

# 煤矿井下定向钻进技术及其发展趋势

董 昌 乐

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 介绍了 5 种定向钻进技术, 概述各自的定向原理、技术特点和应用概况, 总结了煤矿井下使用的稳定组合钻具定向钻进技术和孔底马达滑动定向钻进技术的发展历程和存在的不足; 结合当前已有的定向钻探设备及技术, 指出高强度通缆钻具和适合煤矿井下环境的无线传输技术是实现复合钻进技术的难点; 井下信息闭环控制系统和先进的导向工具系统是实现旋转导向技术的难点; 随钻近钻头地质测井技术是实现地质导向技术的难点; 最后指出了高度自动化和智能化导向钻进是定向钻进技术的发展方向, 并为加速煤矿井下定向钻进技术的发展提出了相关建议。

**关键词:** 定向钻进; 稳定组合钻具钻进; 滑动钻进; 复合钻进; 旋转导向钻进; 地质导向钻进

中图分类号: TD41

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)05-0106-05

## Directional drilling technology and development tendency in underground mine

DONG Chang-le

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

**Abstract:** The paper introduced five different directional drilling technologies and stated each directional principle, technical features and application situation. The paper summarized the development progress and shortages existed in the directional drilling technology with stabilized drilling assembly and the sliding drilling technology with downhole motor applied in the underground coal mine. In combination with the available directional drilling equipment and technology, the paper pointed out that a high strength full cable drilling tools and the wireless transmission technology suitable for underground mine were the difficulty to realize a compound drilling technology. An underground information closed-loop control system and the advanced steering tool were the difficulty to realize a rotary steering technology. A geological logging technology while the bit drilling was the difficulty to realize a geological steering technology. Finally, the paper pointed out that a high automation and intelligent steering drilling would be the development orientation of the directional drilling technology. Related proposals were provided to speed up the development of the directional drilling technology in the underground mine.

**Key words:** directional drilling; drilling with stabilized drilling assembly; slide drilling; compound drilling; rotary steering drilling; geosteering drilling

## 0 引 言

定向钻进技术是指利用钻孔自然弯曲规律或采用专用工具使钻孔轨迹按设计要求延伸钻进至预定目标的一种钻探方法, 即有目的地将钻孔轴线由弯变直或由直变弯<sup>[1-2]</sup>。定向钻进技术最早起源于石油行业, 20 世纪 60—70 年代, 美、德、英等西方发达国家将其应用至煤矿井下, 初期主要应用稳定组合钻具定向钻进技术, 20 世纪 90 年代以后, 随着机

械、电子、液压以及信息控制等行业的蓬勃发展, 定向钻进技术研究重点转向孔底马达钻具的随钻测量定向钻进技术。国内煤矿井下定向钻进技术起步比国外晚 20—30 年, 最初的发展重点也一直是稳定组合钻具定向钻进技术, 20 世纪 90 年代中期开始, 国内一些煤矿先后引进国外孔底马达随钻测量定向钻进技术及配套装备, 并取得积极成果, 但由于进口设备存在价格昂贵、供货周期长、配套服务受限等缺点, 实现孔底马达随钻测量定向钻进技术以及装备

收稿日期: 2014-10-12; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.05.026

作者简介: 董昌乐 (1982—), 男, 安徽六安人, 助理研究员, 硕士。Tel: 029-88816737, E-mail: dongchangle@cctegxian.com

引用格式: 董昌乐. 煤矿井下定向钻进技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 106-110.

DONG Chang-le. Directional drilling technology and development tendency in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 106-110.

国产化便成为相关科研院所的工作重心。2005 年以来,在相关项目如国家发改委“井下水平长钻孔钻机研制及配套工艺开发”项目的支撑下,以中国煤炭科工集团西安研究院有限公司(下称西安研究院)为代表的科研单位陆续研制出适合国内煤矿地质条件的孔底马达随钻测量定向钻进技术及装备。通过近几年的推广与应用,国内煤矿井下定向钻进技术取得了飞跃发展,利用该技术施工的最大钻孔深度已达 1 818 m,刷新了世界煤矿井下钻孔深度记录。

但是与国外先进的导向钻进技术相比,当前煤矿井下普遍采用的孔底马达滑动定向钻进技术只是导向钻进技术的初级阶段,旋转导向、地质导向等先进导向钻进技术仍需不断攻关。国外对现代导向钻进技术研究的起步早,技术水平领先国内 10 年以上,对导向钻进工具及其关键配套技术、随钻测井、随钻地震及先进的随钻参数测量传输技术形成技术垄断,应借鉴、吸收国内外先进钻探技术,把握定向钻进技术发展趋势,加大投入,不断创新,形成适合国内煤矿地质条件特点的现代化导向钻进技术及配套装备。

## 1 稳定组合钻具定向钻进技术

### 1.1 技术原理

稳定组合钻具定向钻进技术原理是通过调节底部钻具组合(BHA)中稳定器的数量及位置,在重力、给进力以及回转离心力的共同作用下,改变近钻头处钻杆的受力状态,使钻头上仰、下倾或保持原方向。稳定组合钻具上仰、下斜的造斜强度通过调整扶正器间钻杆数量或规格来实现,一般情况下钻头与稳定器或稳定器之间用普通钻杆连接,特殊情况下选用细、加重钻杆连接;保证钻进时组合钻具钻头后的稳定器等距布置,使整个钻具达到“满”、“刚”、“直”,钻头不对或很少对孔壁产生切削作用,钻孔轨迹按原方向延伸<sup>[3]</sup>。图 1 给出了 3 种常见稳定组合钻具形式。

### 1.2 发展历程

国内稳定组合钻具定向钻进技术源于 20 世纪 80 年代,受制于当时国内螺杆马达、测斜仪器等制造技术的落后,在学习借鉴英、美、德等国长距离近水平钻孔技术的基础上,西安研究院积极推进以稳定组合钻具为核心技术的煤矿井下近水平定向钻进技术的发展,并形成了一套适合煤矿井下近水平长

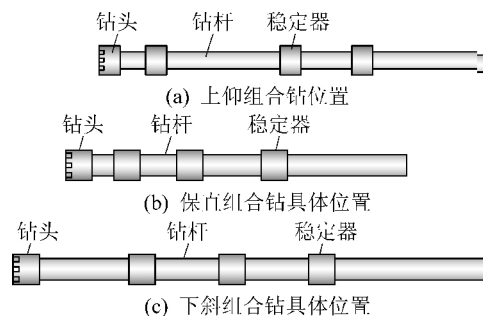


图 1 3 种常见稳定组合钻具形式

钻孔施工工艺,分别于 1999 年、2000 年和 2002 年完成 603、721 和 865 m 近水平定向钻孔<sup>[2]</sup>。

### 1.3 技术缺点

稳定组合钻具定向钻进技术缺点主要表现在测斜技术落后、定向工具“死板”和钻孔方位不可控 3 个方面。

1) 测斜技术落后。稳定组合钻具定向钻进技术采用单点或多点的测斜方式,代表仪器有 CQ-1 型单点测斜仪和 ZJS-1 型钻孔监测系统<sup>[4]</sup>。2 种测斜方式对测点信息仅是记录存取功能,只能在孔外对测点信息进行读取,且都存在如何安全快速输送测斜仪的问题。

2) 定向工具“死板”。理论上任意一种稳定组合钻具入孔后,只能保持造斜的唯一性,即下入增斜钻具组合只能增斜,当需要降斜的时候,必须提钻重新更换钻具组合。

3) 钻孔方位不可控<sup>[3,5]</sup>。稳定组合钻具定向钻进施工时,由于钻杆与岩煤粉颗粒间摩擦力作用的差异,钻杆左侧岩屑堆积较右侧多,在岩屑作用下右偏,导致无论哪种稳定组合钻具形式,实际钻孔轨迹都存在右偏现象。这种情况的存在,决定了稳定组合钻具定向钻进技术只能用于对方位无要求或要求不高的钻孔施工中。

## 2 孔底马达滑动定向钻进技术

### 2.1 技术原理

采用滑动钻进方式,不回转钻具。钻进时通缆钻杆将钻机输出的钻压传递至钻头,并将冲洗介质输送至孔底马达,马达在水压的作用下工作,带动钻头破碎地层;同时,测量探管通过通缆钻杆的信号传输装置将测量的钻孔倾角、方位、工具面等主要参数实时传输至防爆计算机或孔口监视器,施工人员根据设计要求及时调整工具面,实现孔口与孔底双向通信,从而达到控制钻孔施工轨迹的目的。

常用的孔底螺杆马达有  $0^\circ$ 、单弯和可调式等多种结构形式,随钻测量系统分有缆传输和无缆传输(泥浆脉冲、电磁波、声波等)2 种信号传输方式。目前,煤矿井下孔底马达定向钻进技术主要采用  $1.25^\circ$  单弯螺杆马达和有缆传输随钻测量系统。煤矿井下滑动定向钻进如图 2 所示<sup>[6]</sup>

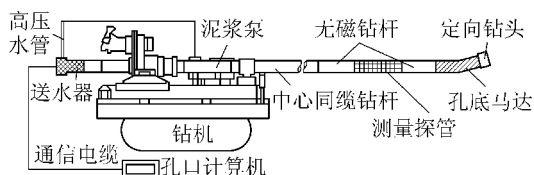


图 2 煤矿井下滑动定向钻进示意

## 2.2 发展历程

国内煤矿井下孔底马达定向钻进装备及技术的发展经历了引进吸收到自主研制 2 个阶段。

1) 引进吸收阶段。国内煤矿井下定向钻进技术的引进吸收始于 20 世纪 90 年代中期,一些煤矿企业陆续从美国、澳大利亚进口 9 套千米定向钻机,分别在松藻、铁法、淮南、抚顺、平顶山等矿务局试用<sup>[7]</sup>。由于这些煤矿地质条件复杂,煤层松软,进口钻机配套钻杆壁厚、强度有限,使用中经常发生钻杆折断、螺杆钻具脱落等孔内事故,成孔率非常低,钻孔深度也非常有限,最深钻孔只有 470 m,不到钻机标定钻进能力的  $1/2$ 。直到 2003 年,山西亚美大宁能源有限公司利用引进的 VLD-1000 定向钻进施工了 1 002 m 的瓦斯抽采孔,随后该类型钻机及配套装备又陆续在晋城寺河矿、宁煤白篾沟矿钻成 1 005 和 1 023 m 的长钻孔,才实现真正意义上的千米钻孔<sup>[2]</sup>。

2) 自主研制阶段。鉴于孔底马达定向钻进技术在国、内外的成功应用,从 2005 年起,以国家科技支撑计划项目为依托,西安研究院对孔底马达随钻测量定向钻进技术与配套机具进行系统研究开发,成功研制了适合我国矿井地质条件的千米定向钻机、 $\phi 73$  mm 高强度大通孔中心通缆钻杆和新型随钻测量系统<sup>[2,6,8]</sup>。通过现场试验和推广应用,2011 年 9 月在大佛寺煤矿本煤层中完成孔深 1 212 m 的瓦斯抽采钻孔,刷新了国内煤矿井下钻孔深度。

经过数年的科研攻关和经验积累,国内煤矿井下孔底马达滑动定向钻进装备及技术已达到国际先进水平。此外,该技术发展的同时,应用领域也在不断拓展,由最初仅应用于煤矿瓦斯抽放(采)钻孔施工扩展至疏放水钻孔、底板注浆加固钻孔等防治水

钻孔施工,并取得显著效果<sup>[9]</sup>。

## 2.3 技术缺点

1) 滑动定向钻进时,钻具不回转,部分钻具贴靠孔壁,摩擦阻力较大。

2) 滑动钻进导致钻孔轨迹不平滑,形成螺旋状钻孔,容易发生卡阻、粘滑和涡动等孔内事故。

3) 螺旋状钻孔底边会形成岩屑床,不仅增大钻具和孔壁间的摩擦阻力,还增大了排渣难度,导致孔内净化不良。螺杆马达弯角越大程度越严重。

4) 较大的摩擦阻力大幅减小了实际施加在钻头上的有效钻压,导致钻速较低,钻孔成本增大。

## 3 煤矿井下定向钻进技术

### 3.1 复合钻进技术

#### 3.1.1 技术原理

复合钻进是指高压水驱动孔底马达工作的同时钻机回转钻具的钻探技术,仅在造斜段(增斜或降斜)采用定向滑动钻进,而在稳斜段(保直)采用回转钻进方式。

#### 3.1.2 技术特点

1) 复合钻进技术可避免全孔段定向钻进施工时,不断调整工具面向角导致整个钻孔轨迹在三维空间内呈无序的类弹簧状曲线,优化钻孔轨迹。

2) 复合钻进技术能够大幅降低施工时的摩擦阻力,使钻机提供的动力最大程度地作用在钻头上,提高钻进效率。

3) 复合钻进技术可回转钻具,钻杆对环空水流具有搅动功能,增加水流携带岩屑的能力,从而减小钻孔排渣的难度,降低发生钻孔事故的概率。

基于以上 3 点,在同等钻机能力下,采用复合钻进技术能够增加钻孔长度,提高钻孔利用率。

#### 3.1.3 技术难点

复合钻进技术已广泛应用于石油钻井之中,但煤矿坑道钻进有着自身特点,与石油钻井使用的泥浆脉冲无线随钻测量系统相比,煤矿井下主要采用有线传输随钻测量系统,为了保证信号传输质量,需将传输导体置于绝缘的腔体内,而该腔体又需其他附件固定于钻杆体内(图 3),导致了钻杆的大通孔设计,造成钻杆尤其是接头部位的整体机械性能受到限制。因此,复合钻进技术应用于煤矿井下定向钻进施工中,需研制高强度的通缆钻具或适合井下条件的无线随钻测量系统。目前,已有国内科研单位从事这方面的研究。



图3 大通孔通缆钻杆示意

### 3.2 旋转导向钻进技术

#### 3.2.1 技术原理

旋转导向钻进技术是 20 世纪 90 年代的一项尖端自动化钻进新技术,它的出现是世界钻探技术一次质的飞跃。旋转导向钻进技术采用闭环控制系统(指的是信息闭环)。根据地质资料设计的钻孔轨迹数据存储于导向工具中的井下控制器内,实际钻探施工时,井下控制器将近钻头传感器测出的倾角、方位角与设计轨迹预设值进行比较,偏差超过规定范围时,控制器发出相应控制指令,调整近钻头位置的偏置机构,对钻头或钻杆施加导向力,从而改变轨迹的方向,使其与设计轨迹一致并按照设计轨迹继续钻进。旋转导向钻进技术原理如图 4 所示<sup>[10]</sup>。

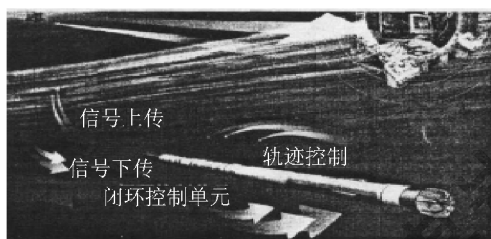
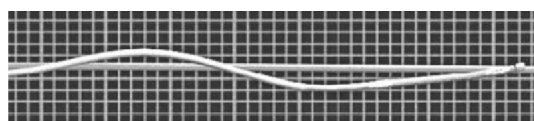


图4 旋转导向钻进技术原理示意

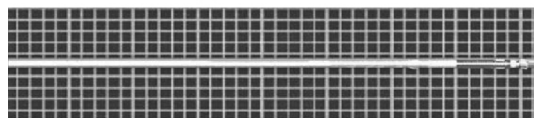
#### 3.2.2 技术特点

与传统导向钻进技术相比,利用旋转导向钻进技术,无论在造斜段还是稳斜段施工,孔内钻具都保持着旋转工作状态,可以最大程度地减少滑动摩擦阻力,钻孔净化效果更好,轨迹控制精度更高,位移延伸能力更强<sup>[10-13]</sup>。

滑动定向钻进与旋转导向钻进施工钻孔轨迹如图 5 所示,滑动定向钻孔轨迹位于设计轨迹附近屈曲延伸,而旋转导向钻孔轨迹基本与设计轨迹重合。



(a) 滑动定向钻进



(b) 旋转导向钻进

图5 不同导向钻进方式的钻孔轨迹

#### 3.2.3 关键技术

旋转导向工具系统是实现旋转导向钻进技术的

关键。导向工具系统按照不同的导向方式分为推靠式和指向式 2 种。推靠式利用流场变向原理控制上盘阀稳定在预定方向,控制上盘阀高压孔方向恒定,钻柱旋转过程中,导向机构对井壁的作用力的反力就是钻柱受到的导向力,方向沿着上盘阀预定方向的反方向;指向式靠不旋转套与万向短节之间的一套偏心机构使万向轴偏置,从而为钻头提供了一个与井眼轴线不一致的倾角,产生导向作用,使钻头指向井眼轨迹控制方向。2 种不同导向方式的旋转导向工具如图 6 所示。



图6 旋转导向工具示意

#### 3.2.4 应用概况

旋转导向系统商用始自 20 世纪 90 年代,经过多年的发展与完善,目前市场上所用的旋转导向系统主要是 Baker Hughes、Schlumberger 和 Halliburton 三大石油公司的 Power Drive、Auto Trak 和 Geo-Pilot 旋转导向钻井系统,前 2 种系统属于推靠式旋转导向钻井系统,后 1 种属于指向式旋转导向钻井系统。

我国对旋转导向钻井系统研究起步较晚,始于 20 世纪 90 年代中期,依托国家高技术研究发展计划“863 项目”可控(闭环)三维轨迹钻井技术和旋转导向钻井工程化技术研究等项目,在旋转导向钻井方面也取得了突破性的成果。但大多研究以推靠式旋转导向钻井居多,指向式旋转导向钻井的研究在国内还处于瓶颈状态<sup>[13]</sup>。

### 3.3 地质导向钻进技术

#### 3.3.1 技术原理

地质导向钻进技术是通过地质导向随钻测井系统(LWD)实现的,它在定向随钻测量系统 MWD 基础上发展起来的,具有测量、传输、导向 3 大功能。

1) 近钻头地质参数(电阻率、自然伽马、孔隙度、岩石密度等)和工程参数(倾角、方位角、工具面向角等)测量,应用无线短传技术将近钻头测量信息越过导向马达传至 MWD(LWD),并进一步上传。

2) 用随钻测量仪器 MWD(或 LWD) 做为信息

传输通道,将所测的部分孔内信息传至地面处理系统,做为导向决策的依据。

3) 用孔内导向马达做为导向执行工具。

4) 地面信息处理与导向决策软件系统,将测量信息进行处理、解释、判断、决策,指挥导向工具准确钻入目的层。

### 3.3.2 技术特点

地质导向钻进技术核心在于近钻头位置地质参数的实时测量。煤矿井下滑动定向钻进技术所用的 MWD 系统,只能够测量倾角、方位角等工程参数,一般根据钻进速度和孔口返渣岩性判断钻孔是否偏离目的层位,再通过调节孔底马达的工具面向角重新调整钻孔轨迹,属于被动调整;而地质导向钻进技术的 LWD 系统,不仅能够测量工程参数,还可以测量近钻头的地质参数,可以提前预判钻孔轨迹延伸方向地层的岩性、目的层位的顶底板及断层等,从而及时调整钻孔轨迹,确保钻孔在目的层的最佳位置延伸,属于主动调整。

### 3.3.3 应用概况

目前世界上能够生产 LWD 仪器和提供这项技术服务的公司主要集中在美国 4 个定向井技术服务公司;1996 年,苏义脑院士<sup>[14]</sup>积极倡导开展近钻头地质导向钻井技术研究,并于 1999 年在中石油集团公司立项,通过近 6 年的刻苦攻关,于 2005 年研制出 CGDS-I 近钻头地质导向钻井系统样机,该系统由 CGMWD 无线随测斜仪、CAMIS 测传马达、CFDS 地面信息处理与决策软件包 3 个子系统组成,系统总体设计技术指标:井眼直径为 216~244 mm,传输深度大于 4 500 m,最高工作温度 125℃,传输速率 5 bit/s,连续工作时间不小于 200 h,可测出近钻头参数井斜角、伽马、电阻率。自 2006 年 1 月在冀东、辽河油田的 15 口井中进行了应用试验,累计水平段进尺 4 845 m,效果显著<sup>[13-14]</sup>。

胜利油田钻井工艺研究院依托重大装备国产化研究项目,已经成功地研制出了 MWD 和随钻伽马测量仪,并投入了现场试验。使用自行研制的 MWD 和伽马测量仪,配合引进的随钻电阻率仪器,已经开展了 8 口井的探索性试验,取得了一定的效果<sup>[15]</sup>。

## 4 结论和建议

1) 随着科学技术的发展和煤矿安全快速高效生产的实际需求,煤矿井下定向钻进技术在不断地发展和完善。

2) 煤矿井下定向钻进技术来源于石油行业,但又有自身特点。煤矿井下的滑动定向钻进技术是现代导向钻进技术发展的初级阶段。

3) 结合定向钻进发展趋势,近期应积极研发高强度通缆钻具和适合煤矿井下工作环境的无线随钻测量(井)系统,推广复合钻进技术;长期应在完善 MWD 技术的基础上,研发近钻头 LWD 技术和导向钻进工具系统。

4) 现代导向钻进技术具有高度自动化、智能化的特点,是一项涉及机械、电子、仪表、液压及力学、数学等多学科的高科技系统工程。国外对现代导向钻进技术研究起步早,技术水平领先国内 10 年以上,对导向钻井工具及其关键配套技术、随钻测井、随钻地震及先进的随钻参数测量传输技术形成技术垄断,因此国内应加大投入,突破垄断,自主创新。

### 参考文献:

- [1] 韩广德. 中国煤炭工业钻探工程学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [2] 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): 78-80.
- [3] 周新莉, 胡少韵, 石智军, 等. 沿煤层定向钻进技术的研究[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(6): 62-66.
- [4] 郝世俊. 煤矿近水平定向钻孔测斜技术[J]. 探矿工程, 2003, 23(6): 35-37.
- [5] 石智军. 我国沿煤层定向钻进技术的研究及应用前景[J]. 探矿工程, 1997, 17(5): 33-36.
- [6] LIU Z L, CHRIS F. The application of VLD directional drilling in China[C]. Beijing: The 4th International Symposium on CBM/CMM in China, 2005.
- [7] 石智军. 煤矿井下千米瓦斯抽采钻孔施工装备及工艺技术研究[R]. 西安: 煤炭科学研究总院西安研究院, 2008.
- [8] 石智军, 董书宁, 姚宁平. 煤矿井下近水平随钻测量定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 1-6.
- [9] 董书宁, 李泉新, 石智军, 等. 一种煤层底板注浆加固水平定向钻孔的施工方法: 中国, ZL201110026900. X[P]. 2012-01-18.
- [10] 苏义脑, 窦修荣, 王家进. 旋转导向钻井系统的功能、特性和典型结构[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(4): 5-7.
- [11] 宁小军, 星学平, 蒲德柱. 旋转导向钻井技术在 MDC-15 井的应用[J]. 石油和化工设备, 2011, 14(5): 23-26.
- [12] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-89.
- [13] 熊继有, 温杰文, 荣继光, 等. 旋转导向钻井技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2010, 30(4): 87-90.
- [14] 苏义脑. 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 92-95.
- [15] 邢书超. 地质导向技术在江汉油田广华区块中的应用[D]. 武汉: 长江大学, 2012.