



# 硫酸钙晶须和聚酯纤维复合改性沥青混合料的疲劳性能

徐靖怡, 王修山, 张小元, 郭 林  
(浙江理工大学建筑与工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 为研究硫酸钙晶须和聚酯纤维掺量对沥青混合料疲劳性能的影响, 通过对比复合改性沥青老化前后针入度、延度及软化点的变化差值, 得出不同掺量外加剂对沥青抗老化性能的效应, 以验证复合改性的可行性; 进一步通过四点弯曲疲劳试验, 对外加剂掺量、拉应变水平与沥青混合料疲劳寿命之间的关系进行了研究。结果表明: 加入两种外加剂可使沥青和沥青混合料的性能指标得到较大改善, 当硫酸钙晶须掺量为 6.0 wt%、聚酯纤维掺量为 0.3 wt% 时, 复合改性沥青抗老化性能最佳; 沥青混合料疲劳寿命达到最大, 且与相同试验条件下的基质沥青混合料相比提高了 580%; 而拉应变与疲劳寿命呈负相关规律。此外, 综合考虑两种外加剂与拉应变对沥青混合料疲劳寿命的影响, 得到了三因素形成的疲劳因子与疲劳寿命呈线性正相关的规律, 并建立了两者之间的关系方程。该研究结果可为实际工程中复合改性沥青混合料外加剂掺量的合理选择提供参考。

**关键词:** 沥青混合料; 老化性能; 疲劳寿命; 硫酸钙晶须; 聚酯纤维

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0109-08

## Fatigue properties of calcium sulfate whisker and polyester fiber composite modified asphalt mixture

XU Jingyi, WANG Xiushan, ZHANG Xiaoyuan, GUO Lin

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the mixing amount of calcium sulfate whisker and polyester fiber on the fatigue performance of asphalt mixture, the influence of additives under different mixing amount on anti-aging performance of asphalt was obtained to verify the feasibility of composite modification by comparing the differences of needle penetration, elongation and softening point of composite modified asphalt before and after aging. Furthermore, the relationship among admixture content, tensile strain level and fatigue life of asphalt mixture was studied through four-point bending fatigue test. Results show that the performance of asphalt and asphalt mixture could be improved greatly after the addition of two additives. For example, when the mixing amounts of calcium sulfate whisker and polyester fiber were 6.0 wt% and 0.3 wt%, the anti-aging performance of composite modified asphalt was the best, and the fatigue life of asphalt mixture was the maximum. Besides, the value of the fatigue life was 580% higher than that of matrix asphalt mixture under the same conditions. The tensile strain was negatively correlated with the fatigue life. In addition, considering the influence of two kinds of admixtures and tensile strain on the fatigue life of asphalt mixture, the linear positive correlation between the fatigue life of asphalt mixture and the fatigue factor formed by three factors was obtained, and the relation

收稿日期: 2020-08-01 网络出版日期: 2020-10-09

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ19E080025); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF18E080015); 浙江省土木工程一流学科(B)建设计划(11140031281901)

作者简介: 徐靖怡(1997-), 女, 浙江省宁波市人, 硕士研究生, 主要从事沥青路面材料方面的研究。

通信作者: 王修山, E-mail: wxs77777@163.com

equation between the two was established. The research results can provide the reference for the reasonable selection of the admixture content of composite modified asphalt mixture in practical projects.

**Key words:** asphalt mixture; aging performance; fatigue life; calcium sulfate whisker; polyester fibers

## 0 引言

在温度、湿度、荷载等外部环境因素影响下,随着服役时间的增加,沥青路面使用功能和寿命会加速降低<sup>[1-2]</sup>,而沥青本身耐久性和抗老化性能不足是造成沥青路面开裂的重要原因<sup>[3-4]</sup>。因此,为了增强沥青路面的耐久和老化性能,学者们从材料的角度对普通沥青进行改性研究。

硫酸钙晶须(Calcium sulfate whisker, CSW)是生石膏经过特定化学反应最终合成的产物,是一种无水或半水硫酸钙的纤维状单晶体。作为一种具有高模量、高强度、耐高温、耐磨耗以及易与聚合物复合等诸多优良性能的改性剂,CSW在造纸、建筑水泥、催化剂和沥青路面等领域的应用越来越广泛,并具有良好的效果<sup>[5-6]</sup>。目前,将CSW作为外加剂在提高沥青路面性能的研究方面已取得一定成果。Fan等<sup>[7]</sup>将三种不同种类的CSW分别加入沥青混合料,宏观路用性能试验和微观试验结果表明:这三种CSW均能改善沥青混合料的高温性能。王文清等<sup>[8]</sup>通过沥青三大指标试验对沥青的软化点和延度进行分析,结果表明:CSW改性后的沥青软化点增大、延度降低,说明CSW的掺加可改善沥青的高温性能,但会对低温性能产生一定负面影响。王修山<sup>[9]</sup>对埃索90#普通沥青混合料和CSW高模量沥青混合料分别进行疲劳试验,结果表明:与埃索90#普通沥青混合料相比,掺入CSW后沥青混合料的抗疲劳性能明显得到改善。除了添加CSW外,还有研究者提出通过添加聚合物纤维来改善沥青材料的路用性能。聚酯纤维具有塑性变形小、强度和模量高、长径比大等特点,作为一种聚合物掺入沥青中,可利用其吸附、增粘、稳定、分散、加筋、增韧等作用改善沥青混合料的路用性能,延长沥青路面疲劳寿命<sup>[10-12]</sup>。董刚等<sup>[13]</sup>采用木质素纤维和聚酯纤维分别对沥青进行改性,并通过四点弯曲疲劳试验对这两种改性沥青混合料进行对比研究,结果表明:相较于木素纤维,聚酯纤维的掺加对沥青混合料抗疲劳性能的提高效果更佳显著。

近年来,学者们也开始对复合改性沥青混合料进行相关研究。常睿等<sup>[14]</sup>将聚酯纤维和反应性弹性体三元共聚物(Reactive elastomer terpolymer,

RET)两种材料复配后掺入沥青混合料,通过疲劳试验研究复合改性沥青混合料的抗疲劳性能,并与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene butadiene styrene, SBS)、丁苯橡胶(Styrene butadiene rubber, SBR)单一改性的沥青混合料试验结果进行对比,结果表明:聚酯纤维和RET复合改性可以有效改善沥青混合料抗疲劳性能,且效果优于单一改性的沥青混合料。伍剑奇<sup>[15]</sup>将聚酯纤维、硅藻土和抗车辙剂进行复配,通过小梁疲劳试验对复合改性沥青混合料进行疲劳性能研究,并与基质沥青和SBS改性沥青混合料进行对比,结果表明:这三种材料复合改性后显著改善了沥青混合料的疲劳性能,且与其他两种沥青混合料相比,复合改性沥青混合料的长期路用性能更佳。以上研究表明:复合改性沥青混合料可以改善沥青材料的路用性能,为复合改性提供了研究思路。

综上所述,众多学者对CSW或聚酯纤维单一改性沥青及其混合料有一定研究,但将这两种外加剂同时掺入沥青进行复合改性,特别是对于CSW和聚酯纤维复合改性沥青混合料的疲劳性能的研究还有待开展。本文首先将CSW和聚酯纤维掺入沥青中,评估在不同掺量外加剂组合下改性沥青老化前后三大指标变化差值大小,用以验证复合改性的可行性;然后通过四点弯曲疲劳试验,研究多因素影响下沥青混合料疲劳性能的规律,进而确定外加剂最佳掺量组合;最后通过相关分析,建立疲劳因子和沥青混合料疲劳寿命之间的关系,为今后工程中合理选择外加剂及其掺量提供参考。

## 1 试验材料和方法

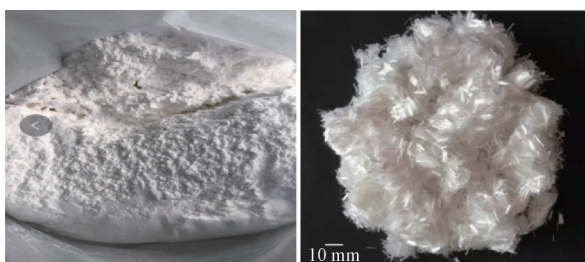
### 1.1 原材料

本文试验所用沥青为70#基质沥青。70#基质沥青的具体技术规范和试验结果见表1,其中:技术规范参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011);本文按照试验规程通过沥青三大指标试验测得基质沥青的针入度、软化点和延度;并通过蒸馏法及闪点试验分别测得基质沥青的含蜡量和闪点,得到的试验结果如表1所示。从表1中可以看出,各试验结果均满足技术规范要求。外加剂为CSW和聚酯纤维,其中:CSW选用山东鑫卓

源化工有限公司产的无水硫酸钙晶须,白色粉状晶体,具有质轻、长径比较大等物理特点,关键性能指标:密度为  $2.69 \text{ g/cm}^3$ ,由 WSB-2 白度仪测得 CSW 白度为 99%,由 XP-1 偏光显微镜测得 CSW 平均长径比为  $30 \mu\text{m}$ ,由 JSM-5600LV 电镜扫描仪获取的外观形貌,如图 1(a)所示;试验选用的聚酯纤维产自江苏常州,关键性能指标:长度为  $6.000 \text{ mm}$ ,直径为  $0.015 \text{ mm}$ ,抗拉强度为  $505 \text{ MPa}$ ,外观形貌如图 1(b)所示。

表 1 70# 基质沥青技术指标与试验数据

项目	25.0℃ 针入度/ $0.1 \text{ mm}$	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	10.0℃ 延度/ $\text{cm}$	蜡含量/%	闪点/ $^{\circ}\text{C}$
技术规范	60.00~80.00	$\geq 45.0$	$\geq 25.0$	$\leq 2.2$	$\geq 260.0$
试验结果	68.00	51.0	52.0	1.8	320.0



(a) CSW

(b) 聚酯纤维

图 1 外加剂的数码照片

## 1.2 复合改性沥青试验

### 1.2.1 复合改性沥青制备

首先,将盛有  $500 \text{ g}$  基质沥青的容器置于加热炉上加热至  $170.0^{\circ}\text{C}$ ,经高速搅拌仪器搅拌  $10 \text{ min}$ ,再按照预定比例将 CSW 加入至容器内,持续搅拌  $30 \text{ min}$ ,使硫酸钙晶须与改性沥青进行充分融合。然后,将制备好的硫酸钙晶须改性沥青放入控温箱中,温度调至  $135.0^{\circ}\text{C}$ ,进行养护备用。另外,参照 CSW 改性沥青的制备方法,可得到聚酯纤维改性沥青。最后,将 CSW 和聚酯纤维同时加入沥青中,得到 CSW 和聚酯纤维复合改性沥青。

### 1.2.2 复合改性沥青老化试验及结果

本试验规程参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。本试验采用沥青旋转薄膜加热试验,根据改性沥青在薄膜旋转烘箱加热前后延度、针入度、软化点的变化差值,来评价复合改性沥青老化性能。差值小表明该掺量的改性沥青较为稳定,抗老化性能较强,反之则表示抗老化性能较弱。试验加热时间设置为  $20 \text{ h}$ ,硫酸钙晶须掺量(占沥青质量的百分比)分别为  $2.0 \text{ wt}\%$ 、 $4.0 \text{ wt}\%$ 、 $6.0 \text{ wt}\%$ 、 $8.0 \text{ wt}\%$ ,聚酯纤维掺量(占沥青质量的百分比)分别为  $0.1 \text{ wt}\%$ 、 $0.2 \text{ wt}\%$ 、

$0.3 \text{ wt}\%$ 、 $0.4 \text{ wt}\%$ 。老化前后不同 CSW 和聚酯纤维掺量下沥青三大指标试验结果见图 2,其中:横坐标均表示聚酯纤维掺量;图 2(a)—(b)的纵坐标表示  $25.0^{\circ}\text{C}$  下沥青的针入度,图 2(c)—(d)的纵坐标表示  $10.0^{\circ}\text{C}$  下沥青的延度,图 2(e)—(f)的纵坐标表示沥青的软化点。

由复合改性沥青的三大指标试验结果可知:

a)在 CSW 不变的情况下,随聚酯纤维增加,复合改性沥青针入度逐渐降低;在聚酯纤维掺量不变的情况下,随 CSW 增加针入度逐渐减小;基质沥青经老化后针入度明显降低,但随外加剂掺量增加其针入度逐渐提高,其中未掺外加剂的基质沥青在老化前针入度为  $6.80 \text{ mm}$ ,老化后为  $4.50 \text{ mm}$ ,差值为  $2.30 \text{ mm}$ ;  $6.0 \text{ wt}\%$  的 CSW 和  $0.3 \text{ wt}\%$  的聚酯纤维掺量组合下,老化前沥青针入度为  $6.50 \text{ mm}$ ,老化后为  $5.55 \text{ mm}$ ,差量为  $0.95 \text{ mm}$ ,与基质沥青相比,复合改性沥青老化前后针入度差值降低了  $58.70\%$ ,且在所有不同掺量外加剂组合中该组差值最小,此复合改性沥青较为稳定。

b)CSW 掺量不变时,复合改性沥青延度随聚酯纤维增加逐渐降低;聚酯纤维掺量不变时,其延度随 CSW 增加逐渐减小,其原因是 CSW 细小,能与沥青较好交融,且聚酯纤维具有良好的吸油性,能吸附自由沥青,减少了沥青的含油量和流动性,使复合改性沥青不会与基质沥青一样出现有一定变形但不易发生断裂的情况。基质沥青经老化后延度明显降低,但随外加剂掺量增加其延度逐渐提高,基质沥青老化前延度为  $52.0 \text{ cm}$ ,老化后延度为  $33.0 \text{ cm}$ ,老化前后延度变化差值为  $19.0 \text{ cm}$ ;  $6.0 \text{ wt}\%$  的 CSW 和  $0.3 \text{ wt}\%$  的聚酯纤维掺量组合下,老化前延度为  $44.2 \text{ cm}$ ,老化后为  $39.6 \text{ cm}$ ,老化前后延度差值为  $4.6 \text{ cm}$ ,其差值与基质沥青相比降低了  $75.79\%$ 且小于其他各组,此时复合改性沥青较为稳定。

c)基质沥青随 CSW 和聚酯纤维的加入,其软化点逐渐升高,表明外加剂的掺加使得沥青内部形成网状结构从而导致软化点升高显著。其中基质沥青软化点老化前为  $51.0^{\circ}\text{C}$ ,老化后为  $40.2^{\circ}\text{C}$ ,老化前后软化点的差值为  $10.8^{\circ}\text{C}$ ,而老化前后复合改性沥青软化点差值均小于基质沥青,这表明外加剂的掺入使沥青抗老化性能提高;且  $6.0 \text{ wt}\%$  掺量的 CSW 和  $0.3 \text{ wt}\%$  掺量的聚酯纤维组合时,复合改性沥青老化前后软化点差值最小,为  $4.3^{\circ}\text{C}$ ,比基质沥青老化前后软化点的差值下降了  $60.19\%$ ,该掺量下的复合改性沥青性能较为稳定。通过对复合改性

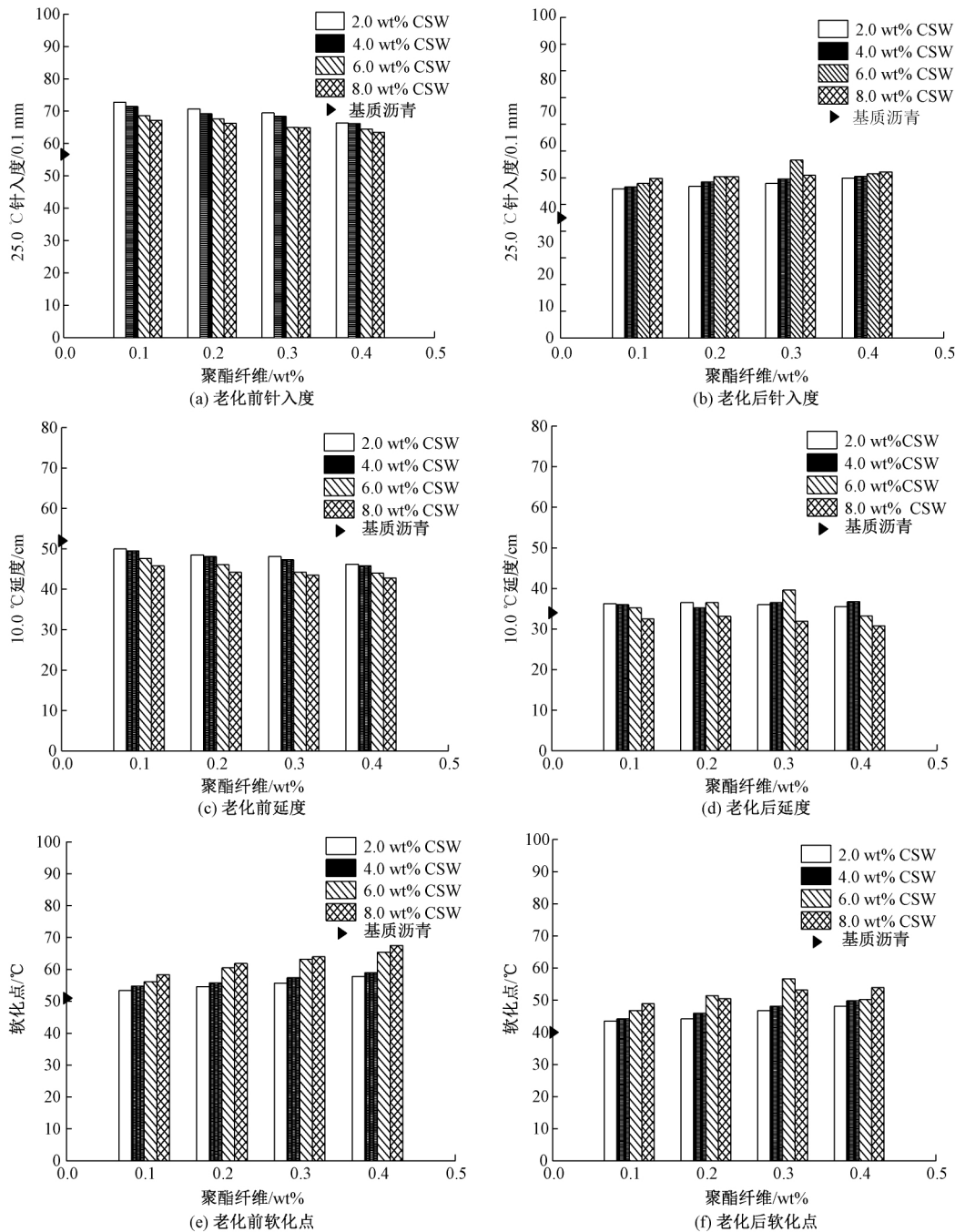


图2 老化前后改性沥青的三大指标

沥青老化前后性能的评估,可知将CSW和聚酯纤维复合添加于沥青,能有效改善其老化后的针入度、延度和软化点指标,因此可进一步开展复合改性沥青混合料疲劳性能研究。

## 2 复合改性沥青混合料疲劳性能评估

### 2.1 配合比设计

本次试验沥青混合料选用AC-13密级配,设计级配如表2所示。按照经验预估沥青混合料的油石比,将沥青混合料分为4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、

6.0% 5个等级,将5组油石比分别制成马歇尔试件,每一组马歇尔试件个数不得少于5个。根据马歇尔试件进行试验,得到的各项马歇尔指标列于表3。

由表2—表3可以计算出沥青用量为 $OAC_1 = 5.4\%$ 和 $OAC_2 = 5.0\%$ ,因此可以得出最佳沥青含量 $OAC = (OAC_1 + OAC_2)/2 = 5.2\%$ 。其中: $OAC_1$ 、 $OAC_2$ 为最佳沥青含量,%; $OAC$ 为最终沥青含量,%。

### 2.2 沥青混合料疲劳试验及结果

目前用于评价沥青混合料疲劳性能的试验方法

表 2 AC-13 沥青混合料试验级配

筛孔/ mm	项目			
	目标上 限/%	目标下 限/%	目标级 配/%	设计级 配/%
16.000	100	100	100	100
13.200	100	90	95	94
9.500	85	68	76	78
4.750	68	38	53	50
2.360	50	24	37	42
1.180	38	15	26	24
0.600	28	10	19	25
0.300	20	7	13	15
0.150	15	5	10	11
0.075	8	4	6	5

表 3 马歇尔稳定度试验数据

油石 比/%	理论最大 相对密度	毛体积相 对密度	空隙 率/%	矿料间 隙率/%	饱和 度/%	稳定 度/kN	流值/ mm
4.0	2.682	2.542	7.8	12.6	49.5	13.68	3.02
4.5	2.674	2.547	6.6	12.7	55.6	14.29	3.42
5.0	2.669	2.549	5.3	12.9	67.4	13.87	3.76
5.5	2.667	2.551	4.7	13.2	71.6	13.52	4.12
6.5	2.664	2.553	4.1	13.3	78.0	12.96	4.51

有很多,常见的有四点弯曲法、梯形悬臂梁法和间接拉伸法等,不同试验方法存在不同优缺点,选用四点弯曲试验的原因是其对沥青混合料的敏感程度强于其他传统试验方法,且试验较简便,操作性较强。通过控制应变大小对沥青混合料进行重复弯曲荷载的施加,疲劳试验的整个过程更加接近于沥青路面在车轮荷载作用下的实际受力情况。

本文通过四点弯曲疲劳试验测得在重复弯曲荷载加载下沥青混合料的积累耗散能及加载次数(疲劳寿命),用以分析其抗疲劳性能。此试验采用 3 个拉应变水平,分别为 500、700  $\mu\epsilon$  及 900  $\mu\epsilon$ 。依据

《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),设弯曲荷载加载频率为 10 Hz,试验温度为 15.0  $^{\circ}\text{C}$ ,荷载加载采用恒应变控制的连续偏正弦加载模式,且当小梁试件的弯曲劲度模量为初始值的 50%时停止试验。小梁弯曲试件是利用高精度切割机将沥青混合料板块试件切割而成,其尺寸为 375 mm $\times$ 60 mm $\times$ 50 mm。该试验小梁弯曲试件如图 3 所示。

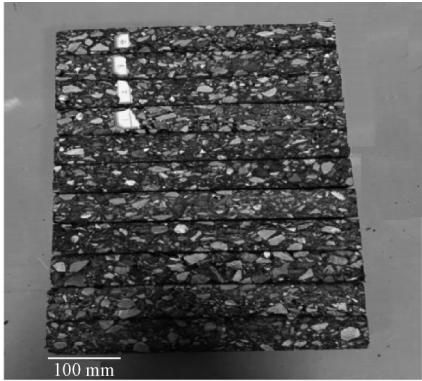
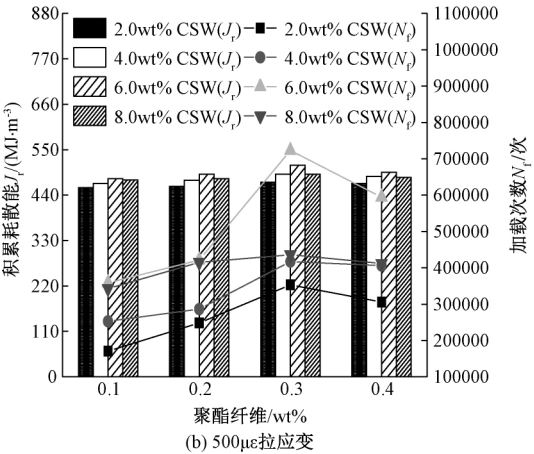
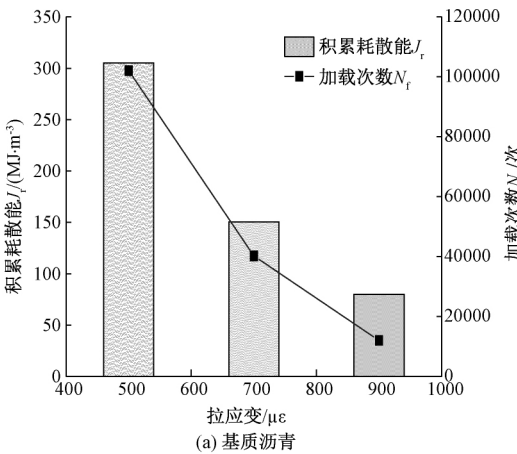


图 3 小梁弯曲试件照片

三种拉应变下不同 CSW 和聚酯纤维掺量与积累耗散能  $J_f$ 、疲劳加载次数  $N_f$  的关系见图 4。图 4(a)表示当 CSW 和聚酯纤维掺量均为 0 wt% 的基质沥青混合料试验结果,横坐标表示拉应变的大小,纵坐标表示三种拉应变下沥青混合料的积累耗散能和加载次数;图 4(b)—(d)表示不同 CSW 和聚酯纤维掺量下的复合改性沥青混合料试验结果,横坐标均表示聚酯纤维的掺量,左边纵坐标表示当拉应变分别为 500、700  $\mu\epsilon$  和 900  $\mu\epsilon$  时,不同 CSW 和聚酯纤维掺量组合下沥青混合料的积累耗散能;右边纵坐标表示相同状态下沥青混合料的加载次数,每个试验结果为三组平行试验结果的平均值。





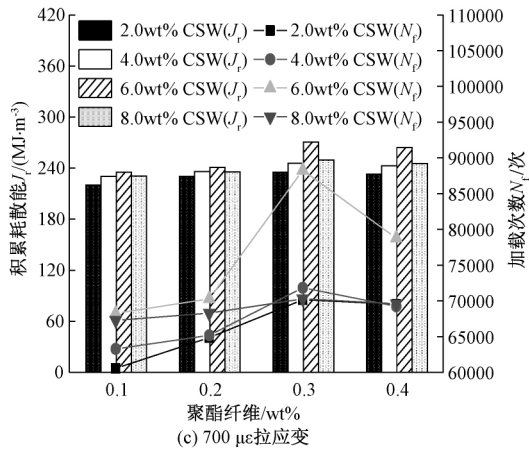
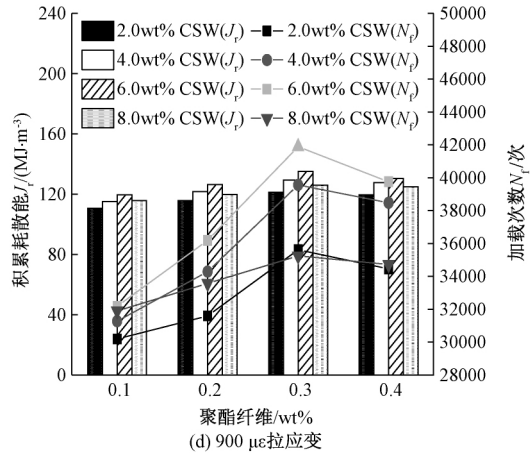
(c) 700  $\mu\epsilon$  拉应变(d) 900  $\mu\epsilon$  拉应变

图4 三种拉应变下外加剂掺量与累积耗散能及加载次数的关系

由试验结果可知:在拉应变不变的情况下,随着CSW和聚酯纤维的增加,复合改性沥青混合料累积耗散能和疲劳加载次数逐渐增大,但达到一定的峰值后会随掺加剂增加而减小,如拉应变为500  $\mu\epsilon$ 时,基质沥青的累积耗散能为305.1 MJ/m<sup>3</sup>,疲劳加载次数为113000次,当CSW掺量为6.0 wt%且聚酯纤维掺量为0.3 wt%时,复合改性沥青混合料的累积耗散能和疲劳加载次数最大。相较于基质沥青的结果,分别提高了近68%和540%。其次,随着拉应变增大,复合改性沥青混合料的累积耗散能和疲劳加载次数逐渐下降,说明拉应变与沥青混合料累积耗散能和疲劳加载次数呈负相关的规律,如拉应变为500、700  $\mu\epsilon$ 和900  $\mu\epsilon$ 时,对应的复合改性沥青混合料累积耗散能最大分别为512.6、270.6 MJ/m<sup>3</sup>和135.1 MJ/m<sup>3</sup>,其中900  $\mu\epsilon$ 的结果相较于500  $\mu\epsilon$ 时降低了近75%;对应的复合改性沥青混合料疲劳加载次数最大分别为722684、88276次和41891次,其中900  $\mu\epsilon$ 的结果相较于500  $\mu\epsilon$ 时降低了近95%。此外,在各应变条件下,累积耗散能和疲劳加载次数峰值所对应的外加掺量都为6.0 wt%的CSW和0.3 wt%的聚酯纤维,说明在该掺量组合下,复合改性沥青的抗疲劳性能最佳。

### 2.3 与累积耗散能相关的疲劳寿命预估方程

疲劳寿命是指沥青混合料在循环加载破坏前所经历的次数,疲劳寿命也是直接反映沥青混合料抗疲劳性能的指标,其与累积耗散能之间关系的建立,对预测不同外加剂掺量对应的改性沥青混合料寿命有直接意义。将图5中疲劳寿命与累积耗散能数据进行拟合,得到如下拟合方程:

$$N_f = A e^{B E_D} + C \quad (1)$$

其中: $E_D$ 为累积耗散能, MJ/m<sup>3</sup>;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为试验确定系数。得到的相关拟合曲线如图5所示,横坐标

表示沥青混合料累积耗散能,纵坐标表示沥青混合料疲劳寿命。

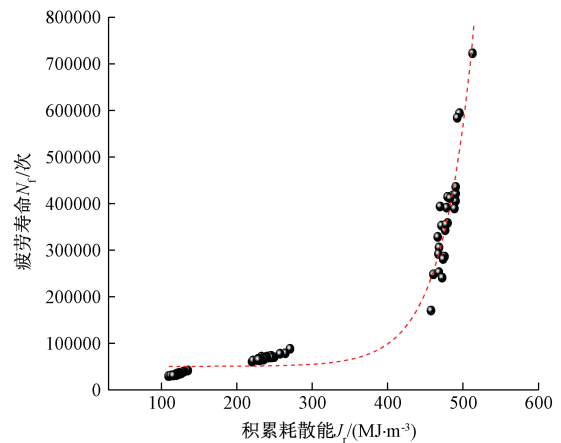


图5 沥青混合料累积耗散能与疲劳寿命关系

根据拟合曲线求出 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 的值,则疲劳寿命与累积耗散能的具体拟合方程如下:

$$N_f = 3.56 e^{0.024 E_D} + 50709 \quad (2)$$

式(2)中相关系数 $R^2$ 为0.9646,表明拟合程度较高。由图5可知,疲劳寿命与累积耗散能之间呈正相关,即累积耗散能增长,疲劳寿命也相应增加。具体而言,疲劳寿命与累积能耗这两个指标对材料破坏的影响可解释为:沥青混合料每次加载过程会产生能量损耗(即损失能),并随加载次数增加混合料能量损失逐渐增加,直至能量损失殆尽,此时发生疲劳破坏;另外,累积耗散能亦是同样规律,无外部荷载施加时沥青混合料能量为最大值,当开始施加外部荷载时能量开始损失,每次损失的能量不断累积,直至无能量损失,此时达到累积耗散最大值,即发生破坏。

## 3 多因素下复合改性沥青混合料疲劳性能分析

### 3.1 三种因素对疲劳寿命的数据分析

在不同掺量的CSW和聚酯纤维复合改性沥青混

合料试件中,CSW 掺量范围为 2.0 wt%~8.0 wt%, 聚酯纤维掺量范围为 0.1 wt%~0.4 wt%, 控制应变设置为 500、700、900  $\mu\epsilon$  及 1100  $\mu\epsilon$ , 通过四点弯曲疲劳试验获得的 500、700  $\mu\epsilon$  和 900  $\mu\epsilon$  拉应变下试验结果可见图 4(b)~(d), 1100  $\mu\epsilon$  拉应变下两种外加剂掺量对应的疲劳寿命试验结果如图 6 所示, 横坐标表示聚酯纤维的掺量, 纵坐标表示复合改性沥青的疲劳寿命。

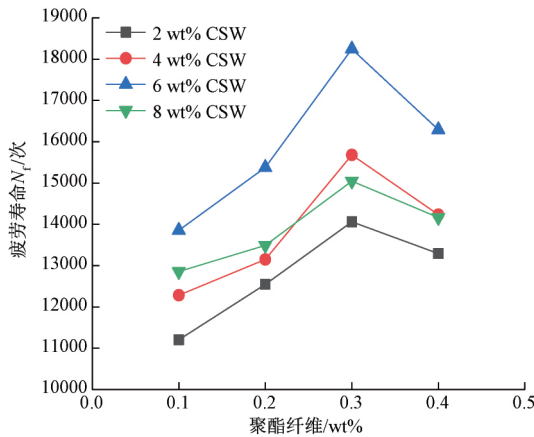


图 6 1100  $\mu\epsilon$  拉应变下弯曲疲劳试验

将 CSW 掺量、聚酯纤维掺量以及拉应变视为自变量, 对应的复合改性沥青混合料疲劳寿命为因变量, 对以上数据进行拟合, 其拟合方程设置如下:

$$N_f = a \times \left(\frac{x}{10}\right)^b \times m^c \times n^d + e \quad (3)$$

其中:  $x$  为硫酸钙晶须掺量, wt%;  $m$  为聚酯纤维掺量, wt%;  $n$  为拉应变数值,  $10^3 \mu\epsilon$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为试验确定的系数。

将图 4(a)~(c) 及图 6 的数据代入式 (3), 求出数值  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ , 拟合方程为:

$$N_f = 1.149 \times \left(\frac{x}{10}\right)^{0.146} \times m^{0.256} \times n^{-5.591} + 1.453 \quad (4)$$

式 (4) 中相关系数  $R^2$  为 0.8900, 可知拟合度良好, 且沥青混合料的疲劳寿命与以上三个影响因素均有关联, 其中系数  $b=0.146>0$ ,  $c=0.256>0$ , 说明两种外加剂的掺加对沥青混合料抗疲劳性能起到正相关的作用;  $d=-5.591<0$ , 说明拉应变对沥青混合料抗疲劳性能起到负相关作用。

### 3.2 疲劳因子 $Y$ 与沥青混合料抗疲劳性能的关系

根据以上研究, 进一步引入一个包含 CSW、聚酯纤维掺量及拉应变的无量纲  $Y$  作为疲劳因子, 其与复合改性沥青混合料的抗疲劳性能成关系式如下:

$$Y = \left(\frac{x}{10}\right)^{0.146} \times m^{0.256} \times n^{-5.591} \quad (5)$$

根据式 (4)~(5), 可转化得到疲劳因子  $Y$  与复合改性沥青混合料疲劳寿命之间呈线性关系, 如下所示:

$$N_f = 1.149 \times Y + 1.453 \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 复合改性沥青混合料疲劳因子与疲劳寿命成正比, 随着疲劳因子的增大, 疲劳寿命呈线性增加。基于以上关系式, 多因素影响下复合改性沥青混合料的疲劳性能可利用所提出的疲劳因子  $Y$  进行表征, 也为工程中选择外加剂对沥青混合料疲劳影响提供了参考。

## 4 结 论

本文将硫酸钙晶须和聚酯纤维复合改性, 并研究其对沥青抗老化性能以及沥青混合料抗疲劳性能的影响, 得出以下主要结论:

a) 在基质沥青中加入硫酸钙晶须和聚酯纤维加以复合改性, 使其针入度和延度减小, 软化点增大; 基质沥青和复合改性沥青分别经过老化后, 复合改性沥青的三大指标变化量均小于基质沥青, 表明了外加剂的掺入能提高沥青的抗老化性能, 且当硫酸钙晶须的掺量为 6.0 wt%, 聚酯纤维掺量为 0.3 wt% 时, 复合改性沥青的抗老化性能最佳。

b) 随着拉应变的增大, 复合改性沥青混合料的积累耗散能和疲劳寿命指标逐渐下降, 且这两个指标都存在随外加剂的增加先上升而后逐渐下降的规律, 即积累耗散能和疲劳寿命均存在峰值, 且在不同拉应变控制下其峰值所对应的硫酸钙晶须和聚酯纤维掺量分别为 6.0 wt% 和 0.3 wt%。

c) 根据复合改性沥青混合料的疲劳寿命与积累耗散能两者的数据拟合, 表明疲劳寿命与积累耗散能之间存在正相关关系; 通过进一步分析多因素下的疲劳性能, 引入由拉应变和外加剂组成的一个无量纲疲劳因子, 并建立了疲劳因子与沥青混合料疲劳寿命之间的线性关系方程。

## 参考文献:

- [1] 钱春香, 解建光, 王洪博. SBS 和 SEBS 改性沥青及混合料抗老化性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 945-949.
- [2] 周兴业, 王旭东, 关伟, 等. 宽温度域内沥青路面结构响应规律分析[J/OL]. 哈尔滨工业大学学报: 2020(2020-06-29)[2020-07-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20200629.1535.002.html>.
- [3] 张小元, 吕俊秀, 王修山, 等. 沥青混合料高温抗剪强

- 度及性能参数研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 682-687.
- [4] 徐鸥明, 韩森, 段小琦. SBS 改性沥青混合料疲劳极限拉应变研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2): 193-197.
- [5] 江南, 薛彩虹, 张超, 等. 改性硫酸钙晶须增强聚丙烯复合材料的制备与表征[J]. 塑料, 2019, 48(1): 1-6.
- [6] 李茂刚, 叶楷, 罗康碧, 等. 硫酸钙晶须改性及其在材料领域中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1590-1593.
- [7] Fan T T, Wang X S, Gao Y, et al. Investigating the interaction mechanism and effect of different calcium sulfate whiskers on performance of asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 515-533.
- [8] 王文清, 樊成霖, 王凯, 等. 硫酸钙晶须改性沥青混合料性能分析[J]. 建材世界, 2016, 37(2): 21-24.
- [9] 王修山. 硫酸钙晶须高模量沥青混凝土的路用性能[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(6): 1331-1334.
- [10] 郭乃胜, 赵颖华, 孙略伦. 纤维掺量对聚酯纤维沥青混凝土韧性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4): 32-35.
- [11] Zhang X Y, Gu X Y, Lv J, et al. Mechanism and behavior of fiber-reinforced asphalt mastic at high temperature [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(5): 407-415.
- [12] 叶群山, 吴少鹏. 聚酯纤维沥青胶浆流变特性研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 37-40.
- [13] 董刚, 郑南翔, 王甲飞. 聚酯纤维沥青胶浆及混合料路用性能[J]. 科技导报, 2015, 33(3): 49-53.
- [14] 常睿, 郝培文. 聚酯纤维复配 RET 改性沥青混合料的技术性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 484-490.
- [15] 伍剑奇. 聚酯纤维复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(7): 39-45.

(责任编辑:康 锋)