

冲击荷载作用下冻融红砂岩动力特性及损伤模型

于 洋, 江亲财, 王泽华, 卢毓崑, 郭啟翔, 曾慧明

(华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘 要:为研究冻融岩石在冲击荷载作用下的动态力学特性和损伤演化特征,以寒区红砂岩为研究对象,开展 0、15、30、45、60 次冻融循环试验和动态冲击试验,分析了应变率和冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响,在考虑损伤阈值的损伤演化方程基础上,基于组合元件模型理论和统计损伤理论构建了冻融红砂岩的损伤黏塑性动态本构模型,并验证了模型的合理性及适用性。结果表明:红砂岩存在冻融循环效应和应变率效应,其动态峰值强度随应变率的增加或冻融循环次数的减少而降低,高应变率对冻融损伤的敏感性越强;引入动态峰值强度损失量 γ 可以消除冲击荷载作用下的应变率效应,能更直观地反映不同冲击荷载作用下冻融循环对岩石动态峰值强度的影响,冻融 45 次是损伤阈值点,经过 45 次之后冻融损伤趋于稳定;冻融与未冻融相比,内部形成了尺度较大的裂纹网络,破坏模式由劈裂向剪切破坏转变,冻融环境下力学特性劣化明显;砂岩的线弹性阶段表现明显在经过冻融循环之后,在 D-P 破坏准则的基础上,推导出了考虑损伤阈值的损伤演化方程,更具有合理性。基于朱-王-唐本构模型,引入了损伤体构建的黏弹塑性动态本构方程,体现本构模型的全面性;研究建立的动态本构模型很好地反映了红砂岩在受荷变形过程中所表现出的损伤软化、黏弹性和黏塑性等复杂特性,并且也反映出冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响;所得结论可为研究季节性高寒地区岩石的冲击动态破坏提供参考。

关键词:冻融循环;动态力学;损伤演化;应变率效应;本构模型

中图分类号:TD713 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)05-2437-16

Dynamic characteristics and damage model of freezing thawing red sandstone under impact load

YU Yang, JIANG Qincai, WANG Zehua, LU Yuyin, GUO Qixiang, ZENG Huiming

(State Key Laboratory of Rail Transit Infrastructure Performance Monitoring and Guarantee,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To study the dynamic mechanical properties and damage evolution characteristics of freeze-thaw rocks under impact loads, 0, 15, 30, 45, and 60 freeze-thaw cycle tests and dynamic impact tests were conducted on red sandstone in cold regions. The effects of strain rate and freeze-thaw damage on the dynamic mechanical properties of red sandstone were analyzed. Based on the damage evolution equation considering the damage threshold, a damage viscoplastic dynamic constitutive model of freeze-thaw red sandstone was constructed based on the combination element model theory and

收稿日期: 2024-06-06 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0641

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42177156); 江西省自然科学基金重点资助项目 (20224ACB204021); 国家重点实验室开放基金资助项目 (HJGZ2023201)

作者简介: 于 洋 (1982—), 男, 黑龙江安达人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lukeryuyang@163.com

通讯作者: 江亲财 (1996—), 男, 江西九江人, 硕士研究生。E-mail: 1226729709@qq.com

引用格式: 于洋, 江亲财, 王泽华, 等. 冲击荷载作用下冻融红砂岩动力特性及损伤模型[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2437-2452.

YU Yang, JIANG Qincai, WANG Zehua, et al. Dynamic characteristics and damage model of freezing thawing red sandstone under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2437-2452.



移动阅读

statistical damage theory, and the rationality and applicability of the model were verified. The results show that red sandstone exhibits freeze-thaw cycle effects and strain rate effects, and its dynamic peak strength decreases with the increase of strain rate or the decrease of freeze-thaw cycle times. The higher the strain rate, the stronger the sensitivity to freeze-thaw damage; the introduction of dynamic peak strength loss γ can eliminate the strain rate effect under impact loads and more intuitively reflect the impact of freeze-thaw cycles on the dynamic peak strength of rocks under different impact loads. The damage threshold point is 45 freeze-thaw cycles, and after 45 cycles, the freeze-thaw damage tends to stabilize; compared with unfrozen and thawed environments, a larger scale crack network is formed internally, and the failure mode changes from splitting to shear failure. The mechanical properties deteriorate significantly in the freeze-thaw environment; the linear elastic stage of sandstone exhibits obvious behavior after freeze-thaw cycles. Based on the D-P failure criterion, a damage evolution equation considering the damage threshold is derived, which is more reasonable. Based on the Zhu-Wang-Tang constitutive model, a viscoelastic plastic dynamic constitutive equation for constructing damaged bodies is introduced, reflecting the comprehensiveness of the constitutive model; the dynamic constitutive model established in this article well reflects the complex characteristics of damage softening, viscoelasticity, and viscoplasticity exhibited by red sandstone during load deformation, and also reflects the influence of freeze-thaw damage on the dynamic mechanical properties of red sandstone; the conclusions obtained can provide reference for studying the dynamic impact failure of rocks in seasonal high-altitude and cold regions.

Key words: freeze-thaw cycle; dynamic mechanics; damage evolution; strain-rate effect; constitutive model

0 引 言

季节性高寒地区岩石长期受到冻融循环作用,冻融过程中岩石物理力学性能将出现损伤劣化,极易引发各类冻融灾害^[1-3]。同时,在防护工程建设、岩石爆破开挖、采矿等环境下都要考虑岩石在动载作用下的强度特性^[4]。因此,研究冻融与冲击荷载作用下的岩石力学问题及损伤模型对解决季节性冻土地区工程建设问题起到重要作用。

在试验方面,国内外学者针对冻融岩石的物理力学特性和机制损伤研究成果较多,主要为静载下岩石力学特性、损伤演化等方面^[5-6]。DENG 等^[7]研究了腐蚀和冻融耦合作用下砂岩的物理力学特性的变化规律及劣化机制。FREIRE 等^[8]对冻融花岗岩进行单轴压缩试验,得出了花岗岩的力学参数随冻融次数增加而逐渐降低的结论。张慧梅等^[9]开展了 4 种围压下,不同冻融循环次数下红砂岩的力学特性试验,研究了冻融循环和围压对岩石劣化模式以及物理力学性质的影响规律。李杰林等^[10]通过核磁共振测试和力学试验,得出了岩石的 NMR 孔隙率和谱面积与单轴抗压强度之间的关系式均为指数分布的结论。张慧梅等^[11]开展了砂岩和页岩的冻融循环试验和力学特性试验,对比分析了 2 种岩石冻融损伤的同一性和差异性。得出了砂岩对冻融反应更敏感的结论。还有一些学者对冻融岩石的冲击动力学特性进行了研究,刘德俊等^[12]利用霍普金森压杆,对不同冻融循环条件下砂岩的拉伸性能进行了研究。发现冻融循环对砂岩

动态抗拉强度有很大影响,冻融循环后试样结构损伤,力学性能劣化。楚亚培等^[13]、张春会等^[14]通过一系列相关试验揭示了液氮冻结和冻融环境对煤岩力学特性的影响,获得了液氮冻结和冻融循环后,煤样的弹性模量呈指数函数降低的趋势的结论。张阳阳等^[15]采用岩石试验机和霍普金森压杆试验系统,对岩石进行了静动态劈裂拉伸力学性能试验,对比分析了不同冻融循环次数对静动态力学性能的影响,发现随着循环次数的增加,试件的纵波波速和干密度逐渐减小,而孔隙率和损伤度逐渐增大。以上研究表明了冻融循环岩石静载力学特性方面的研究已很丰富,在动态力学特性方面的研究还稍显匮乏。

在冻融岩石的损伤本构方面,张二峰等^[16]通过冻融循环试验建立了考虑压密阶段修正统计损伤本构模型。李斌等^[17]定义了冻融损伤变量,基于统计强度理论推导出荷载损伤变量,建立了损伤黏弹性本构模型。张蓉蓉等^[18]基于朱-王-唐本构模型,建立了考虑冻融和热循环损伤的红砂岩动态本构模型,对模型的准确性和适用性进行了验证。ZHANG 等^[19]评估了朱-王-唐本构模型中低频参数对冻土的影响后,在改进的朱-王-唐模型中引入损伤,建立了冻土的动态本构模型。MA 等^[20]基于 Lemaitre 等效应变理论,计算出能够反映宏观和细观缺陷耦合效应的损伤变量,基于此建立了 2 种冻土的动态本构模型,并比较了它们的适用性、优缺点。ZHOU 等^[21]提出了一种使岩石以恒定应变率变形的的方法,同时采用考虑应力-应变-应变率的三维散点图法,获得了与应变率相关的动态岩

石本构关系。ZHAO 等^[22]通过量纲分析对修正过应力本构方程进行简化,考虑了损伤软化效应,开发了一个基于损伤的过应力本构模型。

上述研究为正确认识冻融循环下岩石力学特性的变化和损伤本构模型奠定了良好的基础,但也存在以下不足:① 目前关于岩石冻融循环力学特征主要集中在静载力学试验,而动态力学特性研究还需进一步深入。② 基于 D-P 准则建立的损伤演化方程没有考虑到损伤阈值,其适用范围存在一定的局限性。③ 基于朱-王-唐建立的本构模型未考虑损伤软化效应,且建立的本构模型体现的力学性质不够全面。鉴于此,笔者以红砂岩为研究对象,采用 SHPB 试验系统对红砂岩开展冲击试验,研究应变率和冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响,在考虑损伤阈值的损伤演化方程基础上,基于组合元件模型理论和统计损伤理论构建了冻融红砂岩的损伤黏弹塑性动态本构模型,并验证了模型的合理性及适用性。从而为正确认识冻融岩体在冲击荷载作用下力学特性的变化,科学地评价工程岩体的长期稳定性,提供一定的理论依据。

1 红砂岩试样制备和试验方案

1.1 红砂岩试样制备

试样取自甘肃九龙山,该地区处于我国西部,属于季节性寒冻地区,岩石易受冻害影响。为避免试样不均匀性对试验结果产生影响,岩样均取自同一块岩石,岩样颗粒均匀,表面无节理。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 对 SHPB 冲击试验岩样的制作建议对红砂岩进行切割打磨,制作加工成直径 75 mm,高度 37.5 mm 的标准圆柱体岩样,并保证岩样两端面不平行度、端面与侧面不垂直度均小于 0.02 mm。测量岩样的纵波波速,剔除波速离散性较大的试样以确保试验的准确性。在之后的冻融循环试验中,冻融循环次数分别为 0、15、30、45、60 次,将试样根据冻融循环次数的不同共分为 5 组,每组最少取 15 个试样 (SHPB 试验共设置 5 种应变率等级,每个应变率等级取 3 个试样) 和 2 个试样用来扫描电镜的观测。表 1 为各冻融循环次数下红砂岩物理力学参数。

1.2 试验方案

为避免含水量和其他因素对试件强度的影响。将筛选后的岩样放入 70 ℃ 恒温烘箱内干燥处理 24 h,直至岩样恒重。为实现充分饱水,随后将烘干岩样放入真空饱和缸,以 0.1 MPa 压力抽取缸内空气 2 h,直至水面无气泡,然后真空饱和处理 48 h,直至岩样恒重。

首先将饱水岩样放入装有水的容器 (岩样完全浸

表 1 各冻融循环次数红砂岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of red sandstone in each freeze-thaw cycle

冻融次数	岩石编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	单轴抗压 强度/MPa
0	A-1	2.62	2.87	38.34
	A-2	2.64	2.82	38.56
	A-3	2.64	2.79	38.78
	A-4	2.63	2.83	37.97
	A-5	2.63	2.85	38.05
15	B-1	2.56	2.81	35.67
	B-2	2.57	2.77	35.51
	B-3	2.54	2.76	34.98
	B-4	2.57	2.77	36.04
	B-5	2.56	2.78	36.01
30	C-1	2.47	2.72	30.55
	C-2	2.46	2.70	31.62
	C-3	2.50	2.70	30.87
	C-4	2.47	2.69	29.96
	C-5	2.48	2.66	29.9
45	D-1	2.40	2.64	27.63
	D-2	2.41	2.65	27.78
	D-3	2.39	2.63	27.54
	D-4	2.38	2.61	28.01
	D-5	2.40	2.63	27.19
60	E-1	2.34	2.58	25.82
	E-2	2.33	2.55	25.74
	E-3	2.35	2.57	26.58
	E-4	2.32	2.60	25.63
	E-5	2.32	2.55	25.33

没于水中),随后放入冷冻箱内,设定冷冻箱的冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,将岩样冷冻 4 h,随后取出岩样放入恒温水浴箱内以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 溶解 4 h,完成 1 次冻融循环。循环次数为 0、15、30、45、60 次,每组 3 个平行试样。

动态试验采用直径 75 mm 的 SHPB 装置,压杆材料为 40Cr 高强度合金钢,弹性模量为 210 GPa,密度为 7.85 g/cm^3 。冲击杆、入射杆和透射杆长度分别为 5 000 mm、3 000 mm 和 2 500 mm。采用橡胶整形片来减弱波形弥散效应,橡胶整形片的尺寸为直径 30 mm、厚度 2 mm。与此同时,在杆子的接触面通过涂抹适量凡士林来降低端面摩擦效应。图 1 所示为波形平

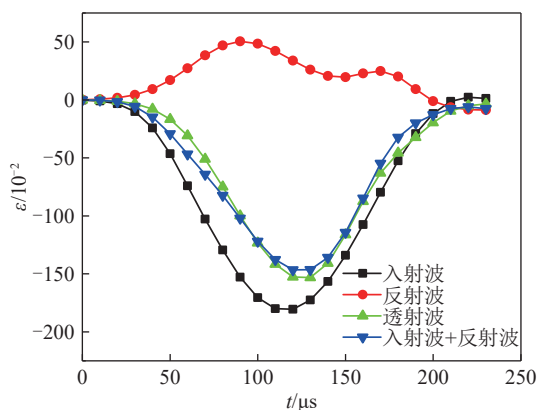


图1 应力均匀性验证

Fig.1 Stress uniformity verification

衡图,从图中可以看出,入射波和发射波相加与透射波发生重合,这表明符合应力均匀性假设。

不同加载条件下的冲击试验可以通过改变撞击杆的冲击速度 v 来实现。以冲击速度 $7.5\sim 11.0\text{ m/s}$ 对不同冻融次数红砂岩进行多次冲击测试,并利用式(1)、

式(2)、式(3)对各冲击加载条件下冻融红砂岩进行了求解,可以得到不同冲击速度下的加载应变率。

$$\sigma_m = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = -\frac{2C}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C}{l_s} \varepsilon_r \quad (3)$$

式中: E 为入射杆、透射杆弹性模量, GPa; A 为入射杆、透射杆横截面积, mm^2 ; A_s 为试样横截面积, mm^2 ; ε_r 为反射应变; ε_t 为透射应变; σ_m 为平均应力, MPa; ε_s 为平均应变; $\dot{\varepsilon}_s$ 为应变率, s^{-1} ; C 为弹性应力波波速, m/s ; l_s 为试样长度, mm 。

为了更好地分析,应变率可采用相近的应变率,见表2,在下文中将对不同应变率下冻融红砂岩测试数据进行分析,应变率采用表中的分析应变率。试验流程如图2所示。

表2 不同冻融次数下选取的应变率

Table 2 Selected strain rates under different freeze-thaw cycles

不同冻融次数下选取的应变率/ s^{-1}					分析应变率/ s^{-1}
冻融0次	冻融15次	冻融30次	冻融45次	冻融60次	
57.45	57.97	58.49	59.30	58.15	58
71.76	71.09	72.85	73.92	72.53	72
88.49	88.46	88.18	87.09	87.83	88
106.96	106.64	105.89	107.90	106.95	107
133.06	133.89	134.86	134.56	134.42	134

2 试验结果分析

2.1 动态全应力-应变曲线特征

图3为动态全应力-应变曲线。从曲线的形态可以看出,在冲击加载过程当中,各冻融次数红砂岩的应力-应变曲线主要经历弹性阶段、屈服阶段及峰后阶段3个阶段。

从图3中可以看出,在加载初期,应力、应变关系呈现出近似线性关系,此阶段变形以弹性变形为主;在弹性变形阶段之后,继续增加荷载会显著增加岩样内部裂纹的数量,此时岩样仅需承受更小的应力而会产生更大的应变,曲线表现出“上凸”形态,岩样进入屈服阶段,该阶段的起点为岩样变形屈服点,使用两点做差法,观察两点应力差与应变差比值的变化,从而可以确定出屈服点。对应的坐标分别为动态屈服应变和动态屈服应力,终点为岩样的变形峰值点,对应的坐标分别为动态峰值应变与动态峰值应力;当应

力达到峰值,继续增加荷载,岩样破坏,岩样承载能力降低,此时岩样处于卸载状态,岩样与加载系统发生脱离。

2.2 应变率效应

砂岩作为一种脆性材料,在较高应变率的冲击荷载作用下会表现出更高的峰值应力,即应变率效应^[23]。图4为不同应变率下红砂岩动态应力-应变曲线。

从图4中可以看出,随着应变率的增高,红砂岩的峰值应力也增大,具有明显的应变率效应。并且材料的峰值应变也随应变率的增大而增大。对于一般应变率敏感的均匀材料,在冲击压缩作用下表现出随应变率提高峰值应力增大而峰值应变反而减小的现象,即所谓的“动脆”现象^[24]。而冻融红砂岩的试验结果有所不同,这是因为:虽然砂岩颗粒较均匀,但是在冻融循环后,砂岩内部孕育并增生了大量的微裂纹,在冲击荷载作用下,其最终破坏结果是应变率硬化和损伤软化共同导致的。在加载的初始阶段,砂岩内部

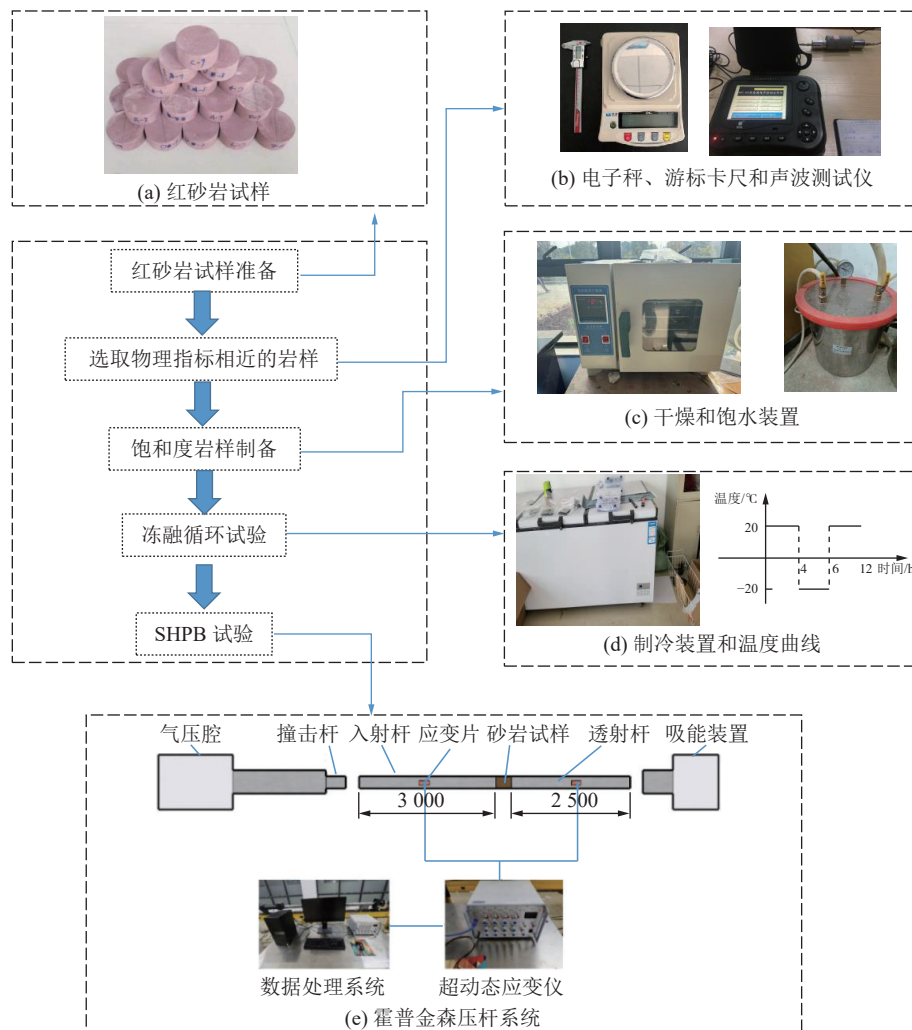


图2 试验流程

Fig.2 Test flow chart

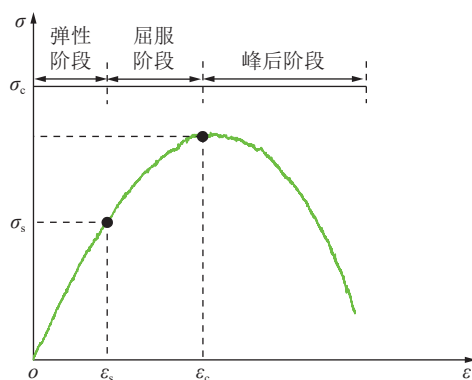


图3 冻融红砂岩典型曲线的阶段特征

Fig.3 Stage characteristics of typical curve of freeze-thaw red sandstone

的微缺陷还来不及扩展,此时应变率硬化起主导作用,应力-应变曲线接近线性。之后随着应力应变的增加,红砂岩内部的微裂隙和孔洞急剧扩张并形成一片损伤区域。应力应变曲线形态变为上凸的非线性曲线。与低应变率的冲击加载相比,在高应变率的冲击荷载

作用下,加载的初始阶段,冻融砂岩内部产生的微裂纹数量更多,从而使高应变下冻融红砂岩的韧性更高。由于变形速度的增加,内部裂隙无法充分扩展,导致损伤路径发现了变化,损伤破坏只能在各自的区域进行,因此提高了冻融砂岩的峰值应力与峰值应变。

2.3 冻融循环效应

冻融循环作为一种特殊的强风化作用,会使材料内部微缺陷增生扩展,对材料的微结构会造成一定程度的损伤,从而影响材料的宏观力学性能。岩石、混凝土等材料在经过冻融循环后会劣化其力学性能^[25-26]。图5反映的是各冻融次数下红砂岩应力与应变之间的关系。

从图5中可知,峰值应力与冻融次数呈负相关。可见冻融循环弱化了砂岩试样抵抗变形的能力,使其力学性能发生了劣化^[27]。当砂岩处于冻结状态时,砂岩试样内部的孔隙水被冻结成冰,体积随之增大,相关研究表明水转化成冰时,体积最大膨胀率为9%^[28]。从曲线的特点来看,应力-应变曲线弹性变形阶段所

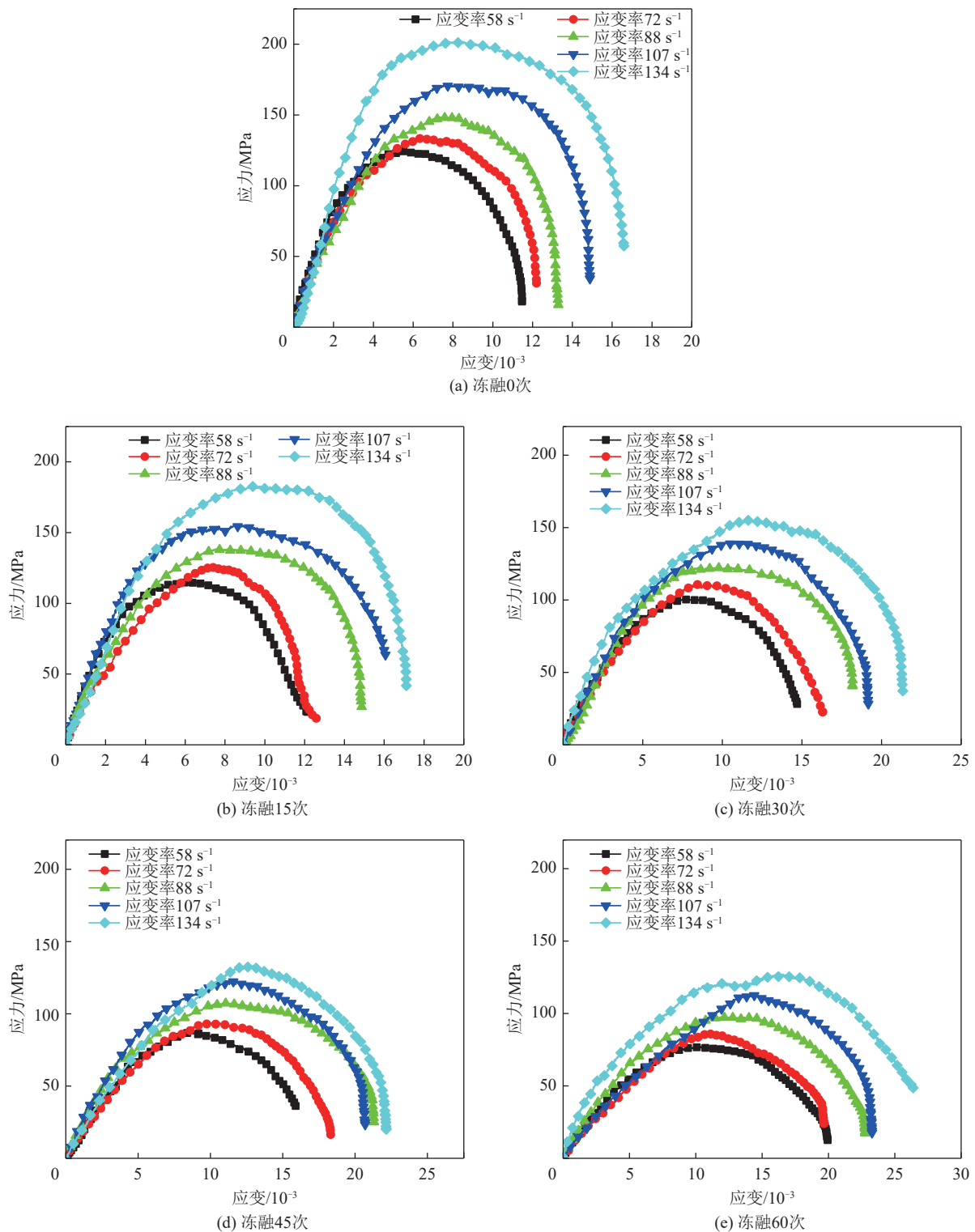


图4 各应变率下冻融红砂岩的动态应力-应变曲线

Fig.4 Dynamic stress-strain curves of freeze-thaw red sandstone under different strain rates

占比例逐渐降低,而屈服阶段所占比例逐渐提高,砂岩进入屈服阶段的时间提前。这是因为冻融损伤加剧,孔隙和微裂隙发育更加剧烈,在荷载的作用下,砂岩的初始损伤产生孔隙和微裂隙进一步被压密。岩石受到的冻融损伤越多,对红砂岩力学性能的劣化越显著。从图5还可以看出,冻融次数较少时,在发现

破坏阶段,曲线的形态呈现出陡直的特点,具有发生脆性破坏的特点;但随冻融次数的增加,在发生破坏阶段的曲线下降趋势趋缓,应变增大,表现出延性破坏的特征。

2.4 动态峰值强度变化特征

图6表现了峰值强度变化特征,从图6a可以看

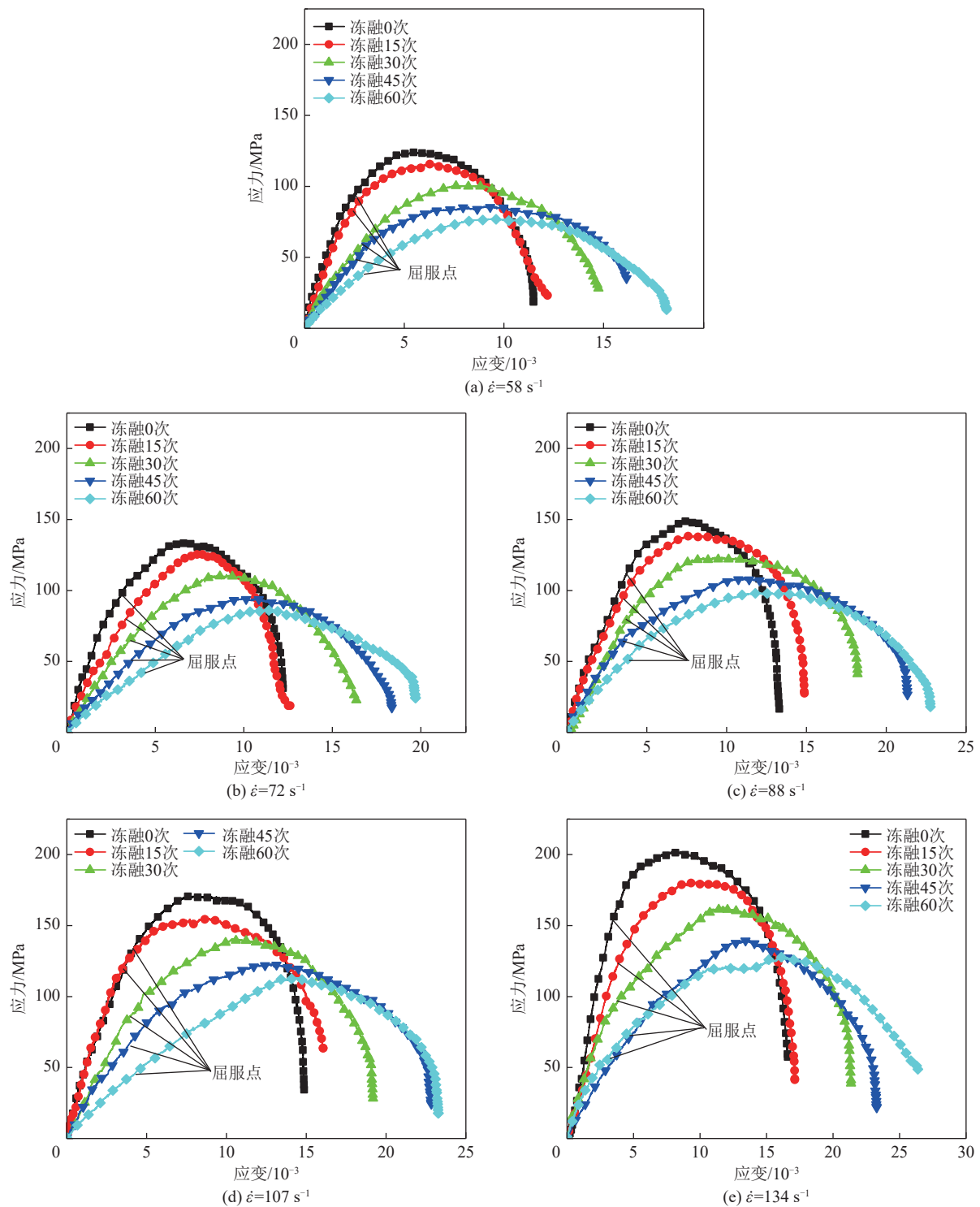


图5 各冻融次数下冻融红砂岩动态应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic stress-strain curves of freeze-thaw red sandstone under different freeze-thaw times

出,直线斜率的绝对值随着应变率的增大而逐渐增大。究其原因,由于动态峰值强度具有应变率效应,应变率越大对峰值强度的强化作用更明显,但冻融循环次数的增加使得红砂岩内部冻融损伤程度更高,内部结构劣化更严重,导致在高应变率下红砂岩动态峰值强度下降更快,即随着应变率的增大,红砂岩动态峰值强度对冻融损伤的敏感性越强。具体来说,当冻融次

数由0次增加到60次,应变率为 58 s^{-1} 和 134 s^{-1} 时,降幅分别为39.8%和44.1%,再一次证实了应变率越大,对冻融损伤越敏感。冻融45~60次的降幅均比冻融15~45的降幅要低,可见,冻融循环45次是一个重要阈值点,在45次之后,冻融损伤已基本趋于稳定。

为了揭示不同应变率下冻融循环次数与红砂岩

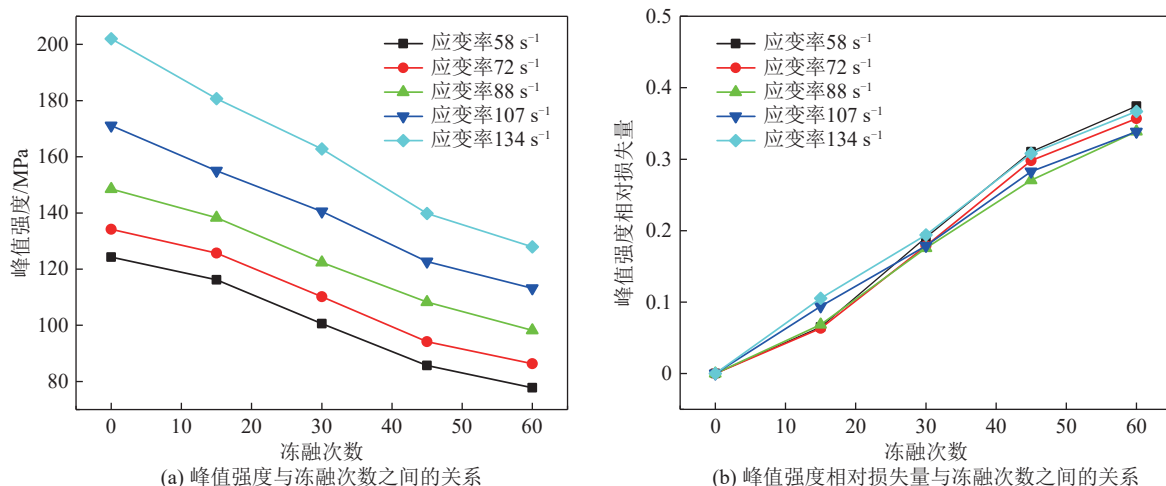


图6 红砂岩峰值强度特征量与冻融次数之间的关系

Fig.6 Relationship between peak strength characteristic quantity of red sandstone and number of freeze-thaw cycles

动态峰值强度变化之间的关系,引入动态峰值强度相对损失量 γ :

$$\gamma = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \quad (4)$$

其中, σ_t 为经历不同冻融次数后岩石的动态峰值强度; σ_0 为冻融 0 次的岩石的动态峰值强度。 γ 反映了不同冻融次数下不同应变率对试样动态峰值强度的影响,根据试验数据作图 6b。图 6b 中不同的应变率下的 5 个曲线相互交叉,这说明应变率介于 58~134 s⁻¹,试样动态峰值强度相对损失量 γ 随冻融循环表现出相似性, γ 受应变率效应较小,因而在研究冲击动态峰值强度应优先考虑冻融损伤的影响。基于 3 条曲线的相似性,从图中不难发现动态峰值强度损失量与冻融循环次数的关系密切,受应变率的影响较小。该直线能在一定程度上反映出在不同应变率下条件下冻融循环对岩石动态峰值强度的影响,对研究冻融岩石的动力学强度提供参考。

图 7 表现了不同应变率对峰值强度损失量的影响,由图不难发现,随应变率的增大,峰值强度损失量呈现出增大的趋势。在低应变率水平时,峰值强度损失量的增幅低于高应变率水平。并且冻融次数越多,此现象越明显。冻融次数的增加,使得内部裂隙增多,结构劣化越严重,应变率的增加,由于加载时间极短,没有足够的时间积累能量,导致峰值强度损失越严重。这也进一步佐证了应变率越大,对冻融损伤的敏感性越强。

3 动态破坏特征和微观损伤分析

3.1 岩石动态破坏特征

不同冻融次数和不同应变率组合条件下的红砂

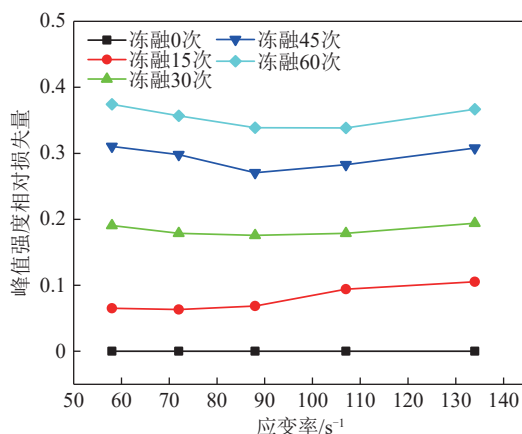


图7 峰值强度损失量与应变率的关系

Fig.7 Relationship between peak strength loss and strain rate

岩动态破坏特征如图 8 所示。从图 8 可以看到,冻融循环次数和应变率对红砂岩破碎形态的影响显著。

在相同冻融循环次数下,随着应变率的增大,红砂岩破碎程度越来越大,碎块尺寸越来越小。以冻融循环 15 次为例,当应变率较小时,红砂岩岩样破碎主体为几块较大的柱状碎块,另有少许碎屑,破坏模式为劈裂破坏;随着应变率提高,柱状碎块数量变少,大量的“三角锥”形碎块开始出现,破裂面变得弯曲并产生了较多粉末,破坏模式为剪切劈裂破坏;当应变率提高到 88 s⁻¹,岩样所吸收的能量更多,导致岩样内部裂纹发育更完全,宏观上则表现为岩样小尺寸碎块更多,破碎程度也更高。

在相同的应变率下,岩样破碎程度也在随着冻融循环次数的增加而增大,以应变率 88 s⁻¹ 为例,冻融 0 次岩样的破坏形态主要为尺寸较大的柱状碎块和少量楔形碎块;冻融 30 次岩样破碎形态主要为小尺寸柱状碎块、楔形碎块以及颗粒状碎块;冻融 60 次岩样

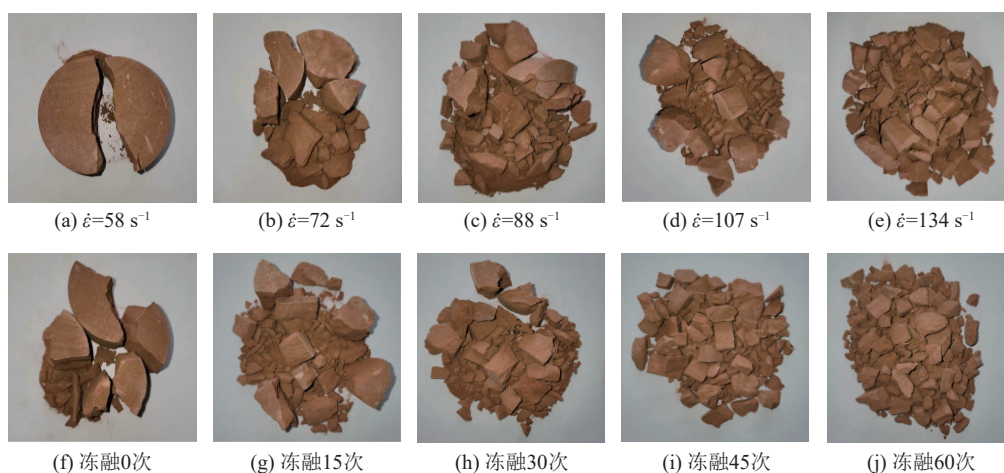


图8 岩石破碎形态

Fig.8 Rock fracture morphology diagram

破碎程度更大,主要为颗粒状碎块。这是由于红砂岩内部裂隙、孔洞在冻融循环作用下发育扩张,内部结构的劣化随着冻融循环次数的增加变得更加严重。

3.2 冻融红砂岩的微观损伤

冻融循环使岩石内部微裂纹的发育得到了扩展,这对岩石的微观形貌有显著影响。本文利用电镜扫描对未冻融和冻融后的砂岩进行观测,如图9所示。

由图9可知,红砂岩的细观形貌随冻融次数的增加发生了较为明显的变化。冻融0次的红砂岩内部孔隙多为微孔隙,不同颗粒之间有胶结物的连接,胶结物质多,黏结稳固,试样结构致密,表面较为平整,有少量岩渣散落在表面。冻融30次之后,观察可发现与未冻融差别比较明显,孔隙中的水分子产生冻胀力,试样表面由于胶结物脱落而不再平整,较为粗糙,结构变得松散,颗粒间的孔隙增大,开始出现小尺度的裂纹网络。冻融60次之后矿物颗粒间胶结物质流失严重,晶体结构变得更加松散,试样内部的孔隙经过扩展、汇合、贯通导致大尺度裂纹网络出现,裂隙的数量和尺度显著增加,这也是导致冻融红砂岩宏观力学性能显著减弱的主要原因。

由此可知,随着冻融损伤的增大,其内部裂隙的数量增多、尺度增大,同时红砂岩的吸水性能较强,在进行冻融循环试验中,更多的水分会参与到冻结中来,体积膨胀的愈严重,胶结物的完整性破坏的也就越严重。再者,红砂岩所含的物质在冻融循环中体积也会随之变化,对岩样内部的结构也会造成一定的破坏。在这双重作用下,严重降低了红砂岩的峰值应力,同时,冲击加载过程中,更多的裂纹等缺陷参与到试样的破坏过程中,成为裂隙发育的前期助力。导致碎块的数量逐渐增多,而碎块的体积尺度会逐渐减小。

针对岩石细观图像的分析,本文采用 Image-

Pro Plus 6.0 图像分析软件。相关参数为:分辨率为 640 pixel×480 pixel,放大倍数为 300 倍。根据像素和实际面积之间的换算,0.67 μm 对应一个像素,基于此

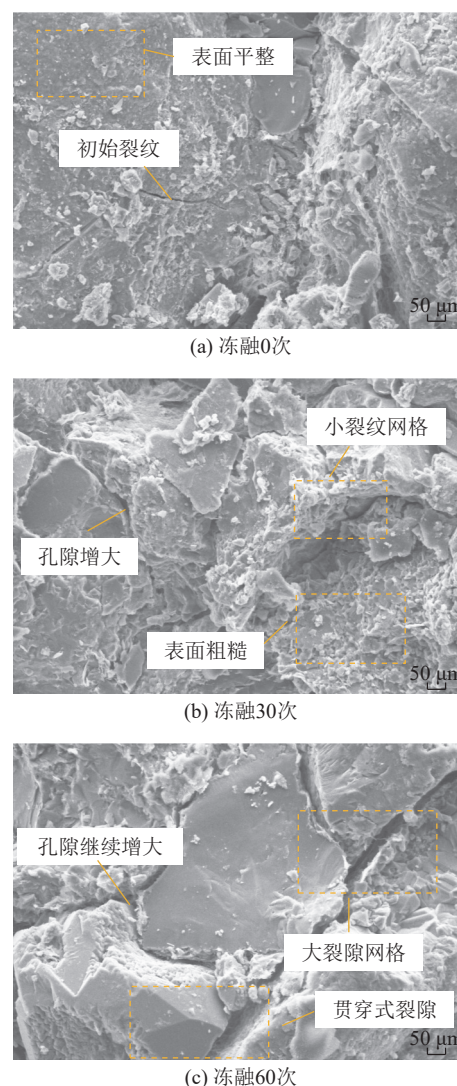


图9 冻融岩石的细观图像

Fig.9 Mesoscopic image of freeze-thaw rock

可以研究冻融红砂岩孔隙面积。对细观图像运用 irregular 工具进行处理。如图 10 所示, 图中的数字代表不同的空隙, 通过对不同的孔隙区域进行点选后。运用计数便可以得到孔隙面积。

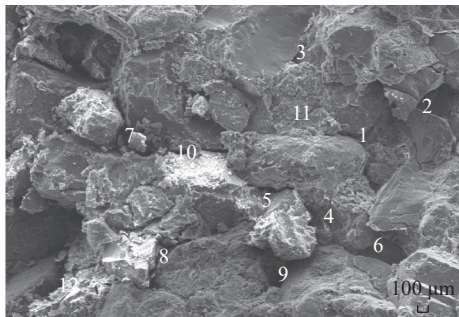


图 10 孔隙区域选择示意

Fig.10 Schematic diagram of pore area selection

将计算得到的数据进行处理, 根据试验数据绘制图 11。

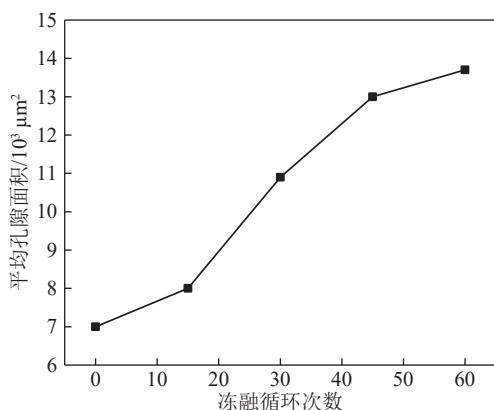


图 11 孔隙面积与冻融次数之间的关系

Fig.11 Relationship between pore area and number of freeze-thaw cycles

从图 11 可以看出, 孔隙面积与冻融次数呈正相关的关系。冻融 15 次试样孔隙面积变化不明显, 但是冻融 45 次和冻融 15 次相比, 提高了 62%, 在冻融 45 次之后, 孔隙面积增长变缓。在冻融 15 次之前, 砂岩矿物颗粒之间联结较紧密, 孔隙面积变化较小。在冻融 15~45 次, 水的润滑作用增强, 颗粒基质间胶结能力减弱, 孔隙率大幅提高。在冻融 45 次之后, 冻融循环产生的劣化影响逐渐趋于稳定, 孔隙率的增幅变缓。

4 本构模型

4.1 冻融-荷载耦合作用下损伤本构方程

随着冻融损伤加剧, 一方面岩石内部微裂隙、孔洞等原生缺陷在水冰相变作用下不断发育扩展, 另一方面, 岩石内部矿物不断收缩与膨胀也加剧了损伤发

育。从宏观唯象学角度出发, 将冻融引起的岩石宏观力学性能劣化情况用损伤变量 D_n 来描述:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (5)$$

式中: D_n 取值范围为 0~1, 分别对应岩石无损与完全损伤状态; E_0 、 E_n 分别为未冻融红砂岩弹性模量和冻融循环 n 次红砂岩弹性模量。

基于 Weibull 分布, 且考虑 D-P 准则, 可得微元体强度表达式^[29]为

$$D_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (6)$$

$$F = (\alpha + 1 / \sqrt{3}) E \varepsilon_1 \quad (7)$$

$$\alpha = \sin \varphi / \sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)} \quad (8)$$

其中, D_f 为统计损伤变量; F 为分布变量微元体强度; F_0 为 Weibull 分布参数; α 与内摩擦角 φ 相关; ε_1 为主应力方向应变。将式 (7) 代入式 (6) 便得到了能反映岩石变形破坏全过程的损伤软化本构方程。

但是基于破坏准则建立的微元体强度表达式虽然考虑了应力状态对微元体强度的影响, 但其仍存在不足, 主要表现为: 一方面, 通过这种方法建立的微元体强度表达式表明岩石只要产生变形就会出现损伤, 但实际上岩石在加载前期处于线弹性状态, 此状态下岩石不会产生损伤, 当外荷载达到某一水平后才会出现损伤。为此, 本文提出了改进后的受荷损伤演化方程。

将岩石的受荷损伤演化过程分为 2 个阶段, 在线弹性阶段, 岩石不产生损伤; 当岩石进入屈服阶段, 微元体强度超过屈服强度, 开始计算岩石损伤。改进后的岩石损伤演化方程为

$$\begin{cases} D_f = 0, & \sigma < \sigma_s \\ D_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F(1-a)}{F_0} \right)^m \right], & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (9)$$

其中, σ 、 σ_s 分别为损伤材料破坏应力和屈服应力; a 为屈服应变与损伤材料应变的比值, 相较于前述损伤演化方程, 考虑损伤阈值的损伤演化方程更具合理性。

考虑到实际工程中, 岩石除了受到外荷载作用外往往还会受到复杂环境的影响, 比如岩石冻融损伤、酸腐蚀损伤和高温损伤等。另外由于岩石内部含有初始损伤, 对此张全胜等^[30]提出了推广后的应变等价原理: 将岩石的初始损伤 (未损伤) 作为一种损伤状态, 并将岩石的复合损伤状态分解为几个独立损伤状态

来应用应变等价原理。

2次运用推广后的应变等价原理,在冻融损伤状态基础上引入荷载引起的统计损伤变量 D_f 和冻融引起的统计损伤变量 D_n 可得到冻融与荷载耦合作用下的复合损伤变量及本构关系:

$$\sigma = E_0(1 - D_n)(1 - D_f)\varepsilon = E_0(1 - D)\varepsilon \quad (10)$$

$$D = D_n + D_f - D_n D_f \quad (11)$$

式中: D 为冻融荷载复合损伤变量。

将式(5)与式(9)代入式(11)可得冻融-荷载复合损伤变量演化方程:

$$\begin{cases} D = 1 - \frac{E_n}{E_0}, \sigma < \sigma_s \\ D = 1 - \frac{E_n}{E_0} \exp \left[-\left(\frac{F(1-a)}{F_0} \right)^m \right], \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)便得到了同时考虑冻融损伤效应和冲击荷载损伤软化效应的损伤本构方程:

$$\begin{cases} \sigma = E_n \varepsilon, \sigma < \sigma_s \\ \sigma = E_n \exp \left[-\left(\frac{F(1-a)}{F_0} \right)^m \right] \varepsilon, \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (13)$$

4.2 冻融砂岩黏弹塑性动态本构方程建立

岩石受荷变形所表现出的损伤软化效应,是建立本构模型不可忽略的因素,对于冲击荷载,朱-王-唐本构模型可以很好地反映在较大应变率范围内的材料的非线性黏弹特性,但是没有考虑到微缺陷发育引起的损伤软化效应,对此本文将能反映岩石损伤演化规律的损伤体 D 引入组合模型并与损伤体并联。当岩石处于高应变率加载时,岩石材料的黏性更加明显,应力应变的非线性关系会表现更突出,塑性屈服阶段延长,岩石主要表现为黏塑性^[31],故将黏性体和塑性体并联再串联一个弹性体可得到反映岩石变形黏弹塑性特性的宾汉姆体,最后与损伤体和麦克斯韦体并联。这样便得到了兼顾岩石损伤特性、弹性、黏性和塑性的组合元件力学模型,组合模型如图12所示。

图12中, σ_D 、 ε_D 和 D 分别为损伤体应力、应变和损伤变量; σ_{11} 、 ε_{11} 、 E_1 和 σ_{12} 、 ε_{12} 、 η_1 分别为麦克斯韦

体中弹性体的应力、应变、弹性模量和黏性体的应力、应变、黏滞系数。 σ_{21} 、 ε_{21} 、 E_2 和 σ_{22} 、 ε_{22} 、 η_2 分别为宾汉姆体中弹性体的应力、应变、弹性模量和黏性体的应力、应变、黏滞系数。 σ_{23} 、 ε_{23} 和 σ_s 分别为宾汉姆体中塑性体的应力、应变和屈服应力。

对于损伤体的本构方程已在前面推导得出:

$$\begin{cases} \sigma = E_n \varepsilon, \sigma < \sigma_s \\ \sigma = E_n \exp \left[-\left(\frac{F(1-a)}{F_0} \right)^m \right] \varepsilon, \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (14)$$

对于麦克斯韦体,根据力学元件串联规则得:

$$\sigma_1 = \sigma_{11} = \sigma_{12} \quad (15)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} \quad (16)$$

其弹性体和黏性体本构关系分别为

$$\varepsilon_{11} = \sigma_{11} / E_1 \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \dot{\sigma}_{11} / E_1 \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_{12} = \sigma_{12} / \eta_1 \quad (19)$$

将式(18)与式(19)代入式(16)可得麦克斯韦体本构关系:

$$\sigma_1(t) = \dot{\varepsilon}_1 \eta_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{E_1}{\eta_1} \right) \right] \quad (20)$$

对于宾汉姆体,根据力学元件串并联规则得:

$$\sigma_2 = \sigma_{21} = \sigma_{22} \quad (21)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} \quad (22)$$

其弹性体本构关系为

$$\varepsilon_{21} = \sigma_{21} / E_2 \quad (23)$$

$$\dot{\varepsilon}_{21} = \dot{\sigma}_{21} / E_2 \quad (24)$$

黏塑性体本构关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_{22} = \varepsilon_{23} & \dot{\varepsilon}_{22} = \frac{\sigma_{22} - \sigma_s}{\eta_2}, \sigma_{23} \geq \sigma_s \\ \varepsilon_{22} = 0 & \dot{\varepsilon}_{22} = 0, \sigma_{23} < \sigma_s \end{cases} \quad (25)$$

将式(24)与式(25)代入式(22)便得到了宾汉姆体本构关系式:

$$\begin{cases} \sigma_2 = (\dot{\varepsilon}_2 \eta_2 + \sigma_s) [1 - \exp(-E_2 / \eta_2)], \sigma_{23} \geq \sigma_s \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2, \sigma_{23} < \sigma_s \end{cases} \quad (26)$$

最后将式(14)、式(20)与式(26)根据串并联便得到了组合模型本构关系:

$$\begin{cases} \sigma = E_n \varepsilon + \dot{\varepsilon} \eta_1 [1 - \exp(-E_1 / \eta_1)] + E_2 \varepsilon, \sigma < \sigma_s \\ \sigma = E_n \exp \left[-\left(\frac{F(1-a)}{F_0} \right)^m \right] \varepsilon + \dot{\varepsilon} \eta_1 [1 - \exp(-E_1 / \eta_1)] + (\dot{\varepsilon} \eta_2 + \sigma_s) [1 - \exp(-E_2 / \eta_2)], \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (27)$$

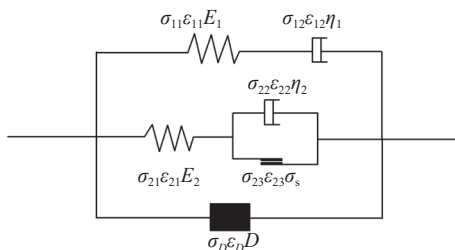


图12 组合元件力学模型

Fig.12 Mechanical model of combined components

为了方便对试验数据进行拟合,拟合过程中减少因变量个数,考虑到 $\dot{\varepsilon}$ 为定值,则有 $\varepsilon = \dot{\varepsilon}t$,令 $\theta_1 = E_1/\dot{\varepsilon}\eta_1$, $\theta_2 = E_2/\dot{\varepsilon}\eta_2$,将其代入式(27),另外考虑到岩石属于脆性材料,其塑性变形能力较小,本文认为岩石进入屈服阶段时的应力值与岩石出现损伤时的应力阈值近似相等^[32],并且前文所述当应变率介于 $58 \sim 134 \text{ s}^{-1}$,动态峰值强度受应变率效应较小,为此,时间便为定值1,这样便建立了不考虑时间效应的岩石损伤软化黏弹塑性的动态本构方程:

$$\begin{cases} \sigma = E_n \varepsilon + \frac{E_1}{\theta_1} [1 - \exp(-\varepsilon\theta_1)] + E_2 \varepsilon, \sigma < \sigma_s \\ \sigma = E_n \exp[-(F(1-a)/F_0)^m] \varepsilon + \\ \frac{E_1}{\theta_1} [1 - \exp(-\varepsilon\theta_1)] + \\ \left(\frac{E_2}{\theta_2} + \sigma_s\right) [1 - \exp(-\varepsilon\theta_2)], \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (28)$$

4.3 本构模型验证

上述反映岩石损伤软化黏弹塑性的动态本构方程中,需要确定6个参数: θ_1 、 θ_2 、 E_1 、 E_2 、 m 和 F_0 。本构模型中涉及到的参数中,屈服应力 σ_s 通过应力应变曲线屈服阶段起始点确定,冻融损伤状态下的弹性模量 E_n 可以通过常规单轴压缩试验来获得。微元体强度 F 与内摩擦角 φ 有关,内摩擦角反映了岩石颗粒间摩擦特性与抗剪强度,已有研究表明内摩擦角对损

伤本构模型没有影响或者影响很小^[33],因此,参考相关研究,人为确定了两参数的合理取值,将冻融0、15、30、45、60次红砂岩内摩擦角设定为 34° 、 32° 、 30° 、 28° 和 26° ^[29]。 θ_1 、 θ_2 与 E_1 、 E_2 和 η_1 、 η_2 相关,黏滞系数需要通过蠕变试验来确定,但根据戚承志等^[34]的研究表明,岩石材料黏滞系数在动载作用下会表现出应变率相关性,受试验条件所限, η_1 、 η_2 由试验数据拟合来确定。综上所述,本构模型中需要确定的参数则变为 η_1 、 η_2 、 E_1 、 E_2 、 m 和 F_0 。

为了验证本文建立的动态本构模型的合理性,对各冻融循环次数下的红砂岩动态应力应变曲线进行拟合,试验曲线和理论曲线对比情况如图13所示,限于篇幅,图中仅示出了部分理论曲线与试验曲线的对比情况,动态本构模型参数的拟合结果见表3。

从图13可以看出,本文所建立的基于统计、损伤理论和组合元件模型理论的损伤软化黏弹塑性动态本构方程所得出的理论结果与试验结果吻合较好,其具体表现为

1) 理论曲线反映出了红砂岩变形破坏的全过程,尤其是损伤软化效应,还体现了红砂岩在屈服阶段前弹性线弹性的特点,另一方面,随着冻融循环次数增加,理论曲线也很好反映了冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响。

2) 本文建立的本构模型与试验曲线峰值点的峰

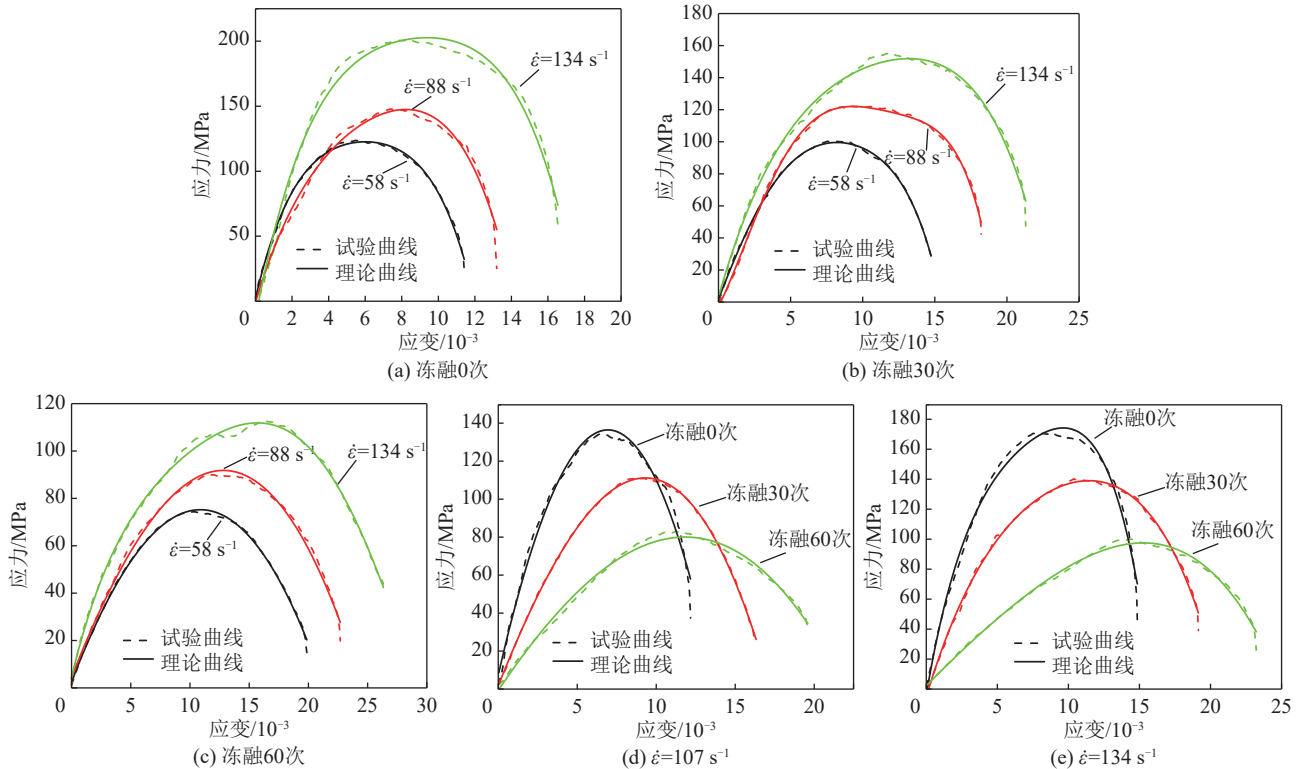


图13 试验曲线与理论曲线对比结果

Fig.13 Comparison of test and theoretical curves

表 3 本构模型参数拟合结果
Table 3 Constitutive model parameter fitting results

冻融次数	应变率/ s^{-1}	E_n/GPa	η_1	η_2	E_1/GPa	E_2/GPa	m	F_0	$\varphi/(^{\circ})$
0	58	30.3	0.149	0.452	10.8	16.7	2.05	100.2	34
	72	29.8	0.152	0.448	11.7	18.1	1.98	111.1	32
	88	28.6	0.146	0.445	10.8	16.7	1.88	119.3	30
	107	30.5	0.141	0.447	11.4	17.2	1.73	139.1	28
	134	29.2	0.139	0.442	14.3	21.5	1.58	158.0	26
15	58	23.5	0.136	0.406	9.8	16.2	1.97	94.1	34
	72	24.1	0.132	0.403	7.4	11.5	2.06	101.2	32
	88	24.7	0.133	0.389	8.3	13.0	1.80	111.7	30
	107	23.6	0.130	0.385	10.6	15.4	1.68	123.0	28
	134	22.4	0.126	0.383	12.2	18.9	1.52	148.4	26
30	58	17.8	0.124	0.357	5.3	9.3	1.47	81.2	34
	72	18.2	0.123	0.355	6.6	8.9	1.43	89.9	32
	88	18.5	0.125	0.353	7.3	11.7	1.27	98.4	30
	107	17.3	0.119	0.354	6.8	12.5	1.32	114.9	28
	134	16.9	0.120	0.352	8.1	10.2	1.25	128.8	26
45	58	13.2	0.116	0.314	4.5	7.0	1.20	66.7	34
	72	12.5	0.112	0.311	4.4	6.9	1.10	75.6	32
	88	12.1	0.109	0.306	5.2	7.9	0.91	89.6	30
	107	12.9	0.108	0.302	5.3	8.3	1.08	99.2	28
	134	13.5	0.105	0.295	4.8	7.4	1.14	105.9	26
60	58	9.6	0.108	0.269	3.1	4.8	0.98	59.4	34
	72	9.2	0.105	0.263	2.9	4.5	1.00	66.8	32
	88	8.8	0.106	0.265	3.3	5.1	0.95	73.0	30
	107	8.6	0.103	0.262	2.6	4.1	0.97	79.0	28
	134	9.2	0.102	0.258	4.2	6.3	0.82	88.3	26

值应变随冻融次数和应变率的变化有一定的波动,而峰值应力随冻融次数的变化是不大的,误差在 1% 以内。压密阶段和弹性阶段的拟合度更高,能较好的反映岩石的弹性模量和峰值应力。

3) 理论曲线还反映出了当岩石处于低应变率加载,岩石的黏性机制对红砂岩动力强度的贡献并不明显,岩石主要表现为黏弹性,塑性变形较小;随着应变率提高,岩石的黏滞性开始发挥不可忽视的作用,应变率强化效应显著,岩石主要表现为黏塑性,岩石在进入屈服阶段后随着变形增大,应力应变曲线在峰值前后出现了显著的塑性变形阶段,出现了较大塑性平台。

5 讨 论

为了验证本文建立的动态本构模型的适用性,对文献[18]中冻融红砂岩动态应力应变曲线进行拟合并

将拟合结果与文献[18]的拟合结果做对比,如图 14 所示,文献[18]试验参数见表 4。

从图中可以看出,文献[18]所提出的朱-王-唐动态本构模型虽然能较好地拟合试验曲线,但在峰前阶段其理论曲线与试验曲线相差较大,主要原因在于:

1) 根据朱-王-唐本构模型中没有考虑岩石塑性的力学元件,在高应变率下,考虑到岩石的黏性机制,岩石强度除了表现出应变率强化效应外,黏塑性也需在岩石变形过程中重点考虑。从图 8 可以看到,文献[18]冻融 0、10、20 次红砂岩应力应变理论曲线均滞后于试验曲线进入屈服阶段,理论曲线屈服阶段较短,而试验曲线屈服阶段较长,理论曲线不能很好地体现岩石塑性变形特性。

2) 从改进后的朱-王-唐本构模型可以看到,模型虽然考虑了材料冻融损伤和受荷损伤软化效应,将损伤因子引入模型中,但其在原本构方程前乘以损伤因

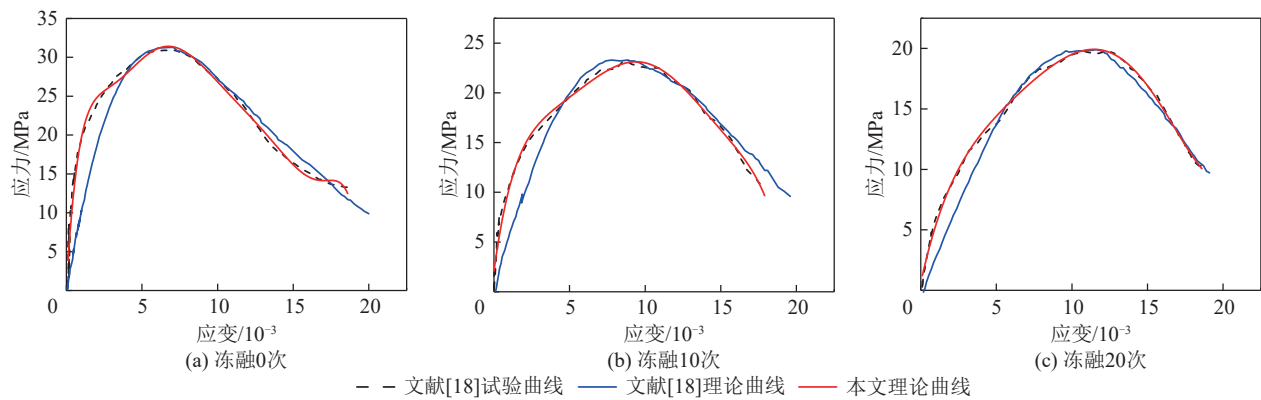


图 14 本文与文献[18]试验曲线拟合情况对比

Fig.14 Comparison of experimental curves fitting between this article and Reference [18]

表 4 文献[18]试验曲线拟合参数

Table 4 Reference [18] test curves fitting parameter values

冻融次数	应变率/s ⁻¹	E_n /GPa	η_1	η_2	E_1 /GPa	E_2 /GPa	m	F_0	σ_s /MPa	φ (°)
0	193	31.5	0.147	0.461	2.32	6.02	5.32	171.22	21.2	32
10	209	24.1	0.135	0.412	1.47	4.95	4.54	146.58	12.5	30
20	201	15.4	0.126	0.350	1.03	3.25	3.28	110.64	8.2	28

子对整个模型做损伤处理,代表黏性体也受到损伤,但实际上黏性体不会受到损伤,改进后的朱王唐本构模型合理性有待商榷。

综上所述,文献[18]理论曲线弹性模量小于试验曲线,并且理论曲线屈服阶段不能体现实际情况,造成峰前阶段理论曲线与试验曲线相差较大。而本文建立的动态本构模型的理论曲线与其试验曲线吻合度更高,存在合理性偏差,表明本文提出的损伤软化黏弹塑性动态本构模型不仅可以体现出冻融损伤对岩石力学性能的劣化,还体现了红砂岩在动载作用下变形的复杂特性。

6 结 论

- 1) 红砂岩存在冻融循环效应和应变率效应,其抗压强度随应变率的增加或者冻融循环次数的减少而降低。高应变率对冻融损伤的敏感性越强。通过动态峰值强度损失量的引入可以消除冲击荷载对红砂岩的应变率效应,能更直观的反映不同冲击荷载作用下冻融循环对岩石动态峰值强度的影响。
- 2) 随着冻融循环次数的增加,弹性变形阶段所占比例逐渐降低,砂岩进入屈服阶段的时间提前,延性提高,冻融 45 次是冻融损伤阈值点。破坏模式由劈裂向剪切破坏转变,经过冻融之后,内部形成了尺度较大的裂纹网络。冻融环境下力学特性劣化明显。
- 3) 冻融循环砂岩的线弹性阶段明显,在 D-P 破坏准则的基础上,推导出了考虑损伤阈值的损伤演化方

程,更具有合理性。引入了损伤体构建的黏弹塑性动态本构方程,体现了本构模型的全面性。

4) 建立的动态本构模型很好地反映了红砂岩在受荷变形过程中所表现出的损伤软化、黏弹性和黏塑性等复杂特性,并且也反映出冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响,验证了本文建立的本构模型的合理性。

参考文献(References):

[1] 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.
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.

[2] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 452–471.
LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 452–471.

[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] 刘石,许金余,刘军忠,等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1864–1871.
LIU Shi, XU Jinyu, LIU Junzhong, et al. Shpb experimental study of

- sericite-quartz schist and sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1864–1871.
- [5] LI J, ZHOU K, LIU W, et al. NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(11): 2997–3003.
- [6] 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.
- [7] DENG H W, DONG C F, LI J L, et al. Experimental study on sandstone freezing-thawing damage properties under condition of water chemistry[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 608–609: 726–731.
- [8] FREIRE-LISTA D M, FORT R, VARAS-MURIEL M J. Freeze-thaw fracturing in building granites[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 113: 40–51.
- [9] 张慧梅, 夏浩峻, 杨更社, 等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 441–448.
- ZHANG Huimei, XIA Haojun, YANG Gengshe, et al. Experimental research of influences of freeze-thaw cycles and confining pressure on physical-mechanical characteristics of rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 441–448.
- [10] 李杰林, 周科平, 波柯. 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 Jielin, ZHOU Keping, BO Ke. 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.
- [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 Huimei, YANG Gengshe. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1756–1762.
- [12] 刘德俊, 浦海, 沙子恒, 等. 冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 60–67.
- LIU Dejun, PU Hai, SHA Ziheng, et al. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 60–67.
- [13] 楚亚培, 张东明, 杨瀚, 等. 液氮冻结和冻融循环作用下煤样力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 82–92.
- CHU Yapei, ZHANG Dongming, YANG Han, et al. Study on evolution law of mechanical properties of coal samples subjected to freezing and freeze-thaw cycles of liquid nitrogen[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 82–92.
- [14] 张春会, 耿哲, 徐刚, 等. 液氮冻融循环作用下饱水煤样力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(10): 218–224.
- ZHANG Chunhui, GENG Zhe, XU Gang, et al. Experimental study on mechanical properties of saturated coal samples subjected to freezing-thawing cycles of liquid nitrogen[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(10): 218–224.
- [15] 张阳阳, 黄伟. 冻融循环后红砂岩静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.
- [16] 张二锋, 刘慧, 康跃明, 等. 冻融受荷砂岩力学性能劣化与统计损伤模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(5): 84–91.
- ZHANG Erfeng, LIU Hui, KANG YueMing, et al. Study on deterioration of mechanical properties and statistical damage model of freeze-thaw loaded sandstone[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 84–91.
- [17] 李斌, 朱志武, 李涛. 冻融循环冻土的冲击动态力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(9): 164–178.
- LI Bin, ZHU Zhiwu, LI Tao. Impact dynamic mechanical properties of frozen soil with freeze-thaw cycles[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 164–178.
- [18] 张蓉蓉, 经来旺, 马冬冬. 冻融和热冲击循环作用后红砂岩 SHPB 试验和本构模型研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(9): 267–275.
- ZHANG Rongrong, JING Laiwang, MA Dongdong. SHPB tests and constitutive model of red-sandstone after freeze-thaw and thermal shock cycles[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(9): 267–275.
- [19] ZHANG F L, ZHU Z W, FU T T, et al. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 140: 103217.
- [20] MA D D, XIANG H S, MA Q Y, et al. Dynamic damage constitutive model of frozen silty soil with prefabricated crack under uniaxial load[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 147(6): 04021033.
- [21] ZHOU Z L, LI X B, YE Z Y, et al. Obtaining constitutive relationship for rate-dependent rock in SHPB tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 697–706.
- [22] ZHAO G M, XIE L X, MENG X R. A damage-based constitutive model for rock under impacting load[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(4): 505–511.
- [23] 董凯, 任辉启, 阮文俊, 等. 珊瑚砂应变率效应研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(9): 30–39.
- DONG Kai, REN Huiqi, RUAN Wenjun, et al. Study on strain rate effect of coral sand[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 30–39.
- [24] 巫绪涛, 胡时胜, 陈德兴, 等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(2): 125–131.
- WU Xutao, HU Shisheng, CHEN Dexing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(2): 125–131.
- [25] LI B, ZHU Z W, NING J G, et al. Viscoelastic-plastic constitutive model with damage of frozen soil under impact loading and freeze-thaw loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 214: 106890.
- [26] JIN S S, ZHENG G P, YU J. A micro freeze-thaw damage model of concrete with fractal dimension[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119434.
- [27] ZHANG Z Y, LIU Q, WU Q, et al. Damage evolution of asphalt mixture under freeze-thaw cyclic loading from a mechanical perspective[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105923.
- [28] ZENG W, DING Y N, ZHANG Y L, et al. Effect of steel fiber on

- the crack permeability evolution and crack surface topography of concrete subjected to freeze-thaw damage[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 138: 106230.
- [29] 朱晶晶, 李夕兵, 宫凤强, 等. 单轴循环冲击下岩石的动力学特性及其损伤模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(3): 531–539.
- ZHU Jingjing, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. Dynamic characteristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(3): 531–539.
- [30] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 30–34.
- ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 30–34.
- [31] 陈思羽, 王青成, 杨立云. 类岩石材料动态本构模型研究进展[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 115–126.
- CHEN Siyu, WANG Qingcheng, YANG Liyun. Review of dynamic constitutive models of rock-like materials[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(8): 115–126.
- [32] 翟越, 赵均海, 李寻昌, 等. 岩石类材料损伤黏弹塑性动态本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S2): 3820–3824.
- ZHAI Yue, ZHAO Junhai, LI Xunchang, et al. Study of damage viscoelasto-plastic dynamic constitutive model of rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S2): 3820–3824.
- [33] 袁超, 张慧梅, 孟祥振, 等. 内摩擦角对冻融岩石损伤本构模型的影响探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(4): 138–143.
- YUAN Chao, ZHANG Huimei, MENG Xiangzhen, et al. Influence of internal friction angle on damage constitutive model of freeze-thaw rock[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(4): 138–143.
- [34] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 177–181.
- QI Chengzhi, QIAN Qihu. Physical mechanism of dependence of material strength on strain rate for rock-like material[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 177–181.