

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.07.015

吴霞, 何兆益, 张思源, 等. 川藏过渡区不同气温和风速下沥青混合料降温与压实特性 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(7): 149-163.

川藏过渡区不同气温和风速下沥青混合料降温与压实特性

吴霞^{1,2}, 何兆益¹, 张思源³, 甘祥丽³

1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 江西应用技术职业学院 建筑工程学院, 江西 赣州 341000;
3. 四川省交通建设集团有限责任公司, 成都 610041

摘要: 川藏过渡区气温和风速复杂多变, 在进行沥青混合料摊铺碾压时难以有效控制其压实质量. 为此, 以川藏过渡区德昌至会理高速公路 LM3 标段为依托开展现场铺筑试验. 首先基于理论分析和现场实测对 SMA-13、AC-20C 及 AC-20 共 3 种不同沥青混合料在铺筑过程中的降温规律进行分析. 然后对气温、风速及混合料类型共 3 个因素开展 SPSS 正交分析, 从而获得其对有效碾压时间的影响性排序. 进一步根据降温规律建立沥青混合料的碾压温度估算模型, 同时开展室内变温击实试验对其最佳击实温度进行估算. 结果表明: 当风速小于 6 m/s 且气温大于 5 °C 时, AC-20C 与 AC-20 的碾压质量较好; 当风速大于 3 m/s 且气温为 5~15 °C 时, SMA-13 的碾压质量欠佳; 对有效碾压时间的双因素影响性排序为气温 & 风速 > 气温 & 混合料类型 > 风速 & 混合料类型; SMA-13、AC-20C 及 AC-20 的最佳击实温度分别为 169 °C, 166 °C, 152 °C. 最后基于分数阶理论, 给出了不同气温、风速下不同类型沥青混合料的现场摊铺和碾压温度建议值.

关键词: 沥青混合料; 压实质量; 气温; 风速; 降温规律; 实测

中图分类号: U416 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2024)07-0149-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Cooling and Compaction Properties of Asphalt Mixture under Different Air Temperatures and Wind Speeds in Sichuan-Xizang Transition Zone

WU Xia^{1,2}, HE Zhaoyi¹, ZHANG Siyuan³, GAN Xiangli³

1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of Architecture Engineering, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China;
3. Sichuan Communications Construction Group Co. Ltd., Chengdu 610041, China

收稿日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978116); 江西省自然科学基金面上项目(20202BAB203016).

作者简介: 吴霞, 博士研究生, 副教授, 主要从事道路工程方面的教学与研究.

Abstract: The temperature and wind speed in Sichuan-Xizang transition zone are complex and variable. It is difficult to effectively control the compaction quality when paving with asphalt mixture. Therefore, the field paving test was carried out based on LM3 section of Dechang—Huili expressway in the transition zone between Sichuan and Xizang. Firstly, the cooling laws of SMA-13, AC-20C and AC-20 were analyzed based on theoretical analysis and field measurement. Then, SPSS orthogonal analysis was carried out on three factors, namely air temperature, wind speed and mixture type, so as to obtain the order of their influence on effective rolling time. Additionally, the rolling temperature estimation model of asphalt mixture was established according to the cooling law, and the indoor variable temperature compaction test was carried out to estimate its optimal compaction temperature. Facts and figures show that when the wind speed is less than 6 m/s and the temperature is higher than 5 °C, the rolling quality of AC-20C and AC-20 is better. When the wind speed is more than 3 m/s and the temperature is 5~15 °C, the rolling quality of SMA-13 is poor. The order of two factors influencing the effective rolling time is air temperature & wind speed > air temperature & mixture type > wind speed & mixture type. The optimal compaction temperature of SMA-13, AC-20C and AC-20 is 169 °C, 166 °C and 152 °C, respectively. Finally, the values of field paving and rolling temperature for different types of asphalt mixtures at different air temperatures and wind speeds were recommended based on fractional order theory.

Key words: asphalt mixture; compaction quality; temperature; wind speed; cooling law; field measurement

碾压温度是保证沥青混合料能否有效压实的重要因素之一^[1]. 受气温和风速影响, 沥青混合料在摊铺及碾压过程中会迅速降温, 导致难以碾压密实、降低沥青路面的强度和耐久性, 进而容易造成裂缝、车辙等严重的早期损坏^[2-4]. 为此, 在实际工程中常采用提高沥青混合料的碾压温度和增大压实功来保证压实质量. 但提高碾压温度极易导致拌合温度过高从而加剧沥青老化并最终影响沥青混合料的耐久性^[5], 而增大压实功则一方面易造成集料产生“过压”而导致空隙率过小或破碎, 从而出现“泛油”病害, 另一方面容易改变沥青混合料的级配从而影响路面的结构强度甚至“失稳”^[6-7].

为此, Yu 等^[8]针对 SMA-13、AC-13 沥青混合料研究了级配、压实次数及初始压实温度对压实特性的影响, 表明压实度与初始压实温度之间具有良好的相关性. Wang 等^[9]基于 DEM 离散元模型及现场试验, 考虑摊铺速度、摊铺角度、摊铺厚度等因素, 对摊铺作业方式进行了改进. Qian 等^[10]基于三维数值模拟分析, 发现压实过程中的初始碾压温度和层厚会影响整个层位的温度场, 且风速和气温主要影响沥青混合料的上层温度场. 在此基础上, 王黎明等^[11]对铺筑过程中的热扩散影响因素进行了仿真模拟和敏感性分析, 认为气温和风速对热扩散影响显著, 且摊铺温度、混合料类型和铺层厚度对压实影响具有敏感性. 此外, 在碾压机械与施工效率方面, 刘聂子等^[12]从节能角度建立了沥青混合料的摊铺碾压机械总体能耗计算模型, 提出了沥青混合料摊铺碾压节能施工技术. Polaczyk 等^[13]基于 Witczak 模型, 针对沥青振动压实仪和旋转压实仪, 研究发现用沥青温度和碾压遍数能更有效地对压实度进行评估. 基于现场试验, Yohana Ribas 等^[14]采用马歇尔压路机得到了沥青混合料的成型试样, 发现马歇尔击实仪和旋转击实仪的代表性最佳. Wan 等^[15]认为在较低的频率下实施多次压实可提高压实效率, 据此史妍妮等^[16]发现 AC-20 沥青混合料的高效压实摊铺频率为 33~49 Hz, 最佳摊铺速度为 2 m/min. 上述研究对于丰富和完善沥青混合料的压实质量控制具有积极意义.

然而, 以上研究多单一地对沥青混合料在压实过程中的温度场变化、压实影响因素或碾压机械效率等进行分析. 理论研究和工程实践表明, 沥青混合料的碾压温度一般根据相关设计与施工规范进行经验取值, 但在恶劣环境下, 不同的沥青混合料具有不同的压实降温特性, 达到目标密实度的最佳碾压温度也并不相同, 由此导致采用规范进行经验取值的做法存在明显的主观性、经验性缺陷.

对此, 本文以压实过程中的碾压温度为切入点, 对川藏过渡区不同气温和风速环境下不同沥青混合料

的降温规律开展足尺度试验研究, 并基于时温等效原则及多因素方差分析研究气温、风速及混合料类型对降温速率及有效压实时间的影响规律, 基于压实等效原则建立室内击实温度与压实温度(摊铺、初压、复压、终压)间的关系, 进而量化摊铺温度及碾压温度, 以期为不同气温和风速环境下沥青混合料的压实质量控制提供相关参考.

1 原材料及现场铺筑

依托现场实体工程开展足尺度试验研究. 综合考虑地形、地貌以及工程地质条件等因素, 在由四川省蜀道集团投资建设的德昌至会理高速公路 LM3 标段的主线上共选取 3 个直线铺筑试验段, 长度分别为 500, 300, 800 m, 累计长度为 1 600 m, 地点分别位于爱国村、沙坝村和高家村, 图 1 所示为位于爱国村的铺筑试验段. 铺层为上、中、下共 3 个层位, 厚度分别为 4, 6, 6 cm. 沥青混合料共 3 个类型, 即: SMA-13、AC-20 及 AC-20C, 沥青及用量分别为 90[#] SBS 改性沥青 5.9%、90[#] SBS 改性沥青 4.1% 以及 70[#] 基质沥青 4.1%. 矿质混合料的级配见表 1.



图 1 现场铺筑试验段

表 1 矿质混合料级配

沥青混合料 类型	通过下列直径筛孔的质量百分率/%											
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
SMA-13	9.5	11.9	14.8	17.5	20.2	22.5	25.9	64.3	95.1	100	100	100
AC-20C	5.4	8	11.9	16.6	23	29.5	37.8	55.9	72.3	85.5	98.4	100
AC-20	5.2	10	11.2	14.8	21	26.5	40.3	58.5	74.8	88.6	97.8	100

选择非降雨日开展铺筑施工, 并在每个铺筑现场搭建移动式罩棚以便做好防雨准备. 采用间歇式拌和机对沥青混合料进行拌制. 为了便于施工及保证施工的连续稳定性, 采用 5 辆与摊铺机相匹配的自卸式汽车进行前后搭接运输, 且在装料前在车厢板表面均匀喷洒一层防黏隔离剂, 同时采用小堆装料以减少集料离析.

采用履带式摊铺机进行摊铺, 预先采用防黏隔离剂对摊铺机的料斗内表面进行刷涂以防止黏结成硬块. 单台摊铺机的铺筑宽度为 6 m, 同时采用 2 台摊铺机以前后 10~15 m 的间距实施错位梯队式同步摊铺, 左右两幅的搭接摊铺宽度为 15~30 cm, 且上、下层的铺筑搭接位置需错开 40 cm. 每台摊铺机的摊铺速度为 2~4 m/min, 采用自动找平方式进行找平, 下面层采用钢丝绳引导实施高程控制, 上面层采用平衡梁辅助摊铺. 由于采用机械摊铺, 沥青混合料的松铺系数取 1.25. 采用 12 t 钢轮压路机进行碾压, 初压时的碾压速度控制在 1.5~2.0 km/h, 复压和终压时的碾压速度均控制在 2.5~3.0 km/h. 现场碾压均为静压, 其中初次碾压和终止碾压的次数均为 2 遍, 复压为 3~5 遍.

2 沥青混合料压实降温特性

依据时温等效原则, 通过足尺度试验监测压实过程中沥青混合料在不同气温风速下的降温规律和有效压实时间, 并对影响因素(气温、风速及混合料类型)进行敏感性分析.

2.1 试验方案

采用手持式气象站对气温及风速实施监测, 采用插入式温度计通过点测法获得路面的内部温度^[17-18]. 试验中同时考虑气温和风速 2 个环境因素, 为了合理地对气温和风速进行确定, 经与当地气象部门协商后获得了 20 年的气温和风速数据. 经统计分析, 以 5℃为梯度共设置 3 个气温段, 即: 5~10℃、10~15℃、15~20℃; 以 3 m/s 为梯度共设置 3 个风速段, 即: 0~3 m/s(微风)、3~6 m/s(中风)及 6~9 m/s(大风).

沿横断面方向共均匀布置 5 个插入式温度计,横向布置间距视断面实际宽度而定,插入深度为铺层厚度的中点.为了防止施工破坏以及提高数据的代表性,同时对 3 组横断面实施监测,保证每次可得到不少于 15 个温度数据并取其平均值为最终值,且每隔一分钟即读取一次数据,从而完成对摊铺压实阶段路面温度降至 90 ℃ 时的温度变化规律实施监测.

2.2 压实降温特性分析

2.2.1 不同气温下压实降温规律

不同气温下,SMA-13、AC-20C 及 AC-20 共 3 种沥青混合料在摊铺压实过程中的降温变化分别如图 2~图 4 所示.

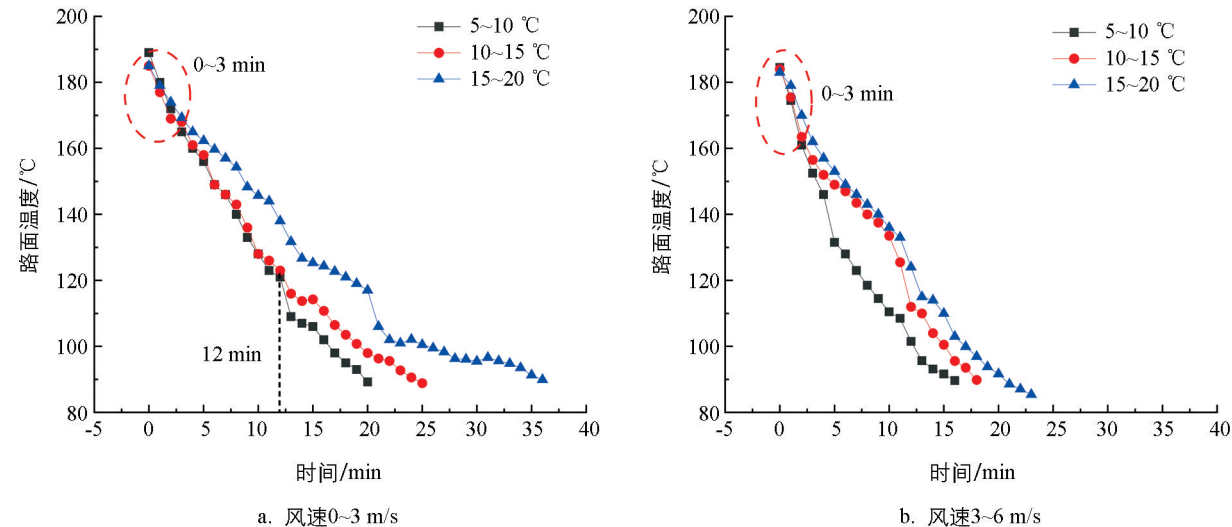


图 2 SMA-13 不同气温下铺筑降温过程曲线

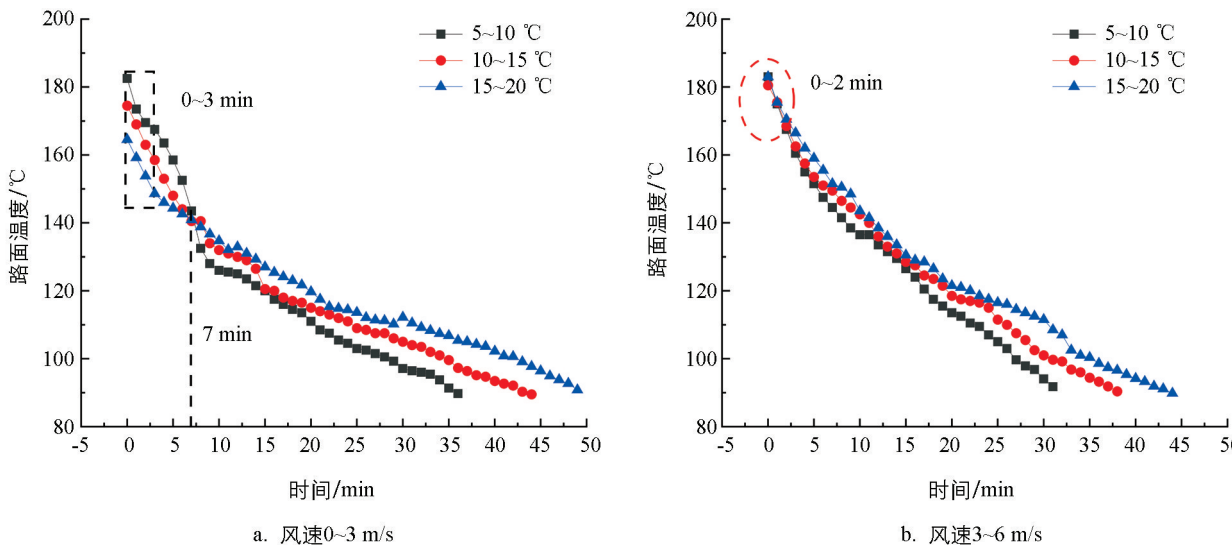


图 3 AC-20C 不同气温下铺筑降温过程曲线

由图 2a 可知,当风速为 0~3 m/s 时,在 0~3 min 内,降温速率明显快于后期,气温越低则降温速率越快.从第 3 min 开始,SMA-13 在 15~20 ℃ 时的降温速率明显小于 5~10 ℃ 和 10~15 ℃ 时的降温速率;在 3~12 min 内,气温在 5~10 ℃ 与 10~15 ℃ 时的降温速率相当,其原因在于该阶段已经基本完成了初次碾压并形成了相对致密的结构;在第 12 min 后,当气温低于 15 ℃ 时,SMA-13 沥青混合料降温显著,其有效压实时间将缩短达 10~15 min 以上.

由图 2b 可知,当风速为 3~6 m/s 时,在 0~3 min 内,气温为 5~10 ℃ 及 10~15 ℃ 时混合料的降温速率大.当气温为 15~20 ℃ 时,降温速率明显小于气温为 5~10 ℃ 及 10~15 ℃ 时.另外可以看到,当风速为 3~6 m/s 时,SMA-13 在不同气温下的有效压实时间变化不大,表明风速的影响明显强于气温.

由图 3 可知,在 0~3 min 内,气温越低,则 AC-20C 降温越快;在第 3 min 后,随着气温逐渐升高,降温速率越缓.此外,可以看到从第 7 min 开始,在气温为 10~15 ℃ 及 15 ℃~20 ℃ 时 AC-20C 的降温速率均变缓,由此可见当风速小于 6 m/s、气温大于 5 ℃ 时,AC-20C 的有效压实时间是能满足摊铺和碾压要求的.

AC-20 沥青混合料在摊铺压实过程中的降温变化如图 4 所示.可以看到,在 0~3 min 内,当气温为 5~10 ℃ 时,AC-20 沥青混合料的降温速率明显比其他气温时更快.当气温小于 10 ℃ 时,在碾压初期其内部温度的影响变化显著,从第 7 min 后随着气温的逐渐升高,AC-20 沥青混合料的降温速率明显变缓,有效压实时间差值较小,表明气温对 AC-20 沥青混合料的影响较小.

2.2.2 不同风速下压实降温规律

在压实过程中,风速对沥青混合料内部的降温变化如图 5、图 6 所示.

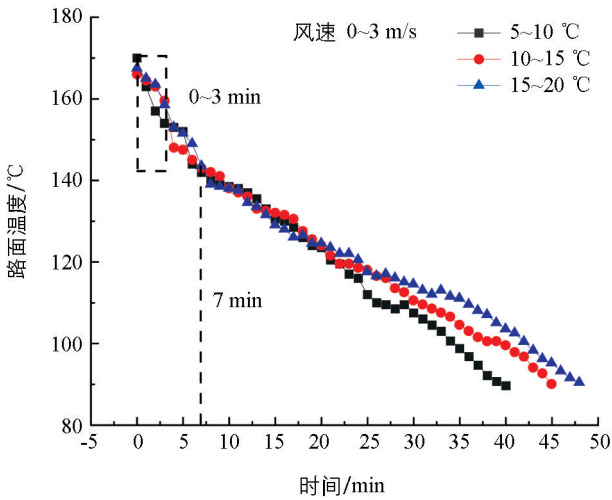
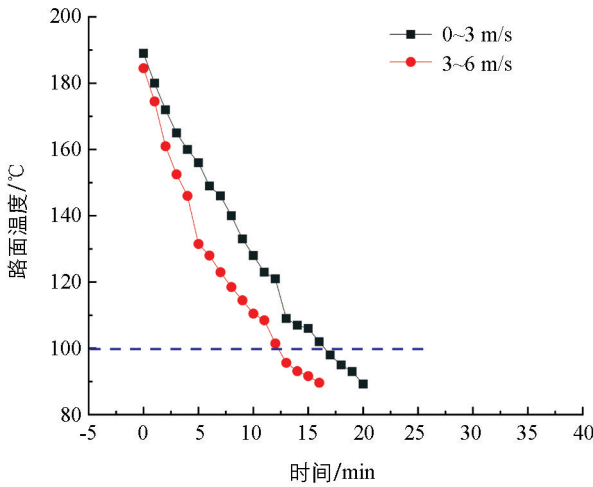
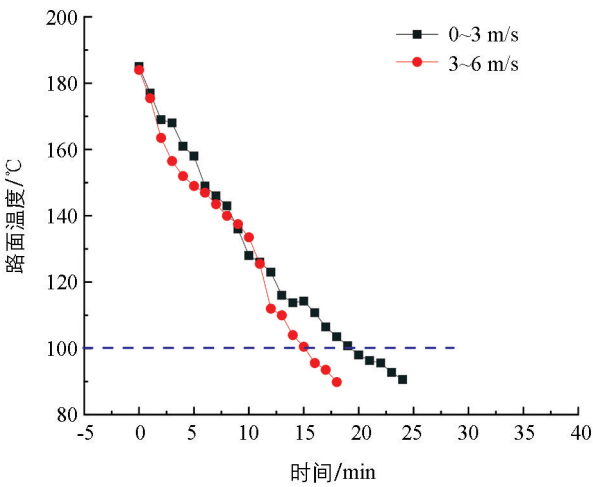


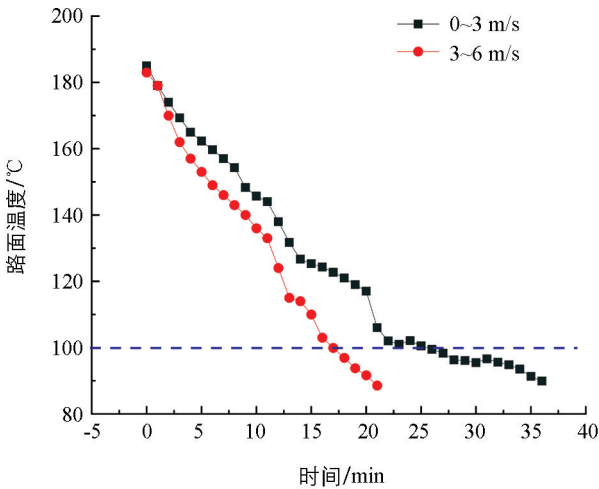
图 4 AC-20 不同气温下铺筑降温过程曲线



a. 气温 5~10 ℃



b. 气温 10~15 ℃



c. 气温 15~20 ℃

图 5 SMA-13 不同风速下铺筑降温过程曲线

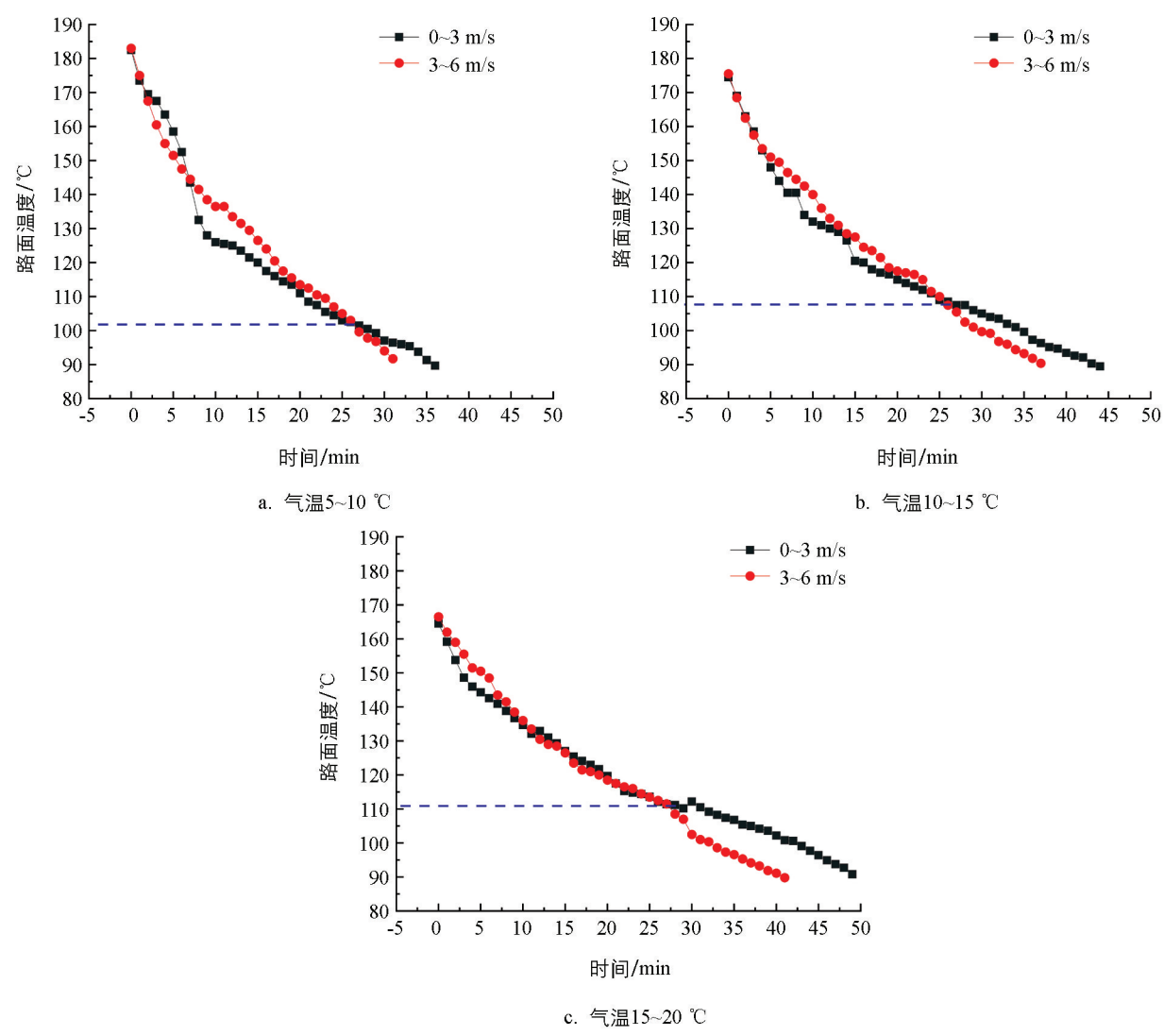


图 6 AC-20C 不同风速下铺筑降温过程曲线

由图 5 可知,当风速为 3~6 m/s 时,SMA-13 的降温速率明显高于风速为 0~3 m/s 时的降温速率,且随着风速逐渐增大,SMA-13 沥青混合料的降温愈发显著.当气温为 15~20 °C 时,风速为 0~3 m/s 时的有效压实时间是风速为 3~6 m/s 时的 1.7 倍,可见该气温下风速对 SMA-13 的降温影响显著;当气温分别为 5~10 °C 及 10~15 °C,风速为 0~3 m/s 时 SMA-13 的有效压实时间约为风速为 3~6 m/s 时的 1.25 倍及 1.4 倍,可见气温越高,风速对 SMA-13 的影响越大.当气温为 15~20 °C 时,SMA-13 从 100 °C 降至 90 °C,风速为 0~3 m/s 时的降温速率明显小于 3~6 m/s 时的降温速率,有效压实时间减少约 10 min,表明风速对 SMA-13 终压阶段的影响是显著的.

由图 6 可知,当风速为 3~6 m/s 时,AC-20C 沥青混合料在初压及复压阶段的降温与风速为 0~3 m/s 时相比不显著.当温度降至 110 °C~90 °C(终压阶段)时,随着风速逐渐增大,AC-20C 沥青混合料的降温越明显,其有效压实时间的降低越显著.可见,在初压及复压阶段,风速对 AC-20C 沥青混合料的降温影响并不显著,而在压实后期,风速对 AC-20C 沥青混合料的降温影响显著.

2.2.3 不同混合料类型压实降温规律

在同等环境条件下,不同沥青混合料在摊铺压实过程中其内部的降温变化见图 7.由图 7 可知,在 0~9 min 内,AC-20C 沥青混合料的降温速率明显高于 AC-20 沥青混合料;在第 9 min 后,AC-20C 沥青混合

料与 AC-20 沥青混合料的降温速率相当, 说明在摊铺碾压的初期阶段, 2 种混合料的热扩散有差异, 混合料本身热物性参数对摊铺碾压初期阶段具有显著影响, 表明在该阶段, 改性沥青混合料的热扩散明显快于基质沥青混合料。

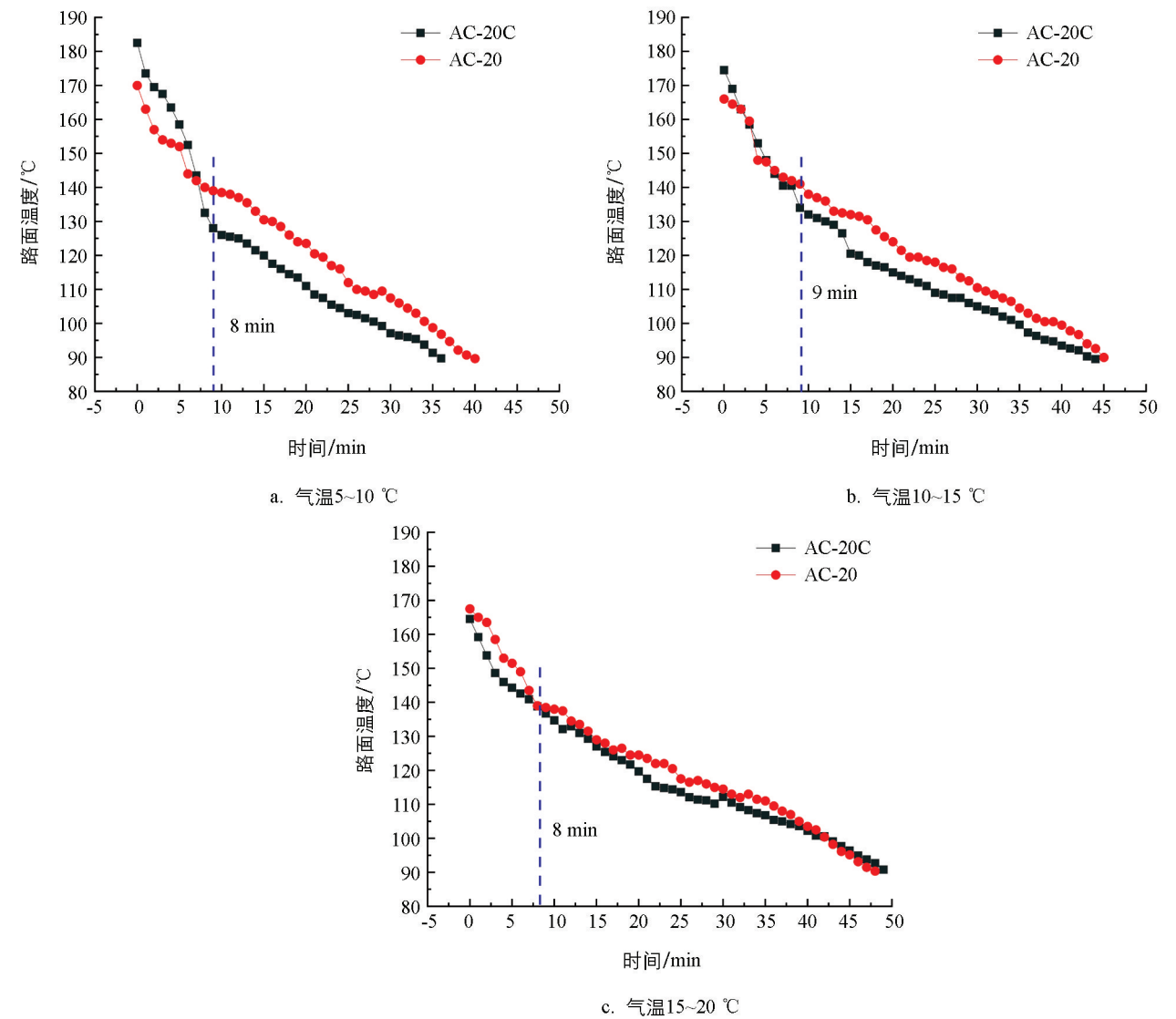


图 7 风速为 0~3 m/s 下不同混合料类型摊铺降温过程曲线

2.3 多因素敏感性分析

根据上述试验方案, 基于实测气温、风速及混合料类型对有效压实时间的影响实施 SPSS 多因素方差正交分析. 需要说明的是, SPSS 是成熟的多因素方差分析方法, 已经得到了广泛认可及应用, 其原理详见相关教材, 此处不再赘述.

2.3.1 确定影响因素及其水平

将影响因素划分为 2 类, 累计共 7 个影响因素. 第一类是单一影响因素, 共 3 个, 即: 气温(A)、风速(B)以及混合料类型(C); 第二类是耦合影响因素, 共 4 个, 即: 气温 & 风速(D)、气温 & 混合料类型(E)、风速 & 混合料类型(F)以及气温 & 风速 & 混合料类型(G).

根据当地气象资料, 气温和风速均有 3 个变化梯度, 故第一类影响因素的水平数为 3, 其水平取值如表 2 所示.

表 2 影响因素及其水平取值

水平	气温/℃	风速/(m·s ⁻¹)	混合料类型
1	5~10	0~3	SMA-13
2	10~15	3~6	AC-20C
3	15~20	6~9	AC-20

2.3.2 确定分析模型

采用 IBM 公司设计开发的 SPSS 统计程序实施多因素方差分析. 根据该程序的操作规程, 在确定好影响因素及其水平后, 需要选择合适的数据分析模型实施分析. SPSS 程序中共包含 3 种数据分析模型, 即: 一般线性模型、广义线性模型以及混合模型. 实践表明, 采用一般线性模型中的多变量分析方程即可完成大多数多因素方差分析, 且具有迭代累积误差小、收敛速度快的优势, 故选用一般线性模型中的多变量分析方程对方差、均值以及 F 值等进行分析. 以 A、B 两因素方差分析为例, 其模型方程如下式所示:

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + \epsilon_{ijk}$$

(1)

式中: X_{ijk} 为第 k 次迭代时第 i 组的第 j 个观察值, 无量纲; μ 为总体的平均水平值, 无量纲; α_i 为因素 A 在 i 水平下的附加效应, 无量纲; β_j 为因素 B 在 j 水平下的附加效应, 无量纲; $\alpha_i\beta_j$ 为 A、B 两因素的耦合效应, 无量纲; ϵ_{ijk} 为随机误差变量, 无量纲.

2.3.3 实施分析

完成上述步骤后, 只需按照程序的提示执行操作即可完成分析过程并得到结果, 如表 3 所示.

表 3 多因素敏感性分析结果

影响因素	III 类平方和	自由度	均方差	F 值	显著性
气温(A)	1 226.988	2	613.494	310.581	0.00
风速(B)	1 897.877	2	948.938	480.4	0.00
混合料类型(C)	3 693.432	2	1 846.716	934.9	0.00
气温 & 风速(D)	45.827	4	11.457	5.8	0.001
气温 & 混合料类型(E)	45.16	4	11.29	5.716	0.001
风速 & 混合料类型(F)	36.049	4	9.012	4.563	0.003
气温 & 风速 & 混合料类型(G)	121.136	8	15.142	7.666	0.00
误差	106.667	56	1.975		

由表 3 可知, 气温、风速及混合料类型对有效压实时间的影响显著. 依据 F 值可以看到, 单一因素中的敏感性排序为: $C>B>A$; 两因素相组合的敏感性排序为: $D>E>F$. 可见, 对于沥青混合料在压实过程中的降温及有效压实时间, 应重视不同混合料类型的差异带来的压实降温特性差异, 并同时考虑气温和风速的综合作用对压实降温的影响. 此外, 在施工中还需根据混合料的不同类型及环境条件实施分类铺筑施工, 从而保证压实效率.

3 沥青混合料最佳击实温度

3.1 试验方案

理论研究和工程实践表明^[19-20], 室内击实温度是保证沥青混合料密实度及施工压实质量的有效评价依据. 为了合理确定沥青混合料在施工过程中的摊铺及碾压温度, 依据压实等效原则, 分别对 SMA-13、AC-20C 和 AC-20 沥青混合料开展变温击实试验. 依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[21]对不

同层位碾压温度的推荐值, 以 5 ℃ 为试验温度梯度对不同沥青混合料的室内击实温度进行设计.

其中, 上面层为 SMA-13, 厚度为 4 cm, 集料为玄武岩, 沥青为 90[#] SBS 改性沥青, 油石比为 5.9%, 以 155 ℃, 160 ℃, 165 ℃, 170 ℃, 175 ℃ 共 5 个温度进行马歇尔变温击实. 中面层为 AC-20C, 厚度为 6 cm, 集料为石灰岩, 沥青为 90[#] SBS 改性沥青, 油石比为 4.1%, 以 155 ℃, 160 ℃, 165 ℃, 170 ℃, 175 ℃ 共 5 个温度进行击实. 下面层为 AC-20, 厚度为 6 cm, 集料为石灰岩, 沥青为中海牌 70[#] 基质沥青, 油石比为 4.1%, 以 140 ℃, 145 ℃, 150 ℃, 155 ℃, 160 ℃ 共 5 个温度进行击实.

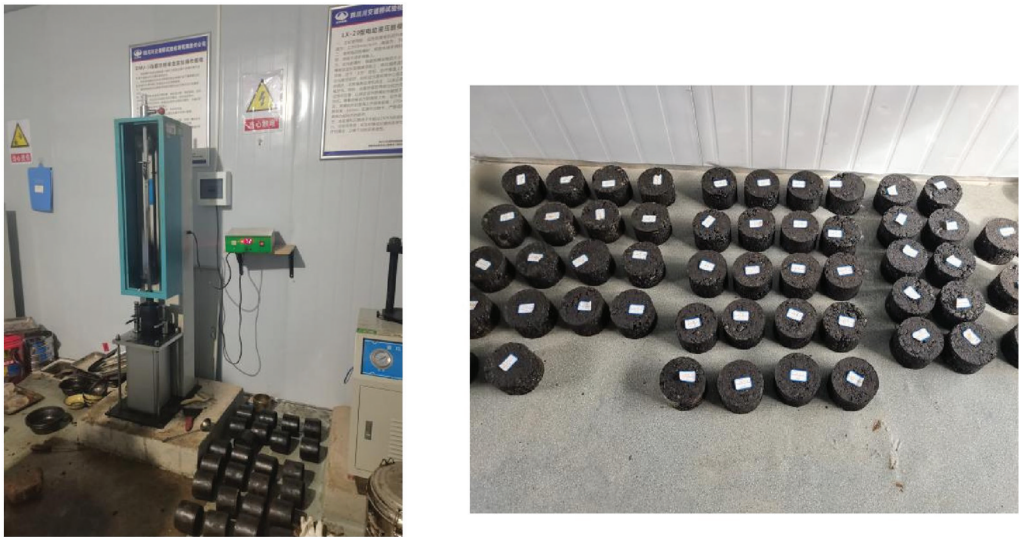


图 8 马歇尔击实成型试件

3.2 确定最佳击实温度

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[22] 的规定, 利用式(2)对不同击实温度下沥青混合料的空隙率进行计算, 结果如表 4 所示.

$$e = \frac{1 - \sigma_1}{\sigma_2} \times 100\%$$

(2)

式中: e 为孔隙率, 无量纲; σ_1 为毛体积密度(g/mm^3); σ_2 为最大理论密度(g/mm^3), 用下式进行计算:

$$\sigma_2 = \frac{100}{\frac{100}{\sigma'} + \frac{m}{\sigma_3}}$$

(3)

式中: σ' 为集料的有效相对密度(g/mm^3); m 为沥青用量(g); σ_3 为沥青在 25 ℃ 时的密度(g/mm^3).

表 4 沥青混合料马歇尔击实试验结果

混合料类型	不同击实温度下的混合料空隙率/%							
	175 ℃	170 ℃	165 ℃	160 ℃	155 ℃	150 ℃	145 ℃	140 ℃
SMA-13	3.43	3.46	3.58	3.61	3.71			
AC-20C	3.56	3.68	3.71	3.76	4.04			
AC-20				3.42	3.62	3.71	3.97	4.19

利用最小二乘法对表 4 中由试验所得空隙率进行直线拟合, 得到不同沥青混合料空隙率与击实温度之间的拟合关系, 如图 9 所示.

由表 4、图 9 可知: 随着击实温度的逐渐升高, 沥青混合料的空隙率不断降低, 击实温度越高则沥青混合料越密实、空隙率越小. 然而理论研究和实践均表明^[23-24], 当热拌沥青混合料温度过高时, 易引起沥青老化, 进而影响沥青的耐久性和使用性能. 依据沥青混合料配合比设计以及空隙率验证结果,

SMA-13 混合料上面层的最佳空隙率为 3.5%，AC-20C、AC-20 混合料上面层的最佳空隙率均为 3.7%。以最佳空隙率为控制指标，通过拟合可知 SMA-13 混合料的最佳击实温度为 169℃，AC-20C 混合料的最佳击实温度为 166℃，AC-20 混合料的最佳击实温度为 152℃。

3.3 路用性能评价

为了验证最佳击实温度下热拌沥青混合料路用性能是否良好，采用车辙试验、低温小梁弯曲试验及浸水马歇尔试验对其路用性能指标进行评价，试验结果如表 5 所示。可以看到，在最佳击实温度下，各沥青混合料的高温、低温及水稳定性能均良好，能满足规范要求，这为确定各沥青混合料的摊铺碾压温度提供了初步依据。

表 5 沥青混合料路用性能试验结果

沥青混合料类型	击实温度/℃	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	残留稳定度/%	最大弯拉应变/μϵ
SMA-13	169	7 992	91.8	2 708
AC-20C	166	6 753	93.5	1 612
AC-20	152	1 998	93.0	532

4 摊铺及碾压温度

4.1 摊铺至初压阶段降温速率

采用插入式温度计对现场摊铺压实阶段进行降温监测，同时考虑气温和风速 2 个环境因素。根据当地气象站提供的气温和风速统计资料，设置 5~10℃，10~15℃，15~20℃ 共 3 个温度梯度以及 0~3 m/s，3~6 m/s，6~9 m/s 共 3 个风速梯度。采用手持式气象站对最佳击实温度下 3 种沥青混合料在摊铺、初压阶段(前 3 min)的平均降温速率实施监测，结果如图 10 所示。

试验结果表明，从摊铺至初压阶段，风速的影响大于气温。在相同气温条件下，随着风速的增大，混合料的降温速率越来越大。SMA-13 在气温为 5~10℃、风速为 6~9 m/s 的环境下，降温速率达 15.3℃/min，约为气温为 5~10℃、风速为 0~3 m/s 时降温速率的 1.8 倍。可见在低温时，风速对初压阶段温度的损失影响极大。此外，AC-20C 的降温速率明显高于 AC-20，说明在初压阶段，改性沥青混合料的热扩散过程快于普通沥青混合料。综上所述，在初压阶段，沥青混合料的平均降温速率从高到低的顺序依次为：SMA-13>AC-20C>AC-20。

4.2 最佳击实温度与摊铺碾压温度计算模型

李锐铎等^[25]的研究表明，基于分数阶理论，热拌沥青混合料的温度场特征与初始温度、静置时间、日照强度以及地形系数等具有如下式所示的关系：

$$T_i = \eta \Delta t \frac{\partial p}{\partial t} + T_0^j$$

(4)

式中： T_i 为 i 时刻沥青混合料的温度(℃)； η 为地形系数，无量纲，表征地形对温度变化的增量效应； Δt

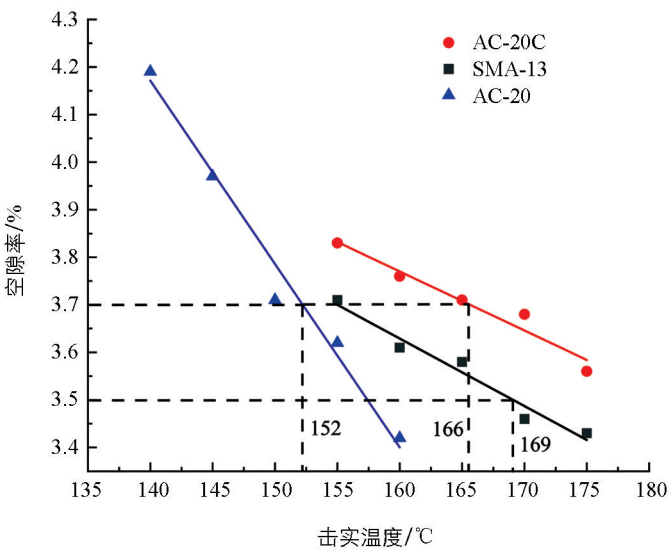


图 9 沥青混合料空隙率与击实温度关系

为环境中的静置时间(min); p 为太阳辐射量(MJ/m^2); j 为风力效应系数,表征环境风对温度场的变化效应,无量纲; T_0^j 为沥青混合料在风力系数 j 条件下的初始温度($^{\circ}\text{C}$).

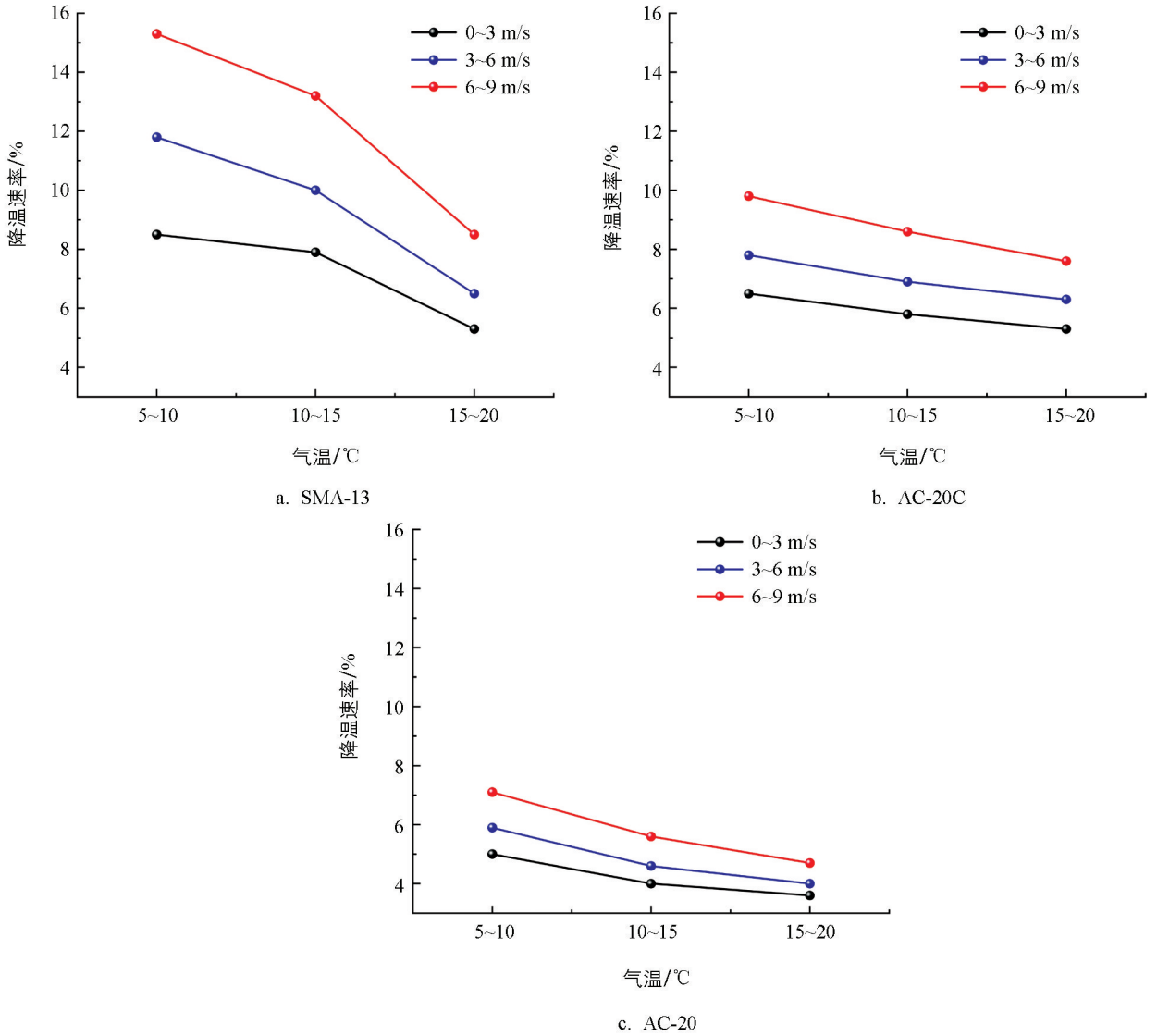


图 10 沥青混合料摊铺至初压阶段的平均降温速率

根据《太阳能资源测量 总辐射》(GB/T 31156—2014)^[26]的规定,在平坦、开阔的地形条件下,地形系数 η 以及风力效应系数 j 的取值均为 1,即视为无增量效应.据此,可将式(4)改写为如下形式:

$$T_i = \Delta t \frac{\partial p}{\partial t} + T_0 \quad (5)$$

式中:太阳辐射量 p 对时间 t 求一阶偏导数,其结果表征太阳辐射量随时间的变化率,即:降温速率.本次铺筑试验段均位于同一地区,故日光辐射率、水热传导系数等均为等值常量,对时间 t 求一阶偏导数后,日光辐射率、水热传导系数等偏导数分项结果均为 0,此时降温速率为一个不带隐函数的单变量.为此,引入参数 V 用于表征该降温速率.此时,可将式(5)改写为如下形式:

$$T_i = \Delta t V + T_0 \quad (6)$$

为此,根据上述实际监测的统计分析结果,以最佳击实温度为基准综合考虑当地的降温速率,可建立摊铺温度的估算模型,如下式所示:

$$T_1 = (t_3 - t_2)V + T_0 \quad (7)$$

$$T_2=(t_2-t_1)V+T_1$$

(8)

式中： T_2 为摊铺温度上限值(℃)； T_1 为摊铺温度下限值或称为初压阶段上限值(℃)； T_0 为最佳击实温度值(℃)； V 为摊铺至初压阶段的平均降温速率(℃/min)； t_1 为摊铺时刻(min)； t_2 为初次碾压时刻(min)； t_3 为初压完成时刻(min)。

联合式(7)、式(8)，同时结合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中终压温度不低于 90 ℃ 的规定，可得：摊铺温度为 $T_1\sim T_2$ ，初压温度为 $T_0\sim T_1$ ，复压温度为 90 ℃ $\sim T_0$ ，终压温度 ≥ 90 ℃。

4.3 确定摊铺及碾压温度

工程实践和现场监测表明，在低温下实施紧凑碾压时，从摊铺至初压完成大约需用时 2 min。为满足低温下对压实质量的控制要求，依据图 9 和图 10 的结果，联合式(7)、式(8)可推算得到不同铺层混合料在不同气温及风速下各个阶段的碾压温度值(表 6)。

表 6 不同沥青混合料的摊铺及碾压温度

沥青混合料类型	气温/℃	风速/(m·s ⁻¹)	摊铺温度/℃	初压温度/℃	复压温度/℃	终压温度/℃
SMA-13 厚度 4 cm	5~10	0~3	178~187	169~178	90~169	≥ 90
		3~6	181~193	169~181		
		6~9	184~199	169~184		
	10~15	0~3	177~185	169~177		
		3~6	179~189	169~179		
		6~9	182~195	169~182		
	15~20	0~3	175~179	169~175		
		3~6	177~183	169~177		
		6~9	178~186	169~178		
		0~3	172~178	166~172	90~166	≥ 90
		3~6	173~181	166~173		
		6~9	175~185	166~175		
AC-20C 厚度 6 cm	5~10	0~3	172~178	166~172	90~166	≥ 90
		3~6	173~181	166~173		
		6~9	175~185	166~175		
	10~15	0~3	171~177	166~171		
		3~6	172~179	166~172		
		6~9	174~182	166~174		
	15~20	0~3	170~175	166~170		
		3~6	171~177	166~171		
		6~9	173~179	166~173		
		0~3	158~163	152~158	90~152	≥ 90
		3~6	159~165	152~159		
		6~9	160~167	152~160		
AC-20 厚度 6 cm	5~10	0~3	158~163	152~158	90~152	≥ 90
		3~6	159~165	152~159		
		6~9	160~167	152~160		
	10~15	0~3	157~161	152~157		
		3~6	158~162	152~158		
		6~9	159~164	152~159		
	15~20	0~3	157~160	152~157		
		3~6	157~161	152~157		
		6~9	158~163	152~158		
		0~3	157~160	152~157		
		3~6	157~161	152~157		
		6~9	158~163	152~158		

结合表 6 及图 10 可知, 对于 SMA-13 热拌沥青混合料, 当气温为 5~15 ℃、风速>3 m/s 时, 由于碾压温度过高, 考虑运输过程中的温度损失, 拌合温度将达 200 ℃, 容易产生废料或沥青老化, 进而导致耐久性变差, 故不宜开展铺筑施工。在工期紧的情况下, 可采用热拌温铺技术降低最佳击实温度及施工碾压温度, 通过延长有效压实时间来达到预期压实效果。此外, 通过严格控制各个阶段的铺筑温度、提高碾压效率, 可弥补低温大风造成的温度损失, 能有效保证沥青路面的压实质量。

4.4 有效压实时间

依据表 6 设定的摊铺及碾压温度, 对 SMA-13、AC-20C 及 AC-20 沥青混合料在不同气温和风速下的有效压实时间进行足尺度试验监测, 结果如图 11 所示。由图 11a 可知, 当气温小于 15 ℃、风速大于 3 m/s 时, SMA-13 的有效压实时间小于 20 min, 不能满足铺筑压实施工的时间要求。由图 11b 和图 11c 可知, 当 AC-20C 及 AC-20 沥青混合料的铺层厚度为 6 cm 时, 在低温大风下能满足铺筑压实施工时所需的时间(>20 min), 通过优化压实机械效率可保证正常施工。

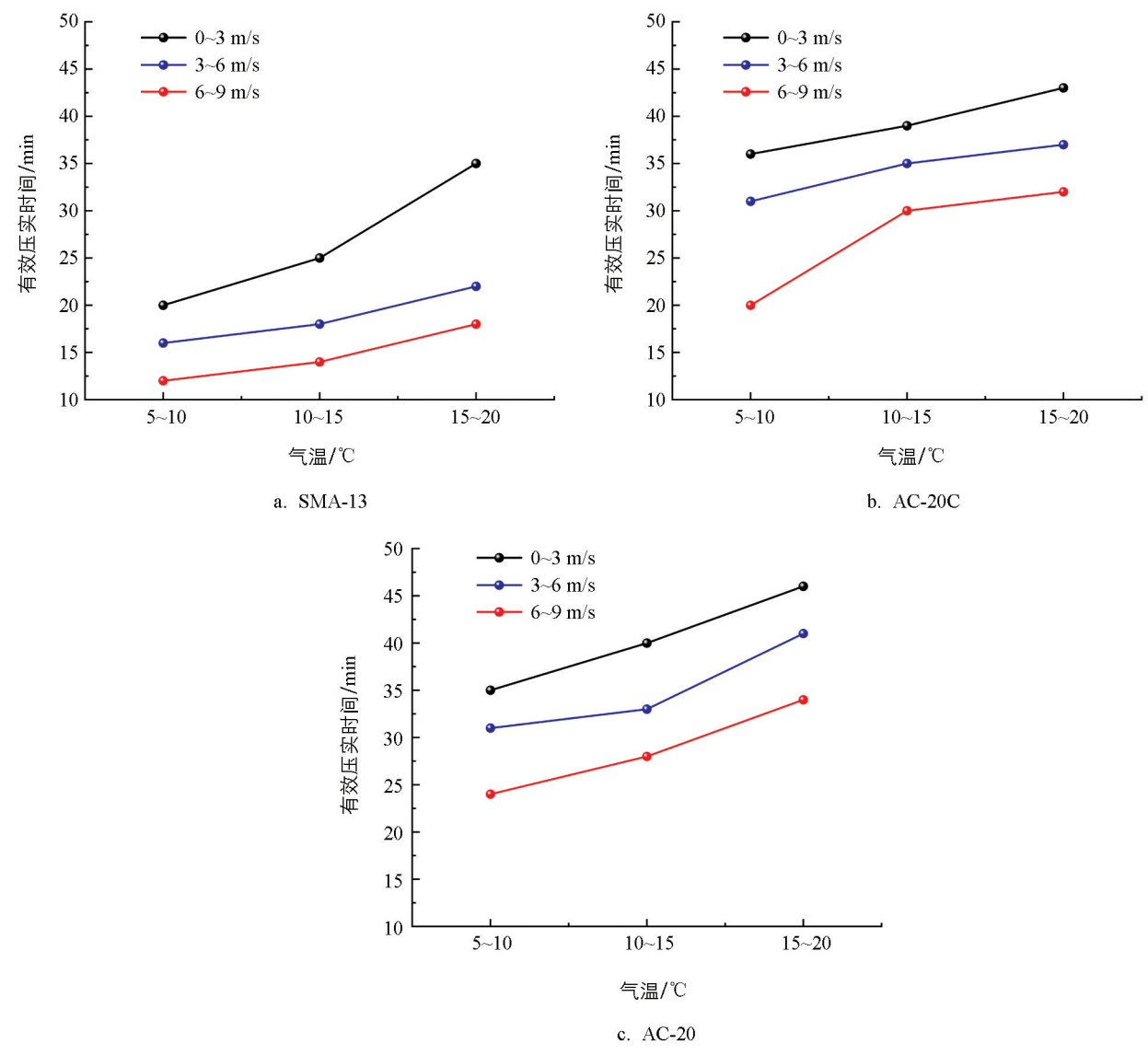


图 11 不同沥青混合料的有效压实时间

SMA-13 沥青混合料具有骨架密实型结构, 集料采用的是间断型级配, 由此使得大小孔隙依次被填充, 集料之间的摩擦接触和咬合接触更加优越, 且多采用风化程度弱、硬度高、强度大的岩浆岩类石料(如玄武岩), 易形成大量的三钢片式锁闭结构。此时若集料之间的黏结性和包裹度不佳, 将难以被压实, 故需要适

当地提高碾压温度以增强沥青的软化性、渗透性。上述分析也表明 SMA-13 沥青混合料具有最高的碾压温度,这也意味着在快速降温环境下,沥青的软化性、渗透性容易下降而稠度上升,进而难以被压实。因此对于 SMA-13 沥青混合料,在压实施工过程中需要特别注意保证其碾压温度并规避快速降温环境。

与 AC-20 沥青混合料相比,AC-20C 沥青混合料虽然也采用连续型级配,属于悬浮密实型结构,但粗集料大颗粒含量更多,抗车辙能力更强,由此也使其骨架抗力强于 AC-20 沥青混合料。在最大粒径相同的情况下,其内部空隙之间的贯通性以及与外界的连通性亦强于 AC-20 沥青混合料,导致在相同的气温和风速条件下,其降温速率更快,也更不容易被压实。因此,两者相比之下,在工程实践中 AC-20C 沥青混合料需要更高的碾压温度且对气温和风速的要求更高。另一方面,也意味着当在风速大、气温低的条件下,易致碾压温度下降过快,此时需特别注意要通过提高压实机械效率来保证压实质量。

5 结论

1) 基于室内马歇尔变温击实试验,得到 SMA-13、AC-20C 及 AC-20 沥青混合料在压实过程中的最佳碾压温度分别为 169°C 、 166°C 、 152°C 。当气温为 $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、风速大于 3 m/s 时,不宜开展 SMA-13 沥青混合料铺筑施工。当风速小于 6 m/s 、气温大于 5°C 时,AC-20C 及 AC-20 沥青混合料在铺层为 6 cm 时能正常摊铺和碾压,但当风速大于 6 m/s 、气温为 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时,需提升压实机械效率以保证压实质量。

2) 在碾压初期的 $0\sim 3\text{ min}$ 内,风速对 SMA-13 沥青混合料的影响大于 AC-20C 及 AC-20,降温可达 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$;在初压阶段,平均降温速率的高低顺序依次为 $\text{SMA-13} > \text{AC-20C} > \text{AC-20}$;在同等条件下,改性沥青混合料 AC-20C 在初压阶段的热扩散过程快于基质沥青混合料 AC-20。

3) 气温、风速及混合料类型对有效压实时间的影响是显著的。单因素敏感性排序为:混合料类型 $>$ 风速 $>$ 气温,两因素组合的敏感性排序为:气温 $\&$ 风速 $>$ 气温 $\&$ 混合料类型 $>$ 风速 $\&$ 混合料类型。

4) 现场铺筑所用沥青混合料均由设计所定,今后可继续对其他类型的沥青混合料进行分析研究;铺筑时的压实机械类型是不变的,可考虑采用多种具有不同压实功的机械实施现场铺筑并分析其压实特性,这也是接下来需要继续研究的重要工作。

参考文献:

- [1] 姚洁,邱劲. 基于 SSA-BP 算法的道路交通流量预测研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(10): 193-201.
- [2] LIANG W, LIU P S, WANG S Y. An Efficient Non-Destructive Separation Method of Road Marking from Asphalt Pavement by Microwave Directional Heating [J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(9): 2156-2173.
- [3] KHRESAT G A, DARABI M K, LITTLE D N, et al. Prediction of Permanent Deformation of Granular Layers in Asphalt Pavements with Pavement Analysis Using the Nonlinear Damage Approach—Airfield Pavements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(7): 520-531.
- [4] CONSOLI N C, TEBECHRANI NETO A, KHAJEH A, et al. Dynamic Properties of Reclaimed Asphalt Pavement-Green Cement Blends for Road Base Layer [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(6): 3495-3511.
- [5] 洪正强,郑彬双,陈嘉颖,等. 基于车辆行驶稳定性的沥青路面车辙阈值 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 718-725.
- [6] 司伟,张博文,杨若聪,等. 青藏高寒区基于真实环境冻融作用的沥青混合料冻融疲劳破坏表征 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 11-21.
- [7] 李宁利,王猛,赵新坡. 橡塑合金改性沥青混合料路用性能研究 [J]. 重庆大学学报, 2022, 45(11): 46-58.
- [8] YU H N, YUE X, ZHANG C, et al. Evaluation of Compaction Characteristics of Asphalt Mixture under Different Compaction Effects [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(6): 1943-1955.
- [9] WANG C H, MOHAREKPOUR M, LIU Q, et al. Investigation on Asphalt-Screed Interaction during Pre-Compaction;

Improving Paving Effect via Numerical Simulation [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123164.

[10] QIAN G P, HE Z Y, YU H N, et al. Research on the Affecting Factors and Characteristic of Asphalt Mixture Temperature Field during Compaction [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119509.

[11] 王黎明, 李崑. 热态沥青混合料铺筑热扩散影响因素分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 307-314.

[12] 刘聂场子, 王元庆, 刘洪海, 等. 沥青路面摊铺碾压过程能耗模型与节能技术 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(7): 80-86.

[13] POLACZYK P, HU W, GONG H R, et al. Improving Asphalt Pavement Intelligent Compaction Based on Differentiated Compaction Curves [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124125.

[14] YOHANA RIBAS C, PADILHA THIVES L. Evaluation of Effect of Compaction Method on the Macrostructure of Asphalt Mixtures through Digital Image Processing under Brazilian Conditions [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116821.

[15] WAN Y P, JIA J. Nonlinear Dynamics of Asphalt-Screed Interaction during Compaction: Application to Improving Paving Density [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 363-373.

[16] 史妍妮, 刘洪海, 高新民, 等. 沥青路面高密实度摊铺工艺参数研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(2): 240-245.

[17] 马子媛, 李海莲, 蔺望东. 基于层次变权未确知理论的沥青路面预养护评价模型 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(12): 1668-1675.

[18] 陈岳峰. 基于 MEPDG 的组合式基层沥青路面车辙预估 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(12): 15-23.

[19] JIA H C, SHENG Y P, GUO P, et al. Effect of Synthetic Fibers on the Mechanical Performance of Asphalt Mixture: A Review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2023, 10(3): 331-348.

[20] LI B, ZHANG P, ZHU X W, et al. Permeability Model and Characteristics Analysis of Porous Asphalt Mixture under the Circulation Clogging and Cleaning [J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(6): 1440-1460.

[21] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[22] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[23] JAIN S, CHANDRAPPA A K. Critical Review on Waste Cooking Oil Rejuvenation in Asphalt Mixture with High Recycled Asphalt [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(32): 77981-78003.

[24] 李强, 陆杨, 王家庆, 等. 温拌再生沥青胶结料二次老化性能 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 102-116.

[25] 李锐铎. 基于分数阶导数理论的沥青混合料力学特性 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源测量 总辐射: GB/T 31156—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

责任编辑 柳剑
崔玉洁