

# 复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究

曹小军

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:**碎软煤层在我国煤炭资源中占比大,一般顺煤层钻孔成孔性差、成孔深度浅,而以空气作为冲洗介质的定向钻进工艺是解决碎软突出煤层钻进问题的有效方法。部分矿区受复杂工况影响,致使冲洗介质产生大量凝结水造成碎软煤层顺煤层空气定向钻进效率极低、甚至难以钻进的情况。因此,本文从井下碎软煤层空气定向钻进技术出发,对复杂工况下空气冲洗介质中凝结水形成机制以及空气钻进中凝结水对定向钻进作业的影响进行分析与研究,并通过改进冲洗介质管道装置解决了这一复杂工况下产生的钻进低效问题。该研究成果在西南某矿得以验证和应用,在使用改进工艺时空气螺杆马达在软煤顺层定向钻进的单班最大进尺达到51 m、单孔钻进最大平均速度达到34.5 m/班次,为相似工况下顺煤层钻孔施工提供了范例,对复杂工况下碎软煤层钻孔成孔研究有重要推进意义。

**关键词:**碎软煤层;顺煤层钻孔;空气定向钻进;冲洗介质;钻进效率

**中图分类号:**P634.5;TD7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0150-05

## Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions

CAO Xiaojun

(China Coal Technology and Engineering Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd, Xi'an Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** Broken soft coal seams account for a large proportion of coal resources in China, and generally, in-seam drilling is featured of poor hole-forming and shallow drilling depth; while air as a flushing medium of directional drilling process is an effective way to solve the outstanding problems in soft coal seam drilling. In some mining areas, a large amount of condensed water is generated by the flushing medium due to complex working conditions, resulting in extremely low efficiency of in-seam directional drilling, or even difficulty in drilling in broken and soft coal seams. Therefore, from the perspective of underground directional drilling technology for broken soft coal seams, the author analyzes and studies the formation mechanism of condensed water in the air flushing medium under complex working conditions and the influence of condensed water on directional drilling operations in air drilling, and has solved the problem of low drilling efficiency under the complex working conditions by improving the flushing medium channel device. The research results have been verified and applied in a mine in Southwest China. With the improved process, the maximum footage per shift of in-seam directional drilling with the air screw motor reached 51m in soft coal seam with the maximum average drilling rate for a single hole up to 34.5m/shift, which provides an example for in-seam drilling in the similar environment and has important significance for promoting the research on drilling in broken soft coal seam under complex working conditions.

**Key words:** broken soft coal seam; in-seam drilling; air directional drilling; flushing medium; drilling efficiency

## 0 引言

碎软煤层因其煤质软而破碎、透气性差,在顺

煤层钻进施工中经常出现卡钻、塌孔现象等。我国碎软煤层占比大,随着开采深度增加,开采的碎软

收稿日期:2022-07-06; 修回日期:2022-09-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.021

作者简介:曹小军,男,汉族,1993年生,地质工程专业,硕士,从事煤矿井下钻探工艺研究工作,陕西省西安市锦业一路82号, caoxiaojun@cctegxian.com。

引用格式:曹小军.复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J].钻探工程,2023,50(2):150-154.

CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):150-154.

煤层越来越多。在碎软煤层中以清水作为冲洗介质的顺煤层钻进成孔性较差,钻孔极浅,而以空气作为冲洗介质的钻进是碎软突出煤层钻进的有效方法之一<sup>[1]</sup>。

常规的空气钻进在顺煤层钻进中不能对钻孔轨迹有效控制,钻孔易遇煤层顶底板而提前终止钻孔,导致煤层钻孔深度浅、煤层钻遇率低。井下空气螺杆马达定向钻进技术的出现使空气钻进轨迹可控、有效钻孔深度增加,该钻进技术在碎软煤层的开发过程中得到广泛应用<sup>[2-6]</sup>。

由于部分矿区井下工况环境复杂,导致用于空气定向钻进作业的冲洗介质含凝结水,从而造成煤层钻进效率极低,甚至难以钻进的情况。因此笔者从井下碎软煤层空气定向钻进技术出发,对复杂工况下空气冲洗介质中凝结水形成机制以及空气钻进中凝结水对钻进影响因素进行分析与研究,通过改进冲洗介质管道装置解决了这一复杂工况下产生的钻进低效问题,在实践中得到了验证和应用。

## 1 碎软煤层空气定向钻进技术

碎软煤层空气定向钻进技术是煤矿井下以空气螺杆马达为定向钻具的定向钻进技术,用于施工碎软煤层顺层定向钻孔。

### 1.1 空气螺杆马达定向钻进原理

空气螺杆马达定向钻进是以压缩空气作为钻进过程中的冲洗介质,并依靠随钻测量系统对钻孔轨迹控制的一种井下定向钻进工艺。空气螺杆马达定向钻进不同于液动定向钻进,它是依靠压缩空气为钻进动力源和冲洗介质的定向钻进工艺,该钻进工艺使用空压机提供冲洗介质来驱动孔底马达带动钻头旋转碎岩,并通过调整螺杆马达的孔底空间姿态达到造斜的目的。

### 1.2 煤矿井下空气定向钻进系统

煤矿井下空气定向钻进系统包括了钻机(含附属设备)、钻杆、螺杆马达、随钻测量系统、冲洗介质供应系统、孔口装置系统等,见图1。其中,冲洗介质供应系统由空压机、流量计、专用供风管道等设备组成。

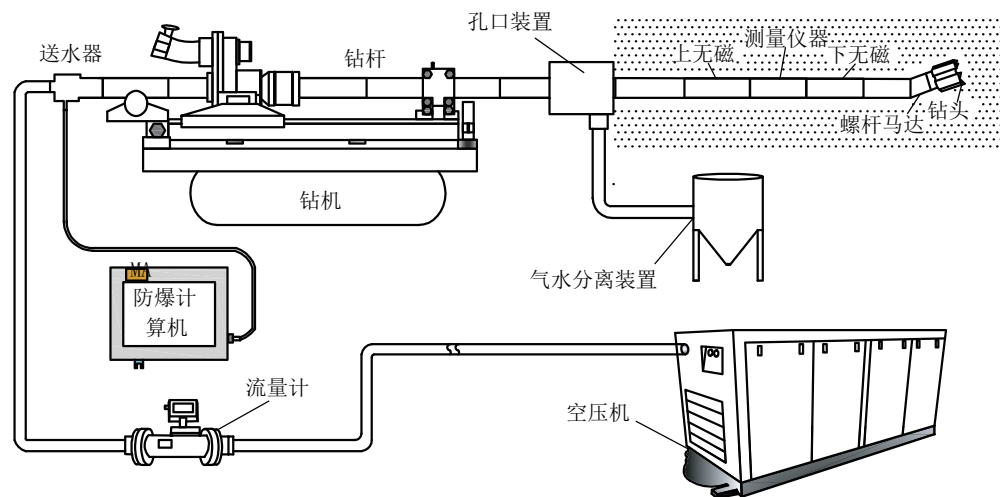


图1 煤矿井下空气定向钻进系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the underground air directional drilling system in coal mines

### 1.3 冲洗介质

冲洗介质从钻柱内部到达孔底后携带钻渣以气固两相流的方式流出孔外,因此定向钻进的冲洗介质不仅具有驱动孔底动力钻具功能和冷却孔内钻具功能,还具有携带钻渣保持钻孔循环畅通功能。目前井下空气螺杆马达定向钻进工艺使用的压缩气体为“干空气”。在钻进作业中通过观察冲洗介质的循

环来判别孔内的钻进状态,因而冲洗介质的循环和运移与钻进状况息息相关。

## 2 复杂工况空气钻进影响因素研究

### 2.1 冲洗介质运移分析

在不考虑孔底钻具的情况下,对空气冲洗介质运移产生影响的主要因素来自2个方面:一是冲洗

介质自身供应能力,即孔外供风情况,二是孔内通道中钻渣的运移状态。

(1)钻渣运移形式。压风作用下的钻渣时而悬浮、时而沉降,以跳跃方式沿着钻柱和钻孔环空间隙向孔口运移<sup>[7]</sup>,这种冲洗介质下的钻渣运移形式属于气固两相流中的颗粒和颗粒群运动。

(2)供风量。碎软煤层空气定向钻进中,压缩空气较液动冲洗介质的密度和粘度都小,钻渣依靠循环气流携带至孔外<sup>[8]</sup>。因受限于煤矿井下特种作业环境,目前井下常用防爆空压机能提供的供风压力为1.25~2 MPa。既要满足空气螺杆钻具正常启动及运转需要,同时又要满足碎软煤层高效且快速排渣需要,因此送入钻进系统的压缩空气风量要达到要求。供风量不仅仅决定于冲洗介质供风系统的供风能力,还受孔内通道环境的影响,主要表现为返风量和出渣量的异常。一般钻进系统供风能力是固定的,一旦返风和出渣量异常,钻进速率必然受到影响。

## 2.2 复杂工况下凝结水产生机制分析

空气定向钻进中,冲洗介质由空压机压缩工作环境中的空气提供。因此,冲洗介质中凝结水的产生与环境空气湿度和空气压缩后的压力露点相关。

(1)空气湿度。空气湿度是反映空气中水分含量多少的物理量。空气湿度越小越接近理想状态下的“干空气”,空气湿度越大,压缩后的空气冲洗介质水分越多。复杂工况下,工作环境中的空气湿度难以控制,并不能在理想的空气湿度下运行空压机等设备,导致空气冲洗介质产生大量凝结水。

(2)压力露点。空气露点温度的大小,既与空气中所含水分的多少有关,也与空气的压力有关<sup>[9]</sup>。环境中湿空气被空压机压缩后,其露点温度发生变化,压缩比越大压力露点越高。复杂工况下,环境温度差异较大也不恒定,是影响空气冲洗介质凝结水产生的因素。当压力露点越高、环境温度越低,致使产生的凝结水越多。工作环境中空气湿度和温度并不能选择理想状态,空压机和供应管路受复杂工况的影响,大量凝结水形成并沿着冲洗介质供应管道通过钻杆进入钻孔。

## 2.3 凝结水对空气定向钻进影响分析

当钻孔内有水时,压风作用下水被吹散形成细小的雾状液滴,钻渣暴露在雾状液滴中并吸收其水分,此时钻渣颗粒之间的间隙逐渐被水分充填,形成

钻渣颗粒的“液桥”,引起钻渣的团聚<sup>[10]</sup>。

这种团聚性取决于钻渣颗粒间的作用力和钻渣的重力之比,其大小为:

$$C_0 = F_{\text{inter}} / mg \quad (1)$$

式中: $m$ ——岩屑颗粒的质量; $F_{\text{inter}}$ ——岩屑颗粒之间的各种相互作用力。

在空气定向钻进作业中,孔内的水分不断地增多会使钻渣的团聚性增强,导致孔内阻力增大、钻渣运移到孔口的难度增大,钻进效率受到影响。由于空气状态下的颗粒的团聚主要是“液桥力”造成<sup>[11-12]</sup>,因此保持粉体颗粒干燥是防止团聚的重要措施。

## 3 冲洗介质管道装置改进

为防止空气定向钻进作业中钻孔内的钻渣团聚,必需保持钻孔通道内为干燥状态。为此对冲洗介质供应管道装置进行改进,其目的在于在空气冲洗介质进入钻杆之前排放出全部空压机和供应管路的凝结水成分。改进后冲洗介质管道装置所处的冲洗介质供应系统见图2,它是在空压机与流量计之间的供风管路上增加两级放水器。

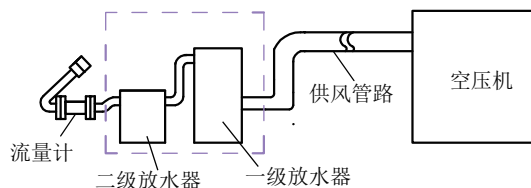


图2 冲洗介质供应系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the flushing medium supply system

两级放水器由2个放水器构成,冲洗介质经过放水器的顺序依次为一级放水器、二级放水器。放水器外观主要有管路进口、管路出口和排水口等结构。冲洗介质经过放水器时,凝结水沉积到蓄水容器后被排出管路,从而达到放水效果。一级放水器为手动放水器,相对于二级放水器结构简单、容器体积大。一级放水器在续钻期间手动操作放水。二级放水器为机械式自动放水器,水沉积到蓄水容器后,静水压力作用下水球阀打开,释放后自动关闭。一级放水器能有效地去除管路中的绝大部分凝结水,二级放水器能检验一级装置的放水效果,并能将一级放水器未能处理完的凝结水再次排出。

通过冲洗介质管道装置改进工艺的应用,可达到去除冲洗介质凝结水的目的,从而降低钻孔内因液桥力引起钻渣的团聚,进一步降低钻渣难以排出孔外的风险、防止孔内循环通道的堵塞、提高碎软煤层空气定向钻进速度。

#### 4 应用试验

西南地区地质构造复杂,覆藏的碎软煤层数量较多。为解决碎软煤层中钻孔成孔问题,西南某矿施工顺煤层定向钻孔时采用空气定向钻进工艺。钻进时受复杂工况环境影响较大,因此依托该次施工开展应用试验,对以上研究内容进行验证。

试验采用ZDY4000LDC型钻机,钻具组合为:  $\Phi 73$  mm通缆钻杆( $L=1.5$  m)+上无磁+探管+下无磁+空气螺杆马达+ $\Phi 108$  mm钻头。

试验分为2个阶段:第一阶段采用以往的空气螺杆马达定向钻进工艺在该矿掘进巷道迎头实施顺煤层施工;第二阶段通过运用冲洗介质管道装置改进后的工艺进行施工。最后,在本次应用试验中成功验证了复杂工况下顺煤层空气定向钻进的研究。装置改进前后单班进尺数据统计见表1。

表1 单班钻进进尺统计

Table 1 Drilling footage per shift m

| 阶段  | 序号 | 班次 |    |    |    |    | 6  |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|
|     |    | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |    |
| 改进前 | a  | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |    |
|     | b  | 15 | 12 | 18 | 6  |    |    |
| 改进后 | c  | 45 | 27 | 51 | 24 | 27 | 33 |
|     | d  | 21 | 39 | 27 | 36 | 30 |    |

##### 4.1 试验初始阶段

下入定向钻具后,单班进尺维持在15 m左右,随着孔深增长钻进效率越来越低,因此初期钻进尺慢。针对这一情况首先对钻具运行状态进行检查,判断孔底马达等钻具均属正常后,对供风管路排查,发现供风系统中的冲洗介质管道(即供风管路)含水,提出钻具后,发现钻头糊眼,钻渣潮湿并附着在钻具上,见图3。

该矿井下不同位置温度差异较大,而且空压机安置点空气湿润,这些复杂工况环境是造成定向钻进冲洗介质管道中凝结水产生的原因。通过分析得



图3 煤矿井下孔口钻具钻渣附着情况

Fig.3 Drilling tool out of the hole in a coal mine

出:由于这些冲洗介质供应管道的凝结水通过钻具进入孔内,从而增加了钻孔钻渣的团聚性,影响了空气定向钻进的效率。

##### 4.2 试验改进阶段

在空压机与流量计之间的供风管路上增加两级放水器,改进冲洗介质管道装置后,进行空气定向钻进作业时,二级自动放水器有水释放、释放量较少于一级放水器,在稳定情况下加钻杆一次进行一次手动操作放水排出一级放水器蓄水容器中全部水分。试验改进阶段钻进作业过程中钻孔孔口返风、返渣潮湿情况明显下降,无钻头糊眼现象,钻头与钻杆钻具之间无钻团聚现象,钻进效率与之前相比明显提高。通过表1钻进进尺数据统计得出,改进冲洗介质管道装置后,空气定向钻进效率大幅提升,单班最大钻进进尺达到51 m,单孔钻进最大平均效率达到34.5 m/班次。

#### 5 结语

(1)复杂工况下冲洗介质中凝结水的产生与环境空气湿度和经空压机高压作用后的压缩空气的压力露点相关。凝结水进入钻孔在颗粒间形成的液桥增加钻渣团聚性,使空气定向钻进时钻渣排出难度增大,进而影响顺煤层空气定向钻进效率。

(2)通过对冲洗介质管道装置改进增加两级放水器,有效排除冲洗介质中凝结水成分,解决了复杂工况下以“干空气”为冲洗介质的顺煤层空气定向钻进效率低、甚至难以钻进的问题。空气螺杆马达在软煤层中顺层定向钻进的单班最大钻进进尺达到51 m,单孔钻进最大平均速率达到34.5 m/班次。

(3)复杂工况下顺煤层空气定向钻进研究在西南矿区的成功应用,为相似环境下碎软煤层顺煤层



钻孔施工提供了范例,对复杂工况下碎软煤层钻孔成孔研究有重要推进意义。

### 参考文献(References):

- [1] 王毅. 中风压钻进在煤矿井下的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(3): 70-73.  
WANG Yi. Application of medium wind pressure drilling technology for gas extraction borehole in underground coal mines [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(3): 70-73.
- [2] 姚宁平, 姚亚峰, 方鹏, 等. 我国煤矿坑道钻探装备技术进展与展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 81-87.  
YAO Ningping, YAO Yafeng, FANG Peng, et al. Advances and outlook of coal mine tunnel drilling equipment and technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 81-87.
- [3] 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.
- [4] 彭涛. 松软突出煤层大功率坑道钻机研制与钻进工艺研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 91-93.  
PENG Tao. Soft coal power tunnel drilling rig drilling technology development and research [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(7): 91-93.
- [5] 张杰, 王毅, 黄寒静, 等. 空气螺杆马达软煤定向成孔技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 114-118.  
ZHANG Jie, WANG Yi, HUANG Hanjing, et al. Research on directional drilling technology of air screw motor in soft coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 114-118.
- [6] 刘飞, 方俊, 褚志伟, 等. 空气螺杆钻具在碎软煤层定向钻进中的应用分析[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(8): 129-132.  
LIU Fei, FANG Jun, CHU Zhiwei, et al. Application analysis on air screw drill in directional drilling of broken soft coal seam [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(8): 129-132.
- [7] 刘建林, 方俊, 褚志伟, 等. 碎软煤层空气泡沫复合定向钻进技术应用研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 278-285.  
LIU Jianlin, FANG Jun, CHU Zhiwei, et al. Application of air foam composite directional drilling technology in broken soft coal seams [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 278-285.
- [8] 王达, 何远信, 赵国隆, 等. 地质钻探手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.  
WANG Da, HE Yuanxin, ZHAO Guolong, et al. Geological Drilling Handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [9] 刘晖, 樊玉光, 肖红. 压缩空气压力露点和常压露点的换算[J]. 压缩机技术, 2008(5): 7-8, 35.  
LIU Hui, FAN Yuguang, XIAO Hong. Conversion of the atmospheric dew-point temperature and the dew-point temperature under ordinary pressure of compressed air [J]. Compressor Technology, 2008(5): 7-8, 35.
- [10] 王延民, 孟英峰, 李皋, 等. 气体钻井出水条件下环空携岩机理研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008(4): 1-3.  
WANG Yanmin, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. Annular carrying cutting study on gas drilling of water bearing formation [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 10(4): 1-3.
- [11] 冯永国, 雷文, 刘家祥. 粉体颗粒在空气及空气分级中分散性的研究进展[J]. 有色矿冶, 2006(S1): 69-71.  
FENG Wenguo, LEI Wen, LIU Jiaxiang. Research progress of dispersion of powder particles in air and air classification [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2006(S1): 69-71.
- [12] 翟酉湘, 熊晓燕, 唐建. 湿煤颗粒聚团碰撞解聚的离散元模拟研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(12): 167-171.  
ZHAI Youxiang, XIONG Xiaoyan, TANG Jian. Impact disaggregation simulation of wet coal agglomerate using discrete element method [J]. Coal Engineering, 2019, 51(12): 167-171.

(编辑 李艺)