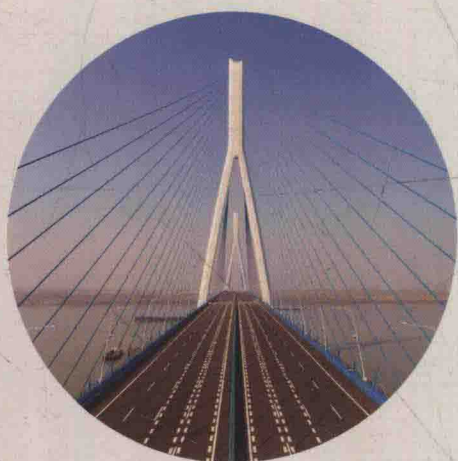




首届钢桥面铺装 技术研讨会论文集

Proceedings of The First Workshop on
Steel Deck Pavement Technology

郝增恒 王 民 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

首届钢桥面铺装技术研讨会论文集

郝增恒 王 民 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

首届钢桥面铺装技术研讨会论文集 / 郝增恒, 王民
主编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司,
2018.10

ISBN 978-7-114-15068-5

I. ①首… II. ①郝… ②王… III. ①桥面板—桥面
铺装—文集 IV. ①U443.33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 223292 号

书 名: 首届钢桥面铺装技术研讨会论文集

著 作 者: 郝增恒 王 民

责任编辑: 赵瑞琴

责任校对: 宿秀英

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 14

字 数: 220 千

版 次: 2018 年 10 月 第 1 版

印 次: 2018 年 10 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15068-5

定 价: 60.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

序

自 20 世纪 90 年代以来,我国桥梁建设蓬勃发展,钢结构桥梁具有建造周期短、自重轻、跨越能力大、适合于工业化制造、便于运输、构件易于修复和更换等诸多优点,目前已建或在建设的大跨径桥梁较多采用了正交异性钢桥面板。

鉴于我国早期缺乏大跨径钢结构桥梁的建设经验,未解决钢桥面铺装这一难题,我国先后借鉴和引进了包括德国、英国、美国和日本等在内的多种钢桥面铺装体系。通过消化吸收以及结合我国自身条件和交通构成特点进行研究改进和创新,取得了多项成果,逐步形成了适合中国国情的钢桥面铺装体系。

此次钢桥面铺装技术研讨会由中国公路学会联合国际浇注式沥青协会(IMAA)共同举办,堪称国际钢桥面铺装领域的顶级盛会。国内外专家学者以及行业从业人员对钢桥面铺装现状、钢桥面铺装的结构形式、钢桥面铺装设计标准与方法、钢桥面施工工艺及装备进行交流与探讨。

这本论文集是将研讨会中各位学者及其团队多年研究成果的结晶择优筛选编著,内容较为全面,既包含有钢桥面铺装基础理论研究和试验研究,也包括工程实践。

随着现代交通事业的飞速发展,在桥梁建设技术及高性能材料不断进步的同时,桥梁结构也正朝着大跨、高强、长寿命的方向发展。钢桥面铺装作为大跨径钢结构桥梁的重要组成部分,其耐久性越来越受到人们的关注,希望有更多的研究人员和技术人员,共同探索与努力,进一步提高我国钢桥面铺装的技术水平和工程品质。

中国公路学会

前 言

我国早期大型钢桥建设中,钢桥面铺装往往很快出现病害,因此钢桥面铺装工程引起了国内工程界的高度重视。近年来,随着我国基建事业的进一步投入和施工技术的提高,桥梁作为跨越江、河、谷及道路干线的便捷结构形式,得到了长足的发展,我国钢桥面铺装设计与施工技术逐渐得到完善,这为我国道路建设的快速发展起到了极大的促进作用。

为了更好地推广钢桥面铺装技术的应用,中国公路学会联合国际浇注式沥青协会举办“2018 国际浇注式沥青协会(IMAA)年会暨首届钢桥面铺装技术研讨会”,国内外专家云集重庆,共同探讨钢桥面铺装铺装技术难题。

本次研讨会议题主要涉及国内外钢桥面铺装现状、钢桥面铺装的结构形式、钢桥面铺装设计标准与方法、钢桥面施工工艺及装备、改性沥青 SMA 铺装、浇注式沥青混凝土铺装、环氧沥青混凝土铺装、ERS 钢桥面铺装技术、UHPC 轻型组合桥梁结构、聚合物铺装材料与技术、其他桥面铺装新技术、新材料、新工艺、新装备等。

本论文集所收录的论文摘选自参加此次研讨会的国内外专家的优秀论文,得到了郝增恒、王民等专家的支持。在此,谨向文章作者以及为本文编写和出版提供帮助的同志们致以诚挚的谢意。

希望本论文集的出版能够对钢桥面铺装技术的交流与发展有所裨益。

目 录

钢桥面铺装在中国的发展现状	胡德勇 郝增恒 王 滔(1)
一种冷拌环氧沥青混合料配合比设计及路用性能评价	巩春伟 姚 庚 高 原 张发盛(12)
压入碎石浇注式下层与密级配面层沥青混凝土(PGA + AC) 钢桥面铺装车辙研究	章登精 谢发祥 丁鸿志 宗 海(25)
莫桑比克马普托大桥钢桥面铺装用地材匹配性研究	尚 飞 王 民 郝增恒 孙 娜(38)
模糊评价理论在钢桥面铺装方案比选中的应用研究	纵瑾瑜 张可强(53)
闵浦大桥钢桥面铺装病害成因分析	向 磊(64)
浇注式沥青混凝土在 G40 公路长江大桥钢桥面铺装维修工程的应用	何昌轩 孙文州 向 磊 徐静焕 朱天同 蔡 明(79)
浇注式沥青混合料材料特性研究	肖 丽 王 民(90)
基于耐久性要求的中小跨径钢桥面铺装方案研究	朱天同 蔡 明 柴冲冲 乐海淳 曹亚东(100)
国产材料复合浇注式沥青钢桥面铺装在市政工程中的应用研究	吴 钊(110)
港珠澳大桥 GMA 钢桥面铺装关键性能试验研究	高文博 苏权科 张劲文(121)

钢桥面铺装环氧类防水黏结材料性能对比研究

..... 刘 攀 李 璐 郝增恒 盛兴跃(134)

沌口长江公路大桥钢桥面铺装用浇注式沥青混凝土应用研究

..... 盛兴跃 刘 攀 李 璐(143)

基于高温稳定性的浇注式沥青矿料级配研究 王 滔 胡德勇(154)

基于贯入度试验对浇注式沥青混合料高温性能的研究 周 玥(165)

钢板厚度对铺装层力学指标影响分析 常 城(174)

高弹改性沥青优化及混合料性能试验研究

..... 包广志 王 民 苟举琼 刘 攀(185)

浇注式沥青混合料储存稳定性研究

..... 刘学松 胡德勇 南军强 王 滔(193)

浇注式沥青混凝土重熔技术在钢桥面铺装维修中的应用研究

..... 彭祝涛 赵国云(200)

薄层铺装桥面对正交异性板疲劳细节受力影响分析 赵国云(207)

钢桥面铺装在中国的发展现状

胡德勇 郝增恒 王 滔

(重庆市智翔铺道技术工程有限公司 重庆 401336)

摘 要 本文收集了中国近 20 年钢桥面铺装发展过程中的资料,介绍了在中国应用最为广泛的几种铺装体系特点,阐述了不同铺装体系在中国的发展历程,分析了不同铺装体系在中国的应用状况。

关键词 钢桥面铺装 SMA 浇注式沥青混合料 环氧沥青混合料 UHPC 特点 发展历程 应用

The Development of Steel Bridge Deck Pavements in China

HU Deyong, HAO Zengheng, WANG Tao

(Chongqing Zhixiang Paving Technology Engineering Co., Ltd. Chongqing, 401336)

Abstract In this paper, the data of the development of steel bridge deck pavement in the past 20 years was collected, the characteristics of the most-widely used pavement systems in china were introduced, the development of different pavement systems was described, and the current application of these pavement systems was analyzed.

Key Words steel bridge deck pavement; stone mastic asphalt; gussasphalt; epoxy Asphalt; ultra high performance concrete; characteristics; development; application

钢桥面铺装是铺筑在钢桥面板上的一层沥青混凝土结构层,由防水黏结层、保护层和磨损层等组成,起到保护桥梁结构和提供舒适的行车界面的作用。目前,大跨径钢桥基本采用正交异性钢桥面板结构。钢桥面铺装在行车荷载、温度

条件和 U 肋、横隔板、纵腹板等结构条件的耦合作用下,表面或层间都会出现非常大的应力或应变(图 1、图 2),长期处于复杂的应力状态下,其耐久性一直是关注和研究的重点。

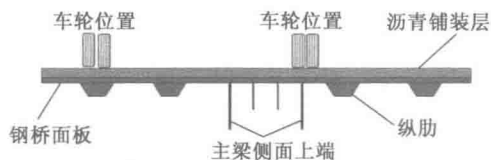


图 1 荷载作用示意图

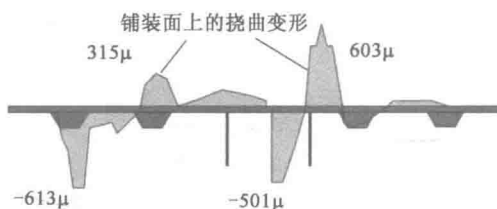


图 2 钢桥面铺装挠曲变形示意图

因此,在行车荷载、自然环境和桥梁结构耦合作用下,钢桥面铺装在使用过程中出现的破坏类型包括疲劳开裂、黏结层失效、车辙、推移、拥包及坑槽等。

1 钢桥面铺装体系特点

我国科技、工程人员经过二十余年研究及应用,在引进国外技术的基础上通过自主研发,形成了改性沥青 SMA/AC、浇注式沥青混合料 GA10、环氧沥青混合料 EA10、高性能混凝土等多种铺装材料。

基于钢桥面铺装材料的研究,在国内应用最为广泛的钢桥面铺装体系主要有三种,分别为改性 SMA 铺装体系、浇注式沥青混合料铺装体系和环氧沥青混合料铺装体系,除此之外,还包括 UHPC 等其他新型的铺装体系。而由不同铺装体系形成的铺装结构可分为三大类型,分别为同质单层、同质双层和异质双层结构。

1.1 改性沥青 SMA 铺装体系

改性沥青 SMA 铺装体系的典型铺装结构为双层 SMA 铺装结构,结构示意

图见图 3。



图 3 改性沥青 SMA 铺装体系典型结构

双层改性沥青 SMA 铺装结构具有以下特点：

- (1) 防水黏结层采用经过增韧处理后的环氧树脂材料,分为两层涂布。为提高抗剪强度,每层涂布后撒布一定规格的碎石。
- (2) 环氧树脂防水黏结层和 SMA 之间设置缓冲层,可显著降低桥面铺装层的弯拉应力,改善防水黏结层与沥青混合料铺装层间的抗剪切能力,同时也具有一定的防水作用。
- (3) 双层改性沥青 SMA 方案施工简单,无需特殊设备,施工质量易于控制,且工程造价相对较低。

改性沥青 SMA 铺装体系在中国已应用于 30 多座大跨径桥梁,应用面积达到 60 万 m²。

1.2 环氧沥青混凝土铺装体系(EA10)

环氧沥青混凝土铺装体系的典型铺装结构为双层环氧沥青混凝土 EA10 铺装结构,结构示意图见图 4。

双层环氧沥青混合料铺装结构具有以下特点：

- (1) 具有很高的强度,其马歇尔稳定度是一般沥青混合料的 3~5 倍；

(2) 环氧沥青混合料通过化学反应形成强度,热稳定性好,铺装层在高温时不易发生推移和车辙等永久变形。

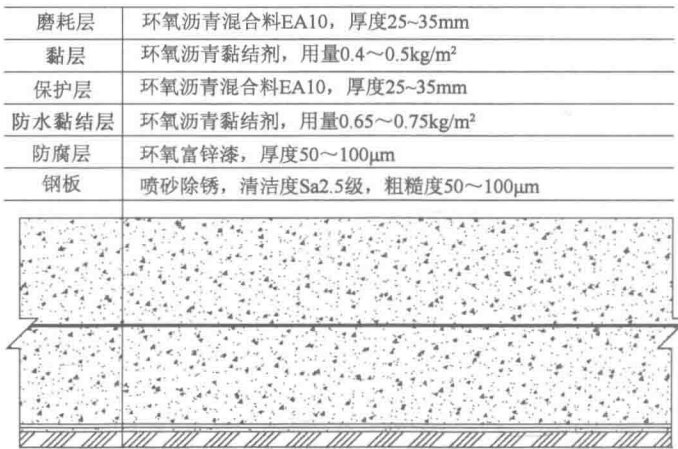


图4 环氧沥青混合料铺装体系典型结构

(3) 环氧沥青混合料属于热固性材料,断裂时均为脆性断裂,因此开裂后对铺装的整体性影响较大,防水性能减弱。

(4) 环氧是热反应型材料,对施工控制和原材料要求极为苛刻,对施工单位的施工控制水平要求极高。

环氧沥青混合料铺装体系先后应用于国内 50 余个钢桥面铺装工程中,应用面积达到 110 万 m²。

1.3 浇注式沥青混合料铺装体系(GA10)

浇注式沥青混合料铺装体系典型铺装结构为浇注式沥青混合料(GA10) + 改性沥青 SMA10,结构示意图见图 5。

浇注式沥青混合料 + 高弹改性沥青 SMA 结构具有以下特点:

(1) 防水黏结层采用甲基丙烯酸树脂体系,由防腐底涂料、甲基丙烯酸树脂(MMA)防水涂料、反应性黏结剂构成,主要功能是防护钢材结构,并承接桥面的沥青混合料结构层。该材料除了具有良好的防腐性、密水性和黏结效果外,最大的特点是具有优异的柔韧性,在正交异型钢桥面板上,能很好的适应其结构特性。

(2) 浇注式沥青混合料作为铺装下层,其良好的密水性、耐久性、疲劳抗裂

性能和随从变形能力,很好地适应了钢桥面铺装的本质要求,又对桥梁结构具有良好的保护作用。

磨耗层	高弹改性沥青SMA10, 厚度30~40mm
黏层	改性乳化沥青, 用量0.3~0.5kg/m ²
保护层	撒布粒径为5~10mm的预拌碎石, 用量7~12kg/m ²
	浇注式沥青混合料GA10, 厚度30~40mm
防水黏结层	丙烯酸树脂黏结剂, 用量0.15~0.20kg/m ²
	两层甲基丙烯酸甲酯树脂, 用量2.5~3.5kg/m ²
防腐层	丙烯酸防腐漆, 用量0.1~0.2kg/m ²
钢板	喷砂除锈, 清洁度Sa2.5级, 粗糙度50~100μm

图5 浇注式沥青混合料铺装体系典型结构

(3) 铺装上层 SMA 采用高弹体改性沥青技术,从根本上改变了传统 SMA 铺装结构疲劳性能不足的缺点,大幅提高了其疲劳抗裂能力,可有效遏制裂缝等病害的出现。

浇注式沥青混合料铺装体系先后应用于国内 110 余座钢桥面铺装工程,应用面积达到 240 万 m²。

1.4 超高性能混凝土铺装(UHPC)

超高性能混凝土铺装是由超高韧性混凝土结构层和沥青混凝土磨耗层组成的一种钢桥面铺装体系,结构示意图见图6。

超高性能混凝土铺装结构(UHPC)具有以下特点:

(1) 超高性能混凝土是由水泥、矿物掺合料、细集料、钢纤维和减水剂等材料与水拌和后,经蒸养、凝结硬化后形成的一种具有高抗弯强度、高韧性、高耐久性的水泥基复合材料。

(2) 超高性能混凝土在铺筑过程中,事先通过在正交异性钢桥面板表面按照一定的间距焊接剪力钉,并在其上绑扎钢筋网,保证水泥混凝土与钢桥面板表

面形成整体。

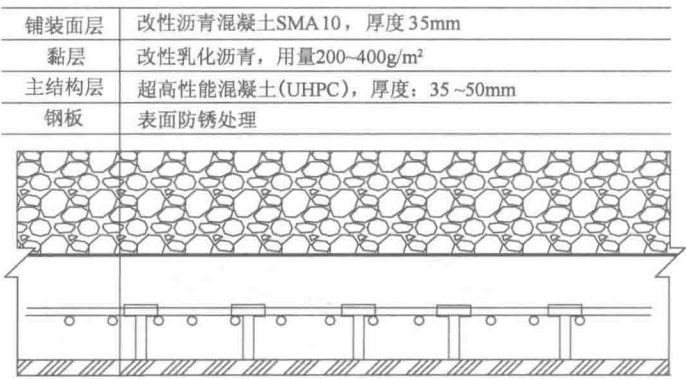


图6 超高性能混凝土铺装结构示意图

(3) 面层采用改性沥青 SMA/AC 或超薄磨损层等,主要是起到增加行车舒适性和提高铺装表面的抗滑性能。

(4) 该铺装方案在整体上对支撑结构的刚度有加强作用,高温稳定性和抗开裂性能都能得到提升。

2 钢桥面铺装体系发展历程

2.1 改性沥青 SMA 铺装体系发展历程

改性沥青 SMA 铺装体系是早期应用最广泛的铺装体系。招商局重庆交通科研设计研究院(原交通部重庆公路科学研究所)在广泛调查世界上各种钢桥面铺装的基础上,针对铺装层的高温稳定性、疲劳耐久性等技术进行了比较系统的研究,提出了改性沥青 SMA 结构。

为提高钢桥面铺装的高温稳定性,采用高黏改性沥青制备 SMA 混合料,防水黏结层采用高黏沥青(撒布 2.36~4.75mm 碎石),首次应用于广东虎门大桥(1997 年),结构类型为单层 SMA(厚度为 60mm)。单层 SMA 铺装结构存在压实难度大等问题,导致后期出现车辙、推移等病害,后期改性沥青 SMA 铺装体系均采用双层 SMA 铺装结构,随后应用于重庆鹅公岩长江大桥(2000 年)、宜昌长江公路大桥(2001 年)、厦门海沧大桥(2006 年)、汕头礮石大桥(1999 年)等。

在改性沥青 SMA 铺装体系的后期应用过程中,持续对该体系进行优化和改进。为提高层间黏结性能,防水黏结层双层环氧树脂黏结层(撒碎石)+沥青砂胶+溶剂型黏结剂,可起到层间应力吸收作用,同时防水性能优越。为提高钢桥面铺装体系的疲劳开裂性能,沥青结合料采用高弹改性沥青制备 SMA 沥青混合料;

在改性沥青 SMA 铺装体系发展过程中,出现一种新型的结构——ERS 铺装结构。该结构不设置防腐层,包括 EBCL(撒 1.18 ~ 2.36mm 碎石)防水黏结层,15 ~ 20mm RA05 和 25 ~ 30mm 双层 SMA 铺装层。该结构目前应用于西陵长江大桥(2005 年翻修)、江东大桥(2008 年)、嘉绍跨江大桥(2013 年)等工程。

2.2 环氧沥青混凝土铺装体系发展历程

环氧沥青混凝土铺装体系按照环氧沥青的特性可分为温拌环氧沥青混凝土铺装体系和热拌环氧沥青混凝土铺装体系。

温拌环氧沥青混凝土铺装体系采用的是美国 ChemCo System 环氧沥青,首次由东南大学引进。在施工过程中,对各项参数要求非常严格,沥青混合料的拌和温度控制在 110 ~ 121℃,从拌和生产到碾压完成需在 55min 内完成,对水分极其敏感,并且需要养护 30 ~ 45d。其防水黏结层采用的是环氧沥青黏结剂,为一次性固化反应材料,所以在施工过程中需分幅施工(图 7);结合料为双组分,在沥青混合料摊铺过程中,需采用侧方位喂料机进行二次转运。采用的结构为同质双层结构,并应用于南京长江二桥(2001 年)、润扬长江大桥(2005 年)、武汉天兴洲长江大桥(2009 年)等工程。

随后,日本的 TAF(现为 KD)环氧树脂结合料被引进,形成热拌环氧沥青混凝土(图 8)。在施工过程中,沥青混合料的拌和温度控制在 170 ~ 185℃,从拌和生产到碾压完成可在 120min 内完成,养护时间为 3 ~ 5d,因其拌和温度高,对水汽敏感性相对较低。其防水黏结层为二阶环氧树脂黏结层,具有二次固化的特性,可以整幅一次性施工。结合料为三组分,拌和过程中需要额外的设备对环氧树脂的双组份进行混合和泵送。采用的结构也为同质双层结构,先后应用于珠江黄埔大桥(2008 年)、宁波大榭二桥(2012 年)、广东江顺大桥(2015 年)、湛江海湾大桥(2017 年翻修)等工程。



图7 环氧沥青黏结剂

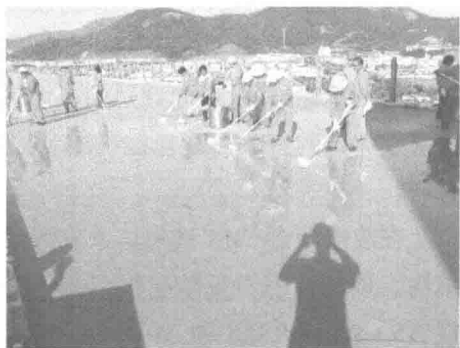


图8 环氧树脂黏结剂

2.3 浇注式沥青混合料铺装体系发展历程

浇注式沥青混合料根据材料特点可分为 MA 和 GA 两种体系,前者主要为同质单层结构,后者主要为异质双层结构。

国内最早采用浇注式沥青混合料铺装的大跨径钢桥是香港青马大桥(1997年),全套采用的是英国的 MA 铺装技术,防水黏结层为 Eliminator 防水体系,铺装层为 37mm 的沥青玛蹄脂 MA。随后,整套技术应用在江阴长江大桥上,但从应用效果来看,该铺装体系不适用于内地的使用环境。

随后,招商局重庆交通科研设计院引进德国和日本的浇注式沥青混合料铺装技术,并进行改进。沥青结合料采用的是聚合物改性沥青与湖沥青的混合料沥青(85:15),防水黏结层采用的双层环氧树脂(撒碎石)+沥青砂胶+溶剂型黏结剂,铺装结构为异质双层的浇注式沥青混合料 GA10+改性沥青 SMA10 结构,应用于山东胜利黄河大桥(2003年)、长沙三汊矶大桥(2006年),随后浇注式铺装体系在国内大面积应用。

浇注式沥青混合料铺装体系在国内大面积应用后的发展主要体现在两个方面,一个是防水黏结层的发展,一种是浇注式用沥青结合料的发展。

防水黏结层:双层环氧树脂(撒碎石)+沥青砂胶+溶剂型黏结剂体系、溶剂型黏结剂、甲基丙烯酸树脂防水体系。

双层环氧树脂(撒碎石)防水体系是多层设置的防水体系,施工工序繁琐,工期时间长,受环境影响因素大,遗留的缺陷多,施工控制难度大,后期施工过程中未得到应用。

单层的溶剂型黏结剂是前述防水体系的简化,应用于安庆长江大桥(2004年),但该防水体系的耐腐蚀性能有限,黏结性能不足,在后期的也未继续得到广泛应用。

甲基丙烯酸树脂防水体系既具有良好的黏结性能,又具有优异的防腐性能和可施工操作性,随后快速取代了上述两种防水黏结剂,得到快速推广。

沥青结合料:聚合物沥青+湖沥青的混合沥青(85:15)、聚合物复合改性沥青、30#基质沥青+湖沥青(70:30)、70#基质沥青+湖沥青(30:70)。

在这四种沥青结合料应用过程中,聚合物沥青与湖沥青的混合沥青应用最早,随后被具有更为优异性能的聚合物复合改性沥青取代,与甲基丙烯酸树脂防水体系和高弹改性沥青 SMA 形成典型的浇注式沥青混合料铺装结构,先后应用于重庆朝天门长江大桥(2009年)、厦漳跨海大桥(2012年)、安徽马鞍山长江大桥(2013年)、贵州北盘江大桥(2016年)、武汉沌口长江大桥(2017年)等工程。

30#基质沥青与湖沥青的混合沥青在国内应用的桥梁较少,主要是南京长江四桥(2012年)、泰州长江大桥(2012年)和芜湖长江大桥(2017年)等。

其中,目前中国最大的跨海单体工程港珠澳大桥采用的 GMA 铺装体系,是将 MA 的混合料设计与 GA 的拌和工艺相结合,形成性能稳定、施工效率高的新型浇注式沥青混合料铺装体系。

3 钢桥面铺装体系应用情况

中国钢桥面铺装体系累计应用面积见图 9 和图 10。

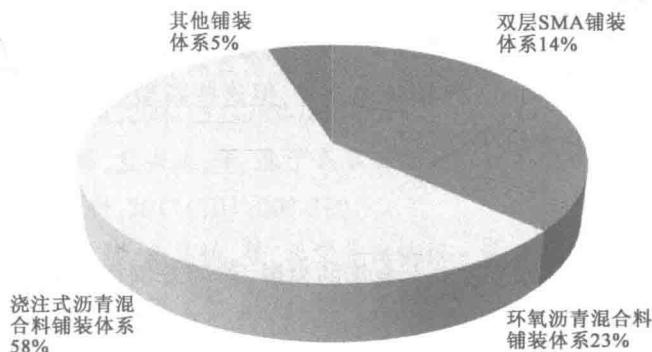


图9 中国钢桥面铺装体系国内应用面积比例(2017年)

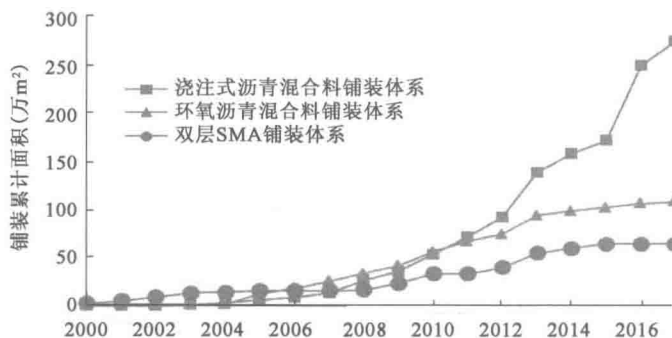


图 10 三种典型铺装累计应用面积曲线图

对中国钢桥面铺装体系的应用情况进行总结如下：

(1) 改性沥青 SMA 铺装体系：双层 SMA 钢桥面铺装技术由国内科研院所结合我国具体情况提出，1997 年开始在我国应用，但总体使用效果欠佳。鉴于大跨径桥梁对结构安全与耐久提出了更高要求，双层 SMA 结构目前主要应用于小跨径桥梁或市政跨线桥。

(2) 环氧沥青混合料铺装体系：环氧沥青混合料开裂、坑槽等早期病害表现较为突出，加之维修养护难度大，2009 年之后推广速度减缓，但对于高温重载极为苛刻的桥梁仍具有性能优势。

(3) 浇注式沥青混合料铺装体系：浇注式沥青混合料铺装技术经过多年实践和技术改进，形成浇注式沥青混合料 + 高弹改性沥青 SMA 典型结构，在云南龙江特大桥等多项工程应用。目前，在新建及翻修的大跨径桥梁钢桥面铺装工程中，呈现明显的增长趋势，已成为国内应用数量最多、应用面积最大的主流铺装体系。

(4) 目前，除了上述三种典型铺装体系外，还出现其他新型的铺装体系，如 UHPC 铺装体系，EA10 + SMA10 铺装体系等，但这些新型铺装体系在国内桥梁上应用面积还较少，而且应用时间较短。

4 结论

我国钢桥面铺装技术经过二十余年的发展，伴随着钢桥面铺装材料以及结构的不断变化和完善，钢桥面铺装铺装这一世界性难题的研究正在趋于完善。就目前我国钢桥面铺装的发展和应用现状来看，继续对铺装结构的优化，更好地适应我国道路使用条件的是重点。