

文章编号:1000-582X(2008)10-1178-07

# 三峡库区危岩群发性机理与防治 ——以万州太白岩为例

陈洪凯<sup>1,2</sup>, 鲜学福<sup>2</sup>, 唐红梅<sup>1,2</sup>, 封全红<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 瑞典 BBK 岩土工程技术咨询公司, 斯德哥尔摩 SE-17143)

**摘要:**以太白岩危岩为例, 研究获得了群发性危岩的形成条件, 即泥岩和砂岩交互成层组合、陡峻的地形及高强度的降雨; 揭示了危岩群发性机理演绎过程, 包括从陡崖底部逐渐向崖顶演化的微观链和从临空面向山体内部演化的宏观链, 陡崖砂岩底部的岩腔是危岩群发性机理的起搏器, 宏观链中位于陡崖顶部的危岩块受到裂隙水压力作用易于破坏; 针对单个危岩体, 提出了2种荷载组合, 基于极限平衡理论建立了危岩稳定性分析方法; 基于危岩群发性机理, 研发了危岩支撑-锚固联合治理技术和锚钉-锚杆(索)联合治理技术两类核心技术。

**关键词:** 岩石力学; 危岩; 群发性机理; 防治技术; 三峡库区

中图分类号: P642.3; O346.5

文献标志码: A

## A massive development mechanism and countermeasures for perilous rocks in the Three Gorges Reservoir area of P. R. China: The example of the Taibaiyan cliff at Wanzhou

CHEN Hong-kai<sup>1,2</sup>, XIAN Xue-fu<sup>2</sup>, TANG Hong-mei<sup>1,2</sup>, FENG Quan-hong<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 3. BBK AB, Ankdammsgatan, Solna, Stockholm, SE-17143, Sweden)

**Abstract:** Perilous rock is a dominant geological hazard in Three Gorges Reservoir area of P. R. China. The Taibaiyan cliff at Wanzhou is a representative case of massive perilous rocks in the area. Using this cliff as an example, the conditions triggering massive perilous rocks were studied and described. This included examining the following three conditions: alternating layers of mudstone and sandstone; steep landforms such as cliffs or scarps; and intense rainfall. The massive development mechanism for perilous rocks was discussed, including micro-chained pattern gradual and interval evolution from the bottom to the summit of the cliffs individually as perilous rock, and a macro-chained pattern evolving stage by stage from the cliff face backward up the mountain. In some respects, rock cells below sandstone in cliffs serves as the pulsating valve of the massive development mechanism for perilous rock. In any micro-chained pattern, perilous rock situated on summits is the easiest to rupture due to the fissure pressure. For any single

收稿日期: 2008-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678182); 重庆市重点自然科学基金资助项目(2008BA0015)

作者简介: 陈洪凯(1964-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事地貌学、地质安全理论及工程结构健康方向研究,

(Tel)023-62652719; (E-mail) chk\_cq@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

perilous rock, two load compositions were derived. In addition, methods for analyzing perilous rock stability were established in detail using the limit equilibrium principle. Two key techniques, a union scheme that both supports and anchors and a union scheme that nails and anchors, are proposed in light of the massive development mechanism for perilous rock.

**Key words:** rock mechanics; perilous rock; massive developing mechanism; countermeasure; Three Gorges Reservoir area

危岩是指位于陡崖或陡坡上被岩体结构面切割且在重力、地震、裂隙水压力等诱发因素作用下稳定性较差的岩石块体及其组合<sup>[1]</sup>。三峡库区危岩具有群发性、突发性和致灾严重性特征。初步查明,三峡库区仅重庆境内便有危岩体 50 000 多个,集中分布在 600 余个工点,威胁着 80 多万人的生命安全和数百亿元的财产安全。迄今,国内外科技工作者对危岩灾害的研究尚处于初步积累阶段,Richad 等(1984)认为危岩属于地表过程的突变类型<sup>[2]</sup>,Jones(1984)、Reginald(1999)、Betran(2003)、Hung(1999,2004)和 Braathen(2004)等从地质学角度分析了危岩的形成过程及破坏机理<sup>[3-8]</sup>,陈洪凯等从 20 世纪 90 年代以来实施三峡库区的危岩研究,基本建立了危岩稳定性分析方法和治理技术体系<sup>[9-21]</sup>,据此撰写了危岩防治工程设计规范<sup>[22]</sup>。但是,这些研究主要针对危岩个体,对危岩群发性机理缺乏充分认识和系统研究,以至于危岩灾害防治针对性不强,对危岩致灾区土地资源综合利用指导价值不大。鉴于此,以三峡库区万州太白岩危岩为例,对危岩群发性机理进行系统研究,据此探索群发性危岩灾害有效的工程防治措施。

## 1 工程概况

万州区位于三峡库区中心地带,主城区南侧的太白岩危岩带包括中段、东段和南坡三部分,已探明的危岩体 127 个,总体积约 81 186 m<sup>3</sup>,呈现集团式组合特征,以坠落式危岩为主(如图 1 所示)。

中段:东起警备司令部上方,西至打靶场,分布于上、下两级陡崖,陡崖长约 850 m,共有 48 个危岩体,总体积 47 662 m<sup>3</sup>,分布简图见图 2。

东段:位于万州军分区至打靶场一带,分布在上、下两级陡崖上,共有危岩体 18 个,总体积 923.45 m<sup>3</sup>。

南坡:太白岩南坡共探明危岩 61 个,总体积 24 562 m<sup>3</sup>,座落在三级陡崖上(见图 3),第一级陡崖底部高程 265~315 m、顶部高程 325~335 m,第二级陡崖底部高程 350~360 m、顶部高程 375~380 m,第三级陡崖底部高程 395~405 m、顶部高



图 1 位于太白岩陡崖的坠落式危岩

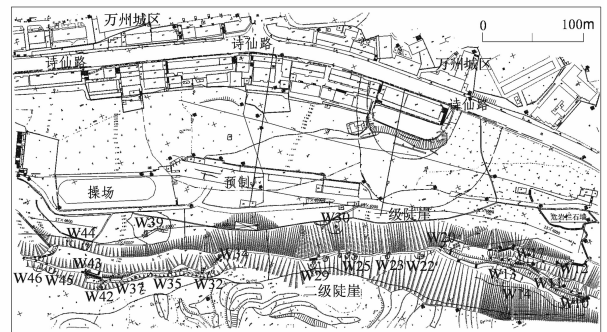


图 2 位于太白岩陡崖的坠落式危岩

程 430~435 m。

20 世纪 90 年代以来,太白岩常有危岩崩落致灾事件发生,造成公共设施被毁、人员伤亡、危及交通和供电、供水安全的灾害事故,严重威胁着太白岩坡前的 4 万余人、20 余家企事业单位及沙龙路、诗仙路的交通安全。每个危岩带内,卸荷拉张裂缝发育,单体危岩形态清晰。在暴雨季节,高强度的降雨渗入裂缝中,诱发了多起危岩崩落致灾事件生,危岩体多数处于临界稳定状态。

2001 年,三峡库区地质灾害防治工作全面启动,太白岩危岩带被纳入三峡库区首批地质灾害防治工程,并于 2002 年 7 月开工,2003 年 4 月完工。

直到 2007 年 10 月的监测资料表明,已经实施工程

治理的危岩体未出现失稳崩塌迹象,但是原地质勘查认为处于稳定状态的岩块则发生了多起崩落事件,尤其是2004年5月19日W24危岩和W25危岩之间发生较大规模的多个危岩块连续崩落事件,体积约2000m<sup>3</sup>,毁坏何其芳纪念馆。究其原因,主要是之前的地质勘查、设计均把着眼点放在单体危岩上,对陡崖上危岩群发性机理缺乏必要的认识,导致危岩漏勘现象比较严重。



图3 万州太白岩南坡危岩带

## 2 危岩形成条件及稳定性分析方法

### 2.1 危岩形成条件

太白岩危岩是地质、地貌及气象条件耦合异变的地质产物:

1) 太白岩位于渝东平行岭谷地貌区,处于铁峰山背斜南翼万州向斜内,岩层产状近于水平,由侏罗系硬质长石石英砂岩和软质泥岩交替成层组合,软、硬岩层抗风化能力差异显著。1998~2004年的现场观测表明,砂岩和泥岩的风化速率分别为 $(7.1\sim 8.3)\times 10^{-4}$  cm/d和 $(1.0\sim 1.6)\times 10^{-2}$  cm/d,二者相近800倍。

2) 第四纪初以来长江河谷强烈下切形成陡峻岸坡,岸坡岩体卸荷作用强烈,卸荷带宽度8~10 m,卸荷带内岩体处于显著受拉应力状态。

3) 该地区处于渝东万州—云阳—开县暴雨中心,多年平均降雨量1181 mm,最大可及1635 mm,20 min降雨强度超过15 mm的强降雨每年出现20~50次。

### 2.2 危岩稳定性计算

#### 1) 荷载类型及其组合

作用在危岩体上的荷载包括自重、裂隙水压力和地震力,根据出现频率,构成三种荷载组合<sup>[22]</sup>。

组合一:自重+裂隙水压力(天然状态);

组合二:自重+裂隙水压力(暴雨期间);

组合三:自重+裂隙水压力(天然状态)+水平地震力。

近3年来的研究发现,群发性特征显著的危岩防治工程,尤其在考虑三峡水库蓄水运行期间的地质动力效应时,上述三种荷载组合需要做一定调整,即

①对于滑塌式危岩、倾倒式危岩及群发性坠落式危岩顶部危岩块,设计工况为“自重+裂隙水压力(暴雨状态)+地震力”;

②对于群发性坠落式危岩顶部危岩块以外的所有危岩块,由于主控结构面自底端向上逐渐断裂扩展,难于储水,因此组合二不易出现,则设计工况调整为“自重+地震力”。并且,同时考虑水平地震力和竖向地震力两种情况,取使危岩稳定系数较小的水平地震力或竖向地震力作为危岩防治工程的设计工况。

#### 2) 稳定性计算方法

基于危岩体极限平衡理论,建立危岩稳定性计算方法,确定不同荷载组合下危岩体所处的稳定性态。

对于滑塌式危岩和坠落式危岩,由于水平地震力和竖向地震力不可能同时出现,危岩体仅在水平地震力和竖向地震力作用时,稳定系数分别由式(1)、(2)计算。

$$F_s = \frac{cH}{W} + \frac{[0.5 \sin 2\beta - k_0 \sin^2 \beta] \tan \varphi - \frac{Q}{W} \sin \beta \tan \varphi}{\sin^2 \beta + 0.5k_0 \sin 2\beta}; \quad (1)$$

$$F_s = \frac{cH}{W} + \frac{0.5(1+k_v) \sin 2\beta \tan \varphi - \frac{Q}{W} \sin \beta \tan \varphi}{(1+k_v) \sin^2 \beta}. \quad (2)$$

对于倾倒式危岩,危岩体重心在倾覆点内侧和外侧时,稳定系数分别由式(3)、(4)计算。

$$F_s = \frac{M_{\text{抗倾}}}{M_{\text{倾覆}}} = \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{ok}}{k_v Wh_0 + Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)}; \quad (3)$$

$$F_s = \frac{M_{\text{抗倾}}}{M_{\text{倾覆}}} = \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{ok}}{W(a + k_v h_0) + Q \left( \frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)}. \quad (4)$$

式中: $\beta$ 为危岩主控结构面倾角; $c$ 、 $\varphi$ 分别为主控结构面等效粘聚力和等效摩擦角; $W$ 为危岩体自重; $k_0$ 和 $k_v$ 分别为水平地震系数和竖向地震系数; $Q$ 为裂隙水压力,当主控结构面露出地表且在暴雨期间时, $Q = \frac{\gamma_w e_1^2}{2 \sin \beta}$ , $e_1$ 为主控结构面充水深度<sup>[23]</sup>; $f_{lk}$

为危岩体抗拉强度标准值; $f_{ok}$ 为危岩体与基座之间

的抗拉强度标准值,当基座为岩体时,  $f_{ok} = f_{lk}$ , 当基座为软质岩层如泥岩时,取该软质岩石的抗拉强度标准值; $a$  为危岩体重心至倾覆点的水平距离; $l_b$  为危岩体底部主控结构面尖端至倾覆点的距离; $e$  为危岩主控结构面贯通段高度; $h_0$  为危岩体重心至倾覆点的垂直距离。

### 3) 稳定性评价

通过对太白岩 127 个危岩体在不同组合下的稳定性系数,考虑到太白岩危岩防治工程安全等级为一级<sup>[23]</sup>,有 121 个危岩体需要进行工程治理,其余 6 个危岩体不需工程治理。

## 3 危岩群发性机理

多级陡崖及软硬相间的岩性组合是太白岩危岩群发性机理的基本条件,其中砂岩底部泥岩内的岩腔是危岩群发性机理的起搏器,直接控制着陡崖底部第一块危岩的形成过程(见图 4)。太白岩危岩群发性机理可以浓缩为 5 个阶段,即河流下切阶段(阶段 1)、差异风化阶段(阶段 2)、危岩体形成阶段(阶段 3)、单一危岩体崩落阶段(阶段 4)和多个危岩块形成及崩落阶段(阶段 5)(见图 5)。陡崖坡脚岩腔形成以后,把岩

腔顶部危岩体逐渐形成、崩落的过程定义为危岩发育的微观链,而从陡崖或陡坡向其后方山体的阶段性后退过程定义为危岩发育的宏观链,如  $A \rightarrow B \rightarrow C \dots$ 。微观链中,每一个危岩块体均经历主控结构面形成与断裂扩展、临界失稳状态(见图 6)、断裂破坏状态(见图 7)和崩落阶段(见图 8),该阶段危岩体的稳定性可由前述方法进行计算判别,陈洪凯等初步探讨了每个危岩块的形成时间<sup>[11]</sup>。

将危岩发育宏观链和微观链组合即为危岩群发性机理,可分为简单模式(见图 9)和复合嵌套模式(见图 10)。简单模式是指在陡崖坡高度小于 20 m 时,在岩腔形成以后,仅表现为一个宏观链(如 A),该宏观链内的微观链逐渐发育,直到所有微观链结束后进入下一个宏观链;而当陡崖高度超过 20 m 时,危岩群发性机理便体现为复合嵌套模式,即表现为 2 个以上的宏观链同时发育,陡崖高度越大,同时发育的宏观链数量越多。从发生在南川甄子崖和江津四面山的大型危岩崩落事件发现,宏观链的最后一个微观链失稳均具有突发性,其原因可能与该危岩块体相比较其下部的危岩块体尚受到裂隙水压力的共同作用有关。

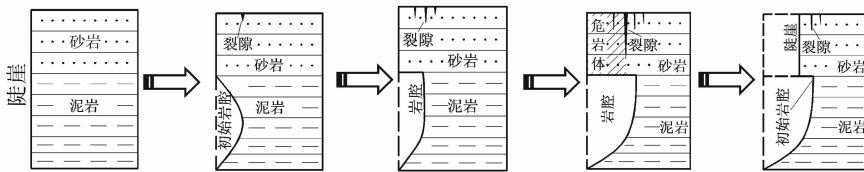


图 4 岩腔形成与危岩体孕育过程

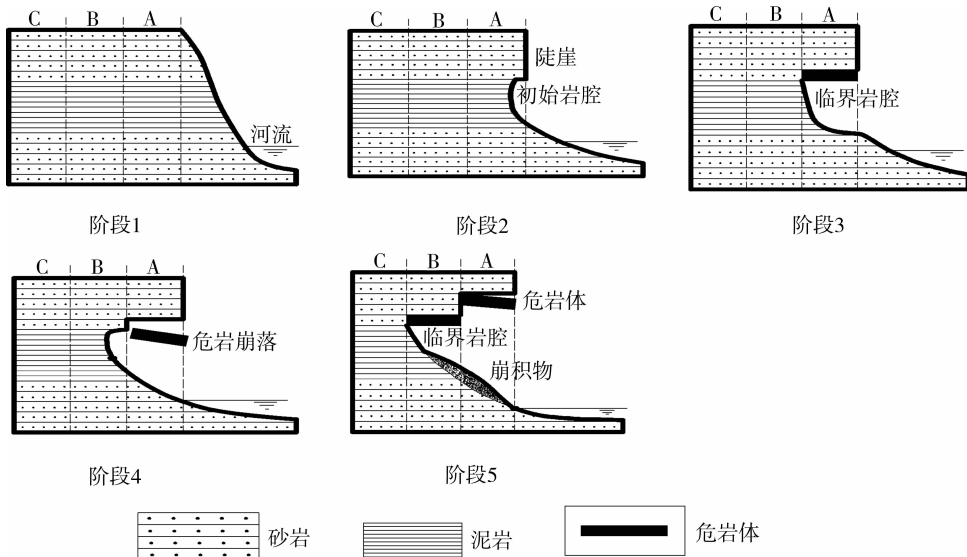


图 5 太白岩危岩群发性机理



图6 处于临界失稳状态的危岩体



图7 处于破坏状态的危岩体



图8 危岩崩落瞬间

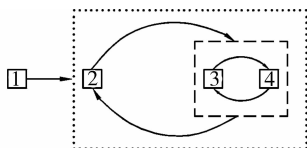


图9 危岩群发性机理简单模式

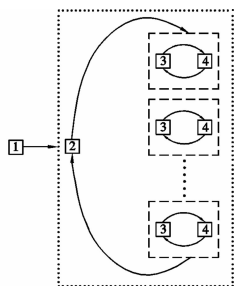


图10 危岩群发性机理复合嵌套模式

## 4 群发性危岩防治技术

《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)提出了锚固、支撑、灌浆封闭、充填、排水、清除等危岩灾害治理技术,这些技术主要针对危岩单体,而对防治群发性危岩灾害的针对性不强。研究表明,群发性危岩的治理应遵循危岩发育的群发性机理,对关键危岩体或集团式组合的危岩体实施工程治理。2003年来,陈洪凯等研究开发了危岩支撑—锚固联合治理技术(见图11、12)和锚钉—锚杆(索)联合治理技术(见图13)两类核心技术<sup>[21]</sup>,前者主要适用于规模大、具有坠落和倾覆破坏模式、群发性危岩的关键危岩体,后者主要适用于群发性危岩中关键危岩体难于辨别、规模较小、破坏模式多样且具有过渡性,通过大量锚钉将集团式危岩体组合为一个整体危岩板,据此用锚杆或锚索将危岩板锚固到陡崖上稳定的围岩体内。此外,拦石墙(见图14)和拦石网也是防治个体方量较小的群发性危岩崩落致灾的有效措施。

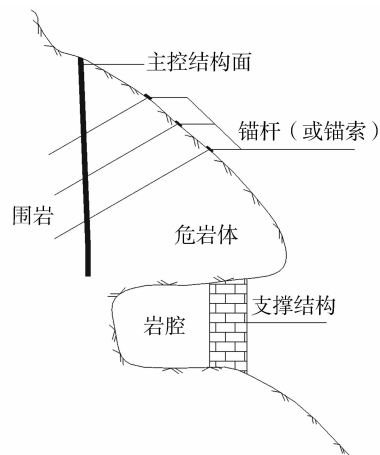


图11 危岩支撑—锚固联合治理技术



图12 竣工后的危岩支撑—锚固联合治理

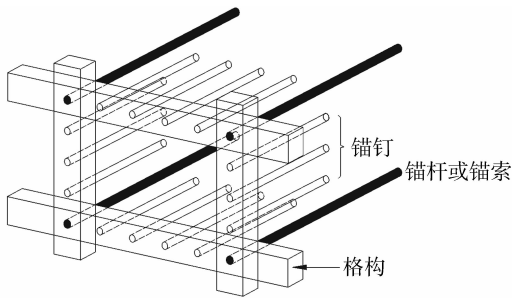


图 13 危岩锚钉-锚杆(索)联合治理技术



图 14 太白岩中段危岩拦石墙

## 5 结 论

1) 危岩是三峡库区主要地质灾害类型之一, 万州太白岩是三峡库区群发性危岩的典型案例, 初步查明的 127 个危岩体坐落在 2~3 级陡崖上, 其失稳形式主要体现为坠落及坠落-倾倒复合型。软硬相间的泥岩和砂岩交互成层组合、陡峻的地形及高强度的降雨是危岩形成的主要环境条件, 砂岩底部泥岩内的岩腔是危岩群发性机理的起搏器, 直接控制着陡崖底部第一块危岩的形成过程。

2) 对于滑塌式危岩、倾倒式危岩及群发性坠落式危岩顶部危岩块, 设计工况为“自重+裂隙水压力(暴雨状态)+地震力”, 对于群发性坠落式危岩顶部危岩块以外的所有危岩块, 设计工况为“自重+地震力”。其中, 地震力需同时考虑水平地震力和竖向地震力 2 种情况, 取使危岩稳定系数较小的水平地震力或竖向地震力作为危岩防治工程的设计工况。基于极限平衡理论, 建立了危岩稳定性分析方法。

3) 揭示了危岩群发性机理演绎过程, 包括从陡崖底部逐渐向崖顶演化的微观链和从临空面向山体内部演化的宏观链, 一个宏观链中位于崖顶的微观链即危岩块要受到裂隙水压力的作用, 因此, 其破坏过程较之于下部危岩块所需时间更短。

4) 基于危岩群发性机理, 提出了危岩支撑-锚固联合治理技术和锚钉-锚杆(索)联合治理技术两类

核心技术, 同时, 为了避免群发性危岩漏勘现象, 建议在局部地段采用拦石墙、拦石网予以防治。

### 参考文献:

- [1] 陈洪凯, 唐红梅, 叶四桥, 等. 危岩防治原理[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [2] RICHARD J C, STANLEY A S, David E S. Geomorphology [M]. Cambridge: University Press of Cambridge, 1984.
- [3] JONES B L, CHINN S S W, Brice J C. Ololele rock avalanche, island of Kauai, Hawaii [J]. Geology, 1984, 12(4):209-211.
- [4] RRGINALD L, HERMANNNS, MANFRED R, STRECKER. Structural and lithological controls on large quaternary rock avalanche (sturzstroms) in arid northwestern argentina [J]. GSA Bulletin, 1999, 111(6):934-948.
- [5] BERTRAN P. The rock-avalanche of February 1995 at Claix ( French Alps) [J]. Geomorphology, 2003, 54(3):339-346.
- [6] HUNGR O, EVANS S G, HAZZARD J. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2):224-238.
- [7] HUNGR O, EVANS S G. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. Felsbau, 2004, 22(2): 16-23.
- [8] BRAATHEN A, BLIKRA L H, KARLSEN S S. Rock-slope failure in Norway: type, geometry, deformation mechanisms and stability [J]. Norwegian Journal of Geology, 2004, 84: 67-88.
- [9] CHEN H K, TANG H M, YE S Q. Research on damage model of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27 (7): 967-974.
- [10] CHEN H K, TANG H M. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics. 2007, 28(5): 643-649.
- [11] CHEN H K, TANG H M. Research on duration for perilous rock to form [J]. Weas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2006, (12): 169-173.
- [12] 陈洪凯, 唐红梅, 刘光华, 等. 危岩锚固-支撑联合计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3):383-388. CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI, LIU G H, et al. Research on calculation method of support-anchorage union to unstable rock [J]. Chinese Journal

- of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 383-388.
- [13] CHEN H K, TANG H M. Chained mechanism and moving routine for perilous rock to avalanche in the area of the Three Gorges Reservoir of China[J]. The Proceedings of the China Association for Sciencf and Technology, 2006, 3(1): 501-506.
- [14] 唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(6): 115-119.  
TANG HONG-MEI. Testing research on development of perilous rock in tension-shear fracture [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(6): 115-119.
- [15] 陈洪凯, 唐红梅, 胡明, 等. 危岩锚固计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1121-1327.  
CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI, HU MING, et al. Research on anchorage calculation method for unstable, rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1121-1327.
- [16] 唐红梅, 叶四桥, 陈洪凯. 危岩主控结构面应力强度因子求解分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 393-397.  
TANG HONG-MEI, YE SI-QIAO, CHEN HONG-KAI. Analysis on solution of stress strength factor of control fissure in unstable rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 393-397.
- [17] 陈洪凯, 唐红梅. 长江三峡水库区危岩分类及宏观判据研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 53-57.  
CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI. Classification and identify of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 53-57.
- [18] 唐红梅. 危岩拦石墙计算方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 12-15.  
TANG HONG-MEI. Research on calculation method for block-rock wall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 12-15.
- [19] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区危岩发育规律研究[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 837-842.
- [20] 陈洪凯, 胡明, 唐红梅. 危岩锚固机理的断裂力学分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 101-105.  
CHEN HONG-KAI, HU MING, TANG HONG-MEI. Fracture mechanism analysis of control fissure of bolted perilous rock [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 101-105.
- [21] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡水库区危岩防治技术[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 105-110.  
CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI. Research on control techniques to unstable dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area [J]. The Chinese Journal of Gedogical Hazarol and Control, 2005, 16(2): 105-110.
- [22] 陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报, 2007, 16(1): 37-41.  
CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI. Method for calculation strength parameters of structural planes controlling the rock block stability [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 16(1): 37-41.

(编辑 侯湘)

(上接第 1177 页)

- [9] 刘牡丹, 李光辉, 董海刚, 等. 中国碳酸锶工业生产现状与进展[J]. 无机盐工业, 2006, 38(1): 9-12.  
LIU MU-DAN, LI GUANG-HUI, DONG HAI-GANG et al. Progress and present status of strontium carbonate industry in China [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2006, 38(1): 9-12.
- [10] 夏士朋, 林万祝. 低品位天青石矿直接制取碳酸锶的新方法[J]. 四川化工与腐蚀控制, 1999(2): 23-25.  
XIA SHI-PENG, LIN WAN-ZHU. A new method of extracting strontium carbonate from lower content celestite [J]. Sichuan Chemical Industry, 1999(2): 23-25.
- [11] 石惠民, 张琳, 唐培坚, 等. 一种回收氯化锶和硝酸锶的方法: 中国, 92111993.3 [P]. 1993-07-21.
- [12] FAIRBRIDGE C, NG S H, PALMER A D. Fractal analysis of gas adsorption on Syncrude coke[J]. Fuel, 1986, 65(12): 1759.
- [13] FARIN D, AVNIR D. Reaction fractal surface[J]. J Phys Chem, 1987, 91: 5517.
- [14] 曲歌. 锶尾矿对环境的影响及回收锶盐研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [15] XU L J, ZHOU Z G, LIU C L, et al. Fractal-like adsorption kinetics of  $Pb^{2+}$  in rocks [J]. Chin J Geochem, 2008, 27(2): 126-129.

(编辑 陈移峰)