

文章编号: 1001-1986(2018)06-0193-05

矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置研发及应用

李泉新

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对现有煤矿井下随钻测量系统信号传输必须依赖通缆专用钻杆而不能采用常规钻杆的技术限制, 提出泥浆脉冲无线传输技术, 以钻杆柱内环空间为信号传输通道, 通过对孔内轨迹参数测量、泥浆脉冲载波信号传输、间歇工作模式设计与控制、孔口信号接收与解调处理等关键技术研究, 研制了基于泥浆脉冲的矿用无线随钻测量装置 YHD3-1500, 并在山西晋城寺河和成庄煤矿进行了试验。试验结果表明: 泥浆脉冲无线随钻测量装置信号幅度大、传输距离远、工作时长、工作稳定性强。装置使用过程中不受钻杆限制, 不但可提高钻孔深度, 又可实现钻孔轨迹实时控制, 进一步拓宽了定向钻进应用领域, 具有极大的推广应用价值。

关键词: 泥浆脉冲; 无线随钻; 装置; 矿用

中图分类号: TP311.52 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.06.029

Development and application of mine mud pulse wireless MWD device

LI Quanxin

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

Abstract: In order to solve the technical limitations that the signal transmission of MWD system must rely on special communication cable pipe instead of the conventional drill pipe in coalmine, mud pulse wireless transmission technology is put forward. Based on the research of engineering parameter measurement techniques, mud pulse carrier signal transmission, intermittent operation mode design and control, aperture signal reception and demodulation processing, YHD3-1500 mine mud pulse wireless MWD device is developed. According to the field test in Sihe and Chengzhuang coalmines, the technology is feasible and the device can improve the strength of drilling pipe and the applicability of directional drilling technology with high signal amplitude, long transmission distance, long working hours, and high stability, which can meet the need of directional drilling in coal mines. The test results show that the mud pulse wireless MWD device has the characteristics of large signal amplitude, high working stability, long transmission distance and working time. The device is not limited by the drill pipe during operation, which can not only improve the depth of drilling hole, but also realize real-time control of borehole trajectory, broadening the application field of directional drilling.

Keywords: mud pulse; wireless MWD; device; mining use

随钻测量是在钻探过程中实现孔内信息实时测量和传输的技术简称。煤矿井下随钻测量装置主要用于井下爆炸性环境中, 在钻进过程中可实时测量倾角、方位角及工具面向角等钻孔轨迹参数, 并在孔口即时显示各种参数与钻孔轨迹, 以便司钻人员随时了解钻孔轨迹偏斜情况, 并及时调整工具面方向和工艺参数, 使钻孔轨迹尽可能沿着设计轨迹延伸^[1-4]。

煤矿井下定向钻进领域目前均采用有线随钻测量方式, 即以专用的中心通缆钻杆为信号传输通道, 为孔内仪器供电的同时实现钻孔内外信号双向通讯, 其传输速度快、传输数据多, 近些年广泛应用于煤矿井下定向钻进中, 最大信号传输深度已达到 2 311 m^[5]。随着有线随钻测量技术的推广, 其技术不足逐渐显现: 信号传输专用的中心通缆钻杆在长时间旋转情况下中心通缆接头会损坏, 所以有线测

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05045-003)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-003)

作者简介: 李泉新, 1980 年生, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 副研究员, 从事于煤矿井下钻探技术与装备研发推广。E-mail: liquanxin@cctegxian.com

引用格式: 李泉新. 矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置研发及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 193-197.

LI Quanxin. Development and application of mine mud pulse wireless MWD device[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 193-197.

量装置一般只用于滑动定向钻进,而不能用于复合定向钻进;信号传输依靠专用的中心通缆钻杆,而煤矿井下常用的螺旋钻杆、肋骨钻杆及三棱钻杆等异形钻杆无法实现随钻测量,工艺适应性和适用地层范围受到限制^[6-7]。

无线传输方式是解决以上问题的方法之一。目前无线随钻测量方式主要有泥浆脉冲、电磁波、声波、智能钻杆、光纤等 5 种,其中电磁波和泥浆脉冲传输方式较为成熟。电磁波传输方式受地层电阻影响较大,应用相对受限,而泥浆脉冲传输方式不受煤岩层电学特征参数和钻井周围地质特征的影响,能更可靠地实现远距离传输,广泛应用于地面石油钻探领域中,但煤矿井下和地面石油领域定向钻进的工作环境、钻具组合、目标地层和工艺特点等均相差较大,主要区别为:

a. 地面石油钻井普遍采用的泥浆脉冲仪器适应钻进参数较大使用限制少,更易实现泥浆脉冲随钻测量;而煤矿井下处于高湿度、大粉尘和瓦斯气体环境中,要求仪器有较高的电气性能和防爆性能,且必须进行一级防爆设计并取得煤安认证。

b. 泥浆是泥浆脉冲信号传输的介质,泵压、泵量和固相颗粒是泥浆脉冲信号传输的应用基础,关系到信号传输的稳定性,地面石油钻井一般采用三级固控系统以保证泥浆的清洁度,并且泵压和泵量较高,泵量最小为 480 L/min;而煤矿井下一般采用清水,无固控系统,泵压和泵量较小,泵压一般在 1.5~6.0 MPa,泵量最小为 90 L/min。

c. 地面石油钻井钻场空间大,钻井井径大,仪器规格尺寸较大;而井下钻孔孔径小,采用的钻具直径一般为 73 mm,要求脉冲发生器直径不大于 73 mm,在仪器的结构、布置方式、供电方式及工作方式方面都必须结合煤矿井下条件进行创新设计^[8-10]。

基于上述三点,针对煤矿井下钻探特征,需研制出适用于煤矿井下特殊应用环境的泥浆脉冲无线随钻测量装置^[11]。

1 矿用泥浆脉冲随钻测量装置总体设计

1.1 装置技术要求

a. 井下防爆要求 煤矿井下对仪器的电气性能和防爆性能要求较高,GB 3836.1—2010《爆炸性环境第 1 部分:设备通用要求》要求“用于煤矿的电器设备,当其环境中除甲烷外还可能含有其他爆炸性气体时,应按照 I 类和 II 类可燃性气体的要求进行制造和试验”。因此泥浆脉冲无线随钻测量装置中测量短节、驱动短节和充电电池筒,在设计过程中这三部分必须进行一级防爆设计并取得煤安认证。

b. 泵量要求 目前煤矿井下钻进用泥浆泵主要分为电驱和液驱两种类型,在定向钻进过程中泥浆泵排量一般为 150~300 L/min,额定压力为 8~12 MPa;在常规回转钻进过程中泥浆泵排量最小选择 96 L/min。因此为保证泥浆脉冲信号稳定传输,要求泥浆脉冲装置在 96 L/min 的小排量下能产生稳定的脉冲信号,且产生脉冲过程中压力波动不能太大。

c. 尺寸要求 煤矿井下施工钻场空间狭小,钻孔孔径小,大多数矿井巷道宽度小于 5 m,井下钻孔直径介于 75~153 mm,所用钻杆直径一般为 73 mm 和 89 mm,因此仪器结构及尺寸满足安装在钻杆内要求,且仪器长度不能超过巷道宽度,同时泥浆脉冲仪器的外径受钻孔直径大小的限制。此外,煤矿井下定向钻进过程中随钻测量仪器使用频繁,因此对仪器的耐用性提出了更高的要求。

针对上述煤矿井下特殊的施工环境和钻进技术要求,对井下泥浆脉冲随钻测量装置提出了表 1 所示技术要求。

表 1 泥浆脉冲无线随钻测量装置技术要求
Table 1 Technical requirements of mud pulse MWD

项目	测量范围	精度
方位角/(°)	0~360	倾角 0°~±30°时±1.5°
倾角/(°)	-90~90	±0.2°
工具面向角/(°)	0~360	倾角 0°~±30°时±1.5°
传输一组数据时间/s		≤21
连续工作时间/d		≥15
最大工作温度/℃		50
最高耐压/MPa		12
适应泥浆排量/(L·min ⁻¹)		≥90
传输距离/m		≥1 500
仪器长度/mm		≤3 217
脉冲器尺寸/mm		≥73

1.2 装置总体设计

针对煤矿井下特殊的应用环境,依据装置总体设计要求,在充分分析煤矿井下泥浆脉冲信号传输特性的基础上,研制了一种矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置—YHD3-1500,主要包括防爆测量短节、防爆充电电池筒、防爆驱动短节及脉冲发生器等。

矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置实现信号传输的技术流程如图 1 所示。装置由防爆充电电池筒分别向防爆测量短节和防爆驱动短节供电。防爆测量短节测量倾角、方位角及工具面向角等孔内工程参数,按约定编码协议进行数据编码,并利用有线通道向防爆驱动短节传输测量数据。防爆驱动短节控制防爆泥浆脉冲发生器关闭或者打开阀门,改变钻杆杆内水力通道的流道面积,限制部分清水流入钻

杆柱, 从而产生泥浆压力正脉冲并传递至孔口; 安装在泥浆泵出水口的防爆压力变送器检测来自孔内的压力脉冲信息后, 传输给孔口防爆计算机进行处理和显示; 数据传输完成后, 防爆测量短节停止工作, 脉冲发生器使钻具内部通道恢复到原来的面积, 泥浆泵压力恢复为正常值, 开始正常钻进。

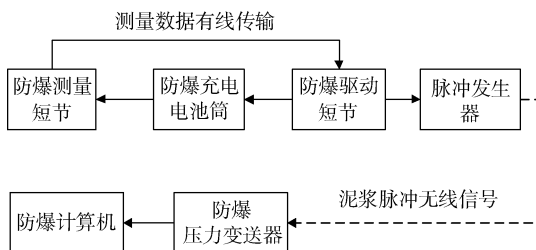


图1 装置设计技术流程

Fig.1 Technical process of device design

针对设计技术流程, 矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置开发的技术难点如下:

a. 孔内工程参数测量 孔内工程参数主要有钻孔倾角、方位角和螺杆马达工具面向角等, 需要确保测量参数的准确性。

b. 泥浆脉冲信号载波传输 如何将采集到的孔内工程参数通过泥浆脉冲的方式传输到孔口, 是装置研究的重点。

c. 间歇工作模式设计与控制 有线随钻测量装置可通过有线传输通道实现孔内仪器供电和钻孔内外双向信号传输, 孔内探管的工作时间长。由于涡轮供电技术稳定性较差, 因此泥浆脉冲无线随钻测量装置的孔内仪器设计采用电池筒供电, 为保证孔内仪器使用时间, 提高电池筒的利用效率, 设计采用间歇工作模式并进行实现。

d. 孔口信号接收与解调处理 将通过钻杆柱内环空间上传的正脉冲压力信号接收, 并解调出正确孔内工程参数。

2 矿用泥浆脉冲随钻测量装置关键技术

2.1 孔内轨迹控制参数测量技术

倾角、方位角及工具面向角等孔内轨迹控制参数的精确测量主要由防爆测量短节实现。防爆测量短节设计由传感器组、CPU 控制器、数据采集单元、通讯接口电路、本安电源控制电路组成, 其中传感器组由 3 个互相垂直的加速度传感器和 3 个互相垂直的 PNI 磁传感器组成, 加速度传感器能够敏感重力加速度信号, 磁传感器能够敏感地磁场信号, 采用的电气框图如图 2 所示。

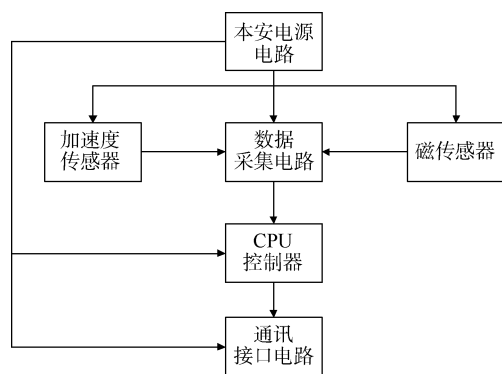


图2 防爆测量短节电气原理框图

Fig.2 The block diagram of electrical principle of explosion proof measurement nipple

参数测量时, 本安电源电路供电, 加速度传感器和磁传感器感应其输入量后将其变换成与之对应的输出电压; 数据采集电路测量电压和基准电压后采用运算放大器对传感器测量信号进行整形和滤波, 获得传感器原始测量数据; CPU 控制器根据倾角、工具面和方位角与重力加速度和磁场强度的关系式(1)计算出孔内轨迹控制参数的实测值。

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{Z}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(XM_y - YM_x) \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{M_z(X^2 + Y^2) + Z(XM_x + YM_y)} \quad (1)$$

$$w = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

式中 θ 为钻孔倾角, ($^\circ$); α 为钻孔方位角, ($^\circ$); w 为螺杆马达工具面向角, ($^\circ$); X 、 Y 、 Z 为各重力加速度传感器测量值, m/s^2 ; M_x 、 M_y 、 M_z 为各磁传感器的测量值。

利用式(1)计算出倾角、方位、工具面等参数以备主控模块调用。主控模块包括泵状态判断和主控 2 个单元, 泵状态判断单元的功能是根据流量开关是否开启判断当前泵状态, 主控的功能是根据泵状态按照预先设定好的模式, 将测量模块传来的测斜数据进行编码后传给驱动短节。

2.2 泥浆脉冲信号载波传输设计

泥浆脉冲载波传输有压力正脉冲、压力负脉冲和连续压力波 3 种方式, 由于压力正脉冲传输具有仪器结构简单、信号稳定、工作可靠、技术成熟、使用广泛等优点, 本装置采用压力正脉冲形式实现信号载波传输^[11-12]。

压力正脉冲的信号传输通道为孔内仪器上部钻杆柱的内环空间, 其信号传输方向与泥浆流动方向相反。

为保证在 96 L/min 小排量下能够产生稳定的脉

冲信号在设计时脉冲发生器采用先导阀结构,且满足 $\Phi 73$ mm 无磁外管内安装尺寸要求,如图 3 所示。当驱动短节工作时,电磁阀带动先导阀上移,关闭脉冲连接头与对接座之间的流道,造成流向阀头和外管之间流道的冲洗液流量突然增加,而阀头和外管之间流道面积变化较小,从而造成小排量条件下泵压的升高,产生压力脉冲。脉冲发生器由驱动短节控制,可以间歇性地产生正压力脉冲,从而可以

传输孔底的多种信息。驱动短节不工作时,一部分冲洗液从阀杆和外管之间的通道流过,另一部分冲洗液从阀杆中心的流道流过,并流向驱动短节,此时不产生压力脉冲。

脉冲幅度的大小由先导阀控制,通过其对阀座的堵塞面积实现;脉冲宽度由电磁阀的作用频率控制;泥浆正脉冲信号由流道控制阀产生,设计为 0.3~0.8 MPa。

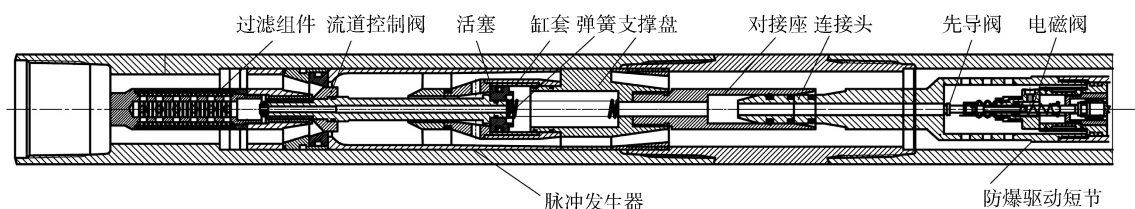


图 3 泥浆脉冲信号载波传输原理示意图

Fig.3 The schematic diagram of carrier transmission principle of mud pulse signal

2.3 间歇工作模式设计与控制技术

装置设计采用流量开关进行泥浆泵工作状态判断,并以此为依据实现间歇工作。

流量开关安装在防爆测量短节前端,如图 4 所示。钻进时当泥浆泵向钻孔内泵送冲洗液时,冲洗液从右向左流动,进入驱动骨架的水口并推动驱动轴向左移动,将驱动轴与驱动骨架分离,冲洗液从仪器左侧流出;停止泥浆泵后,在弹簧作用下驱动轴复位,流量开关闭闭。

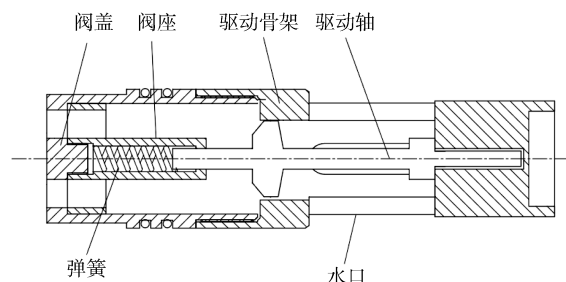


图 4 流量开关设计示意图

Fig.4 The design diagram of flow switch

防爆测量短节随时检测流量开关工作状态,当流量开关判断为停泵后,启动数据采集模块采集钻孔轨迹倾角和方位角等静态参数;当流量开关判断为开泵后,启动数据采集模块采集螺杆马达动态工具面向角,并启动防爆驱动短节发送倾角、方位角和动态工具面向角,数据发送完后,数据采集模块和防爆驱动短节进入休眠状态,等待下一次开停泵操作。

2.4 孔口信号接收与解调处理技术

防爆压力变送器和防爆计算机组成了孔口组件,负责完成信号接收和解调处理,具体步骤如下:

a. 信号接收。将防爆压力变送器安装在泥浆泵

出水口,并将钻杆柱内泵压变化转换成电压信号;防爆计算机通过采集压力变送器的电压值计算出钻杆柱内泵压数值,从而获得泥浆脉冲信号。

b. 信号滤波去噪。由于孔内条件复杂,信号传输过程中会受到许多噪声的干扰导致孔口接收到的泥浆脉冲信号幅值小,噪声大。其中噪声主要有泥浆泵噪声、螺杆马达噪声、随机噪声和反射噪声等。由于噪声一般频率高、幅度小、与脉冲信号独立,因此采用方波相关函数彻底把噪声和干扰进行滤除^[13-15]。

c. 对去噪后的泥浆脉冲信号去除基线漂移,得到适合解码处理的信号。

d. 根据脉冲幅值大小调整脉冲检测压差,去除虚假脉冲,得到有效脉冲序列,如图 5 所示。

e. 根据约定编码协议,对脉冲信号进行解码运算,得到孔内工程参数,并绘制出钻孔轨迹图。

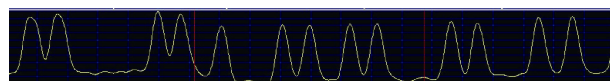


图 5 处理后的泥浆脉冲信号波形示意图

Fig.5 The schematic diagram of mud pulse signal waveform after treatment

3 现场试验

3.1 中硬煤岩层钻进试验

试验点位于山西晋城寺河矿东五盘区 5301 工作面和 5302 工作面,试验过程中共完成 6 个定向钻孔随钻测量,总进尺 3 792 m,其中在东五盘区完成一个孔深 1 566 m 的定向钻孔,钻孔轨迹剖面图见图 6 所示。之后采用泥浆脉冲无线随钻测量装置施工 5 个顶板高位定向钻孔,试验过程中仪器工作稳定。

在实钻过程中测量信号强度大,信号衰减小,信

号传输实时稳定可靠,最大传输距离超过了1 500 m,全孔测试900余次,解调出错20余次,其中为解调信号10次,丢波5次,解调错误5次。脉冲传输过程中前1 000 m接收到大同步时间为105 s,接收一组倾角、一组方位角及二组工具面向角总耗时3 min,满足井下钻进要求。

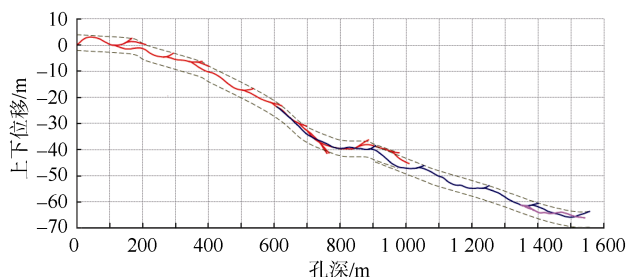


图6 东五盘区西回风巷迎头1号钻孔实钻轨迹剖面图
Fig.6 Drilling trajectory of borehole No.1 in the west air return entry of eastern panel 5

3.2 软硬复合煤层钻进试验

试验点位于成庄煤矿43122切眼和43213巷道。为解碎软破碎地层钻进成孔难题,钻杆选择 $\phi 73$ mm三棱螺旋钻杆,配套泥浆脉冲无线随钻测量装置采用复合定向钻进技术实现软硬复合煤层钻进成孔。

现场试验过程中共完成8个本煤层定向钻孔,其中43122切眼钻场完成本煤层定向钻孔一个,主孔深度402 m。为考察2种定向钻进技术的钻孔排渣效果,对1~3号钻孔的钻孔返渣情况进行量化统计,具体数据见表2。3号试验钻孔综合返渣效率达到1号、2号试验钻孔的3倍。表明无线随钻测量复合定向钻进技术钻孔返渣效果明显优于现有常规定向钻进技术,其对于碎软煤层定向钻孔辅助排渣具有显著的优势。

表2 试验钻孔返渣数据对比表
Table 2 Comparison of cutting return data from test boreholes

施工技术	钻孔编号	累计进尺/m	全孔累积返渣量/t	单位进尺返渣量/t
常规定向钻进	1	1 071	12.8	0.036
	2	936	13.6	0.044
复合定向钻进	3	516	22.8	0.133

4 结论

a. 研发的YHD3-1500泥浆脉冲无线随钻测量装置方位角和工具面向角测量精度 $\pm 1.5^\circ$,倾角测量精度 $\pm 0.2^\circ$,仪器长度3 217 mm,脉冲发生器外径为73 mm。

b. 试验过程中泥浆脉冲无线随钻测量装置在排量96 L/min能够产生稳定的测量信号,最深传输距离1 566 m,测量过程中装置误码率低于3%,采用间歇工作模式,试验工作时间超过20 d。

c. 开发的矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置信号传输不受钻杆制约,可与螺旋、三棱等异形钻具和长螺旋螺杆马达配套形成特殊钻具组合在碎软煤层和破碎带等复杂地层中,不但可提高钻孔深度,又可实现钻孔轨迹实时控制,进一步拓宽了定向钻进应用领域,具有极大的推广应用价值。

参考文献

- [1] 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.
YAO Ningping. Development of near-horizontal directional drilling in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 78-80.
- [2] 石智军,田宏亮,田东庄,等. 煤矿井下随钻测量定向钻进使用手册[M]. 北京:地质出版社,2012.
- [3] 石智军,董书宁,姚宁平,等. 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.
SHI Zhijun, DONG Shuning, YAO Ningping, et al. Directional drilling technology and equipment for near horizontal measurement while drilling in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 1-6.
- [4] 李泉新,石智军,史海蛟. 煤矿井下定向钻进工艺技术的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(2): 85-89.
LI Quanxin, SHI Zhijun, SHI Haiqi. Application of directional drilling technology in coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2): 85-89.
- [5] 大功率定向钻机再创钻孔深度世界纪录[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(1): 185.
New world record of drilling depth for high power directional drilling rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 185.
- [6] 王清峰,黄麟森. 基于外部供电的矿用随钻测量装置研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 12-15.
WANG Qingfeng, HUANG Linsen. Research and application of measuring device for mine use while drilling based on external power supply[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 12-15.
- [7] 王二鹏,刘波,郭文杰. 随钻测量技术在我国煤矿井下水平定向钻进中的应用与展望[C]//2010(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 2010: 218-220.
- [8] 朱桂清,章兆淇. 国外随钻测井技术的最新进展及发展趋势[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 394-397.
ZHU Guiqing, ZHANG Zhaoqi. The latest progress and development trend of logging technology while drilling abroad[J]. Logging Technology, 2008, 32(5): 394-397.

(下转第202页)

- 究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 365–369.
- WANG Li, LI Man, JIA Qianzhong, et al. Study on the brazing of diamond compact and cemented carbide[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(3): 365–369.
- [10] 贾乾忠. 聚晶金刚石复合片高频感应钎焊试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [11] 范文捷, 刘芳, 刘建正, 等. 高频感应钎焊钎料、钎剂对 PCD 刀具焊接性能的影响[J]. 工具技术, 2004, 38(6): 22–24.
- FAN Wenjie, LIU Fang, LIU Jianzheng, et al. Influence of brazing alloy and soldering acid in high-frequency induction brazing welding for welding performance of PCD cutter[J]. Tool Engineering, 2004, 38(6): 22–24.
- [12] RABINKIN A, SHAPIRO A E, BORETIUS M. Brazing of diamonds and cubic boron nitride[J]. Advances in Brazing, 2013: 160–193.
- [13] TILLMANN W, ELREFAEY A, WOJARSKI L. Brazing of cutting materials[J]. Advances in Brazing, 2013: 423–471.
- [14] 邱惠中, 薛淡之, 辛绍文. 聚晶金刚石复合片焊接研究[J]. 珠宝科技, 2003, 15(1): 13–17.
- QIU Huizhong, XUE Danzhi, XIN Shaowen. Welding research of composite pieces of polycrystalline diamond[J]. Jewelry Science and Technology, 2003, 15(1): 13–17.
- [15] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 361–365.
- [16] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 金刚石复合片不取心钻头: MT/T 786—2011[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 197 页)

- [9] 马哲, 杨锦舟, 赵金海. 无线随钻测量技术的应用现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(6): 112–115.
- MA Zhe, YANG Jinzhou, ZHAO Jinhai. Application and development trend of wireless measurement while drilling technology[J]. Petroleum Drilling Technology, 2007, 35(6): 112–115.
- [10] 徐涛, 刘翠海, 黄青斌. 水平定向钻进随钻测量系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1976–1980.
- XU Tao, LIU Cuihai, HUANG Qingbin. Research and design of measuring system for horizontal directional drilling while drilling[J]. Journal of Instrumentation, 2009, 30(9): 1976–1980.
- [11] 肖俊远, 王智明, 刘建领. 泥浆脉冲发生器研究现状[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(10): 8–11.
- XIAO Junyuan, WANG Zhiming, LIU Jianling. Research status of mud pulse generator[J]. Petroleum and Mining Machinery, 2010, 39(10): 8–11.
- [12] 赵常青, 刘凯, 赵桐, 等. 随钻正脉冲测井仪压力信号生成特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(1): 8–12.
- ZHAO Changqing, LIU Kai, ZHAO Tong, et al. Study on pressure signal generation characteristics of positive pulse logging tool while drilling[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1): 8–12.
- [13] 孙荣军. 煤矿井下随钻测量技术及钻孔轨迹数据处理方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009: 8–16.
- [14] 朱利, 万里平, 李红涛, 等. 深井钻井随钻测量压力脉冲信号传播规律研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(6): 108–113.
- ZHU Li, WAN Liping, LI Hongtao, et al. Study on propagation of pressure pulse signal in deep well drilling while drilling[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2014, 36(6): 108–113.
- [15] 涂兵, 李德胜, 贺建, 等. MWD 泥浆脉冲信号互相关滤波算法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 43–46.
- TU Bing, LI Desheng, HE Jian, et al. Study on MWD mud pulse signal cross-correlation filtering algorithm[J]. Journal of Instrumentation, 2010, 31(8): 43–46.

(责任编辑 聂爱兰)