不同围压下冻融安山岩力学性能劣化规律①

邓云腾[1,2,3], 刘轩泽[4], 付俊[1,2,3], 周罕[1,4], 陈安[1], 傅峥[2]
(1.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2.中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 3.云南省岩土工程与地质灾害重点实验室, 云南 昆明 650051; 4.昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南 昆明 650231)

摘 要: 针对高寒矿区岩石边坡冻融失稳难题,以西藏阿里地区某矿区边坡安山岩为研究对象,通过冻融循环试验、单轴压缩试验、三轴压缩试验,得出不同围压下冻融安山岩力学性能劣化规律。结果表明,随着冻融循环次数增加,安山岩抗压强度和抗剪参数均表现为衰减趋势,劣化度逐渐增大。在无围压状态下,安山岩破坏模式随着冻融循环次数增加由劈裂破坏向劈裂-剪切混合破坏演化,并伴随着裂纹增多。施加围压后,围压在一定程度上增强了岩石的抗压能力,随着围压增大,破坏模式逐渐由脆性破坏向剪切滑移破坏模式转变,在较高冻融循环次数下形成辐射状的裂纹扩展,伴随明显的片状脱落现象。

关键词: 岩石力学; 安山岩; 冻融循环; 围压; 岩石劣化; 单轴压缩; 三轴压缩; 抗剪强度; 抗压强度
中图分类号: TD313;TD854 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.018
文章编号: 0253-6099(2026)03-0137-08

Deterioration Laws of Mechanical Properties of Freeze-Thaw Andesite Under Different Confining Pressures

DENG Yunteng[1,2,3], LIU Xuanze[4], FU Jun[1,2,3], ZHOU Han[1,4], CHEN An[1], FU Zheng[2]
(1. *Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650093, *Yunnan, China*; 2. *Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming* 650051, *Yunnan, China*; 3. *Yunnan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Geohazards, Kunming* 650051, *Yunnan, China*; 4. *Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Kunming* 650231, *Yunnan, China*)

Abstract: To address the challenge of freeze-thaw instability of rock slopes in alpine mining areas, the andesite from a slope in a mining area in Ngari of Xizang was taken as the research object. Through freeze-thaw cycle tests, uniaxial compression tests, and triaxial compression tests, the deterioration laws of the mechanical properties of freeze-thaw andesite under different confining pressures were obtained. The results show that with an increase in the number of freeze-thaw cycles, both the compressive strength and shear parameters of the andesite exhibit a decreasing trend, and the deterioration degree gradually increases. Under unconfined conditions, the failure mode of the andesite evolves from splitting failure to mixed splitting-shear failure with an increase in the number of freeze-thaw cycles, accompanied by an increase in cracks. When confining pressure is applied, it enhances the compressive capacity of the rock to a certain extent. As the confining pressure increases, the failure mode gradually transitions from brittle failure to shear-slip failure. After a higher number of freeze-thaw cycles, radial crack propagation develops, accompanied by obvious spalling phenomena.

Key words: rock mechanics; andesite; freeze-thaw cycle; confining pressure; rock deterioration; uniaxial compression; triaxial compression; shear strength; compressive strength

① **收稿日期**: 2025-12-28
基金项目: 昆明市中青年学术和技术带头人科技专项(202405B040035);云南省科技厅省重点实验室科技计划项目(科技人才与平台计划202105AG070006);中国铝业集团有限公司科技人才“明星计划”培养对象项目(中铝人才字〔2022〕622-3 号);中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司科技创新项目(2022YN05A3/2023YN06)
作者简介: 邓云腾(2001—),男,云南昭通人,硕士研究生,主要研究方向为岩石力学。E-mail:2591817486@qq.com
通信作者: 付俊(1986—),男,云南昆明人,博士,正高级工程师,主要研究方向为环境岩土。E-mail:fujun7@qq.com
周罕(1977—),男,安徽安庆人,博士,正高级工程师,主要研究方向为环境岩土。E-mail:948720900@qq.com

岩石是由矿物颗粒、孔隙、裂隙和胶结物质组成的集合体[1],其力学特性易受外界环境的影响。冻融循环是一种重要的风化作用[2],可显著改变岩石的物理力学性质。在高寒高海拔矿区,冻融循环对露天矿山边坡稳定性的影响尤为显著[3]。随着矿山开采,处于不同埋藏深度的岩石逐渐出露,在不同围压和冻融循环的共同作用下,岩体结构遭到破坏,边坡更容易发生滑坡、崩塌、落石等地质灾害,给寒区矿产资源开发带来安全隐患[4]。因此,研究处于不同围压状态下冻融岩石的力学性能对寒区矿山安全工程建设具有重要工程意义。

因对材料结构变化的敏感性和量化表征能力,力学指标常被视为评价冻融循环作用下岩石损伤的有效手段[5]。国内外学者对冻融岩石力学行为展开了大量研究,深入探讨了岩石冻融损伤的机理,取得了显著进展。在冻融岩石单一力学试验研究方面,文献[6-7]对砂岩、灰岩和石灰岩开展了不同次数的冻融循环试验,分别加以直剪试验和单轴压缩试验,发现随着冻融循环次数增加,岩石的力学性质逐渐衰减,冻融损伤劣化程度逐渐加深。但天然岩石往往存在一定缺陷,后续学者进一步研究了节理裂隙岩石在冻融循环条件下的损伤,文献[8-11]分别对饱水裂隙砂岩、不同饱和度的红砂岩、预制不同裂隙长度岩石、节理岩石开展了不同循环次数冻融后的力学试验,进一步揭示了缺陷岩体的冻融力学性能损伤劣化规律。为了进一步还原自然岩体的冻融环境,学者们开展了冻融耦合其他影响因素作用下的研究,文献[12]开展化学腐蚀-冻融循环协同作用后砂岩试样的三轴压缩试验,发现强酸性溶液加剧了冻融岩样的损伤劣化;文献[13-15]分别从冻融-动力扰动、冻融-循环加卸载、冻融-压剪荷载的角度,研究了冻融岩石在复杂工程环境下的劣化破坏机制;文献[16]通过数值模拟研究了应力-冻融耦合实时作用下砂岩的冻胀变形和破裂演化规律。上述关于冻融岩石力学性能劣化研究,主要集中于循环次数、循环环境、工程扰动等方面,且研究对象主要为各类砂岩、灰岩,对不同围压下冻融安山岩的劣化破坏规律关注有限。因此,本文对不同冻融循环周期处理下的安山岩试样分别开展了单轴压缩、三轴压缩试验,分析了不同围压下冻融安山岩力学性能劣化规律及破坏特征。

1 试样制备与方案设计

1.1 试样制备

试验使用的安山岩试样取自西藏阿里某矿区,岩样呈紫红色,局部呈灰绿色。根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),单轴压缩、三轴压缩试验的安山岩试样选用 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱形试样。确保试样的两端面平行度误差不超过 0.02 mm,端面粗糙度不超过 0.02 mm。

1.2 冻融循环试验方案

将制备完成的岩石试样放入 101-OES 电热鼓风干燥箱中进行干燥处理,干燥温度设置为 105 ℃,干燥时间为 24 h,每隔 2 h 对试样进行称重,直至连续 2 次称重差异小于 0.01 g,确保岩石试样内部无自由水分。然后将干燥处理后的岩石试样通过 SHZ-D(Ⅲ)水循环真空饱和设备进行真空饱和吸水处理,将试样放入真空容器中,使用循环水式多用真空泵抽真空至低压,持续时间为 4 h,当真空压力表读数保持-80 kPa 不变时,注入去离子水将岩石试样完全覆盖,使水渗入岩石试样孔隙中,在无气泡逸出后将试件置于真空容器中静置 4 h。若试样在连续 2 次称量间的质量变化小于 0.1%,则认为试样达到饱和状态,模拟实际工程中岩石在自然条件下的受水状态。最后结合露天矿山所在区域实际环境特点以及相关研究[17],采用 TDR-II 冻融循环试验机进行冻融循环试验,将冻融循环温度设置为(-20±2)~(20±2) ℃,冻结与融解时间均为 10 h,冷却和加热时间均为 2 h,冻融循环次数设置为 0、15、30、45 次。冻融循环试验方案如图 1 所示。

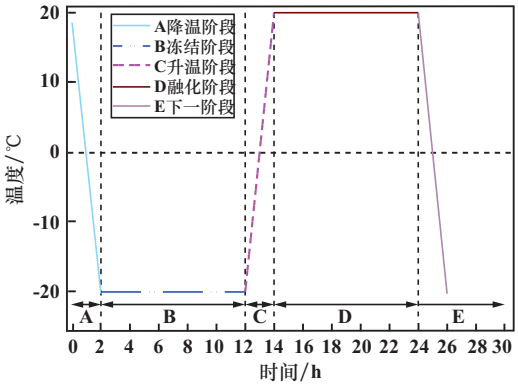


图 1 冻融循环试验方案

Fig. 1 Freeze-thaw cycle test scheme

1.3 力学试验方案

采用法国 Top 50HT 岩石多场耦合流变仪进行单轴压缩与三轴压缩试验。为进一步评估不同冻融循环次数下安山岩在复杂应力条件下的力学行为,在单轴压缩试验的基础上,通过施加围压,模拟实际工程中岩石所受的多轴应力条件,根据研究区域的地应力特征,结合安山岩的赋存深度[18],最终将围压设置为 2.5、5.0、7.5、10.0 和 12.5 MPa。为确保试验数据的可靠性,每个冻融循环下安山岩试样进行 3 次压缩试验,最

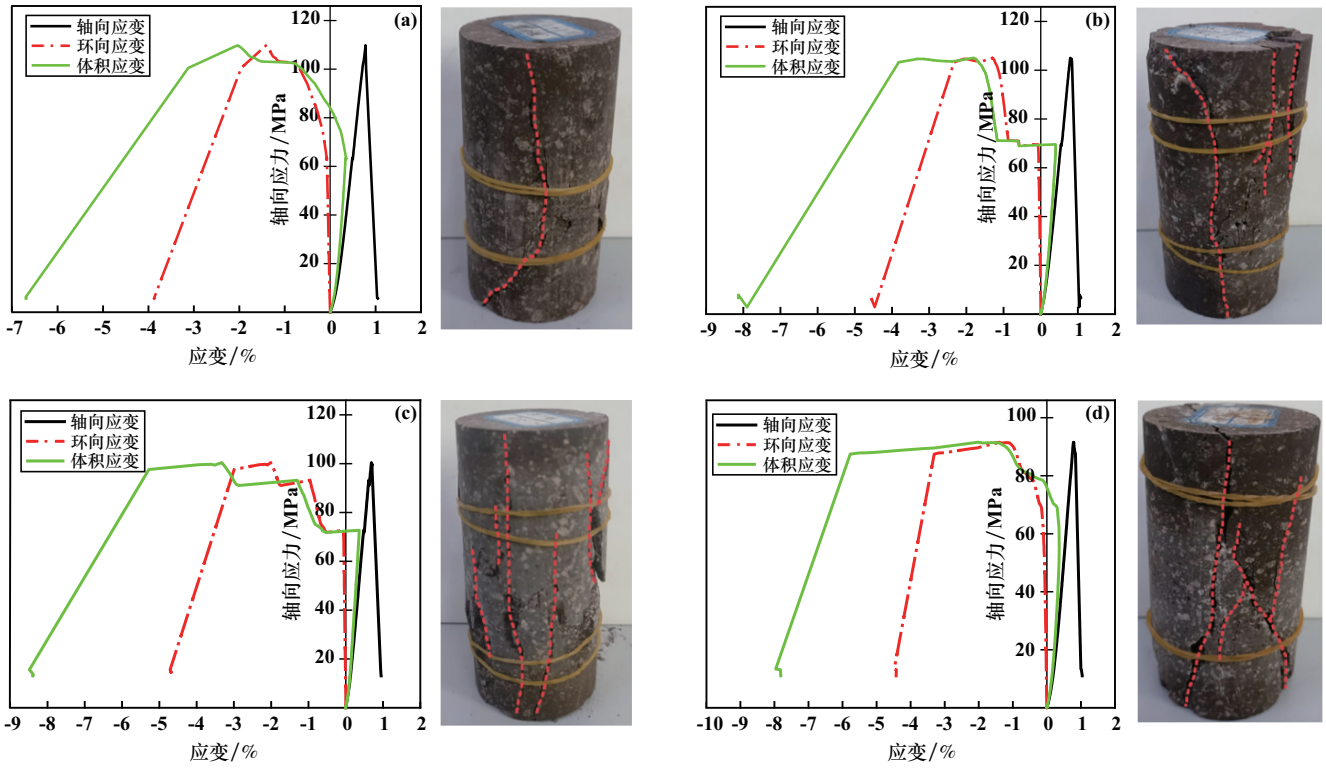
终取其平均值,确保岩石压缩试验结果的代表性与统计学的有效性,同时还需要确保试样的两端平整且垂直,以避免应力集中导致的误差。通过加载系统精确施加轴向压力,并实时监测试样的变形量,利用位移传感器获取变形数据。

2　结果与分析

2.1　单轴应力-应变曲线和破坏模式分析

为了更直观地分析不同冻融循环次数下安山岩的应力-应变曲线特征,在 3 次单轴压缩试验中选取较为典型的应力-应变曲线结合破坏形态进行分析,相关结果如图 2 所示。其中,环向应变与体积应变均能反映弹性阶段与屈服阶段,体积应变呈线性变化时为弹性阶段,而体积应变的转折点标志着进入屈服阶段。

未经冻融循环的岩石试样在加载初期处于线性弹性阶段,轴向应变随着轴向应力增加而增加;当达到平均峰值应力 94.00 MPa 后,试样开始出现裂纹,并快速扩展发育为裂缝,导致岩石发生破坏,应变曲线急剧下降,试样承载能力下降。由于初始状态的岩样结构相对较为完整,应变曲线呈现清晰的弹性阶段特征,平均弹性模量为 15.24 GPa,岩石受载性能良好,并且应变和应力之间保持较好的线性关系。试样在单轴压缩试验中表现为典型的脆性岩石破坏模式,破裂后的岩石较为完整。



(a) 0 次;(b) 15 次;(c) 30 次;(d) 45 次

图 2　不同冻融循环下典型的应力-应变曲线结合破坏形态

Fig. 2　Typical stress-strain curves combined with failure modes after different freeze-thaw cycles

经历了 15 次冻融循环后,试样较早进入屈服阶段,轴向应变随着应力增大而增加,但增幅高于未经历冻融循环的岩石。此时试样平均峰值应力、弹性模量分别为 92.3 MPa、14.00 GPa,比未经冻融循环试样分别下降了 1.81%、8.14%。试样更早进入了塑性变形阶段,出现了屈服平台,表明岩石开始由脆性转变为塑性。该阶段岩石表面出现了裂纹,且有部分岩石碎块脱落。岩石的抗压强度下降幅度相对较小,破坏方式仍主要表现为劈裂破坏,破坏过程表现为沿着主应力方向的裂纹扩展。

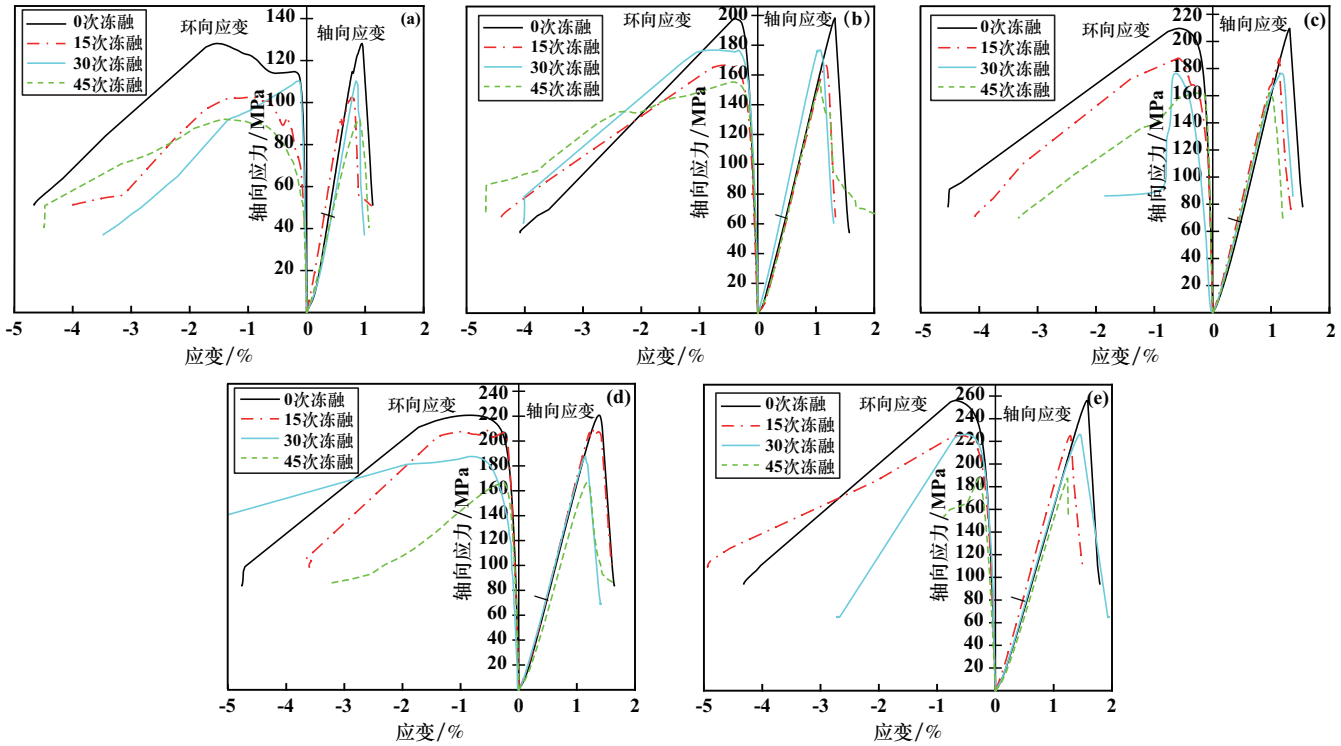
经历了 30 次冻融循环后,试样更早进入屈服阶段,塑性变形特征更加明显,应力和应变之间呈现非线性关系。此时试样的平均峰值应力、弹性模量分别为 77.36 MPa、13.42 GPa,比未经冻融循环试样下降了 17.70%、11.94%。破坏后应变的增长不再受到应力限制,表明岩石的整体强度丧失。岩石的表面裂纹更加明显,且部分裂纹已经贯穿整个试样,此时,岩石的破坏模式不再是单一的脆性断裂,而是呈现出更多的裂纹扩展和分裂,且裂缝的扩展路径变得更加复杂。

经历了 45 次冻融循环后,岩石在应力作用下表现出更多的塑性变形,达到峰值应力后,岩石的变形不再与应力成正比,尽管平均峰值应力有所下降,但应变持续增加,表明岩石继续发生塑性变形。此时试样的平均峰值应力、弹性模量分别为 72.31 MPa、12.80 GPa,比未经冻融循环试样分别下降了 23.07%、16.01%,在冻融循环影响下损伤不断累积,并出现了劈裂与剪切滑移相结合的破坏模式。

不同冻融循环周期处理后的安山岩试样在经历单轴压缩后,随着冻融循环次数增加,平均峰值应力逐渐减小,脆性减弱,塑性增强,破碎程度逐渐增大,碎块逐渐增多,破坏模式逐渐复杂,这与文献[19]试验结果类似。冻融循环对岩石的损伤主要表现为两方面:一方面,通过反复冰冻和解冻岩石内部的水分,产生的冻胀力会对岩石的内部骨架结构施加压力,导致岩石内部骨架结构的破坏,基质间的胶结能力减弱,致使岩样表面颗粒产生不规则剥落[8];另一方面,在冻融循环后,岩石内部的孔隙水在水-冰相变过程中产生冻胀力也会导致孔隙的扩张和微裂隙的产生[20],致使岩样在单轴压缩过程中表现为裂纹不断扩展并相互连接贯通,形成更大的裂缝,使得岩石完整性下降,从而发生破坏。特别是经历 30 次及以上冻融循环后,岩石出现明显的力学性能退化,无法继续承载更大的应力。

2.2 三轴压缩应力-应变曲线和破坏模式分析

不同冻融循环次数及不同围压下三轴压缩应力-应变曲线如图 3 所示。



(a) 2.5 MPa; (b) 5.0 MPa; (c) 7.5 MPa; (d) 10.0 MPa; (e) 12.5 MPa

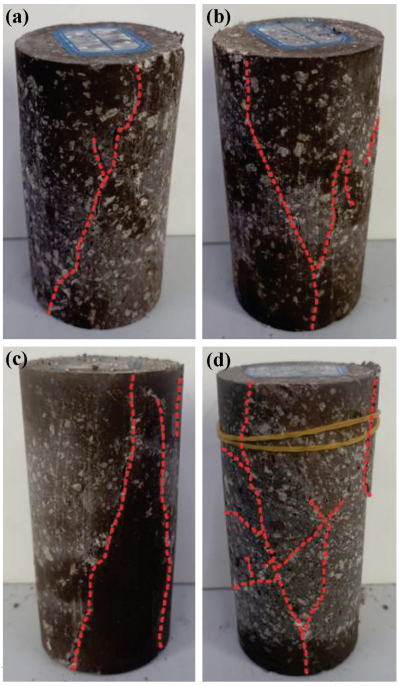
图 3 不同冻融循环次数及不同围压下三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Triaxial compression stress-strain curves after different freeze-thaw cycles and with different confining pressure

由图 3 可知,在围压分别为 2.5、5.0、7.5、10.0 和 12.5 MPa 下经历了 45 次冻融循环的安山岩三轴压缩平均峰值应力,比相应围压下未经冻融循环的三轴压缩平均峰值应力,分别下降了 36.08、43.04、47.30、54.47、68.47 MPa,降幅分别为 28.14%、21.70%、22.56%、24.67%、26.73%,表明冻融循环导致了岩石强度的退化,且整体上随着围压增大退化效果更明显。其中在 2.5 MPa 围压下,岩石的三轴压缩峰值应力相对较低但降幅最大,曲线呈现出明显的脆性破坏特征,破坏点后的应力迅速下降,这说明低围压不足以抑制裂纹的快速扩展。而在较高围压下,岩石的峰值应力显著提高,且曲线的下降部分较为平缓。这表明围压增大能够约束裂纹的扩展,提高岩石的抗压强度,即使在高冻融循环次数下,高围压仍能部分缓解强度退化的程度。

选取冻融安山岩三轴压缩试验中具有代表性试样(围压 7.5 MPa 下)的破坏形态进行分析,如图 4 所示。相较于单轴压缩试验,由于三轴压缩试验围压的加持,岩石试样的破坏模式存在显著区别,在围压作用下,岩

石破坏时的主裂缝扩展受到抑制,有效提高了岩石变形能力,改变了试样破坏方式。围压作用下未经过冻融循环的安山岩试样表现出典型的脆性破坏模式,沿主应力方向发生明显的剪切破裂。随着冻融循环次数增加,安山岩破坏时的裂纹数量开始逐渐增多,破坏模式逐渐由脆性破坏向更复杂的塑性破坏转变,并表现出较为明显的片状剥离现象,特别是经历了 45 次冻融循环的安山岩试样,与文献[14]研究结果相似,在经历多次冻融过程后,岩样表面开始变得松软剥落,劣化损伤逐渐从表面向内部发展,从而导致岩样裂纹扩展增多,并形成了辐射状的裂纹扩展,同时还出现明显的片状脱落以及碎裂现象,表明冻融作用可调控裂纹扩展自由度。冻融累积损伤削弱了岩体内空间结构的限制,促进裂纹网格及孔隙发育,从而形成多向贯通[13]。



(a) 0 次(剪切破坏);(b) 15 次(裂纹增多);
(c) 30 次(贯穿裂纹);(d) 45 次(辐射状裂纹)

图 4　不同循环次数下代表性试样的破坏形态

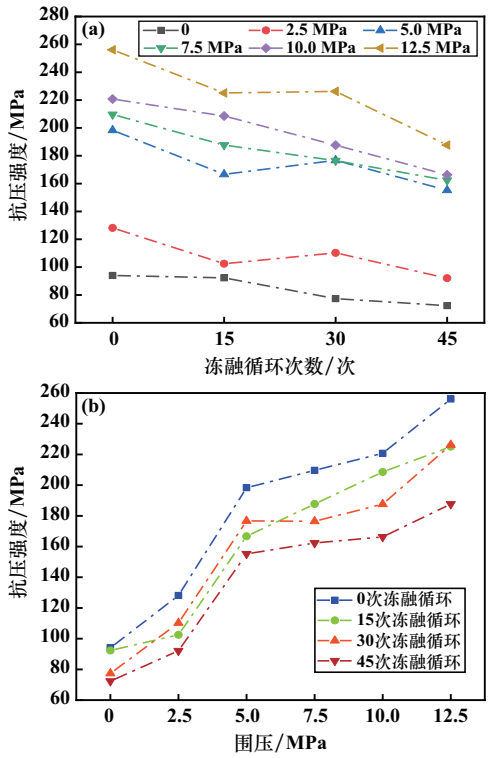
Fig. 4　Failure modes of representative samples after different numbers of cycles

3　讨论

3.1　抗压强度参数劣化规律

图 5 为不同冻融循环次数与不同围压下安山岩抗压强度变化规律。

由图 5(a)可以看出,冻融循环会对岩石的力学性能产生显著影响。在无围压情况下,安山岩受冻融循环作用影响,抗压强度呈下降趋势,与文献[21]研究结果一致。随着冻融循环次数增加,安山岩抗压强度从未经冻融循环的 94.00 MPa 降至冻融循环 45 次后的 72.30 MPa,下降幅度为 23.09%。在 15~30 次冻融循环过程中,抗压强度下降趋势更显著,表明随着冻融循环的不断进行,岩石内部的水分不断迁移,水冰相变的内应力[22]导致岩石试样不断发生损伤,进而力学参数发生劣化,安山岩的力学性质退化呈现出累积效应,这一阶段是安山岩在冻融循环过程中发生结构性破坏的关键期。



(a) 抗压强度-冻融循环次数;(b) 抗压强度-围压

图 5　安山岩抗压强度变化规律

Fig. 5　Variation laws of compressive strength of andesite

施加围压时,随着冻融循环次数增加,安山岩的抗压强度显著下降,尤其是冻融循环 45 次时,抗压强度下降尤为显著,这表明冻融循环次数的增加导致岩石内部的微裂隙进一步扩展[23],孔隙结构的破坏加剧[24],进而影响了其力学性能。

由图 5(b)可知,围压 2.5~5.0 MPa 阶段,岩石内部原有孔隙和冻融产生的微裂纹处于开放状态,围压的施加首先迫使这些裂纹闭合,此时安山岩抗压强度快速提升,此阶段在冻融循环 0、15、30、45 次条件下,岩石抗压强度分别增加了 70.15、64.19、66.45、63.18 MPa。围压 5.0~10.0 MPa 阶段,围压对抗压强度增强的效应明显放缓,围压对冻融损伤的补偿作用变弱,表明岩石裂纹完全闭合后,进入以颗粒接触摩擦为主的阶

段[10],处于脆性向延性破坏的过渡区,此阶段岩石局部发生塑性变形而非完全脆性破裂,能量消耗方式改变,导致强度增长斜率降低。当围压超过 10.0 MPa 时,岩石内部颗粒接触面完全压实,摩擦阻力成为强度提升的主要来源,高围压下摩擦效应增强,抗压强度增速恢复。特别是未经历冻融的情况下,围压的作用尤为显著,因为未冻融岩石内部结构致密,侧向压力能均匀传递至岩石内部,有效抑制轴向加载时裂纹的萌生和扩展,岩石本身的抗压强度与颗粒间摩擦阻力的协同增强。

综上所述,围压对岩石抗压强度的提升效果明显,冻融循环次数的增加则显著削弱了岩石的抗压能力,冻融循环次数越多,岩石抗压强度越低。围压可以一定程度上缓解冻融循环对岩石强度的影响,但整体趋势仍是随着冻融循环次数增加,岩石强度显著下降。

3.2 抗剪强度参数劣化规律分析

内摩擦角和黏聚力是三轴压缩试验中不可或缺的重要力学参数,直接反映了岩石在多轴应力状态下的剪切强度特性,可为岩石力学性质的全面评估提供重要依据[25]。根据三轴压缩试验绘制岩石的抗剪参数变化规律,如图 6 所示。在冻融循环之前,安山岩的黏聚力为 14.38 MPa,内摩擦角为 59.62°,岩石的结构较为完整,岩石内部矿物颗粒之间的黏结力相对较强,具有较高的抗剪切能力。但随着冻融循环次数增加,黏聚力和内摩擦角呈现明显下降趋势,此结论与文献[11]的研究结论相吻合,但与文献[6]的结论存在差异,文献[6]中内摩擦角随着循环次数增加呈指数增长,可能是岩性和试验的差异所致。在冻融循环 15 次后,安山岩黏聚力的下降趋势趋于平稳,说明岩石在经历了一定的冻融循环周期后,其内部的结构已损坏至一定程度,进一步的冻融作用对黏聚力的影响逐渐减弱。此时,岩石的黏聚力已经达到一个较低且相对稳定的水平。

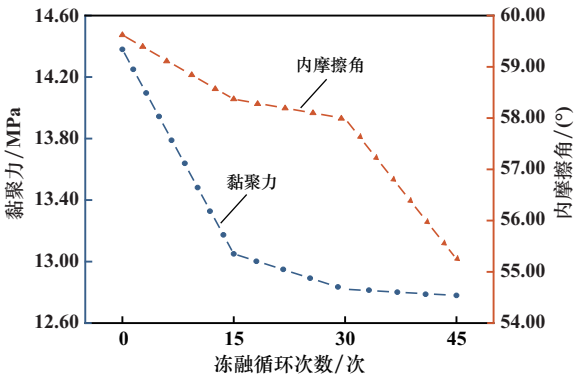


图 6 岩石抗剪参数变化规律

Fig. 6 Variation laws of shear parameters of rock

黏聚力和内摩擦角的下降表明岩石在冻融循环作用下的力学性质显著退化。黏聚力的下降主要是岩石结构的破坏和矿物黏结力的丧失,而内摩擦角的降低则是冻融作用导致的颗粒接触和摩擦力减弱。两者的共同变化说明,冻融循环不仅会破坏岩石的结构稳定性,还会降低其抵抗剪切变形的能力。

3.3 劣化度分析

岩石的抗压强度在岩石破坏过程中起着关键的作用,为分析比较不同围压下岩石的劣化损伤程度,将抗压强度损失值作为冻融安山岩的劣化度[26],计算公式为:

$$D_n = \frac{|T_0 - T_n|}{T_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中:D_n 为劣化度;T_0 为相应围压下未经冻融循环的安山岩抗压强度;T_n 为相应围压下冻融 n 次后的安山岩抗压强度。

根据计算结果绘制劣化度随冻融循环次数的变化,如图 7 所示。不同围压条件下,随着冻融循环次数增加,安山岩劣化度变化趋势不同,但总体呈现上升趋势。围压 0、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 MPa 条件下冻融循环 45 次的安山岩劣化度分别为 23.07%、23.94%、21.70%、22.56%、26.46%、26.73%,表明随着冻融循环次数增加,岩石损伤不断累积。在无围压时,劣化度随着冻融循环次数上升而增大,冻融循环 30 次时上升幅度最大,该阶段岩石损伤劣化显著,与前文试验结果相对应。在低围压(2.5 和 5.0 MPa)时,劣化度随着冻融循环次数增加呈现先降低后增加的变化趋势,冻融循环次数为 30 次的劣化度相比冻融循环 15 次分别下降了 6.08 百分点和 5.04 百分点,表明低围压一定程度上降低了冻融循环对岩石损伤的影响,与强度变化规律相验证。在高围压(大于 5.0 MPa)时,劣化度整体

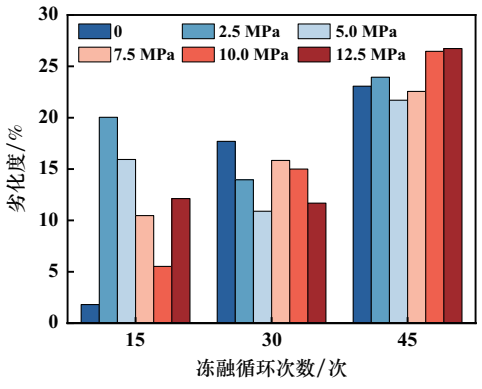


图 7 劣化度随冻融循环次数的变化

Fig. 7 Variation of deterioration degree with number of freeze-thaw cycles

随着冻融循环次数增加而增大,但是前期(30 次之前)上升幅度较小,在后期(45 次)上升幅度变大,表明随着冻融循环次数进一步增加,岩石损伤程度受围压的影响较小,主要受冻融循环次数控制,随着循环次数不断增加,岩石劣化度也不断增大,验证了前文结论。

4　结论

1) 无围压下,随着冻融循环次数增加,安山岩由脆性向塑性演化,破坏模式由劈裂破坏向劈裂-剪切混合破坏演变,裂纹逐渐增多;施加围压后,安山岩主裂纹扩展受到抑制,随着冻融循环次数增加,破坏模式为剪切滑移破坏,并表现出较为明显的片状剥离和碎裂现象。

2) 随着冻融循环次数增加,安山岩抗压强度和抗剪参数逐步衰减。围压作用一定程度上减缓了岩石冻融损伤的发育,使得在冻融循环初期安山岩力学性能有一定增益,但是随着冻融循环次数增加,安山岩力学性能仍会衰减。

参考文献(References):

[1] 候超. 冻融循环作用下硬石膏岩损伤劣化机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
HOU Chao. Study on the damage and deterioration mechanism of anhydrite rock under freeze-thaw cycles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[2] DEPREZ M, DEKOCK T, DE SCHUTTER G, et al. A review on freeze-thaw action and weathering of rocks[J]. Earth-Science Reviews, 2020,203:103143.

[3] LUO X D, JIANG N, FAN X Y, et al. Effects of freeze-thaw on the determination and application of parameters of slope rock mass in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015,110:32-37.

[4] 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.
ZHANG Jizhou, 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.

[5] MOMENI A, ABDILOR Y, KHANLARI G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016,75(4):1649-1656.

[6] HUANG S B, DUAN L Z, ZHEN L B, et al. Study on the freeze-thaw damage degree and its influence on the shear strength parameters of sandstones[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024,228:104328.

[7] 刘先峰,王通,李建国,等. 冻融循环作用下灰岩和石英岩力学特性及损伤本构模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2025,46(1):1-14.
LIU Xianfeng, WANG Tong, LI Jianguo, et al. Experimental study on the mechanical properties and damage constitutive models of limestone and quartzite under freeze-thaw cycles[J]. China Railway Science, 2025,46(1):1-14.

[8] 孙闯,蒲云波,敖云鹤,等. 冻融饱水裂隙砂岩力学特性及细观破裂演化特征研究[J]. 岩土力学, 2025(8):2339-2352.
SUN Chuang, PU Yunbo, AO Yunhe, et al. Mechanical properties of freeze-thaw water-saturated fissured sandstone and its characterization of fine-scale fracture evolution[J] Rock and soil mechanics, 2025(8):2339-2352.

[9] 贾蓬,卢佳亮,毛松泽,等. 不同饱和度冻融砂岩动态冲击压缩特性及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(12):2908-2918.
JIA Peng, LU Jialiang, MAO Songze, et al. Dynamic impact compression characteristics and damage mechanism of freeze-thaw sandstones with different saturation levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(12):2908-2918.

[10] 袁超,张慧梅,车虎斌,等. 甘肃省平山湖矿区冻融裂隙红砂岩力学响应与损伤机制研究[J]. 煤炭学报, 2025(S2):979-993.
YUAN Chao, ZHANG Huimei, CHE Hubin, et al. Research on mechanical response and damage mechanism of freeze-thaw fractured red sandstone in Pingshanhu mining area, Gansu Province[J]. Journal of China Coal Society, 2025(增刊2):979-993.

[11] LEI D X, LIN H, CHEN Y F, et al. Effect of cyclic freezing-thawing on the shear mechanical characteristics of nonpersistent joints[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019:9867681.

[12] 吴静,蔡洋,汪垲彬,等. 化学腐蚀-冻融循环协同作用对砂岩三轴力学特性的影响[J]. 环境工程, 2023,41(增刊2):828-834.
WU Jing, CAI Yang, WANG Kaibin, et al. Effects investigation on mechanical properties of sandstone under the co-action of cyclic freeze-thaw and chemical corrosion[J]. Environmental Engineering, 2023,41(S2):828-834.

[13] 张嘉凡,代超凡,张慧梅,等. 动力扰动作用下冻融砂岩细观损伤演化分析[J]. 岩土工程学报, 2026,48(5):919-928.
ZHANG Jiafan, DAI Chaofan, ZHANG Huimei, et al. Analysis of mesoscopic damage evolution of freeze-thaw sandstone under dynamic disturbance[J]. Journal of Rock Engineering, 2026,48(5):919-928.

[14] 刘涛影,崔梦园,盛业山,等. 冻融和循环荷载下裂隙砂岩断裂特性[J]. 中国有色金属学报, 2025,35(7):2538-2560.
LIU Taoying, CUI Mengyuan, SHENG Yeshan, et al. Fracture characteristics of fractured sandstone under freeze-thaw-cyclic loading[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025,35(7):2538-2560.

[15] 梁博,杨更社,申艳军,等. 冻融-压剪荷载联合作用下含水裂隙岩体冻胀破坏规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(5):1219-1229.
LIANG Bo, YANG Gengshe, SHEN Yanjun, et al. Research on the frost heave failure law of water-bearing fractured rock mass under the combined action of freeze-thaw and compression-shear loads[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(5): 1219-1229.

[16] 朱谭谭,李昂,黄达,等. 应力-冻融耦合作用下砂岩变形与损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(2):342-351.

ZHU Tantan, LI Ang, HUANG Da, et al. Research on deformation and damage characteristics of sandstone under stress-freeze-thaw coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(2):342-351.

[17] 申艳军,杨更社,荣腾龙,等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. 岩土工程学报, 2016,38(10):1775-1782.
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme forfreeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(10):1775-1782.

[18] 李洪超,刘轩泽,付俊,等. 藏北多龙矿集区某金铜矿地应力特征及断裂稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2024,24(12):4659-4668.
LI Hongchao, LIU Xuanze, FU Jun, et al. In-situ stress characteristics and fracture stability analysis of a gold-copper deposit in the Duolong ore concentration area, northern Xizang[J]. Journal of Safety and Environment, 2024,24(12):4659-4668.

[19] 张阳阳,黄伟. 冻融循环后红砂岩静动态劈裂拉伸性能对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2023,51(3):94-99.
ZHANG Yangyang, HUANG Wei. Comparative analysis of static and dynamic split tensile properties of red sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Coal Science and Technology, 2023,51(3):94-99.

[20] 邹峰,祁长青,张爽,等. 冻融循环作用下红砂岩物理力学性质及冻融损伤特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026,54(2):187-196.
ZOU Feng, QI Changqing, ZHANG Shuang, et al. Research on the physical and mechanical properties and freeze-thaw damage characteristics of red sandstone under freeze-thaw action[J], 2026,54(2):187-196.

[21] YAVUZ H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011,70(2):187-192.

[22] MAL'A M, GREIF V, ONDRÁŠIK M. Pore structure evolution in andesite rocks induced by freeze-thaw cycles examined by non-destructive methods[J]. Scientific Reports, 2022,12:8390.

[23] FENER M, INCE I. Effects of the freeze-thaw (F-T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015,109:96-106.

[24] ÇELIK M Y, SERT M. Accelerated aging laboratory tests for the evaluation of the durability of hydrophobic treated and untreated andesite with respect to salt crystallization, freezing-thawing, and thermal shock[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020,79(7):3751-3770.

[25] 李鹏飞,赵星光,郭政,等. 北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(7):1599-1610.
LI Pengfei, ZHAO Xingguang, GUO Zheng, et al. Evolution of strength parameters of Beishan granite under triaxial compression conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(7):1599-1610.

[26] 彭飞. 冻融循环作用下灰岩物理力学特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2022.
PENG Fei. Study on physical and mechanics of limestone under freeze-thaw cycles[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

引用本文:邓云腾,刘轩泽,付俊,等. 不同围压下冻融安山岩力学性能劣化规律[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):137-144.

DENG Yunteng, LIU Xuanze, FU Jun, et al. Deterioration laws of mechanical properties of freeze-thaw andesite under different confining pressures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):137-144.