

# 淮北矿区井下钻冲护一体化水力增透技术试验研究

杨 明

(淮北矿业股份有限公司, 安徽 淮北 235000)

**摘要:**目前采用水力冲孔增透是碎软低渗煤层强化瓦斯治理的一种有效手段。针对淮北矿区煤层渗透性差、钻孔抽采率低、抽采周期长等问题,提出了钻冲护一体化水力造穴增透瓦斯抽采技术,开展了钻冲护一体化造穴装置研究。利用该造穴装置,配套大通径螺旋钻杆和可开闭式钻头,实现井下瓦斯抽采穿层钻孔钻进成孔、水力冲孔造穴增透和不提钻下筛管护孔工艺流程的一体化施工工艺,该工艺全过程只需下一次钻,工艺流程简单、辅助工作量小、综合效率高。在杨柳矿开展了现场试验,施工完成29个钻孔,试验结果表明:钻冲护一体化工艺技术可实现钻孔、水力造穴、筛管护孔的一体化施工,避免二次下钻再下筛管护孔,有效提高了全流程施工效率;钻孔穿煤段水力冲孔后平均冲煤量达到 $1.1\text{ m}^3/\text{m}$ ,平均造穴直径 $0.93\sim 1.00\text{ m}$ ,极大地提升了碎软煤层造穴增透效果。

**关键词:**碎软煤层;钻冲护一体化;水力冲孔;增透;造穴装置;筛管完孔

**中图分类号:**TD712<sup>+</sup>.6;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)06-0097-07

## Experimental study on integrated drilling, punching and protection technology for permeability enhancement in Huaibei mining area

YANG Ming

(Huaibei Mining Co., Ltd, Huaibei Anhui 235000, China)

**Abstract:** Hydraulic punching to enhance permeability is an effective means of strengthening gas governance in soft and low-permeability coal seams. In response to the problems of poor permeability of coal seams, low gas extraction rate of drill hole, and long extraction cycles in the Huaibei mining area, integrated drilling, hydraulic punching and protection technology for permeability enhancement has been proposed. Research on the integrated drilling, punching and protection device has been carried out. With the use of this device, matched with large hole triangular spiral drill rods and on-off type drill bit, the integrated construction process of drilling hole, hydraulic punching for permeability enhancement, and screen pipe completion is achieved. The entire process of this technology only requires one drilling, and experiments have been carried out in Yangliu mine, and successfully drilling 29 holes. The experimental results show that the integrated drilling, punching and protection technology can achieve the integrated construction of drilling, hydraulic drilling, and screen pipe protection, avoiding the need for secondary drill pipe run for screen pipe completion, effectively improving the overall construction efficiency. After hydraulic punching through the coal section, the average volume of coal flushing reached  $1.1\text{ m}^3/\text{m}$ , and the average hole diameter reached  $0.93\sim 1.0\text{ m}$ , greatly improving the permeability enhancement effect in fragmented soft coal seams.

**Key words:** fragmented and soft coal seam; integrated drilling, hydraulic punching and protection; hydraulic punching; permeability enhancement; hydraulic cavitation device; screen pipe completion

### 0 引言

水力压裂、水力割缝等技术做了大量研究<sup>[1-8]</sup>,其中针对井下煤层瓦斯治理,国内围绕水力冲孔、造穴增透技术已在河南平煤、焦煤,安徽淮南矿业、

收稿日期:2025-02-03;修回日期:2025-03-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.06.012

作者简介:杨明,男,汉族,1988年生,高级工程师,采矿工程专业,从事煤矿井下一通三防管理工作,安徽省淮北市相山区人民中路276号,349005096@qq.com。

引用格式:杨明.淮北矿区井下钻冲护一体化水力增透技术试验研究[J].钻探工程,2025,52(6):97-103.

YANG Ming. Experimental study on integrated drilling, punching and protection technology for permeability enhancement in Huaibei mining area[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 97-103.

淮北矿业,山西阳煤集团、晋煤集团等煤矿企业得到广泛应用,并取得了较好效果。对于碎软低渗煤层,采取水力增透强化抽采措施是目前应用最为广泛和有效的瓦斯治理手段<sup>[5-6]</sup>。大量实践证明:煤层增透可以使煤体产生更多的裂隙,扩大泄压范围及抽采面积,是提高煤层瓦斯抽采率的根本途径之一<sup>[9-13]</sup>。淮南矿区水力冲孔试验表明,钻孔冲出煤量可达到1.0~2.5 t/m,冲孔影响半径达到5.5~9.0 m,煤层透气性系数增加了70%~370%;采用水力冲孔措施后,石门揭煤速度提高了4倍,煤巷掘进速度提高了3~5倍。钻孔水力造穴增透强化抽采技术具有施工操作简单、性价比高、增透效果明显等优点,推广应用性好。

目前国内水力冲孔和护孔工艺独立或依次进行,即先冲孔提钻后再考虑是否护孔,存在以下问题:(1)水力冲孔后裸孔抽采,煤层破碎容易塌孔,严重影响抽采效果;(2)冲孔后需要提钻再下筛管,由于煤层破碎,提钻后裸孔下筛管的深度通常较浅,瓦斯抽采效果不佳;(3)二次下钻后钻杆内下筛管工序复杂,劳动强度大。国内现有水力冲孔技术,钻冲孔及护孔采用2套钻具,在钻孔、冲孔施工时钻具为全面钻头和水利造穴器,筛管护孔时需要退出孔内钻具后再下入开闭式钻头和大通孔钻杆,从钻杆内下筛管,这需要2次起下钻,工人加卸钻杆频繁,劳动强度大,多套钻杆经济成本高<sup>[14-16]</sup>。因此,针对淮北矿区碎软低渗煤层,开展“钻冲护”一体化工艺技术研究,通过“一套钻具、一趟钻”的工艺方法,实现完备的钻进、冲孔、护孔一体化的水力造穴增透施工,提高煤层透气性和瓦斯抽采效果的同时,减少施工工序,降低工人的劳动强度,提高施工效率。

## 1 钻冲护一体化造穴装置研究

### 1.1 基本结构

常规水力冲孔施工中,受现有水利造穴装置内部结构限制,钻进成孔和冲孔后无法实现不提钻直接从钻杆内下筛管护孔,为解决这一问题,研制一种成孔后不提钻直接冲孔造穴并从钻杆内下筛管护孔的钻冲护一体化水利造穴装置,通过连接造穴装置和开闭式钻头进行施工。钻孔时水直接流向钻头,起到排渣和冷却作用,煤层冲孔时高压水通过造穴装置上喷头造穴,下筛管时造穴装置中间具

有筛管通道,实现钻进成孔、水力冲孔、筛管护孔工序的一钻式施工。

造穴装置初始结构和过流状态如图1所示,造穴装置公扣端与开闭式钻头连接,母扣端与钻杆连接。水流经螺旋钻杆进入造穴装置杆体内部,一部分通过造穴装置杆体上的喷嘴流出,另一部分流经中心的压缩套筒与弹簧座内部通道流入增压活塞,再从增压活塞出水锥面处流出,之后从堵座的环空过流口流出造穴装置并进入钻头。

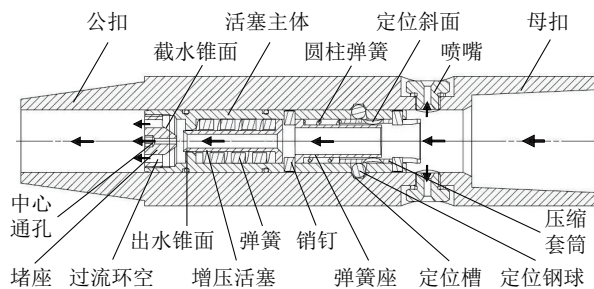


图1 钻冲护一体化造穴装置结构

Fig.1 Structure diagram of integrated drilling, punching and protection device

喷嘴直径、进出水孔直径根据式(1)计算:

$$q = 2.1\alpha d^2 \sqrt{p} \quad (1)$$

式中: $q$ ——出水流量, L/min;  $\alpha$ ——无量纲修正系数,一般小于1,根据实验确定;  $p$ ——进出水口压差, MPa;  $d$ ——出水孔直径, mm。

造穴装置外径与钻杆外径一致,内部活塞主体为一次性使用部件,正常状态下通过定位钢球固定在定位槽内。当筛管前端顶向压缩套筒时,圆柱弹簧压缩,定位斜面轴向移动至钢球位置时,钢球挤出,内部活塞主体与外壳体脱开,沿着中心推出,此时造穴装置中心通道打开。为保证筛管下入顺畅,造穴装置中心活塞推出后,内通道直径与钻杆内径基本一致。喷嘴直径选择2~4 mm,造穴装置内部活塞通孔直径8 mm,以确保喷嘴和中心过流量合理分配。

### 1.2 工作原理

正常钻进时调节流量使水压力小于冲孔压力(钻进和冲孔切换压力可调节),作用在增压活塞上的水压不足以压缩矩形弹簧使出水锥面与堵座的截水锥面接触,堵座过流环空的过流面积大于喷嘴的过流面积,大部分水流经堵座过流环空进入可开

闭钻头用于钻进排渣,仅有小部分水从喷嘴流出进入环空与孔底流出的水合流后再流出孔外。低压钻进时除了适用水以外还可采用压缩气体,即钻遇碎软煤层时,采用水介质钻进对孔壁冲刷扰动大,难以成孔,可改用压缩气体钻进成孔。

钻孔完成需要切换为水力冲孔状态时,逐步增加排量使得水压升高达到切换压力(如5 MPa),作用在增压活塞上水压压缩矩形弹簧推动活塞使得出水锥面与截水锥面接触,堵座过流环空堵塞,过流截面迅速减小,仅少量水流从中心通孔流出。该过程主要通过调节流量使水压迅速升高,完成高低压切换,此时大部分水流通过喷嘴喷出冲击煤壁造穴,随着钻杆回转和前后移动进行高压水力冲孔。

冲孔结束后,连接好筛管和悬挂装置,采用人工推送方式将筛管沿钻杆中心推入。前端悬挂装置在推力的作用下推动压缩套筒,压缩圆柱弹簧,到达预定位置时定位钢球落入定位斜面并与定位槽分离。造穴装置活塞主体在推力作用下继续前进脱离装置杆体,沿中心冲出可开闭式钻头。继续推送筛管总成通过造穴装置杆体、可开闭式钻头进入钻孔进行护孔,悬挂装置张开起到支撑作用。

## 2 钻冲护一体化施工工艺研究

利用钻冲护一体化造穴装置,配套大通径螺旋钻杆和可开闭式钻头,研发钻冲护一体化水力冲孔造穴增透工艺,实现钻孔、水力冲孔、筛管护孔一体化施工,减少常规钻冲护施工过程起下钻频率,提高施工效率,并解决煤层钻孔成孔、冲孔后因提钻导致塌孔难以护孔的问题,保证冲孔造穴的技术优势,提高瓦斯抽采效果。钻冲护一体化施工工艺示意如图2所示。

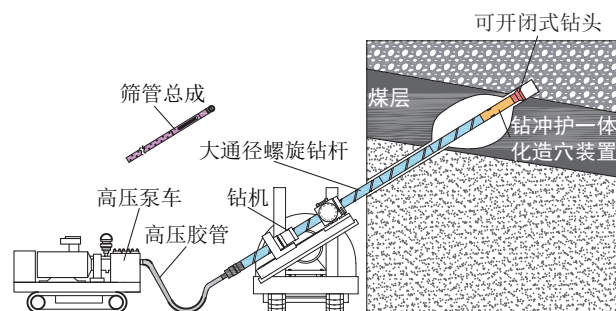


图2 钻冲护一体化施工工艺示意

Fig.2 Schematic diagram of integrated construction technology of drilling, punching and protection

### 2.1 钻进成孔

依次连接可开闭钻头、水力造穴装置、螺旋钻杆、钻机、水辫、高压胶管、风水联动装置、系统风压管路、高压水泵,调整排量,保证正常排渣情况下水泵压力不高于5 MPa,进行回转钻进施工,此时大部分水流经螺旋钻杆、造穴装置后到达可开闭式钻头进行排渣,直到钻至设计深度。期间岩层钻进采用清水钻进,钻遇煤层时若不稳定易塌孔,可调节风水联动装置,改用压风钻进以确保顺利成孔,避免因水的冲刷作用导致塌孔。

### 2.2 冲孔造穴

穿煤完成将造穴装置退至预定造穴孔段后,通过增大供水流量使泵压达到切换压力(5 MPa以上),高压水推动增压活塞,减小过流面积,大部分高压水通过喷嘴喷出,射流冲击煤壁,此时回转钻杆,给进或后退钻具,实现水力冲孔造穴。孔口根据计量的出煤量,分析造穴效果,按不同冲孔压力段进行多次冲孔,以达到预期冲孔效果。若煤层稍硬,则可调节造穴压力,分2~3次逐渐增大至适当的压力冲孔造穴,如需要12 MPa冲孔压力,则分别用6、9、12 MPa压力等级3次冲孔造穴,以达到预定冲煤量,同时也避免一次直接冲孔压力过大、出煤量过多而导致钻孔堵塞卡钻。一般采取后退式冲孔形式。

冲孔结束后,减小流量调整水泵压力低于冲孔压力状态,增压活塞被矩形弹簧推回原位,过流面积恢复,大部分水流经过过流环空进入可开闭钻头。

### 2.3 筛管护孔

完成水力冲孔造穴后,将钻具整体置于预定的护孔位置,冲洗钻孔一段时间后停止供水。拆卸水辫,依次连接筛管悬挂装置、筛管,形成筛管总成,沿螺旋钻杆内部推入。到达造穴装置活塞后继续推进,压缩套筒受压移动实现活塞解卡,直至被推出可开闭式钻头进入孔内。继续推动筛管总成,筛管悬挂装置离开可开闭式钻头,悬挂装置张开挂住孔壁为筛管总成定位,之后逐根提出钻具,筛管留在孔内保护瓦斯抽采通道。

## 3 现场试验

### 3.1 煤层情况

杨柳矿1093工作面回采10#煤层,煤层厚度0~

4.17 m,平均厚度2.7 m,煤层倾角 $0\sim 13^{\circ}$ ,平均倾角 $5^{\circ}$ ;煤层原生结构简单,局部含夹矸。该工作面 $10^{\#}$ 煤层-480 m以浅的开采区域为无突出危险区,-480 m及以深为突出危险区。测得1093机抽巷 $10^{\#}$ 煤层最大瓦斯压力为0.75 MPa,最大瓦斯含量为 $6.46\text{ m}^3/\text{t}$ 。

### 3.2 钻孔布置

1093工作面预抽钻孔在1093机抽巷和切抽巷

施工,采用底板穿层钻孔预抽 $10^{\#}$ 煤层瓦斯,孔间距不大于6 m,钻孔控制整个回采区域的煤层;钻孔按垂直巷道布置施工,面内区域钻孔孔底间距不大于 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,钻孔开孔按三花布置,孔径为113 mm。

本次试验钻孔为切抽巷钻孔,切抽巷钻孔从13到16列,根据现场实际条件展开试验,每列钻孔间距3 m。钻孔设计如图3所示。钻孔设计深度39~78 m,设计倾角最大 $88^{\circ}$ ,最小 $28^{\circ}$ 。

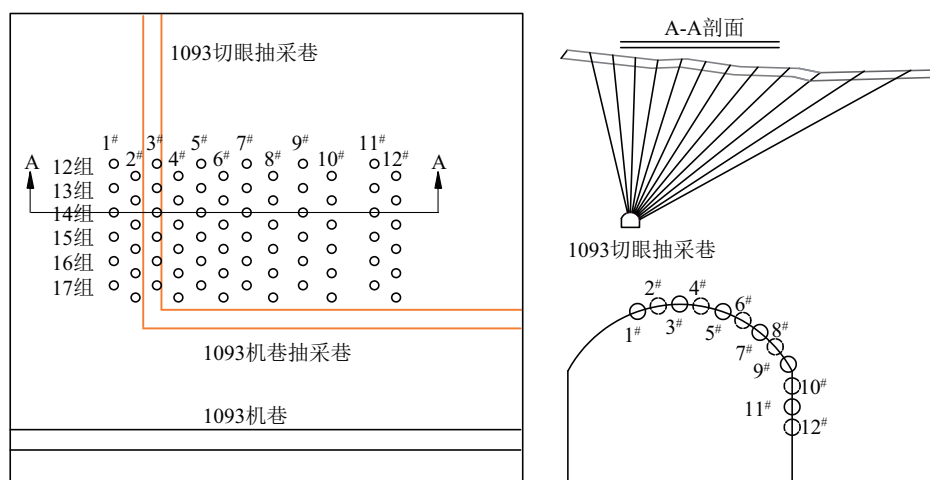


图3 钻孔布置示意

Fig.3 Schematic diagram of borehole layout

### 3.3 主要设备及材料

根据现有装备条件和井下实际施工需要,试验主要配套设备和材料见表1。

表1 现场试验设备与材料

Table 2 Field test equipments and materials

设备	规格型号	数量
钻机	ZDY6500LQK	1台
高压泵车	BLY460	1台
钻杆	$\varnothing 73$	100 m
造穴装置	$\varnothing 73$	4套
造穴活塞	$\varnothing 35$	若干
钻头	$\varnothing 113/36$	6只
筛管	$\varnothing 32$	若干
封孔管	$\varnothing 50$	若干
悬挂装置	$\varnothing 32$	若干

#### 3.3.1 钻机

采用ZDY6500LQK型煤矿用履带式全液压坑道钻机,钻机配备新型变幅装置,能实现 $-90^{\circ}\sim$

$+90^{\circ}$ 钻孔倾角调节和0.7~1.7 m大范围垂直高度调节,适合井下各种穿层钻孔施工。钻机采用遥控控制,操作人员可选择适合位置操作施工。

#### 3.3.2 泵车

为实现水力冲孔掏煤,配套流量和压力满足水力冲孔工艺需求的大流量泵车。考虑实际井下煤层较软,所需冲孔压力不需太高,结合现有设备情况,采用定向钻施工常用的BLY460型泵车,额定流量460 L/min,额定压力12 MPa。

#### 3.3.3 钻杆

根据钻孔施工需要和下筛管工艺要求,选用 $\varnothing 73\text{ mm}$ 大通径螺旋钻杆,如图4所示。该钻杆与ZDY6500LQK型钻机相适应,三棱螺旋结构,有利于排渣,中心大通径,满足钻杆内下筛管工艺要求。

#### 3.3.4 钻头

钻冲护一体化施工工艺要求钻进过程中钻头能够正常全面切削碎岩,而后续下筛管时可以顺利通过 $\varnothing 32\text{ mm}$ 筛管,因此选用开闭式钻头。与 $\varnothing 73$

图4  $\varnothing 73$  mm 大通径螺旋钻杆Fig.4  $\varnothing 73$ mm large diameter spiral drill pipe

mm 钻杆相适应,钻头直径应在 103 mm 以上,水力造穴产生大量煤渣,直径过小穿层孔岩孔段会出现排渣不畅,而直径过大破碎面积大,会造成钻进速度慢、施工效率低。综合考虑,确定选用钻头直径为 113 mm 的可开闭式钻头(见图5)。

图5  $\varnothing 113$  mm 三翼可开闭式钻头Fig.5  $\varnothing 113$ mm three-winged on-off type drill bit

### 3.3.5 造穴装置

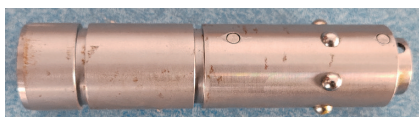
钻冲护一体化技术的核心在于造穴装置(见图6),该装置由造穴装置外壳体(图6a)和造穴活塞(图6b)两部分组成。使用时,将造穴活塞安装在造穴装置外壳体内部,通过定位钢球与壳体固定,造穴装置前端公扣连接开闭式钻头,后端母扣与钻杆连接,即可进行施工。

### 3.3.6 筛管和悬挂装置

护孔筛管选用井下常用的  $\varnothing 32$  mm 护孔筛管。



(a) 外壳体



(b) 活塞

图6 造穴装置

Fig.6 Hydraulic cavitation device

考虑悬挂效果,配套大张开量的悬挂装置(见图7)串联2~3组保证孔底悬挂效果。

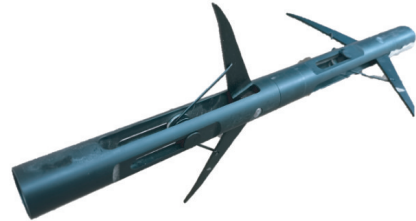


图7 筛管悬挂装置

Fig.7 Screen pipe positioning suspension device

### 3.4 施工工艺流程

钻冲护一体化施工主要工艺流程包括:移钻机开孔→安装防喷装置→连接钻具回转钻进→水力冲孔造穴→下筛管护孔→退钻→下封孔管注浆封孔→连抽。

(1)开孔安装孔口装置。用  $\varnothing 113$  mm 钻头开孔并钻进至 2.5 m 后,采用孔口防喷器进行防喷抽采,安装自动防喷装置和  $\varnothing 108$  mm 孔口管抵至孔壁保证孔口严密不漏气。

(2)钻进施工。连接钻具“ $\varnothing 113$  mm 可开闭钻头+ $\varnothing 73$  mm 钻冲护造穴装置+ $\varnothing 73$  mm 大通径螺旋钻杆+ $\varnothing 73$  mm 水辫”,采用回转钻进方式钻进至煤层顶板 1 m 后停止钻进。根据井下静水压水情况,可采用静压水或者低泵压供水回转钻进。

(3)冲孔造穴。穿层钻孔穿过煤层至顶板钻进 1 m 后,退钻至煤层内,启动泥浆泵,调节泥浆泵流量进行冲孔造穴,冲孔水压可根据煤层条件及冲孔返渣量调节(5~8 MPa)。造穴过程中钻杆边回转边后退,确保冲煤量达到  $1 \text{ m}^3/\text{m}$ ,若出煤量未达到要求,则一次冲孔后再次增大排量调节压力进行二次冲孔,煤层段冲孔完成后停止冲孔。

(4)下筛管护孔。冲孔结束后,切换至小排量洗孔,下放钻具至距离孔底 0.5~1 m。连接  $\varnothing 32$  mm 悬挂装置+ $\varnothing 32$  mm 筛管从钻杆内送入钻头位置,用人力将护孔筛管顶出可开闭钻头,悬挂装置打开固定在孔底,提出钻杆,将护孔筛管留置在钻孔内。

(5)封孔注浆。在孔口将  $\varnothing 50$  mm 封孔管绑扎好囊袋和注浆软管,封孔管沿着  $\varnothing 32$  mm 筛管下入孔内,按设计下入深度不小于 20 m,然后采取“两堵一注”带压封孔工艺进行注浆封孔。

### 3.5 试验效果

#### 3.5.1 试验情况

在杨柳矿 1093 切抽巷开展试验,试验钻孔 29 个,孔深 39~85 m,总进尺 1473 m,29 个钻孔全部下筛管试验,其中第 14 组钻孔施工情况见表 2。调节封堵活塞中堵头和阀座之间间隙,冲孔排量 200~250 m<sup>3</sup>/min,对应冲孔压力 6~8 MPa。

表 2 试验钻孔施工情况

Table 2 Construction situation of experimental drill hole

孔号	倾角/ (°)	终孔 孔深/ m	煤段 长度/ m	筛管下 入深 度/m	筛管 下入 率/%	冲煤 量/m <sup>3</sup>
14-1	76.9	41	4	40	97.6	4.88
14-2	84.2	40	3	39	97.5	3.24
14-3	88.4	40	4	39	97.5	4.6
14-4	80.3	39	3	38	97.4	3.4
14-5	72.4	41	4	40	97.6	4.6
14-6	64.8	43	3	42	97.7	3.4
14-7	57.4	45	4	44	97.8	4.2
14-8	50.1	48	4	47	97.9	4.6
14-9	44.1	66	4	54	81.8	4.5
14-10	38.2	60	4	59	98.3	4.6
14-11	33.3	64	4	63	98.4	4.9
14-12	28.7	72	5	71	98.6	5.2

#### 3.5.2 试验结果分析

本次试验 29 个钻孔总进尺为 1473 m,筛管直径 32 mm,下筛管长度 1412 m,煤层冲孔段平均冲煤量 1.1 m<sup>3</sup>/m,平均等效造穴直径 0.93~1.0 m。筛管下入率 95.9%,成功率达 96.6%,从穿煤段筛管护孔率来看,钻孔煤孔段护孔率均为 100%,实现了“钻到位、管到位”的目标。而原冲孔造穴工艺采用裸孔人工推送筛管,由于煤层碎软易塌孔,提钻后裸孔下筛管时遇阻大,尤其是小倾角钻孔(倾角小于 40°)孔深较大,且煤孔段较长,煤孔段推送长度相对穿煤长度不够,护孔率较低,一般不超过 50%。钻冲护一体化工艺实现穿煤孔段筛管护孔全覆盖,有效提高煤层造穴后抽采效果。

根据钻孔施工要求,每米穿煤段冲煤量不少于 1 m<sup>3</sup>,试验中为提高单孔瓦斯抽采量,并兼顾施工效率和防突要求,一般控制每米穿煤段冲煤量在 1.1 m<sup>3</sup>左右。钻冲护一体化造穴装置冲孔造穴压力可

根据孔内返渣量逐步调节。冲孔造穴初期,煤孔段造穴半径较小,孔内返渣量大,冲煤效率高,随着造穴半径增大,孔内返渣量显著减少,冲煤效率迅速下降。因此需要根据冲煤效率变化动态调节冲孔压力及泵量,如冲孔造穴初期调节造穴压力和泵量在 5~6 MPa 和 200 L/min 左右,随着造穴直径增大,逐步将造穴压力和泵量调高至 8~9 MPa 和 250 L/min 左右,从而保证整个造穴周期的冲孔压力、泵量随施工造穴半径变化,提高冲煤效率和出煤量。

钻冲护一体化工艺与原冲孔工艺在提下钻时间和冲孔造穴用时上,可减少至少一次起下钻,同时可根据冲孔造穴的返渣情况适时调整造穴压力,因此钻冲护一体化工艺较原钻冲工艺大幅节约施工时间,综合施工效率更高。

### 4 结论

(1)采用钻冲护一体化工艺技术在淮北矿区碎软低透煤层开展水力增透试验,实现了钻进、水力造穴、筛管护孔全程只下一次钻具,冲孔压力可根据冲孔返渣情况实时调节,不仅冲孔效率高,而且提高了全流程施工效率。

(2)试验表明,钻冲护一体化工艺技术实现了水力造穴完成后不提钻下筛管,解决了提钻后裸孔下筛管或重入钻杆下筛管难到位的问题,做到了“钻到位、管到位”,试验煤孔段护孔率 100%,有效保障造穴钻孔的瓦斯抽采效果。

(3)钻冲护一体化工艺技术穿煤段平均冲煤量达到 1.1 m<sup>3</sup>/m,平均等效造穴直径 0.93~1.0 m,配合不提钻下筛管护孔,有效提高碎软煤层造穴增透效果及封孔后瓦斯抽采效果。

### 参考文献(References):

- [1] 刘杰,赵长鑫,张浩,等. 白羊岭煤矿底抽巷穿层水力冲孔技术研究与应用[J]. 煤炭科技, 2024, 45(5): 169-175.  
LIU Jie, ZHAO Changxin, ZHANG Hao, et al. Research and application of hydraulic punching technology for Bottom extraction roadway through-layer of Baiyangling coal mine [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2024, 45(5): 169-175.
- [2] 王鹏,席志奇,郝富昌,等. 高瓦斯中硬煤层超高压水力割缝卸压增透技术及应用[J]. 煤炭工程, 2024, 56(8): 177-182.  
WANG Peng, XI Zhiqi, HAO Fuchang, et al. Ultra-high pressure hydraulic slotting pressure relief and permeability enhancement technology in high gassy medium-hard coal seam and its application [J]. Coal Engineering, 2024, 56(8): 177-182.
- [3] 闫志铭. 低透煤层井下长钻孔水力压裂增透技术[J]. 煤田地质

- 与勘探, 2017, 45(3): 45-48.
- YAN Zhiming. Hydraulic fracturing technology for permeability improvement through underground long borehole along coal seam [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(3): 45-48.
- [4] 陈冬冬, 王建利, 贾秉义, 等. 碎软煤层顶板梳状长钻孔水力压裂区域瓦斯高效抽采模式[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 29-36.
- CHEN Dongdong, WANG Jianli, JIA Bingyi, et al. High-efficiency regional gas drainage model after hydraulic fracturing of comb-shaped long boreholes in the roof of broken soft and low permeability coal seam [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 29-36.
- [5] 徐书荣, 刘飞, 梁道富, 等. 底板梳状钻孔在碎软煤层瓦斯治理中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(7): 45-50.
- XU Shurong, LIU Fei, LIANG Daofu, et al. Application of comb type directional drilling in broken-soft coal seam floor for gas control [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(7): 45-50.
- [6] 秦江涛, 覃俊, 龙称心, 等. 低透气性煤层高压脉冲射流割缝—压裂增透技术应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(5): 23-28.
- QIN Jiangtao, QIN Jun, LONG Chenxin, et al. Application of high pressure pulse jet slotting and fracturing anti-reflection technology in low permeability coal seam [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(5): 23-28.
- [7] 任仲久. 导向槽定向水力压裂煤层增透强化瓦斯抽采技术及应用[J]. 煤炭工程, 2024, 56(2): 131-137.
- REN Zhongjiu. Technology and application of directional hydraulic fracturing with guide slot to enhance permeability and gas extraction in coal seam [J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 131-137.
- [8] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 196-210.
- SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, et al. Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 196-210.
- [9] 郑凯歌. 碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 272-281.
- ZHENG Kaige. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(2): 272-281.
- [10] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45-49.
- YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45-49.
- [11] 韩颖, 董博文, 张飞燕, 等. 我国水力冲孔卸压增透技术研究进展[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 95-100.
- HAN Ying, DONG Bowen, ZHANG Feiyan, et al. Progress of hydraulic punching technology for relieving pressure and enhancing permeability in China [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 95-100.
- [12] 张千贵, 李权山, 范翔宇, 等. 中国煤与煤层气共采理论技术现状及发展趋势[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 130-145.
- ZHANG Qiangui, LI Quanshan, FAN Xiangyu, et al. Current situation and development trend of theories and technologies for coal and CBM co-mining in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 130-145.
- [13] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189-3211.
- LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189-3211.
- [14] 王力, 姚宁平, 姚亚峰, 等. 煤矿井下碎软煤层顺层钻完孔技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 285-296.
- WANG Li, YAO Ningping, YAO Yafeng, et al. Research progress of drilling and borehole completion technologies in broken soft coal seam in underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 285-296.
- [15] 曹建明, 宋斌, 刘发义, 等. 松软煤层瓦斯抽采孔PVC管护壁技术应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 1-4.
- CAO Jianming, SONG Bin, LIU Fayi, et al. Application study on wall protection technology with PVC pipe in gas drainage hole in soft seams [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(7): 1-4.
- [16] 郝世俊, 殷新胜, 方俊. 煤矿井下碎软煤层瓦斯抽采钻孔钻进工艺[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 173-180.
- HAO Shijun, YIN Xinsheng, FANG Jun. Drilling technology for soft broken coal seam underground gas extraction in coalmines [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 173-180.

(编辑 王跃伟)