

DOI: 10.11779/CJGE20230028

节理巷道围岩卸荷变形试验研究

侯公羽, 邵耀华*, 刘春雷, 王一哲, 陈钦煌, 胡志宇, 赵庆儒

(中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 自然界中的岩体在长期的地质构造运动作用下, 内部往往发育不同尺度的节理, 而巷道围岩的稳定性与节理的发育密切相关。为研究节理对巷道围岩开挖卸荷变形的影响, 采用课题组的开挖卸荷模型试验系统, 对不同节理尺寸水泥砂浆围岩试件开展了系列试验。研究表明: ①巷道围岩开挖卸荷变形主要发生在卸荷阶段, 维持阶段变形继续存在, 但节理对其卸荷变形无明显影响。此阶段, 卸荷变形程度显著降低并逐渐趋于稳定, 其应变增量大约为 $100\mu\epsilon$; ②与无节理试件相比, 含节理试件 S-1 和 S-2 的应变平均降低幅度超过 70%, 远高于 S-3, 即节理尺寸越大, 卸荷变形程度越大, 卸荷作用越明显; ③试件在不同方向的应变差异较大, 切向应变均大于径向应变, 含节理试件尤为突出。

关键词: 小型模型试验; 节理; 开挖卸荷; 围岩变形

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0616-08

作者简介: 侯公羽(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事煤矿开采、岩土工程和岩石力学等方面的教学与研究。E-mail: hgyht@126.com。

Unloading deformations of surrounding rock in jointed roadways

HOU Gongyu, SHAO Yaohua, LIU Chunlei, WANG Yizhe, CHEN Qinhuang, HU Zhiyu, ZHAO Qingru

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The rock mass in nature often develops joints of different scales under the action of long-term geological tectonic movement, and the stability of surrounding rock of roadways has a great relationship with the development of joints. For the sake of studying the effects of joints on the excavation unloading deformation of surrounding rock of roadways, a series of tests are carried out on the cement mortar surrounding rock specimens with different joint sizes through the excavation unloading model test system developed by the authors. The results show that: (1) The unloading deformations of surrounding rock mainly occur at the unloading stage, and the deformations continue to exist at the maintenance stage, but the joints have no obvious influences on the unloading deformations. At this stage, the unloading deformation degree decreases significantly and gradually becomes stable, with the strain increment of about $100\mu\epsilon$. (2) Compared with the specimens without joints, the average strain reduction of S-1 and S-2 specimens with joints is more than 70%, which is much higher than S-3. That is, the larger the joint size, the greater the degree of unloading deformations, and the more obvious the unloading effects. (3) The specimens have great differences in strain in different directions, and the tangential strain is greater than the radial strain, especially for the specimens with joints.

Key words: small-scale model test; joint; excavation unloading; surrounding rock deformation

0 引言

随着地下工程的不断深入发展, 巷道在开挖过程中面临的岩体力学环境愈发复杂。虽然侯公羽等^[1]通过分析、评述相关的巷道支护设计理论与方法, 利用巷道围岩开挖的相关力学原理及对应支护设计的基本特征, 提出常规条件下巷道支护设计的基本原理与方法。但在长期的地质构造运动作用下, 岩体内部结构非常复杂, 往往发育不连续的微小裂隙及不同尺度的节理。长期以来, 众多学者致力于节理对岩体力学特

性影响的研究。已有研究表明, 节理的倾角^[2]、长度^[3]、连通性^[4]、节理面特征^[5]和充填性质^[6]等都是影响岩体力学性能的重要指标。

学者们在研究节理的相关因素对巷道开挖过程中围岩变形、破裂等影响一般采用了模型试验和数值模

基金项目: 国家自然科学基金委员会与 2020 年度高速铁路基础研究联合基金资助重点项目 (U2034205)

收稿日期: 2023-01-09

*通信作者 (E-mail: syh9376@126.com)

拟的方法。蒋爵光等^[7]在早期就通过模型试验研究了不同产状的结构面对隧道围岩稳定性的影响。刘刚等^[8]研究了高地应力场中含发育不同数量节理的岩体在巷道开挖过程中破坏演化规律与扩展机理, 详细的分析了该区域围岩变形和破坏对巷道稳定性的影响。Huang 等^[9]通过开展有、无弱层和有、无支护的弱层的系列模型试验, 研究了隧道围岩的破坏演化规律, 并通过数值模拟进行了验证。经分析, 弱层的滑移将导致围岩产生非对称破坏。在此基础上, 又研究了弱面的厚度、角度等因素对隧道围岩稳定性的影响。朱维申等^[10]采用模型试验分析了节理倾角、节理间距、初始地应力和施加锚杆与否对节理围岩稳定性的影响。马腾飞等^[11]采用大型相似物理模型试验, 分析了不同倾角节理岩体和多层节理岩体在深埋隧道开挖过程中围岩变形破坏特征。钟志彬等^[12]采用天然硬脆性岩石, 通过双轴压缩试验系统开展了系列试验, 研究了大尺寸节理对隧道围岩变形及破裂的影响机理。刘邦等^[13]通过模型试验和数值模拟相结合方法研究了含节理围岩隧道在双轴压力作用下的损伤破坏规律。Bruneau 等^[14]、Suorinen 等^[15]通过针对性的模型实验并结合数值模拟对比验证, 发现隧道整体的稳定性很大程度上取决于岩体中的断层分布。岩体中断层的方向和位置极大影响了隧道的变形破坏。张志强等^[16]采用 FINAL 系统分析了不同围压下软弱夹层在地下洞室中的位置、分布距离对其稳定性的影响, 研究了围岩变形特征和喷锚支护结构受力性状。薄英望等^[17]通过模拟含节理隧道实际开挖过程, 得到不同连通率下节理岩体的宏、微观破坏演化模式。周子涵等^[18]通过分析不同因素对裂隙的作用影响, 并结合类岩试件的卸荷试验, 揭示了平行偏置双裂隙的扩展规律。

以上研究都是基于数值模拟、单轴压缩和常规三轴试验, 无法有效满足工程岩体的复杂应力状态。且由于数值模拟的局限性及立体试验装置加载量级低、模拟岩石材料强度低、应变和位移测量效果差等问题, 均难以模拟实际巷道开挖时围岩的变形及破坏过程。此外, 虽然已有研究表明^[19-20], 采用厚壁圆筒试件模拟巷道开挖是一种简单有效的试验方法, 但还是在常规三轴的基础上分析孔道对岩石力学性质影响, 未真正实现厚壁圆筒试验模拟巷道围岩的变形、强度特征。本文利用课题组自主研发的“小型巷道围岩试件开挖卸荷模型试验系统”^[21]开展试验, 进行了不同节理尺寸围岩试件的开挖卸荷研究, 真实再现了巷道围岩开挖卸荷的过程, 揭示了巷道开挖卸荷作用下节理围岩变形规律。

1 试验系统及设计思想

1.1 试验系统

试验采用侯公羽等^[21]设计与研发的“小型围岩试件模拟与再现巷道围岩开挖卸荷过程的试验系统”。该试验系统通过轴向、内侧壁和外侧壁单独加、卸载, 可实现对试件内、外侧的独立加、卸压。为避免液压油直接接触试件, 对内、外腔分别使用橡胶套予以保护, 并对其上、下端进行密封处理, 可真实的模拟巷道开挖卸荷过程。如图 1 所示。另外, 采用东华静态应变采集仪器 (分辨率为 0.1, 频率为 3 Hz) 记录整个开挖卸荷过程中试件的应变数据。试验系统如图 2 所示。



图 1 密封结构图

Fig. 1 Sealing components



图 2 小型围岩开挖卸荷系统

Fig. 2 Small surrounding rock excavation unloading system

1.2 巷道开挖卸荷原理及试验思路

巷道开挖卸荷是指在原岩应力作用下进行巷道开挖, 待开挖体被取出, 巷道内侧作用力由原岩应力降至 0 MPa 的过程。试验过程中围岩试件受力如图 3 所示, 试件外壁为 5 倍开挖半径处, 符合巷道开挖的边界条件, 故 p_0 为初始地应力。为模拟某一埋深巷道的未开挖前的原岩应力状态, 在试验初期, 对围岩试件的内、外侧和轴向均施加相同的荷载。维持一段时间, 确保围岩试件外侧、轴向压力恒定, 内侧压力以一定速率释放, 此阶段即模拟实际巷道开挖卸荷的过程。

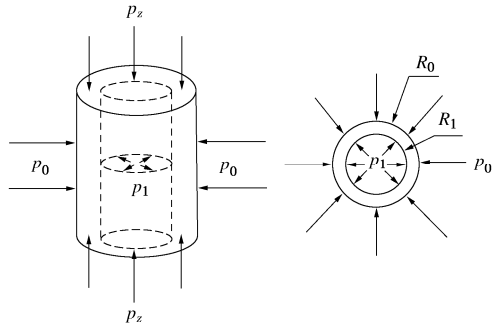


图3 围岩试件初始应力示意图

Fig. 3 Mechanism model for rectangular roadway under excavation unloading

关于深埋圆形洞室围岩应力状态的弹性分析, 已有较为成熟的理论, 侯公羽^[22]对侧压力系数为 1 的深埋圆形洞室围岩的二次应力状态进行了详细的求解。而对于均压厚壁圆筒的弹性分析, 徐秉业等^[23]进行了详细的求解, 可按下式求得

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \left[(1+\nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + (1-\nu) \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \right], \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \left[-(1+\nu) \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + (1-\nu) \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

本文试验所用的试件为厚壁圆筒型试件, 因此采用式(1)进行开挖卸荷条件下巷道围岩二次应力状态的弹性阶段的解析求解。水泥砂浆试件开挖卸荷前, 保持 $P_1=P_2$, 此时应变是由初始应力产生的, 其表达式如下:

$$\varepsilon_{r_0} = \varepsilon_{\theta_0} = \frac{1}{E} \left[(1-\nu) \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \right] \quad (2)$$

而由于开挖所产生的应变可按下式求得

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_r &= \varepsilon_r - \varepsilon_{r_0} = \frac{(1+\nu)}{E} \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2}, \\ \Delta \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta - \varepsilon_{\theta_0} = \frac{-(1+\nu)}{E} \frac{a^2 b^2 (P_2 - P_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: a 为内径; b 为外径; P_2 为外围压; P_1 为内围压。

由式(3)可知, 开挖引起的巷道围岩的切向应变与径向应变的绝对值大小相等, 符号相反, 切向应变是压应变, 径向应变是拉应变。

由于卸荷过程中试件破坏引起保护膜破裂将导致压力液串腔, 为提高试验的成功率, 本试验仅针对巷道围岩开挖卸荷变形特征进行研究。由于试验过程中可实时监测围岩试件的切、径向应变, 故本文仅验证切、径向的理论值与试验值的一致性。

2 试验条件

2.1 模型材料选用

由于在天然岩石内埋设应变片会破坏其本身结构, 故试验中采用类岩石材料模拟岩石, 本文选用水泥砂浆^[24-25], 该材料为自流平材料, 在水泥凝固硬化过程中, 不需要搅拌和振捣, 可更好的保护模具中的应变片和节理片。模型试验中常用模拟节理的方法有预埋式和插拔式两种, 其中预埋的材料包括树脂薄片、云母片、聚合物薄片等^[26-27]。本次试验选用的是绝缘树脂薄片, 具有厚度薄、韧性强的优点, 在浇筑试件过程中可更好的保证其完整性。

由 Martin^[28]可知, 随着洞径尺寸的减小, 其强度和结构效应会显著改变, 因为工程中的巷道断面尺寸一般较大, 强度和结构效应的影响表现不明显。另外, 考虑到巷道开挖卸荷后存在 3~5 倍开挖半径的围岩应力扰动范围, 故选取厚壁圆筒围岩试件的尺寸为高度 270 mm, 内径 40 mm, 外径 200 mm。

为获得围岩试件在开挖卸荷过程的变形规律, 分别在试件内部中心高度距内筒壁 0~1r 处中点设置第 1 个测点, 在其 1r~2r 中点设置第 2 个测点和 2r~3r 中点设置第三个测点, 每个测点分别布置了径向和切向应变片, 共 6 个应变片。如图 4 所示。

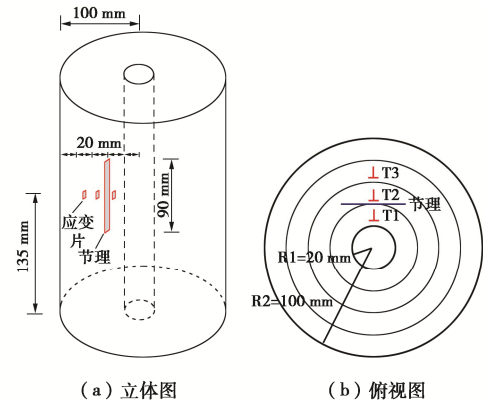


图4 应变片布置示意图

Fig. 4 Arrangement of strain gauges

由于钢丝网与水泥砂浆具有较好的黏结性能, 且两者温度线膨胀系数较为接近, 对试验结果无明显影响, 故把应变片和节理片事先固定在钢丝网上, 钢丝网固定在上、下桶盖细槽上面。如图 5 所示。

2.2 试件制备

为研究节理尺寸对巷道围岩开挖卸荷变形的影响, 在试验中, 通过调整配合比, 分别制作了一组无节理试件和 40 mm×90 mm、50 mm×90 mm 和 60 mm×90 mm 三组轴向节理尺寸的试件。同时, 制作了一批配比相同的标准试件 (φ 50 mm×100 mm),

用以测定材料的物理力学参数。试件出模后, 在养护室标准条件下养护 28 d。取出标养试件后, 通过高精度数控机床对试件进行精加工处理, 得到高度 270 mm, 内径 40 mm, 外径 200 mm 的预制节理试件 (见图 7)。通过模型材料标准试件的单轴、三轴压缩试验, 测定了其物理力学参数, 如表 1 所示。通过分析岩芯试件的应力-应变曲线 (见图 6), 可明显看出通过水泥砂浆制备的试件力学性质比较稳定, 表现出和砂岩相似的力学特性, 故该材料代替砂岩可满足本次试验的要求。



图 5 应变片布置示意图

Fig. 5 Arrangement of strain gauges

表 1 水泥砂浆的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of cement mortar test pieces				
介质	泊松比 μ	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
水泥 砂浆	0.2	7.7	25	1.97
砂岩	0.02~0.2	4.9~78.5	20~170	2.10

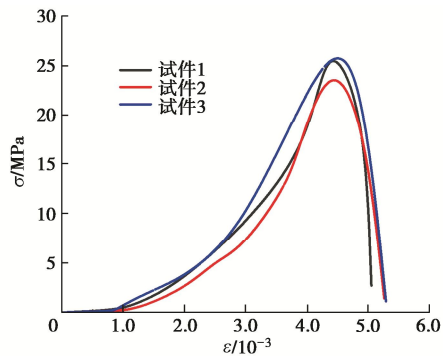


图 6 岩芯试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of core specimens

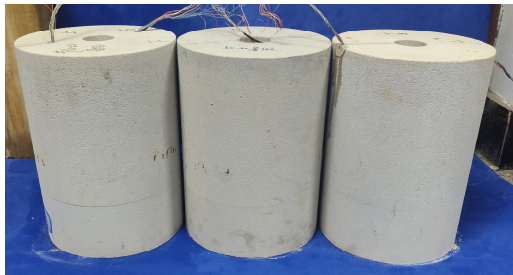


图 7 预制节理试件

Fig. 7 Prefabricated joint specimens

2.3 试验方案

试验前, 将试件安置在密封装置中, 检查密封性后, 安装压力室, 运行监测设备。试验应力路径见图 8。具体试验步骤如下:

(1) *OA*: 安装试件, 调试仪器, 以 0.1 MPa/s 加载速率施加轴压至 2~2.5 MPa, 避免充填液压油时改变试件位置。

(2) *AB*: 充油结束后, 内侧、外侧围压以相同加载速率至 2~2.5 MPa。

(3) *BC*: 以 0.1 MPa/s 加载速率使得轴压、内、外腔围压根据试验路径加至预定荷载 (25 MPa), 而后维持 5 min, 模拟原岩应力状态。

(4) *CD*: 控制外围应力及轴向应力不变, 调整内腔增压器, 以 0.05 MPa/s 卸荷速率降低内围压, 模拟巷道开挖卸荷过程。待内围压降低至零完成卸荷后, 继续维持 10 min 至试件稳定。

试验过程中, 试验系统自动监测、记录三向应力变化, 同时, 应变仪实时采集监测点位应变 (表 2)。

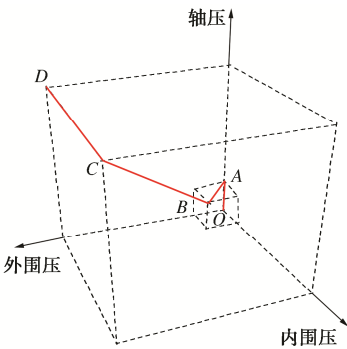


图 8 应力路径

Fig. 8 Stress paths

表 2 试验方案

Table 2 Testing programs			
试样编号	数量	节理尺寸/mm	模拟地应力/MPa
S-0	3	—	25
S-1	3	40×90	
S-2	3	50×90	
S-3	3	60×90	

3 试验结果及分析

3.1 含节理围岩试件的变形特性

为清楚的描述试件在卸荷过程中的实时状态, 根据本试验方案, 整个试验过程包括三向初始围压的原岩应力阶段、卸荷开始点到结束点的卸荷阶段和卸荷结束点到试验结束的卸荷后维持阶段。由于卸荷变形主要发生在后两个阶段, 故着重分析试件在卸荷阶段和卸荷后维持阶段的变形特征。不同轴向节理尺寸的围岩试件开挖卸荷变形特征随时间变化曲线 (其中,

R 代表 Radial, S 代表 Shear), 如图 9 所示。

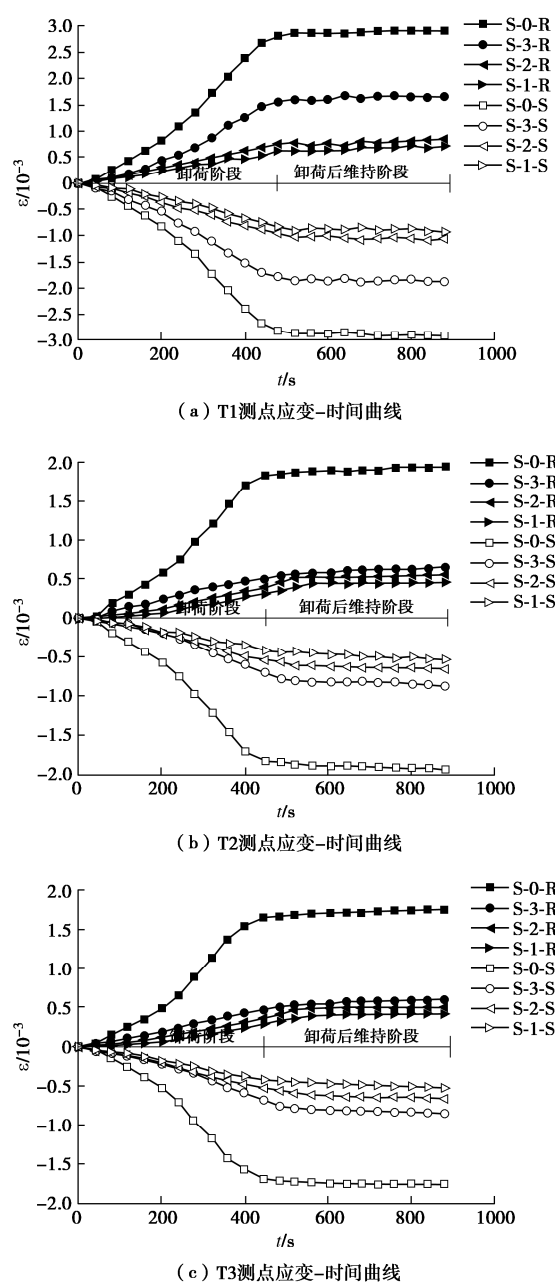


图 9 T1、T2 和 T3 测点应变-时间曲线

Fig. 9 Strain-time curves of points T1, T2 and T3

在同一试验环境下, 采用前述试验方案进行了含节理围岩试件的试验。通过对试验数据的处理, 发现 T3 测点应变值略低于 T2 测点, 且变化趋势基本一致。为节约篇幅, 对最具代表性的 T1 测点和 T2 测点的数据进行了重点分析。其中, 拉应变取正值, 压应变取负值。

由图 9 可知: ①在整个卸荷过程中, 试件卸荷变形主要集中在卸荷阶段, 此阶段应变-时间基本呈线性相关。卸荷后维持阶段的各试件的应变值缓慢增加并逐渐趋于稳定。经分析, 在卸荷阶段, 随内外压差的增大, 试件内侧壁的约束不断减弱, 变形程度不断提

高, 即此阶段, 试件完成了大部分变形。而进入维持阶段后, 由于卸荷导致的应力不均匀已重新分布, 此阶段的变形基本源于外围压和轴压作用下的塑性变形。②与无节理试件相比, 含节理试件的应变值均有不同程度的降低。经分析, 巷道开挖卸荷的过程相当于围岩能量释放的过程, 节理的存在导致能量发生了部分损耗, 从而减弱了其变形。③随着节理尺寸的增大, 各试件的应变值均逐渐增大。节理尺寸越大, 其卸荷阶段的应变峰值越大, 总体上表现为切向应变值大于径向应变值。经分析, 由于试件内部节理的存在, 导致试件岩体的不连续性, 节理尺寸越大, 承担开挖荷载的围岩越少, 应变值越大。其次, 节理的存在导致试件在卸荷过程中应力发生转移, 故其切向、径向方向的变形有所差异。④对比 T1、T2 测点应变-时间曲线, 可明显看出相同节理尺寸的试件在 T1 测点的应变值均大于 T2 测点, 且随节理尺寸的增大, 其应变值增大。经分析, 由于 T1 测点和 T2 测点之间的节理存在, 节理前、后两部分岩体在卸荷过程中会发生不连续变形, T1 测点距试件内侧壁较近, 由于端部效应, 应力更加集中, 所以会产生更大应变值。而 T2 测点位置距离内侧壁较远且位于节理之后, 该测点可看作与周围岩是一个整体, 应力分布较为均匀, 故其应变值不会随节理尺寸的增加而发生较大改变。

表 3 T1、T2 测点径向和切向平均应变值			
Table 3 Radial and shear strain values of points T1 and T2			
测点	试样 编号	卸荷阶段 应变峰值/ 10^{-3}	卸荷后维持阶段 应变增量/ 10^{-3}
T1	S-0-R	2824.18	97.12
	S-1-R	621.39	98.98
	S-2-R	754.57	96.23
	S-3-R	1556.75	103.69
	S-0-S	-2824.18	97.12
	S-1-S	-827.57	102.43
	S-2-S	-958.32	104.94
	S-3-S	-1785.31	95.65
T2	S-0-R	1841.84	100.44
	S-1-R	352.54	96.21
	S-2-R	458.59	98.08
	S-3-R	547.83	99.79
	S-0-S	-1841.84	100.44
	S-1-S	-441.43	100.96
	S-2-S	-560.83	99.21
	S-3-S	-775.98	95.10

由表 3 可知: 对比无节理试件 (试件编号为 S-0) 和含节理试件 (试件编号为 S-1、S-2 和 S-3) 发现, 对于 T1 测点的径向应变, 在卸荷阶段的应变峰值分别降低了 78.1%, 73.3%, 44.9%, 而其切向的应变峰值分别降低了 70.7%, 66.1%, 36.8%。对于 T2 测点的径向应变, 在卸荷阶段的应变峰值分别降低了 80.8%, 75.5%, 70.3%, 而其切向的应变峰值分别降低了 76.1%, 69.6%, 57.9%。

分析上述数据可知,试件编号为 S-1、S-2 的应变平均降低幅度超过 70%,远高于 S-3 应变降低幅度,说明随节理尺寸的增大,试件的卸荷变形程度越大,卸荷作用越显著。而各试件在卸荷后维持阶段的应变值增量基本相同,大约增加了 100×10^{-6} ,说明试件在此阶段的卸荷变形基本不受节理影响。

3.2 试验与理论综合对比分析

在整个试验过程中,通过 T1 测点、T2 测点和 T3 测点记录了试件不同位置的实时应变值。通过对试验数据的处理,发现 T1 测点应变值明显高于 T2、T3 测点,且变化趋势基本一致。经分析,该差异符合实际工程中巷道开挖卸荷后存在 3~5 倍开挖半径的围岩应力扰动。为节约篇幅,对最具显著特征的 T1 测点数据进行了重点分析。图 10 为 T1 测点内、外侧切向应变理论值与试验值随内、外压差的变化关系。

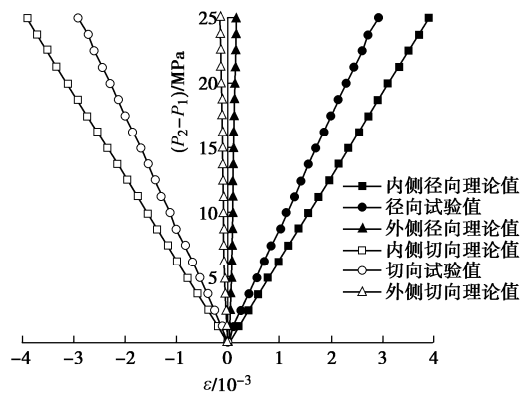


图 10 T1 测点无节理试件理论值与试验值对比

Fig. 10 Comparison between theoretical and experimental values of specimen without joints at point T1

由图 10 可知:①随着内腔压力的卸除,径、切向应变试验值呈线性增加,符合理论值的线性计算结果。对应的应变值大小相等、符号相反,切向应变值为负值,说明试件的切向是在试验过程中处于受压状态,径向应变值为正值,说明径向处于受拉状态。即在卸荷过程中,围岩试件的变形是向洞内发展的。②试验值介于内、外侧的理论值之间。其中,内侧理论值高于试验值,而外侧理论值基本可忽略不计(外侧壁为 5 倍开挖半径处)。

经分析,内侧理论值大于试验值有以下几点原因:首先,为防止外腔压力室在充油压力的作用下移动试件,需先对围岩试件的轴向施加轴压,试件外侧及内侧分别通过 2 条独立的油路实现外压和内压的加载。可推测,试验装置的加载方式及本身存在问题对试验的准确性产生了干扰,下一步可对试验装置改进优化。其次,由于在制作试件的过程中,通过人工进行浇筑、振捣等工序,可能导致试件本身均匀性及试件存在差

别,也会在试验中造成些许误差。试验结果与理论值虽然有差别,但变化趋势基本一致。考虑到试验装置本身、试验环境及试件造成的误差,可证明本文所构建试验系统的可靠性。

4 结 论

(1)在整个试验过程中,切向应变值为负值,径向应变值为正值,说明试件在切向、径向方向分别处于受压和受拉状态;通过试验与理论综合对比分析,发现试验值与理论值接近且变化趋势一致,忽略可能的误差,证明了本文所构建试验系统的可靠性。

(2)根据上述试验结果,可发现试件卸荷变形主要发生在卸荷阶段,此阶段的应变基本呈线性增长。切向、径向应变-时间曲线出现较为明显的拐点,而拐点之后(卸荷后维持阶段)应变增长速率均明显减小,无论是否存在节理或不管节理尺寸大小,其应变值增量基本相同,大约为 100×10^{-6} ,说明此阶段节理对巷道围岩开挖卸荷变形无明显影响。

(3)对比无节理试件和含节理试件,同一试件的试验结果均为切向应变大于径向应变,表现出明显的各向异性,但含节理试件更加显著。同时,试件不同位置的应变差异较大,距离内侧壁较近的 T1 测点的应变值明显大于 T2、T3 测点,即距离巷道内壁较近的位置卸荷作用更显著。

(4)与无节理试件相比,含节理试件的应变值均发生不同程度的降低。其中试件编号为 S-1 和 S-2 平均降低幅度超过 70%,远高于 S-3,即节理尺寸越大,变形程度越高,其卸荷作用越显著。

参考文献:

- [1] 侯公羽,梁金平,李小瑞. 常规条件下巷道支护设计的原理与方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 691-711. (HOU Gongyu, LIANG Jinping, LI Xiaorui, et al. Research on principles and methods of roadway support design under conventional conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 691-711. (in Chinese))
- [2] 刘明星,廖孟柯,刘恩龙,等. 不同结构面倾角节理岩体三轴试验力学特性[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(3): 336-343. (LIU Mingxing, LIAO Mengke, LIU Enlong, et al. Experimental research on mechanical properties of jointed rock mass with different angles of inclination[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(3): 336-343. (in Chinese))
- [3] 杨圣奇,戴永浩,韩立军,等. 断续预制裂隙脆性大理岩变

- 形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(12): 2391-2404. (YANG Shengqi, DAI Yonghao, HAN Lijun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(12): 2391-2404. (in Chinese))
- [4] 王乐华, 柏俊磊, 孙旭曙, 等. 不同连通率节理岩体三轴加卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(12): 2500-2508. (WANG Lehua, BAI Junlei, SUN Xushu, et al. The triaxial loading and unloading mechanical properties of jointed rock masses with different joint connectivities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(12): 2500-2508. (in Chinese))
- [5] 杨圣奇, 陆家炜, 田文岭, 等. 不同节理粗糙度类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊1): 21-32. (YANG Shengqi, LU Jiawei, TIAN Wenling, et al. Experimental study of mechanical behavior of rock specimens with different joint roughness coefficient under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S1): 21-32. (in Chinese))
- [6] 张波, 李术才, 张敦福, 等. 含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1647-1652. (ZHANG Bo, LI Shucui, ZHANG Dunfu, et al. Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1647-1652. (in Chinese))
- [7] 蒋爵光, 李隽蓬, 钱惠国, 等. 不同产状节理岩体隧道围岩稳定性的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 1984, **5**(3): 13-19. (JIANG Jueguang, LI Junpeng, QIAN Huiguo, et al. Model test study on the stability of tunnel surrounding rock masses of jointed rock masses with different occurrences[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1984, **5**(3): 13-19. (in Chinese)).
- [8] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟, 等. 节理密度对围岩变形及破坏影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1737-1741. (LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hongwei, et al. Physical modelling of effect of joint density on deformation and failure of surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1737-1741. (in Chinese))
- [9] HUANG F, ZHU H, XU Q, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel-scaled model tests and numerical analysis[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, **35**: 207-218.
- [10] 朱维申, 任伟中, 张玉军, 等. 开挖条件下节理围岩锚固效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 1997, **18**(1): 1-7. (ZHU Weishen, REN Weizhong, ZHANG Yujun, et al. Model testing research on stability and anchoring effect of opening excavation in jointed rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(1): 1-7. (in Chinese))
- [11] 马腾飞, 李树忱, 李术才, 等. 不同倾角多层节理深部岩体开挖变形破坏规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2899-2908. (MA Tengfei, LI Shuchen, LI Shucui, et al. Model experimental study of deformation and failure law in excavation of deep rock mass with multi-cleftiness of different angles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(10): 2899-2908. (in Chinese))
- [12] 钟志彬, 邓荣贵, 孙怡, 等. 隧道近距大节理硬脆性围岩破裂机理[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(5): 106-116. (ZHONG Zhibin, DENG Ronggui, SUN Yi, et al. Fracture mechanism of hard and brittle tunnel surrounding rock with nearby large joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(5): 106-116. (in Chinese))
- [13] 刘邦, 朱哲明, 周磊, 等. 贯穿隧道的节理对隧道稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2018, **43**(5): 1296-1304. (LIU Bang, ZHU Zheming, ZHOU Lei, et al. Effect of the joints crossing the tunnel on tunnel stability[J]. Journal of China Coal Society, 2018, **43**(5): 1296-1304. (in Chinese))
- [14] BRUNEAU G, TYLER D B, HADJIGEORGIOU J, et al. Influence of faulting on a mine shaft-a case study: Part I-background and instrumentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(1): 95-111.
- [15] SUORINENI F T, TANNANT D D, KAISER P K. Determination of fault-related sloughage in open stopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(7): 891-906.
- [16] 张志强, 李宁, 陈方方, 等. 不同分布距离的软弱夹层对洞室稳定性的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1363-1368. (ZHANG Zhiqiang, LI Ning, CHEN Fangfang, et al. A study of influence of weak interlayers distributed at different intervals on opening stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1363-1368. (in Chinese))
- [17] 薄英璽, 王华宁, 蒋明镜. 深部节理岩体开挖卸荷动力破坏机制的离散元研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊2): 196-201. (BO Yingjun, WANG Huaning, JIANG Mingjing.

- Cracking mechanism of deep jointed rock mass induced by transient excavation via DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 196-201. (in Chinese)).
- [18] 周子涵, 陈忠辉, 王建明, 等. 卸荷条件下岩石平行偏置双裂隙的扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 721-730. (ZHOU Zihan, CHEN Zhonghui, WANG Jianming, et al. Propagation of offset parallel cracks in rock under unloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 721-730. (in Chinese))
- [19] 苏承东, 李冰洋, 吴秋红. 石灰岩孔道试样压缩条件下变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 1): 2739-2748. (SU Chengdong, LI Bingyang, WU Qihong. Experimental study on deformation and strength properties of hollow cylindrical specimens of limestone under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 2739-2748. (in Chinese))
- [20] 李夕兵, 吴秋红, 董陇军, 等. 含充填物的厚壁圆筒砂岩的力学性质研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2149-2156. (LI Xibing, WU Qihong, DONG Longjun, et al. Mechanical property of thick-walled hollow cylinders of sandstone with filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2149-2156. (in Chinese))
- [21] 侯公羽, 李小瑞, 张振铎, 等. 使用小型围岩试件模拟与再现巷道围岩开挖卸荷过程的试验系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(9): 2136-2145. (HOU Gongyu, LI Xiaorui, ZHANG Zhenduo, et al. Experimental system for simulating excavation unloading process of rock around roadway by using small cylindrical hollow specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(9): 2136-2145. (in Chinese))
- [22] 侯公羽. 岩石力学基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (HOU Gongyu. Basic Course of Rock Mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese))
- [23] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 183-203. (XU Binye, LIU Xinsheng. Applied Elastic-Plastic Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 183-203. (in Chinese))
- [24] 李明田, 李术才, 张敦福, 等. 类岩石材料表面裂纹复合型断裂准则探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 3326-3333. (LI Mingtian, LI Shucai, ZHANG Dunfu, et al. Investigation on mixed-mode fracture criterion of surface crack in rock-like materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3326-3333. (in Chinese))
- [25] 董晋鹏, 杨圣奇, 李 斌, 等. 共面双裂隙类岩石材料抗拉强度试验研究[J]. 工程力学, 2020, **37**(3): 188-201. (DONG Jinpeng, YANG Shengqi, LI Bin, et al. Experimental study on the tensile strength of rock-like materials containing two pre-existing coplanar fissures[J]. Engineering Mechanics, 2020, **37**(3): 188-201. (in Chinese))
- [26] 余明坤, 许国伟, 唐国栋, 等. 预制裂隙类岩石材料的分步卸载试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(6): 1672-1681. (YU Mingkun, XU Guowei, TANG Guodong, et al. Experimental study on stepped unloading of rock-like materials with pre-existing fissure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(6): 1672-1681. (in Chinese))
- [27] 张 波, 郭 帅, 杨学英, 等. 含 X 型裂隙类岩石材料水力裂缝扩展研究[J]. 煤炭学报, 2019, **44**(7): 2066-2073. (ZHANG Bo, GUO Shuai, YANG Xueying, et al. Hydraulic fracture propagation of rock-like material with X-type flaws[J]. Journal of China Coal Society, 2019, **44**(7): 2066-2073. (in Chinese))
- [28] MARTIN C D. Seventeenth canadian geotechnical colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(5): 698-725.