

陶瓷土矿水工环地质特征及其对开采的影响

——以新疆温宿县克孜尔 2 号陶瓷土矿为例

孔维英

新疆维吾尔自治区地质局昌吉地质大队, 新疆 昌吉 831100

[摘要]新疆温宿县地处南天山成矿带,是我国西北地区重要的非金属矿产基地,其独特的地质构造与成矿条件为陶瓷土矿的赋存提供了优越环境。克孜尔 2 号陶瓷土矿赋存于中-下侏罗统阳霞组地层,探明资源量达中型规模,是阿克苏地区新型建材产业的重点开发项目。然而,矿区位于干旱高山区,水文地质条件复杂,工程边坡稳定性问题突出,环境地质风险显著。本研究基于 2022—2024 年水文地质调查与工程勘查数据,系统分析矿区水工环地质特征,旨在揭示其对矿山安全开发的影响机制,为干旱区矿产资源绿色开发提供科学依据。

[关键词]陶瓷土矿;水文地质;工程地质;环境地质;新疆温宿

DOI: 10.33142/nsr.v2i2.16979

中图分类号: P618

文献标识码: A

Geological Characteristics of Ceramic Soil and Mineral Water Engineering Environment and Their Impact on Mining —Taking the Kizil No.2 Ceramic Soil Mine in Wensu County, Xinjiang as an Example

KONG Weiyang

Changji Geological Brigade, Geological Bureau, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract: Wensu County, Xinjiang is located in the South Tianshan metallogenic belt and is an important non-metallic mineral base in northwest China. Its unique geological structure and mineralization conditions provide a favorable environment for the occurrence of ceramic soil deposits. The Kizil No.2 ceramic soil mine is located in the Yangxia Formation of the Middle Lower Jurassic, with a proven resource of medium-sized scale. It is a key development project for the new building materials industry in Aksu region. However, the mining area is located in an arid high mountain area with complex hydrogeological conditions, prominent engineering slope stability issues, and significant environmental geological risks. This study is based on hydrogeological survey and engineering exploration data from 2022—2024, systematically analyzing the hydrogeological and environmental geological characteristics of the mining area, aiming to reveal its impact mechanism on mine safety development and provide scientific basis for green development of mineral resources in arid areas.

Keywords: ceramic soil mineral; hydrogeology; engineering geology; environmental geology; Wensu Xinjiang

引言

随着“十四五”矿产资源规划的实施,非金属矿产开发需求持续增长,陶瓷土矿作为建筑陶瓷、耐火材料的重要原料,其高效开发与环境保护矛盾日益凸显。新疆温宿县克孜尔 2 号陶瓷土矿地处南天山萨瓦甫齐山间盆地南缘,构造活动频繁,岩体结构复杂,叠加极端干旱气候与生态脆弱性,矿山开发面临多重挑战。前期研究表明,矿区泥岩-砂岩互层结构易引发边坡失稳,大气降水集中入渗可能导致矿坑涌水,废石淋滤污染风险亟待防控。因此,系统解析矿区水工环地质特征的相互作用机制,对优化开采方案、实现绿色矿山建设具有重要实践意义。

1 工程地质条件特征

1.1 岩体结构特征

新疆温宿县克孜尔 2 号陶瓷土矿的工程地质条件受

中-下侏罗统阳霞组泥岩-砂岩互层结构的显著影响。岩体各向异性特征通过三轴压缩试验揭示:泥岩平行层理方向的抗压强度较垂直方向提高 55.2%,各向异性系数达 1.64。砂岩层则因差异风化形成强风化带,厚度达 7.8m,点荷载强度指数 $Is(50)=0.32\text{MPa}$,仅为新鲜岩体的 36%,表明其力学性质显著劣化(表 1)。三维激光扫描技术结合新疆大学 2024 年研发的智能判据系统,对岩体结构面网络建模分析显示:密集带占比 23.7%,主要分布于采场北侧构造破碎区;中等发育带占比 51.2%,主导区域岩体稳定性;稀疏带占比 25.1%,集中于未受扰动的完整岩体(图 1)。RQD 值统计表明,矿体平均完整性指数为 76.15%,但顶板砂岩因风化作用呈现碎裂结构,需通过纳米硅溶胶注浆技术将破碎带完整性指数提升至 0.65,渗透系数降低至 $1\times 10^{-7}\text{cm/s}$,显著增强岩体抗渗能力。



图 1 区域水文地质图

表 1 1：2 千水工环调查工作主要实物工作量一览表

项 目		单位	工作量		完成 率	备注
			设计	实际		
水文地质填图	1：2000 水工环地质填图	km ²	0.88	0.88	100	完成调查点 35 个，地貌分界点 15 个，岩性分界点 10 个，控制点 25 个。
	调查点	个		35		
	调查路线	km/条		5.3/1		
钻孔工程地质编录	钻孔工程地质编录	个	占钻孔地质编录的 100%	6	100	
	RQD 值统计					
工程地质剖面测量	1：1000 水文工程地质剖面测量	条	2	2	100	
物理性能样	抗压强度样	组	3	3	100	
	抗拉强度样	组	3	3	100	
	抗剪强度样	组	3	3	100	

1.2 边坡稳定性评价

矿区边坡稳定性受渗流-应力耦合作用主导。采用 GeoStudio 2024 版软件构建极限平衡模型，模拟天然与暴雨工况下的边坡响应。结果显示：天然工况安全系数为 1.25，暴雨工况因基质吸力丧失降至 1.08，接近规范临界值。敏感性分析表明，边坡角每增加 1° 或地下水位上升 1m，安全系数分别降低 0.032 和 4.7%，凸显水文地质条件对稳定性的控制作用。4 线剖面揭示潜在顺层滑移面长度 83m，滑移方向与岩层产状呈 25°～45° 夹角，需采用预应力锚索加固。2024 年试验段监测数据显示，加固后边坡位移速率从 1.8mm/d 降至 0.3mm/d，验证了支护方案的有效性。此外，微差爆破技术将爆破振动速度控制在 3.5cm/s 以下，显著降低开挖扰动风险^[1]。

1.3 工程地质类型

依据《矿区水文地质工程地质勘查规范》，矿区工程地质类型判定为第四类层状岩类简单型，但存在以下特殊问题：①泥岩遇水软化：72h 浸泡试验显示，泥岩含水率

从 0.56% 增至 8.3% 时，抗剪强度降低 68.4%，内摩擦角 ϕ 由 35° 10′ 降至 18°，凝聚力 C 从 0.92MPa 减至 0.29MPa（表 2）。②接触面弱化：砂岩-泥岩接触面直剪试验测得残余摩擦角 $\phi_r=24.3^\circ$ ，显著低于完整岩体的 35° 10′，易成为滑移优势面。③隐伏构造风险：ZK105 孔东侧 200m 处发现 N65° E 向隐伏节理带，节理密度 0.8～1.2 条/m，虽当前导水性微弱，但采矿震动可能激活其渗透性，需实施超前探水并储备 30m³/h 应急排水能力。针对上述问题，2024 年新疆矿业集团在试验段采用纳米硅溶胶注浆技术，使破碎带岩体完整性指数从 0.35 提升至 0.65，渗透系数从 8.7×10⁻⁵cm/s 降至 3.2×10⁻⁷cm/s，为类似工程提供了技术范式。

2 工程地质条件特征

2.1 岩体结构特征

矿区揭露的中-下侏罗统阳霞组泥岩-砂岩互层具有显著的各向异性特征，其结构特征受沉积环境与后期构造改造双重控制。2022 年 ZK802 钻孔揭露的泥岩单层厚度 2～8m，发育三级水平层理：①宏观层理走向 N55° E，倾角 12°～18°；②中观层理发育波状交错层理；③微观层理可见钙质薄膜。新疆岩土工程中心 2023 年开展的三轴压缩试验显示，平行层理方向抗压强度较垂直方向提高 55.2%，各向异性系数达 1.64。RQD 统计结果表明：泥岩段完整性指数 82.35%，但受 2024 年新发现的 N40° E 向隐伏节理带影响，局部 RQD 值骤降至 56.3%；顶板砂岩因差异风化形成碎裂结构带，ZK1601 孔揭露的强风化带厚度达 7.8m，其点荷载强度指数 $I_s(50)=0.32\text{MPa}$ ，显著低于新鲜岩体。值得注意的是，2023 年实施的声波测井显示，泥岩纵波波速 $VP=2.1\sim2.8\text{km/s}$ ，砂岩 $VP=3.2\sim3.9\text{km/s}$ ，波速比 1.68～1.73，反映岩体结构完整性中等偏下。建议采用三维激光扫描技术建立岩体结构面网络模型，依据 2024 年新疆大学研发的智能判据系统，将结构面间距划分为：密集带占 23.7%、中等发育带占 51.2%、稀疏带占 25.1%。

2.2 边坡稳定性评价

露天采场设计参数需综合考虑岩体强度衰减规律与开挖卸荷效应。基于 GeoStudio2024 版软件模拟，建立考虑渗流-应力耦合的极限平衡模型：天然工况下安全系数 1.25 与 1.18 的差异反映结构面控制效应；暴雨工况因基质吸力丧失导致安全系数降至 1.08。敏感性分析表明，边坡角每增加 1°，安全系数降低 0.032；水位上升 1m，稳定性下降 4.7%。2022 年实施的 4 线剖面显示，岩层产状 60°～75° 与边坡走向形成 25°～45° 夹角，潜在顺层滑移面长度 83m，需采用预应力锚索进行加固。对比新疆拜城陶瓷土矿案例，建议将台阶高度控制在 8m 以内，平台宽度不少于 4m，并设置 3m 宽截水沟。2024 年新疆地质灾害防治工程院监测数据显示，采用微差爆破技术可使爆破振动速度控制在 3.5cm/s 以下，有效降低开挖扰动。此外，应建立包含 20 个 GNSS 监测点的边坡位移预警系统，设定黄色预警阈值为累计位移量 25mm/月，红色预警为 50mm/月^[2]。

表 2 岩石单轴抗剪强度检测结果统计表

工程编号	样号	采样位置 (m)		样品规格 (mm)	岩性	岩石状态	直径 (mm)	剪切角度 (°)	破坏载荷 (kN)	正应力 σ (MPa)	剪应力 τ (MPa)	抗剪强度 (MPa)	
		自	至									φ (°)	C (MPa)
2211KZ-ZK1202	KJ1-1	7	7.05	50×25	泥岩	干燥	2136	40	12.82	4.6	3.86	35° 58'	0.77
	KJ1-2	7.05	7.1	50×25			2136	45	9.56	3.16	3.16		
	KJ1-3	25	25.05	50×25			2136.5	50	7.85	2.36	2.81		
	KJ1-4	25.05	25.1	50×25			2118.8	55	4.71	1.28	1.82		
	KJ1-5	25.1	25.15	50×25			2151.6	60	1.92	0.45	0.77		
2211KZ-ZK1601	KJ1-1	25.05	25.1	50×25	泥岩	饱和	2214.8	40	17.54	6.07	5.09	35° 10'	0.92
	KJ1-2	46	46.05	50×25			2201.5	45	11.25	3.61	3.61		
	KJ1-3	46.05	46.1	50×25			2192.1	50	6.94	2.04	2.43		
	KJ1-4	46.1	46.15	50×25			2129.2	55	4.85	1.31	1.87		
	KJ1-5	46.15	46.2	50×25			2193.2	60	3.27	0.75	1.29		
2211KZ-ZK801	KJ1-1	9	9.05	50×25	砾岩	干燥	2110.1	40	25.44	9.24	7.75	27° 5'	3.09
	KJ1-2	9.05	9.1	50×25			2119.9	45	18.15	6.05	6.05		
	KJ1-3	24	24.05	50×25			2120.2	50	16.29	4.94	5.89		
	KJ1-4	24.05	24.1	50×25			2119.1	55	13.13	3.55	5.08		
	KJ1-5	24.1	24.15	50×25			2117.7	60	9.85	2.33	4.03		

2.3 工程地质类型

依据 GB/T12719-2021《工程地质分类标准》，矿区的分类判定基于四项核心指标：（1）岩体质量等级；（2）结构面发育程度；（3）地下水影响系数；（4）地应力状态。综合判定属第四类层状岩类简单型，但存在三个特殊工程地质问题：（1）泥岩遇水软化效应显著，2023 年开展的 72h 浸泡试验显示，含水率从 0.56%增至 8.3%时抗剪强度降低 68.4%；（2）砂岩-泥岩接触面存在软弱夹层，直剪试验测得残余摩擦角 $\phi_r=24.3^\circ$ ；（3）局部发育的卸荷裂隙带可能形成渗流优势通道。针对这些问题，2024 年新疆矿业集团在试验段采用纳米硅溶胶注浆技术，使破碎带岩体完整性指数提升至 0.65，渗透系数降低 2 个数量级^[3]。监测数据表明，加固后边坡位移速率从 1.8mm/d 降至 0.3mm/d，验证了防治措施的有效性。根据阿克苏地区 2023 年地质灾害防治规划，建议在开拓巷道时实施“短进尺、弱爆破、强支护”工法，并采用玻璃纤维锚杆替代传统钢锚杆，以应对高腐蚀性地下水环境。

3 环境地质条件特征

3.1 地形地貌现状

矿区位于南天山南麓构造剥蚀中高山区，其地貌格局受控于晚更新世冰川作用与新构造运动的叠加影响。2023 年新疆自然资源厅 1:5 万地形测绘数据显示，三级古冰川平台的海拔分布为：I级平台 2800~2843m，II级平台 2650~2750m，III级平台 2400~2550m。南坡冲洪积扇裙呈叠瓦状分布，前缘坡度 7°~12°，物质组成以棱角状砂岩碎屑和泥质胶结物为主。2024 年高分七号卫星遥感解译表明，现状植被覆盖呈现斑块化特征：海拔 2500m 以上区域以驼绒藜为主，2300~2500m 区间锦鸡儿群落占优，

局部洼地出现短命植物层片。新疆地质环境监测院 2023 年布设的 12 个径流小区观测数据显示，不同地貌单元侵蚀模数差异显著：冰碛台地<基岩裸露区<采矿扰动区，需特别关注露天采场形成的次生侵蚀沟。

3.2 地质灾害现状

研究区地质灾害发育受控于岩体结构面组合与极端降水事件耦合作用。北东向陡坡带的 12 处危岩体中，7 处属倾倒式破坏，5 处为滑移式破坏。2022 年新疆地质灾害防治中心采用三维激光扫描技术测得危岩体体积误差率<3%，其中最大单体体积 213m³，重心偏移量 1.7m，失稳概率达 0.32。3#冲沟泥石流发育区流域面积 0.85km²，主沟纵比降 182‰，2023 年 7 月 17 日暴雨事件中冲出物质总量达 5200m³，最大粒径 1.2m。根据新疆地震局 2024 年发布的地震动参数区划图，矿区设计基准地震动峰值加速度 0.15g，对应地震烈度Ⅶ度，但需注意场地放大效应：ZK1202 孔所在台地场地特征周期 $T_g=0.45s$ ，较基岩区放大 1.8 倍。现状条件下采用灰色关联度法评估地质灾害危险性等级为三级，但露天采场开挖可能形成新的临空面，使崩塌灾害风险指数提升至 0.61。

3.3 环境水文地质问题

矿山开发引发的环境水文地质效应具有多尺度特征：（1）宏观尺度上，开采活动破坏环霞组泥岩隔水层连续性，2023 年采用 TOUGH2 软件模拟显示，开采区渗透系数从原生状态的 $1.2 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 增至 $8.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，地下水径流模数增加 7.3 倍；（2）中观尺度上，废石堆淋滤液污染风险突出，2024 年序批式浸出试验表明，As 的浸出浓度在 pH=5 时达峰值 0.43mg/L，且存在 Cd 和 Pb 的协同释放效应；（3）微观尺度上，阿克苏生态环境局 2023

年在矿区下游布设的 5 眼监测井数据显示,地下水位年均降幅 0.8m,水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型向 $\text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型转化,总溶解固体从 0.86g/L 增至 1.24g/L。建议采用同位素示踪技术识别污染迁移路径,并在重点区段设置防渗墙。

3.4 生态敏感性特征

依据《新疆生态功能区划(2022 年修订版)》三级分区体系,矿区属于天山南坡荒漠草原生态脆弱亚区,其生态敏感性指数 $\text{ESI}=0.68$ 。2023 年 7 月采用网格法开展的生物多样性调查显示:共记录维管植物 17 科 32 属 41 种,其中国家二级保护植物裸果木形成 3 处优势群落,重要值达 0.38。新疆林业规划院 2024 年 Landsat-9 遥感解译表明,矿区与生态保护红线重叠面积 4.7hm^2 ,主要涉及 3#冲沟水源涵养功能保护区。生态修复需遵循“适地适种”原则:试验表明,采用客土喷播技术可使紫花苜蓿出苗率达 91%,较传统撒播提高 37 个百分点。建议建立生态修复效果定量评估体系,将植被盖度、土壤有机质含量和生物量作为核心考核指标。

4 矿山开发影响预测

4.1 工程地质演变

露天开采活动将显著改变矿区原始应力场分布与岩体完整性。根据 2023 年新疆岩土力学研究所监测数据,边坡开挖后最大主应力方向偏转 28° ,应力集中系数达 2.3,反映岩体卸荷效应显著。敏感性分析显示,边坡角每增加 1° 或地下水位上升 1m,安全系数分别降低 0.032 和 4.7%,凸显水文-应力耦合作用对稳定性的影响。岩体劣化方面,泥岩遇水软化效应尤为突出,72h 浸泡试验表明其含水率从 0.56%增至 8.3%时,抗剪强度降低 68.4%,内摩擦角 φ 由 $35^\circ 10'$ 降至 18° ,直接威胁边坡长期稳定性。此外,ZK105 孔东侧 200m 处 N65 $^\circ$ E 向隐伏节理带在爆破震动下可能激活导水性,需实施超前探水并储备 30m 3 应急排水能力。三维激光扫描技术结合新疆大学智能判据系统的结构面网络建模显示,密集带占比 23.7%,主要分布于采场北侧强风化区;中等发育带占比 51.2%,主导区域稳定性;稀疏带占比 25.1%,集中于未扰动岩体。RQD 值统计表明,矿体平均完整性指数 76.15%,但顶板砂岩因差异风化形成碎裂带,需采用纳米硅溶胶注浆技术提升破碎带完整性指数至 0.65,渗透系数降低 2 个数量级,确保岩体长期稳定^[4]。

4.2 环境风险演变

矿山开发引发的环境风险呈现多尺度、多介质特征。粉尘污染方面,CALPUFF 模型模拟显示,破碎车间主导风向向下风向 1.2km 处 PM₁₀ 日均浓度达 $0.38\text{mg}/\text{m}^3$,超出《环境空气质量标准》二级限值 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$,需配置旋风+布袋二级除尘系统以控制扬尘。重金属累积效应方面,类比新疆拜城矿区数据,表层土壤 Cd 含量可能从背景值 $0.18\text{mg}/\text{kg}$ 增至 $0.62\text{mg}/\text{kg}$,超出《土壤环境质量风险管控标准》农用地风险筛选值 $0.6\text{mg}/\text{kg}$,建议种植超积累植

物龙葵,可实现 Cd 年移除量 $1.2\text{kg}/\text{ha}$,同步修复污染土壤。废石淋滤液污染风险突出,序批式浸出试验(2024 年)表明,废石堆在 pH=5 时 As 浸出浓度峰值 $0.43\text{mg}/\text{L}$,远超《地下水质量标准》(III类限值 $0.01\text{mg}/\text{L}$,且存在 Cd 与 Pb 协同释放,需设置渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{cm}/\text{s}$ 的防渗墙阻隔污染迁移。生态扰动方面,矿区与生态保护红线重叠面积 4.7hm^2 ,涉及 3#冲沟水源涵养功能区,2023 年网格法调查记录维管植物 41 种,其中国家二级保护植物裸果木群落重要值达 0.38,需采用客土喷播技术提升植被恢复效率,目标覆盖度 $\geq 70\%$ 、土壤有机质 $\geq 1.2\%$ 、生物量 $\geq 3\text{t}/\text{ha}$ 。

4.3 综合防治体系

针对工程与环境风险,构建“三维时空防控”体系,涵盖垂向分层控制、平面分区分级及时序动态调控。垂向控制上,表层采用生态袋植生技术防治水土流失;中层布设总长 2.3km 的截排水沟,暴雨工况排水能力 $25\text{m}^3/\text{d}$;深层实施帷幕注浆阻断地下水渗流通道。平面分区方面,重点防治区按 $800\text{万元}/\text{km}^2$ 投资标准,优先部署边坡加固与防渗工程;一般防治区投资 $500\text{万元}/\text{km}^2$,侧重粉尘抑制与植被修复;生态保育区投资 $200\text{万元}/\text{km}^2$,严格限制人为扰动。时序调控依托物联网平台,实时监测边坡位移、地下水位及 PM₁₀ 浓度,实现风险预警与响应联动。

5 结语

本研究系统揭示了新疆温宿县克孜尔 2 号陶瓷土矿的水工环地质特征及其对开采的链式影响。工程地质分析表明,泥岩-砂岩互层结构的各向异性与遇水软化效应是边坡失稳的主控因素,需通过纳米注浆技术与动态监测体系提升岩体完整性。环境地质评估显示,矿区生态脆弱性突出,废石淋滤液污染与植被退化风险需通过“三维时空防控”体系综合治理。研究成果为干旱区矿山开发提供了“地质过程-工程扰动-环境响应”协同防控的理论框架,推动矿产资源开发从被动治理向主动防控转型。未来研究应聚焦隐伏构造活化机制与生态修复长效性,进一步提升矿山全生命周期管理的科学性与可持续性。

[参考文献]

- [1]胡朗明,廖为福.江西南源陶土矿地质特征及工艺性能研究[J].西部探矿工程,2017,29(9):197-200.
 - [2]韩鹏飞.韩城西庄紫砂陶土矿地质特征及工艺性能试验[J].中国非金属矿工业导刊,2020(1):8-10.
 - [3]李宜林.大坪里紫砂陶土矿矿产资源勘查与矿业布局分析[J].低碳世界,2021,11(9):86-87.
 - [4]常艳,李可,孟思,等.山西平定紫砂陶土矿成矿地质特征及矿床成因[J].中国非金属矿工业导刊,2024(2):36-39.
- 作者简介:孔维英(1987.2—),毕业院校:中国地质大学(北京),所学专业:地质工程专业,当前就职单位名称:新疆维吾尔自治区地质局昌吉地质大队,职务:项目负责人,职称级别:中级(工程师)。