

文章编号:1007-9629(2011)06-0000-00

沥青发泡性能评价指标及优化设计研究

徐金枝, 郝培文

(长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 采用 3 种不同品种和标号的沥青进行发泡试验, 分析了采用膨胀率、半衰期评价沥青发泡性能存在的问题, 探讨了发泡指数的计算方法及其作为沥青发泡性能评价指标的适用性. 结果表明: 并非沥青温度越高其发泡性能越好; 以膨胀率、半衰期指标设计最佳发泡用水量缺乏理论依据; 采用不同回归方程对沥青泡沫衰变过程进行两阶段拟合, 可获得较为准确的分泡指数, 但并非发泡指数越大, 沥青发泡性能越好, 发泡指数应与膨胀率、半衰期结合用于沥青发泡性能的评价与优化设计. 基于研究成果, 提出了沥青发泡性能的优化设计方法.

关键词: 沥青发泡性能; 膨胀率; 半衰期; 发泡指数; 优化设计

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.000

Research on the Evaluation Index and Optimization Design of Asphalt Foaming Characteristics

XU Jin-zhi, HAO Pei-wen

(Key Laboratory for Road Structure and Material of Communications Industry, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Three types of asphalt were chosen to carry out foaming experiments. Problem of evaluation of asphalt foamability with expansion ratio and half-life was analysed. The calculating method of foamed index and its applicability as evaluating index for asphalt foaming characteristics were also investigated. The results indicate that better foamability was not necessarily the direct result of higher asphalt temperature. It lacked theoretical basis that using expansion ratio and half-life to determine the optimal water content. Two-phase fitting with different curves to the decay process of foamed asphalt could achieve more accurate foamed index. However, higher foamed index did not necessarily mean better foamability. It is suggested that foamed index be combined with expansion ratio and half-life to evaluate and design foamed asphalt. On the basis of the study in this paper, an optimal design for asphalt foamability was put forward.

Key words: asphalt foamability; expansion ratio; half-life; foamed index(FI); optimal design

泡沫沥青是由普通热沥青与水、压缩空气在特定的发泡装置中经过一系列复杂的热力学变化后形成的产物. 泡沫沥青以其经济、节能、环保等独特优势, 作为道路稳定剂广泛应用于沥青路面冷再生工程中, 近年来受到国内外研究者的高度重视. 泡沫沥青具有泡沫体系的共性, 从其应用之初就采用传统的泡沫体系评价指标——膨胀率和半衰期对其发泡效果进行分析评价, 并一直沿用至今. 诸多学者采用

这 2 个评价指标对不同品种沥青的发泡性能、影响因素以及发泡质量的控制模型等进行了试验研究^[1-3], 探索了沥青的发泡与衰变机理及其材料特性. 但是, 膨胀率和半衰期 2 个评价指标随着发泡用水量等材料参数的变化呈现相反的变化趋势, 以这 2 个评价指标确定最佳沥青发泡条件仍存在一些问題, 与之相关的研究也鲜见报道. 本文选用 3 种不同品种和标号的沥青进行发泡性能试验分析, 探究其

收稿日期: 2010-12-23; 修订日期: 2011-01-06

基金项目: 交通部西部科技建设项目(200531800009); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

第一作者: 徐金枝(1978—), 女, 安徽庐江人, 长安大学博士后. E-mail: jinzhi_03@yahoo.com.cn

发泡性能的合理评价指标及评价方法,以期为沥青发泡性能的优化设计提供借鉴.

1 沥青发泡性能评价指标

1.1 膨胀率与半衰期

膨胀率(ER)是指沥青发泡膨胀时达到的最大体积与泡沫完全消失的体积之比,它可反映泡沫沥青黏度的大小;半衰期($\tau_{1/2}$)是指泡沫沥青从最大体积降到最大体积的一半所需的时间,它可反映泡沫沥青的稳定性.JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》规定膨胀率应大于 10 倍、半衰期不小于 8 s.

对于泡沫沥青,希望其膨胀率和半衰期 2 个评价指标都能尽量提高,但实际上这 2 个评价指标却呈现相反的变化趋势(见图 1).在沥青发泡性能的优化设计中,通常选择膨胀率和半衰期 2 条趋势线交点或临近点对应的水量作为设计发泡用水量,旨在兼顾 2 个评价指标均能达到较好状态,从而获得最佳沥青发泡效果.但由图 1 可以看出,在发泡用水量(质量分数)为 1%~4%时,膨胀率、半衰期均能满足沥青发泡性能的规定限值,其他发泡用水量形成的发泡效果是否一定比 1.5%或 2%发泡用水量对应的发泡效果差却不得而知.由此可见,仅凭膨胀率、半衰期 2 个评价指标进行沥青发泡性能优化设计存在一定的盲区.

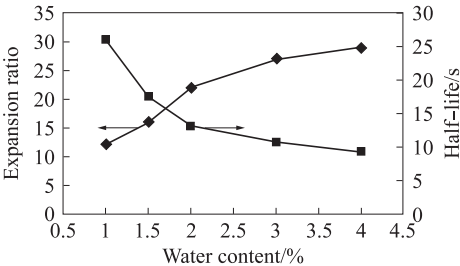


图 1 泡沫沥青膨胀率与半衰期的变化趋势
Fig. 1 Inverse trend of expansion ratio and half-life for foamed asphalt

1.2 发泡指数

膨胀率和半衰期 2 个评价指标本质上存在着一定的关联性.沥青发泡膨胀时,体积变大,黏度相应减小,其稳定性必然降低,导致半衰期减小,反之亦然.鉴于此,Jenkins^[4]通过研究泡沫沥青的衰变曲线,提出用综合膨胀率和半衰期 2 个评价指标的发泡指数(FI)来评价沥青的发泡性能. FI 由泡沫沥青衰变曲线下的积分面积进行计算(见图 2),其中积分下限取膨胀率为 4 倍(即 $ER_{min}=4$)时所对应的衰变时间(t_{min}), t 为沥青泡沫衰变时间, A_1 , A_2 分别表

示衰变曲线下的面积以及以沥青泡沫最大膨胀率真实值与测试值计算的衰变曲线下的面积差.对于呈渐近线($y=ke^{-m}$)衰变的泡沫沥青,Jenkins 提出按式(1)计算 FI,并以此优化沥青的发泡用水量等条件参数,可获得最佳的发泡效果.南非冷再生中期指南 TG2 中以 FI 为评价指标,结合不同集料温度建立了沥青发泡质量的相关评价标准^[5]. Saleh^[6]对以 FI 作为沥青发泡性能评价指标的适用性进行了分析,认为 FI 并不能有效优化沥青发泡的条件参数.本文对此开展了进一步的验证研究.

$$FI = \frac{-\tau_{1/2} [4 - ER - 4 \ln(4/ER)]}{\ln 2} + \frac{(1 + c) ER t_s}{2c} \tag{1}$$

式中: t_s 为沥青喷射时间; c 为膨胀率测定值(ER_m)与真实值(ER_a)之比.

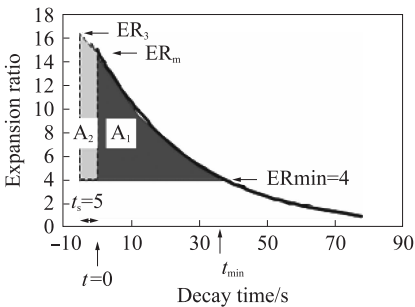


图 2 根据衰变曲线确定 FI 的计算图示^[4]
Fig. 2 Graphical calculation of FI with foamed asphalt decay curve

2 沥青发泡性能试验及分析

2.1 试验材料及基本性能

本文选用中海 90[#] (1), 中海 90[#] (2), 欢喜岭 70[#] 这 3 种沥青进行发泡性能试验,其中:中海 90[#] (1), 中海 90[#] (2) 来自同一炼油厂不同批次的同一类型沥青.各种沥青基本物理性能如表 1 所示.在沥青发泡试验中,发泡用水量(质量分数)分别为 1%, 2%, 3%, 每种发泡用水量下变化 3 个温度: 150,

表 1 沥青基本物理性能

Table 1 Physical properties of test asphalt			
Index	Zhonghai 90 [#] (1)	Zhonghai 90 [#] (2)	Huanxiling 70 [#]
Penetration(25 °C, 100 g, 5 s)/mm	80.0	82.4	63.1
Softening point(ring and ball method)/°C	48.2	45.6	47.6
Ductility(10 °C)/cm	>100.0	90.6	81.3
Viscosity(135 °C)/(Pa · s)	0.265	0.409	0.345
Density(15 °C)/(g · cm ⁻³)	1.009	1.007	1.018

160,170 ℃,其中欢喜岭 70[#] 沥青仅进行了 150,160 ℃ 的发泡试验. 在每一条件下至少平行试验 3 次.

2.2 发泡试验结果

按 $y = a \ln x + b$ 的形式对各沥青在不同条件下的发泡结果进行了拟合,结果见图 3(不同温度下各沥青膨胀率及半衰期指标随发泡用水量的变化规律与图 1 类似,文中不再列示),其中拟合曲线位置偏上的情况被认为其发泡效果较好,可由它来确定沥青最佳发泡温度. 试验结果表明,3 种沥青的最佳发泡温度均为 150 ℃,而 160 ℃ 次之,170 ℃ 最差. 文献[7]对 4 种常用的 70 沥青进行了 140,150,160,170 ℃ 这 4 种温度下的发泡性能研究,其试验结果

也显示 140,170 ℃ 的发泡效果不如 150,160 ℃,且 150 ℃ 下 4 种沥青发泡效果均优于 160 ℃. 结合本文试验结果,可以认为温度升高虽然有利于沥青黏度降低,但其发泡性能并未随之改善,即并非沥青温度越高其发泡效果就越好,相反,沥青温度过高会削弱其发泡性能. 在确定最佳发泡用水量时,如果仅以膨胀率与半衰期趋势线交点或临近点对应的水量作为设计发泡用水量,只能保证沥青具有较好的发泡效果,难以达到优化设计. 因此,采用膨胀率与半衰期作为沥青发泡性能评价指标,无法判定在什么用水量下沥青的发泡效果最佳.

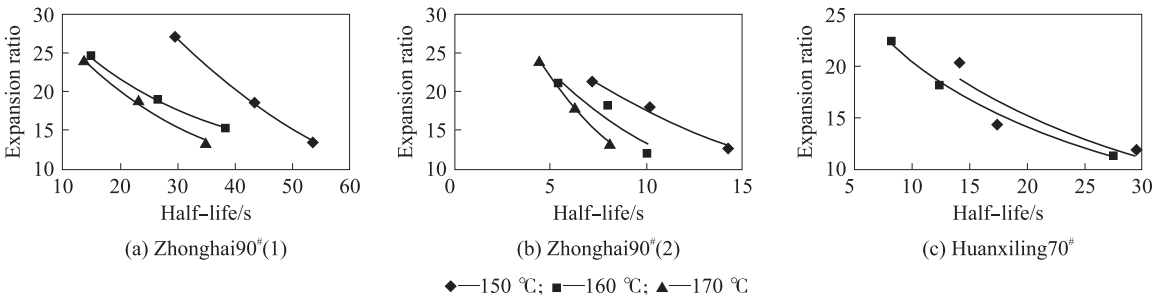


图 3 沥青发泡结果
Fig. 3 Result of asphalt foaming

2.3 FI 作为评价指标的适用性分析

本文通过规定的标尺对沥青整个发泡过程中体积随时间的变化进行了测定,其中衰变曲线的终点为膨胀率达 3 倍时对应的点. 图 4 为中海 90[#] 1) 沥青在 150 ℃ 及 3 种发泡用水量条件下膨胀体积随时间衰变的散点图,并以渐近线对各衰变过程进行了

拟合. 结果显示,沥青泡沫衰变过程的后期与渐近线变化规律比较相符,而在半衰期附近至膨胀率最大点之间两者存在一定的差异. 中海 90[#] (2) 与欢喜岭 70[#] 沥青在不同条件下的泡沫衰变过程拟合规律与中海 90[#] (1) 沥青类似.

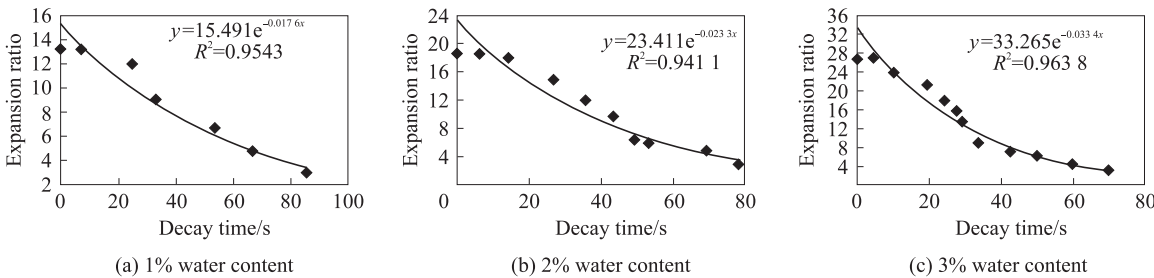


图 4 中海 90[#] (1) 在 150 ℃ 及不同发泡用水量下的衰变散点图与渐近线拟合结果
Fig. 4 Scatter diagram and asymptotic fitted curve for Zhonghai 90[#] (1) at 150 ℃ at different water contents

鉴于此,本文以衰变曲线上凸和下凹 2 个部分之间的拐点(半衰期对应点附近)为界,对各沥青泡沫衰变过程进行分段拟合,膨胀体积最大点至拐点之间用二次多项式 $y = ax^2 + bx + c$ 拟合,拐点后的衰变过程则用渐近线形式拟合. 结果显示,分段拟合

法可以提高沥青泡沫衰变过程的拟合精度,获得更为理想的拟合效果. 图 5 为中海 90[#] (1) 沥青泡沫衰变过程的分段拟合结果,中海 90[#] (2) 与欢喜岭 70[#] 沥青泡沫衰变过程的分段拟合结果类似.

图 6 为 3 种沥青不同发泡条件下的 FI 值. 由图

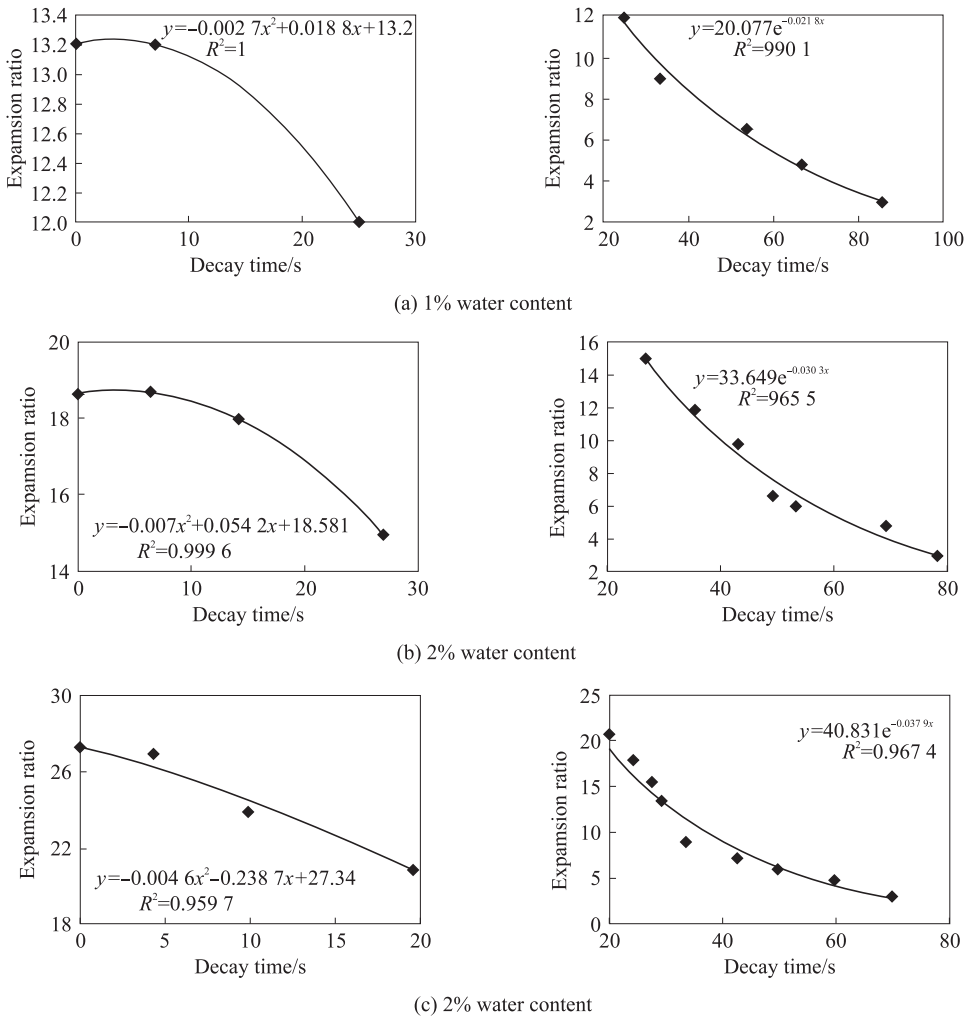


图 5 中海 90# (1)在 150 °C 及不同发泡用水量下衰变过程的分段拟合结果

Fig. 5 Two-phase fitting for the decay process of Zhonghai90# (1) at 150 °C at different water contents

6 可以看出,温度对 FI 具有重要影响.以 FI 为评价指标,沥青发泡性能在 150 °C 下最优,160 °C 次之,170 °C 最差,这与图 3 中泡沫沥青膨胀率和半衰期的对数拟合结果一致.

另外,发泡用水量对 FI 也有显著影响,但并未呈现一定的规律性,有些出现峰值,有些则一直呈现增大趋势.因此,对某些沥青无法以 FI 峰值作为判定依据来确定最佳发泡用水量.对 FI 一直增大的情况,是否 FI 越大沥青发泡性能就越好?表 2 列出了若干条件下不同沥青发泡性能测试结果.由表 2 可见,中海 90# (2) 沥青在 150,170 °C 条件下,欢喜岭 70# 沥青在 160 °C 条件下,当发泡用水量从 1% 增加到 3% 时,其 FI 逐渐增大, $\tau_{1/2}$ 逐渐减小,3% 发泡用水量对应的 FI 最大,但其 $\tau_{1/2}$ 却降低至 8 s(限值)以下. $\tau_{1/2}$ 过小,沥青泡沫的稳定性差,无法与集料进行充分拌和^[8],会对混合料最终性能产生不利影响.因此 ER 较大、 $\tau_{1/2}$ 较小的泡沫沥青,其发泡效果并不理想.由此可见,当发泡用水量超过一定量后,即使

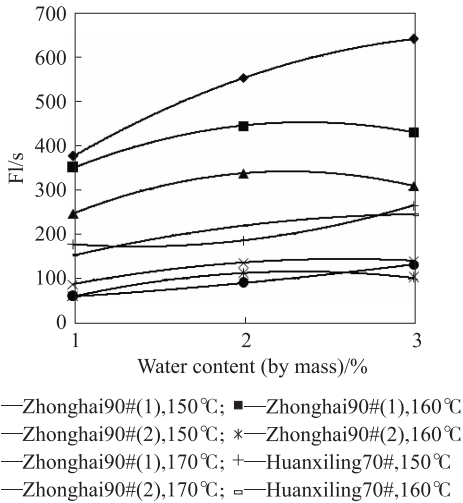


图 6 3 种沥青不同发泡条件下的 FI 值

Fig. 6 FI for three foamed asphalt at different foaming conditions

FI 持续增大,但由于 $\tau_{1/2}$ 已大幅减小,使整体发泡性能出现了衰减,导致沥青发泡效果明显降低.因此,并非 FI 越大发泡性能就越好,仅以 FI 的最大值来

选择最佳发泡用水量并不可取。

表 2 不同沥青发泡特性测试结果
Table 2 Test results of different foamed asphalt

Asphalt and temperature	Zhonghai90 [#] (1) &150 ℃			Zhonghai90 [#] (2) &150 ℃			Zhonghai90 [#] (2) &170 ℃			Huanxiling70 [#] &150 ℃			Huanxiling70 [#] &160 ℃		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Water content (by mass)/%															
ER	13.2	18.6	27.0	12.6	18.0	21.2	13.2	18.0	24.1	12.0	14.4	20.4	11.4	18.0	22.8
$\tau_{1/2}$ /s	53.7	43.4	29.3	14.3	10.2	7.2	8.1	6.3	4.4	29.4	17.4	14.1	27.5	12.3	7.9
FI/s	376.3	552.4	640.0	88.0	136.7	140.8	61.3	91.4	132.9	178.5	187.2	265.1	153.9	220.3	245.5

3 沥青发泡性能优化设计

3.1 优化设计指标

由上述试验结果可知,膨胀率、半衰期和发泡指数从不同的角度反映了沥青的发泡性能,但发泡指数并不能代替膨胀率和半衰期 2 个传统评价指标单独用于沥青发泡性能的评价或设计,而应将发泡指数作为一种辅助或补充指标,与膨胀率和半衰期相结合共同对沥青的发泡性能进行合理评价与优化设计。

3.2 优化设计方法

温度与发泡用水量是影响沥青发泡性能的重要因素,在沥青发泡性能优化设计中应为主要条件参数。温度、发泡用水量过高或过低均不利于沥青发泡,设计中可选择 2~3 种温度(150~170 ℃)进行试验分析,发泡用水量可以 0.5%或 1%为间隔,在 1%~5%中选择 4~5 种发泡用水量进行试验;可在不同温度及发泡用水量条件下,测试沥青发泡的衰变过程及其 ER, $\tau_{1/2}$,并结合它们的趋势线交点及其临近点的 FI 值来确定最佳发泡温度和用水量。优化设计原则为:在最佳发泡条件下,泡沫沥青应具有合理的 ER, $\tau_{1/2}$ 以及较大的 FI 值。

4 结论

(1)温度对沥青发泡性能具有重要影响,并非温度越高其发泡效果就越好,相反,温度过高会削弱其发泡性能,在 150~170 ℃之间,其发泡性能较为理想。

(2)发泡用水量对沥青发泡性能具有显著影响,随发泡用水量的增大,泡沫沥青的膨胀率逐渐增大,半衰期逐渐减小,用膨胀率与半衰期的趋势线交点或临近点来确定最佳发泡用水量缺乏理论依据。

(3)发泡指数综合考虑了泡沫沥青黏度(膨胀率)与稳定性(半衰期)两方面特性,以其评价沥青发泡性能具有合理性;以衰变过程中的拐点为分界点,

采用分段拟合可获得较为准确的 FI 值。

(4)并非 FI 越大沥青的发泡性能就越好,FI 不能代替膨胀率和半衰期 2 个传统评价指标,应将其作为一种辅助或补充指标,与膨胀率和半衰期相结合共同对泡沫沥青进行合理评价与优化设计。在最佳发泡条件下,泡沫沥青应具有合理的膨胀率与半衰期,同时应具有较高的 FI 值。

参考文献:

[1] 杨虎荣,何桂平,韩海峰.不同黏度沥青的发泡性能比较和机理分析[J].公路,2004(6):107-112.
YANG Hu-rong,HE Gui-ping,HAN Hai-feng. Effect of bitumen viscosity on foamability[J]. Highway,2004(6):107-112. (in Chinese)

[2] 曹翠星,何桂平,邱欣.两种进口沥青衰退方程的比较和机理分析[J].中国公路学报,2005,18(3):32-36.
CAO Cui-xing,HE Gui-ping,QIU Xin. Comparison and mechanism analysis of decay functions of two types of imported bitumens[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(3):32-36. (in Chinese)

[3] 王安麟,程海鹰,汪显栋,等.沥青发泡质量控制方程及其参数化[J].建筑材料学报,2009,12(4):413-417.
WANG An-lin,CHENG Hai-ying,WANG Yu-dong, et al. Quality control equation of asphalt foam and parameterization [J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):413-417. (in Chinese)

[4] JENKINS K J. Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen [D]. Cape Town:University of Stellenbosch,2000.

[5] JENKINS K J,COLLINGS D C,THEYSE H T, et al. Interim technical guidelines(TG2):The design and use of foamed bitumen treated materials [R]. Pretoria: University of Stellenbosch,Loudon International & CSIR Transportek,2002.

[6] SALEH M F. Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2007, 8(2): 99-110.

[7] 拾方治,赫振华,吕伟民,等.沥青发泡原理及发泡特性的试验研究[J].建筑材料学报,2004,7(2):183-187.
SHI Fang-zhi,HE Zhen-hua,Lü Wei-min, et al. Principle and

study of bitumen foaming[J]. Journal of Building Materials, 2004,7(2):183-187. (in Chinese)

[8] 拾方治,马卫民. 沥青路面再生技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2006;207-209.

SHI Fang-zhi,MA Wei-min. Technical manuals of the asphalt renewable pavement [M]. Beijing: China Communications Press,2006;207-209. (in Chinese)