

垃圾焚烧炉渣粉替代矿粉对沥青混合料性能的影响

孙 瑜, 李立寒

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 探讨了生活垃圾焚烧(MSWI)炉渣粉料(BAP)100% (质量分数)替代矿粉配制沥青混合料的可行性及其对沥青混合料性能的影响. 进行了炉渣粉沥青混合料的配合比设计, 分析了炉渣粉料对各项马歇尔指标以及沥青用量的影响; 评价了炉渣粉料对沥青混合料路用性能的影响. 结果表明: 炉渣粉料的加入会使设计沥青用量增加, 沥青混合料的马歇尔稳定度有所提高; 炉渣粉料的表面形貌粗糙多孔, 提高了沥青混合料的高温稳定性; 炉渣粉料替代矿粉后, 设计沥青用量的增加和混合料内部嵌挤结构的增强可以改善沥青混合料的低温抗裂性能; 炉渣粉料中的 SiO_2 和金属氧化物会导致沥青混合料的水稳定性有略微的降低; 沥青对炉渣粉料的浸润更加良好, 黏附状况更加理想.

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 炉渣粉料; 矿粉; 路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Effect of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Powder on Properties of Asphalt Mixture

SUN Yu, LI Lihan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash powder (BAP) was used to replace (100% by mass) natural limestone powder in asphalt mixture, and its feasibility and effect on properties were discussed. Based on the designing of asphalt mixture proportion, the effect of BAP on design asphalt content and Marshall index was also studied. Pavement performance of asphalt mixture with BAP was investigated by room testing. The results show that the design asphalt content and the Marshall stability will increase because of the use of BAP. The high temperature stability of asphalt mixture with BAP increases benefitting from its rough and porous surface. The increasing of asphalt content and

extruding structure can improve the low temperature crack resistance of asphalt mixture with BAP. Rather, the water stability decreases a little because BAP contains some SiO_2 and metal oxides, but the infiltration and adhesion between asphalt and BAP is better.

Key words: road engineering; asphalt mixture; municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash powder (BAP); limestone powder; pavement performance

目前,许多国家把焚烧作为城市生活垃圾处理的首选方案,焚烧过程中产生的炉渣属于一般固体废弃物^[1],经过一定的分选处理后可以资源化再利用. 根据国内外现有的研究,炉渣集料可以作为粒料层砾石的替代材料应用于道路的基层和底基层^[2]. 当控制炉渣集料的掺量在合适范围内时,炉渣粉沥青混合料可以表现出良好的性能^[3-5]. 同时,国内外学者对炉渣集料沥青混合料的配合比设计和路用性能也进行了初步研究,表明炉渣集料的加入会增加设计沥青的用量^[6]. 若炉渣集料的掺量适当,炉渣沥青混合料的低温抗裂性能和抗水损坏性能都与普通沥青混合料相当,甚至表现出更优越的性能^[7-8]. 对于高温抗变形能力,不同学者利用不同粒径的炉渣集料得到了不同的性能结果,因此还没有一致的结论^[9-12].

相比之下,国内外对生活垃圾焚烧(MSWI)炉渣粉料(BAP)的研究则非常少见. 炉渣粉料是焚烧炉渣经过破碎、筛分、水洗、沉淀等处理过程而得到的性质稳定、粒径分布均匀,以及可以满足资源化利用技术要求的产物^[13]. 根据现有研究,经过处理后的炉渣粉料呈深灰色并散落成粉状,与天然矿粉极为相似,可以考虑替代矿粉应用于沥青混合料中. 本文以 SMA-13 和 AC-20 炉渣粉沥青混合料为研究对象,通过配合比设计及路用性能试验对炉渣粉沥青

收稿日期: 2017-03-15

第一作者: 孙 瑜(1989—),女,博士生,主要研究方向为道路工程材料. E-mail: 1210698@tongji.edu.cn

通讯作者: 李立寒(1957—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为道路工程材料. E-mail: lhli@tongji.edu.cn

混合料进行评价,并与常规沥青混合料进行对比,为炉渣粉料在沥青混合料中的应用提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

SMA-13 混合料采用的是玄武岩集料、韩国 SK 公司生产的 I-D 型 SBS 改性沥青和海川聚酯王(浙威)聚酯纤维;AC-20 混合料采用的是石灰岩集料和中海 70 号基质沥青;炉渣粉料为杭州绿能环保发电有限公司生活垃圾焚烧厂产品。集料与沥青的技术指标如表 1 和表 2 所示。石灰岩矿粉与炉渣粉料的基本技术指标如表 3 所示,粒度分布如图 1 所示。

由表 3 中填料的基本物理性能指标对比可知,炉渣粉料与石灰岩矿粉的密度很接近,而比表面积更大、亲水系数更小、pH 更高,这些特性都有利于增强炉渣粉料与沥青之间的黏结作用,适合作为沥青混合料的填料。结合表 3 中粒度分析指标与图 3 粒度分布图可知,炉渣粉料与石灰岩矿粉的 $d(0.1)$ 和 $d(0.9)$ 都十分接近,而炉渣粉料的中位径 $d(0.5)$ 和

明显更小,体积平均粒径 $D[4, 3]$ 却更大,说明炉渣粉料整体上比石灰岩矿粉的粒径分布更分散,粒径相对较粗,而石灰岩矿粉的粒径分布非常集中,最频粒径的含量也更高。

表 1 集料的技术指标

Tab.1 Properties of aggregates

集料类型	粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%	压碎值/%
玄武岩集料	0~3	2.863			
	3~5	3.009	2.806	2.41	21
	5~10	2.998	2.815	2.17	22
	10~15	2.985	2.841	1.70	22
石灰岩集料	0~5	2.708			
	5~10	2.825	2.728	1.26	
	10~20	2.739	2.707	0.44	

表 2 沥青的技术指标

Tab.2 Properties of asphalt

沥青类型	延度/cm	25 °C 针入度/(0.1 mm)	软化点/°C
70 号基质沥青	>100.00(10°C)	72.6	47.3
SBS 改性沥青	77.95(5°C)	42.1	79.1

表 3 石灰岩矿粉和炉渣粉料的技术指标

Tab.3 Properties of limestone powder and BAP

填料类型	粒度分析指标/ μm				比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	表观相对密度	亲水系数	pH 值
	$d(0.1)$	$d(0.5)$	$d(0.9)$	$D[4, 3]$				
石灰岩矿粉	1.964	20.170	60.168	26.268	1.09	2.731	0.79	9
炉渣粉料	2.015	12.661	59.995	31.071	1.19	2.750	0.76	11

注: $d(0.1)$ 指累计粒度分布百分数达到 10%时所对应的粒径,它的物理意义是粒径小于它的颗粒占 10%; $d(0.5)$ 是中位径,指累计粒度分布百分数达到 50%时所对应的粒径,它的物理意义是粒径小于它的颗粒占 50%,大于它的颗粒也占 50%; $d(0.9)$ 指累计粒度分布百分数达到 90%时所对应的粒径,它的物理意义是粒径小于它的颗粒占 90%; $D[4, 3]$ 是体积或质量动量平均径。

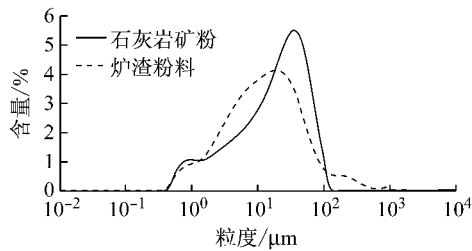


图 1 粒度分布

Fig.1 Particle size distribution

将石灰岩矿粉与炉渣粉料进行充分研磨并烘干后,采用德国 BRURER AXS 公司生产的型号为

SRS 3400 * 的 X 射线荧光光谱仪(XRF)测试其化学成分,测试结果如表 4 所示.该试验可检测的元素范围为 O8~U92、含量范围为 0.001%~100%,试验实际上测定的是元素的含量,但是测试结果以元素相应氧化物的形式表示.由表 4 可知,石灰岩矿粉中含有 Ca、Si、Mg、Al、Fe 等元素的氧化物和盐,其中含量最多的是 Ca 元素,这也验证了它的主要成分为 CaCO_3 ;炉渣粉料的组成复杂,元素种类繁多,主要含有 Ca、Si、Al、Fe、Mg、S、P 等元素的氧化物和盐,其中含量最多的是 Ca、Si 元素。

表 4 石灰岩矿粉和炉渣粉料的化学成分

Tab.4 Chemical component of limestone powder and BAP

填料类型	w_{F}	$w_{\text{Na}_2\text{O}}$	w_{MgO}	$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	w_{SiO_2}	$w_{\text{P}_2\text{O}_5}$	w_{SO_3}	w_{Cl}	$w_{\text{K}_2\text{O}}$	w_{CaO}	w_{TiO_2}
石灰岩矿粉	—	0.09	6.16	2.18	7.88	0.05	0.02	—	0.15	60.3	0.14
炉渣粉料	0.45	0.90	4.20	8.28	27.1	3.73	4.03	1.37	1.23	33.7	1.59
填料类型	$w_{\text{V}_2\text{O}_5}$	$w_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$	w_{MnO}	$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	w_{NiO}	w_{CuO}	w_{ZnO}	$w_{\text{S}_2\text{O}}$	w_{ZrO_2}	w_{Pb}	w_{Pb}
石灰岩矿粉	—	0.01	0.08	1.23	0.01	0.01	—	0.02	—	0.06	—
炉渣粉料	—	0.14	0.16	5.59	0.02	0.24	0.61	0.05	—	0.07	0.09

采用美国 FEI 公司生产的型号为 Quanta200 的

场发射扫描电子显微镜分别对石灰岩矿粉和炉渣粉

料在真空环境下的表面形貌进行分析,结果如图 2 所示.从图 2 可以看出石灰岩矿粉和炉渣粉料的颗粒分布形态以及微观形貌,石灰岩矿粉和炉渣粉料的颗粒大小、形状、表面光滑程度以及颗粒的聚集状态都是不同的.石灰岩矿粉的颗粒分布相对均匀而平整,颗粒的轮廓清晰,多角形颗粒较多,且带有明显的坚硬棱角.这是由于石灰岩矿粉是由石灰岩石料粉碎磨细得到的,其颗粒大小不等,小颗粒略多且分布集中,这与表 3 得到的粒度分析结果一致.从高倍放大的图像可以看出,石灰岩矿粉的颗粒表面光洁、平整,而且很致密,几乎不存在孔隙.相比之下,炉渣粉料的颗粒分布大小不一,外形各异,有球状、针状、片状和絮状等各种形状,它们像棉花一样成簇聚集在一起,看上去厚实而蓬松,颗粒的表面要么是

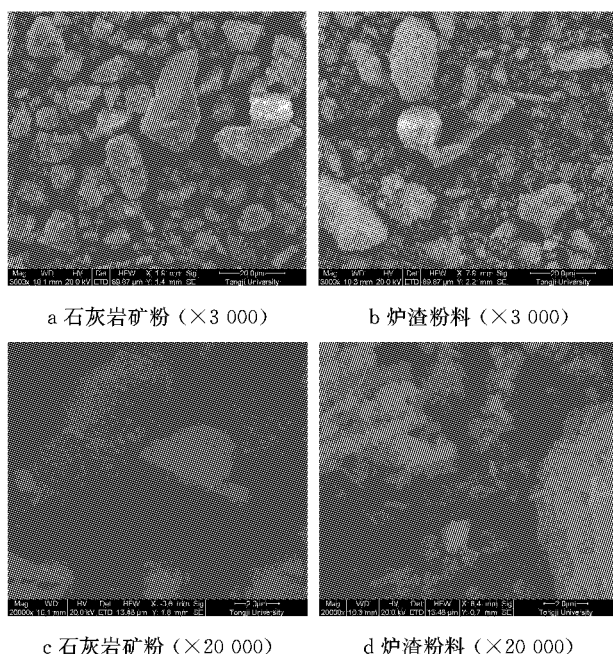


图 2 石灰岩矿粉与炉渣粉料在不同放大倍数下的扫描电镜图像

Fig.2 SEM images of limestone powder and BAP

像鱼鳞一样形成多片的层次,要么是充满细小的孔隙和通道,这与表 3 中炉渣粉料比表面积更大的结论一致.

1.2 沥青混合料的配合比设计

SMA-13 和 AC-20 混合料的设计级配曲线如图 3 所示,试验分别制备常规沥青混合料和炉渣粉沥青混合料,其中炉渣粉料按照质量分数 100% 替代矿粉.

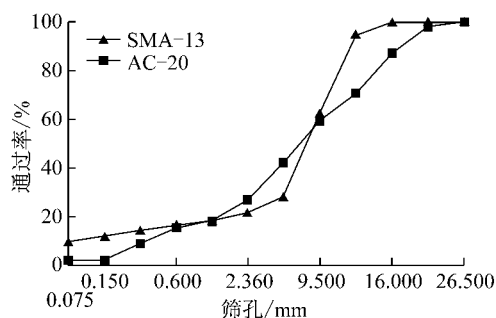


图 3 沥青混合料的级配曲线

Fig.3 Grading curve of mixture

采用马歇尔试验方法^[14]分别对 SMA-13 和 AC-20 进行配合比设计,混合料的目标空隙率均为 4% (体积分数),试验结果如表 5 所示.由表 5 可知, SMA-13 和 AC-20 炉渣粉沥青混合料均能满足规范对马歇尔试验各项指标的要求.对于设计沥青用量,炉渣粉料 SMA-13 比常规 SMA-13 明显增多,而炉渣粉料 AC-20 却与常规 AC-20 相差不大,原因是 SMA-13 的配合比设计中矿粉的用量较大,所以当炉渣粉料完全替代矿粉时,它能够吸附较多的沥青.2 种类型的炉渣粉沥青混合料的矿料间隙率和沥青饱和度都高于常规沥青混合料.炉渣粉沥青混合料的马歇尔稳定度普遍高于常规沥青混合料,而流值或接近、或偏小,说明炉渣粉沥青混合料的强度较好,抵抗变形能力更强.

表 5 马歇尔试验结果

Tab.5 Results of Marshall test

混合料类型	沥青用量/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
SMA-13	石灰岩矿粉	6.50	2.480	17.7	76.7	10.6
	炉渣粉料	7.50	2.440	20.0	79.9	13.2
规范要求 ^[15]			≥17.0	75.0~85.0	≥6.0	
AC-20	石灰岩矿粉	4.10	2.457	13.1	64.5	8.8
	炉渣粉料	4.13	2.473	15.7	74.2	12.8
规范要求 ^[15]			≥13.0	65.0~75.0	≥8.0	1.50~4.00

2 炉渣粉料对沥青混合料性能的影响

2.1 高温稳定性

采用车辙试验的动稳定度指标^[15]评价炉渣粉

沥青混合料的高温稳定性,试验结果如图 4 所示.由图 4 可见,2 种类型的炉渣粉沥青混合料的动稳定度不仅能够满足相应规范的技术要求(SMA-13 混合料不小于 3 000 次·min⁻¹, AC-20 混合料不小于

1 000 次·min⁻¹),甚至还比常规沥青混合料更高。其中,SMA-13 炉渣粉沥青混合料的动稳定度提高了 16.3%,AC-20 炉渣粉沥青混合料的动稳定度提高了 52.9%,说明当炉渣粉料替代矿粉后,即使沥青混合料中的沥青用量增加,混合料的高温稳定性也能得到很大程度的提高,并且 AC-20 混合料要比 SMA-13 混合料表现更加敏感。

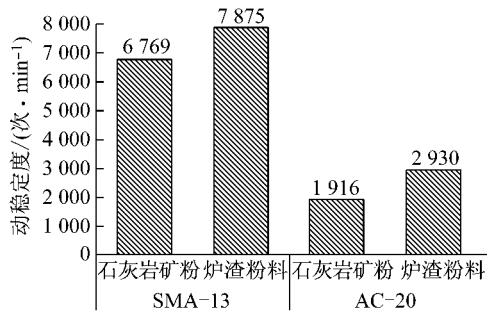


图 4 沥青混合料的动稳定度

Fig. 4 Dynamic stability of asphalt mixtures

2.2 水稳定性

采用冻融劈裂强度比^[14]评价炉渣粉沥青混合料的水稳定性,试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,2 种类型的炉渣粉沥青混合料的冻融劈裂强度比均可以满足相应规范的要求(SMA-13 混合料不小于 80%,AC-20 混合料不小于 75%),但较常规沥青混合料有所下降,下降的幅度并不大。其中 SMA-13 炉渣粉混合料的冻融劈裂强度比下降了 0.79%,AC-20 炉渣粉混合料的冻融劈裂强度比下降了 2.6%,说明当炉渣粉料替代矿粉后,并不会严重影响沥青混合料的水稳定性,但 AC-20 混合料仍然比 SMA-13 混合料表现敏感。

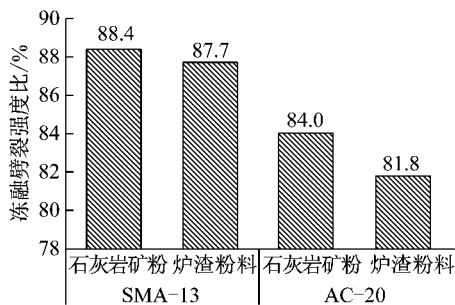


图 5 沥青混合料的冻融劈裂强度比

Fig. 5 Tensile strength ratio of asphalt mixtures

2.3 低温抗裂性

采用低温弯曲试验^[14]评价炉渣粉沥青混合料的低温抗裂性能,试验温度为-10℃,试件为 30 mm×35 mm×250 mm 的小梁,试验结果如表 6 所示。由

表 6 可知,2 种类型的炉渣粉沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变均大于常规沥青混合料,并且都满足规范对破坏应变的技术要求(冬寒区,SMA-13 混合料不小于 2 800 με,AC-20 混合料不小于 2 300 με)。其中,SMA-13 混合料的破坏应变提高了 25.2%,AC-20 混合料的破坏应变提高了 82.7%。试验结果说明,炉渣粉料替代矿粉后,大幅度增强了混合料在低温下的强度和抗变形能力。对于破坏时的弯曲劲度模量,炉渣粉料 SMA-13 与矿粉 SMA-13 相差不大,这是由于混合料内部孔隙发达,应力松弛能力略强,温度应力有所减小,而且混合料的设计沥青用量增加,可以与混合料级配上的缺陷互相抵消,使得低温性能得以改善。对于 AC-20,炉渣粉料的加入增强了混合料的嵌挤结构,对低温性能的改善影响较显著。总体来讲,炉渣粉料完全替代矿粉后,可以改善沥青混合料的低温抗裂性能,并且 AC-20 混合料比 SMA-13 混合料表现敏感得多。

表 6 小梁低温弯曲试验结果

Tab. 6 Results of bending beam test

混合料类型	抗弯拉强度/ MPa	最大弯拉应变/ με	破坏劲度模量/ MPa	
SMA-13	石灰岩矿粉	12.5	6 225	2 008
	炉渣粉料	16.1	7 795	2 065
AC-20	石灰岩矿粉	11.0	2 428	4 387
	炉渣粉料	12.5	4 436	2 817

3 炉渣粉料影响沥青混合料性能的机理分析

3.1 炉渣粉料的化学成分和几何特性

沥青混合料的水稳定性通常与沥青和集料的黏附性有关,而黏附性又在很大程度上取决于集料的化学组成。通过对表 4 中石灰岩矿粉和炉渣粉料的化学成分分析可知,与主要成分为 CaCO₃ 的碱性石灰岩矿粉相比,炉渣粉料中的 SiO₂ 和金属氧化物的含量较多,会在一定程度上影响它与沥青之间的黏附性,所以在进行冻融劈裂试验时,沥青就比较容易剥落,造成了第 2.2 节中炉渣粉沥青混合料水稳定性略差的试验结果。然而,由于填料在沥青混合料中的含量很小,影响程度是有限的,并且由于炉渣粉料的加入使得沥青用量增加,从而增加了沥青膜的厚度,这对沥青混合料的水稳定性是有利的,因此总体上并不会严重降低炉渣粉沥青混合料的水稳定性。

在沥青混合料的组成材料中,矿料性质对沥青混合料高温性能和低温性能的影响是至关重要的。

通过对图 2 中石灰岩矿粉和炉渣粉料的颗粒几何特性的分析可知,炉渣粉料比矿粉的表面更加粗糙,能够增大沥青混合料的内摩阻角,可以增强混合料内部的嵌挤结构.同时,多片和絮状的结构增大了炉渣粉料的比表面积,便于沥青的黏附,孔隙结构在提高比表面积的同时,也便于沥青的吸附与湿润,并起到微毛细管的作用,增强炉渣粉料颗粒与沥青之间的界面作用力,以上的综合作用有利于增强炉渣粉沥青混合料的高温稳定性和低温抗裂性,得到第 2.1 节和第 2.3 节的试验结果.

3.2 炉渣粉料沥青胶浆的微观界面

为了更加直观地观察填料与沥青之间的黏附特性,分别制备了石灰岩矿粉沥青胶浆和炉渣粉料沥青胶浆,并用场发射扫描电子显微镜进行观察(见图 6).从图 6 可以看出,2 种填料沥青之间的浸润状态即黏附形态大不相同,其中图 6a 中石灰岩矿粉与沥

青浸润时的交界界面有些起伏不平的褶皱,沥青在矿粉的周围没有铺展开来,并在黏附时留有空隙,这说明两者浸润并不平滑;相比之下,图 6b 中沥青在炉渣粉料颗粒周围铺展开来,少有褶皱,沥青也较好地填充了炉渣粉料表面的孔隙,两者界面浸润良好,很难分辨出清晰的界限.实际上,石灰岩矿粉和炉渣粉料各自的物理化学性质决定了它们与沥青交互作用的界面形貌的差异,炉渣粉料的表面更加粗糙、比表面积更大,使得它与沥青之间的接触面积增大,能够提高两者的黏结作用,同时炉渣粉料表面的孔隙发达、碱性强,吸附作用和毛细作用能使沥青渗入到孔隙和裂缝中,提高了结构沥青的含量,增强了黏附作用.因此,当炉渣粉料作为沥青混合料的填料时,能够发挥自身的优势,在整体上使得沥青混合料的路用性能得到了一定程度的改善.

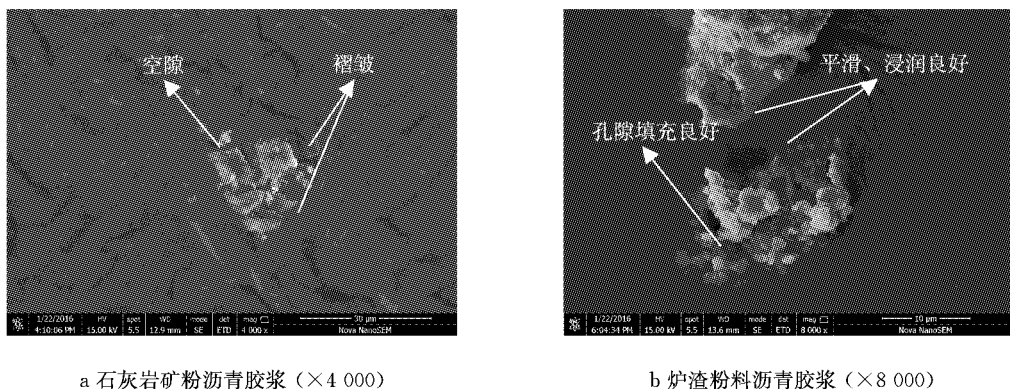


图 6 填料与沥青的界面形貌

Fig. 6 Interfacial morphology between filler and asphalt

4 结语

炉渣粉料 100%(质量分数)替代矿粉后,SMA-13 混合料和 AC-20 混合料的沥青用量均增加,且 SMA-13 混合料沥青用量的增加大于 AC-20 混合料,说明炉渣粉料对沥青的吸附能力更强.马歇尔试验结果表明,2 种类型的炉渣粉沥青混合料的马歇尔稳定度普遍高于常规沥青混合料,而流值或接近、或偏小,说明炉渣粉沥青混合料的稳定性更好,抵抗变形的能力更强.由于炉渣粉料的表面形貌更加粗糙、多孔,使得炉渣粉料能够在不同程度上提高沥青混合料的高温稳定性.炉渣粉料替代矿粉后,设计沥青用量的增加和混合料内部嵌挤结构的增强可以改善沥青混合料的低温抗裂性能.炉渣粉料中含有较多的 SiO_2 和金属氧化物,导致混合料的水稳定性有

所下降,但沥青用量的增加又会平衡此不利因素,因此炉渣粉沥青混合料的水稳定性不会严重降低.通过对炉渣粉料沥青胶浆微观界面的观察发现,沥青对炉渣粉料的浸润更加良好,黏附状况更加理想.

综合分析,炉渣粉沥青混合料的各项马歇尔指标和路用性能指标都满足相应规范的要求,并且在路用性能方面,AC-20 混合料表现均比 SMA-13 混合料更敏感,说明炉渣粉料替代矿粉配制沥青混合料在技术上是可行的,有利于固废再利用.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 危险废物鉴别标准通则: GB 5085. 7—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China. Identification standards for hazardous wastes general specifications: GB 5085. 7—2007 [S]. Beijing: China

- Environmental Science Press, 2007.
- [2] 刘栋. 水泥稳定垃圾焚烧炉渣碎石混合料设计与性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
LIU Dong. Research on design and performance of cement stabilized municipal solid waste incinerator bottom ash and crushed stone[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [3] MARIA I, ANGER L S, VAZQUEZ R E, *et al.* Characterisation of bottom ash from municipal solid waste incineration in Catalonia[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, 77(5): 576.
- [4] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 水泥稳定炉渣碎石的强度性能[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(3): 538.
LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Strength performance of cement stabilized aggregate containing bottom ash aggregate (BAA)[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(3): 538.
- [5] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 405.
LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Pavement performance of cement stabilized municipal solid waste incineration bottom ash aggregate and crushed stones[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(3): 405.
- [6] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 炉渣集料对沥青混合料性能影响的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 307.
LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Experimental study on influence of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate on properties of asphalt mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2): 307.
- [7] KSAIBATI K, PLANCHER H. Moisture resistance of bottom-ash asphalt mixes[C]// Transportation Research Board 85th Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2006.
- [8] HASSAN H F. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(2): 91.
- [9] GOH S W, YOU Z P. The dynamic modulus of asphalt mixture with bottom ash aggregates [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2008(178): 1008.
- [10] OGUNRO V O, INYANG H I, Hooper F, *et al.* Gradation control of bottom ash aggregate in superpave bituminous mixes [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(6): 604.
- [11] CHEN J S, CHU P Y, CHANG J E, *et al.* Engineering and environmental characterization of municipal solid waste bottom ash as an aggregate substitute utilized for asphalt concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(6): 432.
- [12] HASSAN M M, KHALID H. Mechanical and environmental characteristics of bituminous mixtures with incinerator bottom ash aggregates [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2010, 11(2): 83.
- [13] 上海寰保渣业处置有限公司. 垃圾焚烧炉渣路面基层材料专用凝固剂应用研究报告[R]. 上海: 上海寰保渣业处置有限公司, 2010.
Shanghai Huanbao Slag Disposal Co., Ltd. Using bottom ash from municipal solid waste incineration as coagulant for road base[R]. Shanghai: Shanghai Huanbao Slag Disposal Co., Ltd., 2010.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.