

模拟温压实的常温再生混合料二次成型温度研究

韩占闯^{1,2}, 豆文举³, 杨瑞康¹, 刘黎萍¹, 孙立军¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024;

3. 中交一公局第五工程有限公司, 北京 100024)

摘要: 为使室内常温再生沥青混合料设计真实反映现场实际工况, 结合 4 条高速常温再生实体工程, 实测了上覆热拌沥青混合料(HMA)施工过程中常温再生层中不同深度处的温度, 分析了不同常温再生层厚度、不同上覆 HMA 厚度以及不同气候施工对常温再生层温度场的影响, 建立了常温再生层不同深度处的温度预估方程; 同时测试了不同施工大气温度下常温再生层芯样及室内试件的体积参数和力学性能。结果表明: 上覆 HMA 摊铺过程中, 再生层内部温度变化受施工环境影响较大; 施工大气温度以及室内二次成型温度对常温再生混合料空隙率、抗弯拉强度、抗剪强度及断裂功影响显著, 施工大气温度为 30℃ 左右时, 相比于 0℃ 左右, 空隙率降低约 25%, 抗弯拉强度、抗剪强度及断裂功分别至少提升 45%、66%、77%; 室内二次击实温度为 80℃ 时, 相比于 40℃, 空隙率降低约 20%, 抗弯拉强度、抗剪强度及断裂功分别至少提升 42%、35%、80%; 室内常温再生混合料设计时, 应考虑二次成型温度的影响, 以模拟现场再生层因内部温度变化而对混合料性能产生的影响。

关键词: 道路工程; 室内二次成型温度; 温度预估方程; 常温再生混合料; 上覆热拌层; 二次压实

中图分类号: U414

文献标志码: A

Laboratory Secondary Forming Temperature of Cold Recycled Mixture by Simulating Field Secondary Thermal Compaction

HAN Zhanchuang^{1,2}, DOU Wenju³, YANG Ruikang¹, LIU Liping¹, SUN Lijun¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100024, China; 3. Fifth Engineering Co., Ltd., China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: In order to make the design of cold recycled

mixture in the laboratory truly reflect the actual working conditions in the field, this paper measured the process of temperature variation in the cold recycled layer during the construction of the hot-mix asphalt (HMA) mixture above the cold recycled layer. Based on the measured temperature, the effect of the cold recycled layer thickness, the overlying hot-mix layer thickness, and construction seasons were analyzed. The temperature prediction equations in the cold recycled layer were established. Simultaneously, the volumetric parameters and mechanical strength of the core samples after the secondary thermal compaction of the cold recycled layer at different construction temperatures were tested. The results show that during the paving process of the HMA, the temperature change in the cold recycled layer is greatly affected by the construction environment. The void ratio, flexural tensile strength, shear strength, and fracture work of cold recycled mixture are significantly affected by the construction temperature and laboratory secondary forming temperature. Compared with 0 °C, when the construction temperature is about 30 °C, the void ratio is reduced by about 25%, while the flexural tensile strength, shear strength, and fracture work are increased by at least 45%, 66%, and 77% respectively. Compared with 40 °C, when the laboratory secondary compaction temperature is 80 °C, the void ratio decreases by about 20%, while the flexural tensile strength, shear strength, and fracture work increase by at least 42%, 35%, and 80% respectively. The influence of secondary forming temperature should be considered in the design of cold recycled mixture to simulate the effect of the cold recycled layer on the performance due to the change of internal temperature.

Keywords: road engineering; laboratory secondary forming temperature; temperature prediction equation; room temperature recycled mixture; overlying hot-mix layer; secondary compaction

收稿日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51978521, 51778483)

第一作者: 韩占闯, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: 1911543@tongji.edu.cn

通信作者: 刘黎萍, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: llp@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

乳化沥青常温再生技术是沥青路面再生利用技术中的一种,常温再生混合料的拌和、运输、碾压都是在常温下进行的,且具有碳排放低、施工便捷、性价比高等优点,被越来越广泛应用于道路的改扩建或养护修补等工程中^[1-2]。但常温再生混合料在发展中也不可避免遇到了一些问题,比如,常温再生混合料室内试件二次成型温度的选取还没有一个科学、有效的方法。由于缺乏相关方面的研究,现有国内外设计方法认为室内常温再生混合料试件第1次成型温度应在常温下进行,然后选择合适的试件加速养生温度,养生结束后进行第2次击实,目的是便于消除常温再生混合料试件在养生过程中产生的体积膨胀^[3],如AASHTO修正的马歇尔法、修正的Hveem法、ARRA设计方法以及我国公路沥青再生技术规范中推荐的设计方法等^[4-9]。针对常温再生混合料设计,2007年同济大学孙立军课题组首次发现了常温再生层“二次温压实”现象^[10-11],该发现认为常温再生混合料施工过程中完整的压实过程是:首先是常温再生层铺筑时的常温压实,然后是热拌沥青混合料(HMA)加铺时,会因HMA的温度传导效应激活再生料中的老化沥青,同时在碾压机械作用下常温再生层将产生二次温压实。同时结合现场实体工程,提出了常温再生混合料马歇尔一次常温击实100次且二次温击实50次的成型方法,其中二次击实温度(60℃)的选择,考虑了HMA料对常温再生层的热传导作用。之后,又有许多学者开始注意到现场常温再生层“二次温压实”现象:2014年,山东建筑大学马川义^[12]通过在常温再生层埋设温度传感器,验证了再生层“二次温压实”现象,证明常温再生层上覆HMA(温度165℃,厚度8cm,秋季施工)摊铺过程中,再生层上半部分平均有效温度65℃,同时认为室内试件成型应模拟现场实际施工条件;2019年,东南大学陈忠通过模拟再生层上覆HMA层的二次温压实以及长期交通荷载的压实效果,提出常温再生混合料室内设计时二次击实温度为90℃,认为在该温度下二次成型的试件更符合实际工程中常温再生混合料的长期状态^[13];郑广顺^[14]、孙建秀等^[15]也均在常温再生混合料“二次温压实”的基础上提出了相应的室内试件成型方法及混合料性能提升措施。关于常温再生混合料成型温度的研究,国外学者Gandi等^[16]分析了常温再生混合料在0℃、5℃、10℃以及23℃的压实效果,发现温度越低越能凸显出RAP的“黑石”效果,认为常温再生混合料试件成型温度的探讨是值得深入研究的话题;Gao等^[17]、Wang等^[18]

同样研究了相似的问题,并得出一致结论,试件二次成型温度对常温再生混合料体积参数及性能影响显著。与此同时,也有部分研究通过分析室内试件养生温度对常温再生混合料体积参数及力学性能产生的影响,推荐室内试件养生及二次成型温度为40℃,同时上述学者也一致认为室内成型试件时应充分考虑现场实际施工环境^[19-20];李秀君等^[21]为解决低温天气施工对常温再生混合料性能造成的负面影响,建议常温再生混合料室内设计时增大击实功,同时现场施工时增大碾压次数及压路机吨位,始终保证室内设计的混合料充分模拟现场施工条件。综上所述,国内外众多学者均认为温度对常温再生混合料性能将产生重大影响,同时认为常温再生混合料室内试件成型温度应最大限度模拟施工现场的真实条件,这对提升常温再生工程质量具有重要意义。但由于长期以来缺乏合理的常温再生混合料室内试件成型温度研究,现有设计方法中并没有真正实现室内与现场实际施工情况的关联,以致室内配合比设计时不同国家乃至不同研究机构采用的试件成型温度具有较大差异,且室内设计出的常温再生混合料性能与现场芯样性能相差甚远。课题组许严^[22]博士为解决上述问题,通过实时检测常温再生混合料工程施工过程中温度变化规律,建立了再生层温度预估模型,最后推荐室内试件二次成型温度为60℃,但该成果并没有考虑不同气候地区、不同施工大气温度以及不同应用层位等因素对常温再生层温度场的影响。

基于此,本文拟通过南、北方4条改扩建高速公路常温再生实体工程,实时测试出不同地区、不同季节、不同HMA层和再生层厚度施工时常温再生层温度场的变化情况,并利用统计分析法,拟建立现场常温再生层温度预估方程,并利用上述方程,分析上覆HMA层摊铺过程中,再生层内部温度变化规律。同时结合常温再生实体工程,测试不同施工工况下常温再生层取芯试件及室内不同二次击实温度下混合料试件的体积参数及力学性能,系统分析二次成型温度对常温再生混合料性能的影响,为后续将室内二次成型温度纳入常温再生混合料设计变量提供数据支撑。

1 常温再生层温度采集及数据结果分析

1.1 常温再生层二次温压实过程温度采集方案

(1)温度采集器装置选择。温度传感器:采用

Pt100 热电阻温度传感器,具有量程宽泛、精度高的特点,量程可达 $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。导线:选用聚四氟乙稀导线,摊铺热拌料HMA时,温度高达 160°C 以上,普通导线耐高温性能差,因此必须选用特殊的导线。温度采集装置:鉴于需要采集再生层多个深度处的温度,因此采用多路温度无纸记录仪,该仪器可以任意设定采集时间间隔,能够自动保存数据。

(2)温度传感器埋设方案。分别在南、北方地区常温再生实体工程埋设温度传感器,常温再生层厚度分别为6cm、11cm、12cm,分别应用于沥青路面中面层、下面层以及上基层,上覆热拌沥青混合料层厚度分别为5cm、6cm、8cm,分别作为上面层、中面层及下面层。埋设传感器位置周围应无障碍物遮挡,光照充足,不易积水,埋设芯样表面水分和粉尘应擦拭干净,对所取芯样进行侧面横向打孔,用铁丝固定好传感器接线,防止在埋设的过程中传感器掉出;传感器埋设完成后,在不同的大气温度下,上覆热拌层施工过程中,分别对常温再生层中不同深度处的温度进行实测,记录上覆热拌料摊铺至传感器位置之后3h左右常温再生层中不同深度处的温度,每5min记录一次温度数据。常温再生上覆热拌层在某一断面处的摊铺碾压共计耗时1h左右,为了采集更多数据,共记录了3h数据。

1.2 常温再生层温度采集数据及分析

(1)北方某地区试验段温度实测数据。该常温再生试验段共分3段,分别在夏、秋两季施工(施工大气温度分别为 8°C 、 28°C 、 24°C),常温再生层分别作为中面层及下面层,厚度分别为6cm、11cm。将现场实测记录数据绘制成折线图,如图1所示。其中图1a是秋末现场实测数据,大气温度较低,为 8°C 左右,上覆热拌层厚度为5cm;图1b、图1c是北方地区夏末秋初现场测试数据,大气温度较高,上覆热拌层厚度为6cm。图中 T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示大气温度为 8°C 、 28°C 、 24°C 施工时常温再生层实测温度变化情况,图例中1cm、2cm、3cm、4cm等分别表示常温再生层在该深度处温度随上覆热拌沥青混合料摊铺时间变化曲线。

(2)南方某地区实体工程1试验段温度实测数据。该常温再生实体工程共分2段,分别在夏末及秋末时施工(施工大气温度分别为 20°C 、 12°C),常温再生层均作为下面层,厚度均为11cm。实体工程2常温再生试验段上覆热拌层摊铺时,将现场实测数据绘制成折线图,如图2所示。图2a中的大气温度 $T_4=20^{\circ}\text{C}$,图2b中的大气温度 $T_5=12^{\circ}\text{C}$,上覆热拌层厚度均为6cm。

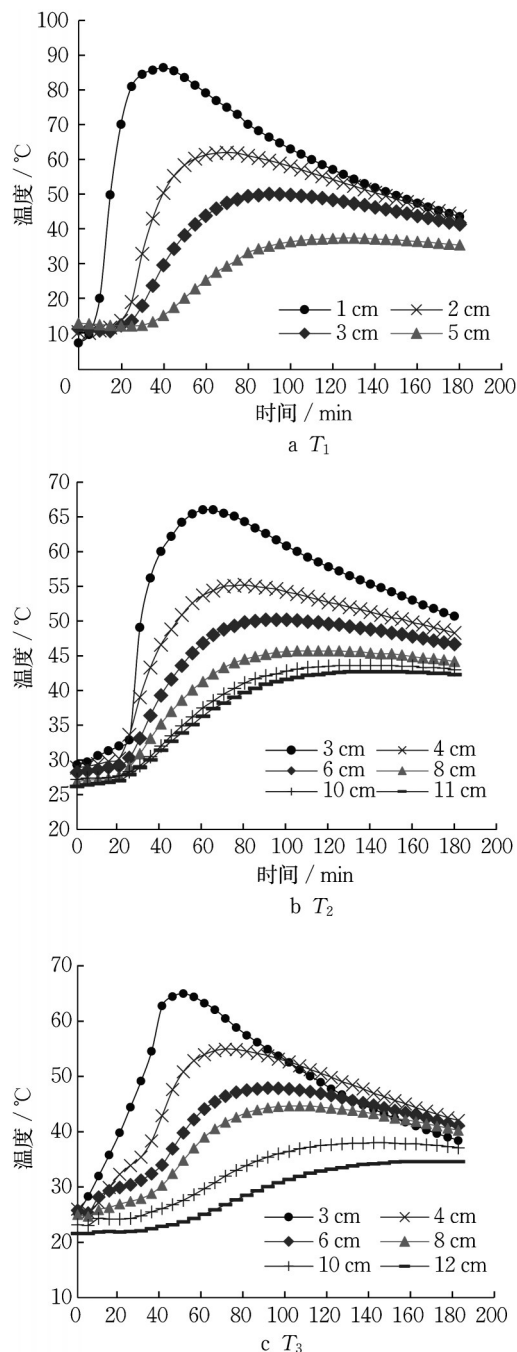


图1 实体工程1摊铺上覆热拌料时常温再生层实测温度
Fig. 1 Physical engineering 1: Actual temperature measurement of cold recycled layer during paving of hot mix material

(3)南方某地区实体工程2温度实测数据。该常温再生实体工程共分2段,分别在夏季、秋末两季施工(施工大气温度分别为 30°C 、 10°C),冷再生层均作为上基层,厚度为12cm。将现场实测记录数据绘制成折线图,如图3所示。其中图3a中的大气温度 $T_6=30^{\circ}\text{C}$,图3b中的大气温度 $T_7=10^{\circ}\text{C}$,上覆热拌层厚度均为8cm。

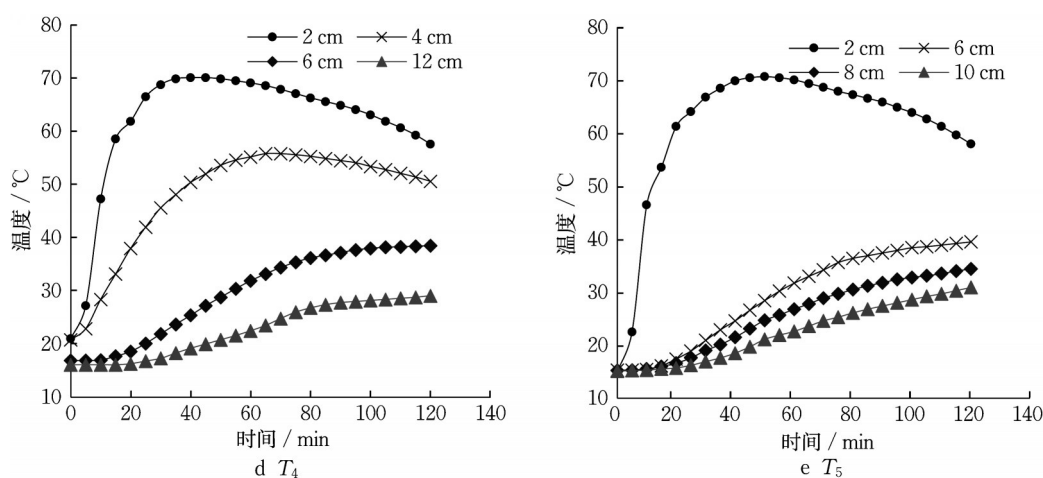


图2 实体工程2摊铺上覆热拌料时常温再生层实测温度

Fig. 2 Physical engineering 2: Actual temperature measurement of cold recycled layer during paving of hot mix material

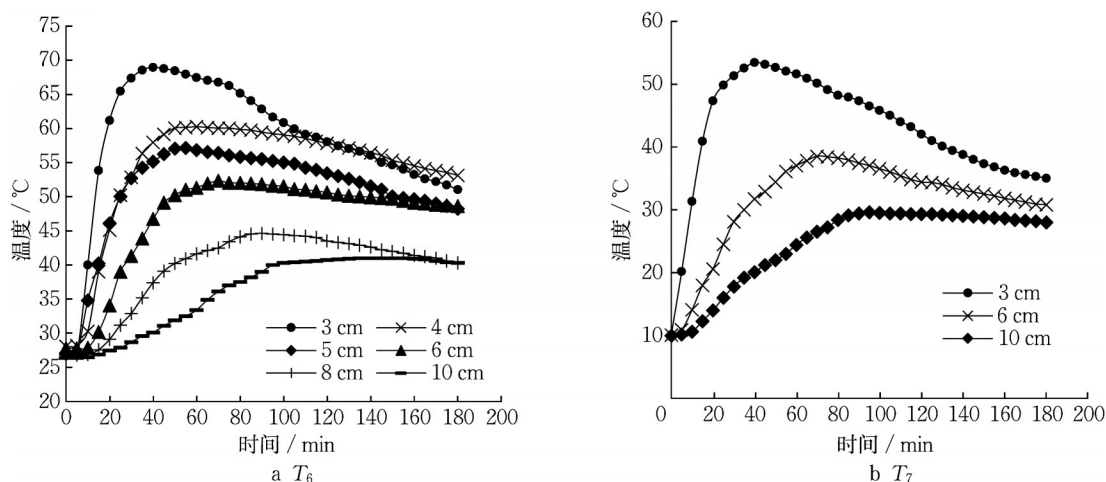


图3 实体工程3摊铺上覆热拌料时常温再生层实测温度

Fig. 3 Physical engineering 3: Actual temperature measurement of cold recycled layer during paving of hot mix material

由图1—3可知,常温再生层的温度在摊铺热料HMA后发生明显变化。不同深度处的温度变化曲线有明显的差异。首先,由于热传递会有一定衰减,越深处其所能达到的最高温度越低;其次,由于热传递会有一段时间间隔,越深处其达到最高温度的时间越晚。最后,经过2h后,整个常温再生层的温度都开始下降。温度变化速度最快、幅度最大的是1cm深度处,由于距离上覆热拌层比较近,其温度在1h左右可以达到最大值,最高温度已经超过80℃,此温度已经高于沥青的软化点,对于二次压实十分有利。比较图1b、图1c与图1a(图2a与图2b或者图3a与图3b)的测试结果,同一深度处图1b、图1c(图2a或者图3a)的温度数据明显比图1a(图2b或图3b)的数据高。这是因为图1b、图1c(图2a和图3a)的大气

温度维持在25℃左右,路面的原始温度 T_0 也在25℃左右,而图1a(图2b和图3b)的大气温度则在10℃左右,如此,在摊铺上覆热拌层的时候,温度上升后所能达到的最大值就会偏低。

2 考虑二次温压实的常温再生层温度预估方程

2.1 预估方程基本形式的确定

根据图1—3可以看出,同一常温再生层深度处的温度曲线图形相似,说明温度随时间的变化在某一深度处具有相似的规律,只是由于常温再生层在摊铺热拌沥青混合料前由于受到气温和太阳辐射等外界因素影响而导致其初始温度(HMA摊铺到温度

传感线断面时,常温再生层的温度)不同,使得同一深度处的温度曲线被沿坐标轴 Y 的方向平移了一个恒定的值 T_0 。根据这一特点,将摊铺上覆热拌料之后的温度实测值减去初始温度 T_0 ,便得到摊铺上覆热拌料之后的温度变化值 ΔT 。常温再生层上覆热拌沥青混合料摊铺时的实际温度主要由 T_0 和 ΔT 两部分组成。

杨进等^[10]提出 ΔT 与上覆热拌料摊铺时间 t 及常温再生层深度 H 有关,实际上, ΔT 还应与上覆热拌层厚度 H_1 、混合料摊铺温度有关,考虑到本研究常温再生工程上覆热拌层混合料摊铺温度基本为 155~160℃,其对 ΔT 预估的影响可以忽略不计,因此,常温再生层温度预估方程建立了 ΔT 与 t 、 H 、上覆热拌料厚度 H_1 的关系式。通过尝试多种温度预估方程的形式并利用概率统计分析,同时参考杨进等^[10]所提的温度预估模型思路,得出 ΔT 与 t^3 有很好的相关性,与 H^2 相关性也很好,与热拌层摊铺厚度的一次方相关性较好。因此,最终确定建立 ΔT 与 t^3 、 H^2 以及 H_1 的关系如式(2)所示。常温再生层在铺筑上覆热拌层时的温度 T 可表示为

$$T = \Delta T + T_0 \quad (1)$$

$$\Delta T = (AH_1 + B)((aH^2 - bH + c)t^3 + (dH^2 + eH - f)t^2 + (gH^2 - hH + i)t) \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 为回归系数; t 为上覆热拌料摊铺的时间,单位为 10min; H_1 为上覆热拌料厚度, cm; H 为常温再生层的深度, cm; T_0 为常温再生层初始温度, °C,理论上可以根据温度、太阳辐射等情况进行预估。

对于初始温度 T_0 的确定,可参照郑莘莢^[23]给出的路面温度场预估公式,如式(3)所示:

$$T_0 = (-0.028h + 1.703) \times \bar{T}_a(N_T, 0) + (0.004h^2 - 0.123h + 1.035) \times \frac{Q(N_Q, 0)}{cm} + 0.005h^3 - 0.145h^2 + 1.025h - 4.747 + (0.038h - 0.311) \times T_m \quad (3)$$

式中: $\bar{T}_a(N_T, 0)$ 为 N_T 小时内平均气温值, $N_T = 0.3212h + 0.1905$; $Q(N_Q, 0)$ 为 N_Q 小时内太阳辐射总量, $N_Q = 0.4311h + 3.8182$; c 为路面沥青混合料的比热容,统一使用 $1200 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; m 为路面沥青混合料的密度,统一使用 $2.36 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为路面深度, cm; T_m 为预估地区的当月历年月平均温度, °C。

2.2 数据处理和参数拟合

由于受到气温和太阳辐射等外界因素影响,再生层初始温度 T_0 将不同, T_0 是指 HMA 摊铺到传感器断面时的温度。可将某一时刻的温度值同时减去该深度的初始温度值 T_0 ,得到温度差 ΔT 随时间的变化关系。通过对图 1 至图 3 数据处理分析,发现不同厚度上覆热拌层温度差 ΔT 随摊铺时间的变化关系如图 4 所示。

由图 4 温度变化 ΔT 可以看出,上覆热拌层厚度越大,常温再生同一深度处温度的变化量就越大。例如,当上覆热拌层厚度为 8cm 时,常温再生层 3cm 处的温度净变化值为 42℃ 左右;当上覆热拌层厚度为 6cm 时,常温再生层 3cm 处的温度净变化值为 38℃ 左右;当上覆热拌层厚度为 5cm 时,常温再生层 3cm 处的温度净变化值为 36℃ 左右。根据式(2),用不同深度处 ΔT 实测数据作为回归所需函数值进行预估方程的回归拟合; H 的单位为 cm; t 的单位为 10min。回归得到系数 A 、 B 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 R^2 的值分别为 5.554、2.6287、0.00321、-0.0598、0.246 9、-0.079 5、1.454 1、-5.476 4、0.457 9、-8.263 3、32.378 8、0.859 0。

2.3 预估方程的建立

将回归系数代入式(2),最终建立的常温再生层摊铺上覆热拌料后的温度预估方程为

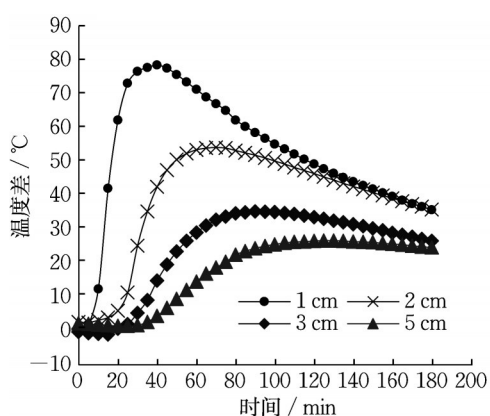
$$T = \Delta T + T_0$$

$$\Delta T = (0.554H_1 + 2.6287)((0.0032H^2 - 0.0598H + 0.2469)t^3 + (-0.0795H^2 + 1.4541H - 5.4764)t^2 + (0.4579H^2 - 8.2633H + 32.3788)t) \quad (4)$$

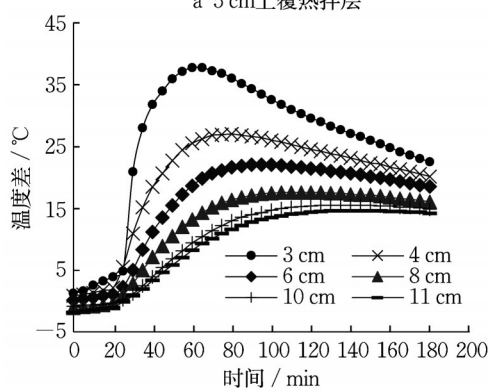
其中 $t \leq 180 \text{ min}$ 。

通过预估方程分别将 5cm、6cm、8cm 上覆热拌料厚度下常温再生层温度变化值 ΔT 同实测温度数据进行比较,绘制成图,如图 5 所示。

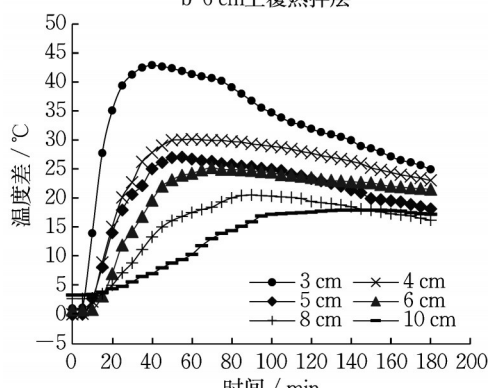
通过图 5 可以发现实测数据和拟合数据相近,拟合程度良好,在常温再生层深度较大的位置,温度敏感性小,预估值与实际值更加接近。预估方程是建立在 180min 内的数据上,通过式(4)形式进行拟合发现,常温再生层厚度 H 值越小的情况下,当时间超过 120min,容易出现 3 次函数的“翘曲”现象。因此,建议将方程的适用范围减小,即: $t \leq 120 \text{ min}$,考虑到常温再生层上覆热拌层在摊铺 1h 之内碾压工作基本结束,二次压实的作用也在此阶段基本完成,因此方程(4)具有实际应用价值。



a 5 cm上覆热拌层



b 6 cm上覆热拌层



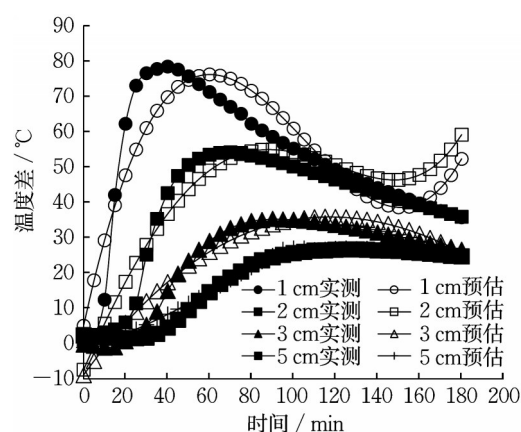
c 8 cm上覆热拌层

图4 不同厚度上覆热拌层下常温再生层温度变化量

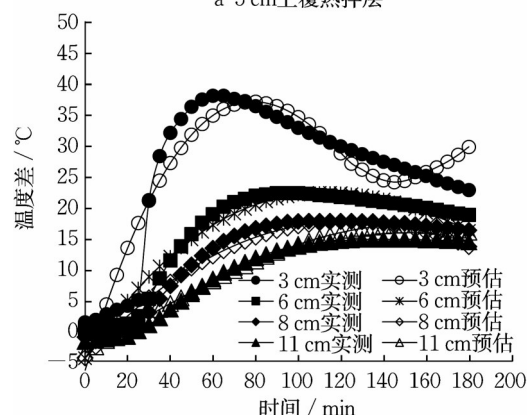
Fig. 4 Temperature variation of cold recycled layer at different thicknesses of hot mix layer

3 常温再生混合料二次成型(压实)温度

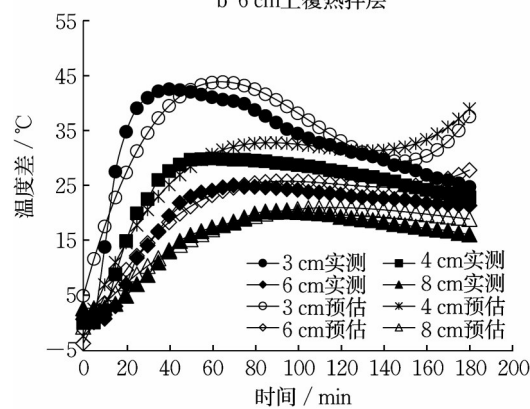
常温再生混合料的室内试验成型方法的原则是使所成型试件的物理特性同现场摊铺完HMA后的常温再生层芯样保持一致。常温再生混合料完整的压实过程是:先是常温再生层铺筑时的常温压实,然后是热拌沥青混合料加铺时碾压机械对常温再生层的二次温压实。室内成型试件时也应尽可能模拟二次压实过程,即室内第1次成型试件在常温下进行,第2次成型试件时的温度应遵循现场常温再生工程



a 5 cm上覆热拌层



b 6 cm上覆热拌层



c 8 cm上覆热拌层

图5 不同厚度上覆热拌层下常温再生层温度预估值与实测值

Fig. 5 Estimated and measured temperature of cold recycled layer at different thicknesses of hot mix layer

实际工况。因此,掌握常温再生层二次温压实过程中内部温度变化规律及探讨二次压实温度对常温再生混合料体积参数及路用性能的影响具有重要的工程意义,为后续室内常温再生混合料设计提供基础数据支撑。

3.1 二次温压实过程中再生层内部温度变化

常温再生层上覆热拌沥青混合料摊铺过程中,再生层内部温度的变化受到不同地区、不同季节因

素、不同应用层位等的影响。根据2.3节提出的温度预估方程(4)可计算出不同施工工况下常温再生

层上覆热拌料摊铺过程中常温再生层温度,不同工况下常温再生层温度变化曲线如图6所示。

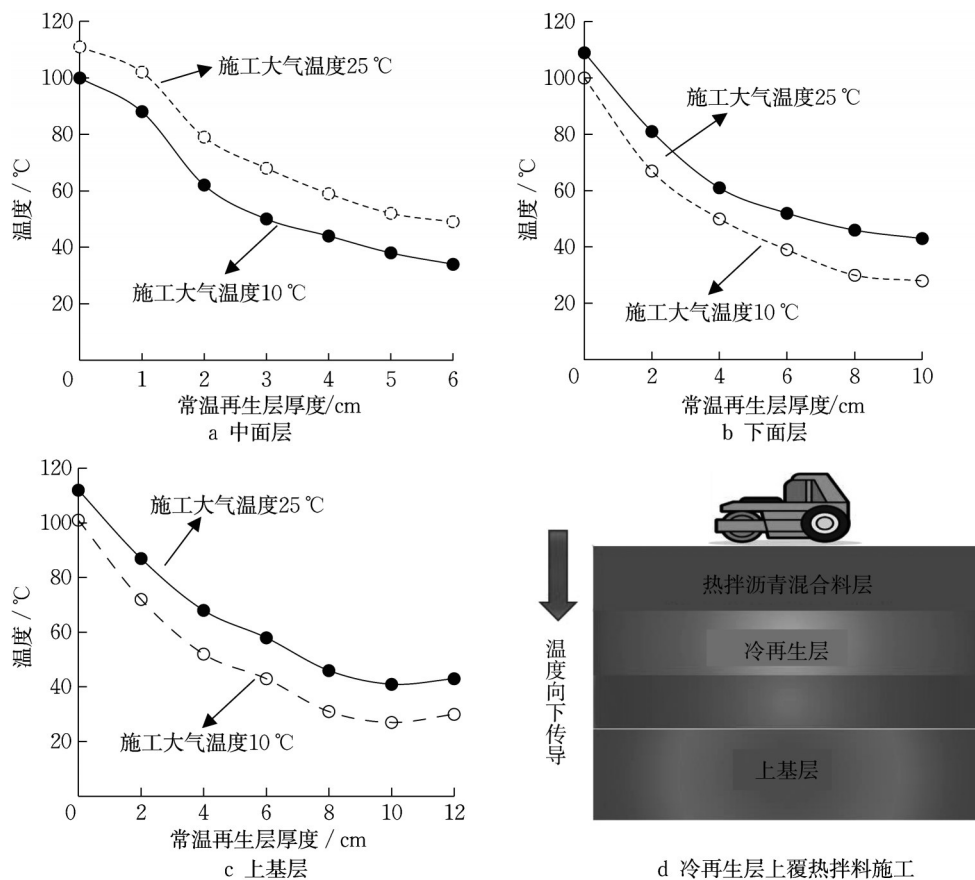


图6 不同层位常温再生层温度变化

Fig. 6 Temperature variation of cold recycled layer at different layers

由图6可知,对于中面层,当大气温度为10℃时,上覆热拌料摊铺时常温再生层温度随着再生层厚度的增大而逐渐降低,常温再生层中部位置处温度可达50℃左右;当大气温度为25℃时,常温再生层温度变化趋势与大气温度10℃时基本一致,但常温再生层中部位置处温度达70℃左右。这是因为当上覆热拌层厚度相同时,各个深度处的 ΔT 变化接近,大气温度的影响主要体现在对 T_0 上,对 ΔT 的影响可以忽略。对于下面层,当大气温度为10℃时,上覆热拌料摊铺时常温再生层中部位置处温度可达45℃左右,当大气温度为25℃时,常温再生层中部位置处温度达55℃左右。对于上基层,当大气温度为10℃时,上覆热拌料摊铺时常温再生层中部位置处温度可达50℃左右,当大气温度为25℃时,常温再生层中部位置处温度达65℃左右。

因此,基于上述分析结果可知,由于受到不同季节、施工环境、层位等因素的影响,再生层内部温度变化是一个范围,对于常温再生混合料上基层、下面

层、中面层,当春末秋初及夏季施工时(大气温度高于10℃),建议室内成型试件二次击实温度范围大于60℃;当春初秋末及冬季施工时(大气温度低于10℃),建议二次击实温度范围小于50℃。

3.2 二次压实温度对常温再生混合料性能的影响

为分析二次压实温度对常温再生混合料体积参数和性能的影响,首先结合常温再生实体工程,记录再生层上覆HMA摊铺时的大气温度,即二次温压实过程中的大气温度,待施工结束后,现场钻取芯样,测试芯样试件体积参数和路用性能。由于该常温再生工程不同工程段分别在不同季节完成,因此,最后得到了不同大气温度(-2℃、6℃、19℃、31℃)施工条件下的再生层芯样空隙率、劈裂强度、抗剪强度和断裂功。试验结果分别如图7所示。上述4个工程段所用原材料、混合料配比、拌和站设备、现场摊铺及碾压工艺等均相同,唯一不同的是施工时的大气温度。

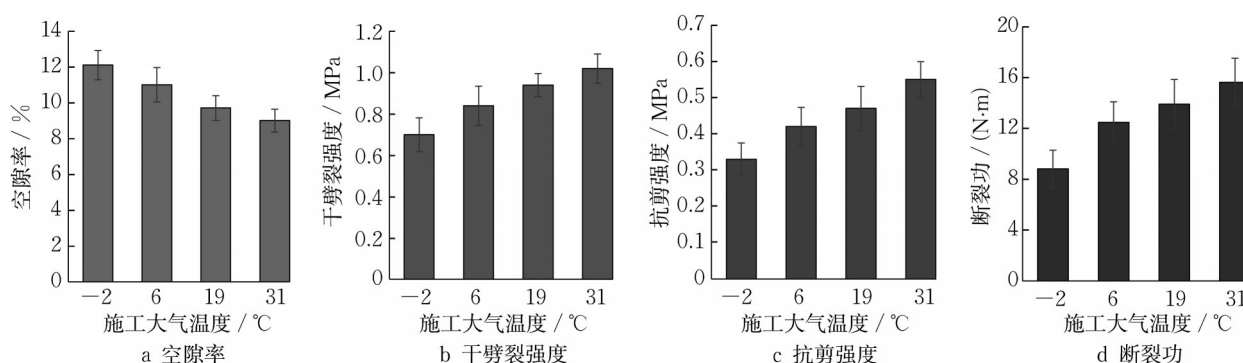


图7 不同施工大气温度下常温再生混合料空隙率及力学性能

Fig. 7 Voids and mechanical properties of cold recycled mixtures at different construction atmospheric temperatures

与此同时,采用本课题组提出的常温再生混合料室内试件成型方法制作试件,即在常温下双面各击实100次后,侧放于室内平坦的地面上常温养生24h,然后置于烘箱中养生48h,取出后双面各击实50次,冷却至室温(一般为6h),脱去模具,试件制作完成。该成型方法是根据现场常温再生工程论证而来,已被许多常温再生工程成功应用。本文试验试

件具体成型过程是:室内马歇尔试件常温下一次双面击实100次,并在60℃鼓风烘箱中养生48h后,然后分别放入40℃、50℃、60℃、70℃、80℃鼓风烘箱中保温3h左右,保温结束后取出试件立即进行二次双面击实50次。试件制作完成后,分别测试不同二次击实温度下常温再生混合料试件的空隙率、劈裂强度、抗剪强度和断裂功,试验结果如图8所示。

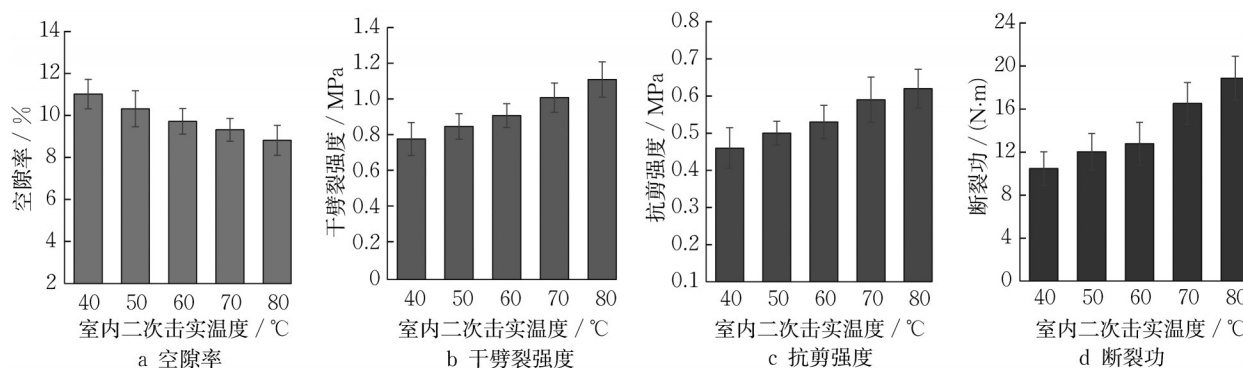


图8 不同室内二次击实温度下常温再生混合料空隙率及力学性能

Fig. 8 Voids and mechanical properties of cold recycled mixtures at different secondary compaction temperatures

由图7可以看出,常温再生层上覆HMA摊铺过程中,随着施工大气温度的提高,再生层空隙率逐渐减小,更容易压密,干劈裂强度、抗剪强度及断裂功均得到不同程度提高,当施工大气温度为31℃时,相比于-2℃,再生层空隙率降低约25%,干劈裂强度、抗剪强度及断裂功分别至少提高45%、66%、77%。由此可见,常温再生混合料的施工质量受大气温度的影响较为显著,结合第2节及3.1节内容分析,再生层上覆HMA摊铺过程中,大气温度的不同影响了再生层内部温度的变化,二次温压实过程中再生层温度越高,混合料中旧沥青的激活、变软程度就越

高,在胶轮压路机、单双钢轮压路机的作用下,沥青与集料再次相互结合、重新分布,因而空隙率下降明显,混合料性能也得到大幅度提升。同样的,由图8可以看出,随着室内二次成型温度的提高,常温再生混合料空隙率逐渐降低,干劈裂强度、抗剪强度及断裂功逐渐提高,当室内二次击实温度为80℃时,相比于40℃,常温再生混合料空隙率降低约20%,干劈裂强度、抗剪强度及断裂功分别至少提高42%、35%、80%。由上述试验结果分析可得,室内二次成型温度是常温再生混合料性能设计的重要调节手段,由于现场常温再生层上覆HMA摊铺时,再生层内部

温度受到不同气候地区、不同施工环境以及应用层位等因素的影响,进而引起混合料性能的改变,所以室内设计常温再生混合料时也应尽可能模拟这一客观因素,从而对常温再生混合料性能进行有效控制。后续会继续深入该部分研究,将室内二次成型温度作为常温再生混合料设计变量,来调节混合料性能,以适应在不同地区、气候环境等工况下施工的常温再生混合料。

4 结论

乳化沥青常温再生混合料上覆HMA层施工时,客观存在二次温压实过程。通过在4个不同地区常温再生实体工程内部埋设温度传感器,并基于上覆HMA层施工时现场实测温度数据建立了再生层温度预估方程,用于研究上覆热拌层施工时对常温再生层温度场的影响,得出如下结论:

(1)上覆热拌料摊铺前后常温再生层温度变化值 ΔT 与上覆热拌料摊铺时间 t 与摊铺厚度 H_1 、常温再生层深度 H 以及混合料摊铺温度有关,建立的再生层温度预估方程可反映再生层内部温度变化规律,对于江西、内蒙古以及类似气候地区温度预测具有一定适用性。后续将进一步补充温度实测数据,以扩大预估方程适用范围。

(2)常温再生层上覆HMA摊铺时,内部温度变化受到不同气候地区、不同施工环境以及应用层位等因素的影响。当施工大气温度高于 25°C 时,常温再生层中部位置温度大于 60°C ,当施工大气温度小于 10°C 时,常温再生层内部温度通常低于 50°C 。

(3)不同施工大气温度及室内二次击实温度对常温再生混合料体积参数及力学性能影响显著,温度越高,越有利于压实,并且混合料劈裂强度、抗剪强度及断裂功也均得到显著提升。因此,建议常温再生混合料施工时应充分利用大气温度优势,以提高常温再生层各项路用性能。

作者贡献声明:

韩占闯:试验方法设计、实际调查研究、试验数据分析和解释、论文初稿撰写。

豆文举:实际调查研究、现场再生层试验段组织协调。

杨瑞康:实际调查研究、试验数据分析与整理。

刘黎萍:研究内容监管与指导、试验设计验证与核实、论文审阅与修订。

孙立军:研究构思与设计、论文审阅与修订。

参考文献:

- [1] ZHU C, ZHANG H, GUO H, *et al.* Effect of gradations on the final and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 95.
- [2] LIU L, HAN Z, WU P, *et al.* Study on the laboratory mixing and compaction methodology of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7: 231.
- [3] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521—2019[S]. 北京: 交通部公路科学研究所, 2019.
- Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications. Technical specification for highway asphalt pavement recycling: JTG/T 5521—2019 [S]. Beijing: Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications, 2019.
- [4] RECLAIMING C. Wirtgen Cold recycling technology [M]. 3th ed. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2010.
- [5] ASPHALT R, RECLAIMING A. Basic asphalt recycling manual [M]. Annapolis: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), 2001.
- [6] MICHAEL S, BRUCE A, *et al.* Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures [R]. Cape Town: Asphalt Recycling & Reclaiming Association, 2002.
- [7] Southern African Bitumen Association. A guideline for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials: JTG/T5521—2020 [S]. Annapolis: Southern African Bitumen Association, 2020.
- [8] MUGUME, RODGERS BANGI. Investigation of foamed bitumen mixes using reclaimed asphalt pavement materials for cold recycling technology [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, 15, 98.
- [9] GODENZONI, CARLOTTA, *et al.* The evolution of the mechanical behaviour of cold recycled mixtures stabilised with cement and bitumen: field and laboratory study [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, 19(4), 856.
- [10] 杨进, 江涛, 孙立军, 刘黎萍. 考虑第二次压密的乳化沥青冷再生混合料室内试验方法研究 [J]. *公路工程*, 2010, 35(1): 76.
- YANG Jin, JIANG Tao, SUN Lijun, LIU Liping. Study on indoor test method of cold recycled asphalt mixture considering the second compaction [J]. *Highway engineering*, 2010, 35(1): 76.
- [11] 许严, 孙立军, 刘黎萍. 考虑热压实过程的乳化沥青冷再生混合料设计方法研究 [J]. *公路工程*, 2013, 38: 72.
- XU Yan, SUN Lijun, LIU Liping. Study on design method of emulsified asphalt cold recycling mixture considering hot compaction process [J]. *Highway Engineering*, 2013, 38: 72.
- [12] 马川义. 乳化沥青冷再生混合料设计方法优化研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- MA Chuanyi. Study on optimization of design method of emulsified asphalt cold recycled mixture [D] Jinan: Shandong University of Architecture, 2014.

- [13] 陈忠. 基于时温等效的冷再生混合料长期性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
CHEN Zhong. Study on long term performance of cold recycled mixture based on time temperature equivalence [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [14] 郑广顺. 乳化沥青冷再生混合料结构设计参数及碾压工艺研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
ZHENG Guangshun. Study on structural design parameters and rolling process of emulsified asphalt cold recycled mixture [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [15] 孙建秀, 刘黎萍, 孙立军. 早强剂对乳化沥青冷再生混合料早期强度的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41: 1037.
SUN Jianxiu, LIU Liping, SUN Lijun. Effect of early strength agent on early strength of emulsified asphalt cold recycled mixture [J] Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science and Engineering Edition), 2017, 41: 1037.
- [16] GANDI, A, CARDENAS, A, SOW, D, *et al.* Study of the impact of the compaction and curing temperature on the behavior of cold bituminous recycled materials [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019; 6, 349.
- [17] GAO, L, NI, F, CHARMOT, S, *et al.* Influence on compaction of cold recycled mixes with emulsions using the superpave gyratory compaction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26, 04014081.
- [18] WANG D, YAO H, YUE J, *et al.* Compaction characteristics of cold recycled mixtures with asphalt emulsion and their influencing factors[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8, 26.
- [19] 王宏. 不同养生温度泡沫沥青冷再生混合料宏观微观结构性能研究[J]. 公路, 2018, 63(1): 237.
WANG Hong. Macro and micro structural properties of cold curing mixtures of foamed asphalt with different curing temperatures[J]. Highway, 2018, 63(1): 237.
- [20] 彭杰. 养生温度对泡沫沥青冷再生混合料路用性能影响的研究[J]. 中外公路, 2017, 37: 285.
PENG Jie. Effect of Grandpa's health temperature on road performance of cold recycled asphalt foams [J]. Chinese and foreign Highway, 2017, 37: 285.
- [21] 李秀君, 拾方治, 田原. 施工气温对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16: 289.
LI Xiujun, SHI Fangzhi, TIA Yuan. The influence of construction temperature on the performance of foam asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16: 289.
- [22] 许严. 乳化沥青冷再生混合料设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
XU Yan. Research on design method of emulsified asphalt cold recycled mixture[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [23] 郑萃萸. 沥青路面温度场预估模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
ZHENG Xinti. Research on prediction model of asphalt pavement temperature field [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.