

猫场铝土矿岩石力学特性试验研究与锚杆支护优化分析

刘国斌¹, 杨建凤^{2*}

1. 中国铝业股份有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳 550014

2. 贵州省贵阳市清镇市犁倭镇综合治理服务中心, 贵州 贵阳 551406

DOI:10.61369/ETQM.2026060012

摘 要 : 猫场铝土矿作为我国重要的铝土矿资源基地, 其地下开采过程中面临复杂岩体力学特性与采场稳定性问题。通过现场岩体采样、室内岩石力学试验及锚杆支护参数优化研究, 系统分析了铝土矿顶底板岩性、土状铝土矿及致密铝土矿的力学特性, 揭示了采场顶板岩体破坏机理, 并提出了针对性的锚杆支护优化方案。研究表明: 不同岩性岩石的力学参数差异显著, 其中顶板白云岩抗压强度达 160.21 MPa, 而土状铝土矿仅 32.18 MPa; 矿柱破坏以剪切-张拉复合模式为主, 顶板破坏受拉应力主导; 基于高预应力锚杆支护理论, 优化后的支护方案可有效控制围岩变形, 研究结果为猫场铝土矿安全高效开采提供了理论与技术支撑。

关 键 词 : 猫场铝土矿; 岩石力学特性; 破坏机理; 支护参数优化

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Bauxite Rock and Optimization Analysis of Bolt Support

Liu Guobin¹, Yang Jianfeng^{2*}

1. China Aluminum Corporation Guizhou Branch, Guiyang, Guizhou 550014

2. Comprehensive Governance Service Center of Liwo Town, Qingzhen City, Guiyang City, Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 551406

Abstract : As an important bauxite resource base in China, Maochang bauxite faces complex rock mechanics characteristics and mining stability issues during its underground mining process. Through on-site rock mass sampling, indoor rock mechanics testing, and optimization research on anchor support parameters, the mechanical characteristics of bauxite roof and floor rock, soil like bauxite, and dense bauxite were systematically analyzed. The mechanism of rock mass failure in the roof of the mining site was revealed, and targeted optimization plans for anchor support were proposed. Research has shown that there are significant differences in the mechanical parameters of rocks of different rock types, with the compressive strength of roof dolomite reaching 160.21 MPa, while that of soil like bauxite is only 32.18 MPa; The main mode of pillar failure is shear tension composite mode, and the roof failure is dominated by tensile stress; Based on the theory of high prestressed anchor rod support, the optimized support scheme can effectively control the deformation of surrounding rock. The research results provide theoretical and technical support for the safe and efficient mining of Maochang bauxite.

Keywords : Maochang bauxite mine; rock mechanics properties; failure mechanism; optimization of support parameters

前言

铝土矿作为我国重要的战略矿产资源, 其安全高效开采对保障工业产业链稳定具有重要意义。贵州猫场铝土矿赋存条件复杂, 岩性类型多样 (如山顶底板白云岩、土状铝土矿、致密铝土矿等), 其采场围岩稳定性直接制约矿山安全生产与资源回采率^[1-2]。然而, 该矿区不同岩性岩体力学特性尚未系统量化, 矿体与围岩的破坏机理亦不明确, 导致现有锚杆支护设计与矿压监测方案缺乏针对性, 存在支护强度冗余或不足的风险。

近年来, 杨强、李夕兵、何满潮、王金华^[3-7]等很多学者针对不同地区铝土矿, 系统研究了不同岩性 (致密状、土状、碎屑状) 的单轴/三轴抗压强度、变形特性及破坏模式, 揭示了铝土矿的动态强度与能量耗散规律。本研究以猫场铝土矿为工程背景, 运用各种分

作者简介: 刘国斌 (1991.11-), 男, 汉族, 贵州贵阳, 采矿中级, 采矿领域。

通讯作者: 杨建凤, 男, 汉族, 本科, 采矿领域

析手段，系统揭示上山顶底板岩性、土状铝土矿及致密铝土矿的力学特性差异，明确其抗压、抗拉、抗剪强度及变形参数（弹性模量、泊松比）的分布规律，建立包含粘聚力与内摩擦角的岩体强度准则^[6]。同时，结合锚杆支护作用机理，提出基于实测力学参数的支护优化方法，并完善矿压监测系统布设方案。研究成果旨在为深部铝土矿安全高效开采提供科学依据，推动复杂岩性矿体力学研究与工程实践的结合。

铝土矿地下开采过程中，采场顶板稳定性与矿柱承载能力是影响安全生产的关键因素。猫场铝土矿赋存条件复杂，矿体直接顶板为粘土岩与铝土岩，间接顶板为白云岩，多岩性组合导致采场围岩力学行为差异显著。现有支护技术难以适应复杂岩体条件，常引发顶板冒落与矿柱失稳。为此，本文结合岩石力学实验、破坏机理分析及锚杆支护优化，系统研究猫场铝土矿多岩性岩石的力学特性及其工程响应，以为采场稳定性控制提供科学依据^[9]。

一、岩石力学特性实验研究

（一）现场岩体取样

为分析猫场铝矿采场岩体破坏岩石力学性质，分别选取铝土矿上山顶底板岩石、土状铝土矿、致密铝土矿进行岩石力学试验，分析了岩石力学性质，粘土岩试样和铝土岩试样的取样地点如表1所示。

表1 铝土矿上山顶底板、土状铝土矿、致密铝土矿岩试验取样地点位置表

岩性	标高	取样地点
铝土矿上山顶底板	1200~1220	ES6# 上山
土状铝土矿岩	1200	ES#6
致密铝土矿岩	1200	ES6#、ES#11、ES#12

（二）标准试验加工

为了准确获取猫场铝土矿岩石的力学参数，试验严格依据《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266 - 1999）、《水利水电工程岩石试验规程》（DL/T 5368 - 2007）、国际岩石力学学会（ISRM）相关试样制备规范，开展系统化静态力学测试。抗压强度和巴西劈裂试验均采用 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 标准圆柱体试件，抗剪强度试验则选用 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 短柱体，保证几何尺寸满足高径比要求，有效减小端部效应。

在试件加工过程中，采用金刚石钻头取芯、端面研磨、平行度校正等工艺，控制直径偏差 $\leq 0.1\text{ mm}$ 、端面不平整度 $\leq 0.02\text{ mm}$ 、轴线偏斜 $\leq 0.25^\circ$ ，有助于保障试样几何精度。每组试验至少制备3个平行试样，消除岩性非均质性带来的离散误差，全面提高数据统计可靠性。所有试样均取自同一岩块或相邻层位，避免风化、节理、矿物成分差异给结果造成干扰（如图1所示）。



图1 岩块制取的标准岩石试件示意图

（三）试验原理

（1）抗压强度压缩试验原理

在开展静力学抗压强度压缩试验时，在试样的准备过程中需要在试样上粘贴轴向和横向电阻应变片，通过应变仪记录岩石在加载过程中的轴向和横向应变，由此计算得到岩石的泊松比。^[10]

（2）巴西劈裂试验原理

巴西劈裂试验通过在圆柱体试样直径两端施加对径集中荷载，诱导试样内部产生均匀拉应力场，当拉应力超过岩石抗拉强度时，试样沿加载直径发生张拉破坏。该方法利用间接方式测定岩石抗拉强度，具有操作简单、受压设备要求低等特征，被广泛应用于脆性岩体拉伸性能评估。^[11]

（3）抗剪强度试验原理

岩石抗剪强度试验测定其在剪切荷载作用下抵抗破坏的能力，目的是建立剪切面上正应力 σ 和峰值剪应力 τ 的函数关系。试验采用直剪或三轴剪切装置，在不同法向应力条件下施加水平剪力，详细记录试样剪断时的应力状态。基于莫尔 - 库仑准则，通过多组试验数据拟合 $\tau - \sigma$ 直线，其斜率即为内摩擦角 ϕ ，截距为凝聚力 C ，二者共同表征岩石抗剪断强度。该参数体系对边坡稳定分析、地下工程支护设计、矿体开采方案优化具有关键指导意义^[12]

（四）实验设备

采用贵州大学实验室 MTS815S 岩石力学伺服实验机和屏显式液压万能试验机通用测控软件对岩石试样进行岩石抗压强度压缩试验、抗剪强度试验。利用贵州省爆破工程技术研究中心的 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机和 DH5922D 动静态应变测试分析系统对岩石试样进行岩石抗拉强度试验。

在开展试验时首先给试样以力控施加 0.2KN 的预载荷，待仪器稳定后转换为位移加载，加载速度为 0.12mm/min，持续位移加载直至试样破坏，得到岩样压缩破坏全过程的应力应变曲线，并计算得出其抗压强度。

（五）试验方案

（1）实验步骤

在开展抗压强度压缩试验时首先给试样施加 0.2KN 的预载荷，待仪器稳定后转换为位移加载，加载速度为 0.10mm/min，持续位移加载直至试样破坏。试验结束后，应描述试件的破坏形态。

(2) 实验记录

岩石抗压强度试验记录须系统涵盖工程名称、取样位置、试件编号、岩性、结构特征描述、含水状态（天然或饱和）、受力方向（平行或垂直层理）、实测几何尺寸（直径与高度）、破坏时峰值载荷。上述信息确保试验数据可追溯，为力学参数统计分析提供可靠依据。

(六) 试验结果及分析

在进行抗压强度试验、抗拉强度试验、抗剪试验之后，部分岩体应力-时间曲线如图2所示：

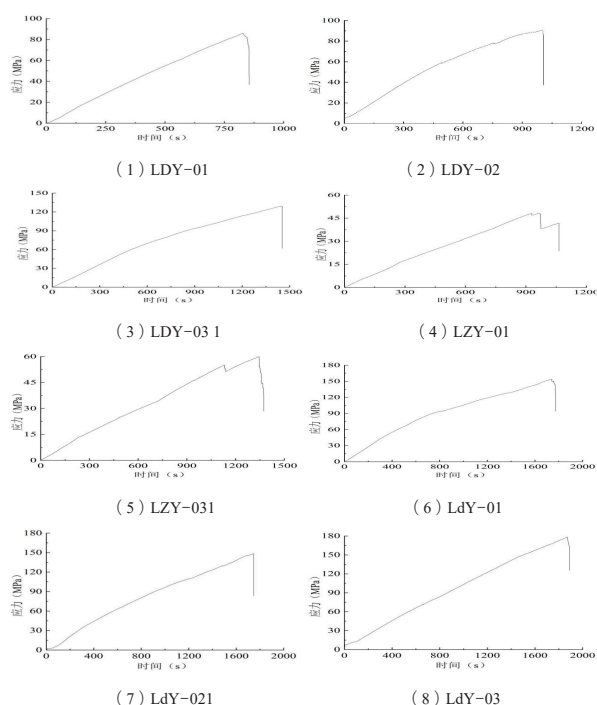


图2 部分岩体应力-时间曲线

根据每组岩样力学参数取平均值，试件的岩石力学试验结果如下表2所示。

表2 岩石力学试验参数表

试件类别	容重 (kg/m ³)	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	抗剪 强度/ MPa	粘聚 力/ MPa	内摩 擦角 (°)	弹性 模量/ GPa	泊松 比
上山顶板	2937.79	102.04	5.38	12.48	16.83	34.56	30.45	0.29
致密铝土矿	2783.29	54.21	3.22	6.87	9.27	36.41	17.49	0.27
底板白云岩	2856.06	160.21	7.85	20.62	27.56	38.39	43.26	0.33
土状铝土矿	2859.07	32.18	2.75	发	6.26	39.94	11.05	0.28

通过上表可知：底板白云岩力学性能最优，抗压强度为160.21MPa，弹性模量43.26GPa，适用于高应力环境。致密铝土矿抗压强度54.21MPa，但遇水易崩解，需重视水理作用影响，土状铝土矿强度最低（ $\sigma_c=32.18$ MPa），且含高岭石等吸水矿物，稳定性差。

二、采场岩体破坏机理研究

猫场铝土矿采场岩体破坏机理受矿柱几何形态、应力状态共同控制，呈现显著的模式分异特征。研究表明，缓倾斜矿柱在单轴压缩条件下主要表现为拉伸-剪切复合破坏，依据宽高比差异演化出三种典型模式：当宽高比较小（通常小于1.0）时，矿柱内部易形成沿对角线贯通的单一剪切带，通常呈现剪切滑移，如图3（a）所示；当矿柱接近等截面且受垂直荷载作用时，端部应力集中诱发径向拉裂，继而引发层状剥落，整体呈对称沙漏状破坏，属于拉伸-剪切耦合机制，见图3（b）；而宽高比较大的矿柱则表现出渐进性失稳特征，剪切带非对称发育，核心区残留呈偏心沙漏形态，破坏过程以多级剪切滑移为主，局部伴随张拉裂隙扩展，如图3（c）所示。上述破坏模式分析矿柱失稳由几何约束向应力重分布演化的内在逻辑，为采场结构参数优化提供力学依据。

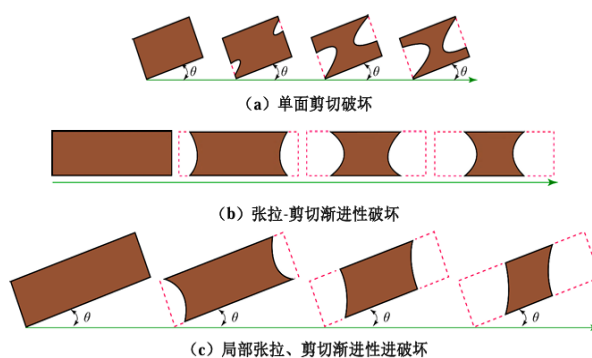


图3 矿柱的破坏模式

(一) 顶板破坏机制

无护顶矿壁时：直接顶板粘土岩与铝土岩因抗拉强度低（ $\sigma_t=2.75\sim3.22$ MPa）易发生离层垮塌，跨度超过3.6 m时失稳风险剧增。

有护顶矿壁时：护顶矿壁承担直接顶板荷载，但厚度不足或遇水崩解时，间接顶板白云岩拉应力（ $\sigma_{\max}=22.7$ MPa）超过抗拉强度（7.85 MPa），引发整体垮塌。

（间接顶板白云岩拉应力（ $\sigma_{\max}=22.7$ MPa）这个数值如何得到需要交代；抗拉强度（7.85 MPa）应该是5.38MPa）

(二) 水理作用影响

粘土岩与铝土岩含高岭石（15%~20%）、云母（10%~15%）等亲水矿物，耐崩解性试验显示其遇水后强度衰减50%~70%，加速顶板离层与矿柱软化。

三、锚杆支护优化分析

锚杆支护理论历经多年发展，已经从早期“悬吊作用”单一认知，逐步演进为涵盖结构成拱、围岩力学性能改善的系统性框架。当前主流观点认为，锚杆功能并不是仅被动承载松动岩体，而是通过高预应力主动约束围岩变形，全面提高锚固区整体刚

度。尤其在巷道开挖后即时施加足量预应力，可有效抑制围岩早期离层、扩容，防止损伤累积。研究表明，锚杆支护效果高度依赖于初始安装力是否达到临界阈值，如果低于该值，即便存在预应力，仍然难以阻断围岩劣化进程；只有实现高预应力、强力支护，才能形成稳定锚固体，控制位移差于微小范围。

基于锚杆受力演化特征，其与围岩协同响应可划分为五类典型曲线。曲线1代表低预应力被动支护，几乎无控变能力；曲线5虽然体现高预应力强力支护优势，围岩位移被有效抑制且长期稳定。介于两者之间的曲线2至4虽具一定预应力，但由于并没有达到临界值，围岩早期离层未能遏制，导致后期响应差异较大：曲线2锚杆破断前变形可控，破断后失稳加速；曲线3经历较大变形后趋于稳定，属于延性破坏；曲线4则由于锚固力持续衰减，围岩位移不断加剧，最终失稳。上述分析表明，在猫场铝土矿采场支护设计中，必须采用高预应力锚杆体系，并确保安装力超越临界阈值，方能实现围岩主动控制，避免支护失效引发的工程风险^[13]。

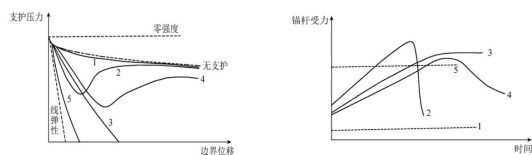


图4 锚杆受力变化曲线(左) 锚杆支护围岩响应曲线(右)

锚杆支护参数设计要以岩体物理力学特性为基础，结合高预应力强力支护理论进行系统优化。猫场铝土矿顶板多为中等强度泥质页岩、铝土质黏土岩，单轴抗压强度位于25~40 MPa，弹性模量相对较低(8~12 GPa)，节理发育，很容易发生离层。依据岩体质量指标RMR及Q系统评估，原支护采用 $\Phi 20$ mm普

通螺纹钢锚杆，长度2.0 m，间排距 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ，预紧力仅为30 kN，属于低预应力被动支护，难以抑制早期变形，导致巷道返修率高。

基于临界支护刚度理论，优化方案将锚杆升级为 $\Phi 22$ mm左旋无纵肋高强螺纹钢锚杆(屈服强度 ≥ 500 MPa)，长度增加为2.4 m，间排距加密到 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ，配套W型钢带与双抗网，预紧力提高至80 kN以上。在计算过程中，先通过数值模拟反演围岩变形特征，确定控制离层所需最小支护刚度；再依据锚固体等效连续介质模型，结合锚杆-托板-围岩协同作用机制，校核预应力扩散半径是否覆盖潜在破坏区。优化后支护系统刚度提高约为2.3倍，现场监测显示顶板离层量由原18 mm下降到5 mm以内，巷道成巷稳定，验证参数调整的科学性。

四、结论

(1) 不同岩性呈现显著的空间异质性。顶板白云岩抗压强度(160.21 MPa)为土状铝土矿(32.18 MPa)的5倍，其弹性模量(43.26 GPa)与泊松比(0.33)表明其为典型脆性岩体；而土状铝土矿低强度($\sigma_c=32.18$ MPa)与高黏土矿物含量(高岭石 $>15\%$)的耦合作用，导致其具有显著的流变特性与时间依存性。

(2) 顶板稳定性控制要素：直接顶板粘土岩的跨塌受控于“水-力耦合”效应。矿柱破坏以剪切-张拉复合模式为主，顶板稳定性受顶矿壁厚度与水文条件控制。

(3) 基于高预应力锚杆与动态设计法的优化支护方案可有效控制围岩变形，提升采场安全性。

参考文献

- [1] 黄陈霖. 堆石混凝土层间抗剪性能及其破坏机理研究[D]. 西京学院, 2025.
- [2] 王耘梓, 孙宁, 王龙, 等. 地下洞室脆性岩石断裂韧度巴西圆盘力学试验研究[J/OL]. 三峡大学学报(自然科学版), 1-6[2025-04-18].
- [3] 韩涛. 近距离煤层巷道围岩变形规律研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(07): 72-75..
- [4] 杨晓飞, 范宏鹏, 金中国, 等. 贵州清镇石牛坝铝土矿(岩)伴生锂的分布特征及其溶出行为[J/OL]. 矿物学报, 1-11[2025-04-18].
- [5] 倪祖甲, 乔江美, 张俊楷, 等. 基于微观岩石力学试验及精确矿物晶体建模的砂岩力学性质及波速分析[J/OL]. 岩土力学, 2025, (06): 1-16[2025-04-18].
- [6] 赵延林, 张敏真, 唐雯钰, 等. 三轴压缩下岩石-砂浆无锚与加锚异性结构面力学特性与强度预测模型[J/OL]. 煤炭学报, 1-17[2025-04-18].
- [7] 郭瑞, 任川, 董亚, 等. 深部高应力破碎巷道变形破坏机理及支护技术研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(04): 46-49.
- [8] 毕智强, 于振亚, 张涛. 深井动压软岩巷道底鼓变形破坏机理与防治技术[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(04): 84-88+113.
- [9] 冯琦, 程博, 陈嘉, 等. 高温加热后花岗岩试样的力学特性研究[J/OL]. 有色金属(中英文), 1-10[2025-04-18].
- [10] 高林, 高昌思, 吴延平, 等. 大型铝土矿山综采工作面区段回风巷围岩破坏特征实测研究[J/OL]. 金属矿山, 1-10[2025-04-18].
- [11] 杨梓瑞, 汪道兵, 霍庭旺, 等. 高温高压作用下裂隙性干热岩弹塑性变形与破坏力学规律的实验研究[C]//北京力学会. 北京力学会第三十一届学术年会论文集. 北京石油化工学院机械工程学院, 2025: 541-543.
- [12] 段江飞, 杜超杰, 温浩, 等. 斜井螺纹钢锚杆支护参数及布置方式的优化设计[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(03): 156-163.
- [13] 陈智贤, 陈东. 等截面圆弧形拱内力解析解及应力数值分析[J/OL]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 1-9[2025-04-18].
- [14] 王连成, 邵安林, 曲福明, 等. 金属矿山开采技术发展现状与展望[J/OL]. 工程科学学报, 1-13[2025-04-18].
- [15] 张洲, 王思远. 旺岭煤矿回采巷道锚杆支护方案优化研究[J]. 河南科技, 2025, 52(05): 50-55.
- [16] 王健, 田刚, 贾哲, 等. 深部巷道围岩变形规律及支护参数优化模拟研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(02): 45-51.
- [17] 李欣. 掘进巷道锚杆支护优化研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (24): 37-39.