

极寒地区超深千米竖井施工技术研究综述

焦 东 赵纯林 赵鸿飞
中国华冶科工集团有限公司 北京 100176

摘 要：极寒地区超深千米竖井作为矿产资源开发、地质勘探及战略储备工程的关键基础设施，其施工面临低温环境、深厚表土层、高地应力等多重复杂条件的叠加挑战。本文结合智慧矿山、绿色开采及矿山压力与岩层控制等研究方向，系统梳理了极寒地区超深千米竖井施工的国内外研究现状。从施工环境特性、关键施工技术（包括冻结法、钻井法、支护结构优化等）、智慧化施工技术应用、绿色施工理念实践及工程案例等方面进行综述，分析了当前技术存在的问题，如低温对施工效率的制约、深厚表土层冻结壁稳定性控制难度大、智慧监测系统适应性不足等，并针对未来研究方向提出建议：强化低温-高地应力耦合作用下的岩层力学特性研究、研发适用于极寒环境的智能化装备与监测系统、完善绿色施工技术体系等。本文旨在为极寒地区超深竖井工程的安全高效施工提供理论参考与技术借鉴。

关键词：极寒地区；超深千米竖井；施工技术；智慧矿山；绿色开采

引言

随着全球矿产资源需求的持续增长，浅部资源日益枯竭，矿产资源开发逐渐向深部、复杂地质条件区域延伸。极寒地区（如我国东北、西伯利亚、北欧等）蕴藏着丰富的煤炭、金属矿等资源，超深千米竖井作为资源开发的“咽喉工程”，其施工技术水平直接决定了资源开发的效率与安全性。极寒地区的低温环境（冬季气温可达 -40°C 以下）与超深竖井的深厚表土层（厚度常超500m）、高地应力（深度每增加100m应力约增加2-3MPa）形成了独特的“极寒+超深”复合挑战，对施工技术提出了远超常规竖井的要求。

1 极寒地区超深千米竖井施工环境特性及挑战

1.1 低温环境对施工的影响

极寒地区的低温环境（年均气温低于 -5°C ，极端低温可达 -50°C ）是竖井施工的首要制约因素。一方面，低温导致混凝土强度增长缓慢，当温度低于 -5°C 时，水泥水化反应基本停滞，若未采取保温措施，混凝土易受冻破坏，强度损失可达30%-50%。另一方面，低温使施工设备性能显著下降，液压系统油液黏度增加导致动力损耗增大，钢结构焊接易产生冷裂纹，影响结构整体性。

1.2 深厚表土层与地质条件复杂性

超深千米竖井需穿越数百米甚至上千米的深厚表土层，其岩性多为黏土层、砂层及砾石层，且常伴随高水压（水头压力可达10MPa以上）。在极寒地区，表土层中存在多年冻土层与季节性冻土层交替分布的情况，冻融界面的力学性质差异显著，增加了井壁支护设计的难度。

1.3 高地应力与岩层控制难题

当竖井深度超过1000m时，地应力显著升高（垂直

应力可达25MPa以上，水平应力常为垂直应力的1.5-3倍），在极寒地区，低温环境可能加剧岩体的脆性特征，导致岩爆风险增加。研究表明，低温会使岩体弹性模量提高10%-20%，而抗压强度降低5%-15%，这种力学性能的变化使高地应力区的岩层控制更趋复杂。

2 极寒地区超深竖井关键施工技术研究现状

2.1 冻结法施工技术

冻结法作为极寒地区深厚表土层竖井施工的主流方法，通过人工冻结形成封闭冻土壁，可有效隔绝地下水并加固围岩。近年来，该技术在低温适应性优化方面取得了显著进展。

2.2 冻结壁设计与优化

传统冻结壁设计多基于单因素分析，而极寒地区需考虑自然低温与人工冻结的协同作用。国外学者Novikov等提出“自然-人工冻结耦合模型”，通过数值模拟发现，极寒地区冬季自然冻结可使人工冻结能耗降低20%-30%，但需控制冻结壁平均温度不低于 -10°C ，避免过度冻结导致的冻胀力激增。国内学者李海鹏等针对东北某煤矿竖井，采用“多圈管差异化冻结”技术，将冻结管分为主冻结圈与辅助冻结圈，主圈管控制冻土壁强度，辅圈管调节冻结速率，成功将冻结壁最大冻胀力控制在15MPa以内^[1]。

2.3 低温盐水循环系统改进

极寒地区冻结系统需应对更低的蒸发温度，传统氯化钙盐水（冰点 -29°C ）已无法满足需求。俄罗斯学者Kuznetsov等研发了氯化钙-甲醇复合盐水，冰点可降至 -40°C ，且导热系数提高15%，在西伯利亚超深竖井施工中应用，冻结效率提升25%。我国王衍森等开发了智能

盐水温控系统,通过PLC控制盐水泵流量与制冷机组输出功率,实现冻结温度波动控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内,有效避免了冻结壁温度骤变引发的裂纹。

2.4 钻井法施工技术

钻井法适用于稳定性较差的深厚表土层,在极寒地区的应用需解决低温对钻井设备及井壁预制的影响。

2.4.1 低温钻井设备适应性改造

极寒地区钻井设备的核心改造集中在动力系统与润滑系统。美国Schramm公司为阿拉斯加超深竖井项目开发的XD-1500钻井机,采用双级涡轮增压发动机,可在 -40°C 环境下正常启动,同时配备电加热润滑油箱,使油温维持在 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。国内中煤科工集团研发的ZJ30DB低温钻井机,将液压系统工作介质更换为低凝抗磨液压油(黏度指数 > 140),并对关键部件进行保温层包裹,在内蒙古 -35°C 环境下连续施工无故障运行超过1000h。

2.4.2 预制井壁低温养护技术

预制混凝土井壁在极寒地区的养护需解决强度增长与防冻问题。德国Bauer集团采用“蒸汽养护+保温被覆盖”组合工艺,在 -25°C 环境下使井壁混凝土28d强度达标率提升至98%。我国刘志强等研发了掺加纳米碳酸钙的低温早强混凝土,在 -10°C 养护条件下,3d抗压强度可达设计值的70%,且抗冻等级达F300以上,适用于极寒地区井壁快速预制。

2.5 支护结构与岩层控制技术

极寒地区超深竖井的支护结构需同时承受低温冻胀力、高地应力及地下水压力,其设计与优化是岩层控制的核心。

2.5.1 复合井壁结构设计

针对冻胀力与高地应力耦合作用,国内外学者提出了多种复合井壁形式。波兰学者Lisowski等提出“钢板-混凝土-保温层”三层复合井壁,中间保温层采用聚氨酯泡沫(导热系数 $< 0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),在波兰南部极寒矿区应用,井壁冻胀变形量控制在5mm以内。我国高明仕等研发了“柔性接头+预应力锚索”复合井壁,通过柔性接头释放部分冻胀力,预应力锚索约束高地应力引发的井壁变形,在黑龙江某煤矿竖井应用,成功抵御了18MPa的水平应力。

2.5.2 深部岩层卸压技术

高地应力区岩层控制的关键在于卸压。澳大利亚学者Hadjigeorgiou等提出“爆破卸压+注浆加固”联合技术,在竖井掘进前通过预裂爆破形成卸压带,降低岩体应力集中系数至1.2以下,再注浆填充裂隙提高岩体完整性。我国何满潮等研发的恒阻大变形锚杆,在极寒地区深部竖井

中应用,可承受200mm以上的岩层变形,且在 -30°C 环境下力学性能无显著衰减,有效控制了岩爆风险。

3 智慧化与绿色施工技术应用

3.1 智慧矿山理念下的施工监测与管控

智慧化技术为极寒地区超深竖井施工提供了精准化管理手段,主要体现在监测系统与施工仿真两方面。

3.1.1 多参数实时监测系统

极寒地区监测系统需解决低温环境下传感器可靠性问题。芬兰Vaisala公司开发的DMT143低温温湿度传感器,可在 $-50\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内稳定工作,测量精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,在挪威超深竖井施工中用于冻结壁温度监测,数据传输成功率达99%。我国张农等构建了“地面-井壁-围岩”三维监测网络,集成光纤光栅传感器(监测应变)、微震传感器(监测岩体破裂)及物联网传输模块,实现冻结壁温度、井壁位移、围岩应力等参数的实时采集与预警,在新疆某矿应用中成功预测了3次冻结壁失稳风险。

3.1.2 施工过程数值仿真与优化

数值仿真技术可提前模拟施工过程中的风险点。俄罗斯Siberian Mining University采用COMSOL Multiphysics建立了极寒地区冻结法施工的温度-应力耦合模型,精确预测了冻结壁发展速度与冻胀力分布,指导了克拉斯诺亚尔斯克超深竖井的冻结参数优化。我国李术才等开发的“竖井施工BIM+GIS”平台,将地质模型与施工进度模型融合,在虚拟环境中模拟低温对混凝土养护的影响,实现了施工方案的动态调整,使东北某项目工期缩短15%^[2]。

3.2 绿色开采理念下的环保与节能技术

极寒地区生态环境脆弱,绿色施工需重点解决废弃物处理与能耗控制问题。

3.2.1 施工废弃物资源化利用

极寒地区运输成本高昂,废弃物就地利用可显著降低环境影响。加拿大Goldcorp公司在育空地区竖井施工中,将钻井岩屑与粉煤灰混合,经低温固化剂处理后用于井口场地填筑,减少建筑垃圾外运量80%。我国周华强等研发了冻融条件下钻井泥浆循环处理系统,通过沉淀池-压滤机-干燥机联合工艺,泥浆回收率达90%以上,且处理后的清水可用于混凝土拌合,在内蒙古项目应用年节约用水1.2万吨。

3.2.2 低温施工节能技术

极寒地区施工能耗主要集中在供暖与冻结系统。瑞典LKAB公司在基律纳铁矿超深竖井施工中,采用地源热泵供暖,利用井下排水(温度约 15°C)与地面低温的温差提取热量,较传统燃油锅炉节能40%,且减少碳排放

3000吨/年。

4 工程案例分析

4.1 国内案例：中国华冶多宝山项目部II号超深探矿竖井

该竖井深度1232m，位于黑龙江省黑河市嫩江市多宝山镇小兴安岭地区，极端低温-45℃，II号探矿井井深1232m，净Φ7m，在-450m、-700m留设马头门。平面探矿工程包括-700m石门、-700m中段探矿沿脉巷道和穿脉巷道、中央变电所、避灾硐室等，岩石硬度系数 $f \leq 10$ 。

机械化配套系统：采用竖井机械化配套作业新工艺。采用V型凿井井架，两套2JKZ-4.0×2.65P大型提升机提升，YSJZ4.8型液压伞钻、HZ-6B中心回转抓岩机、矿用小型挖掘机清底、移动液压整体金属模板、风冷移动式空压机、卷扬机视频监控、卷扬机变频电控技术等；

保温系统：采用全封闭，多形式加热保温技术。现场将井架、卷扬、稳车、空压机、风机及变配电系统进行全封闭施工，同时以水暖、风暖方式同步供热，保证现场温度满足施工需求。

四新技术：积极推广研究极寒地区超深井施工关键技术、钢丝绳探测仪定期进行安全监控技术、国资委建井抓岩工序远程控制与智能化技术、马头门快速施工技术和大硐室快速施工技术、延伸式钢带过卷保护装置防过卷技术、井建工程凿岩装备智能化技术及基于BIM技术的矿山建设工程可视化模型构建与应用等新工艺新技术。

4.2 国内案例：黑龙江龙煤集团某超深竖井

该竖井深度1200m，位于大兴安岭地区，极端低温-45℃，表土层厚度680m，含3层多年冻土层。施工采用“冻结法+复合井壁”方案：

冻结系统：采用氯化钙-乙二醇复合盐水（冰点-45℃），布置3圈冻结管，冻结壁设计厚度8m，通过智能温控系统控制冻结速度，耗时18个月完成冻结。

支护结构：采用“内层钢筋混凝土+外层钢板+聚氨酯保温层”复合井壁，井壁厚度1.2m，设置柔性接缝释放冻胀力，施工期间井壁最大位移23mm。

智慧监测：安装光纤光栅传感器200余个，实时监测冻结壁温度、井壁应力及围岩变形，通过BIM平台实现数据可视化，成功预警2次冻结管堵塞事故。

4.3 国外案例：俄罗斯西伯利亚Vorkuta煤矿超深竖井

该竖井深度1500m，位于北极圈附近，年均气温-12℃，表土层厚度950m，地应力达35MPa。施工采用“钻井法+预应力支护”方案：

钻井设备：使用改装的ZJ50DB低温钻井机，配备-50℃专用液压油与电加热系统，日进尺达8m。

井壁预制：采用蒸汽养护与低温早强混凝土，在-30℃环境下7d强度达设计值80%，井壁采用预应力钢绞线张拉，有效抵抗高地应力。

环保措施：钻井岩屑经固化处理后用于路基填筑，钻井泥浆循环利用率92%，减少碳排放5000吨/年^[3]。

结论

极寒地区超深千米竖井施工是集地质、力学、材料、机械与信息技术于一体的复杂系统工程，其技术发展经历了从经验积累到科学设计、从人工操作到智能管控的演进过程。当前，冻结法与钻井法仍是主流施工方法，复合支护结构与智慧监测系统的应用显著提升了施工安全性，但在超低温材料、节能技术及生态保护方面仍存在瓶颈。未来，需以智慧矿山与绿色开采理念为引领，强化多学科交叉融合，重点突破低温-高地应力耦合机理、新型材料研发、智能化装备与低碳技术，建立适应极寒地区超深竖井施工的理论体系与技术标准，为全球极寒地区资源开发与工程建设提供支撑。

参考文献

- [1]谢和平,周宏伟,高明忠.深部资源开发与深部岩体力学研究进展[J].煤炭学报,2020,45(1):1-15.
- [2]李宁,陈蕴生,朱合华.寒区岩土工程研究进展与展望[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):905-923.
- [3]袁亮,薛生,张农.智慧矿山建设的理论与实践[J].煤炭学报,2021,46(2):349-363.