

文章编号:1007-9629(2023)10-1072-10

混杂纤维/束高强混凝土的抗冻性

李趁趁¹, 马 娇¹, 张 普^{1,*}, 张 冬², 邵景干³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 3. 河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450015)

摘要:为提高混凝土的抗冻性及促进工业废料的应用,利用快冻法对混凝土试件进行冻融试验,测试冻融前后试件的相对动弹性模量(E_r)和抗压强度,研究单掺玄武岩纤维束(BMF)、双掺短切玄武岩纤维(CBF)和BMF以及在双掺的较优配比基础上继续掺加硫酸钙晶须(CSW)对高强混凝土抗冻性能的影响.结果表明:素高强混凝土(PC)在经历150次冻融循环后的 E_r 值为52.4%,视为冻融破坏;单掺、双掺和三掺均提高了高强混凝土的抗冻性,三掺的效果最好;当BMF体积分数为0.30%、CBF掺量为0.15%、CSW掺量为水泥质量的3%时,高强混凝土试件(CSW3CBF0.15BMF0.3)的抗冻性最佳,经历300次冻融循环后的 E_r 值为86.6%,仍未冻融破坏;试件CSW3CBF0.15BMF0.3在经历150次冻融循环后的抗压强度损失率仅为2.5%,远低于PC(30.9%);CSW、CBF和BMF发挥混掺效应,多尺度阻止了高强混凝土的冻胀开裂.

关键词:玄武岩纤维束;短切玄武岩纤维;硫酸钙晶须;混掺纤维;高强混凝土;抗冻性能

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.004

Freezing Resistance of Hybrid Fiber/Bundle High Strength Concrete

LI Chencheng¹, MA Jiao¹, ZHANG Pu^{1,*}, ZHANG Dong², SHAO Jinggan³

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Henan Communications Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450015, China)

Abstract: To improve the freezing resistance of high strength concrete and expand the application of industrial waste, the freeze-thaw test of concrete specimens was carried out by rapid freeze-thaw method, the relative dynamic modulus of elasticity (E_r) and compressive strength of the specimens before and after freeze-thaw were acquired, the effects of single basalt macro-fibers (BMF), double mixed chopped basalt fibers (CBF) and BMF and calcium sulfate whiskers (CSW) on the freezing resistance of high strength concrete were studied. The results show that freeze-thaw failure occurs during 150 cycles for plain high strength concrete (PC), and E_r value is 52.4%. Single BMF, double mixed CBF and BMF and adding them all can improve the freezing resistance of high strength concrete, and adding them all in the concrete can get the best effect. The freezing resistance of high strength concrete is the best when the volume fraction of BMF is 0.30%, the volume fraction of CBF is 0.15% and the mass fraction of CSW is 3% (CSW3CBF0.15BMF0.3), E_r value is 86.6% after 300 freeze-thaw cycles. Loss ratio of compressive strength is only 2.5% for specimen CSW3CBF0.15BMF0.3 after 150 cycles, but is 30.9% for PC. CSW, CBF and BMF play a mixing effect and prevent freeze swelling cracking of high strength concrete in multi-scale.

收稿日期:2022-12-12; 修订日期:2023-02-17

基金项目:交通部重点研发项目(2018-MS5-136);河南省交通运输行业重点科技项目(2018J2, 2019J-2-10)

第一作者:李趁趁(1977—),女,河南济源人,郑州大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: lcc0506@zzu.edu.cn

通讯作者:张 普(1982—),男,河南周口人,郑州大学教授,博士生导师,博士. E-mail: zhpu@zzu.edu.cn

Key words : basalt macro-fiber; chopped basalt fiber; calcium sulfate whisker; hybrid fiber; high strength concrete; freezing resistance

如何提高混凝土材料的抗冻性一直是业界关注的重点.研究表明,将具有优良阻裂、增强作用的纤维均匀分散于混凝土中,可以阻碍现有裂缝的扩展并且预防新裂缝的产生,提高混凝土的力学性能和耐久性^[1-6].玄武岩纤维作为环境友好型纤维,以其优异的耐化学腐蚀及力学性能备受关注.将短切玄武岩纤维(CBF)合理地掺入到混凝土中,可以显著提高混凝土的劈裂抗拉强度、抗折强度以及抗冻性能^[5-8].但部分文献表明,CBF 掺量大于 0.2% 时容易结团,影响其增强增韧的效果^[9-11].将普通玄武岩(BMF)纤维单丝进行加捻合股后浸入丙烯酸乳液中冷压成型,然后短切处理得到玄武岩纤维束.BMF 既保留了 CBF 的优异特性,又改善了其大掺量时在混凝土中分散不均的情况,可以对混凝土更好地增强增韧^[12-15].

目前,BMF 对混凝土抗冻性影响的探究比较缺乏.为了促进 BMF 的应用,本文对此开展研究,变化参数为 BMF 的长度和体积掺量.同时,考虑到纤维混杂可以在不同结构层次和混凝土应力阶段发挥它们的协同效应,以更进一步地提高混凝土的力学性能和抗渗性^[16-18],将 CBF 与 BMF 混掺有望制备出抗冻性更好的混凝土,本文将二者混杂掺入混凝土中,研究其对混凝土抗冻性的影响,探索其较优混掺比例,并与单掺 BMF 的混凝土进行对比.

硫酸钙晶须(CSW)是由工业副产品石膏制备而成,既具有纤维增强特性,又具有“微观骨料”的填充作用.将其应用于混凝土中,不仅可以提高混凝土的抗压强度、抗折强度、抗渗性与耐水性等,还可以缓解中国工业废料石膏的存放压力,减少环境污染^[19-22].

因此,本文在混掺 BMF 以及 CBF 的基础上加入亚纳米级的 CSW,使其在微观层次发挥作用来提高混凝土的抗冻性能,研究三者混掺对高强混凝土抗冻性能的影响,并与单掺 CSW、BMF 及双掺二者的混凝土进行对比.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,其粒径分布如图 1 所示;细骨料为天然河砂,细度模数为 2.85,其颗粒级配组成如表 1 所示;粗骨料为粒径 5~20 mm、级配良好的碎石,其级配组成如表 2 所示;减水剂为粉末状聚羧酸减水剂.BMF 和 CBF 均来自浙江石金玄武岩纤维有限公司,其外观如图 2 所

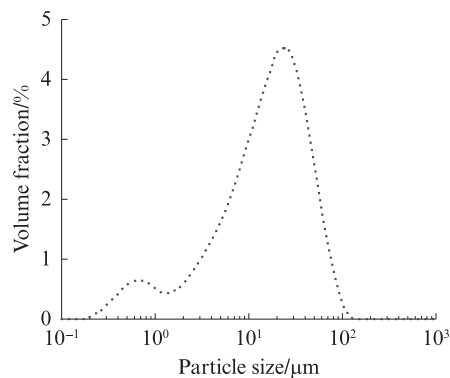


图 1 水泥的粒径分布
Fig. 1 Size distribution of cement particles

表 1 细骨料的级配组成
Table 1 Gradation of fine aggregates

Size of square mesh sieve/mm	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15
Cumulative screen residue(by mass)/%	3.7	13.6	28.5	63.2	89.9	97.6

表 2 粗骨料的级配组成
Table 2 Gradation of coarse aggregates

Sieve diameter/mm	19	16	9.5	4.75	2.36
Cumulative screen residue(by mass)/%	4.75	16.09	67.21	95.42	99.37

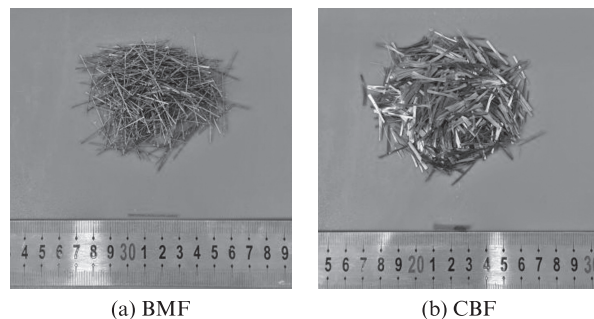


图 2 玄武岩纤维束与短切玄武岩纤维的外观
Fig. 2 Morphology of basalt macro-fibers and chopped basalt fibers

示.其中:BMF 直径为 0.2 mm,长度分别为 20、30、40 mm,CBF 直径为 13 μm,长度为 18 mm,单丝玄武岩纤维的物理力学性能见表 3.

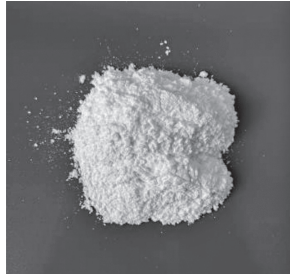
CSW 外观呈白色松散性粉末,在扫描电子显微镜(SEM)下呈纤维状(见图 3),其化学式为 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$,物理力学性能见表 4.

水泥和 CSW 的化学组成(质量分数)见表 5,其中 SO_3 总含量不超过 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》中规定的 3.5%.

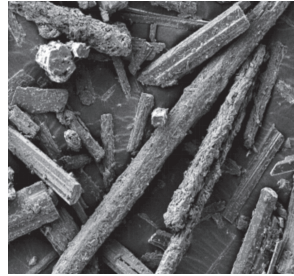
表3 单丝玄武岩纤维的物理力学性能

Table 3 Physical and mechanical properties of single basalt fiber

Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa	Ultimate elongation/%
2.65	3 800~4 840	≥85	3.2



(a) Macro morphology



(b) Micro morphology

图3 硫酸钙晶须的形貌

Fig. 3 Morphology of calcium sulfate whiskers

1.2 试验配合比

试验 C60 混凝土(PC)基准配合比(质量比)为 $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂}):m(\text{石})=1.00:0.34:1.56:2.43$. 在此基础上设计单掺玄武岩纤维束混凝土(BMFRC)、双掺短切玄武岩纤维和玄武岩纤维束混

凝土(CBF/BMFRC)、三掺短切玄武岩纤维、玄武岩纤维束和硫酸钙晶须混凝土(CSW/CBF/BMFRC)这3个试验体系.

单掺玄武岩纤维束混凝土的配合比如表6所示,研究BMF掺量(φ_f ,体积分数)和长度(L)对高强混凝土抗冻性能的影响.基于单掺的试验结果确定双掺试验中BMF长度为30 mm,将CBF和BMF以1:1、1:2的比例混杂且纤维总掺量(φ_{hf} ,体积分数)与单掺BMF混凝土保持一致,参数设计如表7所示.基于双掺的试验结果选择1组较好的配合比,掺入不同质量分数的硫酸钙晶须,即为三掺的试验配合比,如表8所示.为满足新拌混凝土的工作性能,控制混凝土坍落度在80~160 mm,减水剂用量随着纤维掺量的增加而增加.

表4 硫酸钙晶须的物理力学性能

Table 4 Physical and mechanical properties of calcium sulfate whisker

Average length/ μm	Average diameter/ μm	Tensile strength/ GPa	Modulus of elasticity/GPa	Density/(g·cm ⁻³)	Melting point/°C	Solubility/(g·L ⁻¹)
50~200	1~5	20.5	178	2.61	1 450	0.241

表5 水泥和硫酸钙晶须的化学组成

Table 5 Chemical compositions of cement and calcium sulfate whisker

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Cement	58.24	24.14	5.82	4.37	1.48	3.22	
CSW	46.30		0.04		52.80		0.80

表6 单掺玄武岩纤维束混凝土的配合比

Table 6 Mix proportions of single basalt macro-fibers concretes

Specimen No.	L/mm	$\varphi_f/\%$	Amount of water reducer/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa
PC	0	0	0.900	65.3±0.5
BMF-0.15-30	30	0.15	0.945	66.8±1.0
BMF-0.3-30	30	0.30	1.035	69.3±0.8
BMF-0.45-30	30	0.45	1.125	63.4±2.0
BMF-0.6-30	30	0.60	1.170	59.7±1.4
BMF-0.3-20	20	0.30	1.035	68.7±1.8
BMF-0.3-40	40	0.30	1.035	65.9±1.6

1.3 试验方法

试验参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》和 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,采用快冻法对混杂纤维/束高强混凝土进行冻融循环试验.试验采用

2种试件尺寸:尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的试件用于测试经历不同冻融循环次数(N)后的相对动弹性模量(E_r),当 E_r 下降到60%或 N 达到300次时停止试验;尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试件用于测试经历0、150次冻融循环后的立方体抗压强度(f_{cu}).

表 7 双掺短切玄武岩纤维和玄武岩纤维束混凝土的配合比
Table 7 Mix proportions of concretes with chopped basalt fibers and basalt macro-fibers

Specimen No.	$\varphi(\text{CBF})/\%$	$\varphi(\text{BMF})/\%$	$\varphi_{\text{hf}}/\%$	Amount of water reducer/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Compressive strength/MPa
PC	0	0	0	0.900	65.3 ± 0.5
CBF0.075BMF0.075	0.075	0.075	0.150	0.945	64.1 ± 0.1
CBF0.15BMF0.15	0.150	0.150	0.300	1.035	71.9 ± 5.5
CBF0.225BMF0.225	0.225	0.225	0.450	1.125	67.0 ± 1.2
CBF0.3BMF0.3	0.300	0.300	0.600	1.170	61.2 ± 0.4
CBF0.05BMF0.1	0.050	0.100	0.150	0.945	73.2 ± 1.3
CBF0.1BMF0.2	0.100	0.200	0.300	1.035	74.1 ± 1.6
CBF0.15BMF0.3	0.150	0.300	0.450	1.125	69.7 ± 1.2
CBF0.2BMF0.4	0.200	0.400	0.600	1.170	66.3 ± 1.8

表 8 三掺短切玄武岩纤维、玄武岩纤维束和硫酸钙晶须混凝土的配合比
Table 8 Mix proportions of concretes with chopped basalt fiber, basalt macro-fibers and calcium sulfate whiskers

Specimen No.	$\varphi(\text{CBF})/\%$	$\varphi(\text{BMF})/\%$	$w(\text{CSW})/\%$	Amount of water reducer/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Compressive strength/MPa
PC	0	0	0	0.900	65.3 ± 0.5
CBF0.15	0.15	0	0	0.945	66.2 ± 2.3
BMF0.3	0	0.30	0	1.035	69.3 ± 0.8
CBF0.15BMF0.3	0.15	0.30	0	1.125	69.7 ± 1.2
CSW1CBF0.15BMF0.3	0.15	0.30	1	1.148	71.3 ± 2.1
CSW2CBF0.15BMF0.3	0.15	0.30	2	1.170	68.7 ± 1.4
CSW3CBF0.15BMF0.3	0.15	0.30	3	1.193	68.1 ± 1.0

2 结果与分析

2.1 BMFRC 的相对动弹性模量

图 4 为单掺 BMF 对高强混凝土相对动弹性模量的影响.由图 4 可见:

(1)随着冻融循环次数的增加,BMFRC 的 E_r 值的变化规律与 PC 相似,均呈下降趋势,且下降速率先慢后快,说明混凝土受冻融劣化的程度在不断加深.在冻融循环初期(前 50 次),各类别混凝土试件 E_r 值降低程度的差异不大;当 $N=75$ 次时,PC 的 E_r 值为 90.9%,下降幅度明显大于 BMFRC (E_r 值为

95.9%~98.2%);当 $N=125$ 次时, φ_i 为 0.15% 的 BMFRC 的损伤速率快于 φ_i 为 0.30%~0.60% 的 BMFRC. PC 和 φ_i 为 0.15% 的 BMFRC 在经历 150、200 次冻融循环后的 E_r 值分别为 52.4%、49.8%,低于 60%,视为冻融破坏; φ_i 为 0.30%~0.60% 的 BMFRC 在经历 250 次冻融循环后的 E_r 值为 50.1%~55.4%,发生破坏.结果表明,掺入 BMF 有利于改善高强混凝土的抗冻性能,但当 BMF 掺量达到 0.30% 后,随着纤维掺量的继续增加,混凝土 E_r 值的下降幅度差别不大.

对试验结果分析可知,混凝土在持续经受冻融

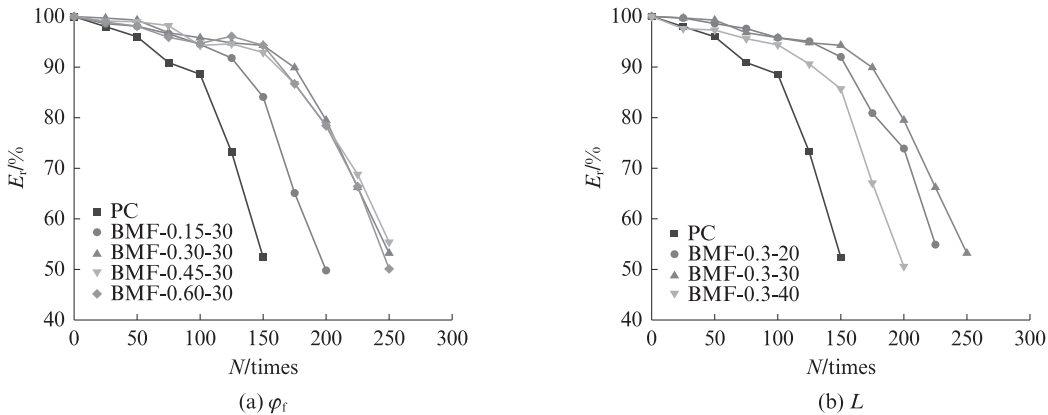
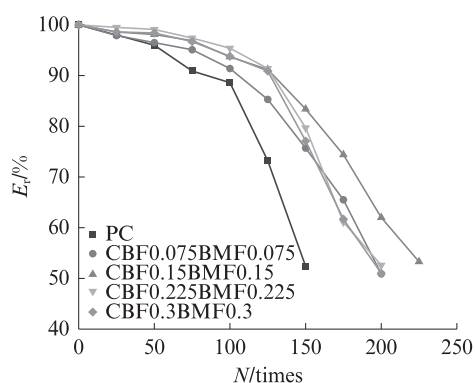


图 4 单掺 BMF 对高强混凝土相对动弹性模量的影响
Fig. 4 Effect of BMF on relative dynamic elastic modulus of high strength concrete

循环作用后,内部的原始孔隙反复承受冻胀压力的作用,逐渐扩展形成贯通的大孔隙.随着冻融循环次数的增加,混凝土构件的表观浆体流失,内部结构疏松,最终发生冻融破坏.首先,掺入适量BMF可以改变混凝土内部的孔径分布,将大孔隙优化成小孔隙,从而降低冰点^[23],减小混凝土内部的冻胀压力;其次,BMF在混凝土内部发挥搭桥连接作用,有效地抑制了混凝土经受冻融循环过程中的开裂,从而提高了混凝土的抗冻性能.在合理的掺量范围内,随着BMF掺量的增大,参与阻裂的纤维根数增多,对高强混凝土抗冻性能的提升效果更好;但当纤维掺量继续增大时,虽然参与阻裂的纤维继续增多,但纤维在基体内的分散性降低,会在混凝土内部引入新的缺陷,导致BMF对高强混凝土抗冻性能的提升效果不再增加.

(2)掺入不同长度的BMF(φ_f 均为0.30%)对混凝土

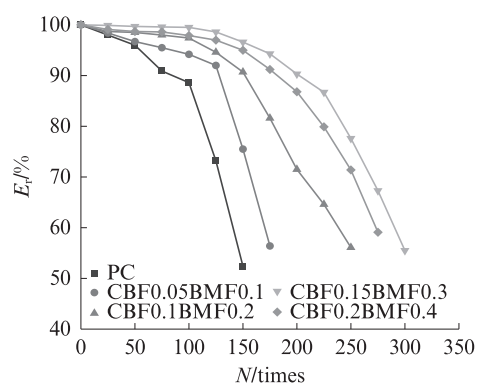


(a) $\varphi(\text{CBF})/\varphi(\text{BMF})=1:1$

土的抗冻性能有不同程度的改善作用,BMF长度为20、30、40 mm的BMFRC在分别经历225、250、200次冻融循环后的 E_r 值下降到60%以下,发生冻融破坏.由此可见,BMF长度对高强混凝土抗冻性能影响的优劣排序为:30 mm>20 mm>40 mm.这是因为,随着冻融循环次数的增加,混凝土的内部损伤逐渐增大,水泥浆体与骨料及BMF间的黏结力降低.当BMF的长径比较小($L=20$ mm)时,在基体中容易拔出,难以发挥桥连作用来抵抗混凝土的冻胀开裂.当BMF的长径比增加,其在基体中的分散性降低,对混凝土抗冻性能的提升效果会变差.同时,在相同体积掺量下,40 mm长度BMF的根数最少,在冻融循环过程中能抑制高强混凝土冻胀开裂的纤维数量较少.

2.2 CBF/BMFRC的相对动弹性模量

图5为混杂玄武岩纤维/束掺量对相对动弹性模量的影响.由图5可见:



(b) $\varphi(\text{CBF})/\varphi(\text{BMF})=1:2$

图5 混杂玄武岩纤维/束掺量对相对动弹性模量的影响

Fig. 5 Effect of hybrid basalt fiber/bundle content on relative dynamic elastic modulus

(1)在1:1混杂体系中,随着冻融循环次数的增加, E_r 值降低速率最快的为素高强混凝土,其次为 $\varphi_{\text{hf}}=0.150\%$ 的纤维混凝土.但是,当经历150次冻融循环后, φ_{hf} 为0.150%、0.450%、0.600%的3组混凝土的 E_r 值随着冻融循环次数的增加,变化规律趋于统一,最终经受200次冻融循环后均发生破坏;当 φ_{hf} 为0.300%时,混凝土 E_r 值的损失幅度最小,最终可承受的冻融循环次数最多,在经受225次冻融循环后发生冻融破坏.

(2)CBF和BMF按照1:2的比例掺入高强混凝土后,在不同 φ_{hf} 下对混凝土的抗冻性能有不同程度的提高.当 φ_{hf} 为0.150%、0.300%、0.450%、0.600%时,高强混凝土在分别经历了175、250、300、275次冻融循环后, E_r 值下降到60%以下,发生冻融破坏.2种混杂方式都呈现出随着 φ_{hf} 的增加,高强混凝土的抗冻性能先增加后降低的趋势,1:1和1:2混杂体系对高强混凝土

土抗冻性能提升效果最优的 φ_{hf} 分别为0.300%和0.450%.总体来看,当 φ_{hf} 相同时,CBF和BMF按照1:2的比例掺入高强混凝土时的抗冻性能更好.

向高强混凝土中混杂掺入CBF和BMF时,首先在混凝土搅拌过程中互相黏接触的CBF阻碍了混凝土内部空气的外溢,增大了混凝土中的含气量,有效缓解了混凝土在冻融初始阶段毛细孔中的静水压力和膨胀压力^[23].另一方面,CBF和BMF相互搭接形成了三维网状结构,发挥了支撑骨料的作用.在混凝土经受冻融循环的过程中,细观尺寸的CBF阻止了原始孔隙受冻胀压力的作用而形成大量的细观裂缝;随着冻胀压力的持续作用,细观裂缝形成宏观裂纹,此时宏观尺寸BMF可以有效桥接裂缝,提高混凝土的抗拉强度,减缓混凝土内部的冻胀开裂.在最佳掺量范围内,随着 φ_{hf} 的增加,单位体积内的CBF和BMF数量增加,更有利于高强混凝土抵抗冻融疲

劳损伤.但随着 φ_{bf} 的继续增加,过量的CBF和BMF给基体引入了更多新的缺陷,对基体与BMF之间的黏结强度造成了负面影响,降低了BMF在冻融循环后期桥接宏观裂缝的作用,因此试件CBF0.225BMF0.225和CBF0.3BMF0.3在经历150次冻融循环后 E_r 值的下降速率很快,试件CBF0.2BMF0.4在经历175次冻融循环后 E_r 值的下降速率很快.

2.3 CSW/CBF/BMFRC的相对动弹性模量

图6为三掺短切玄武岩纤维、玄武岩纤维束和硫酸钙晶须高强混凝土的相对动弹性模量.由图6可见:与PC相比,CBFRC、BMFRC、CBF/BMFRC和所有的CSW/CBF/BMFRC试件均显示出更好的抗冻性能.PC在经历150次冻融循环后的 E_r 值降低到60.0%以下,发生破坏.此时,CBFRC的 E_r 值为86.1%,BMFRC、CBF/BMFRC和所有CSW/CBF/BMFRC试件的 E_r 值均保持在90%以上.随着冻融循环的持续进行,CBFRC、BMFRC、CBF/BMFRC试件分别在经历225、250、300次冻融循环后 E_r 值下降到60.0%以下,发生冻融破坏;所有CSW/CBF/BMFRC试件在经历300次冻融循环后均未发生破坏,CSW掺量为1%、2%、3%的CSW/CBF/BMFRC试件的 E_r 值分别为60.0%、76.1%、86.6%.由此可见,CSW的加入可以进一步改善CSW/CBF/BMFRC的抗冻性能,且改善效果随着CSW掺量的增加相应提高.

添加CSW可以继续提高混凝土抗冻性能的原因是:(1)首先,由于不同孔径中溶液浓度差的存在,微孔溶液向大孔隙迁移对基体产生的渗透压力是引

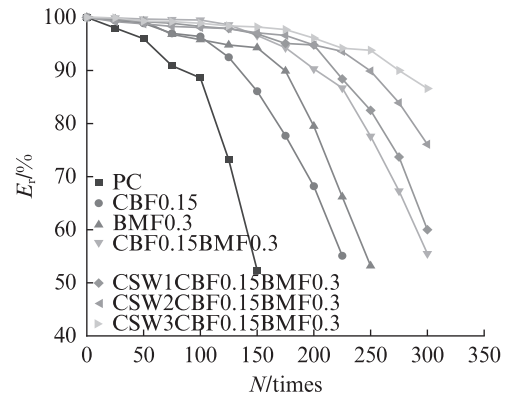


图6 三掺短切玄武岩纤维、玄武岩纤维束和硫酸钙晶须高强混凝土的相对动弹性模量

Fig. 6 Relative dynamic elastic modulus of high strength concretes with chopped basalt fibers, basalt macro-fibers and calcium sulfate whiskers

起混凝土冻融破坏的主要原因^[24-25].CSW具有填充效应,可以与水泥的水化产物反应生成钙矾石,封闭CSW/CBF/BMFRC中的部分微孔隙^[26-29],阻止微孔隙内部的自由水向其他孔隙迁移,从而降低了渗透压.(2)其次,微观、细观和宏观纤维的混合加入更有利于改善骨料与水泥浆体间的界面结合程度,优化基体内的孔径分布,形成更致密的微观结构,减少环境中水向混凝土内部的渗透,降低了内部自由水结冰产生的冻胀压力.(3)最后,结合2.7扫描电镜分析可知,CSW、CBF和BMF进行多尺度阻裂,延缓了冻胀开裂的过程,提高了混凝土的抗冻性能.

2.4 BMFRC的抗压强度及其损失率

图7为单掺BMF对高强混凝土抗压强度损失率(L_R)的影响.由图7可见:

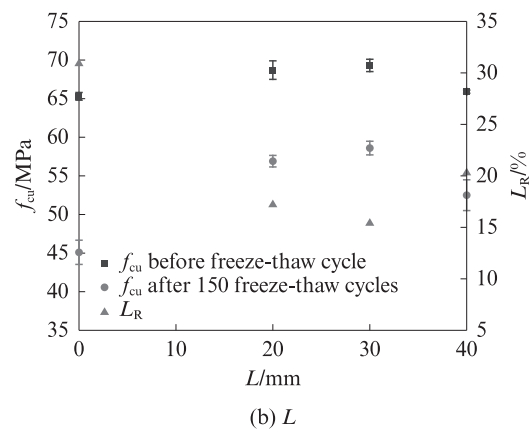
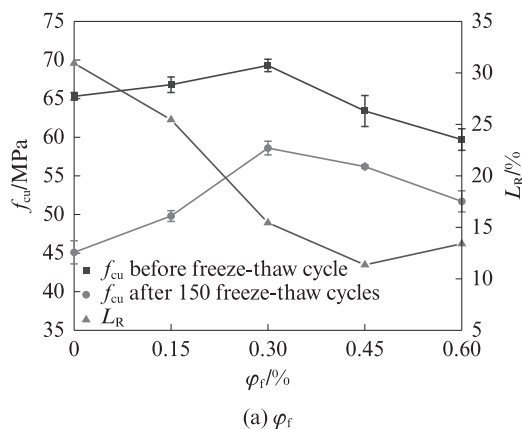


图7 单掺BMF对高强混凝土抗压强度损失率的影响

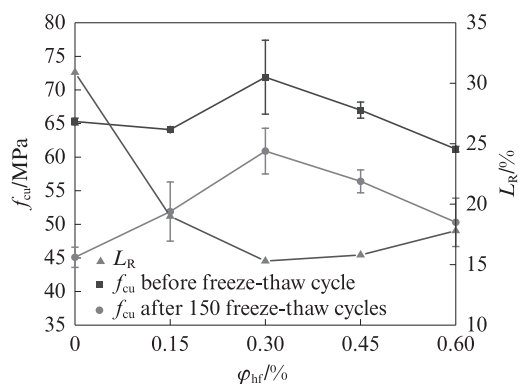
Fig. 7 Effect of single BMF on L_R of high strength concretes

(1)通过对不同BMF掺量BMFRC在经历150次冻融循环前后抗压强度变化情况的分析可知,不管是否掺入BMF,冻融循环作用均降低了混凝土的

抗压强度.从绝对强度来看,冻融循环前后混凝土的抗压强度均随着BFM掺量的增加先增大后减小,均在BFM掺量为0.30%时最高,分别为69.3、

58.6 MPa. 从强度损失率来看, 在经历150次冻融循环后PC的 L_R 值最大, 达30.9%; 随着BMF掺量的增加, 混凝土的 L_R 值先降低后有所增加, 当BFM掺量为0.45%时 L_R 值最小, 为11.4%.

(2) 当BMF长度为30 mm时, BMFRC冻融循环前后的抗压强度值最大. 掺入不同长度的BMF均降低了冻融循环后高强混凝土的 L_R 值.

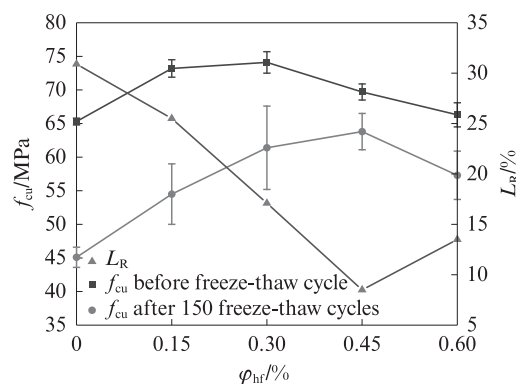


(a) $\phi(\text{CBF})/\phi(\text{BMF})=1:1$

其中, 掺入40 mm长度BMF时的抗压强度相较于冻融前降低最多, L_R 值为20.3%; BMF长度为20、30 mm时的 L_R 值相差不大, 分别为17.2%、15.4%.

2.5 CBF/BMFRC的抗压强度及其损失率

图8为CBF/BMFRC冻融循环150次后的抗压强度损失率. 由图8可见:



(b) $\phi(\text{CBF})/\phi(\text{BMF})=1:2$

图8 CBF/BMFRC冻融循环150次后的抗压强度损失率

Fig. 8 L_R of hybrid CBF and BMF high strength concretes after 150 freeze-thaw cycles

(1) 当CBF和BMF按照1:1比例混杂掺入高强混凝土时, 冻融前后的抗压强度随着 ϕ_{hf} 的增加呈现先增加后降低的趋势, 均在 $\phi_{\text{hf}}=0.300\%$ 时达到峰值, 分别为71.9、60.9 MPa. 当 ϕ_{hf} 为0.150%、0.300%、0.450%、0.600%时, 高强混凝土在经历150次冻融循环后的 L_R 值分别为19.0%、15.3%、15.8%、17.8%, 均显著低于素高强混凝土的 L_R 值(30.9%); 当 ϕ_{hf} 为0.300%~0.450%时, 混凝土的 L_R 值相对较低, 与 E_r 值的结果有很好的 consistency.

(2) CBF和BMF按照1:2的比例掺入高强混凝土时, 冻融前后的抗压强度均随着 ϕ_{hf} 的增加先增大后减小, 但冻融前的抗压强度在 $\phi_{\text{hf}}=0.300\%$ 时最大, 经历150次冻融循环后在 ϕ_{hf} 为0.450%时的抗压强度最优. 随着 ϕ_{hf} 的增加, 冻融后的 L_R 值先降低后增大. 当 $\phi_{\text{hf}}=0.450\%$ 时, 混凝土的抗压强度与未冻融时相比仅降低了8.5%, 抗压强度的保留能力最强.

2.6 CSW/CBF/BMFRC抗压强度及其损失率

图9为CSW/CBF/BMFRC冻融循环150次后的抗压强度损失率. 由图9可见: PC在经历150次冻融循环后的抗压强度为45.1 MPa, $L_R=30.9\%$, CBFRC、BMFRC、CBF/BMFRC在经历150次冻融循环后的抗压强度分别为55.5、58.6、63.8 MPa, 相较于冻融前分别降低了16.2%、15.4%、8.5%. 由此可见, 单掺0.15%CBF与单掺0.30%BMF在冻融前期对混凝土

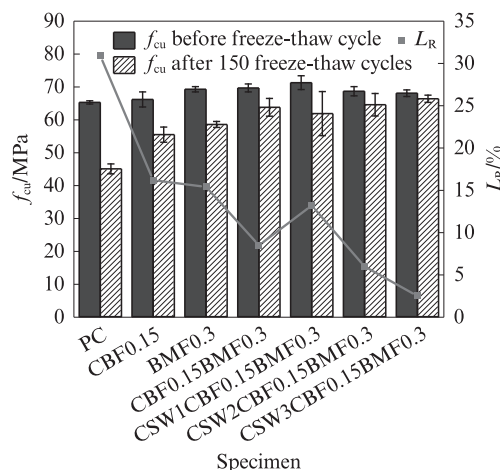


图9 CSW/CBF/BMFRC冻融循环150次后的抗压强度损失率

Fig. 9 L_R of high strength concrete with CBF, BMF and CSW after 150 freeze-thaw cycles

抗冻性能的提升效果相当; 以合适比例和掺量混掺二者后, 混凝土抵抗冻融损伤的效果好于单掺CBF和BMF时. 在引入CSW之后, 当CSW掺量为2%、3%时, CSW/CBF/BMFRC的 L_R 值持续降低, 分别为6.0%、2.5%. 这2组高强混凝土在经历150次冻融循环后的 E_r 值依然高于97%, 可见此时冻融对其内部造成的损伤程度可以忽略不计. 原因分析同2.3, 这里不再赘述. 当CSW掺量为1%时, 在经历150次冻融循环后的 E_r 值也高达96.9%, 但其 L_R 值相对较高, 可能与试验结果的离散性较大有关.

抗压强度、 L_R 值和 E_r 值的结果呈现出很好的一致性。

2.7 SEM分析

以试件 CSW2CBF0.15BMF0.3 为例,通过 SEM 分析 CSW/CBF/BMFRC 经历 150 次冻融循环前后内部的水化产物、纤维与基体界面黏结情况等,结果如图 10 所示。由图 10 可以看出:

(1)冻融损伤前的水泥浆体较为密实,界面区域内可见少量的原始微裂纹以及封闭的小孔隙。冻融损伤后的水泥浆体酥松、剥落,原始小孔隙劣化,连通形成了大孔隙。

(2)试件 CSW2CBF0.15BMF0.3 在经历 150 次冻融循环后,水泥基体剥落导致 CSW 裸露,CSW 之

间相互搭接,形成了空间网状结构,有效阻止了冻融循环前期混凝土内部微裂缝的形成和发展。

(3)冻融循环前 CBF 与基体间的界面结合良好。冻融循环后 CBF 与基体间界面过渡区域(ITZ)变得松散,纤维的部分区段与水泥浆体间剥离,此时 CBF 还没有完全脱黏,可以继续约束基体的冻胀开裂。

(4)在经历 150 次冻融循环后,BMF 与基体界面的过渡区域亦可在低倍数下探测到裂缝,可能是初始结合微裂缝延伸而成,但其损伤程度明显小于其他 2 种尺寸纤维的界面过渡区。这也进一步证明了 CSW、CBF 和 BMF 在混凝土不同冻融损伤阶段发挥了多尺度抑制混凝土胀裂的作用。

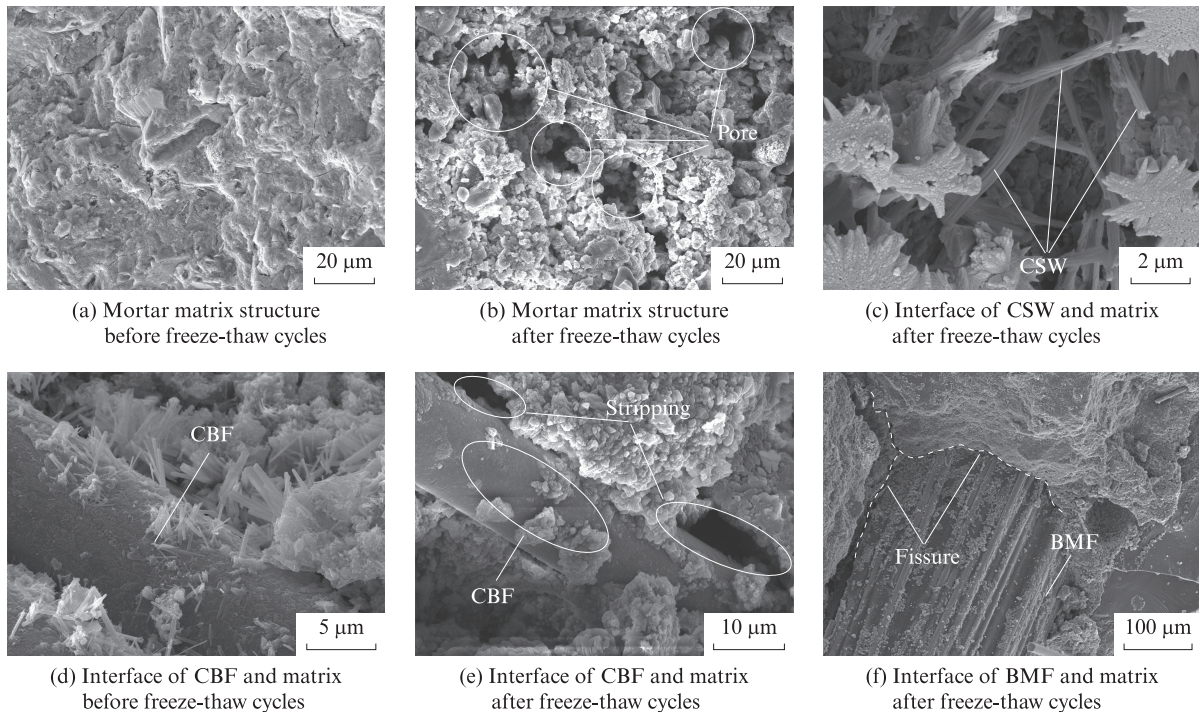


图 10 试件 CSW2CBF0.15BMF0.3 冻融循环前后的微观结构

Fig. 10 Microstructure of specimen CSW2CBF0.15BMF0.3 before and after freeze-thaw cycles

3 结论

(1)各类别高强混凝土的相对动弹性模量(E_r)均随着冻融循环次数的增加逐渐下降,其中以素高强混凝土下降得最快。单独掺入 BMF 时,0.30% 为优势掺量。30 mm 长度玄武岩纤维束(BMF)的效果优于 20、40 mm 长度 BMF。随着纤维总体积分数(φ_{hf})的增加,高强混凝土的抗冻性能先增加后降低。当 φ_{hf} 相同时,短切玄武岩纤维(CBF)和 BMF 体积比为 1:2 时的效果优于 1:1,此时的优势掺量为 0.45%。随着硫酸钙晶须(CSW)掺量的增加,三掺短切玄武岩纤维、玄武岩纤维束和硫酸钙晶须混凝土(CSW/CBF/

BMFRC)的抗冻性能不断提高,在经历 300 次冻融循环后均未冻融破坏。

(2)各类别高强混凝土的抗压强度(f_{cu})在经历 150 次冻融循环后均出现不同程度的降低,其中以素高强混凝土下降得最多,强度损失率(L_R)为 30.9%。单掺 BMF 时,BMF 掺量为 0.45% 时的 L_R 值最低(11.4%),但 BMF 掺量为 0.30% 时冻融前后的 f_{cu} 值最大;30 mm 长度 BMF 混凝土的 L_R 值最小。双掺时, φ_{hf} 为 0.450% 时的 CBF 和 BMF 比例为 1:2 混杂系列的 L_R 值最小(8.5%);三掺时,当 CSW 掺量为 3%,混杂纤维/束高强混凝土冻融后的 f_{cu} 值最大, L_R 值最小(2.5%)。

(3)综合考虑 E_r 、 f_{cu} 和 L_R 值,单掺、双掺和三掺均提高了高强混凝土的抗冻性能.当单掺BMF时,最优掺量为0.30%~0.45%,长度为30 mm;双掺CBF和BMF时,最优总体积分数为0.450%,CBF和BMF比例为1:2;三掺时,BMF掺量为0.30%、CBF为0.15%、CSW掺量为水泥质量的3%时高强混凝土的抗冻性能最好.在优势掺量下对比,双掺优于单掺,加入CSW时的三掺均优于双掺.

(4)高强混凝土的冻融损伤是从界面区(ITZ)、原始孔隙等有缺陷的地方开始的.CSW具有填充效应,可以与水泥的水化产物反应生成钙矾石,形成致密的微观结构.不同尺度的纤维在混凝土不同冻融损伤阶段发挥抗裂作用,使得混凝土的抗冻性提高.

参考文献:

- [1] NARAGANTI S R. Durability study of hybrid fiber reinforced concrete[J]. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2021, 11(1):59-69.
- [2] ZHANG P, LI Q F, CHEN Y Z, et al. Durability of steel fiber-reinforced concrete containing SiO_2 nano-particles [J]. Materials, 2019, 12(13):2184.
- [3] CHIADIGHIKAOBI P C, ALARAZA H, IBEH N U, et al. Durability assessment of basalt fiber polymer as reinforcement to expanded clay concrete in harsh environment [J]. Cogent Engineering, 2021, 8(1):1918855.
- [4] 苏丽,牛获涛,黄大观,等.海洋环境中玄武岩/聚丙烯纤维增强混凝土氯离子扩散性能[J].建筑材料学报,2022,25(1):44-53. SHU Li, NIU Ditao, HUANG Daguan, et al. Chloride diffusion performance of basalt/polypropylene fiber reinforced concrete in marine environment[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):44-53. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 吴倩云,马芹永.冻融循环作用下BSFC的抗冻性及损伤模型[J].建筑材料学报,2021,24(6):1169-1178. WU Qianyun, MA Qinyong. Frost resistance and damage model of BSFC under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1169-1178. (in Chinese)
- [7] ZHOU H, JIA B, HUANG H, et al. Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete [J]. Materials, 2020, 13(6):1362.
- [8] 李趁趁,胡婧,元成方.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. Experimental study on the freezing resistance of fiber reinforced high strength concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8):1977-1983. (in Chinese)
- [9] NIU D T, SU L, YANG L, et al. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117628.
- [10] LI Y, SHEN A Q, WU H. Fractal dimension of basalt fiber reinforced concrete(BFRC) and its correlations to pore structure, strength and shrinkage[J]. Materials, 2020, 13(14):e3238.
- [11] WANG D H, JU Y Z, SHEN H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197:464-473.
- [12] BRANSTON J, DAS S, KENNO S Y, et al. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124:878-886.
- [13] 刘路路.玄武岩纤维束混凝土力学性能试验研究与数值模拟[D].郑州:郑州大学,2020. LIU Lulu. Experimental study and numerical simulation of mechanical properties of twisted basalt fiber bundle reinforced concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [14] IYER P, KENNO S Y, DAS S. Performance of fiber-reinforced concrete made with basalt-bundled fibers[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2016, 5(1):107-123.
- [15] JIANG K D, WANG X, CHEN Z Y, et al. Effect of constituent content on mechanical behaviors of ultra-high performance seawater sea-sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351:128952.
- [16] XIA D T, YU S T, YU J L, et al. Damage characteristics of hybrid fiber reinforced concrete under the freeze-thaw cycles and compound-salt attack[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18:e01814.
- [17] 谢超鹏.多尺度纤维水泥基复合材料断裂性能研究[D].大连:大连理工大学,2021. XIE Chaopeng. Fracture properties of multi-scale fiber reinforced cementitious composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, OZBAKKALOGLU T. High-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(14):6517-6551.
- [19] 张绍奇,郭荣鑫.工业副产石膏制备半水硫酸钙晶须的研究现状[J].硅酸盐通报,2020,39(11):3528-3534. ZHANG Shaoqi, GUO Rongxin. Research status of preparation of calcium sulfate hemihydrate whisker from industrial byproduct gypsum[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11):3528-3534. (in Chinese)
- [20] 丁晓.硫酸钙晶须混凝土力学性能及弯曲荷载作用下碳化和氯离子渗透性能研究[D].北京:北京交通大学,2019. DING Xiao. Mechanical properties of calcium sulfate whisker concrete and carbonization under bending load and chloride ion permeability performance [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese).

- [21] 李趁趁,张文彬,张普,等. 硫酸钙晶须-玄武岩纤维混凝土抗氯离子渗透性能试验[J]. 工业建筑, 2022, 52(9):48-52.
LI Chenchen, ZHANG Wenbin, ZHANG Pu, et al. Experimental research on chloride penetration resistance of calcium sulfate whisker and basalt fiber concrete[J]. Industrial Construction, 2022, 52(9):48-52. (in Chinese)
- [22] 张冬梅,耿欧,赵园园. 硫酸钙晶须对再生混凝土耐久性能的影响研究[J]. 混凝土, 2017(2):21-23, 27.
ZHANG Dongmei, GENG Ou, ZHAO Yuanyuan. Study on the effects of calcium sulfate whisker on durability of recycled concrete[J]. Concrete, 2017(2):21-23, 27. (in Chinese)
- [23] 胡婧. 纤维高强混凝土耐久性试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
HU Jing. Experimental study on durability of fiber reinforced high strength concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [24] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing[J]. Highway Research Board Proceedings, 1953, 32:285-297.
- [25] 周大卫,刘娟红,段品佳,等. 混凝土超低温冻融循环损伤演化规律和机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5):490-497.
ZHOU Dawei, LIU Juanhong, DUAN Pinjia, et al. Damage evolution law and mechanism of concrete under cryogenic freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):490-497. (in Chinese)
- [26] 孙武斌. 晶须增强混凝土抗冻性能及孔隙结构特性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(7):58-60.
SUN Wubin. Experimental study on frost resistance and pore structure characteristics of whisker reinforced concrete[J]. New Building Materials, 2020, 47(7):58-60. (in Chinese)
- [27] 王道正,何玉鑫. 石膏晶须对水泥基复合材料性能和结构影响研究[J]. 无机盐工业, 2015, 47(8):65-68, 72.
WANG Daozheng, HE Yuxin. Study on effect of gypsum whisker on properties and structure of cement composite material[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2015, 47(8):65-68, 72. (in Chinese)
- [28] 李玉根. 毛乌素沙地风积砂混凝土力学特性及冻融盐蚀劣化机理研究[D]. 西安:西安科技大学, 2021.
LI Yugen. Research on mechanical properties and deterioration mechanism of aeolian sand concrete under freeze-thaw and salt corrosion environment in Mu Us sandy land[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [29] 施惠生,郭晓璐,刘红岩. 脱硫石膏对矿渣混凝土抗渗透性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(5):656-659.
SHI Huisheng, GUO Xiaolu, LIU Hongyan. Influence of flue gas desulphurization gypsum on resistance of permeability of slag concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(5):656-659. (in Chinese)