

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.053

OGFC-13 钢渣沥青混合料性能研究

朱铁增, 李旭丹

(河南交通职业技术学院, 河南 郑州 451400)

摘要:开级配沥青路面可以减少路面积水,改善行车安全性,但矿料之间嵌锁能力较为一般,易造成路面松散。工业钢渣强度高、耐磨性好,且与沥青具有较好的黏附性,将工业钢渣掺入 OGFC-13 沥青混合料中,能够改善路面的使用性能。该文将 4.75 mm 及 4.75 mm 以上粒径钢渣以体积法掺入混合料中进行矿料级配设计,并确定最佳油石比;分别对钢渣掺量为 0%、25%、50%、75%、100% 的 OGFC-13 混合料的动态模量、高温抗车辙性能、抗滑性能、低温抗开裂性能以及抗水毁性能进行评价。结果表明:钢渣的掺入会降低 OGFC-13 沥青混合料的低温抗开裂能力,但降低幅度不大;钢渣掺量为 50% 时,混合料高温抗车辙能力、抗水毁能力改善效果最优;钢渣掺量为 25% 时,混合料抗滑性能改善效果最优。

关键词:钢渣; 矿料级配; 最佳油石比; OGFC-13; 路用性能

现阶段中国城镇道路多为密级配沥青路面,这种结构类型的路面由于其级配连续密实,设计空隙率较低,雨天路面容易积水,车辆行驶中容易产生雾气且路面抗滑性能降低,严重影响行车安全,鉴于密级配沥青路面的这些缺点,该文开展开级配排水式沥青磨耗层研究。为增强 OGFC 沥青路面的路用性能,需选用玄武岩、辉绿岩等碱性且磨光值较大的粗集料。但由于环保政策的限制,导致这些优质矿料极为紧缺,同时中国这些优质矿石较为有限,满足不了工程建设的需求,因此寻找一种能够代替优质矿料的原料已成为道路工作者研究的重要方向。工业钢渣是一种炼钢过程中的废弃物,且年产量较为庞大,露天堆放不仅会占用大量土地资源,也会对周边环境造成严重污染,同时也是对资源的一种浪费。大量研究表明:钢渣耐磨性及与沥青黏附性较好,能够替代部分或全部矿料,与沥青拌制成 OGFC 钢渣沥青混合料,可以增强沥青路面的抗滑、强度、抗水毁能力等路用性能;同时大量废弃钢渣投入到工程建设中能够减少环境破坏。该文用体积法将钢渣分别以 0%、25%、50%、75%、100% 的掺量替换 4.75 mm 及 4.75 mm 以上粒径的矿料,系统地研究 OGFC-13 钢渣沥青混合料的相关性能,为 OGFC-13 钢渣沥青路面在城镇道路中的应用提供理论依据。

1 原材料及配合比设计

1.1 钢渣

钢渣由于炼钢工艺及产地不同,会导致其物理、化学性质有所差异。钢渣筛分及力学性能试验结果见表 1、2。

表 1 钢渣筛分试验结果

筛孔/mm	通过率/%	筛孔/mm	通过率/%
26.5	100	2.36	24.7
19	99.1	1.18	13.6
16	96.8	0.6	8.4
13.2	89.4	0.3	6.5
9.5	83.1	0.15	3.4
4.75	52.4	0.075	1.3

由表 2 可以得出:钢渣吸水率略高于 GB/T 25824—2010《道路用钢渣》中要求不大于 2% 的规定,在使用过程中应分析钢渣吸水后的性能变化。

炼钢所用矿石的产地、炼钢的工艺、钢渣回收的方法等因素会影响钢渣的化学成分及含量,钢渣主要由 CaO、MgO、SiO₂ 和 FeO 组成,通常这些成分含量为 88%~90%,钢渣主要矿物成分含量见表 3。

收稿日期:2021-01-03(修改稿)

作者简介:朱铁增,男,大学本科,讲师. E-mail:335826098@qq.com

表2 钢渣相关性能指标试验结果

钢渣粒径/ mm	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压碎值/ %	针片状含量/%		吸水率/ %	磨光值/ BPN	黏附性/ 级
			≥ 9.5 mm	< 9.5 mm			
4.75~9.5	3.476	—	—	6.3	2.3	—	—
9.5~13.2	3.485	17.4	5.8	—	2.2	44	5
13.2~16	3.492	—	4.9	—	2.1	—	—
技术要求	≥ 2.60	≤ 26	≤ 12	≤ 18	≤ 2.0	≥ 40	≥ 4

表3 钢渣中主要矿物成分含量

矿物成分	含量/%	矿物成分	含量/%
CaO	41.2	Fe_2O_3	20.6
MgO	4.1	MnO	4.2
SiO_2	12.8	Al_2O_3	3.7
P_2O_5	2.5		

钢渣吸水率略高于规范要求且钢渣遇水易膨胀,因此需对钢渣遇水膨胀特性进行评价。参照 GB/T 24175—2009《钢渣稳定性试验方法》中的相关规定分别对不同浸水周期时钢渣吸水膨胀率进行试验,结果见表4。

表4 不同龄期时钢渣膨胀率

龄期/d	膨胀率/%	龄期/d	膨胀率/%
1	0.27	6	0.74
2	0.36	7	0.87
3	0.47	8	0.92
4	0.54	9	0.93
5	0.67	10	0.95

由表4可以得出:钢渣膨胀率随时间周期的延长而增大,当龄期超过7d时,膨胀率趋于稳定,且满足 GB/T 24765—2009《耐磨沥青路面用钢渣》中浸水膨胀率不大于2%的规定,表明钢渣浸水稳定性满足规范要求。

表6 不同钢渣掺量时矿料级配设计结果

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	80	30	22	18	15	12	8	6
级配下限	100	90	60	12	10	6	4	3	3	2
级配中值	100	95.0	70.0	21.0	16.0	12.0	9.5	7.5	5.5	4.0
0%钢渣	100.0	94.6	72.1	22.3	15.8	11.6	9.6	8.9	5.7	4.6
25%钢渣	100.0	95.2	68.8	19.3	14.7	10.5	8.7	7.9	5.8	4.3
50%钢渣	100.0	94.8	69.5	21.4	15.8	10.8	8.9	8.4	5.3	4.2
75%钢渣	100.0	95.8	72.3	22.4	16.4	11.3	8.2	7.2	5.1	3.9
100%钢渣	100.0	95.3	71.6	23.5	17.6	13.7	8.3	6.9	4.8	3.7

1.2 矿料及沥青

该文粗集料分别为10~15、5~10、3~5mm玄武岩碎石;细集料为0~3mm石灰岩机制砂;填料为石灰岩磨细矿粉。粗、细集料、矿粉相关技术指标均满足规范要求。选用的改性沥青为SBS I-D,参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求,对SBS I-D沥青进行相关性能检测,试验结果详见表5。

表5 沥青主要指标试验结果

检测项目	单位	试验结果	技术要求
针入度(25℃)	0.1 mm	69	60~80
软化点	℃	64	≥ 60
延度(5 cm/min, 5℃)	cm	36	≥ 30
闪点	℃	252	≥ 230
弹性恢复(25℃)	%	81	≥ 75
135℃运动黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	2.5	≤ 3
质量变化	%	-0.12	± 1
RTFOT			
后残留物 针入度比(25℃)	%	72	≥ 65
残留延度(5℃)	cm	26	≥ 15

对钢渣按照0%、25%、50%、75%、100%比例掺配的OGFC-13沥青混合料进行配合比设计,矿料级配设计结果见表6,不同钢渣掺量时混合料最佳油石比及马歇尔试验结果见表7。

表 7 OGFC-13 不同钢渣掺量时最佳油石比
及马歇尔试验结果

钢渣 掺量/ %	最佳 油石 比/%	空隙率 VV/ %	析漏 损失/ %	肯塔堡 飞散损 失/%	马歇尔 稳定度/ kN
0	4.23	19.8	0.24	16.4	5.27
25	4.34	20.3	0.23	15.8	5.52
50	4.39	20.7	0.19	15.4	5.77
75	4.44	21.4	0.21	16.1	5.47
100	4.49	20.8	0.22	16.2	5.31

2 混合料性能研究

OGFC-13 钢渣沥青混合料作为路面结构层的一种,将会承受大气、日照等自然环境及车辆轴载的综合作用,因此 OGFC-13 钢渣沥青路面须具有较好的高温抗车辙、低温抗开裂、抗滑性能及抗水毁能力等。该文通过体积法评价钢渣按照 0%、25%、50%、75%、100%的比例掺入沥青混合料中的性能差异。

2.1 动弹性模量

沥青路面是一种柔性结构层,其力学特性会随着外界温度及车辆轴载的不同而发生改变。在 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》中增加了动态模量设计参数,表明中国沥青路面设计方法向着动态设计理念进行转变。该文选用 UTM-30 沥青混合料多功能试验机对动态模量展开研究。温度会对混合料动态模量测定结果产生较大影响,选取试验温度分别为 10、25、40℃。研究的 OGFC-13 钢渣混凝土是应用在城镇道路上,行车速度一般不超过 60 km/h,相当于试验加载频率为 10 Hz。不同温度、不同钢渣掺量的钢渣混合料在加载频率为 10 Hz 时动弹性模量及相位角试验结果分别见图 1、2。

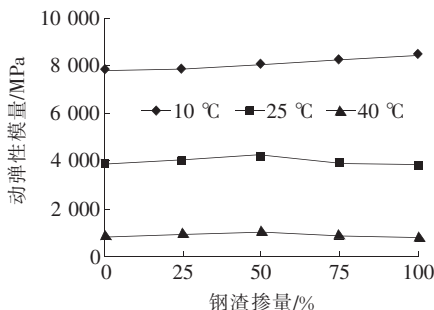


图 1 动弹性模量试验结果

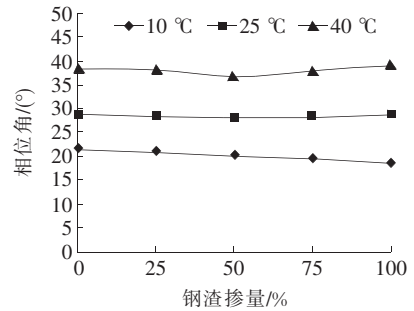


图 2 相位角试验结果

由图 1、2 可以得出:钢渣掺量相同时,钢渣混合料的动弹性模量随温度的升高逐渐降低,相位角逐渐增大,这主要是因为沥青混合料是一种黏弹性材料,对温度较为敏感,沥青黏度随温度升高而逐渐下降,混合料受外力作用的滞后现象增强,相位角随之变大,同时混合料柔性增加,动态模量随之变小,这也是夏季炎热环境下路面形成车辙的原因;当试验温度为 25、40℃时,弹性模量随钢渣掺量的增大先增大后减小,掺量为 50%时均达到峰值,这主要是因为当钢渣掺量小于 50%时,钢渣的掺入能够改善矿料之间的嵌挤效果,随着掺量的增加动弹性模量随之增大,当钢渣掺量大于 50%时,OGFC-13 钢渣混合料最佳油石比也随之增大,沥青含量的增加会降低混合料的动弹性模量。

2.2 高温稳定性

夏季炎热环境下,沥青路面在车辆轴载的作用下极易出现车辙病害。评价沥青路面高温抗车辙能力的方法有多种,主要包括:圆柱体单轴静载、车辙试验、重复试验、三轴静载等。该文选用车辙试验评价不同钢渣掺量下混合料的高温抗车辙能力,不同钢渣掺量时 OGFC-13 混合料动稳定度试验结果见图 3。

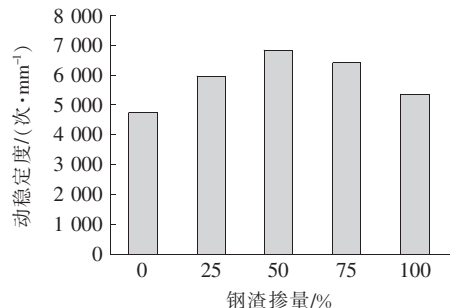


图 3 动稳定度试验结果

由图 3 可以得出:不同钢渣掺量的混合料动稳定度均满足不低于 3 500 次/mm 的规范要求,且随钢渣掺量的增加混合料动稳定度先升高后降低,当掺量为 50%时达到峰值 6 832 次/mm,这主要是因为钢渣棱

角性较好,表面粗糙,且与沥青黏附性较强,沥青与钢渣混合后具有较大的黏聚力,能够改善混合料的高温抗车辙能力,当掺量大于50%时,沥青用量也随之增大,会降低混合料高温稳定性;当钢渣掺量大于75%时,钢渣沥青混合料较难压实,同时钢渣掺量过高会导致最佳油石比增大,钢渣内部的孔隙吸附沥青量增大,高温碾压时混合料更容易产生车辙。

2.3 低温抗裂性

北方季节性冰冻区,当沥青路面内部产生的温缩应力大于混合料的极限容许拉应力时,沥青路面会形成裂缝病害,在雨水及车辆轴载的共同作用下这些病害会进一步恶化,最终形成龟裂、坑槽等严重病害。评价沥青混合料低温抗开裂性能的方法有多种,主要包括:低温弯曲试验、直接拉伸试验、间接拉伸试验、应力松弛试验等。该文选用低温小梁弯曲试验评价不同钢渣掺量下混合料的低温抗开裂能力,不同钢渣掺量时OGFC-13混合料抗弯拉强度及弯曲破坏应变试验结果分别见图4、5。

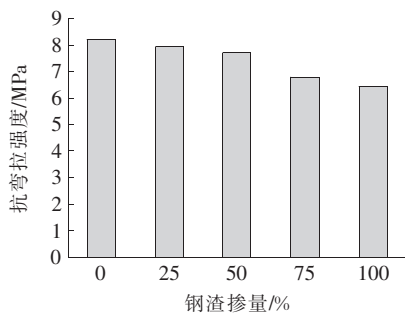


图4 弯拉强度试验结果

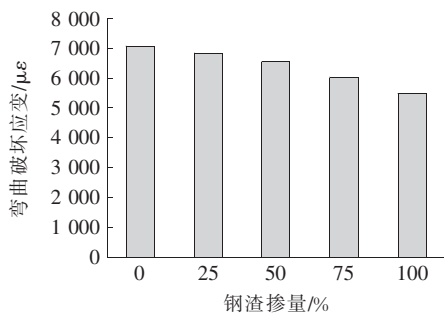


图5 弯曲破坏应变试验结果

由图4、5可以得出:随着钢渣掺量的增大,混合料抗弯拉强度、弯曲破坏应变均逐渐降低,当掺量为100%时,混合料弯曲破坏应变降到最低2748 $\mu\epsilon$,不能满足规范不低于2800 $\mu\epsilon$ 的要求,这主要是因为虽然随着钢渣掺量的增大,混合料最佳油石比也随之增加,但多数沥青会被钢渣的开口空隙吸收,矿料之间的

沥青膜降低,同时钢渣中存在部分粉尘及杂质,低温环境下小梁试件容易断裂,降低混合料的整体强度。

2.4 抗滑性能

良好的路面抗滑能力是行车安全的重要保障,因此该文对各钢渣掺量下的OGFC-13混合料抗滑能力进行研究。选用摆式摩擦仪对不同钢渣掺量的混合料进行抗滑性能试验,试验温度为20℃,试验结果见图6。

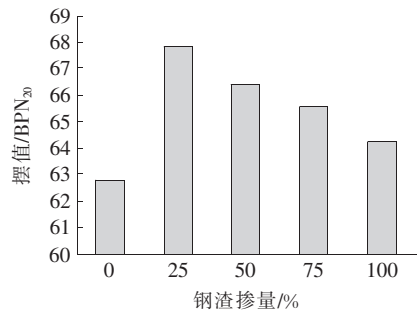


图6 摆值试验结果

由图6可以得出:随着钢渣掺量的增大,混合料抗滑性能先升高后降低,当掺量为25%时达到峰值67.8 BPN,这主要是因为钢渣是一种棱角性较好的材料,随着掺量的增加,混合料表面纹理性得到改善,摩擦系数增强;但当钢渣掺量超过25%时,摆值会逐渐降低,这主要因为钢渣是一种多孔材料,虽然棱角性较好,但呈现近立方体形状,会降低表面凸起的尖锐程度,影响路面的抗滑能力,同时钢渣掺量的增加,最佳油石比也随之增大,更多的沥青填充钢渣孔隙,导致沥青路面表面粗糙程度降低,从而影响沥青路面的抗滑能力。

2.5 水稳定性

由于OGFC-13沥青混合料空隙较大,雨水需从其内部孔隙通道排出路面,会承受严重的水侵蚀破坏,因此须对OGFC-13钢渣混凝土路面的抗水毁能力进行评价。该文选用冻融劈裂及浸水马歇尔试验评价不同钢渣掺量时混合料的抗水毁能力,试验结果分别见图7、8。

由图7、8可以得出:随着钢渣掺量的增加,混合料浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比试验结果均先升高后降低,掺量为50%时均达到峰值,且掺量为100%的试验结果均大于未掺钢渣混合料,表明钢渣的掺入能够有效地改善混合料的抗水毁能力,这主要因为钢渣与沥青具有较好的黏附性,且钢渣表面孔隙较多,能够有效地吸附沥青,改善矿料之间的黏结能力。

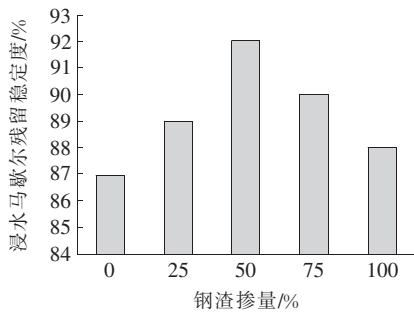


图 7 浸水马歇尔残留稳定度试验结果

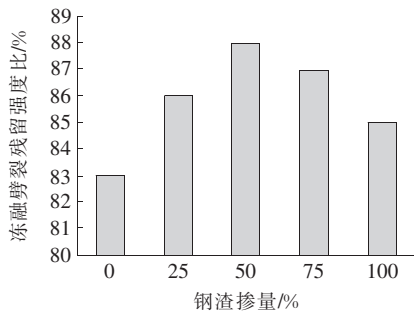


图 8 冻融劈裂残留强度比试验结果

3 结论

选用 OGFC-13 沥青混合料,将钢渣分别以 0%、25%、50%、75%、100% 的掺量等体积替换混合料中的粗集料,并对不同钢渣掺量的沥青混合料进行相关性研究,得出以下结论:

(1) 钢渣掺量相同时,钢渣混合料的动弹性模量随温度的升高逐渐降低,相位角逐渐增大;当试验温度为 25、40℃ 时,弹性模量试验结果随钢渣掺量的增大先增大后减小,掺量为 50% 时均达到峰值。

(2) 随钢渣掺量的增加混合料动稳定度先升高后降低,当掺量为 50% 时达到峰值 6 824 次/mm;随着钢渣掺量的增加,混合料浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比试验结果均先升高后降低,掺量为 50% 时均达到峰值;表明钢渣掺量为 50% 时,混合料的高温抗车辙、抗水毁能力改善效果最优。

(3) 随着钢渣掺量的增大,混合料抗弯拉强度、弯曲破坏应变均逐渐降低,表明钢渣的掺入会降低混合料的低温抗开裂能力,但降低幅度不大;随着钢渣掺量的增大,混合料抗滑性能先升高后降低,当掺量为 25% 时摆值达到峰值 67.8 BPN。

参考文献:

- [1] 仇冬冬,顾文飞,郭晓潞. 钢渣透水沥青路面的设计与应用研究[J]. 粉煤灰,2016(6).
- [2] 陈丰,吴少鹏,陈美祝,等. 钢渣沥青混凝土的制备与应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2010(9).
- [3] 张朝晖,廖杰龙,巨建涛,等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报,2013(7).
- [4] Aziz M M A, Hainin M R, Yaacob H, et al. Characterisation and Utilisation of Steel Slag for the Construction of Roads and Highways[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S6): 255-259.
- [5] 沈佳. 基于 APA 的钢渣沥青混凝土性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016(12).
- [6] 余四新,徐飞萍,刘甲荣,等. 基于新版沥青路面设计规范的路面结构设计分析[J]. 中外公路,2019(2).
- [7] Wang G, Wang Y, Gao Z. Use of Steel Slag as a Granular Material: Volume Expansion Prediction and Usability Criteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184(1-3): 555-560.
- [8] 张春刚,吴少鹏,昌凯. 钢渣沥青混凝土中重金属离子浸出试验研究[J]. 建材世界,2012(6).
- [9] 王鹤迪. 钢渣沥青混凝土路面室内试验研究[D]. 沈阳建筑大学硕士学位论文,2016.
- [10] 李超,陈宗武,谢君,等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报,2017(3).
- [11] 杨苗苗,李建华. 钢渣在 OGFC-13 透水沥青混合料中的应用研究[J]. 粉煤灰,2016(5).
- [12] 郭荣鑫,王川,牛治亮,等. 水侵蚀对钢渣沥青混合料动态模量影响研究[J]. 硅酸盐通报,2018(1).
- [13] 张军. SBS 改性沥青混合料动态模量粘弹性行为研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017(8).
- [14] 王维平. 沥青混合料动态模量及其变化规律研究[J]. 中外公路,2017(5).
- [15] 高晓伟,颜薇,宋琿,等. 温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J]. 中外公路,2019(1).
- [16] 赵小彦. 不同转炉钢渣材料性能及沥青混凝土高温稳定性研究[J]. 公路,2019(2).
- [17] 薛爱新,王洁光,王海军,等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路,2019(3).
- [18] 杨瑞华,许志鸿,李宇峙. 沥青混合料水稳定性评价方法研究[J]. 同济大学学报,2007(11).
- [19] 沈凡,庞若楠,韦国苏,等. 掺钢渣再生沥青混凝土的制备及路用性能研究[J]. 中外公路,2020(3).
- [20] 阮有力,吕正龙. 贵州省 Superpave 沥青路面性能验证及压实度指标适用性分析研究[J]. 中外公路,2019(4).