超星·期刊

钻井液冷却装置技术发展现状及展望

朱浩铭[1,2]，彭俊威[1,2]，郗秦阳[1,2]，戴启平[1,2]，李　森[1,2]，王博芳[1,2]，唐　霄[1,2]
（1.中油国家油气钻井装备工程技术研究中心有限公司，陕西 宝鸡 721002；
2.宝鸡石油机械有限责任公司，陕西 宝鸡 721002）

摘要：随着国内油气钻井向着万米深井开发，钻井过程中井底温度越来越高，因此需要对钻井液降温冷却以保护井下工具仪器。而国内钻井液冷却装置普遍存在设备超大、超高以及设备冷却降温幅度不大的现状。本文从介绍国外钻井液冷却装置技术现状出发，阐述了国外钻井液冷却装置技术现状；同时结合国内钻井工况，重点分析了国内自然冷却、开式冷却、闭式冷却和强制冷却4种钻井液冷却装置的工作原理、优缺点和适应范围。结合国内钻井技术发展现状，为保障冷却装置降温效果，结合道路运输和环保要求，分析了冷却装置降温机理研究、工程适应性、应用局限性和装置可靠性等关键技术难题，提出了冷却装置技术研发思路，为开发研制适应性强、可靠性高和冷却效果显著的装置提供参考。

关键词：钻井液；冷却装置；换热器；冷却塔；制冷机组
中图分类号：TE926；P634.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2024)02-0008-07

Technology development status and prospect of drilling fluid cooling equipment

ZHU Haoming[1,2], PENG Junwei[1,2], XI Qinyang[1,2], DAI Qiping[1,2], LI Sen[1,2], WANG Bofang[1,2], TANG Xiao[1,2]
(1. *CNPC National Petroleum Drilling Equipment Engineering Technology Research Center Company Limited, Baoji Shaanxi* 721002, *China*;
2. *CNPC Baoji Oifield Machinery Co., Ltd., Baoji Shaanxi* 721002, *China*)

Abstract: With the development of domestic oil and gas drilling toward 10,000 meters deep wells, the bottom hole temperature is getting higher and higher, so the drilling fluid needs to be cooled to protect downhole tools. In domestic drilling fluid cooling devices, the equipment is generally oversized, ultra-high and the cooling range of equipment is small. This paper starts from the introduction of the technical status of drilling fluid cooling devices at abroad. The working principle, advantages and disadvantages, and application range of four kinds of drilling fluid cooling devices, including natural cooling, open cooling, closed cooling and forced cooling, are emphatically analyzed in combination with domestic drilling conditions. In order to ensure the cooling effect of the cooling device, the paper analyzes the key technical problems of cooling mechanism, engineering adaptability, application limitation and equipment reliability in combination with the requirements of roads and environmental protection, and puts forward the technical research and development ideas of the cooling device of the cooling device in combination with the domestic drilling situation, providing guidance for the development of devices with strong adaptability, high reliability and remarkable cooling effect.

Key words: drilling fluid; cooling equipment; heat exchanger; cooling tower; refrigeration unit

收稿日期：2023-07-14；**修回日期**：2023-11-21　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2024.02.002
基金项目：中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“高端井筒工作液新材料新技术与装备研究”（编号：2021DJ4406）
第一作者：朱浩铭，男，汉族，1988年生，工程师，机械工程及其自动化专业，从事钻井新装备技术研究工作，四川省成都市成华区成济路3号（610000），bspengjw@cnpc.com.cn。
引用格式：朱浩铭，彭俊威，郗秦阳，等.钻井液冷却装置技术发展现状及展望[J].钻探工程，2024，51(2)：8-14.
ZHU Haoming, PENG Junwei, XI Qinyang, et al. Technology development status and prospect of drilling fluid cooling equipment[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 8-14.

超星·期刊

0　引言

随着深井、超深井和非常规水平井大力开发,在钻井过程中,地层温度随着深度不断升高,温度梯度为3 ℃/100 m,井底作业环境温度也随之增长。温度升高不仅会影响到钻井液性能,尤其循环温度超过165 ℃的井下环境,会导致RSS和MWD/LWD工具失效。目前常采用循环钻井液来降低井底温度,而另一种方式则是冷却钻井液。当地面钻井液温度降低27.8 ℃时,井下温度降幅可达18.3 ℃[1]。近几年国内非常规水平井井深不断增加,导致井底温度急剧升高,最高可达250 ℃,急需开发冷却功率大的钻井液冷却装置对钻井液进行冷却来保障钻井作业稳定可靠。为此,开展高温钻井液冷却装置技术分析,保障我国深井、超深井和水平井开发尤为重要[2]。本文在前人研究基础上,分析国内外成熟钻井液冷却装置产品特点和工作原理,针对当前钻井工况,解析钻井液冷却装置在使用中存在的问题,结合钻井工程需求,从产品工程适应性角度提出研制钻井液冷却装置关键技术特点,为研究开发钻井液冷却系统提供技术参考。

1　钻井液冷却装置国内外技术发展现状

1.1　国外钻井液冷却装置技术发展现状

国外对钻井液冷却技术研究较早,主要集中在天然气水合物勘探开采方面。由于天然气水合物钻井液需要冷却至0 ℃左右,钻井液冷却装置采用强制冷却,加之天然气水合物钻井液排量不高[3],强制冷却功率不大,冷却效果受环境温度影响较小。1988年,加拿大在波弗特海近海冻土层钻井中,采用钻井液冷却装置将钻井液冷却至−9 ℃;2003年,美国在阿拉斯加北坡天然气水合物试采中,将钻井液冷却至−5 ℃左右,天然气水合物钻井液冷却技术应用较成熟[4]。

美国DrillCool公司研制的钻井液冷却装置(图1)采用二级制冷方式,采用氨水制冷机组通过板式换热器制冷乙二醇溶液,冷却后的乙二醇溶液再通过螺旋换热器冷却钻井液,使钻井液温度维持在−2 ℃左右;美国NOV公司、Schlumberger Mi SWACO公司和荷兰Task Enviroimental Servicers公司则采用板式热交换器,将高温钻井液与载冷剂或冷水在板式热交换器中进行热交换,从而实现钻井液的冷却(图2)。新加坡FPT公司钻井液冷却系统采用喷淋方式,将载冷剂/冷却水直接喷淋到钻井液管线上,使载冷剂与高温钻井液最大面积接触,达到冷却钻井液目的[5-6]。由于地质条件不同,国外钻井液冷却装置在深井、超深井和水平井钻探中应用较少。

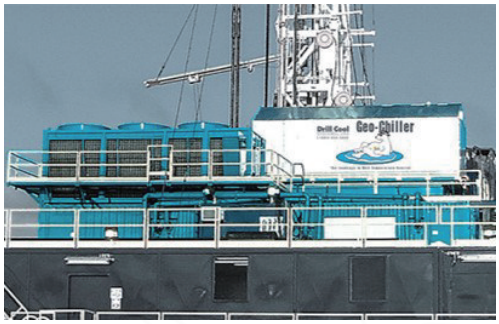


图1　DrillCool公司研制的钻井液冷却装置

Fig.1　DrillCool company drilling fluid cooling device developed

图2　NOV公司的钻井液冷却系统

Fig.2　NOV drilling fluid cooling system

国外钻井液冷却装置多用在海洋钻探领域,由于搭载在钻井平台上,使用海水或者空气作为冷却媒介,整机以模块化拼装而成,根据钻井工艺配置多组小模块换热单元,模块化设计,备份关键模块,工程适应性强,操作维护简单。

1.2　国内钻井液冷却装置技术现状

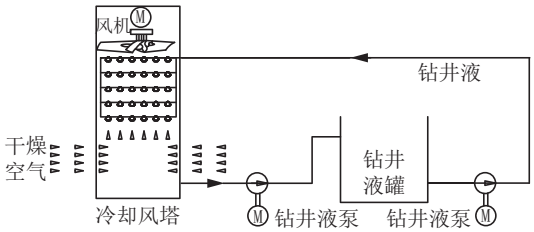
国内对钻井液冷却系统研究与应用从2007年开始,主要应用在冻土层天然气水合物钻探,至2012年取得了一定成果[6-8],近几年随着国内超深井和水平井大力开发,国内配套厂家借鉴国外冷却技术,结合国内钻井实际工况,研发了不同路线的钻井液冷却装置,主要类型有以下几种。

1.2.1　自然冷却型冷却装置

自然冷却型冷却装置主要由钻井液泵和冷却塔组成(图3)。工作原理是通过空气与热钻井液进行热交换,从而带走钻井液热量的方式达到降温的

超星·期刊

目的。这种冷却方式优点是无需冷却介质参与,利用快速流动的空气与钻井液进行充分热交换。由于空气与钻井液热交换系数较低,此种冷却方式需将钻井液自上而下进行点状喷射分散,增大与空气交换面积;同时利用风机使空气快速流动,与钻井液形成逆流式换热,空气流动风量越大,冷却效果越显著。这种冷却方式由于将钻井液暴露在空气中,会带走钻井液中水分和其他易挥发微量元素,会改变钻井液性能;同时热空气夹杂着矿物元素会污染大气,不符合绿色环保要求;但设备无需冷却介质参与,结构较简单,成本低。



(a)原理图

(b)实物图

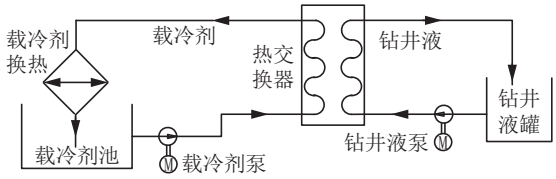
图3 自然冷却型冷却装置

Fig.3 Natural cooling type cooling equipment

1.2.2 开式换热型冷却装置

开式换热型冷却装置主要由钻井液泵、载冷剂泵、载冷剂散热器和热交换器等组成(图4)。工作原理是通过将钻井液和载冷剂在热交换器中进行热交换,载冷剂通过冷却水塔或散热器进行冷却,冷却后的载冷剂通过载冷剂泵循环与钻井液在热交换器中进行热交换[9],重复以上过程,进行钻井液冷却,载冷剂一般为水。

开式换热型冷却装置特点是钻井液冷却与载冷剂冷却在不同装置中进行,因此,可以将钻井液冷却与载冷剂冷却方式独立进行设计,换热功率可根据实际需求进行个性化设计;一般钻井液冷却采用板式换热器,钻井液流道较小,换热效率高,容易结垢堵塞和密封件老化,需对钻井液流道大小、单片厚度、换热效率与流阻匹配分析论证,形成最优



(a)原理图

(b)实物图

图4 开式换热型冷却装置

Fig.4 Open heat exchange type cooling equipment

冷却方案。板式换热器主要分为平板式、螺旋板式和板翅式,板式换热器体积小,采用逆流换热,换热效率较高,但换热器结构复杂,造价高,承压低,维护清洗困难[10-11],由于降温效果较好,适用于深井钻井平台。

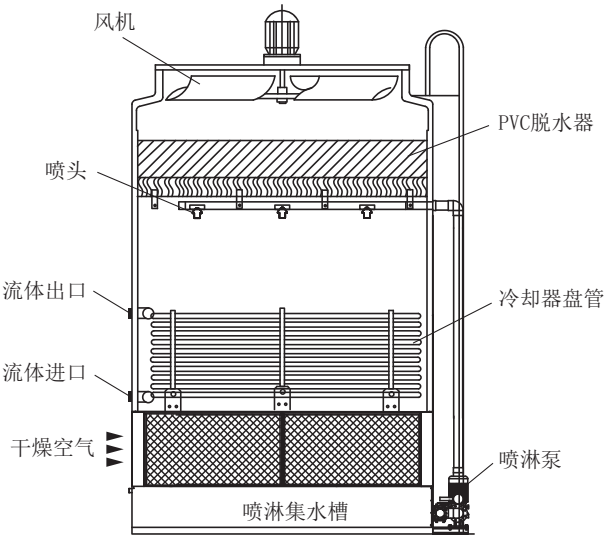
1.2.3 闭式换热型冷却装置

闭式换热型冷却装置(图5)主要由钻井液泵组和闭式冷却水塔组成,冷却机理为空气-水-钻井液的冷却模式,工作原理为钻井液与载冷剂在闭式冷却水塔进行冷却,载冷剂冷却钻井液后进入下方的散热填料,利用空气对载冷剂冷却。载冷剂循环冷却塔上层为钻井液冷却通道,下层为载冷剂冷却通道,在同一装置内进行钻井液冷却与载冷剂冷却。闭式换热型冷却装置特点是集成度高,一般采用大通径(Ø25 mm)不锈钢管作为钻井液流道,由于钻井液通道较大,降低了换热效率,导致不锈钢钢管铺设长度较大,需千米以上钢制盘管;当管道堵塞后,需对载冷剂循环冷却塔进行整体拆卸,但此种装置集成度高,随着作业时间不断增加,管壁结垢导致换热效率降低,同时装置属于超高超大设备,属超限运输范畴,对安装空间不受限和降温幅度要求不高的钻井平台较适用。

1.2.4 强制冷却型冷却装置

强强制冷却型冷却装置主要由2个热交换器、制冷机组、载冷剂池、钻井液泵、载冷剂泵和管汇组成。冷却机理为制冷机组-载冷剂-钻井液的模式。如图6所示,钻井液由钻井液泵泵入热交换器Ⅰ,与

超星·期刊



(a)原理图

(b)实物图

图5　闭式换热器型冷却装置

Fig.5　Closed heat exchanger type cooling equipment

载冷剂进行热交换,钻井液与载冷剂在热交换器Ⅰ中进行热交换,钻井液冷却后回到钻井液罐,达到钻井液降温目的;作为载冷剂的乙二醇溶液由载冷剂泵从载冷剂池依次泵入热交换器Ⅰ、热交换器Ⅱ,升温后的乙二醇溶液进入热交换器Ⅱ中,由制冷机组将载冷剂强制冷却后,返回载冷剂池[12-13],重复以上过程进行钻井液冷却。与闭式冷却装置不同的是,增加了制冷机组对载冷剂强制冷却。通过强制冷却机组可将制冷剂制冷至环境温度以下,可将钻井液降温幅度增大。强制冷却装置优点是通过制冷机组将载冷剂冷却到目标温度[14],可不受环境温度影响,但由于制冷机组受到井场供电、设备外形大小等限制,制冷功率一般不大,当钻井液排量增大时,强制冷却机组制冷功率不能完全满足钻井液连续作业工况,此种冷却装置一般用在天然气水合物勘探开发中。

2　关键技术问题

2.1　机理研究

(1)井筒循环温度影响因素众多,主要影响因素为井型、地层物性、钻井液物性、钻柱运动状态、正常钻井工况、复杂钻井工况等,需研究一套理论计算方法,建立全域井筒温度精确计算模型,分析工艺参数对温度循环影响因子[15-17],制定相应钻井工艺减少钻井施工对钻井液温升效应。

(2)影响钻井液换热器传热效率关键因素和作用机制还不清晰,可开展理论数值分析以及试验研究,揭示钻井液换热器热交换机制及效率提升方法,为突破大排量钻井液高效冷却提供理论基础。

(3)由于钻井液富含无机盐等组分,容易造成换热系统流道结垢和堵塞,严重影响换热冷却性能,应重点攻关换热器在有效抑制结垢、降低堵塞率特性研究,提高传热效率,以此提升换热系统可靠性和使用寿命。

2.2　工程适应性

(1)对于4000 m以浅的浅中井,井底温度不高,无需配置冷却装置;4000 m以深的深井,需根据钻井区块位置和钻井工艺进行合理选配。新疆地区钻井井场水资源匮乏,风沙大,不适合用水换热的

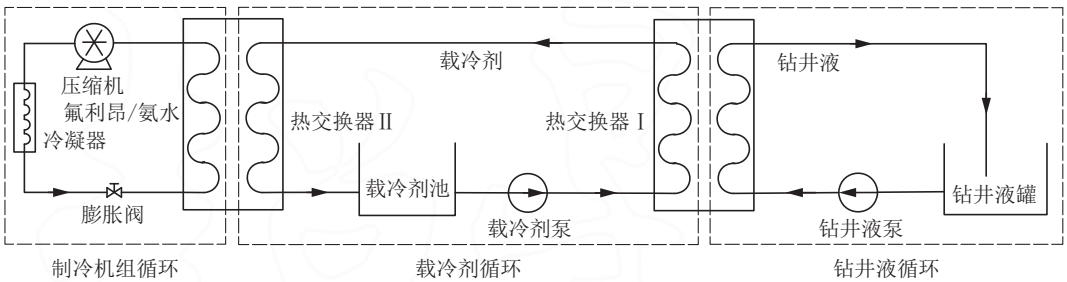


图6　强制冷却型冷却装置

Fig.6　Forced cooling type cooling equipment

超星·期刊

冷却装置;而川渝非常规页岩油气开发地区钻井平台普遍较小,固控系统区域内设备较多,实际预留钻井液冷却装置空间不大,还需考虑电源连接、循环罐进出连接管线和水源连接等,钻井液冷却装置应尽可能减少单元设备外形尺寸,以功能划分各设备单元,设备与设备之间以管路连接,提高设备的移运性和组装效率。

(2)基于水基泥浆和油基泥浆对设备密封材料、管道清洗等存在差异,因此要求设备部件可根据作业环境快速更换。

(3)井场供电电源接口一般为200 A,除正常钻井外,可提供其他设备有效电容量较小,对于大电容量钻井液冷却设备,需考虑井场供电容量对设备正常作业的影响。

(4)钻井液通过介质交换的热量最终通过水和空气带入大气中,同时伴随着水分蒸发,需定时补充水源。对于川渝和新疆等地区,水资源运输较困难,在设备使用过程中,应避免不必要水耗,同时可研究零水损耗和水份回收装置,对冷却水进行重复循环利用。

2.3 应用局限性

(1)根据近几年钻井液冷却装置使用效果分析,装置使用在7000 m以浅井深、水平段在2000~3000 m的钻井井况,地面钻井液冷却进入井底,井底温度可明显降低(8~15 ℃),而使用在8000 m以深钻井平台,地面钻井液冷却后进入井底过程中,地层对钻井液形成二次升温,井底温度降幅有限(1~3 ℃)[18-19]。因此,钻井液冷却装置对于超深井使用效果不明显。

(2)但对于超深井钻探,地面钻井液温度降低可显著提高钻井泵阀体阀座使用寿命,提高钻井泵作业的可靠性,选配钻井液冷却装置时,应评估台面钻井液温度降低对钻井作业影响的经济性。

2.4 装置可靠性

(1)钻井作业为24 h连续不间断工况,对钻井液冷却装置部件可靠性要求极高。钻井液由于杂质较多,需过滤后进入钻井液冷却装置。同时钻井液在换热器中进行热交换,钻井液易附着在换热器内壁结垢,影响换热效率,如附着物过多,可堵塞换热通道,导致设备停机。

(2)基于油基和水基体系的钻井液对装置管路中密封件性能影响较大,耐油性、耐腐蚀、耐高温对密封件性能提出了新的挑战。因此,冷却装置对于不同密度、体系钻井液应具备可兼容性,同时钻井液循环动力系统的主体部件——砂泵应具备长时间连续运转能力,以维持钻井作业连续性。

3 冷却装置发展方向

3.1 固控系统顶层设计

(1)钻井液冷却装置作为固控系统配套设备,在固控系统顶层设计中,应将冷却钻井液作为固控系统分支系统性考虑,从现场位置布局、管线连接、电源、水源供给和控制进行整体考虑,提高固控设备的兼容性和集成度。

(2)在钻井液返排回地表时,因钻井液在振动筛系统处理时间较长,可考虑在振动筛处增加风冷等降温措施;在循环罐中布置管路时,应合理设计钻井液流道,尽最大可能延长钻井液行程,增大钻井液与空气热交换面积;钻井液冷却装置与循环罐连接回路,应充分考虑过滤、流阻等对冷却的影响,利用现场作业条件,在固控系统各个环节降低钻井液温度。

3.2 标准模块化

现阶段国内水平段钻井时,新开发研制投入使用的钻井液冷却装置还处在探索应用阶段。目前各个配套厂家主要在满足功能性要求下,进行系统设计和优化,导致不同厂家装置在整机外形、技术特性、冷却方式和使用维护等方面存在较大差异,不具备通用性和拓展性。为保证装置冷却性能和满足井场通用性要求,应加大对装置模块化开发,针对不同钻井液、不同冷却要求进行装置标准化拼装和集成,应用模块化、功能化设计方法,完成冷却装置系统开发。

3.3 功能冗余设计

钻井液冷却装置在水平段钻井时冷却装置系统稳定性和可靠性要求较高,而冷却装置在运行过程中,对冷却装置吸入口过滤设备、循环泵设备、热交换设备可靠性要求高,针对容易引起设备故障的重要部件,应适当增加冗余设计功能,紧急情况应设置手动切换功能。同时在自动化控制程序下,应考虑在自动模式下手动应急切换,并可通过多种独立操作实现设备正常运行。

3.4 节能环保

(1)由于钻井液冷却装置在作业过程中,钻井

超星·期刊

液热量最终通过空气和水交换以水蒸汽方式进入大气中,热蒸气挥发带走大量水汽,同时由于整个装置装机功率较大,冷却装置满负荷功率可达到150 kW,一些钻机的配电房可能没有足够的余量供给钻井液冷却装置,因此,节能控制是冷却装置满足通用性应用的必要条件。

(2)大部分冷却装置采用的是空气-水冷的方式,耗水量30 m^3/d,应重点攻关冷却水循环使用和节能控制,满足缺水和山区钻井平台应用,同时与未来建设绿色环保型井场保持一致。

3.5　良好维护性

由于钻井液介质特殊性,钻井液在循环系统中砂泵、换热器和管路运行,存在腐蚀和附着特性,在长时间停机或者定期维护时,应保证装置良好维护性能;且由于装置24 h连续作业特点,良好操作维护性能可减少操作人员工作量,降低劳动强度。

4　结论与建议

(1)钻井液冷却装置对降低井底温度和井下工具作业温度能起到一定的效果,可根据钻井工艺和使用环境选择不同机理装置。

(2)钻井液冷却装置降低钻井液温度后,可降低钻井液阀体的使用温度和循环罐周边环境温度,提高钻井泵工作稳定性和改善操作人员工作环境。

(3)建议开展钻井液对换热器传热效率关键因素和作用机理研究,通过理论、数值分析以及试验研究,揭示钻井液换热器热交换机制及效率提升"瓶颈"难题,为突破大排量钻井液高效冷却提供理论基础。

(4)建议开展对钻井液换热器研究,增强换热器在抑制结垢能力、降低堵塞率,提高传热效率性能,开展密封材料对钻井液适应性研究,提高密封材料耐腐蚀性,提升换热器可靠性和使用寿命。

(5)开展冷却系统在制冷、散热等方面的环保性能研究,开发绿色友好型冷却装置,为智能化、绿色钻井平台提供有力支撑。

参考文献(References):

[1] Javay Alexandre, Schmidt Anderson, Franco Nata, et al. Mud cooler and chiller packages in high-temperature deep horizontal gaswells: A case study from Saudi Arabia[C]//Abu Dhabi, Society of Petroleum Engineers, 2020:1-17.

[2] 马青芳.钻井液冷却技术及装备综述[J].石油机械,2016,44(10):42-46.
MA Qingfang. Discussion on drilling fluid cooling technology and equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(10):42-46.

[3] 陈大勇,陈晨,冯雪威.漠河盆地天然气水合物钻探施工中的泥浆冷却系统及其应用[J].地质与勘探,2011,47(4):705-709.
CHEN Dayong, CHEN Chen, FENG Xuewei. Application of a mud cooling system to gas hydrate exploration in the Mohe Basin, Heilongjiang Province[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4):705-709.

[4] 李宽,张永勤,孙友宏,等.天然气水合物钻井泥浆冷却系统研究及优化[J].钻采工艺,2013,36(4):34-36.
LI Kuan, ZHANG Yongqin, SUN Youhong, et al. Research and optimization of mud cooling system in gas hydrate drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(4):34-36.

[5] 马岩,邢希金.天然气水化物钻井液冷却技术进展[J].非常规油气,2016,3(1):82-86.
MA Yan, XING Xijin. Development of mud cooling technology for gas hydrate drilling[J]. Unconventional Oil & Gas, 2016,3 (1):82-86.

[6] 赵江鹏,孙友宏,郭威.钻井泥浆冷却技术发展现状与新型泥浆冷却系统的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(9):1-5.
ZHAO Jiangpeng, SUN Youhong, GUO Wei. Current situation of drilling mud cooling technology and research on a new-type of drilling mud cooling system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(9):1-5.

[7] 李国圣,孙友宏,郭威.天然气水合物钻井泥浆冷却系统的设计及现场应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(2):8-11.
LI Guosheng, SUN Youhong, GUO Wei. Design and field application of gas hydrate drilling mud cooling system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(2):8-11.

[8] 李宽,张永勤,王汉宝,等.冻土区天然气水合物钻井泥浆冷却系统设计及关键参数计算[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):45-48.
LI Kuan, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, et al. Design of cooling system for gas hydrate drilling mud in frozen soil region and the calculation of important factors[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(7): 45-48.

[9] 高杭,刘海涛.钻井液制冷系统概念设计[J].石油矿场机械,2007,36(6):31-32.
GAO Hang, LIU Haitao. Concept design for drilling fluid cooling system[J]. Oil Field Equipment,2007,36(6):31-32.

[10] 吕恕位,杨卓娟,刘书溢.人字形板式换热器板片几何参数对换热性能影响的研究[J].吉林工程技术师范学院学报,2018,34(12):91-94.
LÜ Shuwei, YANG Zhuojuan, LIU Shuyi. Effect of geometric parameters of herringbone plate heat exchangers upon their performance[J]. Journal of Jilin Engineering Normal University, 2018,34(12):91-94.

[11] 苗勇虎,吴礼云.板式换热器清洗方法探讨[J].山西冶金,2018(4):104-106.

超星·期刊

MIAO Yonghu, WU Liyun. Discussion on the cleaning method of plate heat exchanger[J]. Shanxi Metallurgy, 2018(4): 104-106.

[12] 马喜伟,马青芳.天然气水合物钻井液冷却系统设计研究[J].石油机械,2017,45(10):27-31.
MA Xiwei, MA Qingfang. Study on design of mud cooling for natural gas hydrate drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(10):27-31

[13] 李胜忠,张铜鋆,聂军,等.ZLZY310高温钻井液冷却系统研制及应用[J].石油机械,2022,50(8):46-51.
LI Shengzhong, ZHANG Tongjun, NIE Jun, et al. Development and application of ZLZY310 high temperature drilling fluid cooling system[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(8):46-51.

[14] 冯壕辛,贾瑞,孙思远,等.高温钻井液高效冷却系统设计与模拟研究[J].钻探工程,2023,50(3):106-115.
FENG Haoxin, JIA Rui, SUN Siyuan, et al. Design and simulation of a high-efficiency cooling system for high temperature drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2023,50(3):106-115.

[15] 赵江鹏.天然气水合物钻控泥浆制冷系统及孔底冷冻机构传热数值模拟[D].长春:吉林大学,2010.
ZHAO Jiangpeng. Research on mud cooling system and simulation of down-hole freezing mechanism for gas hydrate core drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2010.

[16] 张晶,文珏,赵力,等.基于计算流体力学数值模拟的板式换热器传热与流动分析及波纹参数优化[J].机械工程学报,2015,51(12):137-145.
ZHANG Jing, WEN Jue, ZHAO Li, et al. Heat transfer and flow analysis and corrugation parameters optimization of the plate heat exchanger based on computational fluid dynamics numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(12):137-145.

[17] 刘玉民,赵大军,郭威,等.水合物钻探低温泥浆制冷系统实验及理论[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):301-308.
LIU Yumin, ZHAO Dajun, GUO Wei, et al.Experiment and theory of mud refrigeration system for hydrate drilling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012,42(3):301-308.

[18] 瞿雪姣,杨立伟,薛璇,等.松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科2井:井底温度、地层压力预测[J].地学前缘,2017,24(1):257-264.
QU Xuejiao, YANG Liwei, XUE Xuan, et al. Prediction of the bottom hole geotemperature, formation pressure and formation fracture pressure of the Continental Scientific Drilling of Cretaceous Songliao Basin (SK2)[J]. Earth Science Frontiers, 2017,24(1):257-264.

[19] 李文龙,高德利,杨进,等.深水超深井钻井井筒温度剖面预测[J].石油钻采工艺,2020,42(5):558-563.
LI Wenlong, GAO Deli, YANG Jin, et al. Prediction of the borehole temperature profile in ultra-deep drilling under ocean deepwater conditions[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020,42(5):558-563.

(编辑 荐华)