

非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势

魏建平^{1,2}, 蔡玉波^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 余大炀^{1,2}, 黄逸^{1,2}, 李兴^{1,2}, 高梦雅^{1,2}

(1. 河南理工大学 瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要:随着我国深地战略的逐步实施, 深部资源开采和地下空间建设迎来新的机遇, 但也面临诸多挑战, 高地应力、高地温和坚硬岩体等极端地质条件层出不穷。岩石破碎技术是所有资源开采和地下空间建设的主要工程活动, 是决定施工工艺和工程效率的主要因素。在极端地质条件下, 以刀具为基础的岩石破碎技术由于刀具磨损快、岩石破碎效率低, 已成为制约深地战略顺利实施的关键技术瓶颈, 为解决深地岩石高效破碎难题, 保障深地战略的顺利实施, 迫切需求革命性的岩石破碎技术。无刀具破岩技术作为刀具破岩技术的重要补充, 是突破刀具破岩技术瓶颈的可行性思路。为此, 将无刀具破岩技术归纳为冲击破岩、热应力破岩和冲蚀磨损破岩3类技术体系, 系统分析了水射流、激光和磨料空气射流等16种岩石破碎技术, 总结了每种技术的发展历史和技术原理, 分析了其破岩优势和技术瓶颈。得出, 目前非刀具破岩技术没有在资源开采和地下空间建设中广泛应用的主要原因为破岩能耗高、适用较差和技术装备复杂等。相比刀具破岩, 非刀具破岩技术破岩能量利用率较低, 水射流破岩比能耗为刀具的40~70倍。微波、激光和等离子体等技术对施工环境要求较高, 无法适用于钻井、隧道掘进等受限和恶劣环境。为解决极端地质条件岩石破碎难题, 提出多种非刀具破岩技术协同破岩的思路, 充分发挥每一种非刀具破岩的技术优势, 构建了以射流切缝卸除高地应力、粒子冲击体积破碎坚硬岩体的破岩理念, 最大限度降低岩石破碎能耗, 简化系统装备, 为岩石破碎技术向非刀具化发展提供理论支撑。

关键词: 岩石破碎; 非刀具破岩; 刀具破岩; 硬岩破碎; 深地空间

中图分类号: TD80 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0801-32

Progress and trends in non-tool rock breaking theory and technology

WEI Jianping^{1,2}, CAI Yubo^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, YU Dayang^{1,2}, HUANG Yi^{1,2}, LI Xing^{1,2}, GAO Mengya^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: With the gradual implementation of China's deep-earth engineering strategy, deep resource extraction and underground space construction have brought in some new opportunities, but they also face many challenges, with extreme geological conditions such as high geopathic stresses, high ground temperatures and hard rock bodies popping up all the time. Rock breaking technology is the main engineering activity for all resource extraction and underground space construction, and it is the main factor determining the construction process and engineering efficiency. Under extreme geological conditions, tool-based rock breaking technology has become a key technical bottleneck to affect the smooth implementation of deep-earth engineering strategy due to fast tool wear and low rock breaking efficiency. In order to solve the

收稿日期: 2023-09-24 修回日期: 2023-10-22 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1199

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374193, 52374192, 52174170)

作者简介: 魏建平 (1971—), 男, 河南遂平人, 教授, 博士。E-mail: weijianping@hpu.edu.cn

通讯作者: 刘勇 (1984—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士。E-mail: yoonliu@hpu.edu.cn

引用格式: 魏建平, 蔡玉波, 刘勇, 等. 非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 801-832.

WEI Jianping, CAI Yubo, LIU Yong, et al. Progress and trends in non-tool rock breaking theory and technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 801-832.



移动阅读

problem of high-efficiency rock breaking in deep-earth and to guarantee the smooth implementation of deep-earth engineering strategy, there is an urgent need for a revolutionary rock breaking technology. As an important supplement to the tool-based breaking technology, the non-tool rock breaking technology is a feasible solution to break through the bottleneck of the tool-based breaking technology. To this end, the non-tool rock breaking technology is summarized into three types of technological systems, namely, impact rock breaking, thermal stress rock breaking and erosion and abrasion rock breaking. Sixteen types of rock breaking technologies, such as water jets, lasers and abrasive air jets, etc., are systematically analyzed. Also, the history of the development of each technology and their technical principles are summarized, and the advantages of the rock breaking and the technological bottlenecks are analyzed. It is concluded that the main reasons why the current non-tool rock-breaking technologies are not widely used in resource extraction and underground space construction are high energy consumption, poor adoptability and complex technical equipment. Compared with tool-based breaking, non-tool breaking technology has a lower energy utilization rate for breaking rock. The specific energy consumption of water jet breaking is 40–70 times that of a tool breaking. Microwave, laser and plasma technologies require high-standard operation environment and cannot be applied in drilling, tunneling and other restricted and harsh environments. In order to solve the problem of rock breaking in extreme geological conditions, the idea of synergistic rock breaking by multiple non-tool rock breaking technologies is proposed, giving full play to the technological advantages of each non-tool rock breaking technology. The rock breaking concept of unloading high geo-stress by jet slit and breaking hard rock by particle impact volume is constructed to minimize the energy consumption of rock breaking, simplify the system equipment, and provide a theoretical support for the development of non-tool rock breaking technology.

Key words: rock breaking; non-tool breaking; tool breaking; hard rock breaking; deep earth space

我国深部资源储量丰富,目前 1 000 m 以深的煤炭资源量占已探明煤炭资源储量的 53%,超过 4 500 m 以深的油气资源储量占探明油气资源储量的 1/3,超过 3 000 m 的地热资源占探明地热储量的 95% 以上^[1-7]。深部资源的高效开采是保障我国能源战略顺利实施的重要保障。随着我国浅中部资源的逐渐枯竭,开采深部资源将逐渐成为常态^[8-9]。我国千米矿井已多达 50 余座^[10],果勒 3C 井已经突破 9 000 m^[11],2 口万米钻井已开始施钻^[12]。但深部地层的高地应力、高地温等极端复杂条件为地下井巷建设、钻井和资源开采等工程带来前所未有的难度。高地应力、高地温岩石掘进导致刀具磨损快、寿命短,严重遏制了工程效率,在在地应力坚硬围岩隧道掘进工程中,TBM 刀具使用时间为 1~2 d,换刀时间占据施工时间的 30% 以上^[13-14]。在深地页岩气、干热岩等非常规能源钻井工程中,刀具磨损是抑制工程效率的主要因素,甚至成为决定深地资源是否能够开采的决定性因素。突破高地应力、高地温和坚硬岩石破碎技术瓶颈,解决深地层出不穷复杂地层钻探难题,是推动深地战略和能源战略顺利实施的关键^[8,15-17]。

相比于刀具破岩,无刀具破岩技术以非刀具截割、冲击的方式破岩,从源头上解决了刀具磨损和换刀的难题。根据破岩作用机理的不同,非刀具破岩技术可分为:以动载荷冲击破岩为主的高压水射流破岩技

术^[18-19]、超临界二氧化碳射流破岩技术^[20-21]等;以热应力为主的激光破岩技术^[22-24]、微波破岩技术^[25]等;和以冲蚀磨损为主的磨料空气射流技术^[26-29]、磨料水射流技术^[30-31]等。几乎所有的非刀具破岩技术在其发展之初并非为了解决岩石破碎难题。比如水射流切割技术主要用于机加工、表面处理和清洁等领域,并发挥了重要作用,甚至成为不可取代的技术^[32-34]。凭借水射流优秀的切割、破碎能力,逐渐被推广应用于石油钻井、射孔和煤层卸压增透等资源开采领域^[35-36]。但其破岩能力并不能完全解决井巷建设、地下空间开挖的问题,仍需要配合刀具联合破岩。采用水射流辅助刀具破岩不仅能够预先破碎岩体,降低岩石力学强度,而且能够充分冷却刀具,提高掘进效率^[37-38]。但仅使用水射流进行破岩并不能满足现有的工程需求,在硬岩掘进时,水射流技术需要极高的水压(≥ 200 MPa)^[39-42]才能有效切割岩石,比能耗为刀具的 40~70 倍^[43-44],不仅增加了整机功率而且对设备的耐压和安全性能提出了更高要求。即便采用磨料水射流可以降低破岩阈值,但由于磨料连续供给、工具磨损等关键难题,(超)高压水射流在硬岩破碎领域并没有得到广泛应用。激光破岩技术最早提出是用于金属加工^[45-49],并逐渐推广应用于岩石破碎领域^[24,50-51]。岩石与金属材料不同,其导热性差,依靠热应力切割的激光需要较高的功率才能实现岩石的有

效熔化和破碎^[52-53]。尤其在环境恶劣的掘进工作面, 激光能量衰减严重^[54-56]。这一问题在以热应力为主的破岩技术中普遍存在。目前尚未见以热应力为主的破岩技术在工程中广泛应用的相关报道。

在刀具破岩技术对硬岩破碎领域的瓶颈无法突破时, 非刀具破岩技术是突破该瓶颈的可行性途径。但非刀具破岩技术尚无法达到工程应用的要求。为促进深地战略的实施, 寻求非刀具破岩技术的发展方向, 充分发挥其破岩优势, 解决硬岩破碎关键难题势在必行。为此, 笔者系统梳理了非刀具破岩技术, 根据破岩机理的不同进行分类, 归纳总结了各技术的发展历史、破岩机理, 进一步明确各技术优势, 指出非刀具破岩技术发展方向, 展望硬岩破碎完全无刀化的思路和前景, 为突破高地应力、高地温硬岩破碎提供理论支撑。

1 冲击破岩技术

采用冲击作用破岩的方式思路简单, 只要使用的介质具备足够的冲击动能便可冲破岩石。基于这种思路, 以冲击作用为主的破岩方式应运而生。

1.1 高压水射流破岩技术

水射流技术起源并兴盛于表面处理、切割等领域^[32,57], 19 世纪中叶首次应用于矿场开采^[58], 20 世纪初, 我国开始将水射流技术应用于水力采煤^[59], 并在近 50 年得到了迅猛发展。得益于水射流技术装备的发展, 尤其是高压水泵的发展, 水射流破岩技术被广泛应用于石油钻井、瓦斯治理、煤炭开采和巷道掘进等领域^[60-64]。但随着深地战略的实施, 深部资源开采面对更为复杂的地层环境, 高地应力、高地温、坚硬岩体采掘已经成为常态, 这也对传统水射流破岩理论和技术提出了更高的要求^[65]。

高压水射流破岩是利用高压水泵将水进行增压, 然后经过喷嘴将静压能转化为射流冲击动能, 对岩石进行冲击、侵蚀, 破碎岩石^[66-67], 破岩系统如图 1 所示。目前普遍认为高压水射流破岩理论主要包括拉伸-水楔岩石破坏理论^[68-71]、准静态弹性破碎理论^[72-75](图 2)、应力波破碎理论^[76-78]、密实核-劈拉岩石破坏理论^[79-81]。由于破岩过程较为复杂, 各种理论的提出都有一定局限性。目前学界较为认可的是综合破碎理论, 该理论认为煤岩体会受到冲击动压、准静态集中应力、空化气蚀和应力波的综合作用^[82]。但水射流破岩过程中哪一种作用起主导作用, 仍没有定论。这不仅与岩石的非均质性有关, 也与射流破岩动态发展的属性有关。尤其在冲蚀坑形成之后, 在返流的作用

下, 射流的破岩机理将更为复杂。考虑反射流体对射流场结构和冲击压力的影响, 定量表征岩石的裂隙、节理和层理等结构面。在此基础上, 进一步完善射流理论, 寻求提高破岩效率的方法。水射流破煤岩效果如图 3 所示。

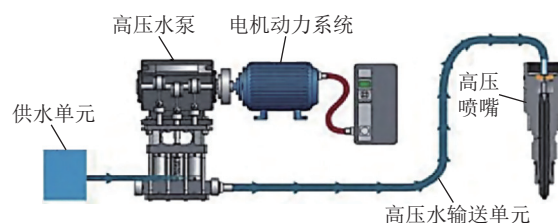


图 1 水射流破岩系统^[83]

Fig.1 Water jet rock breaking system^[83]

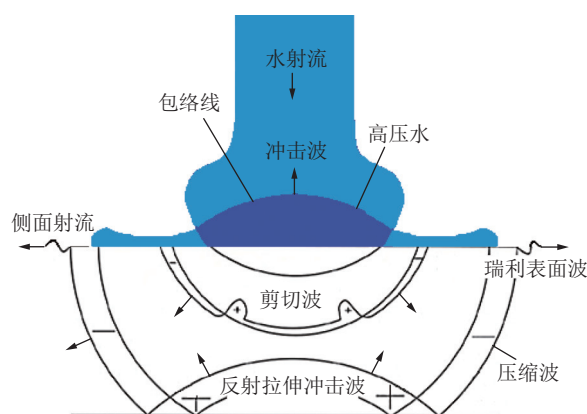


图 2 准静态破岩理论^[60]

Fig.2 Quasi-static rock-breaking theory^[60]

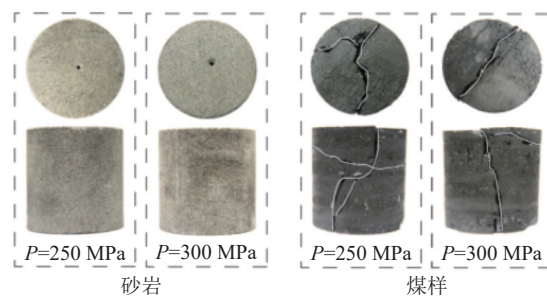


图 3 高压水射流破岩效果^[84]

Fig.3 Effect of high-pressure water jet breaking rock^[84]

在 高地应力、高地温和坚硬岩体等复杂环境中, 水射流破岩技术瓶颈是其较高的破岩压力和较低的破岩效率。破碎抗压强度超过 160 MPa 的花岗岩需要超过 400 MPa 的水压^[85], 依靠水射流形成的冲击应力波破碎岩石, 其破岩比能耗为刀具的 40~70 倍^[43-44]。国内首台高压水射流耦合破岩 TBM“龙岩号”^[86](图 4) 采用 270 MPa 压力的水射流辅助破硬岩, 虽然取得了一定的工程效果, 但该技术并没有得到广泛推广。关键原因是高水压使系统装备极度复杂, 不仅挤占了



图 4 高压水射流耦合 TBM 龙岩号

Fig.4 High-pressure water jet coupled TBM Longyan

TBM 有限的空间,而且极大地增加了系统的风险度和系统能耗。

如何在不断增加水射流压力的基础上,提高破岩效率是水射流破岩技术发展的必由之路。唯一的途径是提高射流破岩能量转换率。如优化喷嘴结构、改变流场结构、调整射流-岩石接触方式等^[87-89]。优化喷嘴结构是提高能量转化效率的主要手段之一。曲面喷嘴相比较锥形喷嘴和圆锥收敛型喷嘴能量转化效率更高,但由于曲面喷嘴加工难度大,应用较多的仍然是圆锥收敛型喷嘴^[90]。除此之外,空化喷嘴和脉冲喷嘴均能够形成特有的射流形式,提高能量转化效率^[91-92],这 2 种射流在后续 2 节进行详细综述。

在喷嘴结构日臻完善的同时,通过调整射流-岩石接触方式是提高射流能量转化效率的重要手段。射流入射角度对于射流冲击效果具有重要影响^[40,93-94],

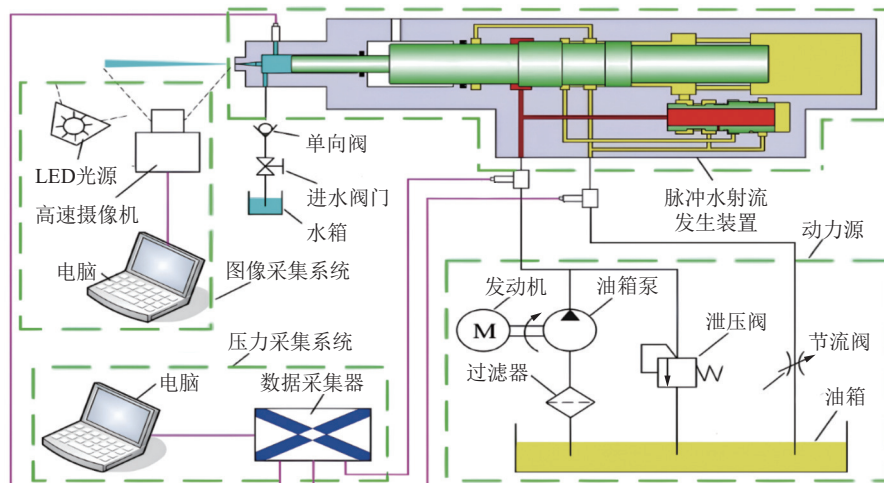
入射角在 75° 左右时破岩效果最佳。靶距也是影响射流能量转化效率的关键因素,一般认为最优靶距为 8~10 倍喷嘴直径。喷嘴高速旋转可以避免在定攻角工况下出现的水垫效应,有助于提高能量转换效率^[95]。旋转速度或者横移速度对弱化水垫效应和提高能量转化效率具有重要影响。且射流压力和旋转、横移速度是相互匹配的,即每一射流压力都有与之相匹配的最优旋转、横移速度^[96-97]。

但仅从上述几个方面提高射流能量转化效率仍然不能解决水射流在硬岩破碎领域的关键难题,目前连续射流的能量转化效率仍然较低,往往低于 10%,仍有较大的提升空间。在提高射流冲击动能的同时,寻求合理的途径进一步提高射流能量转化效率是水射流破岩理论和技术的发展趋势。

1.2 脉冲水射流破岩技术

20 世纪 70 年代,人们从追求高压水射流转向提高射流冲击效果的研究上来,到 80 年代,脉冲射流形式以其能明显降低射流压力开始得到发展^[98],并于 80 年代中期开始逐渐应用于石油钻井等领域。

脉冲水射流可有效减弱水垫效应,提高射流峰值压力,其破岩能力显著优于连续水射流^[99],是提高射流破岩能量转化效率的有效途径,脉冲射流系统如图 5 所示。根据脉冲产生的原理,脉冲水射流技术分为冲击挤压式、截断式、自激振荡式^[100-101],破岩原理如图 6 所示。

图 5 增压式脉冲水射流系统^[102]Fig.5 Pressurized pulsed water jet system^[102]

任何一种脉冲水射流均是通过产生间歇性“水锤压力”作用于岩石,冲击应力波在岩石内部不断地叠加、反射,使岩石产生拉伸、剪切和疲劳形成裂纹。当水锤压力足够大时,岩石内部可形成贯穿性裂纹,使

岩石发生体积破碎。如冲击挤压式脉冲水射流,落锤冲击腔室内的水产生单脉冲,能够将花岗岩试样体积破碎(图 7)。截断式脉冲水射流通过截断连续射流,减弱水垫效应、提高水锤压力,也可产生较好的破岩

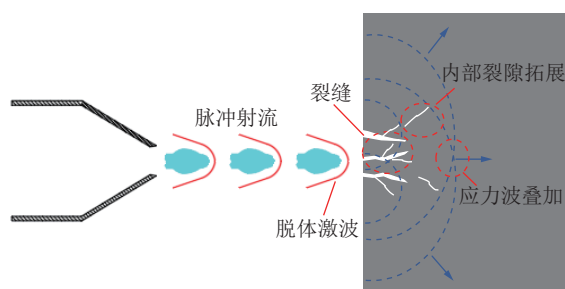


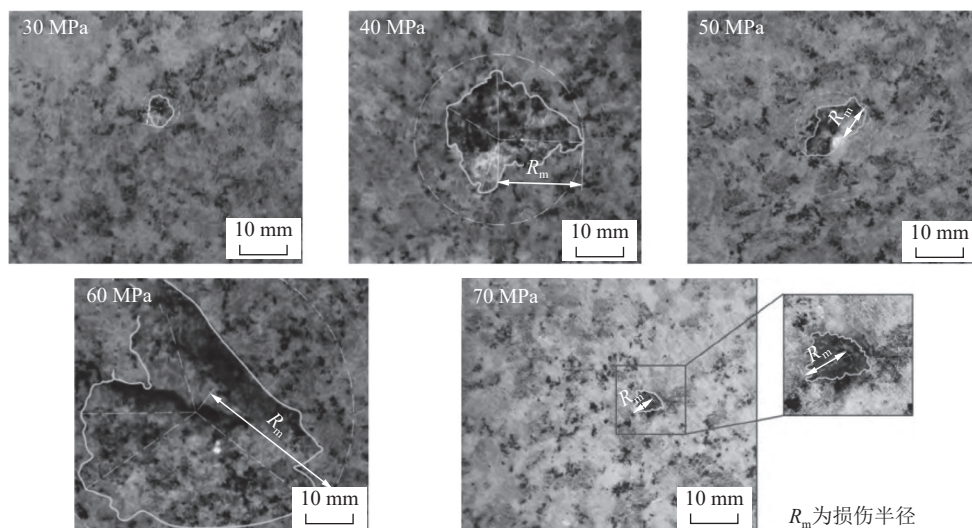
图6 脉冲水射流破岩机理

Fig.6 Pulsed water jet rock breaking mechanism

效果。与连续水射流相比,冲击挤压式和截断式脉冲水射流明显提高了射流能量转化效率,破岩效率更高。但冲击挤压式和截断式脉冲水射流产生装备较

为复杂,在施工空间受限的土木工程中,尤其是钻井、钻孔内破岩无法应用^[78,103-104]。采用电磁和声波激励的脉冲水射流存在相同的技术瓶颈。

相比它激式,自激振荡脉冲水射流依靠自激振荡脉冲喷嘴形成脉冲,装备简单,具有更高的工程适用性。自激振荡喷嘴是形成脉冲射流的关键装置,主要有霍姆赫兹式和风琴管式^[105-106]。射流在喷嘴振荡腔内产生扰动,扰动向下游发展,在碰撞壁处返回并和上游扰动叠加,使扰动放大,提高射流脉冲压力。通过调整喷嘴腔径比、碰撞壁角度和下游喷嘴直径可调整射流压力和频率,在增大射流脉冲压力的同时,促使谐振效应的发生,将破岩效果最大化^[107-108]。

图7 脉冲水射流冲击花岗岩^[102]Fig.7 Pulsed water jet impact on granite^[102]

脉冲幅值和频率是决定破岩效率的关键。但自振脉冲水射流并不能像冲击挤压式或截断式形成完全孤立的脉冲体,无法完全打断连续射流^[109]。因此,其脉冲幅值并不是很大。而且,目前对于自振脉冲水射流的幅值控制并没有系统性、成熟的方法。虽然目前对脉冲频率的研究较多,而且也有相关的控制方法^[110]。但当脉冲幅值较小时,仅依靠调控脉冲频率不能有效提高破岩效率。由于理论上的不完善,使脉冲水射流破岩的研究仍停留在理论研究和实验室阶段,尚没有在工程上应用的成熟经验。寻求自振脉冲水射流压力幅值调控方法,建立完善的调控理论,是突破脉冲水射流工程应用技术瓶颈,实现技术跨越的重要途径。

1.3 空化水射流破岩技术

同脉冲射流一样,空化射流技术也是为了在不提

升射流压力的同时提升射流冲击力发展而来的一种射流形式。空化现象最早是人们发现船舶螺旋桨在使用后会产生严重侵蚀,20世纪初,英国工程师首次提出空化概念,随着技术的不断完善,到20世纪80年代以后逐渐开始研究在石油钻井领域的工程应用^[111-114]。

空化是当液流系统中局部压力低于相应温度下该液体的饱和蒸气压时引起液体蒸发而产生的微气泡(半径小于20 μm)爆发性生长的现象。当环境压力高于饱和蒸气压时,气泡湮灭^[115-117],湮灭时在局部区域产生极高的压力和高速射流,产生的微射流流速能达到450 m/s。空化射流破岩依靠的正是空化泡溃灭时产生的极高射流压力^[118],也是这一特性使空化射流具有比同等条件下普通水射流更强的冲击力^[119-121]。其破岩原理如图8所示。

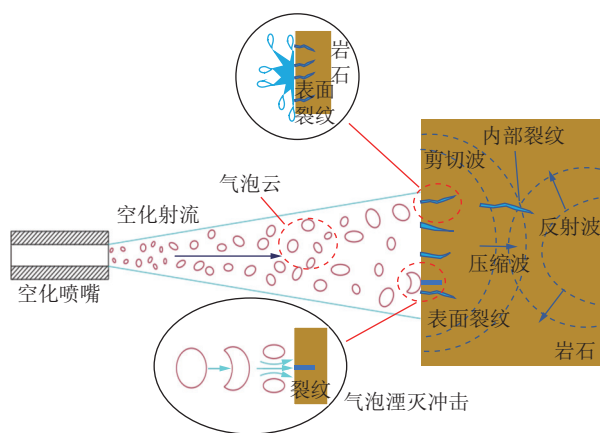
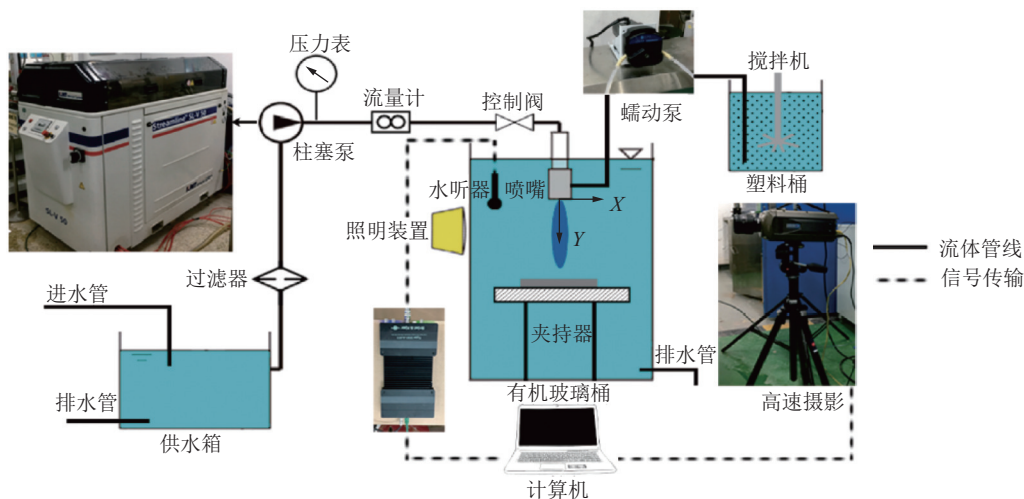
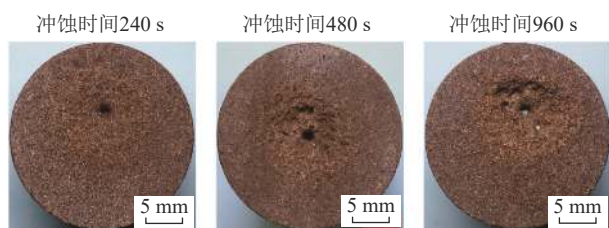


图8 空化水射流破岩机理

Fig.8 Mechanism of rock breaking by cavitation water jet

图9 空化水射流破岩系统^[129]Fig.9 Cavitation water jet breaking system^[129]

然而,一味追求更多空化泡数量是以牺牲射流冲击动能为基础的。现有的空化射流喷嘴结构主要为了产生更多的空化泡,而产生空化泡的同时会导致射流流场发生波动,使射流冲击力降低。如1.1节所述,目前工程常用的水射流喷嘴是为了尽可能获得高冲击效应的圆锥收敛型喷嘴,因此,依靠牺牲射流冲击力来提高空化效应的方式并不利于提高破岩效果,空化射流冲击砂岩效果如图10所示。

图10 空化水射流冲击砂岩^[129]Fig.10 Cavitation water jet impact sandstone^[129]

相比于连续射流,空化射流处理硬质材料所需工

由于空化射流只在淹没环境下才能发挥较好的空化冲击效果,故基于淹没环境,考虑如何能产生更多的空化泡是提升空化效应的关键,空化射流破岩实验系统如图9所示。喷嘴结构设计是形成空化泡的主要手段,特制的空化喷嘴可有效提升空化泡的数量,从而提升射流冲击效果^[122]。目前空化喷嘴结构主要有3种,分别为风琴管喷嘴、中心体喷嘴和角形喷嘴^[123-124],研究发现在喷嘴喉部长度与直径比为2,喷嘴的扩张角为40°时,空化效果最好^[125]。此外,为更多地产生空化泡,有学者提出新型双空化射流^[126-127],相比于传统的空化射流喷嘴,其设计的新型双空化射流喷嘴能产生双重空化效果,可获得更大体积的空化云^[128]。

作压力大幅度降低、喷嘴和其他高压部件寿命更长^[130]。但空化射流也存在一些问题,空化的产生是牺牲射流冲击力的结果,并且空化射流只有在淹没条件下才能发挥出效果^[131]。因此,未来对于空化射流的研究应基于淹没条件下的工程场景,如石油钻井工程等。此外,空化效应应当基于不减弱射流冲击力的原则上,作为一种辅助增强射流冲击效果的方法使用。

1.4 超临界CO₂射流破岩技术

水射流在硬岩破碎领域应用时存在技术瓶颈难以突破,能量转化效率低,仍有较大的提升空间。为此,学者们尝试除水射流之外的射流介质冲击破岩,以期提高射流能量利用率。相较于水射流,超临界二氧化碳射流破岩深度是水射流的1.65~7.85倍,破岩效果更好,由此,超临界二氧化碳射流破岩技术应运而生^[132]。超临界二氧化碳是二氧化碳的一种特殊状态,具有黏度低、密度大、渗透性强和表面张力小等特点^[133]。2000年美国Tempress公司首次提出超临界

二氧化碳连续油管钻井^[134], 2011年中国石油大学王瑞和教授等建立了国内首套超临界二氧化碳射流破岩试验装置^[135], 开启了超临界二氧化碳向工程应用的探索。

超临界二氧化碳射流冲击岩石时存在冲击荷载^[132,136]、对煤岩的溶解和萃取^[137-138]、相变致裂^[139]等的协同作用。超临界二氧化碳射流冲击破岩初期以冲击应力波的作用为主, 在冲击过程中, 由于超临界二氧化碳低黏度的特点, 会逐渐渗透到岩石微孔和裂隙中, 溶解和萃取岩石内部矿物质和有机物, 降低岩石的力学强度。此外, 在冲击过程中超临界态的CO₂产生的相变作用使煤孔隙孔径和累积孔体积继续增大, 使裂缝进一步拓展, 破岩机理如图11所示。

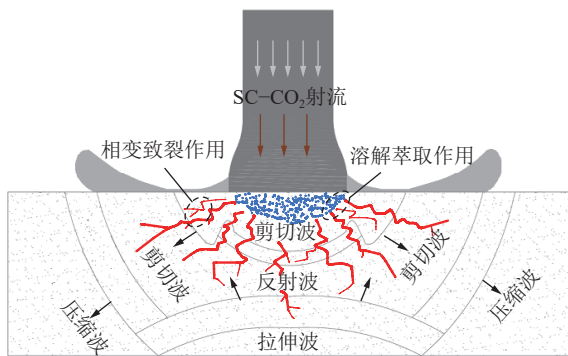


图11 超临界二氧化碳射流冲击破岩机理

Fig.11 Mechanism of supercritical carbon dioxide jet impact rock breakage

然而在钻井时间尺度下, 超临界二氧化碳是否能够改变煤体的孔隙结构和力学强度, 从而提高冲击破碎效率和钻井效率尚未可知。目前对超临界二氧化碳作用煤岩体的研究多集中在长时浸泡条件下(浸泡时间 > 24 h)^[140], 但笔者团队研究发现^[141]短时浸泡下(浸泡时间 3 min), 超临界二氧化碳仍能对煤基质产生明显的吸附膨胀和溶解萃取作用, 并对煤体裂隙造成显著影响。此外, 为提高超临界二氧化碳射流的利用效率推动其工程应用, 笔者团队提出采用自激振荡脉冲射流, 研制适用于超临界二氧化碳射流的自激振荡喷嘴结构, 发现其高脉冲压力和谐振效应可有效降低破煤门限压力, 提高能量转化效率^[142-144]。通过对脉冲频率的研究, 采用位移响应振幅表征谐振效应, 进而改善喷嘴结构, 提高了超临界二氧化碳射流破煤岩的效率, 团队所用实验系统设备及破煤效果如图12、13所示。

相比于水射流技术, 虽然超临界二氧化碳射流技术具有破煤岩门限压力低、破岩效率高且可避免储层伤害等技术优势^[145-146]。但目前超临界二氧化碳射流



图12 超临界CO₂实验系统

Fig.12 Supercritical CO₂ experimental system

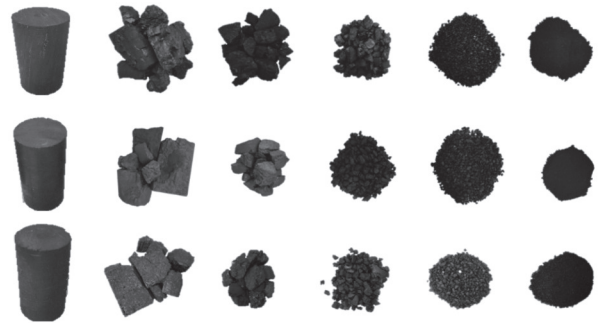


图13 超临界CO₂破煤效果

Fig.13 Supercritical CO₂ coal breaking effect

技术在工程上仍未得到推广, 主要原因是CO₂的捕集与运输成本高, 相比水射流等其他钻完井技术, 工程成本高。但超临界二氧化碳射流的低黏度、高渗透性、溶解萃取和谐振冲击等诸多优势仍使其在未来破岩领域能够占有一席之地。在攻克CO₂捕集及运输关键问题的基础上, 充分发挥其多种优势破岩效应, 揭示多效应协同机制, 进一步提高射流能量转化效率是该技术的发展趋势。

1.5 粒子冲击破岩技术

2003年美国的PDTI公司受到石油射弹冲击思想的启发, 提出粒子冲击钻井技术(简称PID)^[147]。作为一种新型破岩技术, 以其操作简便、能量利用率高等优点在破岩领域得到广泛关注^[148], 破岩系统如图14所示。

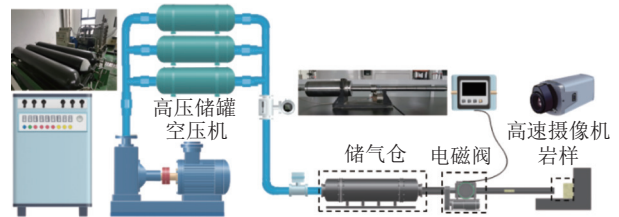


图14 粒子冲击破岩系统

Fig.14 Particle impact rock breaking system

粒子冲击破岩技术是采用高速介质加速粒子, 高速粒子冲击岩石, 对岩石产生冲击应力波并在岩石内传播, 在冲击应力波的作用下促使岩石原生裂隙扩展、

新生裂隙生成,当裂隙与临空面贯通时,岩石产生体积破碎^[149-150],破岩原理如图 15 所示。

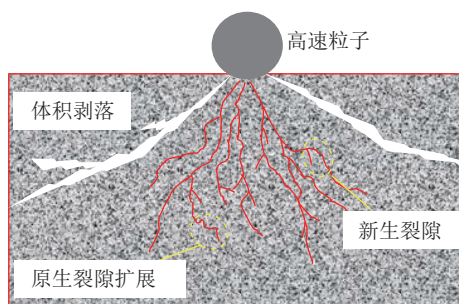


图 15 粒子冲击岩石裂缝拓展

Fig.15 Particle impact rock fracture expansion

粒子冲击破岩技术的破岩能量利用率高、能耗低并且能使岩石产生大体积破碎,降低了新增表面积及所需能量,破岩效率高,为常规破岩技术效率的 2~4 倍^[151-153]。

然而,现阶段工程活动多基于井下和隧道等受限空间,井下岩石围压的存在使岩石颗粒之间更加紧密,抑制了晶间主裂隙扩展区和破碎区的形成,降低了粒子冲击效果(图 16)。并且,由于粒子冲击的动力供给系统和粒子冲击系统是分离的,难以实现整体设备的井下应用。此外,粒子冲击技术尚未解决受限空间条件下的连续性冲击问题,因此目前还没有单独在工程实际中应用的先例。

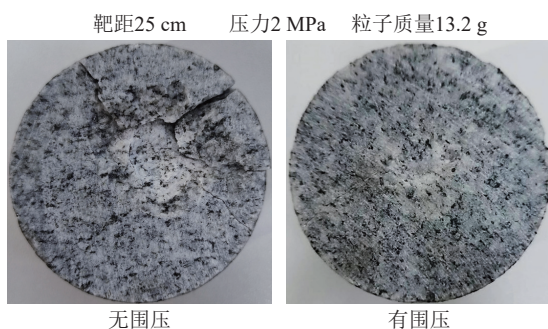


图 16 粒子冲击花岗岩破坏效果

Fig.16 Particle impact granite damage effect

总体而言,粒子冲击破岩技术有较高的能量利用率,能达到 20% 以上^[154],这是其能够广泛推广应用的重要基础。为适应复杂受限工程施工环境,粒子冲击技术应简化系统装备,提高施工效率,从而实现低能耗和高效率的硬岩破碎。

1.6 炸药爆破破岩技术

炸药是由火药发展而来,限于早期人们的生产生活方式,当时火药只用于制作爆竹和焰火等,不涉及大规模工程活动^[155-156]。直到 1865 年,诺贝尔发明了雷管,用于引爆硝化甘油,能够产生强大的爆炸威

力^[157],而后炸药爆破技术开始逐步应用于矿山、水力和交通等领域^[158-159]。

炸药爆破就是利用炸药在外界激发冲量的作用下,瞬间产生高温、高压和高速气体,以极高的功率对外做功,在爆生气体的准静态作用和爆轰波的动作用下冲击周围岩体,在极短时间内产生较大范围的岩石破碎^[160-162]。破岩原理如图 17 所示,破岩效果如图 18 所示。

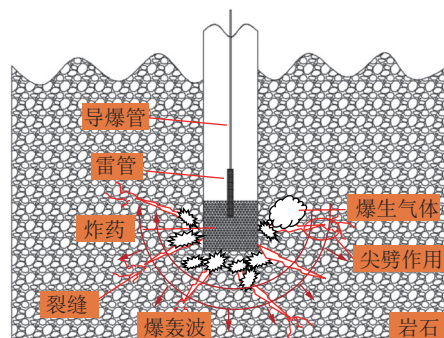


图 17 炸药爆破破岩原理

Fig.17 Principle of rock breaking by explosive blasting



图 18 炸药爆破效果

Fig.18 Explosive blast effect

炸药的破岩效率受炸药类型、装药量和装药结构等的影响^[163-164],如采用 TATP(熵炸药)、PETN(太恩)相比于 TNT 炸药的威力更大。然而,对于炸药性能评价不只有威力、猛度还有感度和安定性等^[165-167]。若威力高的炸药感度也高,则极易发生爆炸,不利于运输和储存^[168-171]。感度较低,则不容易引爆,特别是当引爆线路或雷管有问题时,极易产生哑炮,对后续工程的安全推进影响较大。在矿山开采等领域,炸药的安全性必须得到保证,目前对于煤矿使用的炸药,由于其特殊的工程作业环境(有瓦斯或矿尘爆炸危险),对于炸药的种类有严格限制,只能使用安全性高的煤矿许用炸药^[172-173]。随着对爆破技术的不断研究,我国的炸药爆破技术也取得了许多重要进展。目前,对于隧道建设领域,炸药爆破技术已经可以实现精准爆破,如光面爆破^[174-175]。为了实现岩石土方的有序爆

破, 研发了毫秒爆破技术^[176-178]。随着对炸药爆破研究的继续深入, 炸药爆破破岩技术开始变得越来越科学化、专业化, 不断向着可控方向发展^[179-181]。

炸药爆破破岩技术作为一种高效破岩手段, 在交通和矿山开采等众多领域得到广泛应用, 但其本身存在风险系数高、爆炸时会产生剧烈震动、噪声和空气污染等缺点而逐渐受到限制^[182-184]。因此, 未来炸药爆破破岩技术应逐步考虑朝着安全性和环保性等方面发展。为实现高地应力区的破岩, 考虑进一步提升炸药爆破威力, 但同时要考虑降低炸药的敏感度、提升炸药的安定性和降低哑炮率等方面继续努力。

1.7 高压气体爆破破岩技术

高压气体爆破技术是一种物理性的爆破方法, 20 世纪 60 年代初, 美国研究人员尝试利用这种方法进行煤炭开采, 20 世纪 70 年代, 我国学者开始研究该技术, 到 1992 年煤科总院首次平顶山进行爆破实验并取得成功, 之后开始逐渐推广^[185]。近些年, 随着相关装备和理论不断发展, 气体爆破技术开始在边坡治理、开挖等工程中得到应用, 装置系统如图 19 所示。

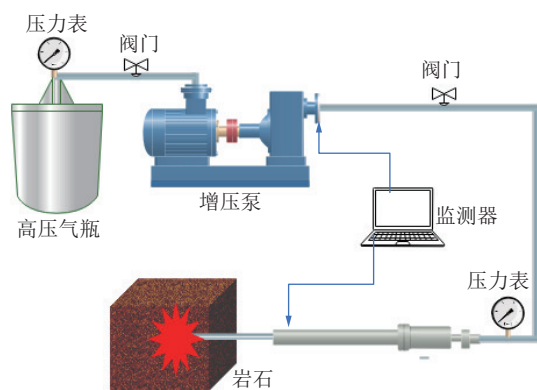


图 19 高压气体胀裂破岩系统

Fig.19 High pressure gas expansion and breaking systems

高压气体爆破技术主要以液氧、液氮和液态二氧化碳等为原料, 通过爆破筒装置将高压气体原料填充至钻孔底部, 依靠诱发装置促使原料产生相变, 释放高压气体, 瞬间膨胀产生高压力和高能冲击波, 对煤岩体施加切向拉应力。当冲击应力超过煤岩体的动抗拉强度时, 产生径向裂隙, 促使岩石破碎^[186-187]。破岩原理如图 20 所示。

相比于炸药爆破方法, 高压气体爆破破岩技术具有更好的环保性和安全性, 避免了传统爆破方法中大量炸药残留和炸药爆炸带来的危险, 减少了对周围环境的影响^[188-189]。然而, 气体膨胀爆破技术也存在一

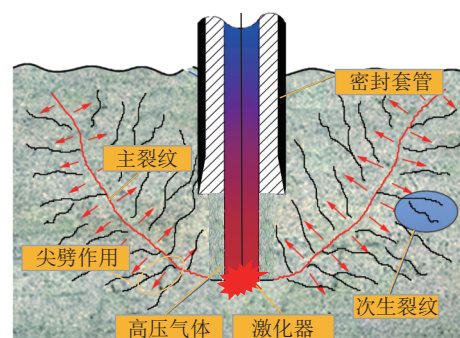


图 20 高压气体胀裂破岩原理

Fig.20 Principle of high pressure gas expansion fracture breaking rock

些缺点。该技术在爆破煤岩体时, 由于单位体积气体能量密度比炸药小, 爆破能力有限, 只适用于软岩和土方的爆破工程 (图 21), 对于硬岩和高围岩等级的岩体无法产生有效破碎^[190-191], 而提高压力, 又会使装置整体安全性降低。此外, 针对不同高压气体介质需要研发配套的储存运输和激化器设备, 通用性差。

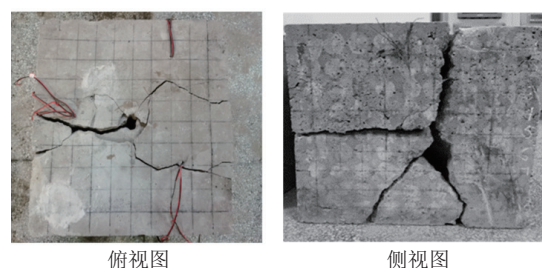


图 21 高压气体胀裂破煤效果^[192]

Fig.21 Effect of high-pressure gas expansion cracking coal^[192]

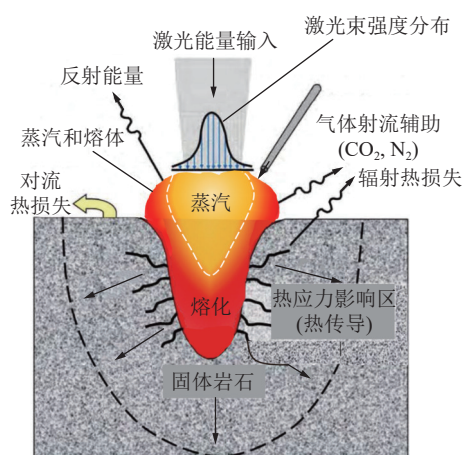
因此, 虽然高压气体爆破技术在破软岩和土方等具有独特优势, 但未来还需要提高单位体积气体能量密度方面来进一步提升爆破效率, 并且需要设计安全性更高的爆破装置。

2 热应力破岩技术

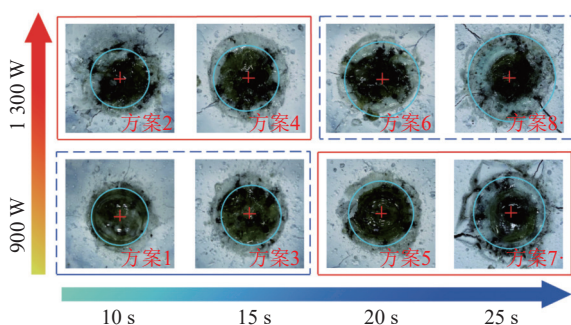
依靠热应力破岩的方法具有悠久的历史, 截至目前, 学者相继开发了微波破岩、激光破岩、等离子体破岩、高能电脉冲破岩和液氮射流破岩等多种热应力破岩技术。

2.1 微波破岩技术

微波加热技术常见于生活, 常作为一种高效加热的方式被广泛使用。微波, 是一种波长为 0.001~1 m, 频率在 0.3~300 GHz 的超高频电磁波^[193-194]。1953 年美国科学家 PETER H. Pearse 在研究微波辐射对岩石的作用时, 发现微波辐射使岩石内部发生热胀冷缩效应, 从而产生破坏^[195], 由此提出微波破岩技术。之后, 各国学者逐渐开展微波技术在破岩领域的研究,

图 26 激光破岩作用机理^[214]Fig.26 Mechanism of laser rock breaking action^[214]

激光参数、岩石性质、激光传递介质和工作环境几个方面均会影响激光破岩效率^[210,215-218],但主要取决于激光功率和作业环境。依靠激光的高照射功率可在极短时间内融化岩石,破岩速度快,但由于岩石本身导热系数极低,因此,相比于微波可在岩石内传播的特性,激光不能使岩石产生大体积破碎,仅依靠加热融化岩石破岩,效率低。虽然提高激光照射功率可以提升对岩石的破坏效果,但提升幅度并不大,并且随着破坏深度的增加,激光能量利用效率更低^[219-222],破岩效果如图 27 所示。而提高激光照射功率又会增加系统能耗,不符合低能耗的要求。此外,激光破岩效果极易受环境影响,对于高粉尘和受限的采掘工作面,激光在传播过程中容易发生衰减,能量耗散严重,并且激光设备复杂,并不适用于深部钻井的巷道掘进,这也是激光破岩技术目前还没有在工程中广泛应用的主要原因。

图 27 激光破岩效果^[22]Fig.27 Laser rock-breaking effect^[22]

目前激光破岩技术还只在实验室阶段,对于工作现场的高粉尘、恶劣工作环境,激光传播过程中能量损耗严重,破岩难度大、效率低^[223-224]。如何适应岩土工程中的受限、恶劣环境,尤其是满足煤矿井下巷道掘进中对防爆的需求,是激光破岩技术从实验到应用

的关键。根据工程特点,不断改进设备,减少激光传播过程中的能量损耗,提高作用于岩石的能量转化效率,降低系统能耗,是激光破岩技术推广应用需要突破的关键技术瓶颈。

2.3 等离子体破岩技术

等离子体是除固态、液态和气态之外的第 4 种物质存在形态,整体呈电中性^[225](图 28)。根据气体电离程度的不同,等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体两大类。等离子体技术最初是研究核聚变反应,到 20 世纪 60 年代有学者提出利用等离子体的特性来破岩^[226-228]。

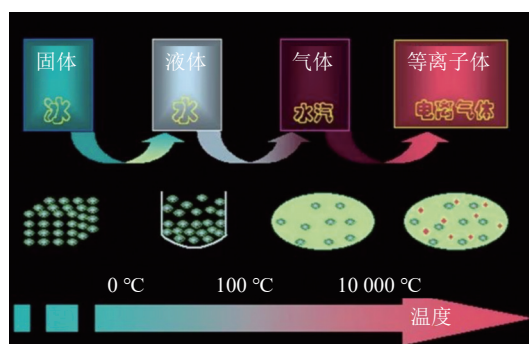
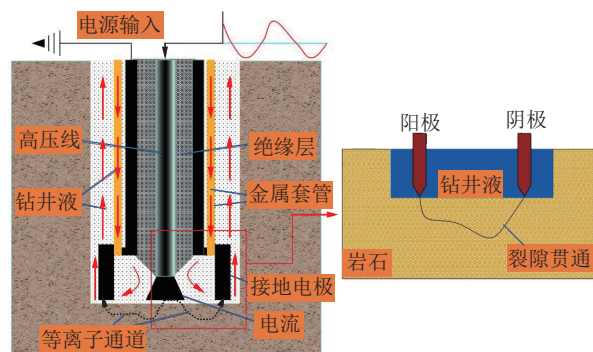


图 28 物质第四态-等离子体

Fig.28 The fourth state of matter - plasma

和激光破岩技术相同,等离子体破岩技术也是通过将热传递给岩石破岩。通过在岩石中通入电流产生高温等离子体,利用高温高速的等离子弧在岩石中生成热应力场,当岩石热膨胀应力突破岩石抗拉强度极限时造成岩石的破碎^[229-231]破岩原理如图 29 所示。

图 29 等离子体电脉冲破岩机理^[231]Fig.29 Mechanism of rock breaking by plasma electric pulse^[231]

等离子体破岩速率受击穿电压和岩石内部结构的影响较大,同一种岩石,输入电压越高越容易发生破坏;在相同电场强度下,岩石缺陷越大岩石越容易被击穿^[232-233]。等离子体破岩技术在某些情况下可代替爆破,对环境友好,但是也存在一些缺点。等离子体的生成条

件较为苛刻,一般人工生成等离子体的方法有核裂变、核聚变和通入高能电流等,并且等离子体作用范围较小,只能在两电极之间才能发挥有效作用(图 30、31)^[234]。

目前该技术还处于理论研究阶段,由理论研究到

工程应用的过程中仍有诸多问题需要攻克。最重要的是提高该技术的工程适用性,简化技术装备,寻求最适用于该技术工程,提高该技术的成熟度,并逐步推广。

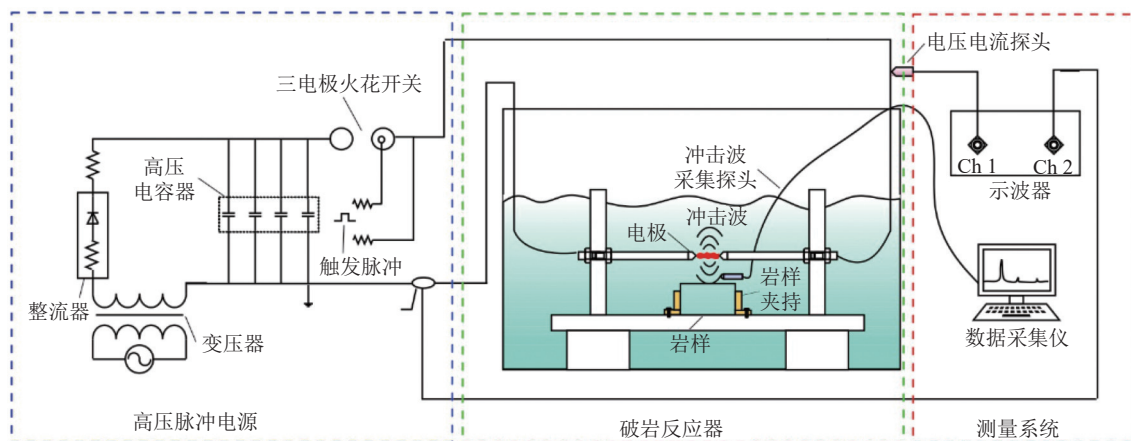


图 30 等离子体破岩系统装置^[234]

Fig.30 Plasma rock-breaking system units^[234]

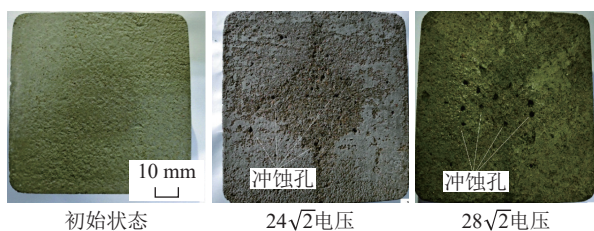


图 31 等离子体破岩效果^[234]

Fig.31 Plasma rock-breaking effect^[234]

2.4 高能电脉冲破岩技术

由电子的短时电压改变产生电脉冲^[235],电脉冲技术最早用于生物、医疗和材料改性等领域^[236-237],20 世纪 80 年代俄罗斯科学家首次提出在矿山和隧道中

应用,之后各国开始研究高能电脉冲技术在破岩领域的应用。

高能电脉冲破岩是利用电能的转化和释放产生强大的电热效应和应力波,使岩石受到高强度的热应力作用,从而实现岩石的破碎^[238-239]。根据电击穿理论其破岩过程分为以下几个阶段:首先,在电脉冲的作用下,电能注入岩石内部并形成少量等离子体;而后由于电脉冲的反复作用,岩石内部的孔隙被电击穿,在孔隙处逐渐形成等离子通道,岩石开始产生裂纹;最后电能持续通过等离子通道,产生大量的热和冲击力,岩石内部的裂纹逐渐扩大直至破碎^[240-242],破岩过程如图 32 所示。

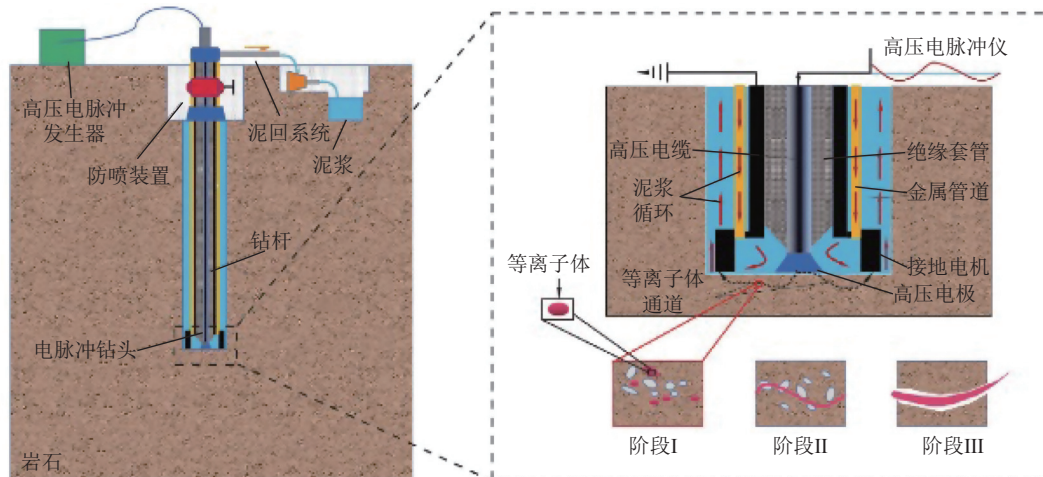


图 32 高能电脉冲破岩过程

Fig.32 High-energy electric pulse breaking process

影响高能电脉冲破岩效率的主要因素有岩石孔隙度、围压、岩石厚度等。其中,破岩效率会随着岩石孔隙度的提高而提高,随着岩石厚度和围压的增大而减小^[243-244]。虽然高能电脉冲破岩技术破岩速度快、不需要刀具配合并且可实现定向破岩,但也存在一些不足之处。由于电脉冲破岩依靠的是短时高能电击,作用过程中会消耗极高的电能并释放大量的热,对设备耐压和耐热性有极高要求。并且由于岩石的导热性差,依靠电击产生热无法进一步拓展岩石破坏区域。此外,高能电脉冲技术系统装备复杂,在复杂的土木施工环境中应用难度较大^[245]。破岩效果如图33所示。

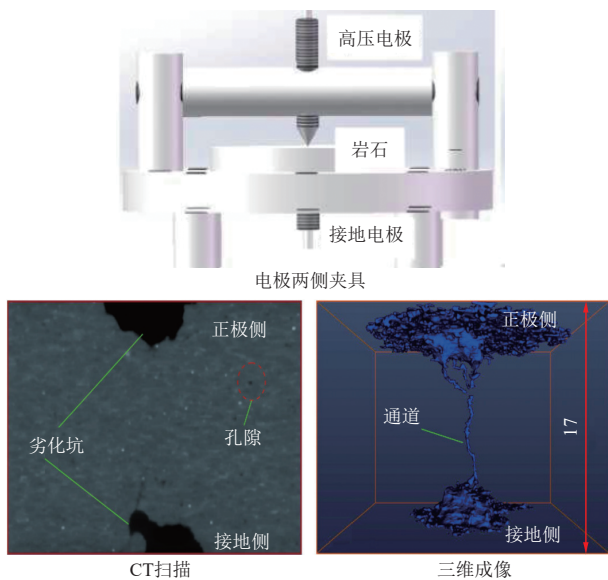


图33 高能电脉冲破岩效果^[246]

Fig.33 High-energy electric pulse rock-breaking effect^[246]

目前,高能电脉冲破岩技术还处于理论研究阶段,尚无工程应用先例。主要原因在于其较高的能耗和复杂的电脉冲发生装置。但电脉冲较强的穿透性能和较高的能量转化效率使其具备推广应用的重要前提。简化电脉冲发生装置,提高该技术的工程适用性,进一步降低系统能耗是该技术主要的发展趋势。

2.5 热力射流破岩技术

火焰喷枪、导弹推进和火箭发射等均是采用燃料与氧化剂混合燃烧产生高温高压射流并以此作为能

量或动力源。20世纪80年代,在石油钻井领域研究岩石热裂解的破岩方法时^[247-250],提出采用射流与岩石热裂解共同作用的热力射流破岩技术,以期实现较高的钻井效率^[251-252]。早期的热力射流采用空气燃烧火焰进行破岩,但空气本身携带的热量有限且密度低,破岩效率并不高^[253]。之后,开始采用高温超临界水为介质^[254-255],在超临界水环境下,燃料和氧气发生氧化反应形成火焰,不仅可以实现均相氧化^[256-257]还能够携带更多的热量和更强的携岩清岩能力,大幅提高破岩效率。

热力射流钻井技术通过采用不同管路,向深孔内分别注入燃料、氧化剂和水,而后控制井下点火装置引发燃料与氧化剂发生反应,生成大量的热,此时,在一定地层深度状态下,控制地面泵压,可使得反应腔内部的水处于超临界态(温度大于 374.3°C ,压力大于 22.1 MPa),燃料、氧气和水实现完全混相,加速燃料与氧气的氧化过程^[258],系统装置如图34所示。反应生成的高温介质作用于井底岩石,诱使岩石产生热裂解,在生成裂隙的同时通过射流的尖劈作用进一步拓展裂隙,最终实现高效的钻进^[259-261],超临界水热火焰如图35所示,破岩原理如图36所示。然而,前期基于流体热开裂技术的研究,主要侧重利用岩石热开裂效应破碎岩石,缺少对高温射流冲击力和热应力耦合作用下岩石破碎机理的研究。2013年中国石油大学首次提出将水射流冲击作用与岩石热裂解效应相结合的热力射流破岩技术,并对高温射流调制特性、

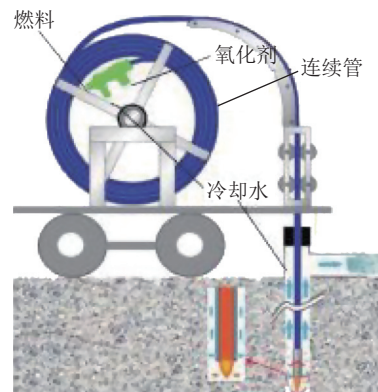


图34 热力射流破岩系统^[263]

Fig.34 Thermal jet rock breaking system^[263]



图35 超临界水热火焰^[255]

Fig.35 Supercritical hydrothermal flame^[255]

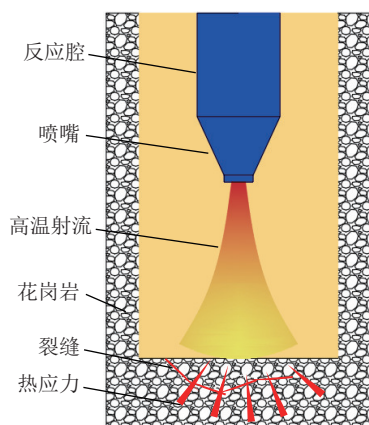


图 36 热力射流破岩原理

Fig.36 Principle of thermal jet rock breaking

比能特性等开展了研究^[262-264],为热力射流破硬岩技术提供了一定的理论支撑。

考虑射流冲击效应与热裂解效应耦合作用岩石的热力射流破岩技术能够兼具射流冲击效应与岩石热裂解效应的优势,因此在破硬岩领域具有广阔的发展前景。目前,学者们也对两者的耦合作用机理进行了一些研究并取得一定研究成果,包括门限温度和门限热流密度等^[257,264]。但目前对于热力射流破岩技术还处于理论研究阶段,射流冲击作用与热裂解作用的耦合机理还需要明确。未来要实现该技术的工程应用,还需要进一步深入研究在超临界水作用下的岩石热裂解效应与射流冲击效应对岩石破坏效率之间的影响关系,明确射流冲击参数、岩石特性等对热力射流破岩效果的影响。

2.6 液氮射流破岩技术

液氮是指液态的氮气,常压下液氮的沸点为 -196°C , 21°C 时液氮体积可膨胀约700倍^[265]。20世纪80年代科学家和工程师提出利用液氮的骤冷特性在岩石内产生较高的温度应力使岩石破碎。

不同于激光、微波等技术采用高温作用岩石的方式,液氮射流破岩依靠超低温特性产生低温应力并伴随着液氮相变的体积膨胀和射流冲击效应共同作用下使岩石破碎^[266]。低温条件下,岩石的内部水分凝结导致体积膨胀能促进岩石产生裂隙,并且岩石中的某些物质低温条件下硬化,使岩石强度进一步降低,破岩原理如图37所示。

液氮射流冲击破岩技术在应用时可以减少设备的热损伤且对环境友好,因此在硬岩破碎工程中更具有优势。例如在石油钻井工程中,结合射流高速冲击与低温特性,在深部热岩表面产生超高的温度应力使岩石产生高效破碎^[267-268],系统装备如图38所示,破岩效果如图39所示。

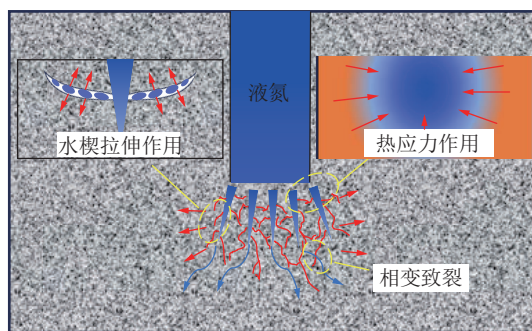


图 37 液氮射流破岩原理

Fig.37 Liquid nitrogen jet rock breaking principle

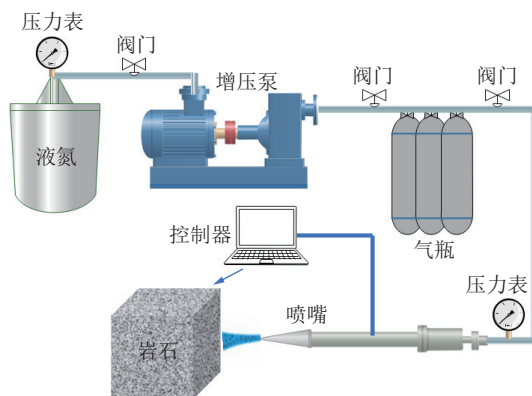
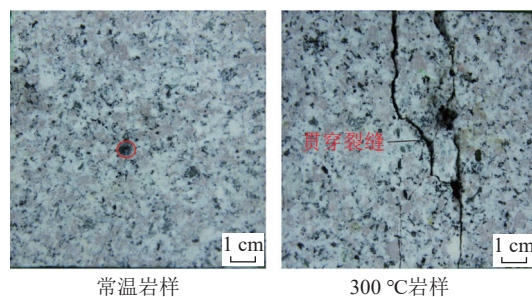


图 38 液氮射流系统

Fig.38 Liquid nitrogen jet system

图 39 液氮射流冲击不同温度岩石效果^[267]Fig.39 Effect of liquid nitrogen jet impingement on rocks of different temperatures^[267]

然而,由于液氮受环境影响大,如何保持液氮的物理形态是实现其高效破岩的关键。特别是应用于深部地层时,超长钻孔导致运输过程中维持液氮的物理形态十分困难,导致工程成本较高。此外,液氮增压过程中容易使设备产生霜冻,同时液压油在超低温环境下会固体化难以使用,对增压设备提出了更高的要求^[269-270]。

虽然液氮射流具有热应力、冲击和相变等多种优势破岩效应,具备高效破岩的条件,但由于液氮射流制备系统对温度条件要求较高,导致工程成本高,工程应用前景仍不乐观。在液氮射流破岩的基础上,进

一步解放思路,利用低温氮气破岩是解决目前液氮射流破岩固有问题的可行性思路。借鉴高压空气的制备技术,实现对低温氮气的压缩和升压,充分利用低温氮气热应力和冲击力,是提高该技术工程适用性的基础。

3 冲蚀磨损破岩技术

为解决热应力破岩方式的高能耗、适用性差以及传统水射流超高压、能量利用率低等难题,综合射流冲击作用与磨料冲蚀磨损的优势,以冲蚀磨损破岩为主要方式的磨料水射流、脉冲磨料水射流和磨料空气射流等技术相继被提出,形成一系列工艺简单、高效的破煤岩方法。

3.1 磨料水射流破岩技术

磨料水射流技术最早由美国工程师 RAYMOND E. Frenzel 提出,主要用于抛光、切割等领域。随着技术的不断成熟,20 世纪 80 年代开始应用于岩石切割。该技术是一种利用高速水射流携带磨料颗粒运动,使磨料颗粒具有足够的冲击动能,通过磨料的磨削作用实现对硬质材料的有效切割^[271-273]。破岩原理如图 40 所示。

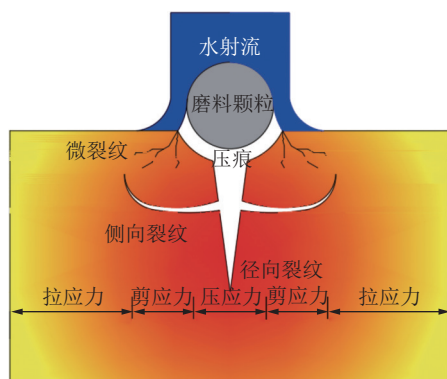


图 40 磨料水射流破岩原理

Fig.40 Abrasive water jet rock breaking principle

根据磨料与水混合方式的不同,磨料水射流可分为前混合式和后混合式。后混合磨料水射流主要是利用高速水流动时在混合腔内产生的负压将磨料颗粒吸入混合腔,然后通过混合腔将高速水流与磨料颗粒进行混合后经喷嘴喷出^[274-275]。相比纯水射流,磨料水射流能够在相对较低射流压力条件下对煤岩体进行破坏。但由于后混合磨料水射流磨料混合时间短,磨料不能全部进入射流核心段,导致磨料加速不充分。因此,后混合磨料水射流仍需要较高的射流压力($> 100 \text{ MPa}$)才能有效切割硬质材料^[276-277]。系统压力的提高,不仅增大了能耗,也对系统的安全性和可靠性提出了更高的要求,不利于在深部资源开采中

的应用。

前混合磨料水射流是在高压管道内进行充分混合并得到初步加速,并在喷嘴内部和射流核心段得到充分加速,磨料能够在较低的射流压力下获得较大的速度,切割性能相比后混合射流更强,系统如图 41 所示。相同输入能量条件下 2 者切割深度的比例关系相差 10 倍以上^[278]。且由于其是在喷嘴前部混合,其工程适用性更广,尤其在隧道、巷道和钻孔等受限空间内破岩时,只能采用前混合磨料水射流,破岩效果如图 42 所示^[279]。但由于前混合磨料水射流磨料罐承压水平与系统压力相同,磨料的连续均匀供给是决定该技术破岩效率的关键^[280-281]。虽然学者提出了双罐并联解决连续供给问题,但磨料的均匀供给仍然是限制该技术广泛应用的关键因素之一。在不提高射流压力的前提下,精准控制磨料质量流量是有效提高破岩效率的重要方法。

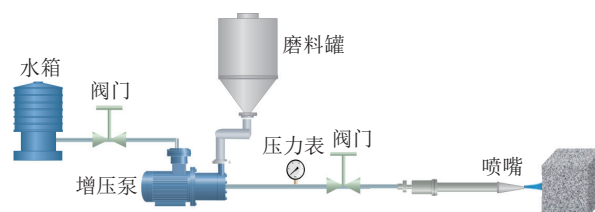


图 41 前混合磨料水射流破岩系统

Fig.41 Pre-mixed abrasive water jet rock breaking system

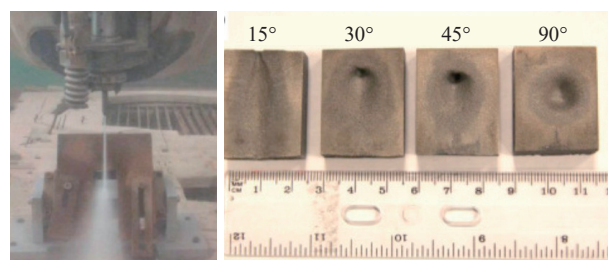


图 42 磨料水射流破岩效果^[279]

Fig.42 Abrasive water jet rock breaking effect^[279]

虽然磨料水射流具有较高的破岩效率,但在实际破岩工程中并没有得到广泛应用。除了磨料连续均匀供给问题外,磨料对设备的磨损也是限制其应用的关键^[282]。尤其在深长钻孔内,磨料不仅容易堵塞喷嘴,而且由于磨料在钻具内运行时间长,对钻具磨损较大,尤其对水辫、切缝器等旋转密封部件磨损尤为严重。

综上所述,相比后混合磨料水射流,前混合磨料水射流磨料利用率高,能量转换效率更大,适用性更广。但前混合磨料水射流技术并没有在深部资源开采领域广泛推广应用的根本原因在于磨料的连续均匀供给问题并未得到解决。因此,在不提高射流压力的前提下解决磨料稳定连续供给,并提高磨料动能的

转化效率是实现前混合磨料射流在深部资源开采中进一步推广应用的关键。

虽然磨料水射流相比于纯水射流极大地增加射流的冲击破碎能力,减少水的消耗量,降低射流系统压力。但磨料无法回收,造成破岩成本增加,且增加了喷嘴的磨损,减少了使用寿命。因此进一步提升装备耐压等级和可靠性是磨料水射流的主要发展趋势。

3.2 脉冲磨料水射流破岩技术

脉冲磨料水射流是在磨料水射流的基础上,为进一步增强磨料水射流破岩能力而提出的一种射流技术^[283]。国内最早由李晓红院士提出脉冲磨料水射流,采用 Helmholtz 式自激振荡脉冲喷嘴产生自激振荡脉冲磨料水射流^[284]。该技术能够产生较大的瞬时冲击能量,通过水锤效应与磨料冲蚀磨损效应共同对岩石产生效果,可进一步提升破岩效率^[285]。破岩原理如图 43 所示。

相比于磨料水射流,脉冲磨料水射流能够产生较大水锤压力,弱化水垫效应。提高射流压力的同时,增强了水锤压力作用效果,破岩效率更高。但射流的脉冲特征并不利于磨料加速。磨料速度源于水射流对磨料的持续加速过程。相比于连续射流,脉冲射流单脉冲体形成-发展-消散过程较快,边界层发展充分。虽然能够获取瞬时高压,但由于加速时间较

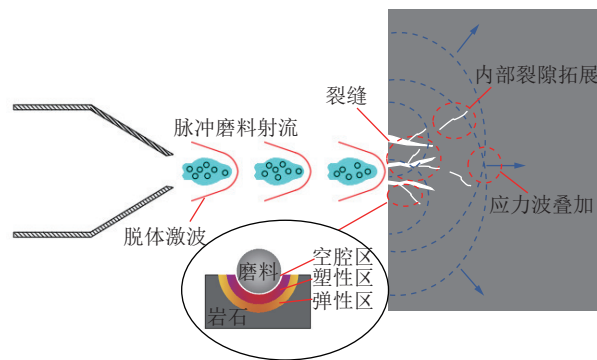


图 43 脉冲射流破岩机理

Fig.43 Pulsed jet rock breaking mechanism

短,并不利于磨料的持续加速,从而无法形成高速磨料^[59,286]。

为提高脉冲磨料水射流磨料冲蚀能力和工程适用性,笔者团队提出了预混合脉冲磨料水射流(图 44),通过预先将磨料与水在开放环境中充分混合,利用液固两相柱塞泵,对磨料和水同时进行加压,经过管道从喷嘴喷出,形成磨料水射流,通过调节柱塞频率控制射流脉冲,形成脉冲磨料水射流。由于磨料与水混合阶段较前混合磨料水射流更为提前,磨料混合均匀,且磨料与水同时加速,实现了磨料高速喷射。不仅如此,磨料与水在开放环境中混合,解决了磨料连续供给问题,大幅提高了磨料水射流的工程适用性^[30,287]。破煤效果如图 45 所示。

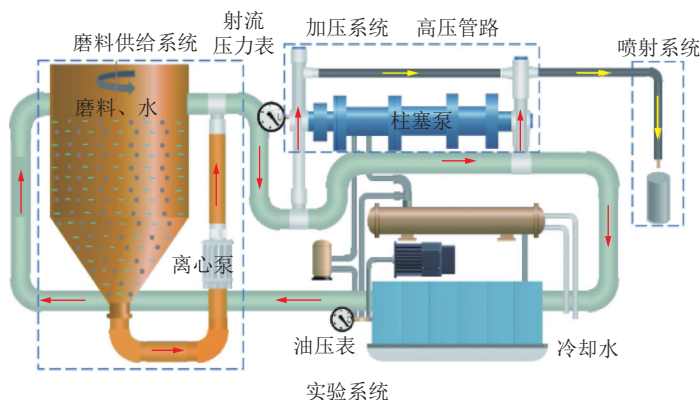


图 44 预混合脉冲磨料水射流系统装置

Fig.44 Pre-mixed pulsed abrasive water jet system units



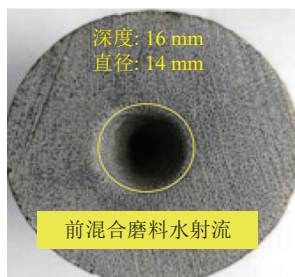
实验装置



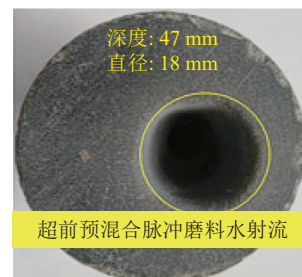
前混合磨料水射流破硬煤



超前预混合脉冲磨料水射流破硬煤



前混合磨料水射流



超前预混合脉冲磨料水射流

图 45 前混合磨料水射流与超前预混合脉冲磨料水射流破岩效果对比

Fig.45 Comparison of rock-breaking effect of pre-mixed abrasive water jet and over-mixed pulsed abrasive water jet

与脉冲水射流相同,脉冲磨料水射流的脉冲特征同样具有弱水垫、谐振冲击等作用。由于两相射流流动的复杂性,对于上述特征的研究并不充分,其优势破岩效应也未得到充分利用。相比连续磨料水射流,充分发挥脉冲水射流的优势效应,构建多效应的协同机制,是进一步提高磨料水射流能量转化效率,实现高效破岩的重要基础。

3.3 磨料空气射流破岩技术

19 世纪初,美国工程师发现在空气射流中添加颗粒可以有效磨削材料和金属抛光。到 1991 年,荷兰的飞利浦研究室将该方法改进为微磨料气体喷射处理技术。自此,该技术在硬、脆性材料的微加工领域逐渐成熟^[288-289]。因其高效低耗、工艺简单优点,逐渐被应用于其他领域。2013 年,作者团队首次将磨料空气射流技术用于煤层卸压增透和辅助机械硬岩掘进。该技术以压缩空气为动力源,在优化设计的喷嘴结构下,以较低的空气压力使射流达到超声速,超声速气流带动磨料加速,使之具备较高的冲击动能。在射流冲击应力波效应和磨料冲蚀磨损效应的协同作用下,对煤岩体产生破坏^[290-291]。破岩系统如图 46 所示,破岩原理同磨料水射流(图 40)。

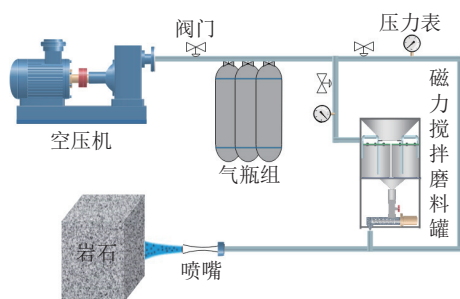


图 46 磨料空气射流破岩系统

Fig.46 Abrasive air jet rock breaking systems

使空气射流达到高超声速是加速磨料并实现高效破岩的重要基础。喷嘴结构是决定空气射流流速的关键。传统空气射流喷嘴多采用亚声速喷嘴,如鸭舌型喷嘴,不能很好地控制流场结构和射流速度,严重制约了射流冲击效果。Laval 喷嘴结构^[281,292-293]可以在较低气压下获得超声速射流。通过设计 Laval 喷嘴收缩段和扩展段曲线,可以控制空气射流膨胀和压缩状态,实现空气射流的高超声速喷射。作者团队采用膨胀比统一了影响喷嘴结构设计的诸多因素,提出在 Laval 膨胀比为 1.12 时,射流流场最稳定,射流具有较长的等速核,射流加速效果最佳,射流速度可高达 900 m/s^[294-296]。团队基于 Laval 喷嘴结构,以 30 MPa 的空气压力冲击煤体,能对煤体产生较强的冲击应力

波效应,使煤体产生体积破碎。基于此,为进一步提升破煤岩效率,提出磨料空气射流破煤岩理论与技术,充分利用空气射流的高超声速加速磨料,使磨料具有高冲击动能。在射流冲击应力波效应和磨料冲蚀磨损耦合作用下,能够实现煤岩体的高效破碎。定点冲蚀花岗岩效果如图 47 所示。

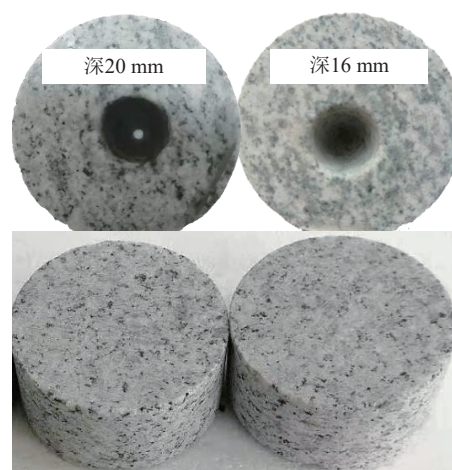


图 47 磨料空气射流定点冲蚀花岗岩

Fig.47 Abrasive air jet fixed point erosion of granite

但较高的射流压力限制了该技术的推广应用。为提高磨料空气射流的技术适用性,作者团队进一步优化喷嘴结构,实现了在低于 2 MPa 的空气压力条件下,空气射流速度达到 800 m/s 以上的高超声速,并将磨料加速至超声速,实现了和高压条件下相同的加速效果,提高了技术工程适用性^[29,297]。通过系统地分析射流压力、磨料质量流量、磨料粒径、磨料硬度和磨料密度等因素对破煤岩效果的影响,发现磨料质量流量和磨料硬度是影响破煤岩效果的重要因素^[298-299]。相比于提高压力,控制磨料质量流量能够更有效地提高破煤岩效果。合适的质量流量不仅使磨料得到充分的加速,而且将砂垫效应弱化到最低,能够实现能量转化效率的最大化^[300-301]。硬度较高的磨料在冲击过程中,由于磨料自身很难发生破碎,提高了能量转化效率,是提高破煤岩效果的有效手段。

在最优射流参数条件下,尽可能地提高气固两相能量转化效率,以实现低压磨料空气射流技术在破岩工程中的应用。基于此,团队着手将磨料空气射流技术与刀具技术相结合,采用磨料空气射流预切槽的方式辅助机械掘进。实验结果表明,采用磨料空气射流技术切槽卸压能明显降低整机功率和刀具受力,工程效益明显。然而,在移动条件下,采用传统圆形截面喷嘴结构粒子易发散,限制了岩石切槽效率。为增强移动条件下的切槽能力,团队突破了传统圆形断面喷

嘴结构,提出基于 Laval 喷嘴结构的新型矩形断面喷嘴结构,如图 48 所示。该结构条件实现了磨料颗粒的切向集中分布,使单位时间内更多的磨料用于切割岩石,从而获得更高效的硬岩切槽效果,实验切槽效果如图 49 所示(实验所用花岗岩单轴抗压强度为 175 MPa)。

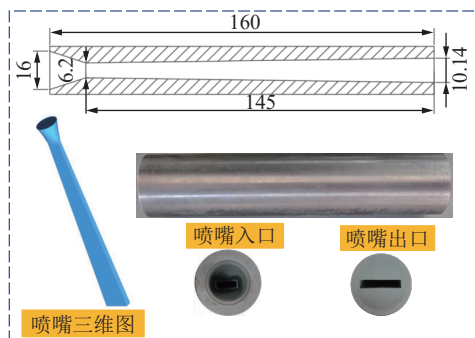


图 48 基于 Laval 基本结构的矩形截面喷嘴

Fig.48 Rectangular cross-section nozzle based on Laval basic structure

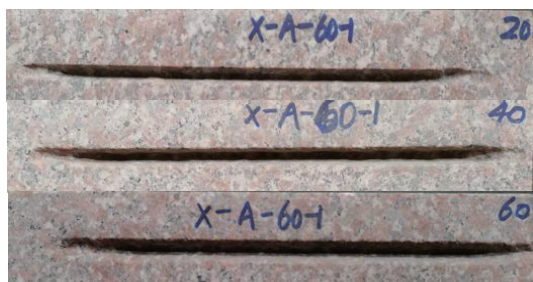


图 49 移动条件下低压磨料空气射流切割花岗岩

Fig.49 Low-pressure abrasive air jet cutting granite under moving conditions

低压磨料空气射流技术作为新型的无刀具破岩技术为破硬岩技术发展提供了一种新思路。满足了硬岩高效切槽、低能耗和降低整机功率等要求。目前,笔者团队做了大量研究工作^[26-29,295-299],从探究磨料空气射流破岩过程和破岩机理,到揭示磨料空气射流破煤岩规律,最后建立磨料空气射流破岩理论体系,实现了从理论到工程应用的重大跨越。

4 非刀具破岩技术发展趋势

目前已有的非刀具破岩技术在资源开发、市政工程等领域发挥了重要作用。如磨料水射流破岩是石油钻井射孔的重要手段,水射流破煤是煤层卸压增透的主要技术方法。但对于高地应力、高地温和坚硬岩石,现有非刀具破岩技术仍存在诸多短板。与刀具破岩技术相比,破岩效率低和能耗高是遏制水射流应用的主要原因,远远不能达到工程需求。尤其

以热应力为主的破岩技术无法适用高粉尘、受限空间等恶劣施工环境。在极端复杂的深地储层中,当刀具破岩技术无法实现岩石破碎时,探索新型的非刀具破岩技术或为解决深地资源开采工程中岩石高效破碎难题提供一种解决办法。然而,在未来较长一段时间内,刀具破岩技术仍然是主要的破岩方式,无刀具破岩方式考虑作为一种辅助机械钻进方法进行使用。此外,为了充分发挥现有无刀具破岩方法的技术优势,可将现有非刀具破岩技术进行搭配组合,作为推动实现深部硬岩有效掘进的一种手段。例如,在硬岩隧道掘进时,采用传统机械刀具破硬岩,刀具磨损严重,而采用无刀具破岩技术的组合破硬岩,可以避免刀具破岩技术瓶颈,实现对硬岩隧道的高效掘进。以磨料空气射流技术与粒子冲击技术组合破硬岩,首先采用磨料空气射流技术按照预定切缝参数(槽深、槽间距)分割隧道掘进工作面,产生临空面的同时卸除围岩压力,提高粒子冲击破岩效果。而后采用粒子冲击装置对分割的隧道掘进工作面进行冲击,使隧道掘进工作面上岩石产生大块碎块,能够产生更小的岩石破碎比表面积,如图 50 所示。更小的岩石破碎比表面积意味着更低的破岩比能耗,这也是无刀具破岩组合破岩的优势所在。无刀具破岩技术的组合条件下,破硬岩效率高且相比于纯机械刀具破岩技术和单一无刀具破岩技术,比能耗更低、适用性更强。因此,未来充分发挥无刀具破岩技术的技术优势,构建以射流切缝卸除高地应力、粒子冲击体积破碎坚硬岩体的破岩理念,最大限度降低岩石破碎能耗,简化系统装备,推动实现岩石破碎技术向非刀具化发展。

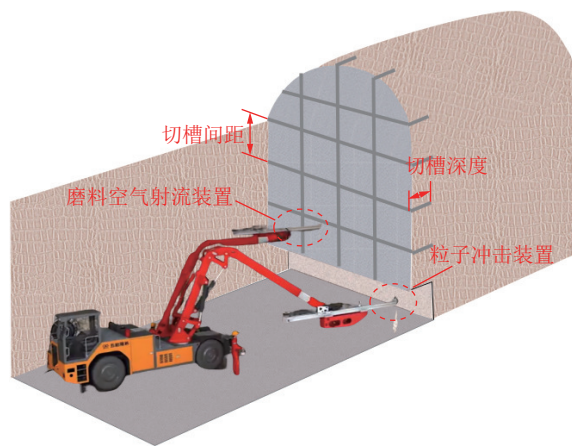


图 50 粒子冲击耦合磨料空气射流隧道掘进

Fig.50 Particle impact coupled abrasive air jet tunnel boring

5 总结与展望

将无刀具破岩技术归纳为以动载荷冲击破岩、热

应力和冲蚀磨损为主的3类技术体系,系统分析了水射流、激光和磨料空气射流等16种岩石破碎技术,总结出以动载荷冲击为主的破岩方式,采用粒子冲击和超临界二氧化碳射流是较为高效的方式,可以对岩石产生大体积破碎。而传统高压水射流其工程应用广泛,但其在破岩时单位体积岩石破碎能耗较高,水射流破岩比能耗为刀具的40~70倍,尤其在高地应力硬岩隧道,需要提供极高的射流压力(>200 MPa),使能耗进一步增大,不满足低碳要求。以热应力作用为主的非刀具破岩方式,整体钻速高、破硬岩速度快,但也存在一些不足,其破岩效率受环境影响大,对于钻井、隧道掘进等受限和恶劣的作业环境不能适用。因此,目前以热应力为主的破岩方式还没有进行工程应用的实例。以冲蚀磨损为主的破岩方式,其对硬质材料的高效切割能力使得该技术在金属加工、表面处理和煤层卸压增透中广泛应用。而磨料射流技术虽然可以高效破硬岩,但不能产生大体积破碎,仅能够进行切槽卸压,因此在单独应用时并不能促进岩石开挖工作面的整体推进。现阶段,随着深地战略的实施,为解决深地极端地质条件下岩石破碎难题、简化系统装备、降低系统能耗,提出多种非刀具破岩技术协同破岩的思路,充分发挥不同非刀具破岩的技术优势,以高效切缝卸除高地应力与粒子冲击体积破碎坚硬岩体的破岩理念,最大限度降低岩石破碎能耗,简化系统装备,为岩石破碎技术向非刀具化发展提供理论支撑。虽然未来一段时间内,岩石破碎仍是以机械破岩方式为主,但随着无刀具技术的不断完善和相应装备的研发,亦有望实现隧道开挖或深部煤岩巷道掘进的无刀具化,改变现有刀具隧道掘进方式,从而实现更加经济、更加高效的岩土工程施工工序和工法。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[1][N]. 人民日报, 2023-03-01(9).
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [3] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [4] 周宏春, 管永林. 对碳中和导向下我国能源发展的若干战略思考[J]. 中国经济报告, 2021, 128(6): 108-120.
- ZHOU Hongchun, GUAN Yonglin. Some strategic thoughts on china's energy development under carbon neutral orientation[J]. China Policy Review, 2021, 128(6): 108-120.
- [5] 童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 727-736.
TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources[J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2018, 45(4): 727-736.
- [6] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649.
SUN Longde, ZOU Caicai, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [7] 赵志宏, 刘桂宏, 王佳铖, 等. 城市深层地热能可持续开采多场耦合效应数值模拟研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1126-1138.
ZHAO Zhihong, LIU Guihong, WANG Jiacheng, et al. Coupled multi-field effect on sustainable development of deep geothermal energy in cities[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1126-1138.
- [8] 刘志强, 宋朝阳, 纪洪广, 等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826-845.
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, JI Guanghong, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826-845.
- [9] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [10] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形的理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.
- [11] 张锦宏, 周爱照, 成海, 等. 中国石化石油工程技术新进展与展望[J]. 石油勘探技术, 2023, 51(4): 149-158.
ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's Petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 149-158.
- [12] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.
- [13] 魏忠良. 硬岩掘进机刀具消耗分析[J]. 隧道建设, 2004(1): 52-55.
WEI Zhongliang. Analysis of tool consumption of hard rock boring machine[J]. Tunnel Construction, 2004(1): 52-55.
- [14] 韩伟锋. 水射流辅助机械滚刀破岩试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1414-1419.
HAN Weifeng. Experimental study on rock-breaking using a wa-

- ter jet assisted mechanical disc cutter[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1414–1419.
- [15] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716–725.
- [16] FAIRHURST C. 深部开采的一些挑战[J]. Engineering, 2017, 3(4): 210–232.
FAIRHURST C. Some challenges of deep mining[J]. Engineering, 2017, 3(4): 210–232.
- [17] 虎维岳. 深部煤炭开采地质安全保障技术现状与研究方向[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 1–5.
HU Weiyue. Study orientation and present status of geological guarantee technologies to deep mine coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 1–5.
- [18] 刘勇, 陈长江, 刘笑天, 等. 高压水射流破岩能量耗散与释放机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2609–2615.
LIU Yong, CHEN Changjiang, LIU Xiaotian, et al. Mechanism on energy dissipation and release of rock breakage with high pressure water jets[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2609–2615.
- [19] 常宗旭, 邵保平, 赵阳升, 等. 煤岩体水射流破碎机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 983–987.
CHANG Zongxu, YU Baoping, ZHAO Yangsheng, et al. Mechanical of breaking coal by water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 983–987.
- [20] 梁卫国, 贺伟, 阎纪伟. 超临界 CO₂ 致煤岩力学特性弱化与破裂机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2557–2568.
LIANG Weiguang, HE Wei, YAN Jiwei. Weakening and fracturing mechanism of mechanical properties of coal and rock caused by supercritical CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2557–2568.
- [21] 孙可明, 李天舒. 超临界 CO₂ 作用下煤体膨胀变形理论模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1419–1426.
SUN Keming, LI Tianshu. Theoretical model of coal swelling deformation under supercritical carbon dioxide action[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1419–1426.
- [22] 郭辰光, 孙瑜, 岳海涛, 等. 激光辐照热裂破岩规律及力学性能[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1734–1742.
GUO Chenguang, SUN Yu, YUE Haitao, et al. Law and mechanics of thermal cracking of rock by laser irradiation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1734–1742.
- [23] 张建阔. 激光破岩试验及激光技术在石油工程中的应用[J]. 石油机械, 2017, 45(3): 16–20.
ZHANG Jianguo. Experimental study on laser rock breaking and discussion on its application in petroleum engineering[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(3): 16–20.
- [24] 张世一, 韩彬, 李美艳, 等. 激光钻井技术研究进展与展望[J]. 石油机械, 2016, 44(7): 7–11.
ZHANG Shiyi, HAN Bin, LI Meiyang, et al. Research progress and prospect on laser drilling technology [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(7): 7–11.
- [25] 周科平, 薛轲, 刘涛影. 微波作用下砂岩孔隙结构演化及强度劣化的试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 6–11.
ZHOU Keping, XUE Ke, LIU Taoying. Pore structure evolution and strength degradation of sandstone after microwave treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2): 6–11.
- [26] 刘勇, 何岸, 魏建平, 等. 高压气体射流破煤应力波效应分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1694–1700.
LIU Yong, HE An, WEI Jianping, et al. Analysis of stress wave effect during coal breakage process by high pressure gas jet[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1694–1700.
- [27] 刘勇, 陈长江, 魏建平, 等. 磨料水射流与磨料气体射流破岩压力对比分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2510–2517.
LIU Yong, CHEN Changjiang, WEI Jianping, et al. Comparison analysis on the rock breakage pressure induced by abrasive water jets and abrasive gas jets[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2510–2517.
- [28] 刘勇, 李志飞, 魏建平, 等. 磨料空气射流破煤冲蚀模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1733–1742.
LIU Yong, LI Zhifei, WEI Jianping, et al. Erosion model of abrasive air jet used in coal breaking[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1733–1742.
- [29] LIU Yong, CUI Jiawei, XU Zhiyuan. Comparison of the rock breakage pressure of abrasive water jets and abrasive air jets[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(3): 637–645.
- [30] 魏建平, 王梦园, 杨恒, 等. 磨料质量分数对预混合磨料水射流破岩效果的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 251–262.
WEI Jianping, WANG Mengyuan, YANG Heng, et al. Influence of abrasive mass fraction on the effect of premixed abrasivewater jets on rock breaking[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 251–262.
- [31] 林晓东, 卢义玉, 汤积仁, 等. 前混合式磨料水射流磨料粒子加速过程数值模拟[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 19–24.
LIN Xiaodong, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Numerical simulation of abrasive particles acceleration process in pre-mixed abrasive water jet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 19–24.
- [32] 陈彦臻, 胡以怀. 船体表面附着物清洗技术的研究及应用[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 60–71.
CHEN Yanzhen, HU Yihuai. Research and application of ship hull fouling cleaning technologies[J]. Surface Technology, 2017, 46(10): 60–71.
- [33] 曹运红. 水射流切割技术的发展及其在航空航天工业中的应用[J]. 宇航材料工艺, 1992(4): 35–38.
CAO Yunhong. Development of water jet cutting technology and its application in aerospace industry[J]. Aerospace Materials and Technology, 1992(4): 35–38.
- [34] MAID M, 王勇. 高能水射流切割在工业中的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 1990(5): 70–71.
MAID M, WANG Yong. Application of high-energy water jet cutting in industry[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1990(5): 70–71.
- [35] 刘勇, 何岸, 魏建平, 等. 水射流卸压增透堵孔诱因及解堵新方法

- [J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1963–1967.
- LIU Yong, HE An, WEI Jianping, et al. Plugging factor and new plugging method to hydraulic relieving stress[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1963–1967.
- [36] 廖华林, 李根生, 牛继磊, 等. 径向水平钻孔直旋混合射流钻头设计与破岩特性[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 424–429.
- LIAO Hualin, LI Gensheng, NIU Jilei, et al. Integrating straight & swirling jets bit design and its rock breaking characteristics for radial horizontal hole drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 424–429.
- [37] 张金良, 罗星臣, 杨风威, 等. 磨料水射流辅助与常规工况下滚刀破岩特性对比研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 333–340.
- ZHANG Jinliang, LUO Xingchen, YANG Fengwei, et al. A comparative study on rock breaking by a disc cutter under abrasivewater jet-assisted and conventional working conditions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 333–340.
- [38] ZHANG Jinliang, YANG Fengwei, CAO Zhiguo, et al. In situ experimental study on TBM excavation with high-pressure water-jet-assisted rock breaking[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(12): 4066–4077.
- [39] WANG Huajian, LIAO Hualin, WEI Jun, et al. Stress release mechanism of deep bottom hole rock by ultra-high-pressure water jet slotting[J]. Petroleum Science, 2023, 20(3): 1828–1842.
- [40] 黄璐云, 陈正寿, 倪路新, 等. 靶距与冲击角对超高压水射流喷嘴水动力学性能影响的研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 169–178.
- HUANG Luyun, CHEN Zhengshou, NI Luxin, et al. Study on the effects of target distance and impact angle on the hydrodynamic performance of ultrahigh-pressure water jet nozzles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 169–178.
- [41] 易恩兵, 张永将. 超高压水射流“横切纵断”防治复合煤岩动力灾害技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1271–1279.
- YI Enbing, ZHANG Yonggong. Ultra-high-pressure water jet “cross-cutting and longitudinal breaking” technology for prevention and control of composite coal-rock dynamic disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1271–1279.
- [42] 张金良, 杨风威, 曹智国, 等. 大线速度下超高压水射流破岩试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 615–623.
- ZHANG Jinliang, YANG Fengwei, CAO Zhiguo, et al. Experimental study on rock breaking by ultrahigh-pressure water jet under large linear velocity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 615–623.
- [43] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 掘进机刀盘滚刀间距对北山花岗岩破岩效率的影响实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 54–60.
- GONG Qiuming, HE Guanwen, ZHAO Xiaobao, et al. Experimental study on the effect of cutter hob spacing of roadheader on rock breaking efficiency of granite in Beishan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 54–60.
- [44] 杨锡林. 高压水射流破岩简介[J]. 轻金属, 1980(4): 29–31.
- YANG Xilin. Introduction to high-pressure water jet rock breaking[J]. Light Metals, 1980(4): 29–31.
- [45] 路明雨, 张明, 张加波, 等. 激光加工非金属材料的研究与应用进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(1): 30–38.
- LU Mingyu, ZHANG Ming, ZHANG Jiabo, et al. Research and application progress of laser processing of nonmetallic composites[J]. Aerospace Materials Technology, 2022, 52(1): 30–38.
- [46] 李兴, 管迎春. 浅述几种典型激光加工技术在航空制造领域的应用现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 38–45.
- LI Xing, GUAN Yingchun. An overview of the current status of application of several typical laser processing technologies in the field of aerospace manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(S2): 38–45.
- [47] 王瑞凤, 张彦朴, 许志艳. 激光技术军事应用的现状及发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2007(S1): 308–311.
- WANG Ruifeng, ZHANG Yanpu, XU Zhiyan. Current status and development trend of military application of laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007(S1): 308–311.
- [48] 陈德煌. 激光技术及其军事应用[J]. 激光与光电子学进展, 1992(12): 4–6.
- CHEN Dehuang. Laser technology and its military applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1992(12): 4–6.
- [49] 陈小明, 王海金, 周夏凉, 等. 激光表面改性技术及其研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 341–344.
- CHEN Xiaoming, WANG Haijin, ZHOU Xialiang, et al. Laser surface modification technology and its research progress[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 341–344.
- [50] GRAVES R M, ANIBAL A, GAHAN B C, et al. Comparison of specific energy between drilling with high power lasers and other drilling methods[J]. Society of Petroleum Engineers, 2002: 77627.
- [51] AHMADI M, ERFAN M R, TORKAMANY M J, et al. The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in ND: YAG laser perforating[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 226–231.
- [52] MOAVENZADEH F, MCGARRY F J, WILLIAMSON R B. Use of laser and surface active agents for excavation in hard rocks[J]. Journal of Petroleum Technology, 1968: 75206.
- [53] GAHAN B C, PARKER R A, BATARSEH S, et al. Laser drilling: determination of energy required to remove rock[J]. Society of Petroleum Engineers, 2001: 71466.
- [54] GRAVES R M. Laser-rock-fluid interaction: application of free-electron laser (FEL) in petroleum well drilling and completions[J]. International Society for Optics and Photonics, 1999, 3614: 168–176.
- [55] FIGUEROA H G, LAGRECA A, GAHAN B C, et al. Rock removal using high-power lasers for petroleum exploitation purposes[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, 4760: 678–690.
- [56] MERMILLOD-Blondin A, ROSENFELD A, Stoian R, et al. Formation dynamics of femtosecond laser-induced phase objects in transparent materials[J]. Proc Spie, 2012, 8247: 13.
- [57] 刘海青, 王志文, 成明, 等. 高压水射流切割技术发展及应用现状[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 173–179.
- LIU Haiqing, WANG Zhiwen, CHENG Ming, et al. Development and application status of high-pressure water jet cutting technology[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2018, 46(21): 173–179.

- [58] 沈忠厚. 水射流理论与技术[J]. 中国安全科学学报, 1999(S1): 89.
SHEN Zhonghou. Theory and technology of water jet[J]. China Safety Science Journal, 1999(S1): 89.
- [59] 刘庭成, 白俊英, 白春雪. 高压水射流技术综述[J]. 冶金设备, 1995(5): 51–53.
LIU Tingcheng, BAI Junying, BAI Chunxue. Review of high-pressure water jet technology[J]. Metallurgical Equipment, 1995(5): 51–53.
- [60] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189–3211.
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Progress and strategic thinking of water jet pressure relief and permeation technology in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189–3211.
- [61] 刘勇, 卢义玉, 李晓红, 等. 高压脉冲水射流顶底板钻孔提高煤层瓦斯抽采率的应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1115–1119.
LIU Yong, LU Yiyu, LI Xiaohong, et al. Application study of high-pressure pulse water jet top and bottom plate drilling to improve coal seam gas extraction rate[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1115–1119.
- [62] 卢义玉, 刘勇, 夏彬伟, 等. 石门揭煤钻孔布置优化分析及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 283–287.
LU Yiyu, LIU Yong, XIA Binwei, et al. Optimization analysis and application of Shimon coal uncovering drilling arrangement[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 283–287.
- [63] 王敏生, 光新军. 高压水射流钻完井技术进展及发展思考[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 173–179.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Progress and development thinking of high-pressure water jet drilling and completion technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 173–179.
- [64] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45–49.
YUAN Liang, LIN Boquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas management of coal mine hydraulics technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45–49.
- [65] 王少锋, 吴毓萌, 周子龙. “三深”复杂环境下岩石钻进与机械化开挖技术发展及展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 819–836.
WANG Shaofeng, WU Yumeng, ZHOU Zilong. Development and prospect of rock drilling and mechanised excavation technology in the complex environment of “Three Depths” [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(3): 819–836.
- [66] PIANTHONG K, ZAKRZEWSKI S, BEHNIA M, et al. Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics[J]. Shock Waves, 2002, 11(6): 457–466.
- [67] BOWDEN F P, FIELD J E. The brittle fracture of solids by liquid impact. by solid impact, and by shock[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1964, 282(1390): 331–352.
- [68] 薛永志. 高压水射流冲击下煤岩损伤诱导机制及分布特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- XUE Yongzhi. Study on damage inducing mechanism and distribution characteristics of coal rock under high pressure water jet impact[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [69] 任利, 谢和平, 朱哲明, 等. 裂隙岩石拉伸断裂破坏理论分析试探[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 21–27.
REN Li, XIE Heping, ZHU Zheming, et al. A trial analysis of tensile fracture damage theory for fractured rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 21–27.
- [70] 赵岳然, 姜文忠, 靳鹏, 等. 高压水射流破煤机理研究进展及展望[J]. 煤矿安全, 2022, 53(4): 183–192.
ZHAO Yueran, JIANG Wenzhong, JIN Peng, et al. Research progress and prospect of coal breaking mechanism by high pressure water jet[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4): 183–192.
- [71] 常宗旭. 水射流非均质破岩理论及其应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
CHANG Zongxu. Water jet non-homogeneous rock breaking theory and its application[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.
- [72] 高富强, 杨军, 刘永茜, 等. 岩石准静态和动态冲击试验及尺寸效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(4): 19–22.
GAO Fuqiang, YANG Jun, LIU Yongqian, et al. Quasi-static and dynamic impact tests on rocks and dimensional effects[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(4): 19–22.
- [73] 金解放. 静载荷与循环冲击组合作用下岩石动态力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
JIN Jiefang. Study on dynamic mechanical properties of rocks under combined static load and cyclic impact[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [74] 左宇军. 动静组合加载下的岩石破坏特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
ZUO Yujun. Study of rock damage characteristics under combined dynamic and static loading[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [75] 潘峰, 党发宁, 焦凯, 等. 冲击荷载作用下不均匀脆性材料动态弯拉强度提高机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3948–3955.
PAN Feng, DANG Faning, JIAO Kai, et al. Study on the mechanism of dynamic bending and tensile strength enhancement of inhomogeneous brittle materials under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3948–3955.
- [76] SAADATMAND HASHEMI A, KATSABANIS P. The effect of stress wave interaction and delay timing on blast-induced rock damage and fragmentation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(3): 1–20.
- [77] 张青成. 应力波作用下花岗岩损伤演化的试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
ZHANG Qingcheng. Experimental study on the damage evolution of granite under the action of stress waves[D]. Beijing: China University of Mining and Technology–Beijing, 2014.
- [78] 万国香. 应力波作用下岩石电磁辐射与声发射特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
WAN Guoxiang. Study on the characteristics of the electromagnet-

- ic emission and acoustic emission in rock under stress wave[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [79] 张强, 王聪, 刘玉果, 等. 难采煤岩的高效破碎方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 163–176.
- ZHANG Qiang, WANG Cong, LIU Yuguang, et al. Research of high efficient crushing methods for coal rock[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 163–176.
- [80] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩机理研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002(4): 118–122.
- WANG Ruihe, NI Hongjian. Research on the mechanism of rock breaking by high pressure water jet[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2002(4): 118–122.
- [81] 王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883–3912.
- WANG Shaofeng, SUN Licheng, ZHOU Zilong, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883–3912.
- [82] 杨云龙. 高压气液两相射流冲击动力特性与影响因素研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
- YANG Yunlong. Research on impingement dynamic characteristics and influencing factors of high-pressure gas-liquid two-phase jet[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [83] 齐志冲, 吕旦, 贺飞, 等. 水刀辅助破岩技术的搭载及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(8): 1404–1412.
- QI Zhichong, LÜ Dan, HE Fei, et al. Carrying and application of water jet cutter-assisted rock breaking technology[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(8): 1404–1412.
- [84] CAO Shirong, GE Zhaolong, ZHANG Di, et al. An experimental study of ultra-high pressure water jet-induced fracture mechanisms and pore size evolution in reservoir rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022: 150.
- [85] LIU Yong, WEI Jianping, TANG Jiren. Analysis of the stress wave effect during rock breakage by pulsating jets[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 49(2): 503–514.
- [86] 贺飞, 张金良, 鲁义强, 等. 滚刀-高移速水射流耦合切削极硬花岗岩试验与模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1187–1203.
- HE Fei, ZHANG Jinliang, LU Yiqiang, et al. Experimental and simulation study of hob-high-movement velocity water jet coupling for cutting very hard granite[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2023, 54(3): 1187–1203.
- [87] 黄飞, 胡斌, 左伟芹, 等. 不同形状喷嘴的高压水射流冲击力特性实验[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(9): 124–133.
- HUANG Fei, HU Bin, ZUO Weiqin, et al. Experiments on the impact pressure of high-pressure water jet under different nozzle shapes[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(9): 124–133.
- [88] 顾北方. 高压水射流割缝煤体损伤演化规律研究与应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- GU Beifang. Coal damage and evolution law under influence of high pressure water hydraulic cutting and their application[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2016.
- [89] 张培铭, 袁聪, 朱丽莎. 高压水射流的流场动态行为机理分析[J]. 机械设计与制造, 2023, 389(7): 197–200.
- ZHANG Peiming, YUAN Cong, ZHU Lisa. Investigation on dynamic behavior of water jet under high pressure drop[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, 389(7): 197–200.
- [90] 韩启龙, 马洋. 喷嘴结构对高压水射流影响及结构参数优化设计[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 68–74.
- HAN Qilong, MA Yang. Influence of nozzle structure on high pressure water jet and optimization design of nozzle structural parameters[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(3): 68–74.
- [91] 赵江南, 雷泽勇, 钟林, 等. 高压水射流喷嘴研究进展[J]. 清洗世界, 2023, 39(1): 45–48.
- ZHAO Jiangnan, LEI Zeyong, ZHONG Lin, et al. Research progress of high-pressure water jet nozzle[J]. Cleaning World, 2023, 39(1): 45–48.
- [92] 周慧宇, 杜岩, 陈淑楠, 等. 结构参数对扇形喷嘴的射流性能影响研究[J]. 宽厚板, 2023, 29(3): 15–22.
- ZHOU Huiyu, DU Yan, CHEN Shunan, et al. Influence of structural parameters on jet performance of fan-shaped[J]. Wide and Heavy Plate, 2023, 29(3): 15–22.
- [93] 甘川, 孙春勇, 宋佳佳. 基于 SPH-SPH 方法的水射流冲击破岩的数值模拟[J]. 技术与市场, 2021, 28(11): 20–21.
- GAN Chuan, SUN Chunyong, SONG Jiajia. Numerical simulation of water jet impact rock breaking based on SPH-SPH method[J]. Technology and Market, 2021, 28(11): 20–21.
- [94] 雷光宇, 党发宁, 李骞, 等. 基于高压水射流破岩的岩石损伤破坏效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 34–38.
- LEI Guangyu, DANG Faning, LI Qian, et al. Study on the rock damage fracture effect based on the high pressure water jet rock breaking[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 34–38.
- [95] 陈正寿, 黄璐云, 杜炳鑫, 等. 超高压水射流喷头水力特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(5): 158–171.
- CHEN Zhengshou, HUANG Luyun, DU Bingxin, et al. Insight of hydrodynamic characteristics related to ultra-high pressure water jet rust removal sprayers[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(5): 158–171.
- [96] 张熊栋. 高压水射流破岩技术的特点[J]. 矿业工程, 1980(11): 12–25.
- ZHANG Xiongdong. Characteristics of high pressure water jet rock breaking technology[J]. Mining Engineering, 1980(11): 12–25.
- [97] 邱浩权. 水射流在新型 TBM 联合破岩中的破岩能力研究[J]. 土工基础, 2022, 36(4): 576–581.
- QIU Haoquan. Water jetting in the new TBM combined rock breaking feasibility study[J]. Soil Engineering and Foundation, 2022, 36(4): 576–581.
- [98] BREMHORST K, HOLLIS P G. Velocity field of an axisymmetric pulsed, subsonic air jet[J]. Aiaa Journal, 1990, 28(12): 2043–2049.
- [99] 杨林, 唐川林, 张风华. 高压水射流技术的发展及应用[J]. 洗净技术, 2004(1): 9–14.
- YANG Lin, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua. Development and

- application of high-pressure water jet technology[J]. *Cleaning Technology*, 2004(1): 9–14.
- [100] SRIPANAGUL G, MATTHUJAK A, SRIVEERAKUL T, et al. Experimental investigation of stone drilling using water jet generated by electromagnetic actuator[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021: 142.
- [101] 李贤忠. 高压脉动水力压裂增透机理与技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- LI Xianzhong. The mechanism and technology of permeability enhancements in coal seam based on high pressure pulsating hydraulic fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [102] 卢义玉, 朱志丹, 汤积仁, 等. 增压式脉冲水射流破碎硬岩性能研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(7): 114–122.
- LU Yiyu, ZHU Zhidan, TANG Jiren, et al. Hard rock-breaking performance of supercharged pulsed water jet[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(7): 114–122.
- [103] 凌远非. 增压式脉冲水射流形成机理及破碎硬岩性能评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- LING Yuanfei. Formation mechanism of pressurized pulsed water jet and evaluation of hard rock fracturing performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [104] TRIPATHI R, HLOCH S, CHATTOPADHYAYA S, et al. Application of the pulsating and continuous water jet for granite erosion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104209.
- [105] 韩健, 蔡腾飞, 潘岩, 等. 风琴管喷嘴和赫姆霍兹喷嘴射流特性分析[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(7): 134–137.
- HAN Jian, CAI Tengfei, PAN Yan, et al. Study on jet's characteristics of organ nozzle and helmholtz nozzle[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(7): 134–137.
- [106] 李登, 李晓红, 康勇, 等. 风琴管喷嘴内表面粗糙度对高压射流特性的影响试验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(17): 169–176.
- LI Deng, LI Xiaohong, KANG Yong, et al. Experimental investigation on the influence of internal surface roughness of organ pipe nozzle on the characteristics of high pressure jet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(17): 169–176.
- [107] 易灿, 李根生. 喷嘴结构对高压射流特性影响研究[J]. *石油钻采工艺*, 2005(1): 16–19, 80.
- YI Chan, LI Gensheng. Study of the influence of the nozzle structure on waterjet characteristics[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005(1): 16–19, 80.
- [108] 俞强强. 基于脉冲水射流喷嘴形状设计的射流流场数值模拟[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
- YU Qiangqiang. Numerical simulation of jet flow field based on shape design of pulsed water jet nozzle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [109] 廖振方, 唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002(2): 24–27.
- LIAO Zhenfang, TANG Chuanlin. Theory of the self-excited oscillation pulsed jet nozzle[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science)*, 2002(2): 24–27.
- [110] 白志华, 曹林卫. 脉冲水射流破岩的数值模拟与分析[J]. *重庆工*
- 学院学报(自然科学版), 2009, 23(2): 31–35.
- BAI Zhihua, CAO Linwei. Numerical simulation and analysis of rock breaking under pulse water jet[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2009, 23(2): 31–35.
- [111] 李根生, 田守嵘, 张逸群. 空化射流钻径向井开采天然气水合物关键技术研究进展[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(3): 349–365.
- LI Gensheng, TIAN Shouxian, ZHANG Yijun. Research progress on key technologies of natural gas hydrate exploitation by cavitation jet drilling of radial wells[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(3): 349–365.
- [112] WU Xiaoya, ZHANG Yiqun, HUI Chengyu, et al. Cavitation damage inducing the improvement of jet breaking efficiency during hydrate drilling[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 20(2): 1104–1118.
- [113] CHEN Yan, FANG Zhenlong, XIONG Ting, et al. An experimental study on the erosion of sandstone by self-excited oscillation cavitation waterjet in submerged environment[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114546.
- [114] TIAN Lei, ZHANG Yongxue, YIN Jianyong, et al. Study on the liquid jet and shock wave produced by a near-wall cavitation bubble containing a small amount of non-condensable gas[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 145(A): 106815.
- [115] 王建杰, 陈立宇, 杨夏明, 等. 空化水射流的研究进展[J]. *精密成形工程*, 2016, 8(5): 156–162.
- WANG Jianjie, CHEN Liyu, YANG Xiaming, et al. Research progress of cavitation water jet[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016, 8(5): 156–162.
- [116] HU Jincheng, YUAN Miao, FENG Gan, et al. Experimental investigation on the cavitation modulation mechanism in submerged self-sustained oscillating jets[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 274: 114108.
- [117] ZHUANG Dongdong, ZHANG Shuhao, LIU Haixia, et al. Cavitation erosion behavior and anti-cavitation erosion mechanism of NiTi alloys impacted by water jet[J]. *Wear*, 2023, 518: 204631.
- [118] 李子丰. 空化射流形成的判据和冲刷机理[J]. *工程力学*, 2007(3): 185–188.
- LI Zifeng. Criteria and erosion mechanism of cavitation jet formation[J]. *Engineering Mechanics*, 2007(3): 185–188.
- [119] 程效锐, 张舒研, 陈红杏, 等. 空化射流技术的应用进展与前瞻性分析[J]. *能源化工*, 2018, 39(4): 19–24.
- CHENG Xiaorui, ZHANG Shuyan, CHEN Hongxing, et al. Application progress and prospective analysis of cavitation jet technology[J]. *Energy Chemical Industry*, 2018, 39(4): 19–24.
- [120] 黄晨阳, 李凡, 田华, 等. 空化场中大气泡对空化泡振动的抑制效应分析[J]. *物理学报*, 2023, 72(6): 210–219.
- HUANG Chenyang, LI Fan, TIAN Hua, et al. Analysis of the suppression effect of large bubbles on cavitation bubble vibration in cavitation field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(6): 210–219.
- [121] 张博浩, 宋立国, 邓琤琪, 等. 水力空化强化 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 的船舶废气脱硝实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(2): 244–250.
- ZHANG Bohao, SONG Liguang, DENG Chengqi, et al. Experimental study on the denitrification of ship exhaust gas by hydrocavitation-enhanced $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ [J]. *Journal of Harbin Engineering Uni-*

- versity, 2023, 44(2): 244–250.
- [122] 罗冲. 空化泡及空化水射流的数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- LUO Chong. Numerical simulation of cavitation bubbles and cavitation water jets[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [123] 王勇. 喷嘴结构对淹没空化水射流冲蚀能力影响的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.
- WANG Yong. Research on the influence of nozzle structure on the erosion capacity of submerged cavitation water jet[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021.
- [124] 张风华, 王勇, 陈谷. 喷嘴结构对空化水射流冲蚀能力的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(2): 30–37.
- ZHANG Fenghua, WANG Yong, CHEN Gu. Influence of nozzle structure on the erosion capacity of cavitation water jet[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2021, 35(2): 30–37.
- [125] WU Xiaoya, ZHANG Yiqun, TAN Yawen, et al. Flow-visualization and numerical investigation on the optimum design of cavitating jet nozzle[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(5): 2284–2296.
- [126] 张俊尧. 喷嘴结构对水射流速度和空化能力影响的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- ZHANG Junyao. Research on the effect of nozzle structure on water jet velocity and cavitation capacity[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [127] 涂翊翔, 樊辰星, 钱亦楠, 等. 双空化射流中心体结构优化及破煤岩特性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3250–3259.
- TU Yixiang, FAN Chenxing, QIAN Yinan, et al. Optimization of the structure of double cavitation jet center body and characteristics of broken coal rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3250–3259.
- [128] 李登, 姚致远, 涂翊翔, 等. 非淹没双空化射流流场及冲击特性数值模拟[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 31–38.
- LI Deng, YAO Zhiyuan, TU YIXiang, et al. Numerical simulation of non-submerged double cavitation jet flow field and impact characteristics[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6): 31–38.
- [129] 楚恒智, 郭勇, 张楠, 等. 微颗粒强化射流空化及破岩能力研究[J]. 石油机械, 2023, 51(8): 34–42.
- CHU Hengzhi, GUO Yong, ZHANG Nan, et al. Research on cavitation and rock-breaking capacity of microparticle-enhanced jet[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(8): 34–42.
- [130] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 203(2): 239–243.
- LI Gensheng, SHI Huaizhong, SHEN Zhonghou, et al. Hydraulic pulse cavitation jet drilling mechanism and test[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 203(2): 239–243.
- [131] 曹泽平. 新型空化喷嘴的射流与冲蚀特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- CAO Zeping. Research on jet and erosion characteristics of new cavitation nozzle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [132] 魏建平, 崔家玮, 张铁岗, 等. 腔径比对自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流性能影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3239–3249.
- WEI Jianping, CUI Jiawei, ZHANG Tiegang, et al. Effect of cavity-diameter ratio on the performance of self-excited oscillating pulsed supercritical CO₂ jets[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3239–3249.
- [133] 赵博, 赵焕省. 超临界二氧化碳流体钻井技术研究现状[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(11): 53.
- ZHAO Bo, ZHAO Huansheng. Research status of supercritical carbon dioxide fluid drilling technology[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2011, 31(11): 53.
- [134] 王瑞和, 倪红坚, 宋维强, 等. 超临界二氧化碳钻井基础研究进展[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 1–9.
- WANG Ruihe, NI Hongjian, SONG Weiqiang, et al. Progress of basic research on supercritical carbon dioxide drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(2): 1–9.
- [135] 杜玉昆, 庞飞, 陈科, 等. 超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3749–3756.
- DU Yukun, PANG Fei, CHEN Ke, et al. Supercritical carbon dioxide injection fracturing shale test[J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3749–3756.
- [136] ZHANG Huidong, LIU Yong, TANG Jiren, et al. Investigation on the fluctuation characteristics and its influence on impact force of supercritical carbon dioxide jet[J]. *Energy*, 2022, 253: 124125.
- [137] 杜玉昆, 王瑞和, 倪红坚, 等. 超临界二氧化碳旋转射流破岩试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(6): 1078–1085.
- DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Experimental study on rock breaking by supercritical carbon dioxide rotating jet[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(6): 1078–1085.
- [138] 黄飞, 卢义玉, 汤积仁, 等. 超临界二氧化碳射流冲蚀页岩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 787–794.
- HUANG Fei, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Experimental study of supercritical carbon dioxide jet erosion of shale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 787–794.
- [139] 倪红坚, 郭兴, 丁璐, 等. 超临界二氧化碳浸泡对页岩力学性质影响的实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 77–84.
- NI Hongjian, GUO Xing, DING Lu, et al. Experiments on the effect of supercritical carbon dioxide immersion on the mechanical properties of shale[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(2): 77–84.
- [140] ZHANG Beining, LIANG Weiguo, RANJITH P R, et al. Coupling effects of supercritical CO₂ sequestration in deep coal seam[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(1): 460–473.
- [141] 刘勇, 张东鑫, 张宏图, 等. 超临界二氧化碳射流冲击短时浸泡煤体破坏特征分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3310–3319.
- LIU Yong, ZHANG Dongxin, ZHANG Hongtu, et al. Characterization of damage analysis of supercritical carbon dioxide jet impingement on short-time immersed coal body[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3310–3319.
- [142] LIU Yong, SHEN Helian, WEI Jianping, et al. Cracking characteristic induced by supercritical carbon dioxide phase change in micro-cracks of coal[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(5): 1–13.
- [143] 沈荷莲, 刘勇, 魏建平, 等. 自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流冲

- 击频率变化规律[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1097–1104.
- SHEN Helian, LIU Yong, WEI Jianping, et al. Changing law of shock frequency of self-excited oscillating pulsed supercritical carbon dioxide jet[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1097–1104.
- [144] 刘勇, 崔家玮, 魏建平, 等. 自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流发生机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2643–2655.
- LIU Yong, CUI Jiawei, WEI Jianping, et al. Self-excited oscillatory pulsed supercritical carbon dioxide jet generation mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2643–2655.
- [145] 李仁明, 田益平, 刘佳云, 等. 超临界二氧化碳钻井技术与展望[J]. 中国石油石化, 2017, 363(4): 74–75.
- LI Renming, TIAN Yiping, LIU Jiayun, et al. Supercritical carbon dioxide drilling technology and prospect[J]. China Petroleum, 2017, 363(4): 74–75.
- [146] 王海柱, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界 CO₂ 钻井与未来钻井技术发展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 1–5, 135.
- WANG Haizhu, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Supercritical CO₂ drilling and future drilling technology development[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(2): 1–5, 135.
- [147] 伍开松, 古剑飞, 况雨春, 等. 粒子冲击钻井技术述评[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 127(2): 142–146, 198–199.
- WU Kaisong, GU Jianfei, KUANG Yuchun, et al. Review of particle impact drilling technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2008, 127(2): 142–146, 198–199.
- [148] 鞠明和, 陶泽军, 李晓锋, 等. 粒子重复冲击破岩细观损伤及破碎特征试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3281–3293.
- JU Minghe, TAO Zejun, LI Xiaofeng, et al. Experimental study on microscopic damage and crushing characteristics of rock broken by repetitive particle impact[J]. Geotechnics, 2022, 43(12): 3281–3293.
- [149] TIBBITTS G A, GALLOWAY G G. Particle drilling alters standard rock-cutting approach[J]. World Oil, 2008, 229: 37–44.
- [150] 任建华, 徐依吉, 赵健, 等. 粒子冲击破岩的数值模拟分析[J]. 高压物理学报, 2012, 26(1): 89–94.
- REN Jianhua, XU Yiji, ZHAO Jian, et al. Numerical simulation analysis of particle impact rock breaking[J]. Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(1): 89–94.
- [151] 王瑞和, 王方祥, 周卫东, 等. 粒子破岩钻进技术研究进展及发展趋势[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 71–79.
- WANG Ruihe, WANG Fangxiang, ZHOU Weidong, et al. Research progress and development trend of particle rock-breaking drilling technology[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2016, 40(6): 71–79.
- [152] 颜廷俊, 姜美旭, 张杨, 等. 基于 ANSYS-LSDYNA 的围压下粒子冲击破岩规律[J]. 断块油气田, 2012, 19(2): 240–243.
- YAN Tingjun, JIANG Meixu, ZHANG Yang, et al. Particle impact rock breaking law under confining pressure based on ANSYS-LSDYNA[J]. Fractured Block Oil and Gas Fields, 2012, 19(2): 240–243.
- [153] 伍开松, 荣明, 李德龙, 等. 双粒子联合冲击破岩仿真研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 19–23.
- WU Kaisong, RONG Ming, LI Delong, et al. Simulation study on rock breaking by double-particle joint impact[J]. Geotechnics, 2009, 30(S1): 19–23.
- [154] 刘勇, 郭鑫辉, 魏建平, 等. 岩弹冲击破岩规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 270–278.
- LIU Yong, GUO Xinhui, WEI Jianping, et al. Experimental study on the rock-bouncing impact breaking law[J]. Vibration and Impact, 2023, 42(4): 270–278.
- [155] 郭正谊. 火药源起的新探讨[J]. 化学通报, 1986(1): 55–57.
- GUO Zhengyi. A new study on the origin of gunpowder[J]. Chemistry, 1986(1): 55–57.
- [156] 孟乃昌. 火药发明探源[J]. 自然科学史研究, 1989, 8(2): 147–157.
- MENG Naichang. Exploration of the origin of gunpowder invention[J]. Studies in The History of Natural Sciences, 1989, 8(2): 147–157.
- [157] 张永谦. 诺贝尔——向死神索取动力的人[J]. 自然杂志, 1980(4): 308–311, 276.
- ZHANG Yongqian. Nobel—the man who asked for power from death[J]. Chinese Journal of Nature, 1980(4): 308–311, 276.
- [158] 付建钢, 王学东, 崔积弘, 等. 高边坡控制爆破技术的应用[J]. 爆破, 2003(S1): 36–38.
- FU Jiangang, WANG Xuedong, CUI Jihong, et al. Application of controlled blasting technology on high slopes[J]. Blasting, 2003(S1): 36–38.
- [159] 洪泳, 马宏昊, 沈兆武, 等. 基于环形自由面岩土高效爆破的研究与应用[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 98–105.
- HONG Yong, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al. Research and application of efficient blasting based on annular free surface geotechnical[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 98–105.
- [160] 潘井澜. 爆破破岩机理的探讨[J]. 爆破, 1994(4): 1–6.
- PAN Jinglan. Exploration on the mechanism of rock breaking by blasting[J]. Blasting, 1994(4): 1–6.
- [161] ZHANG Z, HOU D, GUO Z, et al. Experimental study of surface constraint effect on rock fragmentation by blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 128: 104278.
- [162] SINGH M M, MANDAL S K. Mechanics of rock breakage by blasting and its applications in blasting design[J]. Journal of Mines, Metals Fuels, 2007, 55(6/7): 183–189.
- [163] 王亲会. 一种新型熔铸炸药研究[J]. 含能材料, 2004(1): 46–47, 55.
- WANG Qinhui. Research on a new type of molten explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004(1): 46–47, 55.
- [164] 蔡昇, 魏晓安, 王泽山. 含发射药的粉状低爆速炸药研制[J]. 含能材料, 2004(4): 231–234.
- CAI Sheng, WEI Xiaolan, WANG Zeshan. Development of powdered low explosive velocity explosives containing launching charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004(4): 231–234.
- [165] 刘子如. 火炸药老化失效模式及机理[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 425–433.
- LIU Ziru. Aging failure mode and mechanism of fire explosive[J].

- Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(5): 425–433.
- [166] 孙铭泽, 王艳平, 罗太明, 等. 火炸药静电感度试验数理统计方法分析与优化[J]. 火炸药学报, 2023, 46(3): 266–274.
SUN Mingze, WANG Yanping, LUO Taiming, et al. Analysis and optimization of mathematical and statistical methods for electrostatic susceptibility test of pyrotechnic explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(3): 266–274.
- [167] 张为鹏, 郭惠丽, 邓雅静, 等. 压装不敏感炸药相关技术最新进展[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 52–56.
ZHANG Weipeng, GUO Huili, DANG Yajing, et al. Recent advances in technology related to pressure-loaded insensitive explosives[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(12): 52–56.
- [168] 王振宇. 国外近年研制的新型不敏感单质炸药[J]. 含能材料, 2003(4): 227–230, 240.
WANG Zhenyu. New insensitive monolithic explosives developed abroad in recent years[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2003(4): 227–230, 240.
- [169] 张景林, 吕春玲, 王晶禹, 等. 亚微米炸药的感度选择性[J]. 爆炸与冲击, 2004(1): 59–62.
ZHANG Jinglin, LÜ Chunling, WANG Jingyu, et al. Sense selectivity of submicron explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2004(1): 59–62.
- [170] 徐姣, 吴立志, 沈瑞琪, 等. 掺杂和密闭透窗对炸药激光起爆感度的影响[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 77–79, 85.
XU Jiao, WU Lizhi, SHEN Ruiqi, et al. Influence of doping and confined window on laser detonation sensitivity of explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(1): 77–79, 85.
- [171] CHI Liyuan, WANG Cheng, Zhang Zongxian, et al. Experimental Investigation of Decoupled Charge Effect on Rock Fragmentation by Blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(7): 3971–3806.
- [172] 汪海波, 郭子如, 宗琦. 高威力三级煤矿许用水胶炸药的试验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 857–861.
WANG Haibo, GUO Ziru, ZONG Qi. Experimental study on high power class III coal mine permissive hydrocolloid explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 857–861.
- [173] 马秉田, 崔应娟, 袁光军, 等. 煤矿许用无起爆药毫秒电雷管的研制[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(6): 22–26.
MA Bingtian, CUI Yingjuan, YUAN Guangjun, et al. Development of millisecond electric detonator without detonating charge for coal mine[J]. Coal Science and Technology, 1996, 24(6): 22–26.
- [174] 马元磊, 贺鹏. 光面爆破技术在过断层巷道掘进的研究与应用[J]. 爆破, 2020, 37(4): 59–62, 165.
MA Yuanlei, HE Peng. Research and application of surface blasting technology in tunnel boring over fault[J]. Blasting, 2020, 37(4): 59–62, 165.
- [175] 李先才. 光面爆破原理与参数的探讨[J]. 煤炭科学技术, 1978, 6(1): 41–47, 50.
LI Xiancai. Discussion on the principle and parameters of surface blasting[J]. Coal Science and Technology, 1978, 6(1): 41–47, 50.
- [176] 丁长兴. 论毫秒爆破的安全性[J]. 煤炭科学技术, 1993, 23(4): 22–27, 64.
DING Changxing. On the safety of millisecond blasting[J]. Coal Science and Technology, 1993, 23(4): 22–27, 64.
- [177] 复杂环境大区台阶深孔延时爆破取得圆满成功[J]. 工程爆破, 2013, 19(S1): 122.
Complex environment of large area step deep hole delayed blasting achieved complete success[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(S1): 122.
- [178] 李顺波, 杨军, 陈浦, 等. 精确延时控制爆破振动的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(5): 513–518.
LI Shunbo, YANG Jun, CHEN Pu, et al. Experimental study on precise delay control of blast vibration[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(5): 513–518.
- [179] 冯叔瑜, 张正宇, 刘美山. 爆破技术在水利水电工程中的应用和前景[J]. 工程爆破, 2005(4): 22–26, 21.
FENG Shuyu, ZHANG Zhengyu, LIU Meishan. Application and prospect of blasting technology in water conservancy and hydro-power projects[J]. Engineering Blasting, 2005(4): 22–26, 21.
- [180] 煤炭科学研究总院爆破技术研究所. 只能成功不能失败的火工爆破事业[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(10): 54–57, 41.
- [181] 李战军. 一次无飞石、无粉尘污染、低噪音的清洁拆除爆破[J]. 爆破, 2005(1): 111.
LI Zhanjun. A clean demolition blast without flying stones, dust pollution and low noise[J]. Blasting, 2005(1): 111.
- [182] 李成龙, 李雯佳, 丁亚军, 等. 绿色火炸药进展与未来[J]. 科学通报, 2023, 68(25): 3311–3321.
LI Chenglong, LI Wenjia, DING Yajun, et al. Progress and future of green fire explosives[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(25): 3311–3321.
- [183] 吕嘉炫. 钻爆法隧道原位扩建的振动效应分析与爆破方案比选[J]. 工程爆破, 2022, 28(5): 135–142.
LÜ Lixuan. Analysis of vibration effect and selection of blasting program for in-situ tunnel expansion by drill-and-blast method[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(5): 135–142.
- [184] 陈举师, 王毅, 蒋仲安. 采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 147–152.
CHEN Jushi, WANG Yi, JIANG Zhongan. Numerical simulation of the concentration distribution and diffusion pattern of blasting soot in a quarry[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 147–152.
- [185] 徐颖. 高压气体爆破采煤技术的发展及其在我国的应用[J]. 爆破, 1998(1): 67–69.
XU Ying. Development of high-pressure gas blasting coal mining technology and its application in China[J]. Blasting, 1998(1): 67–69.
- [186] 曹运兴, 张新生, 张军胜, 等. CO₂相变致裂煤的显微构造特征与成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 137–145.
CAO Yunxing, ZHANG Xinsheng, ZHANG Junsheng, et al. Microstructural characteristics and genesis mechanism of CO₂ phase change fractured coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 137–145.

- [187] 周盛涛, 罗学东, 蒋楠, 等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883–893.
ZHOU Shengtao, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. Progress and prospects of carbon dioxide phase change fracturing technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883–893.
- [188] 彭怀德, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 硬岩隧道高压气体膨胀破岩开挖试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 242–248.
PENG Huaide, LIU Dunwen, CHU Fujiao, et al. High-pressure gas expansion rock-breaking excavation test in hard rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 242–248.
- [189] 褚怀保, 余梦飞, 严少洋, 等. 高压气体爆破与炸药爆破振动试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(4): 177–185.
CHU Huaibao, YU Mengfei, YAN Shaoyang, et al. Experimental study on vibration of high-pressure gas blasting and explosive blasting[J]. *Blasting*, 2022, 39(4): 177–185.
- [190] 梅比, 高星, 方莹, 等. 二氧化碳膨胀爆破新型致裂管与安全技术研究[J]. 爆破, 2021, 38(2): 153–159.
MEI Bi, GAO Xing, FANG Ying, et al. Research on new type of fracturing pipe and safety technology of carbon dioxide expansion blasting[J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 153–159.
- [191] 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J]. 煤矿爆破, 1996(3): 1–4.
XU Ying, CHENG Yusheng. Experimental study on the mechanism of coal breaking by high pressure gas blasting[J]. Coal Mine Blasting, 1996(3): 1–4.
- [192] CHU Huaibao, WANG Donghui, YANG Xiaolin, et al. Mechanism of nozzle position affecting coalbed methane mining in high-pressure air blasting[J]. Sustainability, 2023, 15(14): 111171.
- [193] 高亚楠, 王云龙, 张垚, 等. 基于连续-离散方法的微波照射下花岗岩力学行为与破裂特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 693–713.
GAO Yannan, WANG Yunlong, ZHANG Yao, et al. Mechanical behavior and fracture characteristics of granite under microwave irradiation based on continuous-discrete method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 693–713.
- [194] 高明忠, 谢晶, 杨本高, 等. 场微波作用下岩石体破裂特征及其机制探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1122–1137.
GAO Mingzhong, XIE Jing, YANG Bengao, et al. Exploring the characteristics of rock body rupture and its mechanism under the action of field microwave[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1122–1137.
- [195] 戴俊, 孟振, 吴丙权. 微波照射对岩石强度的影响研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2014(3): 54–57.
DAI Jun, MENG Zhen, WU Bingquan. Research on the effect of microwave irradiation on rock strength[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2014(3): 54–57.
- [196] 陈登红, 袁永强, 汤允迎. 微波技术辐射岩石实验探讨与成孔应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9447–9455.
CHEN Denghong, YUAN Yongqiang, TANG Yunying. Experimental exploration of microwave technology for radiating rocks and research progress in application of pore formation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(22): 9447–9455.
- [197] 胡亮, 薛占峰. 微波破岩井下环境建模及多场耦合分析[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 44–49.
HU Liang, XUE Zhanfeng. Microwave rock-breaking downhole environment modeling and multi-field coupling analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(6): 44–49.
- [198] 陈方方, 王超, 张志强. 微波照射路径对辅助破岩效果的影响研究[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(2): 245–252.
CHEN Fangfang, WANG Chao, ZHANG Zhiqiang. Study on the influence of microwave irradiation path on the effect of assisted rock breaking[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(2): 245–252.
- [199] 胡亮, 马兰荣, 谷磊, 等. 高温高压对微波破岩效果的影响模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 50–55.
HU Liang, MA Lanrong, GU Lei, et al. Simulation study on the effect of high temperature and high pressure on the effect of microwave rock breaking[J]. *Petroleum Drilling Technology*, 2019, 47(2): 50–55.
- [200] 胡梦玲, 叶家桐, 戴俊, 等. 微波-力作用下硬岩损伤规律及本构研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 40–49.
HU Mengling, YE Jiatun, DAI Jun, et al. Microwave-force damage law and ontogeny study of hard rock under microwave-force action[J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(4): 40–49.
- [201] GAO Mingzhong, YANG Bengao, XIE Jing, et al. The mechanism of microwave rock breaking and its potential application to rock-breaking technology in drilling[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3): 1110–1124.
- [202] 卢高明, 李元辉, HASSANI Ferri, 等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1497–1506.
LU Gaoming, LI Yuanhui, HASSANI Ferri, et al. Advances in experimental and theoretical research on microwave-assisted mechanical rock breaking[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1497–1506.
- [203] LIU Junjun, XIE Jing, YANG Bengao, et al. Experimental study on the damage characteristics and acoustic properties of red sandstone with different water contents under microwave radiation[J]. Materials, 2023, 16(3): 979.
- [204] 高明忠, 谢晶, 杨本高, 等. 场微波作用下岩石体破裂特征及其机制探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1122–1137.
GAO Mingzhong, XIE Jing, YANG Bengao, et al. Characterization of rock body rupture and its mechanism under field microwave[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1122–1137.
- [205] 郑亚魁, 旷鸣海, 张魁, 等. 激光破岩技术研究进展[J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(8): 1282–1298.
ZHENG Yakui, KUANG Minghai, ZHANG Kui, et al. Research progress of laser rock-breaking technology[J]. Tunnel Construction(In English), 2023, 43(8): 1282–1298.
- [206] 李贺龙, 王思琪, 付尧, 等. 空气激光的原理、产生及应用[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 288–299.
LI Helong, WANG Siqi, FU Yao, et al. Principle, generation and application of air laser[J]. China Laser, 2020, 47(5): 288–299.
- [207] MAIMAN H T. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187.
- [208] SALISBURY W W, STILES W J. Earth boring apparatus employing high powered laser: US05/750875[P]. US04066138A.

- [209] WRREN C. Oil and gas drilling with star wars technology[J]. *Mines Magazine*, 1998(3): 88.
- [210] 马卫国, 杨增辉, 易先中, 等. 国内外激光钻井破岩技术研究与发展[J]. *石油矿场机械*, 2008(11): 11–17.
MA Weiguo, YANG Zenghui, YI Xianzhong, et al. Research and development of rock-breaking technology of laser drilling at home and abroad[J]. *Oil Field Equipment*, 2008(11): 11–17.
- [211] 李密, 王岩楼, 王亚丽, 等. 激光破岩的理论分析与数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, 380(8): 1245–1249.
LI Mi, WANG Yanlou, WANG Yali, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of laser rock breaking[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, 380(8): 1245–1249.
- [212] 易先中, 高德利, 明燕, 等. 激光破岩的物理模型与传热学特性研究[J]. *天然气工业*, 2005(8): 62–65.
YI Xianzhong, GAO Deli, MING Yan, et al. Physical modeling and heat transfer characteristics of laser rock breaking[J]. *Natural Gas Industry*, 2005(8): 62–65.
- [213] 徐依吉, 周长李, 钱红彬, 等. 激光破岩方法研究及在石油钻井中的应用展望[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(4): 129–134.
XU Yiji, ZHOU Changli, QIAN Hongbin, et al. Research on laser rock breaking method and its application prospect in oil drilling[J]. *Petroleum Drilling Technology*, 2010, 38(4): 129–134.
- [214] 刘拓, 王智信, 崔子昂, 等. 花岗岩表面激光破岩预钻孔工艺影响研究[J]. *应用激光*, 2017, 37(4): 580–585.
LIU Tuo, WANG Zhixin, CUI Ziang, et al. Study on the impact of laser rock-breaking pre-drilling process on granite surface[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(4): 580–585.
- [215] ZHENG Yanlong, HE Lei. TBM tunneling in extremely hard and highly abrasive rocks: problems, solutions and auxiliary rock breaking methods (in English)[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(2): 454–480.
- [216] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 激光破岩技术的研究现状及进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 229–248.
GUAN Bing, LI Shibin, ZHANG Ligang, et al. Research status and progress of laser rock-breaking technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 229–248.
- [217] R M E, K S, M S, et al. Coupled T-H-M processes' effect on specific energy in continuous wave fiber laser rock perforation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2018, 30(3): 32005.
- [218] GAHAN B, BATARESH S, WATSON R, et al. Effect of Down-hole pressure conditions on high-power laser perforation[C]//*Spe Technical Conference & Exhibition*, 2005.
- [219] 张云博. 高功率激光器石油井下射孔相关技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
ZHANG Yunbo. Research on the technology related to downhole drilling of oil wells with high power laser[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [220] 苏芮, 刘刚. 激光破岩机理及其影响因素分析[J]. *西部探矿工程*, 2013, 25(9): 1–6.
SU Rui, LIU Gang. Analysis of laser rock breaking mechanism and its influencing factors[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2013, 25(9): 1–6.
- [221] 杨阳, 孙晓娜, 程春杰, 等. 油井激光射孔可行性实验研究及防砂机理分析[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(33): 8855–8858.
YANG Yang, SUN Xiaona, CHENG Chunjie, et al. Experimental study on the feasibility of laser perforation in oil wells and analysis of sand prevention mechanism[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(33): 8855–8858.
- [222] FIGUEROA H, LAGRECA A, PDVSA-Intevep, et al. Rock removal using high power lasers for petroleum exploitation purposes[C]//*Conference on High-Power Laser Ablation IV Pt. 2*, Apr 22–26, 2002, Taos, NM, USA. Technology Institute, (Venezuela), 2002.
- [223] HAFEZ A, IBRAHIM E S, OMAR E S, et al. Laser drilling using Nd: YAG on limestone, sandstone and shale samples: ROP estimation and the development of a constant ROP drilling system[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2015: 175848.
- [224] XIE Hui, ZHOU Yan, DONG Huairong, et al. Experimental study on laser assisted rock breaking[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(4): 152–155.
- [225] 郑鲁. 物质第四态——等离子体[J]. *金属世界*, 1995(2): 13–14.
ZHENG Lu. The fourth state of matter—plasma[J]. *Metal World*, 1995(2): 13–14.
- [226] 陈世和, 麻胜荣, 邹文洁. 应用低温等离子体破碎岩石[J]. *核技术*, 2006(11): 877–880.
CHEN Shihe, MA Shengrong, ZOU Wenjie. Application of low-temperature plasma to rock fragmentation[J]. *Nuclear Technology*, 2006(11): 877–880.
- [227] LAWTON J, MAYO P J. Fluid flow aspects in the formation and removal of dross during plasma-torch cutting[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1974, 96(3): 168–175.
- [228] 胥萌, 晋伟, 周济, 等. 低温等离子体在矿物加工领域应用现状[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(9): 201–208.
XU Meng, JIN Wei, ZHOU Ji, et al. Current status of low-temperature plasma application in mineral processing[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 201–208.
- [229] 刘晓丽, 孙欢, 董勤喜, 等. 深埋引水隧洞极硬岩 TBM 掘进及辅助破岩技术[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2022, 62(8): 1292–1301.
LIU Xiaoli, SUN Huan, DONG Qinxi, et al. Deep buried water diversion tunnel very hard rock TBM tunneling and auxiliary rock breaking technology[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2022, 62(8): 1292–1301.
- [230] BERGMAN É D, POKROVSKII G N. Some results of plasma rock-breaking[J]. *Soviet Mining Science*, 1968, 4(6): 595–597.
- [231] 祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. *石油学报*, 2020, 41(9): 1146–1162.
ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Experimental and numerical simulation methods of plasma electric pulse drilling for rock breaking mechanism[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(9): 1146–1162.
- [232] 章志成. 高压脉冲放电破碎岩石及钻井装备研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG Zhicheng. Development of high pressure pulse discharge rock crushing and drilling equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

- [233] TIMOSHKIN I V, MACKERSIE J W, MACGREGOR S J. Plasma channel miniature hole drilling technology[J]. *Plasma Science IEEE Transactions on*, 2004, 32(5): 2055–2061.
- [234] 张辉, 蔡志翔, 陈安明, 等. 液相放电等离子体破岩室内实验与破岩机理[J]. *石油学报*, 2020, 41(5): 615–628.
ZHANG Hui, CAI Zhixiang, CHEN Anming, et al. Liquid phase discharge plasma rock-breaking indoor experiments and rock-breaking mechanism[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(5): 615–628.
- [235] 刘进元, 山冰. 半宽度为 300ps 超快高压电脉冲的产生与研究[J]. *电子学报*, 1999(8): 134–135.
LIU Jinyuan, SHAN Bing. Generation and study of ultrafast high-voltage electric pulse with half-width of 300 ps[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999(8): 134–135.
- [236] SHEN Yicheng, CHEN Jizhi, FENG Zhongchao, et al. Distribution and behavior of rare earths in laser coatings[J]. *Journal of Rare Earths*, 1998(3): 19–24.
- [237] 沈以赴, 郭晓楠, 张坤, 等. 单电流脉冲作用下的碳纤维石墨化[J]. *航空学报*, 1998(5): 117–119.
SHEN Yifu, GUO Xiaonan, ZHANG Kun, et al. Graphitization of carbon fibers under single current pulse[J]. *Acta Astronautica Sinica*, 1998(5): 117–119.
- [238] KANG Jifeng, LI Changping, DUAN Longchen, et al. An experimental and numerical study on the mechanism of high-voltage electro pulse rock-breaking[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 56(3): 2185–2195.
- [239] LIU Weiji, HU Hai, ZHU Xiaohua. The rock breaking mechanism of a combined high-voltage electric impulse-PDC bit drilling technology[J]. *Geothermics*, 2023, 111: 102723.
- [240] 刘伟吉, 张有建, 罗云旭, 等. 岩石内部高压电脉冲等离子体通道生成机理[J]. *石油学报*, 2023, 44(4): 684–697.
LIU Weiji, ZHANG Youjian, LUO Yunxu, et al. Mechanism of generation of high-pressure electric pulse plasma channels inside rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(4): 684–697.
- [241] 肖一标, 段隆臣, 李昌平, 等. 基于高压电脉冲破岩损伤模型的破岩过程研究[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 323–330.
XIAO Yibiao, DUAN Longchen, LI Changping, et al. Study on the rock breaking process based on the damage model of high-voltage electric pulse rock breaking[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(3): 323–330.
- [242] SUN Yaohong, ZHOU Jian, FU Rongyao, et al. Experimental study on rock fracturing by using pulsed power technology[J]. 2014: 7287250.
- [243] BOEVS, VAJOV V, LEVCHENKO B, et al. Electropulse technology of material destruction and boring[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 97CH36127). Baltimore: IEEE, 1997: 220–225.
- [244] 白丽丽, 李铮, 王营, 等. 岩石孔隙性质对电脉冲破岩的影响规律[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(1): 148–153.
BAI Lili, LI Zheng, WANG Ying, et al. Influence of rock pore properties on the law of electric pulse rock breaking[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2021, 28(1): 148–153.
- [245] 刘毅, 吴敏干, 林福昌, 等. 液电脉冲激波碎煤能量转换效率分析[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 217–224.
LIU Yi, WU Mingan, LIN Fuchang, et al. Analysis of energy conversion efficiency of hydroelectric pulsed shock wave coal crushing[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 217–224.
- [246] 何建岐. 高压电脉冲破岩电击穿影响规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
HE Jianqi. Research on the influence of high voltage pulse rock breaking electric breakdown [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [247] WARTH H. The quarrying of granite in india[J]. *Nature*, 1895, 51(1316): 272–272.
- [248] RAUENZAHN R M, TESTER J W. Flame-Jet induced thermal spallation as a method of rapid drilling and cavity formation[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1985: 14331.
- [249] POTTER R M, TESTER J W. Continuous drilling of vertical boreholes by thermal processes: including rock spallation and fusion: US19950445330[P]. US5771984A.
- [250] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2071–2078.
TANG Shibin, TANG Chunan, ZHU Wancheng, et al. Analysis of rock fracture process under thermal stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2071–2078.
- [251] SAKSALA T. 3D numerical modelling of thermal shock assisted percussive drilling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 128: 103849.
- [252] EDOARDO R, KANT M A, CLAUDIO M, et al. The effects of high heating rate and high temperature on the rock strength: feasibility study of a thermally assisted drilling method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 2957–2964.
- [253] PIERCE K G, LIVESAY B J, FINGER J T. Advanced drilling systems study[R]. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 1996.
- [254] 丁一刚, 霍旭明. 超临界流体的技术与应用[J]. *医药工程设计*, 2002(4): 3–6.
DING Yigang, HUO Xuming. Technology and application of supercritical fluids[J]. *Pharmaceutical Engineering Design*, 2002(4): 3–6.
- [255] 李艳辉, 王树众, 任萌萌, 等. 超临界水热燃烧技术研究及应用进展[J]. *化工进展*, 2016, 35(7): 1942–1955.
LI Yanhui, WANG Shuzhong, REN Mengmeng, et al. Research and application progress of supercritical hydrothermal combustion technology[J]. *Chemical Progress*, 2016, 35(7): 1942–1955.
- [256] 宋先知, 吕泽昊, 崔柳, 等. 高温射流反应腔结构设计与反应规律[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 587–596.
SONG Xianzhi, LÜ Zehao, CUI Liu, et al. Structural design and reaction law of high-temperature jet reaction chamber[J]. *Journal of Petroleum*, 2017, 38(5): 587–596.
- [257] MARDOUKHI A, HOKKA M, KUOKKALA V T. Experimental study of the dynamic indentation damage in thermally shocked granite[J]. *Rakenteiden Mekaniikka*, 2018, 51(1): 10–26.
- [258] SAKSALA T. Thermal shock assisted percussive drilling: A numerical study on the single-bit axisymmetric case[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132:

- 104365.
- [259] 崔柳, 纪国栋, 韦海涛, 等. 两相态多物质高温射流钻井井下流场模拟分析[J]. 石油机械, 2019, 47(8): 55–60.
- CUI Liu, JI Guodong, WEI Haitao, et al. Simulation analysis of downhole flow field of two-phase multi-material high-temperature jet drilling[J]. Petroleum Machinery, 2019, 47(8): 55–60.
- [260] 宋先知, 石宇, 李根生, 等. 基于 FLUENT 的热力射流调制与流场计算分析软件[J]. 计算机应用, 2016, 36(S1): 315–318.
- SONG Xianzhi, SHI Yu, LI Gensheng, et al. FLUENT-based thermal jet modulation and flow field calculation and analysis software[J]. Computer Applications, 2016, 36(S1): 315–318.
- [261] SONG Xianzhi, LÜ Zehao, LI Gensheng, et al. Numerical study on reaction characteristics under high pressure conditions for thermal spallation drilling[J]. Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics, 2018, 29: 1304–1314.
- [262] LÜ Zehao, SONG Xianzhi, LI Gensheng. Numerical analysis of characteristics of reaction in hydrothermal jet drilling for geothermal energy[J]. Geothermics, 2019, 77(1): 62–74.
- [263] 崔柳, 汪海阁, 纪国栋, 等. 高温射流井底流场与参数影响分析[J]. 石油机械, 2017, 45(5): 1–9.
- CUI Liu, WANG Haige, JI Guodong, et al. Analysis of the flow field and parameter effects at the bottom of a well with high-temperature jet[J]. Petroleum Machinery, 2017, 45(5): 1–9.
- [264] 胡晓东. 高温射流作用下花岗岩破碎机制与参数研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- HU Xiaodong. Research on the crushing mechanism and parameters of granite under high-temperature jet action[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [265] 黄中伟, 武晓光, 李冉, 等. 高压液氮射流提高深井钻速机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 768–775.
- HUANG ZW, WU XG, LI Ran, et al. Mechanism of high pressure liquid nitrogen injection to improve deep well drilling rate[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 768–775.
- [266] 武晓光. 液氮射流破岩机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- WU Xiaoguang. Research on the mechanism of rock breaking by liquid nitrogen injection[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [267] 黄中伟, 张世昆, 李根生, 等. 液氮磨料射流破碎高温花岗岩机理[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 604–614.
- HUANG Zhongwei, ZHANG Shikun, LI Gensheng, et al. Mechanism of high-temperature granite crushing by liquid nitrogen abrasive jets[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 604–614.
- [268] 黄中伟, 温海涛, 武晓光, 等. 液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 68–76.
- HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, et al. Experiment on high temperature granite damage under the effect of liquid nitrogen cooling[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2019, 43(2): 68–76.
- [269] CAI C, HUANG Z, LI G, et al. Feasibility of reservoir fracturing stimulation with liquid nitrogen jet[J]. Acta Petrolei Sinica Science and Engineering, 2016, 144: 59–65.
- [270] QU H, TANG S, LIU Y, et al. Characteristics of complex fractures by liquid nitrogen fracturing in brittle shales[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 1807–1822.
- [271] 林琳, 何周伟, 胡涛, 等. 磨料水射流抛光技术进展综述[J]. 液压与气动, 2022, 46(1): 74–91.
- LIN Lin, HE Zhouwei, HU Tao, et al. A review of the progress of abrasive water jet polishing technology[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2022, 46(1): 74–91.
- [272] REN Fushen, FANG Tiancheng, CHENG Xiaoze. Theoretical modeling and experimental study of rock-breaking depth in particle jet impact drilling process[J]. Acta Petrolei Sinica Science and Engineering, 2019, 183: 106419.
- [273] LI Huan, HUANG Zhongwei, LI Jingbin, et al. Rock breaking characteristics by swirling impeller abrasive water jet (SAWJ) on granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022: 159.
- [274] 黄飞, 焦杨洋, 米建宇, 等. 冰粒磨料射流冰粒加速规律及破碎煤岩数值模拟[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3260–3269.
- HUANG Fei, JIAO Yangyang, MI Jianyu, et al. Ice particle acceleration law of ice particle abrasive jet and numerical simulation of crushed coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3260–3269.
- [275] 米建宇, 黄飞, 李树清, 等. 基于 SPH-FEM 耦合算法的后混合磨料水射流冲击破岩数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 132–139.
- MI Jianyu, HUANG Fei, LI Shuqing, et al. Numerical simulation study of post-mixed abrasive water jet impact rock breaking based on SPH-FEM coupling algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 132–139.
- [276] 胡焰, 陈加东, 戴庆文, 等. 磨料射流加工技术的发展与研究现状[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 80–98.
- HU Yan, CHEN Jiadong, DAI Qingwen, et al. Development and research status of abrasive jet processing technology[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 80–98.
- [277] GE Zhaolong, SHANGGUAN Jianming, ZHOU Zhe, et al. Investigation of fracture damage and breaking energy consumption of hard rock repeatedly cut by abrasive water jet[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(4): 3215–3230.
- [278] 周大鹏, 段雄, 江山. 前混合原理用于井下便携式水射流切割机设计中的特点分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(6): 62–64.
- ZHOU Dapeng, DUAN Xiong, JIANG Shan. Characterization of premixing principle used in the design of underground portable water jet cutter[J]. Coal Machinery, 2013, 34(6): 62–64.
- [279] LIU W, BELL A, WANG Z, et al. Evaluation of the slurry erosion resistance of the body materials of oil & gas drill bits with a modified abrasive waterjet[J]. Wear, 2020: 456–457.
- [280] 左伟芹, 卢义玉, 夏彬伟, 等. 前混合磨料射流新型连续加砂系统设计与实验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 328–335.
- ZUO Weiqin, LU Yiyu, XIA Binwei, et al. Design and experiment of a new continuous sanding system for premixed abrasive jet[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(2): 328–335.
- [281] 卢义玉, 李良伟, 汤积仁, 等. 前混合磨料水射流连续加料系统设计与实验研究[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(8): 111–120.
- LU Yiyu, LI Liangwei, TANG Jiren, et al. Design and experiment-

- al research on continuous charging system of premixed abrasive water jet[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(8): 111–120.
- [282] 杨恒, 魏建平, 蔡玉波, 等. 后混合磨料空气射流喷嘴结构优化及破煤效果研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 114–126.
YANG Heng, WEI Jianping, CAI Yubo, et al. Optimization of post-mixed abrasive air jet nozzle structure and coal breaking effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 114–126.
- [283] DU Yukun, CHEN Xiaohong, ZHAO Bo, et al. Experimental study on the dynamic rock-breaking performance of pulsed abrasive jet drilling method[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 8872919.
- [284] 李晓红, 向文英, 卢义玉. 脉冲磨料射流破碎岩石的实验研究[J]. 岩土力学, 2005(7): 1043–1048.
LI Xiaohong, XIANG Wenying, LU Yiyu. Experimental study of rock crushing by pulsed abrasive jets[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(7): 1043–1048.
- [285] 庞惠文, 艾白布·阿不力米提, 解赤栋, 等. 新型自激脉冲射流装置实验与现场应用[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 293–306.
PANG Huiwen, AIBEIB Abulimiti, XIE Chidong, et al. Experiment and field application of a new self-excited pulse jet device[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 293–306.
- [286] 王晖, 何学秋, 聂百胜, 等. 自振脉冲磨料水射流切割性能影响因素及矿用安全性分析[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(3): 69–73.
WANG Hui, HE Xueqiu, NIE Baisheng, et al. Analysis of factors influencing the cutting performance of self-oscillating pulse abrasive water jet and safety of mining use[J]. Mining Research and Development, 2012, 32(3): 69–73.
- [287] 倪红坚, 唐志文, 霍洪俊, 等. 簧阀阻断式脉冲磨料射流破岩的试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(5): 567–573.
NI Hongjian, TANG Zhiwen, HUO Hongjun, et al. Experimental study on rock breaking by reed valve blocking type pulse abrasive jet[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: A Series, 2011, 26(5): 567–573.
- [288] CHO M W, CHO W S, PARK D S, et al. Application of powder blasting techniques to micro-pattern making process for Si_3N_4 -hBN composites[J]. Key Engineering Materials, 2005, 287: 51–56.
- [289] LIAO Y, CHEN L C. Determination of mask opening size in creating a fluid hole on brittle material by double-side sand blasting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(5): 511–517.
- [290] LIU Y, ZHANG J, WEI J, et al. Optimum structure of a laval nozzle for an abrasive air jet based on nozzle pressure ratio[J]. Powder Technology, 2020, 364.
- [291] 陈长江. 高压磨料气体射流破煤应力波传播模型研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
CHEN Changjiang. Research on stress wave propagation model of high pressure abrasive gas jet breaking coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [292] 何岸. 磨料气体射流破煤岩喷嘴结构优化[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
HE An. Optimization of nozzle structure of coal rock breaking by abrasive gas jet[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [293] LI Zhengdong, ZHANG Guoqing, LI Zhou, et al. Simulation of gas flow field in laval nozzle and straight nozzle for powder metallurgy and spray forming[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 15(6): 44–47.
- [294] 张娟. 膨胀比对高压磨料气体射流破煤影响规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
ZHANG Juan. Research on the influence law of expansion ratio on high pressure abrasive gas jet coal breaking[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [295] 陈长江, 刘勇, 魏建平, 等. 不同膨胀比下气体射流流场结构及脉动频率[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3883–3890.
CHEN Changjiang, LIU Yong, WEI Jianping, et al. Structures of gas jet flow field and pulsation frequency under different expansion ratios[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3883–3890.
- [296] LIU Y, ZHANG J, WEI J, et al. Optimum structure of a laval nozzle for an abrasive air jet based on nozzle pressure ratio[J]. Powder Technology, 2020: 364343–364362.
- [297] 刘勇, 代硕, 魏建平, 等. 低压磨料空气射流破硬岩规律及特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1172–1182.
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Experimental study on the law and characteristics of hard rock breaking by low-pressure abrasive air jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1172–1182.
- [298] 刘勇, 张涛, 魏建平, 等. 磨料属性影响高压磨料气体射流破岩效果的理论与实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1335–1342.
LIU Yong, ZHANG Tao, WEI Jianping, et al. Theoretical and experimental study on the influence of abrasive properties on the rock breaking effect of high-pressure abrasive gas jet[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1335–1342.
- [299] 刘勇, 魏建平, 王登科, 等. 磨料气体射流冲刷磨损岩石特征分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3033–3041.
LIU Yong, WEI Jianping, WANG Dengke, et al. Characterization of abrasive gas jet erosive wear rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3033–3041.
- [300] 万继伟, 牛争鸣, 牛助农. 高速水射流粉碎中射流冲击区水垫的增阻效应[J]. 化工进展, 2012, 31(1): 30–34.
WAN Jiwei, NIU Zhengming, NIU Zhunong. Drag enhancement effect of water mat in the jet impact zone in high-speed water jet pulverization[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(1): 30–34.
- [301] 刘沛清, 高季章, 李永梅. 多层水股射流在水垫塘内的流动特征与动水垫效应分析[J]. 水利学报, 1999(3): 2–8.
LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Yongmei. Analysis of flow characteristics and dynamic water cushion effect of multilayer water strand jet in a water cushion pond[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(3): 2–8.