

康永水, 黄友琦, 李翔, 等. 煤矿深部软岩巷道钻孔卸压技术研究进展综述[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023541.

KANG Yongshui, HUANG Youqi, LI Xiang, et al. A review on the research progress of borehole pressure relief technology in deep soft rock roadways in coal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023541.

煤矿深部软岩巷道钻孔卸压技术研究进展综述

康永水¹, 黄友琦², 李翔³, 刘滨¹, 李寅玉^{1,4}, 张海骄³, 张桂民², 刘海明⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232131; 4. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 煤矿深部软弱围岩高应力与低强度的矛盾突出, 易诱发巷道大变形灾害, 严重威胁安全生产。钻孔卸压技术通过应力释放与空间补偿机制提升围岩强度应力比, 近年来在理论与工程实践中取得显著进展。本文系统梳理了国内外钻孔卸压技术研究动态, 重点从作用机理、参数设计、模型试验及效果评价等方面展开分析, 得出以下关键结论: ①卸压钻孔通过诱导裂隙扩展实现三向应力协同调控及剪胀变形补偿, 形成“浅部卸压-深部承载”的应力分布格局, 并与高强支护协同构成“卸-支协同”体系; ②钻孔直径、间距与深度等关键参数对卸压效果影响显著, 现有研究已初步建立多因素耦合设计准则, 但其在复杂地质条件下的适用性仍需进一步验证; ③当前技术仍面临卸压效果定量评价体系不完善、能量演化机制不明确、卸压-支护动态耦合理论欠缺等瓶颈。展望未来, 应重点构建“多场耦合-动静协同”的卸压机制分析框架, 发展融合热-水-力-损伤效应的动态本构理论; 研发基于随钻感知与智能决策的精准卸压装备; 优化差异化支护与注浆补强办法, 构建卸压-支护-加固一体化控制体系, 推动钻孔卸压技术向智能化、精准化、规模化方向发展。

关键词: 深部软岩; 钻孔卸压; 高应力; 能量演化; 参数优化

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3541-23

A review on the research progress of borehole pressure relief technology in deep soft rock roadways in coal mines

KANG Yongshui¹, HUANG Youqi², LI Xiang³, LIU Bin¹, LI Yinyu^{1,4}, ZHANG Haijiao³,
ZHANG Guimin², LIU Haiming⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance in Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232131, China; 4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In deep coal mines, the prominent conflict between the high in-situ stress and the low strength of soft surrounding rock frequently induces large-scale deformation disasters that pose a severe threat to safe production. Borehole pressure relief technology, which improves the strength-to-stress ratio of surrounding rock through stress release and space compensation mechanisms, has achieved remarkable advancements in both theoretical

收稿日期: 2025-08-30

修回日期: 2025-10-22

责任编辑: 付玉凯

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1335

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(42277170); 岩土力学与岩土工程国家重点实验室基金资助项目(SKLGME-JBGS2401)

作者简介: 康永水(1985—), 男, 山东聊城人, 博士, 研究员, 主要从事煤矿深部高应力软弱围岩大变形稳定控制理论与技术方面的研究工作。E-mail: yskang@whrsm.ac.cn

通信作者: 黄友琦(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事深部岩石力学方面的研究。E-mail: huang09172021@163.com

development and engineering practice in recent years. This paper systematically reviewed the research dynamics of borehole pressure relief technology both domestically and internationally, focusing on four aspects, i.e., operational mechanisms, parameter design, model testing, and effect evaluation. The following key conclusions were drawn: ① Pressure relief boreholes facilitate the coordinated regulation of triaxial stresses and compensate for shear dilation by inducing fracture propagation, resulting in a stress distribution pattern characterized by “shallow-pressure relief and deep-bearing capacity” and forming a “pressure relief-support” synergic system when combined with high-strength support. ② Key parameters such as borehole diameter, spacing, and depth significantly influence the pressure relief effectiveness. Although multi-factor coupled design criteria have been preliminarily established, their applicability under complex geological conditions requires further validation. ③ Current technical bottlenecks include an incomplete quantitative evaluation framework for pressure relief effectiveness, unclear energy evolution mechanisms, and underdeveloped theories for dynamic pressure relief-support coupling. Looking forward, research should focus on constructing a “multi-field coupling and static/dynamic synergy” analytical framework and developing dynamic constitutive theories integrating thermal-hydraulic-mechanical-damage (THMD) effects. Innovations in precise pressure relief equipment enabled by while-drilling sensing and intelligent decision-making are also needed. Furthermore, optimizing differentiated support and grouting reinforcement and building an integrated “pressure relief-support-reinforcement” control system will drive borehole pressure relief technology toward intelligent, precise, and large-scale applications.

Key words: deep soft rock; borehole pressure relief; high in-situ stress; energy evolution; parameter optimization

随着浅部煤炭资源枯竭,我国中东部矿井已全面进入深部开采阶段^[1-2],深部地层受长期构造运动影响,普遍存在岩体破碎、高构造应力、地下水富集等复杂环境,导致软岩巷道大变形灾害频发,实测位移常超米级、收敛率高达80%以上^[3-4]，“高应力-低强度”矛盾凸显。传统高强度支护体系,如加密锚杆/锚索、钢架耦合支护、注浆加固等,虽能暂时抑制变形,但难以阻断能量积聚-释放的灾变链,致使深部软岩大变形灾害依然频繁发生,不仅大幅增加了返修成本,更带来严重安全隐患^[5-6]。针对这一技术困局,“主动卸压-协同支护”的围岩调控思路逐步形成,通过应力重分布与变形空间补偿提升强度应力比成为研究核心。当前卸压技术涵盖爆破卸压、掘进卸压巷、导洞卸压、钻孔卸压等^[7-13],其中钻孔卸压技术因其施工简便、成本低廉而备受关注。

钻孔卸压技术是通过钻孔诱导孔周围裂隙扩展,削弱应力集中区,吸收弹性应变能,并诱导应力峰值向深部迁移,形成“浅部卸压-深部承载”的梯度应力场^[14-16],工程实践已证实其可有效消除深部围岩高应力,为煤炭安全高效开采提供新路径^[10-13]。目前,学者通过数值模拟与现场试验,已初步建立钻孔孔径、深度、间距等参数的设计体系。然而,当

前研究仍存在以下几方面问题:首先,在数值建模方面,数值建模多未充分反映真实地应力、温度及水文条件,与工程实际偏差较大;其次,研究过度聚焦于应力场分布的变化,对能量场的演化规律关注不足,导致卸压阈值的判定缺乏充分依据,且在追求卸压效果的同时,易忽视过度卸压对围岩整体结构稳定性的负面影响;最后,钻孔设备与精细化模拟技术滞后,难以适配深部复杂地质条件。未来应积极发展基于模型试验的高应力实时钻孔卸压模拟方法,实现对钻孔钻进过程中的多参量监测,为揭示卸压机制与优化工程设计提供更为全面的依据。

鉴于此,本文系统梳理了国内外钻孔卸压理论与技术的研究进展。首先,在理论研究层面,深入阐述了钻孔卸压的作用机理、钻孔布置参数设计及卸压效果评价等方面的研究现状;其次,对国内外学者在钻孔卸压模型试验、数值模拟等领域所取得的进展进行了总结分析;最后,通过探讨现有模型试验和数值模拟在具体应用场景中的结合,进一步明确未来需重点突破“多场耦合-动静协同”卸压机制、智能钻孔装备研发、卸压-支护协同技术三大方向。通过揭示当前研究的不足与突破方向,为深部软弱围岩变形控制提供理论支撑与技术路径。

1 钻孔卸压机理及能量耗散机制

1.1 钻孔卸压原理

钻孔卸压技术最早由德国学者提出,旨在释放高应力煤层的封闭弹性能,后在苏联、日本等国发展。我国引入后先用于冲击地压防治,21世纪以来,该技术逐渐被应用到水利工程和隧道工程中,并在岩爆的防治方面发挥了重要作用^[17-21]。因此,钻孔卸压可被定义为通过钻孔实现卸压目的的一种工程技术,其施工位置包括煤层和岩层,且不仅是针对冲击危险区,在处理具有复杂地质条件的高应力围岩和变形膨胀较大的软弱围岩时,钻孔卸压技术同样显示出良好的效果^[22-25]。

钻孔卸压技术通过在深部高应力岩体中施工钻孔,诱导钻孔周围岩体在高应力驱动下发生塑性损伤和裂隙扩展,形成卸压区。该过程有效降低了应力集中程度,并释放围岩积聚的高弹性能量。同时,形成的破碎岩体带能显著衰减矿震(冲击地压)产生的震动波能量,即使深部发生冲击事件,该破碎带也能形成能量缓冲屏障,保护巷道安全。具体地说,卸压钻孔在巷道帮部的作用主要是诱导应力重分布,促进应力峰值向围岩深处转移,从而降低浅部围岩应力集中(图1)^[26-29]。易恩兵等^[30]研究表明煤岩体的强度对卸压效果有显著影响,相同卸压参数时软煤卸压效果比硬煤好,对于同一卸压区域,卸压效果主要与孔深、孔径、间排距有关。

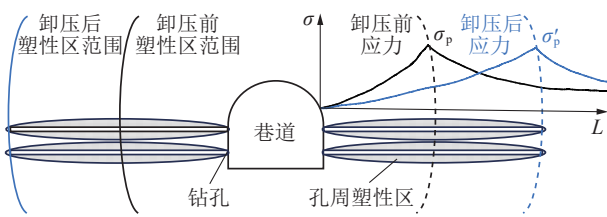


图1 巷道帮部卸压原理示意^[26-29]

Fig. 1 Schematic diagram of pressure relief principle in the sidewalls of roadway^[26-29]

底板和帮部处于完全不同的应力环境中,这导致两者卸压设计存在差异,底板被周围岩体牢牢挤压,尤其是受到来自上覆岩层的垂直应力作用。底板的破坏模式主要是挤压流动、褶皱隆起(底臃)^[1]。因此,钻孔在巷道底板的作用主要是在巷道底板形成“梯形”结构(图2,其中 σ_h 为原岩应力),阻止来自巷道底板两侧的水平应力向自由面传递^[31-32],从而优化底板的受力情况,卸压效果主要与钻孔角度、

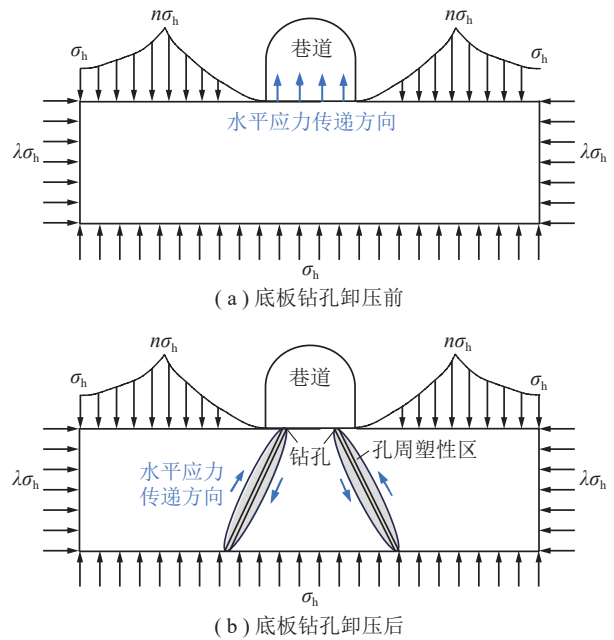


图2 巷道底板卸压原理示意^[32]

Fig. 2 Schematic diagram of pressure relief principle in the floor of roadway^[32]

孔径、间排距有关。

1.2 钻孔破裂模式

当前针对钻孔破裂模式的研究,聚焦单孔与多孔试样在不同加载条件下的裂纹演化规律。钻孔诱发孔周围应力集中,促使煤体萌生裂隙并逐步破碎^[22]。静载和动载下的室内试验和PFC数值模拟均表明,裂纹优先在孔端、孔壁萌生,随荷载增加扩展贯通,最终释放弹性能^[33-35]。钻孔窥视仪的长期探测显示,钻孔内表面的破裂过程分为裂隙发育、极限平衡、塌孔及破碎煤体压实4个阶段^[36]。同时,随着孔径增大,次生裂纹与破碎块体数量也随之增多,导致试样的峰值应力降低。在动载条件下,试样峰值应变随孔径降低;而在静载条件下,试样峰值应变无明显差异。此外,多孔试样抗压强度低于单孔,孔间距越小,试样强度降幅越明显。孔间距较小时,试样破坏时主裂纹贯穿两孔;而孔间距较大时,则表现为单孔独立破坏^[37-39]。

真三轴试验与实时CT扫描进一步量化了孔径的影响^[40-41]。小孔径(如3mm)试样初期仅孔端产生单一裂纹,以塌孔为主;孔径增至5~10mm时,孔壁径向裂纹显著发育,塌孔范围扩大。变角度剪切试验表明^[42],破坏模式受孔径与剪切角双重影响。固定孔径下,随着剪切角增大(40°~55°),试样裂纹数量减少,且沿剪切方向分布;固定剪切角时,随着

孔径增加, 峰值应力对应的变形量降低, 同时主裂纹沿剪切方向分布。

受限于实施条件和监测技术水平, 目前关于钻孔破裂机制的研究多采用室内模型试验和理论分析的方法, 缺乏现场试验的相关研究。室内试验环境与实际工程的围岩条件和应力场赋存环境存在较大差别, 因而室内模型试验的研究结论存在一定的弊端和适用局限性。

1.3 卸压钻孔塑性区半径解析方法

国内外学者围绕卸压钻孔塑性区半径与孔周围应力分布开展了大量研究。KIRSCH^[43] 通过对弹性板中的圆孔进行分析, 提出了圆孔周围二维应力分布规律, JAEGER 等^[44] 进一步对这一成果进行了完善。基于上述研究, 卡斯特奈公式 (亦称修正的芬纳公式) 被提出^[45-46]。考虑到卸压孔无支护措施, 在省略公式中支护抗力项后, 该公式成为计算卸压孔周边塑性区半径的核心表达式。

$$R_p = R_0 \left[\frac{(P + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中, R_p 为塑性区半径, m; R_0 为卸压孔半径, m; P 为垂直应力, MPa; C 为岩体黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, (°)。

该公式基于理想弹塑性材料平面应变条件, 通过联立静力平衡方程与 Mohr-Coulomb 屈服准则推导得出, 假设围岩为均质各向同性线弹性材料 (无蠕变/黏性)、初始地应力各向等压 (侧压系数为 1)。

卡斯特奈公式假设围岩为均匀应力场 (侧压系数为 1), 从而得出卸压区边界呈圆形。然而, 实际工程中煤岩体受复杂地质扰动, 侧压系数往往不等于 1, 导致该公式适用性受限。在高应力下施工大直径钻孔时, 孔周围岩体会破裂松动, 形成远大于初始孔径的破碎区, 对塑性区演化产生显著影响。岩体中钻孔受力状态如图 3 所示, 卸压钻孔处于双向应力状态, R_b 是破碎区半径^[47-51]。

当侧压系数不为 1 时, 塑性区不再呈圆形分布。马斌文^[52] 和祁林凡^[53] 等基于弹性力学叠加原理, 将垂直与水平应力分解计算后叠加, 推导得出卸压区边界方程, 指出卸压区范围随岩体内摩擦角、黏聚力增大而减小, 随孔径增大而增大。马念杰等^[54] 进一步研究表明, 当侧压系数小于 1 时, 水平方向的塑性区半径大于垂直方向, 整体形状近似为横蝶

形; 当侧压系数大于 1 时, 水平方向的半径小于垂直方向, 形状近似为竖蝶形, 如图 4 所示。

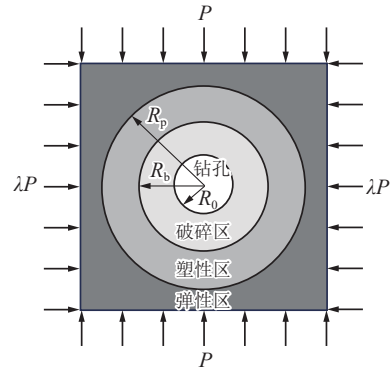


图 3 钻孔受力状态^[47-51]
Fig. 3 Stress state of drilling^[47-51]

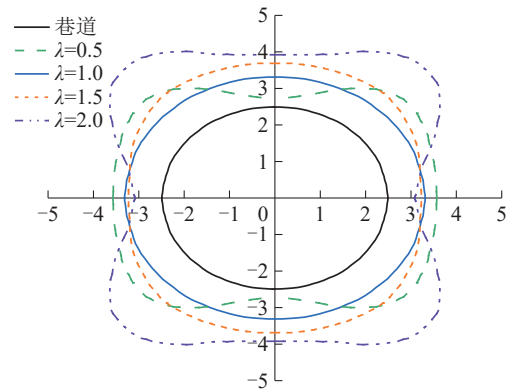


图 4 侧压系数变化时塑性区分布^[54]
Fig. 4 The distribution of plastic zone when side pressure coefficient changes^[54]

针对上述局限, 李云鹏等^[36, 47] 考虑煤体塌落效应 (仅增加裂隙、不扩大原破碎区范围), 基于煤体塌落前后体积不变的原则, 推导出破碎区半径公式为

$$R_b = \sqrt{\frac{p}{p-1}} R_0 \quad (2)$$

式中, p 为煤体碎胀系数, 取值 1.2~1.5^[55]。

进一步提出塑性区半径 R_p 的计算式为

$$R_p = R_b \left\{ \frac{[P(1+\lambda) + 2C \cot \varphi](1 - \sin \varphi)}{2C \cot \varphi} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \left\{ 1 + \frac{P(1-\lambda)(1 - \sin \varphi) \cos 2\theta}{[P(1+\lambda) + 2C \cot \varphi] \sin \varphi} \right\} \quad (3)$$

式中, λ 为侧压力系数; θ 为极坐标对应的环向角度, (°)。

因煤体裂隙发育, 导致实际塑性区偏大, 需对 R_p 乘以 1.5~2.5 的放大系数。式 (3) 的可用性得到了 FLAC^{3D} 数值模拟试验及现场原位测试的验证。

吴锋锋等^[49]采用该公式确定了分区卸压大直径钻孔的间距, 提出钻孔间距小于 2 倍塑性区半径时可形成连续卸压区。此外, 根据分布式光纤传感技术对塑性区范围的长期测量结果可知, 钻孔施工后卸压范围稳定需 20 d 左右, 但不同工况对上述时间有较大影响, 包括钻孔布置参数、岩体力学性质等^[36]。

胡寅^[48]从细观的裂纹发育规律入手, 推导不同侧压系数下破碎区半径公式为

$$\begin{cases} R_b = R_0 \left(\frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}} \right)^{\frac{1}{2}}, \lambda \neq 1 \\ R_b = R_0 \left(-\frac{B}{C} \right)^{\frac{1}{2}}, \lambda = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, 系数 A 、 $B=f(\lambda, P, \theta, \chi, \alpha)$ 、 $C=f(\lambda, P, \theta, \chi, \alpha, K_{IC}, b)$ 。其中, χ 为裂隙面摩擦因数; α 为裂隙与钻孔轴向的夹角, ($^\circ$); K_{IC} 为裂纹止裂韧度; b 为裂纹长度, mm。

由于该公式参数取值方法未明确, 且形式复杂, 该公式并未在后续钻孔参数设计中推广应用。

此外, 潘俊锋^[56]和 HAN^[57]等结合声发射监测与 FLAC^{3D} 模拟发现, 钻孔卸压能力受动载影响显著, 低能动载促进孔周围裂纹稳定扩展, 消耗弹性能; 高能高频动载加剧孔壁应力集中, 诱发失稳, 削弱卸压耗能作用。马宏源^[58]进一步指出, 大直径钻孔卸压存在局限性, 动载能级与扰动周期的增加会扩大孔周围应力集中区, 缩小弹性能高能区与钻孔的距离。静载的加载速度增加会减小塑性区范围, 提高弹性能储能率, 增量动/静载均会弱化钻孔防冲效果, 需及时优化钻孔布置。

综上所述, 国内外学者已建立钻孔周边破碎区、塑性区、弹性区的理论计算体系, 但当前研究仍存在

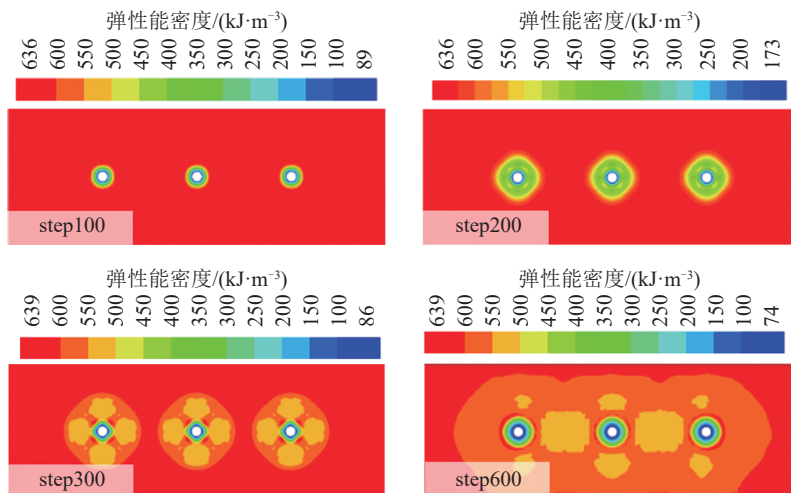
短板。研究仅聚焦静载应力释放, 忽略能量演化规律与多因素耦合作用 (如钻进摩擦热致岩体软化)。深部围岩卸压研究多停留在弹性力学模型阶段, 针对非均质各向异性岩体的卸压机制研究不足。

1.4 能量演化与耗散机制

根据热力学定律, 岩体变形破坏是能量驱动的失稳过程, 伴随着能量的积聚、耗散、转化与释放。完整岩体可积蓄高量级弹性能, 而塑性破坏显著降低其储能能力^[59-60]。钻孔卸压的本质是通过人为制造裂隙/破碎区等弱化结构, 诱导煤体塑性破坏, 促使弹性能转化为塑性能耗散, 实现能量再分布。室内试验与数值模拟均证实, 裂隙越发育, 应力转移越明显, 能量释放越多, 卸压效果越好^[47-53]。

忽略动力散失与热能时, 围岩系统总机械能守恒, 钻孔的核心作用是为能量提供转移与重分布路径, 孔周围岩体需经历三阶段能量转换: ①在卸压瞬间, 孔壁岩体在经历弹性变形后迅速进入塑性屈服状态, 此时岩体内部积聚的局部弹性能被快速释放, 并通过微观损伤与宏观裂隙扩展转化为不可逆的塑性耗散能, 形成低强度破碎区 (图 3); ②破碎区释放的能量驱动应力向远场转移, 促使深部岩体二次积聚弹性能, 部分弹性能转化为塑性耗散, 以延缓破裂扩展; ③低应力区持续向钻孔外扩展, 直至应力平衡, 未参与卸压的岩体 (如孔间岩体) 保持高应力弹性状态^[22]。盖德成等^[61]基于 FLAC^{3D} 获得了孔间弹性能密度演化云图, 直观呈现了这一过程 (图 5)。

弹性能密度 (式 (5)) 因纳入三向主应力 (σ_1 、 σ_2 、 σ_3), 更贴合围岩复杂应力环境, 是判断能量演化的核心指标。



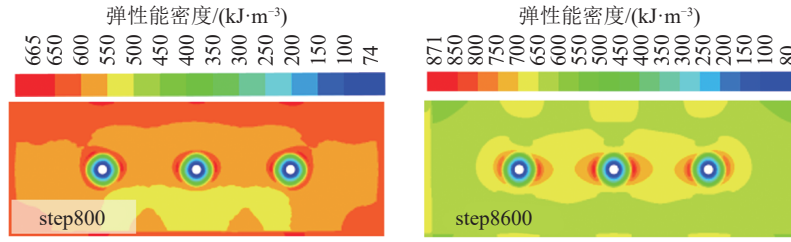


图5 孔周围弹性能密度演化^[61]

Fig. 5 Evolution diagram of elastic energy density around the boreholes^[61]

$$U_\epsilon = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

式中, E 为弹性模量, MPa; μ 为泊松比。

吴锋锋等^[49]通过 FLAC^{3D} 模拟验证了卸压对能量积聚的抑制作用, 卸压后能量降低区面积增加 80.7%, 顶底板能量升高区面积缩减 34.6%, 同时巷道肩角和底角的应力集中点能量峰值均从 70 kJ/m³ 降低至 50 kJ/m³, 如图 6 所示。

钻孔几何参数对弹性能密度演化存在显著影响, 增大孔径可扩大破碎区, 加速弹塑性转化, 提升

应力转移效果与能量耗散率; 增加孔深能将塑性区延伸至深部高应力带, 增大能量降低区范围; 增大间排距则会削弱钻孔协同效应, 导致应力转移不充分, 塑性区贯通受阻, 能量耗散程度下降。此外, 锚杆与钻孔存在不同耗能机制, 锚杆通过与岩体共同变形, 抑制大裂隙, 促进微裂隙发育以增加耗散能; 钻孔通过提供变形补偿空间, 延长破坏阶段并催生更多裂隙^[38, 62]。因此, 支护方案若能较好地将锚杆和钻孔结合, 二者协同可显著提升巷道围岩抗冲击能力。

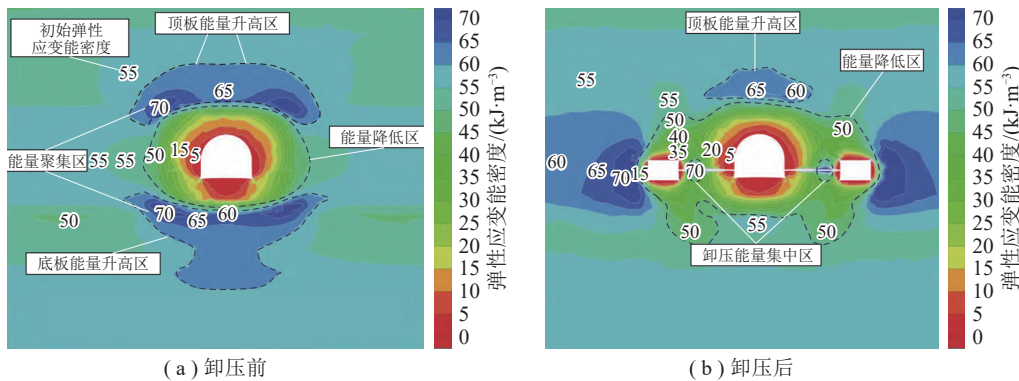


图6 卸压前后弹性能密度分布^[49]

Fig. 6 Distribution of elastic energy density before and after pressure relief^[49]

2 钻孔布置参数设计

2.1 常规卸压钻孔参数

钻孔卸压技术的关键是合理设计钻孔参数, 包括钻孔直径、间距和深度。总体而言, 增大钻孔直径可以扩大孔塑性区的范围; 减小钻孔间距有助于形成连续的卸压弱化带; 钻孔深度与应力转移距离呈正相关关系。

2.1.1 钻孔直径

部分研究通过室内试验与数值模拟, 明确了孔径对钻孔试样力学性质的影响。袁红辉^[42]基于应变软化模型, 采用 FLAC^{3D} 对含不同孔径的单钻孔围岩模型进行单轴压缩试验, 得到的应力-应变曲

线如图 7 所示。随孔径增大, 试样峰值应力和峰值

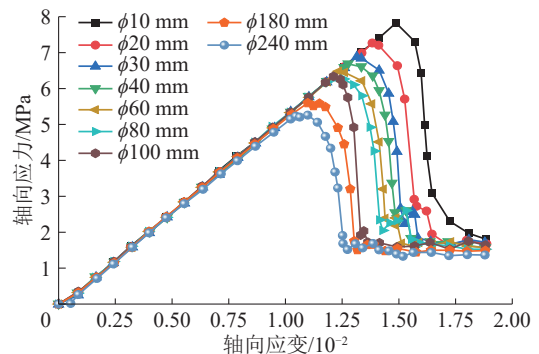


图7 不同孔径下试样应力-应变关系曲线^[42]

Fig. 7 Stress-strain relationship curves of specimens under different pore sizes^[42]

应变均减小。在三轴加载条件下, 试样峰值应力和弹性模量也随孔径增大而明显降低^[40]。

从能量角度分析, 单轴加载时试样总能量 U 、弹性应变能 U^e 与耗散能 U^d 的计算公式见式 (6), 其中总能量通过式 (7) 计算, 弹性应变能通过式 (8) 计算。

$$U = U^e + U^d \quad (6)$$

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (7)$$

$$U^e = \frac{1}{2E_0} \sigma_1^2 \quad (8)$$

式中, σ_1 为主应力, MPa; ε_1 为主应变; E_0 为初始弹性模量, MPa。

结合试验与理论计算可知, 随孔径增大, 试样总输入能与弹性能降低, 破坏所需能量及其释放剧烈程度也随之下降^[37]。能量耗散比 (U^d/U) 曲线 (图 8) 可以看出, 大孔径试样耗散比陡增对应的应变更小, 更不易积聚能量引发冲击破坏。YIN 等^[63] 提出的能量预释放指数、能量耗散增加指数及岩爆能力弱化指数, 也与钻孔直径、数量呈正相关关系。

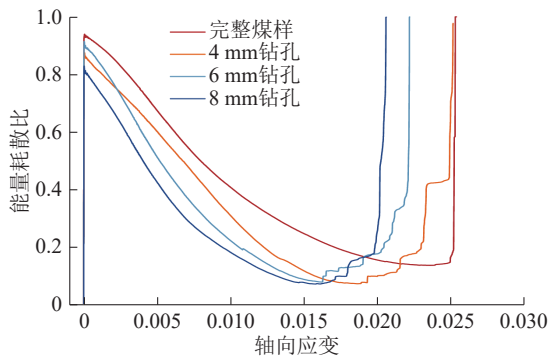


图 8 不同孔径试样能量耗散比曲线^[37]

Fig. 8 Energy dissipation ratio curves of samples with different hole diameters^[37]

结合 1.3 节分析可知, 钻孔周围的卸压区范围与垂直应力、侧压力系数、钻孔直径及孔周围任意点的极坐标有关。其中孔径由施工决定, 单孔卸压区范围随孔径增大而增大 (图 9), 但需要注意的是, 由于岩体裂隙发育导致材料异质性, 实际卸压半径并不与孔径成正比, 如高永格等^[64] 在现场观测孔径为 75 和 110 mm 的钻孔周围塑性区分布, 发现后者对应的塑性区半径约为前者的 2 倍。

需要注意的是, 孔径并非越大越好, 过大孔径不仅可能诱发孔内冲击, 还会造成围岩表面过度破碎而致使锚杆出现非协调受力, 降低围岩和支护结

构的承载能力^[40, 48, 65-66]。李云鹏等^[47] 发现, 孔径过大的钻孔对岩体能量扰动大, 导致孔边的能量密度较高, 容易诱发冲击地压; 陈涛^[32] 指出底板卸压时, 过大孔径可能导致底板弹性能突然释放, 诱发冲击显现。同时, 当孔径超过与锚固位置间距相关的临界值后, 锚杆的最大抗拔力和最大抗拔位移随孔径的增大而减小, 支护效果骤降^[67]。而当钻孔直径过小时, 不仅起不到卸压作用, 反而会在孔周围积聚大量弹性能, 可能会诱发更强烈的冲击地压, 齐燕军等^[68] 提出单孔条件下孔径与煤柱高度比的合理取值范围为 0.05~0.10。

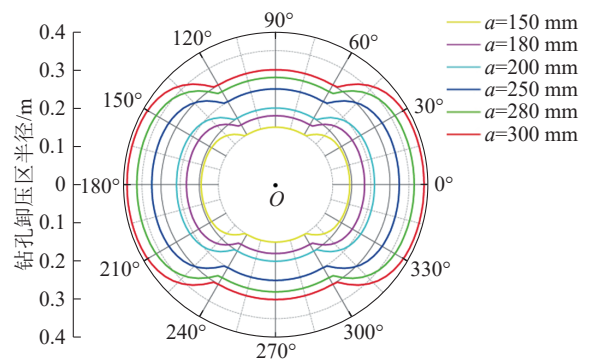


图 9 钻孔卸压区分布随钻孔直径的变化^[52]

Fig. 9 Distribution of pressure relief zone changes with drilling diameter^[52]

综上所述, 大直径卸压钻孔设计需兼顾防冲击与围岩稳定, 现场孔径多选取 100~300 mm, 具体需结合地质条件、支护方案及钻机情况综合确定。

2.1.2 钻孔间排距

钻孔间排距需在确定孔径后, 结合孔周围卸压区范围设计。研究^[69] 表明, 巷帮单侧施工 2 个钻孔的卸压效果优于单孔。间距与排距确定方法相似, 但受巷道断面尺寸限制, 间距通常不宜过大, 总体需遵循“沿巷道走向持续卸压、控制巷道收缩”的原则。

室内试验和数值模拟^[37, 42, 49] 表明, 试样钻孔密度越大, 能量释放越多, 抗压强度越小, 但工程中过大或过小的间排距均不利于卸压。对于巷帮的卸压, 若孔间距过大, 各钻孔形成独立的卸压区和承载区, 孔间未扰动岩体仍保持高应力, 易向巷道传递荷载, 导致卸压不充分; 若排距过小, 各个钻孔的卸压区会完全重叠, 形成大范围连续破碎区, 虽然卸压彻底, 但过度破坏了岩体的整体性和承载结构, 导致原本由围岩自身承担的一部分荷载现在完全

需要由更深部的岩体或巷道的支护结构来承担, 加速了巷道的收敛和破坏。因此, 仅当间排距适中, 单个钻孔卸压圈恰好重叠贯通时, 孔间岩体既能发挥必要的承载作用, 其应力水平又被控制在安全范围内^[40, 48, 69]。

王猛等^[70]采用数值模拟给出了具体的优化依据, 如图 10 所示。排距介于 0.6~1.8 m 时, 原应力峰值位置的孔间应力呈单峰分布, 表明巷道充分卸压; 而孔径与排距之比过大时, 孔间应力峰值骤降至远小于原岩应力, 说明卸压过度导致岩体结构遭到破坏, 不利于巷道稳定。确定最佳排距后用同样的方法确定间距, 当间距小于 1.2 m 时, 孔间应力峰值小于原岩应力, 巷道处于过度卸压状态; 间距在 1.2~1.8 m 范围内为最佳区间, 该方案可将应力峰值向深部转移。

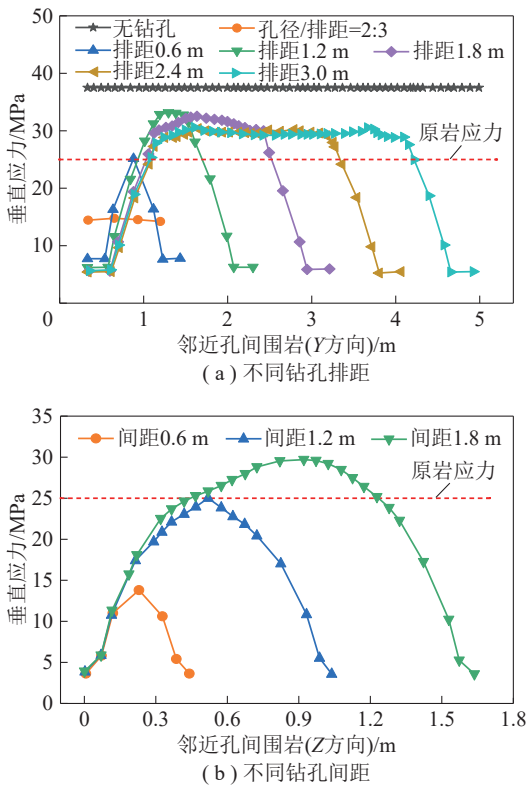


图 10 原峰值应力位置处邻近孔间应力分布曲线^[70]
Fig. 10 Distributions of vertical stress between two adjacent boreholes at the original peak stress position^[70]

因底板与帮部力学环境存在差异, 二者间排距设计方法不同。陈涛^[32]从数值模拟结果中提取了不同钻孔排距方案下的水平应力, 具体位置为底板以下 1.5 m 深度处、沿巷道走向一侧的相邻两孔之间, 如图 11 所示。当排距介于 1.2~1.8 m 时, 应力

均低于未卸压时, 这说明卸压有效。当两孔对称于巷道中心线布置时, 随着间距从 5 m 减小至 2 m, 底板中央的水平应力集中区逐渐减弱直至基本消失。然而, 当间距进一步减小至 1 m 时, 两底角出现明显应力集中, 易导致岩体破碎。

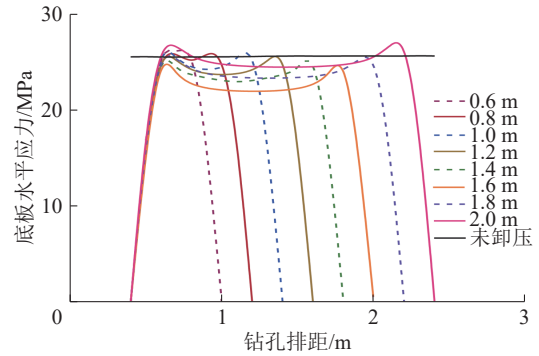


图 11 底板水平应力随钻孔排距增大的变化情况^[32]
Fig. 11 The variation of the horizontal stress of the floor with the increase of the hole spacing^[32]

除数值模拟外, 朱斯陶等^[71]基于理论分析与室内试验, 在新巨龙矿提出用能量耗散指数 X_E 作为设计钻孔参数的指标。

$$X_E = \Delta S / (\Delta S + S_1) \quad (9)$$

式中, ΔS 为煤体卸压过程中耗损变形能, J; S_1 为卸压后的残余变形能, J; $\Delta S + S_1$ 为峰值前积聚的变形能, J。

设定了针对不同危险等级区域的 X_E 目标值及对应的有效卸压应变率 $\Delta \epsilon$, 并提出用于计算钻孔排距的公式。

$$d = \pi \beta R_0^2 / 4h \Delta \epsilon \quad (10)$$

式中, d 为钻孔排距, m; β 为现场测定的塌孔系数; h 为巷道高度, m。

该方法突破了以往单纯依赖经验或数值模拟确定参数的局限, 但作者同时指出, 该方法在极软和极硬煤层中的应用效果仍不理想。

综上所述, 间排距设计需通过力学计算, 在“卸压充分性”与“围岩完整性”之间寻求平衡。具体而言, 需结合现场工况, 经 FLAC^{3D}、UDEC 等数值模拟反复优化, 再辅以应力计、微震监测等现场实测进行验证, 最终确定合理参数, 而非单纯追求密集布置。

2.1.3 钻孔深度

贾传洋^[72]和王守光^[73]等通过室内试验与数值

模拟证实, 钻孔深度对卸压效果影响显著。随着孔深增加, 试样的破坏峰值强度显著降低, 抗变形能力减弱, 促使试样应变能充分释放, 卸压幅度相应增大, 不同孔深的应力-应变曲线(图 12)直观体现了这一力学行为差异。

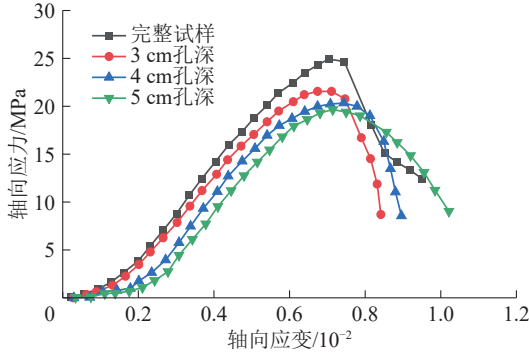


图 12 不同孔深条件下试样应力-应变曲线^[72]

Fig. 12 Stress-strain curves of samples with different borehole depths^[72]

钻孔深度的核心设计目标是将巷帮高应力峰值转移至深部围岩, 孔深增加会促使应力集中区向钻孔端部迁移。若深度不足, 卸压仅作用于浅部, 深部高应力区未受扰动, 巷帮仍存失稳风险, 因此多数研究认为钻孔需穿透帮部深部应力集中区^[74-75]。在实践中, 形成了多项经验准则。ORTLEPP等^[76]建议采煤工作面卸压孔深取 3 倍采高, 工作面两侧巷道钻孔深度取 4 倍采高; 朱斯陶等^[71]依据山东省煤矿冲击地压防治规定, 提出孔深宜取 3.5 倍巷道高度; 陈涛^[32]提出底板卸压需遵循“钻透煤层至底板岩层”原则, 以解除底板应力集中。

王猛等^[70]采用数值模拟进一步明确了孔深的优化原则, 如图 13 所示。当孔深较浅(2 m 和 4 m)时, 卸压作用仅限于浅部围岩, 对原应力峰值位置及更深部的岩体影响甚微; 随孔深增加, 原峰值应力显著降低, 且位置向深部迁移, 卸压效果增强; 当孔深超过 12 m 后, 巷道顶板与帮部的位移反而增大。这一现象与汪学清等^[69]得出的结论一致, 即过度增加孔深将延长巷道围岩应力调整时间, 扰动范围的扩大反而不利于围岩稳定性的控制。

因此, 为兼顾卸压效果与围岩稳定, 部分学者^[25, 77-78]提出卸压孔深应控制在原峰值应力位置至其 2 倍距离之间, 既可覆盖高应力区实现能量释放, 又能避免扰动原岩诱发大范围变形。此外, 孔深还需针对不同工况进行差异化设计。胡寅^[48]针

对工作面保护煤柱(宽 20 m)条件, 为保证煤柱侧留设不少于 5 m 保护带, 将钻孔深度分为煤壁侧 16 m、煤柱侧 12 m; TAI 等^[79]设计的变径钻孔卸压方案同样区分了煤壁与煤柱侧; 杜学领^[21]强调, 煤柱帮钻孔须考虑采空区侧向应力, 避免穿透煤柱, 可配合较小孔径实现有效耗能并控制应力集中。

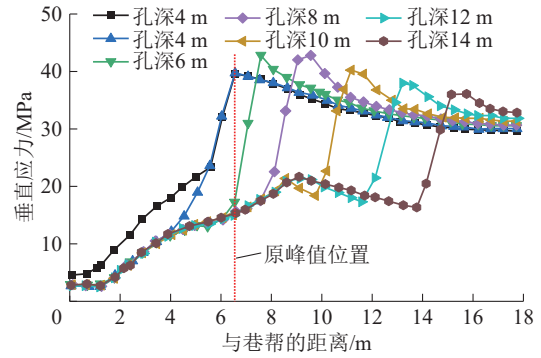


图 13 巷帮垂直应力随孔深增加的变化情况^[70]

Fig. 13 The variation of vertical stress on the roadway side with the increase of hole depth^[70]

2.2 变径分区卸压钻孔参数

由上述可知, 大直径卸压孔易导致浅部围岩破碎, 削弱巷道承载结构, 不利于围岩稳定。为此提出两类优化方案: 一是采用水泥浆液囊袋对卸压孔浅部进行封孔^[80], 二是应用变径分区卸压技术, 其核心理念为“浅部保强度, 深部促卸压”, 通过差异化设计钻孔参数, 在维持浅部围岩完整性的同时, 实现深部高能量释放^[81-83]。该技术由浅部小孔径段 L_1 和深部大孔径段 L_2 组成(图 14), 核心参数包括浅部小孔孔径 D_1 、小孔长度 L_1 、深部大孔孔径 D_2 、大孔长度 L_2 及排距 d 。设计需满足两个基本条件: ① L_1 超出锚杆(索)锚固范围, 避免卸压影响支护; ② L_2 穿透卸压前巷帮应力集中峰值区, 确保应力有效转移。

基于现有研究, 变径分区卸压参数确定需遵循系统优化流程:

(1) 确定总钻孔深度 L 。 L 应控制在原岩应力峰值位置与其 2 倍距离之间, 具体确定方法参见 2.1.3 节。此外, 吴锋锋等^[49]提出, 可将巷道开挖后的应力扰动区范围 R_r (式(11))作为 L 的实际上限。在实际工程中, 总孔深还需考虑保护煤柱宽度等因素的约束。

$$R_r = 4.47a \quad (11)$$

式中, a 为巷道等效半径, m。

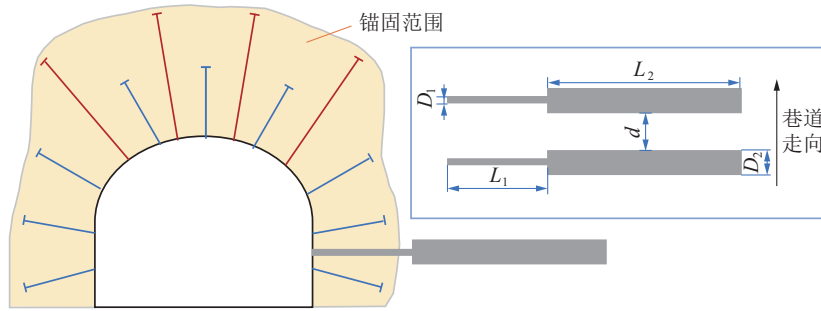


图 14 变径钻孔卸压示意

Fig. 14 Schematic diagram of pressure relief in a variable diameter borehole

(2) 确定 L_1 与 L_2 。 L_1 取决于巷帮锚杆(索)的锚固长度, 需超出锚固范围, 如锚杆长 4.3 m 时, L_1 取 7 m^[84]; L_2 须穿透应力峰值区, 如原峰值应力位置与巷帮的间距为 7.6 m 时, L_1 取 5 m, L_2 取 15 m^[40]。 XIE 等^[66] 的研究则指出, 当大孔孔径 D_2 足够大时, 孔周卸压区可覆盖原峰值应力位置, 因此可将变径位置设于原峰值应力之后 1 m 处。此外, L_2 不宜过长, 还需兼顾施工效率与经济性。

(3) 确定浅部小孔孔径 D_1 。在钻机条件允许的前提下应尽可能取小值, TAI 等^[79] 通过数值模拟发现, 当 D_1 超过临界值(如 120 mm)时, 巷道表面位移明显增大, 同时帮部锚杆的有效约束力显著下降。基于这一认识, LYU^[81] 和 GU 等^[50] 在实践应用中分别选用了 100 和 90 mm 的小孔径。

(4) 确定深部大孔孔径 D_2 。作为控制深部卸压效果的关键参数, 其增大对卸压效果增益存在阈值, 过大易导致浅部裂隙发育、锚固区失稳及围岩变形增加^[49, 66]。在工程实践中, 张季平^[84] 和丁可^[40] 采用目标巷道以往大直径钻孔卸压参数中的孔径作为 D_2 。

(5) 确定钻孔排距 d 。 d 与 D_2 紧密相关, 其确定原则与常规大直径钻孔类似(2.1.2 节), 需确保相邻钻孔深部卸压区重叠贯通。具体可通过孔间围岩的弹性应变能密度曲线或垂直应力分布曲线进行验证, 合理的排距应避免曲线出现“双峰”现象, 且其峰值应低于未卸压前的初始值(图 15)。

变径分区钻孔的实施依赖专用装备与工艺。张季平^[84] 采用“前进式”钻进至 L 后, 钻头展开为大孔径进行“返回式”钻削的机械扩孔法; 丁可^[40]、胡寅^[48] 等采用液压或水压控制的可变径钻头, 在正常钻进小孔段时, 钻头处于收缩状态, 到达预定变径位置后, 通过增加液压/水压驱动内部机构使扩孔

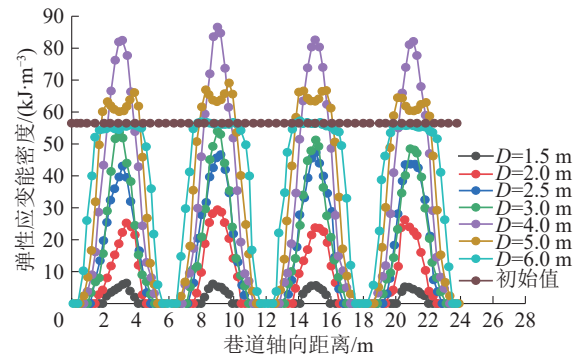


图 15 孔间弹性应变能密度随排距变化情况^[49]

Fig. 15 The variation of the elastic energy density between holes with the row spacing^[49]

刀片张开, 继而钻进形成大孔径段。

优化后的分区变径卸压可实现理想围岩应力分布(图 16)。在浅部小孔区域及锚固区内, 应力基本保持稳定; 在深部大孔区域, 初始应力峰值(A 点)转变为前峰值(B 点)和后峰值(C 点), 此时 B 点相较于 A 点垂直应力大幅下降, 而 C 点相较于 A 点向远离巷帮的方向转移, 从而在锚固区与深部原岩区之间形成一个有效的应力降低缓冲带。

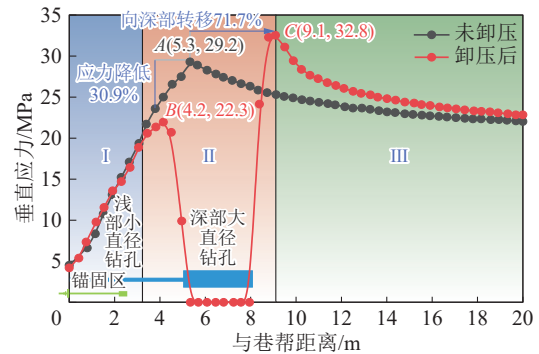


图 16 卸压后帮部垂直应力分布^[49]

Fig. 16 Vertical stress distribution on the side after pressure relief^[49]

此外, XIE 等^[66] 研究不同动载系数 ($k=1.0\sim$

1.3) 对变径钻孔卸压的影响。 k 值增大不会导致卸压孔端部至巷帮的应力发生变化, 相邻孔间的应力值变化不大, 只会导致峰值应力位置向外转移及峰值应力增大, 且峰值应力增大的梯度比峰值应力位置转移的梯度大; LYU 等^[51] 研究了变径卸压参数对动荷载应力波传播的影响, 随着深部大孔直径变大、深孔长度增加、孔间距减小, 钻孔对动荷载应力波的吸收和消散的影响越来越显著。

综上所述, 分区变径卸压技术解决了高强度卸压与浅部围岩稳定的矛盾, 其参数确定需结合数值模拟、理论分析及现场监测, 以围岩应力分布、弹性能密度云图、锚杆(索)有效约束力、巷道表面位移等为评价指标。该技术已成为防治冲击地压、控制巷道大变形的的重要手段。

2.3 钻孔方位与施工时机

卸压钻孔的施工时机与空间方位需结合巷道工况(掘进、开采、修复)进行差异化设计, 三者因巷道形成时序与工程目标不同, 其技术方案亦存在差异。

掘进巷道卸压的核心在于应对开挖后围岩的剧烈应力调整与早期流变。王猛等^[59, 65, 70, 78] 提出“一次让压支护-钻孔卸压-二次高强锚注支护”协调技术, 具体流程为: 先通过一次让压支护允许围岩可控变形, 避免钻孔施工引发的应力重分布影响支护系统; 支护完成后尽快排矸, 紧跟掘进工作面(滞后 30~40 m)施工巷帮卸压孔; 待应力稳定后实施二次锚注, 控制卸压区破碎岩体后期流变。卸压孔滞后开挖时间越短, 控制效果越好, 夏宏根^[85] 提出帮部卸压孔滞后掘进工作面不超过 20 m。

回采巷道的卸压服务于工作面开采期间, 核心目标是预防工作面推进诱发的冲击地压。李云鹏等^[36] 通过分布式光纤传感揭示了卸压效果的时间效应, 钻孔需 402 h (约 17 d) 才能发育至破碎煤体压实阶段, 达到最佳卸压效果。因此, 卸压钻孔需超前开采施工。结合工作面日推进度计算, 超前距离约 110 m, 可确保工作面采至该位置时, 钻孔卸压效果恰好达到峰值, 实现弹性能释放与深部高应力转移。

修复巷道(包括扩修与翻修)卸压是在已受掘进扰动围岩基础上的二次施工, 其工况更为复杂。刘天啸^[25] 提出了卸压时机前置的原则: 即在巷道修复施工之前, 先完成巷帮水平卸压钻孔的施工。其目的在于使修复前围岩内部的应力得以充分调整

和释放, 待其进入相对稳定状态后, 再进行扩断面或修复支护作业。若顺序颠倒, 在修复后施工钻孔, 将对已趋于稳定的围岩造成二次扰动, 反而延长应力调整时间, 不利于围岩控制。

为均衡卸压并利于施工, 钻孔多布置在距巷道底板 1.2~1.5 m 处。汪学清等^[69] 建议将其置于巷帮中部, 以实现最佳的应力拦截效果。为有效解除底板应力、抑制底臃, 陈涛^[32] 指出钻孔需穿透煤层进入底板岩层, 且在施工条件允许时, 倾角控制在 60°~75°能取得较好效果。方位设计的基本原则是垂直于巷道围岩最大主应力方向^[86], 该布置可使钻孔在最大主应力方向上的投影长度最大化, 从而最有效地削弱应力集中。XIE 等^[66] 研究表明: 当钻孔垂直巷帮或向下倾斜 10°时能形成连贯的低应力区; 而倾角过大(向上 10°或向下 20°)则可能在孔间形成新的应力集中。因此, 垂直巷帮施工被视为最优角度, 尽管向下倾斜一定角度有时效果相近, 但需考虑煤粉排出的实操困难。

2.4 钻孔卸压效果评价方法

当前钻孔卸压效果评价技术主要包括直接监测、地球物理探测、钻屑法及电磁波 CT 等^[87-90]。

直接监测法通过在钻孔间布设深浅部应力计, 实时反馈岩体应力转移状态; 同时结合位移传感器量化巷道变形控制效果, 其中顶板离层观测可直接反映卸压有效性^[91]。基于监测数据, 王猛等^[70] 根据卸压前后围岩应力与变形的变化, 将卸压效果分为非充分卸压、充分卸压和过度卸压; 李云鹏等^[36, 47] 采用分布式光纤传感技术测量卸压区半径, 实测结果与理论计算、数值模拟结果相吻合。

微震监测技术通过高灵敏度传感器网络捕获岩体破裂信号, 结合定位算法反演震源位置与能量释放强度, 追踪岩体破裂的演化过程。卸压有效时, 微震事件从孔周密集分布转为向深部迁移, 且能量释放率显著下降^[40, 84, 92]; 震动波 CT 技术通过对比卸压前后波速场变化定量评价效果。卸压前高波速高应力区占比高, 卸压后该区域缩小且波速梯度平缓, 结合 CT 反演残余高应力区可指导补打卸压孔^[93]。二者分别提供实时预警与静态应力分布信息, 形成动静互补的监测体系。

钻屑法作为现场核心手段, 依据排粉量及动力现象(吸钻、卡钻、煤爆)判定应力状态。高排粉量区对应高应力集中, 低排粉量区表征卸压有效。

GENG^[94]、朱广安^[95]和丁传宏^[96]等研究了不同采深、煤厚、煤体力学参数、富水条件等因素下的钻屑量修正系数,为不同工况下的钻孔钻粉率指数及临界煤粉量等预警指标的确定提供了依据,显著提高了钻屑法检测的准确性。为提高煤粉的采集和称量精度,卢方庆等^[90]研发了带有负压装置的内排式钻屑法;赵同彬等^[89]将大直径钻孔卸压与钻屑法结合,提出了考虑大孔径和卸压后应力降低程度的钻粉率指数和临界煤粉量的确定方法,并研发了具有煤粉自动称量、远程监控和图表预警功能的智能监测装置,在唐口矿3号煤工作面实现了“卸压-检测”同步进行。

电磁波CT技术通过探测围岩裂隙发育间接反映卸压效果^[87-88],其核心指标为吸收系数 β 与吸收系数异常指数BI,计算公式为

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (12)$$

$$BI = \frac{\beta - \beta_0}{\alpha\beta_{\max} - \beta_0} \quad (13)$$

式中, ω 为天线圆频率; μ 为磁导率; ϵ 为介电常数;

σ 为电导率; β_{\max} 为吸收系数最大值; β_0 为吸收系数均值; α 为动压显现特征参数。

当电磁波在岩体内部传递时,发育的裂隙和弱面会使电磁波衰减。因此,岩体破碎程度越高,对电磁波的吸收系数就越高(即 β 与BI值越高),说明卸压效果越好,煤岩体的弹性应变能释放越充分。

目前卸压效果评价体系因地质条件差异存在适用性局限,需结合多种监测手段,从钻孔参数、支护受力等方面开展直接评价,并通过效果反演优化参数设计。

2.5 钻孔卸压典型案例

钻孔卸压技术作为较为成熟的冲击地压防治手段,其有效性已在多种地质条件和工程场景下得到验证。为系统展示钻孔卸压技术的工程实践效果,遴选了国内外典型研究案例,从地质条件、技术参数与适用工况等维度进行对比(表1)。通过对常规钻孔卸压与变径分区卸压典型案例的梳理,旨在为工程技术人员针对特定场景选择最优卸压方案提供切实的参考和借鉴。

笔者研究团队提出了大孔径扇形密集钻孔群

表1 钻孔卸压典型案例
Table 1 Typical cases of pressure relief by drilling

文献来源	巷道工况	钻孔直径/m	钻孔深度/m	钻孔间排距/m	卸压效果
马斌文等 ^[52]	工作面回风巷,埋深约660 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 较近	0.15	15	1.5 m×0.6 m, 2排三花眼布置	巷帮峰值应力下降23.7%,应力集中向深部转移
夏宏根 ^[85]	工作面辅运巷,埋深约530 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为3 m	0.15	25	排距3 m, 两帮和底板各1个	巷道两帮、底板及工作面的垂直应力明显下降
王志康 ^[97]	煤层上山猴车机道,埋深约1000 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为2~3 m	0.125	15	排距1.3 m, 两帮各1个	卸压区煤粉量减少且应力处于较低水平
王猛等 ^[70]	岩巷,埋深约1030 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为6.5 m	0.115	10	1 m×0.8 m, 两帮各2个	巷道变形速率和变形量骤降
卢全体 ^[91]	高应力软岩巷道,埋深约750 m	0.12	6	1 m×0.8 m, 两帮各3个	巷道变形较小,顶板离层减弱,锚杆锚索寿命大幅增加
丁可 ^[40]	工作面轨道巷,埋深约905 m, 锚固层3 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为7.6 m	$D_1=0.09$ $D_2=0.24$	$L_1=5$ $L_2=15$	排距1.6 m, 两帮各1个	微震事件释放能量及煤粉量均降低,两帮变形量减少51%~73%
胡寅 ^[48]	工作面辅运巷,埋深约300 m, 锚固层2.4 m, $L(\sigma_{\text{peak}}$ 煤壁) 为5.3 m, $L(\sigma_{\text{peak}}$ 煤柱) 为4.8 m	$D_1=0.1$ $D_2=0.25$	$L_1=4$ $L_2=12$ (煤壁) $L_2=8$ (煤柱)	排距2 m, 两帮各1个	两帮及顶底板变形量分别减少45.1%和31.4%
吴锋锋等 ^[49]	泥岩巷道,埋深约800 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为5 m, 锚固层2.6 m	D_1 不明 $D_2=0.6$	$L_1=5$ $L_2=3$	排距3 m, 两帮各1个	两帮及顶底板变形量分别减少58.7%、23.7%及27.4%,锚杆锚索最终受力减小
XIE ^[66]	硐室,埋深约660 m, 锚固层6.5 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为9 m	$D_1=0.13$ $D_2=1$	$L_1=10$ $L_2=5$	排距4 m, 两帮各1个	两帮变形量仅115 mm, 锚索最终受力减小
张季平 ^[84]	工作面回风巷,埋深约680 m, 锚固层4.3 m, $L(\sigma_{\text{peak}})$ 为6 m	$D_1=0.15$ $D_2=0.35$	$L_1=7$ $L_2=13$	排距2 m, 两帮各1个	巷帮垂直应力下降,微震事件释放能量降低

卸压技术, 通过在围岩中形成定向卸压区, 实现了围岩高应力的卸压。该技术应用于淮南矿区顾桥煤矿近千米深部软岩巷道, 取得了理想效果。现场施工卸压钻孔 96 个, 分 3 组在巷道两帮肩窝至帮角范围内施工, 钻孔共分 4 排, 每排 4 个钻孔, 钻孔间距 1.5 m, 并以一定的角度进行扇形布置, 钻孔孔深 20~25 m, 孔径 113~130 mm, 具体布置如图 17 和 18 所示。

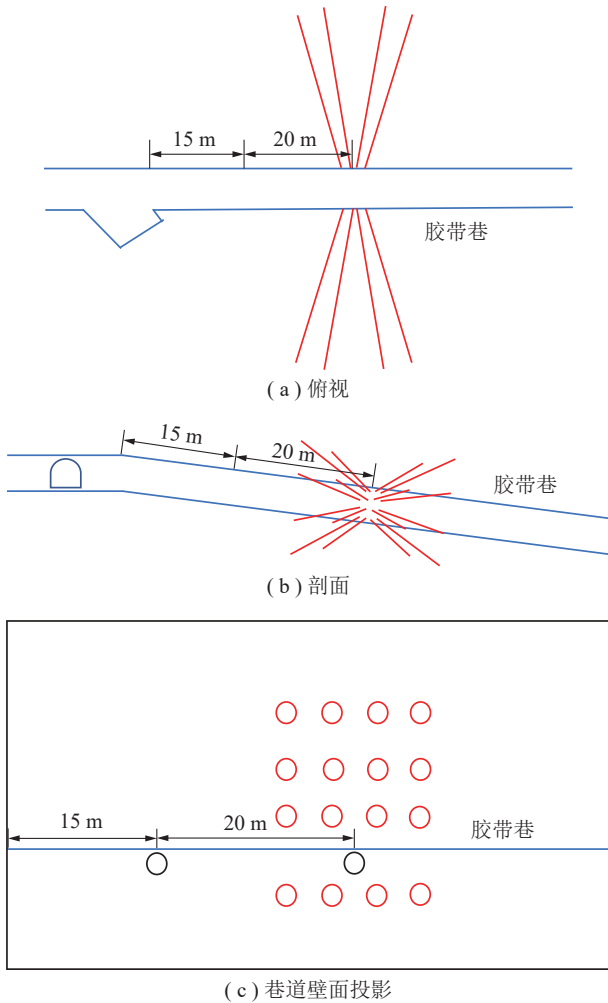


图 17 顾桥矿深部软岩巷道卸压钻孔布置

Fig. 17 Pressure relief drilling design diagram for deep rock roadway in Guqiao Coal Mine

试验巷道表面位移监测结果表明: 扇形卸压钻孔设计方案可有效减缓巷道围岩的大变形速率及降低变形量。与邻近巷道对比分析显示, 钻孔卸压巷道试验段围岩表面位移平均降低 30% 以上。工程实践证实, 合理的钻孔卸压利于巷道稳定控制和大变形灾害的防控, 为钻孔卸压技术提供了新的方案参考。

国内外学者关于钻孔卸压数值模拟的研究普

遍进行了不同程度的简化。随着钻孔卸压理论与模型试验的发展, 钻孔卸压数值模拟将向更贴合现场工程实际条件的方向发展。这一趋势要求科研人员深入探究深部复杂地质条件, 建立更符合实际的三维钻孔卸压数值模型。同时, 多参数耦合作用的算法实现与程序开发也是未来的重要研究方向。

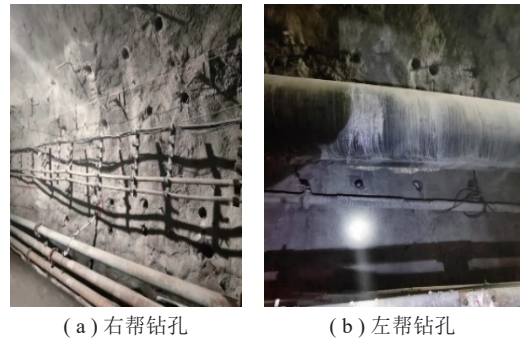


图 18 顾桥矿深部软岩巷道现场卸压钻孔

Fig. 18 Pressure relief drilling scene for deep rock roadway in Guqiao Coal Mine

3 钻孔卸压模型试验研究进展

室内模型试验是连接钻孔卸压理论与现场实践的核心桥梁, 既能弥补理论分析缺乏实证的不足, 又可规避现场试验成本高、参数难测的局限, 是揭示卸压机制的关键途径。开展此类试验需重点解决三方面问题: ①合理设计模型尺寸、钻孔布置及模拟方式, 确保与工程实际物理过程一致; ②根据试验目标预设传感器, 精准获取待测物理量; ③保证试验结论具备工程转化性, 可指导实际问题解决。

3.1 预制卸压钻孔模型试验

该类试验多采用预制钻孔方式, 通过单轴、三轴或动态加载模拟卸压机制。如 LYU 等^[51] 采用相似材料构建巷道模型 (图 19), 在预设钻孔位置埋设尼龙绳 (深部大孔段多次折叠防缠绕), 结合应力传

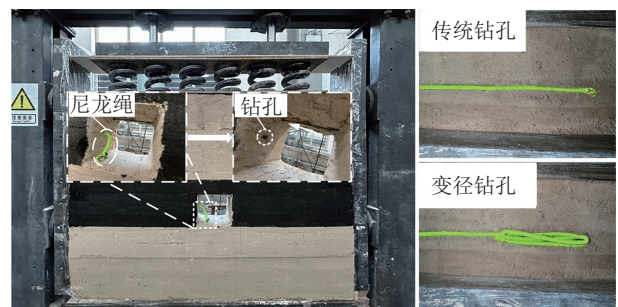


图 19 巷道钻孔卸压试验模型^[81]

Fig. 19 Roadway drilling pressure relief test model^[81]

感器, 证实变径钻孔控制巷帮垂直应力的效果优于常规钻孔。

贾传洋等^[72]通过单轴压缩试验发现, 试样峰值抗压强度随孔径增大、孔深增加、间距减小而显著降低(图 20)。在此基础上, 丁可^[40]通过真三轴加载

试验进一步验证了该规律; 焦振华等^[98]利用 $\phi 50$ mm 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置, 开展含钻孔煤样的动力学试验, 分析了不同钻孔直径对应力-应变响应、裂纹扩展行为及损伤演化规律的影响(图 21)。

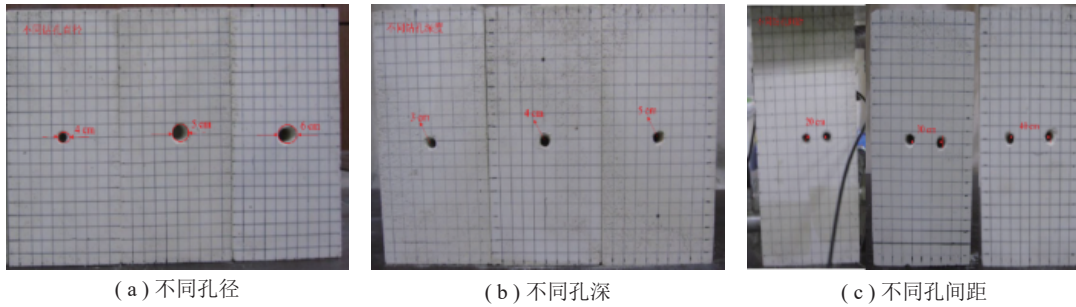


图 20 钻孔参数的影响对比试验方案设计^[72]

Fig. 20 Comparative of prefabricated borehole parameters^[72]

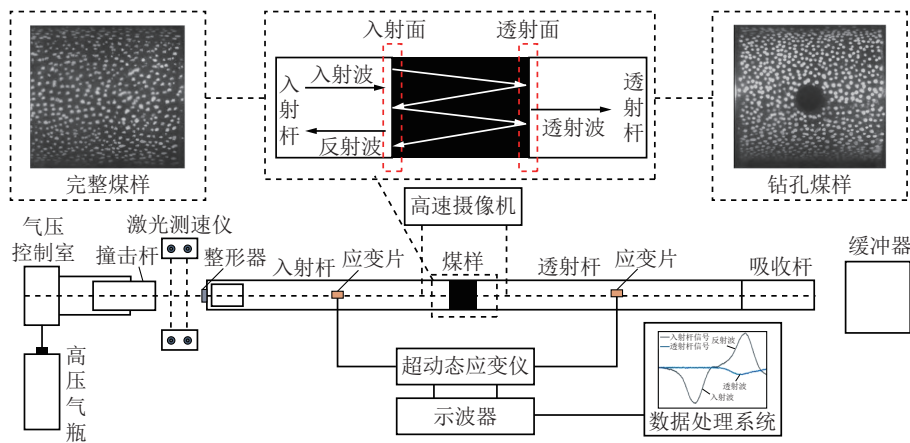


图 21 SHPB 试验装置示意^[98]

Fig. 21 Schematic diagram of SHPB test device^[98]

鲁俊等^[99]开展了更具工程针对性的真三轴试验, 模拟煤体“五面受力、单面临空”状态, 并在不同中间主应力 ($\sigma_2=10、20、30$ MPa) 条件下, 对比了卸压孔分别平行于 X 和 Y 方向时的效果。结果表明, 卸压孔平行于中间主应力时, 煤样塑性区更广、呈阶梯状层裂(图 22), 且抛射质量与弹射动能显著降低(图 23), 卸压防冲效果最优。

3.2 高应力实时钻孔卸压模型试验

“先钻孔后加载”的预制方式无法模拟高应力下现实施工的钻孔卸荷过程, 存在理论局限, 因此“先加载后钻孔”的实时试验成为研究前沿。HE^[100]和 GONG^[101]等自主研发了 SG4500 钻机试验系统(图 24), 可在高应力条件下开展实时钻进试验。HE 等^[100]通过不同钻进速度和钻孔直径下的

红砂岩单轴压缩试验, 发现降低钻速与增大孔径均会显著削弱岩石的峰值强度、弹性模量、岩爆倾向及峰值弹性应变能储量。裂纹演化分析进一步揭示小孔径与高钻速促进远场裂纹扩展, 而大孔径与低钻速则易在孔周围产生局部破裂。

GONG 等^[101]对比了无钻孔 (ND)、预制钻孔 (PD) 与实时钻孔 (RD) 红砂岩试件的力学响应。结果表明, PD 与 RD 均能有效弱化岩石力学性能、降低储能能力, 但 RD 更贴合高地压下钻孔的能量演化过程。与 ND 相比, PD、RD 的储能系数分别降低 1.01%、5.16%, 岩爆倾向指数分别下降 5.15%、19.32%。值得注意的是, RD 较 PD 进一步使储能系数降低 3.8%、岩爆倾向指数降低 14.9%(图 25), 凸显了实时钻孔模拟方法在揭示高应力卸压机理

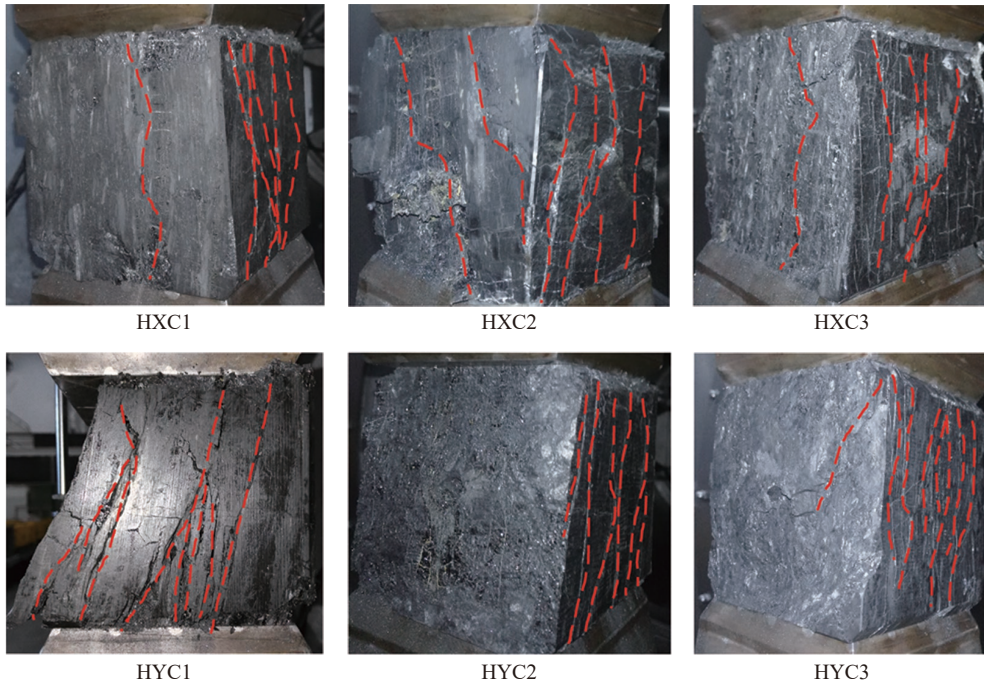


图 22 真三轴应力条件下含卸压钻孔煤样破坏^[99]
 Fig. 22 Failure characteristics of coal samples with relief^[99]

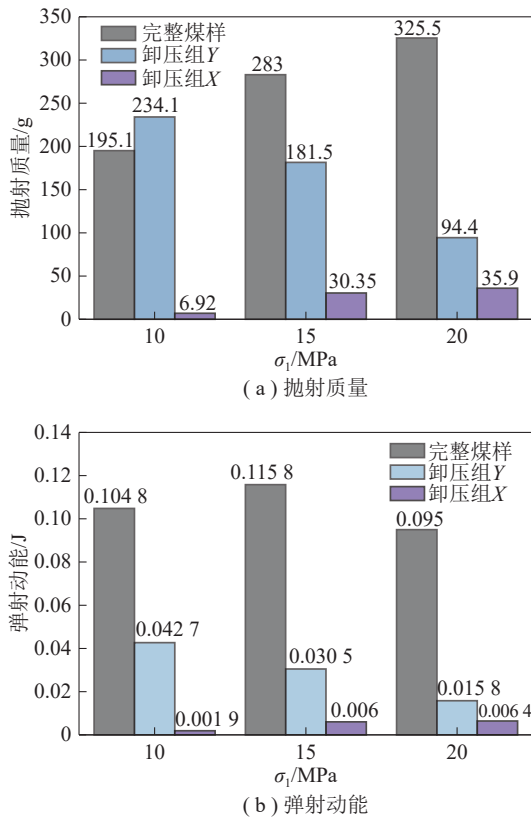


图 23 钻孔卸压前后煤样抛射质量和弹射动能对比^[99]
 Fig. 23 Comparison of projectile mass and ejection kinetic energy before and after drilling pressure relief^[99]
 方面的优势。

高应力实时钻孔试验代表了当前钻孔卸压室

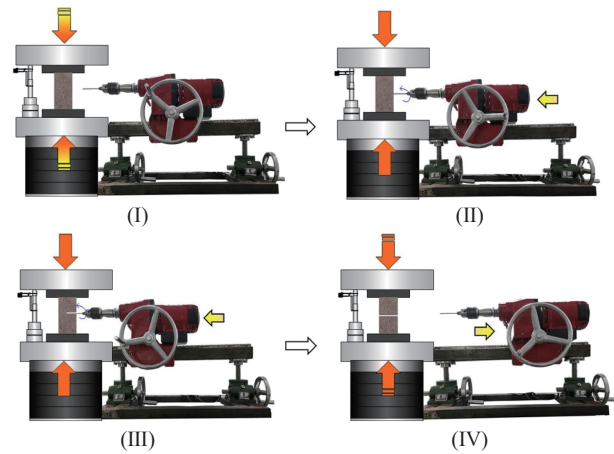
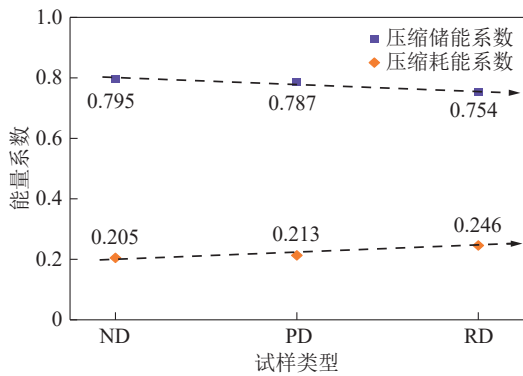


图 24 SG4500 钻机设备实时钻孔过程示意^[100]
 Fig. 24 Schematic diagram of real-time drilling process of SG4500 during rig equipment^[100]

内研究的前沿方向, 该技术不仅能实现卸压过程的可视化与参数化, 还通过布设多元传感器系统, 为研究卸压过程中的应力场与能量场演化提供了丰富数据。然而, 当前试验仍存在明显不足。试验系统难以复现真实地质构造、复杂应力边界及岩体非均质性, 工程适用性受限。未来需重点突破两大方向: 一是发展真三轴下“实时钻进-卸压”同步试验技术, 实现钻孔全过程应力与能量响应的精准监测; 二是开展渗流-应力-损伤多场耦合下的卸压机制研究, 结合地质条件、地应力与支护协同作用, 通过

图 25 岩石试件压缩应变能量储存与耗散特性^[101]Fig. 25 Compression strain energy storage and dissipation characteristics of the rock specimen^[101]

“物理模拟+数字分析”深度揭示卸压机理,为工程设计提供科学依据。

4 钻孔卸压技术未来发展方向构想

目前关于高应力围岩钻孔卸压理论与技术的研究已取得一系列重要进展,为深部高应力软弱围岩的大变形灾害防控提供了坚实的理论与技术基础。然而,鉴于实际工程中地质条件、技术装备与施工环境的显著差异,不同卸压方法与参数的适应性及最终效果仍存在较大不确定性。为突破现有瓶颈,推动该技术向精准化、智能化方向发展,未来研究应重点关注以下三个层面:

(1) 构建多场耦合-动静协同的卸压机制分析框架,深化深部环境下应力演化与能量耗散机制研究。当前研究存在两大理论短板:其一,多基于理想化的应力-损伤二元模型,未能充分耦合深部特有的高地温-高渗压-强应力环境,忽视了地下水流体对裂纹扩展的楔裂作用、温度变化对岩体力学特性的影响及渗流-应力场交互反馈,导致对卸压区演化规律的理论预测与工程实践存在显著偏差;其二,现有能量分析主要针对静态或准静态加载,对采矿扰动(如矿震、采动应力波)这一关键外因考虑不足,缺乏对动载能量瞬时输入-钻孔裂隙动态响应-能量耗散这一全过程的理论描述,无法揭示动静载叠加条件下卸压系统的能量调控机制。未来研究应该致力于发展融合热-水-力-损伤 (THMD) 耦合效应的动态本构模型,并借助能实现瞬时能量加载的物理模拟试验与高精度数值计算,揭示多场耦合环境中能量驱动裂隙萌生、扩展直至贯通的时空演化规律,最终建立适用于深部复杂地质动力学

环境的卸压理论体系与能量设计准则。

(2) 发展精准可控的智能钻进与卸压方法,推动工艺装备革新。当前井下卸压仍以等径直孔为主,该方法虽施工简便,但存在卸压范围固定、无法动态调控的固有局限,易导致浅部围岩过度损伤而深部应力集中区卸压不充分的矛盾。尽管定向变径与深层造穴技术(图 26)已见初步探索,但其发展仍面临关键挑战:现有变径钻具多缺乏“随钻感知-智能决策”的闭环控制能力,难以根据实时岩体条件动态调整孔径;而造穴技术则多聚焦于单一穴位的成穴机理,其空间布设方案、工艺参数与宏观卸压效果间的系统关联尚不明确。未来应重点攻关:①研发集成地质感知功能的智能变径钻机,实现卸压范围的精准控制与“浅部保强、深部增卸”的主动调控;②深化旋冲造穴技术的破岩机理与能量耗散规律研究,建立造穴参数-卸压空间-应力场演化的定量设计方法,通过创造离散化的大容量卸压空间,高效释放深层封闭应力。

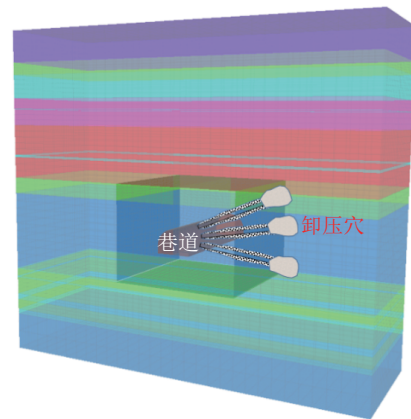


图 26 钻孔造穴卸压示意

Fig. 26 Schematic diagram of pressure relief through drilling and cavitation

(3) 建立动态差异化的支护设计准则,优化卸压-支护协同体系。钻孔卸压在释放高应力的同时,必然导致周边岩体产生不同程度损伤,因此支护方案必须依据卸压技术特征进行动态、差异化设计。具体而言:①对于常规等径钻孔卸压,因卸压后裂隙发育集中于钻孔周边有限范围,锚索可采用“加深减密”原则,即增加锚索长度(需确保锚固段位于应力转移后的深部弹性承载区)、增大间排距,平衡支护强度与经济性;②对于变径分区卸压或钻孔造穴卸压,若深部裂隙发育,但仍保持Ⅲ级及以上岩体,依然可采用加长锚索并增大间排距的方法;若

深部岩体已劣化为IV级及以下, 则应缩短锚索长度, 将锚固段置于完整界面以内, 并加密布置或采用端头让压锚索+注浆加固联合方案, 避免锚固段位于高裂隙区造成失效。若需控制 L_2 段裂隙扩展, 应采取深孔注浆措施对其周围的破碎岩体进行固结, 再施作长锚索, 可引入预埋大直径长锚索分段自锁锚定方法(图 27), 通过分段自锁锚定装置将大直径长锚索 L_1 段安全区、 L_2 段注浆加固带实现多点锚固, 既适配深部高应力环境, 又避免单一锚固段落入 L_2 段破碎区。此外, 需根据围岩稳定监测情况及时开展局部补强加固, 通过微震监测、分布式光纤传感等手段量化不同卸压技术下的裂隙发育范围与应力峰值位置, 为支护参数优化提供精准依据, 切实提升卸压-支护协同控制效果。

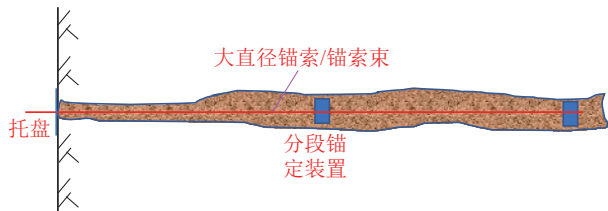


图 27 预埋大直径长锚索分段自锁锚定方法示意

Fig. 27 Schematic diagram of sectional self-locking anchoring method for embedded large-diameter long cable

5 结 论

系统梳理了国内外煤矿深部软岩巷道钻孔卸压技术的理论研究、模型试验与工程实践成果, 从作用机理、参数设计、效果评价及未来方向 4 个维度, 明确了当前技术的进展与瓶颈, 得出以下结论:

(1) 钻孔卸压通过诱导孔周围裂隙扩展与塑性区形成, 实现“浅部卸压-深部承载”应力重分布, 配合高强支护构建“卸-支协同”体系, 可有效释放围岩弹性能, 提升强度应力比, 是深部软岩大变形防控的核心辅助手段。当前研究已厘清常规参数(孔径、间排距、深度)的影响规律, 建立了理论计算与模拟验证方法, 但对大直径钻孔围岩弱化特征、卸压与支护动态耦合机制的研究不足, 难以完全适配复杂地质条件。

(2) 常规钻孔参数形成“理论-模拟-验证”基础流程, 主流工程取值为: 孔径 100~300 mm, 帮部间排距 1.2~1.8 m, 孔深覆盖应力集中区。变径分区卸压通过“浅部保支护-深部促卸压”的设计, 解决了

卸压与围岩稳定矛盾。然而, 现有体系在复杂地质下适配性不足, 且对卸压时间效应(施工后约 20 d 稳定)考虑不充分。因此, 需结合地质条件动态调整参数, 必要时采用二次卸压或锚注措施, 以实现长期稳定。

(3) 模型试验已从“预制静态加载”升级为“高应力实时钻进”, 结合 CT、声发射等手段揭示了应力-能量演化规律; 效果评价形成多维度体系(直接监测、地球物理探测、钻屑法), 可定量表征卸压效果。但当前存在小尺度模型与工程脱节、多场耦合模拟不足、评价标准不统一等问题, 亟需通过大尺度试验与工业性验证, 推动从试验结论向工程应用转化。

(4) 为突破上述瓶颈, 未来研究应聚焦三大方向: 一是构建“热-水-力-损伤多场耦合-动静协同”分析框架, 完善动态本构模型; 二是研发集成随钻感知的智能钻孔装备; 三是建立差异化支护准则, 构建“卸压-支护-加固”一体化体系, 推动钻孔卸压技术向精准化、智能化发展。

参考文献 (References):

- [1] 康红普, 徐刚, 王彪, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 年及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1): 013501.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013501.
- [2] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217-232.
XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232.
- [3] 康红普, 高富强. 煤矿采动应力演化与围岩控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 1-40.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 1-40.
- [4] 侯朝炯, 王襄禹, 柏建彪, 等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 1-12.
HOU Chaojiong, WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, et al.

- Basic theory and technology study of stability control for surrounding rock in deep roadway[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(1): 1–12.
- [5] 刘少伟, 张润泽, 侯建军, 等. 巷道底板锚索扩孔注浆锚固机理及参数研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2025, 7(3): 033032.
LIU Shaowei, ZHANG Runze, HOU Jianjun, et al. Research on mechanism and parameters of reaming anchorage for grouted anchor cable in roadway floor[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2025, 7(3): 033032.
- [6] KANG Yongshui, LIU Quansheng, XI Hailong, et al. Improved compound support system for coal mine tunnels in densely faulted zones: a case study of China's Huainan coal field[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 10–20.
- [7] ZHAO Kaikai, LIU Chenxi, HUA Ye, et al. Permeability enhancement simulation of hydraulic fracturing in underlying coal seams in goaf[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2025, 11(1).
- [8] 康红普, 姜鹏飞, 冯彦军, 等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 1–15.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 1–15.
- [9] KANG Hongpu, LYU Huawen, GAO Fuqiang, et al. Understanding mechanisms of destressing mining-induced stresses using hydraulic fracturing[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 196: 19–28.
- [10] 顾倩悦, 曹安业, 杨耀, 等. 高位长钻孔爆破防治冲击地压技术研究及应用[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2025, 7(2): 023024.
GU Qianyue, CAO Anye, YANG Yao, et al. Research and application of high-level long drilling blasting technology for preventing and controlling rock burst[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2025, 7(2): 023024.
- [11] HAO Qi, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Numerical investigation on damage effect of deep hole pre-cracking roof rock and controlling rockburst[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2025, 12(4): 206–229.
- [12] ZHANG Quan, HE Manchao, WANG Jiong, et al. Non-explosive directional fracturing blasting using coal-based solid waste expanding agent[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(6): 3691–3710.
- [13] DING Guoli, CAO Anye, GUO Zhengjun, et al. Investigation of the mechanism and application of pressure relief roadway in preventing rock burst[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 28262.
- [14] 张寅, 张季平, 杨建军, 等. 冲击地压煤层机械扩孔卸压机理研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2025, 21(3): 1011–1020.
ZHANG Yin, ZHANG Jiping, YANG Jianjun, et al. Study on mechanical reaming and unloading mechanism of impact ground pressure coal seam[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2025, 21(3): 1011–1020.
- [15] ZHANG Lei, HUANG Peng, LIU Sijia, et al. Relief mechanism of segmented hole reaming and stress distribution characteristics of drilling holes in deep coal mine[J]. *Processes*, 2022, 10(8): 1566.
- [16] ZHANG Yujiang, CHEN Yexing, ZHANG Shuai, et al. Study on the influence of drilling parameters on the mechanical properties and pressure relief effect of coal rock[J]. *Processes*, 2025, 13(4): 993.
- [17] 姜福兴, 杨光宇, 魏全德, 等. 煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 333–339.
JIANG Fuxing, YANG Guangyu, WEI Quande, et al. Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time prewarning platform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 333–339.
- [18] 李金奎, 刘东生, 李学彬, 等. 小煤柱应力集中区钻孔卸压效果的数值模拟[J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(5): 527–530, 569.
LI Jinkui, LIU Dongsheng, LI Xuebin, et al. Numerical simulation of small pillar stress concentration areas borehole pressure relief effect[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(5): 527–530, 569.
- [19] 董洪凯, 雷瑞德. 采场大直径钻孔卸压解危参数的优化[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(4): 191–194.
DONG Hongkai, LEI Ruide. Optimization of pressure-relieving and danger-breaking parameters for stope large diameter borehole[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(4): 191–194.
- [20] 李国玉, 李田华. 大直径钻孔卸压技术防治巷道冲击危险的研究应用[J]. *中国煤炭*, 2016, 42(12): 76–80.
LI Guoyu, LI Tianhua. Research and application on with large-diameter drillhole pressure relief technology for preventing roadway rock burst[J]. *China Coal*, 2016, 42(12): 76–80.
- [21] 杜学领. 防治冲击地压的钻孔卸压技术研究进展与展望[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(11): 28–40.
DU Xuelling. Research progress and prospects of drill-hole destressing in the prevention of rock burst[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(11): 28–40.
- [22] 康永水, 耿志, 刘滨, 等. 煤矿深部巷道软弱围岩密集钻

- 孔卸压技术与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3187-3194.
- KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Bin, et al. Pressure relief technology using dense borehole in soft surrounding rock of deep coalmine roadway and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3187-3194.
- [23] 孙雁新. 深部高应力巷道破坏机理及置孔卸压支护技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- SUN Yanxin. Study on the failure mechanism of deep high stress roadway and the technical study on setting pressure relief hole support[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [24] LI Yinyu, QING Li, KANG Yongshui, et al. Method for pressure relief in deep coal mine roadways using borehole groups and its application to Guqiao coal mine[J]. Lithosphere, 2024, 2: 1-14.
- [25] 刘天啸. 高应力巷道钻孔卸压机理及让压支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- LIU Tianxiao. Study on borehole destressing mechanism and yielding support technology in high-stress roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [26] 孙东飞, 刘彪. 大直径钻孔卸压深度优化数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(8): 155-156.
- SUN Dongfei, LIU Biao. Study on numerical simulation in depth optimization of large diameter drillhole pressure relief[J]. Coal Technology, 2016, 35(8): 155-156.
- [27] 李跃文, 刘赛, 曹安业, 等. 卸压钻孔对巷道煤体卸压效应的数值分析及应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(11): 50-53.
- LI Yuewen, LIU Sai, CAO Anye, et al. Numerical analysis and application of coal pressure relief effect with drillings in roadway[J]. Coal Engineering, 2016, 48(11): 50-53.
- [28] 刘红岗, 贺永年, 徐金海, 等. 深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 33-37.
- LIU Honggang, HE Yongnian, XU Jinhai, et al. Numerical simulation and industrial test of boreholes destressing technology in deep coal tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 33-37.
- [29] 孙浩翔. 唐山矿 5 煤层卸压钻孔破坏演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- SUN Haoxiang. Destress drilling failed evolution law of No. 5 coal seam in Tangshan mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [30] 易恩兵, 牟宗龙, 窦林名, 等. 软及硬煤层钻孔卸压效果对比分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(6): 1-5.
- YI Enbing, MOU Zonglong, DOU Linming, et al. Study on comparison and analysis on pressurereleasing effect of boreholes in soft and hard seam[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 1-5.
- [31] 赵善坤, 黎立云, 吴宝杨, 等. 底板型冲击危险巷道深孔断底爆破防冲原理及实践研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 636-642.
- ZHAO Shankun, LI Liyun, WU Baoyang, et al. Theory and application of deep hole floor-break blasting in floor rock burst coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(4): 636-642.
- [32] 陈涛. 煤巷底板防冲钻孔释能解危原理及参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 21-31.
- CHEN Tao. Danger-relief principle and parameter optimization of borehole energy relief for rock burst in coal road floor[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 21-31.
- [33] TAI Lianhai, LI Chong, HU Yin, et al. Experimental study on the significance of pressure relief effect and crack extension law under uniaxial compression of rock-like materials containing drill holes[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1104.
- [34] ZANG Chuanwei, LI Qi, CHEN Miao, et al. Study on dynamic loading characteristics of rock containing holes[J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(8): 3395.
- [35] CHEN Miao, ZHANG Yuliang, ZANG Chuanwei, et al. Experimental investigation on pressure relief mechanism of specimens with prefabricated reaming boreholes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(4): 2949-2966.
- [36] 李云鹏, 张宏伟, 韩军, 等. 基于分布式光纤传感技术的卸压钻孔时间效应研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2834-2841.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, HAN Jun, et al. Time effect of borehole pressure relief based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2834-2841.
- [37] 焦振华, 倪志辉, 胡浩, 等. 单轴压缩下含钻孔煤样力学行为试验与数值模拟[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 108-119.
- JIAO Zhenhua, NI Zhihui, HU Hao, et al. Testing and numerical simulation of mechanical behavior of drilled coal samples under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 108-119.
- [38] 陈森, 肖灿, 王肖珊, 等. 动载作用下含孔锚固体力学特性及破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2): 342-358.
- CHEN Miao, XIAO Can, WANG Xiaoshan, et al. Study on dynamic characteristics and failure mechanism of anchorage body with holes under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(2): 342-358.

- [39] 王雁冰, 张瑶瑶, 聂俊文, 等. 冲击荷载下含孔洞砂岩的力学特性[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(1): 013024.
WANG Yanbing, ZHANG Yaoyao, NIE Junwen, et al. Mechanical properties of sandstone with holes under impact load[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1): 013024.
- [40] 丁可. 深部巷道卸压钻孔围岩强度弱化机理及扩孔卸压方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
DING Ke. Study on the weakening mechanism of surrounding rock strength of pressure relief boreholes in deep roadway and the method of reaming pressure relief[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [41] 马衍坤, 李笑笑, 翟少彬, 等. 含预制钻孔煤体承载破坏应变场与声发射响应真三轴试验[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 497–508.
MA Yankun, LI Xiaoxiao, ZHAI Shaobin, et al. The true triaxial test of strain field and acoustic emission response of bearing failure of coal with prefabricated borehole[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2024, 53(3): 497–508.
- [42] 袁红辉. 钻孔卸压对煤岩力学性能及破坏特征的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
YUAN Honghui. Study on the effect of destressing boreholes on mechanical properties and failure characteristics of the coal and rock[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [43] KIRSCH E G. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre[J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1898, 42: 797–807.
- [44] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [45] 任青文, 张宏朝. 关于芬纳公式的修正[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 109–111.
REN Qingwen, ZHANG Hongchao. Revision of Fenner's formula[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2001, 29(6): 109–111.
- [46] 汪波, 喻勇. 关于圆形隧道卡斯特纳公式的讨论[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1408–1413.
WANG Bo, YU Yong. Discussion on Kastner formulae of circular tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1408–1413.
- [47] 李云鹏, 张宏伟, 朱志洁, 等. 冲击危险煤层卸压钻孔安全参数研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 122–128.
LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, et al. Study on safety parameters of pressure relief borehole in rockburst coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 122–128.
- [48] 胡寅. 平朔井工一矿动压巷道变孔径钻孔卸压技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
HU Yin. Research on pressure relief technology of variable aperture drilling in dynamic pressure roadway of Pingshuo No. 1 Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [49] 吴锋锋, 谷浩源, 杨培举, 等. 深部软岩大变形巷道变径分区卸压围岩控制技术的应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 53–67.
WU Fengfeng, GU Haoyuan, YANG Peiju, et al. Control technology and application of variable-diameter zoned pressure relief for surrounding rock in deep soft rock and large deformation roadway[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 53–67.
- [50] GU Shitan, CHEN Changpeng, JIANG Bangyou, et al. Study on the pressure relief mechanism and engineering application of segmented enlarged-diameter boreholes[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5234.
- [51] LYU Jinguo, QI Linfan, PAN Yishan, et al. Study on the pressure relief energy dissipation law of variable-diameter boreholes in roadway surrounding rock under dynamic and static loads[J]. Plos One, 2024, 19(9): e0306449.
- [52] 马斌文, 邓志刚, 赵善坤, 等. 钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 35–40.
MA Binwen, DENG Zhigang, ZHAO Shankun, et al. Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 35–40.
- [53] 祁林凡. 动静载作用下巷道围岩变径钻孔卸压耗能规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.
QI Linfan. Study on the pressure relief energy dissipation law of variable-diameter boreholes in roadway surrounding rock under dynamic and static Loads[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2024.
- [54] 马念杰, 李季, 赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206–213.
MA Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(2): 206–213.
- [55] 刘少虹. 动载冲击地压机理分析与防治实践[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.
LIU Shaohong. The study on the mechanism and prevention of dynamic-loading rockburst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [56] 潘俊锋, 马宏源, 贺海鸿, 等. 煤层防冲卸压钻孔动载响应规律及其极限性[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 137–

- 149.
- PAN Junfeng, MA Hongyuan, HE Haihong, et al. Dynamic load response law and limit of pressure relief drilling for coal seam prevention and control of rock burst[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(9): 137–149.
- [57] HAN Zhenyu, LIU Kai, MA Jinyin, et al. Numerical simulation on the dynamic mechanical response and fracture mechanism of rocks containing a single hole[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 1–20.
- [58] 马宏源. 大直径卸压钻孔时变特性与动静载荷响应规律研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.
- MA Hongyuan. Study on time-varying characteristics and dynamic and static load response law of large-diameter pressure relief drilling[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023.
- [59] 王猛, 李志学, 夏恩乐, 等. 深部巷道围岩能量耗散与支护调控效应[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 741–749.
- WANG Meng, LI Zhixue, XIA Enle, et al. Energy dissipation and supporting regulation effect of surrounding rock in deep roadway[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(4): 741–749.
- [60] 吴宇, 郝阳, 浦海, 等. 煤岩体变形破坏的能量演化模型及冲击危险性评价[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(6): 1177–1186.
- WU Yu, HAO Yang, PU Hai, et al. Energy evolution model and rock burst risk assessment for deformation and failure of coal-rock mass[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(6): 1177–1186.
- [61] 盖德成, 李东, 姜福兴, 等. 基于不同强度煤体的合理卸压钻孔间距研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 578–585, 593.
- GAI Decheng, LI Dong, JIANG Fuxing, et al. Reasonable pressure-relief borehole spacing in coal of different strength[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 578–585.
- [62] REN Fuqiang, ZHU Chun, KARAKUS M, et al. Rock burst mitigation mechanisms of pressure relief borehole and rock bolt support: insights from granite true triaxial unloading rock burst tests[J]. *Engineering Geology*, 2024, 336: 107571.
- [63] YIN Yanchun, CHEN Biao, Zhang Yubao, et al. Experimental study and evaluation on the weakening of bursting liability of coal with boreholes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 155: 107754.
- [64] 高永格, 靳志新, 孟晓强, 等. 钻孔孔径及布置方式对煤巷卸压效果的影响[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(1): 138–140.
- GAO Yongge, JIN Zhixin, MENG Xiaoqiang, et al. Effects of hole diameter and arrangement on tunneling surface relief effect[J]. *Coal technology*, 2017, 36(1): 138–140.
- [65] 王猛, 司英涛, 胡景宝, 等. 深部巷道围岩卸压协调控制技术[J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2017, 36(5): 9–16.
- WANG Meng, SI Yingtao, HU Jingbao, et al. The coordination control technology of pressure relief and its application in deep roadway[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2017, 36(5): 9–16.
- [66] XIE Shengrong, JIANG Zaisheng, CHEN Dongdong, et al. A new pressure relief technology by internal hole-making to protect roadway in two sides of deep coal roadway: a case study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(2): 1537–1561.
- [67] YIN Yanchun, ZHOU Hongjie, ZHANG Yubao, et al. Anchorage weakening effect of coal roadway sidewall with different destressing borehole diameters[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(3): 1325–1335.
- [68] 齐燕军, 靖洪文, 孟波, 等. 卸压孔尺寸效应的模型试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 538–544.
- QI Yanjun, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Experimental modelling on size effect of pressure relief hole[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(3): 538–544.
- [69] 汪学清, 吴帅军, 唐红平, 等. 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(3): 1–5.
- WANG Xueqing, WU Shuaijun, TANG Hongping, et al. Impact of pressure-relief borehole on stability of deep roadway and determination of drillings parameters[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2023, 43(3): 1–5.
- [70] 王猛, 王襄禹, 肖同强, 等. 深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1138–1145.
- WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang, et al. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1138–1145.
- [71] 朱斯陶, 姜福兴, 史先锋, 等. 防冲钻孔参数确定的能量耗散指数法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2270–2276.
- ZHU Sitao, JIANG Fuxing, SHI Xianfeng, et al. Energy dissipation index method for determining rockburst prevention drilling parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2270–2276.
- [72] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(6): 1115–1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, et al.

- Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1115–1122.
- [73] 王守光, 刘化广, 穆鹏宇, 等. 不同钻孔组合影响下单轴压缩试验中砂岩的力学性质和破坏特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(10): 1821–1837.
WANG Shouguang, LIU Huaguang, MU Pengyu, et al. Different combinations of boreholes affect the mechanical properties and failure characteristics of sandstone in uniaxial compression tests[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2025, 65(10): 1821–1837.
- [74] 王峰, 蒋广龙, 龚超. 钻孔参数对深部巷道卸压效果影响研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(14): 126.
WANG Feng, JIANG Guanglong, GONG Chao. Study on the influence of drilling parameters on the pressure relief effect of deep roadway[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017(14): 126.
- [75] 王峰. 考虑弹脆性损伤的深部巷道钻孔卸压控制围岩变形研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
WANG Feng. Study on deformation control of surrounding rock of deep roadway drilling considering brittle damage[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [76] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59–65.
- [77] 刘天啸, 闫帅, 韩力. 高应力大变形巷道卸压让压联合控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 269–276.
LIU Tianxiao, YAN Shuai, HAN Li. Combined control technology of destressing and yielding support in high-stress and large deformation roadway[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 269–276.
- [78] 王猛, 郑冬杰, 王襄禹, 等. 深部巷道钻孔卸压围岩弱化变形特征与蠕变控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 437–445.
WANG Meng, ZHENG Dongjie, WANG Xiangyu, et al. Deformation characteristics and creeping control of deep roadway with pressure-relief borehole[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(3): 437–445.
- [79] TAI Lianhai, LI Chong, YU Xiaoxiao, et al. Unloading technology and application research of variable diameter drilling in dynamic pressure roadway[J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(15): 6443.
- [80] 陈金宇, 王社新, 贾金河, 等. 卸压钻孔对锚索作用的影响及控制方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 68–72, 96.
CHEN Jinyu, WANG Shexin, JIA Jinhe, et al. Study on the effect and control of the pressure relief borehole on anchor cable[J]. Mining Safety & Environmental protection, 2022, 49(6): 68–72, 96.
- [81] LYU Jinguo, HAN Wenhe, QI Linfan, et al. Study on the pressure relief energy dissipation law of variable-diameter boreholes in roadway surrounding rock[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 5460.
- [82] WANG Wenmiao, YUAN Yong, DING Ke, et al. The optimization of segmented reaming parameters and the analysis of the pressure relief effect in impacted coal seams[J]. Processes, 2023, 11(4): 1235.
- [83] LI Yangyang, GUO Rongwei, ZHANG Shichuan, et al. Experimental study on pressure relief mechanism of variable-diameter borehole and energy evolution characteristics of the surrounding rock[J]. Energies, 2022, 15(18): 6596.
- [84] 张季平. 冲击地压煤层机械扩孔卸压机理及工程应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2024.
ZHANG Jiping. Study on pressure relief mechanism and engineering application of mechanical reaming in rock burst coal seam[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2024.
- [85] 夏宏根. 巨厚煤层开采扰动特征及大直径钻孔卸压效果研究[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(12): 1–8.
XIA Honggen. Mining disturbance characteristics of huge thick coal seams and pressure relief effect of large-diameter boreholes[J]. Shaanxi Coal, 2024, 43(12): 1–8.
- [86] 王襄禹, 柏建彪, 王猛, 等. 深部巷道有控卸压与围岩稳定控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015.
WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, WANG Meng, et al. Research on controlled pressure relief and stability control of surrounding rock in deep roadway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2015.
- [87] 秦子哈. 大直径钻孔卸压机理及效果检验技术研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(4): 77–80.
QIN Zihan. Study of pressure relief with large diameter drilling hole and results verified[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(4): 77–80.
- [88] 李杨杨, 张惟昭. 基于 CT 技术的唐口煤矿大直径钻孔卸压效果研究[J]. 山东煤炭科技, 2020(2): 173–176.
LI Yangyang, ZHANG Weizhao. Research on pressure relief effect of large diameter drilling in Tangkou Coal Mine based on CT technology[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2020(2): 173–176.
- [89] 赵同彬, 尹延春, 任文涛, 等. 基于煤体卸压钻孔钻屑的冲击危险性检测方法及应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2384–2393.
ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, REN Wentao, et al. Coal burst risk monitoring method based on the drilling powder of destressing drilling in coal seam and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2384–2393.

- [90] 卢方庆, 崔磊, 潘济安, 等. 冲击地压矿井内排式钻屑法钻屑运移规律研究及应用[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(3): 489-499.
LU Fangqing, CUI Lei, PAN Ji'an, et al. Transportation patterns of drilling cuttings and application using the internal row drilling cuttings method in rockburst mines[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(3): 489-499.
- [91] 卢全体. 高应力软岩煤巷钻孔卸压支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
LU Quanti. Study on the drilling pressure relief support technology of high stress soft rock coal roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [92] 郑凯歌, 郭伟, 张俭, 等. 厚硬顶板冲击地压井下长钻孔压裂防治关键技术装备与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 228-245.
ZHENG Kaige, GUO Wei, ZHANG Jian, et al. Key technical equipment and engineering practice of long borehole fracturing prevention and control in thick and hard roof rock burst underground[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 228-245.
- [93] 李允生, 徐德生, 马志锋, 等. 微震异常区 CT 反演监测预警技术应用[J]. 工矿自动化, 2021, 47(12): 39-45.
LI Yunsheng, XU Desheng, MA Zhifeng, et al. Application of CT inversion monitoring and early warning technology in microseismic anomaly area[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(12): 39-45.
- [94] GENG Y F, TAN J, YIN Y C, et al. Theoretical analysis of drilling cuttings considering stress zoning of surrounding rock and its application in stress detection[J]. Energy Science & Engineering, 2023, 11(5): 1662-1670.
- [95] 朱广安, 刘欢, 苏晓华, 等. 基于声发射特征的含水煤体钻屑法临界指标优化试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4433-4442.
ZHU Guang'an, LIU Huan, SU Xiaohua, et al. Experimental study on critical index optimization of drilling cuttings method of water-bearing coal based on acoustic emission features[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4433-4442.
- [96] 丁传宏, 吴振华, 潘鹏志, 等. 不同地质条件下冲击地压特厚煤层钻屑法检测指标确立方法研究及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(9): 52-58.
DING Chuanhong, WU Zhenhua, PAN Pengzhi, et al. Research and application of determining evaluating index of rock burst in exceptionally thick coal with drilling cutting method under the different geological conditions[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(9): 52-58.
- [97] 王志康. 煤层力学性质对钻孔卸压防冲效能的控制作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
WANG Zhikang. Control effect of mechanical properties on borehole pressure relief in coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [98] 焦振华, 杨利文, 袁安营, 等. 含钻孔煤样动力学特性试验与数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(12): 57-66.
JIAO Zhenhua, YANG Liwen, YUAN Anying, et al. Experimental and numerical simulation study on dynamic mechanical properties of coal specimens with borehole[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(12): 57-66.
- [99] 鲁俊, 尹光志, 高恒, 等. 真三轴加载条件下含瓦斯煤体复合动力灾害及钻孔卸压试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1812-1823.
LU Jun, YIN Guangzhi, GAO Heng, et al. Experimental study on compound dynamic disaster and drilling pressure relief of gas-bearing coal under true triaxial loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1812-1823.
- [100] HE Zhichao, GONG Fengqiang, GAO Mingzhong. Experimental study on the mechanical behavior of high-stress rocks during real-time drilling[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2025, 12(1): 98-120.
- [101] GONG Fengqiang, HE Zhichao, JIANG Quan. Internal mechanism of reducing rockburst proneness of rock under high stress by real-time drilling pressure relief[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(8): 5063-5081.