

4 种钢渣表面处理技术的对比试验研究^{*}

刘明金¹, 邓覃浩², 柯望², 甘有为²

(1.萍乡公路勘察设计院, 江西 萍乡 337000; 2.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要:为解决钢渣(SS)集料孔隙率大、遇水膨胀的技术难题,推广钢渣集料替代天然集料制备沥青混凝土技术,选取水泥净浆(CP)、硅烷偶联剂(SCA)、聚乙烯醇溶液(PVA)及环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR)作为表面改性剂,采用拌和法、浸泡法对钢渣表面进行处理,以处理前后钢渣集料的压碎值、吸水率及与沥青的黏附性为指标对钢渣集料表面改性剂的处理效果进行评价。

关键词:公路;钢渣;改性剂;表面处理技术;压碎值;吸水率;与沥青的黏附性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)06-0049-06

钢渣(SS)具有质地坚硬、外观多孔、棱角丰富、表面粗糙、强度高、耐磨性好、抗冻性好等物理及力学性能,它多孔且是碱性集料,能更好地黏附沥青。将钢渣用作沥青混合料集料的研究表明,钢渣集料表面包裹的沥青在水作用下乳化、脱落,脱落后钢渣与水接触,其中游离氧化钙($f-CaO$)水化后体积膨胀,产生较大的膨胀应力,从而加速钢渣沥青混合料路面的开裂,对行车造成不利影响,严重影响路面的耐久性。同时钢渣孔隙率高,应用于沥青混凝土路面时沥青用量相比石灰岩更大。钢渣遇水膨胀和钢渣孔隙率太大成为钢渣应用于沥青混凝土路面的两大技术难题。章照宏等研究发现通过钢渣预处理如陈伏、研磨、防水抗油剂浸泡等方式可以抑制钢渣沥青混合料的体积膨胀。朱光源研究常温下浸水处理、单掺矿物材料及复合掺矿物材料等 3 种钢渣预处理方式,取得了一定效果。郭其杰选择水玻璃(Na_2SiO_4)、有机硅树脂及硅烷偶联剂 3 种溶液对再生骨料进行强化处理,结果表明有机硅树脂对再生骨料的处理效果最好,其强度、吸水性能提高显著。王川采用改性材料浸泡处理钢渣,发现改性钢渣的抗水侵蚀胀裂性能得到明显提升。本文以萍乡钢铁有限责任公司的钢渣为依托,在参考国内外相关试验研究和工程经验的基础上,选择水泥净浆(CP)、硅烷偶联剂(SCA)、聚乙烯醇溶液(PVA)及环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR)4 种表面改性剂,采用拌和法或浸泡法对钢渣进行表面改性处理,通过评价表面改性处理前后钢渣的吸水率、压碎值

及与沥青的黏附性确定最优钢渣表面改性剂。

1 钢渣表面处理和钢渣集料试验

1.1 钢渣表面处理方式

目前钢渣表面改性方式主要分为雾喷法、拌和法、浸泡法 3 种。雾喷法通常是将改性剂通过雾喷器以雾状形式喷到钢渣表面进行改性,具有节约改性剂的优点,改性面积相同的情况下改性剂用量最少。但由于钢渣表面结构复杂,孔洞较多,采用雾喷法不能将复杂构造区域覆盖,钢渣表面改性面积小。拌和法是将一定质量的改性剂直接加入钢渣中,通过机械拌和使改性剂均匀分布在钢渣表面。对于表面构造复杂、多孔的钢渣,拌和法中的改性剂以液体形式存在能有效流动填充到各个区域,3 种方法中其改性剂用量居中。浸泡法是将钢渣浸泡到一定质量分数的改性剂中,改性剂充分填充到钢渣每个区域,在钢渣表面形成一层完整的改性层,具有优秀的改性效果。缺点是改性剂用量大、成本高,同时对作业场地要求高,对环境污染严重。这里采用拌和法或浸泡法对钢渣表面进行处理。

1.2 表面处理改性剂

(1) 水泥净浆(CP)。水泥是工程上用途最广的一种材料,使用水泥对钢渣进行表面处理具有造价低、操作简单、黏附性好等优点。水泥属于水硬性胶凝材料,其中含有大量硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙及铁铝酸四钙,这些矿物成分是影响水泥水化的主要因素,水泥水化后生成水化硅酸钙凝胶及氢

^{*} 基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2020H0029)

氧化钙晶体,最终硬化成坚固的水泥石。考虑到水泥在初凝前具有较好的流动性,能充分填充钢渣的孔隙,包裹钢渣表面,起到隔水、增强的作用,选择水泥净浆作为钢渣表面处理改性剂。

(2) 硅烷偶联剂(SCA)。钢渣表面经过 SCA 处理后形成一层薄膜可以起到隔水的作用,使水不容易与钢渣接触,从而达到抑制沥青混凝土遇水膨胀的作用,同时降低钢渣集料空隙率,增强钢渣与沥青的黏附性。因此,选择 SCA 作为钢渣表面改性剂。

(3) 聚乙烯醇溶液(PVA)。对多孔隙再生骨料的研究发现,一定质量分数的 PVA 可以很好地弥补骨料多孔隙的缺陷,减小再生骨料空隙率,降低再生骨料吸水率,提高再生骨料强度。钢渣存在多孔隙,故选择 PVA 作为钢渣集料表面处理改性剂进行试验研究。

(4) 环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR)。EAOR 由含苯基甲基的有机硅中间体与环氧树脂、丙烯酸树脂等经过特殊加工工艺制备而成,主要用于建筑防水涂料(如真石漆)、汽车面漆等。丙烯酸树脂具有黏结性强、成膜性高的特点,但耐水性能差;环氧改性丙烯酸树脂具有化学稳定性好、热稳定性好、黏结性能好等特点;有机硅材料具有优秀的耐热、抗氧化性能且表面能低,具有一定的防水性。EAOR 兼具环氧丙烯酸树脂的黏结性强、成膜性好、化学性质稳定与有机硅材料的耐高温、防水等优点,故选用 EAOR 对钢渣集料进行表面改性处理。

1.3 试验方法和评价指标

钢渣集料表面处理的目的是解决钢渣中游离氧化钙遇水引起的体积膨胀和钢渣孔隙率大导致的吸收沥青系数大,钢渣沥青混合料油石比偏大的问题。选择 9.5~13.2 mm 粒径钢渣,采用 CP、SCA、PVA 及 EAOR 4 种表面改性剂处理后,通过对比钢渣集料改性前后吸水率、压碎值和与沥青的黏附性的变化来评价钢渣表面改性效果。依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》进行吸水率和压碎值检测,依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》检测沥青与钢渣集料的黏附性。吸水率降低程度越大,钢渣集料沥青吸收系数越小,改性效果越好。通过拌和法或浸泡法使集料表面包裹一层改性剂膜,通过钢渣集料改性前后压碎值的变化,检验改性剂的强度和钢渣与改性剂的包裹黏结力,压碎值降低越大,效果越好;通过与沥青的黏附性试

验,检测评价改性剂与沥青的黏附能力,黏附等级越高,黏附性越好。

2 钢渣表面改性试验设计及结果分析

2.1 水泥净浆表面处理钢渣

水泥采用中材萍乡水泥有限公司生产的 32.5 级矿渣硅酸盐水泥,其技术指标和强度等级满足 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》的要求。

分别按未改性和水灰比 0.3、0.4、0.5 调制水泥净浆液,称取 300 g 粒径为 9.5~13.2 mm 的钢渣,采取浸泡法进行改性处理。试验过程:根据不同水灰比调制水泥净浆液,将洗净的钢渣倒入水泥浆中不断搅拌 15 min 以尽量排除钢渣孔隙中空气,使水泥浆充分浸润钢渣;将钢渣从水泥浆中捞出放入托盘中,盖上保鲜薄膜防止水分蒸发,静置 1 d 后放入标准养护室中养护 28 d 后得到水泥净浆改性钢渣 CPSS(见图 1)。钢渣改性前后吸水率、压碎值检测结果见图 2。



图 1 CPSS 图像

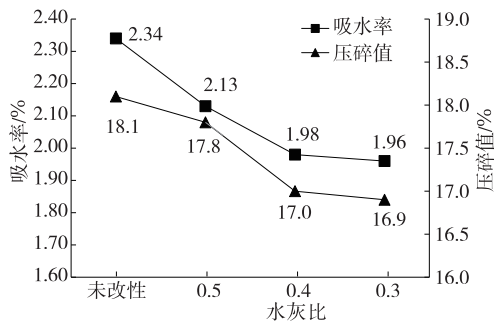


图 2 SS 和 CPSS 的吸水率、压碎值试验结果对比

从图 2 可以看出:与 SS 相比,CPSS 的吸水率和压碎值随着水灰比的减小呈降低趋势,这是因为在相同条件下钢渣表面覆盖的水泥水化层越密实,改性钢渣的吸水率越小,改性层越密实强度越高,压碎值越小。水灰比为 0.4 时,CPSS 的吸水率降低到 1.98%,比 SS 降低 15.4%;压碎值降幅为 6.1%。水灰比从 0.4 降低到 0.3 时,CPSS 的吸水率、压碎值

降幅不明显。据此确定 CPSS 的最佳水灰比为 0.4。即使水灰比降低到 0.3, CPSS 的吸水率依然高达 1.96%, 这是因为水泥在水化过程中始终会留下一部分毛细孔, 同时水泥水化是一个长期的过程, 本次试验中试样仅养护 28 d, 28 d 后水泥水化仍在继续, 可能是其毛细孔数量进一步增加导致吸水率高。

2.2 硅烷偶联剂表面处理钢渣

采用江苏晨光公司生产的硅烷偶联剂 KH-550, 它是一种无色透明液体, 25 ℃ 下的相对体积质量为 0.946、折光率为 1.41~1.422, 沸点为 217 ℃。KH-550 的分子结构中含有两种化学性质不同的功能团, 一种亲有机物, 一种亲无机物, 因而它可以将有机材料和无机材料黏合在一起。KH-550 经过水解生成—OH, 硅烷上的—OH 可以与被处理材料表面的羟基—OH 通过氢键连接起来, 再经过脱水聚合生成—O—共价键, 进而使改性剂牢固地吸附在被处理材料表面。文献[19]的试验结果表明, KH-550 的最佳水解配方为 $m(\text{KH-550}) : m(\text{水}) : m(\text{乙醇}) = 5 : 45 : 50$, 最佳水解时间为 20 min。

采用拌和法处理钢渣表面, 方法如下: 将配置好的 KH-550 水解溶液分别按照钢渣质量的 2%、4%、6% 进行表面处理, 不断拌和钢渣使改性剂均匀附着在钢渣表面, 随后将被改性剂润湿的钢渣放入烘箱中, 考虑到沥青混合料生产过程中集料预热温度, 将烘箱温度调整至 160 ℃ 固化 30 min, 钢渣自然冷却后得到 SCA 改性钢渣 SCASS(见图 3)。用铲子将 SCASS 充分分散后进行吸水率与压碎值测试, 测试结果见图 4。



(a) KH-550 掺量 2% (b) KH-550 掺量 4% (c) KH-550 掺量 6%

图 3 SCASS 图像

从图 4 可以看出: 经过 KH-550 处理后的钢渣, 吸水率有所下降, 但下降幅度不大。KH-550 水解溶液掺量达到钢渣质量的 4% 时, 吸水率降到 2.13%, 降幅为 9.0%; 掺量大于 4% 时对钢渣吸水率的影响不明显。经过 KH-550 改性后钢渣的压碎值变化不明显, 降幅仅为 1.1%。KH-550 具有一定

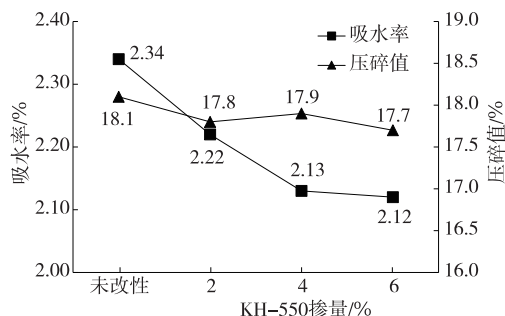


图 4 SS 和 SCASS 的吸水率和压碎值试验结果对比

的隔水作用, 改性后钢渣吸水率有所降低, 但其在钢渣表面形成的膜并不连续、致密, 导致改性后钢渣吸水率仍然偏高, 压碎值无明显强化。

2.3 聚乙烯醇溶液表面处理钢渣

聚乙烯醇(PVA)采用 PVA-1799(160 目), 其聚合度为 1 700, 醇解度为 99%, 呈白色粉末状。PVA 能在热水中溶解, 是一种重要的有机化合物, 常用于制作胶水、黏合剂、乳化剂等。

用开水配制 6%、8%、10%、12% 4 种质量分数的 PVA 溶液。由于 PVA 固体在 95 ℃ 加热条件下才能完全溶入水中, 加热温度越高其溶解速率越快, 但温度达到 160 ℃ 时发生脱水醚化, 失去溶解性。因此, 将装有 PVA 的盆密封后放入 150 ℃ 烘箱中加热, 直至 PVA 粉末完全溶解, 得到 PVA 溶液。

将 PVA 溶液冷却至室温后开始浸泡钢渣, 浸泡时 PVA 溶液高出钢渣顶面 1 cm 以上以保证钢渣被充分浸润。浸泡过程中每隔 6 h 搅拌一次, 以排出钢渣内部气泡。浸泡 24 h 后用滤网将钢渣沥干, 并放入 105 ℃ 烘箱中烘干, 之后在室温下冷却得到 PVA 改性钢渣 PVASS。由于 PVA 溶液烘干后会在钢渣表面形成一层有黏性的膜, 钢渣烘干后会黏结在一起, 需用小铲子将其分散开。PVASS 见图 5, PVASS 试验结果见图 6。



图 5 PVASS 图像

由图 6 可知: PVA 溶液质量分数达到 8% 时, 钢渣的吸水率、压碎值基本已降至最低, 吸水率降到 1.91%、降幅为 18.4%, 压碎值降到 17.3%、降幅为 4.4%; 质量分数继续增大, 改性效果无明显增长。

据此确定 PVA 溶液最佳质量分数为 8%。

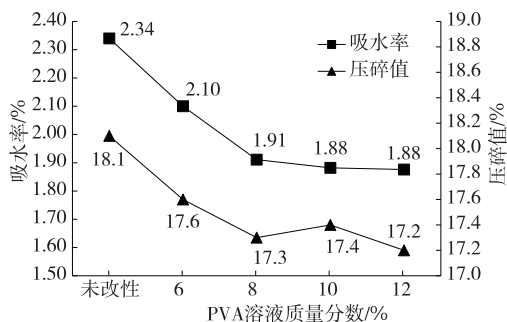


图6 SS和PVASS的吸水率和压碎值试验结果对比

2.4 环氧丙烯酸改性有机硅树脂表面处理钢渣

采用无锡某化工材料公司生产的 50% 固含量的环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR), 它为无色透明液体, 不溶于水和乙醇, 溶于甲苯、二甲苯、醋酸丁酯等溶剂, 其主要参数见表 1。

表1 EAOR 的主要参数

参数名称	测试结果
溶剂	二甲苯
固含量(150℃, 2h)/%	50±2
黏度(涂-4杯, 25℃)/s	>60
自干时间(马口铁片, 25℃)	表干 10~30 min, 指压干 2 h
烘干时间(马口铁片, 150℃)/min	≤40
耐热性(马口铁片, 200℃≥200h)	不泛黄, 不起皮

由于改性剂黏稠程度不一样, 在表面处理钢渣的过程中, 钢渣上改性剂附着厚度不同, 改性剂流动性不同, 不同黏稠程度改性剂的最佳剂量不一致。参考 SCA 对钢渣表面处理的最佳用量, 使用占钢渣质量 4% 的 EAOR 对钢渣进行表面处理, 使用二甲苯溶剂将 EAOR 稀释成不同质量分数后对钢渣进行表面处理。

试验采用 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=1:0, 2:1, 1:1, 1:2$ 4 种质量分数制成改性剂溶液对钢渣进行表面处理。过程如下: 将改性剂溶液按照钢渣质量 4% 的用量掺入钢渣中, 不断搅拌使改性剂溶液均匀分布在钢渣表面; 将拌和好的改性钢渣放入烘箱中进行固化(根据表 1, 烘箱温度为 150℃, 固化时间为 1~2 h), 待钢渣表面改性剂溶液完全固化后, 从烘箱中取出钢渣, 在室温下冷却得到 EAOR 改性钢渣 EAORSS(见图 7)。EAORSS 的吸水率、压碎值测试结果见图 8。

由图 8 可知: 1) 仅加入二甲苯稀释剂的 SS 的吸



图7 EAORSS 图片

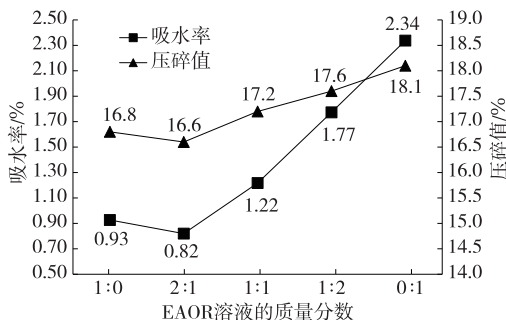


图8 SS和EAORSS的吸水率、压碎值试验结果对比

水率为 2.34%, 随 EAOR 质量分数的增加, 总体上吸水率呈逐渐下降趋势。 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=2:1$ 时, EAORSS 吸水率为 0.82%, 比 SS 下降 65.0%, 降低吸水率效果较好, 印证了 EAOR 优良的成膜性及憎水性。改性剂质量分数进一步增加至直接用未稀释的 EAOR 对钢渣进行表面处理时, 吸水率反而有所上升, 这是因为未经稀释的 EAOR 过于黏稠, 在改性钢渣拌和过程中, 改性剂不易于均匀覆盖钢渣表面, 同时钢渣表面改性剂层厚度较大, 4% 的改性剂用量无法完全覆盖钢渣表面。2) 随着 EAOR 质量分数的增长, EAORSS 的压碎值降低, EAOR 能填充原状钢渣的孔隙及部分微裂缝, 使钢渣内部更加密实, 从而进一步提高钢渣的力学性能。 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=2:1$ 时, 压碎值降低 8.3%; 使用未稀释的 EAOR 时, 压碎值未进一步降低, 再次证明质量分数过高的改性剂不利于其均匀分布在钢渣表面, 表面处理效果差, 同时会增加改性剂用量。EAOR 用量为钢渣质量的 4% 时, 其最佳稀释比例为 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=2:1$, 改性钢渣的吸水率降至 0.82%、降幅达 65.0%, 压碎值降至 16.6%、降幅为 8.3%。

3 钢渣表面处理效果评价

3.1 沥青黏附性分析

将 4 种改性剂采用最佳表面处理方案对钢渣进行表面处理, 分别测试表面处理前后钢渣与沥

青的黏附性。钢渣粒径为 9.5~13.2 mm。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用水浸法进行试验,试验结果见表 2。

表 2 沥青与表面处理前后钢渣的黏附性试验结果

钢渣类别	沥青黏附等级	钢渣类别	沥青黏附等级
SS	5 级	PVASS	4 级
CPSS	5 级	EAORSS	4 级
SCASS	5 级		

由表 2 可知:采用 4 种改性剂对钢渣表面进行处理后,CPSS、SCASS 与沥青的黏附性与 SS 一致,为 5 级;PVASS、EAORSS 与沥青的黏附性有所降低,为 4 级。

3.2 表面处理钢渣的表面微观分析

采用扫描电镜(SEM)观察钢渣表面的微观结构,分析各种改性剂对钢渣表面构造的影响。钢渣表面处理前后微观形貌见图 9。

由图 9 可知:CPSS 在 500 倍放大和 2 000 倍放大下依旧可以看到部分小孔隙及微裂缝,这是因为水泥在初凝前依旧存在流动性,导致钢渣局部区域表面水泥浆分布不均,同时水泥在硬化过程中发生干缩产生裂缝;SCASS 在放大 500 倍及 2 000 倍下依旧存在大量孔隙及微裂缝,在 500 倍下大孔隙也较多,这是由 SCA 在钢渣表面成膜性差导致的;PVASS 在放大 500 倍及 2 000 倍下表面孔隙数量明显减少,钢渣表面小孔隙及微裂缝几乎都被改性剂填满或覆盖,但仍存在很多大孔隙;EAORSS 表面孔隙、微裂缝几乎都被填充,但钢渣表面粗糙的纹理并未被覆盖,图中白色的即为“凸起”点。

3.3 钢渣表面处理技术效果评价

钢渣表面处理前后技术性能参数对比见表 3。技术要求采用 CJJ 1—2008《城镇道路工程施工与质量验收规范》对城市快速路、主干道表面层级粗集料

的要求。

由表 3 可知:采用 EAOR 作为钢渣表面改性剂时钢渣的吸水率、压碎值降幅最大,分别为 65.0%、8.3%,两项性能提升幅度均排第一,同时 EAOR 与沥青的黏附性达到 4 级标准,满足规范要求。4 种钢渣表面处理改性剂中,EAOR 的综合效果最优。

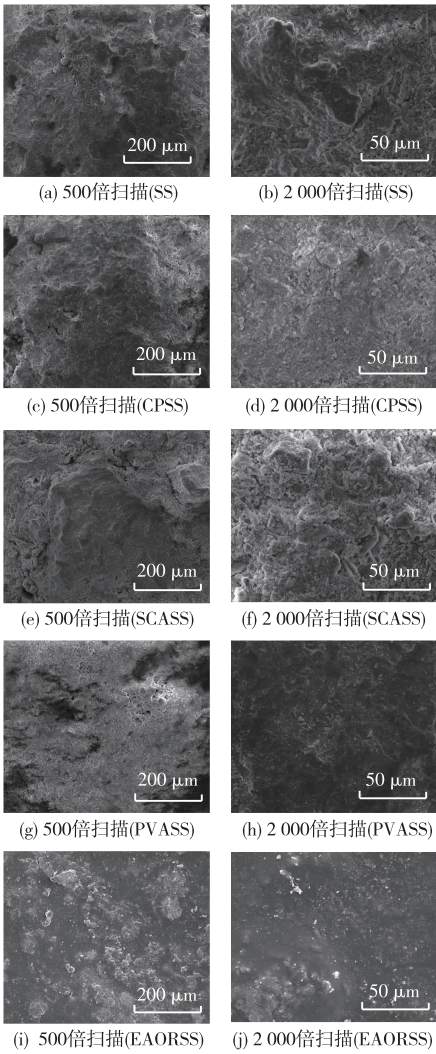


图 9 钢渣表面处理前后微观形貌对比

表 3 钢渣表面处理前后技术性能参数对比

钢渣表面 处理技术	压碎值			吸水率			沥青黏附等级		
	测量值/ %	性能提升/ %	性能优劣 排序	测量值/ %	性能提升/ %	性能优劣 排序	测量值	性能提升	性能优劣 排序
SS	18.1	—	—	2.34	—	—	5 级	—	—
CPSS	17.0	+6.1	2	1.98	+15.4	3	5 级	0	1
SCASS	17.9	+1.1	4	2.13	+9.0	4	5 级	0	1
PVASS	17.3	+4.4	3	1.91	+18.4	2	4 级	-1 级	2
EAORSS	16.6	+8.3	1	0.82	+65.0	1	4 级	-1 级	2
技术要求	≤26	—	—	≤2.0	—	—	≥4 级	—	—

4 结论

(1) 4种改性剂的最佳设计方案为:水泥净浆改性钢渣(CPSS),水灰比0.4,采取浸泡的方式处理钢渣表面;硅烷偶联剂改性钢渣(SCASS),水解配方溶液为 $m(\text{KH}-550):m(\text{水}):m(\text{乙醇})=5:45:50$,掺量4%,采用拌和法处理钢渣表面;聚乙烯醇溶液改性钢渣(PVASS),用热水配制PVA溶液,质量分数为8%,采取浸泡的方式处理钢渣表面;环氧丙烯酸改性有机硅树脂改性钢渣(EAORSS),采用 $m(\text{EAOR}):m(\text{二甲苯稀释剂})=2:1$ 配制改性剂,掺量4%,采用拌和法处理钢渣表面。

(2) 按照4种改性剂的最佳设计方案进行试验,依据吸水率、压碎值、与沥青的黏附性综合提升效果,环氧丙烯酸改性有机硅树脂(EAOR)表面处理性能最好,其次是聚乙烯醇溶液(PVA)、水泥净浆(CP),硅烷偶联剂(SCA)最差。

参考文献:

- [1] 何亮,詹程阳,吕松涛,等.钢渣沥青混合料应用现状[J].交通运输工程学报,2020,20(2):15-33.
- [2] 吴跃东,彭彝,吴龙,等.国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状[J].环境工程,2020(2):1-6.
- [3] 庞才良,杨雪晴,宋杰光,等.钢渣综合利用的研究现状及发展趋势[J].砖瓦,2020(3):77-80.
- [4] 陈宗武.钢渣理化特性及其沥青混凝土性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [5] 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.
- [6] 牟存玉,凌天清,陆亚,等.钢渣 SAC-10 沥青混合料路用性能研究[J].中外公路,2019,39(2):249-255.
- [7] 刘明金,柯望,李闯民.基于路用性能的掺钢渣透水沥青混合料设计[J].公路与汽运,2021(3):68-73+77.
- [8] 刘明金,柯望,李闯民.掺钢渣沥青混合料 AC-13 配

合比优化设计[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):24-32.

- [9] 李闯民,李士东,柯望.不同沥青结合料的 PAC-13 混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):1-8.
- [10] 章照宏,刘代雄,朱国军,等.沥青混凝土用钢渣集料预处理方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014(3):103-105.
- [11] 朱光源.钢渣的膨胀性抑制方法及其路基填料路用性能的研究[D].南京:南京林业大学,2014.
- [12] 郭其杰.再生骨料强化处理以及在沥青稳定碎石中的应用研究[D].西安:长安大学,2014.
- [13] 王川.钢渣表面改性工艺及改性钢渣沥青混合料性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [14] 刘广生,周煜华,杨静,等.硅烷偶联剂应用研究进展[J].江西化工,2019(6):75-77.
- [15] 吴素瑶,宗翔.PVA 改性再生骨料对再生混凝土基本力学性能的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2019,16(4):115-118.
- [16] 耿世博,邢振贤,孙培钊.改性再生骨料对混凝土基本力学性能的影响[J].四川建材,2020,46(4):1-2+4.
- [17] 朱青龙,赵启良,狄兰永.不同类型溶液对再生混凝土粗骨料的改性研究[J].科技通报,2019,35(5):149-153+158.
- [18] 吴建鹏.改性再生粗骨料混凝土耐久性试验研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [19] 梁鑫.基于沥青石料表面改性的油石界面粘结剂研究[D].长春:吉林大学,2011.
- [20] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [21] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [22] 中国建筑材料科学研究总院.通用硅酸盐水泥:GB 175—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

收稿日期:2021-10-08

(上接第48页)

- [13] 肖凤,邓星鹤.沥青改性剂研究进展[J].中国胶粘剂,2020,29(9):61-66.
- [14] ZHANG R, WANG H N, GAO J F, et al. High temperature performance of SBS modified bio-asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 99-105.
- [15] ABO-SHANAB Z L, RAGAB A A, NAGUIB H M. Improved dynamic mechanical properties of sustainable bio-modified asphalt using agriculture waste[J]. International

Journal of Pavement Engineering, 2019, 22(7): 1-7.

- [16] 李智文.温拌胶粉改性沥青高低温性能影响因素研究[J].公路,2020,65(10):297-303.
- [17] 单鸣宇,王岚,张宝鑫.盐冻融循环下温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):467-473.
- [18] FERRY J. Viscoelastic properties of polymers[M]. 3rd Edition. New York: Wiley, 1980.

收稿日期:2022-04-29