DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260643

不同温度对聚丙烯防裂基布与半刚性基层-沥青面层界面黏结特性的影响

张源斌[1],陈云介[2],杨　明[2],万长明[2],许　竞[3],樊向阳[4]
(1.江西省交通投资集团项目建设管理公司,江西 南昌 330025; 2.江西省交通投资集团有限责任公司,江西 南昌 330025;
3.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌,330013; 4.公路桥梁与隧道结构江西省重点实验室,江西 南昌 330025)

摘　要: 为揭示聚丙烯防裂基布对半刚性基层-沥青面层界面层间黏结性能的影响,通过45°斜剪试验和宽条拉伸试验,研究了3种温度下,有无防裂加筋处置及基布纵横向铺设对层间剪切强度和等效剪切模量的影响,并分析了基布拉伸各向异性与裂缝扩展变形的关系。结果表明:层间剪切强度和等效剪切模量均随温度升高呈下降趋势,25 ℃时层间剪切强度较-15 ℃时降幅均超过80%;-15 ℃条件下基布可提高层间抗剪性能,且纵向铺设效果优于横向铺设,但在5、25 ℃条件下,有布试样剪切性能低于无布试样,表明中、高温条件下基布夹层未表现出层间抗剪优势;聚丙烯防裂基布拉伸性能表现出各向异性,横向极限拉伸强度和伸长率较高,而在伸长率小于40%的小变形阶段,纵向基布可提供更大的拉伸抗力。

关键词: 道路工程;聚丙烯防裂基布;斜剪试验;半刚性基层-沥青面层界面;层间黏结;温度效应
中图分类号: U416.217　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0050-05

Effect of Different Temperatures on Interfacial Bonding Characteristics of Polypropylene Anti-Cracking Fabric Between Semi-Rigid Base and Asphalt Surface Layer

ZHANG Yuanbin[1], CHEN Yunjie[2], YANG Ming[2], WAN Changming[2], XU Jing[3], FAN Xiangyang[4]
(1. Project Construction Management Company, Jiangxi Provincial Communications Investment Group, Nanchang 330025, China; 2. Jiangxi Provincial Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330025, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Highway Bridge and Tunnel Structures, Nanchang 330025, China)

Abstract: To reveal the influence of polypropylene anti-cracking base fabric on the interlaminar bonding performance at the interface between a semi-rigid base and an asphalt surface layer, through the 45° oblique shear tests and wide-width tensile tests, the effects of anti-cracking reinforcement treatment and the longitudinal and transverse laying of base fabric on the interlaminar shear strength and equivalent shear modulus at three different temperatures are studied. The relationship between the tensile anisotropy of the base fabric and crack propagation deformation is also analyzed. The results show that both the interlaminar shear strength and the equivalent shear modulus show a downward trend with the increase of temperature, and the interlaminar shear strength at 25 ℃ decreases by more than 80% compared with that at -15 ℃. Under the condition of -15 ℃, the base fabric can improve the interlaminar shear resistance, and the longitudinal laying effect is better than the transverse laying effect. However, at 5 ℃ and 25 ℃, the shear performance of specimens with fabric is lower than that of specimens without fabric, indicating that the interlayer of the base fabric does not exhibit an interlaminar shear resistance advantage under medium and high-temperature conditions. The tensile properties of polypropylene anti-cracking base fabric exhibit anisotropy. The transverse ultimate tensile strength and elongation are relatively high, while in the small deformation stage where the elongation is less than 40%, the longitudinal base fabric can provide greater tensile resistance.

Keywords: road engineering; polypropylene anti-cracking base fabric; oblique shear test; semi-rigid base-asphalt surface interface; interlaminar bonding; temperature effect

收稿日期: 2026-06-09
基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2025ZG029)
作者简介: 张源斌(1993—),男,本科,工程师,从事高速公路建设工作。

0　引　言

半刚性基层沥青路面因承载能力强、整体刚度

大和施工适应性好，在我国高等级公路中得到了广泛应用。但在温度循环、基层干缩温缩及车辆荷载共同作用下，基层裂缝易向沥青面层扩展而形成反射裂缝；同时，基层与面层之间层间黏结不足会诱发剪切滑移、推移、拥包等病害，削弱路面结构整体性和长期服役性能[1-3]。

聚丙烯防裂基布具有应力分散、变形协调和施工便捷等特点，常用于半刚性基层与沥青面层之间以延缓裂缝扩展。但其介入也会改变界面接触状态，使层间抗剪性能受温度、黏结材料及铺设方向等因素影响[4-7]。

围绕上述层间黏结弱化、反射裂缝扩展及防裂基布介入后界面受力状态改变等问题，国内外学者已从层间黏结评价方法、土工合成材料防裂作用及温度影响等方面开展了较多研究。汪水银[1]从半刚性基层与沥青面层黏结性能影响因素出发，指出界面状态、黏层材料和温度均会显著影响层间黏结强度；其后又通过室内抗剪试验比较了不同测试方法，认为斜剪试验可较好反映层间复合受力特征[2]。Khweir 等[8]、Canestrari 等[9-11]研究表明，层间黏结失效会显著降低路面寿命，测试温度、法向荷载及界面处治方式均会影响层间剪切阻力。刘红坡等[3]基于切-拉拔试验研究发现，温度、水平推力和黏层油用量会共同影响沥青路面层间黏结性能。张海伟等[4]从土工布夹层抗反射裂缝性能角度分析，认为土工布可提高复合梁抗裂能力，但黏层油用量存在适宜范围。钱劲松等[12]利用 MMLS3 设备研究发现，土工布可延缓反射裂缝初裂和贯穿。宿松亚[6]、付伟[13]分别从聚丙烯土工布吸油热冲击特性和工程应用效果出发，指出防裂基布的材料性能与施工状态会影响其抗裂效果。此外，吴树恒等[14]研究表明，黏层沥青类型、洒布量及水泥稳定碎石中的纤维掺量会影响水泥稳定碎石与沥青混合料的层间黏结效果。刘东亮等[15]从温度-荷载耦合作用角度指出，温度、垂直荷载和层间接触状态是层间剪应力与损伤发展的重要影响因素。总体来看，既有成果为聚丙烯防裂基布夹层结构的层间黏结评价提供了重要依据，但其在不同温度及不同铺设方向下的抗剪响应仍有进一步研究空间。

现有研究已从层间黏结评价、土工布抗反射裂缝及温度效应等方面取得较多成果，但聚丙烯防裂基布设置于半刚性基层-沥青面层界面时，不同温度下层间剪切强度、等效剪切模量及基布纵横向拉伸差异之间的关系仍需进一步明确。为此，本文采用 45°斜剪试验和宽条拉伸试验，研究-15、5、25 ℃条件下有无防裂基布及其铺设方向对层间黏结性能的影响，以期为防裂基布合理选用和施工优化提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

半刚性基层采用工程常用水泥稳定碎石，水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，水泥剂量 5%，最佳含水量 5.2%，最大干密度 2.36 g/cm³，标准养生 7 d 的无侧限抗压强度 4.2 MPa。粗集料为石灰岩轧制碎石，按 0~5、5~10、10~20、20~30 mm 分级备料后掺配，碎石级配符合《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20—2015）中 C-B-2 级配要求。

AC-20C 沥青混合料与 C-B-2 水泥稳定碎石的合成级配见表 1；AC-20C 沥青混合料级配曲线见图 1；C-B-2 水泥稳定碎石级配曲线见图 2。混合料的最佳含水量与最大干密度由重型击实试验确定，成型时压实度控制不小于 98%。

沥青下面层采用 AC-20C 型密级配沥青混合料，沥青选用 70 号 A 级道路石油沥青（沥青主要技术指标见表 2），集料采用石灰岩碎石，矿粉由石灰岩磨细而成。原材料技术指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）要求。混合料配合比设计采用马歇尔方法，标准马歇尔试件双面击实 75 次成型，确定最佳油石比为 4.5%，对应马歇尔稳定度为 12.6 kN、流值为 32.5（0.1 mm）、空隙率为 4.3%、矿料间隙率为 13.6%、有效沥青饱和度为 68.5%，各项体积指标均满足上述规范要求。

层间黏结材料采用阳离子慢裂型乳化沥青，乳化沥青洒布量为 1.2 L/m²；该乳化沥青蒸发残留物含量、残留物针入度等主要技术指标也列于表 2。聚丙烯防裂基布为聚丙烯纤维经纺黏热轧工艺制成的非织造土工布，呈白色，表面平整、无明显缺陷，单位面积质量为 150 g/m²，厚度约 1.38 mm，熔点约 165 ℃，具有变形协调性好、耐酸碱腐蚀和施工便捷等特点，其主要物理力学性能见表 3。

1.2 试件制备与试验方案

本试验采用复合车辙板分层成型法制备层间剪切复合试件，以尽量模拟现场路面施工工艺。首先成型尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的水泥稳定碎石基层车辙板，标准养生 28 d 后用钢丝刷清理表面浮

表1　AC-20C沥青混合料与C-B-2水泥稳定碎石合成级配（通过率）　单位：%

级配类型	筛孔尺寸/mm											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-20C	100	98.3	89.4	75.1	61.7	35.5	24.8	19.1	15.6	12.3	9.5	6.5
C-B-2	100	100	93.0	77.2	65.6	39.0	26.9	15.5	8.6	6.0	3.3	2.1

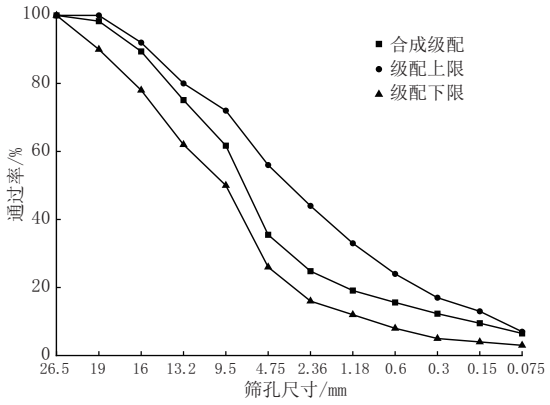


图1　AC-20C沥青混合料级配曲线

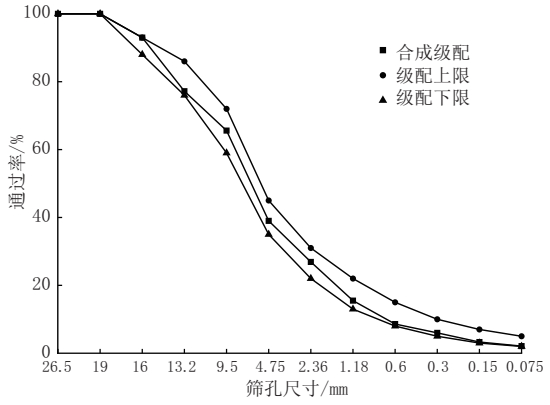


图2　C-B-2水泥稳定碎石级配曲线

表2　70号道路石油沥青与阳离子乳化沥青主要技术指标

沥青种类	技术指标	技术要求	实测值
70号道路石油沥青	针入度（25 ℃，100 g，5 s）/（0.1 mm）	60~80	67
	软化点（环球法）/℃	≥46	48.5
	延度（10 ℃，5 cm/min）/ cm	≥15	28
	60 ℃动力黏度/（Pa·s）	≥180	215
	闪点/℃	≥260	312
阳离子慢裂型乳化沥青	破乳速度	慢裂	慢裂
	筛上残留物（1.18 mm）/%	≤0.1	0.05
	蒸发残留物含量/%	≥50	58.6
	残留物针入度（25 ℃）/（0.1 mm）	50~300	76
	残留物延度（15 ℃）/ cm	≥40	65
	储存稳定性（5 d）/%	≤5	1.2

表3　聚丙烯防裂基布主要物理力学性能

单位面积质量/（g·m^{-2}）	厚度/mm	拉伸强度/（kN·m^{-1}）		CBR顶破力/N	刺破强力/N
		纵向	横向		
150	1.38	7.89	11.64	1 820.1	470.3

浆与松散颗粒，再均匀喷洒阳离子慢裂型乳化沥青黏层油。待乳化沥青充分破乳且表面无明显游离水后，按试验方案分别铺设聚丙烯防裂基布；无布对照组不铺设基布。随后摊铺预热至规定温度的AC-20C沥青混合料，采用轮碾法碾压成型厚50 mm车辙板。待试件冷却至室温后，采用金刚石切割机切割成100 mm×100 mm×100 mm的立方体剪切试件。试验设置无布、有布纵向铺设、有布横向铺设3种工况，每种工况分别在-15、5、25 ℃这3个温度下进行测试，每组制备6个平行试件，取平均值作为最终结果。

层间剪切性能采用45°斜剪试验测定。在该试验中，层间界面与加载方向成45°夹角，使界面能同时承受法向压应力和剪切应力，从而较好地模拟行车荷载作用下半刚性基层-沥青面层界面的复合受力状态，综合反映黏层黏结、界面摩阻与嵌挤以及基布加筋的共同贡献。

试验在配备高低温环境箱的万能材料试验机上进行。将试件放入设定温度的环境箱中保温4 h以上，确保内部温度均匀稳定后，迅速装入专用45°斜剪夹具，以20 mm/min的恒定速率加载至层间发生剪切破坏。记录破坏荷载P及对应剪切位移，按式（1）计算层间剪切强度τ，按式（2）计算等效剪切模量G。

$$\tau = \frac{P \cdot \sin 45^{\circ}}{A} \tag{1}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2}$$

上述式中：P为破坏荷载，N；A为层间剪切面积，mm^2；γ为等效剪切应变。

等效剪切应变γ反映界面在剪切作用下的相对变形程度，可用剪切破坏时层间相对剪切位移Δ与剪切作用区段高度h之比表达：

$$\gamma = \frac{\Delta}{h} \tag{3}$$

聚丙烯防裂基布拉伸性能按照《土工合成材料宽条拉伸试验方法》（GB/T 15788—2017）测试。分别沿基布纵向和横向裁剪尺寸为200 mm×70 mm的矩形试件，每个方向制备5个平行试件。试验采用土工布专用夹具，采用平面夹持方式，夹持力为500 N，预加载至10 N后开始正式加载，夹持距离100 mm，加载速率50 mm/min，加载至试件完全断裂。记录拉伸过程中的力-位移数据，绘制拉伸力-伸长率曲线，

计算最大拉伸力和断裂伸长率。每组取5个平行试件的曲线，剔除发生夹持端断裂等无效破坏的试件后取平均，得到纵、横向代表性曲线；以最大拉伸力对应的伸长率为断裂伸长率，并依据曲线初始段斜率比较纵、横向在小变形阶段的拉伸刚度。宽条拉伸试验在（20±2）℃、相对湿度约60%的环境条件下进行。

2　试验结果与分析

2.1　温度对层间剪切强度和等效剪切模量的影响

不同温度下层间剪切强度与等效剪切模量试验结果见表4。

表4　不同温度下层间剪切强度与等效剪切模量

温度/℃	工况	层间剪切强度/MPa	等效剪切模量/MPa	相对无布强度变化/%
−15	有布（纵）	9.69	66.38	+50.0
−15	有布（横）	7.10	55.62	+9.9
−15	无布	6.46	42.33	
5	有布（纵）	3.59	37.64	−24.9
5	有布（横）	3.35	26.31	−29.9
5	无布	4.78	40.88	
25	有布（纵）	0.99	9.23	−19.5
25	有布（横）	0.92	8.10	−25.2
25	无布	1.23	9.98	

由表4可知：

（1）3种工况的层间剪切强度均随温度升高而明显下降。温度由−15 ℃升至25 ℃时，有布纵向、有布横向和无布试样的层间剪切强度分别由9.69、7.10、6.46 MPa降至0.99、0.92、1.23 MPa，降幅分别为89.8%、87.0%、81.0%，说明在本文试验温度范围内，温度升高会明显削弱半刚性基层-沥青面层界面的抗剪能力。另外，在−15 ℃条件下，有布纵向和有布横向试样的层间剪切强度分别较无布试样提高50.0%和9.9%，说明低温条件下聚丙烯防裂基布可发挥一定加筋作用，其中纵向铺设试样的层间剪切强度更高，表明其更有利于限制斜剪加载过程中的界面早期相对位移；在5、25 ℃条件下，无布试样的层间剪切强度高于有布试样，表明中、高温条件下本试验基布夹层体系的层间抗剪贡献有限，后续工程应用中应结合黏层材料、基布浸润状态和施工质量进行进一步验证。

（2）3种工况的等效剪切模量与层间剪切强度变化趋势基本一致。温度由−15 ℃升至25 ℃时，有布纵向、有布横向和无布试样的等效剪切模量分别下降86.1%、85.4%和76.4%。低温条件下，有布纵向试样的等效剪切模量为66.38 MPa，较无布试样提高56.8%；有布横向试样为55.62 MPa，较无布试样提高31.4%。这说明在−15 ℃条件下，基布可提高界面整体刚度并限制其剪切变形。在5、25 ℃条件下，有布试样的等效剪切模量未表现出优势，尤其横向铺设试样在5 ℃下仅为26.31 MPa，明显低于无布试样的40.88 MPa。由此可见，基布夹层对界面刚度的改善主要体现在−15 ℃低温条件下；在5、25 ℃条件下，其等效剪切模量未高于无布工况，说明温度升高后需重点关注基布夹层体系的界面黏结质量。

2.2　基布拉伸各向异性及其层间抗裂机制

聚丙烯防裂基布纵、横向拉伸力-伸长率曲线见图3。

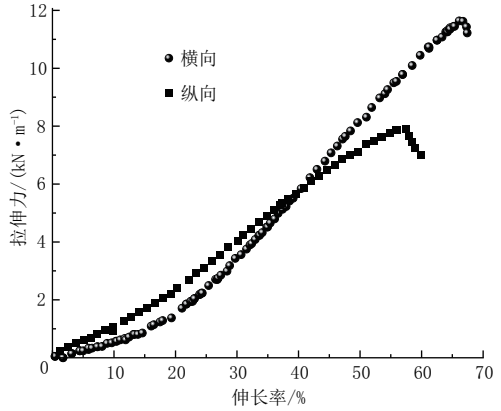


图3　聚丙烯防裂基布纵、横向拉伸力-伸长率曲线

由图3可知：

聚丙烯防裂基布纵横向力学性能存在差异。横向最大拉伸力约为11.64 kN/m，对应伸长率约66%；纵向最大拉伸力约为7.89 kN/m，对应伸长率约57%。但在伸长率小于40%的小变形阶段，纵向拉伸力高于横向。路面反射裂缝扩展初期通常以小变形和局部应力集中为主，此时纵向基布较高的小变形拉伸抗力可为应力分散和裂缝扩展延缓提供材料力学支撑；当裂缝继续发展并产生较大变形时，横向基布较高的极限拉伸力和伸长能力则有利于吸收裂缝扩展能量。因此，基布铺设方向不宜仅依据极限强度判断，还应结合裂缝张开方向、层间黏结质量和实际服役温度综合确定。

另外，纵、横向拉伸曲线在小变形阶段近似呈线性，纵向曲线初始段斜率更大，即小变形拉伸刚度更高；当伸长率超过约40%后，横向曲线持续上升并最终达到更高的极限拉伸力和断裂伸长率，呈现出更强的延性。2条曲线在约40%伸长率处出现交叉，反

映出基布在不同变形阶段的受力主导方向不同:小变形阶段以纵向纤维承载为主,大变形阶段则以横向纤维的伸长与能量吸收为主。这种各向异性源于纺黏非织造工艺中纤维取向与缠结结构的方向性差异。将拉伸特性与斜剪结果相联系可以发现,斜剪试验中层间相对剪切位移在破坏时通常较小,对应基布的小变形受力阶段,因此小变形拉伸刚度更高的纵向铺设在低温下表现出更优的层间抗剪性能,这与2.1节的结果相互印证。由此说明,基布对层间剪切的贡献主要由其小变形拉伸特性决定,而对裂缝大变形扩展阶段的抑制则更依赖横向的极限拉伸性能;铺设方向的选择应与界面主导变形阶段相匹配。

3 结 语

(1)温度对半刚性基层-沥青面层界面剪切性能具有明显影响。温度由-15 ℃升至25 ℃时,有布纵向、有布横向和无布试样的层间剪切强度分别降低89.8%、87.0%和81.0%,等效剪切模量分别降低86.1%、85.4%和76.4%,表明层间剪切性能随温度升高而整体下降。

(2)聚丙烯防裂基布对层间剪切性能的影响具有温度依赖性。-15 ℃条件下,纵向和横向铺设试样的层间剪切强度分别较无布试样提高50.0%和9.9%;但在5、25 ℃条件下,有布试样的层间剪切强度低于无布试样,表明中、高温条件下本试验基布夹层体系未表现出层间抗剪优势,工程应用中应结合黏层材料和施工质量控制进行进一步评价。

(3)在本文斜剪试验条件下,纵向铺设试样的层间剪切强度和等效剪切模量整体高于横向铺设试样,说明纵向铺设更有利于限制界面早期剪切变形。宽条拉伸试验表明,基布横向极限拉伸强度和断裂伸长率较高,而纵向在小变形阶段具有较大的拉伸抗力。

(4)工程应用中,聚丙烯防裂基布铺设方向不宜仅依据极限拉伸强度确定,应综合考虑裂缝张开方向、层间黏结质量及服役温度。

参考文献:

[1] 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.
[2] 汪水银.室内沥青混凝土路面层间抗剪强度试验方法研究[J].公路,2010(2):144-147.
[3] 刘红坡,艾长发,Rahman A,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.
[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.
[5] 董海东,麻旭荣,裘秋波,等.基于斜剪试验的超薄罩面层间黏结性能研究[J].公路,2022,67(4):94-97.
[6] 宿松亚.新型防裂基布在新疆公路养护工程中应用效果研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
[7] 陈磊.聚丙烯长丝土工布力学特性及防治反射裂缝研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2020.
[8] Khweir K, Fordyce D. Influence of layer bonding on the prediction of pavement life[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, 2003, 156(2): 73-83.
[9] Canestrari F, Santagata E. Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(1): 39-46.
[10] Canestrari F, Ferrotti G, Partl M, et al. Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1929: 69-78.
[11] Canestrari F, Cardone F, Gaudenzi E, et al. Interlayer bonding characterization of interfaces reinforced with geocomposites in field applications[J]. Geotex tiles and Geomembranes, 2022, 50(1): 154-162.
[12] 钱劲松,陈欣然,郑毅,等.基于MMLS3设备的土工布防治反射裂缝效果研究[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(8):1042-1048.
[13] 付伟.聚丙烯土工布沥青吸收特性及热冲击效应试验研究[J].公路,2016,61(3):196-199.
[14] 吴树恒,马新伟,姜益顺,张永鹏.聚芳酯纤维水稳碎石-沥青混合料层间黏结性能[J].城市道桥与防洪,2025(11):288-291.
[15] 刘东亮,周维维,徐韵淳.温度-荷载作用下钢桥面铺装层间黏结性能分析[J].城市道桥与防洪,2026(2):57-62.