

# 基于电镜扫描实验的柱状节理隧洞 卸荷破坏机制研究

郝宪杰<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 江 权<sup>1</sup>, 李邵军<sup>1</sup>, 肖亚勋<sup>1</sup>, 樊义林<sup>2</sup>, 胡连兴<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. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

**摘要:** 采用现场调查、室内力学实验、细观实验的方法, 对导流洞内柱状节理玄武岩的卸荷破坏机制进行研究。研究表明: (1) 柱状节理岩体内节理面主要包括: 柱间节理面、柱内竖直隐节理面、柱内水平节理面, 柱间节理面表面粗糙不平, 为岩浆岩冷却后形成; 柱内竖直隐节理面存在羽毛状陡坎, 开挖卸荷后易松弛成为显节理; 柱内水平节理面表面平整, 方向近乎水平。(2) 将现场破坏面与标准破坏模式下的电镜扫描结果对比表明: 柱内竖直隐节理面为原生节理面, 破坏形式主要为拉破坏; 柱间节理面为原生张拉节理, 破坏形式包括拉伸与剪切及其混合破坏; 水平节理面为构造运动中形成, 无明显开挖卸荷破裂特征。(3) 柱状节理塌方机制为: 受多组节理切割, 柱体易沿节理面从柱体内外共同破裂, 呈小柱体垮落, 即洞室开挖后, 当法向力超过柱间节理面抗拉强度时, 柱状节理沿着柱间节理面开裂, 并滑移; 在滑移过程中, 柱间节理面相互摩擦, 形成剪破坏特征; 当法向力超过柱内竖直隐节理抗拉强度时, 柱体内部沿着柱内竖直隐节理破裂; 节理面相互切割形成小柱体, 从柱体内外共同破裂, 并向临空面滑落; 由于水平节理面非常发育, 小柱体最终会在重力及开挖扰动作用下垮塌脱离母岩, 严重时形成塌方。该机制可以很好地解释现场边墙柱体破裂面中三弱面共存的原因。

**关键词:** 岩石力学; 柱状节理; 卸荷破坏机制; 电镜扫描实验; 隧洞

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2013)08 - 1647 - 09

## RESEARCH ON UNLOADING FAILURE MECHANISM OF COLUMNAR JOINTED ROCK MASS IN TUNNEL BASED ON SCANNING ELECTRON MICROSCOPY EXPERIMENTS

HAO Xianjie<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>, LI Shaojun<sup>1</sup>, XIAO Yaxun<sup>1</sup>, FAN Yilin<sup>2</sup>, HU Lianxing<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. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The unloading failure mechanism of columnar jointed rock mass in tunnel was studied by using in-situ measuring method, laboratory and scanning electron microscopy(SEM) experiments method. The results indicated that: (1) The fractures contained in the columnar jointed rock mass mainly include three types of joints: joints between the columnar, implicit joints inside columnar and crosswise joints. The joints between the columnar formed in the cooling process of basaltic lava flows are rough. The implicit joints inside columnar, which would resolve into explicit joints after excavation, have plumose steep sill in their surfaces. The crosswise joints, whose direction almost horizontal, is a smooth surface. (2) Compared with SEM analysis under standard failure mode, the results of SEM in site showed that: implicit joints and the joints between the columnar are native tension joints, while the former is mainly in tension failure and the latter is composite tension-shear failure. The crystals is so well developed on the crosswise joints that no apparent breakage characteristic induced by excavation is found. (3) The unloading failure mechanism of columnar jointed rock mass is: The fractures are so well developed that

**收稿日期:** 2013 - 02 - 26; **修回日期:** 2013 - 03 - 26

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(11232014)

**作者简介:** 郝宪杰(1987 -), 男, 2009年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事智能岩石力学方面的研究工作。E-mail: xianjie.hao.irms@gmail.com

the columnar joints would break from both exterior and interior which lead to the results that the collapse columnar are mainly small columnar and rarely have intact columnar. That is the columnar will first break between columnar and then break from inside when normal force is beyond the tension strength of joints between columnar and implicit joints, respectively. Then the friction between the columnar would come which formed shear failure. The small columnar would collapse at last under the effect of gravity and excavation- disturbance for the crosswise joints are so well developed and large scale collapse would happen in severe cases. This mechanism was a good explanation of three weak planes coexists at the rupture plane of sidewall in site.

**Key words:** rock mechanics; columnar jointed rock mass; unloading failure mechanism; scanning electron microscopy(SEM) experiments; tunnel

## 1 引言

柱状节理是常见于火山熔岩中的一种呈规则柱状形态的原生张性破裂构造(见图 1)<sup>[1]</sup>,在我国西南一些水电站(铜街子、溪洛渡、白鹤滩)都有揭露,因其内部节理、裂隙异常发育,在开挖卸荷作用下极易出现松弛和开裂,自稳时间较短且稳定性差,极易形成垮塌事件(见图 2)。若能掌握柱状节理可能的破坏形式与机制,那么就能有针对性的选择合理的支护结构对其进行控制,从而避免垮塌事件的发生。因此,针对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。



图 1 导流洞内柱状节理分布

Fig.1 Columnar jointed rock mass distribution in diversion tunnel



图 2 隧洞内柱状节理垮塌情况

Fig.2 Collapse of columnar jointed rock in tunnel

现阶段国内外对柱状节理的研究主要集中在旅游地质<sup>[2]</sup>、地质成因学说<sup>[3-5]</sup>等方面,而柱状节理

岩体力学性质的研究由于近些年大型水电站的相继修建也逐渐引起了人们的注意。由于柱状节理岩体破碎,现场很难对其进行取样,其力学性质的研究目前主要通过现场实测、数值模拟的方法来进行研究,如 K. Kim 和 M. L. Cramer<sup>[6]</sup>对美国一核废料埋藏工程柱状节理玄武岩进行弹性波测试,研究了其各向异性特征;狄圣杰等<sup>[7-11]</sup>以白鹤滩坝基为研究对象,针对柱状节理数学模型、横观各向同性本构、节理面屈服准则、等效弹性模量等内容进行了深入研究;朱道建等<sup>[12-13]</sup>采用有限元实现的柱状节理本构模型为包括多节理面、节理力学参数按照 Weibull 分布、几何模型采用 Voronoi 算法构建的多角度力学模型;石安池等<sup>[14-16]</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。此外,刘海宁等<sup>[17-19]</sup>对柱状节理真三轴实验、尺寸效应、岩体质量评价等方面也进行了研究。这些工作的开展对于深入了解柱状节理的力学特性都具有非常大的帮助。

但是柱状节理作为一种特殊的岩体,其特殊性主要体现在其节理裂隙异常发育,不仅包括构成柱体的柱间节理,还存在着柱内竖直隐节理面<sup>[5]</sup>(即“羽毛状结构面”)、柱内水平节理面等,这些结构面相互切割使得岩体破坏模式也呈现多样化,如现场调查研究表明破坏面经常呈现多节理面共存,而其原因目前尚未有人对其进行详细研究。

在岩石断裂的过程中,其破裂面上的微观形貌是由岩石断裂过程中的受力情况和微观特征所决定,因此,考察岩石破裂面的微观形貌特征,可以在一定程度上反映岩石的破坏模式。因此,利用 SEM 实验所获得的岩石断口几何图象,判定岩石断裂性质,建立岩石断口微观形态与岩石断裂的联系,是非常有意义的<sup>[20]</sup>。目前,很多学者已经针对岩石断裂<sup>[21-22]</sup>、岩爆<sup>[23]</sup>、冲击倾向煤<sup>[24]</sup>、砂岩断口<sup>[25]</sup>、大理岩断口<sup>[26-28]</sup>等方面进行了相关的研究,但是尚未有人将该方法应用到现场节理岩体卸荷垮塌破坏机制的研究上。

综上所述，本文针对导流洞柱状节理施工期的围岩稳定问题，通过大量的现场调研和理论分析工作，以标准破坏模式下的节理面电镜扫描结果为标尺，结合不同节理面电镜扫描结果，系统研究了柱状节理的破坏模式与机制，对柱状节理洞段的安全开挖具有显著的指导意义。

## 2 柱状节理结构面特征

为研究柱状节理结构面特征，采用测窗法对一类柱状节理进行测量(见图 3)，可以得出如下结论：岩层产状总体为 $(40^{\circ}\sim 50^{\circ})\angle(15^{\circ}\sim 25^{\circ})$ ，导流洞中部揭露柱状节理处断面产状总体为 $(80^{\circ}\sim 90^{\circ})\angle 35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。柱体形状一般为四、五、六边形，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  $120^{\circ}$ ；柱体自身的倾角为  $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。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。



图 3 柱状节理节理面特征测量

Fig.3 Measurement of columnar joints character

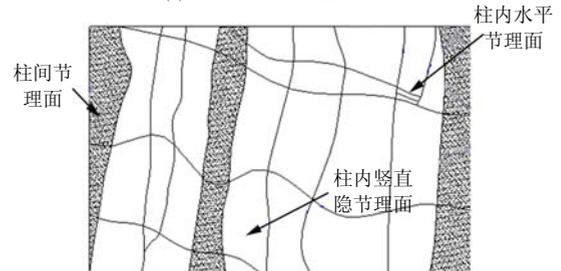
从上述调查中可以看出，垮落后的柱状节理并不是完整的柱体，而且垮落后的柱体尺寸要远小于完整柱体，也就是说柱状节理的垮落并不都是沿着柱间节理面垮落的，造成这一问题的原因是由于柱体内也存在软弱结构面(见图 4)。

通过大量的现场调查与分析，可将柱状节理软弱结构面分为以下 3 种：

(1) 柱间节理面：呈不规则形状分布，如四、五、六边形。该面为岩浆岩主冷却面，表面呈颗粒状，手感粗糙不平，是在冷缩时形成的张拉节理(见图 5(a))。



(a) 现场破坏面节理分布图



(b) 对应的破坏面节理素描图

图 4 现场柱状节理破坏面节理分布图

Fig.4 Joints distribution of failure plane in site



(a) 柱间节理面 (b) 柱内竖直隐节理面 (c) 水平节理面

图 5 柱状节理面不同节理面结构特征图

Fig.5 Character figure of different kinds of joints

(2) 柱内竖直隐节理面：该面较光滑，类似镜面，且表面存在深度不一的陡坎，平行而且等距，呈羽毛状分布，因此又叫羽毛状结构面(见图 5(b))。

(3) 柱内水平节理面：其表面较为平整，方向近乎水平(见图 5(c))。

由于柱状节理存在上述 3 种弱面，导致其在开挖卸荷作用下，容易沿着这些弱面发生松弛、开裂，并最终导致破坏，严重的还会形成垮塌事件。

## 3 标准破坏模式下的 SEM 特征

为了采用 SEM 来判断现场柱状节理破坏模式，对标准破坏模式下的柱状节理微观特征进行研究，并以此为标尺判断现场柱状节理的破坏模式。

### 3.1 实验步骤

(1) 对现场取回的柱状节理试样进行加工，由于柱体内节理面发育，试样很难加工成标准圆柱体，为减小加工扰动，将试样加工成方形(见图 6(a))。

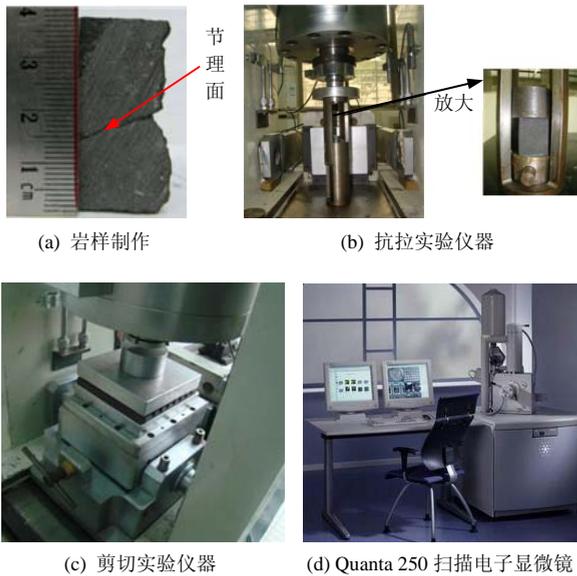


图6 岩样制作及实验仪器

Fig.6 Sample fabrication and laboratory apparatus

(2) 需要进行的标准破坏方式包括拉破坏和剪破坏。对于拉破坏，采用“变拉为压”的方法(相当于直接拉伸)，如图 6(b)所示，将岩样上下两端用 AB 胶固定，向下压下端压头即可将岩块拉开。对于剪破坏，由于岩块不规则，采用剪切盒进行(见图 6(c))，实验中应保证节理面的位置应该正好位于剪切缝上，实验中采用力(FORCE)来控制剪切速率，速率为 1 kN/s，正压力为 5 MPa。抗拉、拉剪实验均在 RMT - 150C 岩石力学试验系统上进行。实验中要获取的信息包括轴向应力 - 应变曲线、峰值强度、宏观断口特征等。

(3) 将破坏后的主破裂面断口进行 SEM 扫描，分析不同破坏模式下的典型微观特征。所用扫描仪器为 Quanta 250 扫描电子显微镜，其可放大倍数为 6~1 000 000，分辨率在高真空模式下可达 3.0 nm，如图 6(d)所示。

### 3.2 拉伸实验结果分析

从图 7, 8 中可以看出：(1) 节理面拉伸强度为

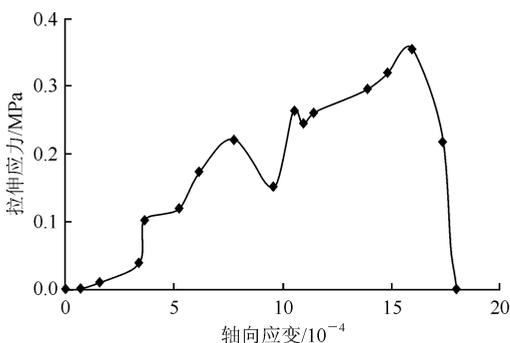


图7 拉伸应力 - 轴向应变曲线

Fig.7 Tensile stress-axial strain curve

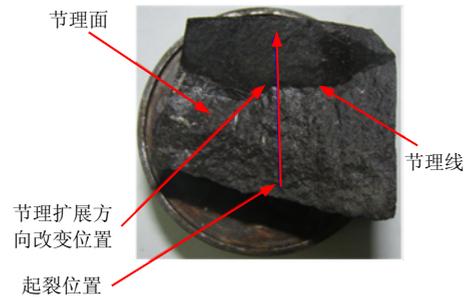
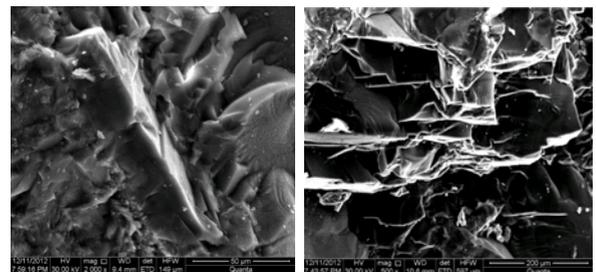


图8 柱状节理拉伸破坏面

Fig.8 Tension failure plane of columnar joints

0.35 MPa; (2) 曲线基本没有屈服阶段，而且下降时基本呈直线下降，呈现脆性破坏特征。

从图 9 中可以看出，拉破坏面为脆性张裂，其特征为：棱角锋利鲜明，侧面光滑平整，并且方向平行；断面高低起伏，呈阶梯状，在断面上以及侧面低洼部位没有或者少有散落的岩屑，并且在图上看不到平行的擦痕，断裂性质为穿晶节理断裂。该特征即为柱状节理拉破坏后的典型特征，可以利用该特征判断破坏是否为拉破坏。



(a) 单台阶状花样 (b) 多台阶状花样

图9 柱状节理拉伸破坏后的 SEM 典型花样

Fig.9 Representative SEM patterns of tension failure of columnar joints

### 3.3 剪切实验结果分析

从图 10, 11 中可以看出：节理面抗剪强度为 2.78 MPa，残余抗剪强度为 2.71 MPa，曲线平缓上升，基本没有中间峰值，表明节理间黏结力较小，抗剪强度主要是由节理间的摩擦力引起。

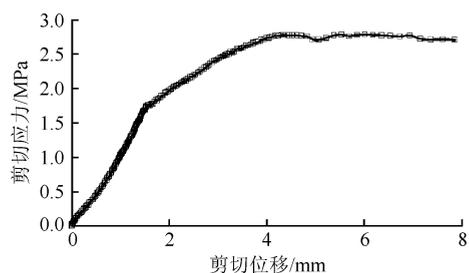


图10 剪切应力 - 剪切位移曲线

Fig.10 Shear stress-shear displacement curve

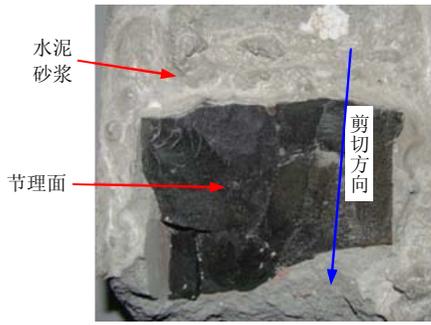
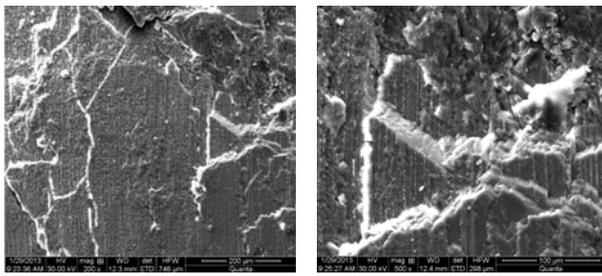


图 11 柱状节理剪切破坏面

Fig.11 Shear failure plane of columnar joints

从图 12 中可以看出，剪破坏面由于存在相对位移，使表面沿运动方向产生擦痕，擦痕平行且密集分布，有平面剪切和台阶剪切 2 种，台阶高度一般较拉破坏要小。该特征即为柱状节理剪破坏后的典型特征，可以利用该特征判断破坏是否为剪破坏。



(a) 平面平行剪切花样

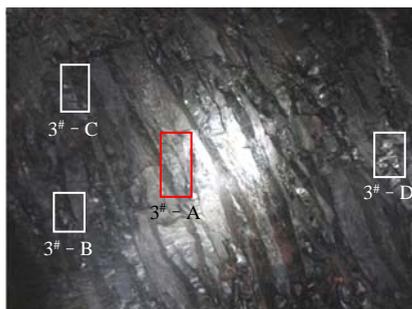
(b) 小台阶平行剪切花样

图 12 柱状节理剪切破坏后的 SEM 典型花样

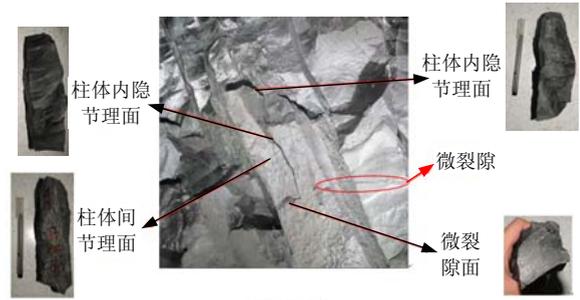
Fig.12 Representative SEM patterns of shear failure of columnar joints

### 3.4 柱状节理在标准破坏模式下的微观特征

为研究柱状节理塌方机制，对导流洞内已经支护一段时间但仍出现垮塌的位置进行取样，从而保证所取柱状节理岩体破坏方式为卸荷破坏，而非爆破破坏(见图 2)，在 3#导流洞内不同部位取试样 4 块(见图 13(a))，同样，在 1#，2#导流洞各取 3 块岩样，所取塌方块体破坏形式一般为三棱柱，存在 1 个柱间节理面，2 个柱内竖直隐节理面和 2 个柱内水平节理面(见图 13(b))。



(a) 3#导流洞内取样分布部位



(b) 柱状节理面特征

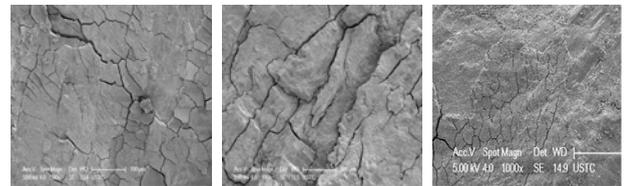
图 13 现场取样的柱状节理各面特征

Fig.13 Character of different columnar joints of in-situ sampling spot

下面以 3# - A 为例，通过 SEM 电镜扫描特征逐一分析各面的破坏方式。

#### 3.4.1 柱间节理面破坏特征

柱间节理面 SEM 电镜扫描与现场柱体平面图如图 14 所示。



(a) 土地干涸状花样



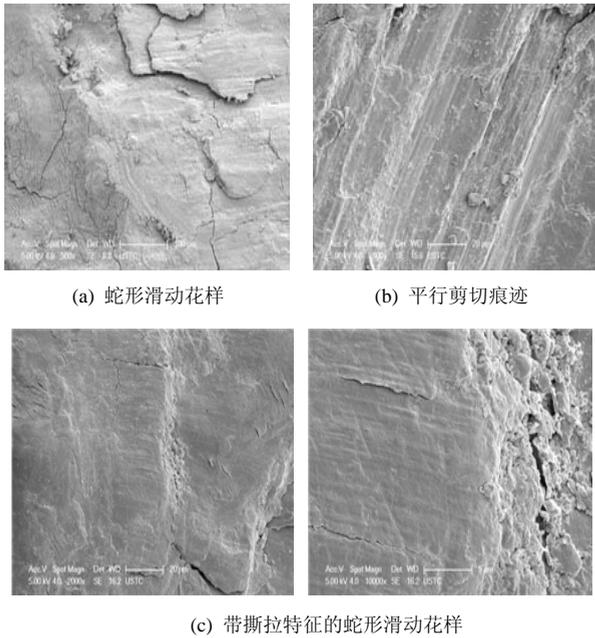
(b) 现场柱体平面图特征

图 14 柱间节理面 SEM 与现场柱体平面图

Fig.14 Representative SEM patterns of joints between columnar and its in-situ planar graph

图 14(a)为在不同试样的柱间节理面存在的土地干涸状花样，土地干涸状花样是岩体受张拉作用时形成的典型花样，具体到柱状节理，是岩浆岩在冷却收缩时产生的张拉作用而形成的花样。将该花样与现场柱体平面相比较，两者几何特征相似，均由小柱体镶嵌而成，表明柱状节理具有明显的自相似特征，同时也说明土地干涸状花样是柱间节理面的典型花样。

同时在柱间节理面也发现存在着一定的张拉和剪切痕迹(见图 15)，由于张剪痕迹棱角鲜明，可判断为近期产生，表明在开挖卸荷中，柱间节理面受到张拉和剪切作用。



(a) 蛇形滑动花样

(b) 平行剪切痕迹

(c) 带撕拉特征的蛇形滑动花样

图 15 柱间节理面的 SEM 花样

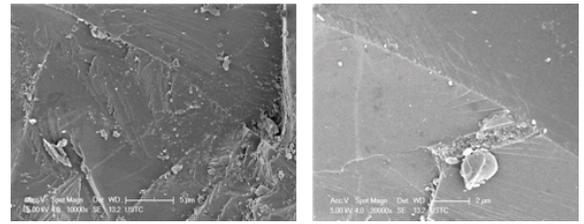
Fig.15 Shear pattern of joints between columnar

综上所述，柱间节理面成岩过程中受到张拉作用，形成张拉节理，而在开挖卸荷中受到了张拉和剪切作用。

### 3.4.2 柱内竖直隐节理面破坏特征

根据现场调查，破坏面存在大量的柱内竖直隐节理面，表明柱状节理岩体极易沿着该节理面从内部破坏，而在以往的研究中该类节理面并未引起足够的重视，因此本文也将该类节理面的研究作为重点。

对柱内竖直隐节理明显存在的陡坎进行电镜扫描，其特征如图 16(a)所示，可以看出，陡坎周围存在土地干涸状花样，但是没有柱状节理面密集，表



(c) 柱内竖直隐节理面的鱼骨状花样

图 16 柱内竖直隐节理面的典型花样

Fig.16 Representative SEM patterns of implicit vertical joints inside columnar

明柱内竖直隐节理面也是原生张拉节理面，但不是主要的岩浆岩冷却面。

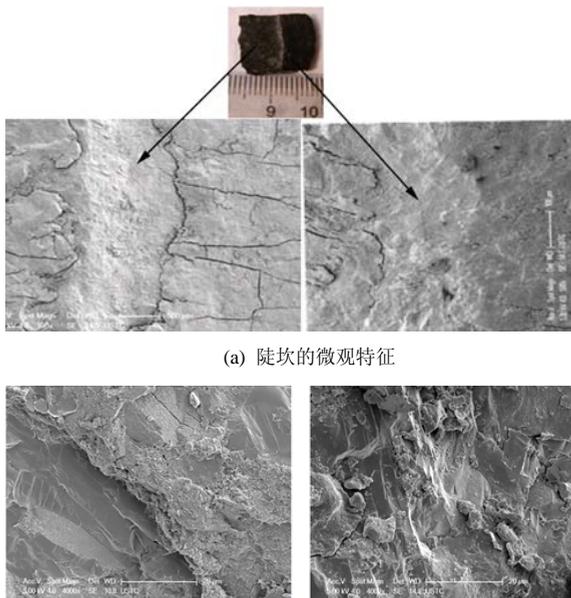
图 16(b)为柱内竖直隐节理面呈现的解理断裂特征，断面高低起伏，棱角光滑鲜明，为脆性断裂特征，属于穿晶断裂，是拉破坏的典型特征，且破裂面边缘清晰，为近期产生，也即是在开挖卸荷产生的拉伸作用下而生成的破裂面。

图 16(c)为柱内竖直隐节理面的鱼骨状花样，当解理主裂纹沿着孪晶面与基体面向前扩展时，孪晶面与基体面解理而成为鱼骨的两侧，其孪晶与基体相交部分，即成为鱼骨中部长条，形成鱼骨状花样，这种花样也为典型的拉破坏花样。

综上所述，柱内竖直隐节理面为原生节理，而其断面形状为典型的拉伸花样，因此柱内竖直隐节理面的破坏形式为拉破坏。

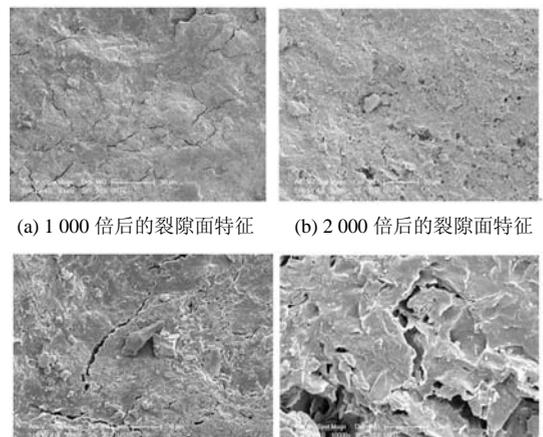
### 3.4.3 柱内水平节理面破坏特征

水平节理面在宏观上平直、光滑，不存在任何凸起，对该面进行电镜扫描，其微观特征如图 17所示，可以看出，该面晶体生长完好，不存在明显的拉破坏、剪破坏特征，仅在极少数情况下会存在图 17(e)所示的剪切特征，由于剪切痕迹微弱，边缘模糊，不易分辨，不是开挖卸荷作用所致，而是构造运动所致。综上，水平节理面中不存在明显的开挖卸荷特征，其破坏方式为沿着原有弱面滑落。



(a) 陡坎的微观特征

(b) 柱内竖直隐节理面的断裂特征

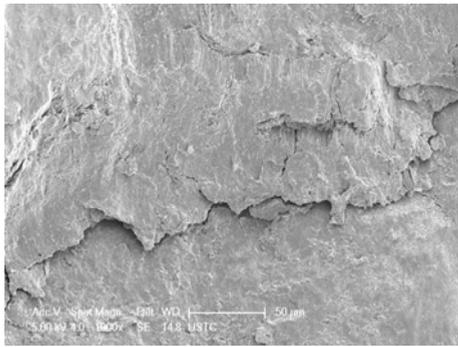


(a) 1 000 倍后的裂隙面特征

(b) 2 000 倍后的裂隙面特征

(c) 5 000 倍后的裂隙面特征

(d) 10 000 倍后的裂隙面特征



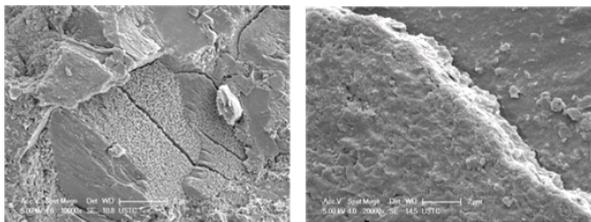
(e) 水平节理面的剪切特征

图 17 柱内水平节理面 SEM 微观特征

Fig.17 Representative SEM patterns of horizontal joints inside columnar

### 3.4.4 玄武岩破坏特征

尽管现场柱状岩体塌方中基本不存在岩石内部破裂，但是我们也对玄武岩微观特征进行分析，以作对比。该处玄武岩主要成分为长石，为隐晶质，其断口呈油脂光泽，断口多为不平坦状，阶梯状，而结晶通常呈板状、短柱状(见图 18)。



(a) 5 000 倍

(b) 20 000 倍

图 18 玄武岩断口及结晶特征

Fig.18 Fracture and crystallization characteristics of basalt

### 3.4.5 各试样破坏模式汇总

从表 1 中可以看出，对于柱间节理面，试样破坏模式为剪切和拉伸破坏共存，仅有少量为无明显特征，表明柱间节理面的破坏模式主要为张拉、剪

表 1 各试样破坏模式汇总

Table 1 Summary for failure mode of every specimen

试样编号	柱间节理面破坏模式	柱内竖直节理面破坏模式	柱内水平节理面破坏模式
1# - A	剪切	拉伸	剪切
1# - B	拉伸	拉伸	无明显特征
1# - C	剪切	剪切	无明显特征
2# - A	无明显特征	拉伸	剪切
2# - B	拉伸	拉伸	无明显特征
2# - C	拉伸	拉伸	剪切
3# - A	拉伸	无明显特征	无明显特征
3# - B	剪切	拉伸	无明显特征
3# - C	拉伸	拉伸	无明显特征
3# - D	剪切	无明显特征	无明显特征

切及其混合破坏，同理柱内竖直隐节理面的主要破坏模式为拉伸破坏，柱内水平节理面大部分试样无明显特征，仅有少量呈剪切破坏模式。

## 4 柱状节理塌方模式与力学机制

归纳并分析其不同节理面在洞室开挖后的基本破坏方式，可得柱状节理的塌方机制：

(1) 柱体首先从柱体内外共同破裂：洞壁围岩因开挖卸荷而产生法向拉张型作用力，当法向力超过柱间节理面抗拉强度时，柱状节理开始沿着柱间节理面开裂，并滑移；在滑移过程中，柱间节理面相互摩擦，形成剪破坏特征；当法向力超过柱内竖直隐节理抗拉强度时，柱体内部开始沿着柱内竖直隐节理破裂；节理面相互切割形成小柱体，从柱体内外共同破裂(见图 19)。

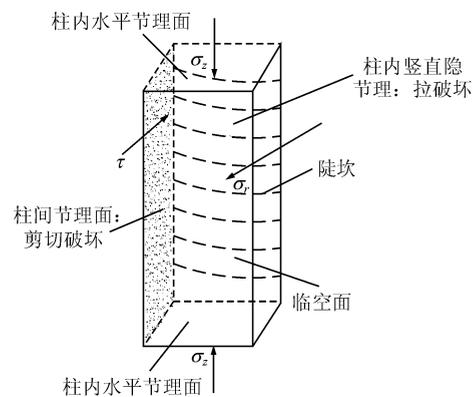


图 19 柱状节理的力学破坏模式

Fig.19 Mechanical failure mode of columnar joints

(2) 柱体沿柱内水平节理面垮落：在开挖卸荷作用下，小柱体沿柱内竖直隐节理与柱间节理面逐渐与母岩分离，当下部柱体塌落后，上部小柱体失去支撑，会在重力及开挖扰动作用下垮塌脱离母岩。

实际工程中，3 种基本破坏方式经常组合发生(见图 20)，这也是为什么现场垮落的柱体比完整柱

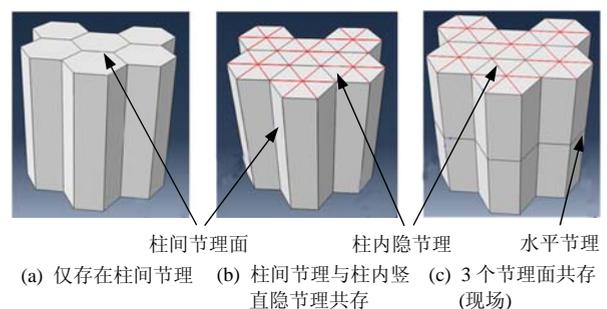


图 20 柱状节理的理论破坏模式

Fig.20 Theoretical failure mode of columnar joints

状节理岩体小、且破裂面中柱间节理面、柱内竖直隐节理面、水平节理面共存的原因(见图 21)。

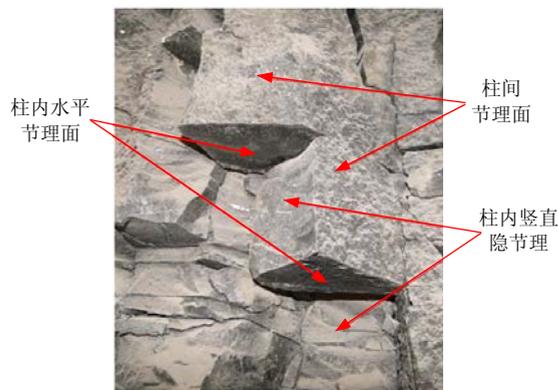


图 21 柱状节理的现场破坏模式

Fig.21 In-situ failure mode of columnar joints

## 5 结 论

(1) 通过对导流洞的柱状节理岩体的现场调查, 岩体内弱面主要包括: 柱间节理面、柱内竖直隐节理面、柱内水平节理面, 柱间节理面为岩浆岩冷却后形成, 表面粗糙不平; 柱内竖直隐节理面表面存在深度不一的陡坎, 成羽毛状, 开挖卸荷后易松弛成为显节理; 柱内水平节理面较平整, 方向近乎水平。柱体内弱面异常发育导致现场柱体破坏易沿内外弱面共同发生, 垮落柱体多为小柱体, 极少出现完整柱体垮落, 岩体破坏面中柱间节理面、柱内隐节理、柱内水平节理面并存。

(2) 对标准破坏模式下的柱状节理微观特征进行研究, 表明: 拉破坏面断面高低起伏, 台阶较高, 棱角锋利鲜明, 并且方向平行; 而剪破坏面由于存在相对滑移, 使表面沿运动方向产生擦痕, 擦痕平行且密集分布, 若存在台阶其高度一般较拉破坏要小。

(3) 将现场柱状节理微观特征与标准破坏模式下的微观特征进行对比, 可以得出柱状节理各面的破坏形式: 柱内竖直隐节理面为原生节理面, 其破坏形式为拉破坏; 柱间节理面为原生的张拉节理, 破坏形式为张拉和剪切共存; 水平节理面仅有微弱的剪切痕迹存在, 是在构造运动中形成的, 开挖卸荷后则无明显的破裂特征。

(4) 综合上述分析, 柱状节理塌方机制为: 受多组节理切割, 开挖卸荷后易沿节理面从柱体内外共同破裂; 当法向力超过柱间节理面抗拉强度时, 柱状节理沿着柱间节理面开裂, 并滑移; 在滑移过程中, 柱间节理面相互摩擦, 形成剪破坏特征; 当

法向力超过柱内竖直隐节理抗拉强度时, 柱体内部开始沿着柱内竖直隐节理破裂; 由于水平裂隙极为发育, 因此柱体也易沿柱内水平节理面垮落。

需要注意的是本文仅仅是针对边墙柱状节理的破坏形式进行了研究, 事实上, 柱状节理岩体内还存在错动带等结构面, 造成现场柱状岩体破坏模式多而复杂, 有待于进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 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 Xiaobing, 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.(in Chinese))
- [2] 徐松年. 浙江中生代酸性火山岩柱状节理构造的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 325 - 332.(XU Songnian. Discovery of columnar joint structure of mesozoic acidic volcanic rocks in Zhejiang Province and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(3): 325 - 332.(in Chinese))
- [3] MÜLLER G. Experimental simulation of basalt columns[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 86(1): 93 - 96.
- [4] 吕惠进. 我国酸性火山岩中的柱状节理构造景观[J]. 自然杂志, 2004, 27(1): 33 - 36.(LU Huijin. The columnar joint landscape of mesozoic acidic volcanic rocks in China[J]. Chinese Journal of Nature, 2004, 27(1): 33 - 36.(in Chinese))
- [5] GROSSENBACHER K A, MCDUFFIE S M. Conductive cooling of lava: Columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1995, 69(1): 95 - 103.
- [6] KIM K, CRAMER M L. Rock mass deformation properties of closely jointed basalt [J]. Rock Mechanics, 1982, 12(1): 210 - 230.
- [7] 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 Shengjie, XU Weiya, WANG Wei, et al. Transversely isotropic constitutive properties of a columnar jointed rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(6): 881 - 887.(in Chinese))
- [8] 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 Dongxu, XU Weiya, 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.(in Chinese))
- [9] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效强度参数的柱体尺寸效应[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(3): 334 - 342.(YAN Dongxu, XU Weiya, WANG Wei, et al. Column size effect of macroscopic equivalent strength parameter for columnar jointed rock mass[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(3):

- 334 - 342.(in Chinese))
- [10] 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 Wentang, XU Weiya, 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.(in Chinese))
- [11] 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): 3 081 - 3 084.(ZHONG Shiyong, XU Weiya. Anisotropic failure criterion incorporating microstructure tensor for rock mass with columnar joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3 081 - 3 084.(in Chinese))
- [12] 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 Daojian, YANG Linde, CAI Yongchang. 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.(in Chinese))
- [13] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体各向异性特性及尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1 405 - 1 414.(ZHU Daojian, YANG Linde, CAI Yongchang. Research on anisotropic characteristics and size effect of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 405 - 1 414.(in Chinese))
- [14] 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): 2 079 - 2 086.(SHI Anchi, TANG Mingfa, ZHOU Qijian. 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): 2 079 - 2 086.(in Chinese))
- [15] 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 Chunfang, 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.(in Chinese))
- [16] 狄圣杰, 徐卫亚, 王伟. 柱状节理岩体原位变形试验力学浅析与模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 501 - 508.(DI Shengjie, XU Weiya, WANG Wei. Mechanical analysis and simulation of in-situ deformation test of columnar jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 501 - 508.(in Chinese))
- [17] 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1): 163 - 171.(LIU Haining, WANG Junmei, WANG Sijing. 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.(in Chinese))
- [18] 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 Shungui, CHI Yongxiang, WANG Sijing, et al. Size effect on shear strength of basalt rock mass with columnar joints[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 367 - 370.(in Chinese))
- [19] DEGRAFF J M, AYDIN A. Surface morphology of columnar joints and its significance to mechanics and direction of joint growth[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(5): 605 - 617.
- [20] 冯涛, 谢学斌, 潘长良, 等. 岩爆岩石断裂机制的电镜分析[J]. 中南工业大学学报, 1999, 30(1): 14 - 17.(FENG Tao, XIE Xuebin, PAN Changliang, et al. Fracture mechanism analysis for burst rock with electron scanning microscope[J]. Journal of Central South University of Technology, 1999, 30(1): 14 - 17.(in Chinese))
- [21] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机制分析[J]. 煤炭学报, 1989, 14(2): 57 - 67.(XIE Heping, CHEN Zhida. Analysis of rock fracture micro-mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(2): 57 - 67.(in Chinese))
- [22] 高嘉兰, 孔常静, 李廷芥, 等. 岩石细观损伤破坏的观测研究[J]. 实验力学, 1999, 14(3): 373 - 383.(SHANG Jialan, KONG Changjing, LI Tingjie, et al. Observation and study on meso damage and fracture of rock[J]. Experimental Mechanics, 1999, 14(3): 373 - 383.(in Chinese))
- [23] 谭以安. 岩爆岩石断面扫描分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微学报, 1987, 6(2): 41 - 48.(TAN Yi'an. Analysis of fractured face of rockburst with scanning electron microscope and its progressive failure process[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1987, 6(2): 41 - 48.(in Chinese))
- [24] 宋晓艳, 王恩元, 刘贞堂, 等. 冲击倾向煤破坏断面微观特征及其机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 775 - 779.(SONG Xiaoyan, WANG Enyuan, LIU Zhentang, et al. Study on microscopic characteristics and mechanism of impact trend coal fracture[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(6): 775 - 779.(in Chinese))
- [25] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 温度-拉应力共同作用下砂岩破坏的断面形貌[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 444 - 2 457.(ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Fractography of sandstone failure under temperature-tensile stress coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 444 - 2 457.(in Chinese))
- [26] 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 Zhesheng, GONG Qiuming, SUN Zhuoheng. 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.(in Chinese))
- [27] 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高水压条件下大理岩断面微观机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44 - 51.(ZHU Zhende, ZHANG Yong, XU Weiya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 44 - 51.(in Chinese))
- [28] 黄达, 谭清, 黄润秋, 等. 高应力卸荷条件下大理岩破裂面细观形态特征及其与卸荷岩体强度的相关性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 7 - 15.(HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu, et al. Study of micro-mesoscopic characteristics of marble fracture surface and correlation with unloading rock mass strength under high stress and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Supp.2): 7 - 15.(in Chinese))