

极寒地区超深竖井施工工艺研究与优化

焦 东 罗向阳 熊研淞 范永胜
中国华冶科工集团有限公司 北京 100176

摘 要：本文以多宝山 II 号探矿竖井工程为研究对象，聚焦极寒地区超深竖井施工的关键技术问题。首先分析了极寒气候对施工材料、设备及地层稳定性的影响，梳理了国内相关研究现状与不足。通过文献研究法、现场调研法及数值模拟法，结合工程实际，从材料选择、设备选型、施工工艺及组织管理等方面提出优化策略，并设计了材料性能、设备适应性及施工工艺的试验方案。最后构建评估指标体系，预期优化方案能提升施工效率、保障工程质量与安全，为极寒地区类似超深竖井工程提供参考。

关键词：极寒地区；超深竖井；提升系统

引言

全球矿产需求持续攀升，极寒地区赋存铜、铁、金等战略矿产，对保障国内原料供给至关重要，但低温、冻土环境大幅提升超深竖井施工难度。本文以黑龙江多宝山II号探矿竖井为研究载体，矿区高纬度极寒，极端低温可达-40℃，竖井深1232m，是深部铜矿开发关键工程。当地铜矿储量充足，该竖井有助于深部资源勘探，稳固国内铜资源供给。极寒工况存在多重施工痛点：低温劣化设备性能、钢材冷脆、混凝土凝固迟缓；冻土扰动易引发围岩失稳，严寒损害人员健康、降低作业效率。开展极寒超深竖井施工工艺优化，可破解本工程技术难题，为寒区矿山建设提供技术依据。本研究依托现场实际优化全套施工工艺，兼顾提效、安全、降本目标。通过调整钻爆、提升运输参数并适配耐寒设备压缩工期；完善支护、设备维保、防寒防护体系，规避设备故障、井壁坍塌、人员冻伤等风险；优化材机配置，减少耗材与运维开支，提升项目经济效益。理论层面完善低温、冻融、地压多场耦合下竖井施工理论，补充寒区试验数据；实践层面形成成套优化方案，既可直接服务本项目，也能为国内同类极寒深井工程提供实操借鉴。

1 多宝山 II 号探矿竖井工程概况

多宝山II号竖井坐落于黑龙江嫩江多宝山铜山矿区，属小兴安岭西北低山丘陵，海拔512m。区域季节性冻土深0.8–2.1m，冻结期9月中旬至次年5月末，极端低温低至-40℃，施工气候条件恶劣。矿区岩体种类繁多，经多期变质挤压后软硬交错、破碎带广泛发育，岩石可钻性10–12级，凿岩爆破施工难度大。地下水埋深2.5–30m，单孔涌水量0.33–2.36L/(s·m)，排水压力大，易造成井壁失稳，需配套止水防冻排水体系。

1.1 工程设计参数

竖井掘进标高512m至-720m，总深度1232m，净直径7m；于-450m、-700m设置马头门，连通竖井与水平巷道。配套地下工程涵盖-700m石门、沿脉及穿脉巷道、中央变电所与避灾硐室等。巷道系统可完整探明矿体分布，变电所保障井下供电，避灾硐室用于灾害避险，构建完整井下作业保障体系。

1.2 工程施工难点与挑战

极寒气候是工程首要施工难题。低温会大幅延缓混凝土凝结硬化进程、阻碍强度增长，易造成结构缺陷、降低耐久性；同时引发钢材冷脆现象，大幅降低金属构件韧性，严重威胁钢结构支护及设备运行安全。此外，极寒环境会导致设备润滑油粘度升高、传动磨损加剧，电池容量骤降、设备启动困难，电子元件性能失稳，频繁影响施工连续性。复杂地质条件进一步加剧施工难度，岩体裂隙发育、软硬不均、可钻性极差，竖井开挖过程中易出现片帮、坍塌隐患，丰富的地下水也进一步提升井壁失稳风险。同时，1232m超深竖井施工存在诸多技术瓶颈，深部地压显著增大，常规支护工艺难以满足高承压井壁稳定需求；井下深部通风阻力大，新鲜空气输送、有害气体排出难度高；长距离大载荷提升运输系统对设备稳定性、安全性及运输效率也提出了极高要求^[1]。

2 试验方法设计与实验手段

2.1 材料性能试验

对于混凝土，采用低温冻融试验来测试其抗冻性。按照标准规范，将混凝土试件制备成 100mm×100mm×100mm的立方体，在标准养护条件下养护28天后，放入低温环境中进行冻融循环试验。设置试验温度为-20℃，冻结时间为4小时，然后在20℃的水中融化4小时，作为一个冻融循环。记录在不同冻融循环次数下混凝土试件的质量损失、相对动弹性模量等指标，评估混凝土的抗

冻性能。当冻融循环次数达到50次时,观察混凝土试件表面是否出现裂缝、剥落等现象,测量其质量损失率和相对动弹性模量,若质量损失率超过5%,相对动弹性模量下降超过25%,则认为混凝土的抗冻性能不满足要求。

进行混凝土的低温抗压强度和抗拉强度试验。将混凝土试件在不同低温环境下(如-10℃、-20℃、-30℃)养护一定时间后,采用压力试验机和万能材料试验机分别测试其抗压强度和抗拉强度,分析温度对混凝土强度的影响规律。

对于钢材,采用低温夏比(V形缺口)冲击试验来测试其低温韧性。按照GB4159《金属低温夏比冲击试验方法》的规定,制备10mm×10mm×55mm的标准试样,若无法制备标准试样时,也可采用7.5mm×10mm×55mm、5mm×10mm×55mm的小尺寸试样。将试样放入低温环境中冷却至规定温度,如-40℃,然后使用冲击试验机对试样进行冲击,测量试样断裂时吸收的能量,即冲击功。通过冲击功的大小来评估钢材的低温韧性,冲击功越大,表明钢材的低温韧性越好。

进行钢材的低温拉伸试验。在不同低温环境下,使用拉伸试验机对钢材试样进行拉伸,测量钢材的屈服强度、抗拉强度、伸长率等力学性能指标,分析低温对钢材拉伸性能的影响。

2.2 设备适应性试验

针对提升设备,搭建模拟低温环境试验平台,将提升设备的关键部件,如提升绞车、钢丝绳、提升容器等,放置在试验平台内。利用制冷设备将试验平台内的温度降至极寒地区的最低气温,如-40℃,并保持稳定。在低温环境下,按照提升设备的正常工作流程进行模拟运行,测试提升设备的启动性能、运行稳定性、制动性能等。记录提升设备在运行过程中的各项参数,如电机电流、电压、转速,钢丝绳的张力,提升容器的加速度等。观察提升设备各部件在低温环境下是否出现异常,如电机启动困难、钢丝绳脆断、制动失灵等现象。

对通风设备进行极寒环境适应性测试。将通风机放置在模拟低温环境试验室内,调节试验室内的温度、湿度和气压,模拟极寒地区的恶劣气候条件。在不同工况下,测试通风机的风量、风压、功率等性能参数,分析低温环境对通风机性能的影响。改变通风机的转速,测量在不同转速下通风机的风量和风压变化,绘制性能曲线,对比常温下的性能曲线,评估低温对通风机性能的影响程度。还需检查通风管道在低温环境下的密封性和强度,防止因管道破裂或泄漏导致通风系统失效。

2.3 施工工艺试验

设计不同井壁支护工艺的对比试验。选择传统的双层钢筋混凝土井壁支护工艺和新型的纤维增强混凝土井壁支护工艺进行对比。在试验场地内,按照相同的井筒尺寸和地质条件,分别采用两种支护工艺进行井壁施工。在施工过程中,记录施工时间、材料用量、施工难度等参数。施工完成后,对井壁进行监测,测量井壁的变形、应力分布等指标。定期使用全站仪测量井壁的垂直度和半径变化,使用应变片测量井壁内部的应力分布。通过对比分析两种支护工艺的施工效果和性能指标,评估其在极寒地区超深竖井施工中的适用性和优缺点^[2]。

3 施工工艺优化策略

3.1 材料选择与优化

根据材料性能试验结果,在极寒地区超深竖井施工中,应优先选用抗冻性能优良的混凝土。可采用硅酸盐水泥,并适当降低水胶比,以提高混凝土的早期强度和抗冻性。在配合比设计中,添加引气剂和减水剂,引气剂能在混凝土内部引入微小气泡,缓解冻融循环时的膨胀应力,提高抗冻性;减水剂则可减少用水量,改善混凝土的工作性能,增强其强度。如在某极寒地区竖井工程中,通过优化混凝土配合比,添加引气剂和减水剂,使混凝土的抗冻等级达到F300,满足了工程在极寒环境下的耐久性要求。

钢材方面,选择低温韧性好的钢材至关重要。可选用含有镍、铬等合金元素的低合金钢,这些合金元素能有效提高钢材的低温韧性和抗疲劳性能。如Q345D、Q355D等耐低温型钢,在-40℃的低温环境下仍能保持较好的力学性能。在多宝山II号探矿竖井工程中,采用Q355D钢材制作井架和提升设备的关键部件,经过实际运行验证,在极寒条件下未出现因低温导致的脆性断裂等问题,确保了施工的安全和顺利进行。

3.2 设备选型与维护

依据设备适应性试验结果,在极寒地区超深竖井施工设备选型时,要充分考虑设备的耐寒性能。选择具有良好低温启动性能的发动机,如配备低温预热装置的发动机,能在极寒环境下顺利启动。在提升设备方面,选用提升能力大、运行稳定且适应低温环境的提升绞车,如采用带有自动张紧装置和低温润滑系统的提升绞车,可确保钢丝绳在低温下的张力稳定,减少磨损,提高提升系统的可靠性。

通风设备应具备在低温环境下高效运行的能力,选择风量大、风压高且电机具有良好耐寒性能的通风机。同时,要对通风管道进行保温处理,可采用聚氨酯泡沫保温材料,减少热量散失,防止管道内结露和结冰,确

保通风系统的正常运行。

在设备维护方面,制定严格的维护制度至关重要。定期对设备进行全面检查和保养,特别是在冬季来临前,要对设备的润滑系统、冷却系统、电气系统等进行重点检查和维护。更换适合低温环境的润滑油和防冻液,检查电气线路是否老化、破损,及时进行修复或更换。

3.3 施工工艺改进

在井壁支护方面,针对多宝山II号探矿竖井工程复杂的地质条件,可采用锚网喷与钢筋混凝土联合支护的工艺。在竖井开挖后,及时喷射混凝土,封闭围岩,防止围岩风化和松动。然后铺设钢筋网,打设锚杆,增强围岩的整体性和稳定性。最后浇筑钢筋混凝土井壁,提高井壁的承载能力和抗渗性。在某类似工程中,采用这种联合支护工艺,有效控制了井壁的变形,保障了竖井的长期稳定。

对于开挖工艺,优化钻爆参数,根据岩石的硬度和地质条件,合理调整炮眼间距、深度和装药量,提高爆破效率,减少超欠挖现象。采用光面爆破技术,控制爆破轮廓,减少对围岩的扰动。在通风工艺方面,加强通风管理,合理布置通风管道,确保新鲜空气能够均匀地输送到井底各个作业面。增加通风量,降低有害气体浓度,改善作业环境。采用局部通风机与主通风机联合通风的方式,提高通风效果^[3]。

排水工艺上,加强排水系统的建设和维护,设置足够容量的排水泵房和排水管路。采用高效的排水设备,如大流量、高扬程的排水泵,确保及时排除井筒内的积水。对排水管路进行保温和防冻处理,防止管路冻结堵塞。在某寒冷地区竖井施工中,通过采用电伴热保温技术对排水管路进行保温,有效避免了管路冻结问题,保障了排水系统的正常运行。

结论

本研究以多宝山II号探矿竖井工程为依托,针对极

寒地区超深竖井施工关键技术开展系统研究,形成了理论扎实、实用性强的施工成果,可为同类极寒竖井工程建设提供重要参考。在材料优化方面,通过极寒环境性能试验确定了适配超深竖井的施工材料体系。混凝土采用硅酸盐水泥,通过降低水胶比、复掺引气剂与减水剂的优化配比,显著提升低温抗冻性与早期强度,有效适配极寒施工工况;主体结构选用Q355D镍铬合金低合金钢,该钢材低温韧性与抗疲劳性能优异,保障了极寒工况下工程结构安全稳定。在设备管控方面,基于低温适应性试验结果,优选耐寒启动发动机、高稳定性提升绞车、耐寒大风量通风机等专用设备。同时建立极寒专项设备维保体系,更换低温专用润滑油与防冻液,落实设备防寒保温措施,显著提升了施工设备在极寒环境的运行稳定性与服役寿命。在施工工艺方面,采用锚网喷与钢筋混凝土联合支护工艺,有效提升井壁承载力与整体稳定性;优化钻爆参数并应用光面爆破技术,减少围岩扰动与井筒超欠挖;优化通风与排水系统,采用主次通风机联合通风改善井下作业环境,配套排水管路防冻措施,杜绝管路冻堵、积水滞留问题,保障施工连续高效推进。本研究成果既为本项目施工提供核心技术支撑,也为极寒地区超深竖井工程施工提供了宝贵借鉴。

参考文献

- [1]刘红,肖宇,肖杨,等.土体热力学性质及本构关系研究综述[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),2025(1): 1-16.
- [2]丁鑫,肖晓春,潘一山,等.煤岩本构关系与冲击倾向指标的力学分析[J].地下空间与工程学报,2020(3): 15-17.
- [3]虞洪,陈晓斌,易利琴,等.软土修正剑桥模型参数反演及其应用研究[J].岩土力学,2023(10): 38-40.