

环氧沥青道面高温足尺加速加载动力响应

冉武平^{1,2}, 凌建明¹, 赵鸿铎¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 利用 MLS66 加速加载试验系统对某军用机场试验段 2 种典型的环氧沥青道面进行足尺加速加载试验. 考虑到高温环境影响, 将道面加热至 60℃, 研究 2 种道面的环氧沥青面层以及沥青混凝土下卧层的动力响应特性. 环氧沥青面层响应在加载初期均为拉压交替变化, 而加载后期半刚性基层道面以拉应变为主, 复合道面以压应变为主; 沥青混凝土层均以压应变为主. 通过响应结果分析可知, 在高温条件下受沥青黏弹性和流变性影响, 道面的力学行为和状态随加载次数的增加发生变化; 不同力学响应导致环氧沥青道面结构高温条件破坏机理不同, 因而设计控制指标亦不同, 复合道面控制压应变, 半刚性基层道面控制拉应变.

关键词: 机场道面; 环氧沥青混凝土; 加速加载; 动力响应
中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A

later periods of the loading. Asphalt concrete layers are predominantly compressive strain. Response analysis shows that mechanical behavior and state of pavement changed with the increase of loading times because of viscoelastic and rheological property of bitumen under the high temperature condition; Different mechanical response of epoxy asphalt pavement structural bring about different failure mechanism under high temperature condition, thus design control indexes are also different. Compressive strain should be controlled for composite pavement and tensile strain should be controlled for semi-rigid base level.

Key words: airport pavement; epoxy asphalt concrete; accelerated pavement testing; dynamic response

Acceleration Load Dynamic Response of Full-scale Epoxy Asphalt Pavement under the Condition of High Temperature

RAN Wuping^{1,2}, LING Jianming¹, ZHAO Hongduo¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Full-scale tests of two kinds of epoxy asphalt pavement structure were carried out using MLS66 accelerated pavement test system at a test section of military airport. Considering high temperature environment, the pavement was heated to 60℃. Dynamic response characteristics was studied under the epoxy asphalt layer and asphalt concrete layer of two pavement structures. Dynamic response of epoxy asphalt layer is in the alternative state of tensile strain and compressive strain at the beginning of the loading, but is the tensile strain for semi-rigid base pavement and is the compressive strain for semi-rigid base pavement at middle and

近些年来受到日益增多的航空量和多轴重载及复杂起落架的大型客机的严峻挑战, 传统机场道面结构对荷载及环境的不适应性也逐渐显露. 大量水泥混凝土道面提前开裂和破损, 主要表现为: 混凝土道面疏松或剥落、表面薄层分离、边角破损、板块断裂、板角破碎、板间错台等局部混凝土道面损坏^[1]; 而沥青道面损坏是受飞机重复荷载、周边环境变化、材料疲劳损伤及其他运营因素的综合影响下产生的道面结构劣化、功能退化的表现, 主要体现为产生较多纵横向裂缝、高温轮辙、表面坑槽松散等病害, 这严重威胁到机场飞机运行的安全^[2].

环氧沥青混凝土作为新型铺装材料, 于 1959 年首次应用于美国空军基地, 主要是为提高道面的耐腐蚀性和耐高温尾喷^[3]. 随后由于其技术不成熟和成本高昂, 推广应用受到了限制. 然而近些年, 在公路行业的钢桥面铺装结构中广泛应用. 工程实践证明, 环氧沥青混凝土具有抗松散能力强、强度高、耐久性好、耐腐蚀性强、环境适应性强等技术优点, 是

收稿日期: 2014-11-18

基金项目: 空军后勤科研项目; 国家自然科学基金(U1433201)

第一作者: 冉武平(1977—), 男, 博士生, 主要研究方向为道面结构设计. E-mail: rwp@tongji.edu.cn

通讯作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

优良的道面铺装材料^[4]. 但环氧沥青混凝土作为机场道面铺装材料的研究应用尤其是在不同道面结构组合下的力学响应鲜有报道. 因而环氧沥青道面动力响应是目前亟需解决的问题.

模拟通航交通荷载对道面结构进行动力响应研究, 是分析和评价新型材料道面结构组合及其性能的方法, 是甄选和优化动力响应模型的基础, 是建立和检验道面结构性能预估模型的条件, 是提出道面力学破坏模式和解释损伤机理的有效途径. 1999 年美国建成了目前世界上最先进的道面足尺试验系统——国家机场道面试验设施 (National Airport Pavement Test Facility, NAPTF). 通过修改不同的道面结构, 测试新一代大型飞机轮载作用下的道面结构力学响应^[5-6]. 自此欧美发达国家投入大量的资金对不同工况下的沥青混凝土试验环道或试验路段展开实际交通作用下的动力响应特性研究^[7-10]. 在国内, 管志光等^[11]研究了车辆轴重、行驶速度和轮胎胎压对路面结构动力响应的影响; 董忠红等^[12]通过在足尺试验场地采用埋入式应变传感器研究了移动车辆荷载作用下半刚性基层沥青路面结构动力响应规律以及轴重和温度对路面结构动力响应的影响; 凌建明等^[13]对大型军用运输机作用下的水泥混凝土道面结构响应和设计方法进行了一定研究; 赵鸿铎^[14]对静荷载作用下的弹性层状沥青道面结构进行了分析, 建议以全起落架作用下的道面空间结构响应作为分析基础.

环氧沥青混凝土作为新型铺装材料, 铺面结构的动力响应目前仍主要集中在桥面铺装的响应特性研究, 而在机场道面结构中尤其是受高温环境影响的动力响应特性方面有待进一步研究. 鉴于此, 本文采用加速加载试验系统 MLS66 (Mobile Load Simulator 66) 模拟道面结构荷载, 对道面表面加热至 60℃, 模拟高温条件下的道面工作状态, 展开对环氧沥青道面动力响应特性的研究.

1 加速加载试验方案

1.1 加速加载试验设备

足尺加速加载设备 MLS66 是一个足尺铺面加速加载车, 长、宽、高尺寸分别为: 15 m, 2.87 m, 3.5 (3.8)m, 其外观如图 1 所示. 该加载车由刚性主框架、6 组轮架及内部配置的双轮胎组成. 轮架在垂直环形导轨中运行, 当轨道运行到底部时, 轮架上的测试轮与铺面接触施压.



图 1 加速加载试验设备 MLS66

Fig.1 MLS66 accelerated loading test equipment

1.2 道面结构

加速加载试验段为某军用机场, 考虑到环氧沥青新建和改建的 2 种道面情况, 试验段分为半刚性基层道面和复合道面, 具体结构形式见表 1.

表 1 试验段道面结构类型

Tab.1 Pavement structure type of test section

半刚性基层道面结构	复合道面结构
4 cm 环氧沥青混凝土	4 cm 环氧沥青混凝土
6 cm AC-20 沥青混凝土	6 cm AC-20 沥青混凝土
8 cm AC-25 沥青混凝土、 20 cm 水泥稳定砂砾	28 cm 水泥混凝土板
20 cm 水泥稳定砂砾	20 cm 水泥稳定砂砾

1.3 试验段平面布置及传感器埋设

为分析加载过程中动载在环氧沥青道面表面沿荷载移动方向和垂直方向产生的响应, 在复合道面和半刚性基层道面表面各布设 2 排应变片, 从轮迹带边缘开始, 每 20 cm 一组纵横向垂直布设, 共 8 组应变片. 其中复合道面应变片编号为 A, 从右至左 1~8 代表组数, I, II 分别代表每组沿轮迹方向和垂直轮迹方向应变片. 半刚性基层道面编号为 B, 从左至右, 1~8 代表组数, I, II 分别代表每组沿轮机方向和重直方向应变片. 应变计分别布设于环氧沥青面层底与基层顶, 具体如图 2 所示.

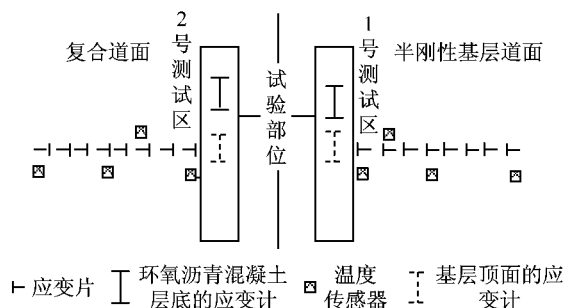


图 2 试验段平面图

Fig.2 Test section plane sketch

为反映动载作用过程中各面层层底纵向应变时程曲线, 将 2 个 ASG152 应变计埋设在环氧沥青混凝土层底, 2 个 KM100 应变计埋设在普通沥青混凝土层底, 具体布设位置如图 3 和图 4.

应变片	
应变计	4 cm 环氧沥青混凝土
应变计	6 cm AC20 沥青混凝土
	6 cm AC25 沥青混凝土
	40 cm 半刚性基层

图 3 半刚性基层道面传感器布设

Fig.3 semi-rigid base pavement sensor layout

应变片	
应变计	4 cm 环氧沥青混凝土
应变计	6 cm AC20 沥青混凝土
	28 cm 水泥混凝土
	20 cm 半刚性基层

图 4 复合道面传感器布设

Fig.4 Composite pavement sensor layout

1.4 加载方案

加速加载以单轮加载进行试验,方案如下。

(1)单轮轮压:由文献[14]可知,军用飞机胎压在 0.4~1.0 Mpa,因而取试验胎压 1.0 Mpa,可以模拟单起落架飞机轮载作用。

(2)加载位置分为 2 个测试区,半刚性基层道面和复合道面,如图 2 所示。

(3)温度:在各面层顶部均布置埋入式热电偶,进行温度自动监测和调控。在监测过程中确保环氧沥青层顶的温度为 60 °C。

(4)路表应变片分别沿荷载移动方向和垂直方向呈“T”字形布设,如图 2 所示,分别检测纵向弯拉应变和横向弯拉应变;应变计分别埋设在轮迹带下环氧沥青层底和普通沥青混凝土层底,监测动载作用下的层底应变。

1.5 试验准备

通过现场测试 MLS66 加载系统的轮胎着地面积并经统计计算后确定长、宽分别为 18.26 cm, 25.04 cm。根据试验要求,各结构层埋设传感器,现场温度监测控制面层顶面温度在(60±1) °C。半刚性基层道面中面层顶温度 54 °C 左右,下面层顶温度 49 °C 左右。复合道面中面层层顶温度 55 °C 左右。

1.6 混合料材料组成及其力学性能

针对试验路段路面结构设计,面层采用 EAC-13, AC-20, AC-25 混合料。普通沥青混合料采用石灰岩,环氧沥青混合料采用玄武岩,各混合料级配组成见表 2。

该研究对 2 种普通沥青混合料分别进行了 15 °C

和 20 °C 的抗压回弹模量试验,结果见表 3。

表 2 混合料级配

Tab.2 Mixture gradation							
筛孔尺 寸/mm	通过质量分数/%			筛孔尺 寸/mm	通过质量分数/%		
EAC-13	AC-20	AC-25	EAC-13	AC-20	AC-25		
31.5	100.00	100.00	100.00	2.36	41.29	23.20	20.00
26.5	100.00	100.00	98.90	1.18	29.84	14.10	11.30
19	100.00	93.60	86.70	0.6	20.28	11.50	9.60
13.5	95.86	74.70	71.10	0.3	12.59	7.30	6.30
9.5	79.96	66.80	60.20	0.15	9.44	6.20	5.50
4.75	61.95	45.70	40.30	0.075	8.48	4.90	4.40

表 3 抗压回弹模量试验结果

Tab.3 The test results of compressive resilience modulus			MPa
混合料类型	15 °C	20 °C	
AC-20	1 630	1 320	
AC-25	1 450	1 155	

环氧沥青混合料进行了动态模量试验。采用旋转压实仪成型后钻心取样。选取了 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz 为加载频率,选择的试验温度为-20, -10, 5, 20, 35, 50 °C,试验结果见表 4。

表 4 环氧沥青混合料动态模量试验结果

Tab.4 Test results of dynamic modulus of epoxy asphalt mixtures							MPa
温度/°C	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz	
-20	38 665	38 351	37 866	37 324	37 141	36 308	
-10	18 680	18 024	17 891	17 316	17 114	16 740	
5	11 796	10 635	10 131	9 377	9 050	8 155	
20	9 696	8 147	7 665	6 213	5 556	3 897	
35	6 843	5 080	3 991	2 250	1 813	1 098	
50	3 172	2 152	1 573	877	678	384	

2 试验结果分析

MLS66 加载系统轮架控制每小时施加 6 000 次轴载,运行速度通过换算大约为 6 m·s⁻¹ (21.6 km·h⁻¹),展开道面加速加载动力响应特性分析。

2.1 半刚性基层道面动力响应特性

2.1.1 环氧沥青面层顶面的应变

通过现场应变片采集的数据绘制环氧沥青层顶应变时程曲线,并取近轮迹带 B1 和远轮迹带 B8 的应变时程曲线进行分析,如图 5 所示。

从面层顶面应变片时程曲线可以看出,半刚性基层道面环氧沥青面层顶 B1 处的 I 号应变时程曲线以受压为主,II 号应变以受拉为主。对于同一位置的纵横应变片时程曲线,在同一时刻的波峰与波谷恰好相反,不同位置处相同方向的应变片时程曲线波形基本一致;随着应变片远离轮迹带,应变峰值不

断减小. 由此可以看出环氧沥青道面表面承受拉压复合应力状态, 尤其是在轮迹带两侧的变形最大, 因而对于半刚性基层道面的环氧沥青层顶在高温工作环境下的疲劳开裂应作为可能的一种破坏形态而关注.

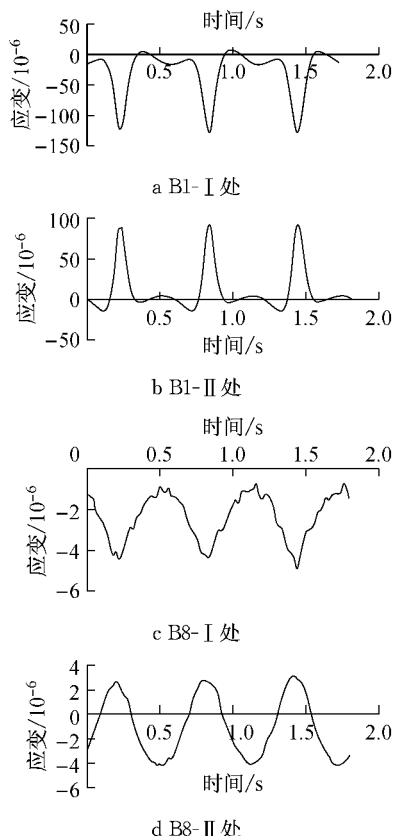


图 5 B1 与 B8 处环氧沥青层顶应变时程曲线

Fig.5 B1 and B8 strain curve of epoxy asphalt layer top

2.1.2 环氧沥青面层层底动力响应分析

由图 6a 可以看出, 半刚性基层道面在高温条件下环氧沥青面层层底纵向应变出现显著的拉压应变交替. 轮载临近时, 呈现压应变状态; 轮载到达时, 呈现拉应变状态; 且拉应变约是压应变的 2.7 倍. 出现该状况主要是沥青混合料的动回弹模量受试验温度、加载频率、混合料的性质影响^[15]. 由文献^[16]根据美国沥青协会 AI 经验公式可知, 道路结构各面层沥青混合料的模量受温度影响非常明显: 路面温度每升 10 °C, 沥青混合料的模量降低 1/2 ~ 1/3. 因此在高温条件下普通沥青混合料的动态模量迅速下降; 而环氧沥青混合料由于不可逆的热固性, 其动态模量影响较小. 这就形成上层模量高、下卧层沥青混凝土模量低的典型道面结构组合, 使得环氧沥青面层层底部产生显著的弯拉应力^[17]. 加载初始阶段, 经动荷载的反复作用, 随加载次数增加, 下卧层沥青混合料的塑性变形和材料的劲度模量衰减, 导致在该阶

段应变逐渐增加, 最终由拉压交替应力状态变为完全受拉状态, 如图 6b 所示.

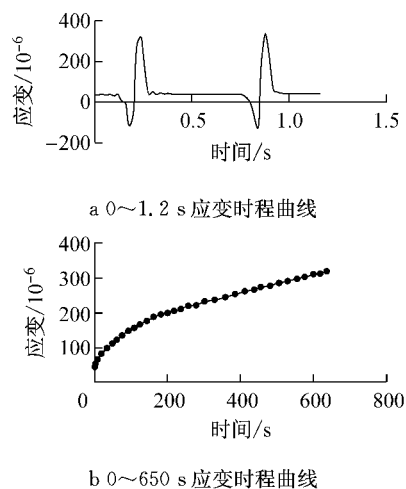


图 6 半刚性基层道面环氧沥青层底应变

Fig.6 Epoxy asphalt layer bottom strain curve of semi-rigid base pavement

通过分析可知, 对于热固性优越的环氧沥青, 其产生疲劳破坏一方面是下卧层的普通沥青混凝土在高温环境下受重载反复作用产生过量的塑性变形累积导致底部弯拉应力增加; 另一方面则是道面结构内拉压交替变化的复杂应力状态影响. 单纯以面层底部压应变或拉应力为控制指标存在不足, 应以变形幅值作为控制指标, 这样就可以充分考虑下卧层的过量塑性变形引起的环氧沥青层底复杂应力状态, 从而更有效地控制道面的疲劳破坏.

2.1.3 普通沥青混凝土层底动力响应

由图 7a 可知, 半刚性基层环氧沥青道面沥青混凝土层底纵向应变在加载初期是拉压交替状态, 但拉应变显著高于压应变. 动载作用一段时间后, 逐渐由拉压交替变为完全受压状态. 这主要是高温条件下半刚性基层道面中普通沥青混凝土在反复的动荷载作用下出现层间滑移、塑性变形和劲度模量衰减, 导致普通沥青混凝土塑性变形累积, 出现层底以受压为主; 且随着加载次数增加, 压应变总体呈增长的趋势, 如图 7b 所示. 因而对长期处于高温工作条件的环氧沥青道面结构, 其下卧层普通沥青混凝土出现强度衰变, 且产生过量的竖向变形, 这将增加环氧沥青面层层底的拉应力, 加剧道面结构的整体疲劳破坏, 引起道路使用性能和耐久性下降, 这应作为道面结构设计控制的关键, 亦应引起关注.

由此看来对于半刚性基层环氧沥青道面, 环氧沥青面层层顶与层底纵向均受拉为主, 因而面层是受拉疲劳破坏; 而下卧层的普通沥青混凝土纵向应

变以受压为主,则以控制过量的塑性变形为主.

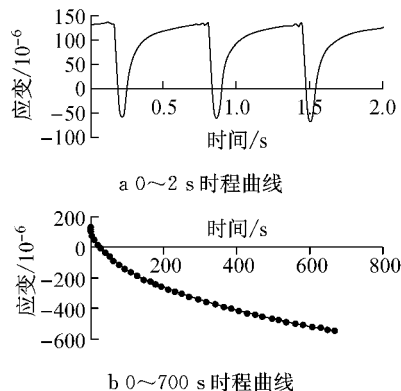


图 7 半刚性基层道面沥青混凝土层底应变

Fig.7 Asphalt concrete layer bottom strain curve of semi-rigid base pavement

2.2 复合环氧沥青道面动力特性

2.2.1 环氧沥青层表面动力响应特性

复合道面仍取近轮迹带 A1 和远轮迹带 A8 的应变时程曲线进行分析,如图8所示.由应变片时程

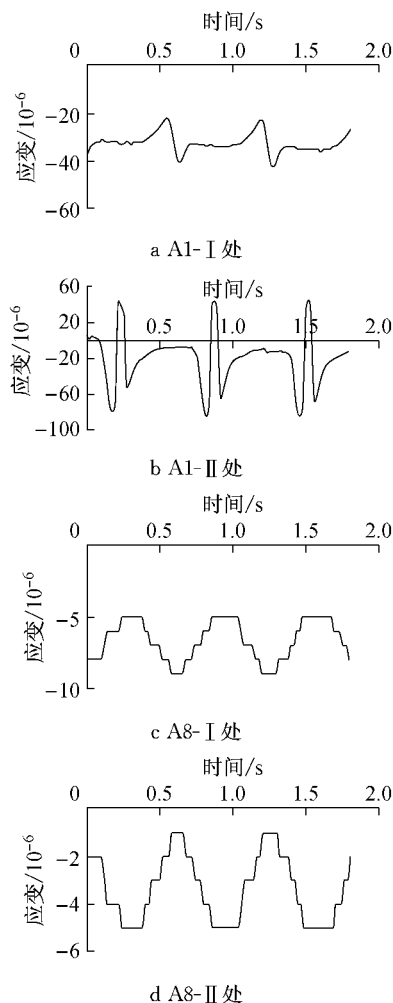


图 8 A1 与 A8 处环氧沥青层顶应变时程曲线

Fig.8 B1 and B8 strain curve of epoxy asphalt layer top

曲线可以看出,复合道面环氧沥青面层顶部 A1-I 应变时程曲线完全受压,远轮迹带 A8-I 处也全为受压状态,其应变状态沿横向逐渐变小;A1-II 应变时程曲线则在沿横向为拉压交替状态,在远轮迹带 A8-II 处应变曲线则为受压状态.

就时程曲线特征而言,复合道面环氧沥青面层层顶总体以受压为主;近轮迹带曲线光滑,而远轮迹带则呈折线状.这说明随着道面结构整体刚度的增加距离动载作用点越远,不但响应峰值显著减小,其对荷载响应的敏感性也降低.

2.2.2 环氧沥青层层底动力响应特性

由图 9a 可知,在加载初期复合道面环氧沥青混凝土面层底纵向应变处于拉压应变交替,且以压应变为主,压应变峰值明显大于拉应变峰值.但经过一段时间动载作用后,动力响应应变为完全受压,如图 9b 所示.

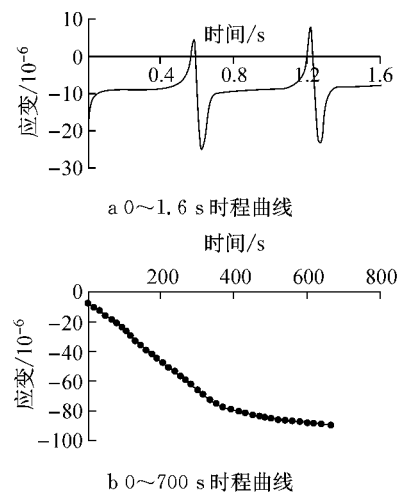


图 9 复合道面环氧沥青层层底应变

Fig.9 Epoxy asphalt concrete layer bottom strain curve of composite pavement

分析复合道面环氧沥青面层层底应变特性,主要是受高温环境影响,动载作用初期道面结构压密变形及普通沥青混凝土微小流变引起较小的拉应变;但由于复合道面普通沥青混凝土层厚度较薄,在短期的塑性变形后,骨架结构重组达到一个稳定状态.再加之水泥混凝土板的整体模量较高,因而环氧沥青面层底面经过短暂的拉压交变变为完全受压状态.通过对比不难发现,复合道面环氧沥青混凝土层底应变不论是发展速度还是最终的峰值都比半刚性基层道面小.这也说明下卧层的整体强度对其力学响应特性影响显著.

2.2.3 普通沥青混凝土层底应变

由图 10a 可知,普通沥青混凝土层底的响应主

要受压,这是由于在高温情况下中间层的沥青混凝土模量较上面层的环氧沥青和下层的水泥混凝土板都小,且差值较大,形成一类似的“软弱中间层”,因而在该层底产生压应力。

而图 10b 反映了在持续加载过程中应变特性:在动载作用最初,由于受温度影响和荷载作用模量衰变较快,沥青混合料出现短期快速流变,在反复动载作用下初期应变增加较快;而中后期随着沥青混合料形成稳定骨架,应变增加相对变缓。

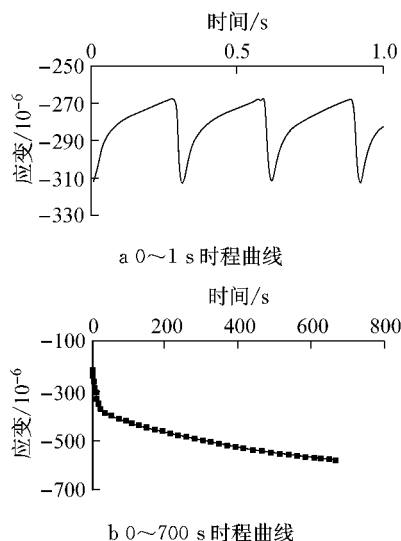


图 10 复合道面沥青层层底纵向应变

Fig.10 Asphalt concrete layer bottom longitudinal strain curve of composite pavement

3 结论

(1) 通过足尺加速加载动力响应试验研究可知,在高温条件下受沥青黏弹性和流变性影响,道面结构力学行为随加载次数的增加发生变化。

(2) 通过对应变时程曲线的分析,明确了高温条件下不同结构组合的环氧沥青道面动力响应特性,分析了不同结构组合的环氧沥青道面破坏机理:半刚性基层道面结构、环氧沥青面层受拉,而沥青混凝土层受压,因而在疲劳荷载作用下环氧沥青面层受拉疲劳破坏,而下卧层则应以控制过量的塑性变形为主;复合道面结构环氧沥青面层和沥青面层均受压,因而以控制压应变和累积塑性变形为主,防止过量的层间滑移。

(3) 为提高环氧沥青道面的耐久性,应加强环氧沥青混凝土与下卧层沥青混凝土的层间黏结,同时要尽可能提高其高温稳定性和压实度,这可以有

效减小下卧层沥青混凝土在高温条件下的滑移,从而减小塑性累计和环氧沥青混凝土的拉应力。

参考文献:

- [1] 乐建新. 机场水泥混凝土道面开裂机理理论研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
LE Jianxin. Study on the mechanism of crack generating of cement concrete airport pavement [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [2] 刘文. 机场沥青道面设计指标及方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
LIU Wen. Study on design indexes and methods for asphalt airport pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [3] Joseph A H. Behavior of Epoxy-asphalt airfield pavements, 1963 Inspections [R]. [S. l.]: Army Engineer Water Ways Experiment Station Vicksburg MS, 1965.
- [4] Peiliang C, Jianying Y, Shuanfa C. Effects of epoxy resin contents on the rheological properties of epoxy - asphalt blends [J]. Journal of applied polymer science, 2010, 118(6): 3678.
- [5] Garg N, Hayhoe G F. Asphalt concrete strain responses at high loads and low speeds at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) [J]. American Society of Civil Engineers, 2001(271):1.
- [6] Hayhoe G F, Cornwell R, Garg N. Slow-rolling response test on the test pavement at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) [J]. American Society of Civil Engineers, 2001(271):30.
- [7] Al-Qadi I L, Loulizi A, Elseifi M, *et al.* The virginia smart road: The impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004, 73:427.
- [8] Priest A L, Timm D H. A full-scale pavement structural study for mechanistic-empirical pavement design [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2005, 74: 519.
- [9] Immanuel S, Timm D H. Measured and theoretical pressures in base and subgrade layers under dynamic truck loading [C]// Proceedings of 2006 Airfield and Highway Pavements Specialty Conference. Reston: ASCE, 2006.
- [10] Qi X C, Mitchell T, Gibson N, *et al.* Pavement responses from the full-scale accelerated performance testing for superpave and structural validation [C]// Pavement Mechanics and Performance-Geo Shanghai International Conference. Shanghai: [s. n.], 2006:75-86.
- [11] 管志光, 庄传仪, 林明星. 足尺沥青混凝土路面加速加载动力响应 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 24.
GUAN Zhiguang, ZHUANG Chuanyi, LIN Mingxing. Accelerated loading dynamic response of full scale asphalt concrete pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 24.
- [12] 董忠红, 徐全亮, 吕彭民. 基于加速加载试验的半刚性基层沥青路面动力响应 [J]. 中国公路学报, 2011, 24(2):1.