

基于MSCR试验的废口罩纤维改性沥青高温老化性能研究

张广进^{*#}, 聂忆华, 李心怡, 杜思怡, 杜泓毅

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年10月11日; 录用日期: 2023年11月13日; 发布日期: 2023年11月22日

摘要

为了有效高值再利用废弃口罩以减少资源浪费, 本研究将废弃口罩作为道路沥青的改性剂。通过MSCR试验, 采用不可恢复的蠕变柔度 J_{nr} 、蠕变恢复率 R 以及应力敏感性指标 $J_{nr,diff}$ 、 R_{diff} 等作为评价指标, 分析了废口罩纤维改性沥青在未老化、短期老化和长期老化三种状态下的高温性能变化规律。结果表明: 废口罩纤维改性沥青较基质沥青的软化点明显升高, 延度、针入度下降; 废口罩纤维改性沥青的 R 值、 R_{diff} 值、 J_{nr} 值、 $J_{nr,diff}$ 值随老化程度的增加分别呈增大、减小、减小、先增后减的趋势变化; 在相同老化阶段和应力水平条件下, 废口罩纤维改性沥青较基质沥青的蠕变恢复率 R 值大、不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 小; 在相同应力水平条件下, 废口罩纤维改性沥青较基质沥青老化前后的蠕变恢复率 R 值的增幅大、不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 和应力敏感性指标 R_{diff} 的减幅小。废口罩纤维的加入可以提高沥青的高温或重载抗变形能力和弹性变形恢复能力, 抗老化性能更好, 疲劳寿命更长。

关键词

改性沥青, 废口罩纤维, 高温性能, 老化, MSCR试验

Study on the High-Temperature Aging Performance of Waste Mask Fiber-Modified Asphalt Based on MSCR Test

Guangjin Zhang^{*#}, Yihua Nie, Xinyi Li, Siyi Du, Hongyi Du

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

Received: Oct. 11th, 2023; accepted: Nov. 13th, 2023; published: Nov. 22nd, 2023

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 张广进, 聂忆华, 李心怡, 杜思怡, 杜泓毅. 基于 MSCR 试验的废口罩纤维改性沥青高温老化性能研究[J]. 土木工程, 2023, 12(11): 1339-1347. DOI: 10.12677/hjce.2023.1211154

Abstract

In order to effectively reuse waste masks at high value to reduce the waste of resources, waste masks were used as modifiers of road asphalt in this study. Through the MSCR test, the unrecoverable creep flexibility J_{nr} , creep recovery rate R and stress sensitivity index $J_{nr\text{diff}}$, R_{diff} , etc. were used as evaluation indexes to analyze the change rule of high-temperature performance of waste mask fiber-modified asphalt in the three states of unaged, short-term aging and long-term aging. The results show that the softening point of waste mask fiber-modified asphalt is significantly higher than that of matrix asphalt, and the ductility and needle penetration decrease; the R value, R_{diff} value, J_{nr} value, and $J_{nr\text{diff}}$ value of waste mask fiber-modified asphalt with the increase in the degree of aging were increasing, decreasing, decreasing, and first increasing and then decreasing trend; in the same aging stage and stress level conditions, the waste mask fiber-modified asphalt compared with the matrix asphalt creep recovery rate R value is large, unrecoverable creep flexibility J_{nr} is small; in the same stress level conditions, waste mask fiber-modified asphalt than matrix asphalt before and after the aging of the creep recovery rate of R value increase is large, unrecoverable creep flexibility J_{nr} and stress sensitivity index R_{diff} decrease is small. The addition of waste mask fiber can improve the asphalt's high-temperature or heavy-load deformation resistance and elastic deformation recovery ability, better aging resistance and longer fatigue life.

Keywords

Modified Asphalt, Waste Mask Fibers, High-Temperature Performance, Aging, MSCR Test

Copyright © 2023 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

聚丙烯(PP)是医用外科口罩中的一种成分,由于其具有优良的耐热性、稳定的物理化学性能、低廉的价格等优势,在医用口罩生产中得到了广泛的应用[1]。随着2020年新冠病毒疫情的暴发,产生了越来越多的废弃口罩,然而废弃医用口罩对环境和卫生带来了巨大压力,包括废弃口罩本身的塑料材质对生态环境带来的危害和携带病原微生物造成疫情扩散[2]。微塑料侵入动植物栖息地后,不仅会污染生物体的生存环境,还会通过食物链进入人体内,最终影响人类健康和整个生态系统,故寻找妥善回收和处置废旧口罩的方法刻不容缓。

Kilmartin-Lynch 等人[3]首先在混凝土中引入医用口罩,研究发现掺加少量的一次性医用口罩可以提高混凝土的力学性能。马立纲等人[4]把一次性医用口罩作为沥青的改性剂,其主要化学成分为聚丙烯材料,能改善沥青的刚度与弹性,提高其高温抗变形能力并延缓老化。程培峰等人[5]选择正交试验设计等方法对 MBF 改性沥青的最佳制备工艺和特性进行了探索,研究发现,废旧口罩熔喷布处理后可有效提高沥青的高温抗变形能力。

作为高性能沥青路面(Superpave)技术规范的进一步补充,美国沥青协会建议使用多应力重复蠕变恢复试验(MSCR)来评估改性沥青的高温性能。其中,不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率是从 MSCR 试验中确定的两个核心参数,在 3.2 kPa 下测量的不可恢复蠕变柔量被用作重复荷载条件下沥青粘合剂抵抗永久

变形的量度。作为评价沥青结合料高温性能的规范方法, MSCR 试验已得到广泛认可[6]。本文基于沥青三大指标试验得到最佳制备工艺并制备废口罩纤维改性沥青, 并进行不同程度的老化, 进行 MSCR 试验, 开展高温性能研究, 为后续废弃口罩纤维改性沥青的研究应用提供重要参考。

2. 实验材料和方法

2.1. 基质沥青

所选用的沥青为 70 号基质沥青, 其基本性能试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)进行测试, 其技术指标见表 1。

Table 1. Main technical indicators of 70A matrix asphalt

表 1. 70A 基质沥青的主要技术指标

技术指标	单位	试验结果	技术要求	试验方法
软化点	°C	48	≥46	T0606-2011
25°C 针入度	0.1 mm	70.5	60~80	T0604-2011
15°C 延度	cm	185	≥100	T0605-2011

2.2. 废口罩纤维改性沥青

本文采用了高温高速剪切法制备废口罩纤维改性沥青。本文根据响应面法中 Box-Behnken 设计方法, 采用分析软件 Design-Expert 13, 对废口罩纤维改性沥青进行试验设计。选用改性沥青制备工艺中的剪切时间、剪切速率、剪切温度作为响应变量, 设计了三因素三水平优化试验, 选取软化点、延度、针入度作为响应值, 建立数学回归模型。得到废口罩纤维改性沥青最佳制备工艺为: 先对回收的废旧口罩放入乙醇消毒液中进行浸泡消毒, 待消毒结束后, 去掉口罩鼻夹、耳带, 人工将剩余主体部分剪裁至直径 5 mm 的碎片备用; 其次, 把基质沥青放入 150°C 烘箱中加热, 使其达到熔融状态; 其次, 在熔融基质沥青中加入口罩碎片进行人工搅拌; 最后, 将初步搅拌的废口罩与沥青混合液放置在具有保温功能的电热板上进行高速剪切, 剪切温度为 167°C、剪切时间为 45 min、剪切速率为 4145 r/min, 完成废口罩纤维改性沥青的制备, 静置半小时后用于技术性能指标试验。根据最佳制备工艺确定的废口罩纤维最佳掺量为基质沥青的 3%, 技术指标测试结果见表 2, 可知废口罩纤维改性沥青较基质沥青的软化点显著升高, 延度、针入度下降。

Table 2. Main technical indicators of waste mask fiber modified asphalt

表 2. 废口罩纤维改性沥青的主要技术指标

技术指标	单位	试验结果	试验方法
软化点	°C	62.5	T0606-2011
25°C 针入度	0.1 mm	27.0	T0604-2011
15°C 延度	mm	61.3	T0605-2011

2.3. 试验仪器及方法

软化点仪采用 2SYD-806E 型, 针入度仪采用 SYD-2801E 型, 延度仪采用 SYD-4508C 型, 流变仪(DSR)采用 Thermo HAAKE MARS 6-型。

2.3.1. 沥青老化

本研究依据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对沥青进行了老化试验。短期老化实验采用沥青旋转薄膜烘箱(RTFOT), 老化瓶中沥青质量为 (35.0 ± 0.5) g, 老化温度为 163°C , 老化时间为 85 min ; 长期老化实验采用 PAV9300 型压力老化试验仪, 盘中沥青质量为 (50.0 ± 0.5) g, 老化温度为 100°C , 老化时间为 24 h 。

2.3.2. 动态剪切流变实验

本文参照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对六种沥青试样(未老化基质沥青、未老化改性沥青、短期老化基质沥青、短期老化改性沥青、长期老化基质沥青、长期老化改性沥青)进行动态剪切流变实验, 试验选取的温度为 64°C 。

试验对六种试样分别在两种蠕变水平(0.1 kPa 、 3.2 kPa)下进行连续的“加载-卸载”循环测试。每个试样的总试验时间为 300 s , 共 30 个周期, 包括前半部分 0.1 kPa 下的 20 个周期和后半部分 3.2 kPa 下的 10 个周期, 每个周期包含 1 s 的加载蠕变阶段和 9 s 的卸载恢复阶段。需要注意的是, 前 10 个周期为设备调试阶段, 不计入分析中。

利用 DSR 仪器可以记录每个循环周期内的应力应变相关数据。依据 ASTM 中的 D7405-15 计算方法, 从 MSCR 试验中可得到两个关键参数: 不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 和蠕变恢复率 R 。依据不同的应力水平(0.1 kPa 、 3.2 kPa)可以得到 $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr0.1}$ 、 $J_{nr3.2}$ 、 R_{diff} 、 $J_{nr diff}$, 计算公式如下:

$$R = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_r}{\varepsilon_c - \varepsilon_0}$$

$$J_{nr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_0}{\tau}$$

$$R_{diff} = \frac{(R_{0.1} - R_{3.2}) \times 100\%}{R_{0.1}}$$

$$J_{nr diff} = \frac{(J_{nr3.2} - J_{nr0.1}) \times 100\%}{J_{nr0.1}}$$

式中: ε_0 、 ε_c 、 ε_r 分别为每个加载周期内的初始应变、峰值应变和残余变形, τ 为每个加载周期的应力水平。 $J_{nr0.1}$ 、 $J_{nr3.2}$ 分别为 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平作用下的 10 次蠕变恢复周期内所求得的不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 值的平均值; $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 分别为 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平作用下的 10 次蠕变恢复周期所求得的蠕变恢复率 R 值的平均值。 R_{diff} 、 $J_{nr diff}$ 为应力敏感性指标。

3. 试验结果及分析

3.1. 应变变化规律

分别绘制不同老化程度下的基质沥青、废口罩纤维改性沥青在 0.1 kPa 、 3.2 kPa 二种应力水平下的应变曲线, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 在相同条件下, 基质沥青和废口罩纤维改性沥青的应变均随老化程度增加而减小, 随应力水平增加而明显增大。造成此现象的原因可能是随着老化程度的增加, 沥青组分发生转变, 油分转化为了沥青质, 沥青质含量的增加使得沥青的硬度和强度增大, 从而提高沥青的抗流动变形能力, 并且沥青在老化过程中会形成特定的含氧功能团, 例如羧基、亚砷基和醛基等, 这些官能团的数量和分布也可能对沥青的抗流动变形能力产生影响。

在相同应力条件及老化程度下, 废口罩纤维改性沥青的应变值明显低于其基质沥青, 表明废口罩纤

维改性沥青的高温抗变形能力优于基质沥青。分析原因是废弃口罩在经过快速剪切后,其中含有的纤维分散于沥青后形成了一种复合材料,并在沥青中形成了物理交联点,使得沥青的高温抗变形能力得到提高。由于纤维具有较高的耐热性和稳定性,可有效提高沥青在高温环境下的稳定性,并且由于废口罩中纤维的加入,有效抑制了沥青的氧化反应,并减少了沥青中轻质组分的挥发,从而使得沥青在高温下更难变形。

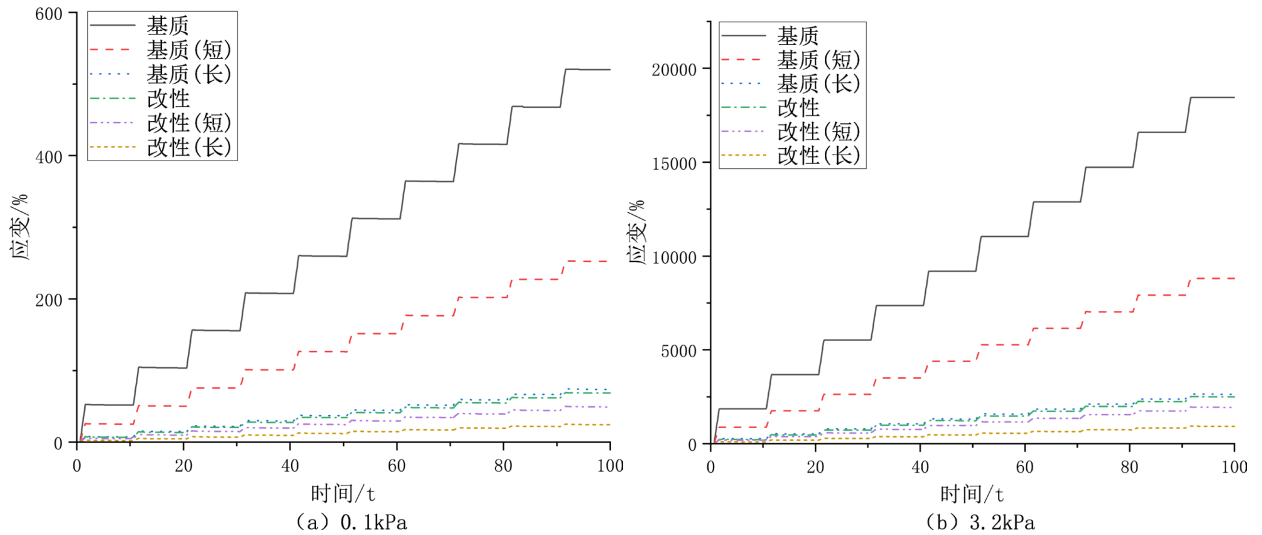


Figure 1. Effect of aging on asphalt strain
图 1. 老化对沥青应变的影响

在每一个荷载周期,基质沥青和废口罩纤维改性沥青第 1 s 加载阶段具有相似的蠕变变形趋势,然而,在进行应力卸载之后,这两种沥青的形变几乎难以复原或变动不大,其残留的应变值与最初的应变值非常接近,其弹性部分几乎完全缺失。分析其原因是在加载过程中,两种沥青的主要蠕变形式为粘性流动变形[7],废口罩纤维的加入并不能有效提高其延迟弹性变形的能力。

3.2. 蠕变恢复率 R 变化规律

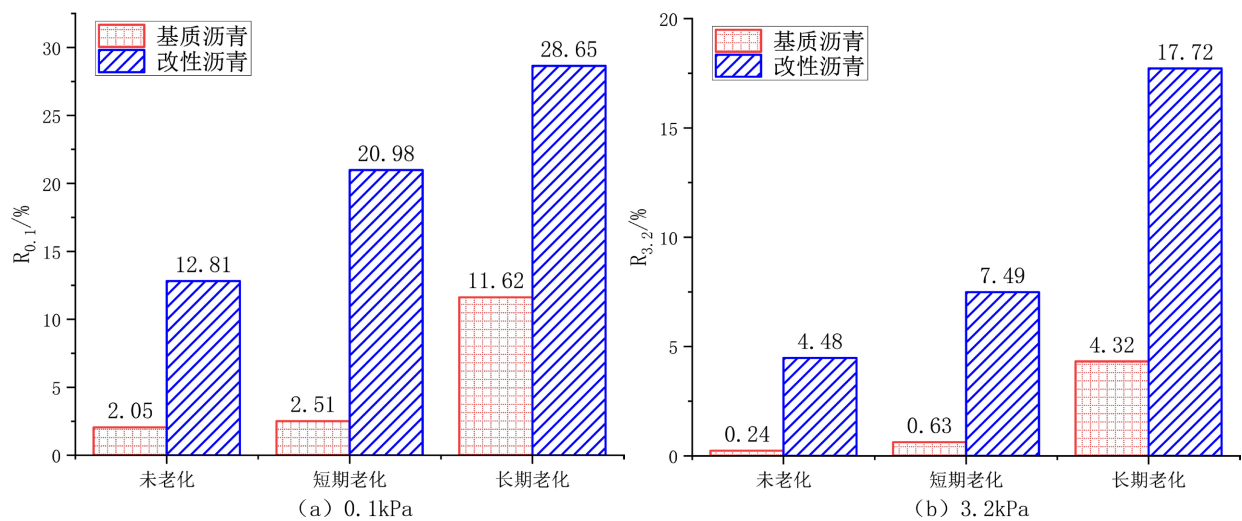


Figure 2. Effect of aging on R value of creep recovery rate of asphalt
图 2. 老化对沥青蠕变恢复率 R 值的影响

图2给出了0.1 kPa、3.2 kPa两种应力水平下,不同老化程度下,基质沥青、废口罩纤维改性沥青的蠕变恢复率 R 值。试验采用蠕变恢复率 R 评估沥青的延迟弹性,随着 R 值增加,沥青的弹性性能也随之增加,在承受重量荷载时不易产生永久变形或破坏,其可恢复应变在总应变的比例增加,残余变形的比例相应降低,最终表明了沥青的弹性变形能力和高温抵抗车辙变形的能力增强[7][8]。

由图2可知,在相同条件下,基质沥青和废口罩纤维改性沥青的蠕变恢复率 R 值均随老化程度的增大而提高,应力水平越高对应 R 值越小,变化幅度不同。在0.1 kPa下,未老化到短期老化、短期老化到长期老化的 R 值增幅,基质沥青分别为0.46%、9.11%,废口罩纤维改性沥青分别为8.17%、7.67%;在3.2 kPa下,基质沥青分别为0.51%、10.23%,废口罩纤维改性沥青分别为3.01%、10.23%。表明沥青随老化程度增加,其高温性能随之提高,这与文献彭红卫等人[9]的研究结果相符。

在相同的试验温度、应力水平和老化程度下,废口罩纤维改性沥青的 R 值明显高于基质沥青。0.1 kPa时,未老化、短期老化、长期老化三种状态下,废口罩纤维改性沥青的 R 值分别高出基质沥青10.76%、18.47%、17.03;3.2 kPa时,其 R 值分别高出4.36%、6.86%、13.4%。原因分析为口罩纤维具有较好的抗拉强度和弹性,当沥青受到外部荷载的作用产生变形时,口罩纤维会阻止沥青分子之间的流动并且提供额外的弹性抵抗力,从而降低沥青的蠕变程度。此外,当载荷作用消失后,口罩纤维能够迅速恢复其原始形状和弹性,带动沥青分子回到原始位置,从而提高了沥青的蠕变恢复值。表明废口罩纤维改性沥青可以显著提高 R 值,增强沥青的弹性变形能力。

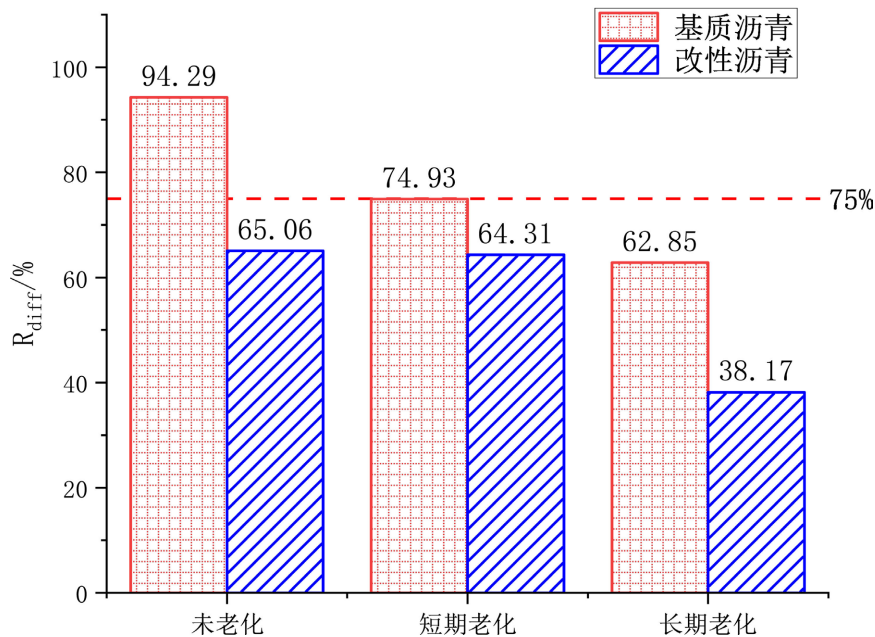


Figure 3. Variation of R_{diff} value with degree of aging

图3. R_{diff} 值随老化程度的变化

沥青的弹性敏感性可以通过 R_{diff} 来体现, R_{diff} 的数值越小,其弹性稳定性就越出色。通常情况下,较高的弹性稳定性表明沥青结合料具有更强的抵抗高温或重载的能力,以及更长的疲劳寿命[7]。

由图3可知,对于基质沥青,随着老化程度的提高,其 R_{diff} 值逐渐降低,但是在未老化和短期老化阶段,其 R_{diff} 值仍然超过了75%,这并不符合AASHTO M 332-20标准中关于沥青结合料 R_{diff} 值“ $\leq 75\%$ ”的要求,如果超过75%,意味着沥青结合料可能处于蠕变破坏阶段,这意味着基质沥青在高温环境下无法有效抵抗车辙变形。

由图 3 可知, 对于废口罩纤维改性沥青, 随着老化程度的提高, 其 R_{diff} 值呈现逐渐下降的趋势, 且都低于 “ $\leq 75\%$ ” 的标准要求, 同时 R_{diff} 值的减小也说明沥青结合料中的复合网格结构越完整。

由图 3 可知, 在未老化、短期老化、长期老化三种阶段, 废口罩纤维改性沥青的 R_{diff} 值明显小于基质沥青。原因分析为基质沥青力学性能、抗高温变形能力较差, 对于高温或者重载较为敏感, 而废口罩纤维改性沥青由于口罩中的纤维与沥青形成了同一种复合网状结构, 进而加强了沥青的稳定性, 对于高温和重载有着更强的抵抗力。

3.3. 不可恢复蠕变柔量 J_{nr}

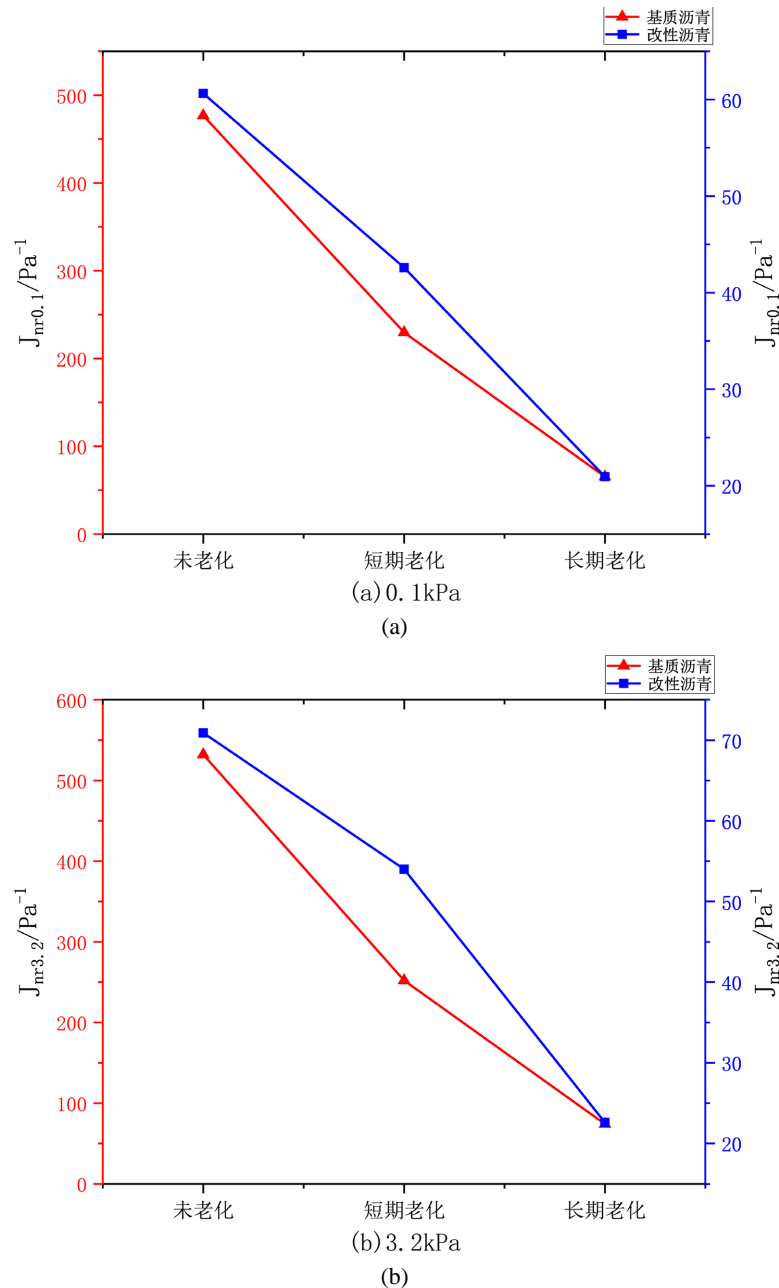


Figure 4. Variation of J_{nr} value with degree of aging
图 4. J_{nr} 值随老化程度的变化

不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 是指材料在蠕变过程中, 无法恢复到初始状态的应变部分, 它通常被用来描述材料在承受长时间负载作用后发生的不可逆变形。对于沥青来说, J_{nr} 通常用于评估其在特定条件下的变形性能和抵抗永久变形的能力。 J_{nr} 值越大, 表明重复荷载作用下沥青永久变形量就越大, 其抵抗高温变形的能力越差[7] [8]。图 4 给出了基质沥青和废口罩纤维改性沥青 J_{nr} 值随老化程度的变化。

由图 4 可知, 在相同的老化程度时, 沥青的 $J_{nr3.2}$ 值明显大于其 $J_{nr0.1}$ 值, 表明沥青在较高应力条件下, 其不可逆变形更大。且随着老化程度的加大, 两种沥青的 J_{nr} 值均明显减小, 表明老化对沥青 J_{nr} 值有明显影响。在相同条件下, 废口罩纤维的加入可以极大地降低沥青的不可恢复柔量 J_{nr} 值, 并减缓其减小的趋势。

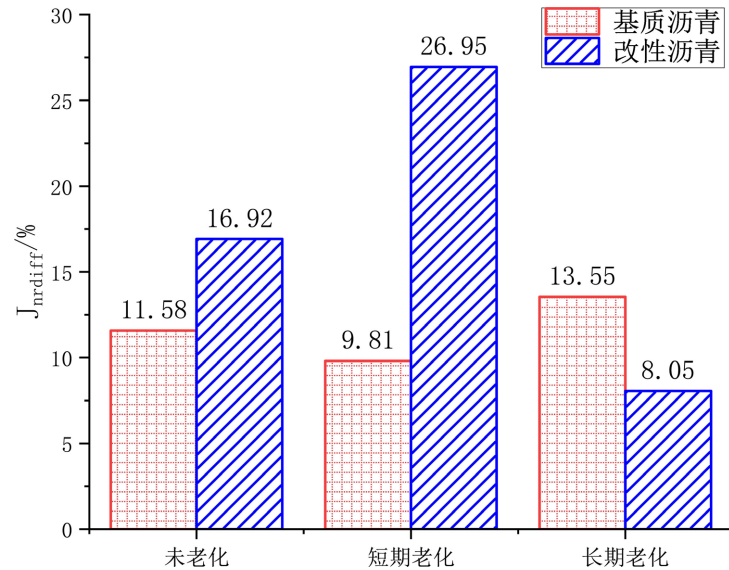


Figure 5. Variation of $J_{nr\text{diff}}$ value with the degree of aging

图 5. $J_{nr\text{diff}}$ 值随老化程度的变化

由图 5 可知, 在未老化、短期老化阶段, 废口罩纤维改性沥青的 $J_{nr\text{diff}}$ 值均高于基质沥青, 说明废口罩纤维的加入无法降低沥青的应力敏感性, 但随着老化程度的加大, 其作用开始凸显, 在长期老化阶段, 其 $J_{nr\text{diff}}$ 值明显低于基质沥青, 有效改善了沥青的应力敏感性。分析其原因可能为, 当老化程度较大时, 在低应力水平 0.1 kPa 时, 废口罩中的纤维与沥青由于融合效果不佳, 沥青承受了大量的应力。在高应力水平 3.2 kPa 时, 沥青承载能力有限, 此时废口罩纤维与沥青形成的复合物发挥较大作用, 加载完成后和恢复阶段的累计应变和残余变形都相对较小, 所以 $J_{nr\text{diff}}$ 值较小。

4. 结论

- 1) 废口罩纤维改性沥青较基质沥青的软化点明显升高, 延度、针入度下降。
- 2) 废口罩纤维改性沥青与基质沥青的 R 值均随老化程度的增加而显著增大、而 J_{nr} 值显著下降; 在相同的老化阶段和应力水平条件下, 废口罩纤维改性沥青较基质沥青的 R 值明显大, J_{nr} 值明显小; 表明废口罩纤维改性沥青具有更好的弹性和高温抗变形能力, 且随老化程度的增加而增加。
- 3) 废口罩纤维改性沥青与基质沥青的 R_{diff} 值均随老化程度的增加而减少; 在相同的老化阶段, 废口罩纤维改性沥青较基质沥青的 R_{diff} 值明显小; 说明废口罩纤维改性沥青对高温或者重载有更强的抵抗力和更长的疲劳寿命。
- 4) 废口罩纤维改性沥青的应力敏感性指标 $J_{nr\text{diff}}$ 值随老化程度的增加呈先增后减趋势, 在长期老化阶段, 应力敏感性得到改善。在相同的应力水平条件下, 随老化程度的增大, 废口罩纤维改性沥青较基质

沥青的 R 值的增幅大, J_{nr} 值与 R_{diff} 值的减幅小, 表明废弃口罩纤维改性沥青抗老化性能更好。

基金项目

湖南省大学生创新创业训练计划项目: 基于废弃口罩纤维改性沥青技术性能研究(湘教通[2023] 132号(No. 1461)); 湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30259)。

参考文献

- [1] 叶小波, 唐林, 陈春亮, 董雄伟, 叶兆青. 医用口罩非织造材料研究进展[J]. 纺织科技进展, 2020(10): 11-14+18.
- [2] 魏聪, 魏鹏举, 周静, 等. 废弃医用口罩问题探讨[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 473-478.
<https://doi.org/10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2022.07.001>
- [3] Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Roychand, R. and Zhang, G.M. (2021) Preliminary Evaluation of the Feasibility of Using Polypropylene Fibres from COVID-19 Single-Use Face Masks to Improve the Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Cleaner Production*, **296**, Article ID: 126460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126460>
- [4] 马立纲, 葛生深, 赵增刚, 等. 一次性医用口罩改性沥青的流变性能研究[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20211202.2235.002.html>
- [5] 程培峰, 郑春萌, 张展铭, 等. 废旧口罩熔喷布对沥青及混合料性能影响研究[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 126-134.
- [6] Zhang, Y.Q., Zhang, Z.F. and Wang, L. (2020) Explicit Constructions of Optimal-Access MSCR Codes for All Parameters. *IEEE Communications Letters*, **24**, 941-945. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2972899>
- [7] 刘圣洁, 林钰, 李梦然, 等. 基于 MSCR 试验的温拌阻燃沥青高温性能评价与分级[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 146-151.
- [8] 雷俊安, 郑南翔, 许新权, 等. 基于多应力蠕变恢复试验的温拌沥青高温性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 459-465.
- [9] 彭红卫, 聂忆华, 余沛涵. 基于 MSCR 的基质沥青老化高温性能[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(8):1-4.
<https://doi.org/10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2023.08.059>