

# 煤矿水害治理多分支水平井精准定导向技术研究

郝登峰<sup>1,2,3</sup>, 徐影<sup>\*1,2,3</sup>, 郭增付<sup>1,2,3</sup>

(1. 河南豫中地质勘查工程有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 河南省能源钻井工程技术研究中心, 河南 郑州 450016;  
3. 河南省自然资源科技创新中心(非常规天然气开发研究), 河南 郑州 450016)

**摘要:** 多分支水平井注浆技术因其施工成本低、环境污染小、隔水效果好等特点, 被广泛应用于煤矿水害治理中。但由于煤层底板普遍存在断层发育、目的层薄、破碎带聚集等复杂情况, 施工时常出现泥浆漏失、顺层钻进困难、穿越断层易卡钻等难题, 严重影响了注浆治理效果。针对这些问题, 本文以安徽某煤矿为例, 在对其地质特征进行分析的基础上, 从定向轨迹设计、定向设备选型以及井眼轨迹控制等方面展开研究, 将定向钻进和地质导向技术结合, 优化复杂地质条件下多分支水平井定向技术, 并成功应用于多分支水平井超前注浆改造工程中。现场应用表明, 该技术提高了井眼轨迹控制的精确性, 保证了目的层钻遇率, 应用效果良好。

**关键词:** 多分支水平井; 煤矿水害治理; 定向技术; 井眼轨迹控制; 注浆改造

中图分类号: P634.7 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)01-0125-08

## Research on precise directional drilling technology for multi-branch horizontal wells in coal mine water hazard control

HAO Dengfeng<sup>1,2,3</sup>, XU Ying<sup>\*1,2,3</sup>, GUO Zengfu<sup>1,2,3</sup>

(1. Henan Yuzhong Geological Exploration Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450016, China;

2. Henan Energy Drilling Engineering Technology Research Center, Zhengzhou Henan 450016, China;

3. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Unconventional Natural Gas Development Research), Zhengzhou Henan 450016, China)

**Abstract:** Multi-branch horizontal well grouting technology has been widely used in coal mine water hazard control due to its low construction cost, low environmental pollution and good water isolation effect. However, the coal seam floor generally is featured of complex conditions such as fracture development, thin target layers, and aggregation of fracture zones, often leading to problems such as mud leakage, difficulty in in-seam drilling, and easy sticking through the fractures during drilling operations and affecting the effect of grouting treatment seriously. In view of these problems, taking a coal mine in Anhui as an example, based on the analysis of its geological features, this paper studies directional wellbore trajectory design, selection of directional equipment and control of wellbore trajectory. Directional drilling and geo-steering technology were combined and successfully applied to the advance grouting treatment project with multi-branch horizontal wells. The field application showed that the technology improved the accuracy of wellbore trajectory control, ensured the target layer intersection rate, and had good application effect.

**Key words:** multi-lateral horizontal well; control of water hazards in coal mines; directional drilling technology; well trajectory control; grouting treatment

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-08-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.018

第一作者: 郝登峰, 男, 汉族, 1975年生, 高级工程师, 水文地质与工程地质专业, 从事水文地质、非常规能源勘探与开发工作, 河南省郑州市郑东新区商鼎路70号, 1363492264@qq.com。

通信作者: 徐影, 女, 汉族, 1984年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事煤层气等清洁能源勘探开发工作, 河南省郑州市郑东新区商鼎路70号, 382593448@qq.com。

引用格式: 郝登峰, 徐影, 郭增付. 煤矿水害治理多分支水平井精准定导向技术研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 125-132.

HAO Dengfeng, XU Ying, GUO Zengfu. Research on precise directional drilling technology for multi-branch horizontal wells in coal mine water hazard control[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 125-132.

## 0 引言

煤炭在我国能源结构中处于主体地位,据统计,2021年我国能源消费总量达52.4亿吨标准煤,比上年增长5.2%,煤炭消费量同比增长4.6%,煤炭消费量占能源消费总量的56.0%<sup>[1]</sup>。随着开采深度和强度的增加,我国煤炭开采条件和难度愈加复杂多变,而作为煤炭生产五大自然灾害之一的突水问题也日益突出,严重制约了煤炭资源的安全高效开采。

多分支水平井是指在一口主水平井眼中的适当位置定向钻出多口进入目的层的分支井眼<sup>[2-7]</sup>。在地面施工多分支水平井后通过井眼注浆以填充煤层底板导水裂隙,可有效降低矿区水害威胁程度。由于其施工成本低、环境污染小、隔水效果好,地面多分支水平井注浆技术逐步成为采矿区水患超前治理的重要方式<sup>[8-9]</sup>。在煤矿水害超前治理上,多分支水平井定向技术经历了3个阶段:1989年为奠基阶段,开始使用定向钻井技术;2012—2013年为发展阶段,开展了地面大位移L型定向水平井关键技术研究;2016—2017年为实现阶段,在山东邱集煤矿多分支水平井施工项目上,定向技术得到了应用并取得了成功,在11个煤层首采区共计完成6个主井和25个分支井,累计进尺12011 m<sup>[10-14]</sup>。

随着钻井技术逐渐成熟,多分支水平井定向技术在煤层底板区域超前注浆治理方面取得了显著的成效。但我国复杂煤矿数量较多,煤层底板地质构造复杂、起伏变化大且厚度较薄,在应用多分支水平井定向技术时,存在轨迹控制困难、漏失严重、井眼易垮塌等问题。本文针对地质构造复杂的安徽某煤矿,将地质导向与定向技术结合并应用于该矿的多分支水平井钻探施工中,重点从定向轨迹设计、设备选型以及轨迹控制3个方面开展研究,优化复杂地质条件下多分支水平井定向技术,并通过生产应用总结该技术的优缺点,为今后该区开展矿井水害防治提供借鉴。

## 1 区域地质概况

研究矿区主采煤层为10号煤,其下伏地层共4层含水灰岩层。综合钻探、测井及地震资料,全区组合落差 $\geq 3$  m的断层共180条(含边界断层),其中正断层172条,逆断层8条。受断层发育的影响,主采煤层下伏含水灰岩层地质构造复杂,导致地面多分支水平井技术定向施工面临诸多困难:(1)由于断层

发育,目的层被断层分割后在垂向上产生偏移,导致钻穿断层后,井眼轨迹无法进入目标岩层,影响后续注浆效果;(2)岩层厚度较薄且倾向起伏,井眼轨迹无法保证顺层钻进,易穿透目的层,从顶部或底部钻出;(3)钻遇破碎带时,工具面角度易摆动,影响定向效果,且钻井液漏失严重,泥浆脉冲信号传输困难,导致定向人员无法做出正确的地质导向策略。

## 2 定导向轨迹设计

多分支水平井的轨迹设计方法为:(1)参考目标治理区域的地质要求设计靶点,根据靶点情况选择合适的主井眼轨迹剖面类型。(2)根据靶点考虑主井眼及分支井眼轨迹设计,将主井眼和分支井眼轨迹分解,对各分支进行独立设计。设计主井眼时,考虑该矿区目的层倾向朝下,将轨迹角度设计为下倾结构,既便于施工,又降低了因岩屑返出不及时而导致的卡钻风险;设计分支井眼时,由于断层发育,导水裂隙带数量较多,应最大程度地保证分支与断层相切,提升注浆效果。(3)利用二维轨迹设计方法得到转换拆分后的各三维分支轨迹<sup>[15-16]</sup>。

### 2.1 主井眼剖面轨迹设计

根据安徽某矿10号煤层下伏的4层含水灰岩特征,确定3号灰岩为目的层,以此设计主井眼井身结构。主井眼轨迹剖面只在二维平面上变化,设计时只需考虑井斜角的改变。常规水平井井眼轨迹剖面类型主要有3种,即:三段式、双增式和五段式(如图1所示)。其中,三段式适用于短半径水平井且造斜率和目标垂深均确定的情况;双增式适用于中半径水平井且地层情况认知较好的情况;五段式适用于中长半径水平井且造斜率和地层情况都不确定的情况。在满足施工要求前提下,井眼轨迹剖面结构应尽可能简单<sup>[17]</sup>。

由于Z7井基岩层顶部距离目的层垂深较近,为保证达到设计井斜,该井的主井眼采用直—增—稳三段式剖面类型。Z7井主井眼井身结构如图2所示,一开采用 $\varnothing 311$  mm钻头钻至稳定基岩顶部,下入 $\varnothing 244.48$  mm表层套管后固井;二开采用 $\varnothing 216$  mm钻头钻至煤层下伏3号灰岩层,下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管后固井;三开采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头在3号灰岩层内定向钻进,裸眼完井。

### 2.2 分支井轨迹间距设定

为增强3号含水灰岩层的整体强度,同时封堵

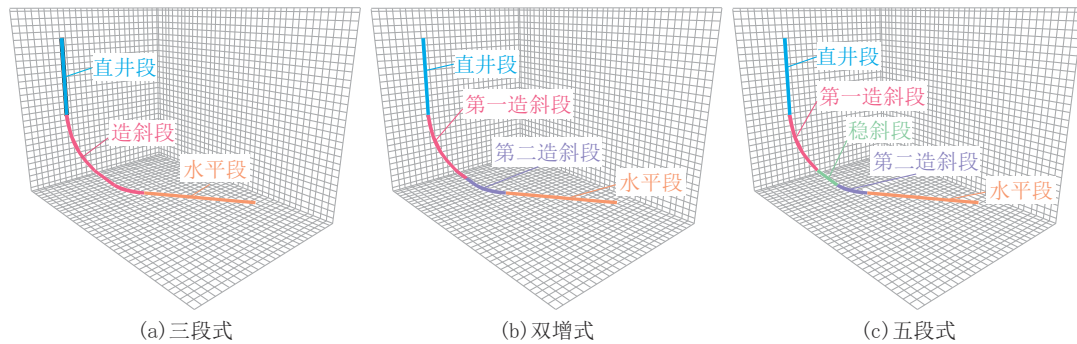


图 1 水平井井眼轨迹剖面类型

Fig.1 Types of horizontal well trajectory profiles

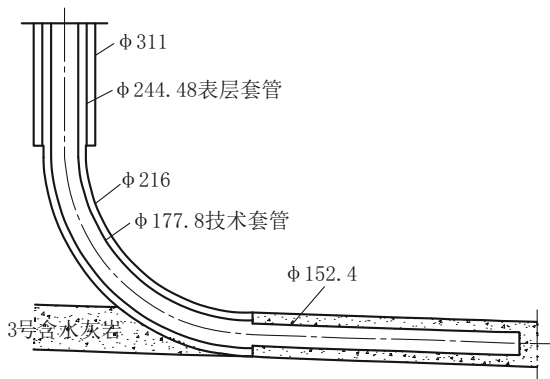


图 2 Z7 井井身结构

Fig.2 Structure of Well Z7

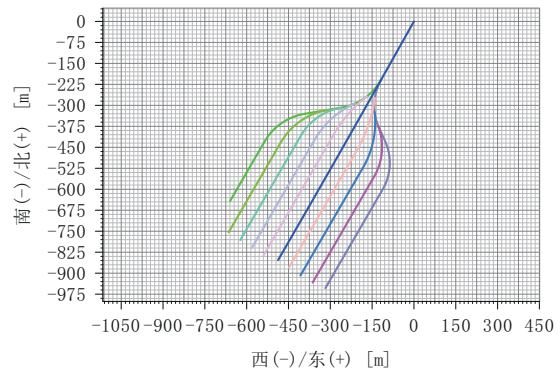


图 3 Z7 井多分支平面图

Fig.3 Plan of Z7 multi-branch well

断层产生的导水裂隙,避免下部奥陶系灰岩地下水从断层产生的导水裂隙带涌出,应选择合适的分支间距,保证侧钻分支全面覆盖治理区域,实现工作面底板注浆改造的目的。通过 Z7 井注浆试验,发现水平井主支长度在 800 m 左右,多分支轨迹在太原组 3 号灰岩顶面向下垂直距离 1~10 m 全覆盖注浆改造效果最好。综合考虑区域地质特征、浆液粘滞系数以及沿程损耗等因素,设计水泥浆的有效扩散范围为 25 m<sup>[11,18]</sup>,根据分支井间距不大于 2 倍的浆液扩散距离的原则,各分支井轨迹间距确定为 50 m,据此设计的多分支井平面图如图 3 所示。

### 3 定导向技术

#### 3.1 导向技术选型

目前钻井导向技术有常规几何导向和地质导向 2 种方式。常规几何导向技术是利用随钻测量工具采集数据,根据设计井眼轨迹进行导向控制。该技术导向方式简单、使用成本低,但测量精度低、导向风险大,适用于地质构造简单、精度要求低的井眼施

工。地质导向技术是利用随钻测量仪器实时监测钻遇地层,并根据地层情况校正、优化井眼轨迹,保证准确着陆入靶,有效提高钻遇率,该技术适用于构造复杂或信息不详的地层。由于研究区域断层发育,地质构造复杂,故采用地质导向技术进行 Z7 多分支水平井的施工。

#### 3.2 定导向设备选型

常见的定导向设备包括螺杆钻具、无线随钻测量仪器、方位伽马地质导向仪器等,在定向施工时,三种设备配合使用以满足导向的要求。

##### 3.2.1 螺杆钻具

螺杆钻具是一种以钻井液为动力,将液体压力能转为机械能的容积式井下动力钻具。螺杆钻具的选择应综合考虑井眼大小与造斜率要求等因素。螺杆钻具外径与井壁之间应留有一定环空间隙,间隙大小一般在 25.4 mm 以上,以避免发生卡钻等事故。同时,螺杆钻具的造斜率应比井身设计造斜率高 10%~20%,以便能够解决可能出现的造斜率不足等问题<sup>[19]</sup>。



根据上文设计的Z7井井身结构,选择弯角为 $1.25^\circ$ 或 $1.5^\circ$ 、 $\varnothing 127$  mm或 $172$  mm的螺旋扶正器螺杆。常见型号的螺杆尺寸及造斜能力见表1。

表1 常用型号单弯螺杆不同弯度造斜能力

弯壳体弯度/ $^\circ$	5LZ127型	5LZ165IV型	5LZ172IV型
1.00	0.28~0.51	0.17~0.30	0.17~0.30
1.25	0.35~0.64	0.21~0.38	0.21~0.38
1.50	0.42~0.77	0.25~0.45	0.25~0.46
1.75	0.49~0.90	0.29~0.53	0.29~0.53

### 3.2.2 无线随钻测量仪器

无线随钻测量系统是利用井下仪器测得钻井数据后传输至地表,利用计算机处理后获得井下实时

钻井及地层参数。仪器的选择主要考虑信号的传输效果。无线随钻测量系统的信号传输方式主要有泥浆脉冲和电磁波两种,二者性能特点见表2。由于该矿3号灰岩电阻率过高,电磁波信号被屏蔽,因此应选用泥浆脉冲无线随钻测量<sup>[20-21]</sup>。

### 3.2.3 地质导向仪器

目前地质导向仪器主要有方位伽马、近钻头、前探、远探等几种类型,不同仪器的工作原理有一定差别。方位伽马的原理是由于不同地层放射性伽马值存在差异,采用四扇区或八扇区的探测器探测地层放射性,将带有方位信息的测量数据实时上传到地面,实现地质导向功能。该煤矿目的层为灰岩,伽马值较低,上下层为泥岩,伽马值较高,地层伽马值差异大,同时由于国产近钻头测井仪器稳定性较差,国外前探远探仪器成本过高,因此选择方位伽马地质导向仪器。

表2 不同无线随钻测量仪器对比

Table 2 Comparison of various wireless MWD

仪器类型	传输介质	传输时间/s	优点	缺点
泥浆脉冲仪器	泥浆	50~90	配置简单、操作方便、成本较低	受泥浆性能影响较大,传输效率低
电磁波随钻仪器	地层	3~8	数据传输快,不受泥浆性能等条件限制	对地层电阻率反应敏感,传输距离短

## 4 井眼轨迹控制

受地层、钻井参数及钻具组合等多种因素的综合影响,多分支水平井井眼轨迹的控制较为复杂。本文分别从准确着陆入靶、分支侧钻、沿目标地层顺层钻进3个方面展开研究。

### 4.1 准确着陆入靶

确保主井眼轨迹着陆入靶是水平段钻进的前提。为准确着陆,需在目的层上部选取合适的地层作为标志层,以引导钻头钻进,同时为后续地质导向提供参考。为准确提供井下信息,标志层的选取应保证该地层发育稳定、分布连续且厚度适中,同时距离目的层垂深变化范围较小。一般将煤层底板含水层作为目的层时,可选取上部煤层或砂岩作为标志层。

直井段需严格控制井斜和水平位移,可通过测单点的方式获得井下的实际井眼轨迹。井斜过大时及时纠偏,确保井眼轨迹达到设计要求,避免直井段井斜偏差过大导致后续造斜段施工难度增加。

造斜段钻进时,一方面根据设计井眼轨迹,确定

螺杆钻具组合的反扭角和工具面角,选取合适的钻具组合;另一方面,当钻至标志层时,综合地质岩屑录井信息和地层层位表,准确判断标志层位置及垂深,及时修正设计轨迹。根据该区域10号煤层倾向,在着陆到目的层前,井斜应维持在 $88^\circ$ 左右,以保证顺利进入目的层。

### 4.2 分支侧钻

由于该煤矿多分支水平井主支完井后需注浆候凝,因此在距离套管鞋10 m左右位置进行侧钻。

新井眼初始形成阶段采用控时钻进方式,直至新老井眼间夹墙厚度达到安全要求,避免夹墙段应力集中导致井壁失稳<sup>[22]</sup>。具体操作是将工具面转至合适角度,保持钻压5 kN、钻速1 m/h均匀钻进<sup>[23]</sup>;当侧钻出新的台阶时,可以适当增加钻压,保持2 m/h的速度钻进。

钻进11 m后,对比分支井眼与相邻老井眼的井斜方位数据,以及岩屑中水泥含量,确定是否成功钻出与老井眼分离的分支井眼。若测斜数据不同,岩屑中水泥含量接近于零,说明侧钻成功,可逐步加快

钻速至正常速度<sup>[24]</sup>。对于多分支水平注浆井,由于注浆候凝时间较短,老井眼内水泥未完全凝固,侧钻成功后,再次进入新井眼需要解决分支重入的问题。经研究,可通过侧钻修窗操作,避免下钻时再次进入旧井眼,提高新分支重入的机率。

### 4.3 沿目标地层顺层钻进

由于该矿煤层底板下伏含水灰岩层构造复杂,在沿地层顺层钻进时存在以下问题:(1)穿过断层后,井眼轨迹无法重新回到目的层;(2)目的层灰岩较薄,钻头容易从目的层中钻出;(3)钻进破碎带时,泥浆易漏失,若使用泥浆作为无线随钻测量系统的传输介质,将无法向地面传输井下信息。

#### 4.3.1 穿断层钻进

该矿区断层较发育,当区内断层构造上下盘产生垂向位移时,目的层垂深也会随之发生变化,导致井眼轨迹在穿过断层构造后,无法继续沿原目的层钻进。考虑区内断层断距较小,且目的层与上下底板的伽马值相差较大,因此创新性地应用方位伽马仪器来解决该难题。通过方位伽马随钻测量系统采

集所处层位上下部分的伽马值生成伽马曲线,利用上下伽马曲线的响应特征,判断钻头的位置及变化趋势,为定向提供准确的地层信息,更好地指导定向人员进行地质导向,确保井眼轨迹在目的层中钻进<sup>[25]</sup>。

分析各种断层情况,并结合地层剖面图及井眼轨迹钻进方向,可将穿断层类型分为4种,如图4所示。其中图4(a)、(b)轨迹分别位于正断层下、上盘,图4(c)、(d)轨迹分别位于逆断层下、上盘。当轨迹经过不同穿断层类型时,其方位伽马曲线响应不同,图4(a)、(d)类型的方位伽马曲线表现为后半段下伽马曲线低于上伽马曲线,图4(b)、(c)类型的方位伽马曲线表现为后半段下伽马曲线高于上伽马曲线。通过建立不同穿断层模型与其方位伽马曲线的响应关系,可以有效解决过断层追层问题。在实际钻进过程中,根据穿断层类型,及时调整工具面,同时结合方位伽马曲线信息及时精准地判断追层效果以及是否追入目的层。

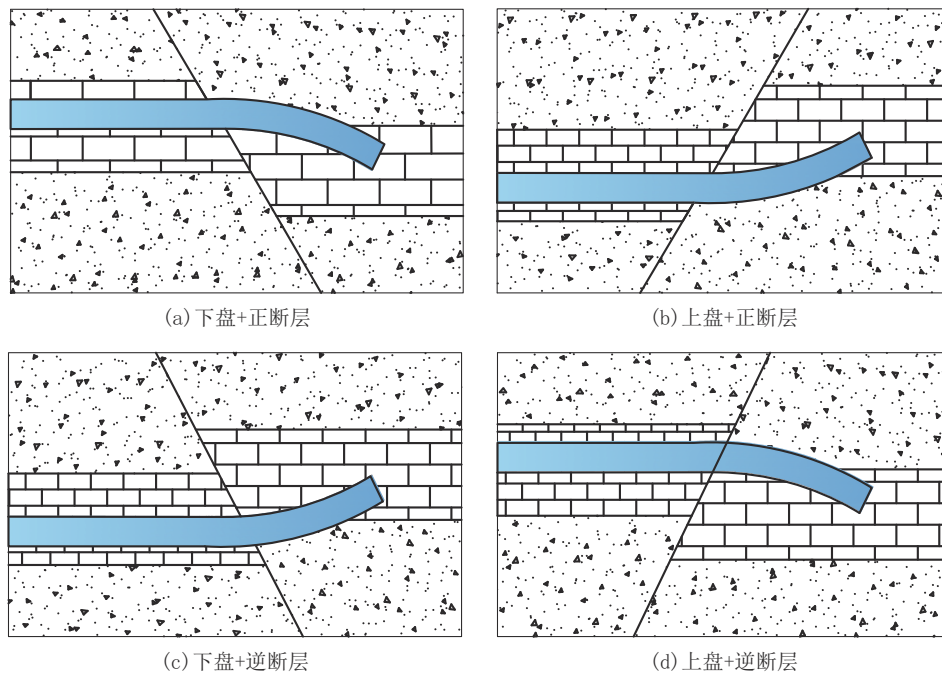


图4 四种穿断层类型示意

Fig.4 Four types of cross-fault directional drilling

钻遇正断层时,方位伽马曲线上升,若上伽马曲线首先上升,平均伽马曲线次之,最后是下伽马曲线,说明目的层下移,此时需调整螺杆钻具工具面,

降斜钻进,直至井眼轨迹追入目的层,如图4(a)类型;若下伽马曲线首先上升,平均伽马曲线次之,最后是上伽马曲线,说明目的层上移,此时需增加井

斜,使井眼轨迹向上移动进入目的层,如图4(b)类型。

钻遇逆断层时,方位伽马曲线上升,若下伽马曲线首先增加,平均伽马曲线次之,上伽马曲线最慢,说明目的层上移,需增斜钻进,如图4(c)类型;若上伽马曲线首先增加,平均伽马曲线次之,下伽马曲线最慢,说明目的层下移,需降斜进入目的层,如图4(d)类型。

Z7-3井眼轨迹与断层剖面关系如图5所示,图中断层上盘下降,下盘上升,为正断层,且井眼轨迹所在位置为下盘,判断为图4(a)过断层类型。受断层影响,位于上盘的目的层向下位移,因此需降斜追入目的层。在做好穿越断层堵漏措施后,调整螺杆钻具的工具面,使井眼轨迹向下钻进。穿越断层时的方位伽马曲线如图6所示,伽马值先增加,后降低,且下伽马曲线低于上伽马曲线,说明追层效果良好。继续控制轨迹向下钻进,当3条曲线稳定在低伽马值状态,说明已经追入目的层中。根据测井数据,该分支实际井眼轨迹满足工程要求。

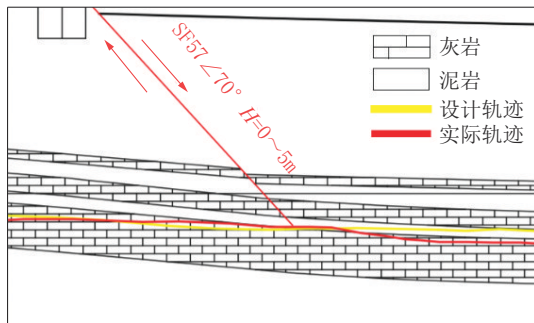


图5 设计轨迹与正断层剖面示意

Fig.5 Profile of designed trajectory and normal fault

#### 4.3.2 薄岩层顺层钻进

以Z7-3分支钻进为例,当钻至井深1100 m处时,方位伽马曲线出现图7(a)所示异常,伽马整体趋势升高,且上伽马值首先升高,平均伽马次之,下伽马值最后,说明井眼轨迹有向上钻出灰岩顶板进入泥岩的趋势。因此导向人员及时做出导向调整方案:调整钻具工具面,降斜钻进,控制轨迹重新钻入灰岩目的层。经调整,当钻至井深1153 m时,方位伽马曲线恢复正常范围,如图7(b)所示。

#### 4.3.3 泥浆漏失

穿越破碎带时,如出现泥浆失返现象,随钻测量

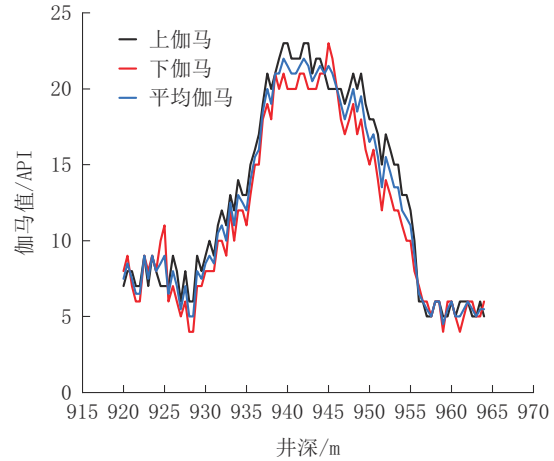
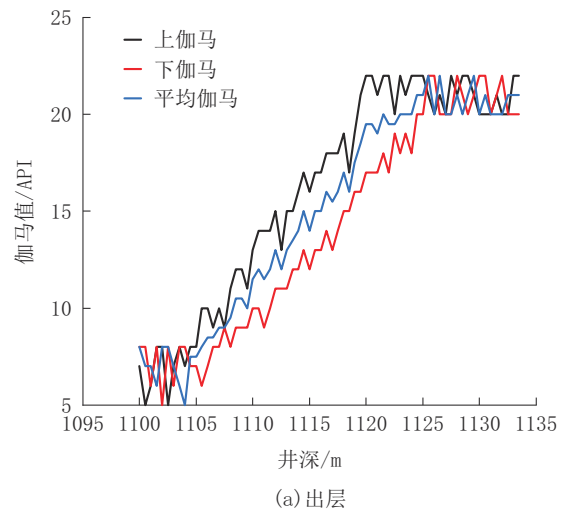
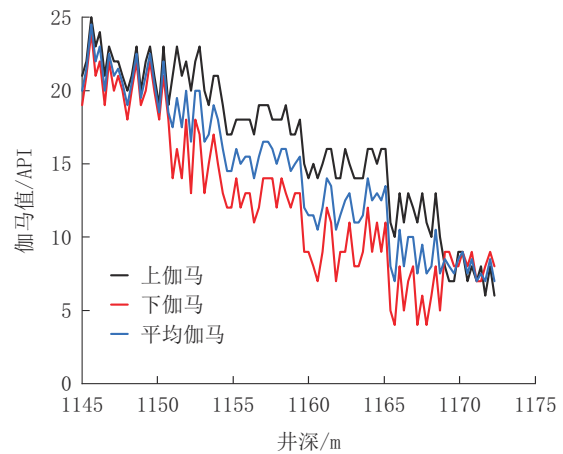


图6 穿越正断层过程方位伽马曲线

Fig.6 Azimuthal gamma curve during crossing the normal fault



(a) 出层



(b) 入层

图7 井眼轨迹从灰岩顶部出入层的伽马曲线

Fig.7 Gamma curves when the well trajectory entered and exited from the top of limestone

数据无法通过泥浆信号传递至地表,对此,可在钻至破碎带时,起钻注浆,利用水泥封堵破碎带后,再下钻进行定向。

## 5 结语

为将多分支水平井应用于安徽某煤矿水害超前治理工程,本文结合现场实际应用情况,重点研究了钻井过程中的井眼轨迹设计、定导向设备、分支轨迹控制、穿越断层后快速追层等技术难点,确保了该矿地面区域治理注浆效果。

(1)该煤矿地质构造复杂,断层发育,应用多分支水平井进行注浆改造时,需要针对性地设计井眼轨迹和优化钻具组合,从而进行经济高效的煤矿水害超前治理。

(2)针对区内地质构造,制定一套依托于方位伽马地质导向作用的定导向结合的技术。现场应用结果表明,该技术能够有效解决分支井眼轨迹控制的难题,保证目的层钻遇率,为后续施工提供了宝贵的经验。

(3)定导向技术对于落差巨大的断层,效果并不理想,后续需优化该技术以提升其应用能力。

## 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[N].人民日报,2022-03-01(10).  
2021 Statistical Bulletin of the People's Republic of China on National Economic and Social Development[N]. People's Daily, 2022-03-01(10).
- [2] 宋传祥,贾楠生,季文森,等.定向钻进技术与装备在穿层定向长钻孔中的应用[J].钻探工程,2021,48(8):83-88.  
SONG Chuanshiang, JIA Nansheng, JI Wenmiao, et al. Application of directional drilling technology and equipment in cross-bed directional long hole drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8):83-88.
- [3] 曹建明.复杂地层梳状定向长钻孔在区域瓦斯治理中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):20-25.  
CAO Jianming. Application of comb directional long boreholes to regional gas control in complex formation[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):20-25.
- [4] 白刚.煤矿井下定向钻孔超长套管下放技术[J].钻探工程,2021,48(6):57-62.  
BAI Gang. RIH of over-long casing in underground directional boreholes in coal mines[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6):57-62.
- [5] 刘刚,宋宏伟.煤巷围岩松动圈规律研究[J].煤炭学报,2002(1):31-35.
- LIU Gang, SONG Hongwei. Study on the distribution law of the broken rock zone around rectangular-shape coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2002(1):31-35.
- [6] 胡焮彭.煤层底板注浆加固多分支水平井钻井工艺技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2020.  
HU Xinpeng. Research on drilling technology of multilateral horizontal well reinforced by grouting in coal seam floor[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [7] 张西锋.定向长钻孔技术在煤矿井下防治水钻孔施工中的应用[J].煤矿机械,2019,40(2):130-132.  
ZHANG Xifeng. Application of directional long drilling technology in coal mine underground water prevention drilling construction[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(2):130-132.
- [8] 王宗明.定向水平分支井施工技术在煤层底板注浆加固中的应用[C].中国煤炭学会,2017:114-117.  
WANG Zongming. Application of construction technology of directional horizontal branch well in grouting reinforcement of coal seam floor[C]. China Coal Society, 2017:114-117.
- [9] 孙晓宇.地面L型钻孔煤层底板注浆加固技术与装备研究[J].煤炭工程,2018,50(3):53-56.  
SUN Xiaoyu. Grouting reinforcement technology and equipment for ground L-type drilling coal seam floor[J]. Coal Engineering, 2018, 50(2):53-56.
- [10] 陈峰.多分支奥灰注浆孔大位移水平段钻井技术研究[J].中国煤炭地质,2021,33(6):69-73.  
CHEN Feng. Study on multi-branch Ordovician limestone grouting borehole large displacement horizontal segment drilling technology[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(6):69-73.
- [11] 张永成,董书宁,苏坚深,等.注浆技术[M].北京:煤炭工业出版社,2012.  
ZHANG Yongcheng, DONG Shuning, SU Jianshen, et al. Grouting Technology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2012.
- [12] 王桦.定向钻孔技术在我国煤矿地层注浆改造中的应用及发展[J].煤炭工程,2017,49(9):1-5.  
WANG Hua. Application and development of directional drilling technology in strata grouting transformation for coal mines in China[J]. Coal Engineering, 2017, 49(9):1-5.
- [13] 范建国,翟明华,郭信山,等.深井顶板水害定向钻孔及控域注浆关键技术[J].煤矿安全,2015,46(10):97-100.  
FAN Jianguo, ZHAI Minghua, GUO Xinshan, et al. Roof water inrush disaster directional drilling and contour controlled grouting technology in deep mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(10):97-100.
- [14] 朱冠宇,姜波,朱慎刚.朱仙庄煤矿“五含”水文地质特征及水害防治对策[J].煤田地质与勘探,2018,46(2):111-117.  
ZHU Guanyu, JIANG bo, ZHU Shengang. Hydrogeological characteristics and prevention countermeasures of “fifth aquifer” in Zhuxianzhuang Coal Mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2018, 46(2):111-117.



- fer" in Zhuxianzhuang Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2018,46(2):111-117.
- [15] 吴志臣,李云飞,王学军,等.多分支孔技术在浅层急倾斜煤层采空区注浆治理中的应用[J].煤炭技术,2019,38(7):136-138.  
WU Zhichen, LI Yunfei, WANG Xuejun, et al. Application of multi-branch hole technology in grouting treatment of goaf in shallow inclined coal seam[J]. Coal Technology, 2019,38(7):136-138.
- [16] 程怀标.多分支井定向钻井技术[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(7):224-227.  
CHENG Huaibiao. Directional drilling technology of multi-branch wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020,40(7):224-227.
- [17] 王怀洪,滕子军,于付国,等.煤层气钻井工程设计与施工[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.  
WANG Huaihong, TENG Zijun, YU Fuguo, et al. Design and Construction of Coalbed Methane Drilling Engineering [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2014.
- [18] 胡长勤,刘坤鹏.多分支水平井注浆技术在防治灰岩水害中的研究与应用[J].能源与环保,2020,42(7):65-69,73.  
HU Changqin, LIU Kunpeng. Research and application of multi-branch horizontal well grouting technology in preventing and controlling limestone damage[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020,42(7):65-69,73.
- [19] 谭逢林.螺杆钻具在油气钻井中的理论分析和应用选型[D].成都:西南石油大学,2017.  
TAN Fenglin. Downhole motor of theoretical analysis and application in petroleum and natural gas drilling [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [20] 杨哲.煤矿区地面注浆多分支水平井装备及技术[J].煤矿安全,2020,51(4):125-128.  
YANG Zhe. Research on equipment and technology of ground grouting multi-branch horizontal well in coal mining area [J]. Safety in Coal Mines, 2020,51(7):125-128.
- [21] 汪凯斌.矿用电磁波随钻方位伽马测井系统的研究与实现[J].煤田地质与勘探,2018,46(3):145-151.  
WANG Kaibin. Research and realization of the mine electromagnetic wave azimuth gamma logging system while drilling [J]. Coal Geology & Exploration, 2018,46(3):145-151.
- [22] 李乾,秦丙林,王家航,等.裸眼悬空侧钻技术在东海XX低渗气田的实践分析[J].石油地质与工程,2021,35(4):75-81.  
LI Qian, QIN Binglin, WANG Jiahang, et al. Practice analysis of open hole suspended sidetracking technology in XX low permeability gas field in East China Sea [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021,35(4):75-81.
- [23] 王永新,朱文良,张立功,等.悬空侧钻工艺技术探讨[J].石油钻探技术,1997(3):19-20.  
WANG Yongxin, ZHU Wenliang, ZHANG Ligong, et al. Discussion on suspended sidetracking technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997(3):19-20.
- [24] 李晓龙,张红强,郝世俊,等.煤层底板奥灰水害防治定向钻孔施工关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(5):64-70.  
LI Xiaolong, ZHANG Hongqiang, HAO Shijun, et al. Key techniques for directional drilling & construction for control of coal floor Ordovician limestone karst water disaster [J]. Coal Science and Technology, 2019,47(5):64-70.
- [25] 孙佃金,孙蕾.地质导向技术在煤层气水平井施工中的应用[J].煤田地质与勘探,2015,43(2):106-108.  
SUN Dianjin, SUN Lei. Application of geosteering technology in construction of CBM horizontal well [J]. Coal Geology & Exploration, 2015,43(2):106-108.

(编辑 荐华)