

泡沫沥青发泡特性的影响因素研究

王昊宇^{1*}, 胡国玺^{1#}, 李永波²

¹蜀道投资集团有限责任公司, 四川 成都

²长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年7月28日; 录用日期: 2024年8月19日; 发布日期: 2024年8月29日

摘要

泡沫沥青作为一种新型回收路面材料的沥青胶结料, 其冷再生的生产方式在进行道路的维修和养护时产生的经济效益和环境效益具有独特的循环利用优势和广阔的发展前途。为了评价沥青发泡效果, 本文通过发泡机分别对中海70#沥青、SK70#沥青、镇海90#沥青和SK90#沥青4种基质沥青进行发泡试验, 分析种类、标号、发泡用水量、沥青温度、发泡剂等5个因素对沥青发泡效果的影响, 采用膨胀率与半衰期指标评价沥青的发泡效果。试验结果表明, 发泡用水量和发泡温度是影响沥青发泡特性的最主要因素, 提高发泡用水量和发泡温度能够增加发泡过程中的膨胀率, 但会缩短半衰期; 沥青种类对发泡效果产生影响较大, 不同沥青的最佳发泡条件不同, 但同一标号沥青的最佳发泡条件差异不大; 此外, 发泡剂的掺入能显著提高半衰期。

关键词

道路工程, 泡沫沥青, 发泡特性, 膨胀率, 半衰期

Research on the Influencing Factors of Foaming Properties of Foam Asphalt

Haoyu Wang^{1*}, Guoxi Hu^{1#}, Yongbo Li²

¹Shudao Investment Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 28th, 2024; accepted: Aug. 19th, 2024; published: Aug. 29th, 2024

Abstract

Foam asphalt, as a novel type of recycled pavement material and asphalt binder, offers significant

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王昊宇, 胡国玺, 李永波. 泡沫沥青发泡特性的影响因素研究[J]. 土木工程, 2024, 13(8): 1621-1632.

DOI: 10.12677/hjce.2024.138175

economic and environmental benefits through its cold regeneration production method, making it highly advantageous for recycling and promising for future development. To evaluate the effects of asphalt foaming, this study conducted foaming tests on four types of base asphalt: Zhonghai 70#, SK70#, Zhenhai 90#, and SK90#. The analysis focused on five factors: asphalt temperature, type, grade, foaming water content, and foaming agent. The effectiveness of asphalt foaming was assessed using expansion rate and half-life indicators. The test results indicated that foaming water content and foaming temperature were the most critical factors affecting the foaming characteristics of asphalt. Increasing the foaming water content and foaming temperature enhanced the expansion rate during the foaming process but shortened the half-life. The type of asphalt significantly impacted the foaming effect, with optimal foaming conditions varying across different asphalts. However, there was little difference in optimal foaming conditions for asphalts of the same grade. Additionally, the inclusion of a foaming agent significantly improved the half-life of the asphalt.

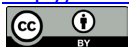
Keywords

Road Engineering, Foamed Asphalt, Foaming Properties, Expansion Rate, Half-Life

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着目前我国沥青路面逐步进入大修及改扩建阶段,产生了大量废旧沥青混合料,沥青路面再生技术随之得到快速发展及应用。泡沫沥青冷再生旧料处理技术具有重复利用道路资源、节省能源、实现绿色可持续发展等众多优势[1][2]。该技术由上世纪50年代Csanyi教授提出,其原理是通过向高温沥青中加入水滴形成蒸汽泡产生连锁反应,增大沥青与集料的接触面积,显著提高沥青混合料的胶合性能[3]。由于其具有粘度低,适用温拌施工的特点,因此,被用于沥青冷再生技术中[4]。

泡沫沥青的发泡特性是影响冷再生沥青及混合料性能的重要因素[5]。Biruk W等研究表明[6],在低温条件下,增加含水量有助于发泡膨胀率,从而利于沥青包裹大骨料,但高含水量在一定程度上会降低马歇尔稳定性。You L等发现[7],发泡温度和夹杂水对混合料的空袭流程,抗拉强度有显著的影响。Diana B等人发现[8]优异的发泡工艺和适当的拌和温度会提高泡沫沥青流变性能。Liu等人[9]研究发现沥青的发泡行为大大改善了沥青与集料之间的相互作用。黄维蓉等[10]对泡沫沥青的发泡效果做出评价,提出采用泡沫直径、尺寸分布来评价发泡效果。Bairgi B K等人[11]发现,发泡过程改变了泡沫沥青的摩擦阻力,降低了弹性流体动力。郝培文等人[12]认为,为了揭示泡沫沥青冷再生混合料的强度损伤机理和形成机理,需要将微观分析与宏观力学相结合。

目前,对于泡沫沥青的研究主要致力于发泡效果对沥青及混合料性能的影响,关于不同沥青材料对发泡效果影响的研究较少。因此本文选取沥青种类、沥青标号、发泡用水量和沥青温度、及发泡剂5种对发泡特性的主要影响因素,分别对中海70#沥青、SK70#沥青、镇海90#沥青和SK90#沥青4种沥青进行发泡效果研究,有针对性地改善不同沥青发泡效果,并在工程中推广使用。

2. 试验材料及试验方案

2.1. 试验材料及仪器

选用中海70#沥青、SK70#沥青、镇海90#沥青和SK90#沥青,根据《公路工程沥青及沥青混合料试

验规程》(JTG E20-2001), 对四种不同基质沥青的主要技术指标进行检测, 测试结果见表 1。

Table 1. Main technical indicators of asphalt

表 1. 沥青主要技术指标

技术指标		中海 70#	SK70#	镇海 90#	SK90#	技术要求	试验方法
针入度(100 g, 5 s)	15	20.0	21.3	23.4	28.7		T0604
	25	64	68	83.4	83		T0604
针入度指数		-1.15	-0.94	-1.83	-1.04	-	T0604
延度(15°C, cm)		>160	>160	>160	>160	≥100	T0605
软化点(°C)		47.8	47.5	45.6	46.2	≥45	T0606
动力粘度(135°C, Pa·s)		0.341	0.371	0.380	0.409		T0620
RTFOT 后残留物							
质量变化(%)		0.312	0.176	-0.087	-0.115	≥245	T0611
残留针入度比(%)		61.2	53.6	66.3	55.3		T0603

采用德国维特根公司生产的 WLB10S 型发泡机, 并配有气压泵装置进行室内试验。该设备操作简单, 是现场泡沫冷再生机器的缩小版, 完全满足室内试验的要求。该设备可以提前检测所用沥青的发泡性能。试验设备如图 1 所示。



Figure 1. Asphalt foaming device
图 1. 沥青发泡装置

2.2. 泡沫沥青制备

制备过程如下:

1) 首先将气泵管道连接至发泡机压缩空气系统, 在气罐与水罐连接器关闭状态下向水罐中注入纯净水, 随后接入气泵和发泡机电源, 打开空气压缩系统开关向气罐中注入压缩空气, 调节水罐压力表为 5 bar, 气罐压力表为 6 bar, 确保沥青正常发泡。

2) 开机后将整个发泡环境进行预热。设置沥青罐、循环泵、喷嘴及循环管道预热温度至 160°C, 将烘热至流动状态的沥青加入沥青罐中, 打开循环泵是沥青在管道中进行循环, 设置沥青发泡温度, 待沥青显示温度达到设置温度后进行发泡试验。若加入的沥青为块状, 应逐步且缓慢对沥青进行加热, 避免

因加热过快产生蒸汽压力。

3) 标定沥青喷射量。按照维特根技术规范要求，沥青一次喷射量应该是 500 g，标定时根据沥青泵转速已经标定的流量，在供水球阀关闭状态下，多次对沥青泵转速进行调整，直至喷出的沥青为 500 g 为止。转速计算见式(1)：

$$\text{所需转速} = \frac{\text{目前转速} * 500}{\text{喷出沥青重}} \quad (1)$$

4) 调整用水量。打开供水球阀，同时按下水喷洒按钮和压缩空气喷射按钮，调节水流量调节阀至所需用水量。

5) 发泡。当沥青温度、沥青泵转速及发泡用水、气压和水压达到测试要求后便可开始对沥青进行发泡试验。发泡时应将泡沫沥青由发泡嘴喷入发泡桶中，用标尺和秒表对沥青膨胀率和半衰期进行测定和综合评价。

2.3. 试验方案

根据上述评价方法中可知沥青发泡时的温度、沥青种类、发泡用水量、发泡剂等因素对沥青发泡效果均存在影响，针对各个因素分别设计发泡试验。

1) 分析不同种类沥青对沥青发泡效果影响。试验选用中海 70#和 SK70#两种沥青，沥青温度分别设置为 155℃、165℃、175℃，发泡用水量分别调整为 1.5%、2%、2.5%、3%。

2) 分析沥青的标号对发泡效果产生的影响。试验选用 SK70#和 SK90#两种沥青，沥青发泡温度分别为 155℃、165℃、175℃，发泡用水量分别为 1.5%、2%、2.5%、3%。

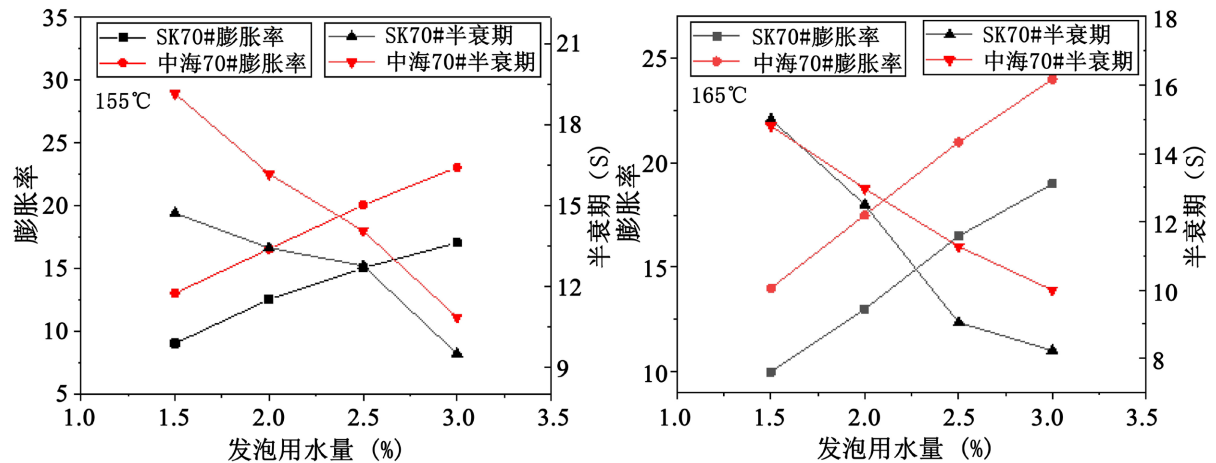
3) 分析沥青温度和发泡用水量对发泡效果的影响。试验选用镇海 90#沥青，沥青发泡温度分别为 155℃、165℃、175℃，发泡用水量分别为 1.5%、2%、2.5%、3%。

4) 分析发泡剂对沥青发泡效果的影响。试验选用 SK90#沥青，并在沥青中直接加入发泡剂，研究发泡剂掺量变化对发泡效果的影响。沥青温度分别为 155℃、165℃、175℃，发泡用水量分别为 1.5%、2%、2.5%、3%。

3. 试验结果分析

3.1. 沥青种类对膨胀率和半衰期的影响

沥青种类对发泡效果的影响试验结果如图 2 所示。



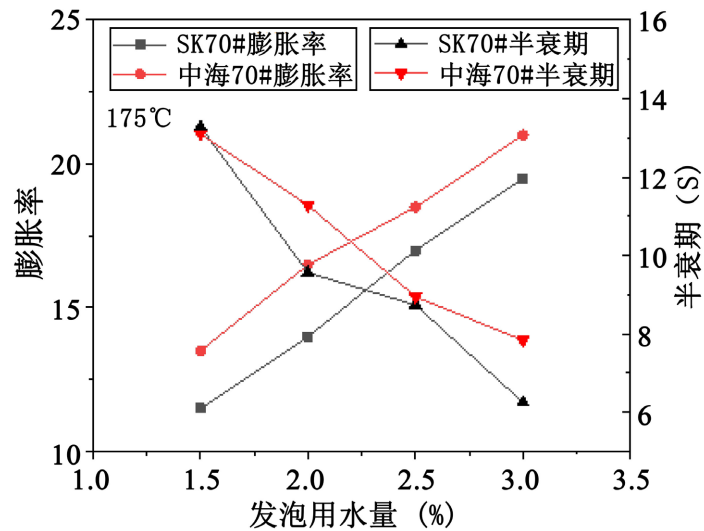


Figure 2. Relationship between asphalt type and foaming index at different temperatures
图 2. 不同温度下沥青种类与发泡指标关系

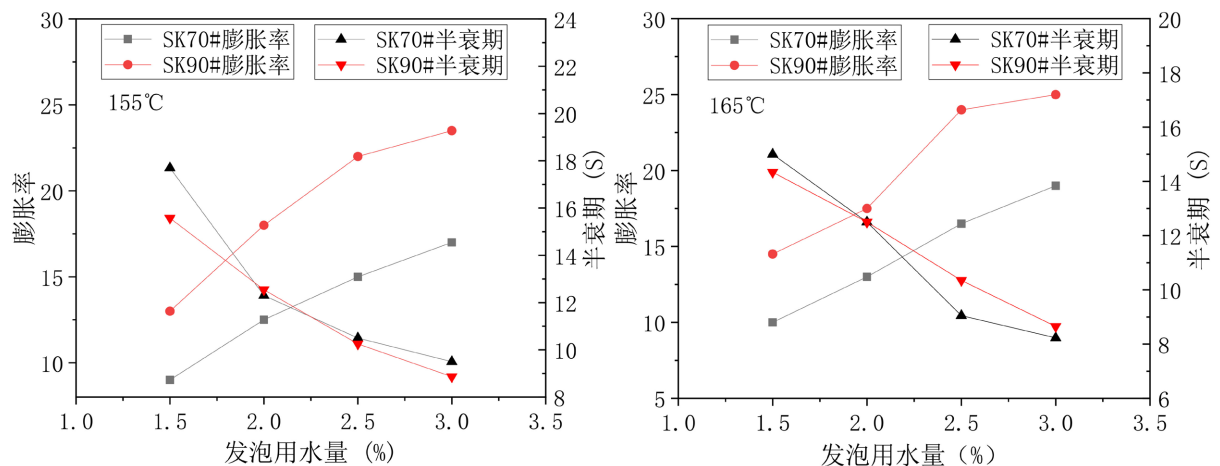
由图 2 可得, 在 155°C、165°C、175°C 三个沥青发泡温度中, 两种沥青的膨胀率和半衰期存在差异, 并且中海 70# 沥青的膨胀率和半衰期均高于 SK70#, 沥青发泡温度的升高和用水量的增加导致两种沥青的半衰期逐渐接近。

在试验选取的三种温度下, 用水量处于 1.5%~3% 之间, 两种基质沥青的膨胀率和半衰期均达到《沥青路面再生技术规程》的试验要求。SK70# 最佳发泡条件为沥青发泡温度 165°C、发泡用水量 2%, 最佳发泡效果为膨胀率 $E = 13$ 、半衰期 $H = 12.5$ s; 中海 70# 沥青最佳发泡条件为沥青温度 165°C、发泡用水量 2%, 最佳发泡效果为膨胀率 17.5、半衰期 12.97 s。上述分析结果表明, 中海 70# 沥青膨胀率优于 SK70# 沥青, 半衰期不存在明显差异。

3.2. 沥青标号对膨胀率和半衰期的影响

标号相同和宏观指标相近的沥青其发泡效果差异也可能较大, 其原因在于沥青的化学组成成分比例不同对于发泡质量有明显影响[13]。

不同温度的 SK70# 和 SK90# 沥青的发泡特征曲线图如图 3 所示。



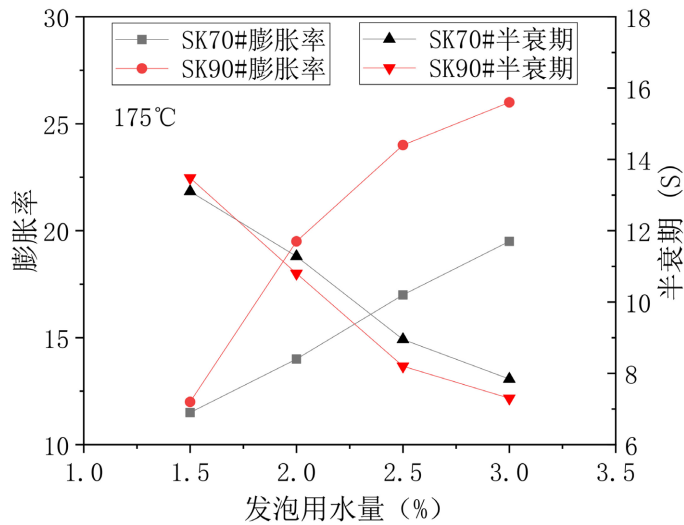


Figure 3. Relationship between asphalt grade and foaming index at different temperatures
图 3. 不同温度下沥青标号与发泡指标关系

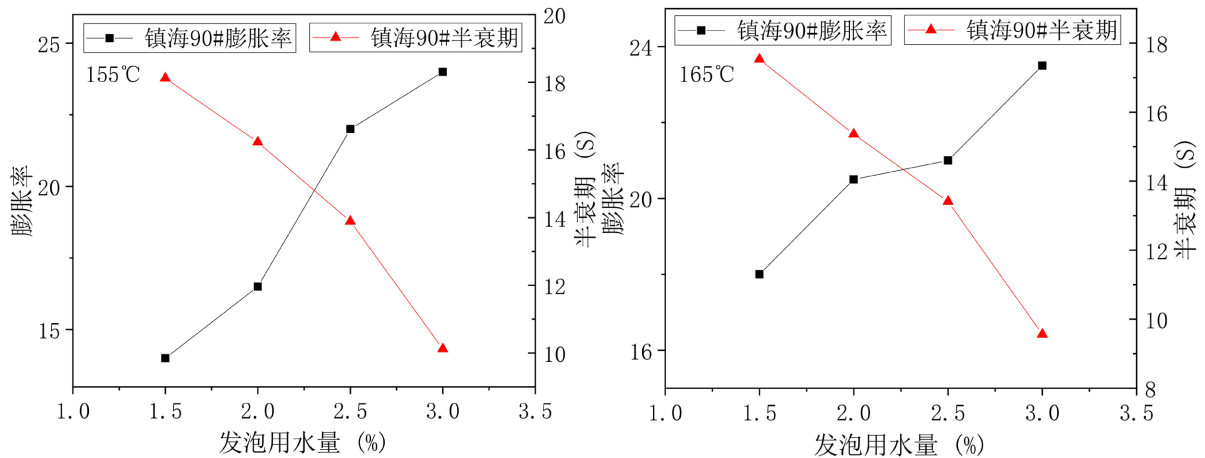
图 3 显示，膨胀率在发泡用水量为 1.5% 时最小，并且随着用水量增长逐渐增长，膨胀率差值随用水量增长逐渐扩大，半衰期随用水量呈递减趋势，半衰期差值逐渐接近于 0。对膨胀率(ER_m)和半衰期(HL)两个泡沫沥青发泡指标进行综合分析，SK90#沥青最佳发泡条件为温度 155℃，用水量 2%，最佳发泡效果为膨胀率 E = 18、半衰期 H = 12.58 s。

对比 SK70#沥青的最佳发泡效果及条件可发现，两种标号的同一品牌沥青发泡效果存在明显差异，SK70#沥青最佳发泡效果为膨胀率 E = 13、半衰期 H = 12.5 s，其膨胀率值和半衰期值均低于 SK90#沥青，表明达到相同的发泡效果 SK90#需要的温度更低，用水量更少。

3.3. 发泡用水量及沥青温度对膨胀率和半衰期的影响

不同温度的镇海 90#沥青发泡特征曲线如图 4 所示。

从图 4 可得，发泡用水量为 1.5% 时，半衰期在各个温度下最大，变化区间为 16.56 s 到 18.12 s，但此时膨胀率最小，变化区间为 13.5 倍到 14 倍；加水量最大为 3% 时，膨胀率最大，变化区间为 23.5 倍到 24 倍，半衰期最小，变化区间为 8.56 s 到 10.12 s。综合各温度及用水量下沥青发泡试验结果，镇海 90#沥青最佳发泡条件为温度 165℃、用水量 2%；最佳发泡效果参数为膨胀率 E = 21 倍，半衰期 H = 13.41 s。



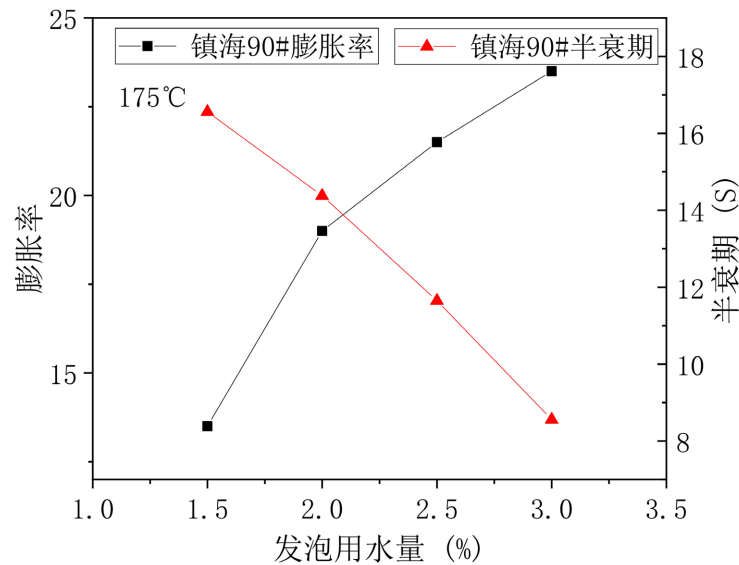


Figure 4. Relationship between asphalt temperature and foaming indexes
图 4. 沥青温度与发泡指标关系

1) 发泡用水量对膨胀率和半衰期的影响

沥青的膨胀率和半衰期与发泡用水量的关系图，见图 5 与图 6。

如图 5、图 6 所示，发泡用水量从 1.5% 升到 3% 的过程中，镇海沥青的膨胀率随温度的升高逐渐增大，这表明发泡用水增加对沥青的发泡其促进作用，但是纵观整个用水量期间的发泡过程，膨胀率在用水量 1.5% 到 2% 时增加最快，超过或者低于这个限度时增加缓慢，这表明适当的用水量可以促进发泡并发泡沥青的稳定，超过这个限度时泡沫沥青热力学系统平衡被打破[14]，虽然用水量的增加促进了发泡，但相对于用水量较低时泡沫破坏过程明显，因此导致膨胀比增速下降，半衰期减小。

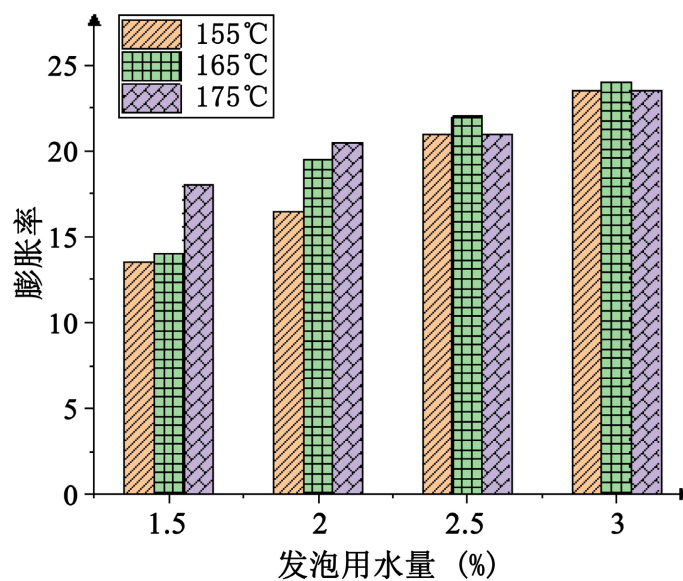


Figure 5. Relationship between foaming water consumption and expansion rate of Zhenhai 90# asphalt
图 5. 发泡用水量与镇海 90# 沥青膨胀率关系图

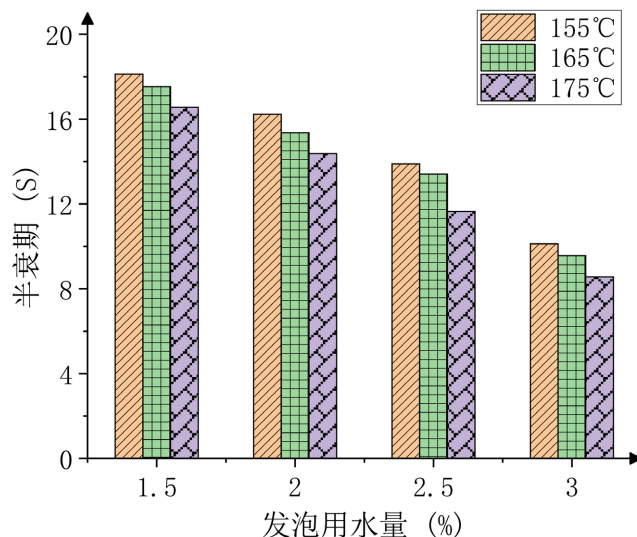


Figure 6. Relationship between foaming water consumption and half-life of Zhenhai 90# asphalt

图 6. 发泡用水量与镇海 90#沥青半衰期关系图

2) 发泡温度对膨胀率和半衰期的影响

根据镇海 90#沥青发泡试验结果, 分别绘制沥青的发泡指标膨胀率和半衰期与沥青发泡温度关系图, 见图 7 和图 8。

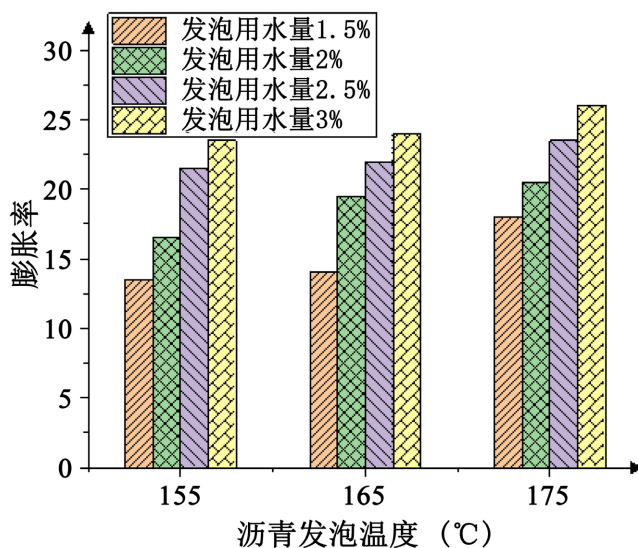


Figure 7. Plot of asphalt foaming temperature versus expansion rate

图 7. 沥青发泡温度与膨胀率关系图

如图 7、图 8 所示, 同一用水量的条件下, 升高温度对于沥青膨胀率和半衰期的影响效果不大。在同一温度下, 增加用水量对膨胀率和半衰期的作用效果明显。由此可见, 发泡用水对沥青发泡指标的影响强于沥青温度。沥青的发泡是一个复杂的热力学过程, 提高沥青温度和增加发泡用水量有助于发泡水气化, 形成气泡, 使得膨胀率增大, 沥青膜的表面张力增大, 根据拉普拉斯方程, 气相与液相之间存在的压力差增大, 使得在 Plateau 边界处的液压小于附近弯曲较小的区域, 从而引起液体从曲率半径小处向

平稳态边界流动，这种液体的流动将使液膜逐渐变薄，当液体膜厚度在 5~10 mm 时，沥青膜发生破裂，这对沥青发泡效果产生了不良影响[15]。

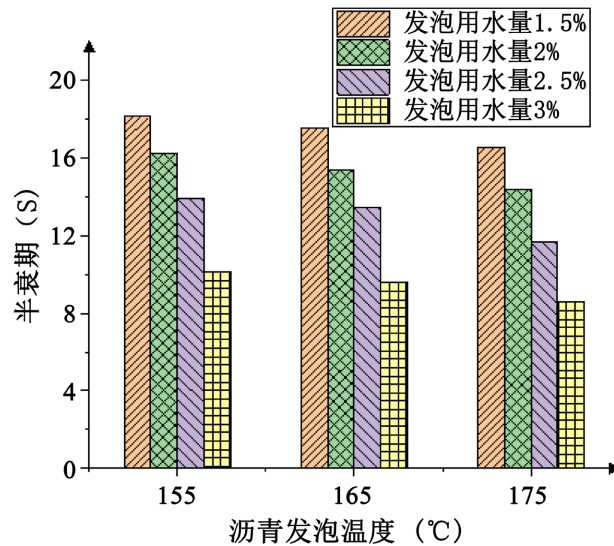


Figure 8. Plot of asphalt foaming temperature versus half-life
图 8. 沥青发泡温度与半衰期关系图

为继续研究沥青温度和发泡用水量对发泡效果影响因素，本小节采用多元方差分析的方式对镇海 90# 沥青的发泡数据结果进行多元方差分析，其中膨胀率(ER_m)和半衰期(HL)响应变量，并预设显著水平 $\alpha = 0.05$ 。镇海 90# 沥青膨胀率和半衰期分析结果见表 2、表 3。

Table 2. Zhenhai 90# asphalt expansion rate analysis of variance results
表 2. 镇海 90# 沥青膨胀率方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
沥青温度	23.292	2	11.6458	16.6	0.0036
用水量	148.667	3	49.5556	70.65	0
误差	4.208	6	0.7014		
总和	176.157	11			

Table 3. Zhenhai 90# asphalt half-life analysis of variance results
表 3. 镇海 90# 沥青半衰期方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
沥青温度	6.702	2	3.3508	70.9	6.689E-05
用水量	105.639	3	35.2129	745.11	4.192E-08
误差	0.284	6	0.0473		
总和	112.624	11			

根据表 2 和表 3 中沥青发泡温度和用水量对膨胀率和半衰期产生影响的方差分析结果，发现沥青温度及用水量两个因素对应 F 值的显著性概率均远小于 0.05，表明沥青发泡温度和用水量均对沥青的膨胀率和半衰期产生显著影响。

3.4. 发泡剂对膨胀率和半衰期的影响

发泡性能好的沥青产生的沥青泡沫均匀、稳定，比表面积显著增大，促进沥青在再生混合料中均匀分布并与矿料充分拌和，有助于提高混合料的抗疲劳性能[16]。为有效改变部分沥青发泡效果不理想的情况，可通过直接在沥青或者发泡水中添加表面活性剂的方式，提高沥青的发泡性能。添加阳离子发泡剂的方式有溶解到水中和直接添加到沥青罐。直接在水中添加发泡剂的形式会增加沥青的膨胀率，然而半衰期会有所减小，对混合料的拌和有不利影响[17][18]。因此将发泡剂直接添加到沥青中，研究发泡剂对沥青发泡性能的影响。

参照上述 SK90#基质沥青的最佳发泡沥青温度 165℃，设置沥青发泡温度不变，改变发泡剂的掺量和发泡用水量。发泡剂掺量为沥青质量的 0.1%、0.2%、0.3%，发泡用水量为 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%。发泡剂对沥青发泡膨胀率、半衰期的影响见图 9、图 10。

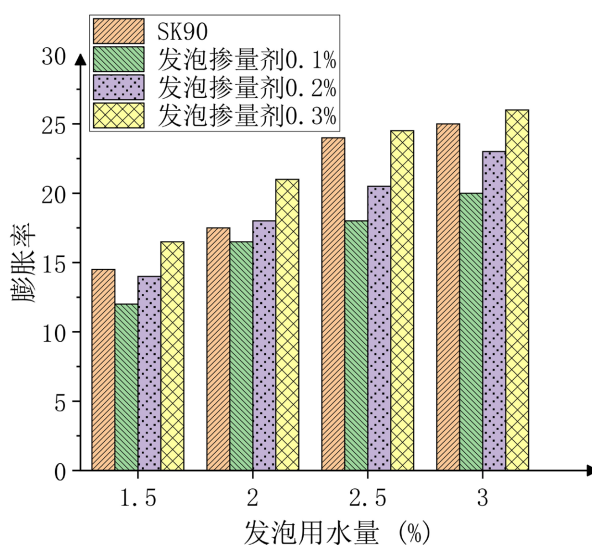


Figure 9. Effect of blowing agent on asphalt expansion rate
图 9. 发泡剂对沥青膨胀率的影响

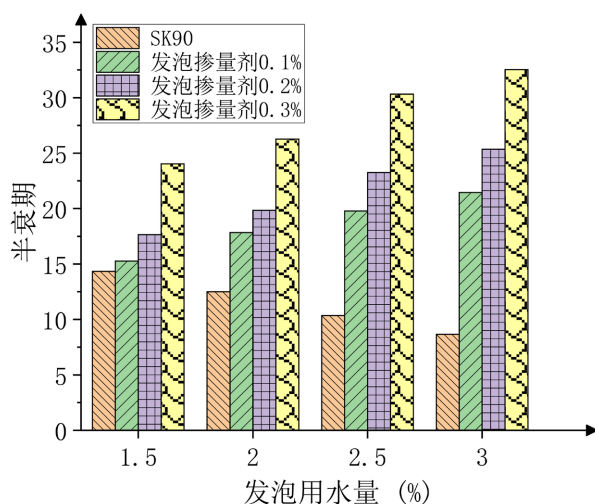


Figure 10. Effect of blowing agent on the half-life of asphalt
图 10. 发泡剂对沥青半衰期的影响

由图 9、图 10 可知, 随发泡剂掺量的增加, 沥青的膨胀率逐渐超过基质沥青, 并且增加发泡用水可促进沥青发泡。掺加发泡剂之后沥青的半衰期增大, 说明发泡剂对于提高延长半衰期具有促进作用, 并且发泡用水量越大半衰期增长时间越长。沥青在发泡温度为 175℃, 用水量为 3%, 发泡剂掺量为 0.3% 时发泡效果最佳, 膨胀率为 26 倍, 半衰期为 32.54 s, 膨胀率较基质沥青相比增长不大, 半衰期提高 2 倍以上。

4. 结论

1) 不同种类沥青在相同的发泡条件下有不同的发泡效果, 相较于 SK70# 沥青, 中海 70# 沥青的膨胀率较高, 但半衰期无显著差异。此外, 两种沥青的最佳发泡条件相同, 发泡温度为 165℃, 发泡用水量为 2%。

2) 对比 SK70# 和 SK90# 沥青发泡效果发现, 沥青的标号对发泡性能和发泡条件产生较大影响。由于 90# 沥青的粘度较 70# 沥青小, 因此相比之下发泡膨胀率 90# 高于 70# 沥青, 并且达到最佳发泡效果的温度也低于 70# 沥青。

3) 同一用水量下升高温度或同一温度增加用水量时, 可以使发泡水膨胀的体积增大, 沥青膨胀率呈增长趋势, 同时增加发泡速率, 提高沥青的发泡效果。但泡沫沥青半衰期随温度和用水量的增加均减小, 通过方差分析的方式同样证明了沥青温度和发泡用水量均对沥青的膨胀率和半衰期产生显著影响。

4) 将发泡剂直接加入至沥青中会对膨胀率有一定的负面影响, 但在该影响下依然符合规范要求, 半衰期在该发泡剂影响下, 随温度和用水量的增加呈增长的趋势。

参考文献

- [1] 董明渊, 吕征. 泡沫沥青就地冷再生技术在石家庄周边地区的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(7): 46-48.
- [2] 马涛, 栾英成, 何亮, 等. 乳化沥青与泡沫沥青冷再生技术发展综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 1-23.
- [3] Turk, J., Mauko Pranjić, A., Mladenović, A., Cotič, Z. and Jurjavčič, P. (2016) Environmental Comparison of Two Alternative Road Pavement Rehabilitation Techniques: Cold-in-Place-Recycling versus Traditional Reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, **121**, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.040>
- [4] 韦万峰, 孔令云, 禰炜安, 等. 沥青发泡特性及其温拌混合料水分敏感性研究[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-17. <https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230841>, 2024-08-27.
- [5] 周雯怡, 易军艳, 陈卓, 等. 泡沫沥青冷再生混合料界面黏附性提升原理与路用性能验证[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 37-45.
- [6] Hailesilassie, B.W., Hugener, M. and Partl, M.N. (2015) Influence of Foaming Water Content on Foam Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, **85**, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.071>
- [7] You, L., You, Z., Dai, Q., Guo, S., Wang, J. and Schultz, M. (2018) Characteristics of Water-Foamed Asphalt Mixture under Multiple Freeze-Thaw Cycles: Laboratory Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002474](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002474)
- [8] Sánchez, D.B., Airey, G., Caro, S. and Grenfell, J. (2019) Effect of Foaming Technique and Mixing Temperature on the Rheological Characteristics of Fine Rap-Foamed Bitumen Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, **21**, 2143-2159. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593228>
- [9] Liu, S., Zhou, S. and Peng, A. (2020) Comparison of Performance Characterization of Asphalt Mastic Prepared by Foamed and Unfoamed Asphalt Binders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **144**, 657-669. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09507-z>
- [10] 黄维蓉, 任海生. 基于非接触式方法的沥青发泡评价指标研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(9): 43-47.
- [11] Bairgi, B.K., Mannan, U.A. and Tarefder, R.A. (2019) Influence of Foaming on Tribological and Rheological Characteristics of Foamed Asphalt. *Construction and Building Materials*, **205**, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.009>

- [12] 郝培文, 李志刚, 徐金枝. 泡沫沥青冷再生技术发展展望[J]. 山西交通科技, 2022(3): 1-7, 34.
- [13] 仇银吉. 沥青路面再生技术的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [14] 于泳潭. 基于水稳拌合站的泡沫沥青冷再生技术研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [15] 徐金枝. 泡沫沥青及泡沫沥青冷再生混合料技术性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [16] 王海成, 金娇, 刘帅, 等. 环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2137-2169.
- [17] 陶卓辉, 沈士惠, 孙杨, 等. 表面活性泡沫沥青发泡工艺及流变特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 41-49.
- [18] 李永波. 泡沫沥青冷再生技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.