文章编号:1674-2869(2024)04-0460-07

硅烷化玻璃骨料对沥青混合料水稳定性的影响

李珊珊[1,2],刘孜慧[1,2],彭昱昊[1,2],赵 程*[1,2],徐 雄[1,2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430074

摘 要:由废弃碎玻璃(WGC)所制备的玻璃沥青混合料容易发生水损破坏。采用预制1 mol/L的NaOH溶液对WGC进行浸润表面化学处理,并利用预先配制好的氨丙基三乙氧基硅烷(AMEO)偶联剂水解溶液对其进行化学修饰,通过扫描电子显微镜法、X射线荧光光谱术、傅里叶变换红外光谱术和粒度分析,评价化学修饰对WGC微观结构、化学成分、分子结构与粒径分布的影响,同时通过冻融劈裂与浸水马歇尔试验检测,研究化学修饰后的玻璃骨料对沥青混合料水稳定性的影响。结果表明:NaOH溶液对WGC亲水性与表面粗糙度的提升具有显著效果,同时能促进AMEO对WGC的有机化修饰效果。相较于WGC,NaOH/WGC会使沥青混合料出现浸水松散与间接拉伸强度比低的现象,导致无法检测浸水残留稳定度且间接拉伸强度比仅为30.3%,而AMEO对NaOH/WGC进行化学修饰后,浸水残留稳定度恢复至96.7%,间接拉伸强度比达76.7%,表明WGC的表面修饰作用具有显著提高玻璃沥青混合料抗水损害的能力。

关键词:废弃碎玻璃;化学修饰;玻璃沥青;水稳定性
中图分类号:TV431+.5 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202306007

Effect of silanized glass aggregates on moisture stability of asphalt mixtures

LI Shanshan[1,2],*LIU Zihui*[1,2],*PENG Yuhao*[1,2],*ZHAO Cheng*[*1,2],*XU Xiong*[1,2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan 430074, China

Abstract: The glassphalt mixtures prepared by waste glass cullet (WGC) is prone to damage. In this study, we used a prefabricated 1 mol/L NaOH solution to chemically treat the WGC by immersion, and chemically modified it by using a pre-formulated aminopropyl triethoxysilane (AMEO) coupling agent hydrolysis solution. Using scanning electron microscopy, X-ray fluorescence spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, and particle size analyzer, the effects of chemical modification on the microstructure, chemical composition, molecular structure and particle size distribution of WGC were evaluated. Moreover, the freeze-thaw splitting and Marshall water-immersion tests were carried out to determine whether the chemical modification promotes the enhancement of glass asphalt's resistance to water. The results show that NaOH solution enhances the hydrophilicity and surface roughness of WGC, as well as promotes the organic modification of WGC with AMEO. Compared with WGC, NaOH/WGC makes the asphalt mixture loose in association after immersion with a low indirect tensile strength ratio, causing the immersed residual stability can not be tested and indirect tensile strength ratio only reaches 30.3%, while the immersed residual stability is recovered to 96.7% and the indirect tensile strength ratio is 76.7% after further chemical modification of

收稿日期:2023-06-12
基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20221514);武汉工程大学大学生校长基金(XZJJ2023017)
作者简介:李珊珊,本科生。Email:2104040614@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:赵 程,博士,讲师。Email:zc2021@wit.edu.cn
引文格式:李珊珊,刘孜慧,彭昱昊,等. 硅烷化玻璃骨料对沥青混合料水稳定性的影响[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(4):460-466.

NaOH/WGC with AMEO, demonstrating that the modification of WGC has significant capacity of improving glassphalt's resistance to the moisture-induced damage.

Keywords: waste glass cullet; chemical modification; glassphalt; water stability

随着我国经济的快速发展，各类城市垃圾的产生量日益增多[1-3]。玻璃作为窗户、饮料瓶、屏风等商业产品的原材料，达到使用寿命而发生破坏时，其通常难以被有效修复、回用，致其不可避免地成为难以处理的城市垃圾[4]。废弃玻璃作为最常见的生活和工业垃圾之一，占城市垃圾总量的4%~8%[5]。因此，考虑废弃玻璃的有效循环再生利用是相关行业亟需思考的重要问题。

为实现废弃玻璃的可持续应用，道路工程领域研究人员已提出并开展了其在沥青路面中应用的可行性研究。废弃玻璃经破碎处理后作为骨料或填料使用均具有路用可行性，其沥青路面的初始性能均可达到应用要求。例如，宋文佳[6]研究发现废弃碎玻璃（waste glass cullet，WGC）与天然骨料在某些理化性质上具有相似之处，如硅酸盐类组分、压碎特性、硬度等方面，其虽表面光滑、亲油性差，但仍具有作为替代部分骨料的潜质，且玻璃能一定程度提升沥青混合料的马歇尔稳定度。Gedik[7]研究发现WGC作为矿物填料使用时，能较大程度改善沥青路面的热敏感性与疲劳特性，且其他性能均符合应用要求。

尽管WGC在某些方面具有路用的优良性质，但其存在表面光滑、附着力弱的明显缺陷会导致沥青和WGC之间因界面黏结强度差而发生明显的路面水损破坏现象[8]。目前，大多数相关研究主要关注玻璃沥青混合料的力学性能[9-11]，而忽略了WGC对沥青混合料长期性能的影响，特别是与黏结性能密切相关的水稳定性。因此，考虑如何对WGC的表面进行修饰、提升其路面抗水损害能力是其资源化利用的关键问题。

本研究采用预制一定浓度的NaOH溶液与预先配制好的氨丙基三乙氧基硅烷（aminopropyl triethoxysilane，AMEO）偶联剂水解溶液依次对WGC进行浸润化学修饰，通过扫描电子显微镜法（scanning electron microscopy，SEM）、X射线荧光光谱术（X-ray fluorescence spectroscopy，XRF）、傅里叶变换红外光谱术（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）、粒度分析，评价化学修饰对WGC微观结构、化学成分、粒径分布与分子结构的影响。同时，通过冻融劈裂与浸水马歇尔试验，研究化学修饰手段对玻璃沥青抗水损害能力的影响。

1　实验部分

1.1　原材料

WGC是武汉市某厂回收的啤酒瓶和饮料玻璃瓶经破碎后获得，其粒径小于4.75 mm，作为沥青混合料的骨料使用。为了进一步使用，对回收的WGC进行冲洗，去除土壤、标签和其他杂质。

氢氧化钠（NaOH）采用Sigma-Aldrich公司生产的固体颗粒物，其用于对WGC进行化学刻蚀，增大表面粗糙程度和羟基化程度。

沥青为中国石化生产的70号重交石油沥青，其软化点、25 ℃针入度与10 ℃延度分别为47.0 ℃、74 dmm与34 cm。

天然骨料为酸性花岗岩碎石。矿粉为石灰岩活性粉末。

1.2　玻璃沥青混合料的制备

（1）玻璃的化学修饰：先对WGC进行冲洗，根据粒径要求进行筛分，并去除可视标签以及其他杂质；在废弃玻璃粉末（waste glass powder，WGP）中加入预制1 mol/L的NaOH溶液，制成NaOH/WGP试样；AMEO、水、无水乙醇按照质量比为12∶10∶100配制硅烷偶联剂水解溶液，并将NaOH/WGP试样加入水解溶液中浸泡，在60 ℃烘箱中热诱导干燥，制成AMEO-NaOH/WGP试样。

（2）玻璃沥青混合料的制备：采用AC-13型沥青混合料骨料级配（表1），其中0.60~4.75 mm粒径骨料为碎玻璃，其他粒径骨料为花岗岩。首先，将设计所需骨料与矿粉在170 ℃下预热2 h，沥青在150 ℃下加热至熔融流动状态；其次，将预热后的WGC与其他骨料加入170 ℃的拌锅中预拌80 s，随

表1　AC-13型骨料级配

Tab. 1　AC-13 aggregate gradation

通过不同筛孔的骨料的质量分数 / %									
16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm	0.075 mm
100.0	93.0	82.0	53.0	32.0	24.0	19.0	14.0	8.5	5.5

后按照4.8%的油石比加入沥青，继续拌合120 s；最后，加入矿粉，继续拌合60 s，得到玻璃沥青混合料。

1.3 测试方法

1.3.1 *微观形貌表征* 采用TESCAN VEGA 3型SEM分别对预先喷金处理的WGP、NaOH/WGP和AMEO-NaOH/WGP进行观察，获得5kx和10kx放大倍数的显微镜照片，分析NaOH与AMEO对WGP表面微观形貌的影响。

1.3.2 *粒径测试* 采用LS-609型激光粒度分析仪测试WGP试样的粒度，评价NaOH与NaOH/AMEO分别对WGP粒径的影响。

1.3.3 *化学结构表征* 采用Nicolet iS20型红外光谱测试仪对WGP试样分子结构进行表征，评价化学修饰对WGP表面化学结构的影响。测试条件：分辨率为4 cm^{-1}，扫描次数为32次，测试范围4 000~400 cm^{-1}。

1.3.4 *氧化物含量检测* 采用BE62 8009型XRF对WGP试样的主要氧化物成分进行半定量测试，分析NaOH与NaOH/AMEO分别对WGP氧化物成分相对含量的影响。

1.3.5 *水稳定性试验* 根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的T0709和T0729标准制备马歇尔试件并测试试件的浸水马歇尔稳定度(Marshall stability，MS)和间接拉伸强度(indirect tensile strength，ITS)，分析马歇尔试件浸水残留稳定度(Marshall stability ratio，MSR)和间接拉伸强度比(indirect tensile strength ratio，ITSR)的变化规律。另外，参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中有关热拌沥青混合料技术标准，按照浸水残留稳定度和间接拉伸强度比阈值80%和75%的技术要求，评价化学修饰对玻璃沥青水稳定性的影响。MSR和ITSR分别按照式(1)和式(2)进行计算：

$$S_{MSR}=\frac{M_{S_2}}{M_{S_1}}\times 100 \tag{1}$$

$$R_{ITSR}=\frac{f_{ITS\,2}}{f_{ITS\,1}}\times 100 \tag{2}$$

式(1)~式(2)中：S_{MSR}为试件浸水马歇尔残留稳定度，%；M_{S_1}为试件浸水0.5 h后的马歇尔稳定度，kN；M_{S_2}为试件浸水48 h后的马歇尔稳定度，kN；R_{ITSR}为试件间接拉伸强度比，%；$f_{ITS\,1}$为未冻融试件的间接拉伸强度，MPa；$f_{ITS\,2}$为冻融后试件的间接拉伸强度，MPa。

2 结果与讨论

2.1 表面化学处理对WGP微观形貌的影响

为更清晰地认识化学处理对WGC表面形貌的影响，采用WGP替代WGC作为微观结构分析的研究对象。图1为表面化学处理前后WGP的SEM图。由图1(a)和图1(b)可以看到，未经处理的WGP外观非常光滑，其表面上仅残留了少量因破碎留下的更细玻璃粉末。经过NaOH溶液蚀刻后，WGP的光滑表面变得明显粗糙，并且出现了高密度的微孔结构，如图1(c)和图1(d)所示。通过AMEO处理后，NaOH/WGP表面微观结构发生了较大变化，形成了一种类花状结构，如图1(e)和图1(f)所示。这些结果表明，NaOH溶液作为刻蚀剂，可以明显提高WGP表面粗糙度，而AMEO对NaOH/WGP表面粗糙度无明显影响，但能促使其表面形成一些新的生成物。这是因为废弃玻璃化学成分中的部分金属氧化物在一定温度条件下能与NaOH溶液发生化学相互作用并生成水溶性反应产物，其通过冲洗后表面留下密集微孔，进一步在AMEO的处理下，产生硅烷-玻璃间氢键和硅烷接枝、自缩合等物理化学相互作用，促进了表面结构发生变化。

2.2 表面化学处理对WGP粒径的影响

图2为表面化学处理前后WGP的粒径分布。由图2可知，WGP经过NaOH溶液处理后，粒径向较低粒径等级移动，而经过AMEO进一步处理后，其粒径几乎无法达到更高的粒径等级。同时可以看到，WGP、NaOH/WGP和AMEO-NaOH/WGP的中位数尺寸D_{50}分别为149.939、85.742和87.409 μm。结果表明，NaOH溶液能够对玻璃进行刻蚀，从而在微观尺度上减小玻璃尺寸，并且随着AMEO改性，蚀刻玻璃的尺寸不会明显变大。这是因为NaOH溶液与玻璃中的部分金属氧化物发生化学相互作用，在玻璃表面产生了一些可溶性盐，用水冲洗后导致WGP粒径减小。然而，通过AMEO处理后，其水解产物在物理和化学性质上以微尺寸薄膜的形式附着在玻璃表面上，不会促使玻璃尺寸显著增加。

2.3 表面化学处理对WGP分子结构的影响

图3为表面化学处理前后WGP的FTIR光谱。对于WGP，在3 126和1 400 cm^{-1}处出现的主要特征谱带分别归因于结晶水的O—H伸缩振动和CO_3^{2-}的C—O的不对称伸缩振动，在SiO_2的四面

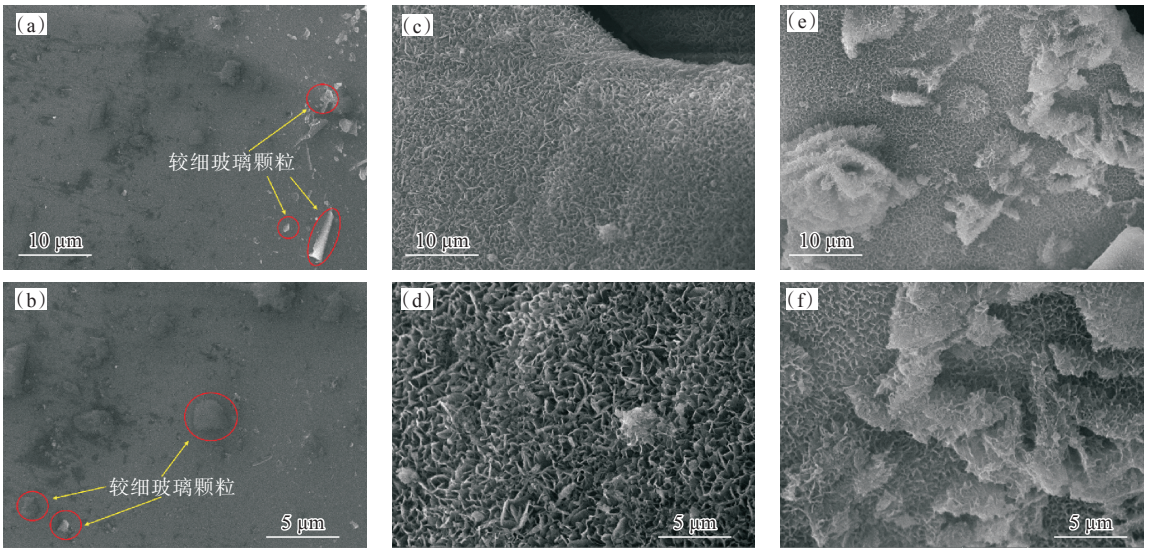

图1　表面化学处理前后WGP的SEM图：(a,b) WGP,(c,d) NaOH/WGP,(e,f) AMEO-NaOH/WGP

Fig. 1　SEM images of WGP before and after surface chemical treatments: (a,b) WGP, (c,d) NaOH/WGP, (e,f) AMEO-NaOH/WGP

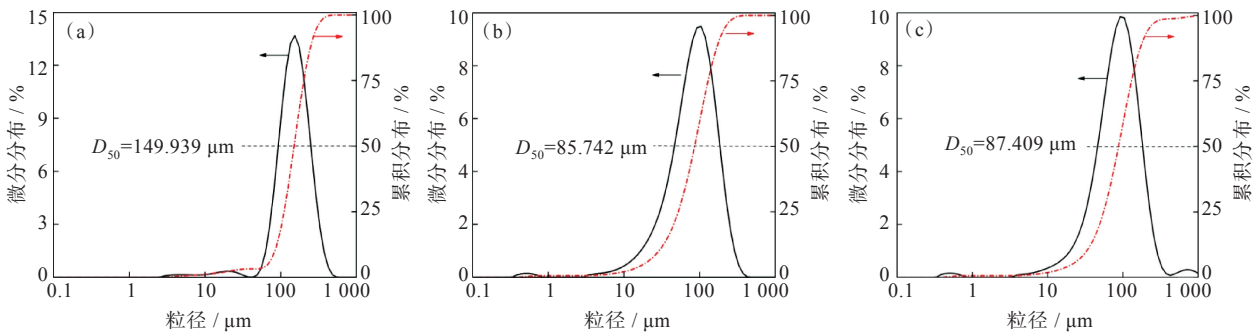

图2　表面化学处理前后WGP的粒径分布：(a) WGP,(b) NaOH/WGP,(c) AMEO-NaOH/WGP

Fig. 2　Particle distribution of WGP before and after surface chemical treatments: (a) WGP, (b) NaOH/WGP, (c) AMEO-NaOH/WGP

体结构上，未观察到Si—O—Si伸缩和弯曲振动的明显吸收峰。上述结果表明，WGP中的结晶水合物和碳酸盐对红外检测有明显的光学反应，但是SiO_2的峰值信号未明确显示。这可能是因为市场上的玻璃瓶通常涂有一些保护材料，导致SiO_2的结构振动没有明显的红外响应。此外，对于NaOH/WGP与AMEO-NaOH/WGP，3 300、1 645 cm^{-1}处的谱带分别归因于氢键作用下的O—H伸缩振动和结晶水的O—H弯曲振动。969、443 cm^{-1}处的谱带分别归因于Si—O—Si不对称伸缩和面内弯曲振动。对于871、668 cm^{-1}处出现的峰值，分别是由于CO_3^{2-}的C—O的面外和面内弯曲振动引起的。这些结果表明，NaOH溶液对废弃玻璃表面进行了有效腐蚀，生成了O—H和CO_3^{2-}等特征结构，经AMEO处理后，玻璃表面特征结构无较大变化。

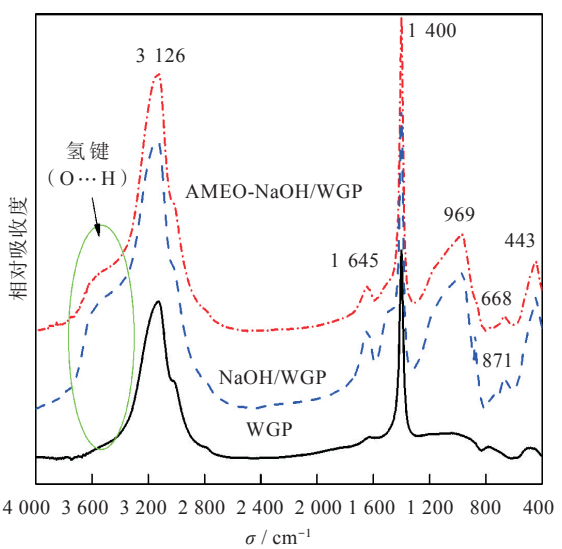

图3　表面化学处理前后WGP的FTIR光谱

Fig. 3　FTIR spectra of WGP before and after surface chemical treatments

2.4 表面化学处理对WGP化学成分的影响及其影响机理分析

表2为表面化学处理前后WGP的氧化物组成。由表2可知，经过NaOH溶液处理后，WGP中SiO_2、CaO和Na_2O的含量变化显著，而其他氧化物的含量的变化则较小。结果表明，SiO_2、CaO和Na_2O是参与NaOH溶液化学反应的主要反应物。另外，WGP中SiO_2和Na_2O的含量均明显降低，但是CaO的含量则显著增加，这说明SiO_2/Na_2O与空气中的水分子或CO_2的反应产物具有水可溶性，而CaO的反应产物$Ca(OH)_2$与$CaCO_3$则因表面沉积及水微(不)溶性而得以存留。涉及的主要化学方程式如下：

$$SiO_2+2NaOH=Na_2SiO_3+H_2O \quad (1)$$

$$Na_2O+H_2O=2NaOH \quad (2)$$

$$Na_2O+CO_2=Na_2CO_3 \quad (3)$$

$$CaO+H_2O=Ca(OH)_2 \quad (4)$$

$$CaO+CO_2=CaCO_3 \quad (5)$$

$$Ca(OH)_2+CO_2=CaCO_3+H_2O \quad (6)$$

通过AMEO水解产物对NaOH/WGP进行修饰处理，SiO_2的含量从45.32%增加到62.22%，表明硅烷被成功接枝到NaOH/WGP表面。这些结果也说明NaOH溶液可以促进玻璃表面结构的羟基化，产生大量亲水结构，这与FTIR表征结果一致。此外，AMEO水解产物能与玻璃表面的活性结构发生物理和化学相互作用，提高含Si氧化物的含量。

根据FTIR与XRF表征结果，WGP经过NaOH溶液和AMEO处理后的表面改性机理包括NaOH溶液对玻璃表面的羟基化过程、AMEO的水解过程、物理吸附/自缩合过程以及接枝反应/自缩合过程，如图4所示。

(1)NaOH溶液对玻璃表面的羟基化过程，如图4(a)所示。二氧化硅(SiO_2)在玻璃和水泥等硅酸盐材料中以四面体配位几何形状($[S_iO_4]^{4-}$)的形式呈现[12-13]。由于Si原子结构四面体配位的原因，Si—O—Si和Si—OH的连接通常出现在SiO_2的不完全晶体结构中，随着晶体含量降低，Si—OH的含量增加。由于选择NaOH溶液作为碱性活化剂时Si—O—Si键断裂，形成Si—OH键，增加了玻璃表面的亲水性，与FTIR和XRF表征结果一致。

(2)AMEO的水解过程如图4(b)所示。当

表2 表面化学处理前后WGP的化学成分

Tab. 2 Chemical composition of WGP before and after surface chemical treatments %

试样名称	$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(Na_2O)$	$w(K_2O)$	$w(SO_3)$
WGP	68.41	2.67	0.52	10.91	1.45	14.21	0.95	0.17
NaOH/WGP	45.32	1.60	2.29	45.72	1.00	0.19	0.91	0.05
AMEO-NaOH/WGP	62.22	3.40	0.78	23.74	4.09	3.93	0.69	0.06

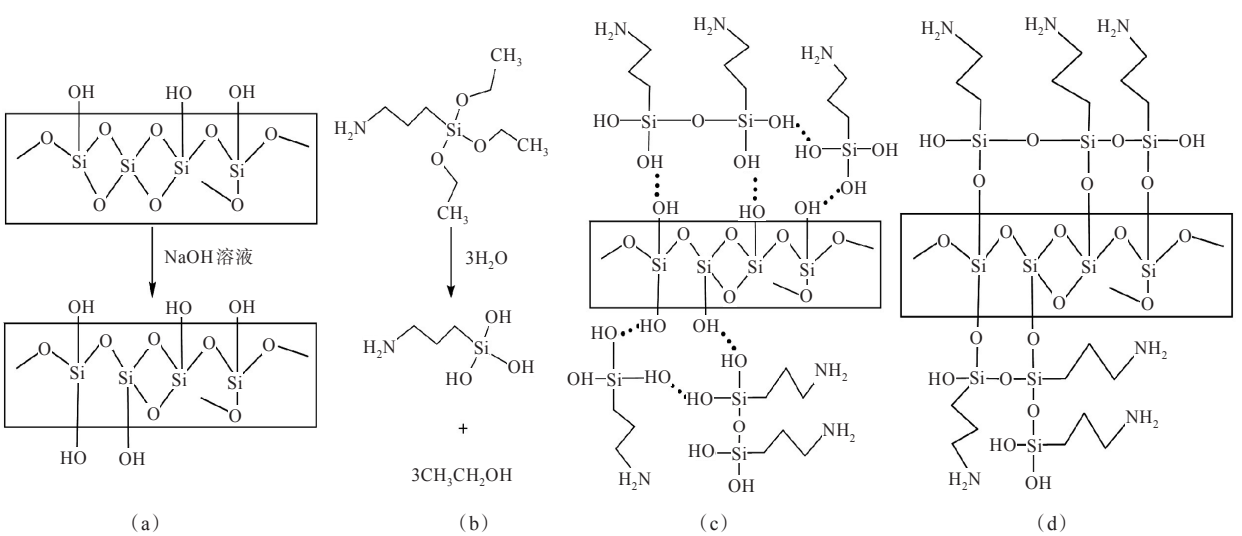

图4 玻璃的表面化学修饰过程：(a)NaOH溶液对玻璃表面的羟基化过程，(b)AMEO的水解过程，(c)物理吸附/自缩合过程，(d)接枝反应/自缩合过程

Fig. 4 Surface chemical modifying process: (a) hydroxylation of glass surface with NaOH solution, (b) hydrolysis of AMEO, (c) physical absorption/self-condensation, (d) grafting reaction/self-condensation

AMEO加入水中后，硅烷发生水解反应，生成了—NH_2结构和三硅羟基结构的水解产物及乙醇相关的副产物[14-15]。

（3）AMEO水解产物在NaOH/WGP表面发生的物理吸附/自缩合过程如图4(c)所示。AMEO水解产物与NaOH/WGP表面的大部分Si—OH基团物理聚集形成氢键，而其少部分Si—OH基团则自缩合形成的Si—O—Si结构。由此可见，该过程的主要相互作用是AMEO水解产物和NaOH/WGP之间产生的氢键物理吸附作用。

（4）AMEO水解产物在NaOH/WGP表面发生的接枝反应/自缩合过程如图4(d)所示。在物理吸附过程结束后，随着热能诱导，氢键处的Si—OH基团发生化学相互作用，连接硅烷和玻璃，同时AMEO上的部分Si—OH基团发生自缩合。由此可见，该过程促使更多的硅烷接枝到玻璃表面上，提升玻璃的疏水性。同时，—NH_2官能团的存在能促使修饰后的玻璃更好与酸性沥青相结合。

2.5　水稳定性分析

图5为玻璃沥青在浸水和冻融条件下的水稳定性。由图5(a)和图5(b)可知，在浸水后，含WGC的玻璃沥青混合料的MS值由9.88 kN下降到8.88 kN，使其MSR变化为89.9%；含NaOH/WGC的玻璃沥青混合料发生物料松散现象；而含AMEO-NaOH/WGC的玻璃沥青混合料的MS值则仅由11.22 kN下降到10.85 kN，MSR值高达96.7%。上述结果表明，利用NaOH溶液对WGC进行处理来增加其表面的粗糙度不能提升玻璃沥青混合料的水稳定性，而AMEO则可弥补性地提升NaOH/WGC混合料的抗水损害能力。这是因为，NaOH溶液对WGC的腐蚀作用使其表面产生大量亲水羟基，导致玻璃沥青混合料水敏感性增大，而AMEO的接枝反应则改善了NaOH/WGC与沥青之间的亲和力，极大提升了玻璃沥青混合料的憎水性。由图5(c)和图5(d)可知，冻融作用对玻璃沥青混合料有显著影响，含WGC、NaOH/WGC和AMEO-NaOH/WGC的玻璃沥青混合料的ITS值分别由951.8、763.8、846.0 kPa降低至478.2、231.4、662.4 kPa，致使其ITSR值分别为50.2%、30.3%和76.7%。这表明沥青混合料更容易在NaOH/WGC的粗糙表面发生冻融剥离，而AMEO则可明显减弱冻融作用对NaOH/WGC混合料的水损害影响。

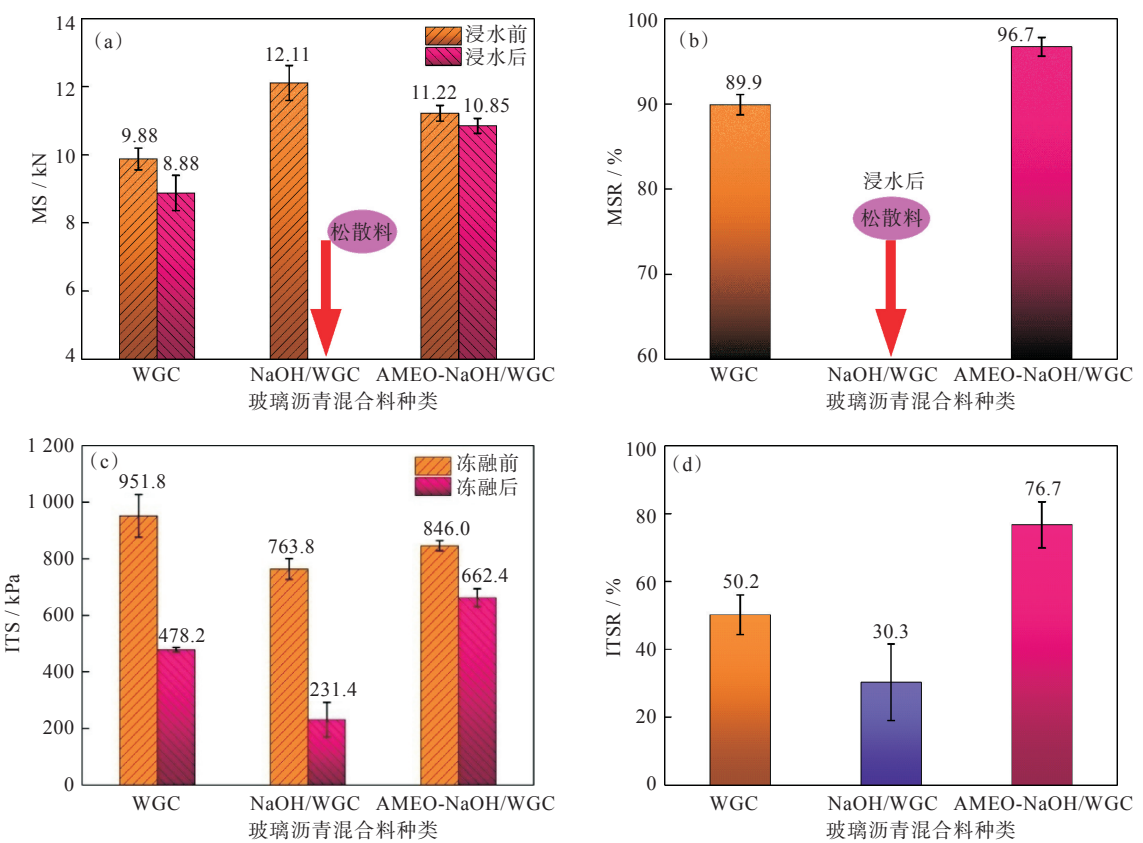

图5　玻璃沥青在浸水和冻融条件下的水损害结果：(a) MS，(b) MSR，(c) ITS，(d) ITSR

Fig. 5　Moisture damage results of glassphalt under water-immersion and freeze-thaw conditions: (a) MS, (b) MSR, (c) ITS, (d) ITSR

3 结 论

本研究采用NaOH溶液和AMEO水解溶液对WGC进行浸润表面化学修饰处理，通过SEM、XRF、FTIR表征和粒径分析，评价化学修饰对WGC微观结构、化学成分、粒径分布与分子结构的影响，分析其化学修饰机理。同时基于浸水马歇尔与冻融劈裂试验，分析化学修饰对玻璃沥青抗水损害能力的影响。主要结论如下：

（1）NaOH溶液的化学腐蚀作用导致WGC表面由光滑状态向粗糙状态转变，引起粒径减小，而AMEO对NaOH/WGP表面粗糙度无明显影响，但会促使其表面产生一些新的生成物，且粒径变化不大。

（2）NaOH溶液对WGC表面进行了有效腐蚀，生成了O—H和CO_3^{2-}等特征结构，经AMEO处理后，玻璃表面特征结构无较大变化，但含硅氧化物含量有所提高。

（3）WGC表面的化学修饰过程包括NaOH溶液对玻璃表面的羟基化过程、AMEO的水解过程、物理吸附/自缩合过程及接枝反应/自缩合过程。

（4）NaOH溶液会使玻璃沥青混合料的水敏感性增大，而AMEO则能改善NaOH/WGC与沥青之间的亲和力，有效提升玻璃沥青混合料浸水和冻融下的水稳定性。

参考文献

[1] 屠艳平，陈国夫，徐雄，等. 再生混凝土微粉对沥青及沥青混合料性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2023，45(3)：349-354.

[2] 周启，陈旭勇，程书凯，等. 再生粗骨料对不同强度等级混凝土性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(5)：534-539.

[3] 吴枫琪，朱志刚，袁军，等. 固化淤泥掺建筑垃圾制备免烧砖的研究[J]. 武汉工程大学学报，2023，45(3)：337-341，348.

[4] 林添兴. 废弃玻璃再生细骨料在混凝土中的应用研究[J]. 新型建筑材料，2022，49(8)：100-105.

[5] HUANG Y，BIRD R N，HEIDRICH O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements [J]. Resources，Conservation and Recycling，2007，52(1)：58-73.

[6] 宋文佳. 聚合物纤维和玻璃对沥青混合料力学性能的影响[J]. 公路，2021，66(8)：29-33.

[7] GEDIK A. An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction [J]. Construction and Building Materials，2021，300：123980.

[8] OLOFINNADE O M，EDE A N，NDAMBUKI J M，et al. Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand [J]. Cogent Engineering，2018，5(1)：1483860.

[9] MOHAMMED M，PARRY T，THOM N，et al. Microstructure and mechanical properties of fibre reinforced asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials，2020，240：117932.

[10] TAHMOORIAN F，SAMALI B，TAM V W Y，et al. Evaluation of mechanical properties of recycled material for utilization in asphalt mixtures [J]. Applied Sciences，2017，7(8)：763.

[11] MOHAJERANI A，VAJNA J，CHEUNG T H H，et al. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials：a review [J]. Construction and Building Materials，2017，156：443-467.

[12] 万法琦，马艳平，董丹丹，等. 氧化物玻璃中的类分子结构单元[J]. 物理学报，2020，69(13)：136101.

[13] KIMOTO K，MATSUI Y，NABATAME T，et al. Coordination and interface analysis of atomic-layer-deposition Al_2O_3 on Si(001) using energy-loss near-edge structures [J]. Applied Physics Letters，2003，83(21)：4306-4308.

[14] 刘佳，姚光晔. 硅烷偶联剂的水解工艺研究[J]. 中国粉体技术，2014，20(4)：60-63.

[15] FIORILLI S，RIVOLO P，DESCROVI E，et al. Vapor-phase self-assembled monolayers of aminosilane on plasma-activated silicon substrates [J]. Journal of Colloid and Interface Science，2008，321(1)：235-241.

本文编辑：苗 变