

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.11.005

# 橡塑合金改性沥青混合料路用性能研究

李宁利<sup>1</sup>, 王 猛<sup>1</sup>, 赵新坡<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津高速公路集团有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 为了研究橡塑合金改性沥青混合料的路用性能, 采用精密开炼机将废轮胎胶粉和废塑料制备成橡塑合金, 对基质沥青及混合料进行改性, 采用正交试验确定 AC-13 型、SMA-13 型橡塑合金改性沥青混合料的成型参数, 通过车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和小梁弯曲试验, 对橡塑合金改性沥青混合料和废轮胎胶粉改性沥青混合料的路用性能进行对比研究。结果表明, AC-13 型橡塑合金改性沥青混合料的成型参数分别为油石比 4.8%、拌和温度 180 °C、击实温度 165 °C; SMA-13 型橡塑合金改性沥青混合料的成型参数分别为油石比 6.1%、拌和温度 185 °C、击实温度 170 °C, 与废轮胎胶粉改性沥青混合料相比, 橡塑合金改性沥青混合料的高温稳定性和水稳定性更好, 但低温抗裂性较差。

**关键词:** 道路工程; 路用性能; 施工参数; 橡塑合金; 改性沥青混合料

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2022)11-046-13

## Study on road performance of rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture

LI Ningli<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, ZHAO Xinpo<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Tianjin Expressway Group Co., Ltd., Tianjin 300384, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the road performance of rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture, the rubber-and-plastic alloy is prepared from waste tire rubber and powder and waste plastic by precision mixer, and used to modify the matrix asphalt and mixture. The molding parameters of AC-13 and SMA-13 rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture are determined by orthogonal test. The road performances of rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture and waste-tire-rubber-and-powder-modified asphalt mixture are compared by rutting test, immersion marshall test, freeze-thaw splitting test and beam bending test. The results show that the molding parameters of AC-13 rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture are asphalt to aggregate ratio 4.8%, mixing temperature 180 °C and compaction temperature 165 °C, and the molding parameters of SMA-13 rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture are asphalt to aggregate ratio 6.1%, mixing temperature 185 °C and compaction temperature 170 °C. Compared with waste-tire-rubber-and-powder-modified asphalt mixture, rubber-and-plastic-alloy-modified asphalt mixture has better high-temperature stability and water stability, but poor low-temperature crack resistance.

**收稿日期:** 2022-06-05

**基金项目:** 天津市交通运输科技发展计划项目(2016A-01-02)。

Supported by Tianjin Transportation Science and Technology Development Plan Project (2016A-01-02).

**作者简介:** 李宁利(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事沥青路面结构与材料研究, (E-mail) lnl808@hebut.edu.cn.

**Keywords:** road engineering; road performance; construction parameters; rubber-and-plastic alloy; modified asphalt mixture

近年来,废轮胎、废塑料堆积造成的环境污染问题受到社会的广泛关注。实践证明,2种废旧高分子材料在高速公路路面材料中的应用取得了较好成果<sup>[1-5]</sup>。但废轮胎胶粉和废塑料与沥青的相容性较差<sup>[6-12]</sup>,有学者借鉴金属材料中合金的概念<sup>[13]</sup>,预先将废轮胎胶粉和废塑料通过特定工艺,制备成橡塑合金改性剂,废轮胎胶粉和废塑料可以通过前期扩散渗透,在改善与基质沥青相容性的同时,兼顾沥青及其混合料的性能<sup>[14-15]</sup>。学者普遍采用双螺旋杆挤出机制备橡塑合金,双螺杆挤出机输送性能和混合性能良好、生产能力强,但在使用过程中容易出现物料逆流的现象,大部分热量要从料筒外部的加热器传入,这种特性会导致物料的热降解,降低材料的使用性能<sup>[16]</sup>。基于此,文中采用精密开炼机混炼所得的橡塑合金以及市售废旧轮胎橡胶粉分别对伦特70#基质沥青进行改性,选择AC-13及SMA-132种级配类型,橡塑合金改性沥青和废轮胎胶粉改性沥青2种沥青拌制混合料并进行试验,分析橡塑合金改性沥青混合料的高温稳定性、水稳定性以及低温抗裂性。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

伦特70#基质沥青:25℃针入度66(0.1mm),10℃延度37.1cm,软化点49.8℃,15℃密度1.028g/cm<sup>3</sup>;废旧轮胎橡胶粉:粒径40目,密度1.18Mg/m<sup>3</sup>,加热减量0.6%,纤维含量0.3%;废旧塑料(LDPE):密度0.917g/cm<sup>3</sup>,拉伸强度10MPa,熔点110℃。增溶剂:糠醛抽出油,密度0.9~1.01g/cm<sup>3</sup>,闪点>210℃;稳定剂:硫磺,表观密度0.8~1.0g/cm<sup>3</sup>,熔点≥110℃,水分≤5%。

橡塑合金改性剂由精密开炼机制备,橡塑质量比为7:3。粗集料、细集料和矿粉物理力学指标如表1~表3所示。选择AC-13及SMA-132种级配类型,级配范围及合成级配如表4、表5所示,级配曲线如图1、图2所示。

表1 粗集料物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of coarse aggregate

项 目	试验结果/mm		规范要求	试验方法
	10~15	5~10		
压碎值/%	12.1	—	≤26	T0316
洛杉矶磨耗损失/%	—	13	≤28	T0317
表观相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.825	2.882	≥2.6	T0304
吸水率/%	1.51	1.26	≤2.0	T0305
坚固性/%	3	—	≤12	T0314
针片状含量/%	7.3	6.8	≤15	T0312
水洗法<0.075mm 颗粒含量/%	0.3	0.5	≤1	T0310
软石含量/%	1.1	1.3	≤3	T0320
磨光值/%	47	—	≥42	T0321

表 2 细集料物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of fine aggregates

项 目	试验结果	规范要求	试验方法
表观相对密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.751	$\geq 2.5$	T0328
毛体积密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.720	实测	T0330

表 3 矿粉技术指标

Table 3 Technical indexes of mineral powder

项 目	试验结果	规范要求	试验方法
表观密度/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2.741	$\geq 2.50$	T0352
粒度范围 $<0.6 \text{ mm}/\%$	100.0	100	T0351
粒度范围 $<0.15 \text{ mm}/\%$	96.5	90~100	T0351
粒度范围 $<0.075 \text{ mm}/\%$	94.3	75~100	T0351
外观	无团粒结块	无团粒结块	—
亲水系数	0.5	$< 1$	T0353

表 4 AC-13 级配范围及合成级配

Table 4 AC-13 gradation range and mixed gradation

项 目	通过各级筛孔/mm						质量百分率/%				
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
筛孔尺寸/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配 要求	最小	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4
	中值	100	95	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10	6
	最大	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8
合成级配	100	96.7	83.9	54.2	37.5	27.9	18.7	12.9	10.2	8	

表 5 SMA-13 级配范围及合成级配

Table 5 SMA-13 gradation range and mixed gradation

项 目	通过各级筛孔/mm						质量百分率/%				
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
筛孔尺寸/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配 要求	最小	100	90	50	20	15	14	12	10	9	8
	中值	100	95.0	62.5	27.0	20.5	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0
	最大	100	100	75	34	26	24	20	16	15	12
合成级配	100	93.2	67.4	28.4	21.2	17.6	14.1	12	10.5	8.7	

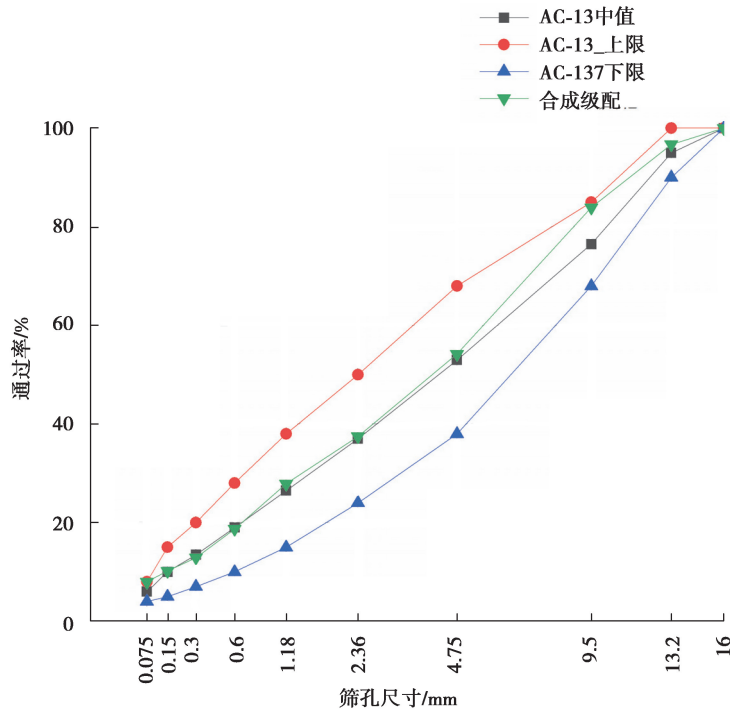


图 1 AC-13 级配曲线

Fig 1 AC-13 gradation curve

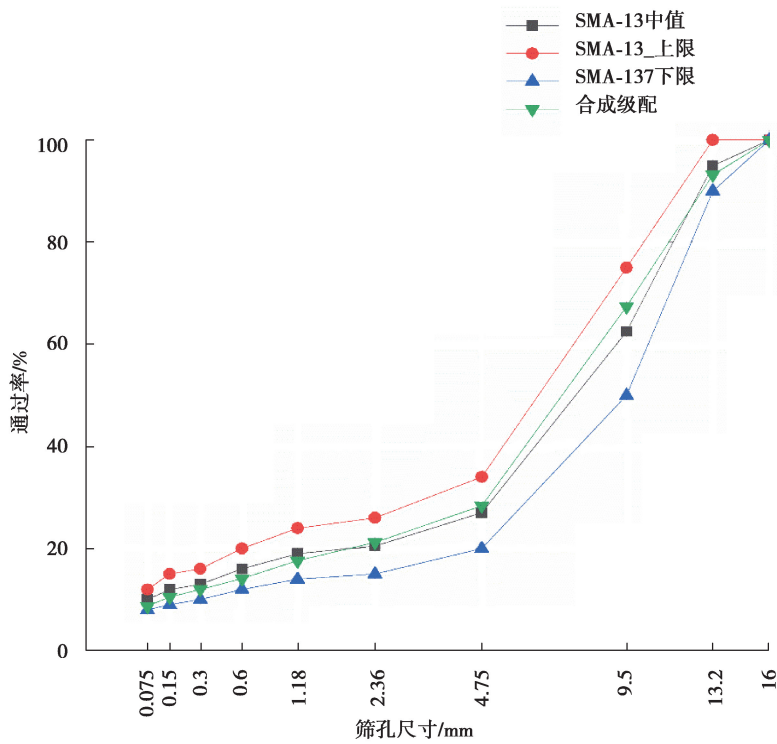


图 2 SMA-13 级配曲线

Fig. 2 SMA-13 gradation curve

## 1.2 改性沥青的制备

### 1.2.1 橡塑合金改性沥青的制备

取一定质量的沥青加热至 180 °C,分批加入橡塑合金(外掺 20%)、增溶剂(外掺 2%),手持玻璃棒快速

搅拌直至橡塑合金全部溶于沥青后,开启高速剪切乳化机,在 3 500 r/min 的转速下剪切 1.5 h,加入稳定剂(外掺 9%),搅拌均匀后溶胀发育 0.5 h,即可制得橡塑合金改性沥青,路用技术指标如表 6 所示。

### 1.2.2 废轮胎胶粉改性沥青的制备

将称重后的沥青加热至 180 ℃,分批加入废轮胎胶粉(外掺 20%),手持玻璃棒快速搅拌 15 min,当废旧轮胎橡胶粉完全溶于沥青时,在高速剪切乳化机中,以 3 500 r/min 的速度剪切 1 h,加入稳定剂(外掺 3%),搅拌均匀后溶胀发育 0.5 h,即可制得废轮胎胶粉改性沥青,路用技术指标如表 6 所示。

表 6 橡塑合金改性沥青和废轮胎胶粉改性沥青路用技术指标试验结果

Table 6 Technical index test results of rubber-plastic alloy modified asphalt and waste tire rubber powder modified asphalt

改性沥青 种类	离析试验			25 ℃ 针入度 (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃延度/ cm
	试样上部 软化点/℃	试样下部 软化点/℃	软化点差/℃			
橡塑合金 改性沥青	62.5	64.1	1.6	42.8	66.7	6.5
废轮胎胶粉改性沥青	55.8	61.1	5.3	54.4	62.7	12.7

由表 6 可知,废轮胎胶粉改性沥青的离析现象十分严重,不能满足有关改性沥青规范中关于离析软化点差不超过 5 ℃的要求<sup>[17]</sup>。而橡塑合金改性沥青,离析软化点差大幅降低,仅为 1.6 ℃,能够满足要求,说明橡塑合金改性沥青与废轮胎胶粉改性沥青相比,具有优良的储存稳定性;与胶粉改性沥青相比,橡塑合金改性沥青的针入度减小、软化点增大,延度减小,说明橡塑合金改性沥青的稠度较大,高温稳定性较好,低温抗裂性能较差。由此可知,胶粉改性沥青适用于温区,而橡塑合金改性沥青适用于热区,气候分区见《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)附录 A<sup>[16]</sup>。

### 1.3 改性沥青混合料成型参数

废轮胎胶粉改性沥青混合料采用马歇尔设计方法,确定 AC-13 型废轮胎胶粉改性沥青混合料最佳油石比为 4.8%, SMA-13 型废轮胎胶粉改性沥青混合料最佳油石比为 6.1%。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)拟定 AC-13 型废轮胎胶粉改性沥青混合料拌和温度 170 ℃,击实温度 165 ℃,拟定 SMA-13 型废轮胎胶粉改性沥青混合料拌和温度 175 ℃,击实温度 160 ℃。

根据既有经验,初拟 AC-13 橡塑合金改性沥青混合料的油石比为 4.8%,初拟 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料沥青混合料的油石比为 6.1%,分别以初拟油石比±0.5%分别制备马歇尔试件。此外,由于废轮胎胶粉弹性较好,含有胶粉的橡塑合金改性沥青和废轮胎胶粉改性沥青弹性好、黏度高,且随着橡塑合金中 LDPE 的加入还会提高沥青混合料的拌和、击实温度。初拟 AC-13 橡塑合金改性沥青混合料的拌和温度为 175 ℃、180 ℃和 185 ℃,击实温度为 165 ℃、170 ℃、175 ℃。由于 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料中矿粉用量较高,因此, SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料的初拟拌和温度和击实温度需要适当提高,初拟拌和温度为 180 ℃、185 ℃和 190 ℃,击实温度为 170 ℃、175 ℃和 180 ℃。

#### 1.3.1 基于正交试验的 AC-13 沥青混合料成型参数

影响沥青混合料性能的影响因素分别为油石比、拌和温度和击实温度,每个因素又分为 3 个水平,因此选用三因素三水平正交表设计试验方案,通过马歇尔稳定度、流值和空隙率,确定最佳方案。AC-13 橡塑合金改性沥青混合料成型因素水平如表 7 所示,正交试验设计如表 8 所示。

表 7 AC-13 橡塑合金改性沥青混合料成型因素水平

Table 7 Forming factor level of AC-13 rubber and plastic alloy modified asphalt mixture

水平	影响因素		
	油石比/%	拌和温度/°C	击实温度/°C
1	4.3 (1)	175 (1)	165 (1)
2	4.8 (2)	180 (2)	170 (2)
3	5.3 (3)	185 (3)	175 (3)

按照表 8 的正交试验方案进行试验,每组方案进行 4 次平行试验,当某个测定值与平均值之差大于标准差的 1.15 倍时,则舍弃该值,取满足误差要求的试验结果,如表 9 所示。

表 8 AC-13 橡塑合金改性沥青混合料正交试验设计表

Table 8 Orthogonal experimental design of AC-13 rubber and plastic alloy modified asphalt mixture

试验号	油石比/%	拌和温度/°C	击实温度/°C
1	4.3(1)	175(1)	165(1)
2	4.3(1)	180(2)	170(2)
3	4.3(1)	185(3)	175(3)
4	4.8(2)	175(1)	170(2)
5	4.8(2)	180(2)	165(1)
6	4.8(2)	185(3)	175(3)
7	5.3(3)	175(1)	170(2)
8	5.3(3)	180(2)	175(3)
9	5.3(3)	185(3)	165(1)

表 9 正交试验结果

Table 9 Results of orthogonal test

试验号	稳定度/kN	流值/(0.1mm)	空隙率/%
1	11.10	20.2	5.5
2	11.30	20.7	4.9
3	11.70	21.0	5.1
4	12.13	22.5	4.2
5	13.48	21.3	4.1
6	12.80	21.7	3.8
7	12.61	23.4	4.8
8	12.03	22.8	4.0
9	13.29	24.6	4.3

对试验结果进行极差分析,发现不同因素对试验指标的影响。由橡塑合金改性沥青的路用性能可知,橡塑合金改性沥青高温稳定性较好,低温抗裂性较差,适用于炎热地区。参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)<sup>[1]</sup>对密级配沥青混凝土混合料马歇尔试验技术标准中夏炎热区空隙率的要求,设定目标空隙率为 4%,稳定度取较大值,流值取较小值。极差分析结果如表 10 所示。

表 10 极差分析结果  
Table 10 Results of range analysis

试验指标	分析指标	A(油石比)	B(拌和温度)	C(击实温度)	最佳组合
稳定度/kN	$\bar{K}_1$	11.37	11.95	11.98	A2B3C3
	$\bar{K}_2$	12.80	12.27	12.24	
	$\bar{K}_3$	12.64	12.60	12.60	
	R	1.44	0.65	0.62	
流值/(0.1 mm)	$\bar{K}_1$	20.63	22.03	21.57	A1B2C1
	$\bar{K}_2$	21.83	21.60	22.60	
	$\bar{K}_3$	23.60	22.43	21.90	
	R	2.97	0.83	1.03	
空隙率/%	$\bar{K}_1$	5.15	4.83	4.46	A2B2C1
	$\bar{K}_2$	4.06	4.33	4.48	
	$\bar{K}_3$	4.38	4.42	4.64	
	R	1.09	0.50	0.19	

由表 10 可知,影响稳定度的因素排序为  $A > B > C$ ,影响流值的因素排序为  $A > C > B$ ,影响空隙率的因素排序为  $A > B > C$ ,表明油石比的大小是影响橡塑合金改性沥青混合料稳定度、流值和空隙率的主要因素,拌和温度为次要因素,击实温度影响最小。综上分析,可以确定的最佳组合为 A2B2C1,即油石比 4.8%,拌和温度 180 °C,击实温度 165 °C。其体积参数接近目标空隙率,说明 A2B2C1 组合可以作为最佳组合。

### 1.3.2 基于正交试验的 SMA-13 沥青混合料成型参数

SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料成型因素水平、正交试验设计如表 11、表 12 所示,正交试验结果如表 13 所示,极差分析结果如表 14 所示。

表 11 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料成型因素水平  
Table 11 Forming factor level of SMA-13 rubber and plastic alloy modified asphalt mixture

水平	影响因素		
	油石比/%	拌和温度/°C	击实温度/°C
1	5.6 (1)	180 (1)	170 (1)
2	6.1 (2)	185 (2)	175 (2)
3	6.6 (3)	190 (3)	180 (3)

表 12 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料正交试验设计表

Table 12 Orthogonal test design of SMA-13 rubber and plastic alloy modified asphalt mixture

试验号	油石比/%	拌和温度/°C	击实温度/°C
1	5.6 (1)	180 (1)	170 (1)
2	5.6 (1)	185 (2)	175 (2)
3	5.6 (1)	190 (3)	180 (3)
4	6.1 (2)	180 (1)	175 (2)
5	6.1 (2)	185 (2)	170 (1)
6	6.1 (2)	190 (3)	180 (3)
7	6.6 (2)	180 (1)	175 (2)
8	6.6 (2)	185 (2)	180 (3)
9	6.6 (2)	190 (3)	170 (1)

表 13 正交试验结果

Table 13 Results of orthogonal test

试验号	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)	空隙率/%
1	9.2	22.8	4.8
2	8.8	23.4	4.7
3	9.0	23.7	4.4
4	9.5	25.4	4.0
5	9.9	24.1	4.3
6	10.0	24.5	3.8
7	9.8	26.4	4.2
8	10.0	25.8	4.5
9	9.4	27.8	4.3

表 14 极差分析结果

Table 14 Results of range analysis

试验指标	分析指标	A(油石比)	B(拌和温度)	C(击实温度)	最佳组合
稳定度/ kN	$\bar{K}_1$	9.00	9.50	9.73	A2B2C1
	$\bar{K}_2$	9.78	9.57	9.22	
	$\bar{K}_3$	9.75	9.46	9.58	
	R	0.78	0.11	0.51	



续表 14

试验指标	分析指标	A(油石比)	B(拌和温度)	C(击实温度)	最佳组合
流值/ (0.1 mm)	$\bar{K}1$	23.30	24.87	24.37	A1B2C1
	$\bar{K}2$	24.67	24.43	25.53	
	$\bar{K}3$	26.67	25.33	24.73	
	R	3.37	0.90	1.17	
空隙率/%	$\bar{K}1$	4.63	4.33	4.37	A2B3C3
	$\bar{K}2$	4.03	4.50	4.33	
	$\bar{K}3$	4.33	4.17	4.30	
	R	0.60	0.33	0.07	

由表 14 可知,影响稳定度的因素排序为  $A > C > B$ ,影响流值的因素排序为  $A > C > B$ ,影响孔隙率的因素排序为  $A > B > C$ ,表明在所选 3 个因素中,油石比对于的试验结果的影响程度最为重要,拌和温度和压实温度次之。按照表 5.12 中最优者可得最佳方案为 A2B2C1,试验结果空隙率接近目标空隙率 4%,说明 A2B2C1,即油石比 6.1%、拌和温度 185 °C、击实温度 170 °C,为 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料的最佳制备工艺。按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)<sup>[18]</sup>对 SMA 沥青混合料配合比设计的要求,对成型的马歇尔试件,进行谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验,测试结果如表 15 所示,均满足规范要求。

表 15 SMA-13 橡塑合金改性沥青混合料谢伦堡沥青析漏和肯塔堡飞散试验结果

Table 15 Results of Schellenburg asphalt leakage and Kentarburg dispersion test for SMA-13 rubber and plastic alloy modified asphalt mixture

沥青析漏损失/%	要求	沥青混合料飞散损失/%	要求
0.093	$\leq 0.1$	13.2	$\leq 15$

为方便叙述,下文将 AC-13 型橡塑合金改性沥青混合料简化为 AC-13-A,AC-13 型废轮胎胶粉改性沥青混合料简化为 AC-13-R,同理,SMA-13 型沥青混合料相应简化为 SMA-13-A、SMA-13-R。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高温稳定性

高温稳定性是指沥青路面高温条件下抵抗变形的能力<sup>[19]</sup>。由于室内车辙试验设备操作简单,试验结果直观且与沥青路面车辙的相关性较好,能够模拟实际中车辆荷载在路面上行走形成车辙的过程,采用室内车辙试验测试沥青混合料的高温稳定性,用轮碾成型机制备试件,试件尺寸为长 300 mm×宽 300 mm×厚 50 mm,车辙试验动稳定度结果如表 16 所示。

表 16 车辙试验结果

Table 16 Results of rutting test

混合料类型	动稳定度 (次/mm)	平均值 (次/mm)	标准偏差	变异系数 /%
AC-13-A	5 274	5 463	169.340 6	3.1
	5 431			
	5 685			

续表 16

混合料类型	动稳定度 (次/mm)	平均值 (次/mm)	标准偏差	变异系数 /%
AC-13-R	4 226	4 485	223.353 7	5.0
	4 457			
	4 771			
SMA-13-A	8 093	8 281	176.931 2	2.1
	8 232			
	8 518			
SMA-13-R	7 173	7 408	189.860 2	2.6
	7 412			
	7 638			

由表 16 可知,橡塑合金改性沥青、废轮胎胶粉改性沥青混合料均具有优良的高温稳定性,AC-13-A 型相比 AC-13-R 型沥青混合料动稳定度可提高 22%,SMA-13-A 型相比 SMA-13-R 型沥青混合料动稳定度可提高 12%,说明橡塑合金改性沥青混合料的高温抗车辙性能较好,可以推断,与废轮胎胶粉改性沥青混合料相比,橡塑合金中的塑料成分的掺入,阻止了沥青混合料的流动,明显提高了沥青混合料的高温抗车辙性能。虽然,制备橡塑合金的配比略有差异,同类研究也通过车辙试验表明,橡塑合金改性沥青混合料具有优良的高温抗车辙性能<sup>[20-21]</sup>。橡塑合金加入到基质沥青中,沥青的针入度降低,软化点升高,橡塑合金在沥青中形成均匀的网状结构,限制了沥青的流动,沥青混合料的黏度提高。橡塑合金对改性沥青混合料在高温时的稳定性起着重要作用。

## 2.2 水稳定性

沥青路面在使用过程中暴露于外界环境中,在水的作用以及车辆行驶产生的动态荷载作用,使得水分逐渐渗入混合料中集料与沥青的界面之间,沥青路面混合料空隙中的水不断浸蚀、冲刷着混合料,降低了沥青的黏附性并导致沥青丧失黏结力,集料表面的沥青膜剥离脱落,混合料表面松散、掉粒,最终使得沥青路面产生坑槽、推挤变形等损坏现象。

文中采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验方法评价 AC-13-A 型、AC-13-R 型、SMA-13-A 型和 SMA-13-R 型沥青混合料的水稳定性。浸水马歇尔试验结果如表 17 所示。

表 17 浸水马歇尔试验结果

Table 17 Results of the immersion Marshall test

混合料类型	浸水前 稳定度/kN	浸水后 稳定度/kN	残留稳定度/%	要求	试验方法
AC-13-A	13.3	11.8	88.72	≥85	T 0709
AC-13-R	12.5	10.7	85.60		
SMA-13-A	9.6	8.4	87.50	≥80	
SMA-13-R	9.2	8.0	86.68		

由表 17 可知,4 种沥青混合料的残留稳定度均满足规范要求,AC-13 型和 SMA 型沥青混合料的残留稳定度比较接近,说明 2 种级配的混合料水稳定性相近;级配类型相同时,橡塑合金改性沥青混合料稳定度高于废轮胎胶粉改性沥青混合料,说明橡塑合金改性沥青混合料水稳定性优于废轮胎胶粉改性沥青混合料。冻融劈裂试验与浸水马歇尔试验不同,试验条件更为严酷,使用最为广泛。冻融劈裂试验过程中,马歇尔试

件会经历真空饱水、冻结和高温水浴 3 个状态。真空饱水状态下水快速进入混合料的空隙中,在压力作用下侵入沥青和集料的表面上,降低其黏附性。在低温和高温 2 个状态循环时,空隙中水的体积会发生变化从而产生动水压力。因此,冻融劈裂试验在短时间内能较好地模拟路面实际状况,冻融劈裂试验试验结果如表 18 所示。

表 18 冻融劈裂试验结果  
Table 18 Results of freeze-thaw splitting test

混合料 类型	未冻融劈裂强度 $R_{T1}$ /MPa	冻融劈裂强度 $R_{T2}$ /MPa	TSR/%
AC-13-A	1.237	1.094	88.440
AC-13-R	1.192	1.013	84.983
SMA-13-A	1.145	1.010	88.210
SMA-13-R	0.973	0.809	83.145

由表 18 可知,对于 AC-13-R、SMA-13-R 2 种级配类型混合料,橡塑合金改性剂能分别提高沥青混合料的冻融劈裂强度比 3.457%、5.065%,由此可知,与胶粉改性沥青混合料相比,橡塑合金中的塑料成分能提高沥青混合料的水稳定性。虽然,制备橡塑合金的配比略有差异,浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验证明橡塑合金改性沥青混合料具有较好的水稳定性<sup>[20-21]</sup>。

### 2.3 低温抗裂性

沥青混合料具有一定的应力松弛能力,气温降低产生的温度应力会因混合料的松弛能力而得到缓解。但气温降低速率较快时,沥青混合料应变的松弛相对于温度应力出现滞后,且低温时沥青混合料的松弛模量增大,松弛性能降低,温度应力不断积累直至超过沥青混合料的极限,混合料会开裂。采用低温小梁弯曲试验,以抗弯拉强度  $R_B$ 、最大弯拉应变  $\epsilon_B$ 、弯曲劲度模量  $S_B$  作为沥青混合料低温性能的评定指标,试验结果如表 19 所示。

由表 19 可知,AC-13-A 型沥青混合料与 AC-13-R 型沥青混合料相比,抗弯拉强度降低了 7.3%,最大弯拉应变降低了 3.2%;SMA-13-A 型沥青混合料与 SMA-13-R 型沥青混合料相比,抗弯拉强度降低了 6.4%,最大弯拉应变降低了 4.3%,2 种级配类型的沥青混合料变化趋势一致。说明随着塑料成分的加入,沥青混合料的低温抗裂性会有一定程度的降低。

表 19 小梁弯曲试验结果  
Table 19 Results of trabecular bending test

混合料 类型	抗弯拉强度 $R_b$ /MPa	平均值	最大弯拉 应变 $\epsilon_B$ / $\mu\zeta$	平均值	弯曲劲度模量/ MPa	平均值
AC-13-A	13.90	14.33	3 380.11	3 492.78	4 111.79	4 102.51
	14.40		3 530.18		4 079.84	
	15.47		3 562.09		4 342.42	
	13.40		3 228.93		4 151.44	
	15.59		3 682.91		4 233.17	
	13.21		3 572.43		3 696.39	

续表19

混合料 类型	抗弯拉强度 $R_b$ /MPa	平均值	最大弯拉 应变 $\epsilon_B$ / $\mu\zeta$	平均值	弯曲劲度模量/ MPa	平均值
AC-13-R	15.00	15.46	3 242.42	3 610.31	4 626.22	4 302.03
	15.54		3 396.38		4 576.76	
	16.69		3 714.77		4 494.07	
	14.47		3 864.81		3 743.38	
	16.83		3 632.89		4 631.69	
	14.25		3 810.61		3 740.08	
SMA-13-A	12.31	13.62	3 606.49	3 617.47	3 414.27	3 764.31
	12.86		3 569.28		3 602.08	
	13.39		3 552.43		3 770.50	
	13.86		3 545.57		3 907.97	
	14.03		3 771.89		3 719.74	
	15.26		3 659.17		4 171.32	
SMA-13-R	14.13	14.56	3 625.79	3 781.48	3 896.29	3 871.74
	14.64		3 786.77		3 866.01	
	15.72		3 542.81		4 437.94	
	13.63		3 521.77		3 868.91	
	15.85		3 950.60		4 011.31	
	13.42		4 261.17		3 149.96	

### 3 结 论

1) 基于正交试验设计,以马歇尔试验得到的体积参数为指标可知橡塑合金改性沥青混合料的成型参数,即 AC-13 改性沥青混合料成型工艺为油石比 4.8%、拌和温度 180 °C、击实温度 165 °C;SMA-13 型改性沥青混合料的成型工艺为油石比 6.1%、拌和温度 185 °C、击实温度 170 °C。

2) 与废轮胎胶粉相比,橡塑合金能够提高 AC-13-A 型沥青混合料动稳定度 22%,SMA-13-A 型沥青混合料动稳定度 12%,表明橡塑合金改性沥青混合料高温性能优于废轮胎胶粉改性沥青混合料。

3) 与废轮胎胶粉相比,橡塑合金能够小幅提高 AC-13、SMA-13 2 种级配类型沥青混合料的水稳定性,但会小幅降低 AC-13、SMA-13 2 种级配类型沥青混合料的低温抗裂性。

#### 参考文献:

- [1] Yu B, Jiao L Y, Ni F J, et al. Evaluation of plastic-rubber asphalt: engineering property and environmental concern[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 416-424.
- [2] Bansal S, Kumar Misra A, Bajpai P. Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017, 6(2): 442-448.
- [3] Yan K Z, Xu H B, You L Y. Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 143-149.
- [4] Zhang F, Hu C B. The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(2): 729-741.
- [5] Navarro F J, Partal P, Martínez-Boza F J, et al. Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications: Thermo-mechanical properties[J]. Polymer Testing, 2010, 29(5): 588-595.

- [6] White G, Reid D. Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders[C]. 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Queensland : 2018.
- [7] 杨锡武,刘克,杨大田.PE改性沥青的几个问题[J].中外公路,2008,28(6):203-207.  
Yang X W, Liu K, Yang D T. Some problems of PE modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6):203-207. (in Chinese)
- [8] 熊保林,王秋敏,谭继宗.复合改性橡胶沥青存储稳定性研究[J].公路与汽运,2017(1):76-78.  
Xiong B L, Wang Q M, Tan J Z. Study on storage stability of compound modified rubber asphalt[J]. Highways & Automotive Applications, 2017(1):76-78. (in Chinese)
- [9] 肖川,蒋兴华,杨锡武,等.废旧塑料改性沥青储存稳定性试验[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(5):943-947.  
Xiao C, Jiang X H, Yang X W, et al. Experimental study on storage stability of waste plastic-modified asphalt[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(5): 943-947.(in Chinese)
- [10] 王征,左娜,杨军,等.废旧塑料橡胶复合改性沥青性能研究[J].石油沥青,2014,28(3):5-8.  
Wang Z, Zuo N, Yang J, et al. Research on properties of composite modified asphalt made of waste plastic and rubber[J]. Petroleum Asphalt, 2014, 28(3): 5-8.(in Chinese)
- [11] 李玉环.废旧塑料改性沥青的研究[D].青岛:中国石油大学,2010.  
Li Y H. Study on asphalt modified by waste plastics[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010. (in Chinese)
- [12] Wang S F, Wang Q, Wu X Y, et al. Asphalt modified by thermoplastic elastomer based on recycled rubber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 678-684.
- [13] 任瑞波,耿立涛,徐强,等.废旧橡塑合金改性剂制备及其改性基质沥青的机理[J].建筑材料学报,2016,19(3):528-533.  
Ren R B, Geng L T, Xu Q, et al. Preparation of reclaimed rubber-plastic alloying agent and its modification mechanism on matrix asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 528-533.(in Chinese)
- [14] 谭坦.废旧橡塑合金改性沥青混合料路用性能及应用研究[D].济南:山东建筑大学,2014.  
Tan T. Research on performance and application of waste rubber and plastic alloy modified asphalt mixture[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2014. (in Chinese)
- [15] 颜宇.橡塑合金(TPE)沥青改性剂路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.  
Yan Y. The study on pavement performance about rubber modified asphalt (TPE) asphalt modification agent[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [16] 柳和生,吕柏源.双螺杆挤出机的结构及工作性能评述[J].橡胶技术与装备,1996(1):1-7+35.  
Liu H S, Lyu B Y. Review on structure and performance of twin screw extruder[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 1996(1): 1-7+35. (in Chinese)
- [17] 天津市住房和城乡建设委员会.天津市硫化橡胶粉改性沥青路面技术规程:DB/T 29-161-2018[S].天津:天津市市政工程设计研究院,2018.  
Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission. Technical specification of ground vulcanized rubber modified asphalt pavement in Tianjin: DB/T29-161-2018 [S]. Tianjin: Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, 2018.
- [18] 中华人民共和国交通部.公路沥青路面施工技术规范:JTG F 40-2004[S].北京:人民交通出版社,2005.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical code for construction of highway asphalt pavement: JTG F 40-2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [19] 李振.温拌再生沥青混合料性能评价研究[D].北京:北京建筑工程学院,2011.  
Li Z. Study on the performances evaluation of warm-recycled mix asphalt[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2011. (in Chinese)
- [20] 杨正军.橡塑合金改性沥青混合料路用性能应用研究[J].公路与汽运,2016(1):108-111.  
Yang Z J. Application research on road performance of rubber-plastic alloy modified asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2016(1):108-111. (in Chinese)
- [21] 刘郁贞,王志锐.橡塑合金改性沥青及其混合料技术性能研究[J].公路工程,2020,45(6):198-206.  
Liu Y Z, Wang Z R. Study on technical properties of rubber-plastic alloy modified asphalt and asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 198-206.(in Chinese)