

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0161

DONG Xihao, YE Wanjun, LIU Shuai. Study on frost heaving characteristics of sandstone under different freezing conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1853–1862. [董西好, 叶万军, 刘帅. 不同冻结条件下砂岩冻胀特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1853–1862.]

# 不同冻结条件下砂岩冻胀特性试验研究

董西好<sup>1,2</sup>, 叶万军<sup>1</sup>, 刘 帅<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. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 人工冻结法由于能够阻止地下水的移动, 限制围岩的变形, 目前已经成为煤矿井筒穿越富水软岩地层的有效方法之一。为了研究不同冻结条件下砂岩的冻胀特性, 结合现有的冻土物理力学性质理论, 采用 GCTS (Geotechnical Consulting & Testing Systems) 电液伺服控制低温高压岩石三轴测试系统对饱和、干燥白垩系红砂岩进行不同冷却速度 ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ) 和不同围压 (5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa) 下的冻胀试验, 研究不同冻结条件下砂岩的冻胀规律, 探索冻胀机理。研究表明: 在降温的过程中, 干燥岩样始终产生冷缩变形, 饱和岩样先产生冷缩变形, 后产生冻胀变形, 最后趋于基本稳定, 且饱和岩样变形量远大于干燥岩样。当冻结温度一定时, 岩样所处的应力水平越大, 冻胀变形越小, 两者呈线性负相关, 这主要是由于高围压限制了岩样内部孔隙水相变成冰时体积的膨胀。岩样的冻胀变形量主要受围压、含水率的影响, 而冷却速度主要影响岩样的冻胀速率, 本试验条件下, 砂岩的冷却速度越大, 冻胀速率越大, 且二者近似呈线性关系。对于饱和岩样, 围压主要通过限制冰水相变时的膨胀变形而减小岩石的冻胀变形, 温度主要通过影响孔隙水的冻结率和岩石骨架的热胀冷缩而影响岩石的冻胀变形, 而干燥岩样变形主要是由于热胀冷缩效应导致岩石矿物颗粒体积收缩, 且温度变化越大, 变形越大。结合试验结果, 运用理论分析方法, 建立了考虑围压影响的岩石冻胀变形计算公式。通过对不同围压下冻结稳定后的砂岩冻胀变形进行计算, 发现计算结果与试验结果具有较好的吻合度。此外, 由冻胀变形计算公式可知, 降温过程中岩石的冻胀变形影响因素大致可分为内因和外因两大类, 内因包括岩石的孔隙度、饱和度、冰和岩石骨架的体积模量, 外因主要是温度、围压。对于饱和岩石, 冻胀变形主要受围压、温度、孔隙度等因素影响。饱和度和孔隙度和冻结率决定了岩石是冻胀还是冻缩, 当这些指标较小时, 岩石可能只产生冻缩变形。内因和外因相互影响、相互制约, 加之冻胀过程中岩石微观结构及力学性质的动态变化, 导致岩石冻胀机理十分复杂。研究结果可为深厚煤层矿井建设冻结法施工方案设计提供理论参考, 也可为冻土地区软岩物理力学性质及其工程应用研究提供理论基础。

**关键词:** 砂岩; 冻胀变形; 冷却速度; 围压

**中图分类号:** P642.14; TU458<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1853-10

## 0 引言

随着“一带一路”倡议的实施, 对能源的需求越来越大, 而我国浅层煤层的剩余储量已不能满足对能源的需求, 深层煤层的开采已经成为一种趋势, 在矿井建设过程中遇到富水软岩地层已是一种常态。砂岩由于具有孔隙大、胶接弱、强度低、变形大、富水等特点, 井筒在穿越该地层时往往采用人

工冻结法。甘肃省新庄煤矿副井井筒穿越的主要软岩地层为白垩系洛河组砂岩, 采用冻结法进行井筒的掘砌施工, 冻结岩石的物理力学特性对冻结圈及井筒的设计具有重要影响。

国内外学者关于冻结或者冻融条件下的岩石物理力学特性进行了大量的研究, 也取得了一定的研究成果<sup>[1-4]</sup>; 杨更社等<sup>[5-8]</sup>以陕西彬长矿区胡家河

收稿日期: 2021-12-11; 修订日期: 2022-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272340; 41702339); 陕西省重点科技创新团队计划资助项目(2016KCT-13)资助

作者简介: 董西好, 工程师, 主要从事低温软岩物理力学性质与工程应用研究. E-mail: dongxh@xust.edu.cn

通信作者: 叶万军, 教授, 主要从事特殊土体防灾减灾研究. E-mail: yewanjun2004@126.com

煤矿冻结立井为背景,以煤岩、软砂岩和泥质砂岩为代表,开展了不同低温环境下的岩石单轴、三轴压缩,获取不同低温状态下岩石样本的力学参数,进而分析了冻结温度与参数的变化规律。张继周等<sup>[9]</sup>研究了岩石在冻融条件下的损伤劣化机制和相应的力学特性。Bayram<sup>[10]</sup>对土耳其不同寒冷地区采集的9个石灰岩样品进行了冻融循环试验,对单轴抗压强度演化进行了系统的分析。Gholamreza等<sup>[11]</sup>针对伊朗中部典型红砂岩开展室内、现场冻融循环下物理力学性质影响特征分析。李金明等<sup>[12]</sup>研究了温度和围压对风化花岗岩抗压强度、剪切强度参数及变形特性的影响规律。路亚妮等<sup>[13]</sup>开展了单、三轴压缩试验和不同次数的冻融循环试验,探讨了岩样强度和变形参数的各向异性随围压和冻融循环次数的变化规律。

此外,一些学者对降温或冻融循环作用下的岩石冻胀性进行了研究。Inada等<sup>[14]</sup>通过单轴压缩、拉伸试验,研究了岩石的冻胀应变与波速、冻结弹性模量与温度的关系;Matsuoka等<sup>[15]</sup>用箔应变计测量了岩石在冻融循环过程中的应变,分析了岩石冻胀机理。Yamabe等<sup>[16]</sup>对干燥、饱和的砂岩进行了一次冻融循环热膨胀应变测试试验;Walbert等<sup>[17]</sup>测定了石灰石在冻结过程中的收缩率和膨胀率,并研究了冻结对岩石弹性模量的影响;Lü等<sup>[18]</sup>引入各向异性冻胀系数 $k$ ,提出了一种考虑横向各向同性冻胀力的弹塑性解析解。近几年,我国学者对岩石的冻胀变形进行了一些研究,康永水等<sup>[19]</sup>运用应变片法测试低温环境下饱和及干燥岩样的低温应变特征,研究岩样冻胀融缩效应,给出了岩石冻胀变形规律;刘泉声等<sup>[20]</sup>利用应变等价原理建立了有效冻胀力下低温饱和和岩石冻胀变形模型;夏才初等<sup>[21-23]</sup>对寒区隧道的冻胀特点、不均匀冻胀系数及冻胀率进行了分析;刘李杰等<sup>[24]</sup>对多因素耦合作用下砂岩冻胀性能进行了试验研究;赵玉报<sup>[16]</sup>、谭贤君<sup>[26]</sup>对青藏高原高寒隧道围压的冻胀行为、冻胀机理进行了分析;张广泽等<sup>[27]</sup>研究了在冻融循环过程中温降速率对冻胀变形的影响;吕志涛等<sup>[28]</sup>建立了单向冻结条件下饱和砂岩冻胀模型。综上所述,目前有关岩石的冻结或冻融条件下的物理力学特性研究较多,涉及温度、围压、含水状态等诸多影响因素,但总体还不够系统和完善,大部分学者主要是针对某一、两个影响因素进行研究,多因素耦合作用下的研究还需要继续探索。涉及冻结砂岩力学性质研究的多,针对物理性质研究

的少,且大部分物理性质都是结合力学性质开展,而有关砂岩的冻胀变形理论研究还不够完善,且计算结果的准确性还有待进一步验证。

本文结合现有的冻土物理力学性质理论,以室内冻结岩石冻胀试验为基础,利用GCTS电液伺服控制低温高压岩石三轴测试系统,对新庄煤矿白垩系中粒红砂岩开展不同冷却速度、不同围压下干燥和饱和两种含水状态下岩样的冻胀试验,测试砂岩的冻胀变形,研究砂岩的冻胀速率与冷却速度之间的关系,分析了围压、含水状态对砂岩冻胀变形的影响,建立了考虑围压影响的岩石冻胀变形计算公式。研究结果可为深厚煤层矿井建设冻结法施工提供设计依据。

## 1 试验介绍

### 1.1 岩样概况

选取甘肃省新庄煤矿副井井筒穿越的主要岩层白垩系洛河组中粒红砂岩作为试验对象,将野外采集的试样加工成标准岩样( $\Phi=50\text{ mm}$ ,  $H_0=100\text{ mm}$ ),先将岩样置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘干 $24\text{ h}$ ,进行干燥处理,然后将部分岩样置于真空抽气罐(真空度为 $0.1\text{ MPa}$ )中进行抽真空饱水处理。为了降低岩样之间的离散性,采用UTA-2000A超声波检测仪对饱和岩样进行超声波波速测试,最终选取纵波波速较为接近的岩样进行试验。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(图1)的表面涂抹一层密封油漆。表1为岩样基本的物理性质指标测试结果。



图1 砂岩试样

Fig. 1 Sandstone samples

### 1.2 试验仪器

#### (1)GCTS三轴仪

试验仪器设备采用西安科技大学岩石冻融实验室自美国引进的GCTS电液伺服控制低温高压岩

石三轴测试系统(图 2),该仪器可在加压的过程中对岩样的温度进行实时动态控制,温控范围-30~80 ℃,精度±0.01 ℃,最大轴压 1 500 kN,最大围压 140 MPa,精度 0.1%。该仪器可完成高低温、高压岩石三轴压缩试验,可实时读取岩样的轴向、径向应变,测得全应力-应变曲线。

表 1 岩样的基本物理参数  
Table 1 Physical parameters of rock

干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	饱和密度 $\rho_{\text{sat}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $w_{\text{sat}}/\%$	孔隙度 $n/\%$
1.99	2.21	10.69	20.98



图 2 GCTS 电液伺服控制低温高压岩石三轴测试系统

Fig. 2 GCTS servo-controlled low temperature and high pressure triaxial rock testing system

(2)温度控制

温度控制系统(图 3)由加热制冷循环器(JULABO FP75)、不冻液循环通道、温度传感器和控制中

心构成。试验时,控制中心将命令发送至加热制冷循环器,加热制冷循环器通过输送不冻液调节压力室内岩样温度的升降,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数据再次做出命令,从而实现对岩样温度的实时控制,控制原理如图 3 所示。

1.3 试验方案

(1)加载方案

新庄煤矿白垩系砂岩所在地层埋深为 210~850 m,水平向地应力为 5~19 MPa。围压是影响冻胀变形的主要因素之一,为了真实地反映砂岩在不同应力状态下的冻胀变形特性,试验时,首先对岩样施加一定的围压,取轴压 $\sigma_1$ 与侧压 $\sigma_3$ 之比为一定值 1.2, $\sigma_3$ 取 5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa 和 25 MPa 共五个不同应力水平,施加围压时保持偏应

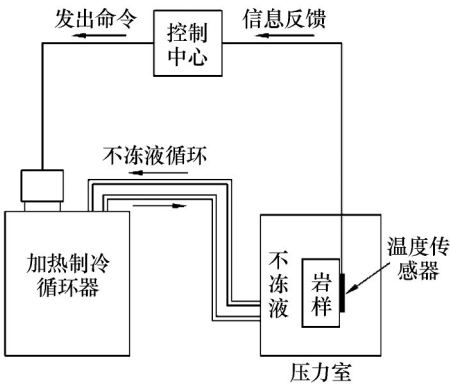


图 3 温度控制原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature control



力不变,以  $1 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$  的速率施加。然后,保持围压不变,当岩样的轴向、径向变形量均小于  $0.002 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时,视为岩样在围压作用下变形稳定,以一定的速度降低环境温度对岩样进行降温。

## (2) 冻胀变形测量

岩样的轴向冻胀变形通过 DEF-R5100-A 型轴向测量装置(图4)测量,该装置由2个 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)位移传感器和一套上下 LVDT 固定器组成,测量范围为  $-6.5 \sim +6.5 \text{ mm}$ ,精度为  $0.001 \text{ mm}$ 。试验前首先用游标卡尺测得 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个位移传感器所测位移变化的平均值为  $\Delta H$ ,  $\Delta H/H$  即为岩样的冻胀变形。

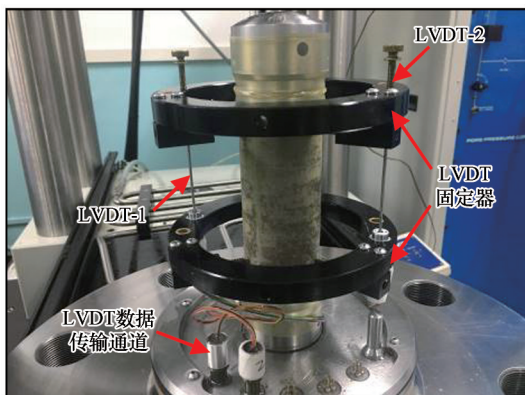
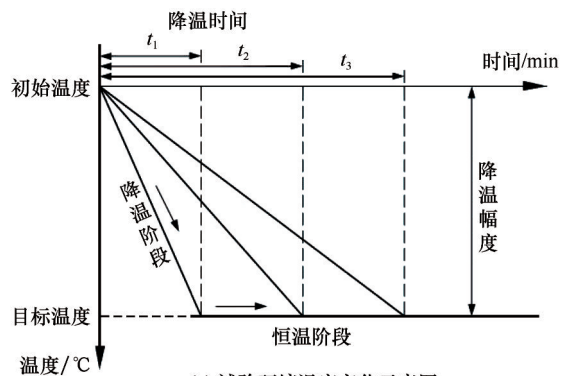


图4 岩样冻胀变形测量装置

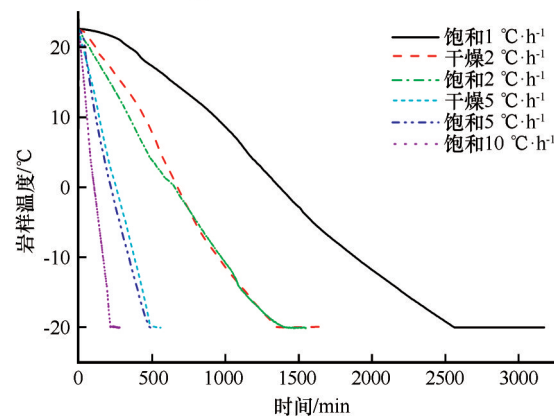
Fig. 4 Frost deformation measuring device for rock samples

## (3) 砂岩温度

根据实践工程监测结果,由于不同位置岩体与冻结孔的水平距离及埋深的不同,积极冻结期岩层降温速率存在差异<sup>[29-30]</sup>。另外,考虑到对比组试验效果,试验时岩样所处环境的冷却速度分别为  $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。温度由室内温度( $22.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )降至  $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随后保持恒温,测试岩样在不同围压、冷却速度下的冻胀变形,待岩样的变形稳定(冻胀变形增量小于  $0.002 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),试验结束。图5(a)为不同冷却速度下岩样侧面温度随时间的变化示意图,图5(b)为实测岩样温度变化曲线。由图5(b)可知,岩样温度基本按照试验方案变化,且温度波动幅度较小。与饱和岩样相比,干燥岩样的降温稍快一些,这可能与试验内部水分降温过程有关。



(a) 试验环境温度变化示意图



(b) 实测岩样温度变化曲线

图5 岩样及其试验环境的温度变化

Fig. 5 Temperature variation of rock samples and its test environment

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冷却速度对砂岩冻胀变形的影响

图6为不同冷却速度下砂岩( $\sigma_3=15 \text{ MPa}$ )的冻胀变形随时间的变化曲线。从图6中可以看出:饱和砂岩在初始阶段,出现冷缩变形(负值),随着温度的降低,砂岩逐渐出现冻胀变形(正值),当冻胀变形增大到一定程度后,变形略有降低,而干燥砂岩始终处于冷缩变形状态;饱和砂岩变形大,干燥砂岩变形小;含水状态和围压相同时,不同冷却速度砂岩最终的变形基本一致。分析认为,对于饱和砂岩,初始阶段处于未冻结状态[图7(a)],内部的孔隙水为液态,对岩样变形几乎无影响,由于热胀冷缩效应,矿物颗粒收缩,岩样出现冷缩变形,且温度越低,颗粒收缩越严重,冷缩变形越大。当温度降至砂岩的冻结温度时,孔隙内部的液态水逐渐相变为固态冰[图7(b)],体积发生膨胀,由于孔隙周围的矿物颗粒限制冰水相变产生体积膨胀变形,导致孔隙与颗粒交界面出现相互作用力(即冻胀力),孔隙压力增大,冰体与颗粒互相挤压,产生弹性压

缩变形,当压缩变形不足以抵消冰的膨胀变形时,冰的膨胀占据主导地位,此时岩石骨架在冻胀力的作用下产生膨胀变形。此外,饱水砂岩在降温冻结的过程中,冰水相变导致的劣化效应,新裂隙的产生导致试样出现膨胀变形。继续降低温度,岩样内部的孔隙水基本冻结完毕[图 7(c)],冻胀基本结束,冻胀变形曲线不再继续上升,但由于岩石颗粒进一步收缩和冰的冷缩效应,岩样出现一定的收缩变形,反映到冻胀变形曲线上即略有下降趋势,最后趋于稳定。对于干燥岩样,随着温度的降低,热胀冷缩效应导致岩石矿物颗粒收缩,体积减小,随着温度降低冷缩变形逐渐增大,最后趋于稳定。

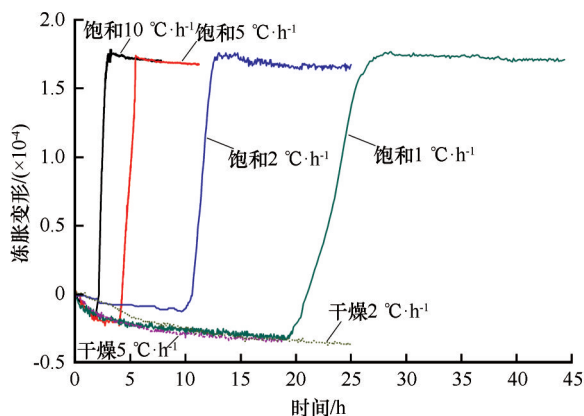


图6 不同冷却速度下岩样冻胀变形-时间曲线  
Fig. 6 Frost deformation-time curves of rock samples under different cooling rates

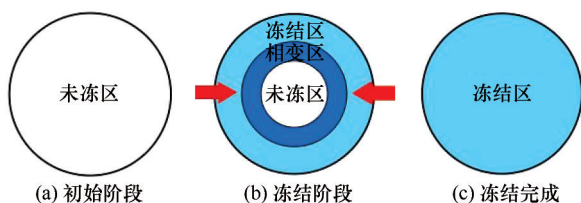


图7 砂岩冻结过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of freezing process of sandstone

为了定量描述某一条件下岩石的冻胀变形快慢,定义岩石冻胀变形-时间曲线切线的斜率为岩石某一时刻的冻胀速率 $v_e$ (单位 $\text{h}^{-1}$ ),其物理意义为:岩石以一定的速率进行降温,当降至某一温度时,单位时间内产生的冻胀变形量。 $v_e$ 主要与岩性、降温速率、含水率、围压、温度等因素有关。通过图6可以看出,不同时刻岩样的冻胀速率不同,取不同冷却速度下饱和岩样在1/2最终冻胀量时的冻胀速率绘制曲线如图8所示。由图8可知,冷却速度越大,冻胀速率越大,二者近似呈线性关系,这主要是

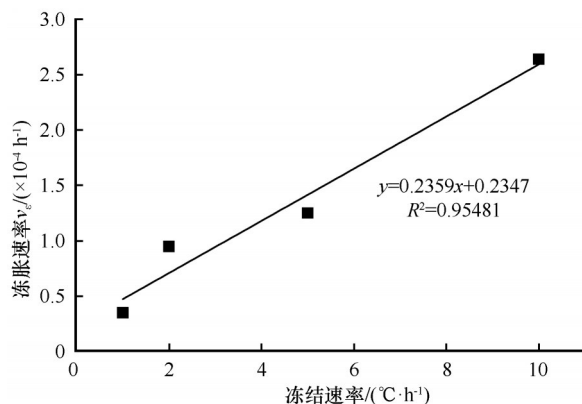


图8 不同冷却速度下饱和砂岩的冻胀速率  
Fig. 8 The speed of frost deformation of saturated sandstone under different cooling rates

因为冷却速度较大时,岩样内外温差较大,孔隙水迅速相变成冰,短时间内岩样出现大量体积膨胀变形。

## 2.2 围压对砂岩冻胀变形的影响

图9为不同围压下砂岩(冷却速度为 $2\text{ °C}\cdot\text{h}^{-1}$ )的冻胀变形随时间的变化曲线。由图9可知,不同围压下饱和岩样的变形不同,围压越大,冻胀变形越小。分析认为,由于围压的存在,导致岩样在冻胀变形前已经处于压缩状态,对于饱和岩样而言,内部产生孔隙水压力,孔隙水的体积略有减小。在岩样降温冻结的过程中,首先是冰水相变作用导致孔隙压力增大,孔隙压力直接作用于岩石骨架,当岩石骨架无法抵消孔隙压力时,剩余的压力由围压承担,当围压不能抵消剩余的压力时,岩样出现冻胀变形。因此,若要产生冻胀变形,则需满足冻胀力大于岩石骨架约束力和围压之和对外做正功,而冻胀力主要由孔隙水冻结成冰产生的体积膨胀提

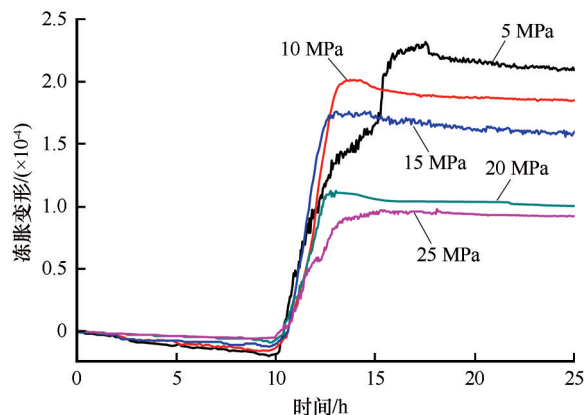


图9 不同围压下岩样冻胀变形-时间曲线  
Fig. 9 Frost deformation-time curves of rock samples under different confining pressures

供。由于冰的弹性模量较砂岩的要小,因此孔隙内的冰晶体要产生大量的压缩变形,才能克服岩石骨架约束和围压做功,这就导致砂岩整体的冻胀变形减小,减小的部分则为冰克服围压产生的体积压缩变形,而围压越大,冰晶体的压缩变形越大,因此砂岩整体的冻胀变形越小。

提取不同围压下饱和砂岩的最大冻胀变形,绘制冻胀变形-围压曲线,如图 10 所示。由图可知,当冻结温度相同时,砂岩的冻胀变形与所处的围压水平成反比,即围压越大,冻胀变形越小,这主要是由于在高围压下砂岩很难产生冻胀变形,围压限制了砂岩空隙内部水相变成冰时体积的膨胀。

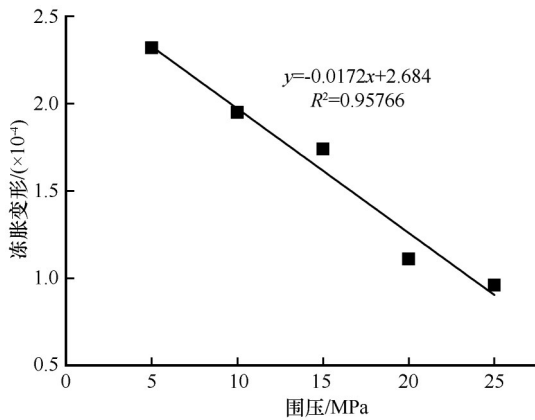


图 10 砂岩试样的冻胀变形-围压曲线

Fig. 10 Frost deformation-confining pressure curves of sandstone samples

### 3 冻胀变形理论分析

为了从理论上得到岩石的冻胀变形计算公式,康永水等<sup>[19]</sup>运用应变片法测试了低温环境下饱和及干燥岩样的低温应变,认为降温产生的总应变 $\varepsilon^T$ 等于岩石骨架的热胀冷缩应变 $\varepsilon_s^T$ 和冻胀应变 $\varepsilon_i^F$ 之和,即:

$$\Delta \varepsilon^T = \varepsilon_s^T + \varepsilon_i^F \quad (1)$$

考虑单元体孔隙度 $n$ ,饱和度 $S_r$ ,围压作用下岩石冻结前后受力示意图如图 11 所示,孔隙内冰水相变体积膨胀产生的压力视为 $P_i$ ,且以孔隙压力的形式施加至岩石骨架。在研究岩石骨架受力时,将 $P_i$ 等效至骨架表面应力 $P_e$ 得:

$$P_e = \kappa P_i \quad (2)$$

式中: $\kappa$ 为冻胀传压系数,根据有效接触面积理论可近似取值为 $n$ 。

假设水相变成冰时体积膨胀系数为 $\beta$ ,即

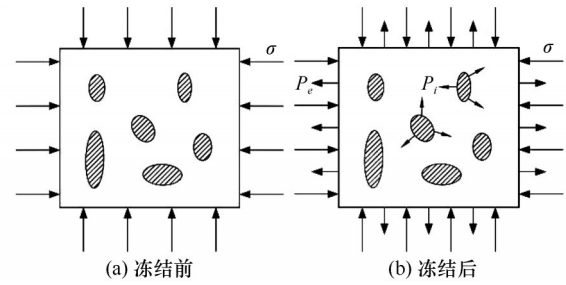


图 11 岩石骨架受力示意图

Fig. 11 Sketch of freezing pressure on rock skeleton

$\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1$ , 其中 $\rho_w$ 、 $\rho_i$ 分别为水和冰的密度,则无约束状态下的体积增量 $\Delta V_f'$ 为

$$\Delta V_f' = \beta n S_r u - n(1 - S_r) \quad (3)$$

$$u = \frac{m_i}{m_w + m_i} \quad (4)$$

式中: $u$ 为冻结率( $0 \leq u \leq 1$ ),表征参与冻结的水分的多少; $m_i$ 为已冻水(冰)的质量; $m_w$ 为未冻水的质量。

由于围压(以 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ 为例)的存在,岩石处于三向受压状态,冰体的冻胀需要克服围压,假设水、冰体和岩石基质为均质各向同性弹性介质,围压对各孔隙冰体所施加的压力与围压相等。同时,考虑岩石骨架的束缚作用,骨架冻胀应变 $\varepsilon_{vs}$ 和冰体的压缩应变 $\varepsilon_{vi}$ 分别为:

$$\varepsilon_{vs} = \frac{P_e - \sigma}{K_s} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{P_i}{K_i} = \frac{P_e}{\kappa K_i} \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为围压; $K_s$ 、 $K_i$ 分别为岩石骨架和冰的体积模量。

根据体积连续性,在“假饱和”之后的冻胀阶段有如下关系:

$$\varepsilon_{vs} + n S_r \varepsilon_{vi} = \beta n S_r u - n(1 - S_r) \quad (7)$$

将式(5)、(6)代入式(7)可得:

$$P_e = \frac{K_s K_i}{K_s S_r + K_i} \left[ \beta n S_r u - n(1 - S_r) + \frac{\sigma}{K_s} \right] \quad (8)$$

若岩体初始饱和,则 $S_r=1$ ,式(8)简化为:

$$P_e = \frac{K_s K_i \beta n S_r u + \sigma K_i}{K_s S_r + K_i} \quad (9)$$

将式(8)代入式(5),可得岩石骨架的体积增量:

$$\varepsilon_{vs} = \frac{K_i}{K_s S_r + K_i} \left[ \beta n S_r u - n(1 - S_r) + \frac{\sigma}{K_s} \right] - \frac{\sigma}{K_s} \quad (10)$$

冻胀应变可表示为

$$\varepsilon_{ij}^F = \frac{K_i [\beta n S_r u - n(1 - S_r)]}{3(K_s S_r + K_i)} \delta_{ij} + \frac{\sigma}{3K_s} \left( \frac{K_i}{K_s S_r + K_i} - 1 \right) \delta_{ij} \quad (11)$$



式中:  $\delta_{ij}$  为岩石骨架微小单元体;  $\varepsilon_{ij}^F$  为单元体  $\delta_{ij}$  产生的冻胀应变。

从而得岩石的总应变:

$$\Delta\varepsilon^T = \varepsilon_s^T + \varepsilon_i^F = \alpha\Delta T\delta_{ij} + \frac{K_i[\beta n S_r u - n(1 - S_r)]}{3(K_s S_r + K_i)}\delta_{ij} + \frac{\sigma}{3K_s}\left(\frac{K_i}{K_s S_r + K_i} - 1\right)\delta_{ij} \quad (12)$$

式中:  $\Delta T$  为岩石的降温幅度;  $\alpha$  为岩石的热胀冷缩系数(与温度有关的参数)。

由式(12)可知, 降温过程中岩石的冻胀变形影响因素大致可分为内因和外因两大类, 内因包括岩石的孔隙度  $n$ 、饱和度  $S_r$ 、冰和岩石骨架的体积模量  $K_i$ 、 $K_s$ , 外因主要是温度  $T$ 、围压  $\sigma$ :

(1)  $T$  主要通过影响岩石骨架的热胀冷缩和  $u$  而影响岩石的冻胀变形, 对于非饱和岩石冻结率较低时, 即  $\frac{1 - S_r}{\beta S_r} \geq \mu$ , 孔隙中有一部分空间被空气占据, 此时  $\varepsilon_i^F = 0$ , 岩石处于冷缩状态; 对于饱和岩石冻结率较低时, 冻胀变形小于冷缩变形 ( $|\varepsilon_i^F| < |\varepsilon_s^T|$ ), 岩样整体表现为冷缩;

(2) 从式(12)可以看出, 由于  $\frac{K_i}{K_s S_r + K_i} < 1$ , 故围压使岩石总的冻胀变形有所减小, 这是因为围压限制了冰的膨胀变形,  $\sigma$  越大, 冰体产生的压缩变形越大, 即岩石的冻胀变形与围压成反比, 这与试验得出的结论一致;

(3) 对于非饱和岩石, 若饱和度很低, 即使完全冻结 ( $\mu = 1$ ), 此时  $\frac{1 - S_r}{\beta S_r} > 1$ , 岩石内部仍不能达到“假饱和”状态, 因而不发生冻胀;

(4) 当  $n$  较小时, 即使初始饱和且完全冻结 ( $S_r = 1, \mu = 1$ ), 此时  $\frac{K_i \beta n - \sigma}{3(K_s + K_i)} < \alpha \Delta T$ , 由于冻胀变形小于冷缩变形, 岩石整体仍表现为冷缩; 当  $n$  较大时, 岩样内部水分冻结时产生的膨胀变形较大, 水分完全冻结时, 冻胀变形达到最大值。

#### 4 模型的验证

根据建立的冻胀变形理论计算公式(12), 对不同围压下冻结稳定后的砂岩冻胀变形进行计算, 并与试验结果进行对比分析(图12)。计算参数取值: 饱和度  $S_r$  取 100%, 孔隙度  $n$  取 20.98%, 冰水相变体积膨胀系数  $\beta$  取 0.11, 冰和岩石骨架的体积模量  $K_i$ 、 $K_s$  分别取 8.58 GPa、16.8 GPa, 冻结率  $u$  取 0.96。

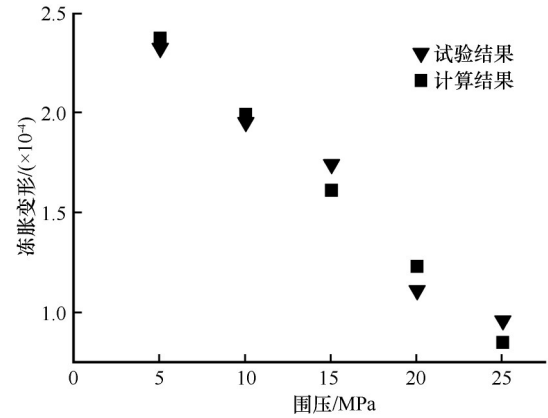


图12 计算结果与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of calculation results and test results

根据干燥砂岩的冷缩变形量, 反算岩石的热胀冷缩系数  $\alpha$  得  $-8.62 \times 10^{-7}$ , 降温幅度  $\Delta T$  为 42.6 °C。由图12可知, 计算结果与试验结果具有较好的吻合度, 砂岩的冻胀变形与围压呈负相关关系, 说明本文建立的冻胀变形理论计算公式可用于评价岩石的冻胀变形。此外, 计算结果与试验结果之间的差异可能与矿物质水解导致试样出现膨胀变形有关, 而公式(12)未考虑这部分变形。

#### 5 展望

由前述分析可知, 砂岩的冻胀受多个因素的影响, 且不同因素之间又有直接或间接的联系, 相互影响, 相互制约。在实践工程中, 受岩层的含水状态和地下水的赋存条件影响, 加之节理裂隙的随机性, 以及裂隙面的填充形式多样性, 冻结变形更加复杂。在后续研究中, 需进一步开展多重因素耦合作用下砂岩的冻胀变形试验, 在评价现场的岩体冻胀时, 需要同时结合现场温度、冻胀变形监测数据, 修正理论计算公式, 使之更加切合实际。

通过本文研究发现, 富水软岩的冻胀变形具有时间效应, 煤矿井筒在冻结法施工开挖前的积极冻结期, 降温作用导致岩石出现冻胀, 冻胀力不断增大, 积极冻结期结束, 冻胀基本稳定。地应力在一定程度上限制了冻胀变形, 从而导致岩石内部的冻胀力先增大, 后趋于稳定, 岩石最终所处的应力水平提高。随着井筒的不断开挖, 岩石内部储存的冻胀力通过冻胀变形的形式对外做功, 岩石所受的水平应力逐渐释放, 冻胀变形亦随之出现, 对井筒的受力是不利的。在冻结壁解冻的过程中, 冻胀变形逐渐减小, 使得围岩产生向井筒外侧收缩的趋势, 在一定程度上可减小井筒的受力, 对工程是有利

的。据此,可根据冻胀变形对工程的利害关系,恰当地加以控制,使之更好地为工程建设服务。

## 6 结论

(1)通过对红砂岩进行不同冷却速度、不同围压下的低温冻结试验,测试了岩样的冻胀变形,得到了不同冻结条件下砂岩的冻胀变形规律:随着温度的降低,饱和砂岩首先出现冷缩变形,随后出现冻胀变形,最后趋于基本稳定,而干燥砂岩始终处于冷缩变形状态。饱和砂岩变形大,干燥砂岩变形小;含水状态和围压相同时,不同冷却速度砂岩最终的变形基本一致。

(2)相同条件下,砂岩的冷却速度越大,冻胀速率越大,二者近似呈线性关系。当冻结温度一定时,砂岩的冻胀变形与所处的围压水平成反比,这主要是由于高围压限制了岩样内部孔隙水相变成冰时体积的膨胀变形。

(3)运用理论分析方法,建立了围压作用下岩石的冻胀变形计算公式,分析了围压、温度、饱和度和孔隙度对冻胀变形的影响。围压主要通过限制冰水相变时的膨胀变形而减小岩石的冻胀变形,温度主要通过影响孔隙水的冻结率和岩石骨架的热胀冷缩而影响岩石的冻胀变形。饱和度和冻结率和孔隙度决定了岩石是冻胀还是冻缩。

## 参考文献(References):

- [1] Yang Gengshe, Pu Yibin, Ma Wei. Discussion on the damage propagation for the rock under the frost and thaw condition of frigid zone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(2): 220-226. [杨更社, 蒲毅彬, 马巍. 寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨[J]. 实验力学, 2002, 17(2): 220-226.]
- [2] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1409-1412. [杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1409-1412.]
- [3] Xu Guangmiao, Liu Quansheng, Peng Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2502-2508. [徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2502-2508.]
- [4] Liu Q S, Xu G M, Hu Y H, et al. Study on basic mechanical behaviors of rocks at low temperatures[C]//Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2006, 306: 1479-1484.
- [5] Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, 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. [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.]
- [6] Yang Gengshe, Xi Jiami, Wang Zongjin, et al. Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujiahe Coal Mine[J]. Coal Mine, 2010, 35(4): 565-570. [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.]
- [7] Yang Gengshe, Lv Xiaotao. 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. [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.]
- [8] Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, 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. [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.]
- [9] Zhang Jinzhou, Miao Linchang, Yang Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1694. [张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688-1694.]
- [10] Bayram F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83(12): 98-102.
- [11] Gholamreza K, Reza Z S, Yasin A. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 8(8): 5991-6001.
- [12] Li Jinming, Li Guoyu, Peng Wanlin, et al. The strength and deformation characteristics of saturated weathered granite under different temperature conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 523-531. [李金明, 李国玉, 彭万林, 等. 不同温度条件下饱水风化花岗岩强度及变形特性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 523-531.]
- [13] Lu Yani, Li Xinping, Han Yanhua. Mechanical characteristics of anisotropic sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 889-898. [路亚妮, 李新平, 韩燕华. 各向异性砂岩冻融力学特性研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 889-898.]
- [14] Inada Y K, Yokota K. Some studies of low temperature of rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 145-153.
- [15] Matsuoka N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 253-270.
- [16] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1029-1034.
- [17] Walbert C, Eslami J, Beaucour A L, et al. Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 6339-6351.



- [18] Lü Z, Xia C, Wang Y, et al. Analytical elasto-plastic solution of frost heaving force in cold region tunnels considering transversely isotropic frost heave of surrounding rock[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 163: 87-97.
- [19] Kang Yongshui, Liu Quansheng, Zhao Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2518-2526. [康永水, 刘泉声, 赵军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2518-2526.]
- [20] Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(10): 2000-2012. [刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(10): 2000-2012.]
- [21] Xia Caichu, Huang Jihui, Han Changling, et al. Methods of frost-heave ratio evaluation and classification of frost-heave susceptibility of tunnel surrounding rocks in cold regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1876-1885. [夏才初, 黄继辉, 韩常领, 等. 寒区隧道岩体冻胀率的取值方法和冻胀敏感性分级[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9): 1876-1885.]
- [22] Xia Caichu, Wang Yuesong, Zheng Jinlong, et al. Study on uneven frost heaving of fractured rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 41(4): 1161-1168. [夏才初, 王岳嵩, 郑金龙, 等. 裂隙岩体不均匀冻胀性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 41(4): 1161-1168.]
- [23] Xia Caichu, Wang Yuesong, Lü Zhitao, et al. Experimental study on Frost heaving characteristics of fractured rock mass under unidirectional freezing condition[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(9): 1268-1276. [夏才初, 王岳嵩, 吕志涛, 等. 单向冻结条件下裂隙岩体冻胀特性试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(9): 1268-1276.]
- [24] Liu Lijie, Bai Ying, Li Xiaoli, et al. Experimental research on the freeze capacity of pisha sandstone under the multifactors[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(11): 169-173. [刘李杰, 白英, 李晓丽, 等. 多因素耦合作用下砒砂岩冻胀性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(11): 169-173.]
- [25] Zhao Yubao. Study on the frost heaving behavior and construction countermeasure for plateau tunnel in cold region after earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. [赵玉报. 高原高寒隧道围岩冻胀行为及施工对策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.]
- [26] Tan Xianjun. Study on the mechanism of frost heave of tunnel in cold region with high altitude and related insulation technology[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010. [谭贤君. 高海拔寒区隧道冻胀机理及其保温技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.]
- [27] Zhang Guangze, Chen Guoqing, Jian Dahua, et al. Research on the freeze-thaw characteristics of rock at different temperature drop rates[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019(8): 19-23, 78. [张广泽, 陈国庆, 简大华, 等. 不同温降速率下岩石冻融特征研究[J]. *铁道工程学报*, 2019(8): 19-23, 78.]
- [28] Lv Zhitao, Xia Caichu, Li Qiang, et al. Frost heave experiments on saturated sandstone under unidirectional freezing conditions in an open system and coupled THM frost heave model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1435-1444. [吕志涛, 夏才初, 李强, 等. 单向冻结时开放条件下饱和砂岩冻胀试验及THM耦合冻胀模型[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1435-1444.]
- [29] Li Borong. Study on the physical mechanical properties of pock and temperature field of shaft freezing wall in cretaceous strata[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. [李博融. 白垩系地层冻结井筒岩石物理力学特性及温度场研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.]
- [30] Wang Weizhi. Temperature monitoring and numerical analysis of freezing shaft in soft rock formation in Mengcun coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. [王伟智. 孟村煤矿软岩地层冻结凿井温度监测与数值分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.]

## Study on frost heaving characteristics of sandstone under different freezing conditions

DONG Xihao<sup>1,2</sup>, YE Wanjun<sup>1</sup>, LIU Shuai<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** At present, artificial freezing method has become one of the effective methods for coal mine shaft to pass through water-rich soft rock strata, which can stop the movement of groundwater and limit the deformation of surrounding rock. In order to study the frost heaving characteristics of sandstone under different freezing conditions, frost heaving tests of saturated and dry Cretaceous red sandstone samples under different freezing rates ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and different confining pressures (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa) were carried out by using GCTS (Geotechnical Consulting & Testing Systems) servo-controlled low temperature and high pressure triaxial rock testing system. In this paper, based on the existing theory of physical

and mechanical properties of frozen soil, we studied the frost heaving law of sandstone under different freezing conditions and explored the frost heaving mechanism. The result shows that in the process of cooling, the dry rock sample always produce cold shrinkage deformation, while the saturated rock sample first produce cold shrinkage deformation, then produce frost deformation, and finally the deformation tends to be stable. The deformation of saturated rock samples is much larger than that of dry rock samples. The larger the stress level of rock samples at the same temperature is, the smaller the frost deformation is, which shows a linear negative correlation, mainly because the high confining pressure limits the volume expansion of the water phase in the pore inside the rock samples when it becomes ice. The frost deformation of rock samples is mainly affected by confining pressure and water content, while the frost heaving rate is mainly affected by cooling rate. Under this test condition, the higher the cooling rate of sandstone is, the higher the frost heaving rate is, and the relationship between them is approximately linear. For saturated rock samples, the confining pressure reduces the rock frost heaving by limiting the expansion during the phase transformation of ice water, and the temperature affects the rock frost heaving by affecting the freezing rate of pore water and the thermal expansion and cold contraction of rock skeleton. For dry rock samples, the deformation is mainly due to the volume contraction of rock mineral particles caused by thermal expansion and cold contraction effect, and the greater the temperature change, the greater the deformation. Based on the experimental results and theoretical analysis method, a calculation formula of rock frost heaving considering the influence of confining pressure was established. By calculating the frost heave of sandstone samples under different confining pressures, it is found that the calculated values are in good agreement with the experimental results. Moreover, according to the calculation formula of frost heaving, the influence factors of rock frost heaving during freezing can be divided into two categories: internal cause and external cause. The internal cause includes porosity, saturation, volume modulus of ice and rock skeleton, and the external cause includes temperature and confining pressure. For saturated rock, the frost heaving is mainly affected by factors such as confining pressure, temperature and porosity. When the saturation, porosity and freezing rate are low, the rock may only produce shrinkage deformation, because these indicators determine whether the rock produces frost heave or freeze shrinkage. The mechanism of rock frost heaving is very complicated due to the interaction and restriction between the internal and external factors and the dynamic changes of rock microstructure and mechanical properties during the process of frost heaving. The research results can provide theoretical reference for freezing construction scheme design of deep coal seam mine construction, and also provide a theoretical basis for the study of physical and mechanical properties and engineering application of soft rock in frozen soil area.

**Key words:** sandstone; frost heaving; freezing rate; confining pressure

(责任编辑: 张明义)