

雄安新区地热 D20 井钻井液固控循环系统应用分析

冯美贵^{1,2}, 翁 炜^{1,2}, 刘家荣^{1,2}, 李 超^{1,2}, 蒋 睿^{1,2}, 赵志涛^{1,2},
刘文武^{1,2}, 欧阳志勇^{1,2}, 徐军军^{1,2}, 郭 坤^{1,2}, 贺云超^{1,2}

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心,北京 100083)

摘要:根据环保要求和雄安新区地热 D20 探采井钻探工程需求,开展钻井液固控循环系统研究和应用效果分析工作。整套系统由 4+1 个模块化封闭罐体组成,配置五级净化设备,满足钻探实施过程中钻井液的配制、储备、循环、净化、补给、加重及井下复杂情况处理等工艺需求与闭环处理环保要求。现场应用表明,系统满足绿色勘查要求和 D20 探采井钻探工程需求,但在结构设计及优化配置等方面有待进一步改进,并提出优化建议。

关键词:雄安新区;地热钻探;钻井液;固控循环系统;环保

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2020)10-0038-05

Drilling fluid solid control circulation system for drilling of geothermal exploration and production Well D20 in Xiongan New Area

FENG Meigui^{1,2}, WENG Wei^{1,2}, LIU Jiarong^{1,2}, LI Chao^{1,2}, JIANG Rui^{1,2}, ZHAO Zhitao^{1,2},
LIU Wenwu^{1,2}, OUYANG Zhiyong^{1,2}, XU Junjun^{1,2}, GUO Kun^{1,2}, HE Yunchao^{1,2}

(1.*Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;*

2.*Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China*)

Abstract: According to the requirements of environmental protection and drilling of geothermal exploration and production Well D20 in Xiongan New Area, the research and application effect analysis of the drilling fluid solid control circulation system are carried out. The whole system is composed of a “4+1” modular closed tank body equipped with five-level purification facilities, which can meet the process requirements for treatment of downhole complex situations, such as drilling fluid make-up, storage, circulation, purification, replenishment, dosing, weighting; as well as the environmental requirements for closed-loop circulation. The field application shows that the system can meet the requirements of green exploration and drilling of exploration and production Well D20, but it needs to be further improved in terms of structural design and optimal configuration. Some suggestions are put forward in the hope of providing reference and guidance for the reasonable practicability of system design and configuration and the economy of drilling engineering.

Key words: Xiongan New Area; geothermal drilling; drilling fluid; solid control circulation system; environmental protection

收稿日期:2020-03-20; 修回日期:2020-07-20 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.10.007

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“雄安新区地热清洁能源调查评价(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20189625)、“共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价(北京探矿工程研究所)”(编号:202027000000180204)、“南方重点地区 1:5 万页岩气地质调查(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20201108)、“合肥盆地及周缘油气资源战略调查(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20201111)

作者简介:冯美贵,女,汉族,1981 年生,高级工程师,机械工程专业,从事钻井液固相控制与废浆处理技术装备和岩土钻掘机具的研发工作,北京市海淀区学院路 29 号,rosy03250186@126.com。

通信作者:翁炜,男,汉族,1977 年生,室主任,教授级高级工程师,地质工程专业,博士,从事地质钻探及岩土钻掘机具研究与开发工作,北京市海淀区学院路 29 号,wengw77@163.com。

引用格式:冯美贵,翁炜,刘家荣,等.雄安新区地热 D20 井钻井液固控循环系统应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):38-42,60.

FENG Meigui, WENG Wei, LIU Jiarong, et al. Drilling fluid solid control circulation system for drilling of geothermal exploration and production Well D20 in Xiongan New Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):38-42,60.

0 引言

钻井液被称为“钻井的血液”,其性能的好坏直接关系到钻井的速度和质量。现代钻井技术的不断发展对钻井液的性能提出了更高的要求,特别是钻井液固控技术已成为科学钻井的重要组成部分。固控系统的合理配置与使用,对钻井工程的环境效益和经济效益有着重要的影响。本文笔者根据雄安新区地热 D20 探采井钻探工程需求开展钻井液固控循环系统研究,结合我国地质钻探现状和发展前景分析^[1],并针对应用过程中存在的问题和系统发展趋势,强化技术创新,提出改进建议。

1 系统功能与配置

1.1 总体方案

钻井液固控循环系统符合雄安新区环保要求,满足钻井液不落地绿色勘查要求;符合 ZJ30DB 型钻机的配套要求,满足 2500~3000 m 钻深、终孔直径 ≤ 152 mm 及局部井段硬岩取心要求的地热 D20 探采井工程实施,适应野外钻探作业防渗漏、耐高

温、防爆、防腐蚀、防雨等工况要求。

整套系统由沉砂罐、净化罐、循环罐、制浆罐、配药罐等 4+1 个模块化封闭罐体组成,配置振动筛、真空除气器、除砂器、除泥器、离心机五级净化设备^[2-10],满足钻井液的配制储备、循环、净化、补给加重及井下复杂情况处理等工艺需求与现场钻井液循环净化闭环处理要求,提供优质钻井液循环介质,确保钻探工程环保、安全、优质、高效地顺利实施。

1.2 技术参数

系统主要由 4 个钻井液罐、1 个配药罐及 2 个配重钻机底座的清水罐组成,其中 4 个钻井液罐、1 个配药罐的主要技术参数如下(不含清水罐)。

总容积:136 m³,有效容积:125 m³。

泥浆枪管线额定压力:6.4 MPa;水管线额定压力:0.5 MPa。

最大处理量:200 m³/h;总装机功率:320 kW。

1.3 配套设备

主要配套设备如表 1 所示。

1 号罐设有 2 个隔仓,分别为沉砂仓和除气仓。

表 1 系统主要配套设备
Table 1 Main auxiliary equipment

设备名称	型号	技术描述	数量	
1 号罐	沉砂罐	9000 mm×2300 mm×1800 mm	有效容积 27.5 m ³ ,分锥形仓	1 个
	振动筛	ZDS160	处理量 160 m ³ /h,振动轨迹直线,电机功率 1.86 kW×2	2 台
	真空除气器	ZCQ1/4	处理量 3 m ³ /min,真空泵功率 2.2 kW,主电机功率 15 kW/6 级	1 台
	补给砂泵	SB4×3-11	处理量 60 m ³ /h,电机功率 11 kW	1 台
2 号罐	净化罐	9000 mm×2300 mm×1800mm	有效容积 28.9 m ³ ,分两仓	1 个
	除砂器	CSQ250×2	处理量 200 m ³ /h,旋流器尺寸 250 mm×2 个,分离点 44~74 μm	1 台
	除泥器	CNQ100×10	处理量 200 m ³ /h,旋流器尺寸 100 mm×10 个,分离点 15~20 μm	1 台
	砂泵	SB8×6-13	处理量 200 m ³ /h,电机功率 55 kW,同时做泥浆枪供液泵用	2 台
3 号罐	循环罐	9000 mm×2300 mm×1800 mm	有效容积 37.3 m ³ ,分两仓	1 个
	离心机供液泵	5.5 kW/4 级 50 Hz	防爆型,杆泵	1 台
	离心机	LW450×1000 N	处理量 50 m ³ /h,分离点 5~7 μm,转速 2200 r/min,转鼓 Ø450 mm	1 台
4 号罐	制浆罐	9000 mm×2300 mm×1800 mm	有效容积 28.9 m ³ ,不分仓	1 个
	配浆漏斗	SLH150×50	处理量 200 m ³ /h,进料口直径 150 mm,漏斗尺寸 Ø600 mm	1 台
	加重砂泵	SB8×6-12	处理量 200 m ³ /h,电机功率 45 kW,同时做泥浆枪供液泵用	1 台
5 号罐	配药罐	Ø1500 mm×1500 mm	有效容积 2.5 m ³	1 个
	立式搅拌器	JBQ-5.5 L	配备 650 mm 叶轮,电机功率 5.5 kW	1 台
附件	泥浆枪	NJQ80A-3X	1、2、3、4 号罐用,旋转式,喷头数量 3	7 件
	卧式搅拌器	JBQ-11 kW	电机功率 11 kW,叶轮转速 60 r/min,叶轮直径 950 mm	7 台

沉砂仓也可作为补给仓,起下钻向孔内及时补给泥浆。沉砂仓底部为锥形结构,其上有双联振动筛和 1 台 SB4×3-11 型补给泵;除气仓上有 1 台卧式搅拌器、1 台真空除气器和 1 套泥浆枪。振动筛可清除 74 μm 及以上固相颗粒,也可根据地层特性匹配

更换筛网目数。

2 号罐设有 2 个隔仓,分别为除砂仓和除泥仓,隔仓间用罐底阀连通。除砂仓上有 1 台除砂器、1 台卧式搅拌器和 1 套泥浆枪。除泥仓上有 1 台除泥器、1 台卧式搅拌器和 1 套泥浆枪;除砂仓端侧的下

方有2台并联的SB8×6-13型砂泵,分别为除砂器或除泥器供液。其中除砂器分离点为44~74 μm,除泥器分离点为15~20 μm。

3号罐设有2个隔仓,分别为离心仓和储浆仓,隔仓间用罐底阀连通。离心仓上有1台离心机供液泵、1台离心机、1台卧式搅拌器和1套泥浆枪;储浆仓上有1台卧式搅拌器和1套泥浆枪。其中离心机可清除5 μm及以上无用固相。

4号罐设有2个隔仓,分别为储浆仓和加重仓,隔仓间用罐底阀连通。储浆仓上有1台卧式搅拌器和1套泥浆枪;加重仓上有1台卧式搅拌器和1套泥浆枪;加重仓端侧的下方有1台SB8×6-13混合泵和1台混合漏斗,用于配制加重泥浆。

5号罐为圆形配药罐,上有1台立式搅拌器,用于特殊工况下泥浆配制。

1.4 电控与照明系统

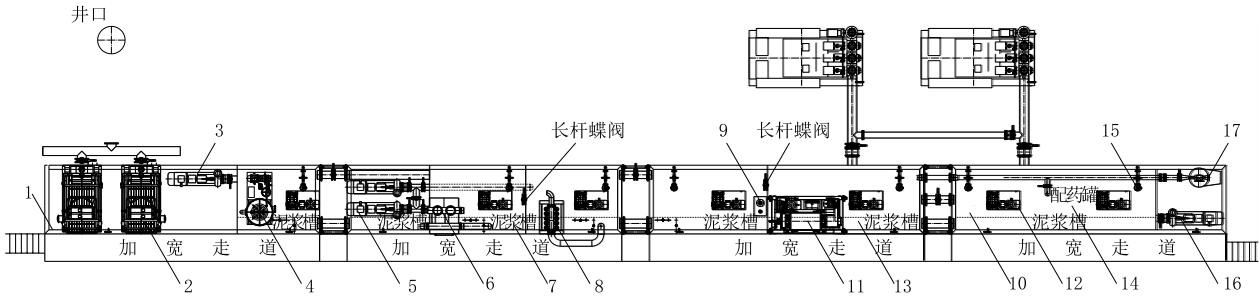
电控系统采用分散控制与MCC房PLC集中控制相结合,既便于近距离对设备的运行进行观察监视,也便于远程控制。固控系统中功率为30 kW以下的电机不经MCC房集中控制,仅提供三相电源,如

振动筛、补给砂泵、除气器、搅拌器、离心机和离心机供液泵等,这些电机通过本地防爆磁力启动器实现控制;功率>30 kW的电机经MCC房集中控制,如除砂器/除泥器用砂泵、加重砂泵等,这些电机均采用两地控制(MCC房PLC集中控制或就近分散控制)。功率>30 kW的电机采用软启动器启动。所有电机控制回路均具有过载、短路保护。采用电缆槽、穿线钢管、防爆挠管保护布线。控制按钮站设在就近控制,罐与罐间采用防爆插接件实现快速连接。

照明为一路控制,每个罐面安装2盏防爆荧光灯,每个泵仓下安装1盏防爆荧光灯。罐面灯架可放倒,高度、方向可调,电源可插拨。泵仓灯具为固定式,电源可插拨。

2 系统布局与工艺流程

系统成一字形(见图1),4个钻井液罐并排依次布置,整体布局紧凑;整套系统工艺流程设计满足钻井液的筛分—除气—除砂—除泥—离心机5级固相控制、钻井液配置、加重、加药及储备等工艺要求。系统工艺流程见图2。



1—沉砂罐;2—振动筛;3—补给泵;4—除气器;5—除砂器/除泥器砂泵;6—除砂器;7—净化罐;8—除泥器;9—离心机供液泵;10—离心机;11—循环罐;12—制浆罐;13—搅拌机;14—配药罐;15—泥浆枪;16—加重砂泵;17—配浆漏斗

图1 系统平面布局

Fig.1 System layout plan

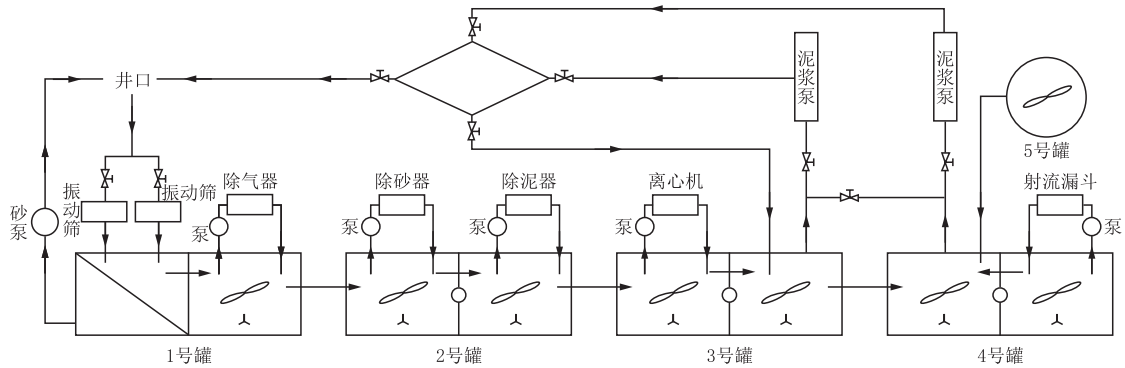


图2 系统工艺流程

Fig.2 System process flow chart

2.1 钻井液净化循环流程

钻井液净化循环工艺流程满足钻探实施过程中孔壁稳定,减少孔底岩屑重复破碎,提高钻进效率,钻井液循环利用,降低钻探成本。井口返回的钻井液由泥浆伞收集后通过高架泥浆管线输送泥浆分配器中,通过渡槽插板的调整可分别或同时输送到 1 号沉砂罐的双联振动筛,经过振动筛处理后进入沉砂仓;从沉砂仓出来的钻井液经过泥浆渡槽溢流进入除气仓,除气仓的钻井液经真空除气器处理后经过泥浆渡槽溢流进入 2 号净化罐上的除砂仓;除砂器砂泵吸入除砂仓的钻井液,将钻井液通过管线输送至除砂器,经过除砂器处理后钻井液溢流到除泥仓,除泥器砂泵吸入除泥仓的钻井液,除泥器处理后的泥浆经过泥浆渡槽溢流进入离心仓;离心机供液泵吸入离心机仓的钻井液,将钻井液通过管线输送至离心机,离心机处理后的钻井液经过泥浆渡槽溢流进入储浆仓,泥浆泵可吸入储浆仓的钻井液并输送至井内循环使用。然后通过罐底相通管线及泥浆泵吸入管线由泥浆泵重复泵入井内循环使用。

2.2 泥浆泵吸入工艺流程

泥浆泵通过吸入管线可吸入储浆仓与制浆罐内的钻井液,泥浆泵的吸入口采用法兰(或倒刺)安装方式,并安装有滤清器、泥浆过滤器,采用快装式过滤装置。

2.3 补给工艺流程

起钻过程中,补给泵可吸入补给仓的钻井液,输出至井内,维持井内钻井液柱压力,抵消地层压力;下钻过程中,溢流的钻井液通过溢流管、补给管线返回补给仓;可根据起钻前后补给罐中钻井液的容积变化,判断井下钻井液漏失情况。当补给仓需要钻井液时,可通过泥浆枪供液管线补充。

2.4 加重工艺流程

钻井液加重系统由加重泵、混合漏斗、吸入和排出管汇组成。加重泵和混合漏斗安装于 4 号罐的后端下部。加重泵通过加重吸入管汇吸入钻井液,并通过混合漏斗加重后,将加重的钻井液输送至储浆仓。加重泵还可把加重的钻井液通过罐边方管经泥浆枪将钻井液输送至 1~4 号罐各仓(除振动筛仓)中。

2.5 加药工艺流程

在配药罐里配好药的钻井液通过配药罐下部的法兰连接回路将配好药的钻井液输送至储浆罐内。

2.6 泥浆枪工艺流程

在罐的内侧方管设泥浆枪管线,泥浆枪管路由泥浆泵、或加重泵、或除砂器/除泥器砂泵供液,整个管路及管路上蝶阀等部件额定工作压力均 6.4 MPa,泥浆罐每个隔仓(除振动筛仓)设 1 只泥浆枪,并带蝶阀。可保证各仓泥浆枪的正常工作。罐间泥浆管线通过 6.4 MPa 锤击由壬连接。

2.7 清水工艺流程

在罐的外侧方管设一条清水管线,清水管线用以清洗罐面设备,在各罐面方管的适当位置装有 1 in(1 in=25.4 mm)出水口,可用于清洗罐面设备和罐面设备用水。

3 现场应用效果

钻井液固控循环系统应用于雄安新区地热 D20 探采井工程(见图 3)实施的全过程,现场应用结果表明,满足钻探工程钻井液综合处理工艺需求,可及时有效清除有害固相,降低钻井液固相含量,改善钻井液性能,延长钻具和钻井泵寿命,提高钻探效率,确保钻探工程顺利实施;同时可减少废浆排放,降低钻探工程对环境的污染,符合雄安新区对井场环保要求,满足钻井液循环净化不落地绿色勘查要求;处理后的液相循环利用,减少钻井液材料消耗,固相集中回收处理,符合节能减排要求。



图 3 钻井液固控循环系统在雄安新区地热 D20 探采井工程应用现场

Fig.3 Field application of the drilling fluid solid control circulation system in drilling of geothermal exploration and production Well D20 in Xiongan New Area

4 建议

综合现场应用过程中存在的问题和国内外系统发展趋势^[8,11-16],在罐体和净化设备的结构设计及优化配置等方面提出如下建议,希望对系统设计配置的合理实用性及钻探工程的经济性等方面有借鉴和指导意义。

(1)建议增大罐体尺寸、减少罐体数量,罐体高度便于运输的同时综合考虑工作人员进入罐体内清理沉渣与维修保养设备时安全性和最优操作空间,满足人体工学设计。

(2)罐体四角有死角,搅拌不均匀,不利于清砂,同时罐体空间利用率不高;建议改为圆弧底型罐体,这种罐底不利于沉砂,搅拌更加充分,减少罐死角和钻井液堆积,便于清砂,提高罐体有效容积,也有利于外置管线的布置和拖运。

(3)振动筛激振力方向与激振电机底座联接螺栓的轴线不平行,导致螺栓受剪切力,易疲劳剪切断裂,筛网易破损寿命短,建议深化振动筛工作机理研究,将激振动力与筛面钻井液固相颗粒运移轨迹相结合进行动力学数值模拟仿真分析,进一步优化振动筛筛箱、筛网与激振电机底座的结构设计、材料选型和加工工艺等,提高整机和零部件的可靠性,延长设备寿命,提升净化效果,降低劳动强度和维护保养成本。

(4)建议将激振电机改为变频型,通过调节激振力和筛网目数与地层特性和钻井液体系相匹配,及时有效清除钻井液固相含量,并拓展清除粒度范围,减轻下一级净化设备的负载和磨损。

(5)除砂器和除泥器的供液砂泵功率大、能耗高,泵轴密封件易损坏,砂泵压力易穿刺旋流器并导致岩屑更加细化;且除砂器和除泥器的净化处理效果不够理想,存在跑冒漏钻井液现象;离心机差转速固定,不能根据地层特性和钻井液性能参数适时调节,建议改为变频调速智能型。

(6)建议将五级固控系统配置优化为二级固控,即变频超强振动筛与变频调速智能离心机组成的二级固控,既可根据地层特性和钻探工艺对不同钻井液性能参数的需求适时调节,亦可简化工艺流程,节能降耗,提高净化设备综合利用率和系统可靠性,降低钻探工程综合成本。

参考文献(References):

- [1] 王达,李艺,周红军,等.我国地质钻探现状和发展前景分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):1-9.
WANG Da, LI Yi, ZHOU Hongjun, et al. Analysis on present situation of geological drilling in China and the development prospects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):1-9.
- [2] 张文正,王强,王连云,等.ZYG320型钻井液固控系统的开发与研制[J].石油机械,2001,29(10):27-29.
ZHANG Wenzheng, WANG Qiang, WANG Lianyun, et al. Model ZYG320 solid control system for drilling fluid[J]. China Petroleum Machinery, 2001,29(10):27-29.
- [3] 张建军,张子胜,王维忠,等.GKXT200型钻井液固控系统的研制[J].石油矿场机械,2003,32(1):40-42.
ZHANG Jianjun, ZHANG Zisheng, WANG Weizhong, et al. Development of model GKXT200 solid control system of drilling fluid[J]. Oil Field Equipment, 2003,32(1):40-42.
- [4] 王洪升,龚志敏,黄勇,等.“322”固控对调整钻井液性能的功效发挥及应用[J].钻井液与完井液,2006,23(1):84.
WANG Hongsheng, GONG Zhimin, HUANG Yong, et al. The effect on properties of drilling fluid of “322” solid control technology and its application[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(1):84.
- [5] 钱德宏,李俊,俞光印,等.ZJ90DB型钻机泥浆净化系统设计与制造技术[J].石油矿场机械,2007,36(10):50-54.
QIAN Dehong, LI Jun, YU Guangyin, et al. Design of mud purification system and its fabrication for ZJ90DB Rig[J]. Oil Field Equipment, 2007,36(10):50-54.
- [6] 柴占文,牟长清,侯召坡,等.4000m低温车载钻机固控系统的研制[J].石油机械,2011,39(10):57-60.
CHAI Zhanwen, MOU Changqing, HOU Zhaopo, et al. Research on the solid control system of the 4000m low-temperature truck-mounted rig [J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(10):57-60.
- [7] 张虎山,谢陈平,杨建辉,等.沙漠快速移运钻机固控系统的研制[J].石油机械,2014,42(11):60-63.
ZHANG Hushan, XIE Chenping, YANG Jianhui, et al. Development of solid control system of fast moving rig for desert drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2014,42(11):60-63.
- [8] 张鹏,刘战锋,张虎山,等.8000m超深井钻机固控系统的研制[J].石油机械,2016,44(10):47-51.
ZHANG Peng, LIU Zhanfeng, ZHANG Hushan, et al. Development of solid control system for 8000m ultra-deep drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(10):47-51.
- [9] 张虎山,陆俊康,刘远波,等.5000m沙漠钻机固控系统的研制及应用[J].石油机械,2018,46(2):23-28.
ZHANG Hushan, LU Junkang, LIU Yuanbo, et al. Development of solid control system on 5000m desert rig[J]. China Petroleum Machinery, 2018,46(2):23-28.
- [10] 孙晓微,浅析7000m钻机固控系统的应用[J].企业技术开发,2019,38(8):56-58.
SUN Xiaowei. Brief analysis solid control system of 7000m drilling rig [J]. Technological Development of Enterprise, 2019,38(8):56-58.
- [11] 张玉华,李国华,熊亚萍,等.钻井液固控系统配套现状及改进措施[J].石油矿场机械,2007,36(12):84-87.
ZHANG Yuhua, LI Guohua, XIONG Yaping, et al. The current status and improvement methods of mud solid control system[J]. Oil Field Equipment, 2007,36(12):84-87.
- [12] 王宗明,王瑞和,油田钻井固控技术新概念浅析[J].石油钻采工艺,2008,30(6):34-36.
WANG Zongming, WANG Ruihe. New concepts concerning solid control technology in oil drilling engineering [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(6):34-36.

- depth analysis of FLAC3D 5.0[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [5] 黄士奎,赵杰,刘道勇.基于 FLAC^{3D} 预应力锚杆抗滑桩支护边坡地震响应分析[J].地震研究,2016,39(1):74-78.
HUANG Shikui, ZHAO Jie, LIU Daoyong. Seismic response analysis for the prestressed anchor anti-slide pile supporting slope based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Seismological Research, 2016,39(1):74-78.
- [6] 庞训鹏,曹日跃.基于 FLAC3D 的锚杆支护边坡地震稳定性分析[J].兰州工业学院学报,2016,23(4):21-24.
PANG Xunpeng, CAO Riyue. Seismic stability analysis of side slopes with bolt support based on FLAC3D[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2016, 23(4): 21-24.
- [7] 马小斐,李海平,徐建强.基于 FLAC^{3D} 的深挖边坡锚杆支护探讨[J].公路交通科技,2019,35(4):14-20,27.
MA Xiaofei, LI Haiping, XU Jianqiang. Discussion on design of deep excavation slope anchor support based on FLAC^{3D}[J]. Technology of Highway and Transport, 2019,35(4):14-20, 27.
- [8] 袁东进.基于 FLAC^{3D} 的边坡锚固效果及锚杆受力分析[J].人民黄河,2016,38(1):102-104,108.
YUAN Dongjin. Slope stability analysis and anchor bolt stress study based on FLAC^{3D}[J]. Yellow River, 2016,38(1):102-104,108.
- [9] 张卢明,郑明新,何敏,等.深基坑开挖与锚杆支护 FLAC^{3D} 数值模拟分析[J].华东交通大学学报,2007,24(5):9-12.
ZHANG Luming, ZHENG Mingxin, HE Min, et al. FLAC^{3D} numerical simulation analysis of foundation excavation and bolting[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(5):9-12.
- [10] 张红涛.北京中关村科技园区丰台园东区基坑工程支护设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):64-68, 74.
ZHANG Hongtao. Design and construction of foundation pit support in Fengtaiyuan east area of Zhongguancun Science and Technology Park, Beijing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):64-68, 74.
- [11] 王谊.桩板抗滑结构中预应力锚索锚固段受力动态响应特性研究[J].路基工程,2012(3):137-140.
WANG Yi. Research on dynamic force response of anchorage segment of prestressed anchor cable in pile-board anti-sliding structure[J]. Subgrade Engineering, 2012(3): 137-140.
- [12] 刘金龙,栾茂田,许成顺,等. Drucker-Prager 准则参数特性分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4009-4015.
LIU Jinlong, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Study on parametric characters of Drucker-Prager criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(S2):4009-4015.
- [13] 张颖,陈晨,王彧佼,等.基于 FLAC^{3D} 对大连某工程桩基承载力数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):65-71,85.
ZHANG Ying, CHEN Chen, WANG Yujiao, et al. FLAC^{3D} based numerical simulation of bearing capacity of pile foundation in Dalian[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):65-71,85.
- [14] 吴德成,李永旗,陈燕,等.运用 FLAC^{3D} 分析澜沧江某边坡地震稳定性[J].安全与环境工程,2011,18(6):15-19.
WU Decheng, LI Yongqi, CHEN Yan, et al. FLAC^{3D} analysis on the slope seismic stability of Lancang River[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011,18(6):15-19.
- [15] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):21-26.

(编辑 王建华)

(上接第 42 页)

- [13] 王宗明,王瑞和.中浅井钻机固控设备应用效果研究[J].石油矿场机械,2009(6):1-3.
WANG Zongming, WANG Ruihe. Study on effect of solid control equipment on shallow and mid-deep well rig[J]. Oil Field Equipment, 2009(6):1-3.
- [14] 许锦华,陈龙,柴占文,等.圆形罐钻井液固控系统的研制与应用[J].石油机械,2009,37(5):41-42.
XU Jinhua, CHEN Long, CHAI Zhanwen, et al. Research and application of the drilling fluid solid control system of the round tank[J]. China Petroleum Machinery, 2009,37(5):41-42.
- [15] 张晓东,何石,苟如意,等.超深井钻井液固控系统配套合理性探讨[J].石油钻采工艺,2013,35(6):52-54.
ZHANG Xiaodong, HE Shi, GOU Ruyi, et al. Matching rationality discussion of ultra-deep well drilling fluid solid control system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6):52-54.
- [16] 雷先革,牟长清,涂志威,等.钻井固控环保一体化装备的研制与应用[J].石油机械,2017,45(12):28-31.
LEI Xiange, MOU Changqing, TU Zhiwei, et al. Development and application of integrated drilling solid control and environmental protection equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(12):28-31.

(编辑 韩丽丽)