

冷补沥青混合料用冷补剂及技术性能研究综述

王立宸*, 聂忆华, 杜泓毅, 徐智成, 邓胜良, 夏雨欣

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年2月19日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月26日

摘要

冷补沥青混合料(CPAM)因其节能环保、施工便捷、可在不利气候条件下快速修复路面病害等突出优点,已成为道路预防性养护与应急维修的关键材料。其性能核心在于冷补剂(包括稀释剂、反应型改性剂、生物基材料等)的组成与性质,直接决定了混合料的施工和易性、强度发展规律及长期耐久性。本文系统梳理了冷补剂的分类、作用机理及性能评价方法体系;深入剖析了溶剂型稀释剂、反应型树脂、生物基粘结剂等不同类型冷补剂对CPAM工作性能、力学性能及耐久性的影响规律与提升机制;进而探讨了冷补剂与再生沥青路面(RAP)、填料、添加剂的协同优化策略;凝练总结了当前CPAM评价体系缺失、性能与环保难平衡、微观机理研究不足、专用化程度不高等关键问题。在此基础上,展望了未来低毒/无毒环保型冷补剂开发、高性能反应型体系设计、多尺度评价与机理研究、高掺量RAP利用及标准规范建立等主要发展方向。本文旨在为高性能环保型冷补剂的研发与CPAM的标准化、智能化应用提供理论参考。

关键词

道路工程, 冷补沥青混合料, 冷补剂, 性能, 综述

A Review of Cold-Patch Agents and Technical Performance of Cold-Patch Asphalt Mixtures

Lichen Wang*, Yihua Nie, Hongyi Du, Zhicheng Xu, Shengliang Deng, Yuxin Xia

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: February 19, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 26, 2026

Abstract

Cold-patch asphalt mixture (CPAM) has become a key material for preventive maintenance and

*通讯作者。

文章引用: 王立宸, 聂忆华, 杜泓毅, 徐智成, 邓胜良, 夏雨欣. 冷补沥青混合料用冷补剂及技术性能研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(3): 174-181. DOI: 10.12677/hjce.2026.153065

emergency repair of road pavements due to its outstanding advantages such as energy saving, environmental protection, convenient construction, and capability for rapid repair under adverse weather conditions. The performance of CPAM is fundamentally governed by the composition and properties of cold-patch agents (including diluents, reactive modifiers, bio-based materials, etc.), which directly determine the workability, strength development, and long-term durability of the mixture. This paper systematically elaborates on the classification, action mechanisms, and performance evaluation methods for cold-patch agents. It then provides an in-depth analysis of the influence patterns and enhancement mechanisms of different types of cold-patch agents (e.g., solvent-based diluents, reactive resins, bio-based binders) on the workability, mechanical properties, and durability of CPAM. Furthermore, synergistic optimization strategies between cold-patch agents and reclaimed asphalt pavement (RAP), fillers, and additives are discussed. Key issues in current research are summarized, including the lack of a dedicated evaluation system, the difficulty in balancing performance with environmental friendliness, insufficient understanding of micro-mechanisms, and low degree of specialization. Future development directions are prospected, focusing on the development of low-toxicity/non-toxic and environmentally friendly cold-patch agents, design of high-performance reactive systems, multi-scale evaluation and mechanistic research, utilization of high-content RAP, and establishment of standards and specifications. This review aims to provide theoretical references for the research and development of high-performance, environmentally friendly cold-patch agents and the standardized, intelligent application of CPAM.

Keywords

Road Engineering, Cold-Patch Asphalt Mixture (CPAM), Cold-Patch Agent, Performance, Review

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青路面在交通荷载与环境因素的长期耦合作用下, 极易产生坑槽、裂缝等局部病害。及时有效的修补对于保障行车安全舒适、延长路面使用寿命至关重要[1]。传统的热拌沥青混合料(HMA)修补工艺受季节、温度及施工场地限制, 且存在能耗高、排放大的问题。相比之下, 冷补沥青混合料(CPAM)可在常温甚至低温条件下进行储存、运输与施工, 无需加热, 具有显著的节能、环保与高效优势, 尤其适用于冬季、雨季等不利条件下的应急修补与日常预防性养护[2]。

CPAM 的性能, 特别是其初始施工和易性、早期强度形成速率以及最终的长期路用耐久性, 在很大程度上取决于其所用的冷补剂。冷补剂是一个广义概念, 泛指为赋予或改善 CPAM 性能而添加的各类功能性材料, 主要包括: 1) 用于降低沥青粘度、提高拌和与摊铺工作性的稀释剂(如柴油、煤油等石油基溶剂); 2) 用于增强粘结、提高早期及最终强度的反应型改性剂或树脂(如环氧树脂、聚氨酯、不饱和聚酯等); 3) 作为传统石油基沥青替代或补充的生物基或可再生粘结剂(如废食用油、生物柴油、环氧大豆油等); 4) 用于改善特定性能的功能性添加剂(如水泥、纤维、纳米材料等) [3] [4]。

尽管 CPAM 及其冷补剂的研究与应用已取得丰富成果, 但如何系统性地认知不同冷补剂的多尺度作用机理、量化其对 CPAM 全周期性能的影响规律、并以此指导高性能环保型新产品的开发, 仍是当前领域的研究热点与难点[5]。本文基于国内外最新研究进展, 对冷补剂的类型划分、性能影响机制、协同优化策略及现存挑战进行系统综述, 以期对相关研究的深化与工程应用的精准化提供参考。

2. 冷补剂的类型、作用机理与性能评价

2.1. 冷补剂的主要类型及作用机理

根据其化学成分、功能与作用机制，冷补剂可分为以下主要类型：

1) 溶剂型稀释剂

作为传统 CPAM 的核心组分，其主要通过物理溶解与稀释作用，显著降低基质沥青在常温下的粘度，从而赋予混合料良好的施工工作性和对集料的裹覆能力。常用稀释剂包括柴油、煤油等石油馏分。其强度形成机理主要依赖溶剂的挥发，固化后沥青性能可部分恢复。然而，该过程导致早期强度低、固化周期长，且存在挥发性有机物(VOCs)排放带来的环保与健康隐患[6]。研究表明，稀释剂挥发量可达 80% 以上，挥发后残留沥青的高温性能可接近甚至优于原基质沥青，这解释了此类冷补料强度随时间缓慢增长的现象[7]。

2) 反应型树脂/改性剂

此类冷补剂通过引入可发生化学反应的官能团，在混合料中形成三维交联网络结构，从根本上提升粘结剂的性能。主要包括：

环氧树脂：环氧基团与固化剂发生加成聚合，形成致密交联网络，赋予混合料极高的强度与模量、优异的耐腐蚀性和耐久性，常用于高性能或特种路面修补。但在基质冷补沥青掺加环氧组分后发现：沥青胶结料在低温条件下应变松弛能力变差、蠕变速率降低后使对温度应力的消散能力减弱，使其在低温下易发生脆断，从而降低了沥青的低温性能[8]。

聚氨酯(PU)：异氰酸酯基团(-NCO)可与水分或多元醇反应，生成聚氨酯/聚脲结构。单组分湿固化 PU 施工简便，对环境湿度适应性强，具有优异的粘结力、弹性及耐水性[9][10]。研究表明，PU 基 CPAM 的拉拔强度在低温和浸水条件下显著高于乳化沥青和稀释沥青基材料[9]。然而，聚氨酯(PU)分子结构中含有的氨基甲酸酯基、脲基、脲基甲酸酯基等极性基团，在湿热环境等条件下易发生水解反应。水分子侵入分子链并使上述基团发生断键，导致聚合物分子链长度缩短、相对分子质量下降，进而使此材料的综合力学性能劣化。该水解过程属于化学结构层面的不可逆变化，会显著削弱 PU 改性沥青与集料间的界面黏附性能，最终降低 PU 改性沥青混合料的水稳定性。

不饱和聚酯/乙烯基酯树脂：通过自由基聚合实现快速固化，固化速度可调，适用于快速修补场景。亦有研究将丙烯酸酯化环氧大豆油(AESO)作为光固化反应型稀释剂，在降低粘度的同时，通过紫外光引发聚合形成网络结构以提升性能[11]。

3) 生物基及可再生冷补剂

以废弃资源或生物质衍生材料替代传统石油基组分，旨在提高 CPAM 的可持续性。然而，以生物油为代表的生物基材料普遍富含不饱和脂肪酸结构、酯键及天然活性官能团，这些结构易发生自由基链式氧化反应，进而导致材料黏度升高、酸值增加以及交联老化等劣化行为，最终导致其长期抗氧化性较差。例如：

废食用油(WCO)：可直接作为稀释剂，或经化学改性(如与马来酸酐聚合)合成生物粘结剂。WCO 能有效降低沥青粘度，其改性产物还能提升粘结力[12]。

生物柴油：经预处理后可作为稀释剂，与柴油复配使用。研究发现，在相同用量下，添加生物柴油的 CPAM 其施工性能和高温稳定性均得到改善，这可能源于其极性酯类基团增强了与沥青及集料的相互作用[13]。

生物基反应型稀释剂：如丙烯酸酯化环氧大豆油(AESO)，兼具稀释功能与光聚合活性，能在施工后通过反应形成增强网络[11]。

4) 功能性添加剂

为针对性改善 CPAM 特定性能而添加，通常不单独作为粘结介质。主要包括：

水泥、石灰等无机胶凝材料：通过水化反应提供早期强度，改善水稳定性。水泥窑灰(CKD)等工业副产品也显示出类似效果[13]。

纤维(如聚酯纤维、木质素纤维)：起到加筋和桥联作用，抑制开裂，提高混合料的整体性和韧性。

纳米材料(如纳米粘土、膨润土)：通过增大界面面积，改善沥青流变性和混合料的抗水损害能力(表 1)。

Table 1. Comparison of main types, action mechanisms, advantages and disadvantages of cold-patch agents ([1] [3]-[5] [8] [10]-[13])

表 1. 冷补剂主要类型、作用机理及优缺点对比([1] [3]-[5] [8] [10]-[13])

类型	主要成分/代表	核心作用机理	优点	缺点
溶剂型稀释剂	柴油、煤油、低毒溶剂(松节油等)	物理溶解、稀释降粘；强度依赖溶剂挥发	施工和易性好，成本较低，技术成熟	早期强度低，固化慢，VOCs 排放，环保性差
反应型树脂	环氧树脂、聚氨酯(PU)、不饱和聚酯	化学聚合/交联形成三维网络结构	强度高、模量大、耐久性好，固化速度可调(尤其湿固化 PU)	成本较高，对配比及施工条件敏感，部分体系可操作时间短
生物基/可再生	废食用油(WCO)、生物柴油、环氧大豆油(AESO)	物理稀释或兼具化学反应(如 AESO 光聚合)	可再生、环保，部分可实现高值化利用	性能变异性可能较大，长期耐久性数据待积累，部分原料供应不稳定
功能性添加剂	水泥/石灰、纤维、纳米材料	水化增强、加筋桥联、界面改性等	针对性改善早期强度、抗裂性、水稳定性等	不单独作为粘结介质，需与主冷补剂协同使用

2.2. 冷补剂及 CPAM 的性能评价方法

针对冷补剂的特性，需建立涵盖从材料、施工到服役的全周期性能评价体系(图 1)。

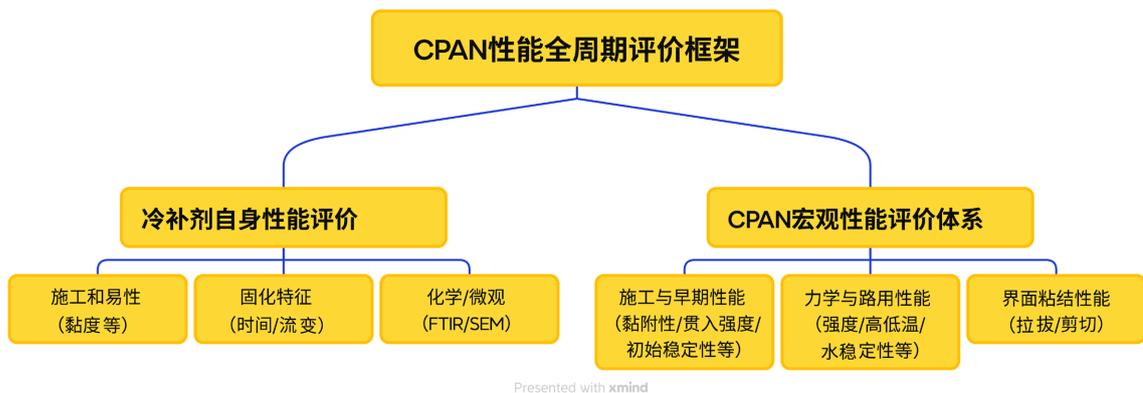


Figure 1. Framework for full-cycle performance evaluation of Cold-Patch Asphalt Mixture (CPAM) ([1] [6] [8] [10] [15]-[17])

图 1. 冷补沥青混合料(CPAM)全周期性能评价框架([1] [6] [8] [10] [15]-[17])

1) 冷补剂自身性能评价：

施工和易性：主要采用布氏旋转粘度计测量特定温度下的粘度，评价其泵送、储存及裹覆集料的能力。通常要求 60℃ 旋转粘度不宜大于 2 Pa·s 以保证良好工作性[14]。

固化特性: 对于反应型冷补剂, 需测试其表干时间、实干时间, 或通过动态剪切流变仪(DSR)监测模量增长曲线。

化学/微观结构: 采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析官能团变化; 利用扫描电镜(SEM)观察固化后的微观形貌与网络结构[10]。

2) CPAM 的宏观性能评价:

施工与早期性能: 包括粘结力试验(评价粘附性)、可松散时间(评价储存稳定性)、马歇尔稳定度或贯入强度等。我国行业标准 JT/T 972-2015 对此有明确技术要求[13]。

力学与路用性能: 主要包括间接抗拉强度、无侧限抗压强度(强度); 车辙试验(高温稳定性); 浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验(水稳定性); 弯曲梁流变试验(BBR)、低温弯曲试验(低温抗裂性)。

低温抗裂性: 弯曲梁流变试验(BBR)获取蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 、低温弯曲试验。

界面粘结性能: 拉拔试验、剪切试验, 评价 CPAM 与旧路面基层之间的粘结强度, 此为修复成败的关键[10]。

3. 冷补剂对 CPAM 性能的影响与优化

3.1. 溶剂型稀释剂的性能影响与环保化改进

传统溶剂型冷补剂的性能严重依赖溶剂种类与用量。高溶剂用量利于施工但导致早期强度低、固化慢及 VOCs 问题。当前改进集中于:

溶剂复配与优化: 探索低毒或无毒溶剂(如松节油、矿物油)替代部分传统溶剂。研究表明, 某些低毒溶剂配制的冷补料, 其初始及浸水后稳定度可达标甚至更优[6]。

减少溶剂用量: 通过添加反应型稀释剂(如 AESO [10])或表面活性剂, 在保证工作性的前提下大幅降低溶剂总用量, 从源头减少 VOCs 排放。

3.2. 反应型树脂冷补剂的性能强化作用

反应型树脂通过化学交联赋予 CPAM 卓越性能, 是高性能 CPAM 发展的主流方向。

环氧树脂体系: 强度高、耐久性好, 但对固化条件(温度、配比)要求严格。研究通过优化体系、与其他树脂共混来平衡性能、成本与施工时间[4]。

聚氨酯(PU)体系: 单组分湿固化 PU 施工便捷。研究证实, SBS 与 PU 复合改性的冷补沥青砂浆, 在高温抗车辙、低温抗裂、抗疲劳等方面均表现优异, 这归因于 PU 的交联网络与 SBS 弹性体的协同增强作用[15]。

其它反应型体系: 如双环戊二烯(DCPD)树脂, 具有初始粘度低、固化后韧性好、成本相对较低等优点[4] (图 2)。

3.3. 生物基/可再生冷补剂的可持续性应用

利用废食用油(WCO)、生物柴油等开发冷补剂, 是实现道路工程循环经济的重要途径。

WCO 的直接与改性应用: 直接使用可配制低成本 RAP-WCO 修补料; 经马来酸酐改性后, 能显著提高混合料的间接抗拉强度和抗车辙性[11]。

生物柴油作为稀释剂: 与柴油复配, 可改善 CPAM 的施工性能与高温稳定性[12]。

生物基反应型稀释剂: 如 AESO, 兼具稀释与光固化功能, 能提升冷补料的初始强度与压实强度[10]。

3.4. 冷补剂与其它组分的协同优化

CPAM 的性能是各组分协同作用的结果。

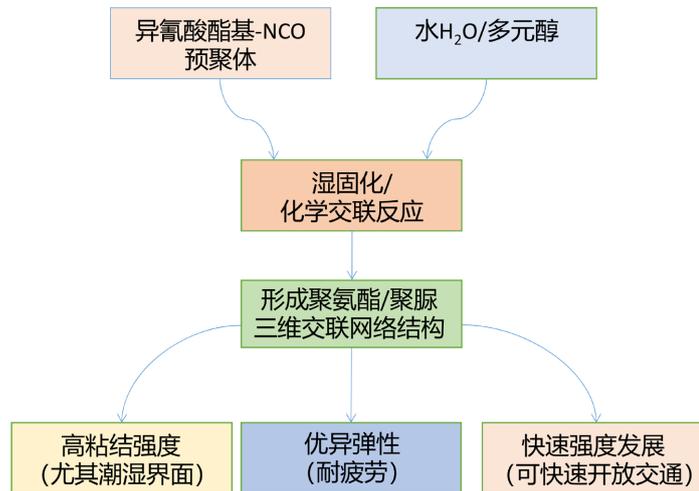


Figure 2. Schematic diagram of curing mechanism and performance advantages of reactive polyurethane (PU) cold-patch agent ([1] [8] [9])
图 2. 反应型聚氨酯(PU)冷补剂固化机理及性能优势示意图([1] [8] [9])

与再生沥青路面(RAP)的协同: 使用高掺量(如 100%) RAP 配制 CPAM 具有极高的经济和环境效益。冷补剂(特别是生物基或反应型粘结剂)对 RAP 中老化沥青的“再生”或“活化”作用是关键[11] [16]。

与填料的协同: 填料(矿粉、水泥、膨润土等)的性质显著影响 CPAM 性能。研究表明, 使用水泥和膨润土复配替代部分矿粉, 可显著提升 CPAM 的成型强度、残留稳定性和冻融劈裂强度[17]。

配合比智能优化: 采用正交试验、响应面法及智能算法(如蚁狮算法 ALO)对 CPAM 进行多目标优化, 能高效确定最佳配比[18] (表 2 和表 3)。

Table 2. Synergistic optimization strategies and effects between cold-patch agents and different components
表 2. 冷补剂与不同组分协同优化策略及效果

协同组分	优化策略	主要作用机理	性能提升效果	关键参考文献
再生沥青路面(RAP)	使用高掺量(如 100%) RAP; 采用生物基/反应型冷补剂	冷补剂对老化沥青的溶解、再生或化学键合	显著的经济和环境效益; 混合料稳定性与附着力可优于传统冷补料	[11] [16]
填料 (水泥、膨润土等)	水泥与膨润土复配替代部分矿粉; 优化比例	水泥水化提供早期强度; 膨润土改善沥青浆流变性及抗水损害	成型强度、残留稳定性、冻融劈裂强度显著提升	[17] [18]
配合比设计	采用正交试验、响应面法、智能算法进行多目标优化	系统分析各组分交互影响, 高效寻优	获得最优的综合性能 (如强度、稳定性、水敏感性)	[18]

Table 3. Comprehensive Life Cycle Cost Analysis (LCCA) of cold patch material
表 3. 冷补剂全生命周期成本 - 效益分析

类型	初始成本	施工成本	使用寿命	维护成本	环境效益	综合性价比
溶剂型稀释剂	低	低	短	高	差	中
反应型树脂	高	中	长	低	中	高
生物基冷补剂	中	低	中	中	低	最高

4. 存在问题与未来展望

4.1. 当前存在的主要问题

1) **评价体系与标准缺失**: 目前多直接套用热拌沥青(HMA)标准, 未能充分反映 CPAM 固化漫长、施工与强度要求矛盾等特性, 缺乏统一、专用的全周期性能评价体系与规范。

2) **性能与环保的平衡难题**: 传统溶剂型环保性差; 高性能反应型树脂成本高; 生物基材料的长期性能稳定性与变异性有待验证。

3) **微观机理研究不足**: 冷补剂在混合料中的分散状态、与 RAP 老化沥青的相互作用、反应固化网络的形成过程等细微观机理尚需借助先进表征技术(如 CT、SEM、分子模拟)深入揭示。

4) **专用化程度不高**: 针对特殊路面(如多孔路面、钢桥面)的专用冷补剂及配套技术研究相对缺乏。

4.2. 未来研究方向

1) **开发低毒/无毒环保型冷补剂**: 持续研发基于低毒溶剂及低 VOCs 排放的专用产品, 并深入研究生物基稀释剂的长期路用性能。

2) **设计高性能反应型冷补剂体系**: 探索基于可再生资源的聚合物、自修复微胶囊、感应加热等功能性材料, 实现修复材料的智能化与长寿命化。

3) **深化多尺度评价与机理研究**: 建立宏-细-微观多尺度关联的评价与预测系统。例如, 利用 CT 扫描量化内部结构, 并与宏观性能建立定量关系[18]。

4) **拓展高掺量 RAP 与废弃物协同利用**: 深入研究冷补剂对高掺量 RAP 及其他废弃物(废塑料、废橡胶粉)的活化机制, 开发高性能全再生 CPAM。

5) **制定标准规范与全生命周期评估(LCA)**: 推动建立 CPAM 专用评价标准与施工规范, 并系统评估不同体系的环境足迹与经济成本。

5. 结论

1) 冷补剂是决定 CPAM 综合性能的核心。根据功能可分为溶剂型稀释剂、反应型树脂、生物基/可再生粘结剂及功能性添加剂四大类, 各有其独特的作用机理与适用场景。

2) 反应型树脂(如环氧、聚氨酯)通过化学交联能从根本上提升 CPAM 的强度、模量与耐久性, 是高性能 CPAM 发展的主流方向。SBS 与 PU 等复合改性展现出优异的协同增强效果。

3) 以废食用油、生物柴油为代表的生物基冷补剂, 在实现 CPAM 可持续性方面潜力巨大, 其直接或改性应用均能获得良好的技术经济效益。

4) 冷补剂的性能优化需与骨料(特别是高掺量 RAP)、填料等进行协同设计。采用智能算法进行多目标配比优化是高效的研究手段。

5) 溶剂型冷补料成本最低、响应最快, 适合路面应急修补; 反应型树脂体系长期经济性最优, 适合较为重要的交通路段; 生物基冷补剂结合 RAP, 综合经济与环境效益最佳, 适合养护工程与有低碳要求的交通体系。

6) 未来研究应聚焦于开发环保型高性能冷补剂, 深化多尺度表征与机理研究, 建立专用评价标准, 并推动 CPAM 向功能化、智能化及全再生资源化方向发展。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目: 低碳固路——100% RAP 再生沥青冷补料修补技术研究(教高司函[2025] 10 号)。

湖南省大学生创新创业训练计划项目：低碳固路——100% RAP 再生沥青冷补料修补技术研究(湘教通(2025)141号(202510534031))。

参考文献

- [1] Wang, T., Dra, Y.A.S.S., Cai, X., Cheng, Z., Zhang, D., Lin, Y., *et al.* (2022) Advanced Cold Patching Materials (CPMs) for Asphalt Pavement Pothole Rehabilitation: State of the Art. *Journal of Cleaner Production*, **366**, Article 133001. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133001>
- [2] Jain, S. and Singh, B. (2021) Cold Mix Asphalt: An Overview. *Journal of Cleaner Production*, **280**, Article 124378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- [3] Hafezzadeh, R., Autelitano, F. and Giuliani, F. (2021) Asphalt-Based Cold Patches for Repairing Road Potholes—An Overview. *Construction and Building Materials*, **306**, Article 124870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124870>
- [4] Wang, T., Zhang, X., Cheng, Z., Shen, D., Tan, J., Xie, S., *et al.* (2024) Road Performance of Cold Repaired Asphalt Mixture with New Green Maintenance Materials. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e03959. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03959>
- [5] 杨彦海, 等. 冷补沥青混合料材料组成和性能评价综述[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 221-229.
- [6] 陈伟盛, 秦靖闰, 刘刚, 等. 沥青冷补液的高低温性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 93-96.
- [7] 石福周, 史宝红, 段伟, 等. 端羧基丁腈橡胶/环氧树脂冷补沥青研发及其混合料性能[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 514-519.
- [8] Fan, X., Ma, C., Wang, S., Dong, R., Yao, Z., Zhang, J., *et al.* (2025) Development and Evaluation of Composite Modified Cold Patch Asphalt and Cold Patch Asphalt Mortar. *Construction and Building Materials*, **495**, Article 143666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143666>
- [9] 况栋梁, 李佩佳, 吴永畅, 等. 路用单组分湿固化聚氨酯冷补液的制备与性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 22-33.
- [10] Li, D. and Zhang, Y. (2025) *Advances in Frontier Research on Engineering Structures II*. Springer Nature.
- [11] Zhang, K., Xiong, J., Ruiz, C. and Zhang, J. (2024) Design and Performance Assessment of Sustainable Road Pothole Patching Materials Using Waste Cooking Oil, Plastic, and Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **429**, Article 136426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136426>
- [12] Bao, L., Guo, R. and Yan, F. (2024) Effect of Biodiesel on Performance of Cold Patch Asphalt Mixtures. *Materials*, **17**, Article 5566. <https://doi.org/10.3390/ma17225566>
- [13] 中华人民共和国交通运输部标准. JT/T 972-2015 沥青路面坑槽冷补成品料[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [14] 徐心硕. 沥青冷补液及其冷补料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
- [15] 康颖祿. 生物系冷补剂研发及冷补沥青混合料路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2025.
- [16] Kwon, B.J., Kim, D., Rhee, S.K. and Kim, Y.R. (2018) Spray Injection Patching for Pothole Repair Using 100 Percent Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **166**, 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.145>
- [17] Bi, C., Wang, X., Fu, J., Zhao, H., Zheng, M. and Xu, J. (2025) Study on the Filler Composition Optimization and Performance Evaluation of Cold-Patch Asphalt Mixture. *Materials*, **18**, Article 3894. <https://doi.org/10.3390/ma18163894>
- [18] Meena, P., Ransinchung R.N., G.D. and Kumar, P. (2025) An Ideal Cold Mix Asphalt for Road Pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, **10**, Article 342. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02097-5>