

文章编号:1003-1995(2018)02-0001-05

# 我国铁路沥青混凝土技术研究进展

仲新华<sup>1,2</sup>, 蔡德钧<sup>1,2,3</sup>, 李享涛<sup>1,2</sup>, 石越峰<sup>1,2,3</sup>, 裘智辉<sup>1,2</sup>, 何 龙<sup>1,2</sup>

(1.中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所,北京 100081;2.中国铁道科学研究院 高速铁路轨道技术国家重点实验室,北京 100081;  
3.北京铁科特种工程技术开发公司,北京 100081)

**摘 要** 全断面铺筑沥青混凝土是铁路路基排水技术的重大举措。文章介绍了沥青混凝土的主要性能特点及其在国内外铁路工程中的应用情况,从力学适用性、防水抗渗性和界面安全性 3 个方面阐述了铁路基床表层铺筑沥青混凝土的关键技术和研究进展,提出了铁路全断面铺筑沥青混凝土机械化施工的合理化建议。

**关键词** 铁路路基;路基防排水;沥青混凝土;抗压模量;层间摩擦;抗渗性

**中图分类号** TU528.42 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1003-1995.2018.02.01

路基是铁路重要的工务基础设施,维护路基的长期稳定是保证线路平顺性继而维持列车正常运行的重要条件。列车运行速度越快,线路的平顺性要求越高<sup>[1]</sup>。

铁路长期工务实践表明,降雨、融雪等明水侵入引起的翻浆冒泥、冻胀等路基病害是降低线路平顺性水平的主要原因<sup>[2-3]</sup>。为阻隔明水侵入路基,维持路基稳定和平顺性水平,铺设具有良好变形协调能力、防水性、耐久性和较好经济性的沥青混凝土是铁路路基面防排水技术的重大举措。

研究表明,控制沥青混凝土的孔隙率即可保证沥青混凝土的耐久性和抗老化性<sup>[4-6]</sup>。沥青混凝土铺设于路基面级配碎石和混凝土支承层之间,既可作为轨道系统支承结构的重要组成部分,用于进一步优化轨道结构,又可作为路基面防水材料,起到防水和排水的作用。

沥青混凝土技术在公路交通领域具有成熟的理论 and 应用经验,在德国、法国、意大利、美国、日本等国铁路也有应用。这给我国铁路领域研究和应用沥青混凝土技术提供了宝贵经验。但是由于各国铁路轨道结构、线路运载能力、地域环境等条件的差别很大,使得沥青混凝土应用的结构部位、设计厚度、材料性能要求等呈现出多样性,因此不能完全照搬使用。

本文介绍了国内外铁路沥青混凝土的工程应用,

并根据应用特点阐述了铁路沥青混凝土的关键技术和目前的研究进展,对铁路沥青混凝土机械化施工存在的潜在问题提出了合理化建议。

## 1 沥青混凝土的主要性能特点

沥青混凝土是一种黏弹性材料,沥青混凝土的工程性能强烈地受到沥青结合料性质的影响。一方面,沥青混凝土在低温小变形范围内接近线弹性,赋予沥青混凝土作为结构材料的正常使用功能;另一方面,沥青混凝土在较高温度和较大变形范围内表现为黏弹性,当局部受力超出预期时,具有较好的变形协调能力。沥青混凝土的胶体结构和劲度是影响其应用的关键因素。

### 1.1 沥青的胶体结构

沥青由饱和分、芳香分、胶质和沥青质 4 种分子量依次增加的化学组分组成,根据 4 种组分的相对含量和分布形态,分为溶胶型、溶-凝胶型和凝胶型 3 种胶体结构<sup>[7]</sup>。

溶胶型沥青中沥青质分子量较低,且含量很少,同时有一定数量芳香度较高的胶质,使得形成的胶团能够完全胶溶而分散在芳香分和饱和分的介质中。胶团间相距较远,可在分散介质中自由运动,因此溶胶型沥青具有较好的自愈性和低温变形能力,多用于不需承载力但要求具有良好防渗功能的工程。

溶-凝胶型沥青中胶团数量增多,相对较近,相互间有一定的吸引力,因此溶-凝胶型沥青在高温时具有较低的感温性,低温时又具有较好的变形能力,此类沥青多用于高等级公路工程。

凝胶型沥青中的胶团数量最多,相互靠得很近

收稿日期:2017-12-10;修回日期:2018-01-23

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2017G008-B);中国铁道科学研究院基金(2015YJ030)

作者简介:仲新华(1971—),男,研究员,硕士。

E-mail:zhongxinhua216@163.com

的胶团可形成空间网络结构,弹性更为明显,因此凝胶型沥青具有较好的温度感应性,但低温变形能力较差。

沥青的胶体结构与其应用所需的性能有密切关系。胶体结构类型的确定,可以根据高分子溶液理论来研究,即视高分子量的沥青质为溶质,溶解于低分子量的软质沥青的高分子溶液。现阶段通常用针入度指数法来划分胶体结构类型。针入度指数越高,沥青的凝胶特征越明显,沥青的温度感应性越好。

## 1.2 沥青混凝土的劲度

在沥青混凝土的材料组成中,矿料属于弹性材料,沥青属于黏弹性材料,因此沥青和沥青混凝土的应力-应变关系应采用包括弹性反应和黏滞反应在内的劲度来表征。

### 1) 沥青的劲度

沥青的黏弹性可分别采用描述弹性、黏性的元件并联模型进行表征。

弹性元件用弹簧表示,其应力-应变关系服从胡克定律,即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中: $E$  为弹性模量; $\sigma, \varepsilon$  分别为应力和应变。

黏性元件用阻尼器表示,其应力-应变关系服从牛顿黏性定律,即

$$\sigma = \lambda \varepsilon / t \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为黏滞系数; $\varepsilon/t$  为应变率。

因此,沥青的劲度  $S_b$  可用最简单的二元模型表示为

$$S_b = E/(1 + tE/\lambda) \quad (3)$$

当荷载短期作用时,沥青材料表现为弹性。

### 2) 沥青混凝土的劲度

在沥青混凝土组成中,沥青是提供黏性的唯一来源。沥青混凝土的劲度( $S_m$ )依赖于沥青的劲度和矿料的体积分数( $C_v$ )。

Heukelom 和 Klomp 用试验研究进一步将这一关系确定为<sup>[8]</sup>

$$\frac{S_m}{S_b} = \left[ 1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{(1 - C_v)} \right]^n \quad (4)$$

式中: $n=0.83\log(S_b/10^4)$ ;  $S_b$  以  $\text{MN}/\text{m}^2$  计。

显然,除了沥青劲度和矿料体积外,沥青混凝土的劲度还和矿料级配、压实度、压实方法、侧限应力等因素有关,尤其是侧限应力。

在小应变弹性范围内,沥青混凝土的劲度和抗压回弹模量基本一致。

## 2 沥青混凝土在国内外铁路工程中的应用

国际上,在高速铁路技术发展起步较早的德国、法国、意大利、美国、日本等国,均有应用沥青混凝土的相关经验<sup>[9]</sup>。

国外铁路沥青混凝土按工程应用结构部位可分为 3 类:

### 1) 无砟轨道结构上垫层

其特征是在沥青混凝土层上直接铺设轨枕、宽轨枕、整体道床、轨道板等轨道部件,起到提高路基稳定性、减振降噪等作用,如德国 GETRAC-A3 型轨道、荷兰的 ERIA 型轨道。

### 2) 无砟轨道下垫层

其特征是在沥青混凝土层上先铺设道砟层,再在道砟层上铺设轨道部件,起到减轻路基应力、保持路基稳定等作用,如法国 TGV 东线沥青道床试验段、意大利罗马到佛罗伦萨高速铁路、日本的东海道新干线铁路和美国的重载铁路。

### 3) 道砟层

其特征是在轨枕周边的道砟内注入热熔改性沥青,达到固化道砟、防排水等作用,应用于日本的部分既有铁路改造。

我国铁路沥青混凝土的工程试验应用起步较早,主要用于线间和路肩的级配碎石表层,起到防排水的作用。中国铁道科学研究院中铁二院分别在此前研究基础上提出采用中粒级密级配沥青混凝土和细粒级沥青混凝土进行铺筑的建议,并分别在国家轨道试验中心、遂渝试验段、武广客专、京津城际和哈大试验段进行了少量应用。但因作业场地狭窄,无法配套机械化施工,无法保证质量,后期未能全面推广。近年来,随着研究的深入,铁科院陆续在郑徐、京张和郑万铁路采用机械化施工开展了全断面沥青混凝土的试验应用。

## 3 铁路沥青混凝土关键技术

优化轨道结构和防排水是我国开展全断面沥青混凝土应用技术研究的主要目的。结合我国铁路轨道结构特点,重点关注沥青混凝土的力学适用性、防水抗渗性和界面安全性。其中力学适用性以抗压回弹模量予以表征,界面安全性以层间摩擦因数予以表征。

### 3.1 抗压回弹模量

铁路路基及轨道结构可采用弹性层状体系作为其力学分析模型,沥青混凝土的抗压回弹模量是影响结构效应的主要指标。由于铁路轨道结构具有很高的刚度,因此传递到沥青混凝土的应力较低,通常仅为 60~80 kPa,沥青混凝土在小应变弹性范围内服役。但是

由于沥青混凝土是黏弹性材料,温度升高,沥青黏度下降,沥青混凝土的抗压回弹模量同步降低。因此应重点评估高温对沥青混凝土抗压模量的影响。

受无砟轨道或道砟的遮挡作用影响,轨道结构下部沥青混凝土的温度相对稳定。在极端条件下,我国南方炎热地区地面短时最高温度可达 60℃,此时轨道结构底部的实测温度一般不超过 45℃。因此,承受荷载的轨下沥青混凝土应评估其在 45℃ 条件下的抗压回弹模量。

周雪艳等<sup>[10]</sup>从公开发表的 111 篇文献中提取 1 142 组有效数据进行统计分析后,获得了规格为 AC-16 的密级配 SBS 改性沥青混凝土在不同温度条件下的抗压回弹模量代表值。抗压回弹模量与温度的关系见图 1。

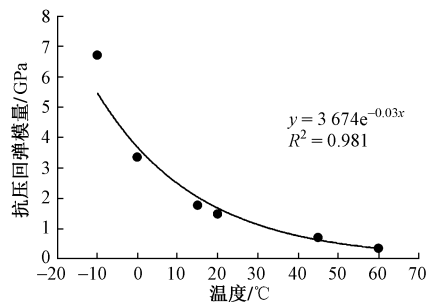


图 1 抗压回弹模量与温度的关系

由图 1 可知,温度为 45℃ 时沥青混凝土的抗压回弹模量代表值为 711 MPa,高于下卧层级配碎石的抗压回弹模量。因此,沥青混凝土用作路基全断面防排

水材料不存在高温条件下结构失效的问题,可在极端高温条件下安全服役。

3.2 抗水渗透性

在沥青混凝土的组成中,矿料虽然存在内部孔隙,但是由于内部孔隙和外界并不连通,且矿料表层高强和高度致密,因此矿料和沥青自身均具有不透水性。沥青和矿料在高温状态碾压结合并经降温稳定的过程中,沥青与骨料的结合面以及沥青内部将产生不均匀的应力分布和微细裂缝。这些裂缝在内部或外部应力作用下将进一步扩展和连通,与原本存在于沥青混凝土中的孔隙一起在沥青混凝土内部形成渗流通道。因此,降低沥青混凝土的孔隙率可提高其抗水渗透性。

渗水系数和渗透系数是表征沥青混凝土抗水渗透性的 2 种主要试验方法。由于渗水系数试验具有快速、简便的特点,张正麟等<sup>[11-12]</sup>建议将侧向渗水换算为竖向渗水,根据渗水系数试验结果近似估算渗透系数,并给出了推荐换算方法。

对于同一实物沥青混凝土,渗水系数和渗透系数必然存在一定的对应关系,理论上二者之间可通过换算取值。然而由于材料和碾压工艺的差异,不同实物的沥青混凝土的换算关系存在较大的不确定性,目前尚难以形成稳定统一的换算关系。

铁科院的研究人员用设计的 AC-16 和 AC-20 2 种界面增强的沥青混凝土铺筑试验段,开展现场渗水试验和芯样渗透试验。试验结果见表 1。

表 1 渗水系数及渗透系数试验结果

类型	渗水试验			渗透试验
	试验数量	渗水系数均值/(mL/min)	标准差	
AC-16	10	62.3	30.96	每 30 min 按 0.1 MPa 的级差逐渐加大水压,最大加压至 0.6 MPa,沥青混凝土试件未出现渗水迹象
AC-20	10	60.5	17.30	

从表 1 可以看出:渗水试验结果存在较大的标准差,主要原因是渗水试验过程中存在侧向渗水;规格为 AC-16 和 AC-20 的 2 种沥青混凝土具有相近的抗水渗透性。

为降低试验结果的不确定性风险,宜采用渗透试验表征沥青混凝土的抗水渗透性。

3.3 层间摩擦因数

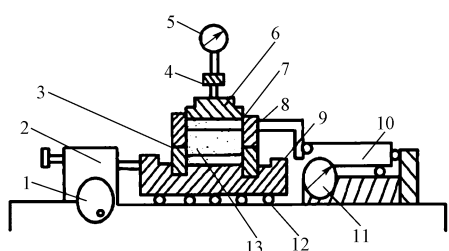
沥青混凝土上覆水泥混凝土后的层间横向摩擦阻力是轨道稳定性的重要指标。以往公路领域的研究主要集中于水泥混凝土上覆沥青混凝土后的层间抗剪能力。目前尚未发现有沥青混凝土上覆水泥混凝土后的层间抗剪能力研究的相关文献<sup>[13-15]</sup>。考虑到运营后

可能存在离缝病害,尚应评估解除黏结后沥青混凝土和上覆水泥混凝土间的层间摩擦阻力。

铁科院的研究人员通过在沥青混凝土上浇筑水泥混凝土的方式成型复合试件,并采用图 2 所示的直剪仪进行试验。

在复合试件上施加一定垂直压力,然后在水平方向对沥青混合料试件施加机械推力进行剪切。将完成静摩擦试验的复合试件按原位置组装,施加不同的垂直压力,然后施加水平推力进行剪切,复合试件滑动产生位移时的剪切力即为动摩擦力。整个试验控制环境温度 为 20℃,加载速率为 1.2 mm/min。试验结果见表 2。





1-剪切传动装置;2-推动器;3-下盒;4-垂直加压框架;  
5-垂直位移计;6-传压板;7-透水板;8-上盒;9-储水盒;  
10-测力计;11-水平位移计;12-滚珠;13-试样

图 2 应变控制式直剪仪

表 2 摩擦因数试验结果

油石比/%	压力/kPa	静摩擦因数	压力/kPa	动摩擦因数
3.8	100	6.90	100	1.22
			150	1.07
			250	1.06
4.8	100	6.28	100	1.10
			150	0.88
			250	0.84
5.8	100	6.13	100	0.83
			150	0.83
			250	0.71

从表 2 可以看出:3 种油石比条件下静摩擦因数和动摩擦因数均随油石比的增加而减小;随着压力的增加,动摩擦因数呈降低趋势;在高应力条件下动摩擦因数最小值为 0.71。

#### 4 施工组织优化建议

近年来,铁科院分别在郑徐、京张和郑万铁路采用机械化施工进行了全断面沥青混凝土的铺筑和试验。为提高沥青混凝土防排水层施工质量和给机械化铺筑创造条件,在施工组织方面提出如下建议:

1)在防水层的排水设计中,应充分考虑有利于大型机械作业;

2)进一步提高级配碎石路基面的平整度,有利于沥青混凝土的摊铺厚度控制和提高防水层表面平整度;

3)路基护坡和电缆槽应先行施工,电缆槽可起到路缘石的作用,为沥青混凝土摊铺提供稳定的基础;

4)接触网支柱或声屏障基础应先行施工,当基础有碍施工时应将基础标高控制在沥青混凝土防水层中部水平,待沥青混凝土铺筑完成后进行接长施工;

5)严格控制路基沉降观测点标高,使其略低于沥青混凝土表层;

6)尽量采用宽幅摊铺,减少沥青混凝土接缝,有

条件时可先行施工线间排水沟,避免纵向接缝;

7)在满足沥青混凝土厚度对矿料粒径限制条件下,尽量选用公称粒径较大的矿料;

8)由专业化队伍进行沥青混凝土防水层的施工。

#### 5 结语

沥青混凝土在经过热拌热铺、碾压密实后具有很好的密实性和耐久性,可对铁路路基起到良好的防排水作用。

中粒级密级配沥青混凝土具有良好的力学适用性、防水抗渗性和界面安全性,全断面铺筑于级配碎石表层有利于降低路基应力水平,提供优化轨道结构的

空间。  
建议进一步研究铁路路基表层铺筑厚层沥青混凝土的可行性。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵国堂.高速铁路无砟轨道技术[M].北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 仲新华,陈勋,杨元治,等.高速铁路路基沉降病害成因分析及对策[J].铁道建筑,2015,55(11):69-72.
- [3] 刘彬,魏永幸.客运专线无砟轨道路基防排水体系的思考[J].铁道工程学报,2008,25(6):36-38.
- [4] 张宏超,孙立军.沥青路面早期破坏的现象与试验分析[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(6):331-334.
- [5] 徐淑云.空隙率对沥青路面性能的影响[J].交通世界,2010(11):265-267.
- [6] 张永平,陆永林,张洪亮,等.基于弹性理论的沥青路面 Top-Down 开裂机理研究[J].公路交通科技,2014(4):16-21.
- [7] 黄晓明,吴少鹏,赵永利.沥青及沥青混合料[M].南京:东南大学出版社,2002:10-12.
- [8] BROWN S F.沥青材料的粘弹性[J].梁锡三,译.中外公路,1982(1):55-59.
- [9] 魏永幸.客运专线无砟轨道路基面防水材料试验研究[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2008.
- [10] 周雪艳,马磊,田宇翔,等.面层沥青混合料抗压回弹模量的取值[J].江苏大学学报,2017(9):615-620.
- [11] 张正麟.沥青混合料渗水简化试验与渗透仪试验的对比分析[J].工程建设,2006(8):11-13.
- [12] 但汉成,罗苏平,李亮,等.SMA 路面渗水性能试验研究与评价分析[J].中南大学学报,2011,42(11):3536-3544.
- [13] 田冬梅,邓德华,彭建伟.温度对水泥乳化沥青砂浆层与混凝土层间界面黏结影响[J].铁道学报,2013,35(11):78-85.
- [14] 王岚,郭莹莹,邢永明.桥面防水层间剪切性能的试验研究[J].内蒙古工业大学学报,2008,27(1):54-58.
- [15] 吴仕磊,宗俊泽.层间接触状态对沥青路面剪切应力的影响[J].公路与汽运,2013(11):115-117.

(下转第 31 页)

## Research on Longitudinal Rigidity Limit of Pier-top of Simply Supported Bridge for Urban Rail Transit

HE Tengfei, ZHAO Wenjuan

(College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou Hebei 075000, China)

**Abstract** In order to study the longitudinal rigidity limit of pier-top of simply supported bridge for urban rail transit, the calculation model of continuous welded rail on simply supported bridge with twenty holes of 30 m span was established. Taking the rail strength, relative displacement of beam (slab)-rail and rail broken seam value as the control index, the influence of longitudinal rigidity of pier-top on stress characteristics of continuous welded rail on bridge was analyzed. The research results show that with the increase of longitudinal rigidity of pier-top, the rail expansion additional force increases, the rail braking additional force and the relative displacement of beam (slab)-rail interaction decrease. For the simply supported bridge, the relative displacement of beam (slab)-rail is the control index for longitudinal rigidity of pier-top. Consider a certain safe margin, the longitudinal rigidity of pier-top of 30 m simply supported bridge on double-track subways is recommended to 240 kN/cm. In order to reduce the engineering investment, the longitudinal rigidity of pier-top could be decided by the principle of beam-rail interaction.

**Key words** Urban rail transit; Simply supported bridge; Numerical calculation; Longitudinal rigidity of pier-top; Beam-rail interaction

(责任编辑 赵其文)

(上接第 4 页)

## Progress of Railway Asphalt Concrete Technology Research in China

ZHONG Xinhua<sup>1,2</sup>, CAI Degou<sup>1,2,3</sup>, LI Xiangtao<sup>1,2</sup>, SHI Yuefeng<sup>1,2,3</sup>, QIU Zhihui<sup>1,2</sup>, HE Long<sup>1,2</sup>

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory for Track Technology of High Speed Railway, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

3. Beijing Tieke Special Engineering Technological Development Corporation, Beijing 100081, China)

**Abstract** Paving asphalt concrete on whole subgrade section is a major technique measure for railway subgrade waterproofing and drainage. This paper introduced the main characteristics of asphalt concrete and its application in railway engineering at home and abroad. From three aspects of mechanical applicability, waterproof impermeability and interface security, the key technology of paving asphalt concrete on subgrade surface and its current research progress were expounded. Some rational suggestions on mechanical construction of paving asphalt concrete were put forward.

**Key words** Railway subgrade; Subgrade waterproofing and drainage; Asphalt concrete; Compression modulus; Friction between layers; Impermeability

(责任编辑 李付军)