

增强纤维对冷再生沥青混合料性能影响研究

刘志杰, 黄彦春

新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月15日

摘要

本研究聚焦于含增强纤维的冷再生沥青混合料,旨在深入探究增强纤维对其性能的影响规律与作用机制。通过系统的室内试验,全面分析不同纤维掺量下冷再生沥青混合料的力学性能变化,研究结果表明,适量的增强纤维可显著提升冷再生沥青混合料的疲劳性能,同时对其高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性也有积极影响。本研究成果为冷再生沥青混合料的优化设计和工程应用提供了依据。

关键词

冷再生沥青混合料, 增强纤维, 性能特性, 马歇尔试验, 力学性能

Study on the Effect of Reinforced Fiber on the Properties of Cold Reclaimed Asphalt Mixture

Zhijie Liu, Yanchun Huang

Xinjiang Communications Construction Group Co., LTD, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

This study focuses on the cold recycled asphalt mixture containing reinforced fiber, aiming to investigate the effect of reinforced fiber on its properties and mechanism. Through systematic laboratory tests, the mechanical properties and road performance of cold reclaimed asphalt mixture with different fiber content were comprehensively analyzed. The results show that appropriate reinforcement fiber can significantly improve the fatigue performance of cold reclaimed asphalt mixture, and has positive effects on its high temperature stability, water stability and low temperature crack resistance. The research results provide a basis for the optimal design and engineering

application of cold reclaimed asphalt mixture.

Keywords

Cold Recycled Asphalt Mixture, Reinforced Fiber, Performance Characteristics, Marshall Test, Mechanical Property

Copyright © 2025 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

冷再生沥青混合料[1]-[5]是一种将旧沥青路面材料(RAP)进行回收、加工,并与新的结合料、添加剂等混合而成的新型道路材料。它具有显著的环保优势,能够有效减少资源浪费和环境污染,降低道路建设成本。然而,目前冷再生沥青混合料在实际应用中仍存在一些局限性。一方面,冷再生沥青混合料的早期强度发展较慢,需要较长的时间才能达到开放交通的强度要求,这在一定程度上影响了道路的施工进度和交通通行效率。另一方面,冷再生沥青混合料的疲劳性能相对较差,在长期的交通荷载作用下,容易出现疲劳开裂等病害,缩短道路的使用寿命。

增强纤维作为一种有效的改性材料[6]-[13],在改善沥青混合料性能方面展现出了巨大的潜力。纤维具有较高的抗拉强度和弹性模量,能够在沥青混合料中形成三维网状结构,增强混合料的内聚力和韧性。在沥青混合料中添加纤维,可以有效提高其高温稳定性、低温抗裂性和疲劳性能等。例如,在高温条件下,纤维能够限制沥青的流动,增强混合料的抗变形能力,从而提高其高温稳定性;在低温环境中,纤维能够吸收和分散应力,抑制裂缝的产生和扩展,提高混合料的低温抗裂性;在疲劳荷载作用下,纤维能够桥接裂缝,阻止裂缝的进一步发展,延长混合料的疲劳寿命。

因此,开展含增强纤维的冷再生沥青混合料特性研究具有重要的现实意义。通过研究不同类型、不同掺量的增强纤维对冷再生沥青混合料性能的影响,可以为冷再生沥青混合料的性能优化提供理论依据和技术支持,推动冷再生沥青混合料在道路工程中的广泛应用。这不仅有助于提高道路的建设质量和使用寿命,降低道路维护成本,还能够促进资源的循环利用,减少环境污染,实现道路工程的可持续发展。

2. 实验方法及材料

2.1. 原材料选择与制备

旧沥青路面材料(RAP)作为冷再生沥青混合料的主要组成部分,其性能对混合料的质量有着关键影响。本研究选用的RAP来自新疆某交通繁忙的城市主干道的铣刨料,该路段服役年限为10年,交通量较大,车辆荷载复杂。通过对RAP的性能测试,其沥青含量为4.5%,沥青针入度为35(0.1 mm),软化点为55°C,延度为15 cm(5°C)。这些性能指标表明,RAP中的沥青已经发生了一定程度的老化,其粘结性能和流变性能有所下降。对RAP进行筛分分析,其级配情况如表1所示。从级配结果可以看出,RAP中粗集料含量较高,细集料相对不足,需要进行适当的调整以满足冷再生沥青混合料的级配要求。在使用前,对RAP进行了严格的预处理,包括清洗、破碎和筛分等工序,以去除其中的杂质和不符合级配要求的颗粒,确保其质量的均匀性和稳定性。

新集料的选择应与 RAP 的级配相匹配, 以优化冷再生沥青混合料的级配组成。本研究选用了石灰岩作为新集料, 其压碎值为 18%, 磨耗值为 12%, 坚固性为 8%, 表现出良好的力学性能, 能够为混合料提供稳定的骨架结构。石灰岩的密度为 2.7 g/cm^3 , 吸水率为 0.5%, 与沥青具有较好的粘附性, 有利于提高混合料的粘结性能和水稳定性。新集料的级配设计参考了相关规范和经验, 旨在弥补 RAP 级配的不足, 使混合料的级配更加合理。具体的级配范围如表 2 所示。在使用前, 对新集料进行了水洗和烘干处理, 去除表面的泥土和杂质, 确保其洁净度, 避免对混合料的性能产生不良影响。

Table 1. Screening of recycled asphalt aggregate

表 1. 再生沥青骨料筛分情况

筛孔尺寸(mm)	通过率(%)	筛孔尺寸(mm)	通过率(%)
19	98	1.18	12
16	85	0.6	8
13.2	70	0.3	5
9.5	55	0.15	3
4.75	35	0.075	2
2.36	20		

Table 2. New aggregate grading range

表 2. 新集料级配范围

筛孔尺寸(mm)	通过率(%)	筛孔尺寸(mm)	通过率(%)
19	100	1.18	10~30
16	95~100	0.6	5~20
13.2	85~95	0.3	3~15
9.5	65~85	0.15	2~10
4.75	35~65	0.075	1~7
2.36	20~40		

乳化沥青作为冷再生沥青混合料的结合料, 其性能直接影响混合料的强度和耐久性。本研究选用了阳离子慢裂乳化沥青, 其沥青含量为 60%, 破乳速度为慢裂, 与水泥具有良好的相容性。通过对乳化沥青的性能测试, 其恩格拉粘度为 8 (E25), 储存稳定性(1 d)为 1%, 与水泥的拌和稳定性为良好。在使用前, 对乳化沥青进行了质量检验, 确保其各项性能指标符合要求。同时, 根据试验方案的要求, 对乳化沥青进行了适当的稀释, 以调整其粘度和流动性, 满足混合料拌和的需要。

水泥在冷再生沥青混合料中起到固化和增强的作用, 能够提高混合料的早期强度和整体稳定性。本研究选用了 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 其初凝时间为 180 min, 终凝时间为 360 min, 安定性合格, 抗压强度为 45 MPa (28 d), 抗折强度为 6.5 MPa (28 d)。同时, 根据试验方案的要求, 准确计量水泥的用量, 以保证混合料的配合比准确无误。

增强纤维的选择是本研究的关键之一, 不同类型的纤维对冷再生沥青混合料的性能影响各异。本研究选用了聚酯纤维作为增强纤维, 其长度为 6 mm, 直径为 0.02 mm, 抗拉强度为 500 MPa, 弹性模量为 4 GPa, 熔点为 250℃。聚酯纤维具有较高的抗拉强度和弹性模量, 能够在沥青混合料中形成有效的增强网络, 提高混合料的力学性能。其良好的耐热性和化学稳定性, 使其在混合料中能够保持稳定的性能,

不易受到环境因素的影响。

2.2. 配合比设计

本研究采用马歇尔试验方法进行冷再生沥青混合料的配合比设计, 以确定最佳的纤维掺量和混合料配合比。根据前期的研究和经验, 确定了纤维掺量的范围为 0%~0.5%, 以 0.1% 为间隔进行试验, 分别设计了 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 纤维掺量的冷再生沥青混合料配合比。

在设计配合比时, 首先对 RAP 和新集料进行了级配调整, 使其满足冷再生沥青混合料的级配要求。根据目标级配范围, 通过计算确定了 RAP 和新集料的比例, 使混合料的级配曲线处于合理的区间内。在确定沥青用量时, 参考了相关规范和经验, 结合试验结果进行调整。通过马歇尔试验, 测定不同沥青用量下混合料的马歇尔稳定度、流值、空隙率、矿料间隙率等指标, 以马歇尔稳定度最大、空隙率适中、矿料间隙率符合要求为原则, 确定了最佳沥青用量为 5.0%。

对于水泥用量, 考虑到其对混合料早期强度的影响, 通过试验确定了水泥用量为 2.0%。在添加水泥时, 注意控制其均匀性, 确保水泥能够充分发挥固化和增强的作用。在确定纤维掺量时, 通过对不同纤维掺量的混合料进行性能测试, 分析纤维掺量对混合料性能的影响规律。随着纤维掺量的增加, 混合料的马歇尔稳定度先增加后减小, 在纤维掺量为 0.3% 时达到最大值; 流值则呈现出相反的趋势, 先减小后增加。空隙率和矿料间隙率也会随着纤维掺量的变化而发生改变, 纤维掺量过高会导致空隙率和矿料间隙率增大, 影响混合料的密实性和强度。综合考虑各项性能指标, 确定最佳纤维掺量为 0.3%。此时, 混合料的马歇尔稳定度为 12.5 kN, 流值为 2.8 mm, 空隙率为 4.5%, 矿料间隙率为 13.0%, 各项性能指标均符合相关规范和工程要求。最终确定的冷再生沥青混合料配合比如图 1 所示。

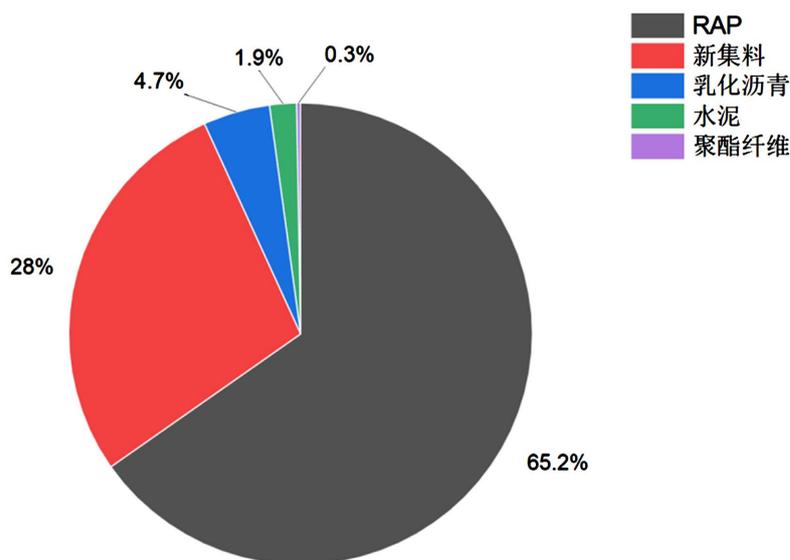


Figure 1. Mix ratio of cold recycled asphalt mixture
图 1. 冷再生沥青混合料配合比

2.3. 试件制备

本研究采用马歇尔击实法制备试件。按配合比称取 RAP、新集料、乳化沥青、水泥和聚酯纤维, 经干拌、加乳化沥青搅拌、再加水泥和纤维湿拌后, 装入试模。标准试件双面击实 75 次, 大型的击实 112 次。击实后连模在 60℃ 烘箱养生 48 h, 冷却脱模。过程中严格控制原材料计量、搅拌、击实和养生环节,

每个配合比制成 6 个试件以保障试验精度。

2.4. 试验方法与指标

本研究采用多种试验方法评估冷再生沥青混合料性能:

(1) 马歇尔试验: 将马歇尔试件在 60℃ 恒温水浴保温 30 min 后, 在马歇尔稳定度仪上以 50 mm/min 速率加载至破坏, 记录稳定度、流值, 测试件尺寸算空隙率和矿料间隙率, 评估物理性能。

(2) 劈裂试验: 25℃ 恒温水浴保温 2 h 的试件, 在万能材料试验机上用 12.7 mm 压条以 50 mm/min 加载至劈裂破坏, 计算劈裂强度, 评估抗拉性能。

(3) 四点弯曲疲劳试验: 15℃ 恒温水浴保温 2 h 的试件, 在疲劳试验机上四点加载, 频率 10 Hz, 不同应力比下测试, 记录疲劳寿命, 评估疲劳性能。

(4) 车辙试验: 60℃ 恒温室保温 5 h 的车辙试件, 在车辙试验机上以 0.7 MPa 轮压、42 次/min 速率试验, 记录变形量算动稳定度, 评估高温稳定性。

(5) 低温弯曲试验: -10℃ 低温箱保温 4 h 的试件, 在万能材料试验机上简支梁加载, 速率 50 mm/min, 记录最大荷载和跨中挠度, 计算抗弯拉强度和弯拉应变, 评估低温抗裂性能。

3. 结果及分析

3.1. 马歇尔稳定度

马歇尔试验结果如表 3 所示。随着聚酯纤维掺量的增加, 冷再生沥青混合料的马歇尔稳定度呈现出先上升后下降的趋势。当纤维掺量为 0.3% 时, 马歇尔稳定度达到峰值 12.5 kN, 相较于未添加纤维的混合料, 稳定度提高了 15%。这是因为聚酯纤维在混合料中形成了三维网状结构, 增强了混合料的内聚力, 使集料之间的嵌挤作用更加紧密, 从而有效提高了混合料抵抗破坏的能力。当纤维掺量超过 0.3% 时, 由于纤维的团聚现象逐渐加剧, 导致混合料内部结构不均匀, 部分区域纤维分布过多, 影响了沥青与集料的粘结, 使得稳定度有所下降。流值则呈现出相反的变化趋势, 在纤维掺量为 0.3% 时达到最小值 2.8 mm, 此时混合料的柔韧性和抗变形能力达到较好的平衡。

Table 3. Marshall stability under different fiber content

表 3. 不同纤维掺量条件下的马歇尔稳定度

聚酯纤维掺量(%)	马歇尔稳定度(kN)	相较于未添加纤维稳定度提升比例(%)
0	10.9	/
0.1	11.5	5.5
0.2	12	10.1
0.3	12.5	15
0.4	12.2	12
0.5	11.8	8.3

3.2. 劈裂强度

劈裂试验结果如图 2 所示, 随着纤维掺量的增加, 冷再生沥青混合料的劈裂强度逐渐提高。当纤维掺量从 0 增加到 0.5% 时, 劈裂强度从 0.8 MPa 提高到 1.2 MPa, 提高了 50%。这表明聚酯纤维的加入显著增强了混合料的抗拉性能。纤维在混合料中起到了桥接和拉结的作用, 当混合料受到拉伸应力时, 纤维

纤维能够承担部分荷载, 阻止裂缝的产生和扩展, 从而提高了劈裂强度。纤维与沥青和集料之间良好粘结也有助于应力的传递, 进一步增强了混合料的抗拉能力。

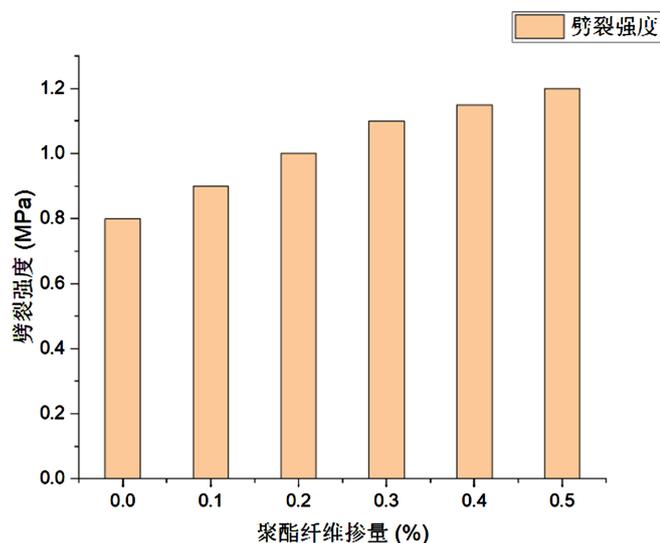


Figure 2. The splitting strength under different fiber content
图 2. 不同纤维掺量条件下的劈裂强度

3.3. 疲劳寿命

四点弯曲疲劳试验结果如图 3 所示, 冷再生沥青混合料的疲劳寿命会随着纤维掺量的增加而显著延长。当应力比为 0.4 时, 未添加纤维的混合料疲劳寿命为 5000 次, 而纤维掺量为 0.3% 的混合料疲劳寿命达到了 12,000 次, 提升幅度达 140%。这是由于纤维在混合料中形成了增强网络, 能有效分散应力, 降低应力集中, 进而延缓裂缝的产生与发展。当裂缝出现后, 纤维可桥接裂缝, 阻止裂缝进一步扩展, 让混合料能够承受更多次的荷载循环。此外, 纤维的高抗拉强度和弹性模量还为混合料提供了额外的承载能力, 增强了其抗疲劳性能。

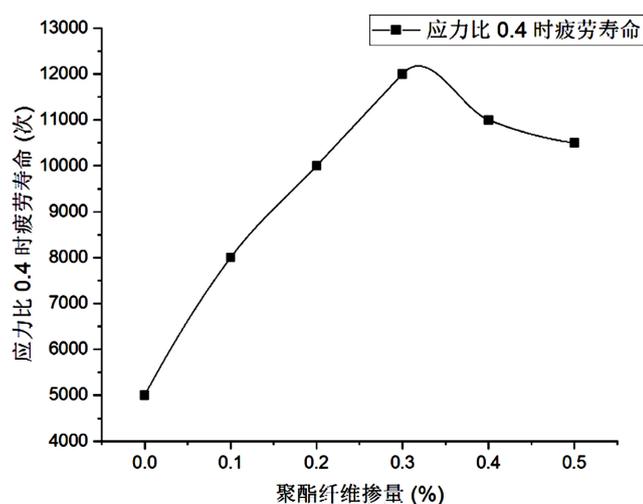


Figure 3. Fatigue life under different fiber content conditions
图 3. 不同纤维掺量条件下的疲劳寿命

3.4. 车辙性能

车辙试验结果如图 4 所示, 随着纤维掺量的增加, 冷再生沥青混合料的动稳定度逐渐增大。

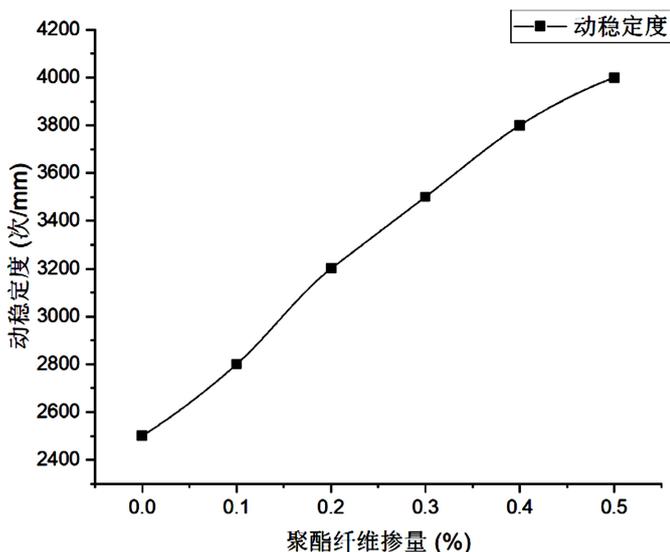


Figure 4. Dynamic stability under different fiber content

图 4. 不同纤维掺量条件下的动稳定度

当纤维掺量从 0 增加到 0.5% 时, 动稳定度从 800 次/mm 提高到 1500 次/mm, 提高了 87.5%。这表明聚酯纤维的加入显著改善了混合料的高温稳定性。在高温条件下, 纤维能够限制沥青的流动, 增强混合料的抗变形能力。纤维与沥青之间的相互作用提高了沥青的粘度, 使得沥青在高温下不易软化和流动, 从而有效抵抗了车辆荷载引起的永久变形。纤维形成的网络结构也增强了集料之间的嵌挤作用, 进一步提高了混合料的高温稳定性。

3.5. 抗弯拉强度

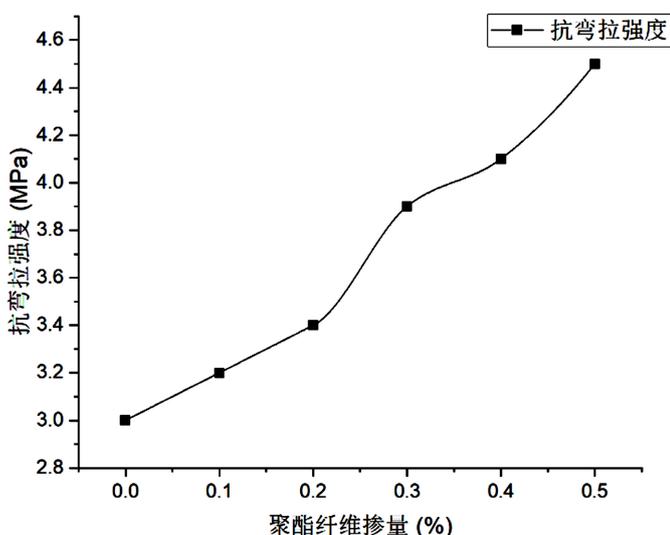


Figure 5. Flexural and tensile strength under different fiber content

图 5. 不同纤维掺量条件下的抗弯拉强度

低温弯曲试验如图 5 所示。随着纤维掺量的增加, 冷再生沥青混合料的抗弯拉强度和弯拉应变逐渐增大。当纤维掺量从 0 增加到 0.5% 时, 抗弯拉强度从 3.0 MPa 提高到 4.5 MPa, 提高了 50%; 弯拉应变从 2000 $\mu\epsilon$ 增加到 3000 $\mu\epsilon$, 提高了 50%。这表明聚酯纤维的加入显著提高了混合料的低温抗裂性能。在低温环境下, 纤维能够吸收和分散应力, 抑制裂缝的产生和扩展。纤维的柔韧性使得混合料在受力时能够发生一定的变形而不破裂, 从而提高了弯拉应变。纤维与沥青和集料之间的粘结也增强了混合料的整体性, 使得混合料在低温下能够更好地抵抗收缩应力, 保持路面的完整性和稳定性。

4. 结语

本研究聚焦含聚酯纤维的冷再生沥青混合料, 经试验分析, 得出以下结论:

(1) 聚酯纤维掺量对冷再生沥青混合料性能影响显著。马歇尔稳定度随纤维掺量增加先升后降, 0.3% 掺量时达峰值, 超过该掺量因纤维团聚导致稳定度下降; 流值变化趋势则相反, 0.3% 掺量时最小, 此时混合料柔韧性与抗变形能力平衡最佳。

(2) 劈裂强度、抗弯拉强度和弯拉应变随纤维掺量增加而增大。纤维掺量从 0 增至 0.5%, 劈裂强度从 0.8 MPa 提升到 1.2 MPa, 抗弯拉强度从 3.0 MPa 提高到 4.5 MPa, 弯拉应变从 2000 $\mu\epsilon$ 增加到 3000 $\mu\epsilon$, 增幅均为 50%。这表明纤维增强了混合料抗拉性能, 提升了低温抗裂性, 其桥接、拉结作用及与各成分的良好粘结, 有效阻止裂缝产生扩展, 增强了混合料整体性。

(3) 纤维显著延长混合料疲劳寿命, 提高高温稳定性。应力比 0.4 时, 0.3% 纤维掺量的混合料疲劳寿命达 12,000 次, 较未添加纤维的 5000 次提升 140%。纤维形成的增强网络分散应力、桥接裂缝, 其高抗拉强度和弹性模量提供额外承载能力。同时, 纤维掺量从 0 增加到 0.5%, 动稳定度从 800 次/mm 提高到 1500 次/mm, 提高了 87.5%, 纤维限制沥青流动、提高沥青粘度, 增强集料间嵌挤作用, 有效抵抗永久变形。

本研究成果为冷再生沥青混合料的性能优化提供了理论依据和技术支持。在实际道路工程中, 合理添加聚酯纤维可以有效改善冷再生沥青混合料的性能, 提高道路的建设质量和使用寿命, 降低道路维护成本。

参考文献

- [1] 封志鹏, 薛玲, 胡博, 周沛键, 莫浩天. 冷再生沥青混合料的粘弹性及长期性能评价[J]. 价值工程, 2024, 43(7): 43-46.
- [2] 李强, 王锐军, 李斌, 许傲, 商健林, 赵曜. 发泡剂对冷再生沥青混合料强度特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 282-287.
- [3] 孙高强. 冷再生沥青混合料配合比设计及路用性能研究[J]. 质量与认证, 2025(1): 106-109.
- [4] 雷君霞. 泡沫沥青及其冷再生沥青混合料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [5] 肖青战. 纤维对冷再生沥青混合料性能的影响[J]. 合成纤维, 2023, 52(9): 60-62+69.
- [6] 王恩, 张启志. 纤维对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(6): 74-78.
- [7] 陈则辉, 吴喆野, 郑育新, 冯小伟, 吴翔. 玄武岩纤维增强乳化沥青冷再生混合料的性能研究[J]. 合成纤维工业, 2025, 48(1): 41-46.
- [8] 孔林. 改性纤维乳化沥青冷再生混合料增强机理及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [9] 池静. 混杂纤维改性乳化沥青冷再生混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(4): 18-21.
- [10] 池静. 不同类型纤维对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响研究[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(3): 39-41.
- [11] 褚晨枫, 邓军, 周琛, 王子昂, 况澳, 刘宏富. 乳化沥青冷再生混合料断裂性能试验研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 82-90.
- [12] 石磊. 基于不同纤维的冷再生乳化沥青混合料性能试验[J]. 交通世界, 2024(28): 32-35.
- [13] 杨东光. 不同纤维对乳化沥青冷再生混合料力学及路用性能的影响[J]. 公路, 2020, 65(3): 1-7.