

聚氨酯基修复材料的配合比优化及与沥青路面界面粘结温度效应研究

李丹¹, 房昕宇¹, 许海东¹, 杨光耀¹, 章文¹, 赵益颀¹, 冷冰^{1,*}

1. 北华大学, 土木与交通学院, 吉林 吉林, 132013

摘要: 鉴于现有园林路面普遍存在的损伤破坏、与周边结构部件界面脱粘等技术短板, 本文通过对聚氨酯基修复材料进行配合比设计与力学性能试验, 通过抗压试验与抗折试验, 设计聚氨酯基修复材料的最佳配合比, 制作聚氨酯基-沥青混凝土组合结构试件, 通过拉拔试验测试, 探究聚氨酯基修复材料与沥青混凝土之间的界面粘结性能, 系统分析不同温度因素对二者界面粘结性能的作用规律。实验结果表明聚氨酯基修复材料在 0 °C 条件下, 材料刚性最为突出, 在相同应力作用下产生的变形最小, 表现出较高的结构稳定性; 在 65 °C 条件下, 材料塑性显著增强, 变形能力明显提升。相同应力水平下, 温度的升高有助于聚氨酯与沥青混凝土界面之间的粘结强度的提升。此外, 聚氨酯基修复材料不仅有较高的抗压强度 (7 天抗压强度为 97.14 MPa, 28 天抗压强度为 98.57 MPa), 而且材料修复后的早期强度表现较传统修补材料更为优越, 满足快速修补需求。

关键词: 聚氨酯; 沥青混凝土; 配合比优化; 界面粘结性能; 温度效应

Study on Mix Proportion Optimization of Polyurethane-Based Repair Materials and Temperature Effect on Interface Bonding with Asphalt Pavement

Dan Li¹, Xinyu Fang¹, Haidong Xu¹, Guangyao Yang¹, Wen Zhang¹, Yijie Zhao¹, Bing Leng^{1,*}

1. School of Civil and Transportation Engineering, Beihua University, Jilin, 132013, China

Abstract: In view of the prevalent technical deficiencies of existing garden pavements, including damage, deterioration, and interfacial debonding from surrounding structural components, this study conducts mix proportion design and mechanical performance tests on polyurethane-based repair materials. The optimal mix proportion of the polyurethane-based repair material is determined via compressive and flexural tests. Composite specimens of polyurethane-based material and asphalt concrete are fabricated, and pull-out tests are performed to explore the interfacial bonding performance between the two materials. The action laws of different temperature factors on their interfacial bonding performance are systematically analyzed. The experimental results demonstrate that the polyurethane-based repair material exhibits the most prominent rigidity at 0 °C, with the minimum deformation under the same stress and excellent structural stability. At 65 °C, the plasticity of the material is significantly enhanced, and its deformability is remarkably improved. At the same stress level, the increase in temperature is conducive to the improvement of the interfacial bonding strength between polyurethane and asphalt concrete. In addition, the polyurethane-based repair material not only possesses high compressive strength (7-day compressive strength of 97.14 MPa and 28-day compressive strength of 98.57 MPa) but also shows superior early strength

after repair compared with traditional patching materials, which can meet the requirements of rapid repair. **Keywords:** Recycled brick aggregate concrete; Microbial reinforcement treatment; Mechanical properties; Frost resistance; Microstructure

Keywords: Polyurethane; Asphalt concrete; Mix proportion Optimization; Interfacial bonding performance; Temperature effect

在园林道路的建设中沥青是最常用的路面材料,基本结构由级配集料与沥青粘结而成^[1]。集料构成路面结构骨架,沥青作为粘结材料维持集料相对位置稳定。然而,沥青在环境与荷载耦合作用下会不可避免地出现老化,硬化、脆化等现象,最终引发路面病害,缩短使用寿命^[2]。由于园林道路的特殊性,其养护与维修的施工工期较长,施工成本较高^[3]。

近年来,研究人员提出了一些创新的沥青路面预防性养护技术。例如,通过射频或微波电磁辐射对金属纤维改性沥青铺装路面进行加热,能够修复沥青胶浆与混合料裂缝。实验室测试表明,在加热后,裂缝胶浆和多孔沥青混凝土梁的断裂强度恢复率接近80%。然而,感应加热技术目前仍处于试验阶段,且由于大多数沥青路面未掺配钢纤维,实际应用面临一定挑战^[4]。Dar Hao Chen^[5]提出MS-III超薄磨耗层修补技术可显著提升整体耐久性,虽然微表处初始抗滑性能小幅提升,因细集料基体快速磨光,摩擦系数下降最快,无法长期保持性能^[6]。在现有修复工艺中,灌缝技术表现出显著的经济效益,能够有效阻止水分和固体颗粒物侵入路面基层,同时在一定程度上恢复路面的承载能力^[7],从而提高路面的耐久性和使用性能,已在实际工程中得到广泛应用^[8,9]。

对于沥青修补材料的研究也取得很大进展,牟存玉^[10]采用废橡胶粉与废塑料裂解产物作为核心改性材料,通过常规试验,确定了废橡胶制品和废塑料裂解产物与基质沥青的相容性较好,自制高温型和普通型修补材料。贺强^[11]针对西部高海拔山区沥青路面,开展了温拌灌缝胶的制备及性能研究,重点解决了低温环境下灌缝胶的施工性能和耐久性问题。马玉林^[12]通过正交试验确定了最佳剪切参数,制备出高温型、普通型以及低温型三种不同类型的灌缝材料,并对灌缝材料的高温流变性能展开研究。赖明利^[13]通过对比四种灌缝材料的三大指标,优选橡胶粉、芳香基橡胶油等原材料,研制的三种灌缝材料性能优于对比材料,低温性能突出。

聚氨酯是一种具有优异耐磨性、耐高温性以及综合力学强度的合成材料,应用范围广泛^[14]。刘贵位、王剑琳等^[15]通过材料配方的研究,制作聚氨酯混凝土复合材料,并将其应用于浙江省宁波市白溪大桥的加固实践。结果表明,采用聚氨酯混凝土这种材料对桥梁进行加固,桥梁的承载能力和刚度有显著提高。国外Hussain等^[16,17],利用掺有粉煤灰的聚氨酯水泥混合材料,进行了T型截面梁的抗弯强度试验,结果表明利用这种材料对梁进行加固,能够明显提高梁的极限承载能力,明显降低梁的裂缝产生数量。本研究提出以聚氨酯为核心材料的聚氨酯基修复材料,具有轻质、高强度、高韧性的特点,为园林道路修复材料的研发与应用提供新的思路与方向。

1 材料与方法

1.1 试验材料

聚氨酯材料由异氰酸酯和多元醇的混合物制成,其中,异氰酸酯由巴斯夫聚氨酯黑材料制成,性能指标见表1;聚醚多元醇由山东腾展聚氨酯有限公司生产,性能指标见表2。

表1 异氰酸酯的性能

Table 1 Performance index of isocyanate

黏度 (mPa·s)	官能团的质量分数 (NCO, %)	外观	密度/ (g·cm ⁻³)
200~300	30.5~32.0	深棕色液体	1.1

表2 聚醚多元醇的性能

Table 2 Performance index of polyether polyol

外观	pH	含水率 (%)	黏度 (mPa·s)	羟基值 (mg KOH/g)	酸值 (mg KOH/g)	密度 (g·cm ⁻³)
无色或淡黄色液体	5.0-8.0	≤0.05	300-500	440~460	≤0.07	1.05

水泥在聚氨酯基修复材料中主要起填充作用，能够增加聚氨酯基修复材料的早期强度。本次研究采用 P·O 42.5 水泥的性能参数见表 3。

表3 水泥性能参数

Table 3 Cement performance parameters

密度 (g·cm ⁻³)	细度 (%)	凝结时间 (min)		安定性	抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
		初凝	终凝		3d	28d	3d	28d
3.1	0.6	143	214	合格	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5

遇到水蒸气或在潮湿环境中，聚氨酯基修复材料容易膨胀，产生大量气泡，造成孔隙结构，影响受力性能和耐久性。因此，使用时需要添加除湿剂。除湿剂是粉末状，材料特性见表 4。

表4 除湿剂材料特性

Table 4 Material characteristics of dehumidifier

外观	直径 (mm)	堆积密度 (g·cm ⁻³)	平衡吸水能力 (%)	固体有机硅质量分数 (%)
白色粉末	2.3	0.82	26.50	>99

1.2 配合比设计

为提升聚氨酯基修复材料的综合力学性能并考虑经济性与可持续性，本文基于抗压强度试验结果，采用正交试验法研究粉煤灰与硅灰掺量对聚氨酯修复材料体系的影响规律。由于硅灰在聚氨酯基修复材料中主要体现出提升界面结合强度与抗压性能的作用^[18]。粉煤灰主要体现填充与胶凝作用，可减少水泥的掺量，减少材料成本并实现工业废弃物资源化利用^[19]。掺入硅灰与粉煤灰可改善聚氨酯修复材料的微观结构与宏观力学性能。在试验设计中，以硅灰、水泥与粉煤灰掺量及聚氨酯组分的主要控制变量，采用 L9 (3²) 正交表设计 9 组材料不同配比方案。各因素及水平的设置综合依据《公路工程材料试验规程》及前期预试验结果，确保材料在 28 d 养护龄期下的抗压强度控制在 60~100 MPa。各因素的具体水平与试验方案见表 5。D₁-D₉ 为 9 组试验，每组分别测试 7、14、28d 力学性能。为降低数据离散性对试验结果的影响，在相同制备与养护条件下，每组均制备 3 份平行试样。

表5 正交试验因素及试验组合

Table 5 Factors, levels and orthogonal experimental design

试验编号	因素 M: 硅灰掺量 (%)	因素 N: 水泥:粉煤灰 (质量比)	正交组合
D ₁	5	1:1	M ₁ N ₁
D ₂	5	1:1.5	M ₁ N ₂
D ₃	5	1:3	M ₁ N ₃
D ₄	10	1:1	M ₂ N ₁
D ₅	10	1:1.5	M ₂ N ₂
D ₆	10	1:3	M ₂ N ₃
D ₇	15	1:1	M ₃ N ₁
D ₈	15	1:1.5	M ₃ N ₂
D ₉	15	1:3	M ₃ N ₃

注: D₁D₂D₃分别代表养护龄期为7、14、28 d, M、N分别代表各控制因素,例如 M₁N₁表示 M 为硅灰掺量 5%, N 为水泥:粉煤灰比为 1:1 的组合。

此外,考虑沥青材料差异对界面性能测试结果的影响,所有沥青混凝土试件均采用统一配合比制备。通过对各控制因素响应结果的分析与比较,确定聚氨酯基修复材料的最优配合比,为后续界面粘结性能及温度效应试验提供依据。

1.3 聚氨酯基修复材料-沥青混凝土试件制备

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410-2025),制作好 50 mm × 100 mm × 100 mm 的沥青混凝土试块并静置 24 h 以确保沥青充分固化。将硅灰、水泥、粉煤灰在自动沥青混合料拌合机中搅拌,搅拌温度为 105 ~ 110 °C,搅拌 10 min,去除材料中的水分。将烘干的异氰酸酯、聚醚多元醇、除湿剂、硅灰、水泥、粉煤灰,使用电子天平按比例称重;将称量好的异氰酸酯、除湿剂、聚醚多元醇一起加入搅拌容器中搅拌,静置 5 min 观察表面气泡变化,以确保混合均匀且气泡排出充分。聚氨酯修复材料与沥青混凝土制备流程见图 1。

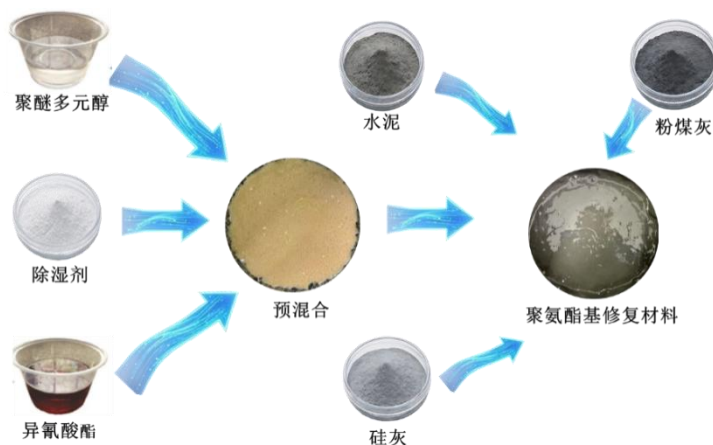


图1 聚氨酯基修复材料制备流程

Fig. 1 Preparation process of polyurethane-based repair materials

2 材料配合比优化

2.1 抗压与抗折试验

由《公路路面坑槽全天候快速修补料应用技术规程》(T/GLYH 15-2025)可知,沥青路面修补材料的强度无严格上限规定,但过高的抗压强度(>100 Mpa)易导致材料在应力作用下发生脆裂失效。因此,合理控制材料强度区间对于实现高承载与抗裂性能的平衡至关重要。聚氨酯基修复材料抗压强度试验见图2。根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30-2005),沥青混凝土路面的抗折强度直接反映材料抵抗弯曲拉伸破坏的能力,是直接决定路面抗裂性能关键指标,聚氨酯基修复材料抗折强度试验采用尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的试件,D1-D9共9组试件,为减小数据差异性对试验结果的影响,在相同的配制和养护条件下,每组配制3个平行试件,聚氨酯基修复材料抗折强度试验见图2。

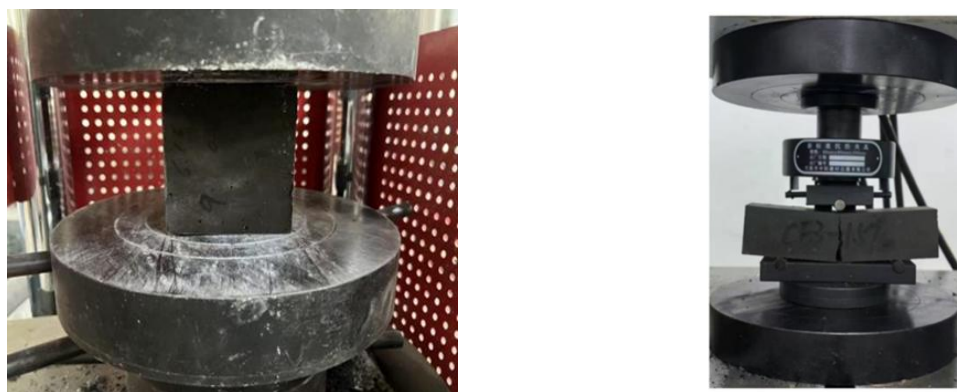


图2 聚氨酯基修复材料抗压强度与抗折强度试验

Fig. 2 Test on compressive strength and flexural strength of polyurethane-based repair materials

试验结果表明,在不同养护龄期(7、14、28 d)下,各组试件的抗压强度见图3,均随龄期延长有所提高。当水泥与粉煤灰质量比为1:1.5时,复合体系的抗压强度达到最优,抗压强度低于100 MPa,符合材料要求。其中,掺入10%硅灰的试件表现最为优异,7、14、28 d抗压强度分别为97.14、97.99、98.57 MPa,强度变化幅度小于1.5%,表明聚氨酯基修复材料的结构稳定性好。抗折试验结果见图4,适当增加聚氨酯组分能够有效提高材料抗折强度,但当掺量超过一定值时,其强化效果将逐渐减弱甚至产生不良影响。因此,在保证材料工作性能与经济性的前提下,应合理控制聚氨酯组分比例,以获得最佳力学性能。

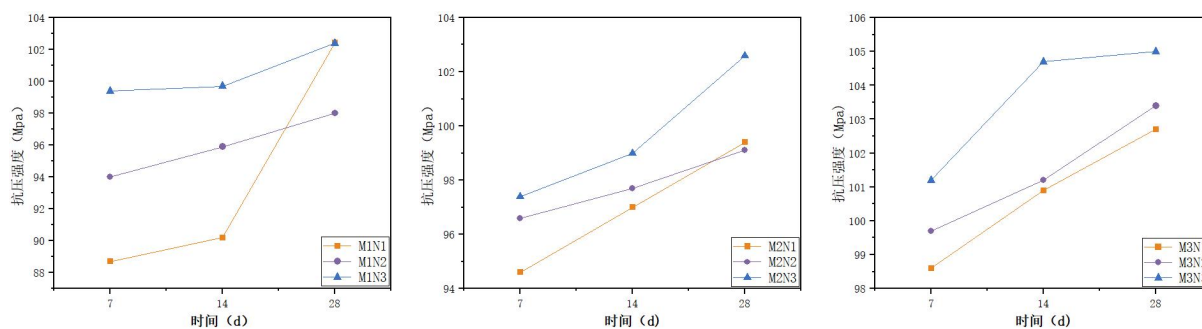


图3 聚氨酯基修复材料配合比优化抗压强度试验

Fig. 3 Optimization test of compressive strength for the mix proportion of polyurethane-based repair materials

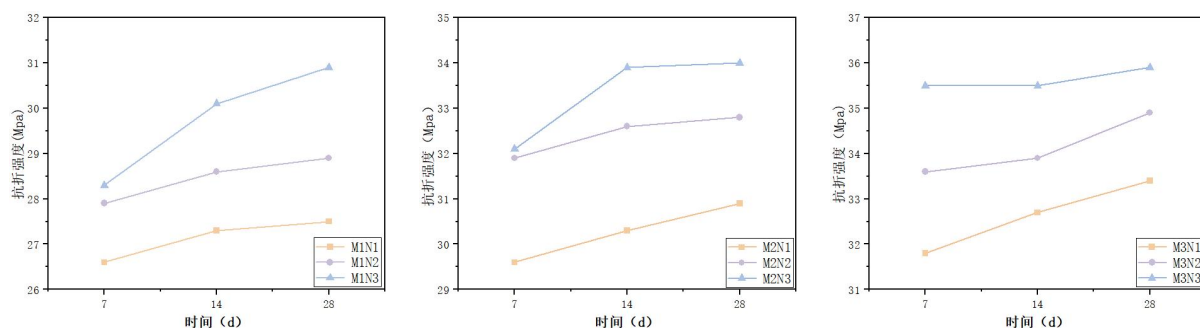


图4 聚氨酯基修复材料配合比优化抗折强度试验

Fig. 4 Flexural strength of mix ratio optimization test for polyurethane-based repair materials

通过对聚氨酯基修复材料进行抗压强度试验与抗折强度试验，综合两试验结果，其最优配合比为：水泥和粉煤灰质量比为 1:1.5，硅灰掺量为 10%。该配合比材料结构稳定，具有相对优异的抗压强度和抗折强度，更适配园林道路轻载工况，满足快速开放交通要求。因此确定该配合比作为后续的拉拔试验的材料基础配合比。

3 拉拔试验

3.1 试验试件制备

将成品倒入 $70 \times 70 \times 70$ mm 模具中使其与沥青混凝土的接触面充分接触，将沥青混凝土与试块结合，等待凝固，静置 24 h 后脱模。在试验前先将粘结试件多余边角打磨，使用记号笔标注试件粘结面位置。使用粘合剂将试样固定在拉力试验机的夹具上，确保试样与夹具紧密贴合，等待凝固并静置 24 h 后脱模。制备完成的拉拔试样见图 5，沥青混凝土与聚氨酯基修复材料粘结面积为 70×70 mm²。该制备方法可保证界面结合质量，为后续界面粘结性能测试提供可靠试验样本。

3.2 试验方法

拉拔试验在 WAW-2000A 型微机控制电液伺服万能试验机上进行，该试验机配备的反力架装置。加载时，沥青混凝土由下夹具固定，聚氨酯修复材料由固定在加载梁上的反力架向上推动。载荷值由试验机上的力传感器采集。在聚氨酯修复材料上承重钢板的上表面和沥青混凝土的自由端分别安装了高精度位移计。位移计数据采集采用 JM3816 静态应变测试仪。加载采用位移控制，加载速度为 0.3 mm/min。载荷和位移数据的采集频率为 1 Hz。当试件出现以下 3 个情况时终止试验：

(1) 聚氨酯修复材料发生劈裂破坏；(2) 沥青混凝土发生断裂；(3) 加载端沥青混凝土滑移大于 10 mm，且荷载值波动很小。



图5 拉拔试验试件

Fig. 5 Pull-out test specimen

启动万能试验机，准备给试件施加拉力。控制按钮，让上方的加载头慢慢向下移动，直到试件

上下两端刚好和试验机接触。之后再检查调整一下试件位置，保证粘结面位置端正，确认没问题后就开始正式试验。试验过程中要仔细观察试件在受力过程中的变化情况，直到试验结束，每组试验数据记录并保存。试验结果以及不同温度下的应力-应变曲线计算结果见图6。

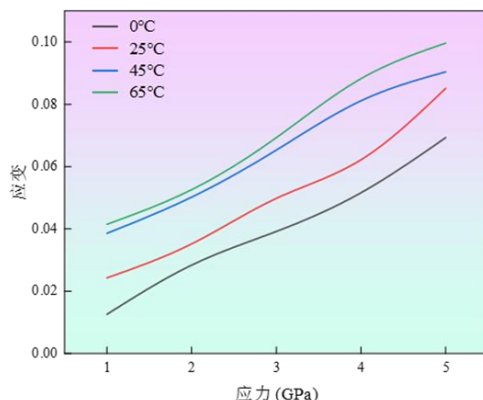


图6 不同温度的聚氨酯基修复材料拉拔作用下的应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of polyurethane-based repair materials under pull-out action at different temperatures

4 讨论

测试温度分别为0 °C、25 °C、45 °C和65 °C，试验中应力（单位：GPa）与应变的关系在不同温度下呈现明显差异。具体表现如下：

在0 °C的条件下，材料表现出较低的应变，且应变随着应力增加而缓慢增长。该温度下的材料应力-应变曲线较为平缓，反映出低温下材料的变形能力有限。

在25 °C的条件下，尽管材料的应变有所增加，但与常温和高温条件相比，其应变增长速率仍较低。温度升高使得材料的粘结性能稍有恢复，但仍受到低温的抑制。

在45 °C的条件下，材料的应变值比低温下大幅上升，且应变的增长更加显著，表明聚氨酯材料在常温下能够提供较为理想的变形能力。

在65 °C的条件下，材料的应变值显著增大，应力和应变的关系趋于陡峭。这表明，聚氨酯修复材料在高温下表现出更强的可变形能力，使材料能够更好地适应外界应力。

在相同应力水平下，材料应变随温度升高呈现出显著的单调递增趋势，其变形能力大小规律为：65 °C > 45 °C > 25 °C > 0 °C。在低温（0 °C）条件下，材料刚性最为突出，在相同应力作用下产生的变形最小，表现出较高的结构稳定性；而在高温（65 °C）条件下，材料塑性显著增强，变形能力明显提升。四条温度曲线均呈现上凸形态，表明应变增长速率随应力增大逐步加快，材料并非遵循线性弹性变形机制。随着应力水平提升，材料内部结构逐渐活化，刚度持续降低，进入更易发生塑性变形的阶段，这一特征在高温条件下尤为突出，反映出应力与温度对变形的协同促进效应。

从温度效应的梯度特征来看，低应力区间（1~2 GPa）内，不同温度下的应变差异较小，温度对变形的调控作用相对温和；而高应力区间（3~5 GPa）内，温度间的应变差距随应力升高持续扩大，说明高应力工况会进一步放大温度对材料变形的影响。在测试范围内，各温度对应的应力-应变曲线未出现交叉现象，说明温度对材料变形能力的影响具有良好的稳定性和一致性。此外，随着温度升高，应变对应力变化的敏感性逐渐增强，其中65 °C条件下曲线斜率最大，表明微小的应力增量即可引起显著变形；相比之下，0 °C曲线最为平缓，材料对应力变化的响应最不敏感。

低温下, 聚氨酯与沥青混凝土的界面可能会受到温度的影响, 导致界面粘结性能降低。界面粘结性差会导致材料的整体力学性能下降。因此, 尽管在低温下聚氨酯材料能够维持较好的力学强度, 但其变形能力较差, 限制了材料的应用范围。

5 结论

(1) 通过正交试验设计与力学性能测试, 确定了聚氨酯基修复材料的最优配合比为: 水泥与粉煤灰比例 1:1.5, 硅灰的掺量 10%。在此条件下, 材料的抗压强度接近 100 MPa, 抗折强度接近 35 MPa, 表现出了优异的力学性能, 且各在养护龄期强度发展稳定, 表明其具有良好的结构稳定性, 因此材料适用于路面的修复工程。

(2) 通过拉拔试验结果显示, 温度对于聚氨酯基修复材料与沥青混凝土之间的界面粘结性能具有显著影响。随着温度升高, 相同应力水平下的应变的趋势呈单调递增, 表明材料变形能力增强。变形能力从大到小的顺序为: $65\text{ }^{\circ}\text{C} > 45\text{ }^{\circ}\text{C} > 25\text{ }^{\circ}\text{C} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这表明界面处温度与力学响应之间存在强烈的耦合效应。

(3) 在常温条件下, 聚氨酯基修复材料实现了强度与变形能力的最优平衡, 且具有良好的界面粘结性能, 因此特别适用于典型服役条件下沥青路面的快速修复工程, 建议在 $5\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 施工, 养护时间 24 h 可开放交通, 适用于园林沥青路面的快速修补工程。

参考文献

- [1] 李富乐, 李梦豪, 王刚, 等. 级配特征与沥青混合料的施工特性[J]. 建筑机械, 2022, 4: 73-77.
- [2] 金大中. 不同紫外光照工况条件下沥青性能变化特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [3] 彭俊杰. 城市园林绿化工程施工及养护管理探究[J]. 南方农业, 2022, 16(14): 35-37.
- [4] Norambuena-Contreras J, Garcia A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating[J]. Materials & Design, 2016, 106: 404-414.
- [5] Chen D, Won M, Chen X, et al. Design improvements to enhance the performance of thin and ultra-thin concrete overlays in Texas[J]. Construction and Building Materials, 2016, 116: 1-14.
- [6] 李强, 倪富健, 王文达, 等. 沥青路面裂缝修补材料技术性能对比研究[J]. 公路工程, 2013, 38(6): 33-37.
- [7] Kong F, Li Y, Wang R, et al. Road performance evaluation of preventive maintenance techniques for asphalt pavements[J]. Lubricants, 2025, 13(9): 410.
- [8] Dan H, Bai G, Zhu Z, et al. An improved computation method for asphalt pavement texture depth based on multiocular vision 3D reconstruction technology[J]. Construction and Building Materials, 2022, 321: 126427.
- [9] Lee S, Choi J, Le T, et al. Unraveling the optimal strategies for asphalt pavement longevity through preventive maintenance: A case study in South Korea[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03464.
- [10] 牟存玉. 废橡胶粉-废塑料裂解物改性沥青修补材料性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [11] 贺强. 高海拔山区沥青路面温拌修补材料的制备及性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [12] 马玉林. 橡胶粉-SBS 复合改性灌缝材料制备工艺及其高温流变性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [13] 赖明利. 高性能沥青路面修补材料的制备与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [14] 张芳. 聚氨酯及水性聚氨酯纳米复合材料结构和力学性能的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [15] 王剑琳, 刘贵位, 叶李水. 利用 MPC 复合材料进行空心板梁桥加固的应用技术研究[J]. 公路, 2013, (8): 39-43.
- [16] Hussain H, Zhang L, Liu G. An experimental study on strengthening reinforced concrete T-beams using new material polyurethane-cement (PUC)[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 104-117.
- [17] Hussain H, Liu G, Yong Y. Experimental study to investigate mechanical properties of new material polyurethane-cement composite (PUC)[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 200-208.
- [18] 张扬, 张丽丽, 蒲红军. 聚氨酯-硅灰改性修补砂浆的制备及性能研究[J]. 四川建材, 2024, 50(12): 25-26.
- [19] 刘沛. 复合固废基胶凝材料透水混凝土的制备与性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.

基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目（202410201027）；北华大学博士科研启动基金项目（202301）；吉林省留学人员创新创业资助项目；北华大学校级大学生创新创业项目。

¹ **第1作者简介：**李丹（2005-），女，本科在读，研究方向：聚氨酯基修复材料力学性能。 E-mail: lidansjj@126.com。

* **通讯作者简介：**冷冰（1979-），男，工学博士，副教授，研究方向：复合材料结构损伤仿真研究。 E-mail: lengbing@beihua.edu.cn。