

环氧沥青超薄罩面层间抗剪强度的影响因素研究

牟压强¹, 郭大进¹, 马 永², 张林艳³, 赵雁宾², 郭荣鑫¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南省土木工程防灾重点实验室, 云南 昆明 650500; 2. 云南宾南高速公路有限公司, 云南 大理 671000;
3. 云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 为确定路面结构组合(A)、粘结方式(B)、黏结材料(C)及其交互作用($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$)对沥青混凝土路面加铺环氧沥青超薄罩面层间抗剪强度影响的主次顺序和显著性, 根据正交试验方法设计试验方案, 开展了试验研究. 利用自制可拆卸模具, 采用轮碾成型机制备 3 种路面结构组合的复合试件, 下面层为 AC-20, 上面层分别为 SAC-13、SAC-10、AC-10. 3 种类型复合试件的层间界面情况分别为冷粘结无黏结材料、冷粘结有黏结材料、热粘结无黏结材料、热粘结有黏结材料. 利用自行设计加工的 45°斜剪夹具对复合试件进行常温斜剪试验. 结果表明: 相比于界面未做任何处理(冷粘结无黏结材料)的复合试件抗剪强度, 黏结材料、热粘结以及两者的联合三种工艺对层间抗剪强度的平均增长率分别为 29.5%、60.7%、94.1%; 三个因素及其交互作用对复合试件层间抗剪强度影响的主次顺序为: B、C、A、 $B \times C$ 、 $A \times B$ 、 $A \times C$; 其中 A、B、C 为高度显著因素, 交互作用 $B \times C$ 为有一定影响因素, 交互作用 $A \times B$ 、 $A \times C$ 为非显著因素. 试验研究结果可为类似铺装工程提供参考依据.

关键词: 超薄罩面; 环氧沥青混合料; 抗剪强度; 热粘结; 正交试验设计

中图分类号: TU57⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0208-09

Research on influencing factors of shear strength between layers of epoxy asphalt ultra-thin overlay

MOU Yaqiang¹, GUO Dajin¹, MA Yong², ZHANG Linyan³, ZHAO Yanbin², GUO Rongxin¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Binnan Expressway Co., Ltd., Dali 671000, China;
3. School of Architecture and Planning Yunnan University, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to determine the primary and secondary order and significance of the influence of pavement structure combination (A), bonding mode (B), bonding material (C) and their interaction ($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$) on the interlaminar shear strength of epoxy asphalt ultra-thin cover on asphalt concrete pavement, the experimental scheme was designed according to the orthogonal test method and the experimental research was carried out. Using self-made detachable molds, the composite specimens with three kinds of pavement structure combination were prepared by wheel roll forming machine, the lower layer are AC-20, and the upper layers are SAC-13, SAC-10, and AC-10, respectively. The interlaminar interfaces situation of the three types of composite specimens are as follows: cold bonded no-bonding material, cold bonded has a bonding material, hot bonded no-bonding material, and hot bonded has a bonding material. The composite specimen was subjected to oblique shear test at room temperature by using a self-designed and processed 45° oblique shear fixture. The results show that compared with the shear strength of the composite specimens without any interface treatment (cold bonded no-bonding material), the average shear strength growth rates of the three technology of bonding material, hot bonding and the combination of them are 29.5%, 60.7% and 94.1%, respectively; The order of influence of the three factors and their interaction on the interlaminar shear strength of composite specimens is B, C, A, $B \times C$, $A \times B$, $A \times C$; among them A, B and C are highly significant factors, interaction $B \times C$ is a certain influencing factor, and interaction $A \times B$ and $A \times C$ are non-significant factors. The experimental results can provide reference for similar paving engineering.

Key words: ultra-thin cover; epoxy asphalt mixture; shear strength; hot bonding; orthogonal experimental design

收稿日期: 2020-11-01

修改稿日期: 2021-03-22

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科教[2017]35号); 昆明理工大学分析测试基金项目(2019M20182210046)

第一作者: 牟压强(1995—), 男, 硕士生, 主要从事道路工程材料方面的研究. E-mail: 5969085@qq.com

通信作者: 张林艳(1975—), 女, 博士, 主要从事道路新材料研发与应用方面的研究. E-mail: 215337622@qq.com

目前，国内高速公路的沥青面层一般分为三层，中上面层多采用 6+4 cm 的结构组合形式，这种结构组合技术比较成熟^[1]，但存在路表功能性能（抗滑、降噪等）衰减快、结构使用寿命短的现象^[2]。为解决这一问题，笔者所在的课题组在经过一系列理论分析及材料性能研究的基础上，提出了 6 cm 中面层+2 cm 环氧沥青超薄罩面的新型中上面层结构组合体系。该组合体系中沥青混凝土中面层与超薄罩面的牢固黏结是需要解决的主要技术问题之一，它对延长路面使用寿命、避免滑移、剪切等病害至关重要。

在行车荷载作用下，沥青混凝土中面层与环氧沥青超薄罩面的层间会产生较大的水平应力^[3]，且超薄罩面厚度相对较薄，夏季高温时，路面层间温度也相对较高^[4]，常规的黏结材料如乳化沥青、橡胶沥青等无法满足高温与重载耦合作用下的受力要求^[5]。环氧沥青作为一种热固性长寿命材料，具有优异的黏结、抗剪切、高温及耐疲劳性能^[6-7]，充分弥补了沥青类黏结材料的不足，已被广泛应用于复合式路面的防水粘结层中^[8-10]，故本文选用环氧沥青作为该路面结构的层间黏结材料。

目前，国内外学者针对影响复合式路面层间黏结性能因素（结构组合形式、层间界面处理方式、黏结材料类型及撒布量等）的研究已经取得较为丰硕的成果^[11-18]，但现有的研究成果主要是针对一般路面结构组合及黏结材料，很少有针对普通沥青混凝土、环氧沥青黏结材料以及环氧沥青超薄罩面相结合的复合路面层间黏结性能的研究。

普通沥青混凝土是一种温度敏感性材料^[19]，在高温条件下具有较好的可塑性，如果在中间层碾压后，在沥青混合料温度没有严重下降的情况下，紧跟着进行环氧沥青超薄罩面的摊铺及碾压施工（热粘结），对不同路面结构组合形成的层间界面，与中面层沥青混合料温度已降低到常温状态，再撒布环氧沥青黏结材料，最后进行罩面层摊铺及碾压施工（冷粘结）的处理措施相比，哪种处理措施更有利于增强层间的抗剪强度，尚不清楚。

基于以上考虑，本研究选择了施工过程中影响环氧沥青超薄罩面层间黏结性能的 3 种因素（路面结构组合、粘结方式、黏结材料），以层间抗剪强度为评价指标，通过正交试验、直观分析与方差分析，研究了三个因素及其交互作用对沥青混凝土路面环氧沥青超薄罩面铺装层层间黏结性能影响的主次顺序及显著性。以期类似工程设计

及施工提供参考。

1 试验方案设计

针对不同路面结构组合形成的界面，为了分析热粘结施工工艺对沥青混凝土路面环氧沥青超薄罩面铺装层层间抗剪性能的影响情况和确定路面结构组合(A)、粘结方式(B)、黏结材料(C)及三种因素的交互作用(A×B、A×C、B×C)对环氧沥青超薄罩面铺装层层间抗剪性能影响的主次顺序及其显著性，以层间最大抗剪强度为评价指标，利用正交试验方法，设计试验方案，具体考察的因素及水平见表 1。

表 1 因素水平表
Tab. 1 Factor level table

水平	因素		
	路面结构组合(A)	粘结方式(B)	黏结材料(C)
1	SAC-13(上层)+ AC-20(下层)	热粘结	有最佳用量 黏结材料
2	SAC-10(上层)+ AC-20(下层)	冷粘结	无黏结材料
3	AC-10(上层)+ AC-20(下层)	—	—

本试验为考虑交互作用的三因素不等水平正交试验，为全面了解因素 A 对层间抗剪强度影响的显著性，采用了部分追加法进行试验设计^[20]。设计试验方案时先不考虑 A₃，这样每个因素均变成 2 个水平，便可把 A₁、A₂ 同 B、C 因素及其交互作用安排在 L₈(2⁷) 正交表中，然后将水平 A₁ 替换为 A₃ 进行追加试验，每个试验方案设置 4 次重复试验，表头设计如表 2 所示。

表 2 表头设计
Tab. 2 Head design

结构组合	黏结方式	结构组合与黏结方式的交互	黏结材料与黏结材料的交互	结构组合与黏结材料的交互	黏结方式与黏结材料的交互	误差列
A	B	A×B	C	A×C	B×C	—

2 试件制备

2.1 原材料

下面层 AC-20 混合料的胶结料为壳牌基质 SBS I-D 型改性沥青，其技术指标测试结果见表 3；上面层加铺超薄罩面混合料的胶结料及层间黏结材料均为 FY 环氧沥青^[21]，其中环氧沥青 A/B 组分质量比例为 100：705，密度为 1.081 g·cm⁻³，断裂伸长率为 246%，具体技术参数见文献^[22]。

表 3 壳牌基质 SBS I-D 型改性沥青技术指标

Tab. 3 Technical index of SBS I-D modified asphalt based on Shell

参数	技术要求	实测结果	技术性能
相对密度(25 ℃)/g · cm ⁻³	实测记录	1.028	合格
延度(5 ℃, 5 cm · min ⁻¹)/cm	≥20	32	合格
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s,)/0.1 mm	40~60	56	合格
软化点/℃	≥60	81.6	合格
布氏旋转黏度/Pa · S	≤3	1.77	合格
弹性恢复 25 ℃/%	≥75	87	合格

高速公路中面层通常采用连续型密级配 AC-20 沥青混合料作为铺装材料,故选择 AC-20 沥青混合料作为复合试件的下面层。超薄罩面作为一种功能性材料,需要具备良好的抗滑和降噪功能,中断型多碎石 SAC 系列沥青混合料的表面具有较

大的构造深度,能提供较好的抗滑效果,故选择 SAC-13 和 SAC-10 作为复合试件的上面层,同时选择连续型密级配 AC-10 沥青混合料做对比。

下面层 AC-20 沥青混合料的粗细集料均使用石灰岩,矿粉使用石灰岩矿粉;上面层 SAC-13、SAC-10、AC-10 混合料的粗集料选用玄武岩,细集料选用石灰岩,矿粉选用石灰岩矿粉,粗细集料和矿粉的技术性能均能满足《规范》(JTG F40-2004)^[23] 要求。其中混合料 SAC-13、SAC-10、AC-10 及 AC-20 的最佳油石比分别为 5.0%、5.5%、5.8%、4.2%。路面结构组合 1、2、3 形成层间界面对应的最佳黏结材料撒布量分别为 0.97、0.86、0.65 kg/cm²。四种沥青混合料级配及马歇尔试验结果见表 4、5。

表 4 四种沥青混合料级配

Tab. 4 Four kinds of asphalt mixture grading

沥青混合料类型	筛孔/mm											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SAC-13	100.0	100.0	100.0	96.1	74.4	39.0	30.2	22.7	18.4	14.4	12.0	9.5
SAC-10	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	32.3	24.0	19.0	16.2	13.6	11.9	9.8
AC-10	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	45.8	32.3	23.1	17.9	13.1	10.4	8.0
AC-20	100.0	97.1	89.7	75.0	52.8	35.0	22.5	16.0	12.7	9.6	8.0	6.4

表 5 四种沥青混合料马歇尔试验结果

Tab. 5 Marshall test results for four asphalt mixtures

级配类型	油石比/%	理论密度/g · cm ⁻³	毛体积密度/g · cm ⁻³	孔隙率/%	稳定度/kN	流值/0.1mm
SAC-13	5.0	2.635	2.518	4.4	103.4	2.0
SAC-10	5.5	2.623	2.455	6.4	97.2	2.4
AC-10	5.8	2.578	2.486	3.6	94.9	2.5
AC-20	4.2	2.605	2.483	4.7	9.32	3.9

由表 5 可知,自主研制环氧沥青混合料的稳定度是 SBS 改性沥青混合料的几倍或几十倍且其受矿料级配的影响很小。这主要是因为环氧沥青不同于热塑性的 SBS 改性沥青,其表现为热固性,在高温养生过程中,固化剂与环氧树脂发生固化反应,形成致密三维交联网络结构,沥青作为分散相均匀地填充于交联结构中,因而其具有更优异的力学性能;沥青混合料的稳定度由胶结料的黏结力和集料嵌挤力组成,通过对劈裂试验后环氧沥青马歇尔试件破坏界面图图 1 进行观察,可以发现,环氧沥青马歇尔试件受力面上的矿料均被拉裂(而普通沥青混合料的破坏形式为从胶结料处被拉裂),说明环氧沥青在养生结束后,具有极强的黏结力^[24],因而矿料级配对其稳定度影响较小。

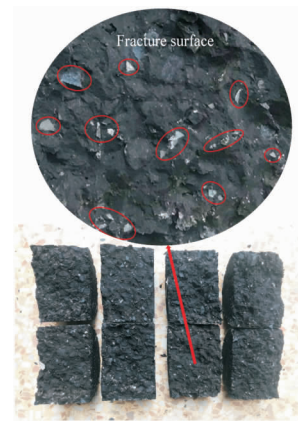


图 1 环氧沥青马歇尔试件破坏界面图

Fig. 1 Failure interface diagram of epoxy asphalt Marshall specimen

2.2 复合试件制备

目前国内没有出台关于制备用于测试路面层间

抗剪强度复合试件的规范,现行规范《规程》(JTGE20-2011)^[25]中评价沥青混合料高温稳定性的方法为:首先成型尺寸为30 cm×30 cm×5 cm的沥青混合料车辙板试件,然后开展车辙试验来评价,该方法适用于高速公路下、中、上面层沥青混合料,为了方便制件和与已有规范相统一,选择了成型5 cm的AC-20车辙板来代替高速公路6 cm的中面层,为了更加准确地测试对比冷粘结与热粘结复合式路面的抗剪强度及真实模拟沥青混凝土路面加铺环氧沥青超薄罩面的实际情况,试验按照现场施工的方式制作复合试件,制备过程如图2所示。

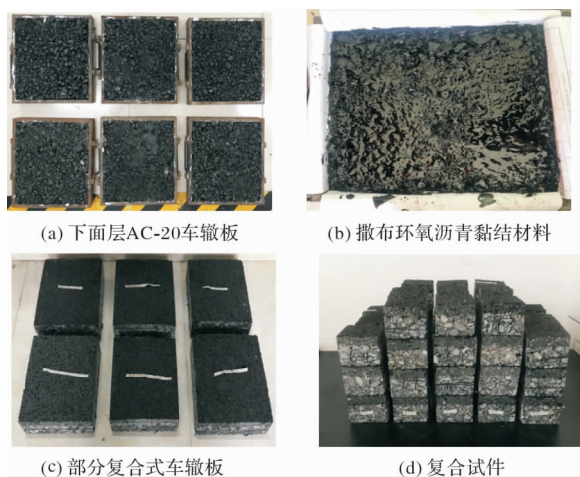


图2 复合试件制备过程

Fig. 2 Forming process of composite specimen

(1)模拟冷粘结施工工艺

a. 参照《规程》(JTGE20-2011)^[25]中的试验方法,利用自制可拆卸车辙板试模成型30 cm×30 cm×5 cm尺寸的下面层AC-20沥青混合料(记录轮碾方向),室温静置24 h;

b. 安装上面层2 cm试模后,利用毛刷撒布设计用量的黏结材料;

c. 采用“后掺法”施工工艺^[26]拌制环氧沥青混合料,参照规程^[25]中的相关要求,在其上加铺2 cm厚的环氧沥青混合料,轮碾方向需和下面层轮碾方向一致(记录轮碾方向),然后带模将复合式车辙板放入120℃恒温烘箱中养生4 h,常温放置24 h;

d. 最后使用DQ-4型自动岩石切割机将养生后的复合式车辙板切割成8 cm×8 cm×7 cm的复合试件(边缘2 cm部分不使用,且记录每一个试件的轮碾方向),由于切割后的复合试件内部会有水份,切割完后放置于25℃恒温鼓风烘箱中24 h,以备45°斜剪试验。

(2)模拟热粘结施工工艺

热黏结施工工艺步骤a、b与(1)的不同之处为

成型完下面层AC-20沥青混合料后,紧接着安装上面层2 cm试模,在撒布设计用量黏结材料后,放入175±5℃恒温烘箱中保温;步骤c、d同上。

3 试件加载

斜剪试验参考美国标准试验方法ASTM C882/C882M-13^[27]进行。试件加载前,将试验夹具和复合试件放在25℃恒温烘箱内保温5 h以上;放置试件时,复合试件的层间需位于自制45°斜剪夹具可动部分和固定部分所形成的间隙中部,且剪切方向与轮碾方向一致;采用100 kN的WAW-100B微机控制电液伺服万能材料试验机,以50 mm/min加载速率对复合试件进行剪切,记录试件的峰值荷载,最终以加载力下降到峰值荷载的85%作为试验终止条件(从恒温烘箱内取出复合试件至其层间被加载破坏的时间不超过30 s),自制45°斜剪夹具如图3所示。

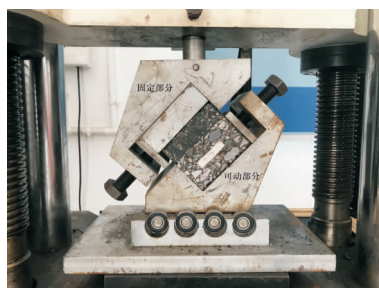


图3 45°斜剪夹具

Fig. 3 45° oblique shear fixture

图4为沥青混凝土路面环氧沥青超薄罩面铺装层复合试件层间受剪全过程的加载力与位移的典型关系曲线。由图4可见,在加载过程的前期,加载力随着剪切位移的增加而增加,且两者呈线性变化关系;当剪切位移达到2.0~4.0 mm之间时,层间产生错动破坏,此时环氧沥青黏结材料和上下两层相互嵌挤的矿料开始产生强度,强度随位移的增加而快速增加,直至达到一个峰值,黏结材料及上下两层相互嵌挤的矿料达到屈服极限,加载力急剧下降,这时黏结材料和上下两层相互嵌挤的矿料已经完全破坏;界面完全破坏后,层间随位移的变化产生滑移,在滑移过程中,由于轴向加载力的作用,复合试件层间产生了滑动摩擦阻力,因此,加载力并未像拉拔试验那样瞬间降低到0 kN。

复合试件在受剪过程中,由于层间产生相互错动,导致其有效受剪面积减小,但通过图4可以看出,加载力达到峰值时的竖向剪切位移很小,平均值在3.0~4.0 mm之间,故产生的面积减小量可以忽略不记,可用试件加载前的实际层间界

面横截面积直接计算抗剪强度。

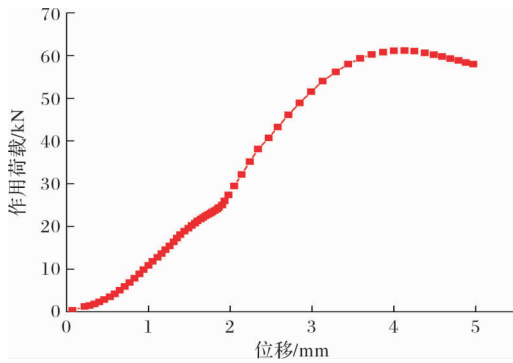


图 4 加载力与位移的典型关系曲线
Fig. 4 Typical relation curve between loading force and displacement

根据斜剪试验测试结果，层间抗剪强度为

$$\tau_{\max} = \frac{p_{\max} \times \sin\alpha}{S} \quad (1)$$

式中： τ_{\max} 为复合试件层间抗剪强度，MPa； p_{\max} 为曲线峰值荷载，kN； S 为复合试件层间受剪截面积， mm^2 ； α 为复合试件层间界面与荷载作用方向的夹角，rad，本文取 45° 。

正交试验设计表 $L_8(2^7)$ 及试验结果如表 6 所示，其中试验号 1~8 为未考虑 A_3 时的试验方案和结果，试验号 9~16 为将 A_1 替换成 A_3 时追加的试验方案和结果。由表 6 可以看出，在普通沥青路面上加铺环氧沥青超薄罩面的路面层间具有较强的黏结能力。

表 6 正交试验设计表及试验结果
Tab. 6 Orthogonal design table and test results

试验号	A	B	A×B	C	A×C	B×C	误差	试验结果/MPa			
1	1	1	1	1	1	1	1	4.079	4.124	4.041	4.381
2	1	1	1	2	2	2	2	3.359	3.545	3.448	3.857
3	1	2	2	1	1	2	2	3.347	2.857	2.764	2.919
4	1	2	2	2	2	1	1	1.703	2.192	1.982	1.843
5	2	1	2	1	2	1	2	5.123	5.253	5.246	5.349
6	2	1	2	2	1	2	1	4.231	4.276	4.277	4.177
7	2	2	1	1	2	2	1	3.402	3.603	3.516	3.059
8	2	2	1	2	1	1	2	2.769	3.042	2.770	2.458
9	3	1	1	1	1	1	1	4.926	4.750	5.214	4.558
10	3	1	1	2	2	2	2	4.038	3.749	3.762	4.339
11	3	2	2	1	1	2	2	3.080	3.074	3.115	2.989
12	3	2	2	2	2	1	1	2.695	3.011	3.085	2.202
13	2	1	2	1	2	1	2	5.123	5.253	5.246	5.349
14	2	1	2	2	1	2	1	4.231	4.276	4.277	4.177
15	2	2	1	1	2	2	1	3.402	3.603	3.516	3.059
16	2	2	1	2	1	1	2	2.769	3.042	2.770	2.458

4 试验结果分析

4.1 直观分析

采用狄克逊准则(显著性 $\alpha=0.05$)对表 6 中的每组试验方案的四个复合试件层间抗剪强度试验

结果进行异常值筛选，以消除试验结果误差，结果显示，数据均合格。每组试验方案层间抗剪强度的平均值及增加率见表 7，路面结构组合对层间抗剪强度影响的规律见图 5。

表 7 层间抗剪强度的平均值及增加率

Tab. 7 Average value and growth rate of interlaminar shear strength

组合 编号	路面结 构组合	冷粘结无黏结 材料/MPa①	冷粘结有黏结 材料/MPa②	热粘结无黏结 材料/MPa③	热粘结有黏结 材料/MPa④	增加率/%		
						$\frac{(\text{②}-\text{①}) \times 100}{\text{①}}$	$\frac{(\text{③}-\text{①}) \times 100}{\text{①}}$	$\frac{(\text{④}-\text{①}) \times 100}{\text{①}}$
组合 1	SAC-13 AC-20	1.930	2.972	3.552	4.156	53.99	84.05	115.34
组合 2	SAC-10 AC-20	2.760	3.395	4.240	5.243	23.01	53.62	89.96
组合 3	AC-10 AC-20	2.748	3.065	3.972	4.862	11.54	44.54	76.93

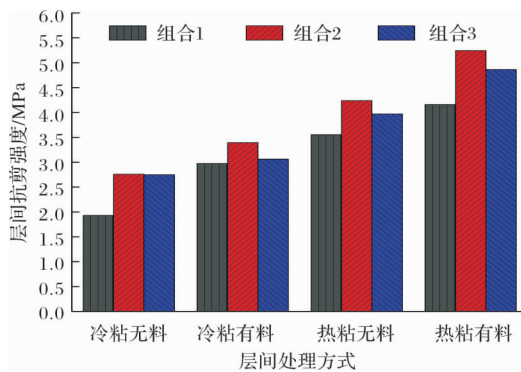


图5 路面结构组合对层间抗剪强度的影响

Fig. 5 Influence of pavement structure combination on interlaminar shear strength

4.1.1 路面结构组合对抗剪强度的影响

根据表7和图5可知,不同路面结构组合形成层间界面的抗剪强度差异很大.在相同的层间处理方式下,组合2的抗剪强度最大,组合3次之,组合1最小.出现这种情况的原因主要是与层间两侧级配类型有关.复合式路面层间抗剪强度由矿料级配之间的机械咬合力、黏结材料与集料层的粘结力以及黏结材料自身的内聚力三部分组成^[28].组合2的罩面层级配为小粒径多碎石中断级配SAC-10,该类级配具有较好的构造深度,SAC-10混合料构造突出部分能和中面层沥青混合料构造下凹部分相互咬合,增大了层间的机械咬合力^[29],故层间的抗剪强度最大;组合3的罩面层级配为密实型细粒式级配AC-10,其在碾压过程中,混合料直接填充到中面层的下凹部分,层间矿料的嵌挤力较弱,故层间抗剪强度居中;而组合1的罩面层级配为SAC-13,其矿料粒径相对较大,混合料表面凸出构造不利于嵌入中面层下凹的构造中,抗剪强度主要由黏结材料自身的内聚力和黏结材料与集料层的粘结力提供,故其层间抗剪强度最小.

4.1.2 层间处理方式对抗剪强度的影响

不同层间处理方式对复合试件抗剪强度的影响也不同,但是对于同一路面结构组合,不同层间处理方式下的抗剪强度按以下规律递增,即冷粘结无黏结材料<冷粘结有黏结材料<热粘结无黏结材料<热粘结有黏结材料.相比于层间未做任何处理(冷粘结无黏结材料)的抗剪强度,黏结材料、热粘结以及两者的联合三种工艺对复合试件层间抗剪强度的平均增长率分别为29.5%、60.7%、94.1%.

不同层间处理方式对3种路面结构组合的复合试件抗剪强度影响程度不同.相比于层间未做任

何处理(冷粘结无黏结材料)的抗剪强度,不同的路面结构组合,撒布环氧沥青黏结材料时的层间抗剪强度的增长率按以下规律递减:组合1(53.99%)>组合2(23.01%)>组合3(11.54%);采用热粘结工艺时的层间抗剪强度的增长率按以下规律递增:组合3(44.54%)<组合2(53.62%)<组合1(84.05%),热粘结工艺对组合2和组合1的抗剪强度奉献率超过了50%;层间既采用热粘结工艺又撒布黏结材料时的抗剪强度增长率按以下规律递增:组合3(76.93%)<组合2(89.96%)<组合1(115.34%),该处理方式对三种路面结构组合的复合试件抗剪强度奉献率均超过70%.

4.2 方差分析

按照文献^[20]中的相关方法,对表7中的试验结果进行方差计算和分析,计算结果如表8所示,由表8可知:

(1)根据均方差 V 的大小,可以确定三种因素及其交互作用对沥青混凝土路面环氧沥青超薄罩面加铺层层间抗剪强度的影响显著性排列顺序为:(B)粘结方式>(C)黏结材料>(A)结构组合>(B×C)粘结方式与黏结材料的交互>(A×B)结构组合与粘结方式的交互>(A×C)结构组合与黏结材料的交互.

(2)结构组合(A)、粘结方式(B)以及黏结材料(C)的 F 值均大于对应的 $F_{0.01}(f, f_e)$,故这三种因素对抗剪强度的影响均为高度显著,但影响的程度不同,粘结方式(B)的 F 值最大(633.5),所以粘结方式对普通沥青路面环氧沥青超薄罩面加铺层层间抗剪强度的改善起着决定性作用;黏结材料(C)与路面结构组合(A)的 F 值之差为102.86,故在层间撒布环氧沥青黏结材料比改变环氧沥青超薄罩面面层级配对抗剪强度增强效果好;结构组合与粘结方式的交互(A×B)和结构组合与黏结材料的交互(A×C)的 F 值均小于对应的 $F_{0.1}(f, f_e)$,故这两种交互作用对层间抗剪强度改善作用很小,为非显著因素,而且 $V_{A \times C}(0.02)$ 小于第一类误差的均方差 $V_{e1}(0.05)$,可将 $V_{A \times C}$ 并入到总误差 e 中;粘结方式与黏结材料的交互(B×C)的 F 值介于对应的 $F_{0.05}(f, f_e)$ 和 $F_{0.1}(f, f_e)$ 之间,故其为有一定影响因素,同时可以看出 $F_{(B \times C)}$ 远远小于粘结方式(B)和黏结材料(C)的 F 值,故于普通沥青路面加铺环氧沥青超薄罩面时,同时采用热粘结工艺和撒布环氧沥青黏结材料两种方法,不如单独采用其中一种对层间抗剪强度的改善程度大.

表8 正交试验结果方差分析
Tab. 8 Analysis of variance of orthogonal test results

源	Ⅲ类平方和 S	自由度 f	均方差 V	F 值	临界值 F_{α}	显著性
A	6.11	2	3.06	49.64	$F_{0.01}(1, 38)=7.36$	高度显著
B	38.97	1	38.97	633.05	$F_{0.05}(1, 38)=4.10$	高度显著
C	9.39	1	9.39	152.50	$F_{0.1}(1, 38)=2.85$	高度显著
$A \times B$	0.17	2	0.09	1.40	$F_{0.01}(2, 38)=5.22$	非显著
$A \times C$	0.05	2	0.02	0.37	$F_{0.05}(2, 38)=3.25$	非显著
$B \times C$	0.19	1	0.19	3.07	$F_{0.1}(2, 38)=2.45$	有一定影响
第一类误差 e_1	0.09	2	0.05			
第二类误差 e_2	2.25	36	0.06			
总误差 e	2.34	38	0.06			
总和 T	57.21	47				

注：第一类误差的Ⅲ类平方和 S_{e1} 是根据正交表的空白列计算得到，第二类误差的 S_{e2} 是根据每个试验方案重复试验结果内部的偏差平方和汇总得到。

5 结论

(1)路面结构组合(A)、粘结方式(B)、黏结材料(C)及其交互作用($A \times B$ 、 $B \times C$ 、 $A \times C$)对普通沥青路面环氧沥青超薄罩面加铺层间抗剪强度影响的主次顺序为：B、C、A、 $B \times C$ 、 $A \times B$ 、 $A \times C$ 。其中，路面结构组合(A)、粘结方式(B)、黏结材料(C)对层间抗剪强度的影响均为高度显著，交互作用 $A \times B$ 、 $A \times C$ 为非显著因素，交互作用 $B \times C$ 为有一定影响因素。

(2)在普通沥青路面上加铺环氧沥青超薄罩面的路面层间具有较强的黏结能力。针对该路面形式，相比于冷粘结无黏结材料施工工艺，采用热粘结工艺或撒布环氧沥青黏结材料，均会显著提高路面的层间抗剪强度，但热粘结施工工艺对路面层间抗剪强度的增加更为有效。

(3)在相同层间处理方式下，超薄罩面级配为 SAC-10 时路面层间抗剪强度最大，AC-10 次之，SAC-13 最小。于复合式路面层间同时采用热粘结工艺和撒布环氧沥青黏结材料两种处理方式，不如单独采用其中一种对层间抗剪强度的改善程度大。

(4)采用热粘结施工工艺的目的是使罩面层与中面层的矿料充分相互嵌挤，从而保证路面结构的整体性，增强复合式路面层间的抗剪切性能，减小长大纵坡路段以及圆曲线半径相对较小路段出现层间病害的风险，延长路面使用

寿命。本文通过室内试验分析了热粘结施工工艺对层间抗剪强度的影响，设置的中面层温度为对应沥青混合料的摊铺温度，与实际施工温度存在一定差异，两者的关联性有待验证。且这种施工工艺的工程可行性、配套机械设施及施工管理安排还需结合具体施工现场情况开展更系统深入的研究。

参考文献 References

- [1] 吴后选,袁怡,邢成炜,等. 新型高速公路沥青面层结构组合设计研究[J]. 中外公路,2017,37(6):55-60.
WU Houxuan, YUAN Yi, XING Chengwei, et al. Research on structural combination design of new expressway asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017,37(6):55-60.
- [2] 李福普,陈景,严二虎. 新型沥青路面结构在我国的应用研究[J]. 公路交通科技,2006(3):10-14.
LI Fupu, CHEN Jing, YAN Erhu. Study and application of new asphalt pavement structures in China[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(3):10-14.
- [3] CHEN C, QIAN Z D, WANG Y Q. Design a thermo-setting asphalt mixture for surfacing on orthotropic steel deck bridge[J]. Advanced Materials Research, 2013, 652-654:1221-1225.
- [4] 延西利,张世平,白伟,等. 沥青路面温度场的热量分析研究[J]. 公路交通科技,2014,31(8):7-12.
YAN Xili, ZHANG Shiping, BAI Wei, et al. Analy-

- sis on heat of temperature field of asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(8):7-12.
- [5] 李嘉,董亮,张坚,等. UHPC-沥青薄面层环氧界面剂黏结性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1):49-57.
- LI Jia, DONG Liang, ZHANG Jian, et al. Experimental on bonding performances of UHPC-thin asphalt layer with epoxy adhesive agents for ultra-high performance composite bridge deck[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2020, 40(1):49-57.
- [6] 李款,潘友强,张辉,等. 钢桥面铺装用环氧沥青相容性研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9):1534-1540.
- LI Kuan, PAN Youqiang, ZHANG Hui, et al. Research progress of compatibility of epoxy asphalt for steel deck pavement[J]. Materials Reports, 2018, 32(9):1534-1540.
- [7] 丛培良. 环氧沥青及其混合料的制备与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
- CONG Peiliang. Preparation and properties of epoxy asphalt and it's mixture[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [8] 吴俊明,王伟,李少芳,等. 环氧薄层铺装材料路用性能研究[J]. 公路, 2016, 61(10):225-228.
- WU Junming, WANG Wei, LI Shaofang, et al. Study on road performance of epoxy thin layer pavement material[J]. Highway, 2016, 61(10):225-228.
- [9] 葛文璇,徐勋倩,高强,等. 基于环氧沥青黏结层的混凝土桥面薄层铺装疲劳性能研究[J]. 公路, 2012(7):18-23.
- GE Wenxuan, XU Xunqian, GAO Qiang, et al. Study on fatigue performance of thin layer pavement of concrete bridge deck based on epoxy asphalt bonding layer [J]. Highway, 2012(7):18-23.
- [10] 张争奇,陶晶,张思桐. 桥面铺装环氧沥青防水粘结层性能试验与评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(4):1-6.
- ZHANG Zhengqi, TAO Jin, ZHANG Sitong. Experiment and evaluation on performance of epoxy asphalt waterproof cohesive layer on bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(4):1-6.
- [11] 王浩,胡松山,任少博. 薄层橡胶沥青复合式路面层间抗剪特性试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(4):29-38.
- WANG Hao, HU Songshan, REN Shaobo. Shear resistance test of thin layer rubber asphalt pavement interlayer[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2018, 38(4):29-38.
- [12] 刘梦梅,韩森,潘俊,等. 水性环氧树脂乳化沥青在高温、低温和浸水条件下的粘结性能[J]. 材料导报, 2018, 32(10):1716-1720.
- LIU Mengmei, HAN Sen, PAN Jun, et al. The adhesion performance of a waterborne epoxy resin emulsified asphalt: a study under high & low-temperature and water-immersion environments[J]. Materials Reports, 2018, 32(10):1716-1720.
- [13] 李秋实,何东坡,丁海波. 黏层对不同类型路面组合界面力学特性的影响[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8):22-30.
- LI Qiushi, HE Dongpo, DING Haibo. Effects of tack coat on mechanical properties of pavement interface with combination of different types[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8):22-30.
- [14] 汪水银. 半刚性基层与沥青面层粘结性能影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2):12-19.
- WANG Shuiyin. 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.
- [15] DAS R, MOHAMMAD L N, ELSEIFI M, et al. Effects of tack coat application on interface bond strength and short-term pavement performance [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2633:1-8.
- [16] LENG Z, OZER H, AL-QADI I, et al. Interface bonding between hot-mix asphalt and various portland cement concrete surfaces[J]. Transportation Research Record, 2015, 11:46-53.
- [17] 刘红坡,邱延峻,蒋鑫. 槽和黏层油对沥青混合料层间抗剪性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4):677-683.
- LIU Hongpo, QIU Yanjun, JIANG Xin. Effect of notch and tack coat on the interface shear performance between asphalt layers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(4):677-683.
- [18] TASHMAN L, NAM K, PAPAGIANNAKIS T, et al. Evaluation of construction practices that influence the bond strength at the interface between pavement layers[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008, 22(3):154-161.
- [19] 王旭东,周兴业,关伟,等. 沥青路面结构内部的力学响应特征及分析[J]. 科学通报, 2020, 65(30):

- 3298-3307.
- WANG Xudong, ZHOU Xingye, GUAN Wei, et al. Characteristics and analysis of the mechanical response inside the structure of asphalt pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30):3298-3307.
- [20] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008:101-174.
- QIU Yibing. Experimental design and data processing [M]. Hefei: China University of science and Technology Press, 2008:101-174.
- [21] 封基良. 一种化学改性热固性沥青混合料: 中国, CN106495567B[P]. 2019-03-15.
- FENG Jiliang. A kind of chemical modified thermosetting asphalt mixture: China, CN106495567B[P]. 2019-03-15.
- [22] 封志佼, 郭大进, 张林艳, 等. 后掺法环氧沥青 OGFC 混合料性能研究及对比分析[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4):633-637.
- FENG Zhijiao, GUO Dajin, ZHANG Linyan, et al. Comparative study on performance of OGFC mixture of epoxy asphalt using post-doping method[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(4): 633-637.
- [23] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 17-21.
- Institute of Highway Science, Ministry of communication. Technical specification for construction of highway asphalt pavements: JTG F40-2004 [S]. Beijing: Peoples' s Transportation Press, 2004:17-21.
- [24] 冉武平, 凌建明, 谷志峰. 环氧沥青混合料低温性能及评价指标[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5): 935-942.
- RAN Wuping, LING Jianming, GU Zhifeng. Low temperature performance and evaluation index of epoxy asphalt mixture[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5):935-942.
- [25] 交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. 197.
- Institute of Highway Science, Ministry of Communication. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20-2011[S]. Beijing: Peoples' s Transportation Press, 2011. 197.
- [26] 封基良. 一种后掺法环氧沥青混合料施工工艺: 中国, CN106351102A[P]. 2019-01-29.
- FENG Jiliang. Construction technology of epoxy asphalt mixture with post mixing method: China, CN106351102B[P]. 2019-01-29.
- [27] 李嘉, 王万鹏, 裴必达, 等. UHPC-TPO 层间黏结性能研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5):84-91.
- LI Jia, WANG Wanpeng, PEI Bida, et al. Evaluation of bonding performances between UHPC and TPO[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5):84-91.
- [28] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
- LÜ Weimin. Design principle and method of asphalt mixture[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011.
- [29] 毛昱, 李萍, 念腾飞, 等. 基于分形理论的沥青路面层间机械摩阻强度行为[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2):594-605.
- MAO Yu, LI Ping, NIAN Tengfei, et al. Mechanical friction intensity behavior of asphalt pavement based on fractal theory[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 594-605.

(编辑 桂智刚)