

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.03.030

# 柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟

郝宪杰<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1,2</sup>, 李邵军<sup>1</sup>, 江 权<sup>1</sup>, 段淑倩<sup>1</sup>, 李帅军<sup>1</sup>, 姚志斌<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 辽宁 110004)

**摘 要:** 柱状节理岩体由于其内部赋存大量的隐节理面, 开挖卸荷后极易出现隐节理面开裂松弛等特征, 导致其破坏模式异于一般岩体。其破坏模式主要受到异常发育的节理面和较高地应力的共同作用影响。由于柱状节理岩体节理面发育, 岩体结构控制型破坏占主要部分, 包括单临空面节理面滑移(塌方)、多临空面节理面滑移(塌方)与错动带、断层等弱面相组合的坍塌等破坏模式; 应力控制型破坏主要为河谷侧顶拱喷层开裂; 应力-结构面型破坏主要为岩性交界处的节理岩体塌落等。柱状节理岩体表层主要发生柱内竖直隐节理面和柱间节理面的拉破坏, 而围岩内部的柱状节理主要发生柱间节理面的剪切破坏。因此, 现场柱状节理的支护也应主要包括两个方面: 以喷射混凝土钢纤维来阻止柱状节理岩体表层的张性开裂, 以系统锚杆来控制柱状节理岩体内部的剪切破坏。

**关 键 词:** 柱状节理岩体; 隐节理; 破坏模式; 支护对策

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 03 - 837 - 10

## Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation

HAO Xian-jie<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1,2</sup>, LI Shao-jun<sup>1</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>, DUAN Shu-qian<sup>1</sup>, LI Shuai-jun<sup>1</sup>, YAO Zhi-bin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract:** There are many hidden joint planes in columnar jointed rock mass. The failure mode of columnar jointed rock mass is different from that of ordinary rock mass due to the crack of hidden joint plane. Its failure mode is mainly influenced by the extremely developed joint and high geostress. Because of the extremely developed joint in columnar jointed rock mass, the failure mode controlled by rock mass structure is the main part of damage mode, which includes joints plane slip (collapse) under single free face, joint plane slip (collapse) under multiple free faces, joint collapse combined with dislocation interface and fault, etc. The failure mode controlled by geostress is the second part of damage mode, which includes concrete layer cracking at crown of valley side. The failure mode controlled by the combination of geostress and rock mass structure is the third part of damage mode, which includes jointed rock mass caving at the lithologic boundary, etc. The failure mode at the surface of columnar jointed rock mass is tension cracking of the joint between columns and joint inside the column. Shear cracking of the joint between columns mainly happens in the surrounding rock. So the corresponding support of columnar jointed rock mass should mainly include two aspects: the shotcrete with steel fiber is mainly to prevent the tensile cracking at the surface of columnar jointed rock mass, and the anchor system is mainly to control the shear failure inside the columnar jointed rock mass.

**Keywords:** columnar jointed rock mass; hidden joint; failure mode; support countermeasures

## 1 引 言

水电作为可再生的清洁能源, 在我国能源发展史中占有极其重要的地位, 进入 21 世纪, 国家从能源的可持续供应、西部大开发等方面考虑, 确定了优先开发水电的方针, 我国水电进入加速发展时期。

目前, 我国的水电工程建设主要集中在西南高山峡谷地区, 在该地区二叠系上统峨眉山玄武岩分布范围较广, 柱状节理作为玄武岩的特殊岩体结构也大量揭露, 如金沙江白鹤滩水电站、溪洛渡水电站、以及大渡河铜街子水电站等都有揭露柱状节理(见图 1), 其中以白鹤滩水电站的柱状节理最为典型。

收稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.11232014); 国家自然科学基金项目(No.41372315)

第一作者简介: 郝宪杰, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事智能岩石力学的研究工作。E-mail: xianjie.hao.irmsm@gmail.com



图1 导流洞内柱状节理分布

Fig.1 Columnar jointed rock mass distribution in diversion tunnel

目前针对柱状节理岩石力学性质的研究主要集中在力学模型、各向异性、强度评价、尺寸效应等方面<sup>[1-2]</sup>。如徐卫亚及其团队<sup>[3-6]</sup>基于柱状节理岩体的基本特征建立了物理概化模型,通过大尺度数值模型估算了不同尺度下柱状节理的等效变形参数和等效强度参数,得出了其表征单元体(REV)尺度,并分析了其各向异性特征。石安池等<sup>[7]</sup>通过现场测试对柱状节理的各向异性、强度评价等方面进行了研究。朱道建等<sup>[8]</sup>采用有限元实现了柱状节理本构模型,对柱状节理的尺寸效应、压缩破坏过程进行了研究。此外,刘海宁<sup>[9]</sup>、刘顺桂<sup>[10]</sup>等对柱状节理真三轴试验、尺寸效应方面,张春芳等<sup>[11]</sup>对岩体质量评价方面也进行了研究。这些工作的开展对于深入了解柱状节理的力学特性具有非常大的帮助,但是也应看到,由于当时像导流洞这样大尺寸的地下工程中的柱状节理岩体并未完全揭露,节理岩体开挖后卸荷破坏未得到充分暴露,因此,尚未有人对其破坏模式进行总结。

根据变形监测及声波测试资料综合判断,柱状节理围岩变形与松弛圈深度普遍显著大于同类埋深和规模的地下隧洞,这些都表明柱状节理岩体有其自身破坏特征。根据大量现场调查研究,柱状节理内部节理裂隙异常发育,以一类柱状节理为例<sup>[7]</sup>,其内部隐含大量的隐节理面,未开挖时这些隐节理面相互镶嵌,可以使得柱状节理保持较高的强度,但在开挖卸荷作用下,这些隐节理面极易出现松弛和开裂,形成破裂结构(见图2),如果对其不重视,极有可能成为威胁水电站正常运营的巨大隐患。

不仅如此,白鹤滩水电站岩体地质结构复杂,除了异常发育的柱状节理外,还存在错动带、断层等不利结构面,另外该地区地应力整体相对较高,测点最大应力达到30 MPa,岩体自身复杂的地质结

构与较高地应力相结合,使得隧洞围岩在开挖过程中表现出复杂多变的破坏现象。

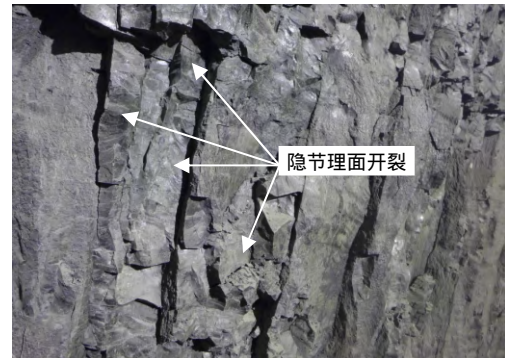


图2 隧洞内柱状节理隐节理面开裂

Fig.2 Cracking of columnar jointed rock in tunnel

目前白鹤滩水电站调压井仍在开挖,其围岩中出露了大量的一类和二类柱状节理,若能总结柱状节理在隧洞开挖中出现的破坏模式,分析出其破坏机制,就能有针对性地预估调压井中柱状节理岩体可能出现的破坏模式、破坏程度,并能选择合理的支护结构对其破坏进行控制,保证调压井的安全开挖。因此,对于地下隧洞内柱状节理破坏机制的研究具有十分重要的意义和应用价值。

为认识柱状节理玄武岩的破坏模式的特点,本文以某大型水电导流洞内柱状节理玄武岩为研究对象,首先在大量的现场调查统计和实测数据分析的基础上阐述了柱状节理特殊的几何结构和松弛特性,而后根据其破坏模式的主导因素将柱状节理破坏模式分成3种类型进行讨论,进而结合数值模拟分析柱状节理破坏形式和影响因素,最后提出对柱状节理岩体相应的支护措施。

## 2 柱状节理导流洞工程简介

### 2.1 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内,属中山峡谷地貌,河谷呈一典型不对称的“V”字型河谷。电站以发电为主,兼顾防洪,并有拦沙、发展库区航运和改善下游通航条件等综合利用效益。电站坝高约289 m,总库容为 $205 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,共安装16台单机 $10^6 \text{ kW}$ 水轮发电机组(左、右岸各8台),将是继长江三峡和溪洛渡之后又一座千万千瓦级巨型水电工程。

### 2.2 地质条件

白鹤滩水电站工程施工导流采用断流围堰、隧洞导流方式,导流方案采用5条导流隧洞,左、右岸分别布置3条、2条,由左向右依次编号1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、

3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>（如图 3 所示）。导流洞均为城门洞型，洞身断面尺寸为 19 m×24 m（宽×高）。

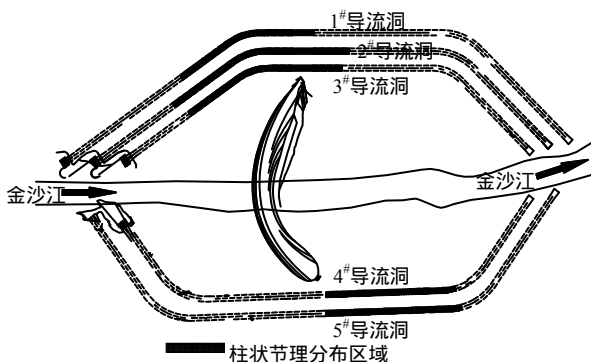


图 3 导流洞及导流洞内柱状节理分布示意图  
Fig.3 Distribution of diversion tunnel and columnar jointed rock mass

工程区主要出露岩层为二叠系上统峨眉山组玄武岩(P2β)，其中，隧洞洞身穿过地层为 P2β<sub>2</sub><sup>2</sup>、P2β<sub>2</sub><sup>3</sup>、P2β<sub>3</sub>、P2β<sub>4</sub>、P2β<sub>5</sub> 岩流层，P2β<sub>3</sub><sup>2</sup> 层主要为二类柱状节理玄武岩，P2β<sub>3</sub><sup>3</sup> 层主要为一类柱状节理玄武岩。

根据地应力测试成果，导流洞深埋段最大主应力值为 19.4~28.0 MPa，方向为 166°~194°，近水平。导流洞深埋部位属于中等~高应力区。

左、右岸导流洞于 2012 年 4 月 15 日正式开工，到 2013 年 6 月基本完成开挖，在此过程中对开挖揭露的柱状节理岩体进行了大量的几何结构形态、破坏模式的调查统计，为研究柱状节理特殊的几何结构、破坏模式等奠定了坚实的基础。

### 2.3 柱状节理的几何结构特性

柱状节理是喷出的未出露于地表的岩浆冷凝后形成的柱状结晶。在熔岩冷凝收缩过程中会形成若干规则而均匀的收缩中心，两个相邻冷缩中心联线的方向上产生张应力，冷凝面上各向相等的张应力节理是通过两组彼此成 120° 交角的无数规则分布的张节理的形成来实现的，因此，形成了横断面多为六边形的柱状节理，但由于熔岩物质的不均一性等因素的影响，也形成了一些四方柱、五方柱、七方柱等<sup>[12]</sup>。

文献[3 - 11]对柱状节理的研究多认为柱状节理面仅由柱间节理面构成。然而根据笔者的现场研究，六边形的柱状节理柱体单边长约为 12 cm，柱体高度为 2~3 m，柱体之间夹角平均约为 120°，柱体自身的倾角从 75°到 85°不等；而现场垮落的柱体边长为 1.5~7.5 cm，极少数有 10 cm 以上，垮落柱体的长度为 8~25 cm；即垮落后的柱体尺寸要远小于

完整柱体。这是由于柱状节理除了由构成其六边形特征的柱间节理面外，在柱体内部也同样存在着软弱结构面，笔者称其为柱内隐节理面。

进一步研究表明，柱状节理内部存在 3 种节理面，分别为柱间节理面、柱内陡倾角隐节理面、柱内近水平隐节理面，3 种节理面分别具有不同的尺寸分布，柱间节理面为岩浆岩的主冷却面，表面呈颗粒状（如图 4(a)所示），柱体单边长约为 12 cm，柱体高度为 2~3 m；柱内陡倾角隐节理面具有波浪起伏的特征，一般长约数十厘米，陡坎间距约为 1.5~7.5 cm，极少数有 10 cm 以上，陡坎成羽毛状分布，因此，又叫羽毛状结构面（如图 4(b)所示）；而缓倾隐节理面大多为平整面，方向近乎水平，间距较小，长度约 25~100 cm 不等（如图 4(c)所示）。这些结构面相互切割，使得最终的柱体形状呈现四边形、五边形、六边形。柱状节理整体几何特征如图 5 所示。

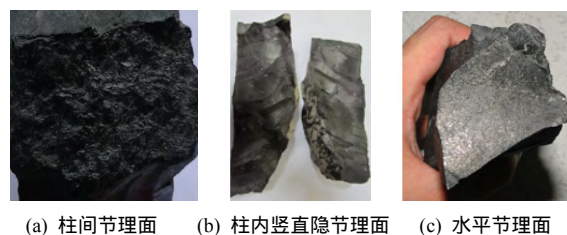


图 4 不同节理面的结构特征  
Fig.4 Characters of different kinds of joint planes

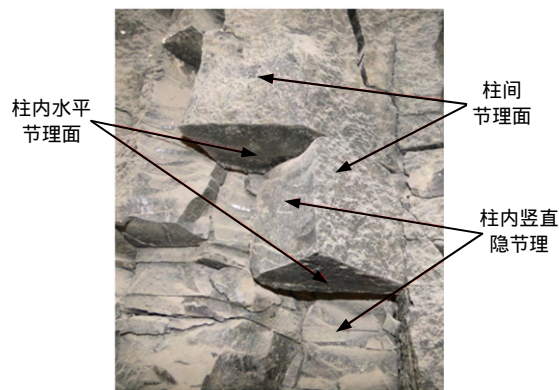


图 5 柱状节理的现场破坏模式  
Fig.5 In-situ failure mode of columnar joints

由于柱状节理内部隐含大量的隐节理面，未开挖时这些隐节理面相互镶嵌，可以使得柱状节理保持较高的强度，但在开挖卸荷作用下，这些隐节理面极易出现松弛和开裂，形成破裂结构（见图 2），使得柱状节理的力学性质迅速降低，严重的还会形成垮塌事件。

### 3 柱状节理岩体破坏模式分类

地下工程围岩的破坏受岩性、岩体结构、地质条件、地应力、洞群结构及开挖等因素的影响,表现为多种破坏模式。例如, Hoek 等<sup>[13]</sup>将地下工程围岩破坏模式总结为块体失稳、破裂、断层滑动、弯曲破坏等类型; Martin 等<sup>[14]</sup>根据地应力水平、岩体强度和结构面发育程度将脆性岩体地下工程围岩的力学响应和潜在破坏模式划分为 9 种类型; Hudson 等<sup>[15]</sup>根据失稳的控制因素将围岩破坏分为结构控制型破坏和应力控制型破坏 2 大类; 李宁等<sup>[16]</sup>针对地下厂房母线洞环向裂缝的成因进行了分析; 李仲奎<sup>[17]</sup>、魏进兵<sup>[18]</sup>、卢波<sup>[19]</sup>、黄润秋<sup>[20]</sup>、侯哲生<sup>[21]</sup>等针对锦屏 I、II 级水电站从不同角度分析了围岩开裂变形机制、破坏模式、处理措施等; 向天兵<sup>[22]</sup>、吴文平<sup>[23]</sup>等针对深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式进行了分类,并针对每种破坏模式都提出了相应的调控策略。

根据上述研究,洞室群的破坏模式基本可分为 3 类,即岩体结构控制型破坏、应力控制型破坏、应力-岩体结构控制型破坏。对于柱状节理岩体来说,由于其隐节理面发育,岩体结构控制型破坏占主要部分,但同时由于白鹤滩水电站地应力相对较高,也存在部分应力控制型破坏和应力-岩体结构控制型破坏,其中岩体结构控制型破坏包括单临空面节理面滑移(塌方)、多临空面节理面滑移(塌方)与错动带、断层等弱面相组合的坍塌;应力控制型破坏主要是河谷侧顶拱层开裂,应力-岩体结构面控制型破坏为岩性交界处的节理岩体垮落等。

#### 3.1 岩体结构控制型破坏

##### 3.1.1 单临空面节理面滑移(塌方)

如图 6 所示,在 4<sup>#</sup>导流洞 K0+850~K0+900 位置,柱状节理岩体发生了沿节理面的滑移,整个过程呈现渐进破坏特征,最终的破坏深度约为 0.2~0.4 m。

沿节理面滑移是柱状节理岩体最常见的破坏模式之一,如前所述,在柱状节理岩体内存在着多组节理面,多方向的节理面相互切割导致柱状节理岩体异常破碎,尤其是柱内隐节理面的存在,洞壁围岩因开挖卸荷而产生法向拉张型作用力,隐节理面发生张开,最终于柱间节理面贯通,节理面互相切割形成小柱体,并从母岩中滑移。如果滑移的范围较大,往往会形成塌方。

以右岸 5<sup>#</sup>导流洞 K1+120~K1+195 柱状节理岩体段右侧边墙为例,该段在中层开挖后存在锚杆钻孔困难、喷层开裂,以及柱状节理岩体松弛掉块显

著等问题(如图 7 所示),掉块部位长度约为 5~8 m,深度约为 0.4~0.7 m。由于该次垮塌范围较大,大面积垮落以至于该段无法进行正常开挖,被迫留台阶以备后续开挖。



图 6 柱状节理岩体沿节理面滑移  
Fig.6 Joint slip of columnar jointed rock mass

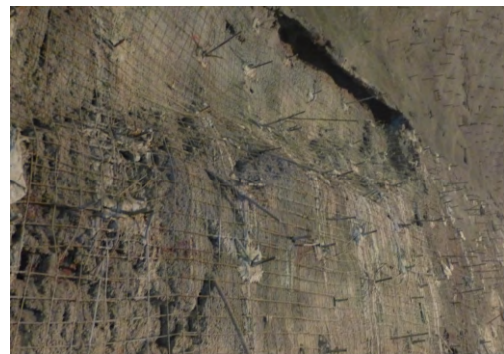


图 7 柱状节理面塌方  
Fig.7 Joint plane collapse of columnar jointed rock mass

##### 3.1.2 多临空面节理面滑移(塌方)

如图 8 所示,在 4<sup>#</sup>导流洞 K1+019 位置,与 2-1<sup>#</sup>施工支洞交叉位置,发生了节理面的滑移,并且伴随着喷层开裂,破坏较之单临空面节理面滑移更为严重,这是由于临空面较多时,不仅会发生应力集中,并且多向开挖导致围岩缺乏约束,节理面更容易松弛张开向临空面塌落。

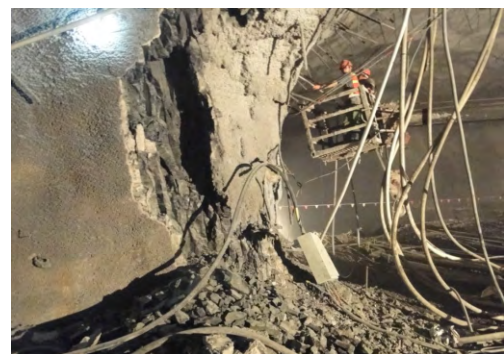


图 8 右岸 4<sup>#</sup>导流洞与 2-1<sup>#</sup>施工支洞交叉位置卸荷松弛破坏  
Fig.8 Joint slip at the cross location of diversion tunnel No.4 and construction adit No.2-1

### 3.1.3 与错动带、断层等弱面组合的滑移（塌方）

由于错动带、断层分布广泛，尺寸较大，因此，当柱状节理遭遇错动带、断层时，所发生的破坏较之单纯的柱状节理岩体破坏更要剧烈。这种破坏主要取决于错动带与柱状节理岩体、开挖临空面之间的几何组合关系。当错动带发育于顶拱时，会造成错动带下部的柱状节理岩体坍塌，如图 9 所示。当错动带发育于边墙时，可能会造成柱状节理岩体沿着错动带滑移的破坏模式。总之，柱状节理岩体由于自身节理发育，开挖卸荷后本就易垮落，如果再与错动带相遇，那么发生破坏的概率大大增加，这些部位一般都是工程中需要重点关注的部位。



图 9 导流洞内柱状节理与错动带组合破坏模式

Fig.9 Joint collapse combined with columnar joints and dislocation interfaces in diversion tunnel

### 3.2 应力控制型破坏

图 10 为 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>导流洞的拱肩混凝土喷层开裂现象，事实上白鹤滩水电站每个导流洞在拱肩或者顶拱处都会出现混凝土喷层开裂或者掉块的现象，而且均发生在靠近河谷一侧。相似的破坏在其他水电站中也有发现。与其他水电站不同的是，白鹤滩水电站导流洞的片帮破坏均是出现在混凝土上，而顶拱柱状节理岩体一般极少发生片帮。

这与河谷地应力的特征密切相关。河谷地应力由于受卸荷特征影响，其方向一般指向河谷侧。从而在相对一侧极易产生压应力集中，则在靠近河谷侧拱肩处的混凝土容易发生开裂、掉落等破坏特征。

但对于顶拱柱状节理岩体，由于玄武岩抗压强度较大，一般较难发生柱状岩体被切裂。相反，由于压应力的存在，导致顶拱柱状节理镶嵌更加紧密，柱状节理岩体不容易垮落。

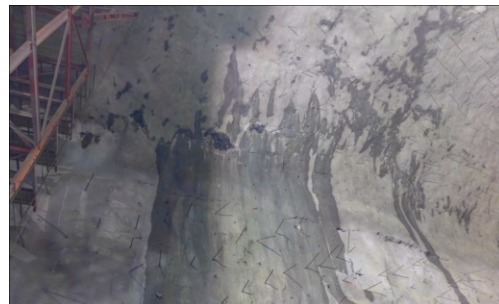
### 3.3 应力-结构控制型破坏

上述各种破坏模式要么以应力为主导，要么以结构面为主导，还存在另一种破坏模式，是同时受结构面和应力的影响，具体到柱状节理岩体中，最主要的表现模式就是岩性交界处的节理岩体垮落。

在岩性交界处，极易出现应力集中，加之节理面异常发育，在共同作用下，岩体经常容易发生垮塌。如在 2013 年 6 月 4 日早上，在右岸 4<sup>#</sup>洞进场交通洞 K2+613 ~ K2+633 处，河谷一侧拱肩位置发生顶拱岩体片帮和柱状节理岩体滑塌（见图 11），并且上方岩体不断掉落，伴随着较大声响，落石砸坏了台车架。



(a) 2<sup>#</sup>导流洞右侧拱肩喷层开裂（桩号 K0+470 ~ K0+490）



(b) 4<sup>#</sup>导流洞左侧拱肩喷层开裂（桩号 K1+230 ~ K1+250）



(c) 5<sup>#</sup>导流洞左侧拱肩喷层开裂（桩号 K1+210 ~ K1+230）

图 10 导流洞内柱状节理岩体拱肩喷层开裂

Fig.10 Concrete crack at the arch of diversion tunnel

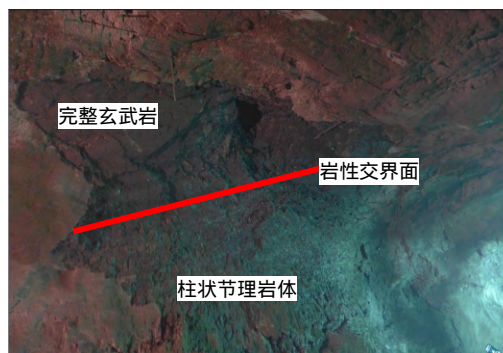


图 11 岩性交界面处片帮和柱状节理岩体滑塌

Fig.11 Joint collapse and spall at the lithologic boundary

从当前围岩面可看出，垮塌突出部位顶拱为较完整玄武岩，而边墙为 I 类柱状节理玄武岩，故该部位应为一岩性分界面，现场多处可见，该交叉洞口段岩体顶拱出现较明显的应力结构型岩石片帮破坏，表明顶拱应力相对较大。而柱状节理的大面积滑塌则说明破坏同时受节理面的控制。

### 3.4 柱状节理破坏模式总结

综上所述，柱状节理岩体可能的破坏模式包括岩体结构控制型破坏、应力控制型破坏、应力-岩体结构控制型破坏，其典型的破坏模式如图 12 所示。这几种破坏模式是基于破坏机制而得出的，但也正好针对不同部位的破坏。在总结这些破坏模式的基础上，现场往往可以有针对性的对这些部位进行加强支护，并且根据机制的不同，选择了不同的加强支护方式，这也是本文的意义所在，下面章节将分别阐述这些破坏模式的影响因素和对应支护对策。

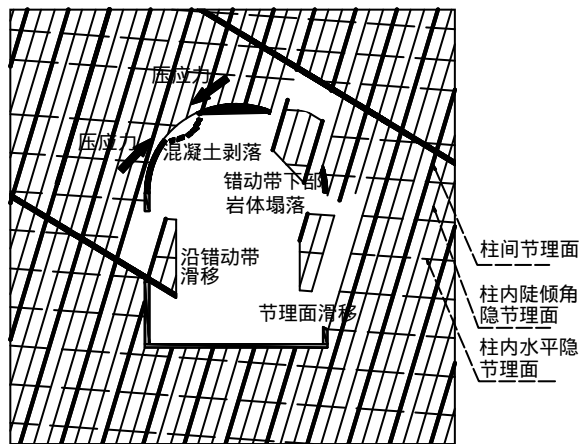


图 12 导流洞内柱状节理典型破坏模式示意图  
Fig.12 Typical failure modes of columnar jointed rock mass in the diversion tunnel

## 4 柱状节理破坏模式的影响因素

在柱状节理中，赋存多个弱节理面，如柱间节理面、柱内竖直隐节理面、柱内水平隐节理面等，且各组节理面产状、力学性质均不相同，因此，笔者建立了考虑多组节理面的柱状节理本构模型。

在上述模型中，为了区分是由哪类节理面引起哪种破坏，对每一种破坏模式都采取不同的标示符，如 Column-am: shear 表示柱间节理面剪切破坏；Column-am: tension 表示柱间节理面拉伸破坏；Column-in: shear 表示柱内隐节理面剪切破坏；Column-in: tension 表示柱内隐节理面拉伸破坏，其对应的颜色如图 13 所示，从而可以根据单元格的状态来判断是哪组节理面发生了何种破坏。

从图 13 可以看出，从塑性区的分布来看，主要是以边墙和拱顶的破坏为主，其中拱顶主要发生

剪切破坏，而且集中在河谷一侧，该破坏模式与现场应力型破坏模式相对应。

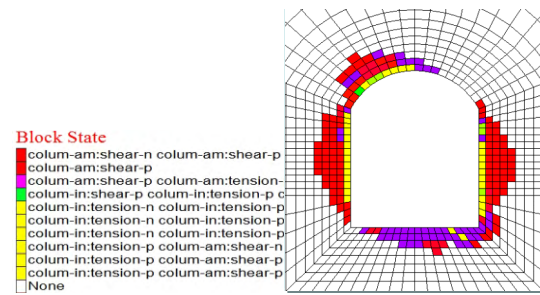


图 13 典型的柱状节理岩体塑性区分布图  
Fig.13 Typical distribution map of plastic zone of columnar jointed rock mass

对于边墙，围岩表层的柱状节理主要发生柱内竖直隐节理面和柱间节理面的拉破坏，而围岩内部的柱状节理主要发生柱间节理面的剪切破坏，其中，柱间节理面的剪切破坏和柱内竖直隐节理面的拉伸破坏占主要部分，柱间节理面的拉伸破坏次之，而柱内竖直隐节理面的剪切破坏极少。

### 4.1 地应力方向

地应力方向对围岩应力、塑性区分布有重要的影响，最大主应力方向的卸荷回弹应力较大，则最大主应力方向上的变形量值较大。同时，最小主应力方向上容易产生压应力集中，由于玄武岩抗压强度较大，一般较难发生柱状岩体被切割。相反，由于压应力的存在，导致柱状节理镶嵌更加紧密，柱状节理岩体不容易掉落。而混凝土强度则相对较低，因此，一般发生混凝土的剥落破坏，如图 10 所示。

白鹤滩水电站地处“V”型河谷区，其地应力明显受到河谷地应力卸荷的影响，两侧导流洞最大主应力方向均倾向河谷。因此，对于左岸导流洞，混凝土剥落主要发生在右侧拱肩位置，如图 14(a)所示。而对于右岸导流洞，混凝土片帮主要发生在左侧拱肩位置，如图 14(b)所示。

### 4.2 节理面倾角

在研究中发现，围岩表层之所以主要发生节理面的拉破坏，而围岩内部则主要发生节理面的剪切破坏，这与节理面角度密切相关。

如图 15 所示，如果柱间节理和柱内陡倾角节理倾角小于 30°，那么主要发生剪切破坏，基本没有拉破坏产生；随着柱间节理和柱内陡倾角隐节理面角度的继续增大，松弛深度逐渐增大，围岩稳定性降低，并且拉伸破坏所占的比例也在不断增大，尤其是当角度为 90°时，松弛深度达到最大值，同时柱间节理和柱内陡倾角隐节理面的拉伸破坏所占的比例也达到最大值。

由于白鹤滩柱间节理、柱内陡倾角隐节理面角度为  $75^\circ \sim 85^\circ$ ，因此，很容易出现沿着柱间节理面、柱内隐节理面的拉伸破坏，这也是围岩表层柱状节理最主要的破坏模式，如图 16 所示。

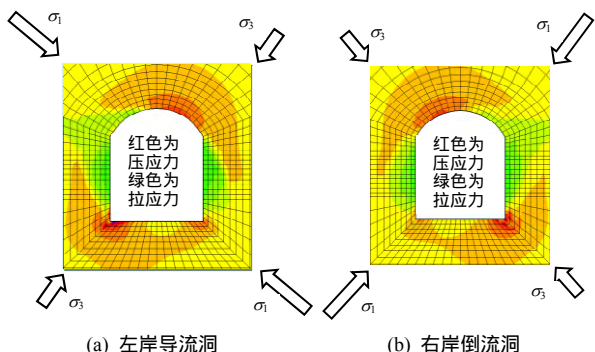


图 14 左、右岸导流洞对应的应力重分布  
Fig.14 Stress redistribution map of the left and right side of division tunnel

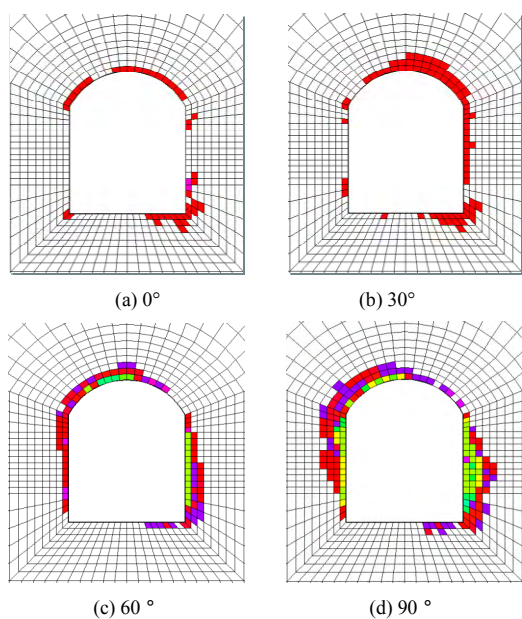


图 15 不同节理面角度对应的塑性区分布图  
Fig.15 Distribution of plastic zone of different joint angles



图 16 典型的柱状节理岩体表层破坏图  
Fig.16 Typical joint slip at the surface of columnar jointed rock mass

### 4.3 节理面表面形态

如图 13 所示，柱内陡倾角隐节理面主要发生拉破坏，而柱间节理面则主要发生剪切破坏，同时伴随着部分拉伸破坏，出现这样的破坏模式与节理面表面形态密切相关。

柱内陡倾角隐节理面具有波浪起伏的特征，并且陡坎间距约  $1.5 \sim 7.5 \text{ cm}$ ，陡坎发育相对较密，如果该节理面要发生剪切破坏，那么需要剪断陡坎；对于柱间节理面，其表面节理虽然也有起伏，但起伏度很小，较容易发生剪切破坏，因此，现场一般更容易发生柱间节理面的剪切破坏。

### 4.4 节理面渐进破坏特征

如果围岩表层的柱状节理发生了塌方，如图 17 所示，那么岩体塑性区范围将会进一步增大，尤其是拉伸破坏的范围增大，部分进入剪切塑性区的岩体也会转化为拉伸破坏，即柱状节理的破坏是层层递进的，最终的破坏模式以拉破坏为主。这也是现场更容易看到柱状节理沿柱间节理面、柱内隐节理面发生拉伸垮落破坏的原因。

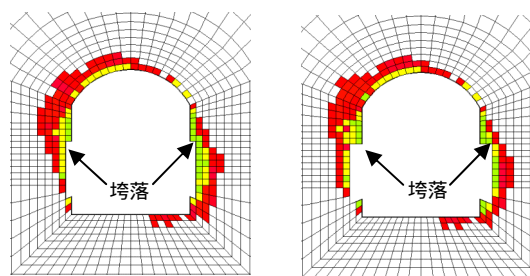


图 17 柱状节理岩体的节理面渐进破坏特征  
Fig.17 Character of progressive failure of joint plane of columnar jointed rock mass

## 5 柱状节理支护对策分析

白鹤滩柱状节理围岩表层主要发生柱内竖直隐节理面和柱间节理面的拉破坏，而围岩内部的柱状节理主要发生柱间节理面的剪切破坏。由于柱状节理内部隐节理面的存在，岩体异常破碎，RQD 值非常低（见图 18），加之其节理角度较大（陡倾），开挖卸荷作用下，当拉应力超过其抗拉强度时，隐节理面就会张开，进而与柱间节理面贯通形成小柱体垮落，因此，应考虑采取措施使得柱状节理岩体本身不高的凝聚力、抗拉强度不丧失或少丧失。及时喷射混凝土支护，尤其是喷射混凝土钢纤维有利于维护开挖卸荷后保持柱状节理岩体的凝聚力。

此外，开挖卸荷后由于隐节理面的张开，相当于此时节理面的粗糙度减小，节理面抗剪性能减弱，

导致柱间节理面更容易发生剪切破坏,因此,采用锚杆来提高其抗剪性能也是非常有必要的。



图 18 柱状节理岩体的钻孔取芯状况

Fig.18 Drilling situation of columnar jointed rock mass

现场柱状节理的支护主要包括两个方面:喷射混凝土钢纤维和锚杆支护。柱状节理岩体开挖后,喷射混凝土层钢纤维一般随之迅速施作,喷射混凝土钢纤维的主要作用是阻止柱状节理岩体表面的张性开裂,尤其是抑制柱间节理面和柱内陡倾角隐节理面的拉伸破坏;同时柱状节理岩体内部的柱间节理面剪切破坏主要依靠锚杆来进行控制。系统的锚杆-喷射混凝土支护两者缺一不可。

如上所述为一般的支护模式,如果已经发生了破坏的部位,则应根据破坏模式的不同,采取不同的支护策略。

如果发生了岩体结构控制破坏,应采用预应力锚杆补强支护。如果柱状节理遭遇错动带、断层时,应采用锚索支护,分析关键块体,锚索应穿过关键块体,通过锚索提供的拉力使得柱状节理岩体不会沿错动带滑动。

如果发生了应力型控制破坏,则应采用复喷混凝土,并且补充随机锚杆的支护对策,严重时则需要挂网,再次复喷混凝土。

## 6 结 论

(1) 在较高应力环境下柱状节理围岩的变形破坏主要受控于节理的发育程度和地应力大小及方位的共同作用。在白鹤滩水电站中出现的松弛深度较大、节理面滑移、混凝土喷层开裂等一系列的变形破坏现象,本质上是由异常发育的节理面和较高地应力形成的不利组合所造成的。

(2) 在国内外关于地下工程围岩破坏模式研究成果的基础上,将柱状节理岩体的破坏模式分为 3 类,即岩体结构控制型破坏、应力控制型破坏、应力-岩体结构控制型破坏。由于白鹤滩水电站柱状节

理岩体节理面发育,岩体结构控制型破坏占主要部分,但同时由于地应力相对较高,也存在部分应力控制型破坏和应力-岩体结构控制型破坏。岩体结构控制型破坏包括单临空面节理面滑移(塌方)、多临空面节理面滑移(塌方)与错动带、断层等弱面相组合的坍塌;应力控制型破坏主要是河谷侧顶拱喷层开裂;应力-岩体结构面控制型破坏为岩性交界处的节理岩体垮落等。

(3) 数值模拟结果表明,柱状节理岩体表层主要发生柱内竖直隐节理面和柱间节理面的拉破坏,而围岩内部的柱状节理主要发生柱间节理面的剪切破坏。

(4) 根据柱状节理岩体的破坏模式,现场柱状节理的支护主要包括两个方面:喷射混凝土和系统锚杆支护。喷射混凝土层的主要作用是阻止柱状节理岩体表面的张性开裂,尤其是抑制柱间节理面和柱内陡倾角隐节理面的拉伸破坏;柱状节理岩体内部的剪切破坏主要依靠锚杆来进行控制。系统的锚杆-喷射混凝土支护两者缺一不可。

**致谢:**感谢中国长江三峡工程开发总公司和中国水电顾问集团华东勘测设计研究院现场设代处工程一线的领导 and 工程师们为本研究提供的相关基础资料与宝贵建议。

## 参 考 文 献

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 139-168.
- [2] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 73 - 88.
- [3] 狄圣杰, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体横观各向同性本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 881 - 887.  
DI Sheng-jie, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Transversely isotropic constitutive properties of a columnar jointed rock mass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(6): 881 - 887.
- [4] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 243 - 250.  
YAN Dong-xu, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 243 - 250.
- [5] 郑文棠, 徐卫亚, 宁宇, 等. 节理玄武岩体变形模量的尺寸效应和各向异性[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 559 - 565.



- ZHENG Wen-tang, XU Wei-ya, NING Yu, et al. Scale effect and anisotropy of deformation modulus of closely jointed basaltic mass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(4): 559 - 565.
- [6] 钟世英, 徐卫亚. 基于微结构张量理论的柱状节理岩体各向异性强度分析[J]. **岩土力学**, 2011, 32(10): 3081 - 3084.
- ZHONG Shi-ying, XU Wei-ya. Anisotropic failure criterion incorporating microstructure tensor for rock mass with columnar joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3081 - 3084.
- [7] 石安池, 唐鸣发, 周其健. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(10): 2079 - 2086.
- SHI An-chi, TANG Ming-fa, ZHOU Qi-jian. Research of deformation characteristics of columnar jointed basalt at Baihetan hydropower station on Jinsha river[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2079 - 2086.
- [8] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体压缩破坏过程模拟及机制分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(4): 716 - 724.
- ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-chang. Simulation of compressive failure process of columnar jointed rock mass and its failure mechanism analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 716 - 724.
- [9] 刘海宁, 王俊梅, 王思敬. 白鹤滩柱状节理岩体真三轴模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 1): 163 - 171.
- LIU Hai-ning, WANG Jun-mei, WANG Si-jing. Experimental research of columnar jointed basalt with true triaxial apparatus at Baihetan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 163 - 171.
- [10] 刘顺桂, 池永翔, 王思敬, 等. 柱状节理玄武岩体抗剪强度参数尺寸效应研究[J]. **工程地质学报**, 2009, 17(3): 367 - 370.
- LIU Shun-gui, CHI Yong-xiang, WANG Si-jing, et al. Size effect on shear strength of basalt rock mass with columnar joints[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(3): 367 - 370.
- [11] 张春芳, 许模, 李虎, 等. 柱状节理玄武岩岩体结构与结构面的分形研究[J]. **四川地质学报**, 2009, 29(3): 292 - 295.
- ZHANG Chun-fang, XU Mo, LI Hu, et al. A study of structure and structural plane fractal of basalt rock mass with columnar joints[J]. **Acta Geologica Sichuan**, 2009, 29(3): 292 - 295.
- [12] 陈旭, 许模, 康小兵, 等. 玄武岩柱状节理成因性状研究及其对岩体质量的影响[J]. **地质找矿论丛**, 2008, 23(3): 260 - 263.
- CHEN Xu, XU Mo, KANG Xiao-bing, et al. The research on genetic habit of columnar cleavage in basalt and the influence on the rock mass[J]. **Geological Prospecting Review**, 2008, 23(3): 260 - 263.
- [13] HOEK E, BROWN E T. 岩石地下工程[M]. 连志升, 田良灿, 王维德, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 148 - 195.
- [14] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(1): 136 - 151.
- [15] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: Part 1: An introduction to the principles[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1997: 339 - 359.
- [16] 李宁, 孙宏超, 姚显春, 等. 地下厂房母线洞环向裂缝成因分析及处理措施[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(3): 439 - 446.
- LI Ning, SUN Hong-chao, YAO Xian-chun, et al. Cause analysis of circumferential splits in surrounding rock of busbar tunnels in underground powerhouses and reinforced measures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 439 - 446.
- [17] 李仲奎, 周钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(11): 2167 - 2175.
- LI Zhong-kui, ZHOU Zhong, TANG Xue-feng, et al. Stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(11): 2167 - 2175.
- [18] 魏进兵, 邓建辉, 王俯凯, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(6): 1198 - 1205.
- WEI Jin-bing, DENG Jian-hui, WANG Di-kai, et al. Characterization of deformation and fracture for rock mass in underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1198 - 1205.
- [19] 卢波, 王继敏, 丁秀丽, 等. 锦屏一级水电站地下厂房

- 围岩开裂变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2430 - 2441.
- LU Bo, WANG Ji-min, DING Xiu-li, et al. Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping I underground powerhouse[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2430 - 2441.
- [20] 黄润秋, 黄达, 段绍辉, 等. 锦屏I级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23 - 35.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da, DUAN Shao-hui, et al. Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass deformation failure in construction phase for underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 23 - 35.
- [21] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 727 - 732.
- HOU Zhe-sheng, GONG Qiu-ming, SUN Zhuo-heng. Primary failure types and their failure mechanisms of deep buried and intact marble at Jinping II hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 727 - 732.
- [22] 向天兵, 冯夏庭, 江权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871 - 883.
- XIANG Tian-bing, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure mode dynamic recognition and control for surrounding rock of large-scale cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 871 - 883.
- [23] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1782 - 1802.
- WU Wen-ping, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Failure mode dynamic recognition and control for surrounding rock of large-scale cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1782 - 1802.

(接第 836 页)

### 《岩土力学》2014 年第 9 期被 EI 收录论文 (40 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
31	盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究	张冬梅, 宗翔, 黄宏伟	2659 - 2666
32	真空轻型井点地基处理试验研究	张勇, 赵云云, 高文龙	2667 - 2672
33	基于厚壁筒三维解析模型的深部洞室围岩分区破裂化机制研究	鲁建荣	2673 - 2684
34	斜坡基桩水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟	程刘勇, 许锡昌, 陈善雄, 等	2685 - 2691
35	三维离散元单轴试验模拟甲烷水合物宏观三轴强度特性	蒋明镜, 贺洁	2692 - 2701
36	模拟三维裂纹问题的多尺度扩展有限元法	王振, 余天堂	2702 - 2708
37	基于离散元法的砂土破碎演化规律研究	周博, 黄润秋, 汪华斌, 等	2709 - 2716
38	基于 OpenMP 的二维有限元-离散元并行分析方法	严成增, 郑宏, 孙冠华, 等	2717 - 2724
39	层状盐岩造腔仿真软件开发及其实用性验证	任松, 吴建勋, 陈结, 等	2725 - 2730
40	基于 CT 扫描的土石混合体三维数值网格的建立	李长圣, 张丹, 王宏宪, 等	2731 - 2736