

高速公路面层病害快速修补型半柔性材料研究

王宁, 金敦建

(安徽环通工程试验检测有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘要: 为解决传统半柔性材料在高速公路面层病害修复中施工效率低、早期强度不足、高温稳定性差的问题, 实现病害快速耐久修复, 开展快速修补型半柔性材料的组分设计、性能优化及施工工艺简化研究。采用4.75~9.5 mm单粒径石灰岩集料制备冷补料, 选用掺量均为水泥质量5%的聚氨酯与河沙复合改性快凝水泥灌浆料, 通过动稳定度试验、马歇尔试验等验证材料性能, 同步简化施工流程。优化后材料动稳定度达13 000次/mm, 较规范要求提升225%; 马歇尔稳定度为29 kN, 较规范要求提高93.3%; 灌浆料养生30 min抗压强度达设计强度80%, 满足半小时开放交通需求。简化后的施工工艺无需大型设备, 1.5 h内可完成修复作业, 为高速公路面层病害快速耐久修复提供技术支撑。

关键词: 快速维修; 水泥灌浆料; 冷补料; 半柔性材料

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0112-05

Study on Rapid-repair Semi-flexible Materials for Pavement Diseases of Expressways

WANG Ning, JIN Dunjian

(Anhui Huantong Engineering Testing Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: To address the issues of low construction efficiency, insufficient early strength and poor high-temperature stability of traditional semi-flexible materials in the repair of expressway pavement distresses, and realize the rapid and durable repair of diseases, the research is conducted on the component design, performance optimization and construction process simplification of rapid-repair semi-flexible materials. The single-particle size limestone aggregates of 4.75~9.5 mm is used to prepare the cold patching materials. The polyurethane and river sand composite modified fast-setting cement grouting material with a dosage of 5% of the cement mass is selected. The material performance is verified through dynamic stability tests, Marshall tests and other methods, and the construction process is simplified simultaneously. The dynamic stability of the optimized material reaches 13 000 times/mm, being 225 % higher than the specification requirements. The Marshall stability reaches 29 kN, being 93.3% higher than the standard requirements. The compressive strength of the grouting material after 30 minutes of curing reaches 80% of the designed strength, meeting the requirement of opening traffic for half an hour. The simplified construction process does not require large-scale equipment, enabling the completion of repair work within 1.5h, providing the technical support for the rapid and durable repair of expressway pavement distresses.

Keywords: rapid repair; cement grouting material; cold patch material; semi-flexible material

0 引言

高速公路作为交通网络的重要组成部分, 路面状况直接关系到行车安全与运输效率。然而, 高速公路面层病害, 如坑槽、裂缝等的出现^[1-3], 却严重威胁着路面的行驶安全性。随着经济的快速发展, 交通流日益增加, 重载车辆占比不断攀升, 给高速公路的使用带来了前所未有的挑战。在交通荷载与复杂

环境的综合作用下, 高速公路路面极易产生各类面层病害。这些病害不仅降低了路面平整度, 还可能引发交通事故, 影响交通的顺畅运行^[4-7]。

传统的高速公路面层病害维修方法^[8-9]存在诸多弊端。材料强度形成较慢, 使得修补后的路面难以快速承受交通荷载, 导致交通管制时间延长。修补效率低, 无法及时应对大量出现的病害。修补部位耐久性差, 经过一段时间的车辆行驶和环境侵蚀后, 容易再次损坏, 增加维修成本和频率。

半柔性材料, 作为一种由灌浆料和冷补料复合而成的新型材料, 凭借高强度、高耐久的特点^[10], 吸

收稿日期: 2025-11-01

作者简介: 王宁(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 从事道路与桥梁工程研究工作。

引了众多科研工作者的目光。它在理论上具备解决传统维修方法弊端的潜力,有望为高速公路面层病害修复带来新的解决方案^[11-15]。然而,目前半柔性材料在实际应用中仍存在问题,比如:作业时间长,影响交通正常通行;修补工艺复杂,对施工人员的技术要求较高,且不易大规模推广;性能不稳定,在不同环境和使用条件下,效果可能存在较大差异。

为攻克半柔性材料在高速公路面层病害修补中的应用难题,本文系统开展材料设计工作。针对材料作业时间长、工艺复杂等问题,选用快凝水泥灌浆料和单粒经冷补料制备快速修补型半柔性材料,并分别对快凝水泥灌浆料和冷补料进行性能设计与分析。通过优化材料配方与性能,同步简化施工工艺,为实现高速公路面层病害快速、耐久修复提供实践经验与技术参考。

1 快速修补型半柔性材料的设计

1.1 快速修补型半柔性材料概述

快修型半柔性材料由大空隙冷补料与快凝水泥灌浆料经科学配比复合而成,是道路面层病害修复新兴材料。从功能层面剖析,快修型半柔性材料构建填充-增强双重功能:以大空隙冷补料为承载骨架,20%~25%的精准空隙结构为灌浆料提供充足渗透通道。其中,空隙率20%时,灌浆料填充率92%,材料抗压强度37.5 MPa,承载稳定性突出;空隙率25%时,填充率达96%,可更充分填充细微缝隙。配合快凝水泥灌浆料的优异流动性与可塑性,人工或小型机械摊铺后,能高效覆盖坑槽边角、裂缝等缺损,解决传统材料渗透不充分、边角填充不足的痛点。加之灌浆料快速固化特性,形成高强度复合骨架,显著增强修补区域承载能力与耐久性,保障修复效果长期稳定。

冷补料与灌浆料的有机复合模式,实现了两种材料优势的协同作用,既完整保留了冷补料无需加热预处理、袋装储存随取随用的施工便捷性,适配夜间抢修、小范围病害修补等灵活作业场景,又充分发挥了快凝水泥灌浆料短时间强度形成的技术优势,解决了传统冷补料早期强度不足、易被重载车辆压溃的缺陷。两者的协同作用使材料同时具备施工快、强度高、耐久性优势,完美平衡了施工便利性与结构稳定性的双重需求,成为当前道路快速修复领域极具应用前景的新型材料体系。

1.2 快速修补型半柔性材料要求

实现道路病害高效快速修复是养护核心目标,尤其在交通密集区域,修复效率与质量直接影响通行、安全及经济成本。工程实践表明,传统材料存在固化慢、早强不足、力学性能弱或施工复杂等问题,理想快修型半柔性材料需适配快速养护诉求,具备以下特性:

(1)快速硬化与早强特性。特征指标为超快速固化,5~35℃施工条件下,30 min至2 h初步固化,4~6 h达设计强度80%以上,高性能产品12 h可满强。此特性满足关键路段“夜间施工、次日开放”需求,大幅缩短交通中断时间,降低养护对交通的影响。

(2)优异力学性能。修补区域需与原路面协同承载,因此在重载交通和高温环境下,修复材料应具备高强度与出色的抗车辙能力,保持良好的抗变形能力,保证修补路面在长期使用中结构稳定。

(3)便捷施工工艺。适配“小批量、多频次”作业,无需加热预处理及重型设备,仅用人工或小型搅拌机将冷补料与灌浆料按比例混合后,摊铺灌注并夯实即可。流程简便、人员要求低,显著提升效率、降低难度。

灌浆材料、冷补料、半柔性材料性能指标要求是:为保证快速修补型半柔性材料在施工及实际应用中性能达标,对三种材料性能指标界定如表1所示。

表1 灌浆材料、冷补料、半柔性材料性能指标要求

材料类别	技术指标	技术要求
灌浆材料	凝结时间	不小于施工所需时间
	抗压强度(7 d)	≥15 MPa
冷补料	马歇尔稳定度	≥2 kN
半柔性材料	动稳定度(60℃,1.1 MPa)	≥4 000 次/mm
	马歇尔稳定度	≥15 kN

基于上述要求,在优选30 min凝固的快凝水泥的基础上,对快速修补型半柔性材料的两类组分进行优化设计,以提升其黏结性能与强度,简化施工工艺。

1.3 基体冷补料配合比设计

快速修补型半柔性材料主要依靠大空隙沥青冷补料构成骨架结构。该骨架不仅为灌浆料提供填充通道,更与固化后的灌浆料协同形成复合承载体系,其结构合理性直接决定材料整体力学性能。大空隙沥青冷补料基体骨架的设计中,空隙率是保证半柔性材料形成整体强度的核心参数。空隙率过低会导致灌浆料难以充分渗透,无法形成连续胶结结构;过

高则会削弱骨架承载基础。结合工程实践,本研究将冷补料空隙率控制在20%~25%。此范围既能保证灌浆料均匀填充,又能维持骨架基本承载能力。同时,单粒径集料可简化级配设计、降低拌合难度,且能形成更稳定的空隙结构。因此,选用4.75~9.5 mm单粒径石灰岩集料,搭配黏结性与流动性适配的70 #乳化沥青制备冷补料,确保骨架性能与施工便捷性兼顾。

通过马歇尔试验得到大空隙沥青冷补料的油石比为4.2%,用水量为1.3%。经测试,本文设计的冷补料的强度性能达到《道路灌注式半柔性路面技术规程》(T/CECS G:D51-01—2019)要求,具体数据如表2所示。

表2 单粒径沥青冷补料设计指标			
粒径范围/mm	油石比/%	用水量/%	马歇尔稳定度/kN
4.75~9.5	4.2	1.3	21.9

1.4 快修水泥灌浆料设计

作为快修型半柔性材料的胶结主要材料之一,灌浆料的强度与黏结性能直接决定复合体系的修复效果,而水灰比是影响水泥基材料性能的关键参数。前期预试验表明,单独使用0.5水灰比的快修水泥灌浆料时,因水泥水化产物结构疏松、孔隙率较高,不仅7 d抗压强度偏低,且与冷补料骨架的界面黏结力不足,易出现“骨架-胶结体”剥离问题。为确保材料满足道路快速修复后对强度和黏结性的要求,本文系统开展灌浆料配比优化设计,并依据《水泥基灌浆材料应用技术规程》(T/CECS G:D51-01—2019)制定专项测试方案,重点对不同配比灌浆料的7d抗压强度进行精准检测,作为配比优化的主要评判指标。

通过多掺量对比试验优化快凝水泥灌浆料配比,最终选定聚氨酯和河沙为改性剂,掺量均为水泥质量的5%。聚氨酯掺量3%时,黏结强度与柔韧性不足,易引发界面开裂;7%时虽柔韧性提升,但抗压强度下降且增加成本;5%掺量可实现黏结性与柔韧性的最佳平衡,确保与原结构无缝衔接。河沙掺量3%时,材料密实度与强度提升有限;河沙掺量7%时会降低灌浆料流动性,影响渗透填充效果;河沙掺量5%时能最大化提升密实度与结构稳定性,故确定该最优掺量。

加入改性剂前后灌浆料的7 d抗压强度如图1所示。图1显示,未加入改性剂时,快修水泥灌浆料7 d抗压强度仅为14 MPa,不满足规范大于15 MPa的要求。改性剂的使用均使得快凝水泥灌浆料强度满足

规范要求。单独使用河沙对快凝水泥灌浆料的7 d抗压强度的提升更为显著,其7 d抗压强度比使用聚氨酯的高11.7%。两者同时加入灌浆料后具有正向协同作用,相比于添加前灌浆料的7 d抗压强度提升了57.1%。

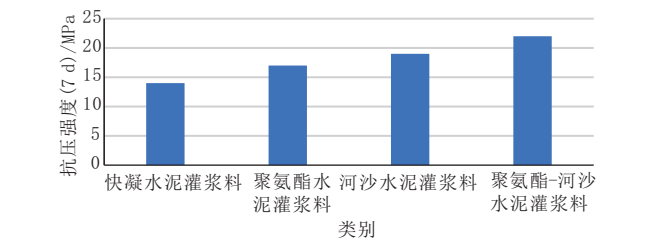


图1 7 d抗压强度分析

此外,为保证快修水泥灌浆料满足养生半小时内即开放交通的需求,对聚氨酯-河沙快凝水泥灌浆料的养生时间与抗压强度进行了测试,测试结果如表3所示。表3显示,聚氨酯-河沙快凝水泥灌浆料养生30 min左右即可达到80%设计抗压强度(17.6 MPa),养生3 h即可达到设计抗压强度的91%。这证明聚氨酯-河沙快凝水泥灌浆料配方可适用于养生半小时即开放交通的快速修补工艺。

表3 聚氨酯-河沙快凝水泥灌浆料的养生时间与抗压强度				
养生时间	30 min	1 h	3 h	7 d
抗压强度/MPa	17	19	20	22

2 快速修补型半柔性材料性能验证

本文通过动稳定度试验与马歇尔试验验证优化后的快速修补型半柔性材料性能的高温稳定性和强度。其中,对比验证单粒径骨架的可行性的普通半柔性材料(普通组)采用普通水泥和普通大空隙冷补料制得,未改性快速修补型半柔性材料(对比组)采用未改性的快凝水泥灌浆料和单粒径沥青冷补料制得,快速修补型半柔性材料采用改性后的快凝水泥灌浆料和单粒径沥青冷补料制得。

2.1 动稳定度

动稳定度是评价快速修补型半柔性材料的重要指标,数值越高,抗车辙能力越强。规范要求的半柔性材料的动稳定度为4 000次/mm。普通组动稳定度为3 900次/mm,低于规范要求,说明抗车辙能力不足。对比组动稳定度为5 780次/mm,相比于规范要求高出44.5%,说明快凝水泥的单粒径冷补料的使用能够提升半柔性材料的抗车辙能力。快速修补型半柔性材料动稳定度高达13 000次/mm,相比于规范要求高出225%,抗车辙能力极为优异。这表示聚氨酯

和河沙能减小快速修补型半柔性材料在抵抗车辆荷载反复作用时产生的车辙变形,大幅延长路面使用寿命。

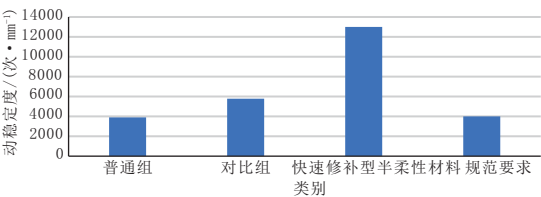


图2 动稳定度分析

2.2 马歇尔强度

马歇尔稳定度数值越高,快速修补型半柔性材料强度越高。图3显示,普通组马歇尔稳定度为14.8 kN,未达到规范要求的15 kN。对比组的马歇尔稳定度提升至16.7 kN,说明快凝水泥的单粒径冷补料的使用能够提升半柔性材料的强度。而本文设计的快速修补型半柔性材料的马歇尔稳定度高达29 kN,远高于规范要求、普通组和对比组,且比规范要求提高了93.3%。这说明聚氨酯和河沙在提高快速修补型半柔性材料的高温稳定性方面具有显著优势,能够在实际道路使用中保障道路长期使用性能。

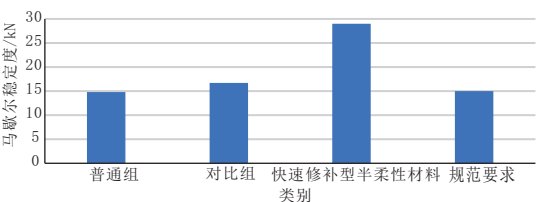


图3 马歇尔强度分析

3 快速修补型半柔性材料的施工工艺

本文在快速修补型半柔性材料性能优化的基础上,以提升施工效率、降低施工难度为核心目标,简化了快速修补型半柔性材料的施工工艺。快速修补型半柔性材料适用于高速公路、桥梁沥青路面病害的维修,要求病害面积不大于0.5 m²,深度5 cm左右。材料施工工艺包括以下步骤:

(1)坑槽基底处理与快凝水泥灌浆料制备。施工前需检查坑槽基底状态,基底应处于干燥状态,若存在潮湿情况,需采用热风机等设备进行烘干处理,确保基底无水渍残留,避免影响材料黏结性能。完成基底处理后,开始制备快凝水泥灌浆料。制备时需先进行干料预混,将各组干料充分搅拌混合均匀。混合过程中需确保无结块现象,然后再将液体倒入搅拌。搅拌时长3 min,直至形成均匀、无颗粒的灌浆料。

(2)冷补料填充。选用4.75~9.5 mm的单粒径

石冷补料填充病害部位。填充时应分层进行,每层厚度不宜超过2 cm,以保证冷补料填充密实。

(3)压实。填充遵循分层投料、逐层压实原则,每层厚度控制在2 cm左右,确保填充密实。压实采用小型平板夯,按先周边后中心顺序碾压2~3遍,直至冷补料与原路面齐平,保证骨架稳定支撑后续灌浆。

(4)灌入快凝水泥灌浆材料。灌浆料需要匀速灌入;填补处混合料表面浮浆即可停止灌入;在灌入灌浆料时,需使其超出病害周边2~3 cm,确保修补处与原路面紧密黏结。灌浆过程中,若发现灌浆料流动不畅,可适当调整灌浆速度或对灌浆料进行轻微搅拌。

(5)对灌浆表面进行纹理处理。在灌浆料达到初凝状态后,使用水泥清洗剂冲刷灌浆表面,静置2 min后使用毛刷和清水对灌浆表面进行刷洗,以露出沥青混凝土基体骨架表面凹凸不平为宜,防止水泥基灌浆材料残留在面上,降低路面的抗滑性能。刷洗过程中,需避免过度用力破坏灌浆层。

(6)养生与开放交通。灌浆完成后,采用塑料薄膜对修补区域进行覆盖养生,防止水分过快蒸发影响灌浆料强度增长。养生环境温度在10~35℃时养生半小时即可开放交通。

当病害面积超过0.5 m²时,建议在上述工艺基础上采用多点均匀灌浆,每0.5 m²设置1个灌浆点,避免局部未灌满。深度超过5 cm时,分次灌浆,首次灌至深度的60%,静置10 min后补灌至表面浮浆,同时将养生时间延长半个小时左右。

4 结 语

(1)采用4.75~9.5 mm单粒径石灰岩集料与70#乳化沥青制备的冷补料,确定油石比4.2%、用水量1.3%的最佳配合比,其马歇尔稳定度达3.9 kN,满足规范要求,且20%~25%的空隙率为灌浆料渗透提供了良好通道。

(2)以5%聚氨酯+5%河沙复合改性快凝水泥灌浆料,7 d抗压强度达22 MPa,较基准组提升57.1%;养生30 min抗压强度达17.6 MPa,实现半小时开放交通的核心需求,同时界面黏结强度提升至1.8 MPa。

(3)优化后的快速修补型半柔性材料动稳定度13 000次/mm、马歇尔稳定度29 kN,分别较规范要求提升225%、93.3%,高温抗车辙能力与承载强度显著优于传统材料,可有效降低重载高温环境下的二次

病害率。

(4)简化后的“基底处理-冷补料填充-压实-灌浆-表面处理-养生”六步工艺,无需大型加热与搅拌设备,3~4人团队1.5 h内可完成0.5 m²内病害修复,大幅提升应急抢修效率。

参考文献:

- [1] 田秀珍.半柔性路面灌浆材料性能分析研究[J].交通世界,2025(增刊1):39-41.
- [2] 黄振雄,邓成,龚明辉,等.半柔性路面抗裂性能研究与应用[J].江苏建材,2024(6):24-27;30.
- [3] 贾俊峰,刘若菲,张龙冠,等.基于二次谐波的预应力筋孔道灌浆脱空定位方法[J].长安大学学报(自然科学版),2025(5):1-11.
- [4] 骆中建,朱晨旭,韩忠明,等.高掺量RAP复合再生沥青混合料路用性能研究[J].塑料科技,2025(10):60-65.
- [5] 许紫刚,胡峻源,庄海洋,等.早强高性能套筒灌浆料的制备技术与力学性能研究[J].材料导报,2025(10):1-12.
- [6] 常建强,赵栩,李晓,等.柔性基层沥青路面联结层混合料力学性

能的温度依赖模型[J].公路,2025(10):10-18.

- [7] 胡晓鹏,王子诣,张永利,等.灌浆料宽度置换加固RC梁抗弯性能研究[J].工程力学,2025(11):1-11.
- [8] 李想,侯铁军,贾兴文,等.磷酸镁水泥灌浆料物理力学性能影响因素研究[J].建筑技术,2025,56(17):2088-2092.
- [9] 陈善祥,赵天有,陈创,等.灌浆式半柔性路面材料路用性能试验研究[J].嘉应学院学报,2024,42(6):51-56.
- [10] 王琦.不同灌浆材料对半柔性路面性能的影响分析[J].交通建设与管理,2024(6):121-123.
- [11] 程同华.高速公路常见病害产生机理及养护措施研究[J].交通世界,2023(20):81-83.
- [12] 任鹏慧.高速公路沥青路面病害调查与治理对策研究[J].交通世界,2023(15):55-57.
- [13] 王小川.高速公路病害的成因分析及治理措施[J].工程技术研究,2023,8(06):145-147.
- [14] 张泽宇,母绍平,惠记庄,等.搅拌设备内多介质路面材料拌和均匀性[J].长安大学学报(自然科学版),2025(4):1-12.
- [15] 谢志惠,何天明,许克健,等.不同温域变化下半柔性路面材料细观界面损伤开裂分析[J].公路交通科技,2024,41(2):57-68.

(上接第73页)

中国公路学报,2017,30(2):11-17.

- [2] 丁建文,洪振舜,刘松玉.疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J].岩土力学,2011,32(增刊1):280-284.
- [3] Kamon M, Boutouil M, Jeoung J H, et al. Microstructure and leaching characteristics of sludge treated with low alkalinity additives[J].Soil and Foundation 2003, 43(2): 105-114.
- [4] 杨彬.洞庭湖区软土硬壳层路基的沉降计算方法与承载特性研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [5] 匡志平,胡坚慰.人造硬壳层软土地基处理法的试验研究和理论分析[J].防灾减灾工程学报,2007,27(2):147-152.
- [6] 王颖,陈永辉,程潇,等.就地固化技术处理道路浅层软基的试验研究[J].上海建设科技,2016(2):29-32.
- [7] 刘青松,张春雷,汪顺才,等.淤泥堆场人工硬壳层地基极限承载力室内模拟研究[J].岩土力学,2008,29(增刊1):667-670.

- [8] 刘建民,王新岐.基于硬壳层理论的滨海新区软土路基强夯法处治[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(8):88-92.
- [9] 王晓谋,尉学勇,魏进,等.硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(3):37-41.
- [10] 商拥辉,徐林荣,王敏,等.低路堤路基动力特性及长期性能技术措施研究[J].公路交通科技,2018,35(2):33-40;47.
- [11] 肖育民,刘春林,徐明江,等.浅层软土路基就地固化效果检测与评价[J].价值工程,2023,42(28):135-137.
- [12] 单华刚,费伟全,朱国华.淤泥就地固化技术在公路路基中的应用实例[J].土工基础,2021,35(4):456-458.
- [13] 徐亮,唐彤芝,白兰兰,等.就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J].水利水电工程学报,2021(2):109-116.
- [14] 陈兴艾.海域滩涂区浅层固化联合钢板路基箱便道施工技术探究[J].中国公路,2023(14):106-108.