

中文引用格式:李翔,苗森,杨博. 不同岩性与断面形状的深部硬岩隧洞板裂失稳试验[J]. 中国安全科学学报,2024,34(8):108-119.

英文引用格式:LI Xiang, MIAO Sen, YANG Bo. Experimental study on spalling failure of deep hard rock tunnels with different lithology and cross-section shapes[J]. China Safety Science Journal,2024,34(8):108-119.

# 不同岩性与断面形状的深部硬岩隧洞 板裂失稳试验\*

李翔 副教授, 苗森, 杨博

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

中图分类号: X935

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.0597

基金项目: 国家自然科学基金资助(51874354, 52074350)。

**【摘要】** 为探究岩性与断面形状对深部硬岩隧洞板裂失稳特性的影响,开展板裂失稳室内真三轴试验。首先,选择以大理岩和花岗岩为主的2种硬岩试样以及高边墙城门洞形和曲墙拱形2种实际应用中的典型断面形状试样;然后,从板裂失稳形态、剥落岩板(片)特征及板裂特征应力3方面入手,对比分析不同岩性与断面形状影响下的不同破坏特征;最后,利用数值模拟探究围岩板裂裂纹发育扩展过程中相应的位移及应力分布特征,进一步揭示深部硬岩隧洞的板裂失稳特性。结果表明:试验过程中,对于板裂失稳形态,与花岗岩相比,大理岩试样岩板剥落及张开破坏现象更为显著;与高边墙城门洞形相比,曲墙拱形试样板裂破坏涉及的断面轮廓范围更小。对于剥落岩板(片)特征,不同岩性产生不同的剥落岩板形态;与高边墙城门洞形相比,曲墙拱形试样对应的近外层剥落岩板更趋细长。对于板裂特征应力,与大理岩相比,花岗岩试样在板裂开始时的应力门槛值更高,板裂失稳演化进程更快;与曲墙拱形相比,高边墙城门洞形试样从开始出现板裂直至发生明显板裂破坏的特征应力均更高。数值模拟中的位移较大区域集中在孔洞侧壁处,距离侧壁越远,位移相对越小;切向应力集中是导致板裂发生的主要原因。

**【关键词】** 岩性; 断面形状; 深部硬岩隧洞; 板裂失稳; 真三轴试验

## Experimental study on spalling failure of deep hard rock tunnels with different lithology and cross-section shapes

LI Xiang, MIAO Sen, YANG Bo

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** To explore the influence of the lithology and cross-section shape on spalling failure properties of deep hard rock tunnels, indoor true triaxial tests on spalling failure were performed. Firstly, two types of rock samples (marble and granite) and two typical cross-section shapes (high side wall gate arch shape and horseshoe shape) samples in practical applications were selected. Then, the failure characteristics under the influence of different lithology and cross-section shapes were analyzed from the three aspects including spalling failure mode, spalling rock plate characteristics, and the characteristic stress during spalling. Finally, numerical simulation was conducted to explore the corresponding displacement and stress distribution characteristics during the development and propagation of the cracks. Furthermore, the spalling failure characteristics of deep hard rock tunnels were investigated. The results indicated that the

slab peeling and opening failure phenomenon for the marble sample was more significant than the granite one in terms of spalling failure mode during the test process. Moreover, the cross-sectional contour range involved in spalling failure for the horseshoe shape sample was smaller than the high-side wall gate arch shape. Different lithologies presented different flaked rock slab shapes for different flaked rock slab characteristics. Compared with the high-side wall gate shape, the flaked rock slabs near the outer layer relevant to the curved wall arch sample were more slender. For the characteristic stress during spalling, the granite sample had a larger threshold at the beginning of the spalling and a faster rate for the evolution process of the spalling failure compared with the marble one. Furthermore, compared with the horseshoe shape sample, the characteristic stresses of the high-side wall gate arch sample were higher from the beginning of plate cracking to the occurrence of obvious plate cracking failure. The area with large displacement in the numerical simulation was mainly observed on the side wall of the hole. The farther away from the side wall, the smaller the displacement. Moreover, the major reason the spalling occurs can be attributed to the tangential stress concentration.

**Keywords:** lithology; cross-section shape; deep hard rock tunnel; spalling failure; true triaxial test

## 0 引言

目前我国地下空间开发蓬勃发展,与之相关的基础交通、水利水电和矿山能源等多类隧洞工程正逐步向深部推进,进而呈现高应力、大埋深、地质复杂、灾害频发等特点<sup>[1-2]</sup>。其中,深部硬岩隧洞围岩的脆性板裂破坏是这类工程失稳的重要形式之一<sup>[3]</sup>,严重阻碍其掘进及后续支护施作的实施,且随埋深的增加极易导致岩爆等安全事故,造成重大人员伤亡和经济损失。因此,深入开展深部硬岩隧洞板裂失稳特性研究具有重要意义。

近些年来,针对深部硬岩板裂失稳问题,学者们从不同途径开展了大量研究,其中,从室内试验模拟这一途径来看,存在2类研究方法:①针对硬质类实心完整岩块(或相似材料),开展单轴<sup>[4]</sup>、双轴<sup>[5]</sup>及三轴<sup>[6]</sup>试验,此类试验采用的完整岩块尺寸相对较小,易造成突发性破坏,不利于充分认知板裂失稳的渐进演化全过程,且其主要体现材料自身的破坏,难以反映空间效应对隧洞围岩板裂失稳的影响。②为考虑隧洞空间整体特征,针对含孔洞硬岩试样(或相似模型)开展单轴<sup>[7]</sup>、双轴<sup>[8]</sup>等形式的先开孔、后加载试验,以及体现卸荷效应的先加载、后开孔试验(如双轴条件下的孔内卸压<sup>[9]</sup>、孔洞内充填物挖出<sup>[10]</sup>及配备挖掘<sup>[11]</sup>或钻孔<sup>[12]</sup>装置等不同手段)。而针对第②类的室内试验研究,为反映深部硬岩隧洞赋存环境下的三维应力状态,在上述单、双轴试验加载形式分别体现一、二维应力状态基础上,须进一步考虑沿隧洞轴向的主应力作用,因此,这类室内试验模拟需从现有单、双轴加载形式逐步拓展

至真三轴加载形式。需要指出,在此过程中如能实现模拟开挖卸荷的先加载、后开孔方式,无疑是最具工程合理性的一种理想试验手段,但该方式目前尚很难具备可操作性<sup>[13]</sup>。为此,现阶段硬岩试样真三轴加载试验研究仍主要借鉴先开孔、后加载的方式。总体而言,近年来有关这方面的研究正处于起步发展阶段,虽已取得长足进步,但仍存在2个方面的不足:①断面形状作为显著影响隧洞围岩破坏模式的重要因素之一<sup>[14]</sup>,已有研究着重考虑圆形<sup>[15]</sup>、椭圆形<sup>[16]</sup>及矩形<sup>[17]</sup>等简单常规断面形状,这与工程实际应用中相对复杂的高边墙城门洞形和曲墙拱形等典型断面形状并不完全相符。工程实践表明<sup>[18]</sup>:对于高边墙和不同曲率拱形区段等关键不利部位,其所在断面轮廓位置应力分布的明显变化将导致裂纹孕育、发展及由此形成的板裂失稳模式与已有试验结果存在较大差异,而当前针对含预制孔洞硬岩试样,尚未见这2种断面形状的真三轴试验研究。②岩性作为围岩产生变形破坏的另一主控因素,不同岩性之间物理力学性质存在差异,导致其具有不同的破坏机制<sup>[19]</sup>,而现有真三轴试验,多采用单一岩性的含预制孔洞硬岩试样,有关不同岩性对深部硬岩隧洞板裂失稳影响程度差异性的研究亦很少涉及。

鉴于此,笔者拟综合考虑岩性与断面形状这2类显著影响深部硬岩隧洞板裂失稳模式的重要因素,针对不同岩性与断面形状相互组合形成的不同试样,开展室内真三轴试验模拟,分析试验过程及各自呈现的不同破坏特征,进而探究围岩板裂裂纹发育扩展过程中相应的位移及应力分布特征,以期深化对深部硬岩隧洞板裂失稳特征的研究。

# 1 板裂失稳试验方案设计

## 1.1 不同岩性与断面形状的试样制作

在试样制作过程中,选用质地均匀、完整性好的硬岩材料,遵照国际岩石力学与工程学会有关规定<sup>[20]</sup>加工预制开孔的立方体试样(100 mm×100 mm×100 mm,标准公差≤0.017 5 mm,垂直公差≤0.025 mm)。其中,岩性分别采用大理岩和花岗岩;断面形状分别加工制作成高边墙城门洞形和曲墙拱形的贯穿孔洞。据此针对同种岩性、2种断面以及

同种断面、2种岩性的情况,通过岩性与断面形状的相互组合可获得以下4种不同试样。试样①:大理岩+高边墙城门洞形;试样②:大理岩+曲墙拱形;试样③:花岗岩+高边墙城门洞形;试样④:花岗岩+曲墙拱形,其断面形状尺寸及试样实物如图1所示。

试验开始前须将以上试样对应的硬岩材料加工制作成尺寸φ50 mm×100 mm的圆柱体试件,利用岩石测试系统开展单轴压缩试验。大理岩与花岗岩材料的基本物理力学参数取值(表中数值为同种岩性加工获得若干试样后,取其算术平均值)见表1。

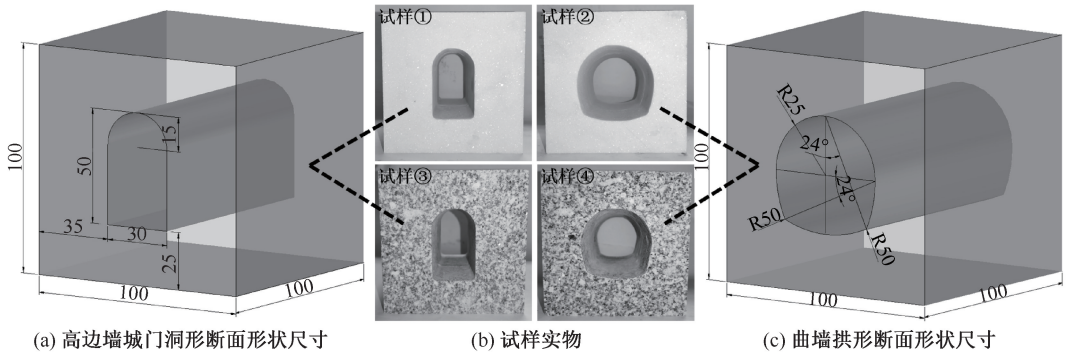


图1 断面形状尺寸及试样实物

Fig. 1 Cross-section shape size and sample

表1 试样材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock samples

硬岩种类	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	纵波波速/(m·s <sup>-1</sup> )
大理岩	55.8	91.7	0.21	2.80	4 485
花岗岩	63.7	88.4	0.30	2.61	3 472

## 1.2 板裂失稳试验设备与装置

试验加载仪器采用自行研制的岩石真三轴电液伺服试验系统,如图2所示。主要技术参数为:前、后和左、右2个水平方向(X、Y方向)可施加最大荷载2 000 kN,垂直方向(Z方向)可施加最大荷载3 000 kN,这3个方向加载速率为10 N/s~10 kN/s。

试验过程中试样板裂失稳全过程,须配合使用在特殊加工的开孔加载块内安装微型摄像头的视频监控系统,具体设计布置如图3所示。

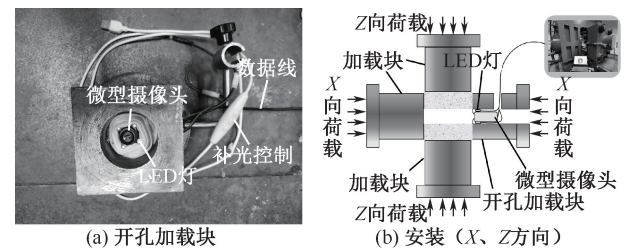
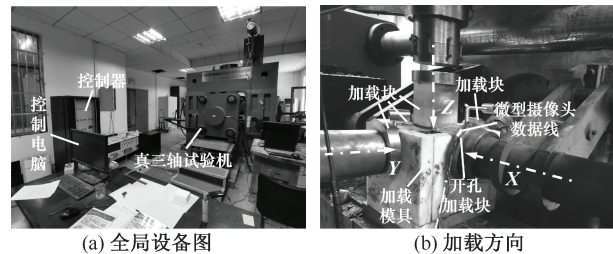


图3 视频监控系统

Fig. 3 Video monitoring system

## 1.3 具体加载方案

试验加载模拟的初始应力状态参照埋深H为500 m的地应力环境<sup>[12,16]</sup>,以该埋深为例,依据中国地应力测量结果计算地应力<sup>[21]</sup>,并设σ<sub>x</sub>、σ<sub>y</sub>、σ<sub>z</sub>分别对应图2b真三轴试验系统中X、Y、Z方向上的应

图2 TRW-3000 真三轴电液伺服试验系统

Fig. 2 TRW-3000 true triaxial electro-hydraulic servo testing system

在三向应力加载作用下,为便于实时观察、记录

力,且选取  $X$  方向为最大水平主应力方向,则分别有  $\sigma_x = 17.7 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_y = 9.9 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_z = 13.5 \text{ MPa}$ ,将其视为初始应力值。相应地,断面形状分别为高边墙城门洞形和曲墙拱形时的初始应力状态如图 4 所示(图中箭头表示三向初始应力值对应的作用方向,三向初始应力的具体加载方式如图 2b、图 3b 所示)。

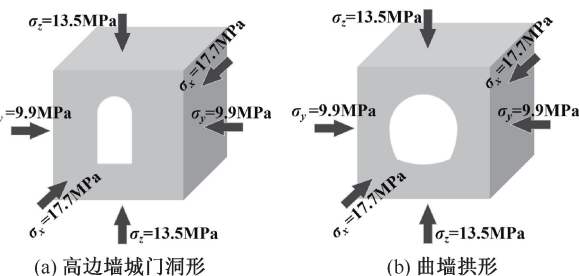


图 4 初始应力状态

Fig. 4 Initial stress condition

考虑到深部硬岩隧洞围岩受到开挖掘进的影响,原岩应力初始状态被打破,围岩径向应力等迅速卸荷至较低水平,而竖向洞顶部位不断下沉,对围岩具有明显的分级加载作用<sup>[22]</sup>;且为防止试样在持续加载过程中出现整体破坏,故试验加载路径借鉴已有试验<sup>[12,17]</sup>采用的三向同时加载至初始应力,垂直方向继续加大荷载至某一水平后,实施分级加载并保载的加载路径,如图 5 所示。其中,当试样加载达到三向初始应力状态后,将  $X$  方向由负荷控制(力控制)调整为位移控制,通过限制试样孔洞沿该方向的变形,以模拟平面应变状态。

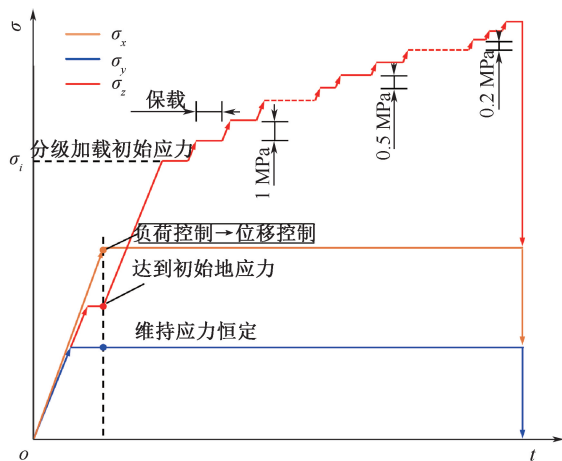


图 5 应力路径

Fig. 5 Stress path diagram

## 2 板裂失稳试验过程及结果

通过视频监控系统实时观察、记录板裂全过程,以下结合时间及应力状态,通过裂纹出现、扩展及贯

通,直至岩板(片)发生屈曲张开、剥落等典型监控画面,分别展示前述 4 种试样的板裂失稳渐进过程,如图 6—图 9 所示。

考虑到论文篇幅限制,以下仅针对图 6 简要描述试样 ①:大理岩+高边墙城门洞形的板裂失稳渐进过程。从图中可以看出,在初始地应力状态(图 6a)下,洞壁完好,初始破坏发生在  $\sigma_z$  达到 20.0 MPa 的应力状态(图 6b),此时右下拱脚处后端出现微小岩片的剥落,右侧壁有隆起。当  $\sigma_z = 25.0 \sim 32.5 \text{ MPa}$ (图 6c—图 6e),右下拱脚处后端出现沿  $X$  方向的裂纹,并扩展至中部,导致在此处有小型岩片屈曲张开(图 6d),板裂开始形成,岩片发生剥落;左侧竖直侧壁后端出现竖向裂纹,并伴随左上拱肩、侧壁中部的颗粒弹射,左上拱肩处还出现了小型岩片张开。当  $\sigma_z = 35.5 \sim 39.5 \text{ MPa}$ (图 6f—图 6g),洞壁破坏主要集中在其左侧,主要形式为裂纹扩展、部分岩板张开及小型岩片剥落;左上拱肩处有裂纹沿  $X$  方向从前端延伸至中部(图 6f),同时后端竖向裂纹向上发展,并在左侧壁形成了贯穿前后的裂纹(图 6g),进而导致左侧拱肩处发生岩片屈曲张开。当  $\sigma_z = 40.5 \sim 41.2 \text{ MPa}$ (图 6h—图 6p),左侧壁整体张开,并在  $\sigma_z = 41.0 \text{ MPa}$  时整体剥落(图 6j),可观察到洞壁左侧的岩片剥落后,其原位置处仍有薄岩板张开,并发生岩屑与颗粒的滑落、岩板(片)的剥落(图 6k—图 6m),其内部甚至还有新发育的薄岩板在层层张开(图 6n—图 6p),且在  $\sigma_z = 41.2 \text{ MPa}$  的保载阶段,这些层层张开的薄岩板之间的间距越来越大,直至发生剥落。从图 6p 可以看出,左侧壁若干层薄岩板层层剥落;在图 6r 中还可看到右侧竖直侧壁岩板发生屈曲张开;在图 6s 中更是进一步出现右上拱肩岩片及碎屑颗粒的滑落,右侧竖直侧壁又有薄岩板张开,此时试样板裂现象十分显著,图 6s 为试样最终破坏形态。

## 3 板裂失稳试验结果及对比分析

### 3.1 不同岩性与断面形状的板裂失稳形态对比

针对上述 4 种试样对应的试验前后情形,分别从岩性与断面形状 2 方面入手,进一步对比分析试验揭示的板裂失稳具体形态。试样左、右侧壁破坏前后、试样整体破坏前及其破坏清理后的对比如图 10 所示。

#### 3.1.1 同断面不同岩性影响下的板裂失稳形态

由图 10 可知:对于大理岩和花岗岩 2 种岩性,当断面形状相同且固定为高边墙城门洞形时,大理岩试



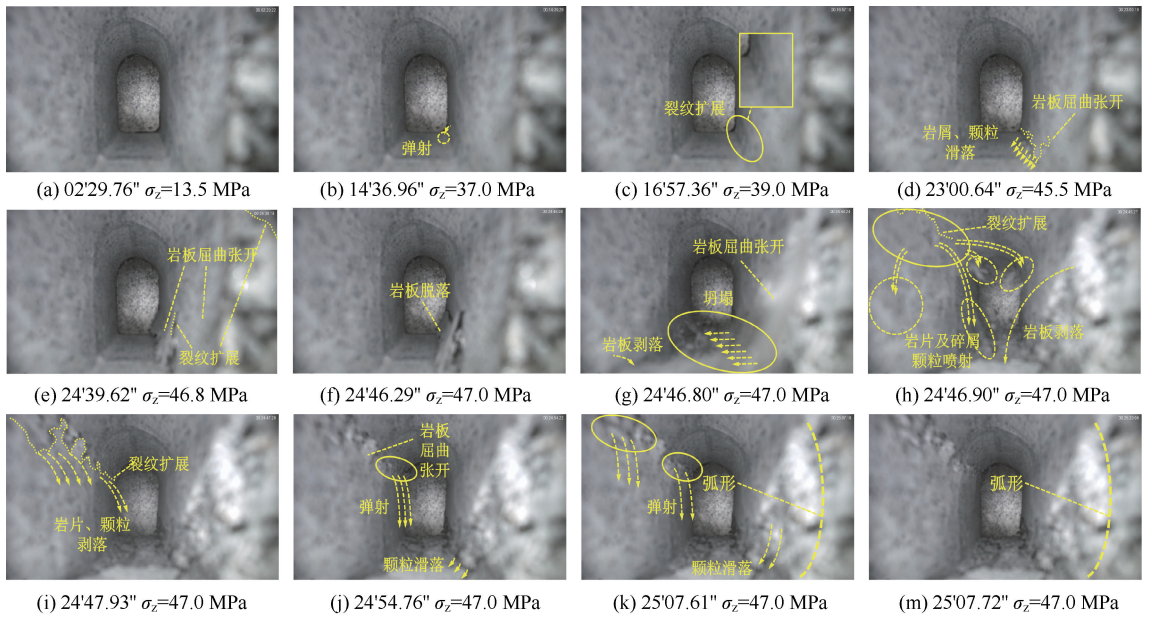


图 8 板裂失稳渐进演化过程 ( min's"; 试样 ③:花岗岩+高边墙城门洞形)

Fig. 8 Progressive process of spalling failure ( min's"; sample ③:granite + high sidewall gate arch shape)

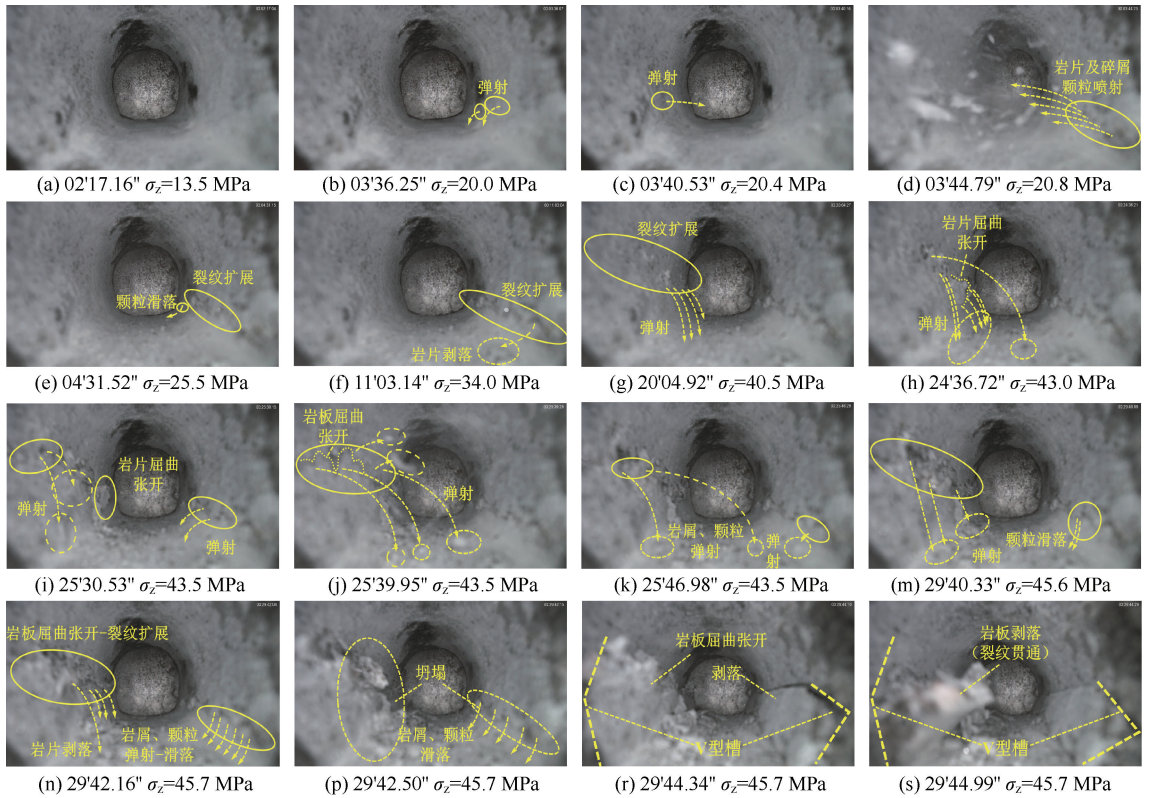


图 9 板裂失稳渐进演化过程 ( min's"; 试样 ④:花岗岩+曲墙拱形)

Fig. 9 Progressive process of spalling failure ( min's"; sample ④:granite + horseshoe shape)

另外,与大理岩试样板裂过程基本呈准静态的破坏现象不同,花岗岩试样在板裂过程中表现出一定的岩爆等动力破坏特征,如图 8h、图 9d 所示岩片及碎屑颗粒出现较为剧烈的喷射,这一现象表明板裂与岩爆等动力破坏特征之间存在相关性。

为进一步阐释大理岩和花岗岩这 2 种岩性对板裂失稳形态的影响,以下引入弹性应变势能指标<sup>[23]</sup>,其对应的表达式为:

$$U = \sigma_c^2 / 2E \quad (1)$$

式中:  $U$  为弹性应变能,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $\sigma_c$  为单轴抗压强度,

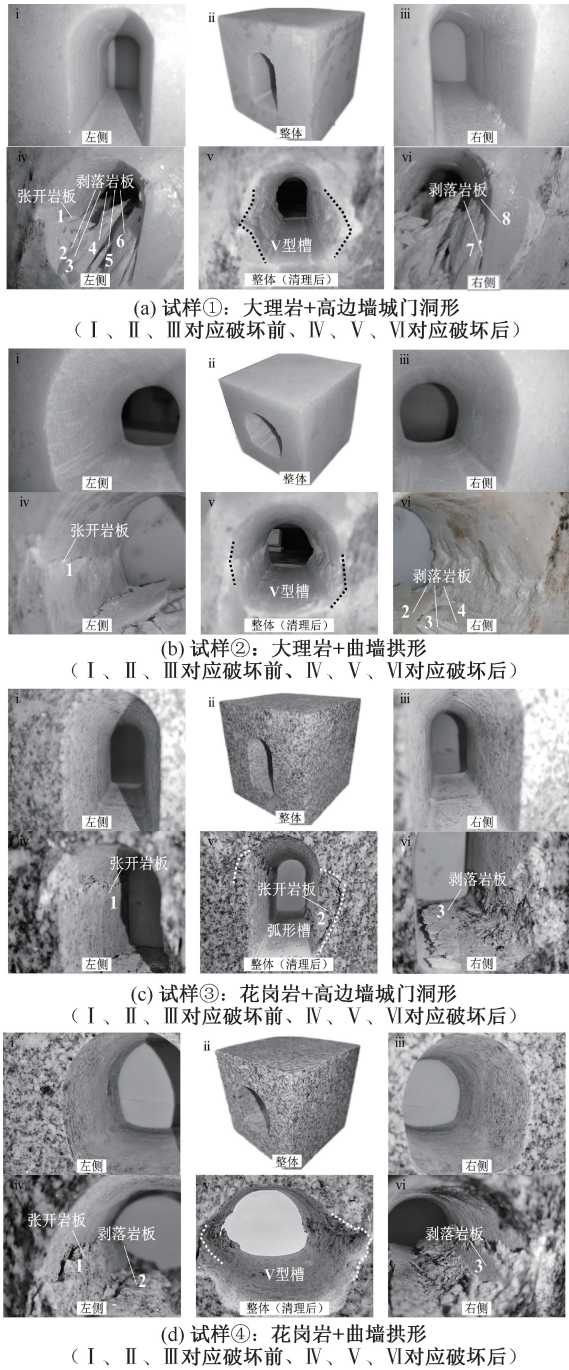


图 10 不同试样试验前后照片对比

Fig. 10 Comparison of sample photos before and after tests

MPa;  $E$  为弹性模量, GPa。

现以岩爆倾向性分类标准<sup>[24]</sup>为例, 判别分析岩爆倾向性, 具体如下:

$$\begin{cases} U < 40 \text{ kJ/m}^3 \text{ 弱岩爆} \\ 40 \text{ kJ/m}^3 < U \leq 100 \text{ kJ/m}^3 \text{ 中等岩爆} \\ 100 \text{ kJ/m}^3 < U \leq 200 \text{ kJ/m}^3 \text{ 强烈岩爆} \\ U > 200 \text{ kJ/m}^3 \text{ 极强烈岩爆} \end{cases} \quad (2)$$

将表 1 中大理岩试样对应的  $\sigma_c = 55.8 \text{ MPa}$ 、 $E = 91.7 \text{ GPa}$ , 花岗岩试样对应的  $\sigma_c = 63.7 \text{ MPa}$ 、 $E = 88.4 \text{ GPa}$ , 代入式(1), 可得试验所用大理岩和花岗岩的弹性应变能  $U$  分别为  $17, 23 \text{ kJ/m}^3$ 。与式(2)对比可知: 二者对应的  $U$  小于  $40 \text{ kJ/m}^3$ , 虽都对应弱岩爆, 但大理岩试样对应的弹性应变能 ( $17 \text{ kJ/m}^3$ ) 小于花岗岩试样对应的弹性应变能 ( $23 \text{ kJ/m}^3$ ), 表明大理岩试样的岩爆倾向性程度相对低于花岗岩试样, 这与图 6—图 9 所示大理岩板裂过程中基本呈准静态破坏, 而花岗岩试样则表现为岩片及碎屑颗粒较剧烈喷射等动力破坏特征 (图 8h 和图 9d) 的弱岩爆试验现象相符, 表明岩性是影响板裂失稳形态的重要因素。

### 3.1.2 同岩性不同断面影响下的板裂失稳形态

在同种岩性条件下, 从 2 种断面形状方面来看, 曲墙拱形试样板裂破坏涉及断面轮廓范围较为有限, 因应力集中在拱脚或拱肩弧度变化处产生 V 型槽 (图 10b、图 10d 中第 V 图)。与之相比, 高边墙城门洞形试样对应的 V 型 (或弧形) 槽 (图 10a、图 10c 中第 V 图) 涉及断面轮廓范围更广。从板裂破坏几乎覆盖整个侧壁的角度看, 根据图 1 所示试样断面形状尺寸数据, 高边墙城门洞形、曲墙拱形断面形状轮廓周长分别为  $147, 162 \text{ mm}$ , 侧壁长度分别为  $70, 42 \text{ mm}$ , 这 2 种断面形状对应的试样侧壁占其断面周长的比例分别为  $48\%、26\%$ , 与曲墙拱形相比, 高边墙城门洞形在这方面的占比明显更高, 这在一定程度上可视为板裂破坏所涉断面轮廓范围大小的影响原因。

另外, 当岩性相同且固定为大理岩时, 高边墙城门洞形试样在左右两侧直壁产生约 8 层剥落或张开岩板 (图 10a 中第 IV、VI 图), 而曲墙拱形试样产生约 4 层剥落或张开岩板 (图 10b 中第 IV、VI 图), 表现为高边墙城门洞形试样的剥落及张开破坏现象更趋显著。

### 3.2 不同岩性与断面形状的剥落岩板特征对比

试验完成后, 对 4 种试样板裂过程中剥落的岩板 (片) 及碎屑分别进行整理归类, 标注出整体性较好的部分岩板 (片) 尺寸, 如图 11 所示。其中,  $l$  为长度 ( $X$  方向长度),  $w$  为宽度 ( $Z$  方向高度)。相应地, 4 种试样各自标注尺寸岩板 (片) 的长宽比 ( $l/w$ ) 值见表 2。

#### 3.2.1 同断面不同岩性影响下的剥落岩板特征

当断面形状相同且固定为高边墙城门洞形时, 对于大理岩试样 (图 11a), 其侧壁外层剥落的岩板尺寸大、整体性好, 沿  $X$  方向长度约为  $10 \text{ cm}$ , 为侧

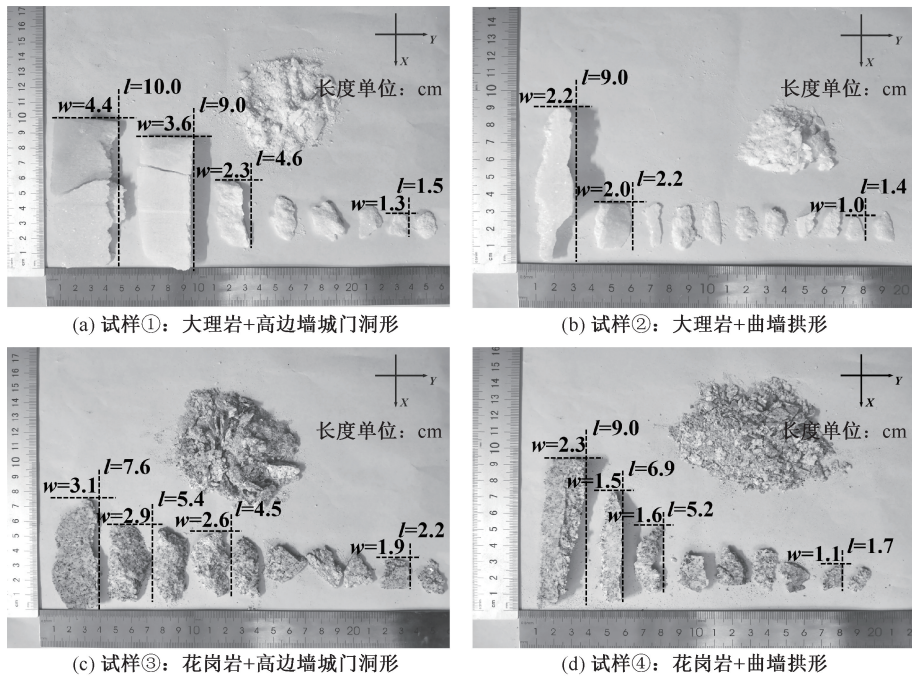


图 11 不同试样的剥落岩板特征对比

Fig. 11 Comparison of properties of peeled rock plate for various samples

表 2 不同试样剥落岩板的长宽比 ( $l/w$ ) 值

Table 2  $l/w$  ratio of peeled rock plate for various samples

试样①: 大理岩+ 高边墙城 门洞形	试样②: 大理岩+ 曲墙拱形	试样③: 花岗岩+ 高边墙城 门洞形	试样④: 花岗岩+ 曲墙拱形
2.27	4.09	2.45	3.91
2.50	1.10	1.86	4.60
2.00	1.40	1.73	3.25
1.15	—	1.16	1.55

注:表中第 2—4 行依次表示随着剥落位置与开孔端侧壁距离(真三轴试验的  $Y$  方向)的增大,不同试样剥落岩板(片)对应的( $l/w$ )值。

壁整体剥落,呈楔形状;对于花岗岩试样(图 11c),剥落的外层岩板  $X$  方向长度减小为 7.6 cm,呈几何不规则形状,剥落的外层岩板在  $Z$  方向上的最大宽度也由大理岩中的 4.4 cm 减小为 3.1 cm,尺寸明显缩小,但由表 2 可以看出,二者的( $l/w$ )值较接近,分别为 2.27、2.45。当断面形状相同且固定为曲墙拱形时,对于大理岩试样(图 11b),侧壁外层岩板剥落形状为纺锤形,而对于花岗岩试样(图 11d),则呈现为楔形,但二者对应  $l$  和  $w$  的量测值几乎一致,其( $l/w$ )值同样较接近,分别为 4.09、3.91。

由图 11 还可看出,4 种试样对应的剥落岩板(片)与孔端侧壁距离( $Y$  方向)越远,板裂剥落岩板(片)尺寸相对越小,表明在远离孔端侧壁方向上,剥落岩板(片)尺寸渐趋变小,再结合表 2 数据,可

观察到形状也更趋粗短。另外,试验过程中板裂剥落的岩板(片)形态主要有直板状、楔形板状、“中间厚、边缘薄”的岩板、弧形片状及不规则的薄片状结构,并出现由裂纹分割成多层薄片但相互间并未分离的组合岩板,剥落岩板表面均较光滑。剥落岩板(片)的部分典型形态如图 12 所示。由图 12 可知:典型形态可分为“中间厚、边缘薄”的大理岩岩板、大理岩组合岩板、花岗岩组合岩板及花岗岩弧形岩板。该试验结果与现场若干深部隧洞岩板(片)的实际主要形态符合较好。

### 3.2.2 同岩性不同断面影响下的剥落岩板特征

在同种岩性条件下(大理岩试样),当断面形状为高边墙城门洞形时(图 11a),剥落岩板中有 2 片长度分别为 10、9 cm 的楔形薄岩板,它们是在前后贯通的裂纹作用下侧壁整体屈曲张开后发生的剥落;与之相比,断面形状为曲墙拱形(图 11b)时对应的剥落岩板(片)尺寸稍小,形态也有明显不同。在同种岩性条件下(花岗岩试样),以上 2 种断面形状(图 11c—图 11d)各自对应的剥落岩板(片)长度、形态等亦存在明显差异。

对比表 2 中不同断面形状对应剥落岩板(片)的长宽比( $l/w$ ),并结合图 11 可看出,对于尺寸较大、整体性较好的剥落岩板(取  $l \geq 4$  cm),( $l/w$ )值在曲墙拱形中要显著大于高边墙城门洞形,前者取值为 3.25~4.60,后者取值为 1.73~2.50,这表明与

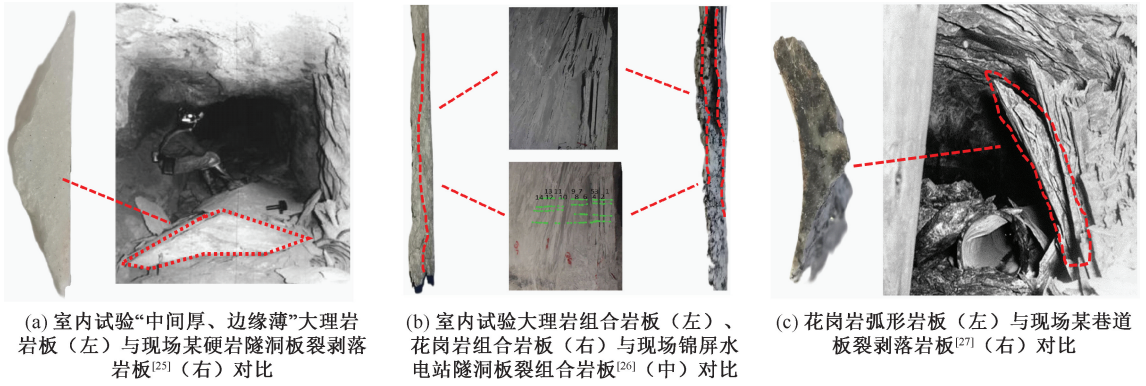


图 12 室内试验与现场岩板(片)形态对比

Fig. 12 Comparisons of rock plate (slice) form between laboratory tests and field observation

高边墙城门洞形相比,曲墙拱形试样剥落的近外层岩板更趋细长(图 11b、图 11d)。

### 3.3 不同岩性与断面形状的板裂特征应力对比

在上述试验过程中,板裂开始及明显板裂破坏等现象的出现是板裂渐进演化的关键阶段,针对此类关键阶段,通过视频监控系统开展实时观测,可将获取的竖向应力视为特征应力<sup>[8]</sup>。基于此,现将试样板裂开始出现及形成明显板裂破坏时对应的应力水平视为特征应力,分别记作 $\sigma_s$ 和 $\sigma_r$ ,其取值可由图 6—图 9 中的相应阶段确定。其中, $\sigma_s$ 取为岩板

(片)发生屈曲张开时的应力值<sup>[8]</sup>,又因试验通常加载至试样发生显著板裂破坏时即开始卸载,故 $\sigma_r$ 取为最大加载应力值,它们各自具体的取值情况见表 3。在此基础上,参照远场最大主应力与岩石单轴抗压强度(Uniaxial Compression Strength, UCS)的比值(即脆性破坏评价指标)<sup>[25]</sup>判别硬岩隧洞围岩的脆性破坏程度(如少量片帮或岩板剥落、严重片帮及中等岩爆、剧烈岩爆),文中采用 $\sigma_r$ 与试验所用大理岩试样和花岗岩试样 UCS(表 1)的比值( $\sigma_r/UCS$ )这一类似形式,见表 3。

表 3 不同试样板裂特征应力对比

Table 3 Comparison of characteristic stress during spalling for various samples

试样种类	$\sigma_s/MPa$	$\sigma_r/MPa$	$(\sigma_r - \sigma_s)/MPa$	$\sigma_r/UCS$
试样①:大理岩+高边墙城门洞形	26.0	41.2	15.2	0.74
试样②:大理岩+曲墙拱形	23.8	32.0	8.2	0.57
试样③:花岗岩+高边墙城门洞形	45.5	47.0	1.5	0.74
试样④:花岗岩+曲墙拱形	43.0	45.7	2.7	0.72

#### 3.3.1 同断面不同岩性影响下的板裂特征应力

对于花岗岩和大理岩 2 种岩性,从表 3 可知:花岗岩试样板裂开始的特征应力 $\sigma_s$ 分别为 45.5 MPa(高边墙城门洞形)和 43.0 MPa(曲墙拱形),均显著大于同等条件下大理岩试样 $\sigma_s$ 对应的 26.0 MPa 和 23.8 MPa,说明岩性对板裂开始出现时的 $\sigma_s$ 有较大影响,表现为大理岩试样在 $\sigma_s$ 相对较低时即可出现板裂,其应力门槛明显低于花岗岩试样;进一步对比表 3 中花岗岩试样和大理岩试样这二者出现明显板裂破坏时的特征应力 $\sigma_r$ ,以及特征应力差( $\sigma_r - \sigma_s$ ),其中,大理岩试样对应的( $\sigma_r - \sigma_s$ )分别为 15.2 (高边墙城门洞形)和 8.2 MPa(曲墙拱形),均显著大于同等条件下花岗岩试样对应的 1.5 和 2.7 MPa,表明从板裂开始出现直至发生明显板裂破坏,花岗岩试

样的板裂失稳进程显著快于大理岩试样;且从表 3 中的比值( $\sigma_r/UCS$ )可看出,当断面形状相同且固定为曲墙拱形时,与大理岩试样对应的比值(=0.57)相比,花岗岩试样对应的比值(=0.72)相对偏大,表明花岗岩试样的脆性破坏程度更为显著,可能出现更趋剧烈的动力破坏特征(如图 9d 中岩片及碎屑颗粒的喷射),这与围岩脆性破坏程度随该比值的增大而逐渐加剧的趋势<sup>[25]</sup>是一致的。

#### 3.3.2 同岩性不同断面影响下的板裂特征应力

在同种岩性条件下,从断面形状这方面看,由表 3 可知:相较于曲墙拱形试样,高边墙城门洞形试样(无论是大理岩还是花岗岩)从板裂开始出现对应的 $\sigma_s$ 至发生明显板裂破坏对应的 $\sigma_r$ 均相对较大,其中, $\sigma_r$ 的差异在岩性相同且固定为大理岩时

更为显著,其对应试样发生明显板裂破坏的  $\sigma_r$  差值达到最大(即有  $41.2-32.0=9.2$  MPa),表明高边墙城门洞形试样从开始出现板裂直至发生明显板裂破坏的门槛要求均高于曲墙拱形试样;对比表 3 中的比值( $\sigma_r/UCS$ )可以看出,与曲墙拱形试样相比(无论是大理岩还是花岗岩),高边墙城门洞形试样对应的比值均相对更大,其中,当岩性相同且固定为大理岩时,以上 2 种断面形状对应( $\sigma_r/UCS$ )的差值达到最大(即为  $0.74-0.57=0.17$ ),表明相较于曲墙拱形试样,高边墙城门洞形试样的脆性破坏程度更趋剧烈,这与图 10a—图 10b 中的高边墙城门洞形与曲墙拱形试样之间呈现出的破坏对比状况一致。

#### 4 板裂失稳数值模拟结果及分析

在探究板裂失稳的力学原理或内在机制方面,特别是针对以圆形或椭圆形隧洞为代表的简单常规断面轮廓,现有研究可基于经典弹塑性理论方法构建圆形<sup>[8]</sup>或椭圆形<sup>[16]</sup>孔洞的位移及应力解析解模型。但对于高边墙城门洞形与曲墙拱形等具有不同曲率区段的不规则断面轮廓,因其孔洞周周围岩位移、应力等分布情况的复杂性,导致当前应用于圆形或椭圆形孔洞的这类理想解析解模型不再适用,因此,从数值模拟方法入手寻求该问题的解决方式是现阶段致力研究的方向。

考虑到基于颗粒流分析程序(Particle Flow Code, PFC)的离散元数值模拟在探究岩石类材料变

形破裂的细观演化方面具备较好适用性<sup>[28]</sup>,因此在以上基于宏观现象的板裂失稳试验基础上,进一步通过 PFC 数值模拟从细观尺度开展初步研究。注意到在前述试验研究中,将图 1 中 4 种不同试样加载至初始应力水平后,沿孔洞断面轴线方向(即  $X$  方向)由负荷控制调整为位移控制(图 5),通过约束该方向变形,以模拟平面应变状态。相应地,文中 PFC 数值模拟同样以这 4 种不同试样为研究模型开展分析。限于论文篇幅,在此仅展示部分数值模拟结果并作简要分析。

4 种不同模型在板裂失稳过程中裂纹发展呈“V 型”或弧形分布时的位移云图与切向应力云图如图 13 和图 14 所示。由图 13 可以看出,一是位移较大的黑色区域均集中在模型孔洞侧壁处,其边界与“V 型”(或弧形)裂纹发育带基本重合,表明该区域围岩已发生板裂,正逐渐剥离直至张开,最终形成“V 型”(或弧形)槽;二是在模型水平方向(即  $Y$  方向)距离侧壁越远,颜色从黑色渐趋转为灰色,直至变成白色,表明其位移越小。进一步观察图 13 可知:在同种断面条件下,与大理岩对应模型相比(图 13a、图 13b),花岗岩对应模型(图 13c、图 13d)白色及浅灰色区域的面积均相对较小,表明在裂纹呈“V 型”(或弧形)分布、围岩发生板裂失稳破坏时,花岗岩对应模型的位移要大于大理岩对应模型的位移;另一方面,在同种岩性条件下,与曲墙拱形对应模型相比(图 13b、图 13d),高边墙城门洞形对

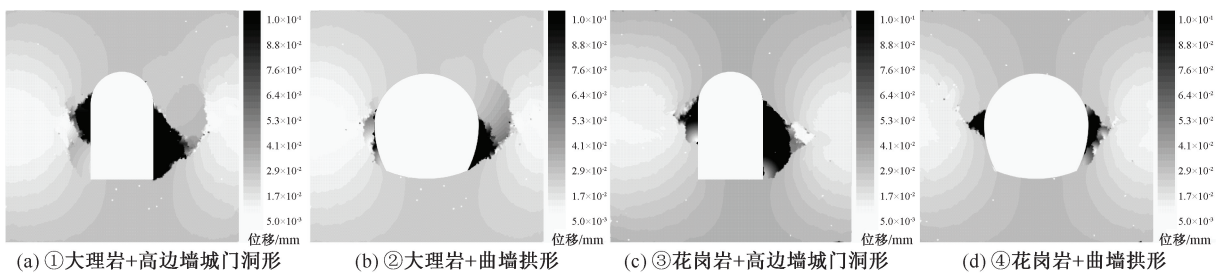


图 13 位移云图

Fig. 13 Displacement contour

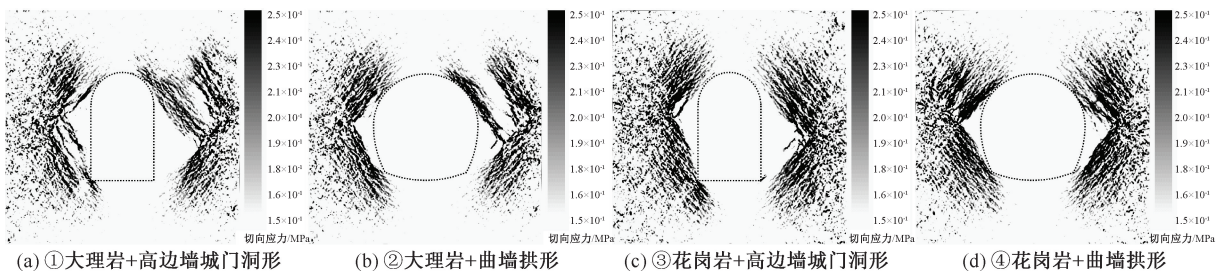


图 14 切向应力云图

Fig. 14 Tangential stress contour

应模型(图 13a、图 13c)的黑色区域面积明显更大、破坏涉及的断面轮廓范围更广,该特征与前述室内试验模拟现象总体上是相符的(图 10)。由图 14 可知:切向应力相对集中区域(黑色部分)在孔洞侧壁水平方向上均呈多个“V 型”条带分布,其范围由贴合裂纹发育带与张开岩板轮廓到围岩深处均有分布,条带之间存在一定的间距,表明侧壁发生板裂出现张开后,板裂失稳仍沿水平方向逐步向侧壁深处扩展,在应力的持续作用下,最终能够形成与试验结果相符的岩板层层张开及剥落现象,同时亦进一步印证了切向应力集中是板裂发生的主要原因<sup>[8]</sup>。

## 5 结 论

1) 不同岩性与断面形状的板裂失稳形态对比表明:在同断面不同岩性影响下,与花岗岩相比,大理岩试样板裂过程中产生的剥落或张开岩板层数更多,岩板剥落及张开破坏现象更趋显著;在同岩性不同断面影响下,与曲墙拱形相比,高边墙城门洞形试样板裂破坏涉及的断面轮廓范围更大。

2) 不同岩性与断面形状的剥落岩板特征对比

表明:在同断面条件下,不同岩性对剥落岩板形态的影响不同,但对尺寸较大、整体性较好的剥落岩板的长宽比影响不明显;在同岩性条件下,不同断面形状显著影响近外层剥落岩板的长宽比,其比值在曲墙拱形试样中明显大于高边墙城门洞形试样。

3) 不同岩性与断面形状的板裂特征应力对比表明:在同断面不同岩性影响下,与大理岩相比,花岗岩试样在板裂开始时的应力门槛值更高,板裂失稳演化进程更快;在同岩性不同断面影响下,与曲墙拱形相比,高边墙城门洞形试样从开始出现板裂直至发生明显板裂破坏时的特征应力均更高。

4) 数值模拟结果对应的位移云图表明:在同断面不同岩性影响下,与大理岩相比,花岗岩模型发生板裂失稳破坏时的围岩位移更大;在同岩性不同断面形状影响下,与曲墙拱形相比,高边墙城门洞形模型产生较大位移的面积更大且涉及的断面轮廓范围更广。应力云图表明:板裂失稳沿模型侧壁水平方向逐步向围岩深处扩展,直至形成与试验结果相符的岩板层层张开及剥落现象。

## 参 考 文 献

- [1] 王新丰,何毅,陆明远,等. 开挖卸荷扰动深部巷道围岩变形破坏特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8):83-90.  
WANG Xinfeng, HE Yi, LU Mingyuan, et al. Study on deformation and failure characteristics of deep roadway surrounding rock under excavation unloading disturbance[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8):83-90.
- [2] 李翔,魏恒,王靖童. 深部隧道支护结构区间非概率可靠度分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 67-76.  
LI Xiang, WEI Heng, WANG Jingtong. Interval non-probabilistic reliability analysis of support structures for deep tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 67-76.
- [3] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785-812.
- [4] 张传庆,刘振江,张春生,等. 隐晶质玄武岩破裂演化及破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2 487-2 496.  
ZHANG Chuanqing, LIU Zhenjiang, ZHANG Chunsheng, et al. Experimental study on rupture evolution and failure characteristics of aphanitic basalt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2 487-2 496.
- [5] SI Xuefeng, GONG Fengqiang. Strength weakening effect and shear-tension failure mode transformation mechanism of rockburst for fine-grained granite under triaxial unloading compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 131: DOI: 10.1016/j.ijmms.2020.104347.
- [6] DU Kun, YANG Chengzhi, SU Rui, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: DOI: 10.1016/j.ijmms.2020.104309.
- [7] KUSUI A, VILLAESCUSA E, FUNATSU T. Mechanical behaviour of scaled-down unsupported tunnel walls in hard rock under high stress[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 30-40.
- [8] 胡小川,苏国韶,陈冠言,等. 深埋隧洞硬岩板裂化过程试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2 271-2 280.  
HU Xiaochuan, SU Guoshao, CHEN Guanyan, et al. Experimental study on slabbing process of hard rock in deep tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2 271-2 280.
- [9] LI Tianbin, WANG Xiangfeng, MENG Lubo. A physical simulation test for the rockburst in tunnels[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(2): 278-285.
- [10] 梁鹏,张艳博,田宝柱,等. 巷道岩爆过程能量演化特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 736-746.  
LIANG Peng, ZHANG Yanbo, TIAN Baozhu, et al. Experimental study on energy evolution characteristics in the process

- of tunnel rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 736-746.
- [11] 阿比尔的, 向钰周, 郑颖人, 等. 隧洞围岩在超载和卸载状态下的破坏模式[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(5): 53-61.  
ABI Erdi, XIANG Yuzhou, ZHENG Yingren, et al. Failure mode of surrounding rock of tunnel under overloading and unloading conditions[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(5): 53-61.
- [12] 司雪峰, 宫凤强. 深部高应力圆形隧洞内部卸荷条件下岩爆模拟试验和强度弱化效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 276-289.  
SI Xuefeng, GONG Fengqiang. Rockburst simulation tests and strength-weakening effect of circular tunnels under deep high stresses and internal unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 276-289.
- [13] ZHANG Qiangyong, LI Fan, DUAN Kang, et al. Experimental investigation on splitting failure of high sidewall cavern under three-dimensional high in-situ stress[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: DOI: 10.1016/j.tust.2020.103725.
- [14] 赵兴东, 段进超, 唐春安, 等. 不同断面形式隧道破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增2): 4 921-4 925.  
ZHAO Xingdong, DUAN Jinchao, TANG Chun'an, et al. Study on failure mode of tunnels with different sections[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4 921-4 925.
- [15] SI Xuefeng, HUANG Linqi, GONG Fengqiang, et al. Failure process and characteristics of three-dimensional high-stress circular tunnel under saturated water content[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(8): 2 696-2 708.
- [16] 王尧, 何满潮, 刘冬桥, 等. 深部椭圆形洞室围岩冲击岩爆实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 214-2 228.  
WANG Yang, HE Manchao, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on impact rockburst of surrounding rock in deep elliptical caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 214-2 228.
- [17] GONG Fengqiang, WU Wuxing, LI Tianbin, et al. Experimental simulation and investigation of spalling failure of rectangular tunnel under different three-dimensional stress states[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 122: DOI: 10.1016/j.ijrmm.2019.104081.
- [18] QIAN Qihu, ZHOU Xiaoping. Failure behaviors and rock deformation during excavation of underground cavern group for Jinping I hydropower station[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 2 639-2 651.
- [19] 黄晶柱, 冯夏庭, 周扬一, 等. 深埋硬岩隧洞复杂岩性挤压破碎带塌方过程及机制分析:以锦屏地下实验室为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1 867-1 879.  
HUANG Jingzhu, FENG Xiating, ZHOU Yangyi, et al. Analysis of collapse process and mechanism of complex lithologic compressive rupture zone in deep buried hard rock tunnel: a case study of Jinping underground laboratory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1 867-1 879.
- [20] FENG Xiating, HAIMSON B, LI Xiaochun, et al. ISRM suggested method: determining deformation and failure characteristics of rocks subjected to true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(6): 2 011-2 020.
- [21] 孙叶, 谭成轩. 中国现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析[J]. 地质力学学报, 1995, 1(3): 1-12.  
SUN Ye, TAN Chengxuan. An analysis of present-day regional tectonic stress field and crustal movement trend in China[J]. Geomechanics Journal, 1995, 1(3): 1-12.
- [22] 陈鹏, 李楠, 房柳林, 等. 砂岩真三轴分级加载声发射特性与损伤演化研究[J]. 金属矿山, 2023(3): 106-113.  
CHEN Peng, LI Nan, FANG Liulin, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of sandstone under true triaxial step-loading[J]. Metal Mine, 2023(3): 106-113.
- [23] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 003-3 010.  
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 003-3 010.
- [24] 蔡美峰, 王金安, 王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38-42.  
CAI Meifeng, WANG Ji'an, WANG Shuanghong. Analysis on energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38-42.
- [25] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: Balkema, 1995: 121-136.
- [26] ZHANG Chuanqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(3): 275-288.
- [27] HOEK E, MARTIN C D. Fracture initiation and propagation in intact rock: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 287-300.
- [28] 唐巨鹏, 丁佳会, 路江伟, 等. 考虑有效应力的煤与瓦斯突出过程分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 129-133.  
TANG Jupeng, DING Jiahui, LU Jiangwei, et al. Analysis of coal and gas outburst process considering effective stress[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(9): 129-133.

作者简介: 李翔 (1977—),男,湖南沅江人,博士,副教授,主要从事地下工程安全可靠性及灾害风险防控、深部岩石力学与工程等方面的研究。E-mail: xli\_xiangli@csu.edu.cn。