

# 煤矿井下充填安全高效开采技术及应用研究

朝格日格

西乌珠穆沁旗应急管理局 内蒙古锡林郭勒盟 026200

**摘要：**煤矿井下充填开采技术通过在采空区及时回填材料，形成有效支撑结构，可显著提高顶板稳定性，减少地表沉陷与采动影响，并为深部及复杂地质条件下的资源高效回收提供可靠途径。近年来，随着智能化装备和绿色开采理念发展，充填工艺由传统方式逐步向高效、可靠与安全协同提升方向演进。为应对深部高应力环境、复杂岩体结构和高效生产需求，本研究围绕材料适配、工艺优化和系统化应用展开，提出可操作性的解决方案与实施路径。通过对典型矿井应用情况的分析，论证充填技术在保障安全、提高资源回收率和促进绿色矿山建设方面的综合价值，为相关技术的推广提供实践依据。

**关键词：**充填开采；安全高效；顶板控制；绿色矿山；工艺优化

## 引言

我国煤矿开采深度不断增加，地压显现更为强烈，地表生态与地质环境保护要求同步提高，使传统采煤方式在安全和可持续方面面临新的挑战。井下充填开采作为一种可以同步控制地压、减少沉陷、提高回采率的关键技术，在深部、破碎围岩及采厚煤层等工况下具有明显优势。随着充填设备升级、管路输送技术改进以及材料体系不断完善，该方法的应用边界持续扩大。本研究从实践需求出发，重点关注充填技术在现场应用中的关键矛盾和突破方向，形成一套面向安全与效率并重的技术体系，为煤矿智能化和绿色化开采提供可实施的技术支撑。

## 一、井下充填开采的技术基础与应用现状

### 1. 充填开采的发展历程与基本原理

我国充填开采技术最早应用于浅部厚煤层治理，初期以矸石与砂浆回填为主，用以维持采空区的基本稳定。随着深部开采推进，地压增大导致传统支护方式难以适应，促使高浓度浆体材料、长距离输送系统和连续化作业模式逐渐形成。目前的充填机理主要基于力学约束原理，通过向采空区注入适配材料以形成空间支撑体，使围岩应力得以重新分布，减弱集中载荷并提高顶板持稳能力<sup>[1]</sup>。为量化支撑效果，行业通常以充填体早期强度、弹性模量和固结时间作为评价参数，并通过试验室模型与现场实测进行校核。由于煤岩体结构差异显著，不同矿区对材料沉积速度、充盈系数与扩散半径均提出独立需求，使充填技术的演进呈现针对性增强的趋势。

## 2. 常用充填方式与装备系统构成

井下充填方式主要包括高水材料充填、胶结充填和固体充填三类，高水材料以快速泵送和低阻输送见长，胶结充填适用于需获得较高承载力的深部采场，而固体充填更多采用矸石或剥离物，依托密闭带和耙斗系统完成堆积。在装备配置方面，充填站通常由储料仓、搅拌设备和计量单元构成，输送系统以高压泵、耐磨管路与耦合接头为核心，使材料在不同坡度与距离下保持稳定流态。为展现各类方式的性能差异，可参考表1中的关键参数。装备系统的布置不仅受采区位置影响，也受主运巷能力、供水压力和井底车场结构约束，使不同矿井在系统组合上形成明显差别。

表1 不同充填方式的典型技术参数对比

充填方式	早期强度 (MPa)	输送距离 (m)	材料浓度 (%)	固化时间 (h)
高水材料	1.0-2.0	800-1500	68-72	6-12
胶结充填	2.5-6.0	600-1200	72-78	8-24
固体充填	0.8-1.5	300-600	—	—

## 3. 国内外典型应用与实践特征

国外煤矿多在厚煤层及深部采场采用胶结充填，以应对高地压环境，典型如美国伊利诺伊盆地与德国鲁尔区，其技术特点是材料配比标准化、泵送压力高和充填连续性强。国内应用则更加复杂，部分矿区在近断层或破碎带条件下采用高水材料以获得较快的支护成型速度，而在厚煤层或上覆岩层较硬处采用胶结充填以提升承载性能。由于我国矿井多为大倾角或多煤层叠置结构，充

填工艺需兼顾不同层位的应力传递与空间形态，使常规参数需要在现场实时校准。国内技术还普遍将监测数据嵌入工艺控制中，使充填体扩展范围和密实度能够持续调整。

## 二、充填开采关键技术的安全保障途径

### 1. 顶板稳定控制与充填体承载性能提升

深部采空区的顶板稳定性取决于充填体的早期承载力与变形协调能力，在高应力环境下，顶板移动速率通常高于浅部，使充填体受力更集中。为量化支撑需求，需根据围岩强度、层间结构与采高计算所需的最小承载能力，再结合流态扩散规律确定材料配比。以某矿现场数据为例，当顶板厚度超过18米且采高达到4米时，充填体平均承载力须达到3.5兆帕以上才能维持稳定。充填体的力学性能受水胶比、固含量与添加剂影响，其中提高浓度可提升强度，但会增加泵送阻力，需要在工艺能力范围内寻找平衡区。为展示材料性能与承载力关系，可参考表2中的数据，使材料设计更具针对性。

表2 水胶比与充填体抗压强度关系

水胶比	1天强度 (MPa)	7天强度 (MPa)	28天强度 (MPa)
0.6	1.2	3.1	5.4
0.7	1.0	2.6	4.5
0.8	0.8	2.1	3.7

### 2. 充填作业过程中的风险识别与应对

井下充填系统在连续运行状态下容易受流态变化、输送压力波动与巷道环境影响，风险主要集中在管路堵塞、压力超限以及材料离析。堵塞多发生于变坡段和弯管处，可通过控制浆体浓度和流速减小沉积。同时，输送压力的实时监测是识别系统异常的关键，现场数据表明，当压力波动幅度超过稳定区间的15%时，系统运行状态开始出现不稳定迹象，需要立即调整泵速或更换流态。离析风险往往由配料精度不足引起，通过提高搅拌均匀度与计量校准频率可降低发生概率。安全监测单元通常配置压力传感器、流量计和温度监测装置，使操作人员能及时识别异常参数变化并进行处理<sup>[2]</sup>。

### 3. 复杂条件下充填系统的可靠运行策略

在地质构造复杂或受断层影响的采空区，充填材料扩散路径往往受围岩裂隙和空间形态限制，输送系统必须保持稳定流态。为提高系统可靠性，可在管路布置上采用等压分段措施，使长距离输送的压力梯度更加均衡。此外，井下注水量变化会影响材料浓度，需要对搅拌系

统配置自动补水单元，使浓度保持在设定区间。对于高倾角煤层，可通过调整出料方向与扩散角度，使材料沿倾斜面均匀堆积，减少局部空隙。现场运行数据表明，当系统维持在设计流量的90%至105%区间时，堵塞概率最低，设备磨损也更可控。为提升系统运行稳定性，可参考表3所列的主要设备参数范围。

表3 充填系统关键设备运行参数

设备	额定压力 (MPa)	额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	建议负荷率 (%)
高压泵	10-12	45-60	80-95
搅拌机	—	25-40	70-85
管路	8-10	—	75-90

## 三、高效充填开采的工艺优化方法

### 1. 充填材料适应性选择与性能改良

材料的适应性主要由地质特征、采高、顶板结构与输送能力决定，高水材料适用于需要快速凝结与细小缝隙填充的区域，胶结材料则适用于承载要求更高的采场。材料性能的改良常通过提高固含量与添加活性组分实现，使早期强度与后期稳定性兼顾。为验证适配性，可通过室内试验测得凝结时间、渗透系数与黏度区间，并与井下输送条件进行匹配。在深部高应力条件下，需关注材料的体积稳定性，使其在固结阶段保持较小变形。材料流变性能对泵送效率影响显著，黏度过高会导致压力急剧升高，而黏度过低会加剧离析，使性能匹配成为关键环节。

### 2. 输送与灌注工艺的效率提升技术

输送效率受泵送能力、管路磨损与流态稳定程度影响，高压泵的流速与压力是决定材料到达速度的核心参数。为提升效率，多数矿井采用变频控制技术，通过调整转速使流量稳定。管路磨损会增加局部阻力，需要使用耐磨材料并定期进行流量衰减测试。灌注阶段的扩散半径取决于材料黏度与出料口角度，可以通过优化扩散结构提高填充质量。现场监测表明，扩散半径在1.5至2.2米区间时充盈效果较好，既能减少空隙又保证材料沉降速度。为降低停泵等待时间，多数矿井将搅拌循环与输送切换同步，使材料在最短周期内形成连续作业。

### 3. 智能化监测与协同控制的应用路径

智能化监测系统通过传感网络、数据采集模块与反馈算法实现对充填过程的实时把控。压力、流量与浓度是核心监测参数，通过将多点传感器布设在关键节点，使数据能够反映输送路径中的状态变化<sup>[3]</sup>。协同控制系

统基于模型计算，自动调整泵速与补水量，使流态维持在设计区间。现场案例显示，采用智能化控制后，管路压力波动幅度降低至10%以内，堵塞率显著下降。系统还可关联巷道稳定性参数，使充填体扩散范围在地质约束内保持合理分布。通过可视化界面，操作人员能够即时获得运行状态，为工艺调整提供可靠依据。

#### 四、充填开采技术的综合应用与实践示范

##### 1. 典型矿井充填开采应用案例

某深部矿井在采高3.8米和顶板厚度21米的综合条件下，为提高采空区稳定性选用高浓度胶结材料作为主要支撑介质。材料在井上搅拌站完成配制后，通过大功率泵站实现约1200米的连续输送，使其在较长距离和较大高差的工况中仍能保持稳定流动状态。现场监测结果显示，已固结充填体的28天抗压强度达到5.2兆帕，地表沉降被控制在30毫米以内，顶板位移曲线呈现平缓变化趋势，说明支撑体系有效缓解了深部高地压环境中的集中载荷。为进一步评估充盈质量，技术人员利用钻孔取芯方法对不同位置的密实度进行检验，平均密实度达到92%，局部区域在调整扩散角度和改变出料方向后呈现更均匀的堆积形态。该矿井的实践表明，在复杂地质结构和高应力约束下，通过匹配材料性能与优化输送和扩散参数能够获得更可靠的空间支护效果，从而保障深部开采过程的持续推进。

##### 2. 安全高效开采模式的构建与验证

安全高效开采模式以充填系统的稳定运行作为核心支点，通过材料性能提升、输送系统调控以及监测技术协同运行构建完整工艺链条，使采空区在开采全过程中保持可控状态。该模式强调高浓度、高均质材料的持续供应，同时保持泵送流量的稳定，使材料在到达采空区后形成可预测的扩散范围并快速固结。现场试验区的监测数据显示，应用该模式后采空区应力分布明显趋于均衡，顶板移动速率下降约35%，资源回采率提升至92%以上。为保持流态稳定，关键节点配置了自动调节单元，通过实时接收传感器反馈调整补水量与泵速，使材料浓度始终处于设计范围。作业人员可利用监测平台及时识别输送压力、流量和扩散状态的变化，使复杂环节实现快速响应，保障系统从配制到固结的全过程维持在高效区间。

##### 3. 推广应用中的关键问题与实施建议

充填技术在不同类型矿井推广时面临材料适应性、

装备标准化和监测体系配置差异较大的现实需求，使前期准备与参数校准成为影响应用效果的重要环节。各矿井在埋深、岩层结构、巷道布局和采场尺寸方面存在显著差异，因此在实施前需开展材料适配性试验，以确定凝结时间、扩散能力与承载性能等关键指标的可用范围。装备标准化能够减少运维强度，使系统在不同采区间具备更好的互通性和替换性，同时可降低由于设备差异带来的参数偏移<sup>[4]</sup>。监测系统的布设密度和处理能力直接影响数据可靠性，需要根据巷道结构和输送线路进行针对性优化，使压力、流量和浓度信息能够覆盖关键位置。不同地区矿井在生产节奏与资源结构上的差异使参数难以完全通用，通过建立区域化参数库和实施动态修正策略可以提升技术迁移效率，为充填工艺在更广范围内稳定运行提供基础。

#### 结语

综上所述，煤矿井下充填开采技术不仅能够有效改善采动地压环境，还能够在提升资源回收率和减少地表扰动方面发挥重要作用，是推动绿色矿山建设的重要技术路径。本研究围绕安全保障、工艺优化和系统应用提出了一套具有可操作性的措施，为应对深部开采、复杂地质条件及高强度生产需求提供了科学可行的思路。未来，通过智能化监测、材料创新与工艺集成，可进一步提升技术的可靠性与适应性，使充填开采在保障矿井安全与提升经济效益方面持续发挥更大作用。

#### 参考文献

- [1] 魏玲玲. 煤矿井下充填安全高效开采技术及应用研究[J]. 能源与节能, 2025, (11): 297-299.
- [2] 惠平, 刘涛, 姜成达. 煤矿井下连续采煤机短壁充填开采工艺的应用[J]. 中国新技术新产品, 2025, (21): 51-54.
- [3] 彭海源, 张培贤. 新型注浆充填技术在煤矿井防治水中的应用研究[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(05): 38-41.
- [4] 王国法, 任怀伟, 富佳兴. 煤矿智能化建设高质量发展难题与路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(01): 1-18.
- [5] 安伟. 煤矿井下工作面支护技术与安全高效开采[J]. 矿业装备, 2024, (02): 119-121.