

文章编号:1673-9469(2020)02-0018-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.02.004

# 纤维掺量对聚酯纤维沥青混合料路用性能的影响研究

周群,荣浩\*,吴昌霞

(广西交投集团有限公司,广西 南宁 530007)

**摘要:** 针对如何提升沥青混合料使用效果的问题,采用马歇尔试验方法,研究了不同掺量的两种纤维掺入后对马歇尔指标的影响,得出对相关指标的影响规律。结果表明:常规的混合料沥青的最优使用量与纤维的加入数量成正比关系,会随着纤维加入数量的提升而升高,但加入量超过一个门限值时,沥青的最优使用量便不再变化;加入纤维后混合料密度均有所下降,空隙率都增大,而且纤维含量越大越明显。混合料的稳定性和流值会随着掺入两种纤维后而提高,加入聚酯纤维混合料表现的增加幅度尤其明显。

**关键词:** 聚酯纤维;沥青混合料;马歇尔试验;配合比设计

中图分类号:TU535

文献标识码:A

## Influence of Fiber Content on Pavement Performance of Polyester Fiber-reinforced Asphalt Mixture

ZHOU Qun, RONG Hao\*, WU Changxia

(Guangxi Transportation Research & Consulting Co. Ltd, Nanning, Guangxi 530007, China)

**Abstract:** Marshall Test was performed to find out how to improve the application effect of asphalt mixture. The effect of two types of fibers with different contents on Marshall Index was investigated to determine the laws of influence on relevant indexes. The results show that the optimal usage of conventional asphalt mixture is proportional to the amount of fiber added. Specifically, the optimal usage increases with the amount of fibers added. However, when the amount of fibers added exceeds one threshold, the optimal usage remains unchanged. The more the fibers are added, the more obviously the mixture density decreases and the voidage increases. The stability and flow value of mixture increases as the two types of fibers are added. In particular, the stability and flow value undergo a significant increase when the polyester fiber-reinforced mixture is added.

**Key words:** polyester fiber; asphalt mixture; Marshall's test; mix design

目前,我国正在大力投资基础设施建设,其中高等级公路是建设的重点。在已建成的公路之中,沥青路面结构的公路已接近高等级公路比例的九成左右。为了改善沥青路面的使用性能,就必须提高沥青混合料的路用性能,降低路面的破损率。一般来说,沥青混合料的路面使用性能划分为表面性能、低温抗裂性能和高温性能<sup>[1]</sup>。但以上三种使用性能之间相互矛盾,并且采用传统筑路材料建成的路面存在较多通病<sup>[2]</sup>,所以研发能够提高道路表面的耐用性,提升交通使用感受,提高道

路投资回报率的路面材料迫在眉睫。近些年来,参考国外的发展动态和做法<sup>[3-4]</sup>,路用性能好、施工技术简单的纤维加强沥青混凝土引起国内学者的广泛关注<sup>[5-8]</sup>。在我国的沥青路面中,应用最为广泛的、为大部分人所熟悉的是木质素纤维<sup>[9]</sup>。钢纤维及石棉纤维在沥青混凝土中的应用相对就少了很多。而在合成纤维中,聚酯纤维表现出了良好的抗高温性和抗拉伸性<sup>[10-12]</sup>,将聚酯纤维应用到沥青混凝土作为加强筋使用,能够提高沥青路面的力学性能<sup>[13]</sup>。

收稿日期:2020-01-02

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB17292035)

作者简介:周群(1968-),女,江西上饶人,工程硕士,高级工程师,从事公路与城市道路方面的研究。

\* 通讯作者:荣浩(1982-),男,山东德州人,工程管理硕士,高级工程师,从事道路与桥梁工程、工程管理方面的研究。

配合比设计是沥青路面施工前最为重要的一个环节,合理的配合比设计往往是决定路面质量好坏的一个前提。为了研究聚酯纤维沥青混凝土在路面中的使用效果,作者开展了加入聚酯纤维沥青拌和料配合比的总体设计原则研究,研究纤维掺量对混合料性能的影响规律,利用马歇尔试验进行了配合比设计及试验,对聚酯纤维沥青混合料的高温稳定性、低温稳定性和水稳定性进行了试验分析,研究纤维掺量对聚酯纤维沥青混合料路用性能的影响,以期可以提供合理的聚酯纤维沥青混合料配合比设计方法。

## 1 纤维性能指标要求及试验方法

沥青胶结料的技术指标包括耐热稳定性、吸水率、平均析出量等,本次研究选取了最常用的路孚 8000 及路伏特两类道路专用聚酯纤维作为试验对象。所采用的试验方法参照现行《沥青及沥青混合料试验规程》操作<sup>[14]</sup>,具体进行了如下试验:

### 1.1 耐高温试验

以混合料拌和的具体工程施工为例,其释放的温度可达近 200 °C,所以对于纤维的耐高温性能要求非常高,必须做到高温受热不能产生物理和化学反应,保证其正常使用效用。所以针对所用纤维的耐高温稳定性试验是非常必要的。

具体试验步骤:取两类等量纤维(路伏特及路孚 8000)作为试样,分别倒入相同大小指定容器,放入烘箱,温度设置为 163 °C,放置 5 h,检验其外观及内部化学反应。

### 1.2 吸水性试验

众所周知,沥青混合料的性能受纤维的吸水性影响很大,纤维的吸水性可以通过检测纤维的外观变化和吸水率的有效测定反映出来。

具体试验步骤:取两类等量纤维(路伏特及路孚 8000)作为试样,各取 3 份放于相同大小指定容器,称取两份容器及内部纤维质量,然后将两个容器放入同一保湿箱,设置好指定温湿度(温度 200 °C,相对湿度 90%),选取抽样时间观察其质量变化和内部纤维外观变化并记录,检测其纤维的吸水性。

### 1.3 沥青析出试验

检测在指定温度环境中纤维沥青析出数量,从而检测纤维对沥青的可持能力。

具体试验步骤:选择两类等量纤维(路伏特及路孚 8000)各 10 g,各放入 100 g 沥青中,在 150 °C 的高温环境中搅拌至均匀,之后冷却操作,稳定后取样各 40 g 放置到网孔大小为 0.25 mm 的网篮中,恒温放置 2 h,每 0.5 h 检测沥青的掉落数量,并记录。

受试验条件限制,无法对拟采用的聚酯纤维的各项性能指标进行检测,直接采用生产厂家提供的聚酯纤维性能指标,详见表 1。

表 1 纤维性能指标表

Tab.1 Fiber performance index

品牌	原材料	颜色	卷曲度	长度/mm	直径/mm
路伏特	聚酯	自然色	无	6±1.5	0.02±0.005
路孚 8000	聚酯	自然色	无	6	0.02±0.005
品牌	比重	熔点/°C	燃点/°C	拉伸强度/MPa	断裂伸长/%
路伏特	1.36±0.04	>250	>540	>500	33±9
路孚 8000	1.38	>249	>556	>531	<50

## 2 聚酯纤维沥青混合料配合比方案设计

### 2.1 级配曲线方案

针对聚酯纤维沥青混合料进行配合比方案设计,其合成级配及级配曲线如图 1 所示。

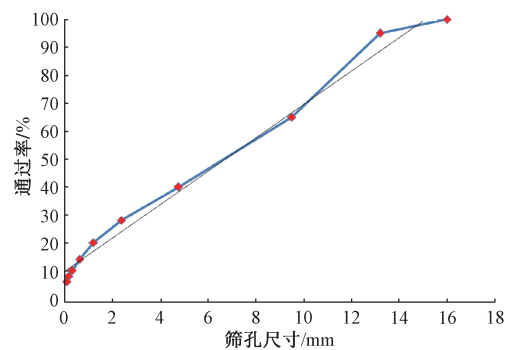


图 1 试验用级配曲线

Fig.1 Gradation curves for testing

### 2.2 沥青最佳用量的确定方法

采用马歇尔试验确定沥青最佳用量的方法是使用自动马歇尔仪双面击实 75 次<sup>[15]</sup>。马歇尔试验在研究分析纤维的长度、细度、剂量以及同一标准沥青用量和不同类别纤维混合后影响程度时,其试验试件均可达到 75 次。针对冻融劈裂试验,要先进行试击实,得出不同击实次数-孔隙率的曲线图,然后通过击实次数-孔隙率曲线图得出孔隙率 8%时的击实次数。

表 2 试验用级配表  
Tab.2 Fiber curves for testing

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	95	65	40	28	20	14	10	8	6

首先,需要确定沥青最优使用量和矿料级配,根据马歇尔法得出的时间体积和毛体积密度可得出车辙试件的重量,然后再乘以 1.005 的系数即可。通过轮碾法制作 50 mm×300 mm×300 mm 的板材,温度设置为介于 160 °C ~ 170 °C 之间,板材成型后立即对混有纤维混合料装模碾压,次数控制在 12 次左右,直至测试样本齐平,在碾压过程中控制尽量不让混合料溢出,同时确保碾压后密实度达到马歇尔标准击实密度的(100±1)%。

按表 2 的级配,纤维掺量、拌和方法采用 4%~6% 的油石比,间隔 0.5% 的 5 组配合比设计。依据纤维的使用数量及用料类别,矿料种类及标准沥青使用数量范围,通过使用马歇尔方法完成最优沥青使用数量的确定,确定两种纤维(路伏特及路孚 8000)的计量结果为:0.25%、0.5%,而所用的矿料级配如表 2 所示,其马歇尔物理力学指标的要求见表 3。

表 3 马歇尔物理力学指标要求  
Tab.3 Marshall's test physical and mechanical index requirements

指标	稳定度 /kN	流值 (0.1 mm)	孔隙率 /%	饱和度 /%	矿料间隙率/%
要求	≥8	20~40	3~5	65~75	≥14

值得注意的是,添加了纤维的混合料在拌制过程中应该有以下几点需要注意:

### 2.2.1 混合料拌和时温度设置

根据试验规范说明,对拌和温度的定义是:针对普通沥青拌合料,选取运动粘度为 150~190 mm<sup>2</sup>/s 时的温度作为沥青的拌和温度,加入纤维后的温度往往会高于没有加入纤维的基质沥青。而沥青的拌和温度会低于粗集料、细集料及矿粉的温度 15 °C 上下。所以综上,可以选取 180 °C 作为纤维沥青混合料的拌和温度,设定沥青在试验中的拌和温度取值为 170 °C,设定矿料的预热温度为 185 °C。

### 2.2.2 混合料击实温度设置

通过实践经验,随着纤维的加入,沥青混合料的矿料间隙率会随之增加,混合料的密度会随之减少。而随着温度降低,沥青混合物会出现击实效果不明显的现象,所以混合物完成之后应迅速装入模具进行击实操作,以免出现上述现象。另

外,在进行车辙试验、马歇尔试验过程中用到的试模应在烘箱里预热大于 1 h 后才能使用。

### 2.2.3 混合料拌和工序和时间

根据拌和方式区分,可将纤维沥青混合料细化为湿法拌和和干法拌和两种方式。湿法拌和的第一道工序是纤维沥青胶体的制作,是按一定的比例和数量将沥青和纤维进行混合,然后使用常规沥青混合料的拌和方法搅拌而形成;而与之对应的干法拌和是首先将矿料和纤维拌和约 1.5 min,目测搅拌均匀后投入沥青,搅拌约 1.5 min,再加入矿粉搅拌 1 min,整个搅拌用时约为 3.5 min。需要注意的是,拌和时间取决于拌和料中的矿料和纤维的疏密度。要掌握拌和时间的度,拌和时间太短会不利于纤维的均匀分布,时间太长会改变纤维及沥青的性能,所以注意拌和时间不应大于 4 min。本文主要以干法拌和进行试验操作。

## 2.3 最佳油石比试验结果

根据上述试验方案,考虑不同工况进行试验,各项物理力学指标与油石比的关系曲线见图 2—图 6。

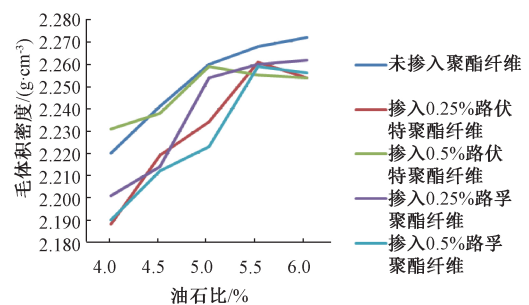


图 2 密度与油石比的关系

Fig.2 Relation between density and oil-stone ratio

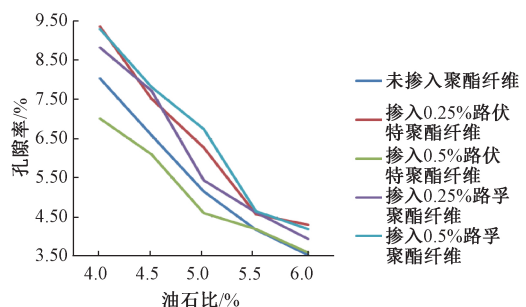


图 3 空隙率与油石比的关系

Fig. 3 Relation between void fraction and oil-stone ratio

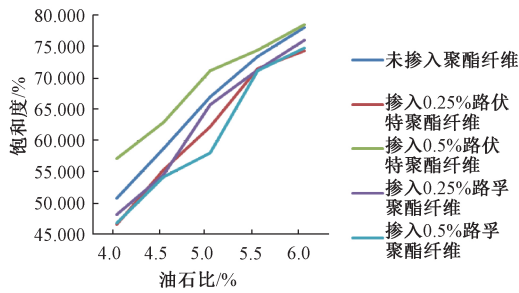


图 4 饱和度与油石比的关系

Fig.4 Relation between saturation and oil-stone ratio

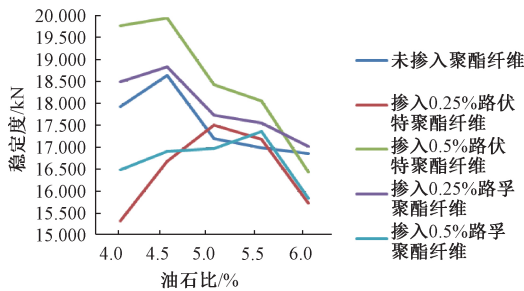


图 5 稳定度与油石比的关系

Fig. 5 Relation between stability and oil-stone ratio

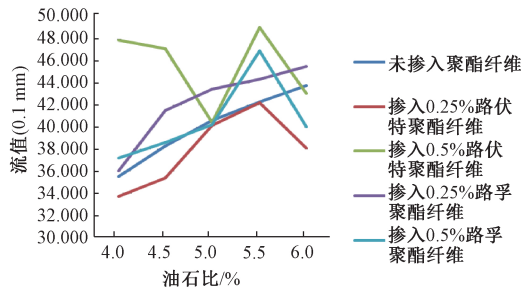


图 6 流值与油石比的关系

Fig.6 Relationship between flow value and oil-stone ratio

根据各项马歇尔指标与油石比之间的关系曲线,最终确定不掺纤维的最佳油石比为 5.2%;掺入

0.25%路伏特聚酯纤维的最佳油石比为 5.4%;掺入 0.5%路伏特聚酯纤维的最佳油石比为 5.5%;掺入 0.25%路孚聚酯纤维的最佳油石比为 5.4%;掺入 0.5%路孚聚酯纤维的最佳油石比为 5.5%。

### 3 聚酯纤维沥青混合料性能试验

#### 3.1 纤维沥青混合料路用性能验证

通过马歇尔试验得到的最佳油石比,对 5 组配合比的高温稳定性和水稳定性进行了验证,其结果如表 4 所示。

从表 4 中试验结果看,以上 5 组配合比的高温稳定性均满足规范要求,而随纤维掺量的增加,动稳定度也随之增加。水稳定性方面,浸水马歇尔试验的残留稳定度均达到 90% 以上,冻融劈裂强度比也达到 90% 以上,但是两者的变化不是与纤维掺量成正比增加。通过配合比设计验证得出,以上 5 组配合比都是合格的。

#### 3.2 纤维对混合料体积指标的影响

根据上述的试验结果,按最佳油石比成型 5 组试件,其各项物理力学性能指标见表 5。

下面从 5 组配合比的体积指标和力学指标两个方面进行分析。

##### 3.2.1 聚酯纤维种类的对比分析

本次试验对未掺纤维和路伏特和路孚 8000 两种聚酯纤维在 0.25% 和 0.5% 掺量情况下的配合比进行了设计。从试验结果可以看出,路伏特和路孚 8000 在掺入量相同时,最佳油石比基本相同;且在最佳油石比情况下马歇尔物理力学各项指标差别不大。由于本次研究着重于不同掺量的纤维对聚酯纤维沥青混合料路用性能的影响,因此考

表 4 高温稳定性和水稳定性验证结果

Tab.4 Verification results of high temperature stability and water stability

方法	指标	0%纤维	0.25%路伏特	0.5%路伏特	0.25%路孚	0.5%路孚
动稳定度	第 1 次试验/(次·mm <sup>-1</sup> )	7 726	8 565	10 321	6 681	10 819
	第 2 次试验/(次·mm <sup>-1</sup> )	6 900	7 123	7 406	8 123	8 230
	第 3 次试验/(次·mm <sup>-1</sup> )	6 377	6 183	8 772	10 580	7 753
	平均值/(次·mm <sup>-1</sup> )	7 001	7 290	8 833	8 461	8 934
浸水马歇尔	未浸水/kN	16.83	17.8	17.29	18.04	16.76
	浸水/kN	15.72	16.5	15.81	16.77	15.47
	残留稳定度/%	91.1	92.5	91.5	93.0	92.3
冻融劈裂	未冻融/kN	0.969	1.066	1.111	1.009	1.035
	冻融后/kN	0.873	0.990	1.001	0.939	0.947
	强度比/%	90.1	92.9	90.1	93.1	91.5

表5 最佳油石比情况下马歇尔物理力学指标

Tab.5 Marshall's test physical and mechanical index under the optimal ratio of oil to stone

指标	0%纤维	0.25%路伏特	0.5%路伏特	0.25%路孚	0.5%路孚
最佳油石比/%	5.13	5.35	5.48	5.36	5.50
毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.265	2.252	2.257	2.257	2.259
孔隙率/%	4.74	5.042	4.621	4.941	4.654
矿料间隙率/%	15.80	16.23	16.25	16.00	16.08
饱和度/%	69.6	65.51	71.01	69.01	71.08
稳定度/kN	16.83	17.36	18.52	17.63	16.94
流值(0.1 mm)	41.0	41.02	40.21	44.02	40.20

虑使用路伏特和路孚 8000 两种聚酯纤维,以提高研究代表性,对不同聚酯纤维类别之间的差异不作展开探讨。

### 3.2.2 最佳油石比

在矿料和添加剂确定,要求的沥青膜厚度一致的情况下,影响最佳油石比的最主要的因素就是集料和添加剂的比表面积,比表面积越大,最佳沥青用量越大。由于纤维的直径只有 20 μm 左右,密度大约在 1.36 g/cm<sup>3</sup>,长度约 6 mm,通过计算可以得到 1 g 聚酯纤维中约含 40 万根纤维。按混合料的 0.3%的掺量,一个马歇尔试件约(1 200 g)约含 144 万根纤维。虽然只有混合料的千分之几的掺量,但是也在很大程度上增加了集料的比表面积,由于比表面积的增加,油石比增加是理所当然的。通过试验,由于比表面积的增加,每增加 0.1%的纤维,最佳油石比的就要增加 0.05%左右。

### 3.2.3 毛体积密度

当纤维掺量为 0.25%时,混合料的毛体积密度比不掺纤维小,但是在纤维掺量达到 0.5%时,毛体积密度又有所回升,但是幅度不是很大,基本上维持在 2.25 左右。这种现象在加入两种不同的聚酯纤维的情况都是一样,说明这不是偶然的。

在纤维掺量为 0.25%时,混合料的毛体积密度减小 0.01 g/cm<sup>3</sup> 以上,相当于混合料的孔隙率增加 0.5%以上。这主要是由于纤维的加入导致混合料的矿料间隙率增加,虽然增加了沥青含量,加入了纤维,但是纤维和沥青的密度都只有 1 g/cm<sup>3</sup> 左右,导致了混合料的密度变小。同时,由于纤维的添加,纤维、矿粉和沥青组成的胶浆粘度增大,击实难度增加,混合料的空隙率有所增加,毛体积密度减小。

在纤维掺量为 0.5%时,密度基本上与纤维掺量为 0.25%时维持在同一水平上。由于最佳油石比的进一步增加,沥青用量增大,沥青和纤维较小密度对试件毛体积密度的影响,同时油石比和纤

维掺量进一步增加导致击实难度下降和孔隙率减小而增加试件的毛体积密度。两者之间影响趋于平衡,其结果是毛体积密度和纤维掺量在 0.25%时基本维持在同一水平。

### 3.2.4 孔隙率

孔隙率在纤维掺量分别为 0.25%和 0.5%时有一个先增大后减小的过程。在 0.5%纤维掺量情况下的孔隙率比不掺纤维时稍微小一些。孔隙率和密度是两个相对应的指标,孔隙率大相应的密度就小,反之亦然。其原因和密度变化是对应的,这里就不再详述。

### 3.2.5 饱和度及矿料间隙率

可以从表 5 的数据中看到,在纤维掺量为 0.5%时,混合料的沥青饱和度比纤维掺量为 0.25%时增加较大,说明沥青、纤维对矿料间隙填充更加充分。在矿料间隙率维持在同一水平,设计孔隙率保持不变时,混合料的密度会随着沥青含量的提高、饱和度的提高而提高,同时由于掺加的沥青和纤维量增加、胶浆粘度也增大,导致密度的减小。

### 3.2.6 流值和稳定度

试验结果表明,混合料的稳定度会随着纤维加入数量的增加而增加,但是当掺入量在 0.5%之后稳定度会随之降低;沥青用量直接影响着流值,流值体现了试件的抗冲击变形能力,尤其当试件达到破坏荷载门限后,假如此时的变形值能持续更久时间则更能体现沥青混合料的抗冲击变形能力。当然,流值的大小受纤维掺量的多少所影响:混合料中的沥青含量会随着纤维加入量的增大而增多,同时,加入纤维后,混合料的抗变形能力会有效加强。在试验过程当中,未加入纤维的混合料都比较脆弱,试件在最大破坏荷载时立刻松散或者劈裂。由于纤维的加入,增加了混合料韧性,提高了混合料的变形能力,导致混合料的流值增多。

## 4 结论

1)混合料沥青的最优使用量与纤维的加入数量成正比例关系,会随着纤维加入数量的提升而升高,但加入量超过一个门限值时,沥青的最优使用量便不再变化。

2)混合料密度会随着加入纤维而降低,但空隙率会提高,其中纤维的含量越大这种现象越显著。

3)混合料的稳定度和流值会随着掺入两种纤维后而提高,其中加入聚脂纤维混合料增加幅度尤其明显。

4)对纤维沥青混合料,配合比设计过程中需要注意以下几方面内容:第一是拌和混合料时由于纤维的加入拌和时间和拌和温度都要有所增加,干拌时间增加 30 s 左右,拌和温度提高 5 ℃ ~ 10 ℃。第二是混合料设计指标中 VMA 应比规范要求提高 0.5%,稳定度提高到不小于 10 kN,流值适当放宽到 2~5 mm。

### 参考文献:

- [1]郝景贤.聚酯纤维对沥青混合料的性能影响研究[J].公路,2015(5):194-197.
- [2]张楠,郑南翔,高志敏.中空聚酯纤维沥青混合料的热阻及路用性能研究[J].公路交通科技,2018,35(10):23-29.
- [3]GORDON D Airey. Behzad Rahimzade Bituminous Binder and Mixture Linear Rheological Properties [J]. Construction and Building Materials,2004,18:12-15.
- [4]WASAGE T L J, PONG G, FWA T F, et al. Laboratory Evaluation of Rutting Resistance of Geosynthetics Reinforced Asphalt Pavement [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2004, 44:26-28.
- [5]张争奇,姚晓光,李伟.环氧沥青混凝土柔韧性及路用性能研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(1):74-81.
- [6]高丹盈,黄春水.纤维沥青混凝土低温性能试验及温度应力计算模型[J].中国公路学报,2016,29(2):8-15.
- [7]刘冉冉,程形燕. RET 与聚酯纤维复合改性沥青混合料路用性能及改性机理分析[J].公路工程,2016,41(2):245-250.
- [8]吴晓霞.高比例 RAP 掺量橡胶热再生混合料路用性能与改性机理研究[J].公路工程,2016,41(4):118-123.
- [9]周刚,李培国,陈天泉,等.聚酯纤维及沥青对高 RAP 掺量沥青混合料路用性能的研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2016,35(4):40-46.
- [10]伍剑奇.聚酯纤维复合改性沥青混合料路用性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2017(7):39-45.
- [11]周斌.聚酯纤维对 TPS 改性沥青及其混合料抗裂性能的影响[J].公路工程,2017,42(2):314-318.
- [12]王宏.聚酯纤维对硬质沥青混合料增柔增韧性及改性机理试验研究[J].公路,2016(3):160-166.
- [13]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.
- [14]JTG E20-2011,公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [15]吴金荣,孙娣,张经双.氯盐对纤维沥青混凝土马歇尔试验影响[J].科学技术与工程,2016(34):261-263.

(责任编辑 王利君)