

文章编号:1672-9331(2021)02-0001-08

# 聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响

周志刚,蔡扬发,谭 军

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 在沥青混凝土 AC-13 中掺加不同掺量(0.15%, 0.25%, 0.35%)的聚酯纤维,对比分析橡胶沥青混凝土的路用性能、强度疲劳性能和表面性能随聚酯纤维掺量的变化规律。结果表明:随着聚酯纤维掺量的增加,沥青混凝土 AC-13 的性能得到显著提升。当聚酯纤维掺量为 0.20% 时,其大部分性能指标达到峰值,之后随聚酯纤维掺量的继续增加而逐渐衰减。说明过多的聚酯纤维会增加沥青混凝土 AC-13 的内部缺陷。

**关键词:** 橡胶沥青混凝土;聚酯纤维;掺量;路用性能;强度疲劳性能;表面性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

## Effect of polyester fiber on performance of rubber modified asphalt concrete

ZHOU Zhi-gang, CAI Yang-fa, TAN Jun

(Key Laboratory of Road Structure and Material of Communication Industry, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Different dosages (0.15%, 0.25%, 0.35%) of polyester fiber were mixed into the asphalt concrete AC-13 to compare and analyze the change laws of the pavement performance, strength fatigue performance and surface performance of rubber modified asphalt concrete with the polyester fiber content. The results show that the performance of the asphalt concrete AC-13 is significantly improved with the increase of polyester fiber content. When the polyester fiber content is 0.20%, most of the performance indexes reach the peak, and then gradually decline with the continued addition of polyester fiber, which indicates that excess polyester fiber can increase internal defects of the asphalt concrete AC-13.

**Key words:** rubber modified asphalt concrete; polyester fiber; content; pavement performance; strength fatigue performance; surface performance

将废旧轮胎制作成胶粉并用来改善沥青路面的性能,是将废旧轮胎变废为宝的一个主要途径。研究表明:聚合物改性沥青能有效地改善沥青的高温抗车辙性能、低温抗裂性能和抗老化性能,还

可以提升黏结剂和矿料的黏结能力及抗氧化性能,从而减少交通噪声<sup>[1-4]</sup>。

纤维可显著提高沥青路面的力学性能,延长其疲劳寿命<sup>[5-7]</sup>。而聚酯纤维在沥青中有良好的

**收稿日期:** 2020-11-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51878079);广东省交通科技计划项目(1912-0002);云南省交通科技计划项目(云交科教[2020]84号)

**通讯作者:** 周志刚(1966—),男,教授,主要从事道路工程结构设计理论与方法、路面材料与施工技术等方面的研究。

E-mail:zhou\_zgcs@sina.com

吸附性和分散性,且具有强度高、延伸性和回弹性好的特点,将其掺入沥青混合料可明显改善沥青混合料的高温稳定性、水稳定性及疲劳性能<sup>[8-11]</sup>。在聚酯纤维、木质素纤维、玄武岩纤维和碳纤维4种材料中,聚酯纤维在混合料性能的改进方面表现得相对优异<sup>[12-13]</sup>。

在沥青的改性机理上,橡胶粉和纤维有很大区别。唐芳<sup>[14]</sup>研究了用木质素纤维与橡胶沥青复合改性的高RAP掺量温拌再生混合料的路用性能和耐久性。Sandra等<sup>[15]</sup>对比分析了椰子、剑麻、纤维素、聚酯纤维在SMA橡胶沥青混合料中的应用。熊伟<sup>[16]</sup>发现掺加聚酯纤维可显著提高橡胶沥青热再生混合料的高温性能。Yang等<sup>[17]</sup>研究了包含橡胶沥青在内的由多种沥青与聚酯纤维等黏结剂制备的高模量沥青混合料的性能,指出橡胶沥青混合料的综合性能最好。Huang等<sup>[18]</sup>发

现抗车辙剂、轮胎橡胶、聚酯纤维、丁苯嵌段共聚物的掺入能明显改善橡胶沥青混合料的路用性能。

综上所述,对在橡胶沥青混凝土中掺加聚酯纤维的研究有待深入。本研究将系统地分析橡胶沥青混凝土的常规路用性能指标,评估聚酯纤维对沥青混凝土产生的影响,从而为聚酯纤维的工程推广应用提供一定的依据。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 橡胶沥青

所用橡胶沥青各项技术指标的测试结果见表1。从表1可以看出,橡胶沥青的各项技术指标均满足规范《橡胶沥青路面技术标准》(CJJ/T 273—2019)中的要求。

表1 橡胶沥青技术指标的测试结果

Table 1 Test results of rubber modified asphalt technical indexes

技术指标	测试结果	规范要求	试验方法
针入度(100 g, 25 °C, 5 g)/(0.1 mm)	76.3	40.0~80.0	T0604
针入度指数/%	0.17	$\geq -0.80$	T0604
延度(5 °C, 5 cm/min)/cm	37	$\geq 10$	T0605
软化点(环与球)/°C	72	$\geq 50$	T0606
135 °C旋转黏度/(Pa·s)	1.206	$\leq 3.000$	T0625
闪点(COC)/°C	314	$\geq 230$	T0611
溶解度(三氯乙烯)/%	99.7	$\geq 97.5$	T0607
25 °C弹性恢复率/%	94	$\geq 60$	T0662
离析、软化点差/°C	0.7	$\leq 3.0$	T0661
质量变化/%	0.033	$\pm 1.000$	T0609/T0610
163 °C旋转 薄膜加热试验	25 °C针入度比/%	$\geq 55$	T0604
	5 °C延度/cm	$\geq 5$	T0605

#### 1.1.2 集料

所用的集料清洁、干燥,且没有被风化,经测试其技术指标见表2。从表2可以看出,所用集料的各项技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求。

#### 1.1.3 矿粉

所用矿粉技术指标的测试结果见表3。矿粉干燥、洁净,其各项技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求。

表2 集料技术指标的测试结果

Table 2 Test results of aggregate technical indexes

技术指标	测试结果	规范要求	试验方法
压碎值/%	13.3	$\leq 26.0$	T0316
磨耗值/%	19.1	$\leq 28.0$	T0317
表观相对密度	$\geq 2.744$	$\geq 2.600$	T0304
吸水率/%	$\leq 1.31$	$\leq 2.00$	T0304
坚固性/%	$\leq 3.3$	$\leq 12.0$	T0314
针片状颗粒掺量/%	$\leq 5.32$	$\leq 15.00$	T0312
粒径小于0.075 mm颗粒的 掺量(水洗法)/%	0.6	$\leq 1.0$	T0310
软石掺量/%	$\leq 2.88$	$\leq 3.00$	T0320

表 3 矿粉技术指标的测试结果

Table 3 Test results of mineral powder technical indexes

技术指标	测试结果	规范要求	试验方法
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.732	≥2.500	T0352
含水量/%	0.232 2	≤1.000 0	T0103 烘干法
粒径小于 0.6 mm 的 颗粒含量/%	100	100	T0351
粒径小于 0.15 mm 的 颗粒含量/%	97.2	90.0~100.0	T0351
粒径小于 0.075 mm 的 颗粒含量/%	77.8	75.0~100.0	T0351
外观	无结团	无团粒结块	—
亲水系数	0.6	<1.0	T0353
塑性指数/%	2	<4	T0354
加热安定性	良好	实测记录	T0355

1.1.4 聚酯纤维

使用的聚酯纤维是束型合成纤维,具有强度高、耐腐蚀、耐高温、化学性能稳定等优点,能较好地与沥青黏结。将聚酯纤维与沥青混凝土混合并搅拌后,可形成大量呈立体状分布的聚酯纤维单丝。聚酯纤维的性能指标见表 4。

表 4 聚酯纤维的性能指标

Table 4 Performance indexes of polyester fiber

性能指标	测试结果
长度	平均值/mm 19~38 偏差/% ±10
直径	平均值/μm 10~20 偏差/% ±10
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.360±0.050
断裂强度/MPa	≥950
卷曲纤维掺量/%	≤3
颜色	自然色(白色)
断裂伸长率/%	≥20
熔点/℃	≥240

1.2 试验方案

本研究通过在沥青混凝土 AC-13 中掺入聚酯纤维(其掺量分别为 0.15%,0.25%,0.35%),对不同聚酯纤维掺量的橡胶沥青混合料进行了一系列的试验研究。水稳定性的主要评定指标为浸水马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比;高温性能的主要评定指标为马歇尔稳定度和由车辙试验测得的动稳定度;低温性能的主要评定指标为由小梁弯曲试验测得的破坏弯拉强度、弯曲极限应变和弯曲劲度模量;疲劳性能的主要评定指标为由室内小梁疲劳试验测得的疲劳寿命;强度特性的主要评定指标为抗压强度和抗压回弹模量;抗滑性能的主要评定指标为表面构造深度和摩擦系数;渗透性能的主要评定指标为渗水系数。本研究通过大量试验,比较分析了不同聚酯纤维掺量对橡胶沥青混凝土各项性能的影响。

2 马歇尔技术指标影响分析

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)建议的沥青用量范围,细粒式沥青混凝土 AC-13 的油石比宜取为 4.0%~6.0%。采用 0.5%区间变异法进行马歇尔试件的制备。通过马歇尔试验确定橡胶沥青混凝土在各聚酯纤维掺量下的最佳配合比。当聚酯纤维掺量不同时,聚酯纤维在混合料中的分散程度、有效比表面积、对混合料的加强效果也有所不同。通过马歇尔试验,确定了最佳沥青用量,试验结果的汇总见表 5。

表 5 不同聚酯纤维掺量下橡胶沥青混凝土马歇尔试验结果

Table 5 Marshall test results of rubber modified asphalt concrete with different polyester fiber contents

聚酯纤维掺量/ %	最佳油石比/ %	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/ %	矿料间隙率/ %	沥青饱和度/ %	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)
0.00	4.7	2.461	4.16	14.1	70.4	13.51	30.15
0.15	4.9	2.451	4.10	14.7	72.0	14.19	31.80
0.25	5.0	2.447	4.05	14.9	72.9	14.18	32.23
0.35	5.1	2.438	4.12	15.3	72.9	13.89	33.32

通过分析表5可得出如下结论:

1) 聚酯纤维掺量同橡胶沥青混凝土最佳油石比呈正比关系。这是因为在橡胶沥青混凝土中掺入聚酯纤维后,这些聚酯纤维的表面需要更多的沥青来包裹。聚酯纤维掺量越大,聚酯纤维的面积就越大,吸附的沥青就越多,沥青用量也就越多。

2) 与矿物相比,聚酯纤维的密度较小,但也要占据一定的空间。由于聚酯纤维在沥青混凝土中相互交叉并形成网状结构,在相同的压实条件下,聚酯纤维掺量的增大削弱了沥青混凝土的压实效果。因此,对于聚酯纤维沥青混凝土,为了提升压实度,降低孔隙率,在压实时应增大压力。当聚酯纤维掺量较小时,由于其良好的分散性,与非纤维沥青混凝土相比,最佳的沥青用量需要增大,且聚酯纤维沥青砂浆可以完全填充在矿物材料中。然而,在聚酯纤维掺量较大的情况下,由于沥青混凝土的均匀性被约束,聚酯纤维在聚集成团后会占据较大的空间,阻挡在矿料表面。虽然使用的沥青用量也有所增加,但依旧存在大量的孔隙。因此,孔隙率随聚酯纤维掺量的增大而呈上升趋势,矿料间隙率也随之增大。

3) 随着聚酯纤维掺量的增大,马歇尔稳定度逐步增大,但在达到0.20%的峰值掺量后,马歇尔稳定度开始减小。依据沥青混凝土强度的宏观、细观和微观层次分析方法,从宏观来看,聚酯纤维沥青混凝土是连续均匀的,但在细微观的层面上往往相反,特别是在聚酯纤维分散不均匀的情况下。当聚酯纤维掺量较小时,因为聚酯纤维分散均匀,所以能够起到很好的加筋作用,稳定度也随之增大。但当聚酯纤维掺量较大时,其分散性受到限制,故马歇尔稳定度增大到一定值后便开始减小。流值与沥青用量密切相关,能侧面反映试件的抗变形的能力。随着聚酯纤维掺量的增加,沥青用量也会增加,使得流值呈上升趋势,而聚酯纤维的加入可有效地提高橡胶沥青混凝土的抗变形能力。在试验过程中,发现未掺纤维的沥青混凝土在最大破坏荷载下很脆,会立即开裂,而掺加聚酯纤维的沥青混凝土试样仍具备一定的完整性,但其裂纹面上有部分聚酯纤维被拔出。

### 3 常规路用性能影响分析

#### 3.1 高温稳定性

通过高温车辙试验得到不同聚酯纤维掺量情况下的橡胶沥青混凝土的动稳定度,并绘制动稳定度与聚酯纤维掺量关系曲线,如图1所示。

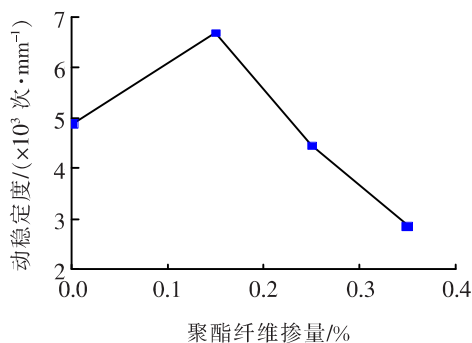


图1 动稳定度与聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between dynamic stability and polyester fiber content

通过分析图1可得出如下结论:

1) 当聚酯纤维掺量较小时,动稳定度同聚酯纤维掺量呈正相关关系。这是因为聚酯纤维分散在三维混合体中,形成了纵横交错的网络结构,从而加强了矿物骨架受到的约束,限制了集料的侧向位移,这种情形类似于土工合成材料。此外,聚酯纤维吸附了沥青混凝土中的轻组分,使沥青更加黏稠,这在很大程度上减少了矿料之间的滑移。

2) 随着聚酯纤维掺量的增大,动稳定度在达到峰值后开始降低,其峰值对应的聚酯纤维掺量约为0.15%。这是由于随着聚酯纤维掺量的增大,聚酯纤维出现了聚团现象,进而使沥青混凝土的孔隙率增大,矿料间的作用力减小,沥青混凝土的高温稳定性也随之下降。

#### 3.2 低温抗裂性

本研究通过小梁弯曲试验评价不同聚酯纤维掺量橡胶沥青混凝土梁的低温抗裂性。试验结果见表6。

通过分析表6可得出如下结论:

1) 当聚酯纤维掺量较小时,橡胶沥青混凝土的弯拉强度和弯曲极限应变均随着聚酯纤维掺量的增大而增大。小梁发生弯曲破坏的主要原因是颗粒界面处产生了拉伸裂纹。在裂纹扩展过程

表 6 不同聚酯纤维掺量下橡胶沥青  
混凝土小梁弯曲试验结果

Table 6 Beam bending test results of rubber modified  
asphalt concrete with different polyester fiber contents

聚酯纤维 掺量/%	弯曲极限应变/ ( $\times 10^{-6}$ )	破坏弯拉 强度/MPa	弯曲劲度 模量/MPa
0.00	1 378	11.22	8 144.60
0.15	1 411	12.86	9 112.81
0.25	1 277	11.02	8 630.95
0.35	1 142	9.39	8 219.54

中,若遇到大颗粒,则会导致剪切破坏。因此,沥青混凝土的界面强度在低温下发挥着重要的作用。随着聚酯纤维的加入,沥青中的轻组分被聚酯纤维吸附,沥青也随之变硬,从而提高了沥青的强度和沥青与矿物材料的界面强度。因此,掺入了聚酯纤维的橡胶沥青混凝土的抗拉强度远高于普通沥青混凝土的抗拉强度。在掺入聚酯纤维后,除沥青的稠度有所增大外,沥青混凝土的沥青用量和弹性均有所增大。聚酯纤维具有一定的分散和“桥接”作用,能延缓裂纹的产生。

2) 聚酯纤维的加入提高了橡胶沥青混凝土的弯曲劲度模量,说明聚酯纤维降低了橡胶沥青混凝土的低温抗裂性能。弯曲劲度模量是应力与应变之比,该比值是材料劲度的表征。当沥青混凝土出现裂纹时,应力、应变水平都是抗裂指数,故而使用比率来评价抗裂性是不合适的。因此,暂且搁置弯曲劲度模量这个有争议的指标,适量的聚酯纤维可以提高沥青混凝土低温下的抗弯曲性能。当聚酯纤维掺量为 0.15% 时,其对改善沥青混凝土的低温性能最有效。

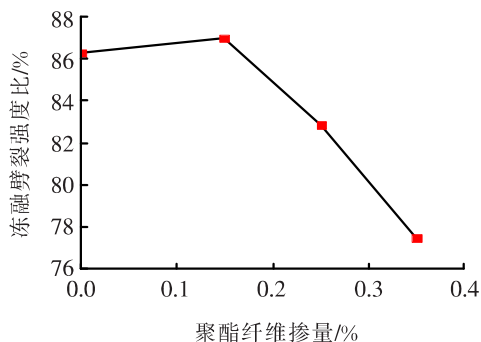
### 3.3 水稳定性

采用马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比评价橡胶沥青混凝土的水稳定性。分别加入掺量为 0.00, 0.15%, 0.25% 和 0.35% 的聚酯纤维,进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,结果如图 2 所示。

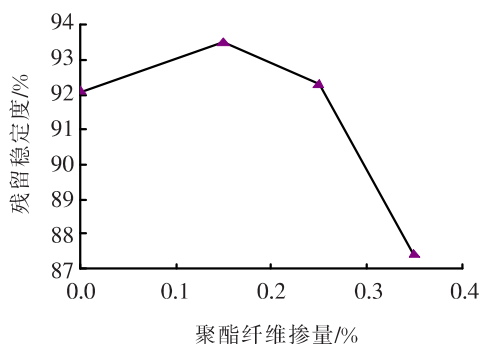
分析图 2 可得出如下结论:

1) 当聚酯纤维掺量较小时,随着聚酯纤维掺量的增大,橡胶沥青混凝土的冻融劈裂强度比和残留稳定性均出现了一定程度的增大。聚酯纤维在沥青混凝土中起到了良好的补强和“桥接”作

用,抵消了水膨胀产生的力,且聚酯纤维增大了沥青混凝土的孔隙率,沥青膜结构在温度变化时发生收缩变形,为提高冻融劈裂强度比提供了一定的空间。考虑到沥青与集料的接触界面,沥青的最佳掺量也会随着聚酯纤维掺量的增大而增大。由于聚酯纤维的吸附作用,沥青的轻组分被吸附在聚酯纤维表面,增大了沥青稠度和沥青有效膜厚度。矿物骨料表面的高黏度沥青能更好地发挥集料作用,从而提高沥青与集料之间界面膜的抗水剥离性能。



(a) 冻融劈裂强度比与聚酯纤维掺量关系曲线



(b) 残留稳定性与聚酯纤维掺量关系曲线

图 2 冻融劈裂强度比、残留稳定性与  
聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between freeze-thaw splitting strength ratio, residual stability and polyester fiber content

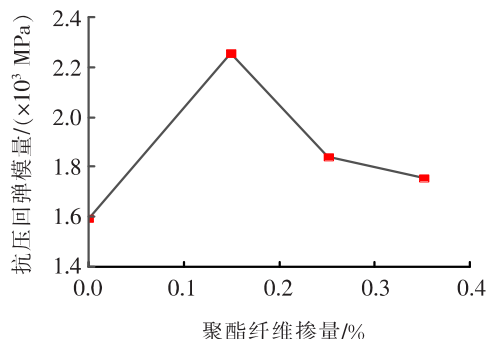
2) 随着聚酯纤维掺量的增大,冻融劈裂强度比与残留稳定性在达到峰值后开始减小,峰值对应的聚酯纤维掺量为 0.15%~0.20%。这是由于随着聚酯纤维掺量的增大,聚酯纤维的均匀性降低,且随着聚酯纤维的聚集,沥青与集料之间的相互作用减弱。同时,许多分散不均的聚酯纤维会形成纤维束存在于沥青膜中,形成纤维束通道,穿透沥青膜。聚酯纤维掺量越大,形成纤维束、穿透沥青膜的可能性也越大,水越容易通过纤维束通道及矿物材料表面渗透到矿物材料中去,最终导

致沥青薄膜剥落,集料松散。因此,过量的聚酯纤维会降低橡胶沥青混凝土的冻融劈裂强度比和残留稳定度,即降低沥青混凝土的水稳定性。

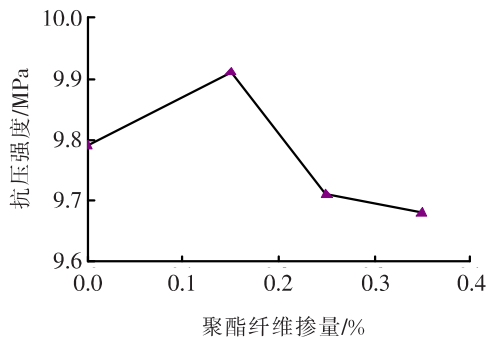
## 4 强度和疲劳性能影响分析

### 4.1 抗压强度和抗压回弹模量

沥青混凝土的材料组成决定了它的力学性能,并直接影响着沥青路面的路用性能。本研究采用单轴压缩试验测试聚酯纤维橡胶沥青混凝土的力学性能,采用抗压回弹模量和抗压强度表征沥青混凝土的强度特性。试验结果如图3所示。



(a) 抗压回弹模量与聚酯纤维掺量关系曲线



(b) 抗压强度与聚酯纤维掺量关系曲线

图3 抗压回弹模量、抗压强度与聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between compressive resilience modulus, compressive strength and polyester fiber content

分析图3可知,当聚酯纤维掺量小于0.15%时,抗压回弹模量和抗压强度随着聚酯纤维掺量的增大而大幅增大。但随着聚酯纤维掺量的继续增大,两者都呈下降趋势。原因类似于上述对其他性能指标的分析。适量的聚酯纤维在沥青混凝土中形成了三相结构,使沥青混凝土强度更大。但如果聚酯纤维增大了沥青混凝土的孔隙率,那么聚酯纤维的增强效应就不再那么明显了。且随着孔隙率的增大,沥青胶浆和矿物之间的相互作

用将会减弱,从而影响了沥青混凝土的强度。

### 4.2 疲劳性能

按照控制应力的方式进行室内小梁疲劳试验。在相同的弯拉荷载作用下,不同聚酯纤维掺量的橡胶沥青混凝土的疲劳寿命如图4所示。

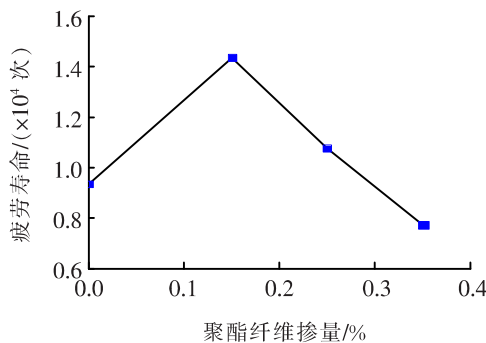


图4 疲劳寿命与聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between fatigue life and polyester fiber content

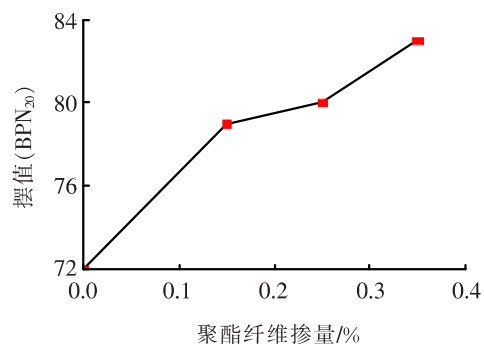
分析图4可知,掺加的聚酯纤维在很大程度上改善了橡胶沥青混凝土的疲劳性能。聚酯纤维对橡胶沥青混凝土疲劳性能的影响可以用断裂发展原理和银纹理论来解释。在疲劳损伤初期,结构的某些部位产生了细纹。随着变形的进一步发展,细纹逐步演变为微裂纹。在反复荷载作用下,微裂纹逐渐成熟,其尖端发生应力集中,导致微裂纹扩展加剧。当微裂纹尺寸达到临界值时,扩展不稳定,形成大裂纹,从而使沥青混凝土发生断裂损伤,直至完全破坏。在沥青混凝土中掺加聚酯纤维的情况下,当银纹变成裂纹时,接口上的许多短纤维具有三维随机分布的特性,它们穿过裂纹两侧,防止裂纹传播,同时消耗分裂沥青混凝土所需的能量。另一方面,随着银纹的发展,纤维使银纹发生转向或分支。这些过程的协同作用大大提高了沥青混凝土的疲劳耐久性。但是,如果聚酯纤维掺量过多,除了与沥青、集料结合的部位外,聚酯纤维会在沥青混凝土中形成不均匀点。在反复荷载作用下,这些不均匀点会产生裂纹,然后进一步扩展,最终缩短了沥青混凝土的疲劳寿命。

## 5 表面性能影响分析

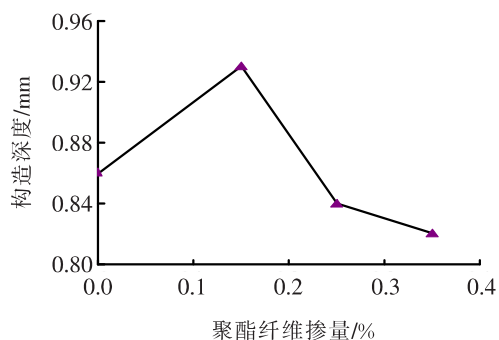
### 5.1 抗滑性能

采用摆式摩擦仪测定橡胶沥青混凝土试件表

面的摆值,采用铺砂法测定其构造深度。试验结果如图 5 所示。



(a) 摆值与聚酯纤维掺量关系曲线



(b) 构造深度与聚酯纤维掺量关系曲线

图 5 摆值、构造深度与聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between pendulum value, texture depth and polyester fiber content

分析图 5 可知:

1) 在沥青混凝土 AC-13 中加入聚酯纤维后,由于聚酯纤维对沥青具有吸附作用,“粗化”了沥青,从而提高了沥青混凝土的抗滑性能。此外,部分在沥青混凝土表面的聚酯纤维增大了沥青混凝土表面的摩擦系数,但其值并不稳定。因为一些裸露在沥青混凝土表面的聚酯纤维在交通荷载作用下会发生磨损,这导致沥青路面使用初期的摩擦系数会有所减小。但尽管沥青混凝土表面的摩擦系数存在这种不稳定性,聚酯纤维还是在一定程度上提高了沥青路面的抗滑性能。

2) 在沥青混凝土中加入聚酯纤维后,少量位于沥青混凝土表面的聚酯纤维加深了沥青混凝土的构造深度。但随着聚酯纤维掺量的增大,构造表面会被多余的聚酯纤维填充,使构造深度有所变浅。

## 5.2 渗透性能

采用渗水试验测定橡胶沥青混凝土试件表面的渗水系数,试验结果如图 6 所示。

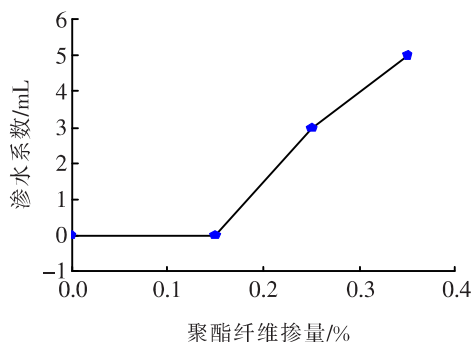


图 6 渗水系数与聚酯纤维掺量关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between water permeability coefficient and polyester fiber content

分析图 6 可知,不同聚酯纤维掺量下的橡胶沥青混凝土的渗水系数均很小,几乎是不透水的。一方面,因为沥青混凝土级配连续,所以结构紧凑不透水;另一方面,由于渗透计的水压和水量较小,很难在短时间内准确测量沥青混凝土的渗水系数。

## 6 结论

1) 掺加聚酯纤维能明显改善橡胶沥青混凝土的性能,当聚酯纤维掺量增大到一定值时,各项性能指标出现峰值。但随着聚酯纤维掺量的进一步增大,各项性能指标又呈下降趋势。

2) 沥青混凝土各项性能指标出现峰值时对应的聚酯纤维掺量之间存在差异。当聚酯纤维掺量为 0.15%~0.25%时,沥青混凝土的各项性能指标一般会达到峰值。因此,对于橡胶沥青混凝土,聚酯纤维的最佳掺量在 0.20%左右。

3) 对于聚酯纤维掺量为 0.35%的橡胶沥青混凝土,由于在搅拌过程中很难将聚酯纤维完全分散,聚酯纤维易出现聚团现象,导致其各项性能指标低于未掺聚酯纤维的沥青混凝土。

## 〔参考文献〕

- [1] 杨军. 聚合物改性沥青[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:43-55.  
YANG Jun. Polymer modified asphalt[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:43-55.
- [2] 郭浩然. SBS/橡胶复合改性沥青性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018:33-57.  
GUO Hao-ran. Study on the properties of SBS/rubber composite modified asphalt[D]. Chongqing: Chongqing

- Jiaotong University, 2018: 33-57.
- [3] Lin P, Huang W D, Tang N P, et al. Performance characteristics of terminal blend rubberized asphalt with SBS and polyphosphoric acid[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 171-182.
- [4] Elisabeta I S, Isabella N, Bagdat T, et al. Highly stable surfactant-crumb rubber-modified bitumen: NMR and rheological investigation[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(5): 192-1202.
- [5] 郭德栋, 许宏妹, 李小刚, 等. 级配类型对纤维沥青混合料路用性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 116-119.
- GUO De-dong, XU Hong-mei, LI Xiao-gang, et al. Influence of graduation types on pavement performance of fibers-reinforced asphalt mixture[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(1): 116-119.
- [6] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞. 掺加纤维对橡胶沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(5): 6-11.
- LIU Shao-peng, HUANG Wei-dong, JI Shu-zhen. Effect of fibers on fatigue performance of asphalt rubber mixture[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(5): 6-11.
- [7] 查旭东, 李康, 袁盛杰, 等. 特种玄武岩纤维增强 OGFC-13 混合料配合比设计及路用性能试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(2): 1-7.
- ZHA Xu-dong, LI Kang, YUAN Sheng-jie, et al. Experiments of mix design and pavement performance for special basalt fiber reinforced asphalt mixture OGFC-13[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(2): 1-7.
- [8] 安静. 聚酯纤维改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 247-251.
- AN Jing. The effect of polyester fiber on road performance of asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 247-251.
- [9] 林钦国, 李斯拓, 徐宏武, 等. 聚酯纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通技术, 2020, 36(4): 23-28.
- LIN Qin-guo, LI Si-tuo, XU Hong-wu, et al. Study on pavement performance of asphalt concrete with polyester fiber[J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 36(4): 23-28.
- [10] 吴德清. 聚酯纤维改性沥青混合料试验及应用研究[J]. 公路与汽运, 2018(3): 67-69, 114.
- WU De-qing. Test and application research of polyester fiber modified asphalt mixture[J]. Highways and Automotive Applications, 2018(3): 67-69, 114.
- [11] 陈伟. 聚酯纤维沥青混凝土路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019: 48-67.
- CHEN Wei. Study on road performance of polyester fiber asphalt concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019: 48-67.
- [12] 贾平虎. 纤维改性沥青与沥青混合料性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(6): 997-1000.
- JIA Ping-hu. Research on properties of fiber modified asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2018, 42(6): 997-1000.
- [13] 章汪琛. 纤维沥青混合料路用性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 50-65.
- ZHANG Wang-chen. Experimental study on pavement performance of fiber asphalt mixture[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 50-65.
- [14] 唐芳. 木质素纤维与橡胶沥青复合改性高 RAP 掺量温拌再生混合料路用性能与耐久性研究[J]. 公路, 2017, 62(10): 201-207.
- TANG Fang. Research on road performance and durability of composite modified high RAP content warm mix recycled mixture with lignin fiber and rubber asphalt[J]. Highway, 2017, 62(10): 201-207.
- [15] Sandra O, José L F, Jesner S I. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26: 13-20.
- [16] 熊伟. 聚酯纤维和 TB 胶粉对高 RAP 掺量沥青混合料路用性能和自愈合性能的影响[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 284-290.
- XIONG Wei. Effect of polyester fiber and TB rubber powder on road performance and self-healing performance of high RAP content asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2): 284-290.
- [17] Yang J H, Leng Z, Ling C, et al. Characterization and comparison of high-modulus asphalt mixtures produced with different methods[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117594.
- [18] Huang Q B, Qian Z D, Zhang M, et al. Experimental investigation of the road performance of terminal blend rubber asphalt mixture with different dry-way additives[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 629(1): 012006.