煤炭科学技术
COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

矿山大直径救援孔钻进工艺及气液双循环技术

郝世俊 王林杰 赵江鹏 史兵言 张金宝 张晶 朱芝同

引用本文:
郝世俊，王林杰，赵江鹏，等. 矿山大直径救援孔钻进工艺及气液双循环技术[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(4): 47−60.
HAO Shijun, WANG Linjie, ZHAO Jiangpeng. Drilling technology and gas−liquid dual−circulation technique for large−diameter rescue boreholes in mines[J]. Coal Science and Technology, 2026, 54(4): 47−60.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12438/cst.2026−0046

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术与装备
Key technology and equipment of hole−forming for surface large diameter borehole in coal mine area
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 190−197 http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b638df2f−cc8f−4720−b1a5−23cf6fde726f

大直径救援井安全透巷技术研究
Study on safe tunneling penetration technology for large diameter rescue wells
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 118−126 http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/953735b6−6e28−4fa5−96d6−eec57f463806

基于重力排渣的大直径井筒钻掘技术与工艺体系研究
Research on technology and equipment system of large diameter shaft drilling based on gravity slagging
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 272−282 https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022−1758

钻井法凿井气举反循环洗井流场的压力分布及流体运移规律
Pressure distribution and fluid migration law of gas lift reverse circulation well washing flow field in drilling sinking
煤炭科学技术. 2025, 53(10): 45−59 https://doi.org/10.12438/cst.2024−1657

基于大直径钻孔钻进多参量的煤体应力钻测方法
Research on coal stress measurement and assessment while drilling method based on multiple drilling parameters in large diameter drilling
煤炭科学技术. 2025, 53(1): 122−132 https://doi.org/10.12438/cst.2024−1465

矿用大直径钻孔连杆式回拉扩孔钻头研发及应用
Design of linkage type back reamer for large diameter drilling in coal mine
煤炭科学技术. 2021, 48(4): 213−219 https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020.12.026

关注微信公众号，获得更多资讯信息

郝世俊, 王林杰, 赵江鹏, 等. 矿山大直径救援孔钻进工艺及气液双循环技术[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(4): 47−60.
HAO Shijun, WANG Linjie, ZHAO Jiangpeng, *et al*. Drilling technology and gas-liquid dual-circulation technique for large-diameter rescue boreholes in mines[J]. Coal Science and Technology, 2026, 54(4): 47−60.

移动扫码阅读

矿山大直径救援孔钻进工艺及气液双循环技术

郝世俊[1,2], 王林杰[1,2], 赵江鹏[1], 史兵言[3], 张金宝[2], 张 晶[2], 朱芝同[3]
(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院 (集团) 有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399)

摘 要: 矿山大直径救援孔施工面临时效紧迫、地质条件复杂、轨迹精度要求高等挑战，为满足复杂多变地层条件下高效、可靠成孔的需求，基于对大直径救援孔钻进技术特点与适用条件的分析，构建大直径救援孔钻进技术分类体系，建立以“地层−工艺−装备”为核心的工艺适配性优选方法，并重点研究气液双循环钻进技术关键难题与工程应用效果。针对牙轮多级扩孔、PDC 多级扩孔、气举反循环、气动潜孔锤及气液双循环等关键技术，从其破岩机理、循环排渣方式、配套钻具及工艺参数等方面进行了系统性梳理与对比，重点探讨了各工艺在不同岩性、不同孔径及不同孔深条件下的表现，分析了其效率瓶颈与面临风险。在此基础上，采用理论分析与数值模拟相结合的方法，研究不同扩孔比条件下的岩石应力分布特征与裂纹扩展规律，分析孔底多相流场演化阶段与岩屑运移特征，揭示孔底背压对潜孔锤冲击性能的影响机制。最后，开展气液双循环钻进先导试验，测试三壁钻具系统及气闭式潜孔锤的密封可靠性与钻进效率。常规工艺对比表明：对于稳定中硬以下地层，PDC 多级扩孔效率优势显著，采用防泥包设计后，ø830 mm 孔径平均钻速可达 5.85 m/h；对于坚硬、破碎或含水地层，气动潜孔锤技术更具优势，其中，集束式潜孔锤反循环钻进在孔口−孔底联合密封工艺保障下，平均机械钻速可达 3.13 m/h，且排渣彻底。破岩机理研究表明，扩孔比 k=3 时岩石破碎效率最高；孔底流场可划分为加速阶段 (0～2 s) 和稳定循环阶段 (2～8 s)；潜孔锤冲击功与冲击频率随背压增大而下降。先导试验表明：气液双循环钻进配套钻具密封可靠，在ø350 mm 孔径、200 m 孔深条件下平均机械钻速达 3.94 m/h。气液双循环钻进通过独立气路驱动潜孔锤、独立液路携渣护壁，使潜孔锤工作效率不受孔深及涌水影响，在深孔复杂地层中具有显著优势，是提升救援孔钻进能力的重要技术方向。

关键词: 矿山事故救援; 大直径救援孔; 钻进技术; 扩孔钻进; 气动潜孔锤; 反循环; 气液双循环
中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253−2336(2026)04−0047−14

Drilling technology and gas-liquid dual-circulation technique for large-diameter rescue boreholes in mines

HAO Shijun[1,2], WANG Linjie[1,2], ZHAO Jiangpeng[1], SHI Bingyan[3], ZHANG Jinbao[2], ZHANG Jing[2], ZHU Zhitong[3]
(1. *Chinese Institute of Coal Science*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *CCTEG Xi'an Research Institute* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710077, *China*; 3. *Institute of Exploration Techniques*, *CAGS*, *Tianjin* 300399, *China*)

Abstract: The construction of large-diameter rescue boreholes in mines faces challenges such as tight timelines, complex geological conditions, and high requirements for trajectory accuracy. To meet the needs for efficient and reliable hole formation under complex and variable strata conditions, based on an analysis of the technical characteristics and applicable conditions of large-diameter rescue borehole drilling, the aim is to establish a classification system for large-diameter rescue borehole drilling technology, develop a process adaptability optimization method centered around “stratum-process-equipment”, and focus on researching key technical challenges and engineering

收稿日期: 2026−01−09 **策划编辑:** 朱恩光 **责任编辑:** 刘雅清 **DOI:** 10.12438/cst.2026−0046
基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3005900); 工信部自然灾害防治技术装备工程化攻关专项科研资助项目 (TC240HE74-1-03)
作者简介: 郝世俊(1970—), 男, 内蒙古凉城人, 研究员, 博士生导师, 博士。E-mail: haoshijun@cctegxian.com

application effects of gas-liquid dual-circulation drilling technology. For key technologies such as roller cone multi-stage reaming, PDC multi-stage reaming, airlift reverse circulation, pneumatic down-the-hole hammer, and gas-liquid dual-circulation, systematic sorting and comparison are conducted in terms of rock-breaking mechanism, circulating slag removal method, supporting drilling tools, and process parameters. The performance of each process under different lithologies, hole diameters, and hole depths is discussed, and its efficiency bottlenecks and risks are analyzed. On this basis, a combination of theoretical analysis and numerical simulation is used to study the rock stress distribution characteristics and crack propagation laws under different reaming ratios, analyze the evolution stages of multiphase flow field at the hole bottom and rock debris migration characteristics, and reveal the influence mechanism of hole bottom back pressure on the impact performance of down-the-hole hammer. Finally, a pilot test of gas-liquid dual-circulation drilling is conducted to test the sealing reliability and drilling efficiency of the three-wall drilling tool system and airtight down-the-hole hammer. Conventional process comparisons show that for stable medium to hard strata, PDC multi-stage reaming has significant efficiency advantages. After adopting a mud-proof design, the average drilling speed for a ø830 mm hole diameter can reach 5.85 m/h. For hard, fractured, or water-bearing strata, pneumatic down-the-hole hammer technology has more advantages. Among them, the cluster-type down-the-hole hammer reverse circulation drilling, with the joint sealing process guarantee at the hole mouth-hole bottom, achieves an average mechanical drilling speed of 3.13 m/h and thorough slag removal. Rock-breaking mechanism research shows that the rock-breaking efficiency is highest when the reaming ratio k=3; the flow field at the hole bottom can be divided into an acceleration stage(0−2 s) and a stable circulation stage(2−8 s); the impact power and impact frequency of the down-the-hole hammer decrease with increasing back pressure. The pilot test shows that the sealing of the supporting drilling tools for gas-liquid dual-circulation drilling is reliable, and the average mechanical drilling speed reaches 3.94 m/h under a hole diameter of ø350 mm and a hole depth of 200 m. Gas-liquid dual-circulation drilling utilizes an independent gas circuit to drive the downhole hammer and an independent liquid circuit to carry debris and protect the wall, ensuring that the efficiency of the downhole hammer is not affected by hole depth or water inrush. This technique has significant advantages in deep and complex strata, and is an important technical direction for enhancing the drilling capability of rescue boreholes.

Key words: mine accident rescue; large-diameter rescue borehole; drilling technology; reaming drilling; pneumatic down-the-hole hammer; reverse circulation; gas-liquid dual circulation

0　引　　言

大直径救援孔是矿难发生后快速建立人员提升通道的关键技术手段，其钻进能力直接决定了救援行动的效率与成败[1-3]。近年来，国内外多次重大救援实践积累了宝贵经验，如美国魁溪煤矿透水事故[4]、智利圣何塞铜矿坍塌事故救援[5]、山东平邑石膏矿坍塌事故救援[6-7] 等。

大直径救援孔以救援通道高效构建为目标，具有成孔时效性强、轨迹控制精度高、钻遇地层复杂、多工艺应用等特点。成孔时效性强，要求尽可能在短时间内构建救援通道，如美国魁溪煤矿透水事故救援孔历时 90 h，将 9 名被困矿工成功救出[4]，重点研发计划工程演练要求 800 m 深度搜救孔 60 h 内、救援孔 68 d 内成孔[8]。轨迹控制精度高，要求大直径救援孔成孔过程中应保持轨迹沿先导孔延伸，与井下被困人员所在区域精准连通。如山东平邑石膏矿救援ø580 mm 潜孔锤钻进因无法定向，未能直接透巷，只能由被困人员井下寻找救生孔[6]。矿区所处地质条件往往较为复杂，钻进时需穿越松散破碎、易坍塌、涌水等地层，要求钻进工艺具备较强的地层适应性，如智利圣何塞铜矿坍塌事故救援第 1 套钻孔方案，计划采用“导向孔+逐级扩孔”钻进，因地层破碎，需不断处理坍塌等复杂情况，始终未能钻至设计位置。多工艺应用，是指因地质条件多变，要求在施工时根据地层条件、设备能力调整钻进工艺，频繁的工艺转换对施工人员和设备机具提出了更高要求，如平邑石膏矿事故救援中，表层采用旋挖钻进，三开ø711 mm、四开ø580 mm 孔径均采用单体式气动潜孔锤反循环钻进[7]，平均机械钻速可达 4 m/h，但在 160 m 处地层发生坍塌后，改用气举反循环工艺技术处理了埋钻事故。

随着救援实践与技术研究的深入，已形成了多种工艺的大直径救援孔钻进技术体系[9-11]。以牙轮、PDC 为主的多级扩孔钻进技术较为成熟，在稳定地层中应用效果良好。气动潜孔锤因其高效碎岩、工艺适应性强，在救援孔中广泛应用，根据循环方式不同可分为正循环、反循环、下排渣 3 种钻进方式[12]。大直径潜孔锤气液双循环钻进作为救援孔钻进新技术，有效解决富水地层与硬岩扩孔效率低的难题，提升复杂地层扩孔稳定性[13]。然而，不同工艺受其机理与地层条件制约，仍面临诸多挑战。当前研究多集中于单一工艺的机理介绍与案例总结，缺乏针对大直径救援孔在时效性与地层不确定性影响下工艺适配性分析。基于多年研究与工程实践，笔者系统梳理各类大直径救援孔钻进工艺的特点，剖析其适

用条件与关键技术，并结合典型实例展开分析，以期为复杂地质条件下大直径救援孔的工艺选择与优化提供参考。

1　大直径救援孔钻进技术分类

大直径救援孔钻进技术种类较多，可根据不同技术特征进行分类。常见的分类方法包括：按钻头类型划分，主要有牙轮钻进、PDC 钻进及潜孔锤钻进（图 1）；按循环介质与排渣方式，可分为正循环钻进、下排渣钻进与反循环钻进（图 2）；按破岩作用机理，则包括回转钻进、冲击钻进及冲击−回转复合钻进。在实际工程应用中，为提高钻进效率并保障成孔可靠性，常采用多种工艺结合的“组合钻进工艺”，如集束式潜孔锤反循环扩孔钻进、PDC 正循环多级扩孔钻进。本文重点阐述扩孔钻进技术（牙轮多级扩孔、PDC 多级扩孔、气举反循环钻进）、气动潜孔锤钻进技术及气液双循环钻进技术。

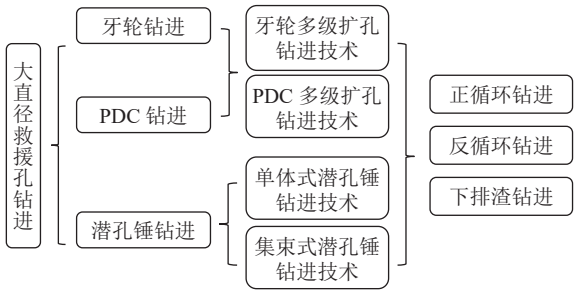


图 1　按钻头类型划分

Fig.1　Classified by drill bit type

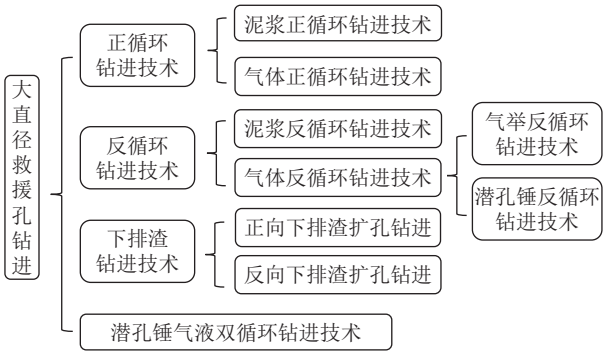


图 2　按循环介质与排渣方式划分

Fig.2　Classified by circulating medium and slag discharge method

2　扩孔钻进技术

扩孔钻进是一种将小直径先导孔通过多次分级，安全、高效地扩至设计井径的钻进方法。该工艺通过合理扩孔级数和间隔，达到减少单次破岩面积、降低破碎功耗的作用，常用的工艺有泥浆循环钻进（牙轮多级扩孔、PDC 多级扩孔）、气举反循环及集束式潜孔锤反循环钻进技术。

2.1　牙轮多级扩孔钻进技术

牙轮扩孔时以冲击、碾压和剪切复合方式破岩，尤其适合在坚硬岩层中钻进，其优点在于成本低、钻头寿命长、破岩面积大，能实现稳定、连续的钻进。该工艺技术成熟度高，便于选取合适钻进参数，对孔壁扰动相对较小，成孔规则。多级扩孔对钻机扭矩和钻压的峰值要求更低，因此，其设备配套通用性强，可与多种大型回转钻机适配。但牙轮扩孔钻进存在明显技术瓶颈：① 牙轮钻头损坏风险高。在硬岩或不均质地层中易发生掉齿、牙轮卡死、轴承失效甚至牙轮脱落等事故；② 钻进效率低。机械钻速较低，普遍不足 2 m/h[14-15]，特别在正循环排渣模式下，大环空间隙导致岩屑上返速度慢，易产生重复破碎和孔底沉渣，影响效率并增加卡钻风险；③ 复杂地层适应性较差。在破碎、强风化或富含大裂隙的地层中，牙轮钻头滚动冲击易加剧孔壁失稳。

中煤科工西安研究院实施的多口大直径孔表明，采用（扩孔孔径/先导孔径）ø850/311 mm 组合式牙轮钻头扩孔时，平均机械钻速不足 0.5 m/h，且因事故频发，一口 400 ~ 500 m 深的大直径孔完井周期超过 60 d，难以满足救援井时效要求。因此，在救援孔场景下，牙轮多级扩孔因其低效性，仅能作为特定硬岩段且时间压力相对较小时的备选方案，而非当前技术体系下的主导工艺。

2.2　PDC 多级扩孔钻进技术

PDC 导向扩孔钻头在地质勘探、非开挖等领域已有所应用，PDC 切削齿以剪切方式破岩，在均质、软至中硬地层中可获得较高的机械钻速。如某煤矿采用ø450/311 mm PDC 钻头进行正循环扩孔钻进的实践表明，其机械钻速较传统方法提升 89.2% ~ 161.5%[14]。但 PDC 钻头对坚硬、高研磨性、非均质性强的地层适应性差，在砾岩、燧石或软硬交错频繁的夹层中蹩跳严重，切削齿极易发生崩裂、异常磨损，导致钻头失效。若采用常规正循环，岩屑上返速度慢，易造成岩屑在孔底和环空重复切削，钻速大幅降低。同时，钻遇强水敏性泥岩、页岩等地层时，切削产生的细屑容易黏附在钻头刀翼和排屑槽上，形成“泥包”，导致钻头无法有效破岩和冷却，钻进效率急剧下降甚至完全停止[16]。

中煤科工西安研究院围绕扩孔级序、导向头布设、防泥包钻头设计及岩屑运移等方面开展研究，取得了阶段性成果并应用于现场。针对巨厚覆盖层钻

头易泥包及大直径扩孔扭矩需求大的技术难点，研制了专用流线型 PDC 扩孔钻头(图 3)与低转速大扭矩螺杆。钻头采用锥形弧面提升泥浆上返流速，设置小喷嘴水力冲刷切削齿以缓解泥包，并通过三阶梯多刀翼结构与加长导向头(>700 mm)增强稳定性、纠正孔底偏斜。同时，研制的专用螺杆具备低转速(<30 r/min)、大扭矩(工作扭矩≥30 000 N·m)特性，可有效满足ø300～ø830 mm 逐级扩孔需求。在淮南某矿的工程演练中，使用 XSC1500 车载钻机和 2 台 F1300 泥浆泵，利用防泥包 PDC 扩孔钻头依次进行ø630、ø830、ø960、ø1 200 mm 四级扩孔，平均机械钻速分别为 3.22(单泵)、5.85、4.50、3.16 m/h，扩孔效果良好。

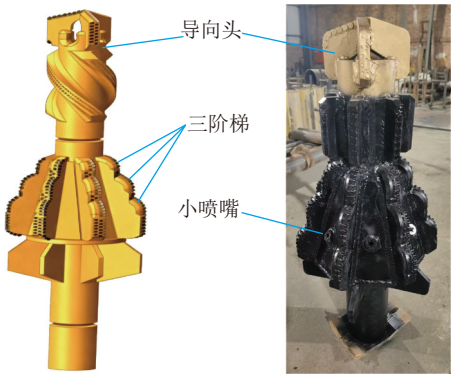


图 3　防泥包 PDC 扩孔钻头

Fig.3　Anti-mud-plugging PDC reaming bit

PDC 多级扩孔在救援应用中的核心优势在于其在适宜地层中的高钻速潜力，这直接回应了救援对“快”的首要需求。其技术创新的方向已从单纯提高破岩效率，转向解决大直径、复杂地层带来的排渣、稳斜和钻头保护等系统性问题，因此决策关键点在于准确预判地层可钻性，避免其进入不适应地层导致效率断崖式下降与时间损耗。

2.3　气举反循环钻进技术

气举反循环钻进工艺利用气举泵的工作原理，通过双壁钻杆的环隙将压缩空气输送至孔底的气水混合器，空气与钻井液混合后形成低密度的气液混合物，从而在钻杆内外产生一定压差。在此压差驱动下，携带岩屑的流体通过钻杆的中心内管连续、快速地返回地面，原理如图 4 所示。相较于正循环钻进工艺，气举反循环对井底的循环压耗大大降低，且携岩效率高，机械钻速快，在大直径钻孔施工中应用广泛[17-18]。通常需要钻孔内自然液柱沉没气水混合器达到一定深度才能建立有效的压力差启动循环，即沉没比≥0.5 才能有效启动和维持反循环[19]，浅孔段无法应用此工艺。气举反循环钻进效率与注入空气压力、风量及混合器沉没深度、沉没比相关。随着内管直径和沉没比的增加，气举反循环的排渣能力增强，而随着进气量的增加，气举反循环的排渣能力呈现出先增大后减小的变化趋势。

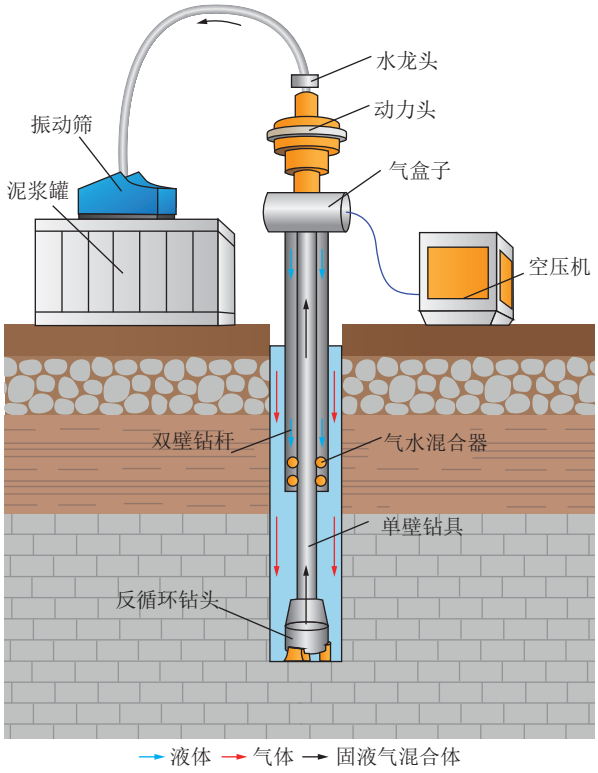


图 4　气举反循环钻进示意

Fig.4　Air-lift reverse circulation drilling diagram

实现气举反循环的关键机具有空压机、双壁气水龙头、双壁钻杆、气水混合器、反循环钻头等。根据钻孔直径、深度、地层情况及沉没比确定空压机风量与风压，双壁气水龙头的作用是向持续旋转的双壁钻杆的环状间隙输送压缩空气，同时将中心通道返回的、携带岩屑的混浆引导至地面排渣系统。双壁钻杆作为重要的气体注入和排渣通道，由同心套装的内、外管组成，常用规格有ø178/113 mm、ø219/152 mm。气水混合器安装在双壁钻杆底部，是将压缩空气与钻井液混合的关键部件(图 5)。反循环钻头为适应反循环流道特殊设计，其中心设有大口径吸渣口，使岩屑能被快速吸入钻杆内腔，针对不同地层，可选用牙轮钻头或刮刀钻头[20]。

气举反循环钻进时，岩屑在钻杆中心通道内高速、直接上返，排渣效率高，在复杂不稳定地层施工优势明显，配合高效反循环钻头和合理钻进参数，可在大直径孔钻进中取得良好效果。山东某队通过优化牙轮钻头结构，解决了气举反循环钻进时钻杆堵

塞、孔底岩渣排出不畅等问题，使钻进效率提升 25% 以上[21]。

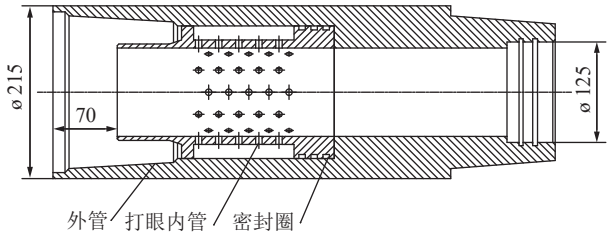


图 5　双壁气水混合器

Fig.5　Double-walled gas-water mixer

对于救援孔而言，气举反循环的核心竞争力在于其较好的深孔携渣能力和对破碎地层的较强适应性，能有效减少孔内复杂情况。其局限性为浅孔段无法启动，决定了它通常不能作为开孔工艺，而是在钻遇深部复杂地层或处理井下复杂情况时作为关键的转换工艺。其适配性决策主要取决于孔深（沉没比）和地层稳定性需求。

3　气动潜孔锤钻进技术

气动潜孔锤钻进以冲击方式破碎岩石，相较于传统回转钻进，在坚硬、强研磨性地层中可获得更高的机械钻速，同时能提升易漏地层的钻进效率和成孔率，且具有较好的“防斜保直”效果，有利于保证井身质量。根据排渣方式的不同，大直径气动潜孔锤钻进可分为正循环、反循环、下排渣 3 种工艺。其中，下排渣扩孔钻进需在钻孔已贯通巷道、井下具备排渣条件时采用，钻进时岩屑在重力作用下沿底部钻孔掉落至井下巷道，该工艺产生的岩屑颗粒大，孔底无重复破碎，钻进效率较高。根据加接钻头方式不同，下排渣钻进可分为正向下排渣扩孔钻进和反向下排渣扩孔钻进。智利圣何塞铜矿曾采用ø660 mm 集束式气动潜孔锤实施正向下排渣扩孔钻进，成功完成了大直径救援孔的施工[4]。

3.1　大直径潜孔锤正循环钻进

气动潜孔锤正循环钻进以高压气体（或气液混合泡沫）为循环介质与动力，驱动孔底的潜孔锤高频冲击破碎岩石，并携带岩屑经钻杆–孔壁环空上返排出地表。该方法配套的主要机具包括：空压机、增压机、常规单壁钻杆及单体/集束式潜孔锤等。

潜孔锤正循环钻进技术虽在中小孔径浅孔中应用广泛，但在破碎坍塌、涌水地层及大直径深孔施工中受到显著限制。随着钻孔直径与深度增加，正循环排渣所需风速和能耗急剧上升，排渣不彻底增加孔内风险。实现大直径潜孔锤正循环高效钻进，可从以下几方面实现技术突破：① 依据孔径、孔深及地层条件，精确匹配空压机与增压机的风量与风压，保障孔底潜孔锤工作与环空携渣所需的最低风速（一般不低于 15 m/s）；② 通过优化钻具组合（如采用扶正器或增大钻杆外径）合理控制环空间隙，在有限供风能力下维持有效上返风速；③ 针对含水地层，研发高效泡沫剂、雾化剂等及其注入工艺，改善岩屑分散性与流动性，防止孔内黏结堵塞。

在魁溪煤矿透水事故救援中，采用气动潜孔锤正循环工艺，配合 6 台空压机、QL200S 潜孔锤及ø760 mm、ø660 mm 钻头，快速完成了救援孔施工[12]。山西王台铺煤矿ø650 mm 排水孔施工中，成功应用“单体大直径潜孔锤+跟管技术”：在钻柱外侧下入较大直径的套管，缩小环空截面积以形成高速上返通道；孔口设置悬挂与密封装置，并与潜孔锤下部跟管装置协同，确保岩屑沿设定路径排出。该工艺在 20 d 内一次性成孔，完成深度 205 m、孔径 650 mm 的大直径钻孔[22]。

潜孔锤正循环在救援中体现了“简单直接”的优势，尤其在浅–中深、含水不严重的硬岩地层中能快速组织施工。但其效率随孔径、孔深增大而衰减的规律显著，是制约其在深大救援孔中广泛应用的主要瓶颈。“跟管技术”等创新是对该瓶颈的现场工程应对，但增加了工艺复杂性，其适配性需通过风量–环空–钻深的量化关系予以明确。

3.2　大直径潜孔锤反循环钻进

潜孔锤反循环钻进时，高压气体沿双壁钻杆环隙下行，驱动潜孔锤工作后，携岩气流经钻杆中心通道返回地面。该工艺返排通道截面显著减小，降低了风量需求，并能有效避免孔底岩屑的重复破碎，具有上返流速高、携岩能力强、排出岩屑粒径大、钻进效率高等优势，已成为矿山地面大直径救援井优先考虑的钻进方法。例如，梅花井矿地面救援井示范项目采用ø830/345 mm 集束式潜孔锤扩孔反循环钻进，平均机械钻速达 3.13 m/h，气力排水和排渣效果良好[23]。

1）反循环建立。建立稳定反循环是大直径潜孔锤反循环钻进工艺的关键，其本质在于使正循环通道流体阻力大于反循环通道流体阻力，实现这一目标的途径主要有 2 种：一是通过增大正循环通道的阻力，如采用机械密封式、孔底水柱密封式等方法；二是减小反循环通道阻力，常见方式包括导流罩式、引射器式以及气举压差式等类型。

针对大直径潜孔锤反循环钻进中反循环建立困

难、井底阻风环易卡阻等问题，中煤科工西安研究院开展了孔口机械密封与孔底水柱密封相结合的反循环钻进工艺(图 6)。

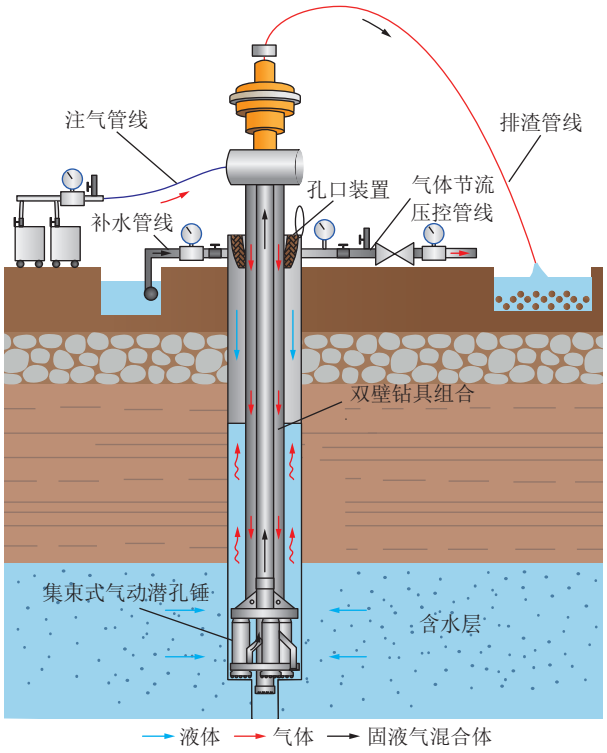


图 6　孔口−孔底联合密封反循环钻进示意

Fig.6　Schematic diagram of combined orifice-hole bottom sealed reverse circulation drilling

该工艺通过 2 种不同机制的协同作用，保障反循环稳定建立：在孔口，采用旋转防喷器或专用密封装置对钻杆与孔壁之间的环空进行刚性物理隔离，实现主动的机械密封，强制携岩气流只能沿双壁钻杆的中心通道上返；同时，在环空内灌注并维持一定高度的水或泥浆柱，利用液柱产生的静压差形成稳定的“液体活塞”效应，构成被动的水柱密封，为气流在中心通道内持续、高效地排出岩屑提供必要的背压辅助[24](图 7)。这种“机械−液柱”复合密封方式，有效克服了单一密封的局限性，提升了工艺的可靠性。

2)配套钻具。集束式反循环潜孔锤钻进基于孔底与孔口联合密封的设计原理，其配套钻具主要包括集束式反循环潜孔锤、双壁钻杆、双壁止回阀短节及孔口密封防喷装置等。

3)钻进工艺参数。① 注气压力和注气量。提高注气量有助于增强潜孔锤冲击功，从而提升碎岩效率，实践表明ø580/215.9 mm 集束式潜孔锤适用风量为 70 ~ 120 m^3/min。在管路配置不变的情况下，随着注气量的增加，注气压力相应增加(通常≥2.0 MPa)，

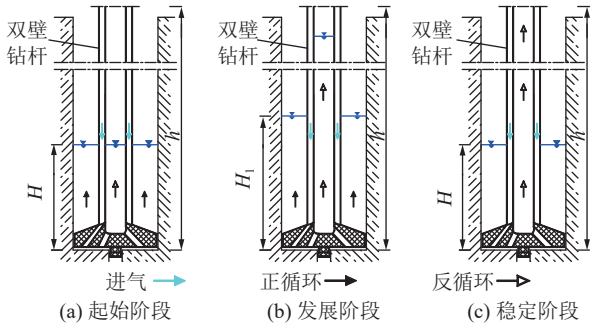


图 7　水柱密封反循环示意[24]

Fig.7　Schematic diagram of water column seal reverse circulation[24]

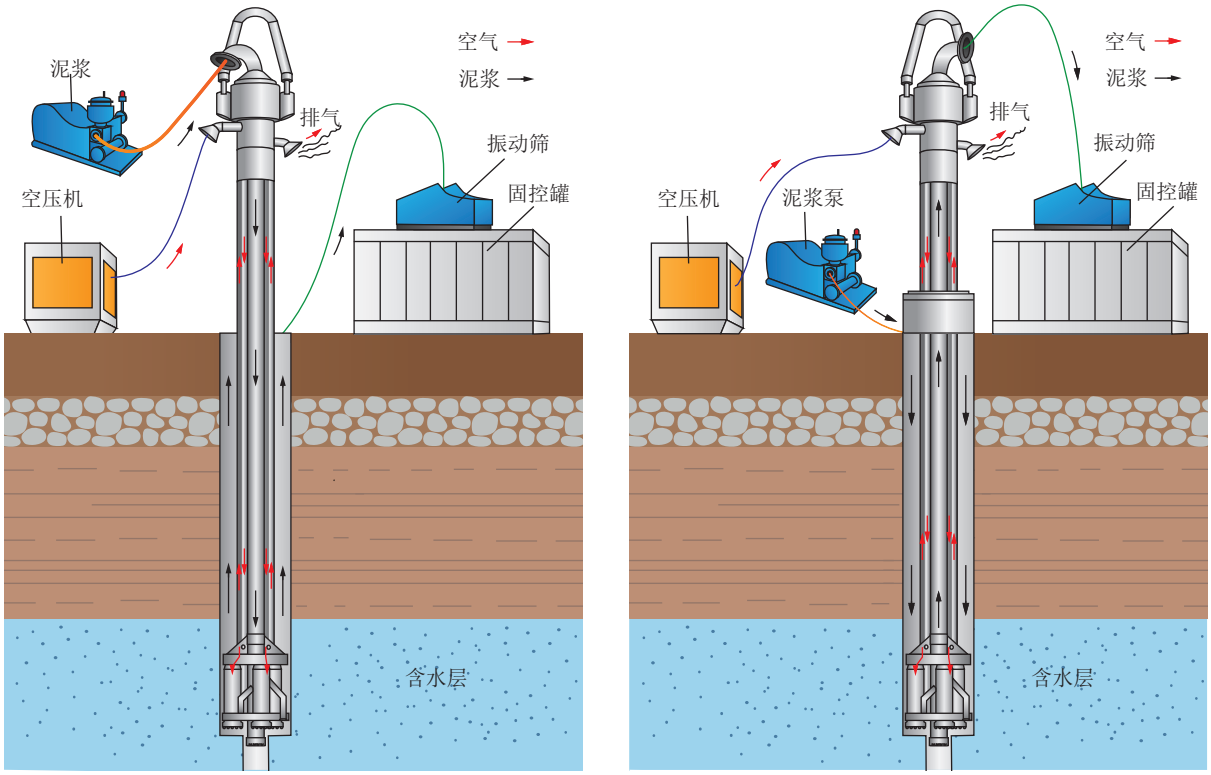
潜孔锤冲击功显著提高，碎岩效率明显增强。通常ø830/346 mm 集束式潜孔锤适用风量为 90 m^3/min。② 注液量。为建立并维持稳定的反循环，需在环空中保持一定的水柱高度。由于钻进过程中上返流体携液量动态变化，而注液一般为恒定量，为确保反循环可靠形成，参考任楼煤矿先导试验与梅花井煤矿示范工程经验，采用较大注液量、维持较高液柱高度有利于反循环通道畅通。ø580/215.9 mm 潜孔锤注液量不宜低于 8 m^3/h，ø830/346 mm 潜孔锤注液量不宜低于 15 m^3/h。注液量同时受地层岩性影响，泥岩地层受水化作业需适当增加注液量，砂岩地层则可酌情减少。③ 钻压。潜孔锤主要依靠冲击作用碎岩，单只潜孔锤工作时钻压一般约为 10 kN，继续增加钻压对机械钻速提升有限。ø850/346 mm 集束式潜孔锤钻进试验表明，10 ~ 20 kN 的钻压可保障正常碎岩，钻压进一步增加会导致扭矩急剧上升，且易引起反循环通道不畅。综合试验结果，推荐钻压宜控制在 10 ~ 20 kN。

潜孔锤反循环技术是当前解决硬岩、含水层大直径救援孔钻进问题的主流高效方案。其技术突破点在于通过“孔口−孔底联合密封”等创新，解决了大直径条件下反循环建立的可靠性难题。该工艺的成功应用，标志着救援孔钻进从“追求单一指标”向“保障系统协同稳定性”的转变，其参数(气−液−压)协同控制是现场操作的关键。

4　大直径潜孔锤气液双循环钻进技术

常规气动潜孔锤钻进时，孔底背压随钻孔加深而增大，导致潜孔锤工作阻力增加，对空压机风压与风量的要求也随之提高。钻遇深孔或强涌水地层时，潜孔锤钻进效率大幅降低甚至无法正常工作，难以满足矿山大直径深孔、高含水层钻进需求。依托重点研发计划，中煤科工西安研究院研制了大直径潜

孔锤气液双循环钻进配套机具，经室内测试和先导试验，形成了完整工艺，取得良好效果。该技术采用独立的气、液双循环系统，压缩空气经三通道水龙头（或气盒子）、三壁主动钻杆、三壁钻杆及气道转换短节进入潜孔锤驱动其破碎岩石，废气由独立排气通道返回地表，岩屑则通过另一独立的液体通道以正循环或反循环方式排出孔外（图 8）。气液双循环钻进融合了常规泥浆循环与气动潜孔锤钻进的优点，压缩气体循环受孔底背压影响较小，保证了潜孔锤工作效率，泥浆则承担携渣、护壁与清洗孔底功能，显著提升了复杂地层大直径钻孔的适应性与施工能力。



(a) 正循环　　(b) 反循环

图 8　气液双循环钻进示意

Fig.8　Schematic diagram of gas-liquid dual circulation drilling

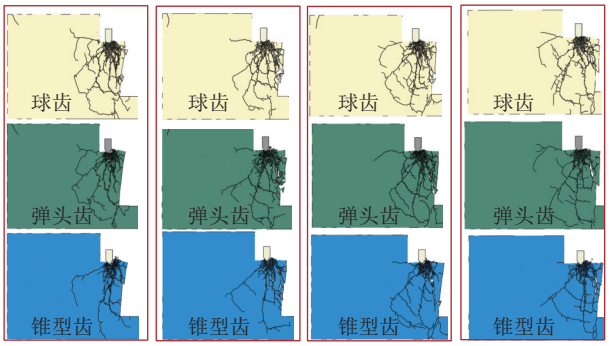
气液双循环钻进技术在大直径钻孔施工中展现出显著优势，但其工程应用仍面临若干关键科学问题与技术挑战，主要体现在大直径扩孔条件下的破岩机理、孔底多相流场特征及岩屑运移规律，以及孔底背压对气动潜孔锤工作性能的影响机制。

4.1　大直径扩孔钻进破岩机理

扩孔钻进过程中，钻头在已有先导孔的基础上对周围岩体进行直径扩大的破碎，此时钻头作用于“台阶状”岩体表面，其应力边界条件显著影响冲击能量的传播路径与岩体的损伤演化规律。在冲击载荷作用下，岩石的破碎是一个高速裂纹萌生、扩展和交汇的过程，可分为 4 个阶段[25-26]：首先是微裂纹在局部应力集中区的随机诱发阶段；随后进入损伤变量的平稳累积阶段；接着裂纹扩展速率骤增，进入损伤加速演化阶段；最终，微裂纹网络相互贯通，形成宏观破碎带。

“扩孔比”k（即扩孔直径与先导孔直径之比）是影响岩石内部的应力重分布特征、裂纹的萌生与扩展行为及破碎坑形态的演化规律的重要因素，图 9 展示了不同扩孔比下岩石应力分布特征与裂纹扩展规律，可以看出，扩孔条件下增强了井壁裂纹的扩展。当 k=3 时，井壁附近裂纹的扩展程度最低，对井壁结构的损伤影响最小，且冲击侵彻深度达到最大值，这一扩孔比岩石自由面的侧向裂纹发育，造成了更大的体积破碎。

不同扩孔比下的位移−力曲线如图 10 所示，扩孔条件下的位移−力曲线积分面积（即冲击能吸收总量）普遍大于常规冲击工况，说明扩孔钻进具有更高的能量利用效率。特别是在 k 介于 2 ~ 3 时，位移−力曲线积分面积达到峰值，表明该区间内能量利用



(a) k=2∶1　(b) k=3∶1　(c) k=4∶1　(d) k=5∶1

图 9　岩石应力分布特征和裂纹扩展规律[8]

Fig.9　Characteristics of rock stress distribution and crack propagation[8]

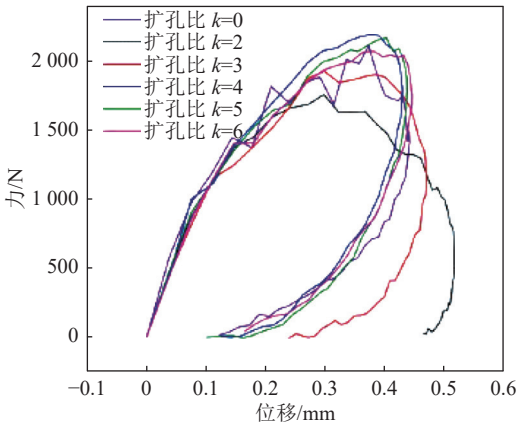


图 10　不同扩孔比下的位移−力曲线[27]

Fig.10　Displacement-force curves under different hole enlargement ratios[27]

率最高。同时，井壁处裂纹数量与扩展尺寸均明显减小，表明用于岩石本体破碎的有效裂纹比例显著提高，进而提升了破碎效率。因此，合理的扩孔比参数设计对于优化冲击能量分配、控制井壁损伤及提高钻进效率具有重要意义。

4.2　大直径扩孔钻进流场分析

为探究大直径扩孔钻进中不同钻井液泵量、回转速度、岩屑质量流量等多种复杂工况下孔底流场以及岩屑运动状态的变化特性，建立了大直径扩孔钻进工况下多相流模型，实时记录岩屑在上返通道和孔底的运动轨迹，分析岩屑在排渣管内部和孔底的运移规律，验证数学模型的准确性，并且为后续的多工况下大直径扩孔钻进反循环流场变化以及排渣管的结构优化提供理论支撑。根据岩屑运动状态的不同将流场划分为 2 个阶段[28]：加速阶段(0 ~ 2 s)和稳定循环阶段 (2 ~ 8 s)，分析在不同阶段下孔底的岩屑运动及分布状态。

在加速阶段(图 11)，孔底岩屑初始数量较少，并呈现向排渣孔附近聚集的趋势。至 0.2 s 时，随着钻井液持续涌入，岩屑在井壁边缘出现局部聚集。此现象主要源于流场发育初期，孔底压力分布仍以静压主导，该阶段高压区集中于井壁边缘，从而导致岩屑在此处初步聚集。随着流场持续发展，孔底岩屑平均速度逐渐增加，并在排渣孔与圆心连线区域出现轻微堆积。该位置对应于低流速区，流体速度的不足直接导致了岩屑的滞留。研究表明，排渣孔的空间位置可能影响孔底岩屑堆积的宏观形貌，进而对系统排渣效率产生潜在影响。

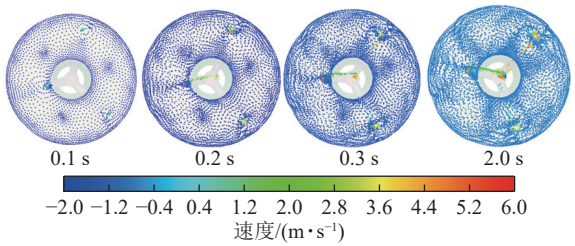


图 11　加速阶段孔底岩屑运动轨迹速度云图

Fig.11　Velocity contour plot of rock debris movement trajectory at the bottom of the hole during the acceleration phase

进入稳定循环阶段(图 12)，流场已充分发育并趋于稳定，孔底岩屑速度分布均匀性显著改善。钻头旋转产生的搅拌作用施加较强的离心力于流体，驱动岩屑随流体作整体圆周运动。此时，在排渣孔附近形成尺度与排渣管截面积相近的旋涡，岩屑在此涡流作用下呈螺旋运动轨迹上升并进入排渣管。这一机制显示，排渣管的直径(即截面积)很可能通过调制旋涡的尺度与强度，成为影响孔底岩屑输运与排渣效率的关键结构参数。

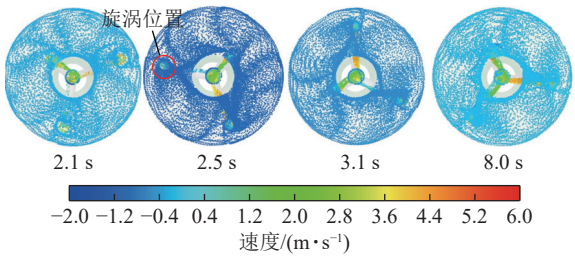


图 12　稳定阶段孔底岩屑运动轨迹速度云图

Fig.12　Velocity contour plot of rock debris movement trajectory at the bottom of the hole during the stable phase

4.3　气动潜孔锤冲击特性与孔底背压关系

潜孔锤工作时，其内部活塞的往复运动驱动钻头冲击岩层。孔底背压对这一过程的影响表现在：① 潜孔锤的活塞在完成冲击后需要回程，为下一次冲击做准备，当孔底背压较高时，活塞回程需要克服

的阻力增大，这直接导致活塞的运动速度减慢、行程可能缩短[29]；② 削弱能量传递效率，为了保证冲击功有效传递至岩石，钻头需要与岩石紧密接触。如果钻压不足，钻头可能被较高的背压和潜孔锤自身的反弹力“顶起”，导致冲击能量无法有效作用在岩石上，而是消耗在钻具系统的振动中。

气液双循环钻进气体独立循环，背压几乎不受井筒内的静液柱压力影响，而是由潜孔锤排气口之外、气体上返通道中存在的压力构成。这部分压力主要包括密封不严导致的上返通道气液压力、流动摩擦压力损耗、地面节流压力等。

为探究气动潜孔锤冲击特性与孔底背压关系，基于差微分原理，采用仿真电算方法，求解潜孔锤冲击参数与背压的关系，进而求解性能参数（冲击功、冲击频率、冲击末速度等）与背压的变化关系。以 GQ-100 型潜孔锤为研究对象，当改变背压并开展相关参数计算时，不同背压条件下潜孔锤的工作参数见表 1，潜孔锤参数变化如图 13 所示。

表 1　GQ-100 型潜孔锤不同背压条件下性能参数（额定风压 P_e=1.67 MPa）

Table 1　Performance parameters of GQ-100 down-the-hole hammer under different back pressure conditions (rated air pressure P_e=1.67 MPa)

背压/Pa	耗风量/(m^3 · min^{-1})	冲击末速度/(m · s^{-1})	结构行程/m	冲击功/J	有效热效率	冲击频率/Hz	冲击功率/kW
98 100	15.48	11.99	0.15	646.94	0.190 0	19.60	12.680 0
196 200	14.70	11.76	0.15	622.95	0.180 0	19.19	11.950 0
294 300	13.09	10.95	0.15	539.89	0.180 0	18.90	10.200 0
490 500	9.82	8.93	0.14	359.00	0.100 0	18.08	6.490 0
686 700	7.02	6.90	0.13	214.64	0.110 0	16.77	3.600 0
882 900	4.37	4.83	0.12	105.30	0.080 0	15.01	1.580 0
981 000	3.19	3.67	0.11	60.81	0.060 0	13.85	0.840 0
1 373 400	0.98	0.34	0.07	0.55	0.001 2	9.54	0.005 3
1 471 500	0.90	0.26	0.06	0.31	0.000 6	8.08	0.002 5

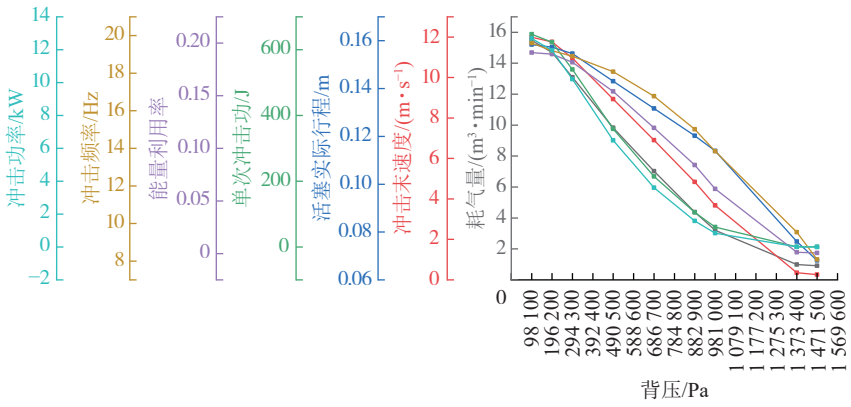


图 13　潜孔锤性能参数随背压变化

Fig.13　Performance parameters of down-the-hole hammer vary with back pressure

计算结果表明：在其他条件保持不变的情况下，随着背压的增大，潜孔锤的耗风量、冲击末速度、冲击能、结构行程、冲击频率、冲击功率、有效热效率呈减小趋势，背压升高会直接导致潜孔锤的冲击功和频率下降，从而影响钻进效率。

4.4　气液双循环配套钻具

气液双循环钻进系统通过三壁钻具与孔壁环状间隙，形成了 4 个互相独立的封闭通道，分别用于压缩气体和泥浆的进、排通道。三壁钻具系统主要包括主动三壁钻杆、气水龙头（或气盒子）、三壁钻杆等（图 14），设计时需进行各部件强度验算、密封性测试及压力损失计算。

① 强度验算：对三壁钻杆开展抗拉、抗扭及抗弯等力学性能验算，确保各连接部位安全可靠；② 密封性测试：对三壁钻具内部及连接部位进行压力测试，防止钻进过程中发生气体或泥浆刺漏及相互串

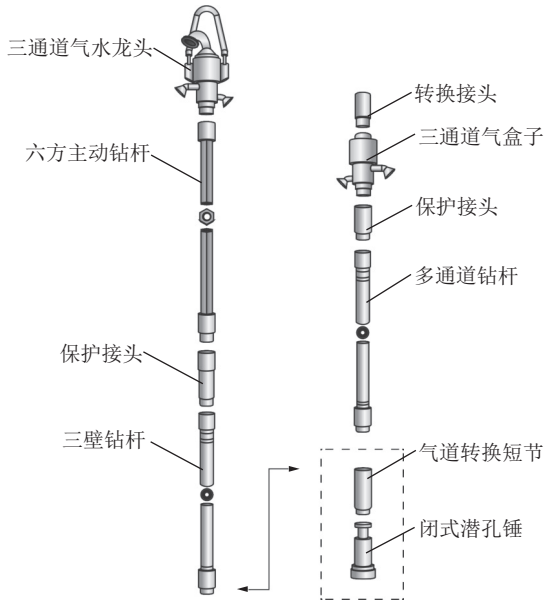


图 14　气液双循环配套钻具系统组成

Fig.14　Composition of the gas-liquid dual circulation supporting drilling tool system

流；③ 压力损失计算：计算气体在钻具内流动时因管壁摩擦产生的沿程阻力，以及因通道截面突变引起的局部阻力。过大的压力损失将要求进一步提高供风压力与风量，因此该项计算可为关键部位的优化设计提供依据。

气闭式潜孔锤是孔底冲击碎岩的动力装置，需具备足够的抗拉、抗压、抗弯、抗扭综合力学性能及良好密封性。为降低压力损失，其排气流道截面应大于进气流道截面，且二者尺寸相差不宜过大。针对大直径救援孔钻进需求，设计研制了ø830/346 mm气闭式扩孔集束潜孔锤(图 15)。该集束式潜孔锤由数个气闭式中空冲击器组成，借鉴油缸密封、导向套支撑结构特点，完成了底部密封机构设计。

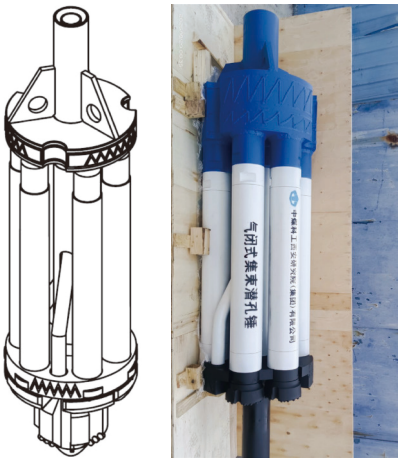


图 15　ø830/346 mm 气闭式扩孔集束潜孔锤

Fig.15　ø830/346 mm air-sealed reaming cluster DTH hammer

4.5　钻进工艺参数

气液双循环钻进工艺参数主要包括注气压力、注气量、冲击频率、钻压和转速等。

1）注气压力和注气量。注气压力与注气量是决定潜孔锤工作性能与钻进效率的核心工艺参数。在传统气动潜孔锤钻进中，所需注气压力必须克服地下水柱压力、系统沿程压力损耗及潜孔锤额定启动压力之和，所需最小注气量则需满足潜孔锤正常耗气量与携带岩屑所需气量中的较大值。而在气液双循环钻进工艺中，气体仅在密闭独立通道内完成“注入—驱动活塞—排出”的循环，不参与携岩。因此，其注气参数仅需满足驱动潜孔锤工作、克服系统压力损失及孔底背压的要求。根据计算，采用气液双循环钻进时，注气压力需在 0.5 ~ 2.5 MPa 内，并随孔深增加而相应提高。由于注气压力通常通过调节注气量来实现，实际钻进中所需注气量应综合考虑空压机性能、孔深等因素确定，一般不宜低于 30 m^3/min。

2）冲击频率。冲击频率是潜孔锤的核心性能参数之一，是指活塞单位时间内对钻头的冲击次数，在冲击功恒定条件下，更高的冲击频率意味着单位时间内对岩石的破碎作用更频繁，有助于提升钻进效率。冲击频率主要受注气量和注气压力影响，潜孔锤室内性能测试表明，其冲击频率与注气量在一定范围内近似呈线性增长关系，但当注气量超过一定值时，频率的增长趋势显著放缓，表明其工作频率存在上限。设计搭建了可控冲击回转试验装置，研究冲击频率对扩孔钻进的影响。通过对比不同冲击频率下破岩比功(图 16)，非扩孔条件下，破岩比功随冲击频率的增加先降低后增加，表明在一定频率范围内，随着频率增加岩石破碎效率逐渐提升，超过一定

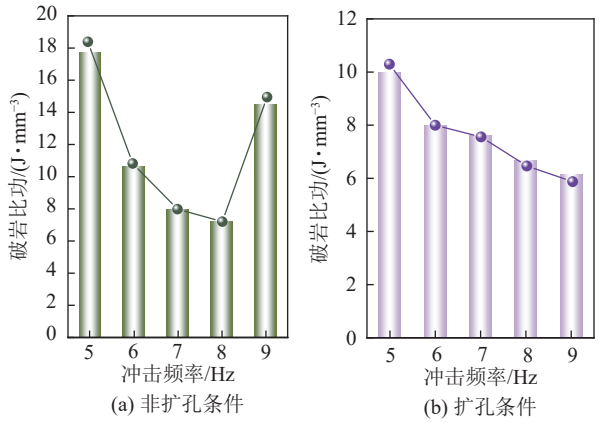


图 16　不同冲击频率下常规钻进与扩孔钻进岩石破岩比功[27]

Fig.16　Specific work of rock breaking between conventional and reamed drilling at different impact frequencies[27]

频率后冲击波相互干扰，反而降低了破岩效率；对于扩孔条件，破岩比功随着冲击频率增加而降低，破岩效率在一定频率范围内并未出现明显降低，表明扩孔条件下需要更高的冲击频率来提升破岩效率。气动潜孔锤额定冲击频率一般为 12 ~ 25 Hz。

3）钻压。钻压是保证钻头与孔底岩石紧密接触、使冲击能量得以有效传递的关键参数。气动潜孔锤以冲击破岩为主，钻压的合理控制至关重要：钻压过小会导致冲击波反射，造成能量损失大、破岩效率低下；钻压过大则会使部分冲击能量被岩层吸收，不仅降低能量传递效率，还会加剧钻头的早期磨损。因此，钻压应控制在既能保障能量有效传递，又能避免过度磨损的合理范围内。通常情况下，钻压宜控制在 5 ~ 20 kN，在钻进大直径钻孔或上向孔时，可依据实际情况适当提高。

4）转速。转速是保证钻头在 2 次冲击间隔之间旋转至新位置，使球齿能持续冲击新鲜岩面的关键参数。转速设置不当会显著影响钻进效率与钻具寿命。转速过低时，钻头会重复破碎“老坑”，造成能量浪费、钻进缓慢，并易在钻头底面形成“梨形”凹槽，导致偏磨和卡钻。转速过高则会使冲击点落在上次冲击形成的破碎坑边缘或外围，无法充分利用岩石的预破碎效应，同样导致效率下降并加速钻头磨损。通过数值模拟分析，得到不同转速下排渣效率的变化规律(图 17)，可以看出，在 15 r/min 情况下排渣效果最好，清渣率达到了 0.92，在转速从 10 r/min 增加到 15 r/min 时清渣率增加了 41%，效果最为明显，在 15 r/min 之后，随着转速的增加清渣率逐渐下降，在转速从 25 r/min 增加到 30 r/min 时，清渣率下降速度最大，达到了 15%，在转速为 15 ~ 25 r/min 时清渣率变化并不大，说明转速为 15 ~ 25 r/min 时为比较合适的转速区间。合理的转速需根据冲击频率、钻头结构及岩石类型等综合确定，根据最优转角理论[30]，对

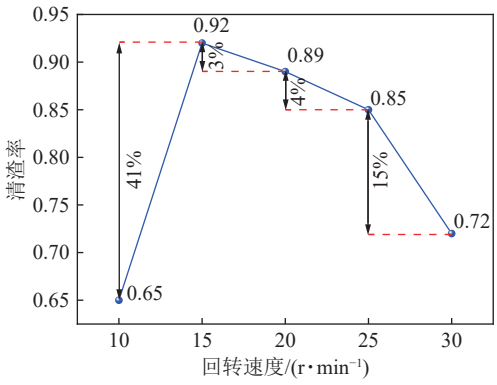


图 17　不同回转速度下清渣率

Fig.17　Slag removal rate at different turning speeds

于ø600 mm 以上气动潜孔锤，推荐的转速为 9 ~ 30 r/min，且钻头尺寸越大，转速通常应相应降低。

5）泥浆泵排量。泥浆泵排量对气液双循环钻进效率有决定性影响，它直接影响孔底岩屑清除、钻头冷却及整体机械钻速。根据最小上返速度计算满足携岩要求的排量，同时考虑循环损耗、设备能力等因素确定所需排量。不同泥浆泵排量清渣效率如图 18 所示，清渣率随着排量增大逐渐增加，在清渣率小于 85% 时，钻井液泵量的提高对于提高排屑速度有着显著影响，在钻井液泵量从 72 m^3/h 增加到 108 m^3/h 时，岩屑排渣效率提高了 33.8%；在清渣率大于 85% 时，在钻井液泵量从 144 m^3/h 增加到 180 m^3/h 时，岩屑输送效率只提升了 6.8%，提高钻井液泵量只能微弱提高排渣速度，也就是说，当钻井液泵量增大到一定程度时，大部分的岩屑均可以顺利排出，提高钻井液泵量将不会显著提高排渣效率。实际应用中不可能无限增加泥浆泵排量，在通常现场投入 2 台 F1300 泥浆泵情况下，排量可达到 100 m^3/h，可满足排渣需求。

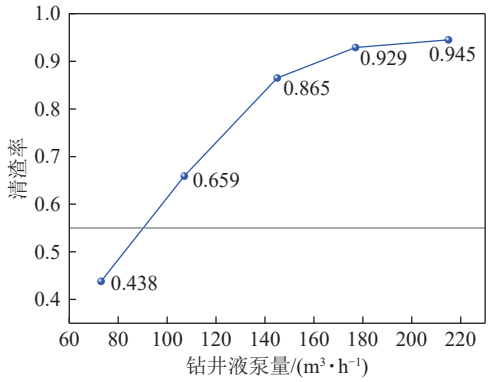


图 18　不同泥浆泵排量清渣率

Fig.18　Discharge capacity and slag removal rate of different mud pumps

4.6　先导试验

在山西某地进行的先导性试验中，成功施工了一口孔径ø350 mm、深度 200 m 的垂直钻孔。试验采用ø350 mm 气闭式潜孔锤+ø219 mm 三壁钻杆+三壁保护接头+三壁六方主动钻杆+三壁气水龙头的钻具组合，实现了泥浆循环携带岩屑与气体循环冲击破岩两套系统的独立、同步运行。试验使用了 1 台空压机供气，注气量为 35 m^3/min，通过在 0 ~ 21 m 及 25.5 ~ 54.0 m 孔段进行实钻试验，重点测试了三壁钻具系统工作性能及密封机构的内外密封效果，采用的主要钻进参数为：钻压 10 ~ 20 kN，转速 25 ~ 30 r/min，泥浆排量 18 ~ 25 L/s，泥浆泵压 1 ~ 3 MPa。

结果表明，全套钻具密封可靠，未出现漏气、串通等问题。试验在灰岩层中累计钻进 44 m，平均机械钻速达 3.94 m/h，冲击功传递良好，取得了较高的钻进效率。

4.7　适用性与局限性

气液双循环钻进时，气体闭环循环使潜孔锤驱动几乎不受孔深与地下水压力的影响，保障了在深孔、高含水层中的冲击效率与工作稳定性；而独立的泥浆循环则充分发挥了其携渣能力强、护壁效果好的特点。因此，该工艺在大直径深孔、复杂不稳定地层及对钻进效率要求高的工程（如救援孔）中具有明显优势。

尽管优势明显，该技术在推广应用中也面临以下限制：① 系统复杂性与应急响应速度的矛盾。救援初期需要快速动员、安装和开钻，该技术设备庞杂（空压机、泥浆泵、三壁钻具系统），对场地条件要求高，在偏远或场地受限时可能难以快速部署，且专用钻具（如三壁钻杆）储备有限，一旦损坏，应急更换可能困难。② 极端地层适应性有限。虽然对含水地层适应性强，但在极端破碎、漏失严重的地层中，泥浆大量漏失会导致成本激增且护壁困难；在极坚硬的岩层中，潜孔锤本身碎岩效率会下降，钻头磨损加剧，可能需频繁提钻更换，影响连续作业。③ 工艺操作要求严格。需要同时精确控制气、液 2 套循环系统的参数（如压力、排量），并对密封可靠性要求极高，任何环节的泄漏或串流都会导致工艺失效，对操作人员的技术水平和经验依赖性强。④ 高昂成本在救援中的特殊考量。尽管救援不惜代价，但高昂的初始投资和维护成本可能影响该技术在基层救援队伍的装备普及率，并非所有救援单位都能随时调用。

因此，该技术并非适用于所有救援场景的通用方案，而是针对地层复杂、孔深较大、对钻进速度有极端要求的重点救援任务的优选方案。成功的应用取决于前期的精准地质判断、高效的设备与人员调度能力，以及现场高超的技术管理与实施水平。在条件匹配时，它能成为突破钻进瓶颈、决定救援成败的关键技术。

5　结　　论

1）构建了矿山大直径救援钻孔的钻进工艺分类体系，系统对比了牙轮多级扩孔、PDC 多级扩孔、气举反循环及气动潜孔锤 4 种钻进方法的工艺特点、适用条件与关键技术，揭示了各工艺在破碎岩层、坚硬地层及富水地层中的适应性差异，为复杂地质条件下救援钻孔的快速优选与精准设计提供了理论依据。

2）通过不同扩孔比下岩石应力分布特征和裂纹扩展规律分析，得出当 k=3 时更有利于岩石破碎；将孔底流场演化划分为加速阶段（0 ~ 2 s）和稳定循环阶段 (2 ~ 8 s)，指出排渣管截面积是影响携屑效率的核心结构参数；揭示了潜孔锤冲击性能随背压增大而下降的规律：当背压从 0.1 MPa 升至 1.5 MPa 时，冲击功率衰减超过 99%。上述成果为深孔大直径潜孔锤的结构优化及工艺参数调控提供了理论支撑。

3）开展了气液双循环钻进技术的现场先导试验，验证了三壁钻具系统及气闭式潜孔锤结构设计的合理性与密封可靠性，实现了气、液两路循环介质的独立稳定运行。在ø350 mm 孔径、200 m 孔深条件下，平均机械钻速达 3.94 m/h，充分证实该技术在深孔、复杂地层条件下具备良好的钻进效率与工程适应性，是提升矿山应急救援钻孔能力的关键技术路径之一。

参考文献(References)：

[1] 袁亮，张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报，2019，44(8)：2277−2284.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277−2284.

[2] 田宏亮，邹祖杰，郝世俊，等. 矿山灾害生命保障救援通道快速安全构建关键技术与装备[J]. 煤田地质与勘探，2022，50(11)：1−13.
TIAN Hongliang, ZOU Zujie, HAO Shijun, et al. Key technologies and equipment of quickly and safely building life support and rescue channel in mine disaster[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 1−13.

[3] 王志坚. 矿山钻孔救援技术的研究与务实思考[J]. 中国安全生产科学技术，2011，7(1)：5−9.
WANG Zhijian. Considering and researching of drilling technology in mine rescue[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(1): 5−9.

[4] LIU L Y, ZHOU J, KONG L R, et al. Analysis of the dynamic response and impact parameters of pneumatic down-the-hole hammer drilling rescue holes[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 228: 211935.

[5] 田宏亮，张阳，郝世俊，等. 矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J]. 煤炭科学技术，2019，47(5)：29−33.
TIAN Hongliang, ZHANG Yang, HAO Shijun, et al. Technology and equipment for rapid safety construction of emergency rescue channel after mine disaster[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 29−33.

[6] 杨涛, 杜兵建. 山东平邑石膏矿矿难大口径救援钻孔施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(5): 19−23.
YANG Tao, DU Bingjian. Construction technology of large diameter rescue borehole in Pingyi gypsum mine disaster of Shandong[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(5): 19−23.

[7] 唐永志, 赵俊峰, 丁同福, 等. 复杂地质条件下大直径救生孔成孔关键技术与工艺[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 22−26, 39.
TANG Yongzhi, ZHAO Junfeng, DING Tongfu, et al. Key technology and technique of large diameter rescue borehole drilling under complicated conditions geological[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 22−26, 39.

[8] 姚宁平, 邹祖杰, 张忠海, 等. 高效钻孔救援技术及装备[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(9): 217−235.
YAO Ningping, ZOU Zujie, ZHANG Zhonghai, et al. Technologies and equipment for efficient drilling rescue[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(9): 217−235.

[9] 石智军, 赵江鹏, 陆鸿涛, 等. 煤矿区大直径垂直定向孔快速钻进关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 13−18.
SHI Zhijun, ZHAO Jiangpeng, LU Hongtao, et al. Key technology and equipment of rapid drilling for large diameter vertical directional borehole in mine area[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 13−18.

[10] 郝世俊, 张晶. 大直径救援井高效钻井技术及装备现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 75−81.
HAO Shijun, ZHANG Jing. Development status and prospect of high-efficiency drilling technology and equipment for large-diameter rescue wells[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 75−81.

[11] 麻坦, 诸葛雷, 赵伟东. 矿山地面救援应急响应与大直径钻孔关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 192−202.
MA Tan, ZHUGE Lei, ZHAO Weidong. Emergency response and critical technologies for large-diameter boreholes in mine rescue through surface drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 192−202.

[12] 赵江鹏, 郝世俊. 气动潜孔锤技术在矿山事故钻孔救援中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 24−34.
ZHAO Jiangpeng, HAO Shijun. Application of pneumatic DTH hammer in drilling rescue of mine accidents[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 24−34.

[13] 纪天坤. 三通道闭式循环空气锤钻进系统流场分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
JI Tiankun. Analysis on flow field of closed-cycle DTH air hammer drilling system with three channels[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[14] 郭辉. 杭来湾煤矿大直径钻井工程钻头选型[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 112−114.
GUO Hui. Type selection of drilling bit for large diameter drilling in hanglaiwan coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 112−114.

[15] 莫海涛. 煤矿区地面大口径定向井成井工艺研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.
MO Haitao. Research of construction technology on large-diameter directional borehole in coal mining areas[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2014.

[16] 李斌, 张跃恒, 刘庆东, 等. 矿区大直径排水孔成孔技术应用研究[J]. 建井技术, 2025, 46(4): 8−15.
LI Bin, ZHANG Yueheng, LIU Qingdong, et al. Research on the application of large diameter drainage hole piling technology in minefield[J]. Mine Construction Technology, 2025, 46(4): 8−15.

[17] GUO L H, CHENG H, YAO Z S, et al. Study on the flow field of multi-phase coupling slag discharge and the influencing factors of slag discharge effect in gas lift reverse circulation of drilling shaft sinking[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2024, 11: 82.

[18] YE H Y, LAI Z W, TIAN L J, et al. Air-lifting reverse-circulation drilling in deep geothermal wells and the effect of dual-wall drill pipe depth down the hole[J]. Energies, 2025, 18(5): 1224.

[19] 莫海涛, 郝世俊, 赵江鹏. 煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 190−197.
MO Haitao, HAO Shijun, ZHAO Jiangpeng. Key technology and equipment of hole-forming for surface large diameter borehole in coal mine area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 190−197.

[20] 程林, 王克虎, 齐新超, 等. 气举反循环钻进工艺在严重漏失地层施工中的应用[J]. 地质装备, 2025, 26(1): 44−48.
CHENG Lin, WANG Kehu, QI Xinchao, et al. Application of air-lift reverse circulation drilling technology in severe leakage formations[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2025, 26(1): 44−48.

[21] 赵元强. 大口径钻探应急救援技术研究与空气反循环钻进工艺应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 226−231.
ZHAO Yuanqiang. Application of air reverse circulation technology in the rapid completion of large-diameter rescue passages[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 226−231.

[22] 王立峰, 张晓昂, 徐影. 单体大直径空气潜孔锤钻井工艺研究及应用[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(8): 65−67.
WANG Lifeng, ZHANG Xiaoang, XU Ying. Study on and application of unicum large diameter pneumatic DTH hammer drilling technology[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(8): 65−67.

[23] 赵江鹏. 大直径潜孔锤气体反循环钻井技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 218−222.
ZHAO Jiangpeng. Gas reverse circulation drilling technology for large-diameter DTH hammer[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 218−222.

[24] 莫海涛. 集束式潜孔锤水柱密封反循环形成机理与过程控制研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
MO Haitao. Research on reverse circulation formation mechanism and process control of cluster-type pneumatic DTH hammer

with water column seal downhole[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2021.

[25] LI Y L, PENG J M, ZHANG Y L, et al. Rock indentation characteristics induced by spherical button subjected to dynamic and quasi-static loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(7): 5253−5273.

[26] ZHANG C, GAO K, ZHAO Y, et al. Simulation and experimental study on rock-breaking mechanism of the reverse rotary torque self-balancing dual drill bit[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(12): 16571−16586.

[27] 张丛珊. 钻孔救援扩孔−冲击作用下岩石损伤演化规律与破碎机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2025.
ZHANG Congshan. Research on rock damage evolution and fragmentation mechanism under reaming-impact in rescue drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2025.

[28] 赵研, 刘松赫, 郝世俊, 等. 大直径救援井井底流场模拟与实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(9): 247−255.
ZHAO Yan, LIU Songhe, HAO Shijun, et al. A simulation and experimental study of bottomhole flow field in a large-diameter rescue borehole[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(9): 247−255.

[29] 王圣林. 集束式气动潜孔锤钻进性能研究 [D]. 重庆: 重庆科技学院, 2022.
WANG Shenglin. Research on drilling performance of cluster pneumatic down-the-hole hammer[D]. Chongqing: Chongqing University of Science & Technology, 2022.

[30] 周兢. 矿山灾害应急救援生命保障孔钻井工艺研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 128−134.
ZHOU Jing. Research on drilling technology for mine disaster rescue life support holes[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 128−134.