

生活垃圾焚烧炉渣沥青混合料的耐久性能

刘 栋, 李立寒, 杨 昆

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用马歇尔试验方法设计掺加不同质量、不同粒径范围生活垃圾焚烧炉渣集料(BAA)的炉渣沥青混合料, 分析BAA对马歇尔试验参数及路用性能的影响, 并采用冻融循环劈裂试验、老化试验和疲劳试验研究混合料的耐久性能。研究表明: 随着BAA质量分数增加, AC-20、SMA-13的设计沥青掺量、稳定度及流值提高, 高温稳定性降低, 但水稳定性能与低温抗裂性能的变化规律则不同; BAA替代天然集料的质量分数分别为10%的AC-20和10%~15%的SMA-13经3次冻融循环后, 其劈裂强度、冻融劈裂强度比均提高, 但老化后冻融劈裂强度比降低幅度较高; AC-20中BAA替代天然集料的质量分数为20%、SMA-13中为5%~10%时可降低老化对低温抗裂性能的不利影响, 混合料疲劳寿命较高。综合试验结果, AC-20、SMA-13中BAA替代天然集料的质量分数均宜在10%左右。

关键词: 道路工程; 生活垃圾焚烧炉渣; 沥青混合料; 老化试验; 耐久性能

中图分类号: U416.25

文献标志码: A

Durability of Asphalt Mixture Containing Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Aggregate

LIU Dong, LI Lihan, YANG Kun

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

Abstract: Asphalt mixtures containing different dosages, different particle sizes of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate (BAA) were designed by Marshall test method. The effect of BAA on Marshall test parameters and pavement performance was analyzed. Durability performance of asphalt mixture containing BAA was also investigated by freeze-thaw cycles splitting test, aging test and fatigue test. The results show that as the dosage of BAA in AC-20 and SMA-13 increases, the designed asphalt content, Marshall stability and flow value increases, high-temperature stability

decreases, meanwhile water stability and anti-crack performance at low temperature changes differently. Using BAA instead of 10% (by mass) natural aggregate for AC-20, 10%~15% for SMA-13 can both improve splitting strength after 3 freeze-thaw cycles, tensile strength ratio and its reduction after aging test. When the dosages of BAA in AC-20 and SMA-13 are respectively 20% and 5%~10%, the mixtures have better anti-crack performance at low temperature after aging and longer fatigue life. Based on the test results, the recommended dosages of BAA in AC-20 and SMA-13 are both 10%.

Key words: road engineering; municipal solid waste incineration bottom ash; asphalt mixture; aging test; durability performance

垃圾焚烧炉渣(简称炉渣)是生活垃圾焚烧后的产物,属于一般固体废弃物。炉渣经处理后可作为替代集料或填料用作土木工程材料,简称为炉渣集料(BAA)。国外对BAA在道路工程中的应用研究已有数十年,主要应用于沥青混合料、水泥混凝土、基层及路基工程。在沥青混合料方面, Ogunro等^[1]、Chen等^[2]分别采用美国北卡罗来纳州、中国台湾地区粒径范围0~12.5 mm左右的BAA,依据Superpave方法和马歇尔试验方法设计了炉渣沥青混合料, BAA掺量(质量分数,下同)每增加10%, 沥青掺量分别增加0.60%和0.86%, 且其掺量超过20%后, 混合料的马歇尔试验参数不再满足常规要求。对于炉渣沥青混合料力学与路用性能, Chen等^[2]认为BAA降低了其高温稳定性及抗水损害性能; Hassan^[3]发现0~3 mm BAA掺量小于15%可提高混合料抗水损害能力, 超过20%则将产生不利影响; Hassan等^[4]通过炉渣沥青混合料单轴压缩试验研究认为, 0~10 mm及10~20 mm BAA对其高温稳定性能有利, 推荐BAA掺量最高可达60%;

收稿日期: 2015-01-14

第一作者: 刘 栋(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程结构与材料。E-mail: zbyikun@163.com

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结构与材料。E-mail: lhli@tongji.edu.cn

Goh 等^[5]进行的动态抗压模量试验结果则表明,0~12.5 mm BAA 降低了混合料的动态模量;文献[6]采用上海市某垃圾焚烧厂生产的0~9.5 mm BAA,按照马歇尔试验方法设计了 AC-16 沥青混合料,试验表明 BAA 掺量 10%左右时混合料的高温稳定性、水稳定性较普通混合料有所提高。综上,不同地区、不同粒径或掺量的 BAA 对沥青混合料马歇尔试验参数及路用性能指标的影响可能不同,有必要针对不同地区、不同批次 BAA 开展研究。随着国内生活垃圾焚烧厂增多,近年来炉渣在道路工程中的资源化利用研究也逐渐增多,主要将其替代无机结合料稳定材料中的天然集料^[7]、填筑路基等^[8],但应用于沥青混合料的相关研究较少,国内外对于炉渣沥青混合料在水、温度及荷载作用下长期路用性能的研究报道则更少。

本文采用不同粒径范围、不同掺量的 BAA 替代天然集料,进行 AC-20 和 SMA-13 炉渣沥青混合料的配合比设计,采用室内试验分析 BAA 对混合料长期水稳定性、抗老化性能和疲劳性能等耐久性能的影响,为 BAA 在道路沥青面层中的资源化应用提

供参考。

1 试验原材料与性能测试

BAA:粒径范围为 0~9.50 mm,产自浙江省杭州市某生活垃圾焚烧发电厂,含有烧结熔渣、陶瓷、玻璃、砖石、少量金属及未燃物。陶瓷、玻璃呈扁平状、针片状,主要集中在>4.75 mm 部分,熔渣主要集中在<2.36 mm 部分,扫描电子显微镜得到其表面形貌,见图 1,可见其内部孔隙结构发达。X 射线荧光光谱分析得到的 BAA 化学成分见表 1。BAA 通过 0.075、0.600、2.360、4.750 及 9.500 mm 筛孔的质量分数分别为 9.5%、38.7%、63.0%、83.7% 及 98.3%。筛分除去大于 2.36 mm 部分得到 0~2.36 mm BAA。不同粒径 BAA 基本性能测试结果见表 2。0~2.36、2.36~4.75、4.75~9.50 及 0~9.50 mm BAA 浸出液的 pH 值分别为 11.7、11.4、11.0 及 11.4,可见 BAA 粒径越小碱性越高,这与 CaO 含量较高有关。

表 1 BAA 的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of BAA

w_{SiO_2}	$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	w_{CaO}	$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	w_{MgO}	$w_{\text{P}_2\text{O}_5}$	$w_{\text{Na}_2\text{O}}$	$w_{\text{K}_2\text{O}}$	w_{ZnO}	w_{SO_3}	w_{Cl}
19.40	6.17	39.00	4.27	2.47	5.77	1.69	1.49	0.55	3.02	3.39



图 1 BAA 表面微观形貌

Fig.1 Surface micro topography of BAA

天然集料:AC-20、SMA-13 分别采用石灰岩集料、玄武岩集料,其粒级规格及基本性能测试结果见表 2。由表 2 可见,与天然集料相比,BAA 的强度与密度较低,而吸水率较高。

沥青:AC-20、SMA-13 分别采用中海 70 号沥青、韩国 SK 的 I-D 型 SBS 改性沥青。

纤维:SMA-13 采用聚酯纤维。

2 炉渣沥青混合料配合比设计及性能检验

2.1 配合比设计

将 0~9.50 mm BAA 分别以 0、10%、20%和

表 2 BAA 及天然集料的基本性能

Tab.2 Basic properties of BAA and natural aggregate

集料类型	粒径/ mm	压碎值/ %	表观质量密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/ %
BAA	0~2.36		2.667	
	2.36~4.75	30.0	2.410	7.00
	4.75~9.50	38.7	2.198	7.20
石灰岩 集料	0~5		2.708	
	5~10	18.7	2.825	1.26
	10~20	28.4	2.739	0.44
玄武岩 集料	0~3		2.863	
	3~5	20.8	3.009	2.41
	5~10	21.5	2.998	2.17
	10~15	22.1	2.985	1.70

30%的掺量替代石灰岩集料制备 AC-20 沥青混合料,代号分别为 C-0(对照组)、C-10、C-20、C-30;将 0~2.36 mm BAA 分别以 0、5%、10%和 15%的掺量替代玄武岩集料制备 SMA-13 沥青混合料,代号分别为 M-0(对照组)、M-5、M-10、M-15。通过调整矿料配合比使混合料矿料级配分别在《公路沥青路面施工技术规范》^[9](JTJG F40—2004)(以下简称《规范》)中 AC-20 和 SMA-13 设计级配范围的中值附近,级配曲线见图 2。SMA-13 中纤维用量为 0.3%

(占矿质混合料质量).按照 4%空隙率(体积分数)确定试验沥青混合料的设计沥青掺量,并检验设计沥青掺量下的马歇尔试验参数,试验结果见表 3.由表 3 可见,BAA 提高了混合料的设计沥青掺量、马歇尔稳定度和流值,这与采用上海 BAA 制备的 AC-16 马歇尔试验结果^[6]一致.除 C-30 的矿料间隙率、沥

青饱和度指标略大于规范要求外,其余混合料的各项指标均满足规范要求.总体来看,在试验掺量范围内 0~2.36 mm BAA 对 SMA-13 马歇尔试验参数的影响程度略小于 0~9.50 mm BAA 对 AC-20 的影响.

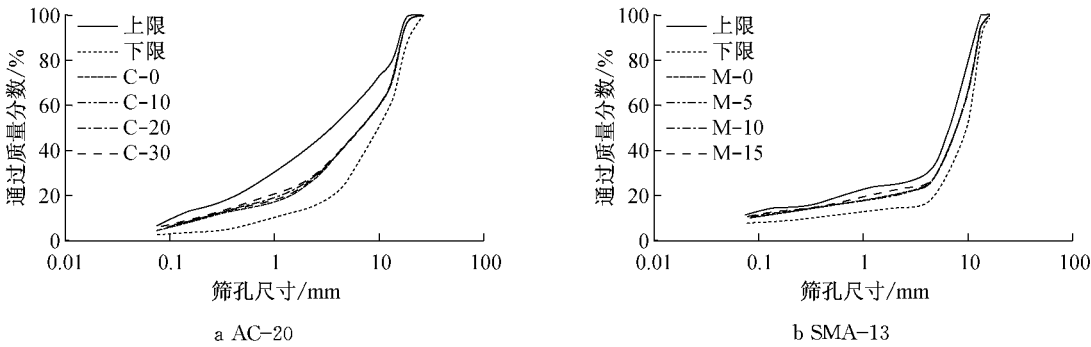


图 2 混合料级配曲线
Fig.2 Grading curve of mixture

表 3 马歇尔试验结果

Tab.3 Marshall test results									
混合料 代号	设计沥青 掺量/%	毛体积相 对密度	矿料间 隙率/%	沥青饱 和度/%	稳定度/ kN	流值/ mm	较对照组的提高幅度/%		
							沥青掺量	稳定度	流值
C-0	4.08	2.465	13.0	68.0	8.6	3.60			
C-10	4.71	2.403	14.1	72.0	8.7	3.70	15.4	1.2	2.8
C-20	5.25	2.354	14.9	74.8	9.4	3.65	28.7	9.3	1.4
C-30	5.87	2.293	16.3	76.3	13.0	4.71	43.9	51.2	30.8
《规范》要求			≥13	65~75	≥8	1.5~4.0			
M-0	6.19	2.478	17.7	76.7	10.6	4.17			
M-5	6.52	2.445	18.2	78.0	10.7	4.02	5.3	0.9	-3.6
M-10	6.66	2.418	18.3	78.1	12.3	4.65	7.6	16.0	11.5
M-15	6.72	2.407	18.1	78.5	14.5	5.00	8.6	36.8	19.9
《规范》要求			≥17	75~85	≥6	2~5			

注:负值提高幅度表示较对照组呈降低趋势,降低幅度为负值的绝对值.

2.2 性能检验

采用表 3 中设计沥青掺量下的各试验混合料,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[10](JTG E20—2011)(以下简称《规程》)中的试验方法检验其路用性能,试验结果见表 4.

由表 4 可见,BAA 的掺入降低了混合料的动稳定度,SMA-13 的降低幅度普遍小于 AC-20.分析原因:BAA 的掺入增加了混合料的沥青掺量,导致其抗高温变形能力降低,其中 0~2.36 mm 的 BAA 在 SMA-13 中主要起到填充作用,对混合料骨架结构影响较小,>2.36 mm 的 BAA 在 AC-20 中提供了部分嵌挤力,荷载作用下 BAA 发生滑移、破碎的可能性高于天然集料,对混合料抗高温变形能力的影响较大.

综合浸水残留稳定度和冻融劈裂强度比指标来

看,SMA-13 的水稳定性能提高,AC-20 则降低.分析原因:0~9.50 mm 的 BAA 中陶瓷、玻璃较多,其表面较熔渣、天然集料光滑,与沥青的黏附性较低;0~2.36 mm 的 BAA 以熔渣为主,其表面粗糙、孔隙结构发达,与沥青的接触面积大于天然集料,与沥青的黏附性较高,受水损害影响较小.

BAA 对 AC-20 和 SMA-13 最大弯拉应变的影响规律不同,其掺量 10%时 AC-20 的最大弯拉应变最大,SMA-13 则最小.分析原因:BAA 掺量增加,混合料的沥青掺量增加、低温劲度减小,其低温抗变形能力呈增加趋势,但 AC-20 中逐渐增加的陶瓷、玻璃等针片状颗粒使混合料中的应力集中点增多,这增加了混合料发生断裂的可能;0~2.36 mm 的 BAA 增大了 SMA-13 的刚度,导致其应力松弛能力低于对照组,而随着 SMA-13 沥青掺量增加,应力松

弛能力则呈增加趋势,低温变形能力提高。

C-20 的冻融劈裂强度比, C-30 的浸水残留稳定度、冻融劈裂强度比及最大弯拉应变均不能满足规范要求, SMA-13 的配合比设计检验指标均能满足规范要求。另外,析漏试验和飞散试验结果表明,炉

渣沥青混合料与普通沥青混合料没有显著区别,且能满足规范要求。上海 BAA 设计的 AC-16 配合比检验结果表明^[6], 0~9.50 mm 的 BAA 掺量在 10% 时可增加动稳定度和冻融劈裂强度比, 此结论与本文试验结果存在差异。

表 4 配合比设计检验结果
Tab.4 Mix design test results

混合料代号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	浸水残留 稳定度/%	冻融劈裂 强度比/%	最大弯拉 应变/10 ⁻⁶	较对照组的降低幅度/%			
					动稳定度	浸水残留 稳定度	冻融劈裂 强度比	最大弯 拉应变
C-0	1 916	92.1	75.3	2 469				
C-10	1 010	81.8	77.7	3 134	47.3	11.2	-3.2	-26.9
C-20	1 208	80.2	67.6	2 407	37.0	12.9	10.2	2.5
C-30	1 101	66.8	58.3	2 200	42.5	27.5	22.6	10.9
《规范》要求	≥1 000	≥80	≥75	≥2 300				
M-0	6 769	92.0	84.0	5 286				
M-5	3 774	95.7	96.3	4 793	44.2	-4.0	-14.6	9.3
M-10	6 503	99.8	87.3	4 469	3.9	-8.5	-3.9	15.5
M-15	6 114	93.1	81.2	6 488	9.7	-1.2	3.3	-22.7
《规范》要求	≥3 000	≥80	≥80	≥2 800				

注:负值的降低幅度表示较对照组呈提高趋势,提高幅度为负值的绝对值。

3 耐久性能试验

3.1 冻融循环劈裂试验

按照《规程》中冻融劈裂试验方法,将炉渣沥青混合料试件进行 3 次冻融循环后测试劈裂强度,试验结果见图 3a。图 3b 中同时列出了 1 次冻融和 3 次冻融循环劈裂试验结果以及 3 次冻融循环劈裂强度比较 1 次的降低幅度(图中负值表示提高,后同)。由图 3 可见,经 1 次冻融循环后试件的劈裂强度均降低,经 3 次冻融循环后大部分试件的劈裂强度进一步降低,但试件 C-10、M-10 及 M-15 的劈裂强度则有所增加,这也造成其 3 次冻融循环劈裂强度比大于 1 次冻融循环劈裂强度比。AC-20 中只有 C-10 试件的 1 次、3 次冻融循环劈裂强度比均能满足规范中大于 75% 的技术要求;而 SMA-13 在试验 BAA 掺量范围内,即使经过 3 次冻融循环,冻融循环劈裂强度比仍能满足大于 80% 的技术要求。与对照组相比, BAA 掺量 ≥10% 时混合料冻融劈裂强度比的降低幅度较小。分析原因:在长时间水环境下 BAA 中活性化学成分自身、及其与沥青之间可能发生一系列的物化反应,新生物质促进了混合料的黏结力,而这种反应需要一定的时间,1 个冻融循环内反应并不明显,而 3 个冻融循环内生成物质较多,对混合料黏结力的提高作用明显。0~2.36 mm BAA 中活性物质含量较高, BAA 掺量较高的 SMA-13 中生成物质较

多,而 0~9.50 mm 的 BAA 活性物质较少,在 AC-20 中的生成物质较少, AC-20 中 BAA 掺量较高时其劈裂强度受 BAA 低强度特性影响较大。

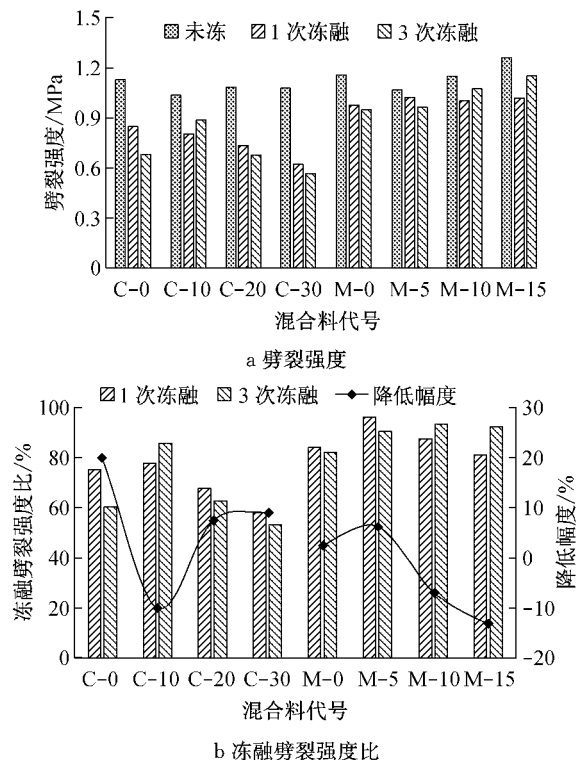


图 3 冻融循环劈裂试验结果

Fig.3 Freeze-thaw cycle splitting test results

3.2 长期老化试验

按照《规程》中沥青混合料加速老化试验方法,

对炉渣沥青混合料试件进行长期老化处理(短期老化+85℃下5d长期老化),然后进行冻融劈裂试验,试验结果见图4,图中同时列出了未老化试件冻融劈裂试验结果.由图4a可见,老化增大了试件的劈裂强度. BAA 掺量对 AC-20、SMA-13 冻融劈裂强度的影响规律不同. 随着 BAA 掺量增加, AC-20 老化试件的冻融劈裂强度先增大后减小, SMA-13 老化试件的冻融劈裂强度则先减小后增大. 由图4b可见, AC-20 中除 C-0 外其余试件老化后冻融循环劈裂强度比均不能满足规范中大于75%的技术要求; SMA-13 中除 M-10 外其余试件均能满足规范中大于80%的技术要求. AC-20、SMA-13 老化后冻融循环劈裂强度比的降低幅度随 BAA 掺量增加均呈上凸抛物线状,且均在10%时降低幅度最高. 分析原因:老化使沥青硬化、黏度增加,混合料的力学强度提高;不同粒径、不同掺量 BAA 因其化学活性物质含量、力学强度等方面的不同导致其对 AC-20、SMA-13 老化作用机理的影响存在差异.

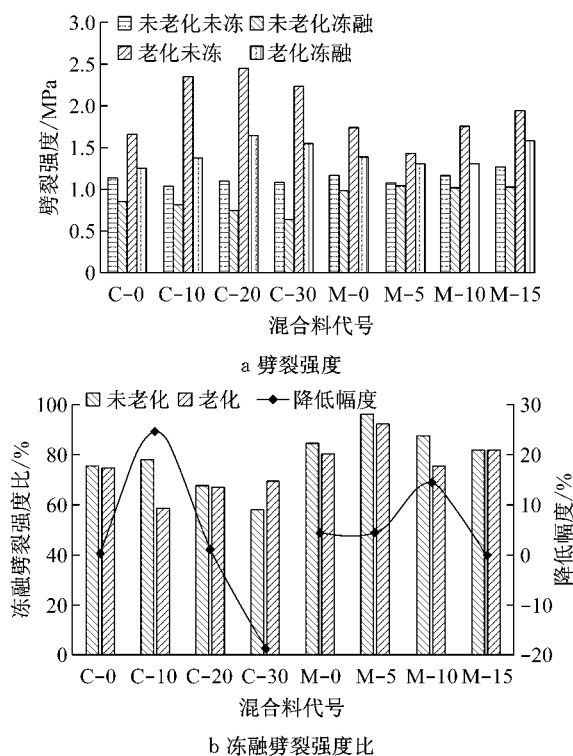


图4 老化冻融劈裂试验结果

Fig.4 Freeze-thaw splitting test results of aging mix

将长期老化后的沥青混合料小梁试件进行低温弯曲试验,计算破坏时的抗弯拉强度 R_B 与最大弯拉应变 ϵ_B ,同时按照文献[11]计算弯曲应变能密度临界值 J ,试验结果见图5.由图5可见, AC-20、SMA-13 的 R_B 、 ϵ_B 及 J 经老化后均降低,这表明老化对于炉渣沥青混合料的低温抗裂性能不利.

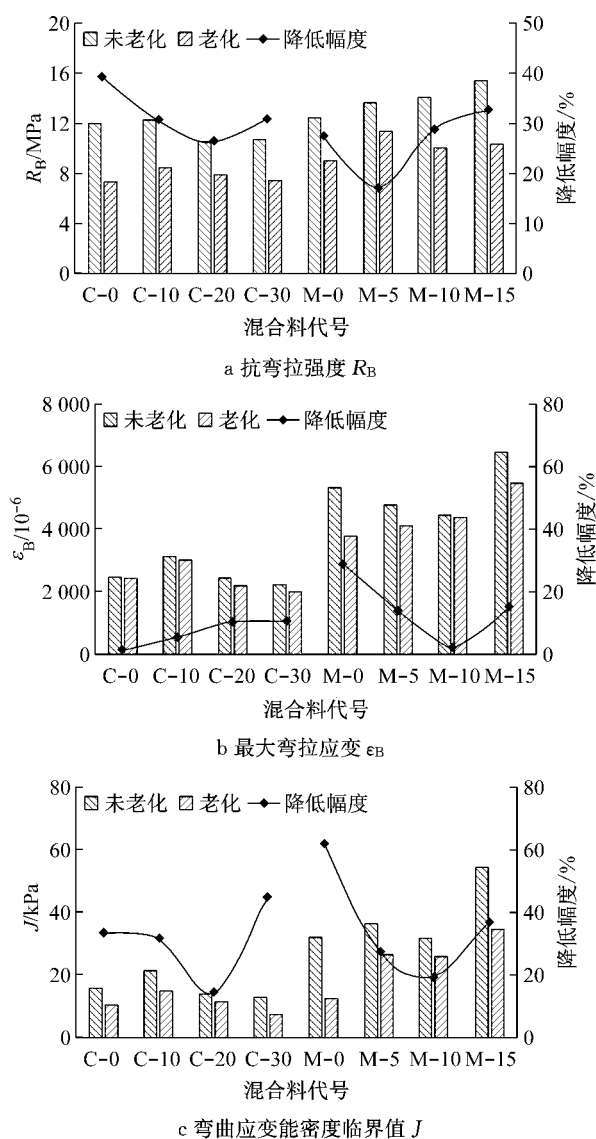


图5 老化低温弯曲试验结果

Fig.5 Bending test results of aging mix

由图5a可见,老化前后 AC-20 中 BAA 掺量10%左右时 R_B 均最大,超过10%后则减小.未老化 SMA-13 的 R_B 随 BAA 掺量的增加而增大,老化 SMA-13 中 BAA 掺量超过5%后 R_B 则减小.2种混合料 R_B 老化后降低幅度随 BAA 掺量增加均呈下凹抛物线状,这表明适量 BAA 可减缓老化对 R_B 的不利影响.由图5b可见, AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在10%、15%左右时 ϵ_B 最大.除老化 C-20、C-30 外其余试件的 ϵ_B 均能满足规范中大于 $2\,300\,\mu\epsilon$ 的技术要求. AC-20、SMA-13 的 ϵ_B 降低幅度的变化规律不同, AC-20 老化后 ϵ_B 的降低幅度随 BAA 掺量增加而增大, SMA-13 则呈下凹抛物线状.由图5c可见,老化前后 AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在10%、15%左右时 J 均最大,此时其低温抗裂性能最佳.老化后 J 的降低幅度均呈先降低后增加的趋

势,AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在 20%、5%~10%左右时可减小老化对其低温抗裂性能的影响.分析原因:老化沥青中的沥青质含量增多,黏度提高,但轻质油分减少,不利于沥青和集料的黏附,导致其黏附强度降低,弯拉应力作用下混合料开裂的可能性增加;碱性高的 BAA 与沥青中高级性物质的连接较天然集料紧密,集料表面的结构沥青性能更好,黏附强度提高,从而可起到减缓沥青老化的作用.

3.3 疲劳试验

疲劳试验采用应力控制的间接拉伸试验方法.旋转压实成型试件尺寸 $\Phi 100\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$,采用 MTS 810 试验机施加连续式正弦波形,加载频率 10 Hz,采用 0.4、0.5、0.6 和 0.7 这 4 个应力比作为试验荷载,试验温度 15℃.疲劳寿命与应力比的关系可采用疲劳方程 $\lg N_f = a - b(\sigma/S)$ 进行回归分析.其中, N_f 为沥青混合料疲劳寿命,次; σ/S 为应力比; a 为回归系数, a 越大表明试件疲劳曲线线位越高,混合料的疲劳性能越好; b 为回归系数, b 越大表明试件疲劳寿命对应力比变化越敏感.

疲劳试验结果见图 6,图中同时列出了试验混合料的疲劳方程.由图 6 可见,随 BAA 掺量增加,AC-20、SMA-13 疲劳方程的回归系数 a 、 b 均呈先增加

后降低的趋势,BAA 掺量分别在 20%、10%时回归参数 a 、 b 均最大,即此掺量下混合料抗疲劳性能较好,但同时此掺量下混合料对应力比的变化更为敏感. M-15 的疲劳寿命在试验应力比下比其他 SMA-13 试件大,且对应力比变化更加不敏感,但并不能认为 M-15 的抗疲劳性能最佳,这是因为本文试验结果均为在较大应力比下得到的,实际路面材料经受的应力比可能更小,依据本文得到的疲劳方程, M-15 的疲劳寿命在小应力比下可能出现较其他试件减小的趋势.其他 BAA 掺量下混合料疲劳方程的回归系数 a 、 b 与对照组没有明显区别,表明 BAA 的掺入并不会显著影响混合料的疲劳性能.前期试验结果^[6]表明,AC-16 混合料中 0~9.50 mm BAA 掺量 20%时抗疲劳性能最佳,其余掺量下混合料的疲劳寿命差别并不明显,这与本文 AC-20 的试验结果相似.

4 结论

(1)炉渣沥青混合料的设计沥青掺量、马歇尔稳定度和流值大于对照组,高温稳定性降低, SMA-13 的水稳定性提高,但 AC-20 的水稳定性降低, AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在 10%、30%时其低温变形能力较高,其中 BAA 掺量分别 $\leq 20\%$ 、 $\leq 15\%$ 时,马歇尔试验参数与路用性能指标均能满足规范要求.

(2)AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在 10%、10%~15%时,3 次冻融较 1 次冻融的劈裂强度、冻融劈裂强度比增大,且均高于对照组沥青混合料.

(3)AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在 $\leq 30\%$ 、 $\leq 10\%$ 时,长期老化后冻融劈裂强度比低于对照组,掺量均在 10%时老化后冻融劈裂强度比的降低幅度最大. BAA 掺量分别在 10%、15%左右时长期老化后低温抗裂性能最佳,掺量分别在 20%、5%~10%时则可最大程度减缓老化对其低温抗裂性能的降低幅度.

(4)AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量分别在 20%、10%时疲劳寿命较高,但对应力比的变化也更加敏感,其他掺量下混合料的抗疲劳性能没有明显差异.

(5)炉渣沥青混合料的耐久性能与 BAA 的掺量关系显著,且其掺量对长期水稳定性、老化性能及疲劳性能的影响规律不同,对不同类型沥青混合料的影响也存在差异.总体来看,炉渣沥青混合料的耐久性能较普通沥青混合料没有明显降低,为保证其路

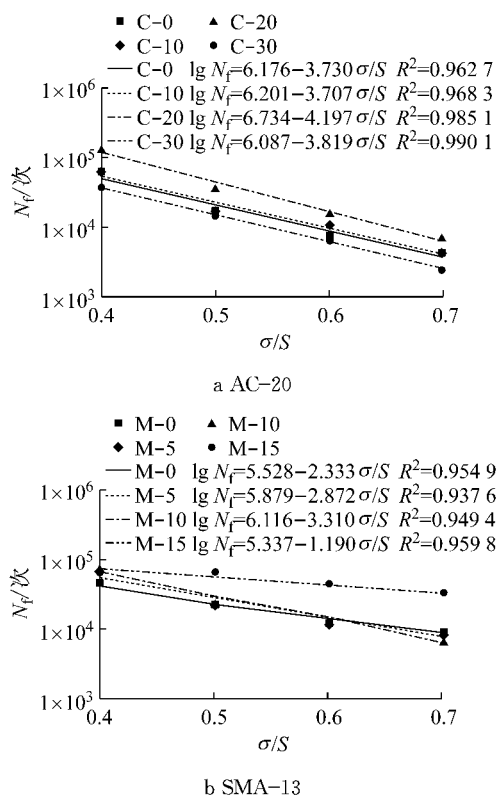


图 6 N_f 与 σ/S 的关系

Fig.6 Relationship between N_f and σ/S

用性能,建议 AC-20、SMA-13 中 BAA 掺量均宜在 10%左右。

(6)BAA 对沥青混合料性能的影响与其物理组成复杂、孔隙率高、强度低、碱性高等一系列特性有关。对比本文与笔者前期试验结果及其他研究成果发现,不同 BAA 批次、粒径及掺量对混合料性能的影响不同,这可能是因为 BAA 的物质构成、化学组成存在一定变异性,这造成炉渣沥青混合料内部微观结构、与沥青的作用机理存在差异,但这尚需微观试验进行验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Hassan H F. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(2):91.
- [4] 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.
- [5] Goh S W, You Z P. The dynamic modulus of asphalt mixture with bottom ash aggregates [C]//*Proceeding of Geosustainability and Geohazard Mitigation*. New Orleans: Geocongress, 2008:1008-1015.
- [6] Liu D, Li L H, Cui H J. Utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash aggregate in asphalt mixture [C]//*Proceeding of the International Conference on Asphalt Pavements*. Raleigh: ISAP, 2014:1169-1176.
- [7] 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.
- [8] 崔华杰.生活垃圾焚烧炉渣应用于路基回填的试验研究[D]. 上海:同济大学, 2014.
CUI Huajie. Experimental study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as subgrade filling [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG F40—2004 Technical specifications for construction of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [11] 葛折圣,黄晓明,许国光.用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2002, 32(4):653.
GE Zhesheng, HUANG Xiaoming, XU Guoguang. Evaluation of asphalt-mixture's low-temperature anti-cracking performance by curvature strain energy method[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2002, 32(4): 653.