

热再生沥青砖级配结构对性能的影响

朱曲平^{1,2}

(1. 重庆工程学院, 重庆市 400020; 2. 重庆交通大学)

摘要: 为了确定级配类型与集料粗细程度对旧沥青材料(RAP)制备沥青砖使用性能的影响,分别对两种级配类型,3种粗细程度的沥青砖进行抗压强度、冻融强度比、棱角破损率和棱角最大破损长度试验。研究结果表明:AC-10级配沥青砖抗压强度整体优于SMA-10,而经冻融循环后,后者的抗压能力损失小于前者。试验结果显示,集料的粗细对沥青砖抗压能力的影响较大。在棱角最大破损尺寸与棱角破损率指标方面,不同级配类型的沥青砖呈现出较大差异,集料越细,AC-10型沥青砖受冲压作用后,破损程度越轻。方差分析与综合评分分析表明:各级配类型下,集料越细,沥青砖综合性能越好,考虑到经济效益与设计初衷,AC-10型细级配是热再生沥青砖最佳的设计级配。

关键词: 旧沥青材料; 沥青砖; 级配类型; 性能试验; 显著性分析

1 前言

中国交通事业的发展使得对沥青及石料的需求剧烈增加,每年因路面铺筑而消耗的沥青混合料达到了2亿t。沥青混合料的生产与运输,都将消耗大量的能源,并带来严重的环境问题,而如何对已铺装的沥青混合料进行高效节能的回收(RAP)及再利用,中国企业的手段还比较单一,主要集中于利用铣刨机等筑路机械进行现场回收翻新及原路段铺筑。

20世纪末,中国各科研机构依托试验路段,对沥青的热再生工艺进行了深度优化,取得了良好成果,而美国、日本和欧洲通过工程实践,已将沥青混合料旧料利用率提高至80%,并相继出台了沥青路面再生技术手册等规范化资料,极大地鼓舞和推动了再生产业的发展。

通过考察人类筑路发展历史,筑路材料经历了木块、石块、水泥混凝土至沥青混凝土的发展历程。由于天然石块具有良好的耐久性,在比利时布鲁塞尔广场、荷兰达姆广场,至今仍保留为石块路面,供行人和机动车使用。考虑到现代沥青热再生技术的成熟与块体材料筑路的历史,以沥青路面回收材料制备砌块沥青砖,用于特殊场合的路面铺装将具有良好的经济效益和社会效益,可将其用于人行道、城市CBD、市民公园等景观步道的路面铺装。同时,采用沥青回收料制备砖体

材料极大降低了传统砖窑对土地资源的侵蚀,在节约资源的同时又保护了自然环境,符合当代中国的绿色环保发展思路。

目前中国对于沥青砖制备、利用的报道尚且不多,而在国外,沥青砖的发展已有100余年的历史,早在1876年,美国黑斯廷斯公司就生产出一种工业地板用沥青砖砌块,它具有力学性能好、行走舒适、耐久性高的特点。自1885年起,美国俄亥俄州也出现了一种类似沥青砖的岩石地板砖,这种地板质地坚韧,能有效地吸收振动,减轻收缩,且具有高密度、低吸水率的特点。另外,这种地板主要集中在工厂生产,装卸、修理较为容易,技术经济性很强。在3D打印技术发展愈加成熟的今天,美国汉诺威公司将沥青砖从工业用品发展成为一种具有极强观赏价值的商品,基于已有的沥青砖加工技术与3D打印技术,将沥青砌块做成无数种设计方案,通过颜色与形状的改变,达到完美的铺筑效果,获得了路用功能与视觉效果统一。

结合中国实际情况,有必要基于传统的热再生沥青工艺进行产业升级,沥青的再生技术不再局限于对病害路面进行提质改造,亦可将再生后的沥青混合料制备成RAP沥青砖,用于人行道、停车场等区域的路面铺装,从而降低水泥基材料的用量,间接地达到节能减排的效果。同时,考虑到2017年末,世界首条光伏路面在济南绕城高速公路的建成通车,未来亦可将沥青砖及其周边产品与光伏电池等功能元件结合起来,

进行多方向、模块化生产,有利于此类多功能型路面的高效推广。

路用性能方面,使用热再生沥青混合料生产的沥青砖,在不同场合,需满足不同的使用需求。应用于渠化交通路段,沥青砖必须有足够的抗压强度以承受低速重载的车辆荷载。在高等级公路中,由于路面必须保持良好的平整度,以保证高速行驶车辆的行车稳定性,因而沥青砖的最大棱角破损尺寸等因素必须严格控制。而在高寒地区,沥青路面常受到冻融循环作用,冻融循环对沥青混合料的力学性能破坏极大,因此,在进行热再生沥青砖的开发与应用时,冻融循环强度比也应该成为主要评价指标之一。已有的文献与专著显示,沥青掺量、新集料替代率等因素对沥青混合料的路用性能有一定影响,但都不是主要决定因素。由于相同材料在不同级配下,所体现出来的路用性能可能存在很大差异,因此,对沥青砖的路用性能进行综合评价时,有必要

考虑沥青砖级配结构的不同对其造成的影响。

2 试验材料准备

2.1 原材料

该文采用某高速公路路面大修时回收的 RAP,研究中提出两种典型的级配结构:AC—10 连续密集配和 SMA—10 间断密集配,同时为了对比级配粗细程度对沥青砖的影响,对 2.36 mm 为关键控制筛孔分别设计出粗、中、细级配。再生沥青砖的设计初衷主要是使用原有沥青的胶结料、集料,尽量不添加新料,以保证经济性,因此,使用 AC—10 和 SMA—10 等骨架密实或悬浮密实结构(表 1),可以充分发挥其内部原有沥青的作用,减少新添加胶结料的用量,更符合沥青砖设计的研究方向。

为快速取得各个级配结构的RAP沥青砖配比中

表 1 沥青砖设计级配结构

沥青砖中沥青 混合料类型	级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
		0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2
AC—10	粗级配	4.0	6.5	9.8	13.1	23.5	33.0	48.0	90.0	100
	中级配	5.1	9.1	14.6	20.1	32.1	43.0	60.2	95.0	100
	细级配	7.6	13.8	22.4	33.1	44.2	56.0	75.1	100	100
SMA—10	粗级配	7.8	9.8	11.0	11.6	16.0	20.0	28.0	90.0	100
	中级配	9.7	12.6	14.7	16.1	21.0	25.5	44.0	95.0	100
	细级配	12.2	15.7	18.3	20.1	26.3	32.0	60.0	100	100

沥青含量 α ,试验采用沈阳产 KSW 型燃烧炉在(538±5)℃下进行燃烧。

此外,通过设计正交试验,以抗压强度、冻融强度比、棱角破损最大尺寸为指标,确定 AC—10 再生沥青混合料最佳油石比为 7.2%,SMA—10 混合料根据混合料设计经验,油石比应控制在 5.8%~6.2%之间,此次研究统一取 6.0%。

根据上述试验分别对两种级配结构,6 种不同级配测试了其中 RAP 中的沥青含量 α ,并计算出外加沥青含量 β (相对于 RAP 混合料)以及最终沥青砖混合料中的沥青有效油石比 ϕ ,结果如表 2 所示。

2.2 沥青砖制备

为保证沥青砖混合料的质量及经济性,沥青砖制备过程中仅适当添加新沥青胶结料,而并未添加新的集料,拌和过程及保温过程严格按照 RAP 集料加热温度为(170±5)℃、沥青胶结料加热温度控制在150

表 2 沥青砖中沥青用量确定

沥青砖中 沥青混合 料类型	设计 级配	RAP 中的沥 青含量 α /%	外加沥青 量 β /%	混合料有效 油石比 ϕ /%
AC—10	粗	5.9	1.2	7.2
	中	6.1	1.0	7.2
	细	6.5	0.5	7.2
SMA—10	粗	5.2	1.1	6.0
	中	5.1	1.1	6.0
	细	5.6	1.0	6.0

~160℃之间,拌和温度 160℃,采用马歇尔击实仪的成型原理,将试模改装成 100 mm×100 mm×63.5 mm 规格,其试件单位面积的作用压强等效于马歇尔试件表面的作用压强,即 $\sigma=5.49\times10^{-3}$ MPa,冲击次数该文选择单面 100 次,双面共 200 次,冷却后脱模即为沥青砖。

3 试验方案

3.1 抗压强度测试

抗压强度是沥青砖的一个关键技术指标,为了满足室内试验研究的需要,特制定以下试验方法:100 mm×100 mm×100 mm 规格试件采用 TYA-300 型微机控制恒加载试验机,控制加载速率 0.6 kN/s。试件在恒温空气箱中保温 6 h,温度控制在 20 ℃。试验开始后,自试件从恒温箱中取出至试验结束,时间应不超过 2 min。

3.2 冻融强度比测试

冻融强度比用以评价沥青砖在水及冻融循环下试件的抗水损坏能力。试验条件参照沥青混合料冻融劈裂强度试验条件(T0729-2000):① 沥青砖在-18 ℃冰冻 16 h;② 60 ℃水浴浸泡 24 h;③ 25 ℃水中放置不低于 4 h;④ 试验时环境温度控制在(25±3) ℃;⑤ 取出试件后,立即按 2.1 节测试方法对试件进行抗压强度测试,得到冻融作用后试件的抗压强度值。

3.3 棱角破损率

棱角破损率试验用以评定沥青砖棱角抗外界冲击的能力,棱角破损率越小表明其具有越好的抗棱角破损性。查阅相关技术文献资料显示,当前国内外尚未见关于沥青砖棱角破损性试验方法报道。为了模拟沥青砖从“生产—转运—码垛—再转运—砌筑”等过程及偶然事件导致的砖块遭受的棱角破损,室内在评价沥青砖时采用将沥青砖放置在洛杉矶转筒中进行旋转,旋转 10 次,以棱角破损率 θ 来进行评价。

$$\theta = \frac{m_0 - m'}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ 为棱角破损率(%); m_0 、 m' 分别为试件旋转前、后质量(g)。

同时考虑到不同沥青砖在质量不同的情况下,如果最大破损尺寸完全相同,则计算的棱角破损率不同,实际上沥青砖的外观破损则完全相同,为此在评价时也引进另外一个关键评价指标——棱角破损最大尺寸 L_{\max} ,其测试方法是用游标卡尺测试旋转后沥青砖试件的棱角最大破损长度。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

4.1.1 抗压强度

不同级配类型的沥青砖抗压强度如图 1 所示。

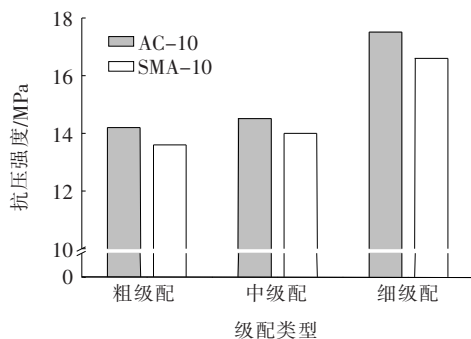


图1 不同沥青砖的抗压强度

由图1可知:级配越细,其抗压强度越高,而粗、中级配的抗压强度基本相当,分析原因为:① 级配越细其中RAP中细集料越多,其内含的沥青含量 α 越大,在控制相等的有效油石比下,外加沥青含量就越少,这使得制备出的沥青砖整体上刚性更高,属于偏刚性沥青结构,有利于提高整体强度;② 对于粗、中级配结构由于RAP料中沥青含量 α 基本相同,这一点从表3中RAP内含沥青含量 α 可以得到验证,因此整体的结构较细级配刚性较弱,类属于柔性沥青结构,故使得抗压强度基本相当。

4.1.2 冻融强度比

不同级配类型对沥青砖的冻融强度比影响规律如图2所示。

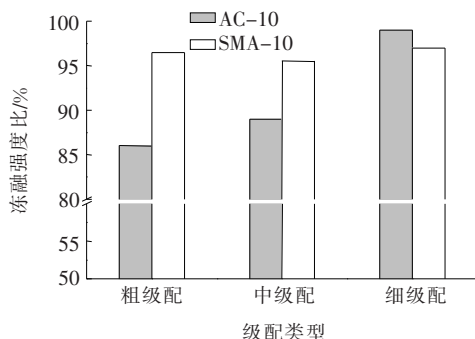


图2 不同沥青砖的冻融强度比

由图2可知:对于AC-10型沥青砖,随着级配变细,其冻融强度比逐渐提高,而SMA-10型沥青砖级配粗细程度对冻融强度比影响不大,整体上看SMA结构较AC结构更有利于提高其冻融强度比。分析可能出现的原因:① 尽管AC-10型沥青砖在一定有效油石比下,级配越细其整体结构偏刚性,对冻融强度不利,但是由于级配偏细,结构整体均匀性更好,可以有效降低冻融循环水对试件的破坏,试件的脱粒现象降低,因此使得整体冻融强度比有所提高;② SMA-10型沥青砖试件由于不同粗细级配中RAP内含的沥

青含量 α 基本相同,外加沥青掺量也基本相同,加之骨架密实结构优势,因此整体上冻融强度比变化不大,且整体上较 AC-10 型沥青砖试件冻融强度比大。

4.1.3 棱角破损率

不同级配类型沥青砖棱角最大破损尺寸见图 3。

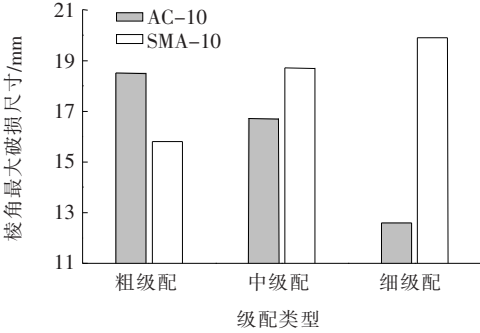


图 3 不同沥青砖的棱角最大破损尺寸

由图 3 可知:对于 AC-10 型沥青砖,其级配越细 L_{\max} 越小,这归结于其级配越细,整体均匀性越高,粒料之间黏结较好,有利于提高抗外界的冲击作用;相反对于 SMA-10 型沥青砖,则是级配越细 L_{\max} 越大,这可能是由于级配越细,粗细集料界限进一步弱化,骨架密实结构优势降低,混合料抵抗外力作用自然降低,故出现上述现象。

图 4 为不同级配结构类型的沥青砖棱角破损率试验结果。

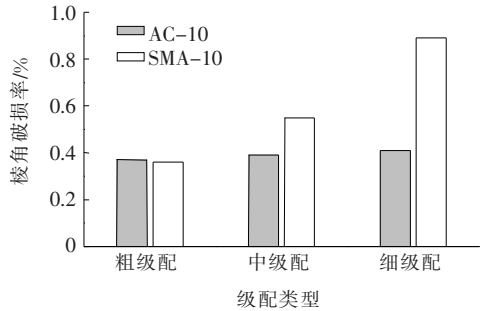


图 4 不同沥青砖的棱角破损率

由图 4 可知:AC-10 型沥青砖级配的粗细程度对棱角破损率 θ 影响不大,基本在 0.4% 以下,而 SMA-10 型沥青砖级配越细棱角破损率 θ 越大,但即使这样棱角破损率 θ 仍小于 1%。

4.2 方差分析

双因素方差分析是数据处理中一种重要的分析方法,它是研究讨论两因素对试验指标影响的显著性,根据两因素每种组合水平上试验次数,可以将双因素试验的方差分为无重复试验和重复试验的方差分析。

研究过程中为分析方便,采用无重复试验的方差

分析,其中两因素分别为:级配类型 A ,级配粗细程度 B , A 有 r 种水平 A_1, A_2, \dots, A_r (这里 $r=2$), B 因素有 s 种水平 B_1, B_2, \dots, B_s (这里 $s=3$),试验结果为 X_{ij} ,则所有 X_{ij} 相互独立,试验数据分布如表 3 所示。

表 3 双因素无重复试验数据 X_{ij}

因素	B_1	B_2	B_3
A_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}
A_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}

双因素无重复方差分析按照以下步骤进行:

(1) 计算平均值

$$\bar{x}_i = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s X_{ij} \tag{2}$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r X_{ij} \tag{3}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{sr} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s X_{ij} \tag{4}$$

式中: \bar{x}_i 为 A_i 水平时所有试验算术平均值; \bar{x}_j 为 B_j 水平时所有试验算术平均值; \bar{x} 为所有试验值的算术平均值。

(2) 计算离差平方和

$$SS_A = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \tag{5}$$

$$SS_B = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \tag{6}$$

$$SS_e = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (X_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2 \tag{7}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (X_{ij} - \bar{x})^2 \tag{8}$$

式中: SS_A 为因素 A 引起的离差平方和; SS_B 为因素 B 引起的离差平方和; SS_e 为误差引起的离差平方和; SS_T 为总离差平方和。

(3) 计算自由度

$$SS_A \text{ 自由度: } df_A = r - 1 \tag{9}$$

$$SS_B \text{ 自由度: } df_B = s - 1 \tag{10}$$

$$SS_e \text{ 自由度: } df_e = (r - 1) \times (s - 1) \tag{11}$$

$$SS_T \text{ 自由度: } df_T = rs - 1 \tag{12}$$

(4) 计算均方

$$MS_A = SS_A / (r - 1) \tag{13}$$

$$MS_B = SS_B / (s - 1) \tag{14}$$

$$MS_e = SS_e / [(r - 1)(s - 1)] \tag{15}$$

(5) F 检验

$$F_A = MS_A / MS_e \tag{16}$$

$$F_B=MS_B/MS_e \tag{17}$$

表 4 给出了级配结构类型 A,级配粗细程度 B 对沥青砖抗压强度、冻融强度比以及棱角破损最大尺寸的方差分析结果。

表 4 方差分析结果

试验指标	抗压强度/MPa	冻融强度比/%	棱角破损最大尺寸/mm	棱角破碎率/%
总均值 \bar{x}	15.07	93.83	17.03	4.95
总离差平方 SS_T	10.53	109.44	28.69	17.60
因素离差平方 SS_A	0.33	18.75	3.63	3.31
因素离差平方 SS_B	7.95	35.39	1.43	5.54
误差离差平方 SS_e	2.25	55.31	23.64	8.75
因素均方 MS_A	0.33	18.75	3.63	3.31
因素均方 MS_B	3.97	17.69	0.71	2.77
误差均方 MS_e	1.12	27.65	11.82	4.37
F_A	0.30	0.68	0.31	0.76
F_B	3.54	0.64	0.06	0.63

注： $f_A=1,f_B=2,f_e=2,f_T=5$ 。

由表 4 可看出：

(1) 从对抗压强度的影响看：级配类型为 AC-13 或 SMA-13 对沥青砖的抗压强度性能影响并不大,其显著性水平只有 0.3 左右,但相对的,集料颗粒的粗细程度对沥青砖抗压强度性能的影响显而易见,其显著性水平达到了 3.54,二者差距 10 倍有余,因此,在考虑沥青砖制品的抗压强度时,首先应选择颗粒较细的回收料作为集料制备沥青砖。

(2) 从棱角最大破损尺寸来看：虽然级配结构类型和级配粗细程度对棱角破损最大尺寸的影响均不显著,但相比于级配粗细程度,级配结构类型的影响更为显著,其显著性水平是级配粗细程度的 5 倍多。原因有：① 由改性沥青、矿粉、纤维稳定剂共同组成的沥青玛蹄脂,各组成成分的性能与旧材料可能存在较大差异,新加入的胶结料与旧集料孔隙及表面残余的胶结料相容性难以评估。造成对粗集料黏附力参差不齐,棱角最大破碎尺寸离散性较大；② 回收后的集料在经过反复高温处理后,其酸碱性可能发生变化,不同类型的集料在高温下氧化,所发生的化学反应不同,这会影响到集料与沥青胶结料的结合力,从而导致沥青砖表面完整性的差异。针对 SMA 沥青玛蹄脂碎石混合料,粗集料用量多,粗集料的表面积相对较大,决定了其受集料表面酸碱性变化的影响较大,胶结料与集料的结合程度受此因素影响存在较大的随机性。

(3) 从对冻融强度比和棱角破损率的方差分析来看,级配类型与集料粗细程度对这两个指标的影响有限,且影响程度相当接近,因此,冻融强度比与棱角破碎率两个指标不适合用来甄选沥青砖制备材料。

4.3 综合评分分析

双因素方差分析可以判定各个影响因素对单个试验指标的影响显著性,但是对于沥青砖混合料,其性能包含多个评价指标,若某些评价指标显著性水平不明显或评价指标在某些方面适用性不高,则无法利用该分析方法做出准确评价。基于以上分析,为优化级配结构类型及级配粗细程度对沥青砖的总体性能,需要引入另外一种评价方法,多指标综合评分法。综合评分法是根据各个试验指标的重要程度,对得出的试验结果进行分析,给每一个试验评出一个分数,作为这个试验的总指标,然后根据这个总指标利用单指标试验结果的直观分析方法作进一步分析,最后确定较好的试验方案。其操作步骤为：

(1) 首先确定试验指标的权重。假定有 $P_1、P_2、\cdots、P_i$ 等 i 个试验指标,每个试验指标权重为 $\gamma_1、\gamma_2、\cdots、\gamma_i$,则满足 $\gamma_1+\gamma_2+\cdots+\gamma_i=1.0$ 。

(2) 确定试验指标的隶属度。设指标值 X ,指标最小值 X_{\min} ,指标最大值 X_{\max} ,则试验指标的隶属度 U 的计算公式如下：

$$U=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{18}$$

(3) 计算综合评分 \bar{U} ,计算公式如下：

$$\bar{U}=\gamma_1U_1+\gamma_2U_2+\cdots+\gamma_iU_i \tag{19}$$

式中： \bar{U} 为试验指标综合评分； U_i 为第 i 个试验指标隶属度。

沥青砖综合性能控制 4 个关键试验技术指标,即抗压强度、冻融强度比、棱角最大破损尺寸、棱角破损率,综合考虑每个试验指标权重如表 5 所示。由于再生沥青砖主要的受荷方向与类型为竖向与侧向的压应力,因此其最可能的破坏方式为受压破坏,因此权重较大,而在其服役期间,冻融循环作用也不可忽略,而棱角最大破损尺寸与棱角破损率相对前两者而言,属于形态规格上的变化,因此权重分布较小。

表 5 试验指标权重分布

试验指标	权重 γ_i	试验指标	权重 γ_i
抗压强度	0.6	棱角最大破损尺寸	0.1
冻融强度比	0.2	棱角破损率	0.1

表 6 为级配结构类型 A 和级配粗细程度 B 对试验指标的隶属度及综合评分。综合得分最靠前两种组

合分别为:AC 级配结构细级配以及 SMA 级配结构细级配。

表 6 试验指标综合评分

因素水平		抗压强度	冻融强度	棱角最大	棱角破损	综合得分
级配类	级配粗细	U_1	比 U_2	破损尺寸 U_3	率 U_4	\bar{U}
型 A	程度 B					
AC-10	粗	0.15	0	0.81	0.02	0.18
	中	0.23	0.23	0.56	0.06	0.25
	细	1.00	1.00	0	0.09	0.81
SMA-10	粗	0	0.81	0.44	0	0.21
	中	0.10	0.73	0.84	0.36	0.33
	细	0.77	0.85	1.00	1.00	0.83

采用 SMA 级配结构细级配尽管综合评分较 AC 级配结构细级配高,但综合评分差距不大,从制备角度来看前者级配结构较后者需要增加大量的矿粉及外掺沥青,从经济角度看,这一点与 RAP 再生沥青砖的研究初衷不符,综合考虑建议沥青砖的最佳级配结构为 AC-10 型细级配。

5 结论

(1) AC-10 级配 RAP 沥青砖的初期抗压性能整体优于 SMA-10 级配,在经过冻融循环处理后,不同粗细程度的 SMA-10 级配沥青砖的冻融强度比变化不大,较 AC-10 而言,抗压强度损失较小,说明 SMA-10 级配的沥青砖在不利工况下可以保持较为稳定的使用性能,较 AC-10 型而言更优。

(2) AC-10 级配的沥青砖,随着集料粒径减小,集料与胶结料之间黏附性更好,整体更为均匀,受冲击荷载作用时,表面破损率逐渐降低。而 SMA-10 级配中,粒径逐渐变小的同时,在木纤维作用下,粗、细集料分界愈发不明显,密实骨架型结构优势逐渐降低,导致粒料之间嵌挤效果下降,在冲击荷载作用下,粒料更容易发生分散。

(3) 双因素方差分析显示集料粒径的大小对抗压强度影响较大,而沥青砖的表面平整度受级配类型的

影响更为明显,根据综合评分结果,两种级配类型的细级配方案具有最高的评分,但考虑到经济效益与实用价值,AC-10 型细级配为生产 RAP 沥青砖最佳的级配方案。

参考文献:

[1] 胡林,李科锋. 沥青搅拌设备节能环保实施路径研究[J]. 建筑机械,2017(10).

[2] 王甲辰. 高速公路沥青路面高掺量 RAP 厂拌热再生关键技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2013.

[3] 查旭东,闵斌,宋微. RAP 掺量对热再生沥青混合料性能影响分析[J]. 长沙理工大学学报,2013(4).

[4] 汤文,盛晓军,谢旭飞,等. 回收料掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报,2016(1).

[5] 邵强. 厂拌热再生沥青混合料优化设计研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2016.

[6] 张晨,张金喜,苗英豪. 新型多功能路面的铺装方法与特点[J]. 公路工程,2008(5).

[7] 王晓亮. 冻融循环对 SMA 混合料性能的影响研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2014.

[8] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[9] 李峰,曾蔚,石小培. 沥青混合料低温抗裂性能及影响因素评价[J]. 山东建筑大学学报,2012(6).

[10] 王华. 道路沥青性能的综合分析与评价[D]. 长安大学硕士学位论文,2014.