

就地热再生沥青混合料间接拉伸疲劳性能研究

申 雄

招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆
Email: 846954711@qq.com

收稿日期: 2021年7月15日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月9日

摘 要

为了系统评价就地热再生沥青混合料疲劳性能, 应用简介拉伸试验评定了不同应力比、不同温度及空隙率下的就地热再生沥青混合料疲劳性能, 研究结果表明: 随着应力比水平从0.3逐渐升高至0.5, 沥青混合料疲劳寿命呈指数形式逐渐降低, 且对传统的单对数疲劳方程呈现较好的相关性; 空隙率每增加1%疲劳寿命将会降低45%左右。

关键词

路面工程, 沥青路面, 就地热再生, 间接拉伸疲劳试验, 疲劳寿命

Study on Indirect Tensile Fatigue Performance of Hot in Place Asphalt Mixture

Xiong Shen

China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co. Ltd., Chongqing
Email: 846954711@qq.com

Received: Jul. 15th, 2021; accepted: Jul. 30th, 2021; published: Aug. 9th, 2021

Abstract

In order to systematically evaluate the fatigue performance of hot in place recycled asphalt mixture, the fatigue performance of hot in place recycled asphalt mixture under different stress ratio, temperature and void ratio was evaluated by tensile test. The results show that the fatigue life of asphalt mixture decreases exponentially with the increase of stress ratio from 0.3 to 0.5, and it has

a good correlation with the traditional single logarithm fatigue equation; the fatigue life will decrease about 45% when the void ratio increases by 1%.

Keywords

Pavement Engineering, Asphalt Pavement, Hot in Place Recycled, Indirect Tensile Fatigue Test, Fatigue Life

Copyright © 2021 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

沥青混合料再生技术可分为就地热再生、厂拌热再生、就地冷再生、厂拌冷再生四类。其中，沥青路面就地热再生技术(Hot in-place recycling)可将老化的、破损的路面转化为新的、平整的面层，重新利用原有路面的骨料和沥青原材料，能较好地处理路面裂缝，并有施工周期短、对交通干扰小、材料利用率高、运输费用低等优点，因而被广泛应用于道路修复和养护施工中。目前，我国的东北、华北、华东、华中、西南等等均有就地热再生沥青路面的工程应用实例。针对就地热再生技术的研究主要集中在施工工艺和再生混合料路用性能等方面，对再生混合料长期性能评价方面的研究涉及较少，导致了就地热再生沥青路面的长期性能缺乏可靠的评价分析[1]-[6]。

疲劳破坏是沥青混凝土路面最主要的破坏形式之一，一直受到道路研究者重视，由于RAP材料中沥青经长期老化变硬变脆，其抗疲劳破坏的性能会出现一定程度的下降。为了保证道面具有良好的路用性能，很多国家路面设计方法均以路面疲劳特性作为设计原则，包括美国公路战略研究计划也把沥青混合料的疲劳性能作为主要研究项目之一[7]-[13]，但是目前中国还没有一个比较成熟的指导意见。本文依托实体工程，对就地热再生沥青混合料的疲劳性能进行研究，对指定的就地热再生的沥青混合料在不同的交通与环境条件下的疲劳性能进行研究，为今后就地热再生沥青路面长期性能评价提供一定的依据。

2. 就地热再生配合比设计

2.1. 再生剂

再生剂为辽宁鞍山双城科技有限公司提供的SZS再生剂样品，其主要作用为：1) 调节旧油粘度和使过硬过脆的旧沥青混合料软化，使其能和新沥青、新集料混合均匀；2) 改善沥青流变性质，使老化过程中处于凝聚状态的沥青质重新溶解分散，调节沥青的胶体结构形式[14]。其推荐掺量范围为RAP料中旧沥青的5%~10%，或混合料的0.3%~0.4%，本次再生路面施工考虑再生剂对后续路面性能可能带来的不利影响。借鉴李俊杰[15]等人研究，将掺量取值为RAP料中旧沥青的3%。

2.2. 就地热再生沥青混合料级配

1) RAP料级配

原RAP料中旧矿料在2.36 mm筛孔通过率小于40%，属于AC13-C粗型混合料，适用于高温重载交通的路段中。原RAP料的级配如表1所示：

Table 1. The gradation of RAP
表 1. RAP 料级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)										
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	油石比
RAP	100	93.4	77.5	45.6	29.2	23.2	17.2	12.7	11.1	10.3	5.0%

2) 新沥青混合料级配

为改善 RAP 料的路用性能，需要添加新沥青混合料，确定新沥青混合料占合成后混合料的比例为 10%。新沥青混合料的级配如表 2 所示：

Table 2. The gradation of new asphalt mixture
表 2. 新沥青混合料级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)									
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
新料	3.5	5.0	6.9	12.2	19.1	28.0	47.1	78.2	91.6	100.0

3) 合成后的沥青混合料级配

对 A 级配分别以五个沥青掺量制备新沥青混合料，经试验验证，同时考虑使新沥青混合料含有富余沥青以添加至旧沥青混合料而又便于混合料运输的原则，将 A 级配新沥青混合料的最佳沥青含量定为 5.1%。通过表 1~3 可以发现新混合料与旧混合料合成后 A 整体级配没有发生明显变化。考虑到这个原因，将目标级配设计中 A 级配的最佳新沥青含量 5.1% 下调 0.1% 作为生产级配最佳新沥青含量。则 A 级配生产配合比最佳新沥青含量定为 5.0%。前期试验得出旧路面平均沥青含量为 4.77%，经计算，新沥青混合料与旧沥青混合料按照 1:9 合成后，A 级配最佳沥青含量为 4.79%。合成后的目标级配如图 1 和表 3 所示：

Table 3. The synthesis target gradation of asphalt mixture
表 3. 合成后沥青混合料目标级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)									
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
目标合成级配 A	9.6	10.5	12.1	16.7	22.8	29.1	45.7	77.6	93.2	100.0

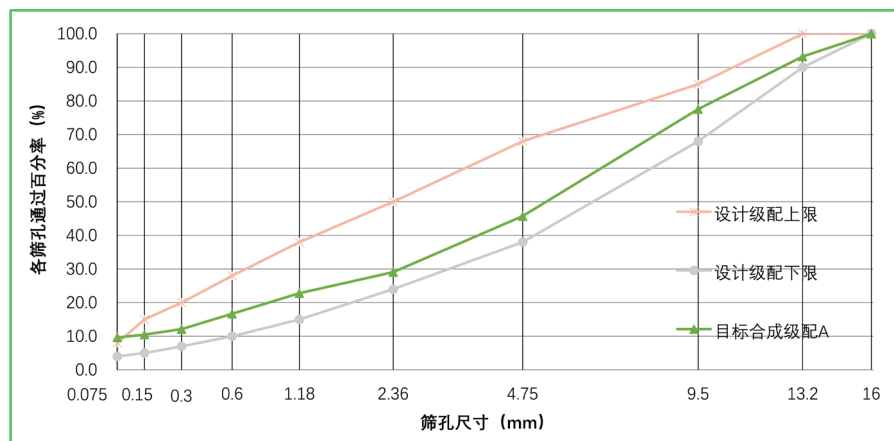


Figure 1. The synthesis target gradation of asphalt mixture
图 1. 合成后沥青混合料目标级配

2.3. 就地热再生沥青混合料配合比验证

1) 车辙试验

众多的相关研究表明,采用车辙试验测得的动稳定度能较好的反映沥青路面在高温季节抵抗车辙的能力。车辙试验主要根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(T0719-2011) [16]进行,车辙试件尺寸 300 mm × 300 mm × 50 mm,试验温度 60℃,试验轮胎压 0.7 MPa。试验结果以动稳定度值表示,车辙试验结果如表 4 所示。

Table 4. Rutting test results

表 4. 车辙试验结果

级配&编号	动稳定度 DS (次/mm)	技术要求	试验方法
1	7518		
A 2	8124	≥2800	T0719
均值	7821		

2) 浸水马歇尔试验

根据现行沥青路面设计规范应对混合料进行水稳定检验,水稳定性试验主要以浸水马歇尔试验为主。本试验目的在于检验沥青混合料受水损害时抗剥落的能力,通过测试其水稳定性检验配合比的可行性。

浸水马歇尔试验结果如表 5 所示。

Table 5. Marshall test results and the volume parameter calculation results

表 5. 马歇尔试验结果及体积参数计算结果

级配&编号	非条件(0.5 h)			条件(48 h)			残留稳定度(%)
	稳定度(kN)	流值(0.1 mm)	VV (%)	稳定度(kN)	流值(0.1 mm)	VV (%)	
1	14.72	34.10	5.42	13.15	36.00	5.53	
A 2	13.07	38.80	5.69	13.51	41.20	5.57	95.02
3	15.16	32.70	5.54	14.15	38.20	5.18	
均值	14.32	35.20	5.55	13.60	38.5	5.43	
规范要求	≥8	15~40	4~6	≥8	15~40	4~6	≥85

3) 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验主要用于评价沥青混合料的抗水损坏性能,采用马歇尔方法成型,共两组试件。一组置于常温 20℃保温,另一组置于-18℃保温 16 小时再置于 60℃水浴中保温 24 小时后进行试验。冻融劈裂试验结果如表 6 所示。

Table 6. Freeze-thaw splitting test results

表 6. 冻融劈裂试验结果

级配&编号	冻融前劈裂强度(MPa)	冻融后劈裂强度(MPa)	TSR (%)	技术要求	试验方法
1	1.82	1.84			
A 2	1.89	1.81	95.13	≥80	T0729
3	1.98	1.76			
均值	1.90	1.80			

通过对目标级配的再生沥青混合料进行车辙、浸水马歇尔、冻融劈裂试验,发现目标级配的再生沥青混合料各项性能符合规范规定的相应混合料的技术要求。

3. 就地热再生沥青混合料筒介拉伸疲劳性能试验

3.1. 试验参数

3.1.1. 疲劳试验控制模式

疲劳试验荷载控制模式主要有控制应力或控制应变两种不同的加载模式。

控制应力方式是指在反复加载过程中所施加的荷载(或应力)的峰谷值始终保持不变,随着加载次数的增加最终导致试件断裂破坏,受力情况较为接近沥青混合料路面的车辆荷载作用的情况,这种控制方式以完全断裂作为疲劳损坏的标准。

应变控制方式是指在反复加载过程中始终保持挠度或试件底部应变峰谷值不变。由于在这种控制方式下,时间通常不会出现明显的断裂破坏,一般以混合料劲度下降到初始劲度的 50%或更低作为疲劳破坏标准。

根据相关研究表明[17],控制应力模式适用于厚沥青层(约 > 15 cm)。在反复荷载作用下,应力变化较小的结构承重层中。本项目依托于高速公路路面结构 4 cm AC-13 SBS 改性沥青 + 6 cm AC-20 SBS 改性沥青 + 6 cm AC-25 普通沥青 + 12 cm 冷再生层 + 20 cm 水泥稳定碎石 + 32 cm 级配碎石。采用应力控制模式能更准确的反应该路面结构的疲劳破坏过程;其次,控制应力模式,数据点分散程度较小,所需试件较少,疲劳寿命次数较短,这样就大大缩短了试验时间,并且所获取的数据较为准确;并且采用应力控制模式的破坏标准是以完全断裂作为疲劳损伤标准,试件破坏较容易确定。综上所述,故采用应力模式进行试验较为合适。

3.1.2. 加载频率与波形

对于就地热再生沥青混合料疲劳试验的加载波形,大量研究表明,移动的车轮荷载对路面产生接近正弦曲线的应力应变效应[18]。相关研究表明[19],荷载波形(正弦波、半正矢波)对疲劳寿命的影响很小。参考 SHRP-M-009 标准,采用半正矢波荷载进行疲劳试验,为了避免长时间试验可能出现的时间脱空现象,从而对试件产生冲击作用,试验采用较小荷载进行预加载 10 s,以使试件与夹具有良好的接触。

3.1.3. 间歇时间

对于实际路况而言,路面在承受车轮荷载时,前后轮的作用或前后两辆车载的作用之间都存在时间间歇。对于本次试验而言,由于试验设备的自身条件关系,其相应频率存在间歇时间。

3.1.4. 试验温度

根据葛折圣等人的研究[20],温度是影响沥青混合料的第二大影响因素。本试验所处地区气候温和,历年平均气温在 17.1℃~17.8℃之间。气温变幅大,盛夏极端最高气温达 40℃以上,隆冬极端最低气温低于-10℃。根据以上气候特点,为了更全面的研究温度对其疲劳性能的影响,设定试验温度为 5℃, 15℃, 25℃。虽然根据 SHRP 的相关研究[21],建议不考虑高于 20℃以上的疲劳破坏,但为了解高温条件下疲劳寿命状况,25℃的试验工况下的对比试验不可舍去。

3.1.5. 应力比

疲劳试验所采用的应力比需要根据试验目的来确定。选择的应力水平过低,那么进行疲劳试验所消耗的时间较长,并且不能正常的模拟实际路面荷载的作用情况;若应力水平过高,疲劳试件很容易发生破坏,试验数据结果离散性大,不能很好的反映材料的抗疲劳性能。本文为研究不同行车荷载对就地热

再生沥青混合料的疲劳性能的影响，故采用 0.3、0.35、0.4、0.45、0.5 这五个应力比等级进行试验。

综上所述，就地热再生沥青混合料的间接拉伸疲劳试验设置如下表 7 所示：

Table 7. Indirect tensile fatigue test program

表 7. 间接拉伸疲劳试验方案

试验材料	试验频率与波形	间歇时间	试验温度(°C)	应力比
AC-13C	1 HZ 半正弦波	有	5	0.3、0.35、0.4、0.45、0.5
			15	0.3、0.35、0.4、0.45、0.5
			25	0.3、0.35、0.4、0.45、0.5

3.2. 间接拉伸疲劳试验结果

3.2.1. 空隙率对就地热再生沥青混合料疲劳寿命的影响

在 15°C、0.45 的应力水平工况下，空隙率的变化范围为 4.3%~8.0%左右，能更好的反映空隙率对疲劳寿命的影响。在排除了误差数据点后，利用该组数据(如表 8 所示)建立了空隙率与就地热再生沥青混合料对数疲劳寿命之间的关系曲线，如图 2 所示。

Table 8. The influence of void ratio on HIR asphalt mixtures fatigue life

表 8. 空隙率对就地热再生沥青混合料疲劳寿命的影响

15°C、0.45 应力水平					
空隙率	8.015%	6.512%	6.008%	5.012%	4.333%
疲劳寿命 Nf	79	243	319	633	853
lgN _f	1.898	2.386	2.504	2.801	2.931
降低 1%空隙率疲劳寿命变化率	44.9%	47.3%	49.8%	38.0%	/
变化率均值	45.0%				

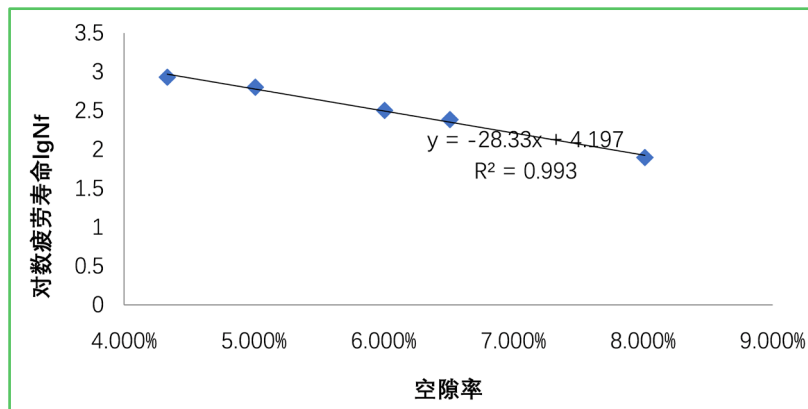


Figure 2. The figure relating to void ratio and logarithmic fatigue life

图 2. 空隙率与对数疲劳寿命关系图

通过表 8 和图 2 可以发现，空隙率与对数疲劳寿命有较好的线性相关关系。每升高 1%空隙率再生混合料疲劳寿命会降低 45%左右。

3.2.2. 应力比再生混合料疲劳寿命的影响

本次试验为了比较高、低应力比条件下的疲劳特性，所选择应力比水平为 0.3~0.5，分别进行了不同

温度(5℃、15℃、25℃)下的相应应力比水平的间接拉伸疲劳试验的对比。试验结果如下表 9 所示。

Table 9. The fatigue test results at different temperatures
表 9. 不同温度下疲劳试验结果

试验温度(℃)	应力比	疲劳寿命(次)	平行试件数量
5	0.30	14,988	4
	0.35	8442	
	0.40	3224	
	0.45	1005	
	0.50	466	
15	0.30	11,160	4
	0.35	4689	
	0.40	1058	
	0.45	398	
	0.50	172	
25	0.30	2558	4
	0.35	558	
	0.40	251	
	0.45	170	
	0.50	68	

由表 9, 显然可以看出, 随着应力比水平从 0.3 逐渐升高至 0.5 时, 沥青混合料的疲劳寿命逐渐降低。以单对数曲线方程为例, 对上述不同试验温度下的试验结果进行线性拟合如下图 3~5 所示:

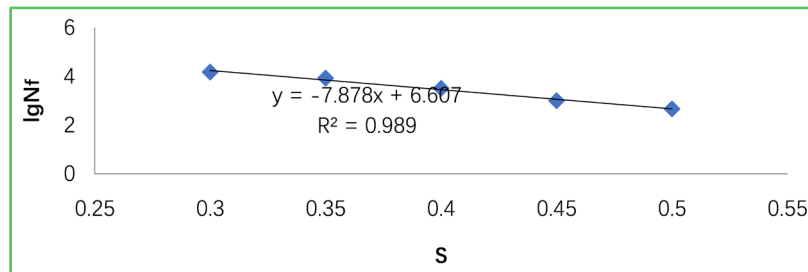


Figure 3. Single logarithmic curve of fatigue for 5 degrees Celsius
图 3. 5℃的单对数疲劳曲线

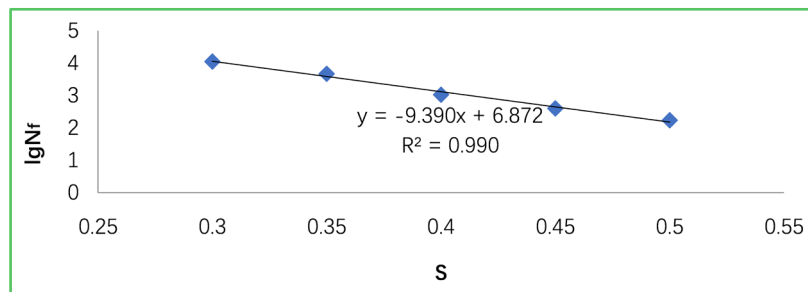


Figure 4. Single logarithmic curve of fatigue for 15 degrees Celsius
图 4. 15℃的单对数疲劳曲线

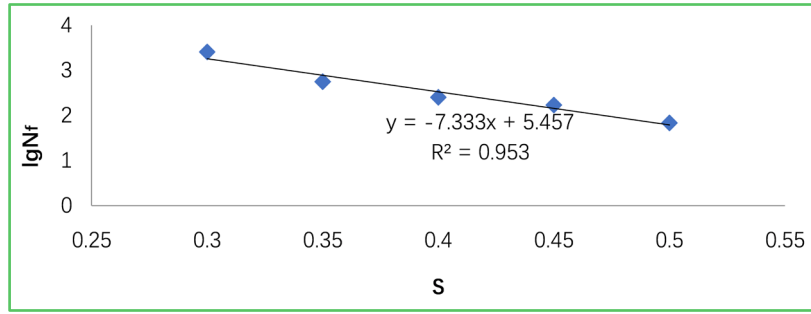


Figure 5. Single logarithmic curve of fatigue for 25 degrees Celsius
 图 5. 25℃的单对数疲劳曲线

将不同温度下的单对数疲劳曲线方程汇总于表 10。

Table 10. The stress ratio—fatigue life equation of different temperatures
 表 10. 不同温度下的应力比——疲劳寿命方程

试验温度(℃)	单对数疲劳方程	相关系数 R ²
5	$\lg N_f = 5.457 - 7.3339S$	0.9893
15	$\lg N_f = 6.8721 - 9.3909S$	0.9904
25	$\lg N_f = 5.457 - 7.3339S$	0.9532

根据以上的图表内容可以发现，对于不同温度下的单对数疲劳寿命方程表现出良好的线性特性。

3.2.3. 温度对再生沥青混合料疲劳寿命的影响

不同温度下的再生沥青混合料疲劳寿命如图 6 所示，对于本试验控制模式为应力加载控制。由图可以明显看出，对于相同的应力比作用下时，疲劳寿命随温度的降低而增长。这种温度疲劳寿命的影响可以用混合料的劲度来解释，温度在一定限度内下降时，沥青混合料的劲度增大，试件在承受一定应力的条件下所产生的应变就小，因而在控制应力加载模式的试验中导致有较长的寿命。

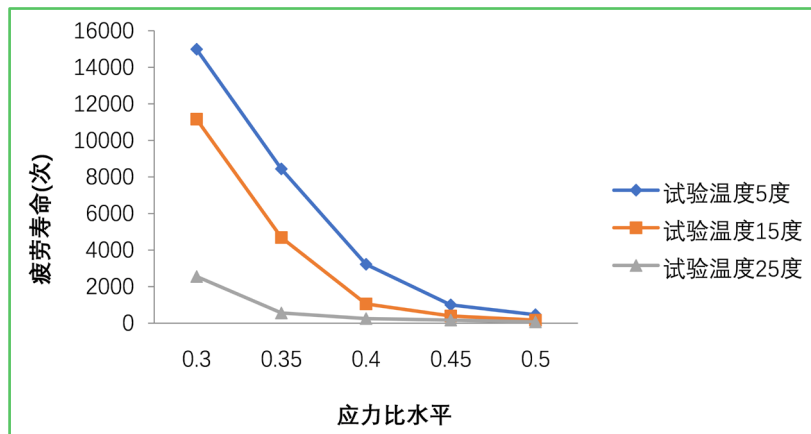


Figure 6. The fatigue life at different temperatures
 图 6. 不同温度下的疲劳寿命

从图像斜率来分析, 试件在较低试验温度时对应力比水平的敏感程度比较高, 试验温度时敏感程度更高。造成这种现象的原因是对于相同的应力比水平, 较低试验温度增长幅度较大, 而较高试验温度增长幅度较小。而温度对劲度模量的影响幅度相较于应力而言, 增幅较小。那么就会出现增加相同的应力比水平, 较低试验温度的疲劳寿命变化幅度较较高试验温度的疲劳寿命变化幅度大。

4. 结论

本文对就地热再生沥青混合料试件进行不同空隙率、温度和应力比下的间接拉伸疲劳试验, 可以得到以下结论:

- 1) 依托实体工程, 进行了就地热再生沥青混合料配合比设计, 经试验验证, 所确定的目标级配配合比具有良好的高温稳定性、水稳性以及抗水损性。
- 2) 相同温度条件下, 随着应力比水平从 0.3 逐渐升高至 0.5 时, 沥青混合料的疲劳寿命逐渐降低; 应力比与对数疲劳寿命表现出良好的线性关系。
- 3) 相同应力比条件下, 较低试验温度的试件表现出较好的抗疲劳性能, 试件在较低试验温度时对应力比水平的敏感程度比较高, 试验温度时敏感程度更高。
- 4) 空隙率与对数疲劳寿命有较好的线性相关关系。每升高 1% 空隙率再生混合料疲劳寿命会降低 45% 左右。

参考文献

- [1] 吴永平, 聂涛. 沥青路面再生技术的适用性研究[J]. 建设机械技术与管理, 2006, 18(9): 62-65.
- [2] 刘先森, 王树林. 热再生沥青路面耐久性述评[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 45-48.
- [3] 郑健龙, 吕松涛. 沥青混合料非线性疲劳损伤模型[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 21-28.
- [4] 孙杰. 基于应力控制模式下的沥青混合料疲劳开裂预估模型的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [5] Pérez-Jiménez, F., Valdés, G.A., Botella, R., *et al.* (2012) Approach to Fatigue Performance Using Fénix Test for Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, **26**, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.036>
- [6] 鲁明. 基于沥青和沥青混合料性能的再生剂合理掺量分析[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 264-269.
- [7] 徐静, 刘加平, 洪锦祥. 再生剂对就地热再生沥青混合料的性能影响[J]. 公路, 2013(8): 290-294.
- [8] 吴庆怀. 再生剂对就地热再生沥青混合料的性能影响[J]. 公路交通科技, 2014(7): 130-133.
- [9] 李永翔, 郝培文, 雷宇, 李志刚. 微波敏感型沥青再生剂的开发及作用机理分析[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(1): 80-88.
- [10] 张军仁, 张兴军, 任小遇. 就地热再生沥青混合料配合比优化设计及性能研究[J]. 中国建材科技, 2017, 26(4): 40-42.
- [11] 马登成, 任化杰, 马尉倘. 沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J]. 公路交通科技, 2014, 31(8): 1-6+12.
- [12] 巫裕润, 陈琨. 复拌型就地热再生沥青混合料配合比设计及质量控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(5): 108-112.
- [13] 欧阳自强. 典型沥青再生剂性能研究与评价[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [14] 吕伟民, 严家汲. 沥青路面再生技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 5-20.
- [15] 李俊杰. 基于模量匹配的就地热再生沥青路面结构设计方法[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20-2011) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [17] 郑育新. 加铺型就地热再生沥青混合料配合比设计与施工[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(7): 3-5.
- [18] 易忠平. 沥青路面就地热再生混合料配合比设计研究[J]. 江西建材, 2017(6): 143.
- [19] Leykauf, G. and Kawohl, W.J. (1972) Structural Design of Full Depth-Asphalt-Pavements and Field Test in Compari-

son with German Standardized Asphalt Pavement. *The Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, London, 11-15 September 1972, 1049-1060.

- [20] 葛折圣, 黄晓明. 沥青混合料疲劳性能影响因素的灰关联分析[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 8-11.
- [21] 张广, 李艳, 马庆伟. 复拌型就地热再生沥青混合料配合比设计与路用性能研究[J]. 青海交通科技, 2015(6): 24-30.