

文章编号:1671-8879(2019)03-0019-08

# 基于压-直剪试验的沥青路面层间剪切疲劳特性

黄恒伟<sup>1,2</sup>, RAHMAN Ali<sup>1,2</sup>, 黄杨权<sup>1,2</sup>, 安少科<sup>1,2</sup>, 艾长发<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘 要:**为探讨沥青路面在车辆荷载作用下的层间剪切疲劳特性,利用自主研发的压-直剪试验加载装置,对含层间界面的沥青混合料复合小梁进行层间压-直剪剪切疲劳寿命测试。通过改变 3 种环境温度(25 ℃、35 ℃、45 ℃)、2 种黏层油用量(0.3、0.5 L/m<sup>2</sup>)、5 种剪切应力水平(0、0.03、0.06、0.1、0.2 MPa)及 4 种压应力水平(0.16、0.18、0.2、0.22 MPa)等试验条件,研究上述因素对复合小梁试件层间剪切疲劳寿命的影响规律。研究结果表明:随着温度升高,在 25 ℃~45 ℃区间,0.3、0.5 L/m<sup>2</sup> 黏层油用量下的层间疲劳寿命平均降幅分别为 47.12%、72.79%,黏层油用量较多时层间剪切疲劳寿命对温度变化更敏感;随温度升高,在相同温度梯度内,相对常温区间段[25 ℃, 35 ℃)小梁层间剪切疲劳寿命的变幅大于相对高温区间段[35 ℃, 45 ℃];随着压应力水平增大,层间剪切疲劳寿命也逐渐增大,但其增大趋势随着温度升高逐渐减弱,当温度为 45 ℃、压力 0.2 MPa 时,层间疲劳寿命仅 521.8 s;随着剪切应力增大,在 25 ℃、35 ℃、45 ℃条件下,层间剪切疲劳寿命下降速率(分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ),存在  $k_2 > k_1$ 、 $k_2 > k_3$  的关系,且常温(25 ℃)状态下剪切应力对层间剪切疲劳寿命的影响不明显,而高温(45 ℃)状态下层间剪切疲劳寿命整体水平较低,剪切应力增大时其层间剪切疲劳寿命衰减效果也不明显。

**关键词:**道路工程;沥青路面;层间;压-直剪试验;复合小梁;剪切疲劳

**中图分类号:**U416.224 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.003

## Characterization of interface shear fatigue in asphalt pavement based on direct shear test with vertical loading

HUANG Heng-wei<sup>1,2</sup>, RAHMAN Ali<sup>1,2</sup>, HUANG Yang-quan<sup>1,2</sup>, AN Shao-ke<sup>1,2</sup>, AI Chang-fa<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to study the interlayer shear fatigue characteristics of an asphalt pavement under vehicular loading, the shear fatigue life of double-layered composite asphalt beam samples with an interface was tested, and a loading device that independently developed for compression-direct shear test was used. By change the factors of three test temperatures (25 ℃, 35 ℃, 45 ℃), two tack coat dosages (0.3, 0.5 L/m<sup>2</sup>), five shear stresses (0, 0.03, 0.06, 0.1, 0.2 MPa) and four types of compressive stress levels (0.16, 0.18, 0.2, 0.22 MPa), the

收稿日期:2019-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51878574)

作者简介:黄恒伟(1989-),男,四川遂宁人,工学博士研究生,E-mail:hw Huang@my.swjtu.edu.cn.

通讯作者:艾长发(1975-),男,江西南城人,教授,博士研究生导师,E-mail:cfaier@home.swjtu.edu.cn.

influence of the above factors on the interface shear fatigue life of composite beam samples was studied. The results show that as the temperature increases from 25 °C to 45 °C, the interlayer shear fatigue life reduces by 47.12% and 72.79%, when 0.3 and 0.5 L/m<sup>2</sup> tack coat dosages are applied, respectively. Further, the interface shear fatigue life is more sensitive to temperature changes when the dosage of the tack coat is higher. The variation in the fatigue life at an intermediate temperature range [25 °C, 35 °C) is larger than that at the high temperature range [35 °C, 45 °C]. As the compressive stress level increases, the interface shear fatigue life increases gradually. However, the increasing trend gradually decreases with temperature increasing. When the temperature reaches 45 °C and the compressive stress is 0.2 MPa, the interlayer shear fatigue life is only 521.8 s. The failure rate of the interface shear fatigue life at 25 °C, 35 °C, and 45 °C is  $k_1$ ,  $k_2$ , and  $k_3$ , respectively. When the shear stress increased, the failure rate ranked as  $k_2 > k_1$  and  $k_2 > k_3$ . Furthermore, the effect of shear stress on the interface shear fatigue life was not obvious at normal temperatures (25 °C), but at the high temperature condition (45 °C), the overall level of the interlayer shear fatigue life was lower, and the attenuation effect of the interlayer shear fatigue life was not obvious when the shear stress increased. 3 tabs, 6 figs, 27 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; interface; compression direct shear test; composite asphalt beam; shear fatigue

## 0 引言

新建路面、桥面铺装、旧路加铺等铺面结构是由不同材料组成的多层结构体系,其力学性能不仅与结构材料的性能有关,还与不同结构材料层间性能有关。层间界面是铺面结构中的薄弱位置。在沥青路面结构中间层黏结状态将决定路面的整体性能及耐久性<sup>[1-2]</sup>。文献[3]~文献[7]中注意到沥青路面结构中层间黏结不足时易引发车辙、剥离、推移、拥包和 Top-down 开裂等路面早期病害。Ge 等认为路面结构层间黏结不良时会在下层结构表面引发疲劳开裂,并系统分析了 4 种黏层油对路面结构层间剪切性能的影响<sup>[3]</sup>。Mohammad 等认为路面结构层间良好的黏结状态是保证其有效承受外部荷载与环境的前提,否则易出现路面结构层间滑移并导致疲劳开裂<sup>[5]</sup>。随着经济建设的不断发展,车辆重载、超载化,交通量不断增加以及渠化交通的加剧,由层间疲劳性能不足引发的路面病害越来越严重,特别是在路面防水性能不足而有水下渗时,在车辆荷载作用下极易导致层间开裂及分离,造成路面结构型损坏<sup>[8]</sup>。综上可知,沥青路面层间结构的整体性能至关重要,现有的层间黏结性能研究主要是从测试方法、评价指标及提高措施等方面开展研究。文献[9]~文献[12]利用层间拉拔测试装置,分别对道路层间结构和桥面铺装层间结构的黏结性能进行研究,并采用层间拉拔强度表征黏结

强度。如 Hakimzadeh 等利用自制的路面结构层间黏结性能测试装置对不同黏层油用量下的复合试件进行测试,并将测试结果与直接拉拔强度进行比较,验证了测试装置的有效性<sup>[9]</sup>。王亚玲等利用 MTS810 试验机和拉拔仪,研究了沥青混凝土桥面铺装结构在不同黏层油用量和不同温度下的层间黏结强度<sup>[12]</sup>。除拉拔试验外,剪切试验也是常用的层间性能测试方法,其主要包含直剪试验<sup>[13-15]</sup>和斜剪试验<sup>[11,16]</sup>,通过直剪强度和斜剪强度值比较层间黏结性能优劣。然而,在道路服役期内,沥青路面在车辆重复荷载作用下主要发生疲劳破坏,致使层间结构发生疲劳破坏。因此,研究层间结构疲劳性能对阐述路面结构整体性能十分必要。文献[17]~文献[23]中则利用层间剪切疲劳试验(直剪试验、斜剪试验),详细介绍了温度、竖向正压力,水平剪切应力、黏结材料种类及用量、层间污染等对层间疲劳寿命的影响,并基于研究结论提出了层间疲劳寿命提高措施。如刘丽等利用直剪装置分别测试了 3 种黏层油用量下双层沥青混凝土复合试件的直剪强度,并得出喷洒黏层油和减少层间污染是提高层间剪切强度的有效措施<sup>[17]</sup>。Jayakesh 等分析了路面结构中层间界面处理方式对直剪强度的影响,发现层间界面穿孔可有效提高其直剪强度<sup>[19]</sup>。Tozzo 等采用斜剪装置研究了复合试件在剪切过程中体积的膨胀特性,并根据膨胀速度提出了表征层间剪切疲劳性能的新方法<sup>[22]</sup>。上述研究为路面结构层

间设计、层间处置方式及黏层油类型与用量选择等提供重要的理论依据。

对于层间性能的测试与评价,目前国内外尚未形成统一标准。主要原因在于测试方法和评价指标的差异,各类层间性能测试装置较多;然而,现有的层间性能测试装置中,直剪试验装置忽略了车辆荷载作用下竖向拉/压应力的影响,拉拔试验装置则未考虑行车过程中水平剪切应力的作用,斜剪装置难以消除试件自重对试验结果的影响;且上述加载装置与试验结果多是层间界面在单一应力或弯拉应力与剪切应力同时存在时的状态,难以保证在对层间界面施加竖向压力的同时对其提供纯剪切应力。鉴于此,笔者团队在自制的切-拉拔试验装置的基础上<sup>[15]</sup>,对文献<sup>[24]</sup>中既有的四点剪切试验装置进行改进,设计出既可以施加竖向压力,又可以提供纯剪切应力的层间性能测试装置,简称压-直剪测试装置<sup>[25]</sup>。本文利用该装置对不同温度、黏层油用量、剪切应力及压应力作用下的层间疲劳性能进行测试,着重分析不同试验条件下各类影响因素的主次关系,以及层间疲劳寿命的变化规律及其原因,以期分析行车荷载过程中路面结构层间力学行为提供理论依据。

## 1 试验设备与方法

目前,国内外路面结构疲劳性能研究多基于间接拉伸疲劳试验或四点加载疲劳试验,但以上试验仅考虑了单一应力的作用;在行车过程中,路面结构在车辆荷载作用下,层间结构既承受着法向压应力,同时还需抵抗水平方向的剪切应力,尤其是在公交车站台、收费站、沥青面层薄层加铺、桥面铺装及陡坡、急弯、交叉路口等特殊路段的铺面结构中,法向压应力与水平剪切应力的综合作用是上述路段易产生病害的主要原因。因此,现有的间接拉伸疲劳试验和四点加载疲劳试验不能准确测试路面结构的层间疲劳性能,需对上述装置进行改进,使之在压应力加载过程中能施加剪切应力。

### 1.1 试验设备

为满足上述需要,对既有的四点剪切试验装置<sup>[24]</sup>进行改进,设计了一套施加压应力的辅助装置,并与改进后的四点剪切加载装置相组合,构成一套既可施加压应力又可加载剪切应力的层间疲劳性能试验装置,见图 1。

图 1 中,剪切应力由 UTM-100 万能试验机提供,用以模拟车辆在行驶过程中对层间结构的水平

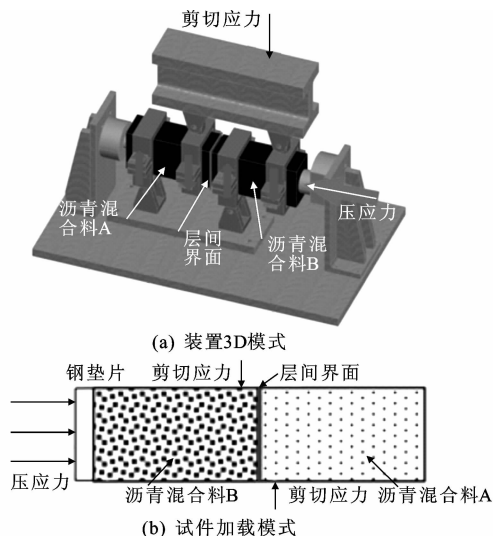


图 1 压-直剪试验装置模型

Fig. 1 Model of direct shear test with vertical loading set up  
剪切力。压应力由自制的压力辅助装置提供,以模拟车辆在行驶过程中对路面层间结构的竖向压力。

### 1.2 试验方法

压-直剪试验装置实物如图 2 所示,并通过以下步骤进行层间疲劳寿命测试。

(1)将事先已制作完成的含层间界面的复合小梁置于恒温箱中,在试验温度下保温 4 h 以上。

(2)将压应力辅助装置置于底板上,并将位移传感器固定于底板两侧的立柱上,待装置拼装完成后置于恒温箱中,在设定试验温度下保温 2 h 以上。

(3)从恒温箱内取出含层间界面的复合小梁及试验装置,将小梁固定于装置内,并将支撑片及位移传感器固定于试件上。用螺栓将压应力辅助装置固定于底板上,再将装有试件的试验装置快速安装于 UTM-100 万能试验机上,利用 UTM-100 万能试验机自身保温箱对试件及试验装置再次保温 0.5 h 以上。

(4)根据试验需要,设置合适的压力  $F$ ,通过千斤顶对小梁一端施加压应力,压应力由拉压传感器及挡板传递给试件,压应力由辅助装置上的读数仪进行实时显示,精度为 1 MPa,其大小可由液压千斤顶上的控制阀进行调控。

(5)启动 UTM-100 万能试验机控制系统进行压-直剪试验,测试小梁在压应力与剪切应力综合作用下的层间疲劳寿命。由于压应力会影响层间疲劳性能,同时为使压力的效果更加突出,本文中剪切应力取试件最大抗剪强度的 20%,即  $0.2P$ ,  $P$  为层间最大抗剪强度,施加频率为<sup>[26]</sup>

$$f = 0.277v^{0.944} \quad (1)$$

式中:  $f$  为行车荷载施加频率;  $v$  为行车速度。

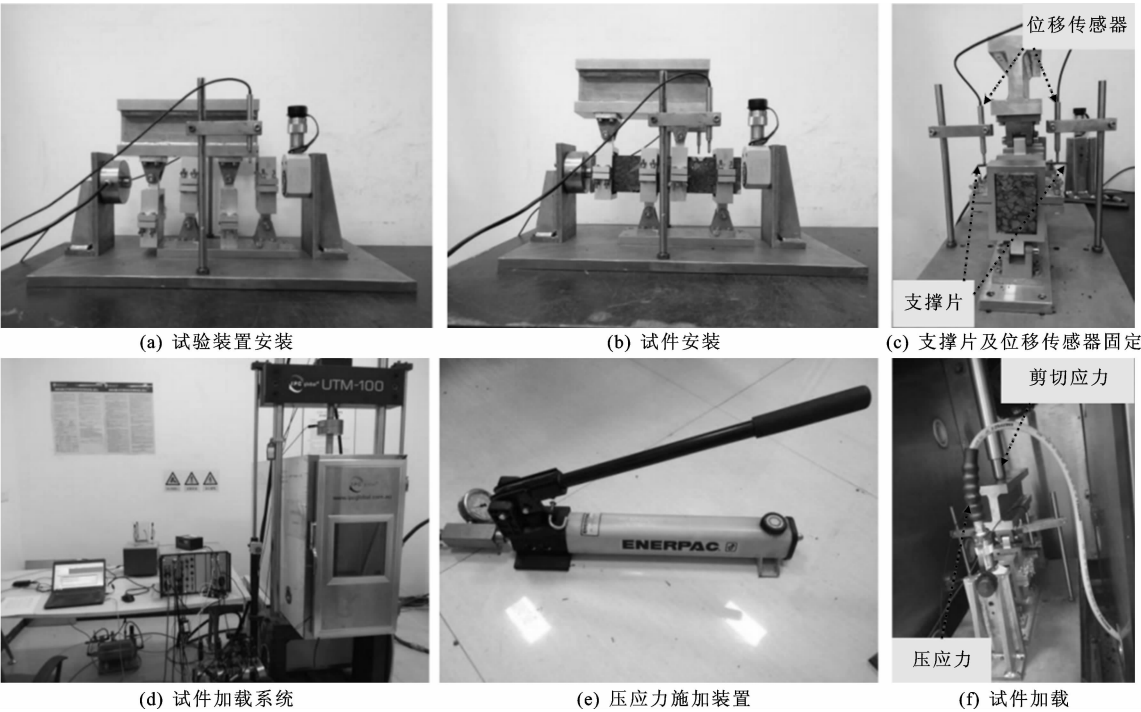


图2 压-直剪试验操作步骤

Fig. 2 Operation steps of direct shear test with vertical loading

2 试验材料与方案

2.1 试验材料

复合小梁采用 AC-20 与 SMA-13 组成的含层间界面的复合试件,混合料级配见表 1。

制作含层间界面的复合小梁时,先击实成型一半宽度的 AC-20 车辙板试件,将试件于室温下静置

24 h 后,用刷子在其靠近剩下一半车辙板模具的一侧均匀地洒铺黏层油,随后再击实另一半车辙板混合料 SMA-13 至最后成型。据文献[24]中梁形试件尺寸并结合改进后的四点剪切试验装置,利用 IPC 全自动切割机将车辙板试件切割成长、宽、高分分别为 280、50、70 mm 的含层间界面的复合小梁,具体制作过程见图 3。

表 1 混合料合成级配

Tab. 1 Aggregate gradation of mixture

混合料类型	各筛孔尺寸(mm)下的通过率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13	100	100	100	95	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10.0	6
AC-20	100	95	85	71	61.0	41	30	22.5	16	11.0	8.5	4

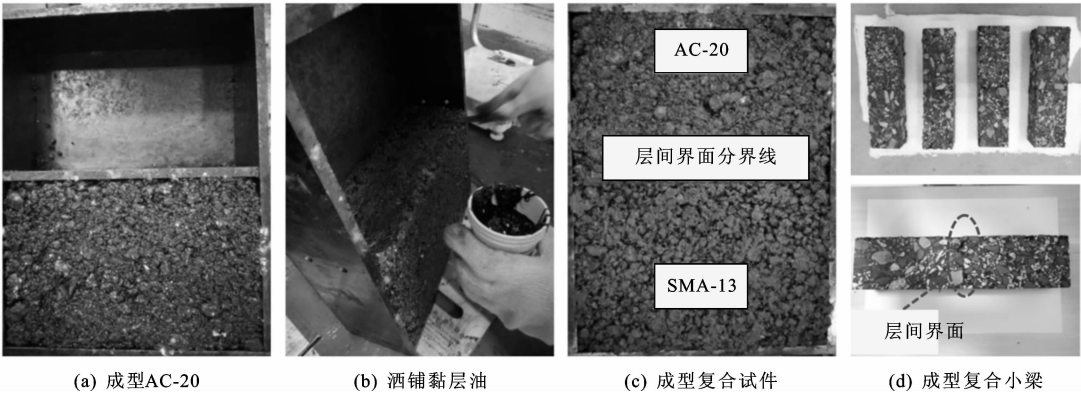


图3 车辙板成型及含层间界面的复合小梁制作

Fig. 3 Fabrication of hot mix asphalt slab and composite asphalt beam with interface

在复合小梁制作时,沥青胶结料和黏层油均使用自制改性沥青<sup>[27]</sup>,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)测试其性能指标见表 2。

表 2 自制改性沥青技术性能指标<sup>[27]</sup>  
Tab. 2 Technical performance indexes of homemade modified asphalt<sup>[27]</sup>

测试指标	试验结果
软化点/℃	113.4
延度(15℃,5cm·min <sup>-1</sup> )/cm	68
针入度(25℃,5s,100g)/0.1mm	42.8
黏韧性(25℃)/(N·m)	21.1
韧性(25℃)/(N·m)	7.4
粗集料黏附等级	5
脆点/℃	-22
旋转薄膜加热质量损失率/%	-0.02
旋转薄膜加热残留物针入度/%	83.1
闪点/℃	265

2.2 试验方案

2.2.1 黏层油用量

通常情况下,层间黏层油用量不足,将难以起到黏结作用,用量过多会增加层间润滑作用,抑制黏结效应发挥。因此,本文参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2017)中建议值,研究黏层油用量在 0.3、0.5 L/m<sup>2</sup> 情况下的层间疲劳寿命行为。

2.2.2 试验温度

为研究环境温度对层间疲劳寿命的影响,本文主要针对常温及高温环境,将试验温度设为 25℃、35℃、45℃。

2.2.3 压应力及剪切应力

在车辆行驶过程中,层间结构将会受到平行于层间界面方向的剪切应力作用,试验中该力由 UTM-100 万能试验机提供,为研究剪切应力对层间界面疲劳寿命的影响,试验中将剪切应力以半正弦波的形式施加于试件之上,加载频率为 10 Hz。

在压-直剪试验装置中,压应力模拟的是车辆行驶过程中对层间结构的竖向压力,路面设计中 BZZ-100 标准轴载作用下轮胎与路面间的接触压应力 0.7 MPa,复合小梁的侧面面积为 0.35 m<sup>2</sup>,鉴于尺度效应与施加装置情况,本文中压应力取 0~0.2 MPa。

3 试验结果与分析

3.1 黏层油用量对层间疲劳寿命的影响

本文中分别制作了黏层油洒铺量为 0.3、0.5 L/m<sup>2</sup> 含层间界面的复合小梁试件,在不施加压力

时取剪切应力为 0.2P,加载频率为 10 Hz,分别于试验温度 25℃、35℃、45℃下测定其疲劳寿命,如图 4 所示。

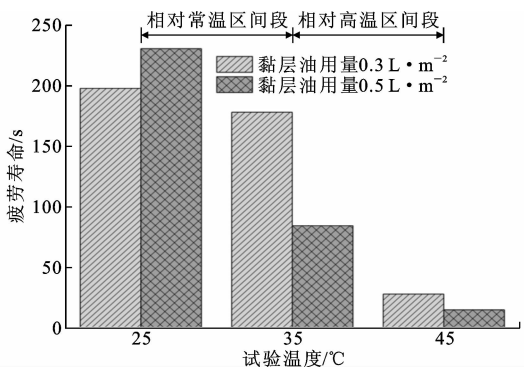


图 4 黏层油用量对层间疲劳寿命的影响  
Fig. 4 Effects of tack coat dosages on interlayer fatigue life

从图 4 可知,随着温度升高,2 种黏层油用量下的疲劳寿命均大幅下降,从 25℃升温至 45℃,0.3、0.5 L/m<sup>2</sup> 黏层油用量下的层间疲劳寿命分别下降 85.84%、93.49%,可见,温度是影响层间疲劳寿命的显著因素。高温条件下黏层沥青将逐渐趋于流态,黏滞性能不断下降,黏结效果迅速劣化,即使在低剪切应力作用下也易造成层间沥青剪切损伤,进而导致其层间疲劳寿命降低。同时,随着温度升高,2 种黏层油用量下疲劳寿命间的差值先增大后减小,依次为 32.7、93.5、13 s;在 35℃时 0.3 L/m<sup>2</sup> 用量下层间疲劳寿命下降不明显,0.5 L/m<sup>2</sup> 用量下层间疲劳寿命下降明显,在相对常温区间段[25℃, 35℃)温度对 0.5 L/m<sup>2</sup> 黏层油用量下层间疲劳寿命的影响大于 0.3 L/m<sup>2</sup>。与相对常温区间段[25℃, 35℃)相比,相对高温区间段[35℃, 45℃],0.3、0.5 L/m<sup>2</sup> 用量下层间疲劳寿命平均降幅分别为 47.12%、72.79%,再次证明了 0.5 L/m<sup>2</sup> 黏层油用量对温度的敏感性大于 0.3 L/m<sup>2</sup>。综上可知,为减弱黏层油用量对层间疲劳寿命的影响,下文试验中黏层油用量取 0.3 L/m<sup>2</sup>。

3.2 压应力对层间疲劳寿命的影响

试验中,黏层油洒铺量设计为 0.3 L/m<sup>2</sup>,选取 25℃、35℃、45℃为试验温度条件,剪切应力设为 0.2P,即 0.2 MPa,加载频率 10 Hz,再分别施加压应力 0、0.03、0.06、0.1、0.2 MPa,其层间疲劳寿命随压应力的变化如图 5 所示。

由图 5 可知:相同温度下的层间疲劳寿命随着压应力的增大而增大,以 25℃为例,压应力为 0 MPa 时,在剪切力为 0.2 MPa 作用下,其层间疲劳寿命仅为 197.7 s;当压应力增大至 0.2 MPa 时,在相同剪切

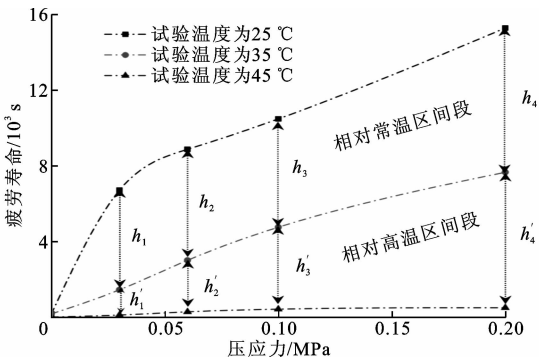


图 5 压应力对层间疲劳寿命的影响

Fig. 5 Effects of pressure strengths on interlayer fatigue life

应力作用下,其层间疲劳寿命达 15 296.5 s。试验中压应力模拟的是行车过程中车辆对路面的竖向荷载,可见适宜的压应力在一定程度上能抑制层间疲劳寿命降低,其原因为竖向荷载能使层间法向应力增大,在滑动摩擦因数  $\mu$  一定时,正压力  $F_N$  越大,则滑动摩擦力  $f_m$  越大,即

$$f_m = \mu F_N \tag{2}$$

在水平剪切应力作用下,层间疲劳破坏前需克服层间滑动摩擦力,尤其在高温状态下,层间沥青的黏附效果极其微弱,层间结合性能主要取决于层间界面内不同混合料表面粗糙纹理间形成的滑动摩擦力及互锁力,滑动摩擦力在一定程度上能抑制剪切应力的作用效果,进而增大层间疲劳寿命。

在同一压力水平下,温度越高,疲劳寿命越低,且在同一温度梯度范围内(图 5 中为 10 °C),相对高温区间段内温度对疲劳寿命的影响  $h'_1 \sim h'_4$  低于相对常温区间段的影响  $h_1 \sim h_4$ 。分析认为:同上文所述,在相对常温区间段黏层沥青处于黏弹状态,层间黏结效果明显,该区间段内随着温度升高,黏层沥青的黏结效果衰变缓慢,层间疲劳寿命衰减不明显;进入相对高温区间段后,黏层沥青将逐渐由黏弹状态过度至流态,黏结效果逐渐降低,但随着温度继续升高,黏层沥青快速变为流态,其黏结性迅速减弱,层间疲劳寿命也随之降低。

为进一步研究不同温度下压应力对层间疲劳寿命的影响,以每种温度下未施加压力时的疲劳寿命为基准,分别计算施加不同压力水平与未施加压力时的疲劳寿命之比,该比值即为疲劳寿命上升比值,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,不同温度下层间疲劳寿命上升幅度不同。当压应力由 0 逐渐增大至 0.2 MPa 时,25 °C、35 °C、45 °C 情况下层间疲劳寿命上升比值分别为 77.37、38.79、18.64;压应力增大到 0.03 MPa

表 3 不同压力水平下层间疲劳寿命上升比值

Tab. 3 Ratios of interlayer fatigue life under different pressure levels

温度/℃	不同压应力水平 (MPa) 下层间疲劳寿命上升比值				
	0	0.03	0.06	0.1	0.2
25	1.00	34.06	44.96	53.09	77.37
35	1.00	7.42	15.29	24.12	38.79
45	1.00	5.00	11.00	16.01	18.64

时,25 °C、35 °C、45 °C 时层间疲劳寿命上升比值分别为 34.06、7.42、5,上述现象表明温度越高,同一压力水平对层间疲劳寿命的影响越小。黏层沥青黏结性质随温度升高而降低,其黏结效果也随之减弱。根据黏层沥青的黏结效果作用机理可知,在本文试验装置中,压力水平较低时导致层间摩擦力不足,加之高温条件削弱了黏层沥青的黏结效果,在两者的综合作用下,层间疲劳寿命升幅较小。

3.3 剪切应力对层间疲劳寿命的影响

为研究剪切应力对层间疲劳寿命的影响,试验中黏层油洒铺量、试验温度、剪切应力及加载频率同第 3.2 节。剪切应力设为 0.16、0.18、0.2、0.22 MPa,压应力 0.1 MPa,其层间疲劳寿命随剪切应力的变化如图 6 所示。图 6 中: $y$  为因变量; $x$  为自变量; $R^2$  为判定系数。

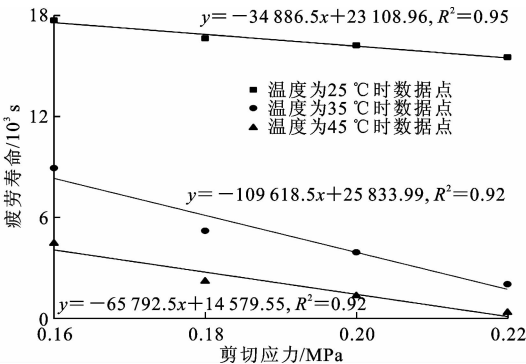


图 6 剪切应力对层间疲劳寿命的影响

Fig. 6 Effects of shear stresses on interlayer fatigue life

由图 6 知,相同温度下,层间疲劳寿命随剪切应力增大而降低。以 35 °C 为例,当剪切应力由 0.16 MPa 增至 0.18、0.2、0.22 MPa 时,其层间疲劳寿命降幅分别为 41.76%、56.1%、77.28%,可见随着剪切应力持续增加,在达到某一数值时,层间疲劳寿命降幅将达 100%,此时层间剪切应力即为其最大抗剪强度。剪切应力水平与层间疲劳寿命关系如下

$$N_f = k(1/\sigma)^n \tag{3}$$

式中: $N_f$  为试件破坏时的加载次数(疲劳寿命); $\sigma$

为每次施加剪切应力的最大幅值(MPa); $k$ 、 $n$ 分别为沥青混合料成分及特性常数,由试验计算获得。

在25℃、35℃、45℃温度下层间疲劳寿命与剪切应力的拟合曲线斜率分别为 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ,且 $k_2 > k_1$ 、 $k_2 > k_3$ ,表明疲劳寿命的降低速度先增大后减小。常温(25℃)及高温(45℃)条件下,随着剪切应力增大,疲劳寿命的下降趋势相对平缓,尤其在常温条件下黏层沥青处于黏弹状态,黏结性能较为稳定,所施加的剪切应力难以对层间沥青造成剪切损伤,故常温条件下剪切应力不易对层间疲劳寿命产生明显影响。然而,高温条件下黏层沥青将由常温时的黏弹状态变化至流态,黏结效果也将随着其状态变化而迅速降低,即使在较小的剪切应力作用下也易导致层间黏结沥青损伤,致使高温温度下层间整体疲劳水平较低,竖向剪切应力的影响程度亦不明显。

## 4 结 语

(1)在剪切应力作用下,随着温度升高,不同黏层油用量下的疲劳寿命均不断降低,且温度对其影响程度存在差异,0.3 L/m<sup>2</sup>黏层油用量下其层间疲劳寿命对温度的平均敏感性低于0.5 L/m<sup>2</sup>。

(2)试验中随着温度的逐渐升高,不同温度区间段内由于黏层沥青的状态变化致其黏结性质呈非线性变化,同一温度梯度范围内层间疲劳寿命在相对常温区间段[25℃,35℃)内的降幅大于相对高温区间段[35℃,45℃]。

(3)试验中随着压应力提高,同一温度条件下,层间疲劳寿命逐渐增大;但随着温度升高,压应力对层间疲劳寿命的影响增幅将随之减弱。

(4)同一温度条件下,层间疲劳寿命随着剪切应力提高而降低;当温度升高时,随着剪切应力增大,层间疲劳寿命逐渐下降,且下降速率先增大后减小,常温状态下剪切应力不易对层间疲劳寿命产生影响,高温状态下由于层间疲劳寿命的整体水平较低,剪切应力效果亦不明显。

(5)不同类型黏层油对温度的敏感程度有所差异,但本文复合小梁中黏层油只采用了一种自制改性沥青,对于其他类型黏层油对层间疲劳寿命的影响还需进一步研究。

## 参考文献:

## References:

[1] WANG X, SU Z, XU A, et al. Shear fatigue between

asphalt pavement layers and its application in design[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 297-305.

[2] CHUN S, KIM K, GREENE J, et al. Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 307-318.

[3] GE Z, WANG H, ZHANG Q, et al. Glass fiber reinforced asphalt membrane for interlayer bonding between asphalt overlay and concrete pavement[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 918-925.

[4] CALTABIANO M A, BRUNTON J M. Reflection cracking in asphalt overlays[C]//ITRD. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions. Washington DC:ITRD, 1991: 310-332.

[5] MOHAMMAD L N, RAQIB M, HUANG B. Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength[J]. Transportation Research Record, 2002, (1789): 56-65.

[6] SONG W, SHU X, HUANG B, et al. Laboratory investigation of interlayer shear fatigue performance between open-graded friction course and underlying layer[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 381-389.

[7] LUO X, GU F, LYTTON R L. Mechanistic composition-specific fatigue life of asphalt pavements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(12): 04017136.

[8] ZOFKA A, MALISZEWSKI M, BERNIER A, et al. Advanced shear tester for evaluation of asphalt concrete under constant normal stiffness conditions[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(S): 187-210.

[9] HAKIMZADEH S, KEBEDE N A, BUTTLAR W G, et al. Development of fracture-energy based interface bond test for asphalt concrete[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(S): 76-87.

[10] XIAO Y, WANG Y, WU S, et al. Assessment of bonding behaviors between ultrathin surface layer and asphalt mixture layer using modified pull test[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015, 29(14): 1508-1521.

[11] 汪水银. 半刚性基层与沥青面层黏结性能影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 12-19.

WANG Shui-yin. Influence factors of bond performance between asphalt surface layer and semi-rigid base[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 12-19.

- [12] 王亚玲,周玉利,姚爱玲,等. 沥青混凝土桥面铺装结构层间剪切与拉拔试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(6):15-18.  
WANG Ya-ling, ZHOU Yu-li, YAO Ai-ling, et al. Test of shear and pull-off between asphalt and concrete on bridge deck pavement structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009,29(6):15-18
- [13] SONG W, SHU X, HUANG B, et al. Factors affecting shear strength between open-graded friction course and underlying layer[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 527-535.
- [14] AI C, RAHMAN A, SONG J, et al. Characterization of interface bonding in asphalt pavement layers based on direct shear tests with vertical loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9):04017102.
- [15] 刘红坡,艾长发,RAHMAN Ali,等. 基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2017,37(3):16-23.  
LIU Hong-po, AI Chang-fa, RAHMAN Ali, et al. Characterization of interlayer bonding in asphalt pavement based on direct tension test with horizontal loading[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(3): 16-23.
- [16] TANG T, ZHA X, XIAO Q, et al. Laboratory characterization and field validation of ROADMESH-reinforced asphalt pavement in China[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(3): 299-313.
- [17] 刘 丽,郝培文,徐金枝. 黏层状况对沥青路面层间剪切疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10): 11-15.  
LIU Li, HAO Pei-wen, XU Jin-zhi. Influence of tack coat condition on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(10): 11-15.
- [18] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 1-10.  
HUANG Xiao-ming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 1-10.
- [19] JAYAKESH K, SURESHA S N. Experimental investigation of interface treatment technique on interface shear bond fatigue behavior of ultra-thin whitetopping[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 489-500.
- [20] 周志刚,虢 柱,罗根传,等. 水和超载对混凝土板沥青层间剪切疲劳寿命的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 9-15.  
ZHOU Zhi-gang, GUO Zhu, LUO Gen-chuan, et al. Effect of moisture and overload on interfacial shear fatigue life between asphalt overlay and cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 9-15.
- [21] 李 盛,刘朝晖,李宇峙,等. 刚柔复合式路面层间界面剪切疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 151-156.  
LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi, et al. Effect of moisture and overload on interfacial shear fatigue life between asphalt overlay and cement concrete pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 151-156.
- [22] TOZZO C, D'ANDREA A, AL-QADI I L. Dilatancy in the analysis of interlayer cyclic shear test results[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(12): 04016171.
- [23] 王选仓,孙耀宁,王文强,等. 黏层材料剪切疲劳特性及层间设计方法研究[J]. 材料导报, 2018, 32(16): 2750-2756, 2767.  
WANG Xuan-cang, SUN Yao-ning, WANG Wen-qiang, et al. Study on shear fatigue performance of tack coat materials and interlayer design method[J]. Introduction of Materials, 2018, 32(16): 2750-2756, 2767.
- [24] RAHMAN A, HUANG H, AI C, et al. Fatigue performance of interface bonding between asphalt pavement layers using four-point shear test set-up[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 181-190.
- [25] 任东亚,艾长发,RAHMAN Ali,等. 基于四点弯曲梁法的沥青混合料层间剪切强度测试装置: 中国, CN107389475A[P]. 2017-11-24.  
REN Dong-ya, AI Chang-fa, RAHMAN Ali, et al. Interlaminar shear strength testing device for asphalt mixture based on four point bending beam method: China, CN107389475A[P]. 2017-11-24.
- [26] AL-KHATEEB G G, GHUZLAN K A. The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 254-261.
- [27] AI C, RAHMAN A, WANG F, et al. Experimental study of a new modified waterproof asphalt concrete and its performance on bridge deck[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(S3): 270-280.