

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.012

考虑冻融循环的聚酯纤维沥青混合料性能研究

李钰¹, 刘金修², 李泽³, 甄天宇¹

(1.新疆交通科学研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830099;2.新疆交通投资(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;3.中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为研究聚酯纤维掺量对沥青混合料路用性能和冻融损伤劣化规律的影响,通过高温车辙试验、低温劈裂试验、水稳定性试验和冻融循环条件下小梁弯曲试验,对比分析聚酯纤维掺量为 0.0、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 时沥青混合料动稳定度、极限弯拉强度、弯拉应变、残留稳定度、冻融劈裂强度比和冻融弯曲应变的变化。结果表明,随着聚酯纤维掺量的增加,沥青混合料路用性能指标和冻融损伤性能呈现先增大后减小的趋势,聚酯纤维掺量为 0.2% 左右时,沥青混合料动稳定度出现峰值(3 512 次/mm),抗弯拉强度提高 12.4%,极限弯曲应变增加 7.6%,弯曲劲度模量超过 2 670 MPa,马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比分别提高 2.2%、3.2%;聚酯纤维掺量为 0.2% 左右、冻融循环次数为 12 次时,弯曲破坏应变出现峰值,抗冻融性能最佳;聚酯纤维沥青混合料的弯曲破坏应变与冻融循环周期呈负相关关系,冻融循环次数超过 12 次时,弯曲应变下降速率减小并逐渐趋于稳定。

关键词:公路;聚酯纤维;沥青混合料;冻融循环;小梁弯曲试验;路用性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)05-0053-05

聚酯纤维因其独特的空间分布特性、加筋和桥接效应、较强的吸附作用,常被用于沥青混凝土路面新建或养护工程,以解决普通沥青路面常见病害(如车辙、开裂、龟裂、网裂等)^[1]。为解决特殊地区如西北和东北高寒地区、南方高温湿热地区、北方高强度紫外线辐射地区路面病害区域性强、分布范围广、管养费用高的问题,须改善传统沥青混凝土的路用性能,提升道路使用品质。

有关在沥青混合料中掺入聚酯纤维等复合材料改善其性能和路用指标的研究成果较多。在复合材料性能方面,纤维沥青混合料中主要以纤维和沥青为基材,通过尝试不同纤维掺量和油石比梯度变化实现复合材料的增韧增黏效果,研究沥青纤维复合体和纤维沥青混凝土的材料特性^[1-3],如沥青纤维胶浆、最佳油石比、复合材料集料级配设计、纤维分散性和复合材料性能指标测试等^[4-5]。在聚酯纤维掺量对单一或多场耦合作用下沥青混合料性能的影响方面,文献^[6-7]认为沥青混凝土路面多处于水分、温度、除雪剂盐溶液、荷载等单一、两场或多场耦合作用下,不同纤维掺量和油石比对纤维沥青混合料材料性能和使用性能的影响不同。在道路用纤维类型和尺寸效应方面,通过选定 2 种或以上常见路用纤维品种分别进行高低温特性、抗疲劳和水稳定

性等试验,判定某一类型纤维对沥青混合料材料性能不足的提升和改善效果^[8-10],以断裂韧性为优化指标,筛选出某项或多项性能指标改善的纤维尺寸。在试验边界条件和分析方法方面,采用数字图像、扫描电子显微镜、紫外荧光图像采集等技术手段和灰色关联等数理统计方法分析纤维在沥青混合料中的分散性、沥青混凝土开裂机理、自愈合前后微观形貌和断裂性能等^[6-7,9,11-13]。目前大多数研究仅针对纤维沥青混合料的常规性能指标,对冻融循环作用下掺配聚酯纤维的沥青混合料性能的劣化机理、变化规律与常规试验条件下性能指标的对比分析较少。本文研究冻融循环条件下不同聚酯纤维掺量沥青混合料的高低温性能、水稳定性等的变化,确定沥青混合料中聚酯纤维最佳掺量与最佳油石比,分析聚酯纤维沥青混合料的性能指标在冻融循环作用下的衰减规律和裂化机理,为寒旱区特殊气候条件下纤维沥青混合料设计及应用提供参考。

1 原材料及配合比设计

1.1 试验原材料

(1) 沥青。基质沥青采用 SK90[#],其各项技术指标均满足规范要求(见表 1)。

表1 SK90[#]基质沥青的性能指标

检测项目	规范要求	检测结果	
针入度(25℃,100g,5s)/(0.1mm)	80~100	85	
延度(15℃,5cm/min)/cm	≥100	106.1	
软化点(环球法)/℃	≥45	49.3	
闪点/℃	≥245	256	
溶解度/%	≥99.5	99.8	
密度/(g·cm ⁻³)	实测	1.035	
质量变化/%	±0.8	0.14	
薄膜烘箱试验 (163℃,5h)	残留针入度比/%	≥57	73
	延度(10℃,5cm/min)/cm	≥8	8.7

(2) 集料。粗、细集料均采用石灰岩,其各项技术指标均满足规范要求(见表2、表3)。

表2 粗集料的性能指标

检测项目	规范要求	不同粒径(mm)粗集料的检测结果	
		10~20	5~10
压碎值/%	≤28	14.26	—
洛杉矶磨耗损失/%	≤30	13.10	14.26
表观相对密度	≥2.5	2.755	2.797
毛体积相对密度	实测	2.714	2.760
吸水率/%	≤3.0	0.90	0.92
坚固性/%	≤12	7.1	—
针片状颗粒含量/%	≤15	4.0	3.8
含泥量(水洗法)/%	≤1	0.30	0.35

表3 细集料的性能指标

检测项目	规范要求	不同粒径(mm)细集料的检测结果	
		3~5	0~3
表观相对密度	≥2.5	2.800	2.745
毛体积相对密度	实测	2.702	—
坚固性/%	≤12	5.0	—
含泥量(筛洗法)/%	≤3	1.1	1.5

表6 AC-16级配设计

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%										
	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
合成级配	100.0	97.5	84.0	71.3	42.6	26.8	20.5	17.1	10.8	9.3	5.8
级配上限	100.0	100.0	92.0	80.0	62.0	48.0	36.0	26.0	18.0	14.0	8.0
级配中值	100.0	95.0	81.0	70.0	48.0	34.0	24.5	17.5	12.5	9.5	6.0
级配下限	100.0	90.0	70.0	60.0	34.0	20.0	13.0	9.0	7.0	5.0	4.0

(3) 矿粉。矿粉由石灰岩磨制而成,其各项技术指标均满足规范要求(见表4)。

表4 矿粉的性能指标

检测项目	规范要求	检测结果
表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	2.801
含水量/%	≤1	0.55
粒度范围/%		
<0.600mm	100	100
<0.150mm	90~100	96.3
<0.075mm	75~100	88.7
亲水系数	<1	0.65
塑性指数	<4	2.9
加热安定性	实测	无结块,颜色正常

(4) 纤维。本文研究聚酯纤维对沥青混合料性能的影响。所用聚酯纤维为白色,安全无毒,其各项技术指标均满足规范要求(见表5)。

表5 聚酯纤维的性能指标

性能指标	检测结果	性能指标	检测结果
当量直径/μm	19.81	断裂伸长率/%	22.2
密度/(g·cm ⁻³)	1.355	弹性模量/MPa	8 798
长度/mm	12	熔点/℃	266
断裂强度/MPa	1 103		

1.2 配合比设计

采用AC-16型级配,合成级配满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求(见表6)。

2 试验方案

为研究聚酯纤维掺量对沥青混合料性能的影响机理和冻融循环条件下混合料的损伤劣化特性,选择5种聚酯纤维掺量,分别为0.0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%,通过马歇尔试验确定不同聚酯纤维掺

量下沥青混合料的最佳油石比,评价指标包括抗冻融循环性能、高温抗车辙性能、低温抗裂性能和水稳定性。

冻融试验开始前将所有试件进行抽真空处理,向装有试件的密封塑料袋中注入 30 mL 水,置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冷冻箱中冻结 12 h,再将其置于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中保温 12 h,此为一次冻融循环。每 4 次循环作为一个试验周期,分别采用 0、4 次、8 次、12 次、16 次、20 次冻融循环为试验周期,每个试验周期完成后将试件静置于环境箱中保温备用。

采用 MTS810 万能试验机对不同聚酯纤维掺量、不同冻融循环次数的小梁试件 ($200\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 35\text{ mm}$) 进行低温弯曲试验,环境箱温度控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,小梁弯曲试验温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,以轴向位移控制,加载速率为 2 mm/min 。

3 试验结果与分析

沥青混合料的油石比随着外加剂掺量的变化而变化,不同掺量聚酯纤维与沥青结合后形成的沥青膜厚度不同,产生的自由沥青的富余度直接影响纤维沥青胶浆与集料的嵌锁和吸附效应,进而反映在沥青混合料内部细观缺陷,最终导致宏观性能不断劣化和损伤度增加。通过试验确定聚酯纤维掺量为 0.0、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4% 时沥青混合料的最佳油石比分别为 4.9%、5.0%、5.1%、5.4%、5.6%。各项试验均在最佳油石比下进行。

3.1 高温抗车辙性能

采用动稳定度评价聚酯纤维掺量对沥青混合料高温抗车辙变形能力的影响,试验结果见图 1。

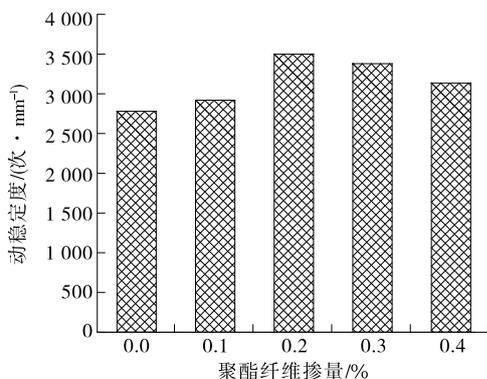


图 1 沥青混合料高温抗车辙性能与聚酯纤维掺量的关系

由图 1 可知:1) 掺加 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 聚酯纤维,沥青混合料的动稳定度分别增加 5.1%、25.9%、21.6%、12.8%,沥青混合料高温抗剪切变形

能力有不同程度的提升。2) 随着聚酯纤维掺量的增加,沥青混合料动稳定度呈先增大后降低的趋势,聚酯纤维掺量为 0.2% 左右时,沥青混合料的动稳定度出现峰值 ($3\ 512\text{ 次/mm}$)。聚酯纤维掺量小于 0.2% 时,由于沥青用量较小,掺入有效比表面积较大的聚酯纤维吸附了集料的部分沥青,导致石料表面沥青膜有效厚度不足,混合料的各向随机流变性降低,表现为高温条件下车辙深度大、剪切速率快;聚酯纤维掺量超过 0.2% 时,沥青混合料中除富余的自由沥青与部分纤维在沥青胶浆中均匀分散形成纵横交错的空间网状结构外,剩余的部分纤维在混合料中难以均匀分散,局部团聚较多对集料间吸附和黏合效应起到削弱作用,导致沥青流动性增强、混合料高温抗滑移性能降低。

3.2 低温抗裂性能

采用极限弯拉强度、弯曲破坏应变和弯曲劲度模量评价不同聚酯纤维掺量下沥青混合料的低温抗裂性能,试验结果见图 2。

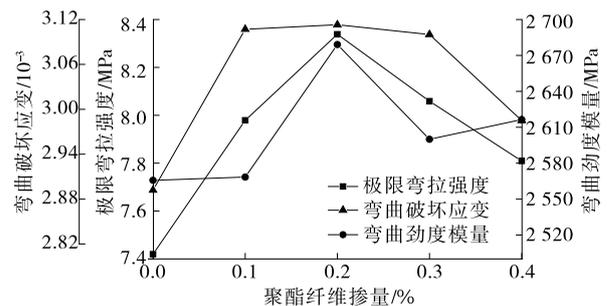


图 2 沥青混合料低温抗裂性能与聚酯纤维掺量的关系

由图 2 可知:1) 聚酯纤维掺量低于 0.2% 时,沥青混合料的极限弯拉强度、弯曲破坏应变和弯曲劲度模量随纤维掺量的增加而增大;聚酯纤维掺量超过 0.2% 时,三项性能指标随纤维掺量的增加而减小。优良的低温抗裂性能对应的最佳聚酯纤维掺量为 0.2%。沥青混合料中掺入适量聚酯纤维后形成的纤维沥青复合胶浆除部分裹覆在集料表面外,其余沥青填充集料空隙,成型的聚酯纤维沥青混凝土赋予了材料较强的低温柔韧性和自愈合能力,在较低温度下也能保持一定的变形自适应能力和较高的抗弯拉强度,对于增强沥青路面低温抗裂性能、减少温缩裂缝和防止反射裂缝起到积极作用。2) 聚酯纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 时,沥青混合料的抗弯拉强度分别提高 7.5%、12.4%、8.6%、5.3%,极限弯曲应变增加 3.2%~7.6%,聚酯纤维有助于改善低温条件下沥青混合料易开裂的特性。

3.3 水稳定性

采用马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比评价不同聚酯纤维掺量下沥青混合料的水稳定性,试验结果见图3。

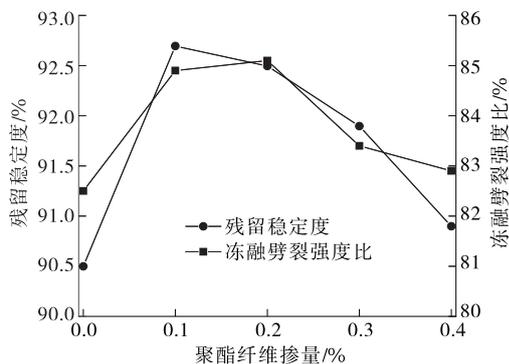


图3 沥青混合料水稳定性与聚酯纤维掺量的关系

由图3可知:1) 参加聚酯纤维的沥青混合料的马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比均增大,掺量为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%时,马歇尔残留稳定度分别增加2.4%、2.2%、1.5%、0.4%,冻融劈裂强度

比分别提高2.9%、3.2%、1.1%、0.5%。2) 随着聚酯纤维掺量的增加,马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比总体呈先增大后减小的趋势,掺量为0.15%~0.2%时出现峰值。单纯从水、温度、荷载的某一方面评价沥青混合料的水稳特性失之偏颇,研究多场耦合作用下水稳定性指标更客观、更贴合实际情况。聚酯纤维的添加有利于沥青复合胶浆充分填隙,降低沥青混合料空隙率,减少进入沥青混合料内部的水分。此外,聚酯纤维的加筋作用使沥青质具备更宽的高低温上下限阈值,有利于发挥其自愈合特性,在荷载作用下,冻融试验中试件空隙的水冰相变体积膨胀产生的附加应力对纤维沥青混合料空隙内壁的挤压效应有所削弱,聚酯纤维的加筋和桥接作用的充分发挥对提高集料与沥青之间抗剥落能力和改善沥青混合料的水损害性能的效果显著。

3.4 抗冻融循环性能

采用弯曲破坏应变评价不同聚酯纤维掺量下沥青混合料的抗冻融循环性能,试验结果见图4。

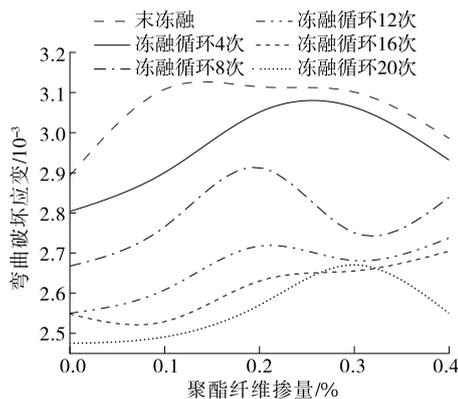
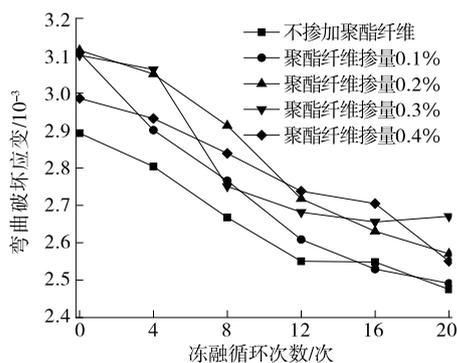


图4 沥青混合料抗冻融循环性能与聚酯纤维掺量的关系

由图4可知:1) 冻融循环次数与弯曲破坏应变呈负相关关系,冻融循环次数超过12次时,弯曲破坏应变下降速率降低并逐渐趋于稳定。2) 聚酯纤维掺量为0.15%~0.25%时,不同冻融循环次数下混合料的极限弯曲应变达到峰值。掺量为0.4%时有个别点呈增大趋势,可能是由于不属于同一批次制备的试件,在混合料拌和、车辙板成型、小梁试件切割等阶段存在内、外部缺陷导致试件力学特性差异,但不影响试验结果的总体演化趋势。在损伤初期,混合料内部产生的冻融空隙、微裂缝受压闭合或发展滞后,当弯曲破坏应变达到材料损伤破坏阈值(冻融持续循环12次)时,聚酯纤维沥青混合料内部缺陷逐渐发展、裂缝扩展直至试件断裂破坏。聚

酯纤维掺量超过0.2%时,沥青混合料内部空隙因沥青用量增加而减小,由水冰相变产生的膨胀力急剧下降,低于聚酯纤维胶浆-集料黏结力失效阈值时,试件的弯曲破坏不受冻融循环形成的冻胀压力控制,演化机理上表现为纤维沥青混合料冻融损伤衰减速率逐渐降低并趋于平缓。

4 结论

(1) 聚酯纤维掺量为0.2%左右时,表征沥青混合料高温抗车辙性能的动稳定度出现峰值(3 512次/mm),低温抗裂评价指标中抗弯拉强度提高12.4%、极限弯曲应变增加7.6%、弯曲劲度模量超过2 670 MPa,水稳定性指标中马歇尔残留

稳定度和冻融劈裂强度比分别提高 2.2%、3.2%。

(2) 掺加聚酯纤维的沥青混合料的路用性能指标和冻融损伤性能总体呈先增大后减小的趋势,聚酯纤维掺量为 0.2% 左右、冻融循环次数为 12 次时,弯曲破坏应变出现峰值,抗冻融性能最佳。

(3) 聚酯纤维沥青混合料的弯曲破坏应变与冻融循环次数呈负相关关系,冻融循环次数超过 12 次时,弯曲破坏应变下降速率变小并逐渐趋向稳定。

本文对聚酯纤维沥青混合料冻融循环的研究主要集中在弯曲破坏应变指标方面,缺乏对不同聚酯纤维掺量对低温弯曲劲度模量与弯拉破坏应力的影响、聚酯纤维沥青混合料冻融疲劳寿命和细观结构力学等方面的研究,有待进一步研究,以全面把握聚合物沥青混合料的材料特性和使用性能。

参考文献:

- [1] MAHMOUD E, ABOELKASIM D, XU Y. Short- and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(1): 64-76.
- [2] KLINSKY L M G, KALOUSH K E, FARIA V C, et al. Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 747-752.
- [3] BROVELLI C, CRISPINO M, PAIS J C, et al. Assessment of fatigue resistance of additivated asphalt concrete incorporating fibers and polymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(3): 554-558.
- [4] 闫纾梅. 短切纤维沥青混合料配合比优化设计研究[J].

- 公路工程, 2019, 44(5): 110-113+134.
- [5] 周志刚, 蔡扬发, 谭军. 聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 1-8.
- [6] 闫景晨, 李瀚翔. 盐冻融和重复荷载作用下沥青混凝土开裂的细观分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 774-780.
- [7] 马海鹏, 余沛. 高寒高海拔地区玄武岩纤维沥青混凝土损伤自愈合性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2803-2810.
- [8] 郭庆林, 王红雨, 高颖, 等. 短切柔性纤维对密实型沥青混凝土断裂特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5377-5382.
- [9] 窦晖, 曹晖, 曹贵, 等. PVA 纤维在沥青混凝土路面中的分散性评价方法及应用[J]. 公路, 2021, 66(12): 86-90.
- [10] 张军. 纤维种类对沥青混凝土冻融劈裂强度影响研究[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 193-196+215.
- [11] 吕耀华. 玄武岩纤维沥青混凝土优选及疲劳寿命预估[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 303-307.
- [12] 邵先胜, 李超, 裴珂. 基于韧性指数的玄武岩纤维沥青混凝土抗裂性分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 67-73.
- [13] MOTAMEDI H, FAZAEI H, ALIHA M R M, et al. Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234(4): 117365.

收稿日期: 2022-06-17

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊的网址为 <http://glyqy.csust.edu.cn>。互联网上以“公路与汽运”名义建立的其他网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊唯一的投稿邮箱是 gongluyuqi Yun@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

《公路与汽运》编辑部