

软破岩质高陡边坡治理方案优化研究

王旭^{1,2}, 杨志一³, 马增^{1,2}, 徐志强⁴, 张忠光⁴

- 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
- 金属矿山安全技术国家重点实验室, 长沙 410012;
- 中铁十九局集团矿业投资有限公司, 内蒙古赤峰 100105;
- 珲春紫金矿业有限公司, 吉林珲春 133300)

摘要:受不良工程地质条件、下部采矿活动及雨雪入渗等影响,曙光金铜矿露天边坡存在较为明显的蠕滑现象,导致多处台阶出现严重变形、开裂、下沉。通过边坡灾害体分析、边坡稳定性计算,并结合矿山实际情况,提出了5种边坡治理方案,分别为:①预应力长锚索+钢板方案;②喷锚网方案;③浆砌石挡墙+素喷方案;④预注浆固结方案;⑤微型桩+浆砌石挡墙方案。经多角度方案对比,最终选取了方案①与方案⑤相结合的综合治理方案。通过方案实施,取得了良好的边坡治理效果,保障了矿山安全生产,该矿山边坡治理的研究与分析可为类似条件软破岩质高陡边坡治理提供可借鉴的经验和依据。

关键词:边坡;安全系数;锚索;微型桩;挡墙;滑坡

中图分类号:TD854.6

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)02-0102-06

Optimization of treatment scheme for high and steep slope with soft broken rock

WANG Xu^{1,2}, YANG Zhiyi³, MA Zeng^{1,2}, XU Zhiqiang^{1,2}, ZHANG Zhongguang⁴

- Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China;
- State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha 410012, China;
- China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Chifeng Inner Mongolia 100105, China;
- Hunchun Zijin Mining Co., Ltd., Hunchun Jilin 133300, China)

Abstract: Affected by unfavorable engineering geological conditions, underground mining activities and rain and snow infiltration, there is an obvious creep phenomenon in the open-pit slope of Shuguang Gold and Copper Mine, which leads to serious deformation, cracking, and subsidence of many steps. Based on the analysis of the slope disaster body and the calculation of slope stability, combined with the actual situation of the mine, five slope treatment schemes are put forward, namely: ① Prestressed long anchor cable + steel plate scheme; ② Spray anchor net scheme; ③ Masonry retaining wall + plain spraying scheme; ④ Pre-grouting consolidation scheme; ⑤ Micro-pile + masonry retaining wall scheme. After comparing the schemes from different angles, the comprehensive treatment scheme combining scheme ① with scheme ⑤ was finally selected. Through the implementation of the scheme, good slope treatment effect has been achieved, which ensures the safe production of the mine. The research and analysis of slope treatment in this mine can provide reference experience and a basis for the treatment of soft rock high and steep slopes under similar conditions.

Key words: slope; factor of safety; anchor cable; micro-piles; retaining wall; landslide

伴随着矿山开采技术水平的持续性提高,露天矿山工程中的复杂边坡问题变得越来越明显。相关

研究人员将重点放在了复杂边坡问题的处理和研究方面,露天矿山的地质构造以及岩性特征,还有在开采过程中的工艺技术都会对于矿山的的使用效果造成影响,尤其是软破岩质高陡边坡的治理问题^[1-11]。

郁平等^[12]针对庙沟铁矿边坡采用挡土墙、锚杆

收稿日期:2023-09-27

作者简介:王旭(1991—),男,硕士,主要从事矿山岩石力学及矿山安全、地质灾害治理研究,E-mail:295119230@qq.com。

格构梁、柔性防护网等工程,取得了良好的治理效果。刘建等^[13]针对三道庄露天矿边坡台阶滑坡问题,提出了多级框架锚索与微型抗滑桩群组合加固边坡技术,最终确保了边坡稳定。许洪亮等^[14]采用预应力锚固洞对某矿山边坡进行治理,实现了高预应力、深层加固的功效。刘成敏等^[15]针对某大型凹陷露天矿的开采现状,在不改变原有开采方案与工艺的前提下,设计应用光面爆破技术进行边坡治理,最终实现了矿山安全开采。李福艳^[16]将“坡面散体及碎石石清理挖除+被动网拆除+预应力锚索+锚杆+框架梁+喷锚网+排水孔+帷幕注浆”技术应用于内蒙古八岔沟矿,最终彻底消除了矿山边坡安全隐患。

本文结合曙光金铜矿软破岩质高陡边坡实际情况,通过边坡灾害体分析、边坡稳定性计算,共提出了 5 种边坡治理方案,经多角度对比,最终选取了两种相互结合的综合治理方案并付诸实施,取得了良好的治理效果,为类似矿山提供可借鉴的经验与依据。

1 项目背景

曙光金铜矿位于吉林省辉春市春华镇西 15 km 的小西南岔处,是目前国内规模最大的低品位黄金露天矿山之一。设计终了边坡高度 278~350 m,总体边坡角 $42^{\circ}\sim 48^{\circ}$,台阶高度 12 m,并段后 24 m,台阶坡面角 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$,属于大型露天矿山。

矿山开采过程中,矿体中部存在一条构造破碎带,该破碎带在 0 线至 6 线间,长约 700 m,控制最大延深 350 m。破碎带中有闪长玢岩侵入,闪长玢岩脉的上下盘有矿脉断续分布,总宽度 0.5~3.0 m 不等,个别地段也有超过 3 m 的。开采过程中,在雨季地表渗透水量较大的情况下极易塌落。

截至目前,曙光金铜矿露天边坡已经存在蠕滑现象,特别在 614 m 平台以上边坡开裂严重,裂缝沿边坡临空面展布,且伴随沉降,566 m 平台边坡面产生挤压鼓出,严重威胁到矿山的安全生产。受不良工程地质条件、下部采矿活动及雨雪入渗等影响,+566 m 平台、+542 m 平台均产生较大规模边坡开裂现象。同时,由于边坡下部岩体软弱破碎,在原有 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 设计台阶坡面角下单台阶难以实现自稳。因此,结合矿山实际情况,急需在充分考虑矿山工程地质条件的基础上,提出确保整体边坡及下部单台阶稳定性的综合治理方案,从而保证矿山安全生产。

2 边坡灾害体特征及分析

根据现场调查结果,拟治理区域分为 +494 m 以上边坡及 +494~+400 m 边坡。其中 +494 m 以上边坡变形破坏严重,多处台阶发育不同规模裂缝,部分台阶边坡下沉明显。最大错动深度可达 1 m 以上,其中 +566 m 平台测量裂缝深度达 5 m 以上,边坡呈现“倾倒+座卧式”滑塌趋势。受断层蚀变破碎带影响,下部 +494~+400 m 边坡台阶坡面极易产生片帮、滑塌,多数台阶面岩体风化土状,在 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 台阶坡面角下稳定性极差。

矿山边坡地质雷达监测表明:目前(2022 年 9 月 27 日—2023 年 1 月 28 日)监测的边坡移动范围主要集中在 506~566 m,其中以 566 m 点 17 为最大,如图 1 所示,最大为 1 mm/h,边坡处于等速变形阶段,再发展可能处于初加速阶段。根据现场也观测到 566 m 下部边坡开裂严重,滑动迹象明显。

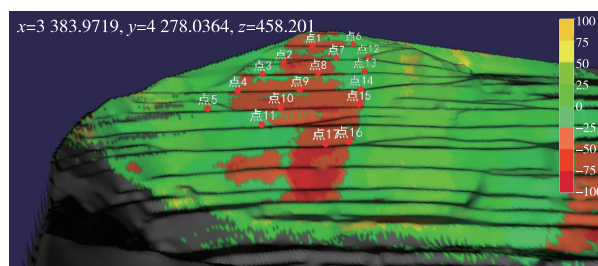


图 1 边坡雷达监测位移云图

Fig. 1 Displacement cloud image of slope radar monitoring

组成曙光金铜矿边坡的岩体为花岗岩、闪长岩,岩体强度较高,但在断层及蚀变破碎带的穿插及交汇下,呈整体较破碎状,局部边坡岩体呈条带碎裂状。因边坡高度较高(超过 300 m)且受下部强采活动影响,在降雨入渗、地下水爆破振动影响下,岩体整体强度进一步下降,抗滑力减少,下滑力增大。加之坡脚大型机械振动对坡体的扰动,各类不利因素综合作用下,边坡体自稳性降低,易逐步发生不同规模的滑塌。

通过资料的收集和现场的调查发现,现状边坡存在以下 4 个不安全因素。

1) 组成边坡体的岩体较复杂:受坡顶第四系表土或强风化岩层岩性的影响,该处的岩体松散破碎,局部破碎严重,在雨水及地下水影响下,易发生滑坡。

2) 断层与破碎蚀变带:本区基本的构造格架和基本的构造与矿化形式决定了北帮发生滑塌体的类

型及滑塌范围。矿区构造复杂,断层及结构面发育。

3)降雨及地下水:本区的地下水基本为基岩裂隙水,地下水的来源为大气降雨。目前矿山在边坡体上的出水点在北边坡,北边坡泄(出)水点较多,如果将相关泄水点连线,可看出其受控于东西向和近南北向破碎带。大约在边坡体上有4个垂向的出水带;边坡上排水孔见水深度为31 m。

4)采矿设计参数及生产爆破:受矿权林地的约束,目前部分采场台阶的坡面角偏高,在地下水及爆破作业影响下,易发生滑塌。

为达成矿山安全、高效强采的目的,曙光金铜矿边坡稳定性共面临以下两个难题:

1)边坡整体开裂严重、滑动迹象明显,监测结果显示边坡变形具有逐渐加速的趋势,在现有采矿活动下,整体边坡稳定性难以保证;

2)按照现有境界,为尽可能多地回采高品位矿石,+494~+400 m区段台阶坡面角需达到 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。然而根据现场实际工程地质条件及预裂爆破情况,现场边坡台阶坡面角最多仅可维持 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 自稳。

3 边坡稳定性计算

根据矿区地质地形图,结合勘察报告成果,制作了矿区地质模型。通过对矿山边坡雷达监测数据分析并结合矿山边坡实际破坏位置,对采坑进行剖面切取,如图2所示。并最终选取剖面2为本次稳定性分析的代表性剖面,剖面2工程地质模型如图3所示。

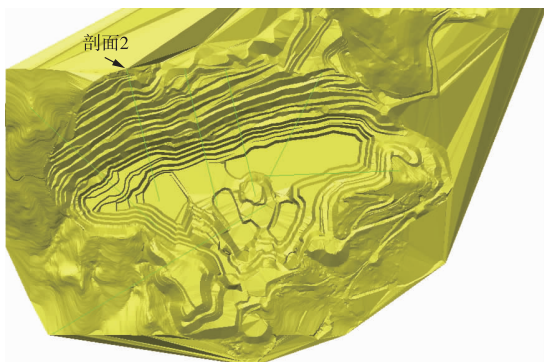


图2 治理区域分析剖面位置图

Fig. 2 Location map of the analysis section of the governance area

采用极限平衡法对剖面2进行稳定性计算,分析的受力工况状态为自重,得出其安全系数为1.065。计算结果表明,边坡稳定性处于极限平衡状

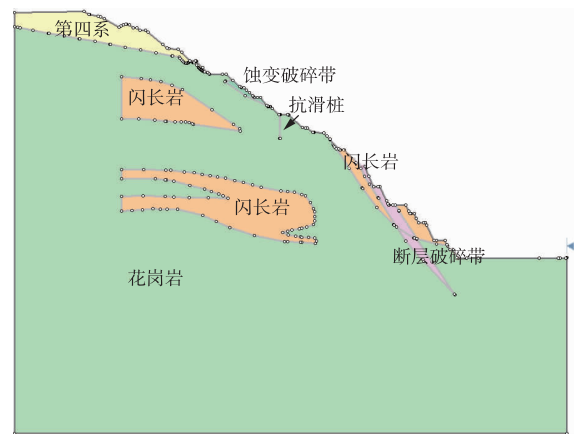


图3 剖面2工程地质模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of engineering geological model in section 2

态,在开采活动的持续推进下,边坡产生失稳的可能性很高,需采取一定的加固措施以保证边坡整体稳定。

按照矿山设计境界,台阶并段后高度为24 m,台阶坡面角为 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$,但目前现场爆破作业后大部分台阶坡面角不能够达到 50° 。为了分析并段后台阶稳定性,采用SLIDE 6.0进行单台阶稳定性计算,得出其安全系数为1.058。即单台阶处于欠稳定状态,在生产爆破、地下水等因素的影响下,24 m台阶失稳的可能性较大。

根据以上的边坡稳定性分析,总体来看,曙光金铜矿整体边坡及局部单台阶边坡均处于欠稳定状态,在生产扰动下,边坡稳定性难以保证,需采取一定的加固处理措施。

4 治理方案优化选择

4.1 治理方案总体设计

经现场踏勘,并结合矿山边坡工程地质条件及实际情况。本滑坡治理工程,应优先采用锚索加固方式对边坡上部进行整体加固,使边坡达到整体稳定。其次为了能够满足局部单台阶坡面角要求,再采取其他工程措施对提高单台阶进行治理。

根据曙光金铜矿滑坡体的实际情况,结合过去的滑坡治理经验,提出以下5种滑坡治理方案。

1)上部边坡治理方案:预应力长锚索+钢板(即方案一)。

2)下部单台阶治理方案:喷锚网(即方案二);浆砌石挡墙+素喷(即方案三);预注浆固结(即方案四);微型桩+浆砌石挡墙(即方案五)。

其他辅助措施:利用现有的设备与已有的工程

进行边坡雷达监测、坡面截排水等。

4.2 治理方案分项设计

4.2.1 预应力长锚索+钢板方案(方案一)

按照目前计算的边坡滑面情况来看,滑面主要在边坡下部,400~518 m处,滑面沿断层破碎带穿过下部花岗岩在边坡脚部穿出。因此,为了确保预应力长锚索达到稳定滑面的效果,施工位置以靠近坡脚为宜。同时,应尽可能减少施工对下部开采的影响,将预应力长锚索以单排形式布置在494 m和470 m平台上,施工区域主要是边坡出现位移的区域。

本次锚索设计采用理正岩土软件6.5PB3进行计算,通过不断的试验,最终确定加固锚索的参数为:锚索孔径130 mm、单排孔、孔距3 m、距离地面0.75 m、锚索入射角为 20° 。由于边坡岩体破碎,为提高锚索效果,避免群锚效应,布置两种长度锚索,一长一短布置。一种锚索长为32.5 m,自由段为23 m,锚固段为9 m,端头为0.5 m;一种锚索长为34.5 m,自由段为25 m,锚固段为9 m,端头为0.5 m。锚索施工过程中,遇破碎带较宽时,锚索的长度可适当加长。孔内注入M30混凝土砂浆,设计张拉力为850 kN,超张拉力为900 kN。494 m布置长度为165 m,共布置55孔,518 m布置长度为162 m,共布置54孔。

采用矿山库存已有材料钢板为锚索提供锚固基础,同时钢板能够作为挡墙使用。钢板采用6~12 mm,薄厚钢板混合使用,也可以根据加固边坡位置岩体破碎条件选择钢板厚度。

采用预应力长锚索+钢板方案后,经稳定性计算,边坡安全系数为1.212,满足规范要求。

4.2.2 喷锚网方案(方案二)

为保证曙光金铜矿下部+400~+494 m边坡台阶坡面在最新设计境界下维持稳定,结合矿山工程地质资料与现场踏勘,对断层破碎带密集处采用挂网喷浆的支护方式。其主要目的在于封闭边坡岩体以防渗水、风化等因素,保证单台阶坡面角在 $60^\circ\sim 65^\circ$ 时维持稳定状态,为下方作业人员及设备提供安全的作业环境。挂网采用 $\Phi 6.5$ mm钢筋制成 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 钢筋网,由锚杆进行固定,喷射150 mm厚C20混凝土。根据设计,挂网喷浆共分为12个区域,加固总长约为800 m,总面积约为 $15\,261\text{ m}^2$ 。

4.2.3 浆砌石挡墙+素喷方案(方案三)

为了保证下部台阶坡面角达到设计要求,提出浆砌石挡墙+素喷方案,在边坡台阶开挖后及时进行素喷,达到维持台阶稳定的目的。采用混凝土和

325#普通硅酸盐水泥,使用湿拌法喷射混凝土机,强度达到C20,喷射厚度5~10 cm,在边坡揭露后及时喷射混凝土。为保证台阶坡面稳定,阻止坡面不稳定岩体继续滑动,采用浆砌石挡墙作压坡脚。按照单台阶(24 m)设计,挡墙以浆砌石构筑在台阶坡面脚部,顶部宽为1.5 m,墙高为2 m,面坡倾斜坡度约为 65° ,背坡倾斜坡度约为 65° ,底部水平,在构筑浆砌石挡墙时应将挡墙底部碎石清理干净,底部清理0.5 m。

4.2.4 预注浆固结方案(方案四)

在预裂爆破孔施工的同时,在距离预裂顶线0.5 m左右同时施工一排灌浆孔,孔距为1 m,孔径为120 mm,孔深为6 m,为便于施工,钻孔设计为垂直孔。以此设计,共施工钻孔1 310个,深度共7 860 m。注浆浆液采用单液浆,采用325#普通硅酸盐水泥,水灰比为1:0.45,为了保证注浆效果,进行分段注浆,分段高度为3 m。

4.2.5 微型桩+浆砌石挡墙方案(方案五)

为确保下部台阶坡面角达到设计要求,提出微型桩+浆砌石挡墙方案。由于并段台阶高度为24 m,分两段进行施工,在第一段预裂钻孔施工时,施工微型桩。在第二段并段后采用浆砌石挡墙方式,维护坡面,达到维持台阶稳定的目的。为保台阶大坡面角边坡的稳定性,要求易施工且与矿山的爆破出矿等工艺过程不冲突。因此,在预裂孔爆破完成后并段前的12 m台阶,设计施工局部破碎带或断层台阶的微型抗滑桩,并段后的下12 m台阶的坡脚进行挡墙。

利用Slide 6.0软件进行微型抗滑桩的设计,经微型桩支护后,台阶边坡的安全系数可达1.1以上。如图4所示。

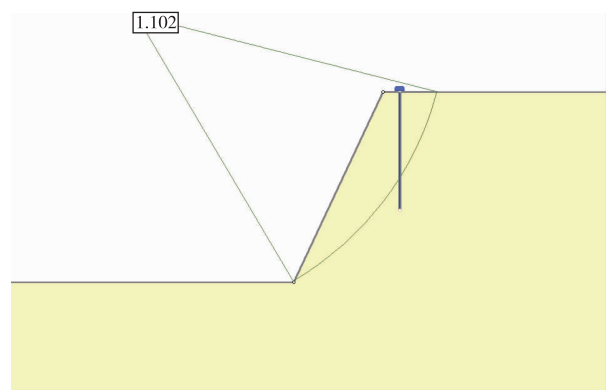


图4 微型桩加固后的台阶边坡稳定性计算结果

Fig. 4 Stability calculation results of step slope strengthened by micro pile

根据计算对 24 m 高单台阶,微型抗滑桩孔径 $\Phi 150$ mm,孔间距取 10 倍桩径,即 1.5 m,孔深 14 m,内布设 HRB400 型 $\Phi 32$ mm 钢筋 1 根。微型桩离台阶眉线 2 m。

浆砌石挡墙主要目的为压坡脚,保证台阶坡面稳定,阻止坡面不稳定岩体继续滑动。按照单台阶(24 m)设计,挡墙以浆砌石构筑在台阶坡面

脚部,顶部宽 1.5 m,墙高 2 m,面坡倾斜坡度约为 65° ,背坡倾斜坡度约为 65° ,底部水平,在构筑浆砌石挡墙时应将挡墙底部碎石清理干净,底部清理 0.5 m。

4.3 治理方案优化选择

从工程加固治理效果、施工难度及工程结构安全可靠、工程概算等角度进行方案对比,见表 1。

表 1 加固治理方案技术经济比较

Table 1 Technical and economic comparison of reinforcement treatment schemes

序号	项目	上部边坡治理方案(方案一)	下部单台阶治理方案			
			方案二	方案三	方案四	方案五
1	治理工程内容	目前 590 m 正在施工抗滑桩,上部边坡下移得到有效的减缓,但目前 566 m 及以下出现较大开裂,为了全面控制边坡下部滑动现象,拟在 494 m 和 470 m 施工两排预应力长锚索+钢板挡墙。	为保证单台阶坡面角在 $60^\circ \sim 65^\circ$ 时维持稳定状态,为下方作业人员及设备提供安全的作业环境,对破碎区域采用喷锚网方式加固,挂网采用 $\Phi 6.5$ mm 钢筋制成 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 钢筋网,由锚杆进行固定,喷射 150 mm 厚 C20 混凝土。	按照单台阶(24 m)设计,挡墙以浆砌石构筑在台阶坡面脚部,顶部宽 0.5 m,墙高 2 m,面坡和背坡倾斜坡度为 $1:0.43$ 和 $1:-0.43$,底部水平,底部开挖 0.5 m;采用混凝土和 325# 普通硅酸盐水泥,使用湿拌法喷射混凝土机,强度达到 C20,喷射厚度 5~10 cm,在边坡揭露后应及时喷射混凝土。	在预裂爆破孔施工的同时,在距离预定坡顶线 0.5 m 左右同时施工一排灌浆孔,孔距 1 m,孔径 120 mm,孔深 6 mm,为便于施工,钻孔设计为垂直孔。	24 m 高单台阶,微型抗滑桩孔径 $\Phi 150$ mm,孔间距为 1.5 m,孔深 14 m,内布设 HRB400 型 $\Phi 32$ mm 钢筋 1 根。微型桩离台阶眉线 2 m。挡墙以浆砌石构筑在台阶坡面脚部,顶部宽 1.5 m,墙高 2 m,面坡倾斜坡度为 $1:0.43$ (约 65°),和背坡倾斜坡度为 $1:-0.43$ (约 65°),底部水平,在构筑浆砌石挡墙时应将挡墙底部碎石清理干净,底部清理 0.5 m。
2	工程加固治理效果评价	此方案配合上部抗滑桩,能够有效提高整体边坡稳定性。	此方案能够有效解决台阶坡面角不能够满足要求的问题,保障下部采矿。	此方案一方面通过素喷防止边坡面滑动,另一方面通过压坡脚形式提高调节稳定性。	能够有效应对单台阶上部碎石滑塌现象出现,能够一定程度控制台阶坡面角。	能够全面的对台阶坡面进行防护。
3	施工难度及工程结构安全可靠	此方案整体边坡稳定性较好,满足规范要求,施工简单。下部台阶坡面角无法保障。	此方案对整体边坡稳定性未考虑,施工难度较大,成本较高。	此方案施工难度一般,未对整体边坡稳定性考虑,对于稳定单台阶坡面角效果一般。	施工简单,但注浆效果难以保证,台阶爆破对注浆体的影响难以预测。	施工简单,不影响下部边坡开挖。
4	工程投资概算/万元	148	343	128	362	261

由表 1 可知,上部边坡治理方案(方案一)能够有效提高边坡的整体稳定性;下部单台阶治理中方案二切实能够保证下部台阶坡面角达到 $60^\circ \sim 65^\circ$,但该方案施工难度较大且成本较高;方案三工程投资最低但治理效果一般;方案四成本最高且治理效果不确定,需要现场试验;方案五施工简单,不影响边坡下部施工,且施工效果有保证,工程费用适中。从工程可靠性和效果来看,最终综合选择上部边坡治理方案(方案一)和下部单台阶治理方案(方案五)相结合的方式对边坡进行加固。

5 治理效果评价

在综合考虑曙光金铜矿边坡工程地质条件、现场实际情况的基础上,通过边坡灾害体特征分析、边坡稳定性计算,选取了 5 种边坡加固方案。根据边坡治理效果及经济合理性、现场可操作性,最终综合选取了长锚索+钢板(上部边坡治理)+微型桩+挡墙(下部单台阶治理)的方案。矿山最终于 2023 年 3 月至 2023 年 5 月完成所有治理工程施工,该工程充分保障了矿山整体边坡及局部单台阶边坡稳定

性,避免了边坡滑坡及大规模地质灾害的发生,治理效果良好,现场治理照片如图5、图6所示。



图5 上部边坡长锚索+钢板方案现场治理照片
Fig.5 Site treatment photos of upper slope long anchor cable+steel plate plan



图6 下部单台阶微型桩方案现场治理照片
Fig.6 Site management photos of lower single step micro pile scheme

6 结论

以曙光金铜矿边坡治理项目为背景,通过边坡稳定性分析及治理方案研究,最终综合选取了适合矿山实际的边坡治理方案。通过方案实施,达到了良好的治理效果,得出了以下几点结论:

1)基于矿山工程地质条件、边坡灾害体特征分析、边坡稳定性计算,提出了5种边坡治理方案。

2)根据矿山实际情况,结合方案对比,最终选取了长锚索+钢板(上部边坡治理)+微型桩+挡墙(下部单台阶治理)的综合治理方案。通过现场实施,达到了良好的治理效果。

3)通过对曙光金铜矿边坡治理相关的研究与分析,可为类似条件软破岩质高陡边坡治理提供可借鉴的经验和依据。

参 考 文 献

- [1] 高庆,杨润基,卢许佳,等.降雨及爆破扰动下某露天矿山顺层高陡岩质边坡稳定性的影响及优化[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):52-57.
GAO Qing, YANG Runji, LU Xujia, et al. Influence and optimization of the stability of high and steep rock slope in an open pit mine under blasting and rainfall disturbance [J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2023,75(4):52-57.
- [2] 张宁晓,陈茜,林智勇.基于强度折减法及雷达探测法的破碎岩质边坡的稳定性研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):58-63.
ZHANG Ningxiao, CHEN Xi, LIN Zhiyong. Stability of broken rock slope based on strength reduction method and radar detection method [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023,75(4):58-63.
- [3] 张莹,王旭阳,林智勇.某露天矿山破碎岩体高陡岩质边坡稳定性的数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):100-105.
ZHANG Ying, WANG Xuyang, LIN Zhiyong. Numerical simulation study on the stability of high and steep rock slope with broken rock mass in an open pit mine [J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2023,75(2):100-105.
- [4] 崔松军,王飞飞,宋洪勇,等.刚果(金)地区长时效于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] 王旭,孙海,潘懿,等.露天边坡雷达监测预警技术应用研究[J].矿业研究与开发,2021,41(7):56-60.
WANG Xu, SUN Hai, PAN Yi. Research on application of radar monitoring and warning technology of open-pit slope [J]. Mining Research and Development,2021,41(7):56-60.
- [6] 王旭,唐绍辉,潘懿,等.基于数值模拟的露天边坡稳定性分析[J].矿业研究与开发,2016,36(8):37-40.
WANG Xu, TANG Shaohui, PAN Yi. Stability analysis of open-pit slope based on numerical simulation [J]. Mining Research and Development,2016,36(8):37-40.
- [7] 李源源,李屹,张良兵,等.爆破地震波作用下含断层结构面高陡边坡动力响应分析[J].有色金属工程,2023,13(7):96-107.
LI Yuanyuan, LI Yi, ZHANG Liangbing, et al. Dynamic response analysis of high steep slope with fault structural plane under blasting seismic wave [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(7):96-107.
- [8] 朱新平,郭昭华,韦忠跟,等.黑岱沟露天矿边坡动态实时监控预警技术[J].露天采矿技术,2010(3):1-3.
ZHU Xinping, GUO Zhaohua, WEI Zhonggen. Real-time monitoring and early warning technology of Heidaigou open-pit slope [J]. Open pit Mining Technology,2010(3):1-3.

