

文章编号: 1674-599X(2020)01-0007-07

嵌入式抗滑表层施工工艺参数研究

周志刚¹, 罗靖¹, 曹长斌²

(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. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要: 为了确定嵌入式抗滑表层撒铺碎石粒径、撒铺量、拌合温度、摊铺温度、碾压温度及压实功等施工工艺参数, 进行了四因素三水平的正交试验。以高温性能、粘结性、抗滑性及密实性作为评价指标, 分析了其对各项性能的影响程度, 并确定了各项工艺的最优水平组合。研究结果表明: 不同因素对嵌入式抗滑表层不同性能的影响存在着明显的差异。影响高温性能的最主要因素为压实功, 它能增大压实功能, 有效增强高温稳定性; 撒铺量的增加会降低撒铺层与嵌入层的粘结性, 施工温度的降低会使得粘结性变差; 撒铺碎石粒径和撒铺量对抗滑性的影响明显, 在保证粘结性的条件下, 选择较大的与构造深度对应的施工参数。各因素水平较好的组合方案为: 撒铺量 12 kg/m²、撒铺碎石粒径 9.5~13.2 mm、拌合-摊铺-碾压温度为 170-160-150 °C、压实功为 90(135) kN。

关键词: 路面材料; 嵌入式抗滑表层; 施工工艺; 正交试验; 高温性能

中图分类号: U611

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.002

Study on construction process parameters of hot-rolled asphalt

ZHOU Zhi-gang¹, LUO Jing¹, CAO Chang-bin²

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Communication Industry, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: In order to identify the construction process parameters of hot rolled asphalt (such as particle size, spreading quantity, mixing temperature, paving temperature, rolling temperature and compaction work), the orthogonal test of four factors and three levels was carried out, and taking the high-temperature performance, embed bonding, anti-sliding performance and compactness as evaluation index, the influencing degree of these construction process parameters on various performance index were analyzed, and the optimal level combination of each process parameter were determined. The results show that the influence of different construction parameters on different performance of hot rolled asphalt is significantly different. The main factor affecting high-temperature performance is compaction work. Increasing compaction work can effectively enhance high-temperature stability. Increasing the amount of spraying will reduce the embed bonding between the spraying layer and the embedded layer. Meanwhile, the lower the construction temperature is, the worse the embed bonding is. The size and amount of gravel sprayed have obvious influence on the anti-sliding property. On the premise of guaranteeing the cohesiveness of embedding, the construction parameters corresponding to the larger structural depth can be selected. The better combination scheme of each factor and level is as follows: the number of paving is 12 kg/m², the gravel size is 9.5~13.2 mm, the construction temperature is 170-160-150 °C, the compacting work is 90(135) kN.

Key words: pavement material; hot-rolled asphalt; construction technology; orthogonal test; high-temperature performance

收稿日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878079); 广西交通投资集团科研项目

作者简介: 周志刚(1966-), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

沥青路面的主要材料包括沥青和集料。随着中国高等级公路的飞速发展,对优质石料的需求也越来越多。优质的石料不仅影响到路面的使用寿命,也可以提供较好的抗滑耐磨性能。嵌入式抗滑表层(Hot Rolled Asphalt, 简称为 HRA)不仅可以大量节约优质石料,也可以提供较好的抗滑性能。该路面是在摊铺好的断级配细粒式混凝土(嵌入层)上撒铺一层单一粒径且抗滑耐磨的预拌沥青碎石(撒铺层),最后通过碾压形成的路面结构。

嵌入式抗滑表层路面在英国应用较多。近年来,中国的学者们也开始对嵌入式抗滑表层路面进行研究。邴桂斌^[1]在英国 HRA 修筑技术规范基础上,针对中国的气候和交通条件进行了研究,提出了相应的改进措施。刘勇^[2-3]等人以国道 G318 线康东段改建项目为依托,对嵌入式抗滑表层混合料的集料组成和配合比进行了研究。李杨^[4]等人对 HRA 的抗车辙性能进行了研究。陆阳^[5]等人对 HRA 的高温粘弹塑性进行了研究。但人们对 HRA 的研究集中在配合比和路用性能方面,而在施工工艺、工程实践和质量控制方面研究得较少。嵌入式抗滑表层

的结构和施工过程与中国其他普通沥青路面的结构和施工过程存在着明显的差别。对 HRA 的施工工艺进行系统全面的研究极为重要,关系到路面的使用性能和寿命,也是保证施工质量的重要依据。因此,作者拟通过室内模拟试验,对施工工艺中涉及到的多个关键因素进行研究,以期推荐一种最优的组合,为 HRA 路面的铺筑提供参考。

1 试验材料及配合比

1.1 沥青

本试验采用的沥青为 SBS I-D 改性沥青,其中,SBS 的掺量为 4.7%。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)》中的试验方法进行了检测,其性能指标(见表 1)均满足规范要求。

1.2 集料与级配

本试验嵌入层所用粗、细集料均为石灰岩,撒铺层颗粒为玄武岩。根据《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》,集料的各项性能指标(见表 2)均满足规范要求。采用英国标准 BS EN 13108—4^[6]中给出的 C 型级配进行矿料级配,见表 3。

表 1 SBS 改性沥青技术性能

Table 1 Technical index of the SBS modified asphalt

数据类型	针入度(25 ℃,5 s, 100 g)/0.1 mm	延度(15 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	延度(5 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	软化点 TR&B/℃	TFOF 后		
					质量变化/%	针入度比(25 ℃, 100 g, 5 s)/%	延度(5 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm
试验数据	40~60	80.05	21.76	86.4	-0.03	79	20
技术要求	42	≥20	≥20	≥60	±1.0	≥65	≥15

表 2 沥青混合料集料技术特性

Table 2 Technical index of aggregate in the asphalt mixture

数据类型	粗集料石灰岩					粗集料玄武岩					细集料石灰岩			
	压碎 值/%	表观相对密 度/(g·cm ⁻³)	吸水 率/%	坚固 性/%	软石含 量/%	压碎 值/%	表观相对密 度/(g·cm ⁻³)	吸水 率/%	坚固 性/%	软石含 量/%	表观相对密 度/(g·cm ⁻³)	坚固性 (>0.3 mm 部分)/%	含泥 量/%	砂当 量/%
技术标准	≤28	≥2.5	≤3.0	≤12	≤5	≤26	≥2.6	≤2.0	≤12	≤3	≥2.50	≤12	≤3	≥60
试验数据	24.6	2.765	0.43	0.9	0.4	13.5	2.853	0.64	0.7	0.1	2.743	5.9	2.8	76

表 3 嵌入层沥青混合料级配组成

Table 3 Embedded layer aggregate grade of the asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
19	100	1.18	43.2
16	95	0.6	34.1
13.2	81.9	0.3	26.5
9.5	68.9	0.15	15.9
4.75	60.7	0.075	9.1
2.36	56.6		

2 正交试验设计

2.1 正交试验

正交试验是一种能够分析多个因素多个水平的实验设计方法。通过正交试验,选出具有代表性的试验组,再对试验结果进行处理,得出最优的因素组合方案。正交试验具有效率高、可减少大量实验次数的优点^[7]。

2.2 因素和水平的选择

影响嵌入式抗滑表层施工工艺参数的因素众多，本次实验选取了几个关键性控制因素，包括：预拌碎石撒铺量、预拌碎石粒径、拌和温度、摊铺温度、碾压温度及压实功。英国规范 BS 594987—2015^[8]中推荐的撒铺碎石量为 9~17 kg/m²；撒铺碎石粒径为 9.5~13.2 mm。根据中国《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》，沥青混合料最低施工拌和、摊铺和碾压温度分别为 170,160 和 150 ℃，且不同的拌合温度对改性沥青混合料的性能有一定影响^[9]；试件高度为 150 mm 时的压实功为 80 kN，试件高度为 63.5 mm 时的压实功为 125 kN。为了简化正交试验，将拌和、摊铺和碾压温度合并为施工温度这一个因素。本次正交实验在规范推荐值的范围内选取，或上、下浮动一定的值进行设计，见表 4。

表 4 正交试验的因素和水平

Table 4 Factors and levels of orthogonal test				
因素水平	撒铺量/(kg·m ⁻²)	撒铺碎石粒径/mm	施工温度/℃	压实功/kN
1	9	4.75~9.5	180~170~160	70/(115)
2	12	9.5~13.2	170~160~150	80/(125)
3	15	13.2~16	160~150~140	90/(135)

2.3 评价指标

嵌入式抗滑表层不仅要求具有良好的高温稳定性，还需具有抗滑耐磨以及撒铺层嵌入效果较好的性能。因此，通过进行 SPT 静态蠕变试验、肯塔

堡飞散试验、手工铺砂试验及压实度试验，测定试件的流变时间、稳定阶段斜率、飞散损失、构造深度及压实度等，评价并得出最佳施工工艺参数。试件采用静压成型方式，其中，SPT 静态蠕变试验试件高度为 150 mm，其他试验试件高度均为 63.5 mm。

2.4 正交试验方案

根据本试验选取 L9(3⁴)正交试验表开展试验，正交试验方案见表 5。

表 5 正交试验方案

Table 5 Scheme of orthogonal test				
编号	撒铺量/(kg·m ⁻²)	撒铺碎石粒径/mm	施工温度/℃	压实功/kN
1	9	4.75~9.5	180~170~160	70/(115)
2	9	9.5~13.2	170~160~150	80/(125)
3	9	13.2~16	160~150~140	90/(135)
4	12	4.75~9.5	170~160~150	90/(135)
5	12	9.5~13.2	160~150~140	70/(115)
6	12	13.2~16	180~170~160	80/(125)
7	15	4.75~9.5	160~150~140	80/(125)
8	15	9.5~13.2	180~170~160	90/(135)
9	15	13.2~16	170~160~150	70/(115)

3 试验结果及分析

3.1 正交试验结果

9 组试验的 SPT 静态蠕变试验、飞散试验、手工铺砂试验及压实度试验的结果见表 6。

表 6 正交试验结果

Table 6 Results of orthogonal test								
编号	流变时间/s	稳定阶段斜率	撒铺层普通飞散/%	撒铺层浸水飞散/%	普通飞散颗粒损失/%	浸水飞散颗粒损失/%	构造深度/mm	压实度/%
1	141.3	15.0	3.98	7.65	23.48	34.51	1.15	95.49
2	123.5	19.6	4.10	8.01	24.61	36.21	1.49	95.45
3	115.0	10.4	6.29	10.53	30.27	45.12	1.45	95.77
4	296.5	2.9	10.03	11.43	43.42	54.78	1.32	96.25
5	72.0	23.6	12.07	13.56	51.80	62.21	1.82	95.61
6	147.5	14.4	7.09	7.92	38.64	47.56	1.65	95.57
7	107.0	14.9	12.85	14.27	57.89	66.30	1.73	95.53
8	196.0	7.8	11.10	14.55	48.30	55.09	2.11	96.21
9	77.3	19.5	11.07	13.32	51.19	58.66	2.15	95.49

3.2 不同因素对高温性能影响的分析

采用直观分析方法，计算某一因素在同一水平试验组下的平均值，对其在不同水平下的变化趋势

进行了分析，通过比较每个因子在不同水平均值的大小来判断该水平的好坏，用同一因素在不同水平的极差来判断该因素对指标的影响程度。

在 SPT 静态蠕变试验中,根据流变时间的大小来判别高温性能的好坏,流变时间越大,越不容易发生剪切破坏,高温性能越好,稳定阶段斜率越小(稳定阶段斜率与车辙试验结果具有很好的相关性)。表明:试件在高温条件下的变形越慢,耐高温性越好。根据这 2 个指标来综合判断高温性能^[10]。

不同因素对高温性能影响的直观分析结果见表 7。高温性能各指标随因素和水平的变化规律如图 1 所示。从流变时间和稳定阶段斜率这 2 个控制指标的极差大小看出,压实功对高温性能的影响明显大于其他 3 种影响因素。随着压实功的增大,流变时间变长且稳定阶段斜率也降低。这是因为增大

表 7 高温性能各指标极差分析

Table 7 Range analysis of high-temperature performance index							
影响因素	流变时间						极差
	K1	K2	K3	k1	k2	k3	
撒铺量	379.8	516.0	380.3	126.6	172.0	126.8	45.4
撒铺碎石粒径	544.8	391.5	339.8	181.6	130.5	113.3	68.3
施工温度	484.8	497.3	294.0	161.6	165.8	98.0	67.8
压实功	290.6	378.0	607.5	96.9	126.0	202.5	105.6

影响因素	稳定阶段斜率						极差
	K1	K2	K3	k1	k2	k3	
撒铺量	45.0	40.9	42.2	15.0	13.6	14.1	1.4
撒铺碎石粒径	32.8	51.0	44.3	10.9	17.0	14.8	6.1
施工温度	37.2	42.0	48.9	12.4	14.0	16.3	3.9
压实功	58.1	48.9	21.1	19.4	16.3	7.0	12.3

注: K1,K2 和 K3 分别表示各因素在 3 个不同水平试验结果的总和; k1, k2 和 k3 分别表示各水平试验结果的均值。

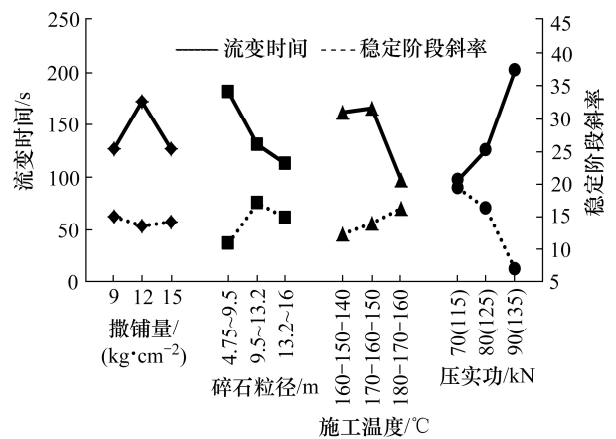


图 1 高温性能各指标随因素和水平的变化规律

Fig. 1 Variation of high-temperature performance index with factor level

压实功使得撒铺层的嵌入效果更好,使得嵌入层与撒铺层能更好地结合。对高温性能影响程度由大到小的顺序为:压实功、撒铺碎石粒径、施工温度和撒铺量。

3.3 不同因素对粘结性影响的分析

通过开展肯塔堡飞散试验,测定沥青混合料试件质量损失率来评价粘结性能。试验的目的是得出撒铺层碎石的质量损失率,但飞散试验的结果为全部颗粒的质量损失率。为了区分嵌入层和撒铺层颗粒的散落情况,撒铺层的实际损失率采用 2 种方法:①按照同样制备工艺分别成型加撒铺碎石的试件和不加撒铺碎石的试件,通过计算单位面积的飞散损失来得出撒铺层损失比例^[11-12];②在试件成型后,利用防水高黏的环氧地坪漆,对试件表面的撒铺层碎石进行染色。飞散试验后,取染色颗粒来计算撒铺层碎石的损失率。为了检验试件在高温、湿热状态下沥青老化对粘结性能的影响,分别开展普通标准飞散和浸水飞散,其中:普通标准飞散试验试件在 20±0.5℃的恒温水槽中养生 20 h,浸水飞散试验试件现在 60±0.5℃恒温水槽中养生 48 h。然后,在室温中放置 24 h。

不同影响因素对粘结性能的结果见表 8。通过计算得出的撒铺层飞散损失随因素和水平的变化规律如图 2 所示。通过染色得出的撒铺层颗粒损失随因素和水平的变化规律如图 3 所示。从图 2,3 中可以看出,撒铺量对粘结性的影响最大,撒铺碎石损失率随着撒铺量的增大而增加,其原因是:随着撒铺颗粒变多,嵌入层的细集料不足以被挤上来包裹住撒铺层颗粒,嵌入层和撒铺层的粘结主要通过沥青之间的粘结作用,其次是施工温度对粘结性的影响较大。随着施工温度升高,损失率逐渐变小。这是因为温度过低时,嵌入层沥青混凝土变硬,而导致嵌入效果不好。施工时,应注意温度的控制,避免温度过低而导致压实嵌入效果不好^[13]。飞散损失率受撒铺碎石粒径和压实功的影响不大。因此,对嵌入式抗滑表层粘结性影响程度由大到小的顺序为:撒铺量、施工温度、压实功和撒铺碎石粒径。

3.4 不同因素对抗滑性能影响的分析

对构造深度的影响结果见表 9。构造深度随因素和水平的变化规律如图 4 所示。碎石的撒铺量和粒径对构造深度的影响较大。随着撒铺量的增加,构造深度变大。这是因为撒铺量增加时,试件单位

表 8 粘结性能各指标极差分析

影响因素	撒铺层普通飞散损失(计算)							撒铺层浸水飞散损失(计算)						
	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差
撒铺量	14.4	29.2	35.0	4.8	9.7	11.7	6.9	26.2	32.9	42.1	8.7	11.0	14.0	5.3
撒铺碎石粒径	26.9	27.3	24.5	9.0	9.1	8.2	0.9	33.4	36.1	31.8	11.1	12.0	10.6	1.4
施工温度	22.2	25.2	31.2	7.4	8.4	10.4	3.0	30.1	32.8	38.4	10.0	10.9	12.8	2.8
压实功	27.1	24.0	27.4	9.0	8.0	9.1	1.1	34.5	30.2	36.5	11.5	10.1	12.2	2.1

影响因素	普通飞散颗粒损失(染色)							浸水飞散颗粒损失(染色)						
	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差
撒铺量	78.4	133.9	157.4	26.1	44.6	52.5	26.4	115.8	164.6	180.1	38.6	54.9	60.0	21.4
撒铺碎石粒径	124.8	124.7	120.1	41.6	41.6	40.0	1.6	155.6	153.5	151.3	51.9	51.2	50.4	1.5
施工温度	110.4	119.2	140.0	36.8	39.7	46.7	9.9	137.2	149.7	173.6	45.7	49.9	57.9	12.2
压实功	126.5	121.1	122.0	42.2	40.4	40.7	1.8	155.4	150.1	155.0	51.8	50.0	51.7	1.8

注：K1,K2 和 K3 分别表示各因素在 3 个不同水平试验结果的总和；k1, k2 和 k3 分别表示各水平试验结果的均值。

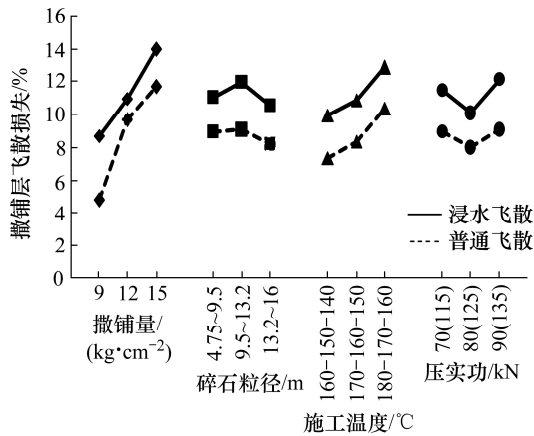


图 2 计算得飞散损失随因素和水平的变化规律
Fig. 2 Variation of cantabro test wastage indicators with factor level

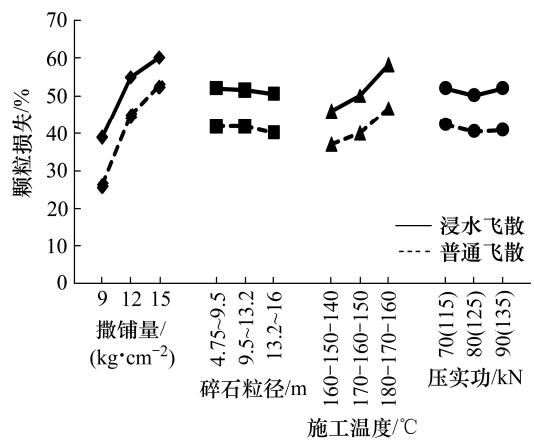


图 3 染色颗粒损失随因素水平变化规律
Fig. 3 Variation of grain wastage indicators with factor level

面积内撒铺碎石露在外面的体积增大。施工温度和压实功的变化对构造深度的影响不明显。对试件表

面抗滑性能影响程度由大到小的顺序为：撒铺量、撒铺碎石粒径、压实功和施工温度。随着构造深度的增加，该试件的表面抗滑性能变好。当构造深度过大时，撒铺碎石与嵌入层的粘结性能变差，嵌入效果不好，撒铺碎石容易脱落，抗滑性能会变得更差。因此，在满足粘结性的基础上，选择较大构造深度所对应的施工参数。

表 9 构造深度极差分析

影响因素	构造深度						
	K1	K2	K3	k1	k2	K3	极差
撒铺量	4.09	4.79	5.99	1.36	1.60	2.00	0.64
撒铺碎石粒径	4.20	5.42	5.25	1.40	1.81	1.75	0.41
施工温度	4.91	4.96	5.00	1.64	1.65	1.67	0.03
压实功	5.12	4.87	4.88	1.71	1.62	1.63	0.09

注：K1,K2 和 K3 分别表示各因素在 3 个不同水平试验结果的总和；k1, k2 和 k3 分别表示各水平试验结果的均值。

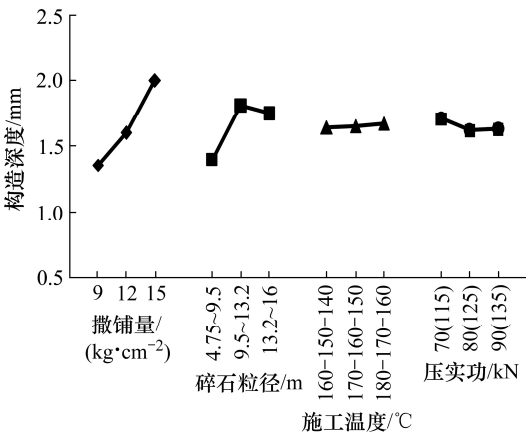


图 4 构造深度随因素和水平的变化规律
Fig. 4 Variation of tectonic depth with factor level

3.5 不同因素对密实性影响的分析

开展密实性试验时，不需要撒铺碎石，影响因素只有施工温度和压实功。其极差分析见表 10。压实度随因素和水平的变化规律如图 5 所示。从表 10 和图 5 中可以看出，压实功对密实性的影响程度比施工温度的大。压实度越大，表明密实效果越好。

表 10 压实度极差分析

Table 10 Range analysis of compaction

影响因素	压实度						极差
	K1	K2	K3	k1	k2	k3	
施工温度	287.3	287.2	286.9	95.76	95.73	95.64	0.12
压实功	286.6	286.6	288.2	95.53	95.52	96.08	0.56

注：K1,K2 和 K3 分别表示各因素在 3 个不同水平试验结果的总和；k1, k2 和 k3 分别表示各水平试验结果的均值。

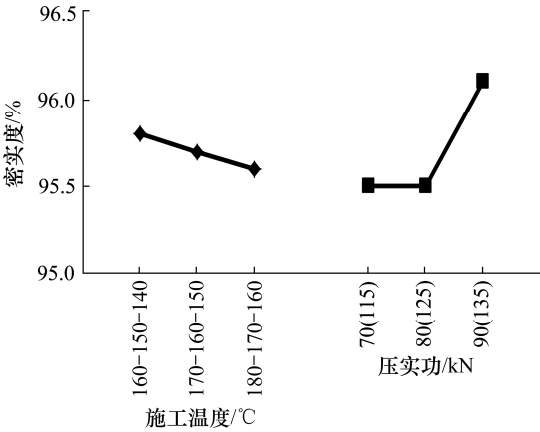


图 5 压实度随因素和水平的变化规律

Fig. 5 Variation of compaction with factor level

4 工艺参数确定

不同控制指标下各因素的最优水平见表 11。撒铺量在 4 种控制指标下分别得出了不同的结果。从影响程度判断，撒铺量对粘结性能和抗滑性能的影响最大，对高温性能的影响较小。当撒铺量为 9 kg/m²时的粘结性能最好；当撒铺量为 15 kg/m²时的抗滑性能最好，出现了 2 种极端情况。若考虑粘结性势必会影响抗滑性能。若抗滑性能好时，颗粒间粘结嵌入效果较差，容易导致碎石脱落。经综合考虑，选取撒铺量为 12 kg/m²。施工时，建议撒铺量范围为 10~12 kg/m²。

撒铺碎石粒径对高温性能和抗滑性能的影响较大，而对粘结性的影响较小。当碎石粒径为 9.5~13.2 mm 时，其抗滑性能最好；当碎石粒径为 4.75~

9.5 mm 时，其高温性能最好；且这 2 种粒径对抗滑性能和高温性能的影响波动均不大。考虑到后期的长期磨损，选取撒铺碎石粒径为 9.5~13.2 mm。

根据流变时间，确定最佳拌合-摊铺-碾压温度为 170-160-150 ℃；根据稳定阶段斜率，确定施工温度为 180-170-160 ℃；且采用这 2 种施工温度时，流变时间的变化仅为 2.5%。施工温度越高尤其是碾压温度越高，撒铺层与嵌入层之间的粘结性越好。当施工温度大于 170-160-150 ℃时，飞散损伤的变化趋于缓慢。随温度的升高，压实度的升高也变缓。因此，从能源消耗和沥青高温老化这 2 个方面考虑，选定拌合-摊铺-碾压温度为 170-160-150 ℃。施工中拌和温度的建议范围为 170~180 ℃，摊铺温度的建议范围为 160~170 ℃，初压温度的建议范围为 150~160 ℃，终压结束时温度不宜低于 90 ℃。

压实功对高温性能和密实性的影响最大，而对粘结性和抗滑性能的影响最小。当压实功为 90(135) kN 时，混合料的高温性能和密实性都最好。因此，选定压实功为 90(135) kN。施工中，初压应在混合料摊铺后较高温度时进行，可采用 10~12 t 双钢轮压路机静压 1~2 遍；复压可采用 6~10 t 振动碾压 3~4 次；终压时，使用 8~15 t 胶轮压路机碾压 2~3 次；最后，再用双轮压路机静压收面压实 2 次。

表 11 各控制指标下各因素最优水平表

Table 11 Optimal level of each factor under each control

因素	index			
	撒铺量/(kg·m ⁻²)	撒铺碎石粒径/mm	施工温度/℃	压实功/kN
流变时间	12	4.75~9.5	170-160-150	90/(135)
稳定阶段斜率	12	4.75~9.5	180-170-160	90/(135)
粘结性	9	13.2~16	180-170-160	80/(125)
抗滑性能	15	9.5~13.2	160-150-140	70/(115)
密实性	—	—	180-170-160	90/(135)

5 结论

1) 正交试验结果表明，在选定的 4 种关键因素中，压实功对嵌入式抗滑表层高温性能的影响最大，撒铺碎石粒径和施工温度的影响次之，撒铺量的影响最小。高温性能随着压实功的增大而变好。

2) 撒铺层和嵌入层的粘结性受撒铺量的影响最大。撒铺量越多，粘结性越差，撒铺碎石越容易脱落。其次受施工温度的影响较大。施工温度降低

时,粘结性将变差。粘结性随撒铺碎石粒径和压实功的变化最小。

3) 撒铺碎石粒径和撒铺量对嵌入式抗滑表层抗滑性能的影响较大。当粒径和撒铺量增大时,表面构造深度变大,但此时粘结性又变小,应选用合适的撒铺粒径和撒铺量。

4) 嵌入式抗滑表层施工工艺各关键因素的最佳组合为:撒铺量 12 kg/m^2 、撒铺碎石粒径 $9.5 \sim 13.2 \text{ mm}$ 、拌合-摊铺-碾压温度为 $170 \sim 160 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压实功 $90(135) \text{ kN}$ 。施工时,各参数宜在推荐范围内。

参考文献(References):

- [1] 邴桂斌.嵌入式抗滑路面表层研究[D].北京:北京交通大学,2009.(BING Gui-bin. Research of the hot-rolled asphalt[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [2] 刘勇,陆阳,杨彭.高寒地区 HRA 的配合比设计与问题探讨[J].中外公路,2011,31(3):252-255.(LIU Yong,LU Yang, YANG Peng. Mix ratio design and discussion of HRA in alpine and cold area[J].Journal of China & Foreign Highway,2011,31(3):252-255.(in Chinese))
- [3] 杨彭,陆阳,刘勇.热压式沥青混合料 HRA 集料组成特征分析[J].中外公路,2010,30(6):200-203.(YANG Peng,LU Yang,LIU Yong. Analysis of aggregate composition of the hot-rolled asphalt[J].Journal of China & Foreign Highway, 2010,30(6):200-203.(in Chinese))
- [4] 李扬,刘清泉,曹东伟,等.浅谈热压式沥青混凝土路面[J].公路,2008,53(11):1-4.(LI Yang,LIU Qing-quan,CAO Dong-wei,et al. Discussion about hot-rolled asphalt pavement[J]. Highway,2008,53(11):1-4.(in Chinese))
- [5] 陆阳,游宏,黄晚清.热压式沥青混合料高温黏弹塑性特征分析[J].公路,2011,56(1):187-191.(LU Yang,YOU Hong, HUANG Wan-qing. Laboratory evaluations of visco-elastoplastic properties of the hot-rolled asphalt mixture at high temperatures[J].Highway,2011,56(1): 187-191.(in Chinese))
- [6] European Committee for Standardization.BS EN13108-4:2016,Bituminous mixtures-material specifications-part 4. hot rolled asphalt[S]. Britain: BSI Standards Publication, 2016.
- [7] 黄伟,琚贵安,邓玉训,等.基于 Mclead 法的掺钢渣碎石封层配合比计算与正交试验研究[J].公路工程,2018,(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
- 43(3):207-214.(HUANG Wei,JU Gui-an,DENG Yu-xun, et al.The Mclead-method-calculation and orthogonal experimental study of the proportioning of the asphalt chip seal surface with steel slag[J].Highway Engineering, 2018,43(3):207-214.(in Chinese))
- [8] European Committee for Standardization.BS 594987-2015,Asphalt for roads and other paved areas—Specification for transport, laying, compaction and product-type testing protocols[S]. Britain:BSI Standards Publication,2015.
- [9] 查旭东,李洲,王宏祥,等.阿尔巴尼亚岩沥青改性混合料设计及性能试验[J].交通科学与工程,2019,35(1):1-7. (ZHA Xu-dong, LI Zhou, WANG Hong-xiang, et al. Experiments of the design and the performance for the modified mixture with Albania rock asphalt[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(1):1-7.(in Chinese))
- [10] 周志刚,李利略,袁秀湘.再生沥青混合料单轴静态蠕变试验的离散元仿真[J].交通科学与工程,2013,29(3):1-7. (ZHOU Zhi-gang,LI Li-lue,YUAN Xiu-xiang.Discrete element simulation on uniaxial static creep test of recycled asphalt mixtures[J].Journal of Transport Science and Engineering,2013,29(3):1-7.(in Chinese))
- [11] 刘红坡,艾长发,RAHMAN Ali,等.基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(3):16-23.(LIU Hong-po,AI Chang-fa, RAHMAN Ali,et al.Characterization of interlayer bonding in asphalt pavement based on direct tension test with horizontal loading[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2017,37(3):16-23.(in Chinese))
- [12] 陆阳,游宏,黄晚清,等.热压式沥青混合料磨耗层与嵌入层粘结性能的评价方法[P].中国:201310639619.2. 2014-03-05.(LU Yang,YOU Hong,HUANG Wan-qing, et al. A method for evaluating the bonding properties of the abrasion layer and embedded layer of the hot-rolled asphalt mixture[P].China:201310639619.2.2014-03-05. (in Chinese))
- [13] Li X,Zhou Z,Lv X,et al.Temperature segregation of warm mix asphalt pavement:Laboratory and field evaluations[J]. Construction and Building Materials, 2017, 136 (Complete):436-445.