

文章编号:1007-9629(2022)10-1101-08

聚合物预浸改性钢渣及其混合料的力学性能

高 颖*, 王伟赫, 李彦苍, 陈 萌, 汲治鹏

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸, 056107)

摘要:用不同质量分数甲基硅酸钾溶液(PM)、硅丙乳液(SAE)对钢渣进行预浸改性处理,探究改性剂对钢渣物理力学性能的增强效果,研究不同替代方式下水泥稳定碎石钢渣混合料力学性能的变化规律.结果表明:预浸改性处理可以提高钢渣的体积稳定性;改性钢渣全部替代天然集料后,混合料抗压强度下降,不宜采用全部替代的方式;部分替代方式下,3%PM改性钢渣混合料力学性能优于12%SAE改性钢渣混合料,4.75~9.50 mm的PM改性钢渣混合料表现出较好的力学性能.建议采用4.75~9.50 mm的PM改性钢渣部分替代天然集料的方式制备改性钢渣混合料.

关键词:钢渣;表面改性;改性钢渣;替代方式;力学性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.015

Mechanical Properties of Polymer Prepreg Modified Steel Slag and Its Mixture

GAO Ying*, WANG Weihe, LI Yancang, CHEN Meng, JI Zhipeng

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056107, China)

Abstract: Steel slag was pretreated with different mass fractions of potassium methylsilicate (PM) and silicon acrylic lotion (SAE) to explore the enhancement effect of different modifiers on the physical and mechanical properties of steel slag. The change rule of mechanical properties of cement stabilized crushed stone steel slag mixture under different substitution was studied. The results show that the volume stability of steel slag can be improved by prepreg modification. After the modified steel slag completely replaces the natural aggregate, the compressive strength of the mixture decreases, so it is not suitable to use the method of full replacement. Under the partial substitution, the mechanical properties of 3% PM modified steel slag mixture are better than that of 12% SAE modified steel slag mixture. The PM modified steel slag mixture with particle size from 4.75 mm to 9.50 mm shows excellent mechanical properties. It is suggested to use PM modified steel slag with particle size from 4.75 mm to 9.50 mm to prepare modified steel slag mixture with the method of partially replacing the natural aggregate.

Key words: steel slag; surface modification; modified steel slag; alternative method; mechanical property

近年来,国家公路建设消耗了大量天然集料,造成了不可再生资源的减少,环境污染问题严重^[1].据有关部门统计,每生产1 t钢材就会产生100~200 kg的钢渣,每生产1 t铁就会产生300 kg的钢渣^[2].将钢渣粗集料代替天然集料应用于道路工程中,对解决环境污染、土地资源紧张、建筑材料匮乏等问题具有

重要意义^[3].

钢渣体积稳定性的不足是导致钢渣在道路工程中利用率低的主要因素^[4].现阶段抑制钢渣体积膨胀的方法主要有陈化改性^[5-7]、碳酸化改性^[8-10]、重构改性^[11-13]等.研究表明^[4,14],预浸表面改性处理后的钢渣疏水性能显著提高,钢渣体积膨胀性问题得到明显

收稿日期:2021-08-27; 修订日期:2022-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508150);“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFF0300200);河北省自然科学基金资助项目(E2018402206);河北省教育厅青年拔尖人才计划资助项目(BJ2017034);河北省教育厅青年基金资助项目(QN2019108)

第一作者(通讯作者):高 颖(1977—),女,河北廊坊人,河北工程大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:gaoying@hebeu.edu.cn

改善,该处理方法可为提高钢渣资源化利用率提供新的思路.然而,采用预浸法表面改性处理技术来抑制钢渣体积膨胀,并将改性后的钢渣应用于水泥稳定钢渣碎石混合料中的研究比较少见.

本文采用2种改性剂对钢渣进行表面改性处理,通过测试钢渣改性前后的物理力学性能、浸水膨胀率、表面形貌的变化情况来优选出合适的改性剂掺配比例,并研究碎石、钢渣、改性钢渣的替代方式对水泥稳定碎石钢渣混合料力学性能的影响规律.

1 试验

1.1 原材料

水泥为普通硅酸盐水泥,其基本性能指标见表

1.天然集料(NA)为邯郸自产,钢渣集料(SSA)取自

邯郸市邯钢钢厂,集料(粒径 $d=4.75\sim 26.50\text{ mm}$)的基本性能指标见表2.粉煤灰取自邯郸热电厂,烧失量(质量分数,文中涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)为13.26%.将甲基硅酸钾(PM)溶液稀释为PM质量分数 $w_{\text{PM}}=1\%、2\%、3\%、4\%$ 的溶液;将硅丙乳液(SAE)稀释为SAE质量分数 $w_{\text{SAE}}=6\%、9\%、12\%、15\%$ 的溶液.试验用水均为自来水.

1.2 改性钢渣的制备

将SSA洗净烘干处理,分成3组:2组分别放置在不同质量分数的PM溶液、SAE溶液中浸泡12 h,捞出风干5~7 h,得到甲基硅酸钾改性钢渣(PMSSA)、硅丙乳液改性钢渣(SAESSA);1组不进行改性处理(对照组).钢渣表面改性处理过程见图1.

表1 水泥的基本性能指标

Table 1 Basic performance indexes of cement

IL/%	$w(\text{SO}_3)/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	Specific surface area/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	Setting time/min		Compressive strength (28 d)/MPa	Flexural strength (28 d)/MPa
				Initial	Final		
2.31	2.13	3.62	357	175	235	51.8	8.9

表2 集料(粒径 $d=4.75\sim 26.5\text{ mm}$)的基本性能指标

Table 2 Basic performance indexes of aggregates ($d=4.75\sim 26.50\text{ mm}$)

Index	SSA	NA
Apparent relative density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3.481~3.526	2.681~2.774
Water absorption(by mass)/%	0.99~1.80	0.48~0.63
Crushing value(by mass)/%	14.9	19.6
Los Angeles abrasion value(by mass)/%	14.4	17.2
Needle flake content of coarse aggregate(by mass)/%	11.8	13.5

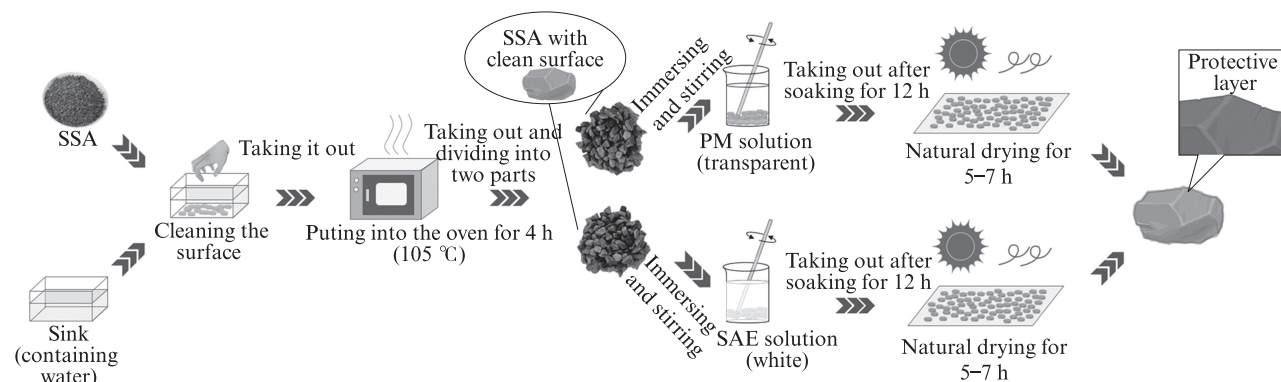


图1 钢渣表面改性处理过程

Fig. 1 Surface modification treatment process of steel slag

1.3 混合料的配合比设计

根据JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》对骨架密实型级配的要求,取级配中值作为水泥稳定碎石钢渣混合料(简称混合料)试件的级配.由于钢渣密度大于天然碎石,为防止级配变异,本文采用等体积替代法,将改性钢渣全部或部分掺入混

合料中,设计了9种替代方式: $d=4.75\sim 26.50\text{ mm}$ 未改性钢渣全部替代同粒径规格的碎石,配制成的混合料记为SSM; $d=4.75\sim 26.50\text{ mm}$ 甲基硅酸钾改性钢渣、硅丙改性钢渣全部替代同粒径规格的碎石,配制成的混合料分别记为PMSSM、SAESSM; $d=4.75\sim 9.50、9.50\sim 13.20、19.00\sim 26.50\text{ mm}$ 甲基硅酸

钾改性钢渣、硅丙改性钢渣部分替代同规格的天然碎石,当某一规格粒径集料为改性钢渣时,其余 2 种规格集料为碎石,配制成的混合料分别记为 4.75PMSSM、9.50PMSSM、19.00PMSSM、4.75SAESSM、9.50SAESSM、19.00SAESSM.将天

然集料配制的混合料作为对照组,并记为 NAM.设置水泥掺量 $w_c=5\%$ 以及 $w_c=5\%$ 、粉煤灰掺量 $w_{FA}=10\%$ 这 2 种配比,将其与 9 种替代方式组合,得到 18 种混合料.不同类型级配下混合料集料的筛孔通过率见表 3.

表 3 不同类型级配下混合料集料的筛孔通过率
Table 3 Sieve passing ratio of aggregate of mixtures under different types of gradation

Specimen	Sieve size/mm						
	w/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
NAM	100.00	77.00	48.00	27.00	22.00	11.50	1.50
SSM	100.00	75.12	44.12	22.45	18.34	9.58	1.24
PMSSM	100.00	74.84	44.00	22.76	18.59	9.71	1.26
SAESSM	100.00	74.91	44.25	22.13	18.08	9.44	1.22
4.75PMSSM	100.00	74.96	43.78	22.60	18.46	9.65	1.26
9.5PMSSM	100.00	74.78	43.97	22.75	18.58	9.71	1.26
19PMSSM	100.00	74.99	43.75	22.64	18.49	9.66	1.25
4.75SAESSM	100.00	75.03	44.55	22.29	18.21	9.52	1.25
9.5SAESSM	100.00	74.82	43.90	22.71	18.55	9.69	1.26
19SAESSM	100.00	74.51	43.47	22.49	18.37	9.60	1.25

2 结果与讨论

2.1 混合料的制备工艺

2.1.1 改性剂的质量分数

改性钢渣的基本性能指标见表 4.由表 4 可见:钢渣经表面改性处理后,物理力学性能均有所改善.以 $d=9.50\sim 13.20$ mm 钢渣为例: $w_{PM}=1\%$ 、 3% 时,PMSSA 的吸水率比对照组分别降低了 23.8%、52.5%;当 $w_{SAE}=6\%$ 、 12% 时,SAESSA 的吸水率比对照组分别降低了 15.0%、48.0%.这是由于改性剂质量分数增加时,包裹在钢渣表面的改性层变厚,钢渣表面的疏水能力提高,使得集料的吸水率降低.当 $w_{PM}=1\%$ 、 $w_{SAE}=6\%$ 时,PMSSA、SAESSA 的压碎值比对照组仅仅降低了 3.40%、0.67%,而当 $w_{PM}=3\%$ 、 $w_{SAE}=12\%$ 时,其压碎值则降低了 8.70%、6.04%,这是由于钢渣在改性过程中,表面逐渐被改性剂和钢渣水化反应生成的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶包裹,增加了集料的致密性,从而降低了其压碎值.

不同钢渣粒径的 PMSSA、SAESSA 体积膨胀率随改性剂溶液质量分数的增加呈先降低后增大的趋势.以 $d=4.75\sim 9.50$ mm 钢渣为例:当 $w_{PM}=1\%$ 、 $w_{SAE}=6\%$ 时,钢渣膨胀率下降幅度较小,随着改性剂质量分数的提高,当 $w_{PM}=3\%$ 、 $w_{SAE}=12\%$ 时,PMSSA、SAESSA 体积膨胀率比对照组降低了 28%、24%,表明 2 种改性剂在钢渣表面形成的疏水

薄膜可以降低改性钢渣中膨胀组分反应速率,进而起到抑制钢渣体积膨胀的作用.

当 $w_{PM}=4\%$ 、 $w_{SAE}=15\%$ 时,钢渣的吸水率、压碎值、体积膨胀率与 $w_{PM}=3\%$ 、 $w_{SAE}=12\%$ 时相比,并未产生明显差异,这说明增加改性剂质量分数,并不会进一步提高钢渣的各项基本性能.考虑到经济性因素,后文采用 $w_{PM}=3\%$ 、 $w_{SAE}=12\%$ 的 PMSSA、SAESSA 展开进一步研究.

2.1.2 钢渣表面改性机理

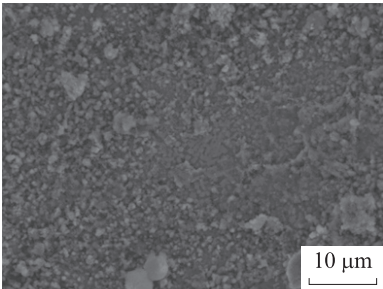
为更深入地研究钢渣改性机理,从微观角度出发,采用扫描电镜(SEM)观察并分析钢渣改性处理后其结构的变化情况.改性前后钢渣的 SEM 照片见图 2.由图 2 可见:改性前,钢渣表面粗糙不平,且存在较多孔隙;经 2 种改性剂处理后,钢渣表面被致密改性层包裹,表面结构较为平整,钢渣的疏水能力有所提高.预浸表面改性处理钢渣的实质是通过改性剂和钢渣水化反应生成的 C-S-H 凝胶来填充钢渣表面孔隙,并在钢渣表面附着一层疏水薄膜,最终达到降低钢渣吸水能力,延缓钢渣内部活性物质反应速率,抑制钢渣体积膨胀的目的.

2.1.3 混合料的最佳配合比

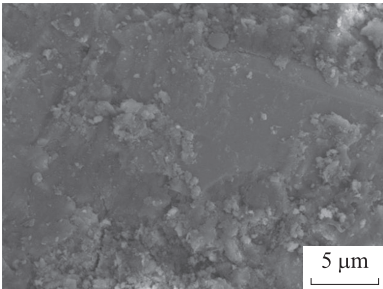
对 18 种混合料进行 7 d 无侧限抗压强度试验,并以试验结果为依据,确定其性能较优的配合比.混合料的 7 d 无侧限抗压强度见图 3.由图 3 可见:(1)钢渣或改性钢渣替代天然集料的混合料无侧限抗压强度

表 4 改性钢渣的基本性能指标
Table 4 Basic performance indexes of modified SSA

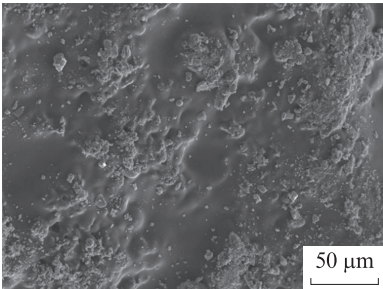
<i>d</i> /mm	PMSSA				SAESSA			
	$w_{PM}/\%$	Water absorption(by mass)/ $\%$	Crushing value(by mass)/ $\%$	Expansion rate (by volume)/ $\%$	$w_{SAE}/\%$	Water absorption (by mass)/ $\%$	Crushing value(by mass)/ $\%$	Expansion rate (by volume)/ $\%$
4.75~9.50	0	1.80		2.5	0	1.80		2.5
	1	1.70		2.4	6	1.55		2.4
	2	1.05		2.1	9	1.29		2.2
	3	1.02		1.8	12	1.28		1.9
	4	1.03		1.8	15	1.30		1.9
9.50~13.20	0	1.60	14.9	2.1	0	1.60	14.9	2.1
	1	1.22	14.4	2.0	6	1.36	14.8	2.0
	2	1.06	13.8	1.8	9	1.25	14.4	1.9
	3	0.76	13.6	1.6	12	1.12	14.0	1.8
	4	0.77	13.6	1.7	15	1.14	14.1	1.8
19.00~26.50	0	0.90		1.9	0	0.90		1.9
	1	0.62		1.7	6	0.68		1.8
	2	0.57		1.6	9	0.65		1.7
	3	0.46		1.5	12	0.64		1.7
	4	0.47		1.6	15	0.66		1.8



(a) SSA



(b) PMSSA



(c) SAESSA

图 2 改性前后钢渣的 SEM 照片
Fig. 2 SEM images of steel slag before and after modification

明显高于天然集料配制的混合料,说明钢渣对水泥稳定碎石基层抗压性能的提升起着重要的作用.9种替代方式下混合料的无侧限抗压强度值均大于 2 MPa,满足道路规范设计中有关基层材料强度的要求.(2)水泥掺量一定时,向混合料中加入粉煤灰有利于提高其抗压强度,此现象在 SSM 中尤为明显,掺入粉煤灰后,SSM 的无侧限抗压强度值提高了 16.4%,这是由于粉煤灰可以促进钢渣的水化反应,水化生成物 C-S-H 凝胶、Ca(OH)₂使得未改性钢渣表面变得更加粗糙,集料间形成有效的嵌挤结构,提高了混合料的无侧限抗压强度.(3)混合料的无侧限抗压强度受钢渣替代方式影响较大,改性钢渣部分替代 $d=4.75\sim9.50$ 、 $9.50\sim13.20$ mm 碎石时混合料的无侧限抗压强度较高,而当 2 种改性钢渣全部替代碎石时,混合料的无侧限抗压强度均低于对照

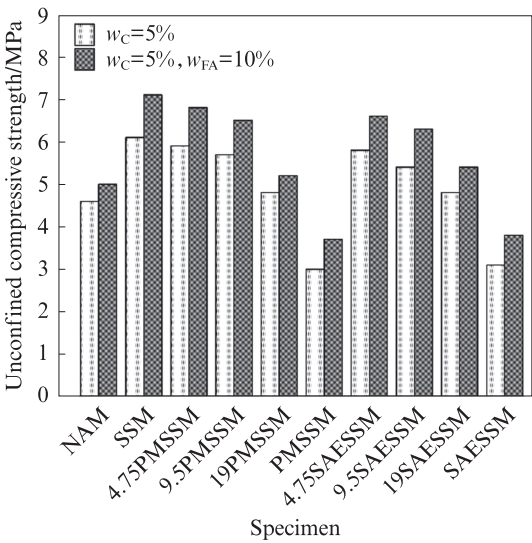


图 3 混合料的 7 d 无侧限抗压强度
Fig. 3 Unconfined compressive strength of mixtures at 7 d

组,粉煤灰掺入后,PMSSM、SAESSM抗压强度值也仅为3.7、3.8 MPa,这是由于钢渣经预浸表面改性处理后,其表面由粗糙变为平整,疏水性由亲水变为疏水,若将改性钢渣全部替代天然集料,则会影响水泥与集料的黏结作用,不利于混合料强度的提升。

综上所述,通过对比分析不同配比下混合料的7 d无侧限抗压强度可知,改性钢渣部分替代天然碎石的方式与全部替代方式相比,前者对提高混合料的抗压强度更加有效,因此,本文后续将针对NAM、SSM、4.75PMSSM、9.50PMSSM、4.75SAESSM、9.50SAESSM这6种替代方式, $w_c=5\%$ 以及 $w_c=5\%$ 、 $w_{FA}=10\%$ 这2种配比,共12种混合料展开进一步研究。

2.2 混合料的力学性能

2.2.1 无侧限抗压强度

将混合料标准养护至28、60 d,测得其无侧限抗压强度,结果见图4。由图4(a)可见:当龄期为28 d时,

9.50PMSSM、9.50SAESSM的无侧限抗压强度比NAM分别提高了29.8%、26.3%,这是由于改性钢渣表面较为致密,使得材料本身抗压能力有所提升,进而提高了混合料的无侧限抗压强度;60 d龄期时,SSM的无侧限抗压强度比4.75PMSSM低12.8%,这可能是因为随着龄期的增长水化反应逐渐加快,钢渣水化产物增多,体积发生膨胀,导致混合料内部出现损伤,使得SSM的无侧限抗压强度降低。由图4(b)可见:当龄期为60 d时,4.75PMSSM、4.75SAESSM的无侧限抗压强度比其在28 d时分别提高了14.6%、18.9%,这是由于随着龄期的延长,钢渣水化反应速率有所提高,与水反应的生成物将使得混合料强度的提升速率加快;60 d龄期时,4.75PMSSM、4.75SAESSM无侧限抗压强度比SSM低2.7%、5.3%,这是由于改性钢渣表面较为平整,粉煤灰对钢渣水化反应的促进作用较小,集料与水泥的黏结性较低,荷载作用时,使得未改性钢渣混合料无侧限抗压强度高于改性钢渣混合料。

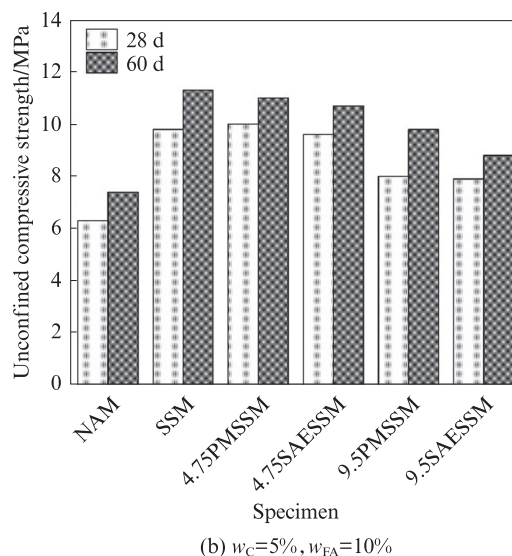
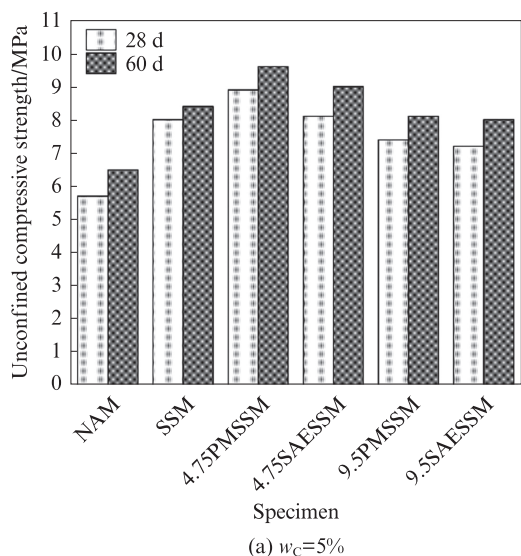


图4 混合料的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength of mixtures

2.2.2 间接抗拉强度

混合料的间接抗拉强度见图5。由图5可见,混合料的间接抗拉强度均随着龄期的延长而增加。对图5(a)中的4.75SAESSM而言:60 d龄期下混合料间接抗拉强度比其在28 d时提高了8.9%,这是由于龄期越长,钢渣与水泥的水化反应越充分,混合料的抗拉能力越强;28 d龄期时,SSM的间接抗拉强度比4.75PMSSM低24.4%,这是由于未改性钢渣表面孔隙较多,对水泥具有一定的吸附性,导致能参与反应的水泥量减少,降低了混合料的抗拉强度。对图5(b)中的4.75SAESSM而言:60 d龄期下混合料的间接

抗拉强度比SSM低6.0%,这说明预浸法表面改性虽可提高材料的性能,但过于致密平整的表面不利于钢渣与胶凝材料的黏结,会造成集料嵌挤结构的稳定性不足,影响混合料的抗拉能力。掺入粉煤灰后,SSM的间接抗拉强度比9.50PMSSM、9.50SAESSM高3.2%、9.1%,这一方面是由于粉煤灰可促进钢渣的水化反应,反应生成的C-S-H凝胶可提高集料间的黏结力,提高混合料的抗拉性能;另一方面,结合表4可知,此类混合料中 $d=9.50\sim13.20$ mm粒径钢渣占比大于其他粒径,改性钢渣水化反应速率较慢,导致改性钢渣混合料抗拉强度不及未改性钢渣混合料。

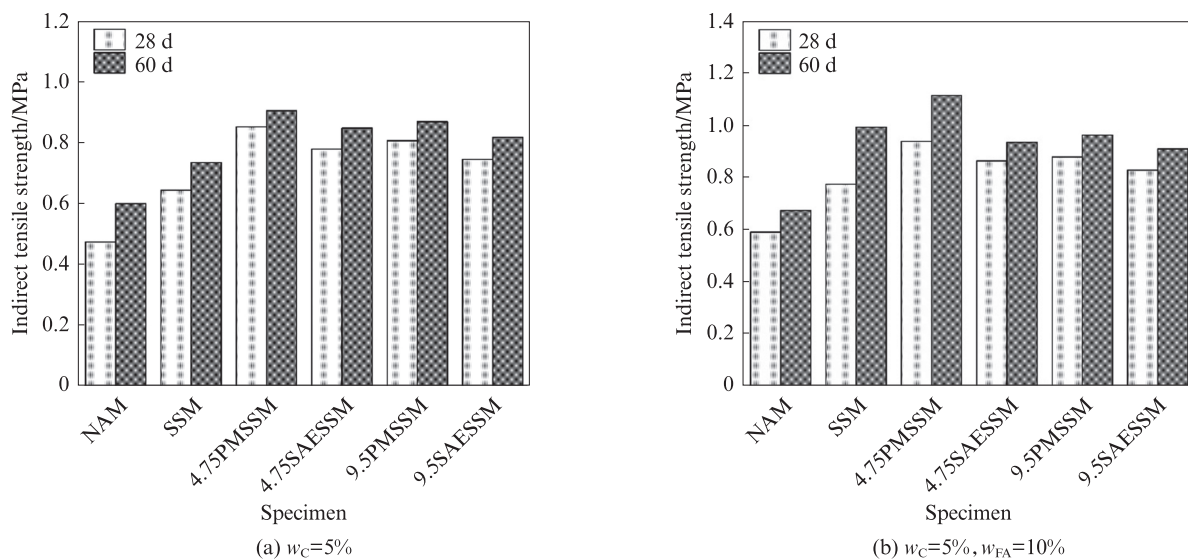


图5 混合料的间接抗拉强度
Fig. 5 Indirect tensile strength of mixtures

2.2.3 抗压回弹模量

混合料的抗压回弹模量见图6.由图6(a)可知,60 d龄期下,4.75PMSSM的抗压回弹模量比4.75SAESSM高6.3%,这是由于钢渣经硅丙乳液改性处理后,其表面过于平整致密,导致混合料中集料与集料、集料与水泥石之间容易发生滑移,使得混合料刚度减小,抗变形能力降低.由图6还可见,当 $w_c=5\%$,龄期为28 d时,SSM的抗压回弹模量比

4.75PMSSAM低1.6%,而后随着粉煤灰的掺入以及养护龄期的延长,SSM的抗压回弹模量达到最大值2495 MPa,比4.75PMSSM、4.75SAESSM分别高7.08%、9.14%,这是由于钢渣前期活性较低,后期因水化速率加快,集料之间黏结能力增强,混合料刚度有所提高,但改性钢渣表面的改性层会降低钢渣水化速率,影响混合料后期强度形成,最终导致改性钢渣混合料的回弹模量低于未改性钢渣混合料.

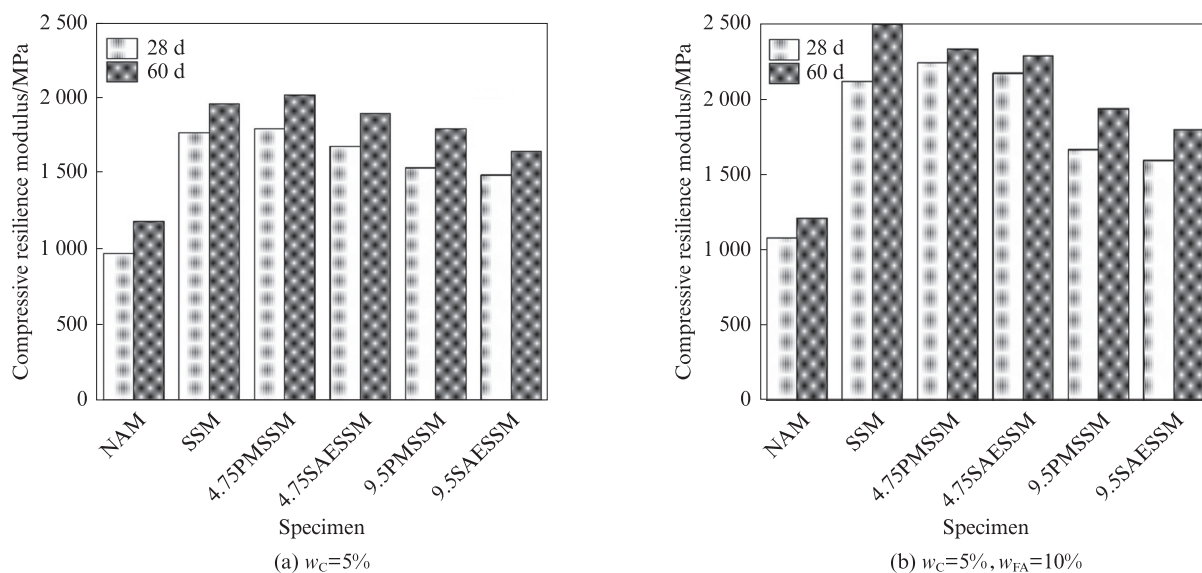


图6 混合料的抗压回弹模量
Fig. 6 Compressive resilience modulus of mixtures

2.3 混合料的抗冻性能

对 $w_c=5\%$ 、 $w_{FA}=10\%$ 的6种混合料进行抗冻性能测试,结果见表5.由表5可见:混合料抗冻系数均随着龄期的延长而增大,60 d龄期下SSM

的抗冻系数比其在28 d时提高了2.5%,这是由于钢渣自身纹理较为丰富,水泥的水化产物与其黏结强度较高,限制了冻融条件下试件内部裂缝的发展,提高了混合料的抗冻性能;当龄期为60 d

时,9.50PMSSM、9.50SAESSM 的抗冻系数比 SSM 下降了 1.3%、2.8%,这是由于改性钢渣表面较为平整光滑,导致钢渣与水泥的黏结能力下降,当混合料受到冻融循环作用时,水在混合料的孔隙中扩散迁移而产生水压力,水结冰时也会产生张拉应力,这些力的作用会导致水泥和改性钢渣

界面产生微裂缝,使混合料的抗压能力降低;9.5PMSSM 冻融前的抗压强度与冻融后相比下降了 3.1%,而 9.5SAESSM 下降了 4.5%,这与钢渣的改性效果有关,甲基硅酸钾改性处理后的钢渣抗压能力有所提升,冻融循环作用后,混合料强度降低幅度较小。

表 5 混合料的抗冻性能
Table 5 Frost resistance of mixtures

Specimen	28 d			60 d		
	Compressive strength/MPa		Frost resistance coefficient/%	Compressive strength/MPa		Frost resistance coefficient/%
	Before freezing and thawing	After freezing and thawing		Before freezing and thawing	After freezing and thawing	
NAM	6.5	5.9	90.76	7.4	6.9	93.24
SSM	8.4	8.1	96.43	11.3	11.1	98.23
4.75PMSSM	9.6	9.4	97.92	11.0	10.8	98.18
4.75SAESSM	9.0	8.7	96.67	10.7	10.4	97.19
9.5PMSSM	8.1	7.9	97.53	9.8	9.5	96.94
9.5SAESSM	8.0	7.6	95.00	8.8	8.4	95.45

3 结论

(1)经甲基硅酸钾溶液、硅丙乳液溶度预浸改性处理后,钢渣的吸水率、压碎值、膨胀率均明显降低,集料品质有所提升.建议甲基硅酸钾溶液的质量分数为 3%、硅丙乳液溶度的质量分数为 12%。

(2)改性钢渣替代方式对混合料的抗压性能影响较大,由改性钢渣全部替代天然集料后,改性钢渣混合料抗压性能不及未改性钢渣混合料,因此不宜采取全部替代的方式。

(3)部分替代方式下,3% 甲基硅酸钾改性钢渣混合料的力学性能优于 12% 硅丙改性钢渣混合料,前者短期内可有效提升混合料的抗冻能力,由 4.75~9.50 mm 甲基硅酸钾改性钢渣配制成的混合料表现出较好的力学性能。

(4)建议采用 4.75~9.50 mm 的甲基硅酸钾改性钢渣部分替代天然集料的方式制备改性钢渣混合料。

参考文献:

[1] 陈奠东,武旭,张富奎,等.钢渣作为集料在道路工程中的均质性应用研究[J].公路,2021,66(1):82-86.
CHEN Diandong, WU Xu, ZHANG Fukui, et al. Research on homogenization application of steel slag as aggregate in road engineering[J]. Highway, 2021,66(1):82-86.(in Chinese)
[2] 曾路,余意恒,任毅,等.碱激发钢渣-矿渣加气混凝土的制备研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):206-213.
ZHENG Lu, XU Yiheng, REN Yi, et al. Preparation of aerated

concrete with alkail activated steel slag and blast furnace slag[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):206-213.(in Chinese)
[3] 申爱琴,喻沐阳,郭寅川,等.钢渣沥青混合料疲劳性能及改善机理[J].建筑材料学报,2018,21(2):327-334.
SHEN Aiqin, YU Muyang, GUO Yinchuan, et al. Fatigue properties and improvement mechanism of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):327-334.(in Chinese)
[4] 林志伟,颜峰,郭荣鑫,等.富水环境下钢渣骨料体积膨胀行为及抑制方法研究现状综述[J].硅酸盐通报,2019,38(1):118-124.
LIN Zhiwei, YAN Feng, GUO Rongxin, et al. Summary of research status of volume expansion behavior and inhibition methods of steel slag aggregate in water-rich environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1):118-124.(in Chinese)
[5] 秦林清.陈化对钢渣及其沥青混凝土的体积和水稳定性影响研究[J].中外公路,2019,39(6):264-270.
QIN Linqing. Influence of ageing effect on steel slag and performance of asphalt concrete volume and its water stability[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2019, 39(6):264-270.(in Chinese)
[6] LUCIANA R, WASHINGTON P N, JORGE A P C. Electric are furnace steel slag base material for low-volume roads [J]. Transportation Research Board, 2018, 19:201-207.
[7] 张浩,杨刚,刘秀玉,等.基于小波分析理论的指数平滑模型预测自然陈化中钢渣 f-CaO 含量[J].过程工程学报,2015,15(4):555-558.
ZHANG Hao, YANG Gang, LIU Xiuyu, et al. Forecast on f-CaO content in steel slag with natural aging by exponential smoothing model based on wavelet analysis[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(4):555-558.(in Chinese)

- [8] 白智韬, 岳昌盛, 邱桂博, 等. CO₂气体对钢渣组成和性能的影响[J]. 环境工程, 2018, 36(12):171-176.
BAI Zhitao, YUE Changsheng, QIU Guibo, et al. Influence of CO₂ on composition and properties of steel slag[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12):171-176.(in Chinese)
- [9] PAN S Y, CHIANG P C, CHEN Y H, et al. Kinetics of carbonation reaction of basic oxygen furnace slags in a rotating packed bed using the surface coverage model: Maximization of carbonation conversion[J]. Applied Energy, 2014, 113:267-276.
- [10] 彭犇, 岳昌盛, 黄世烁, 等. 热态钢渣CO₂改性及热力学性能研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4):100-102.
PENG Ben, YUE Changsheng, HUANG Shishuo, et al. CO₂ modification and thermodynamic property of hot steel slag[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(4):100-102.(in Chinese)
- [11] 尹啸, 张崇民, 杨骥, 等. SiO₂基酸化剂高温消解转炉钢渣中游离CaO的研究[J]. 材料导报, 2018, 32(2):301-306.
YIN Xiao, ZHANG Chongmin, YANG Ji, et al. Research on stabilization of free CaO in basic oxygen furnace slag with SiO₂ bearing acidifier at high temperature[J]. Materials Review, 2018, 32(2):301-306.(in Chinese)
- [12] 殷素红, 高凡, 郭辉, 等. 石灰重构钢渣过程中的物相变化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(6):47-52.
YIN Suhong, GAO Fan, GUO Hui, et al. Phase change of steel slag during reconstruction by lime[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2016, 44(6):47-52.(in Chinese)
- [13] 吴六顺, 周云, 王珏, 等. 二氧化硅改性钢渣易磨性的研究[J]. 炼钢, 2014, 30(2):62-65.
WU Liushun, ZHOU Yun, WANG Yu, et al. Study on the grindability of steelmaking slag modified by silica [J]. Steelmaking, 2014, 30(2):62-65.(in Chinese)
- [14] CHEN Z W, WU S P, XIAO Y, et al. Effect of hydration and silicone resin on basic oxygen furnace slag and its asphalt mixture [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:392-400.