

# 冻融与盐腐蚀对混凝土动态力学性能的影响

熊佳航<sup>1,2</sup>

1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016

2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016

**摘要：**为研究硫酸盐腐蚀与冻融循环耦合作用下对混凝土动态力学性能的影响, 利用分离式霍普金森杆装置, 对于0、15、30次耦合作用下的C40混凝土试块, 冲击气压分别为0.175、0.2、0.25、0.3MPa, 分析了不同应变率下的动态性能。结果表明: 混凝土受冻融腐蚀后, 动态峰值应力与动态峰值应变均有明显下降。在应变率逐渐增大时, 伴随着冻融腐蚀次数的增加混凝土应力峰值下降趋势逐渐增大。应变率达到 $196.24\text{ s}^{-1}$ 时, 应力峰值下降为22.92%。当应变率相近时, DIF值随试件冻融腐蚀天次数的升高而增加, 同时冻融腐蚀浸泡时间的延长, 对试件速率敏感性有所提高。高应变率( $127\sim194\text{ s}^{-1}$ )状态下, 冻融腐蚀耦合作用下试件内部裂缝受阻碍, 冲击韧性呈现出先减小后增大的趋势。

**关键词：**硫酸钠腐蚀; SHPB; 动态力学性能; 冲击荷载; 应变率

## Effect of Freeze Thaw and Salt Corrosion on Dynamic Mechanical Properties of Concrete

Xiong Jiahang<sup>1,2</sup>

1. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016

2. Qinghai Province Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Xining, Qinghai 810016

**Abstract :** The dynamic mechanical properties of C40 concrete specimens were examined using a divided Hopkinson bar setup to study the impact of sulfate corrosion and freeze-thaw cycle interplay. The specimens were subjected to varying numbers of coupling cycles (0, 15, and 30) at different strain rates and impact air pressures (0.175, 0.2, 0.25, and 0.3 MPa) in order to analyze their dynamic characteristics. After freeze-thaw corrosion, the dynamic peak stress and strain of concrete both drastically diminish. As the rate rises, the peak stress of concrete diminishes with an increase in the number of cycles of freezing/reeling. When  $196.24\text{ s}^{-1}$  is reached, the peak stress drops to 22.92%. The specimen's number of freeze-thaw corrosion days escalating, the DIF value rises when the strain rates are comparable. At the same time, the extension of the freeze-thaw corrosion soaking time increases the sensitivity of the specimen rate. At strain rates of  $127\sim194\text{ s}^{-1}$ , freeze-thaw corrosion coupling impedes the internal cracks in the specimen, and its impact toughness exhibits a pattern of decreasing first, then increasing.

**Keywords :** Sodium sulfate corrosion; SHPB; dynamic mechanical properties; impact loading; strain rate

## 引言

混凝土是一种由水泥、骨料、砂和水组成的常见建筑材质, 具备优秀的耐用性和承重能力。然而, 在中国西北地区, 由于天气寒冷, 温度常处于冷热交替状态, 在这种环境下, 混凝土长期受到冻融循环与硫酸盐侵蚀的耦合作用, 其中硫酸盐腐蚀是较为常见的腐蚀之一。混凝土冻融破坏同样也是一种严重的问题, 这些都可能导致建筑物结构的破坏, 硫酸盐腐蚀混凝土的主要原因之一是硫酸盐的化学作用。硫酸盐存在于土壤、地下水和工业废水中, 当混凝土暴露在含有硫酸盐的环境中时, 硫酸盐会与混凝土中的钙氢石灰石反应, 生成硬度较小的产物, 导致混凝土的体积膨胀和强度下降。其核心在于环境中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子渗入混凝土内层, 与水泥石内特定一些物质反应, 形成难以溶解的盐类矿物, 这些矿物吸收大量水分后体积膨胀, 产生膨胀的内应力。当应力超过混凝土的抗拉强度时, 混凝土开始受损, 导致其强度和粘结能力下降。硫酸盐侵蚀对混凝土的破坏通常表现为表面出现白色沉积物, 损坏通常从棱角处开始, 随后裂缝逐渐扩展, 伴随剥落, 最终使混凝土变得脆弱甚至破碎。冻融循环对混凝土力学性能的恶化同样是一个重要因素, 目前针对冻融损害的研究主要包括静水压理论、渗透压理论、膨胀压理论等四种假设<sup>[2]-[3]</sup>。尽管各国学者对冻融损害的机理有不同的看法, 但这些假设为混凝土材料的研究提供了基础, 并在提高其抗冻性能方面发挥了关键作用。有关混凝土冻融破坏的研究主要集中在以下几个方面: 深入分析冻融破坏的机制、提升抗冻性能的措施, 以及预测冻融循环对耐久性的影响。

目前对于混凝土的冻融循环与硫酸盐腐蚀研究已取得许多成果，其中对于混凝土的基本力学性能<sup>[4]</sup>以及对于损伤后的微观结构围观结构分析<sup>[5-6]</sup>都有着较为深度的研究，而对于混凝土在遭受硫酸盐腐蚀与冻融循环耦合作用下的动态力学性能方面的研究相对较少，然而受到冻融腐蚀后的混凝土在遭受冲击、振动等突发极端情况破坏时，混凝土在冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下的动态力学性能研究就显得尤为重要。

本文利用分离式霍普金森杆（SHPB）试验装置研究混凝土在冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下的动态压缩性能，分析在耦合作用下对混凝土的破坏形态、动态增强因子以及冲击韧性的影响，使混凝土在复杂环境下更有效的发挥作用。

## 一、试验简介

### (一) 试件制备

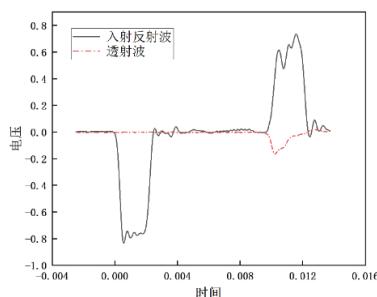
本次试验使用了由青海大学拓华水泥股份有限公司生产朔山牌P.O42.5普通硅酸盐水泥作为试验用料；同时采用了C40的常规硅酸盐混凝土样品并未加入任何外加剂，其主要成分包含有：水泥、沙子和破损石头及适量的水分等等，具体的混合比例详见表格1中的数据。此外，此次试验也制作了一些规格大小分别为100×100×400 mm和100×100×100 mm的大小不同的样本块来测试它们的性能表现情况。这些模型是在成形后且从模板中取出之后被放置在一个环境条件(20±2)°C中，并且在室内静态保温和干燥的环境下进行了28天的观察与养护过程。后钻芯取样直径72mm、厚度34mm的圆柱形试件，再用抛光机对试件进行打磨，保证所有试件打磨后使得端面平整度误差在±0.02mm以内<sup>[7]</sup>。

为了模拟腐蚀冻融的共同作用，试验方法是将打磨完的试件放在试验低温模拟箱中进行冷冻，在10%的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中融化，腐蚀冻融次数分别为0、15、30次，分别对实验组进行编号(SF00、SF15、SF30)。待达到相应的腐蚀冻融次数后，取出试件静置风干。

### (二) 制备和原理

本研究中使用了来自青海大学的振动与冲击试验室的大型分离式霍普金森压杆设备(见图2)，其尺寸为Φ75mm：试件部分的长度为500mm；入射杆的长度为5500mm，投射杆为3500mm。为了避免因接触面磨损导致所产生的误差影响<sup>[8]</sup>，在测试前需要对被测物体表面涂一层薄油脂即“凡士林”来降低滑动效应并提高测量准确程度。再把试件固定在入射杆和透射杆之间，通过调节氮气瓶的气压来控制冲击子弹的速度。由两侧杆件的应变片收集各个信号，据SHPB试验基于一维应力波传播理论和应力均匀性假设，在此假设的基础上以入射应变、透射应变、反射应变为计算方法。随后使用二波法来进行计算，最终得出试件的应变率以及应力-应变曲线。

SHPB试验典型的波形图如图1所示。



>图1 SHPB试验典型波形图

表1 混凝土配合比

强度	成分	水泥	水	砂	石
C40	/kg	370	181	574	1166



## 二、霍普金森压杆(SHPB)系统

此次SHPB试验基于两种假设：应力均匀性假设以及一维应力波传播理论，计算方法包括入射应变、透射应变和反射应变<sup>[9]</sup>。

$$\begin{aligned}\sigma_s(t) &= \frac{A_0}{A_s} E \varepsilon_t(t) \\ \dot{\varepsilon}_s(t) &= -2 \frac{C_0}{L_s} \varepsilon_r(t) \\ \varepsilon_s(t) &= -2 \frac{C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt\end{aligned}$$

式中： $L_s$ 为试件长度、 $E$ 为杆件的弹性模量， $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_t$ 为测得的透射波与反射波， $A_0$ 为压杆面积、 $A_s$ 为试件面积， $C_0$ 为杆中波速。

## 三、试验结果与分析

### (一) 试件破坏形态分析

在此次试验中腐蚀冻融次数分别为0、15、30次，分别对试验组进行编号(SF00、SF15、SF30)，3种不同腐蚀情况下的混凝土试件在4种不同冲击气压下的破坏形态，具体图3所示。试验结果很明显能看出，冻融与硫酸盐腐蚀过程对于混凝土的破坏模式有着显著的影响。经过这种联合效应后，当受到撞击力的影响，试验样品会产生多个裂纹并快速崩溃。随着压力气的不断增大，测试样本承受的变形速度也在提升，并且其损坏情况也变得更加严重。在冲击气压为0.25MPa时，未经过腐蚀的试件(SF00)四周破碎严重，但中心保留部分主体并未完全破坏，冻融盐腐蚀

试件(SF15)与(SF30)多条裂缝相互贯穿,最终使得试件完全破坏。又由于SF15破坏所产生的较大尺寸碎片明显多于SF30。当冲击气压逐渐增加时,随着冻融腐蚀次数的增加,试件裂缝发展更为迅速,破坏所产生碎片的尺寸逐渐减小。



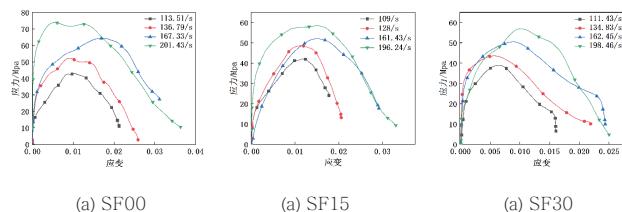
>图3 相同冲击气压下各腐蚀试件的破坏形态

## (二) 应力 - 应变曲线分析

通过试验测得不同冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下试件在不同应变率下的应力 - 应变曲线如图4所示。混凝土试块在受到撞击时,曲线的初始阶段随着应变的增加,应力呈现出线性增长的趋势。材料在此阶段具有弹性变形特性,随着应变增大,试件内部微裂纹逐渐扩展,曲线斜率逐渐减小,此时,应力 - 应变曲线不再呈线性关系,呈现应变硬化效应,混凝土试件出现塑性变形现象。当超过峰值应力点后,试件内部的微裂缝相互贯穿,这使得混凝土强度迅速下降,试件进入损伤软化阶段,应力从峰值后随应变的增大而减小,试件逐渐失去承载能力,最终完全被破坏。

经过冻融循环与硫酸盐腐蚀的试件与普通混凝土试件相比,动态峰值应力与动态峰值应变均有明显下降,在应变率相近的情况下,随着冻融腐蚀次数的增加,混凝土试样的应力峰值不断下降,在应变率为 $109\text{ s}^{-1}$ 左右时,应力峰值由常态下的 $45.2\text{ MPa}$ ,在经历30次冻融循环与硫酸盐腐蚀过后,应力峰值下降至 $40.985\text{ MPa}$ ,同比下降了 $9.33\%$ ,在应变率接近 $128\text{ s}^{-1}$ 左右时,冻融腐蚀次数从

0次增加至30次的过程中,混凝土的峰值应力由 $52.201\text{ MPa}$ 下降至 $48.54\text{ MPa}$ 、 $45.24\text{ MPa}$ ,分别下降了 $7.01\%$ 、 $13.33\%$ 。随着应变速率逐渐增大,当应变率接近 $161.43\text{ s}^{-1}$ 、 $196.24\text{ s}^{-1}$ 时,混凝土应变峰值分别下降了 $21.39\%$ 、 $22.92\%$ 。由此可看出冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用对混凝土试件抗压性能有明显影响,当应变速率逐渐增大时,随着冻融与腐蚀次数的增加峰值应力下降趋势逐渐增大。



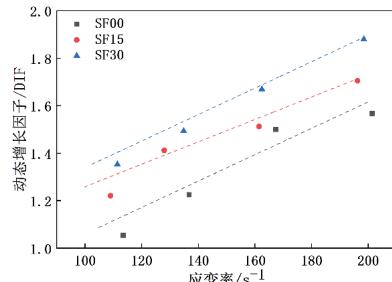
>图4 试件不同应变率下的应力 - 应变曲线图

## (三) 动态强度增强因子

动态强度增加因子(dynamic increase factor)一般被定义为动态抗压力与准静态抗压力的比率,用于对材料的动态性能进行研究。应变率和DIF之间的关系如图5所示,通过下述公式4来计算。

$$\mu_{DIF} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s}$$

$\sigma_d$  为不同应变率试件的动态抗压强度;  $\sigma_s$  为准静态试件的抗压强度。



>图5 应变率与DIF关系图

由图可得出,在应变率从 $100\text{ s}^{-1}$ 增加至 $200\text{ s}^{-1}$ 左右时,试件的DIF值均呈线性增长趋势,这是由于不同应变率下,材料的破坏方式不同,动态压缩破裂发生时,非薄弱层会形成众多微裂缝,而静态压缩破裂则是薄弱层中微裂缝合并形成一条或数条主要裂缝。在动态环境中,形成裂缝需要更多的能量投入;同时,伴随着撞击速度的提升,产生的微裂缝数量也会相应增加,进一步消耗了更多的能源。当冻融腐蚀次数达到30次时,随着应变率增加,DIF值的增长速率由慢变快,混凝土在不同冻融腐蚀程度下都具有应变率强化效应。同时可见,受到 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 腐蚀与冻融过后的试件DIF值有着明显影响,在同样水平应变率下,试件的DIF值随冻融腐蚀次数的增加而升高,这表明动态抗压强度增强幅度大于静态抗压强度增强幅度。当试样被 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀时,其内部析出的硫酸钠结晶会持续地填满混凝土中的缝隙,随着浸泡时间增加,这些结晶体的数量也在逐步增多,并由此导致了对混凝土内的压力增大,形成扩张应力<sup>[10]</sup>。因此,受 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀的试样的裂纹开始扩展,这也使其对速度变得更加敏感。

在宁建国<sup>[11]</sup>等人的研究中表明, DIF的取值与应变率的对数

有关,由<sup>[12]-[13]</sup>给出的拟合模型,得到DIF值于应变率对数的拟合关系式如下:

$$DIF = a_0 (\lg \dot{\varepsilon})^2 + a_1 \lg \dot{\varepsilon} + a_2$$

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 均为对试验数据拟合得到的常数,结果如表2所示。

表2 拟合结果与相关系数

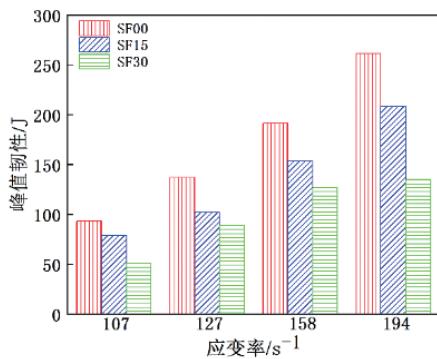
次数	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$
0	-5.51E-5	0.023	-0.92	0.951
15	-1.70E-5	0.010	0.318	0.901
30	-2.31E-6	0.007	0.623	0.999

#### (四) 冲击韧性

材料吸收能量的能力通常表示为冲击韧性<sup>[14]</sup>,可以通过试件体积乘以应变能量密度来表示<sup>[15]</sup>,如图6所示。可以用材料的应力-应变曲线下方的面积来表示,并按以下公式6计算:

$$W_T = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

式中:  $W_T$ —冲击韧性,  $\varepsilon_u$ —极限应变,  $\sigma(\varepsilon)$ —应力-应变曲线。



&gt;图6 在不同应变率下吸收的能量

在四种不同应变率下试件所能吸收的能量中,应变率为 $107\text{ s}^{-1}$ 左右时,冻融与 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 腐蚀15、30次的混凝土试件相较于常态下的试件,冲击韧性下降15.382%、50.631%,这是由于试件内部的水泥石在受到化学反应后遭到一定破坏,裂缝发展较为充分,试件强度明显降低、抗冲击性能下降,使得材料吸能效应降低。当应变率为127至194  $\text{s}^{-1}$ 之间时,15天和30天的试验样品显示出其冲击韧性的减少与时间呈现线性相关性。这表明它们以约19%~24%和33%~48%的比例逐渐减少。这是因为这些样本正在吸收水份并形成如钙矾石、石膏等物质,同时释放出硫酸钠结晶,这种过程导致了它们的内部孔隙被填满。然而,在这个高应变条件下,混凝土内的形变受到了限制,从而使裂纹的发展速度放缓。具体的表现在于,SF30的冲击韧性开始增加,随后又有所减少,最后才慢慢上升。

## 四、结论

1. 冻融与硫酸盐腐蚀显著改变了混凝土的破坏模式。在冲击气压下,腐蚀试件(SF15、SF30)裂缝更为严重,且随着冻融腐蚀次数增加,试件破坏速度加快,碎片尺寸减小。冻融与硫酸盐

腐蚀的联合效应使得混凝土在受到撞击时表现出较大的裂纹和更快速的崩溃。

2. 混凝土在遭受撞击时,初始阶段呈现弹性变形,随着应变增加,出现塑性变形并进入损伤软化阶段。冻融与腐蚀对混凝土的应力-应变曲线产生影响,导致混凝土的承载力下降。

3. 随着冻融和硫酸盐腐蚀次数的增加,试件的动态峰值应力明显下降。在相同应变率下,随着腐蚀次数的增加,混凝土的抗压性能逐渐减弱,表现为应力峰值和应变峰值的下降,且冻融腐蚀对混凝土抗压性能的影响在高应变率下更为显著。

4. 冻融和硫酸盐腐蚀导致混凝土冲击韧性显著下降,尤其在应变率为 $107\text{ s}^{-1}$ 时,试件的冲击韧性下降幅度达到50%以上。腐蚀程度与时间的增加对冲击韧性的影响呈线性下降趋势,但在高应变条件下,裂纹发展受限,导致韧性逐渐回升。

## 参考文献

- [1] 仵江涛,何锐,王笑风,等.硫酸盐侵蚀混凝土内外影响因素及影响机理研究进展[J].硅酸盐通报,2019,38(01):110-117.DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.01.019.
- [2] POWERS T C.The mechanisms of frost action in concrete (Durability of Concrete, SP-8) [R]. Detroit:ACI, 1965, 42~47.
- [3] LITVAN G G.Frost action in cement in the presence of deicers [A]. Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cement [C]. Moscow:[sn], 1974, 2:145~152.
- [4] 杨健辉,李潇雅,叶亚齐,等.全轻纤维混凝土的SHPB冲击强度与耗能效应[J].振动与冲击,2020,39(02):148-153+177.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2020.02.021.
- [5] 聂良学,许金余,刘远飞,等.硫酸盐环境下混凝土强度变化规律及微观结构分析[J].振动与冲击,2016,35(20):203-208.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2016.20.033.
- [6] HEKAL E E, KISHAR E, MOSTAFA H.Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1421-1427.
- [7] 李胜林,刘殿书,李祥龙,等. $\Phi 75\text{mm}$ 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(01):93-97.
- [8] LU F, LIN Y, WANG X, et al. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 79: 95 - 101.
- [9] 黄雄,谭换成,刘璐璐,等.编织角和承载方向对三维四向编织复合材料动态压缩性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(04): 823-833. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20170720.001.
- [10] GAO J, YU Z, SONG L, et al. Durability of concrete exposed to sulfate-attack under flexural loading and drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39(2): 33-38.
- [11] 宁建国,任会兰著.钢筋混凝土的动态本构关系[M].北京:北京理工大学出版社,2018.12.
- [12] 罗银剑,李秀地,蔡涛,等.ECC冲击压缩力学特性及耗能机制的试验研究[J].振动与冲击,2023,42(04): 19-27+64.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.04.003.
- [13] 谢磊,李庆华,徐世烺.纤维掺量对聚丙烯纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J].复合材料学报,2021,38(09): 3086-3100. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20201204.001.
- [14] MANOLIS G D, GAREIS P J, TSONOS A D, et al. Dynamic properties of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(4): 341-349.
- [15] HOU X M, CAO S J, ZHENG W Z, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive-powder concrete at high strain rates [J]. Engineering Structures, 2018, 169: 119-130.