水文·工程·环境

陕西榆林地区煤田钻探技术研究与应用

刘维平[1,2]，张 波[3]，郑秀华[1]
（1. 中国地质大学（北京），北京 100083；2. 武警黄金七支队，山东烟台 264004；
3. 西安地质矿产勘查开发院，陕西西安 710000）

[摘 要]陕西榆林地区煤田钻探通常使用单管钻进，钻进效率低、技术落后。针对这一现状，使用金刚石复合片钻头绳索取心技术，配合国产微电脑控制全液压钻机，取得了良好的效果。文章主要从冲洗液配方和钻进参数设计、ZK2508 现场施工过程中出现问题及处理、经验分析总结等方面进行阐述，并讨论国产全液压钻机在金刚石小口径钻进的优势与不足，以期为以后的煤田钻探提供借鉴。

[关键词] 煤田钻探 PDC 取心钻头 冲洗液 全液压钻机 绳索取心
[中图分类号]P634 [文献标识码]A [文章编号]0495 - 5331(2015)01 - 0181 - 05

Liu Wei-ping, Zhang bo, Zheng Xiu-hua. Research and application of drilling technology in coal fields of the Yulin area, Shaanxi Province[J]. Geology and Exploration,2015, 51(1):0181 - 0185.

1 概况

矿区位于陕西省榆林市，地貌上属于典型的黄土高原，海拔 1000 ~ 1500 m。勘查区地表绝大部分被第四系松散沉积物覆盖，主要有全新统风积沙，现代河床冲、洪积层，上更新统萨拉乌苏组，中、下更新统黄土。钻孔揭露的地层还有侏罗系中统安定组、直罗组、延安组及下统富县组，三叠系上统瓦窑堡组等。主要含煤地层在侏罗纪中统延安组，平均深度在 600m 左右。岩层岩性主要以泥岩、粉砂岩、砂岩为主，洛河组与安定组一段较长的红色、紫红色砂岩是钻进与护壁的难点。

该矿区煤层钻探大多采用普钻“打单管”的方式，技术比较落后，工人劳动强度大，成本相对较高。也曾尝试过绳索取心钻进，但效果不理想。针对目前现状建立一套行之有效的钻进方法及规程非常必要。该项目采用全液压钻机、绳索取心技术以及金刚石复合片钻头，配备除砂器、动力钳等先进设备，使用电脑采集和数据分析系统，力争提高钻探水平，探索出高效、节能的钻探工艺。

2 室内设计

2.1 冲洗液配方设计

钻进该地区煤田地层主要有两个难点：首先是松散地层的钻进。由于绳索取心钻进时环状间隙小，冲洗液上返速度高，对孔壁冲刷作用大，不利于井壁泥皮的形成，同时上下钻具时产生的激动压力大，易造成孔壁坍塌和钻孔超径。提高冲洗液的护壁性能，减少对地层的扰动，保证冲洗液液柱压力大于地层坍塌压力，是防止松散地层孔壁坍塌的主要措施。其次是泥页岩水化问题。煤田主要以沉积地层为主，多为泥岩、页岩和粉砂岩互层，易发生水化膨胀，导致冲洗液固相含量过高、密度与粘度难以控制、孔内岩粉堆积等问题，严重时会产生吸钻、钻孔弯曲、压差卡钻等事故，能否妥善解决这一问题也将是成功钻进的关键（索忠伟等，2009；孙平贺等，2010；毛洪江，2011）。

松散地层的防塌和护壁与防止泥页岩水化膨胀是该矿区施工的主要难点，对冲洗液的性能要求较高，既要有良好的流变性，还要有防塌、抑制页岩水化以及有效控制固相含量的能力（刘维平等，2009）。适量的 KCl、NaCl、$CaCl_2$ 等无机盐可以降低冲洗液中水的活度，诱发空隙流体向冲洗液中渗透，从而达到页岩去水化和改善页岩稳定性目的。在众多无机盐中，KCl 的这种效果最好（郭健康，2005），因为钾离子本身具有抑制性，同时，钾离子比钠离子水化半径小，对聚硅醇酸根束缚力大，可以妨碍粘土

[收稿日期]2013 - 05 - 03；[修订日期]2014 - 05 - 20；[责任编辑]郝情情。
[第一作者]刘维平（1986 年 - ），男，2011 年毕业于中国地质大学（北京），获学士学位，在读研究生，现主要从事钻井液方面的研究工作。E - mail:king8671@126.com。

表 1　不同地层冲洗液配方、性能表

Table 1　Formulas and performances of drilling fluids for different formations

地层	配方	比重 g/cm³	漏斗粘度 s	含砂量%	胶体率%	泥皮厚 mm	pH
第四系地层井段或者不取心孔段	2% 膨润土 + 0.02% 低粘 CMC + 1% GLUB + 纯碱。	1.01	17.5	<0.4	100	1	10
完整地层	清水 + 0.015 ~ 0.02% 聚丙烯酰胺 + 1% GLUB	1.00	15.78	<0.4	100	0	8
泥岩、页岩、砂岩地层	2% 膨润土 + 0.2% CMC + 0.2% XC + 3% KCl + 1% GLUB。	1.01	27	<0.4	100	1	8

端面吸附聚硅酸根,而且钾离子比钠离子聚沉能力大,钾离子浓度越高,冲洗液絮凝效果越好,冲洗液整体性、稳定性越好(要二仓等,2008)。

根据现场实际情况,主要选择常用的膨润土、纤维素、聚丙烯酰胺、XC、GLUB、KCl 作为添加剂(鄢捷年,2006),通过室内正交实验调整其配比,满足不同井段地层对冲洗液的要求。

2.2　钻进参数设计

2.2.1　转速

转速是影响金刚石钻头钻速的重要因素。在一定条件下,转速越快,钻速越高(刘光志,1991)。转速主要受岩石性质和破岩时间效应的影响。对于复合片钻头,其转速可以根据公式:$n=\frac{60\times v\times 1000}{\pi\times D}$,求得($v$ 圆周线速度,D 钻头外径)。针对煤田地层,Φ113 钻头转速控制在 150 ~ 300 r/m,Φ76 钻头转速控制在 300 ~ 500 r/min。另外在钻进中硬完整地层时采用高钻速,岩层破碎、裂隙发育、软硬不均、钻进时振动大时应采用低转速。

2.2.2　钻压

切削具在轴向荷载的作用下施力于岩石,由于切削具的形状尺寸不同,产生的应力是不同的。仅就应力区而言,吃入深度、破碎区和压力成正比。对于复合片钻头钻压的计算可以使用经验公式 $P_Y=f\times\sigma_r\times Q\times F$ 获得(f - 调整系数:0.5 ~ 0.7,Q - 钻头复合片数量,σ_r - 岩石抗压强度 Pa,F - 复合片与岩石的接触面积 mm²)。经计算复合片钻头钻进煤田岩层施加到单片复合片的钻压为 70 ~ 100 kg,钻进煤层施加到单片复合片的钻压为 50 ~ 60 kg(夏柏如,1991)。

2.2.3　泵量

设计原则是满足冲洗液上返速度的要求。金刚石钻进上返速度应大于 0.3 ~ 0.7 m/s;金刚石绳索取心钻进保持上返流速为 0.5 ~ 1.5 m/s。通常使用复合片钻头泵量要超过表镶或者孕镶的 20% ~ 50%,其泵量计算可根据公式 $Q=6\times V\times A$(Q - 冲洗液量 L/min,V - 环状间隙上返流速 m/s,A - 钻孔环状断面 cm²)。经计算 Φ76 口径钻进,冲洗液泵量参考值为 50 ~ 80 L/min。

3　现场施工

3.1　PDC 取心钻头应用效果

PDC 钻头实质上就是微型切削片刮刀钻头,因此 PDC 钻头的工作原理与刮刀钻头的工作原理基本相同,主要以切削、剪切和挤压方式破碎地层,通过克服岩石的剪切强度而不是挤压强度来破碎岩石。因此在相对较软的地层相对于孕镶金刚石钻头,其切削速度快、钻进效率高、钻头寿命长(孙明光,2002)。煤田多以沉积地层为主,地层偏软能够较好的发挥 PDC 钻头优势。PDC 钻头在雷龙湾 - 赵石畔矿区 ZK2508 钻孔施工中表现出以下特点:钻头寿命长,全孔 534 m 仅更换一次钻头,钻进时效相比于普通孕镶钻头高出 20% ~30%,节约了大量辅助时间;PDC 钻头切削具锋利耐磨,便于进行恒速钻进,钻进中压力小,转速相对较低,钻具稳定;岩心采取率高,岩煤心完整;钻头成本低,ZK2508 折算钻头每米成本仅 2.37 元,经济效益高。

3.2　断钻问题分析及处理

钻杆在受孔内各种荷载作用,包括弯曲、扭转、振动、拉压及腐蚀,容易出现钻杆折断现象,特别是金刚石绳索取心钻进复杂地层因钻杆壁薄,更易出现钻杆折断。钻杆丝扣及接手卡槽室应力集中,是最易折断的地方。通常加压钻进最大挠度在离井底 1/3 深度处,井壁间隙越大折断规律越明显;而减压钻进时,钻杆应力零点断面处交变应力最大,因而最易折断(董智广等,1994)(见图 1)。

一般来说,金刚石钻头钻进速度越慢,钻进时效越低,越容易出现钻杆折断事故。如此恶性循环最

地质勘探

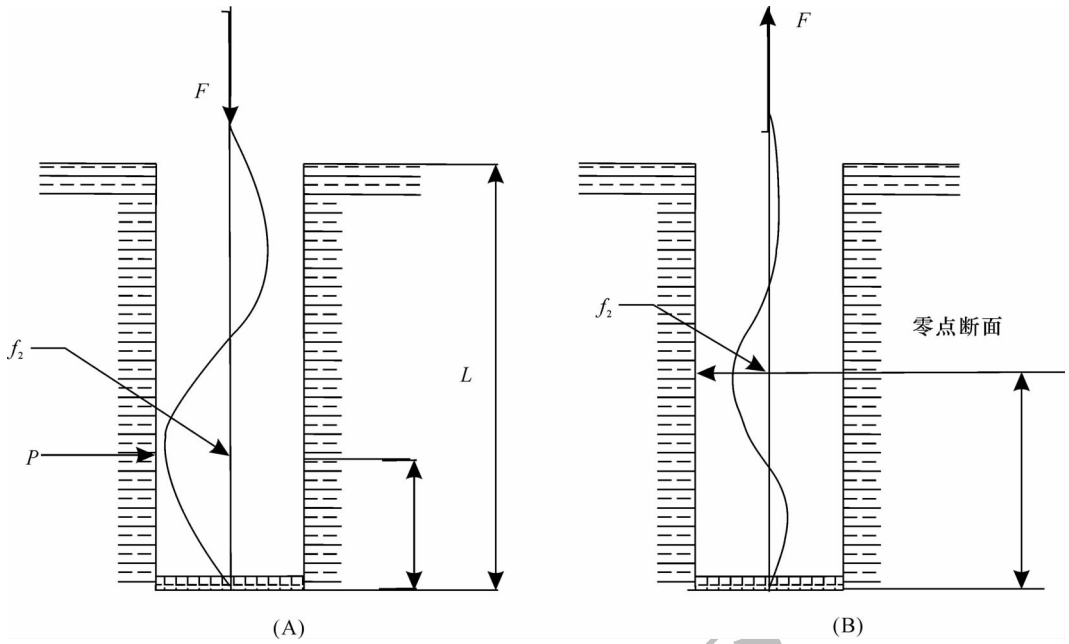

图 1 钻杆受力图

Fig. 1 Drill pipe stresses

A – 加压钻进;B – 减压钻进; L – 孔深;H – 折断孔深;P – 合成应力;f_2 – 钻杆弯曲最大挠度

A – pressurized drilling; B – reduced-pressure drilling; L – hole depth; H – broken depth; P – resultant stress; f_2 – the maximum deflection of drill pipe

终会导致严重的后果:钻杆弯曲严重,钻压加不到孔低,易压垮地层,造成地层坍塌、钻孔弯曲;漏失严重,钻杆处于干摩擦状态、孔内堆积物较多,重复破碎严重(石得权,2010)。

ZK2508 钻孔施工过程中共发生 6 次钻杆折断现象。事故原因分析:一是钻孔级配不合理。开孔 Φ108 套管下完后,直接用 Φ73 钻杆钻进,孔壁间隙大,钻压难以有效施加至钻头,钻进时效提不上去,钻杆折断频繁;二是钻压过大。前期对地层认识不足,加之全液压钻机动力大,一味求快加大钻压,应力集中导致钻杆折断;三是冲洗液配比不合理导致局部出现塌孔现象,断钻事故头难以找到而情况恶化。

现场采取的解决措施有:改善钻孔结构、钻杆级配,减小钻孔环状间隙,减小钻杆弯曲挠度和弯曲应力,增加半波长度。建议将钻杆与接头、钻杆与孔径和合理比值达到 0.89 ~ 0.93。二是改善冲洗液配比,有效保护孔壁,减少钻杆吸附,有效释放上部应力堆积;特别在更换冲洗液时,要保证孔内压力持续性,避免过激操作。三是提高钻杆强度,在现场更换了采用复合热处理的钻杆后,断钻问题明显减少。

3.3 冲洗液性能控制

ZK2508 钻进过程中常会出现钻孔漏失、冲洗液固相含量难以控制、地层坍塌、掉块、钻进速度慢等问题。现场具体解决方法有:增加循环槽长度,配备除砂器,加入选择性絮凝剂,降低固相含量;定期测定冲洗液密度、粘度,发现固相含量过高,立即进行稀释、沉降或更换泥浆;每个班组都要进行冲洗液参数测定,并保证现场冲洗液性能:漏斗粘度 28 s ~ 33 s,pH 8 ~ 10,含沙量 < 5%,密度 1.01 ~ 1.03 g/cm^3(刘选鹏等,2010),纤维素、黄原胶、聚丙烯酰胺等有机高分子材料使用前均需要提前充分预水化;保持搅拌机正常工作状态;保证冲洗液中一定的钾离子浓度,定时补充 KCl;在砂岩等不稳定地层适当提高冲洗液密度以平衡地层压力(曾祥熹等,1981)。

3.4 钻进参数的控制

钻进技术参数的控制,主要是指针对当前孔深、地层等情况,对钻压、钻速、泵压、扭矩以及冲洗液性能等参数的控制。表 2 是 ZK2508 孔在不同孔深、地层情况下各个参数的实时记录,能够正确反应孔内情况并为处理措施提供依据。复杂地层钻进应当坚持轻压吊打的原则,控制钻速和钻压,时刻关注扭矩情况,当出现跳跃式进尺时说明钻进参数配比不合理,及时调整保证平稳快速钻进(孙建华,2006)。

地质勘探

表 2　技术参数汇总表

Table 2　Summary of technical parameters

日期	孔深/m	地层岩性	加(减)压/kg	转速/r/m	扭矩/N/m	泵压/MPa	漏斗粘度/s	密度/g/cm^3	pH	钻进时效	备注
3.11	42	覆盖层	加 600	100 ~ 150	200 ~ 400	无	33	1.13	9	快	开孔
3.17	56	紫红色泥岩	加 200	200 ~ 300	200 ~ 400	0.7	37	1.12	8	快	下套管
3.18	134	红砂岩	加 100	250 ~ 350	200 ~ 400	0.7	27	1.03	8	跳跃	下套管后
3.21	241	蓝灰色泥岩、砂岩	减 300	300 ~ 400	300 ~ 500	1.1	30	1.05	8	跳跃	
3.23	289	蓝灰色泥岩、砂岩	减 600	220 ~ 280	400 ~ 500	1.3	28	1.07	8	慢	更换泥浆
3.25	320	灰色泥岩、砂岩	减 800	200 ~ 350	400 ~ 600	1.3	28	1.05	9	快	
4.4	534	煤层	减 1800	150 ~ 220	500 ~ 600	2.4	31	1.03	8	跳跃	终孔

4　全液压钻机应用于金刚石小口径钻进优缺点分析

ZK2508 是首例在该地区使用全液压钻机配合金刚石复合片钻头绳索取心技术成功钻穿目的地层的钻孔。在此仅就西安探矿机械厂生产的全液压钻机在现场应用过程中发现的优势与不足予以阐述。

首先全液压钻机相对于之前普通岩心钻机不论是在技术上、动力上、安全性上、操作上以及劳动强度上都是质的突破,也是钻探技术向前发展的形势所趋。在本次煤田钻探应用上突出的几个优势有:突出的微电脑控制自动钻进系统,可根据地层情况调节钻进参数,初步实现智能操作;较高的转速与合理的转速范围,能够有效提高金刚石小口径钻进速度;动力头行程长,有效减少倒杆次数,防止岩心堵塞,提高岩心的采取率;动力头与夹持器配合,可实现机械拧卸钻具,并配有液压动力钳,有效提高钻进效率并降低劳动强度;整机模块化一体设计,配备履带和钻探,大大减少工人劳动强度并有效提高现场施工的安全性(鄢泰宁,2001;张伟,2007)。

与此同时,由于国内自主设计小口径岩心钻探全液压钻机还处于起步阶段,技术以及现场施工经验还存在不完善方面,具体表现在:微电脑自动控制数字显示技术还不够成熟,有时不能够真实的反应钻孔内情况;钻工们习惯于液压表操作,对数字显示操作经验较少;自带钻塔高度有限,处理事故的能力相对较差;设计中搅拌机考虑的较少,现场施工过程中,搅拌机经常出现故障;钻机照明设备相对欠缺,夜间施工需要另外配备发电机照明;钻塔上缺乏扶正机构,特别在钻进斜孔时,上下钻与添加钻杆时有诸多不便;液压系统的密封不够理想,在高强度、高负荷下工作常会出现漏油问题;对钻工保养维修的技能要求较高。

5　结论

实践证明,金刚石复合片钻头是钻进煤田沉积地层的理想钻头,这种钻头寿命长,节约大量的辅助时间,并且钻进速度快,转速低,在松软、破碎地层,尤其是煤层,采取率高,岩心完整,可大幅度降低成本,值得推广应用。

煤田勘探的钻机相对于石油、天然气行业比较落后,全液压钻机是该类型钻机的发展趋势,目前国外生产技术已经比较成熟,国内的技术也有了长足的进步,但仍有不尽人意的地方。ZK2508 成功钻进证明引进使用全液压钻机是非常有必要的。

冲洗液是此次钻孔顺利完成的关键,成功抑制页岩水化地层、有效平衡地层压力、减少漏失、保证了井眼轨迹的规则,在任何钻探施工中,都不能忽略冲洗液这一重要环节。

在现场施工过程中出现过很多问题,有经验也有教训,在文中都有论述,希望在煤田地层钻探施工中能有借鉴意义。

[References]

Dong Guang-zhi, Chang Xi-shun. 1994. The research on drill pipe break of diamond drilling in complex formation[J]. Geology and Prospecting, 22(3):63 - 66(in Chinese with English abstract)

Guo Jian-kang, Yan Jie-nian, Wang Kui-cai, Liu De-jun, Fan Wei-wang, Zhao Jian, Zhang Hong-jing, Xiao Jin-yu. 2005. Strong inhibitive KCl/Silicate based drilling fluid and its application in Sudan Block 6 [J]. DFCF, 22(1):14 - 18(in Chinese with English abstract)

Liu Guang-zhi. 1991. The hand book of diamond drilling [M]. Beijing: Geological Publishing House:223 - 245(in Chinese)

Liu Wei-ping, Hu Yuan-biao. 2009. Drilling fluids selection and lost circulation control technology in Jinchang gold mine[J]. Prospecting Work, 36(6):13 - 18(in Chinese with English abstract)

Liu Xuan-peng, Zheng Xiu-hua, Wang Zhi-min, Wang Jun, Jie Wei-quan. 2010. Study of the silicate fluid for prevention of borehole-wall collapse and its application to drilling in carbonaceous mudstone [J]. Geology and Exploration, 46(5):967 - 971(in Chinese with

地质技术

English abstract)

Mao Hong-jiang. 2011. Characteristics of borehole losses during drilling and composite plugging technology[J]. Geology and Exploration, 47(4): 686 – 691(in Chinese with English abstract)

Sun Ming-guang. 2002. The hand book of drilling and completion basic knowledge[M]. Beijing: Petroleum Industry Press :9 – 12(in Chinese).

Suo Zhong-wei, Wang Sheng. 2009. Drilling flush with wall protection and plugging[M]. Beijing: Geological Publishing House: 71 – 72 (in Chinese)

Sun Jian-hua, Zhang Yong-qin, Zhao Hai-tao, Liu Xiu-mei. 2006. Research on deephole wireline cored drilling tech in complicated stratum[J]. Prospecting Work, 34(5):46 – 50(in Chinese with English abstract)

Shi De-quan, Wang Zheng-min, Yan Zhi-hua. 2010. A study on drill hole-wall protection technologies in complicated strata of the Shizimiao Gold Mine[J]. Geology and Exploration, 46 (z): 1301 – 1304 (inChinese with English abstract)

Sun Ping-he, Wu Xiao-ming, Zhao Jun-wen, Zhao Ren-ming. 2010. Researchand application of sealing technologies in complex molybdenumstratum in Dabao mountain[J]. Geology and Exploration, 46(1):132 – 136(in Chinese with English abstract)

Xia Bai-ru. 1990. Test and research on drilling technological parameters with PDC bits[J]. Geosciencf, 4(3):120 – 126(in Chinese)

Yan Tai-ning. 2001. The technology of drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press :88 – 93(in Chinese)

Yan jie-nian. 2006. Drilling fluids technology [M]. Beijing: China Petroleum University Press :156 – 176(in Chinese)

Yao Er-cang, Zheng Xiu-hua, Yang Ai-jun. 2008. Application of recyclable foam mudin leaching in-situsandstonesty leuranium deposits[J]. Geology and Prospecting, (5) :87 – 89(in Chinese with English abstract)

Zeng Xiang-xi, Chen Zhi-chao, He Yu-ming. 1981. The protection, plugging and prag reduction of drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House :56 – 77(in Chinese)

Zheng Wei. 2007. Analysis on factors enfluencing drilling efficiency of d iam ond wire-line drillin[J]. Prospecting Work, (10) :22 – 34(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

董智广,常喜顺. 1994. 复杂地层金刚石钻进钻杆折断原因初探[J]. 煤田地质与勘探, 22(3):63 – 66

郭健康,鄢捷年,王奎才,刘德军,范维旺,赵健,张洪静,肖金裕. 2005. 强抑制性 KCl/硅酸盐钻井液体系及其在苏丹六区的应用[J]. 钻井液与完井液,22(1):14 – 18

刘光志. 1991. 金刚石钻探手册[M]. 北京:地质出版社:223 – 245

刘维平,胡元彪. 2009. 牡丹江金厂矿区钻井液选用与堵漏技术[J]. 探矿工程,36(6):13 – 18

刘选鹏,郑秀华,王志民,王军,解卫劝. 2010. 硅酸盐防塌泥浆研究及其在碳质泥页岩钻探中的应用[J]. 地质与勘探,46(5):967 – 971

毛洪江. 2011. 地矿钻探井漏特点及复合堵漏技术[J]. 地质与勘探, 47(4):686 – 691

孙明光. 2002. 钻井、完井工程基础知识手册[M]. 北京:石油工业出版社:9 – 12

索忠伟,王生. 2009. 钻孔冲洗与护壁堵漏[M]. 北京: 地质出版社: 71 – 72

孙建华,张永勤,赵海涛,刘秀美. 2006. 复杂地层中深孔绳索取心钻探技术研究[J]. 探矿工程,34(5):46 – 50

石得权,王政敏,颜志华. 2010. 狮子庙金矿田复杂地层护壁技术探索[J]. 地质与勘探,46(z): 1301 – 1304

孙平贺,乌效鸣,赵均文,赵仁明. 2010. 大宝山复杂钼矿地层钻孔堵漏技术研究与应用[J]. 地质与勘探,46(1) :132 – 136

夏柏如. 1990. 复合片钻头钻进规程参数的试验研究[J]. 现代地质. 4(3):120 – 126

鄢泰宁. 2001. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社:88 – 93

鄢捷年. 2006. 冲洗液工艺学[M]. 北京:中国石油大学出版社:26 – 57

要二仓,郑秀华,杨爱军. 2008. 可循环微泡沫泥浆在地浸砂岩铀矿中的应用[J]. 地质与勘探, (5):87 – 89

曾祥熹,陈志超,何玉明. 1981. 钻孔护壁堵漏与减阻[M]. 北京:地质出版社:56 – 77

张伟. 2007. 金刚石绳索取心钻进施工效率影响因素分析[J]. 探矿工程,(10):22 – 34

Research and Application of Drilling Technology in Coal fields of the Yulin Area, Shaanxi Province

LIU Wei-ping[1,2], ZHANG Bo[3], ZHENG Xiu-hua[1]

1. *China University of Geosciences, Beijing* 100083;

2. *No.7 Detachment Brigade of Chinese People's Armed Police Force, Yantai, Shandong* 264004;

3. *Institute of Geological Prospection and Design ,Xi'an, Shaanxi* 710000)

Abstract: Single-tube drilling is usually used for prospecting coal formation in the Yulin area, Shanxi Province, which is a kind of backward technique with low drilling efficiency. To solve this problem, the PDC bit wire-line core drilling technology has been employed, coupled with the microcomputer controlled all-hydraulic operated drill rig, which obtained good results. Several aspects of this technology are presented in this article, including the design of drilling fluids and drilling parameters, problems and treatments of ZK2508 during the drilling process, the summary of experiences, and the analysis of the strengths and weaknesses of all-hydraulic operated drill rig made in China based on in-site drilling. Some techniques mentioned in this article are worthy to be used for reference in drilling of coal fields.

Key words: coal field drilling, PDC bit, drilling fluid, all-hydraulic operated drill rig, wire-line core drilling

地质勘探