

Application of Weibull Distribution Model in Fatigue Analysis of Hot Recycled Asphalt Mixture

Zhaobiao Dai¹, Qiang Sun^{2*}, Na Wang³, Zhaowei Jiang²

¹Anqing Highway Administration Bureau, Anqing Anhui

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

³Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

Email: *chinasun0813@163.com

Received: May 13th, 2019; accepted: May 30th, 2019; published: Jun. 6th, 2019

Abstract

In order to study the fatigue characteristic of hot recycled asphalt mixture, indirect tensile test was carried out aiming at hot recycled AC-25. In view of the randomness and discreteness of small sample fatigue test results, three-parameter Weibull distribution model was introduced to analyze test data. The results show that the fatigue life of hot recycled AC-25 obeys three-parameter Weibull distribution; the stress fatigue equation under different guarantee rates shows that the fatigue resistance of recycled asphalt mixture decreases greatly with the increase of temperature, but the sensitivity of fatigue performance to stress decreases at the same time; the appropriate guarantee rate should be selected to predict fatigue life of asphalt mixture according to the actual situation.

Keywords

Hot Recycled Asphalt Mixture, Fatigue Characteristic, Weibull Distribution Model, Indirect Tensile Test

Weibull分布模型在热再生沥青混合料疲劳特性分析中的应用研究

戴照彪¹, 孙强^{2*}, 王娜³, 江照伟²

¹安庆市公路管理局, 安徽 安庆

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³山东高速股份有限公司, 山东 济南

*通讯作者。

Email: *chinasun0813@163.com

收稿日期: 2019年5月13日; 录用日期: 2019年5月30日; 发布日期: 2019年6月6日

摘要

为研究热再生沥青混合料的疲劳特性, 采用间接拉伸试验对热再生AC-25沥青混合料进行室内试验, 同时, 针对小样本疲劳试验结果的随机性和离散性, 引入三参数Weibull分布模型分析试验数据。结果显示: 热再生AC-25沥青混合料疲劳寿命服从三参数Weibull分布; 不同保证率下的应力疲劳方程表明, 温度升高使再生沥青混合料的抗疲劳性能大幅度降低, 但同时降低了混合料疲劳性能对应力的敏感程度; 应根据实际情况综合考虑选取合适的保证率进行沥青混合料疲劳寿命预估。

关键词

热再生沥青混合料, 疲劳特性, Weibull分布模型, 间接拉伸试验

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

目前, 将废旧沥青混合料应用于公路建设和养护中, 变废为宝, 已成为建设资源节约型和环境友好型交通的必要条件[1]。相较于其他再生方式, 热再生可以应用于更高的公路等级和结构层位, 是一项非常重要的再生技术[2]。由于再生沥青混合料中含有一定比例的回收旧料, 这部分已老化旧料会对再生混合料的路用性能产生影响, 其中热再生沥青混合料的疲劳特性是当前国内外研究人员重点研究和关注的方向[3] [4] [5]。为研究热再生沥青混合料的疲劳特性, 采用间接拉伸疲劳试验对热再生 AC-25 混合料进行系统试验, 同时, 针对疲劳试验结果随机性和离散性较大的问题, 引入三参数 Weibull 分布模型研究热再生沥青混合料的疲劳寿命分布, 得到了不同保证率下的应力疲劳方程。研究结果可为热再生沥青混合料在工程中的应用提供理论参考。

2. 热再生沥青混合料配合比设计

2.1. RAP

在车辆荷载和气候因素的共同作用下, 旧沥青路面混合料的级配组成和原材料性能发生了巨大变化, 具体表现为矿料级配的变化和沥青的老化[6]。本研究所用 RAP 铣刨自安徽省某高等级公路下面层, 经抽提筛分, 测得其沥青含量为 4.2%, 回收沥青的相关试验结果如表 1 所示。

Table 1. Recycling asphalt index

表 1. 回收沥青指标

回收沥青检测项目	针入度/0.1mm	软化点/°C	15°C延度/cm
	42	68.3	6.2

查阅原路面的建设及养护资料,该路面下面层所用沥青为 70#道路石油沥青,设计沥青用量为 4.0%。试验结果表明:回收沥青针入度、延度明显降低,软化点升高,说明长时间的服役后,RAP 中的沥青发生了变硬变脆的老化现象。

与施工级配相比,RAP 回收旧集料中 19.0 mm、16.0 mm 和 13.2 mm 档的骨料有所减少,而 4.75 mm、2.36 mm 和 0.075 mm 档的细料增加,表明沥青混合料的级配在外部荷载长期作用下发生了细化。

2.2. 热再生沥青混合料配合比

根据 RAP 的技术指标,本研究确定的热再生沥青混合料类型为 AC-25,RAP 掺入量为 30%。新沥青为 70#道路石油沥青,所用粗集料为石灰岩,细集料为石灰岩石屑,填料采由石灰岩矿粉,其指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) [7]的要求。

通过掺加新集料和控制 RAP 级配的方式,使热再生沥青混合料的合成级配接近规范级配中值,其合成级配如图 1 所示,经室内试验确定其最佳沥青用量为 4.1%。

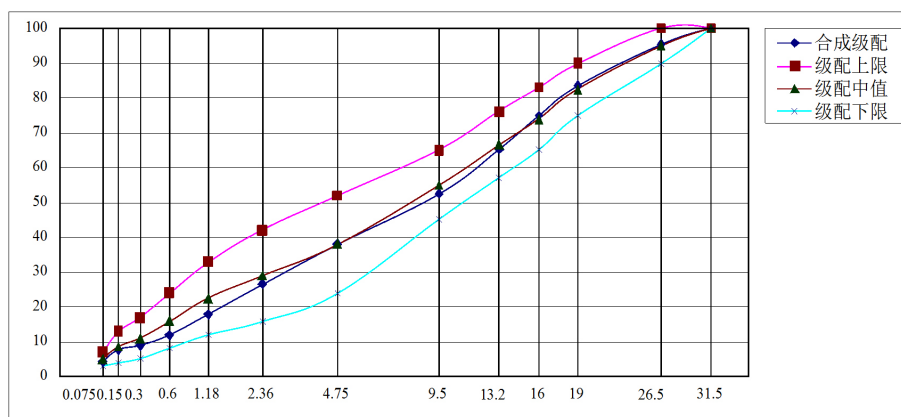


Figure 1. Synthetic gradation curve of mixture
图 1. 混合料合成级配曲线

3. 间接拉伸疲劳试验

本研究采用间接拉伸试验作为验证热再生混合料疲劳性能的试验方法,试验设备为 UTM-100 万能试验机。为了研究热再生沥青混合料在不同荷载水平下的疲劳性能,在疲劳试验进行前需要测得混合料的劈裂强度。

3.1. 试件制备

根据配合比设计结果成型标准马歇尔试件,分别进行劈裂强度试验和间接拉伸疲劳试验,劈裂强度试验一次平行试验试件个数为 5 个,疲劳试验中同一温度-荷载组合条件下试件个数 3~4 个。

3.2. 试验参数

劈裂强度试验中,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[8]中的规定,加载速率设定为 50 mm/min;试验温度选取 10℃、20℃、30℃三个典型温度。

间接拉伸疲劳试验的控制模式为应力控制;荷载大小为材料对应劈裂强度的 0.3~0.6 倍;加载波形为半正弦波,加载频率 10 Hz,荷载通过宽 12.7 mm 的加载压条作用在试件上,试件预压荷载为 20 kPa,预压时间 30 s,以使压条与试件充分接触;试验温度选取 10℃、20℃、30℃三个典型温度;以试件发生

断裂或者竖向变形超过 5%作为疲劳失效判断依据。

4. 试验结果及分析

4.1. 劈裂强度

根据 10℃、20℃、30℃三个典型温度下劈裂强度的平行试验结果,按照保证率 $\alpha = 97.5\%$ 的 t 分布法得到热再生沥青混合料的劈裂强度代表值,见表 2。

Table 2. Representative value of splitting strength

表 2. 劈裂强度代表值

试验温度/℃	10	20	30
劈裂强度/MPa	3.36	1.04	0.91

4.2. Weibull 分布模型

沥青材料具有复杂的粘弹性特性,影响其疲劳性能的因素较多,疲劳试验本身耗时长,若要全面研究各种因素组合对沥青混合料疲劳性能的影响,需要投入巨大的时间成本。受制于此,疲劳试验往往只能采用数量不多的若干试件进行,如本研究因涉及到的工况组合较多,每种组合下只能采用 3~4 个平行试件进行试验,而疲劳寿命本身具有很大的随机性和分散性,如何准确的分析在小样本试验条件下热再生沥青混合料的疲劳性能,需要借助统计分析和可靠性原理来进行研究。

以往研究普遍认为,沥青混合料的疲劳寿命一般服从对数正态分布,但近年来有研究提出疲劳寿命服从三参数 Weibull 分布[9],Weibull 分布模型是由瑞典人威布尔于 1951 年提出的,其优点就在于它适用于小样本抽样及对各种类型试验数据极强的适应能力。其概率密度函数[10]为:

$$f(N) = \frac{b}{N_a - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (N \geq N_0) \quad (1)$$

式中: N 为试验疲劳寿命;

N_0 为起始最小寿命参数;

N_a 为特征寿命参数;

b 为形状参数。

疲劳寿命 $n \leq N$ 的概率,即不可靠函数(失效率)为:

$$F(N) = p(n \leq N) = \int_{N_0}^N f(N) dN \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)则得到疲劳寿命分布函数:

$$F(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (3)$$

则可靠度函数为:

$$R(N) = \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (4)$$

对式(4)两边先取倒数,再取两次对数,得:

$$\ln \left[\ln \frac{1}{R(N)} \right] = b \ln(N - N_0) - b \ln(N_a - N_0) \quad (5)$$

式(5)中, $b \ln(N_a - N_0)$ 为常数, 令 $y = \ln \left[\ln \frac{1}{R(N)} \right]$, $x = \ln(N - N_0)$, 则式(5)可以转化为线性问题。

4.3. 疲劳寿命数据分析

表 3 为 10℃ 时各应力比下热再生沥青混合料的疲劳寿命。由表中数据可以看出, 即使是在同一温度、同一荷载条件下, 不同试件的疲劳寿命次数也相差很大, 最大值与最小值甚至能相差 10 倍以上, 说明小样本的疲劳试验结果存在很大离散性, 在此情况下采用正态分布或对数正态分布分析疲劳试验结果具有很大的不准确性。

由于篇幅所限, 文中只列出 10℃ 条件下的疲劳试验结果, 以此为例来分析热再生沥青混合料的疲劳特能。

Table 3. Laboratory fatigue test results

表 3. 室内疲劳试验结果

试验温度/℃	应力比	应力/MPa	疲劳寿命/次	
10	0.6	2.016	203	
			420	
			660	
	0.5	1.680	970	
			710	
			1040	
	0.4	1.344	1550	
			2830	
			2260	
	0.3	1.008	3790	
			5390	
			12,200	
				11,640
				32,700
				48,730
			115,056	

首先需要判定热再生沥青混合料疲劳寿命是否服从 Weibull 分布。根据以往研究, 起始最小寿命参数 N_0 通常略小于一组试件中最小疲劳寿命, 由表 3 的数据, 10℃ 时不同应力比下 N_0 分别取 50、300、1000、1000, 同时设定可靠度 $R(N)$ 分别为 80%、60%、40%、20%, 代入式(5), 采用最小二乘法对表 3 中的数据进行回归拟合, 拟合结果相关性基本在 0.95 以上, 说明热再生沥青混合料疲劳寿命服从 Weibull 分布, 同理可对 20℃、30℃ 下的疲劳试验结果进行拟合判定。各工况下的拟合参数见表 4。

Table 4. Fitting result of fatigue life based on Weibull distribution**表 4.** 疲劳寿命 Weibull 分布拟合结果

试验温度/°C	应力比	b	$b \ln(N_a - N_0)$	R^2
10	0.6	1.089	7.031	0.9923
	0.5	1.082	7.907	0.9823
	0.4	0.915	7.942	0.9750
	0.3	0.852	9.399	0.9859
20	0.6	0.885	6.891	0.9889
	0.5	0.688	5.904	0.9661
	0.4	0.746	6.930	0.9924
	0.3	0.893	9.892	0.9574
30	0.6	1.917	10.337	0.9365
	0.5	1.277	8.389	0.9881
	0.4	1.431	10.971	0.9854
	0.3	0.725	6.153	0.9864

根据表 4 的拟合结果, 结合式(5)即可计算各工况在不同保证率下的疲劳寿命, 现将 10°C 条件下, 热再生沥青混合料在保证率 50%、70%、90%、95% 下的目标疲劳寿命计算结果列于表 5。

Table 5. Fatigue life under different guaranteed rates**表 5.** 不同保证率下的疲劳寿命

试验温度/°C	应力比	保证率/%	目标疲劳寿命/次
10	0.6	50	505
		70	297
		90	131
		95	92
	0.5	50	1363
		70	875
		90	486
		95	396
	0.4	50	4941
		70	2907
		90	1503
		95	1229
0.3	50	41,196	
	70	19,429	
	90	5405	
	95	2892	

4.4. 疲劳寿命预估模型

基于表 5 中的数据, 可以进行不同温度、不同保证率条件下热再生沥青混合料的应力疲劳方程拟合。

应力疲劳方程采用如下形式：

$$N = \kappa \sigma^{-n} \quad (6)$$

式(6)中参数 κ 、 n 具有明显的物理意义， κ 值的大小代表混合料的抗疲劳性能的好坏； n 值则代表材料疲劳性能对应力的敏感度。

本研究针对 50%、70%、95%三个保证率下热再生沥青混合料在不同温度下的应力疲劳方程在双对数坐标下进行了拟合，进而分析不同工况下的混合料疲劳特性。

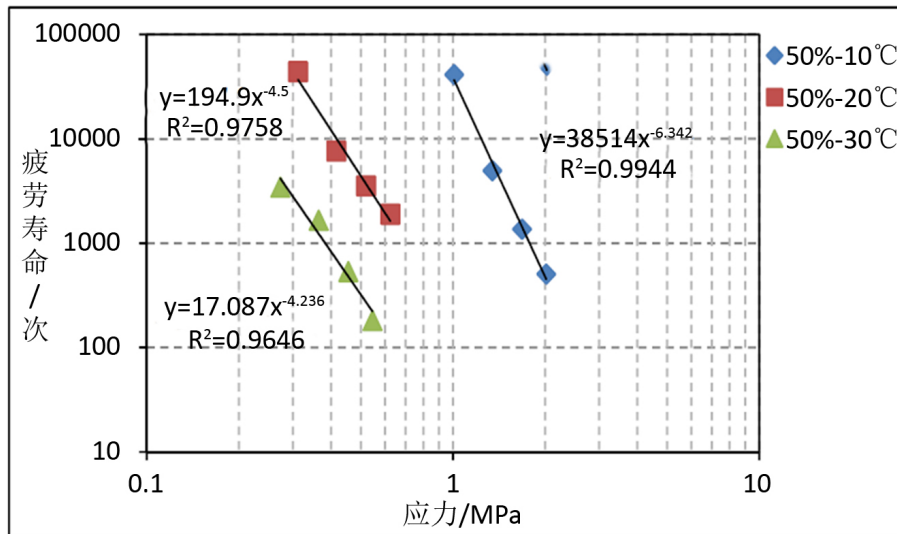


Figure 2. 50% guaranteed rate, stress fatigue equation under different temperatures
图 2. 50%保证率，不同温度下的应力疲劳方程

图 2 表明，对比 50%保证率下，三种温度条件下应力疲劳方程的参数后发现，随着试验温度的升高， κ 值和 n 值均明显减小，再生沥青混合料的抗疲劳性能大幅度降低，同时混合料疲劳性能对应力的敏感程度也降低。70%和 95%保证率下情况与此类似。

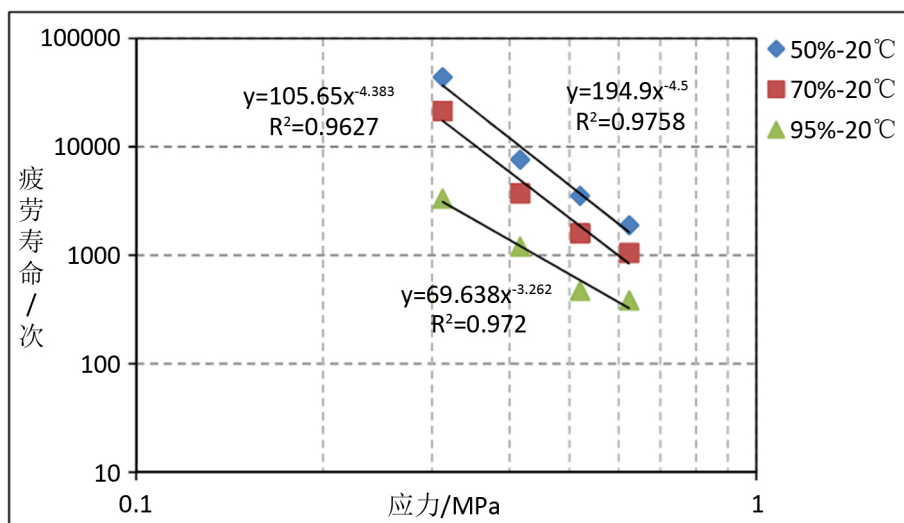


Figure 3. 20°C, stress fatigue equation under different guaranteed rates
图 3. 20°C，不同保证率下的应力疲劳方程

图 3 表明, 随着保证率的增大, 疲劳寿命显著降低, 这表明: 在进行热再生沥青混合料疲劳寿命预估时, 应根据实际情况综合考虑选取合适的保证率, 若保证率取值过高, 将导致材料疲劳失效判定次数过低, 保证率取值过低则与之相反。

5. 结论

1) 劈裂强度试验结果表明, 热再生沥青混合料的劈裂强度随温度的升高而明显降低, 这与普通沥青混合料的规律相一致, 说明温度仍然是影响热再生沥青混合料性能的重要因素。

2) 间接拉伸疲劳试验结果表明, 即使所有试验条件均相同, 小样本疲劳试验结果仍然具有很大的离散性, 采用正态分布或对数正态分布来分析热再生混合料疲劳特性存在很大的不准确。

3) 热再生沥青混合料的疲劳试验结果服从三参数 Weibull 分布, 可以拟合得到不同保证率下混合料的应力疲劳方程, 疲劳方程显示, 随着试验温度的升高, 热再生沥青混合料的抗疲劳性能大幅度降低, 同时混合料疲劳性能对应力的敏感程度也降低。

4) 在进行热再生沥青混合料疲劳寿命预估时, 应根据实际情况综合考虑选取合适的保证率, 保证率取值的大小决定了材料疲劳失效判定次数的高低。

参考文献

- [1] 邹桂莲, 徐剑. 再生沥青混合料路用性能试验研究[J]. 公路与汽运, 2011(2): 121-124.
- [2] 熊巍, 卢何. 热再生沥青混合料的路用性能试验研究[J]. 公路, 2006(10): 191-194.
- [3] 何兆益, 陈龙, 陈先勇. 厂拌热再生沥青混合料力学性能及应用研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5): 871-875.
- [4] 张科, 郑鑫, 张旭. 热再生沥青混合料疲劳特性试验研究[J]. 公路工程, 2017, 42(1): 228-232.
- [5] Huang, B., Zhang, Z. and Kinger, W. (2004) Fatigue Crack Characteristics of HMA Mixtures Containing RAP. *Proceedings of 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements*, Limoges, 2004, 631-638.
- [6] 兰青, 徐伟, 赵劲松, 等. 高比例 RAP 厂拌热再生沥青混合料在广惠高速公路试验与评价[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 79-83.
- [7] 交通部公路科学研究所. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 交通部公路科学研究院. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 黄琴龙, 权晨嘉, 杨壮, 等. 乳化沥青水泥稳定碎石混合料的疲劳性能试验[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5): 739-744.
- [10] 贾侃. 半刚性基层材料的疲劳特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org