

矿山地质环境治理中坚硬岩石削坡方法比较和优化

高 骏

(江苏省国土工程技术研究中心, 江苏 南京 210001)

摘要:对各种岩性的山体进行削坡减载是矿山地质环境治理项目中的重要工程。以江苏省某地矿山环境治理项目为例,对高边坡坚硬石体削坡的“露岩爆破法”、“膨胀剂破碎法”、“二氧化碳致裂法”、“机械破碎法”4种方法进行了比较和优化,在分析了该工程的施工重点、难点的基础上,选用“二氧化碳致裂法”施工,取得了良好的效果。详细介绍了工程的施工工艺、施工过程等,总结了相关经验,对用“二氧化碳致裂法”施工进行了进一步的思考。

关键词:矿山地质环境治理;高边坡;坚硬岩石;削坡;二氧化碳致裂

中图分类号:TD167 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2020)12-0079-07

Comparison and optimization of slope cutting methods for hard rock in treatment of mine geological environment

GAO Jun

(Jiangsu Provincial Land Engineering Technology Research Center, Nanjing Jiangsu 210001, China)

Abstract: Slope-cutting and load-reducing for mountain bodies of various lithologies is an important job in the mine geological environment control project. Taking a mine environmental control project in Jiangsu Province as an example, comparison and optimization is made of four methods: open rock blasting method, expanding agent crushing method, carbon dioxide fracturing method, and mechanical crushing method for cutting hard rock on high slopes. Based on the analysis of the key points and difficulties on the project, carbon dioxide cracking was selected. This paper introduces the construction technology and process of the project in detail, summarizes the relevant experience, and presents further thought on the carbon dioxide cracking method.

Key words: mine geological environment treatment; high slope; hard rock; slope cutting; carbon dioxide cracking

0 引言

露天开采的矿山完成或废弃后,会产生土地资源破坏、地貌景观和生态环境破坏及崩塌、滑坡等地质灾害隐患等问题,为了保证矿山的可持续发展和恢复生态环境的需要,矿山地质环境的治理工作是必不可少的^[1]。在指导思想,要针对矿山地质环境破坏的特点、方式、分布及危害程度,抓住重点和关键环节,因地制宜、因害设防,采取拦、排、护、整、填、植等方面的综合治理措施对矿山环境进行治理。在具体措施上,采取工程措施和生物措施相结合对矿山环境进行治理。在工程方法上,可采用削坡减载、排水设施、挂网喷播绿化、鱼鳞坑绿化和种植乔灌木等^[2-4]。对各种岩性的山体进行削坡减载是矿

山地质环境治理项目中的重要工程,本文结合江苏省某地矿山环境治理工程,重点讨论高边坡坚硬石体削坡方法。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

江苏某矿山地质环境治理工程,据现场调查,出露地层主要为含碎石粉质粘土及二叠系栖霞组灰岩。

含碎石粉质粘土主要分布于坡顶及山间洼地处,土体呈红褐色、棕褐色,厚度分布不均,碎石主要为全一强风化破碎岩块,粒径大小不一。土体结构松散,孔隙较大,易受雨水浸润、冲刷而滑塌。

收稿日期:2020-03-18; 修回日期:2020-05-28 DOI:10.12143/j.tkge.2020.12.013

作者简介:高骏,男,汉族,1963年生,副主任,正高级工程师,土木工程专业,从事土地整治、污染场地治理修复、矿山地质环境治理等工作,江苏省南京市中山南路315号27楼,gaojun63@126.com。

引用格式:高骏.矿山地质环境治理中坚硬岩石削坡方法比较和优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):79-85.

GAO Jun. Comparison and optimization of slope cutting methods for hard rock in treatment of mine geological environment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(12):79-85.

其中,二叠系栖霞组灰岩呈薄—中厚层状,岩质地坚硬,敲击声脆,抗压强度高,属较硬岩体,但受节理、裂隙切割及长期风化作用,局部岩体结构较破碎,呈块状结构,完整性较差,同时因矿山早期无规划开采致使矿山边坡陡立,局部甚至反倾,为岩体的崩塌提供了有利的临空条件,对边坡的稳定性产生了不利的影响。

1.2 地质构造

工程项目区地层呈北北东走向单斜构造,倾向西北西,总体倾角 50° ,矿区岩体节理、裂隙发育,据量测,项目区南侧主要发育有 $40^\circ/85^\circ$ 一组结构面,无明显软弱夹层填充。

在项目区东北部边坡中上部发育一条实测性质不明断层 F1,上盘为二叠系下统,下盘为石炭系中统,局部可见断层泥,总体产状为 $319^\circ/32^\circ$,断层长度约 380 m。

项目区北部存在一小背斜褶皱构造,背斜核部地层为二叠系下统,轴向北东 12° 左右,背斜向东南、西北两翼倾覆并撒开,背斜两翼地层比较完整。 P_{1q} 薄—中厚层灰岩(标志层)出露清晰。

1.3 治理区现状

根据《南京市江宁区某矿山地质环境治理工程设计》,治理区分 A、B、C 三个,项目区三维图、治理分区图及 A2(主要工程区)现状见图 1~3,存在问题见表 1。

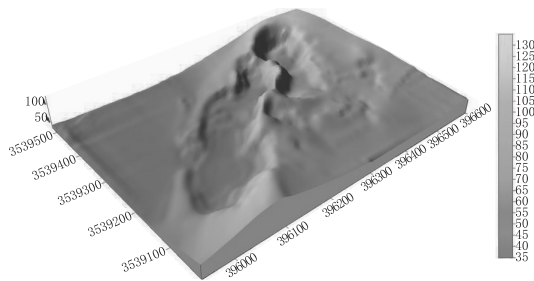


图 1 项目区及周边三维地形

Fig.1 Project area and surrounding terrain in 3D

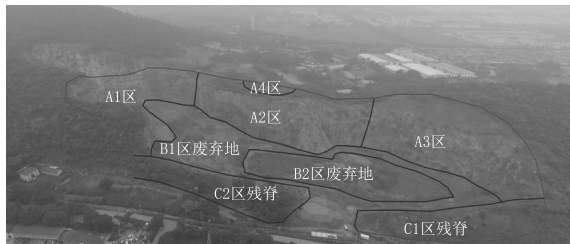


图 2 工程分区示意图、地形图

Fig.2 Project zoning diagram and topographic map



图 3 A2 区

Fig.3 A2 area

表 1 项目区现状及存在问题统计表
Table 1 Summary of current status and problems in the project area

治理分区	占地面积/ m ²	存在的地质环境问题
边坡区	A1	10158.60 高陡边坡、坡面风化严重,发育危岩、碎石,存在多处崩塌隐患点
	A2	5672.00 高陡边坡、发育危岩、碎石,坡脚崩塌后形成反倾,存在崩塌隐患点
	A3	8403.60 坡面裸露、坡顶上部残坡积层较厚,有明显滑塌现象
	A4	3409.50 坡面裸露、碎石散布
矿山废弃地	B1	26853.30 地形凌乱、高低起伏大、场地难以利用
	B2	8486.87 场地低洼,积水严重
残丘、残脊区	C1	5375.70 自然复绿,人工栽植经济植被
	C2	6694.89 地形凌乱、高低起伏大、残脊凸出、遗留出料台
原始山体	9664.54	植被发育良好
合计	84719.00	

1.3.1 A1 区边坡

A1 区为宕口东北部边坡,整体呈近凹陷式环形,坡脚高程约 $+55 \sim +61$ m,坡顶高程约 $+61 \sim +111$ m,最大边坡高差约 50 m,占地面积 10158.60 m^2 ,表面积 17194.40 m^2 。边坡总长约 270 m,原矿区开采石头时采用“一面式”开采方法,现状是,下边坡坡度约 $60^\circ \sim 85^\circ$,边坡下部坡脚风化较严重区崩塌后形成凹陷反坡,为高陡型边坡。边坡出露基岩岩性为二叠系栖霞组(P_{1q})地层灰岩,灰色、灰褐色,呈块状构造,岩性致密,一般产状 $282^\circ \sim 304^\circ/50^\circ \sim 86^\circ$,岩层有明显变化现象,呈薄层状。

1.3.2 A2 区边坡

A2 区为宕口中部边坡,整体呈近直线型,坡脚高程约 $+42 \sim +64$ m,坡顶高程约 $+82 \sim +95$ m,最大边坡高差约 48 m,占地面积 5672.00 m^2 ,表面积 12740.00 m^2 。边坡总体呈北东—南西走向,总

长约 250 m, 倾向西北 307° , 原矿区开采石头时采用“一面式”开采方法, 现状是, 下边坡坡度约 $60^\circ \sim 85^\circ$, 边坡下部坡脚风化较严重区崩塌后形成凹陷反坡, 为高陡型边坡。边坡出露基岩岩性为二叠系栖霞组(P_1q)地层灰岩, 灰色、灰褐色, 呈块状构造, 岩性致密, 一般产状 $282^\circ \angle 50^\circ$ 。边坡岩层倾向与坡向呈 25° 夹角。

1.3.3 A3 区边坡

A3 区为宕口南侧边坡, 整体呈近直线型, 坡脚高程约 $+42$ m, 坡顶高程约 $+57 \sim +101$ m, 最大边坡高差约 59 m, 占地面积 8403.60 m^2 , 表面积 12670.70 m^2 。边坡总体呈北东—南西走向, 总长约 170 m, 倾向西北 338° , 原开采时采用“一面式”开采, 现状是, 下边坡坡度约 $60^\circ \sim 85^\circ$, 为高陡型边坡。边坡 $+78$ m 以下为岩质边坡, 出露基岩岩性为二叠系栖霞组(P_1q)地层灰岩, 灰色、灰褐色, 呈块状构造, 岩性致密, 一般产状 $282^\circ \angle 50^\circ$ 。边坡岩层倾向与坡向呈 56° 夹角, 为斜交坡, 坡面节理、裂隙发育, 边坡整体稳定性好。边坡 $+78 \sim 101$ m 为土质边坡。

1.3.4 A4 区

A4 区为宕口东侧边坡坡顶上部残留小型开采宕口, 主要由裸露岩石边坡和宕底废弃地组成, 占地面积约 3409.50 m^2 , 表面积约 3758.00 m^2 。坡面最大高差约 12 m, 坡度约 $30^\circ \sim 45^\circ$, 坡度较缓, 区内有大量块石、碎石分布,

由于本文重点讨论高边坡较硬石方削坡方法, 故不对 A4、B、C 两区及项目区矿山环境问题、边坡稳定性评价情况做介绍。

2 治理施工重点、难点分析

2.1 重点

本项目工程施工工序多, 有 11 个分部分项工程, 从施工前准备(临时便道修筑)开始, 分别是“削坡减载、残脊挖方和废弃地填方、机械结合人工清坡、场地平整、截排水沟、客土(普通)喷播、治理区供水系统设置、坡脚挡土墙、排水沟砌筑、植被养护管理”等; 工期短, 中标工期仅 60 个日历天; 施工场地周围复杂, 项目区外 200~300 m 范围内有居民区、军事禁区、汽车 4S 店(新车)露天停车场、通行公路等。

2.2 难点

(1) 工程造价低, 中标费用为 998 万元, 由于前期勘探简单, 对二叠系栖霞组(P_1q)地层灰岩认识不足, 用原有的机械破碎削坡施工方案不仅成本高, 而且不能在规定工期完工。

(2) 合同总工期 60 日历天, 施工组织设计中, 削坡工期只有 25 日历天, 在这个很短的时间内、用较少的费用完成占地面积 7.5 万 m^2 、 11 万 m^3 石方山体削坡工程, 难度颇大。

3 施工工艺比选

该工程在投标前期对山体的石方情况了解不到位, 二叠系栖霞组灰岩质地致密, 在做施工组织设计和施工方案时, 采用挖掘机加“破碎锤”施工工艺, 在对石方山体削坡时遇到困难, 有时挖掘机一天破碎不了 2 m^3 岩体, 使原来就紧张的工期一度拖延。项目部暂停施工, 施工单位组织专家组对施工工艺进行比选, 提出 4 种岩体削坡工艺。

一是常用的露岩爆破法^[5]。其优势明显, 效率高、成本低、工期短, 但也有致命缺点, 即炸药是公安部门严格管理的爆炸物品, 爆破认证困难、批准困难、办理手续更困难, 工期有限; 施工场地周围复杂, 特别是军事禁区和 4S 店停车场距离项目区较近, 爆破作业安全要求高, 购买、运输、储存、使用雷管炸药均要符合《中华人民共和国民用爆炸物品管理条例》, 项目工地条件在短时间内满足不了相关要求。有关部门否决爆破作业申请。

二是膨胀剂破碎法^[6-8]。它是一种以硅酸盐及生石灰为主体的能使岩石破裂的粉状工程施工材料。原理是: 破碎膨胀剂在钻孔内, 由于自身膨胀反应, 产生以孔为中心向四周孔壁作用的压应力。在自由面的作用下压应力转化为剪切和拉应力, 而岩石的抗拉剪应力只是抗压应力的 $1/10$ 左右, 因此使岩石胀裂、产生裂缝, 再用风镐解小、破除达到开挖的目的。和露岩爆破相比, 膨胀剂破碎技术具有安全、无噪声、无震动、无飞石、无粉尘炮烟, 无污染, 不影响周边环境等优点。缺点是工期长。

三是二氧化碳致裂法^[9-10]。它是指利用液态二氧化碳吸热汽化膨胀, 压力急速上升的原理, 在达到目标压力后瞬间释放高压气体使岩层开裂, 达到削坡目的的方法。该方法有以下特点:

(1) 储存、运输、组装、施工等过程安全, 相对炸药爆破可完整消除哑炮等不安全因素。液态二氧化

碳灌注仅需 1~3 min/个。

(2)经济,整套系统可多次反复使用,施工成本低。

(3)致裂施工简单,不需搭建炸药库,施工过程简单,施工人员少,无需专业技术。

(4)环保、节能,可就地取材,没有复杂的报批审核手续等。

四是机械破碎法^[11-12]。将液压破碎锤安装在挖掘装载机或轮式装载机上进行破碎作业的方法,称之为机械破碎法。这种机具是以液体静压力为动力,驱动活塞往复运动,活塞冲程时高速撞击钎杆,由钎杆破碎岩石、混凝土等固体。这种施工方法相对安全、施工顺利时效率能满足工期要求,市场设备来源多。但对莫氏 5 度以上的岩石,机械破碎法效率低。

根据本工程施工实际情况和现有资源。从施工成本、工期进度要求、安全生产风险、施工质量优劣、施工对周围环境影响、社会管理要求等方面进行比较和优化,最后选定以“二氧化碳致裂”方法和机械破碎方法相结合方法施工。比选情况见表 2。

表 2 工艺比选情况
Table 2 Process comparison

序号	约束条件	施工工艺			
		露岩 爆破法	石体 膨胀剂	二氧化碳 致裂法	机械 破碎法
1	社会管理要求	高	低	较低	次低
2	施工成本要求	低	低	较低	次低
3	工期进度能力	快	慢	较快	次慢
4	安全生产风险	高	低	较低	次低
5	施工质量优劣	次劣	劣	较优	优
6	对周围环境影响程度	大	小	较小	次小

4 施工工艺

4.1 工艺流程(见图 4)

4.2 “二氧化碳致裂”山体削坡施工特点

4.2.1 工作原理

二氧化碳“致裂器”由充装阀、发热装置、储液管、“泄能器”等组成^[13]。二氧化碳在低于 31 °C 或压力大于 7.35 MPa 时以液态存在,而超过 31 °C 时开始汽化,且随温度的变化压力也不断变化。利用这一特点,在“致裂器”主管内充装液态二氧化碳,使用发爆器快速激发加热装置,液态二氧化碳瞬间汽化膨胀并产生高压,当压力达到爆破片极限强度(可设定压力 100~300 MPa)时,定压泄能剪切片破断,

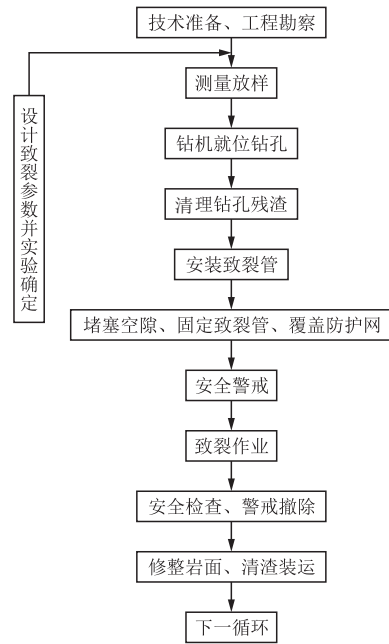


图 4 工艺流程

Fig.4 Process flow

高压气体从“泄能器”释放,汽化后的二氧化碳在 0.4 ms 内渗入基岩孔隙和裂缝,整体岩石受几何当量冲击波向外迅猛推进,达到致裂效果。

4.2.2 “二氧化碳致裂”优点和要求

(1)二氧化碳“致裂器”采用独特的设计,在工作时不产生明火或火花;“致裂器”的核心材料——发热剂,是经过优化配比的特殊材料配置而成,在空气中无法点燃或引爆,还可防止由于碰撞或高空坠落而造成的燃烧;不会造成放炮崩人事故,安全性强。

(2)二氧化碳“致裂器”爆破威力大、抛石多、块大、抛出距离短,减少了工人的劳动强度;一次投入可反复使用。设备结构及性能经数千次反复试验、改进、优化,使用中故障少、可靠性高、适用性强、生产效率高。

(3)二氧化碳“致裂器”爆破后,粉尘明显降低,不产生一氧化碳及氮氧化物等有毒气体,施工环境得到改善,环境友好。

(4)二氧化碳“致裂器”的爆破能力可控,通过选择不同泄能片、二氧化碳充装量及发热管等调节控制“致裂器”的工作压力,针对不同岩石的特性,控制致裂范围、深度等,经济性好。

(5)采用“二氧化碳致裂”法作业,要取的理想的效果,需要临空面,至少要有一个临空面。

(6)为保证安全施工,致裂作业应在白天完成,

便于观察和现场清理。不可在雨天作业,孔内不得有水,特别要注意孔隙潜水及基岩裂隙水。

4.3 边坡削坡施工

江苏某矿山地质环境治理工程属高边坡,施工采用“二氧化碳深孔致裂”,孔径为 120 mm,深度为 8 m,深孔致裂具有单位钻孔量小和二氧化碳单位耗量低、生产效率高优点。与机械削坡等技术相结合,可获得开挖面平整、围岩稳定、提高工程施工质量的效果。“深孔致裂”还有施工灵活,破碎效果好,对降低破碎振动、减少破碎冲击波,都能很好控制的优点。具体施工步骤如下。

4.3.1 测量放线

利用在施工现场设置测量控制网,采用 SET3110 型全站仪进行测量施工控制,根据设计坡比精确放样出路基边坡开挖线,用白石灰画出轮廓线,经监理人员确认后进行下一步开挖工作。

4.3.2 清除表土

用 PC-200 型挖掘机清除上覆土层及岩溶沟槽内土方,尽可能清除干净。

4.3.3 设计布眼

根据工程特点,岩石性质,台阶高度,临空面间距等分别布置。不同的工程特点,不同的岩石性质,不同的台阶高度布孔的方式也不同,本工程选用的布孔方式为直列并排布孔方式,由现场管理人员根据现场实际情况进行布孔设计。

4.3.4 致裂参数设计和选取

(1)临空面台阶高度通常设计: $H \leq L$,实际 $H > 8$ m。

(2)超深: $h = 0.2$ m。

(3)孔深: $L = 8$ m。

(4)孔径:0.12 m。

(5)孔距:设计 $b = (0.4 \sim 0.6)L$,取 3.2~4.8 m,但通过现场实验,取 2.5~3.0 m。

(6)直列孔与临空面间距:设计值 $a = 1.00 \sim 2.00$ m,选定 $a = 1.5$ m。

4.3.5 钻孔

钻孔必须做到准、平、直、齐四要素,各“致裂”孔孔底深度误差均不得大于致裂深度的 5%,致裂孔深度不够、孔的数量或间距误差符合施工要求时一律按规定进行补孔^[14]。

4.3.6 二氧化碳的充装

根据工程特点,岩石性质、台阶高度、临空面间

距、致裂管孔径以及直列顺序等分别计算每孔致裂管二氧化碳的充装数量,并在致裂管上标记直列顺序。二氧化碳气体致裂设备数据采集为:

(1)根据二氧化碳气体“致裂”设备数据,选定直径 90 mm、长度 1000 mm 致裂管,最大充气量为 3.7 kg,总重为 47 kg/根,根据现场岩层的不同,充气量相应变化。

(2)二氧化碳充装前,应打开窗门,检查连接管有无泄漏,一旦发现泄漏或发生头晕、心慌、气短、气喘、恶心呕吐等症状,应立即停止工作到正常空气中,再次通风排除污浊空气,换进新鲜空气降低二氧化碳浓度,直到达标后方可继续工作。

(3)二氧化碳致裂管充装完之后,将两端分别插入水中,检查气密性。若水中不冒泡,则气密性良好,可使用;若出现冒泡,则需要重新上紧阀门。

4.3.7 清孔

致裂孔成型后,二氧化碳液体充装前要对致裂孔进行检查,一是检查致裂孔内杂质是否清理干净,二是检查致裂孔是否符合致裂参数设计要求的孔深、孔距、排距等。

4.3.8 致裂管安装和填塞

致裂管安装时要 2 人配合,8 m 深的孔,需要 3 个致裂管并联完成。先把第一个致裂管放到预裂爆破的钻孔中后,首先检查导通性,用专用的导通器检查“致裂管”的导通性能,若导通性能良好,则可以使用;若不能导通,需查明原因,必要时更换发热器。用填塞材料把第一个致裂管填塞好,然后安装第二、第三个致裂管。

其次,在致裂管尾端(即装有注液头的一端)连上放炮线,并将起爆线端头短接,防止受杂散电流的影响。推移致裂管时注意不要碰断起爆线。若钻孔过长,可在储液管上连接若干数量的钻杆,将致裂管的排气头准确推送至预裂位置,实现精准定位。

致裂管安装到位并进行相关检查后,需对钻孔的间隙进行填塞。填塞时要选用理想的填塞物,本项目选用中粗砂作为填塞物。致裂孔有水时要做到排水后方可作业。要边填塞间隙,边用“炮杆”或振捣器将填塞物捣实,避免在填塞时造成致裂孔卡堵、填塞不实现象。一旦出现卡堵、填塞不实的情况,操作员必须做好标记,并报告作业班长处理。“致裂”前要做好充分的覆盖措施,严防引发飞石事故。禁止无填塞致裂^[15]。

4.3.9 致裂管连接固定

用2根 $\text{O}22\text{ mm}$ 钢丝绳分别对所有致裂管进行连接固定,并采用绳卡固定法对接头处进行卡接,确保致裂管处于整体状态,在受强劲冲力后不会单个飞出,起到双层保护的作用。

4.3.10 场地覆盖橡胶防护网

防护网由废、旧车轮胎编制而成,需要有较高的强度、弹性和韧性,不易折断,并有一定的重量,不易被致裂气浪抛起,橡胶防护网厚度 $<1\text{ cm}$,编织要严密,四面用钢丝扎紧,在“致裂”作业前用 $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 规格的防护网对致裂管四周 2 m 距离进行覆盖,并四周采用钢丝扎紧,防止致裂飞石及减少空气冲击波。

4.3.11 警戒

警戒范围:以致裂作业区为中心,考虑到本工程实际情况在作业区中心 40 m 范围区域为致裂警戒范围,作业时无关人员禁止进入。

4.3.12 致裂

将致裂管推送至预定位置后,人员撤离到安全位置,并将放炮线放线至安全位置,连接发爆器开始致裂。

“致裂”由有“致裂”经验的“致裂”施工员操作,前面各项工作做完之后,派有经验的“致裂”施工员检查网络。清理施工现场,一切机械和人员撤至安全地点;专职人员执行“一炮三检”制度;没有“致裂”负责人的起爆指令,不得致裂。启动发爆器。半小时后人员回到现场,回收使用过的致裂器。

4.3.13 致裂前后安全检查和措施

致裂前,要进行安全、技术交底。根据本合同的特点,列出危险源清单,编制有针对性、内容全面的资料,对技术人员和劳务人员进行安全技术交底。交底时要严格履行签字手续。

致裂作业施工前,边坡要有防护安全保证措施^[16]。A1区、A2区工程量较大,且边坡高陡,施工前应搭设防护栏,防护栏布置于边坡边缘,上部为槽钢,防护栏高度在 2 m 以上。

防护栏采用 20 A 工字钢作为柱子每隔 1000 mm 布置1条工字钢,共计120条工字钢。工字钢深埋入山体边沿 1500 mm 以下,并采用底宽 1000 mm 、高 600 mm 、顶宽 700 mm 的 $\text{C}25$ 混凝土基座。

每隔 300 mm 设置横栏(采用 $\text{O}50\text{ mm}$ 钢管),共3层,其中钢管交接处不少于 300 mm 并用扣件

扣紧。

致裂后,在确认无盲炮时,必须不小于 15 min ,致裂安全员进入现场察看是否存在盲炮、滑坡塌方等安全隐患,确认安全后发出撤除警戒命令。

4.3.14 二次破碎

二氧化碳“致裂”循环后,对于大块石头,采用“破碎锤”进行二次破碎。“破碎锤”破碎施工时,将破碎锤的钎杆压在岩石上,并保持一定压力后开动破碎锤,利用破碎锤的冲击力,将岩石破碎,挖掘机配合清除破碎岩体。岩体即将破除至设计坡面时,采用人工、风镐进行整修。

第一段或第一级施工平台上的岩层被“削、破、平整”到位后,然后进行下一施工段或平台岩体的致裂、破碎施工,直至全段坡面成型并且标高达到设计要求。

5 经验和思考

5.1 经验

该工程项目由于使用了“二氧化碳致裂”加机械配合的组合技术,抢抓了关键分部分项工程施工进度,保证了整个项目的顺利完工,工程质量良好(见图5),社会效益显著。同时通过精心组织,削坡施工费用比单纯机械削坡减少了很多。本项目共钻孔 4200 m ,使用二氧化碳致裂管 1589 根。完成相应工程量后,经核算施工费用为 $20\text{ 元}/\text{m}^3$,比单纯机械削坡的单价 $30\text{ 元}/\text{m}^3$ 节省 $1/3$ 。具有良好的推广应用价值。



图5 施工后的项目区

Fig.5 Project area after treatment

5.2 思考

“二氧化碳致裂”施工方法和其他削坡施工方法相比具有“安全性、可靠性、高效性、环保性”的特点。但是有两点思考:一是管理滞后,对“二氧化碳致裂”施工方法没有管理规章和技术标准可依、可循,影响产业发展;二是“二氧化碳致裂”施工方法工序相对

较多,所用机械设备较多,施工安全生产环节多。因此,相关主管部门要出台有针对性的管理、技术规范,项目的参与各方要履行好安全生产、技术质量职责。从而加快和规范“二氧化碳致裂”施工方法在削坡施工中的大力应用。

参考文献 (References):

- [1] 郑思光,赵志杰.露天矿山边坡治理的“喷砼飘台”技术试验及效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):80-87.
ZHENG Siguang, ZHAO Zhijie. Technical test and results of “shotcrete floating platform” for slope treatment at the open pit mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):80-87.
- [2] 崔恒,李慎锋,张吉庆,等.新型生态边坡治理支护形式现场试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):77-82.
CUI Heng, LI Shenfeng, ZHANG Jiqing, et al. Field test on new type of ecological slope retaining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):77-82.
- [3] 阴可,杨秀丽,王伯成.植被护坡及其在重庆地区的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):103-108.
YIN Ke, YANG Xiuli, WANG Bocheng. Principles of slope vegetation and application in Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005,16(4):103-108.
- [4] 呼铁斌.矿山地质环境治理存在的问题及对策[J].世界有色金属,2020(3):213-214.
HU Tiebin. Problems and Countermeasures of mine geological environment management[J]. World Nonferrous Metals, 2020(3):213-214.
- [5] 陈亚军,常治国,毛金峰,等.高段陡帮山坡露天矿非均质岩体爆破方法研究[J].煤炭技术,2017,36(7):12-14.
CHEN Yajun, CHANG Zhiguo, MAO Jinfeng, et al. Study on blasting method for non homogeneous rock mass in high slope surface mine[J]. Coal Technology, 2017,36(7):12-14.
- [6] 温尊礼,徐全军,姜楠,等.新型大孔径静态破碎技术的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):72-74.
WEN Zunli, XU Quanjun, JIANG Nan, et al. Experimental study on a new technology of static blasting in large diameter borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(5):72-74.
- [7] 郭瑞平,杨永琦.静态破碎剂膨胀机理及可控性的研究[J].煤炭学报,1994(5):478-485.
GUO Ruiping, YANG Yongqi. Swelling mechanism and controllability of sca[J]. Journal of China Coal Society, 1994(5):478-485.
- [8] 王振宇.岩石静态膨胀剂在地质灾害治理中的应用研究[J].建筑工程技术与设计,2017(36):2606.
WANG Zhenyu. Application of rock static expansion agent in geologic hazard control[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2017(36):2606.
- [9] 王莉,张力,孙礼超,等.地铁车站二氧化碳相变致裂法施工的动力响应分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(6):94-98.
WANG Li, ZHANG Li, SUN Lichao, et al. Dynamic response analysis of CO₂ phase change fracturing method construction at metro station[J]. Urban Mass Transit, 2019,22(6):94-98.
- [10] 李世安.二氧化碳致裂技术在地铁车站基坑开挖中的应用[J].市政技术,2020,38(4):258-262,273.
LI Shian. Application of carbon dioxide cracking technology in foundation pit excavation of metro station[J]. Municipal Engineering Technology, 2020,38(4):258-262,273.
- [11] 吴立,张时忠,林峰.现代破岩方法综述[J].探矿工程,2000(2):49-51.
WU Li, ZHANG Shizhong, LIN Feng. Synthesizing comment on modern rock fragmentation methods[J]. Exploration Engineering, 2000(2):49-51.
- [12] 刘柏禄,潘建忠,谢世勇.岩石破碎方法的研究现状及展望[J].中国钨业,2011,26(1):15-19.
LIU Bailu, PAN Jianzhong, XIE Shiyong. On the research development of rock fragmentation and its prospect[J]. China Tungsten Industry, 2011,26(1):15-19.
- [13] 安标字[2014]第 48 号,二氧化碳致裂器安全技术要求(试行)[S].
Ma Center Standard [2014] No.48, Safety technical requirements for carbon dioxide cracking device(Trial)[S].
- [14] 姚洪瑞.软弱围岩大断面隧道光面爆破[J].爆破,2020,37(2):42-47.
YAO Hongrui. Smooth blasting for large cross-section tunneling in weak surrounding rocks[J]. Blasting, 2020,37(2):42-47.
- [15] 张艳军,雷美荣.钻孔爆破堵塞因素分析[J].煤炭技术,2019,38(7):68-70.
ZHANG Yanjun, LEI Meirong. Analysis on block factors about drilling blasting[J]. Coal Technology, 2019,38(7):68-70.
- [16] 陈艳春,项斌,虞子平,等.复杂城市环境下边坡预裂爆破应用与效果检验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(8):81-84.
CHEN Yanchun, XIANG Bin, YU Ziping, et al. Application and effect test of slope pre-splitting blasting in complicated urban environment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(8):81-84.

(编辑 王建华)