

# 高应力条件下错动带加卸荷力学特性试验研究

段淑倩<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 江 权<sup>1</sup>, 徐鼎平<sup>1</sup>, 徐 鸿<sup>2</sup>, 刘国锋<sup>1</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试验室, 湖北 武汉 430071;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对白鹤滩地下厂房开挖过程中所揭露的力学响应行为十分复杂的错动带, 为研究其在高应力条件下的加卸荷力学特性, 开展一系列不同应力水平和应力路径下的不排水三轴常规加、卸荷试验。研究表明: (1) 卸荷过程中, 错动带卸荷应力-应变曲线特征与初始围压相关性很大, 错动带向卸荷方向回弹变形显著, 从卸围压开始即表现出强烈的剪胀现象; 卸轴压卸围压方案比增轴压卸围压方案的侧向扩展变形表现更为显著; 且在试样表面都出现了张/剪裂纹。(2) 卸荷应力路径下, 错动带变形模量劣化效应十分明显, 随围压的减小而逐渐降低, 基本呈三次多项式递减; 体积模量随体积应变的增加而减小, 整体呈负指数形式降低; 泊松比则随体积应变逐渐增加, 整体呈近似抛物线形式递增。(3) 相同初始围压条件下, 相较于加荷条件, 卸荷条件下错动带的破坏应力有所降低, 内摩擦角明显增大, 而黏聚力则明显降低; 卸轴压卸围压方案下的破坏应力劣化更显著。试验所采用的应力水平和应力路径基本涵盖和反映了错动带在洞室开挖过程中所经历的复杂的应力重分布过程, 具有一定的代表性, 地下厂房开挖后高边墙错动带黏聚力和内摩擦角取值基本可参考卸轴压卸围压应力路径下天然含水率错动带的试验结果, 为后续进一步讨论错动带强度特征并建立错动带本构模型提供了有效依据。

**关键词:** 水利工程; 错动带; 卸荷试验; 变形特征; 强度参数

**中图分类号:** TV 221

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)06-1090-12

## Experimental study of mechanical properties of staggered zones under loading and unloading conditions of high stresses

DUAN Shuqian<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>, XU Dingping<sup>1</sup>, XU Hong<sup>2</sup>, LIU Guofeng<sup>1</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. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines,

Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** For staggered zones revealed in Baihetan underground powerhouse with complex mechanical response behavior, a series of undrained triaxial conventional and unloading tests under different stress levels and paths were carried out to study the mechanical properties of staggered zones under loading and unloading in high stress conditions. In the unloading process, the unloading stress-strain curves were related to the initial confining pressure, deformation rebounded in the direction of unloading and strong dilation occurred from the start of unloading. The lateral expansion in the course of the unloading of the axial and confining pressure was more

**收稿日期:** 2015-05-28; **修回日期:** 2015-08-25

**基金项目:** 国家自然科学基金国际合作重大项目(41320104005); 国家自然科学基金重点项目(11232024); 国家自然科学基金青年基金项目(51309219) Supported by the Projects of International Cooperation and Exchanges NSFC(Grant No. 41320104005), Key Program of the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 11232024) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51309219)

**作者简介:** 段淑倩(1991-), 女, 2012年毕业于中国矿业大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: qianshudian@126.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0691

significant than that in the course of loading axially and unloading of confining pressure. The tensile-shear cracks appeared in the surface of the staggered zone samples. For the stress unloading path, the deformation modulus was degraded with the decrease of confining pressure, which was described with a cubic polynomial. The bulk modulus was decreased exponentially with the increasing of volumetric strain. The Poisson's ratios of interlayer zone samples increased gradually with a parabola trend. In comparison to the loading conditions, the failure stress was decreased and the internal friction angle was increased and the cohesion was reduced significantly. The degradation in the course of unloading of axial and confining pressure was more significant than that in course of loading axially and unloading of confining pressure.

**Key words** : hydraulic engineering ; staggered zones ; unloading test ; deformation feature ; mechanical parameters

## 1 引言

新世纪以来,我国已在西部金沙江,雅鲁藏布江规划和兴建了一系列水利水电工程,这些水电站集中在岩体环境构造复杂,地质环境脆弱的西部深山峡谷,其规模和建设难度都是空前的<sup>[1]</sup>。其中大多数采用大型或超大型地下洞室群作为主要的水工建筑物,地下厂房洞室规模巨大,在建的白鹤滩水电站,主副厂房断面尺寸:长 438 m,高 88.7 m,岩梁以下宽为 31 m,以上宽为 34 m;主变洞断面尺寸为:长 368 m,宽 21 m,高 39.5 m<sup>[2]</sup>,具有“高边墙、大跨度大、高地应力、复杂地质条件”的特点,不可避免地受到大型错动带的影响,厂房所在玄武岩岩流层顶部沿凝灰岩发育着 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 和 C<sub>5</sub> 等多条错动带,延展性强,力学性质差,先期受到地质历史时期引起的围压作用;高地应力开挖卸荷作用下,对地下厂房稳定性构成了严重威胁。

错动带是指岩体中的软弱岩体在构造作用下因剪切错动使其原岩蚀变,结构遭到破坏,易受水软化和风化作用的一种结构疏松、性状软弱、多层产出、厚度不一、分布随机、延展性强、危险性大的薄层带状岩土系统<sup>[3-6]</sup>,其空间展布范围广,尺寸上远远大于岩体工程结构物尺寸,在地下洞室群大范围开挖下,岩体具有明显的高应力卸荷特征,缓倾角错动带附近破坏自然成为了地下洞室的失稳的决定性因素之一。徐鼎平等<sup>[7]</sup>通过对因错动带导致工程岩体结构变形失效或破坏的实例进行归纳总结,采用岩体结构控制理论的观点将含层间错动带的岩体的破坏模式分为拉裂破坏、掉块和层间剪切滑移破坏三大类。白鹤滩水电站左、右岸厂房第一层开挖过程中,洞室围岩整体上基本处于稳定,但受河谷深切复杂初始地应力、大型软弱构造及优势节理面的影响,依然揭露了大量的围岩局部破坏现象,左岸 LS3152、右岸 C3, C4 和 RS411 错动带附近岩体在开挖卸荷条件下于顶

拱和边墙处发生不同规模的结构应力型塌方,左岸 1<sup>#</sup>置换洞边墙 C2 错动带则在卸荷下发生塑性挤出型拉伸破坏,需要给予高度重视。

徐鼎平等<sup>[7-12]</sup>针对错动带的力学特性进行了试验研究,因这些错动带所处的工程地质条件和力学环境的特殊性,故主要采用剪切试验对其力学特性进行研究,所依托的工程背景主要为浅部岩体工程(如边坡工程、坝基岩体工程等),已获得的错动带变形破坏机制的研究成果,要么是基于较低的常法向荷载水平( $< 2.0$  MPa)下的直剪试验和剪切蠕变试验获得的,要么现场试验是基于小尺寸工程所进行的,而受大型错动带影响下的白鹤滩厂区最大主应力平均一般为 15.0~24.0 MPa,整体属高地应力区<sup>[2]</sup>,高应力卸荷作用下错动带、特大型洞室群错动带的变形破坏机制尚不清楚。

鉴于此,本文以白鹤滩水电站地下厂房区域所揭露的错动带为研究背景,结合地质、施工及监测分析资料,开展了一系列不排水三轴常规加荷和卸荷试验(考虑现场施工速度较快,高加卸荷速率可能会产生不排水边界条件<sup>[3]</sup>),研究不同应力水平和应力路径下错动带的变形、破坏机制特征规律;为白鹤滩地下厂房后续开挖过程中错动带本身以及含错动带岩体的稳定性分析提供更合理的力学参数和力学模型。需要指出的是,错动带具有软硬互层岩体特性,即上盘凝灰岩+错动带+下盘玄武岩/凝灰岩的组构特征,本文以下试验研究对象均为错动带本身(简称错动带)。

## 2 错动带试验方案

### 2.1 地质条件

白鹤滩水电站地处高原峡谷地带,河谷呈不对称 V 型,地势北高南低,向东侧倾斜,左右岸地下厂房布置基本相同,左岸地下厂房垂直埋深约

260~330 m,单斜地层,岩层总体产状  $N42^\circ \sim 45^\circ E$ ,  $SE 15^\circ \sim 20^\circ$ ,围岩主要为隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩和角砾熔岩等,岩质坚硬,围岩以 III<sub>1</sub> 类围岩为主,局部少量 IV 类围岩;厂区内最大主应力为 15.4~23.0 MPa,方向为  $N30^\circ \sim 50^\circ W$ ,局部实测最大值达 33.39 MPa。右岸地下厂房垂直埋深为 420~520 m,岩层总体产状为  $N48^\circ \sim 50^\circ E$ ,  $SE 15^\circ \sim 20^\circ$ ,围岩主要为隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩等,岩质坚硬且完整性较好,围岩以 III<sub>1</sub>, II 类围岩为主;厂区内最大主应力为 15.0~24.0 MPa,方向  $N0^\circ \sim 20^\circ E$ ,局部实测最大值达 30.99 MPa;整体属高地应力区<sup>[2]</sup>。

白鹤滩厂区洞室群规模庞大,而错动带贯穿整个厂区内,厂区内洞室难以避开错动带,左岸 C2 错动带(见图 1(a))斜穿厂房边墙中下部,层内错动带 LS3152 斜切厂房顶拱;右岸地下厂房错动带 C3 上段、C3-1 及 C4(见图 1(b)),均交切于厂房,沿凝灰岩层发育,空间展布与岩流层产状一致,延伸较长,层内错动带 RS411 则斜切厂房顶拱,左右岸地下厂房区主要错动带特征<sup>[2]</sup>见表 1。

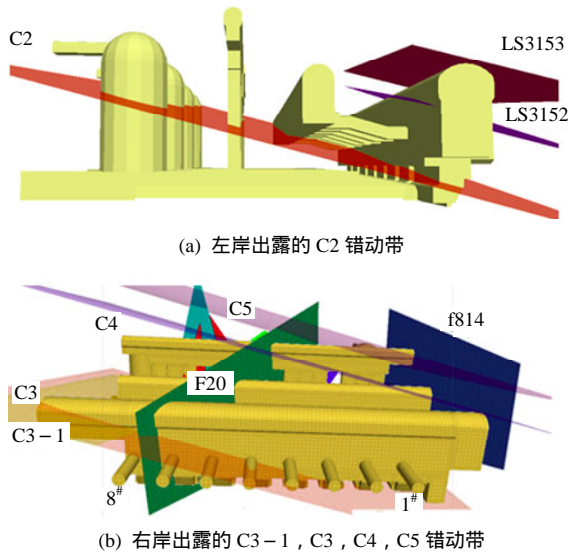


图 1 白鹤滩地下厂房布置及错动带分布图<sup>[2]</sup>

Fig.1 Layout of Baihetan underground caverns and spatial distribution of staggered zones<sup>[2]</sup>

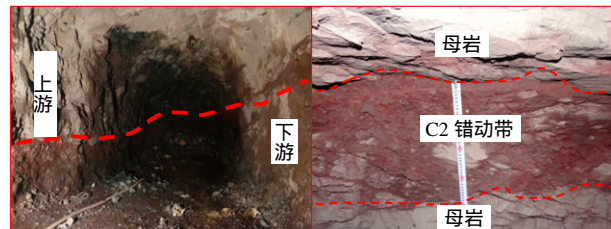
2.2 试验条件

试验错动带取自白鹤滩左岸地下厂房 C2 错动带 1#置换洞(见图 2)中,选择错动带厚度大于 10 cm 处作为采样位置,测定密度为 2.5 g/cm<sup>3</sup>,含水率为 9%,利用可开合的取样工具<sup>[3]</sup>利用重锤水平贯入取样。将取得的圆柱型试样放入镀锌铁皮筒中,上下两端加盖密封后再用保鲜膜进行二次密封,并用胶

表 1 左右岸地下厂房区主要错动带特征<sup>[2]</sup>

Table 1 Characteristics of staggered zones in the underground powerhouse<sup>[2]</sup>

| 错动带类型  | 产状   | 厚度/cm | 特征  |
|--------|--|-------|---|
| C2     | $N42^\circ \sim 45^\circ E$ ,<br>$SE 14^\circ \sim 20^\circ$ | 10~30 | 凝灰岩的厚度(0.3~1.75 m)不等,破碎带厚度 8~60 cm(平均 26 cm),变化较大,泥夹岩屑型,遇水易软化                                     |
| LS3152 | $N45^\circ E$ ,<br>$SE 15^\circ \sim 20^\circ$               | 约 2   | 长约 200 m,以岩块岩屑型为主,带内为角砾化构造岩,断续延伸  |
| C3     | $N35^\circ \sim 40^\circ E$ ,<br>$SE 15^\circ \sim 17^\circ$ | 5~30  | 凝灰岩厚度 0.1~1.3 m,主要由砾和岩屑组成,局部有厚 1~5 cm 的泥质条带,目前未见错动痕迹,性状良好   |
| C3-1   | $N45^\circ \sim 56^\circ E$ ,<br>$SE 13^\circ \sim 18^\circ$ | 10~40 | C3 之下,并与 C3 相交于勘线上游。凝灰岩厚度 0.1~0.7 m,不稳定,破碎带变化大,局部达 70 cm,主要由砾和岩屑组成,部分地段有厚 1~5 cm 的泥化带,多分布于破碎带的上界面 |
| C4     | $N40^\circ \sim 55^\circ E$ ,<br>$SE 15^\circ \sim 20^\circ$ | 20~30 | 凝灰岩厚度较稳定,0.3~0.5 m,泥夹岩屑 A 型,中上部有厚 1~3 cm 的泥化带   |
| C5     | $N40^\circ \sim 55^\circ E$ ,<br>$SE 15^\circ \sim 20^\circ$ | 10~30 | 凝灰岩厚度 0.5~0.8 m,错动带位于顶部,为岩屑夹泥型  |
| RS411  | $N55^\circ E$ ,<br>$SE 18^\circ \sim 25^\circ$               | 500   | 硬性结构面,宽 5 m 左右,带内为裂隙密集带,主要发育一组缓倾角裂隙,平直,较光滑,附钙膜,间距 20~40 cm,局部 5~10 cm                             |



(a) 1#置换洞及揭露的 C2 错动带



(b) 现场取得错动带试样

图 2 白鹤滩左岸地下厂房置换洞典型错动带取样

Fig.2 Natural specimens from staggered zone at the replacement tunnel in the left-bank underground caverns

带牢固的缠绕在钢筒外壁以保证固定错动带试样,编号记录,专车运回室内;用削土刀将取得的原状土柱样两端削平,参照标准<sup>[13]</sup>,用切土器把原土柱削至直径 50 mm,高度 100 mm 的圆柱形试样,称

重后装入密封塑料袋搁置在恒温(22 )室内,并利用自行研制的错动带试样制备装置压至先期固结压力 35 MPa(反映原岩应力),以备试验,同时进行 X 射线衍射,获取 C2 错动带的矿物成分,揭露其矿物成分主要为楣石、赤铁矿、伊利石和绿泥石。

试验在 MTS815-04 型电液伺服岩石试验系统上进行(见图 3),该试验系统可以测量试样的轴向和环向应变,轴向变形采用 2 种方法测量,即 LVDT 和应变规。LVDT 同时测量垫片和变形,而应变规仅测量试样中部变形。试样的环向变形采用由链条链接的伸长计进行测量,链条安置在试样的中部。其中,内置式轴向应变测量引伸计轴向行程 +5.0 ~ -2.5 mm,置式环向应变测量引伸计行程 +8.0 ~ -2.5 mm,满足卸荷条件错动带变形要求。

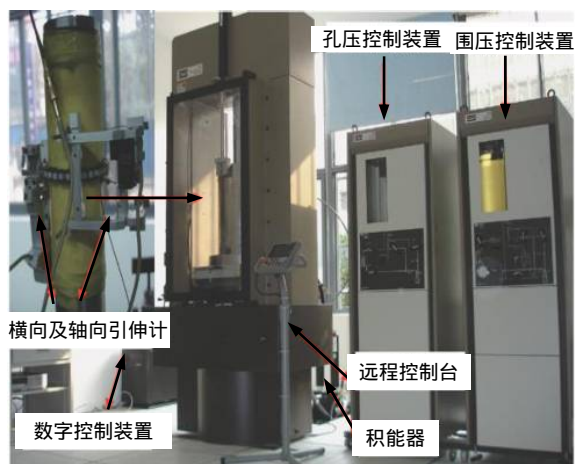
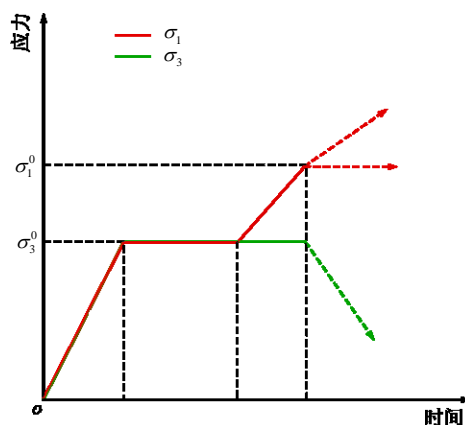


图 3 MTS815-04 型电液伺服岩石试验系统  
Fig.3 MTS815-04 type rock mechanical triaxial testing system

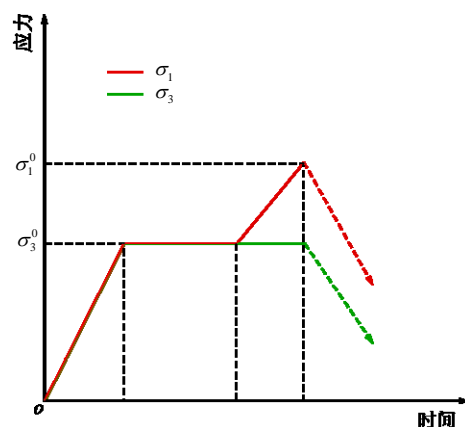
### 2.3 试验方案

错动带力学性质差,先期受到地质历史时期引起的围压作用;现场白鹤滩地下厂房地应力实测最大主应力高达 33.39 MPa,仍然承受着较高的应力状态;在开挖卸荷过程中,错动带应力的变化经历了一个相当复杂的过程,根据白鹤滩地下厂房应力监测成果及相关数值分析<sup>[14]</sup>,首先确定错动带不同应力路径下的卸荷试验方案,应力路径示意如图 4 所示。

图 4(a)为升轴压降围压试验方案,模拟地下厂房开挖卸荷过程中错动带切向应力增高,径向应力降低的应力调整过程,试验分为 3 个阶段:(1)采用轴向冲程位移控制,试验采用以 0.05 MPa/s 的加荷速率同步施加围压及轴向力至预定静水压力状



(a) 增(恒)轴压卸围压



(b) 卸轴压卸围压

图 4 试验应力路径示意图

Fig.4 Sketch of stress paths in the test

态,并稳压 5 min。(2) 稳定  $\sigma_3$ ,以 0.005 mm/s 的轴向剪切速率增高  $\sigma_1$  至错动带试样破坏前某一应力状态,即升高至试件峰值强度(最大主应力差)的 70%(对应体变拐点)。(3) 按一定速率增高  $\sigma_1$  的同时逐渐降低  $\sigma_3$  ( $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 2/1$ ),直至试样破坏或达到位移限值为止。图 4(b)为同时卸载轴压和围压试验方案,用于模拟高边坡墙局部位置错动带开挖卸荷过程,前两阶段与升轴压降围压方案相同,皆是模拟错动带卸荷前的应力状态,卸载阶段不同,同时卸载轴压围压( $\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 1/2$ )直至试样破坏或达到位移限值。

为了更好地描述错动带卸荷过程中应力-应变曲线的变化规律及强度力学参数的劣化特征,同时开展常规三轴剪切试验,围压设计水平为 5, 15, 25 MPa 三个应力水平。常规和卸荷试验每个方案每一围压下试验 2~3 个试样,试样编号:方案编号-试样编号-围压,按前述卸荷和常规试验方案,错动带试样分组如表 2 所示。



表2 错动带试样分组

Table 2 Groups of staggered zone specimens

| 试验方案       | 围压/MPa | 错动带试样分组                |
|------------|--------|------------------------|
| 常规三轴 I     | 5      | 1-1-5, 1-2-5, 1-3-5    |
|            | 15     | 1-1-15, 1-2-15, 1-3-15 |
|            | 25     | 1-1-25, 1-2-5, 1-3-25  |
| 增轴压卸围压 II  | 5      | 2-1-5, 2-2-5, 2-3-5    |
|            | 15     | 2-1-15, 2-2-15, 2-3-15 |
|            | 25     | 2-1-25, 2-2-25, 2-3-25 |
| 卸轴压卸围压 III | 5      | 3-1-5, 3-2-5, 3-3-5    |
|            | 15     | 3-1-15, 3-2-15, 3-3-15 |
|            | 25     | 3-1-25, 3-2-25, 3-3-25 |

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 卸荷变形特征

白鹤滩地下厂房区总体上属于高应力区，洞室开挖后应力调整，一般洞壁含错动带岩体法向应力 $\sigma_3$ 卸荷，应力急剧降低，而平行于开挖面的切向应力 $\sigma_1$ 急剧增加，同时高边墙一定范围内在开挖作用下会双向卸荷，从而引起错动带岩体产生强烈的卸

荷回弹变形<sup>[15-16]</sup>，因此对试验中错动带主卸荷方向变形(环向变形)和体积应变的分析尤为重要。

图5, 6给出了常规三轴和卸荷试验中错动带不同初始围压下以静水压力状态时的变形作为应变轴起点的典型应力-应变过程曲线, 图6中虚线为卸围压的起始点; 其实, 在实际情况下, 岩土体承受压差是客观存在的, 而且在长期的压力差的作用下, 岩土体加荷部分的变形已经完成<sup>[17]</sup>, 因此, 可以将错动带加荷引起的变形忽略不计, 只研究卸荷过程中引起的变形, 并假定这部分变形从0开始, 得到各典型错动带试样在初始围压下仅由于卸荷引起的应力-应变曲线如图7所示。

由图5, 6错动带应力-应变曲线对比分析图7卸荷阶段的变形曲线, 可以得出如下规律性认识:

(1) 常规加荷条件下, 错动带在单轴压缩时表现出一定的应变软化特性; 随着围压的升高, 错动带三轴剪切应力-应变曲线均表现出显著的塑性流动特征, 曲线表现为应变硬化型, 同时强度均随围压逐步增大。分析其原因在于较高围压使得错动带试样孔隙闭合, 同时 C2 错动带呈椭石晶体片状构造, 且错动带黏土细颗粒具有一定的黏性, 较高围压剪切条件下, 颗粒排列更加紧密, 同时片状粗颗粒破碎后

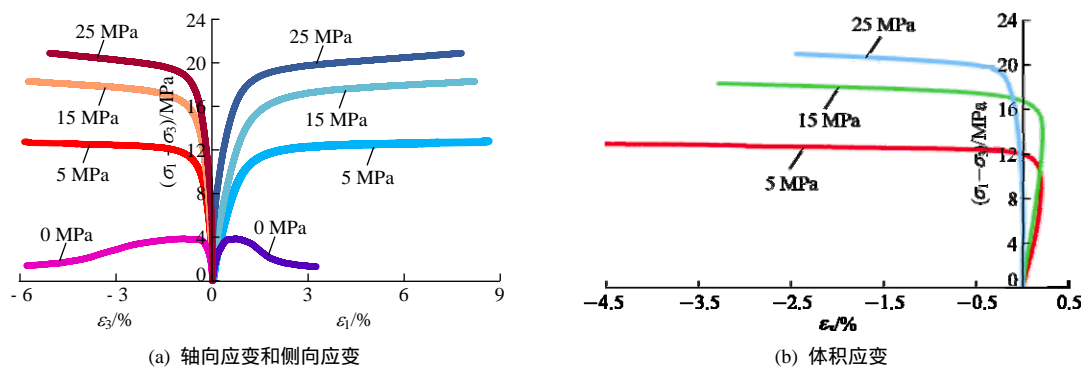
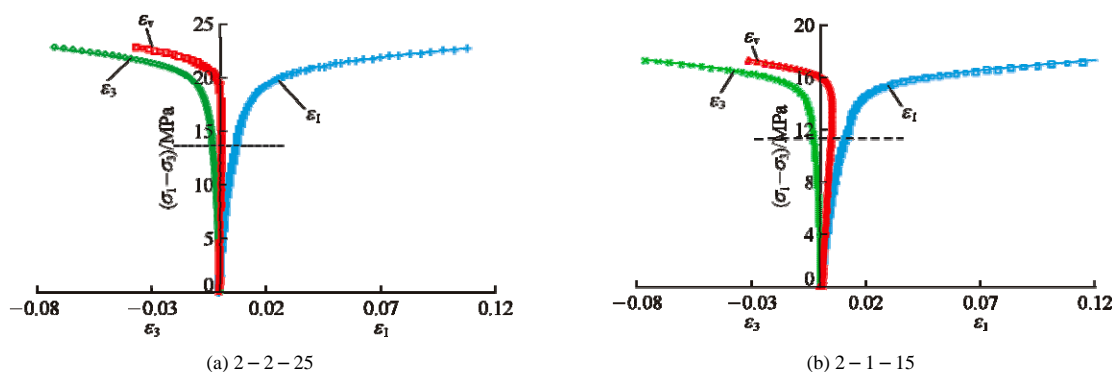


图5 常规加荷条件下错动带试样典型应力-应变曲线

Fig.5 Typical stress-strain curves of staggered zone specimens under loading conditions



(a) 2-2-25

(b) 2-1-15

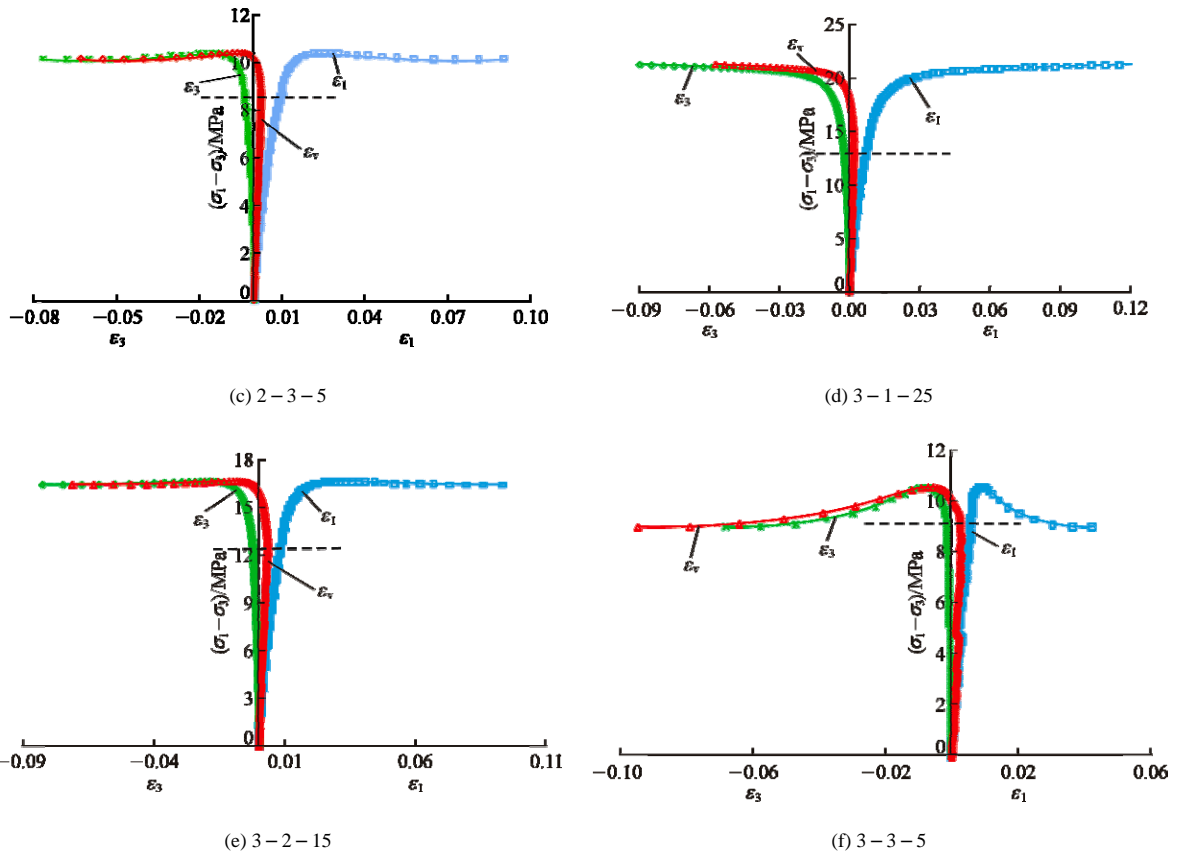
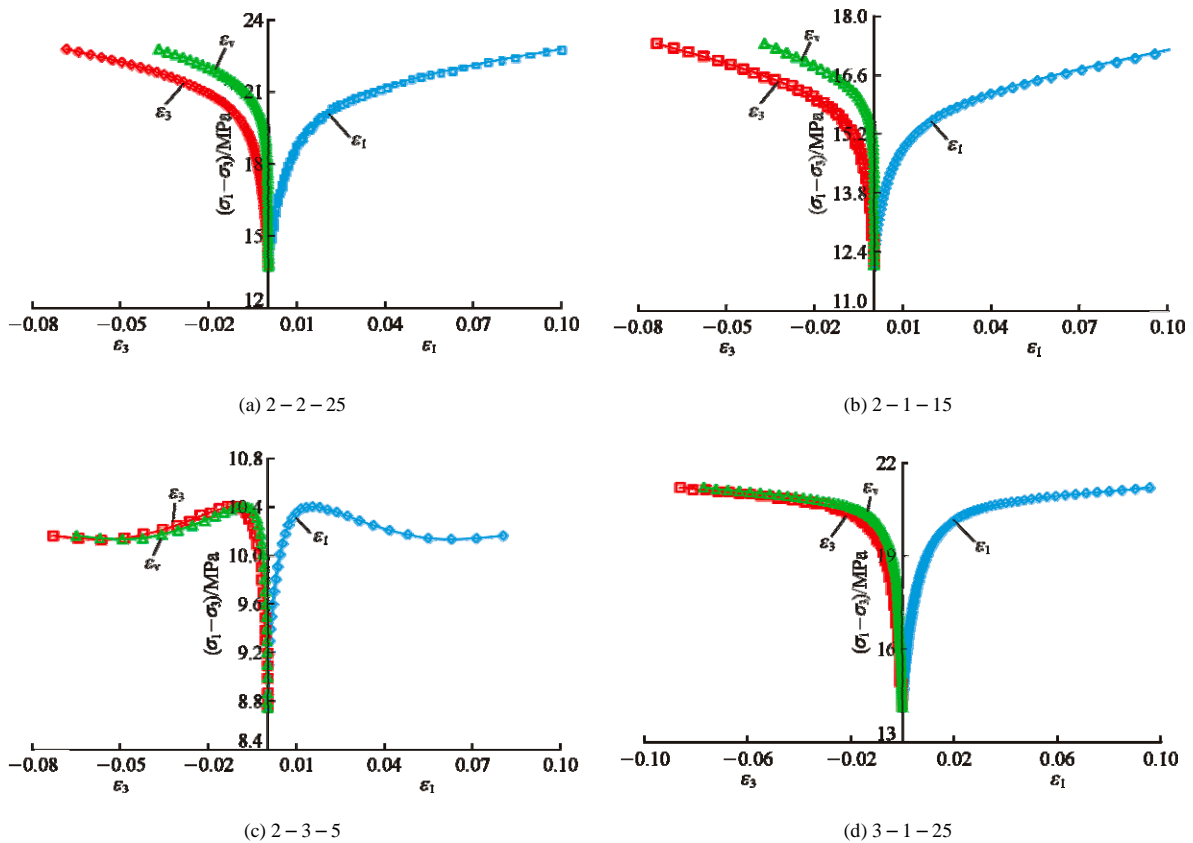


图 6 卸荷条件下错动带试样典型应力-应变曲线

Fig.6 Typical stress-strain curves of staggered zone specimens under unloading conditions



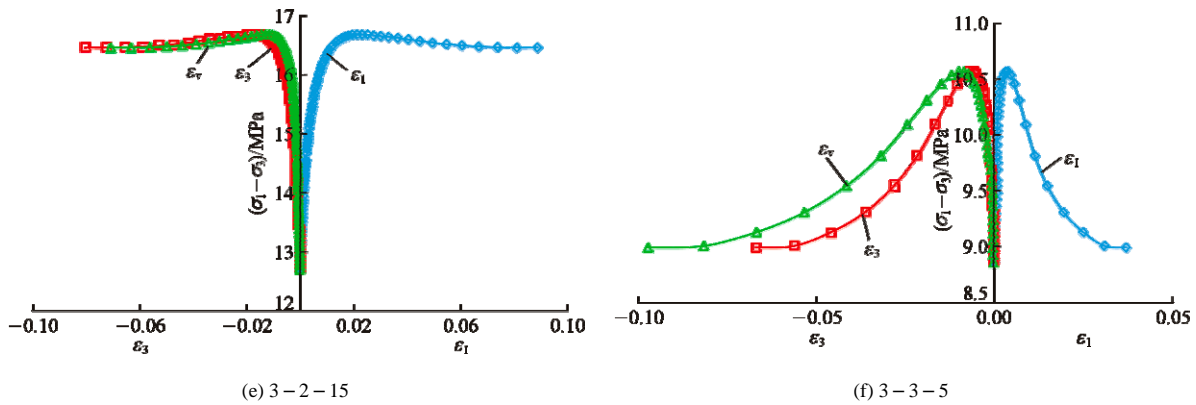


图7 忽略初始变形后错动带试样卸荷阶段典型应力-应变曲线

Fig.7 Typical stress-strain curves of staggered zone specimens under unloading conditions without considering initial strain

形成的小颗粒，极易滑动而不断填满颗粒空隙，使得试样的密度增加而呈现应变硬化型。

(2) 由图6和7可知，卸荷条件下，无论是增轴压卸围压，或是卸轴压卸围压状态，较高围压条件下(25和15 MPa初始围压)，卸荷开始后，随着偏应力的增大，错动带试样逐渐进入破坏状态，应力-应变曲线无明显下降段，基本呈应变硬化型或塑性流动明显；而5 MPa初始围压条件下，错动带表现为一定的应变软化特性；表明错动带卸荷特征与初始围压相关性很大。

(3) 图6,7表明，与常规加荷试验相比，不同初始围压条件下，2种卸荷方案卸围压前后错动带试样的变形规律皆出现了显著变化：轴向应变曲线斜率突然增大，说明轴向压缩变形增速减慢；横向应变曲线斜率稳步变小，表明横向变形加速增长；体积应变曲线斜率左拐，说明错动带试样从体积压缩转为体积膨胀，且错动带试样从卸围压开始即表现出剪胀现象。这些特征在不考虑初始压缩变形的卸荷阶段典型应力-应变曲线表现更明显：在卸荷初始阶段，轴向变形不如横向变形大，变形以横向变形为主，表现在应力-应变曲线上，横向应变曲线较为光滑，并迅速向左发展，表明横向变形一直处于加速增长状态。在临近破坏状态时，围压很小的变化，都会引起较大的横向与轴向变形，即塑性流动。而整个卸荷过程中，体积应变曲线比较光滑，其变化规律主要取决于错动带横向应变发展规律。

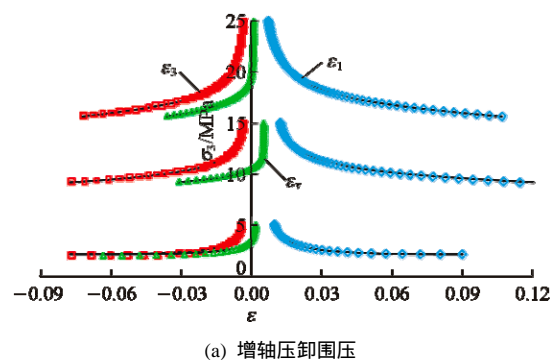
(4) 相同初始围压条件下，方案II较I下的峰值强度有所减小，对应轴向应变也有所减小，方案III较II峰值强度和对应轴向应变更小；围压相对较低(15和5 MPa初始围压)时，方案I应力-应变曲线均为应变硬化型或理想弹塑型，卸荷方案应力-应变曲线则出现峰值应力跌落，表现出显著的应变软

化特性(方案III比II表现更为突出)。

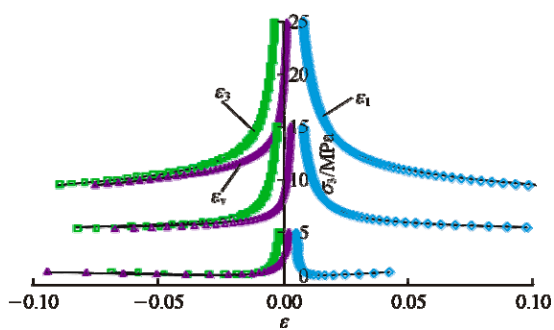
(5) 相同初始围压条件下，2种卸荷方案下错动带横向变形在峰值点附近较常规加荷方案I的大(方案II比III侧向扩展变形表现更为突出)，同时卸荷残余横向应变(8%~10%)大于加荷残余横向应变(5%~6%)；卸荷横向应变扩展明显，特别是临近破坏状态(见图7)。

(6) 观察图5~7中错动带试样应力-应变曲线，相同初始围压条件下，错动带达到卸荷破坏时的围压减小量远小于压缩破坏时的轴向应力的增加量，表明卸荷更容易导致错动带破坏，这与现场错动带在开挖卸荷作用下发生破坏时一致的。

(7) 相同初始围压条件下，2种卸荷方案下错动带体积应变较常规加荷方案I的大得多，从卸荷点开始，错动带即出现扩容，方案III比II侧向扩展变形表现更为显著；这一点在图8中体现更明显。图8为错动带卸荷过程中的变形特征，即围压-应变曲线，发现卸荷过程中错动带试样向卸荷方向卸荷回弹变形比较强烈，造成扩容现象显著，试样出现横向张拉裂纹，逐步表现出应变软化破坏特征。推测其主要原因是卸荷应力状态实际上相当于在原来的应力状态上叠加一个侧向拉应力使得错动带试样



(a) 增轴压卸围压



(b) 卸轴压卸围压

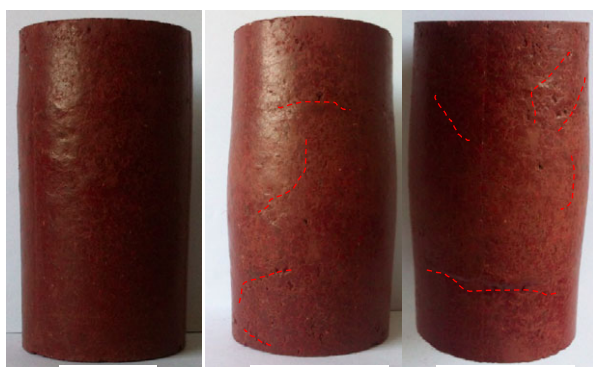
图 8 卸荷过程中错动带试样的变形特征

Fig.8 Deformation characteristics of staggered zone specimens in course of unloading

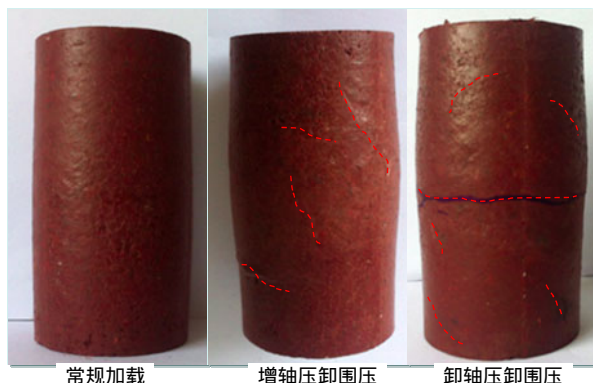
表面产生张剪型裂纹，同时宏观上样表现出明显的侧向扩容，后期的应力增长主要来源于错动带颗粒的破碎和摩擦力。

### 3.2 卸荷破坏特征

图 9 给出了初始围压 5 和 15 MPa 条件下错动带试样常规加荷和卸荷条件下最终的破坏形态，综合图 5~9 可以看出：



(a) 初始围压 5 MPa



(b) 初始围压 15 MPa

图 9 不同初始围压下错动带试样常规加荷和卸荷条件下最终的破坏形态

Fig.9 Failure modes of staggered zone specimens in triaxial compression tests and triaxial unloading tests under different confining pressures

(1) 比较错动带试样在常规加荷和 2 种卸荷方案下的破坏形态可知，错动带试样在常规三轴压缩、卸荷条件下都没有出现类似岩石般的破碎状态，仍然为较完整的圆柱体，以腰鼓型破坏为主，部分存在张剪裂纹。

(2) 对于 2 种卸荷应力路径，错动带试样表面都出现了张/张剪裂纹，在初始围压较高的情况下，卸轴压卸围压方案 III 错动带试样表面出现环向/横向裂纹，这是因为在双向卸荷时，错动带在次卸荷方向也会出现张拉裂纹。

(3) 与加荷条件相比，错动带在三轴卸荷试验条件下剪胀扩容现象更加显著，并具有一定的张性破坏特征，产生的张拉剪切裂纹如图 9 所示。这充分说明错动带在常规加荷和卸荷 3 种应力路径的力学响应是不同的<sup>[18]</sup>，常规加荷过程中，围压恒定，轴压增加，当错动带这种介于岩石和土之间的非均质颗粒材料进入塑性以后，以颗粒的摩擦、滑移和颗粒破碎为主，轴压增加是因为错动带孔隙闭合，同时稳定的围压有效地限制了剪切面的开展，膨胀效应不太明显。而在增轴压卸围压和卸轴压卸围压过程中，错动带试样向卸荷方向卸荷回弹变形比较强烈，造成扩容现象显著，破坏主要是因为错动带试样向卸荷方向的强烈扩容所致，同时也进一步说明错动带的破坏特征与应力路径密切相关，需要给予高度重视和考虑。这为反映白鹤滩地下厂房高地应力条件下错动带的开挖卸荷变形破坏机制提供有力依据。

## 4 卸荷条件下力学参数变化规律

### 4.1 卸荷变形参数劣化

通常情况下，变形参数都是通过单轴试验(弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ )获取：

$$\left. \begin{aligned} E &= d\sigma_i / d\varepsilon_i \\ \mu &= d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

然而，对于错动带而言，在常规加荷条件和卸荷条件下的求解与单轴试验是不同的，卸荷过程中横向变形十分显著，只考虑轴向应变显然不准确，因此，在考虑轴向应变和横向应变的同时，也需要考虑轴压和围压的影响；为了求得卸荷过程中每一应力状态下错动带的变形参数，采用以下计算公式<sup>[19]</sup>，即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] / E \\ \varepsilon_2 &= \sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3) / E \\ \varepsilon_3 &= [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] / E \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于常规试验  $\sigma_2 = \sigma_3$ ，对式(2)进行变换后，得

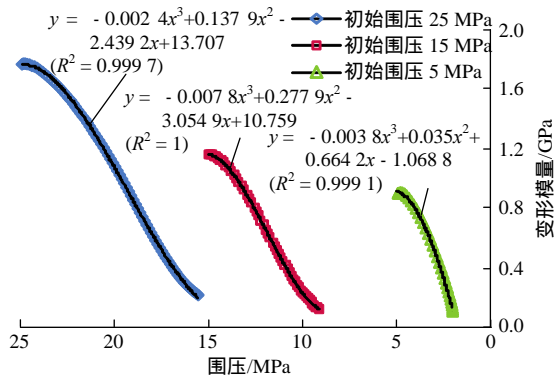


出变形模量和泊松比公式为

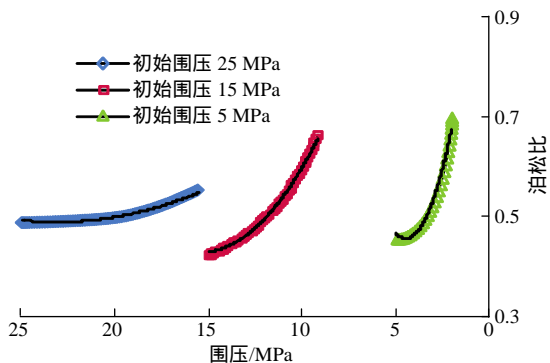
$$\left. \begin{aligned} E &= (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) / \varepsilon_1 \\ \mu &= (B\sigma_1 - \sigma_3) / [\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1] \\ B &= \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中：B 为卸荷过程中横向应变和轴向应变之比。

图 10, 11 分别给出了增轴压卸围压和卸轴压卸围压 2 种卸荷方案下错动带试样的变形模量和泊松比随围压的变化关系曲线, 图 12 为 2 种卸荷应力路径下错动带变形模量 E 和体积应变  $\varepsilon_v$  的关系曲线。



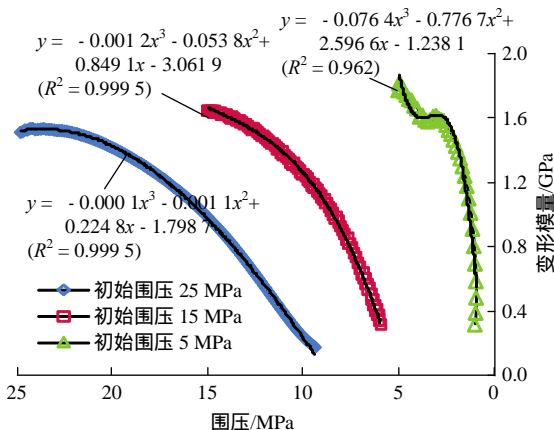
(a) 变形模量



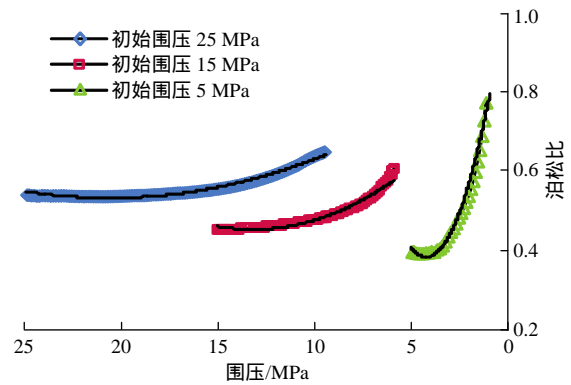
(b) 泊松比

图 10 增轴压卸围压过程中错动带试样变形参数变化特征

Fig.10 Characteristics of deformation parameters of staggered zone specimens in course of loading axially and unloading of confining pressure



(a) 变形模量



(b) 泊松比

图 11 卸轴压卸围压过程中错动带试样变形参数变化特征

Fig.11 Characteristics of deformation parameters of staggered zone specimens in course of unloading of axial and confining pressure

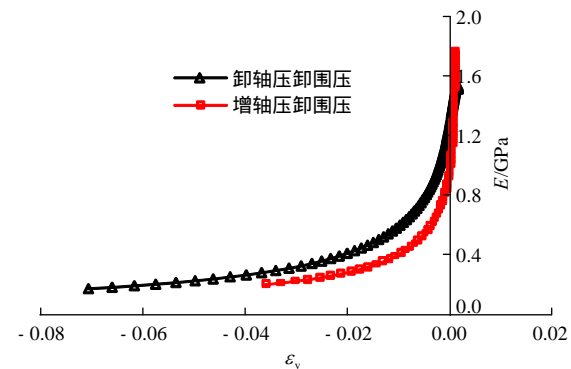


图 12 卸荷过程中错动带试样变形模量 E 和体积应变  $\varepsilon_v$  的关系曲线图

Fig.12 Curves of E and  $\varepsilon_v$  of staggered zone specimens in the process of unloading

从图 10 ~ 12 中可以得到以下规律性认识：

(1) 对于错动带的 2 种卸荷方案, 变形模量的变化趋势基本相同, 但是随着初始围压的降低, 变形模量值有所降低。

(2) 从图 10(a)和 11(a)可知, 不论是增轴压卸围压方案, 还是卸轴压卸围压方案, 卸荷过程中错动带的变形模量随围压的减小而逐渐降低, 基本呈三次多项式递减(表达式见图 10, 11), 劣化效应十分明显, 且其非线性特征随初始围压的增大而表现更为显著。

(3) 对比图 10(a)和 11(a)可以发现, 方案 III 中, 错动带变形模量变化非线性特征较增轴压卸围压方案 II 更为显著, 方案 II 在相对较低初始围压状态基本为线性特征; 在方案 III 卸荷过程中, 变形模量呈加速降低趋势更为突出。

(4) 对于错动带的 2 种卸荷方案, 泊松比的增加过程与变形模量的变化趋势基本类似, 在卸荷初始阶段, 随着围压的降低, 泊松比增长较为缓慢,

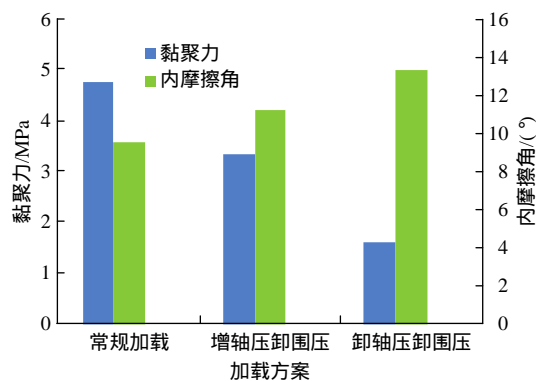
后期增长较快，整体呈近似抛物线递增趋势；方案 III 较 II 泊松比增加速率稍大一些，但 2 种方案中泊松比增量值基本相同。

(5) 在卸荷至一定程度后，错动带泊松比量值超过 0.5(弹塑性材料极限泊松比值)，甚至增大到 0.7~0.8。从图 9 可以发现，错动带试样在加荷条件下仅观察到了剪胀；而在卸荷条件下，错动带试样除测试到明显的卸荷扩容变形外，还在其表面观察到明显的裂纹，这表明引起卸荷条件下错动带强烈扩容的原因除材料自身体积变形外，还包含了试样内部裂纹的扩展和张开，因此测得泊松比已不是一般意义上的材料基本属性参数<sup>[20]</sup>，会出现大于 0.5 的情况。

(6) 从图 12 可以得出，错动带体积模量随体积应变的增加而减小，卸荷初始阶段劣化趋势较快，后期逐步减缓，整体呈负指数式降低。本质上，错动带在卸荷应力路径下的破坏是一个剪胀扩容显著的过程，也是其变形参数随其扩容而不断劣化的过程。

#### 4.2 卸荷强度参数特征

图 13(a)给出了不同应力路径下典型错动带破坏应力与围压的关系曲线。从图中可知不同应力路径下错动带试样的破坏应力皆随围压的增大而增大；但相同的初始围压条件下，相较于加荷条件，卸荷条件下错动带破坏应力有所降低，卸轴压卸围



(c) 不同应力路径下典型错动带黏聚力和内摩擦角特征

图 13 不同应力路径下错动带强度参数变化特征

Fig.13 Characteristics of strength parameters of staggered zone specimens under various stress paths

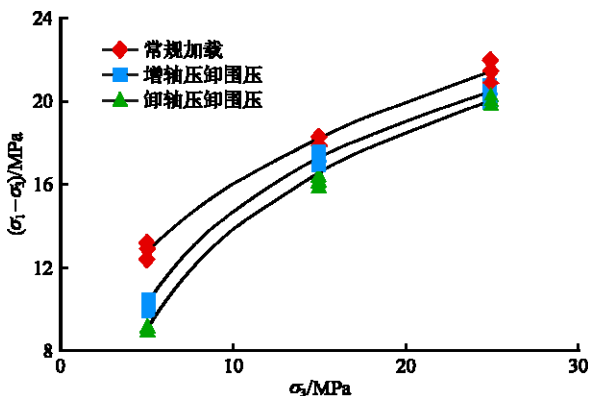
压方案较增轴压卸围压方案更低一些，这与现场观察到的高地应力条件下含错动带岩体在开挖卸荷条件下更容易遭到破坏的现象一致。

假定错动带加卸荷破坏遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则，回归得出的错动带在常规加荷和 2 种卸荷应力路径下的  $\sigma_1-\sigma_3$  的最佳关系曲线如图 13(b)所示，所求得的不同应力路径下的错动带黏聚力和内摩擦角柱状图如图 13(c)所示，可以发现，根据 2 种卸荷应力路径曲线所得的错动带试样的内摩擦角较常规加荷试验得到的内摩擦角要高，而黏聚力则显著降低；而卸轴压卸围压方案较增轴压卸围压方案劣化更显著。分析以上 2 种现象原因是，错动带在卸荷过程中的破坏是向卸荷方向的强烈扩容所致，而在加荷过程中以压剪腰鼓变形为主，因此卸荷破坏更严重，且破坏面的粗糙度则要更高一些。而且方案 III 中的试样在轴压和围压同时减小时，会使得破裂面张开更为明显，从而得到较低的黏聚力和较高的内摩擦角。

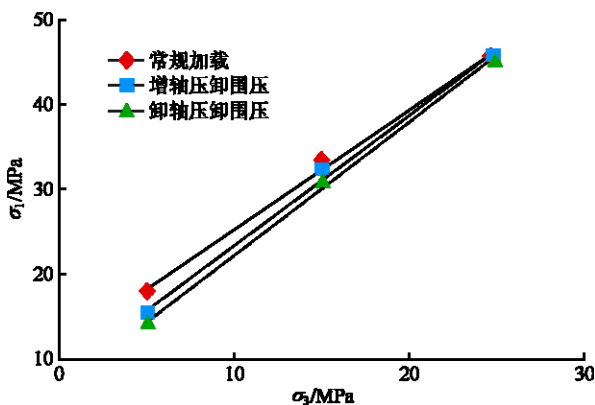
#### 4.3 错动带强度参数特征探讨

错动带常规加荷试验和不同应力路径下的卸荷试验从不同角度阐述了错动带高应力条件下的强度特征和力学响应，从以上 3 种类型试验分析可知，错动带强度参数特征具有典型的应力路径效应和围压效应，但除此之外还受到母岩的组构效应、弱胶结效应以及遇水软化效应的影响<sup>[21]</sup>，从而降低错动带本身或者错动带/母岩复合体的强度。

考虑到白鹤滩地下厂房错动带特殊的出露位置(高边墙)、超固结作用、高应力(实测最大主应力高达 33.39 MPa)以及开挖扰动卸荷作用，地下厂房洞室开挖后高边墙错动带黏聚力取值基本可以参考卸轴压卸围压应力路径下天然含水率错动带的试验结果，即 1 MPa 左右；因为此方案下错动带经历应力



(a) 不同应力路径下典型错动带破坏应力-围压曲线



(b) 不同应力路径下典型错动带  $\sigma_1-\sigma_3$  最佳关系曲线

路径与实际工程较为接近,且破坏模式为卸荷强烈扩容,同时此黏聚力值远小于三轴压缩试验所获取的黏聚力值,理论上可以接受。

同样,地下厂房洞室开挖后高边墙错动带的内摩擦角取值也可大致综合以上试验结果,并结合现场条件确定。考虑到开挖扰动和初始地应力卸荷作用会导致错动带本身强度参数的劣化,从而加剧含错动带岩体的破坏,因此,卸轴压卸围压应力路径下天然含水率错动带的内摩擦角试验结果取为 $16^\circ$ 是合理的。这为后续进一步讨论原状错动带强度特征、建立错动带的本构模型提供了有效依据。

## 5 结 论

本文通过该大型地下厂房开挖所揭露的错动带开展的一系列不同应力水平和应力路径下的不排水三轴常规加荷和卸荷试验,得到以下主要结论:

(1) 卸荷过程中,错动带卸荷应力-应变曲线特征与初始围压相关性很大;较高围压条件下(25和15 MPa 初始围压)应力-应变曲线无明显下降段,基本呈应变硬化型或塑性流动,而相对较低围压(5 MPa)条件下,错动带表现出一定应变软化特性。

(2) 与常规加荷试验相比,2种卸荷应力路径下错动带向卸荷方向回弹变形显著,横向变形加速增长;且从卸围压开始即表现出强烈扩容现象,卸轴压卸围压方案侧向变形增长更为显著。错动带卸荷应力状态实际上相当于在原来的应力状态上叠加拉应力,从而导致显著的卸荷回弹变形和扩容特征。

(3) 常规三轴压缩、卸荷条件下都没有出现类似岩石般的破碎状态,仍然为较完整的圆柱体,以腰鼓型破坏为主;卸荷应力路径下,试样表面出现了张/张剪裂纹,特别是初始围压较高的情况下,卸轴压卸围压方案试样表面出现环向/横向裂纹,这是由于双向卸荷(环向和轴向)使得错动带在次卸荷方向出现了张拉裂纹。

(4) 卸荷应力路径下,错动带变形模量随围压增大基本呈三次多项式递减,劣化效应十分明显,且变形模量的非线性特征随初始围压的增大而表现更为明显(卸轴压卸围压方案非线性特征更强);泊松比在卸荷初始阶段增加较为缓慢,后期随体积应变呈近似抛物线形式加速增加,卸轴压卸围压卸荷方案增加速率稍大。错动带变形参数的变化特征则是随着错动带的扩容而不断劣化的过程。

(5) 相同初始围压条件下,相较于加荷条件,卸荷条件错动带破坏应力有所降低,所得的错动带试样的内摩擦角较常规加荷试验得到的内摩擦角要高,而黏聚力则明显降低;卸轴压卸围压方案下的破坏应力较增轴压卸围压方案劣化更显著。

(6) 试验所采用的应力水平和应力路径基本涵盖和反映了错动带在洞室开挖过程中所经历的复杂的应力重分布过程,具有一定代表性,地下厂房洞室开挖后高边墙错动带强度参数取值基本可参考卸轴压卸围压应力路径下天然含水率错动带的试验结果,这为后续进一步讨论错动带强度特征、建立本构模型以及深入研究错动带影响下白鹤滩地下厂房稳定性提供了有效依据。

**致谢** 论文在撰写过程中,得到中国长江三峡集团公司白鹤滩建设部、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、中国葛洲坝集团公司白鹤滩施工局和中国水利水电第七工程局有限公司白鹤滩施工局等单位给予的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢!

## 参考文献(References):

- [1] 潘家铮. 水电与中国[J]. 水力发电, 2004, 30(12): 17-21.(PAN Jiazheng. Hydropower and China[J]. Water Power, 2004, 30(12): 17-21.(in Chinese))
- [2] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站地下厂房顶拱第一层及后续边墙开挖支护咨询材料[R]. 杭州: 中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院, 2014.(Huadong Engineering Corporation Limited of HydroChina Corporation. Consulting materials on the first layer and subsequent excavation and supporting of Baihetan hydropower station, Jinsha River[R]. Hangzhou: Huadong Engineering Corporation Limited of HydroChina Corporation, 2014.(in Chinese))
- [3] 赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等. 高压下原状层间错动带三轴不排水剪切特性及其影响因素分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 365-371.(ZHAO Yang, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Undrained shear behaviour of intact infilled joint soil with triaxial shear tests under high pressure and its influence factor analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 365-371.(in Chinese))
- [4] 冯夏庭, 王泳嘉. 泥化夹层错动带残余强度的人工神经网络[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(3): 17-21.(FENG Xiating, WANG Yongjia. Artificial neural network of the residual strength of mudded intercalation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1995, 5(3): 17-21.(in Chinese))
- [5] 贾志远. 层间剪切带工程地质专家系统[J]. 水文地质工程地质, 1994, 21(3): 29-34.(JIA Zhiyuan. Engineering geological expert system for interlayer shear zone[J]. Hydrogeology and Engineering

- Geology, 1994, 21(3): 29–34.(in Chinese))
- [6] 王世梅. 层间剪切带工程地质专家系统知识模型的建立[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2): 44–50.(WANG Shimei. Construction of knowledge model of expert system for interlayer shear zone[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(2): 44–50.(in Chinese))
- [7] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 含层间错动带岩体的破坏模式及其剪切特性研究方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 129–136.(XU Dingping, FENG Xiating, CUI Yujun, et al. On failure mode and shear behavior of rock mass with interlayer staggered zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 129–136.(in Chinese))
- [8] SKEMPTON A W. The strength along structural discontinuities in stiff clays[C]// Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength of Natural Soils and Rocks. Oslo: [s.n.], 1967: 153–170.
- [9] TAN T K, LI K R. Relaxation and creep properties of thin interbedded clayey seams and their fundamental role in the stability of dams[C]// Proceedings of the International Symposium on Weak Rock. [S.l.]: A.A. Balkema, 1981: 369–374.
- [10] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱层带的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 584–587.(FU Wenxi, NIE Dexin, SHANG Yuequan, et al. Study on engineering properties of weak layers underground stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 584–587.(in Chinese))
- [11] 张成恭, 聂德新, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层泥化的可能性分析[J]. 地质评论, 1990, 30(2): 160–167.(ZHANG Xiangong, NIE Dexin, HAN Wenfeng. The effect of confining pressure and the possibility of argillization of weak intercalations[J]. Discussion of Geology, 1990, 30(2): 160–167.(in Chinese))
- [12] 赵然惠, 周瑞光, 孙广忠. 软弱结构面的工程力学效应[J]. 工程勘察, 1981, (6): 56–59.(ZHAO Ranhui, ZHOU Ruiguang, SUN Guangzhong. Engineering mechanical effect of weak structural plane[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1981, (6): 56–59.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [14] 孟国涛, 褚卫江. 金沙江白鹤滩岩石力学综合研究地下厂房第 I 层开挖围岩破坏机制与工程对策研究[R]. 杭州: 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 2014.(MENG Guotao, CHU Weijiang. Rock failure mechanism and engineering countermeasures in the excavation of the first layer of Baihetan hydropower station, Jinsha River[R]. Hangzhou: HydroChina ITASCA R&D Center Corporation Limited, 2014.(in Chinese))
- [15] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(ZHU Jiebing. Study on unloading mechanics and its reological properties of rock under high stress[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [16] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 205–2213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 205–2213.(in Chinese))
- [17] 胡云华. 高应力下花岗岩力学特性试验及本构模型研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.(HU Yunhua. Study on mechanical properties of granites under high pressure conditions and its constitutive models[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))
- [18] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 软岩三轴加-卸载试验的破坏特征及抗压强度取值方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 959–964.(DENG Huaifeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Research on failure characteristics and determination method for compressive strength of soft rock in triaxial loading and unloading tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 959–964.(in Chinese))
- [19] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机制及其稳定性研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007.(HUANG Da. Study on unloading deformation mechanism and stability of excavating surrounding rock mass of large underground caverns[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [20] 潘华, 陈国兴, 孙田. 原状海洋土动泊松比的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1): 346–350.(PAN Hua, CHEN Guoxing, SUN Tian. Experimental research on dynamic Poisson's ratio of undisturbed marine soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 346–350.(in Chinese))
- [21] 江权, 冯夏庭, 周辉, 等. 层间错动带的强度参数取值探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3379–3386.(JIANG Quan, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Discussion of strength value for interlayer shear belt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3379–3386.(in Chinese))