

千米深井井筒冻结法施工关键技术与安全控制

甘柱恩

江西贤友教育咨询有限公司 江西南昌 330000

摘要：本文围绕千米深井井筒冻结法施工展开研究。详细阐述了千米深井井筒冻结法施工的关键技术，包括冻结壁设计、冻结孔施工、制冷系统优化等方面。同时，深入分析了施工过程中的安全控制要点，如冻结管断裂、片帮冒顶、冻结壁变形等问题的预防与处理措施。通过对关键技术和安全控制的研究，旨在提高千米深井井筒冻结法施工的效率和安全性，为类似工程提供参考。

关键词：千米深井；井筒冻结法；关键技术；安全控制

引言

随着煤炭资源开采向深部延伸，千米深井的建设逐渐增多。井筒作为煤矿开采的咽喉工程，其施工质量和安全至关重要。冻结法是一种常用的井筒施工方法，通过人工制冷使井筒周围的岩土体冻结形成冻结壁，以抵抗地压和防止地下水涌入。然而，千米深井井筒冻结法施工面临着诸多挑战，如深部地温高、地压大、地层条件复杂等，这对施工技术和安全控制提出了更高的要求。因此，研究千米深井井筒冻结法施工关键技术与安全控制具有重要的现实意义。

一、千米深井井筒冻结法施工关键技术

(一) 冻结壁设计技术

从理论层面来看，冻结壁设计涉及到力学和热学等多学科知识。力学方面，深部地层复杂的力学环境与传统的弹性力学假设存在差异，传统弹性力学公式难以精准反映冻土与围岩的耦合作用，这体现了实际工程与理想理论模型之间的差距。厚壁圆筒理论修正公式属于弹塑性力学的应用，它考虑了材料的塑性变形，更符合深部地层中冻土和围岩在高压力下的力学行为^[1]。在热学方面，温度效应会影响冻土的力学特性，如地温升高会导致冻土黏聚力衰减等。

在冻结壁厚度计算上，采用“理论计算+数值模拟”的复合方法，这是一种将理论与实践相结合的科学手段。先通过弹塑性力学公式初步估算，为后续的数值模拟提供基础数据。利用ABAQUS建立三维模型，输入地层参数、冻土力学特性及温度场分布等信息，模拟不同开挖阶段的应力释放过程。这种数值模拟方法可以更直观地

展现冻结壁在实际工况下的力学响应，从而对冻结壁厚度进行优化。某千米矿井通过该方法将冻结壁厚度从传统计算的8.5m优化至6.8m，既满足抗渗性要求（渗透系数 $< 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ），又降低了制冷能耗，这体现了该复合方法在实际工程中的有效性和经济性。

冻结壁强度设计需分阶段动态适配施工荷载，这是基于施工过程中不同阶段的力学需求提出的。掘进阶段，围岩初始地压与爆破冲击荷载较大，采用“冻土强度×安全系数2.0–2.5”的设计标准，是为了确保冻结壁在该阶段有足够的强度抵抗外力。支护阶段考虑混凝土浇筑时的侧向压力，通过现场埋设应力传感器实时监测，能够及时掌握冻结壁的受力情况，保证施工安全。室内试验中，采用-15℃冻融循环试验模拟深部地温波动，测得冻土黏聚力衰减率约15%，据此修正强度参数，这是将实验数据应用于实际工程设计的体现^[2]。某工程通过掺入2%氯化钙改良冻土性能，使冻结壁抗压强度提升20%，成功抵御了深部断层突水压力，说明通过材料改良可以有效提高冻结壁的强度。

(二) 冻结孔施工技术

在钻孔精度控制方面，“导向-监测-修正”一体化技术体现了系统工程的思想。千米深井冻结孔深度大，采用Φ159mm孔径的满眼钻具组合（钻铤长度≥100m），配合MWD随钻测量系统（实时方位角误差<0.1°），每50m进行一次轨迹校正，这是从设备和测量手段上保证钻孔精度。针对高角度岩层（倾角>60°），采用“轻压慢转”钻进参数（钻压80–100kN，转速60–80r/min），并注入优质钻井液（黏度40–50s）平衡地层压力，这是根据不同地质条件调整施工参数，以确保钻孔精度。某矿

冻结孔施工中，通过该技术使孔斜控制在0.3%以内，确保冻结管下放顺利度达100%，证明了该一体化技术的有效性。

在钻孔施工过程中，垂直度控制采用了多种技术手段协同配合的综合控制体系。首先，自动垂直钻井系统（AVDS）作为核心控制设备，通过井下液压执行机构实时监测并调整钻具姿态，其采用闭环反馈控制机制，能够将钻孔垂直度偏差精确控制在 $0.2^\circ / 100\text{m}$ 的范围内，实现了钻孔过程的高精度自动化控制^[3]。其次，为确保测量数据的可靠性，每钻进100m就采用高精度陀螺测斜仪进行复测，当发现数据异常时，立即采用“侧钻纠偏”技术进行修正，该技术具有 $1.5^\circ / \text{m}$ 的造斜率，能够快速有效地纠正钻孔轨迹偏差，形成了对钻孔垂直度的双重保障机制。针对特殊地质条件，如在松散含水层等易坍塌地层施工时，专门采用“跟管钻进”工艺，使用 $\Phi 219\text{mm}$ 大直径套管同步跟进，有效防止了孔壁坍塌导致的垂直度偏差问题。在某实际工程应用中，通过实施这一整套多手段协同控制体系，成功将全井冻结孔的垂直度合格率从原先的85%显著提升至98%，不仅确保了冻结壁的连续性和完整性，更充分验证了这种综合控制方法的技术可行性和工程实用性，为类似工程提供了可靠的技术参考。

（三）制冷系统优化技术

制冷设备选型需匹配深部高负荷需求，这是基于热力学和工程经济学的原理。采用三级压缩螺杆机组（单台制冷量1200kW），蒸发温度低至 -35°C ，较传统活塞机组能效比提升30%，体现了新型制冷设备在能效方面的优势。配置板式换热器（换热效率 $>95\%$ ），使盐水进出口温差控制在5–8°C，这有助于提高制冷系统的效率。针对地温梯度影响，采用“分段供冷”模式，浅部（0–500m）用 -20°C 盐水，深部（500–1500m）用 -30°C 盐水，通过变频泵调节流量（ $80\text{--}120\text{m}^3/\text{h}$ ），这种根据不同深度地温需求进行供冷的方式更加科学合理。某项目采用该方案，冻结壁形成时间缩短15天，满足深部快速冻结需求，证明了该制冷设备选型和供冷模式的有效性。

制冷系统节能技术聚焦冷损控制与余热利用，符合可持续发展的理念。冻结管采用 $\Phi 127\text{mm} \times 8\text{mm}$ 低碳钢管，外裹100mm厚聚氨酯保温层（导热系数 $<0.025\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ），冷损率降至5%以下，这是通过优化材料和结构来减少冷量损失。利用螺杆机组余热（水温 $60\text{--}70^\circ\text{C}$ ）

供暖及融化盐水，年节约标准煤800t，实现了能源的二次利用。通过AI控制系统动态调节蒸发温度与盐水流量，当围岩温度波动 $\pm 2^\circ\text{C}$ 时，系统响应时间 $<30\text{min}$ ，某矿井由此实现制冷能耗降低22%，单井节约电费超300万元，说明AI控制技术在制冷系统节能方面具有巨大潜力^[4]。

二、千米深井井筒冻结法施工安全控制

（一）冻结管断裂预防与处理

从理论上来说，冻结管断裂预防涉及到材料力学和施工工艺等方面的知识。选材采用 $\Phi 127\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的20#无缝钢管（屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$ ），这是根据深部地层的高压力环境选择具有足够强度的材料。出厂前进行1.5倍工作压力（ 2.5MPa ）水压试验，确保无渗漏，这是对材料质量的严格把控。连接方式优先选用氩弧焊打底+手工电弧焊盖面的双道焊接工艺，焊口进行100%超声波探伤，合格率需达100%，这是保证焊接质量的关键步骤。下管过程中采用专用保护套管（壁厚 $\geq 10\text{mm}$ ）穿越不稳定地层，避免钻具碰撞导致管体变形，这是从施工过程中对冻结管进行保护。某千米深井通过该体系使冻结管断裂率控制在0.5%以下，说明该预防体系是有效的。

若发生断裂，“快速定位–应急封堵–永久修复”三步处理流程体现了事故处理的科学性和系统性。利用压力传感器（精度 $\pm 0.01\text{MPa}$ ）与流量监测仪定位漏点，这是基于传感器技术和流体力学原理实现对漏点的精准定位。浅部（ $< 500\text{m}$ ）断裂可采用带压补焊（预热至 150°C ，选用E5015焊条），深部断裂则先关闭该管路供冷，通过相邻冻结管加大供冷量（盐水温度降低 $2\text{--}3^\circ\text{C}$ ）维持冻结壁强度，再采用“套管跟进法”下入 $\Phi 159\text{mm}$ 修复管，环形间隙注入水泥–水玻璃浆液（水灰比1:1，凝胶时间30–60s）密封，这些处理方法根据断裂位置和实际情况进行选择，确保在不同情况下都能有效修复冻结管。某矿通过该方法36小时内完成断裂修复，未影响井筒开挖进度，说明该处理流程具有高效性。

（二）片帮冒顶预防与处理

千米深井片帮冒顶预防需建立“监测–预警–加固”联动机制，这是基于岩土力学和安全工程的原理。在冻结壁内侧每5m布置一组振弦式压力传感器（量程0–60MPa）与光纤位移计（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ），实时传输数据至监控中心，当变形速率超过 5mm/d 或压力突增20%时自动预警，这是通过实时监测冻结壁的力学状态来提

前发现潜在危险。开挖时采用“短段掘砌”工艺（段高 $\leq 1.5\text{m}$ ），临时支护选用 $\Phi 20\text{mm}$ 中空注浆锚杆（间距 $800 \times 800\text{mm}$ ）+ 50mm 厚喷射混凝土（强度C20），形成即时承载结构，这是从施工工艺和支护措施上预防片帮冒顶的发生。某工程通过该措施使片帮深度控制在 300mm 以内，说明该联动机制是有效的。

若发生冒顶，需立即启动应急响应。首先撤离作业人员，这是保障人员安全的首要措施。采用 $\Phi 108\text{mm}$ 钢管架设临时挡矸棚（间距 500mm ）封闭冒顶区，防止矸石持续垮落，这是对冒顶事故的初步处理。小规模冒顶（范围 $< 5\text{m}^2$ ）可采用“锚网喷+锚索”补强，锚索选用 $\Phi 17.8\text{mm}$ 钢绞线（抗拉强度 1860MPa ），锚固深度 $\geq 8\text{m}$ ；大规模冒顶（范围 $> 5\text{m}^2$ ）需先注浆加固（采用42.5级水泥+水玻璃双液浆，注浆压力 $3\text{--}5\text{MPa}$ ），待围岩稳定后再进行支护修复，这些处理方法根据冒顶规模进行选择，确保在不同情况下都能有效处理冒顶事故。某矿通过该方案成功处理 20m^2 冒顶事故，恢复施工仅用72小时，说明该应急响应措施具有高效性^[5]。

（三）冻结壁变形控制

冻结壁变形控制采用“精准监测+动态调控”方法，其理论基础源于岩土力学和自动化控制理论。岩土力学可帮助理解冻结壁在不同地质条件和工况下的力学响应，为分析冻结壁变形原因和规律提供理论支持；自动化控制理论则为实现对冻结壁变形的精准调控提供了方法和手段，使得监测与调控过程能够高效、准确地进行。监测系统采用“地表+井下”立体布点，地表布设全站仪（测角精度 $2''$ ）监测冻结壁顶部位移，井下每 100m 安装一组测斜管（分辨率 0.1mm/m ），配合埋入式应变计（量程 $\pm 2000\mu\epsilon$ ）实时捕捉内部应力变化，数据通过5G传输至云端平台，生成变形速率曲线（更新频率1小时/次），这种立体监测方式可以全面、准确地掌握冻结壁的变形情况。

调控措施需针对性实施，若因冷量不足导致变形（温度回升 $> 2^\circ\text{C}$ ），立即将盐水流量从 $80\text{m}^3/\text{h}$ 增至 $120\text{m}^3/\text{h}$ ，蒸发温度从 -30°C 降至 -35°C ，使冻结壁平均温度降低 $3\text{--}5^\circ\text{C}$ ，这是从制冷系统的运行参数上进行调整

以增加冷量。若因地压超限（压力 $>$ 设计值1.2倍），采用“冻结+注浆”联合加固，通过冻结管向围岩注入低温水泥浆（温度 $\leq 5^\circ\text{C}$ ），扩散半径达 1.5m ，形成“冻结壁-注浆体”复合承载结构，这是通过改变冻结壁的结构和力学性能来抵抗地压。某深井通过该方法将最大变形量从 150mm 控制至 80mm ，确保井筒开挖尺寸满足设计要求，说明“精准监测+动态调控”的方法在冻结壁变形控制方面是有效的。

结论

千米深井井筒冻结法施工是一项复杂的系统工程，面临着诸多技术难题和安全挑战。本文通过对千米深井井筒冻结法施工关键技术和安全控制的研究，提出了一系列有效的技术措施和安全控制方法。在关键技术方面，包括冻结壁设计、冻结孔施工、制冷系统优化等方面的技术创新；在安全控制方面，针对冻结管断裂、片帮冒顶、冻结壁变形等安全隐患，提出了相应的预防和处理措施。通过工程实例分析，验证了这些技术和措施的有效性。未来，还需要进一步加强对千米深井井筒冻结法施工技术的研究和创新，不断提高施工的效率和安全性，为深部煤炭资源的开发提供技术支持。

参考文献

- [1] 马宏伟. 煤矿副井千米深井冻结技术的实践[J]. 山西冶金, 2021 (006): 044.
- [2] 杜和赞. 千米深孔冻结壁纵向形成规律[D]. 中国矿业大学, 2022.
- [3] 赵天亮. 大断面千米立井巨厚含水层冻结技术及快速掘砌技术在核桃峪煤矿的成功应用[J]. 甘肃科技, 2019, 35 (2): 4.DOI: CNKI: SUN: GSKJ.0.2019-02-021.
- [4] 贾成刚. 深井特厚冲积层冻结法凿井井壁结构设计[J]. 建井技术, 2019, 40 (5): 1-4[1] 贾成刚. 深井特厚冲积层冻结法凿井井壁结构设计[J]. 建井技术, 2019, 40 (5): 1-4
- [5] 高瑞军. 高强高性能混凝土：让千米煤炭深井披上“钢筋铁骨”[J]. 中国建材科技, 2016, 0 (5): 3-4