

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2018. 0080

ZI Fan, YANG Gengshe, JIA Hailiang. Influence of saturation degree on the mechanical properties of frozen argillaceous siltstone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 748 – 755. [訾凡, 杨更社, 贾海梁. 饱和度对泥质粉砂岩冻结力学性质的影响[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 748 – 755.]

饱和度对泥质粉砂岩冻结力学性质的影响

訾 凡, 杨更社, 贾海梁

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 饱和度对泥质粉砂岩常温下力学性质的影响已多有讨论, 但其冻结状态下力学性质的影响尚不明确。对 6 种饱和度(0%、20%、40%、60%、80%、100%) 的泥质粉砂岩样品冻结前后的纵波波速、核磁共振 T_2 谱、冻结状态下的抗拉强度和点荷载强度进行了测试, 试验结果表明: (1) 冻结状态下, 随饱和度的增加, 纵波波速呈现先降低后升高的趋势; (2) 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 完全饱和样品内部孔隙水有 49.2% 保持未冻, 60% 饱和度的样品有 81.4% 未冻, 而 20% 饱和度样品有 87.4% 的孔隙水没有冻结; (3) 冻结状态下岩样的抗拉强度和点荷载强度随初始饱和度的增加均呈现减小 – 增加 – 减小的趋势, 在饱和度 80% 左右均有一极大值, 且两个强度的最大值均不出现在饱和度 100% 时。分析后发现, 在低饱和度的状态下, 冻结岩石的强度仍取决于孔隙中的未冻水含量; 而在高饱和度的区间, 孔隙冰的含量决定了其冻结强度; 对于接近饱和的岩石, 其冻结强度还受到冻胀损伤的影响。

关键词: 泥质粉砂岩; 饱和度; 冻结强度; 细观机制; 核磁共振; 未冻水含量

中图分类号: TU458⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0748-08

0 引言

随着国家“一带一路”倡议及“西部大开发”战略的不断推进, 大量的基础设施建设正在或将要在新疆、西藏的高寒山区开展。这些地区年均气温低, 岩土体在每年的大部分时间内处于冻结状态, 研究其冻结力学性质具有重要的工程意义。由于上述地区地貌形态复杂, 加之天气多变, 岩体的含水状态也千差万别。诸如边坡的坡向、坡角、植被覆盖等地貌因素, 降水周期、风向、风速、日照等气象因素, 及隧道围岩与进出口的距离、岩层的开挖深度等工程因素, 均会影响岩体的含水状态。可以说, 在上述地区开展工程活动必然会面对不同含水状态岩石的冻结强度问题。因此, 有必要研究岩石的饱和度对其冻结力学性质的影响。

目前国内外学者对岩石冻融损伤力学特性的研究已经比较广泛^[1-5], 但对岩石冻结力学性质的研究还不充分。Nekrasov 等^[6]研究了冻结岩石在高频电热场中的强度特征。Park 等^[7]通过研究岩石

在 $-160\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的单轴压缩强度、抗拉强度、断裂韧性, 表明随着温度的降低这些力学性质都有增强的趋势, 并且这一变化趋势对含水岩石比干燥岩石表现得更明显。Inada 等^[8]将安山岩、花岗岩进行干燥、饱和状态下的单轴压缩及拉伸试验, 得到 $-160\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的抗压强度与抗拉强度, 表明岩石的矿物收缩和冰自身的强度造成抗拉、抗压强度在低温下均随温度降低而变大。Kodama 等^[9]研究了含水量、温度和加载速率对高寒地区岩石强度和岩石破裂过程的影响。王开林等^[10]对冻结的饱和及自然干燥凝灰岩在不同的应变速率下进行单轴压缩试验, 分析了应变速率对冻结状态下的岩样变形、强度等力学参数的影响规律, 并推导建立了冻结状态下饱和岩样和应变速率相关的单轴抗压强度的经验公式。杨更社等^[11-13]借助 CT 成像技术就不同冻结温度下饱和岩石损伤特性进行了试验研究, 主要分析了岩石损伤与冻结速率、冻结温度的关系, 对三种不同饱水岩样在温度降低至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的损伤演化过程进行了研究。

收稿日期: 2018-01-26; 修订日期: 2018-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774231; 41772333; 41702334); 中国博士后科学基金项目(2017M613293XB)资助

作者简介: 訾凡(1992 -), 男, 陕西西安人, 2015 年在华北水利水电大学获学士学位, 现为西安科技大学在读硕士研究生, 从事寒区岩石冻融损伤及工程应用研究. E-mail: 1098637020@qq.com

通信作者: 贾海梁, E-mail: hailiang. jia@xust.edu.cn.

徐光苗等^[14]在不同温度下对饱和与干燥岩石进行了单轴压缩试验和三轴压缩试验,指出岩石的含水状态对岩石的冻结强度有显著影响。唐明明等^[15]对花岗岩进行了不同冻结温度(−10 ~ −50 ℃)和不同含水状态(干燥和饱和)的单轴及三轴压缩试验,分析了岩石的变形破坏规律、干燥和饱和状态下的抗压强度以及三轴剪切强度参数 c 、 φ 值随温度的变化关系。刘慧等^[16]利用数字图像处理技术建立了冻结岩石的细观结构模型,精确地描述了页岩内部的空间结构及细观介质分布的几何形态。单仁亮等^[17]对负温下的红砂岩进行了三轴压缩试验,从饱水红砂岩的三轴抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角随温度降低的变化规律分析了导致这一变化规律的原因。可见,目前的研究主要集中在对岩石冻结下的物理力学性质的测量与描述,而不同饱和度对岩石冻结力学性质的影响研究较为缺乏,对其微观机制的分析则更少。

本文以泥质粉砂岩为研究对象,首先制备了不同饱和度的试样;之后测定了不同饱和度试样在冻结前后的纵波波速及核磁共振 T_2 谱;最后利用不同饱和度试样进行了冻结状态下的巴西劈裂与点荷载试验。基于上述结果,分析了不同饱和度岩石冻结后的含水状态,据此探讨了饱和度对岩石冻结状态下的纵波波速、抗拉强度、点荷载强度的影响机制。

1 试样制备与试验方案

1.1 试样制备

(1) 岩石矿物成分

试验所用含泥质粉砂岩取自宜昌地区白垩系地层,具体来源于厚层泥质粉砂岩地层。岩石呈灰白色,肉眼观察无明显层理。岩样粉晶 X 射线衍射分析结果表明:试样中石英、长石和方解石等晶体矿物含量分别为 33%、24% 和 16%;黏土矿物及其他含量约为 27%,主要黏土矿物成分为 I/S(伊蒙混层)、绿泥石和伊利石,其相对含量分别为 48%、29%、23%。

(2) 样品加工和选取

根据《水利水电工程岩石试验规程》^[18]中 4.11 节对巴西劈裂试验试样的制备要求,将岩石加工成直径为 50 mm、高度为(30 ± 5) mm 的圆盘状试样用于巴西劈裂试验与超声波波速测试;根据上述规范中 4.14 节对点荷载试验试样的制备要求,将做过巴西劈裂后的试样加工成满足点荷载试验的试

块。上述所有样品均来自同一块岩石。测量样品天然状态下的纵波波速,并用抽气饱和法测得样品孔隙率,选取波速、孔隙率相近且外观无明显缺陷的试件作为试验样品,以减少样品因个体物理性质差异导致的离散性。试验所用岩样基本物理性质指标见表 1。

(3) 不同饱和度试样制备

设置饱和度为 0%、20%、40%、60%、80%、100%,采用先饱和、后控制脱水过程的方法来获得不同饱和度的试样。上述过程中使用的设备主要有真空抽气饱和装置、烘箱、电子天平、冰箱等。详细步骤如下:①烘干。烘干温度为 105 ℃,持续 48 h 以上。②真空抽气饱和。抽气压力为 1 个大气负压,在抽气 2 h 后将水放进饱和缸内直至没过试样表面,之后持续抽气至气泡不再逸出,继续浸泡在水中直至质量不变,认为其达到饱和;③自然脱水。测量饱和质量后开始进行脱水计时,每隔一定时间对岩样进行称重,并按照式(1)计算不同脱水时间下的饱和度。脱水在实验室环境下进行,温度为 24 ℃,湿度为 80% 左右。

$$S_t = \frac{m_t - m_d}{m_s - m_d} \tag{1}$$

式中: S_t 为试样在 t 时刻的饱和度; m_t 为试样在 t 时刻的质量; m_d 为试样的干燥质量; m_s 为试样的饱和质量。样品含水量达到设定的饱和度时,将样品用保鲜膜包好置于保湿缸中,静置 1 周,使岩样中的水均匀分布,之后用于后续试验。

1.2 试验方案

(1) 冻结前后纵波波速测试

岩样纵波波速测试采用 NN-4B 型非金属超声检测分析仪(发射脉宽为 0.1 ~ 600 μs,采样周期为 0.1 μs)。在不同饱和度样品制备完成后进行波速测试,波速测试步骤依据《水利水电工程岩石试验规程》^[18]中 7.1 节对岩块声波测试的方法进行,得到不同饱和度样品冻结前的纵波波速;之后放入环境箱在 −20 ℃ 下冻结 12 h,冻结完成后再次进行波速测试,得到各样品冻结后的波速。

(2) 冻结前后核磁共振测试

岩石核磁共振试验采用苏州纽迈科技公司生产的 MacroMR12-150H-I 型低温核磁共振微结构分析与成像系统,该系统配备有西安科技大学自主研发的高低温环境系统,可实现冻融过程中实时的核磁共振测试。在不同饱和度样品制备完成后进行核磁共振测试,每个饱和度下选取 1 块样品进行测试。

表 1 试验岩样的基本物理性质
Table 1 Physical properties of the samples

组别	试样编号	孔隙率/%	自然状态含水率/%	自然状态纵波波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和度/%
1	SY01	7.86	2.88	2.37	0
	SY02	8.22	2.82	2.33	0
	SY05	7.49	2.74	2.36	0
2	SY06	7.85	2.81	2.31	19.8
	SY08	8.10	2.91	2.17	20.1
	SY09	6.86	2.70	2.58	20.0
3	SY10	7.50	2.71	2.45	40.1
	SY13	8.17	3.04	2.52	39.9
	SY14	7.23	2.89	2.56	40.1
4	SY15	8.31	3.06	2.14	60.3
	SY17	6.74	2.60	2.64	60.0
	SY19	7.98	2.99	2.35	60.1
5	SY23	7.71	2.82	2.19	80.1
	SY24	7.18	2.61	2.26	80.3
	SY25	7.31	2.56	2.40	79.9
6	SY26	6.60	2.37	2.82	100
	SY28	7.82	2.82	2.46	100
	SY30	8.11	2.90	2.43	100

在冻结开始前测试其常温状态下的核磁共振 T_2 谱，之后将温度设定为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行冻结，冻结 12 h 后再次测试其 T_2 谱。

(3) 冻结状态下抗拉强度测试

用于劈裂试验的圆盘状试样共 6 组，对应不同饱和度，每组 3 块。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻结 12 h，之后取出快速进行巴西劈裂试验。试验步骤依据《水利水电工程岩石试验规程》^[18] 中 4.11 节对劈裂法抗拉强度试验的要求进行。劈裂试验采用 RFP-09 型智能测力仪，控制加载速率 $0.02\text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ ，使样品 3 min 内破坏，减小样品融化对试验结果的影响，破坏时记录峰值荷载计算抗拉强度。

(4) 冻结状态下点荷载强度测试

将劈裂破坏的试样进行加工，制作成符合点荷载试验的样品。用于点荷载试验的试样共 6 组，对应于设定的饱和度，每组不少于 10 块。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行冻结 12 h，之后取出快速进行点荷载试验。试验步骤依据《水利水电工程岩石试验规程》^[18] 中 4.14 节对点荷载强度试验的要求进行。稳定的施加荷载，使试件在 10 ~ 60 s 内破坏，减小样品融化对试验结果的影响，记录破坏荷载。

2 试验结果

2.1 脱水时间与饱和度的关系

由图 1 可以看出脱水初期(0 ~ 12 h)水分散失较快，饱和度大约降到 40%。之后水分散失逐渐变缓，在约 48 h 后饱和度基本不再变化，维持在 20% 左右，达到天然含水率。

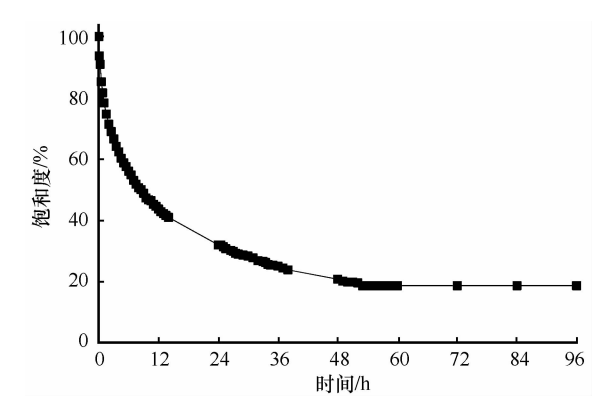


图 1 饱和度与脱水时间的关系

Fig. 1 Variation of saturation with dehydration time

2.2 不同饱和度岩样冻结前后 T_2 谱

根据核磁共振的相关理论^[19-20]，岩石 T_2 谱的

总面积反映了其内部液态水的含量。由图 2 可知, 随着初始饱和度的降低, 试样内部孔隙水的未冻结率(定义为岩石冻结后的未冻水含量与初始含水量

的比值)逐渐增加。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻结后, 完全饱和样品内部孔隙水有近一半保持未冻, 60% 饱和度的样品则有超过八成未冻, 而 20% 饱和度的样品则有

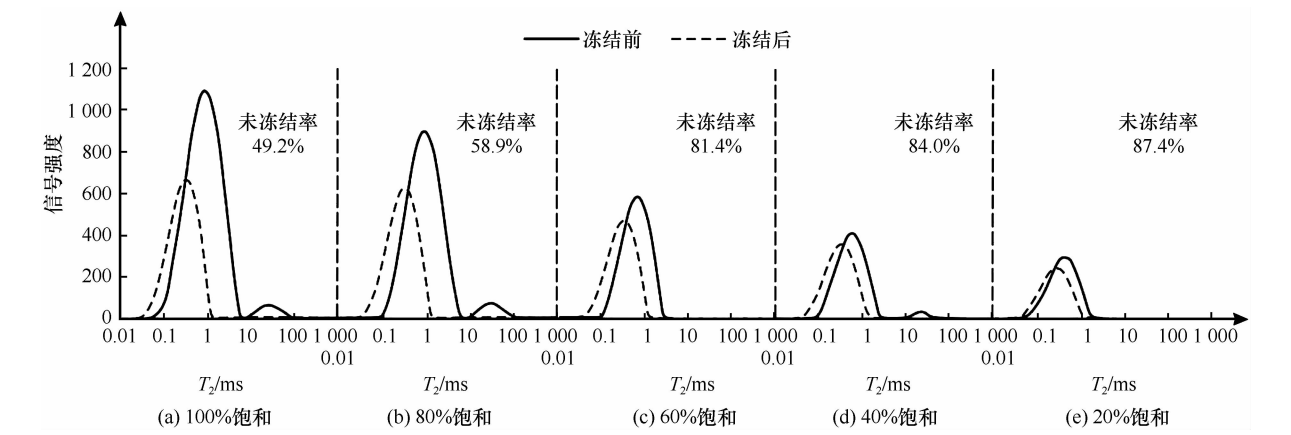


图 2 不同饱和度岩样冻结前后的 T_2 谱

Fig. 2 T_2 spectra of samples with initial saturation of 100% (a), 80% (b), 60% (c), 40% (d) and 20% (e) before and after freezing

接近九成的孔隙水没有冻结。

2.3 饱和度对岩样冻结前后纵波波速的影响

饱和度对岩样冻结前后纵波波速的影响强度不同。由图 3 可见, 冻结前试样的纵波波速随饱和度增加整体呈现增加的趋势, 但增加的幅度有限。冻结状态、饱和度对试样纵波波速的影响变得显著。随着饱和度的增加, 试样冻结状态下纵波波速呈现先降低后升高的趋势, 最小值出现在饱和度 20% 左右, 最大值为饱和度 100% 试样。

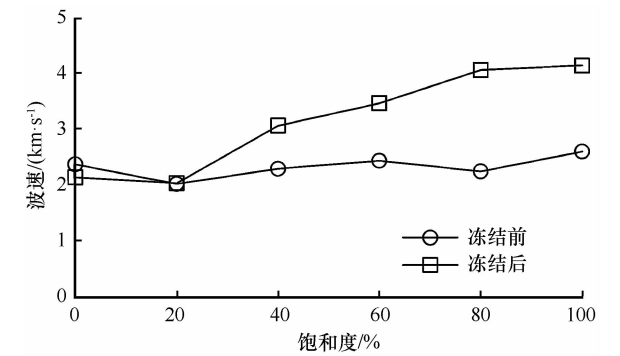


图 3 不同饱和度试样冻结前后的纵波波速

Fig. 3 P-wave velocity changing with saturation of the samples before and after freezing

冻结作用引起了岩样饱和度的显著变化。干燥状态下(饱和度 0%)岩样冻结后纵波波速有所减小, 相比冻结前减小了 10.8%; 20% 饱和度岩样在冻结前后纵波波速变化不明显; 饱和度在 20% ~ 100% 区间时, 岩样冻结后波速显著增加, 增加幅度呈现先增加后减小的趋势; 饱和度在 80% 左右增

加幅度最大, 相比冻结前增加了约 44.9%, 岩样完全饱和时(饱和度 100%), 冻结后波速增加了 37.4% (图 4)。

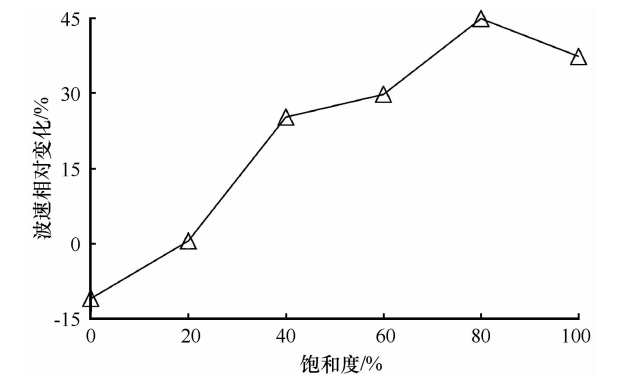


图 4 不同饱和度试样冻结前后纵波波速的相对变化

Fig. 4 Relative change of P-wave velocities of the samples of various saturations before and after freezing

2.4 饱和度对岩样冻结力学性质的影响

(1) 抗拉强度

由图 5 可见, 冻结状态下岩样的抗拉强度随饱和度的增加呈现减小-增加-减小的趋势。最小值出现在饱和度 60% 附近, 约为 0.993 MPa; 最大值为干燥状态, 约为 2.073 MPa; 饱和度 80% 左右有一极大值, 约为 1.514 MPa。不同饱和度岩样冻结后巴西劈裂破坏形态如图 6 所示, 基本呈现沿荷载轴线的拉破坏。

(2) 点荷载强度

不同饱和度岩样冻结状态下的点荷载强度变化趋势与抗拉强度变化趋势基本一致。最小值出现在

饱和度 40% 附近, 约为 3. 21 MPa; 最大值则位于饱和度 80% 左右, 约为 5. 49 MPa(图 7)。

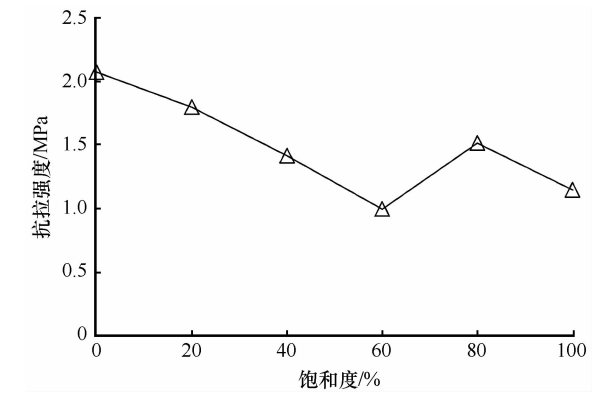


图 5 不同饱和度试样冻结状态下的抗拉强度
Fig.5 Tensile strength of frozen samples with various saturations

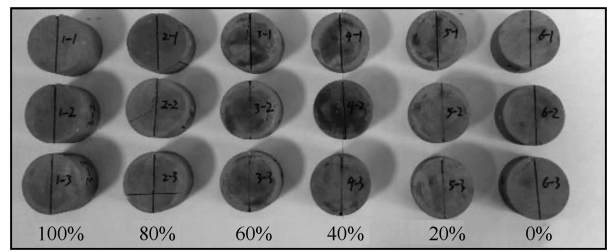


图 6 试样巴西劈裂测试后的破坏状态
Fig.6 The failure states of samples with various saturations after Brazilian splitting test

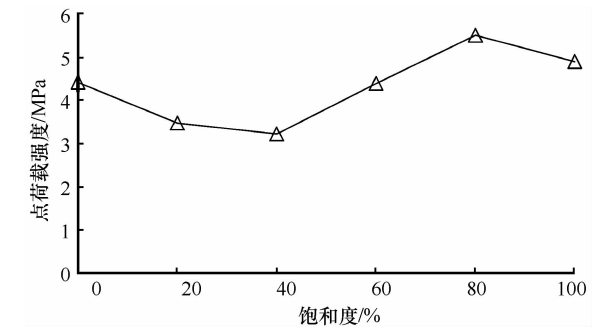


图 7 不同饱和度试样冻结状态下的点荷载强度
Fig.7 Point load strength of frozen samples with various saturations

3 机制分析

3.1 岩样冻结前后波速的变化机制

常温条件下, 关于饱和度对波速的影响机制探讨已经很多^[21-22], 在此不再赘述。冻结作用对试样的纵波波速具有显著的影响, 不同饱和度试样冻结后波速的变化趋势不同。干燥状态的试样在冻结后纵波波速相较于常温状态下减小(图 3), 其原因

应有两个: 一是低温条件下矿物颗粒骨架发生冷缩, 颗粒间的空隙变大, 导致弹性波传播距离相较于常温状态下“变长”, 从而引起波速的降低; 二是由于试样含有膨胀性黏土矿物, 在前期试样制备的过程中经历 1 次完整的干湿循环, 可能会导致矿物颗粒骨架微裂隙的扩展, 即引起了矿物颗粒骨架的损伤, 从而引起波速的减小。

饱和度 20% 的试样, 在 -20 ℃ 的条件下绝大部分孔隙水未发生冻结(图 2)。其孔隙水类型主要为黏土矿物层间水和吸附水^[23]。与常温状态下相比, 低温条件下岩石矿物颗粒骨架收缩与黏土矿物吸水膨胀同时存在, 两者的影响可在一定程度上相互抵消, 因此试样的波速变化不明显。此外, 与干燥状态相比, 饱和度 20% 试样冻结后波速偏低, 其原因应是层间水和吸附水的存在增加了弹性波的反射幅^[24], 使得弹性波的传播“路径”变长, 进而引起波速的降低。

随着饱和度的增加(40% ~ 80%) 孔隙中毛细水和自由水含量增加, 低温条件下孔隙水的冻结比例也在增加。自由水和毛细水冻结成冰后会填充孔隙空间, 同时压缩矿物颗粒骨架; 一方面削弱了层间水和吸附水引起的弹性波的反射和散射, 另一方面为弹性波跨越孔隙空间传播架设了“桥梁”, 即缩短弹性波的传播距离, 上述两种效应引起了波速的升高。但随着饱和度接近和超过 90%, 由于水冰相变后体积膨胀(约 9%), 孔隙水结冰后体积将大于孔隙的初始体积, 从而引起微裂隙的扩展, 导致矿物颗粒骨架的损伤, 进而降低波速^[25]。这可以解释完全饱和的试样其冻结后波速的增加幅度反而小于饱和度 80% 的试样(图 4)。

综合来看, 导致试样冻结后波速产生差异的潜在过程有: 矿物颗粒骨架的冷缩, 黏土矿物的吸水膨胀导致矿物颗粒骨架损伤, 吸附水及层间水导致弹性波的反射和散射显著增加, 自由水和毛细水的相变以及由此引起的微裂隙扩展等。不同饱和度试样内部孔隙水的类型和赋存状态不同, 低温条件下孔隙水结冰的比例也不同, 造成了波速变化趋势的不同。

3.2 饱和度对岩样抗拉强度的影响

不同饱和度试样冻结后抗拉强度的差异, 归根结底是由孔隙水的类型和赋存状态不同导致的。岩石的抗拉强度在细观上是由矿物颗粒之间的粘结强度决定的(沿用基本假定, 巴西劈裂测试样品为拉破坏), 孔隙水会对矿物颗粒之间的粘结产生显著

影响。

处于干燥状态的试样, 抗拉强度完全决定于矿物颗粒骨架的粘结强度。当试样饱和度在 0% ~ 60% 之间时, 在 -20 ℃ 下有超过 80% 的孔隙水处于未冻状态(图 2), 其孔隙水主要为黏土矿物层间水和吸附水。对于泥质粉砂岩, 黏土矿物水化作用导致层间膨胀和粒间膨胀的产生, 导致微裂隙的扩展, 引起矿物颗粒骨架粘结强度的降低; 同时吸附于微裂隙端部的结合水将会显著降低其断裂能^[26], 这两种效应叠加则造成了宏观岩石强度的降低。随着未冻孔隙水含量的增加冻结岩石强度的降低越显著(图 5)。

随着饱和度的进一步升高(60% ~ 80%), 孔隙中毛细水和自由水的含量增加, -20 ℃ 下孔隙中冰的含量随之增加。相比于液态水冰与矿物颗粒之间具有较强的粘结力, 当样品受拉时这种粘结作用可抵抗一部分外荷载, 从而引起样品抗拉强度的升高。

但同样, 在样品饱和度接近并超过 90% 时, 水冰相变后的体积膨胀会引起微裂隙的扩展, 导致矿物颗粒骨架的损伤, 从而削弱其粘结强度, 宏观上表现为试样冻结抗拉强度的降低(图 5)。

3.3 饱和度对岩样点荷载强度的影响

岩石点荷载强度与单轴抗压强度具有线性的对应关系^[27], 一般认为点荷载测试样品为压破坏(虽然最终样品为劈裂破坏形态, 但在加载点附近为压破坏, 即受压起裂)。饱和度对岩石冻结后点荷载强度的影响机制, 与其对抗拉强度的影响机制相似。其区别在于, 在强度上升阶段, 抗拉强度的升高(饱和度 60% ~ 80%)是由于冻结样品在拉伸过程孔隙中冰的粘结作用; 而点荷载强度的升高(饱和度 40% ~ 80%)则是由于冻结样品在受压过程孔隙中冰的支撑作用。

综上所述, 在不同的饱和度下, 控制岩石冻结强度的因素不同。在低饱和度的状态下, 冻结岩石的强度取决于孔隙中的液态水(未冻水)的含量, 这一规律与在常温状态下类似(常温状态下饱和度越高强度越低); 而在高饱和度的区间, 孔隙冰的含量决定了其冻结强度(孔隙冰的粘结或支撑作用); 对于接近饱和的岩石, 冻胀损伤则会对其冻结强度产生显著的影响。

本文试验结果可为评估不同含水状态下岩石冻结强度提供重要参考。与通常认识不同的是, 依据试验结果冻结岩石的抗拉强度(巴西劈裂)和抗压

强度(点荷载试验)均非在完全饱和时达到最大, 且二者的最小值均出现在中等饱和度区间(40% ~ 60%)。而该饱和度区间对于自然环境中的岩石来讲是普遍的或易于达到的, 这意味着在对寒区岩体进行稳定及安全状态评价时, 冻结作用对其强度的提升需要慎重考虑。

4 结论

本文对不同饱和度泥质粉砂岩在冻结状态下的纵波波速、抗拉强度、点荷载强度进行了试验研究, 得到以下结论:

(1) 冻结状态下, 随着饱和度的增加, 纵波波速呈现先降低后升高的趋势; 相比于冻结前, 冻结干燥岩样纵波波速减小, 20% 饱和度岩样波速变化不显著, 之后随着饱和度增加冻结岩样波速均显著增加。

(2) 冻结状态下岩样的抗拉强度和点荷载强度随饱和度的增加呈现减小-增加-减小的趋势, 不同的是抗拉强度最小值出现在饱和度 60% 附近, 最大值为干燥状态, 饱和度 80% 左右有一极大值; 点荷载强度最小值出现在饱和度 40% 附近, 最大值则在饱和度 80% 左右。

(3) 随着初始饱和度的降低, 试样内部孔隙水的未冻结率逐渐增加; 在 -20 ℃ 下, 完全饱和样品内部孔隙水有 49.2% 保持未冻, 60% 饱和度的样品有 81.4% 未冻, 而 20% 饱和度的样品有 87.4% 的孔隙水没有冻结。

(4) 在不同的饱和度下, 控制岩石冻结强度的机制不同。在低饱和度的状态下, 冻结岩石的强度仍取决于孔隙中的未冻水含量; 而在高饱和度的区间, 孔隙冰的含量决定了其冻结强度; 对于接近饱和的岩石, 冻胀损伤则会对其冻结强度产生显著的影响。

参考文献(References):

- [1] Li Ning, Zhang Ping, Cheng Guodong. Experimental study on dynamic characteristics of low cycle of frozen fractured sandstone [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(11): 1175-1180. [李宁, 张平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1175-1180.]
- [2] Yang Gengshe, Zhang Changqing. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(2): 97-100. [杨更社, 张长庆. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(2): 97-100.]
- [3] Chen T C, Yeung M R, Mori N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action [J]. Cold

- Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 127–136.
- [4] Wang Lehua, Jiang Zhaorong, Li Jianlin, et al. The bedding sandstone unloading mechanical properties experimental study in the freeze-thaw cycle conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1052–1058. [王乐华, 姜照容, 李建林, 等. 冻融循环条件下层理砂岩卸荷力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1052–1058.]
- [5] Lu Yani, Li Xiping, Wu Xinghong. Failure modes of fractured rock masses under freeze-thaw action and load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 351–357. [路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 单轴压缩条件下裂隙岩样冻融损伤破坏模式分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 351–357.]
- [6] Nekrasov L B, Misnik I M, Movshina S D. Technical and economic evaluation of high-frequency electrical thermo-hammers for breaking frozen rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1974, 11(6): 127.
- [7] Park C, Synn J H, Shin H S, et al. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 4(Supp 1): 81–86.
- [8] Inada Y, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(7): 1029–1034.
- [9] Kodama J, Goto T, Fujii Y, et al. The effects of water content temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 6(2): 1–13.
- [10] Wang Kailin, Yang Shengqi, Su Chengdong. Test study on the mechanical property of tuff at different strain rates in freezing condition[C]// Essays on Academic Conference of the 2006 National Mine Construction; vol II. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2006: 330–334. [王开林, 杨圣奇, 苏承东. 冻结状态多级应变速率下凝灰岩力学特性的试验研究[C]//2006 全国矿山建设学术会议文集: 下册. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 330–334.]
- [11] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperature[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 40–46. [杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度下岩石细观损伤演化 CT 扫描[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2004, 24(6): 40–46.]
- [12] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Ren Jianxi, et al. Study on the effect of freezing rate on the damage CT values of Tongchuan sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4099–4104. [杨更社, 张全胜, 任建喜, 等. 冻结速度对铜川砂岩损伤 CT 数变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4099–4104.]
- [13] 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.]
- [14] 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): 2286–2289. [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): 2286–2289.]
- [15] Tang Mingming, Wang Zhiyin, Sun Yili, et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 787–794. [唐明明, 王芝银, 孙毅力, 等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 787–794.]
- [16] Liu Hui, Yang Gengshe, Ye Wanjun, et al. Analysis of unfrozen water content and damage characteristics based on histogram technique of CT images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1591–1598. [刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于 CT 图像直方图技术的冻结岩石未冻水含量及损伤特性分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1591–1598.]
- [17] Shan Renliang, Yang Hao, Guo Zhiming, et al. Experimental study of strength characters of saturated red sandstone on negative temperature under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 3657–3664. [单仁亮, 杨昊, 郭志明, 等. 负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 3657–3664.]
- [18] Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering: SL 264–2001[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2001. [水利水电工程岩石试验规程: SL 264–2001[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.]
- [19] Xiao Lizhi. MRI logging and rock NMR and their applications[M]. Beijing: Science Press, 1998. [肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [20] Li Jielin, Zhou Keping, Zhang Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1208–1214. [李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1208–1214.]
- [21] Deng Tao, Han Wenfeng, Bao Hanzhang. On the characteristics of wave velocity variations for marbles saturated in water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 762–765. [邓涛, 韩文峰, 保翰章. 饱水大理岩的波速变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 762–765.]
- [22] Deng Huafeng, Yuan Xianfan, Li Jianlin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1625–1631. [邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625–1631.]
- [23] Jia Hailiang, 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. [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.]
- [24] Domenico S N. Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale[J]. Geophysics, 2012, 39(6): 759–769.
- [25] Jia Hailiang, Xiang Wei, Krautblatter M. Quantifying rock fatigue and decreasing compressive and tensile strength after repeated freeze-thaw cycles[J]. Permafrost and Periglacial Processes,

2015, 26(4): 368–377.

[26] Rehbindler P A, Lichtman V. Effect of surface active media on strains and rupture in solids[C]// Proceedings of the 2nd International Congress of Surface Activity. London: Butterworths Scientific Pub, 1957: 563–580.

[27] Fu Zhiliang, Wang Liang. Comparative experimental research on point load strength, uniaxial compressive strength and tensile strength for rocks in roof and floor of coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 88–96. [付志亮, 王亮. 煤层顶底板岩石点荷载强度与拉压强度对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 88–96.]

Influence of saturation degree on the mechanical properties of frozen argillaceous siltstone

ZI Fan, YANG Gengshe, JIA Hailiang

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Influence of saturation degree on the mechanical properties of argillaceous siltstone at room temperature has been widely investigated, but at subzero temperature there is still unclear. In this paper, the P-wave velocities and the NMR T_2 spectra of argillaceous siltstone samples with 6 different saturation degrees (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) before and after freezing have been studied, as well as the tensile strength and the point load strength of these samples in frozen state. The results indicated that: (1) the P-wave velocities of frozen samples rise first and then fall with the increase of their saturation degrees; (2) 49.2% of the pore water in the totally saturated sample remain unfrozen at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, while this value is 81.4% and 87.4% for 60% saturated sample and 20% saturated sample, respectively; (3) the frozen tensile strength and point load strength of samples both show a drop-rise-drop trend following the increase of saturation degrees, for both strengths the maximum value appears at saturation degree of 80% and the peak value does not emerge at saturation degree of 100% unexpectedly. The following conclusions can be drawn: in low-saturation degree interval, the strength of frozen rock is primarily determined by the content of unfrozen porous water; while in high-saturation degree interval, the content of porous ice controls the frozen strength; for rock close to full saturation, frost damage is also a key influence for the frozen strength.

Key words: argillaceous siltstone; saturation degree; frozen strength; mesoscopic mechanism; NMR test; unfrozen water content

(本文编辑：武俊杰)