

摘 要

环氧沥青混合料作为大跨径桥面铺装材料，欧美一些国家早在 60 年代就开始研究和应用，许多桥梁的桥面铺装都采用环氧沥青混合料。国内目前也只有南京长江第二大桥和浙江舟山桃夭门大桥等几座大跨径桥梁采用环氧沥青混凝土铺装。东南大学桥面铺装课题组结合大量系统全面的室内试验，认为环氧沥青混凝土具有以下优点：强度高；高温时抗塑性流动和永久变形能力很强；低温抗裂性能很好；具有极好的抗疲劳性能；具有高度抵抗化学物质侵蚀的能力。为此引进了环氧沥青混合料作为大跨径钢桥面铺装材料。

同时我们也发现环氧沥青混合料的配制工艺比较复杂，施工中对时间和温度要求十分严格，施工难度较大。因此对于采用环氧沥青混凝土作为大跨径钢桥桥面铺装材料，必然会产生由于不可避免的因素而导致使用期的病害。

本文首先结合南京长江第二大桥养护过程中发现的问题进行分析，然后提出环氧沥青混凝土桥面铺装使用过程中可能会出现的病害。进一步针对不同病害，对几种适宜的维修材料进行试验对比研究，并根据南京二桥环氧沥青混凝土的病害情况，进行现场处理，为进一步提出适合环氧沥青混凝土桥面铺装的养护对策打下基础。

本文对桥面铺装层开裂修复机理进行了简单的描述，使读者认识到“补强设计”的重要性。对不同时期的鼓包病害修复，文章从多个角度分析修复材料的性能，并对其现场施工操作进行了初步的讨论，以保证修复材料实施的可行性。

关键词：环氧沥青混凝土、桥面铺装、病害修复、现场处治

ABSTRACT

As a kind of steel deck surfacing material, epoxy asphalt has been studied and used in Europe and America from the 1960s, while still a blank in China. In China, there are just 2nd Nanjing Bridge; Tao Yaomen Bridge in Zhe Jiang province and some other bridges which using epoxy asphalt concrete as the surfacing of the steel decks. The Southeast University Deck Paving Group have accomplished a large quantity of experiments and determined that epoxy asphalt served as steel deck surfacing material has great advantages such as high strength property, anti-rutting and water stability property, low temperature and deformation property, oil corrosion resistance. Thus introduce epoxy asphalt act as long span deck paving material.

At the same time, we found that because of the difficulty in production and construction of epoxy asphalt and stringent requirements of time and temperature control, there must be some inevitable diseases caused by certain factors for using epoxy asphalt as long span deck paving material. This thesis based on the maintenance of the steel deck surfacing of the Southern Branch Bridge (SBB) of the Nanjing Second Yangtze River Bridge, analyzing the possible diseases about the epoxy asphalt deck pavement according to the data of construction, and researches each policy for each disease, then brings forward maintenance policies suitable for epoxy asphalt deck pavement.

This thesis analyzes the problems we met during the course of maintenances for 2nd Nanjing Bridge firstly. Then put forward the possible diseases during the usage of the epoxy asphalt deck pavement. Then according to some parallel tests and bring forward some suitable materials aim at different diseases, and carry through the local treatments based on the diseases occurred on the deck surfacing of 2nd Nanjing Bridge. And set a foundation for the maintenance of epoxy asphalt deck surfacing.

This thesis ordinary describes the mechanism of the restoration for the cracks occurred on the deck surfacing. Let the readers have cognizance of the importance of “fortified design” for the cracks restoration. Aimed at blister diseases occurred in different phases, the thesis analyzed the performance of the maintain materials through multi-points of view, and had an ordinary discuss for the local construction, insure the feasibility of putting the maintain materials into practice.

Key words: Epoxy Asphalt Concrete、Deck Surfacing、Disease Restoration、Treat on Site

学 位 论 文 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名: 宋波 日 期: 2005.03

关于学位论文使用授权的说明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

签 名: 宋波 导师签名: 黄卫 日 期: 2005.03.

第一章 绪论

§1.1 研究背景及意义

近十几年来，随着我国经济的快速增长，国家建设了许多大跨径桥梁，大都采用了自重较轻、经济性好的正交异性钢箱梁桥面板形式。作为大跨径钢桥建设的关键技术之一的正交异性钢桥面铺装问题，也因此越来越被人们关注。

桥面铺装是桥梁行车系的重要组成部分，它的好坏直接影响到行车的安全性、舒适性、桥梁耐久性及投资效益和社会效益。由于桥面铺装直接铺设在正交异性钢板上，在行车荷载、风载、温度变化及钢桥面局部变形等因素影响下，其受力和变形远较公路路面或机场道面复杂，因而对其强度、变形特性、温度稳定性、疲劳耐久性等均有更高要求。同时，又由于铺装所处的特殊位置，在使用性能上又提出重量轻、粘结性高、不透水等特殊要求。

目前国内大跨径钢箱梁桥桥面铺装形成四大铺装材料，两种铺装结构的铺装格局。四种铺装材料主要是以德国、日本为代表的高温拌和浇注式沥青混合料（Gussasphalt）；以英国为代表的沥青玛蹄脂混合料（Mastic Asphalt）；德国和日本等国近期采用的改性沥青SMA（Stone Mastic Asphalt）；以美国为代表的环氧树脂沥青（Epoxy Asphalt）混合料。两种铺装结构是指双层铺装结构（分两层摊铺碾压，如南京长江二桥双层环氧沥青混凝土铺装）与单层铺装结构（一层铺装，如江阴大桥玛蹄脂沥青混凝土铺装）。

对于大跨径钢箱梁桥的桥面铺装问题，目前还不能定论完全适合的桥面铺装材料。国内长江上的多座大跨径正交异性板钢箱梁桥，多座均采用 SMA 混合料，个别的如江阴长江公路大桥采用英国玛蹄脂沥青混凝土铺装，国内采用环氧沥青混凝土作为桥面铺装材料的大跨径钢箱梁桥有南京长江第二大桥和浙江舟山桃夭门大桥，在江阴长江公路大桥第一次大修中进行了约 200 米的试验段铺装。环氧沥青混合料作为大跨径桥面铺装材料，欧美一些国家许多新建桥梁与修复桥梁的桥面铺装都采用环氧沥青混合料。

环氧沥青混凝土结合料是热固性聚合物，也就是说在固化后不会流淌。这是环氧沥青混凝土极大的优点，因为普通的沥青混凝土是热塑性聚合物，在温度升高时会变软，以至无法承受交通荷载的重复作用与推挤。刚摊铺的环氧沥青混凝土也能承受车辙或推挤，因为在批量产生运输时已经完成初步固化，达到一定的稳定性能。

南京长江第二大桥经过四年多的高低温及行车荷载的严峻考验，证明了环氧沥青混合料作为大跨径桥面铺装材料，具有显著的优点：强度高；高温时抗塑流和永久变形能力很强；低温抗裂性能很好；具有极好的抗疲劳性能以及较高的抵抗溶剂、燃料和油等化学物质侵蚀污染的能力。

但在研究过程中发现，由于环氧沥青混合料的配制工艺比较复杂，施工中对时间和温度要求十分严格，施工难度较大。再加上大跨径钢箱梁桥面的变形复杂性与温度变化的影响，因此，环氧沥青混凝土作为钢桥面铺装材料时，必然会由于不可避免的因素而导致使用期间内出现细微的病害。如何对桥面铺装可能会发展的病害进行预估分析，并研究出针对性的处理方法，对于延长环氧沥青混凝土桥面铺装使用寿命具有极其重要的意义。

国内除南京二桥与桃夭门大桥外，即将通车的润扬长江公路大桥也采用环氧沥青混凝土作为桥面铺装材料。在我国当前大跨径桥梁建设事业迅速发展的背景以及深入了解环氧沥青混合料桥面铺装材料性能以及使用条件下，寻求适合环氧沥青混凝土铺装的病害处理对策，对于指导我国大跨径桥梁建设具有重要的理论意义和一定的实用价值。

§1.2 国外环氧沥青混合料的研究与应用

国外对环氧沥青的研究主要开始于壳牌石油公司，在 20 世纪 50 年代后期，壳牌石油公司开发出环氧沥青，主要用于抵抗飞机燃油的腐蚀与高温气流的作用。1967 年，美国粘结剂工程公司得到壳牌公司的许可，首次将环氧沥青混凝土用于横跨旧金山海湾的正交异性钢桁架桥 San Mateo-Hayward 桥面铺装，该桥投入使用三十多年至今，仍表现出优异的使用性能。如今，由粘结剂工程公司大部分成员组成的 ChemCo 公司保持了采用环氧沥青混凝土作大跨径钢桥桥面铺装材料的专利权，并提供丰富经验的技术支持。拥有美国专利的成品环氧沥青混凝土是一种由惰性固化剂、环氧沥青结合料以及一定级配的集料在特定的条件下进行热拌混合后形成的聚合物混凝土。

日本北海道大学土木工学科的间山正一、菅原照雄在 70 年代对环氧沥青混合料的配制、模量、应力松弛性能、破坏性能等进行了研究。环氧沥青混合料作为高性能材料，在国外工程中得到了较为广泛的运用。荷兰的壳牌石油公司、日本的 Watanabegumi 公司、美国的 ChemCoSystems 公司也都已生产专利的环氧沥青商品出售（如壳牌石油公司的 Shellgrip System，Watanabegumi 公司的 W-Epoxy 等）。由于环氧树脂价格较高，与普通沥青混合料相比环氧沥青混合料单价要高出约十倍左右，加之施工技术要求也较高，因而被认为是超高级的路面材料。

环氧沥青混凝土是一种聚合物混凝土，拥有约四十年超强持久性能的历史。自 1967 年开始至今，已经有超过十万吨的混合料被用于各种类型的大跨径桥梁的桥面铺装上。1967 年环氧树脂沥青混合料首次用作美国 San Mateo-Hayward 大桥正交异性钢板桥面的铺装层。近三十年来使用这种材料进行桥面铺装的国家主要有美国、加拿大、荷兰和澳大利亚，其中美国应用最为广泛，使用效果非常优异。最为有名的是旧金山—奥克兰海湾大桥的水泥混凝土桥面铺装，自 1976 年重新铺装约 2.0cm 环氧沥青混凝土面层后，该桥每日交通量近 3 万辆/车道，其铺装至少承受了二十五年的极端重载车辆使用，至今表现良好，显示出环氧沥青混凝土铺装的优越使用性能。表 1-1 列出了世界上部分采用环氧沥青混合料铺装的桥梁。

国外环氧沥青混凝土主要用途：

- (1) 用于轻交通量路段修补或新建的薄层罩面 (2~5cm 厚);
- (2) 用于极端条件下的使用 (如对抗燃油、抗化学污染等有要求的地段);
- (3) 用于对硬度与弹性较大环境中的铺装层 (如正交异性钢桥面板铺装)。

表 1-1 部分采用环氧沥青混凝土铺装的桥梁^[16]

桥名	地点	年份	主梁结构类型	铺装厚度 (cm)	铺装面积 (m ²)
San Mateo-Hayward 桥	圣马迪亚	1967	14mm 钢桁架桥	5.0	39,947
San Diego-Coronado 桥	圣地亚哥	1969	10mm 钢桁架桥	4.0	10,776
旧金山—奥克兰海湾大桥 (San Francisco-Oakland)	旧金山, 美国	1969	预应力混凝土梁桥	1.3	14,400
McKay 桥	哈利法克斯, N.S.	1970	10mm 钢桁架桥	5.0	11,891
皇后道 (Queensway A)	Long Beach, CA	1970	钢桁架桥 (厚度不详)	5.0	8,918
麦克唐纳桥 (MacDonald)	哈利法克斯, N.S.	1971	主梁段采用钢筋混凝土加劲	3.8	11,055
罗丝岛 (Ross Island)	波特兰, OR	1972	预应力混凝土梁桥	1.3	13,563
Evergreen Point 桥	西雅图, 美国华盛顿	1972	预应力混凝土梁桥	1.3	25,083
Sellwood 桥	波特兰(美国俄勒冈西北部港 市)	1973	预应力混凝土梁桥	2.2	4,366
弗里蒙特桥 (Fremont)	波特兰(美国俄勒冈西北部港 市)	1973	16mm 钢桁架桥	6.4	14,400
Costa de Silva (Rio-Niteroi)	里约热内卢, 巴西	1973	10mm 钢桁架桥	6.0	20,438
1-94 Bridges 桥	明尼阿波利斯, 美国	1973	预应力混凝土梁桥	2.0	9,197
Mercer 桥	蒙特利尔 (加拿大魁北克)	1974	10mm 钢桁架桥	3.8	1,951
狮门桥 (Lions Gate)	范库弗峰, 北美	1975	12mm 钢桁架桥	3.8	7,153
旧金山—奥克兰海湾大桥 (San Francisco-Oakland)	旧金山, 美国	1976 1977	预应力混凝土梁桥	2.0 2.0	137,000 120,000

续表 1-1

桥名	地点	年份	主梁结构类型	铺装厚度(cm)	铺装面积(m ²)
绿林桥 (Luling)	新奥尔良(美国港口城市)	1983	11mm 钢桁架桥梁	5.0	20,345
本弗兰克林 (Ben Franklin)	费城(美国宾西法尼亚州东南部港口城市)	1986	16mm 钢桁架桥	3.2	58,713
金门桥 (Golden Gate)	美国旧金山	1986	16mm 钢桁架桥	1cm 临时层*	53,510
McKay 桥	哈利法克斯, N.S.	1990	10mm 钢桁架桥	5.0	11,889
Champlain 桥	蒙特利尔(加拿大魁北克)	1993	10mm 钢桁架桥	1cm 临时层*	18,580
Maritime Off-Ramp 桥	乌克兰, 加拿大	1996	16mm 钢桁架桥	7.6	6,417
南京长江二桥	南京, 中国	2000	14mm 正交异性钢箱梁	5.0 (斜拉)	37,262
狮子桥 (Lion Gate)	范库弗峰, 北美	2002	12mm 钢桁架桥	1cm 密封层 2.5cm 承重层	---
桃夭门大桥	浙江, 中国	2003	14mm 正交异性钢箱梁	5.0 (斜拉)	---
江阴长江公路大桥(试验段)	江阴, 中国	2003	12mm 正交异性钢箱梁	5.0~6.0 (斜拉)	2,655
润扬长江公路大桥	镇江, 中国	2004	14mm 正交异性钢箱梁	5.5 (斜拉) 5.5 (悬索)	22,800 43,770
南京第三大桥	南京, 中国	2005	14~16mm 正交异性钢箱梁	在建	---

*——临时层是指由于替换梁的通车需求，临时预先在替换钢板上洒布环氧沥青粘结料，并撒布少许砾石，提供临时通车。

日本铺装专家则认为，单从环氧沥青混合料材料本身性能来看，这是一种非常好的材料，但由于这种材料的性能受其成型时温度、时间等因素变化的影响很大，施工条件苛刻，施工中对其质量很难控制，加上材料费用昂贵，而摊铺过的环氧沥青桥面铺装曾出现破坏现象，日本专家似乎并不十分支持使用该种材料进行桥面铺装。

尽管有些桥梁的环氧沥青混凝土使用状况表现优异，但由于其受施工时环境与外界条件干扰较大，从世界上已建环氧沥青混合料钢桥面铺装使用情况来看，成功的例子和失败的例子都有。使用环氧沥青混凝土铺装桥梁所产生的破坏状况与修补如表 1-2 所示。尽管有如上这些环氧沥青混合料钢桥面铺装破坏的实例，但美国环氧沥青钢桥面铺装专家认为出现这些破坏的原因主要出自设计时对桥梁所在地的气候环境（温度）、交通荷载等因素考虑不足而导致的设计失误或是施工控制不严。他们认为在正确设计和施工的前提下，环氧沥青混合料桥面铺装在设计年限内一般不会出现破坏。就国外的环氧沥青混凝土钢桥缩出现的病害状况而言，病害情况简单，病因较为明确（疲劳开裂或劣质的施工质量），因此在修复处理时能够对症下药，且修复效果也较好。

从美日两国专家的共同观点来看，如果在设计中能够充分考虑桥面铺装的环境和交通条件，严格按照设计要求而控制施工，使环氧沥青混合料的优越性能得以充分体现，采用环氧沥青混合料进行桥面铺装将是一种很好的方案。

§1.3 国内研究与应用状况

国内道桥行业对环氧沥青的研究起步较晚。最初与环氧沥青相关的也是环氧煤焦油沥青，主要应用于路面裂缝的修补。上海市市政工程管理处和同济大学于 1992 年至 1995 年期间研究了环氧沥青混合料的配制原理、配制方法、热拌、冷拌环氧沥青混合料的物理力学性能，并对环氧沥青混合料的物理力学性能进行了综合评价，提出了热拌、冷拌环氧沥青混合料路面的设计和施工指南，并在上海龙吴路摊铺了一段 200m² 的试验路。由于经费原因，这项研究没有延续下去。而其研究成果又因为环氧沥青材料本身较高的成本，也没在国内得到实际工程应用。随后，长沙交通学院路桥工程系于 1998 年在同济大学研究成果的基础上也开展了环氧沥青混合料的试验研究，并初步分析了环氧沥青的改性机理。



图 1-1 南京长江第二大桥

从实际道桥工程运用方面来看，我国在环氧沥青混合料方面基本还是空白。国内大规模采用环氧沥青混凝土作为正交异性钢桥面板的铺装主要开始于南京长江第二大桥（图 1-1）。

我们在南京长江第二大桥钢桥面铺装材料试验研究过程中，对环氧沥青混合料的材料组成和路用性能进行了全面而系统的试验研究，历时二年多，完成四十六大项一百多小项的室内试验研究工作，针对特殊的使用要求与条件提出了特定的集料种类和级配、环氧沥青混合料的最佳沥青用量，并对桥面铺装进行了相关的力学计算。在南京长江第二大桥 2001 年 3 月投入使用至今，经过极端高低温的考验，其表面状况较同类型桥梁要优越的多。优越的使用性能表明，环氧沥青混合料较其他铺装材料要更适合于大跨径钢箱梁桥面铺装。同时大量的室内研究也表明，环氧沥青混合料在成型温度、时间、施工工艺和摊铺压实等方面较其它混合料技术要求更为苛刻。

在国内的大跨径钢箱梁桥中，只有南京长江第二大桥使用的环氧沥青混凝土铺装材料经受过严峻的使用条件的考验。而对于环氧沥青混凝土桥面铺装所出现的病害状况的修复处理技术的研究，国内尚属空白。

表 1-2 部分采用环氧沥青混合料作为铺装材料的桥梁破损状况

桥梁名称与位置	主梁结构	问题所在	修复描述	修复结果
位于旧金山海湾的 San Mateo-Hayward 桥, 1967 年开放交通。	钢桁架桥	1985 年发现在顶板的外缘翼顶部出现大约 60m 长的裂缝。	只对裂缝进行密封处理。	至 2004 年桥面铺装的使用状况仍然很好。
位于圣地亚哥与克若那多岛屿的圣地亚哥桥, 于 1969 年开放交通。	钢桁架桥	采用 10 mm 厚的钢板。在纵向加劲肋顶出现疲劳开裂 (1980 年)。	大约每 5 年对裂缝进行密封处理一次。 1993 年整桥采用环氧沥青混凝土对整桥进行重新铺装。	处理效果非常好, 裂缝部位的钢板没有锈蚀现象。
位于加拿大新斯科舍和法克斯洲达特茅斯港的 McKay 桥, 于 1970 年开放交通。	钢桁架桥	在伸缩缝前部有一段大约 4m 长和 4m 宽 (近似一个车道) 的施工质量非常差。	整个这一段在项目完工后一个月内都被铣刨挖除。在现场进行环氧沥青混合料的拌制与摊铺碾压。	修补工作非常成功。在整个桥铺装在 1990 年采用环氧沥青混凝土重新铺装时, 这一部分非常难铣刨。
位于波特兰俄勒冈洲的弗里蒙特桥, 于 1973 年开放交通。	钢桁架桥	铺装层没有得到充分的压实。开放交通后, 在轮迹带出现松散, 该现象是由于嵌钉轮胎*所导致的。在第一年内, 铺装层轮迹带有大约 3mm 厚被嵌钉轮胎所磨耗。	全桥采用大约 40mm 厚的普通沥青混凝土进行罩面处理, 同时禁止嵌钉轮胎车辆通行。	至 2000 年没有任何有关破损的报道。

* 嵌钉轮胎是指那些在内部预埋防滑钉的轮胎, 主要用于在冰雪覆盖的道路上的防滑。

§1.4 南京长江第二大桥钢桥面铺装使用状况

在南京长江第二大桥钢桥面铺装施工过程中，我们发现有一些不利因素且无法及时进行有效的控制，如炎热天气下的摊铺施工时，由于施工人员的忽略而将汗水滴落钢板表面；采取当天洒布粘结层隔天摊铺混合料时雨水或湿气对粘结层的影响；由于先设置伸缩缝的标高差导致无法采用摊铺机进行机械摊铺而不得已采用人工摊铺对压实度和温度的影响等等。这些当时无法控制的因素可能会在铺装层投入使用过程中导致不同类型和不同程度的病害。

在南京长江第二大桥环氧沥青混凝土钢桥面铺装投入运营后，我们定期对其桥面铺装使用状况进行调查。在调查过程中，我们已经发现由于施工不可避免的水份(雨水、汗水等)影响而导致的鼓包病害。

鼓包病害是在环氧沥青混凝土铺装完成后，水份逐渐蒸发成为水汽。由于环氧沥青混凝土铺装的空隙率很小(<3%)，水汽很难挥发到铺装层外，于是逐渐形成高压将铺装层顶起，形成铺装层表面的隆起现象。隆起的部分在车辆荷载的反复作用下很容易被压碎，进而形成表面的不规则裂纹。鼓包初期的症状表现为不规则的三角锉状裂纹，如不及时进行处理，在行车荷载作用下被压碎，从而发展成为坑洞病害。

另外，在由南京至八卦洲方向靠近八卦洲一侧的伸缩缝前约3~5米的范围内出现细微裂纹，在此段范围内的病害主要是由于先设置好的伸缩缝与钢桥面板的标高不一致而导致在混合料摊铺过程中无法进行机械摊铺，而不得不采用人工进行摊铺，从而导致混合料的温度与压实问题均无法得到保证，在水份浸泡与行车荷载的高压作用下，特别是在春季冻融循环作用下，引起混合料局部粘结力丧失，从而导致该区域内的铺装层表面出现细微开裂症状。

同时我们还发现由于外界因素导致的铺装层破损。主要表现在由于车祸引起的铺装层表面划痕；车辆零部件掉落铺装层表面，在行车荷载冲击作用下引起的铺装层表面的凹坑现象等等。

为此要针对各种外界不利因素分析所有可能的破损状况，并提出适宜的处理方法，做到防患于未然。

§1.5 研究技术路线

本文结合南京长江第二大桥环氧沥青混凝土桥面铺装的日常调查与养护过程中所遇到的问题，综合考虑施工中可能的不利因素，分析环氧沥青混凝土铺装施工及使用过程中可能出现的病害状况，并对每种不同的病害提出适当的处理方法。同时，本文也考虑到了国内大跨径钢箱梁桥铺装最常见的病害——开裂(非结构性裂缝)在环氧沥青混凝土铺装上出现后的处理方法。研究遵循的技术路线为：

1. 对南京长江第二大桥环氧沥青混凝土铺装进行跟踪调查，及时发现病害或破损(划痕、凹坑等外伤)；
2. 通过对国内其他桥梁病害的广泛调查，归纳环氧沥青混凝土桥面铺装可能的病害；
3. 通过对不同已有病害的进行分析，初步掌握不同病害的成因；
4. 室内适合不同病害的新型修补材料探索与比选；
5. 通过大量的室内试验研究，针对不同病害提出最佳的修补材料与修补方法、工艺等；
6. 针对环氧沥青混凝土桥面铺装的使用条件，提出适宜的病害处理对策，力争延长环氧沥青混凝土桥面铺装的使用寿命。

§1.6 主要研究内容

本文依据大量的室内与现场试验、调查研究，以期达到如下目的：

1. 根据南京长江第二大桥环氧沥青混凝土桥面铺装的实际使用状况与可能的破损情况，选择合适的桥面铺装修复材料，以达到延长桥面铺装使用寿命的功效；
2. 根据环氧沥青混凝土桥面铺装可能出现的不同病害，提出适宜的修复材料；
3. 结合本文提出的不同病害的修复材料，提出适宜的修补工艺。

根据以上目标，本文的研究内容包括以下部分：

1. 环氧沥青混凝土材料性能及使用分析;
2. 环氧沥青混凝土桥面铺装使用状况调查;
3. 环氧沥青混凝土桥面铺装可能病害分析;
4. 针对不同病害的修复材料的探索与比选;
5. 环氧沥青混凝土桥面铺装病害处理对策。

第二章 环氧沥青混凝土铺装

§2.1 概述

一般公路沥青路面设计是围绕耐久性这个核心提出的。耐久是指具备足够长的使用寿命，这就要求整个路面结构具有足够的强度和抵抗变形的能力。大跨径钢箱梁桥由于其重要的地位，对其铺装层的要求尤为严格。大跨径桥梁桥面铺装的设计使用寿命一般为十五年，这对于钢桥面铺装结构而言是一个严峻的考验。桥梁本身的结构对于耐久性没有太大的影响，但是如何保证桥面铺装体系的耐久，是我们必须认真对待的问题。

桥面铺装设计的主要任务就是确保其在使用寿命期内不发生恶性破坏。为了达到这一目标，应该综合考虑桥面铺装体系的“结构、材料、荷载与环境”等几个方面的问题，从而最终判断桥面铺装的使用性能。

纵观国内外的大跨径桥梁桥面铺装体系，在铺装结构上不外乎单层式和双层式铺装两种。在材料的选择上主要形成以高温浇注式沥青混凝土、改性沥青 SMA、沥青马蹄脂和环氧沥青混凝土四种铺装材料为首的格局。在铺装层的设计荷载的选取，目前国内均按照汽超-20 考虑。国内的大跨径桥梁主要位于长江和黄河两大河流上，就江苏境内而言，属北亚热带向中亚热带过渡气候带，具有过渡性、季风性、湿润性的特点。春季以风和日丽天气为主，6月中旬前后为梅雨季节，夏季天气炎热，雨水充沛，汛期暴雨主要由梅雨和台风形成，集中发生在 6~9 月，秋季秋高气爽，气温日差较大，冬季天气晴朗，寒冷干燥，气候条件比较复杂，为此必须在进行桥面铺装设计时综合考虑到环境因素对桥面铺装结构的影响。另外，目前正在兴建的几座跨海大桥（如杭州湾大桥以及舟山大陆连岛大桥等）也开始重视特殊环境对桥面铺装体系的影响。

另外，由于大跨径桥梁的特殊地理位置及其在交通网络中的重要作用，对于大跨径桥梁的维修要求较高，整体大修对于过往车辆通行有较大影响，甚至引发交通事故。为此，选择一种性能优异、耐久性高、能抵抗环境复合作用的高强混凝土作为大跨径钢箱梁桥桥面铺装材料，必将会对提高大跨径桥梁的整体使用寿命起到至关重要的作用。

历年以来，国内的学者和研究人员均在努力寻找一种适合我国国情的桥面铺装材料，能够从性能、结构以及环境等多种条件上满足我国的交通状况。国内长江上的几座大跨径桥梁桥面铺装体系也均发生了不同程度的破坏，有的虽然已经经历过一次全面大修，但已经出现大范围的二次破坏。南京长江第二大桥采用环氧沥青混凝土作为桥面铺装材料，自 2001 年投入使用至今，表现出优异的路用性能。与国内的同类型桥梁所采用的铺装材料和结构相比较而言，环氧沥青混凝土用作大跨径桥梁桥面铺装材料具有独特的优势。

环氧沥青是由环氧树脂与掺配固化剂的石油沥青，按照一定配比混合后发生固化反应，从而生成不可逆的聚合物。

环氧树脂（组分 A）是由双酚 A 和表氯醇经反应得到的液态双环氧树脂，不含任何稀释剂、软化剂或增塑剂。也不含无机填料、色素或其他污染物或不溶物质。掺配固化剂的沥青（组分 B）是一种由石油沥青和环氧树脂固化剂组成的匀质合成物，不含不溶物质（如无机填料或色素等）和污染物等。

如在 A、B 组分混合的同时掺加一定级配的集料，充分拌和并进行一定时间的预反应后，碾压成型即形成环氧沥青混凝土。

§2.2 环氧沥青混凝土性能

环氧沥青混凝土是由结合料与一定级配的集料混合而成的，与普通沥青混凝土不同的是，环氧沥青混凝土在低温下不会变脆，在高温下又不会变软（自由沥青从集料骨架中析出）。表 2-1 中的试验结果反映了环氧沥青混凝土的大部分性能指标。总体上来说，环氧沥青混凝土桥面铺装的主要性能可以概括为以下几个方面。

§2.2.1 优异的高温稳定性

在南京长江第二大桥桥面铺装试验研究过程中，我们发现环氧沥青混凝土桥面铺装在高温季节不会出现车辙与推挤病害。固化后的车辙板试件在 60℃ 基本无变形，固化四小时后试件的 70℃ 条件下的变形不足 1mm，固化八小时后的试件基本无变形。具体试验结果如图 2-1 所示。

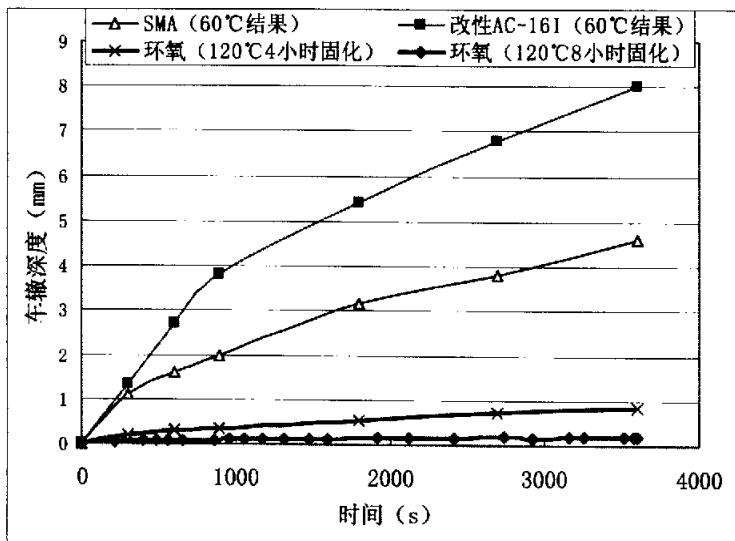


图 2-1 沥青混合料车辙试验

由图中的试验结果可知，环氧沥青混凝土动稳定性随混合料固化时间的延长而增加，同温度条件下固化八小时的试件最终变形明显小于固化四小时的试件，由此可见环氧沥青混凝土铺装材料具备优异的高温稳定性，且随着时间的推移而逐渐增强。

§2.2.2 卓越的抗疲劳性能

环氧沥青混凝土铺装在行车荷载作用下不会轻易开裂，室内的高低温疲劳试验（表 2-2）表明，环氧沥青混凝土具有优越的抗疲劳性能（在经 1200 万次循环后未出现开裂）。

用于大跨径钢桥面铺装的环氧沥青混凝土不仅具有优越的抗疲劳开裂性能，还起到加强正交异性板的功效，可以减少钢板挠曲变形，延长钢板使用寿命。

§2.2.3 优良的防腐保护功能

由于环氧沥青混凝土铺装空隙率较小（一般小于 3%），且存在的空隙均为内部不连通

空隙，这就为钢桥面板提供一个致密的防腐保护层，能够有效防止雨水渗入铺装层内部，对钢板起到一定的防护作用。

环氧沥青混凝土用于大跨径钢箱梁桥桥面铺装主要起始于美国旧金山 San Mateo-Hayward 海湾大桥，由该桥长达三十多年的海盐潮湿条件下的使用情况可知，环氧沥青混凝土具有较好的防护功能，能够有效防止钢桥面板受环境腐蚀。

表 2-1 环氧沥青混凝土性能一览

指标项目		试验条件	单位	实测值	技术要求
车辙 试验	动稳定性	60℃, 0.7MPa	次/mm	12600	≥ 5000
		70℃, 0.7MPa		9000	≥ 3000
	车辙深度	60℃, 0.7MPa	mm	<0.3	≤ 2
		70℃, 0.7MPa		0.53	≤ 4
弯曲 试验	极限弯曲强度	-15℃, 1mm/min	MPa	18.3	≥ 10
	极限弯曲应变		10 ⁻³	2.74	≥ 2
	劲度模量		MPa	6752	5000~15000
线收缩系数		15~-15℃, -10℃/h	10 ⁻⁵ ℃ ⁻¹	1.52	≤ 3.00
抗压 试验	回弹模量	15℃, 2mm/min	MPa	—	—
	抗压强度		MPa	41	≥ 20
劈裂及 冻融劈裂 试验	劈裂强度	15℃, 50mm/min	MPa	5.83	—
	劈裂破坏应变		10 ⁻³	12.7	≥ 10.0
	劲度模量		MPa	860	—
	TSR		%	77	≥ 70

表 2-2 南京长江第二大桥环氧沥青混凝土疲劳试验结果（复合梁试件）

试验温度 (°C)	荷载条件	静挠度 (mm)	动挠度 (mm)	试验结果
0	10Hz; 5kN	0.25	0.20	12x10 ⁶ 次，试件未破坏
18	10Hz; 5kN	0.35	0.22	12x10 ⁶ 次，试件未破坏
60	10Hz; 5kN	0.61	0.58	12x10 ⁶ 次，试件未破坏

另外，由于环氧沥青混凝土与普通的沥青混凝土不同，其生产是一种不可逆的固化反应过程，因而对于汽车燃油与酸、碱以及盐分等化学物质有较强的抗侵蚀作用，能够在极端不利状况下保护钢桥面板。

§2.3 环氧沥青混凝土铺装

§2.3.1 环氧沥青混凝土生产

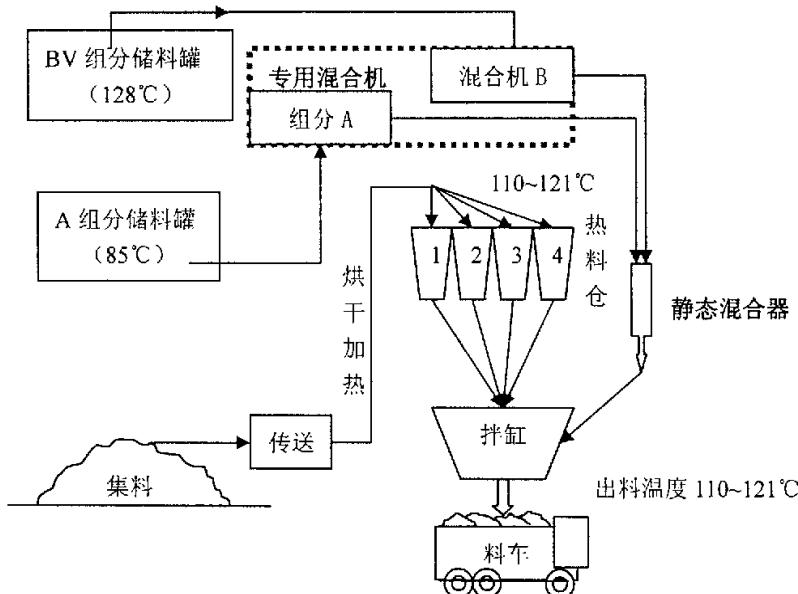


图 2-2 环氧沥青混凝土生产流程示意图

美国化学系统公司所生产的成品环氧沥青已经在多座桥梁的桥面铺装使用过（见表 1-1）。由于混合料的性能受两组分比例的影响较大，因此必须在施工过程中严格监控两组分比例，保证混合精度，以确保混合料生产质量。

图 2-2 所示的是环氧沥青混凝土生产流程示意图。首先将 A、B 组分分别脱桶分装进独立的储料罐，并保温待用。为了达到预定的比例精度，需要配置专用的组分混合机，以能将混合比例控制在精度要求范围以内为准。为了确保混合机的工作精度，必须在每日开工前校正混合机的比例，具体可以采用分别泵出计量的方法进行检测。

集料经过传送带进入滚筒加热到一定温度，再进入 1~4 号热料仓，按预定的生产配合比计量所需的各热料仓集料总量，卸入拌缸内进行干拌。此时 A、B 组分也已按照设定的比例与总量控制，经过专用混合机，再由专用静态混合器充分搅拌后进入拌缸，进行湿拌，再加入矿粉拌和后出料即完成环氧沥青混凝土的生产。

§2.3.2 正交异性板钢桥面铺装

在 20 世纪 60 年代，正交异性钢桥面板从欧洲引进美国桥梁建设中，提出了普通 AC 沥青混凝土应用的第二次限制，这就是在高柔性钢板上的疲劳开裂问题。

针对柔度较大的正交异性钢桥面板的特性，普通的路面材料由于其较差的变形能力以及抗疲劳性能而无法适应由于钢板柔性导致的开裂。1967 年的旧金山海湾大桥管理局在经过一系列的室内疲劳等试验研究对比评估后，选择使用环氧沥青混凝土作为 San Mateo-Hayward 桥正交异性钢桥面板桥面铺装材料，从而拉开环氧沥青混凝土在钢桥面上使用的历史序幕。

San Mateo-Hayward 桥^[26]钢板厚度为 14mm，全长 1676 米，宽 24.5 米，由两根平行的纵隔板支撑。采用的无机锌漆作为钢板防腐保护层，以防止混合料在没有达到预定压实度情况下雨水下渗腐蚀钢板。桥面铺装总厚度为 50mm。

投入使用三十多年后，San Mateo-Hayward 桥表现出优异的使用性能。在 1980 年前后，在纵隔板外侧曾经出现一条裂缝，但是没有导致任何的加剧破坏。自 1967 年后，又有大约七座钢桥采用了环氧沥青混凝土作为桥面铺装材料，其中几座桥已经投入使用超过二十年，表现良好。

早在 1969 年，San Diego-Coronado 海湾大桥^[26]在其 10mm 厚的钢桥面板上采用环氧沥青混凝土作为桥面铺装，但是在 1993 年重新采用环氧沥青混凝土进行铺装。铺装在 10mm 厚的柔性钢板上的环氧沥青混凝土在 1979 年出现开裂，很显然是由于疲劳问题而导致的铺装层开裂。随后大桥管理单位定期对裂纹进行密封处理，其良好的使用状况一直维持到 1993 年的大修，在此期间没有出现铺装层的粘结力丧失病害。另外还有一座钢板厚度为 10mm 的钢桥，位于哈利法克斯的 McKay 桥，在 1971 年首次采用环氧沥青混凝土作为其桥面铺装材料，由于钢板柔性过大，导致铺装层在 1975 年出现疲劳开裂病害，随后采用多种沥青混合料对粘结力丧失的约全桥面积 25% 的铺装层重新进行修补。其他部位的环氧沥青混凝土一直使用到 1989 年整桥重新采用环氧沥青混凝土铺装，并表现出较好的使用性能。实际情况证明，其他所采用的各种沥青混合料的桥梁的使用性能均无法令人满意。

§2.3.3 正交异性板替换梁铺装

除了用于新建的正交异性钢桥的桥面铺装之外，环氧沥青混合料还用于替换水泥混凝土板的正交异性钢板的面层。最为著名的旧金山金门大桥（Golden Gate）在 1986~1987 年的两年期间完成近八百块正交异性钢桥面板替换水泥混凝土桥面。在钢板替换前预先采用碎片压入粘结层内，提供约 10mm 厚的暂时表面层。在替换完成后，采用厚约 40mm 的环氧沥青混凝土作为最终承重层。

在此之前，位于北美洲范库弗峰（加拿大）的狮门大桥（Lion Gate）也是采用过正交异性钢桥面板替换了原水泥混凝土梁桥，所替换的部分是引线桥的水泥混凝土梁，主要是在 1975 年前后完成。针对狮门大桥，其施工工序与金门大桥略有不同。12mm 厚的正交异性钢桥面板预先在后场铺装约 37mm 厚的环氧沥青混凝土层，然后再利用铺装了环氧沥青混凝土之后的钢桥面板替换原水泥混凝土梁桥。

类似的情况还有 Ben Franklin 桥^[26]的替换工程。这三座桥均表现出较好的使用性能，没有明显的破损病害，只有狮门桥在使用十八年后检测到铺装层表面的磨耗损失厚度约为 1mm/年^[26]，据悉，这种变形是由于冰雪季节的车辆防滑链所引起的铺装层表面磨耗。

与此同时，加拿大魁北克的 Champlain 桥也采用钢桁架来替换原有的水泥混凝土梁。具体替换方法与金门桥类似，先在钢板表面设置约 9~10mm 厚的临时表层密封材料（环氧沥青粘结料碎石层），最终采用普通沥青混凝土作为承重层。

对于狮门大桥而言，由于北美洲范库弗峰地区的恶劣气候，冬季大雪较为频繁，因此大多数车辆均在驱动轮上安装防滑链。在 1976 年完成替换后的环氧沥青混凝土铺装经受了约二十五年的防滑链轮胎使用后，遭受了一定程度的磨损。因此，在 2002 年重新采用环氧沥青混凝土进行铺装。铺装时先将原先的磨损铺装层铣刨，再重新铺装与磨耗部分相同厚度的环氧沥青混凝土层。

由于狮门大桥的引线桥环氧沥青混凝土铺装层的优良使用性能，在 2002 年修复引线桥部分的同时，对主跨部分的水泥混凝土箱梁桥也采用类似的方法进行替换，并铺装环氧沥青混凝土，按照与引线桥相同的厚度进行铺装。具体施工工序与金门大桥类似，也是先在箱梁拼装场预先洒布环氧沥青粘结料，再压入碎石，以提供临时通车表层。临时表层的厚度约

9mm，在所有的钢板衔接好之后，再在其表面洒布环氧沥青粘层油，铺装了25mm的环氧沥青混凝土表层，因此总厚度就是与引线桥相同的37mm，至面前没有破损的相关报道。对铺装层厚度的选择，主要是考虑到桥梁恒载的限制。

§2.3.4 水泥混凝土桥面铺装

环氧沥青混凝土在水泥混凝土梁桥上的应用起始于旧金山—奥克兰海湾大桥。对于旧金山—奥克兰海湾大桥的水泥混凝土面层，最初采用的是13mm厚的升级配沥青混凝土，当时主要考虑的是抗滑等安全问题。直至1977年采用环氧沥青混凝土重新铺装，铺装层除了少数地段出现一些松散之外（事后查明是由于水泥混凝土面板的恶化而导致的），达到了预期的效果，雨水完全从铺装层下渗，然后排除，起到良好的预防湿路滑胎效果。环氧沥青混凝土面层使用至今表现出较好的性能。

另外还有其他约七座水泥混凝土桥梁采用密级配（空隙率较小）环氧沥青混凝土面层。1972年，横越华盛顿河畔的Evergreen Point桥与波特兰的Ross Island桥^[26]均采用了13mm厚的密级配环氧沥青混凝土作为铺装材料。这两座桥均表现出优异的使用性能。但是，对于1971年位于哈利法克斯的MacDonald桥^[26]，采用13mm厚的环氧沥青混凝土铺装，若干年后最终导致失败，事后检查原因发现，破坏的最终原因是由于水泥混凝土桥面板的恶化。

§2.4 环氧沥青混凝土铺装控制

环氧沥青混凝土是一种性能优异的混合料体系，但如何保证环氧沥青混凝土发挥其优异的使用性能，必须掌握其铺装设计的关键。总结国内外环氧沥青混凝土桥面铺装至今的成败经验，正交异性钢桥面板上的环氧沥青混凝土铺装必须注重以下几点：

1. 正确的设计；2. 适当集料的选取；3. 组分比例控制与混合要求；4. 摊铺操作过程控制。

除上述几点之外，对于不同的使用条件，以下几个方面的问题是必须慎重考虑的。

§2.4.1 正交异性钢桥面板铺装的疲劳试验

用于正交异性钢板上的铺装层易于在纵向加劲肋顶产生疲劳开裂病害。正交异性钢板上的铺装材料的抗疲劳特性可以通过室内的模拟试验来评价。对于包括环氧沥青混凝土在内的大多数聚合物混凝土，最不利的使用条件是高温季节，因为气温较低时，聚合物的劲度增大导致复合梁体系的变形降低，从而减小了铺装层内的应变。

正确的混合料设计包括选择合适的集料，为此必须进行石料的比选试验。如果集料选择与混合料设计没有预先进行试验，以评估其对混合料疲劳寿命的影响，可能会由于材料缺陷而导致开裂病害。1973年，里约热内卢的Rio-Niteroi桥^[26]由于没有进行疲劳试验导致铺装层早期出现开裂和某段铺装层的早期恶化。在新爱尔兰密西西比河的绿林桥（Luling），科研人员更改了混合料设计（主要是提高油石比），当时的主要目的是使得混合料能够较易被压实，绿林桥在1983年完成铺装。随后出现了铺装层的局部早期恶化，在通车后一年内就出现了铺装层的开裂病害并导致局部铺装层崩塌。

疲劳试验需要特殊的试验设备以及加速试验（将几周内的试验缩短为几天）。然而，相对铺装层的长久使用寿命而言，花费的时间与开销是微不足道的。

§2.4.2 拌和楼温度控制

环氧沥青混凝土从拌和楼内卸料时刻的温度取决于送入拌缸的集料的温度。如果每盘

之间的混合料的温度波动范围大到 15~20℃，其中就会有某个盘次的混合料由于粘度过大而出现固化速度过快，必将导致某些区段的铺装层不能得到充分压实。压实不足将会导致铺装层透水并加速铺装层的破坏。

§2.4.3 混合料压实

在环氧沥青混合料被卸入到摊铺机开始摊铺后，混合料的温度逐渐降低，同时混合料的粘度逐渐增大。如果压实操作没有及时跟进，即没有在混合料温度降低到 82℃前完成初压，没有在温度降低到 65℃前完成终压，混合料的粘度会由于温度过低而变大，使得混合料几乎不可能得到充分压实。而且，随后的交通荷载作用也无法完成铺装层的二次压实，因为混合料随后固化，结合料无法在铺装层内流动。这势必会造成铺装层过大的空隙率，导致铺装层渗水或疲劳寿命大大降低。在 1973 年的俄勒冈州波特兰的正交异性钢梁桥 Fremont 桥^[26]，由于当时温度等检测工具的限制而无法观测这种时间的限制。随着手持式红外线温度枪的发明，使得混合料温度的检测变得轻而易举，为人们提供了优异的混合料压实温度控制手段。

§2.4.4 铺装层厚度控制

从国外的几座桥梁建设情况来看，尽管有好几座水泥混凝土梁式桥铺装了约 15mm 厚的环氧沥青混凝土面层，而且其使用寿命也较长，然而在铺装层碾压时出现了某些不利剪切作用，尤其是对于密级配沥青混凝土。薄层铺装的剪切作用将导致铺装层渗透性。另外，薄层铺装对铺装层的受力也较为不利，且增加了施工的难度，容易引起施工时的混合料离析等一系列问题。考虑到这些方面的原因，不主张采用小于 20mm 厚的铺装。

§2.4.5 水泥混凝土梁桥罩面

与其他水泥混凝土罩面类似，环氧沥青混凝土罩面取决于下层水泥混凝土梁的质量，基层桥面板表面必须洁净无污染。1971 年，哈利法克斯 Macdonald 桥^[26]环氧沥青混凝土罩面层就是由于不断的水泥混凝土恶化而导致最终失败。尽管在铺装环氧沥青混凝土前铣刨了 1.3 cm 的混凝土，但还是出现退化，主要是由于混凝土内的氯含量超标而导致的，氯含量超标会导致梁体内部的钢筋锈蚀。除了要求水泥混凝土桥面板内的氯含量外，还必须要求其表面的拉拔强度不小于 1.4MPa^[26]，以确保混合料铺装层足够的粘结力。

§2.5 小结

环氧沥青混凝土在正交异性钢桥面板上的铺装与在水泥混凝土桥面上的罩面层拥有三十多年的历史，绝大多数应用取得了非常满意的使用效果，只有个别桥梁进行了简单的养护维修，某几座桥甚至完全没有进行维修，使用性能相当优异。

为了确保环氧沥青混凝土桥面铺装的优异使用性能，必须做到以下几点：

1. 如果是在正交异性钢桥面板上使用，必须根据混合料设计进行复合结构疲劳试验；
2. 必须在环氧沥青混凝土拌制过程中严格进行混合料的质量控制（温度、级配等）；
3. 混合料的压实必须在温度降低到规定要求前完成；
4. 最低铺装厚度不能小于 20mm，基层表面必须洁净无污染。

环氧沥青混凝土是一种性能优异的材料，适合于某些使用条件苛刻的场所。但是，如何保证环氧沥青混凝土能够充分发挥其优势，必须从选材出发，综合考虑集料、填料以及油石比等因素，再兼顾材料的各项性能试验，最终才能设计出令人满意的铺装体系。

第三章 环氧沥青混凝土桥面铺装病害类型

§3.1 概述

环氧沥青混凝土是一种高性能桥面铺装材料，能够承受重交通荷载并表现出优异的耐久性。在美国，采用环氧沥青混凝土桥面铺装的桥梁当中，以 1967 年的圣马特亚海湾大桥（San Mateo-Hayward Bridge）、1976~1977 年的旧金山-奥克兰海湾大桥（San Francisco-Oakland Bay Bridge）以及 1986 年的金门大桥（Golden Gate Bridge）最为著名，所采用的环氧沥青混凝土铺装均表现出优异的使用性能。这种聚合物沥青混凝土桥面铺装材料来源于环氧聚合物体系与特殊的沥青结构，经过特定条件下的聚合反应后，为桥面板提供一个优良的保护层，同时为过往交通车辆提供一个安全、舒适、耐久的行车道面。

与同类铺装材料相比，环氧沥青混凝土桥面铺装表现出非常优异的使用性能，但是，在对国内外铺装环氧沥青混凝土的桥梁进行使用状况调查时，也发现了不同类型及不同程度的病害。除了在第二章中介绍的由于认识不足而导致使用环氧沥青混凝土铺装的部分桥梁出现早期的某些缺陷外，环氧沥青混凝土桥面铺装在不同时期还可能表现出不同病害。

§3.2 环氧沥青混凝土桥面铺装主要病害

§3.2.1 早期损坏

选择环氧沥青混凝土作为桥面铺装后，如何确保铺装层在投入使用后的优异性能，除了正确的设计与选材之外，其中最重要的一点就是如何保证铺装层施工中不出现由于质量隐患而引起的铺装层早期损坏。在国外的沥青路面设计中，将未达到设计寿命就出现的各种非正常损坏统称为早期损坏。但是对于采用环氧沥青混凝土作为大跨径桥梁桥面铺装而言，时间与环氧沥青混凝土的固化有十分密切的关联，因此，初期强度较低状态下的早期损坏的可能性所占的比例相当大。为此，将环氧沥青混凝土的早期损坏定义为在铺装层施工完成后至投入使用前的养护期间所出现的损坏。实际上，这种损坏不是因为材料性能的问题，绝大部分是由于施工的因素而导致的。所以必须仔细分析由于施工的原因造成环氧沥青混凝土铺装可能出现的质量隐患，以期指导日后的环氧沥青混凝土铺装。

根据环氧沥青混凝土施工过程中缺陷起因的不同，将环氧沥青混凝土铺装层所出现的早期损坏划分为以下几个方面：

1. 机械设备原因

根据以往的施工经验和实际工程情况，由施工机械设备导致的环氧沥青混凝土表现的早期缺陷主要有以下几个方面：

(1) 铺装层表面出现鱼尾状裂纹

鱼尾状裂纹出现在铺装层碾压完成之后，表面的裂纹有如鱼的尾部，波浪型排列，图 3-1 中所示的是较轻微的鱼尾状裂纹。鱼尾状裂纹深度随压路机行走时的速度而定，碾压速度越快，表面裂纹的宽度越大，裂纹的深度也越深，如图 3-2 所示，严重时鱼尾状裂纹表面互相贯通。

铺装表层出现鱼尾裂纹的主要原因有两个方面，其一是由于混合料的部分固化而导致无法达到最佳的密实状态，从而造成碾压完成后的铺装层呈现出松散开裂的现象。其二是因

为油石比较大的混合料温度过高，在钢轮压路机的搓揉作用下很容易产生裂纹。

波浪型鱼尾状裂纹是由于在碾压过程中，压路机（主要是钢轮压路机）行走速度过快或急速刹车等，从而将铺装层表层混合料拉裂。这种病害的出现对于混合料的影响主要不利于环氧沥青混凝土强度的形成，且成为铺装层投入使用后的薄弱点，此外，铺装的外观质量也较差。



图 3-1 铺装层碾压完成后的鱼尾状裂纹（轻微）

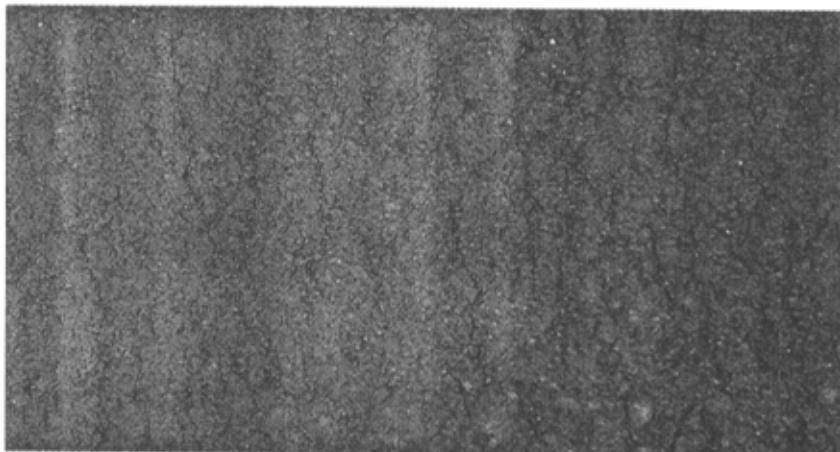


图 3-2 铺装层碾压完成后的鱼尾状裂纹（中度）

(2) 异物“鼓起”开裂

铺装层在碾压完成后，会出现由于异物而导致的“鼓起”开裂现象，如图 3-3 所示。

在对铺筑完成后的“鼓起”开裂处进行开挖发现，这种“鼓起”现象主要是由于异物影响而造成的（如料车的橡胶轮胎上的橡胶块剥落等），在摊铺时混入铺装层内部。由于异物的不可压缩性（或低压缩性），压路机碾压时暂时被压缩，碾压完成后异物块反弹，从而将未固化的环氧沥青混凝土铺装层顶起，形成图 3-3 中的异物“鼓起”开裂现象，这种病害以料车橡胶轮胎上的橡胶块（完全不可压缩性）剥落最为严重。因此，在环氧沥青混凝土摊铺过程中，应该严格控制各机械部件，不至于混入铺装层内。



图 3-3 碾压完成后的“鼓起”开裂与铺装层内的异物

(3) 结块“皮料”

在混合料摊铺碾压完毕后，在铺装层表面有时会发现某些结块的“皮料”，“皮料”主要表现为细料在表层的积聚，在阳光下会出现较为明显的反光现象，如图 3-4 所示。

铺装表层的“皮料”现象对于铺装层投入使用后期有一定的影响，由于皮料部分结合料较多，而且没有形成骨料结构支撑，因而较脆，必然会在行车荷载作用下与铺装层剥离，形成坑洞。为此，需要及时解决在环氧沥青混凝土摊铺过程中出现的结块“皮料”现象，彻底杜绝后期隐患。

出现碾压后的结块“皮料”现象有以下几种可能性，第一是矿粉等细填料在投入拌缸前受潮结块，在进行拌和时没有得到充分打散，吸收较多的结合料，从而导致混合料碾压后出现“皮料”现象。第二是由于矿粉吸附结合料后，如果温度稍低，则粘度增大，很容易因结团而粘附在一起，在固定物上（如拌缸开启活塞、铲车或滑车边角等）产生粘附将不断积聚，最终由于结块过大而掉落料车内，混入混合料内部，从而影响混合料摊铺质量。这种“皮料”缺陷，由于结合料与矿料内较细的集料粘附在一起，在摊铺初始时一般较容易发现，在混合料碾压之后形成表面的反光，更容易与周边混合料区分开。由于每日摊铺工作开始时摊铺机过冷而导致的“皮料”现象，即高温混合料触及低温摊铺机（如螺旋器等）部位，导致混合料骤冷，从而出现细集料部分出现粘附积聚现象。这种结块“皮料”现象主要在摊铺起始阶段较为严重。

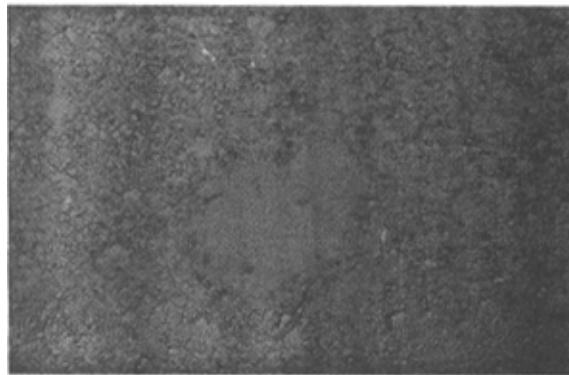


图 3-4 铺装表面结块“皮料”

(4) 铺装表面混合料“脱落”

在环氧沥青混凝土铺装过程中，还有一种常见的病害现象，主要表现为表面混合料的“脱落”（如图 3-5 所示）。

铺装层出现混合料“脱落”现象主要是由于在邻幅混合料摊铺过程中，料车粘附的粘结料在未完全固化的铺装层上行驶，从而将未固化的铺装层表面混合料拉离铺装层。这种病害在早期对于铺装的影响主要是外观，发展到后期铺装层可能会由于局部冲击荷载作用而导致坑洞扩展，影响铺装层外观与使用寿命。

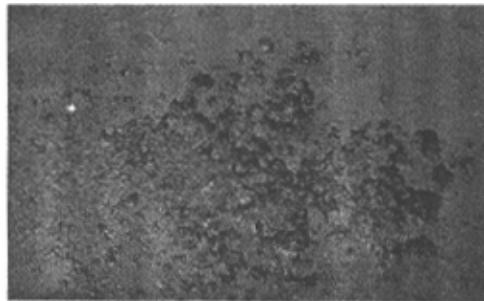


图 3-5 铺装表面混合料“脱落”

(5) 铺装层透水

由于环氧沥青混凝土的摊铺、碾压受环境因素影响较大，必须在规定的温度与时间内完成混合料的摊铺碾压。混合料温度过高会导致混合料性能发生急剧的变化，温度过低除会对混合料的性能产生影响之外，还会影响混合料的压实效果，导致铺装层空隙率过大。

由于机械设备的原因导致的铺装层透水情况主要是由以下几方面引起的：

① 摊铺宽度过大

摊铺宽度过大导致混合料在螺旋布料器内传输距离过长，从而导致混合料的离析现象，主要表现为较大粒径的混合料在摊铺宽度边缘聚集，从而导致混合料的级配在摊铺宽度边缘产生较大的变化，直接导致此处的铺装层空隙率过大；

② 碾压不足

对环氧沥青混凝土的碾压应按照规定控制在限定温度范围内，因此，必须及时对摊铺完成的区域进行碾压，严格控制碾压后混合料的温度与碾压遍数，以确保混合料达到最佳压实度。

图 3-6 是某桥试验段环氧沥青混凝土铺装层施工完成两天后测得的渗水系数，由图中结果可见，摊铺宽度边缘以及接缝处附近的铺装层渗水系数较幅中大的多。

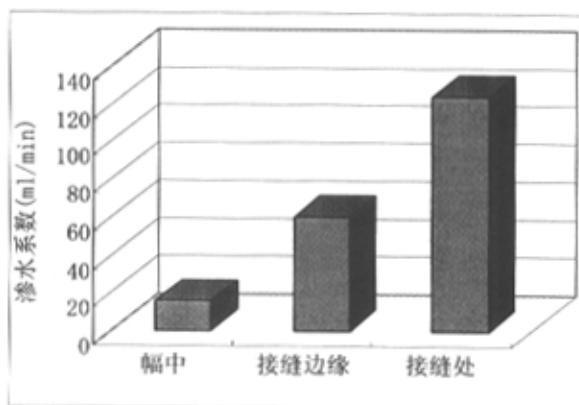


图 3-6 完工两天后的铺装层渗水系数测定

2. 人为因素

在铺装过程中，对环氧沥青混凝土的铺装性能影响较大除了铺筑设备外，就是操作人员在混合料摊铺过程中所造成的。

在环氧沥青混合料摊铺过程中，必须派专人负责专项技术关卡，在摊铺过程中时刻把守质量关，不断检查、监督、纠正铺装过程中的错误。由人为因素导致的铺装层早期病害主要有以下几个方面：

(1) “死料”

将出现“死料”的原因归结于人为因素主要是针对环氧沥青混凝土的摊铺过程而言的。此处出现“死料”的前提是混合料的配比与温度均在要求范围之内，由于在摊铺过程中的人为因素，没有及时清理混合料摊铺机（主要是螺旋布料器）内的“过时”混合料而导致的。

在混合料的摊铺过程中，由于较细级配的混合料的比表面积大，单位粘附力也较大，相对较粗的混合料部分而言，更易于与摊铺设备的某些“死角”发生“沾粘”现象，而这种“沾粘”现象一般不易被操作人员发现，从而导致大量的“过时”混合料在某一角落不断积聚，最终混入正常摊铺的混合料内部。混入铺装层内部的“死料”由于反应时间已经超过规定的容许摊铺碾压时间，环氧的胶粘大分子链已经初步形成，在摊铺机的碾压下，该处的混合料将会出现粘结力丧失、表面干枯、松散等症状。“死料”区域内的松散混合料在行车荷载（甚至是施工车辆）作用下将会产生剥离，如图 3-7 所示。

图 3-7 中表现出的铺装层表面“死料”被拉离铺装层的现象与图 3-5 中所描述的表面混合料“脱落”有着本质区别，前者是由于“死料”强度较低，结构间的机械作用力较小，容易在早期施工车辆作用下产生剥离。而后者是由于粘附在车轮粘度较大的粘结料将未固化的铺装层表皮拉脱而导致的。另外，由于结块“皮料”也可能导致铺装层表面出现“脱落”现象，需要针对不同的病害状况来分析病害的成因，以采取针对性处理措施。

除了人为原因导致的“死料”外，“死料”的产生还与环氧沥青 A、B 组分的配比精确度有关。如果 A、B 组分比例偏大，即如果树脂含量超过容许范围，则会大大加快化学反应的速度，从而导致混合料在摊铺前已经由于粘度过大而产生“死料”。另外由于混合料的出料温度过高也可能会导致化学反应速度过快，从而提前使混合料超过环氧沥青的最佳碾压粘度范围，形成“死料”。

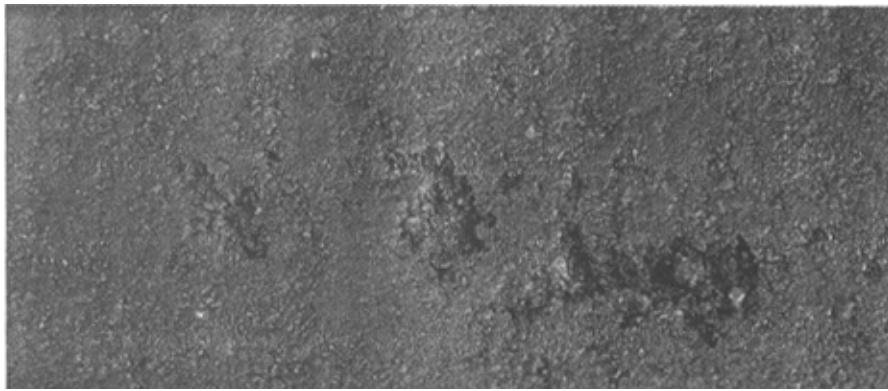


图 3-7 铺装层“死料”表面松散剥离

铺装层表面出现“死料”是可以通过在摊铺机后派设专人负责检查以及时进行挖除，并从螺旋布料器前取新的混合料进行填补来弥补。

(2) “人为离析”

铺装层表面的“人为离析”如图 3-8 所示。

“人为离析”病害主要表现为粗集料集中分布，这种病害是环氧沥青混凝土铺装初期病害内最轻的一种，主要是由于在环氧沥青混凝土摊铺过程中人工“补料”时的不均匀性造成的。人工“补料”是操作人员在摊铺机后对出现的“死料”、异物等缺陷处所进行的填补。如果操作人员缺乏经验，在取料填补缺陷处时操作不当，势必会导致混合料中粗集料部分分离散到表层，从而形成图 3-8 所示的局部离析现象。

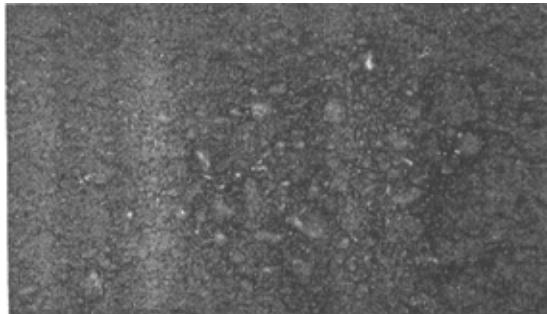


图 3-8 混合料离析

混合料所出现的局部离析只是出现在混合料的表层，给铺装结构层带来的危害是表层空隙率过大，且影响铺装层整体外观。

3. 环境因素

环氧沥青混凝土受环境影响较大，主要的影响因素有水份与温度。

(1) 水份因素

在混合料摊铺过程中，如果底层在摊铺其上层混合料前遇到雨水或工人的汗水滴落工作区，且水份没有在摊铺混合料前得到及时的处理（如经过太阳曝晒等），在上层环氧沥青混凝土摊铺完成后，一般在次日午后高温时，摊铺完成后的铺装层表面有时会出现微微隆起的现象。这主要是混合料内部的自由水在高温下汽化而产生水汽体积膨胀并将铺装层顶起，形成鼓包隆起，严重时会出现早期鼓包开裂病害（如图 3-9 所示）。

对于初期鼓包应该及时进行处理，否则在行车荷载和水的综合作用下将加剧病害发展。

环氧沥青混凝土是一种性能优越的铺装材料，但如果由于施工操作不当，必然会导致各种病害产生。必须在正式施工前对用于环氧沥青混凝土摊铺的机械设备进行仔细的检查，严格杜绝使用漏油、漏水的机械设备。

(2) 温度影响

环氧沥青混凝土施工时应该密切关注天气情况，不得在气温低于 10℃ 时施工。但是，由于某些特殊条件影响，如摊铺环境恶劣，风速过大等，也会导致混合料在卸入料车时温度降低过快。温度过低将导致混合料得不到最佳状态的压实，导致铺装层空隙率过大，直接影响铺装层使用寿命。

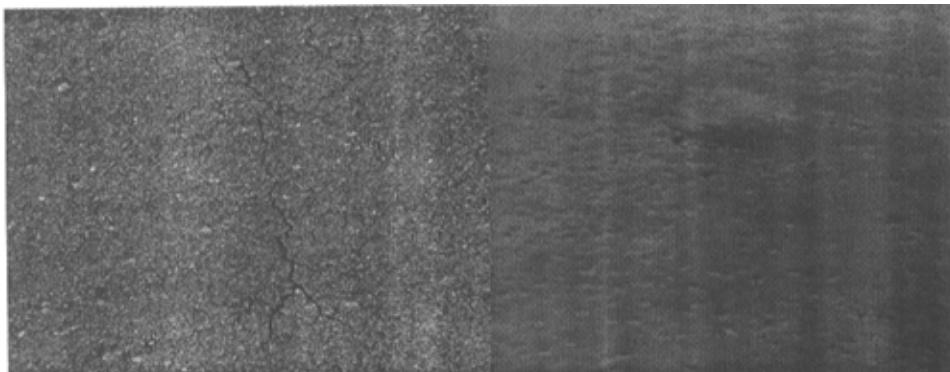


图 3-9 碾压完成后次日铺装层出现鼓包

§3.2.2 使用期损坏

普通沥青路面在使用期内的损坏主要可以分为裂缝、变形和表面损坏三大类。参照这一标准，再结合日常调研中的经验，将环氧沥青混凝土桥面铺装在使用期间可能会出现的问题分为以下几类。

一、鼓包

鼓包是密级配沥青混凝土桥面铺装最常见的一种病害表现形式。

鼓包病害一般是由于施工时的非人为因素（诸如汗水、雨、露水等）而引起的。大跨径钢箱梁桥面铺装体系必须保证其密封不透水，为此，要求铺装层的空隙率尽可能的小。铺装层的空隙率很小，能够存在的空隙也均为内部不连通空隙。在环氧沥青混凝土铺装完成后，水分逐渐挥发成为水汽。由于环氧沥青混凝土铺装的空隙率很小（<3%），水汽很难挥发到铺装层外，于是将铺装层局部顶起，形成铺装层表面的“隆起”现象。隆起的铺装层部分在车辆荷载的反复作用下很容易被压碎，从而形成表面的不规则裂纹。

按照鼓包发展的不同形式和表现出来的外观形态，可以将鼓包病害划分为以下几个阶段。

（一）初期隆起

鼓包初期表现出来的是表面的圆形小范围内的微微隆起现象（如图 3-10 所示）。铺装层“隆起”顾名思义即是该范围内的铺装层被顶起，此处的铺装层脱离钢板或下层铺装（视病害根源所在位置而定）的支撑，从而形成视觉上的高差。

初期隆起开裂现象出现后，如果不及时进行处理，就会发展成为更为严重的中期裂缝扩展。

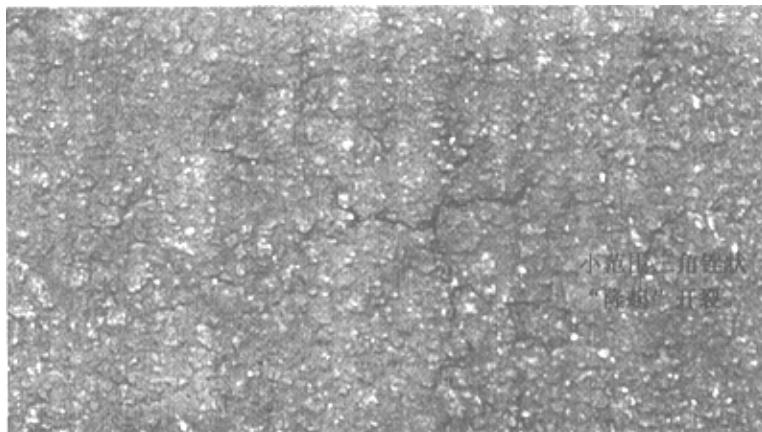


图 3-10 初期“隆起”开裂

（二）中期裂缝扩展

初期隆起的铺装层在行车荷载的重复作用下，迅速发展成为如图 3-11 所示的裂缝扩展情况。

中期裂纹的扩展最为明显的特征除了“隆起”顶端的三角锉裂纹继续扩展以外，就是在初期“隆起”的圆形范围的根部出现圆形裂纹，并有逐渐闭合的趋势。该裂纹是“隆起”的铺装层部分在丧失支撑后被车辆荷载碾压“塌陷”而导致的。

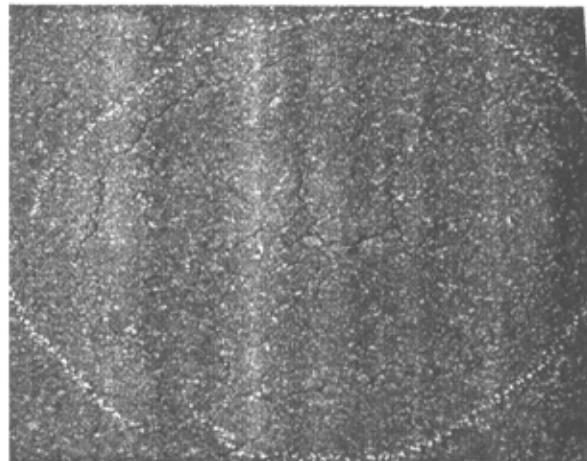


图 3-11 中期裂缝扩展

（三）完全破坏阶段

如果“鼓包”病害发展到表面塌陷（图 3-12），则对铺装层极为不利。水分在行车荷载产生的压力作用下，很容易从开裂铺装层处下渗到铺装层内部，严重的情况会在铺装层和钢板间产生拍打效应，即形成的动水压力不断冲击钢板（或粘结层），从而导致钢板锈蚀或发生脱层病害。

同时，在行车荷载作用下，整个鼓包区域混合料被压碎，完全丧失其应有功能，最终出现坑洞（如图 3-12 所示）。坑洞的出现是鼓包病害发展过程中的必然结果，如果不及时对出现的坑洞进行修补，坑洞会在车辆荷载的不断冲击下继续扩展，对铺装结构和钢板均会产生致命影响。

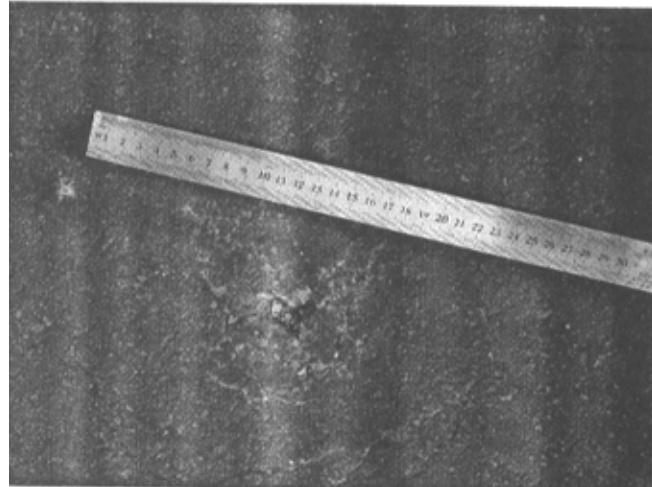


图 3-12 晚期坑洞病害

二、开裂

我们在对几座使用环氧沥青混凝土作为桥面铺装的桥梁投入使用后的桥面状况进行调查后发现，其桥面铺装出现某些非结构性受力裂缝。所谓非结构性受力裂缝是指裂缝出现的位置并非是力学分析的最不利位置（应力或应变最大点）^[46]。

根据大量的力学分析结果可知，正交异性钢桥面板铺装层的最大拉应力（拉应变）均出现在铺装层表面，横向最大拉应力位于 U 型加劲肋肋顶和纵隔板顶的铺装层表面附近区域，而纵向最大拉应力位于横隔板顶部的铺装层表面，因此在纵向加劲肋顶部和纵隔板顶部铺装层表面易出现纵向开裂，横隔板顶部铺装层表面易出现横向开裂。

力学分析结果与国内某些桥梁投入使用后所出现的铺装表面开裂病害一致（如国内某公路大桥玛蹄脂沥青混凝土铺装投入使用后的大规模功能性 U 型肋顶开裂破损），这种病害主要表现为铺装表面的典型“H”型裂缝，如图 3-13 所示。

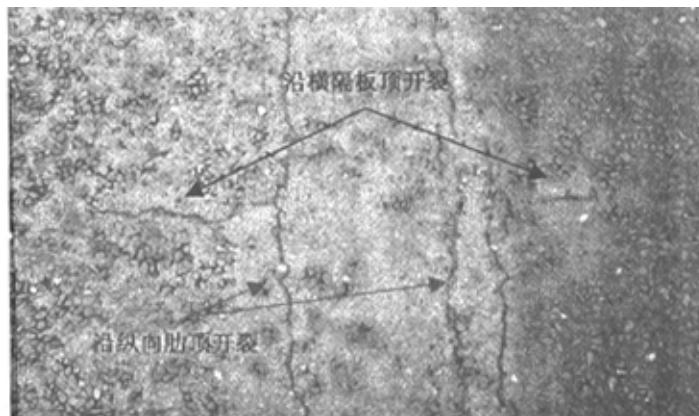


图 3-13 国内某桥玛蹄脂沥青混凝土铺装破损状况

对于环氧沥青混凝土桥面铺装而言，其铺装层表面一般不会产生开裂现象（除非钢板劲度较低）。由于施工或环境因素导致的裂纹状况远比其他类型桥面铺装材料好的多。根据我们调研的结果，某采用环氧沥青混凝土作为桥面铺装的桥梁出现的开裂病害如图 3-14 所示。从铺装层开裂的位置而言，裂缝出现极为不规则，只有个别裂缝位于 U 型肋顶端附近，且裂缝的间距也不固定。从裂纹发展的速度而言，由于及时进行了简单处理，其裂缝发展速度极为缓慢，个别裂缝由于雨水下渗的影响有扩展的趋势，但总体趋势较慢。由于这种状况的裂缝位置和外形尺寸均毫无规律可循，因此其裂缝成因也较为复杂。

经调查后发现，采用环氧沥青混凝土铺装的国内某桥建成通车后，从整体横断面上来看，裂缝主要位于一侧慢车道的左侧轮迹带范围附近，其他部位的铺装层情况相对而言较好。

经过调查，该桥建成后各方面的管理工作做的比较到位，对超载问题监察相对较严，从而降低了超载车辆过桥的可能性。另外，如果有大量的超载车辆过桥，则由于桥面横坡的影响，车辆右侧轮胎的单位压力应该较左侧轮胎的单位压力大，理论上来说，如果要发生受力结构损坏（疲劳开裂等），则应该先发生在右侧轮迹带上。然而，根据现场的裂缝调查情况可以发现，该桥环氧铺装层所出现的裂缝却主要是位于慢车道的左侧轮迹带范围内，这进一步说明裂缝病害与过桥的车辆荷载无太大的关联。

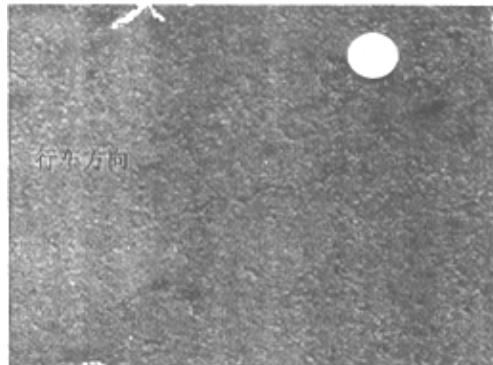


图 3-14 环氧沥青混凝土裂缝破损

而裂缝病害应该与材料性能无关，因为所采用的环氧沥青在使用到桥面之前均经过严格的检测。从裂缝出现的整体情况而言，病因应属于施工技术、施工工艺等不成熟或施工过程中机械故障导致的漏油、漏水等问题而导致的。对于由这种原因导致的环氧沥青混凝土铺装表层的开裂病害，可以暂时选用适当的密封材料进行裂缝密封，待投资回报后，可以考虑将该病害面积段铣刨后重新铺装新混合料。

除了图 3-14 中所示的主桥段出现的非结构性裂缝以外，还有另外一种类型的裂缝，主要出现在伸缩缝前 3~5 米范围以内的区域，这类裂缝出现的位置也主要集中在人工摊铺区域，裂缝首先是单个独立形式，有逐渐向网裂发展的趋势。这类裂缝的病因较为简单，主要是由于铺装层混合料的空隙过大而造成的，因为伸缩缝预先安装问题导致沥青混凝土摊铺机在摊铺过程中无法对该区域进行机械摊铺，不得已采用人工摊铺，必然导致混合料形成“人为离析”现象，出现铺装层的粗糙状表面。另外，由于人工摊铺无法保证预先设定的松厚，难以保证摊铺后混合料表面与伸缩缝的衔接平顺，从而引起行车荷载对该地段的冲击作用，导致铺装层出现裂纹。

三、外伤

外伤是指环氧沥青混凝土铺装层由于过往车辆上硬物掉落铺装表面对铺装表面的冲击，或由于车祸等问题导致的硬物在铺装层表面形成的划痕。图 3-15 所示的是由于硬物掉落等导致的铺装表面破損。

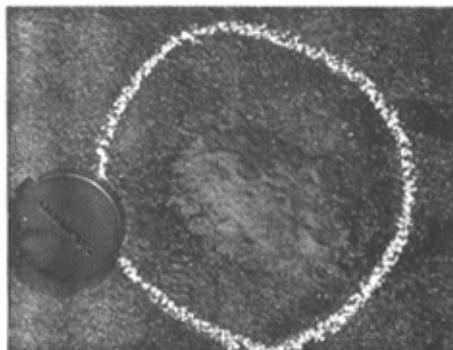


图 3-15 铺装层表面外伤

§3.3 环氧沥青混凝土潜在病害

环氧沥青混凝土铺装成功与否的关键之一就是正确的施工。施工不当会导致铺装层在运营期出现各种可能的病害。除了在第二节中所介绍的几种使用期间能明显表现出来的病害外，还有由于某方面原因而在短期内无法预见的病害。

§3.3.1 粘结料与钢板粘结问题

环氧沥青粘结料与钢板表面的粘附性较好，常温下的拉拔强度可达 2.75MPa，除了用于粘结铺装层间与铺装层和钢板间的粘结外，同时还用作层间的应力吸收层。影响粘结料与钢板间的粘结力的主要因素有组分混合比例与钢板表面清洁度等。

粘结料是通过专用的洒布设备进行喷洒施工，A、B 组分混合比例可以通过流量监控器进行监测，能够确保其比例精度控制在要求范围之内（ $\pm 3\%$ ），必须在粘结料喷洒过程中时

刻检测 A、B 组分比例，以避免由于比例误差而导致的粘结性能降低。

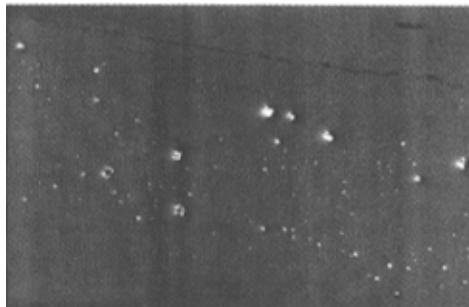


图 3-16 钢板表面粘结层的“鱼眼”状斑点

在粘结料喷洒前必须确保钢板表面的清洁度，钢板表面的油污、蜡等都会大大降低粘结料与钢板的粘结性能，必须事先按照规定要求采用清洗剂进行清洗。如果钢板表面存在油污，会形成表面的“鱼眼”状斑点（如图 3-16 所示）。“鱼眼”状斑点的形成发展最终会导致铺装层在投入使用后由于钢板与混合料间的粘结力丧失而出现铺装层的“脱层”病害。

§3.3.2 粘结料洒布量

在进行环氧沥青粘结料的洒布时，为了防止粘结料飞溅而污染临近的非铺装区域，必须在粘结料洒布时派专人在粘结料洒布范围内用挡板做好防污染措施，粘结料在两块挡板范围内进行洒布。由于粘结料洒布时的操作顺序，必将在洒布范围内形成边缘粘结料聚积现象，我们在某桥粘结料洒布过程中对粘结料的洒布量进行检测，检测按照一断面三点进行，检测结果如图 3-17 所示，其中左边缘为需切缝处理的边缘，右边缘为与临近铺装衔接的边缘部分。

根据检测结果可知，对于单幅洒布的粘结料而言，边缘处的洒布量要远比幅中洒布量大的多，主要是由于洒布在防污染挡板上的粘结料由于长时间积累而滑落钢板表面，形成粘结料积聚现象。在混合料摊铺时，过多的粘结料必将会由于混合料的高温（110~121℃）而形成“泛油”上涌现象（图 3-18）。过多的粘结料对于铺装层的密实度（空隙率）较为有利，但是间接增加了混合料的油石比，导致混合料各方面性能（稳定度与高温稳定性等）均有不同程度的降低。

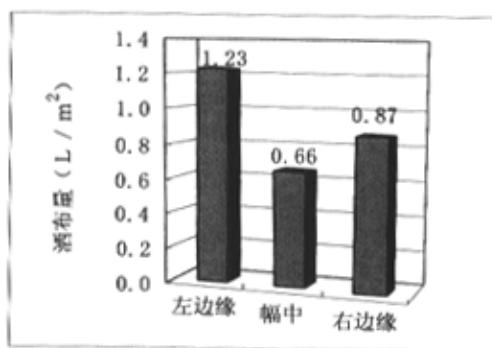


图 3-17 单幅钢板表面粘结料洒布量检测结果

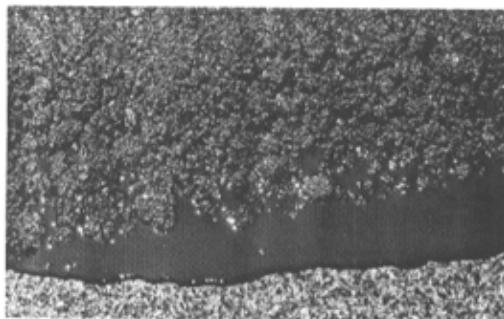


图 3-18 边缘处的过多粘结料

§3.3.3 其他因素

对环氧沥青混凝土施工影响较为严重的另外一个因素就是雨水或露水。

环氧沥青混凝土铺装层在施工时如果遇雨应该立刻停止施工，并将多余混合料废弃。但是雨水会影响已经洒布完成的粘结层，导致粘结层失效（固化等），为此需要根据实际情况确定是否需要补洒，而失效的粘结层在铺装层间形成薄弱层，影响铺装层使用质量。

在温差较大的季节进行施工时，会由于昼夜较大的温差而导致在粘结层表面凝聚露水，必将对铺装粘结料质量产生影响。因此，必须在环氧沥青混凝土施工过程中，切实按照施工实施细则进行，严格杜绝恶劣天气条件下施工。

§3.4 钢桥面环氧沥青混凝土铺装病害调查

钢桥面铺装是大跨径钢箱梁桥建设中最为关键的技术难题。环氧沥青混凝土铺装更不例外，如何保证环氧沥青混凝土在铺设到柔性较大的正交异性钢桥面板上后能够获得优越的使用性能，除了对混合料设计与施工进行严格控制外，还必须加强铺装层使用期间的调查，及时对铺装层所出现的问题进行汇总、分类与评价，为确定日后适时的养护与维修工作打下坚实的基础。

§3.4.1 调查内容与频率

经过本章内容的叙述可知，环氧沥青混凝土钢桥面铺装的病害主要分为裂缝类、鼓包类（鼓起开裂）以及外伤等三大类。对环氧沥青混凝土桥面铺装的调查主要需要检测铺装层表面状况，主要包括桥面铺装温度调查、破损状况调查、桥面铺装平整度调查与桥面铺装层的抗滑能力几个部分，如有必要可以钻芯取样，检测环氧沥青混凝土铺装强度值。

一、铺装层温度调查

作为钢桥面铺装的环氧沥青混凝土，其使用性能主要受外界环境（如极端高低温）的影响较大。因此，需要每年在寒暑期间测定其铺装层的温度，以为日后铺装层使用状况分析提供基础资料。

二、铺装层破损状况调查

环氧沥青混凝土钢桥面铺装层的破损状况调查可以参照普通沥青路面的相关调查方法与评价技术指标（综合破损率 DR）进行。但是由于环氧沥青混凝土桥面铺装的特殊地位与作用，必须采用人工巡查检测的调查方法，并对破损的病害铺装进行拍照备份，以便于日后查找对比。对于未发生任何破损的桥面铺装层，可以将检测频率放宽到每月一次。如果一旦

发现环氧沥青混凝土铺装层的裂缝等破损，除了必须立刻进行现场密封处理以外，还必须加强检测频率，以每两周一次为宜。

三、铺装层平整度调查

平整度是评价过往车辆通行舒适度的重要指标，一般采用国际平整度指数 IRI 进行评价。对于环氧沥青混凝土大跨径钢箱梁桥面铺装，由于其固化后的不流淌特性，成型后的铺装层平整度受外界影响较小，因此在测试时可以采用车载式记录设备（如颠簸累计仪）进行检测，如发现个别数据超出规范要求，应该进行局部抽检。局部小范围的抽样检测可以采用三米直尺或平整度仪进行。将检测结果换算成国际平整度指数 IRI 进行综合评价。

随着新型勘测设备的问世，可以采用激光平整度仪来测定桥面铺装的平整度，所测得的数据即为国际平整度指数 IRI。环氧沥青混凝土的平整度可以根据前一次的测试结果来决定其检测频率，如结果比较满意可以适当放宽检测频率，如每半年一次。

四、铺装层抗滑性能调查

大跨径钢箱梁桥面铺装的抗滑性能的评价指标可以采用摆值 BPN。可以派专人利用摆式仪在现场进行检测。抗滑性能的检查可以与铺装层平整度调查同时进行。

各项内容的检查频率如表 3-1 所示。

表 3-1 环氧沥青混凝土钢桥面铺装路况检查频率

调查内容	检查频率	备注
铺装温度	每年高低温季节月份集中调查。	人工检查 备案存档
铺装层破损状况	一般每月一次，一旦发现病害应该增加检查频率。	人工检查 拍照存档
铺装平整度	一般每半年一次。	测试车 备案存档
铺装抗滑性能	一般每半年一次。	摆式仪 备案存档

§3.4.2 养护与维修对策的决定

环氧沥青混凝土桥面铺装的养护与维修对策的决定应该根据路况调查的结果综合确定。

就目前国内的大跨径钢箱梁桥桥面铺装而言，主要病害为铺装层开裂与重车作用下的车辙病害。这两种病害对桥面铺装层的影响是十分致命的，裂缝的出现会导致雨水下渗，裂缝不断扩展，钢板锈蚀，最终导致铺装层整体崩溃。车辙的出现会直接导致车辙部位的铺装层厚度降低，出现开裂病害。对于环氧沥青混凝土桥面铺装而言，难以形成车辙病害，因此，对钢桥面环氧沥青混凝土铺装层所出现的裂缝病害必须进行及时处理，以现发现处理为宜。

如检测到环氧沥青混凝土铺装层抗滑性能降低时，可以考虑加铺一薄环氧罩面层以增加抗滑性能。

§3.4.3 修复材料与病害处理

由于环氧沥青混凝土的高强特性，对所出现的病害进行处理时应该选择适当强度或强度更高的修复材料进行局部缺陷的修复。相关修复材料及工艺研究参见第五章内容。

§3.4.4 环氧沥青混凝土钢桥面铺装日常养护

由于大跨径钢箱梁桥桥面铺装的重要性，必须加强对铺装层的日常养护。可以参照下面的规定进行。

1. 加强铺装状况调查，对发现的病害状况进行及时的总结，并进行相关维护处理，杜绝病害加剧发展。由于大跨径钢箱梁桥桥面铺装的特殊作用，对其铺装层所出现的病害（鼓包、开裂等）必须及时、快速的处理。所选择的材料必须具备高强、耐久、固化快以及施工操作简便等特性，以尽量减小由维修操作而对交通所造成的影响。

2. 对于发现铺装层上的异物要及时清扫，特别是过往车辆上掉落的螺丝钉等杂物，以杜绝异物在车辆荷载作用下影响铺装层出现坑洞病害。

3. 由于大跨径钢箱梁桥的特殊位置，受环境污染（灰尘等）影响较小，因此，对于桥面铺装的养护过程，除特殊情况外（如化学溶剂或燃油洒落等），最好不要洒水，特别是在高温季节。铺装层夏季高温的表面最高温度一般在 60℃以上，洒水会导致表面温度骤降，导致铺装层产生较大的温度应力，对铺装受力不利。

4. 虽然环氧沥青混凝土能够抵抗燃油与化学物质的侵蚀，同时能抵抗高温的作用。但是对于交通事故（车祸、火灾等）导致的铺装表面被燃油或化学物质污染时，必须及时进行处理，以防止污染临近结构。对于化学品污染的处理方法可以先洒砂、木屑或化学中和剂进行处理，清扫后再用大量的水进行冲洗，直至铺装表面洁净为止。对于火灾的处理方法，则需要根据火灾严重程度选择适宜的修复方法与工艺。

5. 严禁履带车或铁轮车直接在环氧沥青混凝土桥面铺装上行驶。

6. 严寒降雪季节来临时，应立刻按照部署计划进行除雪与防冻工作，由于大跨径钢箱梁桥桥面纵坡较大 ($>2\%$)，而且环氧沥青混凝土桥面铺装的空隙率较小 ($<3\%$)，能够有效防渗。因此，可以采取散布特殊融雪剂等防冻防滑材料。不建议散布氯化钠化雪，以降低对桥梁附属结构的腐蚀。

§3.5 环氧沥青混凝土铺装抗滑性能探索

用于大跨径钢箱梁桥桥面铺装的环氧沥青混凝土是一种悬浮密实结构的密级配类型的混合料，主要是满足桥面密封防水功能要求。大跨径钢箱梁桥需要满足大量的高速交通流安全、舒适、快速地通行。由于大跨径钢箱梁桥一般均是交通车辆跨越地区的要塞通道，交通量较大。为此，必须使得其桥面铺装在具备优良的使用性能的同时具有一定的抗滑性能。自然地，环氧沥青混凝土桥面铺装的抗滑问题就被人们提到议事日程上来。大跨径钢箱梁桥桥面铺装的抗滑性能主要取决于表面层的表面构造深度与集料纹理结构。

§3.5.1 国外使用情况

在 20 世纪 60 年代，针对桥面铺装进行一系列试验后，高温碾压的密级配环氧沥青混凝土被选择来用于美国当时一座正交异性钢桥桥面铺装，即圣马迪亚海湾大桥^[26]。1966 年，铺筑了一条试验段，并在 1967 年铺筑了剩余的 418000 平方英尺的钢桥面板。之所以选择环氧沥青混凝土，主要是考虑到其优良的抗疲劳开裂性能。

在铺装工作完成后，某些专家对这地区的交通安全进行了客观的评估，主要是由于其选用了当地的石灰岩集料。在此期间，人们认识到，在普通 AC 沥青混凝土中使用石灰岩作为集料不能满足对抗滑的要求，因为石灰岩的抗磨耗性较差。为此曾经提出一个新型抗滑检测方法，以确保交通安全。该段的环氧沥青混凝土铺装被进行了喷砂加糙、纹理化以及刻槽加粗处理，以提高抗滑性能，但据悉处理后的使用效果也不尽如人意。在此之前还有一座采

用环氧沥青混凝土铺装的桥梁。旧金山-奥克兰海湾大桥是美国承受交通荷载最严重的道路之一，是双向分离式桥梁体系，由左右两幅桥面板组成，每幅五个车道。

1963年，桥面板采用先前提到的耐久的环氧煤焦油结合料与细质硅砂碎片进行修复处理。自1963年以来，以英国TRRL为首的科研机构开展了大量的研究工作，主要致力于集料磨耗性能。与石灰岩类似，现在我们知道硅岩也会遇到和石灰岩相同的磨耗问题。除此之外，当硅砂被用于环氧表面敷料（不是混合料）时，某些硅砂岩也可能会出现“剥离”趋势，最终产生与铺装层剥落。

旧金山-奥克兰海湾大桥建成投入使用八~十年后，根据视觉立体检测，未来可能会由于表面集料的磨光、集料的脱落、剪切（以重车道最为严重）而导致表面抗滑性能有非常明显的降低趋势，同时，暴露在太阳下的环氧中的煤焦油易于脆化，从而引起顶板粘结力部分丧失的现象。

在美国，针对环氧沥青混凝土这种新型沥青混凝土铺装类型，为了研究其抗滑性能，特意提出了一个新的评价方法。新的试验方法仍然采用原先的拖车试验法，但是试验结果包括四个测定数值，使用表面轮纹明显的轮胎测定60km/h和90km/h两种速度条件下的抗滑系数，另外两个数据是光滑轮胎所测定的同样速度条件下的抗滑系数。

对于光滑轮胎而言，抗滑性能主要取决于路面的纹理结构（构造深度），以消除水膜使轮胎与集料充分接触，因此，光滑轮胎所测得的数据是路面抗滑特性的最佳表现。如果将所测得的四个数据平均，就产生了综合抗滑系数CSN。综合抗滑系数是反应速度梯度与路面抗滑特性的综合体现，CSN数值越高，路面的抗滑性能越好。

为了检验这种方法的适用性，美国材料方面的人员将此方法应用与测定旧金山—奥克兰海湾大桥(San Francisco-Oakland Bay Bridge)通车十二年的原煤焦油环氧沥青混凝土表面处理层的抗滑性能。测试结果如图3-19所示。

$$\text{综合抗滑系数 } CSN = 25 = \left(\frac{(32 + 27)_{\text{棱纹}}}{(22 + 18)_{\text{光滑}}} \right) / 4.$$

试验结果表明，煤焦油环氧沥青混凝土表面处治层的构造较差，抗滑性能较低。

为了进行对比分析，针对通车一年的新型环氧沥青混凝土进行了同样的试验，新型环氧沥青混凝土是采用优质耐磨的玄武岩集料。

$$\text{综合抗滑系数 } CSN = 71 = \left(\frac{(77 + 69)_{\text{棱纹}}}{(71 + 66)_{\text{光滑}}} \right) / 4.$$

由新型环氧沥青混凝土的试验结果可知，光滑轮胎所测得的数据与粗糙棱纹轮胎数据比较接近，这说明新型的环氧沥青混凝土铺装层具有较好的表面构造，抗滑性能较高。

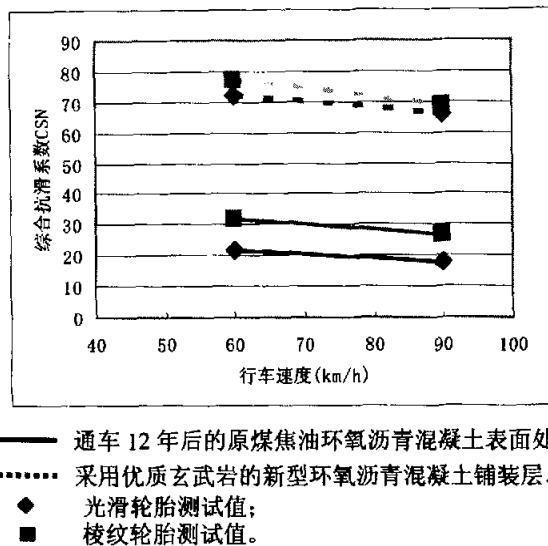


图 3-19 旧金山—奥克兰海湾大桥抗滑性能测试结果

§3.5.2 国内使用情况

参照国外对环氧沥青混凝土桥面铺装研究的成果，并根据大量的材料比选研究，最终选择优质坚硬的玄武岩作为环氧沥青混凝土集料。国内几座大跨径正交异性钢桥面板桥梁桥面铺装所采用的集料相关技术指标如表 3-2 所示。

表 3-2 国内钢桥面环氧沥青混凝土铺装用集料相关技术指标

序号	石 料 产地与名称	洛杉矶 磨耗值 (%)	压 碎 值 (%)	磨 光 值	吸 水 率 (%)	表 观 密 度 (g/cm ³)	抗压 强 度 (Mpa)	粘 附 性
1	句容方山玄武岩	12.6	11.3	50	0.9	2.968	112	4 级
2	句容花山玄武岩	10.6	8.6	52	1.0	2.995	138	4 级

由表中技术数据可知，所选用的玄武岩集料具有非常优异的抗磨耗性能与力学性能，完全能够胜任大跨径钢箱梁桥面铺装的重任。

§3.5.3 问题提出与对策

我们对国内某桥的环氧沥青混凝土进行了跟踪调查，主要检测其桥面铺装混合料的抗滑性能。测试结果如表 3-3 所示。

由表 3-3 中测试结果可知，建成后的测试结果只能勉强达到规范要求的一般高速公路使用要求，而使用两年后的表面轮迹带上的铺装层抗滑系数有明显的增长，这与一般的路面结构抗滑性能发展趋势完全相反，即抗滑性能随时间推移而逐渐增加。根据测试结果可以发现，对于使用两年后的轮迹带间的铺装层而言，其表面抗滑系数与刚建成时相比差异较小，基本没有变化。

表 3-3 环氧沥青混凝土桥面铺装抗滑性能检测结果

项 目		摩擦系数 (BPN)
建成后		47
使用两年后	轮迹带上	53
	轮迹带间	49

在经过大量的资料调查并进行了相关咨询后了解，裹覆在环氧沥青混凝土铺装层的表面集料的环氧沥青结合料易于受到气候环境的氧化作用，这在环氧罩面技术中称为“灰粉化”作用。在交通荷载作用下，尤其是在潮湿环境中的高速车轮引起的高压水作用下，环氧沥青混凝土表面的氧化灰粉层将逐渐被磨损，从而裸露出表层的集料。这种氧化机理需要太阳光的紫外线的催化剂作用，因此，在表面铺装层发生这种作用的同时，铺装内部的环氧沥青结合料还是受到集料的很好的保护，“灰粉化”现象只是在铺装表层发生。

普通的沥青混凝土与热固性环氧沥青混凝土的最大区别在于，在夏季高温季节路面没有沥青从集料间隙中传送的“油份”迁移现象（泛油）。高温季节中普通 AC 混凝土路表出现的明显闪亮色泽就是这个原因导致的。对于热固性环氧沥青混凝土而言，沥青已经被“分装”进入分散相体系，因而不会在高温时出现“油份”迁移的现象，这对于确保整体铺装结构内部的优异混合料性能有非常重要的意义。也正是由于热固性环氧沥青混凝土这种高温油份不迁移的优点，才使得只是表面环氧沥青被“灰粉化”，而其他部位的混合料保存完好。

这种理论可以合理地解释轮迹带上与轮迹带之间的铺装层不同摩擦系数的原因。主要是因为轮迹间的铺装层没有受到行车荷载的磨损，而表面的“灰粉”仍然裹覆在表层集料颗粒表面，从而导致其摩擦系数较小。

§3.5.4 铺装层抗滑性能发展趋势

根据我们检测的结果可知，环氧沥青混凝土抗滑性能在较短期限内表现出随时间而增加的趋势，具体这个期限能维持多长时间，应该根据环氧沥青混凝土铺装层表面的“灰粉化”程度，同时还与混合料空隙率、油石比等密切相关。

裹覆在环氧沥青混凝土表面集料上的结合料由于“灰粉化”作用，在行车荷载磨耗作用下而裸露出洁净的集料表面结构，从而增加了混凝土表面的抗滑性能。虽然裸露的表面玄武岩集料具有优异的抗磨耗性能，但还是在行车荷载作用下逐渐被磨损，只是这种磨损发展速度非常慢，可能是好几年时间。为此，我们调查了国外部分使用环氧沥青混凝土作为桥面铺装材料的桥梁养护资料，调查结果如表 3-4 所示（试验根据 ASTM E274 标准进行）。

表 3-4 国外某桥环氧沥青混凝土抗滑性能检测

检测时间	摩擦系数 (NPS)
第一年	40
通车后二~六年	47
通车七年后	43

由表 3-4 中调查结果可知，环氧沥青混凝土桥面铺装的表面摩擦系数在通车两年至六年期间达到一个最大值，即抗滑性能逐渐增大。通车七年后检测的摩擦系数表明，铺装层的抗滑性能略有下降，但是仍比刚建成时的抗滑性能好。环氧沥青混凝土铺装层的抗滑性能出

现这种峰值的原因与集料的耐磨性有密切关联。刚建成后的铺装层由于其密级配混合料类型决定了其抗滑性能较差，通车两年后的铺装表层的环氧结合料由于“灰粉化”与车轮磨耗综合作用而导致抗滑性能有明显的提高，并维持了相当长一段时间，随后由于集料逐渐被车轮磨耗而导致其抗滑性能逐渐降低。环氧沥青混凝土铺装的这种“灰粉化”～集料磨耗综合作用确保了铺装层良好的抗滑功能。因此，对于大跨径钢箱梁桥桥面环氧沥青混凝土铺装所用集料，必须采用耐磨耗的高强集料，这一点对于上面层材料的选择尤为重要，是影响环氧沥青混凝土桥面铺装抗滑性能的重要因素，必须在混合料设计时慎重考虑。

§3.6 小结

环氧沥青混凝土铺装层表现出的主要缺陷如表 3-5 所示。铺装层早期所表现出的某些病害会由于表面结合料的“灰粉化”～车辆荷载磨耗的综合作用而逐渐淡化（不明显）。

尽管环氧沥青混凝土在使用期间会出现某些无法预料的病害，但与其他同类型的桥梁桥面铺装层使用状况相比，环氧沥青混凝土铺装层整体表现出非常优异的使用性能。

环氧沥青混凝土是一种性能优异的铺装材料，特别适合于大跨径正交异性钢箱梁桥桥面铺装。但是环氧沥青混凝土受施工环境与工艺的影响较大。因此，必须在思想上高度重视，在施工前严格制定施工工艺，检查每道施工工序，杜绝存在影响铺装质量的隐患，切实将环氧沥青混凝土的优越使用性能发挥出来。

表 3-5 环氧沥青混凝土钢桥面铺装主要病害一览

病害名称	主要症状	成因
鼓包	铺装层局部范围的“隆起”现象，还伴有隆起铺装表面的开裂。不及时处理将导致裂缝加速发展	施工时无法避免的雨水、汗水等逐渐蒸发而形成一定的压力，将铺装层顶起
外伤 (凹槽、坑洞)	铺装层表面凹坑、划痕等	车辆安全问题引起的硬物冲击铺装层表面而导致的铺装层外伤
开裂	铺装层表面的无规则非结构裂缝	——
其他	铺装层出现不同程度的缺陷	燃油等对铺装表面的污染，或火灾对铺装层的不良影响等

第四章 环氧沥青混凝土补充试验研究

§4.1 概述

大跨径正交异性钢箱梁桥桥面铺装历来都是困扰人们的棘手问题。国内大多数正交异性钢箱梁桥桥面铺装均出现不同程度的破损，个别桥梁铺装已经进行了第二次大修。如何确保桥面铺装的优异使用性能，对于延长桥梁结构使用寿命有非常重要的意义。

完全固化后的环氧沥青混凝土桥面铺装具有较高的强度；优越的抗腐蚀性能；抗燃油性能与高低温下的柔性特性。

在第三章中已经介绍了环氧沥青混凝土在早期和使用期间可能表现出来的病害状况，这些病害有些是在施工期间克服的（例如加强施工质量控制与关键点控制），有些是难以避免的。为此，必须尽可能掌握各种病害机理，对症下药，对铺装层出现的病害进行及时处理，防止病害加剧。

在将环氧沥青混凝土引进国内正交异性钢箱梁桥桥面铺装之前，对于环氧沥青材料及环氧沥青混合料进行了相关的试验研究，主要包括常温下（23℃）环氧沥青材料的哑铃状试件的拉伸试验；60℃下的混合料马歇尔试验；高温（60℃）、低温（-15℃）与常温（23℃）下的复合梁疲劳试验以及高温（70℃）车辙试验等研究。研究结果表明，环氧沥青混凝土具备优异的抗疲劳特性、优越的高温稳定性、高强及耐久的特性，完全可以满足大跨径钢箱梁桥桥面铺装的特殊使用环境与条件，为此将环氧沥青混凝土引进并成功应用于南京长江第二大桥桥面铺装。

尽管我们的试验研究囊括了沥青混合料的各个方面试验项目，但是目前我们的跟踪调查结果显示，某些方面的试验条件还是不够苛刻，以导致对环氧沥青混凝土实际使用条件下的特殊性能认识不足。为此，需要进行补充试验研究与分析。

§4.2 拉伸试验

在第三章中叙述过，环氧沥青混凝土在使用期间会由于紫外线的“灰粉化”作用而造成表面环氧沥青氧化剥落，从而导致表面粗糙集料裸露而间接增加环氧沥青混凝土铺装表面的抗滑性能。但是，必须了解这种“灰粉化”作用对环氧沥青本身的影响，为此，需要进行特殊的环氧沥青拉伸试验。

拉伸试验仍然采用哑铃状试件进行。将成型完并完全固化后的试件放在与桥面铺装相同的外界自然环境中，与铺装层受同等条件的紫外线辐射作用，测定其拉伸强度与断裂延伸率，试验方法与各参数均与原先拉伸试验相同，即23℃，500mm/min速度拉伸。

另外，由于铺装层在使用期内所承受的外界自然条件以极端高、低温为最不利温度，为此，可以通过高、低温拉伸试验来评估环氧沥青在极端不利温度条件下的性能，可供环氧沥青混凝土性能分析时参考。由于时间与试验设备的限制，拟定的高、低温拉伸试验取0℃与60℃，低温下的拉伸试验速率为50mm/min。特殊的拉伸试验结果如表4-1所示。

表 4-1 环氧沥青结合料特殊拉伸试验结果

试 件	拉伸强度(MPa)	断裂延伸率(%)	试验条件
原始试件	2.22	249	23℃,500mm/min
成型三个月	2.13	220	23℃,500mm/min
成型六个月	1.98	201	23℃,500mm/min
低温拉伸	4.88	145	0℃,50mm /min
高温拉伸	1.16	380	60℃,500mm/min

由表 4-1 中试验结果可知, 经历不同时间紫外线作用后的环氧沥青结合料的断裂强度与延伸率有不同程度的降低, 主要原因是由于紫外线辐射试件表面, 从而导致拉伸试验时局部应力集中, 形成强度降低的现象, 但可以肯定试件内部的结合料性能比较稳定。由于紫外线仅仅作用在试件表面, 因此, 长期的拉伸强度与延伸率试验结果必将趋于稳定。

环氧沥青混凝土与普通沥青混凝土不同, 主要在环氧沥青混凝土在高温时不会出现沥青在集料框架结构内部“迁移”, 即通常的泛油现象。环氧沥青在高温下只会变软, 而不会流动, 因此, 高温下的拉伸试验结果导致其拉伸强度降低, 而断裂延伸率大幅度增加。而低温下的沥青材料会变脆, 这也是普通沥青路面在低温下很容易出现开裂病害的主要原因。环氧沥青在温度降低时其拉伸强度值比常温下拉伸强度要高, 但是其断裂延伸率较低, 这主要是环氧沥青体系内约 80% 沥青所表现出的性能, 即低温下沥青质变脆、变硬。

由于环氧沥青材料并非普通的沥青, 因而其性能与普通沥青有较大差异。为了解其物理力学特性, 可以进行环氧沥青的拉伸试验。试验是在室内成型标准的环氧沥青哑铃状试件, 然后进行标准温度下(23℃)的拉伸试验(图 4-1)。但是拉伸试验受环境(温度、拉伸速度以及环境湿度等)的影响较大, 甚至不同试验人员成型的试件也可能会得到差异较大的试验结果, 图 4-1 所示的是美方成型后邮寄过来的试件与我们室内自己成型试件在相同试验条件下的拉伸试验曲线对比结果。

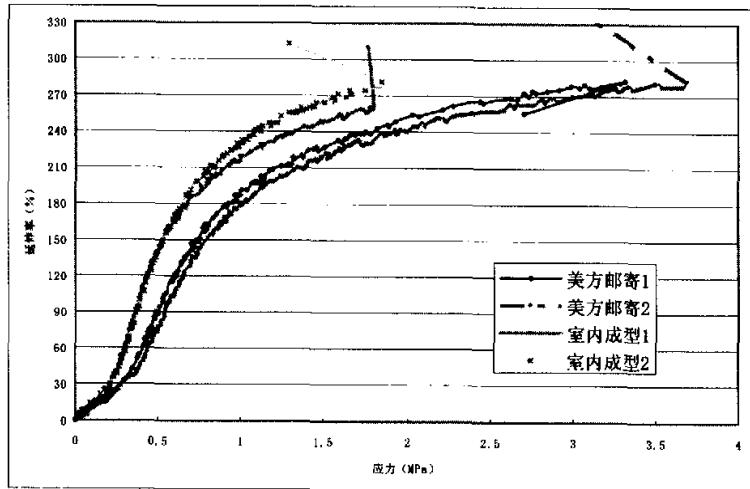


图 4-1 不同成型试件的拉伸结果对比

由图中的试验结果可知，环氧沥青拉伸过程有较为明显的“胡克区域”，该区域内的拉伸曲线服从胡克定律，即应力应变成正比，也即环氧沥青在此区域内表现出一定的弹性性能。另外，从不同成型方法（操作人员）的试验结果来看，不同成型方法对试验结果的影响差异较大（强度相差两倍左右）。因此，需要在试验过程中切实关注试验方法以及试验所处的环境温度、湿度等条件，力求消除环境对试验结果的影响。

§4.3 马歇尔试验

环氧沥青是一种热固性材料，在温度升高时只会变软，而不流动，高温变软的特性可以由高温拉伸试验得到验证。根据高温拉伸试验结果可知，环氧沥青结合料的拉伸强度也有一定程度的降低，这势必会影响混合料的马歇尔强度。

根据润扬长江公路大桥试验桥钢桥面环氧沥青混凝土桥面铺装温度的实际检测结果，夏季桥面铺装的极端最高气温可达 63~65℃（见图 4-2）。在此温度下，变软的环氧沥青混凝土的马歇尔稳定度值也会有所降低，而室内试验所采用的常规马歇尔试验方法是 60℃下的试验，不能完全反映实际使用环境中的桥面铺装状况。为此，考虑将马歇尔试验温度提高到 70℃，加载速率不变，以考察极端高温下的铺装强度。补充的马歇尔试验结果如表 4-2 所示。

另外，标准的马歇尔试验中对环氧沥青混凝土试件固化条件的要求是置于 120℃的烘箱中固化 4 小时，即能达到要求的马歇尔稳定度指标。但对于固化完成后的试件强度情况没有再进一步的试验。为了跟踪评价已经完全固化后的环氧沥青混凝土强度指标，通过长期固化试验来模拟固化后的环氧沥青混凝土强度性能，在试验过程中，分别测定不同固化时间的马歇尔试件强度指标，结果如图 4-3 所示。

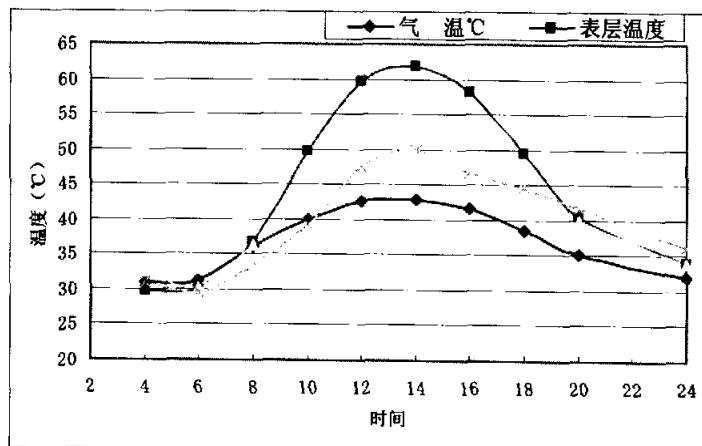


图 4-2 夏季环氧沥青混凝土桥面铺装温度变化情况

表 4-2 补充马歇尔试验结果

试验温度	稳定度 (kN)	流值 (0.1mm)	固化条件
60℃	56.3	33.1	120℃固化 4 小时
70℃	45.5	39.6	120℃固化 4 小时

由表 4-2 中补充的高温马歇尔试验结果可知, 当温度升高 10℃, 马歇尔强度值降低约 19%, 流值增大约 20%, 但是仍然满足相关技术指标要求, 即在桥面铺装极端高温条件下, 环氧沥青混凝土铺装层仍具备较高的强度性能, 满足使用要求。

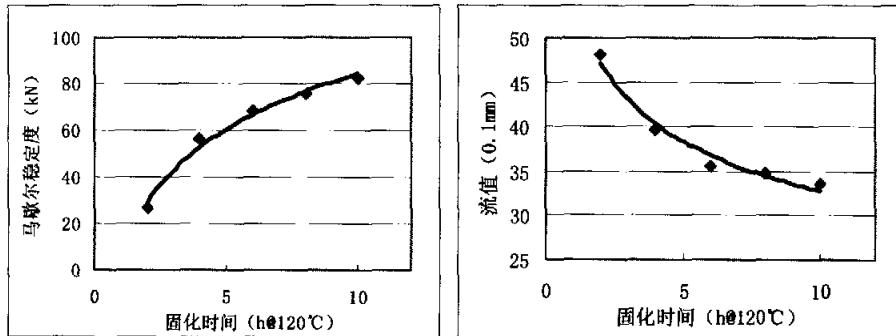


图 4-3 马歇尔稳定度、流值于固化时间关系曲线

通过不同固化时间的马歇尔试验, 不仅可以了解环氧沥青混凝土在固化过程中的强度发展情况, 而且还可以通过延时固化来模拟已经达到固化强度后的环氧沥青混凝土强度发展情况。

由图 4-3 中的试验结果可知, 环氧沥青混凝土在初期固化阶段(2~4 小时内) 的强度发展较快, 完全固化后(四小时), 其强度发展速率变缓, 但强度值仍有较大的增长。相对而言, 流值表现出类似的规律, 总体趋势随固化时间增加而逐渐降低。

图 4-3 中的后期延时固化结果表明, 如果温度条件适宜, 环氧沥青混凝土在达到规范要求的马歇尔强度后其强度仍在逐渐增加。因此, 可以推断, 投入使用期时间越长的环氧沥青混凝土铺装, 其性能越稳定, 强度越高, 由于强度不足引起破坏的风险也越低。

众所周知, 环氧沥青混凝土是一种性能优越的桥面铺装材料, 但是其施工受环境温度、气候以及自身混合料温度与时间等因素影响较大, 必然给环氧沥青混凝土施工带来某些困难, 有些甚至会影响混合料使用期的性能。影响混合料性能的主要因素有以下几个方面:

1. 拌和楼生产控制不严, 导致混合料级配等出现较大偏差;
2. 由于特殊情况而导致的混合料摊铺时间变更(如受天气影响等);
3. 不可忽略的其他因素(如因机械问题而影响混合料配比精度等)。

为了了解环氧沥青混凝土在不同影响因素下的性能变化情况, 必须对相关的影响因素进行试验研究。

§4.4 时间对环氧沥青混合料性能的影响研究

环氧沥青混合料对温度和时间的要求较普通沥青混合料严格, 是施工控制过程中的重要指标, 也是施工难点所在。因此, 掌握不同温度下的混合料成型时间对环氧沥青混凝土性能的影响, 对桥面铺装工程的施工质量控制具有十分重要的指导意义。

为了评定不同成型时间对环氧沥青混凝土性能的影响, 特此进行超时马歇尔试验(油石比为 6.5%), 测定其相关物理指标, 以对比分析延时成型的马歇尔试件性能变化情况, 试验结果如表 4-3 所示。

由表 4-3 中的试验数据可知, 超时成型的马歇尔试件空隙率随时间的延长而逐渐增大, 主要是由于超出最佳成型时间的混合料由于环氧沥青粘度较大, 从而导致在击实成型时无法达到最佳的压实状态, 导致混合料空隙率的增大。从固化后的最终强度角度来看, 强度指标也有较明显变化, 主要是由于空隙率过大而造成的。流值总体上有下降的趋势, 表明混合

料的变形能力逐渐降低。

表 4-3 成型时间对马歇尔试验结果的影响

成型温度 (℃)	最佳成型时间 (min)	成型时间 (min)	空隙率 (%)	稳定性 (kN)		流值(0.1mm)	
				未固 化	固 化	未固 化	固 化
116	54~74	56	2.0	6.2	56.5	38.5	33.6
120	46~60	72	4.6	5.8	50.3	45.0	39.2
118	49~66	72	4.1	6.1	50.6	43.3	32.2
121	45~57	72	4.3	6.8	47.2	38.5	33.8
115	55~76	33	1.6	5.6	56.8	40.2	36.6

根据表中提前击实的混合料数据可知，提前击实的混合料试件的空隙率较小，主要是由于混合环氧沥青的粘度较低，成型时单位混合料接受的击实功较大，因此成型试件效果较佳。从不固化马歇尔强度来看，其稳定性值较低，主要是因为混合料成型时的初始粘度较低而导致的，但不影响固化后的最终强度值，从一定程度而言，如果在混合料的摊铺过程中，由于某些特殊原因为避免较大的经济损失而不得不提前摊铺是可行的，但必须保证混合料的固化时间，以确保混合料强度增长。

总之，混合料成型时间的延长，会导致铺装空隙率较大，且混合料强度也有不同程度的降低，必将导致铺装层渗水现象，从而影响铺装使用寿命（抗疲劳性能大大降低）。混合料成型时间过早，会导致铺装层早期强度较低，影响铺装层强度增长速率，间接影响通车时间。

§4.5 温度对环氧沥青混合料性能的影响研究

温度决定环氧沥青的粘度，直接影响到混合料的和易性及施工质量。由于碾压不充分的原因导致的混合料不密实的可能性较小，影响混合料摊铺碾压密实度的本质原因是由于混合沥青的粘度过大。导致粘度过大主要有两方面原因，一是由于温度过低而导致的混合料粘度过大；二是由于混合料超出最佳摊铺时间而导致的混合料反应剧烈引起的粘度增大。过低的混合料温度可能会影响混合料早期强度的形成，而且会给混合料摊铺碾压带来一定的风险，即无法压密。过高的混合温度也会导致环氧树脂的反应速度过快，从而缩短了混合料的最佳摊铺时间，影响摊铺质量。因此，温度对环氧沥青混合料的影响是不可忽视的。

为了评价混合料温度对环氧沥青混凝土性能的影响，进行不同温度条件下的马歇尔试验，检测其物理指标的变化情况。其中超高温时的混合料容留时间按照 30 分钟考虑。超低温条件下的马歇尔试验按照 110℃下的混合料最佳成型时间进行。试验结果如表 4-4 所示。

由表 4-4 中试验结果可知，高温条件下的 30min 成型未固化试件的马歇尔强度值较稳定，且固化后的试件强度等物理指标也较稳定。但高温条件下超长时间（50min、127℃）的马歇尔试件由于环氧沥青反应粘度较大而导致成型后空隙率较大，未固化试件的初期强度值也较低，主要是因为混合料结构不密实（空隙率过大）而造成的，且固化后的试件也由于类似原因而出现马歇尔稳定性值较低。由此可见，严格控制混合料的温度对保证混合料摊铺质量至关重要。对于因非材料因素（组分比例失误除外）而超出规定高温要求的混合料，应该提前进行摊铺操作，以确保混合料摊铺质量。

表 4-4 成型温度对马歇尔试验结果的影响

成型温度 (℃)	成型时间 (min)	空隙率 (%)	稳定性(kN)		流值(0.1mm)	
			未固化	固化	未固化	固化
123	33	2.3	6.3	50.4	39.0	35.6
125	32	2.2	6.8	46.4	40.7	37.2
128	31	2.6	7.9	46.8	36.3	33.3
127	50	4.2	5.5	48.2	33.2	31.7
106	70	1.8	5.3	54.9	39.2	38.2
108	70	1.6	5.8	53.3	40.9	37.3
106	70	2.1	5.2	55.7	38.5	36.6

由表中的超出低温要求的试验数据可知，混合料的空隙率指标均较小，初期不固化强度较低，但从固化试件的强度来看，其最终强度指标完全满足相关技术要求，但可以预知的一点是：混合料自然固化的强度增长速率较慢。对于超出混合料低温限制的混合料，由于马歇尔试验成型过程较短，混合料击实完成后的混合料温度仍然较高（约 70~80℃），与实际桥面铺装施工过程大相径庭。实桥铺装过程中的碾压过程时间较长，因此，对于初压与终压的混合料温度控制有较大难度，必须在实际操作中注意避免。

§4.6 级配对环氧沥青混合料性能的影响研究

用于大跨径钢箱梁桥的桥面铺装结构必须满足严格密水要求，这就限制了环氧沥青混凝土桥面铺装的级配只能采用密级配结构类型。

设计的目标配合比再经过拌和楼的生产配合比调整，即可以正式进行混合料生产。确保拌和楼级配稳定，是关系环氧沥青混合料质量的关键。纵观国内几座桥梁环氧沥青混凝土桥面铺装过程中的跟踪抽提试验结果，集料级配波动范围主要集中在 4.75mm 粒径以下的部分（尤其是 2.36mm 粒径），详细的级配曲线如图 4-4 所示。

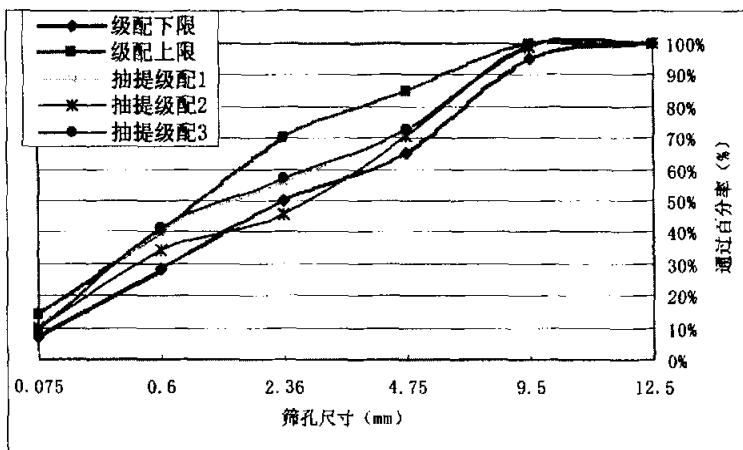


图 4-4 环氧沥青混合料生产抽提结果

为了评价级配对环氧沥青混凝土性能的影响，为此选取抽提级配 2 与抽提级配 3 以及上下限级配进行马歇尔试验，级配如表 4-5 所示。

表 4-5 选取试验级配

筛孔尺寸 (mm)	通过百分率(%)			
	抽提 2	抽提 3	下限	上限
12.5	100.0	100.0	100	100
9.5	99.1	99.7	95	100
4.75	70.6	72.9	65	85
2.36	45.4	57.1	50	70
0.6	34.3	41.4	28	40
0.075	9.7	9.5	7	14

由表中的级配可知，两种试验级配分别是 2.36mm 与 0.6mm 粒径的通过百分率分别超出现级配上下限要求，选取这两种级配主要是为评价实际施工时对某个粒径档的级配失去控制时对混合料的性能影响。同时我们还选择了级配范围上下限进行试验对比油石比统一采用 6.5%，具体试验结果见表 4-6 所示。

表 4-6 不同级配环氧沥青混合料的马歇尔试验结果

级配情况	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	稳定度 (kN)	流值(0.1mm)
级配中值	2.564	2.1	55.5	38.3
抽提级配 2	2.556	2.5	51.5	37.1
抽提级配 3	2.557	2.4	50.1	39.6
级配上限	2.581	2.6	49.9	35.7
级配下限	2.549	2.0	53.8	36.5

由表中试验结果可知，混合料个别级配小范围内的波动对混合料马歇尔强度等指标影响较小。对于级配较粗的混合料类型（如级配下限），其混合料强度值比细级配类型混合料略高，主要是由于细级配混合料的最佳油石比可能比 6.5% 大，因此影响到混合料的强度。对于级配较细的混合料类型（如级配上限），由于其理论密度偏大（约 2.651g/cm³），因而出现空隙率较大的情况。为了进一步评价级配波动对混合料的影响，建议进行不同级配的混合料疲劳试验。

另外，环氧沥青混凝土中的集料采用的是优质耐磨玄武岩，其级配是在美国推荐级配的基础上略微变更，如表 4-7 所示。

表 4-7 环氧沥青混凝土集料级配

筛孔尺寸 (mm)		16	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过百分率 (%)	美方推荐	100	95~100	80~95	58~75	-	20~35	7~14
	实际级配	100	100	95~100	65~85	50~70	28~40	7~14

由表中级配可知，在控制级配过程中，我们只对表中的几个粒径范围的通过百分率进行监控，但是在实际生产过程中，必须注意提防其他粒径范围的通过百分率超出要求的级配范围，这一点可以从如图 4-4 所示的级配图上清楚的反映出来。

由图中曲线可知，由于对集料级配的监控点中没有明确提出 0.3mm 与 0.15mm 等粒径的通过百分率的要求，但是在实际集料配制过程中确实存在这个问题，即混合料集料级配可能在这几个粒径突然超出范围，而在其他点级配又回到控制点要求以内，这如果按照表 4-7 中的集料级配要求是无法检测出来的，因此，应该加强对环氧沥青混凝土集料级配的控制点要求，杜绝在混合集料中发生这种变异现象。

§4.7 抗污能力试验

环氧沥青混凝土材料是一种特殊的沥青混合料，可不同程度地抵抗燃油与高、低温的侵蚀。凭借其优越的路用性能因而越来越多地应用于大跨径钢箱梁桥面铺装中。为了评价环氧沥青混凝土的抗燃油污染能力，进行燃油浸泡后的马歇尔试验，试验首先成型马歇尔试件，由于新摊铺完成的铺装层在养护期内禁止车辆通行，因此试验只针对固化后试件进行。由于汽油的高挥发性，滴漏在路面的汽油对路面的损伤较小，考虑到极端不利条件，将固化后的试件放于汽油中浸泡不同时间，再测定马歇尔试件强度值，以此评定环氧沥青混合料的抗燃油污染能力，试验结果如表 4-8 所示^[26]。

表 4-8 抗污染能力试验结果

60℃汽油浸泡 时间 (h)	马歇尔稳定度 (kN)	
	环氧沥青混凝土	AC-16I
未浸泡试件	57.3	11.8
4	44.5	3.1
16	43.6	6h 后崩裂溶解
20	43.1	

由表中的试验结果可知，环氧沥青混凝土在汽油浸泡后的前 4 小时内强度值有较大的降低，但随着时间的推移强度值降低的幅度明显减小，而强度值也能满足环氧沥青混凝土新建桥面铺装层的强度指标要求。相比之下普通的 AC 混合料在浸泡 4 小时后强度值已经降低到不能满足一般高速公路通车标准，而在 6 小时后 AC 混合料则完全被融解。通过本次试验，验证了环氧沥青混凝土具备较好的抗燃油污染能力。

§4.8 组分比例对环氧沥青性能的影响研究

由于环氧沥青结合料的两组分比例是 A:B=1:5.85，因而，在环氧沥青混凝土正式生产过程中需要借助专用组分混合机。但是，在混合料的正常生产过程中，混合机有可能会出现某些故障而导致配比不失调，为了评价比例失调后的混合物性能，特此进行不同配比的拉伸试验，试验条件与常规拉伸试验相同，结果见图 4-5、图 4-6 所示。

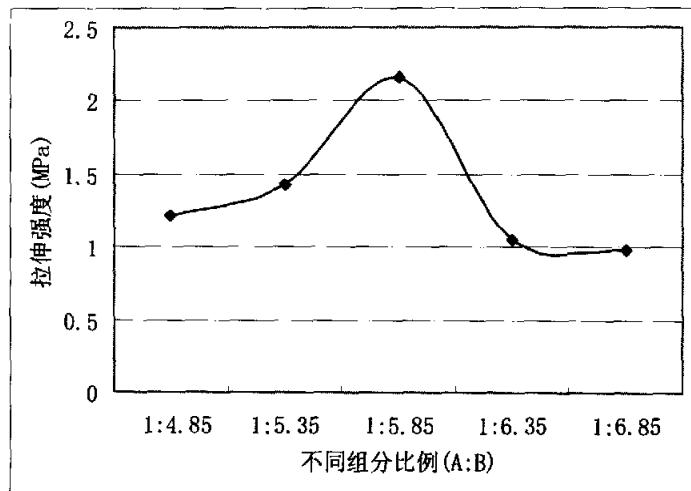


图 4-5 不同组分配比的拉伸强度

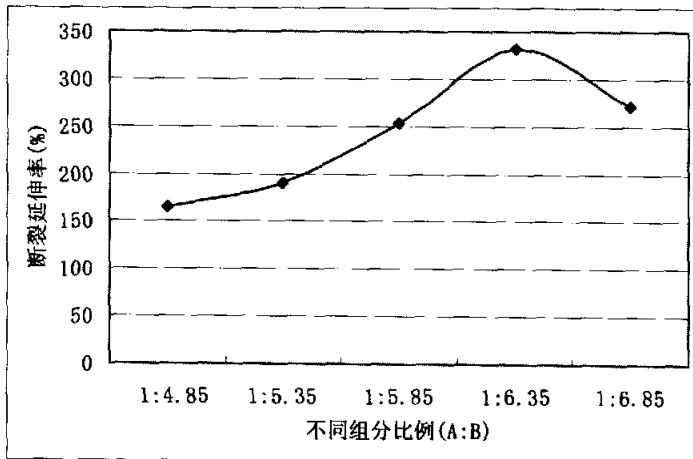


图 4-6 不同组分配比的断裂延伸率

由图中试验结果可知，随着组分比例的降低（树脂增多），环氧沥青的拉伸强度和断裂延伸率均明显降低，这表明环氧沥青变脆，主要是因为树脂用量增大后导致环氧沥青内部的化学反应过于剧烈，导致混合材料变脆。随着配比逐渐增大（树脂用量降低），混合沥青的断裂延伸率逐渐增大，拉伸强度曲线出现拐点，即有一个强度最大值，而此时对应的断裂延伸率仍然继续增大。

在试验过程中可以发现，配制不同组分比例的环氧沥青材料时，树脂用量较多的混合物固化时间较快，这主要是由于剧烈的化学反应而造成的。由试验结果可知，组分配比对环氧沥青混凝土的性能有较大的影响。为了确保所拌制的环氧沥青混凝土的质量，就要求混合机的配比达到规定的精度。因此，在每个工作日开始拌制混凝土前，应该先将混合机进行标定，即分别将 A、B 组分泵送到空桶内，称量其各组分重量，检测其组分比例，然后再进行混合料的正常生产。

§4.9 小结

本节通过对环氧沥青的材料性能检测以及最不利因素条件下的混合料性能检测，深入了解环氧沥青混凝土对环境的依赖性以及如何确保环氧沥青混凝土在生产过程中的质量控制，不至于影响钢桥面铺装的使用性能。

通过本章的相关内容研究，使我们在认识环氧沥青混凝土的基本性能的基础上深入了解环氧沥青混凝土受各种不利条件影响后的性能变化情况，并为实际桥面铺装施工过程中由于某些无法避免的因素而引起的突发情况的应急处理提供了一定的依据。

第五章 环氧沥青混凝土钢桥面铺装病害 修复技术研究

§5.1 概述

在第三章中阐述了环氧沥青混凝土铺装层运营中所表现出的主要病害症状。为了避免病害的加剧发展，必须对某些病害进行及时处理。针对不同的病害状况，必须采取不同的修复材料。但由于环氧沥青混凝土是一种高强性能的铺装材料，一般的道路修补技术与材料无法适应其苛刻的使用条件与环境。为此，必须针对环氧沥青混凝土特性及不同的病害选择不同的修复材料。

§5.2 裂缝修补

裂缝是钢桥面铺装层所表现出的最主要的一种病害，前面章节中已经阐述过环氧沥青混凝土与国内其他类型桥面铺装材料（如浇注式沥青混凝土铺装）出现开裂病害的机理完全不相同，环氧沥青混凝土桥面铺装层出现开裂病害是非结构性、非功能性的，因而裂缝的位置与外形尺寸等均无规则可循。

文献【27】、【28】中指出，出现裂缝后的铺装层表面最大拉应力与应变均有不同程度的增加，也即出现所谓的应力集中现象，若不及时对出现的裂缝进行处理，铺装表面的裂缝有进一步扩展的趋势。

裂缝病害对钢桥面铺装的影响是不容忽视的，低温季节冻胀、雨水下渗与行车荷载高压作用会造成裂缝的急剧发展，因此，必须及时对铺装层所出现的裂缝病害进行修复处理，杜绝病害加剧发展。

§ 5.2.1 修补材料及性能

在对国内某桥环氧沥青混凝土桥面铺装调查过程中所发现的裂缝病害，裂缝出现的位置杂乱无章，裂缝的形状也没有规律可循，而裂缝的宽度均较小(0.2~0.3mm)，一般长度为5~15cm。然而，由于出现裂缝的铺装层在荷载作用下是应力集中的薄弱点，因而裂缝必然会展开。在调查过程中发现，环氧沥青混凝土铺装层表面裂缝的发展速度较慢，个别由于鼓包导致的裂缝，由于其裂缝的产生机理与一般裂缝完全不同，是由于行车荷载作用在底面脱空的铺装层而导致的铺装层压碎塌陷，初期鼓包裂纹在雨水和行车荷载的综合作用下，发展速度较快，最终形成鼓包范围内的坑洞。因此，必须对出现的裂缝病害进行及时处理，以避免裂缝进一步扩展。

早期出现的裂缝由于其宽度与长度均较小，为此给裂缝的修复带来了较大困难，因此，必须选用一种粘度较低的灌缝材料，对出现的裂缝病害进行密封。对于大跨径桥梁桥面铺装层所出现的裂缝进行修补，修补材料的选择除了能够起到密封裂缝之外，还应该满足桥面铺装的受力状况，不至于（或短期内不会）在行车荷载作用下出现二次开裂。厦门海沧大桥由于未限制过桥的超载车辆，而导致铺装层出现严重的开裂病害，后来采用重庆智翔公司提供的PS表面密封材料对裂缝进行处理，PS暴露在空气中一定时间后，其中的轻质油份会逐渐挥发，裂缝中的固体残留物达到密封表面的功效，而其材料本身强度较低。因而，修复处理

后的厦门海沧大桥不久就出现了二次开裂现象。

针对环氧沥青混凝土钢桥面铺装的裂缝修补，由于环氧结合料与普通的沥青或改型沥青结合料完全不同，因此，必须选择一种低粘度，但强度值与原环氧粘结料相当的灌缝材料进行修补。

为了评价不同的处理方法与相应材料对环氧沥青混凝土铺装裂缝的处理效果，为此拟采用小梁试件弯曲试验进行了对比分析。所选用的修复材料为国内外较为常见的几种裂缝密封处理材料，主要有以下三种：

1. 采用类似 PS 的挥发残留物密封法；
2. 采用柔性聚合物密封材料（延伸率较高）；
3. 采用刚性高强密封材料（拉伸强度较高）。

前面已经介绍过，PS 密封材料是凭借挥发残留物填塞缝隙，从而达到密封裂缝的效果。而以环氧类为首的柔性密封粘结材料与刚性密封材料是利用环氧的开环胶粘作用，从而达到粘结裂缝的效果。无论采用哪种修复材料，必须遵循一个原则，即是尽可能将裂缝完全填充，以减少应力集中对铺装层受力的不利影响。

另外，由于对桥面铺装的维修工作一般在不中断交通条件下进行，所以要求密封粘结材料的固化时间较短。为此，要求所选择的裂缝修复材料在操作温度下的初始粘度应该较低，以便于在粘结剂固化前进行简便的灌缝处理。这一方面可以通过选择固化时间适宜的粘结剂，另一方面可以尽量避开夏季高温季节，选择气温较低的黄昏或傍晚等进行铺装层的裂缝缺陷密封处理。

为了评价密封材料的处理效果，我们进行了不同初始粘度的密封材料处理后的效果检测。通过处理不同裂缝宽度的小梁试件，待密封剂固化一定时间后（随温度而定），再沿裂缝处折断试件，观测密封材料的灌缝处理效果，试验结果见表 5-1。

表 5-1 不同类型密封粘结剂灌缝效果对比

名称	粘度 (cp、23℃)	缝宽 (mm)	温度 (℃)	灌缝处理效果 (粘结剂覆盖面积占总断面的百分比)
YLW ¹⁶⁵	800	0.11	18	80%~85%（密封效果较差）
LSQ ⁴⁷	295	0.13	21	90%~98%（密封效果较好）
YBL ⁸⁶	75	0.12	20	100%（完全密封）
EYY ²¹¹	1800	0.16	20	0%（完全不下渗）
YEB ¹²⁸	1100	0.11	18	5%~10%（基本不下渗）
LBJ ⁸⁹	180	0.12	21	100%（完全密封）
LWY ⁵¹	230	0.15	19	95%~100%（密封效果较好）
LWL ⁵⁰	500	0.15	18	85%~90%（密封效果一般）
BEJ	1580	0.12	20	0%~5%（基本不下渗）

由表 5-1 中的试验结果可知，对于宽度较小的裂纹，在温度较低的环境条件（≤23℃）下，采用初始粘度小于 300cp 的密封粘结剂的灌缝处理效果比较理想，能够有效降低应力集中的可能性。

对于采用快速固化的密封粘结材料处理不中断交通的铺装层时，粘结剂的固化时间与粘度是一对矛盾的控制点。因此，寻找一种在温度较高条件下初始粘度值较低，并拥有较长固化时间的密封材料是解决这个矛盾的关键。

根据表 5-1 中的试验结果选取 LSQ⁴⁷、YBL⁸⁶、LBJ⁸⁹三种粘度较低的灌缝材料，其物理力学性能如表 5-2 所示。

表 5-2 灌缝密封材料物理力学性能指标 (23℃)

名称	粘度 (cp)	拉伸强度 (MPa)	断裂延伸率 (%)
LSQ ⁴⁷	295	16.3	63
YBL ⁸⁶	75	42.5	5.4
LBJ ⁸⁹	180	15.6	88

§ 5.2.2 修补机理

目前，对于沥青混合料裂缝的密封处理，国内主要的观点是认为对出现裂缝病害处应采用延伸率较大的低粘度材料对缝进行密封处理（对强度要求不高），以期达到防水目的，同时能够满足裂缝处较大的位移要求。也有某些专家认为，对于裂缝的修补应该采用较高强度的低粘度刚性材料，以期能够弥补原铺装处的缺陷（强度不足等）。目前国内外常用的柔性密封剂以环氧类密封粘结材料与泡沫型聚合物密封材料为主，刚性密封剂主要是环氧密封材料。为了对比分析不同类型密封材料的密封机理，进行相关裂缝修补机理的试验研究。

做如下简单的假设：采用某种断裂延伸率为 $x\%$ 的密封材料处理 0.5mm 宽的结构物裂缝后，该结构物处的裂缝应在修补处的最大位移达到 $0.5 \times (x\% + 1) \text{ mm}$ 时才可能会出现再次开裂现象。为了验证这种假设，进行如下试验。

试验借助标准小梁弯曲进行，先按预定级配成型环氧沥青混凝土车辙板，固化后切割成标准尺寸的小梁试件，在 MTS-810 多功能材料试验机上进行弯曲试验，以小梁试件底部出现裂缝为破坏标准，测定标准环氧沥青混凝土小梁试件的弯曲应变。取破坏后的小梁，利用专用裂缝观测仪测定裂缝的宽度与深度，定义“深宽比”（裂缝断面尺寸因子）为小梁试件开裂处的裂缝深度与表面裂缝宽度的比值。利用快速固化环氧粘结材料将开裂的小梁试件进行灌缝处理，粘结剂技术指标如表 5-3 所示。待固化剂达到完全固化强度后，再次在相同温度条件下测定修复后的小梁弯曲应变，对比分析修复前后的小梁试件在裂缝处的应变变化情况。试验结果如图 5-1 所示。

表 5-3 试验用粘结剂技术指标

技术指标	技术要求
粘度 (cp, 23℃)	75
拉伸强度 (MPa)	41.3
断裂延伸率 (%)	8.0

由图 5-1 中的试验结果可知，随着裂缝因子（深宽比）的增加，弯曲前后的应变比值呈现较明显的变化，比值按照抛物线规律递增，这说明修复后的小梁试件弯曲应变随着裂缝因子深宽比的增加（即裂缝深度增加）而不断降低（远小于修复前的小梁试件）。

按照先前的假设，对于宽度为 0.3mm 的裂缝，出现再次开裂的位移量应该是 $0.3 \times (1+8\%)$ ，即 0.324mm，且与该处的裂缝深度无关。然而，根据本次试验结果可知，这种假设是完全没有根据、完全错误的。

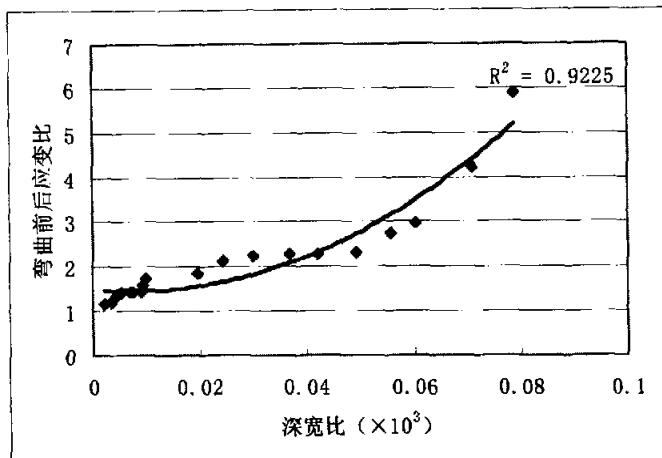


图 5-1 不同深宽比的小梁弯曲试验结果

环氧沥青试件的断裂延伸率指标是通过标准哑铃试件的拉伸试验来测试的。当哑铃试件加载受拉时，试件将被拉长，但试验过程中试件的总体积将不会改变，因此当试件被拉伸的时候横截面将减小。为了维持相同的体积，在试件被拉长一倍时，其横截面积必须降低一半。这种现象可以在试验过程中很明显的观察到（拉伸时哑铃试件截面面积均匀减少）。但是，当密封粘结剂应用于修复破損的铺装层裂缝时，与裂缝的周边紧密粘结。在受行车荷载作用时，裂缝内的密封粘结剂在受到其铺装表面的弯拉应力而产生拉伸作用（如图 5-2 所示），受拉伸作用的粘结剂由于自身的弹性，开始在荷载作用下逐渐被拉长，但是由于粘结剂与裂缝结构内部周边粘结牢固，无法适应裂缝扩张而导致的裂缝内体积增大。因此，这种粘结剂的可伸缩弹性受到限制，也就是说，即使是高柔性的粘结剂也会变为“刚性”的。必然，最终的破坏原因是裂缝内的粘结剂粘结强度不足，与裂缝周壁产生剥离作用，而非粘结剂延伸率不足。

这与图 5-1 中的试验结果完全吻合，环氧沥青混凝土桥面铺装层表面的裂缝宽度一般均较小 (<2mm)，因此，裂缝断面尺寸因子（深宽比）越小（即裂缝的深度较小），弯曲前后的表面应变值相差较小，而随着裂缝深度的增加，弯曲前后的应变值相差也较大。类似的数据分析可参见 5.2.4 节中的小梁弯曲强度对比试验。

§ 5.2.3 试验研究

试验首先按照与实桥铺装层完全相同的材料成型车辙板试件，待环氧沥青混凝土完全固化后 (4h、120°C)，将车辙板切割成标准尺寸的小梁试件，先进行标准弯曲试验 (23°C，加载速率 50mm/min)，然后采用不同密封材料对破壞了的小梁试件进行密封处理，待密封材料完全固化后再进行相同试验条件下的弯曲试验，对比分析密封处理前后的弯曲强度等指标，可以评价不同的密封材料修补效果。具体试验结果如表 5-4 所示。

由表 5-4 中试验结果可知，采用不同修复材料的小梁弯曲强度在修复前后有明显的差

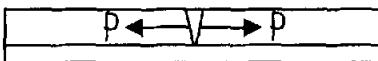


图 5-2 裂缝受力示意图

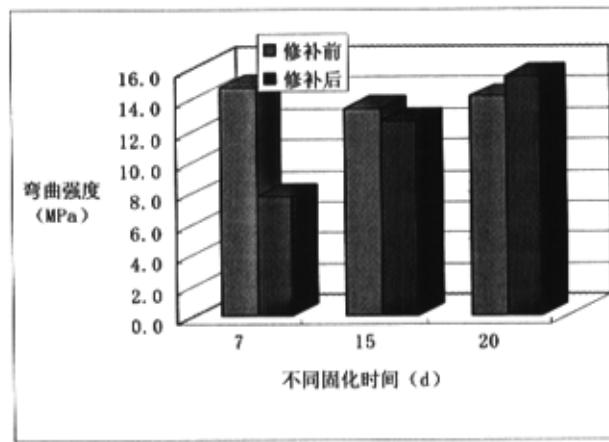
异，对于由 PS 密封材料修复处理的小梁，其弯曲应力～应变曲线没有明显的屈服点，且修复后的小梁弯曲强度值很低，达不到原小梁弯曲强度的十分之一。

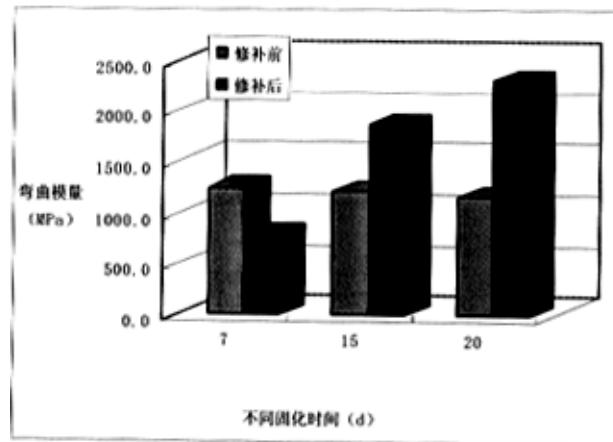
另外，从弯曲试验后的小梁试件的破坏情况来看，可以发现所选择的几种修复材料以刚性密封材料的灌缝处理效果最佳。断裂的区域内所填充的密封材料面积高达 98% 以上（基本完全灌充），这对于填补原裂缝处缺陷，减少应力集中有一定作用。

表 5-4 小梁弯曲对比试验结果(23℃)

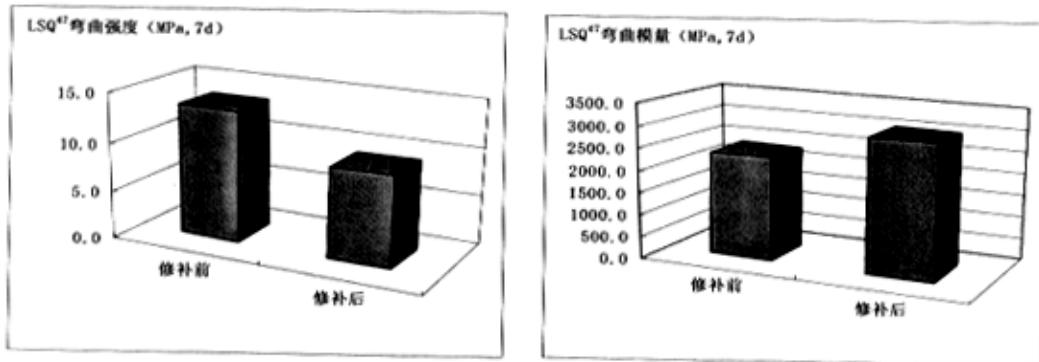
修复材料		原样小梁弯曲		修补后小梁弯曲		备注
		弯曲强度 (MPa)	最大应变 ($\times 10^{-3}$)	弯曲强度 (MPa)	最大应变 ($\times 10^{-3}$)	
PS 保护剂		11.8	11.8	—	—	灌缝料脆裂 无法测定
柔性 密封 材料	AEP	12.3	12.1	1.8	3.2	灌缝料脆裂
	CPL	12.1	11.2	1.3	156.0	裂缝内部 无灌缝料
刚性 密封 材料	YBL ⁸⁶	13.5	10.8	14.6	9.2	原裂缝修复处 松动断裂
	LSQ ⁴⁷	12.8	11.4	9.8	6.8	原裂缝修复处 松动断裂
	LBJ ⁸⁹	9.6	9.6	11.5	5.8	粘结剂剥落

通过对比小梁弯曲试验，三类密封材料中，CPL 材料对于封闭非受力裂缝的防水功效较佳。从补强设计的角度出发，结合相关试验结果可知，以刚性密封材料效果最佳，因此，我们进行了小梁弯曲的后期跟踪试验，以检测其修复裂缝缺陷的效果。试验结果如图 5-3、图 5-4、图 5-5 所示。

图 5-3(a) YBL⁸⁶ 修复前后环氧试件弯曲对比

图 5-3(b) YBL⁸⁶ 修复前后环氧试件弯曲对比

从图中的试验结果可以看出，采用 YBL⁸⁶ 修复的小梁弯曲前后的强度值有较大的变化，且随固化时间增加强度有超越原环氧沥青混凝土的趋势。由图 5-3 可知，二十天后的小梁试件弯曲强度值较原环氧沥青混凝土大，其弯曲模量也较大，从弯曲断裂后的小梁试件断面情况来看，破坏发生在粘结剂与混合料粘结面上，即说明是由于原先破坏的小梁试件裂缝处断面松动而导致的。

图 5-4 LSQ⁴⁷ 修复前后环氧试件弯曲对比

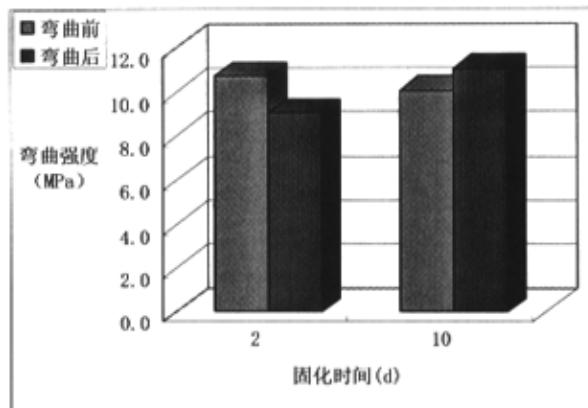
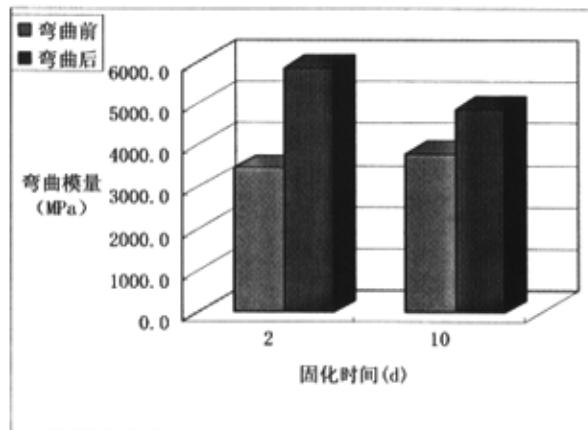
图 5-5(a) LBJ⁸⁹ 修复环氧试件弯曲强度对比图 5-5(b) LBJ⁸⁹ 修复环氧试件弯曲模量对比

图 5-4 中修复前后的弯曲指标对比可知，采用 LSQ⁴⁷ 修补后的小梁弯曲强度值只达到原小梁强度的 70%，从小梁破坏断面来看，裂缝内仍有约 5% 作用的残余面积没有完全被 LSQ⁴⁷ 粘结剂所填充，从而影响了修复后试件的弯曲强度值。修复后的小梁试件弯曲模量高于原小梁弯曲模量，这说明修复后小梁试件的破坏弯曲应变远小于原环氧沥青混凝土小梁的弯曲模量。

由图 5-5 中的修复试验结果可知，LBJ⁸⁹ 修复后的强度值较原小梁弯曲强度高，弯曲模量均较破坏前弯曲模量值低，且随时间推移有下降的趋势。从小梁试件弯曲破坏的断面来看，断裂的两小梁试件断面壁上均残留部分粘结剂，这说明试件断裂发生在粘结剂之间，试件的破损是由于粘结剂脆弱而导致的。

由上述试验结果可知，从长期修复结果来看粘结剂，以 YBL⁸⁶ 修复的效果较佳，其强度值随时间有一定的增长趋势。为进一步了解 YBL⁸⁶ 粘结剂的其他性能，进行剪切试验。试验采用 α 角度的斜向剪切试验来评定其抗剪性能。

当对试件施加垂直荷载 P 时, 试件受剪切面剪切强度可以按照如下公式计算:

$$\tau = \frac{P \times \sin \alpha}{S}$$

式中: P——作用荷载 (N);

S——试件受剪面积 (mm^2);

τ ——剪切强度(MPa);

α ——剪切面与水平面的夹角。

试验与南京长江第二大桥环氧沥青混凝土剪切试验方法相同, 即选取加载速率为 50mm/min。试验结果如表 5-5 所示。

表 5-5 粘结剂剪切试验

温度	YBL ⁸⁶ 粘结剂 (MPa)	环氧沥青粘结材料 (MPa)	技术要求 (Mpa)
23°C	3.11	5.14*	≥ 3.0

*——试验数据来自参考文献【28】。

由表中试验结果可知, 虽然 YBL⁸⁶粘结剂的拉伸强度较环氧沥青粘结料强度高出许多, 其抗剪切能力却较差, 但仍然满足相关技术要求, 这主要是材料本身原因而导致的。但这不会影响其与裂缝周壁的粘结性能, 因为大跨径钢箱梁桥桥面铺装表面主要受弯拉应力, 而这种弯拉应力在出现开裂的铺装层附近更大, 灌入裂缝内部的 YBL⁸⁶粘结剂主要受拉应力作用, 因而能够充分发挥其抗拉强度的优势。另外, YBL⁸⁶粘结剂在灌入到细微裂缝内后, 会逐渐向裂缝周壁的细微空隙内渗透, 从而增强了其与裂缝的粘结性能。

§ 5.2.4 施工处理

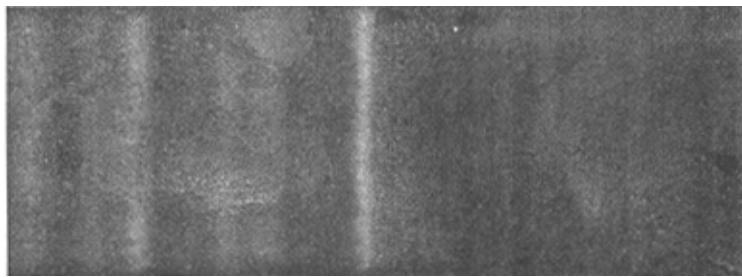
因为环氧沥青混凝土铺装层所出现的裂缝病害毫无规律可循, 其裂缝的形状和发展速度等均较慢。采取的低粘度灌缝材料是为了填充裂缝内部空隙, 降低铺装层的应力集中现象, 以彻底消除铺装层所出现的开裂病害, 杜绝雨水下渗。

然而, 影响大部分的快速固化修复材料性能的至关重要的因素就是水份。水份的存在不仅仅会加速材料固化, 使得灌缝材料在没有到达裂缝底部时即已经由于反应剧烈而导致粘度过大无法下渗, 水份还会大大降低粘结材料的力学性能, 降低其粘结强度, 导致固化后的粘结剂脆性大大增加。另外, 油脂的存在也会影响粘结剂与基层环氧沥青混凝土材料的粘结强度。为此, 现场修复时必须密切关注下面两个问题:

1. 消除裂缝内部水份;
2. 清除裂缝内部的油污等影响粘结强度的杂质。

为了彻底清除铺装层裂缝内部的水份, 可以选择在铺装层经连续烈日暴晒后进行, 但需要注意应避免高温时分进行灌注操作, 以避免铺装层裂缝由于温度较高而发生“自愈”现象, 力求达到最佳的灌缝密实效果。

对于油脂的检测, 可以通过目测来初步断定裂缝内是否有油污存在。应该对存在油污的裂缝进行某些特殊处理(见第六节), 或先用肥皂水进行刷洗, 待日后烈日暴晒干燥后再进行灌缝处理。实际处理效果如图 5-6 所示。



(a) 处理三个月后

(b) 处理一年后

图 5-6 YBL⁸⁶粘结剂处理效果

从短期的处理效果来看，由于灌缝材料色泽透明，因此在阳光照射下会产生明显的“反光”现象，会影响铺装外观，因此，在进行裂缝处理时，应该在灌浆材料混合并灌注后约 15 分钟再在粘结剂表面洒少许细集料（如标准 5# 料），以获得较好的初期表面外观。对于已经灌注较长时间的裂缝而言，由于车辆荷载的磨耗作用，表面外观与铺装层接近，取得较好的实际效果。

§ 5.2.5 特殊灌缝处理

特殊灌缝处理主要针对某些较为特殊的裂缝，这主要包括放射性裂缝、裂缝内部含有较多油污、汽车燃油等无法处理的裂缝，以及裂缝内存在水份（潮湿或过湿状态）下的裂缝修补。放射性裂缝是指裂缝表面宽度较宽，而导致水份下渗较深，难以靠暴晒干燥处理的裂缝，这种裂缝内部可能存在部分唧浆病害，主要是由于高速行车荷载引起的高压导致裂缝内部的水份不断冲刷裂缝周壁，从而引起混合料内部细质填料剥落，形成唧浆现象。由于油污以及裂缝内部唧浆形成的灰粉的存在主要影响粘结剂与裂缝周壁的粘结强度，因而，必须对放射性裂缝进行特殊处理，彻底清除裂缝内的油污。

对于潜在唧浆病害的放射性裂缝，应该用小型切割机先将裂缝切割，加宽裂缝表面宽度，以尽量将裂缝内存在的油污或唧浆形成的灰粉与松动部分割除。应该对切割完成后的裂缝进行简单处理，可以采用吹风机将裂缝内部的灰尘与浮粒吹走，再采用棕毛刷将裂缝内部刷干净，以便于进行灌缝处理，确保粘结剂与裂缝周壁的粘结强度。

由于切割机切割后的表面裂缝宽度一般在 0.3~0.5cm，因而，必须采用特殊的灌缝处理，以增加切割缝内部的粘结性能。对于这种拓宽的裂缝处理，可以预先在裂缝内部填充洁净的细集料（如 4# 料），再进行粘结剂的灌缝处理，粘结剂材料选择前文所述的高强低粘材料 YBL⁸⁶ 粘结剂，利用标准弯曲试验来对比分析弯曲修复前后的小梁弯曲强度与弯曲应变的变化情况，试验结果如表 5-6 所示。

由表 5-6 中的试验结果可知，对于表面切割的裂缝修复，如果不采用回填细集料直接填补 YBL⁸⁶ 粘结剂，修复后的弯曲强度有一定程度的降低，且弯曲应变也较低。而采用 4# 细集料填充裂缝后再采用 YBL⁸⁶ 粘结剂修复的弯曲试验结果表明，这种特殊的修复结构修复后的弯曲强度值较原环氧沥青混凝土小梁试件大，但其弯曲应变也较原环氧沥青混凝土小梁试件小，即试件的变形能力有所降低。

表 5-6 特殊修复小梁弯曲试验结果（固化时间 10d）

修复材料	原小梁试件弯曲结果			修复后小梁试件弯曲结果			备注
	弯曲强度(MPa)	最大应变($\times 10^{-3}$)	弯曲模量(MPa)	弯曲强度(MPa)	最大应变($\times 10^{-3}$)	弯曲模量(MPa)	
4 [#] +YBL ⁸⁶ -1	14.2	12.5	1139.8	18.4	4.0	4647.1	原裂缝处断裂
4 [#] +YBL ⁸⁶ -2	14.1	10.5	1356.7	18.6	5.7	3287.5	原裂缝处断裂
YBL ⁸⁶	14.8	14.1	1050.0	11.5	5.7	2011.5	原裂缝处断裂

§ 5.2.6 小结

综合对比分析几种低粘高强灌缝粘结材料，以 YBL⁸⁶ 修复小梁试件强度最高，且密封填充效果最佳（基本完全密封缺陷裂缝断面），弯曲模量是弯曲强度与弯曲应变的比值，因而弯曲模量值变化会受到弯曲强度增加的影响。LSQ⁴⁷ 修复小梁弯曲强度值降低，但弯曲模量有较大幅度的增加，即破坏时的弯曲应变较小。LBJ⁸⁹ 修复小梁试件弯曲前后的弯曲模量差异也较大，也是由于粘结剂强度较低，且修复后试件的弯曲应变值较小，而造成弯曲模量增大。因此，无论从降低应力集中，或是补强设计的角度考虑，选择 YBL⁸⁶ 粘结剂修复环氧沥青混凝土铺装层表面出现的裂缝均具有较大的优势。

§5.3 鼓包修补

在第三章中已经介绍过鼓包病害的成因及其不同发展阶段的表现症状，鼓包缺陷的危害众所周知，不仅影响铺装层美观、行车性能，严重时会危害到铺装层的使用寿命。因此，必须对环氧沥青混凝土桥面铺装层所出现的鼓包病害进行及时处理。

由第三章中的内容可知，鼓包病害一般是由于施工时残留在铺装层内部的水汽而造成的，水汽在铺装投入使用期间由于汽化作用而将铺装层顶起，形成表面隆起，隆起的部分在行车荷载的反复作用下会出现开裂。从这个角度出发，环氧沥青混凝土铺装投入使用后，必须及时、仔细地进行全桥调查。由于鼓包病害因承受荷载与调查时间不同而存在不同的破损阶段，因此需要针对鼓包病害发展的不同阶段，采取不同的修补方式。

§ 5.3.1 不同病害时期的修复处理

处理环氧沥青混凝土铺装鼓包病害所选择的修复材料必须能够适合不同时期的病害特性与施工操作特性，选择不同的修复处理方法。

一、初期鼓包病害

初期鼓包是在铺装层刚摊铺完成时所表现出的主要病害。由于环氧沥青混凝土摊铺一般在温度较高的正午进行，且刚摊铺完后的气温已经降低，内部残留的水汽在次日高温时刻（正午）汽化，体积膨胀，又由于刚摊铺完成的环氧沥青混凝土铺装强度仍较低，因此水汽的体积膨胀将铺装层顶起，形成表面开裂现象。对于初期出现的鼓包病害，最简单的补救方法是在气温较高的正午加强对铺装层检查，对发现的鼓包及时采用钢针刺穿鼓包将水汽排后，再将铺装层击实，另外还可以选择低粘度材料进行简单密封处理，也可以将鼓包处挖除，重新填充新的混合料，具体措施根据现场病害面积、严重程度等情况决定。

二、使用期早期鼓包

使用期间出现的鼓包病害主要是施工时的少量水分而引起的。由于初期鼓包开裂程度较轻，且已经投入使用后的环氧沥青混凝土强度等均已经达到最终要求值，在修复时开挖回填的处理方式显得不符合实际。因此，经济可行的方法是选取低粘度材料对鼓包开裂病害进行处理。对早期的鼓包开裂病害处理所选用的材料是建立在裂缝处理病害研究的基础上，所选用的修复材料必须能够达到修复裂缝，并增强缺陷处的功效。

三、中期鼓包

如果不及时对环氧沥青混凝土铺装层进行勘测、调查，某些早期的鼓包开裂现象可能会较难以察觉，在行车荷载的重复作用下将恶化为中期鼓包病害（详见 3.2.2 节）。

对恶化后铺装层的中期鼓包病害，可以根据鼓包范围根部的裂缝闭合情况确定中期鼓包病害的严重程度，再根据不同的严重程度选择采用灌缝密封处理或开挖回填处理。

四、晚期鼓包坑洞

出现晚期鼓包坑洞病害的铺装层已经基本丧失承载力，丧失铺装层使用功能，是鼓包病害发展过程中最严重的阶段。这个阶段会影响其他完好铺装的使用寿命，甚至影响钢板的使用寿命，因此，必须对晚期鼓包坑洞及时进行处理，适宜的处理方法也只有将坑洞破损处的残缺铺装层开挖后，再重新回填。

§ 5.3.2 修复机理

纵观上述不同时期的鼓包病害对修复材料的要求，总体上来说，离不开低粘高强的灌缝类修复材料与高强度回填材料。对于低粘高强的灌缝类修复材料，可以采用裂缝病害修复处理研究中取得的相关材料与成果。如果采用开挖回填的修复技术，这种快速固化的低粘高强材料将不再适合，为此，需要选用另一种适合的新型修复材料。

开挖回填是指将原破损处的混合料全部挖除，进行基层与切割断面清理后，再采用新拌制的混合料进行回填。因此，在回填过程中对新旧铺装层的衔接是必须解决的首要问题。标高差不仅会导致过往车辆的跳车，而且会对铺装层产生冲击作用，导致临近铺装层或修复铺装层产生冲击破损。针对这种对现场施工操作要求较高的修复过程，所选择的材料应该能够在满足原环氧沥青混凝土强度与变形能力的基础上再进行加强。

§ 5.3.3 早期病害修复

由于鼓包病害的根源是潜伏在铺装层内部的水份汽化而导致的，而且，出现开裂的鼓包病害也很难避免雨水的下渗。因此，要解决鼓包病害，最重要的一点必须首先根治水。然而，对于采用灌缝类材料对初期鼓包病害进行密封处理，如何处理铺装层内部的水分是至关重要的。另外，如何解决铺装层鼓起范围底部的脱空是处理鼓包裂缝的关键。

为此，对于使用期间出现的早期鼓包开裂病害，应该先在鼓起范围的铺装层表面不同位置锥刺三到四个小孔（直径以 0.3~0.6cm 为佳，且鼓起范围内的最高点必须有一个锥刺孔），锥刺深度以达到鼓起底层位置，再利用热吹风机或红外线灯将热空气鼓吹到鼓包铺装层内部，待鼓包铺装层内湿气充分干燥并待温度冷却后即可进行灌缝处理。灌缝时，应该按照从最低位置的锥刺孔灌注粘结料的原则进行粘结料的灌注，灌注可以采用注射器或专用裂缝灌注仪进行，待临近锥刺孔内有粘结剂渗出后，采用橡胶皮将该小孔堵住，如此往复，直至最高位置的锥刺孔内粘结剂渗出为止，最后再利用灌缝料将鼓起范围内的铺装表层出现的裂缝密封，用红外线灯将鼓包修复范围烘软，同时加速粘结剂的固化，并采用重物将鼓起范围压平，将多余粘结剂挤出，待灌缝料完全固化后即可开放交通。

采用这种灌缝处理的鼓包病害基本解决了鼓包病害底部脱空现象，并能够根除内部水分，杜绝产生二次鼓包。

§ 5.3.4 回填修复材料比选

对于较严重的病害，一般均伴随铺装层的压碎与结构松散现象，严重的出现坑洞，因此必须采用开挖回填方式处理。

环氧沥青混凝土是一种高强的桥面铺装材料，选择何种修复材料进行混合料回填处理是采用这种方法修复鼓包病害的关键所在。由于环氧沥青混凝土所处的特殊使用环境，选取一种合适的回填修复材料主要应从以下几方面入手：

1. 由于回填施工是现场操作，因而选择回填材料的要求最好是操作简便，对施工要求较低；
2. 由于修复区域面积较小，碾压不充分，因而要求选择的回填材料在简便的操作下具备较高的密水性能；
3. 由于鼓包范围较小，因而回填区域面积也较小，因而要求回填材料具有更高的强度（抗冲击等）与耐久性，以抵抗由可能存在的新旧混凝土高差而导致的冲击荷载以及蠕变作用；
4. 回填施工应该以不影响交通为原则，选择的回填材料固化时间应该尽可能短，但又不至于影响操作时间；
5. 用于大跨径钢桥桥面铺装的回填材料应该具有较高的疲劳寿命。

从以上几个角度出发，必须要求所选择的回填材料除了具有原环氧沥青混凝土性能之外，还应该满足更高强度、快速固化、施工操作简便、密水等要求，以克服铺装层缺陷处可能存在的各种不利因素。

考虑到环氧沥青混凝土的特殊性，在材料比选过程中选择了如表 5-7 中所示的几种修复材料进行试验。

根据表中的对比分析结果可知，其中 AEP 环氧沥青修复材料需要在 120℃的高温条件下配制并需要专门碾压工具进行压实处理，其施工可操作性较其他两种差。LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂与 LLS⁶⁴ 高性能环氧沥青均属于冷拌材料，其中前者可以以较低的油石比进行配制，级配可完全采用标准环氧沥青混凝土级配。后者因为常温粘度较大，因而常温下拌制时需要加大结合料的用量，并对级配进行调整，取消<0.075mm 粒径的细质填料，以降低结合料的用量（降低油石比），具体级配如表 5-8 所示。BEJ 高性能环氧沥青材料为英国进口材料，由于粘度较大，因而在国外应用时采用的油石比为 20%，采用专用集料与级配，但主要缺陷是需要在 70℃条件下才能进行混合操作，因为其中的环氧树脂组分粘度太大。为了评定各种材料的强度指标，进行马歇尔试验，试件成型时环境温度为 26℃，试验结果如表 5-9 所示。

表 5-7 回填材料主要技术参数

原材料	材料主要技术参数			备注
	粘度 (cP)	拉伸强度 (MPa)	延伸率 (%)	
AEP 环氧沥青	200(120℃)	1.87	223	需高温配制，高温固化
LSQ ⁴⁷ 高性能环氧树脂	295(23℃)	16.3	71	常温配制，固化时间短
LLS ⁶⁴ 高性能环氧沥青	1300(23℃)	21.1	59	常温配制，固化时间短
BEJ 高性能环氧沥青	1560(70℃)	6.8	143	70℃配制，固化时间短

表 5-8 LLS⁶⁴ 高性能环氧沥青混凝土集料级配

集料	1#	2#	3#	4#	5#	矿粉
配比	2.5%	22.5%	20.0%	22.0%	33.0%	0.0%
粒径(mm)	12.5	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配 (%)	100.0	97.6	75.4	60.7	33.8	0.0
规范要求 (%)	100	95~100	65~85	50~70	28~40	0.0

表 5-9 不同修复材料马歇尔试验结果

结合料	油石比 (%)	空隙率 (%)	稳定度 (kN)	流 值 (0.1mm)	可操作时间	备 注
AEP 环氧沥青	6.5	2.1	55.3	36.8	120℃30min	高温击实成型
LSQ ⁴⁷ 高性能 环氧树脂	6.6	2.8	89.2	23.1	26℃40min	正反击实 50 次
	8.5	2.1	122.3	36.5	26℃40min	正反击实 20 次
	9.0	2.2	103.5	38.4	26℃40min	静置成型
	10.0	1.8	73.6	39.7	26℃40min	静置成型
	10.0	3.5	107.7	32.7	26℃30min	正反击实 20 次
LLS ⁶⁴ 高性能 环氧沥青	11.0	2.6	121.3	38.5	26℃30min	正反击实 10 次
	12.0	2.3	136.2	41.1	26℃30min	压密成型
	13.0	1.9	---	---	26℃30min	静置成型
	20.0	1.5	93.6	68.6	26℃30min	静置成型
BEJ 环氧沥青	20.0	1.6	73.2	78.8	26℃20min	70℃静置成型

* 注：试验时超出试验设备量程（15 吨大马歇尔试验仪）。

由表中试验数据可知，所选取的几种环氧沥青混凝土材料均具备较高的强度，尤其是 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混凝土和 LLS⁶⁴ 高性能环氧沥青混凝土，这两种材料的强度远远大于原环氧沥青混凝土，而且施工操作又是在常温下进行，便于在现场进行回填操作。LLS⁶⁴ 环氧沥青的粘度较大，增加了拌和操作困难。BEJ 高性能环氧沥青混合料虽然强度较高，但是其流值也较大，变形能力过大，且拌和时又有温度要求，此外，最重要的一点就是可操作时间较短，这对于气温较高条件下的施工很不方便。类似的问题还存在于环氧沥青混凝土材料，较高温度条件下的拌和生产，后期固化的条件要求等等，因而不适合于简单的现场修复采用，需要匹配相关试验设备以及碾压设备。综合考虑以上因素，几种材料中最合适的回填材料是 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混凝土。在实际施工操作时，可以根据实际情况选取不同的油石比（如 8.5%，再匹配简单的手持式平板振动夯实仪），以达到最佳的路用性能。

§ 5.3.5 修复材料特性研究

前面已经叙述过，LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混凝土用作环氧沥青混凝土桥面铺装材料时除

具有更高的强度之外，还必须具备高耐久性等功能，为了评价 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混凝土的其他路用性能，特进行蠕变试验与复合梁修复疲劳试验等路用性能的试验研究（未经特殊说明，LSQ 试件采用的油石比为 8.5%）。

一、拉拔试验

如果采用 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂回填混合料进行回填修复时，由于 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂是一种快速固化材料，因而，所采用的粘结料也必须具备类似的性能，考虑到 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂材料的拉伸强度指标远大于环氧沥青粘结料，因而，在修复时可以用作粘结材料。为此，需进行材料与钢板的拉拔试验。

选择经喷砂除锈、防锈涂装处理后的实际桥面钢板(16Mnq)。拉拔试验采用专用拉拔仪，试验按照混合料油石比 8.5% 考虑，因而所需粘结料的涂布率按照 $0.3L/m^2$ 考虑。在钢板表面按照预定的粘结料涂布率涂刷 LSQ⁴⁷ 粘结料，并在其上放置直径 1cm 的铝制拉头，待粘结剂完全固化后再进行标准温度下的拉拔试验，试验结果如表 5-10 所示。

表 5-10 粘结料拉拔试验

粘结材料	试验温度 (℃)	拉拔强度 (MPa)	破坏位置
LSQ ⁴⁷ 粘结剂	21	6.8	钢板与粘结层间
环氧沥青粘结料	22	3.7	钢板与粘结层间

由表中的试验结果可知，LSQ⁴⁷ 粘结剂的粘结强度远远大于环氧沥青粘结料的粘结强度，这说明前者与钢板的粘结强度较后者大，可以用作钢桥面板的粘结料。

二、蠕变特性

蠕变试验是评价混合料的一定荷载作用下的抗永久变形的能力，注意的反应指标有蠕变速率以及蠕变稳定时间。试验先进行 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料标准温度下的劈裂试验，然后按照 0.25 应力比取试验荷载，进行两种混合料的劈裂蠕变试验。为了便于对比分析，同时进行了原环氧沥青混凝土的蠕变试验，试验结果如图 5-7 所示。

由图中的蠕变曲线可知，沥青混合料的蠕变过程分为三个阶段：

1. 初始阶段。该阶段主要是混合料存在部分粘弹性变形，主要表现为时间一位移曲线急剧上升，很快进入平稳期；
2. 稳定阶段。该阶段是蠕变稳定期，主要表现为时间一位移曲线斜率变缓，即位移随时间增加速率较慢；
3. 加速发展阶段。时间一位移曲线出现拐点，即混合料出现裂缝，拐点过后的混合料位移随时间陡增，混合料最终破坏。

由于时间限制，AEP 出现破坏后即停止试验，此时 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料蠕变过程仍然处于稳定期。由图中的试验结果可知，在同等荷载作用条件下，LSQ⁴⁷ 环氧树脂混合料的抗永久变形能力要比 AEP 混合料高的多，LSQ⁴⁷ 混合料的初始化阶段耗费时间比 AEP 混合料耗费时间短，前者混合料的蠕变速率为 $0.036mm/min$ ，而 AEP 环氧沥青混合料的蠕变速率为 $0.174mm/min$ ，约是前者的五倍，可见 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料的抗变形能力要远远大于 AEP 环氧沥青混合料。

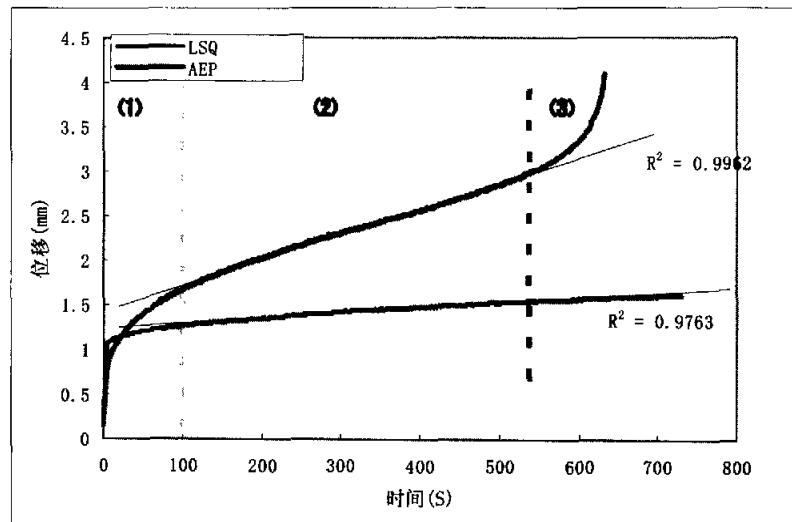


图 5-7 对比蠕变试验曲线 (15°C, 0.25 应力比)

四、疲劳特性

沥青混合料室内疲劳试验方法各异，各国都没有统一的规定。目前应用最多的主要有：简单弯曲试验（包括三点加载、旋转悬臂梁和梯形悬臂梁）、支承弯曲试验、单轴试验、间接拉伸试验、三轴试验、断裂力学试验和轮廓试验等。这几种主要试验方法中，又以重复弯曲试验（特别是三点加载试验）以及间接拉伸试验（即劈裂试验）得到了广泛采用。

混合料的疲劳响应与加载控制方式有关。一般研究沥青混合料的疲劳通常有两种控制加载方式：控制应力和控制应变。应力控制方式的再现能力较好，试验所需时间较短，试验结束以试件断裂为标准，疲劳破坏的定义比较明确。另外，控制应力试验所需试件数量较少，疲劳数据点分散程度小，应力精度控制可靠，且较容易设定试件破坏的状态。控制应变方式下，试件一般不会出现明显断裂破坏，而一般以混合料劲度下降到初始劲度的 50% 或更低时为疲劳损坏标准，因此具有一定的随意性，且在技术应用上存在一定困难。考虑到试验方法的简便性，本次试验采用控制应力的劈裂疲劳试验。

用于回填开挖鼓包病害的 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料除了具备较好的抗永久变形能力外，还必须具有较高的疲劳寿命。由于该材料强度较大，且固化时间较短，因而在回填操作时应采用同样的材料做粘结层，以尽量缩短固化时间。为了评价 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料的修复疲劳性能，拟定进行原材料疲劳试验对比分析与修复的复合梁疲劳试验研究。

原材料疲劳对比研究采用同一应力比条件下劈裂疲劳试验，试验主要根据南京长江第二大桥桥面铺装材料试验过程中的相关成果，为了评价在相同使用荷载作用下的混合料疲劳性能，同时缩短试验时间，选取 8kN 荷载条件进行劈裂疲劳试验，加载频率为 8Hz，试验在 MTS-810 材料试验机上完成。试验温度为 15.6°C，试验结果如表 5-10 所示。

表 5-10 剥裂疲劳对比试验结果

试验名称	频率 (Hz)	荷载 (kN)	荷载 作用次数	试件 情况
6.5%油石比 AEP 试件	8	8	41300 次	表面出现 纵向裂缝
8.5%油石比 LSQ ⁴⁷ 试件	8	8	>50000	未破坏

由表 5-10 中的疲劳试验结果可知，两种材料相同应力比条件下的剥裂疲劳试验结果有较大差异。本次试验采用的加载模式为控制应力加载，因而，在相同荷载与相同荷载作用次数条件下，环氧沥青混凝土试件的单位能耗要比 LSQ⁴⁷ 试件大的多^[21]，因此，其达到最终破坏的荷载作用次数也较少，即疲劳寿命较短。

剥裂疲劳试验只是简单地评价了在相同荷载条件下两种材料的疲劳特性，为了进一步对比修复结构的疲劳性能，选取原南京长江第二大桥材料试验研究过程中破坏的复合梁试件，将开裂的铺装层挖除，重新回填 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料，可以采用加温来加速固化，待试件完全固化后进行复合梁疲劳试验。为了对比分析不同修复材料的抗疲劳性能，试验对比进行了采用原环氧沥青混凝土修复的复合梁疲劳试验。为了缩短疲劳试验时间，试验参数尽可能与南京长江第二大桥试验过程中的参数一致，采用超载模式加载，荷载选用 6kN，加载频率选取 10Hz，试验温度 18℃，详细参数见表 5-11，试验结果如图 5-8 所示。

表 5-11 复合梁超载疲劳试验参数对比

试验名称	试验温度 (℃)	频率 (Hz)	荷载 (kN)	试件 情况
二桥常温超载疲劳试验	18.0	10	6	破坏
LSQ 修复超载疲劳	18.2	10	6	—
AEP 修复超载疲劳	18.3	10	6	—

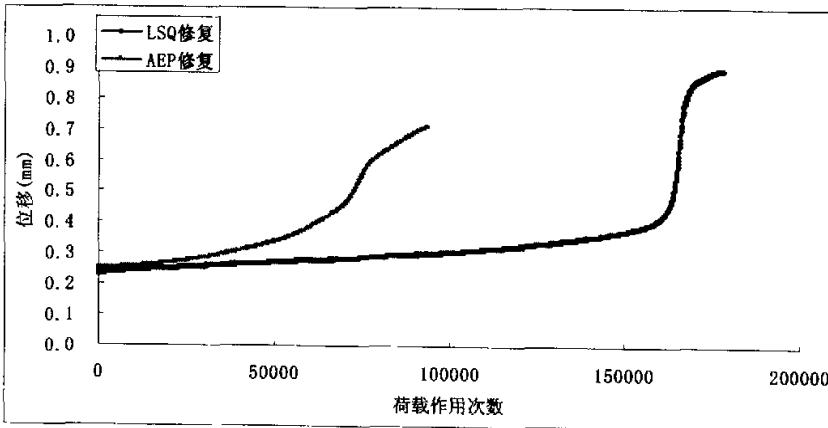


图 5-8 修复后的复合梁疲劳试验

两者试验最终的破坏均发生在接缝断面上，究其原因，主要是因为开挖后的原铺装层周边切割的接缝面上没有集料的咬合作用，因而，最终的疲劳破坏是由于接缝粘结力丧失而导致的，这一点也进一步说明了纵向施工缝不能设置在 U 型加劲肋顶。由图中的试验结果可知，采用 LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂回填混合料修复破坏的复合梁疲劳寿命要远大于采用 AEP 环氧沥青混凝土修复后的疲劳寿命，具有较强的实际应用可行性。

三、低温特性

为了解所选择的回填修复材料的低温特性，必须先研究原环氧沥青混凝土的低温性能，为此，进行室内不同温度的小梁弯曲试验，以期得到环氧沥青混凝土的脆化点温度。根据“七五”国家科技攻关课题的研究成果以及文献【14】中的相关理论，试验加载速率均按照 50mm/min，试验结果如图 5-9 所示。

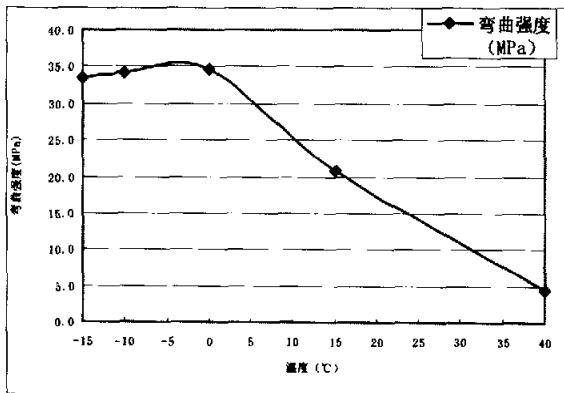


图 5-9 (a) 环氧沥青混凝土不同温度小梁弯曲试验

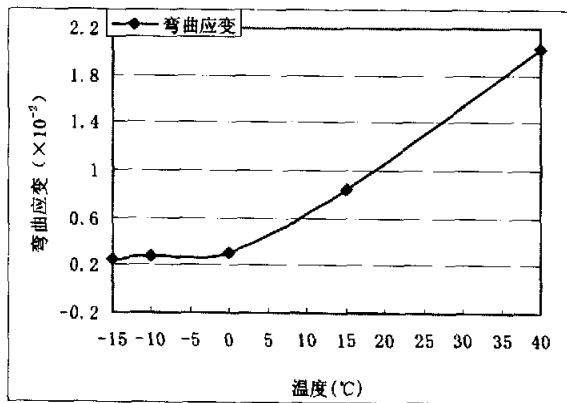


图 5-9 (b) 环氧沥青混凝土不同温度小梁弯曲试验

由图中的试验结果可知，环氧沥青混凝土的脆化点温度在-4°C~ -6°C间，其强度~温度曲线在此温度区间呈现明显的拐点，温度向此范围外逐渐增加，环氧沥青混合料的弯曲强度值迅速降低。随着温度向此范围外逐渐降低，混合料的强度没有太大变化。相应与弯曲应变曲线而言，环氧沥青混凝土的弯曲应变也在相同温度范围内出现拐点，且拐点前后的应变值

变化较大。图中的试验结果表明,环氧沥青混凝土的脆化点温度为-4℃~-6℃,温度较低时,环氧沥青混凝土主要表现出弹性体特性。但从应变曲线图中可以看出,此温度范围内的弯曲应变值仍较一般的桥面铺装材料要大的多(室内新沥青+30%TLA+3%改性剂的新型浇注式沥青混凝土铺装材料相同温度下的弯曲应变只有0.0012^[30]),因此,由此可以看出,虽然环氧沥青混凝土的脆化点温度较高(-4℃~-6℃),但这并不代表其低温抗裂性较差。由于环氧沥青混凝土的固化特性,其低温抗裂性较好。

沥青混凝土路面不必像水泥混凝土路面那样设置伸缩缝,是因为沥青混合料具有粘弹性,因此荷载在路面结构中产生的应力可以得到一定的松弛而减小。在较高温度时应力甚至会因松弛能力强而很快消失;在温度较低时,沥青混合料的应力松弛能力较差,松弛速度慢,因此在路面结构中会存在一定程度的应力累积,当累积的应力超过其强度极限时,就会发生开裂破坏。在相同的温度和强度条件下,沥青混合料的应力松弛速度越快,其抗裂性能就相应越好。相反,应力松弛速度越慢,则易开裂破坏。因此,沥青混合料的应力松弛性能是评价其低温开裂的重要性能指标。同时,由于应力松弛试验是确定沥青混合料的粘弹性参数最基本的试验方法之一,可以根据应力松弛试验结果得到沥青混合料的粘弹性参数,可为用粘弹性理论来进行理论分析提供参数。

据我们了解,在南京长江第二大桥养护过程中,夏季通常采用洒水的方式来降低铺装层的温度,这必然会导致铺装层局部由于应力来不及消散而产生应力的积聚。另外,钢桥面铺装使用温度最低达-15℃。虽然环氧沥青混凝土脆化点温度在-5℃附近,但为了研究修复材料的低温抗裂性,仍然选择-15℃的试验温度。从这个方面考虑,回填修复材料应该与原环氧沥青混凝土桥面铺装类似,具有抵抗温度骤降而导致的温度应力影响。为了评价这种混合料的温度应力特性,特此进行低温条件下的松弛试验。

试验借助劈裂试验进行,首先进行-15℃条件下的劈裂试验,为了缩短试验时间,取最大破坏荷载所对应的位移的0.25倍作为试验的控制位移,进行定性分析。同时选取6.5%油石比的环氧沥青混凝土进行对比试验。试验结果见图5-10。

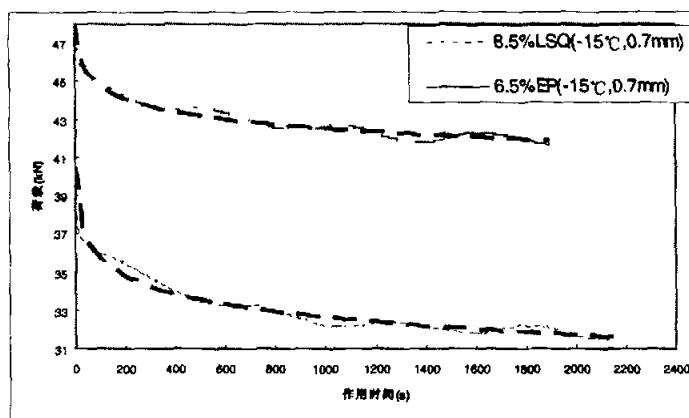


图 5-10 低温松弛试验结果 (0.7mm, -15℃)

由图中的试验结果可知,LSQ⁴⁷高性能环氧树脂回填混合料的低温松弛速率与AEP环氧沥青混凝土相差较小,说明在相同位移条件下,铺装层间的应力能够平稳过渡,有效避免在修复铺装层与临近铺装层间引起应力突变,对修复后的铺装受力较为有利。

§ 5.3.6 施工处理

对于鼓包病害的现场修复处理，应针对不同的破坏阶段而采取相应的处理方法，以达到最佳的处理效果。如发现及时，初期鼓包只需要进行简单的灌注粘结剂处理即可以达到填充密实的效果。但对于后期出现严重坑洞的鼓包病害而言，显然水分已经渗入到铺装层内部，而产生的唧浆病害也导致铺装层内部有较多的细质填料。我们对图 3-12 中的后期鼓包坑洞进行开挖，如图 5-11 所示。



图 5-11 后期鼓包坑洞内部的松散与唧浆

从图 5-11 的开挖情况可以看出，后期鼓包坑洞在行车荷载所形成的高压水作用下，其内部的环氧沥青混合料已经出现松散，且有较严重的唧浆现象。由于后期鼓包坑洞的出现，水份将渗入到铺装层内部，而引起钢板锈蚀。如不及时进行处理，后果不堪设想。对此类铺装层进行修复时，应先将铺装层出现病害的区域彻底清除干净，清除混合料的松动部分及铺装层内部存在的水份。对已经锈蚀的钢板必须进行打磨除锈，以消除粘结剂与钢板的粘结隐患。

从材料的角度考虑，绝大多数的快速固化材料均需要严格控制水份，水份的存在会加速环氧树脂的固化，影响混合料操作时间，同时会加剧混合料固化后的收缩变形，导致回填操作失败（裂缝出现二次开裂、接缝开裂等）。为了彻底消除水份的影响，可以在开挖后对基层表面进行处理，如清除松动混合料、清洁基层表面等，最后再烘干残余的水份。

由前面的试验结果可知，采用 LSQ⁴⁷ 粘结剂作为混合料与钢板间的粘结材料具有一定的可行性。考虑到修复材料的均匀性与固化时间，在选择 LSQ⁴⁷ 高强混凝土进行回填修复时同时采用 LSQ⁴⁷ 粘结材料。

另外，在修复过程中需要密切关注的一个问题是如何保证回填部分混合料与临近铺装层标高一致，以避免引起过大的冲击荷载，从而导致临近铺装层破损。如果操作人员相关经验比较丰富，可以人工进行回填区域的整平。否则建议在回填修复时回填部分标高稍微高于临近环氧沥青混凝土铺装层，待混合料完全固化后再进行打磨与整平处理。

§5.4 其他修复

由前述可知，LSQ⁴⁷ 高性能环氧树脂混合料因为操作方便，固化时间短而适合于小面积的一次性开挖回填修复处理。但是对于由特殊原因（主要是车祸火灾导致的大面积损伤等）而导致的大面积破损处桥面铺装修复，无论从经济角度还是操作和易性角度考虑，显然这种快速固化材料是不适用的，因此，必须针对这种特殊情况找寻其他经济可行的修复材料。

§ 5.4.1 修复材料

环氧沥青混凝土桥面铺装的大面积修复最低要求应该满足原环氧沥青混凝土的相关强度技术要求，以不形成薄弱区域为基准，因此，可以考虑采用原环氧沥青混凝土进行修复。但是采用环氧沥青混凝土进行修复时需要考虑到混合料拌制完成的保温措施等与混合料性能相关的关键技术。如果修复区域面积较大，可以考虑采用专用拌和楼进行拌制，然后运输至施工现场进行施工操作。为了达到预定压实度，需要采用规定的碾压设备。

另外，因为环氧沥青结合料拌制完成后需要一定的保温时间，以获得一定的初期强度，借此原因可以考虑采用环氧沥青粘结料作为结合料拌制混凝土，为了决定环氧沥青粘结料的最佳摊铺压实时间，需要测定其粘温曲线。

§ 5.4.2 试验研究

从理论分析来说，环氧沥青粘结料性能要远大于环氧沥青结合料，两者相关技术指标对比如表 5-12 所示。

表 5-12 环氧沥青粘结料与结合料性能技术指标对比

技术指标	测试结果		试验方法
	粘结料	结合料	
组分比例 (A : B)	1 : 4.45	1 : 5.85	—
拉伸强度 (23℃, MPa)	7.18	2.16	ASTM D 638
断裂延伸率 (23℃, %)	225	240	ASTM D 638
热固性 (300℃)	不熔化	不熔化	小试件放置在热板上

由相关技术指标对比分析结果可知，环氧沥青粘结料的拉伸强度值要远大于环氧沥青结合料拉伸强度。为评定两种混合料的强度特性，可以通过马歇尔试验。为了进行马歇尔试验，必须首先确定采用环氧沥青粘结料拌制混合料的最佳成型时间。

测定粘结料混凝土的最佳摊铺压实时间可以采用 Brookfield 旋转粘度仪测定其旋转粘度值，然后根据不同的粘度范围确定对应的时间值，试验结果如图 5-12 所示。

根据大量的试验结果及施工经验可知，环氧沥青混凝土在 A、B 组分混合后粘度达到 200~600cp 时为最佳摊铺与压实时间。根据这种理论可知，若使用粘结料作为修复材料，在 130℃ 条件下，采用粘结料作为结合料拌制的混合料在组分混合完成后约 10 分钟后即需要进行摊铺操作，在拌制完成 20 分钟内完成碾压，以使混合料达到最佳压实状态。这对于现场操作而言，可以减少混合料的保温时间，便于施工。

测定了环氧沥青粘结料的施工操作时间后，即可以开始室内成型马歇尔试件，测定其强度指标，试验结果如表 5-13 所示。

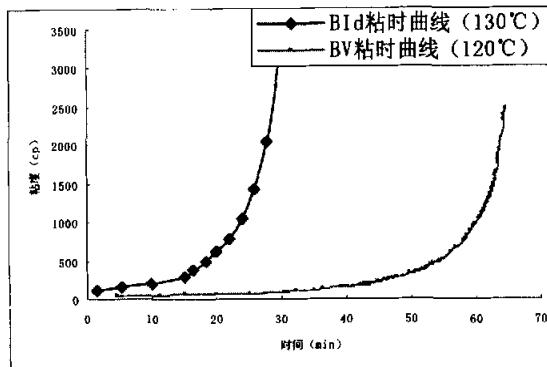


图 5-12 环氧沥青材料粘时曲线

表 5-13 环氧沥青混凝土马歇尔试验结果（固化）

沥青材料	油石比 (%)	空隙率 (%)	稳定度 (kN)	流 值 (0.1mm)	拌和 温度
环氧沥青粘结料	6.5	2.1	93.2	43.8	130℃
环氧沥青结合料	6.5	2.3	55.3	36.1	120℃

由试验结果可知，采用环氧沥青粘结料拌制的混合料的马歇尔强度值较采用环氧沥青结合料拌制的混合料高的多。综上所述，在130℃条件下采用环氧沥青粘结料拌制混合料的最佳成型时间不能超过20分钟，而拌和温度的降低会导致环氧沥青粘结料的粘度急剧增加，120℃粘度大于800cp，直接增加了拌和操作的难度，而一味增加温度又会导致反应时间过快。为此，采用环氧沥青粘结料作为混凝土回填材料只适合于一次性小范围的修补操作。

对于较大范围破坏面积的回填修复操作（需分批拌和混合料），应该采用先前所阐述的LSQ⁴⁷高性能混凝土材料或环氧沥青结合料混凝土。若考虑采用原环氧沥青结合料混凝土，则应考虑到其混合料拌和完成后的保温时间，这是施工操作过程中最大的难点。

由于环氧沥青材料是由两组分组成，组分A是环氧树脂，组分B为添加固化剂的沥青，两组分材料在一定的温度条件下混合后即开始化学反应，环氧树脂开环，逐渐形成大分子胶粘体系，主要表现就是混合物的粘度增大，混合料的初始强度也逐渐增大。当两组分混合物达到一定的粘度后，即可以进行混合料的摊铺与碾压等施工操作。如果摊铺时间过早，则会导致环氧沥青混凝土由于初期强度较低而导致后期强度发展缓慢，更重要的一点是可能会由于沥青材料粘度过低而导致混合料在摊铺等操作过程中出现离析。如果摊铺时间过晚，则会由于两组分混合物的粘度过大而导致无法达到混合料的最佳密实状态，从而导致修复铺装部分空隙率增大，导致铺装层渗水，直接降低修复部分铺装的使用寿命，严重情况下可造成钢板锈蚀。

为此，保证环氧沥青两组分混合物在一定温度条件下的预反应时间对于保证混合料质量具有至关重要的作用。如果是大面积的铣刨后重新铺装，可以采用专门拌和楼以及混合料摊铺机、钢胶轮压路机等专用设备进行重新摊铺。但是，对于较小范围修复，采用拌和楼的费用是非常高的，对于这种现场施工操作，需要找寻一种经济、实效、可行的局部修复方案与修复施工工艺。

前面已经介绍过环氧沥青的反应机理，不同的反应温度条件均对应不同的反应时间，

为此,只要能够找寻到不同反应温度对应的反应时间即可以掌握环氧沥青混凝土的最佳摊铺时间。对于新建钢桥的摊铺操作,美国 ChemCo 公司已经研究出对应的温度一时间关系,如表 5-14 所示。

表 5-14 环氧沥青混凝土不同温度的摊铺时间 (min)

温度范围 (℃)	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121
混合料 最长容许时间	94	90	86	82	78	76	74	70	66	63	60	57
混合料 最短容许时间	69	66	63	60	57	55	54	51	49	48	46	45

注: 最长容许时间 是指从运料车中第一批料出料到运料车将混合料倒入摊铺机中之间的最大允许时间。

最短容许时间 是指从运料车中第一批料出料到运料车将混合料倒入摊铺机中之间的最小允许时间。

由表中的数据可知,美方所提供的环氧沥青混凝土拌制的温度最高值为 121℃,所对应的摊铺时间范围为 45~57min。对于现场的施工操作而言,这个时间范围还是相当长的。为了再缩短现场施工时混合料拌制后的保温时间,可以适当提高混合料的拌和温度。环氧沥青混凝土的拌和温度只是为了保证环氧树脂开环形成大分子胶粘链,温度越高,反应越剧烈,所需的反应时间也越短。为此,需要测定不同温度条件下的粘度~时间关系曲线,以确定混合料的最佳拌和温度与拌和后的保温时间。试验采用 Brookfield 旋转粘度仪进行,具体试验结果如图 5-13 所示(本次试验同时进行了 145℃条件下的粘度曲线测定,但由于反应剧烈,短时间内粘度增加较快而无法测定其粘度曲线)。

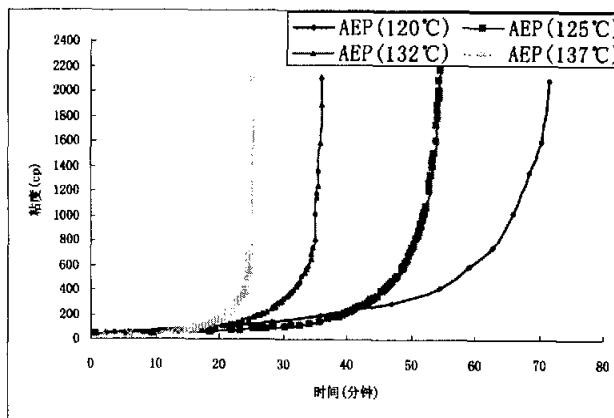


图 5-13 不同温度下的环氧沥青结合料粘时曲线

由试验结果可知,随着混合后温度的升高,混合环氧沥青的化学反应越剧烈,其达到一定粘度的反应时间也就越短,因而曲线走势越陡。从这个角度出发,以达到 600cp 的混合粘度为基准,120℃温度下的反应时间需要约 60min,125℃温度下的反应时间约 50min,132℃温度条件下的反应时间约 35min,137℃温度条件下的反应时间只需要约 25min。根据本次试验结果,对于现场修复时的拌和操作,可以适当提高混合料的温度,以缩短混合料的保温时间,增加现场施工的可操作性。

§ 5.4.3 施工处理

选取环氧沥青结合料混凝土进行修复处理时，根据不同温度条件下的粘度时间关系曲线，按照实际情况，选取一定的温度条件进行混合料的拌和。在实际现场修复施工时，如果修复面积较大，需要分批次拌和混合料，则需要先将拌和好的混合料分次拌和好后再保温一定时间。这一方面可以通过增加混合料的拌和温度来减少保温时间，另外一方面也可以通过将一定温度的混合料保温一定时间后再进行摊铺。对于保温操作，由于现场条件限制，可以利用现场修复区域进行保温。先拌和温度稍低的混合料，然后将混合料倒在修复区域，覆盖防雨布、棉衣等进行保温，再拌和其他温度较高的混合料，以缩短各批次拌和的混合料操作时间上的差异，并采用同样方法进行保温。混合料拌制完成后，保温时间也相继到位，即可以开始现场的铺装操作。

§5.5 特殊处理

§ 5.5.1 凹坑

第三章中介绍过，在对南京长江第二大桥环氧沥青混凝土桥面铺装的调查过程中发现，凹坑外伤是环氧沥青混凝土最为主要的病害。

凹坑外伤主要是由于过往通行车辆坠物磨损或冲击铺装层而导致的铺装层表面出现凹坑。凹坑外伤的面积以及深度与车辆坠物的大小以及重量相关。形成凹坑的另外一个原因是在环氧沥青混凝土摊铺过程中，由于矿粉结团而形成的铺装层表面拉皮现象，在摊铺过程中又没有及时进行检查与处理，导致铺装混合料在投入使用后由于表面矿粉团松散剥落而导致的铺装层表面的凹坑。

凹坑病害的出现使得行车荷载对该区域的铺装层形成冲击荷载，导致凹坑病害不断扩展恶化。因此，需要在环氧沥青混凝土铺装层使用期间定期检查铺装层使用情况，对所发现的凹坑病害进行及时处理。

处理凹坑所采用的修复材料与修复方法应该根据凹坑的面积深度尺寸选取。对于尺寸较小的凹坑病害，可以先利用钢丝刷与鬃毛刷将凹坑内的浮动颗粒与灰尘清除干净，然后预埋细质集料（如4#料），与临近铺装层表面齐平，再将YBL86粘结剂灌入凹坑内，待粘结剂完全固化后即可开放交通。

对于破损面积较大的凹坑，应该根据实际情况将凹坑的尺寸与深度扩展到能够回填与原环氧沥青混凝土类似级配的混合料为准。尺寸扩展可以利用手持式切割机进行，在切割时应根据回填混合料对铺装深度的要求来确定切割深度。一般沥青路面设计中要求路面厚度应至少有混合集料公称最大粒径的2/3。为此，以南京长江第二大桥为例，根据实际情况，可以将混合集料中的较大粒径的集料（如1#料）剔除，再拌制混合料进行回填。考虑到操作可行性，凹坑扩展以矩形为准，凹坑边缘以斜缝形式为准。

破损面积较大的凹坑回填时可以采用现场拌制的LSQ⁴⁷高强混凝土。相关修复材料试验与现场施工工艺参照本章第二节部分内容。

§ 5.5.2 燃油与化学污染

由于固化后的沥青材料被分散到环氧大分子胶链体系中，因而基本不会出现普通沥青混凝土那种高温流动迁移、遇溶剂溶解的性能。化学污染主要是由于某些化学品运输车滴漏等原因而残留在铺装表层的。虽然环氧沥青混凝土对汽车燃油以及化学品等有较好的抵抗能力，但是为了避免存在的燃油等对行车安全造成影响以及潜在的隐患（火灾等）对铺装层的

损坏，必须适时的将铺装层表面的燃油污染物清除。

清洗化学品或汽车燃油时，可以按照以下几个步骤考虑：

1. 在污染面积内散布大量的砂、木屑或矿粉填料等，以充分吸附污染物质；
2. 待污染物基本被吸附后，清扫表面的砂或其他吸附材料；
3. 利用清洗剂擦洗污染区域；
4. 再用大量的清水冲洗，冲洗时以目测表面基本无污染物为准。

§5.5.3 火灾影响

这里所指的火灾是指由于过往于桥面上的交通车辆事故而导致的燃烧。虽然环氧沥青混凝土能够抵抗一定的高温影响，但是由于这种火灾的发生一般持续较长的时间，且温度要较使用条件下高的多。为此，必须在火灾发生后对铺装层进行适当的处理，以防止火灾对铺装层使用性能产生不必要的影响。

对于由火灾而导致的铺装层修复，主要需要根据火灾的持续时间和火灾的严重程度而定。短时间的小范围火灾可能只是影响铺装层的表面，但长时间持续的火灾会导致较大面积范围的破损。因此，对不同程度的火灾影响的铺装层的修复需要采取不同的方法。在此规定，对于铺装层影响深度小于 5mm 的火灾成为小范围火灾，影响深度大于 5mm 的火灾称为严重火灾。

对于影响深度小于 5mm 的小范围火灾而言，修复可以分为两个步骤：

1. 将表面受火灾影响而松动的混合料挖除；
2. 采用与鼓包开挖修复的相同材料（不含集料）进行回填修复。

对于影响深度大于 5mm 的严重火灾，可以按照如下步骤进行处理：

1. 沿破损区域向外加宽至少 50mm 切割；
2. 将破损区域内的混合料凿除，注意必须再沿深度方向上加深至少 25mm；
3. 采用鼓包修复混合料类型进行回填修复。

相关施工操作与鼓包修复类似，注意修复区域的压实度以及与临近铺装层的衔接平顺情况，杜绝渗水或跳车情况的发生。

§5.6 小结

环氧沥青混凝土是一种性能优越的桥面铺装材料，相比其他类型的铺装材料而言，环氧沥青混凝土拥有较高的强度、优异的变形能力、优越的高温稳定性与低温抗裂性，能够抵抗多种燃油与化学物质的侵蚀，具有较好的抗滑性能，能够满足桥梁使用寿命要求。为此越来越受到人们的青睐。

但是，环氧沥青混凝土对施工工艺的要求非常苛刻，对施工期间的环境温度、湿度以及混合料摊铺时间的要求均较严，因而，在环氧沥青混凝土材料施工期间必然会由于某些不可避免的因素而给环氧沥青混凝土铺装层的后期使用埋下隐患。

在我们对南京二桥环氧沥青混凝土桥面铺装进行调查过程中发现，环氧沥青混凝土所表现出的某些病害主要有鼓包和开裂以及坑洞三大类。通过本章相关内容的研究，我们初步掌握了对环氧沥青混凝土桥面铺装的鼓包、开裂以及坑洞病害的处理方法，相关现场处理效果也比较满意。这三类病害状况中以开裂病害最为复杂，主要是因为其出现的位置与开裂尺寸均毫无规律可循，因而还需要相当长的时间来进行跟踪观测来确定对此种病害的处治效果与修复材料及其施工工艺的可行性。

第六章 结论与展望

§6.1 结语

大跨径桥梁钢桥面铺装是一项涉及多学科的系统工程。对正交异性板钢桥面铺装这种刚柔结合的复合结构，受力状态十分复杂，对铺装材料及铺装结构的疲劳强度、变形能力、抗腐蚀性、水稳定性、高温稳定性、低温抗裂性、层间粘结性、表面抗滑性以及施工等都有很高要求。钢桥面铺装一直是我国大跨径缆索支承钢箱梁桥建设中的关键技术之一，受到学术界与工程界的普遍重视。环氧沥青混凝土桥面铺装材料是适时而生的优异桥面铺装材料，在国外，尤其是美国拥有使用期超过三十年的历史，凭借其卓越的使用性能而逐渐在桥面铺装工程尤其是大跨径正交异性钢箱梁桥桥面铺装工程中崭露头角。

国内针对环氧沥青混凝土的研究主要起始于南京长江第二大桥，对环氧沥青材料性能以及环氧沥青混凝土性能均有系统的认识，并为现场施工研究出一套切实可行的施工工艺与流程。与国内其他类型桥梁的桥面铺装相比，南京长江第二大桥环氧沥青混凝土投入使用至今表现出优越的性能。为了进一步跟踪研究环氧沥青混凝土的使用性能，我们对南京长江二桥环氧沥青混凝土桥面铺装进行定期调查，对所发现的问题进行及时总结，力争延长桥面铺装使用寿命，服务于国内的大跨径钢箱梁桥建设事业。

针对南京长江二桥桥面环氧沥青混凝土铺装所出现的病害，东南大学桥面铺装课题组与南京长江第二大桥管理局联合研究，并投入了大量的人力、物力进行定期跟踪调查、记录，针对病害及时处理，以防止水份进一步下渗引起大面积破损。同时，课题组与南京第二大桥管理局合作，共同开展环氧沥青混凝土病害分析与处理方法的研究。

环氧沥青混凝土桥面铺装各种病害所产生的原因各不相同，为了找出针对性的处理方法，解决环氧沥青混凝土铺装的病害，本文根据南京长江第二大桥环氧沥青混凝土桥面铺装调查过程中发现的不同病害，从补强设计与密封防水角度出发，对多种修复材料进行比选研究，提出针对性的处理方案，并对现场施工操作进行了简单的叙述，为现场实施提供了一定的依据。本文通过大量的室内对比试验、现场不同处理方案的实施及处理效果的跟踪调查，得到如下结论：

1. 环氧沥青混凝土是一种优异的桥面铺装材料，但是由于其对施工期间的环境、材料温度等要求非常苛刻，这必然会由于某些无法避免的因素而导致铺装层在投入使用后出现某些缺陷。
2. 本文深入分析了环氧沥青混凝土施工期间与使用期间所出现的不同病害，并对病害成因进行了初步的探讨，使读者对环氧沥青混凝土桥面铺装的病害情况有初步了解。
3. 本文对环氧沥青混凝土桥面铺装抗滑性能问题进行系统的调查与研究分析，从而对环氧沥青混凝土桥面铺装抗滑问题有崭新的认识。研究结果表明，由于“灰粉化”～磨耗的综合作用，随时间的推移环氧沥青混凝土桥面铺装的抗滑性能有不同的变化。
4. 本文分析了大跨径钢箱梁桥桥面铺装层开裂病害的修复机理，裂缝修复材料应以能够密封缺陷断面，降低应力集中为准则。文章同时提出裂缝断面因子（深宽比）决定修复材料的特性，为此，选择裂缝修复材料时应该主要考虑其与裂缝周壁的粘结强度，而非修复材料的断裂延伸率。
5. 本文根据不同的时期与不同病害表现状况，对环氧沥青混凝土铺装层在使用期间出现的鼓包病害进行了较为系统的阐述。进一步以补强设计为原则从材料性能方面对修复材料

进行了研究比选，并在此基础上针对不同的病害发展时期提出了不同的处理方法与相应的现场施工操作措施。

6. 本文同时还对其他特殊情况（如燃油污染等）的修复进行了相关研究，为彻底消除影响环氧沥青混凝土桥面铺装使用性能的隐患打下一定的基础。

§6.2 需进一步研究及探讨的问题

本文以美国环氧沥青为基础，结合南京长江第二大桥环氧沥青混凝土桥面铺装使用过程调查与分析，集中研究了环氧沥青混凝土桥面铺装材料不同的病害修复处理技术。但由于试验设备、研究经费、研究时间所限以及本人能力有限，本文的研究还不够全面，有待研究的内容有：

1. 本文虽然研究分析了环氧沥青混凝土的各种病害情况与病害处理方法，但是对于裂缝病害的成因难以得到满意的答案。主要是因为环氧沥青混凝土桥面铺装层的裂缝病害并非是结构性或功能性的破坏，其裂缝外形与尺寸均无规律可循，给力学分析带来一定的难度。因而，深入调查环氧沥青混凝土钢桥面铺装的开裂病因是十分有价值的。
2. 文章由于时间以及设备的限制，没有进行环氧沥青混凝土约束试件的温度应力（冻断试验）以及温度变更交替而引起的温度应力疲劳的相关试验研究。而针对目前的现状，研究环氧沥青混凝土桥面铺装层在温度骤降时的抗裂性能与温度变更交替而引起的温度应力疲劳是非常有意义的。
3. 随着国内大跨径钢箱梁桥建设事业的突飞猛进，进一步研究环氧沥青混凝土的关键技术指标，提出适宜的桥面铺装的养护技术规范是目前十分迫切的关键课题。

参考文献

- 1 黄卫, 胡光伟, 张晓春. 大跨径钢桥面沥青混合料特性研究[J]. 公路交通科技, 2002.19(2): 53-55
- 2 黄卫, 钱振东. 高等沥青路面设计理论与方法[M]. 科学出版社, 2001.8
- 3 李闯民, 李宇峙. 钢桥桥面沥青铺装层应变变化规律研究[J]. 公路交通科技, 2000.17(6): 2-4
- 4 邓学均, 顾兴宇, 周世忠, 周建林. 钢桥面沥青铺装层裂缝破坏趋势研究[J]. 公路交通科技, 2002.19(4): 4-7
- 5 胡光伟, 钱振东, 黄卫. 正交异性钢箱梁桥面第二体系结构优化设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002.31(3): 76-78
- 6 胡小弟, 孙立军. 不同车型非均布轮载作用力对沥青路面结构影响的三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2003.20(1): 1-5
- 7 顾兴宇, 邓学均, 周世忠, 周建林. 车辆荷载下钢箱梁沥青混凝土铺装受力分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001.31(6): 18-20
- 8 邓学均. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002.2(2): 1-7
- 9 吉林, 冯兆祥. 江阴大桥动静载试验与分析[J]. 华东公路, 2001(1): 36-39
- 10 周世忠. 江阴长江大桥建设中的重大技术问题[J]. 桥梁建设, 2000(2): 20-24
- 11 金增洪. 江阴大桥简介[J]. 公路, 1999(11): 31-37
- 12 黄卫, 张晓春, 胡光伟. 大跨径钢桥面铺装理论与设计的研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002.32(3): 480-487
- 13 曾勇. 武汉白沙洲大桥钢桥面铺装设计与施工[J]. 公路, 2001(1): 42-46
- 14 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 人民交通出版社, 2003.5
- 15 余叔藻, 陈仕周等. 大跨径悬索桥钢桥面沥青铺装技术[J]. 中国公路学报, 1998(3)
- 16 李洪涛, 黄卫. 浇注式沥青混合料在日本钢桥面铺装中的应用[J]. 华东公路, 1998(3)
- 17 陈先华. 润扬大桥钢桥面铺装结构试验研究[D]. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2003.3
- 18 沙庆林. 沥青和沥青混合料现状[J]. 国外公路, 1997.1(3): 1-6
- 19 中华人民共和国交通部. 沥青路面施工及验收规范[S]. 中国计划出版社, 1996.9
- 20 交通部公路科学研究所等. 道路沥青及沥青混合料路用性能的研究[R], 1995.11
- 21 中华人民共和国交通部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 人民交通出版社, 1993.2
- 22 黄卫. 沥青混合料疲劳响应新模型的研究[J]. 中国公路学报, 1995(1)
- 23 张起森, 李宇峙等. 厦门海沧大桥桥面沥青铺装层直道疲劳试验研究[J]. 中国公路学报, 2001.14(1): 60-72
- 24 交通部公路管理司. 公路养护与管理手册[S]. 人民交通出版社, 1993.4
- 25 K. Nishikawa, J. Murakoshi, T. Matsuki. Study on the Fatigue of Steel Highway Bridges in Japan[J]. Construction and Building Materials, 1998.12
- 26 <http://www.chemcosystem.com/>[Z]
- 27 张磊. 江阴大桥桥面铺装病害研究[D]. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2004.3
- 28 李新发. 桥面铺装粘结层试验研究[D]. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2004.3

- 29 樊叶华. 浇注式沥青混凝土桥面铺装材料[D]. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2004.3
- 30 于力. 江阴大桥铺装病害修复技术研究[D]. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2004.3
- 31 黄卫, 邓学钧, C.L. Monismith. 能量方法分析沥青混合料的疲劳特性[J]. 中国公路学报, 1994.7(3): 23-35
- 32 葛折圣, 黄晓明, 许国光. 用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J]. 东南大学学报, 2002.32(4): 653-655
- 33 G. H. Gunther, S. Bild, G. Sedlacek. Durability of Asphaltic Pavements on Orthotropic Decks of Steel Bridges[J]. Construct. Steel Research, 1987.
- 34 郝培文, 刘红瑛. 运用蠕变速率评价沥青混合料低温抗裂性的研究[J]. 石油沥青, 1994: 6-10
- 35 黄卫, 李淞泉. 南京长江第二大桥钢桥面铺装技术研究. 公路[J], 2001.(1): 37-41
- 36 宗海, 张磊, 徐安宁. 表面涂刷型沥青路面保护材料试验研究[J]. 江苏交通, 2003.(8): 19-21
- 37 应荣华, 田小革. 沥青混凝土温度应力试验研究[J]. 公路, 2001(4): 66-89
- 38 郝培文, 张登良. 沥青混合料应力松弛性能研究. 西安公路交通大学学报[J], 1996.12
- 39 许志鸿, 李淑明, 高英, 丰晓. 沥青混合料疲劳性能研究[J]. 交通运输工程学报, 2001.1(1): 20-24
- 40 闵召辉, 黄卫, 王晓. 环氧沥青混凝土钢桥面铺装层温度应力研究[J]. 公路交通科技, 2003.20(4): 12-15
- 41 张力, 陈仕周. 钢桥面铺装技术的研究与发展[J]. 公路, 2001.(1): 2-5
- 42 潘世建, 杨盛福. 厦门海沧大桥建设丛书(第七册/第八册)[M]. 人民交通出版社, 2003.07
- 43 中华人民共和国交通部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTJ052-2000) [R]. 人民交通出版社, 2000.
- 44 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范((JTJ 032-94) [R]. 人民交通出版社, 1994.
- 45 南京长江第二大桥钢桥面铺装设计研究[G]. 东南大学交通学院内部资料, 2000 年
- 46 D.H.Jung, T.S.Vinson, etc. Low-Temperature Cracking: Test Selection [G]. SHRP-A-400.
- 47 Antonio Maia, Yves Marciano, etc. Low Temperature Behavior of Hard Bitumen: Experiments and Modeling[J]. Asphalt Paving Technology, 1999.vol.68.
- 48 AASHTO Provisional Standard. Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength [G]. AASHTO Designation: TP10-93, 1996.
- 49 张婧娜, 谭忆秋, 张肖宁. 应用能量原理预测沥青混合料的疲劳破坏[J]. 中国公路学报, 1998.11(4): 11-17
- 50 应荣华, 田小革, 郑健龙. 沥青混合料的低温低频疲劳试验研究[J]. 公路与汽运, 2001(83): 23-24
- 51 长沙交通学院. 沥青路面低温抗裂设计指标与计算方法研究[R]. 长沙, 2000.
- 52 王邵怀, 张肖宁. 沥青混合料疲劳破坏预测方法的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995.28(2): 37-44

致 谢

论文终于如期完成，虽然时值寒冬，但内心有说不出的欣慰！

首先感谢我的导师黄卫教授为我创造的良好环境，使我从一个涉世未深的小孩成长为拥有丰富专业知识与社会经验以及科研工作能力的优秀研究生。

导师严谨的治学态度、渊博的专业知识以及诲人不倦的学者风范使我终生受益。在攻读硕士学位期间，导师在各个方面给予了我无微不至的关怀和教诲，在此向导师致以衷心的感谢和崇高的敬意！

感谢东南大学桥面铺装课题组负责人程刚教授和钱振东副教授，感谢杨军教授、王晓研究员以及王建伟老师，自我进入桥面铺装课题组以来，他们教给我做人的道理和参加科研工作基本要点与方法，使我的人生道路充满梦幻般的色彩，让我受益匪浅。

感谢张磊、陈先华两位博士对我的科研启蒙，在他们的关心和帮助下，我在科研的道路上取得了重要进步，再次向他们表示谢意！

感谢道桥试验中心的试验员李佳乐、刘明莉、周登阳、王根成等在试验期间提供的便利和帮助。

感谢润扬长江公路大桥建设指挥部与山东交通工程总公司领导提供的试验机会，感谢江阴市道路工程处领导，东南大学闻召辉博士和南京长江第二大桥于力，扬子大桥股份有限公司樊叶华，学友张永强、姚波、敬森森、朱义铭、关永胜等对我的关心和帮助。

最后，谨以此文献给我的父母亲人和我的女友锁珊珊，感谢他们对我的关怀与呵护，我永远爱你们。

宋 薜

二〇〇五年元月于东南大学道桥实验室