

高压聚能射流发生装置设计及性能

顾聪聪^{1,2}, 刘送永^{1,2}, 李洪盛^{1,2}, 孙敦凯^{1,2}, 江红祥^{1,2}, 周小磊³

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿山智能采掘装备省部共建协同创新中心, 江苏 徐州 221008; 3. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450016)

摘 要: 针对普通射流在破岩过程中存在的靶距短、喷嘴直径小造成的破岩能量小, 难以实现岩石的高效破碎等问题, 提出一种高压聚能射流发生装置。该装置利用阀芯改变流体介质的流动方向, 使活塞在缸内往复运动, 依靠活塞的高速运动实现射流的增压效果, 并通过改变泵站流量实现对射流脉冲频率以及脉冲压力的可靠调节。首先, 对高压聚能射流发生装置整体结构以及不同工作阶段进行详细介绍, 阐述其工作原理。其次, 基于流体力学和能量守恒理论, 建立高压聚能射流发生装置动力学模型, 分析装置不同结构参数与动力参数的关系, 探究装置结构参数对射流冲击压力的影响, 揭示增压活塞在冲击过程阶段的能量演化规律, 进而得到射流冲击压力与泄油口面积、活塞杆直径、喷嘴出口直径以及系统压力均呈现先增大后减小的趋势、系统压力、喷嘴出口压力、泄油口面积、活塞杆直径对装置性能的影响程度依次降低的影响规律; 在此基础上, 构建高压聚能射流破岩试验系统及液压控制系统, 开展高压聚能射流冲击破岩试验研究, 以此验证系统可行性以及理论分析的正确性。试验结果表明: 相较于普通射流, 无论是在射流产生的破碎深度和破碎坑体积方面, 高压聚能射流破岩效果均优于普通射流。高压聚能射流冲击破岩过程呈周期性变化, 在 10 MPa 的输入压力下, 输出压力可以达到 72.5 MPa, 具有良好的增压效果; 在预定系统压力下, 射流冲击岩石的最优靶距为 10 cm; 射流冲击频率随液压泵流量呈线性增长, 且岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度均随着冲击频率的增加呈现增长的趋势。

关键词: 高压聚能射流; 动力学模型; 射流压力; 破岩性能

中图分类号: TD402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)12-4632-15

Design and performance of high-pressure energy-gathering water jet generator

GU Congcong^{1,2}, LIU Songyong^{1,2}, LI Hongsheng^{1,2}, SUN Dunkai^{1,2}, JIANG Hongxiang^{1,2}, ZHOU Xiaolei³

(1. Jiangsu Province and Education Ministry Cosponsored Collaborative Innovation Center of Intelligent Mining Equipment, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Collaborative Innovation Center of Intelligent Mining Equipment Co-sponsored by Jiangsu Province and the Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: A high-pressure energy-gathering water jet generator was proposed to solve the problems of rock breaking caused by the short target distance and small nozzle diameter, which made it difficult to achieve efficient rock breaking. The device uses the valve core to change the flow direction of the fluid medium so that the piston moves reciprocally in

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-09-27 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0503

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51975570); 江苏省杰出青年基金资助项目 (BK20211531); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20210516)

作者简介: 顾聪聪 (1996—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生。E-mail: gcc1232020@163.com

通讯作者: 刘送永 (1981—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lsycumt@163.com

引用格式: 顾聪聪, 刘送永, 李洪盛, 等. 高压聚能射流发生装置设计及性能[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4632-4646.

GU Congcong, LIU Songyong, LI Hongsheng, et al. Design and performance of high-pressure energy-gathering water jet generator[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4632-4646.



移动阅读

the cylinder, realizes the pressurization effect of the jet by relying on the high-speed movement of the piston, and realizes reliable regulation of the jet pulse frequency and pulse pressure by changing the flow rate of the pump station. Firstly, the whole structure and different working stages of the high-pressure jet generator are introduced in detail, and its working principle is expounded. Secondly, based on fluid mechanics and energy conservation theory, a dynamic model of a high-pressure energy-gathering water jet generator is established to analyze the relationship between different structural parameters and dynamic parameters of the device, explore the influence of device structural parameters on jet impact pressure, and reveal the energy evolution law of a pressurized piston in the impact process. The impact pressure of the jet, the area of the oil outlet, the diameter of the piston rod, the diameter of the nozzle outlet, and the system pressure all increase first and then decrease, and the influence of the system pressure, the nozzle outlet pressure, the area of the oil outlet, and the diameter of the piston rod on the performance of the device decreases successively. On this basis, the high-pressure shaped charge jet rock breaking test system and hydraulic control system are constructed, and the high-pressure shaped charge jet impact rock breaking test research is carried out to verify the feasibility of the system and the correctness of the theoretical analysis. The experimental results show that the high-pressure-shaped jet has a better rock-breaking effect than an ordinary jet, both in terms of crushing depth and crushing pit volume. The rock-breaking process of high-pressure jet impacts changes periodically. Under the input pressure of 10 MPa, the output pressure can reach 72.5 MPa, which has a good pressurization effect. Under the predetermined system pressure, the optimal target distance of a jet-impacting rock is 10 cm. The impact frequency of the jet increases linearly with the flow rate of the hydraulic pump, and the rock crushing volume, crushing pit diameter, and depth all increase with the increase in impact frequency.

Key words: high-pressure energy-gathering water jet; dynamic model; jet pressure; rock breaking performance

近年来,随着国防工程、水利工程、地铁、公路等国家基础建设项目的蓬勃发展,地下隧道、巷道建设的需求日益增大^[1-2]。作为隧道、巷道建设的基础环节,岩体破碎的破碎效率以及破碎效果对地下工程建设起着至关重要的作用。在硬岩破碎领域,钻爆法是目前公认的最为经济有效的方法,但钻爆法存在着效率低、安全性差、成型质量差、可控性弱、粉尘量大等问题^[3-5]。

硬岩的高效掘进作为一个世界性技术难题,国内外学者先后提出了 20 余种破碎硬岩的方法,如电火花、电子束、激光、等离子体、微波、高压泡沫、水射流等^[6-9],其中水射流破岩方法在破岩性能及比能耗方面最具优势,因此水射流冲击及辅助破岩被广泛应用于采矿、隧道、石油钻探等领域^[10-13]。国内外学者为此进行了大量理论分析与研究。WANG 等^[14]提出了一种 TBM 与高压水射流耦合掘进的新方法。分析了滚刀与水射流耦合作用下的岩石破坏机理。采用有限元法 (FEM) 和光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法建立滚刀和水射流破碎岩石的数值模型。LIU 等^[15]采用磨料水射流辅助镐型截齿破岩,研究了截深和水压对破岩性能的影响。廖华林等^[16]提出了高压水射流井底切槽应力卸载方法,建立了深部岩层物理模型,分析了不同井深、地应力状态、井底压差条件下岩石有效应力的分布形态和切槽应力的卸载程度,使用自定义岩石抗压强度函数分析了井底切槽对岩石强度

分布特征的影响规律。黄璐云等^[17]开展了不同靶距和冲击角对超高压水射流动力学性能影响的分析,阐明了靶面最大剪切应力、打击压强分布规律与靶距和冲击角的关系。

上述研究均为水射流在破岩领域提供了理论与技术支撑。但水射流破岩方法仍然存在 3 个主要问题:一是连续射流仅产生单一的“水锤压力”,破岩能力有限,而后续的“滞止压力”难以加剧硬岩内部损伤或裂纹拓展,致使其未能在破碎硬岩工程中得到广泛的应用^[18-19];二是连续射流耗水量较大,易在巷道工作面形成积水,降低掘进效率。在岩石破碎过程中,为了提高效率,常选择高压、大流量、强冲击力的射流破碎硬岩,此法在工作面产生大量积水,增加掘进辅助工作量^[20-21];三是喷嘴作用靶距短、直径小,导致破碎岩石的效率低。因此,亟需一种高能、大靶距、大喷嘴直径的水射流方法进行硬岩破碎。

针对现有水射流技术存在的不足与难点,笔者利用高压聚能射流具有的高冲击力能够有效避免水垫和液体回流现象以及通过间断的“水锤压力效应”使坚硬岩石破裂并使裂纹得以迅速扩展从而实现高效破岩的特点设计了一种高压聚能射流破岩装置。介绍了高压聚能射流发生装置的机械结构、工作原理,推导了装置的计算模型,并研究了装置结构参数对装置破岩性能的影响,开展了高压聚能射流发生装置破岩性能试验,为硬岩的高效破碎提供了一种新的方法

和设备。

1 结构及工作原理

1.1 发生装置整体结构

高压聚能射流发生装置整体结构如图 1 所示, 主要包括增压系统、密封系统、缓冲系统及喷射系统。其中后端盖、增压活塞及液压缸缸体构成装置的增压系统, 依靠增压活塞两侧的氮气腔和液压油腔之间的压力差实现增压活塞对射流的增压效果, 达到对岩石的瞬间冲击的效果; 增压活塞、液压缸缸体、喷嘴端盖

及活塞杆套之间的密封构成装置的密封系统, 减少和避免系统内部气体和液体的泄漏; 增压活塞与活塞杆套之间的锥形缓冲腔构成装置的缓冲系统, 利用缓冲腔产生的背压对增压活塞的动能进行缓冲; 聚能喷嘴构成装置的喷射系统, 依靠喷嘴内部渐缩型流道实现对射流的聚能效果。

1.2 工作原理

高压聚能射流发生过程具体可分为准备阶段、蓄能阶段、冲击阶段以及缓冲阶段 4 个工作阶段, 其工作流程如图 2 所示。

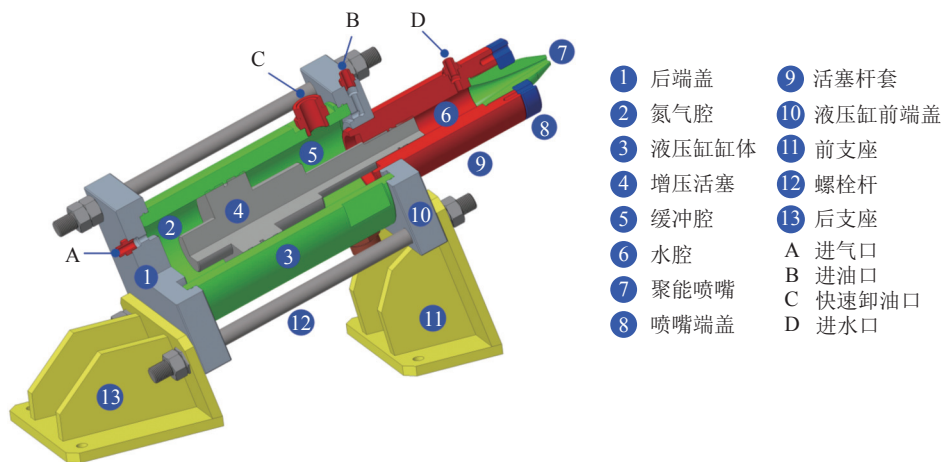


图 1 高压聚能射流发生装置结构

Fig.1 Structure diagram of high-pressure energy-gathering water jet generator

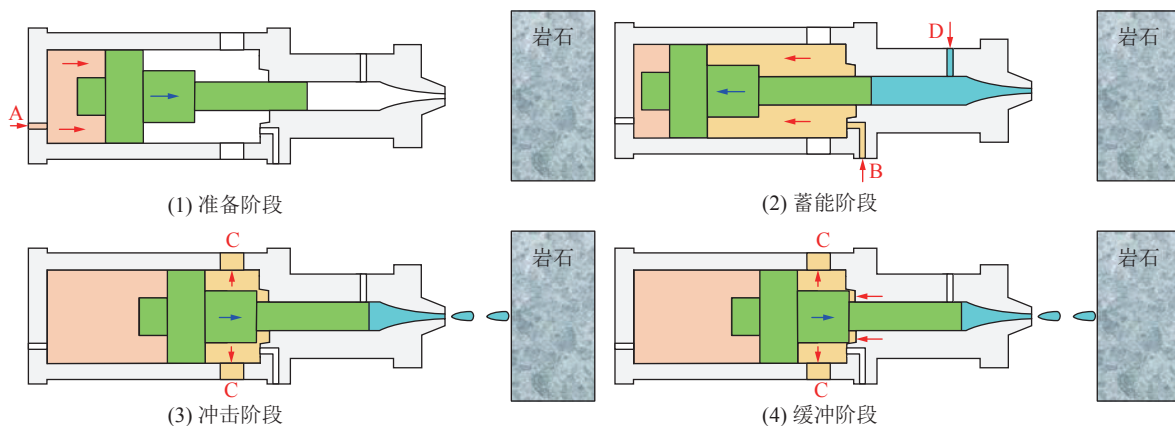


图 2 高压聚能射流发生装置工作流程

Fig.2 Working process of high-pressure energy-gathering water jet generator

(1) 准备阶段。通过进气口 A 向氮气腔内通入一定压力的氮气, 推动增压活塞向右运动, 直至氮气腔内的压力达到预设压力值时, 停止向氮气腔内通入氮气, 为整个装置系统提供动力来源。

(2) 蓄能阶段。准备阶段结束后, 通过进油口 B 向液压缸内通入液压油 (快速泄油口关闭), 随着液压油的压力升高, 推动增压活塞向左运动并压缩氮气腔内的气体, 直至氮气腔内的气体压力达到预设的工作

压力。同时通过进水口 D 向水腔内注入水, 使活塞杆前端充满水。

(3) 冲击阶段。氮气腔内的气体压力达到工作压力后, 快速泄油阀开启, 液压缸内的液压油通过快速泄油口 C 排出, 液压缸内的油压急速降低, 增压活塞在氮气腔和油腔产生的巨大压差下向右产生加速运动, 活塞杆推动水腔内的水, 经聚能喷嘴喷出, 形成一束最大压力可达岩石硬度数倍的高压聚能射流。

(4) 缓冲阶段。增压活塞运动到缓冲腔位置时, 缓冲腔对其施加巨大的缓冲力。在缓冲力作用下, 活塞的运动速度在较短的时间内迅速降低, 减速后的增压活塞与活塞套端面碰撞后停止运动, 高压聚能射流发生装置完成一次作业。

2 发生装置计算模型

高压聚能射流发生装置主要是通过增压活塞将氮气腔内的压力能转化为增压活塞的动能后再转化为射流的压力能。为提高装置能量的利用效率, 研究装置性能与装置主要结构参数之间的关系, 以此得到装置的最佳设计参数, 本节建立高压聚能射流发生装置的力学模型, 为装置结构参数设计提供理论依据。准备阶段为增压活塞提供动力来源, 是高压聚能射流发生装置破岩的前提条件, 其设计参数对后续阶段不产生影响, 因此, 本节只涉及蓄能阶段、冲击阶段和缓冲阶段的研究。

2.1 蓄能阶段

由图 2 可知, 液压油从进油口 B 进入液压缸, 推动增压活塞运动并挤压氮气腔内的气体, 氮气腔内的气体体积减小, 气体压力升高, 完成装置的蓄能。由于蓄能过程中, 液压油向液压缸内的注入速度缓慢, 此时氮气腔内的气体压力变化过程可看成是等温过程

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1)$$

式中, P_1 为氮气初始压力, MPa; V_1 为氮气腔内气体初始体积, L; P_2 为蓄能过程后氮气腔内气体压力, MPa; V_2 为蓄能过程结束后氮气腔内气体体积, L。

因此, 蓄能过程后氮气腔内气体压力变化为

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} \quad (2)$$

蓄能过程后氮气腔内气体体积为

$$V_2 = V_1 - S_1 x \quad (3)$$

式中, S_1 为增压活塞大端面面积, cm^2 ; x 为增压活塞行程, cm。

2.2 冲击阶段

冲击阶段增压活塞的受力状态如图 3 所示, 氮气腔内的氮气作用在增压活塞上作为活塞的驱动力, 液压油从快速泄油口排出时产生的油腔背压以及水腔内的水对增压活塞的反作用力作为活塞的运动阻力。此时, 氮气压力、油腔背压及水压都随着增压活塞的行程变化而不断改变。因此, 通过将增压活塞的行程分为多个运动阶段, 采用近似逼近法将增压活塞各个运动阶段的受力简化为初末两位置的平均值, 对增压

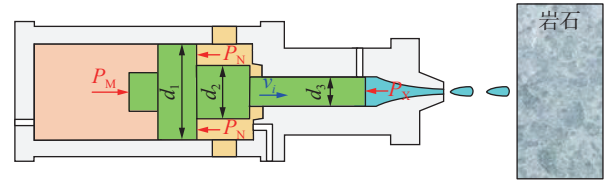


图 3 冲击阶段时活塞的受力

Fig.3 Piston force diagram during impact stage

活塞的运动参数和射流压力进行计算。

根据增压活塞运动的动能定理可知, 外力 (氮气压力-油腔背压-射流压力) 对增压活塞所做的功等于增压活塞功能的增量

$$\Delta x_i (S_1 P_{Mi} - S_2 P_{Ni} - S_3 P_{Xi}) = \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_{i-1}^2 \quad (4)$$

式中, Δx_i 为增压活塞在第 i 个运动阶段的位移, cm; P_{Mi} 为氮气腔内气体在第 i 个运动阶段作用在增压活塞上的压力, MPa; S_2 为冲击阶段增压活塞与液压油接触时的环状面积, cm^2 ; P_{Ni} 为第 i 个运动阶段作用在增压活塞上的油腔背压, MPa; S_3 为活塞杆截面面积, cm^2 ; P_{Xi} 为第 i 个运动阶段作用在增压活塞上的射流压力, MPa; m 为增压活塞的质量, kg; v_i 为第 i 个运动阶段增压活塞的末速度, m/s; v_{i-1} 为第 i 个运动阶段增压活塞的初速度, m/s。

高压聚能射流发生装置可实现增压活塞对射流的瞬间冲击效果, 因此冲击阶段所持续的时间极短, 故氮气腔内气体在状态变化过程可看成是绝热过程:

$$P_0 V_0^{1.4} = P_{Mi} V_i^{1.4} \quad (5)$$

式中, P_0 为蓄能后氮气腔内气体压力, MPa; V_0 为蓄能后氮气腔内气体体积, L; V_i 为经过 i 个运动阶段后氮气腔内气体体积, L。

经过第 i 个运动阶段后, 氮气腔内的气体体积为

$$V_i = V_0 + S_1 \sum \Delta x_i \quad (6)$$

氮气腔内的气体在第 i 个运动阶段施加在增压活塞上的压力为

$$P_{Mi} = 1.4 P_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + S_1 \sum \Delta x_i} \right) \quad (7)$$

氮气腔内气体压力作用面积 S_1 为

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (8)$$

式中, d_1 为增压活塞大端截面直径, mm。

氮气腔内气体推动增压活塞向前运动, 液压油腔内减小的体积为

式中, d_2 为增压活塞缓冲段直径, mm。

缓冲背压对增压活塞的作用面积 S_7 为

$$S_7 = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_3^2) \quad (21)$$

增压活塞在缓冲腔内移动时, 由于缓冲腔为锥形, 故缓冲腔内的液压油从增压活塞的缓冲段与缓冲腔之间的缝隙中被挤压出, 从而产生缓冲背压。由流体连续性方程可知: 相同时间内缓冲腔减小的体积等于液压油从缝隙中挤压出来的体积, 即

$$S_7 v_{bi} = S_8 v_Z \quad (22)$$

式中, S_8 为缓冲腔与增压活塞缓冲段之间的圆环缝隙的面积, cm^2 ; v_Z 为缓冲腔内的液压油从圆环缝隙挤压出时的速度, m/s 。

缓冲腔与增压活塞缓冲阶段之间的圆环缝隙面积 S_8 为

$$S_8 = \frac{\pi}{4}(d_i^2 - d_2^2) \quad (23)$$

式中, d_i 为第 i 个运动阶段时缓冲腔内径, mm。

作用于增压活塞上的缓冲背压为

$$P_{Zbi} = \frac{v_{Zi}^2 \gamma_1}{2} \quad (24)$$

联立式 (22) 和式 (24) 求得缓冲背压、增压活塞速度二者之间的关系为

$$P_{Zbi} = \frac{(S_7 v_{bi} / S_8)^2 \gamma_1}{2} \quad (25)$$

由式 (7)、(13)、(16) 及 (25) 求得增压活塞在缓冲阶段第 i 个运动阶段初末两位置所受到的氮气压力、油腔背压、缓冲背压及射流压力与增压活塞速度之间的关系式, 将其代入到式 (19) 可得到增压活塞在缓冲阶段第 i 个运动阶段时的末速度 v_{bi} , 最终将 v_{bi} 代入式 (13)、(16) 和 (25) 可得到增压活塞在缓冲阶段第 i 个运动阶段时所受到的油腔背压、射流压力和缓冲背压。

3 结构参数及系统压力对装置性能的影响

装置结构参数直接决定着装置的性能, 合理的结构参数设计是保障装置性能和缩减设计成本的关键, 本节利用所推导的计算模型进行主要结构参数对高压聚能射流发生装置性能影响的研究, 探究结构参数对装置动态特性的影响, 为装置参数设计提供理论依据。

装置在冲击阶段时油腔背压、射流压力作为增压活塞的运动阻力, 其大小直接影响装置的性能, 由式 (13) 和式 (16) 建立的数学模型可知, 油腔背压大小与其对增压活塞的作用面积的平方成对比、与泄油口面

积的平方成反比, 射流压力大小与活塞杆面积的平方成正比、与喷嘴出口面积的平方成反比。因此, 深入研究泄油口面积、活塞杆直径、喷嘴出口直径等主要结构参数对高压聚能射流发生装置性能的影响对其破岩效果的好坏具有重要意义。高压聚能射流发生装置的基本特征参数见表 1。

表 1 高压聚能射流发生装置的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of high-pressure energy-gathering water jet generator

参数	取值
氮气初始压力/MPa	15
氮气工作压力/MPa	30
增压活塞大端面直径 d_1 /mm	200
增压活塞缓冲段直径 d_2 /mm	110
增压活塞杆直径 d_3 /mm	60
喷嘴出口直径/mm	10
泄油口面积/ cm^2	20
增压活塞质量/kg	40
冲击阶段增压活塞位移/mm	150
缓冲阶段增压活塞位移/mm	20
发射水量/($\text{L} \cdot \text{次}^{-1}$)	0.5

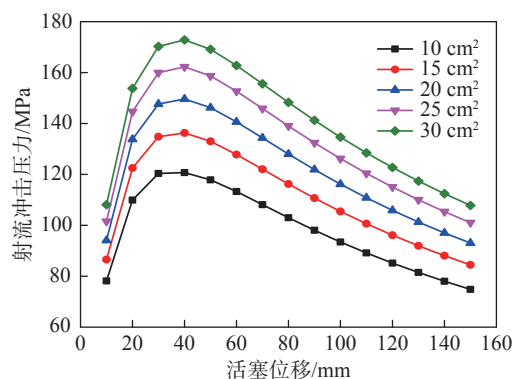
3.1 泄油口面积

在研究泄油口面积对装置性能的影响规律时, 固定活塞杆直径为 60 mm, 喷嘴出口直径为 10 mm, 分别对泄油口面积为 20、15、20、25、30 cm^2 进行分析。泄油口面积对射流冲击压力的影响规律如图 5 所示。

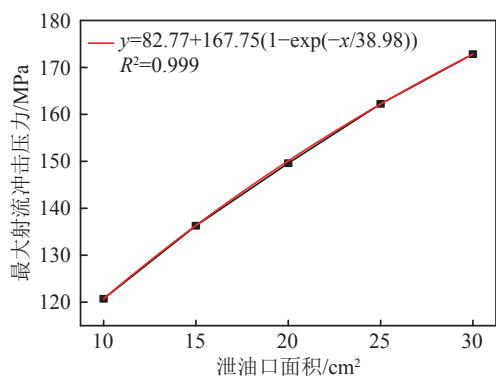
由图 5 可知射流冲击压力的变化趋势为: 随着增压活塞位移的增加, 射流冲击压力呈现先瞬间增加至最大压力后缓慢减小的趋势, 存在一个最大射流冲击压力; 射流冲击压力随着泄油口面积的增大呈现增大的趋势, 但当泄油口面积增大至 20 cm^2 后, 随着泄油口面积的继续增大, 射流冲击压力增大的幅度明显降低。油腔背压是增压活塞运动的阻力, 由式 (13) 建立的数学模型可知油腔背压与泄油口面积的平方成反比, 泄油口面积越大, 液压油从泄油口排出所产生的油腔背压越小, 增压活塞克服油腔背压所做的功越小, 射流的冲击压力越大。但泄油口面积过大会影响液压缸缸体的强度, 因此, 应在保证缸体强度要求的前提下适当增大泄油口面积, 提高装置性能。

3.2 活塞杆直径

活塞杆直径直接影响增压活塞冲击阶段所受油腔背压、射流压力的作用面积及喷嘴入口直径大小。在其他参数相同的条件下, 分别对活塞杆直径为



(a) 射流冲击压力



(b) 最大射流压力

图5 泄油口面积对射流冲击压力的影响

Fig.5 Influence of oil outlet area on the jet impact pressure of the device

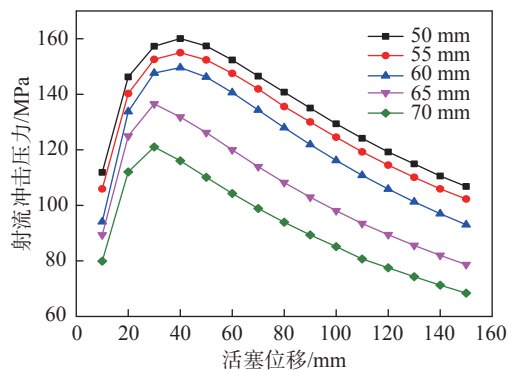
50、55、60、65、70 mm 进行分析。结合式 (14)、式 (15) 以及式 (16) 建立的数学模型得到活塞杆直径对射流冲击压力及最大射流压力的影响规律如图 6 所示。

由图 6 可知, 射流冲击压力随着活塞杆直径的增大呈现减小的趋势, 但当活塞杆直径增大至 65 mm, 随着增压活塞位移的增加, 射流冲击压力达到高压后所持续的时间明显减小; 当活塞杆直径小于 60 mm 时, 随着活塞杆直径的减小, 射流冲击压力增长的幅度降低。活塞杆直径直接影响增压活塞所受射流压力的作用面积, 根据射流压力对增压活塞的作用面积之间的数学模型关系可知: 活塞杆直径越小, 射流压力对增压活塞的作用面积越小, 增压活塞在运动过程中克服射流阻力所消耗的能量越低, 增压活塞在冲击阶段时的运动速度越大。因此, 射流冲击压力随着活塞杆直径的增大而减小。

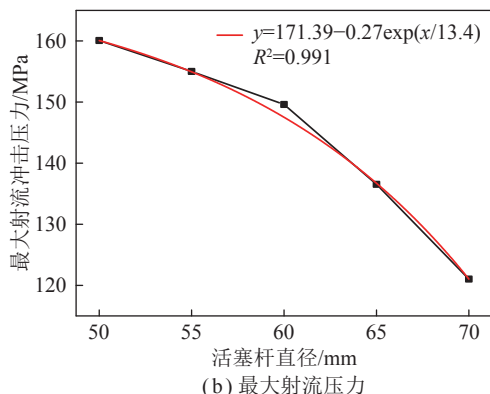
3.3 喷嘴出口直径

在其他参数相同的条件下, 初步选定喷嘴出口直径的方案为 6、8、10、12、14 mm。计算 5 种条件下的射流冲击压力, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 射流冲击压力随喷嘴出口直径的增大而逐渐减小, 当喷嘴出口直径小于 8 mm 时, 射流冲



(a) 射流冲击压力



(b) 最大射流压力

图6 活塞杆直径对射流冲击压力的影响

Fig.6 Influence of piston rod diameter on jet impact pressure

击压力达到最大值后衰减速度明显增大。由式 (16) 推导而来的数学模型可知射流冲击压力与喷嘴出口直径的平方成反比, 喷嘴出口直径越小, 射流作用在增压活塞上的反作用力越大, 增压活塞所要克服的运动阻力越大, 因此, 随着活塞位移的增加, 射流冲击压力衰减的速度增大。

射流打击力是射流对岩石打击效果的有效衡量标准, 射流作用在岩石上, 其原有的速度和方向均发生改变, 即动量发生改变。而这种动量的改变主要是由于射流与岩石之间的相互作用引起的。高压聚能装置作用于岩石表面的射流反射方向如图 8 所示。

根据动量方程, 射流对岩石上的总打击力为

$$F = \rho q v (1 - \cos \beta) \quad (26)$$

式中, F 为射流作用在岩石上的总打击力, N; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; q 为射流体积流量, m^3/s ; v 为射流流速, m/s ; β 为射流方向变化角度, $(^\circ)$ 。

由图 8 可知, 当射流方向变化角度约等于 180° , 即射流完全反射时, 射流打击力达到最大值, 即

$$F = 2\rho q v \quad (27)$$

整理后, 可得

$$F = \pi d^2 p \quad (28)$$

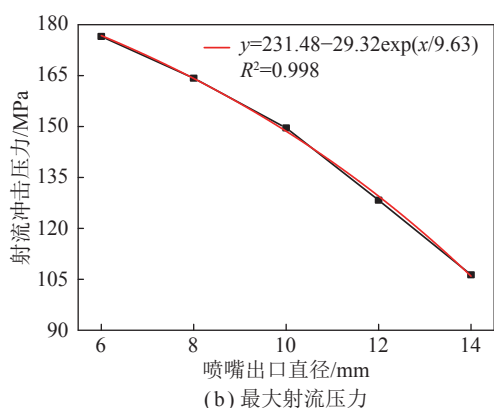
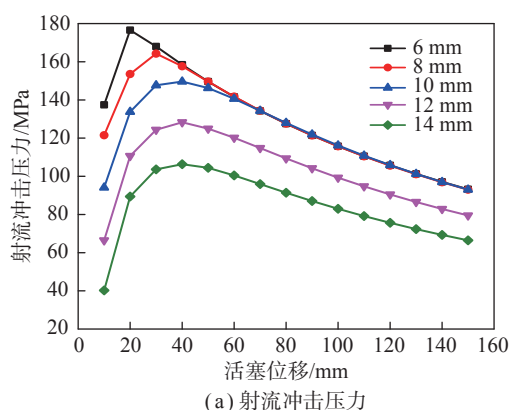


图 7 喷嘴出口直径对射流冲击压力的影响

Fig.7 Influence of nozzle outlet diameter on jet impact pressure

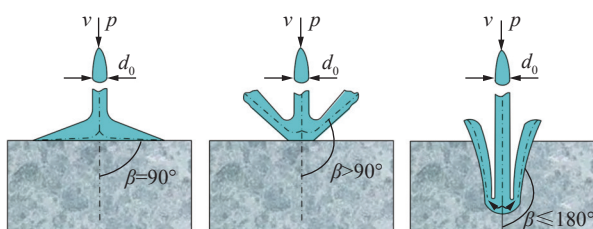


图 8 高压脉冲射流作用于物体表面后的不同反射方向

Fig.8 Different reflection directions of high-pressure pulsed jet after acting on the surface of the object

式中, d 为喷嘴出口直径, mm。

根据式 (28) 求得射流作用在岩石上的总打击力, 不同喷嘴出口直径所对应的总打击力如图 9 所示。

根据图 9 可知, 喷嘴出口直径过小, 射流冲击压力可以达到很高, 但射流作用在岩石上的总打击力却很低, 喷嘴直径过大, 射流达不到较高的冲击压力, 都影响射流对岩石的打击效果。因此, 在满足射流冲击压力的前提下, 应尽可能的增大喷嘴出口直径。

3.4 系统压力

氮气腔内气体压力决定了射流的冲击压力, 因此将氮气腔内气体压力定义为系统压力, 在研究系统压力对装置性能的影响规律时, 固定快速泄油口面积为 20 cm^2 , 活塞杆直径为 60 mm , 喷嘴出口直径为 10 mm ,

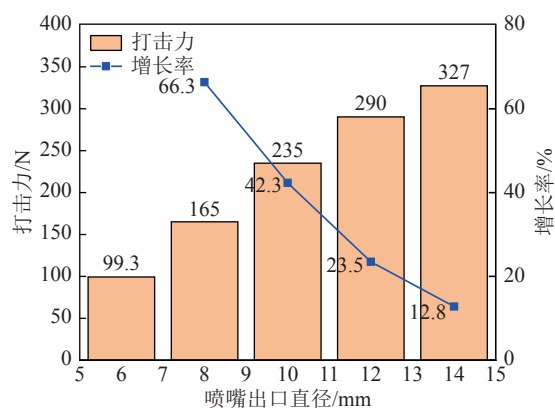


图 9 不同喷嘴出口直径所对应的总打击力

Fig.9 Total impact force corresponding to different nozzle outlet diameters

分别对系统压力为 20、25、30、35 MPa 进行分析, 系统压力对射流冲击压力的影响规律如图 10 所示。

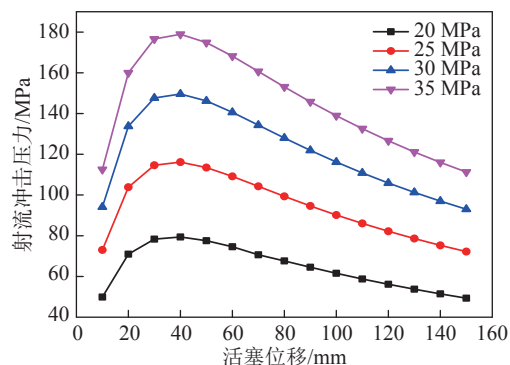


图 10 系统压力对射流冲击压力的影响规律

Fig.10 Influence of system pressure on jet impact pressure

从图 10 可以看出, 射流冲击压力随着系统压力的增加呈现增长的趋势, 氮气腔内气体作用在增压活塞上作为活塞的驱动力, 氮气压力直接决定着增压活塞的运动速度, 故系统压力对射流冲击压力具有较大的影响。但系统压力达到一定大小时, 需要对液压缸强度具有极高的要求, 因此在满足液压缸强度的前提下, 合理的选择系统压力。

4 试验研究

4.1 试验系统及液压控制系统

为验证高压聚能射流发生装置的性能, 搭建了高压聚能射流破岩试验系统及液压控制系统, 原理如图 11 所示。该系统主要由高压聚能射流发生系统、信号采集系统、电力控制系统组成, 其中高压聚能射流发生系统又由气体供给系统、液压油供给系统、水供给系统和破岩装置组成。高压聚能射流发生系统在整个试验系统中占主导部分, 完成高压聚能射流的形成和岩石的破碎; 信号采集系统主要用于采集冲击

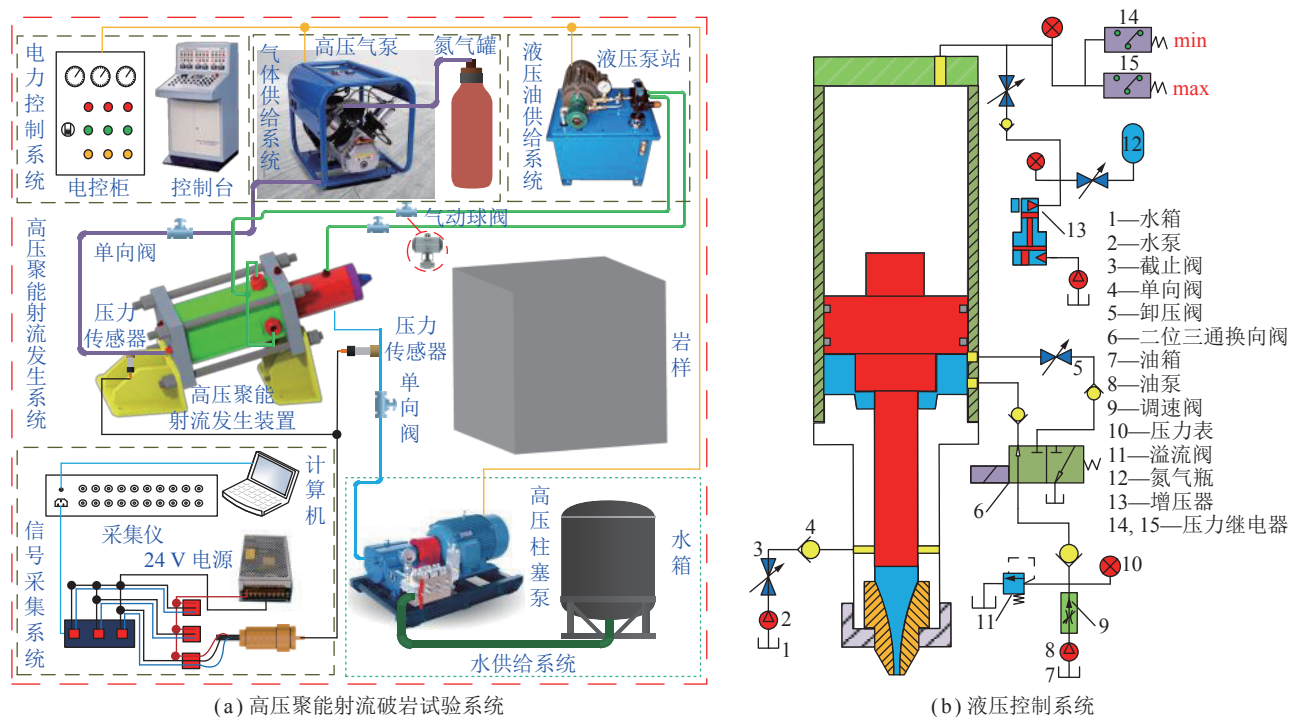


图 11 高压聚能射流破岩试验系统及液压控制系统

Fig.11 High-pressure energy-gathering water jet rock-breaking test system and hydraulic control system diagram

破岩过程中氮气腔内氮气压力及射流压力的变化趋势;电力控制系统主要用于控制整个系统的运行状态。

高压聚能射流破岩试验的操作流程:①打开信号采集软件,实时采集氮气腔内压力以及水腔内的射流压力;②开启高压气泵,向装置内通入氮气,直至氮气腔内的压力达到预设压力值后,关闭高压气泵,停止向氮气腔内通入氮气;③开启液压泵站,并通过操控控制台向装置液压油腔内通入液压油,此时氮气腔内的氮气被挤压,当氮气腔内压力达到系统工作压力时,关闭液压泵站,停止向液压油腔内通入液压油,同时开启水供给系统,向水腔内注满水;④启动高压球阀,液压腔内的液压油通过快速泄油口迅速排出油箱,增压活塞在两侧巨大压差下快速向前运动,挤压水腔内的水通过聚能喷嘴喷射出去形成聚能射流,打击在岩石表面,实现岩石的冲击破碎;⑤关闭高压球阀,并停止信号采集系统,完成一次聚能射流冲击破岩。

高压聚能射流发生装置的液压控制原理主要包括气体供给回路、水供给回路和液压油供给回路组成,其中气体供给系统主要由氮气瓶、增压器、截止阀和单向阀构成,通过气腔入口向装置的气腔内通入一定压力的气体,为装置提供动力来源;液压油供给系统实现装置的回程过程和冲压过程;水供给系统主要为装置提供水并通过聚能喷嘴喷出形成射流打击在岩石上。

根据高压聚能射流发生装置的工作原理,其装置

破岩过程主要包括回程过程和冲压过程,其工作过程如下:

(1) 气体供给回路。启动气体供给回路,氮气瓶 12 内的气体通过增压器 13 进行增压,然后将增压后的氮气通过单向阀进入装置的气腔内,直至气腔内的压力达到预设压力值时停止向气腔内继续通入氮气。在气体供给回路中,压力继电器 14 和 15 是为了检测气腔内气体压力,当气体压力达到预设压力值时,压力继电器会向二位三通换向阀 6 输出电信号,进行换向,实现装置的回程和冲压过程。

(2) 回程过程。回程过程也就是进油过程,当压力继电器 14 检测装置气腔内气体压力达到预设压力值时,此时压力继电器 14 向二位三通换向阀 6 输出一个电信号,使二位三通换向阀位于左位,油箱 7 内的液压油通过液压泵 8 增压,并通过调速阀 9 进行液压泵流量的调节,然后打开单向阀并通过二位三通换向阀进入装置液压油腔内,液压油推动活塞运动并压缩气腔内的气体,使气体压力升高,为装置提供动力。

(3) 冲压过程。冲压过程也就是泄压过程,在回程过程中使气腔内的气体压力升高,当压力继电器 15 检测到气体压力升高至预设压力值时,此时压力继电器 15 向二位三通换向阀 6 输出一个电信号,使二位三通换向阀 6 位于右位,打开卸压阀 5 和单向阀,油腔内的液压油经二位三通换向阀快速排到油箱内,此时油腔内压力快速降低,活塞在两侧巨大压差下做加

速运动,完成一次冲压过程,当气腔内压力降至预设压力值时,进入下一个回程过程。

4.2 试验样机、岩样及系统主要参数

根据上文对高压聚能射流发生装置的理论计算及三维模型加工得到高压聚能射流发生装置试验样机如图 12 所示。此外,由于巷道工作面岩样存在体积较大、形状多样以及质地不均匀等问题,巷道工作面岩样需要加工后才能够使用,因此,本文通过人工配置岩样的方法来开展试验。



图 12 高压聚能射流发生装置试验样机

Fig.12 Prototype of high-pressure energy-gathering water jet rock-breaking device

为进行岩样力学性能参数测定,利用 MTS816 岩石力学试验系统将制备的岩样进行取样并进行单轴抗压试验,考虑到岩样配制以及取样过程中的随机因素,对同一块岩样在 3 个不同位置进行岩芯取样,采用求均值的方法获得岩样力学性能参数,如图 13 所示。所配制岩样的力学特性参数见表 2。

在进行高压聚能射流冲击破岩试验过程中,受限

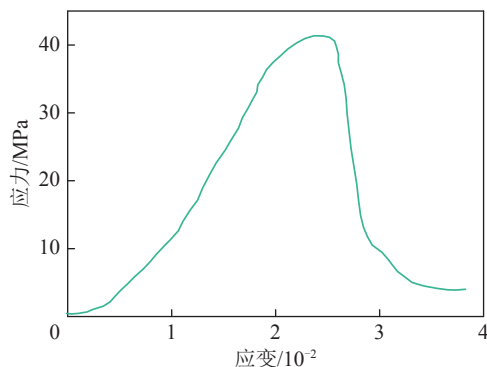


图 13 岩样单轴抗压试验

Fig.13 Uniaxial compression test of rock sample

表 2 岩样的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock samples

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
2 472	41.3	2.9	36.2	0.17

于实验室液压泵站的最大工作压力仅为 20 MPa,考虑到试验的安全性等因素,在进行冲击破岩试验过程中,将氮气腔内氮气初始压力以及工作压力分别设置为 10 和 19 MPa,由 3.3 节图 10 可知在此工作压力下射流最大冲击压力可达 74.5 MPa,采用控制变量法研究不同冲击时间、冲击靶距以及冲击频率对岩石破碎效果的影响,高压聚能射流破岩试验系统主要参数见表 3。

表 3 高压聚能射流破岩试验系统主要参数

Table 3 Main parameters of high-pressure energy-gathering water jet rock breaking test system

参数	取值
氮气初始压力/MPa	10
氮气工作压力/MPa	19
活塞大端面直径 d_1/mm	200
活塞缓冲段直径 d_2/mm	110
活塞杆直径 d_3/mm	60
喷嘴出口直径/mm	10
泄油口面积/ cm^2	20
冲击阶段增压活塞位移/mm	150
缓冲阶段增压活塞位移/mm	20
发射水量/ $(\text{L} \cdot \text{次}^{-1})$	0.5
岩样尺寸长×宽×高/ $(\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	200×200×200
岩样抗压强度/MPa	41.3

为验证设计的高压聚能射流冲击破岩效果优于普通连续水射流效果,进行了高压聚能射流与普通连续水射流破岩效果对比试验,固定液压泵站的流量为 120 L/min,普通射流与高压聚能射流靶距 (15 cm)、系统初始压力/普通喷嘴射流压力 (19 MPa)、射流冲击角度 (90°)、喷嘴直径 (10 mm)、冲击时间 (60 s) 均相同。实验结果如图 14 所示。

由图 14 可以看出,高压聚能射流与普通射流在破碎坑底部均形成圆柱形冲击坑,冲击坑直径大致相同,相比较于普通水射流所产生的单一水锤压力,高压聚能射流通过间断的水锤压力效应使得应力波在岩石内部叠加、反射,从而加剧岩石的破碎和疲劳破坏进而形成较大的破碎坑,无论是在射流产生的破碎

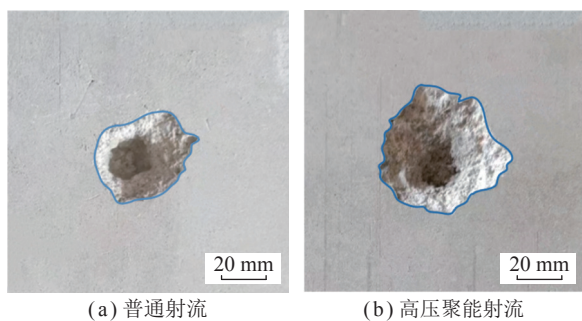


图 14 普通射流与高压聚能射流实验对比

Fig.14 Comparison of ordinary jet and high-pressure energy-gathering water jet experiment

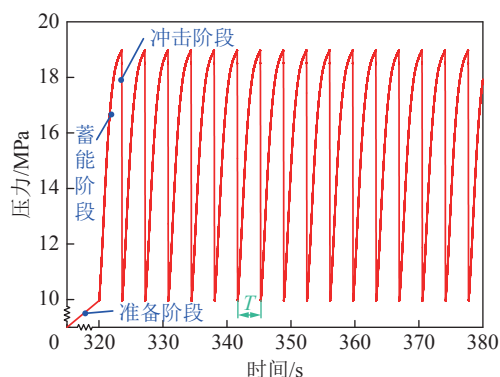
深度和破碎坑体积方面,高压聚能射流破岩效果均优于普通射流,进而验证了高压聚能射流冲击破岩的优越性。因此,开展高压聚能射流冲击破岩试验研究是有必要的。

4.3 高压聚能射流冲击破岩试验研究

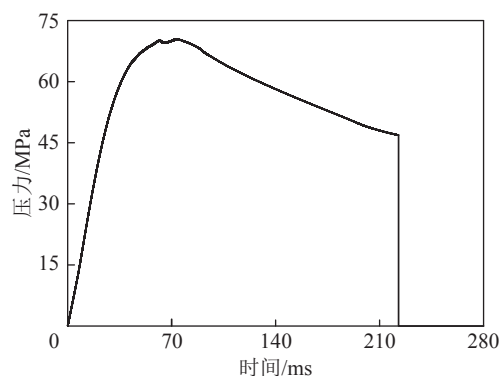
4.3.1 高压聚能射流冲击破岩时效特性

图 15 为高压聚能射流发生装置在氮气腔初始压力为 10 MPa、系统工作压力 19 MPa、靶距 15 cm、液压泵流量 120 L/min 下氮气腔内气体压力以及射流压力随时间的变化情况,从中可以看出,高压聚能射流随时间呈周期性变化,其周期为 3.6 s,频率为 0.28 Hz,其频率主要是由液压泵流量决定的。 T 为高压聚能射流冲击破岩过程中压力随时间变化的单个周期。单个周期内主要包括蓄能阶段以及冲击阶段 2 个阶段,冲击阶段的时间非常短暂,只有 0.23 s。射流压力随时间的增加呈现先快速增加后缓慢减小的趋势,最大值为 72.5 MPa,该装置在 10 MPa 的输入压力下,输出压力可以达到 72.5 MPa,其增压比为 7.25,证明该装置具有较好的增压效果。

为了定量分析高压聚能射流冲击作用下岩石的破碎效果,对射流冲击作用下岩石破碎体积、破碎坑直径以及破碎坑深度随冲击时间的变化趋势进行了分析,如图 16 所示。岩石破碎体积、破碎坑直径以及破碎坑深度均随着冲击时间的增加呈现增加的趋势,且增长均有逐渐减缓的趋势,最终趋于一个稳定值,近似服从指数函数曲线的规律。这主要是由于随着冲击时间的增加,高压聚能射流多重冲击使岩石表面产生疲劳损伤,岩石单元发生剪切破坏和拉伸破坏,岩石表面形成破碎坑,且随着时间的推移,岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度均会逐渐增大。但随着冲击时间的增加,一方面高压聚能射流冲击破碎岩石的同时将会在岩石底部产生“水垫”效应,进一步阻碍射流能量的传递以及岩石破碎;另一方面,当岩石破碎



(a) 气体压力



(b) 射流压力

图 15 不同时刻气体压力及射流压力

Fig.15 Gas pressure and jet pressure at different times

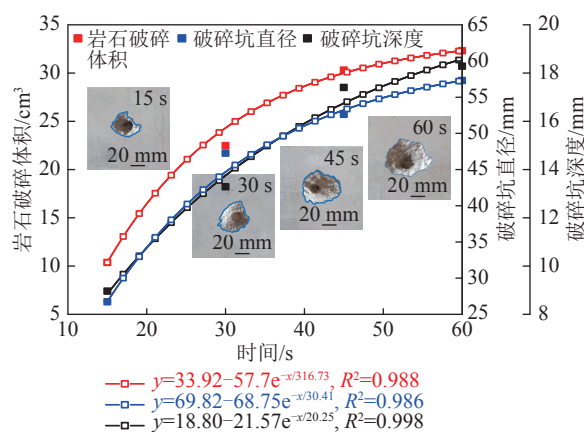


图 16 岩石破碎体积、破碎坑直径以及破碎坑深度随冲击时间的变化趋势

Fig.16 Variation trend of rock crushing volume, diameter of crushing pit and depth of crushing pit with impact time

坑深度达到一定值时,射流作用在岩石上所产生的回流也会在一定程度上阻碍射流能量的传递,因此,岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度随着时间的推移呈现增加有减缓的趋势。

4.3.2 冲击靶距

冲击靶距为水射流喷嘴到岩石表面之间的距离,也是影响射流效果的重要参数之一,冲击靶距过大,射流对物体表面的有效冲击力会降低,而冲击靶距过

小, 岩石表面只受到射流动压的作用, 而冲蚀作用不显著, 都会导致射流冲击破岩的效果, 因此, 水射流冲击破岩存在一个最佳的冲击靶距。为了揭示冲击靶距对岩石破碎效果的影响规律, 对比分析了高压聚能射流在不同冲击靶距情况下的岩石破碎形貌、岩石破碎体积以及破碎坑直径和深度。试验条件均设定在射流冲击时间 60 s、系统工作压力 19 MPa、液压泵流量为 120 L/min 下进行, 高压聚能射流在不同冲击靶距条件下岩石的破碎形貌如图 17 所示。

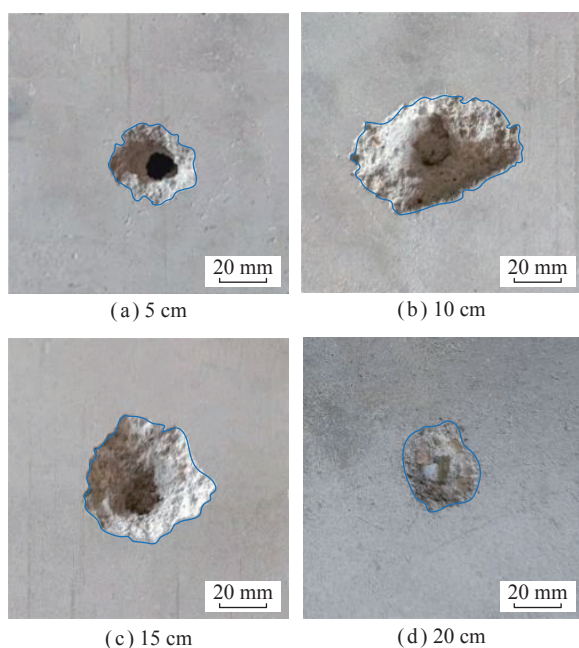


图 17 不同冲击靶距条件下岩石的破碎形貌

Fig.17 Fracture morphology of rock under different impact target distances

从图 17 可以发现, 高压聚能射流冲击作用下所形成的破碎坑表面面积随着冲击靶距的增加呈现先增大后减小的趋势, 而破碎坑深度随着冲击靶距的变化趋势呈现逐渐减小的趋势。从岩石的破碎坑形貌来看, 当射流冲击靶距为 10 cm 时, 破碎坑的表面面积达到最大, 但破碎坑深度比冲击靶距为 5 cm 时的要小, 当射流冲击靶距为 20 cm 时, 射流只将岩石表面剥落, 并未产生“漏斗”型破碎坑。

为了更直接的分析冲击靶距对岩石破碎效果的影响, 测得高压聚能射流在不同冲击靶距下的岩石破碎体积、破碎坑直径和深度等数据, 图 18 为岩石破碎体积、破碎坑直径和深度以及其变化率随冲击靶距的变化趋势。

从图 18 可以发现, 岩石破碎体积以及破碎坑直径均随着冲击靶距的增加呈现先增加后减小的趋势, 但破碎坑深度随着冲击靶距的变化趋势呈现为减小的趋势。当射流冲击靶距从 5 cm 增加至 10 cm 时,

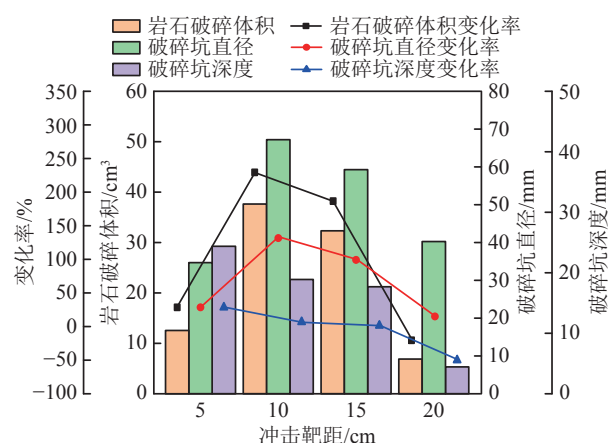


图 18 岩石破碎体积、破碎坑直径和深度以及变化率随冲击靶距的变化趋势

Fig.18 Variation trend of rock crushing volume, crushing pit diameter and depth and change rate with impact target distance

虽然破碎坑深度减小了 22.52%, 但岩石破碎体积、破碎坑直径均增加了 199.68% 和 104.32%, 当射流冲击靶距从 10 cm 增加至 15 cm 时, 岩石破碎体积、破碎坑直径和深度及其变化率均有所减小, 其变化率分别为 157.32%、70.88% 和 -27.44%, 而当冲击靶距增加至 20 cm, 其岩石破碎效果进一步降低, 因此, 当射流冲击靶距为 10 cm 时, 高压聚能射流冲击作用下岩石破碎效果达到最佳。这主要是由于当射流冲击靶距过小时, 射流冲击岩石表面产生的回流会对射流产生干扰, 降低岩石的破碎效果, 射流冲击靶距过大, 射流的集束性变弱, 射流传递岩石表面的能量密度降低, 导致射流破碎岩石的效果变差。

4.3.3 冲击频率

在单个周期内由于冲击阶段的时间非常短暂, 故高压聚能射流的冲击频率取决于蓄能阶段, 即液压泵的流量决定的。装置油腔内的容积为 6.5 L, 而实验室液压泵站的最大流量为 150 L/min, 因此在研究冲击频率对高压聚能射流冲击破岩性能的影响规律时, 只需改变液压泵的流量来改变射流的冲击频率, 通过调速阀改变液压泵流量。

固定射流冲击靶距、射流冲击时间、系统工作压力为 15 cm、60 s 以及 19 MPa, 分别设定液压泵流量为 80、100、120、140 L/min, 开展不同射流冲击频率对高压聚能射流冲击破岩性能的试验。高压聚能射流在不同冲击频率条件下岩石的破碎形貌如图 19 所示。从图 18 可以看出, 高压聚能射流冲击作用下所形成的破碎坑表面面积以及深度均随着液压泵流量的增加呈现增加的趋势。从岩石破碎坑形貌来看, 当液压泵流量从 100 L/min 增加至 120 L/min 时, 破碎坑表面面积以及深度虽继续增加, 但增长的幅度明显减

小,但当流量从 120 L/min 增加至 140 L/min 时,增长的幅度却明显增加,当液压泵流量为 140 L/min 时,岩石破碎坑表面面积以及深度均达到最大。

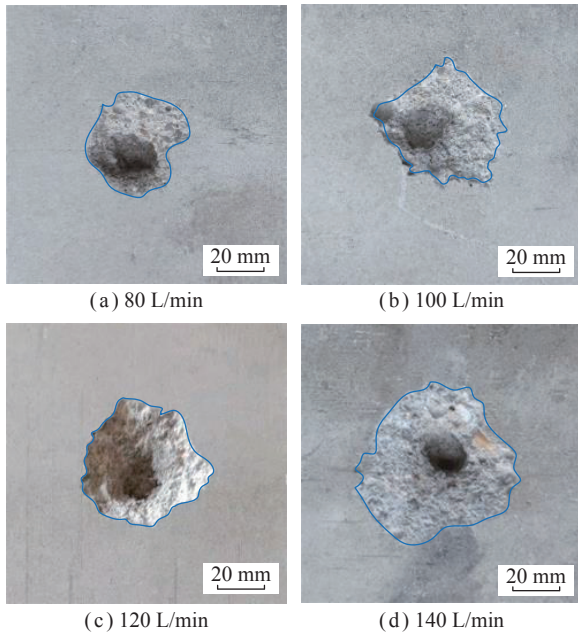


图 19 不同冲击频率条件下岩石的破碎形貌

Fig.19 Fracture morphology of rock under different impact frequency conditions

图 20 为不同液压泵流量条件下气体压力随时间的变化曲线,从图 20 可以看出,随着液压泵流量的增加,气腔内气体压力均呈周期性变化,即射流呈周期性变化,且气体压力的变化趋势一致,单个周期内均包括蓄能阶段和冲击阶段 2 个阶段。液压泵流量的改变仅改变蓄能阶段的时间,而冲击阶段时间依然保持在 0.23 s,这主要是由于冲击阶段时间主要由泄油口面积决定的,即液压油的排油速度决定的。当液压泵流量从 80 L/min 增加至 140 L/min 时,气体压力的周期从 5.225 s 减小至 3.136 s,从而增加射流的冲击频率。

图 21 为冲击频率随液压泵流量的变化曲线,从图中可以看出,当液压泵流量从 80 L/min 增加至 140 L/min 时,射流冲击频率从 0.191 4 Hz 增加至 0.318 9 Hz,且呈线性增长。但氮气腔内气体最大压力保持不变,这主要是因为一方面氮气具有良好的稳压效果,在压缩至一定体积后其自身压强不会再次发生变化,另一方面,由于液压泵流量的增加,即增加了蓄能阶段时液压油的进油速度,从而减小了进油时间,即减小了蓄能阶段时间,最终增加了射流冲击频率。

为了更直接的分析冲击频率对岩石破碎效果的影响,对高压聚能射流冲击作用下岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度随冲击频率的变化趋势进行了分

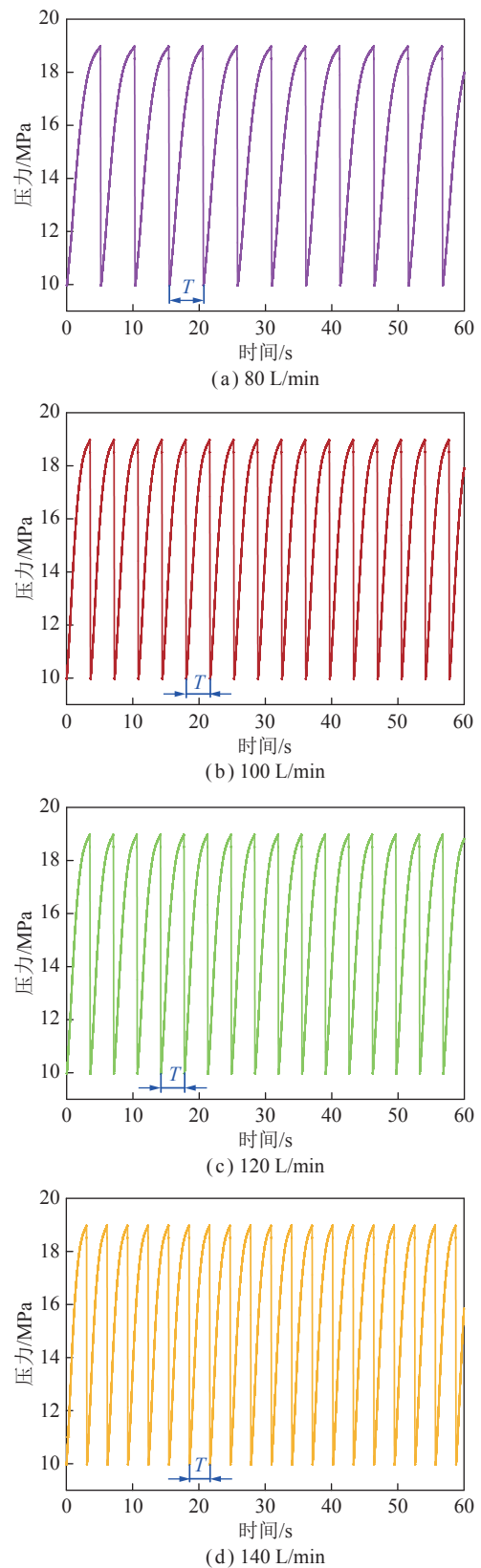


图 20 不同液压泵流量条件下气体压力随时间变化曲线

Fig.20 Variation curve of gas pressure with time under different hydraulic pump flow

析,如图 22 所示。从图 22 可以看出,岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度均随着冲击频率的增加呈现增

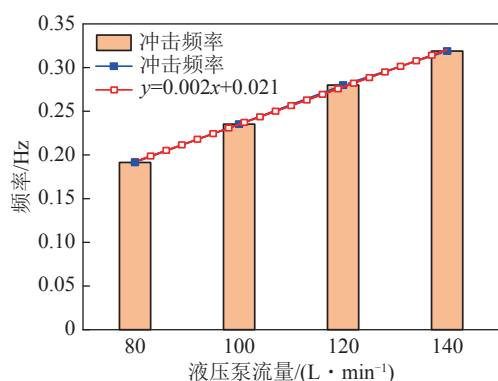


图21 冲击频率随液压泵流量的变化曲线

Fig.21 Change curve of impact frequency with the flow rate of hydraulic pump

加的趋势,值得注意的是,在液压泵流量为 120 L/min 时,虽然岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度相较于液压泵流量为 100 L/min 时均有所增加,但其变化率增长的幅度均有减缓的趋势,而当液压泵继续增加至 140 L/min 时,相较于液压泵流量为 120 L/min 时岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度均呈现大幅度增长的趋势,说明了当液压泵流量为 140 L/min 时,高压聚能射流冲击作用下岩石破碎效果达到最佳。

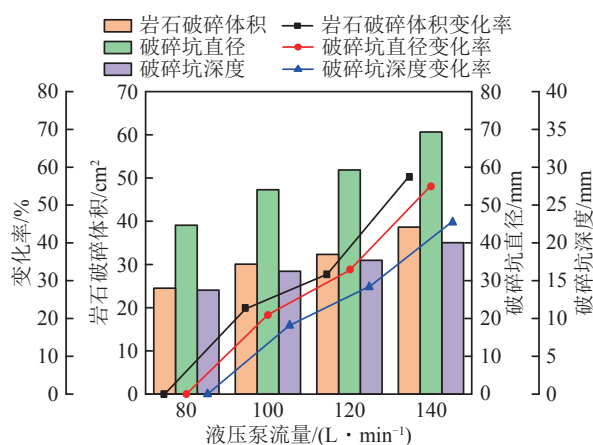


图22 岩石破碎体积、破碎坑直径和深度以及变化率随冲击频率的变化趋势

Fig.22 Variation trend of rock crushing volume, crushing pit diameter and depth and change rate with impact frequency

5 结 论

(1) 针对普通水射流破碎岩石过程中存在的喷嘴作用靶距短、喷嘴直径小导致的破岩效率低下等问题,设计并加工了一种高压聚能射流破岩装置,该装置依靠增压活塞两侧的氮气腔和液压油腔之间的压力差实现增压活塞对射流的增压效果,进而将气体的压力能转化为射流的压力能,从而实现射流对岩石的冲击破碎。试验表明所提出的高压聚能射流破岩装置相

较于普通水射流能够实现岩石的高效破碎。

(2) 基于流体力学理论,建立了高压聚能射流破岩装置蓄能阶段、冲击阶段以及缓冲阶段的动力学参数计算模型,通过计算模型求解装置所产生的最大射流压力,并进行试验验证,试验结果表明:该装置在 10 MPa 的初始压力下,能够产生 72.5 MPa 左右的射流冲击力,具有较好的增压效果。

(3) 研究了装置结构参数及系统压力对装置性能的影响:射流冲击力与泄油口面积、活塞杆直径、喷嘴出口直径以及系统压力均呈现先增大后减小的趋势,系统压力、喷嘴出口压力、泄油口面积、活塞杆直径对装置性能的影响程度依次降低。

(4) 开展了高压聚能射流冲击破岩的时效特性、冲击靶距以及冲击频率对其破岩性能的试验研究,结果表明:高压聚能射流冲击破岩呈周期性变化,在预定系统压力下射流冲击岩石的最优靶距为 10 cm。射流冲击频率随液压泵流量且呈线性增长,且岩石破碎体积、破碎坑直径以及深度均随着冲击频率的增加呈现增长的趋势。

参考文献(References):

- [1] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Tunnel boring machines under squeezing conditions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(2): 139–157.
- [2] 石茂林, 孙伟, 宋学官. 隧道掘进机大数据研究进展: 数据挖掘助推隧道挖掘[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(22): 344–358.
SHI Maolin, SUN Wei, SONG Xueguan. Research progress on big data of tunnel boring machine; how data mining can help tunnel boring[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(22): 344–358.
- [3] 刘志强, 李术才, 王杜娟, 等. 千米竖井硬岩全断面掘进机凿井关键技术与研究路径探析[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 3163–3174.
LIU Zhiqiang, LI Shucai, WANG Dujuan, et al. Analysis of key technology and research path of full section boring machine for 1 000 m vertical shaft with hard rock strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3163–3174.
- [4] 马伟斌. 铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望[J]. *铁道学报*, 2022, 44(3): 64–85.
MA Weibin. Development and prospect of key technology of drilling and blasting for railway mountain tunnels[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(3): 64–85.
- [5] ZHAO Jianjian, ZHANG Yong, RANJITH P G. Numerical modeling of blast-induced fractures in coal masses under high in-situ stresses[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 225: 106749.
- [6] 刘送永, 商港, 李洪盛. 水下跨介质射流破岩性能试验研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1723–1733.
LIU Songyong, SHANG Gang, LI Hongsheng. Experimental study on rock breaking performance of underwater cross medium jet[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1723–1733.
- [7] 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 Yuguo, et al. Research of high efficient crushing methods for coal rock[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 163–176.
- [8] 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.
- [9] 刘送永, 李志强, 谢奇志. 高压泡沫胀裂装置结构参数设计及特性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 197–206.
- LIU Songyong, LI Zhiqiang, XIE Qizhi. Structural parameter design and performance analysis of high pressure foam fracturing device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 197–206.
- [10] LI Hongsheng, LIU Songyong, ZHU Zhencai, et al. Experimental investigation on rock breaking performance of cutter assisted with hydraulic fracturing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 248: 107710.
- [11] 江红祥, 赵慧贺, 刘送永, 等. 磨料射流冲击割缝岩石性能影响因素分析[J]. 振动·测试与诊断, 2022, 42(3): 564–571.
- JIANG Hongxiang, ZHAO Huihe, LIU Songyong, et al. Analysis of influencing factors of abrasive jet impact slotting rock performance[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 564–571.
- [12] 李洪盛, 刘送永, 郭楚文. 自振脉冲射流预制裂隙对机械刀具破岩过程温度影响特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2136–2145.
- LI Hongsheng, LIU Songyong, GUO Chuwen. Effect of crack pre-fabrication by self-oscillating pulsed jet on the temperature of conical pick during rock breaking processes[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2136–2145.
- [13] LUO Xingchen, ZHANG Jinliang, YANG Fengwei, et al. Experimental and simulation study on the hard rock-Breaking characteristics of disk cutter under the water jet pre-cutting kerf[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(4): 04023029.
- [14] WANG F, ZHOU D, ZHOU X, et al. Rock breaking performance of TBM disc cutter assisted by high-pressure water jet[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6294.
- [15] LIU Songyong, ZHOU Fangyue, LI Hongsheng, et al. Experimental investigation of hard rock breaking using a conical pick assisted by abrasive water jet[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4221–4230.
- [16] 廖华林, 王华健, 牛继磊, 等. 高压水射流井底切槽应力卸载特性[J]. 石油学报, 2022, 43(9): 1325–1333.
- LIAO Hualin, WANG Huajian, NIU Jilei, et al. Characteristics of stress release during downhole slotting by high-pressure water jet[J]. Acta petrolei sinica, 2022, 43(9): 1325–1333.
- [17] 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, 223.
- HUANG Luyun, CHEN Zhengshou, NI Luxin, et al. Effects of target distance and impact angle on hydrodynamic performance of ultra-high pressure water jet nozzle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 169–178, 223.
- [18] PAN Yue, ZHAI Shengyu, MENG X, et al. Study on the fracturing of rock by high-speed water jet impact[J]. Processes, 2022, 11(1): 114.
- [19] JIANG Hongxiang, LIU Zenghui, GAO Kuidong. Numerical simulation on rock fragmentation by discontinuous water-jet using coupled SPH/FEA method[J]. Powder Technology, 2017, 312: 248–259.
- [20] 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. Research progress and strategic thinking of coal mine waterjet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189–3211.
- [21] LIU Songyong, CUI Yuming, CHEN Yueqiang. Numerical research on rock breaking by abrasive water jet-pick under confining pressure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 120: 41–49