维普资讯 http://www.cqvip.com

第32卷第6期 煤 炭 学 报 Vol. 32 No. 6
2007年 6月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY June 2007

文章编号:0253-9993(2007)06-0586-06

重庆万盛南桐矿区胡家沟矸石山滑坡灾害成因分析

董 倩[1], 刘东燕[2], 朱正伟[2], 孙海涛[2]

(1. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 400042; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 在勘察胡家沟矸石山滑坡发育背景、分析灾害主要成因的基础上, 运用极限平衡法和FLAC数值模拟对该矸石山进行了稳定性分析评价, 揭示了滑坡产生的原因为: 降雨前矸石山安全储备并不高, 其体内已形成潜在滑移面, 长时间降雨后, 矸石山稳定性降低, 同时, 矸石山自燃加剧, 导致喷爆, 在喷爆动力能量扰动下, 矸石山无法保持自组织临界状态, 从而失稳滑坡, 演化为泥石流. 将宏观定性分析与定量计算相结合, 并结合工程实际提出了矸石山滑坡灾害防治措施.

关键词: 矸石山; 滑坡地质灾害; 成因分析; 斜坡稳定性; 自组织临界性

中图分类号: P694 **文献标识码**: A

Cause analysis of Hujiagou coal wastes landslide in Nantong mining district of Wansheng, Chongqing

DONG Qian[1], LIU Dong-yan[2], ZHU Zheng-wei[2], SUN Hai-tao[2]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing* 400042, *China*; 2. *College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing* 400045, *China*)

Abstract: Introduced the situation and background of the two landslides, and discussed a series cause of two environmental geological hazards of the coal waste dump. Based on the results of exploration, the stability of the coal waste dump was discussed through the limiting equilibrium method and FLAC numerical simulation method. The calculated results show the cause of the coal wastes landslide further. The analyzed results indicate that the stability of the coal waste dump is not sufficient before the rainfall, and a potential slip surface exists in the waste dump. After sustaining rainfalls, the stability of the waste dump decreases. At same time, self-ignition and explosion of the coal wastes occur, and then blast. The blast makes the coal waste dump lose the self-organized critical state and a mass of coal wastes burst apart the dump and turned into flow. In order to avoid the loss of life and property, other analogous coal waste dump must draw lesson from it.

Key words: coal waste dump; geological catastrophes; cause analysis; slope stability; self-organized criticality

我国是世界上最大的煤炭生产和消费国, 矸石山几乎成为我国煤矿的“标志”. 煤炭作为我国最主要的一次性能源, 预计到2020年仍将占一次性能源的70%左右, 矸石山所造成的环境及环境岩土问题是个需要长期面对的问题[1].

矸石露天堆放, 产生污染(水、土、大气), 自燃、占地、爆炸、结构侵蚀、稳定等环境岩土效

收稿日期: 2006-09-05 **责任编辑**: 韩晋平
基金项目: 重庆国土资源和房屋管理局科研计划项目(财建[2003]660号)
作者简介: 董 倩(1971-)女, 辽宁沈阳人, 博士. Tel: 023-65122851, E-mail: xykdq@163.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

应[2]，其中稳定效应指矸石山坍塌、滑坡、泥石流等重力灾害．矸石山堆放方式以顺坡填沟为主，露天自然成堆，自然安息角为38～40°，单体高度一般为20～60 m，矸石粒径下大上小，自然分选．矸石山结构疏松，受矸石中炭分自燃、有机质灰化及硫分离解挥发等作用，稳定性普遍较差，当堆积过高、坡度过大、受人为开挖、爆炸、暴雨侵蚀影响时，易形成重力灾害．由于矸石堆放不稳固，严重威胁公共安全．我国各地矸石山时有垮塌、滑坡及泥石流事故发生，2004—2005年期间重庆万盛南桐矿区东林煤矿胡家沟矸石山发生2次滑坡事故，造成民房被毁和重大人员伤亡．

1　滑坡灾害情况

胡家沟矸石山顶海拔520 m，坡度约35°，第1次崩塌滑坡事故是由于2004年5月末6月初，重庆万盛连续降雨，尤其在6月4日晚降大雨，大量的雨水渗入万盛区万东镇胡家沟矸石山，6月5日上午放晴，到下午13：41，矸石山发出巨大的爆炸声，并伴随强烈刺鼻气味，约20万m^3矸石脱离矸石山以极高的初始速度崩滑而下，滑动方向300°，滑动距离在水平方向约600 m，垂直落差218 m．由于滑体为自然固结的采矿废渣，脱离坡体后经短暂滑动，并在滑床上留下明显压擦痕迹．

崩滑体在滑动过程中完全解体，解体后的矸石以碎屑流的方式在山坡上高速流动冲下陡坡，冲垮坡脚拦矸坝，推翻地面土层，将直径15 cm左右的树连根拔起，并摧毁沿途14座民房，强烈的冲击波横扫流通区两侧庄稼．形成的碎屑流最后冲入坡脚滑体最终滑进坡脚面积约160 m^2的鱼塘并将其填埋，造成重大的人员和财产损失（图1）[3]．

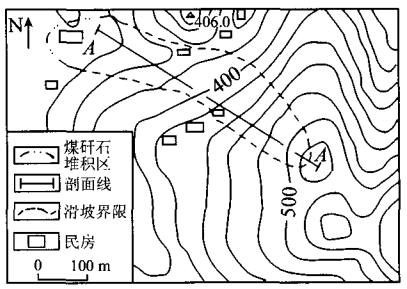


图1　万盛矸石山滑坡、碎屑流

Fig. 1　The plane of landslide and flow of the coal wastes

第2次事故发生在2005－10－25早7点，因连日阴雨，大量雨水渗入矸石山，使矸石山发生爆炸垮塌事故．将约30万m^3矸石向前推移了400 m，形成长约1 000 m、宽150 m、厚5 m的灰黑色矸石堆积带，覆盖在去年的塌方体上，滑坡是由最顶部矸石山垮塌形成的．在矸石山顶，矸石堆上有新的裂缝，危岩体宽度为42 m，长度为57 m．

2　灾害发育背景

2.1　地理位置及地形地貌

万盛矿区处于四川盆地与黔北山区过渡带上，由西北到东南地形逐渐升高：西北属川南低山丘陵区，海拔190～500 m，高差300 m以下，东南属黔北中高山区，海拔1 200～1 400 m，区内山脉大体呈南北向延伸，与地质构造线一致．该区富含煤系地层，万盛区因矿设区，是重庆市五大矿区之一．滑坡发生在万盛区万东镇新华村胡家沟，为低山丘陵区向中山过渡区，海拔500～1 000 m，高差300～500 m．

2.2　气象水文

矿区气候温湿多雨，属亚热带湿热气候，四季分明，5～10月为雨季，其降雨量占全年80%左右．据南桐气象站1983—1991年资料统计，年降雨量在1 102.6～1 560.4 mm，年平均降雨量为1 225.0 mm，最大日降雨量为123.8 mm．最高气温41.4 ℃，最低气温－0.8 ℃，年平均气温17.5 ℃，年平均相对湿度为80%～83%；年平均蒸发量为1 087.7～1 328.7 mm．区内多西北风，一般风力为3～4级，多年平均风速为1.3 m/s，最大瞬间风速为28 m/s．

2.3　地质概况

万盛区境出露地层众多，但全为沉积岩系，除泥盆系、石炭系、白垩系、第三系缺失外，从寒武系至第四系均有不同程度的发育，共有7个系31个地层单位．自东向西，地层由老变新，占39.05%区境地质结构为川东褶带与川鄂湘黔隆起褶带交接部，以东为川鄂湘黔隆起褶带西缘，构造相对复杂；以西以川

维普资讯 http://www.cqvip.com

东褶带东缘，构造比较简单.

2.4 水文地质条件

地下水按赋存条件及岩土体含水类型可划分为孔隙水和岩溶裂隙水.

孔隙水：主要赋存于矸石堆积层和地势低洼的土层中，主要补给源为大气降水，岩基为隔水层，大气降雨补给后多顺矸石体与基岩界面流动，在矸石体前缘渗出，水量受降雨控制. 矸石体呈松散－稍密状，随机排弃，据现场渗水试验，平均渗透系数为 0.072 cm/s，其渗透性好. 矸石山位于斜坡上，地形较陡，不易汇集地表水，地下水多经斜坡排向山体下方，部分渗入矸石体，故矸石山体内无统一地下水位.

岩溶裂隙水：堆积区自然斜坡坡度 18～25°不等，大气降水多顺坡以坡面流形式径流，不利于地下水的入渗. 基地岩体中以溶孔及小的溶蚀裂隙出现，无溶洞、落水洞，地下水贫乏，水文地质条件简单.

2.5 矸石山特征

万盛南桐矿区东林煤矿有新、老两座主要矸石山，其中新矸石山是在老矸石山上堆放而成. 矸石山滑坡的恶性地质灾害是新矸石山面向公路一侧发生垮塌而形成的.

老矸石山呈圆锥台状，第 1 次灾害发生时部分被泥石流冲毁，顶部直径大约 40 m，底部直径大约 55 m，高为 20～30 m（靠公路一侧较高），体积较小. 顶部有人工的简易积水池和排水沟，靠近居民区的临空面坡脚处修有挡土墙. 矸石山表面植被较为发育，冲沟发育明显. 各个临空面坡度大致相同，均为 29～35°之间，局部可达到 50°. 因堆积时间较长，风化强烈，粒径为 1 cm 以下的颗粒占 60% 左右.

新矸石山是在老矸石山顶部后缘堆积而形成，堆积了 4 a 多，其几何形状和老矸石山类似. 因堆积年限不长，故表面上存在大量粒径在 5～10 cm 的块体，表面植被不发育，且固结没有完成，堆积物松散，常有较大块体顺坡滑落，坡角接近自然休止角，表面冲沟较为发育.

3 灾害的主要成因

矸石山自然成堆，颗粒非均匀程度大，临空面以边坡形式出现，由于矸石散体具有部分流动性，所以仅能在一定范围内保持形状. 矸石山具有自组织临界性，在矸石山自由斜面角度不大于其自然临界坡角时，能保持自身形态，处于自组织临界平衡状态；在临界状态下，由于自组织和外力干扰作用，散粒体能量耗散，将发生局部坍塌、坡体失稳、坡面泥石流等现象. 矸石山地质灾害的发生，是散粒体系统内各要素通过一系列非平衡不稳定产生空间、时间、功能和结构的自组织过程，导致开放系统远离平衡态的结果.

天然矸石山的演化，受矸石山组构、矸石山规模和外界扰动方式和扰动强弱的影响，矸石山的规模和组构特征是影响矸石山自组织临界性的内因，扰动方式和扰动强弱是外因. 随着矸石山逐年堆积，矸石山组构特征、规模发生改变，在经历降雨、风化、物理化学变化、外部荷载作用等扰动后，系统原有的平衡将被打破，系统整体丧失鲁棒性，原有临界状态消失，发展过渡到另外一个自组织临界状态. 然而，不同情况的组构特征变化及扰动程度下所发生“灾变”的机理及规模是各自不同的，重庆万盛矸石山产生严重的滑坡、碎屑流灾害主要因素如下.

3.1 地形因素

万盛万东镇新华村胡家沟为低山丘陵区向中山过渡区，矸石山最高海拔 540 m，山坡坡度较陡，煤矸石崩滑而下，垂直落差 218 m，势能条件十分优越（图 2[3]）. 灾害发生时，矸石自燃喷爆动力激发的滑坡是形成泥石流的主导因素；矸石松散碎屑堆积物是泥石流丰富的固体碎屑物源；降雨提供足够数量的水体，滑坡快速转化成高速流动，

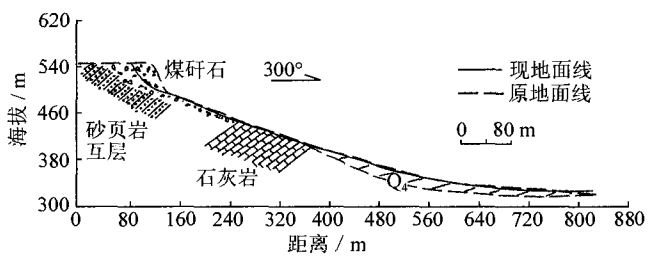


图 2 万盛胡家沟煤矸石山滑坡 *A*—*A* 剖面

Fig. 2 The profile along *A*—*A*

维普资讯 http://www.cqvip.com

形成泥石流；矸石山地势条件为泥石流提供位能，赋予泥石流一定的侵蚀、搬运和堆积能量．泥石流以滑坡和坡面冲刷形式出现，滑坡和泥石流相伴而生．

3.2　气候及降水

2次灾害发生之前均经历了连日降雨．研究表明：矸石山无论是整体失稳，还是坡体下滑，绝大多数都发生在雨季．降雨量的多少是矸石山是否稳定的重要条件．

当降雨渗入矸石山，矸石散体质量密度增加，沉降速度相应加快；矸石散体孔隙水压增加，抗剪强度降低．饱水状态下矸石散体剪切强度试验表明，物料的 φ 值可以减小20%以上；雨水进入矸石山沉降过程中产生的张裂隙后迅速产生水压，一方面增加主动压力，减少滑面摩擦力；另一方面与矸石体内固有水分形成高含水层，产生一定浮托力，减少抗滑力，并构成滑体潜在滑面．

3.3　矸石山自燃、喷爆

万盛矿区区内各煤层是变质程度中等的无烟煤．无机组分以硫铁矿和黏土为主，井田各煤层原煤全硫含量均属富硫和高硫煤，煤炭和煤矸石自燃现象非常严重，区内很多矸石山都存在自燃情况．灾害发生前，胡家沟矸石山体内部一直自燃且有浓烈的二氧化硫味冒出，证实其为含量较大的硫铁矿，为其自燃提供了基本的物质基础．

硫铁矿和碳在一定条件下极易氧化．氧化过程是一个放热反应，使环境升温，引发矸石山的自燃爆炸．硫铁矿氧化在释放大量热量的同时，生成大量二氧化硫（供氧不足则生成硫磺）．胡家沟矸石山滑坡前有明火存在，崩滑当时发出极强烈的二氧化硫刺激味，证实了存在爆炸．

矸石山的喷爆，是一种物理与化学并存的综合类型爆炸，危害较大．其形成机制是因为矸石山自燃所产生的热能与气体超负荷积累与突然释放．当矸石产生爆燃时，高压的气体携带炽热的矸石，突破矸石山表层的束缚，向自由空间喷泄出去．矸石山喷爆极易诱发矸石山的崩塌与滑坡[4]．

3.4　矸石山堆积方式

矸石山由自然下落方式堆积而成，其表层矸石颗粒周围具有临空面，处于相对简单的应力状态，在微小扰动下容易失稳，为散粒层．但是其下部的众多矸石散体颗粒由周围颗粒围绕，颗粒的运动受到临近颗粒的制约，形成颗粒间应力传递的组织结构，处于复杂应力状态，为摩阻层．这种结构增加了颗粒抵抗扰动的能力，仅当扰动强度破坏这种组织结构时，才会发生深层剪切滑移．矸石山这种典型的散粒层和摩阻层二元结构对矸石山临界状态下的动态特性具有重要影响．

另外，矸石山在堆砌过程中，临界角由坡面最不稳定的颗粒所控制[5]，因此，坡面整体结构稳定性取决于未达到临界态的区域所占的比例，当矸石山堆砌于临界角时，若坡面各区域均达到或近似达到临界态，则其整体稳定程度较小，抗扰储备小，易于产生链式放大．由于局部不稳定区域的比例、空间分布、时间分布及下落矸石的空间运动路径都是随机的，因此可以发生任何规模的崩塌．

3.5　排弃强度

由于矸石山自然排弃堆积，既不对地基进行处理，也不对矸石散体进行压实．所以矸石排弃强度对矸石山变形破坏影响重大．当排弃速度过快、堆载数量大，一方面导致矸石散体和地基岩土体来不及固结，强度增长慢；另一方面导致矸石散体及其基底内压力增长速度过快，影响了矸石山的稳定性[6]．

胡家沟矸石山发生第1次滑坡滑塌后，周围居民搬迁撤离，因矿山生产需求，矸石山持续堆排，矸石排弃量大，排弃间隔时间不等，排弃强度与矸石山稳定之间相矛盾，且由于排弃方式，导致从矸石山表面到内部矸石未经充分沉降压密，孔隙率较大，强度低、变形大、稳定性差．

4　稳定性分析及防治措施

4.1　稳定性分析

针对胡家沟矸石山滑坡 *A*—*A* 剖面分别采用极限平衡法和FLAC数值模拟计算分析其稳定性．计算参数根据现场试验，参照《万盛南桐煤矿矸石山治理地勘报告》以及工程经验和工程地质手册等进行选取，

维普资讯 http://www.cqvip.com

见表 1. FLAC 数值模拟时，模型建立为坐标系 x 方向指向坡面反向，y 方向竖直向上.

表 1 计算模型的物理力学参数取值

Table 1 Physical parameters and mechanical parameters of calculation model

岩土体	泊松比	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	容重/kN·m^{-3}	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
矸石堆积体	0.30	76.920	166.670	21.0	33	0.02	0
强风化岩体	0.32	681.818	1 666.667	24.0	40	0.70	0
弱风化岩体	0.27	1 578.803	2 898.551	25.5	44	1.00	1.0
微新－新鲜岩体	0.24	2 822.581	4 487.179	27.0	50	1.40	1.6

采用极限平衡法计算出安全系数为 1.23. 安全系数敏感性分析如图 3 所示，由计算结果可知，安全系数相对于内摩擦角 φ 更为敏感.

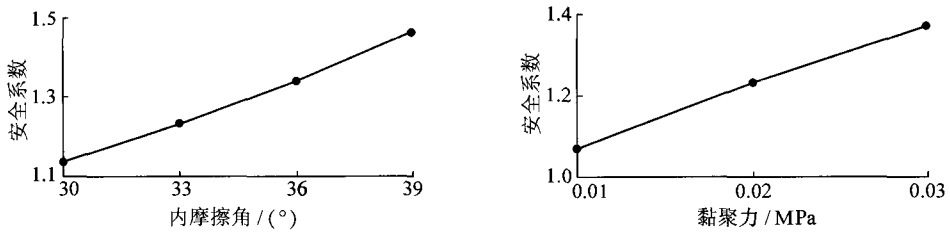


图 3 内摩擦角和黏聚力变化与安全系数的对应关系

Fig. 3 Relationship between internal friction angle, cohesion and stability factor

FLAC 数值模拟分析结果如图 4 所示（计算时步为 7 629），数值分析模拟出的位移变形和剪应变集中带与实际滑坡的滑动面比较吻合.

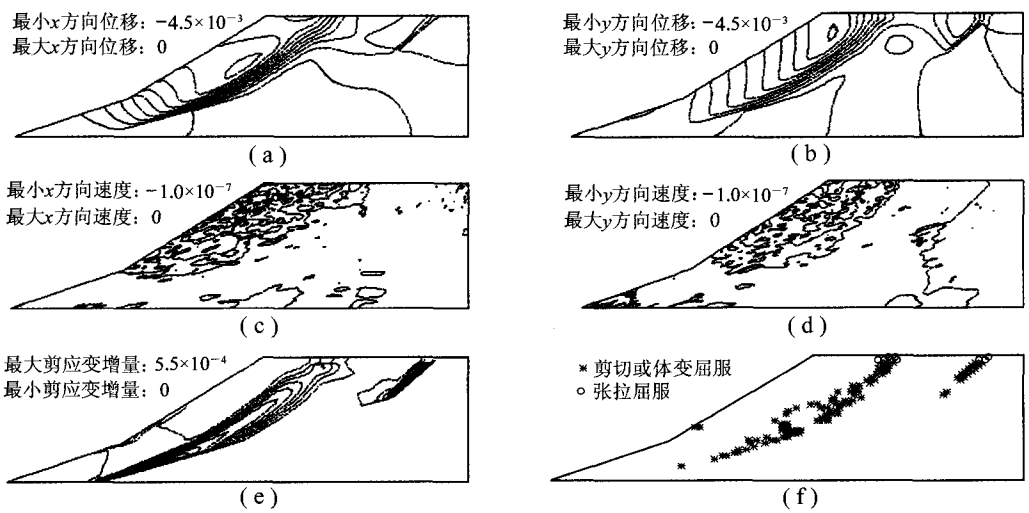


图 4 FLAC 数值模拟计算结果

Fig. 4 Calculation results of FLAC

(a)，(b) 分别为 x，y 方向位移等值线；(c)，(d) 分别为 x，y 方向速度等值线；(e) 剪应变增量等值线；(f) 塑性区及张拉屈服分布

由计算结果可知，降雨前矸石山体安全系数并不高，矸石山体内存在剪应变集中带，最大剪应变在矸石山体内中部，矸石山体内已形成潜在滑移面. 矸石山体中间存在塑性区，有贯穿矸石山体的趋势，且塑

维普资讯 http://www.cqvip.com

性区对应的矸石山顶面及矸石山顶部与原天然地质界面交界处出现张拉屈服. 长时间降雨后，矸石山稳定性降低，同时，矸石山的自燃加剧，导致喷爆，在喷爆动力能量扰动下，稳定性降低的矸石山无法保持自组织临界状态，从而发生失稳滑坡，演化为泥石流.

4.2 矸石山滑坡灾害防治措施

重庆地区还存在大量矸石山，不排除仍有垮塌及爆炸产生灾害的可能，应采取相应防治措施：

（1）矸石堆放中应采取分层堆放、分层碾压等工程措施增加矸石山的固结速度与固结程度.

（2）对矸石山做好完善的浅、深层排水通道，恢复坡面植被，降低降雨对矸石山稳定性的影响.

（3）在固结前即支护，如果选择在坡中部设置支挡结构，首先应保证基脚的稳定，保证基脚下部的矸石已完全固结，同时，还应分析新堆矸石对下部矸石堆积体引起进一步变形的情况.

（4）应根据应力分布、位移分布、速度场的分布合理选择开挖卸载区域对矸石山的整形卸载.

（5）对于易自燃矸石山，堆放前采用微生物脱硫技术对矸石脱硫和酸性改良；采取分层堆放、推平压实等手段切断氧气供应，掺氢氧化镁等阻燃剂，达到预防矸石山自燃爆炸的目的；堆放后采用冷却、灌浆封闭等方法降低矸石温度，以防止自燃爆炸.

5 结　语

矸石山堆积地点地形条件、堆积方式、排弃强度、矸石山散体物料构成是致灾潜在原因；长期降雨是灾害的主要诱因；煤矸石山的剧烈自燃爆炸应是灾害的主要外部激发因素.

胡家沟矸石山的滑坡泥石流灾害是由多方因素造成的，并非完全处于偶然，尤其是第1次灾害发生后，如果能及时对矸石山滑坡原因进行定性、定量分析，确定第一次灾害发生原因，采取对应防治、整改措施，第2次灾害是完全可以避免的. 重庆地区内不少矸石山还存在类似潜在隐患，不排除仍有垮塌及爆炸产生灾害的可能，应该高度重视，切实采取防治措施.

参考文献：

[1] 姜振泉，李　雷. 煤矸石的环境问题及其资源化利用［J］. 环境科学研究，1998，11（3）：57～59.

[2] 邓丁海，岑文龙. 煤矸石堆放区的环境效应研究［J］. 中国矿业，1999，8（6）：87～91.

[3] 赵　宇，崔　鹏，王成华，等. 重庆万盛煤矸石山自燃爆炸型滑坡碎屑流成因探讨［J］. 山地学报，2005，23（2）：169～173.

[4] 张振文. 煤矿矸石山喷爆的形成机制与影响因素［J］. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2002，21（1）：11～14.

[5] Franz－Josef Elmer. Self－organized criticality with complex scaling exponents in the train model［J］. Physical Review E.，1997，56（6）：6 225～6 228.

[6] 黄龙元，杨明朗. 本钢歪头山矿下盘排土场滑坡机理及高台阶排土合理参数［J］. 中国矿业，1996，5（2）：60～64.