



金属材料与冶金

—— 第八届北京冶金 青年优秀科技论文集

北京金属学会 编

JINSHU CAILIAO YU YEJIN
DIBAJIE BEIJING YEJIN
QINGNIAN YOUXIU KEJI LUNWENJI



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

金属材料与冶金

——第八届北京冶金青年优秀科技论文集

北京金属学会 编

北 京
冶金工业出版社
2005

内 容 提 要

本书收录了每两年评选一次的在京冶金行业各研究院、设计院、冶金企业、高等院校等单位的青年科技工作者的优秀科技论文。这些论文涉及有色金属冶金与钢铁冶金的地、采、选、炼铁、炼钢、材料加工、材料分析与新材料开发等各个专业,反映了在京冶金行业的青年研究工作者在科研与生产实践中所取得的最新成果。本书可供钢铁企业、有色企业各专业的科技人员,以及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与冶金:第八届北京冶金青年优秀科技论文集/
北京金属学会编. —北京:冶金工业出版社,2005.10
ISBN 7-5024-3823-8

I. 第… II. 北… III. 冶金—文集 IV. TF-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 099959 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
责任编辑 张卫 王雪涛 李梅 美术编辑 李心
责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波
北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2005年10月第1版,2005年10月第1次印刷
210mm×297mm;11印张;402千字;163页;1-1200册
39.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

编 委 会

编委会主任:朱继民

副主任:千 勇 孙传尧 李成江 施 设 张功焰

张兆祥 徐金悟 屠海令

委 员:王忠实 王海舟 王 莹 尹怡欣 卢世钢

车小奎 石力开 田志凌 刘希义 刘水洋

刘援朝 刘 浏 孙冬柏 孙泽明 许晓东

李兵役 李 健 沙永志 沈安东 邱定蕃

金永春 段东平 赵 沛 张 群 张立诚

胡雄光 钱 凯 钱 雷 康永林 谢建新

董 哲 傅祖明 彭怀生 谭雪峰 慰克俭

薛乃彦

编 辑:金永春 王 莹

第八届北京冶金青年优秀 科技论文获奖名单

一等奖:

刘雪峰 《金属离子掺杂纳米 TiO_2 及其应用基础研究》

二等奖:

李华昌等 《生姜中 6-姜酚单体的分离、测定与结构表征研究》

宗燕兵等 《高梯度磁场去除冶金废水中细菌的试验研究》

王立涛等 《微气泡法去除钢液中的夹杂物》

三等奖:

邢奕等 《高浓度活性污泥法处理焦化废水的研究》

崔大为 《耐高温碱性水腐蚀的水性防腐涂料》

莫文丛 《某露天矿北采场下盘边坡治理稳定性及数值模拟的研究》

赵月红等 《在盐湖水中包铝对超硬铝合金基材的保护作用》

章连香等 《电感耦合等离子质谱法测定铜基中的铈、钇——几个数学校正公式的推导过程》

宋仁伯等 《室温下固相合成 Mg-Si-Ge 系热电材料》

鼓励奖(论文名略):

张延平 李军财 范建文 王昭顺 张太迟

陈冠军 刘青 于浩 潘涛 周德

玄作为 梁剑雄 熊爱民 孙建林 周书莉

张永明 王绪 王海北 龙涛 唐国志

郝德才 韦节辉 屈乐圆 张本昕 杨永奇

前 言

北京冶金青年优秀科技论文评选活动到今年已经进行了八届,本届论文要求首次发表。论文涉及到采选矿、高炉炼铁、转炉炼钢、连铸、压力加工、新材料研发、环保与能源工程、冶金装备、冶金建筑与信息化工程等领域。这些青年的论文内容包括国家“十五”重点攻关项目、国家自然科学基金资助项目、国家高新技术研究发展规划资助项目、“973”项目等,更多的是企业的重点攻关项目。论文作者是北京钢铁研究总院、北京矿冶研究总院、北京有色金属研究总院、北京科技大学、中冶京诚工程技术有限公司、首钢总公司等单位的科技工作者。他们的研究成果有的填补了国家空白,达到国际先进水平,申报了中国发明专利;有的是多学科交叉综合应用研究,对社会将有较大的贡献;有的是对在新领域中的应用进行探讨,很有创新思索;有的虽然是基础研究,但其理论可以应用于产品制造,突出产品的某一特征,造福于民;还有的是针对设备生产工艺的建模研究,对生产实践有很大指导作用;更多的是在生产工艺中的科学实践研究,这些研究成果促进了企业的技术进步,增加了产品的附加值,增强了产品的市场竞争力,真正体现了“科技是第一生产力”的英明论断。

在论文编辑工作中得到许多会员单位的联系人、热心的青年科技工作者、评审专家和冶金工业出版社的大力支持,借此机会谨向他们表示衷心的感谢。由于组织等原因,本届论文征集不够广泛,涉及领域比较窄,有待进一步改进。欢迎广大专家、学者、读者和科技工作者对论文的评选和出版提出宝贵的意见和建议。

北京金属学会
2005年9月

目 录

采矿、选矿研究与技术

某露天矿北采场下盘边坡治理稳定性及数值模拟的研究	莫文丛	(1)
GPS 在深凹露天矿高陡边坡位移动态监测中的应用研究	李军财	(6)
模糊控制在破碎机自控系统中的应用	玄作为	(12)
加压浸出技术在有色冶金行业应用及研究现状	王海北 邱定蕃 蒋开喜等	(16)
原地爆破浸出矿石块度控制研究发展述评	龙 涛 余 斌	(21)

高炉炼铁研究与操作技术

首秦卡卢金热风炉技术研究进展	陈冠军 王连尉 胡雄光	(24)
首钢炼铁厂视频会议系统	郝德才	(29)
闭环调节控制在热风炉自动燃烧系统中的应用	杨永奇	(32)
首钢—三高炉 TRT 控制系统的研究和实现	王 绪	(37)
熔剂性含 MgO 球团矿特点及生产实践	张永明	(41)

转炉炼钢研究与操作技术

微气泡法去除钢液中的夹杂物	王立涛 张乔英 彭世恒等	(46)
转炉试制生产 SAE8620H	唐国志 崔京玉 王立峰等	(52)

连 铸 技 术

汽车用钢连铸坯凝固传热数学模型	刘 青 王良周 曹立国等	(56)
-----------------------	--------------	------

轧 制 技 术

FTSR 线温轧工艺生产低碳钢板的组织演变规律研究	于 浩 康永林 陈礼斌等	(64)
首钢 SWRH82B 的开发与生产	周 德 王全礼 李 飞等	(68)
普通 C-Mn 钢超细晶中厚板的带状组织	范建文 谢瑞萍 张维旭等	(72)

新材料开发与表征

金属离子掺杂纳米 TiO ₂ 及其应用基础研究	刘雪峰	(78)
--	-----	------

生姜中 6-姜酚单体的分离、测定与结构表征研究	李华昌 张雪红 符 斌 (83)
耐高温碱性水腐蚀的水性防腐涂料	崔大为 (89)
在盐湖水中包铝对超硬铝合金基材的保护作用	赵月红 林乐耘 崔大为 (92)
电感耦合等离子体质谱法测定铜基中的铈、钇——几个数学校正 公式的推导过程	章连香 李华昌 符 斌 (97)
室温下固相合成 Mg-Si-Ge 系热电材料	宋仁伯 刘雅政 相泽龙彦等 (101)
热处理对 0Cr15Ni5Cu2Ti 马氏体沉淀硬化不锈钢组织和力学 性能的影响	梁剑雄 杨志勇 李文辉等 (105)
FE Simulation of Grain Size during Isothermal Forging of a TC6 Alloy Disc based on a Microstructural Model Xiong Aiming Jin Yongchun Zhu Qijian Li Miaoquan	(111)
不同加热温度下钒对车轮钢强韧性的影响	潘 涛 苏 航 崔银会等 (115)

环保与能源

高梯度磁场去除冶金废水中细菌的试验研究	宗燕兵 苍大强 李立建等 (121)
高浓度活性污泥法处理焦化废水的研究	邢 奕 饶雪峰 (124)
首钢空分产品能耗分析及管理系统开发	张延平 李树华 范华刚等 (129)

冶金装备技术与设备维护

椭圆曲线密码芯片的设计研究	王昭顺 (134)
基于 ObjectARX 技术的 U 形桥台 CAD 系统开发	张太迟 袁海华 张举兵 (139)
铝板带冷轧润滑与轧制油实验研究	孙建林 袁 驰 (144)
西门子 S7-400 PLC 控制系统在首钢水渣磨细中的应用	张本昕 (148)

冶金建筑与信息化

计划经济与市场经济中工程计价模式的剖析	周书莉 (155)
基于 INSQL 及 .NET 技术的首钢二炼钢生产信息系统	韦节辉 (157)
浅析企业网站设计原则	屈乐国 赫德才 (161)

某露天矿北采场下盘边坡治理稳定性及数值模拟的研究

莫文丛[●]

(首钢技术研究院 北京 100041)

摘 要 根据某露天矿边坡工程地质和水文地质条件及滑坡现状,采用边坡稳定性极限平衡分析软件(SLOPE)对边坡的安全系数进行了计算,同时采用有限差分程序(FAC)对边坡开挖现状、两个削坡方案进行了数值模拟,分析了边坡岩体中的破坏区、位移场、应力场、不平衡力等,为治理方案的制定提供了依据,最终确定了该矿边坡治理的技术方案,该方案正处于实施过程中。

关键词 露天矿 边坡稳定性 治理 数值模拟 有限差分程序 安全系数

Numerical Simulation and Slope Stability Analysis on Reinforcement Works of North Slope Slope in One Open Pit Mine

Mo Wencong

(Research institute of Shougang technology, Beijing, 100041)

Abstract Based on the engineering geology and hydrological condition and rock slope landslide status, With the slope stability analysis software SLOPE, the factors of safety are calculated; and with the explicit finite difference method (FLAC), plastic region, displacement field, stress field, unbalance force of the excavated rock slope and of the two technique scheme are analyzed, this provided for the basis of reinforcement works, in the end, the technique scheme of reinforcement works for slope landslide is determined, and it has been putting into practice by the scheme.

Keywords open pit mine, slope stability, reinforcement works, numerical simulation, explicit finite difference method, safety factor

1 问题的提出

某铁矿位于鞍山市东北约 13 km,是鞍钢的主要铁矿石生产基地之一,该矿整个采场长约 3500 m,宽约 1000 m,最低标高设计为 -270 m,现开采到 -60 m,已形成最高边坡 200 m。该矿北区采场下盘 +22 m 水平以上已经草帮,该部位已发生不同程度的滑坡,特别是雨季和爆破对该部位的边坡影响很大。因 +22 m 水平是铁路运输线路,为了保证铁路运输的安全可靠,必须对铁路上部边坡进行稳定性分析及治理方案的数值模拟,确保铁路上部边坡的稳定。

2 工程地质及水文地质概况

2.1 工程地质概况

该矿勘探成果表明:矿区构造简单,矿床为一单斜构造。矿床为走向 300°~340°的单斜构造,矿体长 4650 m,一般厚度 150~250 m,倾向南西,倾角约 70°,局部倒转。矿区出露地层有太古界鞍山群和元古界辽河群及第四系,另外还出露有混合岩和闪长岩等。该部位断层构造主要有 F₁₋₁,其走向与边坡走向基本一致,但倾向相反,倾角较陡,对边坡稳定性影响不大,但在断层出露的坡面上,由于岩层片理化,可能会

[●] 作者简介:莫文丛,男,1965年生,首钢技术研究院,高级工程师,主要从事矿业工程技术的研究、开发、组织管理等工作。

形成局部台阶破坏。 F_{13} 、 F_{10} 走向与边坡近垂直,规模较小,对边坡稳定性影响较小。

该部位的优势结构面为:(1) $165^{\circ} \angle 71^{\circ}$;(2) $261^{\circ} \angle 80^{\circ}$;(3) $223^{\circ} \angle 47^{\circ}$;总体边坡为: $249^{\circ} \angle 45^{\circ}$;阶段边坡为: $249^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 。矿体下盘主要有花岗岩组成,节理密度为3.51条/m。

2.2 水文地质概况

该矿地处千山山脉的西侧,为千山山脉与辽河冲积平原的过渡地带,为东高西低的丘陵山地。矿床东部有一正在运行的周家沟尾矿库,距矿区1500 m。矿区及附近有一条常年流水河流——沙河支流,两条季节性河流——王家堡子小河和祁家沟小河。沙河支流走向与矿体大致平行,距矿体约500 m,距采场境界最近约220 m,其水量受季节性影响较大,常年有水,干旱季节水量甚少,水位标高在+38 m左右。王家堡子小河发源于矿区东部山地,河床宽度为5 m,最宽处可达10~15 m,最高洪水水位为44.63 m。祁家沟小河位于目前的南,北区之间,水位一般在46 m。北区采场下盘主要为混合岩,该岩石浅部风化裂隙较为发育,并蕴藏有少量的裂隙水,在适宜地点以泉的形式出露地表,泉水流量为0.003 L/s,深部仅有细小的节理,含水较少。

北采场下盘地下水的补给来源主要为大气降水,局部有排土场渗入的水体补给,但来源主要为大气降水,补给条件比较单一。同时为了河水的渗入,在采场境界外约80 m处,设计了一条拦洪坝,解决了对采场洪水的威胁。因此,水文地质条件简单。

经综合分析,该部位边坡出露岩石坚硬,岩体结构条件较好,断层构造简单,地下水不太发育。

3 边坡数值模拟的研究

3.1 计算程序与计算模型

3.1.1 FLAC程序简介

本次研究采用美国明尼苏达大学和美国Itasca Consulting Group Inc. 共同开发的二维有限差分计算程序FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)进行计算。该程序主要适用于模拟计算地质材料和岩土工程的力学行为,特别是材料达到屈服极限后产生的塑性流动。材料通过单元和区域表示,根据计算对象的形状构成相应的网格。每个单元在外载荷和边界约束条件下,按照约定的线性或非线性应力-应变关系产生力学响应。由于FLAC程序主要是为岩土工程应用而开发的岩石力学计算程序,程序中包括了反映岩土材料力学响应的特殊计算功能,可解算岩土类材料的高度非线性(包括应变硬化/软化)、不可逆剪切破坏和压密、黏弹(蠕变)、孔隙介质的固-流耦合、热-力耦合以及动力学行为等。FLAC程序设有多种本构模型:

- (1) 各向同性弹性材料模型;
- (2) 横观各向同性弹性材料模型;
- (3) 莫尔-库仑弹塑性材料模型;
- (4) 应变软化/硬化塑性材料模型;
- (5) 双屈服塑性材料模型;
- (6) 遍布节理材料模型;
- (7) 空单元模型,可用于模拟地下硐室的开挖和矿体开采。

另外,程序还设有界面单元,可以模拟断层、节理和摩擦边界的滑动、张开和闭合行为。支护结构,如砌衬、锚杆、可缩性支架或板壳等与围岩的相互作用也可以在FLAC中进行模拟。此外,程序允许输入多种材料类型,亦可在计算过程中改变某个局部的材料参数,增强了程序使用的灵活性,极大地方便了在计算上的处理。同时,用户可根据需要在FLAC中创建自己的本构模型,进行各种特殊修正和补充。

FLAC程序是建立在拉格朗日算法基础上,特别适合模拟大变形和扭曲。FLAC采用显式算法来获得模型全部运动方程(包括内变量)的时间步长解,从而可以追踪材料的渐进破坏和垮落,这对研究边坡设计是非常重要的。FLAC程序具有强大的后处理功能,用户可以直接在屏幕上绘制或以文件形式创建和输出打印多种形式的图形。使用者还可根据需要,将若干变量合并在一副图形中进行研究分析。基于上述计算功能与特点,本研究应用FLAC程序对该矿北区采场下盘边坡治理进行数值计算分析。

3.1.2 计算模型

由于该矿开采范围较大,整个采场在环线方向的变形很小,可以忽略不计,因此选择剖面做力学分析,用平面应变模型假设,即垂直于计算剖面方向的变形为零。根据地质条件和边坡形态,选择位于滑坡中部的剖面进行设计数值模拟计算,见图1、图2。

治理方案(1):将现有的边坡外扩20 m,(116~22 m)边坡角为 37° ,(116~26 m)边坡角为 42° 。



图1 边坡数值模拟岩石分布图

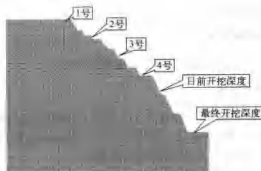


图2 滑坡治理方案(1)中边坡最终开挖形态网格图与典型位置

治理方案(2):将现有的边坡外扩25 m,(116~22 m)边坡角为36°, (116~-26 m)边坡角为41°。

取模型宽度为255 m,高度从水平-81 m起,一直模拟到地表,高度194 m。模型有49470个平面单元,单元网格尺寸平均为1 m×1 m。模型两侧限制水平方向移动,模型底面限制垂直方向移动。

3.2 力学模型和参数

岩石力学试验表明:当载荷达到屈服极限后,岩体在塑性流动过程中,随着变形仍保持一定的残余强度。因此,本计算采用理想弹塑性本构模型——莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则描述:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}$$

式中, σ_1, σ_3 分别是最大和最小主应力, c, φ 分别是黏结力和摩擦角。当 $f_s > 0$ 时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩体的抗拉强度很低,因此可根据抗拉强度准则($\sigma_3 \geq \sigma_T$)判断岩体是否产生拉破坏。

根据现场地质调查和岩石力学试验结果,表1给出计算所用的岩体力学参数。

表1 数值模拟计算所采用的岩体力学参数

岩石名称	密度/ kg·m ⁻³	体积 模量/ MPa	剪切 模量/ MPa	泊松比 ν	粘聚力 c / MPa	内摩 擦角 φ / (°)	抗拉 强度 σ_T / MPa
强风化混合岩	2650	223	121	0.22	0.04	24	0.038
中风化混合岩	2650	560	300	0.24	0.10	24	0.082
弱风化混合岩	2650	1120	610	0.26	0.20	32	0.223
微风化混合岩	2650	2230	1210	0.27	0.60	36	0.823

注:计算时将岩体力学参数按以下级别处理:

- (1) 90 m以上为强风化岩体;(2) 66~90 m为中风化岩体;
(3) 22~66 m为弱风化岩体;(4) 22 m以下为微风化岩体

3.3 模拟开挖过程

岩石力学研究一个重要成果是:岩体力学行为除与本身的物理力学性质有关外,还与载荷状态和加载历史有直接的关系。事实上,岩体现时力学行为是整个开采历史过程中的一个过渡状态,它既是对过去不同开采时期岩体状况叠加后的综合反映,也将对未来开采过程和结果产生影响。欲从现在研究将来出现的状况,应系统模拟整个开采历史和开采过程。模拟计算过程如下:

- (1) 根据原始地貌,形成初始应力场;(2) 实施分步开挖。

边坡开挖程序遵循由上至下、由左向右的原则。根据边坡高度,开挖到现状分成4步完成,每步开挖深度大约25 m;对滑坡体进行削坡分两步完成;然后从现状开挖至标高-30 m分成1步完成,整个模拟过程分7步完成。边坡岩体开挖是一个卸载过程。

3.4 模拟计算结果

3.4.1 对边坡现状的分析

从图3中可以看出,边坡按照原设计进行开挖,最大不平衡力没有收敛,表明边坡在当前状态下没有达到稳定。从图4中可以看出,按照原来设计的边坡角进行开挖,边坡上部台阶出现了较大的塑性破坏区,边坡顶部产生了拉破坏;随着进一步的开挖和时间的推移,将会出现大面积的滑坡。如图5所示,图中塑性区范围呈圆弧状,并有进一步扩大的趋势,这也与实际滑坡范围大小相吻合。还可以看出若采用原设计方案进行开采,典型位置1号点的水平位移不收敛,并会进一步的增大,1号点的水平速度曲线也不收敛,呈发散的趋势。

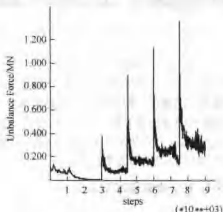


图3 原设计边坡的最大不平衡力随计算时步的变化过程

由此可见,边坡按照原设计方案进行开挖,存在着不稳定的因素,若不及时进行调整,边坡将会出现大面积失稳。实际情况也证明了这一点,目前边坡开挖到标高+22 m处

时,上部台阶已经出现了大面积的塌方。因此,需要及时对滑体进行清理,并对原设计开挖方案进行调整。

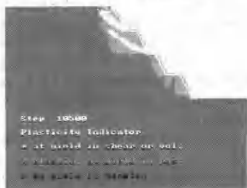


图4 原设计边坡的破坏场分布图

3.4.2 采用方案(1)形成边坡的特征

从图5可以看出,按方案(1)进行滑坡治理后,边坡上部台阶的塑性破坏区明显减少,基本没有出现塑性破坏。典型位置1号~4号点的水平位移最终都趋于一定值;还可以看出1号~4号点的水平速度曲线最终都趋向于零值。

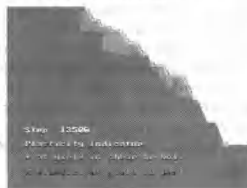


图5 方案(1)边坡的破坏场分布图

3.4.3 采用方案(2)形成边坡的特征

按照方案(2)进行滑坡治理后,边坡上部台阶的塑性破坏区明显减少,比方案(1)塑性破坏区减小的范围大,基本没有出现塑性破坏;典型位置1号~4号点的水平位移最终都趋于一定值;1号~4号点的水平速度曲线最终都趋向于零值,与采用方案(1)的力学行为基本相似。

4 北区采场下盘边坡稳定性分析

4.1 边坡滑移模式分析

岩质边坡的破坏模式取决于构成岩体的岩石性质以及岩体中的构造与边坡的组合形式和空间关系。下盘岩体主要由混合岩组成,滑面的形状总体上为圆弧形或近圆弧形,而局部台阶边坡因优势面与边坡面的不利组合,可能产生楔

体及平面滑动破坏。

4.2 计算软件简介

本次分析采用边坡稳定性计算程序 Slope。

4.3 分析方法

本次计算采用5种分析方法,即简化 BISHOP 法、简化 JANBU 法、SPENCER 法、SARMA 法和 Morgenstern & Price 法,采用模拟退火法搜索边坡临界滑移面。

4.4 边坡安全系数的确定

本次计算根据我国露天矿山的经验,安全系数取 1.15。在这里参考其他矿山并考虑该矿北区下盘的实际情况,在没有考虑爆破震动和地下水影响的前提下,边坡安全系数按 20% 进行折减。

4.5 稳定性分析结果

采用表2所示的5种方法对该矿下盘边坡现状进行分析,同时图6还给出了采用 BISHOP 法计算边坡现状安全系数和滑移面的结果。



图6 采用 BISHOP 法计算边坡现状的安全系数和滑移面

表2 北区下盘(116~44 m)极限平衡分析结果

分析方法	简化 BISHOP	简化 JANBU	SPENCER	SARMA	MORGENSTERN-PRICE
计算安全系数	1.3723	1.2446	1.435	1.3835	1.4348
折减后安全系数	1.10	0.996	1.142	1.11	1.14

由表1可以看出,采用5种计算方法,对该矿下盘(116~44 m)边坡的现状进行了计算,折减后的安全系数均小于 1.15,这与现场实际相吻合,表明该部位边坡处于不稳定状态。

4.6 稳定性分析

根据边坡实际情况,本次研究采用削坡的方法对其进行治理,对两个方案进行了稳定性分析,结果见表3~表6。

表3 某矿北区下盘方案1(116~44 m)极限平衡分析结果

分析方法	简化 BISHOP	简化 JANBU	SPENCER	SARMA	MORGENSTERN-PRICE
计算安全系数	1.5895	1.435	1.817	1.5892	1.8156
折减后安全系数	1.27	1.15	1.45	1.27	1.45

表4 某矿北区下盘方案1(116~30 m)极限平衡分析结果

分析方法	简化 BISHOP	简化 JANBU	SPENCER	SARMA	MORGENSTERN-PRICE
计算安全系数	1.5465	1.446	1.5585	1.5625	1.5585
折减后安全系数	1.25	1.16	1.25	1.25	1.25

表5 某矿北区下盘方案2(116~44 m)极限平衡分析结果

分析方法	简化 BISHOP	简化 JANBU	SPENCER	SARMA	MORGENSTERN-PRICE
计算安全系数	1.6563	1.6021	1.6538	1.6533	1.6534
折减后安全系数	1.32	1.28	1.33	1.32	1.32

表6 某矿北区下盘方案2(116~30 m)极限平衡分析结果

分析方法	简化 BISHOP	简化 JANBU	SPENCER	SARMA	MORGENSTERN-PRICE
计算安全系数	1.5787	1.4619	1.5726	1.5768	1.5728
折减后安全系数	1.26	1.17	1.26	1.26	1.25

5 结论

采用国际上先进的FLAC有限差分计算程序,对滑坡部位进行了数值模拟分析。对边坡开挖现状以及采用滑坡治理方案(1)和方案(2)时的应力场、位移场和破坏场进行了系统和全面的计算模拟。通过考察边坡的应力、位移和破坏状况和性质,对边坡的稳定性状况进行了分析和比较。同时

采用边坡稳定性分析软件SLOPE对边坡的安全系数进行了计算,可得出如下结论:

(1) 边坡上部台阶目前已出现失稳的状况,并有进一步恶化的趋势。通过数值模拟,从边坡变形与破坏情况分析,目前边坡上部塑性破坏范围较大,塑性区呈圆弧状,若不及时对滑坡部位采取治理,坍塌范围将会进一步扩大。通过对边坡现状(116~44 m)分析,边坡安全系数均小于1.15,边坡处于不稳定状态,这与实际边坡变形相一致。

(2) 通过数值模拟及边坡稳定性分析,对两种技术方案进行了比较,得出实施方案后的边坡均处于稳定状态。

(3) 从经济角度上讲,推荐采用方案(1)(即上部台阶最终境界外扩20 m的技术方案)。

本次研究对北区采场下盘边坡工程地质条件的认识是基于迄今矿山开采揭露的情况和分析。随着矿山开采的延伸,采场岩体更多揭露和更深边坡的形成,边坡工程地质条件可能会发生一些新的变化,应根据边坡岩体工程力学属性的改变,适时分析给边坡稳定性可能带来的影响及采取有效的措施,同时加强边坡监测,确保该部位边坡稳定。

参考文献

- 1 FLAC. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Users Manual, Version 3.3. Itasca consulting group, inc., Minneapolis, Minnesota, 1993
- 2 Dr Cheng Y M. SLOPE 2000 ver 1.6 USER GUIDE. Department of Civil and Structure Engineering, Hong Kong Polytechnic University, August, 2001
- 3 Dr Cheng Y M. SLOPE 2000 ver 1.6 Theory Manual. Department of Civil and Structure Engineering, Hong Kong Polytechnic University, August, 2001
- 4 Singh V k. Influence of Geotechnical Factors on Open Pit Slope Stability. Ph. D. thesis, Banaras Hindu University, India, 1992
- 5 Hook E, Bray J W. Rock Slope Engineering, 3rd ed., Inst. Min. Met., London, 1981

GPS 在深凹露天矿高陡边坡位移动态监测中的应用研究[●]

李军财[●]

(首钢技术研究院资源办公室 北京 100041)

摘要 回顾了矿山边坡变形监测技术的发展历程,结合首钢水厂铁矿的实际,建立了基于 GPS 的边坡位移动态监测系统,包括基准点和监测点的确定,边坡 GPS 基线向量网的布设,监测方式,监测周期与数据的输入输出及处理等。实践表明 GPS 完全能够满足矿山边坡变形监测的需要,该系统的建立是成功、有效的。

关键词 露天矿 边坡变形 位移 GPS 监测

Application of Global Positioning System (GPS) to Displacement Monitoring for High Slopes in Open Pit Mines

Li Juncai

(Research Institute of Shougang Technology, Beijing, 100041)

Abstract The development history and current status of monitoring of slope deformation techniques in open pit mines are reviewed. Based on the practice of Shougang open pit mine, GPS slope displacement monitoring system is set up, including fixing datum mark and monitoring mark, laying out of GPS baseline vector network, determining the ways and periods of monitoring, etc. It is proved that GPS could meet the needs of slope deformation monitoring in open pit mines completely, and the monitoring system is successful and infective by practice.

Keywords open pit mine, slope deformation, displacement, GPS, monitoring

1 概述

纵观国内外近年来矿山边坡变形监测技术的发展历程,传统的地表变形监测方法主要为大地测量法和近景摄影法^[1,2]。

(1) 常规地面测量方法的完善与发展,促使全站仪得到较为广泛的应用,尤其是全自动跟踪全站仪(RTS, Robotic Total Station),有人也称为测量机器人(Georobot),为工程局部变形的自动监测提供了一种很好的技术手段,可在一定范围内进行无人值守、全天候、全方位的自动监测。监测精度可达亚毫米级。

(2) 地面摄影测量技术在变形监测中的应用虽然起步较早,但由于摄影距离不能太远,加上测量绝对精度较低,使其应用受到限制。近几年来,发展起来的数字摄影测量和实时摄影测量为地面摄影测量技术在边坡变形监测中的应用开辟了具有非常广泛的应用前景。

(3) 随着光学、机械、电子技术的发展,研制出了一些特殊和专用的监测仪器可用于边坡变形的自动监测,包括应变

测量、准直测量和倾斜测量,具有很高的精度、很强的抗雷击、抗电磁场干扰和抗恶劣环境的能力,便于组成遥测系统,实现在线分布式监测。

(4) GPS 作为一种全新的现代空间定位技术,已逐渐在越来越多的领域取代了常规的光学和电子测量仪器。进入 20 世纪 90 年代后,GPS 卫星定位和导航技术与现代通讯技术相结合,在空间定位技术方面引起了革命性的变化。用 GPS 同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间,从静态扩展到动态,从单点定位扩展到局部与广域差分,从而大大扩展了它的应用范围和在各行业中的应用。数据通讯技术、计算机技术和以 GPS 为代表的空间定位技术的日益发展和完善,使得采用 GPS 由原来的周期性观测向高精度、实时、连续、自动监测发展成为可能。

随着我国深凹露天矿开采深度的不断增加,矿山边坡高度不断加大,特别是近年来,一些矿山采用分段帮衬工艺来提高最终边坡角,边坡稳定性的控制和维护难度加大,若不及时采取监测措施,将严重威胁着矿山的生存和发展^[3,4]。

● “十五”国家科技攻关计划重大项目(2001BA609A-08)。

● 作者简介:李军财,男,博士,首钢技术研究院高级工程师,主要从事于矿业工程的技术开发和管理工作。电话:010-88297322。

本次研究结合首钢水厂铁矿的实际情况,采用 GPS 技术对该矿边坡不稳定部位进行实时监测。

2 首钢水厂铁矿边坡 GPS 动态监测系统的建立

2.1 基准点和监测点的选择依据

选择依据如下:

(1) 根据中华人民共和国国家标准《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314—2001)规定,结合水厂铁矿的实际情况,确定如下观测方案:

- 1) 周围应便于安置接收设备和操作,视野开阔,视场内障碍物的高度角不宜超过 15° ;
- 2) 远离大功率无线电发射源(如电视塔、电台、微波站等),其距离不小于 200 m;远离高压输电线和微波无线电信号传送通道,其距离不得小于 50 m;
- 3) 附近不应有强烈反射卫星信号的物件(如大型建筑物等);
- 4) 交通方便,并有利于其他测量手段扩展和联测;
- 5) 地面基础稳定,易于基准点的保存;
- 6) AA、A、B 级 GPS 点应选在能长期保存的地点;
- 7) 充分利用符合要求的旧有控制点;
- 8) 选站时应尽可能使测站附近的小环境(地形、地貌、植被等)与周围的大环境保持一致,以减少气象元素不同引起的误差。

(2) 依据国家冶金矿山监测点布设原则进行布设

1) 边坡监测点应根据地质和采矿条件布设在具有代表

性部位:关键的地段及不稳定的平台上、运输枢纽等比较重要的地段、高边坡和服务年限较长的地段、边坡岩体结构面发育地段、风化带以及受地表水与地下水影响较大的地段。

2) 边坡监测点应组成观测线,观测线的方向应与边坡岩体移动方向大致相同,并设在移动岩体具有代表性的剖面上,或垂直于边坡的走向,等间距布设。

3) 应对观测环境进行调查,调查埋标地点的地质条件,监测点的标志必须与边坡岩体牢固结合在一起。每一观测点必须埋设混凝土观测墩,墩顶应设置强制对中底座。

4) 地表变形监测应满足下列要求:

观测基点必须定期进行检验,确定其可能出现的位移;监测点位移量必须代表边坡岩体的位移量;选择监测点点位时,必须考虑测量方便和监测人员的安全;测量精度,即测量误差不能掩盖非恢复性变形前后的两个相对变形量之差,并符合以下规定:对岩质边坡监测点位测量中误差,水平方向为 ± 4 mm,垂直方向为 ± 2 mm;对软质边坡水平方向误差为 ± 6 mm,垂直方向误差为 ± 3 mm;对风化岩边坡,水平方向误差为 ± 10 mm,垂直方向误差为 ± 5 mm。对于硬岩、软岩和风化岩边坡,监测点的水平(或垂直)垂直位移分别大于 14 mm、20 mm 和 30 mm 时,可认定为滑坡期开始,应进行全面监测;观测周期应根据边坡分级、变形活跃程度等方面综合进行确定。

2.2 GPS 监测基准点和监测点的确定

根据水厂铁矿边坡地质勘查与试验研究的成果^[5],将水厂铁矿边坡分为三级,见图 1。

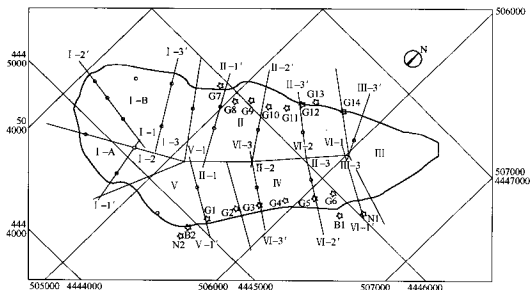


图 1 水厂铁矿工程地质分区及 GPS 布设示意图

Fig. 1 Engineering geological zoning and GPS laying out in shuichang open pit

N1、N2—水厂原有高等级 GPS 基准点;B1、B2—水厂 GPS 监测基准点;G1—G14—首期已布设 GPS 监测点;

○—随开采陆续要布设的 GPS 监测点

(1) I级边坡。为IV区的边坡,位于采场南,东边帮中部。边坡岩体主要由各种变质岩组成,断裂构造十分发育,有三条断层基本上为顺坡断层,时有小型滑塌现象发生,对边坡稳定性十分不利。另外该边坡下方有重要的设备、设施,即矿石胶带运输系统、东部岩石胶带运输系统,对此部位应重点加强监测,进行一级维护。

(2) II级边坡。为I区、II区的边坡。I区位于采场南偏西部位,称为将军墓岭地区,为采场垂直高度最大的边坡,边坡总垂直高将超过660 m。II区位于采场东边帮较长的范围,边坡上部116~34 m水平为西排胶带系统的主要运输公路,一旦该部位塌方将直接危及到西排胶带系统的正常生产。

(3) III级边坡。III、V区的边坡。III区位于采场北东端帮,为采场转折端,呈半圆形边坡,垂直高度相对较小,台阶平台较宽,边坡总体稳定性相对较好。V区位于采场南边帮,岩体结构以块状结构为主,破坏模式受结构面及其组合控制。考虑到这两个区段边坡无重要设施,自身稳定性相对

较好,将其设为三级监控边坡。

监测网的布置形式可分为正交格网、任意方格网、十字交叉网、射线网和基线交点网等五种。采用何种监测网要根据观测区的地形条件确定。

2.3 水厂铁矿边坡 GPS 基线向量网的布设

根据目前已布设的一期14个监测点及2个基准点,共16个点。每点设站2次;4台接收机同时观测,可得到满足精度的最少观测时段数为8,总基线数为48,必要基线数为15,独立基线数为24。

在布网过程中还应着重考虑现场的监测条件,东端帮(G1~G6)与西排(G7~G14)监测点由于障碍方位角几乎恰好反向,如果同时在东帮与西帮排建网,因公共卫星数目较少,测量效果较差。所以应根据现场实际,东端帮和西帮监测点单独布网,并由基准点B1、B2连接,最终布网设计如图2所示。此网每一观测周期共16个观测时段,48条独立基线,见表1。

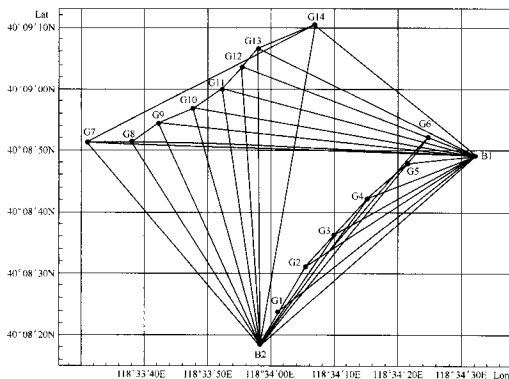


图2 水厂铁矿 GPS 监测点基线网布设图

Fig. 2 GPS monitoring baseline vector network

本次设计的观测网具有以下优点:

- (1) 在网中不存在自由基线。
- (2) 网形按照每点独立设站观测两次的原则进行建立。
- (3) 网中各点均有三条以上基线分支,可确保检核条

件,提高网的可靠性。

- (4) 网形采用边连接,网的几何强度和可靠性较高,整个网形成闭合图形,具有很好的抗粗差能力。
- (5) 此网的图形强度高。

表1 水厂铁矿 GPS 监测系统监测时段及独立基线的选取

Table 1 Selection of monitoring periods and baseline of GPS monitoring system in shuichang open pit

项 目	监测时段	监 测 点	独 立 基 线
东 帮 (G1 ~ G6)	1	B2, G1, G2, B1	B2 - G1, G1 - G2, G2 - B1
	2	B2, G2, G3, B1	B2 - G2, G2 - G3, G3 - B1
	3	B2, G3, G4, B1	B2 - G3, G3 - G4, G4 - B1
	4	B2, G4, G5, B1	B2 - G4, G4 - G5, G5 - B1
	5	B2, G5, G6, B1	B2 - G5, G5 - G6, G6 - B1
	6	B2, G5, G6, B1	B2 - G6, G5 - G6, B1 - B2
	7	B2, G1, G6, B1	B1 - B2, G1 - B1, G1 - G6
西 排 (G7 ~ G14)	8	B2, G7, G8, B1	B2 - G7, G7 - G8, G8 - B1
	9	B2, G8, G9, B1	B2 - G8, G8 - G9, G9 - B1
	10	B2, G9, G10, B1	B2 - G9, G9 - G10, G10 - B1
	11	B2, G10, G11, B1	B2 - G10, G10 - G11, G11 - B1
	12	B2, G11, G12, B1	B2 - G11, G11 - G12, G12 - B1
	13	B2, G12, G13, B1	B2 - G12, G12 - G13, G13 - B1
	14	B2, G13, G14, B1	B2 - G13, G13 - G14, G14 - B1
	15	B2, G13, G14, B1	B2 - G14, G13 - G14, B1 - B2
	16	B2, G7, G14, B1	B1 - B2, G7 - B1, G7 - G14

实践表明,该网对监测数据的基线处理、自由网平差、约束平差完全达到边坡监测所需要的精度。

2.4 监测方式^[4]

由于静态观测精度高,一般 GPS 形变监测均采用双频静态定位方式,水厂铁矿采用 4 台 Trimble 接收机进行同步观测。至少有 1 台架设在基准站上,另外 3 台在待测点或另外 1 个基准点上流动观测,最后求出流动站相对于基准站的相对关系,以及每个流动站的三维空间坐标。由于静态双频接收机的精度达到 $3 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \text{ mm}$,在距离不远的情况下,基线的相对精度非常高。本次布网为了最大程度地减小中误差,监测点和基准点之间的距离不大于 2 km,在此前提下中误差在 4 ~ 5 mm 之间。

2.5 监测周期

对重要监测点观测的时段为 2 h,且要求 2 个或 2 个以上的观测时段,一般监测点为 1 个观测时段,段长为 1 h^[7]。监测数据可自动处理,计算相应的基线向量,并调出相位双差参数图,仔细观察和研究其变化,对于波动起伏超过限差要求的应进行重新测量。

初步拟定 2 周为 1 个监测周期,监测过程中,不断根据上一时段监测结果和边坡稳定程度,分析确定下一时段监测周期。

3 监测结果

3.1 数据的输入输出及处理

GPS 监测系统采用 WGS-84 坐标系,最常采用的数据形式为经度、纬度和椭球高程。对于边坡变形监测可以不进行坐标转换,比较不同时间的观测结果,便可直接求出响应的差值或计算出相应的位移量。但如果分析评价 GPS 测量系统建立之前,用常规测量测得的结果,或要将 GPS 测点作为工程地质测绘图的控制点时,则需要进行坐标体系的转换,将 GPS 系统采用的 WGS-84 坐标系转换成矿区采用的地方坐标系,建立两者之间的联系,便可分析评价边坡历年的累计变形及其发展变化趋势。

根据露天矿山边坡位置的重要性和危险程度,可进行连续观测或阶段性间断观测。整个系统的接收机将观测数据传输到控制中心,进行处理、分析、贮存。

整个系统全自动,应用广播星历时 1 ~ 2 h GPS 观测资料解算监测点的水平和垂直精度均小于 1.5 mm,6 h GPS 观测资料解算监测点的水平和垂直精度小于 1 mm。

GPS 接收机采集数据以后,与计算机相连,把数据下载到计算机中,然后通过后处理软件解算,求出每个点的三维空间坐标。具体过程如下:

(1) 下载数据。外测数据下载到计算机中。

(2) 导入数据。把数据导入到 Pinnacle 软件中,可以在原始数据栏中看到,解算同步观测闭合环中每条边的边长及方位角。

(3) 基线解算。

(4) 无约束网平差。内部符合平差,平差后可以报告 WGS-84 坐标。

(5) 约束平差。给定某些测点在国家坐标系中的坐标,并和网中的某些点相匹配,最终得出整个网中每个点在国家坐标系中的坐标。

3.2 监测结果

第四次监测数据见表 2 及表 3。