

AC-13钢渣沥青混凝土压实特性及 高压实摊铺研究

王亚平¹, 易龙¹, 郑文章^{1,2,3*}, 顾滕³, 王举阳¹

(1.湖北交投宜昌高速公路建设管理有限公司,湖北宜昌 443000;2.湖北省交通规划设计院股份有限公司,
湖北武汉 430000;3.湖北汉宜高速公路有限公司,湖北仙桃 433004)

摘要:为解决钢渣沥青混凝土难以压实、空隙率偏大等问题,该研究采用旋转压实仪,从级配、压实温度和压实能指数等方面对钢渣沥青混凝土压实特性进行分析。通过试验段正交试验,研究摊铺速度、熨平板振动频率和夯锤振捣频率对摊铺压实度的影响,优化钢渣沥青混凝土的摊铺施工参数。研究表明:采用中值偏细级配可以加快压实速率,2.36 mm筛孔通过率建议控制为37%~50%,以减少压实消耗能量。适当提高压实温度,可以提高压实速度和压实度,压实温度以165℃为宜。在摊铺过程中,熨平板振动频率和摊铺速度对摊铺压实度影响最大,钢渣沥青混凝土的最佳摊铺施工组合参数为:振捣频率12 Hz、振动频率35 Hz、摊铺速度2 m/min。

关键词:路面工程;钢渣沥青混凝土;旋转压实;高压实摊铺;正交分析

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research on Compaction Characteristics and High Compaction Paving Technology of AC-13 Steel Slag Asphalt Concrete

WANG Yaping¹, YI Long¹, ZHENG Wenzhang^{1,2,3*}, GU Meng³, WANG Juyang¹

(1. Hubei Jiaotou Yichang Expressway Construction Management Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China;

2. Hubei Communications Planning and Design Institute Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430000, China;

3. Hubei Hanyi Expressway Co., Ltd. Xiantao, Hubei 433004, China)

Abstract: To solve the problems of difficult compaction and high porosity of steel slag asphalt concrete, a rotary compactor was used to analyze the compaction characteristics of steel slag asphalt concrete from the aspects of gradation, compaction temperature, and compaction energy index. By conducting orthogonal experiments in the test section, the influence of paving speed, vibration frequency of the screed, and vibration compaction rate of the hammer on the compaction degree of paving was analyzed, and the paving construction parameters of steel slag asphalt concrete were optimized. Research shows that the use of a median finer gradation can accelerate compaction rate, and it is recommended to control the percent passing the 2.36 mm sieve between 37% and 50% to reduce compaction energy consumption. An appropriate increase in the compaction temperature can improve both the compaction speed and degree, and a compaction temperature of 165 °C is recommended. During the paving process, the vibration frequency and paving speed of the screed have the greatest impact on the compaction degree of paving. The optimal combined parameters for paving construction of steel slag asphalt concrete are a vibration compaction rate of 12 Hz, a vibration frequency of 35 Hz, and a paving speed of 2 m/min.

Keywords: pavement engineering; steel slag asphalt concrete; gyratory compaction; high compaction paving; orthogonal analysis

收稿日期:2025-02-09 修回日期:2025-08-08

基金项目:湖北省交通运输厅重点科技项目(编号:2024-81-Z-1-4)

作者简介:王亚平,男,高级工程师.E-mail:601456582@qq.com

*通信作者:郑文章,男,硕士.E-mail:zheng_wenzhang@126.com

0 引言

钢渣是炼钢工业产生的大宗固体废弃物,经过预处理后加工为集料,相较于玄武岩和辉绿岩,钢渣集料的压碎值、磨耗值均较低,且磨光值较高,具有替代优质天然集料的潜力。高振鑫等^[1]和申爱琴等^[2]采用钢渣替代天然集料制备沥青混凝土,发现钢渣可有效提高沥青混凝土的高温抗车辙性能、水稳定性和疲劳性能。但相关试验段研究表明,钢渣集料棱角性丰富且表面粗糙,致使钢渣沥青混凝土存在难以压实、路面空隙率偏大的问题。

沥青路面的压实度与各项路用性能指标密切相关,压实度不足易导致路面在服役过程中出现剥落松散和疲劳开裂等病害,直接影响路面的服役寿命。为此,许多学者对钢渣沥青混凝土的压实特性开展研究。王利波等^[3]研究了胶粉复合改性沥青钢渣沥青混凝土的压实特性,发现钢渣沥青混凝土压实特性受级配影响较大,应加强级配优化,同时现场施工空隙率宜按低值控制,以保证路面耐久性能;黄书科^[4]对钢渣排水路面压实特性开展了研究,发现钢渣掺入沥青混凝土会增加空隙率,推荐在配合比设计阶段,基于马歇尔压实试验建立压实准则,指导施工控制及验收。目前,相关研究主要集中于室内压实试验,且较少通过旋转压实试验研究AC-13型钢渣沥青混凝土的压实特性,施工方面则主要依靠碾压环节提高路面压实度。由于钢渣表面粗糙,碾压环节阻力较大,且钢渣含有铁元素,碾压过程中温度散失较快且不宜过度碾压,导致路面压实工艺难度较大^[5-8]。在摊铺环节调整摊铺施工参数,以使钢渣混凝土进入高压实状态,可有效提升沥青路面表面层的施工质量,降低碾压工艺难度。

基于此,本文首先对钢渣沥青混凝土压实特性开展研究,分析了钢渣沥青混凝土在温度、级配等因素影响下的压实特性变化规律,从而确定适合于钢渣沥青混凝土的摊铺温度和材料级配。接着,开展了钢渣沥青混凝土的高压实摊铺施工参数匹配研究,形成推荐的施工参数。以为钢渣沥青混凝土压实理论研究及施工实践提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本研究中沥青选用SBS改性沥青,粗集料采用

热焖渣,细集料采用石灰岩。钢渣粗集料参数如表1所示,SBS改性沥青参数如表2所示。

表1 钢渣粗集料性能试验结果

Table 1 Performance test results of steel slag coarse aggregate

项目	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/ %	磨光值/ PSV	磨耗值/ %	压碎值/ %	针片状 含量/%
钢渣	3.37	1.68	46.7	11.1	12.4	4.30
规范要求	>2.90	≤3.00	>42	≤28	≤26	≤12

表2 SBS改性沥青性能试验结果

Table 2 Performance test results of SBS modified asphalt

项目	针入度(25℃, 5 s, 100 g)/ (0.1 mm)	软化点 $T_{R\&B}$ / ℃	135℃运 动黏度/ (Pa·s)	延度(5℃, 5 cm/min)/ cm
SBS改性沥青	56	85.5	2.48	29.5
规范要求	40~60	≥60	≤3	≥20

1.2 试验方法

旋转压实试验能够较好地模拟沥青混凝土实际施工压实方式,相较于马歇尔击实试验能够实现集料颗粒发生较大程度的移动重排,同时试验精确度高,可重复性好,与沥青混凝土的力学性能具有很好的相关性,目前被认为是有效评价混凝土压实特性的试验方法之一。研究采用Troxler 6015型Superpave旋转压实仪进行室内试验,参考AASHTO相关规范,压力值设置为600 kPa,旋转角度设置为内角 1.16° ,外角 0.5° 。

2 钢渣沥青混凝土压实特性研究

2.1 级配对钢渣沥青混凝土压实特性的影响研究

级配是影响沥青路面压实效果的重要因素。不同级配的沥青混凝土,由于其内部颗粒的排列不同,在压实过程中颗粒间的相互作用力也互不相同,表现出不同的压实特性。本文选取AC-13沥青混凝土上限、中值和下限3种级配,即偏细、中值和偏粗3种钢渣沥青混凝土进行室内旋转压实试验,对材料压实特性的变化规律进行研究,所用级配曲线如表3所示。采用SGC成型后获得3种级配钢渣沥青混凝土的旋转压实曲线和闭锁点,如图1、2所示。

旋转压实试验研究中一般采用闭锁点(locking point)指标评价沥青混凝土的压实状态^[9]。闭锁点概念由美国伊利诺伊交通部提出,将旋转压实过程中,连续两次压实试件高度不变的旋转压实次数(第2

表3 AC-13钢渣沥青混凝土级配

Table 3 Gradations of AC-13 steel slag asphalt concrete

级配	通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配1	100	99	83.4	66.9	48.6	37.2	27.2	19.2	14.2	7.6
级配2	100	95.2	77.5	53.3	37.4	27.2	19.1	13.5	9.8	6.2
级配3	100	91.2	68.8	40.2	25.3	16.3	11.2	7.9	5.2	4.2
级配范围	100	90~100	68~85	38~68	24~50	15~38	10~28	7~20	5~15	4~8

次)作为闭锁点。闭锁点指沥青混凝土在压实进程中,沥青混凝土的内部结构处于一个相对稳定的嵌锁状态,压实度指标趋于稳定,增加压实次数对提高压实度作用不明显。不同级配钢渣沥青混凝土所对应的闭锁点如图2所示。

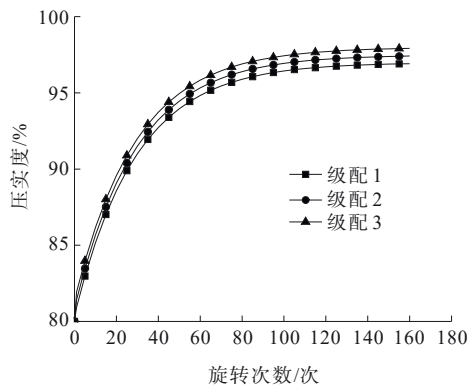


图1 不同级配钢渣沥青混凝土旋转压实曲线

Figure 1 Gyrotory compaction curves of steel slag asphalt concrete with different gradations

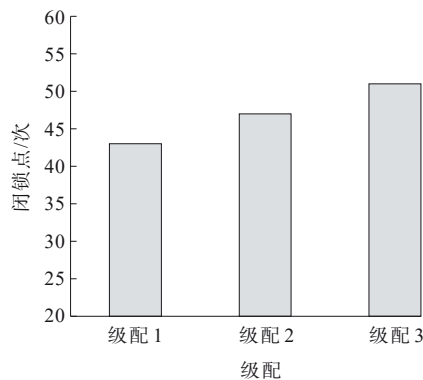


图2 不同级配钢渣沥青混凝土锁点

Figure 2 Locking points of steel slag asphalt concrete with different gradations

由图2可知:3种级配钢渣沥青混凝土的闭锁点从小到大依次为:级配1、级配2、级配3。其中,级配1相较于级配2和级配3,分别提前4次和9次进入锁点。这主要是因为级配1靠近级配上限值,

2.36 mm筛孔通过率达48.6%,而级配3的2.36 mm筛孔通过率仅为25.3%。级配1的细集料较多,具有较好的流动性,能较快填充粗集料中的空隙,沥青混凝土更易被压实。级配3的粗集料较多,粗集料之间摩擦力较大,所需压实功较多。即对于AC-13钢渣沥青混凝土,适当调细级配,可更快进入压实状态,所需压实功更少。对于AC-13沥青混凝土,《沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)将2.36 mm筛孔作为粗型和细型级配的关键性筛孔。结合压实试验结果,建议2.36 mm筛孔通过率不小于37%,且不超过规范50%上限,以获得较好的压实效果。

2.2 温度对钢渣沥青混凝土压实特性的影响研究

沥青混凝土的压实温度是影响压实效果的关键因素。压实温度偏低易致压实后空隙偏大,影响路面性能与寿命;压实温度偏高,则易造成沥青过度老化,变硬变脆导致沥青混凝土的疲劳寿命缩短和低温性能变差。

由于钢渣集料具有多孔特性,且含有较多铁元素,其热物性参数与常规玄武岩和辉绿岩存在一定差异,这对其压实温度控制提出了更高的要求。但目前温度范围主要参考天然集料沥青混凝土的经验确定。为进一步研究钢渣沥青混凝土压实特性随压实温度的变化规律,确定钢渣沥青混凝土的适宜压实温度,本研究采用旋转压实仪对135℃、150℃和165℃下的沥青混凝土进行旋转压实试验。

不同温度下钢渣沥青混凝土的旋转压实试验结果如图3所示。

从图3可以看出:随着压实次数的增加,钢渣沥青混凝土的压实度呈现先快速增加后逐渐稳定的趋势。在相同的压实次数下,压实温度越高试件压实度越大。在第60次旋转压实后,135℃、150℃和165℃三种压实温度下试件压实度差距逐渐扩大,这主要是因为起始温度越低,随着温度散失,沥青黏度

会逐渐偏高,对集料间润滑作用减少,同时钢渣含铁元素,会加速温度损失速度。120次旋转压实后,165℃的钢渣沥青混凝土压实度越大,其相较于150℃和135℃试件,沥青混凝土压实度分别提升0.7%和1.2%,说明温度变化对钢渣沥青混凝土压实度的影响程度较大。钢渣因其较好的抗滑耐磨特性常用于沥青路面表面层,在摊铺施工时应注重考虑摊铺温度对摊铺压实质量的影响,控制摊铺温度在165℃附近有利于钢渣沥青混凝土压实时获得较高的摊铺压实度。

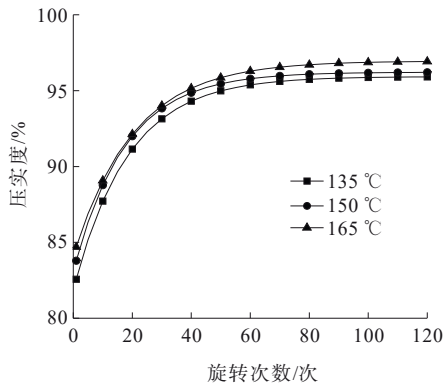


图3 不同温度钢渣沥青混凝土旋转压实曲线

Figure 3 Gyrotory compaction curves of steel slag asphalt concrete at different temperatures

2.3 压实能指数对钢渣沥青混凝土压实特性的影响研究

旋转压实曲线可以反映沥青不同压实阶段的压实特性:第一阶段是施工阶段,用来表示摊铺碾压过程中混凝土的可压实性;第二阶段是路面服役阶段,在交通荷载作用下沥青路面被进一步压实,用路面压实度的变化来表示沥青混凝土的变形特性^[10-11]。第一阶段对应的评价指标为压实能指数(I_{CEI}),指旋转压实试验中,将开始压实到混凝土压实至压实度为92%的区间曲线下的面积。第二阶段对应评价指标为交通压实化指数(I_{TDI}),指压实度为92%~98%对应的旋转压实次数的区间下的面积^[12-15],这两种指标(图4)定义如下:

$$I_{CEI} = \int_8^{N_{92\%}} D_{N_i} dN_i - D_8 (N_{92\%} - 8)$$

$$I_{TDI} = \int_{N_{92\%}}^{N_{98\%}} D_{N_i} dN_i - 92 (N_{98\%} - N_{92\%})$$

式中: $N_{92\%}$ 和 $N_{98\%}$ 分别为压实度达到92%和98%时对应的旋转次数; D_{N_i} 为旋转次数 N_i 对应的压实度(%); D_8 为旋转8次对应的压实度(%)。

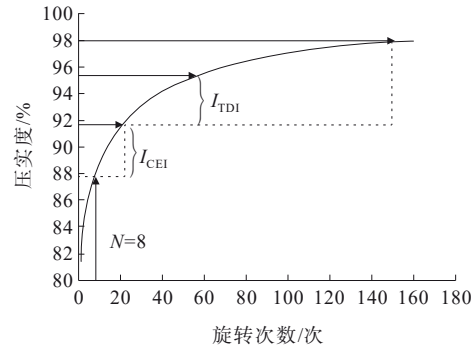


图4 压实指标定义示意图

Figure 4 Compaction index definition

一般而言,沥青路面压实控制的最大空隙率为8%,而设计空隙率不大于4%。沥青路面施工完成后应达到设计要求,避免压实不足或过度压实。而压实度从92%~96%所需的压实能则能够表征沥青混凝土进入相对稳定阶段后压实的难易水平,用 $I_{CEI,92\%-96\%}$ 表示。

$$I_{CEI} = \int_{N_{92\%}}^{N_{96\%}} D_{N_i} dN_i - 92 (N_{96\%} - N_{92\%})$$

式中: $N_{96\%}$ 为压实度达到96%时对应的旋转次数。

采用上述公式对图1、3的压实曲线进行分析,得到各指标计算结果见表4。

粗、中、细3种级配的钢渣沥青混凝土压实能指数 I_{CEI} 值由小到大依次为:级配1、级配2、级配3。级配2和级配3的 I_{CEI} 值相对于级配1分别提高了22.1%和34.5%。这表明钢渣沥青混凝土压实所需要的能量随着级配的变粗而逐渐增大。级配越细该混凝土越容易被压实。这是由于级配较细时,AC-13钢渣沥青混凝土更易形成悬浮压实结构。随着级配偏粗,钢渣集料本身表面粗糙,集料间的摩擦阻力大,导致混凝土较难压实。在混凝土级配不变的条件下,随着压实温度的增加,混凝土的压实能指数 I_{CEI} 逐渐降低,说明在一定范围内提高压实温度有利于提升沥青混凝土的可压实性。试验得出的 $I_{CEI,92\%-96\%}$ 与相应的 I_{CEI} 值变化规律相似。

粗、中、细3种级配的钢渣沥青混凝土交通压实化指数 I_{TDI} 值由小到大依次为:级配1、级配2、级配3。级配2和级配3的 I_{TDI} 值相对于级配1分别提高了5.6%和15.5%。表明细级配和中级配钢渣沥青混凝土进入压实稳定阶段后,所需的交通压实化指数相差较小,粗级配钢渣沥青混凝土的交通压实化指数相对较大。这说明粗级配钢渣沥青混凝土的抗变形性能要好于中、细级配。而中、细级配钢渣沥青混

土压实稳定后抗变形性能基本相当。

表4 不同类型沥青混凝土旋转压实拟合结果
Table 4 Fitting results of gyratory compaction for different types of asphalt concrete

项目	I_{CEI}	$I_{CEI,92\%-96\%}$	I_{TDI}
级配1	35.13	103.39	367.42
级配2	42.91	109.71	389.26
级配3	47.24	124.56	424.50
135 °C	70.61	155.84	—
150 °C	46.99	122.13	482.35
165 °C	38.40	105.33	367.67

3 钢渣沥青混凝土高压实摊铺参数研究

在摊铺施工阶段,若摊铺机运行参数、振动参数与供料设备之间没有合理的协作,将会直接影响后续的碾压作业质量,导致密实度偏低。结合摊铺施工设备的工作原理,通过正交试验,研究影响摊铺密实度的施工参数间的匹配关系,为钢渣沥青混凝土高密实摊铺技术中参数的选取提供理论指导^[16-21]。

为此,在宜昌—张家界高速实施钢渣AC-13上面层试验段,钢渣采用热焖钢渣,钢渣技术指标同表1,钢渣规格为9.5~16 mm和4.75~9.5 mm。

3.1 摊铺参数正交试验设计

沥青混凝土摊铺压实度的主要影响因素有摊铺机摊铺速度、熨平板振动频率和振捣梁的振捣频率,可以通过调整上述3个参数,提高沥青路面摊铺质量和压实效率。分别设置振捣频率为因素A,振动频率为因素B,摊铺速度为因素C。根据所选因素和水平数,设置3因素4水平正交表见表5。

表5 正交因素水平表

Table 5 Factors and levels for orthogonal design

水平	振捣频率(因素A)/Hz	振动频率(因素B)/Hz	摊铺速度(因素C)/(m·min ⁻¹)
1	12	20	5
2	15	25	4
3	18	30	3
4	20	35	2

3.2 摊铺参数正交试验结果

正交试验采用沥青混凝土摊铺压实度为试验评价指标,采用无核密度仪对现场密实度进行检测。现场检测的密度值与室内马歇尔密度之比作为AC-13钢渣沥青路面压实度,所有摊铺工艺组合均采用相同的碾压工艺。正交试验结果如表6所示。

(1) 正交极差分析

极差分析是正交试验数据处理与分析常用的数学方法。采用极差分析来确定3种因素对AC-13钢渣沥青路面摊铺压实度影响的主次,各因素的平均极差R对试验指标的影响程度结果见表7。

由表7可知:3种因素对摊铺压实度影响的主次顺序为:振动频率、摊铺速度和振捣梁频率。各因素与材料压实度关系曲线如图5所示。由图5(a)可知,振捣梁的工作频率由低变高时,钢渣沥青混凝土的平均摊铺压实度值为85%~86%,规律性不强。图5(b)中,熨平板的振动频率由低增高时,钢渣沥青混凝土的摊铺压实度逐渐提升。这是由于熨平板的振动频率提高时,钢渣集料间的相对运动作用增强,细集料可以快速填充到粗集料间的间隙,形成压实结构。由图5(b)可知,在试验范围内,沥青混凝土平均压实度值存在明显的变化规律,振动频率的大小与钢渣沥青混凝土摊铺压实度呈现正相关,且变化

表6 正交试验结果

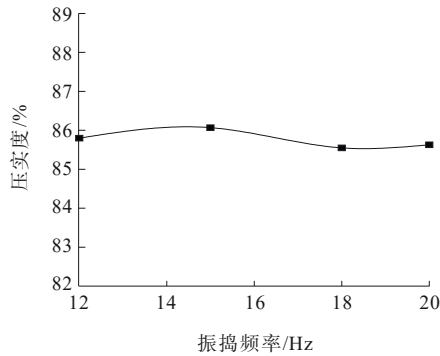
Table 6 Results of orthogonal experiments

编号	现场密度/(g·cm ⁻³)	摊铺压实度/%	终压压实度/%	编号	现场密度/(g·cm ⁻³)	摊铺压实度/%	终压压实度/%
1-1	3.079	81.61	96.12	3-1	3.084	81.79	96.23
1-2	3.177	85.42	97.45	3-2	3.186	85.78	97.32
1-3	3.220	87.13	98.22	3-3	3.208	86.64	97.88
1-4	3.269	89.05	99.69	3-4	3.241	87.97	98.46
2-1	3.079	81.58	95.88	4-1	3.099	82.36	96.45
2-2	3.175	85.35	97.23	4-2	3.179	85.53	97.43
2-3	3.254	88.47	98.89	4-3	3.216	86.97	97.92
2-4	3.265	88.89	99.32	4-4	3.234	87.66	98.76

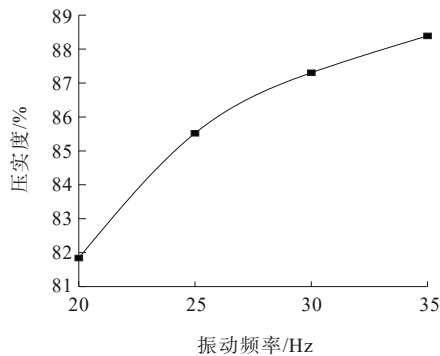
表 7 不同类型沥青混凝土旋转压实拟合结果

Table 7 Fitting results of gyratory compaction for different types of asphalt concrete

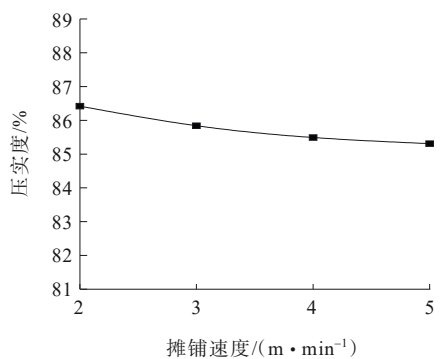
项目	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	K_{4j}	\bar{K}_{1j}	\bar{K}_{2j}	\bar{K}_{3j}	\bar{K}_{4j}	R
因素 A	343.21	344.29	342.18	342.52	85.80	86.07	85.55	85.63	0.52
因素 B	327.34	342.08	349.21	353.57	81.84	85.52	87.30	88.39	6.55
因素 C	341.26	341.94	343.34	345.66	85.31	85.49	85.84	86.42	1.11
平均压实度 / %	$K=85.76$								



(a) 振捣频率与材料压实度关系



(b) 振动频率与材料压实度关系



(c) 摊铺速度与材料压实度关系

图 5 各因素与材料压实度关系曲线

Figure 5 Relationship curves between various factors and material compaction degrees

程度较大。图 5(c) 显示为随着摊铺速度加快, 混凝土的摊铺压实度逐渐减小, 但变化趋势相对较小。

试验结果表明, 摊铺施工应重视确定熨平板振动的最佳频率, 并配合适当的摊铺速度和振捣频率, 可以有效保证摊铺初始压实度。

(2) 正交方差分析

采用方差分析方法分析上述 3 种因素对钢渣沥青混凝土摊铺压实度影响的显著性 (F 值越大, 表明该因素的影响越显著), 结果见表 8。

表 8 方差分析结果

Table 8 Results of analysis of variance

项目	差方和	自由度 f	平均偏差平方和	F 值	显著性
因素 A	0.634 7	3	0.212 0	$2.218 < F_{0.25} = 2.36$	不显著
因素 B	98.850 0	3	32.950 0	$344.665 > F_{0.01} = 29.457$	非常显著
因素 C	2.869 3	3	0.955 6	$10.004 > F_{0.05} = 9.28$	显著
误差	0.573 3	6	0.095 6	—	—
总和	102.927 3	15	—	—	—

由表 8 可知: 因素 B 熨平板振动频率的变化对钢渣沥青混凝土摊铺压实度影响最大。因素 C 摊铺速度的变化对钢渣沥青混凝土摊铺压实度影响较大; 因素 A 振捣频率对钢渣沥青混凝土摊铺压实度影响很小。正交分析结果表明: 摊铺机摊铺速度和熨平板振动频率对钢渣沥青混凝土摊铺压实度增长作用明显, 在摊铺施工时, 可通过调节摊铺机摊铺速度和熨平板振动频率来提升钢渣沥青混凝土的摊铺压实度。

通过正交试验可知, 本试验的钢渣沥青混凝土在振捣频率 12 Hz、振动频率 35 Hz 和摊铺速度 2 m/min 的施工参数组合下, 得到的钢渣沥青混凝土摊铺压实度最高, 3 种施工参数的匹配效果最佳。在试验中较高的振动频率与较低的摊铺速度相匹配时摊铺压实度相对较高, 但是摊铺速度太低时会影响施工效率; 在钢渣沥青混凝土摊铺过程中, 合理地确定摊铺速度和熨平板振动频率的参数范围值对提

高钢渣沥青混凝土摊铺压实效率具有重要作用。同时,结合终压压实度结果来看,初始摊铺压实度的提升,降低了后续碾压工艺的碾压难度,可有效提高终压压实度。

4 结论

(1) 从压实特性出发,AC-13钢渣沥青混凝土宜采用中值或偏细级配,建议2.36 mm筛孔通过率控制为37%~50%,压实温度宜控制在165℃,以提高钢渣沥青混凝土压实度。

(2) 摊铺速度和振动频率对材料压实度增长贡献较大,在摊铺施工时,可通过调节摊铺机摊铺速度和熨平板振动频率来提高AC-13钢渣沥青混凝土的摊铺压实度;振捣梁振动频率的改变对摊铺压实度的影响较小。

(3) 通过正交试验,基于均值和极差、方差分析,确定钢渣沥青混凝土的最佳摊铺施工参数组合为:振捣频率12 Hz、振动频率35 Hz、摊铺速度2 m/min。

参考文献:

References:

- [1] 高振鑫,申爱琴,翟超伟,等. 钢渣沥青混合料体积参数测定与水稳定性影响机理[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 1-10.
GAO Zhenxin, SHEN Aiqin, ZHAI Chaowei, et al. Determination of volumetric parameters and impacting mechanism of water stability for steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 1-10.
- [2] 申爱琴,陈祥,郭寅川,等. 基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路面性能评价[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1245-1252.
SHEN Aiqin, CHEN Xiang, GUO Yinchuan, et al. Road performance evaluate on effects of steel slag asphalt mixture based on grey target decision[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4): 1245-1252.
- [3] 王利波,王雨露,张凯,等. 胶粉复合改性沥青-钢渣沥青混合料室内压实性能分析[J]. 建材世界, 2023, 44(3): 34-39.
WANG Libo, WANG Yulu, ZHANG Kai, et al. Analysis of laboratory compaction performance of steel slag asphalt mixture containing crumb rubber composite modified asphalt[J]. The World of Building Materials, 2023, 44(3): 34-39.
- [4] 黄书科. 钢渣排水性沥青混合料压实特性研究[J]. 公路工程, 2016, 41(6): 294-298.
HUANG Shuke. Compaction characteristic research steel slag drainage asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2016, 41(6): 294-298.
- [5] 何亮,詹程阳,吕松涛,等. 钢渣沥青混合料应用现状[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15-33.
HE Liang, ZHAN Chengyang, LYU Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 15-33.
- [6] 李超,陈宗武,谢君,等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(3): 86-95,122.
LI Chao, CHEN Zongwu, XIE Jun, et al. A technological and applicational review on steel slag asphalt mixture[J]. Materials Review, 2017, 31(3): 86-95,122.
- [7] 周雄,武建民,杨永利,等. 钢渣沥青混合料碾压温度场[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(3): 79-85.
ZHOU Xiong, WU Jianmin, YANG Yongli, et al. Rolling temperature field of steel slag asphalt mixture[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(3): 79-85.
- [8] 赵军林,马红梅,张新雨,等. 钢渣对 ARHM-16 沥青混合料路面性能的影响[J]. 公路, 2025, 70(7): 8-13.
ZHAO Junlin, MA Hongmei, ZHANG Xinyu, et al. Influence of steel slag on road performance of ARHM-16 asphalt mixture[J]. Highway, 2025, 70(7): 8-13.
- [9] 程志强, POLACZYK Pawel Andrzej, 张德, 等. 基于动态响应的沥青混合料冲击“嵌锁点”判别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2232-2245.
CHENG Zhiqiang, ANDRZEJ P P, ZHANG De, et al. A method for determining impact locking point of asphalt mixtures based on dynamic response[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2232-2245.
- [10] 刘朝晖,杨鑫,黄优,等. 基于沥青混合料动态模量主曲线参数的沥青路面结构分析[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 35-45.
LIU Zhaohui, YANG Xin, HUANG You, et al. Analysis of asphalt pavement structure based on master curve parameters of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 35-45.
- [11] 陈伟,俞海明,李倩,等. 新疆钢渣在水稳基层中的试验应用研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 226-230.
CHEN Wei, YU Haiming, LI Qian, et al. Study on experimental application of Xinjiang steel slag in cement stabilized base[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 226-230.
- [12] 朱慧芳,王亮. 沥青路面智能压实及其关键影响因素研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 47-55.
ZHU Huifang, WANG Liang. Intelligent compaction of asphalt pavement and its key influencing factors[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 47-55.
- [13] 黄优,张允宝,刘朝晖,等. 考虑正交异性的粒料压实特性及其结构力学行为研究[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 117-124.

- HUANG You, ZHANG Yunbao, LIU Zhaohui, et al. Compaction characteristics of granular material and its structural mechanical behavior considering orthotropy[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(5): 117-124.
- [14] 彩雷洲, 李刚, 李翔, 等. 压实次数对沥青混合料骨架特征影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(2): 341-350.
- CAI Leizhou, LI Gang, LI Xiang, et al. Study on stability state of asphalt mixture skeleton: compaction power and contact point analysis[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(2): 341-350.
- [15] 王超, 张彩利, 赵辉编, 等, 编译. 基于试验室及道路模拟试验钢渣沥青混合料的性能评价[J]. *中外公路*, 2022, 42(2): 228-232.
- WANG Chao, ZHANG Caili, ZHAO Hui, et al. Performance evaluation of slag asphalt mixtures based on laboratory and road simulator tests[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(2): 228-232.
- [16] 史妍妮. 沥青路面表面层高密实摊铺及密实度感知技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- SHI Yanni. Study on high-density paving and density sensing technology of asphalt pavement surface[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [17] CHEN X Q, ZHANG J, LIU Z H, et al. Self-healing analyses of steel slag asphalt mixture under microwave heating through multi-scale laboratory tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 460: 139851.
- [18] ZHAO W X, WEN W, LI H R, et al. Research on the performance of asphalt mixture with acid-treated steel slag based on microscopic properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 455: 139134.
- [19] DENG B, ZENG G W, GE R. A creep model of steel slag-asphalt mixture based on neural networks[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(13): 5820.
- [20] WANG H W, FENG X M, LIU J Q, et al. Research on less temperature flawing resistance of steel residue asphalt composition based on SCB test[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2736(1): 012014.
- [21] ZHANG W X, XIAO C Y, HONG Q Z, et al. Testing and evaluation for skid resistance of steel slag asphalt wearing course based on surface texture characteristics [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134597.