

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.04.050

乳化沥青稳定炉渣混合料路用性能评价

刘子钰

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着城市发展与人口增长,由焚烧生活垃圾而产生的炉渣产量也逐渐增大。将炉渣资源应用在道路材料方向,能够充分利用资源能源,降低道路修建原材料的成本,同时解决道路建材紧张和短缺的问题。通过车辙实验、浸水劈裂实验、单轴贯入实验、无侧限抗压强度实验与疲劳实验,对比基质沥青混合料、普通乳化沥青混合料、乳化沥青稳定炉渣混合料及乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的高温抗车辙性能、水稳定性能、抗剪性能及疲劳性能。实验结果表明,与普通乳化沥青混合料相比,虽然乳化沥青稳定炉渣混合料的高温抗车辙性能较差,但表现出更好的水稳定性、抗剪性能及疲劳性能。将乳化沥青稳定炉渣混合料中部分矿粉替换为水泥,不仅能够弥补其高温抗车辙性能的不足,并且能够显著提升水稳定性、抗剪性能与疲劳性能。

关键词: 乳化沥青稳定炉渣混合料;水泥;路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)04-0181-06

0 引言

随着国民经济和城市化快速发展,城市生活垃圾产量迅猛增长,生活垃圾焚烧技术在国内外城市生活垃圾处理中已得到广泛应用。生活垃圾焚烧炉渣(简称炉渣)是指从生活垃圾焚烧厂燃烧室底部炉排中排出的物质,是含有烧结熔渣、玻璃、陶瓷、金属及未燃烧物的混合物,其中熔渣占主要成分^[1]。通过微观分析发现熔渣由完全中空的球体或者内部包有数量众多小球的子母球体所组成^[2],内部有较多孔洞,表面凹凸不平^[3],吸水率较高,接近10%^[4]。炉渣的外观呈灰黑色,干燥后呈灰白色,带有轻微的刺激气味,是一种非均质混合物,元素组成主要包括Si、Al、Ca、Na、Fe、C、K、Mg、O,矿物成分包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、 SiO_2 、 $CaAl_2Si_2O_8$ 及少量的 $CaCO_3$ 、 CaO 和 $ZnMn_2O_4$ 等。

近年来,关于炉渣资源化利用的研究越来越受重视。由于炉渣的工程性质与天然集料相近,粒径分布比较均匀,颗粒大小主要集中在2~50 mm范围内,基本符合道路建材的级配要求。现有的研究主要围绕于炉渣用于道路工程替代骨料。将炉渣资源应用在道路材料方向,不仅用量大、利用成本低,而且可以替代日益紧缺的砂石材料,能充分利用资源能源,降低道路修建原材料的成本,缓解填埋用地

的紧张、减少天然石料的开采、减小对环境的破坏,有一定的经济、社会效益和环境效益^[5],有助于可持续发展。

然而,通过研究发现,以炉渣代替天然集料虽然具有显著的经济社会效益,但存在混合料设计沥青用量偏高、炉渣沥青混合料的性能不甚稳定等问题,一定程度上阻碍了炉渣在热拌沥青混合料中的推广应用。考虑到这一点,一些研究人员将炉渣的应用转向了乳化沥青,废渣中的活性物质在乳化沥青中发生的水化反应以及对水的吸收作用有利于混合料的强度增强以及抗水损害能力的提高。Ahmed I. Nassar等^[6]对掺入不同填料的乳化沥青混合料的力学性质、耐久性和内部微观结构进行了研究,其中填料由普通水泥、飞灰、高炉矿渣两两混合而成,并加入了一些硅粉作为对比。研究发现,两两混合后得到的填料显著地增强了乳化沥青混合料的工程性能,包括力学强度与耐久性能;硅粉的掺入进一步提高了混合料的性能,同时消除了乳化沥青对铝酸盐水泥水化作用的阻碍;掺入混合填料后的乳化沥青混合料的耐久性能与普通热拌沥青混合料接近。Shaowen Du^[7]也研究了石灰石矿粉、熟石灰、渣粉、复合水泥、普通水泥、飞灰6种填料对乳化沥青混合料的性能影响。研究发现,6种填料中,水泥与熟石灰的掺入对增强混合料的水稳定性与抗车辙能力最为显著;石灰石填料、渣粉、飞灰的掺入对混合料的性能没有显著影响;不同填料水化反应产生的水化产物的不同,将导致混合料性能的差异。Amir Modarres和Pooyan Ayar^[8]研究了掺入煤渣

收稿日期: 2021-02-21

作者简介: 刘子钰(1989—),男,硕士,工程师,主要从事道路交通工程设计工作。

与煤渣粉的乳化沥青混合料中的性能变化。研究发现,煤渣、煤渣粉的掺入增强了混合料的马歇尔稳定度、抗拉强度、回弹模量,原因是煤渣粉与水发生的火山灰反应改善了混合料的性能;煤渣粉提高了混合料的水稳定性,但是煤渣降低了混合料的水稳定性。

综上所述,用乳化沥青稳定炉渣,可充分利用炉渣中的活性成分,具有较高的研究价值。目前,不同国家对炉渣在沥青混合料中应用方面的研究仍主要集中在掺配炉渣的热拌沥青混合料方面,而对于炉渣在乳化沥青混合料方面的研究还依旧较少^[9-12]。为此,本文针对炉渣在乳化沥青中的应用及乳化沥青稳定炉渣混合料的路用性能评价进行实验研究。对普通乳化沥青混合料(EAM)、乳化沥青稳定炉渣混合料(BAEAM)、乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料(C+BAEAM)进行了高温抗车辙实验、浸水劈裂实验与抗剪实验,并将结果与普通基质沥青混合料的各项性能进行对比分析。

1 实验材料与实验方案

1.1 实验材料

本文的实验测试材料包括70#基质沥青混合料、普通乳化沥青混合料、乳化沥青稳定炉渣混合料以及乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料。其中,乳化沥青稳定炉渣混合料是由将普通乳化沥青中20%(质量分数)的粒径为0~9.5 mm的天然集料替换为炉渣集料而制得;乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料是由将乳化沥青稳定炉渣混合料中2%(质量分数)的天然石灰石矿粉替换为水泥而制得。

1.1.1 乳化沥青

本文实验所用乳化沥青由上海龙孚材料技术有限公司提供,根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JTG E20—2011)对各项性能进行实验测试,其生产技术指标满足乳化沥青技术指标的要求(见表1)。

1.1.2 炉渣

实验用炉渣均由上海市浦东御桥生活垃圾焚烧厂提供,均由干法处理工艺得到,粒径范围为0~26.5 mm,经过烘干筛分,得到实验用3档粒径范围的炉渣集料,分别为4.75~9.5 mm、2.36~4.75 mm、0~2.36 mm,炉渣的基本性能指标见表2。

1.1.3 填料

实验中所用的填料为天然石灰石矿粉与水泥,天然矿粉的表观密度为2.667,水泥的各项技术指标见表3。

表1 乳化沥青技术指标

项目	规范要求	指标
破乳速度	慢裂或中裂	中裂
粒子电荷	阳离子	阳离子
筛上残留物(1.18 mm)/%	≤0.1	≤0.04
与粗集料拌合实验	均匀	均匀
黏附性,裹附面积	>2/3	>2/3
残留分含量/%	≥62	65
蒸发	溶解度/%	≥97.5
残留物	针入度(25℃)(0.1 mm)	50~300
	延度(15℃)/cm	≥40
储存	1 d/%	≤1
稳定性	5 d/%	≤5
		0.45
		≤3.6

表2 炉渣集料的基本性能指标

粒径/mm	表观相对密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	毛体积相对密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	吸水率/ %	坚固性损失/ %	压碎值/ %
4.75~9.5	2.422	2.075	5.92	18.3	—
2.36~4.75	2.341	1.685	14.41	17.6	26.3
0~2.36	2.401	1.896	13.78	9.4	22.6

表3 水泥的技术指标

实验项目	规范要求	测试值
细度 80 μm 方孔筛/ %	≤10.0	0.9
强度实验	3 d 抗折强度/MPa	≥2.5
	3 d 抗压强度/MPa	≥11.0
凝结时间	初凝时间/ min	≥45
	终凝时间/ min	≤600
		201
		256

1.2 乳化沥青稳定炉渣混合料的配合比设计

《公路沥青路面再生技术细则》(JTG F41—2008)(以下简称“技术细则”)中对乳化沥青冷再生混合料的设计给出了建议,其设计方法是一种修正的马歇尔设计方法。通过改变击实过程与技术指标,使设计结果更符合实际施工中乳化沥青混合料的性质要求。本文主要基于修正的马歇尔试验方法确定乳化沥青稳定炉渣混合料的配合比,为减小试件性质的变异性,合理利用已有集料的筛分级配,根据《技术细则》,拟选择“乳化沥青冷再生混合料工程设计级配范围”中的“中粒式”,设计级配要求见表4。

根据《技术细则》中对中粒式乳化沥青混合料级配范围的要求拟定级配,矿料级配见表5,级配曲线如图1所示。在本文中,按照矿质混合料最接近合成级配的原则进行炉渣替代,按照修正的最佳流体含量法确定混合料的最佳乳化沥青用量。确定最佳含水率和最佳乳化沥青用量:普通乳化沥青混合料的最佳含水率为4.8%,最佳乳化沥青用量为6.1%;乳化沥青稳定炉渣混合料和乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的最佳含水率为6.45%,最佳乳化沥青用量为8%。

表4 乳化沥青混合料级配范围

筛孔/mm	各筛孔的通过率/%											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	—	—	80	65	50	—	—	20	—	7
下限	100	90	—	—	60	35	20	—	—	3	—	1
中值	100	95	—	—	70	50	35	—	—	11.5	—	4

表5 矿料级配

混合料	各粒径范围(mm)的矿料用量/%									
	15~25	9.5~13.2	4.75~9.5	3~5	0~3	炉渣集料			矿粉	水泥
						4.75~9.5	2.36~4.75	0~2.36		
EAM	20.0	16.0	22.0	10.0	30.0	—	—	—	2.0	—
BAEAM	20.2	16.0	14.9	6.8	20.3	7.1	3.2	9.7	2.0	0
C+BAEAM	20.0	16.0	14.9	6.8	20.3	7.1	3.2	9.7	0	2.0

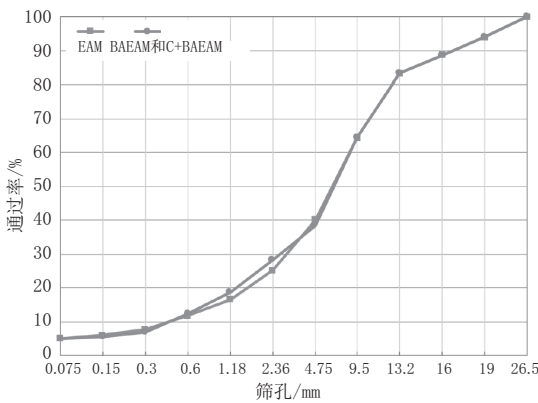


图1 沥青混合料合成级配曲线

1.3 乳化沥青混合料制备方法

乳化沥青冷再生配合比设计中,将试件分两次击实。在拌和完成后进行第一次击实,双面各击实50次(标准试件),然后将试样连同试模一起侧放在60℃鼓风烘箱中养生48h,之后进行双面击实25次后室温放置至少12h后脱模。

但是在乳化沥青混合料中掺入水泥后,部分研究认为,第一次养生较长时,混合料中的水泥将形成较高的强度,二次击实容易破坏已形成的水泥强度,严重影响实验结果。因此,对于乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料,将拌和好的混合料加入试模中双面击实50次,侧放在60℃鼓风烘箱中养生3h后,进行双面击实25次,继续放入60℃鼓风烘箱中养生45h,随后取出,在室温放置至少12h后脱模。

1.4 实验方法

1.4.1 高温车辙实验

车辙实验被用于评价混合料抵抗永久变形的能力。实验按照规范《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JTJ E20—2011)中《沥青混合料车辙实验》(T 0719—2011)对聚氨酯混合料和沥青混合料进行车辙实验,分析对比其高温稳定性,其中实验温度设定

为60℃,试件采用标准车辙试块300mm×300mm×50mm,胎压为0.7MPa。在车辙实验中,以动稳定度作为评价指标。

1.4.2 浸水劈裂实验

浸水劈裂实验是一种常见的用来评价混合料抗水损害性能的实验方法。将成型好混合料每组试件分成两组:一组在25℃恒温水槽中保温22h;另一组在25℃烘箱中保温22h。保温结束后分别测试劈裂强度。用浸水前后的劈裂强度比作为评价混合料水稳定性的指标,由式(1)计算劈裂强度比。

$$ISR = \frac{R_{11}}{R_{12}} \times 100\% \tag{1}$$

$$R_{11} = 0.00628 \times \frac{P_{T1}}{h_1} \tag{2}$$

$$R_{12} = 0.00628 \times \frac{P_{T2}}{h_2} \tag{3}$$

式中:ISR为浸水劈裂强度比,100%;R₁₁为浸水劈裂强度,MPa;R₁₂为干燥劈裂强度,MPa;P_{T1}为第一组试件的实验荷载的最大值,kN;P_{T2}为第二组试件的实验荷载的最大值,kN;h₁为第一组试件的高度,mm;h₂为第二组试件的高度,mm。

1.4.3 抗剪性能实验

本实验通过单轴贯入实验与无侧限抗压强度实验,用混合料的抗剪强度来评价乳化沥青稳定炉渣混合料的高温抗剪性能,并通过计算得到混合料的黏聚力和内摩阻角来分析炉渣对乳化沥青混合料性能的影响。库仑公式中反映了抗剪强度、黏聚力、剪切面法向应力和内摩阻角的关系,即:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{4}$$

式中:τ为抗剪强度,MPa;c为黏聚力,MPa;σ为剪切面上的法向应力,MPa;φ为内摩阻角,°。

在单轴贯入实验中,试件的变形经过压密阶段、

弹性工作阶段、损伤阶段、开裂破坏 4 个阶段。由于破坏拐点的位置代表试件发生了剪切破坏,是试件弹性工作的最高点,但对这个点的选取存在很大的困难,人为因素较大,不够准确。极值点的变化趋势比破坏拐点的变化趋势更明显,并且极值点的数值可以从所得数据点中准确得到,在本文的计算中,选取极值点作为数据点进行计算。单轴贯入和无侧限抗压强度实验的典型应力-变形图如图 2 所示。

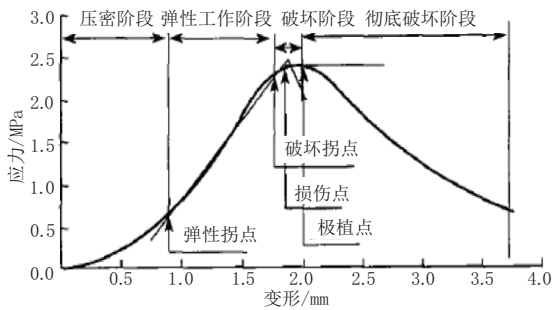


图 2 单轴贯入实验和无侧限抗压强度实验的典型应力-变形图

对于单轴贯入实验,可以通过有限元建立符合实际受力的贯入模型,进而求解出压头压强为 1 MPa 时标准尺寸试件(100 mm × 100 mm)中最大剪应力处的主应力值,以此作为基本的抗剪参数。泊松比为 0.35 的情况下,为了计算主应力和抗剪强度,单轴贯入和无侧限抗压强度实验破坏极值点压强值所乘系数见表 6。

表 6 单轴贯入和无侧限抗压强度实验破坏极值点压强值所乘系数

泊松比	σ_1	σ_3	τ_{max}
0.35	0.765 0	0.087 2	0.339 0

本实验采用非标试件(101.6 mm × 63.5 mm),需要进行修正。依据《沥青路面结构行为学》中非标试件的抗剪强度修正系数表,抗剪强度修正如下:

$$\tau_{max} = f \cdot f_h \cdot \sigma_p \quad (5)$$

式中: σ_p 为单轴贯入强度,MPa; f 为剪应力系数,取 0.345; f_h 为高度校正系数,取 0.848。

实际应用中将贯入实验中破坏极值点所对应的压强值乘以基本抗剪参数得到最大主应力、最小主应力,根据式(5)求出抗剪强度。然后结合无侧限抗压强度,求解出混合料的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,计算公式如式(6)~(9)所示:

$$\sigma_p = F_p / A_p \quad (6)$$

$$\sigma_u = F_u / A_u \quad (7)$$

$$c = 0.5\sigma_u (1 - \sin \varphi) / \cos \varphi \quad (8)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{\sigma_{g1} - \sigma_{g3} - \sigma_u}{\sigma_{g1} + \sigma_{g3} - \sigma_p} \right] \quad (9)$$

式中: σ_p 为单轴贯入强度,MPa; σ_u 为无侧限抗压强度,MPa; A_p 为单轴贯入实验压头的尺寸,cm²; A_u 为无侧限抗压强度实验压头的尺寸,cm²; σ_{g1} 为最大主应力,MPa; σ_{g3} 为最小主应力,MPa。

将成型好的马歇尔试件脱模后,在 60 °C 的烘箱中放置 5~6 h,取出试件后以 1 mm/min 的加载速率分别进行单轴贯入实验和无侧限抗压强度实验。

1.4.4 四点弯曲小梁疲劳实验

四点小梁弯曲疲劳(4PB)实验用于评价沥青混合料的疲劳性能。采用 Controls 公司生产的 Pavelab 77-PV41A02 型标准板压成型机制备沥青混合料车辙板试件,并切割成尺寸为 380 × 63.5 × 50 mm 的四点小梁试件。采用 N_{150} 法作为判断改性沥青的疲劳破坏的标准^[13-14]。实验温度为 25 °C,加载频率为 10 Hz,应变为 600 $\mu\epsilon$ 。

2 实验结果

对普通乳化沥青混合料(EAM)、乳化沥青稳定炉渣混合料(BAEAM)、乳化沥青稳定炉渣 + 水泥混合料(C+BAEAM)进行高温抗车辙实验、浸水劈裂实验与抗剪实验,并将结果与普通基质沥青混合料的各项性能进行对比分析。

2.1 高温车辙实验

如图 3 所示,在同一级配同一掺量的情况下,普通乳化沥青混合料的高温抗车辙性能劣于普通基质沥青混合料。掺入炉渣后的乳化沥青稳定炉渣混合料的高温抗车辙性能相对于普通乳化沥青混合料有略微下降,但二者性能较为接近。2%水泥替代 BAEAM 中的矿粉制成的乳化沥青稳定炉渣 + 水泥混合料的高温性能有大幅改善,甚至好于普通基质沥青混合料。这充分体现出乳化沥青稳定炉渣 + 水泥混合料优异的抗车辙性能,其不仅可以充分满足一般道路的使用要求,同时相较于普通基质沥青混合料,更适用于高温重载交通路面。

2.2 浸水劈裂实验

如图 4 所示,3 种乳化沥青混合料的未浸水劈裂强度均低于基质沥青混合料。其中,乳化沥青稳定炉渣 + 水泥混合料的劈裂强度最高,接近于普通基质沥青,而普通乳化沥青与乳化沥青稳定炉渣混合料的劈裂强度则较低,且乳化沥青稳定炉渣混合料的劈裂强度略低于普通乳化沥青混合料。

浸水后,水稳定性排序为:乳化沥青稳定炉渣 + 水泥混合料 > 普通基质沥青混合料 > 乳化沥青稳定

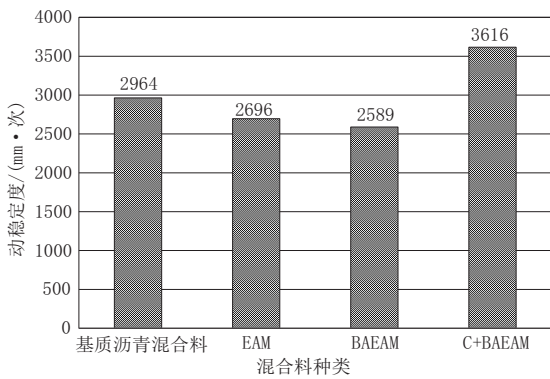


图3 不同种类混合料的高温车辙实验结果对比

炉渣混合料>普通乳化沥青混合料。

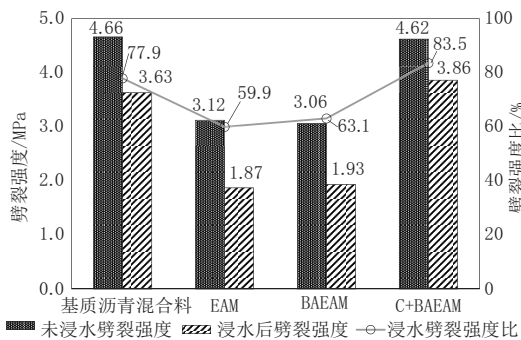


图4 不同种类混合料的浸水劈裂实验结果对比

实验结果表明,炉渣的掺入虽然略微降低了乳化沥青混合料在干燥条件下的劈裂强度,但在浸水条件下,其对抗水损害性能的可利作用则体现出来。这是由于,浸水的过程中提供了促使炉渣发生火山灰反应所需要的水分,反应产生的水化物有利于增强炉渣与乳化沥青的黏附性,增强了其水稳定性。此外,水泥的掺入进一步显著提高了乳化沥青的抗劈裂性能与抗水损害性能,这是因为水泥通过硬化,使集料与乳化沥青胶结,提升了乳化沥青与集料之间的黏附性,从很大程度上提升了混合料的水稳定性。

2.3 抗剪性能实验

对4类混合料进行抗剪实验,其抗剪强度、黏聚力及内摩阻角对比如图5所示。

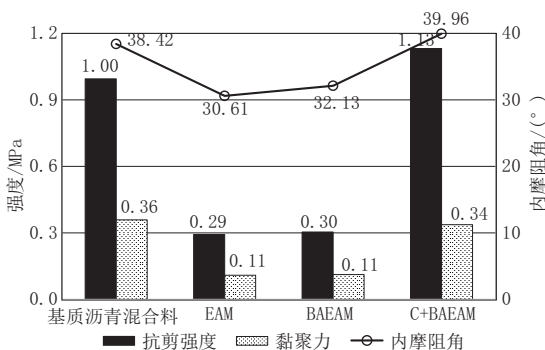


图5 不同种类混合料的抗剪实验结果对比

4类沥青混合料的内摩阻角由大至小排序为:乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料>普通基质沥青混合料>乳化沥青稳定炉渣混合料>普通乳化沥青混合料。

4类沥青混合料的黏聚力由大至小排序为:普通基质沥青混合料>乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料>乳化沥青稳定炉渣混合料=普通乳化沥青混合料。其中,乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的黏聚力远大于其他两种乳化沥青混合料。

4类乳化沥青混合料的抗剪强度由大至小排序为:乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料>普通基质沥青混合料>乳化沥青稳定炉渣混合料>普通乳化沥青混合料。其中,乳化沥青稳定炉渣混合料与普通乳化沥青混合料的抗剪强度较为接近,且远低于普通基质沥青混合料。

2.4 疲劳实验

对4类混合料进行4PB疲劳实验,其疲劳寿命对比如图6所示。

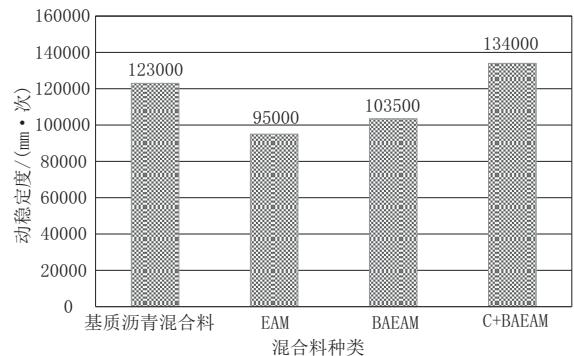


图6 不同种类混合料的疲劳实验结果对比

根据不同沥青混合料的四点弯曲小梁疲劳实验结果可以看出,4类沥青混合料的疲劳性能由大至小排序为:乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料>普通基质沥青混合料>乳化沥青稳定炉渣混合料>普通乳化沥青混合料。

结果表明,普通乳化沥青混合料的疲劳性能弱于普通基质沥青混合料,但掺入炉渣以及炉渣+水泥的乳化沥青稳定炉渣混合料能够明显提升乳化沥青混合料的疲劳寿命。其中,水泥替代BAEAM中的矿粉制成的乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的疲劳性能有大幅改善,优于普通基质沥青混合料。这体现出了乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料在工程中的适用性与耐久性。

3 结论

本文分别采用高温车辙实验、浸水劈裂实验与

单轴贯入实验和无侧限抗压强度评价了乳化沥青混合料的高温抗车辙性能、水稳定性与抗剪性能。并分析了炉渣集料与水泥对乳化沥青混合料的水稳定性与抗剪强度的影响作用机理,得出以下主要结论:

(1)用炉渣集料替代部分天然集料得到的乳化沥青稳定炉渣混合料的高温抗车辙性能略低于普通乳化沥青混合料,且二者均劣于普通基质沥青混合料。然而,以2%的水泥替代乳化沥青稳定炉渣混合料中的石灰石矿粉而得到乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的高温车辙性能有显著提升,甚至优于普通的路用基质沥青混合料。说明水泥的掺入能够弥补乳化沥青稳定炉渣混合料的高温抗车辙性能的不足。

(2)除了乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的浸水劈裂强度外,3类乳化沥青混合料的劈裂强度均低于普通基质沥青混合料。在水稳定性方面,乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料>普通基质沥青混合料>乳化沥青稳定炉渣混合料>普通乳化沥青混合料。这说明炉渣与水泥均能有效提高乳化沥青混合料的水稳定性,且水泥的提高效果更加明显。这是由于相比于普通集料,炉渣与乳化沥青有着较高的黏附性;而相比于普通石灰石矿粉,水泥更能提高乳化沥青与集料的黏附性;浸水的过程中也促进了炉渣及水泥发生火山灰反应,有利于增强炉渣与乳化沥青的黏附性。

(3)通过单轴贯入实验和无侧限抗压强度实验得知,普通乳化沥青混合料与乳化沥青稳定炉渣混合料的抗剪性能均低于普通基质沥青混合料,且炉渣对乳化沥青混合料的抗剪性能无明显提高作用。而乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料的抗剪性能优于普通基质沥青混合料,这是由于水泥的硬化作用既增强了矿料与乳化沥青之间的黏聚力,又增强了矿料之间的嵌锁力,体现了水泥在提高乳化沥青混合料抗剪性能方面的优异作用。

(4)根据四点弯曲疲劳小梁实验结果,普通乳化沥青混合料的疲劳性能低于普通基质沥青混合料,但炉渣以及炉渣+水泥的加入能够提高乳化沥青稳定炉渣混合料的疲劳寿命,其中,乳化沥青稳定炉渣+水泥混合料展现出较优的工程耐久性。

总体而言,炉渣能够降低乳化沥青的高温抗车辙性能,但提高了乳化沥青的水稳定性、抗剪性能与疲劳性能。这证明了乳化沥青稳定炉渣混合料的应

用价值。将乳化沥青稳定炉渣混合料中部分矿粉替换为水泥,不仅能够弥补其高温抗车辙性能的不足,并且能够显著提升水稳定性、抗剪性能并延长疲劳寿命,甚至超过普通基质沥青混合料的性能水平。因此,在乳化沥青稳定炉渣混合料的实际应用工程中,可以考虑以水泥代替部分矿粉,能够取得良好的路用效果。

参考文献:

- [1] 范晓平,邢介明,童琳,等. 生活垃圾焚烧灰渣的物理化学特性[J]. 环境卫生工程,2009,17(3):4-6.
- [2] Hang X, Gress D, Karpinski S, et al. Utilization of municipal solid waste combustion bottom ash as a paving material[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999(1652): 257-263.
- [3] Chang F Y, Wey M Y. Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(3):594-603.
- [4] Huang H W. The use of bottom ash in highway embankments, subgrade, and subbases. Joint highway research project, Final Report[R]. West Lafayette: FHWA/IN/JHRP-90/4, 1990.
- [5] 范宇杰,陈萍,马文欣,等. 城市生活垃圾焚烧炉渣作为土木工程材料的资源化应用探讨[J]. 环境与可持续发展, 2012(6):97-99.
- [6] Nassar A I, Mohammed M K, Thom N, et al. Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:352-363.
- [7] Du, Shaowen. Influence of chemical additives on mixing procedures and performance properties of asphalt emulsion recycled mixture with reclaimed cement-stabilized macadam[J]. Construction & Building Materials, 2016(118): 146-154.
- [8] Modarres A, Ayar P. Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 83(15):263-272.
- [9] 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.
- [10] 杨昆. 生活垃圾焚烧炉渣在沥青混合料中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- [11] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 炉渣集料对沥青混合料性能影响的实验研究[J]. 建筑材料学报, 2015(2):307-311.
- [12] 于永生. 掺加水泥的乳化沥青冷再生混合料设计方法与使用性能[D]. 湖南长沙: 湖南大学, 2008.
- [13] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending. ASTM D7460-10.[C]. Philadelphia: ASTM, 2010.
- [14] 黄明, 温学钧, 黄卫东, 等. 不同设计目标下沥青混合料的疲劳性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):572-579.