

高原钻探设备动力和保温问题研究

魏代锋^{1,2}, 张猛³, 冉恒谦², 马志攀³, 袁文真², 厉瞳瞳², 李明婕⁴, 张毅^{2*}

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质科学院, 北京 100037; 3. 渤海钻探第一钻井公司, 天津 300280; 4. 德州学院能源与机械学院, 山东德州 253023)

摘要:高原钻探难度大, 相较于低海拔钻探面临着更多问题和风险。高原高寒地区的钻探设备主要通过现有设备进行改造完成。本文基于某高原高寒钻探现场应用遇到钻探设备动力不足、高原高寒润滑不充分、以及人员保障方面遇到的问题, 开展钻探设备的高原高寒适应性改造。结合发动机动力下降30%的问题和高原其他设备改造电力需求, 将发电机增加到8台, 同时优选合适的润滑油增加设备保温装置。针对高寒、缺氧和水源质量差的问题, 建立保温功能的沙漠公寓屋, 同时屋内增加氧气供给设备和弥散式供氧面板, 采用渗透式水源净化装置净化水源。最终解决高原钻探设备和人员面临的低温、低氧和低气压等问题, 为我国高原地质资源勘探提供技术支持。

关键词:高原钻探; 设备动力; 润滑方式; 保温措施

中图分类号: P634.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2025)01-0115-06

Study on equipment power and thermal insulation issues for plateau drilling

WEI Daifeng^{1,2}, ZHANG Meng³, RAN Hengqian², MA Zhipan³,

YUAN Wenzhen², LI Tongtong², LI Mingjie, ZHANG Yi^{2*}

(1. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No.1 Drilling Engineering Company of BHDC, Tianjin 300280, China; 4. College of Energy and Mechanical Engineering, Dezhou University, Dezhou Shandong 253023, China)

Abstract: Comparing low altitude drilling, plateau drilling is more challenging and fraught with dangers. In plateau and cold climates, equipment modification is the primary means to complete drilling operations. This article is focused on the different issues that arise when drilling in a field on a particular high-altitude cold plateau which include low equipment power, inadequate lubrication and personnel support, in addition, the adaptation of drilling equipment to cold and plateau conditions is implemented. The number of generators will be expanded to eight units as the 30% loss in engine power and the reform requirement of other devices, in the meantime, appropriate lubricants will be chosen concurrently to add equipment insulating devices. An apartment building with thermal insulation was constructed in the desert to address the issues of extreme cold, oxygen deprivation, and low water quality. Diffuse oxygen supply panel and oxygen supply equipment are also added, at the same time, the water was purified using a permeable water source purification system. By the above measures, the issues of low temperature, low oxygen, and low pressure that workers and equipment encountered are resolved, which will support technical assistance for the exploration of geological resources on the plateau.

Key words: plateau drilling; equipment power; lubrication method; insulation measures

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-07-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.016

基金项目: 自然资源部碳封存与地质储能工程技术创新中心开放基金项目“CO₂管道耐腐蚀涂层和接头密封特性研究”(编号: MNRC-CUSO62301); 中国国家留学基金项目(编号: 202308370229); 中国地质科学院基本科研业务费项目“特深科学钻探取心技术与装备方案预研究”(编号: JKYZD202304)

第一作者: 魏代锋, 男, 汉族, 1983年生, 工程师, 力学专业, 博士, 从事地质钻探装备研发工作, 北京市海淀区北四环中路267号, weidaifeng@hotmail.com。

通信作者: 张毅, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事科学钻探技术与装备研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, shidazhangyang@163.com。

引用格式: 魏代锋, 张猛, 冉恒谦, 等. 高原钻探设备动力和保温问题研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 115-120.

WEI Daifeng, ZHANG Meng, RAN Hengqian, et al. Study on equipment power and thermal insulation issues for plateau drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 115-120.

0 引言

我国是世界上高原面积占有量最大的国家,海拔2000 m以上占国土面积的33%,3000 m以上占国土面积的26%,云贵、青藏、帕米尔高原的平均海拔高度2000~4500 m^[1-2]。我国自然资源和矿产资源丰富多样,地质勘探尤其是深地勘探是研究地球深部的历史和演变过程的重要手段之一,其对自然资源和矿产资源评估、地质结构演化和防震减灾等均有重要的意义^[3]。地质勘探钻机是勘探施工中最常用的设备之一,高原勘探设备作业过程面临多种问题,包括缺氧、低温、低压、风沙大等恶劣条件^[4-5]。

高原设备在使用过程中需要考虑功率衰减、散热、低温启动、材料的低温性能、润滑等问题。高原设备的动力主要采用柴油发动机,针对其功率衰减问题,相关学者提出了换用高功率发动机、采用涡轮增压柴油机等措施^[5-10]。高原设备在运行过程中的润滑也是一个非常关键的问题,相关学者研究发现高原对设备润滑油的粘度、闪点等指标数据有重要影响^[11]。高原设备在使用过程中的散热也是需要重点考虑的因素之一^[12-14],相关学者针对高原特性提出了修正的发动机冷却参数计算模型。

目前,钻探设备在使用过程中主要通过后期改造或实际使用过程中遇到问题后现场整改来满足高原钻探的需求,欠缺前期针对高原工况的专门方案设计。本文结合青藏高原某海拔5000 m地区的钻探设备使用过程的特点,提出相应的建议,为后续高原地区深部勘探提供技术支持。

1 当前高原钻探存在的问题

1.1 发动机的动力不足

柴油发动机相对于汽油发动机能提供更大的负载,同时具有更好的燃油经济性且维护简单方便,是中大型设备的常用动力源。常规柴油机设备在海拔>2600 m后其性能随着海拔升高迅速下降。高海拔地区的大气压力下降是影响柴油机工作的主要因素。随着压力的下降,进气量的降低将直接导致内燃机燃烧恶化,其动力性、经济性显著下降。内燃机驱动的高原钻机的性能在低转速时差别不太明显,高转速下性能快速下降。高原地区的低温对发动机的低温启动性能有重要影响^[13,15-17]。

HQY-500型全液压钻机在甘肃祁连山脉军马场地区施工,该地区海拔3700 m,常年低温,空气稀

薄,含氧量仅为内地的60%,配备的柴油机气缸压缩行程末端对应的空气温度过低,无法压燃柴油和空气混合物,造成柴油机无法启动^[14]。

某施工单位在海拔5000 m使用的钻探设备配置为:70DB型变频钻机,2台16000 hp(11931 kW)高压泵、1台2200 hp(1640 kW)高压泵,4台CAT3512B型发电机组,其功率下降了30%,同时存在启动困难,油耗增大等一系列问题。

1.2 对油水润滑的影响

高原地区气温较低,海拔5000 m位置处冬季的平均气温可低至-15℃,同时大风天气给钻机设备的保暖措施带来了一定困难,低温环境会影响设备的润滑和液压系统^[18]。发电机组和高压泵等钻探设备通常使用润滑油和润滑脂两种润滑材料。高压泵及其他设备的变速箱主要采用油池飞溅润滑方式对齿轮进行润滑,相关轴承等的润滑则采用润滑脂进行润滑。

气温下降后润滑油的粘度会上升,流动性降低,给绞车、高压泵等设备的变速箱齿轮的润滑效果带来重要影响,同时润滑油粘度升高会增大变速箱的传动阻力,进一步降低设备传动效率。对于润滑脂而言,低温下容易冻结而堵塞输送润滑脂的通道,影响润滑设备的润滑效果,加速设备的磨损。

部分钻机设备的冷却系统采用水冷冷却装置,高原地区的气温较低,海拔5000 m位置处水的沸点降低至83.3℃,而常规钻机的散热设计功率往往采用低海拔地区100℃进行设计,设备进入高原前往往需要对散热设计进行校核验证,以保障高原地区情况下设备的正常使用。

1.3 对人员健康安全的影响

高原环境下长期野外钻探作业过程中,人员面临着缺氧、低温和强辐射,以及人员稀疏,导致人员健康发生一系列问题^[19-23]。钻探作业属于重体力作业,高原环境下体内的氧气快速下降引起身体不适,极易导致钻探事故的发生。同时,高原地区低温环境伴随着大风,容易导致作业人员身体失温等问题。高原空气稀薄紫外线强烈,作业人员的防护不足会导致皮肤发生一系列问题。同时人员稀疏电信基础设施不健全,与外界的沟通不便,长期作业过程中对作业人员的心理产生一定的负面影响。

2 高原钻探问题的解决措施

2.1 发动机动力问题

高原地区的大气压比平原地区低许多,4000 m海拔处气压只有平原地区的60%~70%,而发动机吸油能力与气压成正比,低气压可能因油路供油不足而引起发动机掉转,吸油口处压力计算公式如下:

$$Q = \pi d^4 / (128 \mu l) \Delta P \quad (1)$$

式中: d ——油管内径, μ ——油液动力粘度; l ——油管长度, ΔP ——油管两端压力差。

对于柴油机,海伍德提出的功率修正方程,用来估计压力和温度降低的影响,具体如式(2)所示:

$$C_F = P_{std} / (P_m - P_v) (T_m / T_{std})^{1/2} \quad (2)$$

式中: C_F ——修正系数, P_{std} ——在选定的标准条件下的压力; T_{std} ——在选定的标准条件下的温度; P_m ——所处位置的实测压力; T_m ——所处位置的实测温度; P_v ——在试验条件下测量的水蒸气分压力。

不同海拔下的温度、压力和水蒸气变化关系见表1。

表1 不同海拔下的温度、压力和水蒸气变化关系

Table 1 The connection between temperature, pressure, and water vapor changes in different elevation

海拔/m	温度/°C	压力/MPa	水蒸气含量(质量比)/10 ⁻⁶
0	15	0.101	4686
2600	-1.89	0.074	2274
5200	-18.8	0.050	975

高原地区的低温环境对柴油机缸内气体压缩行程终了时的温度有重要影响,压缩行程末端时的温度过低会导致内部柴油和空气的混合喷雾温度达不到燃点而无法被点燃,导致柴油机无法发动。柴油机的环境温度与缸内气体的压缩末端的温度计算公式如下:

$$T_{TDC} = T_i r_c^{n-1} \quad (3)$$

$$n = k - [(k-1)/(F \cdot MPS + 1)] \quad (4)$$

式中: T_{TDC} ——压缩行程末端缸内气体的温度; T_i ——缸入口处的空气温度; r_c ——气体压缩比; n ——压缩比影响指数; k ——绝热指数,为1.4; F ——比例因子,对于低温环境下的柴油机其值约为1.1; MPS ——活塞转速^[18]。

假定 $r_c=17.1$,分析柴油机冷空气-20°C(253 K)和常温空气26.85°C(300 K)时的缸内压缩行程末端温度变化情况,如图1所示。从图中可以看出,

低温对发动机的启动阶段影响较大,温度过低会导致发动机出现无法启动的情况。

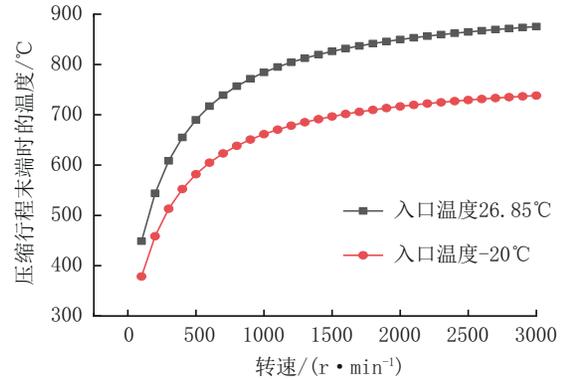


图1 常温和低温下的活塞缸压缩行程末端时的温度对比

Fig.1 Comparison of piston cylinder temperature at the end of compression stroke at room temperature and low temperature

自然吸气柴油发动机的有效功率(输出功率)等于指示功率与机械效率的乘积 $P_e = P_i \eta_m$,指示功率 P_i 计算公式如下:

$$P_i = \frac{\Delta Q}{J} = \frac{G_T H_u \eta_i}{J} = \frac{G_B}{\alpha L_0} \cdot \frac{H_u}{J} \cdot \eta_i = G_B \cdot \frac{H_u}{J L_0} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \quad (5)$$

式中: G_B ——进气质量流,kg/s; H_u ——燃料低热值,kJ/kg; L_0 ——燃烧1 kg燃料所需的理论空气质量,对于柴油为14.3 kg; η_i ——指示热效率; α ——过量空气系数; J ——热功当量,4.2 J/cal。其中与高原地区影响不相关的参数为 H_u 、 L_0 和 J 。

受到高原地区影响的主要是 G_B 、 η_i 和 α 。过量空气系数 $\alpha = G_B / (BL_0)$ (B 为发动机燃油消耗量,kg/h),代入公式(5)可知:

$$P_i = H_u B \eta_i / J \quad (6)$$

由万谢特经验公式可知^[24-25]:

$$\begin{cases} \eta_i = \eta_{i(\alpha=1)} \alpha^{1/\alpha} \\ \alpha_1 / \alpha_0 = (p_1 / p_0) (T_0 / T_1)^{1-m} \\ p_H = 101.325 [(16955 - H) / (16955 + H)] \\ T_1 = T_0 - 6.5H \end{cases} \quad (7)$$

式中: H ——海拔高度; T_0 、 T_1 ——分别为海平面处和海拔 H 处的温度; p_0 、 p_1 ——分别为海平面处和海拔 H 处的气压; α_0 、 α_1 ——不同海拔处的过量空气系数。

结合公式(6)和(7),可求出从海拔高度0 m、环

境温度 $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,上升到海拔 5000 m 处时,假定机械传动效率 η_m 与海拔高度不相关的情况下,求得相同的供油量下输出功率变化的比率 $\eta_{Pi} = P_{e5000}/P_{e0} = 0.411$,即功率损失超过一半。基于输出功率降低到原来的 41.1% 现状,同时考虑现有发动机会自动根据需求调整点火角度等措施提高发动机的效率,另外柴油发动机在中低转速区间 ($< 1800\text{ r/min}$) 下高原的影响会减弱,结合现场使用过程估计动力损失 30% 的情况,该项目在原有 4 台发动机的基础上,增加 4 台 CAT3512B 型发电机组和 2 台 CATC18 型辅助发电机,增加并机装置 1 套,实现 8 台 CAT3512B 型发电机组并机功能。针对低温启动难题,柴油机停机后采取保暖措施,同时启动前采用加热装置预加热一段时间。针对散热的问题,增加冷却水箱 1 套,解决高海拔施工发电机冷却液的沸腾问题,保证了设备的散热性。

2.2 低温下的设备润滑和保温解决措施

对高海拔常年低温环境,发动机防冻液更换为 $-45\text{ }^\circ\text{C}$ 低温防冻液;顶驱采用昆仑 68 号合成型顶驱齿轮油;齿轮油采用 LCKD-150 型工业齿轮油;液压油采用 L-HS46 型低温液压油;冬季采用昆仑 5W-40 型柴机油,夏季采用 15W-40 型柴机油。详细的润滑油品性能参数如表 2 所示。

表 2 润滑油品性能参数对比
Table 2 Property parameters comparison of lubricating oils

油 品	粘度等级	粘度 (40 °C)/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	倾点/ °C	粘度指数	粘度随温度变化比较
昆仑 KG68 型齿轮油	220	220	-27	220	较小
LCKD-150 型齿轮油	150	135~165	-42	198	较小
CH-45W-40 型齿轮油	40	82.8	-35	182	较小
L-HS46 型液压油	46	43.11	-39	197	较小

设备保温方面,为应对高原地区降雪频繁、风沙大等因素,钻井液循环系统采用钢结构防雨棚,侧面采用帆布遮挡保温,钻井液循环罐区设置通风装置。采用环保生物燃料锅炉+蒸汽管线的方式对柴油罐、泥浆泵、循环罐、钻台面等区域进行保温、防冻具体如图 2 所示。结合其他低温地区使用保温策略和经验,选用 1 t 的蒸汽锅炉,压力 $0.7\sim 1.6\text{ MPa}$ ^[26-27]。常见的保温包覆材料有岩棉(导热系

数 $0.04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、玻璃棉(导热系数 $0.034\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、聚氨酯保温材料(导热系数 $0.024\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)和发泡塑料制品(导热系数 $0.02\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)^[26-29]。综合考虑高海拔地区施工难度、运输和环保等问题,选用玻璃棉作为本项目的保温材料。



图 2 现场保温处理措施

Fig.2 On-site insulation measures

通常,电伴热换热效率为 $90\%\sim 96\%$,对于管线类细长结构,采用电伴热的形式辅助保温是最优保温形式^[30]。以某 5000 m 海拔钻井项目为例,计算电伴热的设计需求,单位长度管线散热量损失量 Q ^[30-32](W/m):

$$Q = 2\pi\lambda\Delta t\xi / \ln [(d + 2\delta)/d] \quad (8)$$

式中: λ ——管线保温材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Δt ——管内温度与环境温度之差, $^\circ\text{C}$; d ——管线外径, mm ; δ ——管线的保温层厚度, mm ; ξ ——安全系数,通常取 1.28。

计算 4 in 管线(外径 101.6 mm),采用玻璃棉保温层,保温层厚度 20 mm,假定环境温度 $-40\text{ }^\circ\text{C}$,计算得到管道保温温度 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时的单温长度管线散热损失为 $Q = 41.16\text{ W}/\text{m}$,参照该计算结果确定合适的电伴热带布局。同时对于管线的阀门而言,结合等效系数(对于闸阀来说是 1.22,球阀为 0.85,蝶阀则为 0.62 ^[32])对管路进行电伴热保温处理。

2.3 人员健康安全保障措施

高原地区的缺氧、低温、强辐射和人员稀疏环境对人员的健康都有重要影响。针对当地环境特

点建立急性高原反应风险预警指标和等级划分,并普及人员健康安全知识。分别从取暖、饮水和氧气等多个方面进行详细设计,保障人员的舒适性。

建立沙漠公寓野营房,内部采用超厚防火隔热材料墙体用于保温,并采用电暖器等热源加热,确保室温达到人员舒适温度以使工作效率最大化。

针对高原地区水源矿化度高、杂质多、可能存在病原及微生物等因素,配备存储水仓反渗透式水源净化装置,满足钻探现场作业人员的饮用水需求。采集高原泉眼实际测试水样呈微黄色,TDS值为1156 mg/L。净化后水样透明度达到普通瓶装饮用水色度,TDS数值为2.45 mg/L,小于普通瓶装饮用水4 mg/L。

供氧装置采用制氧系统+弥散式供氧面板结构。考虑高海拔对制氧设备的影响,制氧系统气源采用75 L/h型螺杆式空气压缩机1台,5000 m海拔处制氧塔氧气纯度为65%~80%,氧气流量为20~25 m³/h,满足60间12.6 m²宿舍供氧,氧气含量可达到30%以上,室内人员血氧浓度为90~96% SpO₂,满足设计要求。

3 结论及建议

当前我国对高原地区资源的勘探开发仍处于初级阶段,结合高原钻探作业特点开展钻探设备高原适应性研究。

(1)动力部分,需要针对高原或特高原地区进行改造设计。优先选用适宜高原地区的涡轮增压柴油发动机,针对不同的海拔高度计算发动机功率损失,并校核油路等在高原低压条件下的适应性。结合高原地区维修保养难易程度,配备相关的零部件及备用发动机。

(2)针对5000 m高原地区的低温低压情况,选用适用于低温和重载的润滑油和润滑脂,对某些采用自动加注润滑脂的钻探设备,采用手动加注方式,并增加钻探设备运行过程中的检测频次,保障设备顺利进行。对于设备保温而言,结合设备的类型不同,制定不同的保温方案,依据管道散热公式求解电伴热加热功率需求实现对管道精准保温。

(3)低氧和低温环境对人员及检测设备等都有重要影响,在司钻房等密闭区域增加弥散氧设备,对开放区域增设氧气罐保障人员安全,为相关人员配备监测装置监测血氧浓度,优化人员布局和工作时

间安排,最大程度保障人员健康安全和作业效率。

参考文献(References):

- [1] 靳生盛,蔡善乐.高原地区公路工程施工中机械的合理选用[J].青海交通科技,2008(3):15-16.
JIN Shengsheng, CAI Shanle. Reasonable selection of machinery in highway engineering construction in plateau areas[J]. Qinghai Transportation Technology, 2008(3):15-16.
- [2] 尹登峰,周宏兵,郝鹏.工程机械用柴油机高原性能的预测和分析[J].计算机仿真,2014,31(9):422-426.
YIN Dengfeng, ZHOU Hongbing, HAO Peng. Forecast and analysis for Diesel engine plateau performance of engineering machinery[J]. Computer Simulation, 2014,31(9):422-426.
- [3] 黄贤营,李为.中国矿产资源潜力评价进展及应用展望[J].矿产与地质,2024,38(1):1-6.
HUANG Xianying, LI Wei. Progress of mineral resources potential evaluation and application prospect in China[J]. Mineral Resources and Geology, 2024,38(1):1-6.
- [4] 杨芳,翟育峰,田志超,等.西藏甲玛3000m科学深钻经济技术指标统计与分析[J].钻探工程,2024,51(1):113-119.
YANG Fang, ZHAI Yufeng, TIAN Zhichao, et al. Statistics and analysis of economic and technical indexes for 3000m scientific drilling in Jiama, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):113-119.
- [5] 李建华,刘凡柏,王朝建.“盐湖探险一号”钻机的研制及西藏无人区科学考察[J].探矿工程,2001(S1):138-140.
LI Jianhua, LIU Fanbai, WANG Chaojian. Development of “salt lake expedition 1st” drillrig and inspection of the no-human zone in Tibet[J]. Exploration Engineering, 2001(S1):138-140.
- [6] 朱恒银,王强,刘兵,等.5000 m新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J].钻探工程,2022,49(1):110-119.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):110-119.
- [7] 薛倩冰,刘凡柏,张金昌,等.特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J].钻探工程,2023,50(2):8-16.
XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):8-16.
- [8] 申立中,沈颖刚,毕玉华,等.不同海拔高度下自然吸气和增压柴油机的燃烧过程[J].内燃机学报,2002,20(1):49-52.
SHEN Lizhong, SHEN Yinggang, BI Yuhua, et al. Combustion process of naturally aspirated and supercharged diesel engines at regions with different altitude [J]. Transactions of Csice, 2002,20(1):49-52.
- [9] 申立中,杨永忠,雷基林,等.不同海拔下增压中冷柴油机性能和排放的研究[J].内燃机学报,2006,24(3):250-255.
SHEN Lizhong, YANG Yongzhong, LEI Jilin, et al. Study of performance and emissions of a turbocharged Inter-cooling diesel engine at different altitudes[J]. Transactions of Csice, 2006,24(3):250-255.
- [10] 万德玉.石油钻机柴油机的适应性要求及其对策[J].柴油机,1991(5):1-5.
WAN Deyu. Adaptability requirements for an oil driller powering diesel engine and their countermeasures[J]. Diesel Engine, 1991(5):1-5.
- [11] 张宜哲,郭小川,蒋明俊,等.高海拔环境对地面装备润滑油的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2017,31(10):105-113.
ZHANG Yizhe, GUO Xiaochuan, JIANG Mingjun, et al.

- Analysis of influence of high altitude environment on lubricating oil for ground equipment[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2017,31(10):105-113.
- [12] 汪茂海,陈涛,张扬军,等.高原发动机热管理系统性能分析研究[J].*汽车工程*,2010,32(10):851-853,864.
WANG Maohai, CHEN Tao, ZHANG Yangjun, et al. A research on the performances analyses of engine thermal management system at plateau[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(10):851-853,864.
- [13] 滕锦图.川藏铁路某高原型隧道施工设备发动机系统改造设计[J].*应用能源技术*,2020(5):8-10.
TENG Jintu. Engine system retrofit design for construction equipment of a high prototype tunnel on Sichuan-Tibet railway [J]. *Applied Energy Technology*, 2020(5):8-10.
- [14] 徐小兵.提高高海拔地区钻探效率的几点体会[J].*地质与勘探*,2006,42(3):103-106.
XU Xiaobing. Experiences on improving drilling efficiency in the high elevation area[J]. *Geology and Prospecting*, 2006, 42(3):103-106.
- [15] 李兆权,段纪森,江睿,等.高原条件下柴油机性能影响及恢复研究进展[J].*当代化工*,2022,51(3):683-686.
LI Zhaoquan, DUAN Jimiao, JIANG Rui, et al. Research progress in influence factors and recovery of diesel engine performance under plateau condition[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022,51(3):683-686.
- [16] 沈颖刚.高原环境下内燃机工作过程研究[D].天津:天津大学,2003.
SHEN Yinggang. A fundamental investigation on working processes of I.C.Engines on highland [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [17] 罗诗伟.钻机在高原高寒地带难启动的原因及对策[J].*科技资讯*,2014(29):75-76.
LUO Shiwei. Drill in plateau and high-cold areas of reasons and countermeasures for starting hard [J]. *Science & Technology Information*, 2014(29):75-76.
- [18] 杨艳庆.柴油机高原冷启动方法探讨与分析[J].*柴油机设计与制造*,2019,25(1):1-3,7.
YANG Yanqing. Engine cold-starting performance in altitude areas [J]. *Design and Manufacture of Diesel Engine*, 2019,25(1):1-3,7.
- [19] 谢雪凌.高海拔地区作业人员职业健康防护行为意识研究[D].宜昌:三峡大学,2019.
XIE Xueling. Study on occupational health protection behavior awareness of workers in high altitude area[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [20] 王宇轩,张凯,杨甘生,等.极地钻探装备动密封失效分析及改进措施研究综述[J].*钻探工程*,2023,50(S1):77-81.
WANG Yuxuan, ZHANG Kai, YANG Gansheng, et al. Research status of failure analysis and improvement measures of dynamic seal for key equipment in polar drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(S1):77-81.
- [21] 康红梅,王继园,黎杰,等.大型钻探设备支承底盘焊接工艺优化研究[J].*钻探工程*,2024,51(2):68-77.
KANG Hongmei, WANG Jiyuan, LI Jie, et al. Research on optimization of welding process for support chassis of large drilling equipment[J]. *Drilling Engineering*, 2024,51(2):68-77.
- [22] 杨以春.钻井作业中的事故分析及风险管理研究[J].*中国石油和化工标准与质量*,2014(12):202,161.
YANG Yichun. Accident analysis and risk management research in drilling operations[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2014(12):202,161.
- [23] Hardenberg H O, Hase F W. An empirical formula for computing the pressure rise delay of a fuel from its cetane number and from the relevant parameters of Direct-injection diesel engines [J]. *SAE Transactions*, 1979,88:1823-1834.
- [24] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等.柴油机高原环境适应性研究综述[J].*车用发动机*,2013(4):1-5.
ZHOU Guangmeng, LIU Ruilin, DONG Surong, et al. Review on plateau environment adaptability of diesel engine [J]. *Vehicle Engine*, 2013(4):1-5.
- [25] 柯亚仕,高桐生.柴油发动机高原性能的研究[J].*汽车技术*,1988(2):1-6.
KE Yashi, GAO Tongsheng. Research on the plateau performance of diesel engines[J]. *Automobile Technology*, 1988(2):1-6.
- [26] 高晓军,李魏钢.长庆区域钻机应对偏冷气候保温措施探讨[J].*设备管理与维修*,2022(18):91-92.
GAO Xiaojun, LI Weigang. Discussion on insulation measures for drilling rigs in Changqing area to cope with cold climate[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(18):91-92.
- [27] 王宇哲,张凯,杨甘生,等.南极钻机的耐高温材料和保温方式的优选[J].*钻探工程*,2023,50(S1):82-89.
WANG Yuzhe, ZHANG Kai, YANG Gansheng, et al. Optimization of temperature resistant materials and insulation methods for Antarctic drill rigs[J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(S1):82-89.
- [28] 郑凯波.极地钻井关键设备保温方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
ZHENG Kaibo. Study on insulation method of key equipment in polar drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [29] 胡敏红,刘磊,岳文泽,等.蒙古国某深基坑安全越冬保温防护技术研究[J].*钻探工程*,2023,50(4):103-109.
HU Minhong, LIU Lei, YUE Wenzhe, et al. Research on cold-insulation and protection for safety overwintering of deep foundation pits in Mongolia[J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(4):103-109.
- [30] 王卫强,吴明,张静.电伴热技术在原油输送中的应用与展望[J].*油气田地面工程*,2004,23(8):26.
WANG Weiqiang, WU Ming, ZHANG Jing. Application and prospect of electric heat tracing technology in crude oil transportation[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2004,23(8):26.
- [31] 聂景龙,刘雅静,陈瑶,等.ZJ50 DB低温钻机固控系统的研发[J].*机械研究与应用*,2016,29(2):166-167,171.
NIE Jinglong, LIU Yajing, CHEN Yao, et al. Research on the solid control system for ZJ50 DB low temperature rig [J]. *Mechanical Research & Application*, 2016,29(2):166-167,171.
- [32] 杨艳.北海半潜式钻井平台防除冰技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
YANG Yan. Anti-icing and de-icing technical research of the North sea semi-submersible drilling rig [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.

(编辑 王文)