

文章编号: 1001-4888(2023)06-0751-11

# 红砂岩冻融循环三轴力学特性及损伤机制\*

叶永芑<sup>1</sup>, 杨圣奇<sup>1,2</sup>, 孙博文<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏徐州 221116;

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, 江苏徐州 221116)

**摘要:** 岩石的冻融破坏是寒区工程中不可忽视的自然灾害之一。为了探究冻融循环对岩石物理力学特性的影响, 通过开展不同冻融循环次数下红砂岩的常规三轴试验, 分析了其物理力学参数随冻融循环次数及围压的演化规律。结果表明, 在冻融循环达到 5 次时, 岩样中部表面会出现宏观裂纹且中部直径显著增大, 随着表观裂纹不断发育, 岩样尺寸随之增大; 在单轴情况下, 随着冻融循环次数的增加, 单轴抗压强度不断降低, 降幅最快发生在冻融循环前 5 次, 超过 2 次后, 岩样由脆性破坏转换为延性破坏; 在三轴情况下, 岩样峰值强度随冻融循环次数增加而降低, 降幅最大发生在冻融循环 5 次以后, 在冻融循环前 10 次时围压对弹性模量影响较大, 超过 10 次后冻融损伤对弹性模量影响较大。通过微观结构观察到冻融循环一方面会降低岩石矿物颗粒之间的连结紧密程度, 使岩石孔隙直径增大, 另一方面会使岩石颗粒崩解, 破坏岩石颗粒的完整性。

**关键词:** 冻融循环; 红砂岩; 宏观裂纹; 变形特性; 冻胀力; 微观结构

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-22-280

## 0 引言

据统计, 我国季节性寒区面积占国土面积的 75%<sup>[1]</sup>, 随着我国西部的逐渐开发, 越来越多的岩土工程面临冻害问题。寒区具有气温低、寒期长等特点, 四季温差大引起的冻融循环作用不断损伤岩体, 造成寒区岩质边坡崩解<sup>[2]</sup>、建筑损伤<sup>[3]</sup>、隧道衬砌破坏<sup>[4]</sup>等问题, 严重影响西部的开发, 而红砂岩是工程中最常见的一种岩体, 在寒区广泛分布, 因此研究冻融循环作用下红砂岩物理力学特性演化规律和损伤机理对维持寒区岩土工程的稳定具有重要意义。

国内外学者将岩石冻融损伤原因归纳为两大类。第一类认为组成岩石各种矿物的膨胀系数不同, 在温度变化时, 矿物的不均匀胀、缩导致岩石内部受力集中而产生裂隙<sup>[5]</sup>; 第二类认为孔隙中的水发生相变导致体积膨胀, 产生冻胀力, 使得岩石内部裂隙扩展并萌生裂纹, 由此产生了体积膨胀理论、静水压理论、分凝冰等理论, 这些理论都跟水有关, 因此宋勇军等<sup>[6]</sup>对不同饱和度红砂岩进行冻融试验, 发现饱和度为 70%、冻融循环为 10 次是红砂岩损伤劣化的阈值。

冻融循环对岩石造成的损伤会导致物理特性的劣化。张君岳<sup>[7]</sup>通过观察冻融过程中红砂岩试样表面变化, 归纳总结出裂纹、颗粒脱落、片落三种劣化模式。方云等<sup>[8]</sup>通过测量岩样的几何尺寸, 得到了砂岩冻融循环前后体积变化率, 发现饱水岩样在冻融循环前 20 次体积增加较快。还有学者从微观角度分析了岩石随冻融循环的变化<sup>[9-11]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077231)

通信作者: 杨圣奇(1978-), 教授、博导。主要从事深部岩土力学与地下工程方面的研究工作。Email: yangsqi@hotmail.com

在力学特性研究方面, Feng 等<sup>[12]</sup>研究了冻融循环次数对砂岩的力学特性的影响, 发现随着循环次数的增加, 砂岩峰值应变不断增加, 单轴抗压强度逐渐降低。Mousavi 等<sup>[13]</sup>以钙质片岩为对象进行冻融试验, 发现随着冻融循环的不断进行, 岩样黏聚力和内摩擦角呈指数下降, 其中黏聚力下降幅度较大, 内摩擦角下降幅度较小。刘慧等<sup>[14]</sup>对不同冻融循环次数下砂岩进行巴西劈裂试验, 发现在冻融循环 5 次左右岩样损伤程度最为剧烈。范立峰等<sup>[15]</sup>采用两种应变测量方式得到冻融循环后砂岩的应力-应变曲线, 发现冻融循环会导致砂岩的抗压强度和弹性模量发生劣化。岩石冻融过程中, 冰在融化成水后, 向岩石内部迁移, 造成孔隙裂隙等缺陷进一步发育, 陈宇龙等<sup>[16]</sup>利用激光扫描显微镜从微观角度分析了页岩经历冻融循环作用后其表面裂纹的发育过程, 发现随着循环次数的增加, 裂纹的表面积、深度均逐渐增大。

综上所述, 目前在岩石经历冻融循环作用后物理力学特性方面的研究成果较为丰富, 但是对于岩石冻融损伤机理仍存在分歧, 且学者的研究主要集中于单轴情况, 但实际工程岩体常处于三向应力状态, 因此需要进一步研究冻融损伤机理以及围压与冻融循环共同作用下红砂岩物理力学特性。故本文以红砂岩为研究对象, 对不同冻融循环次数下红砂岩进行常规三轴试验, 记录了循环过程中红砂岩表观特征和尺寸的变化, 并通过微观角度分析了冻融循环对砂岩的影响, 以期为寒区岩土工程的设计及施工提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试样岩性

岩样取自四川省自贡市, 为了探究冻融循环对红砂岩的影响, 按照国际岩石力学学会的建议, 将岩样加工成直径约为 50mm, 高约为 100mm 的圆柱体试样。通过 X 衍射(XRD)分析可知, 该红砂岩试样矿物成分为 69.37% 石英, 11.23% 斜长石, 9.56% 白云母, 6.97% 方解石, 2.8% 钾长石, 0.07% 赤铁矿, 如图 1 所示。试样密度为  $2.17\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.23\text{g}/\text{cm}^3$ , 平均密度为  $2.19\text{g}/\text{cm}^3$ , 饱水率约为 7.33%, 根据饱水法测得的孔隙率平均为 16.10%。

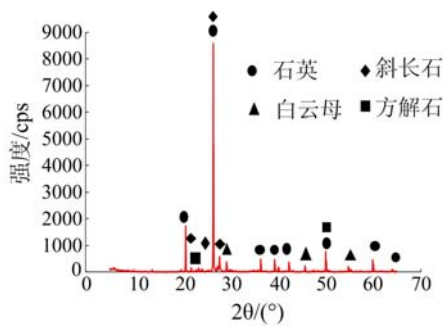


图 1 砂岩矿物成分

Fig. 1 Mineral composition of sandstone

30℃, 一月和十二月温度最低, 月平均最低气温为  $-20^\circ\text{C}$ , 历史最低温度为  $-30^\circ\text{C}$ , 因此将冻融循环试验温度设置为  $-30^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 。

冻融循环时间的设置主要与岩性有关, 本文试验所选红砂岩强度低, 且孔隙率大, 结合国内外研究结果, 恒温冻结时间为 5h, 恒温加热时间为 5h, 升温与降温时间各为 1h, 即一个冻融循环周期为 12h。

因选取的红砂岩吸水率高, 强度低, 太高的循环次数易致红砂岩在循环过程中崩解, 因此将冻融循环次数设置为 0 次、2 次、5 次、10 次、20 次。

### 1.4 试验方案

本文研究饱水试样受冻融循环的影响。首先将岩样放入高温炉内, 温度设定为  $105^\circ\text{C}$ , 保温 4h, 冷却至室温后, 将岩样放入真空皿中, 保证真空皿中的水完全没过岩样, 再用真空泵抽真空, 时间不低于 4h, 最后静置 24h, 确保岩样处于饱水状态。为防止水分在冻融试验机里蒸发, 先用保鲜膜包裹好试样,

### 1.2 试验设备

试验过程中所用到的主要仪器包括: (1) XY-QDR-50 型全自动低温冻融试验机, 由辽宁抚顺鑫源机电仪器厂生产, 温度为  $-50^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ , 冻融方式为气冻气融; (2) 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点试验的 GCTS RTX-4000 高温高压岩石三轴试验系统, 该装置最大轴向荷载为 4000kN, 最大围压为 140MPa, 轴向与环向变形测量值为 0mm~5mm。

### 1.3 冻融循环试验的参数

为了模拟中国西部严寒地区气候对岩石的影响, 以新疆为例, 最热的月份为七月份, 平均最高温度达到

再放入冻融循环机器中,确保冻融循环过程中红砂岩始终处于饱水状态。试验围压设置为 0MPa、3MPa、6MPa、9MPa,围压加载速率为 5MPa/min,轴向采用应变控制,加载速率为 0.06%/min。

## 2 冻融循环作用下红砂岩物理特性

### 2.1 冻融岩石表面特征

岩石受冻融循环影响会不断损伤劣化,其表面可能会出现明显变化,张慧梅等<sup>[17]</sup>将冻融损伤劣化模式归类成 3 种:剥落模式、断裂模式和裂纹模式。为了探究冻融损伤劣化发展过程,本文记录了不同循环次数下同一红砂岩表面变化,如图 2 所示,图中 FT 代表冻融循环。从冻融循环过程中可以看到,当冻融循环次数达到 5 次时,岩样表面首次出现宏观横向裂纹,裂纹宽度、长度较小,且裂纹集中在岩样中部,说明冻融循环对该岩样中部影响最大;当冻融循环达到 7 次时,横向裂纹进一步发育,裂纹长度、宽度小幅度增加,同时岩样中部表面新出现一条纵向裂纹;当冻融循环达到 10 次时,岩样表面裂纹长度、宽度明显增大,裂纹向两端发育,且横向裂纹与纵向裂纹贯通,主裂纹基本形成;当循环次数达到 13 次时,横向与纵向主裂纹进一步发育贯通,同时从主裂纹周围会随机出现一些宏观微裂纹;当循环达到 15 次时,主裂纹继续向两端发育,且裂纹宽度继续增大,裂纹之间出现一些剥落的游离小颗粒,同时主裂纹周围继续出现一些新的宏观微裂纹;当循环达到 20 次时,裂纹的发育情况与 15 次相似,裂纹发育速度明显降低。

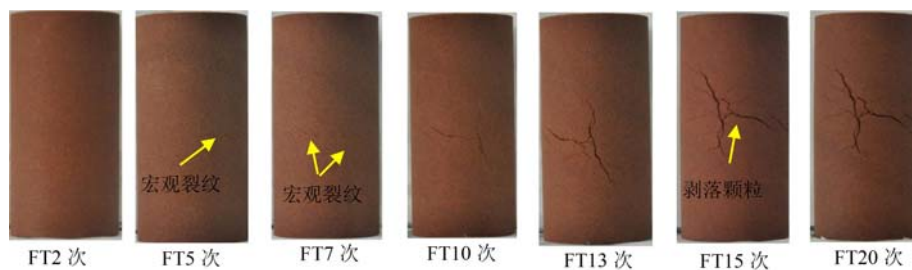


图 2 不同循环次数岩石表面特征

Fig. 2 Rock apparent characteristics with different cycle times

从岩样表面宏观裂纹发育过程中看,在循环 5 次之前冻融循环对岩样的损伤不足以让岩样产生宏观裂纹;当循环次数达到 5 次时,试样表面开始出现宏观裂纹,这是因为冻融循环过程中孔隙中的水被冻结造成约 9% 的体积膨胀,然而受到周围岩石颗粒的约束,产生冻胀力,当岩石内部无法重新平衡冻胀力时,岩石便被破坏,从而表面产生宏观裂纹;在产生宏观裂纹后,由于温度升高,冰融化成水,水向裂纹周围迁移,在下次冻结时会加大冻融损伤,这种恶性循环造成宏观主裂纹的不断发育以及新的宏观微裂纹的不断出现;当裂纹发育较充分后,水在低温冻结产生的体积膨胀受周围岩石颗粒的限制大大减少,冻胀力有足够的空间可以释放,难以再次集中对岩样产生较大破坏,因此循环 15 次的岩样表面特征与循环 20 次的类似。

### 2.2 冻融循环对红砂岩尺寸的影响

为探究红砂岩冻融循环与物理性质的关系,本文记录了不同循环次数下红砂岩的尺寸变化。以表面特征随循环次数增加而变化的岩样为例,如图 3 所示,在冻融循环初期岩样尺寸几乎不变,当冻融循环次数达到 5 次时,岩样中部直径明显增大,且增长速度较快,而岩样两端直径与高度变化较小;当冻融循环在 5 次到 10 次之间时,中部直径继续保持较快增长速度,岩样两端直径与高度出现明显增幅;当冻融循环在 10 次到 15 次之间时,岩样两端直径与高度增长速度大幅下降;当冻融循环超过 15 次时,岩样中部直径增长速度下降,岩样两端直径与高度几乎不再变化。图 4 是根据岩样半径的均值计算出的体积变化率,从图中可以看出岩样体积的变化率与岩样中部直径的变化率类似,在冻融循环前 2 次体积基本不变,在循环 5 次以后快速增长,在循环 15 次以后体积变化率明显下降,最终趋于不变。

从岩样尺寸变化来看,在冻融循环初期,岩样尺寸受影响较小,当岩样表面出现宏观裂纹时,即冻融循环达到 5 次,岩样中部直径会明显增大,说明宏观裂纹的出现会伴随岩样中部膨胀,这是因为水冰相

变产生的冻胀力容易集中在岩样中部,导致岩样中部出现宏观裂纹,发生塑性变形,造成中部直径增大;随着冻融循环的继续进行,岩样内部颗粒在冻胀力及温度变化的影响下发生错动,胶结性减弱,从而造成体积整体膨胀,尺寸增大;在冻融循环后期,岩样宏观裂隙较大,岩样难以继续膨胀,因此尺寸变化幅度大幅下降。

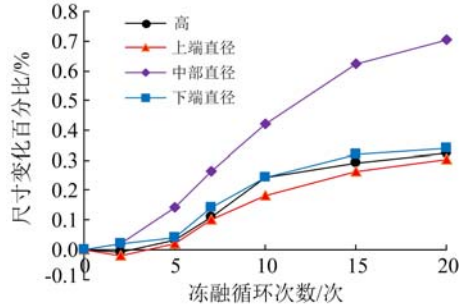


图3 不同冻融循环次数下红砂岩尺寸变化

Fig. 3 The size of several red sandstones under different freeze-thaw cycles varies

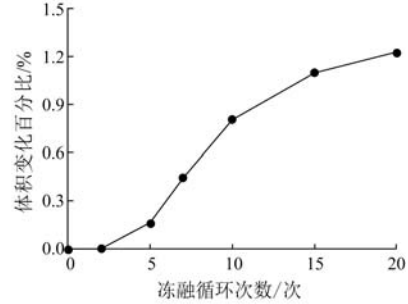


图4 不同冻融循环次数下红砂岩体积变化

Fig. 4 Volume variation of red sandstone under different freeze-thaw cycles

### 3 冻融循环作用下红砂岩单轴力学特性

#### 3.1 冻融岩石单轴力学特性

对试验获得的不同冻融循环次数后红砂岩单轴应力-应变曲线进行分析。如图5所示,在经历冻融循环前后,红砂岩的应力-应变曲线均出现了初始压密阶段、线弹性变形阶段、屈服阶段以及峰后破坏阶段。从整体上看,随着冻融循环次数的增加,初始压密阶段不断增大,这主要是因为,随着冻融循环的持续进行,微观裂纹逐渐增多,宏观裂纹的出现使得压密阶段增大;在冻融循环前5次,试样呈现明显的脆性破坏,当冻融循环达到5次后,岩样峰后阶段明显增长,甚至会经历一段屈服平台后再缓慢跌落,从脆性破坏转变为延性破坏,这主要是因为岩石在冻融循环过程中不断受到冻胀力的影响,岩石颗粒晶键之间以及晶胞结构之间不断损伤,从而导致岩石延塑性的不断提高,弱化了岩石抵抗变形的能力,岩性由脆性向塑性转变,从而出现了屈服平台。

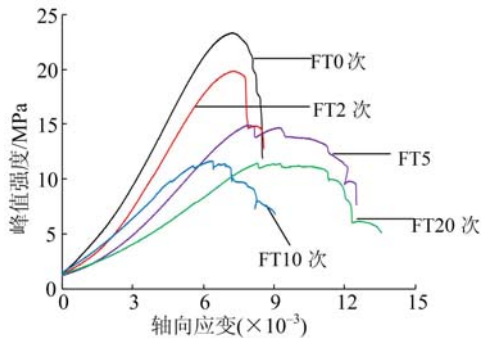


图5 不同冻融循环次数下红砂岩单轴应力-应变曲线

Fig. 5 Uniaxial stress-strain curves of red sandstone under different freeze-thaw cycles

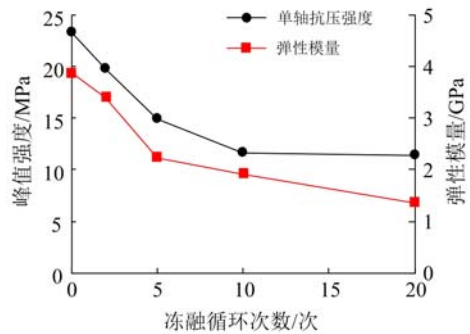


图6 冻融循环次数对红砂岩单轴抗压强度和弹性模量的影响

Fig. 6 Effect of freeze-thaw cycles on uniaxial strength and elastic modulus of red sandstone

根据单轴压缩应力-应变曲线(图5)获得了红砂岩的抗压强度与弹性模量,其中弹性模量取应力-应变曲线中峰值应力30%~70%内直线的斜率。在冻融循环0次、2次、5次、10次、20次后红砂岩的强度分别为23.30MPa、19.84MPa、14.92MPa、11.66MPa与11.41MPa,冻融循环后的岩样的单轴抗压强度较饱水试样分别降低了14.96%、35.05%、50.02%、51.10%。如图6所示,在冻融循环初期,岩样单轴抗压强度呈直线下降,超过10次以后岩样受冻融循环影响较小,这是因为在冻融循环初期,岩样受

水冰相变引起的冻胀力产生损伤,形成微观以及宏观裂纹,破坏了岩样结构,从而造成单轴抗压强度的大幅度下降,由岩样表观特征的发育情况可知,冻融循环达到10次时,主裂纹已基本形成,随着冻融循环的进一步进行,很难出现新的宏观大裂纹,因此岩样单轴抗压强度的劣化主要发生在主裂纹形成时期。

在冻融循环0次、2次、5次、10次、20次后红砂岩的弹性模量分别为3.88GPa、3.40GPa、2.24GPa、1.92GPa与1.36GPa,冻融循环后试样的弹性模量较饱水试样分别降低了12.37%、42.27%、50.52%、64.95%。从整体上看,在冻融循环初期,岩样弹性模量下降幅度较大,循环5次以后弹性模量下降幅度较小。由岩样表观特征变化知5次是岩样产生表观宏观裂纹的阈值,而岩样出现表观宏观裂纹时,其内部必然受冻融损伤产生大量微观裂纹,岩样内部结构被破坏,因此抵抗变形的能力大幅弱化,弹性模量大幅降低;在形成表观宏观裂纹后,矿物颗粒相互挤压程度降低,冻融循环产生的冻胀力减小,因此损伤速率下降,弹性模量下降幅度也随之降低。

### 3.2 红砂岩的抗冻性

岩石抵抗冻融破坏的性能称为岩石的抗冻性。我们通常用抗冻系数来反映,即

$$C_f = \frac{\sigma_c - \sigma_{cf}}{\sigma_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_f$ 为岩石的抗冻系数; $\sigma_c$ 为岩样循环前的单轴抗压强度; $\sigma_{cf}$ 为岩样冻融循环后的单轴抗压强度。 $C_f$ 越小则说明岩石受冻融影响越小。如图7所示,在循环10次前,岩样抗冻系数快速增加,循环10次以后,岩样的抗冻系数趋于稳定。这是因为冻胀力在冻融循环初期最大,最能降低岩石的性能,随着冻融循环的进行,冻胀力逐渐减小<sup>[18]</sup>,对岩石的影响逐渐降低。

## 4 冻融循环作用下红砂岩三轴力学特性

### 4.1 冻融岩石三轴变形特性

岩石在经历冻融循环与围压共同作用后,抵抗变形的能力会有所变化,以围压3MPa与9MPa为例对不同冻融循环次数下红砂岩的应力-应变曲线进行分析,如图8所示,红砂岩的应力-应变曲线与单轴情况类似,均出现4个阶段,但是当冻融不超过10次时,压密阶段不再明显。同一围压下,随着冻融循环次数的增加,岩样的峰值强度逐渐降低。在围压等于3MPa,冻融循环不超过10次时,岩样峰值应变变化不大,当冻融循环达到20次时,岩样峰值应变显著增大;在围压等于9MPa时,岩样峰值应变并无明显增大。这是因为冻融损伤是不可逆的,在冻融循环前期,围压压密了冻融损伤所产生的裂纹,岩样整体性提高,随着冻融循环的进行,损伤不断积累,岩样内部结构破坏严重,冻融损伤带来的弱化影响大于低围压的加强作用,因此围压3MPa、冻融循环20次时岩样塑性显著提高。

当循环次数不超过10次时,不同循环次数岩样的应力-应变曲线具有较高重合度,当循环次数达到20次时,应力-应变曲线几乎没有重合。这是由于在围压的作用下,岩石冻融过程中形成的微裂隙以及宏观裂纹被压密,从而降低了冻融损伤带来的影响,使应力-应变曲线有一定的重合度;当循环达到20次时,冻融循环对岩样造成的损伤较大,围压作用不足以抵消冻融损伤,因此应力-应变曲线重合度降低。

在较低围压下,如图8(a)所示,岩样在经历冻融循环20次后,破坏阶段才出现明显的屈服平台,呈明显的塑性破坏;当围压提高至9MPa时,如图8(b)所示,岩样在经历5次冻融循环后,破坏阶段都出现了明显的屈服平台,峰后塑性变形显著增加。由三轴压缩破坏阶段与单轴压缩破坏阶段对比可发现,在较低围压下,围压使岩样压密,抵消了一部分冻融循环对岩样的破坏,提高了岩样的整体性,从而使岩样的强度上升,延缓了屈服平台的出现;当围压升高时,岩样破坏阶段出现屈服平台所经历的循环次数

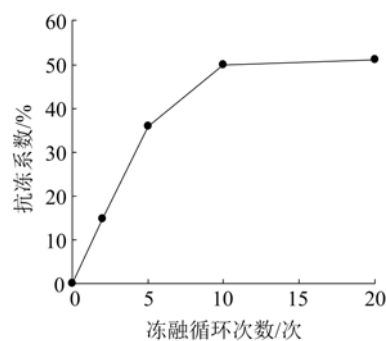


图7 红砂岩抗冻系数与冻融循环次数的关系

Fig. 7 Relationship between freeze-thaw coefficient of red sandstone and number of freeze-thaw cycles



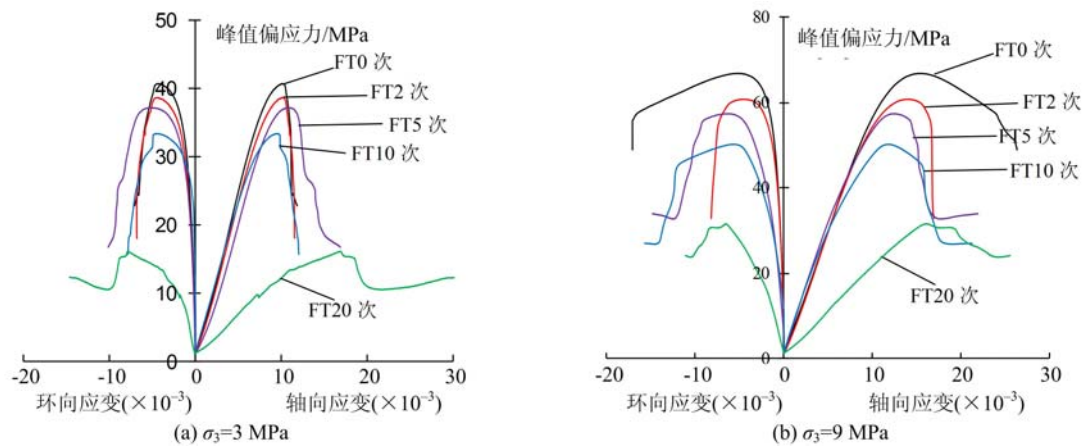


图8 不同围压不同冻融循环次数下红砂岩应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of red sandstone under different confining pressures and different freeze-thaw cycles  
与单轴基本一致,这是因为虽然在围压作用下岩样被压密,抵消了部分冻融循环损伤,但是较大围压会使岩样由脆性向塑性转化,因此在较高围压作用下岩样破坏阶段产生屈服平台所需要的循环次数有所降低。

岩石的弹性模量是一个重要的变形参数。如图9(a)所示,从整体上看,当循环次数相同时,岩样的弹性模量随围压的增大呈现非线性增加,其中冻融循环不超过10次时,岩样弹性模量随围压的变化较为明显,这是因为围压一方面使冻融循环产生的微观与宏观裂纹压密,另一方面限制了岩样的环向变形,从而增加了弹性模量,此时围压对弹性模量影响较大;当冻融循环达到20次时,围压对弹性模量影响较小,这是因为冻融损伤是不可逆的,随着冻融循环的进行,损伤不断增大,当损伤足够大时,围压仅能压密部分微裂纹,因此对岩样弹性模量影响较小,此时冻融损伤对弹性模量影响较大。

当围压相同时,岩样弹性模量与冻融循环次数的关系如图9(b)所示,在三轴压缩情况下,弹性模量最大下降幅度发生在冻融循环10次到20次之间,而在0到10次之间弹性模量变化不大,这与单轴压缩情况区别较大。由裂纹发育情况可知,冻融循环0到10次是岩样表面主裂纹形成期,这期间形成的裂纹与循环20次时的裂纹相比,宽度较小,易被围压压密,因此岩样弹性模量下降幅度较小;当冻融循环超过10次以后,一方面裂纹宽度进一步扩大,另一方面由于此时岩样内部微裂纹以及宏观主裂纹的形成,大量孤立孔隙被贯通,在冻融循环过程中,水在孔隙中反复不断迁移,降低了矿物颗粒之间的黏聚力以及摩擦系数,因此弹性模量下降速度增大。

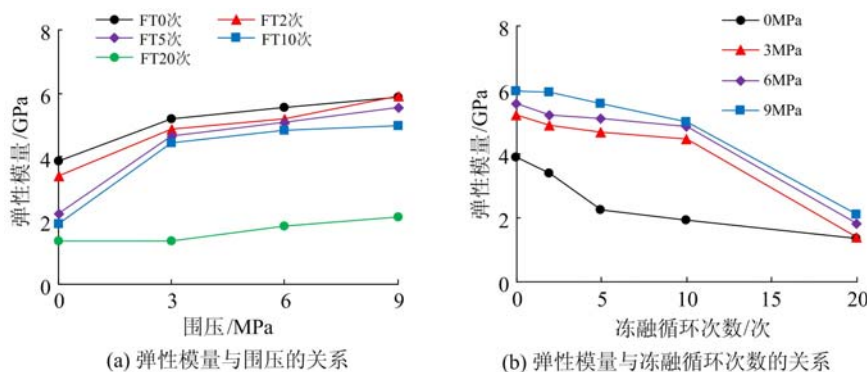


图9 围压与冻融循环次数对砂岩弹性模量的影响

Fig. 9 Effect of confining pressure and freeze-thaw cycle cycles on the elastic modulus of sandstone

#### 4.2 冻融岩石三轴强度特性

寒区岩石的抗压强度不仅受到冻融循环的影响,还和所处的应力条件有关,因此本文研究了冻融循环作用后红砂岩的三轴强度特征。图10(a)为砂岩不同冻融循环次数下峰值强度与围压之间的关系,

从中可以看出,不同冻融循环次数下砂岩峰值强度变化规律类似,都是随着围压的增大,峰值强度逐渐增大,在循环次数不超过10次时,不同冻融循环次数的峰值强度在3MPa、6MPa、9MPa围压下强度相差不大,这是因为在围压的作用下,冻融循环所产生的微观以及宏观裂纹闭合导致在同一围压下砂岩峰值强度相差不大。当循环次数达到20次时,砂岩裂纹虽然基本不再发育,但是岩石颗粒之间的不均匀膨胀依旧让损伤不断加剧,导致岩样十分脆弱,此时围压一方面压密了岩石颗粒,另一方面围压也可能使岩石内部裂隙贯通,从而减弱了围压对试样强度的强化作用,因此在同一围压条件下,冻融循环20次的岩样的峰值强度与较少循环次数下岩样的峰值强度相差较大。

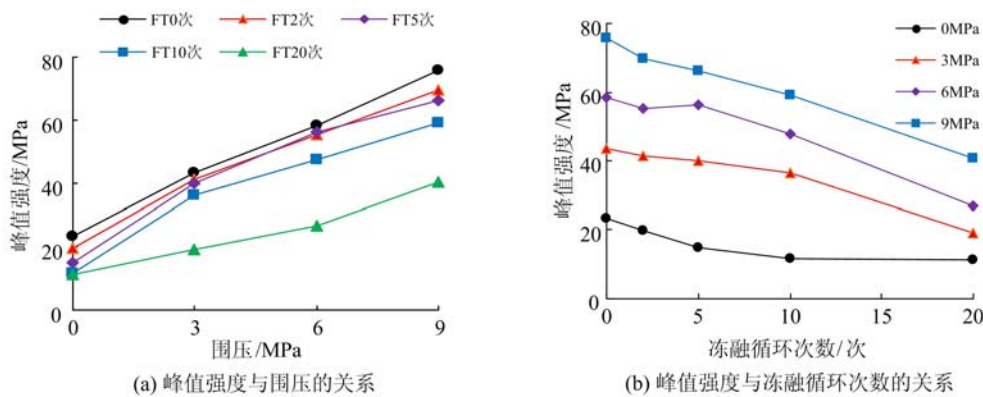


图10 围压与冻融循环次数对砂岩峰值强度的影响

Fig. 10 Effect of confining pressure and freeze-thaw cycle cycles on peak strength of sandstone

图10(b)是不同围压下砂岩峰值强度与循环次数之间的关系,从图中可以看出在三轴压缩情况下,当冻融循环不超过5次时,岩样峰值强度随冻融循环次数的增加缓慢降低,当循环次数大于5次时,岩样峰值强度随着冻融循环次数的增加而快速下降,这是因为在较少循环次数下,岩样还没有出现宏观裂纹,在较低围压作用下,岩样内部的微观裂隙就被压密,此时围压的加强作用大于冻融损伤的弱化作用,导致岩样强度随冻融循环次数的增加,下降幅度较小;当岩样在冻融循环作用下表面出现宏观裂纹时,岩样内部结构发生较大破坏,承载能力大幅度下降,此时冻融损伤占据主导地位。因此在三轴压缩情况下,岩样抗压强度的大幅度降低发生在冻融循环5次以后,即岩样表面出现宏观裂纹后,这与单轴抗压强度的变化有所不同。

#### 4.3 冻融循环作用下砂岩的破坏模式

不同冻融循环次数后砂岩的宏观破坏特征如图11所示。在单轴情况下,冻融循环0次试样为典型的剪切破坏,经历冻融循环后岩样的破坏模式表现为轴向劈裂破坏,破坏裂纹平行于加载方向,且岩样宏观破裂面的数量随着冻融循环次数的增加而不断增加,且当冻融循环达到10次后,宏观破坏裂纹与冻融循环导致的宏观裂纹相交。这可能是因为冻融循环刚开始前,岩样内部较为致密,裂纹将沿着最小耗能的方向扩展<sup>[19]</sup>,形成显著的剪切破坏,随着冻融循环次数的增加,岩样内部结构被破坏,形成微观与宏观裂纹,在外部荷载作用下,裂纹沿着加载方向扩展,从而形成劈裂破坏。在围压作用下,试样大多呈现典型的剪切破坏,且当冻融循环次数达到10次后,宏观破坏裂纹基本都与冻融损伤裂纹相交。

## 5 红砂岩冻融循环损伤机制分析

### 5.1 摩尔库伦强度准则

摩尔库伦强度准则认为岩石的破坏主要是剪切破坏,滑动面上的剪应力最大值取决于最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ ,且两者存在线性关系,即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + q\sigma_3 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\sigma_3 + \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (2)$$

式中: $\sigma_0$ 为岩石单轴抗压强度; $q$ 为围压相关系数; $c$ 为岩石的黏结力; $\varphi$ 为岩石的内摩擦角。如图12所示,不同冻融循环次数后砂岩的峰值强度与围压近似呈线性关系,线性相关系数 $R^2$ 为0.958~0.996,拟

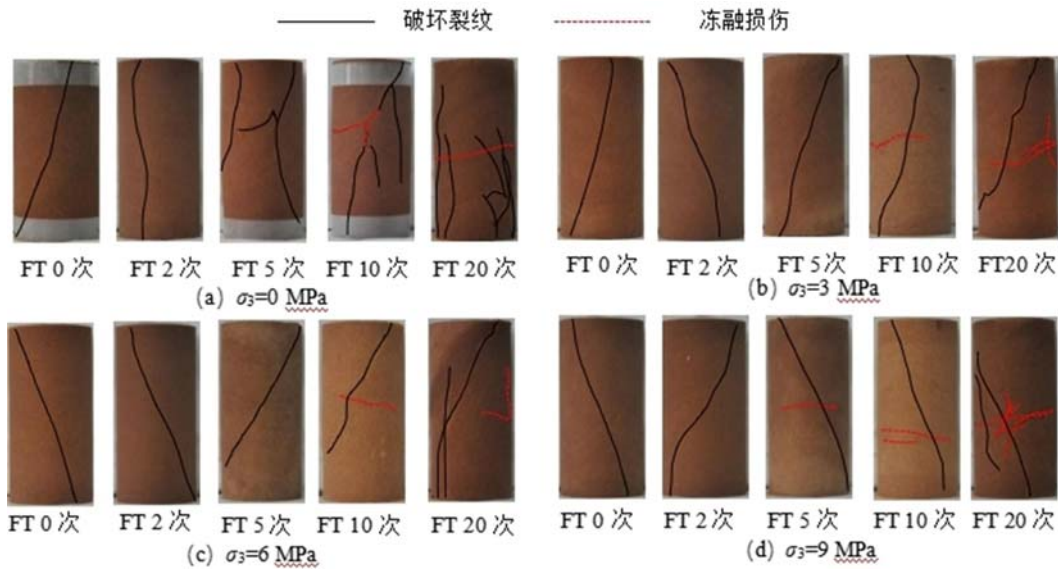


图 11 不同冻融循环下砂岩宏观破坏特征

Fig. 11 Macroscopic failure characteristics of sandstone under different freeze-thaw cycles

合程度较好,说明摩尔库伦准则能较好地预测不同冻融循环后岩样的强度。

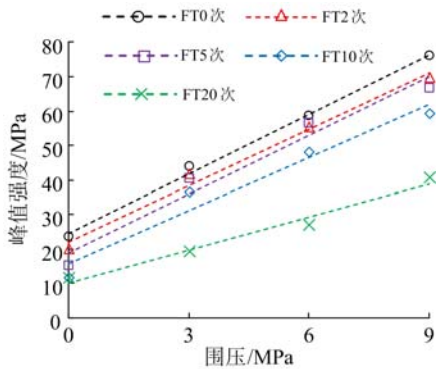


图 12 不同冻融循环次数下砂岩峰值强度与围压的关系

Fig. 12 Relationship between peak strength and confining pressure of sandstone under different freeze-thaw cycles

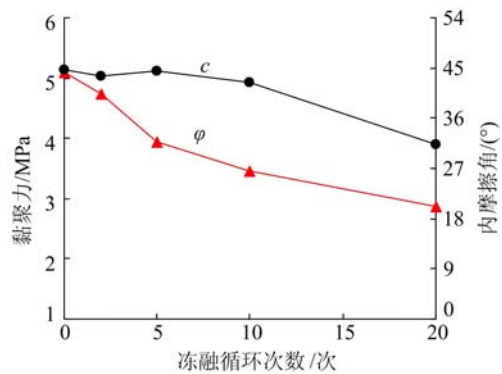


图 13 砂岩黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的关系

Fig. 13 Relationship between sandstone cohesion and internal friction angle and number of freeze-thaw cycles

根据砂岩在不同围压下的峰值强度,结合莫尔应力圆,对强度包络线拟合得到不同冻融循环次数下砂岩的黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$ 。从图 13 中可以看出整体上随着冻融循环次数的增加,砂岩黏聚力和内摩擦角逐渐减小。其中黏聚力在冻融循环不超过 5 次时基本不变,5 次以后黏聚力开始下降,当冻融循环达到 10 次以后,岩样黏聚力快速下降;内摩擦角在冻融循环初期快速下降,当循环次数达到 5 次后,内摩擦角下降速度减缓。这是因为一方面构成岩石的各种矿物不均匀胀、缩导致岩样损伤,另一方面水在低温冻结成冰发生体积膨胀,产生的膨胀压力使岩石结构破坏,造成岩样黏聚力和内摩擦角的减小,在冻融循环初期这些损伤主要降低岩样的内摩擦角,造成岩样强度的降低,当损伤足够大时,岩样表面出现宏观裂纹,此时冻融循环同时大幅度降低岩样的内摩擦角和黏聚力,造成岩样强度进一步下降。

### 5.2 冻融循环作用后砂岩微观结构分析

为探究冻融循环对岩石微观结构的影响,采用电镜扫描对不同冻融循环次数试样进行微观结构观察,结果如图 14 所示,未经冻融循环处理的试样的矿物颗粒之间紧密相连;在经历冻融循环 2 次后,矿物颗粒联结处出现大量矿物碎屑,这是因为由于矿物颗粒的膨胀系数不同,在冻融循环过程中不均匀胀、缩从而相互挤压,导致矿物颗粒四周损伤,产生大量碎屑填充在矿物颗粒联结处;当冻融循环达到 5 次时,一些矿物颗粒损伤严重,有的甚至整体崩解,这是因为冻融循环过程中矿物颗粒不断发生热胀冷



缩现象,导致矿物晶体化学键断裂,从而发生崩解现象;当冻融循环达到10次时,矿物颗粒连结紧密程度相对下降,出现一些孔径较大的孔隙;当冻融循环达到20次时,矿物颗粒连结程度进一步降低,一些体积较小的矿物颗粒不再与整体紧密镶嵌,矿物碎屑大量减少,且有的矿物颗粒产生穿晶裂纹,使完整的颗粒完全分解成多个颗粒,这是因为水冰相变产生冻胀力,不断损伤岩体,且在冻融循环过程中水不断通过孔隙和裂隙迁移,造成恶性循环,从而降低矿物颗粒的连结紧密程度以及破坏矿物颗粒的完整性,当岩样孔隙直径变大后,矿物碎屑在水的迁移过程中被带出岩石内部。综上所述,冻融循环一方面会降低矿物颗粒之间的连结紧密度,另一方面会使一些矿物颗粒崩解,从而损伤岩体,造成岩体力学性能的下降。

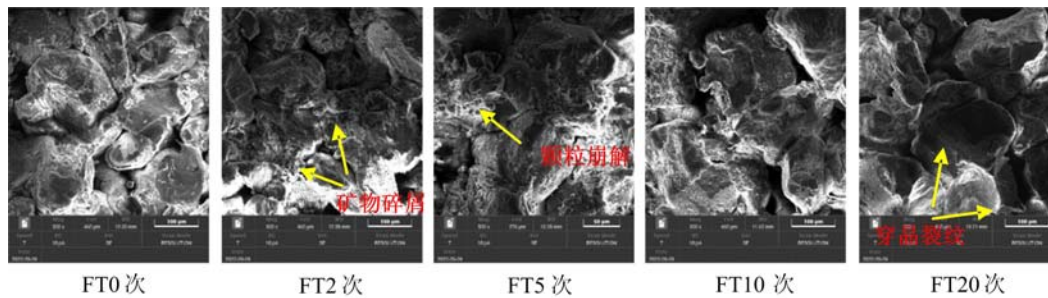


图14 不同冻融循环次数后砂岩试样电镜扫描结果

Fig. 14 SEM images of sandstone samples after different freeze-thaw cycles

## 6 结论

本文通过开展不同冻融循环次数下饱和砂岩的常规三轴试验,研究了冻融岩石表面破坏特征,分析了不同循环次数后砂岩的变形和强度特征,并从微观角度分析了冻融循环对砂岩的影响。主要结论如下:

(1) 岩样在经历5次冻融循环后表面开始出现宏观裂纹,5次到10次时裂纹发育较快,主裂纹贯通,10次到15次时主裂纹周围随机出现一些宏观微裂纹,并有一些岩石小颗粒掉落,15次到20次时裂纹发育速度明显减弱。

(2) 岩样单轴抗压强度的降低主要发生在冻融循环前5次,循环次数超过10次后,岩样单轴抗压强度变化幅度十分小,但是弹性模量会继续下降。

(3) 在同一围压下,随着冻融循环次数的增加,红砂岩峰值强度不断下降,最大下降幅度发生在岩样表面出现宏观裂纹后;当冻融循环次数不超过10次时,围压对弹性模量影响较大,当循环次数超过10次时,冻融损伤对弹性模量影响较大。

(4) 不同冻融循环次数后砂岩的微观结构有明显区别,未经冻融循环处理试样的矿物颗粒连结较为紧密,循环2次后矿物颗粒连结处出现大量矿物碎屑,循环5次后有矿物颗粒崩解,循环10次后岩石连结紧密程度下降,循环20次后有体积较小的矿物颗粒不再与整体紧密镶嵌,且出现了穿晶裂纹将完整颗粒分解成多个颗粒的现象。

### 参考文献:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000 (ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. China permafrost[M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese))
- [2] Lai Y, Hui W, Wu Z, et al. Analytical viscoelastic solution for frost force in cold-region tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 31(3):227-234.
- [3] Krautblatter M, Funk D, Friederike K. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2013, 38(8):876-887.
- [4] Freire-Lista D M, Fort R, Varas-Muriel M J. Freeze-thaw fracturing in building granites[J]. Cold Regions Science & Technology, 2015, 113:40-51.

- [5] 杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3):545—563 (YANG Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, et al. Multi-scale study and progress on mechanical characteristics of rock mass damage in freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3):545—563 (in Chinese))
- [6] 宋勇军, 车永新, 陈佳星, 等. 冻融作用下不同饱和度红砂岩损伤力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12):3493—3502 (SONG Yongjun, CHE Yongxin, CHEN Jiaying, et al. Mechanical characteristics of damage in red sandstone with different saturation under freeze-thaw action[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12):3493—3502 (in Chinese))
- [7] 张君岳. 红砂岩冻融循环条件下损伤演化规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020 (ZHANG Junyue. Study on damage evolution law of red sandstone under freeze-thaw cycle conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020 (in Chinese))
- [8] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9):2433—2442 (FANG Yun, QIAO Liang, CHEN Xing, et al. Experimental study on cyclic freeze-thaw of sandstone in Yungang Grottoes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9):2433—2442 (in Chinese))
- [9] Park J, Hyun C U, Park H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 74(2):555—565.
- [10] Liu T Y, Zhang C Y, Cao P, et al. Freeze-thaw damage evolution of fractured rock mass using nuclear magnetic resonance technology[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170:102951.1—102951.13.
- [11] Shen Y, Wang Y, Wei X, et al. Investigation on meso-debonding process of the sandstone-concrete interface induced by freeze-thaw cycles using NMR technology[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 118962.
- [12] Feng Q, Jin J C, Zhang S, et al. Study on a damage model and uniaxial compression simulation method of frozen-thawed rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1):187—211.
- [13] Mousavi S, Tavakoli H, Moarefvand P, et al. Assessing the effect of freezing-thawing cycles on the results of the triaxial compressive strength test for calc-schist rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019(1):90—104.
- [14] 刘慧, 蒯江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4):830—839 (LIU Hui, LIN Jianghao, YANG Gengshe, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(4): 830—839 (in Chinese))
- [15] 范立峰, 徐超. 基于不同应变测量方式的冻融岩石单轴压缩力学性能研究[J]. 实验力学, 2019, 34(1):73—78 (FAN Lifeng, XU Chao. Study on uniaxial compressive mechanical properties of freeze-thaw rock based on different strain measurement methods[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1):73—78 (in Chinese))
- [16] 陈宇龙, 张科, 孙欢. 冻融循环作用下岩石表面裂纹扩展过程细观研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1):1—7 (CHEN Yulong, ZHANG Ke, SUN Huan. A fine study on the propagation process of cracks on rock surface under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2019, 52(Suppl. 1):1—7 (in Chinese))
- [17] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1):140—145, 151 (ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Mechanical experiments of rock freeze-thaw and damage propagation characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1):140—145, 151 (in Chinese))
- [18] 乔趁, 王宇, 宋正阳, 等. 饱水裂隙花岗岩周期冻胀力演化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8):2141—2150 (QIAO Chen, WANG Yu, SONG Zhengyang, et al. Experimental study on the evolution characteristics of periodic frost heave force of water-saturated fractured granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8):2141—2150 (in Chinese))
- [19] 陆翔, 周伟, 才庆祥, 等. 冻融循环下泥岩力学特性及细观破裂机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4):819—829 (LU Xiang, ZHOU Wei, CAI Qingxiang, et al. Mechanical characteristics of mudstone under freeze-thaw cycle and study on mesoscopic fracture mechanism[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(4):819—829 (in Chinese))

## Triaxial mechanical properties and damage mechanism of the freeze-thaw cycle of red sandstone

YE Yongpeng<sup>1</sup>, YANG Shengqi<sup>1,2</sup>, SUN Bowen<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. China State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** Freeze-thaw destruction of rocks is one of the natural disasters that cannot be ignored in the cold zone project. In this paper, the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of petrophy was explored, and conventional triaxial tests of red sandstone under different freeze-thaw cycles were carried out, and the evolution of physical and mechanical parameters with the number of freeze-thaw cycles and confining pressure was analyzed. The results show that macroscopic cracks and the middle diameter of the rock sample increase significantly when the freeze-thaw cycle reaches 5 times, and the size of the rock sample increases accordingly with the development of apparent cracks. In the uniaxial case, the uniaxial compressive strength decreases with the increase of the number of cycles, and the fastest decline occurs in the first 5 times, and after more than 2 times, the rock sample is converted from brittle failure to ductile failure. In the triaxial case, the peak strength of rock samples decreases with the increase of the number of freeze-thaw cycles, and the largest decrease occurs after 5 freeze-thaw cycles, and the confining pressure has a greater effect on the elastic modulus 10 times before the freeze-thaw cycle, and the freeze-thaw damage has a greater effect on the elastic modulus after more than 10 cycles. The freeze-thaw cycle observed through the microstructure will reduce the tightness of the connection between rock mineral particles, increase the diameter of rock pores, and on the other hand, disintegrate rock particles and destroy the integrity of rock particles.

**Keywords:** freeze-thaw cycle; red sandstone; macroscopic cracks; deformation characteristics; frost heave force; microstructure