

石振武,高博,徐传浩.冻融损伤作用下玉米秸秆纤维再生沥青混合料耐久性能研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):463-470.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240343
SHI Zhenwu,GAO Bo,XU Chuanhao.Study on the durability of corn straw fiber recycled asphalt mixture under freeze-thaw damage [J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):463-470.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240343

冻融损伤作用下玉米秸秆纤维再生沥青混合料 耐久性能研究

石振武,高 博,徐传浩

(东北林业大学 土木与交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 针对再生沥青混合料在冻融循环条件下抗疲劳性能显著下降的问题,采用接触角试验、冻融循环劈裂试验、半圆弯拉疲劳试验,研究玉米秸秆纤维对再生沥青混合料的黏附性能、水稳定性和抗疲劳性能的影响。研究表明:玉米秸秆纤维提升了再生沥青混合料的亲水性和内部结构完整性,发挥了加筋作用;冻融循环 1~40 次时,纤维改性再生沥青的黏附功较基质沥青和再生沥青分别提高 8.34% 和 16.65%;经冻融循环 20 次后,纤维改性再生沥青性能仍满足规范要求;冻融循环 40 次时,纤维改性再生沥青的劈裂强度为 0.67 MPa,较基质沥青混合料和再生沥青混合料分别提高了 23.88%、34.32%,疲劳寿命为 5 017 次,较基质和再生沥青混合料分别提高 37.15%、29.16%。研究结论可为寒冷地区再生沥青路面的材料设计与工程应用提供参考。

关键词: 道路工程;再生沥青混合料;冻融循环;玉米秸秆纤维;耐久性能;劈裂强度

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)04-0463-08

Study on the durability of corn straw fiber recycled asphalt mixture under freeze-thaw damage

SHI Zhenwu, GAO Bo, XU Chuanhao

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Aiming at the problem that the fatigue resistance of recycled asphalt mixture decreases significantly under the condition of freeze-thaw cycle, the effects of corn straw fiber on the adhesion, water stability and fatigue resistance of recycled asphalt mixture were studied by carrying out contact angle tests, freeze-thaw cycle splitting test and semi-circular bending fatigue test. The results show that corn straw fiber significantly improves the hydrophilicity and internal structural integrity of recycled asphalt mixture, and plays a reinforcing role. When the freeze-thaw cycle is 1~40 times, the adhesion work of fiber modified mixture is 8.34% and 16.65% higher than that of matrix asphalt and recycled asphalt respectively. When the freeze-thaw cycle is 20 times, the performance still meets the specification requirements; when the number of freeze-thaw cycles is 40, the splitting strength reaches 0.67 MPa, which is 23.88% and 34.32% higher than that of matrix and recycled asphalt mixture, respectively. The fatigue life of 5 017 times is 37.15% and 29.16% higher than that of matrix and recycled asphalt mixture, respectively. The fatigue life is 5 017 times, which is 37.15% and 29.16% higher than that of matrix asphalt mixture and recycled asphalt mixture, respectively. The research conclusions can provide a direct reference for the material design and engineering application of recycled asphalt pavement in cold regions.

Keywords: pavement engineering; recycled asphalt mixture; freeze-thaw cycle; corn straw fiber; durability; splitting strength

收稿日期: 2024-10-15 修回日期:2024-11-19 接受日期:2024-11-28 责任编辑:朱含露

基金项目: 黑龙江省交通运输厅科技项目(J-20181221);黑龙江省交通投资集团有限公司科研项目(JT-100000-ZC-FW-2021-0121)

作者简介: 石振武(1963-),男,吉林四平人,博士,教授,主要从事道路工程技术方面的研究。E-mail: shizhenwu@126.com

0 引言

随着交通量的不断增长,中国公路已全面进入大规模维修养护期。传统的道路维修方法通常将旧路面材料作为废弃物处理,不仅会占用大量堆放场地,还会对环境造成污染^[1]。相比之下,热再生技术能够实现旧路面材料的循环利用,有效减少废弃物的产生和排放,降低对环境的污染^[2]。在实际应用中,再生沥青混合料的性能受冻融循环影响尤为显著。特别是东北地区,由于气候条件特殊,沥青路面频繁经历冻融循环,对路面的耐久性提出挑战^[3-4]。研究表明,随着冻融次数增加,再生沥青混合料的劈裂强度会大幅下降,同时伴随严重的水损害现象,导致其水稳定性降低^[5],进一步影响再生沥青混合料的疲劳性能,且冻融循环次数越多,损伤越严重^[6-7]。

学者对纤维改善沥青混合料路用性能开展了大量研究。WANG等^[8]研究表明,加入秸秆纤维可显著提升沥青混合料的高温性能和低温抗裂性,同时增强其抗水损伤性能并延长疲劳寿命。李振霞等^[9]研究发现,相较于木质素纤维,玉米秸秆纤维的表面结构更粗糙、长度与直径的比值更大、分散性更优,可在混合料内部形成三维网状结构以抑制裂缝扩展。朱洪洲等^[10]分析了纤维沥青混合料性能的关键影响因素。XUE等^[11]实验证实,秸秆纤维的耐热性、吸油性和抗剪切性能均优于木质素纤维,且界面加固效果显著优于其他纤维材料。LIU等^[12]通过扫描电子显微镜(SEM)观测发现,纤维与沥青在混合体系中呈现良好的润湿特性和均匀分散性。李祖仲等^[13]采用一步法和二步法对蔗渣纤维进行表面改性,结合热重分析、红外光谱及SEM表征揭示了碱处理改性的作用机理。试验表明,改性后的蔗渣纤维可有效提升沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性。王玉林等^[14]研究表明,当木质素纤维掺量为0.02%时,再生沥青混合料的水稳定性、低温抗开裂性及内聚强度显著提高,但其高温性能改善效果受限。韦佑坡等^[15]发现玄武岩纤维的掺入可增强沥青混合料的水稳定性与冻融劈裂强度,同时降低疲劳敏感性并提升抗疲劳性能。马峰等^[16]进一步确定玄武岩纤维最佳掺量为0.3%,验证其可大幅改善混合料高温性能与水稳性,赋予优异的动态力学性能,并显著提升抗疲劳能力。现有研究表明,纤维掺入可有效缓解冻融损伤对路面性能的劣化,但当前研究多聚焦于纤维与沥青混合料水稳定性

的关联,针对水损伤后材料耐久性能的系统研究仍显不足。

因此,本文通过向再生沥青混合料掺入玉米秸秆纤维,结合接触角测试、冻融劈裂试验及半圆弯曲疲劳试验,探究玉米秸秆纤维对再生沥青黏附特性、水稳定性及抗疲劳性能的作用机理,评估玉米秸秆纤维对混合料耐久性能的提升效应。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

(1) 再生沥青混合料和新集料

铣刨的再生沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)取自黑龙江省黑河市公路养护段维修工程中的沥青面层铣刨料。经筛分处理后,RAP的级配通过率见表1。试验采用同粒径规格的新集料与RAP进行掺配,最终各档集料中RAP质量分数均为50%。新旧集料的关键性能指标检测结果详见表2。

表 1 RAP筛分结果

Tab.1 RAP screen size pass rate

RAP 粒径/mm	通过率/%	RAP 粒径/mm	通过率/%
19.000	97.8	1.180	3.5
16.000	92.2	0.600	1.6
13.200	82.4	0.300	1.2
9.500	60.5	0.150	0.9
4.750	22.9	0.075	0.5
2.360	11.4		

表 2 旧料及新集料技术指标

Tab.2 technical index of used material and new aggregate

材料	检测项目	技术要求	实测值
RAP	含水率/%	≤3	1.2
RAP 中粗集料	压碎值/%	≤24	18
RAP 中细集料	棱角性/s	≥30	42
新集料	表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	2.8
	坚固性(>0.6 mm)/%	≤12	10
	棱角性/s	≥30	44

注:含水率为质量分数。

(2) 新沥青与再生剂

试验采用盘锦90#基质沥青作为新沥青,其关键性能指标经检测均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求,见表3。按沥青混合料总质量的2%进行掺配,该再生剂的主要技术参数见表4。

(3) 玉米秸秆纤维

玉米秸秆纤维是制备再生混合料时添加的功能性外掺填料,具有加筋稳定和增强作用。试验中秸秆纤维的掺量为混合料总质量的0.5%,所选纤维的技术指标见表5。

表 3 基质沥青主要技术指标

Tab.3 technical indicators of matrix asphalt

参数	试验结果	行业标准
25℃密度/(g·cm ⁻³)	1.05	
25℃针入度/(10 ⁻¹ ·mm)	84.6	80~100
软化点/℃	58	≥45
15℃延度/mm	>100	≥100
闪点/℃	>320	≥245
溶解度	99.9%	≥99.5%
60℃动力黏度/(Pa·s)	170	≥160

表 4 糠醛抽出油再生剂参数指标

Tab.4 parameter index of furfural extractive oil regenerant

参数	取值
25℃黏度/(Pa·s)	15
闪点/℃	220
凝点/℃	10
密度/(g·cm ⁻³)	1.006 7
胶质质量分数	5.4%
链烷烃质量分数	2.2%
环烷烃质量分数	24.3%
芳烃质量分数	68.1%

表 5 玉米秸秆纤维的技术指标

Tab.5 technical indicators of corn straw fiber

指标	试验值	技术要求 ^[21]
纤维直径/μm	50~420	
纤维长度/mm	≤4	≤6
pH	7.8	6.5~8.5
吸油倍率/%	30.3	
密度/(g·cm ³)	1.3	
灰分含量/%	8.7	13~23
含水量/%	4.1	≤5
裂解温度/℃	≥240	
质量损失/%(210℃, 1 h)	3.5	≤6, 且无燃烧

1.2 试验方法

(1) 再生沥青制备

试验采用高速剪切法制备再生沥青。首先, 将抽提RAP旧料得到的旧沥青置于160℃烘箱中加热30 min, 使其呈流动状态。然后, 向处于流动状态的旧沥青中加入再生剂并进行高速剪切, 制备条件为剪切温度160℃、转速3 000 r/min、时间30 min, 最终制得再生沥青。

(2) 玉米秸秆纤维制备

根据《沥青路面用纤维》(JT/T 533—2020) 的相关规定, 制备研究所用的玉米秸秆纤维。首先, 将未经处理的玉米秸秆手工剥去表面的叶、穗等杂质, 并用小刀沿其直径方向劈成两半, 以便后续去除内芯。其次, 由于秸秆节部分的力学性能较差, 因此在节部位置截断成长段, 并去除秸秆节, 随后将其放入清水中浸泡4 h, 捞出后置于(105±5)℃烘箱内加热45 min, 烘干后剥去内芯。最后, 将秸秆皮剪切成8~10 mm的小段, 采用高速多功能粉碎机以30 000 r/min的转速粉碎2 min。粉

碎后的秸秆纤维经晾干、筛分, 得到可用于混合料外掺的玉米秸秆纤维, 见图1。

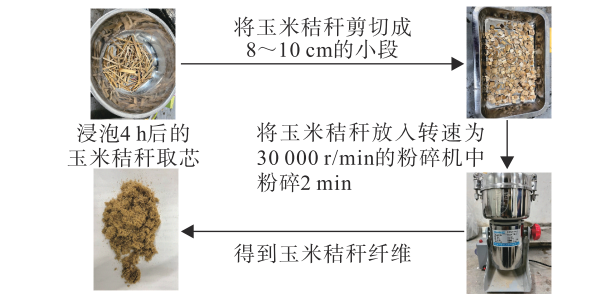


图 1 玉米秸秆纤维制备流程

Fig.1 flow of corn straw fiber preparation

(3) 再生沥青混合料级配设计

试验选用AC-16型连续级配混合料, 旧料掺量为50%。为降低RAP旧料对级配设计变异性的影响, 采用新旧集料等质量掺配的方式进行级配设计, 所得合成级配设计曲线见图2。

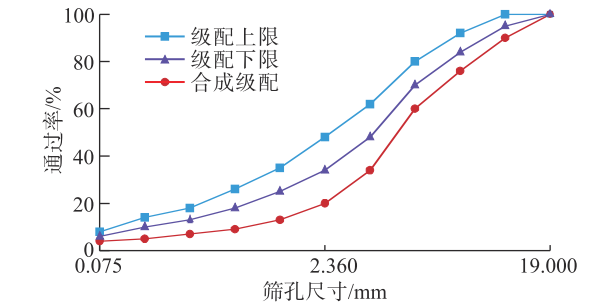


图 2 再生沥青混合料级配设计曲线

Fig.2 gradation design curve of recycled asphalt mixture

(4) 接触角试验

试验采用KRUSS公司生产的DAS30光学接触角仪进行测试。首先将76 mm×22 mm×0.2 mm的载玻片分别浸入已预热至规定温度的基质沥青、再生沥青和纤维改性再生沥青样品中, 缓慢取出后悬挂冷却至室温。然后采用躺滴法依次滴加蒸馏水、甲酰胺和丙三醇。最后, 使用接触角仪测定3种样品的接触角, 并基于表面自由能理论计算其黏附功。样品接触角测试示意图见图3。

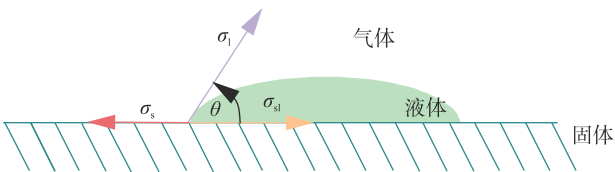


图 3 接触角测试示意

Fig. 3 schematic of contact angle measurement

图3中, 接触角 θ 是判定润湿性好坏的依据。当 $\theta=0^\circ$ 时, 液体在固体表面完全铺展, 达到完全

润湿状态;当 $0<\theta<90^\circ$ 时,液体能够润湿固体,且 θ 越小润湿性越好;当 $\theta=90^\circ$ 时,附着力与内聚力相当,液体在固体表面形成半球形;当 $90^\circ<\theta<180^\circ$ 时,液体不润湿固体。

样品表面自由能为

$$\gamma_l = \gamma_l^d + \gamma_l^p, \quad (1)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p, \quad (2)$$

式中: γ_l 为液体表面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_s 为固体表面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_l^d 、 γ_s^d 分别为液体表面自由能和固体表面自由能的色散分量, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_l^p 、 γ_s^p 分别为液体表面自由能和固体表面自由能的极性分量, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$ 。

固液接触界面的表面自由能为

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l \times 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} \times 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p}. \quad (3)$$

Young 方程为

$$\gamma_l \cos\theta = \gamma_s - \gamma_{sl}, \quad (4)$$

式中, θ 为接触角, $^\circ$ 。

基于式(3)、式(4)得

$$1 + \cos\theta = 2\sqrt{\gamma_s^d} \left(\sqrt{\gamma_l^d} / \gamma_l \right) + 2\sqrt{\gamma_s^p} \left(\sqrt{\gamma_l^p} / \gamma_l \right). \quad (5)$$

化简式(5)得

$$1 + \frac{\cos\theta}{2} \times \frac{\gamma_l}{\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^d} \times \sqrt{\gamma_l^d / \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p}. \quad (6)$$

沥青的黏聚功为

$$\Delta W = 2\gamma, \quad (7)$$

式中, γ 为样品的表面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$ 。

由式(7)可得沥青的黏附功为

$$W = 2\gamma_{ap} = 2(\gamma_{ap}^d + \gamma_{ap}^p), \quad (8)$$

化简得

$$W = \gamma_{ap} + \gamma_{ag} \gamma_{pg} = 2\sqrt{\gamma_{ap}^d \gamma_{ag}^d} + 2\sqrt{\gamma_{ap}^p \gamma_{ag}^p}, \quad (9)$$

式中: γ_{ap} 为样品表面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_{ag} 为集料的表面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_{pg} 为混合的界面自由能, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_{ap}^d 、 γ_{ap}^p 分别为样品表面自由能的色散分量和极性分量, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$; γ_{ag}^d 、 γ_{ag}^p 分别为集料的表面自由能的色散分量和极性分量, $\text{mJ}\cdot\text{m}^2$ 。

(5) 冻融循环劈裂试验

采用冻融循环试验模拟外部水温作用,通过多次循环处理强化长期水温对再生料性能的影响。冻融循环条件设置为:温度区间为 $-18^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$,升降温速率为 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 。循环过程为:饱水试件首先在 -18°C 空气中冷冻2 h,然后在 20°C 水中融化2 h,单次循环总时长为4 h。冻融循环次数设置为0次、1次、10次、20次、30次、40次。冻融处理后的试件按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行劈裂试验。为保证

数据可靠性,每组试验设置5个平行试件。

(6) 半圆弯拉疲劳试验

半圆弯拉疲劳试验可用于评价再生沥青混合料的抗疲劳性能,该试验能模拟道路长期载荷对再生沥青混合料的累积损伤作用。通过监测累计加载过程中试样的变形和损伤情况,评估再生沥青混合料的抗疲劳性能。

试验采用旋转压实法制备直径为150 mm、高为120 mm的圆柱形试件。将成型试件的上下两端各切除10 mm后,对半切割成高为50 mm的圆柱形试件,再沿中心线分割获得半圆试件,见图4。使用UTM-30万能试验机,在应力控制模式下进行重复加载试验,通过监测累计加载次数来测定疲劳寿命,进而分析再生沥青混合料的耐久性能。试验参数设置:温度为 15°C ,应力比为0.3。

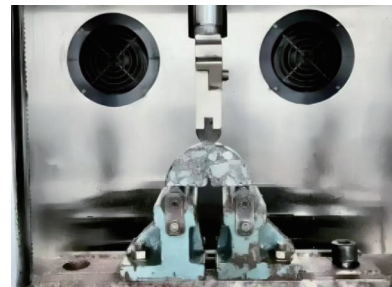


图4 半圆弯拉试验

Fig.4 semi-circular bending test

2 结果与讨论

2.1 黏附性

测试试剂与集料的表面自由能参数见表6。使用接触角仪进行接触角测试,结果见表7。

表6 测试试剂与集料的表面自由能参数

Tab.6 test reagent and aggregate surface free energy parameters

试剂	$\gamma/(\text{mJ}\cdot\text{m}^2)$	$\gamma^d/(\text{mJ}\cdot\text{m}^2)$	$\gamma^p/(\text{mJ}\cdot\text{m}^2)$
蒸馏水	72.8	21.80	51.00
丙三醇	64.3	34.30	30.00
甲酰胺	58.0	38.90	19.00
石灰岩	52.1	45.23	7.31

由表7可知,3种滴定试剂测得的样品接触角数值规律一致,其中纤维改性再生沥青的接触角最小,再生沥青的接触角最大。相关研究表明,接触角越小,材料表面结构越平整,越有利于界面黏结^[17-19]。纤维改性再生沥青的接触角小于普通再生沥青,表明纤维的加入可使沥青表面结构更加平整。这一现象的原因是玉米秸秆纤维增强了沥青的亲水性,使液态沥青沿纤维方向铺展,接

触面积增大, 接触角减小。

表 7 接触角试验测试结果

Tab.7 contact angle test results

试剂	接触角/(°)		
	基质沥青	再生沥青	纤维改性再生沥青
蒸馏水	117.46	105.76	97.89
丙三醇	94.04	85.41	78.37
甲酰胺	101.77	90.55	84.81

基于接触角试验进一步研究 3 种试样与集料的黏附性, 首先由式 (1) ~ 式 (4) 计算其表面自由能, 结果见表 8。

表 8 沥青试样的表面自由能试验结果

Tab.8 test results of surface free energy of asphalt samples

冻融循环次数	表面自由能/(mJ·m ⁻²)		
	纤维改性再生沥青	基质沥青	再生沥青
0	24.01	21.36	20.06
1	23.15	20.25	18.81
10	19.91	12.47	6.39
20	13.28	8.61	3.20
30	2.25	1.45	1.06
40	1.11	0.76	0.53

由表 8 可见, 3 种沥青的表面自由能均随冻融循环次数的增加而降低。这是由于冻融循环作用使沥青的浸润性逐渐减弱, 沥青与集料间的黏附性能下降。对比相同循环次数下的测试结果可见, 掺入秸秆纤维的再生沥青表面自由能值始终高于基质沥青和普通再生沥青。这表明秸秆纤维能够有效抑制沥青黏附性能的衰减, 其作用机理在于秸秆纤维的亲水特性可以减轻冻融循环造成的水损害, 从而延缓沥青浸润性的退化。

基于 3 种沥青的表面自由能数据, 由式 (8)、式 (9) 计算黏附性评价指标, 结果见图 5。

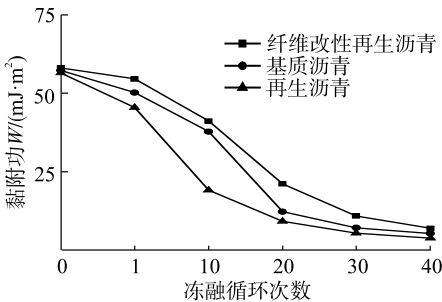


图 5 冻融循环次数与黏附功的相关性

Fig.5 correlation between freeze-thaw cycles and adhesion work

由图 5 可见, 3 种沥青的黏附功均随冻融循环次数的增加而下降。未冻融时, 纤维改性再生沥青的黏附功最大, 为 58.26 mJ·m², 基质沥青和普通再

生沥青的黏附功分别为 57.41 mJ·m²和 56.87 mJ·m²。当冻融循环次数达到 10 次时, 纤维改性再生沥青、普通再生沥青和基质沥青的黏附功分别下降 16.9%、37.7% 和 19.5%。其中, 纤维改性再生沥青的黏附功下降速率最慢, 其黏附功较再生沥青提高 16.7%。

当冻融循环 20 次时, 纤维改性再生沥青的黏附功较普通再生沥青和基质沥青分别提高 57.2% 和 42.56%, 但较冻融循环 10 次时下降 48.81%。此时基质沥青和普通再生沥青的黏附功较 10 次循环时分别下降 67.92% 和 52.71%。

当冻融循环次数增至 30 次和 40 次时, 基质沥青和普通再生沥青的黏附功数值较低且变化趋于平缓, 表明其黏附性能已显著劣化。而纤维改性再生沥青的黏附功仍保持 10.83 J·m²和 7.06 J·m²。

产生这一现象的原因是, 在冻融循环过程中, 动态水压促使水分子渗透沥青膜形成水膜, 并以不同速率剥离沥青的 4 种组分, 导致基质沥青黏附性能劣化^[20-21]。相比之下, 纤维改性再生沥青性能衰减更缓慢, 表明玉米秸秆纤维能有效缓解冻融循环的破坏作用, 纤维的加入增强了沥青与集料间的吸附能力, 提高了再生沥青的黏附功^[22]。

综上, 在再生沥青中加入具有特定长度和粗糙度的玉米秸秆纤维后, 纤维在沥青结构中沿横向方向均匀分布, 促使沥青更充分地铺展。一方面秸秆纤维减小接触角并增大接触面积, 改善沥青与集料的界面接触和结合效果; 另一方面, 秸秆纤维的亲水特性能延缓沥青浸润性的衰减, 提高黏附功。

2.2 冻融循环损伤规律研究

不同冻融循环循环次数下, 测试 3 种类型沥青混合料的劈裂强度, 结果见图 6。由图 6 可知, 3 种沥青混合料的劈裂强度与劈裂强度比均随冻融循环次数的增加而减小, 经第一次冻融循环后, 纤维改性再生沥青混合料与基质沥青混合料的劈裂强度下降较为缓慢, 表现出较好的稳定性。

当冻融循环次数达到 10 次时, 二者的劈裂强度均出现显著下降, 纤维改性再生沥青混合料劈裂强度下降至 0.99 MPa, 劈裂强度比下降至 70.42%, 比未冻融时的劈裂强度和劈裂强度比分别下降 32.7% 和 29.5 个百分点。基质沥青混合料的劈裂强度和劈裂强度比为 0.91 MPa、65.1%, 与未冻融时的混合料相比分别下降 36.3% 和 34.9 个百分点。普通再生沥青混合料在初次冻融后即呈现急剧下降趋势, 表明其抗水损害能力较差, 结构稳定性不足。

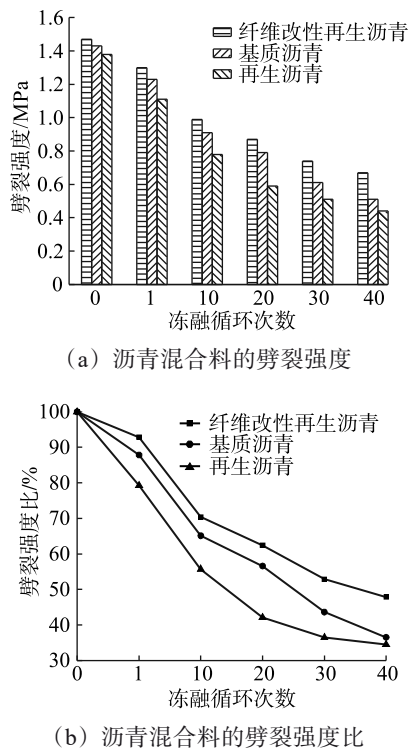


图6 沥青混合料的劈裂强度与劈裂强度比

Fig. 6 splitting strength and splitting strength ratio of asphalt mixture

当冻融循环次数增至20次时,纤维改性再生沥青混合料的劈裂强度较10次循环时下降13.08%。而普通再生沥青混合料和基质沥青混合料则分别下降17.71%和24.35%。在30次和40次冻融循环条件下,3种混合料的劈裂强度持续下降,其中纤维改性再生沥青混合料强度的下降速率更快。

根据《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)^[23]要求,再生沥青混合料的劈裂强度比应大于60%。经过冻融循环1次,纤维改性再生沥青混合料、基质沥青混合料和普通再生沥青混合料的劈裂强度比分别为92.85%、87.84%和79.28%,均符合要求。当冻融循环次数达到10次时,纤维改性再生沥青混合料和基质沥青混合料仍满足水稳定性要求,劈裂强度比分别为70.42%和65.10%,但普通再生沥青混合料的劈裂强度比降至55.71%,不符合规范要求。当冻融循环20次时,仅纤维改性再生沥青混合料的强度比仍高于60%。当循环次数增至30次和40次时,3种混合料的强度比均低于60%,表明其水稳定性能显著下降。

产生这种现象的原因是,在冻融循环前期,水分渗入沥青内部的微孔隙和裂缝,约10次冻融循环后积聚量较高,削弱了沥青分子间的黏结力;

低温下水分结冰膨胀,产生内部应力,引发微裂缝扩展,降低了劈裂强度^[24]。然而,纤维改性再生沥青的劈裂强度始终高于普通再生沥青和基质沥青,说明玉米秸秆纤维能填充沥青微孔隙,优化结构,减少应力集中,增强整体性,从而提高抗冻融破坏能力^[24]。此外,冻融强度比与沥青-集料黏附功的变化趋势一致,进一步证明纤维的加入能改善沥青与集料的黏附性,提升混合料的水稳定性。

综上,3种沥青混合料的水稳定性能均随冻融循环次数的增加而降低。基质沥青混合料的极限循环次数为10次,而纤维改性再生沥青混合料可达20次。这表明玉米秸秆纤维的加入能有效改善混合料的内部结构和水稳定性。一方面,纤维形成的三维网络结构阻碍了水分的渗透和侵蚀;另一方面,纤维的亲水性和吸附特性延缓了水分在混合料内部的扩散速率,减缓由水分引起的剥落、松散和强度衰减现象。

2.3 抗疲劳性能

不同冻融循环次数下,3种沥青混合料半圆弯曲疲劳试验的结果见图7。

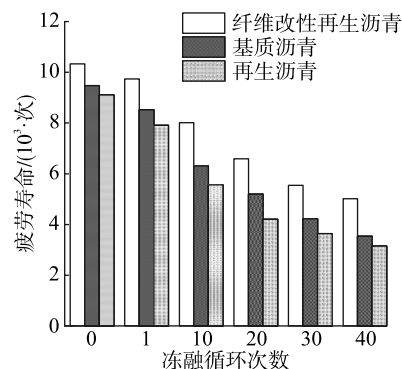


图7 冻融循环下的疲劳寿命

Fig. 7 fatigue life under freeze-thaw cycles

由图7可见,3种沥青混合料的疲劳寿命均随冻融循环次数的增加而降低。对比未冻融和初次冻融状态,纤维改性再生沥青混合料和基质沥青混合料的疲劳寿命下降幅度较小,而普通再生沥青混合料的疲劳寿命降低13.2%,表明普通再生沥青混合料具有较高的水敏感性和较差的水稳定性。

冻融循环达到10次时,普通再生沥青混合料和基质沥青混合料的水损害已接近极限状态,后续循环对其疲劳寿命的影响相对减弱,下降趋势趋于平缓。此时,纤维改性再生沥青混合料的疲劳寿命较基质沥青混合料和普通再生沥青混合料分别提高21.34%和30.66%。

冻融循环达到20次时,纤维改性再生沥青混合料的疲劳寿命较基质沥青混合料和普通再生沥青混合料分别提高21.18%和36.19%,但较10次循环时下降17.75%。当循环次数增至30次和40次时,3种混合料的疲劳寿命持续下降,其中基质沥青混合料的衰减最为显著。因此,基质沥青混合料和普通再生沥青混合料的极限冻融循环次数为10次,纤维改性再生沥青混合料可达20次。

3种混合料中,普通再生沥青混合料的抗水损害能力最弱,疲劳寿命衰减速率最快。未冻融状态下3种沥青混合料的疲劳寿命分别为:纤维改性再生沥青混合料10 332次、基质沥青混合料9 476次、普通再生沥青混合料9 108次。说明秸秆纤维的加入使再生沥青混合料的疲劳寿命提高11.8%。

当冻融循环增至10次时,基质沥青混合料和普通再生沥青混合料达到极限状态,疲劳寿命分别降至6 301次和5 558次,而纤维改性再生沥青混合料仍保持8 011次,较普通再生沥青混合料提高30.6%。

试验结果表明,在达到水损害极限状态后,纤维改性再生沥青混合料的疲劳寿命仍显著高于其他2种混合料。这说明纤维的加入提升了再生沥青混合料的抗疲劳性能。这种增强效应主要源于纤维的加筋作用,在再生沥青混合料承受载荷时,玉米秸秆纤维能有效分担部分应力,减轻沥青基体的疲劳压力,延缓疲劳裂纹的萌生和扩展。这种增韧机制不仅改善了材料的力学性能,也增强了再生沥青混合料在恶劣环境下的耐久性。

综上,在多次冻融循环作用下,混合料所经历的破坏过程与寒区气候条件对混合料的影响具有相似性,二者均会加速混合料的疲劳破坏进程。在此条件下,纤维改性再生沥青混合料的抗疲劳性能更优。玉米秸秆纤维能改善混合料的内部结构,增加材料的韧性和抗裂性,抵抗裂缝的产生与扩展。这种增强效应不仅提升了再生沥青混合料的力学性能,还增强了再生沥青混合料在低温环境下的耐久性,延长使用寿命。试验结果表明,在冻融循环等特殊环境条件下,纤维改性混合料能保持更稳定的性能表现,减少疲劳裂纹的形成和扩展,证明纤维增韧技术在提升再生沥青混合料耐久性方面的应用潜力。

3 结论

通过设计相关试验并获取相应的试验指标,分析玉米秸秆纤维对再生沥青混合料性能的影响,得出以下结论。

(1) 在再生沥青中掺入玉米秸秆纤维后,其接触角减小,接触面积增大,黏附功随之提高。冻融循环1~40次期间,纤维改性再生沥青的平均黏附功较普通再生沥青提高16.65%,较基质沥青提高8.34%。

(2) 玉米秸秆纤维通过加筋作用有效抑制裂缝萌生,提升了再生沥青混合料的整体稳定性。纤维的加入改善了混合料的抗裂性能,延缓冻融循环导致的裂缝扩展,增强材料的结构完整性。当冻融循环次数达到40次时,纤维改性再生沥青混合料的疲劳寿命较普通再生沥青混合料和基质沥青混合料分别提高37.15%和29.16%。

(3) 基于玉米秸秆纤维抗水损伤机理分析,玉米秸秆纤维的加入改善了混合料的内部结构,增强抗冻融循环的能力。通过阻止水分渗透和抵抗水分侵蚀,玉米秸秆纤维不仅提高了再生沥青混合料的劈裂强度,延长使用寿命。在多次冻融循环后,掺入玉米秸秆纤维的混合料表现出更好的力学性能和耐久性,证明玉米秸秆纤维在提升再生沥青混合料耐冻融性能方面具有重要应用价值。

(4) 基于黏附性能、水稳定性和抗疲劳性能试验评价,外掺玉米秸秆纤维再生沥青混合料适用于寒区环境道路工程应用。

参考文献(References):

- [1] 李清富,裴俊杰,吕小永,等.废旧沥青路面再生利用研究现状与进展[J].河南科技,2019,38(20):108-111.
LI Qingfu, PEI Junjie, LYU Xiaoyong, et al. Research status and progress of recycling and utilization of waste asphalt pavement[J]. Henan Science and Technology, 2019, 38(20): 108-111.
- [2] 王雪莲,胡林,黄晓明.沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J].中外公路,2019,39(1):210-214.
WANG Xuelian, HU Lin, HUANG Xiaoming. Key technology of hot recycling process for plant-mixed asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 210-214.
- [3] 刁锡刚,陈智勇,朱云升,等.冻融循环对热再生沥青混合料耐久性能的影响[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(6):1058-1062.
DIAO Xigang, CHEN Zhiyong, ZHU Yunsheng, et al. Effect of freeze-thaw cycle on durability of hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46(6): 1058-1062.
- [4] 谭忆秋,徐慧宁,赵春丽,等.冻融循环下沥青混合料损伤特性研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):778-788.
TAN Yiqiu, XU Huining, ZHAO Chunli, et al. Research on asphalt damage characteristics under freeze-thaw cycling[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2024, 40(5): 778-788.
- [5] 程培峰,王天琪,李艺铭,等.冻融循环条件下沥青混合料的损伤规律[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(2):235-241.
CHENG Peifeng, WANG Tianqi, LI Yiming, et al. Damage law of

- asphalt mixture under freeze-thaw cycle conditions[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 235-241.
- [6] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等.温拌再生沥青混合料耐久性能[J].中国公路学报,2014,27(8):17-22.
- GUO Naisheng, YOU Zhanping, ZHAO Yinghua, et al. Durability of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 17-22.
- [7] 周志刚,王习进,沙晓鹏.水作用对沥青混合料疲劳性能影响试验[J].长沙理工大学学报,2014,11(2):1-8.
- ZHOU Zhigang, WANG Xijin, SHA Xiaopeng. Experimental analysis of influence on fatigue performance of asphalt mixture of water intrusion[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology, 2014, 11(2): 1-8.
- [8] WANG J Q, XIONG Y K, LI Q, et al. Experimental investigation on the preparation and surface treatment of biomass fibers for stone mastic asphalt mixtures modification[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133667.
- [9] 李振霞,陈渊召,周建彬,等.玉米秸秆纤维沥青混合料路用性能及机理分析[J].中国公路学报,2019,32(2):47-58.
- LI Zhenxia, CHEN Yuanzhao, ZHOU Jianbin, et al. Analysis of road performance and fiber mechanism for corn stalk fiber asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 47-58.
- [10] 朱洪洲,谭祺琦,杨孝思,等.纤维改性沥青混合料性能的研究现状与展望[J].科学技术与工程,2022,22(7):2573-2584.
- ZHU Hongzhou, TAN Qiqi, YANG Xiaosi, et al. Research status and prospect of fiber modified asphalt mixture performance[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2573-2584.
- [11] XUE Q, LIU L, CHEN Y J. Study on the action effect of pavement straw composite fiber material in asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 293-299.
- [12] LIU F, PAN B F, BIAN J R, et al. Experimental investigation on the performance of the asphalt mixture with ceramic fiber[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135585.
- [13] 李祖仲,李梦园,刘卫东,等.蔗渣纤维表面改性及其沥青混合料路用性能[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(6):1738-1745.
- LI Zuzhong, LI Mengyuan, LIU Weidong, et al. Surface modification of bagasse fibers and road performances of asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1738-1745.
- [14] 王玉林,卢东,徐宁.木质素纤维对再生透水沥青混合料路用性能研究[J].公路,2021,66(2):52-56.
- WANG Yulin, LU Dong, XU Ning. Effect of lignin fiber on the road performance of recycled pervious asphalt mixtures[J]. Highway, 2021, 66(2): 52-56.
- [15] 韦佑坡,张争奇,司伟,等.玄武岩纤维在沥青混合料中的作用机理[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(2):39-44.
- WEI Youpo, ZHANG Zhengqi, SI Wei, et al. Performance promoting mechanism of asphalt mixture by basalt fiber[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(2): 39-44.
- [16] 马峰,杨宇峰,纪续,等.玄武岩纤维沥青混合料力学及疲劳特性[J].西安工业大学学报,2022,42(4):393-400.
- MA Feng, YANG Yufeng, JI Xu, et al. Mechanical and fatigue properties of basalt fiber asphalt mixture[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2022, 42(4): 393-400.
- [17] 陈燕娟,高建明,陈华鑫.基于表面能理论的沥青-集料体系的粘附特性研究[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(1):183-187.
- CHEN Yanjuan, GAO Jianming, CHEN Huaxin. Research on adhesion in asphalt-aggregate systems based on surface energy theory[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(1): 183-187.
- [18] 郭鹏,唐伯明,冯敏,等.基于表面自由能理论的温拌再生沥青-集料粘附特性[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):38-44.
- GUO Peng, TANG Boming, FENG Min, et al. Warm mix recycled asphalt-aggregates adhesion based on surface free energy theory [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(4): 38-44.
- [19] 孙得力,李传强,杜佳美,等.PE蜡温拌沥青与集料的界面作用研究[J].化工新型材料,2024,52(增刊1):347-352.
- SUN Deli, LI Chuanqiang, DU Jiamei, et al. Study on the interfacial interaction between PE wax warm mix asphalt and aggregate[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(Suppl.1): 347-352.
- [20] LI Q, WANG J Q, LU Y, et al. Effect of dynamic water pressure on the adhesion behavior of recycled asphalt-aggregate interface by molecular dynamics method[J]. Construction and Building Materials, 2023, 382: 131296.
- [21] LUO Y H, GUO P, GAO J F, et al. Prediction and evaluation the moisture damage resistance of rejuvenated asphalt mixtures based on neural network[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131130.
- [22] 陈梓宁.玉米秸秆纤维沥青吸附机制及其SMA路用性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021:33.
- [23] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S].北京:人民交通出版社,2019:26.
- [24] 吴迪.水-温耦合作用下排水沥青混合料的路用性能及损伤特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2020:48.