

## 沥青路面加铺结构中土工布夹层黏结失效时温特性\*

张海伟<sup>1</sup>,郝培文<sup>1†</sup>,唐成<sup>2</sup>,张华<sup>2</sup>

(1.长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064;

2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**针对含土工布夹层的双层沥青混合料试件进行直剪试验,以层间抗剪强度为指标,通过方差分析和多重比较分析了温度和加载速率对土工布夹层黏结失效的影响作用,建立了含土工布夹层试件的层间抗剪强度与温度、加载速率的数学关系,基于时间-温度等效原理确定了层间抗剪强度 sigmodal 主曲线,并对其时温等效特性进行了验证.结果表明:含土工布夹层试件层间抗剪强度受温度和加载速率显著影响,随温度升高或加载速率下降其值逐渐降低;指数模型对层间抗剪强度拟合效果良好,模型预估值与试验测试值基本吻合. sigmodal 主曲线在更宽加载速率范围内表征了层间抗剪强度的变化趋势,黏层油蠕变柔量与层间抗剪强度两力学参量的移位因子一致性验证了土工布夹层黏结失效具有时温等效特性.

**关键词:**道路工程;土工布;层间抗剪强度;指数模型;时间-温度等效原理

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Time-temperature Characterization of Bond Failure for Geotextile Interlayer in Asphalt Overlay

ZHANG Haiwei<sup>1</sup>,HAO Peiwen<sup>1†</sup>,TANG Cheng<sup>2</sup>,ZHANG Hua<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education,Chang'an University, Xi'an 710064,China; 2.College of Highway,Chang'an University,Xi'an 710064,China)

**Abstract:** Layer-parallel direct shear test was carried out on the double-layered asphalt concrete specimens with geotextile interlayer. The influence significances of temperature and deformation rate on the bond failure behavior of geotextile interlayer in asphalt overlay were analyzed by using the index of interlayer shear strength based on ANOVA and multiple comparing methods. The mathematical relationship among temperature, deformation rate and interlayer shear strength was then derived from an exponential function. Moreover, the sigmoidal master curve of interlayer shear strength was built based on the time-temperature superposition principle (TTSP) and the equivalent character of time-temperature for interlayer shear strength was also validated. The results showed that the influences of temperature and deformation rate were significant. The interlayer shear strength was lower when the temperature increases or deformation rate decreases. Furthermore, exponential model was used to predict the interlayer shear strength in laboratory, and the simulation results agreed well with the experimental results. The change

\* 收稿日期:2016-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478046),National Natural Science Foundation of China(51478046);长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(310821150015),Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges,Chang'an University(310821150015)

作者简介:张海伟(1989—),男,河南汤阴人,长安大学博士研究生

† 通讯联系人,E-mail:haopw211@163.com

tendency of the interlayer shear strength was showed in a broader range of deformation rate by using the sigmoidal master curve. The interlayer shear strength of specimen with geotextile interlayer had equivalent character of time-temperature which was validated by the consistency of shift factors for creep compliance and interlayer shear strength.

**Key words:** road engineering; geotextiles; interlayer shear strength; exponential model; time-temperature superposition principle

沥青路面服役一定年限后,出现早期病害可通过加铺新沥青层进行修复,然而旧路反射裂缝往往导致新加铺层快速破坏.土工布夹层能有效延缓反射裂缝,且具有密水作用,所以近年来其在路面加铺工程中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>.与此同时,人们开始关注土工布夹层与沥青层间黏结性能:文献[3]通过力学分析认为沥青路面中土工材料与沥青层的黏结性能直接影响其抗反射裂缝作用的发挥;文献[4]通过复合梁疲劳试验验证了土工布夹层黏结性能会影响其抗反射裂缝作用;文献[5]比较了设置土工布夹层前后沥青层间的黏结性能,发现铺设土工布会降低沥青层间黏结性能;文献[6]研究了乳化沥青洒布量对土工布夹层黏结性能的影响,发现其受乳化沥青洒布量影响并不敏感;文献[7]研究了加铺层沥青混合料摊铺温度对土工布夹层黏结性能的影响,发现沥青混合料较高摊铺温度有利于提升土工布夹层黏结性能;文献[8]比较了浸水前后含土工布夹层试件的层间抗剪强度,得出潮湿环境并没有明显降低土工布夹层的黏结性能的结论.综上所述,土工夹层黏结性能与其抗反射裂缝性能紧密相关,含土工布夹层的加铺路面与常规路面结构的层间黏结性能表现有所不同,且已有研究针对土工布夹层黏结特性并不系统,如在土工布夹层服役过程中,关于路面温度和车载作用速率对其黏结性能影响规律的研究就较为少见.

为此,本文在室内制备含土工布夹层的沥青混合料复合板试件,基于直剪试验测试不同温度和加载速率下试件的层间抗剪强度,然后应用统计学方法分析温度和加载速率的影响显著性并采用指数模型定量描述两因素对土工布夹层黏结失效的影响作用.进一步基于时间-温度等效原理构建 sigmoidal 主曲线在更宽加载速率范围内表征层间抗剪强度变化趋势,并通过比较层间抗剪强度和蠕变柔量两力学参数的移位因子验证土工布夹层黏结失效的时温等效特性,可为后续预测含土工布夹层加铺结构层间破坏的相关研究奠定基础.

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

为模拟铺设有土工布夹层的沥青路面加铺结构,室内采用“沥青下层+土工布夹层+沥青上层”的结构形式制备试件.上下层沥青混合料所用沥青为壳牌 70# 基质沥青,矿料为石灰岩,参照规范<sup>[9]</sup>推荐级配范围设计得到本研究所用 AC-16 型和 AC-20 型矿料级配曲线如图 1 所示.按马歇尔法确定上下层沥青混合料最佳油石比分别为 4.8% 和 4.3%,空隙率均为 4.5%.

所用聚酯无纺长丝土工布单位面积质量为 130 g/m<sup>2</sup>,纵向抗拉强度为 9.9 kN/m,厚度为 1.35 mm,梯形撕裂强度为 0.3 kN/m,耐热性为 230 °C.所用黏层油为壳牌 70# 基质沥青,其 25 °C 针入度为 7.1 mm,10 °C 延度为 25.2 cm,软化点为 46.6 °C,以上所述材料均满足规范使用要求.

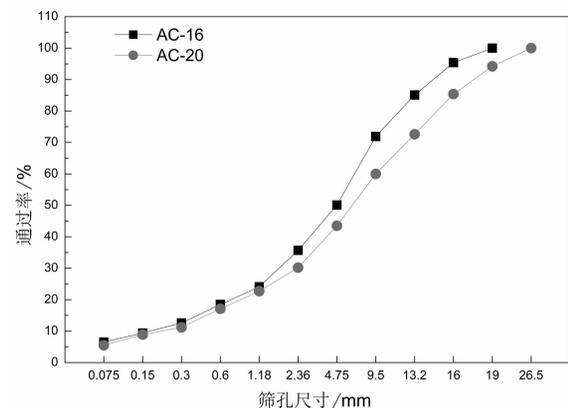


图 1 上下层沥青混合料矿料级配曲线

Fig.1 Aggregate gradation of AC-16 and AC-20 asphalt mixtures

### 1.2 试件制备

试件制备过程如下:1)按优选洒布量 0.9 kg/m<sup>2</sup>在 AC-20 沥青混合料标准车辙板(300 mm×300 mm×50 mm)表面均匀涂抹黏层油,涂抹过程保证黏层油温度(160±10) °C;2)在涂有黏层油的车辙

板表面迅速平整铺设土工布,并用轮碾仪往返碾压 5 次使黏层油浸入土工布,土工布表面出现油斑;3) 铺设土工布的车辙板放于 300 mm×300 mm×100 mm 的车辙模具中,然后将拌好的上层沥青混合料 AC-16 装入车辙模碾压得到双层车辙板;4) 对双层车辙板进行钻芯,得到直径和高度均为 100 mm 的圆柱体试件并在常温下晾干备用。

1.3 测试方法

环境箱中设置恒定温度(-5, 5, 15, 25, 35, 45 和 55 °C)对试件保温 6 h 后,依托 MTS 液压伺服试验机进行直剪试验,所用试验装置如图 2 所示,由上下 2 个夹具组成,其中上夹具固定 AC-20 沥青混合料,下夹具以恒定速率(1, 2.5, 5, 10, 25 和 50 mm/min)带动 AC-16 沥青混合料向下移动.试验过程土工布夹层和沥青混合料间承受剪切应力不断增加,最终土工布夹层发生黏结失效.根据仪器记录荷载按式(1)计算剪应力,试验过程剪应力随时间变化曲线如图 3 所示,剪应力峰值  $\tau_f$  即为土工布夹层发生黏结失效时试件层间抗剪强度<sup>[10]</sup>.

$$\tau = \frac{4P}{\pi D^2} \tag{1}$$

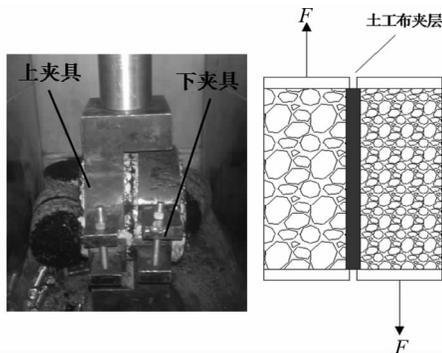


图 2 直剪试验图示

Fig.2 Layer-parallel direct shear test set up

式中:  $\tau$  为剪应力,MPa;  $P$  为记录的荷载,N;  $D$  为试件直径,mm.

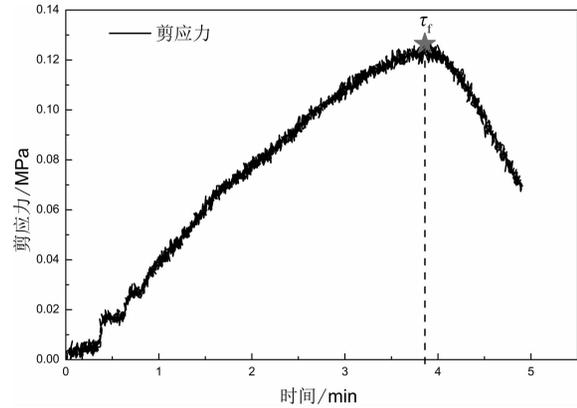


图 3 直剪试验中剪切应力-时间曲线

Fig.3 Shear stress-time curve of layer-parallel direct shear test

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

不同试验温度和加载速率下得到层间抗剪强度(每组 3 次平行试验平均值)汇总如表 1 所示.由表 1 可知,随着试验温度升高或加载速率降低,层间抗剪强度值呈现下降趋势,这与常规沥青路面层间抗剪强度随温度和加载速率变化趋势是一致的<sup>[11-12]</sup>,而呈现这一趋势是因为黏层油材料的热流变属性<sup>[13]</sup>. 55 °C, 1.0 mm/min 试验条件组合下得到抗剪强度平均值最小为 0.021 MPa;-5 °C, 50 mm/min 试验条件组合下得到抗剪强度平均值最大为 1.394 MPa.两者相差 66 倍之多,表明当土工布夹层服役过程所处工况不同时,其抵抗黏结失效的能力有很大差别.

表 1 不同试验条件组合下含土工布夹层试件层间抗剪强度

Tab.1 Shear strength of samples with geotextile interlayer under different test condition

MPa

试验温度/°C	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )					
	1	2.5	5	10	25	50
-5	0.676 (0.093)	0.843(0.120)	0.949(0.068)	1.072(0.083)	1.195(0.099)	1.394(0.104)
5	0.390(0.031)	0.483(0.034)	0.562(0.057)	0.665(0.042)	0.781(0.081)	0.873(0.063)
15	0.201(0.030)	0.242(0.029)	0.281(0.040)	0.334(0.022)	0.412(0.021)	0.453(0.042)
25	0.108(0.021)	0.135(0.016)	0.155(0.017)	0.176(0.035)	0.216(0.028)	0.253(0.021)
35	0.078(0.022)	0.102(0.016)	0.119(0.023)	0.128(0.023)	0.139(0.020)	0.149(0.022)
45	0.042(0.012)	0.048(0.010)	0.059(0.010)	0.069(0.009)	0.082(0.011)	0.091(0.019)
55	0.021(0.005)	0.026(0.004)	0.033(0.008)	0.038(0.007)	0.045(0.009)	0.051(0.010)

注:括号中的数值为每组试验结果的标准差.

对表 1 中试验结果进行方差分析以判定温度和加载速率对层间抗剪强度影响作用是否显著,结果

见表 2.由表 2 可知,温度和加载速率的显著性概率 sig. 值均小于 0.05,表明在 95% 的置信水平下两因

素对层间抗剪强度结果的影响均是显著的;同时温度对应的  $F$  值远大于加载速率对应的  $F$  值,表明温度对层间抗剪强度的影响更为显著.

采用多重比较方法进一步分析温度、加载速率处于不同水平时对应试件层间抗剪强度结果差异的显著性,结果如表 3 和表 4 所示.由表 3 和表 4 可知,加载速率 6 个水平(1, 2.5, 5, 10, 25, 50 mm/min)构成 15 个比较组中有 10 个比较组的均值差值是显著的( $\text{sig.} < 0.05$ ),其余 5 个均值差值不显著的比较组均为相邻水平构成的比较组;温度 7 个水平(-5, 5, 15, 25, 35, 45, 55 °C)构成 21 个比较组中有 18 个比较组的均值差值是显著的,25 °C 与 35 °C 构成的比较组、35 °C 与 45 °C 构成的比较组以及 45 °C 与 55 °C 构成的比较组的均值差值并不显著,可见当温度在常温(25 °C)以上区域时,相邻两温度对应抗剪强度差距并不明显.从表 3 和表 4 还可发现,相比于加载速率,不同温度水平对应抗剪强度均值差值更大,再次表明了当温度因素水平变化时对抗剪强度影响更为显著.

表 2 含土工布夹层试件层间抗剪强度结果方差分析

Tab.2 Variance analysis for shear strength of samples with geotextile interlayer

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	sig.
温度	14.236	6	2.373	278.477	0.000
加载速率	0.89	5	0.178	20.891	0.000
误差	0.336	114	0.009		
总和	16.098	125			

表 3 加载速率不同水平对层间抗剪强度影响显著性分析 ( $\alpha = 5\%$ )

Tab.3 Significance analysis of the influence of different test speed levels on shear strength( $\alpha = 5\%$ )

(I)加载速率 / (mm·min <sup>-1</sup> )	(J)加载速率 / (mm·min <sup>-1</sup> )	层间抗剪强度 / MPa 均值差值(I-J)	sig.
1	2.5	-0.052	0.071
1	5	-0.092 *	0.002
1	10	-0.138 *	0.000
1	25	-0.193 *	0.000
1	50	-0.250 *	0.000
2.5	5	-0.040	0.164
2.5	10	-0.086 *	0.003
2.5	25	-0.142 *	0.000
2.5	50	-0.198 *	0.000
5	10	-0.046	0.107
5	25	-0.102 *	0.001
5	50	-0.159 *	0.000
10	25	-0.055	0.054
10	50	-0.112 *	0.000
25	50	-0.056	0.051

注: \* 代表均值差值是显著的.

表 4 试验温度不同水平对层间抗剪强度影响显著性分析 ( $\alpha = 5\%$ )

Tab.4 Significance analysis of the influence of different test temperature levels on shear strength( $\alpha = 5\%$ )

(M)温度 / °C	(N)温度 / °C	层间抗剪强度 / MPa 均值差值(M-N)	sig.
-5	5	0.396 *	0.000
-5	15	0.701 *	0.000
-5	25	0.848 *	0.000
-5	35	0.902 *	0.000
-5	45	0.956 *	0.000
-5	55	0.986 *	0.000
5	15	0.306 *	0.000
5	25	0.452 *	0.000
5	35	0.507 *	0.000
5	45	0.561 *	0.000
5	55	0.590 *	0.000
15	25	0.147 *	0.000
15	35	0.201 *	0.000
15	45	0.255 *	0.000
15	55	0.285 *	0.000
25	35	0.055	0.078
25	45	0.109 *	0.001
25	55	0.138 *	0.000
35	45	0.054	0.082
35	55	0.084 *	0.008
45	55	0.030	0.340

注: \* 代表均值差值是显著的.

2.2 指数模型回归分析

采用指数函数(见式(2))按最小二乘法对表 1 中结果进行回归分析,得到不同加载速率下层间抗剪强度-试验温度拟合曲线如图 4 所示,对应回归系数  $a$  和  $b$  见表 5.

$$\tau_f(T) = 10^{a \cdot T + b} \tag{2}$$

式中:  $\tau_f(T)$  为层间抗剪强度, MPa;  $a, b$  为回归系数;  $T$  为试验温度, °C.

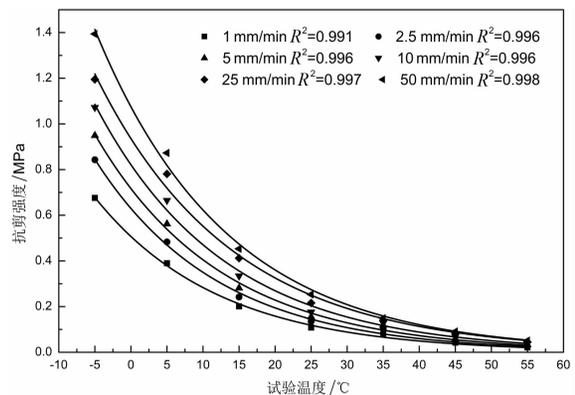


图 4 不同加载速率下层间抗剪强度指数模型拟合曲线  
Fig.4 Interlayer shear strength exponential model fitted curves under different test speed

由图 4 可知,不同加载速率下层间抗剪强度拟合曲线的相关系数均在 0.99 以上,说明指数函数可用于表达含土工布夹层试件层间抗剪强度与试验温度的关系.由表 5 可知,不同加载速率下得到的回归系数  $a$  在  $-0.0245$  附近波动,且波动幅度不超过 10%,所以可认为回归系数  $a$  是独立于加载速率的常数,反映了试件层间抗剪强度对温度的敏感性;反观回归系数  $b$  则依赖于加载速率,其值反映了加载速率对层间抗剪强度结果的影响.

表 5 不同加载速率下层间抗剪强度指数模型回归系数

Tab.5 Coefficient  $a$  and  $b$  of the exponential model under different test condition

加载速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	系数 $a$		系数 $b$	
	估计值	标准差	估计值	标准差
1	-0.025 3	0.000 7	-0.294 9	0.005 4
2.5	-0.025 5	0.000 8	-0.200 7	0.006 4
5	-0.024 8	0.000 9	-0.144 5	0.007 3
10	-0.024 2	0.001 0	-0.085 4	0.008 6
25	-0.023 7	0.000 8	-0.028 7	0.009 9
50	-0.023 9	0.001 1	0.031 6	0.007 4

以加载速率对数  $\log v$  和  $b$  值分别作为自变量和因变量进行线性回归,可得到式(3):

$$b(v) = c + k \log v = -0.282 + 0.187 \log v$$

$$R^2 = 0.99 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得到综合考虑试验温度和加载速率的层间抗剪强度数学模型,如式(4)所示:

$$\tau_f(T, v) = 10^{-0.0245T - 0.282 + 0.187 \log v} \quad (4)$$

为说明式(4)所述模型与试验数据的契合性,对层间抗剪强度的模型计算值与试验测试值进行比较,如图 5 所示.

由图 5 可知,散点基本上分布在  $y=x$  对角线上,模型计算值与试验测试值偏差很小,表明在设置试验条件范围内(温度  $-5 \sim 55$  °C,加载速率  $1.0 \sim 50$  mm/min),式(4)所述模型可以很好地描述含土工布夹层试件层间抗剪强度与温度、加载速率间的关系:

### 3 时温等效特性分析

#### 3.1 层间抗剪强度主曲线

当温度升高(降低)和加载时间延长(缩短)对材料的力学性质影响一致时,通常可用时间-温度等

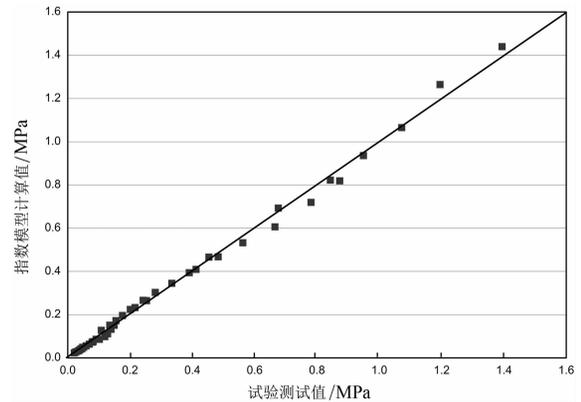


图 5 层间抗剪强度实测值与计算值比较

Fig.5 Comparison of measured values and calculated values for interlayer shear strength

效原理对试验数据进行分析<sup>[14]</sup>.目前时间-温度等效原理已广泛用于分析沥青类材料线黏弹性行为,同时大量的试验研究证明该原理同样适用于分析沥青类材料非线性范围的力学性质<sup>[13,15-16]</sup>.由此,本文应用时间-温度等效原理对温度和加载速率影响土工布夹层黏结失效的等效作用进行分析.

时间-温度等效原理可用式(5)表示,即在任意试验温度  $T$  下荷载作用时间  $t$  时材料学性质(松弛模量、相位角、泊松比、强度等)与参考温度  $T_0$  下荷载作用时间  $t_r$  时力学性质等效.根据时温等效原理可将不同温度对应的力学性质曲线平移  $\alpha_{T_0}(T)$  形成一条参考温度下的主曲线,主曲线的横轴通常为时间,也可以是与时间相关的加载频率或加载速率,当横轴为加载速率时移位因子满足式(6)<sup>[15]</sup>.

$$f(t, T) = f(t_r, T_0) = f\left(\frac{t}{\alpha_{T_0}(T)}, T_0\right) \quad (5)$$

$$v_r = v \alpha_{T_0}(T) \quad (6)$$

式中:  $t$  为试验时间, s;  $t_r$  为等效时间(也称为缩减时间), s;  $T$  为试验温度, °C;  $T_0$  为参考温度, °C;  $f$  代表材料的某一力学性质;  $v_r$  为等效加载速率 (mm/min);  $v$  为试验加载速率, mm/min;  $\alpha_{T_0}(T)$  为移位因子.

绘制不同温度下层间抗剪强度随加载速率的变化曲线,如图 6 所示.在图 6 中,以  $25$  °C 作为参考温度,将其他试验温度下层间抗剪强度进行平移可得到  $-5, 5, 15, 35, 45, 55$  °C 对应的移位因子分别为  $4.08, 2.70, 1.18, -1.10, -2.60, -2.60$  和  $-3.70$ .曲线平移过程还可以看出相同的层间抗剪强度可在高温-高加载速率下得到,也可在低温-低加载速率下得到.

采用式(7) WLF (Williamms-Landel-Ferry) 经

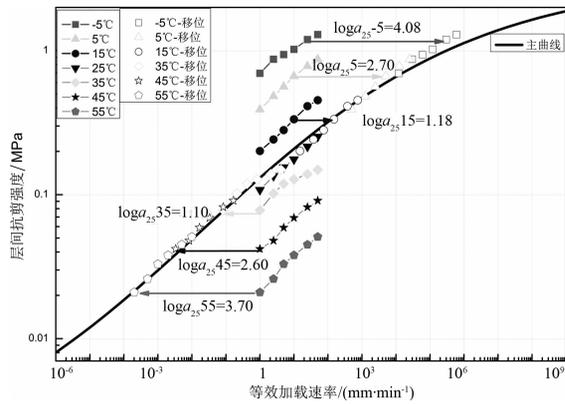


图6 层间抗剪强度主曲线(25 °C)

Fig.6 Interlayer shear strength master curve(25 °C)

验方程<sup>[14]</sup>对图6中不同温度的移位因子进行拟合,如图7所示.从图7中可以看出,拟合得到的层间抗剪强度移位因子曲线的相关系数在0.99以上,可见含土工布夹层试件层间抗剪强度的移位因子能很好地满足WLF经验方程,表明了应用时温等效原理分析层间抗剪强度是可行的.

$$\lg\alpha_{25}(T) = \frac{-C_1(T-25)}{C_2 + (T-25)} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_{25}(T)$  为各试验温度相对于 25 °C 的移位因子;  $C_1$  和  $C_2$  为回归系数;  $T$  为试验温度, °C.

进一步采用式(8)所示的 sigmoidal 方程<sup>[17]</sup>表征含土工布夹层结构层间抗剪强度主曲线.根据移位后的层间抗剪强度-等效加载速率散点,按简面体爬山法对 sigmoidal 方程进行拟合,可得到各回归系数  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$  和  $\theta$  的值,如表6所示.

表6 含土工布夹层试件层间抗剪强度主曲线参数汇总  
Tab.6 Summary of values of coefficient for interlayer shear strength master curve

回归系数	$\delta$	$\varphi$	$\beta$	$\theta$	$C_1$	$C_2$
估计值	-2.977	0.504	-0.412	-0.249	83.2	644.4

$$\lg(\tau_f) = \delta + \frac{\varphi - \delta}{1 + \exp[\beta + \theta \lg v_r]} \quad (8)$$

式中:  $\tau_f$  为层间抗剪强度, MPa;  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  为回归系数, 其中  $\delta$  和  $\varphi$  分别代表层间抗剪强度最小值和最大值对应的对数,  $\beta$  和  $\theta$  为描述曲线形状特征的系数;  $v_r$  为等效加载速率, mm/min.

对式(8)做进一步推导得到式(9),表达了含土工布夹层试件层间抗剪强度与温度以及更宽范围的加载速率的数学关系.

$$\lg(\tau_f) = \delta + \frac{\varphi - \delta}{1 + \exp\left\{\beta + \theta \left[\lg v + \frac{-C_1(T-25)}{C_2 + (T-25)}\right]\right\}} \quad (9)$$

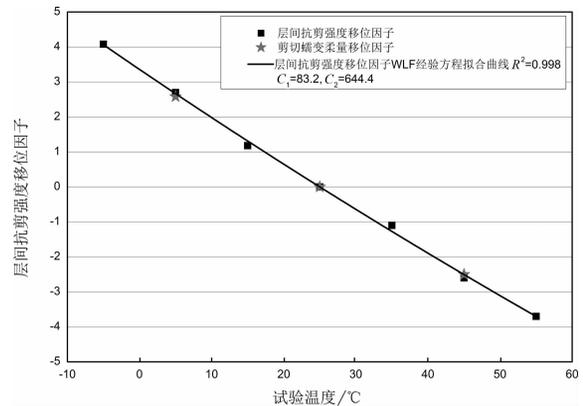


图7 移位因子

Fig.7 Time-temperature shift factor

构建主曲线的意义在于一方面结合移位因子可得到其他温度下层间抗剪强度曲线;另一方面展现了更宽加载速率范围内层间抗剪强度变化趋势.图6中层间抗剪强度主曲线的加载速率范围已由最初试验设置的 1~50 mm/min 扩宽至  $10^{-4} \sim 10^6$  mm/min,大大超过了现有仪器设备的测试范围,且扩宽后的加载速率范围明显包括了实际路面上车载的作用速率,这就为现场含土工布夹层的路面层间黏结失效预测的相关研究奠定了基础.图6中主曲线尾端代表高温-低加载速率区域的层间抗剪强度对数值趋于最小值  $\delta$  ( $\tau_f = 0.001$  MPa),主曲线头端代表低温-高加载速率区域的层间抗剪强度对数值趋于最大值  $\varphi$  ( $\tau_f = 3.192$  MPa),展现了土工布夹层在极限条件下抵抗黏结失效的能力.

### 3.2 时间-温度等效原理适用性验证

路面结构层间剪切破坏过程通常可用式(10)所示的古德曼本构定律(Goodman's Constitutive Law)描述层间材料力学行为,即把黏层油当作一层很薄的夹层材料,由于其自身产生的剪切破坏从而导致了路面层间破坏<sup>[18-19]</sup>.

$$\tau = G\gamma \quad (10)$$

式中:  $\tau$  为层间剪应力;  $G$  为黏层油剪切松弛模量;  $\gamma$  为黏层油薄层产生的剪应变.

不同材料力学性质移位因子的一致性验证是验证时间-温度等效原理适用的重要准则<sup>[20-21]</sup>.所以,为验证时间-温度等效原理分析土工布夹层黏结失效的合理性,将层间抗剪强度的移位因子与黏层油的其他力学性质的移位因子进行比较.考虑到黏层油(基质沥青)蠕变柔量参数试验获取相对简单,本文采用剪切流变仪(DSR)分别在 5, 25, 45 °C 试验温度下对基质沥青进行 100 s 静态剪切蠕变试验,得到黏层油在不同温度下的剪切蠕变柔量,如图8所示.

以 25 °C 作为参考温度,分别对温度为 5, 45 °C 时所对应蠕变柔量进行平移,得到移位因子  $\lg a_{25}(5)$ ,  $\lg a_{25}(45)$  分别为 2.58 和 -2.50。将温度分别为 5, 25, 45 °C 时的蠕变柔量移位因子与图 7 中层间抗剪强度移位因子进行比较,可以看出两力学参数的移位因子基本一致,验证了含土工布夹层试件层间抗剪强度具有时温等效特性。

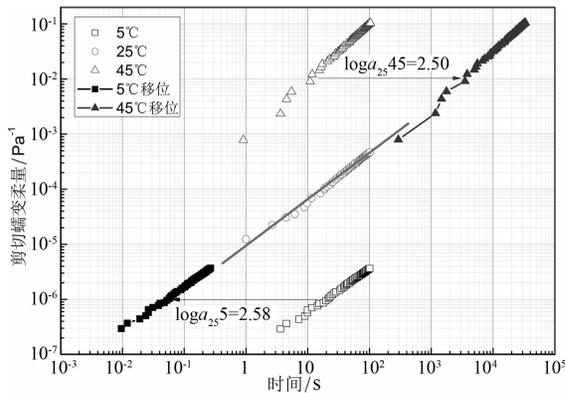


图 8 不同温度下剪切蠕变柔量及移位因子

Fig.8 Shear creep compliance and time-temperature shift factor corresponding to different temperature

## 4 结 论

在不同试验温度、加载速率下对含土工布夹层试件进行直剪试验,以层间抗剪强度为指标研究了土工布夹层黏结失效的时温特性。结论如下:

1) 试验温度和加载速率均会显著影响含土工布夹层试件层间抗剪强度,且相比于加载速率,试验温度对层间抗剪强度的影响更为显著。

2) 随试验温度升高或加载速率降低,层间抗剪强度呈现下降趋势,不同试验条件组合下层间抗剪强度值相差 66 倍之多,表明土工布夹层服役过程所处工况不同时抵抗黏结失效的能力有很大差别。

3) 基于指数函数得到的综合考虑试验温度和加载速率的层间抗剪强度模型可用于预估室内设置试验条件范围内土工布夹层抵抗黏结失效的能力。

4) sigmoidal 主曲线在更宽的加载速率范围内,展现了土工布夹层抵抗黏结失效能力的变化趋势,层间抗剪强度移位因子符合 WLF 经验方程。

5) 黏层油剪切蠕变柔量移位因子与层间抗剪强度移位因子一致性验证了含土工布夹层试件层间黏结失效具有时温等效特性。

## 参考文献

- [1] 孙雅珍,刘杰民,赵复笑.基于土工合成材料加铺层的沥青混凝土路面抗裂性能[J].公路交通科技,2012,29(1):34-37.  
SUN Yazhen, LIU Jiemin, Zhao Fuxiao. Crack resistance of geosynthetics overlay based asphalt concrete pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1): 34-37. (In Chinese)
- [2] BHOSALE S S, MANDAL J N. Experimental study for evaluating crack retardation of asphalt concrete overlays[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(6): 1-13.
- [3] 周志刚,张起森,郑健龙.加筋材料阻止沥青路面反射裂缝的桥联增韧的有限元分析[J].土木工程学报,2000,33(1):93-98.  
ZHOU Zhigang, ZHANG Qisen, ZHENG Jianlong. Bridge-toughening analysis of reinforcement materials preventing bituminous surface from reflection crack by fem [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 93-98. (In Chinese)
- [4] 张海伟,郝培文,江洲,等.加铺路面中土工布夹层抗反射裂缝性能的影响因素[J].武汉大学学报:工学版,2016,49(4):559-564.  
ZHANG Haiwei, HAO Peiwen, JIANG Zhou, et al. Factors of anti-reflective cracking performance of geotextile system in asphalt overlays [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(4): 559-564. (In Chinese)
- [5] 张海伟,郝培文,张强,等.土工布应力吸收层对沥青路面性能影响试验评价[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2016,39(4):508-513.  
ZHANG Haiwei, HAO Peiwen, ZHANG Qiang, et al. Experimental evaluation of the influence of geotextile stress absorbing interlayer on asphalt pavement performance [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2016, 39(4): 508-513. (In Chinese)
- [6] DAVID Z B, MIGUEL C P, DANIEL C F. New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 483-489.
- [7] HÉCTOR L D, CARLOS A G. Adherence in a pavement rehabilitated with a polymeric grid used as interlayer [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 454-459.
- [8] PASQUINI E, CARDONE F, CANESTRARI F. Moisture sensitivity of interlayers between conventional and porous asphalt mixes [C] // International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, 2014. Raleigh, NC, United States: Taylor and Francis, 2014: 1291-1299.
- [9] 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,2005:25-32.

- JTG F40—2004 Technical specifications for construction of high-way asphalt pavements[S]. Beijing: People's Communication Press, 2005: 25—32. (In Chinese)
- [10] 钱振东, 薛永超, 孙健. 橡胶环氧沥青碎石防水黏结层抗剪性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(7): 82—87.  
QIAN Zhendong, XUE Yongchao, SUN Jian. Shear performance of waterproof cohesive layer of rubber epoxy asphalt stone[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(7): 82—87. (In Chinese)
- [11] 纪伦, 李云良, 任俊达, 等. 桥面铺面防水黏结层胶结材料洒布量的确定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 57—62.  
JI Lun, LI Yunliang, REN Junda, *et al.* Method of determining the spraying amount of waterproof binder for bridge deck pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4): 57—62. (In Chinese)
- [12] KIM H, ARRAIGADA M, RAAB C, *et al.* Numerical and experimental analysis for the interlayer behavior of double-layered asphalt pavement specimens[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(1): 12—20.
- [13] CANESTRARI F, FERROTTI G, GRAZIANI A. Shear failure characterization of time-temperature sensitive interfaces [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2016, 20(3): 405—419.
- [14] WILLIAMS M L, LANDEL R F, FERRY J D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids [J]. Journal of the American Chemical Society, 1955, 77(14): 3701—3707.
- [15] YUN T, UNDERWOOD B S, KIM Y R. Time-temperature superposition for hma with growing damage and permanent strain in confined tension and compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(5): 415—422.
- [16] SAUZÉAT C, NGUYEN Q T, DI B, *et al.* Time temperature superposition principle validation for bituminous mixes in the linear and nonlinear domains[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1181—1188.
- [17] PELLINEN T K, WITCZAK M W, BONAQUIST R F. Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization [J]. Geotechnical Special Publication, 2003(123): 83—101.
- [18] 颜可珍, 江毅, 黄立葵, 等. 层间接触对沥青加铺层性能的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(5): 11—15.  
YAN Kezhen, JIANG Yi, HUANG Likui, *et al.* Effect of bond condition on overlay performance[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(5): 11—15. (In Chinese)
- [19] CANESTRARI F, FERROTTI G, LU X, *et al.* Mechanical testing of interlayer bonding in asphalt pavements[M]. Dordrecht: Springer, 2013: 303—360.
- [20] GROHS J R, LI Y Q, DILLARD D A, *et al.* Evaluating the time and temperature dependent biaxial strength of Gore-Select® series 57 proton exchange membrane using a pressure loaded blister test[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(2): 527—531.
- [21] ZHAO Y Q, KIM Y R. Time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1832(1): 161—172.