

文章编号:1671-8879(2014)01-0013-05

# 冷再生设备制备不同材料泡沫 沥青工艺参数优化

李珂,焦生杰

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:**基于自主研发的泡沫沥青试验机,为获得常用再生沥青料最优的泡沫沥青发泡特性,设计正交试验,以膨胀比和半衰期为评价指标,分析温度、含水量和压力3因素对泡沫沥青发泡特性的影响。应用FB100泡沫沥青试验机,针对不同材料沥青,进行试验研究。通过正交试验,并对其做方差分析,可以确定不同工艺参数对泡沫沥青发泡特性的重要度,并通过对东海36-1-90<sup>#</sup>沥青的试验对其进行了验证。研究结果表明:针对此泡沫沥青试验机,施工中常用的4种再生沥青:东海36-1-90<sup>#</sup>沥青、中海90<sup>#</sup>沥青、SK90<sup>#</sup>沥青、中海AH-90<sup>#</sup>沥青的最优发泡工艺参数分别为150℃和1.5%含水量、160℃和2.5%含水量、150℃和2%含水量、170℃和2.5%含水量,为其在泡沫沥青冷再生工程施工应用中提供数据依据和参考。

**关键词:**道路工程;发泡特性;膨胀比;半衰期;再生沥青料;沥青发泡

**中图分类号:**U414.75

**文献标志码:**A

## Optimization of process parameters for preparation of different foamed asphalts using cold recycling equipment

LI Ke, JIAO Sheng-jie

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of  
Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** With foamed asphalt testing machine through independent research and development, to obtain the optimum foaming characteristics of commonly recycled asphalt, with the expansion and half-life as evaluation indexes, the influence of temperature, water content and pressure on the foaming characteristics of the foamed asphalt is analyzed through orthogonal test. Different foamed asphalts were performed the experiment using the foamed asphalt testing machine (FB100 type). The importance of different process parameters for foaming characteristics could be determined through analysis of variance in orthogonal research, and the results were verified by experiments on 36-1-90<sup>#</sup> asphalt. The results show that the process parameters for 36-1-90<sup>#</sup> asphalt, 90<sup>#</sup> asphalt, SK90<sup>#</sup> asphalt and AH-90<sup>#</sup> asphalt with the optimum foaming characteristics are 150℃ and 1.5% water content, 160℃ and 2.5% water content, 150℃ and 2% water content, and 170℃ and 2.5% water content respectively, which will provide data reference in recycled foamed asphalt application. 5 tabs, 3 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; foaming characteristic; expansion; half-life; recycled asphalt; foamed asphalt

收稿日期:2013-02-06

基金项目:西安市科技计划项目(CX12180(4))

作者简介:李珂(1981-),女,陕西户县人,工程师,工学博士研究生,E-mail:ake\_xian@126.com。

## 0 引言

截至 2012 年底,中国公路总里程达  $380 \times 10^4$  km, 位居世界第一,其中高速公路里程突破  $7.2 \times 10^4$  km, 位居世界第二。然而,在路面应用中统计发现,其实际使用寿命往往比设计寿命低<sup>[1]</sup>。中国许多新建高速公路在投入使用 2~3 年内便出现车辙、凹凸等破坏形式,继而出现路面松散、坑槽和龟裂等病害,早期破坏严重,许多路面被迫提前进入修复养护阶段<sup>[2]</sup>。采用传统的方法将铣刨下的废旧沥青混合料遗弃,既浪费资源,又会造成环境污染。因此,如何重新利用这些废料,实现成本的节约和环境的保护成为路面养护的一个难题。泡沫沥青冷再生技术为这一难题提供了途径。采用泡沫沥青发生设备,将高温沥青与冷水混合,产生细微的泡沫,使沥青膨胀,与集料混合,得到的沥青混合料能够被应用到沥青路面的摊铺。既节省了工程投资,又保护了环境,经济效益和环境效益显著。

然而,沥青再生技术的研究大多集中于集料配比混合的研究,对于沥青发泡工艺的研究却很少。Lee 通过试验研究了泡沫沥青特性与混合料稳定度的关系<sup>[3]</sup>。何桂平等对影响发泡特性做了研究,但都是基于 Wirtgen 公司的 WLB10 发泡试验机<sup>[4-5]</sup>。基于中国自主研发的泡沫沥青试验机相关的发泡工艺参数研究甚少。为此,本文采用长安大学和中交西安筑路机械有限公司联合开发的 FB100 泡沫沥青试验机,通过设计正交试验,分别对常见泡沫沥青冷再生材料东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青、中海 90<sup>#</sup> 沥青、SK90<sup>#</sup> 沥青、中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青进行工艺参数的试验研究,分析工艺参数对沥青发泡特性的影响,为得到最优发泡特性的泡沫沥青提供参考数据。

## 1 泡沫沥青发泡原理和发泡特性评价

### 1.1 泡沫沥青发泡原理

沥青的发泡过程是在发泡腔内完成的,如图 1 所示。当冷水滴(环境温度)与高温沥青(140 ℃ 以上)接触时,将发生以下连锁反应:热沥青与小水滴表面发生热量(能量)交换,使水滴加热至 100 ℃,同时沥青冷却;沥青传递的热量超过了蒸汽潜能,导致体积膨胀,产生蒸汽,膨胀腔的蒸汽泡在一定压力下压入沥青的连续相;随着溶有大量蒸汽泡的沥青从喷嘴喷出,压缩蒸汽膨胀使沥青形成薄膜状,并依靠薄膜的表面张力将气泡完全裹附,发泡过程中产生的大量气泡以一种亚稳定态的形式存在,泡沫容易破灭<sup>[5]</sup>。

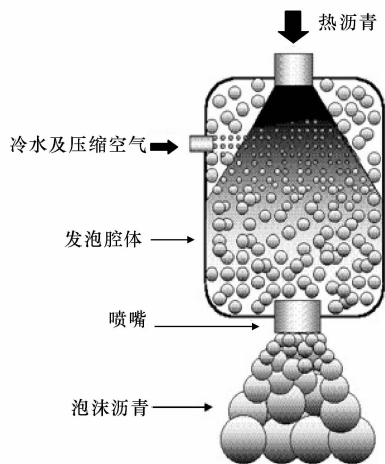


图 1 沥青发泡原理

Fig. 1 Mechanism of foaming of asphalt

### 1.2 发泡特性评价指标

衡量泡沫沥青发泡质量的主要参数是膨胀比和半衰期。膨胀比是最终形成泡沫沥青的最大体积与最初未发泡时沥青的体积之比。膨胀比越大,泡沫沥青与集料的接触就越充分,拌制的泡沫沥青混合料质量就越好。一般泡沫沥青的膨胀比应为 15~20。半衰期为泡沫沥青的体积缩减至其最大体积 50% 时所用的时间,半衰期越长,泡沫越不容易衰减,这样就可与集料有较长的时间进行拌和,从而提高泡沫沥青混合料的质量。半衰期以 s 计,一般半衰期数值在 10~15 s 之间。所以产生泡沫沥青的关键在于控制准确的发泡用水量及获得最佳的膨胀比。

## 2 试验方法和试验方案

### 2.1 试验设备和材料

试验设备采用长安大学和中交西安筑路机械有限公司联合开发的 FB100 泡沫沥青试验机。图 2 为 FB100 泡沫沥青试验机,其技术参数见下页表 1。选用沥青种类:东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青、中海 90<sup>#</sup> 沥青、SK90<sup>#</sup> 沥青、中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青。



图 2 FB100 泡沫沥青试验机

Fig. 2 FB100 foamed asphalt testing machine

表 1 FB100 泡沫沥青试验机技术参数

Tab. 1 Parameters of FB100 foamed asphalt testing machine

沥青发泡能力/(g·s <sup>-1</sup> )	100~200
沥青计量精度/%	±2.5
发泡用水量/%	1.5~2.5
发泡用水量计量精度/%	±12.5
温度工作范围/℃	150~170
气压/kPa	3.0~6.5

2.2 试验方案

在进行试验前,先对沥青进行加热,预设一个较低温度,操作沥青泵加热、管路加热 2 个按钮来控制沥青温度的升降。达到需要的稳定温度后,通过旋转沥青发泡用水量旋钮来标定沥青发泡含水量,旋转气压旋钮来控制气压及水压,并用沥青泵控制沥青流量,控制每次喷出时间为 5 s,沥青量约为 500 g。

在正式试验中,要用自制量筒与量具来进行测量。将发泡产生的泡沫沥青喷入自制量筒中,用量具来测膨胀的高度,计算并确定泡沫沥青的膨胀体积。用秒表来确定泡沫沥青的半衰期,从泡沫沥青膨胀至最高点将要衰减时开始测量,衰减至最大体积的一半处停止测量,用秒表测出的时间间隔即为半衰期时间。

由于试验中的各种条件都可能影响试验结果,因此,每种发泡状态均重复 3~5 次以上,求其平均值,来保证数据的可靠性。

2.3 正交试验设计

在泡沫沥青的制备工艺中,决定泡沫沥青发泡性能的主要工艺因素包括发泡时的压力、沥青发泡温度、发泡用水量(相对于沥青的质量百分比),为了降低试验次数,采用正交试验研究这 3 个工艺参数对泡沫沥青发泡性能的影响。由于前期试验结果表明,水压和气压互相之间有相互影响,只有当水压大于气压,且只大 1 MPa 左右时,才能进行正常的发泡试验。因此将气压和水压进行组合,作为一个影响因素。依据已有的正交试验参照,正交试验表中 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)前 3 列能满足要求,选取发泡时的压力(气压、水压)、沥青发泡温度、发泡用水量作为沥青发泡工艺中的影响因素<sup>[6-7]</sup>。参照经验资料及前期试验结果<sup>[8]</sup>,初步确定分别取因素 A:压力组合 0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa;因素 B:3 种沥青发泡温度 150 ℃、160 ℃、170 ℃;因素 C:发泡用水量(相对于沥青的质量百分比,下同)<sup>[8]</sup>为 1.5%、2.0%、2.5%。因为各因素之间没有交互作用,且因素水平数不相等,故采用拟水平法。泡沫沥青发泡工艺的

因素及水平见表 2,由表 2 可得拟水平正交试验表 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>),首先对东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青进行试验,正交表与试验数据如表 3 所示。

表 2 发泡工艺的因素及水平

Tab. 2 Factors and their levels in foaming process

水平	因素			
	压力组合		发泡温度/℃	发泡用水量/%
	气压/MPa	水压/MPa		
1	0.3	0.4	150	1.5
2	0.4	0.5	160	2.0
3	0.4	0.5	170	2.5

表 3 发泡工艺的拟水平正交试验

Tab. 3 Proposed level orthogonal test of foaming process

工艺 编号	因素					
	压力组合		发泡 温度/℃	发泡用 水量/%	膨胀 比	半衰期/s
	气压/MPa	水压/MPa				
1	0.3	0.4	150	2.5	6.44	36.00
2	0.4	0.5	150	1.5	9.85	36.64
3	0.4	0.5	150	2.0	15.15	19.86
4	0.3	0.4	160	2.0	10.23	28.52
5	0.4	0.5	160	2.5	13.26	20.48
6	0.4	0.5	160	1.5	10.04	33.08
7	0.3	0.4	170	1.5	7.39	22.90
8	0.4	0.5	170	2.0	13.08	17.71
9	0.4	0.5	170	2.5	13.83	14.70

3 试验结果与分析

3.1 膨胀比的指标评价

根据表 3 的试验结果,按照正交试验分析方法,从离差和工程平均 2 个概念入手,计算分析各个因子影响程度及每个因子各种水平的优劣评价。目前评价发泡效果指标主要是膨胀比、半衰期。对泡沫沥青膨胀比试验数据的分析计算,得到膨胀比的方差分析见表 4。

表 4 膨胀比的方差分析

Tab. 3 Variance analysis of expansion

类别	离差平方和 S	自由度 f	均方 S/f	F 值	显著性
A	40.77	1	40.77	15.04	*
B	1.46	2	0.73	0.27	
C	20.93	2	10.47	3.86	
误差 E	8.14	3	2.71		
总和 T	71.30	8			

根据文献[5],查 F 表得  $F_{0.025}(1,3) = 17.44$ ,  $F_{0.05}(1,3) = 10.1$ ,  $F_{0.025}(2,3) = 16.04$ ,  $F_{0.05}(2,3) = 9.55$ 。

其中,  $F_{0.025}(1,3) > F_A > F_{0.05}(1,3)$ ;  $F_B < F_{0.025}(2,3)$ ;  $F_C < F_{0.025}(2,3)$ ;  $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$  分别为

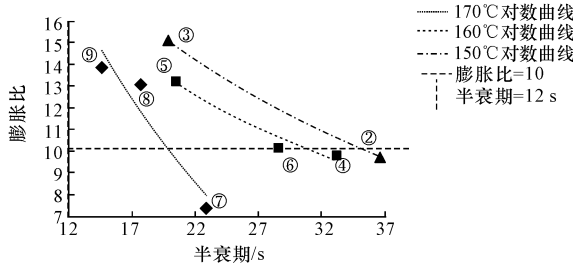
因素 A、B、C 的  $F$  值。

从  $F$  值与临界值相比较,相对来讲因素 A 的影响较大,因素 B、C 均为显著影响。因素重要性的顺序为 A、C、B,由于这里的试验指标是膨胀比,膨胀比越大越好,因此,最优方案为  $A_2C_2B_3$ 。正交表(表 3)中第 8 方案即是此方案。

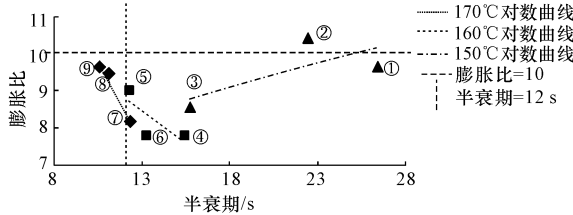
3.2 对半衰期的指标进行分析

同理对半衰期的指标进行判断。从  $F$  值与临界值相比较,相对来讲因素 A 的影响较大,因素 B、C 均无显著影响。因素重要性的顺序为正交表中第 8 方案是此方案。

通过对泡沫沥青发泡特性的 2 个主要评价指标膨胀比和半衰期的分析,判定影响发泡效果的主要因素是压力组合,并通过对正交试验结果的方差分析,判定东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青的最优条件是  $A_2C_2B_3$ 。即气压为 0.4 MPa、水压为 0.5 MPa,沥青温度为 170 ℃,发泡用水量为 2.0%。试验结果表明,利用正交试验能够得到东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青在最佳发泡特性下的的工艺参数。



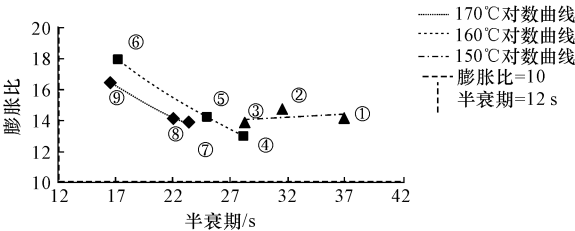
(a) 东海36-1-90<sup>#</sup>沥青发泡特性趋势



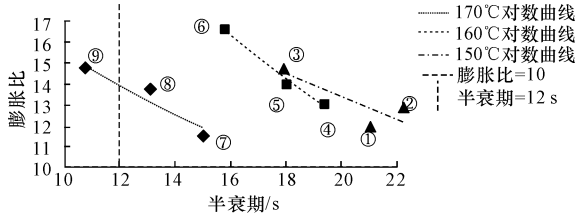
(c) SK90<sup>#</sup>沥青发泡特性趋势

同理,对中海 90<sup>#</sup> 沥青、SK90<sup>#</sup> 沥青、中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青进行发泡特性的试验,根据数据以半衰期为  $x$  轴,膨胀比为  $y$  轴,按对数方程公式,将东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青、中海 90<sup>#</sup> 沥青、SK90<sup>#</sup> 沥青、中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青依次做回归曲线,如图 3 所示。

图中:①~⑨分别代表 9 个工艺状况下所获得的泡沫沥青测试点的膨胀比和半衰期数据。①温度 150 ℃,含水量 1.5%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa;②温度 150 ℃,含水量 2%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa;③温度 150 ℃,含水量 2.5%,气压 0.3 MPa,水压 0.4 MPa;④温度 160 ℃,含水量 1.5%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa;⑤温度 160 ℃,含水量 2%,气压 0.3 MPa,水压 0.4 MPa;⑥温度 160 ℃,含水量 2.5%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa;⑦温度 170 ℃,含水量 1.5%,气压 0.3 MPa,水压 0.4 MPa;⑧温度 170 ℃,含水量 2%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa;⑨温度 170 ℃,含水量 2.5%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa。



(b) 中海90<sup>#</sup>沥青发泡特性趋势



(d) 中海AH-90<sup>#</sup>沥青发泡特性趋势

图 3 不同材料沥青发泡特性趋势

Fig. 3 Foamed asphalt properties' trends of different materials

图 3(a)中所示,①~③为按对数方程式形成的温度 150 ℃下的发泡特性曲线,②和③试验点的数据均为合格,①试验点的数据因为膨胀比过低,因此没有出现在此图中;④~⑥为按对数方程式形成的温度 160 ℃下的发泡特性曲线;⑦~⑨的曲线为按对数方程式形成的温度 170 ℃下的发泡特性曲线;从图 3 并结合数据可看出,对于东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青而言,要使沥青发泡特性满足施工需求(膨胀比大于

10,半衰期大于等于 12 s),除在①、⑦条件下膨胀比无法达到标准,其余条件皆可满足要求。

图 3(b)、(c)、(d)中所示同上。

对于中海 90<sup>#</sup> 沥青,要使沥青发泡特性满足施工需求(膨胀比大于 10,半衰期大于等于 12 s),测试点均可满足指标要求。

对于 SK90<sup>#</sup> 沥青而言,要使沥青发泡特性满足施工需求(膨胀比大于 10,半衰期大于等于 12 s),

测试点均可满足指标要求。由于沥青种类的问题,90<sup>#</sup> 沥青发泡膨胀比不是很好。数据中只有一个条件下膨胀比和半衰期都可达标,即②(含水量 2%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa)。

对于中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青而言,要使沥青发泡特性满足施工需求(膨胀比大于 10,半衰期大于等于 12 s),测试点除⑨(含水量 2.5%,气压 0.4 MPa,水压 0.5 MPa)半衰期过短,不能满足外,其余均可满足指标要求。

将位于膨胀比和半衰期 2 条直线上较大数据的位置找出来,可得出 4 种沥青的最佳发泡条件,见表 5。

表 5 4 种沥青最佳发泡特性

Tab. 5 Optimum foaming characteristics for four kinds of asphalts

沥青种类	发泡 温度/℃	发泡 用水量/%	气压/ MPa	水压/ MPa
东海 36-1-90 <sup>#</sup>	150	1.5	0.4	0.5
中海 90 <sup>#</sup>	160	2.5	0.4	0.5
SK90 <sup>#</sup>	150	2.0	0.4	0.5
中海 AH-90 <sup>#</sup>	170	2.5	0.4	0.5

根据试验得到的的各沥青发泡特性曲线,综合考虑膨胀比和半衰期 2 个因素,选取膨胀比和半衰期都较大时的发泡温度、发泡含水量及气压水压组合,可得出各个沥青的最佳发泡温度和发泡含水量,并以此作为确定泡沫沥青混合料拌制条件的参考依据。

## 4 结 语

(1) 通过引入工程施工中泡沫沥青发泡的主要因素,动压力(气压、水压)、发泡温度、发泡含水量,采用正交试验方法,得到其最优发泡特性的工艺参数。

(2) 基于自主研发的 FB100 沥青发泡试验机对东海 36-1-90<sup>#</sup> 沥青进行发泡试验,验证了正交试验的正确性。

(3) 对施工中常用的 4 种沥青:东海 36-1-90<sup>#</sup>、中海 90<sup>#</sup> 沥青、SK90<sup>#</sup> 沥青、中海 AH-90<sup>#</sup> 沥青进行试验,取得 4 种沥青的最优发泡工艺参数。本文基于中国自主研发的泡沫沥青试验机,对沥青的发泡工艺参数进行研究,不仅为泡沫沥青冷再生设备的工程施工应用提供了可靠的数据依据和参考,更推进了中国冷再生设备的创新及研发。

(4) 创新自主研发的泡沫沥青试验机,并将其应用在施工建设中,下一步需要关注泡沫沥青发泡室

的结构设计,通过研究泡沫沥青的发生过程,对其进行数字化模拟,分析研究物理结构的变化对发泡特性的影响,并对发泡室的结构进行创新设计,从而提高泡沫沥青的发泡效率。

## 参考文献:

### References:

[1] 雒泽华. 沥青路面再生技术在我国的发展应用[J]. 建筑机械技术与管理,2007(7):25-34.  
LUO Ze-hua. Development and application of asphalt pavement recycling technology in China [J]. Construction Machinery Technology & Management,2007(7): 25-34. (in Chinese)

[2] Cheng H Y. The simulation study on pipeline dynamic characteristics of asphalt foaming system[C]//IEEE. International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan;IEEE,2009:1-4.

[3] Lee D Y. Treating marginal aggregates and soils with foamed asphalt [J]. Association of Asphalt Paving Technologists,1981,50(2):211-250.

[4] 何桂平,曹翠星.路面冷再生用沥青的发泡性能影响因素研究[J]. 公路交通科技,2004(10):9-13.  
HE Gui-ping, CAO Cui-xing. Affecting factors about foaming properties for pavement cold recycling asphalt [J]. Highway and Transportation Research,2004(10): 9-13. (in Chinese)

[5] 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.  
SHI Fang-zhi, MA Wei-min. Asphalt pavement recycling technical manual [M]. Beijing:China Communications Press,2006. (in Chinese)

[6] 北京大学数学力学系概率统计组. 正交设计法[M]. 北京:石油化学工业出版社,1976.  
Probability and statistics group of Beijing University mathematical mechanics. Orthogonal design[M]. Beijing: Petrochemical Industry Press,1976. (in Chinese)

[7] 盛骤,谢式千. 概率论与数理统计[ M]. 北京:高等教育出版社,2008.  
SHENG Ju, XIE Shi-qian. Probability theory and mathematical statistics [ M ]. Beijing: Higher Education Press,2008. (in Chinese)

[8] 何佳. 泡沫沥青发泡工艺参数研究[D]. 西安:长安大学,2010 .  
HE Jia. Study on the foaming process parameters of foamed asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University,2010. (in Chinese)