

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.251128

半刚性基层裂缝改性聚氨酯注浆材料性能研究

陈兆南

(中路交科检测技术有限公司,江苏 南京 210000)

摘要: 针对传统非开挖注浆材料普遍存在发泡倍率高、黏结性差、强度低和不耐水的问题,通过开展改性聚氨酯注浆材料稳定性和耐久性试验研究,得到改性聚氨酯注浆材料在不同浸泡条件和时间下拉伸强度、伸长率变化均较小,且沥青面层芯样劈裂强度恢复率72.14%,疲劳寿命恢复率约50%,水稳基层芯样劈裂强度恢复率84.62%,疲劳寿命次数为完好试件的80%。结果表明,改性聚氨酯材料稳定性好、粘结强度高和耐久性优异,可有效提升半刚性基层裂缝非开挖注浆处治质量。

关键词: 半刚性基层裂缝;改性聚氨酯材料;稳定性;耐久性

中图分类号: U418.6;TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)03-0066-03

Research on the Performance of Modified Polyurethane Grouting Materials for Semi-Rigid Base Cracks

CHEN Zhaonan

(Zhonglu Jiaoke Testing Technology Co., Ltd., Jiangsu 210000, China)

Abstract: In view of the common problems of traditional non-excavation grouting materials, such as high foaming ratio, poor adhesion, low strength and poor water resistance, the stability and durability tests of modified polyurethane grouting materials were carried out. It was found that the tensile strength and elongation of the modified polyurethane grouting materials changed little under different soaking conditions and times, and the splitting strength recovery rate of the asphalt surface layer core sample was 72.14%. The fatigue life recovery rate is approximately 50%, the splitting strength recovery rate of the water-stabilized base core sample is 84.62%, and the number of fatigue life cycles is 80% of that of the intact specimens. The results show that the modified polyurethane material has good stability, high bonding strength and excellent durability, which can effectively improve the quality of non-excavation grouting treatment for cracks in semi-rigid base layers.

Keywords: semi-rigid base layer cracks; modified polyurethane material; stability; durability

0 引言

半刚性基层已是我国公路工程首选的基层结构类型,具有强度高、承载力强、综合经济效益好等优势^[1-2]。但是,随着国家经济和交通基础设施建设快速发展,我国公路使用年限和重载交通日益增长,在重载货车反复荷载和高低温循环条件下水泥稳定碎石基层反射裂缝病害日趋凸显^[3-5]。现阶段,公路养护工程多采用热沥青或密封胶灌缝、局部挖补换填和铣刨重铺等裂缝处治方案^[6-8],但普遍存在“治标不治本”、铣刨重铺工效低、施工成本高和耐久

性难以保证等顽疾,最关键的是半刚性基层裂缝未能得到有效处治,在行车荷载和极端天气作用下裂缝仍会复发,严重影响路面行车舒适度及耐久性。

近年来,由于非开挖注浆裂缝处治技术施工工艺简单、效率高和造价低,已在高速公路改扩建和养护工中得到规模化应用^[9-10],非开挖注浆技术主要是将改性聚氨酯注浆材料压入基层裂缝处,通过渗透、扩张等作用在缝隙内形成浆脉,提高路面结构强度,从而延长道路使用寿命^[11-12]。与非开挖注浆水泥材料相比,改性聚氨酯注浆材料具有渗透性好、固化速度快、黏结强度高等特点^[13-15]。因此,本文主要基于微膨胀、粘结性好、强度高和耐水的新型改性聚氨酯注浆材料,对改性聚氨酯注浆材料的路用性能进行深入研究,为改性聚氨酯材料在非开挖注浆处治工程中推广应用提供技术支撑。

收稿日期: 2025-11-26
基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BA2023104)
作者简介: 陈兆南(1991—),男,硕士,工程师,从事沥青路面结构与材料研究工作。

1 注浆材料稳定性试验

如果裂缝处治不及时,降雨期间雨水沿着裂缝渗入到基层内部,半刚性基层中水泥水化后生成大量氢氧化钙,溶解后基层处于碱性环境。因此,本文开展不同浸泡条件(自然环境、自来水、酸性和碱性)和浸泡时间(30、90、180 d)下改性聚氨酯注浆材料稳定性试验,研究改性聚氨酯材料长度、宽度随浸泡时间变化规律。试验方案如表1所示,试验结果如图1和图2所示。

表1 不同浸泡条件和浸泡时间下稳定性试验方案				
试验名称	试件尺寸	浸泡条件	浸泡时间/d	试验参数
稳定性试验	长方体试件 (40 mm×40 mm×160 mm)	自然环境	30、90、180	长度、宽度
		自来水		
		酸 pH3~4		
		碱 pH11~13		

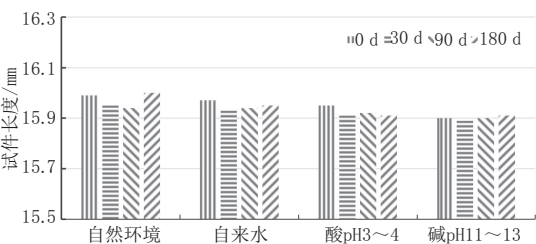


图1 不同浸泡条件和时间下试件长度变化

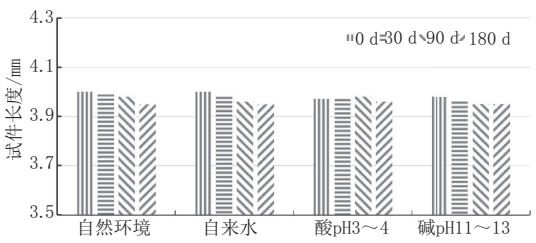


图2 不同浸泡条件和时间下试件宽度变化

在不同浸泡条件和浸泡时间下的试件长度、宽度变化与自然环境试验结果基本一致,说明固化后改性聚氨酯材料在水、酸、碱条件下具有较好的稳定性和微膨胀特性。

2 注浆材料耐久性试验

为进一步验证改性聚氨酯材料注浆后在极端低温条件下抗疲劳耐久性能,对某高速公路改扩建工程实施非开挖注浆处治路段进行现场取芯,开展沥青面层和水稳基层芯样冻融劈裂强度和疲劳性能试验研究。

2.1 冻融劈裂强度试验

分别选取完好处和裂缝注浆后芯样进行冻融条件下劈裂强度试验对比分析,采用劈裂强度恢复率

((裂缝注浆后的直接劈裂强度÷完好处的直接劈裂强度)×100%)作为评价指标,试验结果如表2和表3所示。劈裂强度试验试件直径150 mm,切割后芯样高度5~10 cm。直接劈裂强度试验条件:试件放入(25±0.5)℃水浴中浸泡2 h后进行劈裂强度试验;冻融劈裂试验条件如下。

表 2 沥青面层芯样冻融劈裂强度试验结果						
试验条件	序号	劈裂强度/MPa	平均值/MPa	劈裂强度比/%		
裂缝注 浆处	直接 劈裂	1 2 3	0.75 1.19 1.09	85.15		
	冻融 劈裂	1 2 3	0.79 0.84 0.96			
	完好处	直接 劈裂	1 2 3		1.26 1.37 1.56	82.86
		冻融 劈裂	1 2 3		1.45 1.11 0.93	

表 3 半刚性基层冻融劈裂强度试验结果					
试验条件	序号	劈裂强度/MPa	平均值/MPa	劈裂强度比/%	
裂缝注 浆处	直接 劈裂	1	0.48	106.82	
		2	0.33		0.44
		3	0.49		
	冻融 劈裂	1	0.38		0.47
		2	0.38		
		3	0.65		
完好处	直接 劈裂	1	0.48	105.77	
		2	0.67		0.52
		3	0.40		
	冻融 劈裂	1	0.46		0.55
		2	0.50		
		3	0.70		

- (1)真空饱水后的试件放入塑料袋内并加入(10±0.5) mL水进行密封;
- (2)带芯样的密封塑料袋放进(-18±2)℃冰箱里(16±1) h;
- (3)带芯样的密封塑料袋放入(60±0.5)℃水浴中保温24 h;
- (4)最后将芯样放入(25±0.5)℃水浴中浸泡2 h后开始劈裂强度试验。

沥青面层裂缝注浆后芯样破坏界面主要沿着裂缝注浆位置开裂,裂缝注浆处直接劈裂和冻融劈裂条件下芯样劈裂强度略低于完好处芯样劈裂强度,但裂缝注浆处芯样劈裂强度比85.15%,略大于完好处芯样劈裂强度比。沥青面层芯样劈裂强度恢复率

为72.14%,说明冻融条件对沥青面层本身劈裂强度影响较明显,裂缝注浆处芯样低温抗冻性能较好。

半刚性基层裂缝注浆后芯样破坏界面未沿着裂缝注浆位置开裂,半刚性基层芯样自身发生断裂破坏,在直接劈裂和冻融劈裂条件下裂缝注浆处和完好处芯样劈裂强度基本保持一致,且半刚性基层芯样直接劈裂强度和冻融劈裂强度变化不大,但裂缝注浆处芯样劈裂强度比106.82%,略高于完好处芯样劈裂强度比。半刚性基层芯样劈裂强度恢复率84.62%,说明聚氨酯注浆材料粘结性能强,芯样劈裂强度恢复率高。

后续将分析注浆施工工艺参数(如注浆压力)与疲劳寿命的关联性,进一步优化注浆施工过程质量控制。

2.2 疲劳性能试验

为深入评价服役条件下注浆后路面疲劳寿命,采用劈裂疲劳试验评价注浆材料疲劳性能,试件制备采用室内成型注浆修补试件,并选取注浆后芯样裂疲劳性能试验结果进行验证。

(1)室内成型试件:选用现场路面完好处芯样,将面层(厚4 cm)与基层(厚15 cm)切割一定高度,然后沿着芯样垂直切割成两个半圆,在切割面涂刷一定量的改性聚氨酯材料,然后将另外一半拼接,24 h后待材料完全固化后,方可试验。

(2)路面现场芯样:面层和基层各选择路面完好处芯样以及裂缝注浆后取含裂缝芯样进行强度对比。完好处和裂缝注浆芯样直径150 mm,基层试件厚度15 cm,面层试件厚度4 cm。

将室内成型试件和现场路面芯样进行应力水平为0.5 MPa的疲劳性能试验,试验结果见表4和表5所示。

表4 沥青面层疲劳性能试验结果

试件类型	疲劳寿命/次				平均寿命/次
	试件1	试件2	试件3	试件4	
室内成型	65 748	87 269	75 209	103 628	82 964
现场芯样	19 889	182 337	158 817	19 679	95 181
完好试件	200 833	142 849	117 825	213 889	168 849

表5 半刚性基层疲劳性能试验结果

试件类型	疲劳寿命/次				平均寿命/次
	试件1	试件2	试件3	试件4	
室内成型	478 942	378 903	412 350	326 543	399 185
现场芯样	170 820	210 005	>50万	359 870	—
完好试件	>50万	>50万	>50万	>50万	>50万

沥青面层试件破坏面为裂缝位置,现场芯样试件疲劳寿命结果离散型较大,室内成型试件试验结果变化较小,平均疲劳寿命为82 964次,是完好试件的49.14%,现场芯样疲劳寿命约95 181次,是完好试件的56.37%;半刚性基层室内成型修补试件平均疲劳寿命约40万次,疲劳寿命次数为完好试件的80%,而现场裂缝注浆修补芯样疲劳破坏面为非裂缝注浆修复位置,且基层注浆后疲劳寿命结果离散型较大,主要是由于半刚性基层裂缝处治不及时后雨水进入基层结构内部造成局部结构完整性较差甚至松散等问题,影响半刚性基层整体结构强度。

3 结 语

为解决目前半刚性基层裂缝注浆材料耐久性性能不佳问题,开发一种新型改性聚氨酯注浆材料,研究不同条件下注浆材料的稳定性和耐久性能,主要结论如下:

(1)通过改性聚氨酯材料在不同浸泡条件和浸泡时间下稳定性试验,得到固化后改性聚氨酯注浆材料稳定性较好,改性聚氨酯注浆材料具有优异的微膨胀特性。

(2)沥青面层芯样破坏界面主要沿着裂缝注浆位置开裂,裂缝注浆处的芯样劈裂强度比略高于完好处芯样劈裂强度比,且芯样劈裂强度恢复率72.14%,说明沥青面层的裂缝注浆处芯样劈裂强度有所提升。

(3)水稳基层芯样破坏界面未发生在裂缝注浆处,芯样自身发生断裂破坏,裂缝注浆处芯样劈裂强度比高于完好处芯样,劈裂强度恢复率84.62%,说明聚氨酯注浆材料具有较好的水稳定性和抗疲劳性能,在水泥稳定碎石基层裂缝注浆处治适用性更强。

(4)水泥稳定碎石基层裂缝注浆后芯样抗疲劳性能优异,沥青面层疲劳寿命恢复率约50%,水稳基层疲劳寿命次数为完好试件的80%。

参考文献:

[1] 杜慧.基于数据挖掘与材料性能的半刚性基层沥青路面横向裂缝预测模型研究[D].南京:东南大学,2022.

[2] 朱玉琴.半刚性基层沥青路面设计控制指标研究[D].南京:东南大学,2019.

[3] 朱俊清,尹逸群,马涛,等.半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述[J].交通运输工程学报,2025,25(3):12-32.

[4] 郑福山.高速公路沥青路面横向裂缝成因分析及防治对策[J].福建交通科技,2018(3):16-19.

[5] 王峰.半刚性基层沥青路面裂缝成因分析及处治措施[J].城市道桥与防洪,2018(1):112-114;129.

(下转第92页)