

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0122

冻融后硫铝酸盐陶粒混凝土动态压缩力学性能研究

李哲^{1,2,3}, 李萌萌², 薛文², 陈江瑛^{1,2,3*}

(1.宁波大学 压力容器与管道安全浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211; 2.宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211; 3.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 硫铝酸盐水泥具有快凝早强特点, 是冬季施工、抢修和抢建工程的首选水泥用料, 由此对陶粒体积分数为 40% 的硫铝酸盐陶粒混凝土受冻融循环影响的动态力学性能进行研究。结果表明, 冻融循环周次增加或其最低温度降低都会使材料的抗压强度下降。动态试验的数值模拟表明, 未冻融硫铝酸盐陶粒混凝土试样的应力—应变曲线和破坏形态与试验结果吻合较好。动态压缩试验的细观仿真结果显示, 陶粒混凝土中骨料与基体的界面过渡区是其内部结构的薄弱环节, 在动态压缩过程中容易形成裂纹。

关键词: 陶粒混凝土; 冻融循环; 细观损伤; 数值模拟

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 02-0094-08

混凝土是目前世界上使用量最大的建筑材料。随着建筑节能环保理念的提出和高层、大跨度建筑的增加, 陶粒混凝土以其轻质、保温、抗震抗渗性良好等诸多优点备受重视^[1-3]。

在寒冷地区, 混凝土结构容易受冻融循环作用破坏, 因此研究冻融后的混凝土动态力学性能具有重要意义。当混凝土周围环境温度低于零度时, 周围水分会逐步形成冰晶、霜等物质, 随即对混凝土内部结构造成影响。Powers 等^[4]研究发现混凝土内部较低的环境温度使孔隙内的水变成冰晶, 由于冰的化学势较低, 周围凝胶孔隙中未冻结的水向冻结毛细管迁移。这种现象引发了内部毛细管的膨胀和凝胶孔隙的收缩, 这也是混凝土冻融循环造成损伤的主要原因。Penttala 等^[5]提出混凝土孔隙内空气在冻结过程中产生负压, 导致混凝土收缩。关于提高混凝土抗冻性能的研究发现, 混凝土掺减水剂^[6]和添加特殊处理过后的再生砌体骨料^[7]都能有效提升混凝土的抗冻性能。许多学者对陶粒混凝土冻融后的力学性能开展了研究。满晨等^[8]对煤矸石陶粒混凝土在冻融影响下的抗压、抗

折和抗劈裂等力学性能变化进行研究分析, 总结其衰变规律。袁立月等^[9]对冻融劣化后陶粒混凝土的相对动弹模量与相对抗压强度相关性进行了研究。肖圣哲等^[10]利用分离式霍普金森杆(SHPB)对不同冻融循环温度影响后不同体积分数的页岩陶粒混凝土进行动态试验, 研究陶粒混凝土动态抗压性能与冻融循环温度的规律。Huang 等^[11]通过 SHPB 试验研究陶粒混凝土在高应变率下的应力平台期以及冻融循环作用后硅酸盐混凝土力学性能变化, 并加以仿真模拟。随着计算机性能和数值计算技术的快速发展, 相对快捷、直观的数值模拟分析在预测材料或结构的力学响应以及加快研究设计进度上优势明显, 因而被广泛采用。

数值模拟方法作为试验分析的补充和完善为混凝土破坏机理的研究提供了新的思路。在混凝土材料的细观分析方面, 目前常用的混凝土细观模型按建模方法分为三类: (1)利用计算机图像分析和 X 射线进行断层扫描, 得到混凝土的细观模型^[12]; (2)先生成骨料的几何体, 再确定骨料中心, 根据算法判断是否与其他骨料相交^[13]; (3)Voronoi

收稿日期: 2024-01-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市重点研发计划项目(2022Z209); 国家自然科学基金(11572163, 11832013)。

第一作者: 李哲, 硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土动态力学性能. E-mail: 2111081009@nbu.edu.cn

*通信作者: 陈江瑛, 博士/教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

方法结合骨料生成和放置过程,但很难控制骨料的形状和级配^[14].有限元仿真软件中,LS-DYNA作为通用的动态分析软件适用于解决爆炸、高速碰撞等非线性动态冲击问题,得到广泛应用.Ma等^[15]对高强度珊瑚骨料海水混凝土和剑麻纤维增强高强度珊瑚骨料海水混凝土进行 SHPB 试验并利用 LS-DYNA 模拟分析,研究了不同应变率对两种混凝土力学性能的影响.Wang等^[16]利用 LS-DYNA 模拟了单向预应力混凝土板在低速落锤冲击下的动力响应,研究预应力对混凝土板的抗冲击性能的影响.

高寒冷地区(可低至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)极端恶劣环境下的建筑工程和军事防护工程修建对混凝土冻融循环影响的力学性能研究提出了更高要求,但关于低温冻融的影响,大多是停留在 $-20\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的性能研究,而更低温度(如 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的研究少有报道.本文采用的混凝土胶凝材料为硫铝酸盐水泥,其具有快凝早强特点,是冬季施工、抢修和抢建、配制喷射混凝土等工程的首选水泥用料,且硫铝酸盐陶粒混凝土及其冻融循环影响的动态力学性能鲜有研究.本文研究硫铝酸盐陶粒混凝土(Sulfoaluminate Ceramic Concrete, SCC)动态压缩力学性能以及在极低温环境冻融循环后其动态压缩力学性能的变化情况,利用 LS-DYNA 模拟 SCC 试样的动态压缩试验,分析 SCC 试样的冲击损伤演化规律,可为 SCC 在工程方面的应用提供指导.

1 试验方法

1.1 试样制备

制备尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,陶粒体积分数为40%的硫铝酸盐陶粒混凝土试样,设计强度为LC50.粗骨料采用碎石型页岩陶粒,具体

参数见表1.细骨料采用粒径级配为II区的中砂河砂,细度模数为2.7,表观密度为 $1\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度为 $1\,630\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,试样水灰比0.35.硫铝酸盐水泥采用P·O42.5的世利牌硫铝酸盐水泥,对制备完成的试样进行标准养护.

表1 碎石型页岩陶粒参数

参数	数值
直径/mm	5~20
堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	744
表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 368
筒压强度/MPa	4.25
24小时吸水率/%	4.48

1.2 冻融循环试验

将标准养护28d并端面磨平的SCC试样放入低温冻融循环试验机中进行冻融循环试验.参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB-T 50082—2009)进行试样的快速冻融试验,每次冻融时长5~8h,冻融转换时间10min.冻融循环试验设置3组不同冻融循环温度和5组不同冻融循环次数,在每10次冻融循环后取出全部试样,并在常温水中浸泡,记录试验前后试样质量、超声波波速以及弹性模量.

1.3 动态压缩试验

在霍普金森束杆装置(Bundled Split Hopkinson Pressure Bar, BSHPB)上进行试样的动态压缩试验,BSHPB装置如图1所示.该装置主要由发射加载装置、子弹、转换杆、转换块、入射束杆、透射束杆、吸收装置等组成.子弹和转换杆长度分别为400、800mm,直径为74mm的圆杆,转换块为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的方块,入射和透射压杆由5行×5列的25根方杆构成,尺寸分别为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$ 与 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 1\,000\text{ mm}$,各单杆间隙为1mm,用于贴应变片来采集应力波信号.

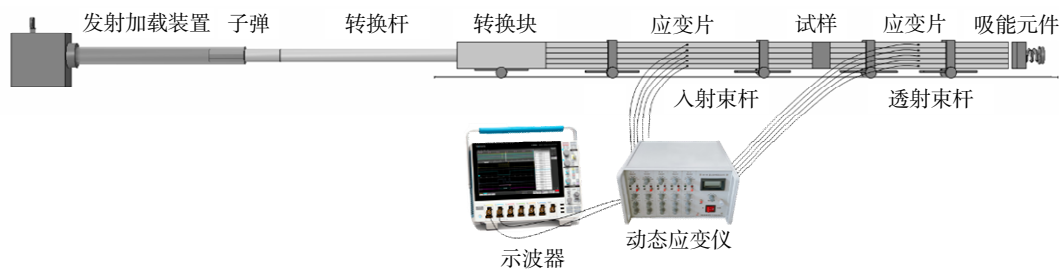


图1 束杆装置示意图

BSHPB 试验装置中子弹、转换杆、转换块、入射束杆、透射束杆的材质均为优质钢。

试验时, 释放气压驱动子弹撞击转换杆和转换块, 并使应力波通过入射束杆和透射束杆间的试样实现试样的动态压缩加载。测试原理与单杆 SHPB 测试原理相同。

试验中, 使用瞬态信号采集仪记录入射杆、透射杆上应变片中的波形响应信号。实测中根据对称性原则在每个试样中共采集 8 组杆的入、透射应力波信号, 采集杆位置如图 2 所示。

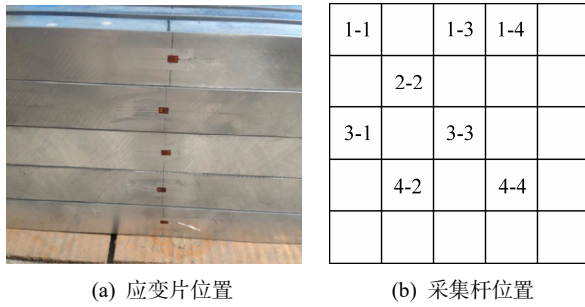


图 2 数据采集点位置

假设 BSHPB 上每对单杆都符合 SHPB 试验的基本假设, 即一维应力波假设和长度方向上应力、应变均匀分布的假设。记录每对 SHPB 杆中入射杆应变片测得的入射波应变信号 $\varepsilon_i(t)$ 和反射波应变信号 $\varepsilon_R(t)$ 以及透射杆应变片所测得的透射波应变信号 $\varepsilon_T(t)$ 。对每对单杆得到的混凝土局部应力—应变曲线进行平均处理, 可以得到试样的平均应力 $\sigma_{ave}(t)$ 和平均应变 $\varepsilon_{ave}(t)$:

$$\sigma_{ave}(t) = \frac{EA}{8A_s} \sum_{i=1}^8 \varepsilon_{Ti}(t), \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ave}(t) = \frac{2C_0}{8L_s} \sum_{i=1}^8 \int_0^t \varepsilon_{Ri}(t) dt, \quad (2)$$

式中: L_s 为试样长度; C_0 为杆中的弹性波波速, $C_0 = \sqrt{E/\rho_0}$; E 为压杆弹性模量; ρ_0 为压杆密度; A 、 A_s 分别表示压杆和试样的端面面积; $i=1,2,3,4,5,6,7,8$ 。

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环试验结果

2.1.1 冻融循环对试样损伤破坏形貌的影响

冻融循环后 SCC 试样外貌变化如图 3 所示, 图中 T 代表冻融循环温度范围, N 代表冻融循环周次。

从图 3 可见在冻融循环温度为 $+10 \sim -40$ $^{\circ}\text{C}$ 时, SCC 试样经过 40 次冻融循环后外表变化不明显。随着冻融循环最低温度降低以及冻融循环周次的增加, SCC 试样表面逐渐变得粗糙。这是因为气孔内部水冻结膨胀, 挤压周围混凝土导致混凝土脱落, 表面变得粗糙。当冻融循环最低温度降低至 -50 $^{\circ}\text{C}$ 和 -60 $^{\circ}\text{C}$ 后, 在同一冻融循环周次情况下, SCC 外表皮脱落更为明显。在冻融循环最低温度为 -60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 混凝土内部更多更小的孔隙水受冻膨胀, 加剧了试样表面脱落。当冻融循环次数超过 30 次后, 外部轮廓发生明显变化, 可见冻融循环周次增加以及冻融循环最低温度降低都会导致 SCC 试样冻融损伤的加剧。

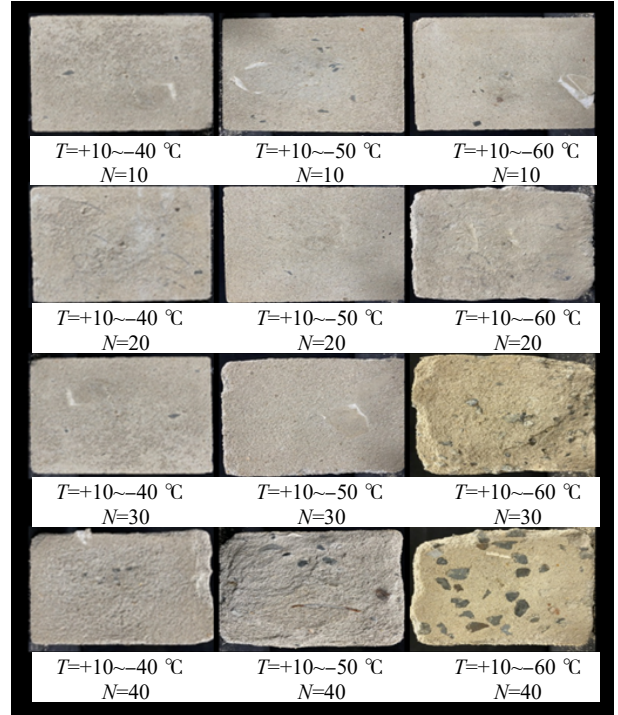


图 3 冻融循环温度和冻融循环周次对陶粒混凝土外貌的影响

2.1.2 冻融循环对试样弹性模量的影响

弹性模量的减少能宏观体现出冻融循环温度和周次对试样造成的损伤。可根据下式求得试样的弹性模量:

$$E_s = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \rho c^2, \quad (3)$$

式中: E_s 为试样弹性模量; ν 为试样泊松比; ρ 为试样密度; c 为测得的超声波波速。试样受冻融循环损伤越严重, 内部孔洞和裂纹越多, 超声波波速

就越小,则弹性模量越小.波速测量时,选取试样相对2个面对角线上的3个对称点采集,每点采集3次,共9次,取3点平均值作为试样的超声波波速,按式(3)计算出的弹性模量结果见表2.

表2 不同冻融循环周次及不同循环温度作用下的 SCC 试样弹性模量 GPa

周次	弹性模量		
	+10~-40 °C	+10~-50 °C	+10~-60 °C
0	34.00	34.00	34.00
10	33.32	31.28	29.92
20	27.88	25.84	24.14
30	24.82	23.80	19.72
40	23.14	20.72	16.32

引入相对弹性模量 E_R , 观察冻融循环作用对 SCC 试样的弹性模量的影响:

$$E_R = \frac{E_s}{E_{s0}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: E_{s0} 为冻融前的 SCC 试样弹性模量. 按式(4)求得试样的相对弹性模量, 结果如图4所示.

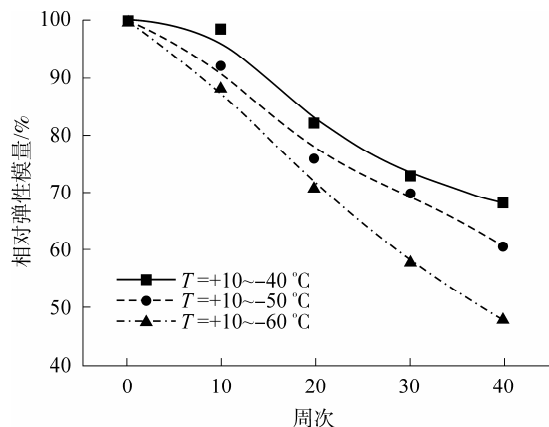


图4 冻融循环引起试样的相对弹性模量变化

2.2 压缩试验结果

对经过不同冻融循环温度和不同冻融循环周次的 SCC 试样进行动态压缩试验, 控制试样的应变率在 $100 \sim 110 \text{ s}^{-1}$, 并绘制出如图5所示应力—应变曲线.

图5(a)的冻融循环温度为+10~-40 °C, 与未冻融试样相比, SCC 试样经前10次冻融后的动态力学性能有明显变化, 结合图6给出的不同冻融循环周次和温度下 SCC 试样的动态压缩强度变化规律可以发现, 在此温度下经过10次冻融后峰值应力

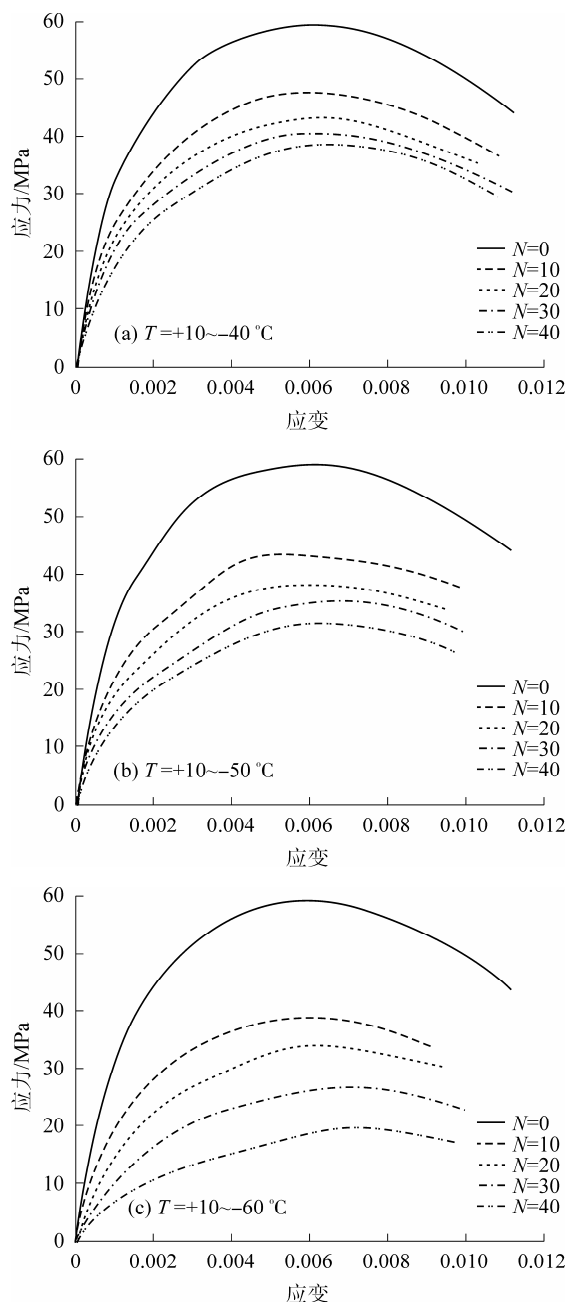


图5 冻融循环周次与温度对 SCC 试样应力—应变曲线的影响

降低 19.39%, 并随着冻融循环周次的继续增加, 试样动态抗压强度降低程度相对不明显, 冻融损伤增加值相对较小, 每10次冻融后损伤增加值都在10%以内, 随着冻融循环次数的增加, 冻融损伤加剧效果趋于平缓.

如图5(b)所示, 当试样在冻融循环温度为+10~-50 °C冻融时与冻融循环温度为+10~-40 °C情况相似. 结合图6能明显看出前10次冻融 SCC 试样动

态压缩强度下降较明显,峰值应力损伤为 26.64%。但之后 20 次甚至更多次的冻融后,冻融损伤累积量增长略大于冻融循环温度为+10~40 °C 的 SCC 试样。

图 5(c)显示当冻融循环最低温度降到-60 °C 时,SCC 试样损伤变化十分明显,每 10 次冻融都会使 SCC 试样动态抗压强度有更显著的降低,每 10 次冻融的峰值应力损失率都超过 10%。混凝土内部气孔(直径 20 nm)被认为有害孔,冻融循环影响下导致内部孔隙水结冰膨胀产生的膨胀力使砂浆基体开裂受损。基于 Powers 等^[4]的研究,混凝土内部孔隙水的冰点与孔隙大小相关,孔隙越小内部孔隙水的冰点越低。因此冻融循环最低温度的降低使得更多的孔隙水结冰膨胀,混凝土内部劣化越严重,其动态抗压强度下降越明显。

由此说明可用冻融循环后 SCC 试样的弹性模量和动态抗压强度来表征冻融循环对其动态力学性能的影响,结合图 4 和图 6 可见,SCC 试样在冻融循环温度为+10~40 °C 和+10~50 °C 时,冻融带来的影响相较于冻融循环温度+10~60 °C 要小。

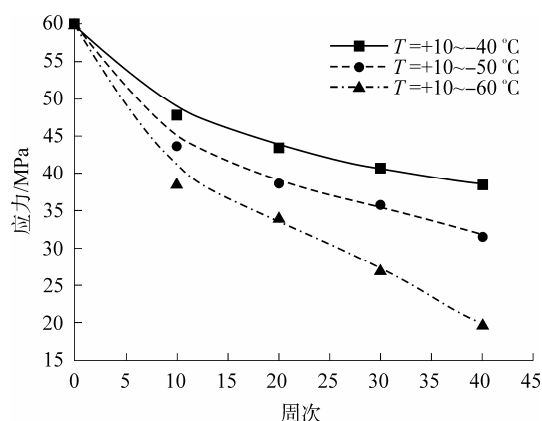


图6 冻融循环周次与温度对 SCC 试样峰值应力的影响

3 动态试验数值模拟

3.1 试样模型的建立

建立陶粒混凝土试样模型,试样模型中包含砂浆、多面体陶粒骨料、粗骨料与砂浆界面的过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)以及气孔。利用折叠正态分布^[17]描述骨料的粒径和孔径的大小分布,首先生成随机骨料,并使用蒙特卡罗随机数方法确定陶粒混凝土内部粗骨料和气孔的空间位置,判断无体积重叠后生成骨料和气孔,再利用“背景

网络方法”进行模型网格划分^[18]。

如图 7 所示(图注中注释与文中解释对应),在隐藏部分砂浆集体暴露出部分的气孔(深蓝色)、ITZ(浅灰色)和骨料(深灰色)的 SCC 试样模型中,可以看到气孔和骨料互不相交,并从 ITZ 和骨料的剖面中可见 ITZ 包围整个骨料。

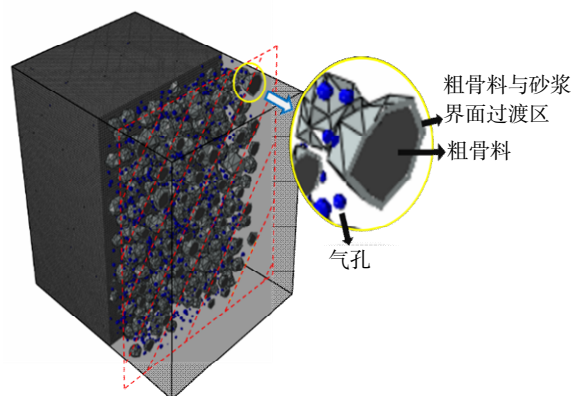


图7 SCC 试样细观模型

3.2 BSHPB 模型的建立

如图 8 所示,BSHPB 束杆装置的模型包含子弹、转换杆、转换块、入射杆和透射杆,入射杆、透射杆中每根杆以不同颜色区分。对子弹施加初速度撞击转换杆进行数值模拟。BSHPB 装置和试样都划分成六面体网格单元,子弹、转换杆、转换块、入射杆、透射杆和试样之间采用面面接触,对试样添加单元删除选项,模拟试样在冲击过程中的裂纹产生和发展。



图8 BSHPB 束杆装置模型

3.3 数值模拟结果及分析

图 9 为 SCC 试样的模拟破坏过程。在模拟前处理中,将气孔对应位置视作混凝土的初始缺陷,并将初始缺陷所对应位置的网格进行删除处理。在模拟损伤破坏过程中可以明显看出当应力波传递到试样端面后,端面开始出现裂纹,在试样端面边缘也出现了损伤。随着应力波的持续加载,裂纹逐步扩展。图 10 为 SCC 试样在 BSHPB 试验过程中用高速摄影拍下的损伤破坏过程,显示裂纹发展规律与数值模拟过程较为吻合。

有效塑性应变是一个单调增加的标量值, 当材料处于屈服状态时, 有效塑性应变会不断累积增加, 因此可用有效屈服应变表征 SCC 试样在应力波作用下的累计损伤. 图 11 为试样在动态压缩过程中的有效塑性应变演化过程, 可以清晰看到 SCC 试样在 0.209 9 ms 后进入了屈服状态, 并产生裂纹.

图 12 为模拟的 SCC 试样动态损伤内部剖面图,

能看到 SCC 试样内部在动态试验过程中产生多条贯穿裂纹. 当应力波传递到试样上, 试样裂纹变多且逐步沿着 ITZ 扩展, 最终贯穿了整个试样. 此外还可以发现由于 ITZ 强度较弱, 当应力波到达后, 此时骨料尚未进入塑性阶段, 但 ITZ 已率先破坏.

图 13 为应力—应变曲线对比. 由图可见, 数值模拟结果与试验结果整体吻合度较高, 相关系数达到 97.4%.

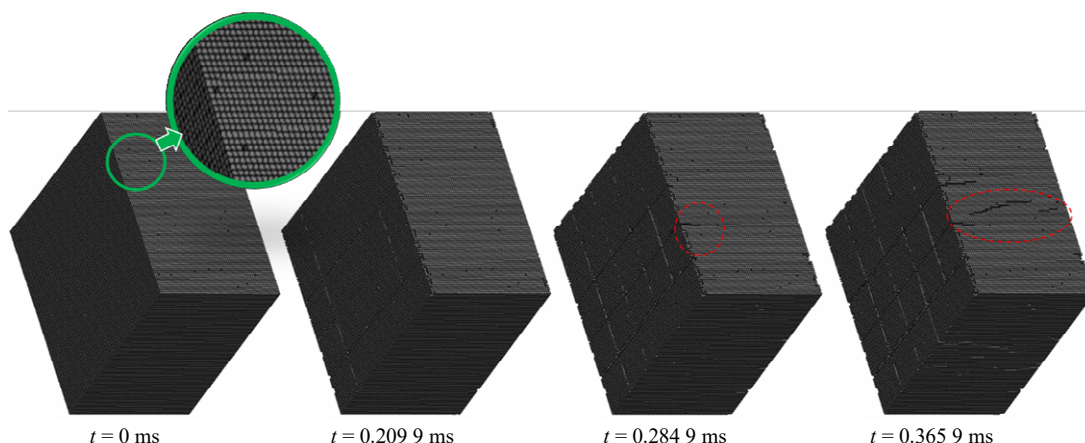


图 9 模拟损伤破坏过程

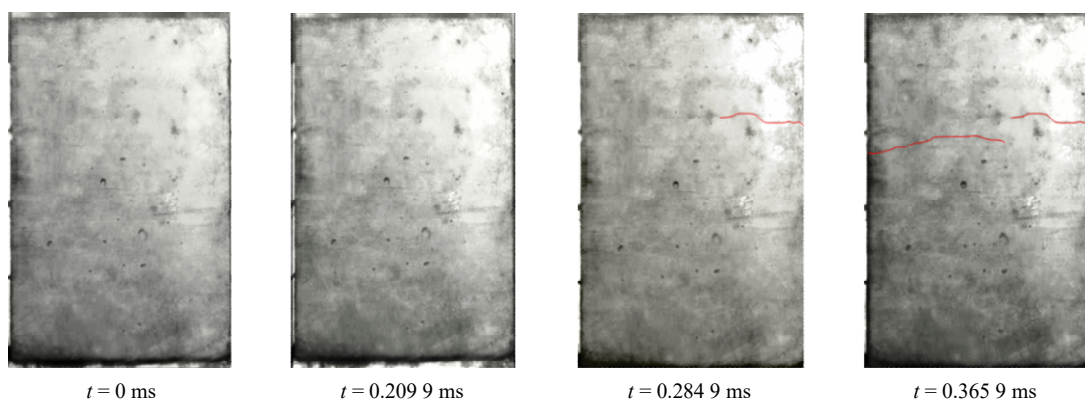


图 10 试验损伤破坏过程

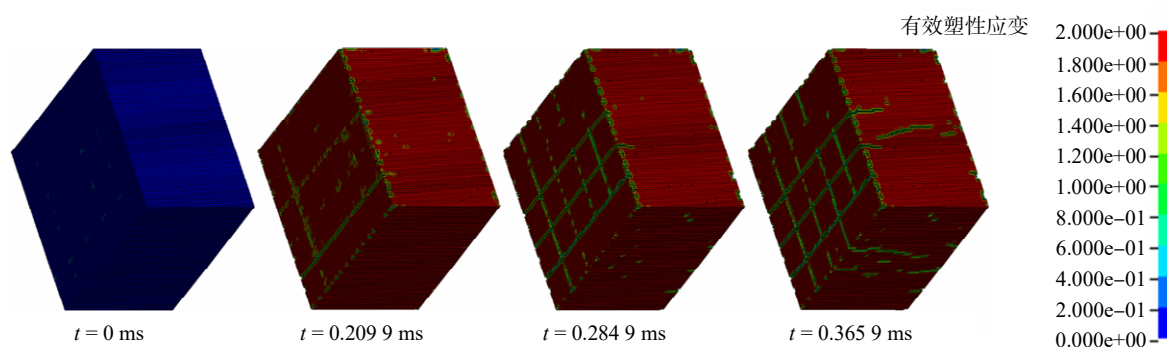


图 11 模拟动态压缩下的试验有效塑性应变演化过程

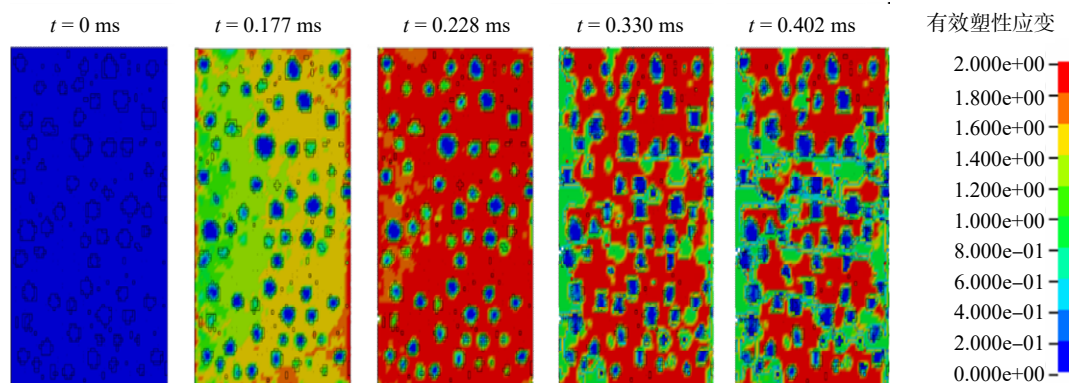
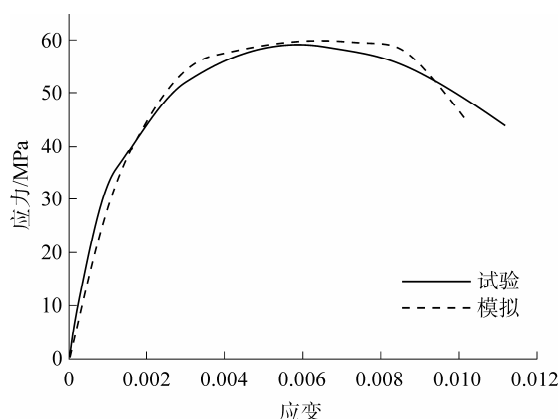


图 12 动态破坏剖面图

图 13 动态压缩试验结果与模拟结果的
应力—应变曲线的对比

4 结论

本文对体积分数 40% 的硫铝酸盐陶粒混凝土进行动力学性能研究, 并运用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 SCC 试样的动态压缩试验进行了数值模拟, 得到了以下结论:

(1) 冻融循环最低温度降低和冻融循环周次增加均使 SCC 试样动态抗压性能下降, 整体损伤加剧。

(2) 冻融循环最低温度越低, 对 SCC 的动态抗压强度影响越明显; 在相同循环温度下, 前 10 次冻融循环对 SCC 动态抗压强度下降的影响最为明显。

(3) SCC 试样的细观数值模拟过程表明, ITZ 是 SCC 试样的薄弱区域, 裂纹偏向于沿着 ITZ 扩展, 直到贯穿整个试样。

(4) 在宏观力学性能和细观观测基础上进行数值模拟, 结果表明模拟计算曲线和破坏形态都与实测结果吻合度较高, 曲线相关系数达 97% 以上。

参考文献:

- [1] KARACA Z, DURMUS A. Investigation of usability of lightweight concrete produced with natural eastern black sea aggregates in reinforced concrete beams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(7):937-943.
- [2] WONGKVANKLOM A, POSI P, KHOTSOPHA B, et al. Structural lightweight concrete containing recycled lightweight concrete aggregate[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(8):3077-3084.
- [3] FARAHANI J N, SHAFIGH P, ALSUBARI B, et al. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing binary and ternary blended cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149:976-988.
- [4] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing[J]. Highway Research Board Proceeding, 1953, 32:285-297.
- [5] PENTTALA V, AL-NESHAUWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9):1407-1420.
- [6] YANG Y J, ZHU H Z, CHEN D G. Influence of the coarse aggregates size on the frost resistance in normal and polycarboxylate mixed concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76:107031.
- [7] VELARDO P, SÁEZ DEL BOSQUE I F, SÁNCHEZ DE ROJAS M I, et al. Durability of concrete bearing polymer-treated mixed recycled aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315:125781.
- [8] 满晨, 邱继生, 袁琳. 冻融劣化作用下煤矸石陶粒混凝土力学性能衰变规律研究[J]. 混凝土, 2023(4):74-77.
- [9] 袁立月, 陈克政, 彭飞, 等. 冻融循环作用下陶粒混凝土抗压性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报(中英俄文), 2023, 14(4):81-87.
- [10] 肖圣哲, 王腾, 陈江瑛. 冻融循环温度对陶粒混凝土动

- 态抗压性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12):3935-3938.
- [11] HUANG Y C, LI Z, CHEN J Y, et al. Stress overshoot and its evolution of ceramsite concrete with freeze-thaw cycles under impact loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 297:109874.
- [12] HUANG Y J, NATARAJAN S, ZHANG H, et al. A CT image-driven computational framework for investigating complex 3D fracture in mesoscale concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 143:105270.
- [13] ZHOU R X, SONG Z H, LU Y. 3D mesoscale finite element modelling of concrete[J]. Computers and Structures, 2017, 192:96-113.
- [14] LI C Z, SONG X B. Mesoscale modeling of chloride transport in unsaturated concrete based on Voronoi tessellation[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 161: 106932.
- [15] MA H Y, YUE C J, YU H F, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137:103466.
- [16] WANG Z Y, HOU C C, GUO Q Q. Numerical simulation on the dynamic response of bonded unidirectional prestressed concrete slabs subjected to low-velocity impact[J]. Structures, 2022, 38:1098-1110.
- [17] 秦晓川. 混凝土及预应力混凝土冻融机理及耐久性评估研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [18] 王甲, 肖圣哲, 邱欣, 等. 陶粒混凝土冲击损伤演化的三维数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(6): 59-65.

Study on dynamic mechanical properties of sulphoaluminate ceramsite concrete after freeze-thaw cycle

LI Zhe^{1,2,3}, LI Mengmeng², XUE Wen², CHEN Jiangying^{1,2,3}

(1.Zhejiang Provincial Engineering Research Center for the Safety of Pressure Vessel and Pipeline, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Sulphoaluminate concrete has the characteristics of fast setting and early strength, and is the first choice of cement materials for winter construction, emergency repair and emergency construction projects. The dynamic mechanical properties of sulphoaluminate concrete with 40% ceramsite volume fraction under freeze-thaw cycle are studied. The experimental results show that the compressive strength of the material decreases with the increase of freeze-thaw cycles or the decrease of the minimum temperature of freeze-thaw cycle. The numerical simulation of dynamic test demonstrates that the stress-strain curves and failure patterns of unfrozen sulphoaluminate ceramsite concrete are in good agreement with the experimental results. The meso-simulation results of dynamic compression test show that the interfacial transition zone between ceramsite and matrix in ceramsite concrete is the weak link in its internal structure, and cracks are easily formed in the process of dynamic compression.

Key words: ceramsite concrete; freeze-thaw cycle; microscopic damage; numerical simulation

(责任编辑 章践立)