

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.012

改性沥青加铺层抗反射裂缝室内小梁试验

张芷英,解建光,张冰洋,朱毅伟,赵勇

(南京航空航天大学 民航与飞行学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对机场水泥道面进行沥青层加铺后容易产生面层反射裂缝的缺点,采用三点弯曲室内小梁试验探究改性沥青-水泥复合梁在不同底层裂缝类型下的反射裂缝的产生和发展过程,评价不同改性沥青混合料抵抗面层反射裂缝的能力。结果表明:在三点弯曲加载模式下,十字裂缝和横缝的反射裂缝发展过程相似、竖缝对反射裂缝的产生影响较小;NRP改性沥青混合料较普通SBS改性沥青具有更好的抗反射裂缝性能。

关键词:路面工程;机场道面;沥青加铺层;面层反射裂缝;复合梁弯曲性能

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

中国大批机场建于20世纪末,大部分水泥混凝土道面逐渐接近设计使用年限,产生裂缝、坑槽、脱空等病害^[1]。为了提高道面使用性能,延长道面使用寿命,迫切需要对机场旧混凝土道面结构进行补强或者功能恢复;加铺沥青层是目前较为有效的解决办法。沥青加铺层出现的病害主要分为变形、裂缝两大类^[2],其中裂缝类病害尤其是反射裂缝对道面结构危害极大^[3],且更容易在后续服役期间产生二次大面积病害^[4]。目前已有朱林等^[5]、Li^[6]多位学者对沥青路面裂缝形成机理进行研究,并且有多位学者对沥青混合料进行抗裂性分析:Zhang等^[7]研究了沥青混合料在间接拉伸试验(IDT)中的微裂纹模式、裂纹萌生和扩展以及能量消耗;Li等^[8]采用指标断裂能评价了掺加钢渣微粉的沥青混合料的抗裂性能;Yang等^[9]采用三点弯曲小梁试验评价了硅藻土改性沥青混合料的抗裂性能;Cheng等^[10]采用间接拉伸试验评价了掺加硅藻土和玄武岩纤维的沥青混合料的抗裂性能;王雪莲等^[11]通过建立大粒径透水性沥青混合料层(LSPM)离散元模型,研究了半刚性沥青路面产生反射裂缝的机理,分析了裂缝尖端处的应力场以及LSPM层内细观

结构对裂尖应力的作用;栾利强^[12]以疲劳断裂力学理论和材料试验为基础,对半刚性基层沥青路面裂缝的扩展行为进行了系统研究。目前国内外学者对于沥青混合料的裂缝成因及开裂特性已经有一定认识,但对加铺层反射裂缝的研究相对较少,因此本文拟用三点弯曲室内小梁试验探究改性沥青-水泥复合梁在不同底层裂缝类型下的反射裂缝的产生和发展过程,揭示不同类型的底层裂缝对沥青加铺层的影响,为优化沥青加铺层结构提供依据。

1 原材料与试验方法

1.1 试验原材料

试验用水泥为普通硅酸盐P.O42.5水泥,细骨料为Ⅱ级配区中砂,粗骨料为最大粒径16 mm的机制玄武岩碎石;试验用沥青为双龙牌70#道路石油沥青,纤维为木质素纤维,矿粉为石灰岩矿粉,试验用改性剂为NRP改性剂及SBS改性剂。

1.2 试验配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)中规定进行反复试配后,最终确定应用于试验的C40水泥混凝土配合比如表1所示。

《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)规定,采用马歇尔试验方法确定SMA-13沥青混合料

收稿日期:2022-12-20

基金项目:南京航空航天大学研究生开放基金项目(编号:kfj20200730)

作者简介:张芷英,女,硕士研究生.E-mail:908180834@qq.com

最佳油石比为6%、矿粉掺量为8%、纤维掺量为0.3%，设计空隙率为3.6%，沥青混合料级配如表2所示。

表1 水泥混凝土配合比 kg/m^3

水泥	水	细集料	粗集料
429.4	210	616.2	1 144.4

表2 SMA-13沥青混合料级配

沥青混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13	100	91.9	71.6	28.6	21.8	18.7	15.9	13.4	12.0	10.0

1.3 试验方案

为模拟实际水泥路面上各类型裂缝,拟对水泥层预设3种裂缝,沥青-水泥复合梁示意图见图1。

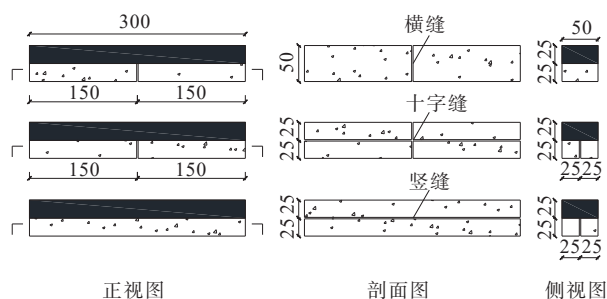


图1 复合梁结构示意图(单位:mm)

本试验复合小梁试件由300 mm×300 mm×50 mm的水泥混凝土板和300 mm×300 mm×70 mm的沥青板切制后黏结而成,其中,沥青层与水泥层采用环氧树脂黏结,水泥层裂缝贯通,复合小梁具体尺寸及数量如表3所示。底层为横缝时,水泥层由2块150 mm×50 mm×25 mm的水泥块拼接而成;底层为十字缝时,水泥层由4块150 mm×25 mm×25 mm的水泥块拼接而成;底层为竖缝时,水泥层由2块300 mm×25 mm×25 mm的水泥块拼接而成。

表3 复合梁尺寸

试件种类	裂缝类型	试件个数/个	试件高度/mm	试件长度/mm	试件宽度/mm
NRP改性沥青混合料	横缝	4	50±2.0	300±2.0	50±2.0
	十字缝	4			
	竖缝	4			
SBS改性沥青混合料	横缝	4	50±2.0	300±2.0	50±2.0
	十字缝	4			
	竖缝	4			

采用液压伺服试验机进行三点弯曲试验,加载

示意图如图2所示,试件层间粘贴应变片用于测量小梁中部纵向应变。为模拟静压时的状态,试验采用1 mm/min的位移加载控制方式,试验温度为15℃,试验终止条件为跨中承受荷载值降低至0。

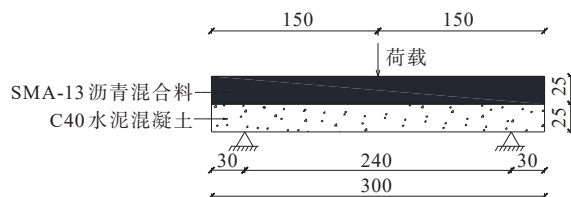


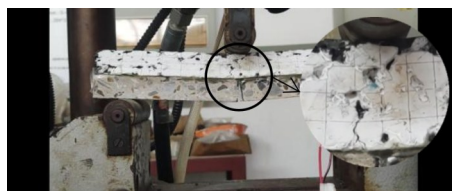
图2 三点弯曲试验加载示意图(单位:mm)

2 复合梁力学响应分析

通过电液伺服系统对沥青-水泥复合梁进行三点加载,加载过程中裂缝发展如图3所示。当复合梁竖向挠度达到3.0 mm时,复合梁承载荷载达到峰值,开始观察到跨中有细微裂缝产生,而后承载荷载进入下降段;当复合梁竖向挠度达到6.3 mm时,复合梁承载荷载进一步下降,此时可明显观察到一条跨中裂缝;当复合梁竖向挠度达到10.0 mm时,复合梁承载能力接近极限状态,裂缝进一步扩张且贯通整个沥青层;继续加载,复合梁承载力下降为0,试件断裂。



(a) 竖向挠度为3.0 mm



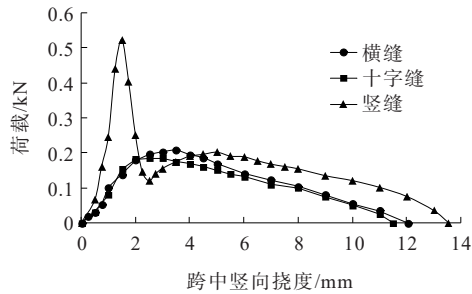
(b) 竖向挠度为6.3 mm



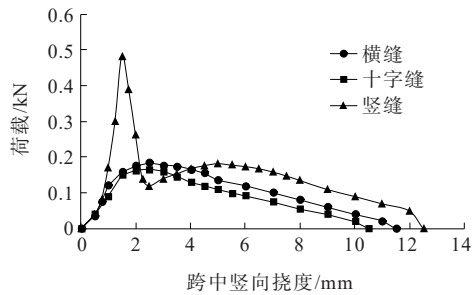
(c) 竖向挠度为10.0 mm

图3 裂缝发展图(以带横缝的SBS复合梁为例)

试验通过外接应变箱采集复合梁三点弯曲试验数据,剔除异常数据后,绘制其跨中荷载-位移曲线及跨中纵向应变-时间曲线,研究了不同底层裂缝类型及两种改性剂对沥青层承载状态的影响,结果见图4~7,峰值荷载及最大竖向挠度见表4。



(a) NRP复合梁

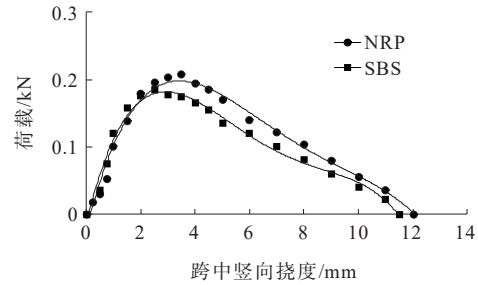


(b) SBS复合梁

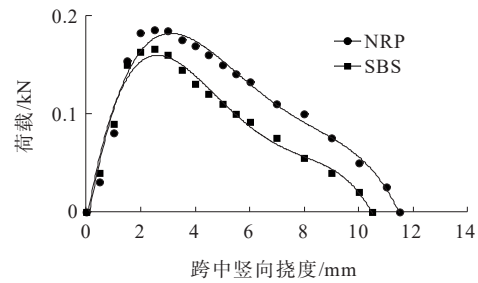
图4 荷载-跨中竖向挠度曲线

从图4可知:①当底面为横缝时,复合梁会先以较快速度达到峰值荷载,而后沥青层进入2 min左右的屈服阶段,随后复合梁进入破坏阶段承受荷载值缓慢下降,最终复合梁完全破坏,荷载值下降为0;②当底面为竖缝时,复合梁迅速达到峰值荷载随后水泥层发生脆性破坏,而后复合梁承载力小幅度回弹随后沥青层进入2 min左右的屈服阶段,接下来复合梁进入破坏阶段承受荷载值缓慢下降,最终复合梁完全破坏,荷载值下降为0;③当底面为十字缝时,复合梁荷载-挠度曲线与横缝相似,先以较快速度达到峰值荷载,而后沥青层先后经历屈服阶段和破坏阶段。比较复合梁底层为横缝和十字缝的荷载-位移曲线可知,十字缝中的横缝为主要破坏缝;④比较复合梁破坏时的跨中挠度,底面为横缝时,NRP复合梁为12.04 mm、SBS复合梁为11.50 mm,底面为十字缝时,NRP复合梁为11.46 mm、SBS复合梁为10.47 mm,底面为竖缝时,NRP复合梁为13.55 mm、SBS复合梁为12.52 mm,两种材料的跨中挠度:竖缝>横

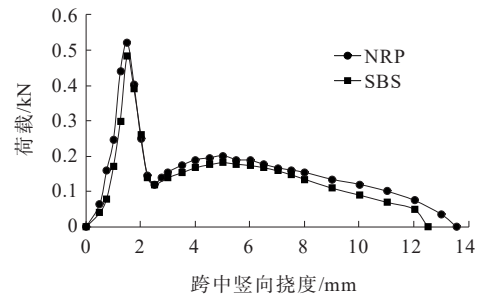
缝>十字缝;比较复合梁破坏时的峰值荷载,底面为横缝时,NRP复合梁为0.208 kN、SBS复合梁为0.185 kN,底面为十字缝时,NRP复合梁为0.185 kN、SBS复合梁为0.166 kN,底面为竖缝时沥青层受力屈服段峰值荷载NRP复合梁为0.202 kN、SBS复合梁为0.182 kN,两种材料破坏时的峰值荷载:横缝≈竖缝>十字缝。



(a)横缝



(b)十字缝

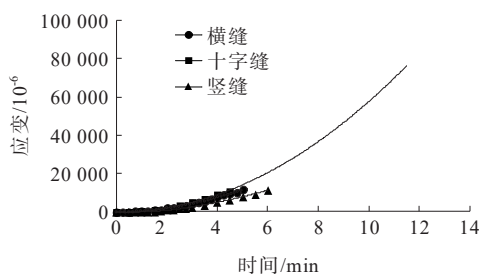


(c)竖缝

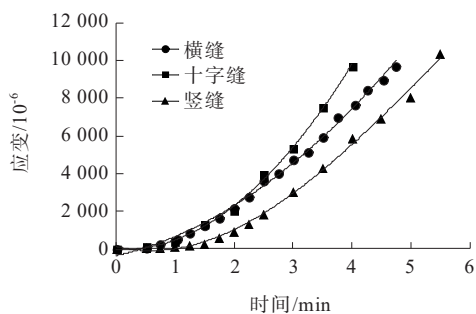
图5 复合梁荷载-跨中竖向挠度曲线

从图5可得:①相同裂缝类型时,NRP复合梁和SBS复合梁荷载-挠度曲线形状和走势相似,NRP复合梁破坏时的最大荷载大于SBS复合梁破坏时的最大荷载,且NRP复合梁最终破坏时的跨中挠度大于SBS复合梁最终破坏时的跨中挠度;②相同裂缝类型时,在达到峰值荷载前,SBS和NRP复合梁承载能力相似;在峰值荷载后,复合梁进入屈服段,此时同一跨中挠度时NRP复合梁承载的荷载更大,承受同

一荷载时NRP复合梁跨中挠度更小,说明NRP改性剂对于沥青混合料进入屈服阶段后的抗反射裂缝能力增强效果更佳;③比较复合梁的荷载-挠度曲线包围面积,底面为横缝时NRP复合梁为SBS复合梁的1.15倍,底面为十字缝时NRP复合梁为SBS复合梁的1.34倍,底面为竖缝时NRP复合梁为SBS复合梁的1.19倍。相同裂缝类型时,NRP复合梁的荷载-挠度曲线包围面积大于SBS复合梁,可以看出NRP改性剂对于带有各种类型初始裂缝的复合梁弯曲韧性的改善效果更好。



(a) NRP复合梁

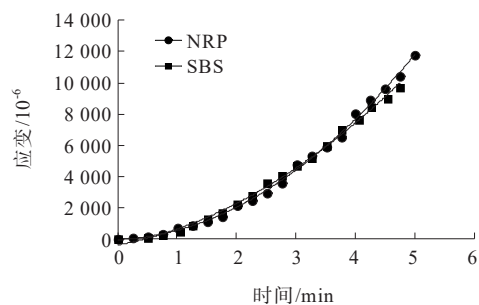


(b) SBS复合梁

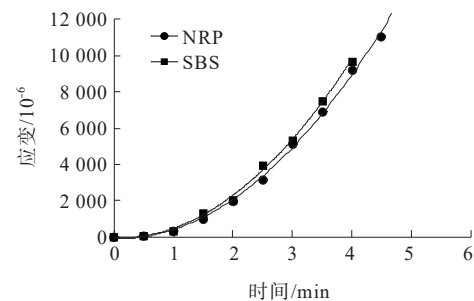
图6 跨中纵向应变-时间曲线

从图6可得:①不同裂缝类型的复合梁跨中纵向应变-时间曲线形状和走势相似,不同裂缝类型的NRP复合梁和SBS复合梁均呈现出跨中纵向应变增长速率随着时间的增长而逐渐变大的规律。在4min过后复合梁位移达到4mm,裂缝发育迅速,复合梁跨中纵向应变片先后失效;②相同时间,复合梁底面跨中纵向应变:竖缝<横缝<十字缝;且复合梁底面跨中纵向应变增长速率亦为:竖缝<横缝<十字缝;③当底面为十字缝时,其跨中纵向应变-时间与横缝更为相似,再次证明此加载方式下十字缝中的横缝为主要破坏缝。

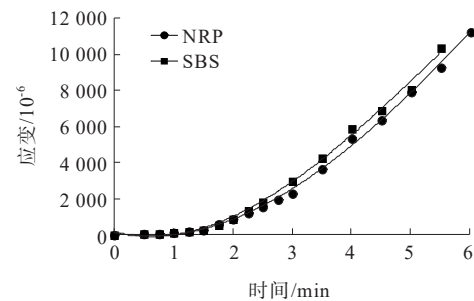
从图7可得:同一时间时,NRP复合梁和SBS复合梁的跨中纵向应变值相近、应变增长速率相似。



(a)横缝



(b)十字缝



(c)竖缝

图7 复合梁跨中纵向应变-时间曲线

表4 复合梁峰值荷载及最大竖向挠度

改性剂种类	裂缝类型	峰值荷载/kN	最大竖向挠度/mm
NRP	横缝	0.208	12.04
	十字缝	0.185	11.46
	竖缝	0.520	13.55
SBS	横缝	0.185	11.50
	十字缝	0.166	10.47
	竖缝	0.480	12.52

此外从纵向应变-时间曲线中可以看出应变片失效时记录到的NRP复合梁的应变值略大于SBS复合梁,说明此时NRP改性沥青混合料层裂缝张开速率略小于SBS改性沥青混合料层,从而再次证明NRP改性剂对于沥青混合料进入屈服阶段后的抗反射裂缝能力增强效果更佳。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011),由式(1)、(2)、(3)计算得到不同

底层裂缝类型下复合梁沥青层的弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量,结果如表5所示。

$$R_B = \frac{3 \times L \times P_B}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2} \quad (2)$$

$$S_B = \frac{R_B}{\epsilon_B} \quad (3)$$

式中: R_B 为试件破坏时的抗弯拉强度(MPa); ϵ_B 为试件破坏时的最大弯拉应变(10^{-6}); S_B 为试件破坏时的弯曲劲度模量(MPa); b 为跨中断面试件的宽度(mm); h 为跨中断面试件的高度(mm); L 为试件的跨径(mm); P_B 为试件破坏时的最大荷载(N); d 为试件破坏时的跨中挠度(mm)。

表5 不同裂缝类型复合梁弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量

裂缝类型	弯拉强度/MPa		最大弯拉应变/ 10^{-6}		弯曲劲度模量/MPa	
	NRP	SBS	NRP	SBS	NRP	SBS
横缝	2.30	2.13	31 354	29 948	73.48	71.16
十字缝	2.13	1.91	29 944	27 266	71.41	70.14
竖缝	2.30	2.10	35 286	32 604	65.29	64.31

从表5可以看出:不同裂缝类型时,NRP复合梁沥青层的弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量均略大于SBS复合梁,说明在一定程度上NRP改性剂对提高沥青混合料阻挡反射裂缝的能力优于SBS改性剂。

3 结论

(1) 在三点弯曲加载模式下,底面为十字缝和横缝的反射裂缝发展过程相似:荷载-挠度曲线走势相似、十字缝的峰值荷载略小于横缝、最终破坏时的竖向挠度略小于横缝,推得十字裂缝中横缝为主要破坏裂缝,且横缝的产生对复合梁整体的结构强度影响较大;底面为竖缝时,具有明显的水泥破坏段,对于NRP复合梁,其竖缝的峰值荷载为横缝的2.50倍,最终破坏的竖向挠度为横缝的1.13倍,对于SBS复合梁,其竖缝的峰值荷载为横缝的2.59倍,最终破坏的竖向挠度为横缝的1.09倍,可以推得竖缝的产生对复合梁承载能力影响较小。

(2) NRP改性沥青混合料较普通改性沥青具有更好的抗反射裂缝性能:①从荷载-挠度曲线中可以

看出破坏时的最大荷载和最终破坏时的竖向挠度均大于SBS改性沥青;②从纵向应变-时间曲线中可以看出应变片失效时记录到的NRP复合梁的应变值大于SBS复合梁,且临近应变片失效时NRP复合梁的应变增长速率略小于SBS复合梁,说明此时NRP改性沥青混合料层裂缝张开速率略小于SBS改性沥青混合料层,从而证明NRP改性剂对于沥青混合料进入屈服阶段后的抗反射裂缝能力增强效果更佳,对于延缓机场道面沥青加铺层反射裂缝产生的效果更好。

参考文献:

- [1] 陈惊宇,武翔云,盛响,等.机场混凝土道面常见裂缝生成原因及防治措施研究[J].建材与装饰,2018(24):252-253.
- [2] 朱朴,肖启扬,蔡芬芳.沥青加铺层使用指标检测与早期病害防治:以泉州市政道路为例[J].吉林建筑大学学报,2020,37(5):31-40.
- [3] 汤豆.基于典型病害的机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构研究[D].西安:长安大学,2016.
- [4] 杨婉怡.旧水泥混凝土道面沥青罩面改造的病害及处置技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [5] 朱林,方诗圣.基于半刚性基层的沥青路面裂缝分析及防范策略[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(12):1839-1842.
- [6] LI H Z. Cracks resisting mechanism analysis of large stone mixture base based on mechanics calculations[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 729-736.
- [7] ZHANG D, HOU S G, BIAN J, et al. Investigation of the micro-cracking behavior of asphalt mixtures in the indirect tensile test[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 163: 416-425.
- [8] LI C, XIAO Y, CHEN Z W, et al. Crack resistance of asphalt mixture with steel slag powder[J]. Emerging Materials Research, 2017, 6(1): 214-218.
- [9] YANG C, XIE J, ZHOU X J, et al. Performance evaluation and improving mechanisms of diatomite-modified asphalt mixture[J]. Materials, 2018, 11(5): 686.
- [10] CHENG Y C, YU D, TAN G J, et al. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber-diatomite-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2018, 11(11): 2148.
- [11] 王雪莲,黄晓明,卞国剑.LSPM对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J].公路交通科技,2016,33(7):12-18.
- [12] 栾利强.半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J].土木工程学报,2017,50(9):118-128.