

文章编号: 1000-8608(2019)03-0280-08

垂直振动成型冷再生混合料疲劳特性研究

蒋应军^{*1}, 林宏伟², 韩占闻², 陈浙江³, 胡永林⁴

- (1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 金华市公路管理局, 浙江 金华 321000;
4. 金华市金东区公路管理段, 浙江 金华 321000)

摘要: 为深入研究乳化沥青冷再生混合料的疲劳特性, 采用更符合混合料现场压实工况的垂直振动法成型圆柱体试件。研究了RAP掺量、成型方法及浸水环境对冷再生混合料疲劳特性的影响, 应用Weibull分布建立冷再生混合料疲劳方程, 并借助扫描电镜揭示了冷再生的疲劳抗裂机理。结果表明: 新集料掺量对冷再生混合料疲劳性能有显著影响, 疲劳性能随新集料掺量的增加呈抛物线变化趋势, 当新集料掺量为20%时抗疲劳性能最优; 垂直振动法设计冷再生混合料在应力作用下的抗疲劳性能及对应力变化敏感性优于马歇尔法; 与未浸水试件相比, 不同应力水平下浸水试件的疲劳寿命均缩短, 对应力变化更加敏感; 水泥-乳化沥青胶浆相互渗透胶结, 并将集料紧密黏结, 形成较致密的网状结构, 有效改善胶浆与集料的界面协调变形, 延缓裂缝发展。

关键词: 冷再生混合料; 疲劳特性; 垂直振动法; RAP掺量

中图分类号: U414

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201903009

0 引言

随着中国早期修建的道路大量进入大中维修养护期, 乳化沥青冷再生技术凭借其节能、环保、施工便捷的特性得到越来越广泛的应用。在冷再生路面结构中, 混合料的疲劳性能是路面结构性能的重要基础^[1], 因而深入研究冷再生混合料的疲劳特性对提高乳化沥青冷再生路面结构性能具有重要意义。目前, 国内外道路工作者对冷再生混合料疲劳性能进行了一些相关研究。国外, Ameri等研究认为在乳化沥青冷再生混合料中掺入适量钢渣可显著提高冷再生混合料的疲劳寿命^[2]; Thanaya等研究认为掺入适量的水泥可显著提高冷再生混合料在低应变水平下的疲劳性能^[3]; Visintine等研究认为在一定范围内冷再生混合料疲劳寿命随面层回收集料(reclaimed asphalt pavement material, 简称RAP)掺量增加而延长^[4]; Kavussi等研究认为水泥对冷再生混合料

的疲劳性能影响与初始假定应变水平有关, 300×10^{-6} 水平以上时水泥的加入会导致疲劳寿命降低, 而在 300×10^{-6} 以下则相反^[5]。国内, 孙立军等基于劈裂疲劳试验研究乳化沥青冷再生混合料的疲劳破坏特征并提出疲劳破坏准则^[6]; 严金海等采用间接拉伸疲劳试验研究乳化沥青冷再生混合料在不同温度条件和应力水平下的劲度模量与疲劳性能^[7]; 王之怡等基于控制应变加载模式下的小梁弯曲疲劳试验研究乳化沥青冷再生混合料疲劳性能并提出相应的应变控制指标^[8]; 汪德才等分析了应力水平、水泥用量、RAP掺量、乳化沥青类型及乳化沥青用量等因素对冷再生混合料疲劳性能的影响^[9]; 蒋应军等研究了级配对冷再生混合料路用性能的影响, 结果表明合理地改变级配可显著提升冷再生混合料的路用性能^[10]。由上述研究成果可知, 当前针对冷再生混合料疲劳性能的研究主要集中在疲劳破坏特性、疲劳试验方法、控制指标对疲劳性能的影响, 关于成型方法对

冷再生混合料疲劳性能影响的研究鲜有报道。鉴于此,本文采用垂直振动法(VVTM),研究成型方法及新集料掺量对冷再生混合料疲劳性能的影响,以供工程实践参考。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

RAP 采用陕西某高速公路沥青路面回收集料,其级配筛分结果见表 1。乳化沥青采用 SBR 改性乳化沥青;新集料采用公称粒径为 10~30 mm 石灰岩;水泥采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥。原材料各项技术性质均满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)的技术要求。

表 1 路面铣刨料 RAP 级配筛分结果

Tab. 1 Grading results of pavement milling material RAP

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
26.5	100.0	2.36	18.7
19	96.1	0.3	4.2
9.5	75.7	0.075	2.4
4.75	36.5		

1.2 试验方案

由表 1 可知,破碎后的集料中粒径 2.36~

4.75 mm 和 4.75~9.5 mm 的含量较高,粗集料含量较少。这是由于沥青路面在铣刨过程中,部分粗集料被破碎,使得铣刨后的级配与原路面级配相比偏细^[11]。因此,掺加公称粒径为 10~30 mm 的新集料调整 RAP 级配。

变化新集料掺量为 10%、20%、30%,并采用垂直振动法进行配合比设计,试验结果见表 2;研究浸水环境对垂直振动成型冷再生混合料疲劳特性的影响,对比分析传统方法与垂直振动法对冷再生混合料疲劳性能的影响,并借助扫描电镜(SEM)分析其疲劳抗裂机理。试验时,外掺水泥用量 1.5%,所用矿料级配见表 3。

表 2 最大干密度、最佳含水率和最佳乳化沥青用量

Tab. 2 Maximum dry density, optimum moisture content and optimum emulsified asphalt dosage

级配编号	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	最佳乳化沥青 用量/%
R100X0	2.197	3.9	4.0
R90X10	2.242	3.9	3.9
R80X20	2.268	3.8	3.8
R70X30	2.256	3.7	3.7

表 3 材料组成及矿料级配

Tab. 3 Material composition and mineral gradation

级配 编号	材料组成/%			通过下列筛孔尺寸质量分数/%						
	RAP	新集料	水泥	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
R100X0	100	0	1.5	100.0	96.1	75.7	36.5	18.7	4.2	2.4
R90X10	90	10	1.5	100.0	94.7	69.9	33.4	16.9	3.8	2.2
R80X20	80	20	1.5	100.0	93.3	64.1	30.4	15.1	3.5	2.1
R70X30	70	30	1.5	100.0	91.9	58.2	27.3	13.3	3.1	1.9

2 试验测试方法

2.1 垂直振动法(VVTM)及可靠性

(1)VVTM

所采用的振动压实仪基本参数:工作频率 35 Hz、名义振幅 1.2 mm、上车系统质量 108 kg、下车系统质量 167 kg。

采用垂直振动击实确定最大干密度和最佳含水率,振动成型时间 60 s。

采用垂直振动成型直径 100 mm、高 63.5 mm 圆柱体试件,振动成型时间 60 s。

(2)VVTM 可靠性分析

分别采用 VVTM 和马歇尔成型试件,然后

将成型试件运送至工地现场并埋入石屑,与现场碾压成型乳化沥青冷再生混合料同步覆盖土工布养护至规定龄期。养护结束后现场钻芯取样,然后分别测试 VVTM 试件、马歇尔试件、现场芯样马歇尔稳定度和劈裂强度,平行试验 6 次,经格鲁布斯法检验后取平均值,试验数据结果见表 4、5。表中 P_M/P_x 是指马歇尔试件力学性质与芯样力学性质比值, P_V/P_x 是指 VVTM 试件力学性质与芯样力学性质比值。

由表 4、5 可知:乳化沥青冷再生混合料 VVTM 试件与现场芯样的力学强度平均相关性可达 94.8%,而马歇尔试件准确度不足 60%。这

表 4 路面芯样、VVTM 试件和马歇尔试件强度

Tab. 4 Strength of pavement core samples, VVTM specimens and Marshall specimens

级配类型	马歇尔稳定度/kN	劈裂强度/MPa
①	芯样	14.0
	马歇尔试件	7.4
	VVTM 试件	13.2
②	芯样	14.7
	马歇尔试件	7.7
	VVTM 试件	13.8

表 5 路面芯样、VVTM 试件和马歇尔试件强度对比

Tab. 5 Strength contrast of pavement core samples, VVTM specimens and Marshall specimens %

级配类型	力学指标	P_M/P_x	P_V/P_x
①	马歇尔稳定度	52.9	94.3
	劈裂强度	64.5	96.7
②	马歇尔稳定度	52.4	93.9
	劈裂强度	66.2	95.4

说明 VVTM 能够很好地模拟现场施工, 并能准确预测路面长期性能, 因此, 证明乳化沥青冷再生 VVTM 成型方法是可靠的.

2.2 测试方法

(1) 干湿劈裂试验方法

干劈裂强度 R_t 是将试件放入 15 ℃恒温水浴 1 h, 然后取出按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) 中《沥青混合料劈裂试验》(T0716—2011) 测试.

湿劈裂强度 R_{tw} 是将试件放入 25 ℃恒温水浴中 23 h, 再放入 15 ℃恒温水浴中 1 h, 然后取出按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) 中《沥青混合料劈裂试验》(T0716—2011) 测试.

(2) 疲劳试验方法

疲劳试验采用圆柱体试件间接拉伸疲劳试验方法进行. 已有研究表明^[12], 间接拉伸疲劳试验过程中试样所处应力状态与路面在荷载作用下所受应力状态相似, 具有较大的优越性, 更易与路面圆柱体芯样形成对比, 且操作方便、结果稳定.

动态伺服液压试验系统见图 1. 夹具及试件安装如图 2 所示. 为模拟路面在行车荷载作用下的实际波形, 采用半正矢正弦波荷载以应力控制模式加载. 加载频率为 10 Hz, 加载时间间隔为 0 min, 循环特征值(高低应力比) R 取 0.1, 选取

的应力水平 S 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7, 试验温度 15 ℃.



图 1 UTM 动态伺服液压试验系统

Fig. 1 UTM dynamic servo hydraulic test system



(a) 斜裂夹具图

(b) 试件安装图

图 2 疲劳试验夹具图

Fig. 2 Fatigue test fixture diagram

3 试验结果及分析

3.1 斜裂强度

斜裂强度试验结果见表 6.

表 6 斜裂强度

Tab. 6 Splitting strength

级配编号	干劈裂强度 R_t /MPa	湿劈裂强度 R_{tw} /MPa
R100X0	0.92	0.82
R90X10	1.09	0.97
R80X20	1.13	1.04
R70X30	1.08	0.97

由表 6 可知, 斜裂强度随新集料掺量增加先增大后减小. 这主要是由于合理掺量的新集料有助于优化混合料级配, 使得混合料达到骨架密实结构, 混合料具有较高黏结力和内摩阻力, 因而使得冷再生混合料的力学强度得到极大的提高^[13]. 当新集料掺量超过 20% 时, 新集料用量偏多, 没有足够的细集料填充空隙之间, 导致空隙率偏大, 混合料之间的黏聚力降低, 混合料的强度降低.

3.2 疲劳试验结果及分析

(1) 疲劳试验结果

疲劳试验结果见表 7.

表 7 疲劳试验结果
Tab. 7 Fatigue test results

级配 编号	疲劳寿命 N/次				
	S=0.3	S=0.4	S=0.5	S=0.6	S=0.7
R100X0	5 723	1 913	856	487	253
	6 458	2 170	996	607	297
	6 842	2 396	1 146	682	332
	7 371	2 704	1 236	767	375
	8 421	3 115	1 324	838	395
R90X10	8 178	2 858	1 696	896	402
	9 035	3 100	1 843	1 086	475
	10 184	3 469	2 020	1 123	525
	11 016	3 772	2 224	1 257	590
	12 014	4 022	2 452	1 350	685
R80X20	12 670	3 882	2 223	1 344	703
	13 790	4 541	2 495	1 608	837
	14 812	4 763	2 701	1 683	892
	16 316	5 191	2 928	1 889	988
	17 786	5 458	3 312	2 125	1 150
R70X30	8 596	2 908	1 640	917	470
	10 236	3 436	1 746	1 111	523
	10 783	3 571	1 924	1 170	615
	11 850	3 964	2 082	1 326	704
	12 614	4 169	2 218	1 475	752

(2) 疲劳寿命预估模型

由表 7 可知, 室内疲劳试验数据离散性较大,

表 8 Weibull 分布检验结果
Tab. 8 Weibull distribution test results

S	R100X0			R90X10			R80X20			R70X30		
	α	$\alpha \ln \mu$	R^2									
0.3	6.050 6	53.946	0.973 0	5.752 2	53.433	0.991 3	6.546 0	63.390	0.979 2	6.444 3	60.759	0.986 6
0.4	4.636 1	36.590	0.979 5	6.300 4	51.724	0.984 8	6.652 7	56.758	0.984 3	6.481 8	53.735	0.980 3
0.5	5.043 9	35.774	0.990 7	5.987 6	46.057	0.977 8	5.791 1	46.229	0.984 7	6.129 1	47.693	0.972 4
0.6	4.176 7	27.603	0.995 4	5.585 0	39.728	0.977 1	5.214 2	39.217	0.950 1	5.664 3	41.389	0.986 4
0.7	4.899 4	28.815	0.991 0	4.335 3	27.626	0.990 6	5.816 9	40.051	0.984 0	5.072 3	33.621	0.995 3

表 9 不同失效概率下的等效疲劳寿命

Tab. 9 Equivalent fatigue life under different failure probabilities

级配 编号	失效概 率 P/%	\bar{N}				
		S=0.3	S=0.4	S=0.5	S=0.6	S=0.7
R100X0	5	4 559	1 411	668	364	195
	50	7 011	2 473	1 119	679	332
R90X10	5	6 456	2 294	1 334	722	295
	50	10 152	3 468	2 061	1 150	538
R80X20	5	10 199	3 246	1 754	1 045	587
	50	15 181	4 801	2 750	1 721	918
R70X30	5	7 843	2 520	1 476	882	421
	50	11 748	3 765	2 257	1 397	704

采用式(3)对表 9 数据进行回归分析, 求得失效概率为 5% 及 50% 的疲劳寿命预估方程, 结果

因此采用数据统计方法进一步分析研究冷再生混合料的疲劳寿命规律.

假定疲劳寿命 N 和等效疲劳寿命 \bar{N} 均服从两参数 Weibull 分布, 建立失效概率和疲劳寿命之间的对应关系. 则失效概率 P 满足下式:

$$P = F_{(\bar{N})} = 1 - \exp[-(\bar{N}/u)^{\alpha}] \quad (1)$$

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = \alpha \ln \bar{N} - \alpha \ln u \quad (2)$$

式中: α 为形状参数, u 为尺度参数.

根据式(2)和表 7 得到不同应力水平 S 对应的等效疲劳寿命 \bar{N} 的回归系数, 见表 8.

由表 8 可知, 在不同应力水平下, 不同新集料掺量下的冷再生混合料线性回归相关系数 R^2 均大于 0.95, $\ln \ln(1/(1-P)) \sim \ln N$ 呈现出良好的线性关系, 表明可用 Weibull 分布模型预估乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命.

限于篇幅, 此处选定两种失效概率为 5% 及 50%, 将表 8 的回归系数代入式(2)中, 可得不同应力水平下乳化沥青混合料等效疲劳寿命 \bar{N} , 结果见表 9.

见表 10.

表 10 失效概率 5% 和 50% 下的疲劳寿命预估方程

Tab. 10 Fatigue life prediction equations with failure probability of 5% and 50%

级配 编号	疲劳寿命预估方程和相关系数	
	$P=5\%$	$P=50\%$
R100X0	$y = -3.6551x + 1.7283$	$y = -3.5160x + 2.0040$
	$R^2 = 0.9982$	$R^2 = 0.9968$
R90X10	$y = -3.4520x + 2.0211$	$y = -3.3059x + 2.2735$
	$R^2 = 0.9832$	$R^2 = 0.9889$
R80X20	$y = -3.2739x + 2.2636$	$y = -3.1736x + 2.4855$
	$R^2 = 0.9945$	$R^2 = 0.9905$
R70X30	$y = -3.2813x + 2.1578$	$y = -3.1569x + 2.3891$
	$R^2 = 0.9889$	$R^2 = 0.9883$

$$\lg \bar{N} = a - b \lg S \quad (3)$$

式中: a 、 b 为方程待定回归系数。

由表 10 可知, 在相同失效概率下, 当新集料掺量为 20% 时, 疲劳曲线的回归系数 a 取值最大, b 取值较小, 说明新集料掺量为 20% 时冷再生混合料的疲劳特性良好, 对应力变化敏感性良好, 具有一定的抗疲劳优势。

4 疲劳性能的影响因素研究

4.1 新集料掺量对疲劳性能的影响

冷再生混合料疲劳方程(3)中的回归系数 a 越大, 表征应力作用下材料抗疲劳性能越好; 回归系数 b 越小, 表征材料对应力变化越不敏感, 材料的抗疲劳性能越好^[14]。

根据表 10 绘制不同失效概率及新集料掺量下的疲劳特性曲线, 如图 3 所示。

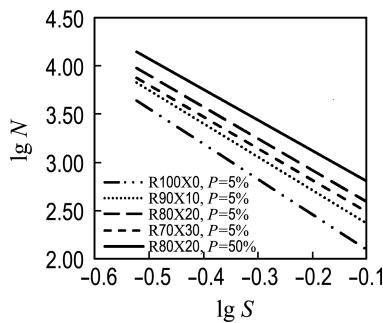


图 3 不同失效概率及新集料掺量下的疲劳特性曲线

Fig. 3 Fatigue characteristics curves with different failure probabilities and new aggregate contents

结合表 9 及图 3 可知:

(1) 不同失效概率及新集料掺量下, $\lg S$ 随 $\lg \bar{N}$ 均呈线性变化趋势, 相关系数 R^2 均大于 0.90, 且新集料掺量对冷再生混合料的疲劳性能影响显著。

(2) 对比分析失效概率为 5% 及 50% 时 20% 新集料掺量下的疲劳寿命预估曲线可知, 在不同失效概率下乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命存在较大差异, 当失效概率由 5% 增大为 50% 时, 混合料的

疲劳寿命显著增大, 在进行混合料疲劳寿命分析时, 应根据实际情况确定合适的失效概率进行评价。

(3) 在同一应力水平及失效概率下, 乳化沥青冷再生混合料的疲劳特性随着新集料掺量的增加呈抛物线变化趋势, 即混合料的疲劳寿命随着 RAP 掺量的增加先上升后下降。当新集料掺量为 20% 时, 混合料的疲劳性能最优。

这主要是由于原 RAP 级配中细集料含量高, 未掺新集料时混合料级配整体偏细, 混合料内部形成悬浮密实型骨架, 级配较差, 集料间难以产生嵌挤力。当冷再生混合料中掺入新集料时, 混合料级配得到优化, 混合料内部形成密实型骨架。新集料填充使得混合料试件更加密实, 混合料具有较高黏结力和内摩阻力, 其抗疲劳性能也随之提高。当新集料掺量超过 20% 时, 粗集料的用量偏多, 混合料内部形成骨架空隙型结构, 试件的内黏聚力降低, 疲劳寿命随之下降。

4.2 浸水环境对疲劳性能的影响

疲劳特性曲线及疲劳方程分别如图 4 及表 11 所示。试验时, 采用 R80X20 级配, VVTM 成型圆柱体试件研究浸水条件对乳化沥青冷再生混合料疲劳特性影响, 试件分两类: 未浸水试件 15 ℃恒温水浴 1 h; 浸水试件 25 ℃水中恒温水浴 23 h, 再放入 15 ℃恒温水浴 1 h。

由图 4 及表 11 可知: 水损害对乳化沥青冷再生混合料的疲劳特性影响是双重的。与未浸水试

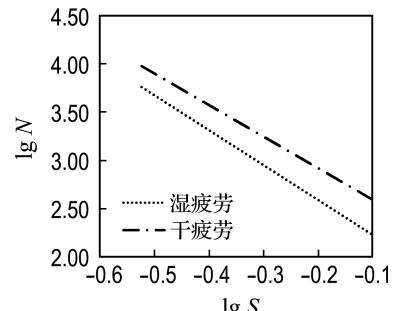


图 4 5% 失效概率下的干湿疲劳特性曲线

Fig. 4 Dry and wet fatigue characteristic curve with failure probability of 5%

表 11 失效概率为 5% 的等效疲劳寿命及预估方程

Tab. 11 Equivalent fatigue life and its prediction equation with failure probability of 5%

试件类型	\bar{N}					疲劳寿命预估方程和相关系数
	$S=0.3$	$S=0.4$	$S=0.5$	$S=0.6$	$S=0.7$	
未浸水试件	10 199	3 246	1 754	1 045	587	$y = -3.2739x + 2.2636, R^2 = 0.9945$
浸水 23 h 试件	6 658	1 798	768	434	322	$y = -3.6210x + 1.8641, R^2 = 0.9828$

件相比,不同应力水平下经浸水处理的乳化沥青冷再生混合料试件的疲劳寿命减小,对应力变化敏感程度增加。具体表现在相同失效概率下,与未浸水试件相比,浸水试件的疲劳寿命预估方程的 a 值减小, b 值增大。这是由于水分经试件表面空隙渗入试件内部,经过长时间的滞留浸泡作用,乳化沥青与集料的黏附强度下降,颗粒间黏聚力不足,对冷再生混合料的劲度模量等材料性质影响较大,导致乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能显著降低。

4.3 设计方法对疲劳性能的影响

乳化沥青冷再生混合料传统上采用重型击实法确定最佳含水率,采用马歇尔方法制备的试件测试劈裂强度或马歇尔稳定度进行冷再生混合料性能评价并设计最佳乳化沥青用量。VVTM 既能确定最佳含水率,又能确定密度与乳化沥青最佳用量。

采用不同设计方法对新集料掺量为 20% 时冷再生混合料疲劳特性进行研究,疲劳方程如表 12 所示。

表 12 不同失效概率下的疲劳寿命预估方程

Tab. 12 Fatigue life prediction equations with different failure probabilities

失效概率 P/%	疲劳寿命预估方程和相关系数	
	VVTM	马歇尔法
5	$y = -3.2739x + 2.2636$ $R^2 = 0.9945$	$y = -3.5900x + 1.9414$ $R^2 = 0.9889$
50	$y = -3.1736x + 2.4855$ $R^2 = 0.9905$	$y = -3.6342x + 2.1790$ $R^2 = 0.9933$

由表 12 可知,成型方法显著影响沥青混合料的疲劳性能。如相同失效概率下,VVTM 成型试件的 a 值均大于马歇尔法,而 b 值正好相反;随着失效概率的提高,马歇尔法的 b 值逐渐增大,而

VVTM 的 b 值逐渐减小。因此,VVTM 乳化沥青混合料在应力作用下抗疲劳性能及对应力变化敏感性均优于马歇尔法。

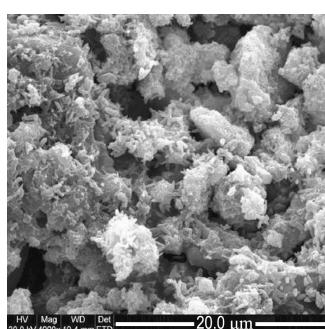
这是由于 VVTM 是靠振动作用使混合料内产生振动压力波,冷再生混合料内部集料逐渐由相对静止转变成相对运动状态,内摩擦阻力减小,集料得以充分移动互相嵌挤形成骨架密实结构。同时,混合料也更易于达到密实,集料破碎情况也较为接近路面芯样,从而表现出力学性能优于马歇尔成型方法。综上,VVTM 振动压实方式比马歇尔击实方式更加合理,且有利于提高乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能。

5 乳化沥青冷再生混合料疲劳抗裂机理分析

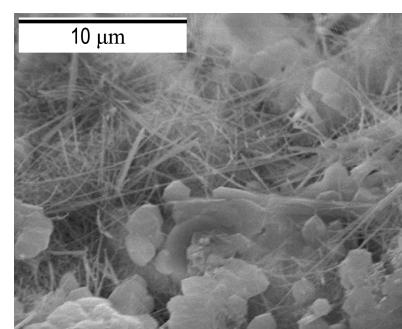
冷再生混合料试样微观图像结果见图 5。试验时,将混合料切割成直径 2.5~5.0 mm 的具有代表性的块状试样,经烘干、去磁等处理后,放入环境扫描电镜 XL30 ESEM 在高放大倍率下观察混合料不同部位的微观结构。

如图 5(a)所示,白色区域的絮状水泥水化产物分布较均匀,与沥青膜相互渗透胶结,有效填充集料表面的微裂空隙,形成较致密的网状结构,将集料紧密地黏结在一起,减少了初始裂缝形成。此外,水泥水化吸水可加快乳化沥青的破乳速度,形成沥青膜裹附在集料上,增强了集料内部的黏聚力,因此宏观上表现为冷再生混合料抗疲劳开裂性能的提升。

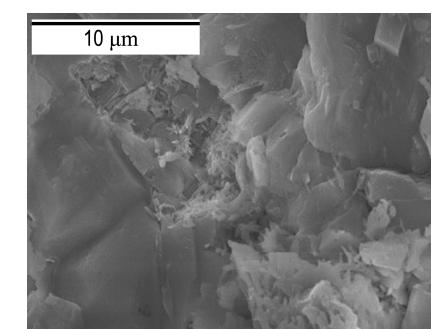
如图 5(b)所示,混合料中原有的旧沥青与胶浆相互包裹,水泥水化产物贯穿其中。水泥水化产物的填充致密作用,有效解决了新旧沥青由于老



(a) 水泥-乳化沥青胶浆



(b) 集料-胶浆界面



(c) 冷再生混合料

图 5 材料疲劳损伤微观结构

Fig. 5 Fatigue damage microstructure of materials

化程度不同所导致两者的劲度模量差异问题,使得界面变形更加协调,延缓裂缝发展。宏观上表现为冷再生混合料的空隙率减小,密实度提高,具有较高的强度和抗裂性能。

如图 5(c)所示,基于界面强度理论和 Miner 疲劳损伤模型,冷再生混合料界面强度相对薄弱^[15]。冷再生混合料在重复荷载作用下,集料与胶浆界面处首先发生破坏,逐步演化到微裂、错位等材料损伤,最后发展至开裂阶段。故应力水平越高,冷再生混合料疲劳寿命越小。

6 结 论

(1)乳化沥青冷再生混合料疲劳寿命服从双参数 Weibull 分布,建立的不同新集料掺量下的乳化沥青冷再生混合料疲劳寿命预估方程能够较为准确地反映乳化沥青冷再生混合料疲劳寿命。

(2)新集料掺量对乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能影响显著,在同一应力水平及失效概率下,乳化沥青冷再生混合料的疲劳特性随着新集料掺量的增加呈抛物线变化趋势。当新集料掺量为 20%时,混合料的抗疲劳性能最优。

(3)不同失效概率下,垂直振动法乳化沥青冷再生混合料在应力作用下抗疲劳性能及对应力变化敏感性优于马歇尔法,主要体现在垂直振动法成型试件的疲劳方程的截距 a 值均大于马歇尔法,而斜率 b 值正好相反。

(4)浸水环境对乳化沥青冷再生混合料的疲劳寿命影响显著。与未浸水试件相比,不同应力水平下浸水试件的疲劳寿命下降,且对应力变化更敏感。

(5)水泥-乳化沥青胶浆相互渗透胶结,形成较致密的网状结构,并将集料紧密黏结,有效改善胶浆与集料的界面协调变形,提高冷再生混合料的疲劳抗裂性能。

参 考 文 献 :

- [1] 徐剑,石小培,秦永春. 乳化沥青冷再生路面性能衰变规律研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 19-24.
- XU Jian, SHI Xiaopei, QIN Yongchun. Study on the decay law of the performance of emulsified asphalt cold recycled pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(1):19-24. (in Chinese)
- [2] AMERI M, BEHNOOD A. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1): 475-480.
- [3] THANAYA I N A, ZOOROB S E, FORTH J P. A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 2009, 162(1):47-55.
- [4] VISINTINE B, KHOSLA N P, TAYEBALI A. Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2013, 14(2):432-437.
- [5] KAVUSSI A, MODARRES A. Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10):1920-1927.
- [6] 孙立军,程怀磊,刘黎萍,等. 在役乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(11):1648-1654.
- SUN Lijun, CHENG Hualei, LIU Liping, et al. Fatigue characteristics of in-situ emulsified asphalt cold recycled mixtures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(11):1648-1654. (in Chinese)
- [7] 严金海,倪富健,杨美坤. 乳化沥青冷再生混合料的间接拉伸疲劳性能 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1):58-61,77.
- YAN Jinhai, NI Fujian, YANG Meikun. Indirect tensile fatigue properties of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(1):58-61,77. (in Chinese)
- [8] 王之怡,郝培文,柳浩,等. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(2):28-32.
- WANG Zhiyi, HAO Peiwen, LIU Hao, et al. Fatigue performance of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(2):28-32. (in Chinese)
- [9] 汪德才,郝培文,魏新来. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能及影响因素 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(4):541-546.
- WANG Decai, HAO Peiwen, WEI Xinlai. Fatigue properties and influencing factors of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(4):541-546. (in Chinese)
- [10] 蒋应军,韩占闯. 级配对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响 [J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(6):607-614.
- JIANG Yingjun, HAN Zhanchuang. Influence of

- gradation on pavement performance of emulsified asphalt cold regenerated mixture [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2018, **58**(6):607-614. (in Chinese)
- [11] 张明杰,祁文洋. 铣刨工艺对RAP变异性及级配的影响 [J]. 石油沥青, 2016, **30**(4):12-17.
ZHANG Mingjie, QI Wenyang. Effect of milling process on RAP variability and gradation [J]. *Petroleum Asphalt*, 2016, **30** (4): 12-17. (in Chinese)
- [12] 蒋应军,曹帆,陈浙江,等. 垂直振动成型水泥稳定碎石疲劳特性及应用 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, **34**(4):1-6.
JIANG Yingjun, CAO Fan, CHEN Zhejiang, et al. Fatigue characteristics and application of vertical vibration forming cement stabilized macadam [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2014, **34**(4):1-6. (in Chinese)
- [13] 刘海鹏,蒋应军,胡永林,等. 级配对乳化沥青冷再生混合料强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2018, **21**(3):503-510.
- LIU Haipeng, JIANG Yingjun, HU Yonglin, et al. Influence of gradation on strength of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, **21** (3): 503-510. (in Chinese)
- [14] 蒋应军,赵占林,李明杰. 两种方法设计沥青混合料的疲劳特性 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, **37**(4):473-478.
JIANG Yingjun, ZHAO Zhanlin, LI Mingjie. Fatigue characteristics of asphalt mixture designed by two methods [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2016, **37** (4): 473-478. (in Chinese)
- [15] 吕政桦,申爱琴,覃潇,等. 乳化沥青冷再生混合料性能优化及机理研究 [J]. 建筑材料学报, 2018, **21**(4):614-619.
LÜ Zhenghua, SHEN Aiqin, QIN Xiao, et al. Study on performance optimization and mechanism of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, **21** (4): 614-619. (in Chinese)

Study of fatigue characteristics of cold recycled mixture of vertical vibration molding

JIANG Yingjun^{*1}, LIN Hongwei², HAN Zhanchuang², CHEN Zhejiang³, HU Yonglin⁴

- (1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
 2. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
 3. Jinhua Highway Administration Bureau, Jinhua 321000, China;
 4. Jindong Highway Management Section, Jinhua 321000, China)

Abstract: In order to study the fatigue characteristics of the emulsified asphalt cold recycled mixture, the cylindrical test piece was formed by the vertical vibration method which was more in line with the compaction conditions of the mixture. The effects of reclaimed asphalt pavement material (RAP) content, forming method and water immersion environment on the fatigue characteristics of cold recycled mixture were studied. The fatigue equation of cold recycled mixture was established by Weibull distribution, and the fatigue anti-cracking mechanism of cold recycle was revealed by scanning electron microscopy. The results show that the new aggregate content has a significant effect on the fatigue performance of the cold recycled mixture. The fatigue performance shows a parabolic trend with the increase of the new aggregate content. When the new aggregate content is 20%, the fatigue performance is optimal. The cold recycled mixtures designed by vertical vibration method have better fatigue resistance and stress sensitivity than the Marshall method under stress. Compared with the unimmersed test piece, the fatigue life of the immersed test piece under different stress levels decreases, and is more sensitive to stress changes; cement-emulsified asphalt cement interpenetrates and cements, and the aggregates are tightly bonded to form a denser network structure, which effectively improves the interface deformation coordination of the cement and aggregate, and delays the development of cracks.

Key words: cold recycled mixture; fatigue characteristics; vertical vibration method; RAP content