

长平矿软硬复合煤体高效钻进技术研究

余孝民^{1,2}, 张杰³, 都海龙^{1,2}

(1. 山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司, 山西 晋城 048006; 2. 山西晋煤集团技术研究院有限责任公司, 山西 晋城 048006;
3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:为解决长平矿煤层钻进成孔深度较浅的问题,进行了软硬复合煤体高效钻进技术研究。结合软硬复合煤层特点,提出运用中高速宽叶片高螺旋复合钻进技术进行钻孔施工的工艺。在研究螺旋钻具排渣机理的基础上,设计制造了 $\phi 110/63.5$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 120$ mm 三翼合金钻头和 $\phi 95/60.3$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 110$ mm 三翼刮刀 PDC 钻头 2 种不同的钻具组合;改进了 ZDY6000LR 钻机的高转速动力头;使用 ZDY3000LG、ZDY6000LR 钻机与设计制造的钻具组合进行钻孔施工,完成 3 期现场工业性试验,形成了以中高速螺旋机械排渣为主、风力排粉为辅的螺旋复合钻进技术,使得长平矿孔深大于 150 m 的煤层钻孔达到了 52%,进一步提高了长平矿软硬复合煤体顺层钻孔效率。

关键词:软硬复合煤体;顺层钻孔;螺旋钻杆;钻进技术

中图分类号:TD231 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)04-0065-06

Research on efficient drilling technology in hard-soft composite coal in Changping Mine

YU Xiaomin^{1,2}, ZHANG Jie³, DU Hailong^{1,2}

(1. Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 2. Technology Research Institute of Shanxi Jincheng Coal Group Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 3. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to solve the problem of shallow drilling hole in Changping coal seam, the research on efficient drilling technology in hard-soft composite coal was carried out. According to the characteristics of hard-soft composite coal seam, the drilling technology which uses medium to high speed, wide blade and high helix compound drilling method is put forward. Based on the mechanism of slag discharge of helix drill, two different drilling tools that were $\phi 110/63.5$ mm spiral drill pipe + $\phi 120$ mm three-wing alloy drill bit and $\phi 95/60.3$ mm spiral drill pipe + $\phi 110$ mm three-wing scraper PDC drill bit, are designed and manufactured, and the high speed unit head of ZDY6000LR drilling rig is improved. Using ZDY3000LG, ZDY6000LR drilling rigs combined with the manufactured drilling tools, a three-stage industrial test was carried out. Accordingly, a helix compound drilling technique which mainly includes the mechanical discharge by means of medium to high speed helix supplemented with fly-ash discharge by using wind power is formed. The rate of resultant boreholes in Changping Coal Mine with depth greater than 150 m is up to 52% and thus the drilling efficiency in the borehole along the hard-soft composite coal seam has been further improved.

Key words: hard-soft composite coal; borehole along coal seam; helix drill rod; drilling technology

0 引言

针对松软煤层钻进困难的问题,中煤科工集团西安研究院、重庆研究院等单位的科研人员从钻机

研制、动力头改造、螺旋钻杆设计制造等技术角度进行试验研究,并在两淮、晋城、陕煤、阳煤、云贵等矿区进行现场试验应用^[1-4],如淮北祁南煤矿配套的 ZDY5000RF 钻机具备在普氏系数 $f=0.5$ 左右的煤

收稿日期:2018-01-04;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.04.011

基金项目:山西省科技攻关资助项目(Q2014-07)

作者简介:余孝民(1970—),男,山西运城人,高级工程师。E-mail:13703561606@163.com

引用格式:余孝民,张杰,都海龙.长平矿软硬复合煤体高效钻进技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(4):65-70.

YU Xiaomin, ZHANG Jie, DU Hailong. Research on efficient drilling technology in hard-soft composite coal in Changping Mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 65-70.

层中钻进 200 m; ZDY2800LG 钻机在天地王坡复杂地质煤层中钻孔平均孔深达到 98.8 m^[5]; ZYWL-2600R 钻机的动力头在钻机低速 220 r/min 时提供不小于 2 600 N·m 的转矩, 在钻机高速 900 r/min 时提供不小于 500 N·m 的转矩, 在阳煤平舒煤矿实现松软突出煤层长钻孔长度普遍不小于 300 m 目标; 在义马煤矿普氏系数 f 小于 0.2 煤层中, ZDY4300LF(A) 型钻机钻进孔深达百米左右等^[6-9]。在试验矿井的松软煤层中, 各种钻机通过与其相适应的螺旋钻杆、钻头配套, 结合螺旋排渣和风力排渣达到了预期钻进深度, 提高了钻孔成孔率^[10-15]。文献[16-17]在软煤钻进困难的原因分析、钻屑运移数值分析、钻具改进等方面做了理论研究分析工作, 建立了钻穴模型, 针对不同类型的钻穴, 提出了降阻增排原理钻具, 设计制造了刻槽螺旋钻杆、双动力低螺旋钻杆、等离子熔涂耐磨钻杆等系列钻杆, 并在地质条件极为复杂的山西某矿应用刻槽螺旋钻杆, 钻进深度提高 25.6%。晋城无烟煤矿业集团长平矿位于晋城矿区的北部区域, 主采的 3 号煤层埋藏深, $f=0.3\sim0.6$, 瓦斯含量 8~14 m³/t, 煤层内生裂隙发育, 软硬互层, 属于软硬复合煤层, 在本煤层钻孔施工过程中, 存在诸多问题。采用的 CMS1-6500/100 型钻机老化严重, 钻进出现异常时处理能力和处理效果差, 当钻孔孔深超过 70 m 后钻进困难, 特别是在应力集中和应力较大区域钻进时表现尤为明显。在钻进工艺方面, 采用的 $\phi 98/73$ mm 螺旋钻杆配套 $\phi 125$ mm 钻头形成的螺旋机械排粉工艺, 由于钻杆螺旋槽较浅导致携粉能力弱, 单一的螺旋机械排粉工艺适应性差, 钻杆螺旋翼片焊接差易脱落, 钻杆加接和拆卸不方便。针对上述问题, 笔者主要通过对钻具改进、钻机升级等方法, 形成一套适合长平矿软硬复合煤层的高效钻进工艺, 提高钻孔施工效率。

1 中高速宽叶片高螺旋复合钻进工艺

中高速宽叶片高螺旋复合钻进工艺是由螺旋钻杆旋转与压风相结合的复合钻进排渣工艺, 结合了螺旋钻进与空气钻进的优缺点, 螺旋钻杆的高速旋转作为主要动力来排出孔内煤屑, 高转速有利于提高排粉效果, 减少孔内阻力; 压风的作用是加速孔内瓦斯运移排出和辅助排粉, 利用一定量压风的透孔作用, 使孔内瓦斯不易聚集, 减少喷孔和卡埋钻事故。高速螺旋钻进工艺参数包括给进速度、钻杆转速和风量, 三者在钻进过程中相互影响, 共同决定着

成孔效果。

1.1 给进速度

高速螺旋钻进工艺的目的就是实现钻孔高效生产, 而给进速度是决定钻速的关键参数。为了防止事故发生, 需及时清空破碎下来的煤粉, 给进速度应该满足以下条件:

$$\frac{\pi D^2}{4} v_g \leq W \quad (1)$$

其中: W 为排粉量; D 为钻头直径; v_g 为给进速度。钻机钻进过程中, 给进速度要适当, 这样才能使螺旋钻杆的产粉量和排粉量平衡, 保证在钻进过程中能充分地排出煤粉。给进速度的掌握, 需要针对不同钻机、不同煤层特征和排渣条件进行测试和总结。当钻机系统压力(回转压力)突然升高时, 多数情况是孔内出现塌孔所致, 必须采取果断措施, 停止给进, 反复扫孔活动钻具, 待孔内动力平衡后再继续进钻。

1.2 钻杆转速

钻杆转速与给进速度需保持适当, 在钻进时, 当发现孔口排渣受阻, 就要停止向前钻进, 直到钻孔掏空后方可继续钻进。在过软分层时, 由于应力和高压瓦斯的作用, 会造成瓦斯喷孔、钻杆和钻头前方周围的煤体失去应力平衡, 煤粒大量溃散, 瓦斯喷孔时所带来的煤粉一时难以排出, 从而积聚并堵塞钻孔, 如果喷孔严重, 会造成卡钻, 此时应反转螺旋钻杆, 因为反转钻杆时螺旋钻杆排粉方向向孔底施加一定的推力, 根据力的作用相互原理, 螺旋钻杆受到相反的推力, 且此力是作用在各个螺旋叶片的分力之和, 在此力与钻机起拔力的作用下, 螺旋钻杆会向孔口外旋出, 当旋出一定距离后再正转螺旋钻杆, 将堵塞的煤粉导出。

当钻孔向煤体深部推进时, 由于钻孔的排渣距离长, 排渣阻力也相应增加, 滞留在钻孔内的沉渣也就越多, 孔内的空间也就越少。因此只要发现孔内空间和孔口排渣量减少, 必须停止前进, 不能蛮进, 这时钻杆应反复退进、来回扫孔、掏空前进。

一般回转转矩随孔深增加而增加, 为了使钻机在钻至目标孔深仍具备处理事故所需的剩余转矩, 钻孔在某一孔深时的回转压力都有一个上限值。所以对应孔深时有最大转速。最大回转角速度 ω_{\max} 与孔深 L 的关系为

$$\omega_{\max} = \frac{1}{K_z} \sqrt{\frac{M(L) - M_k}{L}} \quad (2)$$

式中: K_z 为综合影响因数; $M(L)$ 为最大允许转矩 M 与孔深 L 的函数关系式; M_k 为对应孔深的钻杆空转所需转矩。

取轴向长度 dx 的微元,微元截面如图 1 所示。高速螺旋钻进时的转矩主要由钻杆自身转动、排粉阻力产生。排粉阻力主要来自回转离心力产生的摩擦力矩。在微元上取中心角 θ 的扇形微元,其体积为 $(R^2 - r^2)/2d\theta dx$,产生的离心力为 $\mu\rho r_0\omega^2(R^2 - r^2)/2d\theta dx$,则微元受到的摩擦力矩为 $\mu\rho r_0 R\omega^2(R^2 - r^2)/2d\theta dx$ 。由此可以推导出整个钻具受到的摩擦阻力矩 M_p 。

$$M_p = \frac{1}{2} \int_0^D dx \int_0^\theta \mu \rho r_0 R \omega^2 (R^2 - r^2) d\theta \quad (3)$$

式中: μ 为煤层与钻具间摩擦系数; ρ 为压实状态下煤粉密度,一般为煤层密度; θ 为煤粉堆积体接触孔壁部分堆积角度; R 为螺旋钻杆半径; r 为螺旋钻杆芯杆半径; r_0 为螺旋槽煤粉堆积体质心到钻杆轴线距离; ω 为钻杆回转角速度; D 为钻杆总长。总的回转阻力矩 $M_z = M_p + M_k$ 。

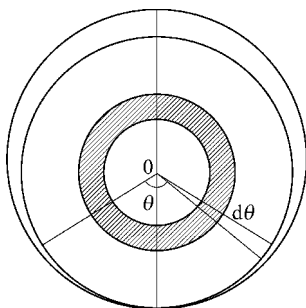


图 1 微元截面示意

Fig.1 Schematic diagram of microelement section

1.3 风量

在空气钻进中,当颗粒受到气流作用,且气流速度大于钻屑颗粒群的自由悬浮速度时,就可以实现排粉,即

$$v_p > v_n = \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_s - \rho_a)}{3C\rho_a K_s}} \quad (4)$$

式中: v_p 为排粉所需风速; v_n 为钻屑的自由悬浮速度; g 为重力加速度; d_s 为钻屑颗粒直径; ρ_s 为钻屑的密度; ρ_a 为空气密度; C 为阻力系数,空气钻进过程属于牛顿阻力区,取 0.44; K_s 为物体形状修正系数,对于煤粉颗粒取 $K_s = 1.1$ 。

实际钻进过程中,钻进产生的钻屑质量流量对于排粉有重要影响,钻进速度越大,产生的钻屑质量流量越大,需要的供风流量越大。钻屑质量流量和

空气质量流量之比称为混合比。为了保证钻进中不断产生的钻屑能够顺利排出而不致堵塞,风速还应满足不堵塞条件。空气钻进所需风速可按照式(5)进行计算:

$$v_k > v_b = 1.3v_n m^{0.25} \quad (5)$$

其中: v_k 为空气钻进所需风速; v_b 为满足不堵塞条件的临界风速; m 为混合比。当压缩空气通过钻杆和钻头进入孔底后,流动方向改变。根据气力输送原理,钻屑在压缩空气的作用下逐渐加速。由于从孔底至孔口气固两相流动存在压力损失,加速后的空气压力高于孔口处的压力,即完成加速的空气仍处于压缩状态,为保证顺利排粉,该状态下空气产生的气流速度也要大于 v_b 。根据钻孔直径、钻杆外径可以确定孔底所需的流量。

$$Q_{ad} = \frac{\pi}{4} (D_h^2 - D_r^2) v_d \quad (6)$$

式中: Q_{ad} 为钻孔孔底空气的体积流量; D_h 为钻孔直径; D_r 为钻杆直径; v_d 为空气在钻孔孔底加速后的速度, $v_d > v_b$ 。

根据管内气固两相流理论,当孔底压力为 p_d 时,所需供风流量可由式(7)计算:

$$p_d Q_{ad} = p_0 Q_a \quad (7)$$

式中: Q_a 为供风流量(大气压状态); p_0 为大气压力。

中高速螺旋复合钻进中,一定的风量起到透孔作用。风量过小,钻孔排粉效果不好,易引起瓦斯聚集,造成堵孔、卡钻事故,但风量不能过大,风量过大对孔壁的冲击作用加强,增加了钻孔孔壁的不稳定性,所以,风量控制在常规空气钻进所用风量的 50%~60%。

2 钻具设计及改进

2.1 钻具设计

根据螺旋钻进的技术要求,设计出 2 种钻具组合:

1) $\phi 110/63.5$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 120$ mm 三翼合金钻头。 $\phi 110/63.5$ mm 螺旋钻杆(图 2)采用插接式连接,可以反转,当发生孔内卡钻事故时,有利于事故处理。钻杆具体参数为:钻杆外径 110 mm,芯杆直径 63.5 mm,螺旋翼片宽度 5 mm,螺距 100 mm,钻杆长度 1.5 m。



图 2 $\phi 110/63.5$ mm 螺旋钻杆

Fig.2 $\phi 110/63.5$ mm spiral drill pipe

钻头采用 $\phi 120$ mm的三翼合金钻头(图3),切削刃采用硬质合金焊接,考虑到钻头在工作过程中冷却不足,采用合金切削齿,避免在钻进过程中钻头烧钻,钻头翼片与钻头体芯轴呈 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 偏角,这样便于岩(煤)粉的导出。钻头前部采用锥形导向结构,以避免长孔钻进造成钻孔轨迹偏离。



图3 $\phi 120$ mm 三翼合金钻头

Fig.3 $\phi 120$ mm three-wing alloy bit

$\phi 110/63.5$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 120$ mm 三翼合金钻头钻具组合(以下简称 $\phi 110$ mm 钻具组合)成孔直径大,利于瓦斯抽采;钻杆强度高,刚度好,钻孔保直性较好;钻杆双头螺旋结构,排渣效率高。

2) $\phi 95/60.3$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 110$ mm 三翼刮刀PDC 钻头。 $\phi 95/60.3$ mm 螺旋钻杆(图4)采用插接式连接,单头螺旋结构,钻杆具体参数为:钻杆外径95 mm,芯杆直径60.3 mm,螺旋翼片宽度18 mm,螺距90 mm,钻杆长度1.5 m。



图4 $\phi 95/60.3$ mm 螺旋钻杆

Fig.4 $\phi 95/60.3$ mm spiral drill pipe

$\phi 95/60.3$ mm 螺旋钻杆+ $\phi 110$ mm 三翼刮刀PDC 钻头钻具组合(以下简称 $\phi 95$ mm 钻具组合)钻杆宽叶片设计,增加孔壁稳定性;钻杆单头螺旋结构,有利于大质量煤渣被转动带出。

选用 $\phi 110$ mm 三翼刮刀PDC 钻头,整体强度较合金钻头高,在煤层夹矸里钻进不易损坏,有利于钻进成孔。

2.2 钻具设计

钻具配比(钻头与钻杆尺寸配比)是钻孔顺利施工的重要参数,直接影响钻进过程的排粉流畅性。钻头的切屑量与钻杆螺纹排粉量的配比必须恰当,防止钻孔内排粉不畅造成压钻、死钻等现象。钻杆1个螺距1 h的理论钻进产粉量 Q_m 为

$$Q_m = 15\pi\psi\gamma_0 n(D^2 - d^2)S \quad (8)$$

钻杆每小时的实际排粉量还受钻孔布置方式

(主要指倾斜角度)、钻孔弯曲程度等因素的影响,故有:

$$Q = 15\pi(D^2 - d^2)S\psi\gamma_0 n\Delta \quad (9)$$

式中: Q 为螺旋钻杆实际排粉量; D 为螺旋钻杆外径; d 为螺旋钻杆中心杆直径; S 螺旋钻杆的螺距; γ_0 为煤粉的密度; ψ 为钻杆叶片间填充率; n 为钻杆转速; Δ 为钻孔倾斜布置及弯曲影响综合系数。

钻头每小时的钻进产粉量 Q_0 为

$$Q_0 = 15V\pi\varphi^2 e\gamma_0 \quad (10)$$

其中: φ 为钻孔直径,m; V 为钻进速度; e 为煤的松散体积系数,取1.5~1.8;式(9)、式(10)中相关系数: γ_0 取 1.42 t/m^3 ;对于钻孔俯角不大于 20° 的煤层钻孔, ψ 取0.3; n 取200 r/min, Δ 取0.9;钻进速度取0.15 m/min;由于煤体松软, e 取上限值1.8;将这些参数代入式(9)、式(10),可以计算出 $\phi 110$ mm、 $\phi 95$ mm 钻具组合的钻头产粉量与钻杆排粉量的比值分别为1.25和1.20。

从表1可知,在地层稳定区域钻进,钻头产粉量为螺旋钻杆实际排渣量的1.2倍左右,属于合理范围,说明钻杆与钻头的级配是合适的。

表1 钻头产粉量与钻杆排渣量比值

Table 1 Ratio of producing powder amount to the discharge quantity for bit

项目	$\phi 110$ mm 钻具组合	$\phi 95$ mm 钻具组合
Q_0/Q	1.25	1.20

在“三软”煤层钻孔易塌孔、应力集中区压力骤增、高瓦斯含量、地应力等一系列因素影响下,该区域钻孔会形成空洞,孔径可能非常大,钻头产粉量也呈非线性递增,此时,钻具级配会出现偏差。

3 钻机选型与改进

根据现场现有条件,选用ZDY3000LG、ZDY6000LR型煤矿用全液压坑道钻机进行试验。对ZDY6000LR钻机进行了改进,设计了最大输出转矩达 $6\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的高速动力头,最高额定转速达到400 r/min。动力头由2个自动变量液压马达、齿轮箱及法兰接头组成。该动力头配合配套油路块、控制阀等可实现串联、并联2种工作状态,串联状态最高转速较高,转矩相对较低,一般适用于反渣量正常,钻进阻力较小的工况;并联状态最大转矩较高,转速相对较低,一般适用于反渣量较大、钻进阻力较大的工况。通过设计动力头的2种工作模式,可实

现高转速和大转矩的液动切换。操纵人员只需坐在钻机尾部操纵台便可完成动力头马达的串并联切换,并可实现钻机转速的无级调节,提高了钻机钻进适应范围及能力。6 000 N·m 高速动力头三维外形如图 5 所示。

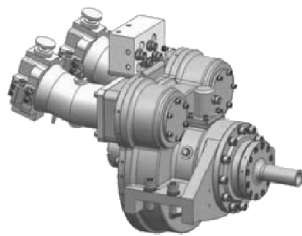


图 5 6 000 N·m 高转速动力头三维示意
Fig.5 3D diagram of high speed dynamic head of 6 000 N·m

4 现场试验

根据前期钻机选型及钻具改进,在长平矿地质条件相似的 5302 工作面和 4308 工作面进行了三期试验,三期试验选用的钻机和钻具见表 2,钻孔施工试验结果统计见表 3。

表 2 三期试验钻机与钻具选配

Table 2 Combination of rig and drilling tool for three stage test

试验	钻机	钻具组合
I 期	ZDY 3000LG	φ110/63.5 mm 螺旋钻杆+φ120 mm 三翼合金钻头
II 期	ZDY 3000LG	φ95/60.3 mm 螺旋钻杆+φ110 mm 三翼 PDC 钻头
III 期	ZDY 6000LR	φ95/60.3 mm 螺旋钻杆+φ110 mm 三翼 PDC 钻头

表 3 三期试验结果统计

Table 3 Statistical results for three stage test

试验名称	总钻孔数量/个	孔深大于 100 m 钻孔数量/个	孔深大于 150 m 钻孔数量/个
I 期	42	13	4
II 期	16	12	4
III 期	27	16	14

由表 2、表 3 可知:①在钻机相同的条件下,φ95/60.3 mm 螺旋钻杆+φ110 mm 三翼 PDC 钻头的钻具组合,相比 φ110/63.5 mm 螺旋钻杆+φ120 mm 三翼合金钻头的钻具组合,孔深大于 100 m 钻孔成率由 31%提高至 75%。②在钻具组合相同的条件下,ZDY6000LR 钻机相比 ZDY3000LG 钻机,孔深大

于 150 m 钻孔成孔率由 25%提高至 52%。

5 结 论

1)φ95/60.3 mm 螺旋钻杆在成孔率方面优于 φ110/63.5 mm 螺旋钻杆,说明深槽宽叶片结构钻杆对长平矿软硬复合煤层适应性强,有利于本煤层钻孔孔深的延长。

2)通过试验优选出 φ110 mm 三翼刮刀式 PDC 钻头,成孔率和钻进效率高,对地层适应性强。

3)通过对 ZDY6000LR 型钻机动力头改进,实现了高转速,大转矩,提升了钻孔深度,提高深孔钻进的成功率,进一步说明大转矩动力头可增加事故处理能力,结合风压辅助排渣,能实现高效深孔钻进。

4)现场试验表明,单头螺旋结构的 φ95/60.3 mm 螺旋钻杆携粉能力强,同时配合压风辅助排渣,减少卡钻事故,提高钻孔成孔率。

参考文献(References):

[1] 张宏钧,姚克,张幼振.松软煤层螺旋钻杆与压风复合排渣钻进技术装备[J].煤矿安全,2017,48(7):99-102.
ZHANG Hongjun, YAO Ke, ZHANG Youzhen. Spiral drill pipe and composite slag discharge drilling technology and equipment in soft coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7): 99-102.

[2] 郝永进,李乔乔,王毅,等.松软突出煤层复合排渣钻进技术试验研究[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2016,43(6):22-25.
HAO Yongjin, LI Qiaoqiao, WANG Yi, et al. Composite slag discharging drilling technology in soft and outburst coal seam [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2016, 43(6): 22-25.

[3] 雷丰励.松软突出煤层长钻孔装备及钻进工艺研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):93-97.
LEI Fengli. Study on long borehole drilling equipment and drilling technique of soft outburst seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 93-97.

[4] 徐鹏博,姚克,张锐,等.高转速螺旋钻进钻机在松软突出煤层中的应用研究[J].煤炭工程,2017,49(9):94-96.
XU Pengbo, YAO Ke, ZHANG Rui, et al. Application of high speed spiral drilling rig in soft outburst coal seams [J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 94-96.

[5] 姚克,张锐,方鹏,等.ZDY2800LG 高转速螺旋钻进技术装备应用[J].煤矿安全,2017,48(6):94-96.
YAO Ke, ZHANG Rui, FANG Peng, et al. Application of ZDY2800LG high rotation speed spiral drilling technology and equipment [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 94-96.

[6] 孙新胜.松软突出不稳定煤层快速钻进技术[J].煤矿安全,2016,47(8):90-93.

- SUN Xinsheng. Fast drilling technology for unstable soft and outburst coal seam [J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(8): 90–93.
- [7] 姚亚峰, 宋海涛, 梁春苗, 等. 松软煤层狭窄巷道大扭矩两体式履带钻机的研制与应用[J]. *煤矿机械*, 2015, 36(10): 215–218.
- YAO Yafeng, SONG Haitao, LIANG Chunmiao, *et al.* Development and application of high torque and two postures full hydraulic tracked drill rig in narrow coal mine roadways and soft coal seam [J]. *Coal Mine Machinery*, 2015, 36(10): 215–218.
- [8] 赵建国, 杨虎伟. 高转速螺旋钻进技术在松软煤层中的应用[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(7): 73–76.
- ZHAO Jianguo, YANG Huwei. Application of high speed auger drilling technology in soft coal seam [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(7): 73–76.
- [9] 龙威, 陈骞, 史春宝, 等. 松软煤层全液压钻机研制[J]. *煤矿机械*, 2014, 35(10): 174–177.
- LONG Wei, CHEN Qian, SHI Chunbao, *et al.* Development of hydraulic drilling machine in soft coal seam [J]. *Coal Mine Machinery*, 2014, 35(10): 174–177.
- [10] 刘新民, 王力, 王建利, 等. 韩城桑树坪二号井松软煤层钻进技术研究与实践[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(3): 165–169.
- LIU Xinming, WANG Li, WANG Jianli, *et al.* Research and practices on drilling in soft coal seams in Hancheng Sangshuping Coal Mine [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(3): 165–169.
- [11] 闫保永. ZYWL-6000DA 型定向钻机给进机构设计与分析[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(4): 271–273.
- YAN Baoyong. Feeding mechanism design and analysis of ZYWL-6000DA model directional drilling rig [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(4): 271–273.
- [12] 李强, 叶嗣喧, 金新. 松软煤层顺层孔筛管护孔工艺及装备应用[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 147–151.
- LI Qiang, YE Sixuan, JIN Xin. Application of borehole protection technique and equipment for screen pipe borehole in soft and weak seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 47(6): 147–151.
- [13] 王传留, 高晓亮, 张朋. 煤矿井下可开闭式 PDC 钻头的设计与优化[J]. *超硬材料工程*, 2017, 29(6): 26–29.
- WANG Chuanliu, GAO Xiaoliang, ZHANG Peng. Research and optimization of switchable bit used in coal mine underground [J]. *Super Hard and Material Engineering*, 2017, 29(6): 26–29.
- [14] 张红, 王滨. 定向钻机在赵庄煤矿松软突出煤层钻进中的应用实践[J]. *中国煤炭*, 2015, 41(3): 118–120.
- ZHANG Hong, WANG Bin. Application of directional drilling machine to soft outburst coal seam in Zhaozhuang Coal Mine [J]. *China Coal*, 2015, 41(3): 118–120.
- [15] 兰安畅, 邹云龙, 徐雪战, 等. 松软煤体钻孔坍塌控制技术研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(10): 173–174.
- LAN Anchang, ZOU Yunlong, XU Xuezhao, *et al.* Study on control technology of borehole collapse in soft coal [J]. *Coal Technology*, 2017, 36(10): 173–174.
- [16] 孙玉宁, 王永龙, 翟新献, 等. 松软突出煤层钻进困难的原因分析[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 117–121.
- SUN Yuning, WANG Yonglong, ZHAI Xinxian, *et al.* Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 117–121.
- [17] 王永龙, 孙玉宁, 王振锋, 等. 松软突出煤层钻进钻孔堵塞力学特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 119–125.
- WANG Yonglong, SUN Yuning, WANG Zhenfeng, *et al.* Mechanical characteristic of borehole clogging drilling in soft and outburst coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 119–125.