

文章编号:1671-8879(2018)01-0041-08

水泥乳化沥青混合料施工和易性 评价方法及影响因素

张翠红¹,焦生杰¹,曹学鹏¹,闫玉奎²,陈小雪²,齐彦秋¹

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室,陕西 西安 710064;

2. 河南高远公路养护技术有限公司,河南 新乡 453003)

摘 要:为了研究水泥乳化沥青混合料的施工和易性及其对压实性能的影响,基于沥青表面自由能理论,采用拌和扭矩表征该混合料的施工和易性。通过拌和和易性测试设备和旋转压实仪分别测定混合料的拌和扭矩和压实性能。通过抗压强度极差分析法确定常温下混合料的最优配合比方案,提出该混合料的拌和和易性评价方法及影响因素;根据拌和状态和拌和扭矩值确定 10℃、25℃、40℃时混合料的最佳含水率与拌和时间的推荐值,并分析 3 种温度下不同摊铺模拟初压次数时的摊铺和易性对压实性能的影响。研究表明:含水率对混合料的拌和和易性有显著影响,10℃、25℃、40℃时的最佳含水率(质量分数)分别为 5.25%、6%、6.5%,3 种温度下混合料的推荐拌和时间均为 12 s;整体上随着温度的增加,试件空隙率随扭矩的增加逐渐下降,抗压强度随扭矩的增加而逐渐增大,最佳施工温度为 40℃;10℃、25℃时的最佳初压次数为 20,相应的试件密实度分别为 84.3%和 85%;40℃时最佳初压次数为 30,相应的试件密实度为 85.7%。采用给出的水泥乳化沥青混合料拌和和易性评价方法可为路面拌和施工工艺提供参考,最佳初压次数对应的密实度可对摊铺机振捣梁和熨平板频率参数的选择与优化组合提供参考。

关键词:道路工程;水泥乳化沥青混合料;扭矩值;拌和和易性;摊铺和易性;压实性能

中图分类号:U415.6 **文献标志码:**A

Evaluation method and influencing factors for construction workability of cement-emulsified asphalt mixture

ZHANG Cui-hong¹, JIAO Sheng-jie¹, CAO Xue-peng¹, YAN Yu-kui²,
CHEN Xiao-xue², QI Yan-qi¹

(1. Highway Maintenance Equipment National Engineering Laboratory, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Gaoyuan Maintenance Technology of

Highway Co. Ltd., Xinxiang 453003, Henan, China)

Abstract: In order to study the construction workability of cement-emulsified asphalt mixture and its effect on the compaction properties, the mixing torque value of cement-emulsified asphalt mixture was employed to represent construction workability on the basis of the surface free energy theory of asphalt. By employing the test equipment of mixing workability and superpave

收稿日期:2017-09-18

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAF07B08);陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JQ5034)

作者简介:张翠红(1982-),女,山西临县人,工学博士研究生,E-mail:751799642@qq.com。

通讯作者:焦生杰(1955-),男,陕西富平人,教授,博士研究生导师,E-mail:jsj@chd.edu.cn。

gyratory compactor (SGC), mixing torque value and compaction performance of the mixture were respectively measured. The optimal mix ratio scheme of the mixture at normal temperature was determined by the range analysis of compressive strength, and evaluation method and influencing factors for mixing workability of the mixture were proposed. According to the mixing states and mixing torque values, the optimum moisture content and recommended value of mixing time were determined for the mixture at 10 °C, 25 °C and 40 °C. Analysis was did about the effect of paving workability on compaction performance for the mixtures at different initial compaction times under the three temperatures. The results show that moisture content has a significant effect on mixing workability of the mixture. The optimum moisture contents of the mixture are 5.25%, 6% and 6.5% at 10 °C, 25 °C and 40 °C, respectively. The recommended mixing time of the mixture at three temperatures is 12 s. As a whole, with the increase of temperature, the void fraction of specimen decreases and the compressive strength increases with the increase of torque value. The best construction temperature is 40 °C. The optimal initial compaction times are 20 at 10 °C and 25 °C, and the corresponding specimen compactness are 84.3% and 85%, respectively. The optimal initial compaction times are 30 at 40 °C, and the corresponding specimen compactness is 85.7%. The evaluation method for mixing workability of the cement-emulsified asphalt mixture is able to offer reference for the mixing technology of pavement construction. The compactness value corresponding to the optimal initial compaction times can provide reference for the parameter selection and optimization combination about the frequency of vibrating beam and screed of paver. 8 tabs, 6 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; cement-emulsified asphalt mixture; torque value; mixing workability; paving workability; compaction performance

0 引言

水泥乳化沥青混合料是采用添加了少量水泥的乳化沥青混合料,可以实现冷拌、冷铺、冷压的常温施工,具有环保节能、环境适应性强、施工难度小等突出优势^[1]。该混合料在拌和过程中,乳化沥青破乳和水泥水化同时进行,乳化沥青破乳后释放出来的水分提供给水泥水化;水泥具有的活性能促进乳化沥青破乳,同时,呈网状的水泥水化产物与沥青通过物理结合形成的水泥沥青胶浆,增大了沥青胶浆的黏度,改善了胶浆与集料界面的黏结,提高了混凝土的力学性能^[2-7]。混合料压实过程中乳化沥青破乳出来的水分和沥青颗粒分离,沥青颗粒黏附在集料表面^[8],多余的水分经压实后从混合料空隙中析出,最终形成混合料试件的密实状态^[9]。

水泥乳化沥青混合料的施工和易性用于描述混合料拌和、摊铺和易性与压实性能等基本特征,直接影响到路面的密实度以及抗压强度等压实性能指标。一些学者对沥青类混合料的和易性进行了研究:张琛等采用拌和扭矩评定橡胶沥青混合料和易性与压实特性的相关性,并通过旋转压实特性指标评价和易性与压实特性之间的关系^[10];王笑风等提

出橡胶粉纤维沥青混合料的施工和易性可以采用含有离析度、拌和均匀性以及压实特性等参数的控制函数来表示,但并未给出具体的函数表达式^[11]。还有学者对水泥乳化沥青类混合料的和易性进行了研究:Wang 等通过流动度试验测定了水泥乳化沥青砂浆的和易性^[12];Kuo 等使用旋转黏度计和坍落度试验仪对影响水泥乳化沥青胶浆工作和易性的黏度特性进行了研究,得出混合料黏度太小时不易形成足够的黏结强度,黏度太大时不易拌和与压实^[13];余春林用改进(稠度 VC)值评定了水泥乳化沥青混合料的工作性能,较好反映了拌和物的可碾压性,但不能充分反映混合料的易密实性^[14]。上述文献均采用水泥乳化沥青砂浆压实成型后的抗压强度评定其和易性。王火明等采用瑞典 NYNAS 公司生产的工作性能试验仪评价了乳化沥青冷再生混合料的拌和及摊铺和易性,并采用混合料成型试件的空隙率和劈裂强度评价其工作性能^[15];汪德才等通过扭力扳手对乳化沥青冷再生混合料的拌和扭矩进行测定,并以空隙率作为验证扭矩的指标,最终确定出最佳拌和扭矩和压实时机^[16];张争奇等采用和易性试验仪对改性沥青混合料拌和扭矩进行测定,确定出最佳的拌和与压实温度,并通过旋转压实法进行了

验证^[17]。已有研究主要借助流动度试验和旋转黏度计、工作性能试验仪、扭力扳手等设备测定水泥乳化沥青类混合料的流动度、黏度、拌和扭矩,并以空隙率、抗压强度、劈裂强度等指标作为判断该类混合料的拌和及压实和易性的依据。

上述文献对水泥乳化沥青类混合料的和易性进行了一定研究,但目前尚未见到关于水泥乳化沥青混合料的施工和易性评价方法及影响因素研究。为此,本文对水泥乳化沥青混合料和易性的表征参数进行分析研究,提出理想拌和状态的判定方法,分析影响混合料拌和和易性的因素,确定 10℃、25℃、40℃这 3 种温度下混合料的最佳含水率和拌和时间的推荐值;分析 3 种温度下不同模拟初压次数时摊铺和易性对压实性能的影响,并确定 3 种温度下最佳的摊铺模拟初压次数。

1 和易性表征参数及检测

根据沥青表面自由能理论,黏性力可以分解为沥青分子之间的黏聚力和沥青与集料之间的黏附力,而黏聚力和黏附力又都可用沥青的黏度来表征^[18-22]。由此可见,黏性力大小也即混合料的黏度直接影响到混合料成型试件的压实性能。为此,本文提出采用实时黏度来评价混合料的拌和及摊铺和易性。

胡槛安等根据旋转黏度计的工作原理,推导出牛顿流体和非牛顿流体黏度与扭矩的关系式为^[23]

$$\eta=\frac{M}{4\pi l\omega}\left(\frac{1}{R_1^2}-\frac{1}{R_2^2}\right)$$

(1)

式中:η 为混合料黏度(Pa·s);M 为拌和扭矩(N·m);ω 为拌和转速(rad/s);l、R₁、R₂ 分别为拌和杆长度、拌和杆半径与拌和筒半径(m)。

从式(1)可知,混合料黏度可通过拌和扭矩来表征,扭矩越大,表明混合料黏度越大。故本文采用实时拌和扭矩作为表征拌和及摊铺和易性的参数。

为了测试混合料拌和及摊铺后的扭矩值,在拌和器上加装扭矩传感器,并通过 RS232 数据接口实时采集数据,实现扭矩值实时动态记录。摊铺后扭矩值测试步骤为:将进行模拟摊铺工艺后的混合料由旋转压实仪试模中倒出,然后放入拌和器中测试扭矩值,和易性测试设备如图 1 所示。

2 原材料性能和混合料配合比方案

2.1 集料级配

水泥乳化沥青混合料矿料选用 AC13 沥青混合

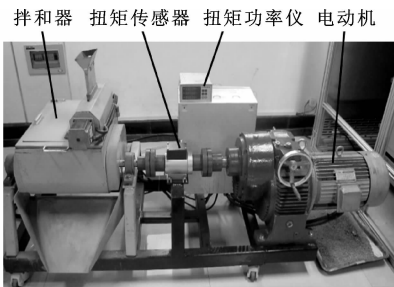


图 1 水泥乳化沥青混合料拌和和易性测试设备
Fig. 1 Testing device of mixing workability for cement-emulsified asphalt mixture

料级配,集料为河南辉县石灰岩,压碎值均小于 12%,集料合成级配见表 1。

表 1 集料合成级配

Tab. 1 Compounded aggregate gradation

筛孔孔径/ mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	97.0	82.2	64.9	38.0	22.9	16.9	10.3	8.0	6.5

2.2 乳化沥青和水泥

沥青原料为山东东明牌 70[#],乳化沥青型号为河南高远 mk-06 慢裂快凝型,乳化沥青性能检测结果如表 2 所示。水泥采用河南孟店牌,水泥检测结果如下页表 3 所示。

表 2 乳化沥青检测结果

Tab. 2 Test results of emulsified asphalt

性能指标	指标值	检测结果
筛上剩余量(1.18 mm)/%	<0.1	0.06
残留物含量/%	≥55	62
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	45~150	63
软化点(5℃)/℃	≥42	47.5
延度(5 cm·min ⁻¹ ,15℃)/cm	≥100	120
标准黏度(25℃)/s	10~60	14
离子电荷		阳离子
破乳速度		慢裂
储存稳定性(1 d)/%	≤1	0.8
储存稳定性(5 d)/%	≤5	4.5

2.3 混合料配合比方案

常温下室内试验采用的水泥乳化沥青混合料配合比三因素分别为水泥、油石比(乳化沥青的含量换算为油石比)和含水率,三因素各选 3 个水平进行试验(见下页表 4),各水平的含量均为质量含量。

对表 4 中各因素采用正交试验设计,记录混合料成型试件的抗压强度值,如下页表 5 所示。对抗压强度值进行极差分析,结果见下页表 6。得出的最优配合比方案为表 5 中试验方案 4,其水泥含量为 2%,油石比为 4.5%,含水率为 6%。

表 3 水泥检测结果
Tab. 3 Test results of cement

性能指标	检测结果
细度/%	4.1
密度/(kg·m ⁻³)	2 906
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	374
标准稠度用水量/%	27.6
初凝时间/min	213
终凝时间/min	289
胶砂流动度/mm	182
抗折强度(3 d)/MPa	4.2
抗折强度(28 d)/MPa	6.7
抗压强度(3 d)/MPa	25.4
抗压强度(28 d)/MPa	38.4

表 4 水泥乳化沥青混合料配合比设计

Tab. 4 Mix design of cement-emulsified asphalt mixture

水平	(A)水泥/%	(B)油石比/%	(C)含水率/%
1	(A1)1	(B1)4.5	(C1)5.5
2	(A2)2	(B2)5.0	(C2)6.0
3	(A3)3	(B3)5.5	(C3)6.5

注:A1、A2、A3 分别为因素 A(水泥)的 3 个水平;B1、B2、B3 分别为因素 B(油石比)的 3 个水平;C1、C2、C3 分别为因素 C(含水率)的 3 个水平。

表 5 试验方案及抗压强度值

Tab. 5 Test programs and values of compressive strength

试验 方案	三因素水平设计			抗压强度/ MPa
	A	B	C	
1	A1	B1	C1	2.03
2	A1	B2	C2	1.84
3	A1	B3	C3	1.76
4	A2	B1	C2	2.96
5	A2	B2	C3	2.18
6	A2	B3	C1	1.28
7	A3	B1	C3	1.98
8	A3	B2	C1	1.85
9	A3	B3	C2	2.09

表 6 抗压强度值极差分析结果

Tab. 6 Range analysis results for values of compressive strength

参数	各因素下的参数值		
	A	B	C
K1	5.631	6.964	5.148
K2	6.420	5.874	6.896
K3	5.910	5.123	5.917
k1	1.877	2.321	1.716
k2	2.140	1.958	2.299
k3	1.970	1.708	1.972
极差值	0.263	0.614	0.583

注:K1、K2、K3 分别为 A、B、C 三因素在 1、2、3 水平下对应的抗压强度之和;k1、k2、k3 分别为 A、B、C 三因素在 1、2、3 水平下对应的抗压强度平均值。

3 拌和和易性评价方法及影响因素

3.1 拌和方法确定

按表 5 中试验方案称取所需的集料、水泥、水和乳化沥青,将拌和器转速调至 350 r/min。拌和顺序:先将集料和水泥倒入拌和器拌和,再将水加入拌和,接着加入乳化沥青拌和。拌和过程中不同初压次数的混合料扭矩值通过拌和试验仪数据采集软件自动记录。

3.2 拌和均匀性判定

观察混合料的拌和时间、拌和均匀性、与集料裹附状态及混合料的浆态。如果拌和完成后集料表面颜色接近黑褐色,且集料表面湿润,沥青裹附均匀,基本无花白料,混合料呈胶团状,浆体不流淌、不聚集,粗细料不分离,则混合料达到理想拌和状态,施工和易性较好^[24]。

3.3 含水率确定

本文水泥乳化沥青混合料主要是为高寒地区常温路面施工设计的,考虑到不同季节温度变化,试验温度 T 分别设为 10℃、25℃、40℃。不同温度下混合料所需的拌和用水量即含水率是不同的。

含水率对混合料的和易性有较大影响。当含水率较小时,乳化沥青难以分散均匀,集料颗粒之间润滑不足、摩阻力较大,混合料和易性较差;当含水率较大时,混合料中细料聚集、粗细料出现离析现象。10℃、25℃、40℃时混合料含水率均取 6%时拌和状态分别如表 7 中状态 a、b、c 所示。状态 a、c 时不适合摊铺和压实,如下页图 2 所示。相应的低温和高温拌和扭矩分别为 21.3、34.7 N·m,可见,状态 b 才是混合料在最佳含水率的拌和状态。因此低温下需要适当减小含水率,高温下需要适当增加含水率。经过室内反复试验,确定出 10℃时的最佳含水率为 5.25%,扭矩增加到 25.2 N·m;40℃时的最佳含水率为 6.5%,扭矩减小到 30.6 N·m。

表 7 混合料不同拌和状态

Tab. 7 Different mixing states of mixture

状态 等级	拌和后混合料状态描述
a	自由水较多,乳化沥青未破乳(呈褐色),混合料呈稀浆状
b	表面湿润,乳化沥青正在破乳(呈黑褐色),混合料呈胶团状
c	表面干涩,乳化沥青已完全破乳(呈黑色),没有黏结性

3.4 拌和时间确定

下页图 3 为 10℃、25℃、40℃混合料拌和 20 s 时的扭矩变化情况。由图 3 可知:3 种温度下混合

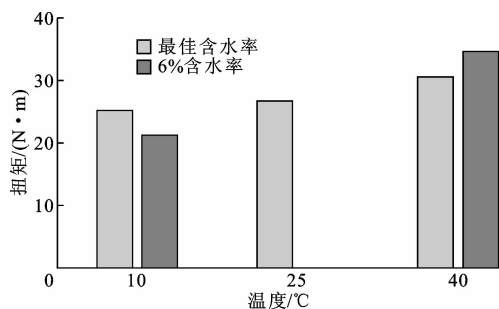


图 2 混合料不同拌和状态下的扭矩

Fig. 2 Torque values under different mixing states of mixture

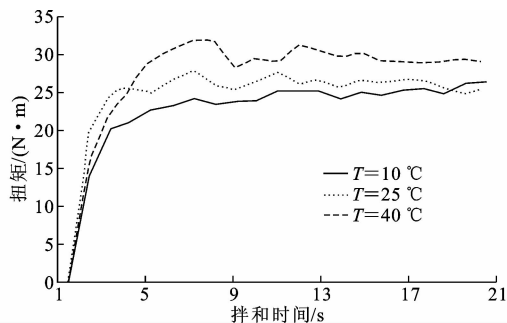


图 3 混合料拌和时间与扭矩的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of mixing torque values of mixture

料拌和 12 s 后,随着时间的增加扭矩变化不大。10 °C 时拌和时间从 12 s 增加到 20 s 时扭矩只增大了 1.2 N·m,这是因为拌和时间的增加只是加快了水泥的水化,使得混合料含水率减小而黏度略有增加;25 °C、40 °C 时拌和时间从 12 s 增加到 20 s 时扭矩分别减小了 1.3、1.7 N·m,这是因为在 25 °C、40 °C 下拌和时间的增加会同时加速水泥的水化和乳化沥青的破乳,导致乳化沥青中的水分析出而降低了混合料的黏度。

由于实际路面施工中拌和摊铺一体机要求拌和时间不大于 15 s,且 3 种温度下拌和 12 s 时的混合料浆态和沥青裹附集料状态满足本文拌和均匀性的判定方法,因此 3 种温度下拌和时间推荐值均确定为 12 s。

4 摊铺和易性对压实性能的影响

4.1 摊铺模拟初压次数对混合料和易性的影响

在实际路面施工工序中,在确定好不同温度混合料的拌和方法、拌和时间、拌和含水率等因素后,混合料要先经过摊铺机的摊铺后再使用压路机进行压实,而选用不同的摊铺机振捣梁和振动器的频率参数组合对混合料的初始密实度会有不同影响,故将不同摊铺机施工工艺参数组合的初始密实度的模拟旋压次数定义为初压次数。本次试验中初压次数

n 分别设定为 10、20、30,对不同温度下的混合料在不同初压次数时的扭矩值进行统计分析。图 4 为不同温度下初压次数对混合料和易性的影响。由图 4 可知,温度为 10 °C 时,扭矩平均值为 23.3 N·m;25 °C 时,扭矩平均值为 24.8 N·m;40 °C 时,扭矩平均值为 28.1 N·m。10 °C 和 25 °C 时扭矩随初压次数的增加逐渐减小,是因为初压次数的增加促进了乳化沥青的破乳,使得乳化沥青中的水分析出,从而使混合料黏度逐渐变小。40 °C 时扭矩随初压次数的增加先减小后增加。扭矩先减小是因为初压次数的增加促进了乳化沥青的破乳,使得乳化沥青中的水分快速析出,然后因为沥青黏聚力开始发挥作用,从而使混合料黏度有所增加。整体上扭矩随温度的上升呈增长趋势,与温度增加会大大加速水泥的水化进程和乳化沥青的破乳速度有关,破乳越快的混合料试件泌水越快且在空气中蒸发越快,沥青的黏聚力发挥的越早,从而导致混合料整体黏度越大。

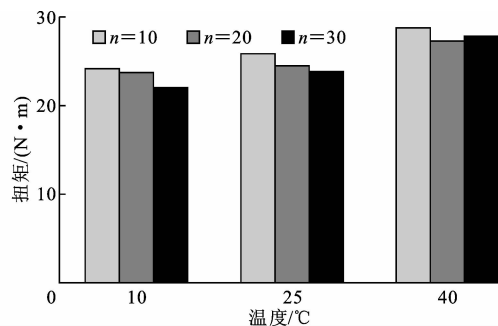


图 4 不同温度下初压次数对混合料和易性的影响

Fig. 4 Effect of initial compaction time on mixture workability under different temperatures

为了研究混合料的和易性指标对混合料压实性能的影响,分别对不同温度、不同初压次数时拌和扭矩对压实后试件空隙率和抗压强度的影响进行分析。

4.2 不同温度下摊铺模拟初压次数与混合料压实性能的关系

4.2.1 初压次数与试件空隙率的关系

将不同温度下的混合料经不同初压次数后并旋压 140 次形成的试件在 60 °C 烘箱中放置 48 h 以上,然后测试其毛体积密度和最大理论密度,计算试件空隙率。

旋压过程中混合料高度值由旋转压实仪自动记录,根据密实度计算公式^[25]可得初压后和初压后旋压 140 次的试件密实度,如下页表 8 所示。

表 8 不同温度下不同初压次数的试件密实度
Tab. 8 Specimens compactnesses under different initial compaction times and different temperatures

温度/ ℃	旋压 次数	初压 10 次		初压 20 次		初压 30 次	
		高度/ mm	密实 度/%	高度/ mm	密实 度/%	高度/ mm	密实 度/%
10	0	87.9	84.0	88.0	84.3	86.2	85.4
	140	79.7	92.6	79.9	92.8	79.2	92.9
25	0	79.8	84.7	80.3	85.0	77.7	86.1
	140	72.8	92.8	73.4	93.0	71.9	93.0
40	0	85.8	85.3	84.5	85.5	85.8	85.7
	140	78.1	93.7	76.9	94.0	78.1	94.1

空隙率随温度和初压次数的变化如图 5 所示。由图 5 可知:温度为 10℃时,空隙率平均值为 7.2%;25℃时,空隙率平均值为 7.1%;40℃时,空隙率平均值为 6.1%。3 种温度下空隙率均随初压次数的增加逐渐减小。同时,随着温度增加,混合料成型试件空隙率逐渐下降,特别是从 25℃上升到 40℃时空隙率大幅减小,这同样是因为温度的快速上升导致乳化沥青破乳加快和沥青黏度较快发挥作用的结果。

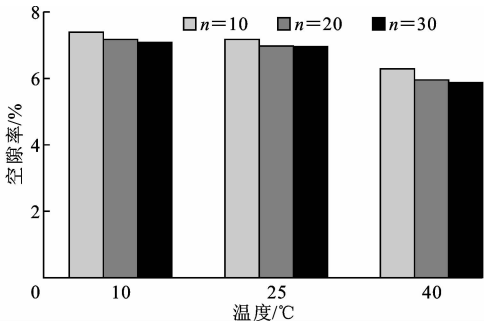


图 5 不同温度下初压次数对试件空隙率的影响
Fig. 5 Effect of initial compaction time on porosity of specimens under different temperatures

4.2.2 初压次数与试件抗压强度的关系

通过万能试验机测定压实成型烘干后试件的抗压强度,抗压强度随温度和初压次数的变化见图 6。由图 6 可知:温度为 10℃时,抗压强度平均值为 2.58 MPa,抗压强度随初压次数的增加先增大后减小;25℃时,抗压强度平均值为 2.64 MPa,抗压强度随初压次数的增加先增大后减小;40℃时,抗压强度平均值为 2.81 MPa,抗压强度随初压次数的增加逐渐增大。10℃和 25℃时混合料的初压次数由 10 增加到 20 时抗压强度先增大是因为其促进了混合料的破乳,但进一步增加初压次数会促使未破乳的乳化沥青从旋压筒孔隙流出从而影响到其油石比;40℃时混合料抗压强度随初压次数的增加逐渐

增加是因为初压前乳化沥青已全部破乳,初压次数的逐步增加会加速水的析出和沥青黏聚力的发挥。整体上随着温度的增加,混合料成型试件抗压强度呈现逐渐增大的规律,是因为温度的增加会促进乳化沥青的破乳,从而导致沥青的黏聚力和集料颗粒间内摩擦阻力的增加,使得混合料成型试件抗压强度增加。

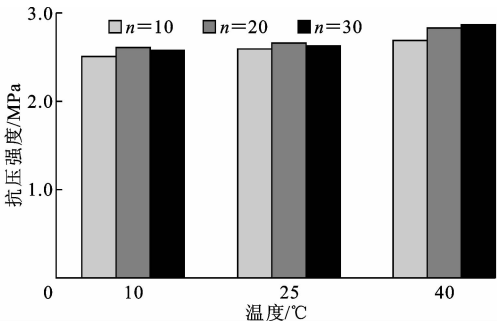


图 6 不同温度下初压次数对试件抗压强度的影响
Fig. 6 Effect of initial compaction time on compressive strength of specimens under different temperatures

由图 5、图 6 可知,随着温度的增加,整体上混合料成型试件空隙率逐渐下降,试件抗压强度逐渐增大,所以可认为本文最佳拌和温度为 40℃。

以影响路面性能的抗压强度为主,结合表 8 中初压密实度数据可知:10℃和 25℃时最佳的模拟摊铺初始密实度的初压次数为 20,初压后成型的试件初压密实度分别为 84.3%和 85%;40℃时最佳的模拟摊铺初始密实度的初压次数为 30,相应的试件密实度为 85.7%。据此,不同温度下最佳初压次数形成的密实度可对摊铺机摊铺振捣梁和熨平板的频率参数进行选择和优化组合,为该混合料在不同温度施工时的摊铺施工工艺参数选择提供参考。

5 结 语

- (1)提出采用黏度来评价混合料的拌和及摊铺和易性,而黏度可通过拌和扭矩来表征。
- (2)提出水泥乳化沥青混合料的拌和和易性评价方法,并分析其影响因素,包括拌和方法、拌和均匀性判定、含水率与拌和时间确定等。其中含水率对混合料的拌和状态及和易性影响较大。确定 10℃、25℃、40℃时的最佳含水率分别为 5.25%、6%、6.5%。3 种温度下混合料的拌和时间均确定为 12 s。
- (3)分析了 10℃、25℃、40℃时不同模拟初压次数对混合料摊铺和易性的影响。整体上扭矩随温度的上升呈增长态势。10℃、25℃时扭矩随初压

次数的增加逐渐减小;40℃时扭矩值随初压次数的增加先减小后增加。

(4)分析了10℃、25℃、40℃时摊铺模拟初压次数与混合料压实性能的关系。整体上随着温度的增加,混合料成型试件空隙率逐渐下降,试件抗压强度逐渐增大,认定最佳拌和温度为40℃。

(5)通过分析10℃、25℃、40℃时不同初压次数对混合料试件空隙率和抗压强度的影响可知:10℃和25℃时最佳的摊铺模拟初压次数为20,相应的密实度分别为84.3%和85%;40℃时最佳的初压次数为30,相应的密实度为85.7%。该密实度可对摊铺机振捣梁和熨平板频率参数的选择和优化组合提供参考。

(6)本文主要研究了水泥乳化沥青混合料的施工和易性评价方法及影响因素,研究结果对该混合料拌和及摊铺工艺的确定有一定的指导意义,但未考虑拌和完成后的混合料等待时间(压实时机)对压实和易性的影响,下一步需进行这方面的研究,为更合理地制定现场施工工艺提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 胡力群,沙爱民. 振碾式乳化沥青-水泥混凝土的路用性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):12-15.
HU Li-qun, SHA Ai-min. Road performance of vibration-compaction emulsified-asphalt cement concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 12-15.
- [2] 张思源,魏建民. 水泥-乳化沥青混合料配合比设计与施工技术研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2000,19(1):72-75.
ZHANG Si-yuan, WEI Jian-min. Research on mix design and construction technology for cement emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Science, 2000, 19(1): 72-75.
- [3] POULIOT N, MARCHAND J, PIGENON M. Hydration mechanisms, microstructure, and mechanical properties of mortars prepared with mixed binder cement slurry-asphalt emulsion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 54-59.
- [4] GARCIA A, LURA P, PARTL M N, et al. Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance [J]. Materials and Structures, 2013, 46(8): 1275-1289.
- [5] 杜少文,王振军. 水泥改性乳化沥青混凝土力学性能

与微观机理[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(8):1040-1043.

DU Shao-wen, WANG Zhen-jun. Mechanical properties and microcosmic mechanism of cement modified asphalt emulsion concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1040-1043.

- [6] RUTHERFORD T, WANG Z, SHU X, et al. Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 76-83.

- [7] 王振军,沙爱民. 水泥乳化沥青复合胶浆微观结构特征[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):11-14.

WANG Zhen-jun, SHA Ai-min. Microstructure characters of cement emulsified asphalt composite mastics [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 11-14.

- [8] 王元元. 表面能在评价沥青与集料黏附性中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.

WANG Yuan-yuan. Application research on adhesion between asphalt and aggregate based on surface energy theory [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.

- [9] 宋哲玉,徐培华,陶家朴. 乳化沥青破乳机理研究[J]. 石油沥青,1995,9(3):24-25.

SONG Zhe-yu, XU Pei-hua, TAO Jia-pu. Study on emulsion mechanism of emulsified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 1995, 9(3): 24-25.

- [10] 张琛,汪海年,尤占平,等. 橡胶沥青混合料和易性与压实特性的相关性[J]. 东南大学学报:自然科学版,2016,46(1):202-208.

ZHANG Chen, WANG Hai-nian, YOU Zhan-ping, et al. Correlation between workability and compaction property of rubber asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(1): 202-208.

- [11] 王笑风,苏青山,王振军. 橡胶粉纤维沥青混合料高温性能及施工和易性[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2006,30(5):846-849.

WANG Xiao-feng, SU Qing-shan, WANG Zhen-jun. Performance at high temperature and construction workability of asphalt mixture with rubber powder and fiber [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006, 30(5): 846-849.

- [12] WANG Z, SHU X, RUTHERFORD T, et al. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar [J]. Construction and Build-

- ing Materials, 2015, 75: 25-30.
- [13] KUO M F, LU C T, DU J C, et al. Workability of fresh cement-asphalt mastic[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 368(1): 1027-1030.
- [14] 余春林. 水泥乳化沥青混凝土路面材料研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
YU Chun-lin. Research of cement emulsified asphalt concrete pavement material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [15] 王火明, 李胜强, 徐周聪, 等. 乳化沥青冷再生混合料施工和易性评价方法研究[J]. 公路交通技术, 2015(6): 21-26.
WANG Huo-ming, LI Sheng-qiang, XU Zhou-cong, et al. Research on evaluation methods for construction workability of emulsified asphalt cold-recycled mixture[J]. Journal of Highway and Transport, 2015(6): 21-26.
- [16] 汪德才, 郝培文, 刘娜, 等. 乳化沥青冷再生混合料和易性指标及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 919-925.
WANG De-cai, HAO Pei-wen, LIU Na, et al. Workability indicator for emulsified asphalt recycled mixture and influence factors[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6): 919-925.
- [17] 张争奇, 吴瑞环, 季社鹏. 改性沥青混合料拌和及压实温度的确定方法[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 6-11.
ZHANG Zheng-qi, WU Rui-huan, JI She-peng. An approach to determine mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 6-11.
- [18] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.
WEI Jian-ming. Study on surface free energy of asphalt, aggregate and moisture diffusion in asphalt[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [19] BHASIN A, LITTLE D N. Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8): 634-641.
- [20] LYTTON R L, MASAD E A, ZOLLINGER C, et al. Measurements of surface energy and its relationship to moisture damage[R]. Austin: Texas A & M University, 2005.
- [21] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
SHEN Jin-an. Research on road performance of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [22] 严家俊. 道路建筑材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
YAN Jia-ji. Road building materials[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [23] 胡槛安, 秦毅. 旋转式黏度计工作原理及其主要部件设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1994, 22(3): 390-394.
HU Kan-an, Qin-yi. Working principle and main parts design of rotary viscometer[J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 1994, 22(3): 390-394.
- [24] 郭震宇. 浦卫公路就地冷再生系统设计方法研究[J]. 上海公路, 2013(3): 47-50.
GUO Zhen-yu. Design method research on Puwei Highway in situ cold regeneration system[J]. Shanghai Highways, 2013(3): 47-50.
- [25] 张翠红, 焦生杰, 吴青山, 等. MOH 材料室内压实特性及压实功研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2017, 40(7): 938-943.
ZHANG Cui-hong, JIAO Sheng-jie, WU Qing-shan, et al. Study on indoor compaction characteristics and compaction power of MOH material[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2017, 40(7): 938-943.