

再生聚苯乙烯掺配改性剂对沥青混合料性能的影响分析

冯新军^{1,2}, 解明卫² 编译

(1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:在沥青混合料生产和施工中由于加热所引起的碳排放,会对环境造成有害影响。该研究在沥青混合料中添加3种不同类型的聚苯乙烯(PS)废料作为沥青的掺配改性剂:通用级聚苯乙烯(GPPS),也称为结晶聚苯乙烯、高抗冲聚苯乙烯(HIPS)和塑料衣架聚苯乙烯(HPS)。设计AC-16S沥青混合料(命名为REF)作为参照,以不同比例聚苯乙烯替代沥青得到的混合料与其进行对比,通过试验得出了加入聚苯乙烯对沥青混合料性质的影响规律:空隙率增加并且塑性变形显著降低,而其他性能仍在常规数量级。通过试验研究验证了改性沥青混合料的力学性能,进行了生命周期评价(LCA),并与常规沥青混合料的环境性能对比。结果表明:采用聚苯乙烯代替部分沥青会减少沥青混合料对环境的影响,且使道路预期寿命增加。

关键词: 沥青混凝土; 聚苯乙烯; 聚合物废料; 干法; 生命周期评价

1 前言

道路是世界上最常见的、也是目前消耗建筑材料最多的建筑结构物之一。欧洲91.9%的道路采用沥青混合料铺筑,对沥青这种来源于石油的有限材料的需求量很高。提取和加工沥青过程中,会向大气中排放0.048 kg 二氧化碳当量/kg,铺筑1 km的道路需要43.7 t的沥青,排放高达2.1 t二氧化碳当量。

在欧洲每年产生2 580万t废塑料。为减少沥青对环境的有害影响,该文研究废塑料替代沥青的可能性。研究选取废塑料是由于聚苯乙烯(PS)具有热塑性和最低的玻璃化温度,又是全球消耗最多的聚合物之一。为了给沥青混合料提供所需的刚度和热稳定性,研究选用高抗冲聚苯乙烯和通用聚苯乙烯作为改性剂,并采用干法制备改性沥青混合料:将改性剂、集料和未改性的沥青一起直接加入搅拌机转鼓中搅拌均匀。

目前中国已有关于回收废塑料加入沥青混合料的研究。杨锡武等采用Ⅰ型废旧塑料改性剂(造粒工艺制作)和Ⅱ型废旧塑料改性剂(加热和加稳定剂处理工艺制作)分别制备了Ⅰ型和Ⅱ型废旧塑料改性沥青,对比分析了Ⅰ、Ⅱ型废旧塑料改性沥青及混合料的性能;何泽等分别对回收废旧塑料(RP)改性沥青及混合料

和废旧塑料经过裂化的加工塑料(CRP)改性沥青及混合料的性能进行了研究;赖增成等对低密度聚乙烯(LDPE)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)单一改性沥青及复合改性沥青的性能进行了研究。然而中国对于采用干法制备再生聚苯乙烯改性沥青混合料的研究很少,而采用废旧塑料代替部分沥青的混合料研究尚未见报道。

该文对两种PS掺配比例以替代部分沥青的沥青混凝土(AC-16S)的性能进行评价,替代率分别为1%和2%,占沥青总量的23%和46%。研究的主要目的是在不降低沥青混合料性能的情况下减少沥青混合料的沥青用量,并进行生命周期评价(LCA),比较降低沥青用量的混合料和常规混合料的环境影响。降低沥青用量从环境角度(沥青是一种石油化合物,它的储量是有限的)和经济角度来看(沥青仅占混合料总重量的4%~5%,却占总成本的60%)都是重要的。

2 材料和方法

2.1 材料

研究采用辉绿岩(2.93 g/cm^3)作为粒径大于2 mm的集料,石灰石(2.725 g/cm^3)作为较小颗粒(包含填料)组成密级配沥青混合料。对照组和试验混合

料中均使用常规的 50/70 针入度等级的沥青。对照组混合料的组成如表 1 所示,试验混合料在此基础上改变得到。

表 1 AC-16S 混合料组成及配比(REF)

集料	组成/mm	配比/%	沥青/混合料
辉绿岩	16~8	33.9	4.3
辉绿岩	8~4	24.6	
辉绿岩	4~2	8.0	
石灰岩	2~0	32.7	
石灰岩	矿粉	0.8	

此外,通过干法加入 3 种不同的聚苯乙烯(PS)样品作为改性剂:再生塑料衣架聚苯乙烯(HPS)、再生高抗冲聚苯乙烯(HIPS)和通用级聚苯乙烯(GPPS)。3 种聚合物均产自西班牙。

根据当地采石场和一家石油公司在 2015 年提供的集料和沥青成本(辉绿岩、石灰岩、50/70[#] 沥青价格分别为 16、7、450 欧元/t)数据可知,所采用的沥青混合料中沥青成本将占整个混合料成本的 61%。

所使用的塑料成本随着其预处理所需步骤的增加而增加。HPS 来自纯塑料衣架,其生产只需研磨至足够小粒度。回收的 GPPS 和 HIPS 都需要两个额外的步骤:分离杂质和使用造粒机获得相似大小的颗粒。塑料在造粒机中被加热直到熔化,然后被从一个孔压出,并切割冷却的塑料股线。

2.2 试件的制备过程

材料在试验室搅拌机中混合。大约 300 kg 材料被分成研究中 3 种不同的样品类型。集料和沥青分别加热到 170、155 ℃。对照组混合料中的原料按以下顺序加入到转鼓中:粗集料、细集料、沥青。搅拌 1 min 后,加入填料再搅拌 4 min 使所有材料搅拌均匀。

这个过程对于试验混合料略有不同,一部分沥青被等质量 PS 替代。考虑到该工艺更容易在沥青厂生产以及颗粒采用其他尺寸或形状的情况,在这些混合料中,在加入粗集料之后加入未加热的 PS,与集料搅拌 30 s,然后继续进行如前所述的过程。此外,在试验的第 1 步中,HPS 不均匀会影响密度值以及集料与 PS 的黏结。

制备 4 种不同类型的试件用于研究:圆柱形马歇尔试件(直径 101.6 mm、高度 65 mm),旋转压实试件(直径 150 mm、高度 100 mm),车辙板(410 mm×260 mm×50 mm)以及棱柱体试件(410 mm×60 mm×60

mm)。

2.2.1 试件的体积密度和空隙率

准备 4 个马歇尔试件以确定所研究的每种混合料的空隙特征。将试验得到的混合料结果与对照组混合料空隙率(西班牙标准,AC 混合料的空隙率为 4%~6%)进行对比。

2.2.2 水稳定性试验

对每种混合料的 8 个试件进行水稳定性试验(4 干、4 湿)。该试验目的是检验水对不同混合料间接拉伸强度(ITS)的影响。采用可记录试件承受拉力的传统液压机进行试验并得到冻融劈裂残留强度比。

2.2.3 车辙试验

对每个混合料的 3 个试件进行车辙试验。试验温度为 60 ℃。试验目的是通过试验仪记录的斜率分析混合料塑性变形。

2.2.4 飞散试验

尽管肯塔堡试验一般针对多孔沥青混合料,而该文研究的是密级配沥青混合料,依然采用该试验测定混合料的飞散损失。对每种配方的 4 个马歇尔试件进行肯塔堡飞散试验,得到 PS 替代沥青的试验混合料的飞散损失百分率。

2.2.5 压实性试验

每种混合料拌制两个平行试样放入旋转压实仪中进行试验计算压实功,并分析添加聚合物后压实过程中是否需要改进或不符合公式(1)。根据欧洲标准将仪器设置如下:600 kPa 压力、30 r/min 的转速和 0.82°的倾角。

$$\frac{W}{m} = \sum_1^N \frac{W_i}{m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot A}{m} \sum_1^N h_i \cdot S_i \tag{1}$$

式中:W 为压实能(kJ);m 为质量(kg);N 为循环次数; α 为圆柱形试件的倾角(rad);A 为试件截面面积(m²); h_i 为每个周期 i 中的试件高度(m); S_i 为在每个周期中测得的剪应力(kPa)。

2.2.6 刚度试验

测试每种混合料的 8 个梁状试件的刚度和相位角,试验条件为:在 20 ℃的恒温箱内施加 50 $\mu\epsilon$ 的恒定变形和 0.1~30 Hz 的不同频率。

2.2.7 抗疲劳性

采用刚度试验仪进行疲劳试验。每种混合料的 8 个试件在 30 Hz 的频率和 20 ℃的温度下进行测试。试验目的是按式(2)确定疲劳规律。

$$\epsilon(m/m) = a \times 10^{-3} N_f^b \tag{2}$$

式中: N_f 为疲劳载荷周期数; ϵ 为应变; a 和 b 为疲劳

常数。

2.3 统计数据分

利用计算机程序 Minitab17 的推理统计功能分析试验室测试的结果,对具有代表性的指标进行验证和推断。因此,推理测试用来研究 PS 是否影响沥青混合料性能。根据夏皮罗维尔克检验法 0.05 的显著性水平,通过图 1 所示的统计检验产生的 p 值来确定。

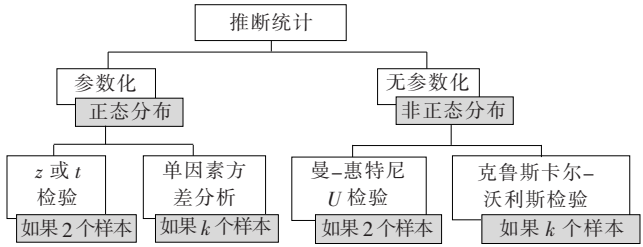


图 1 推断统计模型

2.4 生命周期评价(LCA)

LCA 提供了一个评价产品在整个生命周期中环境影响的整体框架,从提取原材料到最终处置或回收,包括生产、运输和使用等不同阶段。在这项研究的背景下,根据环境管理标准 ISO 14040:2006 (ISO 14040,2006)和 14044:2006(ISO 14044,2006)对沥青混合料进行环境分析。

每个生命周期分析包括 4 个相互依存的阶段:目标和范围、生命周期清单(LCI)、生命周期影响评估(LCIA)和结果解释(图 2)。

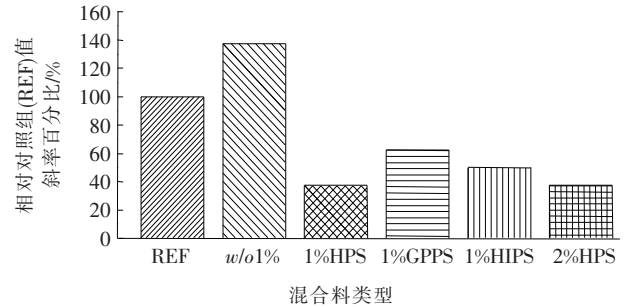


图 2 车辙试验结果对比

此外,对建模进行如下假设:① 养护是使用阶段唯一考虑的过程;② 所有情况下的预期寿命都一样;③ 预计所有的 RAP 都将在达到使用寿命时进行回收;④ 不考虑沥青和 PS 的原料能量。

3 结果与讨论

为研究 PS 替代沥青后沥青混合料的性能,采用

减少 1%、2%沥青(质量比)的沥青混合料作为对照组进行对比。

3.1 聚苯乙烯替代 1%和 2%沥青的混合料力学试验结果

含有 1%聚苯乙烯的混合料相对于对照组力学性能更好,但密度值更低。这种低密度值是由于 PS 在搅拌机中混合时达不到 100%熔化造成的,但它能变得足够软并与沥青均匀混合。此外,PS 的黏度比沥青高,温度降低时结硬更快。这种刚性导致含 PS 的混合料中空隙率更高(表 2)。实际上,通过应用图 2 中所示的方案比较试验组和对照组混合料空隙时获得的 p 值均低于 0.05,这表明它们之间的差异有统计学意义。关于水稳定性试验,如表 2 所示,所有混合料(约 100%)的干湿劈裂强度比($ITSR$)大致相同,表明水对其几乎没有影响。虽然在试验组和对照组混合料之间有一些显著差异(当用 HPS 替代 1%的沥青时 p 值为 0.03),表 2 都表明试验混合料性能的提高。

由表 2 可知:试验组混合料性能显著提高,与对照组混合料相比,斜率降低了 40%~60%(图 2)。PS 颗粒比沥青不易受温度影响,因此刚度下降少。尽管具有较高百分比的空隙,但混合料呈现出更好的抵抗塑性变形能力。因此,试验组混合料特别适用于路面易出现塑性变形的高温地区。另一方面,如表 2 所示,与所有对照值相比,试验组减少 1%的沥青($w/o1\%$)将导致混合料的力学性能较差。但是,这些变化仅仅是在空隙率方面具有统计学意义。

试验结果表明:3 种塑料中 HPS 改性效果最好。原因如下:其空隙率和密度在所有其他塑料结果的范围内,在车辙试验中表现出最好的性能,并且其制备仅需对其进行研磨,与其他塑料(HIPS 和 GPPS)相比简化了相关的过程。

当用 HPS 代替混合料中 2%的沥青时,密度低于参考值和 1%PS 混合料的值,导致空隙率升高,如表 2 所示。这说明,PS 掺量越高,空隙率越高。如在 1% PS 混合料中一样,这种现象是由未熔化的颗粒引起的,这些颗粒在混合料中会作为额外的集料,从而提高了空隙率。同样,关于这个参数的差异有统计学意义(p 值 <0.05)。

水稳定性试验(表 2)结果中 1%PS 混合料未浸水和浸水样品的 RT 值都显著降低。这表明:1%PS 样品会使混合料的水稳定性更差。然而根据欧洲标准, $ITSR$ 值为 84%仍符合常规沥青混合料规范要求。在车辙试验中 2% HPS 试验混合料得到与 1%PS 取

代沥青的混合料相似的结果,数据和统计分析都表明其抗车辙性明显优于对照组混合料(表2和图2),这是由于PS颗粒提供了额外的刚性并且降低了混合料

的温度敏感性。然而,目测2% HPS的车辙板黏结性不足,特别是在边角处容易剥离。

表2 1%、2%PS改性混合料的空隙率、水稳定性、车辙试验结果

混合料	EN 12697-8			EN 12697-12			EN 12697-22	
	密度/ (g·cm ⁻³)	混合料空 隙率/%	集料空 隙率/%	未浸水样品 的RT/kPa	浸水样品 的RT/kPa	ITSR/ %	斜率/[mm· (1 000次) ⁻¹]	车辙深 度/mm
REF	2.522	5.1	15.7	1 991	1 965	99	0.08	2.9
w/o 1%	2.489	6.4	16.8	1 939	1 749	85	0.11	3.2
1% HPS	2.452	7.8	18.0	1 810	1 836	101	0.03	1.5
1% GPPS	2.449	7.9	18.1	1 872	1 878	100	0.05	2.3
1% HIPS	2.460	7.3	17.6	1 960	2 023	102	0.04	1.8
2% HPS	2.370	11.0	20.9	1 277	1 072	84	0.03	1.6

3.2 飞散试验结果

尽管肯塔堡飞散试验不是AC混合料的常规测试,仍可用其量化上述黏结性的不足(表3)。在减少1%沥青(w/o 1%)的混合料中,材料飞散损失明显大于对照组混合料。然而,这些数值低于多孔沥青混合料的规范要求,考虑到混合料之间的差异,认为是可以接受的。

表3 肯塔堡试验(飞散试验)结果

混合料	飞散损失/%
REF	3.8
w/o 1%	10.2
1% HPS	14.4
w/o 2%	42.9
2% HPS	44.8

在替代2%沥青情况下的混合料,飞散损失高达45%(表3)而不可接受。因此对这种替代率的混合料是不可行的。在统计学上,减少1%或2%沥青的混合料与HPS替代沥青的混合料之间没有显著差异,因此无法得出混合料中HPS掺量的影响。

3.3 动态测试结果

试验研究了HPS替代1%沥青混合料的动态特性,包括压实性试验、刚度试验和疲劳试验。替代2%沥青混合料,由于缺乏黏结性,没有研究其动态特性。

压实性试验结果如图3所示,由图3表明聚苯乙烯的含量越高,达到相同密度所需的压实能越高。这些结果与PS改性混合料的密度结果一致,因为PS改性混合料的空隙率更高,需要更多的压实能才能达到

相同的压实程度。但是,试验混合料不需达到对照组混合料密度值就可得到足够的抗车辙能力。该试验结果也与添加HPS后混合料的空隙率增幅一致。统计学方面,与对照组相比没有显著差异(p 值>0.05)。

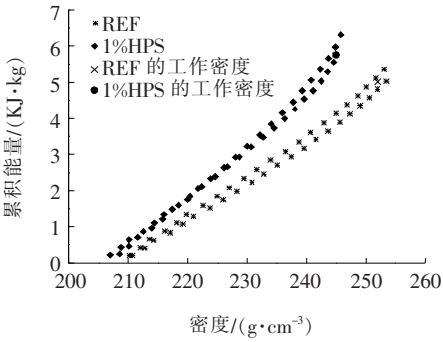


图3 压实性试验结果(累积能量与达到密度的关系)

表4和图4为刚度测试的结果,用于计算混合料的动态模量。两种情况下的刚度值非常相似,而HPS改性混合料的相位角稍低,表示更具有弹性。然而,试验组和对照组混合料的统计学比较产生了0.05的 p 值,表明它们之间的差异不显著,HPS改性混合料在车辙试验中表现出更高的性能。这可能是由于试验是在20℃进行的,沥青表现出较高的刚性。由于在这种条件下结合料的硬度较高,所以它与HPS之间的差异较小。因此,统计学分析中,HPS混合料的空隙率比车辙试验数据影响更大。混合料的疲劳试验结果如表5所示。所采用的破坏准则为混合料一旦达到 $S_0/2$ 的应力值就会破裂,其中 S_0 为初始应力即在施加的变形下经过100次循环后对应的应力值。 N 为达到该值的循环次数,也称为断裂循环, ϵ_c 为混合料在 $1\times$

10⁶ 次循环时的变形,被认为是材料疲劳强度的代表值。尽管在疲劳试验中 1% HPS 混合料的 ϵ_6 值略低(表 5),但根据统计学分析,对照组混合料和试验组混合料之间没有明显差异。

表 4 刚度试验结果(EN 12697-26)

EN 12697-26. Annex B 频率/Hz	REF 结果		1% HPS	
	动态模量+标 准差/MPa	相位角+标 准差/(°)	动态模量+标 准差/MPa	相位角+标 准差/(°)
0.1	893 ± 105	43.8 ± 1.4	1 053 ± 309	36.2 ± 0.7
0.2	1 185 ± 121	42.7 ± 1.5	1 314 ± 390	35.5 ± 0.6
0.5	1 704 ± 160	40.8 ± 1.6	1 788 ± 535	34.5 ± 0.7
1.0	2 222 ± 196	38.8 ± 1.6	2 242 ± 663	33.2 ± 0.9
2.0	2 879 ± 229	36.6 ± 1.7	2 811 ± 827	31.7 ± 1.0
5.0	3 978 ± 293	33.4 ± 1.7	3 729 ± 1 075	29.2 ± 1.2
8.0	4 641 ± 333	31.5 ± 1.7	4 271 ± 1 213	27.7 ± 1.3
10.0	4 974 ± 364	30.9 ± 1.7	4 525 ± 1 271	27.1 ± 1.3
20.0	6 207 ± 428	28.1 ± 1.7	5 431 ± 1 451	25.1 ± 2.6
30.0	6 951 ± 445	26.6 ± 1.6	6 188 ± 1 697	23.9 ± 1.3

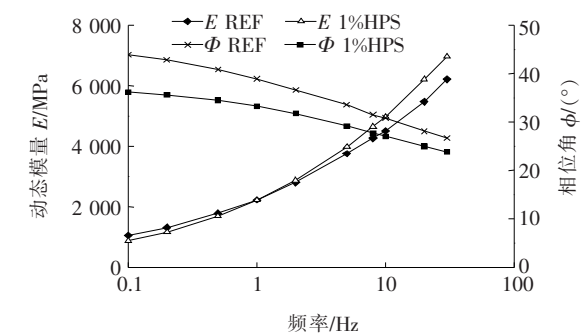


图 4 刚度试验参数比较

表 5 疲劳试验结果

EN 12697-24 Annex D	S_0 / MPa	特征函 数(ϵ_6)/ ($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	疲劳方程 (ϵ)/($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	R^2
REF	154.2	154.2	$1\,075 \times 10^{-3} \cdot N^{-0.140\,5}$	0.987 7
1% HPS	136.8	136.8	$2\,138 \times 10^{-3} \cdot N^{-0.199\,0}$	0.810 7

3.4 生命周期评价结果

LCA 的应用分两种情况,每种情况分为两种不同的方法。选取功能单元为 1 km 的道路。情况 1 中沥青的替代仅限于表面层,而情况 2 则考虑了沥青混合料的完整截面以及在表面层部分沥青材料被替换。对于两种情况使用两种不同的方法建模:① 二次材料(HPS)被认为没有环境负荷(方法 1);② 产品系统中二次材料的环境负荷计入以前的产品系统中(方法 2)。为此,使用了欧洲塑料协会(Plastics Europe,

2016)关于欧洲垃圾填埋、回收利用或能源回收率的统计数据。

对全球影响(G. I.)影响最大的类别划分为 4 个方面:气候变化生态系统(C. C. E),气候变化人体健康(C. C. H. H),不可再生资源消耗(F. D)和颗粒物形成(P. M. F)。在所提出的情况下,HPS 替代沥青的影响都归于这些影响类别的比较(图 5)。

在分析 HPS 改性表面层对环境的影响时(情况 1),考虑与二次材料(HPS)有关的环境负荷的方法是至关重要的。二次材料没有经过特殊处理,它们的环境负荷只在其首次制造时产生(方法 1),所以在沥青混合料中使用 HPS 被认为是有利的。相反,当二次材料改性混合料的预期使用寿命等于对照组混合料的使用寿命却没有改进力学性能(方法 2)时,表明在沥青混合料中使用 HPS 这种改性方法稍有不合格。

当分析整个沥青混合料结构层时(情况 2),两种方法得到的结果表明:将 HPS 掺入沥青混合料中对环境略有好处。此外,将沥青和 HPS 的原料能量包含在 LCA 中已被证明影响其结果,在所有情况下,HPS 略优于沥青。将 HPS 掺入沥青混合料会延长其使用寿命,从而减少道路造成的全球环境破坏(图 6)。由图 6 可知:随着预期寿命的增加,潜在的环境指数降低。

4 结论

(1) 该研究的目的是探讨通过聚苯乙烯(PS)替代

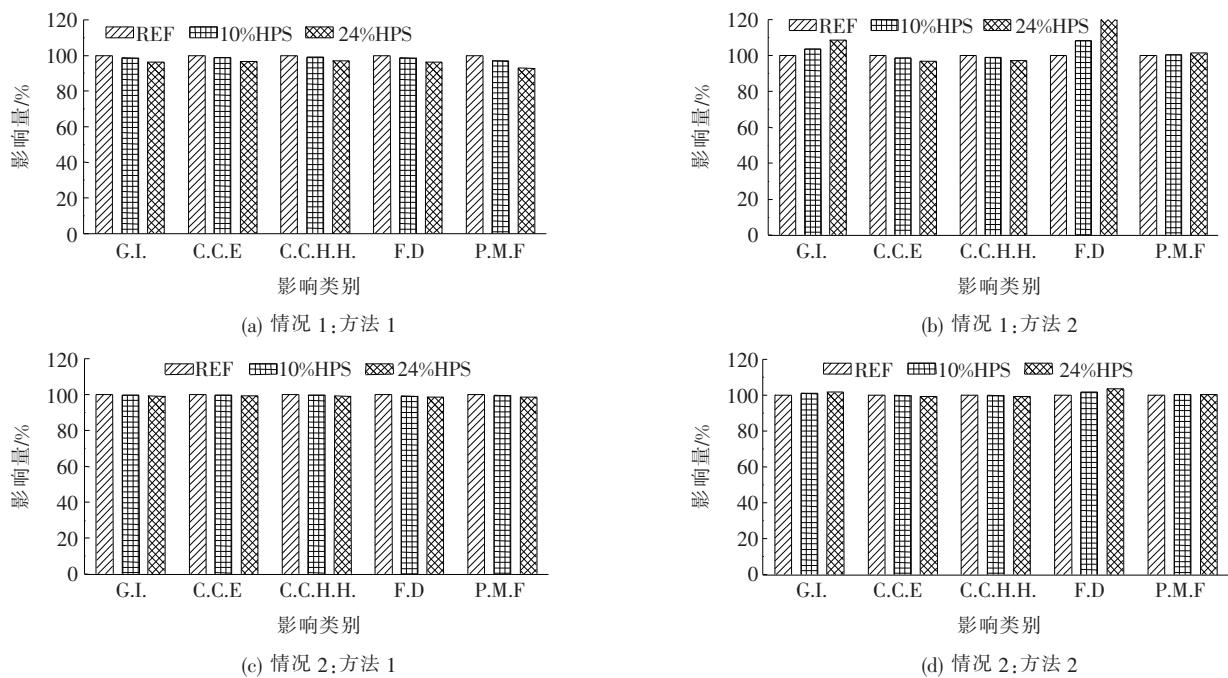


图 5 不同影响类别产生的影响

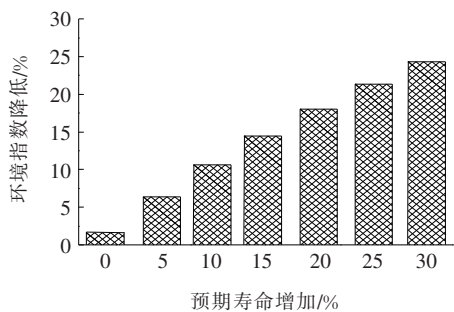


图 6 道路路面预期寿命的增加

部分沥青混合料中的沥青从而获得由于 PS 的通用性和可回收性产生的潜在效益。因此,在混合料中 1% 的沥青被 PS 取代的情况下能达到沥青用量减少和回收聚合物的再利用的目的。PS 替代 2% 沥青的混合料缺乏黏结力,故放弃了这一方案的研究。

(2) 1% 沥青被 PS 替代的混合料即使空隙率较高,仍然达到了对照组混合料的力学性能并改善了一些其他性能。抗车辙性能改善尤其显著,车辙变形减少了 50%。压实性试验表明需要较高的累积能量来达到与对照组混合料相同的密度。然而,所评价的混合料显示出具有较高的空隙率,因此这种混合料的设计可能需要与传统混合料使用不同的标准。动态模量和疲劳的结果完全符合常规 AC 混合料数值范围。

(3) 对于 HPS 替代 2% 的沥青,高替代率使混合料缺乏黏结性,因此需要对其进行额外的试验。通过

常用于评价多孔混合料的肯塔堡飞散试验测试其黏结性。这种技术提供的最显著的优点是由于 PS 给混合料提供了更大的硬度,这在一定温度条件(例如研究中的温度条件)下是非常有利的性质。然而,这种特点可能导致低温抗裂性的不足。

(4) 通过对不同类型的沥青混合料进行生命周期评价发现:HPS 改性沥青混合料在 4 个方面的影响(不考虑力学性能的提高)几乎没有降低。根据车辙试验结果,HPS 改性沥青混合料的抗车辙性能明显更好,可能延长路面的预期寿命,从而在不增加施工期间产生环境影响的情况下延长道路的使用寿命。

(5) 用聚苯乙烯替代沥青减少了沥青生产和加工中所产生的大气排放,提高了社会和环境效益。而且,通过干法将 PS 掺入混合料中不需要工艺的重大改变,并且可以在任何常规设备中进行,与传统沥青混合料生产相比不会增加成本。

——编译自:Marta Vila—Cortavitarte, Pedro Lastra—González, Miguel Angel Calzada—Pérez, Irune Indacochea—Vega. Analysis of the Influence of Using Recycled Polystyrene as a Substitute for Bitumen in the Behaviour of Asphalt Concrete Mixtures[J]. Journal of Cleaner Production, 2017:1 279—1 287.