

铝土矿山破碎顶板超前支护工艺研究与应用

许良发

国电投（山西）矿业有限公司 山西 吕梁 035600

摘要：破碎顶板因稳定性差、易冒顶片帮，是铝土矿山安全高效开采的关键瓶颈。本文聚焦破碎顶板铝土矿山开采难题，剖析其形成机制、开采难点及超前支护技术需求；梳理超前锚杆（索）、超前管棚等主流工艺的技术原理与适用条件；从地质勘察、施工要点、质量检测监测三方面，阐述超前支护工艺应用的关键技术与质量控制措施；结合行业趋势，探讨智能化超前支护技术发展方向及绿色支护理念融入路径，为相关方案优化与实践提供参考。

关键词：铝土矿山；破碎顶板；超前支护

引言：在铝土矿山开采中，破碎顶板问题极为常见，其地质条件复杂，受地质构造、岩性特性及开采扰动等多因素影响。破碎顶板给开采带来诸多难题，如安全风险高、施工效率低、成本控制难等。超前支护作为保障开采安全与效率的关键技术，能主动加固顶板、及时提供支撑。研究破碎顶板铝土矿山超前支护工艺应用，对提高矿山开采的安全性、经济性和可持续性具有重要意义，是当前铝土矿山开采领域亟待解决的重要课题。

1 破碎顶板铝土矿山地质特征与支护需求

1.1 破碎顶板的形成机制

破碎顶板的形成是地质构造、岩性特性及开采扰动共同作用的结果。从地质构造角度，断层、褶皱等构造运动使岩体产生大量节理裂隙，破坏岩体完整性，如某铝土矿受区域断层影响，顶板岩体节理密度达5-8条/m，完整性系数（KV）仅0.3-0.4。岩性特性方面，砂页岩、凝灰岩等软岩顶板抗压强度低（单轴抗压强度<30MPa），遇水易软化，含水率每增加1%，强度下降5%-8%，在地下水长期浸泡下易形成破碎结构；开采扰动是诱发顶板破碎的直接因素，巷道开挖打破原岩应力平衡，导致顶板出现应力集中，当集中应力超过岩体强度时，裂隙扩展贯通，形成破碎区。某铝土矿实测数据显示，开挖后顶板2-3m范围内形成塑性破碎区，岩体强度较原岩下降40%-60%。另外，爆破震动会加剧顶板裂隙发育，炮孔间距过大或装药量超标时，顶板破碎范围可扩大至5m以上。

1.2 破碎顶板开采的核心难点

破碎顶板开采面临安全控制、效率提升与成本平衡三大核心难点。安全方面，破碎顶板稳定性差，开挖过程中易发生突发性冒顶，某铝土矿曾因顶板垮塌导致停工15天，直接经济损失超200万元；同时，破碎岩体易片帮，对施工人员及设备构成严重威胁。效率方面，为

控制风险，需减小开挖进尺（通常≤1.5m/循环），导致循环次数增加，施工效率较完整顶板下降30%-50%。成本控制难度大，一方面，破碎顶板需采用高强度支护材料，支护成本较常规顶板增加20%-30%；另一方面，冒顶事故后的处理成本高昂，包括清淤、重新支护等费用，且延误生产进度^[1]。此外，破碎顶板下的矿石回采率低，部分矿山因顶板垮塌导致资源损失率超过10%，进一步增加开采成本。

1.3 超前支护的技术需求

针对破碎顶板的开采难点，超前支护需满足“主动加固、及时支护、精准控制”的技术需求。主动加固方面，需通过超前支护提前对未开挖区域顶板施加预应力，抑制裂隙扩展，如超前锚杆通过杆体张拉产生的约束力，使顶板岩体形成组合拱结构，提升整体稳定性。及时支护要求支护作业与开挖工序紧密衔接，滞后时间不超过2小时，避免顶板在无支护状态下长时间暴露导致失稳；精准控制需求体现在支护参数与顶板特征的匹配性上，需根据顶板破碎度、埋深等参数，确定支护长度、间距、承载力等指标，如极破碎顶板需采用长度≥5m的管棚支护，而轻度破碎顶板可选用3m长超前锚杆。此外，超前支护还需具备可监测性，通过实时监测顶板变形数据，及时调整支护措施，实现动态控制。

2 破碎顶板铝土矿山主流超前支护工艺体系

2.1 超前锚杆（索）支护工艺

超前锚杆（索）支护是借助在开挖轮廓线前方设置锚杆或锚索，提前对顶板进行加固的被动支护工艺。锚杆材质主要选用HRB400螺纹钢，直径在20-25mm之间，长度为2.5-4m；锚索多采用1×7股钢绞线，直径15.24mm，长度4-6m。其布置方式涵盖单排、双排以及梅花形三种，当采用双排布置时，排距处于0.8-1.2m范围，间距为0.6-0.8m，仰角设定在5°-10°。施工流程包含

钻孔、安装锚杆（索）、注浆三个步骤，钻孔采用风动凿岩机，孔径比锚杆直径大10-15mm；注浆材料选用水泥浆（水灰比1:1-1:1.5），注浆压力控制在0.5-1MPa。该工艺适用于埋深小于300m、轻度至中度破碎的顶板，具备施工简便、成本低廉的优势。不过，其局限性也较为显著，支护长度较短、承载能力有限，在极破碎顶板中易出现锚杆失效的情况。

2.2 超前管棚支护工艺

超前管棚支护是将钢管沿着开挖轮廓线超前布设，形成“棚架”结构，为顶板提供刚性支撑的工艺。钢管选用无缝钢管，直径在80-150mm之间，壁厚4-8mm，长度6-15m，采用丝扣或焊接的方式进行连接。布设参数依据顶板条件确定，间距为300-500mm，仰角1°-3°，外插角0.5°-1°，以此避免钢管侵入开挖断面；施工按照“钻孔-顶进-注浆”的顺序进行，钻孔使用液压凿岩台车，采用跟管钻进技术防止塌孔；顶进通过千斤顶将钢管推入孔内；注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆，凝固时间可控制在30-60分钟，注浆压力1.5-3MPa。该工艺适用于大跨度（大于4m）、中度至极破碎顶板，在一处铝土矿主巷道应用Φ108mm管棚支护后，顶板最大变形量被控制在50mm以内。但管棚施工效率较低，每循环需要1-2天，且材料成本较高^[2]。

2.3 超前小导管注浆支护工艺

超前小导管注浆支护是通过小导管向顶板岩体注浆，使裂隙胶结从而提升整体性的主动支护工艺。小导管采用Φ42-50mm无缝钢管，长度2.5-4m，管壁钻设Φ6-8mm注浆孔，间距150-200mm，前端加工成锥形。布置方式为单排或双排，间距200-300mm，仰角10°-15°，便于浆液扩散；施工时先钻孔插入小导管，再进行注浆，注浆材料可选用水泥浆、化学浆液或复合浆液，注浆压力0.8-2MPa，浆液扩散半径0.5-1m。该工艺灵活性较强，可作为临时支护与永久支护结合使用，适用于断面小、破碎程度高的巷道。其缺点是支护深度较浅，有效支护时间短（通常小于3个月），需配合其他支护工艺使用。

2.4 联合超前支护工艺

联合超前支护是将两种及以上单一工艺组合起来，发挥协同作用的支护方式，常见组合形式有“管棚+小导管注浆”“锚杆+注浆”“管棚+锚杆+注浆”等。在“管棚+小导管注浆”组合中，管棚提供刚性支撑，小导管注浆胶结管棚间的破碎岩体，适用于极破碎顶板。“锚杆+注浆”组合通过锚杆提供预应力，注浆提升岩体强度，适用于中度破碎顶板，成本较管棚支护降低20%。“管棚+锚杆+注浆”三联工艺适用于深部（大于500m）、高地

应力破碎顶板，在一处铝土矿深部巷道应用该工艺后，成功控制了顶板的塑性变形。联合支护的关键在于确定各工艺的协同参数，例如管棚与小导管的间距需与浆液扩散半径相匹配，避免出现支护盲区。

3 超前支护工艺应用关键技术与质量控制

3.1 前期地质勘察与参数设计

前期地质勘察是支护参数设计的基础，需采用“钻探+物探+实验室试验”的综合勘察方法。钻探采用岩芯钻探，钻孔深度超过开挖轮廓线5-10m，获取岩芯进行岩体完整性分级；物探选用地质雷达、声波测井等技术，探测顶板裂隙分布及富水情况，分辨率可达0.1m。实验室试验需测试岩体单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量等力学参数，为数值模拟提供基础数据。参数设计采用“数值模拟+工程类比”的方法，利用FLAC3D软件模拟不同支护参数下的顶板应力与变形，确定最优方案。以超前管棚为例，通过模拟得出：当埋深500m、开挖跨度4.5m时，Φ108mm管棚间距300mm、注浆压力2.5MPa为最优参数组合。同时，参考类似矿山案例进行修正，如某铝土矿借鉴相邻矿山的管棚支护参数，结合自身地质条件调整注浆配比，使支护效果提升15%。

3.2 施工过程关键技术创新

施工过程的关键技术集中在钻孔、支护安装与注浆三个环节。钻孔环节采用跟管钻进技术，针对极破碎顶板，选用Φ127mm套管跟进，套管长度比钻孔深0.5m，防止塌孔；钻孔偏差控制在1%以内，通过激光导向仪实时调整钻杆角度。支护安装时，锚杆需保证锚固长度≥1m，锚索张拉预应力达到设计值的110%，管棚安装后需检查其平面位置与高程，偏差不超过50mm。注浆环节需控制浆液配比、注浆压力与注浆量，根据岩体渗透性选择浆液类型，渗透性好的岩体选用水泥浆，渗透性差的选用化学浆液；注浆压力采用分级升压法，从0.5MPa开始，每10分钟升压0.2MPa，避免压力骤升导致岩体劈裂；注浆量以达到设计注浆量或注浆压力稳定10分钟为准，确保浆液充分填充裂隙^[3]。

3.3 质量检测与安全监测

质量检测包括材料检测、施工质量检测与支护效果检测。材料检测需对锚杆、钢管、水泥等原材料进行力学性能试验，如锚杆抗拉强度需≥600MPa，钢管屈服强度≥345MPa。施工质量检测采用超声波探伤检测管棚焊接质量，采用钻芯法检测注浆饱满度，要求饱满度≥85%。支护效果检测通过载荷试验测试锚杆（索）承载力，需达到设计值的90%以上。安全监测采用“人工监测+自动化监测”相结合的方式，人工监测每周1次，使用

水准仪测量顶板下沉量，收敛计测量巷道收敛值；自动化监测采用光纤传感器、无线位移计等设备，实时监测顶板变形，采样频率1次/小时。监测数据需建立台账，当变形速率超过0.5mm/d时，发出预警信号，采取加密支护等措施

4 破碎顶板超前支护工艺优化与发展趋势

4.1 智能化超前支护技术发展

基于物联网的顶板实时监测与预警系统成为智能化发展的核心方向。该系统通过在顶板岩体和支护体上布置位移、应力、振动等各类传感器，将监测数据实时传输至云端平台，利用大数据分析技术对顶板稳定性进行评估，当监测数据超过预设阈值时，系统自动发出预警信息，提醒现场人员采取应急措施。例如，某铝土矿应用物联网监测系统后，成功预警了3起顶板异常变形事故，有效保障了施工安全；无人机巡检与三维激光扫描技术在顶板评估中的应用日益广泛，无人机可携带高清相机和红外传感器，对井下大跨度、高风险区域的顶板进行巡检，获取顶板的图像和温度信息，识别顶板的裂隙、剥落等隐患；三维激光扫描技术可快速获取顶板的三维点云数据，构建高精度的三维模型，通过对比不同时期的模型，分析顶板的变形情况，为支护方案的优化提供依据。智能决策系统在支护方案选择中的实践取得突破，该系统整合了地质勘察数据、施工经验、数值模拟结果等多方面信息，采用人工智能算法对不同支护方案的可行性、安全性和经济性进行综合评价，自动推荐最优支护方案^[4]。同时，系统可根据施工过程中的监测数据，动态调整支护参数，实现支护方案的智能化优化。

4.2 绿色支护理念的融入

可回收支护材料的开发与应用是绿色支护的重要体现。传统的支护材料如钢筋、钢管等多为一次性使用，不仅浪费资源，还会产生大量建筑垃圾。可回收锚杆、

可回收锚索等新型材料的出现，解决了这一问题。可回收锚杆在支护完成后，通过特殊的回收装置可将锚杆杆体回收重复利用，降低支护成本；可回收锚索则通过可降解的锚固段材料，在服役期满后自动降解，避免对岩体造成永久污染；注浆材料的环保化改进成为绿色支护的关键环节，传统的化学注浆材料如聚氨酯、环氧树脂等含有有毒有害物质，对环境和人体健康造成危害。新型环保注浆材料如改性水泥浆、生物基浆液等应运而生。改性水泥浆通过添加环保型外加剂，提高浆液的性能，降低对环境的影响；生物基浆液以天然生物材料为原料，具有良好的生物降解性和环保性，在满足支护要求的同时，实现对环境的零污染。

结束语

破碎顶板铝土矿山超前支护工艺对于保障开采安全、提升开采效率与经济效益至关重要。本文系统梳理了超前支护工艺体系，明确了各工艺适用条件与优缺点，并探讨了应用中的关键技术与质量控制要点。随着科技发展，智能化超前支护技术和绿色支护理念为工艺优化指明方向。未来，应持续创新支护技术，加强智能化与绿色化应用，推动破碎顶板铝土矿山开采向更安全、高效、环保的方向发展，实现矿业可持续发展目标。

参考文献

- [1]王建栋.浅谈金属矿山巷道支护技术[J].采矿技术,2024,24(01):227-231.
- [2]杨嘉赫威.矿山地质灾害治理施工中边坡支护工程的运用研究[J].世界有色金属,2023,(21):226-228.
- [3]李之强.金属矿山井巷建设工程支护应用探究思路构架实践[J].中国金属通报,2021(03):23-24.
- [4]刘跃庆.单段锤式破碎机破碎腔的设计分析[J].中国设备工程, 2022(24): 107-108.