文章编号:1674-2974(2024)05-0193-14 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024060

掺稻壳灰与纤维素纤维混凝土抗氯离子渗透和抗冻性试验研究

郑山锁[1],李浩冲[1†],阮升[1],周林[2],杨丰[3],董方园[1]
[1. 结构工程与抗震教育部重点实验室(西安建筑科技大学),陕西 西安 710055;
2. 中节能(安康)环保能源有限公司,陕西 安康 725018;
3. 中国启源工程设计研究院有限公司,陕西 西安 710058]

摘 要:为了研究水胶比、稻壳灰和纤维素纤维对混凝土耐久性能的影响,以稻壳灰掺量(0、10%和20%)、纤维素纤维掺量(0.7 kg/m^3、1.1 kg/m^{3}和1.6 kg/m^3)和水胶比(0.37、0.41和0.45)为变量,通过9组正交试验得到3种因素对混凝土抗氯离子渗透性能和抗冻性能的影响规律,并分别建立了掺稻壳灰纤维混凝土质量损失率与相对动弹性模量的冻融预测模型.结果表明:各因素对混凝土抗氯离子渗透性能和抗冻性能影响显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量;混凝土的抗氯离子渗透性能和抗冻性能随稻壳灰掺量的增加显著增强,随纤维素纤维掺量的增加呈先增强后减弱的趋势,在水胶比为0.37时最优;稻壳灰掺量为20%时,混凝土抗氯离子渗透性能最佳,抗冻性能最优;纤维素纤维掺量为1.1 kg/m^{3}时,混凝土抗氯离子渗透性能最好,抗冻性能最强;增加稻壳灰掺量、添加适量的纤维素纤维可以提高混凝土基体的密实度、减少微裂缝,进而增强混凝土的耐久性能;所建立的掺稻壳灰纤维混凝土质量损失率与相对动弹性模量的冻融预测模型与试验结果吻合较好,具有一定的适用性,可为制备绿色高性能混凝土提供理论依据和支撑.

关键词:稻壳灰;纤维素纤维;抗氯离子渗透性能;抗冻性能;耐久性
中图分类号:TU528 **文献标志码**:A

Experimental Study on Chloride Ion Penetration Resistance and Frost Resistance of Rice Husk Ash and Cellulose Fiber Admixed Concrete

ZHENG Shansuo[1], LI Haochong[1†], RUAN Sheng[1], ZHOU Lin[2], YANG Feng[3], DONG Fangyuan[1]
[1. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education (Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China;
2. China Energy Conservation Group An Kang Environmental Protection Energy Co. Ltd., Ankang 725018, China;
3. China Qiyuan Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710058, China]

Abstract: To study the influence of water-to-binder ratio, rice husk ash, and cellulose fiber on the durability performance of concrete, nine orthogonal tests were conducted with three variables: rice husk ash content (0, 10%,

* **收稿日期**:2023-03-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278530), National Natural Science Foundation of China(52278530);陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF06-10),Shaanxi Provincial Key R&D Plan(2021ZDLSF06-10);国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509302),National Key R&D Program of China(2019YFC1509302)
作者简介:郑山锁(1960—),男,陕西西安人,西安建筑科技大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:1409911866@qq.com

and 20%), cellulose fiber content (0.7 kg/m^3, 1.1 kg/m^3 and 1.6 kg/m^3), and water-to-binder ratio (0.37, 0.41 and 0.45). The impact of these factors on chloride ion penetration resistance and freeze-thaw resistance of concrete was analyzed, and prediction models for mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of rice husk ash and fiber concrete during freezing and thawing were established, separately. The results show that the degree of impact of each factor on chloride ion penetration resistance and freeze-thaw resistance of concrete is as follows in descending order: water-to-binder ratio > rice husk ash content > cellulose fiber content. The chloride ion penetration resistance and freeze-thaw resistance of concrete are significantly enhanced with increasing rice husk ash content, while it shows a trend of first enhancing and then weakening with increasing cellulose fiber content. The optimum performance is achieved at a water-to-binder ratio of 0.37. When the rice husk ash content is 20%, the concrete has the best chloride ion penetration resistance and the optimal freeze-thaw resistance. When the cellulose fiber content is 1.1 kg/m^3, the concrete exhibits the best chloride ion penetration resistance and the strongest freeze-thaw resistance. Increasing the dosage of rice husk ash, and adding a suitable amount of cellulose fibers can improve the density of the concrete matrix, reduce microcracks, and enhance the durability performance of the concrete. The prediction model for the mass loss rate and relative dynamic modulus of elasticity of rice husk ash fiber concrete established is in good agreement with experimental results, and has a certain applicability. This can provide a theoretical basis and support for the preparation of green high-performance concrete.

Key words: rice husk ash; cellulose fiber; chloride ion penetration resistance; frost resistance; durability

普通混凝土由于抗渗性低、抗冻性差等耐久性问题,已无法满足现代建筑的需要. 1998 年清华大学的吴中伟院士首次提出了“绿色高性能混凝土”的概念[1]. 绿色高性能混凝土不仅具有较好的耐久性能,还能够节约资源和能源、保护环境,制备绿色高性能混凝土符合我国可持续发展的战略目标. 现阶段我国硅灰年产量仅有 3 000~4 000 t,且价格较高,难以满足实际工程的大量需求. 有研究表明,从 2011 年以来,我国水稻总产量一直稳定在 2 亿 t 以上[2],并且每生产 1 t 水稻大约会产生 200~250 kg 的稻壳,我国产生的稻壳量约占全球产量的 12%~15%. 研究发现,稻壳灰中含有 20% ~25% 的无定型硅,可将稻壳先采用质量分数为 3% ~ 6% 的氯化氢、硫酸和硝酸中一种或多种进行酸化处理和水洗后,得到预处理稻壳;再将预处理稻壳在 550 ~ 850 ℃焙烧 2 ~ 6 h,得到焙烧体;最后将得到的焙烧体与冰水混合物混合进行急速冷却,便可得到稻壳灰. 以来源广泛的稻壳为原料生成稻壳灰,有效提高了稻壳的利用价值,不需生成水玻璃等中间产品,大大节约酸碱原料,生产成本低,工艺简单,制备的稻壳灰成品中有害杂质含量少[3],因其含有 90%~96% 的 SiO_2,具有很好的火山灰活性,在改善混凝土内部结构方面具有与硅灰类似的作用[4-7]. Sensale[8]对掺加了稻壳灰的高强混凝土的收缩性能开展了试验研究. Huang 等[9]用稻壳灰代替超高性能混凝土中不同比例的硅灰,并与基准混凝土相对比进行研究. 明阳等[10]通过试验分析了高温稻壳灰的各项性能,均发现掺加稻壳灰的混凝土的抗氯离子渗透性能显著提高. 冯庆革等[11]通过在 490~520 ℃下煅烧稻壳,得到活性 SiO_2 含量为 92.4% 的稻壳灰,发现 10% 和 20% 稻壳灰掺量的混凝土均具有良好的抗冻融性能. 研究表明,掺加稻壳灰不仅可以增强混凝土材料的耐久性能[12-14],还能减少对硅灰的需求量,解决稻壳大量堆积对土地资源的侵占及就地燃烧造成的环境污染等一系列环境问题[15].

但是,在温度、湿度以及结构层面的地基沉降等众多因素的影响下,混凝土极易产生裂缝,进而导致其存在抗冻、抗渗性不良的缺点[16],因此常采用掺加纤维的方式来提高混凝土的耐久性. 纤维素纤维是新一代混凝土用高性能纤维,该种纤维是采用一种高寒地区特殊物种的植物加工而成的,本身具有高强高弹性模量和天然的亲水性的特点[17]. 张文潇[18]通过电通量法测试抗氯离子渗透性能试验和抗冻融循环试验表明:在高温作用后,纤维素纤维混凝土的质量损失和相对动弹性模量的衰减程度皆小于基准素混凝土. Buch 等[19]对普通混凝土及纤维素纤维混凝土的耐久性能开展的试验研究与郭丽萍等[20]对高温作用后纤维素纤维混凝土的试验研究均指出纤维

素纤维可以使混凝土耐久性能得到显著改善.何柏等[21]通过不同亲水性能的纤维对混凝土抗冻性能影响的研究与陶友海[22]对不同掺量的粉煤灰纤维素纤维混凝土进行的冻融循环试验研究均发现掺加纤维素纤维的混凝土具有良好的抗冻性能.

以上都是通过掺加稻壳灰或者纤维素纤维制备混凝土,研究其耐久性能,但对于同时掺加稻壳灰与纤维素纤维混凝土的耐久性试验研究却罕见报道.鉴于此,本文在现有高性能混凝土研究的基础上,采用农业废料稻壳灰代替部分水泥,并掺加纤维素纤维,制备具有高性能的混凝土,开展掺稻壳灰的高性能纤维混凝土抗氯离子渗透试验和抗冻试验,研究水胶比、稻壳灰和纤维素纤维等因素对混凝土抗氯离子渗透性能和抗冻性能的影响规律,并对所制备的混凝土材料进行耐久性评价,进而建立相应的冻融预测模型,以期为高性能纤维混凝土的制备和工程应用提供理论依据,为更好地利用废弃农副产品、缓解环境压力带来有益启示.

1　试验

1.1　原材料

混凝土原材料所用粗骨料为粒径在5~20 mm之间的石灰石碎石;细骨料为天然中粗河砂,质地坚硬、级配良好,其细度模数为2.8,表观密度为2 580 kg/m^3;减水剂为聚羧酸系高性能混凝土外加剂,最佳掺量为水泥用量的1.0%~1.5%;水泥采用P.O42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰采用Ⅰ级粉煤灰;所用拌和水为生活饮用水.

纤维采用UF500纤维素纤维,其特征参数见表1.稻壳灰采用农业废料稻壳在适当条件下经过浓酸处理、焚烧、浓酸、研磨制成的稻壳灰.研磨前的稻壳灰称为RHA-原灰,其化学组分检测结果见表2,其中SiO_2含量高达91.2%,烧失量为3.9%,可知其SiO_2含量与硅灰相近.使用球磨机对RHA-原灰进行研磨时间依次为0、10 min、20 min、30 min、60 min的研磨处理,研磨后的试样依次为RHA-原灰、RHA-1、RHA-2、RHA-3和RHA-4,各种稻壳灰的细度见表3,试样外观如图1(a)~(e)所示.由此可知,在研磨初期,原状稻壳灰中的薄壳状颗粒及较大粒径的粉体在球磨机的作用下逐渐被粉碎,试样的平均粒径大幅度降低;研磨时间超过30 min后,稻壳灰的内部孔结构在球磨机作用下被严重破坏,部分粉体颗粒逐渐黏聚成团,致使其筛余量增加.故研磨稻壳灰时间为20 min时得到的试样效果最优,在后续试验中,选择经过20 min研磨处理后制备的稻壳灰(RHA-2),其粉体颗粒的平均粒径在10 μm左右,比表面积在50 m^2/g以上.

表1　纤维素纤维的特征参数

Tab.1　Characteristic parameters of cellulose fiber

长度/mm	密度/(g·cm^{-3})	单丝直径/μm	比表面积/(cm^2·g^{-1})	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa	断裂延伸率/%	耐酸碱性
2~3	1.1	15~20	25 000	8~10	800~1 000	10	强

表2　稻壳灰的化学组分

Tab.2　Chemical composition of rice husk ash

化学成分	质量分数/%	化学成分	质量分数/%
SiO_2	91.20	SO_3	0.25
K_2O	1.29	Fe_2O_3	0.21
CaO	1.03	Na_2O	0.12
Al_2O_3	0.63	烧失量	3.90
MgO	0.28		

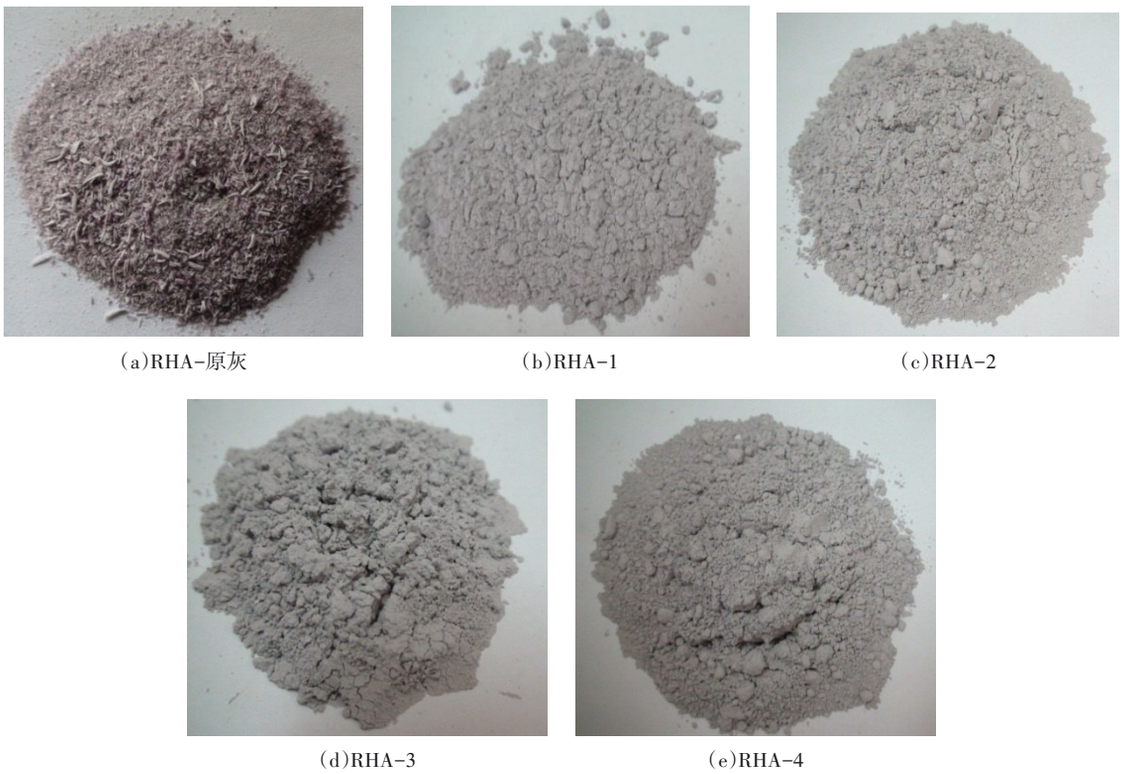
表3　研磨后稻壳灰的细度

Tab.3　Fineness of rice husk ash after grinding

稻壳灰	研磨时间/min	45μm筛余量/%
RHA-原灰	0	87
RHA-1	10	14
RHA-2	20	6
RHA-3	30	15
RHA-4	60	31

1.2　混凝土配合比设计

水胶比和矿物掺合料是混凝土耐久性的主要影响因素.水胶比是指每立方米混凝土用水量与所有胶凝材料用量的比值,而胶凝材料质量=水泥质量+矿物掺合料质量.另外,纤维等增强体材料在混凝土中能够阻裂增韧,纤维掺量对混凝土的流动性和耐久性能亦有较大影响.为揭示水胶比、矿物掺合料用量、纤维素纤维掺量等因素对混凝土耐久性的影响规律和影响显著程度,本文将矿物掺合料等量替代水泥,采用正交试验设计方法,考虑水胶比、稻壳灰



(a)RHA-原灰 (b)RHA-1 (c)RHA-2

(d)RHA-3 (e)RHA-4

图1 稻壳灰试样外观

Fig.1 Appearance of rice husk ash sample

掺量、纤维素纤维掺量这3种因素,每种因素取3个水平,采用$L_9(3^3)$的3因素3水平正交表,设计9组混凝土配合比(该种正交试验设计未考虑各因素间交互作用).按照相关规范规定,本试验中混凝土的砂率取40%,砂取700 kg/m^3,碎石取1 041 kg/m^3,粉煤灰掺量为胶凝材料总量的20%,聚羧酸系高性能减水剂的有效掺量为0.2%,计算用水量为175 kg/m^3(混凝土实际用水量为计算用水量减去聚羧酸系减水剂引入的水量).其他的混凝土单方材料用量见表4.

表4 3因素3水平正交表及单方混凝土材料用量

Tab.4 3 factors 3 levels orthogonal table and the amount of single concrete material

组号	因素			单方混凝土材料用量/(kg·m^{-3})				
	水胶比	稻壳灰掺量/%	纤维素纤维掺量/(kg·m^{-3})	水泥	粉煤灰	减水剂	稻壳灰	纤维素纤维
S1	0.37	0	0.7	378	95	4.73	0	0.7
S2	0.37	10	1.1	331	95	4.73	47	1.1
S3	0.37	20	1.6	283	95	4.73	95	1.6
S4	0.41	0	1.1	342	85	4.27	0	1.6
S5	0.41	10	1.6	299	85	4.27	43	0.7
S6	0.41	20	0.7	257	85	4.27	85	1.1
S7	0.45	0	1.6	311	78	3.89	0	1.1
S8	0.45	10	0.7	272	78	3.89	39	1.6
S9	0.45	20	1.1	233	78	3.89	78	0.7

1.3 试验方法

1.3.1 混凝土制备工艺

1) 搅拌工艺

搅拌工艺和成型养护方法对混凝土的耐久性能有较大程度影响.本文使用HJW-60型混凝土搅拌机,为避免纤维黏聚成团,采用“先干后湿”的投料搅拌顺序,利用干拌时骨料间剪切力将纤维均匀分散.搅拌流程如图2所示.

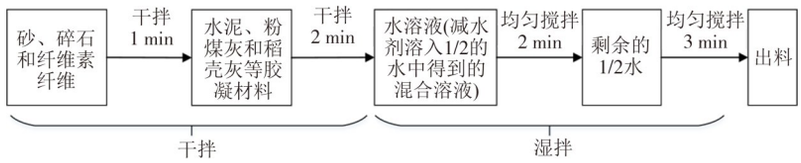


图 2　混凝土搅拌工艺流程

Fig.2　Concrete mixing process flow

2)　成型与养护

所有试件在混凝土拌合物取样后立即制作.将混凝土拌合料装模、振实、表面抹平,成型后用塑料薄膜覆盖表面,静置 1 个昼夜,编号拆模.试件拆模后,立即在温度为(20±3) ℃的饱和石灰水中养护至相应龄期后进行相应试验测试.

1.3.2　抗氯离子渗透试验方法

该试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)[23]要求进行.如图 3 所示,试验采用 RCM-NTB 型氯离子扩散系数测定仪,试件采用直径为 100 mm、高度为 50 mm 的圆柱体试块,每组 3 个.采用快速氯离子迁移系数法(RCM 法)测定氯离子在高性能纤维混凝土中非稳态迁移的系数,以确定高性能混凝土的抗氯离子渗透性能.



图 3　RCM 试验装置

Fig.3　RCM test device

1.3.3　抗冻性能试验方法

该试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)[23]要求进行.如图 4 所示,本试验所用仪器为电脑全自动混凝土快速冻融试验仪和 DT-20 动弹仪,采用 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件,每组试件为 3 块,选择快冻法开展高性能纤维混凝土的抗冻试验,采用共振法测定高性能纤维混凝土的动弹性模量,并对混凝土试块每 25 次冻融后进行一次质量 W_{ni} 和横向基频 f_{ni} 的测试.规定试验达到如下的任一要求时即可停止:a)冻融循环次数达到 300 次;b)试件的相对动弹性模量减小至 60%;c)试件的质量损失率达 5%.试验完成之后,依据测试结果,试件的相对动弹性模量和质量损失率计算均按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)[23]要求计算.



(a)冻融箱



(b)快速冻融试验系统



(c)动弹性模量测试仪

图 4　抗冻融试验仪器及控制系统

Fig.4　Anti-freeze-thaw test instrument and control system

1.3.4　微观形态观察方法

本文还采用 Quanta200 扫描式电子显微镜对混凝土的微观形态进行观察,研究稻壳灰和纤维素纤维对混凝土微观结构的影响.

2　结果与讨论

2.1　抗氯离子渗透性能

下面将通过试验结果,采用极差分析和方差分析对混凝土的抗氯离子渗透能力进行评价,进而反映其抗氯离子渗透性能.

2.1.1　极差分析

本正交试验中,不同配合比的高性能纤维混凝土的非稳态氯离子迁移系数测定值如表 5 所示(其中 A、B、C 分别为水胶比、稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量,下同).图 5 为高性能纤维混凝土的抗氯离子渗透性能随不同参数的变化趋势.由表 5 可知,当水胶比为 0.37、稻壳灰掺量为 10%、纤维素纤维掺量为 1.1 kg/m^3 时,混凝土的抗氯离子渗透性能最优(即 S2 组),其非稳态氯离子迁移系数为 1.69×10^{-12} m^2/s.

表5 高性能纤维混凝土的非稳态氯离子迁移系数

Tab.5 Unsteady chloride ion migration coefficient of high performance fiber reinforced concrete

因素	A	B/%	C/(kg·m^{-3})	非稳态氯离子迁移系数/(10^{-12} m^2·s^{-1})
S1	0.37	0	0.7	2.88
S2	0.37	10	1.1	1.69
S3	0.37	20	1.6	2.05
S4	0.41	0	1.1	3.88
S5	0.41	10	1.6	3.81
S6	0.41	20	0.7	2.74
S7	0.45	0	1.6	5.41
S8	0.45	10	0.7	4.37
S9	0.45	20	1.1	3.72
K_1	2.21	4.06	3.33	
K_2	3.48	3.29	3.10	$\sum$ =30.55
K_3	4.50	2.84	3.76	
R_j	2.29	1.22	0.66	

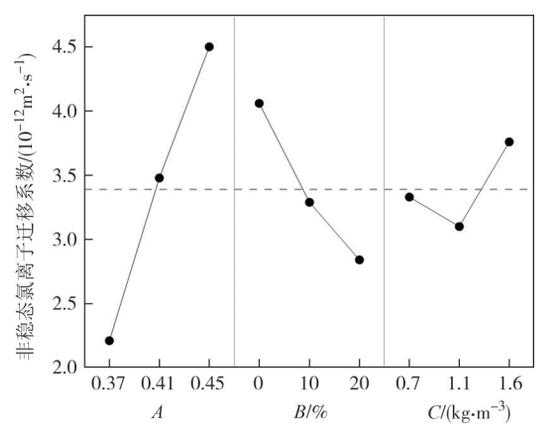


图5 混凝土抗氯离子渗透性能主效应图

Fig.5 Main effect diagram of concret resistance to chloride ion penetration

由极差分析可得,各因素下高性能纤维混凝土的非稳态氯离子迁移系数的极差大小依次为:R_A>R_B>R_C,即水胶比对混凝土的抗氯离子渗透性能影响的最为显著,稻壳灰掺量次之,纤维素纤维掺量的影响最小.适量的稻壳灰和纤维素纤维均有利于提高混凝土的抗氯离子渗透能力.

由图5可知,混凝土的抗氯离子渗透能力随水胶比的减小逐渐增强,抗氯离子渗透性能得到了显著提升.在一定范围内,水胶比的降低,改善了混凝土内部结构的致密性,从而提高混凝土的抗氯离子渗透能力.随稻壳灰掺量的增加,混凝土的抗氯离子渗透能力显著增强.稻壳灰掺量分别为0、10%和20%时,混凝土的非稳态氯离子迁移系数平均值分别为4.06×10^{-12} m^2/s、3.29×10^{-12} m^2/s和2.84×10^{-12} m^2/s,其抗氯离子渗透能力得到显著改善.这是由于稻壳灰等量替代水泥后,一方面可以使硬化浆体内部的晶体更加完整、密实,另一方面优化了混凝土的孔结构,阻碍了氯离子的侵入,可见稻壳灰可用于改善混凝土的抗氯离子渗透性能.当纤维素纤维掺量小于1.1 kg/m^{3}时,混凝土的抗渗透性能随纤维素纤维掺量的增加而增强,当纤维素纤维掺量为1.6 kg/m^{3}时,混凝土的抗氯离子渗透性能则出现减弱的趋势,可见纤维掺量并不是越多越好.当纤维掺量在适宜范围内时,均匀分布的纤维素纤维能够提高混凝土内部结构的密实度,从而提高了混凝土的抗氯离子渗透性能;纤维素纤维掺量较大时,混凝土中出现纤维聚集、无法均匀分散的区域,形成连通的毛细通道加速了氯离子迁移,导致混凝土的抗氯离子渗透能力减弱.

2.1.2 *方差分析*

混凝土非稳态氯离子迁移系数的方差分析结果如表6所示.

表6 混凝土非稳态氯离子迁移系数的方差分析

Tab.6 Variance analysis of unsteady chloride ion migration coefficient of concrete

因素	统计参数					贡献率/%
	自由度	平方和	均方差	F值	p值	
A	2	7.920	3.960	129.92	0.008	72.8
B	2	2.282	1.141	37.43	0.026	21.0
C	2	0.672	0.336	11.03	0.083	6.2
误差	2	0.061	0.030	—	—	—
总和	8	10.934	—	—	—	100

本正交试验中,p值越小认为该因素对混凝土抗氯离子渗透性能影响越显著,故显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量,水胶比对抗氯离子渗透性能的贡献率达到72.8%,稻壳灰掺量的贡献率为21.0%,而纤维掺量对混凝土抗氯离子渗透性能的影响最小,其贡献率为6.2%.

2.2 抗冻性能

2.2.1 *冻融破坏形态*

选择具有代表性的4组混凝土试件(S2、S3、S4和S7)进行破坏形态分析.冻融试验前的混凝土试件表面平整,无明显孔洞,在100次、200次、300次冻融循环后试件的破坏形态如图6所示.在100次冻融循环后,可见各组试件表面有孔洞出现,S7组试件中孔洞直径相对较大,各组混凝土中有部分试件的表层砂浆出现轻微剥落;在200次冻融循环后,可知随着冻融循环次数的增加,各组试件的表面孔洞数量增多、孔径增大,部分孔洞进一步扩展连通加重了混

凝土表层浆体的剥落,表明混凝土试件的冻融损伤加剧.S2和S3组试件表面损伤程度相对较轻,S7组试件的损伤程度最重;在250次冻融循环后S7试件停止试验,在300次冻融循环后,S4组试件表面浆体严重剥落,且试件两端破坏比中间部位更为突出.S2和S3组试件表面出现了较多孔洞,其表面浆体在冻融循环作用下部分剥落,但尚未对混凝土造成实质性破坏.



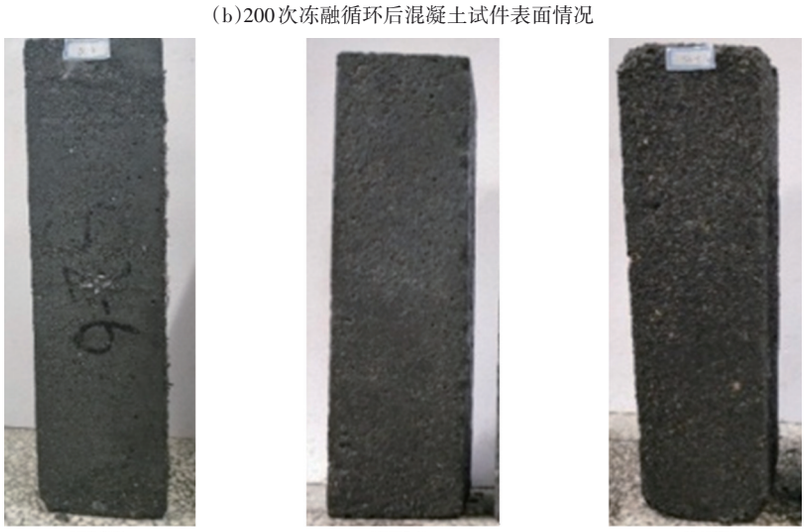
S2试件　　S3试件　　S4试件　　S7试件

(a)100次冻融循环后混凝土试件表面情况



S2试件　　S3试件　　S4试件　　S7试件

(b)200次冻融循环后混凝土试件表面情况



S2试件　　S3试件　　S4试件

(c)300次冻融循环后混凝土试件表面情况

图6　混凝土在不同冻融循环次数下的冻融破坏形态

Fig.6　The freeze-thaw failure modes of concrete under different freeze-thaw cycles

由各组试件在冻融循环过程中的破坏形态可知,S2和S3组试件的抗冻性能优于其他各组.混凝土的抗冻性能与其内部孔结构分布及浆体密实度相关,该试验中S2和S3组混凝土的水胶比较低,其内部结构较为致密,故抗冻能力较强,同时表明水胶比和稻壳灰掺量对混凝土的抗冻性能影响较大.

2.2.2　质量损失率

质量损失率是评价混凝土抗冻性能的重要指

标,其质量损失率测试结果如表7所示.图7为S1~S9组混凝土试件质量损失率随冻融循环次数的变化规律曲线.图8为250次冻融循环后质量损失率平均值在不同因素下的主效应图.图9为不同因素下各水平的混凝土质量损失率平均值随冻融循环次数的变化规律图.

表7 不同冻融循环次数后混凝土的质量损失率

Tab.7 Mass loss rate of concrete after different freeze-thaw cycles

冻融循环次数N	质量损失率/%								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
25	0.19	0.13	0.06	0.39	0.25	0.29	0.14	0.19	0.08
50	0.36	0.24	0.20	0.78	0.42	0.51	0.28	0.36	0.13
75	0.48	0.37	0.30	0.75	0.59	0.56	−0.03	0.47	0.26
100	0.63	0.40	0.37	0.93	0.65	0.64	−0.50	1.32	0.28
125	0.59	0.35	0.41	0.88	0.71	0.63	−0.46	0.48	0.41
150	0.65	0.36	0.37	0.94	0.86	0.67	−0.02	0.84	0.52
175	0.72	0.21	0.52	0.95	0.75	0.74	0.56	−0.21	0.64
200	0.75	0.05	0.28	1.07	0.88	0.76	1.39	1.12	0.63
225	0.83	−0.11	0.32	1.19	0.96	0.78	2.06	3.61	0.79
250	1.06	−0.10	0.68	1.27	1.14	0.96	4.09	4.76	0.94
275	1.20	−0.03	0.95	1.19	1.44	1.19	—	—	1.18
300	1.36	0.38	1.47	1.33	1.59	1.48	—	—	1.09

由图7可知,在250次冻融循环之前,除个别数据外,随冻融循环次数的增加,S2和S3的质量损失呈先增后减的趋势,或许是由于混凝土中的水泥、粉煤灰等胶凝材料吸水后会进一步水化生成更多的凝胶体,从而提高了其质量.而混凝土表层部分的浆体被冻坏并脱落,会导致其质量降低.如果前者的作用比后者更为显著,那么混凝土的质量就会提高;反之,混凝土的质量将会降低.到达250次冻融循环后,S2和S3组试件的质量损失逐渐增大,表明混凝土表层在一定程度上发生冻坏而剥落.S7组试件的质量损失呈先减后增的趋势,S8组试件在200次冻融循环之前,其质量损失呈不均匀锯齿形变化,之后其质量损失不断增大.到250次冻融循环后,S7组的一个试件发生冻坏,S8组两个试件质量损失率超过5%,终止这两组试验.其余各组试件的质量损失率随冻融循环次数的增加呈不同程度增大的趋势,表明试件在冻融循环中逐渐发生损坏.由试验结果可知,S2和S3组混凝土试件的质量损失相对较小,表明这两组试件的抗冻能力最优.

由图8和图9(a)可知,冻融循环过程中,质量损失率平均值随冻融循环次数的增加呈增大趋势,水胶比为0.37的混凝土表现出最佳的抗冻性能,其质量损失率最低,故可知混凝土的抗冻性能随水胶比的减小而提高,水胶比为0.37的混凝土抗冻性能最优.

由图8和图9(b)可知,随着冻融循环次数的增加,不同水平下混凝土的质量损失率平均值总体上呈递增的趋势;300次冻融循环后,稻壳灰掺量为20%的混凝土质量损失率平均值达到1.35%,为三种情况最低.由此可知,稻壳灰能够提高混凝土密实度,并阻止水分和有害离子入侵,使其抗剥落能力不断增强,稻壳灰有利于改善混凝土的抗冻性能,稻壳灰掺量为20%时,混凝土的抗冻性能最优.

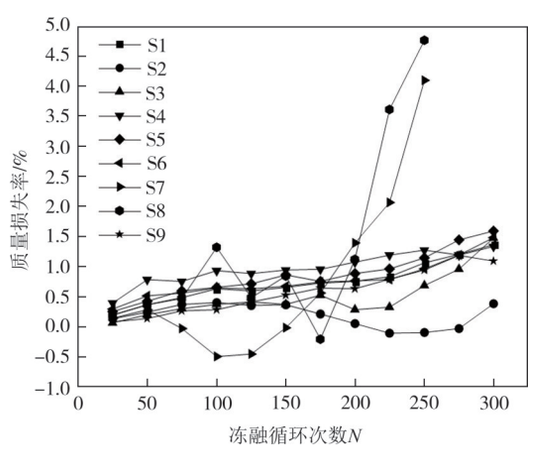


图7 各组混凝土质量损失率随冻融循环次数的变化规律

Fig.7 Variation of mass loss rate of concrete with freeze-thaw cycles

由图8和图9(c)可见混凝土的质量损失率平均值随纤维掺量的增加呈先减小后增大的趋势,这是由于纤维掺量过多而无法完全均匀分散,部分纤维在混凝土中形成薄弱区域,从而加重了混凝土在冻融循环后期的损伤,而适量的纤维素纤维不仅能够

阻止混凝土冻融损伤所引起微裂纹的产生和扩展,还可在试验中逐渐释放储存的自由水,促进胶凝材料进一步水化,使混凝土内部结构更加密实,故适量的纤维素纤维有助于改善混凝土的抗冻性能.由试验结果可知,纤维素纤维的最优掺量为1.1 kg/m^3.

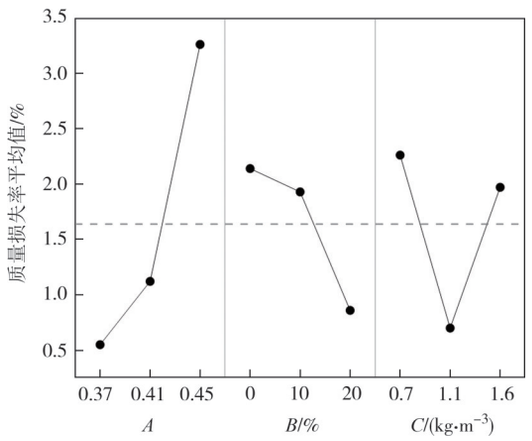


图8　250次冻融循环后质量损失率平均值的主效应图

Fig.8　Main effect diagram of average mass loss rate after 250 freeze-thaw cycles

根据试验结果,本节考虑水胶比、稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量,建立掺稻壳灰纤维混凝土冻融循环后质量损失预测模型:

$$M' = f(N)g(A)h(B)j(C) \tag{1}$$

式中:M'为质量损失率;$f(N)$、$g(A)$、$h(B)$、$j(C)$分别为冻融循环次数N、水胶比A、稻壳灰掺量B、纤维素纤维掺量C单因素下混凝土质量损失率关系函数.

综合表7、图7和图8可得,质量损失率随冻融循环次数和水胶比增长基本呈线性变化,质量损失率与稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量之间呈二次函数关系,则质量损失率预测模型表达式为:

$$f(N) = a_1N + b_1 \tag{2}$$

$$g(A) = a_2A + b_2 \tag{3}$$

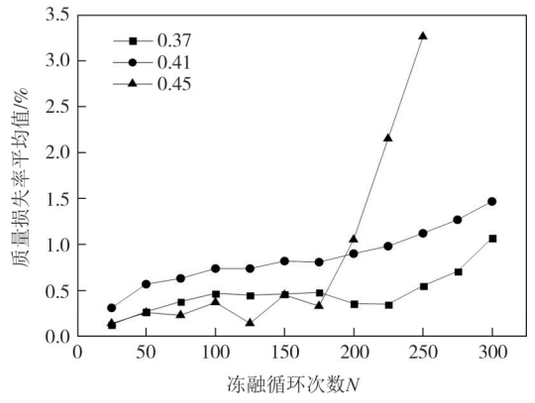
$$h(B) = a_3B^2 + b_3B + c_3 \tag{4}$$

$$j(C) = a_4C^2 + b_4C + c_4 \tag{5}$$

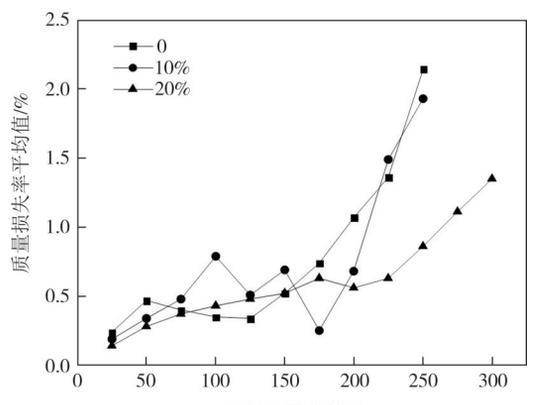
$$M' = (a_1N + b_1) \times (a_2A + b_2) \times (a_3B^2 + b_3B + c_3) \times (a_4C^2 + b_4C + c_4) \tag{6}$$

式中:a_1、b_1、a_2、b_2、a_3、b_3、c_3、a_4、b_4、c_4均为拟合参数.

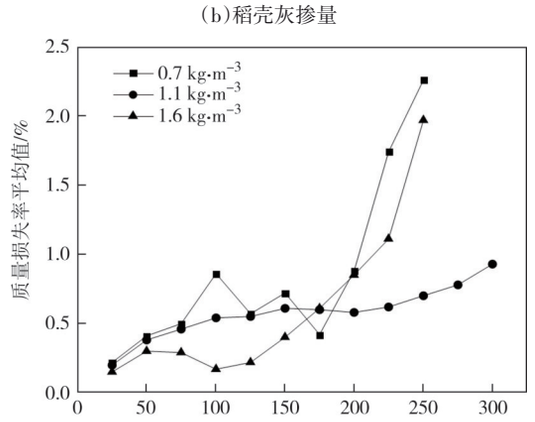
进而对质量损失率M'与冻融循环次数N、水胶比A、稻壳灰掺量B和纤维素纤维掺量C之间的关系进行拟合,考虑到S7和S8组混凝土的抗冻性能相对较差,为减小拟合时的误差,本文仅对S1~S6组以及S9组的混凝土建立统一经验回归公式,相关系数R^2=0.836 3,质量损失率表达式如式(7)所示:



(a)水胶比



(b)稻壳灰掺量



(c)纤维素纤维掺量

图9　不同因素下混凝土质量损失率随冻融循环次数的变化规律

Fig.9　Variation of mass loss rate of concrete with freeze-thaw cycles under different factors

$$\begin{aligned} M' = {} & (4.764\,0N + 274.667\,8) \times \\ & (1.926\,1A - 0.653\,4) \times \\ & (15.086\,6B^2 - 4.060\,8B + 0.370\,9) \times \\ & (0.119\,9C^2 - 0.253\,8C + 0.151\,5) \end{aligned} \tag{7}$$

下面采用质量损失率表达式对部分试验结果进行计算,试验值与计算值比较结果如图10所示,可

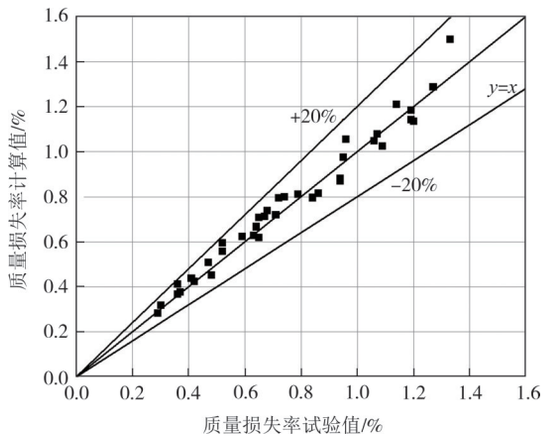


图 10 质量损失率对比

Fig.10 Comparison of mass loss rate

知误差在±20% 以内. 计算得到该部分试验值和计算值比值的平均值为 0.978,标准差为 0.058,变异系数为 0.060,表明该模型能够较为准确地预测掺稻壳灰纤维混凝土冻融后的质量损失率.

2.2.3 相对动弹性模量

本试验中采用共振法测得混凝土的横向基频,进而计算出其相对动弹性模量,根据相对动弹性模量值确定混凝土的冻融损伤程度. S1~S9 组试件的相对动弹性模量计算结果如表 8 所示. 图 11 为 9 组混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律曲线. 图 12 为 250 次冻融循环后混凝土的相对动弹性模量平均值的主效应图. 图 13 为不同因素下混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律图.

由表 8 可知,随冻融循环次数的增加,各组混凝土试件的相对动弹性模量退化程度相差较大. 经过 300 次冻融循环后,S2 和 S3 组试件的相对动弹性模量分别为 88.28%、90.62%,其抗冻性能优于其他各组;75 次冻融循环后,S2~S4 混凝土的相对动弹性模量增加,这可能是由于胶凝材料进一步水化生成了更多的 C-S-H 等凝胶体,填充了混凝土内部结构的毛细孔,混凝土内部密实度得到提升,故所测得的横向基频变大;250 次冻融循环后,S7 和 S8 组试件的相对动弹性模量分别为 54.21%、58.26%,低于规范规定的 60%,故其冻融试验停止.

表 8 不同冻融循环次数后混凝土的相对动弹性模量

Tab.8 Relative dynamic elastic modulus of concrete after different freeze-thaw cycles

冻融循环次数 N	相对动弹性模量/%								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
25	99.79	99.84	99.91	99.58	99.79	99.73	98.54	98.87	99.73
50	97.61	97.42	97.66	96.59	98.24	99.57	96.16	97.35	97.57
75	97.36	100.10	98.13	100.12	96.58	95.97	93.65	95.41	95.97
100	95.27	98.40	97.05	98.18	96.52	95.27	100.40	94.67	94.27
125	94.59	97.06	97.24	97.09	94.65	94.08	92.14	92.55	91.08
150	92.76	97.64	96.14	94.76	93.18	94.74	87.02	89.28	90.74
175	91.45	96.22	95.42	93.47	91.43	93.11	86.11	86.63	89.11
200	90.23	94.24	94.80	90.03	89.85	94.64	81.68	82.65	86.64
225	89.37	93.33	96.50	87.04	88.46	90.96	74.09	70.41	84.96
250	87.65	94.04	93.15	85.55	86.15	89.32	54.21	58.26	80.32
275	85.81	91.93	91.53	82.60	85.72	87.62	—	—	72.62
300	81.46	88.28	90.62	78.08	81.54	84.54	—	—	64.54

由图 11 可知,各组混凝土试件的相对动弹性模量随冻融循环次数的增加呈逐渐降低趋势. S7 和 S8 组试件的相对动弹性模量下降趋势最为明显,而 S2 和 S3 组试件下降速率最慢. 在整个冻融循环过程中,S5 和 S1 组试件的相对动弹性模量值差值较小,两条曲线基本相互重叠,表明两组试件的抗冻能力相近.

由图 12 和图 13(a)可知,在冻融循环过程中,随着水胶比的降低,相对动弹性模量平均值逐渐增加,即表明混凝土材料的抗冻性能随水胶比的减小而增强. 在进行 100 次冻融循环之前,不同水胶比的混凝土相对动弹性模量平均值之间差异不明显. 然而,在进行 100 次冻融循环之后,水胶比为 0.45 的试件下降趋势显著快于其他两种水胶比的试件,水胶比为 0.37 的试件下降速度最慢. 可见,水胶比为 0.37 的混凝土具有最优的抗冻性能.

由图 12 和图 13(b)可知,随稻壳灰掺量的增加,混凝土的相对动弹性模量值逐渐增大,即其抗冻能力增强. 125 次冻融循环之前,各组试件的相对动弹性模量平均值差值较小;之后,稻壳灰掺量为 20% 的

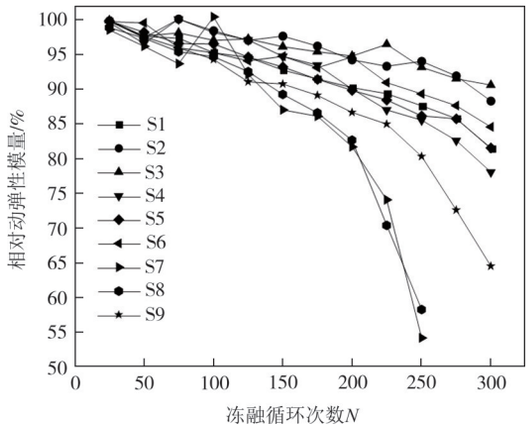


图 11　各组混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律

Fig. 11　The variation of relative dynamic elastic modulus of concrete in each group with the number

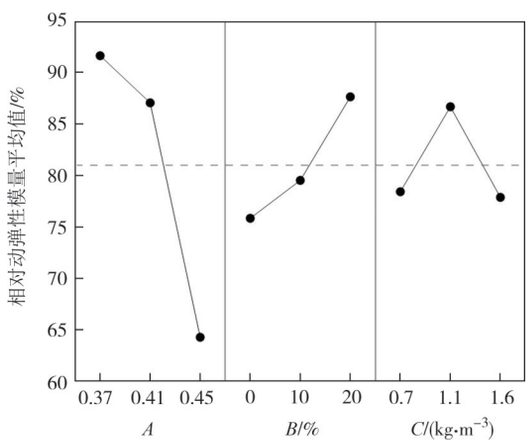
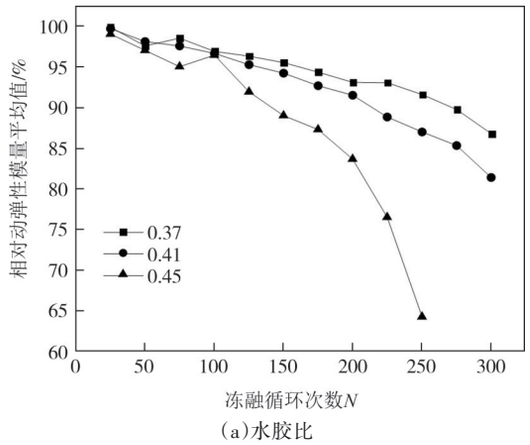


图 12　250 次冻融循环后相对动弹性模量平均值的主效应图

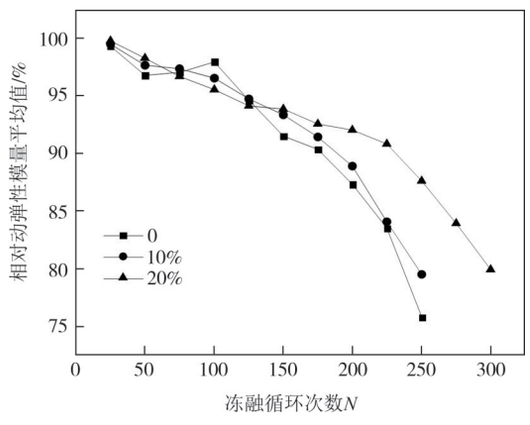
Fig. 12　Main effect diagram of average relative dynamic elastic modulus after 250 freeze-thaw cycles

混凝土试件的相对动弹性模量衰减速率低于其他两组试件,未掺稻壳灰的混凝土试件的相对动弹性模量平均值降至 75.8%,稻壳灰掺量为 10% 和 20% 的混凝土试件的相对动弹性模量平均值分别为 79.48% 和 87.6%. 在其他条件不变的情况下,掺入粒径较小的稻壳灰可以优化胶凝材料颗粒级配,促进体系粉煤灰的水化反应,且稻壳灰中的活性 SiO_2 能够与浆体中的氢氧化钙晶体进一步反应生成 C-S-H 凝胶体,减小气泡和孔隙的平均直径,提高硬化浆体及其与骨料、纤维界面的密实度,且随稻壳灰掺量的增加,稻壳灰对混凝土抗冻性能的增强作用愈加显著.

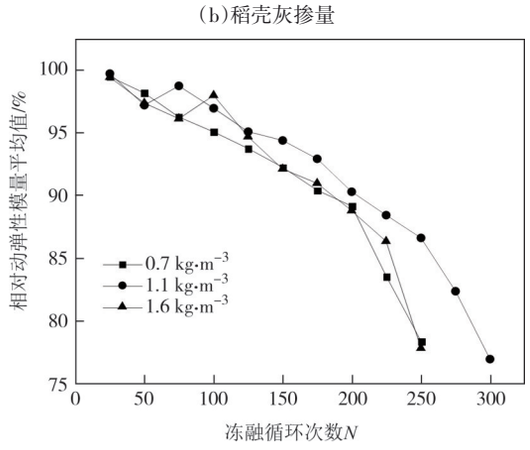
根据图 12 和图 13(c)可知,随着纤维掺量的增加,混凝土的相对动弹性模量平均值呈现先增加后减小的趋势. 在进行 150 次冻融循环之前,三种情况的差异不明显. 其中,纤维素纤维掺量为 1.1 kg/m³ 的



(a)水胶比



(b)稻壳灰掺量



(c)纤维素纤维掺量

图 13　不同因素下混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律

Fig. 13　The variation of relative dynamic elastic modulus of concrete with freeze-thaw cycles under different factors

混凝土材料展现出相对较优的抗冻性能. 然而,进行 200 次冻融循环之后,纤维素纤维掺量为 1.6 kg/m³ 的混凝土材料相对动弹性模量平均值迅速下降. 这种现象可能是由于过多的纤维素纤维在混凝土中分散不均,从而在混凝土内部形成缺陷,对其抗冻能力造成不利影响. 此时,纤维素纤维掺量分别为 0.7 kg/m³ 和 1.1 kg/m³ 的混凝土试件的相对动弹性模量平均值

变化规律基本一致.然而,该现象与对应试件的质量损失率平均值测试结果存在一定区别.

以250次冻融循环后混凝土试验结果为例,对其相对动弹性模量进行方差分析,以评价各因素对混凝土抗冻性能的影响显著程度.方差分析结果如表9所示.

由表9可知,三种因素对混凝土抗冻性显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量,水胶比对抗冻性能的贡献率达到78.0%,稻壳灰掺量的贡献率为13.2%,而纤维掺量对混凝土抗冻性能的影响最小,其贡献率为8.8%.

表9 250次冻融循环后混凝土相对动弹性模量的方差分析

Tab.9 Variance analysis of relative dynamic elastic modulus of concrete after 250 freeze-thaw cycles

因素	统计参数					贡献率/%
	自由度	平方和	均方差	F值	p值	
A	2	1 286.50	643.25	20.36	0.047	78.0
B	2	218.45	109.23	3.46	0.224	13.2
C	2	145.45	72.72	2.30	0.303	8.8
误差	2	63.19	31.60	—	—	—
总和	8	1 713.59	—	—	—	100

根据试验结果,本节考虑水胶比、稻壳灰掺量、纤维素纤维掺量,建立掺稻壳灰纤维混凝土冻融循环后相对动弹性模量预测模型:

$$P = F(N)G(A)H(B)J(C) \tag{8}$$

式中:P为相对动弹性模量;$F(N)$、$G(A)$、$H(B)$、$J(C)$分别为冻融循环次数N、水胶比A、稻壳灰掺量B、纤维素纤维掺量C单因素下混凝土相对动弹性模量关系函数.

综合表8、图11和图12可得,相对动弹性模量与冻融循环次数、水胶比和纤维素纤维掺量之间近似呈二次函数关系,相对动弹性模量随稻壳灰掺量增加基本呈线性变化,可分别设关系式为:

$$F(N) = s_1N^2 + t_1N + k_1 \tag{9}$$

$$G(A) = s_2A^2 + t_2A + k_2 \tag{10}$$

$$J(C) = s_4C^2 + t_4C + k_4 \tag{11}$$

$$H(B) = s_3B + t_3 \tag{12}$$

$$\begin{aligned} P = {} & (s_1N^2 + t_1N + k_1) \times \\ & (s_2A^2 + t_2A + k_2) \times \\ & (s_3B + t_3) \times (s_4C^2 + t_4C + k_4) \end{aligned} \tag{13}$$

式中:s_1、t_1、k_1、s_2、t_2、k_2、s_3、t_3、s_4、t_4、k_4均为拟合参数.

进而对9组不同强度的高性能纤维混凝土建立统一经验回归公式,得到相对动弹性模量P与冻融循环次数N、水胶比A、稻壳灰掺量B和纤维素纤维掺量C之间的拟合关系,相关系数R^2=0.816 7,相对动弹性模量表达式如式(14)所示:

$$\begin{aligned} P = {} & (0.009\,3N^2 + 7.939\,8N - 19\,689.286\,4) \times \\ & (0.982\,2A^2 - 0.577\,2A - 0.279\,7) \times \\ & (0.002\,4B + 0.021\,6) \times \\ & (-0.032\,1C^2 + 0.078\,9C + 0.622\,0) \end{aligned} \tag{14}$$

下面采用相对动弹性模量表达式对部分试验结果进行计算,试验值与计算值比较结果如图14所示,可知误差在±10%以内,并计算得到该部分试验值和计算值比值的平均值为1.000 1,标准差为0.024,变异系数为0.024.说明该模型能够较为准确地预测掺稻壳灰纤维混凝土冻融后相对动弹性模量.

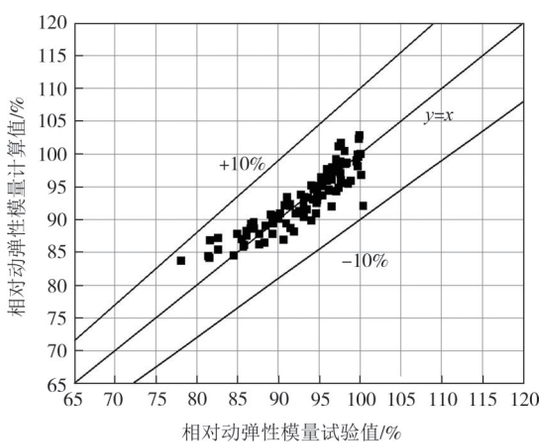


图14 相对动弹性模量对比图

Fig.14 Comparison of relative dynamic elastic modulus

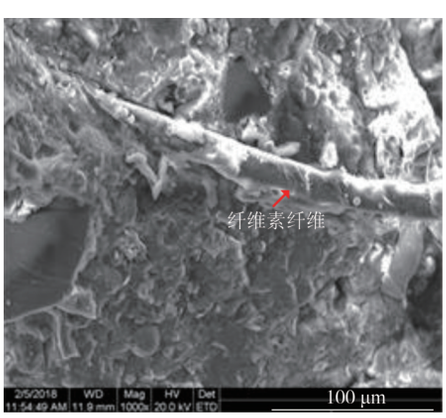
2.3 微观形态以及增强机理

本试验采用Quanta200扫描式电子显微镜观察混凝土的微观形态,研究稻壳灰和纤维素纤维对混凝土微观结构的影响.本文以S2和S3组混凝土的微观形貌为例,对稻壳灰与纤维素纤维的微观作用机理进行简要阐述.

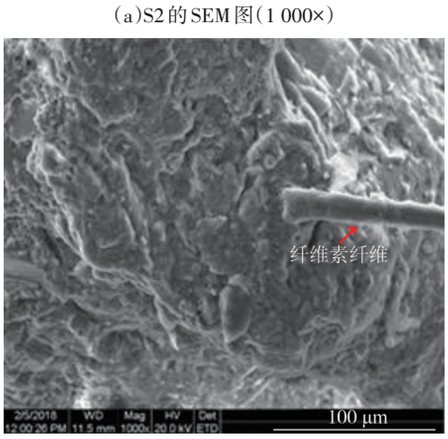
S2和S3组混凝土试件的SEM扫描电镜图像如图15所示.图15(a)和图15(b)分别为S2组(稻壳灰掺量为10%,纤维素纤维掺量为1.1 kg/m^3)和S3组(稻壳灰掺量为20%,纤维素纤维掺量为1.6 kg/m^3)混凝土的微观形貌.从图15可以看出,S2组混凝土内部结构较为密实,胶凝材料水化较好,水化产物紧密堆积,呈块状分布,而S3组混凝土内部孔隙与缺陷更少,结构更为致密,表明增大稻壳灰掺量可以改善混凝土基体结构.这主要是由于稻壳灰中的活性SiO_2含量较高,该组分能够与水泥水化过程中析出的$Ca(OH)_2$发生化学反应,从而生成了大量的C—S—H胶体,进一步填充混凝土内部的毛细孔,减少有害孔隙和连通毛细通道的数量,提高硬化浆体及其

与骨料界面过渡区的致密度;并且稻壳灰平均粒径在10 μm左右,可均匀分布于水泥浆中,可填充混凝土内部孔隙和毛细孔,减少有害孔数量并优化孔径分布,从而提高了混凝土的耐久性能.

纤维素纤维在混凝土中的微观形态如图15标注所示.对比S2组与S3组可以看出,S2组中纤维与混凝土基体结合更加紧密,表明适量的纤维素纤维在混凝土中能更好地分散并与混凝土基体紧密黏结,从而更有效地提高混凝土的耐久性能.纤维素纤维周围被胶凝材料在水化过程中形成的凝胶体紧密包裹,能够阻止硬化浆体中微裂缝的产生与扩展,并且纤维素纤维具有良好的亲水性和分散性,在混凝土中均匀分布并与水泥石粘连成为致密且乱向分布的网状结构,减少了混凝土内部缺陷,提高了混凝土的致密性;同时纤维素纤维独特的空腔结构在胶凝材料水化早期吸收、储存部分游离水,并在水化过程中逐渐释放,发挥"内养护作用",提高胶凝材料的水化程度,生成更多的C-S-H凝胶,使混凝土内部结构更加密实,故适量的纤维素纤维能有效提高混凝土材料的耐久性能.



(a)S2的SEM图(1 000×)



(b)S3的SEM图(1 000×)

图 15　混凝土的SEM扫描电镜图

Fig.15　SEM image of concrete

3　结 论

1)各因素对混凝土抗氯离子渗透性能和抗冻性能影响显著程度依次为:水胶比>稻壳灰掺量>纤维素纤维掺量.

2)混凝土的抗氯离子渗透性能和抗冻性能随稻壳灰掺量的增加显著增强,随纤维素纤维掺量的增加呈先增强后减弱的趋势,在水胶比为0.37时最优;稻壳灰掺量为20%时,混凝土抗氯离子渗透性能最佳,抗冻性能最优;纤维素纤维掺量为1.1 kg/m^{3}时,混凝土抗氯离子渗透性能最好,抗冻性能最佳.

3)随着稻壳灰掺量的增加,混凝土基体的密实度得到了提高,进而减少了有害离子的入侵.纤维素纤维的掺量为1.1 kg/m^{3}时与1.6 kg/m^{3}时相比,其与混凝土基体的结合更加紧密,发挥了更好的阻裂增韧作用,减少了微观裂缝的产生和发展,从而增强了混凝土的耐久性能.

4)以冻融循环次数、水胶比、稻壳灰掺量和纤维素纤维掺量为变化参数,分别建立了掺稻壳灰纤维混凝土质量损失率与相对动弹性模量的冻融预测模型,质量损失率与相对动弹性模量的模型计算结果与试验数据的误差分别小于20%与10%,表明模型能够较为准确地反映掺稻壳灰纤维混凝土冻融后的质量损失率与相对动弹性模量减小,可为高性能纤维混凝土的制备和工程应用奠定一定的理论基础.

参考文献

[1]　吴中伟.绿色高性能混凝土与科技创新[J].建筑材料学报,1998,1(1):1-7.
WU Z W. Green high performance concrete and technological innovation[J].Journal of Building Materials, 1998,1(1):1-7. (in Chinese)

[2]　徐春春, 纪龙, 李凤博, 等.当前我国水稻产业发展形势与战略对策[J].华中农业大学学报, 2022, 41(1):21-27.
XU C C, JI L, LI F B, et al. Current development situation and strategic countermeasures of rice industry in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41 (1): 21-27. (in Chinese)

[3]　张亮,肖阳,张宿峰,等.一种稻壳灰及其制备方法和应用:CN114084891A[P]. 2022-02-25.
ZHANG L, XIAO Y, ZHANG S F, et al. A rice husk ash and its preparation method and application: CN114084891A [P]. 2022-02-25. (in Chinese)

[4]　HOSSAIN M M, KARIM M R, HOSSAIN M K, et al. Durability

of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: a review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 95-109.

[5] ZAREEI S A, AMERI F, DOROSTKAR F, et al. Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties [J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 7: 73-81.

[6] VISHWAKARMA V, RAMACHANDRAN D, ANBARASAN N, et al. Studies of rice husk ash nanoparticles on the mechanical and microstructural properties of the concrete [J]. Materials Today Proceedings, 2016, 3(6): 1999-2007.

[7] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part Ⅰ. Raw materials and mixture design [J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 741-751.

[8] SENSALE G R D. Effect of rice-husk ash on durability of cementtious materials [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(9): 718-725.

[9] HUANG H H, GAO X J, WANG H, et al. Influence of rice husk ash on strengthand permeability of ultrahigh performance concrete [J]. Construction & Building Materials, 2017, 149: 621-628.

[10] 明阳,李杰,张凯峰,等.稻壳灰作混凝土掺合料的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2014(5):88-90.
MING Y, LI J, ZHANG K F, et al. Experimental study on rice husk ash as concrete admixture [J]. Concrete and Cement Products, 2014 (5): 88-90. (in Chinese)

[11] 冯庆革,杨义,童张法,等.掺高活性稻壳灰混凝土的抗冻融特性[J].硅酸盐学报,2008,36(增刊1):136-139.
FENG Q G, YANG Y, TONG Z F, et al. Freeze-thaw resistance of concrete with high activity rice husk ash [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36 (Sup. 1): 136-139. (in Chinese)

[12] PRASITTISOPIN L, TREJO D. Hydration and phase formation of blended cementitious systems incorporating chemically transformed rice husk ash [J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 59: 100-106.

[13] 刘离.电厂稻壳灰及其在混凝土中的应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
LIU L. Rice husk ash from power plant and its application in concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)

[14] 王维红.稻壳灰混凝土性能及机理研究[D].银川:宁夏大学,2017.
WANG W H. Study on properties and mechanism of rice husk ash concrete [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. (in Chinese)

[15] KHAN R, JABBAR A, AHMAD I, et al. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete [J]. Construction & Building Materials, 2012, 30(5): 360-365.

[16] 徐海宾,姚小平,程朝霞.低掺量纤维素纤维混凝土耐久性试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(2):230-234.
XU H B, YAO X P, CHENG Z X. Experimental study on durability of low volume cellulose fiber reinforced concrete [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2013, 32(2): 230-234.(in Chinese)

[17] KAWASHIMA S, SHAH S P. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33 (2): 201-208.

[18] 张文潇.纤维素纤维混凝土耐久性、高温抗爆裂及徐变特性[D].南京:东南大学,2015.
ZHANG W X. Durability, high temperature burst resistance and creep characteristics of cellulose fiber reinforced concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)

[19] BUCH N, REHMAN O, HILLER J. Impact of processed cellulose fibers on portalnd cement concrete properties [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1668(1): 72-80.

[20] 郭丽萍,张文潇,孙伟,等.隧道用纤维素纤维混凝土在弯拉荷载作用下的耐久性[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(3):612-618.
GUO L P, ZHANG W X, SUN W, et al. Durability of cellulose fiber reinforced concrete for tunnel under flexuraltensile load [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(3): 612-618. (in Chinese)

[21] 何柏,谢凌志,刘泉,等.不同亲水性能的纤维对混凝土抗冻耐久性的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):225-230.
HE B, XIE L Z, LIU Q, et al. Effect of fiber with different hydrophilic properties on frost resistance durability of concrete [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(2): 225-230. (in Chinese)

[22] 陶友海.纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律[J].科学技术与工程,2022,22(2):715-720.
TAO Y H. Deterioration law of frost resistance durability of cellulose fiber reinforced concrete [J]. Science and Technology and Engineering, 2022, 22(2): 715-720. (in Chinese)

[23] 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:中国建筑工业出版社.2009.
Standard for test method of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)