

# 地下矿山开采技术的创新与发展趋势研究

江定富

四川 乐山 614000

DOI:10.61369/ERA.2025120024

**摘要：**地下矿山开采技术包括多种方法，各有特点。同时面临岩爆、通风等问题。5G+等智能化技术带来新可能，还有岩层控制等创新技术。生态扰动控制、能源协同优化等也很重要。呈现多技术融合、协同化发展和产业链整合创新趋势，正朝智能化、绿色化、协同化方向发展。

**关键词：**地下矿山开采；技术创新；智能化

## Research on The Innovation and Development Trends of Underground Mining Technology

Jiang Dingfu

Leshan, Sichuan 614000

**Abstract :** Underground mining techniques include various methods, each with its own characteristics. At the same time, it is confronted with problems such as rockburst and ventilation. Intelligent technologies such as 5G+ bring new possibilities, as well as innovative technologies like rock strata control. Ecological disturbance control and energy collaborative optimization are also very important. It is showing a trend of multi-technology integration, collaborative development and industrial chain integration and innovation, and is moving towards intelligence, greenness and collaboration.

**Keywords :** underground mining; technological innovation; intelligentization

## 引言

随着我国2020年提出的《新能源汽车产业发展规划（2021－2035年）》等一系列推动科技进步和产业升级的政策发布，科技在各行业的应用不断深入。地下矿山开采领域也不例外，其开采技术正朝着智能化、绿色化、协同化方向发展。钻孔爆破法等传统技术不断改进，5G+远程操控系统等智能化技术逐渐应用，同时注重生态扰动控制和能源协同优化，在岩层控制、安全防护、综合防控等方面也不断创新，还面临标准完善和人才培养等关键问题，需构建良好生态体系以促进发展。

## 一、地下矿山开采技术现状分析

### （一）现有技术体系概述

地下矿山开采技术主要包括钻孔爆破法、空场采矿法和填充采矿法等。钻孔爆破法是一种常用的传统开采技术，通过钻孔、装药和爆破等工序，将矿石破碎并开采出来。其技术特点是操作相对简单，但对爆破参数的控制要求较高，以确保开采安全和效率<sup>[1]</sup>。空场采矿法主要适用于矿体稳固的矿山，该方法通过留设矿柱支撑采空区，以减少地表塌陷的风险。这种方法能够有效提高矿石回收率，但对矿柱的设计和维护要求严格。填充采矿法是在采空区填充合适的材料，以控制地压和防止地表塌陷。该方法能提高开采安全性，但填充成本较高，且填充材料的选择和填充工艺的优化是关键问题。在机械化装备配置方面，全球主要矿企不断推进采矿设备的升级换代，提高开采效率和安全性，但不同矿企之间存在一定差异。

### （二）技术应用痛点解析

地下矿山开采随着深度增加，岩爆风险加剧，这对开采安全构成严重威胁。由于深部岩体应力集中，能量积聚，在开采扰动下易发生岩爆，给人员和设备带来极大危险<sup>[2]</sup>。通风系统效能不足也是一大痛点，随着开采深度和范围的扩大，通风阻力增大，通风困难，有害气体难以排出，良好的通风环境难以保障，影响作业人员健康和生产效率。复杂矿体的三维建模精度有待提升，矿体形态复杂多样，现有的建模技术难以精确呈现其真实结构，导致开采设计不合理，资源回收率降低。

## 二、开采技术创新方向研究

### （一）智能化技术突破

5G+远程操控系统为地下矿山开采带来新的可能。它凭借低延迟、高带宽的特性，实现了对开采设备的精准远程控制<sup>[3]</sup>。操

作人员可在安全区域对井下设备进行实时操控，极大提高了作业安全性。智能凿岩机器人是智能化开采的关键设备。它具备自主定位、钻孔规划和自动钻孔等功能，能适应复杂的井下环境，提高凿岩效率和质量。AI 矿石分选技术通过对矿石图像或其他特征的智能识别，快速准确地筛选出有用矿石，减少了人工分选的工作量和误差，提高了矿石的回收率和品位。这些智能化技术的突破，正推动地下矿山开采向无人化作业迈进。

## (二) 岩层控制技术创新

微震监测 – 数值模拟联动支护系统是岩层控制技术的创新方向之一。该系统通过微震监测技术实时获取岩层破裂信息，再利用数值模拟技术对岩层变形和应力分布进行分析预测，从而实现对支护结构的动态设计和优化。相位控制爆破技术也是重要创新点，它通过精确控制爆破的相位和时间间隔，能够有效降低爆破对围岩的扰动，提高围岩的稳定性。新型快凝填充材料的应用为岩层控制提供了新的手段，其具有快速凝固、高强度等特点，能够及时填充采空区，支撑围岩，防止岩层变形和垮塌<sup>[4]</sup>。这些创新技术的应用将有助于提高地下矿山开采的安全性和效率。

## 三、环境安全技术发展

### (一) 绿色开采技术体系

#### 1. 生态扰动控制技术

采矿活动不可避免地会对生态环境造成扰动，因此生态扰动控制技术至关重要。对于采矿扰动预测模型，需综合考虑地质条件、开采工艺等多种因素，通过建立精确的数学模型来预测开采过程中可能出现的地表变形、岩层移动等情况<sup>[5]</sup>。地下采空区生态修复技术则是针对采空区造成的生态破坏问题，采用如充填、植被恢复等方法，改善采空区的生态环境。多级废水循环系统的构建，能够对矿山开采过程中产生的废水进行有效处理和循环利用，减少水资源的浪费和对环境的污染。这些生态扰动控制技术相互配合，共同推动绿色开采技术体系的发展，实现地下矿山开采与环境保护的协调共进。

#### 2. 能源协同优化

地下矿山开采过程中，能源协同优化至关重要。一方面，井下地热回收技术可有效利用地热资源，将其转化为可用能源，减少对传统能源的依赖<sup>[6]</sup>。通过合理的地热采集装置和转换系统，实现地热能源在矿山生产中的高效利用。另一方面，光伏储能供电技术为矿山提供了清洁的电力来源。利用矿山的闲置空间安装光伏板，将太阳能转化为电能并储存起来，确保在不同时段都能满足矿山的用电需求。同时，通风余热再利用技术也不容忽视。通风系统排出的余热可以被回收，用于预热空气或其他需要热能的环节，提高能源的综合利用效率，实现能源在地下矿山开采中的协同优化。

### (二) 本质安全技术发展

#### 1. 灾害防控体系

构建包含多元传感网络、灾害模拟推演平台、智能避险系统的综合防控机制对地下矿山开采至关重要。多元传感网络可实时

监测矿山环境参数，如温度、湿度、有害气体浓度等，为灾害预警提供数据支持<sup>[7]</sup>。灾害模拟推演平台利用采集的数据，结合矿山地质结构等信息，模拟可能发生的灾害情况，如塌方、透水等，帮助制定应对策略。智能避险系统则能在灾害发生时，为矿工提供准确的避险路线指引，提高矿工的生存几率。通过综合应用这些技术，可有效提升地下矿山的灾害防控能力，保障矿山生产安全和人员生命安全。

#### 2. 人机协同防护

随着科技的不断进步，人机协同防护在地下矿山开采中得到了进一步发展。例如研发出矿工生命体征智能手环，它能够实时监测矿工的身体状况，如心率、血压等重要指标，一旦出现异常情况可及时发出警报，为矿工的生命安全提供保障<sup>[8]</sup>。AR 辅助维修系统则利用增强现实技术，帮助维修人员更直观地了解设备的故障情况，提高维修效率和准确性。应急救援机器人可在危险环境下代替人类进行救援工作，减少人员伤亡。这些安全装备的研发和应用，不仅提高了矿山开采的安全性，也体现了人机协同防护在本质安全技术发展中的重要作用。

## 四、技术发展趋势预测

### (一) 核心技术演进方向

#### 1. 数字孪生应用深化

BIM+GIS 三维可视化及实时数据镜像技术在地下矿山开采过程中全要素管理中具有广阔应用前景。BIM 可构建矿山三维模型，精准呈现地质结构、矿体分布等信息，为开采设计提供可靠依据<sup>[9]</sup>。GIS 能整合地理空间数据，分析矿山周边环境及开采影响。二者结合实现对开采过程全面直观展示与分析。实时数据镜像技术可实时获取并反馈开采现场数据，如设备运行参数、人员位置等，使管理人员能及时了解开采动态，进行精准决策与调控，提高开采效率与安全性，推动地下矿山开采技术向智能化、可视化方向发展。

#### 2. 极限条件开采突破

深部地压调控技术方面，随着开采深度增加，地压问题愈发复杂，未来将朝着精准监测与智能调控方向发展。借助先进的传感器和数据分析技术，实时获取地压变化信息，进而实现对开采过程的动态调整，确保开采安全与高效<sup>[10]</sup>。超低温环境采矿装备需适应极寒条件，未来可能在材料科学和制热技术上取得突破，提高装备的耐寒性和可靠性。深海采矿机器人技术将重点关注机器人的抗压性、灵活性和智能化程度。通过优化结构设计和控制系统，使其能在深海高压环境下精确作业，同时具备自主决策和自适应能力，以应对复杂的海底开采环境。

### (二) 协同化发展模式

#### 1. 多技术融合路径

随着科技的不断进步，地下矿山开采技术呈现出多技术融合的趋势。自动驾驶卡车与 5G 通讯的融合，可实现车辆的高效、精准运行，5G 的低延迟和高带宽特性确保卡车能实时接收指令并反馈数据。物联网传感与大数据分析相结合，能对矿山环境和设备

状态进行全方位监测，通过传感器收集大量数据，再利用大数据分析挖掘有价值信息，为决策提供支持。数字孪生技术与区块链溯源的融合也具有重要意义，数字孪生可创建矿山的虚拟模型，模拟开采过程，区块链则可确保数据的真实性和不可篡改，为矿山生产的溯源和管理提供可靠保障。

## 2. 产业链整合创新

随着科技的不断进步，地下矿山开采技术在协同化发展和产业链整合创新方面呈现出显著趋势。在协同化发展模式上，采矿、选矿、冶炼各环节的协同合作将更为紧密。通过构建智能系统，实现各环节数据的实时共享与交互，提高整体生产效率。例如，采矿环节的地质数据能及时传递给选矿和冶炼部门，以便其提前做好准备。在产业链整合创新方面，将朝着一体化方向发展。打造矿山全生命周期管理平台，涵盖从矿山勘探、开采到闭坑后的生态修复等各个阶段。这不仅能优化资源配置，还能降低环境影响，实现矿山产业的可持续发展。

## （三）标准体系建设

### 1. 智能装备标准

随着地下矿山开采技术的不断发展，智能装备的应用日益广泛。井下防爆智能设备认证标准及数据接口协议统一化至关重要。统一的认证标准可确保设备在井下复杂环境中的防爆性能及安全性，保障人员和设备安全。同时，数据接口协议统一化有利于不同智能设备间的数据交互与协同工作，提高开采效率。

在实施路径方面，应联合行业内相关企业、科研机构及标准制定部门。共同研究并制定符合井下实际工况的防爆智能设备认证标准，涵盖设备的设计、制造、检测等各个环节。对于数据接

口协议，需综合考虑现有设备及未来发展需求，制定通用、兼容性强的协议标准，并通过推广应用不断完善，推动地下矿山开采技术向智能化、高效化发展。

### 2. 安全评价体系

随着地下矿山开采技术的发展，安全评价体系的建设至关重要。基于实时监测数据的动态安全评估指标及智能预警阈值的标准化研究是关键方向。通过对开采过程中各种参数的实时监测，如岩石压力、温度、湿度等，建立动态评估指标，能够更准确地反映矿山的安全状况。同时，确定智能预警阈值的标准，当监测数据接近或超过阈值时，及时发出预警，为矿山安全提供保障。这需要综合考虑矿山的地质条件、开采工艺等多种因素，建立科学合理的标准体系。该体系不仅要涵盖现有的开采技术和设备，还要具有前瞻性，能够适应未来技术的发展，确保地下矿山开采的安全与高效。

## 五、总结

地下矿山开采技术正朝着智能化、绿色化、协同化方向发展。需构建“技术创新 – 标准完善 – 人才培养”的生态体系以促进其发展。数字孪生技术与新材料应用有望使开采深度超5000米。深部采矿中，地质灾害防控与能源循环利用技术的协同创新至关重要。智能化可提高开采效率与安全性；绿色化符合环保要求；协同化实现多技术融合。完善标准能规范技术应用，人才培养为技术发展提供支撑。未来应持续关注这些关键领域，推动地下矿山开采技术不断创新，实现可持续发展。

## 参考文献

- [1] 张鑫. 基于混合现实地下矿山多源信息融合的路径规划系统研究 [D]. 东北大学, 2021.
- [2] 冯书照. 地下矿山短期出矿计划与装备调度优化技术研究 [D]. 武汉理工大学, 2022.
- [3] 徐涛. 基于 CNN 的矿山开采沉陷灾害预警研究 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [4] 张海燕. 制造业双循环网络嵌入与技术创新研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2022.
- [5] 邵卿. 中国油气开采业的产业震荡与企业生存研究 [D]. 浙江师范大学, 2023.
- [6] 赖建飞. 地下金属矿山智能化开采技术研究 [J]. 建材与装饰, 2021, 17(32): 135–136.
- [7] 黄永胜. 浅析矿山开采技术的创新及安全管理 [J]. 世界有色金属, 2023(12): 54–56.
- [8] 王一. 地下金属矿山开采技术发展趋势探索 [J]. 中国科技纵横, 2021(12): 71–72.
- [9] 杨庆元, 魏诚. 地下金属矿山开采技术发展趋势探索 [J]. 世界有色金属, 2023(1): 46–48.
- [10] 李金昱. 燃气开采系统的技术创新和发展趋势分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(03): 128–130.