

文章编号:1671-1637(2015)05-0001-07

基于龚帕斯模型的改性乳化沥青 胶浆黏度与沥青破乳评价

张久鹏^{1,2}, 朱红斌¹, 裴建中¹, 罗资军³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 伊利诺伊大学香槟分校 土木与环境工程系, 伊利诺伊 厄巴纳 61801; 3. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:针对改性乳化沥青破乳时间难以量化评价的不足,采用不同类型的细集料与改性乳化沥青制备了改性乳化沥青胶浆,运用龚帕斯模型分析了其黏度随时间的变化规律,并建立了准确评价改性乳化沥青破乳的数学模型。研究表明:改性乳化沥青胶浆初始黏度较低,随沥青破乳时间的增大而不断增大,最后趋于稳定;当集料粒径相同时,花岗岩改性乳化沥青胶浆的黏度最大,玄武岩胶浆的黏度次之,而石灰岩胶浆的黏度最小,但黏度增长速率基本相同,符合生长曲线的特征;龚帕斯模型可以较好地反映胶浆黏度随时间的变化规律,计算值与实测值的最大相对误差小于15%;当根据龚帕斯模型建立的沥青破乳评价指标值为0.97~1.00时,胶浆黏度变化趋于平稳,此时改性乳化沥青已经完全破乳;反之,也可以根据黏度试验结果计算龚帕斯模型参数,预测改性乳化沥青破乳时间。

关键词:路面材料;改性乳化沥青胶浆;沥青破乳;胶浆黏度;龚帕斯模型

中图分类号:U414.18 **文献标志码:**A

Evaluation of asphalt demulsification and viscosity of modified asphalt emulsion mortar based on Gompertz model

ZHANG Jiu-peng^{1,2}, ZHU Hong-bin¹, PEI Jian-zhong¹, LUO Zi-jun³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana 61801, Illinois, USA; 3. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of quantitative evaluation on the demulsification time of modified asphalt emulsion, the different types of fine aggregates were added into modified asphalt emulsions to prepare the asphalt mortars, Gompertz model was applied to analyze the variation laws of mortar viscosity with time, and a mathematic model was established to quantitatively evaluate the demulsification of modified asphalt emulsion. Analysis result indicates that the initial viscosity of modified asphalt emulsion mortar is low, but increases with the demulsification time and finally tends to be stable. With the same size aggregates, the granite asphalt mortar has the biggest viscosity, the basalt asphalt mortar has smaller viscosity, and the limestone asphalt mortar has the smallest viscosity. However, the increasing rates of viscosity are basically same

收稿日期:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51378073,51408043);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ7278);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821153502,310821152003)

作者简介:张久鹏(1983-),男,江苏盐城人,长安大学副教授,工学博士,从事路面结构与材料研究。

for the different types of asphalt mortars, and conform to the characteristic of growth function. Gompertz model can be used to reflect the variation laws of viscosity with time because the biggest relative error between the calculated and measured values is lower than 15%. Then, an evaluation index was proposed based on Gompertz model to evaluate the demulsification, and the viscosity variation of asphalt mortar is stable when the index value ranges from 0.97 to 1.00. At the moment, the modified asphalt completes the demulsification. On the other hand, the measured viscosity can be used to calculate the parameters of Gompertz model, and to predict the required time to complete the demulsification for the modified asphalt emulsion. 7 tabs, 10 figs, 25 refs.

Key words: pavement materials; modified asphalt emulsion mortar; asphalt demulsification; mortar viscosity; Gompertz model

Author resume: ZHANG Jiu-peng (1983-), male, associate professor, PhD, +86-29-62630058, zhjiupeng@163.com.

0 引 言

乳化沥青,特别是改性乳化沥青可冷态施工,节约能源,保护环境,被广泛应用于公路工程领域。例如在沥青路面预防养护中大量采用的微表处混合料就要求使用改性乳化沥青,且必须具有合适的破乳速度,才能保证微表处混合料具有足够的拌和与摊铺时间,而改性乳化沥青的破乳速度对微表处混合料施工性能、压实效果与稳定性具有显著影响^[1-4]。对此,国内外研究人员已经开展了一系列的研究。冯虎等进行了阳离子乳化沥青化学破乳试验,结果表明阳离子乳化沥青的破乳度与乳化剂的种类和用量及破乳剂有关,乳化剂含量越高,其化学稳定性越好^[5];Taylor 分析了水包沥青型乳液的热稳定性,确认水包沥青型乳液的温度接近表面活性剂的浊点时可以有效分解^[6];Wang 等采用激光衍射技术研究了水泥乳化沥青胶浆中乳化沥青的稳定性,研究结果表明温度显著影响乳化沥青的稳定性,阳离子乳液的化学稳定性随 pH 值增加而增强,阴离子乳液的化学稳定性随 pH 值的增加而稍微改善^[7-8];Xia 等研究了沥青质和树脂对乳液破乳的影响,发现当沥青质或树脂浓度为 0.3% 或 1.0% 时,在微波辐射下乳液破乳效果在短时间内可以达到 100%^[9];Fortuny 等分析了盐度、温度、含水量和 pH 值对原油乳液微波破乳的影响,发现温度较高、无盐、pH 为 7.0 且含水量高(45%)的乳液可以获得较好的破乳效果^[10];Borges 等研究了盐度和水油比对原油包水乳液破乳行为的影响,指出在高沥青含量下,同时增加盐度和破乳剂可以获得最优的破乳速度^[11];蒋玮等研究了水泥对微表处混合料性能

影响规律与作用机理,结果表明水泥自身吸水、水化反应“需水”与水化反应物的生成,促进改性乳化沥青的破乳^[12];Song 等分析了聚合物-水泥比例对改性沥青胶浆黏附性的影响,发现改性乳化沥青胶浆的黏附性随聚合物-水泥比例的增加而降低^[13];Lu 等分析了矿物填料的细观特性对沥青胶浆黏结强度的影响,指出填料的细观特性对沥青胶浆的低温黏结强度有显著影响^[14]。

上述研究主要分析了改性乳化沥青破乳与破乳后性能的影响因素,但是改性乳化沥青的破乳时间受到温度、改性剂、外加水量、混合料级配、集料的物理化学性质、乳化剂剂量、水泥成分与用量等多种因素的影响,很难准确把握。目前,在研究混合料的可拌和时间与破乳过程时,主要采用观测法来判定微表处混合料的可拌时间和破乳时间,无法剔除人为因素对测定结果的影响,导致混合料破乳时间评判的不确定性^[15];若采用拌合稳定度试验来确定混合料中乳化沥青的破乳时间,需要进行多次试拌和重复试验,耗时费力,并且很难真实模拟混合料真实的状态和施工环境,因此,有必要提出明确的判断乳化沥青破乳的指标,并对破乳时间进行科学判断和预估。本文就此开展研究,分析了改性乳化沥青胶浆黏度变化规律,采用龚帕斯模型对沥青胶浆的黏度变化进行拟合,根据胶浆黏度变化评价改性乳化沥青的破乳过程。

1 原材料与黏度测试

1.1 原材料

试验采用双龙 70# 基质沥青、阳离子乳化剂 M、SBR 改性胶乳和氯化钙稳定剂,通过边改性边乳化

的方法,在实验室制备 SBR 改性乳化沥青。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011),测试了 SBR 改性乳化沥青的各项技术性能,测试结果见表 1。

表 1 SBR 改性乳化沥青的技术指标
Tab. 1 Technical indices of SBR modified asphalt emulsion

试验项目		试验结果	试验方法
破乳速度		慢裂快凝	T0658
粒子电荷		阳离子(+)	T0653
1.18 mm 筛上剩余量/%		0.051	T0652
蒸发 残留 物	固含量/%	60.8	T0651
	针入度(100 g,25 ℃,5 s)/ 0.1 mm	62	T0604
	软化点/℃	60.9	T0606
	延度(5 ℃)/cm	49	T0605
储存稳定性/%		0.2	T0654

改性乳化沥青混合料是一种由改性乳化沥青、集料与填料等组成的混合材料。在拌和初期,集料的几何、理化特性会对混合料的施工性能与改性乳化沥青的破乳过程产生显著的影响^[16-17]。为了研究改性乳化沥青胶浆黏度随沥青破乳时间的变化规律,以及集料的岩性与颗粒尺寸对破乳时间的影响,本文选取了石灰岩、玄武岩与花岗岩 3 种常见集料进行对比分析。

集料粒径越小,比表面积越大^[18]。本文以 MS-3 型微表处混合料的中值级配为例,试算了各粒径集料的比表面积与集料总比表面积^[19],结果表明粒径小于 0.3 mm 的集料的比表面积较大,约占集料总比表面的 80%。同时,考虑到黏度计对集料粒度的要求,最终选择粒径为 0.3、0.15、0.075 mm 集料进行破乳评价。由于集料成分、比表面积与表面电位对破乳过程有显著影响,因此,本文测试了 3 种集料的主要化学成分、比表面积与表面电位 3 项指标,结果分别见表 2~4。

表 2 集料主要矿物成分
Tab. 2 Major chemical components in aggregates

集料 类型	主要矿物成分的质量分数/%					
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
石灰岩	0.764	55.969	6.206	0.034	0.027	0.080
玄武岩	55.851	12.142	9.432	1.390	1.983	6.557
花岗岩	86.740	0.270	6.206	3.422	0.674	0.934

1.2 改性乳化沥青胶浆的黏度测试结果

在研究过程中,需要测定石灰岩、玄武岩与花岗岩细集料胶浆的黏度随着沥青破乳进程的变化规律,并分析集料岩性与颗粒尺寸对改性乳化沥青破

表 3 集料比表面积
Tab. 3 Specific surface areas of aggregates

集料类型	不同粒径(mm)集料的比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)		
	0.3	0.15	0.075
石灰岩	3.16	6.74	12.86
玄武岩	3.85	7.98	15.12
花岗岩	3.53	7.56	13.34

表 4 集料表面电位
Tab. 4 Zeta potentials on aggregate surfaces

集料类型	花岗岩	玄武岩	石灰岩
电位/mV	-29.75	-9.87	+11.32

乳过程的影响。为了保证胶浆在拌和后能够一直处于流动状态,均按照集料与改性乳化沥青乳液质量比 5:2 配制胶浆。试验过程如下。

(1)预估集料胶浆黏度与黏度增长速率,选择布氏黏度计(图 1)和 29 号转子进行黏度测试。0.075 mm 集料胶浆的转子速率为 10 r·min⁻¹,0.15 mm 和 0.3 mm 集料胶浆的转子速率为 20 r·min⁻¹。



图 1 布氏旋转黏度计
Fig. 1 Brookfield rotational viscometer

(2)称取 100 g 集料,再加入 40 g 改性乳化沥青乳液,预热至 25 ℃后快速搅拌约 30 s,将制备好的胶浆置入布氏黏度计的试样筒中。

(3)在 25 ℃±1 ℃的温度下进行黏度测试,每隔 1 min 记录一次黏度数据,测试结果见图 2~4。

测试结果表明,改性乳化沥青胶浆初始黏度较低,随沥青破乳时间的增大而不断增大,3 种集料的曲线斜率基本相同;在一定时间后,黏度增长速率逐渐减小,最后趋于平稳。这一过程是胶浆黏度生长的过程,有明显的出生、成长与成熟阶段。

2 基于龚帕斯模型的黏度分析与破乳评价

2.1 龚帕斯模型参数求解

本文采用生长曲线模型对胶浆黏度随时间的变

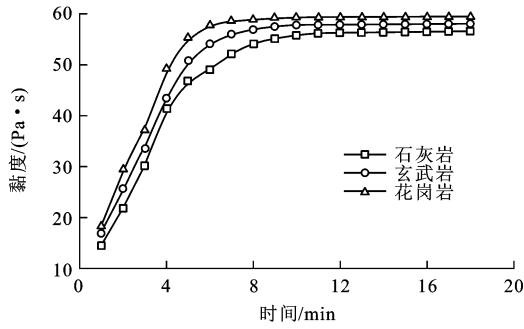


图2 改性乳化沥青胶浆(0.075 mm 集料)黏度变化规律

Fig. 2 Viscosity variation rules of modified asphalt emulsion mortars with 0.075 mm aggregates

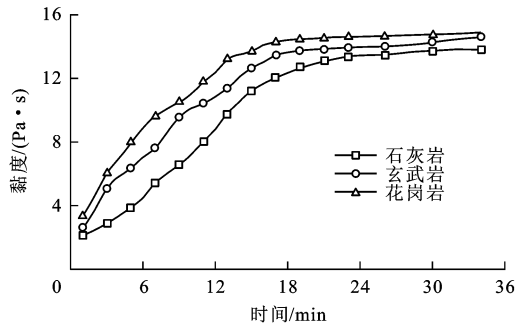


图3 改性乳化沥青胶浆(0.15 mm 集料)黏度变化规律

Fig. 3 Viscosity variation rules of modified asphalt emulsion mortars with 0.15 mm aggregates

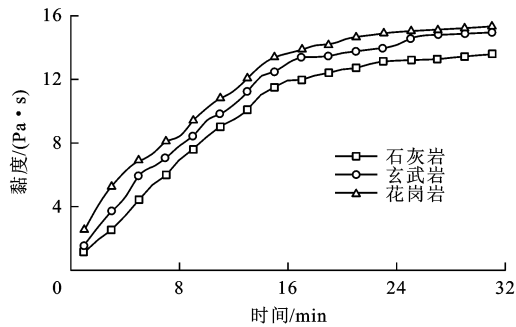


图4 改性乳化沥青胶浆(0.3 mm 集料)黏度变化规律

Fig. 4 Viscosity variation rules of modified asphalt emulsion mortars with 0.3 mm aggregates

化规律进行拟合。生长曲线一般有 Logistic 模型和 Gompertz 模型 2 种类型,其中龚帕斯模型能够较好地描述生长和发展过程^[20]。本文进行黏度测试时,每隔 1 min 记录一次,则根据龚帕斯模型可将黏度描述为

$$\ln(y_i) = k + ab^i \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 次采集的沥青胶浆的黏度; k 、 a 、 b 为模型参数,可以利用三段估计法进行求解。

假设已知 M 个黏度测试结果 $y_1, \dots, y_i, \dots, y_M$, 将 M 个数据平均分成三段,每个时间段有 $n=M/3$ 个黏度测试结果。对 3 个时间段,分别求和可得

$$\begin{cases} Y_1 = \sum_{i=1}^n \ln(y_i) = nk + ab(b^0 + b^1 + b^2 + \dots + b^{n-1}) \\ Y_2 = \sum_{i=n+1}^{2n} \ln(y_i) = nk + ab^{n+1}(b^0 + b^1 + b^2 + \dots + b^{n-1}) \\ Y_3 = \sum_{i=2n+1}^{3n} \ln(y_i) = nk + ab^{2n+1}(b^0 + b^1 + b^2 + \dots + b^{n-1}) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以得到 k 、 a 、 b 分别为

$$k = \frac{Y_1 Y_3 - Y_2^2}{n(Y_1 + Y_3 - 2Y_2)} \quad (3)$$

$$a = \frac{(b-1)(Y_2 - Y_1)}{(b^n - 1)^2 b} \quad (4)$$

$$b = \sqrt[n]{\frac{Y_3 - Y_2}{Y_2 - Y_1}} \quad (5)$$

2.2 改性乳化沥青胶浆的黏度分析

将胶浆黏度测试结果代入式(3)~(5)求解 k 、 a 、 b ,计算结果见表 5~7(R^2 为决定系数),拟合黏度的相对误差见图 5~7。

表5 石灰岩改性乳化沥青胶浆黏度的龚帕斯模型参数

Tab. 5 Gompertz model parameters of modified asphalt

emulsion mortars with limestone aggregates

集料粒径/mm	a	b	k	R^2
0.075	-2.515	0.598	10.941	0.995
0.15	-1.889	0.857	9.619	0.995
0.3	-2.818	0.840	9.532	0.998

表6 玄武岩改性乳化沥青胶浆黏度的龚帕斯模型参数

Tab. 6 Gompertz model parameters of modified asphalt

emulsion mortars with basalt aggregates

集料粒径/mm	a	b	k	R^2
0.075	-2.775	0.532	10.968	0.985
0.15	-2.466	0.887	9.684	0.994
0.3	-2.350	0.850	9.619	0.995

表7 花岗岩改性乳化沥青胶浆黏度的龚帕斯模型参数

Tab. 7 Gompertz model parameters of modified asphalt

emulsion mortars with granite aggregates

集料粒径/mm	a	b	k	R^2
0.075	-2.667	0.503	10.993	0.985
0.15	-1.646	0.841	9.637	0.994
0.3	-1.870	0.865	9.684	0.994

由于起始黏度的变异性较大,第 1 点的拟合效果往往较差,因此,最大相对误差均出现在第 1 点处,特别是对于集料粒径较大的沥青胶浆,相对误差

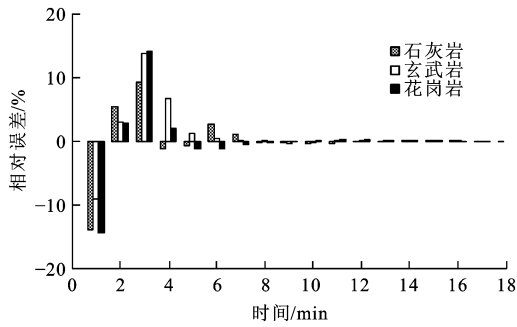


图5 改性乳化沥青胶浆(0.075 mm集料)的黏度拟合相对误差

Fig. 5 Fitted relative errors of viscosities for modified asphalt emulsion mortars with 0.075 mm aggregates

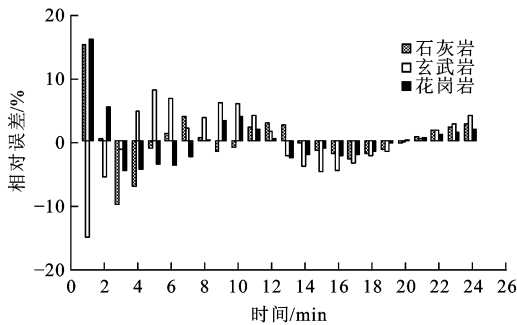


图6 改性乳化沥青胶浆(0.15 mm集料)的黏度拟合相对误差

Fig. 6 Fitted relative errors of viscosities for modified asphalt emulsion mortars with 0.15 mm aggregates

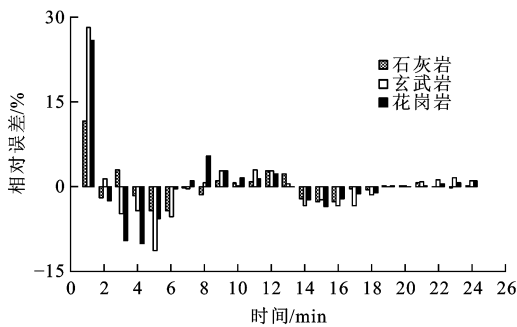


图7 改性乳化沥青胶浆(0.3 mm集料)的黏度拟合相对误差

Fig. 7 Fitted relative errors of viscosities for modified asphalt emulsion mortars with 0.3 mm aggregates

最大值达到 28.22%,但剔除第 1 点的数据后,最大相对误差为 14.11%,可以认为拟合效果满足精度要求。0.075、0.15、0.3 mm 三种粒径的石灰岩沥青胶浆拟合决定系数分别为 0.995、0.995、0.998,计算黏度与实测黏度的相对误差最大值分别为 9.24%、9.79%、4.20%;玄武岩沥青胶浆拟合决定系数分别为 0.985、0.994、0.995,相对误差最大值分别为 13.86%、7.71%、11.27%;花岗岩沥青胶浆拟合决定系数分别为 0.985、0.994、0.994,相对误差最大值分别为 14.11%、5.13%、10.12%。对于 3 种含不同粒径集料的改性乳化沥青胶浆来说,黏

度拟合的相对误差均未超过 15%,其中石灰岩沥青胶浆相对误差的极大值最小,玄武岩次之,花岗岩最大,因此,龚帕斯模型可以较好地反映改性乳化沥青胶浆黏度的发展规律。

2.3 改性乳化沥青破乳评价

在破乳过程中,由于离子电荷的吸附和水分的蒸发使得沥青乳液的性质发生变化,沥青从乳液中分离出来,并与集料接触,许多微小颗粒相互接触形成整体薄膜,因此,破乳过程也是胶浆中沥青固含量逐渐增大的过程。沥青固含量越高,其黏度也越大^[21-22]。随着破乳过程的深入,改性乳化沥青胶浆的黏度也增大,直至乳液破乳完成,此时沥青胶浆的黏度也将随着固含量的平衡而趋于稳定^[23-24]。对此,Ouyang 等测定了破乳过程中乳化沥青胶浆的黏度和粒径分布,结果表明乳化沥青胶浆黏度的变化可以反映胶浆中乳化沥青的破乳过程^[25]。

但是,在利用龚帕斯模型描述沥青胶浆的黏度时,发现黏度随着时间而不断增长,而在实际工况下,当沥青完全破乳后,沥青胶浆的黏度会趋于一个稳定值,因此,需要根据龚帕斯模型确定一个评价标准,用来界定在某一时间节点之后可以将胶浆黏度视为定值,而该时间节点就是乳化沥青完全破乳的时间。假定存在破乳进程评价函数 $\varphi(t)$,其值等于某一时间 t 前后 Δt (Δt 为实测黏度的时间间隔)时间范围内胶浆黏度对时间的积分比值,即

$$\varphi(t) = \int_{t-\Delta t}^t e^{k+ab^t} dt / \int_t^{t+\Delta t} e^{k+ab^t} dt \quad (6)$$

当评价函数值接近 1 时,可以认为沥青胶浆中的改性乳化沥青完全破乳,因此,本文根据破乳形态观测,初步判定改性乳化沥青完成破乳的时间,将其代入式(6)得到评价函数值,见图 8~10。分析结果表明:花岗岩胶浆的沥青破乳时间最短,玄武岩胶浆的沥青破乳时间次之,石灰岩胶浆的沥青破乳时间最长;对于相同岩性的沥青胶浆,破乳时间与集料粒径成正比关系;石灰岩胶浆的破乳进程评价函数值最大,花岗岩胶浆的评价函数值最小,但均处于 0.97~1.00 之间,因此,可以利用式(6)计算破乳进程评价函数 $\varphi(t)$;也可以根据不同时间下的黏度和式(3)~(5)求解龚帕斯模型参数 k 、 a 与 b ,再代入到式(6)中,令 $\varphi(t)=1$,通过数学软件或者试算求出沥青破乳时间。

3 结 语

(1)改性乳化沥青胶浆的初始黏度较低,随着沥

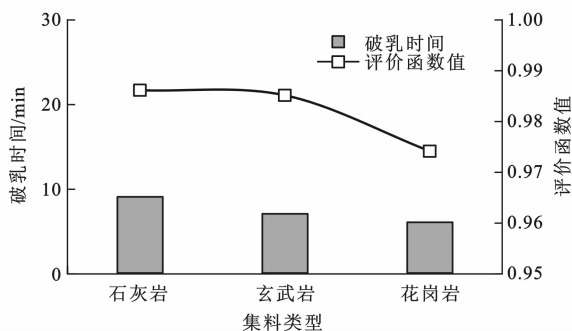


图 8 改性乳化沥青胶浆(0.075 mm 集料)的
沥青破乳时间和评价函数值

Fig. 8 Asphalt demulsification times and evaluation function values of modified asphalt emulsion mortars with 0.075 mm aggregates

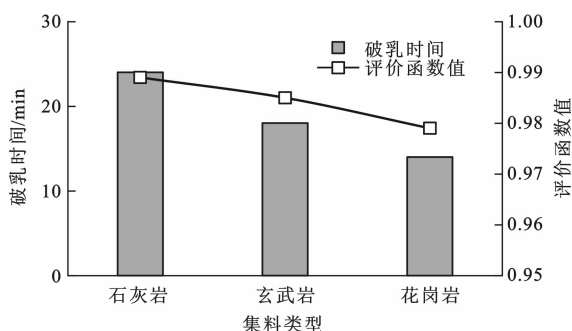


图 9 改性乳化沥青胶浆(0.15 mm 集料)的
破乳时间和评价函数值

Fig. 9 Asphalt demulsification times and evaluation function values of modified asphalt emulsion mortars with 0.15 mm aggregates

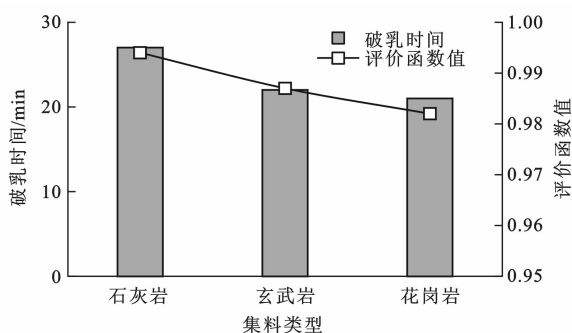


图 10 改性乳化沥青胶浆(0.3 mm 集料)的
破乳时间和评价函数值

Fig. 10 Asphalt demulsification times and evaluation function values of modified asphalt emulsion mortars with 0.3 mm aggregates

青破乳进程的深入,其黏度不断增大,直至稳定,不同集料胶浆的黏度增长速率基本相同;当集料粒径相同时,花岗岩改性乳化沥青胶浆的黏度最大,沥青破乳时间最短;石灰岩改性乳化沥青胶浆的黏度最小,沥青破乳时间最长;玄武岩改性乳化沥青胶浆的黏度和沥青破乳时间介于二者之间。

(2)利用龚帕斯模型分析了改性乳化沥青胶浆的黏度,比较了龚帕斯模型计算值与实测值之间的相对误差,结果显示龚帕斯模型可以较好地反映改性乳化沥青胶浆黏度的发展规律。

(3)在龚帕斯黏度拟合模型基础上,建立了判定改性乳化沥青完全破乳的评价指标,发现该指标值为 0.97~1.00 时改性乳化沥青胶浆的黏度变化趋于平稳,认为此时改性乳化沥青完成破乳。反之,也可以根据改性乳化沥青胶浆的黏度试验结果得到龚帕斯模型参数,据此反算与预测改性乳化沥青的破乳时间。

(4)本文研究是建立在单档与单类集料基础上的,有待进一步验证改性乳化沥青胶浆黏度采集频率对沥青破乳评价指标与破乳时间的影响。

参考文献:

References:

- [1] 林俊涛,吴少鹏,刘全涛,等. 沥青路面功能性预养护材料的养护时机研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 19-24.
LIN Jun-tao, WU Shao-peng, LIU Quan-tao, et al. Research on maintenance time for functional preventive materials in asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 19-24. (in Chinese)
- [2] ORUC S, CELIK F, AKPINAR M. Effect of cement on emulsified asphalt mixtures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(5): 578-583.
- [3] 高志伟,宋炜玮. 乳化沥青微表处混合料耐久性研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(9): 68-71.
GAO Zhi-wei, SONG Wei-wei. Research on durability of emulsified asphalt mixture for micro-surfacing[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(9): 68-71. (in Chinese)
- [4] ZHOU Hai-ping, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [5] 冯 虎,王友刚. 阳离子乳化沥青化学破乳试验研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(5): 32-34.
FENG Hu, WANG You-gang. Experimental study on chemical breaking of cationic emulsified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(5): 32-34. (in Chinese)
- [6] TAYLOR S E. Thermal destabilisation of bitumen-in-water emulsions—a spinning drop tensiometry study[J]. Fuel, 2011, 90(10): 3028-3039.
- [7] WANG Fa-zhou, LIU Yun-peng, ZHANG Yun-hua, et al. Experimental study on the stability of asphalt emulsion for CA mortar by laser diffraction technique[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 117-121.
- [8] WANG Fa-zhou, LIU Yun-peng, HU Shu-guang. Effect of

- early cement hydration on the chemical stability of asphalt emulsion[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 42: 146-151.
- [9] XIA Li-xin, LU Shi-wei, CAO Guo-ying. Stability and demulsification of emulsions stabilized by asphaltenes or resins[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 271(2): 504-506.
- [10] FORTUNY M, OLIVEIRA C B Z, MELO R L F V, et al. Effect of salinity, temperature, water content, and pH on the microwave demulsification of crude oil emulsions[J]. *Energy and Fuels*, 2007, 21(3): 1358-1364.
- [11] BORGES B, RONDÓN M, SERENO O, et al. Breaking of water-in-crude-oil emulsions. 3. influence of salinity and water-oil ratio on demulsifier action[J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23(3): 1568-1574.
- [12] 蒋 玮,肖晶晶,王振军. 水泥对微表处混合料性能影响规律及作用机理[J]. *武汉理工大学学报:交通科学与工程版*, 2012, 36(1): 1-5.
- JIANG Wei, XIAO Jing-jing, WANG Zhen-jun. Influence law of cement on the performance of microsurfacing mixture and its mechanism[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering*, 2012, 36(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] SONG H, DO J, SOH Y. Feasibility study of asphalt-modified mortars using asphalt emulsion[J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(5): 332-337.
- [14] LU Dan, ZHENG Chuan-feng, QIN Yong, et al. Analysing the effects of the mesoscopic characteristics of mineral powder fillers on the cohesive strength of asphalt mortars at low temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 65: 330-337.
- [15] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等. 温拌再生沥青混合料耐久性性能[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(8): 17-22.
- GUO Nai-sheng, YOU Zhan-ping, ZHAO Ying-hua, et al. Durability of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(8): 17-22. (in Chinese)
- [16] 陈静云,孙依人,张 岩,等. 沥青混合料动态粘弹性行为分析的模拟方法[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(8): 11-16.
- CHEN Jing-yun, SUN Yi-ren, ZHANG Yan, et al. Modeling method for analysis of dynamic viscoelastic behavior of asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(8): 11-16. (in Chinese)
- [17] 王朝辉,李彦伟,葛 娟,等. Tourmaline 改性沥青及其混合料热拌减排性能[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(11): 17-24.
- WANG Chao-hui, LI Yan-wei, GE Juan, et al. Emission reduction effect of tourmaline modified asphalt and its mixtures under condition of hot-mix[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(11): 17-24. (in Chinese)
- [18] 冯忠绪,李学武,刘治文. 混合料搅拌设备筛孔尺寸优化配置[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(10): 121-126.
- FENG Zhong-xu, LI Xue-wu, LIU Zhi-wen. Optimal configuration for size of screen hole in asphalt mixing plant[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(10): 121-126. (in Chinese)
- [19] 谭忆秋,任俊达,邢 超,等. 基于细观尺度的沸石沥青结构分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(4): 1-8.
- TAN Yi-qiu, REN Jun-da, XING Chao, et al. Analysis on meso-structure of zeolite asphalt[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(4): 1-8. (in Chinese)
- [20] ÇELEKLI A, BALCI M, BOZKURT H. Modelling of scenedesmus obliquus; function of nutrients with modified Gompertz model[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(18): 8742-8747.
- [21] 傅 珍,延西利,蔡 婷,等. 三角形坐标系下沥青组分与黏度、黏附性关系[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(3): 1-7.
- FU Zhen, YAN Xi-li, CAI Ting, et al. Relationship among asphalt component, viscosity and adhesion in triangular coordinate system[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(3): 1-7. (in Chinese)
- [22] 李晓燕,平 路,汪海年,等. 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(1): 10-17.
- LI Xiao-yan, PING Lu, WANG Hai-nian, et al. Performance test of rubber asphalt based on domestic and abroad test methods[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(1): 10-17. (in Chinese)
- [23] ROMERO N, CÁRDENAS A, HENRÍQUEZ M, et al. Viscoelastic properties and stability of highly concentrated bitumen in water emulsions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, 204(1-3): 271-284.
- [24] TADROS T. Viscoelastic properties of sterically stabilised emulsions and their stability[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 222: 692-708.
- [25] OUYANG Jian, TAN Yi-qiu, LI Yun-liang, et al. Demulsification process of asphalt emulsion in fresh cement-asphalt emulsion paste[J]. *Materials and Structures*, 2014: 1-9. DOI: 10.1617/s11527-014-0446-9.