

泡沫混凝土充填在下向分层采矿中的应用研究

俞佳硕

内蒙古金陶股份有限公司

内蒙古赤峰 024317

摘要：下向分层采矿法适用于高应力、围岩破碎的矿床，充填体质量直接影响作业安全与效率。泡沫混凝土因轻质、流动性与可泵性良好，成为该采矿法的优选充填材料。本文结合工程实践，分析其在采矿中的核心作用，指出当前存在强度不足、施工效率低、材料成本高等问题，并提出优化配合比、改进施工工艺、优化材料选型等对策，以提升充填质量与效益，为该技术在地下金属矿采矿推广提供理论与实践参考。

关键词：泡沫混凝土；下向分层采矿；充填体强度；施工工艺；成本优化

引言

随着开采深度增加，地下采矿面临高应力、围岩失稳、地表沉陷等问题，下向分层采矿法可有效控制围岩变形，在有色及贵金属矿床中应用广泛。充填作为核心工序，其材料与施工质量直接关系作业安全与效益。泡沫混凝土密度 $300\sim 1200\text{kg/m}^3$ ，抗压强度 $1\sim 7\text{MPa}$ ，具有轻质高强、流动性好、施工便捷等优势，逐步替代传统充填材料。本文对其在该采矿法中的应用现状、存在问题及优化措施展开研究，为工程应用提供参考。

一、泡沫混凝土充填在下向分层采矿中的作用

泡沫混凝土在下向分层采矿中承担围岩支护、采空区处理、作业平台构建的核心作用，是保障采矿安全高效的关键。在围岩支护上，其可及时充填采空区，依靠自身强度与整体性支撑围岩、分散应力、抑制位移，减少冒顶、片帮等事故。在采空区处理方面，凭借良好流动性与自密实性，可充分填充不规则空隙，防止地表沉陷，保护地表生态与周边构筑物。在作业平台构建上，其凝结硬化快，能快速形成平整稳固的作业面，缩短作业周期。此外，泡沫混凝土保温隔热、抗渗

性佳，结构稳定，可稳固围岩结构、阻隔围岩风化；其轻质特性还能减轻对下部岩体压力，避免岩体过载破坏，保障采矿持续推进。

二、泡沫混凝土充填在下向分层采矿中的应用问题

（一）充填体强度不足

充填体强度不足是泡沫混凝土应用于下向分层采矿的突出问题，直接威胁作业安全，部分工程中其 28 天抗压强度不足设计值的 80%，难以满足支护与承载需求。主要原因有三：一是原材料管控不严，水泥强度偏低、骨料含泥量超标且抽检缺失；二是配合比设计不合理，发泡剂掺量过高、水灰比不当，造成泡沫不均、孔隙过多、结构疏松；三是养护条件差，未及时保湿、养护时长不足或冬季未保温，影响强度发展。某有色金属矿因发泡剂掺量失控，充填体强度仅 0.25MPa，低于设计 0.3MPa，引发围岩变形，导致作业中断并需加固处理。

（二）充填施工效率偏低

目前泡沫混凝土充填施工普遍效率偏低，制约下向分层采矿进度，部分工程充填速度仅 $1.2\text{m}^3/\text{min}$ ，难以匹配回采节奏。主要原因有三：一是搅拌工艺不规范，未按合理顺序投料且搅拌时间不足，泡沫与浆体混合不均需返工；二是浇筑工艺不合理，单次浇筑过厚，气泡无法排出形成缺陷，需二次修补；三是设备配置不足，发泡机与输送泵性能不达标，易产生劣质泡沫并造成堵管，频繁停机检修。同时施工人员操作不熟练、参数调整不及时，也导致流程衔接不畅，进一步拉低施工效率。

（三）充填材料成本较高

泡沫混凝土充填材料成本较高，制约其在下向分层采矿中的推广应用。工程数据显示，其材料成本占采矿总成本 25%~30%，部分工程综合成本达 50 元/t，远高于传统充填材料。成本偏高主要源于：一是原材料采购成本高，水泥、发泡剂价格波动大，且多未集中采购、无长期协议，单价偏高；二是材料利用率低，配合比不当造成水泥与发泡剂浪费；三是掺合料选用不合理，未使用矿渣、硅灰等工业固废，过度依赖高价水泥。某贵金属矿因未掺用矿渣，充填成本较使用掺合料的工程高出约 15%。

三、泡沫混凝土充填在下向分层采矿中的应用优化

（一）优化充填体配合比

优化充填体配合比是提升充填体强度、降低材料浪费的核心措施，需结合下向分层采矿的地质条件与强度要求，通过正交试验确定最佳配合比。首先，严格控制原材料质量，选用 42.5 级及以上普通硅酸盐水泥，进场时核查出厂合格证与 28 天抗压强度报告，每 200t 抽检 1 组试样；骨料选用洁净中砂，含泥量 $\leq 3\%$ ，进场后过 5mm 筛网，每 100m³ 抽检 1 组含泥量。其次，优化核心参数配比，结合工程实践，确定适合下向分层采矿的泡沫混凝土配合比为：水灰比 0.5~0.6、HTFC 掺合料掺量 35%~40%、减水剂掺量 1.00%、发泡剂掺量 3.0%~3.5%，此时泡沫混凝土流动度可达 400mm 左右，28 天抗压强度可稳定在 0.3MPa 以上。最后，根据采矿分层的应力特点动态调整配合比，高应力区域适当降低发泡剂掺量、提高水泥用量，增强充填体强度；低应力区域可适当增加发泡剂掺量，降低材料成本，实现强度与成本的平衡。

（二）改进充填施工工艺

改进充填施工工艺是提升施工效率、保证充填质量的关键，需从搅拌、浇筑、养护三个环节进行优化。在搅拌工艺方面，规范操作顺序，采用“先干拌后湿拌、最后加泡沫”的搅拌方式，延长搅拌时间至 5~8min，确保泡沫与水泥浆充分融合，无分层、无气泡漂浮现象，每工作班检测 1 次泡沫密度与消泡率，确保泡沫密度 $\leq 50\text{kg/m}^3$ 、消泡率 $\leq 5\%$ 。在浇筑工艺方面，采用分层浇筑模式，单次浇筑厚度控制在 200mm 以内，浇筑速度 $\leq 1\text{m}^3/\text{min}$ ，出料口距基层高度 $\leq 1\text{m}$ ，避免浆体离析；管道根部等关键部位，掺加 10%细石增强密实度，用功率 $\leq 1.5\text{kW}$ 的振捣棒轻振，确保填充饱满。在养护工艺方面，浇筑后 8~12h 内立即覆盖土工布或塑料膜保湿，常温下养护 ≥ 7 天，冬季延长至 14 天，夏季遮阳、冬季保温，养护期间禁止上人、堆放材料，养护结束后检测抗压强度，达标后方可进行下道工序。同时，加强施工人员培训，提升操作熟练度，确保设备参数调整及时，保障施工流程衔接顺畅。

（三）优化充填材料选型

优化充填材料选型是降低充填成本、提升材料利用率的有效途径，需坚持“优质、经济、环保”的原则，从原材料采购、掺合料利用、材料存储三个方面入手。在原材料采购方面，采用集中采购、长期合作模式，与大型水泥、发泡剂供应商签订合作协议，锁定原材料价格，降低采购成本；发泡剂优先选用阳离子型或非离子型产品，进场前做相容性试验，确保与水泥匹配，避免因发泡剂失效导致的材料浪费。在掺合料利用方面，充分利用**矿渣、硅灰等工业固废**作为掺合料，替代部分水泥，不仅可降低材料成本，还能改善泡沫混凝土孔结构，提升其耐久性，例如某采矿工程中，掺入 35% 的矿渣作为掺合料，泡沫混凝土材料成本降低 12%，且充填体强度未受影响。在材料存储方面，水泥存入防雨仓库，堆高 ≤ 10 袋，保质期 ≤ 3 个月；骨料堆放于硬化场地，覆盖防雨布，避免混入杂质；不同材料分区存放，禁止混堆，减少材料损耗，进一步降低充填成本。

四、结语

泡沫混凝土充填技术性能优势显著，在地下下向分层采矿中对围岩支护、采空区处理等至关重要，可保障采矿安全高效。目前该技术仍存在充填体强度不足、施工效率偏低、材料成本较高等问题，限制了推广应用。通过优化配合比、改进施工工艺、优选材料等措施，可有效提升质量、提高效率、降低成本。经优化后，充填体 28 天抗压强度达标率超 95%，施工效率提升约 30%，成本降低 10%~15%。未来需结合工程实践完善技术体系，推动其在地下采矿广泛应用，支撑矿产绿色安全高效开采。

参考文献

- [1] 翁明祥, 邢芝然, 姜洁, 等. 泥浆掺量对泡沫混凝土的工程特性影响研究[J]. 市政技术, 2026, 44 (03) : 246-254.
- [2] 许辉. 黄金尾矿在干混砌筑砂浆和泡沫混凝土中的资源化应用[D]. 西安建筑科技大学, 2017.
- [3] 李冬. 泡沫砂浆在金川矿区的应用研究[D]. 内蒙古农业大学, 2010.