

害分布叠加,识别风险影响区;基于有限元法分析地质扰动引发的应力应变变化,计算结构安全储备系数。采用模糊综合评价法对风险等级进行综合判定,结果以风险指数 R 表示, R 值超过 0.7 即进入重点防控区。耦合模型通过灰色关联度分析量化地质灾害对结构安全的影响程度,相关系数达到 0.85 以上时表明地质因素主导风险。该方法实现地质环境与工程响应的动态关联分析,为安全性预测与预警提供量化依据。

5.3 安全评估模型与定量评价方法研究

安全评估模型基于多参数综合分析与定量化评价方法构建,采用风险矩阵法、层次分析法与 BP 神经网络相结合的混合模型。模型输入包括地质灾害频度、地形坡度、岩性系数、渗流强度及结构应力等多维参数,通过归一化处理后进入风险计算模块。BP 神经网络利用历史监测数据训练权重,实现风险趋势预测,其平均预测精度可达 92%。模型输出以综合安全指数 S 表示, $S \geq 0.8$ 判定为安全状态, $S < 0.5$ 为高风险状态。通过多次迭代优化提升模型适应性,并与时监测数据联动,实现动态评估。该模型具备高精度、高时效与可扩展特征,为水工环工程安全管理提供定量化决策支持。

6 水工环工程安全管理与防治策略优化

6.1 地质灾害风险预控与动态管理机制

地质灾害风险预控与动态管理机制以“监测—评估—响应—反馈”闭环体系为核心,通过全过程管理实现风险最小化。预控环节以地质灾害风险图编制为基础,建立重点监测区与控制区,确定监测频率与阈值。动态管理依托信息化平台,整合气象、水文、地质与工程数据,实现实时监测与自动预警。当监测数据偏离设计阈值超过 10% 时系统自动生成风险警报,触发应急响应程序。该机制强化多部门联动与数据共享,确保信息传输的准确与及时。通过周期性评估与风险更新,构建工程全生命周期的安全监管体系,使风险识别与控制由静态转向动态,提升工程安全韧性与防灾能力。

6.2 防治工程与安全评估结果的反馈应用

防治工程与安全评估结果的反馈应用构成水工环工程管理优化的重要环节。评估结果通过数据回溯与模型修正用于防治设计,实现动态调整与持续改进。若评估结果中结构安全系数下降至设计值的 0.8 以下,系统自动触发加固方

案评估,调整防渗结构或支挡措施。监测数据与评估模型交互更新,形成数据闭环,使工程运行状态与风险变化实现实时对应。通过反馈机制将安全评估成果应用于施工质量控制、运行调度与维护决策,优化资源配置,提高治理精度。该模式实现防治工程与风险评估的耦合联动,为水工环工程长期稳定运行提供技术支撑与决策依据。

6.3 政策支持与技术创新在防治体系中的融合路径

政策支持与技术创新是构建地质灾害防治体系可持续发展的关键动力。国家层面出台的《地质灾害防治规划》《水利工程安全管理条例》等政策,为制度设计与资金投入提供保障。地方政府结合区域地质特征制定分区防控策略,推动防治标准化建设。技术创新方面,遥感监测、无人机航测、物联网传感与人工智能算法的融合应用显著提升风险识别与决策效率。信息化监管平台实现防治项目全过程数字化管理,数据共享率提升 40% 以上。政策推动与技术创新形成互促关系,促使防治体系从工程防护向智能防控转变,构建以科技支撑为核心的长效机制,保障水工环工程与地质环境的协同安全发展。

7 结语

地质灾害防治与水工环工程安全性评估的融合研究,是实现工程安全、生态稳定与资源高效利用的关键路径。通过构建完善的防治体系、建立科学的风险评估模型以及引入信息化监测技术,能够有效提升工程抗灾能力与运行安全水平。实践表明,强化地质环境调查、推进动态监测与智能化预警,是降低工程风险的有效途径。未来防治工作应在政策引导、技术创新与管理协同的支撑下,形成多层次、全周期的安全管理格局,实现从“灾后治理”向“灾前预控”的转变,为我国重大水工环工程的安全运行和生态文明建设提供持续的技术保障与科学支撑。

参考文献

- [1] 崔闯,李凤萍.水工环地质调查和评价在露天矿开采边坡中的应用[J].有色金属设计,2025,52(03):117-122.
- [2] 宋小军.水工环地质技术在矿山地质灾害防治中的应用分析[J].能源与节能,2025,(09):341-344.
- [3] 刘彦阳.矿山水工环地质灾害综合防治策略的研究与实践[J].冶金管理,2025,(08):87-89.
- [4] 洪宇.水工环地质勘查技术在矿山地质灾害防治中的应用[J].中国资源综合利用,2025,43(08):33-35.

Research and Application of High-Temperature Resistant High-Density Cement Slurry System

Shuangquan Li Shuangjin Zheng

School of Petroleum Engineering Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract

In response to the challenges of high temperature and high pressure encountered in cementing operations for deep natural gas wells in China's Sichuan-Chongqing region, this study systematically selected high-temperature-resistant, high-density weighting materials and functional additives based on the principles of dense packing and particle-size distribution. Through laboratory-optimized formulations, a high-temperature high-density cement slurry system suitable for high-temperature and high-pressure environments was developed. The system features an adjustable density range of 1.90–2.40 g/cm³, temperature resistance up to 150°C, and demonstrates excellent sedimentation stability, rheological properties, and gas migration resistance. It provides reliable technical support for cementing operations in deep high-temperature high-pressure wells.

Keywords

Cementing; High-Temperature Resistance; High-Density; Cement Slurry; Dense Packing; Particle-Size Distribution

抗高温高密度水泥浆体系研究与应用

李全双 郑双进

长江大学石油工程学院, 中国 · 湖北 荆州 434000

摘 要

针对国内川渝地区深层天然气井固井作业面临的高温和高压难点, 本文基于紧密堆积与颗粒级配原理, 系统优选抗高温高密度加重材料和功能外加剂, 通过室内实验优化配比, 构建了一套适用于高温高压环境的抗高温高密度水泥浆体系。该体系在密度1.90~2.40 g/cm³范围内可调, 抗温能力达150°C, 具有良好的沉降稳定性、流变性能和防气窜能力。为深层高温高压井固井提供了可靠技术支撑。

关键词

固井; 抗高温; 高密度; 水泥浆; 紧密堆积; 颗粒级配

1 引言

川渝地区深层天然气井具有井底温度高、地层压力大的特点, 常规水泥浆体系难以满足固井质量要求。高温高压环境下, 水泥浆易出现沉降稳定性差、流动性不良、强度衰退、气窜等问题。为此, 国内外学者围绕高密度水泥浆体系开展了大量研究^[1]。斯伦贝谢公司开发的 DensCrete 体系通过优化颗粒级配实现高密度与良好流动性; 哈里伯顿公司研发的可分散加重剂提升了现场混配效率。国内研究多集中于加重材料与外掺料的优选, 但在抗高温外加剂方面仍存在性能不稳定、成本高等问题。本文结合紧密堆积理论与颗粒级配技术^[2], 系统研究抗高温高密度水泥浆的组成与性能, 旨在形成一套适用于川渝地区的高性能水泥浆体系。

【作者简介】李全双(1988–), 男, 中国山东青岛人, 本科, 工程师, 从事石油固井技术研究与应用研究。

2 材料优选与体系构建

2.1 加重材料优选

高密度水泥浆体系中, 加重材料的性能直接影响浆体的密度、稳定性和强度^[3]。通过对重晶石、钛铁矿、赤铁矿、还原铁粉和高效加重剂的对比分析(表1), 赤铁矿因其密度高(4.8~5.2 g/cm³)、需水量小、流动性好, 被选为主要加重材料。

表 1 加重剂性能对比

加重剂	密度/(g/cm ³)	特点	加重能力/(g/cm ³)
重晶石	4.1-4.4	吸水大, 增稠	≤2.28
赤铁矿	4.8-5.2	吸水大, 微增稠	≤2.60
钛铁矿	4.4-4.5	吸水小, 增稠	≤2.40
还原铁粉	6.5-7.5	沉降稳定性差	≥2.60
高效加重剂	4.8	悬浮稳定性好	≤3.0

基于颗粒级配理论, 确定三级颗粒最佳粒径比例为: $r_1 : r_2 : r_3 = 1 : 0.475 : 0.09$, 对应质量比为 117:25:1。实验表明,

三级级配水泥浆的抗压强度显著高于单一级配（表 2），且流变性更优。

表 2 三级颗粒级配对水泥石抗压强度的影响

颗粒级配类型	抗压强度 /MPa（60℃）	抗压强度 /MPa（90℃）
一级颗粒	16.65	19.63
二级颗粒	18.88	21.62
三级颗粒	21.76	23.73

2.2 强度稳定剂优选

为抑制高温下水泥石强度衰退，引入硅粉作为高温稳定剂^[4]。硅粉与水泥水化产物反应生成低钙硅比的水化硅酸钙，提升高温强度。实验表明，硅粉加量为 15% 时，水泥石在 130℃ 下 48 h 强度达 24.5 MPa。

2.3 外加剂优选

防气窜剂：本文优选有机胶乳与纳米液硅作为放弃窜剂，其主要特色是与缓凝剂配伍性良好，加量对水泥浆稠化时间的影响较小，通过计算试验评价数据计算水泥浆防气窜能力的性能系数 SPN 值均小于 3，具备较好的防气窜能力^[5]。

降失水剂：本文选用一种高分子聚合物^[6]并掺以特定的辅助材料组成的降失水剂，在水泥浆中能够有效的吸附于水泥颗粒表面，改变水泥颗粒表面的物理化学性能，形成一种以水泥颗粒为节点的网状聚集体，在颗粒表面迅速覆盖孔道形成致密的滤饼，从而有效降低水泥浆的滤失。其适用于 70 ~ 150℃ 范围内 API 标准各级油井水泥，且与其他外加剂配伍性强，在合理加量范围内均可以控制失水量在 50 mL 以下，对水泥石强度影响小。

膨胀剂：本文选用了金属氧化物类膨胀剂，在加量为 4%

时，通过室内水泥浆养护 7 天后的膨胀率结果显示，其水泥石膨胀率达 1.17%，胶结强度提升 152.4%。

缓凝剂：针对抗高温和大温差作业条件，依据缓凝机理，选取合适缓凝剂，缓凝剂的加量敏感性和温度敏感性必须满足行业标准，本文优选的缓凝剂在 80 ~ 130℃ 范围内可灵活调控稠化时间，具有良好的温度广谱性和加量敏感性。

2.4 确定体系配方

结合抗高温高密度水泥浆体系需求，在满足水泥浆浆体性能和水泥石力学性能前提下，系统优化外加剂的加量，由此确定出抗高温高密度水泥浆体系。

（1）加重型领浆配方：G 级水泥 + 铁矿粉 + 硅粉 + 降失水 + 膨胀剂 + 胶乳 + 缓凝剂 + 淡水

（2）防气窜尾浆配方：G 级水泥 + 硅粉 + 降失水剂 + 膨胀剂 + 胶乳 + 缓凝剂 + 淡水

3 水泥浆体系性能评价

3.1 基本性能

构建的领浆与尾浆体系密度分别为 2.25 g/cm³ 与 1.90 g/cm³，失水量分别为 28 mL 与 36 mL，自由水为 0，稠化时间分别为 286 min 与 189 min，均满足现场施工要求。

表 3 水泥浆基本性能

项目	领浆	尾浆
密度 /(g/cm ³)	2.25	1.90
失水量 /(mL)	28	36
稠化时间 /min	286	189
48 h 强度 /MPa	18.3	22.1
自由水 /mL	0	0

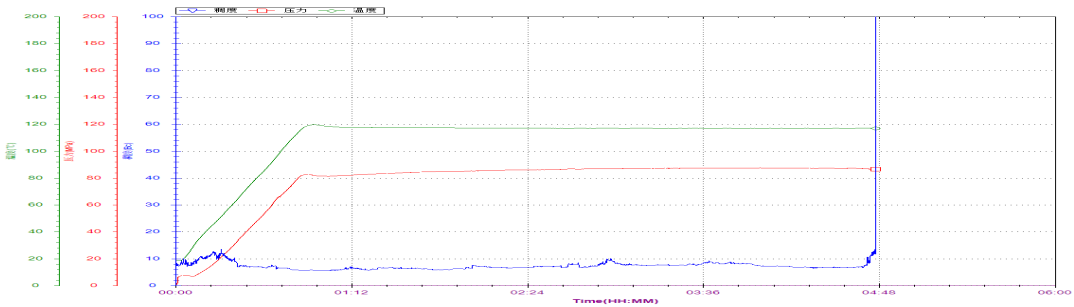


图 1 加重型防气窜领浆稠化曲线

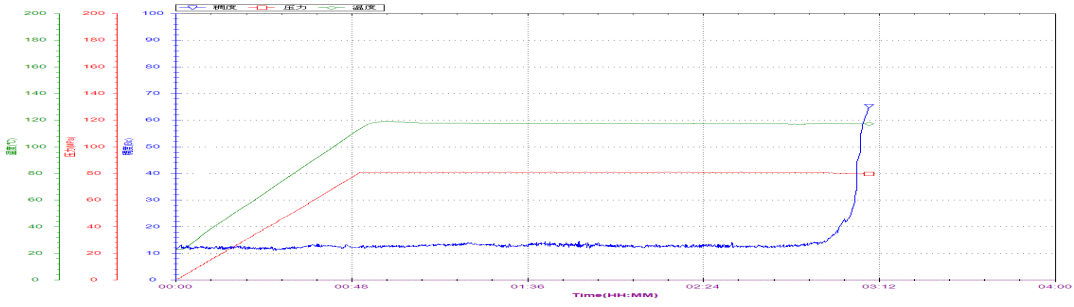


图 2 弹韧性防气窜尾浆稠化曲线