

# BRT 路面铺装方案研究

郑翥鹏, 张子豪

(厦门大学 土木工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** BRT 特有的渠化交通方式和较重的车辆荷载容易使 BRT 路面在运营较短时间内就出现车辙等病害。文章在对比现有施工方案不足的基础上, 借鉴北京 BRT 铺装案例, 并对其各项性能进行试验分析, 针对厦门 BRT 高架段路面提出 TX 铺装新方案的设想。

**关键词:** BRT; 施工方案; 车辙病害; TX 铺装

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2018)06-0536-05

## Research on the pavement scheme of BRT

ZHENG Zhupeng, ZHANG Zihao

(Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The unique channelized traffic mode and heavy vehicle loads would cause rutting and other diseases on the BRT pavement within a short period of operation. Based on the comparison with the shortcomings of existing construction schemes, the case of Beijing BRT paving was taken as an example and its various properties were tested and analyzed. Finally, a new TX paving scheme was put forward for the elevated section of Xiamen BRT.

**Keywords:** BRT; construction scheme; rutting disease; TX pavement

快速公交系统简称 BRT, 是利用当代公交技术, 配合相应运营方式, 使其既有类似轨道交通的服务水平, 又具备公交运营灵活的一种以巴士为基础而发展成的大众运输系统。自 1999 年引入我国, 已先后在多个城市建成使用, 其中以厦门的 BRT 最为成功。由于 BRT 路面完全渠化的独特性, 部分已建成运营 BRT 的城市, 其路面不久便出现了车辙、推移等病害。文章在对比现有铺装方案不足的情况下, 针对厦门 BRT 高架段路面提出新的铺装方案, 为类似工程提供参考。

## 1 传统施工方案

### 1.1 国内外 BRT 路面铺装方案

国外运营的 BRT 路面铺装类型有 3 种模

式<sup>[1]</sup>, 如表 1 所示。

由表 1 可见, 国外 BRT 铺装普遍采用方案二, 即在车站段铺设水泥混凝土, 其余路段均铺设沥青混凝土。也有一些特殊的案例, 比如在波哥大的市中心路段采用砖石铺装的方法。

表 1 国外 BRT 路面铺装方案  
Tab.1 Foreign BRT pavement schemes

序号	铺装方案	采用城市
方案一	全采用水泥混凝土路面	波哥大、卡利
方案二	车站段采用水泥混凝土 其余路段采用沥青混凝土	基多、库里蒂巴、 布里斯班、雅加达
方案三	全采用沥青混凝土路面	较少

收稿日期: 2018-07-24

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT160004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20720160076); 住房和城乡建设部科技项目(2016-K4-046)

第一作者简介: 郑翥鹏(1978-), 男, 福建泉州人, 助理教授, 博士, 研究方向: 结构健康监测。

国内大多城市选择在车站及路口处均使用沥青路面,这其中就包括北京、常州、厦门等城市。只有在 2006 年的北京 BRT 1 号线的沙子口站,采取复合型结构方案对路面进行修复,以及 2008 年在 BRT 2 号线与 3 号线选择了水泥混凝土路面站台、沥青混凝土路段的铺设方案<sup>[2]</sup>。

通过对各地的 BRT 使用状况调查,发现凡是选择全路段铺设水泥混凝土的 BRT,其路面状况良好,未出现显著病害。但水泥混凝土路面也有其不可忽视的缺点,即减振效果差、车辆通过时噪音大,影响乘客的体验舒适性;而采用方案二的复合型路面铺装方案,车站段虽没有产生车辙等病害,但却存在反射裂缝,增大路面的应力与变形,因此也没大范围推广使用;沥青路面的优点为表面平整、驾驶平稳、噪声小及美观等,但采用沥青混凝土的方案,其路面状况一般,特别是在进出站与站台车辆停靠处的位置易产生推移、车辙等病害。

1.2 厦门 BRT 概况

厦门 BRT(如图 1)2008 年正式投入使用,是全国唯一全程高架的 BRT 系统,目前已开通 6 条线路,日客流达到 28 万人次,以约 8%的公交车数量承担了全市公交客运总量的 15%,极大地缓解了高峰拥堵,满足市民的出行需求。



图 1 厦门 BRT  
Fig.1 Xiamen BRT

厦门 BRT 高架路面结构如图 2 所示。其上层采用 4 cm 的 SMA-13(掺加抗车辙剂及木质素纤维),下层采用 6 cm 的 AC-16(掺加抗车辙剂),层间黏接层用 SBR 改性乳化沥青,用 SBS 防水黏接层接地。

厦门 BRT 开通运营不到一年,便在个别车站

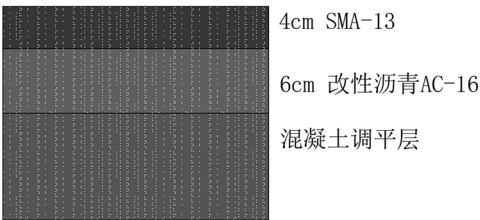


图 2 厦门 BRT 高架路面结构图  
Fig.2 Elevated pavement structure of Xiamen BRT

出现了不同种类的病害。其中以洪文站最为典型,据相关资料显示,车站的车槽最大深度达 12 cm,长度约 30 m,卧龙晓城站也出现大面积的沥青面层推移现象<sup>[2]</sup>。最新的实地调查发现,思北路口站仍出现轻微的车辙病害(如图 3),斗西路路口站在车辆轮迹处有明显的修补痕迹(如图 4)。开通的 10 年里,路面进行过多次修复,都没能彻底解决病害,考虑采取新的铺装方案替代现有方案。

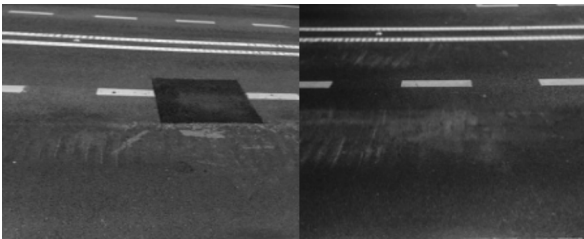


图 3 厦门 BRT 思北车站段病害  
Fig.3 Diseased section of Sibei Station  
of Xiamen BRT



图 4 厦门 BRT 斗西路车站段病害  
Fig.4 Diseased section of Douxi Road Station  
of Xiamen BRT

### 1.3 现有设计方法的不足

国内运营的 BRT 多为 18 m 长的单铰接车,较普通公交表现出大、长、重的特点。BRT 车辆的实际接地压强可达 0.9 MPa,而当前荷载试验大多以标准轴载的 0.7 MPa 作为参数,比实际数值低,故无法得到准确的试验结果;此外,BRT 道路大多是封闭式的专用车道,车辆渠化效应明显,车轮的作用区域比较集中;在车站定点停车的地方,BRT 车辆频繁刹车与启动,导致路面反复承受前后方向及垂直方向的荷载作用,这使得 BRT 路面承受较大的剪切推移力<sup>[2]</sup>。且目前多以马歇尔试验作为模拟依据,其试件与沥青混凝土路面的实际受力状况不完全一致,虽然城市道路设计规范可以初步计算出沥青路面的剪切强度,但车辆进出站时刹车与启动对路面产生的影响目前仍然没有可靠的理论依据<sup>[3]</sup>。因此,现行设计方法最大的不足之处在于无法通过现有规范对病害进行有效的预测与防治,需通过实践检验。

## 2 新方案类型

我国目前传统的 BRT 路面铺装多采用沥青结构,面层为沥青玛蹄脂 SMA 材料。尽管其有着“三多一少”的嵌挤结构特征,理论上能够在高温环境下抵抗车辙,但实践发现,在各地的 BRT 路面都出现了不同程度的车辙病害,因此考虑对原有的铺装方案进行改良。新型的铺装技术将着重提升路面的抗剪切流变性能,提高车辙动稳定度。

### 2.1 双层环氧沥青混合料铺装

双层环氧沥青混合料铺装方法为表面层与下面层均铺筑厚度为 25 mm 的环氧沥青,骨料最大直径为 10 mm,层间用环氧沥青黏接剂连接,黏结层则采用特有的 Eliminator 防水体系<sup>[5]</sup>。试验表明,双层环氧沥青在标准条件下(70 ℃、0.7 MPa)的车辙动稳定度次数可达 9 000 次,高于原有的铺装方案,满足 BRT 路面对抗车辙的要求。

### 2.2 超薄水泥混凝土路面

超薄水泥混凝土路面是一种对旧沥青路面快速修复的新技术。诞生于 20 世纪 90 年代的美国,先后在多个州实地应用,显示在汽车制动频繁的交通路口,其抗车辙效果显著。其方法是在老旧沥青路面上再加铺一层较薄的水泥混凝土面层,加铺的面层一般为 5~10 cm 厚。国内对其理论探索尚在起步阶段,仅有几所大学率先开展研

究。因此还需通过进一步的试验,判断该技术能否在我国得到实际应用<sup>[4]</sup>。

### 2.3 半柔性路面 TX 铺装

半柔性路面 TX 铺装研发于 20 世纪 80 年代,率先在日本应用并且获得认可。它是将特种高渗透性水泥砂浆灌注到高孔隙率的母体沥青混合料中,由此形成特有的复合型路面<sup>[5]</sup>。半柔性路面 TX 铺装概念图如图 5。

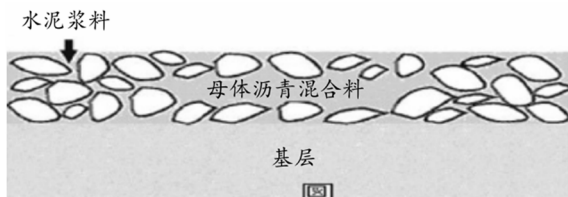


图 5 半柔性路面 TX 铺装概念图  
Fig.5 Concept map of TX pavement on semi-flexible pavement

该技术同时具备水泥混凝土路面与沥青混凝土路面的优点<sup>[6]</sup>:

- 1) 抗车辙力强,动稳定度可达 3.6 万多次/mm(70 ℃、0.7 MPa 条件下),远优于其他技术;
- 2) 变形小,抗耐磨能力强;
- 3) 根据用处不同进行上色,达到美化效果;
- 4) 养护时间短,一般路面铺装施工后,1~2 h 可恢复交通。

基于以上这些优越性能,提出在厦门 BRT 运用 TX 铺装方案的想法。

## 3 厦门 TX 铺装方案探索

### 3.1 TX 铺装 in 试验中的表现

厦门现有的路面铺装材料为 SMA-13,将其与 TX 铺装做试验对比。

运用 BISAR3.0 软件对其路面受力进行初步计算,两种方案的材料参数如表 2 所示。

表 2 SMA-13 与 TX-13 材料参数对比  
Tab.2 Material parameter comparison of SMA-13 and TX-13

材料	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
SMA-13/TX-13	4/5	1 400/3 500	0.35/0.35
AC-16/密级配	6/6	1 200/1 400	0.3/0.3

BISAR3.0 是 20 世纪 70 年代由壳牌公司自主研发的程序,除了能计算应力与应变,BISAR 还能对挠度及层间的水平力和滑动进行计算。其操作简单,只需先设计模型,再输入荷载及各层材料的参数等数据,便能计算结构的总体应力及应变<sup>[7]</sup>,得出想要的结果。

软件算出的二者应变应力对比如图 6、7。

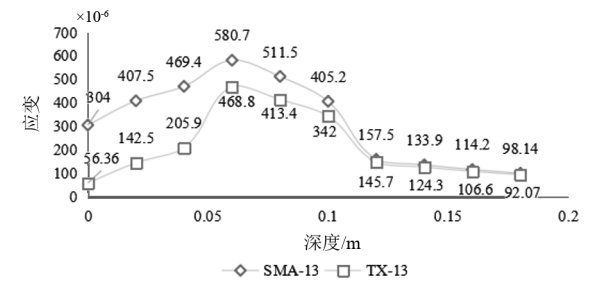


图 6 SMA-13 与 TX-13 的应变随深度变化图

Fig.6 Strain versus depth variation of SMA-13 and TX-13

从对比图中可看出,采用 TX-13 铺装方案的

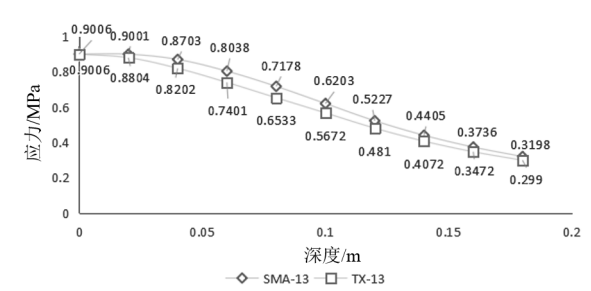


图 7 SMA-13 与 TX-13 的应力随深度变化图

Fig.7 Stress versus depth variation of SMA-13 and TX-13

应力应变普遍小于 SMA-13,其力学性能更优。在面层部位,TX-13 的应变最多能减小到 SMA-13 的 35%,中面层部分也能减小到原来的 80%;在应力方面,面层部分二者有 5%的差距,在中面层部分应力比原方案可减少 10%。应力应变的降低,可提高路面抗车辙的能力,减少病害发生。

TX-13 和 SMA-13 铺装的相关试验数据指标对比见表 3<sup>[8]</sup>。

表 3 SMA-13 与 TX-13 相关数据对比表			
Tab.3 Related data comparison of SMA-13 and TX-13			
项目	SMA-13	TX-13	规范技术指标
油石比/%	6.3	3.5	—、3~4.5
理论密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.547	2.655(母体)	大于 2.5
动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> 60℃)	6 231(0.7MPa)	15 982(1.0MPa)	大于 3 000(T0719)
粗集料 10~13mm、5~10mm/%	张家口玄武岩 55、25	张家口玄武岩 51、35	—
细集料 3~5mm/%	张家口玄武岩 2	张家口玄武岩 0	—
混合料稳定度/kN	8.63	4.9	大于 6、2.94
空隙率/%	3.97	1.7	3~4、—
孔隙率/%	78.4	22.7(母体孔隙率)	75~85、20~28

通过对表 3 的数据分析可看出:

- 1)TX-13 铺装所需混合料油石比为 3.5%,相较于 SMA-13 少了约 40%,可减少沥青的用量;TX-13 铺装车辙试验在高温重载条件下(温度 60℃,轮压 1.0 MPa)进行,试验结果为 15 982 次/mm,比 SMA-13 的 6 231 次/mm 高约 2.56 倍,其抗车辙性能具有明显优势,适合在 BRT 路面使用;
- 2)TX-13 粗集料所占的比例高达 86%,而细集料的含量为零,由此形成了一种低含油量的粗骨料结构,因而具有较好的抗形变能力。试验数据表明,TX-13 满足规范的要求,且较厦门 BRT

现有的 SMA-13 铺装方案性能优越,可考虑应用于 BRT 路面的铺装。

### 3.2 施工控制

半柔性路面 TX 铺装技术在路面车辙防治工程中的一般铺装应用形式如图 8 所示,主要施工流程如图 9 所示。

将 TX-O 添加剂加入渗透用水泥浆,并将其灌注到孔隙率高的开粒度沥青混合料中是 TX 铺装技术的特点。相当于把水泥硬化无机料灌注到沥青混合料的空隙之中,使原来沥青路面的柔性结构变成成为半刚性结构。为保证铺装结构的密实度与稳定性,确保母料结构空隙率和水泥浆的填



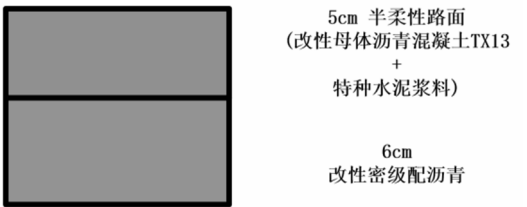


图 8 TX 铺装方案应用示意图

Fig.8 TX paving solution application diagram

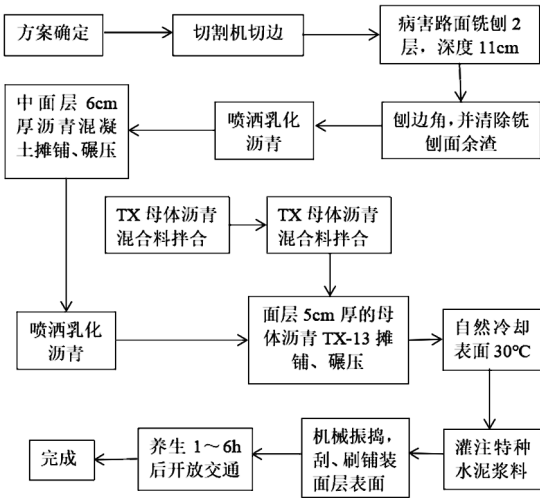


图 9 TX 铺装主要施工流程图

Fig.9 Flow chart of TX pavement's main construction

充尤为重要<sup>[7]</sup>。施工时人员任务应分配明确,严格把控温度,做好防水、防尘等工作。

3.3 实际应用案例

TX 铺装技术于 2006 年首次在北京 BRT 1 号线路面车辙病害处治工程中铺装应用。后期表现良好,在最长 6 年半的时间里,路面车辙深度一直

稳定保持在 1 cm 内,而在桥面铺装部分几乎不产生变形。截至 2013 年,北京地区的路面已大量采用 TX 铺装技术,最新调查报告显示,已铺筑半柔性路面的路段,其铺装完好率近似 100%。在经济效用方面,运用半柔性路面 TX 铺装技术可降低路面车辙病害维修的施工次数,将路面修复施工对 BRT 正常运营的干扰程度降到最低,且一次半柔性路面 TX 铺装的施工成本只有其它种类沥青铺装技术 5 年养护期成本的三分之一左右<sup>[6]</sup>,最大限度地保持 BRT 线路畅通运营不受影响。

3.4 不足之处

尽管 TX 铺装技术是目前解决 BRT 路面病害的最佳方案,但其实际应用的案例较少,经验尚缺乏,施工工艺比较复杂,施工质量不易控制。此外,因涉及到水泥砂浆的灌注技术,施工和修复养护的周期都会相应增加<sup>[9]</sup>。由于厦门 BRT 岛内段为全程高架,而已成功应用的北京 BRT 路段为普通地面,二者在施工技术上,比如对防水的处理,存在一定的差别。因此,综合考虑两地的环境差异,北京 BRT 的 TX 铺装案例是否能完全应用到厦门 BRT 中,是否能适用于各地区的 BRT 路面,需要通过进一步的实践检验。

4 结语

通过对传统与新型的路面铺装技术归纳研究,运用 BISAR3.0 计算得出 TX-13 的应力应变比 SMA-13 大幅减少的结论,并在结合了北京 BRT 成功案例后,得出 TX 铺装新技术的可行性,提出在厦门 BRT 运用的想法。鉴于当前经验尚缺乏,其中的技术不足之处仍需去克服。

参考文献:

[1] 王玉泽. 快速公交系统(BRT)规划设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
[2] 陈琦. BRT 路面结构类型研究[J]. 交通科技, 2010(3): 84-86.  
[3] 张慧敏, 顾启英. 大容量快速公交系统 BRT 路面结构组合方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2008(7): 6-9.  
[4] 周建坤, 王建松, 虞胤. 沥青路面车辙病害分析及处治措施[J]. 交通科技, 2013(S1): 83-86.  
[5] 肖春. BRT 车站段桥面铺装病害的解决方案浅析[J]. 中国市政工程, 2015(5): 4-7.  
[6] 徐开宇. 半柔性路面 TX 铺装——一种长效、高稳定性的抗车辙路面技术[J]. 市政技术, 2013(5): 6-7.  
[7] 高建华, 王兆伦. 基于 BISAR 软件的半柔性复合路面层间粘结力分析[J]. 公路工程, 2013(8): 17-20.  
[8] 杨素青, 南威. 母体沥青混合料结构 TX 在顺沙路昌平段大修的应用[C]//第五届全国公路高层创新高峰论坛. 北京: 人民交通出版社, 2010: 227-235.  
[9] 董广绰. BRT 车站路面铺装的研究[J]. 中国建材科技, 2016(6): 101-102.