

文章编号:1007-9629(2023)11-1183-09

冻融与氯盐侵蚀耦合作用下 GO-RAC 的耐久性能

郭凯^{1,*}, 佟舟¹, 张树峰¹, 潘文浩², 刘琳¹

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:通过混凝土抗冻性快冻法试验,研究了氧化石墨烯再生粗骨料混凝土(GO-RAC)在冻融循环与氯盐侵蚀耦合作用下的耐久性能,测试分析了GO-RAC的相对动弹性模量、质量损失率、抗压强度及氯离子侵蚀情况.结果表明:冻融循环与氯盐侵蚀的耦合作用加速了再生粗骨料混凝土(RAC)的劣化损伤,经历72次冻融循环后不同GO掺量GO-RAC的相对动弹性模量均降至其初始值的60%以下,宏观劣化程度较普通RAC有不同程度的降低;由于耦合初期侵蚀产物的填充致密效应,GO-RAC的抗压强度呈现先增大后减小的趋势;GO-RAC在冻融循环与氯盐侵蚀耦合作用下的Cl⁻分布符合Fick第二定律,表面的Cl⁻质量比随着耦合次数的增加呈指数形式增大,扩散系数随着耦合次数的增加先减小后增大.

关键词:氧化石墨烯再生粗骨料混凝土;冻融循环;氯盐侵蚀;耦合作用;耐久性

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.006

Durability of GO-RAC under the Coupling Action of Freeze-Thaw Cycling and Chloride Salt Erosion

GUO Kai^{1,*}, TONG Zhou¹, ZHANG Shufeng¹, PAN Wenhao², LIU Lin¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The durability performance of graphite oxide recycled coarse aggregate concrete (GO-RAC) under the coupled action of freeze-thaw cycling and chloride ion erosion was tested through the rapid freezing method of concrete frost resistance. The relative dynamic modulus, mass loss ratio, compressive strength and chloride ion erosion of graphite oxide recycled coarse aggregate concrete were tested and analysed. The results show that the effects of freeze-thaw cycling and chloride erosion exacerbates the damage to the recycled coarse aggregate concrete. After 72 freeze-thaw cycles, the relative dynamic modulus of GO-RAC is reduced to less than 60% of its origin value, but the degree of damage of GO-RAC is reduced to a lesser extent than that of ordinary recycled coarse aggregate concrete (RAC). In the early stages of coupling, the freeze-thaw damage is confined to the surface layer and the erosion products are densely packed, so the compressive strength of GO-RAC shows an initial increasing and then decreasing trend. The Cl⁻ distribution of GO-RAC under the coupling of freeze-thaw cycling and chloride erosion follows Fick's second law, the surface Cl⁻ mass ratio increases exponentially with increasing coupling times, and the diffusion coefficient first decreases and then increases with increasing coupling times.

Key words: graphene oxide recycled aggregate concrete(GO-RAC); freeze-thaw cycling; chloride salt erosion; coupling action; durability

收稿日期:2023-03-19; 修订日期:2023-05-10

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(LJKZ0565)

第一作者(通讯作者):郭凯(1981—),男,辽宁沈阳人,沈阳建筑大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:guokai@sjzu.edu.cn

再生粗骨料混凝土(RAC)作为一种典型的绿色材料,多年来被业内广泛关注.相比于天然粗骨料,再生粗骨料表面的残留砂浆导致其密度更低、孔隙率更高且吸水率更高.相关研究表明,RAC的力学性能以及抗冻性能均低于同水灰比普通混凝土(RC)^[1-3],且发生冻融破坏的区域多集中于再生粗骨料与砂浆的结合位置^[3-4].氧化石墨烯(GO)不仅拥有超高的力学性能和纵横比^[5-6],同时含有大量的羧基、羟基和环氧键等活性基团,使其能够吸附于水泥水化过程中的聚合物官能团之上,形成的共价界面提高了复合材料的力学性能^[7-10].

近年来关于GO对混凝土耐久性能影响的研究表明,掺入GO使RAC的微观结构得到细化,结构孔隙率降低,从而提高了RAC的耐久性、抗渗性及抗冻性,并且GO掺量在0.03%~0.08%时对RAC抗冻性能的提升更明显^[11-14].但现阶段研究仅探讨了GO掺量以及冻融或氯盐侵蚀单一因素对GO-RAC耐久性的影响,而现实工程中混凝土的服役环境是复杂的,多种侵蚀因素在不同侵蚀阶段的作用并非单纯的叠加影响^[15-16],致使单一因素的劣化模型不能准确模拟其实际劣化规律.由此可见,对GO-RAC进行多重因素影响下的耐久性研究对其真正走向工程应用,具有十分重要的现实意义.

1 试验

1.1 原材料

水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;砂为天然河砂,细度模数为2.93,属II区中砂;粗骨料为废弃混凝土构件经破碎、筛分后形成的5~20 mm再生骨料,其物理性能如表1所示,属标配中第I类;拌和水为去离子水;外加剂为粉末状聚羧酸减水剂(PCs),减水率(质量分数)为20%~40%;GO为改进Hummers法制备的GO浆料,在GO水溶液中添加PCs,通过磁力搅拌以及超声振荡进一步分散^[17-18],并使用透射电子显微镜(TEM)观察其分散效果,以确保制备的GO悬浮液充分分散.GO的基本参数如表2所示.

1.2 试验方法

根据前期试验,确定不掺GO的参照组以及GO掺量占水泥质量0.03%和0.06%的试验组作为研究对象,分别编号为RAC-0、RAC-3、RAC-6.试验制备2种尺寸试件:尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的试件用于测试RAC的相对动弹性模量(E_r)和质量损失率;尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试件

用于测试RAC的抗压强度、Cl⁻渗透深度以及自由Cl⁻浓度等指标.RAC的配合比如表3所示.

表1 再生粗骨料的物理性能

Water absorption rate (by mass)/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Crush value(by mass)/%
2.30	2 538	16.3

表2 GO的基本参数

Average layer thickness/nm	Single-layer diameter/ μ m	Stripping rate/%	w (oxygen)/%	w (carbon)/%
1	0.2~10.0	>95	39.6	47.7

表3 RAC的配合比

m_w/m_c	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				Sand rate(by mass)/%
	Recycled coarse aggregate	Water	Cement	Sand	
0.42	1 242.0	180.0	432.0	698.6	35.99

冻融循环试验开始前各试件的养护龄期均为28 d.冻融循环试验参照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的快冻法进行,冻融介质溶液为质量分数3.5%的NaCl溶液,试件中心温度控制在(-18±2)~(±2)℃,冻融周期为2.5~4.0 h.当试件的耦合循环次数(N)分别达到18、36、54、72次时,取出试件,将表面擦干后测定相应的性能指标,并更换NaCl溶液以确保溶液的质量分数在试验中保持不变.

物理性能试验根据GB/T 50082—2009进行,力学性能试验按照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行.Cl⁻浓度值采用SSWY-820型磁力搅拌一体式Cl⁻含量快速测定仪进行测定.

2 结果与分析

2.1 试件宏观劣化现象

图1为不同耦合次数下RAC试件的表观形貌.由图1可见:氯盐环境下混凝土的冻融损伤劣化是一个循序渐进的过程,耦合循环18次后试件RAC-0的损伤并不明显;耦合循环36次后试件表层出现了侵蚀坑洞,部分砂浆开始脱落;耦合循环54次后试件表面的损伤程度加剧,表层砂浆剥落严重,部分粗骨料裸露在外;耦合循环72次后试件表面呈蜂窝状,粗骨料与砂浆分离;GO的掺入能有效降低RAC的宏观损伤,且随着GO掺量的增加,改善效果愈发明显.

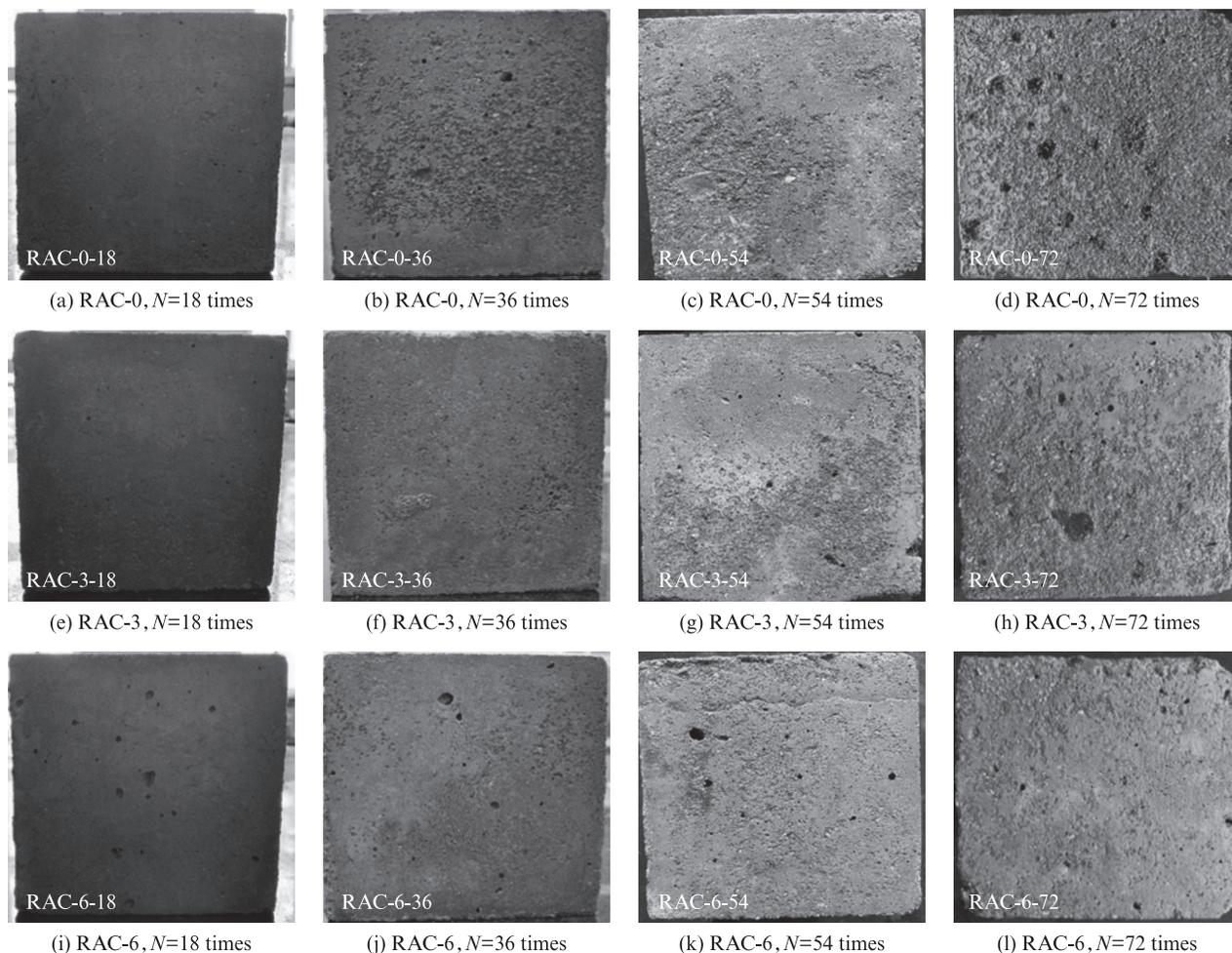


图 1 不同耦合次数下 RAC 试件的表观形貌

Fig. 1 Apparent morphology of RAC specimens under different coupling times

2.2 质量损失率和相对动弹性模量

图 2 为不同 GO 掺量 GO-RAC 的质量变化曲线。由图 2 可见: 在耦合循环初期, 不同 GO 掺量试件的质量均有所增加; 随着耦合循环的持续进行, 试件的质量开始降低, 耦合循环 72 次后试件 RAC-0、RAC-3、RAC-6 的质量损失率分别为 1.539%、0.970%、0.706%, 远小于停止试验的临界值 5%。

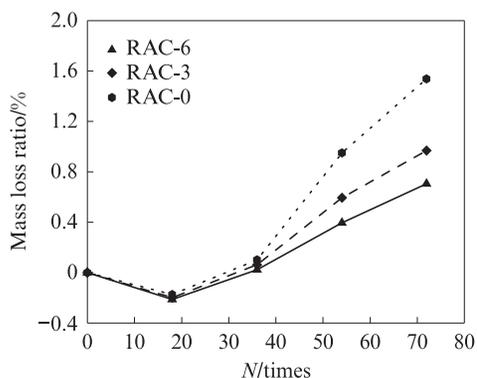


图 2 不同 GO 掺量 GO-RAC 的质量变化曲线
Fig. 2 Variation curves of GO-RAC mass with different GO contents

图 3 为不同 GO 掺量 GO-RAC 的相对动弹性模量变化曲线。由图 3 可以看出: 耦合循环初期不同 GO 掺量 GO-RAC 试件之间的 E_r 值无明显差异, 耦合循环 36 次后试件 RAC-0 的 E_r 值相比于试件 RAC-3、RAC-6 出现了显著的差异, 耦合循环 72 次后试件 RAC-6、RAC-3、RAC-0 的 E_r 值分别为 48.15%、42.75%、31.62%, 3 组试件均超过了 E_r 值下降到

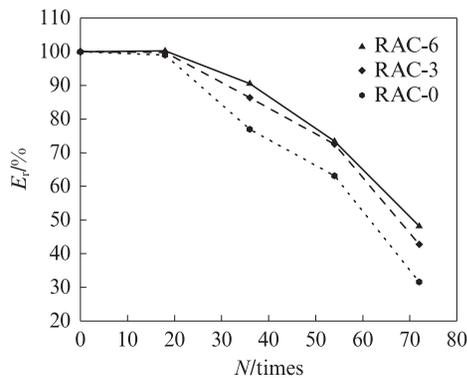


图 3 不同 GO 掺量 GO-RAC 的相对动弹性模量变化曲线
Fig. 3 Variation curves of relative dynamic elastic modulus of GO-RAC with different GO contents

60%的临界值.

已有研究表明,相近配合比的3组试件在经过75次纯水冻融循环后试件RAC-0、RAC-3、RAC-6的质量损失率分别为1.491%、0.701%、0.497%;100次循环后, E_c 值分别为原值的93.59%、91.20%、77.71%^[19].其破坏情况均远小于相近氯盐冻融循环下的试件,说明氯盐的侵蚀作用加速了试件的冻融损伤.GO的掺入能够在一定程度上改善RAC在冻融氯盐侵蚀耦合作用下的抗冻性能,其中当GO掺量为0.06%时的改善抗冻性能效果更好.

2.3 抗压强度及抗压强度损失率

图4为不同GO掺量GO-RAC的强度变化情况.由图4可见,由于GO对水泥基材料水化反应的促进作用及模板效应^[20],使RAC的初始强度得到了明显的提升,抗压强度提升率达10.53%,且在0.06%GO掺量范围内随着掺量的增加线性提高.

图5为耦合作用下不同GO掺量GO-RAC的抗压强度变化.由图5可见:随着耦合循环次数的增加,试件RAC-6的抗压强度呈现先上升后下降的趋势,耦合循环72次后的抗压强度达到最小值(30.03 MPa),较初始值降低了25.52%;试件RAC-3

的抗压强度变化曲线与之相似,同样是随着耦合循环次数的增加先上升后下降;试件RAC-0的抗压强度则随耦合循环次数的增加单调下降,至72个耦合周期结束,抗压强度达到最小值25.96 MPa,较初始值降低了28.84%;GO的掺入不仅提高了GO-RAC的抗压强度,同时有效降低了其在冻融循环与氯盐侵蚀耦合作用下的强度损失率;试件RAC-6相较于其余2组试件表现出了更好的耐久性能.

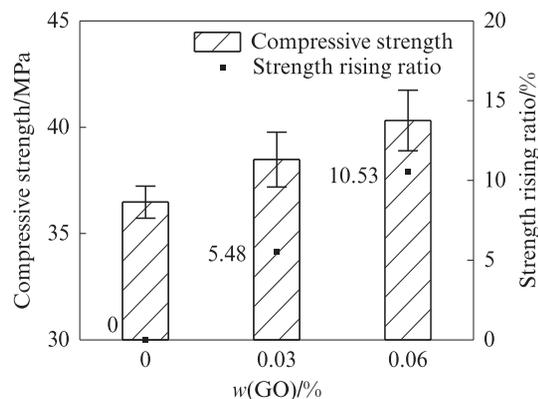
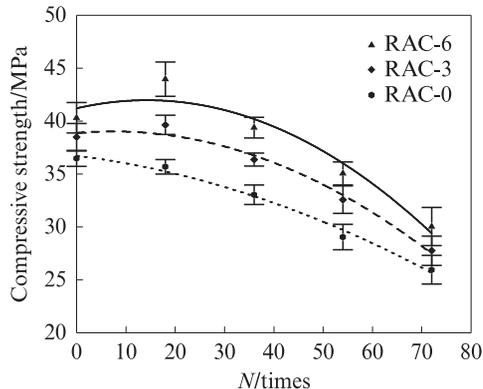
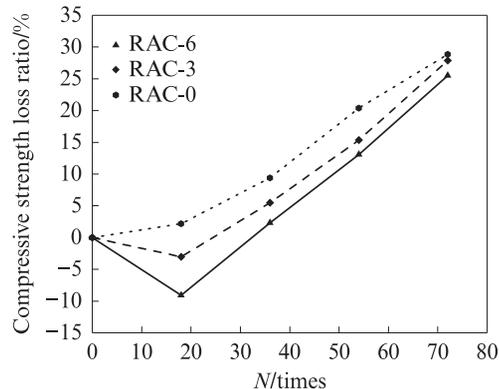


图4 不同GO掺量GO-RAC的强度变化情况
Fig. 4 Variation of GO-RAC strength with different GO contents



(a) Compressive strength



(b) Compressive strength loss ratio

图5 耦合作用下不同GO掺量GO-RAC的抗压强度变化

Fig. 5 Changes of GO-RAC compressive strength with different GO contents under coupling action

2.4 氯离子渗透性

2.4.1 氯离子渗透深度

本文采用 AgNO_3 显色法测定耦合循环后GO-RAC的 Cl^- 渗透深度.具体过程为:取出耦合循环后的试块,将其表面冲洗干净擦干,用平行双面切割机将试块均分为两部分后,立即将 AgNO_3 溶液显色指示剂喷涂在切开的试块横截面上,15 min后试块含 Cl^- 的部分出现银白色的 AgNO_3 沉淀,不含 Cl^- 的部分呈棕褐色.用防水笔绘制渗流分界线.每个试块测量5个点,取平均值作为最终渗透深度,显色方法

如图6所示.

图7为GO-RAC渗透深度与GO掺量间的关系.由图7可见:

(1)在耦合循环72次后,试件RAC-3、RAC-6中 Cl^- 的渗透深度相较于试件RAC-0分别降低了33.80%、56.42%.在相同耦合次数下,GO的掺量越高,GO-RAC的 Cl^- 渗透深度越小,且随着耦合次数的增加,其降幅效果愈发显著.这是由于混凝土内部的孔隙结构、分布和孔径大小对其抗渗性的影响较大^[20].GO的掺入调节了水泥浆体的水化产物,细化、封闭了

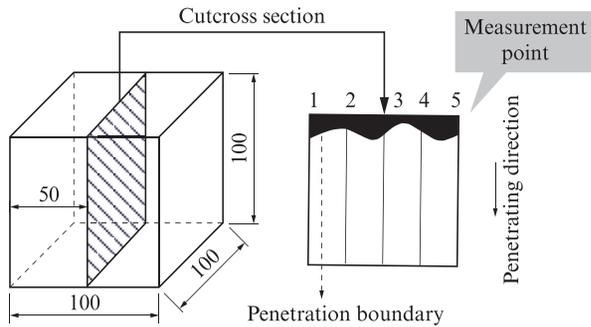
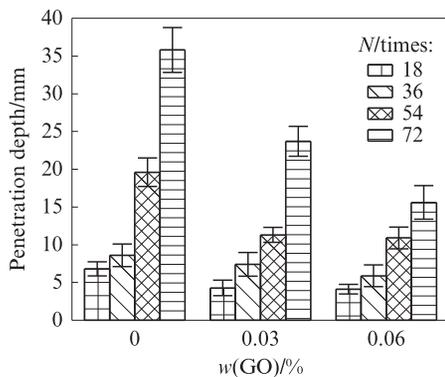
图6 Cl⁻渗透深度显色示意图Fig. 6 Cl⁻ penetration depth color rendering diagram (size: mm)

图7 GO-RAC渗透深度与GO掺量间的关系

Fig. 7 Relationship between GO-RAC penetration depth and GO content

孔结构,优化了孔径分布^[21],同时,GO具有较好的胶结能力,可以有效地将基体与结构内部的NaCl晶体、侵蚀性产物紧密结合,同样减缓了Cl⁻的渗透。

(2)不同GO掺量GO-RAC试件的Cl⁻渗透深度均随着耦合循环次数的增加而增加,但这种趋势是非线性的。以试件RAC-0为例,当耦合循环次数为18~36次时,Cl⁻渗透深度的增幅缓慢,36次耦合循环下的Cl⁻渗透深度较18次循环仅增加了1.80 mm,而其在72次耦合循环下的Cl⁻渗透深度较36次耦合循环增加了27.20 mm。究其原因,循环作用开始以前试件就已经处于盐饱和状态,随着温度的降低,溶液中水结冰引起的膨胀压促进了Cl⁻的扩散。但是,在初始阶段试件受到的破坏仅发生在表层区域,因此Cl⁻的渗透深度很小,界面渗透曲线的变化幅度不明显;当耦合循环进入中后期时,试件内部的损伤程度加剧,孔隙增多,出现宽裂缝,试件的骨架破坏严重,导致Cl⁻渗透程度加深。综合比较发现,掺入GO的试件在耦合作用下始终能保持比对照组更低的渗透深度,体现了更好的抗渗性。

2.4.2 氯离子扩散特性

为探究冻融与氯盐侵蚀耦合作用下GO-RAC的Cl⁻扩散特性,本文采用Cl⁻含量快速测定法测定不

同深度处的Cl⁻质量比。参照显色法试验的初步结果,Cl⁻质量比在试件表层0~10 mm范围内最高,因此在此范围内取2个样品采集点,分别为0~5 mm和5~10 mm处;其余深度按等距设置取样点,分别为10~20、20~30、30~40 mm处,共计5处。

利用钻头直径为6 mm的冲击钻在试块两侧分别钻孔,到达采样点位处采集试样。先用0.15 mm筛对试样进行筛分,去除过粗颗粒后再将剩余试样用研钵磨粉,在80 °C下将粉末烘干直至恒重,待冷却至室温后称取2 g样品用SSWY-820型磁力搅拌一体式Cl⁻含量快速测定仪进行测定。

整理数据,得到耦合循环72次后试件RAC-0、RAC-6不同深度处的Cl⁻质量比曲线,如图8所示。采用Fick第二定律^[22-23]即式(1)对Cl⁻质量比进行拟合,得到的Cl⁻扩散系数($D, \text{m}^2/\text{s}$)以及表面Cl⁻质量比($C_s, \text{mg}/\text{g}$)如表4所示。

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1)$$

式中: C 为不同深度处Cl⁻的质量比,mg/g; x 为深度,m; t 为Cl⁻扩散时间,s。

由图8可见,在冻融和氯盐侵蚀的耦合作用下,Cl⁻在GO-RAC中的分布依然满足Fick第二定律,且相关性系数较高。但此情况下的Cl⁻扩散并非简单的自然扩散,由于冻融引起的试件破坏由表及里,所以在试件表层0~5 mm范围内的Cl⁻质量比有极大幅度的增加。

采用指数函数来表征表面Cl⁻质量比的相关数据,拟合结果见图9。由图9可见,不同配合比试件的表面Cl⁻质量比均随着耦合循环次数的增加以指数形式增大。试件RAC-0的增长形势与其他试件不完全相同,这是因为表面Cl⁻质量比会受到混凝土种类、水灰比等诸多因素的影响^[24],GO掺入后改变了水泥基体的水化产物形态、晶体结构和孔隙分布,也就势必造成了Cl⁻渗透、扩散的差异化。当然,还需要指出的是各种改性混凝土在实际服役一段时期后,其表面Cl⁻质量比都将会逐步趋于稳定不再增长,保持一定质量比值,且该值一般会远小于混凝土所处实际环境中的Cl⁻质量比值。

对耦合循环下的Cl⁻扩散系数进行多项式拟合,得到均具有较高相关性的动态曲线,如图10所示。当耦合循环作用开始时,水冻结形成的膨胀压可以促进Cl⁻的扩散,致使扩散系数较大;随着耦合循环的持续进行,GO-RAC孔隙中的Cl⁻含量趋于平衡,环境中的Cl⁻进入混凝土内部后发生化学反应而固化,使得初期冻融产生的渗透压力、温度压力及冻胀应

力均较小:一方面,Cl⁻渗透削弱了冻融强度,因为其降低了混凝土孔隙液的冰点;另一方面,冻融对Cl⁻侵蚀也起到了制约作用,即低温环境下Cl⁻的侵蚀速率减缓^[13].因此,Cl⁻的扩散系数降低.在耦合循环后期,Cl⁻溶液梯度导致混凝土不同深度的分层结冰和渗透压力差增大,使得冻融对孔隙结构的持续破坏进一步加深了Cl⁻的渗透,对混凝土持续造成损伤,Cl⁻的扩散系数开始增大.

上述GO-RAC的Cl⁻扩散系数变化规律与文献

[23]中特种混凝土的结论较为相似,但有别于普通混凝土随着耦合循环次数的增加,Cl⁻的扩散系数线性增长的变化趋势^[25].可见,混凝土材料的组分构成和配合比对Cl⁻的扩散系数均存在一定影响.横向对比不同GO掺量的试件发现,由于GO纳米片层能够促使水泥基体中的疏松孔隙处形成花形晶体,并且形成交联的网状结构^[8],使得RAC试件的孔隙进一步细化,进而提升了试件的抗盐冻性能,且GO掺量为0.06%时的提升效果更优.

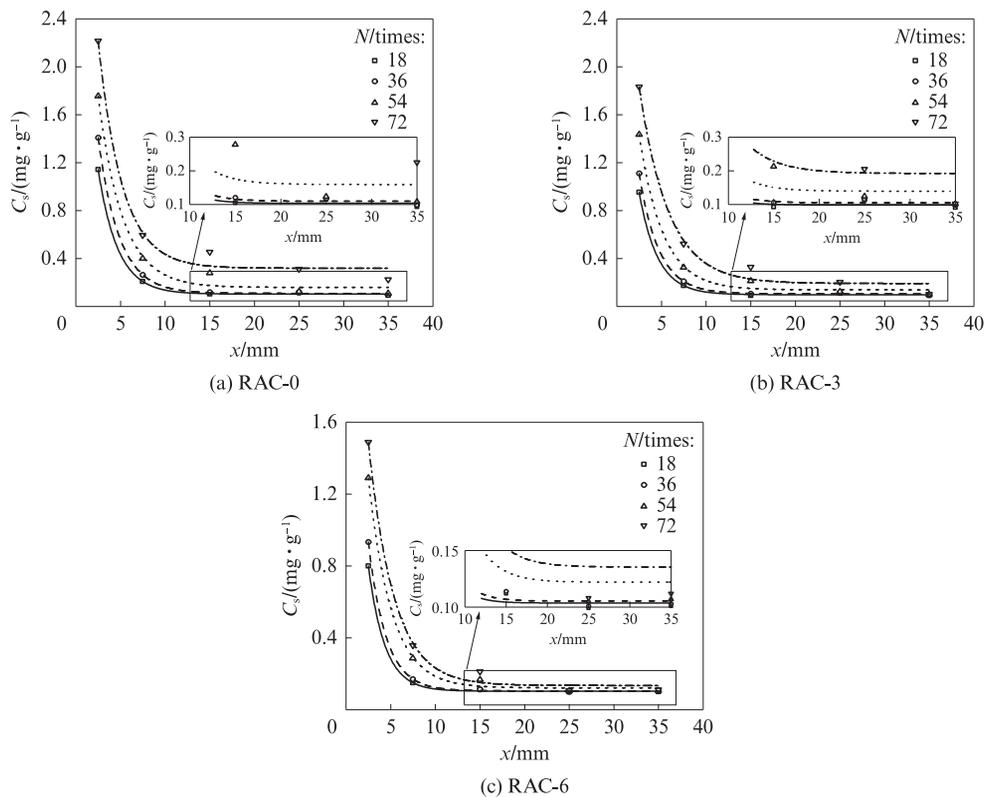


图8 Cl⁻质量比分布实测数据与拟合曲线

Fig. 8 Measured data and fitting curves of Cl⁻ mass ratio distribution

表4 耦合作用下的表面Cl⁻质量比及Cl⁻扩散系数

Table 4 Surface Cl⁻ mass ratio and Cl⁻ diffusion coefficient under coupling

Specimen No.	N/times	C _s /(mg·g ⁻¹)	D/(m ² ·s ⁻¹)	R ²
RAC-0	18	3.365	30.239×10 ⁻¹³	0.9994
	36	3.867	16.950×10 ⁻¹³	0.9997
	54	4.141	21.911×10 ⁻¹³	0.9847
	72	5.124	32.533×10 ⁻¹³	0.9829
RAC-3	18	2.959	28.411×10 ⁻¹³	0.9988
	36	3.225	16.121×10 ⁻¹³	0.9996
	54	3.466	20.746×10 ⁻¹³	0.9911
	72	4.107	29.409×10 ⁻¹³	0.9808
RAC-6	18	2.793	24.898×10 ⁻¹³	0.9995
	36	3.058	13.182×10 ⁻¹³	0.9997
	54	3.191	14.364×10 ⁻¹³	0.9963
	72	3.385	19.892×10 ⁻¹³	0.9925

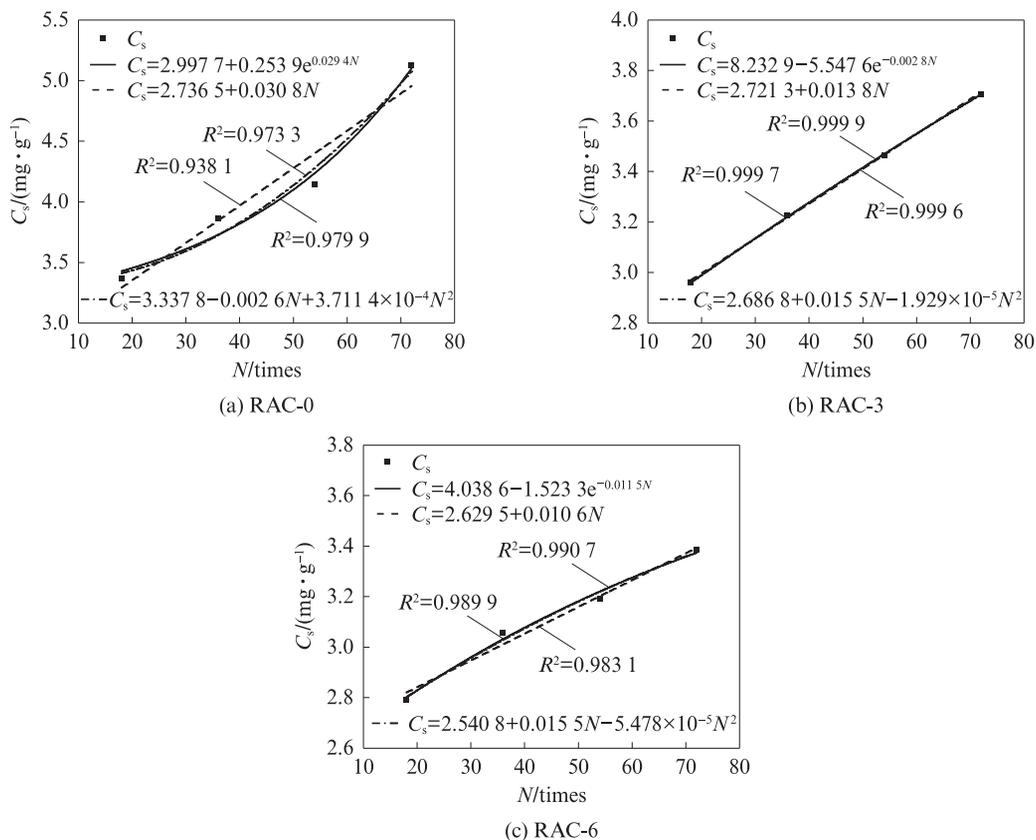


图9 表面Cl⁻质量比与耦合次数的关系
Fig. 9 Relationship between surface Cl⁻ mass ratio and coupling times

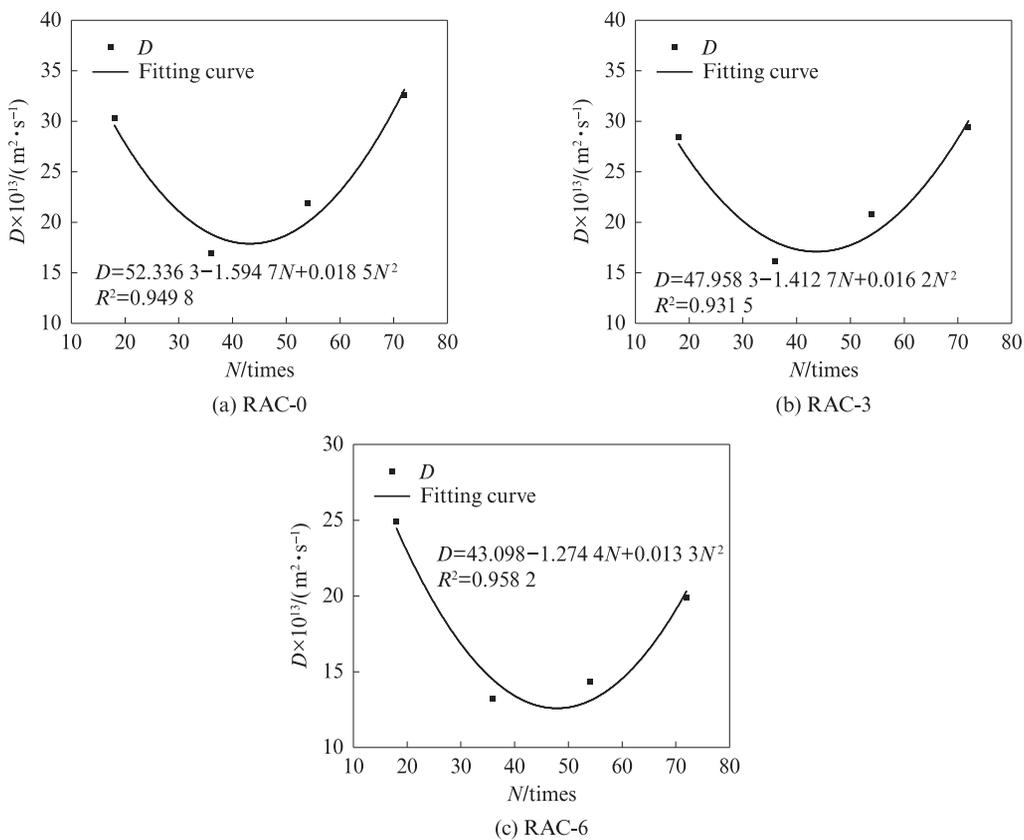


图10 Cl⁻扩散系数与耦合次数的关系
Fig. 10 Relationship between diffusion coefficient of Cl⁻ and coupling times

3 结论

(1)冻融循环与氯盐侵蚀的耦合作用加速了再生粗骨料混凝土(RAC)的劣化损伤,耦合循环72次后不同氧化石墨烯(GO)掺量氧化石墨烯再生粗骨料混凝土(GO-RAC)的相对动弹性模量均降低至初始值的60%以下;其破坏程度较普通RAC有不同程度的降低,当GO掺量为0.06%时的延缓效果最为明显.

(2)在水胶比不变的前提下,GO掺量为0.06%时GO-RAC的抗压强度较基准组RAC提高了10.53%,性能最佳.在冻融与氯盐侵蚀的耦合作用下,基准组RAC的抗压强度随着耦合循环次数的增加而下降,GO-RAC的抗压强度均呈现出先上升后下降的趋势;同时在0.06%掺量范围内GO-RAC的抗压强度损失率随着GO掺量的提高而减小.

(3)在冻融循环与氯盐侵蚀的耦合作用下,GO-RAC始终能保持较低的渗透深度和 Cl^- 质量比,体现了较好的抗渗性.GO-RAC在冻融循环与氯盐侵蚀耦合作用下的 Cl^- 质量比分布符合Fick第二定律.不同配合比GO-RAC的表面 Cl^- 质量比均随着耦合循环次数的增加呈指数形式增大, Cl^- 扩散系数随着耦合循环次数的增加先减小后增大.

参考文献:

- [1] LIMBACHIYA M C, LEELAWAT T, DHIR R K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete [J]. *Materials Structures*, 2000, 33(9):574-580.
- [2] 胡琼,宋灿,邹超英.再生混凝土力学性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2009,10(4):40-43.
HU Qiong, SONG Can, ZHOU Chaoying. Experimental research on mechanical properties of recycled concrete[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 10(4):40-43. (in Chinese).
- [3] MANDAL S, CHAKRABORTY S A G. Some studies on durability of recycled aggregate concrete [J]. *Indian Concrete Journal*, 2002, 76(6):385-388.
- [4] SHARMA S, KOTHIAL N C. Influence of graphene oxide as dispersed phase in cement mortar matrix in defining the crystal patterns of cement hydrates and its effect on mechanical, microstructural and crystallization properties[J]. *Rsc Advances*, 2015, 65(5):52642-52657.
- [5] 王玲玲,谷亚新,李育霖,等.纳米强化技术对再生混凝土耐久性影响研究[J].混凝土,2014(7):48-51.
WANG Lingling, GU Yaxin, LI Yulin, et al. Effects of nano-strengthening technology on the durability of recycled concrete[J]. *Concrete*, 2014(7):48-51. (in Chinese).
- [6] LI X L, ZHI L J. Graphene hybridization for energy storage

- applications [J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(9):3189-3216.
- [7] 吕生华,孙婷.GO纳米片层对水泥基复合材料的增韧效果及作用机制[J].复合材料学报,2014,31(3):644-652.
LÜ Shenghua, SUN Ting. Toughening effect and mechanism of graphene oxide nanosheets on cement matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3):644-652. (in Chinese)
- [8] 吕生华,周庆芳,孙婷,等.GO纳米片层对水泥水化晶体及胶砂力学性能的影响[J].建筑材料学报,2014,17(5):749-754.
LÜ Shenghua, ZHOU Qingfang, SUN Ting, et al. Effects of GO nanosheets on the mechanical properties of cement hydration crystals and mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(5):749-754. (in Chinese)
- [9] HAN B G, ZHENG Q F, SUN S W, et al. Enhancing mechanisms of multi-layer graphenes to cementitious composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 101:143-150.
- [10] LING Y F, ZHANG P, WANG J, et al. Effects of nanoparticles on engineering performance of cementitious composites reinforced with PVA fibers [J]. *Nanotechnology Reviews*, 2020, 9(1):504-514.
- [11] 吕生华,马宇娟,邱超超,等.氧化石墨烯增强增韧水泥基复合材料的研究[J].功能材料,2013,44(15):2227-2231.
LÜ Shenghua, MA Yujuan, QIU Chaochao, et al. Study on reinforcing and toughening of graphene oxide to cement-based composites[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(15):2227-2231. (in Chinese).
- [12] 雷斌,邹俊,饶春华,等.氧化石墨烯对再生混凝土改性试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(增刊2):103-108.
LEI Bin, ZOU Jun, RAO Chunhua, et al. Experimental study on modification of recycled concrete by graphene oxide[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Suppl 2):103-108. (in Chinese).
- [13] 徐义洪,范颖芳.盐冻环境下氧化石墨烯混凝土力学损伤试验研究[J].混凝土与水泥制品,2019(5):9-12,18.
XU Yihong, FAN Yinfang. Experimental study on the mechanical damage of GO-RAC under salt freezing environment[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2019(5):9-12, 18. (in Chinese).
- [14] 王晨霞,郭磊,曹芙蓉.盐碱与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性试验研究[J].硅酸盐通报,2018,37(1):10-16.
WANG Chenxia, GUO Lei, CAO Fubo. Recycled concrete corrosion in saline and freeze-thaw cycle coupling under the action of durability research[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 37(1):10-16. (in Chinese).
- [15] TANG S W, YAO Y, ANDRADE C, et al. Recent durability studies on concrete structure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78:143-154.
- [16] 金伟良,吕清芳,赵羽习,等.混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J].建筑结构学报,2007,28(1):7-13.
JIN Weiliang, LÜ Qingfang, ZHAO Yuxi, et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1):7-13. (in Chinese).
- [17] 王宝民,姜瑞双,赵汝英.石墨烯的分散性及石墨烯水泥基复

- 合材料的研究进展[J]. 混凝土, 2016(12):68-72, 75.
- WANG Baomin, JIANG Ruishuang, ZHAO Ruying. Research progress of the dispersibility of graphene and graphene cement-based composite materials [J]. Concrete, 2016 (12) : 68-72, 75. (in Chinese).
- [18] YANG H B, CUI H Z, TANG W C, et al. A critical review on research progress of graphene/cement based composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 102:273-296.
- [19] 富恩昊. 氧化石墨烯再生混凝土力学性能和抗冻耐久性试验研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2018.
- FU Enhao. Experimental study on mechanical properties and frost resistance durability of graphene oxide recycled concrete [D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University, 2018. (in Chinese)
- [20] 朱思远, 耿欧, 王腾, 等. 废轮胎再生混凝土抗氯离子侵蚀试验研究[J]. 混凝土, 2021(2):53-58.
- ZHU Siyuan, GENG Ou, WANG Teng, et al. Experimental study on resistance to chloride ion corrosion of recycled concrete from waste tires[J]. Concrete, 2021(2):53-58. (in Chinese)
- [21] GUO K, MIAO H, LIU L, et al. Effect of graphene oxide on chloride penetration resistance of recycled concrete [J]. Nanotechnology Reviews, 2019, 8(1):681-689.
- [22] 王月, 安明喆, 余自若, 等. 氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下 C50 高性能混凝土的耐久性研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3):41-46.
- WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. Durability study of C50 high performance concrete under the coupled action of chloride erosion and freeze-thaw cycles [J]. China Railway Science, 2014, 35(3):41-46. (in Chinese)
- [23] 郝璐岑, 刘元珍, 高宇璇, 等. 氯盐侵蚀和冻融循环耦合作用下保温混凝土的耐久性[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(4):1562-1568.
- HAO Lucen, LIU Yuanzhen, GAO Yuxuan, et al. Durability of thermal insulation concrete under the coupled action of chloride erosion and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science), 2018, 43(4):1562-1568. (in Chinese)
- [24] SONG H W, SHIM H B, PETCHERDCHOO A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(2):120-127.
- [25] 陈月顺, 齐国霖, 吴伟. 混凝土在氯离子侵蚀和冻融耦合作用下的研究[J]. 建筑技术开发, 2012, 39(2):45-48.
- CHEN Yueshun, QI Guolin, WU Wei. Research on concrete under the coupled action of chloride ion erosion and freeze-thaw [J]. Development of Building Technology, 2012, 39(2):45-48. (in Chinese)