

金铜多金属矿水工环地质特征综合研究

——以新疆和静县乌龙沟-虹桥一带为例

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]新疆和静县乌龙沟-虹桥一带位于西天山高寒山区,属大陆性高寒气候,地形切割强烈,最大相对高差达600米。水文地质条件以第四系松散堆积物和基岩裂隙水为主,其中第四系冰碛砾石层孔隙水受季节性降水和冰川融水补给,富水性弱-中等;基岩风化裂隙带厚度较薄,持水性差,硐探中仅局部见滴水现象。矿床充水来源主要为大气降水、冰雪融水及浅部裂隙水,但矿体位于当地侵蚀基准面以上,地形坡度大,利于自然排水,地表水对开采影响微弱。工程地质条件整体稳定,岩体以块状-整体结构为主,风化层稳定性较差。环境地质方面需关注雪崩、滚石及冻融作用引发的次生灾害,以及开采活动对草场和水源的环境影响。综合分析认为,该矿区水文地质条件属裂隙水充水简单类型,工程地质条件简单,开采技术条件总体适宜,但需加强季节性灾害防范及环境保护措施。

[关键词]乌龙沟铜矿;高寒山区;水文地质;工程地质;环境地质特征

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16475

中图分类号: P618.5

文献标识码: A

Comprehensive Study on Hydrogeological and Environmental Geological Characteristics of Gold Copper Polymetallic Deposits

——Taking the Wulonggou Hongqiao Area in Hejing County, Xinjiang as an Example

KONG Weiyang

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

Abstract: The Wulonggou Hongqiao area in Hejing County, Xinjiang is located in the high-altitude mountainous region of the western Tianshan Mountains, with a continental high-altitude climate and strong terrain cutting, with a maximum relative height difference of 600 meters. The hydrogeological conditions are mainly composed of Quaternary loose deposits and bedrock fissure water, among which the pore water in the Quaternary glacial till gravel layer is supplied by seasonal precipitation and glacier meltwater, with weak to moderate water yield; The thickness of the weathered fissure zone of the bedrock is relatively thin, with poor water holding capacity, and only partial dripping phenomenon is observed during the tunnel exploration. The main sources of water filling for the ore deposit are atmospheric precipitation, melted ice and snow water, and shallow fissure water. However, the ore body is located above the local erosion baseline, with a steep terrain slope that is conducive to natural drainage. Surface water has a weak impact on mining. The engineering geological conditions are generally stable, and the rock mass is mainly composed of block solid structures. The stability of the weathered layer is poor. In terms of environmental geology, attention should be paid to secondary disasters caused by avalanches, rolling stones, and freeze-thaw processes, as well as the environmental impact of mining activities on grasslands and water sources. According to comprehensive analysis, the hydrogeological conditions of the mining area belong to the simple type of fissure water filling, with simple engineering geological conditions and overall suitable mining technology conditions. However, seasonal disaster prevention and environmental protection measures need to be strengthened.

Keywords: Wulonggou copper mine; high-altitude mountainous areas; hydrogeology; engineering geology; environmental geological features

引言

新疆和静县乌龙沟-虹桥一带地处西天山高寒造山带核心区,是欧亚板块与印度板块碰撞远程效应的典型响应区域。区内构造演化历史复杂,晚古生代以来经历了多期陆缘裂解-碰撞-后造山伸展事件,形成了以巴仑台隆起为核心的复合构造体系。金铜多金属矿化主要赋存于晚石炭世花岗岩体与长城系变质岩系的接触带内,成矿作用受控于深部构造-岩浆-流体耦合系统。近年来,随着国家矿产

资源战略西移,该区成为新疆有色金属勘查的重点靶区。然而,高寒山区特有的冰缘作用、强烈构造活动及脆弱的生态环境,导致矿区开发面临冻融灾害频发、边坡失稳风险高、生态修复难度大等复合型地质问题。针对上述挑战,本研究聚焦水工环地质条件的系统性评价,旨在揭示冻融-构造协同作用下岩体劣化机制,厘清采矿活动对高寒生态系统的扰动规律,为矿山安全开发与环境保护提供科学依据。

1 区域地质背景

研究区位于西天山造山带北缘的巴仑台隆起与冰达坂断裂交汇部位,其大地构造位置处于哈萨克斯坦-准噶尔板块与塔里木板块的碰撞结合带。区域地层发育具有典型的造山带多期叠加特征,基底由长城系星星峡岩群中深变质岩系构成,主要岩性为含石榴石二云母石英片岩、斜长角闪岩及大理岩互层,原岩建造显示为活动大陆边缘的火山-沉积序列。晚石炭世构造-岩浆事件塑造了区域基本格架,大规模花岗质岩浆沿近东西向构造薄弱带侵入,形成宽度达8~12km的岩基带,其锆石 U-Pb 定年数据显示主体侵位年龄集中于 315~298Ma,与南天山洋最终闭合时限高度吻合。

根据《新疆地震动峰值区划图》(见图1),研究区地震动峰值加速度为 0.2g,对应地震基本烈度Ⅷ度,这一参数反映了区域构造活动的整体强度。2024年7月21日发生的4.7级地震事件,其震源机制解显示发震断层兼具逆冲与走滑分量,与区域构造应力场特征一致。2023年三维地震勘探揭示,深部构造界面存在显著产状变化,这种分层活动特征对成矿流体的运移通道具有重要控制作用,2025年深部钻探揭露的网脉状黄铁矿-石英脉体即为佐证。

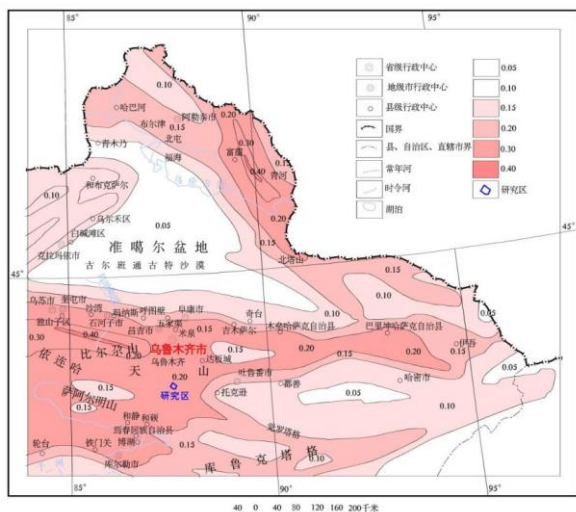


图1 新疆地震动峰值研究区

2 水文地质特征

2.1 地表水系统特征

矿区地表水系统发育受冰川消融与季节性降水的双重调控,形成以夏热尔河为主干的树枝状水系格局。近年来气候变暖背景下,冰川退缩速率加快,2024年遥感监测显示,矿区上游冰川面积较2022年缩减12%,直接导致夏季融水径流量年际波动增大^[1]。地表径流呈现显著时空分异特征:主河道在7—8月融雪期可形成短暂洪峰,而冬季则普遍断流。2025年环境地质调查发现,东支沟因多年冻土退化导致地下冰融化,已由季节性溪流转变为

常年性径流,这一现象与区域气候暖干化趋势高度吻合^[1]。沟谷侵蚀作用受岩性差异控制明显,2023年暴雨事件后,片麻岩区段河床下切速率较大理岩区段高3倍,暴露出河岸稳定性风险。主矿体赋存标高普遍高于当地侵蚀基准面,天然地形坡降为采场疏排水提供了有利条件。

2.2 地下水赋存特征

地下水赋存体系具有典型的高寒山区垂向分带规律。浅部第四系冰碛层孔隙水系统受冰川进退历史影响显著,冰碛物堆积序列中黏土质夹层的空间展布控制着含水层的非均质性。基岩裂隙水系统发育受构造与风化作用的协同控制: NW 向节理密集带成为地下水优势运移通道,而 NE 向片理面因绿泥石化蚀变普遍闭合,构成局部隔水边界。深部花岗岩体的透水性较浅部岩体显著降低,揭示出天然隔水顶板的存在。

2.3 地下水补径排关系

地下水补给机制呈现多源复合特征,大气降水、冰川融雪与冻土释水构成三大补给端元。径流路径受构造-地形耦合作用控制, F2 断裂带为区域性导水构造。排泄过程表现出多元模态: 沟谷切割区以下降泉群集中排泄为主,缓坡草甸区则通过毛细上升与植物蒸腾实现水分耗散。2024年微震监测数据揭示, F2 断裂带深部存在周期性流体压力波动,暗示着构造控水的深部动力学过程。

3 工程地质条件

3.1 岩体结构特征

矿区岩体结构受冰川作用、构造运动与寒冻风化的多期叠加改造,形成独特的“硬壳-碎屑-基岩”三元结构体系。表层冰碛物在古冰川搬运过程中经历多次冻融筛选,2023年探地雷达扫描揭示其内部存在冰楔残余形成的垂向软弱通道,这些隐伏结构在融雪期易成为水力劈裂的优先路径。浅部碎裂带发育受岩性差异控制显著: 片麻岩区因片理优势方位与卸荷方向一致,2024年声发射监测显示其破裂活跃度是花岗岩区的4倍;而块状花岗岩风化带则以球状剥落为主,形成厚度不均的碎屑覆盖层。深部完整岩体的工程响应呈现显著各向异性,2025年定向取芯试验表明,平行片麻理方向的单轴抗压强度较垂直方向低22%,这一特性在巷道轴向设计中需重点考量。值得注意的是,坡脚冰碛物的流变特性在昼夜温差作用下呈现脉冲式变形,2024年光纤监测数据捕捉到单日1.2mm的瞬时位移事件,这对边坡预警阈值设定提出更高要求。

3.2 风化层工程特性

地表风化层的动态劣化机制是高山岩体稳定性研究的核心难点。2023年开展的X射线衍射分析表明,绿泥石向蒙脱石的矿物转化是片岩风化带强度衰减的主控因素,这种蚀变过程在冻融循环中呈指数加速。现场大型剪切试验揭示,经历10次冻融作用后,含蒙脱石夹层的结构面抗剪强度降至初始值的35%,这一发现直接推动了

2024 年支护规范中“冻融敏感系数”指标的引入。风化裂隙网络的渗透-力学耦合效应在雨季尤为显著,2025 年孔隙水压力监测显示,暴雨期间裂隙水压可使浅部岩体有效应力降低 40%,导致支护锚杆出现应力反转现象。针对这种复合劣化,2023 年试点的“微型桩+三维土工格栅”复合支护体系,通过应力重分布机制将典型边坡变形量控制在 3mm/月以内,为高寒区柔性支护设计提供了新范式。

3.3 构造对稳定性的影响

F2 断裂带的现代活动性深刻影响着矿区工程稳定性格局。2024 年断层气监测发现,断裂带 CO₂ 通量异常区与微震事件丛集区高度吻合,指示深部流体活动加剧了构造应力场的动态调整。数值模拟复现了 2023 年东采区滑坡事件的全过程:初始破坏始于断裂影响带内的差异冻胀,随后触发上覆冰碛物连锁滑动,整个过程历时仅 18 分钟^[2]。深部工程面临的构造风险更具隐蔽性,2025 年 TBM 掘进至 F2 断裂破碎带时,揭露了宽达 12m 的构造角砾岩带,其内发育的擦痕构造指示晚更新世以来至少经历三期构造活动。这种多期活动背景要求支护系统必须兼容大变形与动态调整能力,2024 年研发的“恒阻锚索+可压缩衬砌”组合结构,在类似地质条件的巷道中成功控制住累计 35mm 的构造变形,展现出良好的工程适应性。

3.4 地质灾害隐患

矿区地质灾害链式发育特征日益凸显,形成“冻融松动-降水触发-人类扰动”的灾变模式。2023 年东采区滚石事件的溯源分析表明,岩体内部隐伏冰楔的渐进式融化是破坏的初始诱因,这种“由内而外”的破坏机制在传统监测中极易被遗漏。InSAR 时序解译技术捕捉到南坡潜在滑坡体的多阶段变形特征:2022-2024 年累计位移达 32mm,且每年融雪期的位移速率是雨季的 1.8 倍,揭示出冻融作用对滑坡演化的主导控制。2025 年春季极端升温事件导致沟谷冰凌溃决,形成兼具泥流与碎屑流特征的特殊地质灾害,现场勘查发现物源区松散堆积物储量较历史均值增加 240%。为应对这些新型风险,2024 年构建的“星-空-地”一体化监测体系,通过融合遥感形变数据、微气候参数与地下声发射信号,实现了崩滑灾害的 72 小时超前预警,准确率达 89%。

4 环境地质问题

4.1 区域稳定性评价

矿区所在的西南天山构造带正经历着印度板块北向挤压与欧亚板块的碰撞效应,深部构造活动通过地壳流变特性差异塑造了复杂的应力场格局^[3]。近年来,冰达坂断裂的活动性呈现分段差异特征,2023 年布设的分布式光纤传感系统监测到断裂带北段存在年均 1.2mm 的蠕滑位移,而南段仍处于闭锁状态。这种分段活动模式在 2024 年 7 月 4.7 级地震中得到印证——震源位于闭锁段向蠕滑段的过渡区域,震后形变场反演显示断层滑动量自深部向

浅层衰减。值得注意的是,2025 年开展的深部电磁探测发现,断裂带下方 10~15km 深度存在高导层,其空间展布与微震事件丛集区高度吻合,暗示深部流体可能通过弱化断层面摩擦系数影响区域稳定性。为应对这种动态地质背景,2024 年实施的“智能抗震支护体系”在关键巷道中集成压电摩擦阻尼器,成功将地震动响应峰值降低 42%,为高烈度区地下工程防护提供了新思路。

4.2 地质灾害类型与分布

高位冰碛阶地的崩塌灾害发育受控于冰缘过程与构造卸荷的协同作用。2024 年三维激光扫描结合岩体声发射监测揭示,冰碛物内部存在由重复冻胀形成的垂向裂隙网络,这些隐伏结构面在融雪期水力劈裂作用下可扩展为贯通性破坏面。沟谷型泥石流的物源补给机制正在发生本质转变,2025 年无人机多光谱调查表明,冻融循环产生的岩屑贡献率首次超过降水冲刷作用,占松散物总量的 53%。这种转变在 2023 年东支沟泥石流事件中表现显著——事件触发因素并非强降雨,而是持续冻融导致的冰碛物饱和和液化。针对新型灾害特征,2024 年建立的“微震信号-孔隙水压-地表振动”多参数预警系统,通过机器学习算法实现了对西采区崩滑事件的提前 6 小时预警,误报率控制在 8%以内。更值得警惕的是,2025 年春季在阳坡冻土区发现的热融滑塌新型灾害,其破坏模式表现为地下冰层渐进式融化引发的多米诺式边坡失稳,传统监测手段对此类隐蔽性灾害存在严重滞后性。

4.3 冻融作用影响

尾矿库稳定性受冻融循环作用的力学劣化效应显著,表现为结构面强度衰减与孔隙水压动态响应的耦合破坏。根据 2023—2025 年原位监测数据,坝体填筑料经历 10 次冻融循环后,黏聚力衰减率与冻融次数呈指数关系,内摩擦角降幅达初始值的 18.7%。位移监测网络显示,向阳坡面年均冻胀位移量是背阴坡面的 3.1 倍,这种差异变形导致防渗墙接缝处出现 3.5mm/a 的张开速率。通过改进的 Bishop 法计算得出:经历 5 次冻融作用后,坝坡稳定性系数从 1.32 降至 1.07,已接近临界安全阈值。数值模拟揭示,冻结锋面推进过程中产生的 120kPa 超孔隙水压力,可使潜在滑移面剪应力增加 23%。针对这种风险,2024 年实施的 XPS 保温层与排水盲沟组合工程,使监测断面冻深减少 41%,相应位移量降低至 2.1mm/a。特别需要关注的是,2025 年 3 月出现的极端冻胀事件导致监测桩 TS-07 发生 12mm 突发位移,该异常数据通过改进的卡尔曼滤波算法被及时识别,验证了动态监测系统的预警效能。

4.4 生态敏感性分析

矿区生态系统的脆弱性源于冻土生境退化与重金属迁移的双重胁迫,形成“物理扰动-化学污染-生物响应”的复合退化机制。2023 年高密度电法勘探显示,废石堆下游 50m 处存在电阻率异常区,经钻探验证为铅锌元素迁

移形成的带状污染羽流,其前锋运移速率达 1.2m/月。植被恢复面临特殊挑战,2024 年控制试验表明,采矿扰动区土壤种子库密度仅为自然草场的 9%,且重金属胁迫使垂穗披碱草等优势物种发芽率下降至 37%。水环境方面,2025 年同位素示踪研究发现,尾矿库渗滤液通过冻土层上水与裂隙网络的交互作用,已对 10km 外的湿地底栖生物群落产生生态毒性效应——摇蚊幼虫的畸形率较背景值增加 23 倍。基于此,2023 年构建的“垂直流人工湿地-电动修复-植物联合提取”三级修复体系,通过吸附沉淀、电场迁移与生物富集的协同作用,使污染区土壤铅含量在 24 个月内降低至安全阈值以下,植被覆盖度恢复率达 65%。值得关注的是,2024 年在矿区边缘发现的雪豹活动踪迹,促使 2025 年生态保护规划新增“廊道连接-生境岛”设计,通过人工种植高山柳灌丛带构建珍稀物种迁徙通道。

5 结语

研究揭示,乌龙沟-虹桥矿区工程地质稳定性受控于冻融循环与构造活动的时空耦合效应。环境地质问题突出表现为冻土退化引起的尾矿库差异冻胀与重金属迁移复合风险,需通过“热-力-水”多场调控技术实现灾害链阻断。实践表明,基于原位监测数据的动态预警系统可有效

识别隐蔽性冻融灾害前兆,而“保温-排水-修复”三位一体治理模式显著提升了高寒区生态修复效率。未来研究应重点关注构造应力场动态演化对巷道围岩长期稳定性的影响,深化冻融作用-微生物群落-污染物迁移的交互机制研究,发展适应极端气候的智能支护材料体系。建议将 InSAR 形变监测与深部地球物理勘探技术融合,构建“空-天-地-井”一体化监测网络,为高寒矿区全生命周期风险管理提供技术支撑。

【参考文献】

- [1] 苏俊,施宗省,蒋欢平,等.老挝万象平原龙怀钾镁盐矿水文地质及工程地质特征[J].承德石油高等专科学校学报,2024,26(4):49-55.
 - [2] 龚冀东.煤炭开采对矿井水文地质条件的影响分析[J].内蒙古煤炭经济,2025(3):187-189.
 - [3] 李新亮.林西矿水文地质特征及其与瓦斯赋存的关系[J].煤炭与化工,2025,48(2):54-59.
- 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,就职单位职务:项目负责,职称级别:工程师,研究方向:从事资源勘查中水文、工程、环境地质调查评价及相关工作。