

改性玉米秸秆纤维对沥青混合料性能影响及分散均匀性评价方法

李强飞¹,王琨^{1*},谢丹丹¹,孙星辰¹,姜自玉¹,郭仁亮²,刘赢昌²

1. 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357;2. 山东高速工程建设集团有限公司,山东 济南 250014

摘要:为研究改性玉米秸秆纤维质量分数对沥青混合料高、低温性能的影响及纤维的分散均匀性,制备改性玉米秸秆纤维质量分数分别为0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA)-13,进行车辙试验和低温小梁弯曲试验(试验温度分别为-5、-10、-15℃),采用方差分析与效应量分析,并结合低温弯拉强度、弯曲劲度模量、弯拉应变的标准差和改性玉米秸秆纤维质量分数,提出玉米秸秆纤维分散均匀性指数。结果表明:改性玉米秸秆纤维在沥青混合料中的质量分数为0.4%时,SMA-13的动稳定度最大,为4268次/mm,比未掺入改性玉米秸秆纤维的基准组增大50.4%,低温弯拉强度和弯拉应变显著提高,弯曲劲度模量降幅最小,表明其在抗弯拉强度、刚度与延性间实现最优平衡,分散均匀性指数最大,为1.042,纤维分散性最好,与高、低温试验结果一致。

关键词:改性玉米秸秆纤维;沥青混合料;高、低温性能;单因素分析;效应量分析;纤维分散均匀性指数

中图分类号:U416.03

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0059-09

引用格式:李强飞,王琨,谢丹丹,等.改性玉米秸秆纤维对沥青混合料性能影响及分散均匀性评价方法[J].山东交通学院学报,2025,33(4):59-67.

LI Qiangfei, WANG Kun, XIE Dandan, et al. Effect of modified corn straw fiber on the performance of asphalt mixture and the evaluation method for its dispersion uniformity[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 59-67.

0 引言

随着道路交通负荷的不断增大和极冷极热天气的增多,传统沥青混合料在高温下易发生车辙变形,低温时易脆性开裂,严重影响路面使用寿命^[1-3]。采用纤维可增强沥青混合料力学性能,改善沥青基体的黏结性和骨架结构,提高沥青混合料的路用性能^[4-6]。传统的木质素纤维、聚合物纤维存在成本高、环境负担大等问题,农业废弃物改性纤维因其可再生性和低成本特性,逐渐成为研究热点^[7-9]。

玉米秸秆纤维作为典型农业废弃物,经改性处理后具有优异的吸油性与分散性^[10-11]。徐豪等^[12]采用机械剪切方式湿法制备玉米秸秆纤维,通过NaOH溶液对其改性,进行酸碱度、吸油性、耐热性、灰分含量及吸持性试验,分析改性玉米秸秆纤维-沥青混合料的路用性能,改性后玉米秸秆纤维-沥青混合料的路用性能提高,与木质素纤维-沥青混合料相近,可替代木质素纤维作为沥青混合料的掺加料,降低工程成本。李振霞等^[13]通过提取比例及吸油倍数指标优选得到纤维最佳制备工艺,分别评价无纤维、木质素纤维和玉米秸秆纤维沥青混合料的高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性及高温抗剪性,发现玉米秸秆纤维

收稿日期:2025-04-04

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2023B65)

第一作者简介:李强飞(2000—),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为路面材料,E-mail:1778846245@qq.com。

*通信作者简介:王琨(1978—),女,山东平原人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为道路结构与材料,E-mail:wangkun@sdjtu.edu.cn。

最佳制备工艺为将长度为 (10 ± 2) mm 的秸秆皮浸泡 4 h 后,在转速 29 000 r/min 下破碎 2 min;玉米秸秆纤维、木质素纤维沥青混合料的动稳定度均比无纤维沥青混合料增大约 20%,弯拉应变均增大约 3.5%。石振武等^[14]研究玉米秸秆纤维对再生沥青混合料的黏附性能、水稳定性能和抗疲劳性能的影响,认为玉米秸秆纤维可提高再生沥青混合料的亲水性和内部结构完整性;冻融循环 1~40 次时,玉米秸秆纤维改性再生沥青的黏附性比基质沥青和再生沥青分别增大 8.34%和 16.65%;经冻融循环 20 次后,玉米秸秆纤维改性再生沥青性能仍满足要求;冻融循环 40 次时,玉米秸秆纤维改性再生沥青的劈裂强度为 0.67 MPa,比基质沥青混合料和再生沥青混合料分别增大 23.88%、34.32%,疲劳寿命为 5 017 次,比基质沥青和再生沥青混合料分别增大 37.15%、29.16%。郭彦强等^[4]通过试验研究发现随玉米秸秆纤维质量分数的增大,玉米秸秆纤维改性沥青混合料的软化点、高温性能、低温性能比无纤维沥青混合料分别增大 17.9%、79.6%和 36.8%,针入度减小 37.4%。但不同纤维质量分数的改性玉米秸秆纤维对沥青混合料高、低温性能的影响效果尚未明确,纤维的团聚程度尚未量化。

本文研究改性玉米秸秆纤维在沥青混合料中的质量分数分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%时,对沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA)-13 沥青混合料高、低温性能的调控规律,通过车辙试验评估 SMA-13 高温动稳定度 E_{DS} ,结合低温小梁弯曲试验(温度分别为-5、-10、-15 ℃)分析弯拉强度 σ_b 、弯拉应变 ϵ_b 及弯曲劲度模量 D 的变化,采用单因素方差分析与效应量分析量化不同纤维质量分数影响的显著性,通过逆向分析 σ_b 、 ϵ_b 及 D 效应量结果中的标准差,采用纤维分散均匀性指数量化纤维团聚程度,以期建立纤维质量分数与沥青混合料高、低温性能指标的关系,揭示纤维分散均匀性对沥青混合料力学行为的调控机制。

1 原材料和混合料的组成设计

1.1 原材料

1) 沥青

采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(Styrene-Butadiene-Styrene block copolymer,SBS)(I-D)改性沥青,根据文献[15]测试沥青的基本性能,结果如表 1 所示。

表 1 SBS(I-D) 改性沥青基本性能指标

项目	针入度 ^① / (0.1 mm)	软化点 ^② / ℃	针入度 指数	延度 ^③ / cm	运动 黏度 ^④ / (Pa·s)	闪点/ ℃	溶解度/%	弹性 恢复 ^⑤ / %	密度 ^⑥ / (g·cm ⁻³)	TFOT ^⑦ 后残留物 质量变 化/%	TFOT 后 残留物针 入度比/%	TFOT 后 残留物延 度 ^⑧ /cm
检测结果	55.0	79.7	0.16	33.5	1.54	320.0	99.9	96.0	1.026	0.024	80.0	17.0
规范要求 ^[15]	40.0~60.0	≥60.0	≥0	≥20.0	≤3.00	≥230.0	≥99.0	≥75.0	实测	≤±1.000	≥65.0	≥15.0

①25 ℃,100 g,5 s;②环球法;③5 cm/min,5 ℃;④135 ℃;⑤25 ℃;⑥25℃;⑦薄膜烘箱试验;⑧5 ℃。

2) 集料

依据文献[16]要求,检测粗集料、细集料及石灰岩矿粉的各项性能指标。采用玄武岩集料为试验用粗集料,按粒径分为>10~15 mm、>5~10 mm、3~5 mm,粗集料检测结果如表 2 所示。采用有适当级配、粒径为 0~3 mm 石灰岩机制砂作为试验用细集料,石灰岩细集料的各项性能指标结果如表 3 所示。石灰岩矿粉各项性能指标结果如表 4 所示。

由表 2~4 可知,检测结果均满足文献[17]要求。

采用自制的改性玉米秸秆纤维,依据文献[17]检测改性玉米秸秆纤维的各项基本性能,结果如表 5 所示,检测结果均满足文献[17]要求。

表 2 玄武岩粗集料性能指标

项目	集料压碎值/%	表观相对密度			吸水率/%	混合料针片状颗粒质量分数/%	软石质量分数/%	磨耗值 ^① /%
		3~5 mm	>5~10 mm	>10~15 mm				
检测结果	11.8	2.822	2.810	2.802	0.86	6.7	1.1	13.4
规范要求 ^[16]	≤26.0	≥2.600	≥2.600	≥2.600	≤2.00	≤15.0	≤5.0	≤28.0

①洛杉矶法。

表 3 石灰岩细集料技术性能指标

项目	表观相对密度	含泥量 ^① /%	砂当量/%	亚甲蓝值/(g·kg ⁻¹)
检测结果	2.728	1.4	81.3	1.1
规范要求 ^[16]	≥2.500	≤3.0	≥60.0	≤1.4

①粒径小于 0.075 mm 的颗粒的质量分数。

表 4 石灰岩矿粉技术性能指标

项目	表观相对密度	不同粒度范围颗粒的质量分数/%			含水量/%	亲水系数	外观
		<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm			
检测结果	2.726	100.0	93.7	89.5	0.30	0.64	无团粒结块
规范要求 ^[16]	≥2.500	100.0	90.0~100.0	75.0~100.0	≤1.00	<1.00	无团粒结块

表 5 改性玉米秸秆纤维的基本性能指标

pH 值	吸油倍数	热失重率/%	灰分质量分数/%	纤维长度/mm	颜色
8.62	6.4	1.336	5.8	≤9	浅黄色

1.2 沥青混合料组成设计

采用沥青 SMA-13,根据文献[15]设计沥青混合料级配曲线如图 1 所示,根据级配中值曲线制备试验所用集料,改性玉米秸秆纤维质量分数分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,沥青混合料的最佳油石比为 5.9%^[18]。

1.3 沥青混合料试件制备

根据文献[15]要求,制备车辙试验、低温小梁弯曲试验所需试件。在 170℃下将集料、改性玉米秸秆纤维、沥青和矿粉拌和后,分别制备车辙板和小梁弯曲试件,制备流程如图 2 所示。

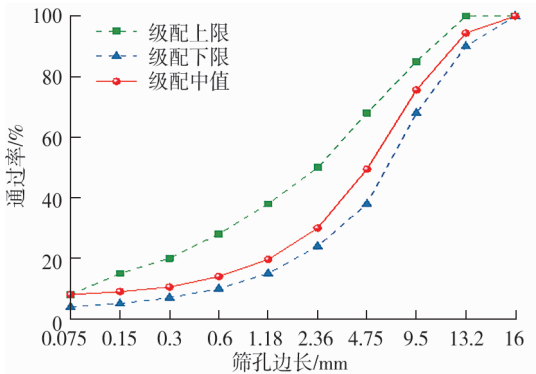


图 1 沥青混合料的级配曲线

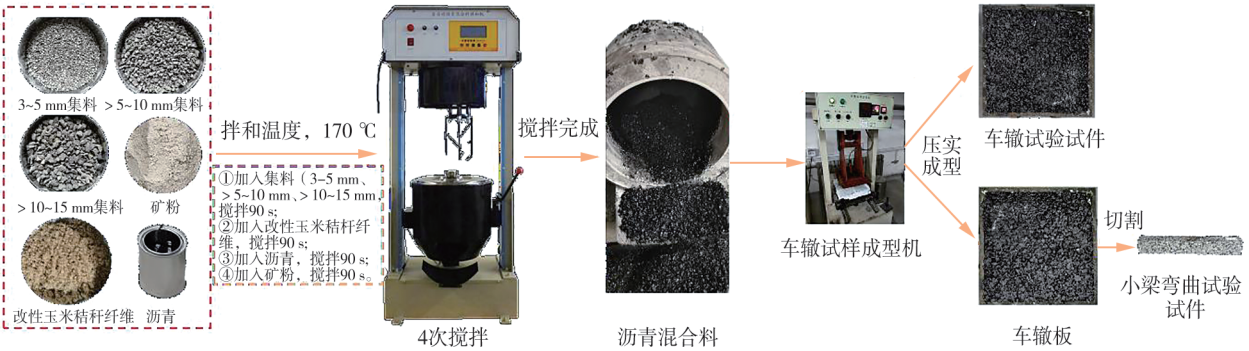


图 2 车辙试验、低温小梁弯曲试件制备流程

2 车辙试验与结果分析

2.1 车辙试验

根据文献[15]中 T0719—2011 试验方法,对改性玉米秸秆纤维质量分数分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的 SMA-13 试件进行车辙试验。试件长 300 mm、宽 300 mm、高 50 mm,试验温度为 60 ℃,轮压为 0.7 MPa,往返碾压速度为 42 次/min,试验前试件在温度为 60 ℃的恒温箱中保温 6 h,试验仪器为自动车辙试验仪。

2.2 试验结果及分析

对改性玉米秸秆纤维质量分数 w 分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的 SMA-13 试件进行车辙试验,得到的动稳定度 E_{DS} 结果如表 6 所示,同一纤维质量分数下分别进行 3 次平行试验,试验结果取平均动稳定度 $\overline{E_{DS}}$,并计算标准差 σ 。

表 6 不同质量分数改性玉米秸秆纤维 SMA-13 沥青混合料的动稳定度

$w / \%$	$E_{DS} / (\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$			$\overline{E_{DS}} / (\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\sigma / (\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$
	第 1 次平行试验	第 2 次平行试验	第 3 次平行试验		
0	2 856	2 724	2 937	2 839	106.6
0.2	3 522	3 683	3 418	3 541	132.3
0.4	4 286	4 194	4 324	4 268	65.3
0.6	3 879	4 025	3 754	3 886	135.7
0.8	3 253	3 129	3 386	3 256	128.9

由表 6 可知:随改性玉米秸秆纤维质量分数的增大,改性玉米秸秆纤维 SMA-13 试件的动稳定度先增大后减小;改性玉米秸秆纤维质量分数分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的 SMA-13 试件的平均动稳定度分别是无纤维 SMA-13 试件的 1.25、1.50、1.37、1.15 倍。当改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%时, SMA-13 试件的动稳定度最大,抗车辙性能最好,表明材料内部形成最佳的骨架支撑结构,在应力作用下抵抗变形的能力更强。改性玉米秸秆纤维质量分数大于 0.4%时, SMA-13 试件的动稳定度开始减小,主要原因是过多纤维团聚引入更多空隙,降低沥青的包裹性,导致骨架结构失衡,材料内部受力分布不均匀,抗车辙能力降低。改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2%时, SMA-13 试件的动稳定度比无纤维 SMA-13 试件有所提高,但未达到最佳增强效果,少量纤维能改善沥青混合料结构,但未形成足够强度的空间支撑体系。加入适量改性玉米秸秆纤维后,沥青混合料的结构稳定性提高,抗车辙能力增强:在物理层面,纤维形成空间网络结构,提高沥青混合料的骨架支撑能力,增强抗流动变形能力^[19];在化学层面,纤维表面的极性基团与沥青分子相互作用,增强沥青膜的包裹性,提高沥青的黏附性能^[20];在微观层面上,改性玉米秸秆纤维使沥青基质更均匀地填充到矿料骨架间隙中,提高沥青混合料的整体刚度和抗流动性。

3 低温小梁弯曲试验与结果分析

3.1 低温小梁弯曲试验

SMA-13 试件中掺加改性玉米秸秆纤维的质量分数分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,通过轮碾压制成标准车辙板试件,试件置室温下冷却 24 h 脱模后,切割为长 250 mm、宽 30 mm、高 35 mm 的棱柱体小梁试件。将待测小梁试件置于高、低温试验箱中,分别在试验温度 -5、-10、-15 ℃下保温 5 h。采用 IPC Global AsphaltQube 多功能沥青测试机进行低温小梁弯曲试验,跨径为 (200.0 ± 0.5) mm,加载速率为 50 mm/min。

3.2 试验结果及分析

加载过程中保持加载速率不变,直至小梁试件破坏,同一改性玉米秸秆纤维质量分数下进行3次平行试验,根据试验结果,分别计算改性玉米秸秆纤维不同质量分数下试件的弯拉强度

$$\sigma_b = 3F_{\max}L/(2bh^2), \quad (1)$$

式中: L 为试件跨径, $F_{\max}$ 为试件破坏时的最大荷载, b 为试件跨中断面宽度, h 为试件跨中断面高度。

弯拉应变

$$\varepsilon_b = 6hd/L^2, \quad (2)$$

式中 d 为试件破坏时的跨中挠度。

弯曲劲度模量

$$D = \sigma_b / \varepsilon_b. \quad (3)$$

根据试验数据,计算改性玉米秸秆纤维不同质量分数下 SMA-13 试件在不同试验温度 t (-5、-10、-15℃)下的低温小梁弯曲试验结果,如表7所示。对 σ_b 、 ε_b 、 D 进行数据处理,即改性玉米秸秆纤维质量分数分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的 SMA-13 试件的 σ_b 、 ε_b 、 D 分别与未掺加改性玉米秸秆纤维的 SMA-13 试件(基准组)的 σ_b 、 ε_b 、 D 之比记作 x_{σ_b} 、 x_{ε_b} 、 x_D 结果如表8所示。

表7 不同温度、不同改性玉米秸秆纤维质量分数下试件低温小梁弯曲试验结果

$w/\%$	σ_b/MPa			$\varepsilon_b/10^{-6}$			D/MPa		
	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	8.90	9.90	11.20	3 245.42	2 728.95	2 401.48	2 742.33	3 628.52	4 663.79
0.2	9.80	10.26	11.50	2 835.38	2 442.30	2 149.73	3 456.33	4 201.46	5 349.51
0.4	9.50	11.34	12.90	2 754.23	2 584.58	2 381.64	3 449.24	4 387.09	5 370.45
0.6	9.20	10.42	12.00	2 978.85	2 570.40	2 264.77	3 088.44	4 052.41	4 963.21
0.8	8.60	9.76	10.50	3 056.34	2 578.80	2 054.34	2 813.82	3 782.81	4 639.65

表8 不同温度、不同改性玉米秸秆纤维质量分数下试件的低温小梁弯曲试验结果数据处理结果

$w/\%$	x_{σ_b}			x_{ε_b}			x_D		
	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.2	1.101	1.036	1.027	0.874	0.895	0.895	1.260	1.158	1.147
0.4	1.067	1.145	1.152	0.849	0.947	0.992	1.258	1.209	1.161
0.6	1.034	1.053	1.071	0.918	0.942	0.943	1.126	1.117	1.136
0.8	0.966	0.986	0.938	0.942	0.945	0.855	1.026	1.043	1.096

由表7、8可知:温度相同时,随改性玉米秸秆纤维质量分数的增大,试件的弯拉强度和弯曲劲度模量先增大后减小,弯拉应变大致先减小后增大,主要原因是适量改性玉米秸秆纤维通过桥接效应抑制微裂缝扩展,提高弯拉强度与弯曲劲度模量,但过量改性玉米秸秆纤维因团聚形成局部应力集中点,削弱界面结合力,导致弯拉强度减小。改性玉米秸秆纤维网络阻碍沥青流动,初始降低弯拉应变,改性玉米秸秆纤维质量分数较大时因缺陷增多释放局部应变;改性玉米秸秆纤维质量分数相同时,随试验温度降低,SMA-13试件的弯拉强度和弯曲劲度模量增大,弯拉应变减小,原因是降温使沥青基质脆化,分子链段运动受限,导致弯拉强度与弯曲劲度模量增大,但材料延性急剧减小,改性玉米秸秆纤维在低温下通过界面锚固延缓脆性断裂,故弯曲劲度模量增幅更显著。

改性玉米秸秆纤维对沥青混合料低温弯曲性能的影响呈非线性与温度协同效应,具体表现为:改性玉米秸秆纤维质量分数为0.4%,在试验温度分别为-5、-10、-15℃时,弯拉强度比基准组增大6.7%、

14.5%、15.2%，增幅随温度减小而增大，凸显低温增强优势；改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.8%，试验温度为-15℃时，弯拉强度降至 10.50 MPa，比基准组减小 6.2%，弯拉应变比基准组减小 14.4%，反映过量改性玉米秸秆纤维削弱界面强度。改性玉米秸秆纤维普遍抑制延性，但改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%，试验温度为-15℃时，SMA-13 试件的弯拉应变为 $2\,381.64\times 10^{-6}$ ，仅比基准组减小 0.8%，降幅显著小于其他试验组，表明适量改性玉米秸秆纤维可缓解低温脆性。改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%，试验温度为-10℃时，弯曲劲度模量为 4 387.09 MPa，比基准组增大 20.9%；试验温度为-15℃，弯曲劲度模量比基准组增大 15.2%，表明改性玉米秸秆纤维增韧效应在试验温度约-10℃时达峰值。最优改性玉米秸秆质量分数为 0.4%，在增大弯拉强度与刚度的同时，最大程度保留低温延展性，实现综合性能平衡。

4 讨论与分析

4.1 动稳定度分析

为量化改性玉米秸秆纤维不同质量分数对沥青混合料高、低温性能的影响规律，采用单因素方差分析评估车辙试验动稳定度 E_{DS} 的组间差异，方差分析结果如表 9 所示。由表 9 可知：不同改性玉米秸秆纤维质量分数对 SMA-13 试件动稳定度 E_{DS} 的影响差异极显著 ($F=66.47, P<0.000\,1$)，组间平方和 (3 657 414) 占总变异的 96.37%，表明改性玉米秸秆纤维质量分数是动稳定度差异的主要来源，组内变异为 3.63%，标准差为 65.3~135.7 次/mm，反映试验数据重复性良好。改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 的 SMA-13 试件平均动稳定度最大，且标准差最小，数据一致性最优；改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6% 的标准差较大。改性玉米秸秆纤维质量分数对动稳定度的调控作用极强。

表 9 方差分析结果

方差来源	自由度	平方和	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
间	4	3 657 414	914 353.5	66.47	<0.000 1
组内	10	137 540	13 754.0		
合计	14	3 794 954			

注：1. *F* 值为方差分析中的统计量，比较组间变异与组内变异的相对大小。
2. *P* 值为检验统计假设的显著性水平，表示在假设为真时得到观察结果或更极端结果的概率；
 $P<0.05$ 时可拒绝原假设，认为变量间存在显著差异。

4.2 效应量分析

采用效应量评估掺加改性玉米秸秆纤维 SMA-13 试件与基准组的差异强度，计算公式为：

$$E_d=(\bar{x}-1)/\sigma, \tag{4}$$

式中 $\bar{x}$ 为 x_{σ_b} 、 x_{ε_b} 、 x_D 在同一改性玉米秸秆纤维质量分数下不同温度的平均值。

结合效应量解析低温小梁弯曲试验中 σ_b 、 ε_b 、 D 的显著性变化。 σ_b 、 ε_b 、 D 效应量结果如表 10 所示，通过逆向分析表 10 中的标准差数据，提出纤维分散均匀性指数 E_{FDI} ，量化纤维团聚程度。

表 10 不同改性玉米秸秆纤维质量分数下 σ_b 、 ε_b 、 D 效应量结果

<i>w</i> /%	$\bar{x}_{\sigma_b}$	σ_{σ_b}	Δ_1 /%	E_{d1}	$\bar{x}_{\varepsilon_b}$	σ_{ε_b}	Δ_2 /%	E_{d2}	$\bar{x}_D$	σ_D	Δ_3 /%	E_{d3}
0.2	1.055	0.057	5.5	0.962	0.888	0.017	-11.2	-6.411	1.188	0.088	18.8	2.132
0.4	1.122	0.066	12.2	1.836	0.929	0.104	-7.1	-0.684	1.210	0.068	21.0	3.074
0.6	1.053	0.027	5.3	1.986	0.934	0.020	-6.6	-3.266	1.127	0.013	12.7	9.590
0.8	0.963	0.034	-3.7	-1.075	0.914	0.072	-8.6	-1.197	1.055	0.051	5.5	1.070

注： σ_{σ_b} 、 σ_{ε_b} 、 σ_D 分别为 σ_b 、 ε_b 、 D 的标准差， Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别为 σ_b 、 ε_b 、 D 的变化率， E_{d1} 、 E_{d2} 、 E_{d3} 为 σ_b 、 ε_b 、 D 的效应量。

由表 10 可知:改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 组的试件平均弯拉强度最大,抗拉强度显著提高;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6% 的试件平均弯拉强度略低,但 E_d 最大,与较低的标准差有关;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.8% 的试件弯拉强度减小,表明掺加过量改性玉米秸秆纤维对弯拉强度产生负面影响。

改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 下,试件的平均弯拉应变均低于基准组。改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2% 的试件负效应最强,改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6% 的试件次之,掺加改性玉米秸秆纤维显著降低沥青混合料延展性;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 试件的弯拉应变下降幅度最小,但效应量不显著。

改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2% 试件的弯曲劲度模量比基准组略增,改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 试件的弯曲劲度模量增幅最显著,改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6% 试件的效应量最高,原因是极低标准差放大了统计差异;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.8% 试件的平均弯曲劲度模量增幅最小,效应量较弱,表明掺加过量改性玉米秸秆纤维会削弱劲度模量提高效果。

4.3 纤维分散均匀性评价

一般多采用单一指标,如动稳定度或弯拉强度,分析纤维质量分数对沥青混合料性能的影响,但纤维团聚或分散不均导致性能波动与界面缺陷,难以通过常规试验直接表征。标准差反映性能数据的离散程度,离散性越大表明纤维分布越不均匀,纤维质量分数的增大会加剧团聚效应,指数函数可放大高质量分数下分散性恶化的非线性影响。引入低温小梁弯曲试验中关键性能参数(σ_b 、 ε_b 、 D)的标准差与纤维质量分数,纤维分散均匀性指数 E_{FDI} 综合表征纤维分散性对多性能稳定性的影响, E_{FDI} 较小表明纤维分散不均,导致性能参数波动。

纤维分散均匀性指数

$$E_{FDI} = 0.3\sigma_{\sigma_b}\sigma_{\varepsilon_b}\sigma_D e^{0.4w} \quad (5)$$

根据式(5)计算表 10 中标准差数据的纤维分散均匀性指数,结果如表 11 所示。由表 11 可知:改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 时,纤维分散均匀性指数最大,为 1.042,表明改性玉米秸秆纤维分散均匀性最好,与相同纤维质量分数下试件的动稳定度(4 268 次/mm)、弯拉强度(较基准组提高 15.2%)、弯曲劲度模量(较基准组提高 20.9%)的最优性能一致;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.2% 时,纤维分散均匀性指数偏小,仅为 0.472,改性玉米秸秆纤维质量分数较小时,增韧效果有限,延性约束不足;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.6% 时,纤维分散均匀性指数最小,为 0.280,表明改性玉米秸秆纤维网络松散,性能波动性低,增韧效果弱化;改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.8% 时,表明改性玉米秸秆纤维过量引发局部团聚,沥青混合料性能波动。

表 11 纤维分散均匀性指数计算结果

$w/\%$	σ_{σ_b}	σ_{ε_b}	σ_D	E_{FDI}
0.2	0.057	0.017	0.088	0.472
0.4	0.066	0.104	0.068	1.042
0.6	0.027	0.020	0.013	0.280
0.8	0.034	0.072	0.051	0.843

5 结论

制备改性玉米秸秆纤维质量分数分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 的 SMA-13,进行车辙试验、低温小梁弯曲试验,研究纤维质量分数对沥青混合料高、低温性能的影响及纤维的分散均匀性。

1) 改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 时,SMA-13 试件的动稳定度最大,为 4 268 次/mm,标准差最小(65.3 次/mm),表明其形成最优骨架支撑结构,抗车辙能力最强;改性玉米秸秆纤维质量分数大于 0.4% 时,试件的动稳定度逐渐减小,原因是过量掺加改性玉米秸秆纤维导致纤维团聚,引起空隙率增大及骨架结构失衡,试件的抗车辙能力减小。

2) 改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4% 时,SMA-13 试件的低温弯拉强度和弯拉应变显著提高,弯

拉强度的效应量为 1.836, 试验温度为 -15°C 时试件的弯拉强度比基准组增大 15.2%, 弯拉应变仅比基准组减小 0.8%, 试验温度为 -10°C 时试件的弯曲劲度模量比基准组增大 20.9%。改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.8%, 试验温度为 -15°C 时, 试件的弯拉强度比基准组减小 6.2%, 效应量为 -1.075 , 弯拉应变比基准组减小 14.4%, 效应量为 -1.197 , 表明改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%时可在弯拉强度、刚度与延性间实现最优平衡, 过量纤维削弱性能增益。

3) 采用纤维分散均匀性指数表征纤维分散性对多性能稳定性的影响, 在改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%时纤维分散均匀性指数最大, 为 1.042, 表明纤维分散性最好, 且与高、低温试验结果一致, 证明纤维分散均匀性指数的有效性。

改性玉米秸秆纤维质量分数为 0.4%的 SMA-13 的高温抗车辙能力、低温弯拉强度及劲度模量增大, 对弯拉应变的抑制最小, 综合性能最优, 改性玉米秸秆纤维通过物理网络支撑、化学界面作用及均匀分散机制, 显著优化沥青混合料的高、低温性能, 纤维分散均匀性指数可有效量化纤维分散均匀性与性能波动的耦合效应。

参考文献:

- [1] 李倩, 王旭东, 周兴业, 等. 沥青混合料高温性能转变特征及抗车辙指标构建[J/OL]. 西南交通大学学报. (2025-03-24)[2025-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20250324.1448.006.html>.
- [2] 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.
- [3] LIU Z, SUN L, LI J, et al. Effect of key design parameters on high temperature performance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 1-11.
- [4] 郭彦强, 向豪, 徐鹏, 等. 植物纤维增强沥青混合料性能试验研究[J]. 现代化工, 2024, 44(增刊 1): 129-131.
- [5] 姚华彦, 王旭洋, 扈惠敏, 等. 玄武岩纤维增强沥青混合料的抗裂性能[J]. 公路, 2024, 69(6): 285-292.
- [6] 王修山, 周恒宇, 沈森杰, 等. 纤维增强聚合物改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 54-59.
- [7] 余锦耀. 秸秆纤维沥青混合料优化设计及路用性能评价[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(1): 48-50.
- [8] 曲璐, 王琨, 朱玉珠, 等. 改性玉米秸秆纤维 SMA-13 路用性能试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(1): 68-73.
- [9] 王明华, 张建超, 刘儒成, 等. 玉米秸秆纤维改性沥青混合料试验研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(8): 95-99.
- [10] 彭开兴. 玉米秸秆纤维微观特性对其沥青胶浆粘弹特性影响研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2023.
- [11] 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.
- [12] 徐豪, 王琨, 樊丽然, 等. 新型沥青混合料掺加料玉米秸秆纤维的制备工艺及改性方法[J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(2): 102-108.
- [13] 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.
- [14] 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/OL]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版). (2025-07-02)[2025-08-11]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1379.n.20250702.0945.004>.
- [15] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [16] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG 3432—2024[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
- [17] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会(SAC/TC 223). 沥青路面用纤维: JT/T 533—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [18] 朱玉珠. NaOH 改性玉米秸秆纤维沥青胶浆及其 SMA-13 混合料性能研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2023.
- [19] MOHAMMED M, PARRY T, THOM N, et al. Microstructure and mechanical properties of fibre reinforced asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117932. 1-117932. 17.
- [20] ZHAO H, LI G, MA Y W, et al. Long-term performance of chemically modified cotton straw fibers in micro-surfacing asphalt mixtures[J]. Microelectronics Journal, 2024, 20: e03294.
- [21] 黄小夏. 秸秆纤维改性沥青混合料的试验及应用研究[J]. 西部交通科技, 2019(12): 22-25.

Effect of modified corn straw fiber on the performance of asphalt mixture and the evaluation method for its dispersion uniformity

LI Qiangfei¹, WANG Kun^{1}, XIE Dandan¹, SUN Xingchen¹,
JIANG Ziyu¹, GUO Renliang², LIU Yingchang²*

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Hi-Speed Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: To study the effect of the quality fraction of modified corn straw fibers on the high and low temperature performance of asphalt mixtures and the uniformity of fiber dispersion, asphalt mastic stone mixture (stone mastic asphalt, SMA) with modified corn straw fiber quality fractions of 0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8% are prepared. Rutting tests and low-temperature beam bending tests (-5 , -10 , -15 °C) are conducted, and variance analysis (with a variance statistic of 66.47 and a probability of less than 0.000 1) and effect size analysis are performed. Combined with the standard deviations of low-temperature tensile strength, bending stiffness modulus, and tensile strain, as well as the quality fraction of modified corn straw fibers, a fiber dispersion uniformity index is proposed. The results show that when the quality fraction of modified corn straw fibers in the asphalt mixture is 0.4%, the dynamic stability is maximized at 4 268 times/mm, which is an increase of 50.4% compared to the control group without modified corn straw fibers. The low-temperature tensile strength and tensile strain are significantly improved, while the reduction in bending stiffness modulus is minimal, indicating an optimal balance between tensile strength, stiffness, and ductility. The dispersion uniformity index is maximized at 1.042, reflecting the best fiber dispersion, consistent with the results of high and low temperature tests.

Keywords: modified corn straw fiber; asphalt mixture; high and low temperature performance; single factor analysis; effect size analysis; fiber dispersion uniformity index

(责任编辑:王惠)