

# 白垩系红砂岩冻结融化后的力学性质试验研究

刘 波<sup>1,2</sup>, 马永君<sup>1</sup>, 盛海龙<sup>1</sup>, 常雅儒<sup>1</sup>, 于俊杰<sup>1</sup>, 贾帅龙<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:**西部煤矿冻结建井穿越岩层以白垩系、侏罗系等富水弱胶结地层为主, 在温度场和地应力场的耦合作用下冻结壁岩体经历了一次完整的冻融过程。以白垩系富水弱胶结红砂岩为研究对象, 充分考虑红砂岩冻融过程中受到的温度场与地应力场耦合作用环境, 基于力学试验得到白垩系弱胶结红砂岩冻结融化后的力学性质及冻融过程中的地应力对红砂岩力学参数的影响, 对白垩系弱胶结红砂岩冻融劣化机理及冻融过程中地应力的影响机制进行了分析。冻融过程中围压分别设置为 0、2、4、6、8 MPa, 冻结温度分别设置为-5、-10、-15 °C, 融化温度统一设置为 20 °C。试验结果表明, 白垩系弱胶结红砂岩胶结差、强度低, 对冻融作用非常敏感, 仅经历一次冻融后单轴抗压强度即下降 28.39%; 冻融过程中的地应力提高了白垩系弱胶结红砂岩孔隙裂隙的约束能力, 使冻结作用可以尽可能地向次级微孔隙发展, 随着冻结程度的加深, 红砂岩内部冻胀力进一步增加, 损伤加剧, 故而融化后的力学参数相对于无围压冻融进一步降低。研究结果为西部地区煤矿冻结建井井壁设计提供了指导。

**关 键 词:** 弱胶结红砂岩; 冻融过程; 力学性质; 地应力

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7598 (2019) 增 1-0161-11

## Experiments on mechanical properties of Cretaceous red sandstone after freeze-thaw process

LIU Bo<sup>1,2</sup>, MA Yong-jun<sup>1</sup>, SHENG Hai-long<sup>1</sup>, CHANG Ya-ru<sup>1</sup>, YU Jun-jie<sup>1</sup>, JIA Shuai-long<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The boreholes in frozen coal mines of western China mainly cut through the Cretaceous and Jurassic rock formations characterized as water-rich and weakly cemented strata. The rock mass in the frozen wall undergoes a complete freeze-thaw process under the coupling effect of temperature field and crustal stress field. In this paper, considering the coupling effect of the temperature field and the geostress field in the process of freezing and thawing, the Cretaceous water-rich and weakly-bonded red sandstone is selected to see its mechanical properties based on experiments. Meanwhile, the deterioration mechanism of Cretaceous weakly cemented red sandstone induced by freeze-thaw process as well as the influence of crustal stress during the freeze-thaw process are analyzed. During freeze-thaw process, the confining pressures are set to be 0, 2, 4, 6, 8 MPa separately, the freezing temperatures are -5, -10, -15 °C separately, and the thawing temperature is 20 °C for all samples. The results show that the Cretaceous weakly cemented red sandstone is very sensitive to freezing and thawing process because of its very poor cementation and low strength. After only one freeze-thaw cycle, the uniaxial compression strength decreases 28.39%. The crustal stress during the freeze-thaw process enhances the binding forces of pores and cracks of Cretaceous weakly cemented red sandstone, therefore the freezing fully develops to the secondary micro-cracks. Due to the further development of freezing effect, the frozen-heave force in the red sandstone increases, strengthening the damage of red sandstone. Therefore, the mechanical properties of red sandstone after melting are further reduced relative to the non-confined freezing and thawing condition. The experimental results in this paper is helpful for the design of shaft lining of borehole located in the frozen coal mines in western China.

**Keywords:** weakly cemented red sandstone; freeze-thaw process; mechanical properties; crustal stress

收稿日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41472259, No.41771083, No.51274209)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472259, 41771083, 51274209).

第一作者简介: 刘波, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、矿山建设工程方面的教学与科研。E-mail: liub@cumt.edu.cn

## 1 引言

岩石的冻融现象普遍存在于寒区工程和人工冻结工程中,冻结过程中岩石内部水冰相变,破坏了岩石原始的孔隙结构,造成岩石损伤,融化后岩石整体性质弱化<sup>[1]</sup>。目前较为常见的岩石冻融损伤机理包括体积膨胀理论<sup>[2]</sup>、静水压理论<sup>[3]</sup>、分凝冰理论<sup>[4]</sup>、毛细管理论<sup>[5]</sup>和结晶压理论<sup>[6]</sup>。岩石在冻融作用下的损伤劣化引发了一系列的工程地质问题诸如隧道冻胀开裂<sup>[7]</sup>、冻结建井冻结壁解冻后的淹井、涌水事故<sup>[8-9]</sup>等。

岩石冻融损伤问题得到了众多学者的关注,基于试验及理论等手段进行了大量的研究<sup>[10-11]</sup>。周科平等<sup>[12]</sup>利用核磁共振(NMR)技术,研究了花岗岩试样冻融后的孔隙特征与力学性质之间的关联性,发现冻融作用下岩石内部裂隙的产生和演化可以用分形理论描述,分形维数越大,孔隙越发育,单轴抗压强度越低。杨更社等<sup>[13-14]</sup>分析了不同冻融循环次数下砂岩的损伤扩展规律,并建立了砂岩冻融与荷载耦合作用下的损伤本构模型。刘波等<sup>[15-17]</sup>基于力学试验、CT扫描及声发射技术得到了白垩系砂岩冻结及融化状态下的强度与变形特征,冻融前后微细观孔隙结构变化的量化规律及冻融后的渗流-应力耦合特性。

现有研究大多是针对寒区工程或季节性冻融工程,对矿山冻结工程尤其是我国西部地区矿山建设的研究相对较少。我国西部煤矿建井穿越的地层主要为白垩系、侏罗系砂岩地层,地层成岩晚、胶结差、强度低、含水丰富,冻结法成为该地区建井主要甚至是唯一有效的施工方法。由于白垩系、侏罗系地层的富水弱胶结特性,井筒冻结解冻后渗水淹井等事故频发,有必要对白垩系、侏罗系砂岩冻结解冻后的力学性质展开研究。此外,煤矿建井冻结法施工不同于寒区工程或季节性冻融工程主要表现在(1)冻结壁岩体只经历了一次完整的冻融过程;(2)冻结壁岩体埋深较大,冻融过程中同时受到了温度场和地应力场的耦合作用;(3)冻结壁的冻结温度可以根据设计人工控制。可见在砂岩冻结融化后的力学性质研究中需要考虑砂岩冻融过程中受到的温度场及地应力场耦合作用环境。

岩石冻融力学性质测试先对岩石试样进行冻融处理,然后施加围压及轴向压力直至试样破坏。对于寒区工程或季节性冻融工程,与岩石所处环境吻合,但对矿山冻结工程,则不符。

本次以白垩系富水弱胶结红砂岩为研究对象,

充分考虑红砂岩冻融过程中温度场与地应力场的耦合作用环境,对红砂岩冻结融化后的力学性质展开试验研究。试验中先对红砂岩试样施加围压,在围压条件下对红砂岩试样进行一次冻融处理,模拟其冻融过程中受到的温度场与地应力场耦合作用环境,最后施加轴向应力,直至试样破坏。相对于传统试验步骤,本研究从红砂岩试样冻融阶段即开始施加围压(围压冻融)以常温试验及无围压冻融试验作对照,得到冻融最低温度、围压、冻融方式等因素对红砂岩冻融后力学性质的影响,分析红砂岩冻融劣化机理及冻融过程中地应力的影响机制。

## 2 试验方案

### 2.1 岩石试样

试验所用的白垩系弱胶结红砂岩取自陕西榆林地区地下200 m,地层为白垩系下统洛河组。按照国际岩石力学学会建议的方法,将红砂岩加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱形标准试样,剔除外观、密度偏差超过5%,超声波速偏差超过10%的试样,以减小试样间的差异性,部分红砂岩试样见图1,物理参数见表1。

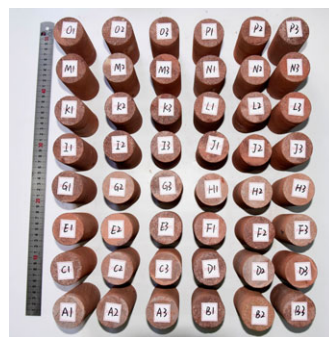


图1 红砂岩试样

Fig.1 Red sandstone samples

表1 红砂岩基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of red sandstone

参数	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	饱和密度 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率 /%	饱和含水率 /%
量值	1.95	2.17	23.22	11.28

利用 Dino-Lite 电子显微镜观测干燥红砂岩试样表面细观结构,分别放大50倍及230倍,见图2。图中,红色标注为颗粒尺寸;蓝色标注为孔隙尺寸。红砂岩外观呈红褐色,砂颗粒排列疏松、无序,粒径主要集中在0.25~0.5 mm,属于中粒砂岩。砂颗粒表面附着有少量的黏土矿物,颗粒间胶结极差,孔隙极为发育。

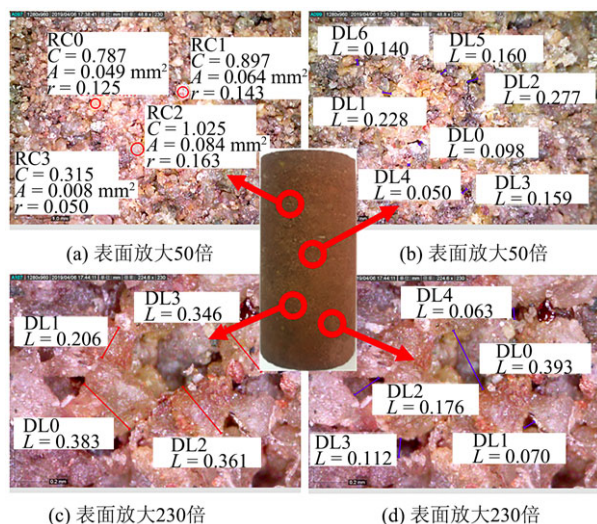


图 2 红砂岩细观结构 (单位: mm)

Fig.2 Mesostructure of red sandstone(unit: mm)

利用 XRD 分析红砂岩的主要矿物成分见表 2。红砂岩主要成分为石英、钾长石及斜长石, 占比达到 89%, 黏土矿物含量较少只有 7.7%, 可知白垩系弱胶结红砂岩主要由非黏土矿物组成, 颗粒间胶结极差, 孔隙极为发育, 连通性好, 孔隙率达到 23.22%, 含水率达到 11.28%, 其力学性质受冻融影响显著。

表 2 红砂岩矿物成分

Table 2 Mineral composition of red sandstone

岩性	非黏土矿物种类及含量/%						黏土矿物 总量/%
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	
砂岩	43.5	18.2	27.3	1.1	0.8	1.4	7.7

## 2.2 试验设备

试验均在中国矿业大学(北京)城市地下工程实验室 TDW-200 微机控制冻土三轴试验机上进行。试验机包括微机控制系统、冷浴循环系统及加载系统, 见图 3。

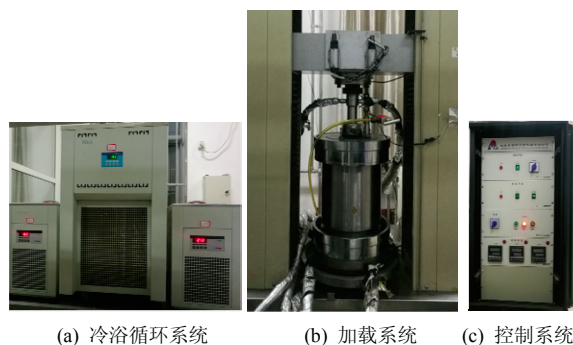


图 3 微机控制冻土三轴试验机

Fig.3 Triaxial testing machine of frozen earth controlled by microcomputer

试验机可以提供最大轴向压力为 200 kN, 最大围压为 30 MPa, 稳定低温环境为最低 -30 °C。

## 2.3 试验方案

本次主要对冻融最低温度、围压、冻融方式 3 个因素对红砂岩冻融后力学性质的影响展开研究。试验选用的红砂岩属于白垩系下统洛河组, 埋深一般不超过 300 m, 由重液公式并考虑试验结果的普适性, 试验中围压梯度设置为 0、2、4、6、8 MPa。西部建井冻结法施工, 冻结壁的实测温度一般在 -15 °C 以上<sup>[18-19]</sup>, 因此冻融试验中最低温度分别设置为 -5、-10、-15 °C, 融化温度统一设置为 20 °C。将红砂岩试样分为 3 组, 分别为常温组、围压冻融组及无围压冻融组, 其中围压冻融组为试验组, 常温组及无围压冻融组为对照组, 试验方案如图 4 所示。

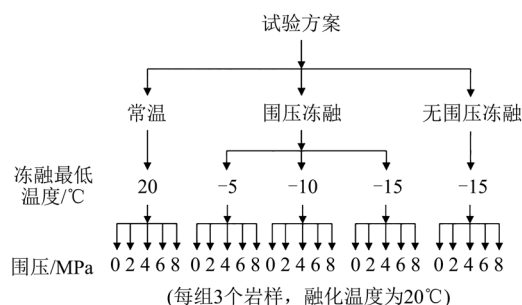


图 4 红砂岩冻融后力学性质试验方案

Fig.4 Experimental scheme for mechanical properties of red sandstone after freeze-thaw

试验前将所有红砂岩试样进行饱水处理, 为分析不同冻融方式对红砂岩冻融后力学性质的影响, 不同组红砂岩试样的试验步骤分别为: ① 围压冻融组, 将试样置于压力室内, 先施加围压至设计值, 后将压力室温度由常温 (20 °C) 降低至设计冻结温度, 冻结完成后再次升高压力室温度至常温, 最后施加轴向压力直至试样破坏。② 无围压冻融组, 将试样置于压力室内, 先将压力室温度由常温降低至设计冻结温度, 冻结完成后, 再次升高压力室温度至常温, 然后施加围压至设计值, 最后施加轴向压力直至试样破坏, 为减少工作量, 该组仅进行了冻融最低温度为 -15 °C 下的冻融试验。③ 常温组 (常规三轴压缩试验), 温度稳定为 20 °C, 不需要进行冻融处理。

## 3 试验结果及分析

红砂岩试样三轴压缩偏应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 与轴向应变  $\varepsilon_1$ 、径向应变  $\varepsilon_3$  及体应变  $\varepsilon_v$  的关系曲线见图 5。



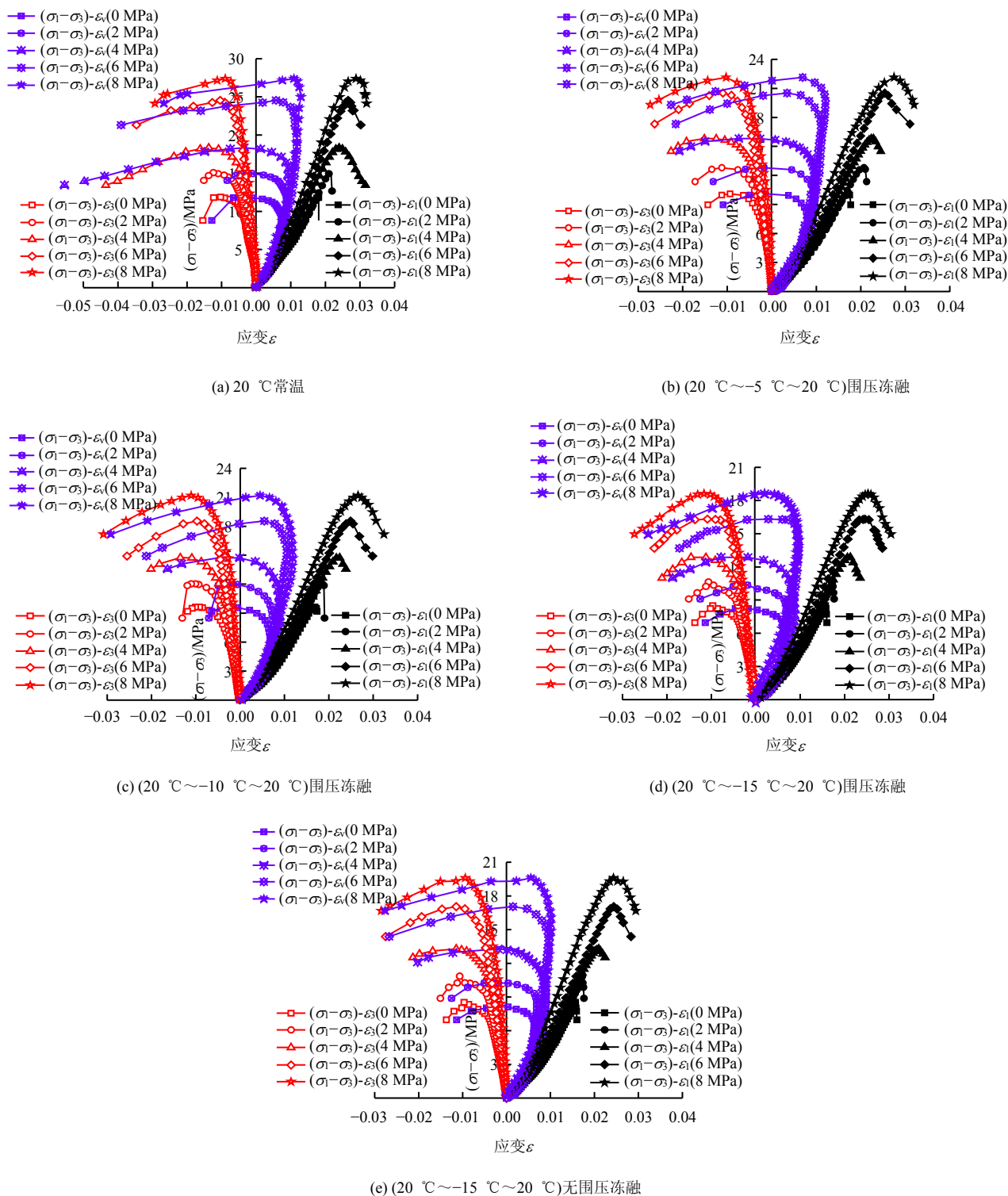


图 5 不同试验条件下红砂岩三轴应力-应变关系曲线

Fig.5 Triaxial stress-strain curves of red sandstone under different test conditions

从图 5 中可以看出,不同试验条件下红砂岩变形破坏过程基本相同,均经历了压密阶段、弹性阶段、裂隙稳定发展阶段、裂隙不稳定发展阶段和峰后阶段 5 个阶段。整体上看,冻融前后红砂岩均为脆性破坏,随冻融最低温度的降低,红砂岩冻融后压密阶段逐渐变大。

根据试验结果,统计得到不同试验条件下红砂岩试样的峰值强度见表 3。根据表 3,相同围压及冻融方式下冻融后红砂岩的强度明显降低。关于冻融损伤问题,目前有众多的理论,其中最简单的为体积膨胀理论<sup>[2]</sup>。冻结过程中水冰相变,体积膨胀,在冻胀力的作用下岩石内部原生孔隙裂隙延伸扩

展, 并产生次生裂隙, 因而融化后岩石的损伤加剧, 强度降低。冻融最低温度越低, 冻融损伤越明显。本次白垩系弱胶结红砂岩颗粒间胶结极差, 孔隙极为发育, 孔隙率达到 23.22%, 对冻融作用更为敏感。以围压冻融组 8 MPa 围压下的试验结果为例, 冻融最低温度由  $-5^{\circ}\text{C}$  下降至  $-15^{\circ}\text{C}$ , 仅经历了一次冻融, 红砂岩强度分别下降了 19.17%、22.64%、32.07%, 下降幅度相当大。

表 3 红砂岩试样不同试验条件下的峰值强度  
Table 3 Peak strengths of red sandstone samples under different experimental conditions

试验条件	冻融温度/ $^{\circ}\text{C}$	不同围压(MPa)下峰值强度/MPa				
		0	2	4	6	8
常温	20	11.87	15.07	18.32	24.54	27.38
围压冻融	20~-5~20	10.09	12.79	15.80	20.51	22.13
	20~-10~20	9.63	12.03	14.75	18.54	21.18
	20~-15~20	8.50	10.64	12.87	16.32	18.60
无围压冻融	20~-15~20	8.52	10.85	13.28	17.04	19.32

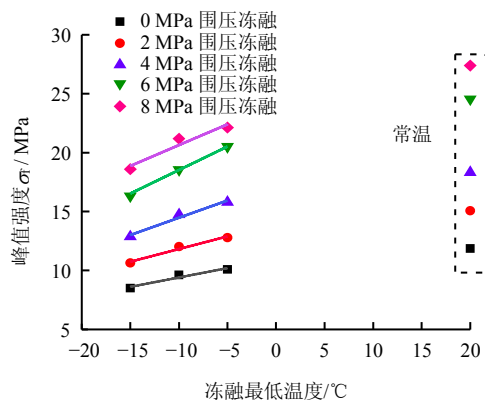
冻融最低温度和冻融方式相同时红砂岩冻融后的强度随围压的增加而增加, 与一般的岩石力学规律相同。此外, 对比不同冻融方式下的试验结果, 相对于无围压冻融, 围压冻融后红砂岩试样的强度进一步降低。

## 4 红砂岩冻结融化后的力学性质

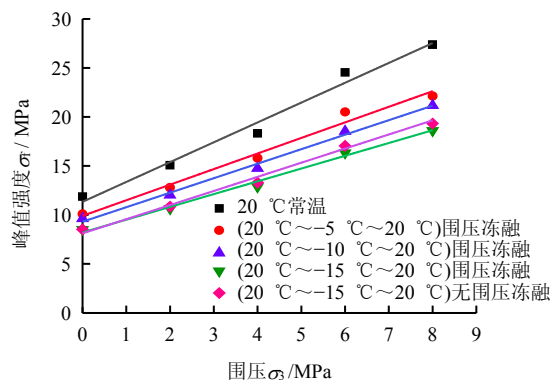
### 4.1 红砂岩冻结融化后的强度

图 6 为红砂岩冻融后的强度与冻融最低温度及围压的关系曲线。从图中可以看出, 在相同围压及冻融方式下红砂岩冻融后的强度明显降低; 相对于常温状态, 冻融最低温度为  $-15^{\circ}\text{C}$  时围压从 0 MPa 提高至 8 MPa, 红砂岩围压冻融后的强度分别降低了 28.39%、29.40%、29.75%、33.50%、32.07%。由图 6(a)可见, 红砂岩围压冻融后的强度随冻融最低温度的降低而降低, 基本呈线性关系。现有岩石冻融损伤的研究多是针对循环冻融, 单次冻融研究较少, 但对于矿山冻结工程, 冻结壁岩体只经历了一次完整的冻融过程。周科平等<sup>[20]</sup>对取自黑龙江的风化花岗岩(孔隙率为 1.90%)进行循环冻融试验, 10 次循环后单轴抗压强度下降 15.11%。杨更社等<sup>[21]</sup>关于陕西红砂岩(孔隙率为 14.26%)的试验结果显示 5 次冻融循环后单轴抗压强度即下降 19.18%, 可见岩性对于岩石冻融后强度下降的幅度有重要影响。本试验中白垩系红砂岩孔隙极为发育, 孔隙连通性较好, 孔隙率达到 23.22%, 对冻融作用更为敏

感, 仅一次冻融后单轴抗压强度就下降 28.39% ( $20^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ )。冻结建井井壁设计需足够重视。



(a) 峰值强度与冻融最低温度关系



(b) 峰值强度与围压关系

图 6 红砂岩冻融后的强度与冻融最低温度和围压关系  
Fig.6 Relationships among strength of red sandstone after freeze-thaw, the minimum temperature during the freeze-thaw and confining pressure

在相同冻融温度及方式下围压可以显著地提高红砂岩的强度, 相对于单轴状态, 8 MPa 围压下冻融最低温度从  $-5^{\circ}\text{C}$  降低至  $-15^{\circ}\text{C}$ , 红砂岩围压冻融后强度提高的幅度分别为 119.33%、119.94%、118.82%。随着围压的增加, 红砂岩冻融后的强度与围压大致呈线性关系, 符合摩尔-库仑强度准则, 见图 6(b)。对比围压冻融组及无围压冻融组试验结果(见图 6(b)), 2、4、6、8 MPa 围压下无围压冻融组红砂岩试样强度分别为 10.85、13.28、17.04、19.32 MPa, 围压冻融组红砂岩试样强度分别为 10.64、12.87、16.32、18.60 MPa; 与无围压冻融组相比围压冻融组红砂岩试样强度分别降低了 1.94%、3.09%、4.23%、3.73%, 可见冻融时围压的存在使得红砂岩冻融损伤进一步发展, 强度进一步降低。结合图 5 及图 6(b)可以发现, 不同冻融方

式下红砂岩宏观变形破坏过程基本相同, 试样的强度与围压均呈线性关系, 符合摩尔-库仑强度准则。

#### 4.2 红砂岩冻结融化后的弹性模量和泊松比

白垩系红砂岩颗粒间胶结极差, 孔隙极为发育, 孔隙率达到 23.22%, 对冻融作用非常敏感。冻融作用下红砂岩内部损伤劣化, 孔隙裂隙网络延伸扩展, 颗粒间的胶结程度进一步降低, 故而红砂岩刚度下降, 变形能力增加。

根据红砂岩三轴应力-应变关系曲线得到不同试验条件下红砂岩的弹性模量及泊松比见表 4、5, 绘制红砂岩冻融后的弹性模量及泊松比与冻融最低温度及围压的关系曲线如图 7 所示。

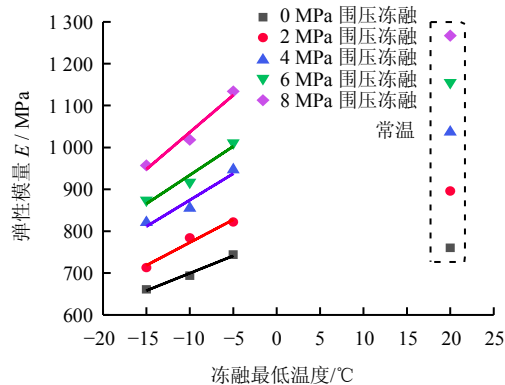
**表 4 红砂岩试样不同试验条件下的弹性模量**  
Table 4 Elastic modulus of red sandstone samples under different test conditions

试验条件	冻融温度 / $^{\circ}\text{C}$	不同围压(MPa)下弹性模量/MPa				
		0	2	4	6	8
常温	20	760	896	1 037	1 155	1 267
	20~-5~20	744	822	947	1 011	1 134
围压冻融	20~-10~20	694	784	855	917	1 018
	20~-15~20	661	713	821	874	957
无围压冻融	20~-15~20	652	735	837	894	1 013

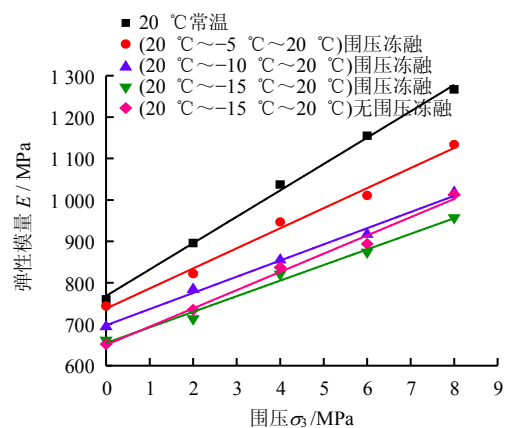
**表 5 红砂岩不同试验条件下的泊松比**  
Table 5 Poisson's ratio of red sandstone samples under different test conditions

试验条件	冻融温度 / $^{\circ}\text{C}$	不同围压(MPa)下泊松比				
		0	2	4	6	8
常温	20	0.314	0.285	0.264	0.251	0.243
	20~-5~20	0.322	0.293	0.277	0.266	0.254
围压冻融	20~-10~20	0.334	0.309	0.296	0.284	0.275
	2~-15~20	0.358	0.327	0.312	0.303	0.294
无围压冻融	20~-15~20	0.353	0.322	0.309	0.297	0.285

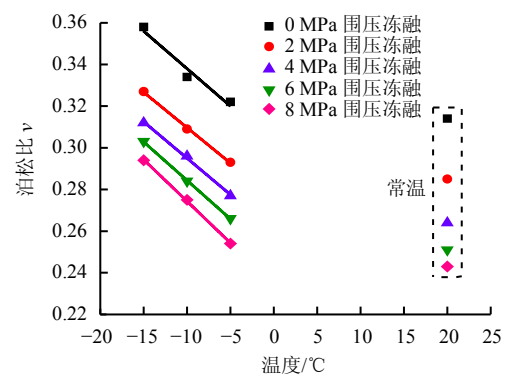
相同围压及冻融方式下红砂岩冻融后的弹性模量下降, 泊松比增加, 冻融最低温度越低, 变化幅度越大。单轴状态下红砂岩常温弹性模量为 760 MPa,  $-15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  温度区间围压冻融后的弹性模量降低至 661 MPa, 泊松比相应地由 0.314 提高至 0.358。由图 7(a)、7(c)可知, 红砂岩围压冻融后的弹性模量及泊松比与冻融最低温度皆呈线性关系。相同冻融温度及方式下, 随围压的增加, 红砂岩弹性模量增加、泊松比下降。 $-15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  温度区间围压冻融后, 红砂岩的弹性模量由 0 MPa 时的 661 MPa 提高至 8 MPa 时的 957 MPa, 泊松比相应地由 0.358 降低至 0.294。弹性模量随围压近似线性增加, 但泊松比则呈指数下降。



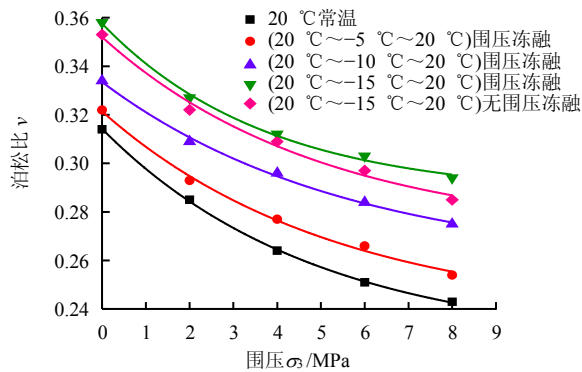
(a) 弹性模量与冻融最低温度关系



(b) 弹性模量与围压关系



(c) 泊松比与冻融最低温度关系



(d) 泊松比与围压关系

图 7 红砂岩冻融后的弹性模量、泊松比与冻融最低温度、围压的关系

Fig.7 Relationships between elastic modulus, Poisson's ratio vs. minimum freezing-thawing temperature and confining pressure of red sandstone after freeze -thaw

对比围压冻融组及无围压冻融组试验结果 (见图 7(b)、7(d)), 围压从 2 MPa 提高至 8 MPa 时, 相对于无围压冻融, 红砂岩围压冻融后的弹性模量下降, 泊松比上升, 弹性模量下降幅度分别为 2.99%、1.91%、2.24%、5.53%, 泊松比上升幅度分别为 1.55%、0.97%、2.02%、3.16%, 也即冻融过程中围压的存在使红砂岩损伤进一步加剧, 刚度进一步下降, 但不同冻融方式下红砂岩弹性模量及泊松比与围压之间的关系并未改变, 红砂岩应力-应变关系曲线型式相同。

#### 4.3 红砂岩冻结融化后的黏聚力及内摩擦角

不同试验条件下红砂岩的强度与围压皆呈线性关系, 满足摩尔-库仑强度准则, 据此可以计算得到红砂岩不同试验条件下的黏聚力及内摩擦角, 结果见表 6。

表 6 不同试验条件下红砂岩黏聚力和内摩擦角  
Table 6 Cohesion and internal friction angle of red sandstone samples under different test conditions

试验条件	冻融温度 /℃	( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 关系 拟合方程	相关系数 $R^2$	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / MPa
常温	20	$\sigma_1 = 11.338 + 3.02\sigma_3$	0.98	30.18	3.26
围压冻融	20~-5~-20	$\sigma_1 = 9.904 + 2.59\sigma_3$	0.98	26.30	3.08
	20~-10~-20	$\sigma_1 = 9.304 + 2.48\sigma_3$	0.99	25.18	2.95
	20~-15~-20	$\sigma_1 = 8.21 + 2.29\sigma_3$	0.99	23.10	2.71
无围压冻融	20~-15~-20	$\sigma_1 = 8.58 + 2.39\sigma_3$	0.99	24.22	2.77

根据库仑准则, 岩石的剪切强度包括黏聚力和摩擦强度, 黏聚力主要反映岩石内部的胶结情况。由于冻融损伤, 岩石颗粒间的胶结作用弱化, 因而冻融后岩石的黏聚力下降, 冻融最低温度越低, 下降幅度越大。内摩擦角反映岩石的摩擦性质, 在冻结过程中的冻胀力破坏了岩石颗粒间的胶结作用, 同时融化后孔隙裂隙中的水进一步软化了胶结物质, 岩石破裂过程中更易发生绕晶裂隙<sup>[22]</sup>, 颗粒间的滑移变得更加容易, 岩石的内摩擦角下降。

相对于常温状态, 红砂岩冻融后的黏聚力和内摩擦角出现不同程度的降低, 冻融最低温度分别为 -5、-10、-15 °C 时红砂岩围压冻融后的黏聚力由常温下的 3.26 MPa 分别降低至 3.08、2.95、2.71 MPa, 降低幅度分别为 5.52%、9.51%、16.87%; 内摩擦角由常温下的 30.18° 分别下降至 26.30°、25.18°、23.10°, 降低幅度分别为 12.86%、16.57%、23.46%。师俊平等<sup>[22]</sup>对取自陕北的砂岩试样 (饱和含水率 3.8%) 进行冻融循环试验, 60 次循环后试样粘聚力

及内摩擦角分别降低 31.5%、18.6%。王鹏等<sup>[23]</sup>对取自云南的红砂岩 (饱和含水率 7.48%) 的试验结果表明, 经历 25 次冻融循环后黏聚力和内摩擦角分别下降 34% 与 23%, 可见孔隙率及孔隙连通性对岩石冻融后的黏聚力和内摩擦角有重要影响。白垩系红砂岩孔隙率高, 连通性好, 含水丰富, 对冻融作用更为敏感, 仅一次冻融后黏聚力和内摩擦角即有相当幅度的下降。

对比不同冻融方式下的计算结果, 相对于无围压冻融, 红砂岩围压冻融后的黏聚力及内摩擦角进一步降低, 幅度分别为 2.17%、4.62%, 也即冻融时围压的存在增加了红砂岩的损伤程度。

#### 4.4 红砂岩冻结融化后的起裂及扩容应力

起裂和扩容应力是岩石破坏过程中重要的分界应力, 本文采用裂隙体积应变法计算得到不同试验条件下红砂岩的起裂及扩容应力, 计算原理如下。

岩石的体应变  $\varepsilon_v$  可由轴向应变  $\varepsilon_1$ 、径向应变  $\varepsilon_2$  表示:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad (1)$$

同时岩石的体应变  $\varepsilon_v$  可以分解为弹性体应变  $\varepsilon_v^e$  与裂隙体应变  $\varepsilon_v^s$ :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^s \quad (2)$$

根据 Hook 定律, 弹性体应变可以表示为

$$\varepsilon_v^e = \varepsilon_1^e + \varepsilon_2^e + \varepsilon_3^e = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

因此, 裂隙体应变可以表示为

$$\varepsilon_v^s = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为岩石三个方向的主应力;  $\varepsilon_1^e$ 、 $\varepsilon_2^e$ 、 $\varepsilon_3^e$  为主应力对应的 3 个主应变;  $E$  为岩石的弹性模量;  $\nu$  为岩石的泊松比。

根据上述计算原理得到不同试验条件下红砂岩起裂及扩容应力见表 7。

常温状态下红砂岩起裂应力水平在 0.64~0.75 之间, 均值为 0.68, 扩容应力水平在 0.75~0.86 之间, 均值为 0.81。冻融最低温度为 -15 °C 时红砂岩围压冻融后的起裂应力水平在 0.57~0.63 之间, 均值为 0.60, 扩容应力水平在 0.66~0.81 之间, 均值为 0.72。相对于常温条件, 红砂岩围压冻融后的起裂及扩容应力水平均有所降低, 冻融最低温度越低, 降低幅度越大。此外, 相同冻融温度及方式下红砂岩的起裂及扩容应力水平随围压的增加而增加, 同时相对于无围压冻融, 红砂岩围压冻融后的起裂及



扩容水平稍许降低,但不是很明显。

**表 7 不同试验条件下红砂岩起裂和扩容应力**

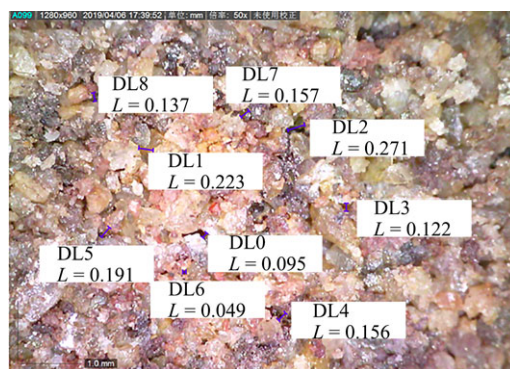
**Table 7 Crack initiations and damage stresses of red sandstone samples under different test conditions**

冻融温度 /℃	围压 /MPa	起裂应力 /MPa	扩容应力 /MPa	峰值应力 /MPa	起裂 水平	扩容 水平
常温(20)	0	7.60	8.85	11.87	0.64	0.75
	2	10.13	12.02	15.07	0.67	0.80
	4	12.03	15.11	18.32	0.66	0.82
	6	16.73	20.15	24.54	0.68	0.82
	8	20.54	23.54	27.38	0.75	0.86
围压冻融 (20~5~20)	0	5.90	6.83	10.09	0.58	0.68
	2	7.83	9.77	12.79	0.61	0.76
	4	10.04	11.84	15.8	0.64	0.75
	6	12.85	16.56	20.51	0.63	0.81
	8	14.51	19.12	22.13	0.66	0.86
围压冻融 (20~10~20)	0	5.43	6.59	9.63	0.56	0.68
	2	7.24	8.57	12.03	0.60	0.71
	4	9.19	10.23	14.75	0.62	0.69
	6	11.53	14.66	18.54	0.62	0.79
	8	13.54	17.60	21.18	0.64	0.83
围压冻融 (20~15~20)	0	4.85	5.62	8.50	0.57	0.66
	2	6.24	7.22	10.64	0.59	0.68
	4	7.85	8.95	12.87	0.61	0.70
	6	9.75	12.38	16.32	0.60	0.76
	8	11.66	15.01	18.60	0.63	0.81
无围压冻融 (20~15~20)	0	4.76	5.74	8.52	0.56	0.67
	2	6.37	7.36	10.85	0.59	0.68
	4	8.02	9.58	13.28	0.60	0.72
	6	10.73	13.44	17.04	0.63	0.79
	8	12.48	15.21	19.32	0.65	0.79

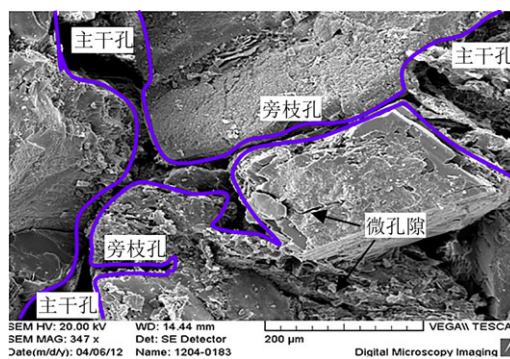
## 5 白垩系弱胶结红砂岩冻融劣化机理及冻融过程中地应力的影响机制

前文分析了冻融最低温度、围压、冻融方式 3 个因素对白垩系弱胶结红砂岩冻结融化后力学性质的影响,可知相同围压及冻融方式下红砂岩冻融后的力学参数明显降低,冻融最低温度越低,冻胀力越大,冻融后力学参数降低幅度越大<sup>[24]</sup>,白垩系弱胶结红砂岩颗粒间胶结极差,孔隙极为发育,连通性好。本试验测得红砂岩孔隙率为 23.22%,含水率为 11.28%,其力学性质受冻融影响显著,仅经历一次冻融红砂岩单轴抗压强度下降了 28.39%。相同冻融最低温度及冻融方式下,随着围压的增加,红砂岩的力学参数也随之明显增加。以上结论与现有岩石冻融力学规律是一致的。试验还发现,在相同的冻融温度及围压下,如果围压从冻融期间

开始施加(围压冻融),红砂岩冻融后的力学参数相对于无围压冻融会进一步降低,也即冻融期间温度场与地应力场的耦合作用使得红砂岩冻融损伤进一步发展,冻融后的力学参数进一步降低,这里对白垩系弱胶结红砂岩冻融劣化机理及冻融过程中地应力的影响机制展开分析。图 8 为放大 50 倍与 347 倍红砂岩细观结构图像。



(a) 放大 50 倍 (单位: mm)



(b) 放大 347 倍

**图 8 红砂岩试样细观结构图像**

**Fig.8 Mesostructure of red sandstone samples**

从图 8 中可以看出,红砂岩孔隙裂隙极为发育,孔隙裂隙网络由不同尺寸的孔隙裂隙结构组成,可以区分为主干孔与旁枝孔,构成“主干-旁枝”型孔隙结构,因此可以利用毛细管理论及结晶压理论对红砂岩的冻融劣化机理进行分析。

分析前先假设:(1)试验中利用冷却酒精控制压力室温度,进而控制红砂岩试样温度,冻融速度较慢,属于慢速冻融;(2)根据贾海梁<sup>[25]</sup>“特征冻融损伤单元”定义,将红砂岩孔隙裂隙网络视为由若干“特征冻融损伤单元”组成,每个特征冻融损伤单元包括一个主干孔及若干级旁枝孔,如图 9 所示,其中图 9(b)为在贾海梁“特征冻融损伤单元”基础上重新绘制。每个单元尺寸微小,慢速冻结状态,认为每个单元内无温差,水、冰的化学势主要受压力



影响, 且冰体内部压力处于平衡状态。

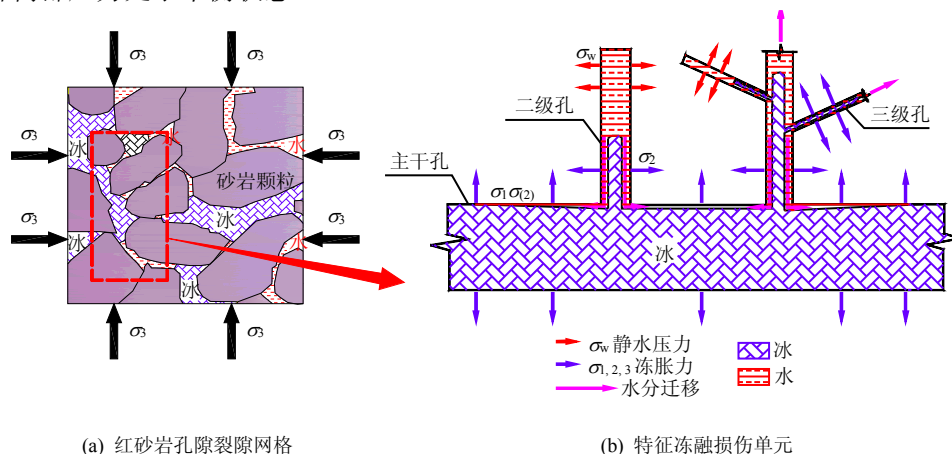


图 9 白垩系弱胶结红砂岩冻融劣化机制

Fig.9 Mechanism of freeze-thaw deterioration of weakly cemented Cretaceous red sandstone

首先分析红砂岩冻结过程:

冻结过程中红砂岩试样外表面先冻结, 驱赶未冻水向红砂岩内部迁移。白垩系弱胶结红砂岩孔隙率高, 孔隙连通性好, 初始含水率高, 加上未冻水的迁移, 红砂岩内部饱水程度增加, 但由于冻结速率较慢, 加上砂岩孔隙连通性好, 冻融损伤的静水压机制受到限制。

随着冻结程度的加深, 红砂岩内部较大的孔隙及裂隙中的水冻结成冰, 同时微孔隙及裂隙内的饱水程度增加。冻结作用开始在微孔隙及裂隙(特征冻融损伤单元)内发展。

水的化学势大于冰, 因此低温下水相变为冰。见图 9(b), 冻结过程中主干孔中的水首先结冰, 未冻水向旁枝孔迁移。根据毛细管理论<sup>[5]</sup>, 主干孔冻结完成时受毛细管力的作用, 二级孔隙若存在冰, 其化学势要比主干孔中大, 冰无法直接进入二级孔。此时水冰相变一直在持续, 二级孔中的未冻水迁移至主干孔中冻结, 待主干孔中冰的压力(化学势)与二级孔相同时, 冰才会进入二级孔。此时主干孔孔隙壁受到的冻胀力为 $\sigma_1$ 。

随着冻结作用在二级孔中发展, 对于端闭型旁枝孔, 此时旁枝孔被主干孔中的冰封闭, 且其内部接近饱和, 因此冻融损伤的体积膨胀机理将发挥主导作用。对于连通型旁枝孔, 根据结晶压理论<sup>[6]</sup>, 旁枝孔中冰水界面处毛细管力要大于冰和孔隙壁界面处的毛细管力, 因此, 孔隙壁需要提供一个额外的力来维持冰内压力平衡。此时, 二级孔中的未冻水沿着冰与岩石基质之间的未冻水膜流向已冻区域, 已冻区的冻胀力继续增大, 此时主干孔中压力达到 $\sigma_2$ 。按照上述过程, 冻结作用不断向更为次级

的孔隙中发展。随着冻结程度的深入, 冻结区的冻胀力不断增加, 对岩石造成的损伤也在不断增加。

融化阶段, 随着外界温度的升高, 红砂岩内部的冰逐步融化为水, 但红砂岩内部损伤是不可逆的。融化后, 红砂岩的整体性能劣化, 力学参数降低。

上述过程的充分发展需要满足一个前提条件, 即较高级的孔隙裂隙, 比如宏观孔隙裂隙结构及“特征冻融损伤单元”的主干孔, 有足够的约束能力, 以抵抗初期的冻胀力, 避免冻结初期宏观孔隙裂隙结构及主干孔出现过大的损伤, 耗散冻胀力, 使冻结不能更深入的发展。

白垩系弱胶结红砂岩颗粒胶结极差(见图 9(a)), 难以抵抗初期的冻胀力。冻融期间地应力的存在则增加了红砂岩孔隙裂隙结构的约束能力, 在温度场与地应力场的耦合作用下冻结作用可以更为深入地微孔隙裂隙发展, 红砂岩内部冻胀力增加, 损伤加剧, 故而融化后的力学参数进一步降低。

很多学者的研究结果表明, 多孔砂岩冻融循环下的破坏开始于表层的剥落, 而后向岩石内部扩展<sup>[11, 21]</sup>, 这一现象也可以反映出初期循环冻胀力主要耗散在试样表层的大孔隙中。笔者在前期研究中, 在不同的围压下对西部地区中生代砂岩试样进行冻融处理, 借助 CT 扫描及三维微细观孔隙结构重构得到了砂岩冻融前后微细观孔隙结构变化的量化规律<sup>[26]</sup>, 研究结果表明砂岩冻融损伤主要体现在 $0 \sim 40 \mu\text{m}$  半径区间的微孔隙数量及占比的增加, 随冻融时围压的增加, 砂岩内部微孔隙逐步向宏观孔隙发展, 也即随着冻融时围压的增加, 冻结作用在砂岩微孔隙中充分发展, 微孔隙的损伤程度加剧。

综上所述, 白垩系弱胶结红砂岩冻融过程中地

应力提高了砂岩孔隙裂隙的约束能力,以抵抗初期冻胀力,使冻结作用可以尽可能地向次级微孔隙发展。研究结果为西部地区煤矿冻结建井井壁设计提供了指导。

## 6 结 论

(1) 白垩系弱胶结红砂岩胶结差、强度低,对冻融作用非常敏感,煤矿冻结建井中仅经历一次冻融后,红砂岩即出现相当大的损伤,力学参数显著降低。

(2) 对于煤矿冻结建井,冻结壁岩体在温度场与地应力场的耦合作用下经历了一次完整的冻融过程,冻融时地应力的存在使白垩系弱胶结红砂岩损伤加剧,力学参数进一步降低。

(3) 白垩系红砂岩属于典型的多孔弱胶结岩石,孔隙裂隙网络由不同尺寸的孔隙裂隙结构组成,并且可以区分为主干孔与旁枝孔。由于孔隙裂隙结构难以提供足够的约束条件,冻结过程中冻胀力会在较大的孔隙裂隙中过多消散。随着冻融时地应力的增加,红砂岩孔隙裂隙约束能力增加,使冻结作用在微孔隙中充分发展,加深了红砂岩的损伤,使得红砂岩融化后的力学性能进一步下降。

## 参 考 文 献

- [1] HORI M, MORIHIRO H. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1998, 36(4): 511—522.
- [2] TAN X, CHEN W, YANG J, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2011, 68(3): 130—138.
- [3] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. **Journal of the American Concrete Institute**, 1945, 16(4): 245—272.
- [4] MURTON J B, COUTARD J P, LAUTRIDOU J P, et al. Physical modelling of bedrock brecciation by ice segregation in permafrost[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 2001, 12(3): 255—266.
- [5] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. **Transactions of the Faraday Society**, 1961, 57: 1541—1551.
- [6] SCHERER G W. Crystallization in pores[J]. **Cement and Concrete Research**, 1999, 29(8): 1347—1358.
- [7] LAI Y, ZHANG X, YU W, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(4): 323—332.
- [8] 程桦, 蔡海兵. 我国深立井冻结法凿井安全现状与思考[J]. **安徽理工大学学报(自然科学版)**, 2013, 33(2): 1—6.  
CHENG Hua, CAI Hai-bing. Safety situation and thinking about deep shaft construction with freezing method in China[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)**, 2013, 33(2): 1—6.
- [9] 陈新年, 奚家米, 张琨. 井筒超深冻结孔封孔缓凝水泥浆性能研究[J]. **煤炭科学技术**, 2015, 43(3): 6—9.  
CHEN Xin-nian, XI Jia-mi, ZHANG Kun. Study on performance of hole sealing retarded cement slurry in ultra-deep freezing holes[J]. **Coal Science and Technology**, 2015, 43(3): 6—9.
- [10] SONDERGELD C H, RAI C S. Velocity and resistivity changes during freeze-thaw cycles in Berea sandstone[J]. **Geophysics**, 2007, 72(2): 99—105.
- [11] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. **煤炭学报**, 2013, 38(10): 1756—1762.  
ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(10): 1756—1762.
- [12] 李杰林, 周科平, 柯波. 冻融后花岗岩孔隙发育特征与单轴抗压强度的关联分析[J]. **煤炭学报**, 2015, 40(8): 1783—1789.  
LI Jie-lin, ZHOU Ke-ping, KE Bo. Association analysis of pore development characteristics and uniaxial compressive strength property of granite under freezing-thawing cycles[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(8): 1783—1789.
- [13] 杨更社, 蒲毅彬. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. **煤炭学报**, 2002, 27(4): 357—360.  
YANG Geng-she, PU Yi-bin. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2002, 27(4): 357—360.
- [14] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(3): 471—476.

- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 471—476.
- [15] LIU B, MA Y, ZHANG G, et al. Acoustic emission investigation of hydraulic and mechanical characteristics of muddy sandstone experienced one freeze-thaw cycle[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2018, 151: 335—344.
- [16] 刘波, 刘念, 李东阳, 等. 含冰软弱面的冻结裂隙红砂岩的强度试验[J]. **煤炭学报**, 2016, 41(4): 843—849.
- LIU Bo, LIU Nian, LI Dong-yang, et al. Strength test on frozen cracked red sandstone combined with ice[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(4): 843—849.
- [17] 刘念. 深井富水砂岩冻结解冻后的渗流应力耦合试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- LIU Nian. Seepage-stress coupling experimental research on deep shaft water-rich sandstone pre-freezing and post-thawing[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [18] 杨更社, 屈永龙, 奚家米, 等. 西部白垩系富水基岩立井冻结压力实测研究[J]. **采矿与安全工程学报**, 2014, 31(6): 982—986.
- YANG Geng-she, QU Yong-long, XI Jia-mi, et al. In-situ measurement and study of freezing pressure of shaft in Western Cretaceous water-rich bedrock[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2014, 31(6): 982—986.
- [19] 郭鹏, 管华栋, 邓晓鹏, 等. 袁大滩煤矿冻结斜井受力实测与分析[J]. **建井技术**, 2015, 36(5): 31—37.
- GUO Peng, GUAN Hua-dong, DENG Xiao-peng, et al. Stress measurement and analysis of mine freezing inclined shaft in Yuandatan mine[J]. **Mine Construction Technology**, 2015, 36(5): 31—37.
- [20] 周科平, 许玉娟, 李杰林, 等. 冻融循环对风化花岗岩物理特性影响的实验研究[J]. **煤炭学报**, 2012, 37(增刊 1): 70—74.
- ZHOU Ke-ping, XU Yu-juan, LI Jie-lin, et al. Experimental study of freezing and thawing cycle influence on physical characteristics of weathered granite[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(Suppl.1): 70—74.
- [21] 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.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2011, 40(1): 140—145.
- [22] 贺晶晶, 师俊平. 冻融后不同含水状态砂岩的剪切破坏特性[J]. **岩石力学与工程学报**, 2018, 37(6): 1350—1358.
- HE Jing-jing, SHI Jun-ping. Shear failure properties of sandstone with different moisture contents after cyclic freezing-thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1350—1358.
- [23] 王鹏, 许金余, 方新宇, 等. 红砂岩吸水软化及冻融循环力学特性劣化[J]. **岩土力学**, 2018, 39(6): 2065—2071.
- WANG Peng, XU Jin-dong, FANG Xin-yu, et al. Water softening and freeze-thaw cycling induced decay of red-sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 2065—2071.
- [24] WINKLER EM. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. **Engineering Geology**, 1968, 2(5): 315—323.
- [25] 贾海梁, 项伟, 谭龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(5): 879—895.
- JIA Hai-liang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 879—895.
- [26] LIU B, MA Y, LIU N, et al. Investigation of pore structure changes in Mesozoic water-rich sandstone induced by freeze-thaw process under different confining pressures using digital rock technology[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, 161: 137—149.