

# 基于正交试验的聚合物改性再生透水 混凝土抗冻性能研究

夏冬桃<sup>1</sup>,刘炎昌<sup>1</sup>,吴方红<sup>2</sup>,李向阳<sup>1</sup>,李彪<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;2. 佛山科学技术学院交通与土木建筑学院,  
广东 佛山 528225)

**摘要** 目的 研究低掺量下水性环氧树脂、粉煤灰、再生骨料对再生透水混凝土抗冻性的影响。方法 采用正交试验设计,以粉煤灰掺量、水性环氧树脂掺量、再生骨料掺量、冻融循环次数为因素设计不同水平的正交试验,参考慢冻法并采用均值极差法分析质量损失率和强度损失率,研究各因素对于再生透水混凝土抗冻性的影响规律。结果 随着冻融循环次数的增加,再生透水混凝土的强度损失率和质量损失率逐渐增大,其中低掺量(0.5%~2%)水性环氧树脂可以有效提升再生透水混凝土抗冻性能,降低再生透水混凝土的强度损失率、质量损失率;添加再生骨料(30%~50%)可以有效提高再生透水混凝土抗冻性。结论 掺量1%的水性环氧树脂及掺量40%的再生骨料对再生透水混凝土抗冻性提升效果最好;在冻融循环过程中,再生透水混凝土的强度损失率会比质量损失率先变化到破坏标准,该参数能更快判断再生透水混凝土的抗冻性能。

**关键词** 再生透水混凝土;水性环氧树脂;正交试验;抗冻性;冻融循环

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Frost Resistance of Polymer Modified Recycled Pervious Concrete Based on Orthogonal Test

XIA Dongtao<sup>1</sup>, LIU Yanchang<sup>1</sup>, WU Fanghong<sup>2</sup>, LI Xiangyang<sup>1</sup>, LI Biao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, China, 430068;  
2. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan, China, 528225)

**Abstract:** The work aims to study the effect of low content of waterborne epoxy resin, fly ash, and recycled aggregate on the frost resistance of recycled pervious concrete. The orthogonal test design was used to design different levels of orthogonal experiments with fly ash content, water-based epoxy resin content, recycled aggregate replacement rate, and freeze-thaw cycles as factors. The

收稿日期:2022-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52208152)

作者简介:夏冬桃(1975—),女,教授,博士,主要从事纤维混凝土等方面研究。

slow freezing method was used and the mean range method, mass loss rate, and strength loss rate were used to study the influence of various factors on the frost resistance of recycled pervious concrete. With the increase of freeze-thaw cycles, the strength loss rate and mass loss rate of recycled pervious concrete increased gradually. The low content (0.5% ~ 2%) of waterborne epoxy resin could effectively improve the frost resistance of recycled pervious concrete and reduce the strength and mass loss rate. Adding recycled aggregate (30% ~ 50%) can effectively improve the frost resistance of recycled pervious concrete. The 1% waterborne epoxy resin content and 40% recycled aggregate replacement rate have the best effect on the frost resistance of recycled pervious concrete; at the same time, in the process of freeze-thaw cycle, the strength loss rate of recycled pervious concrete will change to the failure standard first than the mass loss, which can judge the frost resistance of recycled pervious concrete faster.

**Key words:** recycled aggregate pervious concrete; waterborne epoxy resin; orthogonal test; frost resistance; freeze-thaw cycle

2012年,中国提出了“海绵城市”的概念——城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的“弹性”,下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时将蓄存的水“释放”并加以利用<sup>[1]</sup>。透水铺装是使土壤实现海绵功能的重要手段,再生骨料透水混凝土(Recycled Aggregate Pervious Concrete, RAPC)充分利用了再生混凝土和透水混凝土的功能优势,具有优异透水性。利用再生骨料代替天然骨料可以变废为宝,减少垃圾处置费用,节能减排,减少环境污染<sup>[2]</sup>,RAPC的材料性能符合海绵城市的建设理念。在北京奥运会、上海世博会以及各海绵城市的道路上,都有透水混凝土的实际应用,其良好的透水性能及较好的耐磨性等特点凸显出来。然而,透水混凝土多孔的结构使集料之间多以点接触或者面接触,在冻融循环时一点的破坏容易造成局部更多的破坏<sup>[3]</sup>。再生骨料表面附着的砂浆以及骨料的破碎过程都会导致产生大量微裂纹,其内部空隙的增加也会使骨料的吸水率增大,容易发生冻融破坏<sup>[4]</sup>。透水混凝土与再生骨料的特性<sup>[5-6]</sup>导致RAPC较差的抗冻性能,也是影响它在海绵城市建设中大面积推广的因素之一。

水性环氧树脂是把环氧树脂以微粒或液滴的形式分散在以水为连续相的分散介质中而配得的稳定树脂材料,能与水泥砂浆、混凝土等常用的水泥基材料混合使用,并能提高上述材料的早期强度、韧性、抗冲击性能,增强防水性能<sup>[7]</sup>。相关研究表明:添加聚合物水性环氧树脂的可以有效提升混凝土的抗冻性<sup>[8-10]</sup>,掺入聚合物乳液后,可增加混凝土的耐久性,改善混凝土的抗冻性,同时使得水泥混凝土的路用性能得到了明显的改善<sup>[11]</sup>,其中水性环氧树脂掺量在1.0% ~ 2.0%时,对于无砂透水混凝土的抗冻性能有较大的提升<sup>[8]</sup>。国内外专家学者研究表明<sup>[12-17]</sup>,对胶凝材料的优化可以有效提升再生透水混凝土的性能,掺加一定量的粉煤灰可以有效提高再生混凝土的抗冻性。然而,现在对于复掺水性环氧树脂与粉煤灰对RAPC抗冻性影响的研究尚不多见。基于此,笔者通过冻融循环试验研究低掺量下复掺水性环氧树脂(0.5% ~ 2%)与粉煤灰(5% ~ 15%)对于再生透水混凝土抗冻性的影响及规律;研究表明,低掺量水性环氧树脂能有效提升再生透水混凝土抗冻性能,水性环氧树脂掺量为1%时对透水混凝土的抗冻性提升最好;再生骨料掺量40%时抗冻性提升效果最好。

1 试验设计

1.1 试验原材料及性能

水泥:采用华新牌 P·O 42.5 级水泥,各项指标符合《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)<sup>[18]</sup>要求。骨料:天然骨料选取武汉本地瓜米石,筛分后选用粒径为5~10 mm 的骨料;再生骨料采用某拆迁工地的废弃混凝土,经破碎、清洗、晾晒、筛分后选用粒径为5~10 mm 骨料。外掺料:I 级粉煤灰;水性环氧树脂;聚羧酸高效减水剂,减水率为20%。

1.2 正交试验设计

正交试验是试验设计优化中常采用的方法,是通过部分试验来代替全面试验,再通过对代表性试验结果,分析了解全面的试验情况,以此达到优化试验设计的目的。极差分析是正交试验中常用的一种分析方法,可以直观地分析各因素之间的主次关系,并通过对比找到试验中最优的因素水平搭配。由于本试验考虑的因素水平较高,全面试验需设计 $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ 次试验,故采用正交试验设计进行优化,优化后只需进行16次试验。

参照《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)<sup>[18]</sup>,试验选取目标孔隙率为20%<sup>[19]</sup>,水灰比取0.31<sup>[20-21]</sup>,配合比设计计算也参考该规程。本研究通过正交试验设计研究再生骨料掺量、粉煤灰掺量、水性环氧树脂掺量和冻融循环次数对再生透水混凝土抗冻性的影响程度,试验中每个因素设置四个水平,采用 $L_{16}(4^4)$ 正交表,通过均值极差法研究不同因素的影响规律。正交水平因素及各组试验对应材料掺量见表1。

1.3 试验方法

1.3.1 制备过程

透水混凝土的搅拌采用水泥裹石法,先将全部骨料和20%的水加入搅拌机中预拌60 s;再加入水泥、矿物掺合料、水性环氧树

表1 再生透水混凝土试验正交表  
Table 1 The orthogonal table for recycled pervious concrete tests

试验 编号	再生骨料 掺量/%	粉煤灰 掺量/%	水性环氧树 脂掺量/%	冻融循 环/次
1	0	0	0	0
2	0	5	0.5	25
3	0	10	1	40
4	0	15	2	60
5	30	0	0.5	40
6	30	5	0	60
7	30	10	2	0
8	30	15	1	25
9	40	0	1	60
10	40	5	2	40
11	40	10	0	25
12	40	15	0.5	0
13	50	0	2	25
14	50	5	1	0
15	50	10	0.5	60
16	50	15	0	40

脂和50%的水搅拌120 s,形成胶凝材料均匀包裹骨料的外壳;最后将剩下的水和减水剂加入搅拌机,搅拌60 s;整个搅拌过程4 min。

1.3.2 成型工艺

为防止水泥浆体在振动过程中流动到试件底部堵住透水孔隙,采用人工插捣的方式,将搅拌均匀的混凝土装入100 mm×100 mm×100 mm的试模中,分两层人工插捣,每层插捣由外圈到中心20~25次,插捣结束后抹平表面。

1.3.3 养护方法

覆盖保鲜膜养护24 h脱模,再放入养护箱中水养护28 d。

1.3.4 抗冻融性能和抗压强度试验

参照《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)<sup>[18]</sup>,再生透水混凝土抗冻性能试验应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》

(GB/T 50082—2009)<sup>[23]</sup>慢冻法执行,冻结最低温度为(−20~−18)℃,融化最高温度为(18~20)℃,单次冻融循环时间不应小于4 h,并且冻融循环中的融化时间不能小于总时间的1/4。再生透水混凝土试件采取水养护,在28 d时将试件从水中取出,用湿布擦除表面水分后对外观尺寸进行拍照记录,记录试件质量称重。在冻融25次、40次、60次时<sup>[2]</sup>分别取出对应的试件,进行外观观察、质量称重,在质量损失超过5%或强度损失超过25%时,停止试验。抗压强度试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[22]</sup>进行。

2 试验结果及分析

2.1 基本物理性能

对各组透水混凝土进行冻融前的抗压强度、透水系数测定,各组平均抗压强度和平均透水系数如表2所示。

表 2 各组试件平均抗压强度和透水系数  
Table 2 The average compressive strength and coefficients of permeability for each group of specimens

试验 编号	抗压强 度/MPa	透水系数/ (mm·s <sup>−1</sup> )	试验 编号	抗压强 度/MPa	透水系数/ (mm·s <sup>−1</sup> )
1	12.81	6.14	9	29.05	3.80
2	15.62	7.80	10	29.24	3.97
3	15.60	7.96	11	28.85	5.67
4	10.34	8.56	12	20.72	2.45
5	20.17	6.47	13	30.32	1.80
6	23.42	7.16	14	28.59	1.12
7	22.83	3.96	15	29.29	1.94
8	16.02	7.46	16	32.16	1.45

2.2 外观损伤分析

各组试件在冻融循环后的平均质量损失率和强度损失率如表3所示。

试件冻融循环25次后,观察到试件外表并无太大变化(见图1),由于试件微裂缝吸水质量大于骨料剥落质量,第2组、第13组

表 3 各组试件冻融循环后的平均质量损失率和强度损失率  
Table 3 The average mass loss rate and strength loss rate of each specimens group after freeze-thaw cycles

试件 编号	冻融循 环/次	强度损 失率/%	质量损 失率/%
2	25	2.13	−0.98
8	25	11.69	0.87
11	25	15.92	0.08
13	25	17.94	−0.22
3	40	30.19	−0.27
5	40	30.33	0.73
10	40	27.29	1.04
16	40	19.65	0.40
4	60	40.63	5.50
6	60	52.94	3.00
9	60	34.73	0.40
15	60	53.60	1.10

质量损失率出现了负增长。但所有试件质量损失率、强度损失率均满足《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)<sup>[18]</sup>中对无砂水泥透水混凝土的抗冻性要求:冻融循环25次后的抗压强度损失率不大于20%,质量损失率不大于5%。

冻融循环40次后,试件边缘及表面出现较多骨料脱落(见图2),其中第10组试件脱落最严重,观察到试件侧面出现一个明显的月牙形凹陷,称重后得到试件质量损失率为1.04%,未达到质量损失破坏标准。抗压试验表明,第3组、第5组、第10组试件的强度损失率均超过25%,达到破坏标准。

冻融循环60次后,四组试件骨料脱落均比较严重(见图3),其中第4组质量损失率5.5%最大,达到破坏标准。第4组试件外层骨料脱落较多,试件表面出现了较多坑洞,边缘棱角已经磨成圆形,第15组试件中间出现了贯穿性裂缝,混凝土从中间断开。四组试件强度损失率均超过25%,达到破坏标准。



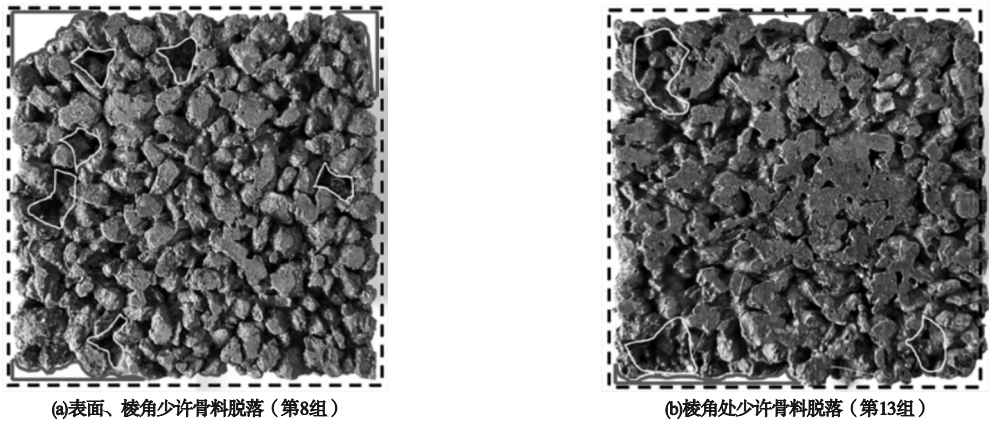


图 1 冻融循环 25 次时试件冻融损伤图

Fig. 1 The freeze-thaw damage of specimens at 25 freeze-thaw cycles

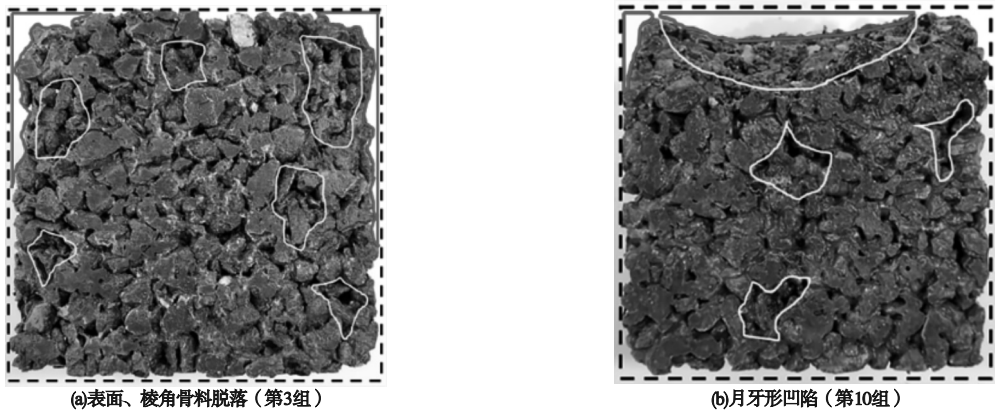


图 2 冻融循环 40 次时试件冻融损伤图

Fig. 2 The freeze-thaw damage of specimens at 40 freeze-thaw cycles

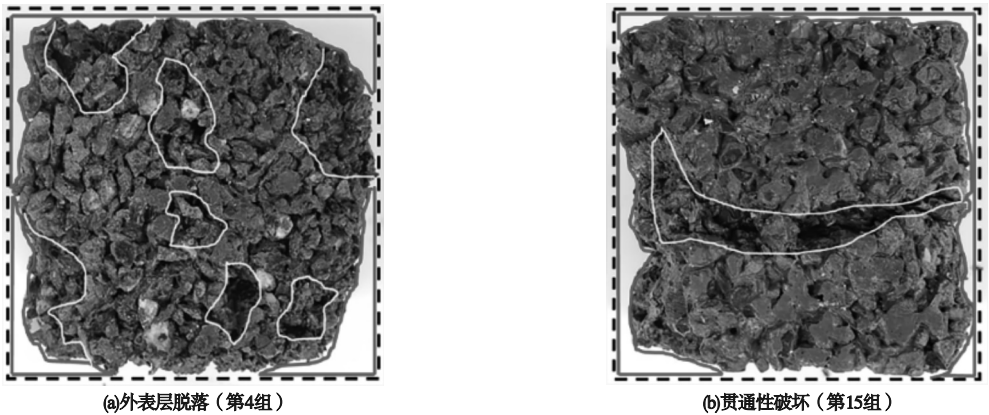


图 3 冻融循环 60 次时试件冻融损伤图

Fig. 3 The freeze-thaw damage of specimens at 60 freeze-thaw cycles

2.3 质量损失率与强度损失率

质量损失率、强度损失率是评价混凝土抗冻性能的重要指标,再生透水混凝土冻融循环前后的质量变化及冻融循环前后的强度损失,可以清楚地反映再生透水混凝土受冻

融后的损伤状态。

2.3.1 极差分析法

通过极差分析法对质量损失率、强度损失率进行分析,结果如表 4、表 5 所示。

表 4 质量损失率极差分析表

因素	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$R$
再生骨料掺量	1.06	1.15	0.38	0.32	0.83
粉煤灰掺量	0.23	0.77	0.23	1.69	1.46
水性环氧树脂掺量	0.87	0.21	0.25	1.58	1.37
冻融循环次数	0	-0.06	0.48	2.50	2.56

表 5 强度损失率极差分析表

因素	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$R$
再生骨料掺量	18.24	23.74	19.49	22.80	5.50
粉煤灰掺量	20.75	20.59	24.93	17.99	6.93
水性环氧树脂掺量	22.13	21.52	19.15	21.47	2.98
冻融循环次数	0	11.92	26.87	45.48	45.48

注: $k_i(i=1\sim4)$ 表示所有组别在给定因素的*i*水平下对应的试验结果之和的平均值; $R$ 表示极差,极差越大说明该因素对试验结果影响越大。

由表 4、表 5 可知,本次试验强度损失率的影响因素从强到弱依次为:冻融循环次数、粉煤灰掺量、再生骨料掺量、水性环氧树脂掺量;本次试验质量损失率的影响因素从强到弱依次为:冻融循环次数、粉煤灰掺量、水性环氧树脂掺量、再生骨料掺量。

2.3.2 水性环氧树脂掺量的影响

再生透水混凝土质量损失率随水性环氧树脂掺量的变化规律如图 4(a)所示。由图可知,冻融循环 25 次前,掺加 0.5%、2% 水性环氧树脂试件的质量损失率要比不掺加水性环氧树脂的试件的质量损失率低;随着冻融次数的增加,直到冻融循环 60 次时试件全部破坏,掺加 1% 水性环氧树脂试件的质量损失率最低达 0.4%。

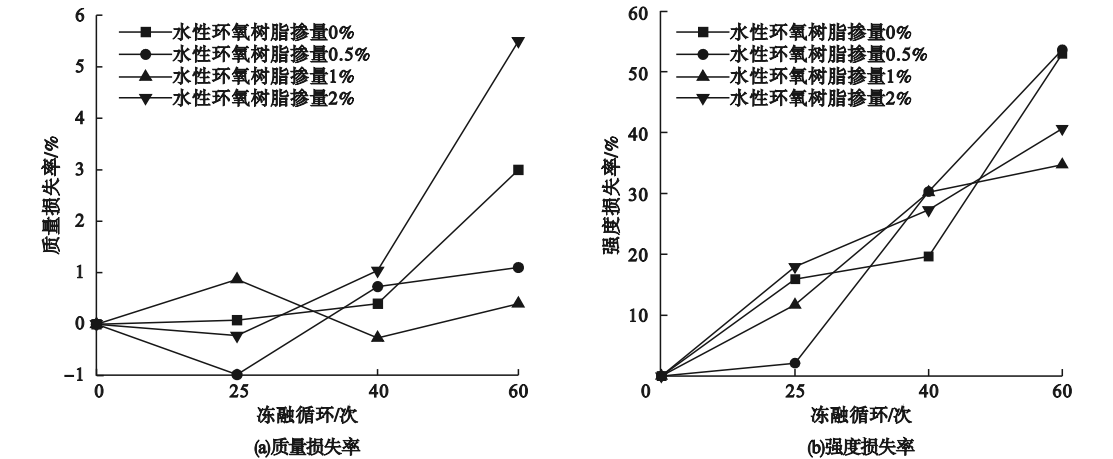


图 4 水性环氧树脂掺量与 RAPC 质量损失率及强度损失率之间的关系

Fig. 4 The relationship between water-based epoxy resin admixture and RAPC mass loss rate and strength loss rate

再生透水混凝土强度损失率随水性环氧树脂掺量的变化规律如图 4(b)所示。由图可知,冻融循环 25 次前,掺加 0.5%、1% 水性环氧树脂试件的质量损失率要低于不掺加水性环氧树脂的试件,随着冻融次数的增加,直到冻融循环 60 次时试件全部破坏,掺加 1% 水性环氧树脂试件的强度损失 0.4% 最低。

掺入适量的水性环氧树脂对再生透水混凝土的抗冻性有提升效果,当水性环氧树脂

掺量为 1% 时对再生透水混凝土的抗冻性提升最好。由于水性环氧树脂乳液中环氧树脂颗粒会聚结形成连续的膜结构,使得浆体均匀的包裹在骨料表面,增强了骨料网络间的粘结力,同时填补了再生骨料以及新旧砂浆间的微裂缝,能够有效提升再生透水混凝土的抗冻能力。

2.3.3 再生骨料掺量的影响

通过冻融循环 25 次、40 次、60 次时试件的质量损失率及强度损失率来研究不同再生

骨料掺量对于再生透水混凝土抗冻性的影响

变化规律,结果如图5所示。

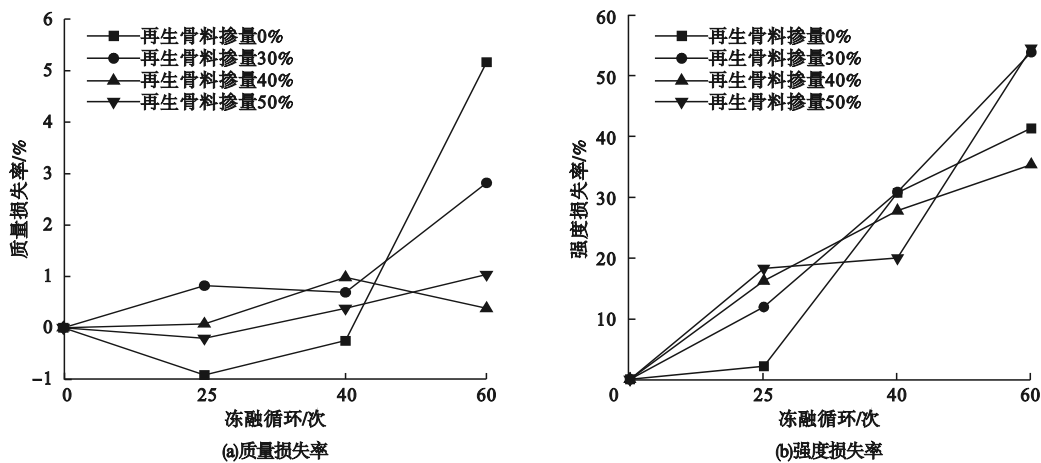


图5 再生骨料掺量与RAPC质量损失率及强度损失率之间的关系

Fig. 5 The relationship between recycled aggregate content and RAPC mass loss rate and strength loss rate

由图5(a)可以看出,未添加再生骨料的混凝土在冻融循环40次前,质量损失为负增长,在濒临破坏时质量损失上升,而添加再生骨料的混凝土随着冻融循环次数增加质量损失呈整体上升趋势,直到混凝土破坏时,添加再生骨料的组别质量损失均低于未添加再生骨料的组别。这是由于再生骨料在破碎时会产生许多微裂缝,分布在内外的微裂缝会提升再生骨料整体吸水率,从而导致透水混凝土一开始的质量损失率为负增长。

再生骨料的表面粗糙,具有更好的黏结面,同时再生骨料吸水性强从而降低了混凝土的实际水灰比,使砂浆变得更加浓稠,加强了骨料间的黏结作用,从而导致再生透水混凝土的抗冻性提升。

由图5可以看出,在低水平冻融次数(0~25次)下,未添加再生骨料时透水混凝土抗冻性更好;在更高水平冻融次数(25~60次)下,添加再生骨料可以有效提高再生透水混凝土抗冻性,其中再生骨料掺量为40%时对再生透水混凝土抗冻性的提升效果最好。

3 混凝土中聚合物的SEM分析

扫描电子显微镜(SEM)是一种利用高

能电子束来对物质微观形貌表征进行观察的手段。通过SEM对水性环氧树脂RAPC的微观结构及增强机理进行分析。图6(a)、图6(b)为未添加水性环氧树脂的RAPC微观形貌,图6(c)、图6(d)为水性环氧树脂掺量1%(抗冻性提升效果最优)的RAPC微观形貌。

由图6(a)可以看到,未添加水性环氧树脂的RAPC中有较大的孔洞存在,孔洞中有许多针状的钙矾石,钙矾石附近还生有较多絮状的C-S-H凝胶,这些物质交联形成间断的、孔隙较大的骨架网状体系,导致RAPC整体结构较为松散。

图6(c)中加入1%水性环氧树脂后的RAPC结构得到了很大的改善,在混凝土的表面环氧树脂与水泥水化产物黏结形成板状薄膜结构,填补了混凝土结构孔隙,从而增加了混凝土结构致密性,进一步放大倍数后可以看到原本针状的钙矾石上覆盖着膜状以及团状物质,这是水性环氧树脂吸附在水泥水化物的表面。水性环氧树脂与水泥水化产物的交联固化改善了水泥基体与骨料间的黏结,同时填补了骨架网状体系中的空隙使结构更加紧密,因此适量地添加水性环氧树脂会增强RAPC的抗冻性。



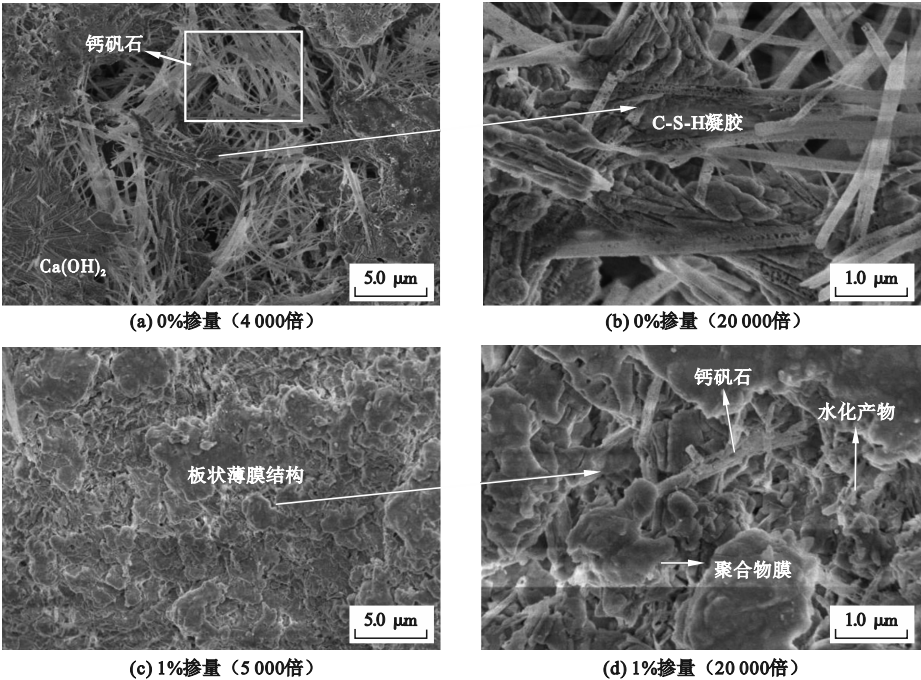


图 6 不同掺量的水性环氧树脂 RAPC 的微观形貌(未冻融)

Fig. 6 The microstructure of waterborne epoxy resin RAPC with different content( without freeze-thawed)

4 结 论

(1)对再生透水混凝土强度损失率的影响因素从强到弱依次为:粉煤灰掺量、再生骨料掺量、水性环氧树脂掺量;对再生透水混凝土质量损失率的影响因素从强到弱依次为:粉煤灰掺量、水性环氧树脂掺量、再生骨料掺量。

(2)低掺量(0.5%~2%)的水性环氧树脂对再生透水混凝土的抗冻性有提升效果,且当水性环氧树脂掺量为1%时对透水混凝土的抗冻性提升最好;添加再生骨料(30%~50%)可以有效提高再生透水混凝土抗冻性,其中再生骨料掺量40%时抗冻性提升效果最好。

(3)冻融循环25次、40次、60次过程中,再生透水混凝土的强度损失率会比质量损失率先变化到破坏标准,该参数能更快判断再生透水混凝土的抗冻性能。

参考文献

[1] 梁义婕,任霞,李莉.海绵城市建设:透水铺装

材料研究应用现状[J].四川建筑,2022,42(2):300-302.  
(LIANG Yijie, REN Xia, LI Li. Sponge city construction-permeable pavement materials research application status [J]. Sichuan architecture, 2022, 42(2):300-302.)  
[2] 王军强.再生骨料透水混凝土的收缩和抗冻性试验研究[J].工业建筑,2016,46(2):103-106.  
(WANG Junqiang. Test research on the shrinkage and frost-resistance of recycled aggregate porous concrete [J]. Industrial construction, 2016, 46(2):103-106.)  
[3] 陈晋栋,王武祥,张磊蕾.透水混凝土性能试验方法研究[J].新型建筑材料,2018,45(8):80-87.  
(CHEN Jindong, WANG Wuxiang, ZHANG Leilei. Study on the performance testing methods of pervious concrete [J]. New building materials, 2018, 45(8):80-87.)  
[4] 韩古月,裴立武.再生粗骨料品质与掺量对再生混凝土抗冻融性能影响规律[J].混凝土,2018(6):89-92.  
(HAN Guyue, NIE Liwu. Influence of recycled coarse aggregate quality and mixing quantity on the freeze-thaw resistance of recycled concrete [J]. Concrete, 2018(6):89-92.)  
[5] SILVA R V, BRITO J D, DHIR R K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production [J]. Construction & building materials, 2014, 65(13):201-217.  
[6] GUNEYISI E, GESOGLU M, KAREEM Q, et al. Effect of different substitution of natural



- aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete [J]. *Materials and structures*, 2016, 49 (1): 521 – 536.
- [7] 张荣辉, 郭建, 吕惠卿. 水性环氧树脂混凝土性能研究[J]. *混凝土*, 2006(12): 71 – 73. (ZHANG Ronghui, GUO Jian, Lü Huiqing. Study on performance of waterborne epoxy resin concrete [J]. *Concrete*, 2006(12): 71 – 73.)
- [8] 罗斐. 环氧树脂对透水混凝土力学性能及抗冻性的改善[D]. 开封: 河南大学, 2018. (LUO Fei. Improving effect of epoxy resin on mechanical properties and freezing resistance of pervious concrete [D]. Kaifeng: He' nan University, 2018.)
- [9] 梁会忠, 韩飞, 钱慧丽, 等. 低掺量水性环氧树脂对高性能混凝土抗冻耐久性的研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2012(1): 9 – 12. (LIANG Huizhong, HAN Fei, QIAN Huili, et al. Study on the frost durability of high performance concrete with low dose of water-based epoxy resin [J]. *China concrete and cement products*, 2012(1): 9 – 12.)
- [10] 黄志强, 张二芹, 吕晨曦, 等. 聚合物改性混凝土抗冻耐久性试验研究[J]. *混凝土*, 2016(4): 50 – 53. (HUANG Zhiqiang, ZHANG Erqin, Lü Chenxi, et al. Experimental study on polymer modified concrete frost durability [J]. *Concrete*, 2016(4): 50 – 53.)
- [11] 梁乃兴, 李祝龙. 聚合物乳液改性水泥混凝土[J]. *西安公路交通大学学报*, 1998(增刊1): 19 – 23. (LIANG Naixing, LI Zhulong. Modified cement concrete with polymer latex [J]. *Journal of Xi'an highway university*, 1998 (S1): 19 – 23.)
- [12] 王晨霞, 张杰, 曹美波. 粉煤灰掺量对再生混凝土力学性能和抗冻性的影响研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(11): 3778 – 3783. (WANG Chenxia, ZHANG Jie, CAO Fubo. Influence of fly ash content on mechanical properties and frost resistance of recycled concrete [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2017, 36(11): 3778 – 3783.)
- [13] 王成刚, 黄秀亮, 柳炳康. 再生混凝土抗冻融性能试验研究[J]. *工程与建设*, 2013, 27(4): 493 – 495. (WANG Chenggang, HUANG Xiuliang, LIU Bingkan. Experimental study on the freeze-thaw resistance of recycled concrete [J]. *Engineering and construction*, 2013, 27(4): 493 – 495.)
- [14] GONG P, ZHOU Y. Influences of mineral admixture on properties of porous pervious concrete made of recycled aggregates [J]. *Advanced materials research*, 2014, 919/920/921: 1934 – 1938.
- [15] NOCHAIYA T, WONGKEO W, CHAIPANICH A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of portland cement-fly ash-silica fume concrete [J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 768 – 774.
- [16] KOU S C, POON C S, AGRELA F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures [J]. *Cement & concrete composites*, 2011, 33(8): 788 – 795.
- [17] SALEM R M, BURDENTTE E G. Role of chemical and mineral admixtures on physical and frost resistance of recycled aggregate concrete [J]. *ACI materials journal*, 1998, 95(5): 558 – 563.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生骨料透水混凝土应用技术规程: CJJ/T 253—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of pervious recycled aggregate concrete: CJJ/T 253—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [19] 姚明来, 王莘, 陈洲, 等. 再生骨料无砂透水混凝土性能试验研究[J]. *混凝土*, 2017(12): 83 – 86. (YAO Minglai, WANG Xin, CHEN Zhou, et al. Experimental study on properties of no-fines pervious concrete utilized by recycled aggregate [J]. *Concrete*, 2017(12): 83 – 86.)
- [20] 胡立国. 透水混凝土的抗冻性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013. (HU Ligu. The research about frost resistance of pervious concrete [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.)
- [21] 杨利香, 韩云婷, 宋兴福. 多因素对再生骨料透水混凝土性能的影响及其协同优化研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(4): 6 – 9. (YANG Lixiang, HAN Yunting, SONG Xingfu. Study on the effect of multi-factors on the performance of recycled aggregate pervious concrete and its cooperative optimization of multiple performances [J]. *New building materials*, 2020, 47(4): 6 – 9.)
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [23] 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: 中国建筑工业出版社, 2009. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)