

文章编号:1007-9629(2021)06-1169-10

冻融循环作用下BSFC的抗冻性及损伤模型

吴倩云^{1,2}, 马芹永^{1,2}

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001;

2.安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心,安徽 淮南 232001)

摘要:为研究玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土(BSFC)的抗冻性能,进行了单轴抗压强度试验、劈裂抗拉试验、超声波检测试验和孔结构表征试验,分析了冻融前后BSFC的质量损失率、相对波速、相对抗压强度、相对劈裂抗拉强度的变化规律以及微观结构特征.同时,运用损伤力学对BSFC的冻融损伤进行多指标评价;采用分形维数计算BSFC的气孔结构分布分形维数,拟合得到玄武岩纤维的贡献率公式,建立了基于气孔结构分布分形维数和玄武岩纤维贡献率的冻融损伤模型.结果表明:随着冻融循环次数的增加,BSFC的质量损失率增大,纵波波速、抗压强度和劈裂抗拉强度下降;BSFC的孔结构劣化,大孔径孔数量增多,气孔结构分布分形维数降低;在相同冻融次数下,玄武岩纤维掺量为0.18%时BSFC的抗冻性好;BSFC的冻融损伤与气孔分布分形维数、玄武岩纤维贡献率之间回归效果显著,可以预测经历冻融循环后BSFC的损伤劣化.

关键词:玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土;抗压强度;纵波波速;分形维数;气孔结构;损伤模型

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.007

Frost Resistance and Damage Model of BSFC under Freeze-Thaw Cycles

WU Qianyun^{1,2}, MA Qinyong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001,

China; 2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the frost resistance of basalt fiber-slag powder-fly ash concrete (BSFC), uniaxial compressive strength test, split tensile test, ultrasonic testing test and pore structure characterization test were carried out. The change rules of mass loss rate, relative wave velocity, relative compressive strength, relative splitting tensile strength and mesostructure characteristics of BSFC before and after freeze-thaw cycle were analyzed. The damage development was evaluated by multi-index of BSFC based on damage mechanical theory. The fractal dimension of distribution of air-void structure of the BSFC was calculated using the fractal theory. The contribution rate formula of basalt fiber under different number of freeze-thaw cycle was obtained by fitting the experimental data. Finally, the freeze-thaw damage model was established based on multiple factors such as fractal dimension and basalt fiber contribution. The results show that with the increase of the number of freeze-thaw cycle, the mass loss rate increases, but the *P*-wave velocity, compressive strength, and splitting tensile strength decrease; the air-void structure deteriorates and the number of harmful voids increases, and the fractal dimension of the pore structure distribution decreases. Under the same number of freeze-thaw cycle, compared with other fiber dosage, BSFC mixed with basalt fiber of 0.18% has the best frost resistance. The regression effect

收稿日期:2020-07-16; 修订日期:2020-08-15

基金项目:安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-005)

第一作者:吴倩云(1990—),女,安徽蚌埠人,安徽理工大学博士生.E-mail:834537065@qq.com

通讯作者:马芹永(1964—),男,安徽宿州人,安徽理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail: qymaah@126.com

of freeze-thaw damage and fractal dimension of air-void structure and basalt fiber contribution rate is significant, which can predict the damage deterioration of BSFC after freeze-thaw cycles.

Key words: basalt fiber-slag powder-fly ash concrete(BSFC); compressive and tensile strength; *P*-wave velocity; fractal dimension; air-void structure; damage model

冻融循环作用是混凝土在正负温度交替环境下服役劣化的重要因素之一,在中国西北和东北寒冷地区,混凝土结构因长期处在特殊环境中遭受不同程度的冻融破坏,严重影响到了混凝土结构的安全性和使用寿命,从而带来巨大的经济损失^[1-2].因此,对混凝土在冻融循环作用下的冻融损伤劣化过程以及冻融损伤模型进行研究,有助于延缓混凝土结构的冻融破坏和评价其服役状态.目前,众多学者对混凝土的抗冻性能开展了大量研究,并取得了丰硕的成果^[3-7].研究表明,在合适掺量下,玄武岩纤维、粉煤灰、矿渣粉的掺入能改善混凝土的抗冻性能^[8-11].

当前,众多学者多是建立以冻融循环次数为主要变量的单一因素影响模型,如抗压强度损伤模型^[12-13]及相对动弹性模量损伤模型^[13-15].然而,混凝土是典型的非均质材料,其内部存在大量微孔洞、微裂纹等缺陷.在外界环境作用下,这些缺陷的扩展贯通是混凝土破坏的主要原因.在冻融环境下,混凝土内部孔隙经静水压力、温度应力等共同作用后不断发生变化.混凝土材料的损伤是细观成因在宏观上的反映.因此,也有部分学者研究通过细观损伤变量及其模型方程来描述混凝土材料的宏观损伤行为.梁昕宇等^[16]以混凝土细观孔结构图像的分形维数为损伤变量,研究了单轴压缩下混凝土的损伤演化规律.金珊珊等^[17]指出,气泡分布分形维数与混凝土相对耐久性指数具有较高的正相关性,故可用气泡分布分形维数评估混凝土的抗冻性能.Tian等^[18]以内部孔隙结构的演化和空间分布为研究对象,来研究混凝土的冻融损伤.Jin等^[19]通过建立以分形维数为损伤变量的冻融损伤模型,指出该损伤模型可以定量反映混凝土的细观损伤程度.以上研究模型均是考虑单因素作用建立的混凝土损伤模型.混凝土材料的性能是受其本身结构和组成材料共同作用的结果^[20-21],因此可以考虑建立孔结构和组成材料2方面因素的损伤模型.

本文以玄武岩纤维掺量、冻融循环次数为主要变量,对玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土(BSFC)进行快速冻融循环试验和孔结构分析试验,拟合得到不同冻融循环次数条件下的玄武岩纤维贡献率公

式,建立基于孔结构分形维数和玄武岩纤维贡献率的BSFC复合冻融损伤模型,以期寒冷地区BSFC的耐久性研究提供理论支撑和试验依据.

1 试验

1.1 试验原材料和配合比

水泥(C):淮南“八公山”牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥;矿渣粉(SP):河北灵寿县博矿产品贸易有限公司生产的S95级矿渣粉,比表面积为400 m²/kg,掺量为胶凝材料总质量的15%;粉煤灰(FA):淮南平圩电厂的Ⅱ级粉煤灰,掺量为胶凝材料总质量的20%;细骨料:天然河沙;粗骨料:5~20 mm连续级配碎石.胶凝材料的化学组成见表1.减水剂:青岛虹厦高分子材料有限公司生产的HSC聚羧酸高性能减水剂,减水率(质量分数)为25%;纤维:选用耐碱性的玄武岩纤维,长度为6 mm,直径为15 μm,弹性模量为91~110 GPa,抗拉强度为3 000~4 800 MPa.

依据JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》配制C40混凝土;试验选择以玄武岩纤维体积分数(φ)0%、0.12%、0.15%、0.18%掺入混凝土中.按照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》制作尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,每组3个.BSFC试件的配合比见表2.

表1 胶凝材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions of binder materials

	w/%							
Material	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
C	19.60	66.30	6.50	3.50	0.70	0.60	0.30	2.50
SP	42.00	40.00	9.80	1.89	5.09			0.21
FA	54.18	0.40	22.35	12.36	0.06	2.62	3.88	

1.2 试验方法

1.2.1 快冻试验

冻融试验采用TEST-1000型高低温湿热试验箱,按照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性与耐久性性能试验方法》中的快冻法进行.设定冻结温度为-20℃,融化温度为15℃,1次冻融循环周期为8 h,即冻结4 h,融化4 h.冻融循环次数(n)为0、25、50、75、100次.试件在养护28 d后,放置于20℃清水中浸泡4 d,然后取出放入冻融试验箱中进行冻融循环试验;达

表2 BSFC的配合比
Table 2 Mix proportions of BSFC

Mixture ID	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						φ/%
	Cement	Fly ash	Slag powder	Aggregate	Sand	Water	
FSB-0	278.57	85.71	64.29	1 111.69	598.60	210.00	0
FSB-0.12	278.57	85.71	64.29	1 111.69	598.60	210.00	0.12
FSB-0.15	278.57	85.71	64.29	1 111.69	598.60	210.00	0.15
FSB-0.18	278.57	85.71	64.29	1 111.69	598.60	210.00	0.18

到设定冻融次数后取出试件晾干并称取试件质量,再使用北京康科瑞公司生产的NM-4A型非金属声波检测仪进行超声波波速测量。

1.2.2 强度测试试验

按照 GB/T 50081—2002,采用 CSS-YAN3000 型压力机开展单轴抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验,加载速率分别为 3、1 mm/min. 每组 3 个试件,结果取其平均值。

1.2.3 孔结构测试方法

BSFC 孔结构测试采用 TR-AHS 型硬化混凝土气孔结构测试仪,运用 ASTM C457—2016《American society for testing and materials》中的直线导线法进行测量。BSFC 试件为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体,每组 3 个试件。BSFC 孔结构试样制作过程:首先,用切割机切成 100 mm×100 mm×20 mm 的切片;其次,将切面放在磨抛机上用不同细度的金刚石磨抛盘进行粗磨、精磨、粗抛、精抛,每个步骤 30 min,以上步骤完成后清洗试块,晾干;然后,用黑色水性记号笔涂黑试样抛光面,置于烘箱中在 105 °C 下烘 30 min,取出在室温下冷却;接着,用硫酸钡粉末填充气孔,使其融到孔隙中,将多余粉末去除,其余表面为黑色;最后,置于试台上用于测量。试样观测面积为 80 mm×80 mm,总路径为 10 387.87 mm。气孔分析试验原理如图 1 所示。

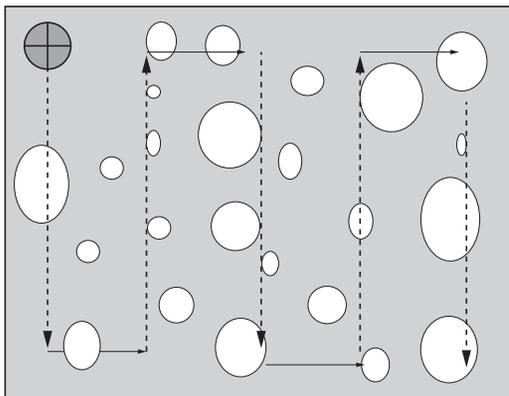


图1 气孔分析试验原理

Fig. 1 Principle of air-void analysis test

2 结果与分析

2.1 冻融作用下BSFC的物理力学性能变化规律

为直观反映冻融循环作用下BSFC的质量变化、强度变化和内部结构等损伤,引入质量损失率 ω 、相对波速 v_r 、相对抗压强度 Δf_c 、相对劈裂强度 Δf_t 等作为评价指标。计算公式如式(1)~(4)所示。

$$\omega = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \quad (1)$$

$$v_r = \frac{v_n}{v_0} \quad (2)$$

$$\Delta f_c = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \quad (3)$$

$$\Delta f_t = \frac{f_{tn}}{f_{t0}} \quad (4)$$

式中: G_0 、 G_n 为BSFC试件的初始质量和第 n 次冻融循环后的质量, g ; v_0 、 v_n 分别为BSFC试件的初始波速和第 n 次冻融循环后的波速,m/s; f_{c0} 、 f_{cn} 分别为BSFC试件未冻融时的抗压强度和第 n 次冻融循环后的抗压强度,MPa; f_{t0} 、 f_{tn} 分别为BSFC试件未冻融时的劈裂强度和第 n 次冻融循环后的劈裂强度,MPa。

按式(1)~(4)计算,得到冻融循环作用下BSFC试件的质量变化率、相对波速、相对抗压强度和相对劈裂抗拉强度与冻融循环次数之间的关系,如图2~5所示。

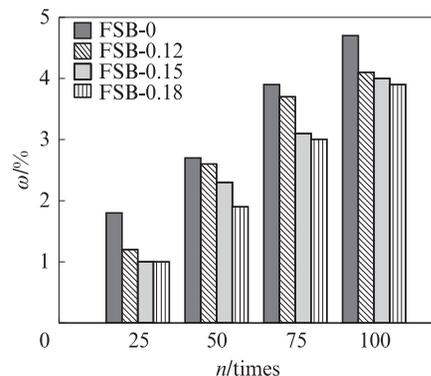


图2 BSFC试件质量损失率与冻融循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between mass loss ratio of BSFC specimens and number of freeze-thaw cycle

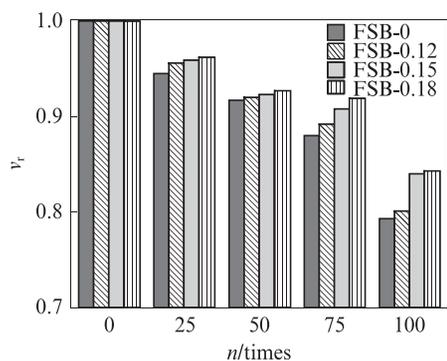


图3 BSFC试件相对波速与冻融循环次数的关系
Fig. 3 Relationship between relative wave velocity of BSFC specimens and number of freeze-thaw cycle

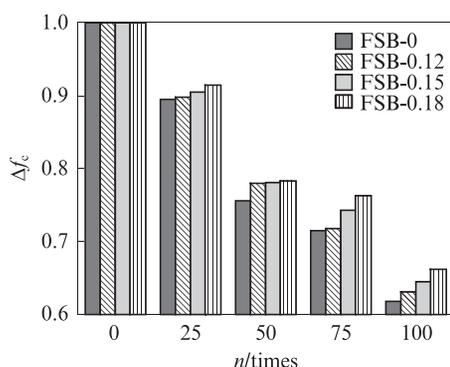


图4 BSFC试件相对抗压强度与冻融循环次数
Fig. 4 Relationship between relative compressive strength of BSFC specimens and number of freeze-thaw cycle

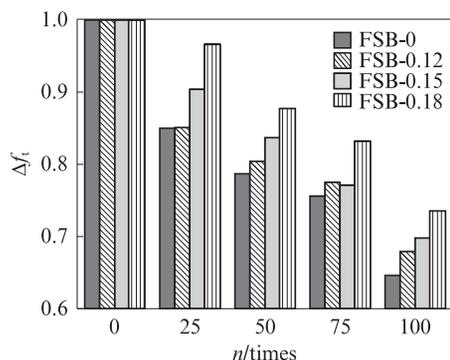


图5 BSFC试件相对劈裂抗拉强度与冻融循环次数
Fig. 5 Relationship between relative splitting tensile strength of BSFC specimens and number of freeze-thaw cycle

由图2~5可见:(1)BSFC试件的质量变化率随着经历冻融循环次数的增加逐渐增大;在不同玄武岩纤维掺量下,BSFC试件的质量变化率随经历冻融次数增加的变化规律相似;在经历相同冻融次数下,BSFC试件的质量损失率随玄武岩纤维掺量的增加而减小。(2)BSFC试件的相对波速随着经历冻

融循环次数的增加逐渐减小;在经历相同冻融循环次数时,BSFC试件的相对波速随玄武岩纤维掺量的增加而逐渐增大。(3)在不同纤维掺量下,BSFC试件的相对抗压强度、相对抗拉强度均随着经历冻融循环次数的增加而下降,且衰减速度逐渐加快;在经历相同冻融循环次数时,纤维掺量越大,BSFC试件的相对抗压强度、相对抗拉强度的衰减速度逐渐减慢。这是因为混凝土在制作成型过程中存在微裂纹等损伤,随着经历冻融循环次数的累加,微裂纹逐渐扩大,水泥浆体流失。在混凝土中掺入玄武岩纤维,纤维在基体内呈三维分布,可以抑制微裂纹的扩展,桥接在裂缝之间,在冻融循环作用下,减少水泥砂浆的剥落,降低相对波速、相对抗压强度和相对劈裂抗拉强度的下降。

2.2 冻融作用下BSFC孔结构变化

经历不同冻融循环次数的BSFC试件气孔分布如图6所示。由图6可见:

(1)相同玄武岩纤维掺量下,BSFC试件在0.5~1.0 mm弦长处的含气量均随冻融循环次数的增加而增大;在0次冻融时,试件FSB-0在0.5~1.0 mm弦长处的含气量超过10%,掺玄武岩纤维的BSFC试件在0.5~1.0 mm弦长处的含气量均未超过10%;在经历100次冻融循环时,试件FSB-0在0.5~1.0 mm弦长处的含气量超过40%,掺玄武岩纤维的BSFC试件在0.5~1.0 mm弦长处的含气量均低于40%。

(2)相同玄武岩纤维掺量下,在经历0次冻融时,BSFC试件在0.01~0.02 mm弦长处的气孔数量最多,随着经历冻融循环次数的增加,BSFC试件在0.01~0.02 mm弦长处气孔数量下降,在0.50~1.00 mm弦长处气孔数量不断上升。即弦长较小的气孔数量下降,弦长大的气孔数量上升,含气量增加。

(3)在经历0次冻融循环条件下,试件FSB-0在0.01~0.02 mm弦长处的气孔频率少于0.5,在0.50~1.00 mm弦长处的气孔频率大于0.05;试件FSB-0.18在0.01~0.02 mm弦长处的气孔频率为0.5,在0.50~1.00 mm弦长处的气孔频率小于0.05。这是因为混凝土在制拌成型和水化硬化过程中已存在大孔径孔洞、微裂缝等损伤,随着经历冻融循环次数的累积,孔洞、微裂缝逐渐扩展,含气量逐渐增大。玄武岩纤维掺入混凝土后,在基体中乱向分布,有效减少了BSFC在硬化之前产生的连通缝隙,防止连通毛细孔的形成,细化大孔隙,增加小孔,在冻融循环作用下能够抑制裂缝扩展,提高BSFC的抗冻性。

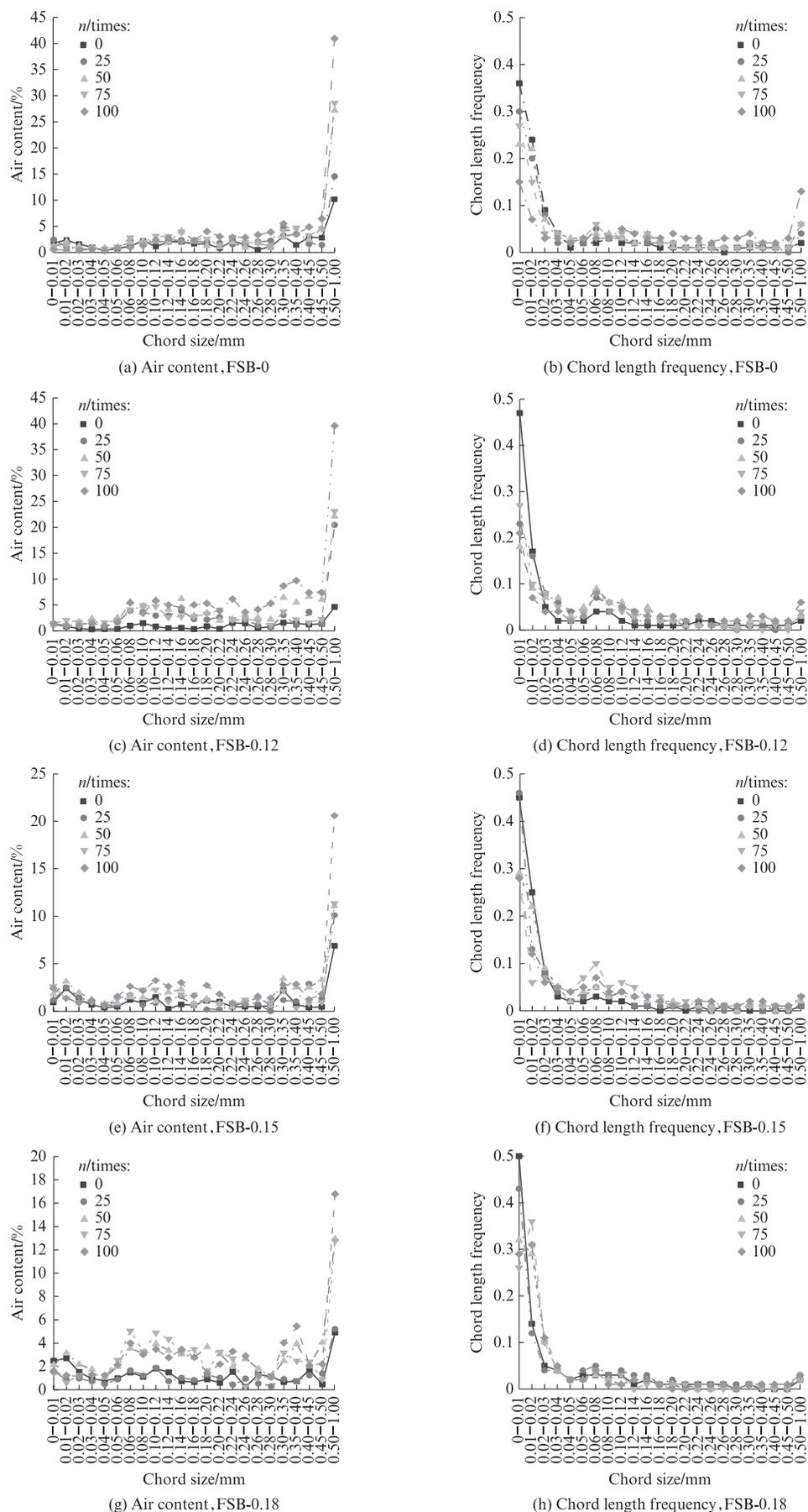


图6 冻融循环下BSFC的含气量与气泡弦长的关系

Fig. 6 Relationship of air content and chord length frequency of BSFC under freeze-thaw cycles

经历不同冻融循环次数的BSFC试件气孔结构参数如图7所示.由图7可见:(1)随着经历冻融循环次数增加,BSFC试件的含气量、气泡间距系数和平均气泡弦长增大,气孔比表面积逐渐降低.(2)在冻融循环前,试件FSB-0.12、FSB-0.15、FSB-0.18的含气量、气泡间距系数和平均气泡弦长较试件FSB-0分别降低了23.97%、34.06%、53.65%、15.62%、37.50%、46.87%和10.59%、20.0%、41.18%,气孔比表面积提高了6.25%、11.84%和18.06%.(3)在经历100次冻融循环条件下,试件FSB-0.12、FSB-0.15、FSB-0.18的含气量、气泡间距系数和平均气泡弦长较FSB-0分

别降低11.02%、23.80%、29.19%、11.11%、31.11%、33.33%和10.0%、18.50%、32.5%,而较气孔比表面积提高10.0%、20.5%、40.0%.这是因为随着经历冻融循环次数的增加,水进入BSFC内部,气孔在静水压力、渗透压力和结晶压力等多种应力作用下破裂、贯通,大孔径孔数量增多,小孔径孔数量减少,含气量、气泡间距系数和气泡平均弦长增大,气孔比表面积降低.将玄武岩纤维掺入BSFC内,与水泥基体之间有很好的黏结,抑制因塑性收缩和干缩产生的微裂缝,跨接在气孔、裂缝等缺陷之间,在冻融作用下,阻碍孔结构、裂缝的扩展,提高BSFC的抗冻性能.

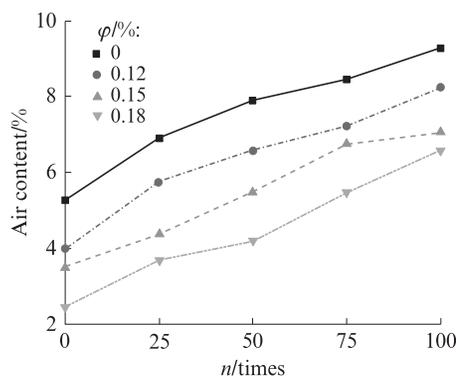
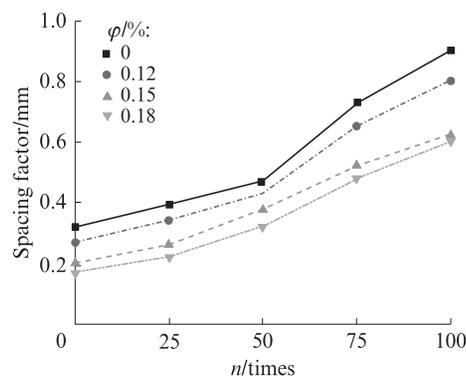
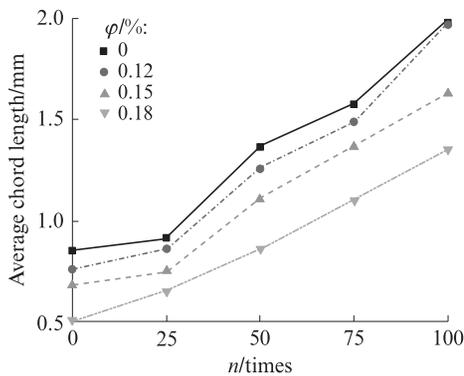
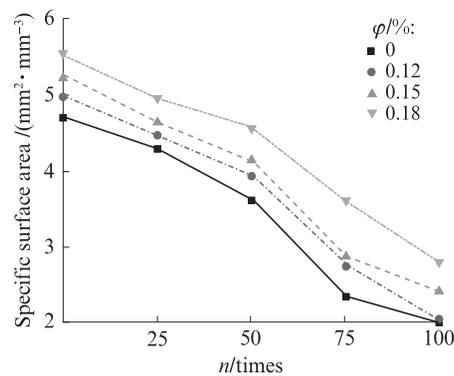
(a) Relationship between air content and n (b) Relationship between spacing factor and n (c) Relationship between average chord length and n (d) Relationship between specific surface area and n

图7 冻融作用下BSFC的气孔结构参数

Fig. 7 Air-void structure parameters of BSFC under freeze-thaw cycles

3 分形维数

分形理论是研究自然界不规则和杂乱现象的理论,可以被用于材料的微观结构研究.混凝土结构中微观缺陷(如孔洞等)的分布具有较强的分形特征,分形维数可以定量地表征混凝土的损伤程度.因此,可以采用盒维数(d)来描述冻融循环作用下微观孔结构的分布特征与演化规律.假设 $N_r(A)$ 为能够覆盖住一个非空点集 A 的或边长为 r 的盒子的最小数目,则定义这个点集的盒维数^[22-24]为:

$$d = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(A)}{\lg r} \quad (5)$$

经历不同冻融循环次数、不同纤维掺量BSFC试样气孔的盒维数如图8所示.由图8可见:(1)随着经历冻融循环次数的增加,BSFC试样气孔的盒维数 d 呈现出逐渐降低趋势,与田威等^[23]研究结果相似.(2)经历0次冻融循环时,不同孔径的气孔同时存在,其中小孔径孔隙数量较多,孔隙分布不规则,盒维数较高.(3)随着经历冻融循环次数的增加,由于气孔内渗透水压力和冻胀力的共同作用,BSFC试样内部小

孔径的孔隙扩展、贯通,导致较大孔径孔隙出现,且大孔径孔隙数量随经历冻融循环次数的增加而增多.因大孔径孔隙数量增多导致孔径尺寸变得单一,孔隙分布趋向均匀,分布形态变得简单.盒维数随着玄武岩纤维掺量的增加而增加,是因为玄武岩纤维在混凝土内呈三维乱向分布,彼此粘连,起到了承托骨架的作用,减少了混凝土的连通缝隙,防止连通毛细孔的形成,小孔数量增多,细化了BSFC试样内部结构.盒维数越大说明混凝土气孔特征越复杂,也表明玄武岩纤维能够改变混凝土内部的气孔结构^[24].

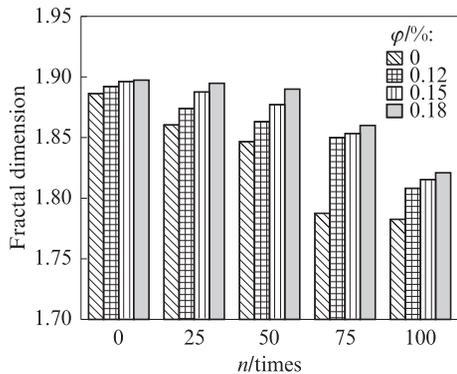


图8 BSFC气孔结构分形维数和冻融次数的关系
Fig. 8 Relationships between number of freeze-thaw cycle and fractal dimension of air-void structure of BSFC

4 玄武岩纤维贡献率

为探究玄武岩纤维对冻融后BSFC抗压强度的影响,定义玄武岩纤维贡献率 Q_φ ^[25]来定量表征玄武岩纤维的影响程度. Q 值越大,表明适量玄武岩纤维可以减缓BSFC冻融后抗压强度的损失,提高其抗冻性能. Q 值计算公式见式(6).

$$Q_\varphi = \frac{f_{\varphi,n}}{f_{\varphi,0}} \quad (6)$$

式中: Q_φ 为 φ 掺量下玄武岩纤维的贡献率,%; $f_{\varphi,n}$ 为 φ 掺量下经历 n 次冻融循环后混凝土的抗压强度,MPa; $f_{\varphi,0}$ 为 φ 掺量下未冻时混凝土的抗压强度,MPa.

分别拟合出BSFC试件经历0、25、50、75、100次冻融循环后玄武岩纤维掺量与其贡献率的关系,如图9所示.

由图9可知,经历不同冻融次数后玄武岩纤维的贡献率呈增加趋势,纤维掺量为0.18%时对BSFC抗冻性能提高最佳,且拟合后相关系数均大于0.88,拟合度较高.图9所示的纤维贡献率各拟合公式形式均如式(7)所示.

$$Q_\varphi = b\varphi^2 + a\varphi + 1 \quad (7)$$

式中: a 、 b 为拟合公式中一、二次项系数.将冻融循环

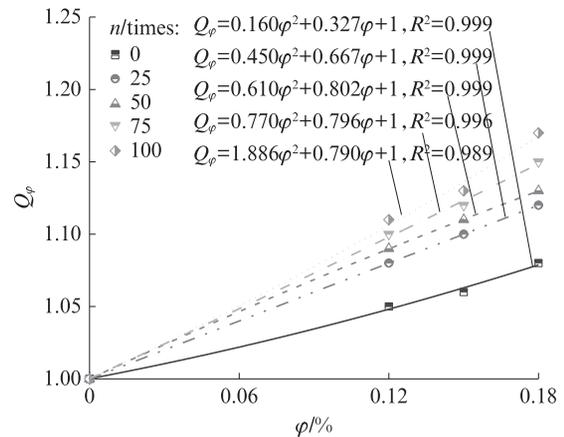


图9 玄武岩纤维贡献率与冻融循环次数的关系
Fig. 9 Relation between the contribution rate of basalt fiber and number of freeze-thaw cycle

次数作为自变量,以 a 、 b 为因变量再次进行拟合.拟合后得到公式如式(8)、(9)所示.

$$a = -0.000\ 006\ 2n^2 + 0.001\ 2n + 0.51 \quad (8)$$

$$b = 0.000\ 002n^2 - 0.000\ 3n - 0.007\ 9 \quad (9)$$

故以纤维掺量、冻融循环次数作为变量的纤维贡献率公式,如式(10)所示.

$$Q_\varphi = -\varphi^2(0.000\ 002n^2 - 0.000\ 3n - 0.007\ 9) + \varphi(-0.000\ 006\ 2n^2 + 0.001\ 2n + 0.51) + 1 \quad (10)$$

5 冻融损伤演化模型的建立

5.1 基于各评价指标的冻融损伤模型

由冻融循环试验可知,随着经历冻融循环次数的增加,BSFC的物理力学性能逐渐降低,宏观物理力学性能的变化能够反映BSFC的劣化程度.为了定量且全面描述冻融环境下BSFC的损伤状态,运用损伤力学理论,分别选取抗压强度 f_c 、劈裂抗拉强度 f_t 和超声波速 v 作为损伤变量,冻融循环作用引起的损伤(D)为:

$$D_c = 1 - \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \quad (11)$$

$$D_t = 1 - \frac{f_{tn}}{f_{t0}} \quad (12)$$

$$D_v = 1 - \frac{v_n}{v_0} \quad (13)$$

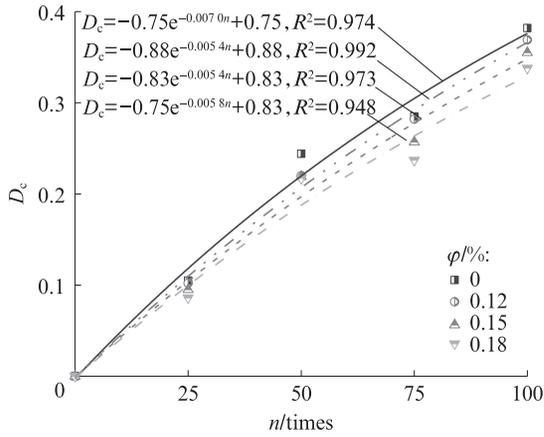
式中: D_c 、 D_t 、 D_v 分别为抗压强度、劈裂抗拉强度和波速对应的冻融损伤变量.

由式(11)~(13)计算出各性能指标的冻融损伤变量,如图10所示.由图10可见:随着经历冻融循环次数的增加, D_c 、 D_t 、 D_v 均不断增大;掺玄武岩纤维的冻融损伤与损伤劣化速率明显小于未掺纤维的冻融损伤,且玄武岩纤维掺量为0.18%时,BSFC损伤劣化较慢;在经历相同冻融循环次数时, D_c 、 D_t 大于 D_v .

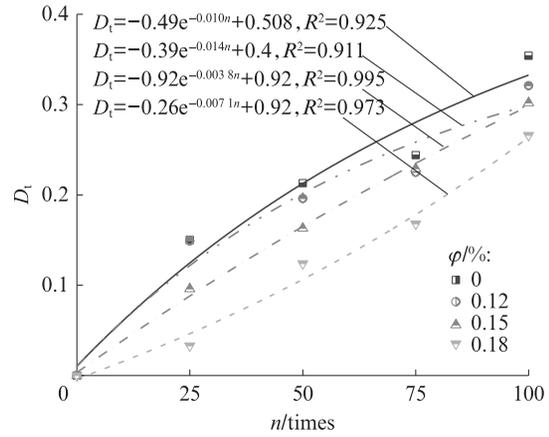
这是因为冻融循环作用对混凝土材料的破坏由表及里逐渐减弱,纵波传播速度变化较小,故采用波速定义冻融损伤相对较小.

同时,由图10可得,各冻融损伤变量拟合公式的

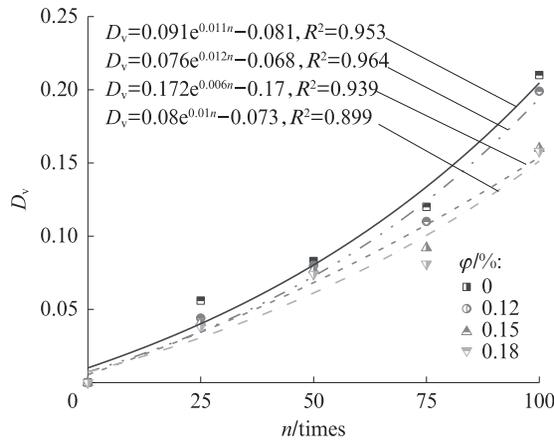
相关系数较高,能够较好地拟合冻融循环作用下BSFC试件随时间的损伤演化规律.各性能指标的冻融损伤演化均表现出较明显的指数函数关系,其总的拟合函数公式如式(14)所示.



(a) Relationship between D_c and n



(b) Relationship between D_t and n



(c) Relationship between D_v and n

图10 不同评价指标冻融损伤与冻融循环次数的关系

Fig. 10 Relationship between freeze-thaw damage of different evaluation indexes and number of freeze-thaw cycle

$$D_n = a_1 e^{b_1 n} + c_1 \quad (14)$$

式中: a_1, b_1, c_1 为拟合系数,如图10所示.

考虑到实际工程中常使用抗压强度作为评价混凝土力学性能的指标,因此建立冻融损伤变量 D_t 和 D_c 之间的关系,如式(15)所示.

$$D_t = a_2 e^{b_2 D_c} + c_2 \quad (15)$$

式中: a_2, b_2, c_2 为拟合系数,如图11(a)所示.

D_c 与 D_v 也存在较好的指数关系,如图11(b)所示.因此,可以用无损检测的波速来预测BSFC结构的强度性能及损伤情况.

5.2 基于分形维数与玄武岩纤维贡献率的冻融损伤预测模型

为了更好地研究BSFC孔结构、玄武岩纤维作

用与BSFC冻融损伤之间的关系,由前文分析可知,可分别用分形维数和玄武岩纤维贡献率来定量描述孔结构分布、形状复杂程度和玄武岩纤维的影响程度,故本文考虑建立分形维数和玄武岩纤维贡献率2方面因素的冻融损伤预测模型.

BSFC试件的 Q_φ, d 与 D_c 的散点图以及根据回归分析建立的冻融损伤模型结果如图12所示,冻融损伤数学模型如式(16)所示.数据回归分析的相关系数为0.903,拟合系数较高,表明可以通过此模型预测冻融循环后BSFC冻融损伤与孔结构、玄武岩纤维的定量关系,以评估寒冷地区BSFC的抗冻耐久性.

$$D_c = -71.819 - 25.605Q_\varphi + 95.702d - 0.509Q_\varphi^2 - 31.105d^2 + 14.878Q_\varphi d \quad (16)$$

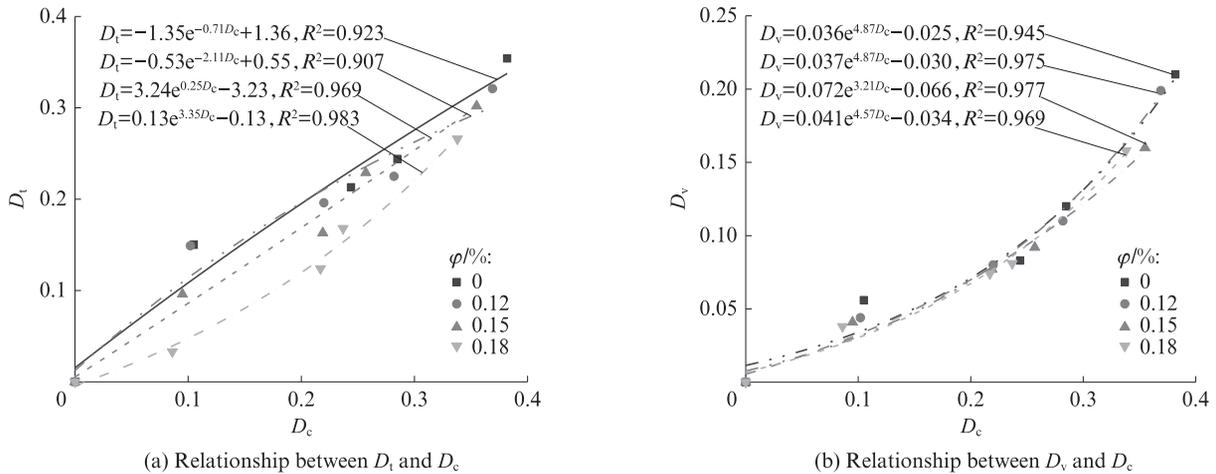


图 11 不同评价指标冻融损伤之间的关系

Fig. 11 Relationship between freeze-thaw damage of different evaluation indexes

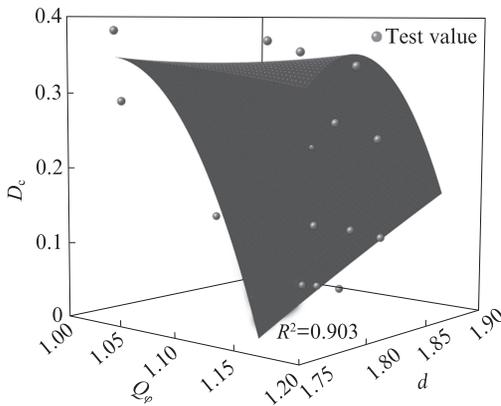


图 12 Q_e, d 与 D_c 的关系

Fig. 12 Relationship between Q_e and d with D_c

6 结论

(1) 不同玄武岩纤维掺量下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土(BSFC)的物理力学性能和孔结构分布及孔结构参数随着经历冻融循环次数的增加逐渐劣化;在经历相同冻融次数条件下,玄武岩纤维掺量为0.18%时BSFC的抗冻性好。

(2) 随着经历冻融循环次数的增加,BSFC内部孔结构的盒维数降低,较好地反映了冻融环境下BSFC孔结构的发育和扩展以及冻融损伤演化规律。

(3) 将抗压强度、劈裂抗拉强度值和波速变化作为损伤变量,用各性能指标损伤变量多方面综合评价BSFC的冻融损伤,通过数据回归得到基于各损伤变量的BSFC冻融损伤演化方程,并建立起不同损伤变量之间的指数函数关系。

(4) 建立以抗压强度为损伤变量的冻融损伤与气孔分形维数、玄武岩纤维贡献率的复合因素冻融损伤模型,通过此模型预测冻融循环后BSFC冻融损伤与孔结

构的定量关系,以评估寒冷地区BSFC的抗冻性能。

参考文献:

[1] 宇晓,张莹秋,袁书成,等.混凝土抗冻耐久性性能研究进展[J].混凝土,2017(4):15-20.
YU Xiao, ZHANG Yingqiu, YUAN Shucheng, et al. Review on frost resistance durability of different concrete materials[J]. Concrete, 2017(4):15-20. (in Chinese)

[2] 金生吉,李忠良,张健,等.玄武岩纤维混凝土腐蚀条件下抗冻融性能试验研究[J].工程力学,2015,32(5):178-183.
JIN Shengji, LI Zhongliang, ZHANG Jian, et al. Experimental study on anti-freezing and thawing performance of reinforced concrete of basalt fiber under corrosion condition[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5):178-183. (in Chinese)

[3] WANG B X, PAN J J, FANG R C, et al. Damage model of concrete subjected to coupling chemical attacks and freeze-thaw cycles in saline soil area[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242:118205.

[4] WANG Z H, LI L, ZHANG Y X, et al. Bond-slip model considering freeze-thaw damage effect of concrete and its application[J]. Engineering Structures, 2019, 201:109831.

[5] 杨才千,刘飞,潘勇,等.冻融循环作用下聚乙烯醇纤维增强快硬混凝土的力学性能[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(2):334-339.
YANG Caiqian, LIU Fei, PAN Yong, et al. Mechanical property of polyvinyl alcohol fiber reinforced fast-hardening concrete under freezing-thaw cycle effect[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2019, 49(2):334-339. (in Chinese)

[6] 郭寅川,翟超伟,李鹏,等.道路混凝土微观结构与抗冻性影响机理研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(6):48-55.
GUO Yinchuan, ZHAI Chaowei, LI Peng, et al. Influence mechanism of frost resistance and microstructure of road concrete[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(6):48-55. (in Chinese)

- [7] 张卫东,董云,彭宁波,等.冻融循环下透水再生混凝土力学性能损伤分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):292-296.
ZHANG Weidong, DONG Yun, PENG Ningbo, et al. Analysis on mechanical properties of pervious recycled concrete by damage under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):292-296. (in Chinese)
- [8] 李阳,王瑞骏,闫菲,等.粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):219-226.
LI Yang, WANG Ruijun, YAN Fei, et al. Effects of fly ash on antifreeze and sulfate resistance of concrete[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science), 2017, 45(2):219-226. (in Chinese)
- [9] 叶邦土,蒋金洋,王文灏,等.矿物掺和料对玄武岩纤维水泥砂浆强度发展的影响[J].建筑材料学报,2014,17(3):521-525.
YE Bangtu, JIANG Jinyang, WANG Wenhao, et al. Influence of mineral admixtures on strength development of basalt fiber reinforced cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3):521-525. (in Chinese)
- [10] 李趁趁,胡婧,元成方,等.纤维/高强混凝土抗冻性能试验[J].复合材料学报,2019,36(8):1977-1983.
LI Chenchen, HU Jing, YUAN Chengfang, et al. Experimental study on the freezing resistance of fiber reinforced high strength concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8):1977-1983. (in Chinese)
- [11] 赵燕茹,宋博,王磊,等.冻融循环作用后玄武岩纤维混凝土的断裂性能[J].建筑材料学报,2019,22(4):575-583.
ZHAO Yanru, SONG Bo, WANG Lei, et al. Fracture properties of basalt fiber reinforced concrete after freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4):575-583. (in Chinese)
- [12] 关斌,邱继生,潘杜,等.冻融环境下煤矸石混凝土损伤度评估方法研究[J].材料导报,2018,32(20):3546-3552.
GUAN Xiao, QIU Jisheng, PAN Du, et al. Research on the evaluation method of damage degree of coal gangue concrete under freezing-thawing[J]. Materials Review, 2018, 32(20):3546-3552. (in Chinese)
- [13] 牛建刚,左付亮,王佳雷,等.塑钢纤维轻骨料混凝土的冻融损伤模型[J].建筑材料学报,2018,21(2):235-240.
NIU Jiangan, ZUO Fuliang, WANG Jialei, et al. Freeze-thaw damage model of plastic-steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):235-240. (in Chinese)
- [14] WANG X X, WU Y, SHEN X D, et al. An experimental study of a freeze-thaw damage model of natural pumice concrete[J]. Powder Technology, 2018, 339:651-658.
- [15] CUI Y H, CHEN Y, CEN G P, et al. Comparative study on the effect of organic and inorganic fiber on the anti-wheel impact performance of airport pavement concrete under freeze-thaw environment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211:284-297.
- [16] 梁昕宇,党发宁,田威,等.基于CT图像的混凝土损伤演化分析特性研究[J].西安理工大学学报,2010,26(4):382-387.
LIANG Xinyu, DANG Fanning, TIAN Wei, et al. A study of fractal characteristics of concrete damage evolution under CT test condition[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(4):382-387. (in Chinese)
- [17] 金珊珊,郑桂萍,林睿颖,等.基于分形理论的混凝土气泡分布特征研究[J].混凝土,2020(2):17-20,24.
JIN Shanshan, ZHENG Guiping, LIN Ruiying, et al. Fractal analysis of air void distribution characteristic of concrete [J]. Concrete, 2020(2):17-20, 24. (in Chinese)
- [18] TIAN W, HAN N. Pore characteristics (>0.1 mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 211:314-322.
- [19] 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.
- [20] MUROTANI T, IGARASHI S, KOTO H, et al. Distribution analysis and modeling of air voids in concrete as spatial point processes [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 115:124-132.
- [21] COO M, PHEERAPHAN T. Effect of sand, fly ash, and coarse aggregate gradation on preplaced aggregate concrete studied through factorial design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:812-821.
- [22] 何晓雁,韩恺,郝负洪,等.基于光学法的纤维增强RPC力学性能及微观结构分形特征研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(3):658-666.
HE Xiaoyan, HAN Kai, HAO Yunhong, et al. Study on mechanical properties and microstructure fractal features of fiber reinforced RPC based on the optical method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(3):658-666. (in Chinese)
- [23] 田威,韩女,张鹏坤.基于CT技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):3069-3075.
TIAN Wei, HAN Nü, ZHANG Pengkun. Experiments on the freeze-thaw damage of concrete porous structure based on CT technique[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(11):3069-3075. (in Chinese)
- [24] 赵燕茹,郭子麟,范晓奇,等.玄武岩纤维混凝土应力应变关系及孔结构分析[J].硅酸盐通报,2017,36(12):4142-4150.
ZHAO Yanru, GUO Zilin, FAN Xiaoqi, et al. Basalt fiber reinforced concrete stress-strain relationship and pore structure analysis[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(12):4142-4150. (in Chinese)
- [25] 赵燕茹,刘芳芳,王磊,等.单面盐冻条件下基于孔结构的玄武岩纤维混凝土抗压强度模型[J].材料导报,2020,34(12):12064-12069.
ZHAO Yanru, LIU Fangfang, WANG Lei, et al. Modeling of the compressive strength of basalt fiber concrete based on pore structure under single-side freeze-thaw condition[J]. Materials Review, 2020, 34(12):12064-12069. (in Chinese)