

聚酯纤维用于环氧树脂沥青混合料 增柔及增韧技术研究

顾晓燕¹, 高剑飞¹, 李惠翔²

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611230; 2. 青海省交通规划设计研究院有限公司, 青海 西宁 810012)

摘要:为解决钢桥面铺装环氧沥青混凝土与桥面变形不一致,导致环氧沥青混凝土出现早期裂缝的问题,通过往环氧沥青混凝土中添加聚酯纤维,采用低温弯曲试验和疲劳试验方法,评价聚酯纤维对环氧沥青混凝土柔性及韧性性能的提升效果。结果表明:聚酯纤维在沥青中与沥青轻质组分吸附、三维网状内部加筋、限位等方式存在,同时与沥青产生的银纹质共同协助,锁定银纹尖端向前拓展和银纹宽度的增加,当聚酯纤维以最优掺量 0.3% 加入后,环氧沥青混凝土具有最优的低温变形能力和抵抗疲劳能力,此时混合料的柔性和韧性最优。

关键词:道路工程; 聚酯纤维; 环氧树脂沥青混合料; 增柔增韧

中图分类号: U414

文献标志码: A

环氧树脂分子中有两个或以上环氧基,在固化剂的作用下,与环氧基反应生成三维交联网状结构,其中骨架为脂肪族、芳香族等。环氧树脂具有很高的强度、机械性能、黏结性能、固化后收缩率低的特点,被广泛用于航空、工业、交通行业,但环氧树脂先天的脆性高、柔性低、韧性低的特点,使其不能在需求耐久性高的环境、区域、行业使用。20 世纪 60 年代,研究人员在环氧树脂中加入丁腈橡胶对环氧树脂进行改性^[1]。后来为提高强度及模量,研究人员逐步采用玻璃微珠、Ca-

CO₃、Al₂O₃ 等高强度的无机基体材料改性环氧树脂,可以起到增韧、提高模量的效果^[2]。1999 年后 Boogh 等开始研究超支化大分子应用于环氧树脂的改性,结果显示使用较少的超支化聚合物可以对环氧树脂起到增韧的效果,且强度和模量不发生明显下降^[3]。在钢桥面铺装时,为使环氧树脂与桥面产生相同的挠度且不产生拉裂变形破坏、疲劳破坏,在环氧树脂中加入橡胶粉,提高环氧树脂的柔性,但在桥面使用过程中,还存在疲劳性破坏的裂缝,近年来疲劳性裂缝控制受到

- *****
- [13] HODHOD A, ZAKI S I. Comparison between the Effect of Addition of Nano-Calcium Carbonate and Nano-Kaoline on Developing the Properties Of reinforced Concrete [C]. 10th International Conference on Nano-Technology in Construction, 2018: 1-24.
- [14] AL-SALAMI A E, MORSY M S, TAHA S, et al. Physico-Mechanical Characteristics of Blended White Cement Pastes Containing Thermally Activated ultrafine Nano Clays[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 138-145.
- [15] 张均良. 纳米偏高岭土水泥砂浆断裂性能试验研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [16] 王迪. 基于 CT 扫描的纳米偏高岭土混凝土力学性能数值模拟[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [17] 范颖芳, 张均良, 李秋超. 纳米偏高岭土对水泥砂浆断裂性能影响的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 637-644.
- [18] 郭晓玉, 张世义, 范颖芳. 纳米偏高岭土砂浆氯离子渗透性的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1 526-1 534.
- [19] 范颖芳, 张世义. 纳米高岭土颗粒改性水泥基复合材料的性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 130-137.
- [20] FAN Y, ZHANG S, WANG Q, et al. Effects of Nano-Kaolinite Clay on the Freeze-Thaw Resistance of Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 1-12.
- [21] 张金山, 李晨, 张国英, 等. 纳米高岭土对水泥混凝土性能的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(4): 24-25.

收稿日期: 2021-07-07(修改稿)

基金项目: 山西省重点研发计划项目(编号: 201803D31215-1)

作者简介: 顾晓燕, 女, 硕士, 副教授. E-mail: 3188291@qq.com

研究人员的高度重视^[4]。该文在环氧树脂沥青柔性的基础上,加入聚酯纤维,借助低温弯曲试验、疲劳试验,研究聚酯纤维对环氧树脂沥青柔性、韧性的提升效果,分析聚酯纤维对其的改性机理,提出合理的聚酯纤维掺量。

1 聚酯纤维的增柔及增韧机理

环氧树脂具有先天的脆性高、柔性低、韧性低的特点,拌和的环氧树脂沥青混合料继承了环氧树脂的特性。所以,拌和的混合料无法满足混合料的低温及抗疲劳性能。为此,环氧树脂混合料中加入增韧、增柔的材料是环氧树脂沥青混合料使用的必经之路。① 聚酯纤维加入后,聚酯纤维在环氧沥青中充分分散,在纤维大比表面积的作用下,沥青中轻质组分被纤维充分吸收,增强了环氧沥青胶浆的黏度,降低了沥青胶浆的温度敏感性;② 聚酯纤维表面并非平滑,在电镜下,聚酯纤维表面有凹槽和凸起,在环氧沥青的包裹下,起到了明显的锚固、嵌锁作用,使其与沥青结合更为牢固,胶结料脆性断裂更加困难,柔韧性能提高;③ 聚酯纤维在环氧沥青中相互交错,相互搭接,形成三维加筋网状结构,起到了桥接组裂作用,在沥青银纹的形成及扩散方面起到明显的抑制作用,表现为混合料低温、高温柔性、韧性方面性能提升效果更为显著。

2 环氧沥青混合料柔性、韧性评价方法

2.1 柔性评价方法

柔性用于反映环氧沥青混合料在外荷载、一定温度范围内的变形能力,沥青对温度较为敏感,研究低温条件下,改性环氧沥青混合料的柔性具有很强的代表性^[5]。该文选用 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的低温弯曲试验方法评价掺聚酯纤维环氧树脂沥青混合料的抵抗弯曲性能。小梁试件采用车辙板试件切割而成,尺寸为 250 mm×35 mm×30 mm,试验温度 (-10 ± 0.5) ℃,加载速率 50 mm/min,通过低温弯曲试验,建立低温弯曲试验荷载—挠度曲线图,最终计算小梁的抗弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量。

2.2 韧性评价方法

沥青混合料的韧性可以反映在重复荷载作用下,抵抗重复变形的能力,韧性越高,疲劳试验时,疲劳次数 F_N 越大^[6]。该文采用四分点弯曲疲劳试验评价掺

聚酯纤维的环氧树脂沥青混合料的韧性提升程度,解决环氧树脂用于桥面铺装时,与桥面韧性不一致,产生的剪切性层间拉裂等病害。试验采用 380 mm×50 mm×63.5 mm 小梁试件,试验过程采用应力控制模式^[7-11],试验温度 15℃,加载频率 10 Hz,最终选择 F_N 评价掺聚酯纤维的环氧树脂沥青混合料的韧性性能。

3 原材料及配合比设计

环氧树脂、聚酯纤维、集料及矿粉均为石灰岩基,油石比 6.1%,沥青为 70# 普通沥青。聚酯纤维技术指标见表 1,合成级配见表 2,纤维环氧树脂沥青混合料马歇尔试验结果见表 3。

表 1 聚酯纤维的技术指标

长度/mm	直径/ μ m	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
6	20	789	15~30

表 2 合成级配

筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%	筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%
13.2	100	0.6	35.6
9.5	77.4	0.3	26.2
2.36	67.7	0.15	20.3
1.18	47.6	0.075	13.8

聚酯纤维改性环氧沥青混合料拌和流程为:室内先将集料加入拌和锅,然后加入固定量的聚酯纤维,干拌 30 s,再加入环氧沥青拌和 90 s,最后加入矿粉拌和 90 s 即可;拌和站施工时,聚酯纤维加入后与集料干拌时间延长 5~10 s,湿拌时间延长 5~15 s,以保证混合料中纤维、沥青、集料拌和均匀。

添加相对较多的聚酯纤维后,纤维对沥青的吸附能力变强,使得被吸附后的沥青针入度变小,软化点提高,相同成型温度下,成型相对越来越困难,试件空隙率逐渐增加。

4 聚酯纤维对环氧树脂沥青混合料的柔性改性效果

为使环氧树脂沥青混合料柔性表现得较为明显,不出现脆性断裂,该文在环氧树脂中添加不同用量的聚酯纤维,采用聚酯纤维纤细、加筋和阻裂的作用,提

表 3 纤维环氧树脂沥青混合料马歇尔试验结果

纤维用 量/%	油石比/ %	毛体积相 对密度	最大理论 相对密度	空隙率/ %	矿料间隙 率/%	沥青饱和 度/%
0	6.3	2.473	2.546	2.87	15.3	83.4
0.1	6.4	2.470	2.555	3.33	15.6	84.5
0.2	6.6	2.464	2.551	3.41	16.5	86.6
0.3	7.0	2.453	2.546	3.65	17.5	87.2
0.4	7.2	2.443	2.529	3.40	17.6	89.9

升和改善环氧树脂沥青混合料的柔性,低温弯曲试验结果见表 4。

表 4 纤维沥青混合料低温弯曲试验结果

纤维掺 量/%	最大荷 载/N	跨中挠 度/mm	弯拉强 度/MPa	破坏应 变/ $\mu\epsilon$	劲度模 量/MPa
0	3 570	0.534	29.14	2 803.5	10 394.15
0.1	3 890	0.554	31.76	2 908.5	10 919.72
0.2	4 135	0.579	33.76	3 039.8	11 106.18
0.3	4 569	0.625	37.3	3 281.3	11 367.62
0.4	4 160	0.556	33.96	2 919.0	11 634.12

从表 4 可知:添加聚酯纤维后,环氧树脂沥青混凝土的小梁试件跨中挠度逐渐增大,逐渐表现出柔性的一面。随聚酯纤维用量的增加,破坏应变、弯拉强度出现先逐渐增大后减小的趋势,表明纤维在改变环氧树

脂沥青混凝土的脆性断裂方面提升效果明显,但当纤维掺量超过 0.3%时,破坏应变出现急剧下降的趋势。主要因为:聚酯纤维在环氧树脂中呈现的三维分布状态已饱和,过多的纤维加入后,纤维无法均匀分散,最终呈现一束一束的分布状态,在环氧树脂沥青混凝土中反而起到隔离沥青裹覆,产生黏结空位的现象。所以,环氧树脂沥青混凝土中添加 0.3%聚酯纤维增柔效果最好。

5 聚酯纤维对环氧树脂沥青混合料的韧性改性效果

采用应力控制模式,研究不同剂量的聚酯纤维对环氧树脂沥青混合料韧性的提升能力,试验结果见表 5。

表 5 聚酯纤维环氧树脂沥青混合料疲劳试验结果

纤维掺 量/%	应力比	应力水 平/MPa	疲劳次数 F_N /次	回归方程 $F_N = K \times (1/\sigma)^N$
0	0.2	3.567	7 765	$F_N = 157\,200 \times (1/\sigma)^{2.363}$, $R^2 = 0.995$
	0.3	5.351	3 065	
	0.4	7.134	1 679	
	0.5	8.918	569	
0.1	0.2	3.651	11 059	$F_N = 200\,800 \times (1/\sigma)^{2.240}$, $R^2 = 0.996$
	0.3	5.477	4 293	
	0.4	7.302	2 699	
	0.5	9.128	1 188	
0.2	0.2	3.745	12 567	$F_N = 241\,600 \times (1/\sigma)^{2.240}$, $R^2 = 0.996$
	0.3	5.618	4 878	
	0.4	7.490	3 067	
	0.5	9.363	1 350	
0.3	0.2	3.976	19 854	$F_N = 329\,300 \times (1/\sigma)^{2.032}$, $R^2 = 0.998$
	0.3	5.964	9 134	
	0.4	7.952	4 560	
	0.5	9.940	2 983	

续表 5

纤维掺量/%	应力比	应力水平/MPa	疲劳次数 F_N /次	回归方程 $F_N = K \times (1/\sigma)^N$
0.4	0.2	3.560	7 680	$F_N = 147\,800 \times (1/\sigma)^{2.321}$, $R^2 = 0.988$
	0.3	5.340	3 450	
	0.4	7.120	1 356	
	0.5	8.900	568	

从表 5 可知：

(1) 随着聚酯纤维掺量的增大，相同应力水平下疲劳次数呈较大幅度的增加，并且增加幅度不尽相同。

(2) 聚酯纤维掺量存在最佳掺量 0.3%，当掺量超过最佳值 0.3% 时，疲劳次数大幅度下降。

(3) 从回归方程可知，系数 K 值越大， N 值越小，疲劳次数越大，此时的疲劳寿命随荷载增大衰减越小，表明聚酯纤维掺量为 0.3% 时，聚酯纤维环氧树脂沥青混合料的疲劳性能达到最优。

聚酯纤维加入环氧树脂沥青混合料中，使环氧树脂沥青混合料表现出明显的韧性性能，主要原因为：在电镜下可以看到聚酯纤维表面并非光滑表面，而具有明显凹凸不平的表面，断面部分呈现扁平状或凹陷状，以上形状很大程度增加了纤维与沥青的接触面积，进而使沥青中的轻质组分得到更大程度的吸收，沥青的黏稠度、软化点得到进一步提高；此外，合理剂量的纤维在沥青混合料中起到加筋、束缚、限位的作用，使沥青混合料中集料在高温下相对位置不能随意改变，保证了混合料集料位置的相对稳定；最后，依据材料破坏银纹理论，材料破坏前先出现细小的银纹，但银纹内部并非空隙，而是空隙中存在银纹质相连，当银纹逐渐受力变粗时，银纹质断裂，才形成了裂缝，当添加聚酯纤维后，聚酯纤维充当了银纹质牵引，当银纹继续发展，银纹尖端向前拓展和银纹宽度增加被有效锁定，从而使沥青混合料的韧性得到大幅度的提升。

6 结论

(1) 添加聚酯纤维对环氧树脂沥青混合料的柔性、韧性提升较为明显。

(2) 聚酯纤维掺量小于 0.3% 时，随聚酯纤维掺量的增加，环氧树脂沥青混合料的低温弯曲、疲劳性能逐渐提高；当掺量超过 0.3% 时，低温弯曲性能、疲劳次数极速下降；掺量到 0.4% 时，性能与未掺相当。所

以，聚酯纤维掺量为 0.3% 时，环氧树脂沥青混合料的柔性和韧性最优。

(3) 聚酯纤维在环氧树脂沥青混合料中以沥青轻质组分吸附、三维网状内部加筋、限位方式提升混合料的柔、韧性，同时与沥青产生的银纹质共同协助，锁定银纹尖端向前拓展和银纹宽度增加，大幅度提升了环氧树脂沥青混合料的韧性性能。

参考文献：

[1] 何景学, 马文石. 环氧树脂增韧改性研究现状[J]. 粘接, 2006, 27(2): 35—38.

[2] 姚兴芳, 高宇, 李健, 等. CTBN 结合纳米 SiO₂ 改性环氧树脂及增韧机理[J]. 热固性树脂, 2011, 26(1): 16—20.

[3] MEZZENGA R, BOUGH L, MANSON J A E. A Review of Dendritic Hyperbranched Polymer as Modifiers in Epoxy Composites[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(5): 787—795.

[4] 朱兴一, 黄志义, 陈伟球. 基于复合材料细观力学模型的沥青混凝土弹性模量预测[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 29—34.

[5] 黄坤, 夏建陵, 丁海阳. 改性环氧树脂制备的热固性环氧沥青材料性能[J]. 热固性树脂, 2010, 25(1): 35—39.

[6] 虞将苗, 邹桂莲, 胡学斌. 沥青混合料老化模拟试验方法与验证研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 14—17.

[7] 张远航, 孟巧娟, 吴国雄. 聚酯纤维沥青混凝土抗疲劳性能试验研究[J]. 公路, 2011, 56(10): 156—161.

[8] 王水. 聚酯纤维掺量对环氧沥青桥面铺装混合料技术性能的影响[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 99—103.

[9] 叶群山, 岳红波, 李力, 等. 聚酯纤维沥青混凝土动态模量与疲劳性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 5—8.

[10] 吴金荣, 董晓红, 马芹永. 聚酯纤维掺量对沥青混凝土疲劳性能影响的试验与分析[J]. 公路, 2014, 59(7): 314—317.

[11] 徐秀维. 聚酯纤维对沥青混凝土路用性能的贡献研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 306—310.