

深部采矿岩石力学进展

何满潮^{1,2,3}, 武毅艺^{1,3}, 高玉兵^{1,2}, 陶志刚^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083; 3. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要:随着煤炭开采日益向深部发展, 深部采矿引发的围岩大变形破坏和强冲击动力灾害日益严峻。在深部高地应力、高地温、高渗透压、强采动、强流变及多场耦合的复杂地质力学环境下, 深部采场的应力场特征、煤岩体破碎性质、岩层移动及能量的积聚释放规律等均发生了显著变化。针对深部采矿中的岩石力学问题, 论述了笔者及团队在深部采煤方法、深部巷道破坏机理与围岩控制、深井热害与地热利用三大方向取得的进展, 主要包括: ①提出了平衡开采理论和实现平衡开采的110/N00工法, 进行了千米深井现场工程应用; ②构建了深部“非均压建井”模式, 研发了实现深井稳定提升的SAP系统, 形成了可大幅简化井巷工程量和提高矿井采出率的建井方法; ③研发了多套适用于研究深部岩体在水、高温、高压、结构效应及多场耦合作用下发生宏观破坏的实验系统和可进行微观层面演算的超算系统, 揭示了深部软岩大变形破坏机理及多尺度力学特性; ④研制了深部岩体冲击型和应变型岩爆实验系统, 阐述了深部岩体冲击能量沿开挖临空面瞬间释放的非线性动力学行为; ⑤提出了深部巷道开挖补偿支护理论, 进一步发展了具有高恒阻、高延伸率、强吸能和耐冲击超常力学特性的NPR支护材料和技术; ⑥研发了模拟深部高温、高湿和高压环境下的岩体热力学实验系统, 提出了热害治理和热能资源化利用方法, 建立了深部热害治理与热能综合利用系统(HEMS)。相关研究成果已在深部开采领域得以应用, 可为深部采矿面临的复杂岩石力学问题提供借鉴。

关键词:深部开采; 岩石力学; 110/N00工法; 巷道变形; 围岩控制; 矿井热害

中图分类号:TD31 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)01-0075-25

Research progress of rock mechanics in deep mining

HE Manchao^{1,2,3}, WU Yiyi^{1,3}, GAO Yubing^{1,2}, TAO Zhigang^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: With the gradual development of coal mining into deep strata, the large deformation failure and strong dynamic impact disasters of surrounding rock caused by deep mining are becoming more and more serious. Under the complex geo-mechanical conditions including high ground stress, high ground temperature, high permeability, strong mining disturbance, strong rheology, and multi-field coupling, the stress field characteristics, rock fragmentation properties, strata movement and energy accumulation and release laws of deep mining areas are significantly different compared with those in shallow mining areas. In response to the rock mechanics issues in deep mining, this paper discusses the research progress made by the authors and team in three aspects: deep coal mining methods, failure mechanism and control of surrounding

收稿日期: 2023-10-30 修回日期: 2024-01-05 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1400

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204164); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600900); 中央高校基本科研业务费资助项目(2023ZKPYB01)

作者简介: 何满潮(1956—), 男, 河南灵宝人, 中国科学院院士。E-mail: hemanchao@263.net

通讯作者: 高玉兵(1989—), 男, 山东烟台人, 副教授。E-mail: yubing_gao@163.com

引用格式: 何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 75-99.

HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.



移动阅读

rock in deep roadway, and deep thermal disaster and geothermal utilization. The main results are as follows: ① the theory of balanced mining and the 110/N00 methodology for achieving balanced mining were proposed and applied in kilometer deep mines. ② The deep shaft construction mode with non-uniform pressure was proposed, and a SAP system to realize the stable lifting was developed. A mine construction method which can greatly reduce the roadway quantities and improve the coal recovery rate was invented. ③ Multiple experimental systems suitable for studying the macroscopic failure of deep soft rock under the effects of water, high temperature, high pressure, structural effects, multi-field coupling were developed. A supercomputing system capable of performing microscopic-level calculations was established. Based on the experimental results, the mechanism of large-scale deformation and failure of deep soft rock and its multi-scale mechanical properties were revealed. ④ An experimental system for simulating deep shock-type and strain-type rock bursts was built, and it was revealed that the rock burst is a nonlinear dynamic behavior in which energy is instantaneously released along the excavation-free surface. ⑤ The theory of excavation compensation support for deep roadway was proposed, and a NPR materials with extraordinary mechanical properties such as high constant resistance, high elongation, strong energy absorption, and impact resistance were invented. ⑥ A thermodynamic experimental system which can simulate deep high temperature, high humidity, and high-pressure environments was constructed, and a high temperature exchange machinery system (HEMS) for heat disaster treatment and heat source resource utilization was established. The above research achievements have been applied in the field of deep mining and can provide guidance for the complex rock mechanics problems faced by deep mining.

Key words: deep mining; rock mechanics; 110/N00 mining method; roadway deformation; surrounding rock control; underground thermal disaster

煤炭作为我国的主体能源,其开采已逐渐转入深部地层。据统计,在已探明的煤炭储量中,埋深千米及以下的资源占比约 53%。目前的煤矿开采深度正以年均 8~12 m 的速度增加,东部地区矿井以每十年 100~250 m 的速度发展,千米级深井资源开采将成为常态,向地球深部进军已成为我国现在和未来面临的重大战略科技问题^[1-2]。

据统计,目前我国已建成开采深度达到或超过 1 000 m 的煤矿超过 40 座,主要分布在华东和华北地区。未来 5~10 a,煤炭矿山还将兴建 30 余座千米深井。深部复杂的地质力学环境给深部采矿带了严峻挑战。针对深部采矿过程中出现的岩石力学与灾害控制问题,早在 1983 年,苏联、联邦德国的学者就对超过 1 600 m 深的矿井进行了专题研究。随后,南非、加拿大、美国等国家也开展了深井研究计划。各国学者逐渐认识到深部矿井面临的一些共性问题^[3-6],其中最突出的是高地应力、高地温、高岩溶水压和强开采扰动^[7-10]。2004 年,我国立项启动了第 1 项系统研究深部开采岩石力学问题的国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”,后续又在深部资源探测^[11-12]、深部动力灾害机理及防治^[13-15]、深井建设与提升^[16-17]、深井围岩控制及智能开采^[18-22]等相关方向布局了一系列重点课题,形成了深地探测与地质透明、深部巷道围岩控制、煤炭资源智能开采、复合灾害监测预警等一系列服务于深部采矿的先进技术^[23-30]。相关研究成果为我国深部资源的安全高效开采提供

了重要的理论与技术支撑。

笔者于 2005 年提出了深部的概念体系及工程评价指标^[5],此后团队陆续在深部开采理论与方法、深部巷道围岩破坏机理与控制技术、深部岩体热力学与热能利用三大方向上开展了重点研究,如图 1 所示。在深部资源开采方面,针对留煤柱采煤方法存在的煤柱应力集中、临空巷道围岩变形及冲击地压等问题,提出了平衡开采理论,形成了无煤柱自成巷 110/N00 工法开采体系,并在深部矿井建设方面阐述了建井新思路;在深部巷道围岩破坏机理与控制方面,研究了深部软岩大变形机理与岩体冲击动力学特性,提出了开挖补偿支理论和高预应力 NPR 补偿支护技术;在深部岩体热力学与热害治理方面,针对深部矿井存在的地热灾害和围岩热-力耦合现象,研究了岩石的热力学效应,提出了基于矿井涌水的温控新方法,建立了深部热害治理与热能综合利用系统 (HEMS)。笔者围绕深部采矿岩石力学中的核心问题,系统阐述了在以上 3 个方向的主要研究进展。

1 深部开采理论与方法

1.1 平衡开采理论

深部开采过程中,留设煤柱的工作面在开采后,顶板岩层呈现出垮落带、裂隙带和弯曲下沉带(“竖三带”),并向上影响直至地表^[31]。在此过程中,顶板岩层受到采矿损伤和破坏,如图 2 所示。

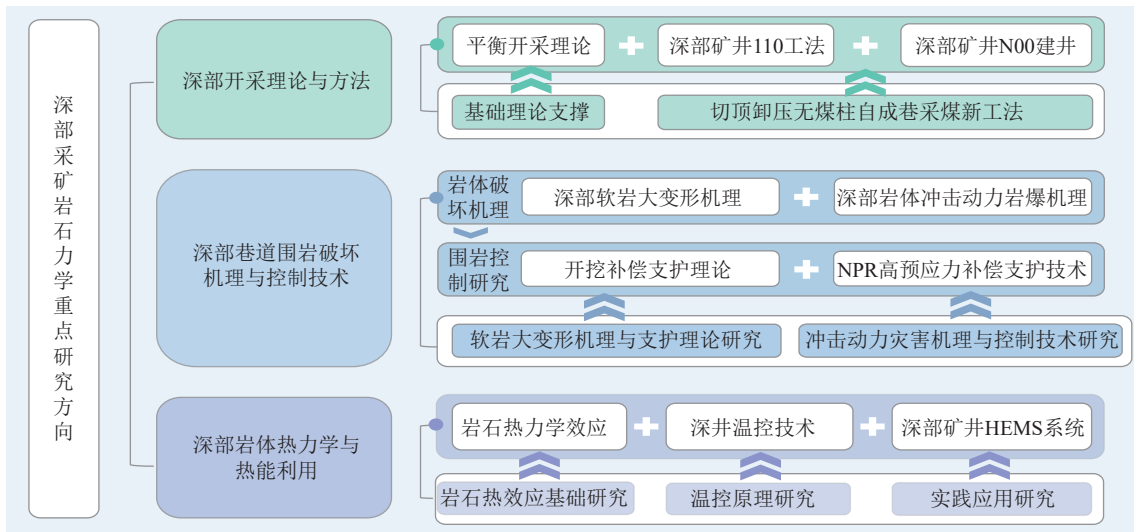


图1 深部采矿岩石力学主要研究内容与路线

Fig.1 Main research contents and route of rock mechanics in deep mining

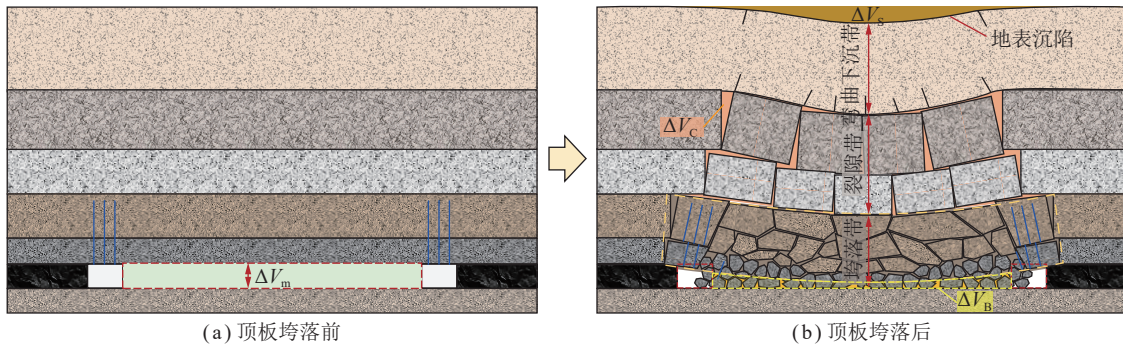


图2 采矿损伤模型示意

Fig.2 Mining damage model diagram

将采矿活动对顶板“竖三带”岩层的损伤及破坏程度进行分类,定义采矿损伤变量 K_i , $i=1, 2, 3$ ^[32]。 K_1 为采矿引起的地表沉降损伤; K_2 为裂隙带中产生的裂隙损伤; K_3 为垮落带中顶板矸石的碎胀程度,各自的表达式^[33]为

$$\begin{cases} K_1 = \Delta V_s / \Delta V_m \\ K_2 = \Delta V_c / \Delta V_m \\ K_3 = \Delta V_B / \Delta V_m \end{cases} \quad (1)$$

其中, ΔV_s 为地表沉降体积; ΔV_c 为裂隙带中的裂隙体积; ΔV_B 为顶板垮落岩体的碎胀体积; ΔV_m 为采矿体积。开采过程中,采矿活动对“竖三带”岩层产生的影响始终满足采矿损伤不变量方程^[33],即

$$K_1 + K_2 + K_3 = 1 \quad (2)$$

地表沉降体积 ΔV_s 可通过测量和计算得到,即 K_1 可以求得,而顶板裂隙带中岩层的裂隙体积 ΔV_c 和垮落带中岩体的碎胀体积 ΔV_B 难以得到,即 K_2 和 K_3 无法求得。

为确定采矿损伤不变量方程的解,提出了开采1个工作面只需掘进1条工作面巷道,留设0个煤柱的

110工法和开采 N 个工作面无需提前掘进巷道和留设煤柱的N00工法^[32-35]。110/N00工法实现了由“对抗”矿山压力到“利用”矿山压力成巷的转变,使得采空区顶板从自然垮落到按照设计高度垮落,理论上实现垮落带矸石的碎胀量抵消采矿量^[33],即

$$\begin{cases} V_B = (K - 1)H_C S \\ K = K_0 e^{-\alpha t} \\ \Delta V_B = \Delta V_m \end{cases} \quad (3)$$

式中, H_C 为切顶高度; S 为开采面积; K 为顶板垮落岩体的碎胀系数; K_0 为顶板垮落岩体的初始碎胀系数; α 为常数; t 为时间。

在采矿损伤不变量方程中, $K_3 \rightarrow 1$,则 $K_1, K_2 \rightarrow 0$,即为方程的特解。此时,地表岩层的沉降体积 ΔV_s 和裂隙带中的裂隙体积 ΔV_c 趋于0,从而实现煤炭资源的平衡开采,如图3所示。

1.2 深部矿井110工法

1.2.1 无煤柱自成巷110工法发展

无煤柱自成巷110工法于2009年提出并在白皎煤矿首次实践成功,110工法取消了区段煤柱或人工

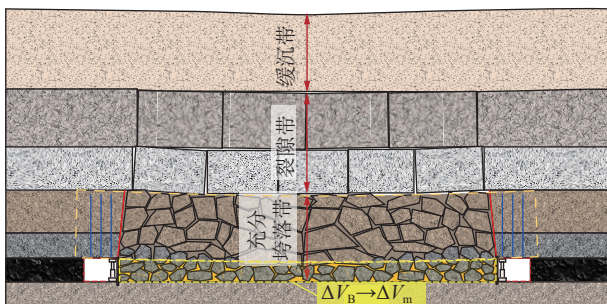


图3 无煤柱自成巷平衡开采覆岩结构模型

Fig.3 Overburden rock structure model of balanced mining without coal pillar

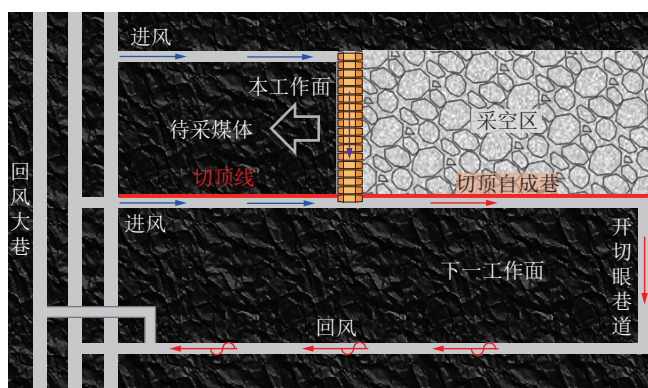
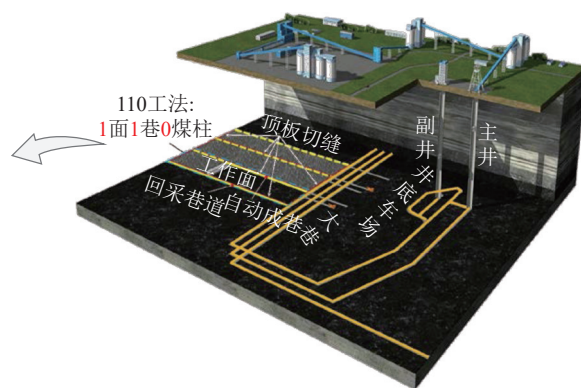


图4 长壁开采110工法平面

Fig.4 Plan chart of longwall 110 mining method



110工法已在大量不同煤矿条件下成功实践,其理论基础、关键技术及配套设备均得到了进一步发展。

(1) 理论研究发展。

无煤柱自成巷通过定向聚能切顶,将巷道的“长臂梁”顶板转化为“短臂梁”顶板,形成稳定的短悬臂梁结构,“切顶短臂梁”理论是110工法实现的重要理论基础^[38-39],如图5所示。

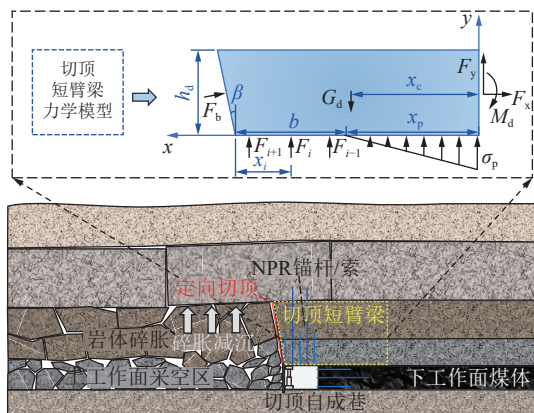


图5 切顶成巷顶板结构和力学模型

Fig.5 Structure and mechanical model of roof cutting self-forming roadway

取切顶后巷道顶板的短臂梁进行受力分析,忽略基本项关键块对切顶短臂结构的施载作用,设巷道宽

充填柱,实现了“一面两巷”变为“一面一巷”^[31]。在110工法工艺流程中,根据作业工序和顶板状态不同,将巷道划分为:超前切顶段、临时支护段和成巷稳定段^[36-37]。超前切顶段需要进行NPR锚杆(索)高预应力补偿支护和预裂切顶,保障巷道顶板“拉得住”和采空区顶板“切得开”;临时支护段需要临时支护设备抵抗采动垮落影响,并进行以U型钢为主的挡矸支护作业;成巷稳定段需要确保巷道矿压稳定,逐步移撤临时支护最终成巷。110工法将工作面传统的“U”型通风方式转变为“Y”型通风,有效解决了工作面上隅角瓦斯积聚问题,其平面布置如图4所示。

度为 b ,煤帮对切顶短臂梁的支撑荷载按线性分布,建立平衡方程 $\Sigma F_y=0$ 和 $\Sigma M=0$ 。

$$\begin{cases} F_b \sin \beta + \sum F_i + \frac{1}{2} \sigma_p x_p + F_y = G_d \\ \frac{1}{6} \sigma_p x_p^2 + \sum F_i x_i + M_d + F_b \sin \beta (x_p + b) = G_d x_c \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_b 为矸石侧向承载力,kN; F_i 为不同支护结构的支护力,kN; F_x 、 F_y 为反作用力,kN; G_d 为短臂梁的自重荷载,kN; M_{ad} 为短臂梁的残余抗弯能力,kN·m; σ_p 为煤帮对短臂梁的作用力,kN/m; β 为切顶角度,(°); x_i 为不同支护结构距煤壁的距离,m; x_c 为短臂梁几何形心横坐标,m; x_p 为煤帮对短臂梁的作用距离,m。

$$\sum F_i (3x_i - x_p) + 3M_{ad} + F_b \sin \beta (2x_p + 3b) - F_y x_p = G_d (3x_c - x_p) \quad (5)$$

式(5)中,等式左侧代表承载能力,它由支护、矸石支撑、煤帮支撑和结构抗弯能力组成;等式右侧代表施载部分。由平衡方程可得,保持悬臂结构的稳定性,一方面需要顶板和煤帮的强力支护,以保障悬臂结构完整性和连续性,发挥结构自身的抗弯能力,另一方面需要进行有效切顶作业,使得矸石充分垮落、

碎胀, 以实现充分利用矸石碎胀进行承载。

随着 110 工法应用条件不断扩展, 其不同工况下参数的设计和变形特征理论分析得以发展, 如图 6 所示。HE 等^[38]建立了切顶状态下顶板受力模型, 计算得到了切顶参数; 在此基础上, 考虑支护、煤帮支撑等因素建立了短臂梁结构受力模型^[40], 进一步确定顶

板短臂梁结构的支护参数; 王亚军等^[41]提出了短臂梁变形计算模型, 分析了不同因素影响下短臂结构在不同成巷阶段的变形程度、敏感度等特征指标; 杨军等^[42]建立了切顶短臂梁和基本顶岩梁的组合力学模型。切顶短臂梁理论的深化研究为深井 110 工法切顶参数的设计提供了理论依据。

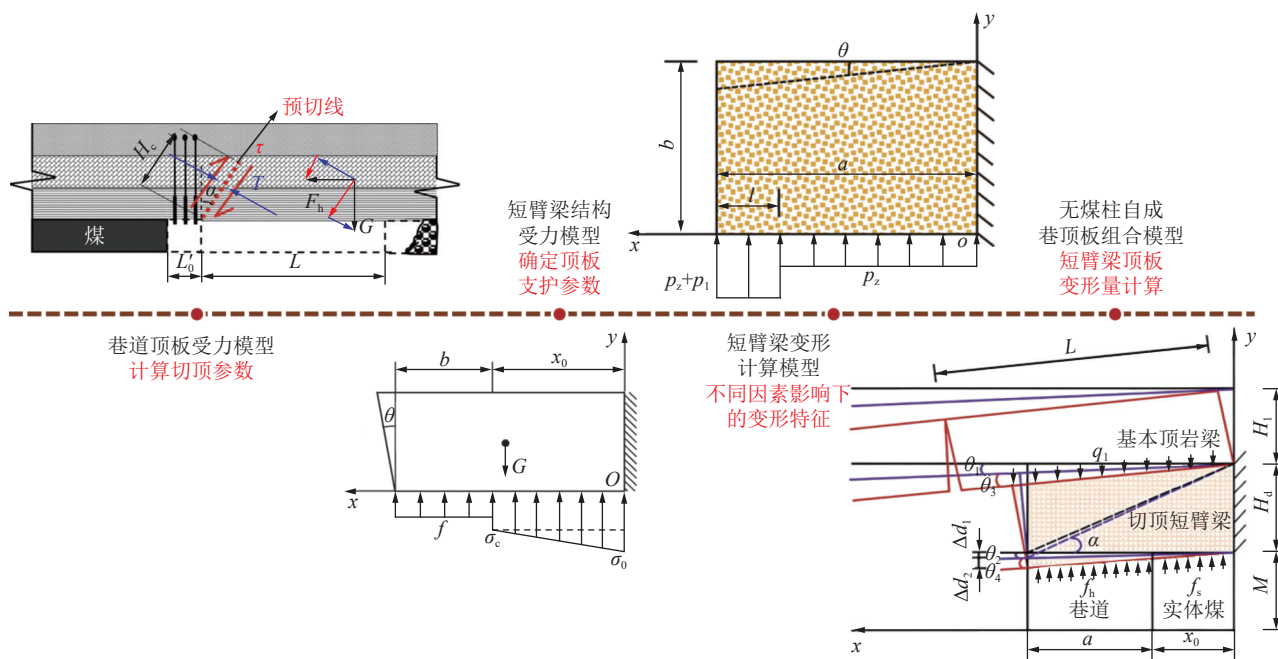


图 6 不同条件下切顶短臂梁模型^[38-42]

Fig.6 Model of "cutting cantilever beam" under various conditions^[38-42]

(2) 切顶技术发展。

① 聚能爆破技术。2003 年, 提出了双向聚能爆破技术, 用于顶板定向预裂^[43], 通过安设聚能管控制爆破冲击波的方向, 实现顶板定向预裂控制, 如图 7 所示。超前顶板预裂是无煤柱自成巷的关键工序, 其切顶效果直接影响后期留巷的稳定性。针对不同顶板条件, 提出了深浅孔耦合聚能爆破技术^[44]、多排聚能孔爆破方法等^[44], 使得顶板在被切落的同时充分碎胀, 提高成巷围岩的平衡稳定性。

② 爆破材料。预裂切顶主要以矿用乳化炸药联合聚能管实现定向聚能爆破, 传统炸药在现场存在一定的使用限制。为此, 研发了一种以煤矸石、秸秆等固废为主要原料的非炸药胀裂材料, 并制作成单裂面瞬时胀裂器, 以实现定向单裂面破岩^[45-46], 如图 8 所示。

单裂面胀裂器包含切缝管、聚能孔、切缝剂、阻燃泡沫、引信和引线, 其具有破岩速度快、定向性能优的特点^[47]。单裂面胀裂器在联合国隔板试验、克南试

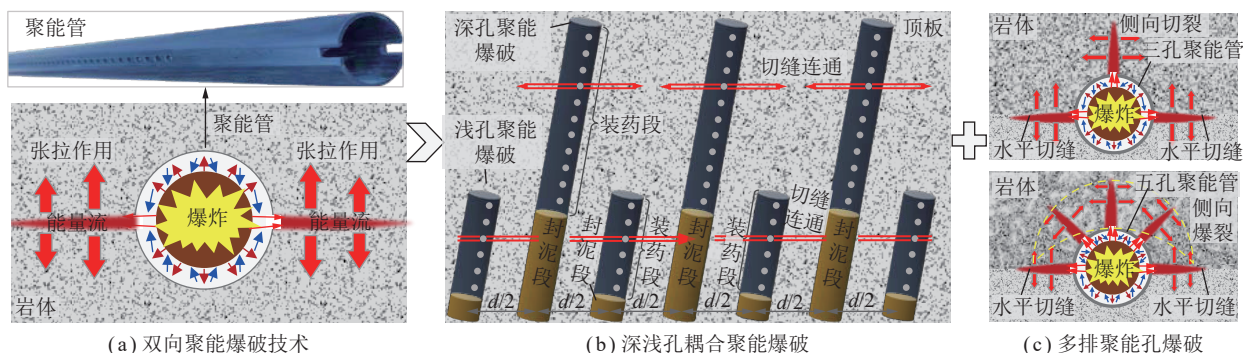
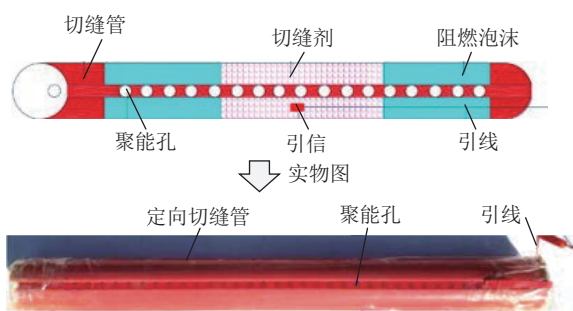


图 7 聚能爆破控制技术进展

Fig.7 Progress of energy-gathering blasting control technology

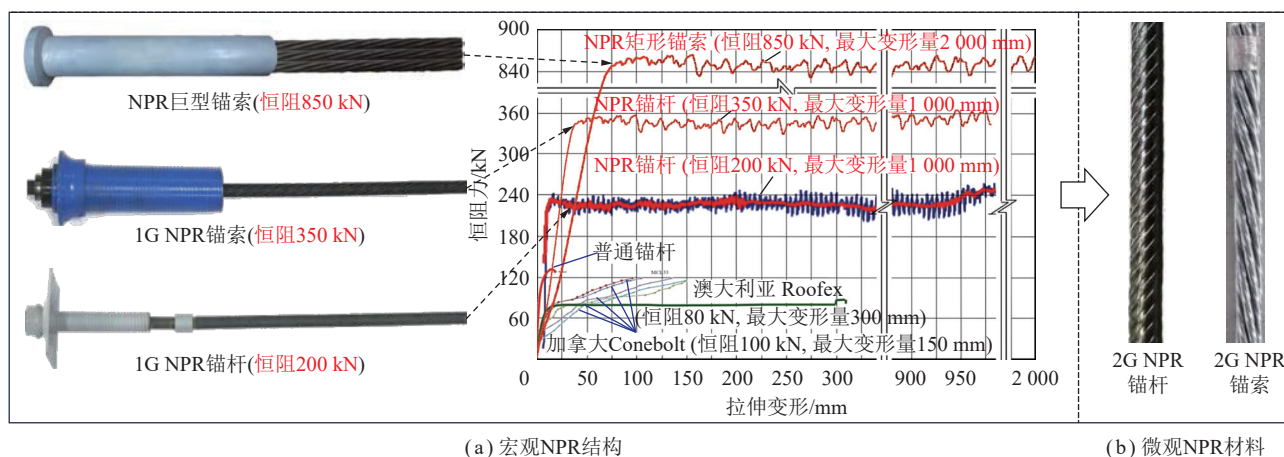
图8 单裂面瞬时胀裂器^[47]Fig.8 Instantaneous expander with a single fracture surface^[47]

验和时间/压力试验均为“—”，此外，其还具有施工工序简易、运输安全等优势。

(3) 支护技术发展。

2004年，提出“理想塑性材料是 NPR(Negative

Poisson's Ratio) 结构材料”的科学猜想^[48]。2007年，提出控制围岩大变形的基本理论，研发 PR(Poisson's Ratio) 材料和 NPR 结构的结合体，实现适应恒阻大变形的支护结构设计^[48]。2009—2011年间，成功研发了宏观上实现负泊松比效应的 NPR 恒阻大变形锚杆/索。根据实测，NPR 锚杆/索实现了高恒阻、大变形、强吸能、防冲抗爆等超常力学性能，形成 1G NPR 不同类型的支护材料^[49]。2014年，基于宏观 NPR 结构，研发了微观 NPR 材料，阐述了其 3 个基本要求：① 材料具有负泊松比效应；② 屈服平台消失；③ 应变大于 20%^[50-52]。采用多尺度多重共格界面设计，创新冶炼添加剂配方加工工艺，研制出了具有微观负泊松比效应、宏观拉伸时无明显颈缩的微观 NPR 钢材，发明了 2G NPR 锚杆(索)^[48, 53-54]，如图 9 所示。



(a) 宏观NPR结构

(b) 微观NPR材料

图9 NPR 支护结构和材料^[48]Fig.9 NPR supporting structure and materials^[48]

(4) 配套装备。

为适应 110 工法超前预裂切顶作业需求，研发了自成巷预裂切顶钻机，配备钻杆夹持结构、支顶装置，方便钻杆的装卸及导向，降低作业人员劳动强度且保障成孔质量，易于安装爆破聚能管^[55]。此外，定制了配套的单元支架，实现留巷矸石帮一侧强力的控顶和

护帮，采用封堵防漏风材料对挡矸网和可伸缩 U 型钢组成的挡矸支护进行密闭，如图 10 所示。

1.2.2 深井 110 工法应用案例

110 工法的应用由简单地质条件向复杂地质条件发展，初期的应用主要以浅埋煤层为主，随着技术发展成熟，其应用煤层的埋藏深度也由浅埋至中深部逐



(a) 自动成巷超前切缝钻机



(b) 配套单元支架和喷涂封闭材料

图10 110工法配套装备及材料案例

Fig.10 Examples of supporting equipment and material case in 110 mining method

渐推广至大埋深条件^[33], 目前已实现了千米深井 110 工法现场应用。

(1) 河南永城城郊煤矿。

城郊煤矿 21304 工作面平均采厚为 3.0 m, 埋深为 835~915 m, 为近水平中厚煤层。如图 11 所示, 在 21304 工作面轨道巷实施 110 工法。设计顶板的补强支护为 2 排长度为 10 000 mm 的恒阻锚索, 间排距为 400 mm×700(1 400) mm; 临时加强支护为“液压支架+单体支柱+ π 型梁”的被动支护方式; 设计挡矸支护为 U29 型钢+金属网^[55]。21304 轨道巷的切顶成巷效果如图 11 所示。

(2) 山东济宁安居煤矿。

安居煤矿为典型的冲击地压矿井, 其 5307 工作面平均采厚为 2.0 m, 埋深为 1 159~1 235 m, 为缓倾斜煤层。5307 工作面轨道巷实践 110 工法, 轨道巷顶板破碎、多网兜, 巷道围岩变形剧烈, 如图 12 所示。

设计巷道顶板补强 2 列 NPR 恒阻锚索, 规格 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 9\,300 \text{ mm}$, 间排距 1 850 mm×800 mm。临时支护采用单元支架+“一梁三柱”相结合的方式; 挡矸支护采用“钢筋网+可伸缩 U36 型钢”^[56]。根据微震监测数据对比, 在不同的回采速度下, 采用 110 工

法留巷的 5307 工作面的微震事件能量值明显低于采用 121 工法的 2311 工作面^[56]。

(3) 山东泰安孙村煤矿。

孙村煤矿最大开采深度约 1 500 m, 最大地应力为 37.9 MPa。该矿 2 号煤平均煤厚 2.5 m, 采用 121 工法窄煤柱掘巷后, 巷道围岩剧烈收敛, 支护失效现象严重, 如图 13 所示。

王琦等^[57-59]采用大型三维物理模型试验系统, 对比研究了深井沿空掘巷与 110 工法开采的应力分布规律, 通过顶板预裂切断采空区与巷道顶板之间的应力传递, 同时对顶板进行锚注支护以提高顶板的完整性, 实现了成功留巷。

(4) 山东菏泽郭屯煤矿。

郭屯煤矿 4306 工作面煤层和顶板岩层均具有 II 类冲击倾向性, 其煤层平均采厚为 2.7 m, 最大埋深 890 m。如图 14 所示, 在 4306 工作面轨道巷实施 110 工法, 顶板上应用 3 列 NPR 恒阻锚索, 排距分别为 800、2 400 和 4 000 mm^[60], 如图 14 所示。

留巷时采用 U36 型钢+挡矸网进行挡矸支护, 并在工作面后方 300 m 范围外, 待留巷稳定后逐步回撤单元支架。根据现场勘察结果, 顶板 NPR 锚索的支

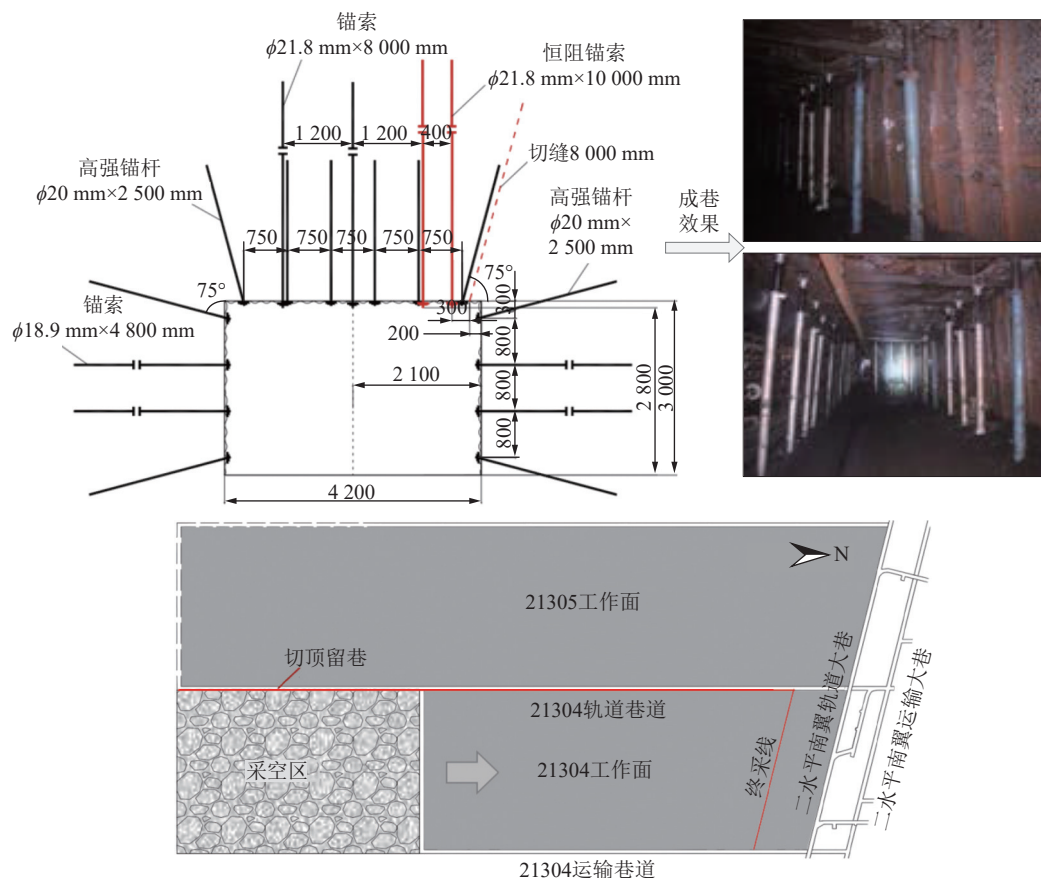
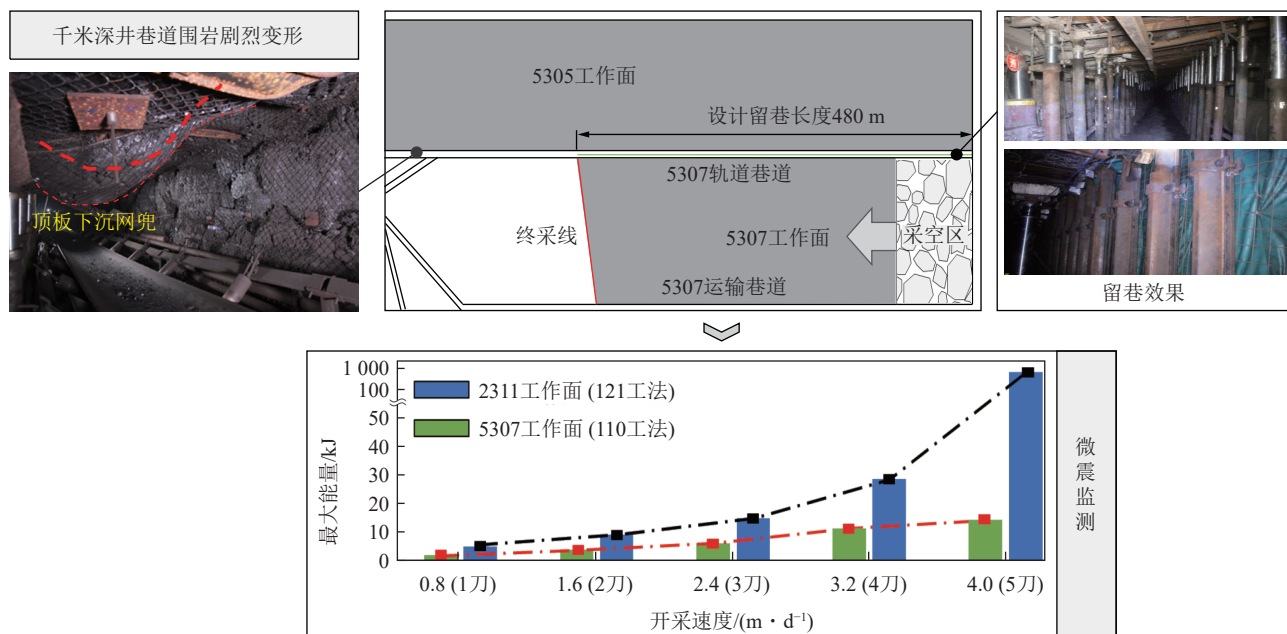
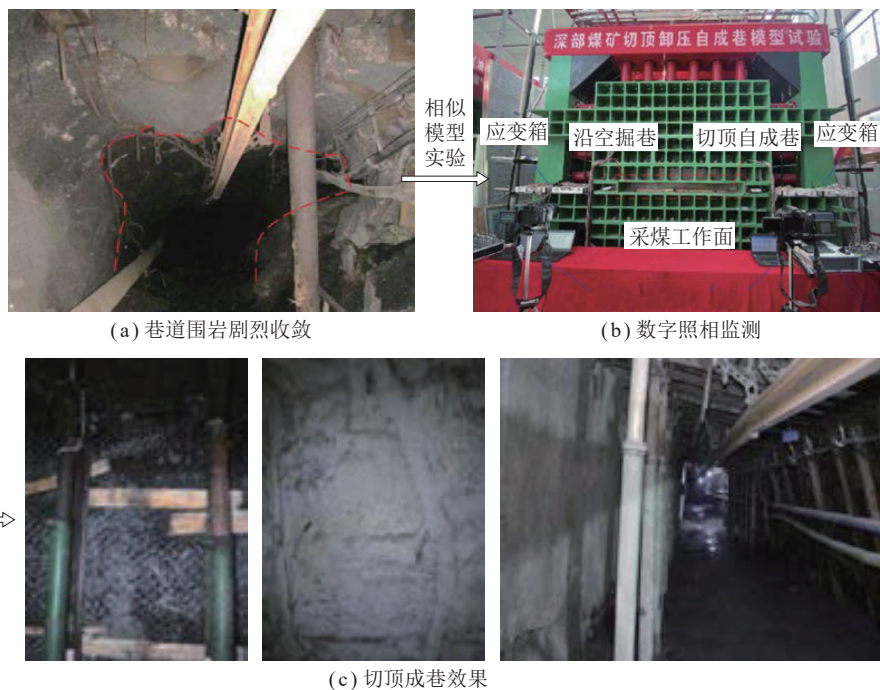


图 11 城郊煤矿 110 工法实践^[55]

Fig.11 Practice of 110 mining method in Chengjiao Coal Mine^[55]

图 12 安居煤矿 110 工法实践^[56]Fig.12 Practice of 110 construction method in Anju Coal Mine^[56]图 13 孙村煤矿 110 工法实践^[58]Fig.13 Practice of 110 mining method in Suncun Coal Mine^[58]

护不仅维护了留巷阶段顶板的稳定性,在巷道复用阶段仍保持较好的支护效果^[60]。

1.3 深部矿井 N00 建井

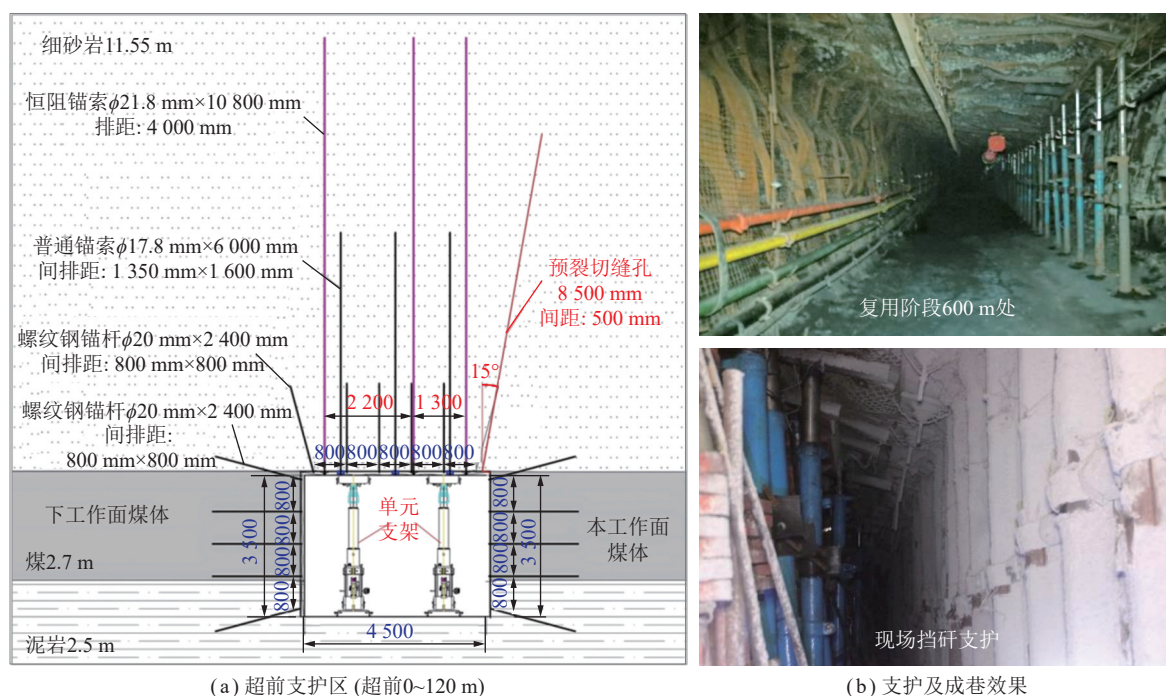
1.3.1 深部非均压建井

在深部复杂的地质力学环境下,地应力场呈现明显的非均匀性,井筒的建设和维护面临较大的挑战。研究发现非均匀压力场是造成井巷支护结构破坏的根本原因,为克服这种非均压状态的影响,提出了“非

均压建井”新模式(σ_1 、 σ_3 为最大、最小主应力)^[17],即在深部环境下提出 2 种模式进行建井,通过对不同井筒工程断面进行非均匀或准均匀的高强预应力恒阻耦合支护,实现井筒围岩应力场的均匀化,从而保障深部井巷工程建设的安全及长期稳定,如图 15 所示。

1.3.2 深部 N00 建井思路

2016 年,提出了长壁开采 N00 工法(1G N00 工法),该方法从巷道布置、工艺体系及配套装备方面革



(a) 超前支护区 (超前0~120 m)

(b) 支护及成巷效果

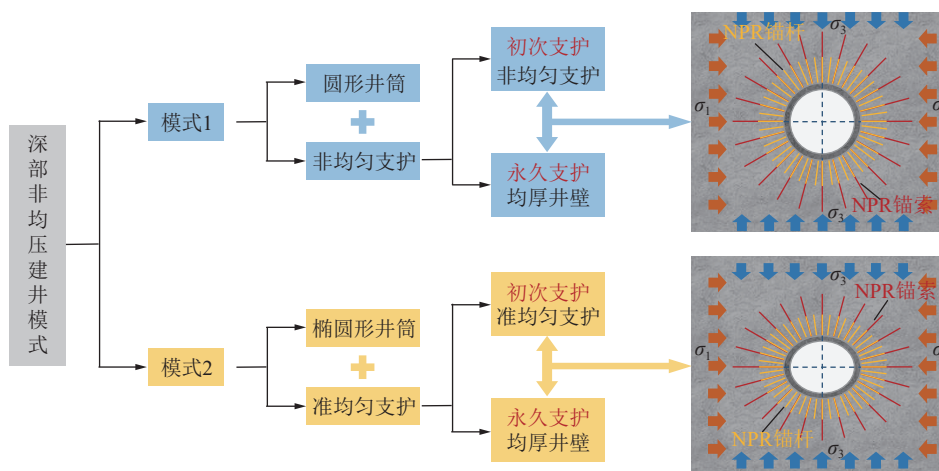
图 14 郭屯煤矿 110 工法实践^[60]Fig.14 Practice of 110 construction method in Guotun Coal Mine^[60]

图 15 深部“非均压建井”模式

Fig.15 “Non-uniform stress field construction” model for deep shaft

新了传统长壁采煤方法,实现了整个采区内多个工作面开采时,无需煤柱留设和新掘巷道的重大升级^[61]。2018年,在1G N00工法基础上,提出了首采工作面双侧切顶成巷模式,无需提前掘进采区边界巷道,构建起整个采区无巷道掘进和无煤柱开采的2G N00工法^[34]。2019年,基于1G、2G N00工法的成功实践,提出了3G N00矿井建设新思路,利用长壁采矿与切顶自成巷技术留设出矿井的运输、通风等准备巷道,简化井底车场,缩短建井周期,取消大巷的掘进与多余煤柱的留设,使得整个矿井的煤炭采出率大幅提高^[32]。三代N00工法的原理如图16所示。

1.3.3 深井提升动力学

在深井建设过程中,保障人员、材料及煤炭的安全顺利提升至至关重要。由于深度增加,深井提升系统的钢丝绳易发生大幅振荡,严重制约了多绳摩擦提升系统在深井井筒的稳定性。为保障深井提升的安全性与稳定性,提出了以深井SAP系统为控制方法的提升新模式^[62],如图17所示。

建立了多元耦合下的SAP提升系统和非光滑动力学模型,得到了多参量作用下系统非线性振荡和非光滑特性^[62]。基于此,研发了SAP提升技术与关键装备,并在现场进行实践,成功解决了铁法煤业深部矿井立井提升中尾绳大摆动、提升容器大振荡的难题。

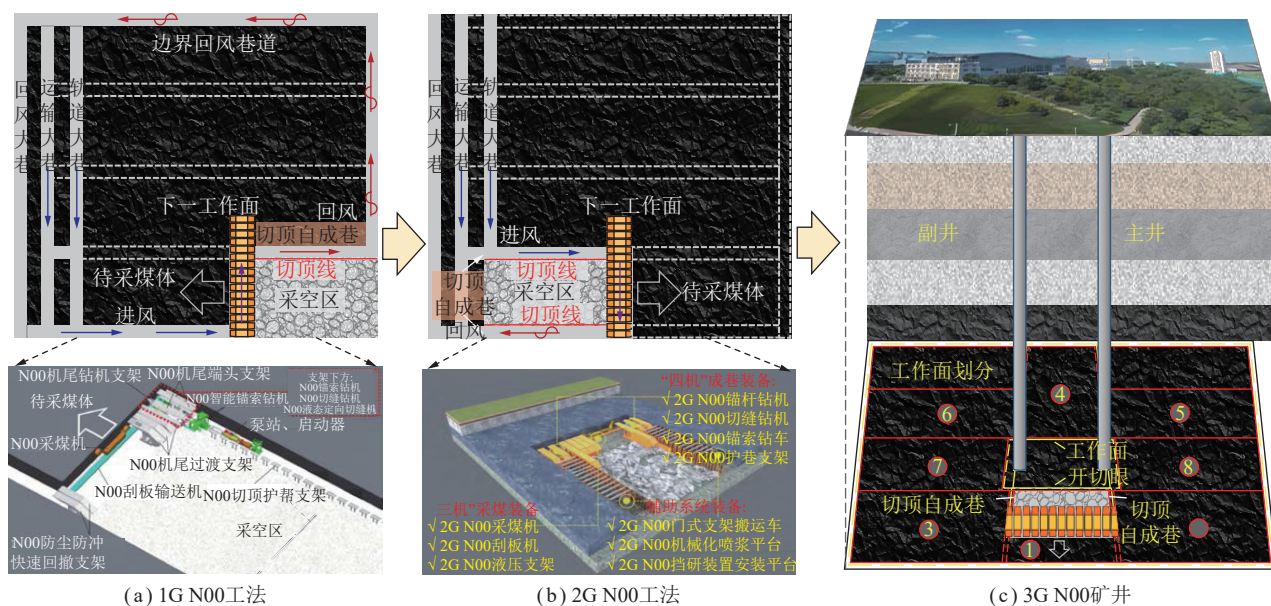


图 16 三代 N00 工法的原理示意

Fig.16 Three generations' layout principle of N00 mining method

2 深部巷道围岩破坏机理与控制技术

2.1 深部软岩大变形机理研究

深部岩层在开挖后发生应力的重分布,岩体在节(层)理结构、高应力、高温高热及渗流作用下软化,造成深部工程面临严峻的软岩大变形问题^[63]。在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体为工程软岩^[64],根据产生显著塑性变形的机制差别,将工程软岩分为4类,如图18所示(图中 σ_c 为岩石的单轴抗压强度)。

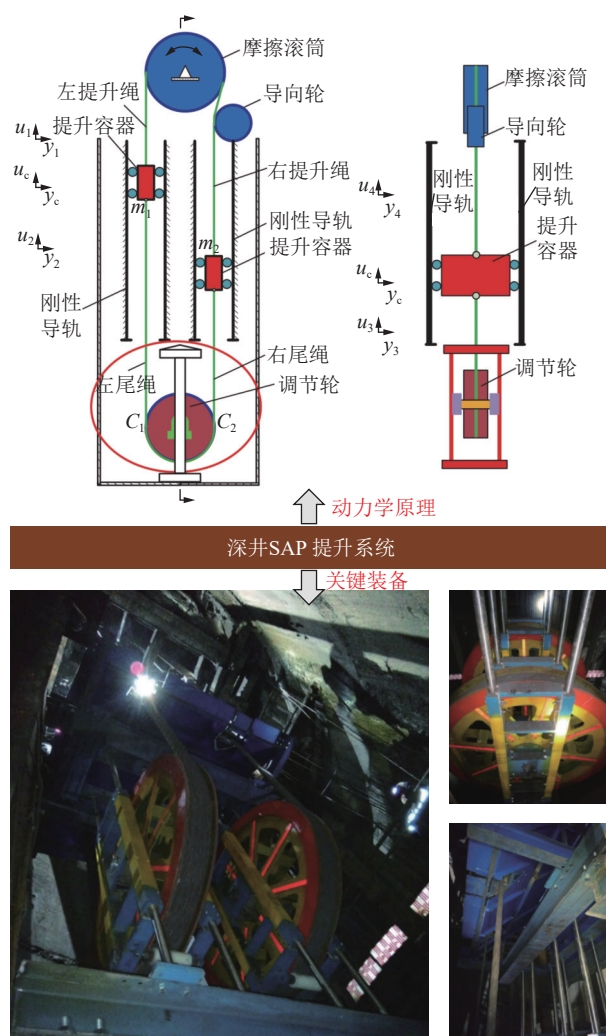
- ① 膨胀性软岩(又称低强度软岩),由于其内黏土矿物滑移和膨胀而产生显著塑性变形;
- ② 高应力软岩,由于其骨架内黏土矿物滑移和扩容而产生整体滑移塑性变形和裂纹扩容;
- ③ 节理化软岩,由于力的作用在结构面处产生滑移和扩容变形;
- ④ 复合型软岩,同时具备以上2种或3种特性的复杂性质软岩^[65]。此分类方法广泛应用于深部沉积岩为主的软岩工程。

2.1.1 深部岩体的吸水软化特性

(1) 深部岩体的吸水实验研究。

深部工程常遇多类型的水源,在水力作用下,岩体吸水膨胀而诱发大变形破坏^[66]。为探究深部特定软岩吸水后岩体力学性质的劣化程度,应用实验室自主研发的水理作用测试系统进行深部岩体的吸水实验,如图19所示。

研究发现,深部环境下,泥岩在吸水后,岩体内部发生泥化现象,从而致使其强度显著降低。通过对深部泥岩岩体进行强度、吸水时间及吸水量的关系实验,得到岩体的吸水特征曲线与强度衰减曲线,量化表征了岩体的吸水软化性质^[67]。

图 17 深井 SAP 提升系统^[62]Fig.17 SAP lifting system for deep shafts^[62]

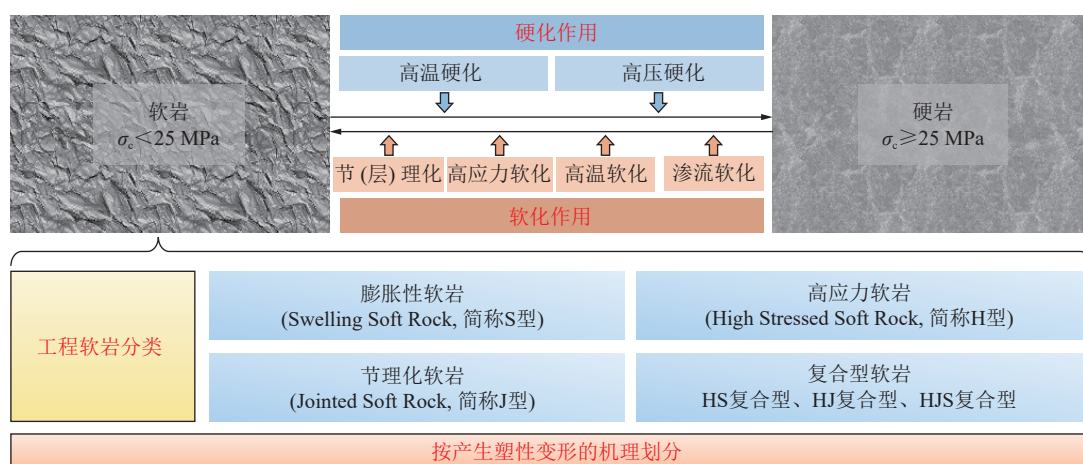
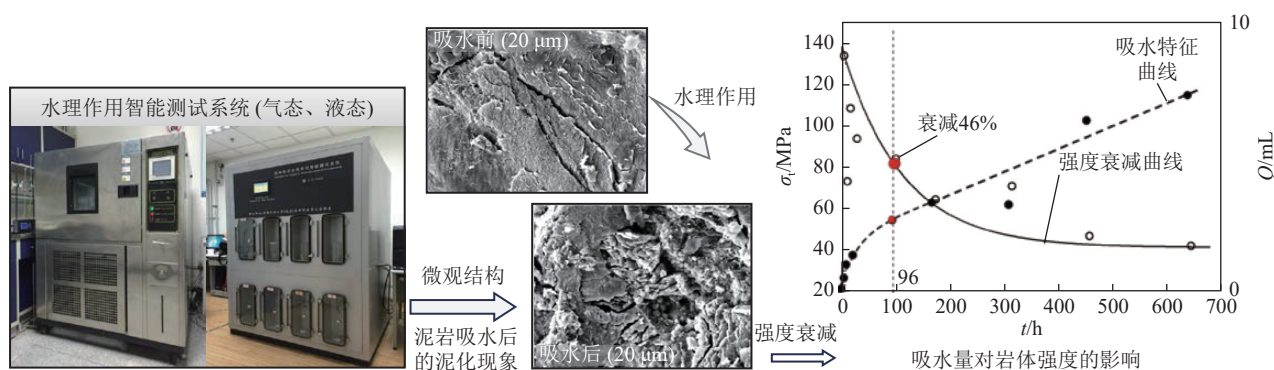


图 18 工程岩体转化与软岩分类

Fig.18 Engineering rock mass transformation and soft rock classification

图 19 深部软岩水理作用实验^[67]Fig.19 Deep soft rock water function experiment^[67]

(2) 软岩吸附膨胀量子力学分析。

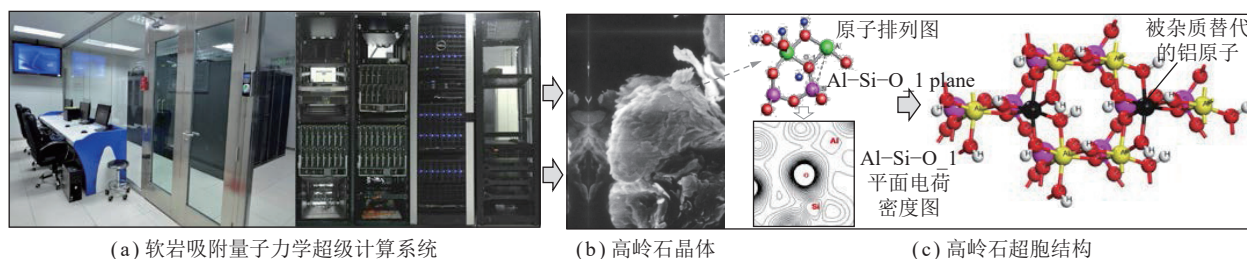
为研究深部软岩吸水膨胀的微观力学机理,引入量子力学第一性原理^[68],建立可进行深部软岩吸附特性分析的量子力学超级计算系统,包含128个刀片服务器系统,计算速度达30万亿次/s,如图20所示。

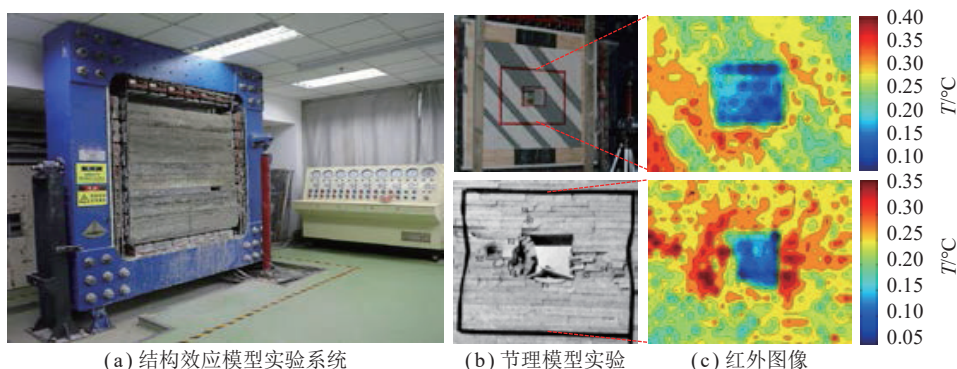
针对深部软岩高岭石进行了吸水大变形分析计算,得到了高岭石晶体图,并利用第一性原理建立了微观晶体结构,揭示了其产生负电性的原因和具有强水分子吸附能量的机理,同时,阐明了吸水膨胀态是由于电荷密度和态密度的改变所致,解释了深部软岩吸水软化膨胀的量子力学机理^[68]。

2.1.2 深部岩体的结构效应

在深部工程中,地质构造类型丰富,巷道围岩常含有多种结构面,在受到深部高应力的作用下往往产生非对称、局部区域明显差异的变形破坏现象。为研究深部含特定类型结构面围岩的变形特征,建立模拟深部应力环境的结构效应模型实验系统,并辅以红外热成像进行能量监测^[69],如图21所示。

深部围岩结构面重构与开挖进程监测是确定围岩非对称破坏关键区域的必要步骤,监测发现围岩变形时在其结构面区域表现出明显的能量差异,得到深部岩体的结构效应是造成围岩局部区域强度降低和

图 20 软岩吸附量子力学分析^[68]Fig.20 Quantum mechanical analysis of soft rock adsorption^[68]

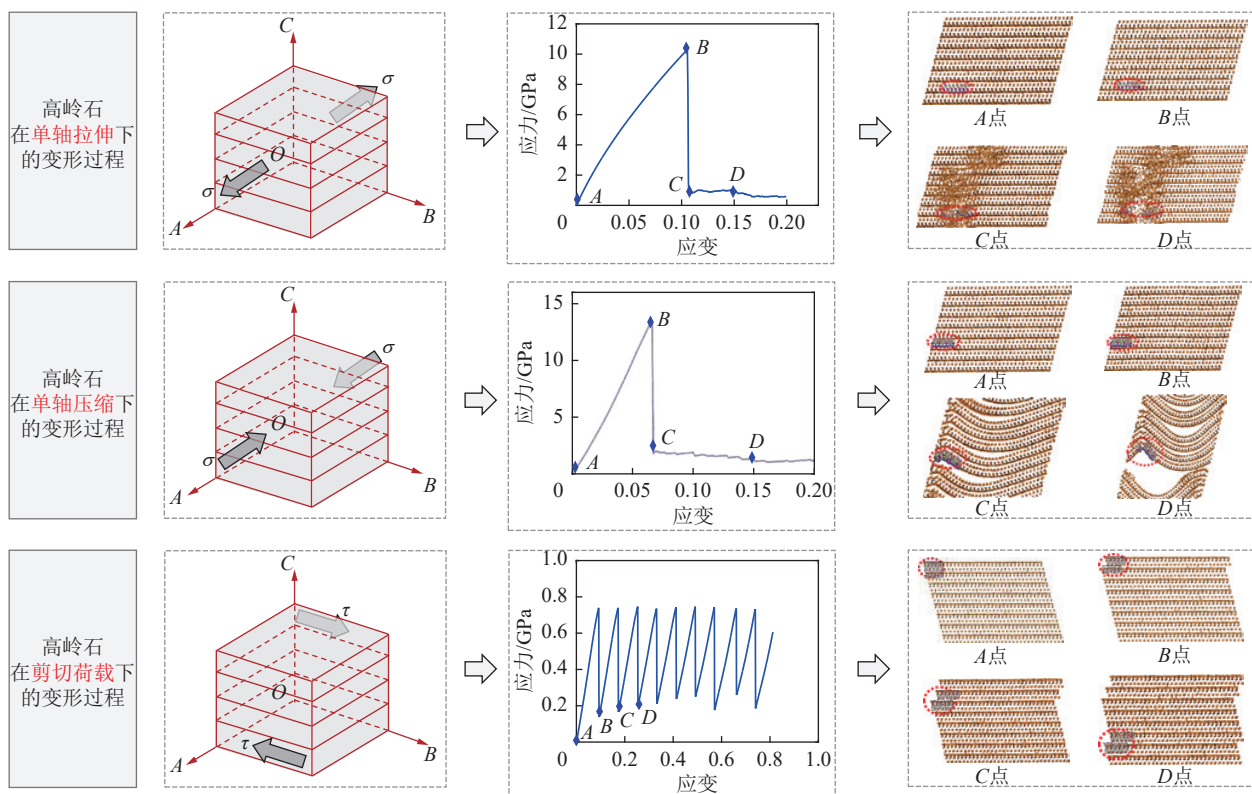
图 21 深部含结构面围岩破坏模型实验^[69]Fig. 21 Failure experiment of deep surrounding rock with structural plane^[69]

发生剧烈非对称变形的主要原因之一^[69]。

2.1.3 深部软岩大变形的微观状态

为从微观上解释深部软岩大变形的机理,采用岩

体微观分子模型中化学键的状态进行阐述。对深部软岩进行单轴拉伸、压缩及剪切状态下分子动力学模拟^[17],得到岩体不同时期化学键的断裂状态,如图 22 所示。

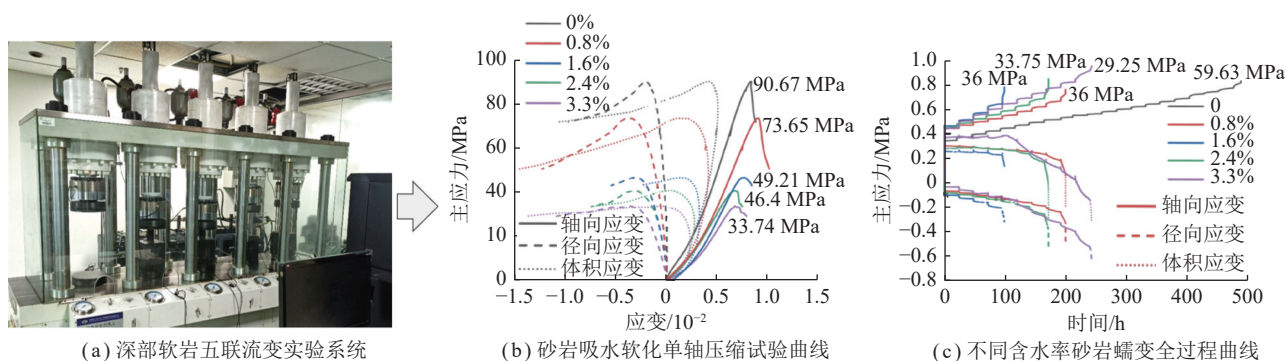
图 22 深部软岩大变形微观机理^[17]Fig. 22 Microscopic mechanism of large deformation of deep soft rock^[17]

选取标准高岭石试样分子模型应力应变曲线的典型位置 A、B、C 及 D 点,得到高岭石微观分子结构模型。由此可知,在由弹性变形转为塑性破坏时,微观结构中不同类型的化学键发生断裂,并随着断裂的加剧,分子模型表现出非线性大变形的特征^[17]。

2.1.4 深部岩体多场耦合力学特性

为研究深部岩体在多场耦合环境下的力学特性,

建立了深部软岩五联流变实验系统,该系统可实现多场耦合、可 5 个试件同时加载、具备自动化微控伺服系统、加热快且保温好、兼顾瞬态岩石力学试验与长时间流变试验,如图 23 所示。其中,图 23(b) 的 0、0.8%、1.6%、2.4%、3.3% 为实验中砂岩的含水率;图 23(b)、(c) 中轴向应变、径向应变、体积应变对应图中的不同线型,0、0.8%、1.6%、2.4%、3.30% 对应两图中

图23 五联流变实验系统与实验分析^[70]Fig.23 Five-joint rheological experimental system and experimental analysis^[70]

不同曲线的颜色。

对深部地层的砂岩进行流固耦合蠕变实验, 分析可得含水率越高, 单轴抗压强度越低; 观测峰后阶段可知, 含水率较低时, 表现出脆性, 含水率较高时, 脆性下降表现为塑性。此外, 根据砂岩蠕变全过程曲线, 蠕变破坏总时间受含水率的影响明显, 干燥状态时蠕变破坏总时间最长^[70]。

2.2 深部岩体冲击动力学研究

深部岩体工程中常遇到岩爆等冲击动力灾害^[71]。深部开采过程中, 脆性岩体在深部“三高一扰动”的环境下向延性转化, 开挖卸荷后又转向脆化, 在能量急剧变化的过程中易发生冲击动力事故^[2-3]。随着深部开采冲击动力灾害频发, 众多学者在冲击动力学基础理论、防治技术和监测预警方面取得了诸多进展^[72-75]。

2.2.1 深部岩体岩爆发生机理

在深部岩层中进行巷道开挖后, 围岩自由面附近岩体的径向应力立即减小为0, 切向应力逐渐集中, 围岩的三维应力状态近似为二维应力状态, 如图24所示。在深部高初始地应力作用下, 随着岩石卸荷, 岩石的最大主应力 σ_{1c} 远远超过没有侧向约束时的岩石强度 σ_c , 从而产生瞬时岩爆; 在低初始地应力下, 卸荷

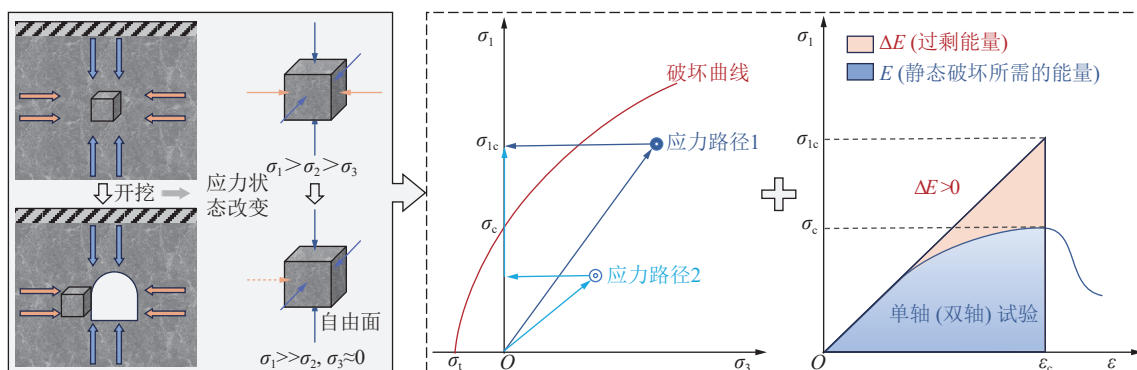
不会引起岩石破坏, 岩爆发生在应力调整和集中过程中, 即为工程中的延迟岩爆^[76]。

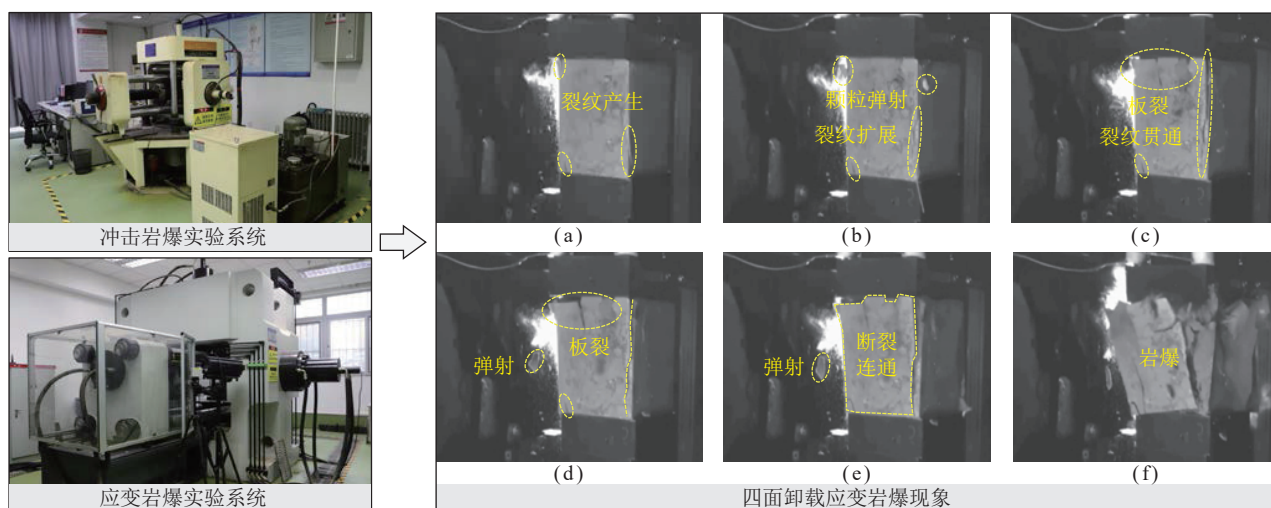
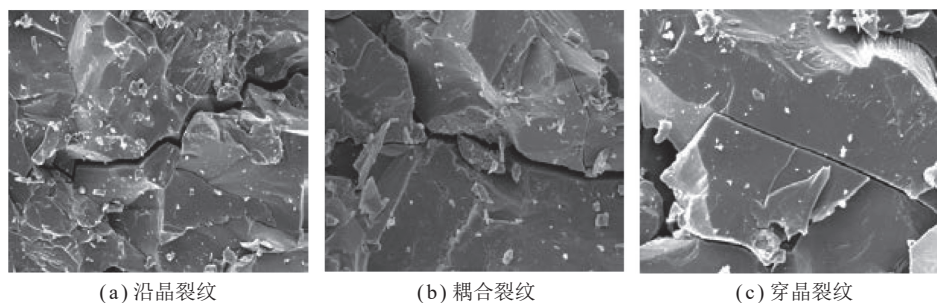
三维应力状态下储存的能量大于单轴应力状态下静态破坏所需的能量, 过剩能量 ΔE 将主要转化为岩爆动能, HU等^[76]提出了 $\Delta E > 0$ 作为岩爆判据, 该准则将岩爆视为一种工程破坏, 认为岩爆过程中的动能释放不同于常规单轴(或双轴)载荷条件下的脆性破裂。

2.2.2 深部岩体岩爆机理实验研究

为研究深部开采过程高应力场作用下巷道围岩体的岩爆机理, 自主研发了冲击岩爆实验系统和应变岩爆实验系统, 可实现冲击诱发型岩体岩爆实验和多面卸载应变型岩爆实验, 该实验系统再现了多种类型岩体的岩爆过程^[76-77], 图25为四面卸载应变岩爆现象的全过程。

岩体在岩爆各个阶段中发育多种内部裂纹, 通过SEM可观测到典型裂纹特征, 如图26所示。以砂岩为例, 得到砂岩岩爆各阶段的裂纹特征^[78]。在卸载阶段, 表现出大量沿晶、张裂纹, 释放能量特征为中—高; 在岩爆前阶段, 表现出各种类型的耦合裂纹, 释放能量特征为中—低; 在岩爆阶段, 表现出沿晶及穿晶剪切裂纹, 释放能量特征为高; 在岩爆后阶段, 表现出张性沿晶裂纹, 释放能量特征为低—中。

图24 应变岩爆的力学机理^[76]Fig.24 Mechanical mechanism of strainburst^[76]

图 25 深部岩体岩爆机理实验系统^[77]Fig.25 Experimental system of rock burst mechanism in deep rock mass^[77]图 26 岩爆过程中的裂纹特征^[78]Fig.26 Crack characteristics in the process of rock burst^[78]

研究表明,岩爆为岩体中能量沿着开挖临空面瞬间释放的非线性动力学现象,即单元岩体中积聚的弹性应变能超过单元岩体单轴破坏能量值时,易引发岩体岩爆,而岩爆的强度决定于高应力岩体压缩弹性能,岩爆模式受结构面产状控制^[79]。根据岩爆发生时的力学状态可分为应变岩爆和冲击岩爆,前者常发生在深部开挖工程中,而后者常发生在深部开挖工程后^[79]。

2.3 深部巷道开挖补偿支护理论

为建立适应深部开采过程中巷道围岩的支护方法,经过长期对深部巷道围岩控制技术的探究,认为深部工程开挖卸荷效应是引发巷道围岩非线性大变形的关键。基于此,提出适用于深部巷道的开挖补偿支护理论^[80,82],即以恢复围岩在开挖扰动前的三维应力状态为核心理念,及时采用高预紧力支护策略,充分调动深部岩体强度,使开挖后的围岩应力得到及时有效的应力补偿,以实现深部巷道围岩变形的有效控制,其原理如图 27 所示。

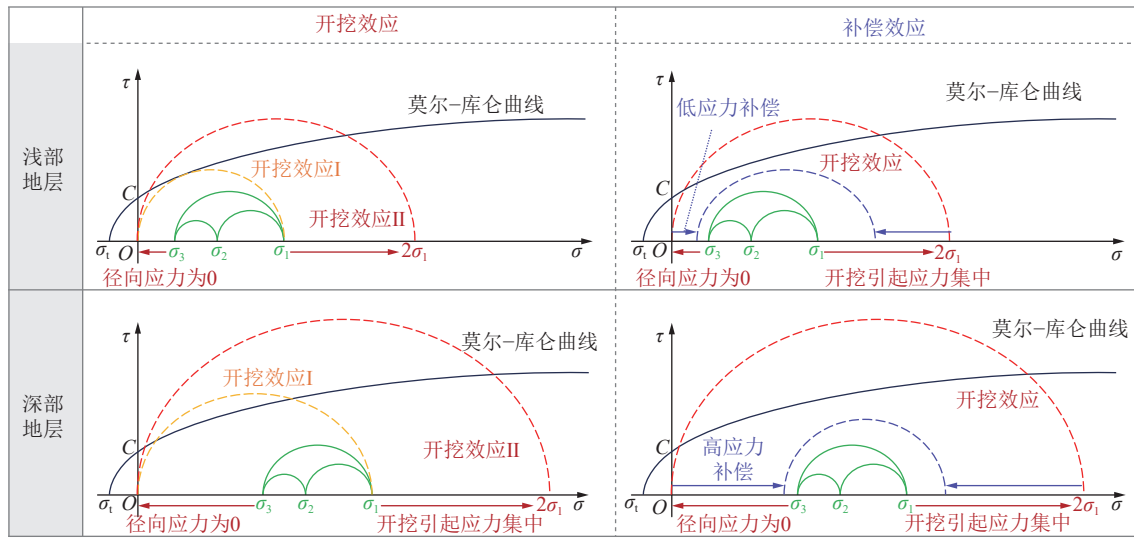
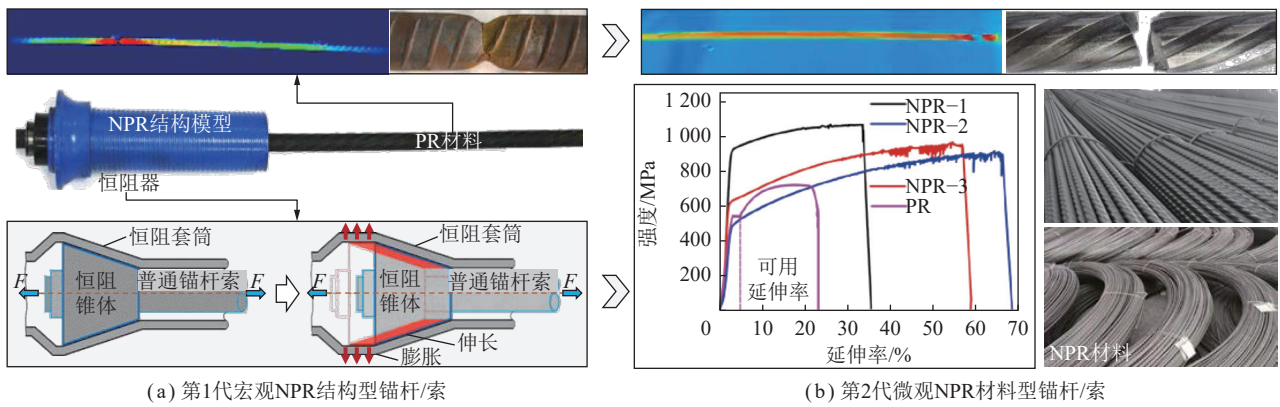
巷道开挖后,围岩在临空一侧卸荷,径向应力 σ_3 变为 0,称为开挖效应 I;同时,开挖亦会引起围岩的应力集中,切向应力 σ_1 几乎增加一倍,称为开挖效应

II^[81]。在浅部工程中,开挖卸荷后岩体的径向应力 σ_3 为 0,莫尔圆未超过莫尔-库仑破坏包络线,但由于 σ_1 的应力集中效应,莫尔圆超过莫尔-库仑破坏包络线,岩体发生破坏。此时,可以施加较低的预应力来补偿径向应力 σ_3 的损失,应力补偿的结果减小了切向应力 σ_1 的集中,从而保证了围岩的稳定性。在深部工程中,开挖卸荷后岩体的径向应力 σ_3 为 0,但由于深部地应力较高,岩体发生破坏,而且应力集中效应更强,导致莫尔圆远超过破坏包络线,岩体会发生突然破坏。因此,必须对岩体进行高预应力补偿,使径向应力 σ_3 尽可能恢复到原始应力,并显著降低切向应力 σ_1 的集中,以保证岩体的稳定。

2.4 NPR 高预应力补偿支护技术

2.4.1 NPR 支护材料及技术

深部开采工程中的巷道非线性大变形破坏及动力冲击问题需要适应大变形的支护材料进行解决。第 1 代宏观 NPR 结构型锚杆(索),利用恒阻结构实现了适应围岩大变形的恒阻支护,形成了 NPR 锚网索高预应力补偿支护技术,恒阻值可达 350 kN。2014 年,团队提出并成功研制了第 2 代微观 NPR 材料型锚杆(索)^[83-85]。2 代 NPR 支护体如图 28 所示。

图 27 巷道的开挖补偿支护理论模型^[81]Fig.27 Excavation compensation support theory of roadway^[81]图 28 两代 NPR 支护结构和材料^[84]Fig.28 Two generations of NPR supporting structure and materials^[84]

NPR 锚杆(索)通过结构及材料实现 NPR 效应,达到了恒定阻力下拉而不断的材料变形目标,解决了深部岩体大变形灾害控制受制于传统 PR 材料抵抗变形能力不足的难题。深部开采工程中产生的软岩大变形、非对称局部强变形、围岩强流变、岩爆冲击动力行为等可利用 NPR 材料进行控制。

2.4.2 深部 NPR 吸能支护与防冲试验

在深部矿井中,巷道围岩的大变形、塌方及岩爆等问题的本质是围岩体能量的释放,对围岩的有效控制需要支护体具备吸能特性,以抵御围岩的冲击释能。

(1) 深部 NPR 吸能计算。单元岩体岩爆释放能量^[79],可表示为

$$\Delta E = E(\sigma_{1c}) - E(\sigma_c) = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} - \sigma_c)\varepsilon_c > 0 \quad (6)$$

式中, ΔE 为围岩单元体岩爆释放能量; $E(\sigma_c)$ 、 σ_c 、 ε_c 分别为岩体单轴压缩破坏能量值、单轴破坏峰值强度及

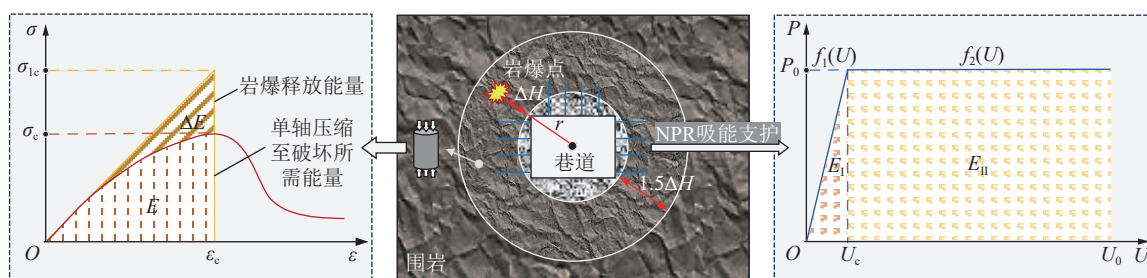
破坏时最大应变; $E(\sigma_{1c})$ 、 σ_{1c} 分别为岩爆发生时刻的能量和最大主应力。

NPR 锚杆(索)经室内性能测试,在动力冲击下可实现高恒阻和高延伸,适应深部开采工程围岩的冲击,围岩岩爆与 NPR 吸能支护如图 29 所示。

设深部开采巷道外接圆的直径为 r ,围岩发生冲击灾害的地点距离最近临空面的距离为 ΔH 。由于深井的地质环境复杂,取岩爆控制区计算深度为 1.5 倍的实际发生最大深度,此时岩爆释放总能量 E_T ^[79] 为

$$E_T = \int_0^{\Omega} f(v)dv = \frac{1}{2}v(\sigma_{1c} - \sigma_c)\varepsilon_c \Big|_0^{\Omega} = \frac{2}{3}\pi(\sigma_{1c} - \sigma_c)\varepsilon_c \left[(r + 1.5\Delta H)^3 - r^3 \right] = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} - \sigma_c)\varepsilon_c \left\{ \frac{4}{3}\pi \left[(r + 1.5\Delta H)^3 - r^3 \right] \right\} \quad (7)$$

其中, $f(v)$ 为围岩单元体岩爆能量函数; v 为函数自变量; Ω 为岩爆控制区面积。在室内岩爆实验中,根据

图 29 围岩岩爆与 NPR 吸能支护^[79]Fig.29 Surrounding rock rockburst and NPR energy absorption support^[79]

准 REV 单元的概念,采用 150 mm×60 mm×30 mm 的岩样进行实验可基本符合工程岩体的 REV 单元尺寸要求,获得 REV 岩爆能量进而计算得到岩爆释放总能量^[79, 84]。

采用理想弹塑性曲线计算 NPR 锚杆(索)的能量吸收能力,则其总吸收能量 E_S 包括弹性阶段吸能 E_I 和塑性阶段吸能 E_{II} ,其表达式^[79]为

$$\begin{cases} E_S = E_I + E_{II} \\ E_I = \frac{1}{2}kU_c^2 = \frac{1}{2}P_0U_c \quad (U \leq U_c) \\ E_{II} = P_0\Delta U = P_0(U_0 - U_c) \quad (U_c \leq U \leq U_0) \end{cases} \quad (8)$$

其中, U_c 为 NPR 锚杆(索)弹性变形长度; U_0 为 NPR 锚杆(索)总变形长度。得到总吸能 E_S ^[79]为

$$E_S = \frac{1}{2}P_0(2U_0 - U_c) \quad (9)$$

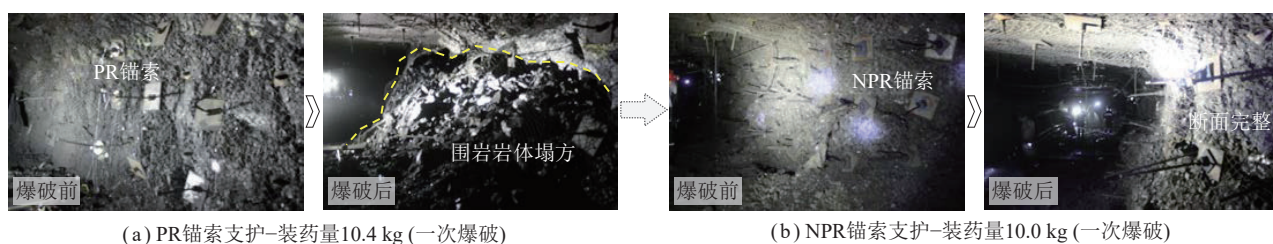
基于深部巷道围岩岩爆总释能 E_T 和单根 NPR 锚杆(索)总吸能 E_S ,可算得围岩支护所需要的 NPR

锚杆(索)数量 n ^[79]为

$$n = \frac{E_T}{E_S} = \frac{\frac{2}{3}\pi(\sigma_{1c} - \sigma_c)\varepsilon_c \left[(r + 1.5\Delta H)^3 - r^3 \right]}{\frac{1}{2}P_0(2U_0 - U_c)} \quad (10)$$

(2) 深部 NPR 支护防冲试验。为有效验证深部工程 NPR 支护的防冲性能,在埋深 780 m 且冲击动力灾害多发的红阳三矿进行了 NPR 支护防冲抗爆试验^[51],如图 30 所示。

设置爆破冲击对比段,装药量控制在 10 kg 左右,对比普通 PR 锚索支护和 NPR 锚索支护的防冲效果。试验发现,在普通 PR 锚索支护区域,炸药爆破致使围岩发生坍塌,帮部锚索出现拉出、拉断失效现象;而 NPR 锚索支护区域的围岩完整,同时,恒阻器明显内缩,实现恒阻吸能。现场试验进一步验证了 NPR 支护可适用于深部巷道冲击灾害的防控。



(a) PR 锚索支护—装药量 10.4 kg (一次爆破)

(b) NPR 锚索支护—装药量 10.0 kg (一次爆破)

图 30 现场 NPR 支护防冲试验^[51]Fig.30 On-site NPR support anti-impact test^[51]

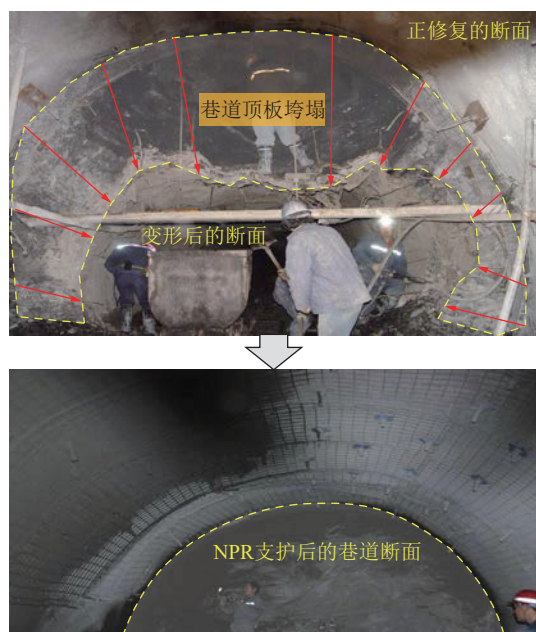
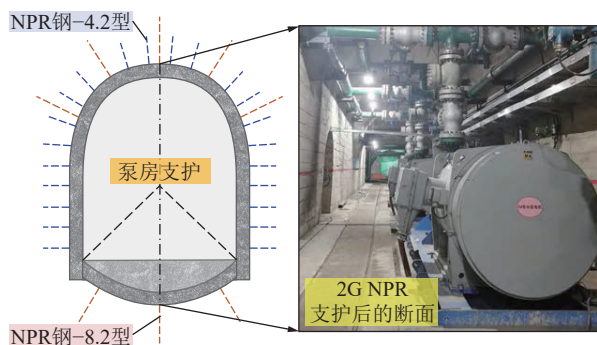
2.4.3 深部巷道 NPR 支护应用实例

(1) 深井软岩剧烈变形巷道支护。新安矿煤层埋深达 1 155 m,其井底车场巷道围岩多含膨胀性矿物,展现出深部软岩的主要特征。在深部复杂地质环境下,巷道出现非线性大变形破坏,且变形非对称性明显,突出特点是顶板的强烈垮塌,如图 31 所示。

通过考察巷道地质情况 and 研究变形特征,提出适用新安矿中生代极软岩煤系地层巷道的 NPR 耦合支护方法,即以 NPR 锚杆+钢带+底角注浆锚杆的耦合

支护设计^[52]。经现场监测表明,NPR 耦合支护方案有效控制了软岩顶板坍塌与强烈底鼓,实现了深部软岩剧烈变形巷道的成功控制。

(2) 千米深井大变形硐室 2G NPR 支护。深部大断面软岩巷道由于其结构属性和围岩特性的共同作用,易发生大变形而常需扩刷、返修。万福煤矿千米深井的泵房巷道,在深部高应力环境下发生顶板多向开裂、底板局部崩裂的劣化现象。为实现千米深井大变形巷道的长期支护稳定,应用 2G NPR 钢材料进行支护^[86],如图 32 所示。

图 31 深部剧烈变形巷道 NPR 支护^[52]Fig.31 Deep severe deformation roadway NPR support^[52]图 32 千米深井大变形硐室 2G NPR 支护^[86]Fig.32 2G NPR support for large deformation chamber in 1 000 m deep mine^[86]

该泵房设计长、短 NPR 钢锚索联合支护,以 4 200 mm 长度、800 mm 间距的微观 NPR 钢 4.2 型恒阻短锚索联合 8 200 mm 长度、1 600 mm 间距的微观 NPR 钢 8.2 型恒阻锚索联合支护^[86]。经现场监测可知,支护后顶板位移量以及左右帮的收缩量均在 80 mm 左右,验证

了 2G NPR 材料对深井巷道大变形围岩支护的有效性。

3 深部岩体热力学与热能利用

3.1 岩石热力学效应

对于作业人员而言,深部开采面临的直接问题是高温高湿的作业环境。目前,我国兖州、淮南、平顶山等矿区的部分深部工作面正面临着严峻的热害影响^[79]。深部高地温的环境将劣化围岩力学性质、危害作业人员健康,造成支护结构和设备的不稳定。为研究深部高温岩体的力学性质,建立了深部岩石热力学实验系统^[87],如图 33 所示。

依托温度压力耦合作用力学实验系统、水热运移宏观特性实验系统、深部软岩五联高温流变实验系统及湿热环境软岩吸附气体实验系统,得到了深部高温高湿环境对多种岩体的影响规律。基于研究成果,提出将降温除湿作为控制深部工程岩体大变形的措施之一^[87]。

3.1.1 深部高温岩体的力学性质

应用自主研发的深部煤岩温压耦合实验系统,对不同层理角度下的软岩进行了温压耦合力学实验,得到泥岩在温压耦合作用下的应力应变曲线、峰值应力关系、峰值应变关系及弹性模量关系^[88],如图 34 所示。

实验研究发现,不同层理角度的泥岩在高温环境下均出现峰值应力、峰值应变和弹性模量的降低,验证了深地高温环境将弱化软岩的岩石力学参数而使其性质劣化^[88]。因此,深部高温高压环境下,软岩的非线性大变形显现为在温度场和压力场共同作用下强度的减弱。

3.1.2 深部开采的热害影响

深部高温气体环境以高温岩体和高温涌水为主要热源,对深部开采的围岩性质、工人作业环境及支护结构 3 个主要方面产生劣化影响^[88-89],如图 35 所示。

对于深部围岩,深部开采的热害将加剧围岩的非线性大变形,影响围岩的稳定性,同时,高温增加气体流速,将诱发煤体处于吸附态的瓦斯溢出。对于作业

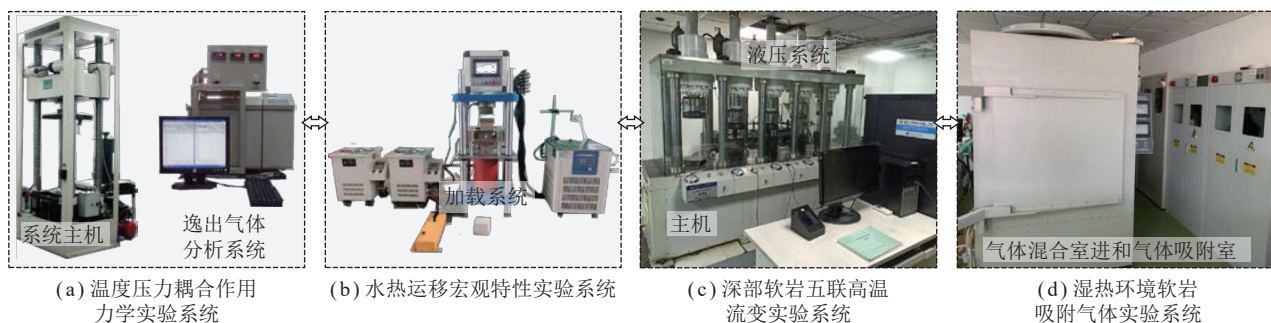


图 33 深部岩石热力学实验系统

Fig.33 Experimental research system of deep rock thermodynamics

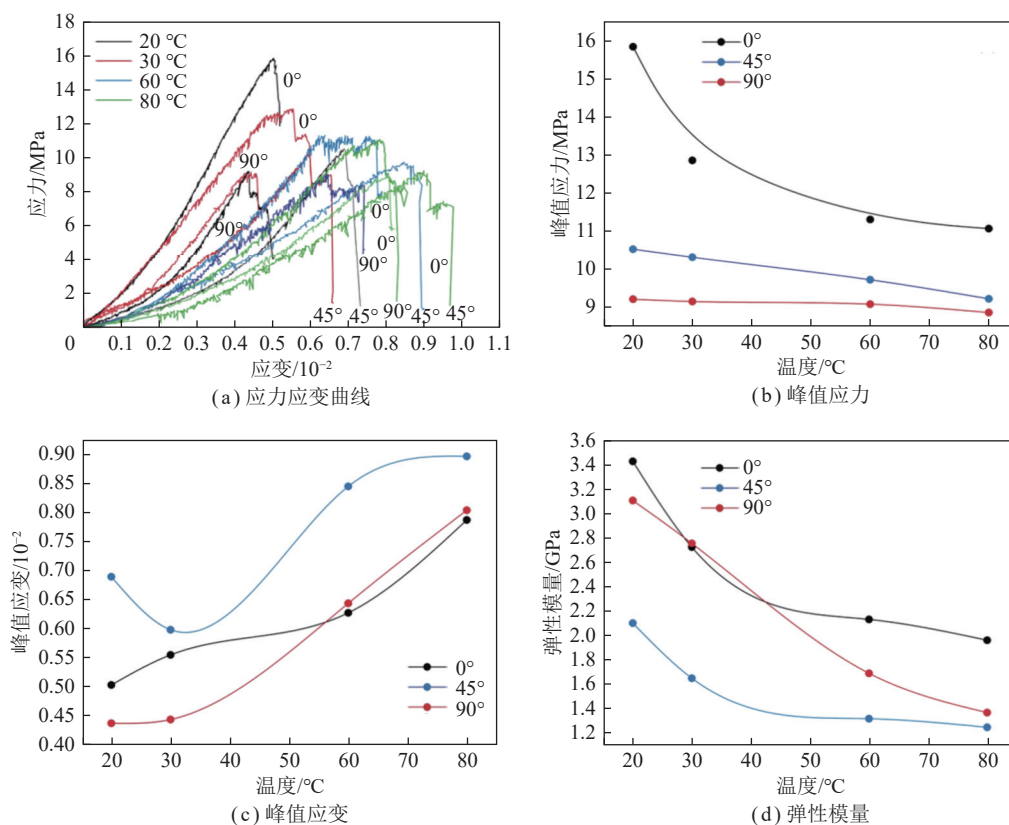
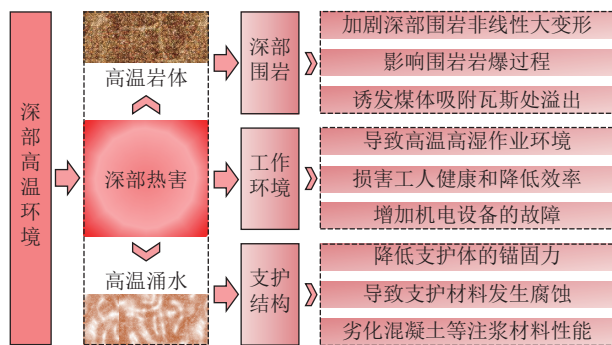
图 34 不同层理角度泥岩在不同温度下的力学性质^[88]Fig.34 Mechanical properties of mudstone with different bedding angles at different temperatures^[88]

图 35 深部开采的热害影响

Fig.35 Heat damage effect of deep mining

环境,最明显是产生高温高湿的空气环境,致使作业人员的健康无法保障,从而降低开采效率。此外,机电设备的正常运转亦会受温度影响。对于支护结构,高温岩壁降低树脂药卷的附着力,高温高湿环境引发支护材料的锈蚀,减弱支护体的有效锚固力。同时,高温高湿环境还会影响注浆、充填材料的凝固和性能,造成整个支护结构的劣化。

3.2 深井温控技术

在受热害影响的深部矿井工作面中,根据冷源是否为人造或引导,将实现作业环境温度控制的技术分为非人工制造冷源降温技术和人工制造冷源降温技术^[88]。

3.2.1 非人工制冷降温技术

应用非人工制造冷源为矿井降温的方式,适用于井下实际温度对生产影响较小的情况,根据降温对象可分为热源控制技术、热湿环境调控技术及个体防护技术,如图 36 所示。

控制矿井的发热来源,可通过减少氧化放热、机械放热和压风管道升温,而热岩、热水型来源需要针对性设计隔热层等方式控制。调控矿井的热湿环境,采取改进通风方式、避开局部热源、增加风量和预冷风量的方法。个体的降温措施主要以冷却服为主,包括固、液和气态度介质型与混合型。而对于深部强热害的矿井,非人工降温技术的作用受限。

3.2.2 人工制冷降温技术

深部热害影响剧烈的工作面亟需人工制冷进行降温,根据矿井人工降温系统对井下输送制冷介质的不同,将降温技术分为气冷式、冰冷式和水冷式三大类,如图 37 所示。

气冷式制冷降温系统是通过地表压缩空气成高温高压的液态,然后流入冷气器冷却成常温高压的液态,以液态的形式运送到井下,在井下膨胀机转化为低温空气后即可将冷量送至工作面。冰冷式制冷降温系统同样在地表进行制冰,制取冰或者冰水混合物,由风力或水力输送至井下融冰池,在此处发生相变成

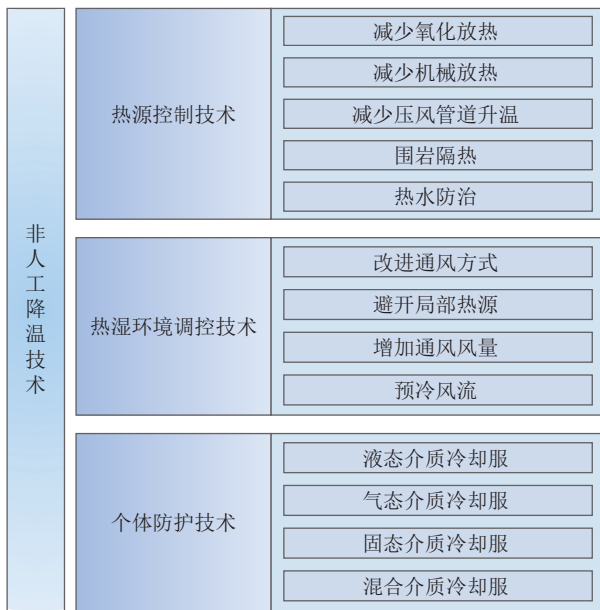


图 36 非人工降温技术

Fig.36 Non-artificial cooling technology

低温冷水, 即可送至工作面空冷器或喷雾系统降温。气冷式和冰冷式投资较高, 气冷式冷量损失多, 适用于需冷量不大的小型矿井或仅局部区域降温的矿井; 冰冷式会产生大量废水, 适用于深埋且需冷量大矿井。

水冷式制冷降温系统包括地面集中制冷系统、回风排热井下集中制冷系统、地面排热井下集中制冷系统和深井热害资源化利用系统^[87-88]。地面集中制冷主要依靠地面布置制冷机组将冷水送至井下至工作面, 对于深部矿井, 其冷量损失较大, 故其适用于浅部

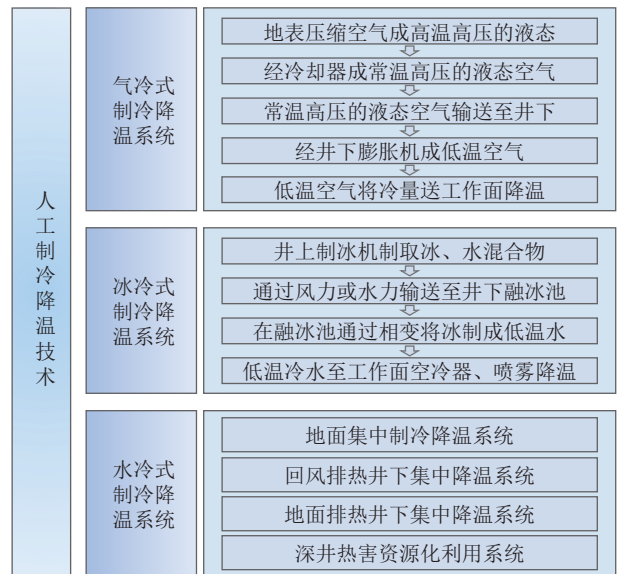


图 37 人工制冷降温技术

Fig.37 Artificial refrigeration cooling technology

矿井的热害治理。回风排热井下集中降温将制冷机组移至井下, 但仅依靠矿井回风排热困难, 故其适用于回风温度低或局部制冷降温的工作面。地面排热井下集中降温系统的制冷机组同样在井下, 不同的是其设置地面冷却塔排放冷凝热, 但深部矿井同样会造成冷却水段的冷量损伤增大, 故其适用于需冷量不大或浅部矿井。深井热害资源化利用系统即为所提出的深部热害治理与热能综合利用系统 (High Temperature Exchange Machinery System, HEMS)^[26, 87-88], 其原理如图 38 所示。

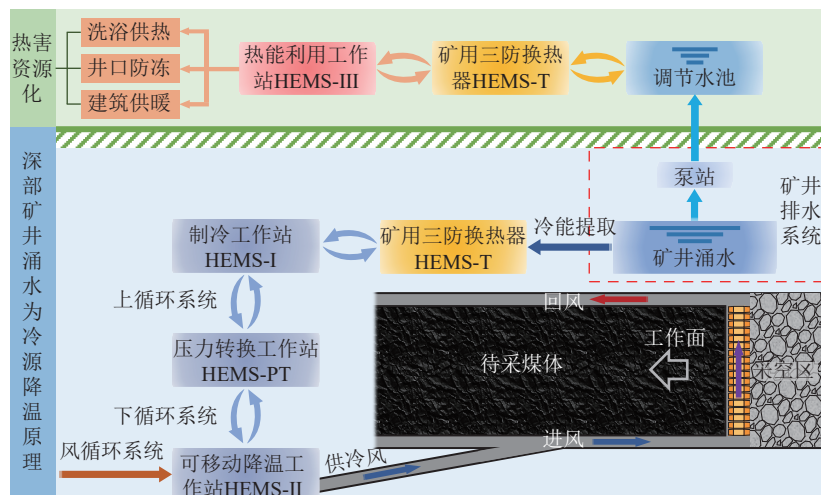


图 38 HEMS 作用原理

Fig.38 Principle of HEMS

根据矿井实际涌水情况, 设置冷量提取系统提取涌水冷量, 使得冷量与工作面高温气体进行换热作用, 同时, 利用矿井涌水作为介质将工作面热害转换为热能至井上, 以此替代燃煤锅炉实现供热。HEMS 实现

了深部开采热害资源化, 强调改善井下高温环境和提取热能加以利用应同时进行, 并在矿井水热能、回风热能和围岩热能的利用上取得了多项进展, 此方法在矿井涌水充足的深部高温矿井应用前景广阔。

3.3 深部矿井 HEMS 应用实例

徐州矿区是典型的深部开采受强热害影响的矿区,其下属的张双楼煤矿、张小楼煤矿、三河尖煤矿等矿井的工作面温度超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且湿度较大,是典型的深部高温高湿高压矿井,在应用 HEMS 进行矿井热害治理和热能利用后取得了显著的效果。

(1) 张双楼煤矿。

通过现场地质调研和监测获取张双楼矿的水文条件以进行冷源分析^[87,90],计算得到该矿实现全工作面的降温需要冷源约 8 MW ,分析其矿井涌水可提供 15 MW 冷源,故选择矿井涌水作为冷源,建立张双楼煤矿的 HEMS,如图 39(a) 所示。

经过现场 HEMS 的热力学平衡参数试验,确定张双楼煤矿矿井涌水的水温在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最优。此时,制冷

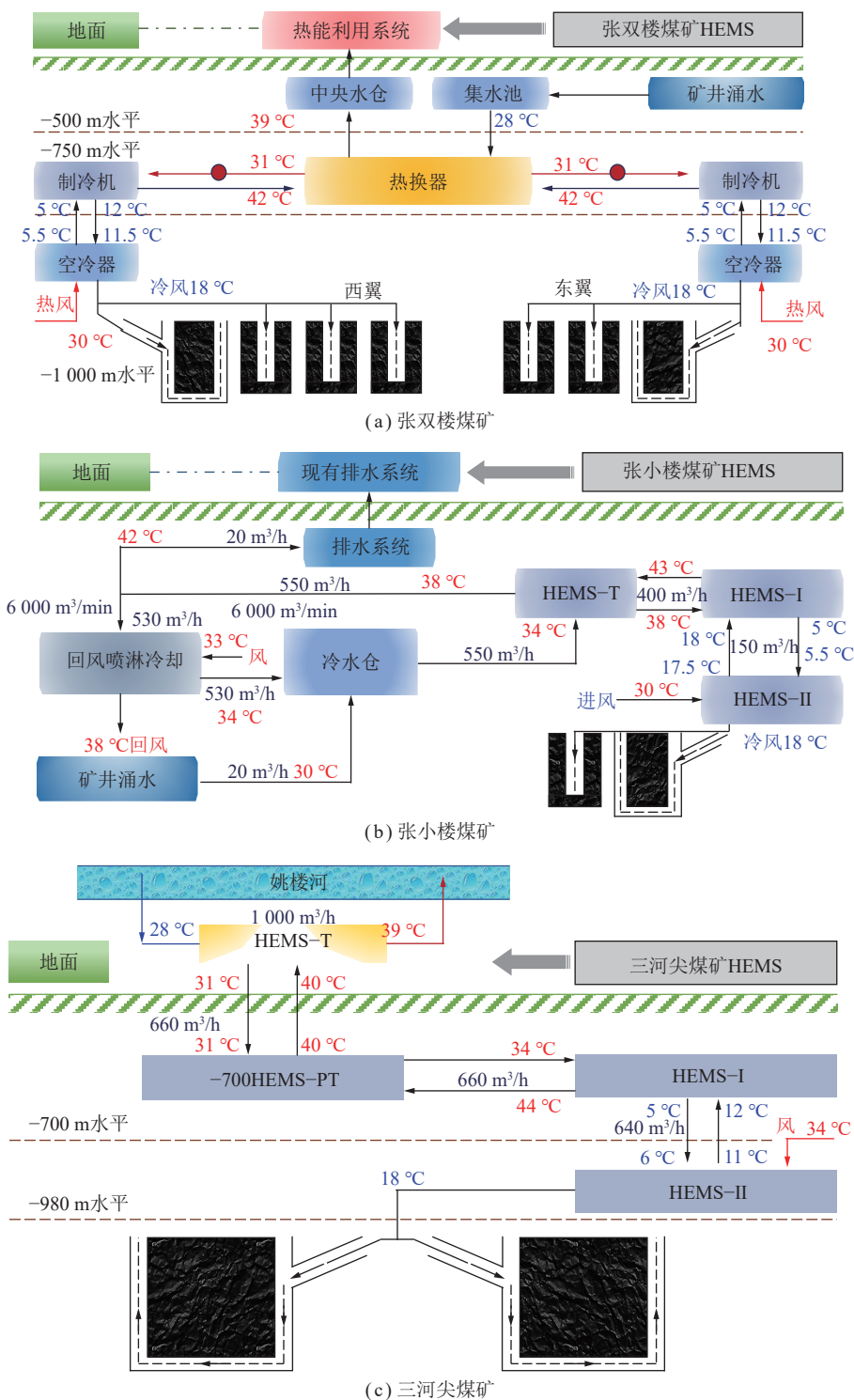


图 39 3 个煤矿的降温系统

Fig.39 Cooling system of three coal mines

机将产生 5 ℃ 的冷源于工作面进行降温,将工作面原本 30 ℃ 的进风温度控制在 18 ℃ 左右,起到显著的降温效果。

(2) 张小楼煤矿。

对张小楼煤矿的水文地质调研,掌握其冷源供给潜在量和矿井降温所需冷源量^[87, 90]。通过计算得到矿井降温需要冷源约 4 MW,而其矿井涌水仅可提供 280 kW,但其矿井回风所蕴含冷源量 4 MW。结合张小楼煤矿的地热特征和冷源状况,确定以矿井涌水和矿井回风共同作为冷源,建立张小楼煤矿的 HEMS,如图 39(b) 所示。

在现场进行系统最优热力学平衡参数试验,得到工作面进风温度控制在 18 ℃ 的参数设计。其中,排水系统需要维持 20 m³/h 的涌水量,矿井回风系统需要维持 6 000 m³/min 的矿井回风量,这两参数指标是保障矿井工作面成功实现降温的重要控制点。

(3) 三河尖煤矿。

调研三河尖煤矿水文地质条件可知,其无有效的矿井涌水作为冷源^[87-91]。计算得到该矿实现全工作面的降温需要冷源约 6 MW,仅靠矿井回风只能提供 2 MW 的冷源,无法满足矿井全工作面的降温对冷源量的需要。由此,对地表冷源进行分析,经计算得到地表姚楼河可为矿井提供冷源 38 MW,故建立以地表水体为冷源的 HEMS,如图 39(c) 所示。

在现场建设以地表水源为冷源的 HEMS,经热力学平衡参数试验得到矿井全工作面进风温度控制在 18 ℃ 的参数路径。制冷工作站和降温工作站可提供温度为 5 ℃ 和 11 ℃ 的冷源,确保其顺利供冷的保障是地表水的温度需在 34 ℃ 之内。

4 结 论

(1) 基于采矿损伤不变量方程提出了平衡开采理论,建立了实现深部平衡开采的 110/N00 工法,在“切顶短臂梁”理论上实现了参数细化设计,在切顶技术上实现了碎胀控制,在爆破材料上实现了非炸药瞬时胀裂,在支护技术上实现了材料装备升级。进一步发展了深部“非均压建井”新模式,提出了 N00 建井新思路,研发了深井 SAP 提升系统及保障稳定提升的关键装备。

(2) 创建了适用于研究深部岩体在水、高温、高压、结构效应及多场耦合作用的实验系统和可进行微观层面演算的超算系统,研发了深部岩体冲击型和应变型岩爆实验系统,阐明了深部岩体冲击动力发生的非线性力学行为和机理。提出了深部巷道开挖补偿支护理论,研发了具有高恒阻、大变形、强能量、耐冲击

超常力学性能的宏观 NPR 支护结构和微观 NPR 支护材料,可有效控制围岩的非线性大变形破坏和冲击性损害。

(3) 研发了深部高温、高湿和高压环境下岩体热力学实验系统并得到了深井高温对岩体性质、支护结构及作业环境的影响效应,提出以矿井涌水、回风等作为冷源的深井热害治理方法和深井热源资源化利用方法,建立了深部热害治理与热能综合利用系统 (HEMS),实现了深部开采的热害防治与热源的有效利用。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 谢和平,彭苏萍,何满潮.深部开采基础理论与工程实践[M].北京:科学出版社,2005:1-35.
- [3] 何满潮,钱七虎.深部岩体力学基础[M].北京:科学出版社,2010:16-21.
- [4] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [5] 何满潮.深部的概念体系及工程评价指标[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2858.
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854-2858.
- [6] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [7] HE Manchao, WANG Qi, WU Qunying. Innovation and future of mining rock mechanics[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13: 1-21.
- [8] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [9] 齐庆新,潘一山,李海涛,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [10] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese

- Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236–1262.
- [11] 刘光鼎. 深部探测: 诠释成矿过程、拓展深部资源[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4317–4318.
LIU Guangding. Deep exploration: Interpreting mineralization process and expanding deep resources[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(12): 4317–4318.
- [12] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128–2138.
DI Qingyun, ZHU Rixiang, XUE Guoqiang, et al. New development of the electromagnetic (EM) methods for deep exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128–2138.
- [13] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 160–172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160–172.
- [14] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105–112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 105–112.
- [15] 潘俊锋, 刘少虹, 高家明, 等. 深部巷道冲击地压动静载分源防治理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1607–1613.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, GAO Jiaming, et al. Prevention theory and technology of rock burst with distinguish dynamic and static load sources in deep mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1607–1613.
- [16] 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 Hongguang, 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.
- [17] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726–746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726–746.
- [18] 高玉兵, 杨军, 张星宇, 等. 深井高应力巷道定向拉张爆破切顶卸压围岩控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2045–2056.
GAO Yubing, YANG Jun, ZHANG Xingyu, et al. Study on surrounding rock control of roadways in deep coal mines based on roof cutting and pressure release technology by directional tensile blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2045–2056.
- [19] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845–864.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845–864.
- [20] 张农, 陈红, 陈瑶. 千米深井高地压软岩巷道沿空留巷工程案例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 494–501.
ZHANG Nong, CHEN Hong, CHEN Yao. An engineering case of gob-side entry retaining in one kilometer-depth soft rock roadway with high ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 494–501.
- [21] 刘泉声, 刘学伟, 黄兴, 等. 深井软岩破碎巷道底臌原因及处置技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 566–571.
LIU Quansheng, LIU Xuewei, HUANG Xing, et al. Research on the floor heave reasons and supporting measures of deep soft-fractured rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 566–571.
- [22] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 763–773.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, et al. Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 763–773.
- [23] HE Manchao, REN Fuqiang, LIU Dongqiao. Rockburst mechanism research and its control[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(5): 829–837.
- [24] 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.
- [25] WANG Qi, HE Manchao, YANG Jun, et al. Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 1–8.
- [26] GUO Pengfei, HE Manchao, ZHENG Liange, et al. A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 833–839.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 武毅艺, 谢生荣, 张玉. 深井嵌套式变截面巷道交岔点稳定性控制研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 720–729.
WU Yiyi, XIE Shengrong, ZHANG Yu. Research on stability control of roadway intersections with nested variable cross-section in deep mine[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(6): 720–729.
- [30] 潘俊锋, 齐庆新, 刘少虹, 等. 我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 111–121.
PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 111–121.
- [31] 高玉兵, 杨军, 王琦, 等. 无煤柱自成巷顶切顶机理及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3349–3359.
GAO Yubing, YANG Jun, WANG Qi, et al. Mechanism of roof

- presplitting in a nonpillar mining method with entry automatically retained and its influence on the strata behaviors[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3349–3359.
- [32] 何满潮, 高玉兵, 盖秋凯, 等. 无煤柱自成巷力学原理及其工法[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 19–30.
- HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai, et al. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 19–30.
- [33] 何满潮. 无煤柱自成巷开采理论与 110 工法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 869–881.
- HE Manchao. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 869–881.
- [34] 高玉兵, 郭志彪, 杨军, 等. 沿空切顶巷道围岩结构稳态分析及恒压让位协调控制[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1672–1681.
- GAO Yubing, GUO Zhibiao, YANG Jun, et al. Steady analysis of gob-side entry retaining formed by roof fracturing and control techniques by optimizing mine pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1672–1681.
- [35] GAO Yubing, GAI Qiukai, ZHANG Kedong, et al. Strata behaviour and stability control of the automatic roadway formation by roof cutting below a fault influenced longwall goaf[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 16362.
- [36] TAO Zhigang, SONG Zhigang, HE Manchao, et al. Principles of the roof cut short-arm beam mining method (110 method) and its mining-induced stress distribution[J]. *International Journal of Mining Science & Technology*, 2017, 28(3): 391–396.
- [37] GAO Yubing, WANG Yajun, YANG Jun, et al. Meso-and macroeffects of roof split blasting on the stability of gateroad surroundings in an innovative nonpillar mining method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 99–118.
- [38] HE Manchao, ZHU Guolong, GUO Zhibiao. Longwall mining “cutting cantilever beam theory” and 110 mining method in China—The third mining science innovation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 7: 483–492.
- [39] YANG Jun, HE Manchao, CAO Chen. Design principles and key technologies of gob side entry retaining by roof pre-fracturing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 309–318.
- [40] 何满潮, 王亚军, 杨军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷开采与常规开采应力场分布特征对比分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 626–637.
- HE Manchao, WANG Yajun, YANG Jun, et al. Comparative analysis on stress field distributions in roof cutting non-pillar mining method and conventional mining method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 626–637.
- [41] 王亚军, 何满潮, 杨军, 等. 无煤柱自成巷“短臂梁”结构特征及变形计算分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(4): 718–726.
- WANG Yajun, HE Manchao, YANG Jun, et al. The structure characteristics and deformation of “short cantilever beam” using a non-pillar mining method with gob-side entry formed automatically[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(4): 718–726.
- [42] 杨军, 魏庆龙, 王亚军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷顶板变形机制及控制对策研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 989–998.
- YANG Jun, WEI Qinglong, WANG Yajun, et al. Roof deformation mechanism and control measures of pillarless mining with gob-side entry retaining by roof cutting and pressure relief[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 989–998.
- [43] 何满潮, 曹伍富, 单仁亮, 等. 双向聚能拉伸爆破新技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(12): 2047–2051.
- HE Manchao, CAO Wufu, SHAN Renliang, et al. New blasting technology—bilateral cumulative tensile explosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 2047–2051.
- [44] 何满潮, 盖秋凯, 高玉兵, 等. 坚硬顶板无煤柱自成巷碎胀平衡机理与调控研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(5): 831–844.
- HE Manchao, GAI Qiukai, GAO Yubing, et al. Research on the mechanism and control of bulking equilibrium of non-pillar mining with automatic entry formation for hard roof[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 831–844.
- [45] ZHANG Quan, HE Manchao, GUO Shan, et al. Investigation on the key techniques and application of the new-generation automatically formed roadway without coal pillars by roof cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 152.
- [46] ZHANG Quan, HE Manchao, WANG Jiong, et al. Instantaneous expansion with a single fracture: A new directional rock-breaking technology for roof cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132.
- [47] 张权. 瞬时胀裂定向破岩原理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHANG Quan. Investigation on principle and application of directional rock breaking by instantaneous expansion[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2023.
- [48] 陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等. 微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(3): 808–818.
- TAO Zhigang, GUO Aipeng, HE Manchao, et al. Static characteristics and engineering applications of micro negative poisson's ratio bolt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 808–818.
- [49] 何满潮, 郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1297–1308.
- HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1297–1308.
- [50] HE Manchao, GONG Weili, WANG Jiong, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 29–42.
- [51] 何满潮, 王炯, 孙晓明, 等. 负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(2): 214–221.
- HE Manchao, WANG Jiong, SUN Xiaoming, et al. Mechanics characteristics and applications of prevention and control rock bursts of the negative poisson's ratio effect anchor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 214–221.
- [52] 何满潮, 李晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(8): 1513–1529.
- HE Manchao, LI Chen, GONG Weili, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(8): 1513–1529.

- [53] 何满潮, 杜帅, 宫伟力, 等. 负泊松比锚杆/索力学特性及其工程应用[J]. 力学与实践, 2022, 44(1): 75–87.
HE Manchao, DU Shuai, GONG Weili, et al. Mechanical characteristics and engineering applications of bolt/cable with negative poisson's ration[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 75–87.
- [54] 陶志刚, 韩惠, 明伟, 等. 新型 NPR 锚杆支护系统抗动力冲击试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2008–2021.
TAO Zhigang, HAN Hui, MING Wei, et al. Experimental study on dynamic impact resistance of new NPR bolt support[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2008–2021.
- [55] 陈上元. 城郊煤矿深部切顶卸压沿空留巷围岩稳定机理及控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
CHEN Shangyuan. Study on stability mechanism of surrounding rock and its control for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure in deep working face of Chengjiao coal mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2017.
- [56] 张磊. 安居煤矿千米深井切顶成巷围岩变形机理及控制[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
ZHANG Lei. Surrounding rock deformation mechanism and control of the entry retained by roof cutting in Anju coal mine with 1, 000 meters deep[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [57] WANG Qi, JIANG Zhenhua, JIANG Bei, et al. Research on an automatic roadway formation method in deep mining areas by roof cutting with high-strength bolt-grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 128.
- [58] 王琦, 张朋, 蒋振华, 等. 深部高强锚注切顶自成巷方法与验证[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 382–397.
WANG Qi, ZHANG Peng, JIANG Zhenhua, et al. Automatic roadway formation method by roof cutting with high strength bolt-grouting in deep coal mine and its validation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 382–397.
- [59] WANG Qi, HE Manchao, LI Shucai, et al. Comparative study of model tests on automatically formed roadway and gob-side entry driving in deep coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(4): 591–601.
- [60] 薛浩杰. 深井切顶自成巷防冲机制与支护设计方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
XUE Haojie. Study on the mechanism of coalburst prevention of gob side entry retaining by roof cutting and the method of support design in deep coal mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2022.
- [61] WANG Yajun, HE Manchao, YANG Jun, et al. Case study on pressure-relief mining technology without advance tunneling and coal pillars in longwall mining[J]. Tunnelling and Underground Space technology, 2020, 97.
- [62] 何满潮. 深井提升动力学研究[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 702–728.
HE Manchao. Research on deep shaft hoisting dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 702–728.
- [63] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409–1417.
HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409–1417.
- [64] 何满潮, 吕晓俭, 景海河. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1215–1224.
HE Manchao, LÜ Xiaojian, JING Haihe. Characters of surrounding rockmass in deep engineering and its non-linear dynamic-mechanical design concept[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1215–1224.
- [65] 王树仁, 何满潮, 范新民. JS 复合型软岩顶板条件下煤巷锚网支护技术[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(4): 390–394.
WANG Shuren, HE Manchao, FAN Xinmin. Bolt-net supporting technique for a gateway with JS composite roof[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(4): 390–394.
- [66] 张秀莲, 韩宗芳, 韩文帅, 等. 南芬露天矿绿泥角闪岩吸水及强度软化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2452–2460.
ZHANG Xiulian, HAN Zongfang, HAN Wenshuai, et al. Water absorption and strength softening law of chlorite amphibolite in Nanfen open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2452–2460.
- [67] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1113–1120.
HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1113–1120.
- [68] HE Manchao, ZHAO Jian, FANG Zhijie, et al. First-principles study of isomorphic(‘dual-defect’)substitution in kaolinite[J]. Clays and Clay Minerals, 2012, 59(5): 501–506.
- [69] HE Manchao. Physical modeling of an underground roadway excavation in geologically 45° inclined rock using infrared thermography[J]. Engineering Geology, 2011, 121(3–4): 165–176.
- [70] 缪澄宇. 万福煤矿深埋砂岩水岩耦合蠕变力学模型及其应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
MIAO Chengyu. Study on creep mechanics model and application under water-rock coupling action of deep buried sandstone in Wanfu Coal Mine [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2022.
- [71] HE Manchao, WANG Qi. Rock dynamics in deep mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, doi:10.1016/j.ijmst.2023.07.006.
- [72] 胡杰, 何满潮, 李兆华, 等. 基于三维离散-连续耦合方法的 NPR 锚索-围岩相互作用机理研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 27–34.
HU Jie, HE Manchao, LI Zhaohua, et al. Numerical study on NPR cable-rock interaction using 3D discrete-Continuous coupling method[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 27–34.
- [73] 刘冬桥, 何满潮, 汪承超, 等. 动载诱发冲击地压的实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1099–1105.
LIU Dongqiao, HE Manchao, WANG Chengchao, et al. Experimental study on rock burst induced by dynamic load[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1099–1105.
- [74] HE Manchao, JIA Xuena, COLI M, et al. Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carrara marble[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 1–8.
- [75] HE Manchao, L RIBEIRO E SOUSA, TIAGO MIRANDA, et al. Rockburst laboratory tests database-application of data mining techniques[J]. Engineering Geology, 2015, 185: 116–130.
- [76] HU Jie, HE Manchao, LI Hongru, et al. Rockburst hazard control using the excavation compensation method (ECM): A case study in

- the qinling water conveyance tunnel[J]. Engineering, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.11.013>.
- [77] HE Manchao, REN Fuqiang, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on strain burst characteristics of sandstone under true triaxial loading and double faces unloading in one direction[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(1): 149–171.
- [78] HE Manchao, CHENG Tai, QIAO Yafei, et al. Experimental study on strain burst characteristics of sandstone under true triaxial loading and double faces unloading in one direction[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15: 1312–1353.
- [79] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 深埋隧道灾变防控方法[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(6): 1777–1797.
- HE Manchao, REN Shulin, TAO Zhigang. Disaster prevention and control methods for deep buried tunnels[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(6): 1777–1797.
- [80] 郭志彪, 李伟涛, 何满潮, 等. 基于补偿理论的深部软岩动压巷道破坏机理及控制对策[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(5): 931–942.
- GUO Zhibiao, LI Weitao, HE Manchao, et al. Failure mechanisms and control strategies in dynamic pressure roadways of deep soft rock based on compensation theory[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 931–942.
- [81] HE Manchao, WANG Qi. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106784.
- [82] HE Manchao, SUI Qiru, LI Mengnan, et al. Compensation excavation method control for large deformation disaster of mountain soft rock tunnel[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(5): 951–963.
- [83] 陶志刚, 任树林, 何满潮, 等. 地下工程微观 PR 锚杆钢静力拉伸及锚固抗剪力学特性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 683–694.
- TAO Zhigang, REN Shulin, HE Manchao, et al. Static tensile and bolting shear mechanical properties of micro-NPR bolt steel in underground engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 683–694.
- [84] HE Manchao, REN Shulin, XU Haotian, et al. Experimental study on the shear performance of quasi-NPR steel bolted rock joints[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15: 350–362.
- [85] HU Jie, HE Manchao, LI Hongru, et al. Control effect of negative poisson's ratio (NPR) cable on impact-induced rockburst with different strain rates: An experimental investigation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 5167–5180.
- [86] 孙晓明, 齐振敏, 缪澄宇, 等. 万福矿深埋大断面 T 型交叉点高预应力 NPR 支护机制及应用[J]. *岩石力学*, 2023, 44(4): 1130–1141.
- SUN Xiaoming, QI Zhenmin, MIAO Chengyu, et al. Supporting mechanism and application of high pre-stress NPR in surrounding rock of deeply-buried large section T-type intersection in Wanfu coal mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(4): 1130–1141.
- [87] 何满潮, 郭平业. 深部岩体力学效应及温控对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2377–2393.
- HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2377–2393.
- [88] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 矿山地热防控与利用研究进展[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1632–1651.
- GUO Pingye, BU Mohua, ZHANG Peng, et al. Research progress on the prevention and utilization of mine geothermal energy[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1632–1651.
- [89] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(7): 1561–1581.
- GUO Pingye, BU Mohua, ZHANG Peng, et al. Review on catastrophe mechanism and disaster countermeasure of high geotemperature tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1561–1581.
- [90] 何满潮, 郭平业. 徐州矿区深部开采热害治理现场试验研究[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(4): 1–4.
- HE Manchao, GUO Pingye. Field experimental study on heat disaster control in Xuzhou mining area[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(4): 1–4.
- [91] 何满潮, 郭平业, 陈学谦, 等. 三河尖矿深井高温体特征及其热害控制方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2593–2597.
- HE Manchao, GUO Pingye, CHEN Xueqian, et al. Research on characteristics of high-temperature and control of heat-harm of Sanhejian Coal Mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 2593–2597.