

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.040

不同外掺纤维增强排水沥青混合料性能研究

高桂海,熊梅,钱波

(西昌学院,四川 西昌 61500)

摘要: 以提高排水沥青路面的稳定性、抗变形能力以及抗疲劳开裂性能为目标,分别选取3种不同纤维(玄武岩纤维、木质素纤维、聚丙烯纤维)作为增强稳定剂,纤维掺量以0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%不等进行PAC-13排水沥青混合料配合比设计,以高温车辙、残留稳定度、冻融劈裂强度比、低温抗裂性以及四点弯曲疲劳寿命作为评价指标衡量排水沥青路面的路用性能。研究表明:玄武岩纤维作为一种新型材料,用其制备成型的沥青混合料在低温抗裂和抗疲劳性能方面具有较好的表现,更适用于排水沥青路面的材料选择。在室内研究的基础上铺筑掺玄武岩纤维的排水沥青路面试验段,验证了玄武岩纤维增强排水沥青路面性能的有效性。在“海绵城市”发展理念的大背景下,玄武岩纤维在排水沥青路面中具有较好的应用前景。

关键词: 排水路面; 不同纤维; 纤维掺量; 路用性能; 工程应用

排水沥青混合料(Porous Asphalt Concrete, PAC)是一种具有连通空隙的级配沥青混合料,因其具有良好的排水抗滑性能而在国内外得以广泛应用。但排水沥青混合料的高空隙率致使它抵抗外界侵蚀能

力较差,易发生沥青膜老化现象,且抗压、抗剪切能力差,所以在地形复杂、地势较陡或车流量较大地区较少使用。现阶段中国经济发展突飞猛进,高速公路交通路况呈现重载荷、高流量和渠道化等明显特点,复杂的

运动,最终填充大颗粒间空隙。处于试件下部的颗粒受到底部约束的作用,向下方运动的同时向两侧偏移。

参考文献:

- [1] Timoshenko S. P., Goodier J. N., Theory of Elasticity [M], McGraw-Hill Book Company, 1970: 420-422.
- [2] 张争奇,边秀奇,杜群乐. 沥青混合料压实特性影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012(6).
- [3] 何义. 真空压实沥青混合料细观结构研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2016.
- [4] 李晓辉. 沥青路面真空压实技术的试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2016.
- [5] 苏沛. 基于离散元法的沥青混合料真空压实特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [6] Chang, K. G., Meegoda, J. N., Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 12(5): 495-503.
- [7] You, Z., Buttlar, W. G., Application of Discrete Element Modeling Techniques to Predict the Complex Modulus of Asphalt-Aggregate Hollow Cylinders Subjected to Inter-
- nal Pressure[J]. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, 2005: 218-226.
- [8] You, Z. P., Development of a Micromechanical Modeling Approach to Predict Asphalt Mixture Stiffness Using the Discrete Element Method[D]. Ph.D. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [9] Zelelew, H., Papagiannakis, T., Micromechanical Modeling of Asphalt Concrete Uniaxial Creep Using the Discrete Element Method[J]. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(3): 613-632.
- [10] Habtamu Zelelew, Enad Mahmoud, Micromechanical Simulation of the Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures[C]. Niki Kringos, Björn Birgisson, David Frost, Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, Dordrecht Heidelberg New York London: Springer, 2013: 421-432.
- [11] 张德育, 黄晓明, 高英. 沥青混合料三维离散元虚拟单轴蠕变试验[J]. 华南理工大学学报, 2012(7).
- [12] 裴建中, 张嘉林, 常明丰. 矿料级配对多孔沥青混合料空隙分布特性的影响[J]. 中国公路学报, 2010(1).

收稿日期: 2019-06-02

作者简介: 高桂海, 男, 大学本科, 高级工程师/副教授, E-mail: 1526160064@qq.com

温度环境、荷载作用进一步加速了排水沥青路面的破坏,导致其出现一系列早期病害。

近年来,有学者对纤维增强排水沥青混合料展开了研究,结果表明:纤维对增强排水沥青混合料高温稳定性、水稳定性、耐久性等方面均有显著效果。因此,在排水沥青混合料中添加纤维成了解决问题的主要方案之一。该文以提高排水沥青混合料路用性能为目标,研究不同纤维类型、纤维掺量对排水沥青混合料路用性能的影响,以推动新型环保路面材料的发展和应用。

1 原材料与试验方案

1.1 集料和填料

试验集料选用河南周口产玄武岩粗、细集料,填料选用镇江产石灰石矿粉,各矿料的技术性质均满足规范要求,集料表面无污物,不含风化产生的细小颗粒,

形状规整,扁平状集料含量少。

1.2 高黏沥青

试验中高黏沥青采用河南产成品高黏沥青,其性能试验结果见表 1,达到 JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》使用要求。

1.3 玄武岩纤维

玄武岩纤维是对玄武岩矿石通过破碎、熔化、喷丝等工艺处理所获得,熔化温度高达 1 500 ℃,外表与截面形态与玻璃纤维近似。试验中玄武岩纤维采用西安产玄武岩纤维,该文采用的玄武岩纤维长度为 9 mm [图 1(a)]。

1.4 木质素纤维

木质素纤维是天然木材经过化学处理得到的有机纤维,外观为棉絮状,呈白色或灰白色。对防止涂层开裂、提高保水性、提高生产的稳定性和施工和易性、增加强度、增强对表面的附着力等有良好的效果[图 1(b)]。

表 1 高黏沥青性能指标及试验结果

项目	针入度 (25 ℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度(5 cm/min, 5 ℃)/cm	闪点/ ℃	旋转薄膜加热试验	
					质量变 化/%	针入度 比/%
规范要求	≥40	≥90	≥30	≥230	≤±1.0	≥65
试验结果	56	97	37	309	-0.08	76
试验方法	T0604	T0606	T0605	T0611	T0610	T0604

1.5 聚丙烯纤维

试验采用丹阳产聚丙烯纤维,其在碱性环境下非常稳定,有较高的熔点,表面憎水,100%的湿强保持率,质量轻、价格低,加工性能优良,纤维长度选用 19 mm[图 1(c)]。

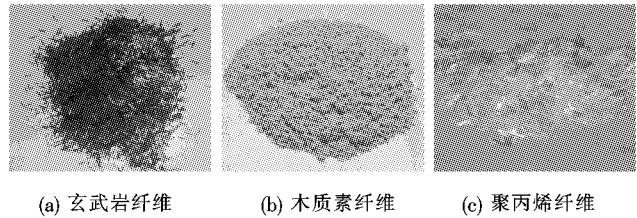


图 1 纤维种类

1.6 试验方案

研究选用玄武岩纤维、木质素纤维、聚丙烯纤维,纤维掺量分别为 0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%进行排水沥青混合料成型试验,采用析漏试验与飞散试验初步确定最佳油石比并通过马歇尔试验进行验证。采用高温车辙、低温弯曲、浸水马歇尔、冻融劈裂以及四

点弯曲疲劳等室内试验,分析其高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和抗疲劳性能。

2 排水沥青混合料配合比设计

试验采用 PAC—13 的级配进行排水沥青混合料配合比设计,排水沥青混合料 PAC—13 级配的关键影响因素为 2.36 mm 筛孔通过率,该筛孔集料通过率需控制在 14.5% 左右。以掺 0.4% 玄武岩纤维的排水沥青混合料为例,试验排水沥青混合料 PAC—13 的设计级配曲线见图 2。矿料级配确定后,根据以往试验经验及初始沥青用量的计算公式,将初始沥青用量定为 5%。在确定最佳沥青用量时,一般在初始沥青用量基础上,以 0.5% 的增减幅度,选取 5 组油石比。该文选取 5 组油石比为 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%。按照所选取的 5 组油石比拌和排水沥青混合料,制成马歇尔试件进行析漏试验与飞散试验,飞散和析漏损失与油石比关系曲线见图 3,根据试验结果分析得到掺

0.4%玄武岩纤维沥青混合料的最佳油石比为4.8%。

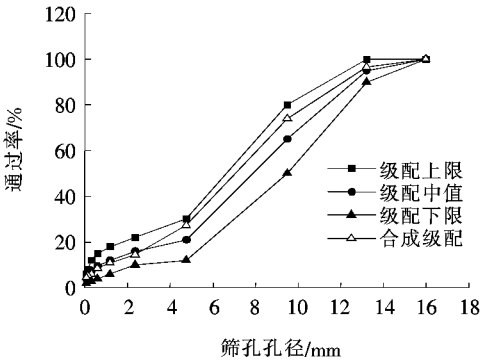


图 2 PAC-13 设计级配曲线

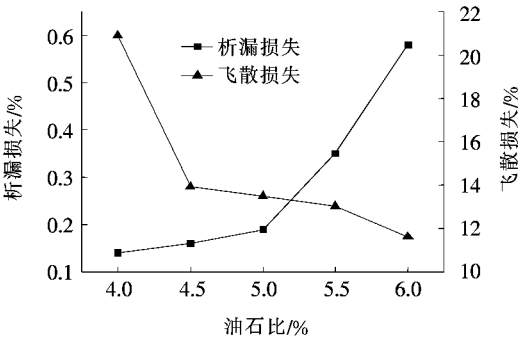


图 3 0.4%玄武岩纤维掺量下混合料的飞散和析漏损失与油石比关系曲线

对 3 种纤维在不同纤维掺量下的沥青混合料进行配合比设计,通过析漏试验与飞散试验确定最佳油石比。在此基础上,进行 PAC-13 沥青混合料马歇尔试验,试验结果如表 2 所示。由表 2 可以看出:随着纤维掺量的增加,掺不同纤维的沥青混合料的最佳油石比均有一定上升。但空隙率、稳定性和流值这些指标相差不大。

将 3 种纤维在不同纤维掺量下的析漏损失和飞散损失进行汇总,试验结果如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知:随着纤维掺量的增加,3 种掺不同纤维的沥青混合料,其析漏损失和飞散损失都有所降低。其中,掺玄武岩纤维的沥青混合料析漏损失最大,掺木质素纤维的沥青混合料飞散损失最大。但析漏损失和飞散损失变化幅度较小,符合排水沥青混合料配合比设计要求。

3 排水沥青混合料路用性能

3.1 高温稳定性

采用高温车辙试验对添加不同纤维类型和掺量的

表 2 PAC-13 沥青混合料马歇尔试验结果

纤维类型	纤维掺量/%	油石比/%	空隙率/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
玄武岩纤维	0.2	4.8	17.93	10.23	36.72
	0.3	4.8	17.37	9.38	34.21
	0.4	4.8	17.31	9.83	36.32
	0.5	4.9	17.35	10.35	32.81
	0.6	4.9	16.78	9.87	34.22
	0.2	4.8	17.31	9.23	36.76
木质素纤维	0.3	4.8	17.20	10.74	35.83
	0.4	4.9	16.82	9.89	36.29
	0.5	4.9	16.78	9.94	33.17
	0.6	4.9	16.64	9.73	35.14
	0.2	4.7	17.32	9.45	32.62
	0.3	4.8	17.06	10.34	37.28
聚丙烯纤维	0.4	4.8	16.97	9.86	36.72
	0.5	4.9	16.83	10.23	34.27
	0.6	4.9	16.74	9.88	35.21

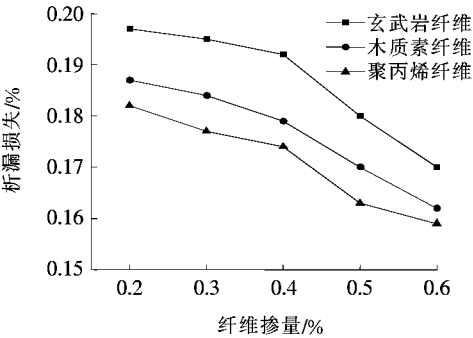


图 4 不同纤维掺量下沥青混合料析漏损失变化

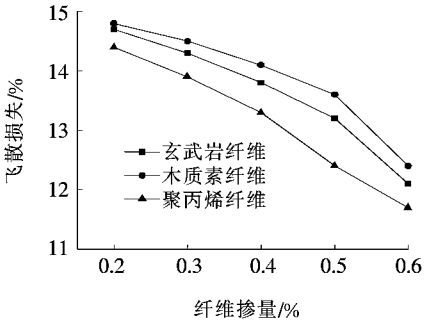


图 5 不同纤维掺量下沥青混合料飞散损失变化

排水沥青混合料进行性能研究,将长 300 mm×宽 300 mm×高 50 mm 的试件板块置于温度 60 ℃环境中,车轮压力为 0.7 MPa 进行模拟车轮反复碾压。通过车辙深度计算动稳定度,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同纤维掺量下混合料动稳定度试验结果

纤维 类型	不同纤维掺量(%)下混合料动稳定度/(次·mm ⁻¹)				
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
玄武岩 纤维	7 739	8 102	8 402	8 572	8 631
木质素 纤维	6 839	6 903	7 320	7 693	7 838
聚丙烯 纤维	6 932	7 123	7 492	7 521	7 793
不掺加 纤维	6 432				
技术要求	≥6 000				

由表 3 可知:分别掺加 3 种不同纤维排水沥青混合料的动稳定度均高于不掺加纤维混合料的动稳定度。掺加 3 种纤维沥青混合料的动稳定度值均随纤维掺量的增加而逐渐增大,其中,掺玄武岩纤维沥青混合料的动稳定度值较掺其他两种纤维沥青混合料的动稳定度值要高出很多。说明掺玄武岩纤维能够有效增强排水沥青路面抗车辙能力。

3.2 低温抗裂性

低温小梁弯曲试验按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料弯曲试验 T0715—2011 方法进行,加载速率为 50 mm/min,试验温度为-10 ℃。以规定的速率 50 mm/min 在跨中位置处施加集中荷载,仪器同时记录荷载、跨中挠度曲线至试件破坏为止。试验结果如表 4 所示。

表 4 不同纤维掺量下混合料弯拉破坏应变试验结果

纤维 类型	不同纤维掺量(%)下混合料弯拉破坏应变/μϵ				
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
玄武岩 纤维	3 102	3 230	3 512	3 689	3 821
木质素 纤维	2 993	3 103	3 303	3 502	3 567
聚丙烯 纤维	3 019	3 183	3 283	3 426	3 693
不掺加 纤维	2 758				
技术要求	≥2 500				

由表 4 可知:分别掺加 3 种不同纤维的排水沥青混合料弯拉破坏应变均高于不参加纤维混合料的弯拉破坏应变。掺加 3 种纤维沥青混合料的弯拉破坏应变

值均随纤维掺量的增加而逐渐增大。其中,当纤维掺量低于 0.3%时,3 种纤维沥青混合料的弯拉破坏应变值增长趋势较为明显,与其余两种纤维沥青混合料对应的弯拉破坏应变值拉开差距。

3.3 水稳定性

根据现行试验规范要求,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来评价沥青混合料的水稳定性,试验按 JTG E40—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0709—2011 和 T0729—2011 试验方法进行,试验结果如表 5、6 所示。

表 5 不同纤维掺量下混合料浸水残留稳定度试验结果

纤维 类型	不同纤维掺量(%)下混合料浸水残留稳定度/%				
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
玄武岩 纤维	87.8	88.4	88.9	88.5	88.8
木质素 纤维	87.2	88.3	88	87.4	87.5
聚丙烯 纤维	88.3	89.1	88.4	88.8	88.3
不掺加 纤维	88.2				
技术要求	≥85				

表 6 不同纤维掺量下混合料冻融劈裂强度比试验结果

纤维 类型	不同纤维掺量(%)下混合料冻融劈裂强度比/%				
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
玄武岩 纤维	86.3	87.8	88.7	87.2	86.8
木质素 纤维	85.3	85.6	86.5	84.1	83.4
聚丙烯 纤维	86.8	87.2	87.7	86.2	85.8
不掺加 纤维	86.4				
技术要求	≥80				

由表 5、6 可知:分别掺加 3 种不同纤维的排水沥青混合料的水稳定性均符合规范要求。其中,三者的浸水残留稳定度、冻融劈裂强度比试验结果数据较为接近,且纤维掺量与浸水残留稳定度、冻融劈裂强度比

试验值之间无明显对应关系。总的来说,掺木质素纤维沥青混合料的水稳定性能较其他两种纤维沥青混合料水稳定性稍差。

3.4 抗疲劳性

根据 JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用小梁四点弯曲疲劳试验来评价沥青混合料的疲劳性能。试验条件为温度 $(15 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,加载频率 $(10 \pm 0.1)\text{Hz}$,采用偏正弦波,应变控制模式加载,试验结果如图 6 所示。

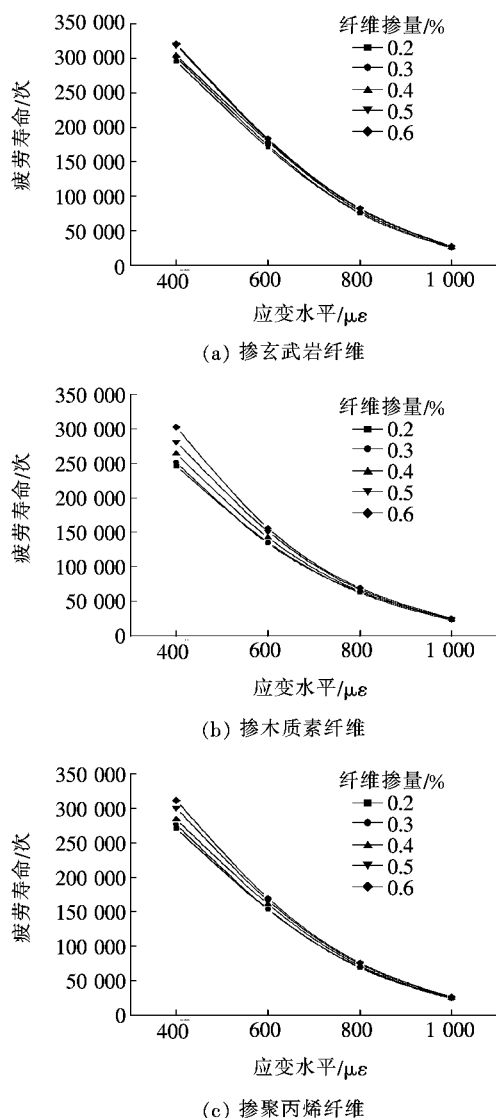


图 6 混合料疲劳寿命试验结果

沥青路面的耐久性与沥青混合料抗疲劳性能有着密切的联系,3 种不同纤维以 0.2%~0.6% 不等的掺量加入到排水沥青混合料中并测试不同应变水平条件下混合料的疲劳寿命。由图 6 可知:混合料的疲劳寿命随纤维掺量的增大而提升,在同等掺量条件下,掺玄

武岩纤维的混合料疲劳寿命优于掺聚丙烯纤维的混合料疲劳寿命,掺木质素纤维的混合料疲劳寿命整体提升幅度较小。与此同时,掺木质素纤维和聚丙烯纤维的混合料,其疲劳寿命受纤维掺量波动幅度较大。总的来说,掺玄武岩纤维的混合料抗疲劳性能优于其他两种。

4 工程应用

4.1 工程概况

在河南南阳某城市快速路改造过程中对辅路进行排水沥青路面工程应用室外试验段验证,将上面层 AC-13 级配的沥青混合料设计成 PAC-13 的排水沥青路面,与中面层之间用防水黏结层相连,排水沥青混合料分别采用 3 种纤维进行稳定增强。其路面结构设计及排水路面示意图分别见图 7、8。

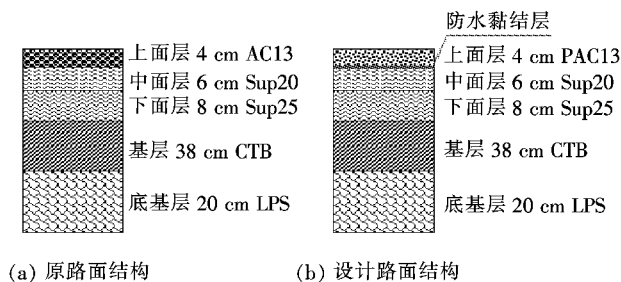


图 7 路面结构设计

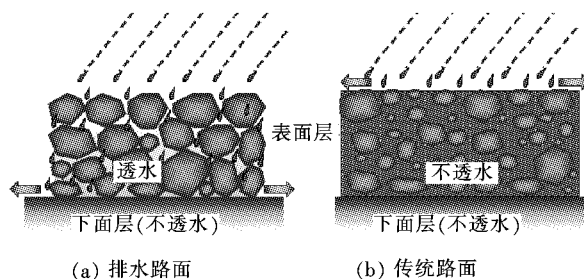


图 8 排水路面示意图

4.2 渗水试验

为评价沥青路面的排水功能,对排水沥青路面进行渗水系数试验。将路面渗水仪放置在排水沥青路面上,并用黏土将渗水仪与地面接触部分进行黏封,使水无法从渗水仪底部边缘的空隙流出。往路面渗水仪中倒入水使凹液面和 600 mL 刻度线水平,打开计时器并打开放水开关,到水的凹液面到达 0 时停止计时,在同一位置附近测量 3 次,记下平均时间并换算成渗水系数,试验结果见表 7。

表 7 PAC-13 试验段渗水系数跟踪观测结果

纤维种类	桩号	位置	渗水系数/ (mL · min ⁻¹)
玄武岩纤维	K5+100 左	行车道	3 531
	K5+150 左	行车道	3 527
	K5+200 左	行车道	3 632
木质素纤维	K5+250 左	行车道	3 349
	K5+300 左	行车道	3 193
	K5+350 左	行车道	3 424
聚丙烯纤维	K5+400 左	行车道	3 029
	K5+450 左	行车道	3 284
	K5+500 左	行车道	3 583

由表 7 可知:PAC-13 试验路段路面渗水系数符合排水路面设计要求,其中,掺玄武岩纤维的排水路面渗水效果最优。

4.3 成本分析

在工程项目中,经济效益作为重要的组成部分,对项目发展具有指导性意义。沥青路面采用 4 cm PAC-13 沥青混合料,以普通道路 20 m 宽计算,修筑 1 km 排水沥青路面需要沥青混合料 $20 \times 1\,000 \times 0.04 = 800\text{ m}^3$ (约 1 905.6 t)。以 0.4% 纤维掺量为例,生产 1 km 排水沥青路面所需纤维费用见表 8。

表 8 生产 1 km 排水沥青路面所需纤维费用

纤维种类	材料单价/ (元 · t ⁻¹)	每公里单价/ (万元 · km ⁻¹)
玄武岩纤维	22 000	16.77
木质素纤维	3 500	2.67
聚丙烯纤维	8 500	6.48

虽然玄武岩纤维初期建设成本较高,但其优异的路用性能可节省日常路面养护开支。因此,玄武岩纤维排水沥青混合料从长远角度来看具有一定的经济效益。

5 结论

选取 3 种不同纤维作为增强稳定剂,选用 5 种纤维掺量进行 PAC-13 排水沥青混合料配合比设计和路用性能研究,结合试验路渗水试验研究,得到以下

结论:

(1) 在高温稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性方面,掺玄武岩纤维的排水沥青混合料表现出更佳的性能,较掺聚丙烯纤维和木质素纤维的混合料存在明显优势。

(2) 在水稳定性方面,3 种纤维对排水沥青混合料的影响差异不大,且随纤维掺量变化无明显规律。

(3) 随着纤维掺量的增加,混合料高温稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性均得到一定幅度增长,结合纤维掺量对混合料各项路用性能影响的结果分析,建议玄武岩纤维的使用掺量为 0.4% 左右,木质素纤维和聚丙烯纤维掺量为 0.5% 左右。

(4) 玄武岩纤维具有较好的路用性能表现和路面渗水效果,是现阶段排水沥青路面中非常适用的材料,发展前景良好。

参考文献:

[1] 李红平,吴德军,杨晨光.不同改性沥青排水路面路用性能研究[J].公路,2009(6).

[2] 张璠,杨军,卞凤兰.排水性沥青路面的排水功能设计与实践[J].中外公路,2009(6).

[3] 尹义林.透水沥青混合料 OGFC 在道路中的应用[J].中国市政工程,2008(3).

[4] 李晓娟.OGFC 沥青混合料路用性能研究[D].长安大学硕士学位论文,2008.

[5] 丁楚志,周建国,薛东峰,等.排水路面材料组成设计与应用[J].中外公路,2007(1).

[6] 李强,李永弟.排水沥青路面典型病害成因分析及预防与养护对策[J].中国市政工程,2017(2).

[7] Voskuilen, J. L. M. and Verhoef P.N. W. Causes of Premature Raveling Failure in Porous Asphalt[R].Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 2003.

[8] 赵德慧.纤维稳定剂在排水沥青路面中的应用简介[J].交通科技,2015(3).

[9] 郑求才,袁迎捷,郑竞友,等.不同高粘沥青对排水路面性能的影响研究[J].中外公路,2008(3).

[10] Kandhal, Prithvi S. and Rajib B, Mallick. Open-Graded Friction Courses: State of Practice [R]. National Center for Asphalt Technology, Report No.98-7,1988.

[11] 吴金荣.透水聚酯纤维沥青混合料路用性能和动态响应研究及应用[D].安徽理工大学博士学位论文,2015.