doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202601001

蔗渣纤维制备工艺及其沥青胶浆流变行为

刘卫东[1],艾玉春[2],熊剑平[1],张学磊[3],王博韬[4],李祖仲[4]

1. 广西交科集团有限公司 广西道路结构与材料重点实验室, 广西 南宁　530007;
2. 桂林电子科技大学 科学技术发展研究院, 广西 桂林　541004;
3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津　300222;
4. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安　710064

摘要:为提升蔗渣纤维的工程适用性并揭示其增强沥青胶浆流变性能的机制,基于Image-Pro Plus 6.0图像分析系统研究了湿法制备工艺(料水比1∶5、1∶10,剪切时间30~120 s),结合动态剪切流变仪和弯曲梁流变仪探究了纤维形态与流变行为的关联性。提出了浸泡预处理协同动态剪切调控的创新策略,浸泡24 h通过破坏氢键网络软化纤维结构,促使剪切模式由脆性断裂转为层间滑移,制备出长径比5.79、1~6 mm占比82.4%的均质纤维。流变试验表明,掺入3%蔗渣纤维的沥青胶浆车辙因子提升至6.56 kPa(58 ℃),劲度模量达726 MPa(-24 ℃),性能提升源于纤维界面粘结增强与应力分散效应。与木质纤维相比,其综合性能略低,主因后者长径比更高及疏水性优化了三维网络致密性。

关键词:沥青路面;蔗渣纤维;湿法制备;流变行为;界面增强

中图分类号:U416.217　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2026)01-0001-10

Preparation Process of Bagasse Fiber and Rheological Behavior of Asphalt Mastic

LIU Weidong[1], AI Yuchun[2], XIONG Jianping[1], ZHANG Xuelei[3], WANG Botao[4], LI Zuzhong[4]

1. Guangxi Key Laboratory of Road Structure and Materials, Guangxi Transport Science and Technology Group Co. Ltd., Nanning Guangxi　530007, China;
2. Institute of Science and Technology Development, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi　541004, China;
3. Tianjin Port Engineering Institute Co. Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Tianjin　300222, China;
4. School of Materials Science and Engineering, Chang′an University, Xi′an Shaanxi　710064, China

Abstract:To enhance the engineering applicability of bagasse fiber and elucidate its mechanism in reinforcing the rheological properties of asphalt mastic, this study investigated the wet preparation process (solid-to-water ratios: 1∶5, 1∶10; shearing times: 30~120 s) using the Image-Pro Plus 6.0 image analysis system. The correlation between fiber morphology and rheological behavior was further analyzed via Dynamic Shear Rheometer and Bending Beam Rheometer. An innovative strategy of pre-soaking combined with dynamic shearing regulation was proposed: 24-hour soaking disrupted hydrogen bonds to soften the fiber structure, transforming the shearing mode from brittle fracture to interlayer slippage, thereby producing homogeneous fibers with an aspect

收稿日期:2025-12-03

基金项目:广西自然科学基金面上项目(2024GXNSFAA010308);南宁市重点研发计划项目(20223039);广西交通运输科技成果推广项目(GXJT-ZDSYS-2023-03-01)。

作者简介:刘卫东(1985—),男,湖南邵阳人,高级工程师,博士,主要研究方向为新型道路材料。

ratio of 5.79 and 82.4% of fibers in the 1~6 mm range. Rheological tests demonstrated that adding 3% bagasse fibers increased the asphalt mastic′s rutting factor to 6.56 kPa (at 58 °C) and stiffness modulus to 726 MPa (at -24 °C), attributed to enhanced interfacial bonding and stress dispersion. However, its overall performance slightly lagged behind wood fiber due to the latter′s higher aspect ratio and hydrophobicity-optimized three-dimensional network densification.

Keywords: asphalt pavement; bagasse fiber; wet preparation; rheological behavior; interfacial enhancement

农林废弃物的资源化利用是推动绿色交通基础设施建设的重要方向。甘蔗是制糖工业的重要原料之一,据统计,国内甘蔗制糖年产量超过1亿t,广西是我国甘蔗种植的主要地区,其甘蔗产量占全国甘蔗总产量的65%以上,制糖副产物蔗渣年产量超过1 000万t[1]。蔗渣在燃料发电、饲料加工、栽培基质、板材、造纸及环保餐具等领域不断延伸,蔗渣环保化、高值化及资源化循环利用是未来的发展方向。近年来,研究人员发现蔗渣作为植物纤维可增强沥青混合料的路用性能,蔗渣纤维具有替代传统木质纤维的潜力,可减少对林业木材的依赖,降低纤维材料成本,助推蔗渣固废在道路领域的资源化利用,符合绿色交通基础设施建设与低碳可持续发展的战略需求。Li等[2]研究发现蔗渣纤维内部存在纤维管束可吸附沥青轻质组分,其表面粗糙纹理也可增强纤维与沥青的界面黏附力,适量的蔗渣纤维分散至沥青胶结料中提高了其混合料的高温稳定性和低温抗裂性。何壮彬等[3]、覃峰[4]指出蔗渣纤维掺量对SMA-16体积参数和成型温度存在影响,掺入0.3%蔗渣纤维的SMA-16可确保其良好的施工性,混合料的级配类型及其公称粒径影响纤维掺量,通过浸水(冻融)劈裂、车辙试验评价蔗渣纤维超薄路面SMA-8的抗腐蚀性,并确定了最佳蔗渣纤维掺量为0.4%。杨猛[5]采用锥入度、动态剪切流变试验研究蔗渣纤维对橡胶沥青高温抗变形能力,结果表明:蔗渣纤维提高了橡胶沥青抗剪切变形能力,其提升效果优于传统木质纤维。为实现制糖副产物蔗渣、废胎胶粉及旧沥青混合料等多元固废协同利用,蒋鑫[6]研究了蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料的路用性能,提出了掺入蔗渣纤维的混合料,其高温稳定性和水稳定性分别提高了25%和9%。由于蔗渣纤维含有大量的亲水性官能团及其微观空腔结构存在吸附沥青和水分的双重性,研究人员开展了蔗渣纤维表面改性研究,文献[7-9]采用盐酸、氢氧化钠、次氯酸钠、硅烷偶联剂、乙酸酐、高锰酸钾等进行一元、二元及多元表面改性,实现了蔗渣纤维路用性能的提升。

综上所述,目前针对沥青路面用蔗渣纤维的研究主要聚焦于强化机理、路用性能及其表面改性等方面,缺少对蔗渣纤维制备工艺的研究,然而纤维制备工艺对纤维品质、混合料路用性能具有重要影响。当前纤维制备工艺以干法和湿法为主。干法工艺简单,但易因原料硬度高导致纤维过度粉碎;湿法则通过水分软化植物组织,结合机械剪切分散,更易获得均匀纤维[7]。然而,现有湿法工艺对蔗渣浸泡时间、料水比及剪切时间的协同作用研究不足,且对纤维性能与工艺参数的定量关系缺乏深入解析,导致纤维形态(如长度、长径比)难以满足规范要求。基于此,本研究通过浸泡预处理降低蔗渣硬度,结合动态剪切实现纤维精细化控制,系统探究料水比、剪切时间对纤维形态的耦合影响,提出蔗渣纤维制备工艺关键参数,基于动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)和弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)研究蔗渣纤维沥青胶浆流变行为,旨在为蔗渣纤维的规模化应用提供理论依据与技术支撑,助力“双碳”目标下道路材料的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 原料与设备

实验原料为广西某制糖厂提供的制糖副产物蔗渣,除杂、烘干后备用。蔗渣原材料为长条形,长度小于5 cm,宽度小于2 cm。在市场上购置的絮状木质纤维,其性能参数满足《沥青路面用纤维(JT/T 533—2020)》[10]的 要求,选用90#基质沥青,其主要技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》[11]的要求,具体如表1所示。采用高速剪切分散机,转速0~30 000 r/min,进行纤维制备。考虑本研究的制备工艺为机械高速剪切劈分,主要影响蔗渣纤维的长度和直径,制备纤维经105 ℃烘干后,通过光学显微镜及Image-Pro Plus 6.0图像分析系统表征纤维形态测定,利用Phenom(飞纳)台式扫描电镜

（SEM）研究纤维微观形貌特征。

1.2　制备工艺方案设计

根据植物纤维初始含水形态的差异，纤维制备工艺分为干法和湿法。干法制备工艺流程主要包括除杂、晾晒干燥、预处理及机械粉碎；湿法制备工艺在除杂后直接浸水，然后进行预处理、机械劈分、干燥及筛分等工序。甘蔗属于禾本科植物，细胞壁硬度较高，通过前期制备工艺探索表明，未浸泡的蔗渣硬度高，物料在机械高速剪切作用下变成粉末，无法满足沥青路面用纤维的尺寸要求；而采用湿法，蔗渣吸水后，其细胞组织软化，形成蔗渣和水混合物，在剪切力和水流耦合作用下蔗渣被剪切分散。因此，湿法适应于蔗渣纤维的加工。

在湿法工艺中，蔗渣原料在投入剪切设备前的状态分为干燥（未浸泡）和浸泡，其不同的状态也会影响纤维的加工质量。经过前期试验探索，基于室内试验设备的装置容器、干蔗渣蓬松状态及纤维质量，发现干燥后纤维产品50 g效果良好，因此选择蔗渣原料的质量为50 g。根据湿法工艺的基本流程，其后续工序为剪切加工，影响剪切加工效果的主要参数为设备容器水量和剪切时间，加水量影响纤维剪切速度，而剪切时间影响纤维的几何尺寸。因此，根据纤维原料的形态、工艺参数及预处理对剪切时间的影响，本研究设计基于预处理和动态剪切的两阶段工艺试验方案分别如表2和表3所示。

表1　90#沥青主要技术指标

Table 1　Main technical specifications of 90# asphalt

技术指标	数值
针入度（25 ℃，5 s，100 g）/0.1mm	92
15 ℃延度/cm	>100
软化点/℃	48.5

表2　未浸泡实验组（A组）

Table 2　Unsoaked group（Group A）

方案	干蔗渣/g	水/g	料水比	剪切时间/s
A1	50	250	1∶5	60
A2	50	250	1∶5	90
A3	50	250	1∶5	120
A4	50	500	1∶10	60
A5	50	500	1∶10	90
A6	50	500	1∶10	120

表3　浸泡24 h实验组（B组）

Table 3　24-hour soaked group（Group B）

方案	干蔗渣/g	湿蔗渣/g	水/g	料水比	剪切时间/s
B1	50	57.8	0	1∶0.15	30
B2	50	57.8	0	1∶0.15	60
B3	50	57.8	0	1∶0.15	90
B4	50	57.8	192.2	1∶5	30
B5	50	57.8	192.2	1∶5	60
B6	50	57.8	192.2	1∶5	90
B7	50	57.8	442.2	1∶10	30
B8	50	57.8	442.2	1∶10	60
B9	50	57.8	442.2	1∶10	90

1.3　测试方法

1.3.1　纤维性能

蔗渣纤维和木质纤维在化学组成与结构、形貌特征存在一定的差异，但是均为植物纤维。纤维可吸附沥青胶结料提升沥青胶浆的黏稠度，降低其高温流动性，确保沥青混合料在施工及应用过程中的稳定性。同时，纤维沥青混合料需高温拌和、压实作业，要求纤维在较高的温度下其性能不发生变化。基于蔗渣纤维在沥青混合料的高温环境和作用，以及前期研究成果[2,7]，蔗渣纤维的性能试验参考木质纤维行业标准，并主要测试其吸油性、耐热性等技术指标[10]，其中吸油率测试以煤油为介质测定纤维吸油倍数；耐热性测试采用210 ℃烘箱处理1 h，计算质量损失率。

1.3.2　纤维沥青胶浆流变行为

研究纤维沥青胶浆流变行为对揭示纤维掺入后对复合材料的高温抗车辙与低温抗裂作用机制具有重要意义。考虑到高掺量纤维在沥青结合料中分布不均匀，低掺量纤维在沥青胶浆中难以形成有效的空间网络结构，不利于抵抗高温剪切变形能力，参考文献[7]研究成果：当纤维掺量为3%时，胶结料的高低温路用性能最佳；同时本研究聚焦纤维制备工艺，故纤维掺量确定为3%。纤维沥青胶浆制备中纤维提前在60 ℃烘箱加热至恒重，纤维应分批次加入确保纤维不结团且分散均匀，其中基准组为无纤维。本研究的纤维沥青胶浆的流变测试包括高温和低温的流变性质试验，其中高温流变性质测试采用DSR，试验温度分别为58、64、70、76 ℃，频率为10 rad/s，主要测定其复合剪切模量G和相位角δ；低温流变性质采用BBR测试，试验温度分别为-12、-18、

-24 ℃,主要测定其弯曲劲度模量S和蠕变速率m。流变试验测试方法参考相关规范[12]。

2　结果与讨论

2.1　制备工艺对纤维形态的影响规律

掺入纤维的形态特征(如长度、直径)对混合料的性能具有重要影响[10]。长径比为纤维长度与直径之比,一般而言,一定单位体积内合理的长径比使得纤维在混合料中相互缠绕交织次数增多,分布稠密,增强混合料的性能,但是长径比过大意味着纤维长度大、直径小,可导致纤维在混合料成团时不易分散均匀或因直径小拉伸强度低,易断裂,严重影响了纤维在混合料的增强效果。为控制纤维的质量,现行规范明确了木质纤维的最大长度不超过6 mm的技术要求[10]。本研究采用Image-Pro Plus 6.0分析不同制备工艺方案下纤维的长度和直径比形态特征规律,提出基于长度分布的蔗渣纤维制备工艺。

2.1.1　未浸泡蔗渣纤维形态特征

使用光学显微镜拍摄未浸泡蔗渣纤维的形态效果如图1所示,利用Image-Pro Plus 6.0得到未浸泡蔗渣纤维形态量化分布如表4所示,平均长度、平均直径与剪切时间的关系分别如图2、图3所示,长度分布与剪切时间的关系如图4所示。



a A1料水比1∶5　　b A2料水比1∶5　　c A3料水比1∶5

d A4料水比1∶10　　e A5料水比1∶10　　f A6料水比1∶10

图1　未浸泡纤维形态

Fig. 1　Unsoaked fiber morphology

表4　未浸泡纤维形态量化特性

Table 4　Quantitative analysis of unsoaked fiber morphology

方案	平均长度/mm	平均直径/mm	长径比平均值	长度分布/%		
				0~1 mm	1~6 mm	>6 mm
A1	7.57	2.43	4.47	3.0	15.2	81.8
A2	5.06	1.69	4.03	28.8	57.6	13.6
A3	2.11	0.95	2.97	33.7	61.9	4.4
A4	6.43	3.05	5.15	6.2	29.2	64.6
A5	3.63	1.58	3.41	14.0	70.5	15.5
A6	1.97	0.92	2.86	37.6	59.9	2.5

由图2、图3可知,不论料水比是1∶5,还是1∶10,纤维的平均长度和平均直径均随剪切时间的增加而不断降低。由图4可知,0~1 mm的短纤维占比随着剪切时间增加而提高;大于6 mm的长纤维占比随着剪切时间增加而降低;1~6 mm的纤维占比在低料水比1∶5时随着剪切时间增加而提高,在高料水比1∶10时则是先随着剪切时间增加而提高,在剪切时间90 s时达到最大,然后随着剪切时间增加而降低。

上述数据表明,未浸泡蔗渣通过调整料水比

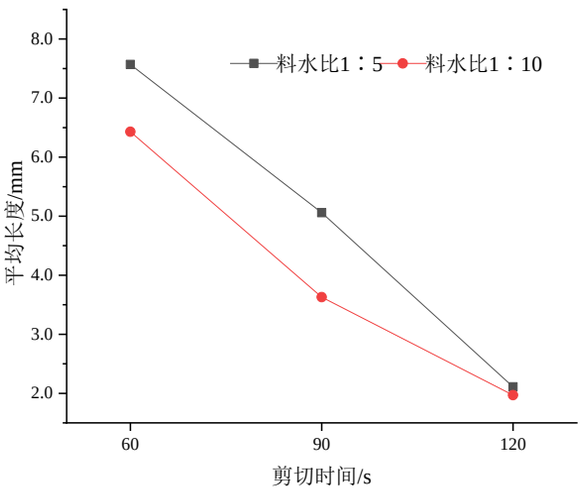


图 2　未浸泡纤维平均长度与剪切时间的关系

Fig. 2　Relationship between mean length of unsoaked fiber and shearing time

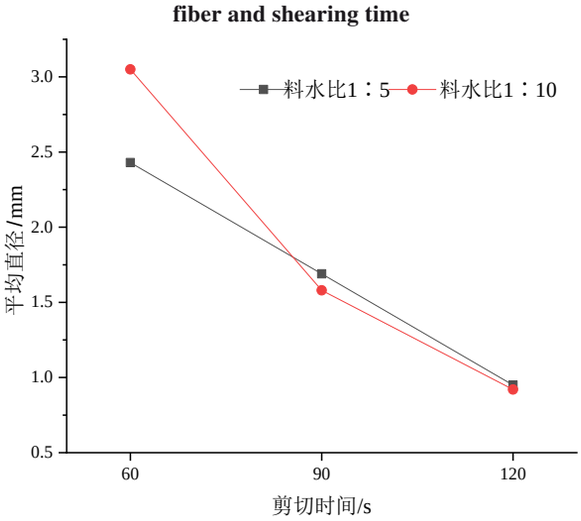
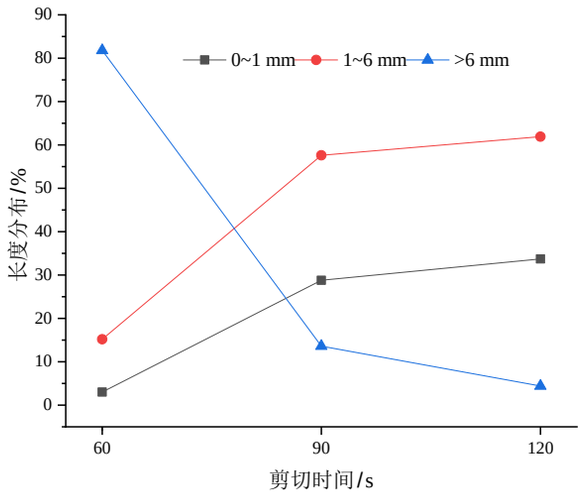
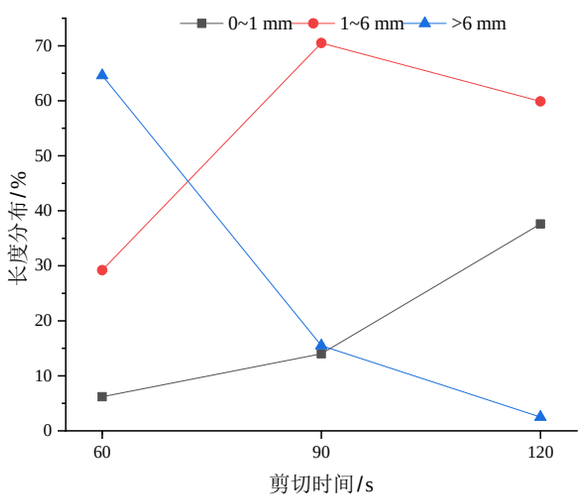


图 3　未浸泡纤维平均直径与剪切时间的关系

Fig. 3　Relationship between mean diameter of unsoaked fiber and shearing time



a　料水比 1∶5



b　料水比 1∶10

图 4　未浸泡纤维长度分布与剪切时间的关系

Fig. 4　Relationship between the length distribution of unsoaked fiber and shearing time

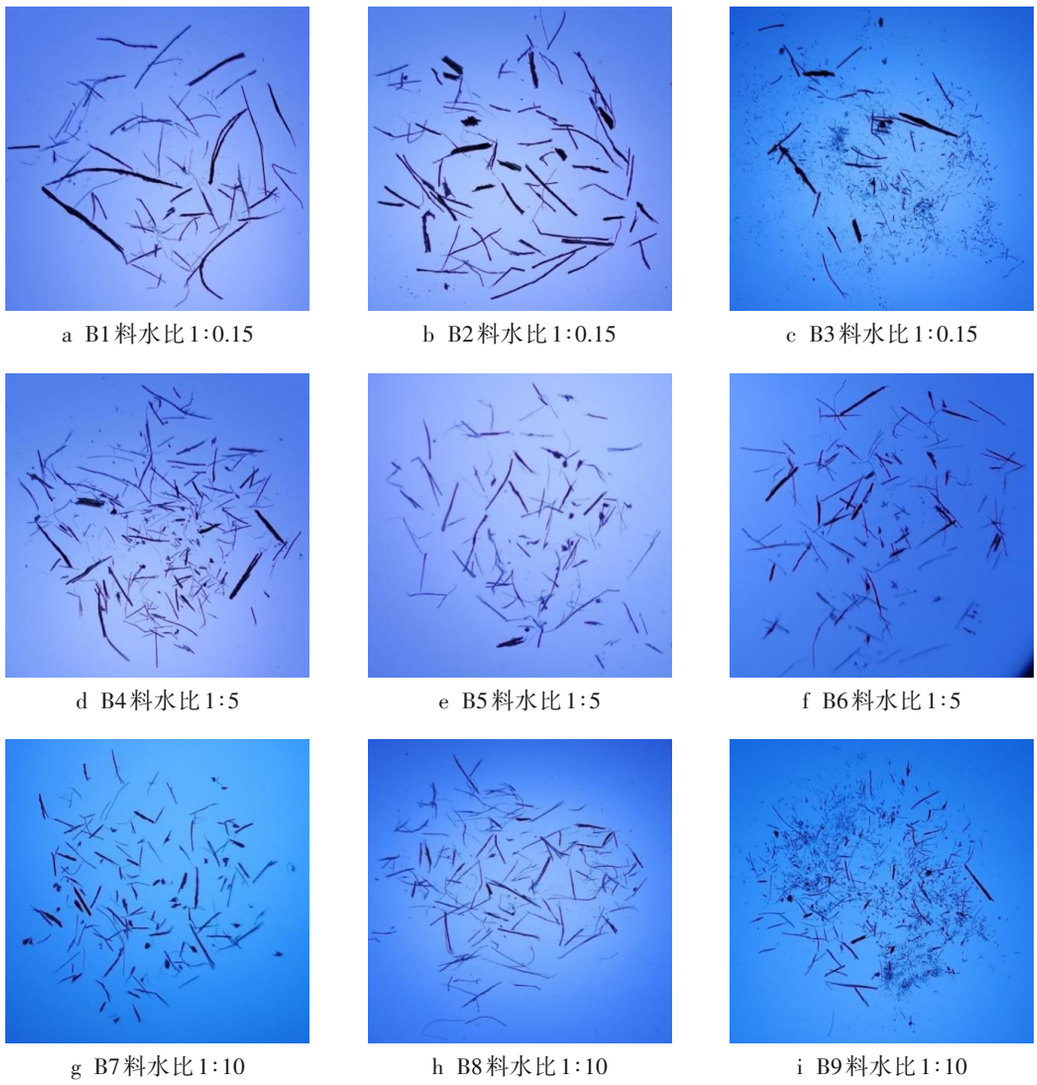
和剪切时间工艺参数可以获得符合规范（长度 1~6 mm 为主）的纤维产物。当剪切料水比 1∶10、剪切时间 90 s 时，制备工艺较优，1~6 mm 纤维占比 70.5%，但是纤维直径偏大（0.92~3.05 mm）且长纤维仍旧存在一定占比。因此，该方案是否为最优制备工艺，有待与浸泡纤维制备工艺进行比较。

2.1.2　浸泡后蔗渣纤维形态特征

针对浸泡 24 h 的蔗渣，使用光学显微镜拍摄浸泡蔗渣纤维的形态效果如图 5 所示，利用 Image-Pro Plus 6.0 得到浸泡蔗渣纤维形态量化分布如表 5 所示，平均长度、平均直径与剪切时间的关系分别如图 6、图 7 所示，长度分布与剪切时间的关系如图 8 所示。

由图 6、图 7 可知，不论料水比是 1∶0.15，还是 1∶5 或者 1∶10，纤维的平均长度和平均直径均随剪切时间的增加而不断降低，只是在料水比 1∶10 时，剪切 60 s 后的平均直径随剪切时间的增加而降低缓慢。由图 8 可知，0~1 mm 的短纤维在料水比 1∶0.15 与 1∶10 时，占比均随着剪切时间的增加而增大，在料水比 1∶5 时，占比随着剪切时间的增加呈现先增大后减小的趋势；1~6 mm 的纤维在料水比 1∶0.15 与 1∶10 时，占比均随着剪切时间的增加呈现先增大后减小的趋势，在料水比 1∶5 时，占比随着剪切时间的增加而增大；大于 6 mm 的长纤维，不论料水比是 1∶0.15，还是 1∶5 或者 1∶10，占比均随着剪切时间的增加而减小。

总体而言，浸泡后蔗渣纤维平均长度与平均直径均显著减小，但是剪切时间不足（如 30 s）将



a B1料水比1∶0.15　b B2料水比1∶0.15　c B3料水比1∶0.15

d B4料水比1∶5　e B5料水比1∶5　f B6料水比1∶5

g B7料水比1∶10　h B8料水比1∶10　i B9料水比1∶10

图5　浸泡纤维形态

Fig. 5　Morphology of soaked fibers

表5　浸泡纤维形态量化特性

Table 5　Quantitative characteristics of soaked fibers

方案	平均长度/mm	平均直径/mm	长径比平均值	长度分布/%		
				0~1 mm	1~6 mm	>6 mm
B1	8.75	1.51	10.07	2.4	42.8	54.8
B2	7.33	1.34	7.37	4.3	58.7	37.0
B3	1.85	0.74	2.94	27.1	57.1	15.8
B4	6.15	1.58	6.39	9.1	46.3	44.6
B5	4.42	1.14	5.84	13.0	56.5	30.5
B6	2.98	0.86	5.24	11.3	77.5	11.2
B7	3.99	1.01	5.25	5.6	81.1	13.3
B8	3.18	0.53	5.79	13.7	82.4	3.9
B9	1.56	0.51	4.12	29.6	70.4	0

导致长纤维残留(方案B1,>6 mm的占比54.8%),而过度剪切(90 s)则引发粉末化(方案B9,0~1 mm的占比29.6%)。通过综合比较未浸泡与浸泡条件下采用不同制备工艺参数获得1~6 mm纤维占比及纤维性能,推荐方案B8(料水比1∶10,剪切时间60 s)为最优工艺,其制备工艺流程如图9所示。

2.2　制备工艺对纤维形态的影响机理

2.2.1　未浸泡处理

未浸泡蔗渣的纤维制备受料水比与机械剪切协同作用影响。研究表明,蔗渣纤维的主要化学成分为木质素、纤维素和半纤维素[7]。干燥蔗渣纤维中的木质素与半纤维素组分交联形成刚性结构,在低料水比下,水分不足以软化纤维,剪切应力集中于局部区域,导致纤维断裂模式以脆

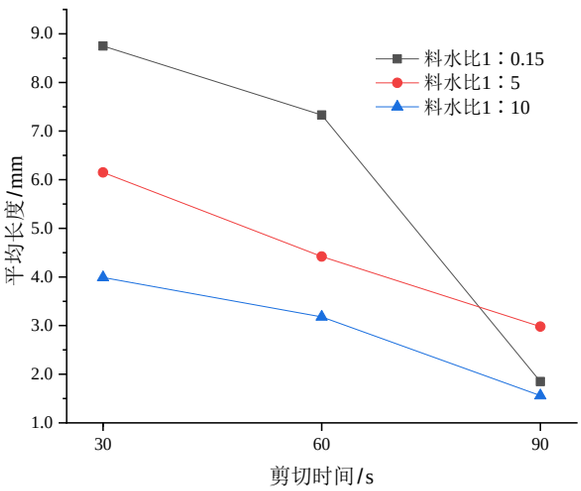


图 6　浸泡纤维平均长度与剪切时间的关系

Fig. 6　Relationship between mean length of soaked fiber and shearing time

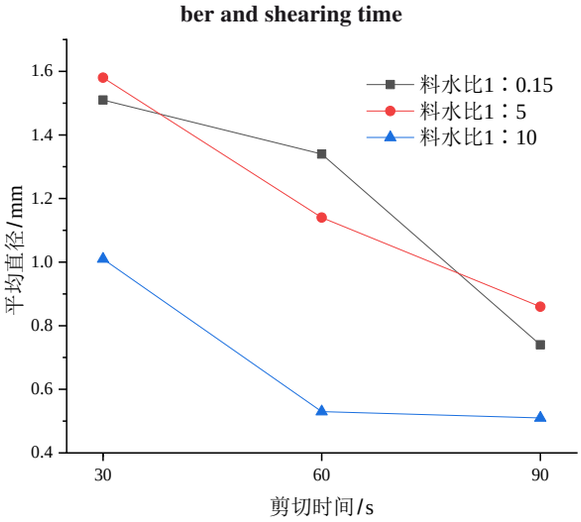
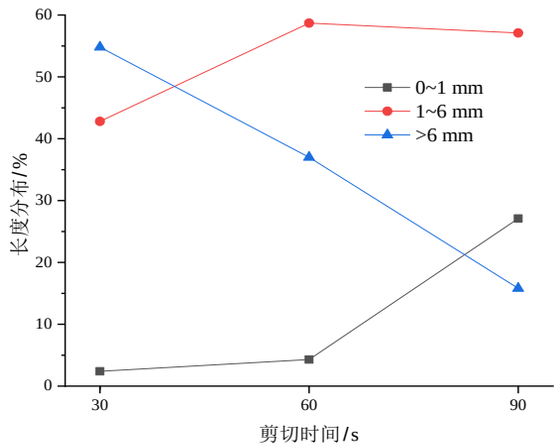


图 7　浸泡纤维平均直径与剪切时间的关系

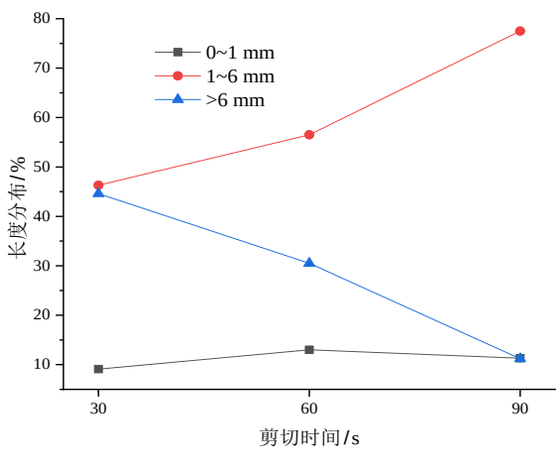
Fig. 7　Relationship between mean diameter of soaked fiber and shearing time

性断裂为主，短时间（60 s）剪切时，应力分布不均，纤维未充分解离，长纤维（>6 mm）残留率高（81.8%）；延长剪切时间（120 s）虽提升解离效率，但纤维反复受载引发次级断裂，粉末化比例显著上升（37.6%）。当料水比提高至 1∶10 时，水分渗透增强，纤维表面润滑作用降低摩擦热积累，但纤维内部刚性未改变，纤维剪切形式仍以表层剥离为主，导致平均直径增大（A4 方案：3.05 mm）。

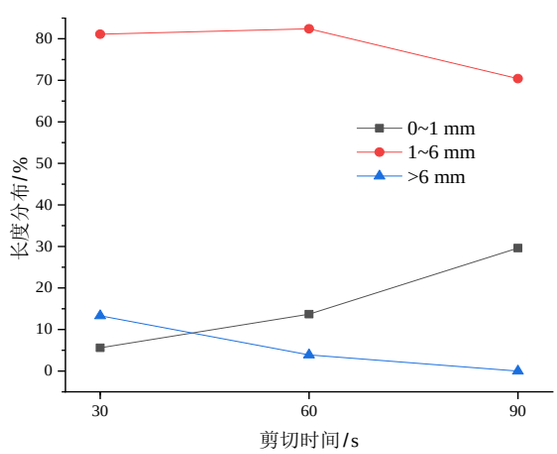
综上所述，未浸泡蔗渣化学组分中的纤维素-木质素复合结构未被破坏，机械剪切仅能调整纤维宏观形态，无法实现微观尺度解离，最终产物长径比低（2.86~5.15）且分布离散，难以满足工程要求。



a　料水比 1∶0.15



b　料水比 1∶5



c　料水比 1∶10

图 8　浸泡纤维长度分布与剪切时间的关系

Fig. 8　Relationship between the length distribution of soaked fiber and shearing time

2.2.2　浸泡处理

Zhang 等[13]研究表明，水分子进入纤维间隙，与纤维素/半纤维素的羟基形成新的氢键桥。这种“抢夺”作用导致原有的纤维素-纤维素氢键被

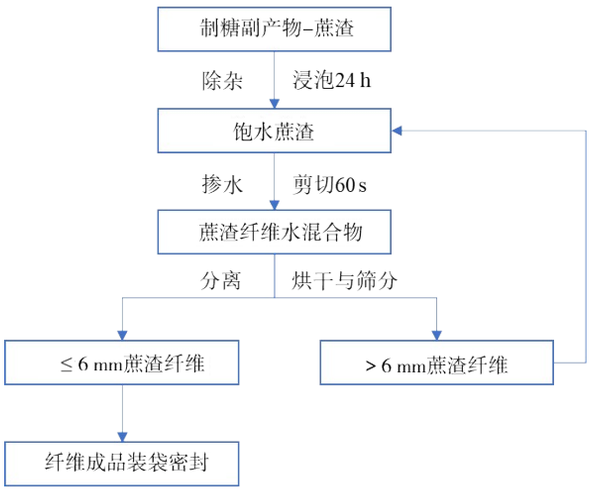


图9　基于纤维形态的蔗渣纤维制备工艺流程

Fig. 9　Process flow of bagasse fiber preparation based on fiber morphology

打断,FTIR(红外光谱)中自由羟基的伸缩振动峰强度显著增强。由此推测,本研究中纤维浸泡处理水分子可能渗透破坏蔗渣纤维的氢键网络,促使半纤维素部分水解,纤维素微纤丝间结合力减弱,赋予纤维更高韧性。在料水比1∶10条件下,充足水分进一步软化纤维,剪切应力均匀传递至纤维内部,引发层间滑移而非脆性断裂,短时剪切(30 s)下,纤维因塑性增强仅发生初步解离,残留长纤维(B1方案:54.8%);延长至60 s(B8方案)时,纤维沿薄弱界面(如胞间层)分离,形成长度1~6 mm、直径0.53 mm的均质产物,长径比提升至5.79;过度剪切(90 s)则因机械能输入超过纤维结合能阈值,导致微纤丝断裂,粉末占比急增(B9方案:29.6%)。浸泡后纤维的化学–力学协同作用,使剪切过程从"断裂主导"转为"解离主导",优化了纤维形态。

2.3　纤维性能

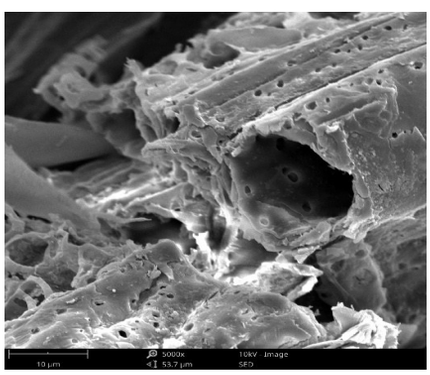
蔗渣纤维与木质纤维的主要性能指标检测结果如表6所示。由表6可知:1) 蔗渣纤维的吸油率为6.2倍、质量损失为4.7%,木质纤维的吸油率为7.6倍、质量损失为3.6%,都满足规范要求;2) 无论是吸油能力还是耐热性能,蔗渣纤维都比木质纤维的低。

表6　纤维主要技术性能

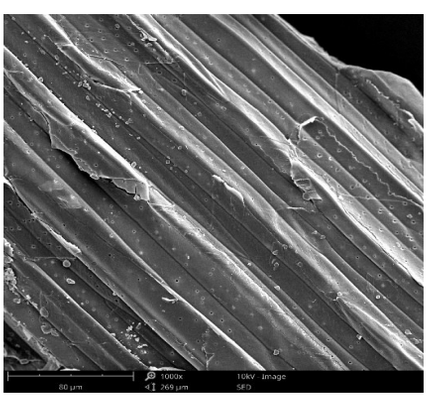
Table 6　Main technical properties of fibers

项目	蔗渣纤维	木质纤维	技术要求
吸油率/倍	6.2	7.6	5~9
质量损失/%	4.7	3.6	≤6,且无燃烧

植物纤维吸油能力的差异可能源于纤维比表面积与孔隙结构的差异。由图10蔗渣纤维微观形貌可知,禾本科植物蔗渣纤维内部存在传递水分的微导管,蔗渣纤维经机械剪切劈分后的平均直径为0.53~3.05 mm,显著大于木质纤维的0.02~0.15 mm,但蔗渣纤维表面致密光滑,比表面积小于木质纤维;此外,蔗渣纤维的微纤丝因木质素紧密包覆并呈层状堆叠,缺乏木质纤维的多级分支孔隙,吸附位点减少,纤维间隙增大,储油能力弱化。



a 横向



b 纵向

图10　蔗渣纤维微观形貌

Fig. 10　Microscopic morphology of bagasse fibers

在耐热性方面,木质纤维因木质素含量高,热稳定性更优;蔗渣纤维中的半纤维素含量较高[14],而蔗渣纤维的热损失主要源于半纤维素降解,但其损失率在工程容许范围内。

2.4　纤维沥青胶浆流变行为

2.4.1　动态剪切流变行为

相比基准组,在沥青胶结料掺入纤维后,其车辙因子显著提升,随温度升高呈衰减趋势,如表7、图11所示。基准组在58~76 ℃内的车辙因子从2.39 kPa降至0.27 kPa,而蔗渣纤维和木质素纤维的车辙因子分别从6.56 kPa降至0.81

表 7　沥青胶浆 DSR 试验

Table 7　DSR test of asphalt mastic

纤维类型	温度/℃	复合剪切模量 G/kPa	相位角 δ/(°)	车辙因子/kPa
基准	58	2. 38	85. 43	2. 39
	64	1. 22	86. 98	1. 22
	70	0. 55	88. 02	0. 55
	76	0. 27	88. 91	0. 27
蔗渣纤维	58	6. 43	78. 68	6. 56
	64	3. 53	79. 76	3. 59
	70	1. 85	80. 65	1. 88
	76	0. 8	81. 03	0. 81
木质纤维	58	7. 08	77. 84	7. 24
	64	4. 01	79. 19	4. 08
	70	2. 07	80. 05	2. 1
	76	1. 05	80. 46	1. 06

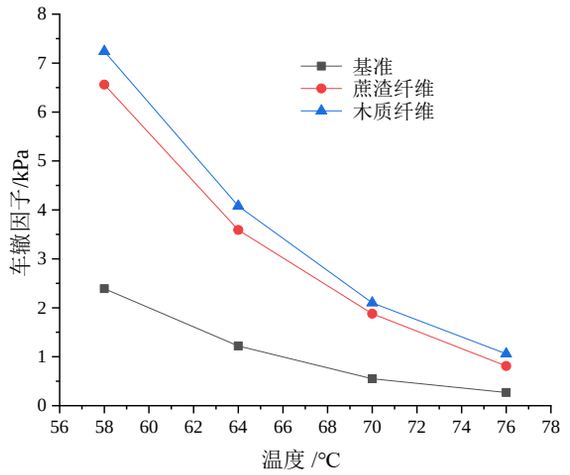
kPa、7. 24 kPa 降至 1. 06 kPa，表明纤维通过增强界面粘结和分散应力，有效抑制高温流动变形，提高了其高温稳定性。相位角随温度升高而增大，但添加纤维后，其数值显著降低，说明纤维增加了材料的弹性占比，减少黏性主导的不可逆变形。

相比蔗渣纤维，木质纤维沥青胶浆的高温稳定性更优。以 58 ℃为例，其车辙因子 7. 24 kPa 高于蔗渣纤维的 6. 56 kPa，相位角也较低，可能的原因是：1）木质纤维的长径比更高，形成更致密的三维网络结构，增强机械互锁；2）木质纤维的疏水性减少水分对界面粘结的弱化，而蔗渣纤维因半纤维素含量高，高温下易吸湿软化；3）木质纤维表面极性基团与沥青相容性更好，延缓应力松弛。

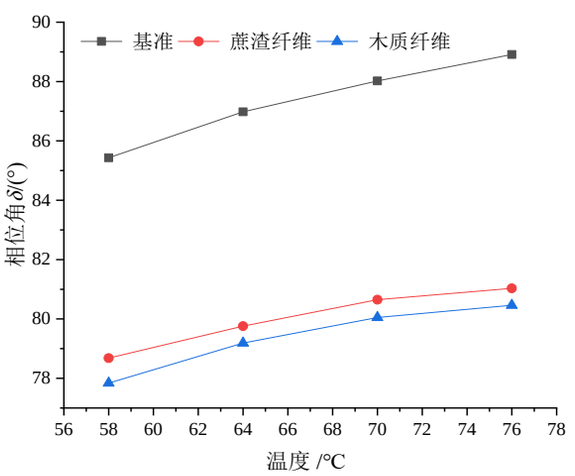
2. 4. 2　低温弯曲流变行为

沥青胶结料添加纤维后，劲度模量在低温下显著提升，且温度越低增幅越明显，如表 8、图 12 所示。基准组在 −12、−18、−24 ℃下的 S 值分别为 74. 5、318. 0、710. 0 MPa，而蔗渣纤维和木质素纤维的 S 值分别达到 85. 5 MPa~726. 0 MPa 和 83. 8 MPa~770. 0 MPa。纤维通过桥接微裂纹和限制分子链滑移，增强低温刚性。蠕变速率则随纤维添加而降低，基准组在 −24 ℃的 m 值为 0. 265，同一温度下蔗渣纤维和木质纤维的 m 值分别降至 0. 234、0. 232，表明纤维通过分散载荷延缓了低温脆性断裂。

与蔗渣纤维对比，木质纤维沥青胶浆的低温



a　车辙因子



b　相位角

图 11　沥青胶浆高温流变性

Fig. 11　High-temperature rheological properties of asphalt mastic

性能较优。−24 ℃时木质纤维沥青胶浆的 S 值高于蔗渣纤维，m 值也更低，可能的原因包括：1）木质纤维刚性骨架在低温下提供更强的支撑；2）木质纤维均匀分散形成连续网络，抑制了裂纹扩展的路径。

综上所述，纤维通过物理增强和界面优化显著提升材料高低温性能，木质纤维因结构稳定性和化学惰性优势，其综合性能稍优于蔗渣纤维，但是蔗渣纤维具有一定的经济效益，在既有加工能力下，相比木质纤维价格，蔗渣纤维可降低 20% 以上。因此，未改性的蔗渣纤维建议在二级及二级以下的非特重载交通公路中的沥青路面应用。

3　结论

本研究通过优化蔗渣纤维湿法制备工艺，明

表 8　沥青胶浆 BBR 试验
Table 8　BBR test of asphalt mastic

纤维类型	温度/℃	劲度模量 S/MPa	蠕变速率 m
基准纤维	−12	74. 5	0. 494
	−18	318. 0	0. 365
	−24	710. 0	0. 265
蔗渣纤维	−12	85. 5	0. 466
	−18	302. 0	0. 333
	−24	726. 0	0. 234
木质纤维	−12	83. 8	0. 449
	−18	308. 0	0. 342
	−24	770. 0	0. 232

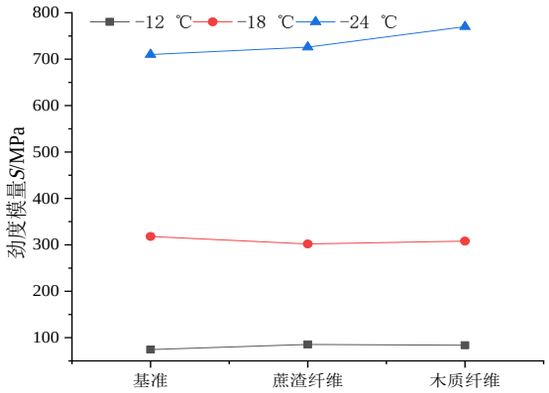
确了关键参数对纤维形态的调控作用,验证了蔗渣纤维对沥青胶浆高低温性能的增强效果,为其工程应用提供理论支持,主要研究结论如下:

1) 湿法制备中,浸泡预处理通过破坏蔗渣纤维氢键网络,显著提升剪切解离效率。料水比 1∶10、剪切时间 60 s(B8 方案)为最优工艺,纤维平均长度 3. 18 mm、长径比 5. 79 时,1~6 mm 纤维占比 82. 4%,满足规范要求。

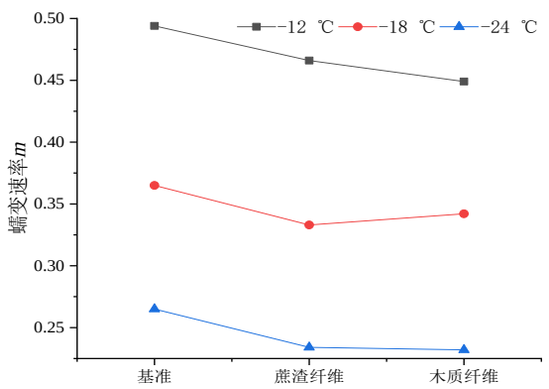
2) 蔗渣纤维吸油率(6. 2 倍)与耐热性(质量损失 4. 7%)符合标准,但其比表面积低、表面致密光滑导致吸油性与高温稳定性略低于木质纤维(吸油率 7. 6 倍,质量损失 3. 6%)。

3) 蔗渣纤维通过增强界面粘结与应力分散,使沥青胶浆车辙因子提升 174%~200%,劲度模量提高 15%~22%,但木质纤维因疏水性与三维网络结构优势,综合流变性能更优。

4)未改性的蔗渣纤维沥青胶浆的路用性能稍微逊于木质纤维的,建议应用于二级及二级以下公路,但蔗渣纤维环境效益显著、经济效益良好,具有替代传统木质纤维用于沥青混合料的潜力,尤其是改性蔗渣纤维,可提升路用性能并实现固废资源化,未来需进一步研究表面改性以优化其界面相容性及长期耐久性。



a 劲度模量



b 蠕变速率

图 12　沥青胶浆低温流变性
Fig. 12　Low-temperature rheological properties of asphalt mastic

参考文献:

[1] 王梦梦,李祖仲,庞萧萧,等. 蔗渣纤维应用研究进展[J]. 应用化工,2020,49(12):3132-3136. DOI:10. 16581/j. cnki. issn1671-3206. 2020. 12. 005.

[2] LI Z Z, ZHANG X L, FA C G, et al. Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118648.

[3] 何壮彬, 覃峰, 黄琼念. 蔗渣纤维 SMA 沥青混合料结构参数实验研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(10): 51-54, 85.

[4] 覃峰. 蔗渣纤维沥青混合料超薄路面层抗腐性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(2): 10-14.

[5] 杨猛. 蔗渣纤维增强橡胶沥青路用性能研究[J]. 西部交通科技, 2024(12): 117-119.

[6] 蒋鑫. 掺蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 130-137.

(下转第 30 页)