中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



# 顶板高位大直径定向钻孔扩孔新技术探索

赵建国,刘建林,董昌乐,王四一
(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

**摘 要**:针对顶板高位大直径定向钻孔施工过程中暴露的扩孔钻进效率低、钻具工作寿命短等问题,提出扭力冲击旋转扩孔技术与反向回拉扩孔技术。在分析现有扭力冲击器产品用于煤矿井下扩孔钻进可行性与反向回拉扩孔技术难点的基础上,完成了扭力冲击器的遴选与改造,研制了 ø216/110 mm 型反向回拉式扩孔器,实施了工艺探索试验。试验结果表明:扭力冲击器对于提升顶板高位定向钻孔扩孔效率效果显著,较常规扩孔技术机械钻速提升 65%。研制的反向回拉扩孔器工作原理可行,动作可靠,保证回拉扩孔钻进效率的同时,改善扩孔钻具受力工况,对于提升扩孔钻具工作寿命具有积极意义。

**关键词**:顶板高位定向钻孔;扩孔;扭力冲击器;回拉扩孔器
**中图分类号**:TD41 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2018)04-0040-06

# New reaming technology for high position and large diameter directional drilling in roof

ZHAO Jianguo, LIU Jianlin, DONG Changle, WANG Siyi
(*CCTEG Xi' an Research Institute, Xi' an* 710077, *China*)

**Abstract**: In view of the problems of low drilling efficiency and short service life of the drill tools in the construction of large diameter roof directional drilling, this paper puts forward the technology of torsion impact rotary reaming and reverse pulling reaming. On the basis of analyzing the feasibility of the existing torque hammer products for reaming in coal mines and the technical difficulties of reverse broaching and reaming, the selection and modification of torque impactor were completed, and a reverse broaching reamer with ø216/110 mm type was developed, and the exploration test was carried out. The test results show that the torque impactor has remarkable effect on improving the reaming efficiency of the high directional hole in the roof, which is 65% higher than that of the conventional reaming technology. The developed reverse broaching reamer has the advantages of feasible working principle, reliable operation, ensuring the efficiency of broaching and reaming, and improving the working condition of reaming drill tools, which has positive significance for improving the service life of reaming drill tools.

**Key words**: directional drilling in roof; reaming; torque impactor; back broaching reamer

## 0 引 言

瓦斯灾害是威胁、制约煤矿安全生产的第一要素[1]。近年来,随着矿井生产强度的提高和开采深度的加大,矿井瓦斯涌出量增大、采空区瓦斯涌出现象加剧,在工作面推进过程中,由于采空区及邻近煤层瓦斯的涌入,导致工作面上隅角瓦斯浓度升高,严重威胁矿井的安全生产、制约着矿井生产效率的提高[2]。同时,瓦斯作为一种清洁能源,在采空区和采动影响区大量赋存,如果将这些瓦斯资源进行有效抽采和利用,会产生可观的经济效益,一定程度上缓解我国能源紧张的局面。

**收稿日期**:2017-12-22;**责任编辑**:赵 瑞 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2018.04.007
**基金项目**:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05041-001);煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2016ZYMS015);中煤科工集团西安研究院有限公司技术创新基金资助项目(2018XAYZD01)
**作者简介**:赵建国(1983—),男,河南孟州人,助理研究员,硕士。E-mail:zhaojianguo@cctegxian.com
**引用格式**:赵建国,刘建林,董昌乐,等.顶板高位大直径定向钻孔扩孔新技术探索[J].煤炭科学技术,2018,46(4):40-45.
ZHAO Jianguo, LIU Jianlin, Dong Changle, *et al*. New reaming technology for high position and large diameter directional drilling in roof[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 40-45.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



顶板高位大直径定向钻孔是通过抽采煤矿采空区及工作面采动影响区卸压瓦斯,进而解决工作面上隅角瓦斯超限问题的重要技术手段[3-4]。利用顶板高位大直径定向钻孔进行卸压瓦斯抽采治理具有显著的技术优点:①钻孔轨迹实现随钻测量和控制,保证钻孔在顶板裂隙带内延伸,钻孔利用率高,瓦斯抽采效果稳定;②钻场设置在煤巷,无需开拓高位钻场,节省工程费用;③钻孔深度大,覆盖范围广,钻孔工程量小;④钻孔施工综合效率高;⑤瓦斯抽采浓度高,有助于瓦斯的资源化利用。基于上述优点,顶板高位大直径定向钻孔治理上隅角瓦斯技术在国内多个矿区推广应用,并取得了良好的瓦斯抽采治理效果。

围绕不同钻孔直径顶板高位定向钻孔的瓦斯抽采效果考察,国内外学者及煤矿工程技术人员开展了大量的研究工作。研究结果表明,钻孔直径是影响顶板高位大直径定向钻孔瓦斯抽采效果的重要因素之一,随着钻孔直径的增大,其理论与实际监测瓦斯抽采效果均显著提升[5-7]。笔者针对现有顶板高位定向钻孔成孔工艺技术与装备存在的问题及进一步提高成孔效率的迫切需求,围绕现有“先导定向孔+旋转扩孔”成孔方案,开展了顶板高位定向钻孔扩孔钻进工艺技术探索研究,对于进一步提高顶板高位定向钻孔施工效率,改善扩孔过程钻具受力状态,缩短高位大直径钻孔施工周期,改善矿井卸压瓦斯治理效果效率具有现实意义。

## 1 顶板高位定向钻孔施工技术现状

基于现有煤矿井下定向钻进技术与钻具级配特征,实施煤矿井下顶板高位大直径定向钻孔,主要采用“定向先导孔+正向分级扩孔”的成孔工艺[8-9]。目前,在小直径定向先导孔的基础上,通过分级扩孔技术可以完成最大 200 mm 直径的顶板高位定向钻孔。

然而随着工作面采动瓦斯治理对于顶板高位定向钻孔总体施工效率、终孔直径、钻孔施工安全与施工综合成本等要求的不断提升,利用分级扩孔技术实施大直径的顶板岩层高位定向钻孔仍然存在以下问题:

1)硬岩扩孔钻进效率低。首先,以砂岩为代表的硬岩钻进效率有待提高。常规回转扩孔钻进在上述硬岩地层中的机械钻速一般不超过 8 m/h,且随着钻孔深度的增加,机械钻速有所下降。其次,分级扩孔级数的增加严重制约着钻孔综合成孔效率的提升,延长了顶板高位定向钻孔的成孔周期,难以满足工作面接替需要。

2)钻具工作寿命短。在目标层以砂岩、粉细砂岩、泥质砂岩等中硬以上岩层为主的顶板高位定向钻孔钻进中,随着钻孔深度的增加以及钻孔直径的增大,钻杆柱对于钻机输出转矩的周期性储存与释放导致 PDC 钻头周期性的失速—加速旋转,称之为黏滑现象[10-12]。黏滑现象增大了钻头切削齿在破岩过程中承受的冲击载荷,导致钻头齿的崩刃掉齿概率增加,工作寿命缩短[13]。再者顶板高位大直径定向钻孔扩孔钻进中,轴向推进与黏滑振动作用使孔内钻柱呈现复杂的空间弯曲、扭曲状态,承受着复杂的弯扭交变应力载荷,由此导致的接头断裂、螺纹粘扣失效情况时有发生,给高位钻孔施工带来安全隐患[14]。

## 2 扭力冲击扩孔与回拉扩孔钻进技术

针对上述问题,笔者提出孔底冲击辅助破岩扩孔钻进技术与反向回拉式扩孔钻进技术,利用液动冲击器与反向回拉扩孔器解决常规分级扩孔效率低,孔内钻具弯曲变形严重,钻头及钻杆使用寿命受限等问题。

### 2.1 孔底冲击辅助破岩扩孔钻进技术

孔底冲击辅助破岩扩孔钻进技术是在钻头后方安装具有辅助破岩功能的冲击器,利用泥浆泵输出的高压流体介质驱动冲击器产生冲击载荷作用于钻头,为其旋转破岩建立能量补给机制,从而达到改善钻头破岩工况,提高钻头破岩效率的目的。根据冲击器提供冲击载荷性质,可分为轴向冲击器与扭力冲击器 2 种。

潜孔锤作为轴向冲击器的典型代表,目前已广泛应用于石油勘探开发、地质资源勘探、水文水井施工等钻探工程领域[15]。随着煤矿井下硬岩钻进问题的日益突出,该项技术也被应用至煤矿井下钻探工程领域,使得硬岩钻进效率大幅提升[16]。然而受液动潜孔锤冲击载荷性质及煤矿井下所广泛采用的 PDC 钻头不耐冲击等因素制约,该项技术在煤矿井下硬岩钻探领域并未获得大范围推广。

扭力冲击器最早应用于石油钻井领域,通过产生直接作用于钻头上高频、低幅的周向冲击载荷来降低或消除黏滑振动现象,以达到提高机械钻速,延长钻头寿命的目的[17]。目前应用最为广泛、效果最

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



好、最具代表性的扭力冲击器是国外 TorkBuster 扭力冲击器,该扭力冲击器最早进入国内市场,对国内扭力冲击器技术的发展起到了推动作用[18-19]。

受国外扭力冲击器成功应用的影响,国内相关科研机构也开展了扭力冲击器的研究工作,并研制出了不同工作机理的钻井液直接驱动型扭力冲击器,其中以 SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具比较有代表性。表 1 中列出了不同规格的 SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具产品参数[20]。

**表 1　SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具产品参数**

**Table 1　Product parameters of SLTIT type torsion impact drilling tools for speed increasing**

| 型号 SLBF-TIT | 254 型 | 203 型 | 190 型 | 121 型 |
|---|---|---|---|---|
| 适合井眼/mm | 311.1~444.5 | 241.3 | 215.9 | 152.4~165.1 |
| 排量/(L·s$^{-1}$) | 55~80 | 40~55 | 28~40 | 12~25 |
| 压降/MPa | 2~5 | 2~5 | 2~5 | 2~5 |
| 安装尺寸/mm | ø254×565/440 | ø203×550 | ø190×545/435 | ø121×460 |
| 上端扣型 | 630/631 | 410 | 410/431 | 310 |
| 下端扣型 | 630 | 630 | 430 | 330 |

目前国内还未有将扭力冲击器用于煤矿井下岩层大直径钻孔工程的报道,同时国内外现有成熟扭力冲击器产品也无法直接用于煤矿井下钻孔施工:首先,现有石油钻井用扭力冲击器只有部分规格尺寸满足煤矿井下大直径钻孔孔径要求;其次现有扭力冲击器工作排量与煤矿井下泥浆泵设备能力匹配性差,目前石油钻井领域涉及的扭力冲击器产品工作排量均在 12 L/s 以上,常用工作排量达到 30~50 L/s,而煤矿井下钻孔工程配备的泥浆泵最大排量一般不超过 10 L/s,无法满足现有扭力冲击器产品的工作排量需要。因此,将扭力冲击旋转破岩钻进技术用于煤矿井下顶板硬岩扩孔钻进,必须结合煤矿井下钻探设备能力与实际使用工况对其内部结构进行优化与改进。

### 2.2　反向回拉扩孔钻进技术

反向回拉扩孔技术最早应用于地面非开挖管线铺设工程,其钻进施工原理如下:首先使用导向钻头沿设计轨迹施工导向钻孔贯穿靶区,然后在靶区更换扩孔钻头实施回拉扩孔,回拉扩孔钻头后方连接待铺设管线,回拉扩孔钻进完成后管线铺设也随即施工完毕[21]。

顶板高位大直径定向钻孔扩孔钻进时,因所使用钻杆直径与钻孔直径级差较大,硬岩钻进时,钻杆柱在钻机推进力作用下呈空间屈曲状态,一方面钻杆柱紧贴钻孔壁,增大钻进系统钻进阻力;另一方面在弯曲扭转作用下,钻杆柱更易出现疲劳破坏。针对上述问题,在借鉴地面非开挖定向钻进技术的基础上,提出了高位钻孔反向回拉扩孔技术。该技术通过以拉扩代替压扩的方式,改变钻杆柱在孔内整体受力状态,避免钻杆柱在弯扭作用下的疲劳破坏。

然而所不同的是,顶板高位大直径定向钻孔靶区(终孔点)位于地下岩体之中,施工人员无法直接进入对回拉扩孔钻头进行更换。面对上述问题,笔者提出采用刀翼可控式回拉扩孔器,在导向钻孔施工完毕之后,将刀翼可控式回拉扩孔器沿先导孔送入孔底,利用冲洗介质控制切削刀翼的张开与闭合,实现煤矿井下顶板高位定向钻孔的反向回拉扩孔施工。

## 3　扭力冲击扩孔与回拉扩孔钻进试验

根据提出的扭力冲击回转扩孔钻进与反向回拉扩孔钻进方案设想,采用国内现有扭力冲击器产品以及研制的刀翼可控式反向回拉扩孔器,实施了扭力冲击回转扩孔与反向回拉扩孔钻进试验,一方面验证上述技术方案在煤矿井下顶板高位定向钻孔扩孔钻进应用的可行性,另一方面验证研制的反向回拉扩孔钻具工作的可靠性。

### 3.1　扭力冲击旋转扩孔试验

1)扭力冲击器选用。结合现场所高位定向钻孔扩孔钻进施工所采用的 ø153 mm 扩孔钻头规格,本次试验选用了 ø121 mm SLTIT 型扭力冲击器,并对其内部结构进行改造。改造后的扭力冲击器(图 1)工作排量范围减至 5~15 L/s,现场配备的 BLY460 型泥浆泵车排量基本满足改造后的排量需要。

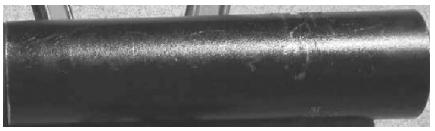


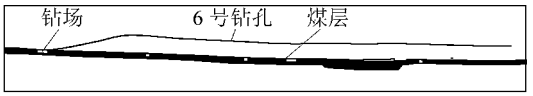
图 1　ø121 mm SLTIT 型扭力冲击器实物

Fig.1　ø121 mm SLTIT type torque impactor

2)试验钻孔概况。试验钻孔为 6 号孔,目标层位岩性为砂岩、泥质砂岩、泥岩。主设计层位距煤层顶板 15 m,设计孔深 510 m,先导孔实钻深度 512 m。先导孔实钻轨迹如图 2 所示。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net






(a) 剖面图




(b) 平面图

图 2　6 号钻孔实钻轨迹

Fig.2　No.6 drilling trajectory

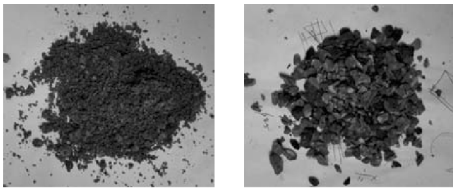
3)钻进效果分析。先导孔施工完毕后,下入扭冲回转扩孔钻具,扩孔钻进至设计孔深。期间 13~53.5 m 孔段扭力冲击器工作正常,钻机运行平稳。53.5 m 以深孔段钻机动力头卡顿现象明显,且机身伴随明显振动,据此判断扭力冲击器 53.5 m 以后工作失效。截取 94 m 之前的钻进参数见表 2。对比工具失效前后,单根钻时变化显著。在相同孔段,相同钻进参数下,单根钻时增加了 65%。

**表 2　试验钻孔钻进参数**

**Table 2　Test drilling parameter**

| 孔深/m | 泵压/MPa | 泵量/(L·min$^{-1}$) | 给进压力/MPa | 转速/(r·min$^{-1}$) | 钻时/min | 单根钻时/min | 地层 | 工具状态 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13~53.5 | 1.5 | 400 | 5.5 | 30 | 64 | 7.11 | 砂岩 | 正常 |
| 53.5~94 | 1.8 | 400 | 5.5 | 30 | 106 | 11.78 | 砂岩 | 失效 |

收集 2 种工况下钻屑样本如图 3 所示:使用扭冲工具且正常工作情况下,孔口返出钻屑呈碎片状,碎片厚度 1~2 mm,长度 10~15 mm,宽度 5~10 mm,表明钻头破岩方式为冲击—剪切碎岩形式下的体积破碎。而未使用扭冲工具工况下,孔口所返钻屑呈碎屑状,碎屑粒径 1~5 mm,表明钻头破岩方式为高转速下的剪切碎岩,二者相比前者碎岩效率更高。



(a) 未使用扭冲工具　(b) 使用扭冲工具

图 3　试验钻孔返渣取样

Fig.3　Sampling of slag returning from the test drill

4)试验过程中存在问题。①扭力冲击器过早失效。原因主要为固相颗粒进入扭力冲击器工作腔体产生卡阻,致其内部旋转冲击锤往复冲击运动失败,导致扭力冲击器过早失效。进入扭力冲击器工作腔体的固相颗粒来源有 2 个:一是泥浆泵泵送的冲洗介质自身夹杂携带少量碎石块,经钻杆柱后进入扭力冲击器工作腔体;二是高位钻孔钻杆柱内液柱回流将孔内钻渣抽吸至工具腔体。②现场配备泥浆泵排量相对偏低。试验现场配备了 BLY460 泥浆泵车,其最大额定输出排量为 7.6 L/min,虽然基本满足改造后的扭力冲击的排量需要,但若要完全发挥扭冲工具的冲击碎岩效果,仍稍显不足。

### 3.2　反向回拉扩孔钻进试验

1)ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器。研制的 ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器(图 4)主要用于基于 ø120 mm 先导钻孔的顶板高位定向钻孔回拉扩孔施工。扩孔器长度 1 415 mm,本体最大外径 110 mm,可一次性回扩成孔直径 216 mm。刀翼设计开启泵压 1 MPa,开启泵量 150 L/min。



图 4　ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器

Fig.4　Reverse broaching reamer with ø216/110 mm type

ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器工作原理如下:常态下扩孔器切削刀翼处于闭合状态,将其接于扩孔钻杆前端沿先导孔下放至孔底。扩孔时,开启泥浆泵,高压清水经钻杆柱进入扩孔器内部,驱动活塞下行撑出切削刀翼,即可实施反向回拉。待扩孔钻进结束之后,下放扩孔器 30~50 cm 停泵,刀翼收回后即可将扩孔器从孔内提出。

反向回拉扩孔钻具组合方案(图 5)如下:ø120 mm 先导钻头+ø216/110 mm 回拉扩孔器+刚变丝(27/8 公扣变 ø89 mm 扩孔钻杆母扣)+ø89 mm 扩孔钻杆。

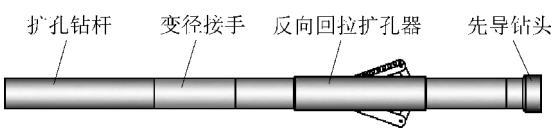



图 5　反向回拉扩孔钻具组合示意

Fig.5　Schematic diagram of reverse pull broaching assembly

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



2)试验钻孔概况。试验地点位于顾桥矿南区1212(3)采面,试验钻孔为 5 号顶板高位定向钻孔。5 号钻孔先导孔实钻深度 505 m,直径 120 mm,其中 0~75 m 孔段钻孔直径已扩至 153 mm。目标地层岩性为泥质砂岩、砂岩等。先导孔实钻轨迹剖面如图 6 所示,回拉扩孔孔段轨迹剖面如图 7 所示。

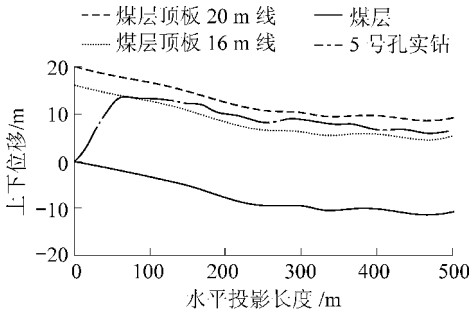



图 6　5 号试验钻孔实钻轨迹剖面

Fig.6　No.5 test drilling trajectory profile

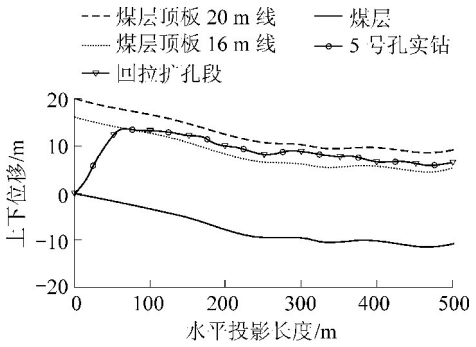



图 7　5 号试验钻孔回拉扩孔孔段轨迹剖面

Fig.7　Broaching trajectory profile in No.5 test drilling

3)试验效果分析。初步试验结果显示:ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器结构原理可行,工作性能可靠,2 个阶段扩孔试验后检查扩孔器本体完好,刀翼张开闭合动作均正常。砂岩地层扩孔,ø120~216 mm 扩孔平均机械钻速 6.8 m/h,ø153~216 mm 扩孔平均机械钻速 15 m/h,与同等地层条件下同等直径正向扩孔钻进机械钻速相当。试验过程中也暴露出以下问题:该扩孔器采用双刀翼结构,PDC 复合片承受破岩产生的冲击载荷,导致复合片切削齿崩齿。

## 4　结论与建议

本次试验作为探索性研究,将扭力冲击回转扩孔技术与反向回拉扩孔技术应用于煤矿井下顶板高位定向钻孔施工取得初步成效。经过上述试验,得出以下 3 点结论:

1)扭力冲击回转扩孔钻进技术发挥了扭力冲击器辅助破岩作用,钻头碎岩方式由 PDC 钻头高转速条件的剪切破岩变为冲击—剪切破岩,对于提升顶板岩层大直径定向钻孔扩孔钻进效率具有积极作用。

2)ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器结构原理可行,动作可靠,能够实现定向钻孔的回拉式扩孔,且扩孔钻进效率与现有正向扩孔工艺基本相当。

3)针对此次试验过程中出现的问题,提出以下 2 点建议:①进一步优化扭力冲击器内部结构。在保证低泵量下的冲击频率与冲击力前提下,优化内部结构,增加过滤机构与防倒流机构,提升其对于顶板高位定向钻孔钻进工况的适应性。②优化现有ø216/110 mm 型反向回拉扩孔器刀翼结构,优选抗冲击型 PDC 切削齿;同时增加扶正器,改善现有扩孔器刀翼受力状态,减轻刀翼在破岩过程中承受的振动冲击载荷,延长刀翼使用寿命。

**参考文献(References):**

[1] 陈开岩,张占国,林柏泉,等.综放工作面抽采条件下瓦斯涌出及分布特征[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):418-422.
CHEN Kaiyan, ZHANG Zhanguo, LIN Boquan, *et al*. Gas emission and distribution characteristics in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 418-422.

[2] 朱大志,陈志平,徐　宏.封闭采空区瓦斯抽采地面钻井技术在大隆矿的初步应用[J].煤矿安全,2009,40(8):20-22.
ZHU Dazhi, CHEN Zhiping, XU Hong. Preliminary application of closed goaf gas drainage drilling technology in Dalong Coal Mine Ground[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(8): 20-22.

[3] 孙荣军,李泉新,方　俊,等.采空区瓦斯抽采高位钻孔施工技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(1):94-99,213.
SUN Rongjun, LI Quanxin, FANG Jun, *et al*. Construction technology and development tendency of high level borehole for gas drainage in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 94-99, 213.

[4] 许　超,刘　飞,方　俊.高位定向长钻孔瓦斯抽采技术及抽采效果分析[J].煤炭工程,2017,49(6):78-81.
XU Chao, LIU Fei, FANG Jun. Effect analysis of gas drainage with high level directional long drilling[J]. Coal Engineering, 2017, 49(6): 78-81.

[5] 刘　洋.高瓦斯矿井采空区大直径高位钻孔瓦斯抽采技术研究[D].太原:太原理工大学,2013.

[6] 王海锋,程远平,沈永铜,等.高产高效工作面顶板走向钻孔瓦斯抽采技术[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2):168-171.
WANG Haifeng, CHENG Yuanping, SHEN Yongtong, *et al*. Gas drainage technology of along-strike roof drills in working face with high production and efficiency[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 168-171.

[7] 周卫金,方小伟.高位钻孔抽放的瓦斯渗流研究[J].煤炭科学

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



技术,2006,34(1):76-78.
ZHOU Weijin,FANG Xiaowei.Research on gas leakage from high level borehole gas drainage[J].Coal Science and Technology,2006,34(1):76-78.

[8] 赵建国.煤层顶板高位定向钻孔施工技术与发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(6):137-141,195.
ZHAO Jianguo.Construction technology and development trend of high directional drilling in coal seam roof[J].Coal Science and Technology,2017,45(6):137-141,195.

[9] 方 俊,石智军,李泉新,等.顶板高位定向大直径长钻孔钻进技术与装备[J].矿业安全与环保,2015,35(7):92-97.
FANG Jun, SHI Zhijun, LI Quanxin,*et al*.Drilling technology and equipment on directional high level and long borehole with large diameter in roof[J].Mining Safety & Environmental Protection,2015,35(7):92-97.

[10] 祝效华,汤历平,孟苹苹,等.PDC 钻头黏滑振动机理分析[J].石油矿场机械,2012,41(12):13-16.
ZHU Xiaohua,TANG Liping,MENG Pingping,*et al*.Stick-slip vibration mechanism analysis of PDC bit[J].Oil Field Equipment,2012,41(12):13-16.

[11] 牟海维,王 瑛,韩春杰.钻柱的黏滑振动规律分析[J].石油机械,2011,39(3):67-69,81.
MOU Haiwei,WANG Ying,HANG Chunjie.Analysis of stick slip vibration law of drill string[J].China Petroleum Machinery,2011,39(3):67-69,81.

[12] 祝效华,汤历平,吴 华,等.扭转冲击钻具设计与室内试验[J].石油机械,2011,39(5):27-29.
ZHU Xiaohua, TANG Liping, WU Hua, *et al*. Design and laboratory test of torsional percussion drilling tool[J].China Petroleum Machinery,2011,39(5):27-29.

[13] 吕苗荣,沈诗刚.钻柱黏滑振动动力学研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(6):150-159.
LYU Miaorong, SHEN Shigang. The simulation and analysis of drill string stick-slip vibration[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(6):150-159.

[14] 董萌萌.煤矿井下用 ø73 mm 高韧性高强度钻杆的研制及应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(2):152-156.
DONG Mengmeng.Development and application of ø73 mm high toughness and high strength drilling pipe[J].Coal Geology & Exploration,2017,45(2):152-156.

[15] 刘秀美,李小洋,孙建华.地质钻探液动冲击回转钻进技术再(新)认识[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2017,44(4):31-35.
LIU Xiumei,LI Xiaoyang,SUN Jianhua.New understanding of hydraulic percussive-rotary drilling technology in geological drilling[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling,2017,44(4):31-35.

[16] 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.Study and spplication of efficient pore-forming in hard rock formations of coal mine[J].Safety in Coal Mine,2016,47(11):114-116.

[17] 周 燕,安庆宝,蔡文军,等.SLTIT 型扭转冲击钻井提速工具[J].石油机械,2012,40(2):15-17.
ZHOU Yan,AN Qingbao,CAI Wenjun,*et al*.SLTIT torsion impact drilling speed increasing tool[J].China Petroleum Machinery,2012,40(2):15-17.

[18] 何 畅,郭丁菲,李 梅,等.油气钻井扭力冲击器的研究进展[J].辽宁化工,2017,46(3):271-274.
HE Chang,GUO dingfei,LI Mei,*et al*.Research progress of torque hammer for oil and gas drilling[J].Liaoning Chemical Industry,2017,46(3):271-274.

[19] 张怀文,马玉佼.TorkBuster 扭力冲击器应用研究分析[J].辽宁化工,2012,41(8):841-843.
ZHANG Huaiwen,MA Yujiao.Application research and analysis of TorkBuster torque impactor[J].Liaoning Chemical Industry,2012,41(8):841-843.

[20] 周 燕,金有海,董怀荣,等.SLTIDT 型钻井提速工具研制[J].石油矿场机械,2013,42(1):67-70.
ZHOU Yan,JIN Youhai,DONG Huairou,*et al*.Development of SLTIDT drilling speed increasing tool[J].Oil Field Equipment,2013,42(1):67-70.

[21] 刘书风.非开挖定向钻进施工技术[J].山西师范大学学报:自然科学版,2014,28(6):140-141.
LIU Shufeng. Construction technology of directional drilling without excavation[J].Journal of Shanxi Normal University:Natural Science Edition,2014,28(6):140-141.