



# 高位定向长钻孔水力输送对接筛管护孔技术研究

张金宝

## 引用本文:

张金宝. 高位定向长钻孔水力输送对接筛管护孔技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 255–264.

ZHANG Jinbao. Research on hole protection technology of screen pipe for hydraulic transportation and automatic butt joint in high position directional borehole[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 255–264.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1614>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 复杂地层高位定向长钻孔成孔工艺研究与应用

Research and application of hole-forming technology of high-position directional long borehole in complex stratum  
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 168–173 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/34fc6d0d-261a-43df-a7a0-4a6337ab7065>

#### 大直径顶板定向长钻孔替代高抽岩巷的瓦斯抽采效果分析

Analysis on gas drainage effect of large diameter roof directional long borehole instead of high drainage rock roadway  
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/43a033be-eee3-4ad6-9101-14d9f64d0df2>

#### 高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究

Research on gas drainage technology of directional high-level borehole in high gassy fully-mechanized mining face  
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b75abe51-d821-4b6f-afb7-60705f16f694>

#### 煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术

High efficiency gas drainage technology of hydraulic fracturing with directional long drilling in underground coal mine  
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/100da6c3-a65e-4274-9fe9-502c6c1c88b7>

#### 井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践

Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing  
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fbd1006f-bb80-476d-bb12-22c188a6a9f4>

#### 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.cst.mcq22-24>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张金宝.高位定向长钻孔水力输送对接筛管护孔技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(4):255-264.  
ZHANG Jinbao. Research on hole protection technology of screen pipe for hydraulic transportation and automatic butt joint in high position directional borehole[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 255-264.

## 高位定向长钻孔水力输送对接筛管护孔技术研究

张金宝

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安 710077)

**摘要:**保障高位定向长钻孔在工作面回采过程中的稳定抽采是实现“以孔代巷”的前提,而采用筛管完孔是维持钻孔稳定的有效护孔措施。为了实现高位定向长钻孔全孔段筛管护孔的工程应用,开发了钻孔内水力输送分组筛管自主对接完孔工艺技术,配套研制了 $\varnothing 95$  mm 筛管悬挂装置、 $\varnothing 95$  mm 玻璃钢筛管、 $\varnothing 100$  mm 封堵短节、 $\varnothing 140$  mm 钻头通水堵头以及 $\varnothing 95$  mm 分组筛管对接装置,并在皖北矿区两个煤矿的不同工作面顶板高位钻孔进行了水力输送分组筛管完孔现场试验。试验结果表明:玻璃钢筛管质量轻推阻小,可在倾角 $17^\circ \sim 26^\circ$ 的钻孔内人工连接长 $100$  m $\varnothing 95$  mm 玻璃钢分组筛管,分组筛管输送过程中水压为 $1.0 \sim 1.5$  MPa,输送到位时水压降为 $0.5$  MPa以下,在泵量 $200 \sim 390$  L/min下,分组筛管水力平均输送速度可达 $150 \sim 260$  m/min,试验期间分组筛管输送到位时泵压变化明显,前后两组筛管对接可靠,可有效实现到位报信,成功实现 $\varnothing 153$  mm 高位定向钻孔内 $\varnothing 95$  mm 筛管的全孔段护孔,2个钻孔的筛管水力输送试验深度分别达到 $501$ 、 $522$  m,工作面回采 $120$  d 累计抽采瓦斯纯量分别为 $139\ 945$ 、 $176\ 139$  m<sup>3</sup>。钻孔内水力输送对接筛管护孔技术为高位定向长钻孔全孔段大直径筛管护孔提供了可实现的技术解决方案,有助于保障高位定向长钻孔的瓦斯抽采效果,为煤矿井下“以孔代巷”的瓦斯治理模式革新提供技术支撑。

**关键词:**高位定向钻孔;筛管护孔;水力输送;以孔代巷;瓦斯抽采

中图分类号:TD713 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2024)04-0255-10

## Research on hole protection technology of screen pipe for hydraulic transportation and automatic butt joint in high position directional borehole

ZHANG Jinbao

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Ensuring the stable extraction of high position directional long boreholes in the mining process of working face is the premise of realizing 'replacing the roadway with the boreholes', and the use of screen pipe completion is an effective hole protection measure to maintain the stability of boreholes. In order to realize the engineering application of full-hole segment screen pipe protection in high position directional borehole, the technology of automatic butt joint technology of grouping screen pipe for hydraulic transportation in the borehole has been developed, and the  $\varnothing 95$  mm screen pipe Hanging unit,  $\varnothing 95$  mm fiberglass screen pipe,  $\varnothing 100$  mm water flow blocking short section,  $\varnothing 140$  mm drilling bit plug with passable water and  $\varnothing 95$  mm grouping screen pipe connecting device have been developed. In addition, the field test of hydraulic transportation grouping screen pipe hole completion was carried out in the high level boreholes of different working faces in two coal mines in the northern Anhui mining area. The test results show that the weight of the GRP screen pipe is light and the resistance to push is small. The  $\varnothing 95$  mm GRP grouping screen pipe with a length of  $\varnothing 100$  m can be manually connected in the borehole with an inclination of  $17^\circ \sim 26^\circ$ . The water pressure in the grouping screen pipe transportation process is about  $1.0 \sim 1.5$  MPa, and the water pressure drops below  $0.5$  MPa when it is transported in place. Under the pump capacity of  $200 \sim 390$  L/min, the average hydraulic transportation speed of the grouping screen pipe can reach  $150 \sim 260$  m/min. The pump pressure changes significantly when the grouping screen tube

is transported in place during the test. The front and rear sets of screen pipes are connected reliably, which can effectively realize the message in place, and successfully achieve the full hole protection of ø95 mm screen pipes in the ø153 mm high position directional borehole. The hydraulic transportation test depth of screen pipes in the two boreholes reaches 501 and 522 m respectively and the cumulative pure gas extracted from the two boreholes in 120 d working face mining is 139 945 and 176 139 m<sup>3</sup> respectively. The technology of screen pipe for hydraulic transportation and automatic butt joint in the borehole provides an achievable technical solution for the large-diameter screen pipe hole protection in the full-hole section of the high-position directional long borehole, helps to ensure the gas drainage effect of the high-position directional long borehole, and provides technical support for the innovation of the gas control mode of ‘replacing the roadway with the boreholes’ in the coal mine.

**Key words:** high position directional borehole; screen pipe hole completion; hydraulic transportation; replacing roadway with the boreholes; gas drainage

## 0 引言

工作面回采过程中的瓦斯超限隐患是威胁我国煤矿安全生产的重要危险源之一<sup>[1-3]</sup>。在待开采煤层顶板岩层中布置高抽巷进行采动区瓦斯的抽采是应用较为广泛的方式之一,但也存在着施工周期长、工程量大、成本高、采掘接替紧张等问题<sup>[4-5]</sup>。2004年煤炭科学研究院西安分院与沈阳煤业集团合作,在国内首次开展顶板走向近水平大直径长钻孔替代闭式高抽巷抽放瓦斯的试验,施工钻孔直径153 mm,最大孔深339 m,结果表明高位大直径长钻孔可以和高抽巷取得同等的抽放效果,初步验证了“以孔代巷”技术的可行性<sup>[6]</sup>。随着基于小口径螺杆钻具的定向钻进技术由国外引进国内,特别是煤科总院西安分院依托国家重大科技支撑计划项目对孔底螺杆马达定向钻进技术与配套装备进行国产化开发及大力推广应用<sup>[7-9]</sup>。通过受控定向钻进技术将定向长钻孔布置在煤层顶板回采断裂带,代替高抽巷抽采工作面煤层顶板裂隙带采动卸压瓦斯的高位定向长钻孔“以孔代巷”工艺技术得到广泛深入研究,针对顶板钻孔钻进深度、成孔率和钻进效率等难题,开发了孔底加压、振动减阻、复合强排渣定向钻进、复杂顶板主动防塌及局部孔段扩孔防堵等工艺技术,使得高位定向长钻孔终孔直径普遍达到153 mm,孔深超过500 m,施工最深孔达1 227 m,基本满足煤矿区顺工作面长度覆盖的需要。且随着钻探装备能力的进一步提高以及顶板岩层大直径定向钻进技术的开发完善,高位定向钻孔向着一次成孔直径200 mm以上,孔深超过1 000 m的方向发展。目前,“以孔代巷”技术已在淮南、淮北矿区得到大规模工程应用并向全国其他矿区推广,取得显著的经济和社会效益<sup>[10-17]</sup>。随着我国煤矿开采向中深层进展,开采煤层顶板岩层应力变化愈加复杂,定向钻孔往往要穿越复杂应力区及构造带,常规裸孔抽采难以保证工

作面回采过程中钻孔抽采通道的畅通,极大制约“以孔代巷”技术的推广应用。目前,较为可行的工程实践方法是采用筛管护孔措施,因常用PVC筛管强度低,普遍采用孔口推送钢筛管工艺方法完成整孔筛管护孔<sup>[18-20]</sup>,实际应用中遇到的问题主要集中在两个方面,一是钢筛管裸孔推送阻力大,为保证推送深度,采用的筛管管径较小,导致钻孔瓦斯抽采混合流量和纯量受限,难以满足“以孔代巷”替代性抽采需求;二是同时增大筛管管径和壁厚以增强刚性可提高下管深度,但大直径高刚性钢筛管经济性差,推广难度大。

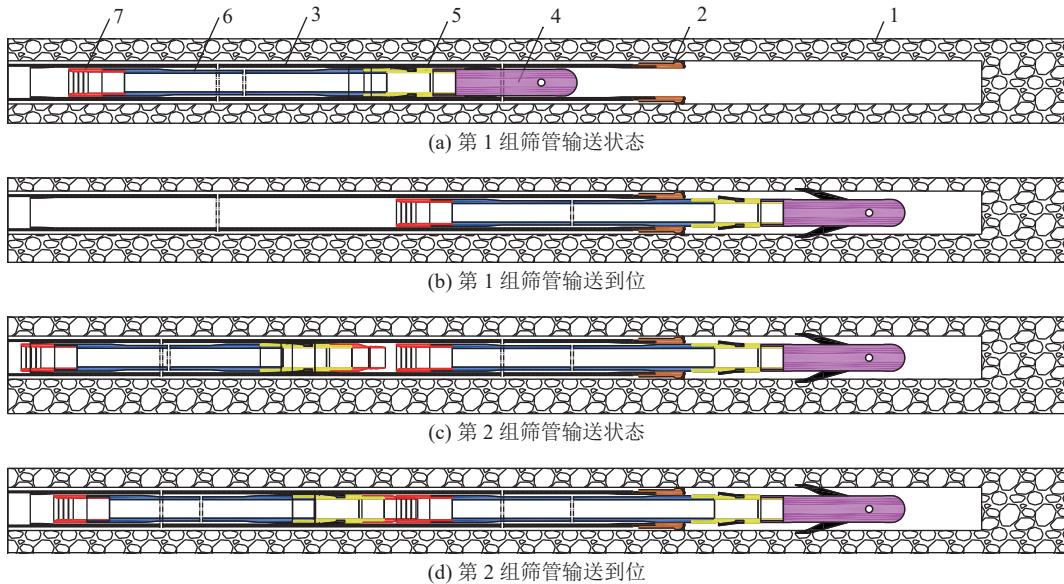
针对高位定向长钻孔筛管护孔遇到的问题,提出将整孔筛管划分为多组筛管分批水力输送孔内对接的方法完成整孔大直径筛管护孔,解决筛管护孔管径和深度难以兼得的难题,同时用玻璃钢筛管替代钢筛管,提高筛管护孔经济性,通过研制的整套分组筛管装置及配套开发的水力输送对接筛管工艺方法,进行两个钻孔的护孔筛管现场试验,为“以孔代巷”技术的进一步推广应用提供技术支撑。

## 1 水力输送对接筛管技术原理

煤矿井下高位定向钻孔水力输送对接筛管技术的分组筛管水力输送及自主对接原理主要由以下几步组成。

第1步,定向孔成孔并扩孔后将定向钻具提出孔外,下入大通径套铣钻具至孔底。将整孔筛管分成若干组筛管下入,如图1a所示,第1组筛管由悬挂装置、封堵短节、玻璃钢筛管、对接母头组成,其中玻璃钢筛管受巷道空间限制,采用长1~3 m的单根连接而成,每推入一根后从后部连接下一根,由于玻璃钢筛管的密度仅为钢筛管的1/5左右,一般人力推送长度可达百米以上。

第2步,待第1组筛管完全下入大通径钻杆内后,连接水辫并启动水泵,水流经封堵短节和悬挂装



1—岩层；2—钻头；3—大通径套铣钻杆；4—悬挂装置；5—封堵短节；6—玻璃钢筛管；7—对接装置母头

图1 分组筛管水力输送对接技术原理

Fig.1 Principle of hydraulic transportation and automatic butt joint technology of grouping screen pipe

置处时被封堵,形成水力驱动力带动整组筛管向孔底输送,逐渐提高水泵流量和压力将第1组筛管输送至孔底,如图1b所示,当悬挂装置和封堵短节冲出钻头后,水从筛管处泄流,此时水压下降,第1组筛管输送到位。

第3步,卸下水瓣,再将第2组筛管连接并下入套铣钻杆内,其中第2组筛管由对接公头、封堵短节、玻璃钢筛管、对接母头组成,连接水瓣并启动水泵,如图1c所示,水流经筛管前端时被封堵短节和对接公头封堵,从而建立输送压力推动整组筛管向孔底运动。

第4步,如图1d所示,第2组与第1组筛管接触,此时对接公头依靠导引环导入上一组筛管的对接母头内,对接母头内的冲击器被压缩蓄能击碎对接公头的钢化玻璃,与此同时,对接母头的卡爪扣入对接公头的环形凹槽中,两组筛管实现连接并贯通中心通道,钢化玻璃颗粒随着水流排出孔外。

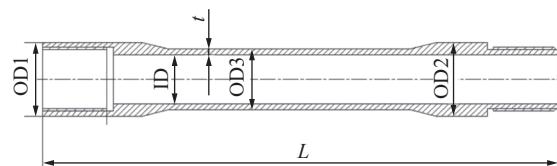
第5步,输送过程中观察泵压表的变化,正常输送筛管状态时泵压升高1 MPa左右,待公母端接头接触时,泵压会逐渐升高,再待泵压迅速回落后,表明第2组筛管与第1组筛管对接成功,钢化玻璃被击碎,且两组筛管内通道实现贯通。重复上述步骤,

以此循环直至最后一组筛管下入到位后提出孔内全部钻具,并下入孔口管封孔抽采瓦斯。

## 2 试验装置

### 2.1 大直径玻璃钢筛管

筛管强度按近水平钻孔孔深为1 000 m,且钻孔向上爬升,钻孔高程增加200 m考虑。筛管结构设计如图2所示,采用直连方式,管体两端的接头处加厚以加强丝扣连接强度,采用圆孔型筛眼,孔眼直径14 mm,每根筛管合计30个圆孔,筛管打孔率0.57%。筛管设计强度见表1,满足:轴向拉力 $\geq 25$  kN,轴向压力 $\geq 10$  kN,抗扭强度 $\geq 2 000$  N·m,管身径向抗挤压强度 $\geq 20$  MPa,筛管最大允许弯曲曲率:每6 m筛管最大允许弯曲角度不小于5°。玻璃钢筛管以环氧



OD1—筛管母接头外径；OD2—筛管公接头外径；OD3—筛管外径；ID为筛管内径；t—筛管壁厚；L—筛管长度

图2 大直径玻璃钢筛管结构

Fig.2 Structure of large diameter GRP screen pipe

表1 大直径玻璃钢筛管结构及性能参数

Table 1 Structure and performance parameters of large diameter GRP screen pipe

接头外径 OD1/mm	内径 ID/mm	壁厚 t/mm	管体外径 OD3/mm	长度L/mm	管身径向抗挤压强度/MPa $\geq 20$	轴向拉力/kN $\geq 25$	轴向压力/kN $\geq 10$	抗扭强度/(N·m) $\geq 2 000$	孔眼直径/mm 14	孔眼数量/个 30
95	76	5	86	3 081.2						

树脂为基体材料,高强玻璃纤维为增强材料采用缠绕成型工艺制成。考虑到煤矿井下瓦斯抽采的煤矿安全要求,筛管电阻率 $\leq 105 \Omega/m$ ,且满足MT 181—1988规定的阻燃性能的要求。

## 2.2 大直径悬挂装置

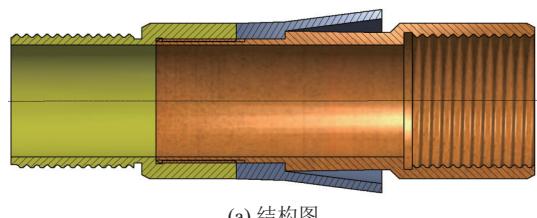
悬挂装置位于第1组筛管端部,其前端顶开可开闭式钻头进入钻孔后,悬挂装置上的翼片在强力弹簧作用下张开,提钻时依靠整套筛管向孔口方向运动趋势或受拉力作用下楔入孔壁,产生抵抗筛管移动的阻力,将筛管固定在钻孔底部。如图3所示悬挂装置采用四爪张开式设计,且导引头可分离,方便进行多个悬挂装置串联使用,提高筛管安设在孔内的可靠性。



图3 悬挂装置  
Fig.3 Hanging unit

## 2.3 封堵短节

封堵短节的作用为配合对接装置公头(或悬挂装备)实现对钻杆内通径的节流封堵,从而使水压上升带动整组筛管向孔底运动(图4)。因为大通径钻杆接头处内径较钻杆本体内通径要小,为了保证节流封堵效果往往需要封堵短节能跟随钻杆内通径的



(a) 结构图



(b) 实物图

图4 封堵短节结构及实物

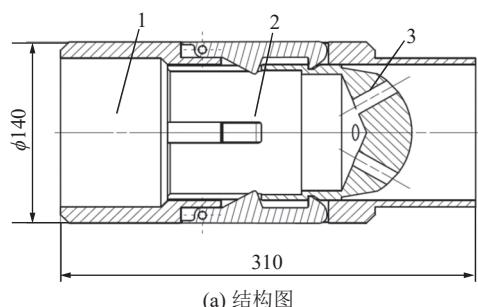
Fig.4 Structure and physical drawing of water flow blocking short section

变化实现动态封堵。

如图4所示,封堵短节主要由前端管体、胶套、后端管体等组成。前端管体的公扣与悬挂装置或对接装置公头的母扣连接,后端管体的母扣与后端筛管的公扣连接,胶套呈喇叭形状,喇叭口的最大外径比钻杆最大内径大1~2 mm,目的是与钻杆杆体内径产生过盈配合,起到预先密封作用,后端管体呈阶梯状,第1阶梯前段为公扣与前端管体母扣连接,第1阶梯管径与胶套内径相同,将胶套穿入第1阶梯管径后与前端管体连接可以固定胶套,第2阶梯管径较第1阶梯管径大,其目的为限制胶套一端的位移起固定作用,同时其直径加上胶套开口处厚度应与第3阶梯管径(即最大管径)相同或略大但要小于钻杆接头处的最小内径,目的是当胶套运行到钻杆接头处时,胶套喇叭口直径收缩到最小时应小于钻杆最小内径才能保证顺利通过。

## 2.4 钻头通水堵头

钻头通水堵头连接于套铣钻头与大通径钻杆之间,防止重入大通径钻杆时被孔内残余岩屑堵塞钻杆内通径导致水力输送筛管时遇阻,其结构如图5所示,主要由外管、卡爪及内套组成。外管的一端与大通径套铣钻头相连,另一端与大通径钻杆相接,外管周向安装有4个卡爪,内套的端头为半圆形并开有4个水口,靠近半圆头的外周开有环槽,尾端则对于卡爪开有4个敞口矩形槽。其工作原理为:将其



(a) 结构图



(b) 实物图

1—外管; 2—卡爪; 3—内套

图5 Φ140 mm 钻头通水堵头

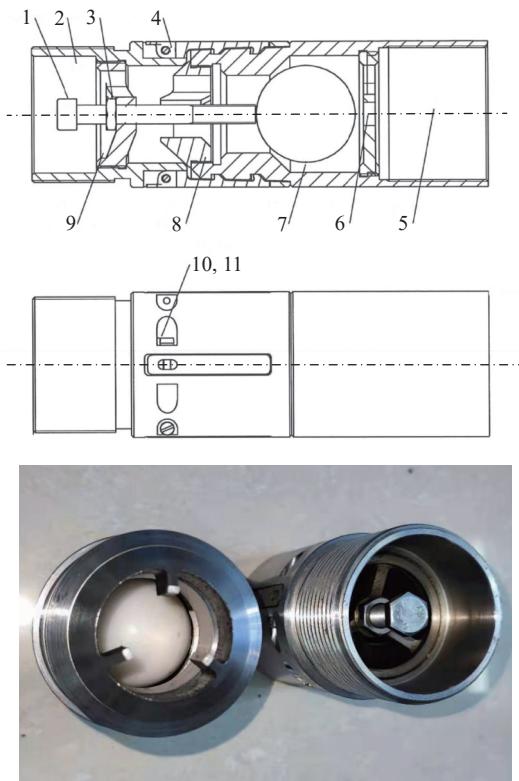
Fig.5 Φ140 mm drilling bit plug with passable water

连接套铣钻头和大通径钻杆后正常下钻,此时卡爪端部抓钩抓住内套沟槽同时卡爪中间凸起挡住内套敞口矩形槽使内套固定于外管内无法前后移动,起到阻挡孔内岩屑进入钻杆的作用,保证钻杆内通径的畅通,当需要通水冲孔时,可以由内套半圆头的4个水口通水冲刷钻头,而当下钻到位后,第1组筛管的悬挂装置进入内套并顶开卡爪凸起带动卡爪的抓钩张开释放内套,从而在水力驱动下使悬挂装置冲出钻头挂住孔壁。

## 2.5 分组筛管连接装置

1)坐封式分组筛管连接装置设计。如图6所示,坐封式分组筛管连接装置由筛管公母接头组成,筛管公接头包含公接头本体、导引环、卡槽、封堵球、挡环、坐封锥面等部分,筛管母接头包含母接头本体、顶杆、卡爪等部分。

筛管公接头和筛管母接头分别连接在下一组筛管的头部及前一组筛管的尾部,并设计引导与自锁机构。筛管公、母接头的水力连接方式为:在水力推进力下筛管公接头在对接导引环的引导下与筛管母接头实现对接,筛管母接头的卡爪卡住筛管公接头



1—顶杆; 2—母头; 3—锁紧螺母; 4—卡爪; 5—公头; 6—挡环;  
7—坐封球; 8—导引环; 9—推环; 10—螺钉; 11—弹簧

图6 坐封式筛管连接装置结构及实物

Fig.6 Structure and physical diagram of setting screen pipe connecting device

的卡槽实现机构自动导正自锁,同时顶杆顶开封堵球,从而使水流通过封堵球和坐封锥面的间隙泄流,此时钻杆内水压降低,前后两组筛管内通道联通实现到位报信。其中,所述封堵球采用可在清水中降解材料,当分组筛管连接后,封堵球可在水中逐渐降解,从而进一步减小后续瓦斯抽采时的接头流阻。

坐封球可溶性实验。坐封球为铝基降解球,对其进行清水中溶解速率实验,以检验筛管连接装置对接后坐封解除释放接头抽采通道的时间。如图7所示,当坐封球完全浸没水中时与水发生化学反应,由外及里逐渐溶解坐封球体,其溶解速率如图8所示,A球和B球在前5 h内溶解速率均较低,球体直径变化不大,随着反应进行,释放热量加快了化学反应进程,B球在溶解进行到10 h后球体直径快速减小,至19 h后完全溶解,A球则在反应进行到7 h后球体直径减小速率落后于B球,至12 h后水分耗尽,溶解中止。试验表明当水分流失或反应消耗掉已有水分后,坐封球降解速率会大幅下降甚至停止,考虑到高位近水平定向钻孔内水力输送对接完筛管后难以保障孔内水分将坐封球完全浸没至其降解完全,



图7 坐封球可溶性实验  
Fig.7 Solubility test of setting ball

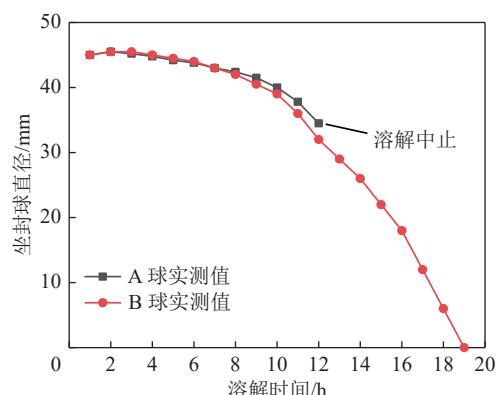
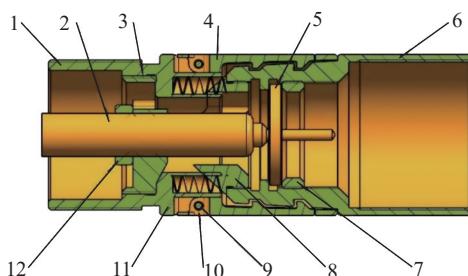


图8 坐封球溶解速率  
Fig.8 Dissolution rate of setting ball

同时降解后仍存留一定量的反应物影响抽采,因此应考虑对坐封式筛管连接装置进行改进设计。

2)击穿式筛管连接装置设计。针对坐封式筛管连接装置存在的问题,将坐封球改进为钢化玻璃,设计了击穿式筛管连接装置,其结构如图9所示,主要由公头、母头、挡环、冲击器、导引环、卡爪、扭簧、弹簧、连接螺钉、钢化玻璃等部分组成。公头和母头分别用于连接后一分组筛管的前端和前一分组筛管的尾端,公头和母头之间采用卡爪与环形凹槽配合连接,卡爪通过连接螺钉固定,且依靠扭簧进行复位。公头为中心通孔式筒状结构,内部加工有凸台,用于安装钢化玻璃,并用挡环固定后封堵水流建立压力,提供水力驱动力助推大直径筛管向孔底运动;公头前安装导引环,用于两段大直径筛管在孔内的导向作用;母头内设有冲击器安装架和锁紧螺母,用于固定冲击器。当公头通过水压驱动至母头,暨钢化玻璃运动接触到冲击器后,直至水压作用使冲击器击穿钢化玻璃,公母接头运动到位,母头卡爪卡入公头环形凹槽内,完成两个接头相连,并使整段大直径筛管中心贯通;依次采用此方法通过水力输送孔内对接方式将各分组筛管逐次下入,最终形成定向长钻孔的瓦斯抽采通道。



1—母头；2—冲击器；3—推环；4—卡爪；5—钢化玻璃；6—公头；7—挡环；8—导引环；9—螺钉；10—扭簧；11—弹簧；12—锁紧螺母

图9 击穿式筛管连接装置结构

Fig.9 Structural diagram of breakdown screen pipe connection device

针对设计的击穿式筛管连接装置进行了50次模拟对接击穿实验,均能有效击碎钢化玻璃实现公母接头连接。根据伯努利试验准则,单次击穿实验成功的概率为 $p(0 < p < 1)$ ,则重复 $n$ 次击穿实验恰好发生 $k$ 次成功的概率为: $p_n(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$  $(k = 0, 1, 2, \dots, n)$ ,那么50次模拟击穿试验均成功的概率 $p_{50}(50) = C_{50}^{50} p^{50} (1-p)^0 = p^{50}$ 。根据统计学小概率原理,一个事件如果发生的概率很小的话(一般认为等于或小于0.05的概率为小概率),那么一次实验

中是几乎不可能发生的,若将此次50次模拟击穿实验全部成功看作一个事件,那么显然 $P_{50}(50)$ 的概率不符合小概率事件,即 $p^{50} > 0.05$ ,那么 $p > 0.9418$ ,即单次随机模拟击穿实验的成功概率不小于94.18%。

3)分组筛管水力输送对接实验。如图10所示,借助发明的分组筛管水力输送对接实验装置(其具体技术原理详见发明专利ZL 2021 1051 7212.7),搭建了地面模拟实验平台,进行了30组击穿式筛管连接装置水力输送筛管自动对接实验,自动对接均取得成功,击碎的玻璃碎片随筛管内水流顺利排出,实现筛管抽采通道的可靠连通。自动对接实验符合伯努利试验原则,根据统计学小概率原理,30次水力输送分组筛管自动对接伯努利实验均成功,则不属于小概率事件,其概率 $p^{30} > 0.05$ ,那么 $p > 0.9050$ ,即单次随机模拟水力输送分组筛管自动对接实验的成功概率不小于90.50%。



图10 分组筛管水力输送对接实验

Fig.10 Experimental on hydraulic transportation and automatic butt joint of grouping screen pipe

### 3 水力输送筛管护孔现场试验

#### 3.1 试验装备

1)钻机。采用ZDY12 000 LD型大功率深孔定向钻机,动力头主轴采用 $\varnothing 135\text{ mm}$ 大通孔结构,可配套使用多种规格的普通钻杆、通缆钻杆、螺旋钻杆和打捞钻具进行定向钻进、扩孔及水力输送筛管施工。配套的泥浆泵额定压力为12 MPa,额定流量为390 L/min,其压力表与流量计能实时监测水力输送筛管过程中的压力与流量,判断输送状态。

2) 钻杆。采用ø89 mm 通缆随钻测量钻杆用于定向长钻孔的钻进及扩孔施工, 采用ø127/103 mm 大通径套铣钻杆实施钻杆内水力输送筛管工艺施工。

3) 钻头。定向钻进施工采用ø120 mm 金刚石复合片弧角钻头成孔后更换ø94/153 mm 扩孔钻头扩至孔底。金刚石复合片弧角钻头采用弧角型冠部形状, PDC 切削齿具有最佳工作角度, 易于切削齿切入岩石, 钻进效率高; 分层错峰布齿, 实现多轨道、分层等体积切削岩石; 包镶式焊接结构, PDC 齿焊接强度高。

### 3.2 地质条件及钻孔施工情况

试验 1 号钻孔位于 A 矿某工作面煤层顶板, 工

作面内 32 煤层为稳定煤层, 工作面内褶曲和断层构造发育, 32 煤垮落带范围为 32 煤顶板上方 0~16.5 m, 裂隙带范围为 32 煤顶板上方 16.5~41 m。煤层随工作面回采, 在采动应力场中形成的裂隙空间演变成为瓦斯流动通道, 将抽采钻孔布置在工作面煤层顶板上方垮落带与裂隙带交汇处, 能获得最佳抽采效果。试验 2 号钻孔位于 B 矿 1077 工作面回采 10 煤层顶板, 煤层直接顶为泥岩, 基本顶为细砂岩, 局部含粉砂质, 底板为深灰色粉砂岩, 少含细砂质。钻孔剖面轨迹控制在距 10 煤层顶板 60~65 m, 沿粉砂岩层钻进。

表 2 试验钻孔设计及施工参数

Table 2 Test drilling design and construction parameters

孔号	开孔倾角/(°)	稳定岩层施工倾角/(°)	设计孔深/m	终孔孔深/m	终孔孔径/mm	终孔至煤顶垂直距离/m
1号	17	0.5	520	511	153	16
2号	26	1.0	600	607	153	65

施工工艺: ①开孔: ø120 mm 钻头+ø89 mm 高韧性螺旋钻杆; ②定向钻进: ø120 mm 钻头+ø89 mm 五级液动螺杆马达+ø89 mm 泥浆脉冲随钻测量系统+ø89 mm 高韧性螺旋钻杆; ③扩孔: ø153 mm 扩孔钻头(带ø120 mm 导向头)+ø89 mm 高韧性螺旋钻杆。

1 号、2 号开孔倾角分别为 17°、26°, ø120 mm 钻头回转开孔 20 m 后, 扩孔至 ø153 mm, 下定向钻具定向钻进, 分别于 60 m、120 m 后进入稳定岩层, 分别保持 0.5°、1.0° 倾角施工至 511 m、607 m, 复合扫孔后提钻, 全孔扩孔至 ø153 mm(表 2)。

### 3.3 试验结果分析

#### 3.3.1 试验计算

高位定向钻孔大直径玻璃钢筛管水力输送完孔工艺分别在皖北矿区 A 矿 W3211 工作面高位钻场和 B 矿 1077 工作面高位钻场进行了 1 号、2 号两个钻孔的现场试验, 试验钻孔开孔倾角分别为 17°、26°, 钻孔孔深 511、607 m, 钻孔直径 ø153 mm。钻孔施工结束后, 将 ø127 mm 大通径套铣钻杆+ø153 mm 套铣钻头重入到孔底, 反复冲孔后将大直径玻璃钢筛管从大通径套铣钻杆内通过分组水力输送孔内对接的方式完成全孔段筛管完孔。

如图 11a 所示, 第 1 分组筛管组合为 ø95 mm 筛管悬挂两个串联+ø100 mm 封堵短节+ø95 mm 玻璃钢的筛管(100 m)+ø95 mm 对接母头; 第 2 及后续分组筛管如图 11b 所示, 为 ø95 mm 对接公头+ø100 mm 封堵短节+ø95 mm 玻璃钢的筛管(100 m)+ø95 mm 对接母头。



(a) 第 1 分组筛管及钻头通水堵头

(b) 第 2 或后续分组筛管

图 11 分组筛管

Fig.11 Grouping screen pipe

先进行玻璃钢筛管的水力输送参数理论计算, 试验用 ø95 mm 玻璃钢筛管平均壁厚为 5 mm, 重度为 18 000 N/m<sup>3</sup>, 浮重度为 8 000 N/m<sup>3</sup>。见表 3, 折算到单位长度后筛管的平均重量为 25 N/m, 在水力输送时筛管的水中浮重量为 11.3 N/m, 玻璃钢筛管与钻杆内壁的摩擦因数在 0.2~0.3, 平均为 0.25。在孔口 100 m 范围内人工连接筛管往孔内推送过程中, 推送阻力为筛管重力沿钻杆轴向向下的分力与筛管重力垂直钻杆内壁分力的摩阻力之和, 人工连接到 100 m 长度时的玻璃钢筛管孔口推送阻力达到最大值, 其计算公式如下:

$$F_t = lG(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \quad (1)$$

式中,  $F_t$  为玻璃钢筛管孔口推送阻力, N;  $l$  为一组筛管连接长度, m;  $G$  为筛管平均重量(在水力输送时取平均浮重量), N/m;  $\alpha$  为钻孔前 100 m 平均倾角, (°);  $\mu$  为筛管与钻杆摩擦因数, 取 0.25。

对于 1 号、2 号钻孔前 100 m 平均倾角分别为

12°、18°,代入式(1)计算得100 m长度一组筛管推送阻力分别为1131、1366 N。当水力输送时,钻杆内筛

管受浮力作用,G取筛管平均浮重量值,代入式(1)计算其孔口段起始水力输送阻力分别为511、618 N。

表3 玻璃钢筛管水力输送参数  
Table 3 Hydraulic transport parameters for fiberglass screen pipes

钻孔号	筛管平均重量/(N·m <sup>-1</sup> )	筛管平均浮重量/(N·m <sup>-1</sup> )	筛管与钻杆摩擦因数	钻孔前100 m平均倾角/(°)	钻孔水平段平均倾角/(°)	孔底距孔口垂距/m	钻杆内径/mm
1号	25	11.3	0.25	12	0.5	46	103
2号	25	11.3	0.25	18	1.0	66	103

输送到钻孔近水平段时其平均倾角仅为0.5°~1.0°,水力输送阻力近似为筛管在浮重下的摩擦阻力,1号钻孔和2号钻孔均为282.5 N。

考虑到封堵短节采用橡胶套密封钻杆内通道,其在水压下与钻杆内壁紧贴产生较大的滑动阻力,通过封堵短节结构设计可计算橡胶套和钻杆内壁接触面积为8 000 mm<sup>2</sup>,滑动摩擦因数取0.8,由封堵短节全断面封堵钻杆内通径后,提供511,618,282.5 N的水力输送力所需的理论水压力分别为0.26,0.32,0.15 MPa。同时筛管输送过程中受静水压力的影响,其中1号,2号钻孔的孔口100 m处的静水压力分别0.2、0.3 MPa,孔底距孔口垂距分别为46,66 m,产生的静水压力分别为0.46,0.66 MPa,1号,2号钻孔在孔口倾斜段水力输送时的起始水压应不小于0.46,0.62 MPa,输送到水平段时输送阻力减小静水压力增大,所需输送水压分别不小于0.61、0.81 MPa。实际水力输送过程中所需水压除受以上因素叠加作用外还将受钻杆内清洁度和输送速度等因素的影响而大于理论计算值。

### 3.3.2 结果分析

第1次为1号钻孔水力输送筛管试验,在大通径套铣钻杆重入钻孔过程中,当卸掉水辫连接钻杆时发现孔内岩屑随水流从钻杆内排出,为避免后续水力输送筛管过程中因钻杆内岩屑大量堆积遇阻,采用每下钻5~10 m开启泥浆泵反复冲孔排出钻杆内岩屑。第1组筛管连接到100 m长度时需两名工人合力才能推入钻杆内,与理论计算的1131 N推送阻力基本相当,输送时水压在1.0~1.5 MPa波动,随着输送深度增加到300 m以上,水压逐渐增大到2.0 MPa左右,并伴有瞬时水压激增至5~8 MPa,输送到位时水压降为0.5 MPa左右。从第1组筛管输送压力来看,其输送水压要远大于理论计算的倾斜段0.46 MPa和水平段0.61 MPa,且输送到300 m后随着孔内积聚的岩屑增加出现压力增大和局部卡滞引起的压力陡增现象,因此应保证钻杆内的清洁度

以防止水力输送过程中的遇阻卡滞。

第2及后续分组筛管输送时,钻杆内的岩屑被第1组筛管输送时排出,较第1组筛管输送时压力有明显下降,水压基本稳定在1.0 MPa左右,两组筛管实现对接后水压降至0.5 MPa左右,与计算的静水压力值相当,可以判断筛管输送到位。试验期间泵压变化明显,在通过每根套铣钻杆接头处时水压会瞬时上升约0.5 MPa,这与套铣钻杆接头处内径较杆体内径小致使封堵短节通过时遇阻变大有关。通过前后两组筛管对接后水压瞬间下降到0.5 MPa左右从而实现到位报信,全孔分组筛管均完成可靠对接,试验筛管水力输送深度达到501 m。

相较于第1次1号钻孔试验,第2次2号钻孔水力输送筛管试验时在钻头与钻杆间增加了钻头通水堵头,解决了下钻过程中岩屑进入钻杆内通径的问题。分组筛管每连接一根即通过人工往钻杆内推入,当筛管连接到100 m长度时因近孔口段钻孔平均倾角较1号钻孔更大,需三名工人合力才能推入钻杆内,与理论计算的1366 N推送阻力基本相当。各分组筛管输送过程中水压在1.0~1.5 MPa区间波动,其中0.5 MPa左右的波动水压与第1次试验一样,为封堵短节通过钻杆接头遇阻变大导致。输送水压略高于理论计算的孔口倾斜段水力输送最小水压0.62 MPa和水平段输送最小水压0.81 MPa。输送到位时水压降为0.6 MPa左右,与理论计算的静水压力0.66 MPa相当,输送过程中未出现遇阻卡滞时的泵压突然升高现象。试验过程中调节泵量在200 L/min时,第1分组筛管由孔口输送到孔底的总用时为2 min 40 s,平均输送速度150 m/min,其余分组筛管输送时调节泵量在390 L/min,平均输送速度260 m/min,试验期间通过泵压由水力输送的1.0 MPa以上迅速回落至0.6 MPa左右的静水压力可判断分组筛管输送到位并连接可靠,实现到位报信,试验筛管水力输送深度达到522 m。

### 3.3.3 抽采效果

分别记录1号、2号钻孔从工作面回采开始后120 d的瓦斯抽采情况,如图12所示,工作面回采初期两个钻孔瓦斯抽采浓度及流量均在低位徘徊,1号钻孔在抽采前30 d浓度为20%~30%,日纯量和日混合量分别在1 000、2 000 m<sup>3</sup>以下,至抽采35 d后小幅上扬,产生一个小波峰,日纯量达到2 390 m<sup>3</sup>,混合量达到4 877.5 m<sup>3</sup>,随着工作面回采,抽采浓度及日抽采量均稳定在较高的平台期,日纯量在1 500~2 000 m<sup>3</sup>,日混合量在3 000~4 000 m<sup>3</sup>,抽采浓度在50%~60%波动,工作面回采90 d后,进入抽采后期,浓度和日纯量均大幅下降,日混合量下降幅度较小。2号钻孔抽采趋势整体和1号钻孔较为类似,抽采前15 d浓度、日纯量和混合量均明显增长,抽采稳定期从20 d~95 d,浓度为40%左右,最高达65.6%,日均纯量和混合量分别为1 819、4 306 m<sup>3</sup>,至抽采120 d浓度下降到18%,日纯量降至500 m<sup>3</sup>左右。

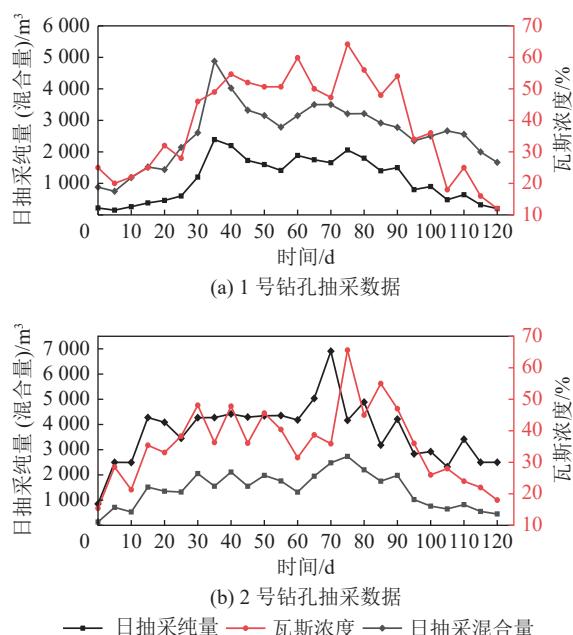


图12 试验钻孔瓦斯抽采数据

Fig.12 Gas extraction data from experimental boreholes

2个钻孔在工作面回采后期抽采浓度和日纯量均出现下降,但抽采混合量下降幅度不大,从整个抽采周期来看,除了抽采初期工作面逐步回采使裂隙与钻孔逐步导通,混合量逐步增大,抽采中期和后期,混合量均维持在较高位,同时1号、2号钻孔120 d累计抽采瓦斯纯量分别为139 945、176 139 m<sup>3</sup>,说明采用大直径筛管护孔对于钻孔稳定抽采有积极作用。

通过以上2个钻孔的试验,表明采用钻孔内分组筛管水力输送孔内对接工艺是解决高位定向长钻

孔全孔段筛管完孔难题的可行方案,有利于保障高位定向长钻孔的瓦斯抽采效果,为实现“以孔代巷”起到支撑作用。

## 4 结 论

1) 研制的分组筛管连接装置由对接公头和对接母头组成,在水力输送筛管过程中对接公头的内通径由钢化玻璃封堵,配合其后连接的封堵短节实现对钻杆内通径的全断面封堵,分组筛管水力对接时由对接母头的冲击器击碎钢化玻璃,实验其一次击穿成功率不小于94.18%,室内实验其连接成功概率不小于90.50%,现场试验表明可通过泵压变化实现筛管到位报信功能,钢化玻璃击碎后可被水流冲刷带走,不影响抽采通道畅通。

2) 通过现场试验,分组筛管水力输送与对接工艺可在153 mm孔径高位定向钻孔内实现95 mm直径玻璃钢筛管的500 m以上孔深完孔,玻璃钢筛管重量轻强度高,每个分组筛管人工连接推送长度可达100 m以上,在390 L/min泵量下单组筛管在ø127 mm钻杆内的500 m孔深水力输送时间仅为2 min,全孔筛管的纯水力输送总用时不超过10 min,采用分组水力输送孔内对接工艺不仅提高了筛管完孔施工效率,降低了劳动强度,而且实现了高位定向钻孔“钻到位,管到底”的全孔段护孔目标,结合工作面回采过程中钻孔瓦斯抽采数据,表明高位定向长钻孔采用大直径筛管护孔可有效保障瓦斯抽采效果,为煤矿井下“以孔代巷”的瓦斯治理模式革新提供技术支撑。

3) 分组筛管水力输送对接完孔工艺需要重入大通径钻具后借助钻具的内通径实现筛管水力输送到位,一方面钻具内径限制了筛管管径的进一步增大;另一方面重入大通径钻具增加了施工工序,也增加了卡埋钻的风险;因此,有必要进行裸孔内的水力输送筛管完孔技术研究,进一步提高高位定向长钻孔筛管完孔的工艺普适性和全流程完孔效率。

## 参考文献(References):

- [1] 李树刚,杨二豪,林海飞,等.深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践[J].煤炭科学技术,2021,49(5):1-10.  
LI Shugang, YANG Erhao, LIN Haifei, et al. Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49( 5 ) : 1-10.
- [2] 张宇菲,郭家豪,安晨,等.高瓦斯矿井内错顶板瓦斯巷合理布设及应用[J].矿业科学学报,2018,3(1):29-38.  
ZHANG Yufei, GUO Jiaohao, AN Chen, et al. Reasonable layout

- and application of inner dislocated gas roadway at the first mining working face with high gas mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(1): 29–38.
- [3] 周爱桃, 张蒙, 王凯, 等. 布尔台矿综放工作面采空区瓦斯运移规律及瓦斯抽采优化研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(3): 291–301.  
ZHOU Aitao, ZHANG Meng, WANG Kai, et al. Research on gas migration law and gas drainage parameters optimization in goaf of fully mechanized caving face in Buertai coal mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(3): 291–301.
- [4] 林海飞, 王旭, 徐培耘, 等. 特厚煤层开采卸压瓦斯储集区演化特征分析及工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 173–182.  
LIN Haifei, WANG Xu, XU Peiyun, et al. Evolution characteristics analysis and engineering application of pressure-relieved gas reservoir in extra-thick coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 173–182.
- [5] 刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 217–231.  
LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang, et al. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 217–231.
- [6] 孙荣军, 魏刚, 吴璋, 等. 顶板近水平长钻孔替代闭式高抽巷进行瓦斯抽放的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 20–21.  
SUN Rongjun, WEI Gang, WU Zhang, et al. Experimental research on using approximate horizontal long-hole instead of closed high extracted roadway to drain gas[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 20–21.
- [7] 李泉新, 石智军, 田宏亮, 等. 我国煤矿区钻探技术装备研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 1–6.  
LI Quanxin, SHI Zhijun, TIAN Hongliang, et al. Progress in the research on drilling technology and equipment in coal mining areas of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 1–6.
- [8] 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.
- [9] 姚宁平. 我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 81–83.  
YAO Ningping. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 81–83.
- [10] 童碧, 许超, 刘飞, 等. 淮南矿区瓦斯抽采中以孔代巷技术研究与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 33–39.  
TONG Bi, XU Chao, LIU Fei, et al. Technology research on borehole in place of roadway and its engineering practice in gas drainage of Huainan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 33–39.
- [11] 于士芹, 杨宏民, 鲁小凯, 等. 王家岭煤矿高位定向长钻孔抽采顶板卸压瓦斯技术[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2018, 37(4): 31–36.
- YU Shiqin, YANG Hongmin, LU Xiaokai, et al. Technology of pressure-relief gas drainage by highly oriented level boreholes from roof fracture zone in Wangjialing coal mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2018, 37(4): 31–36.
- [12] 许超, 王鲜, 李泉新, 等. 顾桥煤矿顶板复杂地层中高位定向钻孔成孔试验[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 184–188.  
XU Chao, WANG Xian, LI Quanxin, et al. Borehole-forming experiment of high level directional drilling in complex seam roof of Guqiao coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 184–188.
- [13] 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.
- [14] 李平, 童碧, 许超. 顶板复杂地层高位定向钻孔成孔工艺研究[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 197–201.  
LI Ping, TONG Bi, XU Chao. Study on hole-forming technology of high-level directional borehole in complicated roof strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 197–201.
- [15] 石浩. 大直径高位定向长钻孔瓦斯抽采技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 195–200.  
SHI Hao. Gas drainage technology and its application of large diameter and high directional long drilling[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 195–200.
- [16] 赵耀江, 郭海东, 袁胜军. 综采面顶板走向大直径长钻孔瓦斯抽采技术参数的研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(1): 74–77.  
ZHAO Yaojiang, GUO Haidong, YUAN Shengjun. The study on the key gas drainage technique by long & large diameter roof bore holes in fully mechanized face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(1): 74–77.
- [17] 郝世俊, 段会军, 莫海涛, 等. 大直径高位定向长钻孔瓦斯抽采技术及实践[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 243–248.  
HAO Shijun, DUAN Huijun, MO Haitao, et al. Gas drainage technology and practice analysis of large diameter high position directional long borehole[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 243–248.
- [18] 童碧. 复杂顶板高位定向长钻孔全程下筛管技术实践[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 85–89.  
TONG Bi. Technical practice of running screen in the whole process for high level directional drilling of complex roof[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 85–89.
- [19] 司原龙. 顶板定向长钻孔全孔下筛管技术的应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(8): 52–54.  
SI Yuanlong. Application of screen technology under directional long hole drilling in roof[J]. Modern Mining, 2019, 35(8): 52–54.
- [20] 赵亮宏. 全程筛管护孔技术在高位瓦斯抽采钻孔中的应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(2): 110–112.  
ZHAO Lianghong. Application of whole-process screen pipe hole protection in highly-located gas drainage borehole[J]. Modern Mining, 2020, 36(2): 110–112.