

聚酯纤维SMA沥青混合料性能影响因素及制备参数优化研究

龚毅¹, 侯茂盛¹, 程博¹, 庄亮¹, 赵世景¹, 黄振¹, 杨帆², 姚群³

(1. 湖南大学设计研究院有限公司, 湖南长沙 410006; 2. 浏阳现代制造产业建设投资开发有限公司, 湖南浏阳 410300;

3. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北武汉 430023)

摘要: 聚酯纤维具有良好的物理性能, 常被用作沥青玛蹄脂碎石 (Stone Mastic Asphalt, SMA) 的纤维稳定剂, 现行技术规范并未对聚酯纤维技术性能进行明确限制, 缺乏可靠施工指导。采用 Plackett-Burman 因子筛选试验, 探究了各个试验因素对聚酯纤维 SMA 沥青混合料制备过程影响的显著性, 并通过正交试验研究了显著因子对 SMA 混合料路用性能的影响规律, 各因素对聚酯纤维 SMA 沥青混合料试件空隙率影响的显著性顺序为: 纤维长度 > 油石比 > 压实温度 > 湿拌时间 > 纤维含量 > 拌和温度 > 干拌时间 > 预热温度。其中纤维长度、油石比、压实温度对混合料制备的影响具有统计学显著性。通过试验得到的推荐制备参数为: 纤维长度 6 mm、油石比 6.5%、击实温度 170 °C、纤维含量 0.5%、预热温度 135 °C、拌和温度 180 °C、干拌时间 30 s、湿拌时间 90 s。

关键词: 沥青玛蹄脂碎石; 聚酯纤维; 影响因素; 正交试验; 路用性能

中图分类号: U416

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0279-05

Study on Influencing Factors and Preparation Parameter Optimization of Polyester Fiber SMA Asphalt Mixture Performance

GONG Yi¹, HOU Maosheng¹, CHENG Bo¹, ZHUANG Liang¹, ZHAO Shijing¹, HUANG Zhen¹, YANG Fan², YAO Qun³

(1. Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410006, China; 2. Liuyang Modern Manufacturing Industry Construction Investment and Development Co., Ltd., Liuyang 410300, China; 3. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: Polyester fiber has the good physical properties and is often used as a fiber stabilizer of stone mastic asphalt (SMA) mixture. However, the current technical specifications do not clearly limit the technical performance of polyester fiber, and lack of reliable construction guidance. The Plackett-Burman factor screening test is used to explore the significance of each test factor on the preparation of polyester fiber SMA asphalt mixture. The effect of significant factors on the pavement performance of the SMA mixture is studied by an orthogonal test. The significant order of influence of each factor on voidage of polyester fiber SMA asphalt mixture is the fiber length > asphalt-aggregate ratio > compaction temperature > wet mixing time > fiber content > mixing temperature > dry mixing time > preheating temperature. The effects of fiber length, asphalt-aggregate ratio and compaction temperature on the preparation of the mixture are statistically significant. The recommended preparation parameters obtained by the tests are the polyester fiber length 6 mm, asphalt-aggregate ratio 6.5%, compaction temperature 170 °C, fiber content 0.5%, preheating temperature 135 °C, mixing temperature 180 °C, dry mixing time 30 s and wet mixing time 90 s.

Keywords: stone mastic asphalt (SMA); polyester fiber; influencing factors; orthogonal test; pavement performance

0 引言

沥青玛蹄脂碎石路面 (Stone Mastic Asphalt, SMA) 是道路工程常用的一种路面形式, 在高温抗变

形性能、抵抗水侵蚀性能以及抗裂性能等方面具有突出优势^[1]。作为沥青玛蹄脂的重要组成部分, 纤维稳定剂对 SMA 沥青混合料的性能具有显著影响。

目前使用较多的纤维稳定剂有木质素纤维、玄武岩矿物纤维以及聚酯纤维^[2-3]。聚酯纤维拥有较高的韧性, 其断裂延伸率相对较高, 因此聚酯纤维沥青混合料具有较好的抗剪与抗裂性能。现有研

收稿日期: 2024-04-23

作者简介: 龚毅(1992—), 男, 学士, 工程师, 从事市政道路设计工作。

究^[4-5]中大多参考现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)(下称《规范》)或《沥青路面用木质素纤维国家标准》(JT-T533—2004)中对木质纤维素的技术要求,研究聚酯纤维对SMA混合料性能的影响,验证了聚酯纤维对混合料高低温稳定性、水稳定性及疲劳抗裂性能的积极影响。然而,曹有军^[6]的研究结果显示,即使在相同的制备工艺或参数条件下,聚酯纤维与木质素纤维混合料的最佳沥青用量也会存在3%左右的差异,因此完全按照木质素纤维的技术要求或施工工艺进行聚酯纤维混合料配合比设计难以达到最佳性能。据此,有必要针对聚酯纤维SMA混合料制备工艺进行更加全面的优化,形成更加符合聚酯纤维SMA混合料的制备技术方案。

浏阳市水佳片区李畋路(浏阳河路—白沙路)勘察,设计项目中的路基结构上面层采用SMA-13材料,在SMA沥青混合料中加入聚酯纤维稳定剂有利于提升路面使用性能。为得到契合该项目的聚酯纤维SMA混合料制备工艺参数,本研究使用Plackett-Burman因子筛选试验方法,以混合料设计空隙率V作为控制指标,筛选出在混合料制备过程中影响较大的因素。之后以这些因素为自变量,采用正交试验设计方法,研究其对SMA混合料路用性能的影响,同时优选配合比设计参数。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

研究所用沥青为SBS I-D改性沥青。其各项性能指标如表1所列。研究所用玄武岩粗、细集料,石灰岩矿粉均满足相关规范及设计文件技术要求。研究所用聚酯纤维性能指标见表2,同时列出参考规范中对木质素稳定剂的技术要求作为对比参考。

表 1 SBS 改性沥青技术性能		
指标	实测值	技术要求
针入度/mm	4.84	4.0~6.0
软化点/℃	73.1	≥60
5℃延度/cm	40.5	≥20
闪点/℃	254	≥230
溶解度/%	99.54	≥99
135℃运动黏度/(Pa·s)	2.6	≤3
25℃弹性恢复/%	81	≥75
贮存稳定性/℃	1.4	≤2.5

研究所用矿料级配为SMA-13,级配范围及合成级配见表3。

表 2 聚酯纤维技术性能		
指标	实测值	木质纤维素技术要求
纤维长度/mm	4/6/8	不大于6
灰分含量/%	12.53	18±5
pH 值	7.43	7.5±1.0
吸油率	5.42 倍	不小于纤维质量的 5 倍
含水率/%	2.4	不大于5

表 3 SMA-13 级配范围										
筛孔尺寸/ mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	75	34	26	22	20	16	15	12
下限	100	90	50	20	15	14	12	10	9	8
合成级配	100	93.4	65.1	26.3	22.7	17.3	15.4	13.6	11.4	9.1

1.2 试验方法

试验过程分为两阶段。

第一阶段采用Plackett-Burman(PB)试验进行显著因子筛选。结合现有研究与工程经验,选择聚酯纤维含量、长度、预热温度、油石比、拌和温度、击实温度、干拌时间、湿拌时间、空隙率作为自变量因子。选择SMA混合料的重要体积参数——空隙率V,作为因变量,用以评价各个因子对聚酯纤维SMA沥青混合料制备过程的影响,并将其作为显著因子筛选指标。

第二阶段采用正交试验设计,以筛选出的显著因子作为自变量,同时固定其他不显著因子为最优水平。采用车辙试验(T0719)评价聚酯纤维SMA沥青混合料的高温稳定性能,以动稳定度作为评价指标。选择浸水马歇尔试验(T0709)作为水稳定性评价方法。采用低温小梁弯曲试验(T0715)评价混合料低温性能,以破坏应变作为评价指标。

2 试验结果与分析

2.1 SMA混合料制备影响因素研究

Minitab软件所给出的PB试验方案以及根据该方案进行试验所得出的SMA沥青混合料空隙率实测结果列于表4中。

通过方差分析可表征自变量因子对因变量的显著性,分析结果见表5。F值是F检验的统计量值,P值表示不拒绝原假设的程度,若P值小于0.05则表示因子在模型中显著,具有统计学意义,应当保留。由表5可看出,若按P值从小到大排序,8个自变量因子显著性顺序为:聚酯纤维长度>油石比>压实温度>湿拌时间>纤维含量>拌和温度>干拌时间>预热

温度。其中聚酯纤维长度、油石比、压实温度的 P 值均小于 0.05,表明这 3 个因素对 SMA 混合料空隙率的影响从统计学意义角度而言是显著的,应当作为重点研究对象。

表 4 Plackett-Burman 试验结果

运行序	聚酯纤维含量/%	聚酯纤维长度/mm	纤维预热温度/℃	油石比/%	拌和温度/℃	击实温度/℃	干拌时间/s	湿拌时间/s	空隙率/%
1	0.5	4	135	5.5	180	160	30	90	3.72
2	0.5	8	105	6.5	180	160	20	90	2.86
3	0.3	8	135	5.5	190	160	20	60	3.46
4	0.5	4	135	6.5	180	170	20	60	3.30
5	0.5	8	105	6.5	190	160	30	60	2.95
6	0.5	8	135	5.5	190	170	20	90	3.05
7	0.3	8	135	6.5	180	170	30	60	2.83
8	0.3	4	135	6.5	190	160	30	90	3.51
9	0.3	4	105	6.5	190	170	20	90	3.53
10	0.5	4	105	5.5	190	170	30	60	3.83
11	0.3	8	105	5.5	180	170	30	90	3.02
12	0.3	4	105	5.5	180	160	20	60	4.03

表 5 Plackett-Burman 试验方差分析

因子	F 值	P 值	显著性
聚酯纤维含量	7.89	0.067	不显著
聚酯纤维长度	247.14	0.001	显著
纤维预热温度	2.15	0.239	不显著
油石比	79.73	0.003	显著
拌和温度	5.71	0.097	不显著
压实温度	16.54	0.027	显著
干拌时间	2.41	0.219	不显著
湿拌时间	8.86	0.059	不显著

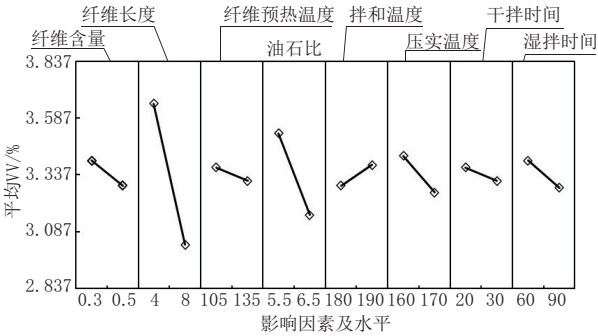


图 1 Plackett-Burman 试验因子效应

因子筛选试验中各个自变量的因子图如图 1 所示,其斜率越大则代表该因子在所选水平区间内变化时对 SMA 混合料制备参数的影响越显著。对于上述三个显著的自变量因子而言,SMA 混合料的空隙率随着聚酯纤维长度的增加呈现显著降低趋势,这是因为长纤维在集料的挤压作用下可发生较大变形,从而降低混合料空隙率。同时纤维的加入会吸附更多沥青,这与图 1 中油石比对 SMA 混合料空隙率的影响规律是相符合的,即油石比较高时能获得密实度更高的 SMA 混合料。压实温度直接影响 SMA 混合料在成型过程中的流动性,若压实温度较低,击

实所需要的击实功相应增大。
干拌时间与湿拌时间均主要影响集料、矿粉、沥青、纤维四项体系的均匀程度,因此拌和时间越长 SMA 混合料空隙率越小。但拌和时间过长可能导致沥青老化,影响混合料品质。纤维含量对混合料空隙的影响与纤维长度类似,纤维含量越高则吸附沥青形成结构沥青薄膜的占比越大。拌和温度主要影响拌和过程中混合料各组分的混合均匀程度。在本研究中拌和温度越高混合料空隙率越大,这与王强等人^[7]的研究结果相似,其原因可能是在高温与拌和时间的交互作用下沥青更容易发生老化,导致混合料空隙率增加。通过综合考虑多方面的影响,在后续研究中将 180 ℃设置为推荐拌和温度。在 135 ℃预热条件下纤维与沥青之间的温差更低,相容性更好,制得的 SMA 混合料体积性能更优。

2.2 聚酯纤维 SMA 混合料路用性能研究

基于 2.1 中的研究结果,将不显著的变量因子水平固定为 PB 试验中使空隙率较小的因子水平,即聚酯纤维含量 0.5%、纤维预热温度 135 ℃、拌和温度 180 ℃、干拌时间 30 s、湿拌时间 90 s。选择显著的 3 个变量因子作为本节的自变量,同时在原有 2 水平之间内插 1 个因子水平,进行 3 因素 3 水平正交试验设计。试验方案及试验结果列于表 6 之中。计算各个因子在各水平下的因变量平均值作为平均效应,绘制效应曲线图。

图 2 显示了动稳定度的效应曲线。纤维长度由 4 mm 增加到 6 mm,则混合料平均动稳定度增幅达到 29.3%。表明长纤维能更好地增大混合料抗车辙能力。然而,纤维长度继续增加至 8 mm 时动稳定度有

表 6 正交试验结果

运行序	聚酯纤维长度/mm	油石比/%	击实/碾压温度/℃	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	残留稳定度/%	破坏应变 με
1	4	5.5	160	3 411	90.6	2 725
2	4	6.0	165	3 764	94.3	3 410
3	4	6.5	170	4 105	97.1	3 581
4	6	5.5	165	4 899	90.2	3 753
5	6	6.0	170	4 835	92.6	3 403
6	6	6.5	160	4 851	94.4	3 563
7	8	5.5	170	4 677	87.6	3 684
8	8	6.0	160	4 653	87.3	3 741
9	8	6.5	165	4 801	88.5	3 353

所下降。其原因是长纤维在拌和过程中极易发生折曲成团现象,导致其本身的增强效应减弱。油石比与碾压温度对动稳定度的影响效果相似,SMA混合料的动稳定度随着油石比的增加而提高。其原因在于聚酯纤维对沥青有着良好的吸附作用,沥青用量过低会导致纤维以及矿粉表面不能完全被沥青覆盖,严重影响混合料高温强度。较高的碾压温度对成型混合料试件的密实度有积极影响,这与击实温度对混合料空隙率的影响是类似的。如图2所示,碾压温度高于165℃时对动稳定度的增强作用有放缓趋势。综上所述,使聚酯纤维SMA混合料高温抗车辙性能最优的推荐自变量因子水平为:纤维长度6 mm、油石比6.5%、击实温度170℃。

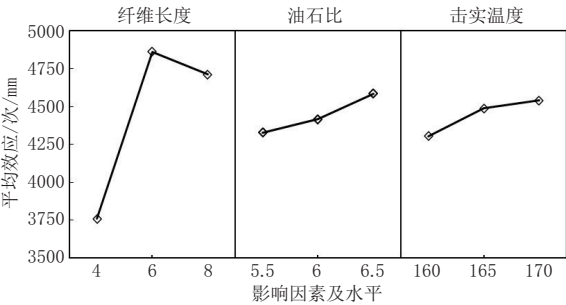


图2 动稳定度效应曲线

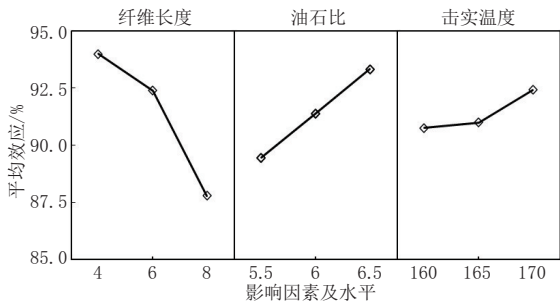


图3 浸水残留强度比效应曲线

浸水残留强度比的效应曲线如图3所示。掺加4 mm聚酯纤维的SMA混合料平均浸水残留强度比达到94%。聚酯纤维长度增加至6 mm,混合料平均浸水残留强度比降低为92.4%,而8 mm的聚酯纤维

的混合料的水稳定性平均浸水残留强度比仅为87.8%。其原因是,虽然聚酯纤维有着比木质素纤维及玄武岩纤维更优异的疏水性能,但过长的纤维使其分散性较差,容易在拌和过程中团聚。这部分纤维中的空气通过集料嵌剂作用被排出,形成一个负压区域,如与水接触时则会吸收水分,并将水分引导至沥青-集料界面,会导致混合料稳定性下降。较高的油石比与较高的击实温度能有效改善SMA混合料的内部孔隙结构,阻止水分的侵蚀,从而提高混合料抵抗水损害的能力。能使聚酯纤维SMA混合料水稳定性最优的自变量因子水平推荐为:纤维长度4 mm、油石比6.5%、击实温度170℃。

图4为低温小梁弯曲试验破坏应变效应曲线图。聚酯纤维在受到外界荷载时,能将小梁底部拉伸应力转化为纤维的内部应力,并沿纤维网络传导。同时聚酯纤维的拔出效应与裂纹桥接效应能有效抑制混合料内部裂纹扩展,提高SMA混合料低温抗裂性能。低温小梁弯曲试验结果显示,越长的聚酯纤维对SMA混合料低温抗裂性能的积极影响越大。6 mm聚酯纤维SMA沥青混合料的平均破坏应变较4 mm聚酯纤维而言提升了10.32%,但8 mm聚酯纤维SMA混合料的平均破坏应变仅高于6 mm聚酯纤维混合料0.6%。若油石比由5.5%提升至6%,则混合料破坏应变显著增大,但继续增加到6.5%,则破坏应变略微降低。这与张宜洛^[8]的研究结果相似。碾压温度对混合料低温性能的影响同高温性能与水稳定性一致,即碾压温度越高则混合料低温抗弯性能越好。因此为使聚酯纤维SMA混合料低温抗弯性能最优,则推荐因子水平为:纤维长度8 mm、油石比6%、击实温度170℃。

综合上述分析,推荐聚酯纤维SMA混合料的击实温度为170℃,在该温度下混合料能获得最优的高低温及水稳定性,6.5%油石比对SMA混合料高温

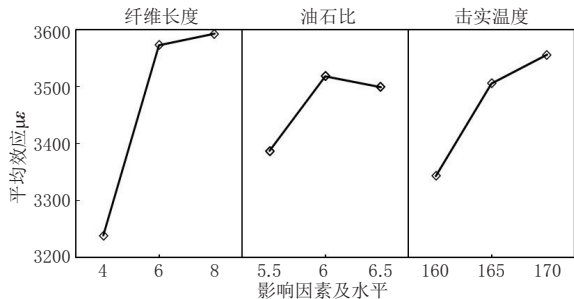


图4 破坏应变效应曲线

与水稳定性能有最优影响。虽然对于混合料低温性能而言,6.5%油石比并非最优选择,但其与最优油石比对低温性能影响的区别并不明显,因此推荐采用6.5%油石比。需要说明的是,在实际工程中确定油石比需要使用体积设计法等方法进行确定,本研究中为突出因素显著性仅采用了较简单的设计方法。而聚酯纤维长度对SMA混合料的高、低温及水稳定性能的影响规律均不相同,综合考虑后选择6mm聚酯纤维长度作为推荐方案,因为6mm聚酯纤维能使混合料获得最优的高温稳定性能,同时具有良好的低温与水稳定性能,故最终推荐使聚酯纤维SMA沥青混合料综合路用性能最优的自变量因子水平为纤维长度为6mm、油石比6.5%、击实温度170℃。

6 结 语

针对目前聚酯纤维SMA沥青混合料制备参数不明确这一问题,本研究进行了两阶段试验设计得到如下试验结论。

(1)PB因子筛选试验结果表明,各因素对聚酯纤维SMA沥青混合料试件空隙率影响的显著性顺序为:聚酯纤维长度>油石比>压实温度>湿拌时间>聚酯纤维含量>拌和温度>干拌时间>纤维预热温度。其中聚酯纤维长度、油石比、压实温度在方差分析中

的P值小于0.05,代表这3个因素对混合料空隙率的影响在统计学上显著。

(2)正交试验结果显示,短聚酯纤维对SMA沥青混合料的水稳定性能具有积极影响,而6mm及8mm的聚酯纤维对SMA沥青混合料的高温及低温抗裂性能提升较为显著;高油石比能有效填补集料空隙,完善骨架密实结构,从而对SMA混合料的高、低温以及水稳定性能均有较好影响;较高的压实或碾压温度能使混合料试件在成型过程中具有更高的流动性,从而更容易密实成型,对SMA混合料的高、低温性能以及水稳定性均有较高提升。

(3)综合因子筛选试验与正交试验结果,推荐聚酯纤维SMA沥青混合料制备条件为:聚酯纤维长度为6mm、油石比6.5%、击实温度170℃、聚酯纤维含量0.5%、纤维预热温度135℃、拌和温度180℃、干拌时间30s、湿拌时间90s。

参考文献:

- [1] 马健萍,许新权,范倩,等.基于加速加载试验的SMA-13沥青混合料抗滑性能研究[J].公路,2022,67(7):388-394.
- [2] 李锋.纤维稳定剂对提高SMA改性沥青路用性能影响研究[J].价值工程,2022,41(21):119-121.
- [3] 王敏,刘晓聪.玄武岩纤维掺量对SMA-8沥青混合料高温稳定性影响研究[J].北方交通,2022(6):51-54.
- [4] 张彬.不同纤维SMA混合料综合性能评价研究[J].公路工程,2015,40(6):77-83.
- [5] 邱冬华,秦仁杰,刘学鹏.复合纤维对SMA-13沥青混合料路用性能研究[J].湖南交通科技,2021,47(1):16-20.
- [6] 曹有军.不同纤维对沥青混合料路用性能的影响[J].交通世界,2023(32):17-19.
- [7] 王强,姚鸿儒,陈智蓉,等.拌和与成型温度对SMA-5混合料性能的影响[J].石油沥青,2019,33(6):49-53.
- [8] 张宜洛.纤维对沥青混合料结构参数及路用性能的影响研究[J].公路交通科技(应用技术版),2010,6(增刊1):36-41.

(上接第275页)

参考文献:

- [1] 马柯佳,徐建设.缓粘结预应力技术研究及应用综述[J].四川建筑科学研究,2020,46(3):58-63.
- [2] 李海鹏,池明智,陶英麒,等.缓粘结预应力技术在国家会议中心

二期工程中的应用[J].建筑技术,2021,52(5):527-529.

- [3] 张志伟.预应力小箱梁极限承载力试验研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2017.
- [4] GB/T 5224—2014,预应力混凝土用钢绞线[S].