

# 露天煤矿排土场边坡稳定性分析与治理技术

李 伟<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013)

**摘 要:** 为了掌握阴湾排土场边坡变形破坏规律, 基于边坡地质资料和现场地表 GPS 位移监测结果, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件分析了阴湾排土场边坡变形破坏机理。结合工程实践, 分析了在滑坡区域继续排土对边坡稳定性的影响, 并通过对 2 种排土压脚方案下边坡稳定性进行极限平衡分析, 提出阴湾排土场滑坡治理措施及后续排土方案。治理后的阴湾排土场 2 个典型剖面的稳定性系数分别达到 1.24、1.38, 满足稳定性储备要求。结果表明: 结合稳定性分析及工程实际综合考虑后的排土压脚方案对边坡的治理效果较好, 对于指导后期排土工作和同类型矿山排土场边坡稳定治理具有指导意义。

**关键词:** 露天煤矿排土场; 边坡稳定性; 滑坡治理; 压脚

中图分类号: TD804 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2014)10-0037-04

## Treatment Technology and Stability Analysis of Dump Slope in Open Mine

LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to obtain the law of Yinwan dump deformation and failure of slope and propose targeted control measures, this paper discussed the causes of Yinwan landslide based on the existing geological data and on-site displacement monitoring results from the surface GPS. Then it analyzed the safety of the slope using FLAC<sup>3D</sup> software and studied the failure mechanism to the creep slope. Combination with the engineering practice, considering the creep areas near to the influence of soil on the slope stability and through to the two kinds of earth pressure foot for slope stability under the limit equilibrium analysis, the paper put forward cloudy bay landslide governance measures and subsequent next dumping scheme and site management after the cloudy bay two typical section 1.24, 1.38 respectively and the stability coefficient of stability meet requirements. The results showed that the stability analysis and engineering practice after comprehensive consideration of soil presser foot scheme of creep slope governance was effective for guiding the late row soil work and the same type mine dump slope stability control had a certain guiding significance.

**Key words:** dump in open mine; slope stability; landslide control; soil pressure foot

## 0 引 言

排土场边坡安全与否关系着矿山安全生产以及排土场下游居民的生产生活设施的正常使用。随着生产的进行, 排土场不断增高无疑增加了边坡失稳的风险。许多专家学者针对排土场边坡稳定性分析均有不同方面、不同角度的研究。黄鑫等<sup>[1]</sup>对金堆城露天矿排土场高边坡变形破坏机制进行了分析, 将破坏方式归纳为 2 种类型: 蠕滑-拉裂破坏、拉

裂-滑移破坏。关铎<sup>[2]</sup>对露天矿软弱基底引起内部排土场滑坡的机理进行研究得出, 内部排土场滑坡机理主要为单台阶圆弧滑移和整体“坐落-滑移式”破坏 2 种形式。李跃等<sup>[3]</sup>提出了排土场凹形夹持效应和凸形发散作用突出以及滑体端部效应的影响, 是分析结果不能准确反映实际的根本原因之一。王俊等<sup>[4]</sup>采用地质力学模型试验方法得出, 随着排土高度的增加, 主要变形由淤泥质黄土上部坡体向邻空方向的压剪变形为主, 逐渐转变为天然黄土上

收稿日期: 2014-05-24; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.10.009

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004065)

作者简介: 李 伟(1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 助理研究员。Tel: 010-84261581, E-mail: nmcfw@yeah.net

引用格式: 李 伟. 露天煤矿排土场边坡稳定性分析与治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 37-40. 5.

LI Wei. Treatment Technology and Stability Analysis of Dump Slope in Open Mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 37-40. 5.

方坡体竖向沉降为主,并且黄土基底含水量的持续增加会直接引起边坡的破坏失稳,变形模式为后缘依附淤泥质黄土与天然黄土(水坑边缘)分界面的整体滑动。陈鹏等<sup>[5]</sup>指出当不存在软弱基底和弱层时传统的极限平衡法是评价排土场边坡稳定的首选方法,但当排土场坐落在软弱基底或存在弱层时,对边坡进行有限元强度折减法与极限平衡法结合分析得到的结果更为可靠。汪海滨等<sup>[6]</sup>以地基坡度、基础性质、排土料岩性、混合体坡高和坡脚线距离为基本因素,区分设定排土场边坡作业台阶安全标准和整体稳定标准,关联安全等级与控制标准以及考虑降雨及地震工况组合,建立以安全系数为主,综合应力场、位移场、塑性区分布特征的综合评价方法技术路线和流程。王建民等<sup>[7]</sup>将监测区进行网格化,初步建立了监测区域的三维动态形变场模型,从整体上分析了边坡的稳定性。总的来看,目前排土场边坡问题主要借鉴边坡处理方法,其处理分析常用数学模型主要可以分为 2 类<sup>[8]</sup>,基于极限平衡理论的条分法和数值分析方法。极限平衡理论下主要有条分法和改进的条分法,如 Sarma 法<sup>[9]</sup>、Bishop 法<sup>[10]</sup>、Morgenstern - Price 法<sup>[11]</sup>等。数值分析方法主要指有限元法,如刚体有限元法<sup>[12-13]</sup>、有限元强度折减法<sup>[14]</sup>等。由于地质工程实验难以全面概括地质工程体的实际情况,因此在进行地质工程分析时,常借用有限元的方法进行数值模拟<sup>[15-16]</sup>。笔者通过对滑坡发生之后的现状稳定性进行了分析,并与治理后边坡的稳定性进行了比较,预测了边坡的破坏发展情况。采用对比分析方法验证了边坡治理方案的合理性和有效性,对类似排土场边坡稳定性分析具有借鉴意义。

## 1 阴湾排土场边坡破坏机理分析

### 1.1 工程地质条件

阴湾排土场位于内蒙古准格尔旗黑岱沟露天矿首采区西南侧,其东侧是 109 国道,西侧有哈尔乌素露天矿的铁路专线。阴湾排土场在大好赖沟边部形成高边坡,边坡 +1 240 m 平盘后缘的拉张裂隙很明显,最大处宽度有 50 cm,裂隙处垂直位移最大可达 1.2 m。该边坡南北长约 1 000 m。阴湾排土场平面如图 1 所示。

钻孔资料显示,阴湾排土场基底表层为第四系黄土层,岩性为粉土,全区分布,含钙质结核;其下伏地层为第三系棕红色粉质黏土,主要分布在排土场

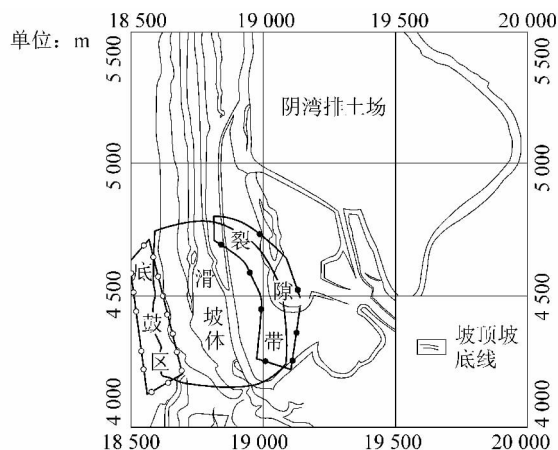


图 1 阴湾排土场平面

的西南部,东部缺失,通过室内试验确定为相对透土层;第三系下伏基岩层为强风化泥质粉砂岩与泥岩,全区稳定发育,通过室内试验确定泥岩为全区稳定隔水层。

2013 年 2 月,阴湾排土场西帮发生了大变形,变形区长约 600 m,宽 300 ~ 400 m,高差 95 m,最大位移速率达 20 mm/d。变形区 +1 240 m 水平出现 8 条近南北向闭合圈椅状裂缝,裂缝宽度 0.3 ~ 0.5 m,裂缝深 3 ~ 4 m;变形区底部 +1 150 m 水平出现底鼓,底鼓区长约 600 m,宽 10 ~ 100 m。

### 1.2 滑坡区域岩土物理力学性质

阴湾排土场滑坡区波及 +1 200、+1 220、+1 240 m 三个平盘,目前形成了潜在滑坡体。通过在滑坡区布置 3 条勘探线 13 个勘察钻孔,采取土样进行物理力学性质试验。根据工程地质勘察获取的地层条件,试验岩土种类主要分为 5 类,分别为排弃物料、粉土、粉质黏土、风化砂岩 and 风化泥岩。排土场基底岩土物理力学参数指标见表 1。

表 1 排土场基底岩土物理力学参数指标

岩性	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
排弃物料	1.99	2.46	0.42	19.0	23.00
粉土	2.60	9.61	0.32	20.8	23.95
粉质黏土	2.04	2.49	0.40	50.4	20.80
风化砂岩	2.05	12.20	0.34	59.5	20.14
风化泥岩	2.01	12.20	0.22	71.5	28.58

### 1.3 滑坡成因模拟分析

根据滑面形态及排土地表标高确定了滑体的形状和体积,计算滑体的体积为  $8.73 \text{ Mm}^3$ ,按平均密度  $2.06 \text{ g/cm}^3$  计算,滑体的质量是 17.98 Mt。原

地形剖面位置及滑坡方向如图 2 所示,剖面主要有 YW-1、YW-2、YW-3 三个剖面。

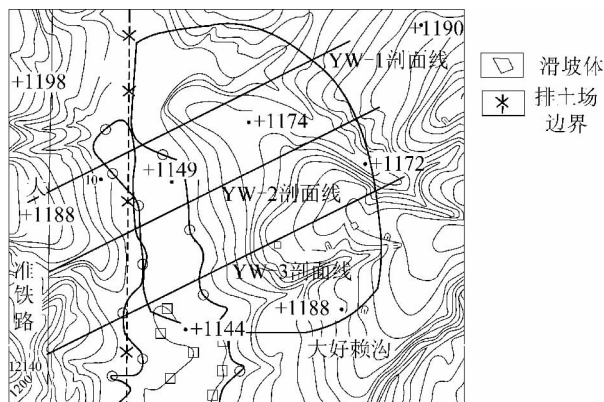


图 2 原地形剖面位置及滑坡方向

依据阴湾排土场工程地质模型,本次选取 YW-1 剖面进行数值分析。数值分析中岩石的物理力学参数采用表 1 中的参数进行分析计算。YW-1 计算模型沿边坡倾向长度为 800 m,边坡垂直最高高度为 170 m。模型的前、后、左、右边界为截离边界,模型前、后以 Y 方向位移约束,模型的左、右方向以 X 方向位移约束,模型的底部以 Z 方向位移约束,从而构成位移边界条件,以确保整个系统受力平衡。模型中排弃物采用摩尔-库仑模型,基岩采用理想的弹塑模型来描述。

边坡位移矢量速率分布如图 3 所示,边坡的位移矢量最大位置位于边坡 +1 240 m 平盘后缘,在后缘剪切带位置处达到最大,说明后缘加载后导致边坡向邻空面及重力的组合方向运动,引起上覆排弃物的破坏。边坡剪应变率云图如图 4 所示,边坡在滑面处剪应变率达到最大,验证了边坡逐步破坏的滑动过程。结合边坡位移矢量分布分析情况,可判定坡体主要是压剪破坏机理,排土场在后缘堆载的影响下,滑带逐步贯穿。边坡应力集中示意如图 5 所示,由于边坡堆载引起应力重分布,边坡沿着潜在滑带部位应力发生明显集中。该应力集中位置即为边坡的首要破坏位置。

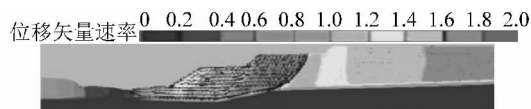


图 3 边坡位移矢量速率分布

## 2 现状边坡稳定性分析与治理

根据地质钻探资料及现场滑坡后缘拉裂缝、前缘鼓胀裂缝调查,并结合地表 GPS 监测水平位移变

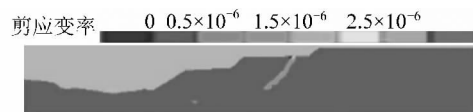


图 4 边坡剪应变率云图

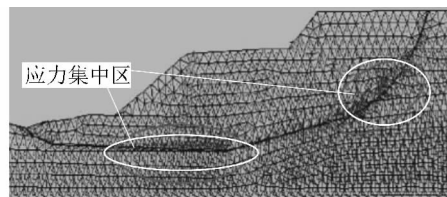


图 5 边坡应力集中示意

化矢量(图 6)和地下位移监测数据,确定了 YW-2、YW-3 剖面的滑动面。YW-2、YW-3 剖面边坡安全系数分别为 1.191 和 1.133,边坡基本稳定,但仍存在一定滑坡风险。结合现场 GPS 监测数据可知,YW-2、YW-3 剖面均在缓慢的沿边坡滑动方向产生一定位移。其结果能较好的与现场情况相契合。YW-1 剖面上包含的 GPS 监测点为 L3、L6,YW-2 剖面上包含的 GPS 监测点为 L1、L4、L7,YW-3 剖面上包含的 GPS 监测点为 L2、L5、L8。

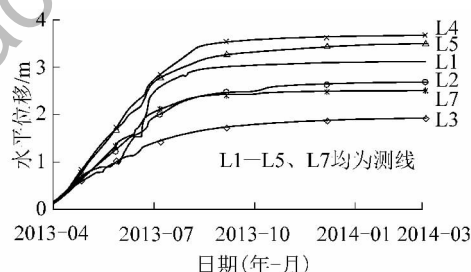


图 6 地表 GPS 监测水平位移变化矢量

以 YW-2 位置为例,考虑滑坡影响区附近继续排土对边坡稳定性的影响,设计 3 种方案进行分析(图 7)。根据现状边坡稳定性计算结果,YW-2 剖面位置稳定系数为 1.19。如果按照现状继续排弃,+1 260 m 平盘推进至影响区边界位置,最小稳定系数为 1.06;若排土场标高继续增高至 +1 280 m,最小稳定系数为 1.07,而整体边坡的稳定系数从 1.11 变为 1.12。可见,不在滑坡影响区范围内排土,段高从 20 m 增加到 40 m 对边坡稳定性影响很小,但稳定系数仍然小于 1.15,考虑到基底滑面可能发展的情况下,需采取相应治理措施后,方可在滑坡影响区外排土。3 个排弃方案的稳定性分析结果:3 个方案的现状边坡稳定系数均为 1.19,方案 1 固定稳定系数和搜索稳定系数分别为 1.04、0.99 时,+1 260 m 平盘继续推进至影响区内;方案 2 固定稳定系数

和搜索稳定系数分别为 1.11、1.06 时, +1 260 m 平盘继续推进至滑坡影响区边界; 方案 3 固定稳定系数和搜索稳定系数分别为 1.12、1.07 时, +1 260 m 平盘继续推进至滑坡影响区边界后增高到 +1 280 m。

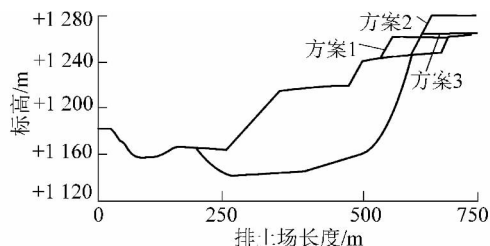


图 7 3 种排弃方案对比

### 3 治理后边坡稳定性分析

通过对滑坡区域实际情况的综合分析, 提出对边坡进行排土压脚的治理方案。采用排土压脚的方法, 可以使边坡下部区域岩土体自重增加, 提高滑坡区域的整体抗滑力; 同时, 排土压脚可以消除滑体剪出口处的自由面, 在一定程度上起到了抑制滑体沿原滑裂面剪出口移动的作用, 因此, 压脚排土可提高边坡的整体稳定性。

考虑阴湾排土场排土现状, 考虑压脚至 +1 170 m 平盘及 +1 180 m 平盘 2 种情况, 运用极限平衡分析, 选取典型剖面, 考察 2 种情况压脚之后现状排土场稳定性是否符合要求。对不同压脚方案下不同边坡剖面稳定性分析结果见表 2。

表 2 现状边坡在不同压脚方案的稳定性系数

剖面位置	压脚至 +1 170 m 平盘	压脚至 +1 180 m 平盘
YW-1	1.20	1.63
YW-2	1.24	1.65
YW-3	1.38	1.84

通过分析可知, 当排土压脚至 +1 170 m 平盘时, 阴湾排土场 3 个典型剖面的稳定性系数均超过 1.20, 满足稳定性储备要求。故压脚排弃至北部原地形 +1 170 m 标高即可。由于阴湾排土场西部及西南部地区原地形呈现北高南低的趋势, 因此压脚排土工作从排土场南部开始, 自阴湾排土场坡脚位置向东排弃直至与原地表 +1 170 m 标高, 然后再依次向北推进。

由于阴湾排土场排土设计排弃至 +1 280 平盘, 平盘宽 40 m, 单台阶坡角 39°, 考虑压脚至 +1 170 m 平盘及 +1 180 m 平盘两种情况, 运用极限平衡

分析, 选取典型剖面, 考察 2 种情况压脚之后排土场稳定性是否符合要求(表 3)。

表 3 排弃至 +1 280 m 后不同压脚方案下边坡稳定系数

剖面位置	压脚至 +1 170 m 平盘	压脚至 +1 180 m 平盘
YW-1	1.01	1.15
YW-2	1.04	1.10
YW-3	1.21	1.40

由表 3 可知, 如按设计标高排弃至 +1 280 m, 当排土压脚至 +1 170 m 平盘、+1 180 m 平盘时, 阴湾排土场 3 个典型剖面稳定性系数仅 YW-3 达到 1.20, 满足稳定性储备要求。故建议矿方在压脚之后不再继续排弃, 保持排土场现状, 以确保排土场边坡稳定性要求。

### 4 结 论

1) 通过研究发现, 针对典型的软弱基底排土场边坡, 以压剪破坏为主, 破坏机理为边坡后缘加载导致上覆排弃物不均匀沉降而产生张拉裂缝, 同时由于边坡体内存在潜在的弱层, 在上覆载荷的作用下边坡沿着弱层发生滑动, 并在弱层部位出现压应力集中区。

2) 地表 GPS 监测、地质勘探及地下位移监测相结合是确定蠕滑边坡滑动面的有效手段, 滑动面的确定对于后期的边坡稳定性分析及破坏机理研究至关重要。

3) 结合排土场现状及工程实际, 采用具有针对性的排土压脚治理方案, 能够最大化的利用排弃空间, 达到边坡稳定储备系数要求, 确保排土场安全。

#### 参考文献:

- [1] 黄鑫, 张晓辉, 薛雷, 等. 陕西省金堆城露天矿排土场高边坡稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 40-43.
- [2] 关 钊. 露天矿软弱基底内部排土场稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 63-65.
- [3] 李 跃, 杨永生, 毛权生, 等. 基于三维地质模型的排土场边坡整体稳定性探究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S0): 533-539.
- [4] 王 俊, 孙书伟, 陈 冲. 饱水黄土基底排土场地质力学模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 861-867.
- [5] 陈 鹏, 陈鹏飞. 露天矿排土场边坡稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 29(6): 1028-1031.
- [6] 汪海滨, 李小春, 米子军, 等. 排土场空间效应及其稳定性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2103-2111.

(下转第 5 页)

围岩一定范围内高应力集中是冲击地压发生的根本应力来源,深孔断顶爆破可以通过爆破作用改变煤岩体所处的应力环境,缓解压力,降低冲击危险性。

### 3.6 煤柱冲击地压矿井防治方法

煤柱冲击地压的发生与作用在煤柱上的力密切相关<sup>[14-16]</sup>,开采过程中在煤柱两侧形成采空区,侧向支承压力作用于煤柱上,在煤柱上形成2个减压区和2个应力集中区(图5)。2个应力集中区形成2个冲击地压高危险区,如果煤柱宽度不合理,这2个应力集中区有可能叠加,使得冲击危险性更加突出。作用在煤柱高冲击危险区煤岩体上的强剪切力使煤柱失稳破坏诱发冲击地压,煤柱中的高应力集中区的存在是诱发煤柱冲击地压的根本原因。

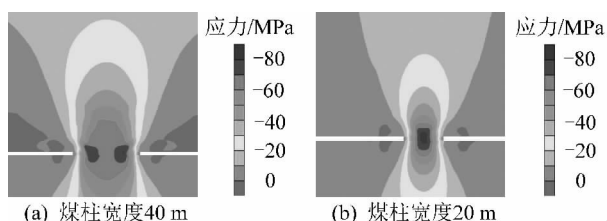


图5 不同宽度煤柱中应力集中情况

因此,治理煤柱冲击地压的方法应该着眼于消除煤柱中的高应力集中区,实施诱发卸压等措施,使应力适当得以释放。防治煤柱冲击地压最根本的方法是避免形成煤柱,消除高应力集中存在的物质基础。

## 4 结 论

1) 冲击地压的发生是有条件的,只有同时具备内在条件、结构条件和应力条件这3个条件,才会发生冲击地压。冲击地压灾害的防治的实质是改变这3个条件,使之不会同时具备。

2) 不同类型的冲击地压矿井,尽管防治方法存在不同,但防冲的本质是相似的,即改变应力分布形式或应力条件。

### 参考文献:

[1] 齐庆新,史元伟,刘天泉.冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J].煤炭学报,1997,22(2):143-148.  
[2] 齐庆新,刘天泉,史元伟.冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J].矿山压力与顶板管理,1995,12(3/4):174-177.  
[3] 龚林名,陆菜平,牟宗龙,等.冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J].煤炭学报,2005,30(6):1156-1161.  
[4] Andy Ruina. Slip Instability and State Variable Friction Laws [J]. Journal of Geophys Research, 1983, 83: 10359-10370.

[5] Rice J R. Ruina. Stability of Steady Frictional Slipping [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50: 343-349.  
[6] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25.  
[7] 沈荣喜,王恩元,刘贞堂,等.近距离下保护层开采防冲机理及技术研究[J].煤炭学报,2011,36(S0):63-67.  
[8] 石必明,刘泽功.保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟[J].煤炭学报,2008,33(1):17-22.  
[9] 陈国祥,龚林名,乔中栋,等.褶皱区应力场分布规律及其对冲击矿压的影响[J].中国矿业大学学报,2008,37(6):751-755.  
[10] 王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(S1):263-268.  
[11] 齐庆新,雷毅,李宏艳,等.深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S0):3522-3527.  
[12] 高明涛,王玉英.断顶爆破治理冲击地压技术研究与应用[J].煤炭学报,2011,36(S1):326-331.  
[13] 赵善坤,欧阳振华,刘军,等.超前深孔顶板爆破防治冲击地压原理分析及实践研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):3768-3775.  
[14] 王永秀,齐庆新,陈兵,等.煤柱应力分布规律的数值模拟分析[J].煤炭科学技术,2004,32(10):59-62.  
[15] 王存文,姜福兴,王平,等.煤柱诱发冲击地压的微震事件分布特征与力学机理[J].煤炭学报,2009,34(9):1169-1173.  
[16] 张修峰.华丰煤矿煤柱冲击地压发生规律及防治[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S0):4765-4768.

### (上接第40页)

[7] 王建民,张锦,邓增兵,等.时空Kriging插值在边坡变形监测中的应用[J].煤炭学报,2014,39(5):874-879.  
[8] 张玉浩,张立宏.边坡稳定性分析方法及其研究进展[J].广西水利水电,2005(2):13-16.  
[9] Sarma S K. Stability Analysis of Embankments and Slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(12): 1511-1524.  
[10] Bishop A W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.  
[11] Morgenstern N R, Price V E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces [J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.  
[12] 张雄.边坡稳定性的刚性有限元评价[J].成都科技大学学报,1994(6):47-52.  
[13] 殷建华,陈健,李焯芬.岩土边坡稳定性的刚体有限元上限分析法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):898-905.  
[14] 连锁营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.  
[15] 杨巨文.胜利东二号露天煤矿首采区边坡稳定性分析[J].煤炭科学技术,2013,41(S1):58-59.  
[16] 蔡利平,李钢,史文中.增地节地型露天矿排土场优化设计[J].煤炭学报,2013,38(12):2208-2214.