

抗剥落剂对泡沫沥青冷再生混合料水稳定性能改善研究

李秀君, 代 鹏, 高世柱, 李 宇, 邓轻松

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 由于泡沫沥青冷再生路面水稳定性能较差, 掺加抗剥落剂可以有效改善普通沥青路面的抗水损能力, 针对此问题探究向泡沫沥青冷再生混合料中掺加抗剥落剂来提高其水稳定性能的可行性。以一种非胺类抗剥落剂为研究对象, 对不同抗剥落剂掺量下的沥青进行发泡试验和 3 大指标试验, 对泡沫沥青冷再生混合料进行相关水稳定性试验。结果表明: 抗剥落剂的最佳掺量为沥青质量的 0.5%, 掺加抗剥落剂后, 在标准试验条件下, 沥青的针入度增大, 延度和软化点降低, 泡沫沥青冷再生混合料的水稳定性能明显提高, 空隙率减小了 3%, 浸水残留稳定度比和 5 次冻融循环后的强度比均提高 10% 以上。

关键词: 泡沫沥青; 抗剥落剂; 空隙率; 浸水马歇尔试验; 冻融循环试验

中图分类号: U 414 文献标志码: A

Improvement on water loss resistance of foamed asphalt cold recycled mixture by anti-stripping agent

LI Xiujun, DAI Peng, GAO Shizhu, LI Yu, DENG Qingsong

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Water resistance performance of the foamed asphalt cold recycled pavement is insufficient. The anti-stripping agent can effectively improve the water loss resistance of the ordinary asphalt pavement. The feasibility of adding anti-stripping agent to the foamed asphalt cold recycled mixture for the improvement of water resistance was explored. A non-amine anti-stripping agent was used as the research object. The asphalt with different anti-stripping agents was tested for foaming and three major indices. The mixture was tested for relevant water stability tests. The results show that the optimum amount of anti-stripping agent is 0.5% of asphalt on a weight basis. After the addition of the anti-stripping agent, under the standard test conditions, the elongation and softening point is reduced, and the penetration of the asphalt is increased. The water loss resistance of the foamed asphalt cold recycled mixture is obviously improved, and the residual stability ratio and the strength ratio after five freeze-thaw cycles are increased by more than 10%.

Keywords: foamed asphalt; anti-stripping agent; porosity; immersion Marshall test; freeze-thaw

收稿日期: 2019-12-19

基金项目: 住房城乡建设部 2018 年科学技术项目计划 (2018-K9-062)

第一作者: 李秀君 (1976-), 女, 副教授。研究方向: 沥青路面结构与路面材料。E-mail: 363096289@qq.com

splitting test

泡沫沥青冷再生技术是我国沥青路面大中修工程实现路面结构转换的重要方式之一^[1], 在国内外高速公路大中修工程中, 泡沫沥青冷再生混合料已得到广泛应用^[2]。但是由于不同地区的气候条件、地形特点和原材料分布的客观差异, 造成泡沫沥青冷再生混合料在很多关键问题上并没有达成共识, 各地方也没有颁布统一的技术规范。因此, 对这类问题的研究仍处于探索阶段。大量工程实践表明, 水损害是泡沫沥青冷再生路面最严重的病害之一, 部分道路水损害的占比甚至达到 80% 以上^[3]。从泡沫沥青冷再生混合料的水稳定性试验中发现, 试件破坏的地方大都是胶结料以及胶结料与铣刨料的界面^[4]。分析其主要原因是该混合料中沥青含量较低, 导致胶结料的粘附性偏弱, 空隙率较大, 路面易出现早期裂缝, 水顺着裂缝进入后会导致细集料流失, 破坏原级配, 导致一系列问题, 最终形成混合料早期破坏。国内外关于泡沫沥青冷再生混合料水稳定性能的研究较少, 但关于普通沥青混合料水稳定性能的研究已经较为成熟, 向沥青中加入抗剥落剂是一种较为有效的方法。彭丹丹等^[5]研究了掺加胺类与非胺类抗剥落剂后混合料的耐久性; 朱建勇等^[6]通过分子动力学理论研究了抗剥落剂与沥青的相容性; 魏建明等^[7]通过表面自由能理论来评价沥青混合料的水稳定性能的强弱。本文通过空隙率、浸水马歇尔和冻融循环试验探究向泡沫沥青冷再生混合料中加入抗剥落剂来提高其水稳定性能的可行性, 结合试验结果确定抗剥落剂的最佳掺量, 对工程应用提供一定的参考。

1 配合比设计

1.1 级配

本试验采用的沥青路面铣刨料(reclaimed asphalt pavement, RAP)来源于嘉兴某高速公路大中修工程, 通过冷铣刨法获取, 各项性能满足规范要求, RAP 中的沥青含量为 4.3%。将 RAP 筛分后逐档称取, 级配参考《公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规范》(DB33/T 715-2018)^[8]的级配中值, 具体级配曲线如图 1 所示。

1.2 最佳发泡条件的确定

采用德国 Wirtgen 公司生产的 WLB 10 S 型室

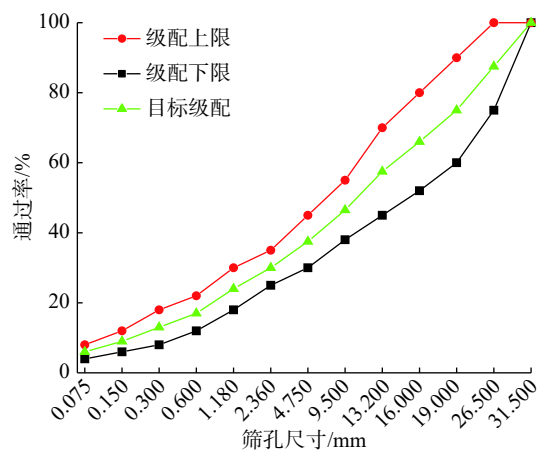


图 1 泡沫沥青冷再生混合料级配
Fig. 1 Foamed asphalt cold recycled mixture grading

内发泡机研究沥青的发泡性能, 该设备可以严格控制发泡时的温度、水压和气压。沥青选择市面常见的镇海牌 A 级 70#沥青。发泡温度和用水量是影响沥青发泡性能的主要因素, 以用水量为横坐标, 膨胀率和半衰期为左右纵坐标, 研究各个温度下 70#沥青发泡情况, 具体发泡结果如图 2 所示。数据表明, 膨胀率和半衰期呈负相关增长, 在 3 种沥青温度下, 过高或过低的用水量无法同时兼顾膨胀率和半衰期两个指标, 用水量为 2.5% 最为合适, 温度为 160 ℃ 时, 发泡效果明显优于其他两个温度。综上所述, 镇海牌 A 级 70#沥青的最佳发泡条件为发泡温度 160 ℃ 和用水量 2.5%, 发泡水压与气压对发泡性能影响较小, 根据相关经验定为 0.5 MPa 和 0.4 MPa。在上述最佳发泡条件下, 发泡结果为: 膨胀率为 18.5>10(倍), 半衰期为 16.5>8(s)。

1.3 最佳拌和用水量和水泥剂量确定

为了确定混合料的最优含水率, 将烘干的铣刨旧料、水泥和石屑按拟定比例搅拌后进行重型击实试验, 数据结果如图 3 所示。由图 3 可知最佳含水量为 6.0%。研究表明, 拌合过程中的实际用水量与最佳含水率之间存在一定的系数关系, 国内外学者给出了几种参考意见^[9-11]。由表 1 可得, 多数学者认为拌合用水量应为最佳含水率的 70%~80%, 结合相关工程经验以及集料本身的干湿情况, 确定本次试验拌合过程中的实际用水量应为最佳含水率的 80%, 则最佳拌合用水量为 4.8%。表中: W_{add} 为需加入集料中的含水量, %;

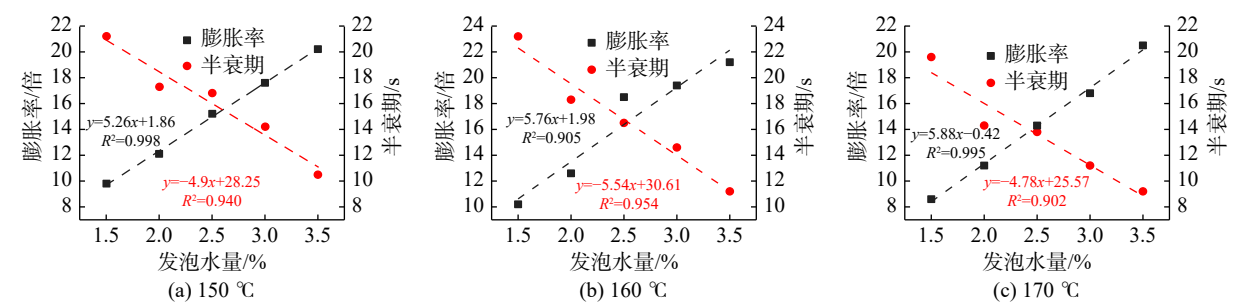


图2 沥青发泡结果

Fig.2 Asphalt foaming results

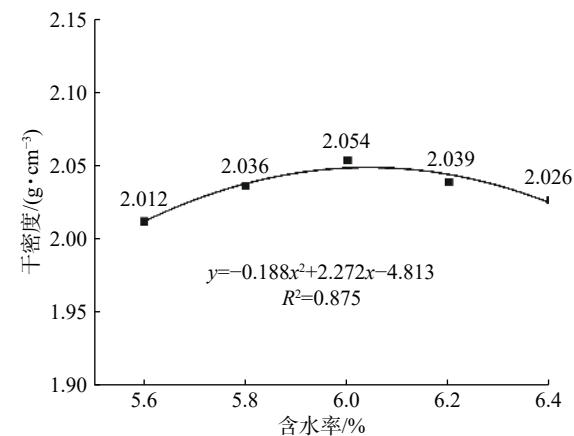


图3 击实曲线

Fig.3 Compaction curve

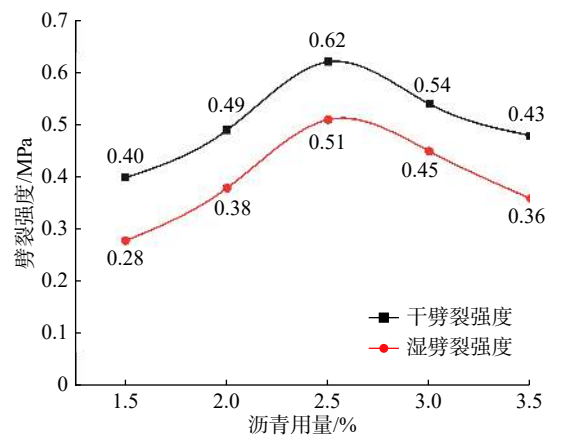


图4 最佳沥青用量

Fig.4 Optimum asphalt dosage

表1 典型的最佳拌和用水量与最佳含水率之间的关系

Tab.1 Relationship between the typical optimum mixing water consumption and the optimum moisture content

研究机构与学者	最佳拌合用水量范围
美孚石油公司 ^[9]	最佳拌合含水量的70%~80%范围内
拾方治 ^[10]	最佳含水量的80%
Witgen公司 ^[11]	经验公式 $W_{\text{add}}=W_{\text{omc}}-W_{\text{moist}}-W_{\text{reduce}}$

W_{omc} 为最佳含水量, %; W_{moist} 为集料中的含水量, %; W_{reduce} 为水分的减少量, 其取值为 $0.3W_{\text{omc}}-0.6, \%$ 。

采用普通硅酸盐水泥, 符合 JTG/T F20 的技术指标, 根据规范要求 and 以往工程实例, 水泥用量确定为 1.5%。

1.4 最佳泡沫沥青用量确定

采用马歇尔击实仪, 在 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0% 和 3.5% 的泡沫沥青用量下成型标准试件, 在 40 °C 鼓风烘箱内养生 72 h 后进行干、湿劈裂试验。为了减小试验的变异性, 每种泡沫沥青用量成型 8 个试件(干、湿劈裂分别 4 个), 试验结果如图 4 所示。结果表明, 过高或过低的沥青用量会削弱试件的干、湿劈裂性能, 泡沫沥青用量为

2.5% 时, 干、湿劈强度均达到最大值, 则混合料的最佳沥青用量为 2.5%。在此用量下, 试件的干劈裂强度为 0.61 MPa, 大于 0.5 MPa, 干、湿劈裂强度比为 77.5%, 小于 80%, 水稳定性能需要提高。

2 抗剥落剂对沥青和泡沫沥青混合料性能的影响

采用南通某公司生产的非胺类抗剥落剂, 其主要成分是磷羟基有机物, 是一种深褐色的黏稠液体, 适用于普通沥青及高分子改性沥青, 是工程中道路排水部位材料常用的添加剂。此抗剥落剂通过物理吸附或者形成化学键等方式, 可以显著改善沥青与石料特别是酸性石料的粘附性能。但泡沫沥青冷再生混合料中的集料被旧沥青包裹, 掺加抗剥落剂的泡沫沥青很难与集料接触, 下文将探究此类抗剥落剂能否对泡沫沥青冷再生混合料性能起到改善作用。

2.1 沥青性能

向沥青中掺加几种不同剂量的非胺类抗剥落剂, 根据抗剥落剂生产商的推荐范围, 抗剥落剂掺量分别为沥青质量的 0.3%, 0.5%, 0.7 % 和 1.0%

4 种, 对这 4 种沥青分别进行性能检测, 试验结果如表 2 所示。结果表明, 随着抗剥落剂掺量的增加, 在标准测试条件下, 沥青的针入度增大, 延度和软化点降低。究其原因是因为, 抗剥落剂分子量较小, 沥青中添加抗剥落剂后轻质组分含量增多, 使得分子运动能力相对增强, 造成沥青对外界温度和氧气含量变化的敏感性较强^[12], 提升沥青的耐老化性能。

表 2 不同抗剥落剂掺量下沥青性能检测结果
Tab.2 Test results for asphalt performance with different additions of anti-stripping agents

检测项目	非胺类抗剥落剂掺量/%					规范要求
	0	0.3	0.5	0.7	1.0	
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	60	63	65	66	67	60~80
延度(15 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	≥100	≥100	≥100	≥100	97	—
软化点(环球法)/℃	62	59	57	55	54	≥46
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.037					—

2.2 泡沫沥青性能

不同抗剥落剂掺量下沥青的发泡效果如图 5 所示。结果表明, 掺加抗剥落剂对沥青的发泡效果有一定程度的削弱, 且随着抗剥落剂掺量的增加, 膨胀率和半衰期均逐渐降低, 但总体削弱程度不大, 仍满足规范要求。这是由于抗剥落剂是黏稠液体, 抗剥落剂掺量越大, 沥青的黏稠度越大, 需要更高的温度使沥青达到相应的流动性; 在泡沫沥青衰减的过程中, 沥青黏稠度增大抑制泡沫的形成, 表现为泡沫沥青膨胀率和半衰期的减小^[13]。

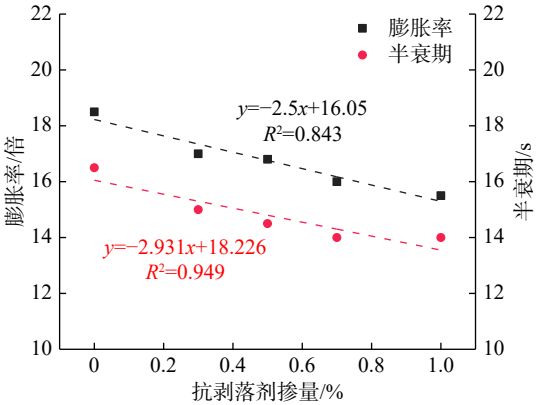


图 5 抗剥落剂对沥青发泡性能的影响
Fig. 5 Effect of anti-stripping agent on foaming performance of asphalt

2.3 混合料水稳定性

2.3.1 空隙率

由于温差变化、降雨等因素的影响, 沥青路面上会存在一层水膜。相关调查显示, 车辆普遍出现超载和重载化现象, 致使沥青路面上面层出现许多微小裂缝。车辆行驶经过这些裂缝时, 轮胎表面的凸起块与表层发生碰撞, 腔内的水被迅速压缩, 形成的正高压水流从面层的微小裂缝中挤压进去, 达到泡沫沥青冷再生层时, 具有正高压的水流会沿着空隙迅速扩散, 如图 6(a) 所示。随着轮胎不断滚动, 腔内的水被进一步压缩, 当轮胎表面的凸起与面层分离时, 空气快速流入导致腔内形成一定程度的真空状态, 使被压缩进去的水被抽离内部结构, 形成负高压水流, 如图 6(b) 所示。这一过程进一步冲刷裂缝, 并且在抽离过程中会带离部分细集料, 破坏原有级配。重复的

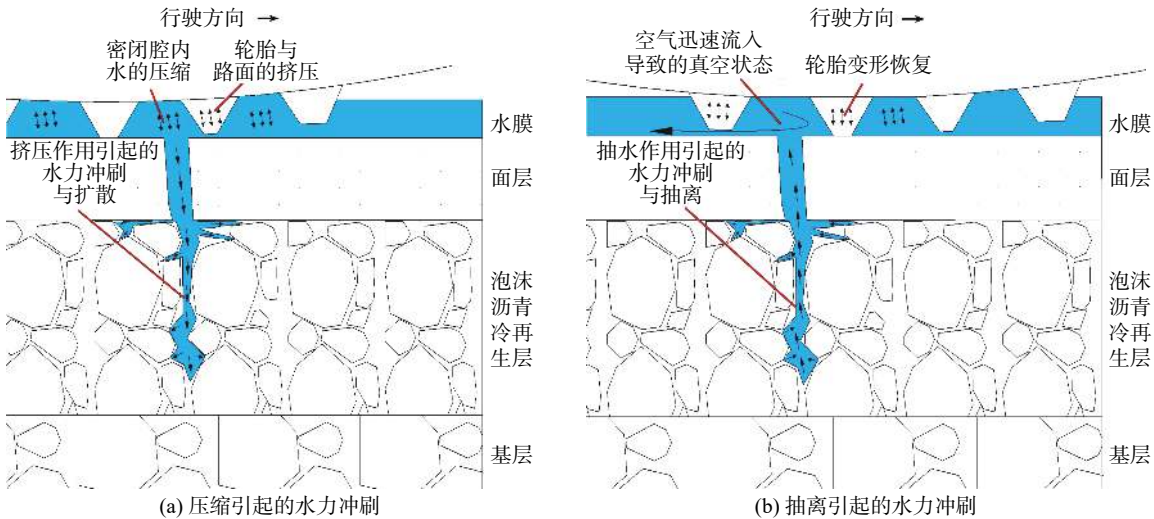


图 6 车辆轮胎与面层相互作用引起的水力冲刷和扩散
Fig.6 Hydraulic scouring and diffusion caused by the interaction of vehicle tires and surface layers

过程导致空隙率越来越大,从面层流入的水越来越容易在泡沫沥青层扩散,最终造成严重的路面水损害害。

分析可知,控制泡沫沥青冷再生层的空隙率可以有效缓解从裂缝中被挤压进入的水的扩散,从而延缓水损病害的发生。向沥青中掺加抗剥落剂后进行发泡,成型标准马歇尔试件,然后采用表干法和真空法计算出试件的空隙率,试验结果如表3所示。结果表明,掺加抗剥落剂可以有效改善胶结料的粘附性,使得细集料更好地填充进粗集料骨架中的缝隙,进而减小泡沫沥青冷再生混合料的空隙率;掺量为0.3%,0.5%和0.7%时效果较优,未掺抗剥落剂与0.5%掺量成型试件的对比图如图7所示,改善效果较明显。

表3 不同抗剥落剂掺量下泡沫沥青冷再生混合料的空隙率
Tab.3 Effects of different additions of anti-stripping agents on the porosity of foamed asphalt cold recycling mixtures

非胺类抗剥落剂掺量/%	0	0.3	0.5	0.7	1.0
空隙率/%	10.5	8.1	7.5	8.3	9.0

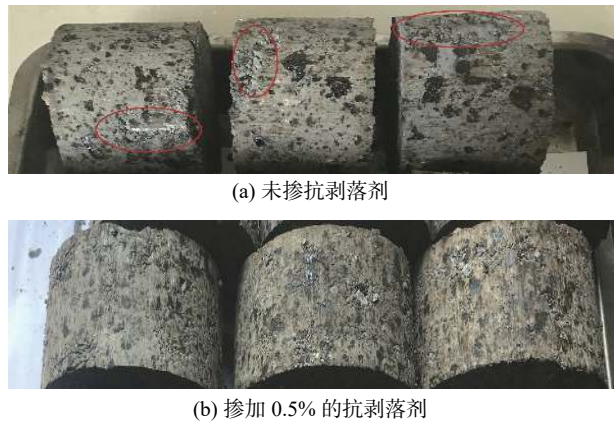


图7 马歇尔试件外观对比图

Fig.7 Marshall test piece appearance comparison chart

2.3.2 浸水马歇尔试验

向沥青中掺加抗剥落剂后进行发泡,成型标准马歇尔试件。养生后将制备好的试件分为两组,一组浸入60℃水中0.5h后测其稳定度,另一组浸入60℃水中48h后测其稳定度。每组按规范做4个试件来减小变异性,试验结果如表4所示。马歇尔稳定度、浸水残留稳定度比(MS_0)与抗剥落剂掺量的关系见图8。

试验数据的变异系数不大,结果表明:未掺加抗剥落剂时,混合料的力学性能满足使用要求,但浸水残留稳定度不满足规范;掺加抗剥落

表4 抗剥落剂对混合料水稳定性能的影响
Tab.4 Effect of anti-stripping agent on water loss resistance of mixture

检测项目	非胺类抗剥落剂掺量/%					规范要求
	0	0.3	0.5	0.7	1.0	
稳定度/kN	1	11.3	11.7	11.2	13.5	11.6
	2	10.9	11.2	13.2	13.2	11.8
	3	10.3	12.0	13.6	12.8	13.1
	4	11.5	13.9	14.0	11.7	13.5
变异系数/%	4.17	8.38	8.28	5.33	6.52	—
稳定度平均值/kN	11.0	12.2	13.0	12.8	12.5	≥5
浸水48 h后 稳定度/kN	1	8.0	9.0	10.9	10.8	9.2
	2	7.6	9.2	10.4	10.0	8.8
	3	9.0	9.6	11.9	9.9	10.6
	4	9.4	11.8	12.8	13.3	11.4
变异系数/%	8.56	11.29	8.04	12.48	10.49	—
稳定度平均值/kN	8.5	9.9	11.5	11.0	10.0	—
MS_0	0.773	0.811	0.885	0.859	0.800	≥0.8

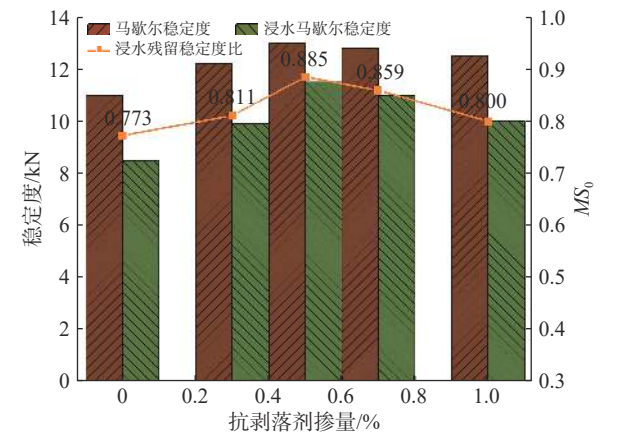


图8 残留稳定度比与抗剥落剂掺量关系图
Fig. 8 Relationship between stability, MS_0 and anti-stripping agent dosage

剂后,混合料的力学性能和水稳定性能均明显提高,且掺量为0.5%时最为明显,在此掺量下,力学指标与浸水残留稳定度比达到峰值。究其原因,抗剥落剂可以提高沥青与矿料的接触程度,减小接触角,使得沥青在矿料表面的铺展程度得到改善。沥青在矿料表面的铺展程度越大,机械粘附力就越大,表现为水稳定性的提高。

2.3.3 冻融循环试验

冻融劈裂试验也是检验泡沫沥青冷再生混合料水稳定性的一种常用方法。试件养护完成后,在25℃水中放置0.5h,然后在真空状态下保持15min,然后使试件在-18℃的低温和25℃的水浴中交替放置12h,每次循环后测其劈裂强度。

经受5次循环后的试件与实际路面的使用情况更加相似,对泡沫沥青冷再生混合料水稳定性的评价也更为准确。通过上述办法完成冻融劈裂试验,试验结果如图9所示。

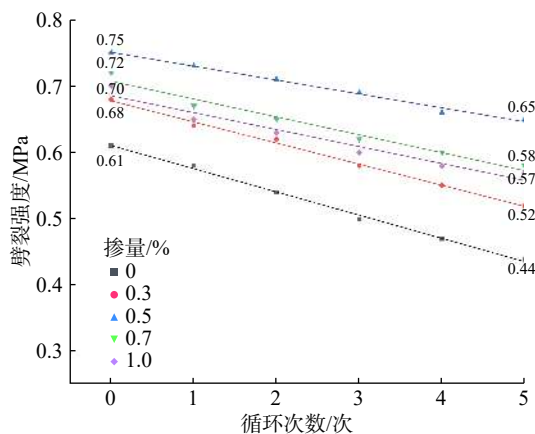


图9 掺加抗剥落剂后的冻融循环试验

Fig.9 Freeze-thaw cycle test after adding anti-stripping agent

数据显示:每次冻融循环后,混合料的劈裂强度均在一定程度上降低,未掺加抗剥落剂时下降得最快;5次冻融循环后的劈裂强度比仅为72.1%,小于75%,水稳定性能不足;3种抗剥落剂掺量下的泡沫沥青混合料,在5次冻融循环后的强度比分别为76.5%,86.7%和80.6%,混合料的力学性能和水稳定性能均有大幅增强,且掺量为0.5%时效果最好。

综合上述试验结果,添加抗剥落剂可以有效提高泡沫沥青冷再生混合料的水稳定性能。这是因为试件在破坏时大多是胶结料和胶结料与铣刨料的界面发生破坏,集料本身并无破坏迹象。而加入抗剥落剂后,沥青的黏度变大,与水 and 水泥混合能有效改善胶结料性能,减小空隙率,并且大幅提高沥青在矿料表面的铺展程度,从而提高混合料的水稳定性能。

3 结束语

为了提高泡沫沥青冷再生混合料的水稳定性,本文向混合料中掺加抗剥落剂进行了试验分析和研究,研究结论如下:

a. 对于掺加适量抗剥落剂的沥青,随着掺量的增加,沥青的针入度增大,延度和软化点降低,沥青耐老化性能提高,但掺量过高对沥青性能的提升不明显;

b. 在最佳发泡条件下,向沥青中掺加不同剂

量的抗剥落剂然后进行沥青发泡试验,泡沫沥青的发泡效果减弱,表现为膨胀率和半衰期的略微减小,但仍符合相关规范要求;

c. 向沥青中掺加抗剥落剂进行发泡,泡沫沥青冷再生混合料的水稳定性能明显提高,掺量为0.5%时效果最好;在此掺量下,空隙率减小3%,在实际使用时可以有效减缓水在再生层的扩散;力学性能提升比较明显,稳定度和残留稳定度分别提高2 kN和3 kN,浸水残留稳定度比提高11.2%,每次冻融循环后的强度均在一定程度上提升,5次冻融循环后的劈裂强度比提高14.6%。

参考文献:

- [1] 薄雪峰. 冻融循环对泡沫沥青冷再生混合料宏观细观结构性能的影响[J]. 公路, 2018, 63(9): 47-58.
- [2] 郭伍军. 泡沫沥青冷再生技术在京港澳高速公路的应用[J]. 公路, 2009(8): 112-115.
- [3] WANG W T, WANG L B, XIONG H C, et al. A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 631-642.
- [4] 周卫峰, 张秀丽, 原健安, 等. 基于沥青与集料界面粘附性的抗剥落剂的开发[C]//天津市市政(公路)工程研究院院庆五十五周年论文选集(1950~2005)上册. 天津: 天津市土木工程学会, 2005: 5.
- [5] 彭丹丹, 陈华鑫, 张晨旭, 等. 沥青抗剥落剂的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(S1): 325-327, 338.
- [6] 朱建勇, 何兆益. 抗剥落剂与沥青相容性的分子动力学研究[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(1): 34-40.
- [7] 魏建明, 张玉贞, 张晏, 等. 抗剥落剂对沥青表面自由能的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 162-165.
- [8] DB33/T 715-2008, 公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] SU K, HACHIYA Y, MAEKAWA R. Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 54(1): 37-44.
- [10] 拾方治. 沥青路面泡沫沥青再生基层的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [11] WIRTGEN GmbH. Wirtgen cold recycling manual[M]. 2nd ed. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2004: 11-35.
- [12] 任满仓. 抗剥落剂对沥青路用性能影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 郭寅川, 赵宾, 李鹏, 等. 基于正交试验的泡沫沥青的发泡性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 492-496.