



# 煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究

刘送永 徐保龙 秦立学 孟庆皓 李洪盛

## 引用本文：

刘送永, 徐保龙, 秦立学, 等. 煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 229–239.

LIU Songyong, XU Baolong, QIN Lixue. Study on long-distance fast advance drilling technology strategy and supporting equipment in coal mine roadway tunneling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 229–239.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0012>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 煤矿井下硬岩层快速成孔钻进技术与发展趋势

Fast drilling technology and development tendency of hard rock in underground coal mine

煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c4d80dfb-60e4-4e1f-bc17-914cb10c59b2>

#### 煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望

Present situation and prospect of directional drilling technology and equipment while drilling measurement in underground coal mine

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/93c04537-26ce-442d-811b-15a25771f337>

#### 煤矿井下长距离大垂距定向钻进工艺精准透巷技术研究

Research on direction drilling in accurate connecting roadway technology with long-distance & large-elevation in underground mine

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f6a888e-a81a-4176-9bc4-b2345add4a33>

#### 我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望

40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1489653e-bd3a-4f34-a308-6cd0de2015e7>

#### 煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备

Directional drilling technology and equipment for efficient and accurate gas drainage underground coal mine

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 65–72 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.mcq22-24>

#### 煤矿钻探用钻杆疲劳寿命预测研究

Study on fatigue life prediction of drill pipe for mine drilling

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/13453010-7b94-4d5e-9b96-c651a0edb136>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



刘送永,徐保龙,秦立学,等.煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究[J].煤炭科学技术,2023,51(S2): 229–239.

LIU Songyong, XU Baolong, QIN Lixue, et al. Study on long-distance fast advance drilling technology strategy and supporting equipment in coal mine roadway tunneling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 229–239.

移动扫码阅读

## 煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究

刘送永<sup>1</sup>,徐保龙<sup>1,2</sup>,秦立学<sup>3</sup>,孟庆皓<sup>4</sup>,李洪盛<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 西安水远山长能源科技有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 江苏神盾工程机械有限公司, 江苏 淮安 211600; 4. 鄂托克旗昊源煤焦化有限公司, 内蒙古 乌海 016030)

**摘要:**随着我国煤炭资源开采深度的逐步增加,地质条件和围岩环境日趋复杂,掘进时面临水害、瓦斯等灾害的程度日益增大,超前钻孔作为探查和治理灾害的必要通道,日益严重的采掘失衡对长距离快速超前钻探技术的需求极为迫切。首先,结合煤矿安全相关规程和煤矿巷道掘进工况,分析了巷道掘进对于超前钻探的需求。然后,根据“长距离快速超前钻探”的要义,分析了目前钻探工艺技术存在的“复杂地层钻孔深度不足”“钻孔偏斜严重”“硬岩钻进效率低”3个关键技术问题。其次,针对3个关键技术问题总结研究了“复杂跟管钻进技术”“钻孔防偏技术”“硬岩高效钻进技术”。针对复杂地层因钻孔坍塌难以成孔的难题,总结了不同护孔技术及配套机具,分析了其对于不同工况的适用性,开发了孔底驱动快速跟管成套机具,将复杂地层钻孔深度延长2~3倍;针对回转钻进工况下的超前探孔防偏难题,分析了回转钻进偏斜的力学机理,从抑制钻孔倾角和方位角的角度分析了防偏钻具的原理、结构以及性能,研发了能够同时稳定倾角和方位角的单动式保直钻具,钻进过程中外管不转、芯轴带动钻头旋转破岩,现场试验表明能够同时将倾角和方位角偏斜率控制在1.5(°)/100 m;针对硬岩巷道超前钻探存在的效率低、破岩刀具磨损快等问题,分析了不同硬岩高效破岩机理并综合阐述了对应的破岩机具及配套技术与装备,研制了基于主动抑振原理的小直径稳压提速钻具,在岩石坚固性系数f为12的煤系石灰岩地层中提速1.5~2倍。最后,针对超前探钻孔“护孔”“防偏”“提速”3个关键需求,提出了相应工艺机具的发展方向。

**关键词:**煤矿巷道;超前钻探;跟管钻进;保直钻进;快速钻进

中图分类号:TD263.3 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)S2-0229-11

## Study on long-distance fast advance drilling technology strategy and supporting equipment in coal mine roadway tunneling

LIU Songyong<sup>1</sup>, XU Baolong<sup>1,2</sup>, QIN Lixue<sup>3</sup>, MENG Qinghao<sup>4</sup>, LI Hongsheng<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Xi'an Shuiyuanshanchang Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 3. Jiangsu Aegis Construction Machinery Co., Ltd., Huai'an 211600, China;  
4. Etuoke Haoyuan Coal Coking Co., Ltd, Wuhai 016030, China)

**Abstract:** With the gradual increase in the depth of coal resource extraction in our country, geological conditions and surrounding rock environment are becoming increasingly complex. The degree of water damage, gas and other disasters faced during excavation is increasing. As a necessary channel for exploring and controlling disasters, advanced drilling is an urgent need for long-distance and rapid advanced drilling technology due to the increasingly serious mining imbalance. Firstly, based on the relevant safety regulations of coal mines and the excavation conditions of coal mine tunnels, the demand for advanced drilling in tunnel excavation was analyzed. Then, based on the es-

收稿日期:2023-01-14 责任编辑:周子博 DOI:10.12438/cst.2023-0012

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

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

通讯作者:徐保龙(1988—),男,山东济宁人,助理研究员,博士研究生。E-mail: tb20050022b4@cumt.edu.cn

sence of “long-distance rapid advance drilling”, three key technical problems of “insufficient drilling depth in complex formations”, “severe drilling deviation”, and “low drilling efficiency in hard rock” in current drilling technology were analyzed. Secondly, a summary study was conducted on three key technical issues, including “complex pipe following drilling technology”, “drilling deviation prevention technology”, and “efficient hard rock drilling technology”. In response to the difficulty of drilling holes in complex formations due to bore-hole collapse, different hole protection technologies and supporting equipment were summarized, and their applicability to different working conditions was analyzed. A complete set of bottom driven fast pipe following equipment was developed, which extended the drilling depth in complex formations by 2-3 times; In response to the problem of preventing deviation in advanced drilling under rotary drilling conditions, the mechanical mechanism of deviation in rotary drilling was analyzed. The principle, structure, and performance of anti deviation drilling tools were analyzed from the perspective of suppressing drilling inclination and azimuth angles. A single action straight drilling tool was developed that can simultaneously stabilize inclination and azimuth angles. During the drilling process, the outer pipe did not rotate, and the core shaft drove the drill bit to rotate and break the rock. On site experiments have shown that it is possible to simultaneously control the tilt angle and azimuth deviation rate to  $1.5(^{\circ})/100\text{ m}$ ; In response to the problems of low efficiency and fast wear of rock breaking tools in advanced drilling of hard rock tunnels, this paper analyzes the efficient rock breaking mechanisms of different hard rocks and comprehensively elaborates on the corresponding rock breaking tools and supporting technologies and equipment. A small diameter stable pressure and speed increasing drilling tool based on active vibration suppression principle has been developed, which can increase the speed by 1.5 to 2 times in coal bearing limestone formations with  $f$ (rock firmness coefficient) coefficient of 12. Finally, in response to the three key requirements of advanced drilling, namely “hole protection”, “deviation prevention”, and “speed improvement”, the development direction of corresponding process equipment is proposed.

**Key words:** coal mine roadway; advance drilling; follow pipe drilling; straight drilling; fast drilling

## 0 引言

目前,我国煤炭开采已经逐渐向深层和复杂地层发展,对深部、复杂地层煤炭资源安全高效开采技术和装备提出了更高的要求和新的挑战<sup>[1]</sup>。由于地应力的增大,通常深部、复杂地层岩石的弹性模量、硬度和破坏强度等随之增大,单轴抗压强度通常达到150 MPa以上。巷道掘进是煤矿井工开采的首要工程,我国年均掘进总工程量超过13 000 km,其施工的安全和高效性至关重要,受瓦斯、水害等灾害威胁的程度随着开采深度、地质复杂性而日益增强。并且,“逢掘必探”,掘进工作面对于高精准地质异常体的探查以及治理提出了更高的要求,例如高压瓦斯聚集区、富水异常区、异常构造带等。

与范围圈定的煤矿井下回采工作面相比,掘进工作面超前探测的难度更大<sup>[2]</sup>。通常利用钻探和物探的技术手段,在巷道掘进工作面前方探测工程地质及水文地质情况,然后根据探测结果科学制定掘进生产方案。采用物探方法可以初步判断掘进工作面前方以及上下一定范围内的异常区,而钻探是获取异常区资料最直接的一种技术手段。另外对于定向长钻孔可进行孔内物探探查。异常区探查完毕后需要对其进行治理,如瓦斯富集区的抽采,富水异常区的疏水降压、注浆驱替,异常构造带的注浆加固,均需要钻孔作为治理的通道。

另外,采掘失调是造成煤炭高效开采的主要原

因之一,而巷道掘进速度慢是造成采掘失调的主要原因<sup>[3]</sup>。造成掘进速度慢的原因之一是“随掘随探”“掘探交替”的传统“短探短掘”模式存在单次掘进距离短、交替作业辅助作业时间长等问题,已经不能满足巷道快速掘进的需求。因此,我国煤矿巷道掘进亟需解决长距离快速超前钻探的问题,为长距离高效掘进提供准确和高效的超前地质预报。

## 1 超前钻探需求

《煤矿安全规程》<sup>[4]</sup>中规定:煤矿巷道掘进前,应当掌握掘进工作面前方地质构造、煤层及其顶底板岩性、煤(岩)与瓦斯/二氧化碳突危险区、受水威胁区等地质情况。井下坑道钻探技术是实现巷道掘进超前探测的最直观和最重要的途径。如图1所示,巷道掘进前要探明巷道左右两帮以外各15 m范围内的地质情况。在掘进工作面方向,超前钻探距离根据瓦斯压力、水压、煤岩特征等综合特征进行确定,一般情况下超前距不低于20 m。在剖面上,需要探明顶底板隐伏构造,防止掘进过程中构造导通瓦斯聚集区、富水区等异常区域,遏制事故的发生。

对于中硬—硬煤层以及稳定的岩层,可以施工定向长钻孔(图2)进行超前探测,利用定向钻进装备研制巷道走向方向一次性施工500 m甚至更深的钻孔,实现长探长掘,能够极大地提高施工进度,提升经济效益。但是对于碎软煤层,由于水力冲刷作用会导致孔壁坍塌,难以在煤层中长距离成孔。相关研究

人员尝试从煤层顶底板稳定岩层中施工长距离定向钻孔主孔,然后向煤层中施工分支孔进行消突和瓦斯抽采,分别称为煤层顶板梳状钻孔和煤层底板梳状钻孔<sup>[5-6]</sup>。但是由于钻具造斜率以及分支孔工艺限制,难以将分支孔间距控制在抽采半径允许的范围之内,因此该方法仅限于用来局部预消突,后续仍要采用普钻加密钻孔进行探查。



图 1 煤巷掘进超前钻探示意

Fig.1 Schematic of advance drilling for coal roadway excavation

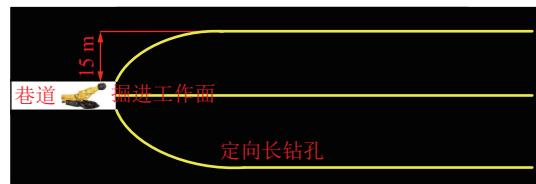


图 2 定向长钻孔示意

Fig.2 Schematic diagram of directional long borehole

## 2 长距离快速超前钻探关键技术问题

目前巷道掘进超前钻探有 2 种方法,一种是普通回转钻进,另一种是定向钻进方法。普通回转钻进方法为:坑道钻机动力头夹紧钻杆带动钻杆回转,钻杆的转动为钻头切削孔底煤岩提供转矩;钻机的进给系统带动动力头向孔内推进钻杆,进而将轴向进力传递给钻头压入孔底煤岩。定向钻进方法为:孔底钻头破岩转矩来自孔底动力马达,动力马达依靠高压水驱动,高压水由高压水泵通过钻杆进入动力马达;定向钻进过程中,整体钻柱不旋转,旋转部位为孔底动力钻具的传动轴总成和钻头,通过控制动力马达的弯头朝向来调整钻孔轨迹;动力马达后接随钻测量装置,随钻测量装置采集孔内几何参数或者地质参数,通过线缆、泥浆脉冲、电磁波传递至孔外防爆电脑,对钻孔轨迹进行实时监测和调整。巷道长距离快速超前钻探存在 2 个要义:一是实现长距离钻进,另一个是实现快速高效钻进。目前巷道长距离钻探存在的关键技术问题有:

1)复杂地层钻孔深度不足。钻孔深度不足导致灾害探查与治理不到位,为后期掘进带来巨大的安全隐患。不稳定地层钻进是导致钻孔深度不足的主要原因,如地层破碎坍塌,导致卡钻、埋钻,难以继续钻进。

2)钻孔偏斜问题。钻孔偏斜直接影响探查的精度,《防治煤与瓦斯突出细则》<sup>[7]</sup>的规定,在掘进碎软煤层煤巷时,需要预抽巷道左右 15 m 内煤层瓦斯,目前,大部分开采碎软煤层的煤矿在底抽巷施工穿层钻孔预抽瓦斯,但由于钻孔的偏斜,钻孔间距可能大于瓦斯钻孔抽采半径,形成抽采盲区<sup>[5]</sup>。探放水也需要施工大量的探放水钻孔,偏斜将导致钻孔无法达到预定靶区,疑似富水异常区无法得到有效验证,为后续巷道掘进留下隐患。尤其是长距离超前钻探时,钻孔偏斜量会随着孔深增大而累积增加,深度越深偏斜量越大。

3)硬岩钻进效率低。钻遇坚硬岩层时,钻速急剧下降,钻头快速磨损和崩齿,从而造成灾害探查治理效率低,影响矿井安全高效接续。

## 3 长距离快速超前钻探关键技术

为了解决上述 3 个关键技术问题,笔者调研了相关研究成果,并针对现有技术的不足,提出并研究了新型长距离快速超前钻探工艺及配套机具,总结形成了如图 3 所示的巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略。

### 3.1 复杂地层套管护孔钻进技术

#### 3.1.1 跟管及套管钻进技术现状

钻进碎软煤层、破碎带、水敏性地层等不稳定地层时,由于钻孔孔壁坍塌造成卡钻、埋钻,使得钻孔不能继续施工。地面钻井主要通过泥浆护壁来解决该问题<sup>[8-9]</sup>,泥浆护壁作用产生的条件为钻井液静液柱压力与地层空隙压力的压力差,从而使得泥浆失水产生泥饼保护孔壁。但是在煤矿井下近水平钻进中,孔内无法形成液柱压力,限制了泥浆护壁技术的应用。因此,目前煤矿井下巷道超前钻探过程中针对钻孔坍塌难以继续钻进的问题,围绕着使用套管护壁技术来解决。鉴于破碎地层钻进后难以二次下放套管的难点,技术聚焦点在随钻跟管钻进,即施工钻孔的过程当中,套管随着钻杆不断进行下放,从而起到保护钻孔孔壁延长钻孔深度的作用。

1)空气潜孔锤(DTH)偏心跟管技术。潜孔锤跟管钻进是指在破碎松散地层或卵砾石层等不稳定地层中采用空气潜孔锤钻进成孔,如图 4 所示,同时套管随钻头跟入孔内<sup>[10-11]</sup>。跟进的套管具有稳定孔壁和保护孔壁的作用,而且钻进、排渣和护壁同时进行,可以很好地解决复杂地层中护壁难的问题,使钻进

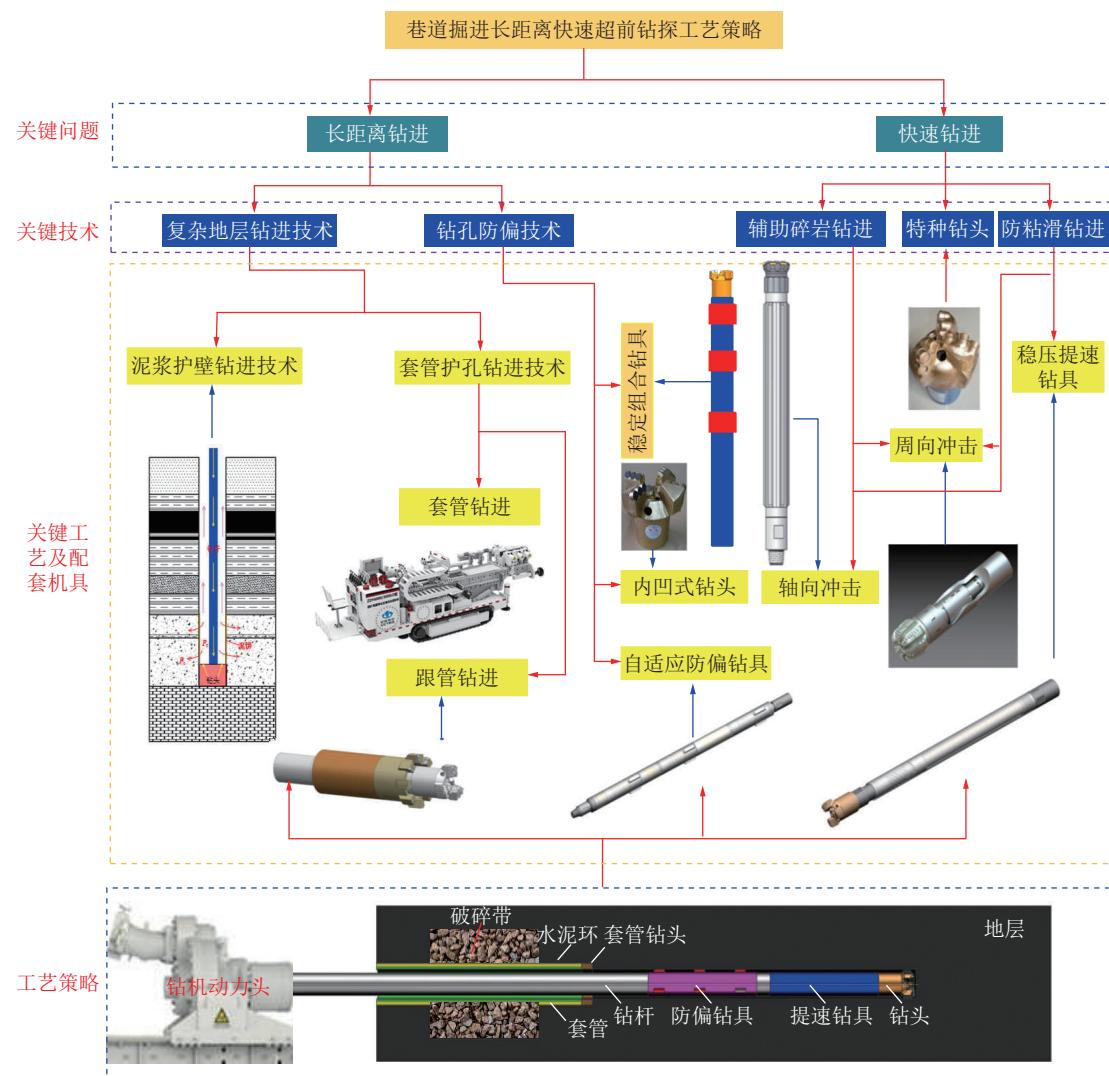


图3 巷道长距离快速超前钻探工艺策略  
Fig.3 Long-distance rapid advance drilling technology system of roadway



图4 空气潜孔锤(DTH)偏心跟管钻具示意

Fig.4 Schematic diagram of air DTH hammer eccentric pipe following drilling tool

工作得以顺利完成。在钻孔完成后,潜孔锤可以从套管中顺利提出,套管留在孔内。但是该种工艺存在以下不足:①跟管钻进过程中套管不旋转,在近水

平孔内钻渣在重力作用下沉积在下孔壁难以排出,存在卡埋套管的风险;②在钻遇含水地层时,水与岩粉混合容易粘结在钻具周围,难以排出,从而导致无法继续钻进的后果。

2)空气套管钻进技术。李乔乔等<sup>[12-13]</sup>针对碎软煤层研发了空气套管钻进工艺,其主要方法为:

**套管钻进。**从套管中间下入组合钻具,通过套管鞋,组合钻具沿套管内部进入锁定总成,固定在套管底部。岩屑随着压风沿着套管与孔壁之间的环空间隙返出孔外,套管钻进穿过松散破碎煤层至达到钻机安全扭矩时停止钻进,如图5a所示。

**组合钻具回收。**当套管钻进穿过松散破碎岩层或达到安全扭矩时,将套管提出距离钻孔底部1~2 m,从套管内下入小直径钻杆,将钻孔底部组合钻具随打捞装置一起提出,如图5b所示。

**二级孔施工。**套管稳定塌孔段的孔壁,从套管

中间下入 $\varnothing 75\text{ mm}$ 钻头到孔底, 细钻杆带动钻头回转钻进至设计孔深, 压缩空气从小直径钻杆中心通道进入孔底, 携带煤粉颗粒沿着钻杆与孔壁环状空间返出, 如图 5c 所示。



图 5 空气套管钻进工艺示意

Fig.5 Schematic diagram of air casing drilling process

本方法领眼钻头、扩眼工具、套管钻头破碎煤岩所需转矩均需要套管进行传递, 因此对套管材质要求极高, 从而增大了成本。

3) 双管双动钻进技术。双管双动空气定向钻进分为定向钻进和复合钻进 2 个工艺过程<sup>[14]</sup>。如图 6 所示, 定向钻进时, 钻杆动力头带动螺杆钻具滑动定向钻进, 同时套管动力头带动套管以较低转速回转跟管钻进, 实现套管随钻护孔, 钻屑从内外环空排出孔外, 实现连续钻进。复合钻进时, 钻杆动力头带动螺杆钻具复合钻进, 同时套管动力头带动套管以较低转速回转跟管钻进, 并随钻护孔。该种钻进方法需要配套双动力定向钻机。

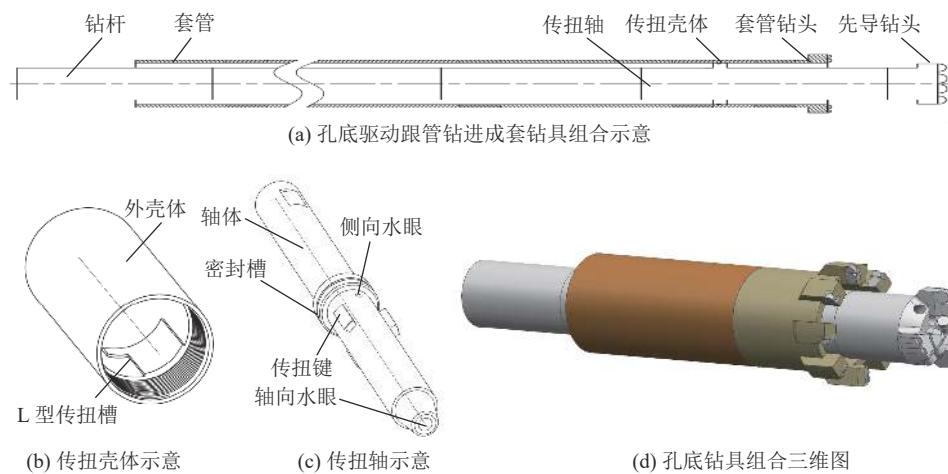


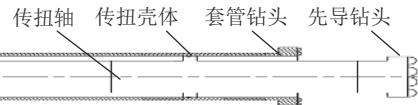
图 6 双管双动钻进过程

Fig.6 Schematic diagram of double-pipe and double-acting directional drilling process

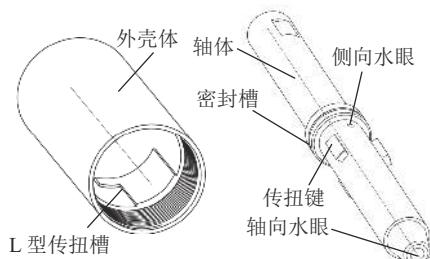
### 3.1.2 孔底驱动随钻跟管新技术

为了减少设备投入并降低管材成本, 笔者所在研究团队提出了孔底驱动随钻跟管钻进技术<sup>[15]</sup>。钻具包括反丝套管、传扭壳体、套管钻头、钻杆、传扭轴、先导钻头, 如图 7 所示。施工时钻杆带动传扭轴和先导钻头破岩, 传扭轴通过传扭键带动传扭壳体的 L 型槽旋转, 进而带动套管钻头钻进。传扭轴包括传扭轴体、密封圈槽、轴向水眼和侧向水眼、传扭键等。所密封圈槽用来安装 O 型圈, 与传扭壳配合, 防止水和岩粉从钻杆与套管的环形空间上返导致的留管受阻事故; 传扭壳体包括外壳体、L 型传扭槽。L 型传扭槽  $3\times120^\circ$  均布, 用来接收传扭轴的扭矩; L 型的根部与传扭轴键配合, 可以实现通过钻杆回拉实现套管的回拉; 当施工完成时, 2 个 L 型键直接的空间为所述传扭轴键的回退空间, 通过反转钻杆一定角度, 实现了传扭轴键与 L 型键的分离。

本跟管钻进技术有以下优势: ①对于整个套管管柱, 最大应力位置为孔底传扭壳体部分, 传扭壳体以上套管处于较低应力水平, 降低了对管材的质量要求, 节约了施工成本; ②钻进过程中内部钻杆与套

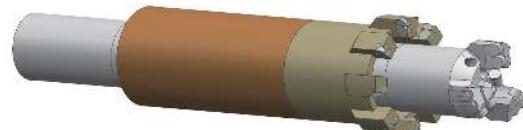


(a) 孔底驱动跟管钻进成套钻具组合示意



(b) 传扭壳体示意

(c) 传扭轴示意



(d) 孔底钻具组合三维图

图 7 孔底驱动随钻跟管钻进机具示意

Fig.7 Schematic diagram of bottom hole driven drilling machine while drilling

管同步旋转,对环空钻渣起到扰动作用,提高了排渣效果;③冲洗介质可以采用清水或者压风,提高了地层的适用性,且不需要额外增添设备。

采用本跟管钻进工艺,在河南某矿巷道破碎底板探水钻孔中最长跟管钻进60 m,解决了底板破碎带不成孔的难题。在山西晋城某矿巷道顶板压裂定向钻孔中,实现了随钻跟管96 m,保护了自孔口到顶板稳定层位之间的破碎孔段,最终该孔实现最大孔深超过400 m,经过水力压裂解决了巷道来压问题。

### 3.2 钻孔防偏斜技术

回转钻进过程中,由于钻具组合、钻进参数、煤岩变化等因素<sup>[16-17]</sup>导致钻孔不能按照直线进行钻进,造成钻孔轨迹的偏斜,导致超前钻探位置不精准。为此从20世纪90年代开始,相关研究人员就回转钻进如何防偏以及控制钻孔轨迹做了大量的研究,主要研究从孔底钻具组合和钻头2个方面进行研究。

#### 3.2.1 防偏技术现状

1)稳定组合钻具钻进技术。稳定组合钻具是指在钻柱底部通过安装不同位置和数量的扶正器,来控制钻孔轨迹保直、上仰和下降的钻具组合<sup>[18-20]</sup>。如图8所示:对于上仰钻具组合,由钻头向右依次安装第一、第二、第三扶正器,第一扶正器为支点,第二、第三扶正器在重力作用下使得钻柱产生向下弯曲力,通过支点的杠杆作用使得钻头产生向上的侧向力,从而使得钻孔轨迹上仰;对于保直钻具组合,由钻头向右依次等间距安装第一、第二、第三扶正器,实现孔底钻具的“满、刚、直”;对于下斜钻具组合,在钻头右方一定距离安装等间距3个扶正器作为支点,支点往左方向钻柱和钻头在重力作用下产生向下偏斜力。

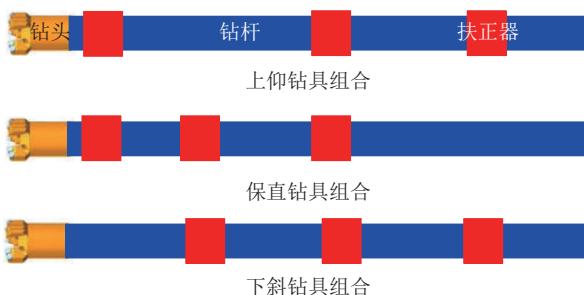


图8 稳定组合钻具示意

Fig.8 Schematic of stabilized assembled drilling tools

该钻具组合通过钻柱与扶正器的重力效应来控制钻孔的倾角,但是无法控制钻孔的方位角,在扶正器的刮削作用下和岩粉堆积支撑下,钻孔轨迹存在向右偏斜的现象,如图9所示。

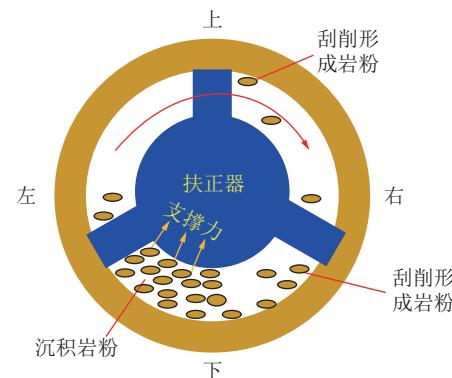


图9 方位右偏原理

Fig.9 Azimuth right deviation schematic diagram



图10 螺旋稳定器照片

Fig.10 Photo of spiral stabilizer

2)螺旋稳定器防偏技术。樊阳洋<sup>[21]</sup>设计了一种用于松软突出煤层的螺旋稳定器(图10),钻头切削下的煤粉通过螺旋叶片排渣钻孔后方,然后在三棱钻杆和压风的作用下排至孔外。实际钻进中,螺旋叶片对钻孔孔壁的刮削作用要强于其他钻杆,因此使用该稳定器时钻孔往右偏斜的程度较大。

3)内凹式钻头技术。内凹式钻头(图11)的中心一定区域凹陷其他几个切削刀翼,在钻进过程中内凹区域形成岩心柱用来支撑钻头和钻杆<sup>[22-23]</sup>,从而起到抑制钻孔偏斜的作用。



图11 内凹式钻头照片

Fig.11 Photo of concave drilling bits

#### 3.2.2 自适应伸缩防偏新技术

为了实现倾角和方位角的双重有效控制,笔者所在团队研发了自适应伸缩防偏钻具<sup>[24]</sup>。其主要结构和技术原理分别如图12所示,由不旋转外壳、芯轴、支撑总成、自适应伸缩机构、推力轴承组、润滑系统等组成,钻进过程中不旋转外壳在3组支撑总成作用下不旋转,起到导正旋转轴的作用,芯轴前后两端分别通过接头与钻头和钻杆联接,钻进过程中

芯轴与钻头和钻杆一起旋转,传递扭矩和给进力。如图13所示,自适应伸缩机构包括支撑块、带斜面槽的活塞和弹簧组成,支撑块伸缩运动从而实现与孔径以及孔壁几何形状的耦合稳定接触,推力轴承组控制外壳体前进和后退。3组支撑伸出量相同,有效克服了钻具重力影响。该钻具实现了旋转轴强制性居中,钻头的偏斜力得到有效抑制,从而达到保直效果。

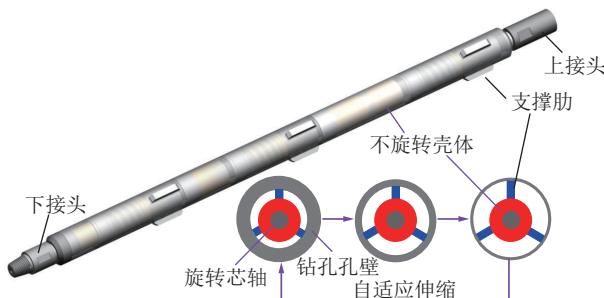


图 12 自适应伸缩防偏钻具结构示意  
Fig.12 Anti deviation drilling tool

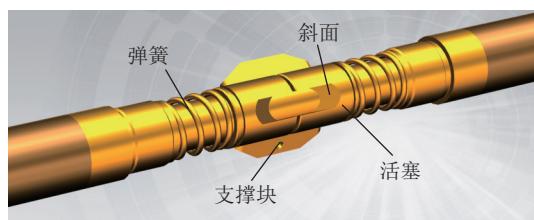


图 13 自适应伸缩机构  
Fig.13 Adaptive telescoping mechanism

在内蒙古某矿进行了开切眼贯通现场试验,钻具组合为“ $\varnothing 63.5\text{ mm}$  水便+ $\varnothing 63.5\text{ mm}$  外平钻杆+ $\varnothing 65\text{ mm}$  防偏钻具+ $\varnothing 91\text{ mm}$  三翼内凹钻头”。深孔钻探试验钻孔轨迹如图14、图15所示。设计钻孔倾角5°,一共施工两个钻孔进行对比,未安装自适应防偏钻具的钻孔钻进至孔深204 m时倾角由开孔时的5°降低至终孔时-3.16°,与设计相比上下位移偏差14.51 m;安装自适应防偏钻具后,钻孔钻进至孔深204 m时倾角由开孔时的5°降低至终孔时2.69°,上下位移偏差仅为4.1 m,左右位移3.9 m,极大程度上降低了超前探钻孔的偏斜量。

### 3.3 硬岩高效钻进技术

#### 3.3.1 硬岩高效钻进技术现状

1)轴向冲击回转钻进技术。轴向冲击回转钻进利用冲击机构产生轴向冲击力,作用在钎头上,进而冲击破碎岩石,同时钻柱回转带动钎头修整孔壁。实现冲击功能的特种钻具称为潜孔锤,其动力介质为压缩空气和高压水<sup>[25]</sup>。在淮南潘三矿的试验中,

液动冲击回转的钻进效率是普通回转钻进的25倍,气动冲击回转钻进的钻进效率是普通回转钻进的4倍<sup>[26-28]</sup>。气动冲击器与液动冲击器示意图如图16、图17所示。

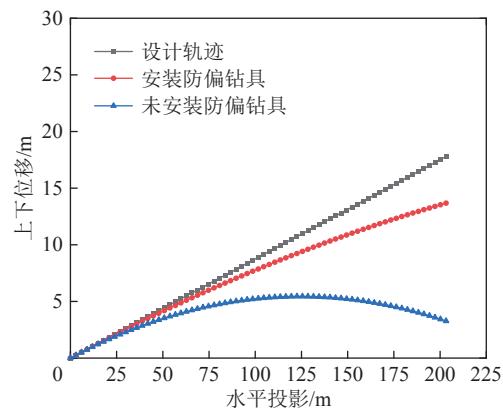


图 14 试验钻孔轨迹剖面  
Fig.14 Test borehole trajectory profile

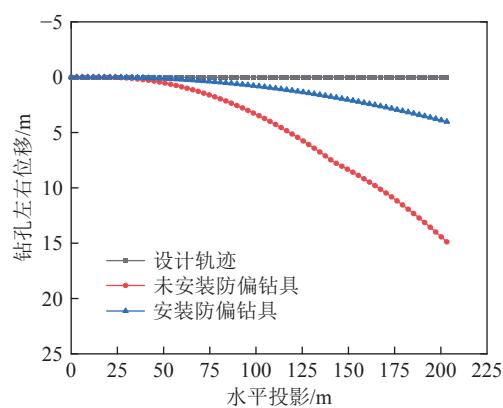


图 15 试验钻孔轨迹平面  
Fig.15 Test borehole trajectory plan

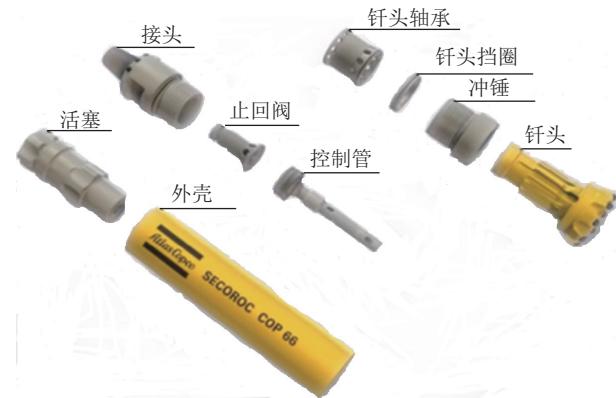


图 16 气动冲击器结构示意  
Fig.16 Structural diagram of pneumatic impactor



图 17 液动冲击器示意  
Fig.17 Schematic diagram of hydraulic impactor

2)周向冲击钻进技术。周向冲击钻进技术是钻进过程中给底部钻具施加周向冲击的钻进技术,同时钻具在钻柱的带动下回转破岩。周向冲击钻进技术主要使用的是扭力冲击器。扭力冲击器(图18)是一种容积式动力钻具,依靠高压冲洗液作为动力介质,在内外旋转冲锤的作用下产生沿着钻具轴线周向扭转的冲击力,提高钻进效率,同时降低钻头的粘滑振动<sup>[29]</sup>。在山西某矿顶板硬岩进行了大直径定向钻孔的高效扩孔试验,机械扩孔钻进效率达到10 m/h以上<sup>[30]</sup>。但是,受制于流体沿程和局部水力损失的影响,目前扭力冲击器难以实现直径100 mm以内的小型化。



图18 扭力冲击器结构示意

Fig.18 Structural diagram of torsion impactor

3)硬岩钻进钻头技术。居培等<sup>[31-32]</sup>通过引入石油钻头设计理论,优化钻头剖面形状与布齿设计,优选新型PDC齿,设计出了一种新型弧角PDC钻头(图19)。刀翼采用圆弧刮刀型浅内锥结构,根据钻头直径不同,刀翼数量一般选择3刀翼或4刀翼,不同刀翼上的切削齿采用错峰交叉布齿原则,实现每个切削齿在不同切削圆半径上的分层切削,从而达到提高钻进效率的目的。并通过在淮南潘一矿顶板穿层孔施工中试验应用,与普通内凹型PDC钻头相比,平均钻进效率提高1.6倍,平均使用寿命提2.8倍。



图19 弧角钻头照片

Fig.19 Photo of arc angle drilling bit

### 3.3.2 防黏滑提速减摩钻进新技术

煤系地层钻进时遇到的硬岩会引起钻柱的剧烈粘滑振动,导致钻进效率急剧下降、钻头快速磨损和崩齿,如图20所示,黏滑振动发生的过程为:

- 1)正常钻进时,钻杆与钻头同步旋转。
- 2)当钻遇硬岩时,由于钻头不能有效切削孔底岩石,旋转钻柱时孔底钻头回出现卡滞现象。
- 3)继续施加转矩,钻头处于停止旋转状态,钻杆继续扭转,储备破岩能量。
- 4)当钻柱储备的能量达到钻头破岩门限能量时,钻头瞬间破碎孔底岩石,然后被扭转的钻杆能量突然释放,从而引起孔底钻头的高速旋转。

为了解决黏滑振动问题,笔者所在研发团队开发了稳压提速钻具。稳压提速钻具是针对巷道超前钻探中钻遇软硬复合地层、强研磨性地层、打滑地层而开发的新型提速降载减磨钻具,如图21所示,由上接头、蓄能组件、壳体、压扭转换机构、下接头组成。用于煤矿井下穿层钻孔、高位钻孔等岩层钻孔施工,具有稳定钻进扭矩、防止PDC钻头黏滑和冲击、提高钻进效率、减少钻头磨损的作用。当出现粘滑效应导致钻头失速时,稳压钻具会与钻头之间产生转速差,转速差通过压扭转换机构转化使下接头和钻头产生轴向收缩,降低钻压和钻头切削扭矩,并将多余能量储存在蓄能组件内;当钻头扭矩下降到一定值内,蓄能组件储存的能量再通过压扭转换机构补偿给钻头,从而使钻头切削扭矩维持在一个定

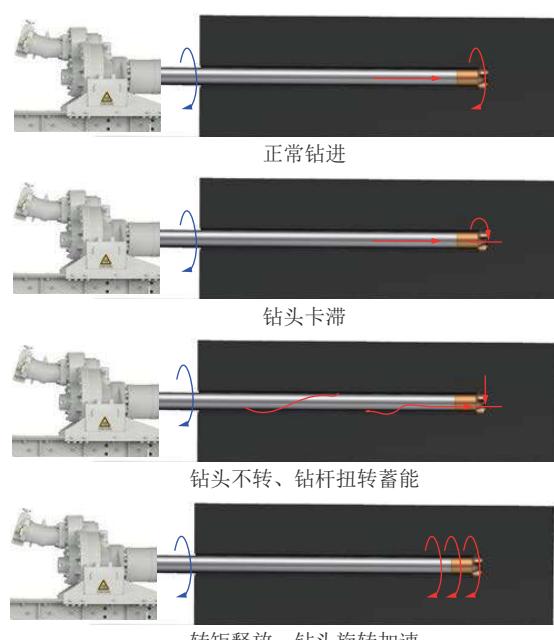


图20 黏滑振动发生机理

Fig.20 Mechanism of stick slip vibration

值附近并且避免失速, 提高了钻进效率同时减小钻头磨损; 可以人工调节并设定启动工作扭矩。

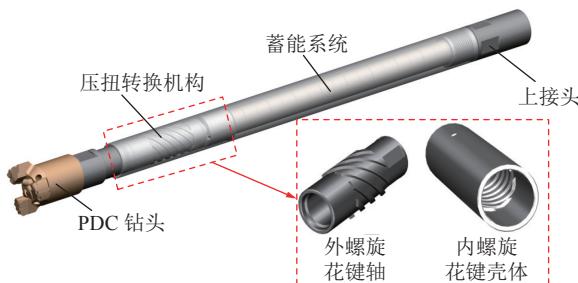


图 21 稳压提速钻具结构示意

Fig.21 Structure diagram of drilling tool for pressure stabilization and speed increase

对钻具进行了现场试验研究, 在岩石坚固性系数 $f$ 为 12 左右的石灰岩中进行了 4 个钻孔的试验, 钻具组合为 “ $\varnothing 73\text{ mm}$  水便 +  $\varnothing 73\text{ mm}$  宽叶片螺旋钻杆 +  $\varnothing 75\text{ mm}$  稳压提速钻具 +  $\varnothing 94\text{ mm}$  三翼内凹钻头”。4 个钻孔分别从煤层中开孔向巷道底板进行水害探查, 穿过 L9 灰和 L8 灰, 因 L9 灰分布不均匀、厚度小, 因此选取了 L8 灰岩段的回转压力进行分析。其中 1 号孔和 2 号孔开孔角度  $-30^\circ$ , 3 号和 4 号钻孔开孔角度  $-45^\circ$ , 4 个钻孔位于河南某矿同一个钻场内。如图 22 和图 23 所示, 1 号钻孔和 3 号钻孔未安装稳压提速钻具, 2 号和 4 号孔安装稳压提速钻具。如图所示, 1 号钻孔回转压力在  $3\sim6.7\text{ MPa}$  剧烈波动, 波动变化量较大, 而安装稳压提速钻具后的 2 号孔的回转压力波动值在  $4.5\sim5.5\text{ MPa}$ , 回转压力波动较小, 统计该硬岩孔段的综合钻速 2 号孔是 1 号孔的 1.5 倍。同样对于 3 号和 4 号孔, 1 号钻孔回转压力在  $3.5\sim7\text{ MPa}$  剧烈波动, 波动变化量较大, 而安装稳压提速钻具后的 2 号孔的回转压力波动值在  $4.5\sim5.8\text{ MPa}$ , 回转压力波动较小, 统计该硬岩孔段的综合钻速 2 号孔是 1 号孔的 1.7 倍。经过验证, 稳

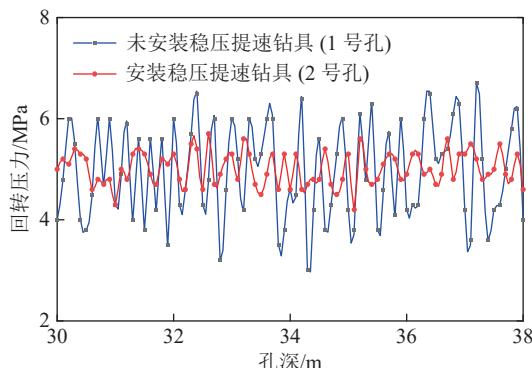


图 22 1 号和 2 号钻孔试验数据

Fig.22 Test data of No.1 and No. 2 boreholes

压提速钻具在巷道超前钻探遇坚硬岩层时能够有效降低黏滑振动剧烈程度、稳定钻进参数以及提高钻进效率。

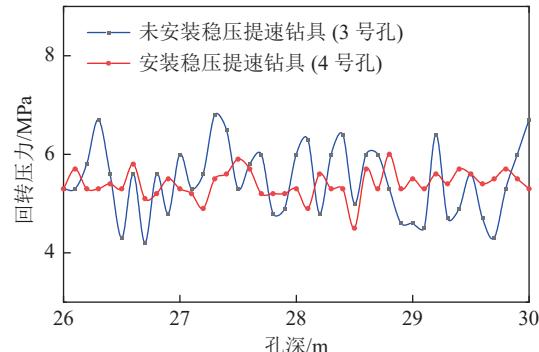


图 23 3 号和 4 号钻孔试验数据

Fig.23 Test data of No.3 and No. 4 boreholes

## 4 结 论

1) 随着我国煤矿开采深度的逐步增加, 地质条件更加复杂、灾害类型和强度逐渐增加, 巷道快速掘进对于长距离快速超前钻探的需求日渐旺盛。巷道长距离快速超前钻探存在“复杂地层成孔难”“钻孔偏斜”“硬岩钻进效率低”3 个关键技术问题。

2) 针对钻孔坍塌造成的钻孔深度不足问题, 分析了针对不同工况的随钻跟管钻进护孔工艺和配套机具, 提出并开发了针对多工况的孔底驱动随钻跟管技术, 解决了复杂地层钻孔深度不足的问题。

3) 针对钻孔防偏需求, 分析了传统防偏钻具、防偏钻头的工作原理以及存在的不足, 提出并研发了能够同时稳定倾角和方位角的单动式保直钻具, 钻进过程中外管不转、芯轴带动钻头旋转破岩, 现场试验表明能够同时将倾角和方位角偏斜率控制在  $1.5 (^\circ)/100\text{ m}$ 。建议钻孔防偏技术向着孔内智能防偏机器人技术方向发展, 即开孔时输入钻孔的方位角和倾角以及误差判据, 当实际误差大于设定判据后, 调整支撑块的伸缩程度, 对钻孔进行即时纠偏。

4) 针对硬岩钻进效率低的问题, 分析了现有轴向冲击钻进、扭转冲击钻进以及特殊冠状钻头的原理及应用效果。提出并研制了的减小粘滑振动强度的小直径稳压提速钻具, 不需要额外消耗能量, 在  $f$  为 12 的石灰岩中能够将钻进效率提升  $1.5\sim2$  倍。建议硬岩超前快速钻探围绕着水射流、磨料水射流等辅助钻头高效破岩方向发展。

## 参考文献(References):

[1] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理

- 论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567–1584.
- QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [2] 张幼振, 范 涛, 阚志涛, 等. 煤矿巷道掘进超前钻探技术应用与发展[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 286–293.
- ZHANG Youzhen, FAN Tao, KAN Zhitao, et al. Application and development of advanced drilling technology for coal mine roadway heading[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5) : 286–293.
- [3] 程建远, 陆自清, 蒋必辞, 等. 煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 404–412.
- CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, et al. A novel technology of “long excavation/ long detection” for rapid excavation in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 404–412.
- [4] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程(2016年版)[Z]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Supervision Bureau. Coal mine safety regulations( 2016 Edition) [Z]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2016.
- [5] 方俊, 李泉新, 许超, 等. 松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 130–137, 172.
- FANG Jun, LI Quanxin, XU Chao, et al. Construction technology and development tendency of gas drainage borehole in soft and outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46( 5) : 130–137, 172.
- [6] 姚宁平, 张杰, 李泉新, 等. 煤矿井下梳状定向孔钻进技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 30–34.
- YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Quanxin, et al. Research and application of comb type directional borehole drilling technology in underground Mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 30–34.
- [7] 中华人民共和国煤炭工业部制定. 防治煤与瓦斯突出细则 [M]. 煤炭工业出版社, 2019.
- Ministry of Coal Industry of the People's Republic of China. Formulates detailed rules for the prevention and control of coal and gas outbursts [M]. Coal Industry Press, 2019.1
- [8] 胡清富, 刘春来, 卞少敏, 等. 伊拉克东巴油田 Tanuma 组泥页岩高效防塌钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 76–82.
- HU Qingfu, LIU Chunlai, MU Shaomin, et al. High-efficiency anti-sloughing drilling fluid technology for Tanuma shale of East Baghdad Oilfield in Iraq[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 76–82.
- [9] 朱旭明, 乌效鸣, 郑文龙, 等. 深孔绳索取心钻进用无固相防塌钻井液试验[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 118–124.
- ZHU Xuming, WU Xiaoming, ZHENG Wenlong, et al. Experimental study on solid-free anti-sloughing drilling fluid suitable for deep core drilling of geological science and technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 118–124.
- [10] 刘英昊, 徐莉娜, 张 涛, 等. 气动潜孔锤在城市松散层地下水监测井建设中的应用[J]. 地下水, 2022, 44(2): 67–68.
- LIU Yinghao, XU Lina, ZHANG Tao, et al. The application of pneumatic DTH hammer in the construction of groundwater monitoring wells in urban unconsolidated strata [J] Groundwater, 2022, 44 (2): 67–68.
- [11] 李民, 何宜霏, 王艳峰, 等. 一种潜孔锤跟管钻具[P]. 中国: CN211549571U 2020.
- LI Min, HE Yifei, WANG Yanfeng, et al. A DTH hammer and pipe drilling tool [P] China: CN211549571U 2020.
- [12] 李乔乔. 煤矿井下空气套管钻进工艺最优参数研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(5): 120–124.
- LI Qiaoqiao. Study on optimal parameters of air casing drilling technology in coal mine [J] Coal Mine Safety, 2018, 49 (5): 120–124.
- [13] 李乔乔, 姚宁平, 王 力, 等. 井下可回收式组合钻具设计及特性分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 127–130.
- LI Qiaoqiao, YAO Ningping, WANG Li, et al. Design and characteristic analysis of downhole recoverable combined drilling tool [J] Coal Mine Safety, 2016, 47 (11): 127–130.
- [14] 王 力. 井下碎软煤层双管双动空气定向钻进工艺研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 166–172.
- WANG Li. Techniques of double-pipe and double-acting directional drilling with air in broken and soft coal seams in under ground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 166–172.
- [15] 唐世界, 阚雪冬. 煤矿井下破碎地层孔底驱动快速跟管钻进工具及方法[P]. 中国: CN202210033969, 20220422.
- TANG Shijie, KAN Xuedong. Tools and methods for driving fast pipe following drilling in broken stratum underground coal mine [P]. China: CN202210033969, 20220422.
- [16] 丁志伟, 周 倪. 煤矿井下瓦斯抽采钻孔偏斜规律分析[J]. 煤矿现代化, 2014(6): 89–91.
- DING Zhiwei, ZHOU Kan. Analysis on deviation law of gas drainage borehole in coal mine [J] Coal Mine Modernization, 2014 (6): 89–91.
- [17] 田广生. 影响煤矿井下钻孔施工轨迹的几点因素分析[J]. 科学技术创新, 2019(28): 61–62.
- TIAN Guangsheng Analysis of several factors affecting the construction track of underground drilling in coal mines [J] Science and Technology Innovation, 2019 (28): 61–62.
- [18] 石智军, 姚 克, 姚宁平, 等. 我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 1–34.
- SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1–34.
- [19] 石智军. 我国沿煤层定向钻进技术的研究及应用前景[A]. 中国科协第31次“青年科学家论坛”暨首届“煤炭青年学者论坛”报告会[C]. 北京: 1998.
- SHI Zhijun Research and application prospects of directional drilling technology along coal seams in China [A]. The 31st “Youth Scientists Forum” and the first “Coal Young Scholars Forum” of China Association for Science and Technology[C]. Beijing: 1998.

- [20] 郭涌. 煤矿井下水平定向钻进钻具组合的选择与优化[J]. 煤炭工程, 2012(5): 45–46, 49.  
GUO Yong Selection and optimization of horizontal directional drilling assembly in coal mine [J] Coal Engineering, 2012, (5): 45–46, 49
- [21] 樊阳洋. 煤矿瓦斯抽采钻孔保直防斜技术研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.  
FAN Yangyang . study on the technology of keeping straight and preventing inclination of coal mine gas drainage boreholes [D]. Jiao zuo : Henan University of Technology, 2018.
- [22] 吕红军, 李科. 钻探用 PDC 内凹钻头的设计 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(3): 1–5.  
LU Hongjun, LI Ke Design of PDC concave bit for drilling [J] Research on Urban Construction Theory ( Electronic Edition) , 2013 (3): 1–5.
- [23] 刘学通. 顺煤层瓦斯抽采钻孔施工偏斜控制技术研究及应用 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.  
LIU Xuetong Research and application of deviation control technology for gas drainage borehole construction along coal seam [D] Huainan. Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [24] 徐保龙, 侯红. 一种煤矿井下保直钻进钻具 [P]. 中国: ZL 2020 2 0823510. X, 20210212.  
XU Baolong, HOU Hong A straight drilling tool for underground coal mine [D] China: ZL 2020 2 0823510. X, 20210212.
- [25] 豆旭谦, 王力. 煤矿井下硬岩定向钻进技术装备与应用 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 117–122.  
DOU Xuqian, WANG Li. Directional drilling technologies equipment and application for hard rock in under-ground coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11): 117–122.
- [26] 豆旭谦, 金新, 童碧, 等. 淮南矿区硬岩穿层钻孔钻进方法对比试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 156–161.  
DOU Xuqian, JIN Xin, TONG Bi, et al. Comparative experimental study on drilling methods of hard rock through strata in Huain-
- an mining area [J] Coal Science and Technology, 2018, 46 (11): 156–161.
- [27] 豆旭谦. 煤矿井下穿层钻孔高效钻进方法 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 126–129.  
DOU Xuqian. High efficiency drilling methods for penetration boreholes in coal mine underground[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 126–129.
- [28] 魏宏超. 煤矿井下硬岩层高效成孔方法研究与应用 [J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 114–116.  
WEI Hongchao. Research and application of high efficiency hole forming method in hard rock strata under coal mine [J] Coal Mine Safety, 2016, 47 (11): 114–116.
- [29] 赵建国. 煤矿井下扭力冲击旋转扩孔钻进技术 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(6): 120–123.  
ZHAO Jianguo. Drilling technology of torsional impact rotary reaming in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(6): 120–123.
- [30] 王四一, 赵江鹏, 赵建国. 扭力冲击器在煤矿井下硬岩钻进中的应用研究 [J]. 煤矿机械, 2018, 39(10): 139–141.  
WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, Zhao Jianguo. Research on application of torque impactor in hard rock drilling in coal mine [J] Coal Mining Machinery, 2018, 39 (10): 139–141.
- [31] 居培, 孙荣军, 石智军, 等. 煤矿井下用新型弧角 PDC 钻头的设计与应用 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(1): 145–148, 152.  
JU Pei, SUN Rongjun, SHI Zhijun, et al. Design and application of new arc angle PDC bit used in coal mine [J]. Coal Engineering, 2018, 50(1): 145–148, 152.
- [32] 居培, 王传留. 弧角型 PDC 钻头切削齿布齿模式仿真分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 240–245.  
JU Pei, WANG Chuanliu. Simulation of the cutter arrangement pattern of the arc PDC drill bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 240–245.