刚果(金)某潜滑带变形机制及治理措施研究*

马增[1,2,3],费汉强[1,2,3],贺云[4],牛小明[1,2,3],王旭[1,2,3],蒋豪[1,2,3],李万里[1,2,3],黄江平[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4.中铁资源集团有限公司, 北京 102300)

摘要:边坡变形机制研究是制定边坡合理治理措施的基础和关键。刚果(金)某露天矿潜滑带在削坡减载和采用微型桩治理后,在下部开采过程中再次产生变形。为制定潜滑带的治理方案,对变形区域开展了现场调查和钻孔勘察,分析了潜滑带滑面形成过程,并基于调查结果,详细分析了潜滑带变形机制,最终制定了以削坡减载、大直径抗滑桩和土钉墙为核心的全面削坡、局部加固的治理方案。研究结果表明:滑面形成以地质构造作用为基础,在露天开采活动扰动下持续变形,滑面不断向下延伸,最终可能贯通形成整体滑面。潜滑带滑面形成机制可分为3个阶段:卸荷回弹产生的推移式滑动、下部开挖产生的牵引式滑动、后期发展的整体推移式滑动。基于潜滑带形成机制的研究结果,制定了削坡减载、土钉墙和抗滑桩联合治理措施,通过计算分析验证了治理方案的合理性。研究结果可为露天矿山相似软岩边坡治理措施研究提供参考。

关键词:露天边坡;潜滑带;滑动机制;治理措施

中图分类号:TD854;TD235 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0127-08

Study on Deformation Mechanism and Treatment Measures of a Submerged Slide Zone in the Democratic Republic of the Congo

Ma Zeng[1,2,3], *Fei Hanqiang*[1,2,3], *He Yun*[4], *Niu Xiaoming*[1,2,3], *Wang Xu*[1,2,3], *Jiang Hao*[1,2,3], *Li Wanli*[1,2,3], *Huang Jiangping*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Provincial Engineering Research Center for Mine Geological Disaster Prevention and Control and Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China;
4.China Railway Resources Group Co., Ltd., Beijing 102300, China)

Abstract: Research on slope deformation mechanism forms the foundation and key to formulating reasonable slope treatment measures. After slope cutting and load reduction combined with micro-pile treatment, a submerged slide zone in an open-pit mine in the Democratic Republic of the Congo experienced renewed deformation during subsequent deeper mining operations. To develop a treatment scheme for this submerged slide zone, field investigations and borehole surveys were conducted within the deformed area. The formation process of the sliding surface in the submerged slide zone was analyzed. Based on the investigation results, the deformation mechanism of the submerged slide zone was analyzed in detail. Ultimately, a treatment scheme centered on comprehensive slope cutting and localized reinforcement, comprising slope cutting and load reduction, large-diameter anti-slide piles, and soil nail walls, was formulated. The research results indicate that the formation of the sliding surface is predicated on geological tectonic processes. Under the disturbance induced by open-pit mining, continuous deformation occurs, and the sliding surface extends progressively downward, potentially coalescing to form an integral sliding surface in the final stage. The formation mechanism of the sliding surface in the submerged slide zone can be divided into three stages: the advancing-type sliding stage induced by unloading rebound, the retrogressive-type sliding stage triggered by excavation at the lower section, and the integral advancing-type sliding stage during later development. Based on the research findings regarding the formation mechanism of the submerged slide zone, a combined treatment measure incorporating slope

* **收稿日期**:2025-10-10

基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ05);国际与区域科技创新合作重点研发项目(2018WK2052);国家科技部重大科技领域创新方法研究与应用(SQ2019IM3640003)

作者简介:马增(1998—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事矿山岩石力学及边坡工程防灾减灾研究。E-mail:mazeng1540@163.com

cutting and load reduction, soil nail walls, and anti-slide piles was formulated. The rationality of the treatment scheme was verified through computational analysis. The research results can provide a reference for the study of treatment measures for similar soft rock slopes in open-pit mines.

Key words: Open-pit slope, Submerged slip zone, Sliding mechanism, Treatment measure

0 引言

滑坡是露天矿山开采中最常见的地质灾害类型之一。软弱岩体诱发滑坡具有成因复杂、演化缓慢等特征[1-3],刚果(金)上加丹加省区域受构造应力作用,沉积岩发育形成破碎岩体,导致区内多个矿山存在滑坡风险[4-5]。边坡变形机制解析是该类滑坡研究的关键环节,对于揭示滑坡失稳过程、评价滑坡风险等级及制定有效防治策略具有重要的理论意义与工程指导价值[6-8]。

按驱动力成因,滑坡可分为牵引式和推移式滑坡两类。张继民等[9]采用边坡雷达监测手段,分析了滑坡前缘及后缘变形的速率,确定了牵引式滑坡的移动特征。唐然等[10]分析了四川盆地红层区构造应力场演化下的滑坡演化特征,发现该区域滑坡多以构造应力作用控制的平推式滑坡为主。李海军等[11]以贵州发耳煤矿尖山营滑坡为例,开展了滑坡特征、影响因素和变形机制分析,确定滑坡形成机制为"塌落沉陷-拉裂-蠕滑",运动形式为推移式滑坡。滑坡变形形式的多样性和个体的差异性,正是滑坡形成机制研究的核心意义所在。

针对不同类型的滑坡体,专家学者采用的分析手段、研究角度、技术方法不同,对应的滑坡形成机制各不相同,所采取的治理措施存在显著区别。王格格[12]在现场地质调查的基础上,采用室内试验、理论计算和数值模拟方法,开展了凹陷露天滑坡致灾机制及反压护坡治理技术研究。常宝[13]以滑坡成因分析为基础,提出了"减荷+固脚+强腰+排水"的治理措施。何华等[14]分析了攀西某露天矿西帮滑坡体成因机制和影响因素,制定了前缘压脚、后缘支挡和截排水措施。白逢义[15]采用现场调查和岩土体试验手段,详细分析滑坡体的基础条件,总结了滑坡诱发因素,提出了边坡参数优化和防排水措施。治理措施研究的核心价值在于提出的治理方案能够与滑坡滑动机制相匹配,实现较好的治理效果。

本文以刚果(金)某露天矿潜滑带为研究对象,基于潜滑带地质资料和现场调查结果,分析滑面形成过程,揭示潜滑带形成机制,并根据现场情况制定治理措施。该滑坡变形机制及治理措施研究结果对矿山边坡防灾减灾具有重要的指导意义,也可为该区域边坡治理提供重要参考。

1 矿山概况

矿区位于刚果(金)卢阿拉巴省科卢韦齐市西南方向 7 km,地处加丹加高原,总体地势为东南高、西北低,海拔标高 1 375~1 525 m。矿区属于热带草原气候,受赤道低压带和信风带南北移动的交替影响,一年内干、湿季节分明,年平均降雨量 1 231 mm,降水量年内分布不均匀,降水主要集中在 11 月至次年 3 月,占全年降水量的 85%以上。矿区出露地层较为简单,主要为第四系、新近系及罗安群地层[16]。罗安群地层是本区的主要地层,为浅海相的细碎屑岩和化学岩,原岩以白云岩、页岩、黏土岩、砂岩等为主,主要分为 R_1 组、R_2 组(CMN、SDS、BOMZ、SDB、RSC、RSF 和 RAT)和 R_3 组地层,R_4 组在本区缺失,如图 1 所示。

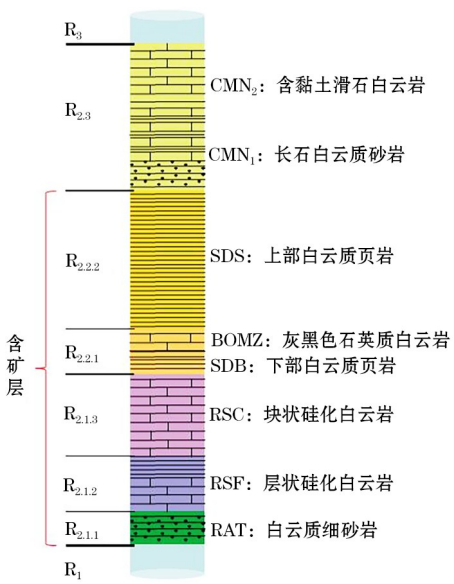


图 1 罗安群地层柱状图

Fig.1 Roan group stratigraphic histogram

矿区受区域构造影响明显,罗安群地层逆冲于孔德龙古群新地层之上,同时形成北东 30°~40°的

主构造线,主要构造为褶皱、断裂及不整合接触构造等[17-18]。矿区工程地质条件和水文地质条件较复杂,环境地质条件简单。矿山露天采场边坡分为东帮、西帮、南帮和北帮 4 个区域,台阶高度为 15 m,局部并段,台阶坡面角为 50°～60°,设计开采高度为 1 425～990 m。

2 潜滑带变形过程

2.1 潜滑带区域历史

潜滑带位于南帮边坡西侧,2022 年 8 月 10 日雷达监测数据显示,潜滑带区域 1 365～1 380 m 区域位移速率发生突变,从 3.5 mm/d 增至 12 mm/d,边坡出现裂缝。2022 年 9 月对南帮潜滑带进行了补充勘察。

2022 年 10 月,制定了削坡减载并在 1 320 m 平台施工三排微型桩的治理方案,经论证后实施。2022 年 12 月,南帮潜滑带区域因卸载至 1 365 m 平台,位移速率开始趋缓。2023 年 1 月,卸载至 1 335 m 平台,位移速率进一步下降,曲线平缓,滑坡不良地质体趋于稳定。2023 年 2 月,完成南帮卸载工作。2023 年 5 月,完成南帮 1 320 m 平台微型桩施工。

本研究采用削坡减载加微型桩等治理方案对 1 320 m 以上局部边坡进行了治理,治理后边坡变形趋于平缓,边坡达到稳定状态。

2023 年 6 月,矿山下部开采至 1 260 m,在爆破振动和 1 320～1 260 m 边坡较陡的影响下,边坡下部再次出现裂缝,为了避免出现滑塌事故,矿山下部开采工作停滞,待治理后复工。2023 年 6 月、7 月、8 月,该区域平均位移速率分别为 3.71 mm/d、1.01 mm/d、0.85 mm/d,整体位移速率趋于平稳。现场裂缝发育情况如图 2 所示。

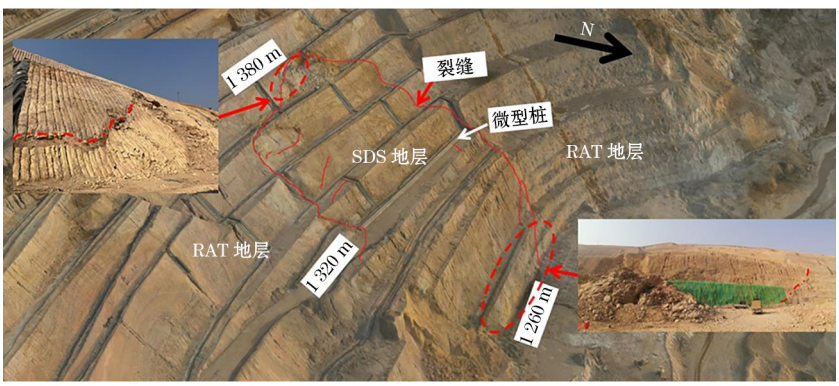


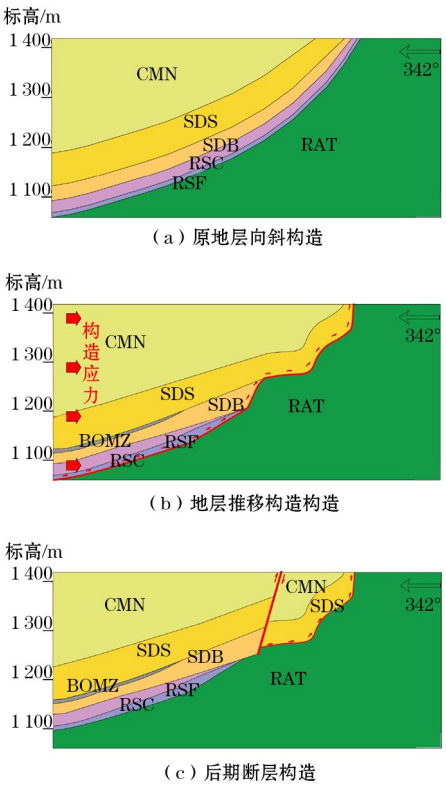
图 2 现状裂缝发育情况

Fig.2 Current situation of existing crack development

2.2 潜滑带滑面形成过程

罗安群地层为一套海相沉积岩,在地质历史时期经过推覆构造作用逆冲于孔德龙古群新地层之上,经褶皱构造作用形成如图 3(a)所示的向斜构造,后经构造应力推动 RAT 上部地层沿着 RSF 地层底界面向上推移,在推移过程中,RSF、RSC 和 SDB 地层经磨蚀后部分消失,岩层界面发生弯曲,在界面摩擦中产生 BOMZ 地层,其原岩为 SDB 地层的白云质页岩,SDS 地层强度相对较弱,在推移过程中,遇到坚硬岩体岩层则受挤压,遇到软弱岩体则剪切岩体形成凹陷,最终形成如图 3(b)所示地层推移构造,后期在逆断层构造作用下,上盘上升,下盘下降,最终形成图 3(c)所示的后期断层构造。

基于上述地层形成条件,矿山采矿作业对岩层进行揭露,2022 年矿山开采至 1 320 m 时,边坡产生裂缝,初始滑面如图 4(a)所示,滑动范围为 1 380～1 320 m,上部滑面沿着 RAT 与 SDS 地层接触面滑动,下部从 1 320 m 剪出,滑面呈近圆弧状。对潜滑带进行了削坡减载和微型桩支护,虽然降低了潜滑带的下滑力,但是上部滑面依然存在。此外,由于开采至 1 260 m 时局部边坡加陡,1 320～1 260 m 产生了新的变形,微型桩连接梁临空侧出现沉降裂缝,目前边坡并未产生明显的滑动,滑面未完全贯通,推测滑面位于 SDS 地层内部,沿下部坚硬岩层面剪出,如图 4(b)所示,后期随着滑面的持续发育,图 4(b)中的两个滑面可能贯通形成一个整体滑面,如图 4(c)所示。



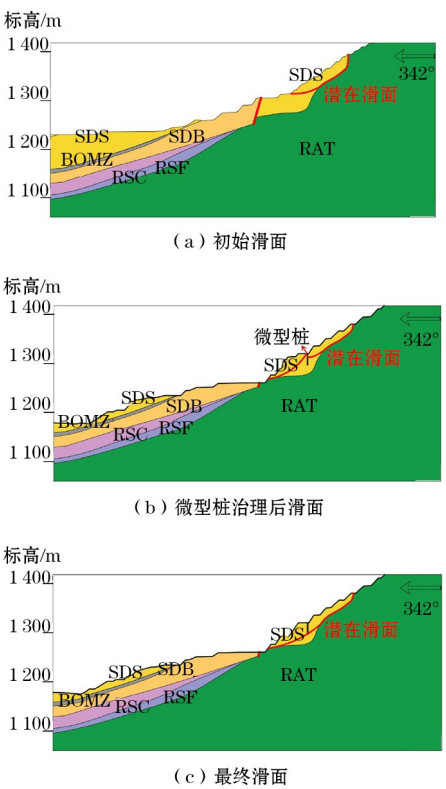
(a) 原地层向斜构造

(b) 地层推移构造构造

(c) 后期断层构造

图 3 潜滑带区域地质条件形成过程

Fig.3 Formation process of regional geological conditions in the potential slide zone



(a) 初始滑面

(b) 微型桩治理后滑面

(c) 最终滑面

图 4 滑面发展过程

Fig.4 Sliding surface development process

3 潜滑带变形机制

3.1 卸荷回弹产生的推移式滑动

按照设计境界参数向下开挖,逐渐形成台阶边坡,SDS 地层覆盖在边坡面上,SDS 地层以粉砂岩为主,胶结程度较差,且在地质历史时期受构造应力作用,岩体更为破碎,边坡开挖过程中,由于岩体强度较低,未采用爆破方式开挖,对坡体的扰动较小,因此台阶开挖后的一段时间内边坡处于稳定状态。台阶形成后,原软弱岩体失去侧向约束,被挤压的岩体逐渐发生卸荷回弹变形。边坡每开挖一个台阶,该台阶即发生卸荷回弹,同时上一级台阶的卸荷回弹变形经过峰值后逐渐减弱,其自重作用导致正处于卸荷回弹的下一台阶产生一定量的沉降,如此循环,直至开采至 1 320 m 时,边坡产生整体裂缝。该裂缝产生的主要原因为开采过程中的卸荷回弹,边坡变形自上而下,变形范围随开采活动和变形累积逐渐扩大,因此本阶段的边坡位移变形为开采卸荷回弹产生的推移式滑动。

3.2 下部开挖产生的牵引式滑动

矿山开采至 1 320 m 时,边坡形成推移式滑坡,采用潜滑带削坡减载和微型桩加固的治理方案,该方案剥离了部分滑塌体即 SDS 地层,在 1 320 m 布置了 3 排长度为 24 m 的微型桩并用连接梁连接,布置长度为 145 m,治理工程施工完成后,边坡达到稳定,矿山按照设计继续向下开采。

根据前期勘察结果,1 305 m 以下岩体较坚硬,因此对 1 320 m 至 1 245 m 的边坡设置了较大的坡面角(50°)。边坡开挖至 1 260 m 时,发现勘察岩体结果与现场揭露岩体强度相差较大,现场揭露岩体较破碎且局部存在孤石,因此断定前期勘察钻孔施工在孤石区域,造成对下部地层的认识不足。破碎岩体难以在 50°的坡面角下维持稳定,同时在爆破振动和降雨的影响下,1 260 m 边坡面上出现圆弧形的剪切裂缝,1 320 m 微型桩桩后出现沉降裂缝,因此判断 1 320～1 260 m 出现了基本贯穿的滑面,下部滑面的产生导致微型桩失去被动土压力,此时微型桩处于悬臂状态,虽对上部滑面仍然有抗滑作用,微型桩桩前处于挤压状态,但该挤压状态未维持较长时间,微型桩顶部产生位移,发生了牵引式滑坡。此牵引式滑动的主要原因为 1 320～1 260 m 台阶的角度较大,且岩体强度较低,在爆破振动和降

雨的作用下产生滑动,引起上部滑面重新启动,因此本阶段为下部开挖引发的牵引式滑动。

3.3 后期发展的整体推移式滑动

随着 1 320～1 260 m 边坡变形持续发展,微型桩失去阻滑作用,带动上部边坡向下移动,产生了两个次级滑面,随着边坡变形不断加剧,上下两个次级滑面可能贯通形成一个整体的滑面,滑面穿过微型桩,下部剪出位置为 1 268 m。从现场情况分析,整体滑面的上部为原推移式滑动阶段产生的滑面,下部滑面为新形成滑面。此外,下部 SDS 地层岩体强度略高于上部松散粉砂岩,上部滑动体推动下部产生滑动,因此此阶段为次级滑面可能贯通后产生的整体推移式滑动,该滑动阶段会持续至边坡产生滑坡为止。

基于该潜滑带的滑动机制,以现状边坡为基础,结合潜在滑面位置,测算得出潜滑带滑动方量约为 46 万 m^3。

4 潜滑带治理措施

该潜滑带形成的机理为构造作用将相对软弱的 SDS 地层向上推覆,与 RAT 地层形成不整合接触,后期在开采活动的影响下,SDS 地层沿着岩层面向下滑动,根据工程地质补勘资料及对潜滑带产生机理和发展机制的认识,结合当地施工条件,制定了全面削坡局部加固的治理方案。

4.1 治理工程布置

4.1.1 削坡减载

由于 SDS 地层在边坡上的形状特殊,若削坡减载工程将 SDS 地层完全剥离,将导致剥离范围增大,工程量增加。因此,在保证削坡后无支护边坡的安全系数基本满足许用安全系数要求的前提下,以边坡面上残留的 SDS 地层最少且工程量也最小为目标,对多方案进行分析和对比,最终确定了削坡方案。

削坡方案的参数为:削坡标高范围为1 425～1 245 m,平台宽度 10 m,台阶高度 15～30 m,其中 1 305～1 275 m、1 275～1 245 m 平台并段,台阶坡面角为 45°;治理区域形成1 410 m、1 395 m、1 380 m、1 365 m、1 350 m、1 335 m、1 320 m、1 305 m、1 282.5 m、1 275 m、1 245 m 共 11 个平台;治理区域整体边坡角为 32.5°。削坡减载工程布置见图 5,削坡减载工程剖面示意见图 6,削坡后边坡境界向边坡背侧移动 50 m,削坡工程量为 225.84 万 m^3。

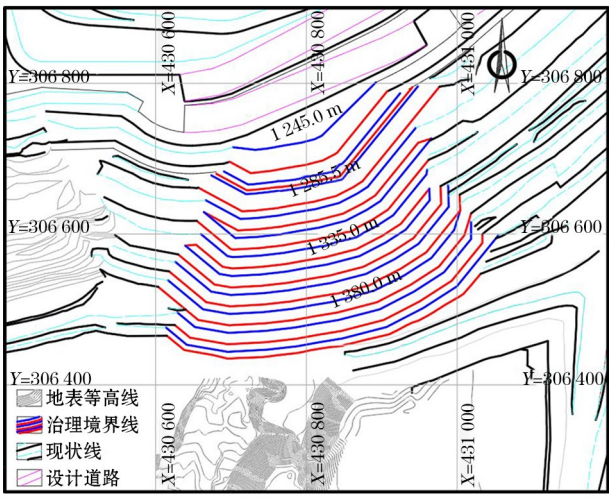


图 5 削坡减载工程布置示意

Fig.5 Layout of cuting slope and reducing load project

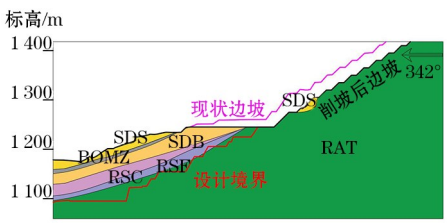


图 6 削坡减载工程剖面示意

Fig.6 Profile of cutting slope and reducing load project

4.1.2 局部加固工程

边坡面上的 SDS 地层无法完全剥离,边坡面残留方量约 6.3 万 m^3,因此需对边坡面上残留的 SDS 地层进行局部加固。受现场施工条件限制,综合考虑可以实施的加固措施,采用土钉墙和大直径抗滑桩对边坡面上残留的 SDS 地层进行加固。

(1) 土钉墙。

设计土钉长度时,充分考虑到 SDS 地层在边坡面上的厚度不一致,以土钉能够将 SDS 地层固定在稳定岩体上为设计目的,设计 1 320～1 305 m 边坡的土钉长度为 15 m,1 305～1 275 m 边坡土钉的长度为 15～20 m。1 320～1 305 m 边坡的土钉布设参数为 2 m(水平间距)×2 m(竖直间距);1 305～1 275 m 边坡的土钉布设参数为 2 m(水平间距)×2 m(竖直间距)和 1 m(水平间距)×1 m(竖直间距)。土钉采用梅花形布置,水平方向倾角(入射角)为−15°。

在边坡面采用钻机成孔,孔径 80 mm,孔内放

置一根 HPB335 级热轧 Φ22 mm 螺纹钢筋,坡面外露长度 20 cm,在土钉头部设置定位筋,土钉每隔 3 m 设置一根加筋杆,加筋杆长为 1 m,采用Ⅱ级螺纹钢筋,规格为 Φ16 mm,加筋杆与钢筋焊接牢固。

边坡表面采用 HPB335 级 Φ8 mm 钢筋对土钉进行连接,钢筋网的孔眼尺寸为 15 cm×15 cm,并喷射 10 cm 厚度 C20 混凝土。

在土钉墙下部布置 2 排仰斜排水孔,孔深 30 m,仰斜角度为 5°,开孔孔径为 110 mm,内置直径为 100 mm 的钢花管,管体外层包裹土工布,孔排距为 2 m,孔间距为 3 m,布置在土钉间隔之间,布置范围与抗滑桩布置范围一致,共需布置 46 孔。土钉支护效果如图 7 所示。

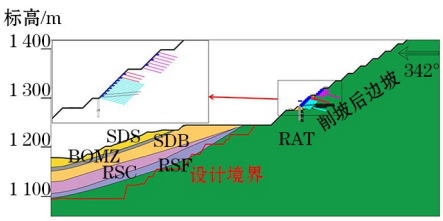


图 7 土钉支护效果

Fig.7 Effect of soil nail support

(2) 大直径抗滑桩。

设置抗滑桩的目的主要为防止破碎 RAT 地层引发上部边坡整体滑动,发生牵引式滑坡,因此在 1 282.5 m 平台设置抗滑桩。

受矿山机械设备及边坡施工难度限制,抗滑桩孔径初步设计为 1 m。抗滑桩布置于在边坡出露 SDS 地层的位置,布置长度为 66 m,孔距为 3 m,共布置 23 根抗滑桩。

抗滑桩桩端必须锚固于稳定坚硬的岩体中,根据勘察剖面,抗滑桩桩端必须嵌入中风化 RAT 地层内,且嵌入深度为桩长的 1/3,方可充分发挥抗滑作用。根据剖面岩层情况,抗滑桩的深度为 26 m。

抗滑桩钻孔直径为 1 000 mm,内部钢筋笼直径为 800 mm,两侧各留出 100 mm 的保护距离。钢筋笼长纵筋采用 HRB400 级 Φ25 mm 螺纹钢,端头超出 0.7 m,环形箍筋采用 HPB300 级 Φ6 mm 圆钢,每个钻孔 12 根长纵筋,箍筋间距 200 mm,纵向受力钢筋的焊接接头应错开布置,钢筋焊接接头的搭接长度为 250 mm,连接处箍筋间距加密至 100 mm;每隔 2 000 mm 布置定位片。

桩顶连接梁高为 0.8 m,宽为 1 m,地表采用 Φ25 mm 螺纹钢筋将钻孔中出露的钢筋连接在一起,并采用 Φ8 mm、间距 200 mm 的箍筋固定,最后用 C30 混凝土浇筑成梁,其中纵梁长度 66.6 m,每 20 m 设置一条伸缩缝。

4.2 治理后稳定性验算

4.2.1 计算剖面及岩体力学参数

(1) 计算剖面。

在治理区域中部选取代表剖面,如图 8 所示,剖面以削坡后的设计境界为分析对象,主要岩组为 RAT、SDS 和 RSF 地层,其中 RAT 地层按照风化程度分为全风化(RAT1)、强风化(RAT2)、中风化(RAT3)、微风化(RAT4)4 个亚层,其中边坡加固措施为土钉墙和抗滑桩。

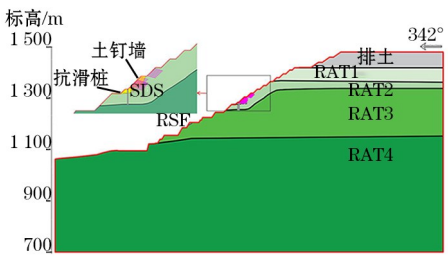


图 8 治理区域代表剖面模型

Fig.8 Representative profile model of the treatment area

(2) 岩体力学参数。

通过室内岩石力学试验,获得岩石的容重、单轴抗压强度、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角等参数,结合现场测绘得到优势结构面的产状、节理形态、节理间距、节理干燥程度等信息,采用 RMR 法、CSMR 法、*GSI* 值等对岩体进行综合评判,在岩体质量分级的基础上采用费辛柯法、格吉法和 Hoek-Brown 强度准则对岩石力学参数进行折减,得到岩体力学参数,综合不同方法的计算结果,再结合潜滑区域岩体参数反算结果,最终确定岩体力学参数取值,见表 1。

采用 GEO5 软件对加固后的设计境界边坡进行稳定性计算,安全系数计算方法采用不平衡推力法。GEO5 软件包含从地质调查到岩体设计的全套模块,不平衡推力方法为《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)推荐的方法,适用于任意滑面形状的边坡稳定性计算,尤其适用于存在支档结构的边坡。不平衡推力法的条块间作用力假设相对简化,针对圆弧型滑面的计算结果劣于其他极限平衡方法。针对目前滑面已经确定且为非圆弧型,

同时存在抗滑桩和土钉墙等支档结构，采用不平衡推力法计算最为适宜。

表 1　岩体力学参数取值

Table 1　The value of rock mass mechanical parameters

岩组	容重/(kN/m³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(×10⁻⁶ m/s)
排土物料	22.4	25.0	20.0	2.88
SDS	19.3	19.0	25.2	1.00
RSF	24.3	575.0	24.7	7.06
RAT1	19.0	25.0	22.0	7.06
RAT2	19.5	28.0	20.0	3.00
RAT3	20.5	220.0	30.0	1.00
RAT4	28.5	637.0	31.6	0.10

4.2.2　稳定性验算结果

通过对代表剖面加固后的边坡进行了稳定性验算，结果表明，加固后滑面位置为 1 285.5 m 至 1 415 m，滑面穿过土钉墙，计算得出边坡安全系数为 1.28，大于许用安全系数 1.25，因此加固后的边坡处于稳定状态，加固方案对保障潜滑带稳定具有明显效果，计算结果见图 9。目前治理工程已经施工完成，治理后边坡现状如图 10 所示，位移监测结果如图 11 所示，边坡面较为规整，现场巡查未发现边坡裂缝，位移趋于稳定。综合分析表明，边坡治理效果较好。

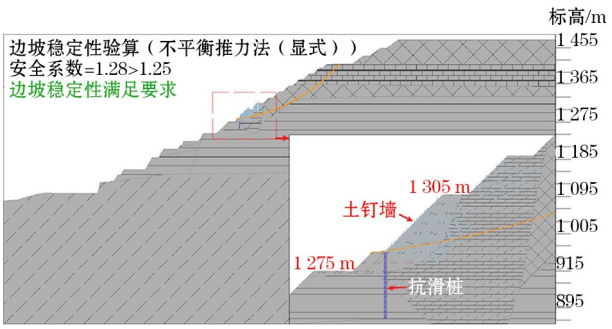


图 9　稳定性分析结果

Fig.9　Stability analysis results

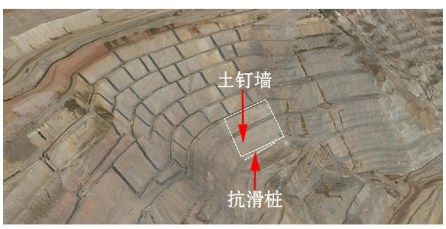


图 10　治理后边坡现状

Fig.10　Present situation of slope after treatment

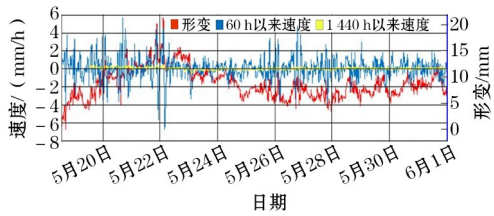


图 11　治理区域位移监测结果

Fig.11　Displacement monitoring results of the treatment area

5　结论

基于现场调查和钻孔勘察手段，应用理论分析方法，厘清了潜滑带滑面形成过程及滑动机制，在此基础上制定了潜滑带的治理措施，并通过计算分析验证了治理措施的合理性，得出的主要结论如下。

(1) 地质历史时期的区域构造作用和当前的露天开采是潜滑带滑面形成的基础，滑面形态在开采过程中不断变化，首先滑动的范围为 1 380～1 320 m，然后在 1 320～1 260 m 产生了新的滑面，最后两个滑面贯通形成一个整体滑面。

(2) 通过分析滑面形成过程中的影响因素，确定了滑动形成机制的 3 个阶段：卸荷回弹产生的推移式滑动阶段、下部开挖产生的牵引式滑动阶段、后期发展的整体推移式滑动阶段。

(3) 针对滑面的形成机制，制定了削坡减载、土钉墙和抗滑桩联合的治理方案，验算加固后边坡稳定性，计算得出边坡安全系数满足许用安全系数要求，加固后边坡处于稳定状态，治理方案对保障潜滑带稳定具有明显效果。

(4) 滑面形成过程和形成机制具有明显的阶段性特征，印证了软岩滑坡成因复杂、演化缓慢的特征，研究结果可为区域性滑坡治理提供可参考的范例。

参考文献(References)：

[1]　李江，许强，张继，等.横向拖拽式滑坡形成机制及三维稳定性评价研究[J].岩石力学与工程学报，2023，42(增刊 2)：4152-4161.
Li Jiang，Xu Qiang，Zhang Ji，et al. Study on the formation mechanism and three-dimensional stability evaluation of lateral drag landslide[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(Suppl.2)：4152-4161.

[2]　陶海川，石长柏，江亚鸣，等.恩施沙子坝滑坡破坏特征与形成机制[J].资源环境与工程，2023，37(3)：308-319＋349.
Tao Haichuan，Shi Changbai，Jiang Yaming，et al. Failure characteristics and formation mechanism of the Shaziba landslide in Enshi [J]. Resource Environment and Engineering，2023，37(3)：308-319＋349.

[3]　易志强，龙建辉，张吉宁，等.水平软弱夹层黄土滑坡形成机制及启动角度[J].科学技术与工程，2022，22(11)：4313-4320.

Yi Zhiqiang, Long Jianhui, Zhang Jining, et al. Formation mechanism and starting angle of loess landslide with horizontal weak interlayer[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(11):4313-4320.

[4] 崔松军,王飞飞,宋洪勇,等.刚果(金)地区长时效干湿循环下的露天采场滑坡机理研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):106-111.
Cui Songjun, Wang Feifei, Song Hongyong, et al. Study on mechanism of open pit landslide under long-term wetting-drying cycle in Congo (DRC)[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(2):106-111.

[5] 贺云,李爱兵,虎万杰.含软弱夹层露采边坡稳定性分析与治理方案研究[J].采矿技术,2022,22(1):54-57+61.
He Yun, Li Aibing, Hu Wanjie. Study on stability analysis and treatment scheme of open-pit slope with weak interlayer[J]. Mining Technology,2022,22(1):54-57+61.

[6] 陈文涛,杨志全,朱颖彦,等.阿塔巴德滑坡形成条件与诱发机制分析[J].中国安全科学学报,2020,30(11):148-155.
Chen Wentao, Yang Zhiquan, Zhu Yingyan, et al. Analyses on formation conditions and triggering mechanism of Atabad landslide[J]. China Safety Science Journal,2020,30(11):148-155.

[7] 王静,胡伟,吴银亮.鄂西高速公路王家湾滑坡形成机制及治理措施动态设计研究[J].灾害学,2019,34(增刊1):122-126.
Wang Jing, Hu Wei, Wu Yinliang. Dynamic design of formation mechanism and control measures of Wangjiawan landslide on Western Hubei Expressway[J]. Journal of Catastrophology,2019,34(Suppl.1):122-126.

[8] 马增,刘正宇,李爱兵,等.德尔尼铜矿多次滑坡形成条件及数值模拟研究[J].防灾减灾学报,2023,39(3):1-6.
Ma Zeng, Liu Zhengyu, Li Aibing, et al. Research on formation conditions and numerical simulation of multiple landslides in Derni Copper Mine[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction,2023,39(3):1-6.

[9] 张继民,张诏飞,席伟.基于边坡雷达的牵引式滑坡滑动过程分析研究[J].山西焦煤科技,2023,47(1):11-15.
Zhang Jimin, Zhang Zhaofei, Xi Wei. Analysis and research on sliding process of tractive landslide based on slope radar[J]. Shanxi Coking Coal Science and Technology,2023,47(1):11-15.

[10] 唐然,许强,范宣梅.构造应力场对平推式滑坡形成演化的影响[J].工程地质学报,2021,29(5):1437-1451.
Tang Ran, Xu Qiang, Fan Xuanmei. Influence of tectonic stress field on formation and evolution of sub-horizontal translational landslides in Sichuan basin[J]. Journal of Engineering Geology,2021,29(5):1437-1451.

[11] 李海军,董建辉,朱要强,等.贵州发耳煤矿尖山营滑坡特征及成因机制[J].科学技术与工程,2019,19(26):345-351.
Li Haijun, Dong Jianhui, Zhu Yaoqiang, et al. Characteristics and genesis mechanism of Jianshanying landslide in Faer coal mine, Guizhou province[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(26):345-351.

[12] 王格格.凹陷土质露天矿滑坡机制及反压护坡治理技术研究[D].广州:华南理工大学,2021:61-64.
Wang Gege. Landslide mechanism and back pressure protection treatment technology of sunken open-pit mine[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021:61-64.

[13] 常宝.某岩质滑坡成因分析及其治理方案建议[J].资源信息与工程,2019,34(4):145-146+148.
Chang Bao. Analysis on the causes of a rock landslide and and suggestions on its treatment scheme[J]. Resource Information and Engineering,2019,34(4):145-146+148.

[14] 何华,王静.攀西某露天矿西帮滑坡稳定性分析及治理措施浅析[J].中国金属通报,2018,18(4):190-191.
He Hua, Wang Jing. Stability analysis and treatment measures of west slope landslide on an open-pit mine in Panxi[J]. China Metal Bulletin,2018,18(4):190-191.

[15] 白逢义.山西某铁矿复杂岩土体边坡滑坡形成机制分析及治理措施[J].矿业工程,2021,19(6):13-18.
Bai Fengyi. Analysis on formation mechanism and treatment measures of complex rock and soil slope landslide in an iron ore mine in Shanxi province[J]. Mining Engineering,2021,19(6):13-18.

[16] 陈兴海,刘运纪,杨焱,等.刚果(金)SICOMINES铜钴矿床地质特征及成因探讨[J].有色金属(矿山部分),2012,64(6):31-37.
Chen Xinghai, Liu Yunji, Yang Yan, et al. Geological characteristics and genesis of SICOMINES copper-cobalt deposit in D. R. Congo[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2012,64(6):31-37.

[17] 刘宏,董明华,张诏飞,等.露天矿边坡岩体抗剪强度参数取值方法研究[J].矿冶工程,2023,43(3):6-10.
Liu Hong, Dong Minghua, Zhang Zhaofei, et al. Determination of shear strength parameters of slope rock mass in open-pit mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(3):6-10.

[18] 张诏飞,席伟.基于FLAC3D-RAR的边坡稳定性分析和监测预警[J].矿业研究与开发,2023,43(5):63-68.
Zhang Zhaofei, Xi Wei. Slope stability analysis and monitoring and warning based on FLAC3D-RAR[J]. Mining Research and Development,2023,43(5):63-68.