

文章编号:1005-7854(2015)S0-0010-07

首钢水厂铁矿指挥中心南沉降边坡削坡减载方案研究

王朝辉

(首钢矿业公司 生产技术处,河北 迁安 064404)

摘要:首钢水厂铁矿是我国大型露天铁矿之一,已具有四十多年开采历史,随着开采深度不断延伸,采场多处发生了沉降滑坡隐患,尤以北采区上盘 80~10 m 水平(7-15#线)边坡隐患较为突出,严重影响到了采场的正常生产及重点工程项目的推进。通过分析首钢水厂铁矿北采区上盘 80~10 m 水平(7-15#线)边坡沉降滑坡的原因机理,为了确保隐患排除方案最优化,达到成本投入少、工程时限短、治理效果好的最终目标,通过充分结合实际情况,制定形成了不同组织方式的治理方案,并进行成本、工期、效果等各方面的综合对比,确立形成了最佳边坡隐患治理方案,达到经济、高效消除滑坡体隐患,改善首钢水厂铁矿北采区上盘边坡技术状况的目的。

关键词:首钢水厂铁矿;滑坡体治理;优化设计;对比分析

中图分类号:TD854+.6 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1005-7854.2015.z1.003

首钢水厂铁矿位于河北省唐山地区迁安市境内,是一座大型火山沉积变质岩型磁铁矿床,是首钢矿业公司的主要矿山之一。该矿由一系列中低山构成,山脊走向 NNE—NE,标高在 170 m 以上,两侧的将军墓岭高 332.9 m,为最高山峰,中部和东南部为低山丘陵,一般东坡较陡,西坡较缓,常有切割较深的冲沟。地理坐标为东经 118°32'~118°36',北纬 40°06'~40°09'。

根据设计,首钢水厂铁矿整个露天采场长 3600 m,宽 400~1680 m,分为南采场和北采场。两个采场在 34 m 以上连通,向下延伸基本是两个独立的采场。北采区上盘 80~10 m 水平(7-15#线)边坡处于北采场内,该部位高水平边帮布置有水厂铁矿南、北两个采区的总出入沟,是出入采区的咽喉,该部位右下方是后期采区内东部排岩系统破碎站搬迁及胶带延长基坑所在地,该部位边坡稳定与否直接影响水厂铁矿后期生产的推进。

1 滑坡体概况

2014 年 1 月,北区上盘 80~34 m 水平(11-15#线)边坡发生沉降变形,沉降区域走向长约 130 m,平均宽 15 m,高 46 m,预测滑坡体体积 7 万 m³。为消除滑坡体隐患,改善上盘 80~10 m 水平(7-11#线)边坡技术状况,2014 年 2 月至 2015 年 2 月陆续

实施四期削坡治理,完成工程量 80.73 万 t(见图 1、2、3)。

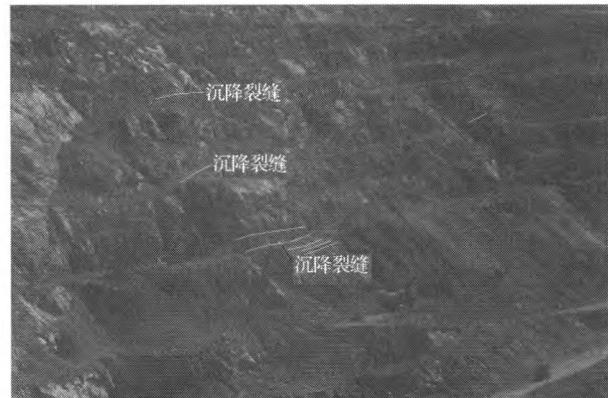


图 1 2014 年 10 月 10 日现状图(前 3 期削坡立体图)



图 2 10~34 m 水平(11-15#线)
削坡现状(2015 年 1 月 6 日)

作者简介:王朝辉,工程师,采矿工程专业。

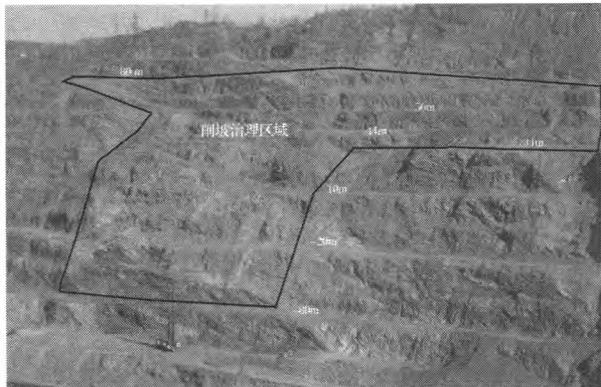


图3 治理后边坡现状图(2015年3月10日)

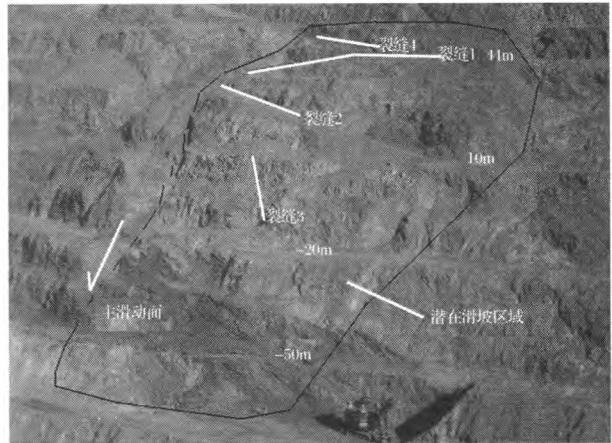


图 5 滑坡体全貌(2015 年 3 月 10 日)

2 该部位边坡再次沉降变形概况

2015年3月,检查发现指挥中心南侧削坡区域44~34 m勾机道中间、34~22 m水平(13-15[#]线)外侧坡面出现两条裂缝,其中:裂缝1长度50 m、裂缝2长度26 m,裂缝宽度10 mm、深度5 mm,其他部位未发现裂缝(见图4)。



图 4 2015 年 3 月 10 日

从 2015 年 4 月雨后观测看,边坡沉降有发展变化趋势,其中:裂缝 1、裂缝 2 主裂缝加宽、加深,沉降幅度达 10~40 mm 不等;另外,裂缝 1 与裂缝 2 主裂缝之间发育数条小裂缝、56~44 m 水平斜坡道坡脚新发育裂缝 4,长度 20 m,宽度 5 mm;10~-5 m 水平斜坡道上口发育裂缝 3,长度 12 m,宽度 4 mm,预计滑坡体体积 5 万 m^3 (注:从 56~-65 m 水平,段高 121 m,长度 70 m,平均厚度 6 m) (见图 5、6、7)。

3 滑塌机理分析

3.1 滑坡机理分析

1) 该区域边坡岩体发育三组优势节理面, 其中



图 6 裂缝 1(2015 年 4 月 3 日)

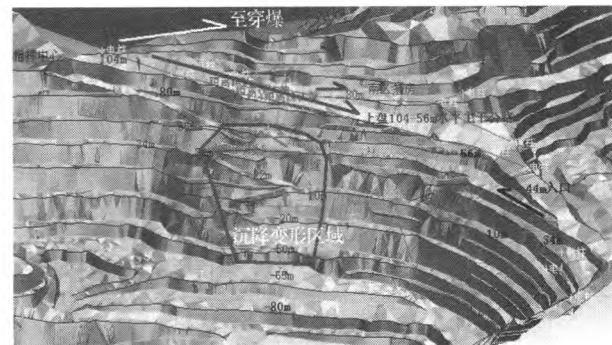
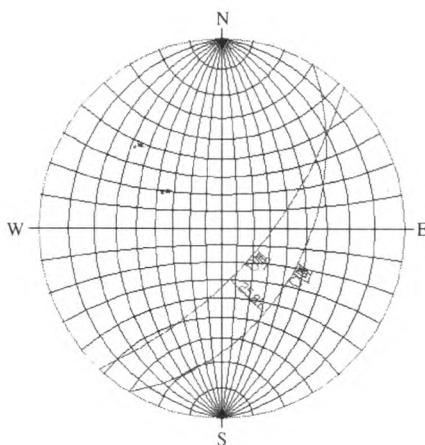


图 7 2015 年 3 月 28 日现状图

J_1 节理 ($315^\circ \angle 54^\circ$), J_2 节理 ($300^\circ \angle 40^\circ$), 以及一组与边坡走向近平行、顺坡向的节理构造(或称为变余层理), 其中 H_9 断层穿过该区域, 走向与边坡相同。现状变形坡体后缘裂缝位于 +56 m 平台坡脚处, 此处正好为 H_9 断层; J_1 节理为 +34 ~ +56 m 标高之间变形体滑动面; J_2 节理构成了 +34 ~ -50 m 标高之间变形体滑动面, 即 J_2 节理为本次变形区域主要滑面。 J_2 节理与该区段边坡面成 26° 斜交, 即该

图 8 J_2 节理与该区段边坡面夹角

节理面在同一标高自北向南逐渐插入坡体内部,随着采场台阶下降,在下部台阶会不断被揭露处理,该产状本身不利于边坡稳定,而最关键的是其产状较缓40°远小于单台阶设计坡面角65°,台阶底部边坡被切,而上部岩体失去支撑,受重力、爆破振动、雨水等多方面因素影响,必然发生台阶变形开裂,从而造成滑坡(见图8)。

2)爆破振动是诱发因素。自2013年3月份从22 m水平按设计废除境界内34~ -65 m水平临时矿车运输公路以来,下方中爆较为频繁,与边坡距离较近,爆破作用对其影响较大,尽管临界30 m范围内采取预裂、缓冲控制爆破,但是边坡岩体在爆破动力的瞬时冲击作用下,使岩体产生变形和破坏,另一方面,边坡发育的节理面是天然的预裂缝,部分爆破能量可能顺节理面往上传递,长期累计效应,节理面将由原生封合状态成为张开状态,致使地表出现裂缝,大气降雨渗入裂缝降低其内摩擦角、凝聚力,抗滑力变化,极限平衡状态被打破,从而诱发沉降变形。

3.2 潜在危害分析

岩质边坡裂缝的形成,标志着边坡进入变形破坏阶段,潜在二次滑塌的可能性,具体影响如下:

1)该隐患部位对下方-50 m水平以下按设计靠帮到界,为东排破碎站下移空间让位的钻机、电铲作业带来安全隐患。

2)该隐患部位对东排破碎站翻卸平台下移到-93 m水平构成安全威胁。

该沉降变形区域与东排破碎站翻卸平台下移至-93 m水平南侧栈桥最短水平距离仅为30 m左右,如果出现滑坡,势必危及下移后破碎站及胶带的安全(见图9)。因此,必须对沉降区域实施削坡治理。

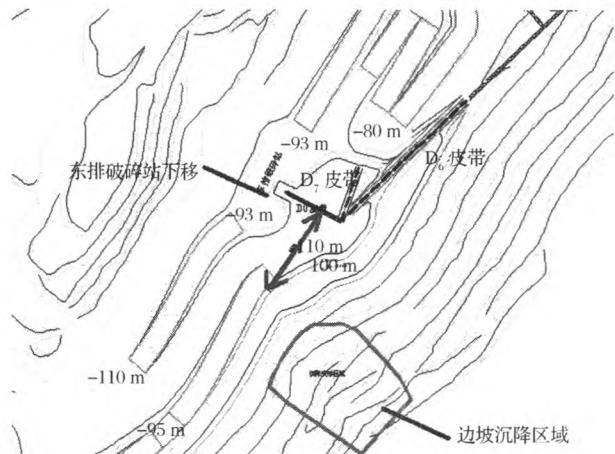


图 9 滑坡体与东排破碎站下移空间关系

4 削坡治理方案优化设计

4.1 方案一(主体采用 WK-10 大铲)

1) 原则

一是上部外扩宽度不少于马鞍山矿山研究院有限公司边坡稳定性研究提出的15 m;二是保证设备最小作业宽度的前提下,尽可能多预留安全平台,有利于削坡之后沿线边坡稳定的同时,最大限度减少削坡工程量,保证东排破碎站下移工程顺利推进。

2) 范围

上盘104~ -20 m水平(3-15[#]线),走向长度600 m,其中:削坡区域主要集中在7-15[#]线,长度400 m,而3-7[#]线为44~22 m水平削坡运输公路布置区域,长度200 m。方案一削坡三维立体图见图10,方案一削坡平面图见图11。

3) 技术参数

① 台阶参数:执行原设计,台阶高度12~15 m,其中:104~44 m、34~10 m段高12 m,44~34 m段高10 m, -5 m以下段高15 m,每两个台阶一并段,并段后台阶高度24~30 m,台阶坡面角65°。

各水平安全平台宽度:80 m水平5 m,56 m水平12~14 m,34 m水平12 m,10 m水平12~18 m, -5 m水平16 m。

② 公路参数:上盘104~56 m水平主干公路:设计宽度35 m(注:考虑公路东西侧均架设有固定高压线),坡度8%;44~ -20 m水平削坡运输公路,其中:44~34 m、34~22 m、22~10 m水平设计宽度27 m,坡度8%,22 m和10 m水平设计20~30 m平坡段,以满足削坡过程中130 t、85 t矿车安全运行的需要;10~ -5 m水平设计宽度20 m,坡度8%,满足85 t矿车安全运行(注:电铲削坡最后一个水

平)。10 ~ -5 m 水平、-5 ~ -20 m 水平勾机道与 -20 m 水平安全平台联通道,设计宽度 9 m, 坡度 20%, 可满足勾机甩货作业; 34 m 水平安全平台与 34 ~ 22 m 水平削坡运输公路联络通道设计宽度 10 m, 坡度 20%。

以上公路设计为永久性通道, 可作为远期勾机进行边坡日常维护的重要通道。

③ 作业平台宽度: 4 m³ 小铲: 最小作业平台宽度 16 m; WK-10 大铲: 作业平台平均宽度 25 m, 局部受空间狭窄影响, 不得少于 20 m; 勾机甩货作业: 最小作业平台宽度不小于 7 m。

④ 工程量: 总量 210.12 万 t, 回收挂帮矿 18.8 万 t, 预裂长度 3200 m。

⑤ 穿孔、采装以及运输

穿孔设备: YZ-55 牙轮钻机负责生产爆区穿孔; F9、L8 边坡钻机负责预裂穿孔以及与北侧削坡区域之后历史边坡狭窄处的衔接生产爆区穿孔。

采装设备: 80 m、68 m 水平安排 4 m³ 小铲; 56 ~ -5 m 水平安排 WK-10 大铲; -5 ~ -20 m 水平以及各水平安全平台堆集虚方的清理安排 CAT345、220 勾机, 局部狭窄处安排 306E 小勾机。

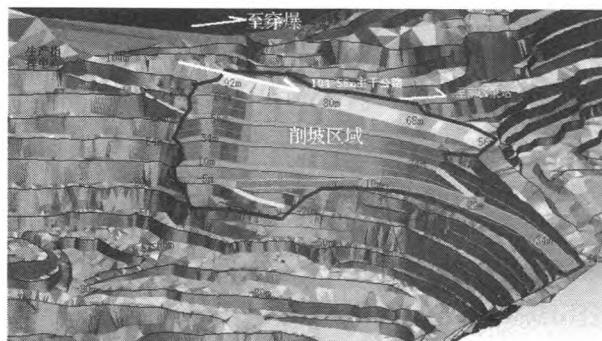


图 10 方案一削坡三维立体图

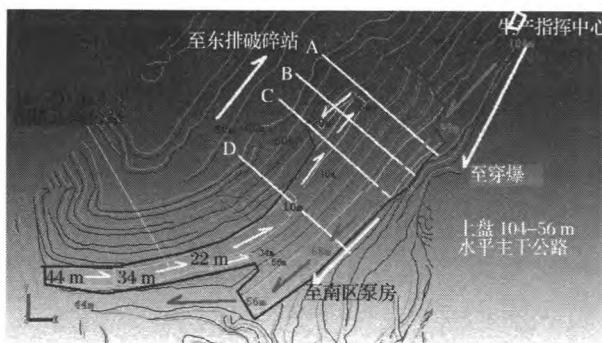


图 11 方案一削坡平面图

运输设备: 80 m、68 m 水平安排 85 t 矿车; 56 ~ -5 m 水平安排 130 t、85 t 矿车; -5 ~ -20 m 水平

安排勾机甩货。

⑥ 工期

设备效率:

穿孔设备: 边坡钻预裂穿孔作业在有安全平台处安排全天作业, 日进米道 200 m/台, 并段部位天亮作业 120 m/台, YZ-55 钻机日进米 180 m, 月爆破量 45 万 t、日产 1.5 万 t。

采装设备: 4 m³ 铲全天采装作业, 日产 0.7 万 t; YZ-55 铲全天采装作业, 日产 1.5 万 t; 勾机全天采装 0.35 万 t/台; 虚方甩货 0.5 万 t/台。

工期排定及施工步骤:

第一步: 上盘 104 ~ 56 m 水平主干公路东靠, 安排边坡钻及 YZ-55 钻机穿孔爆破作业, 预裂长度 75 m, 预裂米道 1500 m (含额头处小平台), 后期安排一台 1 台 10 m³ 铲采装作业, 采装量 6.23 万 t, 工期共 11 d。

第二步: 公路西侧 92 ~ 44 m 水平逐水平往下扩帮作业, 总爆破采装量 63.93 万 t, 预裂长度 1155 m, 工期共 93 d。

第三步: 44 ~ -5 m 水平逐水平往下扩帮作业, 总爆破采装量 135.16 万 t, 预裂长度 1780 m, 工期共 164 d。

第四步: -5 ~ -20 m 水平安排勾机、边坡钻扩帮作业, 使之与 -20 m 水平安全平台联接, 总爆破采装量 4.4 万 t, 预裂长度 190 m, 工期共 16 d。

第五步: 进入 -20 m 安全平台进行堆集在平台上的虚方, 清理长度 600 m, 工程量 12 万 t, 具备 1.5 台勾机清理, 需工期 16 d。

第六步: 在 -65 m 水平预留一定虚方以及上方清理的虚方上, 靠形成 -65 ~ -50 m 水平勾机道, 勾机进入 -50 m 安全平台清理堆集在平台上的虚方量, 清理长度 600 m, 工程量 15 万 t, 需工期 20 d, 勾机修道 2 d, 共 22 d。

以上总工期预计 322 d。

⑦ 削坡工程投资

按目前水厂铁矿总量成本 6.45 元/t 计算, 整个削坡工程新增费用: $6.45 \times 210.12 = 1355.274$ 万元。

⑧ 削坡效果分析

优点: 将 -5 m 以上水平沉降变形边坡岩体沿 J₂ 节理面进行全部剥离。同时, 改善沿线边坡技术状况, 有利于边坡稳定, 主要体现:

一是将滑坡区域 92 ~ -65 m 水平整体边坡角由目前的 40° 放缓到 38.5°。

二是将 2013 年 8 月 19 日边坡崩塌形成的 34~10 m 水平大额头进行清理。

三是 17# 线勘探线以南 56 m、34 m、10 m、-20 m 水平局部中断的安全平台得到贯通, 有利于后期勾机进入安全平台对浮石进行定期清扫。

四是消除目前 -5 m 以上水平(11-15# 线)“大额头”边坡几何形态, 有利于边坡稳定, 从岩体稳定性角度来看, “大额头”边坡曲率较小, 岩体侧向受拉, 应力极易集中, 其稳定性较差。

缺点: 一是削坡投资高达 1355.274 万元; 二是工期较长达 322 d, 折合 10.7 个月, 导致东排破碎站下移滞后 11 个月, 不能解放目前东排破碎站占压空间, 从而造成深部采场可开采轮廓进一步缩小; 二是 -20~ -80 m 水平仍有部分滑坡残留体, 后期仍需采取加固工程治理。

4.2 方案二(主体采用 4 m³ 小铲削坡方案)

基本思路与方案一相似, 不同的是 10 m 以上水平采用小铲采装, 最小作业平台宽度不低于 16 m, 削坡公路设计宽度 16 m、坡度 8%, 上盘 104~56 m 水平主干公路设计宽度 27 m, 坡度 8%。10~ -5 m、-5~ -20 m 水平采用勾机作业, 公路宽度 10 m, 坡度 20%。

56 m 水平安全平台设计宽度 18 m、34 m 水平安全平台宽度 12 m; 10 m 水平安全平台 35 m。

方案二削坡三维立体图见图 12。

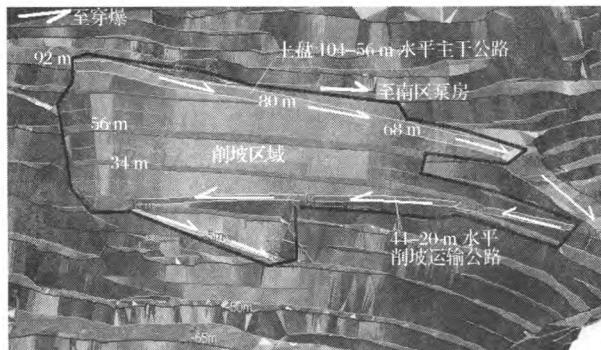


图 12 方案二削坡三维立体图

1) 10 m 以上水平工期排定

穿孔爆破: 采用边坡钻机预裂、牙轮钻机穿孔; 小铲 + 85t 矿车采装, 其中: 爆破量 110 万 t, 穿孔工期 90 d; 预裂长度 2230 m(注: 12 m 台阶 1690 m, 米道 14000 m; 15 台阶 540 m, 米道 5580 m, 共 19580 m, 平均按 1.5 台边坡钻机计算, 需穿孔工期 19580/300 = 65 d)。二者可以同步交替作业, 考虑每个水平预裂超前生产爆区以及响炮影响 2 d, 则, 穿孔爆破

工期 $90 + 14 = 104$ d。

采装工期: 小铲采装量 110 万 t, 按 128# 小铲日保 0.8 万 t, 需工期 $110/0.8 = 138$ d。

除 56 m 水平预留有 18 m 宽度安全平台, 电铲与钻机可同步作业之外, 其它部位, 均是整个水平响炮完毕之后, 电铲才能插铲作业, 扣除重叠工期 25 d(注: 54~44 m 水平爆破量 12.31 万 t、预裂 355 m, 穿孔爆破工期约 15 d; 92~80 m、80~68 m、56~68 m 水平主干公路在电铲插铲之前可提前响炮, 工期约 10 d, 二者共 25 d)。

工期: $104 + 138 - 25 = 217$ d

2) 10~ -20 m 以上水平工期排定

工程量 4.37 万 t, 预裂长度 140 m, 采用边坡钻机 + 勾机甩货作业, 预计工期 20 d。

3) -20 m 安全平台进行堆集在平台上的虚方

清理长度 400 m, 工程量 6 万 t, 安排 1.5 台勾机清理, 需工期 $= 6/0.5 \times 1.5 = 8$ d。

4) -50 m 安全平台的虚方

在 -65 m 水平预留一定虚方以及上方清理的虚方上, 靠帮形成 -65~ -50 m 水平勾机道, 勾机进入 -50 m 安全平台清理堆集在平台上的虚方量, 清理长度 300 m, 工程量 8 万 t。

需工期 11 d、勾机修道 2 d, 共 13 d。

以上总工期预计 238 d。

4.3 方案三(4 m³ 小铲 + 勾机削坡方案)

方案三与方案二 44 m 以上水平基本保持不变, 不同处在于小铲削坡至 22 m 水平, 剩余 22 m 以上水平采用勾机削坡处理, 另外, 44~34 m 水平削坡公路路由不变。

方案三削坡立体图见图 13。

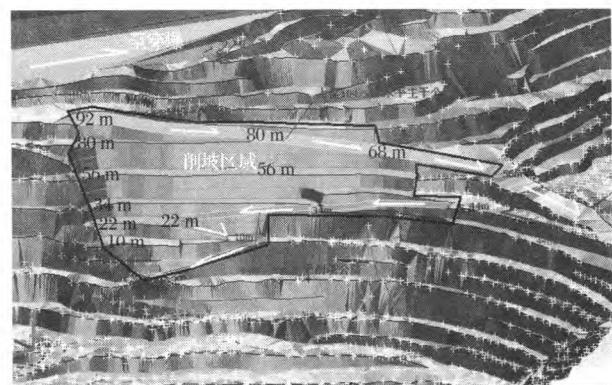


图 13 方案三削坡立体图

1) 22 m 以上水平工期排定

穿孔爆破: 采用边坡钻机预裂、牙轮钻机穿孔; 小铲 + 85 t 矿车采装, 其中: 爆破量 79 万 t, 穿孔工

期 67 d; 预裂长度 1600 m (注: 12 m 台阶 1600 m, 米道 13200 m, 平均按 1.5 台边坡钻机计算, 需穿孔工期 $13200/300 = 44$ d)。二者可以同步作业, 考虑每个水平预裂超前生产爆区以及响炮影响 2 d, 则穿孔爆破工期 $67 + 12 = 79$ d。

采装工期: 小铲采装量 79 万 t, 需工期 99 d。

除 56 m 水平预留有 18 m 宽度安全平台, 电铲与钻机可同步作业之外, 其它部位, 均是整个水平响炮完毕之后, 电铲才能插铲作业, 扣除重叠工期 25 d (注: 54 ~ 44 m 水平爆破量 12.31 万 t, 预裂 355 m, 穿孔爆破工期约 15 d; 92 ~ 80 m, 80 ~ 68 m, 56 ~ 68 m 水平主干公路在电铲插铲之前可提前响炮, 工期约 10 d)。

工期: $79 + 99 - 25 = 153$ d

2) 22 ~ -20 m 以上水平工期排定

工程量 5.38 万 t, 预裂长度 260 m, 采用边坡钻机 + 勾机甩货作业, 预计工期 30 d。

3) -20 m 安全平台的虚方

清理长度 400 m, 工程量 5 万 t, 安排 2 台勾机清理, 需工期 7 d。

4) -50 m 安全平台的虚方

在 -65 m 水平预留一定虚方以及上方清理的虚方上, 靠帮形成 -65 ~ -50 m 水平勾机道, 勾机进入 -50 m 安全平台清理堆集虚方量, 清理长度 300 m, 工程量 6 万 t。

需工期 8 d, 勾机修道 2 d, 共 10 d。

以上总工期预计 $153 + 30 + 7 + 10 = 200$ d。

4.4 方案四(勾机应急处理方案)

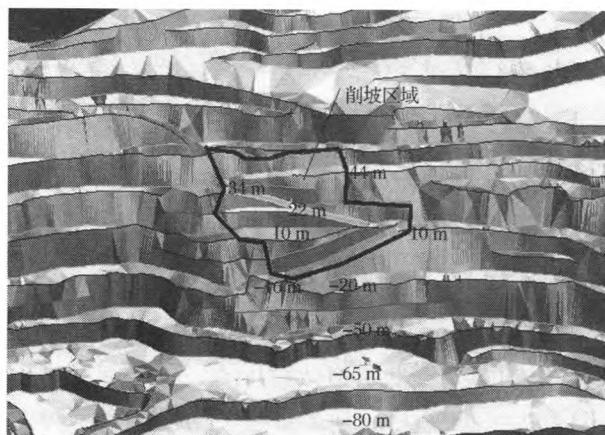


图 14 方案四削坡立体图

1) 原则: 在保证作业设备安全的前提下, 按照工程量最小的原则, 尽快消除 44 ~ -5 m 水平边坡裂缝安全隐患, 保证东排破碎站下移工程安全顺利推进。

2) 设备: 勾机、边坡钻机。

3) 技术参数: 台阶坡面角仍执行原设计 65°, 作业平台宽度和勾机宽度设计 7 m, 满足矿内勾机最小作业平台宽度不小于 7 m 的技术标准要求。44 ~ 34 m 水平、34 ~ 22 m、22 ~ 10 m 水平勾机道设计坡度 20%; 10 ~ -5 m、-5 ~ -20 m 水平勾机道设计坡度 25% (注: 受空间限制); 22 m 水平安全平台宽度 6 m; 10 m 水平安全平台宽度 8 ~ 15 m 不等。

4) 工程总量 7.14 万 t, 预裂长度 290 m。

方案四削坡立体图见图 14, 方案四削坡平面图见图 15。

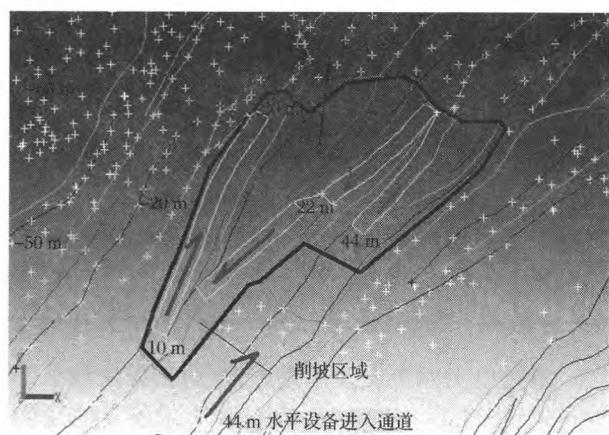


图 15 方案四削坡平面图

5) 工期排定

F9 钻机全天作业日进米道 150 m/台 (注: 岩体裂隙较多), 生产爆区孔网参数 4 m × 3 m, 单孔爆破量 0.04 万 t。

勾机效率: 采装全天 0.35 万 t/台; 虚方甩货 0.5 万 t/台。

由于现场环境狭窄, 削坡过程中不具备边坡钻、勾机同步作业条件, 整个水平完成穿孔爆破之后, 才能安排勾机甩货作业, 二者工期不发生重叠。

经测算, 穿孔爆破工期 42 d, 采装工期 40 d, 合计 82 d。

优点: 工程量少, 工期短, 需 82 d。

缺点: 一是仅是应急处理方案, 绝大部分滑坡体残留体仍在坡面上, 后期还需采取工程加固治理; 二是勾机、边坡钻机等设备在裂缝 1、裂缝 2 上作业, 存在重大不安全隐患, 一旦滑坡体继续往下沉降, 势必对作业设备构成安全威胁。

5 结论

经上述测算,以上四个方案对比如表1。

表1 削坡减载方案综合对比一览表

内容	方案一	方案二	方案三	方案四
矿石/万t	18.8	12.2	12.2	0
总量/万t	210.12	114.37	84.5	19.19
边坡预裂长度/m	3200	2370	1860	410
作业线长度/m	700	500	420	300
穿孔设备	2#、YZ-55、边坡钻机	2#、边坡钻机	2#、边坡钻机	边坡钻机
采装运输设备	10 m ³ + 130 t + 85 t	4 m ³ + 85 t	4 m ³ + 85 t	勾机
总工期/d	322	238	200	100
工程投资/万元	1355	738	545	124
优缺点	对 -20 m 以上水平滑坡体 削坡较为彻底,改善沿线边坡技术状况;但是工程量大、工期长、投资大,导致东排下移严重滞后,对深部、大扩帮带来较大影响	一是工程量小、工期短、投资小,对东排、深部以及大扩帮影响较小;二是 22 m、10 m 以上滑坡体削坡处理相对来说较为彻底	只是一种应急处理方案,暂时消除边坡危石安全隐患,但未使滑坡体得到根本治理,后期治理工程投资大	
共同点	一是受空间限制,运输公路最多只能达到 -20 m 水平,因此,只能对 -20 m 以上水平滑坡体实施削坡,而 -20 ~ -65 m 水平只是简单清理坡面浮石,坡面上仍残留滑坡体,因此,后期还需采取加固工程治理;二是 -20 m 以上削坡区域,局部坡面状况差的,还需采取加固治理			

通过以上四个方案的对比,按照工程量最小、工期最短、投资最少、能够达到削坡治理效果的原则,择优选取方案三组织实施。

参考文献:

- [1] 杨忠. 边坡变形监测与滑坡预报[J]. 露天采矿技术, 2003(1):17-18.

- [2] 中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司. 首钢水厂铁矿指挥中心南侧滑坡体加固治理研究设计[R]. 马鞍山: 中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司, 2015.
[3] 吴景坤, 方祁, 蔡军刚. 滑坡识别及分类专家系统[J]. 北方交通大学学报, 1993, 27(1):73-77.
[4] 文华. 边坡加固方案的优化设计[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.

(上接第 4 页)

- [4] Xia J, Rinne A, Grönstrand S. Effect of turbulence models on prediction of fluid flow in an Outotec flotation cell [J]. Minerals Engineering, 2009, 22:880-885.
[5] Salem-Said A, Fayed H, Ragab S. CFD Simulation of a Dorr-Oliver Flotation Cell[C]// In Proceedings of the SME Annual Meeting and Exhibit. Denver, Colorado, USA, 2011, 1932-1941.
[6] Tiitinen J, Koskinen K, Ronkainen S. Numerical Modeling of an Outokumpu Flotation Cell[C]// In Proceedings of the Centenary of Flotation Symposium. Brisbane, Australia, 2005:271-275.
[7] Koh PTL, Schwarz P, Zhu Y, Bourke P. Development of CFD Models of Mineral Flotation Cells[C]// In Proceed-

- ings of the 3rd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia, 2003: 171-175.
[8] 沈政昌, 卢世杰, 杨丽君. KYF 系列大型浮选机的研制开发与应用[J]. 有色金属, 2008, 60(4):115-119.
[9] 程宏志. 机械搅拌式浮选机相似转换原理[J]. 煤炭学报, 2000, 25(增刊):182-185.
[10] 程宏志, 韩丽萍. XJM-S 型浮选机研究进展与展望 [J]. 选煤技术, 2009, (4):83-7.
[11] Degner VR. Flotation machine selection for sulfide and non-sulfide applications[C]// In Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits. Littleton, Colorado: SME Inc., 1986:57-75.