

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1299

# 侧向卸荷条件下冻结砂岩变形特性

董西好<sup>1</sup>, 杨更社<sup>1</sup>, 田俊峰<sup>1</sup>, 荣腾龙<sup>1,2</sup>, 贾海梁<sup>1</sup>, 刘 慧<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 新庄煤矿立井采用冻结法施工技术, 在井筒开挖的过程中, 由于侧向卸荷作用导致围岩产生卸荷变形。从新庄煤矿立井现场采集白垩系中粒砂岩, 对加工后的岩样进行饱水处理, 然后利用 GCTS 电液伺服控制高低温高压岩石三轴测试系统进行冻结 ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 条件下的恒轴压、卸围压三轴试验, 模拟在井筒开挖过程中围岩的应力变化路径, 探索冻结砂岩的变形特性。研究表明: 侧向卸荷条件下冻结砂岩表现出弹-脆性特征, 轴向表现为压缩变形, 径向表现为膨胀变形, 径向变形量约为轴向变形量的 2 倍; 当卸荷速率一定时, 岩样的卸荷变形随初始围压的增大而增大, 尤其是径向变形最为显著, 这可能与卸荷回弹变形及岩样内部聚集的能量大小有关; 围压卸荷到同一应力水平时, 高卸荷速率下岩样的卸荷变形量较小, 而变形速率较大; 卸荷作用导致岩样变形模量减小, 横向应变与纵向应变之比增大, 卸荷速率越小, 初始围压越大, 应变之比变化越大。

**关 键 词:** 冻结砂岩; 侧向卸荷; 初始围压; 卸荷速率; 变形特性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2518-09

## Characteristics of deformation properties of frozen sandstone under lateral unloading condition

DONG Xi-hao<sup>1</sup>, YANG Geng-she<sup>1</sup>, TIAN Jun-feng<sup>1</sup>, RONG Teng-long<sup>1,2</sup>, JIA Hai-liang<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The freezing method is adopted in Xinzhuan coal mine, and during the process of shaft excavation lateral, unloading leads to the unloading deformation of surrounding rock. The cretaceous media-grain sandstone is collected from Xinzhuan coal mine, and the samples are processed into saturated states. Then, the constant-axial compression and unloading confining pressure triaxial tests are carried out under freezing ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) conditions using GCTS servo-controlled high-low temperature and high-pressure triaxial rock testing system. The stress change path of surrounding rock is simulated in the process of shaft excavation, and the deformation characteristics of frozen sandstone are explored. The results show that under the condition of lateral unloading, the frozen sandstone shows obvious elastic-brittle characteristics. There has compression deformation in the axial direction, but expansion deformation in the radial direction. Moreover, the radial deformation is approximately two times larger than the axial deformation. With the same unloading rate, the unloading deformation of rock specimens increases with the increase of initial unloading confining pressure, and especially the radial deformation is the most significant. This may be related to the unloading rebound deformation and the amount of energy accumulates within the sample. When the confining pressure is unloaded to the same stress level, the unloading deformation of rock specimens is small, and the deformation rate is greater under high unloading rate. The deformation modulus of rock samples decrease in the unloading process, but the ratio of lateral strain to longitudinal strain change increases. The smaller the unloading rate is, the larger the initial unloading confining pressure is, and the greater the variation of deformation modulus is.

**Keywords:** frozen sandy; lateral unloading; initial unloading confining pressure; unloading rate; deformation properties

## 1 引 言

甘肃省新庄煤矿有上千亿吨煤埋藏在地下深

部, 厚度不等, 含水率较大的复杂岩层是该煤矿矿井建设中遇到的一个主要问题。矿区地层条件复杂, 井筒大部分处于白垩系和侏罗纪等地层, 基岩多为

收稿日期: 2017-06-27

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划资助项目(No. 2014KCT-30); 国家自然科学基金资助项目(No. 41272340)。

This work was supported by the Key Scientific and Technological Innovation Team Program Funds for Shaanxi Province (2014KCT-30) and the National Natural Science Foundation of China (41272340).

第一作者简介: 董西好, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩石力学实验教学及低温岩石物理力学性质方面的科研工作。E-mail: dong\_xihao@163.com

通讯作者: 杨更社, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程的教学科研工作。E-mail: yanggs@xust.edu.cn

富水岩层,强度低,而且基岩裂隙中涌水量高达 $60\sim 300\text{ m}^3/\text{h}$ ,建井难度大。目前该矿区主要采用冻结法进行井筒的掘砌施工,在井筒开挖的过程中,地应力重新分布,围岩的受力状态发生变化,可视为由三向受压状态转变为竖向压力保持不变、水平向压力逐渐卸载的应力变化状态。由于开挖卸荷作用,冻结砂岩在水平向上向井筒内产生大量卸荷变形,严重时围岩产生破坏,导致井筒坍塌事故的发生。因此,弄清冻结砂岩在侧向卸荷作用下的变形特性,对于冻结法施工设计至关重要。

有关侧向卸荷条件下砂岩的物理力学特性研究,国内外已有一定的探索,也取得了一定的研究成果<sup>[1-5]</sup>。文献[6-9]对砂岩在卸荷作用下的力学特性进行了试验研究,文献[10-14]对砂岩在卸荷作用下的变形特性、破坏特征、变形参数的劣化规律进行了研究。关于冻结砂岩的物理力学特性研究,目前也取得具有一定应用价值的学术成果:杨更社等<sup>[15-18]</sup>以陕西彬长矿区胡家河煤矿冻结立井为背景,以煤岩、软砂岩和泥质砂岩为代表,探讨了不同围压对冻结岩石三轴强度特性的影响和冻结温度对冻结岩石三轴强度特性的影响规律;张慧梅等<sup>[19-20]</sup>对冻融循环作用下红砂岩的物理力学特性进行了研究;李博融<sup>[21]</sup>、田应国<sup>[22]</sup>、单仁亮<sup>[23]</sup>等对白垩系冻结砂岩的强度、应力-应变曲线、抗剪强度指标进行了研究。但是,目前国内外对冻结砂岩在侧向卸荷作用下的力学特性研究较少,对其变形特性、变形参数劣化规律的研究仍不足。

本文结合新庄煤矿立井冻结法施工实际工程,以井筒穿越的白垩系富水中粒砂岩为研究对象,利用GCTS电液伺服控制高温高压岩石三轴测试系统,对冻结( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )砂岩岩样开展不同初始围压、不同卸荷速率条件下的恒轴压、卸围压试验,对冻结砂岩在侧向卸荷条件下的变形特性进行分析,探索初始围压、卸荷速率对冻结砂岩卸荷变形规律、弹性模量的影响,揭示不同卸荷条件下冻结砂岩的变形机制、弹性模量劣化机制。研究结果可为深厚煤层矿井建设冻结法施工设计提供依据。

## 2 工程背景

选取甘肃省新庄煤矿回风立井,井筒设计全深为 $966.6\text{ m}$ ,净直径为 $7.5\text{ m}$ ,净断面积为 $44.2\text{ m}^2$ ,最大掘进荒径为 $11.3\text{ m}$ 。井壁采用双层钢筋混凝土复合结构,外层井壁厚为 $500\sim 550\text{ mm}$ ,内层井壁厚为 $600\sim 1\,350\text{ mm}$ 。由现场抽水试验估算,白垩系洛河组涌水量约为 $2\,186.38\text{ m}^3/\text{h}$ ,最大影响半径

为 $3\,616.827\text{ m}$ 。因此,采用冻结法主要针对白垩系和侏罗系含水地层封水。白垩系砂岩地层埋深为 $424.98\sim 875.59\text{ m}$ ,水平地应力为 $8.2\sim 19.6\text{ MPa}$ ,竖向地应力为 $9.6\sim 21.7\text{ MPa}$ 。采用普通法凿井到井口以下垂深 $90\text{ m}$ 后,因涌水量过大而转换为人工冻结法。井筒采用单圈孔一次冻全深的方案开拓,冻结深度为 $910\text{ m}$ ,断面冻结孔 $38$ 个,布置圈径为 $15.9\text{ m}$ ,开孔间距为 $1.313\text{ m}$ ,冻结孔平面布置见图1。根据工程的冻结方案和井筒温度场的实测结果,冻结期盐水温度为 $-30\sim -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结壁平均温度约为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

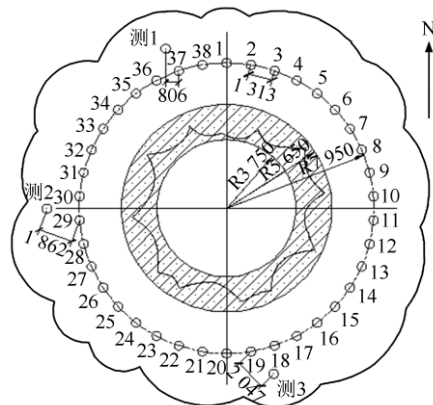


图1 冻结孔平面布置图

Fig.1 Plane arrangement of freezing holes

## 3 试验介绍

### 3.1 岩样概况

现场采集白垩系洛河组中粒砂岩作为试验对象,将试样加工成标准试件(直径为 $50\text{ mm}$ ,高度为 $100\text{ mm}$ ),并将其进行饱水和干燥处理(见图2),同时测试砂岩的基本物理力学性质,试验结果详见表1。

表1 岩石的物理参数平均值

Table 1 Initial physical parameters of rock

干密度 /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	饱和密度 /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	饱和含水率 /%	孔隙度 /%	单轴抗压强度 /MPa
1.99	2.21	10.69	20.98	13.2



图2 砂岩岩样

Fig.2 Sandstone specimens

### 3.2 试验仪器

试验采用西安科技大学岩石冻融实验室自美国引进的 GCTS 电液伺服控制高低温高压岩石三轴测试系统 (见图 3), 该仪器可在加压的过程中对岩样的温度进行实时控制, 温控范围为  $-30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精度为  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最大轴压为  $1\,500\text{ kN}$ , 最大围压为  $140\text{ MPa}$ , 最大孔压为  $140\text{ MPa}$ , 精度为  $0.1\%$ 。该仪器由轴向加载系统、围压加载系统、孔压加载系统、温度控制系统、数据采集系统和数据控制与分析系统组成, 可完成高低温、高压条件下的岩石动、静三轴压缩试验、蠕变试验、渗透试验等, 可实时读取岩样的轴向、径向应变, 测得全应力-应变曲线。



(a) 仪器全景



(b) JULABO 加热制冷循环器



(c) 低温压力室

图 3 电液伺服控制高低温高压岩石三轴测试系统  
Fig.3 Servo-controlled high-low temperature and high-pressure triaxial rock testing system

### 3.3 试验原理

岩样的变形通过 DEF-R5100-A 型变形测量装置 (见图 4) 测量, 该装置分为轴向测量和径向测量两部分, 轴向测量部分由 2 个 LVDT 位移传感器和一套上下 LVDT 固定器组成, 径向测量部分由 1 个 LVDT 位移传感器和 1 套两端带有固定器的链条组成, 测量范围为  $-6.5\sim +6.5\text{ mm}$ , 测量精度为  $0.000\,5\text{ mm}$ 。LVDT 位移传感器由铁芯、衔铁、初级线圈、次级线圈组成, 初级线圈和次级线圈分布在线圈骨架上, 衔铁位于线圈内部, 可自由移动, 当衔铁处于中间位置时, 两个次级线圈产生的感应电动势相等, 这样输出电压为  $0$ ; 当衔铁在线圈内部移动并偏离中心位置时, 两个线圈产生的感应电动势不等, 有电压输出, 其电压大小取决于位移量

的大小, 从而得到位移。试验前首先用游标卡尺精确测量轴向上下 LVDT 固定器固定点之间的距离, 即测量变形段岩样的初始高度  $h$ , 取 2 个 LVDT 位移传感器所测位移的平均值为  $\Delta h$ ,  $\Delta h/h$  即为岩样的轴向应变。岩样的径向变形则是借助一条带有滚珠的开口刚性链条, 链条围绕岩样中部侧面一周, 试验过程中, 岩样径向变形导致链条两端距离产生变化, 通过固定在链条两端的 LVDT 位移传感器测量链条两端距离的变化, 从而测得岩样的径向应变。

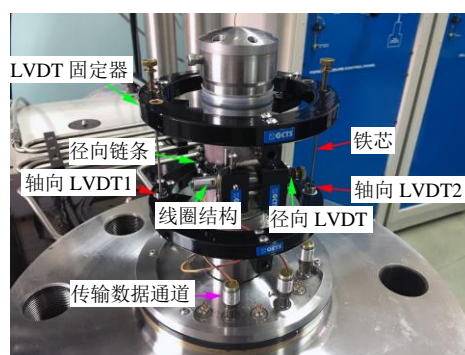


图 4 岩样轴向、径向变形测量装置  
Fig.4 Axial and radial deformation measuring device for rock specimen

GCTS 电液伺服控制高低温高压岩石三轴测试系统的温度控制系统由控制中心、加热制冷循环器 (JULABO FP75)、温度传感器和不冻液循环装置构成。试验时, 控制中心将命令发送给加热制冷循环器, 加热制冷循环器通过调节自身加热器与冷凝器的工作, 对压力室内的浸泡有岩样的不冻液进行温度的升降, 粘贴在岩样侧面的温度传感器将实时监测到的岩样温度反馈给控制中心, 控制中心根据反馈的温度做出下一步命令, 加热制冷循环器根据新的命令对不冻液的温度进行及时调整, 从而实现了对岩样温度的实时精确控制, 温度控制原理示意图如图 5 所示。

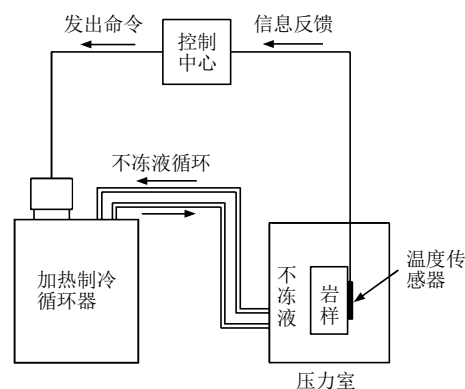


图 5 温度控制原理示意图  
Fig.5 Schematic of temperature control

### 3.4 试验方案

冻结法施工时,在井筒开挖的过程中,围岩处于开挖方向的单向卸荷状态,即轴压保持不变,围压卸荷,故本次试验采用峰前恒轴压、卸围压试验方法。在积极冻结期,由于水发生相变产生膨胀变形,砂岩孔隙压力逐渐上升,使得岩层中的地应力有所增大,根据冻结前的现场地勘数据,试验时的围压有所提高。

冻结砂岩卸荷试验采用如下操作方法:①装样后,以最大降温速率(10 °C/h)对岩样进行低温冻结,温度由室温(18 °C)降至-10 °C,恒温24 h,以保证岩样内部温度均匀;②采用应力控制方式,按照静水压力( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ )条件施加(0.05 MPa/s)一定围压,稳压5 min;③保持围压 $\sigma_3$ 不变,以0.05 MPa/s的速率施加轴压 $\sigma_1$ 至岩样破坏前的某一应力(约为相应围压下三轴试验破坏强度的80%);④保持轴压 $\sigma_1$ 不变,以一定的卸荷速率 $v_u$ 减小围压 $\sigma_3$ ,直至岩样破坏。整个加、卸载过程中岩样温度始终保持为-10 °C,为了防止在降温的过程中岩样内部的水分向表面迁移,造成试验误差,试验前在岩样的表面涂抹一层密封油漆。试验的初始围压和卸荷速率如表2所示。

表2 试验初始围压及卸荷速率

试样编号	含水率 $w$ /%	初始围压 $\sigma_3^0$ /MPa	卸荷速率 $v_u$ /(MPa/min)
A-1	10.66	15	10.00
A-2	10.54	20	10.00
A-3	10.55	25	10.00
A-4	10.68	30	10.00
B-1	10.82	15	0.50
B-2	10.73	20	0.50
B-3	10.65	25	0.50
B-4	10.64	30	0.50
C-1	10.66	15	0.02
C-2	10.71	20	0.02
C-3	10.59	25	0.02
C-4	10.68	30	0.02

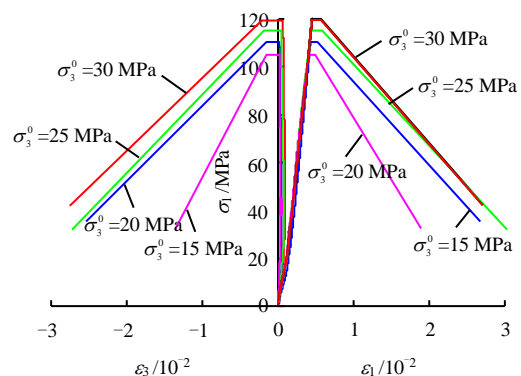
## 4 变形特性分析

### 4.1 典型应力-应变曲线

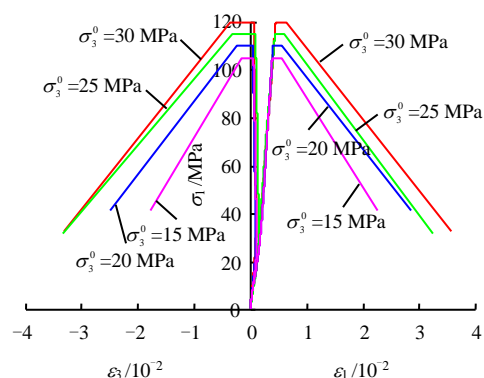
图6为侧向卸荷条件下冻结砂岩的轴向和径向应力-应变曲线,图7为初始围压为20 MPa时不同冻结温度条件下砂岩的体积应变曲线。

由图6可知,侧向卸荷条件下冻结砂岩表现出明显的弹-脆性特征。在静水压力加载的过程中,岩

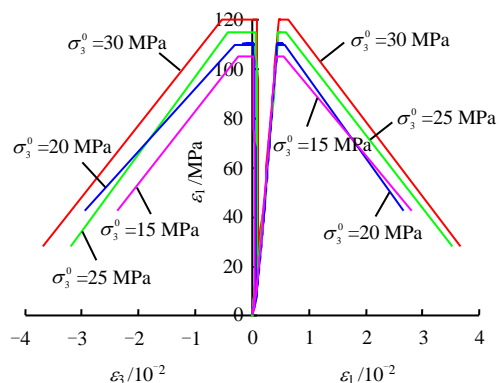
样的轴向和径向均出现压缩变形,且轴向变形大,径向变形小;继续增大轴压,轴向压缩变形继续增大,而径向压缩变形略有减小;在卸荷的过程中,轴向出现为压缩变形,径向由压缩变形迅速转变为膨胀变形,由卸荷引起的径向变形量约为轴向变形量的2倍;当围压减小到一定值时,岩样发生脆性破坏。由图6还可以看出,在静水压力加载的过程中,岩样的应力-应变曲线基本重合,近似线性变化,继续增大轴压时,不同围压下岩样的应力-应变曲线才出现偏差:初始围压越大,岩样加载产生的轴向



(a)  $v_u = 10$  MPa/min



(b)  $v_u = 0.5$  MPa/min



(c)  $v_u = 0.02$  MPa/min

图6 侧向卸荷条件下冻结砂岩应力-应变曲线  
Fig.6 Stress-strain curves of frozen sandstone under lateral unloading conditions



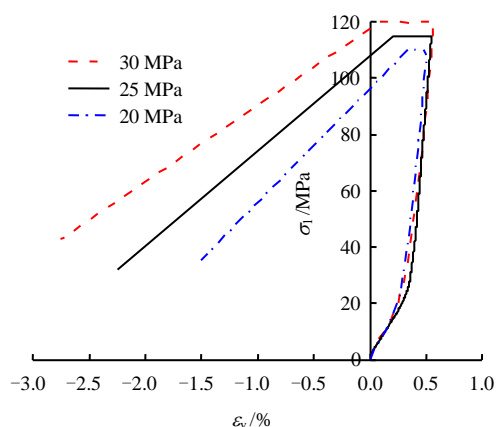


图7 侧向卸荷下砂岩的体积应变曲线 ( $\sigma_3=30$  MPa)

Fig.7 Volumetric strain of sandstone under lateral unloading conditions ( $\sigma_3=30$  MPa)

和径向应变越大,且围压对径向应变的影响越显著;初始围压越大,岩样轴向和径向产生的卸荷变形越大。由图7可知,在加载的过程中,岩样体积始终是减小的,而在卸荷的过程中,体积逐渐变大,出现明显扩容现象。

#### 4.2 围压与应变分析

图8为侧向卸荷条件下冻结砂岩的围压-应变关系曲线 ( $\nu_u=10.00$  MPa/min)。

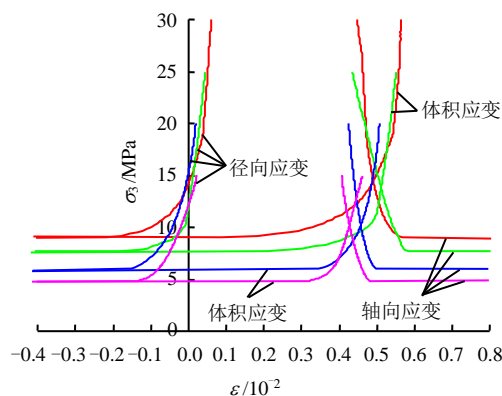


图8 岩样的围压-应变关系曲线( $\nu_u=10$  MPa/min)

Fig.8 Relationships between the confining pressure and strains of rock specimens ( $\nu_u=10$  MPa/min)

由图可知,在围压卸荷的初始阶段,岩样轴向仍为压缩变形,径向则开始出现膨胀变形,且变形量随着卸荷的进行缓慢增加,大致呈直线状,说明岩样处于弹性卸荷变形阶段;当围压减小到一定值时,岩样的径向变形迅速增大,进入塑性变形阶段;继续减小围压,径向变形速度越来越快,轴向变形速度也有所增大,最后岩样在卸荷应力的作用下产生破坏。在卸荷开始至岩样破坏前,轴向变形始终呈近似线性变化,破坏后变形迅速增大,而对于径

向变形,随着卸荷量的增大,变形速度逐渐增大,临近破坏时变形迅速增大。当卸荷速率相同时,岩样的卸荷变形随初始围压的增大而增大,尤其是径向变形最为显著,分析认为可能有以下原因:其一,在加载的过程中,岩石骨架和冰体产生大量的压缩变形,围压越大,变形越大,因此,卸荷导致的回弹变形也越大;其二,初始围压较大时,卸荷初始轴压相应提高,岩样内部聚集的大量能量在卸荷的过程中以卸荷变形做功的形式释放,因此,岩样产生较大的卸荷变形。

侧向卸荷作用下冻结砂岩受力如图9所示。在卸荷前的初始状态,外界施放到岩样上的围压由岩石骨架和孔隙内的冰体共同承担,因此岩石骨架和冰主要承受各个方向的压应力(见图9(a)),处于压缩状态。侧向卸荷开始后,岩石骨架和冰水平方向上的压应力逐渐减小,当卸荷到一定程度后,岩石骨架在水平方向上出现拉力,由于冰体和岩石骨架之间有很强的黏结作用,冰体也出现水平方向的拉力(见图9(b));随着卸荷的持续进行,岩石骨架和冰水平方向上所受的拉应力越来越大,当超过其抗拉强度时,内部裂隙萌生、扩展,最后岩样发生破坏。

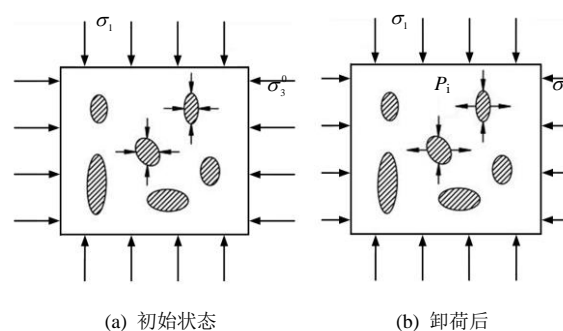


图9 岩石骨架受力示意图

Fig.9 Schematic of freezing pressure on rock skeleton

#### 4.3 卸荷速率与应变分析

图10为不同卸荷速率下岩样的偏应力-应变曲线 ( $\sigma_3^0=30$  MPa)。由图可知:①随着卸荷速率  $\nu_u$  的增大,岩样最终的轴向和径向变形均有所减小,且卸荷速率对变形的影响程度:径向应变>轴向应变。因此,可以推断卸荷速率主要通过侧向变形来影响岩样的变形破坏。②围压卸荷到同一应力水平时,卸荷速率越大,岩样的卸荷变形越小,这主要是由于岩样具有自身的惯性,在高卸荷速率下,岩样侧向来不及产生充分的卸荷变形,导致卸荷变形滞后于应力的变化,内部聚集的能量无法及时地通

过岩样的侧向扩容而充分地释放出来, 导致卸荷变形较小; 在低卸荷速率下, 岩样内部聚集的能量可以做功的方式充分地释放出来, 此外, 由于卸荷时间的延长, 使得岩样不仅可以充分地产生回弹变形, 还可以产生一定的蠕变变形, 因此, 低卸荷速率下岩样的卸荷变形较大。③高卸荷速率下, 岩样的变形更接近弹-脆性变形, 初始卸荷阶段岩样呈近似直线变形, 峰值出现时岩样的变形相对较小, 之后瞬间跌落至残余强度, 说明岩样出现脆性断裂破坏, 岩样内部往往是沿着一条主裂隙面贯通; 低卸荷速率下, 岩样破坏前的塑性变形较大, 破坏后的应变也较大。

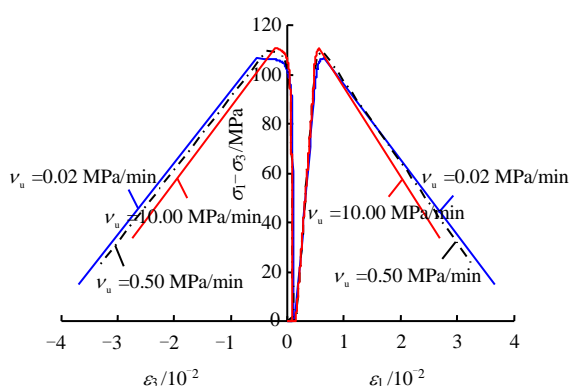


图 10 不同卸荷速率下冻结砂岩的偏应力-应变曲线( $\sigma_3^0=30$  MPa)

Fig.10 Deviatoric stress-strain curves of frozen specimens under different lateral unloading rates ( $\sigma_3^0=30$  MPa)

为了更加直观地分析卸荷速率对岩样变形的影响, 绘制不同卸荷速率下岩样的径向卸荷变形-时间曲线 ( $\sigma_3^0=30$  MPa), 如图 11 所示。由图可知, 高卸荷速率下, 岩样的变形速率较快, 例如, 径向卸荷变形量达到-0.25%时, 卸荷速率为 10.00、0.50、0.02 MPa/min 的岩样分别用时为 2.34、38.08、795.04 min。此外, 由于高卸荷速率节省大量的开挖时间, 使得开挖后岩样的变形相对较小, 而低卸荷速率下的岩样不仅产生卸荷变形, 还会产生大量的蠕变变形, 导致卸荷后的变形较大。因此, 在工程实践中, 通过控制开挖卸荷速率来控制围岩的变形是有效的手段, 但要综合考虑围岩最终的变形来确定合适的开挖卸荷速率。

#### 4.4 变形模量变化规律分析

在侧向卸荷的过程中, 由于冻结砂岩内部裂隙的扩展, 导致变形参数出现劣化效应。本文引入卸荷量  $U$ , 用以衡量卸荷程度, 对冻结砂岩的变形参数进行动态研究, 获得不同卸荷条件下冻结砂岩的

变形参数劣化规律。根据李建林等<sup>[7]</sup>研究, 卸荷量定义为

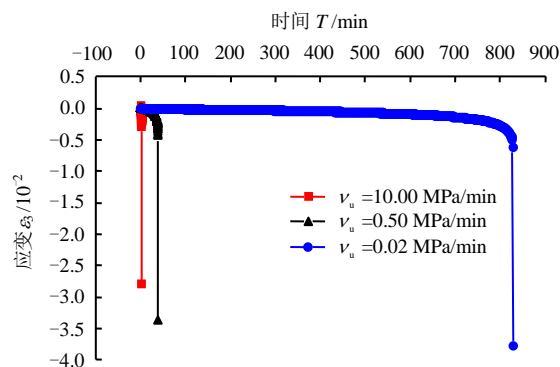


图 11 不同卸荷速率下岩样的径向卸荷变形-时间曲线( $\sigma_3^0=30$  MPa)

Fig.11 Deformation rates of rock specimens under different unloading rates ( $\sigma_3^0=30$  MPa)

$$U = \frac{\sigma_3^0 - \sigma_3^T}{\sigma_3^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $U$  为卸荷量 (%);  $\sigma_3^T$  为卸荷过程中的实时围压 (MPa)。

已有的研究成果表明, 与常规加载方式不同, 三轴卸荷试验变形参数的求解应考虑径向变形和围压的影响, 本文基于胡克定律, 采用下式进行计算<sup>[15]</sup>:

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

式中:  $E$  为变形模量 (GPa);  $\mu$  为泊松比;  $\varepsilon_1$  为轴向应变;  $\varepsilon_3$  为径向应变;  $B$  为  $\varepsilon_1$  与  $\varepsilon_3$  之比。

图 12 为卸荷过程中冻结砂岩岩样变形模量随卸荷比的变化曲线。由图可以看出: ①卸荷作用导致岩样变形模量减小, 岩样破坏前变形模量随卸荷量的减小近似呈线性变化, 当卸荷量达到某一临界值时, 岩样变形模量迅速劣化, 曲线近似竖直, 岩样发生破坏; ②初始围压越大, 卸荷后岩样的变形模量劣化越明显, 这主要是由于初始围压较大时, 岩样内部储存的大量能量在卸荷时迅速释放, 导致岩样破坏剧烈; ③在岩样破坏前, 卸荷速率对变形模量的影响较小, 尤其是高卸荷速率, 这主要是惯性作用使岩样破坏前在高卸荷速率下的变形小, 能

量来不及释放, 裂隙扩展少。

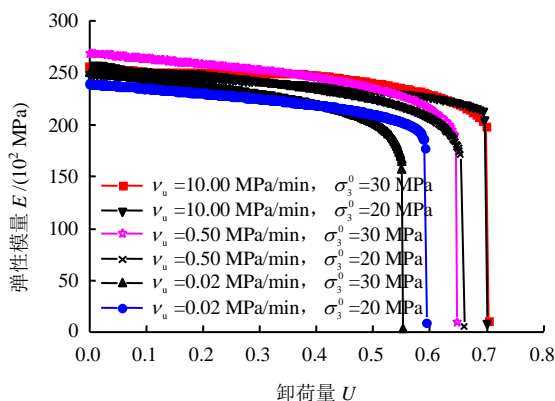


图 12 卸荷过程中变形模量随卸荷比的变化曲线  
Fig.12 Curves of deformation modulus and unloading ratio in unloading process

#### 4.5 横向应变与纵向应变之比变化规律分析

图 13 为卸荷过程中冻结砂岩岩样横向应变与纵向应变之比随卸荷量的变化曲线。为了便于描述, 定义岩样的横向应变与纵向应变之比为  $H$ , 即

$$H = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (3)$$

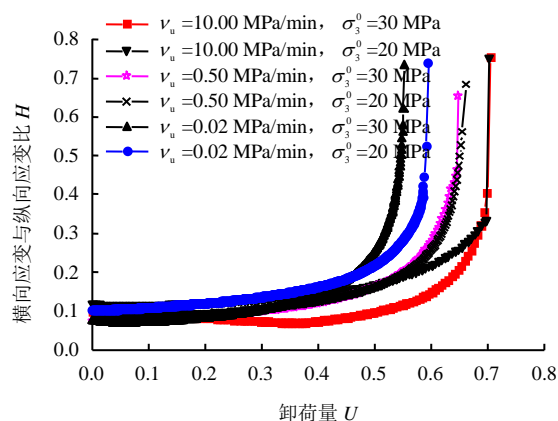


图 13 卸荷过程中泊松比随卸荷比的变化曲线  
Fig.13 Curves of Poisson ratio and unloading percentage in unloading process

由图可以看出, 在卸荷的初始阶段,  $H$  基本保持不变, 当卸荷到一定程度 ( $U=0.2\sim0.3$ ) 后,  $H$  开始出现增大趋势, 但增速较为缓慢, 此时主要是由于在卸荷的过程中冻结砂岩径向产生回弹变形所致; 随着卸荷比的增大,  $H$  增速逐渐增大, 此时岩样内部微裂隙逐渐开始萌生、扩展, 宏观上表现为横向应变比纵向应变变化快; 临近破坏时, 瞬间剧增, 这是由于卸荷应力使得岩样内部产生多条裂隙,

随着裂隙的扩展, 岩样径向变形急剧增大, 导致  $H$  瞬间骤增。从图 13 还可以看出, 卸荷速率较大时, 岩样破坏前  $H$  变化较小, 卸荷破坏时瞬间产生很大变化; 初始围压较大时, 由于卸荷后产生的回弹变形较大, 岩样破坏前  $H$  的变化相对较大。

## 5 讨论

当煤矿井筒穿越富水砂岩地层时, 采用冻结法凿井是最有效的施工方法之一, 在井筒开挖的过程中, 地应力重新分布, 围岩的受力状态发生变化, 可视为由三向受压状态转变为竖向压力保持不变、水平向压力逐渐卸载的应力变化状态。由于侧向卸荷, 导致冻结砂岩在水平方向出现卸荷变形, 即围岩向井筒内变形, 埋深越大, 围岩所受的水平应力越大, 在卸荷的过程中产生的变形也越大。同时, 卸荷速率也是影响围岩变形的重要因素之一, 高卸荷速率下围岩的变形较小, 但是存储在岩体内部的能量无法及时得以释放, 卸荷到一定程度后会导致围岩迅速产生较大的变形, 破坏较突然, 且破坏程度严重。低卸荷速率下围岩不仅产生卸荷变形, 还会由于开挖时间的延长而产生一定的蠕变变形, 导致总的变形量较大。因此, 在施工的过程中需要确定最佳的支护方式及支护时间, 如何根据埋深及岩体的物理力学性质, 动态地确定合理的开挖速度及支护时间、支护方案, 在保证工程安全的前提下, 缩短工期, 降低工程造价, 这是实际工程急需解决的关键问题。

## 6 结论

(1) 侧向卸荷条件下, 冻结砂岩表现出明显的弹-脆性特征, 岩样轴向产生压缩变形, 径向产生膨胀变形, 径向变形量约为轴向变形量的 2 倍; 初始卸荷阶段, 应力-应变曲线呈直线状, 当卸荷到一定程度后, 径向变形迅速增大, 而轴向变形只有岩样临近破坏时才会迅速增大。

(2) 当卸荷速率相同时, 岩样的卸荷变形随初始围压的增大而增大, 尤其是径向变形最为显著; 卸荷速率主要通过侧向变形来影响岩样的变形, 卸荷速率越大, 岩样的卸荷变形越小; 卸荷速率越小, 岩样破坏前的塑性变形越大, 破坏后的应变也越大。

(3) 卸荷作用导致岩样变形模量减小, 横向应变与纵向应变之比增大, 卸荷速率越小, 初始卸荷围压越大, 变形参数变化越大。初始围压越大, 卸荷后岩样的变形模量劣化越明显。

## 参考文献

- [1] 李建林, 陈星, 党莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1587—1595.  
LI Jian-lin, CHEN Xing, DANG Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(8): 1587—1595.
- [2] SWANSON R S, BROWN W S. An observation of loading path independence of fracture Rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1971, 8(3): 277—281.
- [3] CROUCH S L. A note on post-failure stress-strain path dependence of fracture rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1972, 9(2): 197—204.
- [4] 刘泽峰, 乔雨, 李飞. 卸荷速率对含水砂岩卸荷力学特性的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(7): 120—123+137.  
LIU Ze-feng, QIAO Yu, LI Fei. Influence of exhaust state on shear strength of unsaturated soil[J]. **Water Resources and Power**, 2016, 34(7): 120—123+137.
- [5] 王兴霞, 党莉. 基于卸围压试验的砂岩卸荷本构模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 105—108+123.  
WANG Xing-xia, DANG Li. Constitutive model of sand rock under unloading conditions based on unloading confined pressure test and its application[J]. **Water Resources and Power**, 2014, 32(7): 105—108+123.
- [6] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 开挖卸荷对砂岩力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 156—162+206.  
WANG Rui-hong, LI Jian-lin, JIANG Tu-zhou, et al. Experimental study of influence of excavation unloading on mechanical properties of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 156—162+206.
- [7] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034—2041.  
LI Jian-lin, WANG Rui-hong, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2034—2041.
- [8] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034—2041.  
LI Jian-lin, WANG Rui-hong, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2034—2041.
- [9] 单仁亮, 杨昊, 张晋勋, 等. 梅林庙矿负温饱水红砂岩加卸载力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 924—931.  
SHAN Ren-liang, YANG Hao, ZHANG Jin-xun, et al. Mechanical properties of saturated red sandstone of Meilinmiao mine under loading and unloading at negative temperatures[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2016, 33(5): 924—931.
- [10] 田利勇, 朱珍德, 朱姝, 等. 粉砂岩卸荷变形破坏特征试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 44—47.  
TIAN Li-yong, ZHU Zhen-de, ZHU Shu, et al. Deformation and failure characteristics of ciltstone under unloading condition[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(4): 44—47.
- [11] 赵晓东, 周国庆, 李生生. 不同温度梯度冻结中砂加卸荷变形特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 158—162.  
ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, LI Sheng-sheng. Deformation properties of frozen sand during loading and unloading in the presence of a thermal gradient[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2010, 39(2): 158—162.
- [12] 胡政, 刘佑荣, 武尚, 等. 高地应力区砂岩在卸荷条件下的变形参数劣化试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 78—84.  
HU Zheng, LIU You-rong, WU Shang, et al. Experimental study of deformation parameters degradation of sandstone in high geostress regions under unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 78—84.
- [13] 王兴霞, 黄建文, 黄曼丽. 卸荷条件下砂岩变形模量弱化规律[J]. 人民黄河, 2015, 37(6): 131—134.  
WANG Xing-xia, HUANG Jian-wen, HUANG Man-li. Degradation law of sandstone deformation modulus under unloading condition[J]. **Yellow River**, 2015, 37(6): 131—



- 134.
- [14] 刘新荣, 刘俊, 李栋梁, 等. 不同初始卸荷水平对深埋砂岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3081—3088.
- LIU Xin-rong, LIU Jun, LI Dong-liang, et al. Experimental research on the effect of different initial unloading levels on mechanical properties of deep-buried sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3081—3088.
- [15] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459—464.
- YANG Geng-she, XI Jia-mi, LI Hui-jun, et al. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and frozen conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 459—464.
- [16] 杨更社, 奚家米, 王宗金, 等. 胡家河煤矿主井井筒冻结壁岩石力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 565—570.
- YANG Geng-she, XI Jia-mi, WANG Zong-jin, et al. Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujahe coal mine[J]. **Coal Mine**, 2010, 35(4): 565—570.
- [17] 杨更社, 吕小涛. 富水基岩井筒冻结壁砂质泥岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 492—496.
- YANG Geng-she, LÜ Xiao-tao. Experimental study on the sandy mudstone mechanical properties of shaft sidewalls under the frozen conditions[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(4): 492—496.
- [18] 杨更社, 奚家米, 李慧君, 等. 煤矿立井井筒冻结壁软岩力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 690—697.
- YANG Geng-she, XI Jia-mi, LI Hui-jun, et al. Experimental study on the mechanical properties of soft rock of coal mine shaft sidewalls under the frozen conditions[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2012, 8(4): 690—697.
- [19] 张慧梅, 杨更社. 冻融环境下红砂岩力学特性试验及损伤分析[J]. 力学与实践, 2013, 35(3): 57—61.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Mechanical property experiment and damage analysis of red sandstone under freeze-thaw environment[J]. **Mechanics in Engineering**, 2013, 35(3): 57—61.
- [20] 张慧梅, 杨更社. 水分及冻融循环对红砂岩物理力学特性的影响[J]. 实验力学, 2013, (5): 635—641.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. On the influence of moisture and freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties of red sandstone[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2013, 35(3): 57—61.
- [21] 李博融, 杨更社, 奚家米, 等. 白垩系地层冻结砂岩物理力学试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 30—33+16.
- LI Bo-rong, YANG Geng-she, XI Jia-mi, et al. Experimental study on physical mechanics of freezing sandstone of Cretaceous strata[J]. **Coal Science and Technology**, 2015, 43(5): 30—33+16.
- [22] 田应国, 杨更社, 李博融, 等. 冻结白垩系砂岩强度特性试验研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(12): 78—81.
- TIAN Ying-guo, YANG Geng-she, LI Bo-rong, et al. Experimental study on strength characteristics of freezing sandstone in Cretaceous strata[J]. **Coal Engineering**, 2015, 47(12): 78—81.
- [23] 单仁亮, 赵文峰, 宋立伟, 等. 冻结红砂岩力学特性试验研究[J]. 煤矿开采, 2014, 19(2): 9—12.
- SHAN Ren-liang, ZHAO Wen-feng, SONG Li-wei, et al. Mechanical characteristics of frozen red sandstone[J]. **Coal Mining Technology**, 2014, 19(2): 9—12.