

# 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土的改性研究

代明江\*, 殷帅帅, 袁晓洒

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2022年6月6日; 录用日期: 2022年6月27日; 发布日期: 2022年7月5日

## 摘要

在高掺量粉煤灰钢纤维混凝土中掺入氧化石墨烯会增加抗冻性。试验测定了试块的抗压强度、动弹性模量、质量损失, 分析了氧化石墨烯对混凝土的改善情况, 建立了冻融损伤数学模型。通过对试件进行无损CT扫描, 从微观层次揭示了GO对试件的抗冻性能的影响。结果表明: 在高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土加入氧化石墨烯28 d后的抗压强度大于普通高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土; 经过100次冻融循环后, 加入氧化石墨烯的混凝土抗冻性较好, 抗压强度、动弹性模量明显高于对照组。掺量0.01%氧化石墨烯的混凝土抗压强度增加25.02%, 动弹性模量增加14.06%; 所建立的冻融循环二次函数衰减模型与试验结果有很高拟合度, 表现出较高的准确性。

## 关键词

氧化石墨烯(GO), 粉煤灰, 钢纤维, 混凝土

# The Modification of High Content Fly Ash-Steel Fiber Concrete by Graphene Oxide

Mingjiang Dai\*, Shuaishuai Yin, Xiaosa Yuan

Shaanxi Provincial Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 5<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Incorporation of graphene oxide (GO) in high-dose fly ash steel fiber reinforced concrete increases frost resistance. The compressive strength, dynamic elastic modulus and mass-loss of the speci-

\*通讯作者。

mens were measured, the improvement of graphene oxide on concrete was analyzed, and a mathematical model of freeze-thaw damage was established. The effects of GO on the frost resistance of the specimens were revealed from the mesoscopic level by performing non-destructive CT scans on the specimens. The results show that the compressive strength of the high-dose fly ash-steel fiber concrete added with graphene oxide for 28 d is greater than that of the ordinary high-dose fly ash-steel fiber concrete; the freezing-resistance of concrete with graphene oxide was better after 100 freeze-thaw cycles. In addition, its compressive strength and dynamic elastic modulus were significantly higher than those of the control group. The compressive strength and dynamic elastic modulus of concrete with 0.01% GO increased by 25.02% and 14.06%, respectively; the established freeze-thaw cycle quadratic function decay model has a high degree of fit with the experimental results, showing high accuracy.

## Keywords

Graphene Oxide (GO), Fly Ash, Steel Fiber, Concrete

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家经济的发展,混凝土作为基本建筑材料面临着资源不可再生和环境污染的双重压力。采用粉煤灰替代部分水泥有经济、环境和技术等优势。例如,粉煤灰加入混凝土可以降低早龄期的水化热[1][2]。有研究表明,粉煤灰的加入可以减少氯离子的进入,使钢筋混凝土结构更加持久[3]。一般结构混凝土中粉煤灰的掺量适中,为15%~25% [1]。近年来,人们对生产混凝土会加剧环境污染的认识不断提高,这促进了对高掺量粉煤灰混凝土的需求,因此增加粉煤灰掺量是降低水泥含量,从而降低混凝土碳排放的一种方法。已有的研究表明,以普通硅酸盐水泥为唯一粉料的混凝土抗冻性能优于粉煤灰为粉料的混凝土[4][5]。高掺量粉煤灰的水化过程较慢,为改善前期强度不足,钢纤维-粉煤灰混凝土因此产生。钢纤维加入混凝土的主要优点是阻碍宏观裂纹的扩展,通过桥接作用限制微观裂纹扩展到宏观水平和改善混凝土的延展性以及高韧性。氧化石墨烯是一种新型纳米材料,在混凝土中添加纳米材料可以减少混凝土的孔隙率,改善混凝土的抗冻性能[6]。在混凝土中应用的纳米材料有 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、碳纳米管/纤维和氧化石墨烯(GO)纳米片[7]-[15]。许多研究证明,纳米材料的加入可以提高水泥基抗压强度和增强抗渗性[16][17]。也有研究证明,氧化石墨烯可以缩短水化进程,形成以 GO 为核心的具有交联交织的致密结构[18][19]。本文旨在研究氧化石墨烯对高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土抗冻性能的影响,建立冻融损伤模型,从而揭示 GO 对高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土的改善情况。

## 2. 试验材料

### 2.1. 材料

采用普通硅酸盐水泥为 P·O42.5, I 级粉煤灰,基本化学成分见表 1;天然骨料粒径范围 4.75~20 mm;细骨料采用天然河砂,细度模数为 2.67,属于中砂。钢纤维采用剪切波浪线尺寸为 37 mm × 1 mm × 0.8 mm;聚羧酸减水剂(PCs, 20%),减水率为 20%。GO 分散液采用超声波分散,含量为 10 mg/ml,GO 纳米偏层厚度为 3~7 nm,如图 1 和表 2 所示。

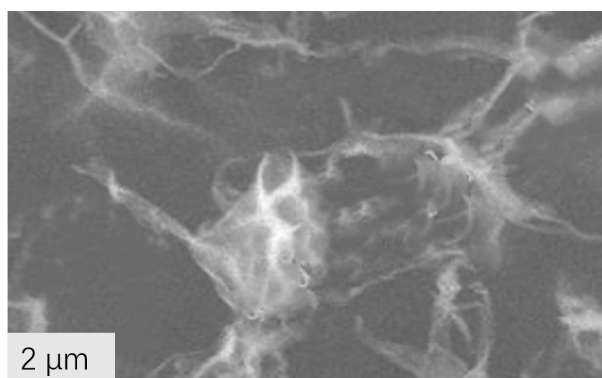
**Table 1.** Chemical composition of ordinary Portland cement and fly ash  
**表 1.** 普通硅酸盐水泥和粉煤灰化学成分

类别	化学成分(%)									
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	碱含量	烧失量
水泥	21.58	3.36	5.62	61.31	2.32	2.41	0	0	0.54	2.86
FA	49.02	6.97	31.56	4.88	0.83	0	1.05	0.73	0	0

注：该百分比为质量百分比。

**Table 2.** Graphene oxide dispersion water solution parameters  
**表 2.** 氧化石墨烯分散水溶液参数

纯度(wt%)	厚度(nm)	片层直径(nm)	层数(层)	比表面积(m <sup>2</sup> /g)	外观
>95	3.4~7	10~50	6~10	100~300	黑褐色



**Figure 1.** The structure of graphene oxide  
**图 1.** 氧化石墨烯的结构示意图

## 2.2. 混凝土的制备

采用 GO、水、PCs、水泥、粉煤灰、钢纤维和河砂等根据表 3 配比制备混凝土，其中 GO 和 PCs 是液体量。制备时，先将水、PCs 及 GO 混合均匀并超声分散 30 min，然后再与水泥、河砂、骨料等搅拌均匀并加入模具，24 h 脱模后进行标准养护 28 d。

**Table 3.** The mix ratio (unit: kg/m<sup>3</sup>)  
**表 3.** 配合比(单位: kg/m<sup>3</sup>)

试件编号	水泥	砂	石	水	GO	FA	钢纤维	减水剂
GFS-0.00	250.8	687	1030.5	115.91	0	205.2	25	2
GFS-0.01	250.8	687	1030.5	115.91	0.0687	205.2	25	2
GFS-0.03	250.8	687	1030.5	115.91	0.2061	205.2	25	2
GFS-0.05	250.8	687	1030.5	115.91	0.3435	205.2	25	2
GFS-0.07	250.8	687	1030.5	115.91	0.4809	205.2	25	2

### 3. 试验方法

试验中采用快冻法, 每组分别设计三个试件, 其尺寸规格为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。并依据按照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》开展试验, 以相对动弹性模量、质量变化和抗压强度变化作为指标, 评价氧化石墨烯对高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土抗冻性能的影响。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 外观变化

图 2 揭示了 GFS-0.00 和 GFS-0.01 在 25 次、50 次、75 次和 100 次冻融循环后试件表面剥落的变化。从图中可以观察到, 在 25 次冻融循环后, GFS-0.00 和 GFS-0.01 的外观剥落程度基本一致。随着冻融循环次数的增加, 在 50 次冻融循环后 GFS-0.00 的表面剥落程度大于 GFS-0.01 的表面剥落。在 100 次冻融循环后, 可以直观的看见 GFS-0.00 的外观剥落程度明显重于 GFS-0.01, 表明了氧化石墨烯对高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土在抵抗冻融侵蚀, 混凝土表面剥落起到了改善的作用。

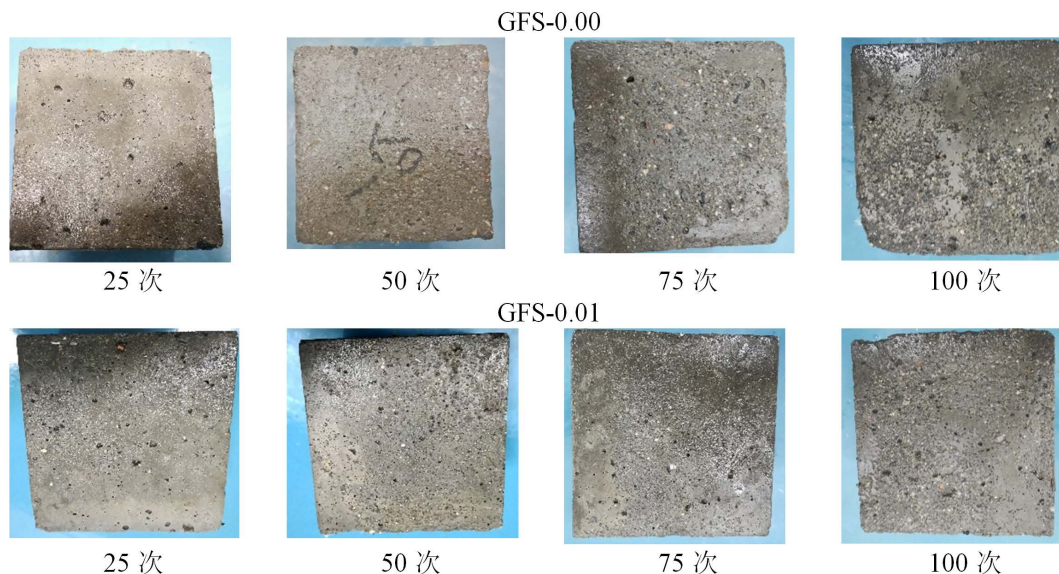
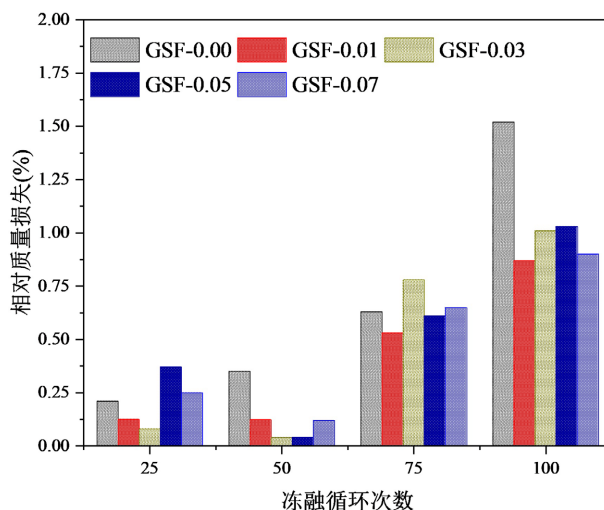


Figure 2. Improve the appearance of the specimen  
图 2. GO 对试件外观改善

### 4.2. 质量损失

每 25 次冻融循环后, 由于混凝土外表面发生剥落, 均会造成混凝土试件质量发生变化。对各组试件的质量进行剥落量统计后, 结果如图 3。若混凝土试件的剥落量大于 5% 或者冻融次数达到 100 次, 则试验终止。在对照组 GFS-0.00 和试验组 GFS-0.01 对比后发现, 在 50 次冻融循环内, GFS-0.01 质量损失远小于 GFS-0.00。结果表明, 加入适量氧化石墨烯使高掺量粉煤灰钢纤维混凝土抗冻性略微增加。在冻融次数达到 100 次, 对照组 GFS-0.00 质量损失远大于试验组 GFS-0.01, 这说明了在该冻融次数下, 混凝土内部产生的裂缝较多, 水分子进入裂缝在温度应力的进一步影响下, 裂缝急剧增多, 使质量损失急剧增加, 而试验组 GFS-0.01 中 GO 约束混凝土内部裂缝发展, 使其质量损失较少。在整个冻融循环过程中, 对照组和试验组的质量损失均小于国家冻融标准质量损失的 5%。



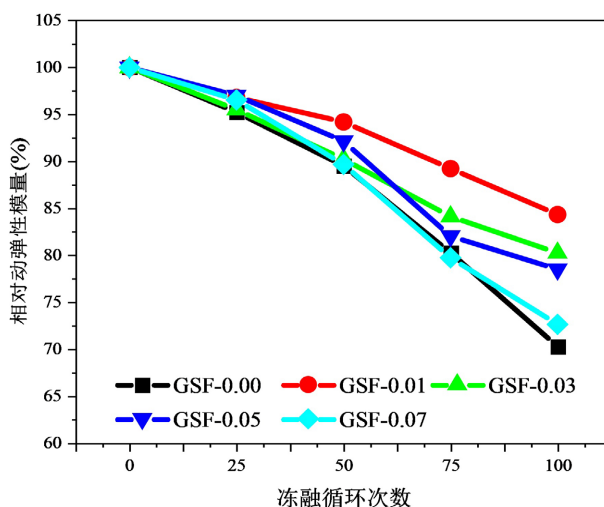
**Figure 3.** The effect of GO on the mass loss of high content fly ash steel fiber reinforced concrete

**图 3.** GO 对高掺量粉煤灰钢纤维混凝土质量损失的影响

### 4.3. 动弹性模量

每 25 次冻融循环后, 使用动弹仪测试各组试块的动弹性模量, 结果如图 4 所示。若试件的相对动弹性模量损失降低 60% 或冻融循环次数达到 100 次, 则试验终止。

从图 4 可知, 在整个冻融循环过程中(100 次循环)对照组 GFS-0.00 的动弹性模量均低于试验组 GFS-0.01、GFS-0.03、GFS-0.05 和 GFS-0.07, 动弹性模量随着冻融循环次数的增加逐渐降低。其中, GFS-0.01 的相对动弹性模量曲线下降最为平缓, 表现出较好的抗冻性能, 在冻融次数达到 100 次时, 相对动弹性模量减少 15%。这可能与 GO 的属性有关, 由于 GO 具有羟基、羧基和含氧官能团, 在水化反应过程中会 GO 为结晶中心形成致密的网状结构, 该结构具有交织交联的特征, 使混凝土抗冻胀应力的能力得到了显著的提升[18]。同时, 高掺量的粉煤灰颗粒能有效填充 GO 水化反应中的孔洞, 使结构的密实度再次得到改善[6]。



**Figure 4.** Effect of GO on dynamic elastic modulus of steel fiber concrete with high dosage of fly ash

**图 4.** GO 对高掺量粉煤灰钢纤维混凝土动弹性模量的影响

图 5 是 GO 对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土相对动弹性模量增强效应的分析。从图中可知, GSF-0.00 的 GO 含量为 0.00% 时, 相对动弹性模量的降低与冻融循环次数的相关系数  $R = 0.966$ , 当 GO 含量增加至 0.03% 时(GSF-0.03), 相关系数变为 0.995。相关系数值增加了 0.029, 该值说明了 GO 能有效抑制高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土相对动弹性模量的降低。试验组整体相对动弹性模量曲线位于对照组 GO 高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土(GSF-0.00)之上, 如图 5 所示。在 100 次冻融循环过程中, GFS-0.00 的 K 值为  $-0.298$ , GFS-0.01 的 K 为  $-0.156$ , 减小了 47.65%。当 GO 掺量过多时, 则降低其在混凝土中的分散性, 使 GO 在混凝中发生团聚。从 GSF-0.03 至 GSF-0.07 中, K 值也从  $-0.204$  降低到  $-0.287$ , 降低了 40.69%。表明了 GO 在混凝土中分散性是使混凝土抗冻性减小的主要原因之一。

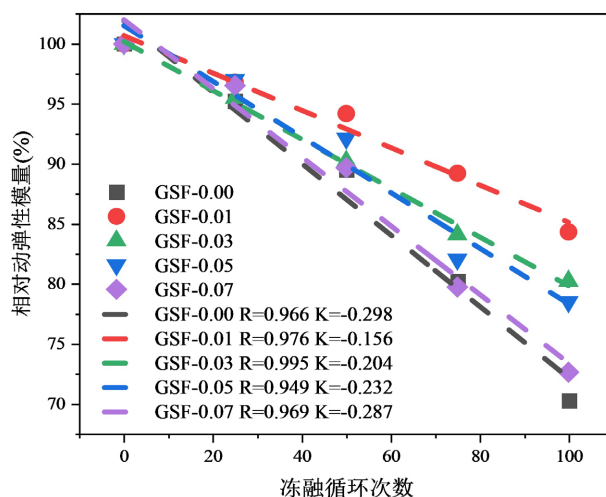


Figure 5. Linear regression analysis of relative dynamic elastic modulus of concrete

图 5. 混凝土的相对动弹性模量线性回归分析

#### 4.4. 抗压强度

图 6 为不同含量的氧化石墨烯对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土在不同冻融次数的抗压强度曲线图。从图中可以得出, 混凝土试件的抗压强度随冻融次数的增加而降低。在相同冻融循环次数下, 其抗压强度从高到低依次为: GFS-0.01 > GFS-0.03 > GFS-0.05 > GFS-0.07 > GFS-0.00。从冻融开始至试验结束, GFS-0.00 和 GFS-0.01 的强度损失率分别为 30.99% 和 22.49%。含有 GO 的试件 GFS-0.03、GFS-0.05、GFS-0.07 的强度曲线下降速率明显低于 GFS-0.00, 这说明在冻融循环试验中, GO 能够有效地提高混凝土的抗冻性和减小强度损失率。基于图中曲线的变化规律, GFS-0.01 和 GFS-0.03 对比 GFS-0.05 和 GFS-0.07, 在经过 100 次冻融循环后, GFS-0.01 和 GFS-0.03 的抗压强度始终高于 GFS-0.05 和 GFS-0.07, 即在一定条件下, GO 掺量越多, 试件强度的提升不一定呈正相关, 这是因为强度的提升除了与 GO 掺量有关, 还与 GO 在混凝土中的分散有关。当 GO 的掺量与在混凝土中的分散性呈现正相关时, 强度的提升则与 GO 的掺量呈现正相关。未来, 关于 GO 在混凝土中的分散性的研究, 这是值得我们关注的。通过 GFS-0.00、GFS-0.01、GFS-0.03、GFS-0.05 和 GFS-0.07 强度变化曲线可以得出试件在冻融循环次数未 50 次时, 抗压强度差值不大是因为试件的冻融破坏不严重。随着冻融循环试验的继续进行, 混凝土试件的破坏损伤不断加深, 导致抗压强度差值逐渐扩大, 试件的抗冻性能逐渐被削弱。在冻融循环试验进行到 50 次至 75 次期间, 混凝土试件的强度曲线曲率逐渐增大, 远大于冻融初期(冻融次数小于 50 次)的曲线曲率。这说明了骨料与浆体之间界面过渡区的粘结性随着冻融次数的增加而不断的被削弱, 使试件内部的破坏损伤进一步增大, 通过添加 GO 来

提高混凝土抗冻性能的增强效应逐渐消失。试验结果表明,在高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土中掺入 GO,能够减缓冻融循环试件的抗压强度损失速率,改善内部孔隙结构,从而提高混凝土的抗冻性。

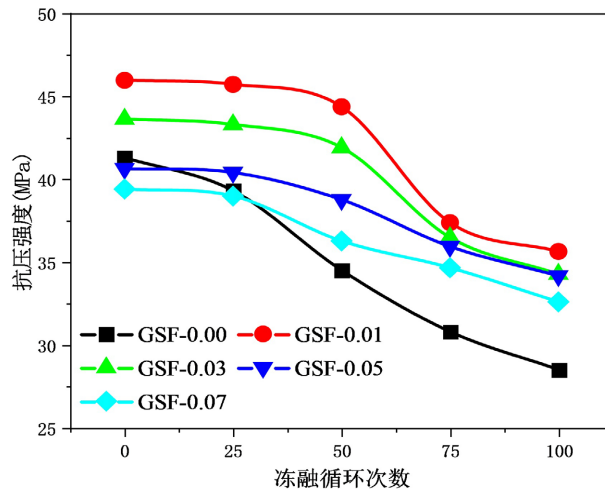


Figure 6. Changes in compressive strength of concrete subjected to freeze-thaw cycles

图 6. 混凝土受冻融循环作用的抗压强度变化

图 7 揭示了 GO 含量与高掺量粉煤灰-钢纤维混凝土抗压强度的关系。从图中可以看出, GFS-0.00 和 GFS-0.01 的 R 值分别是 0.978 和 0.825, 该值越小说明混凝土抗压强度损失值越小, 表明了冻融循环次数下, GFS-0.00 的强度损失率小于 GFS-0.01。GFS-0.03、GFS-0.05 和 GFS-0.07 的 R 值逐渐增大, 分别为 0.859、0.929 和 0.959, 其 R 值均小于 GFS-0.00。这说明了 GO 掺入混凝土会降低抗压强度和冻融循环的关联系数, 增强混凝土的抗冻性。从图 7 中, 对混凝土抗压强度线性回归曲线中可以看出, GFS-0.00、GFS-0.01、GFS-0.03、GFS-0.05 和 GFS-0.07 的 K 值从-0.136 逐渐增大到-0.072, 增大了 46.06%, 从另外一个方面说明混凝土的抗冻性在逐渐增强。

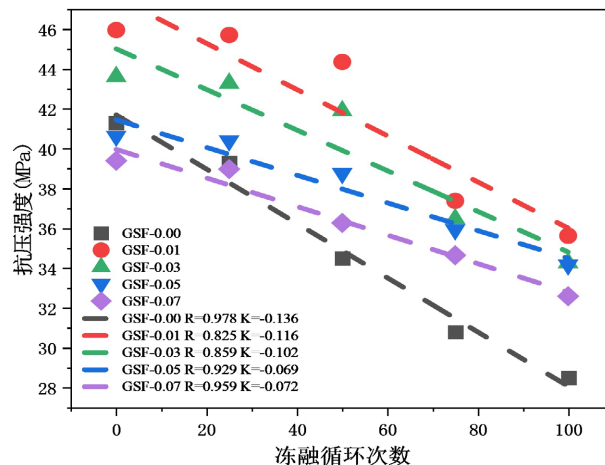


Figure 7. Linear regression analysis on compressive strength of concrete

图 7. 对混凝土抗压强度的线性回归分析

经过 100 次冻融循环后, 将 GSF-0.00、GAF-0.01、GSF-0.07 进行工业 CT 无损检测, 利用 Avizo 软

件对 CT 数据进行后处理, 得到混凝土试件的绝对孔隙率, 结果如表 4 所示。从表中可知, 孔隙率从小到大的排序是 GAF-0.01 > GSF-0.07 > GSF-0.00。该结果从微观角度验证了图 5 和图 7 的分析结果。

**Table 4.** The pores in concrete

**表 4.** 混凝土内部的孔隙

FA (%)	孔数量(个)	孔隙率(%)
GSF-0.00	33,450	1.635
GSF-0.01	27,946	0.932
GSF-0.07	30,745	0.998

## 5. GO 对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土影响冻融损伤模型分析

混凝土基质在搅拌过程中由于会引入空气, 致使硬化后的混凝土内部会出现数量众多且孔径较小的孔隙, 孔隙是影响混凝土长期抗冻的重要因素之一。混凝土冻融破坏损伤是混凝土长期处于冻融环境中, 随着外部气温和湿度变化, 内部会存在温度应力使孔隙由小孔变成大孔, 微裂缝逐渐发展成联通裂缝, 使混凝土出现耐久性问题。

本文采用相对动弹性模量和抗压强度损失两个指评价标准, 对混凝土内部的冻融破坏损失进行评价。根据在冻融循环试验中试件的相对动弹性模量变化和抗压强度变化, 基于混凝土损伤力学, 建立相对动弹性模量冻融损伤程度, 用  $D_r$  表示, 如式(1)所示; 建立力学衰减与冻融之间的关系, 用  $D_c$  表示, 如式(2)所示。

$$D_r = 1 - \frac{E_i}{E_0} \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为冻融循环  $i$  次后试件的动弹性模量,  $E_0$  为冻融前试件初始动弹性模量。

$$D_c = 1 - \frac{F_i}{F_0} \quad (2)$$

式中:  $F_i$  为冻融  $i$  次后试件的抗压强度;  $F_0$  为冻融前试件的抗压强度。

将试件的动弹性模量代入(1), 和抗压强度代入(2), 能得出混凝土试件在冻融循环期间的破坏损伤程度曲线图, 结果如图 8 和图 9 所示。

图 8 揭示了动弹性模量与冻融循环次数的关系, 所有试件的冻融损伤随着循环次数的增加而增加, 冻融循环损伤破坏曲线均呈上升趋势。比较图 8 和图 4, 可以得出试件的相对动弹性模量越大, 混凝土冻融破坏损伤就越小。经过 100 次冻融循环后, GSF-0.00 的损伤程度最大, 相对动弹性模量上升速率最快, 冻融破坏最严重; GSF-0.01 破坏程度最小, 相对动弹性模量上升速率最慢, 冻融破坏最轻微。图 9 揭示了在抗压强度下 GSF-0.00 冻融循环破坏程度最大。分析结果表明了试件的强度损失速率与冻融循环破坏程度是正相关的, 破坏程度越大越多, 试件内部的微裂缝就越多, 混凝土内部破坏就越严重。

为了能够了解冻融循环对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土的冻融破坏程度, 须建立混凝土冻融损伤二次函数衰减模型, 如式(3)所示。

$$y = a \cdot i^2 + b \cdot i + c \quad (3)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为材料系数;  $i$  为冻融循环次数。

将动弹性模量和抗压强度的数值代入式(3)进行拟合, 结果如表 5 和表 6 所示。



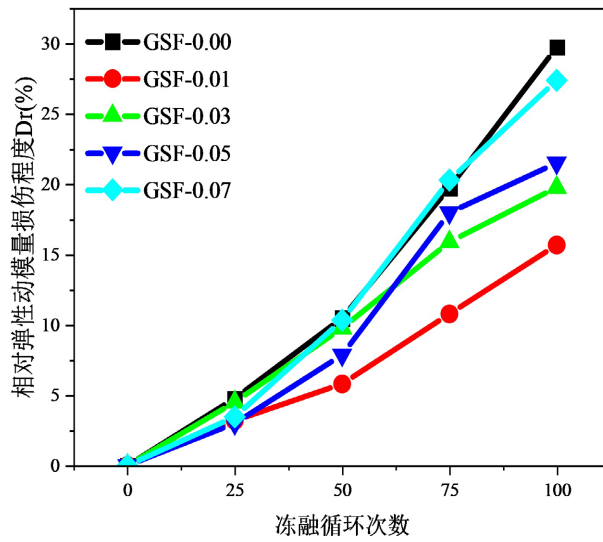


Figure 8. Freeze-thaw damage degree  $D_r$   
 图 8. 动弹性模量冻融损伤程度  $D_r$

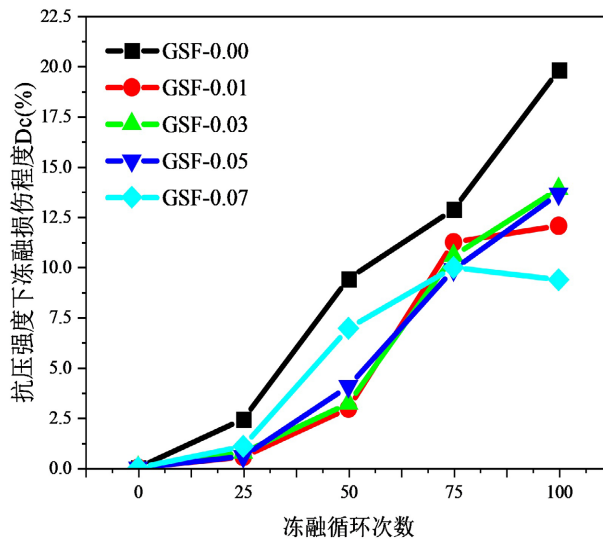


Figure 9. Freeze-thaw damage degree  $D_c$  under compressive strength  
 图 9. 抗压强度下冻融损伤程度  $D_c$

Table 5. Attenuation coefficient of quadratic function of freeze-thaw cycle damage degree  
 表 5. 冻融循环损伤程度二次函数衰减系数

Type	Fitting coefficient			Correlation coefficient $R^2$
	a	b	c	
GFS-0.00	0.00000016	0.13807	0.05514	0.99852
GFS-0.01	0.00006617	0.08963	0.12714	0.99429
GFS-0.03	-0.00004571	0.20833	-0.25714	0.99182
GFS-0.05	0.00007234	0.15978	-0.62971	0.94040
GFS-0.07	0.00000011	0.16793	-0.54657	0.98329

**Table 6.** Attenuation coefficient of quadratic function of freeze-thaw cycle damage under compressive strength  
**表 6.** 抗压强度下冻融循环损伤二次函数衰减系数

Type	Fitting coefficient			Correlation coefficient $R^2$
	a	b	c	
GFS-0.00	0.00006247	0.13784	-0.32702	0.97332
GFS-0.01	0.00007347	0.06584	-0.68599	0.90497
GFS-0.03	0.00000012	0.03555	-0.39921	0.93008
GFS-0.05	0.00009995	0.04656	-0.4435	0.96235
GFS-0.07	-0.00007094	0.18157	-0.94429	0.91006

从表 5 和表 6 中可以看出, 函数衰减模型的拟合系数  $R^2$  等于 0.90497 为最小值, 大部分  $R^2$  均在 0.96 以上, 这说了所建立的二次函数衰减模量的精确度与冻融循环试验结果数据具有较高的拟合, 该模型能够对冻融破坏起到很好的预测。

## 6. 结论

本文基于冻融循环试验, 研究了氧化石墨烯对高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土抗冻性能改性机理。主要的结论如下:

1) 氧化石墨烯加入高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土对抗冻性有明显的改良效果。掺量 0.01% 的氧化石墨烯的改良效果最佳。经过抗压强度、动弹性模量和质量损失分析, GFS-0.01 表现出最佳的抗冻性能, GO 减小了抗压强度、动弹性模量和质量损失与冻融循环次数的关联程度。

2) 适量的氧化石墨烯加入高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土可有效提高混凝土的密实性, 抑制试件的损伤开裂。

基于抗压强度和相对动弹性模量建立冻融循环损伤二次函数衰减模型, 结果表明混凝土中掺入氧化石墨烯可以降低损伤程度; 二次函数衰减模型的拟合系数均在 0.90 以上, 可以较好地反映高掺量粉煤灰 - 钢纤维混凝土冻融损伤变化规律。

## 参考文献

- [1] Thomas, M.D.A. (2007) *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association, Skokie, 24.
- [2] 陈炜一, 周予启, 李嵩, 阎培渝. 水化热抑制剂对水泥-粉煤灰胶凝材料水化和混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1609-1618.
- [3] Luping, T. and Löfgren, I. (2016) *Evaluation of Durability of Concrete with Mineral Additions with Regard to Chloride-Induced Corrosion*. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- [4] Siebel, E. (1989) Air-Void Characteristics and Freezing and Thawing Resistance of Superplasticized Air-Entrained Concrete with High Workability. In: Malhotra, V.M., Ed., *ACI SP-119: Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 297-320.
- [5] Bouzoubaâ, N., Bilodeau, A., Fournier, B., Hooton, R.D., Gagné, R. and Jolin, M. (2008) Deicing Salt Scaling Resistance of Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials: Laboratory and Field Test Data. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **35**, 1261-1275. <https://doi.org/10.1139/L08-067>
- [6] Yuan, X., Dai, M., Li, M., Zhang, S. and Zhang, M. (2022) Effect of Graphene Oxide and Fly Ash on Frost Resistance of the Steel Fiber Reinforced Concrete. *Sustainability*, **14**, Article No. 6236. <https://doi.org/10.3390/su14106236>
- [7] Wang, L., Zheng, D., Zhang, S., Cui, H. and Li, D. (2016) Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> on the Hydration and Microstructure of Portland Cement. *Nanomaterials*, **6**, Article No. 241. <https://doi.org/10.3390/nano6120241>
- [8] Yoo, D.Y., Kim, S., Park, G.J., Park, J.-J. and Kim, S.-W. (2017) Effects of Fiber Shape, Aspect Ratio, and Volume Fraction on Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites. *Composite Structures*,

- 174**, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.069>
- [9] Alrekabi, S., Cundy, A.B., Lampropoulos, A., Whitby, R.L.D. and Savina, I. (2017) Mechanical Performance of Novel Cement-Based Composites Prepared with Nano-Fibres, and Hybrid Nano- and Micro-Fibres. *Composite Structures*, **178**, 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.045>
- [10] Qureshi, T.S. and Panesar D.K. (2019) Impact of Graphene Oxide and Highly Reduced Graphene Oxide on Cement Based Composites. *Construction and Building Materials*, **206**, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.176>
- [11] Zhao, Y., Liu, Y., Shi, T., Gu, Y., Zheng, B., Zhang, K., *et al.* (2020) Study of Mechanical Properties and Early-Stage Deformation Properties of Graphene-Modified Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, **257**, Article ID: 119498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498>
- [12] Yao, X., Shamsaei, E., Chen, S., Zhang, Q.H., de Souza, F.B., Sagoe-Crentsil, K., *et al.* (2019) Graphene Oxide-Coated Poly (Vinyl Alcohol) Fibers for Enhanced Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Composites Part B: Engineering*, **174**, Article ID: 107010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107010>
- [13] Yao, X., Shamsaei, E., Wang, W., Zhang, S., Sagoe-Crentsil, K. and Duan, W. (2020) Graphene-Based Modification on the Interface in Fibre Reinforced Cementitious Composites for Improving both Strength and Toughness. *Carbon*, **170**, 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.051>
- [14] Ahmed, H.U., Faraj, R.H., Hilal, N., Mohammed, A.A. and Sherwani, A.F.H. (2021) Use of Recycled Fibers in Concrete Composites: A Systematic Comprehensive Review. *Composites Part B: Engineering*, **215**, Article ID: 108769. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108769>
- [15] Uygunoğlu, T., Şimşek, B., Ceran, Ö.B. and Eryeşil, Ö. (2021) Novel Hybrid Fiber Reinforced Mortar Production Using Polyvinyl Alcohol with a Blend of Graphene Oxide and Silver Nanoparticles. *Journal of Building Engineering*, **44**, Article ID: 102641. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102641>
- [16] 吕生华, 罗潇倩, 张佳, 高党国, 孙立, 胡浩岩. 氧化石墨烯调控水泥基材料形成大规模规整结构及其性能表征[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 10-14.
- [17] 冯玉洁, 朱建平, 王立, 冯春花, 孙钰江, 李根深, 等. 氧化石墨烯对矿渣水泥抗压强度及微观结构的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 169-175.
- [18] 吕生华, 孙立, 张佳, 胡浩岩, 雷颖, 侯永刚. 具有大规模规整致密花状微观结构形貌高/超高性能氧化石墨烯/水泥基复合材料[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 78-84.
- [19] 徐朋辉, 李相国, 刘卓霖, 杨蓉, 笪俊伟. 氧化石墨烯对粉煤灰水泥的水化和力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4066-4069.