

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.013

纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能

胡 成¹,翁兴中¹,朱懋江¹,高 瑞²,卢昌鑫³

(1.空军工程大学航空工程学院,陕西 西安 710038; 2.西部战区空军军检站,陕西 西安 710082;
3.中国人民解放军空军房地产管理局兰州房地产管理处,甘肃 兰州 730020)

摘要:为解决寒冷地区机场混凝土道面在长期冻融循环作用下出现的表层开裂、起皮和脱落等问题,提出通过在砂浆层中铺设玄武岩纤维网格布和抗碱玻璃纤维网格布来增强机场道面抗冻性能的方法,研究尾焰喷蚀(烧蚀)、氯盐侵蚀(浸盐)和紫外线照射(紫外)3 组环境因素单独和组合作用对纤维网格布强化混凝土抗冻性能的影响规律。对不同种纤维网格布强化混凝土开展不同环境影响因素作用下的单面冻融试验,并利用 SPSS 软件对试验结果进行定量分析。结果表明:在复合因素作用下,纤维网格布可有效增强混凝土抗冻性能,其中玄武岩纤维网格布效果更好;3 种因素同时作用对混凝土抗冻性能影响均很大;2 种因素同时作用对不同混凝土抗冻性能的影响不同,对玄武岩纤维网格布强化混凝土抗冻性能的影响程度由大到小依次为烧蚀+浸盐、紫外+浸盐、烧蚀+紫外,对抗碱玻璃纤维网格布强化混凝土和素混凝土抗冻性能的影响程度由大到小依次为烧蚀+浸盐、烧蚀+紫外、紫外+浸盐;单因素作用对混凝土抗冻性能的影响程度由大到小次序均为浸盐、烧蚀、紫外。

关键词:机场道面工程;混凝土抗冻性能;单面冻融试验;玄武岩纤维网格布;抗碱玻璃纤维网格布
中图分类号:U416.216 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)01-0084-09

Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh

HU Cheng¹, WENG Xingzhong¹, ZHU Maojiang¹, GAO Rui², LU Changxin³

(1. Aeronautical Academy, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Air force Military Inspection Station, Western Theater Command, Xi'an 710082, China;
3. Lanzhou Real Estate Management Office of Air Force Real Estate Administration, PLA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In order to solve the surface cracking, peeling and spalling of airport concrete pavement under the long-term freeze-thaw cycle in cold areas, this study added the basalt fiber mesh and alkali-resistant glass fiber mesh in the mortar layer to enhance the frost resistance of the airport pavement. Effects of three environmental factors, which are the tail flame erosion (ablative), the chloride salt erosion (chloride corrosion) and the ultraviolet radiation (ultraviolet), on the frost resistance of fiber mesh reinforced concrete were studied, by applying factors by separate and combined means. Single-side freeze-thaw tests were carried out on different kinds of fiber mesh reinforced concrete under different environmental factors, and the test results are quantitatively analyzed by SPSS. The result shows that the fiber mesh can effectively enhance the frost resistance of concrete under the effect of composite factors, and the basalt fiber mesh is better. The case in which three factors are applied simultaneously has the greatest effect on the concrete frost resistance, while the case that simultaneously applied of two factors has different effects on the frost resistance of different concretes. The degree of effect for basalt fiber mesh reinforced concrete can be listed in descending order as: ablation and chloride corrosion, ultraviolet and chloride corrosion, ablation and ultraviolet. For the alkali-resistant glass fiber mesh reinforced concrete, it is ablation and chloride corrosion, ablation and ultraviolet, ultraviolet and chloride corrosion. Finally, the degree of effect for single factor is chloride corrosion, ablation and ultraviolet, in descending order.

Key words: airport pavement engineering; frost resistance of concrete; single-side freeze-thaw test; basalt fiber mesh; alkali-resistant glass fiber mesh

作者简介:胡成(1996—),男,硕士研究生,从事机场道面设计与研究。E-mail:1363431101@qq.com

通信作者:翁兴中,教授。E-mail:wxx2626@sina.com

引用本文:胡成,翁兴中,朱懋江,等.纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92.

HU Cheng, WENG Xingzhong, ZHU Maojiang, et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1): 84-92.

机场水泥混凝土道面具有强度高、稳定性好、使用寿命长等特点,但在北方寒冷地区,长期受到冻融循环等不利环境因素作用下的混凝土道面极易发生开裂、剥落等损坏,并且随着我国航空业的发展,飞机向大型化和重载化发展,又会加剧这一损坏,严重影响了新建机场道面的使用性能和使用寿命,并会危及飞机起降,而大量道面修复会带来较大的经济损失,因此迫切需要研究经济有效地提高道面混凝土抗冻性能的方法。近年来,围绕提高道面混凝土的抗冻性能,很多学者进行了研究。通常,通过调整配合比、掺加引气剂和掺合料可以一定程度提高混凝土抗冻性能^[1-4],但采取这些措施后,在寒冷地区混凝土道面仍会出现冻融破坏,因此急需寻找更有效地提高机场混凝土道面抗冻性能的方法。翁兴中等^[5]研究了聚丙烯纤维对提高混凝土耐久性的作用原理。朱懋江等^[6]研究了纤维、聚合物乳液掺入混凝土以及在混凝土表面喷涂硅烷保护剂等对道面混凝土抗冻性能的影响,指出纤维的拉结以及乳液的填充作用,可以间接增强浇筑时混凝土的抗冻性能,并且工程应用较为方便和经济,但该工艺处理下的机场道面混凝土表面抗冻性能的提升并不明显。赵铁军^[7]探究了涂料对混凝土耐久性的影响,研究表明涂料能够有效提高混凝土的抗冻性能,但该方式经济性差,不适合新建机场道面混凝土抗冻性能的增强。苏立海等^[8]研究了混凝土保护剂、聚脲、环氧树脂和硅烷对混凝土抗冻性能的影响,发现 4 种材料中硅烷最适合混凝土抗冻性能的增强,但同样经济性较差。在纤维织物强化混凝土研究方面,田稳苓等^[9]研究了玻璃纤维织物增强混凝土耐久性的原理。张永超^[10]研究了玄武岩纤维网格布以及抗碱玻璃纤维网格布的耐腐蚀性能。Manikandan 等^[11]研究了纤维强化混凝土在腐蚀环境下破坏的机理,指出腐蚀介质经过纤维-混凝土界面,并通过基质逐层向混凝土内传播,并最终导致混凝土的碎裂破坏。Green^[12]、Shi 等^[13]究了玻璃纤维、玄武岩纤维以及碳纤维织物与环氧树脂基质、水泥基结合形成的复合物抵御冻融循环的特性。还有研究比较了玄武岩纤维复合材料与其他种类纤维复合材料的表面性能,结果表明经玄武岩纤维强化的复合材料具有出色的耐热性、吸音性以及低吸水性^[14-19]。这些研究给纤维网格布强化抗冻性能的研究奠定了一定基础,目前所进行纤维织物强化混凝土的研究基本是将纤维织物分散于整个混凝土结构当中,将纤维织物只置于砂浆层中的研究较少,而在实际纤维织物增强混凝土施工中,留在砂浆层中的纤维织物很少,在机场道面当中,砂浆层是直接与环境因素接触的一层结构,是影响混凝土抗冻性能的关键一层,因此本文提出在砂浆层中铺设玄武岩纤维网格布和抗碱玻璃纤维网格布的方式强化机场道面的抗冻性能,对改善新建机场道面混凝土的抗冻性能有重要意义。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥,水取自自来水静置 24 h 后上层不含沉淀部分,砂为天然河沙,细度模数为 2.63,粗集料选取 20 mm 和 40 mm 这 2 种石灰岩碎石,纤维网格布为玄武岩纤维网格布和抗碱玻璃纤维网格布,具体性能参数见表 1。

表 1 纤维网格布性能参数
Table 1 Performance parameters of fiber mesh

材料	弹性 模量/GPa	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	线膨胀 系数/℃	比热容/ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	断裂伸长率/%		耐碱断裂强度/ (N·mm ⁻¹)	
						经向	纬向	经向	纬向
玄武岩纤维网格布	93.1	0.040	7.5×10 ⁻⁶	0.94	3 000	2.5	1.5		
玻璃纤维网格布	72.5	0.035	4.8×10 ⁻⁶	0.79	2 600	3.0	2.0	28	35

1.2 试验配合比

通过数次试调和试拌后,最终确定了试验所采用的机场道面水泥混凝土的基准配合比,其中水泥、水、砂、小石和大石的比例为 335:144.05:660:610:720,水灰比和砂率分别为 0.43 和 0.33。

1.3 试件制备

依据规范^[20],本次试验应采用小梁试件(400 mm×100 mm×100 mm),混凝土试件制备除放置网格布这一步骤外,其余均按规范^[20]进行。放置网格布具体操作为:将纤维网格布放置在抹面完成的混凝土表面上,再次振捣后,用水泥刀进行提浆,使纤维网格布均匀铺入混凝土表层中至肉眼不可见,之后按标准条件养护。

1.4 试验设计

1.4.1 试验影响因素设置

机场道面在使用中,其表面性能会受到周围环境因素的影响,综合考虑后,选取紫外线照射(紫外)、氯盐侵蚀(浸盐)和尾喷烧蚀(烧蚀)3 种因素。以这 3 种因素单独和组合的形式对试件进行处理,并且在试件进行完 10 次冻融后,重复相应处理过程。

1.4.1.1 单因素处理

a. 火焰处理:火焰处理时,将喷枪外焰焰心呈 40°夹角,指向混凝土试件中央,离试件 10 cm,中心温度达到 210 ℃时,继续保持 5 min,随后撤走混凝土试件,进行冻融试验。

b. 紫外线照射:使用 JY-UV-225 型紫外线老化试验机对混凝土试件进行紫外线模拟照射,将 1 个循环设定为 12 h,其中 10 h 为紫外线照射时间,期间环境箱内温度设定为 65 ℃;2 h 作黑暗处理,环境温度设定为 45 ℃,循环结束后进行冻融试验。

c. 氯盐侵蚀:参考规范^[20]关于混凝土试件进行抗冻试验中盐冻法的实施步骤,使用 3% 的 NaCl 溶液作为氯盐侵蚀的环境模拟处理。

1.4.1.2 多因素处理

a. 烧蚀+紫外:进行完烧蚀处理后,待试件表面中央温度降至 50 ℃后,接着对试件进行紫外线照射处理,当进行完老化循环后视作 1 次环境处理循环。

b. 烧蚀+浸盐:进行完烧蚀处理后,待试件表面中央温度降至室温后,直接进行冻融试验(针对冻融试验)或接着进行浸盐处理(针对磨损试验),处理完毕后视作 1 次环境处理循环。

c. 紫外+浸盐:先进行紫外处理,当处理结束后,同烧蚀+浸盐组中第 2 步进行浸盐处理。

d. 烧蚀+紫外+浸盐:先对试件进行烧蚀+紫外组的处理步骤,当处理结束后,同烧蚀+浸盐组中第 2 步进行浸盐处理。

1.4.2 试验方法及评价指标

本次试验为单面冻融试验,仪器为 HDD-II 型单面冻融试验机,试验参照规范^[20]进行,1 次冻融循环时间为 12 h,试验从 20 ℃开始,4 h 匀速降至-20 ℃,保持 3 h,接着 4 h 匀速升至 20 ℃,保持 1 h,至此为 1 个冻融循环。选择单位面积剥落量和相对动弹模量来表征混凝土的冻融损伤。每 10 组冻融循环后测定 1 次。共采用 8 组试件进行试验,包括 3 个单因素试验组、4 个组合因素试验组和 1 组空白对照组。每组中的小梁试件各包括玄武岩纤维网格布强化混凝土试件、抗碱玻璃纤维网格布强化混凝土试件和素混凝土试件各 3 块。为了简便,将玄武岩纤维网格布强化混凝土试件、抗碱玻璃纤维网格布强化混凝土试件和素混凝土试件分别称为黑纤维、白纤维和素混凝土试件。

2 试验结果及分析

2.1 单因素作用

以冻融次数为横轴,相对动弹模量和单位面积累计剥落量为纵轴,分别作出不同环境因素处理组以及对照组的试验结果统计,如图 1 和图 2 所示。

2.1.1 单一环境影响因素对试件动弹模量的影响

在空白对照组当中,3 组试件均在 100 次冻融循环后发生结构破坏,相对动弹模量的衰减规律一致,均在中间 40 次出现较大衰减趋势,而两边衰减较平缓;在中间弹性模量剧烈衰减阶段,黑纤维试件和白纤维试件弹性模量的提升在 20% 以上,而两边提升效果均小于 10%。当环境因素为烧蚀时,3 组试件均在 60 次达到停止试验的标准(包括表面剥落量达到 5% 和试件发生结构破坏,即试件发生掉边掉角破坏),其中素混凝土试件为结构破坏,而黑纤维和白纤维试件则是剥落量达到了标准;与空白对照组对比,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试件的动弹模量降低幅度分别为 0.58% ~ 3.76%,1.14% ~ 4.69% 和 10% 以上。当环境因素为浸盐时,黑纤维和白纤维试件分别在 80 次和 70 次冻融后表面剥落量达到了标准,素混凝土试件则在 70 次的时候发生了结构破坏,3 组试件的动弹模量衰减程度随着冻融循环次数的增加均呈增加趋势;与空白处理的对照组相比,黑纤维试件和白纤维试件在对应冻融次数下相对动弹模量的降幅范围分别为 1.07% ~ 9.23% 和 1.34% ~ 7.6%,素混凝土试件降幅为 10% 以上;当环境因素为紫外时,3 组试件在相对动弹模量

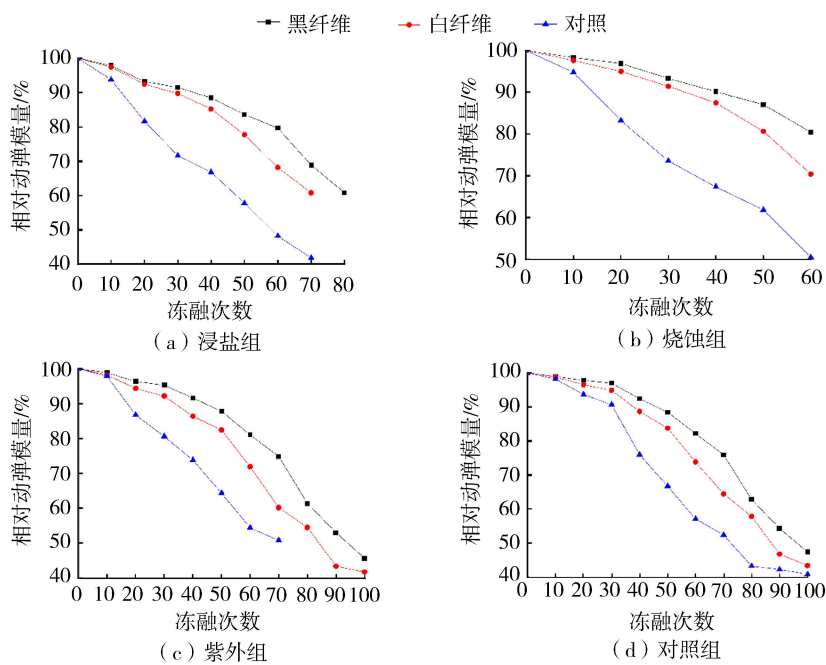


图 1 单因素作用下相对动弹模量

Fig.1 Relative dynamic modulus under the effect of single factors

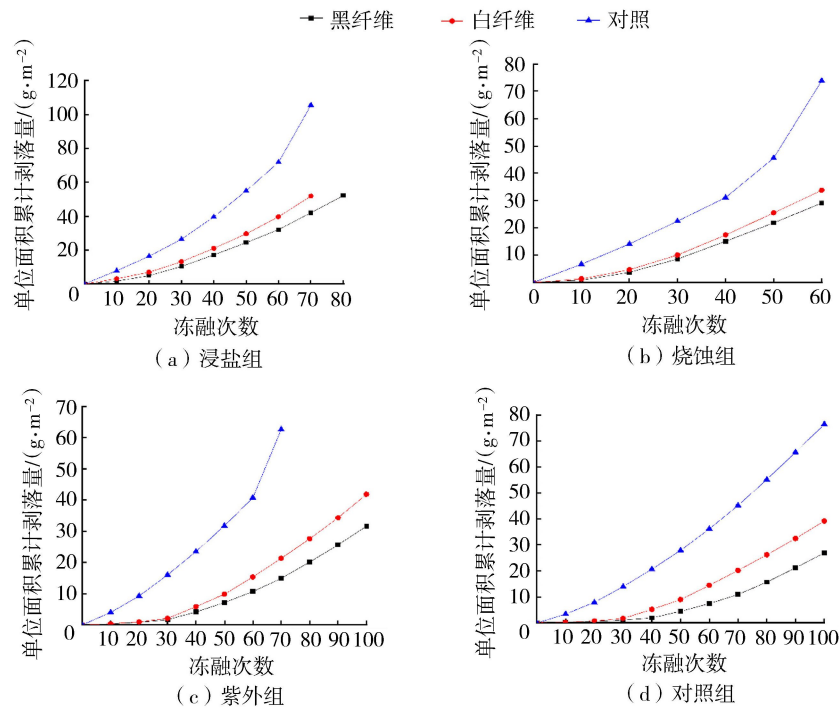


图 2 单因素作用下单位面积累计剥落量

Fig.2 Cumulative exfoliation per unit area under the effect of single factor

衰减曲线以及破坏形式上都与空白对照组相似。与空白对照组中同种试件相比,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试件对应动弹模量的降幅分别为 0.06% ~3.82%,0.52% ~6.7% 和 0.27% ~11.11%。通过以上分析可知,无论有无环境因素的影响,试件动弹模量的减小程度由大到小顺序为黑纤维、白纤维、素混凝土。可见参加纤维网格布能有效提升混凝土经单一环境因素和冻融处理后的动弹模量,其中掺加玄武岩纤维网格布的效果要优于掺加玻璃纤维网格布的效果。

2.1.2 单一环境影响因素对试件累计冻融剥落量的影响

当不施加环境因素时,3 组混凝土试件累计剥落量的变化幅度均较平缓,其中黑纤维试件、白纤维试件

和素混凝土试件的最大单次剥落量分别为 5.75 g/m^2 、 6.75 g/m^2 和 10.75 g/m^2 ;当环境因素为烧蚀时,相较于空白对照组,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试件的最大剥落量分别增加了 26%、23% 和 163%;当环境因素为浸盐时,相较于空白对照组,3 组试件的冻融单次剥落量均为对照组对应试件的 2 倍,而黑纤维试件和白纤维试件的最终累计剥落量均只有素混凝土试件的一半;当环境因素为紫外时,黑纤维试件和白纤维试件与空白环境处理组中对应试件剥落量差别不大。素混凝土试件在前 60 次冻融后剥落量的大小与对照组差异不大,但在第 70 次冻融结束后剥落量陡增,达到了对照组水平的 144%。通过以上分析可以得出,无论有无环境因素,相较于素混凝土,掺加纤维网格布的试件的冻融剥落量都有一定程度的减少,并且掺加玄武岩纤维网格布的效果要优于掺加玻璃纤维网格布的效果。

2.2 复合因素作用结果与分析

以冻融试验次数为横轴,相对动弹模量和单位面积累计剥落量为纵轴,分别作出不同环境因素处理组的试验结果统计,如图 3 和图 4 所示。

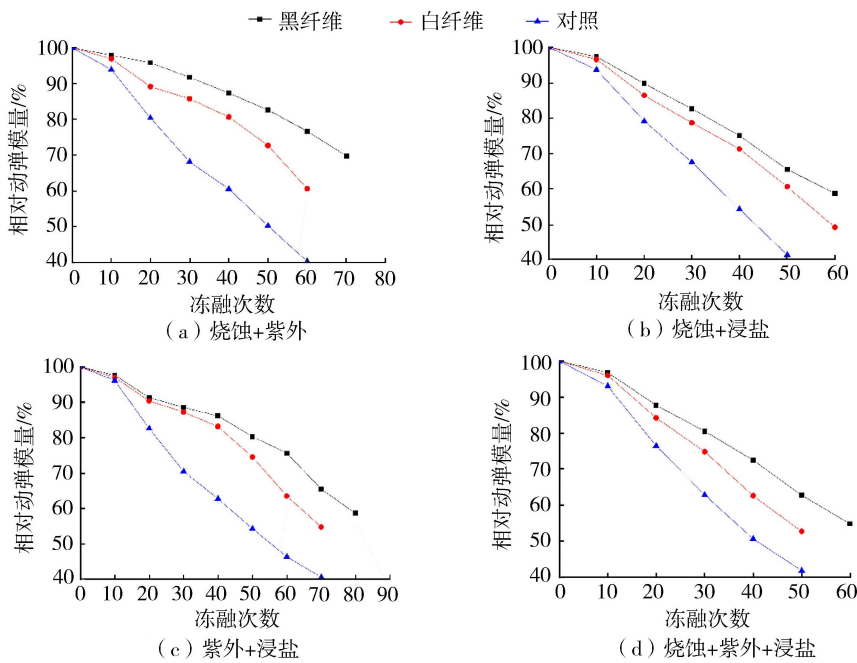


图3 复合因素作用下相对动弹模量

Fig.3 Relative dynamic modulus under the effect of composite factors

2.2.1 对动弹模量的影响

当环境因素为烧蚀+紫外时,相对于空白对照组,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试件的动弹模量降幅分别是 1.0%~8.2%、1.9%~17.9% 和 1.9%~17.9%,相较于单一紫外或烧蚀环境因素,经该复合因素处理的各试件组在对应冻融组数时的相对动弹模量和达到破坏条件前经历的冻融组数均有所降低;当环境因素为烧蚀+浸盐时,相较于空白对照组,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试在冻融对应组数时的相对动弹模量的最高降幅分别为 28.5%、33.5%、38%,且只有黑纤维试件组因表面发生大量剥落而终止试验,白纤维试件和素混凝土试件组均因结构破坏而终止试验;当环境因素为紫外+浸盐时,相较于空白对照组,黑纤维试件、白纤维试件和素混凝土试件的动弹模量降幅分别为 1.3%~7.3%、1.7%~15%、2.0%~22.5%;当环境因素为烧蚀+紫外+浸盐时,相较于空白对照组,该组 3 种类型试件冻融次数下动弹模量降幅均随冻融次数增加依次增高,且下降最高幅度均为 8 个环境试验组之首。黑纤维试件组、白纤维试件组和素混凝土试件组最高降幅分别为 33.3%、37%、37.3%,且均因结构破坏而终止试验。综上可得,在复合环境因素的作用下,试件动弹模量的减小程度由高到低依次为黑纤维试件组、白纤维试件组、素混凝土试件组,且混凝土中掺加纤维网格布能较明显提升经复合环境因素和冻融处理后混凝土的相对动弹模量,并且玄武岩纤维网格布的强化效果要优于抗碱玻璃纤维网格布。

2.2.2 对试件累计冻融剥落量的影响

相较于空白环境处理组,当施加的环境因素分别为烧蚀+紫外、烧蚀+浸盐、紫外+浸盐、烧蚀+紫外+浸盐

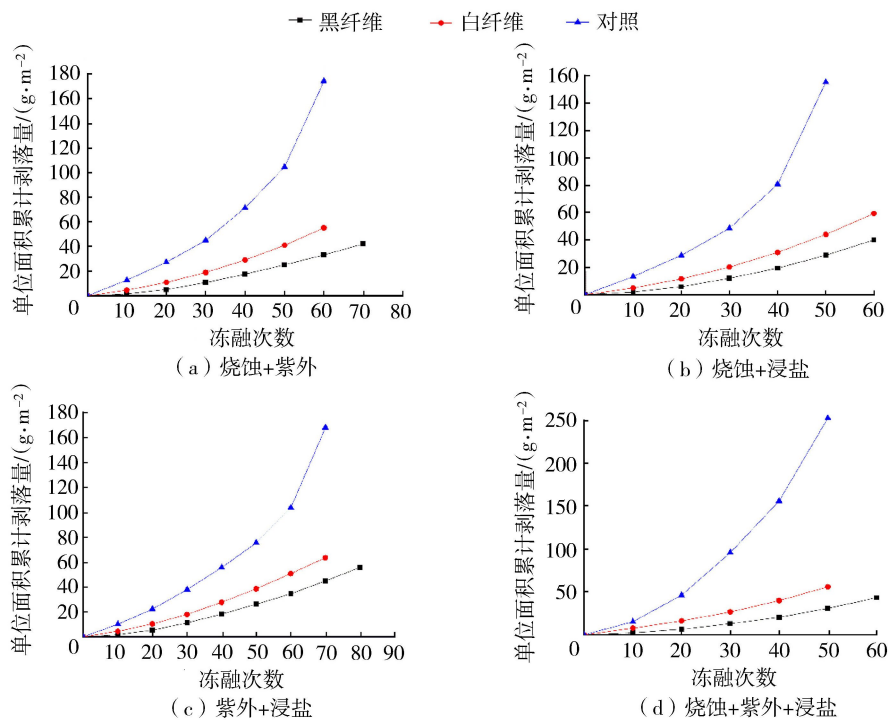


图 4 复合因素作用下单位面积累计剥落量

Fig. 4 Cumulative exfoliation per unit area under the effect of composite factors

时,黑纤维试件组单次最大剥落量增加幅度分别为 50%、95%、88%、114%,白纤维试件组单次最大剥落量增加幅度分别为 110%、127%、90%、151%;素混凝土试件组单次最大剥落量增加幅度分别为 542%、594%、499%、801%。而相同冻融次数下,相较于素纤维试件组,当施加的环境因素分别为烧蚀+紫外、烧蚀+浸盐、浸盐+紫外、烧蚀+紫外+浸盐时,黑纤维试件冻融累计剥落量分别为 13% ~ 19%、15% ~ 18%、17% ~ 27%、12% ~ 15%,白纤维试件冻融累计剥落量分别为 31% ~ 40%、28% ~ 41%、38% ~ 50%、38% ~ 50%。从上述数据分析可知,所有试验组和对照组中冻融后混凝土表面剥落量由大到小依次为素纤维试件组、白纤维试件组、黑纤维试件组。且当 3 种因素共同作用时,对混凝土的影响最大,导致其最大累计剥落量几乎达到上述 3 种复合因素的 2 倍。而在混凝土中掺加纤维网格布能较明显减少经复合环境因素和冻融处理后混凝土表面累计剥落量,且玄武岩纤维网格布的强化效果要优于抗碱玻璃纤维网格布。

2.3 环境因素对水泥混凝土抗冻性能影响程度分析

为精确得到各环境影响因素对黑纤维试件、白纤维试件和素纤维试件的抗冻性能影响次序,将试验取得的 8 组抗冻试验数据按试件种类和评价指标分类,试验结果如图 5 ~ 7 所示。

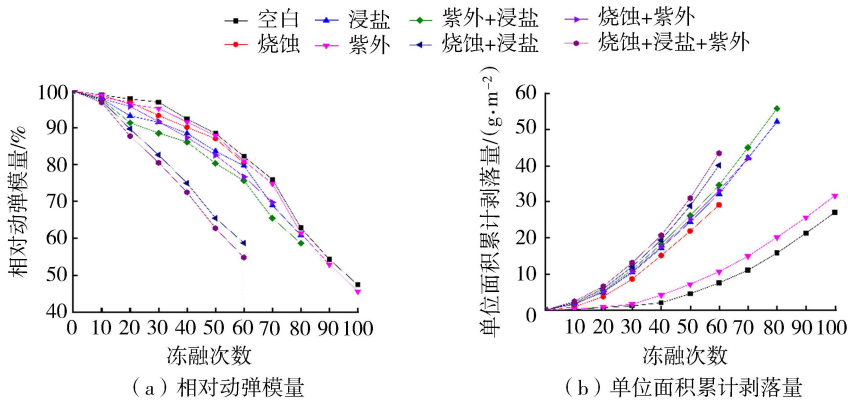


图 5 玄武岩纤维网格布强化混凝土

Fig. 5 Concrete reinforced by basalt fiber mesh

对于黑纤维试件组的抗冻性,分析图 5 可知:烧蚀+浸盐+紫外 3 种因素共同作用时影响最大,其次是烧

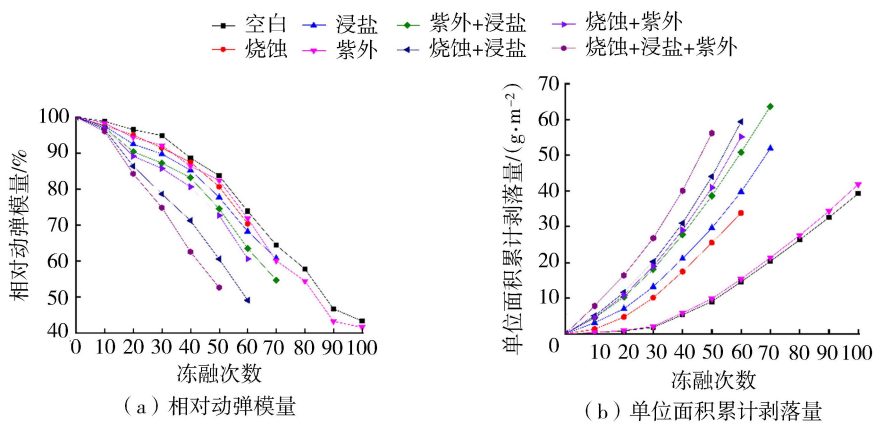


图 6 抗碱玻璃纤维网格布强化混凝土
Fig. 6 Concrete reinforced by alkali-resistant glass fiber mesh

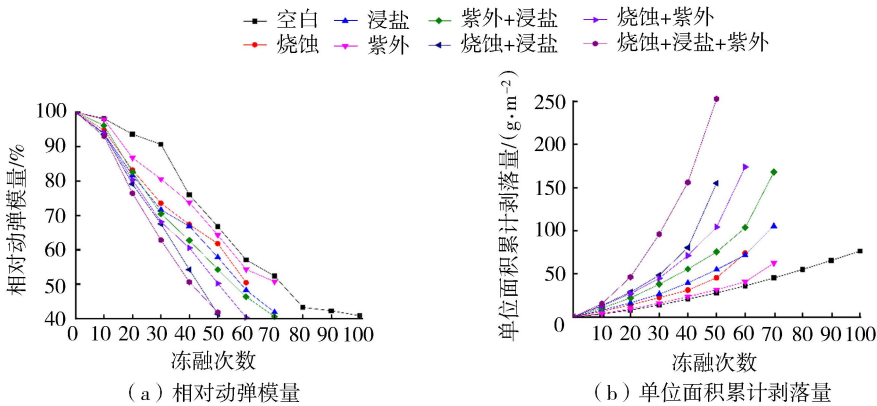


图 7 素混凝土
Fig. 7 Plain concrete

蚀+浸盐,接着是紫外+浸盐。烧蚀+紫外与浸盐单因素的曲线在第 10 次冻融和第 70 次冻融时发生了交叉,且在这 2 点浸盐组的相对动弹模量均小于烧蚀+紫外。但考虑到烧蚀+紫外组试件所经历的冻融次数小于浸盐组试件,因此烧蚀+紫外组的影响大于单一浸盐因素,同理可判别烧蚀因素大于紫外因素。综上可得影响程度由大到小依次为:烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>紫外+浸盐>烧蚀+紫外>浸盐>烧蚀>紫外>空白。对于白纤维试件组,分析图 6 可知,影响程度由大到小依次为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白。对于素纤维试件组,分析图 7 可知,8 组环境影响因素对其抗冻性的影响程度由大到小依次为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白。通过比较环境因素对于黑、白纤维网格布强化后混凝土影响因素的大小发现,在抵抗尾喷烧蚀方面黑纤维效果优于白纤维。从材料性质分析,尾焰高温的烧蚀可能影响到抗碱玻璃纤维网格布外部的抗碱涂层,导致玻璃纤维本体暴露在混凝土碱性环境中,引起材料折损,从而影响其约束和拉结作用。而玄武岩纤维具有耐高温和抗碱腐蚀的双重优点,因此在面对高温的尾喷时具有更好的强化效果。单位面积累计剥落量与冻融组数曲线的斜率越高和破坏前经历冻融次数越少表明某一因素对试验组混凝土的影响越大。综上可知:8 组环境影响因素对黑纤维试件组、白纤维试件组和素混凝土试件组的影响程度由大到小依次为:烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>紫外+浸盐>烧蚀+紫外>浸盐>烧蚀>紫外>空白,烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白,烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白。结果与通过相对动弹模量分析的结果一致。

将衡量试件抗冻性能的两种指标结果综合可得 8 种环境影响因素对 3 组试件组混凝土抗冻性能的影响由大到小依次为:黑纤维试件组为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>紫外+浸盐>烧蚀+紫外>浸盐>烧蚀>紫外>空白,白纤维试件组为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白,素混凝土试件组为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白。

2.4 基于 SPSS 主成分分析方法的抗冻性能影响因素影响权重分析

2.3 节的结论是通过对图形的直观观察和分析得到的,但统计图中数据曲线部分交错,使得结论的取得缺乏统计学科学性;同时从统计图中只能凭借参数的关系定性得出几种影响因素的排序,不能定量得出8 种环境影响因素对于不同混凝土试件抗冻性的影响大小。因此采用 SPSS 软件对试验结果进行分析,定量得到各环境组对于不同试件组混凝土抗冻性的影响权重大小如表 2(单位均为 1)所示。将变量环境因素按因子得分大小进行排序可得 8 种环境影响因素对 3 组混凝土试件抗冻性能的影响程度由高到低依次为:掺加玄武岩纤维网格布的混凝土为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>紫外+浸盐>烧蚀+紫外>浸盐>烧蚀>紫外>空白,掺加抗碱玻璃纤维网格布的混凝土为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐 >烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白,素混凝土为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白,该结果与通过统计图分析得到的结果一致。

表 2 环境影响因素定量分析结果
Table 2 Quantitative analysis results of environmental impact factors

环境因素	相对动弹模量权重			累计剥落量权重		
	黑纤维组	白纤维组	素混凝土组	黑纤维组	白纤维组	素混凝土组
空白	-1.062 48	1.193 08	1.698 17	-1.611 99	1.316 29	1.016 93
烧蚀	-0.673 06	0.686 91	0.207 11	-0.096 94	0.511 84	0.613 55
浸盐	-0.232 75	0.370 39	0.095 40	0.360 20	0.108 43	0.429 98
紫外	-0.881 82	0.818 74	1.041 87	-1.434 66	1.286 43	0.936 18
紫外+浸盐	0.164 23	0.008 04	0.023 29	0.521 06	0.445 74	0.014 96
烧蚀+浸盐	1.264 92	1.080 18	0.964 07	0.794 79	0.701 15	0.637 78
烧蚀+紫外	-0.276 90	0.226 13	0.538 00	0.399 05	0.541 40	0.379 58
烧蚀+浸盐+紫外	1.697 84	1.754 76	1.326 39	1.068 49	1.534 70	1.994 25

3 结 论

- a. 在 7 种环境因素的作用下,试件相对动弹模量的减小程度顺序是黑纤维组>白纤维组>素混凝土组;冻融后混凝土表面剥落量由大到小依次为素混凝土组>白纤维组>黑纤维组。
- b. 掺加黑、白纤维网格布均能有效提高试件的抗冻性,其中黑纤维的强化效果优于白纤维。当环境因素为烧蚀+紫外+浸盐时,掺加纤维网格布能够弱化烧蚀破坏作用,且掺加玄武岩纤维网格布的作用效果略强于抗碱纤维玻璃网格布,但最终所有试件仍会在以氯盐侵蚀为主导的冻胀破坏下发生结构破坏。
- c. 8 种环境组合因素对 3 组试件组混凝土抗冻性能的影响由大到小依次为:玄武岩纤维网格布强化混凝土为烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>紫外+浸盐>烧蚀+紫外>浸盐>烧蚀>紫外>空白;抗碱玻璃纤维网格布强化混凝土:烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白;素混凝土:烧蚀+紫外+浸盐>烧蚀+浸盐>烧蚀+紫外>紫外+浸盐>浸盐>烧蚀>紫外>空白。

参考文献:

[1] 丁向群,周睿彤,王钰. 硅灰对混凝土抗冻性能及其孔结构的影响[J]. 混凝土,2017(2):53-55. (DING Xiangqun, ZHOU Ruitong, WANG Yu. Effect of silica fume on frost resistance and pore structure of concrete[J]. Concrete, 2017(2):53-55. (in Chinese))

[2] 张凯,王齐才,王庆石,等. 引气剂对混凝土性能的研究[J]. 公路工程,2015,40(6):21-23. (ZHANG Kai, WANG Qicai, WANG Qingshi, et al. A effects of air entraining agent on the performance of concrete[J]. Journal of Highway Engineering, 2015,40(6):21-23. (in Chinese))

[3] 张立群,贾辰辰,张晓冉,等. 矿物掺合料和引气剂对混凝土抗盐冻性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2018(3):5-9. (ZHANG Liqun, JIA Chenchen, ZHANG Xiaoran, et al. Study on the influence of mineral admixtures and air entraining agents on salt resistance of concrete[J]. New Building Materials, 2018(3):5-9. (in Chinese))

[4] 陈红伟,胡玉兵,张云必. 高原环境下混凝土配合比优化设计研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(8):2681-2687. (CHEN Hongwei, HU Yubing, ZHANG Yunbi. Study on optimization design of concrete mixing ratio in plateau environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(8):2681-2687. (in Chinese))

[5] 翁兴中,蔡良才,崔树业,等. 道面聚丙烯纤维混凝土的耐久性研究[J]. 混凝土,2008(4):54-56. (WENG Xingzhong, CAI

- Liangcai, CUI Shuye, et al. Study on durability of polypropylene fiber concrete pavement[J]. Concrete, 2008(4):54-56. (in Chinese))
- [6] 朱懋江,翁兴中,高瑞,等. 机场道面混凝土表面强化材料的性能研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 295-302. (ZHU Maojiang, WENG Xingzhong, GAO Rui, et al. Study on properties of concrete surface strengthening materials for airport pavement[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2018, 49(2): 295-302. (in Chinese))
- [7] 赵铁军. 渗透性涂料表面处理与混凝土耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 苏立海,吕燕,冀勋高,等. 表层强化材料增强机场道面混凝土抗冻性能研究[J]. 混凝土, 2019(3):30-39. (SU Lihai, LYU Yan, JI Xungao, et al. Study on frost resistance of airport pavement concrete surface reinforcement materials[J]. Concrete, 2019(3):30-39. (in Chinese))
- [9] 田稳苓,孙雪峰. 纤维编织网增强混凝土耐久性机理和测试方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 33(6):89-92. (TIAN Wenling, SUN Xuefeng. Durability mechanism and test method of fiber woven mesh reinforced concrete[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 33(6):89-92. (in Chinese))
- [10] 张永超. 纤维网格布的耐腐蚀性及其对混凝土力学性能的影响[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [11] MANIKANDAN V, JAPPES J T W, KUMAR S M S, et al. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 812-818.
- [12] GREEN M F. FRP repair of concrete structures: performance in cold regions[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2006, 28(1/2): 160-177.
- [13] SHI J W, ZHU H, WU G, et al. Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze-thaw cycling environments[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60(1): 239-247.
- [14] CZIGÁNY T. Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: mechanical properties and acoustic emission study[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(16): 3210-3220.
- [15] REDDY B R, RAVI K M, WAUGH B K. Compositions comprising melt-processed inorganic fibers and methods of using such compositions: U. S. Patent 7, 493, 968[P]. 2009-02-24.
- [16] REDDY B R, HEATHMAN J F. Cement compositions comprising high aspect ratio materials and methods of use in subterranean formations: U. S. Patent 7, 537, 054[P]. 2009-05-26.
- [17] HUNG T D, LOUDA P, KROISOVÁ D, et al. New generation of geopolymer composite for fire-resistance[M]//PAVLA T. Advances in Composite Materials: Analysis of Natural and Man-Made Materials. MANILA: Intech, 2011:73-92.
- [18] WU Q, CHI K, WU Y, et al. Mechanical, thermal expansion, and flammability properties of co-extruded wood polymer composites with basalt fiber reinforced shells[J]. Materials & Design, 2014, 60: 334-342.
- [19] SEZEMAN G A, MIKULSKIS D, KLIGYS M, et al. Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and SiO₂ microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 718-726.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2009.

(收稿日期:2020-02-11 编辑:张志琴)