

## 摘 要

硬质沥青针入度低，高温性能相对于高标号沥青更为优越，在德国、日本等大跨径钢桥面浇注式沥青混凝土铺装中应用较为广泛，取得了良好的使用效果。本研究采用国产硬质沥青作为浇注式沥青混凝土的胶结料，借鉴国内外的浇注式沥青混凝土的成功经验，采用大量室内试验深入研究适合我国气候交通特征的硬质沥青浇注式沥青混凝土的性能。

本研究参照我国现行沥青技术规范以及德国、日本对浇注式沥青混凝土中沥青胶结料的性能要求以及安庆长江大桥钢桥面铺装确定的胶结料的一些指标，通过大量系统的室内试验研究，比选确定三种硬质沥青——国产直馏硬质沥青；PmB45 改性沥青；德国进口 PmB25 改性沥青，分别掺加适量的湖沥青作为本研究的胶结料。

本研究在深入分析国内外浇注式沥青混凝土配合比设计关键要素的基础上，提出了比较合理的浇注式沥青的配合比设计方法和试验评价指标。通过贯入度试验、高温车辙试验、不同温度的极限弯曲试验以及小梁疲劳试验，评价采用三种硬质沥青胶结料的浇注式沥青混凝土的性能，试验结果显示几种混合料弯曲性能和抗疲劳性能均较好但其高温性能一般，改性硬质沥青性能优于直馏硬质沥青。

最后，本研究通过复合改性的方式，进一步提高国产直馏硬质沥青的性能。通过相应的试验考察了在国产直馏硬质沥青掺加不同改性剂后，浇注式沥青混凝土的性能变化。通过试验发现掺加改性剂可以明显提高浇注式沥青混凝土的高温抗车辙性能，对其低温和抗疲劳性能也有一定的改善。

关键词：硬质沥青 浇注式沥青混凝土 配合比设计 路用性能 复合改性

## ABSTRACT

Hard bitumen has a low penetration and has better high temperature performance than soft bitumen. It is widely used in Gussasphalt in Germany and in Japan. The research did a lot of indoor tests on the Gussasphalt used hard bitumen as the binder, which can satisfy the special climate and traffic character in China, referring to the overseas useful experience.

According to the specification on the binder in our country, a lot of binder tests were done. Based on the results and the binder specification in Germany and Japan, the research chose three kinds of hard bitumen, straight hard bitumen produced in our country, PmB45 bitumen made in our lab and PmB25 imported from Germany, as the binder of the Gussasphalt.

Based on the analysis of the gussasphalt mixture design in and abroad, the paper presents more reasonable mixture design methods and test indexes. The pavement performance of gussasphalt with three kinds of hard bitumen was evaluated by workability test, indentation test, rutting test, bending test and fatigue test. The results showed that the mixtures have excellent pavement performance except their high temperature performance.

In order to improve the high temperature performance of gussasphalt with straight hard bitumen made in our country, the paper presents a composite-modified method with two kinds of modifier. The results are excited, especially the high temperature performance of the gussasphalt.

**Key words:** Hard bitumen Gussasphalt Mixture design Pavement performance  
Composite-modified

## 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： 潘友强 日 期： 2006.4.3

## 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： 潘友强 导师签名： 柯军 日 期： 2006.4.3

# 第一章 绪 言

## 1.1 概述

钢桥面铺装是一个世界性的难题。作为大跨径钢桥的关键技术,桥面铺装的研究工作受到国内外学术界和工程界的高度重视。世界上很多国家都投入大量的人力物力财力去进行研究开发,期望使钢桥桥面能拥有更好的使用条件和更长的使用寿命。硬质沥青作为一种性能优良的胶结料在以德、日为代表的钢桥面铺装浇注式沥青混凝土中获得了广泛的应用,取得了较好的经济效益和社会效益<sup>[1][2][3]</sup>。硬质沥青的发展与浇注式沥青的发展是紧密联系在一起的。

伴随着国内对大跨径桥梁桥面铺装的探索的深入,从江阴大桥,胜利黄河大桥,到安庆大桥,再到我国第一座跨海大桥东海大桥,浇注式沥青混凝土技术的应用日益广泛,探索性能优良、适合我国恶劣气候和繁重交通的浇注式沥青混凝土桥面铺装迫在眉睫。硬质沥青在国外大跨径桥面铺装中获得了成功的应用,这对我国的浇注式沥青混凝土的研究是一个较好的启示。

当前我国大跨径桥梁建设事业迅速发展,以及国外先进技术和设备的引进,获得国产硬质沥青经实践检验也是可行的。采用国产硬质沥青做胶结料,研究适合我国国情的浇注式沥青混凝土大跨径钢桥面铺装技术具有重要的理论意义和实用价值。

## 1.2 国内外硬质沥青的应用概况

本研究的硬质沥青泛指针入度为 20~40 (0.1mm) 的沥青,包括直馏道路沥青和通过各种改性方式获得的沥青,该种沥青针入度低,软化点高,相对于高标号的沥青有更好的高温稳定性,在国外都有比较成功的应用。我国在 2004 年新颁布的公路沥青路面施工技术规范 (JTJ F40-2004) 明确提出了 AH-30 号沥青<sup>[4]</sup>,对我国硬质沥青的研究应用有重要的意义。

### 1.2.1 硬质沥青在路面面层及基层中的应用

硬质沥青,在法国的生产应用有将近四十年,在减少沥青路面车辙和修筑硬质沥青基层方面发挥了较好的作用。硬质沥青主要被用来生产高模量沥青混凝土,例如应用于基层部分的高模量基层混凝土 EME,以及用于面层、磨耗层部分的高模量面层 BBME<sup>[5]</sup>。

70 年代法国重型汽车数量的快速增长,要求沥青混合料要具有更高的硬度以及更好的抗塑性变形能力,这种需求使硬度更高的沥青获得了重视,得到应用。40/50 和 60/70 号的沥青的制造始于 1966 年,在 1968 年,20/30 号的沥青首次问世。1969 年 9 月,法国道路理事会发布了沥青路面建设指导出版物中指出:较硬的沥青一般只有在要求非常苛刻的条件下(高温或交通流量极大)或对沥青型号有具体的要求时才考虑使用。

直馏硬质沥青的有较好的高温性能,但其低温性能较差,如何发挥它的长处,避免它的短处,沥青混凝土合理的设计是非常必要的。国外的经验认为不能把硬质沥青简单的认为是对沥青混凝土中胶结料的简单替换,采用硬质沥青的混凝土需要专门的进行设计。像法国研究的高模量沥青混凝土就具有较高的胶结料含量和较小的空隙率,且主要用于基层材料这些

特点。这样设计主要用来弥补硬质沥青的低温性能不佳所带来的问题，以期取得与传统较高标号的沥青混凝土相同的低温性能。法国多年的经验也认为，可以通过沥青的掺配或者聚合物改性的方法解决硬质沥青低温性能不佳的问题。表1-1为法国生产的硬质沥青（老化前）的一些基本性能<sup>[5]</sup>。

表1-1 典型硬沥青特征（老化前）

等级		15/25	10/20
软化点R&B	℃	66	66-72
针入度指数		+0.2	+0.5
170℃时的动态粘度	Pa	420	700
0℃时的剪切模量	MPa	425	700
10℃时的剪切模量	MPa	180	300
20℃时的剪切模量	MPa	70	110
60℃时的剪切模量	MPa	0.4	0.4

伴随着沥青炼制工艺的进步，优质国产直馏硬质沥青的生产已成为可能。国内对硬质沥青在中下面层的应用也进行了一些有意义的探索研究。表1-2为东南大学陈军等做的硬质沥青混凝土抗车辙性能研究的结果。试验对用做中面层的3种沥青混合料，采用直馏硬质沥青和SBS改性沥青两种不同类型的胶结料的抗车辙性能进行了对比研究<sup>[6]</sup>。

表1-2 中面层沥青混合料采用不同沥青时车辙试验结果

混合料类型	油石比 (%)	沥青类型	10000次车辙深度 (mm)	动稳定度 (次/mm)
Sup20	4.5	SBS改性沥青	2.580	4245
		国产硬质沥青	5.725	1445
AC-20I改进型	4.5	SBS改性沥青	1.883	5000
		国产硬质沥青	4.508	1547
AC-20I	4.4	SBS改性沥青	5.144	2147
		国产硬质沥青	7.869	1062

采用国产直馏硬质沥青的三种类型混合料的动稳定度均大于800次/mm，满足我国规范对普通沥青混凝土动稳定度的要求，但同时也可以看出，在高温抗车辙性能方面，改性沥青混合料明显优于国产直馏硬质沥青，无论是动稳定度，还是1万次车辙深度两个指标，改性沥青在抗车辙性能方面都有一定的优势。

## 1.2.2 硬质沥青在浇注式沥青混凝土中的应用

### 1.2.2.1 钢桥面铺装概述

钢桥面铺装是铺设在钢桥面板上,保护钢板并提供保证汽车行驶要求的路面表面功能、厚度约 35-80mm 的单层或双层构造物。其一般由防锈层、防水粘结层、铺装层等构成。在行车荷载、风载、温度变化及钢桥面局部变形等综合因素影响下,其受力和变形远较道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。作为桥梁行车系的重要组成部分,桥面铺装的好坏直接影响到行车的安全性、舒适性、桥梁耐久性 & 投资效益和社会效益。

钢桥面铺装技术在美国、英国、德国及日本等国家已有二十年的研究历史,在国内从 1995 年开始将该技术作为一项课题进行研究至今已有十几年的历史。钢桥面铺装技术研究是一项世界性难题,铺装使用条件异常严酷,其高温稳定性、抗疲劳开裂性,对钢板变形的追随性,层间粘接及完善的防排水体系等均有极高的要求。从铺装材料和施工方法角度来分,目前世界上主要采用的桥面铺装方案有四类<sup>[7]</sup>:

- 1、以德国、日本为代表的高温拌合浇注式沥青混凝土(Gussasphalt)方案,以英国为代表的沥青玛蹄脂混凝土(Mastic asphalt)方案,也可以归为浇注式沥青混凝土一类;
- 2、德国和我国近期采用的改性沥青 SMA 方案(Stone mastic asphalt);
- 3、以美国为代表的环氧树脂沥青(Epoxy asphalt)混凝土方案;
- 4、以及日本钢桥面铺装上面层采用的改性沥青密级配混凝土(dense grade modified asphalt)。

沥青玛蹄脂碎石(SMA)是一种密实结构的沥青混凝土,沥青玛蹄脂碎石与普通沥青混凝土相比,具有较好的高温稳定性、耐久性、低温抗裂性和抗滑性,但还有 3~5%的空隙率,故在使用过程中对桥面防排水工作要求很高。我国曾在广东虎门大桥,厦门的海沧大桥,武汉军山长江公路大桥采用了 SMA 铺装形式。

环氧沥青混凝土是在沥青中加入环氧树脂,并经过固化反应,使沥青性质由热塑性转为热固性,从而使该材料具有很多优良的性能。环氧沥青混凝土具有很高的强度,其马歇尔稳定度是一般沥青混凝土的 3~5 倍,还有很好的耐疲劳性能,良好的耐腐蚀性,但抗滑性能较差,养护期较长。南京长江二桥,润扬大桥,南京长江三桥桥面铺装采用了这种形式。

浇注式沥青混凝土属于悬浮式密实型结构的沥青混凝土,混合料具有细集料含量高、矿粉含量高、沥青含量高等特点,在混合料中骨料处于悬浮状态,而且由于内部空隙率不连续,因此形成了浇注式沥青混凝土不透水、耐冻融、耐油和抗老化的特点。同时,因沥青混凝土变形能力强,与钢桥面变形有很好的随从性、整体性优良、具有优良的抗低温开裂与抗疲劳开裂性能。它的显著特点是在施工温度条件下,沥青混合料自动流淌成型,不需要碾压就可达到规定的密实度和平整度。浇注式沥青混凝土用作桥面铺装通常有两种形式:一种是以英国为代表的单层浇注式沥青混凝土,另一种是以德国、日本为代表的浇注式沥青混凝土,江阴长江大桥,山东胜利黄河大桥,安庆长江大桥采用了此种铺装形式。

#### 1.2.2.2 浇注式沥青混凝土钢桥面铺装的发展

浇注式沥青混凝土的德语原文为 Guß,原是“河流”之意,引申为“浇注流淌”。德国于 1917 年开始研发浇注式沥青混凝土,并将浇注式沥青混凝土大量应用于建筑物防水层和铺装工程中。浇注式沥青混凝土在概念和历史上可简单解释为“注入式沥青混凝土”<sup>[8]</sup>。

与其它沥青材料相比,浇注式沥青混凝土的特点是在高温状态(约 220℃~260℃)下进行拌合,混合料摊铺时流动性大,依靠自身的流动密实成型,无需碾压,只需要用简单的摊铺平整机具即可完成施工,并能达到规定的密实度和平整度。英国、法国以及地中海沿岸的国家对这种材料习惯于用材料特性命名,称之为沥青玛蹄脂<sup>[9]</sup>。

浇注式沥青混凝土在钢桥面铺装(尤其悬索桥)中的应用首先出现在英国,英国道路运输研究协会在上个世纪 50 年代早期时就对此作了广泛的研究<sup>[10]</sup>。研究认为浇注式沥青混凝土

土主要有以下的优点:

- 1、防水性:空隙率小于1%,几乎为零,因而具有良好的防水性能。
- 2、柔韧性:沥青含量较高,变形能力强,对钢桥面板具有良好的追从性。
- 3、耐久性:一般在直馏沥青中掺配品质良好的天然沥青作为胶结料,而且沥青含量比普通混合料高,因而具有良好的耐久性。
- 4、粘着性:沥青含量大,空隙率几乎为零,因而与桥面板的粘结性能更好。

由于浇注式沥青独特的防水、抗老化性能、抗疲劳性能以及对钢桥面板优良的追从性,其在国外被广泛应用于桥面铺装,代表性的应用有:德国的奥博卡斯勒桥(Oberkasseler)、英国的汉博尔桥(Humber)、丹麦的大贝尔特东桥(GreatBelt East)、日本的明石海峡大桥(Akashi Kaikyō)和多多罗大桥(Tatara)等,主要应用实例见表1-3<sup>[1][12]</sup>。

表 1-3 浇注式沥青混凝土桥面铺装应用实例

国家	桥梁名称	铺装类型
德国	Oberkasseler	单层 60mm 浇注式沥青混凝土
	Zoo	双层 54mm 浇注式沥青混凝土
日本	明石海峡大桥	35mm 浇注式沥青混凝土+30mm 改性密级配沥青混凝土
	多多罗大桥	35mm 浇注式沥青混凝土+30mm 改性密级配沥青混凝土
	本四联络桥	下层浇注式沥青混凝土, 上层改性密级配混凝土
英国	恒伯尔大桥	单层 38mm 沥青玛蹄脂混合料
丹麦	大贝尔特桥	沥青玛蹄脂混合料
中国	江阴长江大桥	单层 50mm 沥青玛蹄脂混合料
	香港青马大桥	单层 40mm 沥青玛蹄脂混合料
	安庆长江大桥	35mm 浇注式沥青混凝土+35mm SMA
	台湾新东大桥	40mm 浇注式沥青混凝土+40mm 改性密级配沥青混凝土
	台湾高屏溪大桥	40mm 浇注式沥青混凝土+40mm 改性密级配沥青混凝土

80年代日本对国内300多座钢桥桥面铺装的使用状况进行了调查。根据其调查的结果,日本的钢桥面铺装可分为五种结构型式,如表1-4所示,其中以下层浇注式沥青混凝土,上层改性密级配混凝土作为桥面铺装的占大多数<sup>[2]</sup>。

表 1-4 80年代末日本钢桥面铺装设计形式调查结果

型式	铺装下层材料(厚度)	铺装上层材料(厚度)	桥梁数(%)
I	热拌沥青混凝土(40~50mm)	热拌沥青混凝土(40~50mm)	83(27)
II	浇注式沥青混凝土(30~40mm)	浇注式沥青混凝土(30~40mm)	71(23)
III	浇注式沥青混凝土(40~50mm)	改性密级配沥青混凝土(30~40mm)	123(41)
IV	单层热拌沥青混凝土(50~70mm)		23(8)
V	单层浇注式沥青混凝土(50~70mm)		3(1)

浇注式沥青混凝土中细集料及矿粉含量多、沥青用量大,普通石油沥青或一般聚合物改性沥青都难以保证其高温稳定性,很容易在桥面出现车辙等高温稳定性的病害。针对钢桥面浇注式沥青混凝土的高温性能不足的现状,英国采用提高 TLA 在胶结料中的含量来改善浇注式沥青混凝土的高温性能,如英国恒伯尔桥(Humber Bridge)采用的比例为 70:30(TLA:StA)。而以德国为代表的浇注式沥青混凝土则采用聚合物改性得到的硬质沥青如 PmB45 级或 PmB25 级沥青作为其结合料,而且现在已倾向于不再采用湖沥青。而日本的浇注式沥青混凝土则采用直馏硬质(普通 20~40 号)沥青(占 70~75%)与湖沥青(占 25~30%)混合而成。参照国外的经验,在钢桥面浇注式沥青混合料中采用硬质沥青结合料是可行的,可以改善桥面铺装的高温稳定性问题。

### 1.3 研究背景及意义

在国外,浇注式沥青混凝土一般具有 15~20 年的使用寿命,但由于钢桥面铺装的特殊性,浇注式沥青铺装层在服务期限内都或多或少地出现裂缝和波浪推移,以及局部拥包、车辙等一种或多种破坏<sup>[42]</sup>。江阴大桥浇注式沥青混凝土一直存在高温抗车辙变形能力不足的问题,自 1999 年 9 月建成通车以来,至 2003 年 11 月,除超车道外,其余车道都存在不同程度的车辙,其中靖江—江阴方向外侧慢车道车辙病害十分严重,最大车辙深度超过 2cm,江阴—靖江方向外侧慢车道的最大车辙深度也超过 1cm<sup>[13]</sup>。高温稳定性不足不仅危及到高速行驶的安全,影响了钢桥面板的使用寿命,同时严重影响了浇注式沥青混凝土作为一种优良的桥面铺装类型在国内的推广应用。

为了探讨适合我国高温重载条件下的浇注式沥青混凝土钢桥面铺装,本研究拟采用硬质沥青作为浇注式沥青混凝土的结合料,改善浇注式沥青混凝土桥面铺装的高温性能。在德国钢桥面铺装规范(1992 年版)中,德国联邦公路局明确规定浇注式沥青混合料的胶结料为聚合物改性沥青 PmB 45。近几年,德国不少建设单位为减少浇注式桥面铺装的车辙问题,建议使用标号更低的沥青结合料,并专门立项研究<sup>[1]</sup>。日本过去使用针入度 40/60 或 60/80 的直馏沥青生产浇注式沥青混凝土作为桥面铺装下层,现在一般用直馏硬质沥青 20/40 掺配湖沥青作为胶结料,取得了较好的使用效果,直馏沥青与湖沥青掺配比例一般为 75:25,也有湖沥青含量用到 30%的情况<sup>[3]</sup>。

根据国内外的研究现状,在钢桥面浇注式沥青混合料中采用硬质沥青胶结料是可行的。在国内获得硬质沥青经实践检验也是可行的。本研究拟通过大量室内试验,综合考证国产直馏硬质沥青、高性能聚合物改性硬质沥青浇注式混合料的高温性能、低温弯曲性能、抗疲劳性能,探讨适合我国国情的,能充分利用我国现有材料的优良的钢桥面铺装浇注式沥青混凝土。在采用硬质沥青改善浇注式混合料高温稳定性的同时,有可能影响混合料的低温性能、疲劳性能,因此本课题也拟通过复合改性的方式保证或适当改善混合料低温性能和抗疲劳性能。

### 1.4 研究的主要内容及研究的技术路线

本研究通过对国内外浇注式沥青混凝土钢桥面铺装的设计理论、试验规范以及铺装材料选择依据进行收集、整理和比较,借鉴国外特别是德国、日本浇注式沥青的相关研究成果,采用大量的室内试验研究,对国产直馏硬质沥青在浇注式沥青混凝土钢桥面铺装中的应用进行较为全面的研究,具体的方法和过程如下:

1. 收集国内外关于硬质沥青和浇注式沥青混凝土的研究使用资料,确定浇注式沥青及



其浇注式沥青混合料的技术标准。

2. 胶结料的主要技术指标检测

根据相关研究成果,检测可用于钢桥面铺装的胶结料的主要技术指标,确定下一步进行混合料试验的胶结料。

3. 确定适合钢桥面铺装结构的浇注式沥青混合料的配合比设计

参考国内外相关研究成果,确定合适的集料配合比,通过浇注式混合料流动性、贯入度试验,高低温试验确定试验所用沥青用量及进一步试验的混合料方案。

4. 浇注式沥青混合料主要性能研究

高温贯入度试验:通过 60℃的贯入度试验结果,评价混合料的高温性能。

高温抗车辙能力:通过能较好模拟路面实际工作状况的车辙试验,比较各种方案高温抗车辙能力的优劣。

抗弯曲性能:通过 20℃~-10℃间几种温度下的弯曲试验,比较各种方案的强度和变形能力。

疲劳性能:通过 15℃的四点加载小梁疲劳试验,比较各种方案的抗疲劳能力。

5. 对国产直馏硬质沥青进行复合改性,在改善浇注式沥青混凝土高温性能的同时,不影响或适当改善其低温性能和抗疲劳性能。

6. 在前述大量试验结果的基础上,综合分析各种浇注式混合料的性能,推荐较优的混合料方案,实现硬质沥青在钢桥面铺装中应用的基础研究。

## 第二章 硬质沥青性能研究

## 2.1 概述

浇注式沥青混凝土中细集料和矿粉含量高、沥青用量大，普通石油沥青或一般聚合物改性沥青都难以保证其高温稳定性，为了探讨适合浇注式沥青混凝土的胶结料类型，各国对浇注式沥青混凝土的胶结料进行了广泛的研究，胶结料的选择和使用经历了一个逐步发展完善的过程，世界各国结合自己的实际，研究了适合自己国情的胶结料方案，虽然各个方案之间也存在较大差异，但核心的目标是降低沥青的针入度，提高浇注式沥青混凝土的抗剪切能力。

德国浇注式沥青混凝土前期一般采用针入度为 20~50 (0.1mm) 的直馏沥青，当前浇注式沥青混凝土则通常采用聚合物改性得到的硬质沥青 PmB45、PmB25 沥青作为其胶结料 而且已经减少湖沥青的使用，以减少对环境的影响<sup>[14]</sup>；英国 Mastic 的沥青胶结料一般采用 60<sup>#</sup>~70<sup>#</sup>普通沥青掺配 50%~70% 的 TLA 拌制而成<sup>[15]</sup>；日本浇注式沥青混凝土则使用直馏硬质（普通 20~40 号）沥青（占 70~75%）与湖沥青（占 25~30%）混合做胶结料<sup>[3]</sup>。国内江阴大桥参照了英国的标准，其胶结料的性质见表 2-1，表 2-2<sup>[16]</sup>；而安庆长江大桥则参照了德国经验，采用改性沥青掺配湖沥青做浇注的胶结料，其主要的性质见表 2-3，表 2-4<sup>[17]</sup>。

表 2-1 江阴大桥 Mastic 基质沥青性能

试验指标		试验结果	技术要求	试验方法	
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	71	60~80	BS2000: 49	
延度(25℃, 5cm/min)	cm	>100	>100	ASTMD113	
软化点(R&B)	℃	48	44~45	BS2000: 5	
含蜡量	%	1.0	<2.0	D/N52015	
密度(15℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.045	—	—	
溶解度(三氯乙烯)	%	99.96	>99.0	ASTMD2042	
粘度(60℃)	Pa	1850	2000±200	ASTMD4402	
闪点(COC)	℃	340	—	ASTMD92	
薄膜烘箱 试验	质量损失	%	0.02	<0.80	ASTMD1754
	针入度比	%	69	>55	ASTMD1754
	延度(25℃)	cm	>100	>70	ASTMD1754

表 2-2 江阴大桥 Mastic 胶结料混合后性能

试验指标		试验结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	14	10~25	BS2000: 49
密度(15℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.257	1.17~1.30	—
软化点(R&B)	℃	68.1	60~70	BS2000: 5
矿物质(灰份)含量	%	25.1	18~27	BS2000: 22
溶解度	%	68.9	66~70	ASTMD2042
薄膜加热试验后质量损失	%	0.25	<2.0	ASTMD1754

表 2-3 安庆大桥浇注式沥青混凝土硬质沥青性能

技术指标		技术要求	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	20~40	JTJ052-2000
软化点(R&B)	℃	≥90	
延度(5℃, 5cm/min)	cm	≥10	
弹性恢复	%	≥90	TL-PmB Teil
RTFOT (180℃)			
质量损失	%	≤1.0	JTJ052-2000
针入度比	%	≥65	
延度(5℃)	cm	≥10	

表 2-4 安庆长江大桥胶结料混合后性能

技术指标		技术要求	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	20~30	JTJ052-2000
软化点(R&B)	℃	≥100	
延度(25℃, 5cm/min)	cm	≥20	

本研究采用的沥青为我国生产的直馏硬质沥青, 自行配制的 PmB45 沥青以及德国进口的 PmB25 沥青。采用三种沥青分别生产浇注式沥青混凝土, 进行相关性能的研究。同时根据试验结果, 若需要拟通过复合改性的方式进一步提高国产直馏硬质沥青浇注的性能, 以满足我国高温重载的使用要求。

## 2.2 沥青的生产工艺简述

### 2.2.1 普通石油沥青

石油沥青是从原油加工过程中得到的最重的组分, 由于原油化学组成是及其复杂的, 而沥青的化学组成不仅与原油的来源有关, 还与它的加工过程有关, 所以使得沥青的化学组成成分更加复杂。

道路沥青生产工艺主要包括减压蒸馏深拔、氧化、溶剂抽提及调合四种工艺。具体采用哪种工艺, 要视原油的性质和产品要求而定。我国目前主要采用的工艺是减压蒸馏深拔和氧化。而溶剂抽提工艺主要用于生产润滑油基础油或催化裂化原料, 副产的脱油沥青作为沥青产品的调合组分。从生产成本看, 费用最低的是调合工艺, 其它依次为减压蒸馏深拔、氧化和溶剂抽提。在优质高等级道路沥青的生产中, 如何选择适宜的生产工艺非常重要。对一定的原油, 如果只依靠一种工艺, 如氧化工艺等, 是不可能生产多种牌号的沥青产品的。如果根据原油特性和产品要求, 选择多种组合工艺生产, 往往会起到事半功倍的作用<sup>[18]</sup>。

氧化沥青或氧化法的原意是空气吹制沥青, 是软化点低, 针入度大及温度敏感性大的减压渣油或溶剂脱沥青或它们的调合物, 在一定的温度条件下通入空气, 使其组成发生变化, 软化点升高, 针入度及温度敏感性减小, 以达到沥青规格指标和使用性能要求。这个过程所发生的不只是氧化反应, 而是一个十分复杂的多种反应。该过程通过改变原料组成和氧化条件, 可以生产道路沥青、建筑沥青和其他专用沥青。世界经济的飞速发展对沥青的品种数量要求日益增多, 对其质量也提出了越来越高的要求。为了生产出多种优质的沥青产品, 世

界各国对沥青在氧化过程中的化学变化、热变化、反应速度等都进行了研究。

### 2.2.2 改性沥青<sup>[19]</sup>

用于改性沥青性能的聚合物主要有三类：树脂类、橡胶类与热塑性橡胶类。树脂类又分为热塑性树脂、如聚乙烯(PE)、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、无规聚丙烯(APP)等与热固性树脂，如环氧树脂(EP)等两类。橡胶类包括天然橡胶(NR)、丁苯橡胶(SBR)，卢丁橡胶(CR)与废旧橡胶粉等。热塑性橡胶类也称热塑性弹性体，主要由苯乙烯类嵌段与不同类型橡胶嵌段组成的共聚物，用作沥青改性剂的典型产品为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)，其他还有苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SIS)，苯乙烯-聚乙烯/丁苯-苯乙烯共聚物(SE/BS)等，这类聚合物兼具橡胶和热塑性树脂的性能，是 20 世纪 60 年代开发的第三代橡胶品。

不同种类的聚合物对沥青所起的改性作用是不同的。一般情况下，PE、EVA 等树脂类聚合物以改善沥青的高温性能为主；SBR、CR 等橡胶类材料以改善沥青的低温性能为主；SBS 等热塑性橡胶材料则既可改善沥青的高温性能，还可起到改善沥青的低温性能的作用，是目前国内外应用最多的一种聚合物改性剂。由于我国幅员辽阔，南北气候差异甚大。所以，在选择改性剂时应根据工程当地的气候条件以及期望得到的改性要求予以确定。同时，工程经济也是考虑的重要因素之一。

### 2.2.3 湖沥青

湖沥青 (TLA) 具有极低的温度敏感性与较强的稳定耐久性能，因此被大量应用于浇注式沥青混凝土等对温度要求较高的混凝土当中。TLA 是使用最广泛的且最为人熟知的一种天然沥青，最著名的是产于特立尼达的湖沥青。

TLA 的生产过程一般为：先对采掘的湖沥青混合物进行粗炼，加热到 160℃把水蒸发。然后把熔化的材料过筛，除去各种粗的杂物<sup>[20][21]</sup>。TLA 的主要成分包括 53%~55%的地沥青（二硫化碳可溶份）、36~37%的灰份、9%~10%的水化物以及挥发性物质等，灰份中有超过 80%是小于 60 μm 的微粒，并且 50% 的微粒小于 10 μm。灰份在天然条件下已经在湖沥青中混合了数千年，因此，它能为浇注式沥青提供稳定的填料，使沥青在低温状况下不发生脆裂破坏<sup>[22]</sup>。

TLA 中存在大量的芳香类化合物，它们中的大部分处在相对稳定的变化体系中，这种结构是 TLA 在复杂的地质作用过程中形成的。特立尼达湖沥青有限公司的研究认为，TLA 是一种凝胶结构而非溶胶结构，具有相对较高的表面张力，其特有的胶体结构使其很容易与普通石油沥青混合，从而降低了普通石油沥青的温度敏感性<sup>[23]</sup>。

由于 TLA 中含有 36~37%的灰份，这是 TLA 与普通沥青的一个重要的区别。因此在进行浇注式沥青混凝土配合比设计时，需要考虑 TLA 中灰份对混合料的影响。表 2-5 为本研究所采用的湖沥青的几个主要的技术指标。

表 2-5 本研究湖沥青的主要性能

试验指标	试验结果
软化点(R&B)	℃ 94.0
针入度 (25℃,100g,5s)	0.1mm 3.6
延度 (25℃, 5cm/min)	cm 13

## 2.3 本研究采用硬质沥青的基本性能

本研究的硬质沥青泛指针入度为 20~40 (0.1mm) 的沥青, 包括直馏道路石油沥青和通过各种方式改性获得的沥青。我国在 2004 年新颁布的公路沥青路面施工技术规范 (JTJ F40-2004) 明确提出了 AH-30 沥青, 对我国硬质沥青的研究应用有重要的意义, 表 2-6 为我国 AH-30 沥青规范要求。

表 2-6 我国 AH-30 沥青规范要求

试验指标		技术要求	试验方法
针入度 (25℃, 100g, 5s)	0.1mm	20~40	T 0604
软化点 (R&B)	℃	>55	T 0606
延度 (15℃, 5cm/min)	cm	>50	T 0605
TFOT 质量变化	%	<±0.8	T 0610
溶解度	%	>99.5	T 0607
闪点	℃	>260	T 0611
密度 (15℃)	g/cm <sup>3</sup>	实测	T 0603

### 2.3.1 国产直馏硬质沥青

直馏硬质沥青在日本浇注式沥青混凝土钢桥面铺装中获得了极大的成功, 这对我国钢桥面铺装材料选择是一个很好的启示, 本次研究将我国自行研制生产的直馏硬质沥青作为研究重点, 考察硬质沥青的性能以及硬质沥青浇注式沥青混凝土的性能。本研究采用的直馏硬质沥青的主要性质见表 2-7。

表 2-7 国产直馏硬质沥青的技术指标

试验指标		直馏硬质沥青	技术要求	日本规范要求
针入度 (25℃, 100g, 5s)	0.1mm	27.9	20~40	20~40
延度 (25℃, 5cm/min)	cm	>150	—	>50
软化点 (R&B)	℃	56.8	>55	55~65
含蜡量	%	1.8	<2.2	
密度 (15℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.039	实测	>1
溶解度 (三氯乙烯)	%	99.85	>99.5	>99.0
闪点 (COC)	℃	318	>260	>260
薄膜烘箱 试验	质量损失	%	0.04	<±0.8
	针入度比	%	78.0	>65
	延度 (25℃)	cm	>150	—

直馏硬质沥青在日本浇注式沥青混凝土中应用最为广泛, 其相关的技术体系及技术指标均比较成熟, 因此本次对硬质沥青的研究参照了日本桥面铺装的设计与施工中硬质沥青规范。通过试验结果可以看出: 国产硬质沥青的性能已达到了日本规范的要求, 可以应用于浇注式沥青混凝土。

## 2.3.2 PmB45 沥青

德国在浇注式沥青混凝土中采用 PmB45 掺加湖沥青改善浇注式沥青混凝土的性能,进行了较多的尝试,取得了许多经验。本研究参考德国的相关经验,评价通过复合改性获得的 PmB45 沥青在浇注式沥青混凝土中应用的性能。

本研究采用的 PmB45 沥青是通过对 70" SBS 改性沥青复合改性获得的。在成品 SBS 改性沥青中掺加适量改性剂后,沥青的针入度降低,软化点升高,可以满足德国 PmB45 的技术要求。

试验采用专用的改性沥青生产设备,将改性剂添加到 160℃左右的改性沥青中,经过大约 30min 的搅拌,即可获得均匀的 PmB45 沥青。表 2-8 为作为基质沥青的 SBS 沥青的性能。表 2-9 为本研究的 PmB45 沥青的性能。

表 2-8 SBS 沥青性能试验

试验指标		试验结果	技术要求	
针入度 (25℃,100g,5s)	0.1mm	58.8	30~60	
延度 (5℃,5cm/min)	cm	57.6	20	
软化点(R&B)	℃	61.5	60	
密度 (15℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.034	实测	
溶解度 (三氯乙烯)	%	99.9	99	
弹性恢复 (25℃)	%	77	75	
闪点 (COC)	℃	>300	230	
薄膜烘箱试验	质量损失	%	0.024	±1.0
	针入度比 (25℃)	%	84.5	65
	延度 (5℃)	cm	20	15

表 2-9 本研究的 PmB45 沥青

试验指标		试验结果	德国规范要求
针入度 (25℃,100g,5s)	0.1mm	45.7	20~60
软化点(R&B)	℃	94.0	55.0~63.0
延度 (25℃,5cm/min)	cm	48.7	>15
老化后质量变化	%	0.03	0.50
老化后延度 (25℃)	cm	46.4	8

## 2.3.3 德国 PmB25 沥青

近年来,德国在钢桥面铺装中也采用 PmB25 改性沥青做浇注式沥青混合料胶结料,并且逐渐减少使用或者不再使用湖沥青,取得了较好的使用效果。在浇注式沥青混合料生产过程中,湖沥青的加入会产生大量的浓烟,味道很难闻,减少或者放弃使用湖沥青有利于环境保护和改善工人工作环境。鉴于当前国内沥青的研究现状,本研究直接采用德国进口 PmB25

沥青作为浇注的胶结料,进行混合料的性能研究。表 2-10 为德国进口 PmB25 改性沥青的性能。

表 2-10 德国 PmB25 沥青主要技术指标

试验指标		试验结果	试验方法
针入度 (25℃, 100g, 5s)	0.1mm	27.5	T 0604
延度 (25℃, 5cm/min)	cm	21.7	T 0605
软化点 (R&B)	℃	87.5	T 0606
脆点	℃	-10	T 0613
密度 (15 ℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.05	T 0603
闪点 (COC)	℃	250	T 0611
弹性恢复率	%	50	T 0602
薄膜烘箱试验	质量损失	%	0.03
	针入度比(25℃)	%	91
	延度(25℃)	cm	11.9

## 2.4 混合沥青的基本性能

由于湖沥青具有极低的温度敏感性与较强的耐久性能,因此为弥补浇注沥青混凝土的高温性能不足的弱点,被大量应用于浇注式沥青混凝土中。英国为了提高浇注的高温性能,沥青胶结料采用 TLA 掺配一定比例的 60<sup>#</sup>~70<sup>#</sup>普通石油沥青拌制而成, TLA 掺配比例高达 50%~70%;德国浇注式沥青混凝土湖沥青的掺加比例为 15~35%,当前一般考虑采用复合改性的方式不再掺加湖沥青;日本浇注式沥青混凝土则使用直馏硬质(普通 20~40<sup>#</sup>)沥青(占 70~75%)与湖沥青(占 20~30%)混合做胶结料。

本研究通过测定在国产直馏硬质沥青中掺加不同含量 TLA 的混合沥青的性能,确定 TLA 的合适掺量。表 2-5 为硬质沥青掺配 TLA 后的性能。图 2-1 为不同掺量 TLA 对硬质沥青性能的影响。

表 2-5 硬质沥青掺配 TLA 试验结果

TLA 掺量 (%)	针入度 (0.1mm)	软化点 (℃)
0	27.9	56.8
20	25.8	58.1
25	23.8	58.4
30	21.4	59.8
40	14.7	63.8
50	11.7	66.8
60	9.0	72.1
日本规范	15~30	58~68

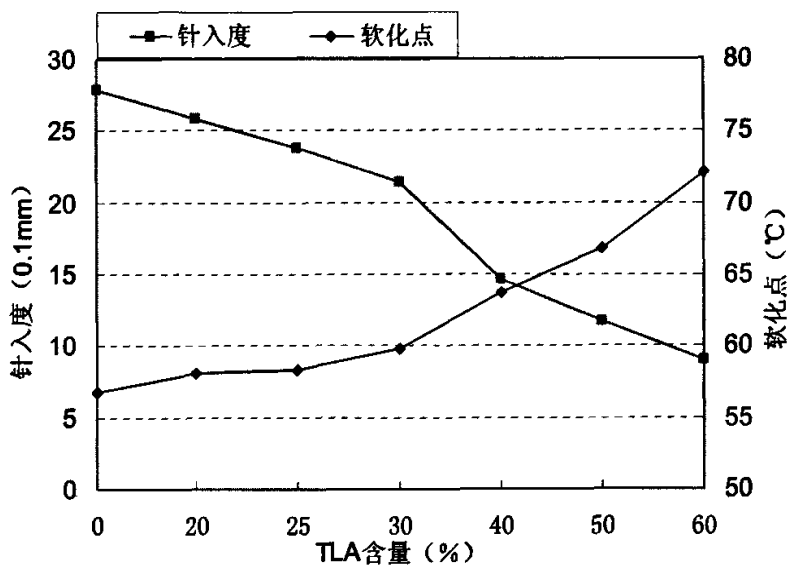


图 2-1 不同掺量 TLA 对硬质沥青性能的影响

对于直馏硬质沥青,本研究根据上述试验结果以及日本规范的要求,同时适当提高 TLA 的掺量以适应我国高温重载的交通条件,将 TLA 的含量定为 30%。

对于 PmB45 改性沥青,德国推荐的 TLA 为 15~35%,本研究为了对比国产硬质沥青和 PmB45 改性沥青的性能,将 TLA 的掺量定为 30%。表 2-6 为本研究采用的混合沥青的性能。

表 2-6 混合沥青的性能

技术指标	直馏硬质沥青+30%TLA	PmB45+30%TLA	PmB25
软化点(R&B) °C	59.8	86.5	87.5
针入度(25°C, 100g, 5s) 0.1mm	21.4	22.8	27.5
延度(25°C, 5cm/min) cm	26	16.2	21.7

## 2.4 本章结论

通过实验室的沥青性能测试,参考国内外的成功经验,决定采用国产直馏硬质沥青与湖沥青,自行配制的 PmB45 沥青与湖沥青以及德国进口 PmB25 沥青三种材料作为浇注式沥青混凝土性能研究的胶结料。



## 第三章 浇注式沥青混凝土的配合比设计

### 3.1 概述

浇注式沥青混凝土不同于普通的沥青混凝土,它是由高含量且高粘度的沥青、高掺量的矿粉,经过高温长时间拌制,设计时几乎以零孔隙率(空隙率小于1%)为目标,所以浇注式沥青混凝土配合比设计不同于其它的沥青混合料。普通热拌沥青混凝土配合比设计一般采用马歇尔设计法,当前 Superpave 配合比设计方法也开始被采用<sup>[24]</sup>。普通热拌沥青混合料组成设计一般包括确定沥青混合料的类型、材料选择、确定混合料级配、确定混合料最佳沥青用量以及混合料性能检验等内容。而浇注式沥青混凝土主要以贯入度及贯入度增量作为设计指标,辅以车辙试验,低温弯曲试验进行配合比检验,但各个国家又根据自己的实践经验,有各自的特色。我国目前还没有浇注式沥青混凝土具体的设计规范,本研究主要参照德国和日本以及国内一些成功的工程实践经验进行配合比设计。

### 3.2 国内外浇注式沥青混凝土配合比设计研究

浇注式沥青混凝土沥青含量高、矿粉含量高、空隙率低,各国的级配要求有共同的特点——细料含量高,粗料含量低,同时各国对于用于浇注的沥青胶结料的要求有比较大的差异,采用的沥青胶结料类型以及最后的性能要求都有所不同。而且对于最后沥青混凝土的设计指标的要求也不同,当前像德国一般只要求一个贯入度增量<sup>[1]</sup>,而日本主要看流动性、贯入度、动稳定度和低温弯曲结果<sup>[2]</sup>,而英国的要求比较多,主要有硬度指数(Hardness Number)、稳定度及流值、轮辙深度以及车辙率等<sup>[15]</sup>。

#### 3.2.1 德国

德国浇注式沥青混凝土在集料的要求方面和其它国家大致相同,均对集料的扁平率、磨耗损失作相关规定。德国浇注式沥青混凝土粒料级配分为 0/11、0/8、0/5 三种,其规格如下表 3-1<sup>[25]</sup>所示<sup>]</sup>。

表 3-1 德国浇注式沥青混凝土适用级配

类型	所占百分比 (%)				
	>11.2 mm	>8 mm	>5 mm	>2 mm	<0.09 mm
0/11 (s)	≤10	≥15	—	45~55	20~30
0/8		≤10	≥15	40~50	22~32
0/5			≤10	35~40	24~34

浇注式沥青混凝土在德国其应用范围是相当广的,并非仅限于钢桥面铺装这一个方面。德国的浇注式沥青混凝土级配分为三个等级,细级配多半应用于室内防水层或屋顶防水层,中间级配多应用于屋外停车场等,粗级配则应用于摩擦层或其它表面需求较粗糙的地方,像高速公路路面以及大跨径桥面铺装。

德国浇注式沥青混凝土胶结料一般采用针入度为 20~50 (0.1mm) 的直馏沥青,其中 0/11(S)、0/11 等类型的浇注式沥青混凝土通常采用 B45 级甚至 B25 级沥青作为其胶结料<sup>[49]</sup>,

掺配 15%~35%的天然沥青 TLA，其技术指标如表 3-2、3-3 所示。但是最近德国更倾向于采用改性沥青 PmB45，PmB25 作为浇注式沥青混凝土的胶结料，以获得性能更优越，且施工时更环保安全的混凝土。其技术指标如表 3-4 所示。

表 3-2 德国直馏沥青 B45、B25 技术指标

技术指标		规范		
		B45	B25	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	35~50	20~30	DIN 52 010
软化点 (R&B)	℃	54~59	59~67	DIN 52 011
脆点 (最大)	℃	-6	-2	DIN 52 012
溶解度 (三氯乙烯) (最大)	%	0.50	0.50	DIN 52 005 DIN 52 014
延度 (25℃, 5cm/min) (最小)	cm	40	15	DIN 52 013
含蜡量 (最大)	%	2.0	2.0	DIN 52 015
密度 (最小)	g/cm <sup>3</sup>	1.00	1.00	DIN 52 004
蒸发后质量变化率 (最大)	±%	0.80	0.80	DIN 52 016
老化后软化点增加 (最大)	℃	6.5	6.5	DIN 52 016 DIN 52 011
老化后针入度变化 (最大)	%	40	40	DIN 52 016 DIN 52 010
老化后延度 25℃ (最小)	cm	15	5	DIN 52 016 DIN 52 013

表 3-3 B45 掺配 TLA 后混合沥青技术标准

基质沥青		TLA	混合沥青		
种类	掺量 (%)	掺量 (%)	溶解度 (%)	针入度 (25℃, 100g, 5s) (0.1mm)	软化点 (℃)
B45	80	20	90.8	45~31	55~61
B45	75	25	88.5	44~30	56~62
B45	70	30	86.2	43~29	57~63

表 3-4 德国热塑性改性沥青 PmB45 C、PmB25 C 技术指标

技术指标		规范		
		PmB45	PmB25	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s)	0.1mm	20~60	10~40	DIN EN 1426
软化点 (R&B)	℃	55.0~63.0	63.0~71.0	DIN EN 1427
脆点 (最大)	℃	-10	-5	DIN EN 12593
延度 (25℃, 5cm/min) (最小)	cm	15	10	DIN 52 013
密度 25℃	g/cm <sup>3</sup>	1.00~1.10	1.00~1.10	DIN EN ISO 3838
贮存稳定性 软化点差 (最大)	℃	2	2	DIN EN 1427 Anhang A
闪点(最小)	℃	235	235	DIN EN ISO 2592

(续)

老化后质量变化(最大)	%	0.50	0.50	DIN EN 12607-3
老化后软化点增加(最大)	℃	6.5	6.5	DIN EN 1427 DIN EN 12607-3
老化后针入度变化	%	10~60	10~60	DIN EN 1426 DIN EN 12607-3
老化后延度 25℃ (最小)	cm	8	5	DIN 52013 DIN EN 12607-3
RTFOT 残留物				
BBR -16℃(最大)	MPa	300	350	AASHTO TP1
测力延度(最小)	J	1	1	DIN 52 013 Anhang B
DSR 60℃ G* (最小)	Pa	7000	15000	AASHTO TP5
δ (最大)	°	75	70	Anhang C

德国浇注式沥青混凝土的设计主要依据贯入度试验,依据后 30min 的贯入度增量确定沥青用量,其具体的要求如表 3-5 所示。在设计过程中,未对混合料的流动性做出具体的要求。

表 3-5 德国浇注式沥青混凝土贯入度指标

贯入度 (40℃)	标准要求	
	前 30 分钟 (mm)	后 30 分钟 (mm)
0/11 s	1.0~3.5	≤0.4
0/11	1.0~5.0	≤0.6
0/8	1.0~5.0	≤0.6
0/5	1.0~5.0	≤0.6

注:S 表示重交通路面,机制砂与天然砂的比例为 1:0

### 3.2.2 日本

日本浇注式沥青混凝土主要用于大跨径钢桥面铺质的下层,因此对浇注式沥青混凝土制定了比较明确的级配范围<sup>[2]</sup>,如表 3-6 所示,对浇注式沥青混凝土的粗集料、细集料以及预拌碎石的要求与普通沥青混凝土类似。

表 3-6 日本浇注式沥青混凝土的级配范围

筛孔尺寸 (mm)	通过百分率 (%)
19	100
13.2	95~100
4.75	65~85
2.36	45~62
0.6	35~50
0.3	28~42
0.15	25~34
0.075	20~27

日本浇注式沥青混凝土一般采用 20<sup>#</sup>~40<sup>#</sup>直馏硬质石油沥青作为基质沥青，与 20~30% 的湖沥青进行混合作为胶结料，表 3-7 为日本沥青技术规范<sup>[2]</sup>。对浇注式沥青混凝土主要依据刘埃尔流动性试验、贯入度试验、车辙动稳定度试验以及极限弯曲试验进行配合比设计和性能评价<sup>[2]</sup>，其具体指标要求如表 3-8 所示。

表 3-7 日本沥青技术规范

技术指标	类型			试验方法
	直馏沥青	湖沥青	混合沥青	
针入度 (25℃, 5s) 0.1mm	20~40	1~4	15~30	JIS K 2207
软化点 (R&B) ℃	55~65	93~98	58~68	
溶解度 (三氯乙烯) %	>99.0	52.5~55.5	86~91	
闪点 ℃	>260	>240	>240	JIS K 2274
密度 (25℃) g·cm <sup>-3</sup>	>1	1.38~1.42	1.07~1.13	JIS K 2249
蒸发质量变化率 %	<0.3	-	<0.5	JIS K 2207
延度 (25℃, 5cm/min) cm	>50	-	>10	

表 3-8 日本浇注式沥青混凝土性能控制指标

试验项目	技术指标	技术要求
流动性试验	流动性 (240℃) /秒	≤20
贯入度试验	贯入度 (40℃, 52.5kgf/5cm <sup>2</sup> , 30 分钟) /mm	1~4
车辙试验	动稳定度 (60℃) /次/mm	≥350
弯曲试验	极限应变 (-10℃, 50mm/min)	≥8.0×10 <sup>-3</sup>

### 3.2.3 英国

英国浇注式沥青混凝土称为 Mastic，与德国日本的浇注式沥青混凝土在本质上没有区别。Mastic 主要由胶结料、粗集料和细集料按比例拌和而成，同时在铺装表面撒布预拌碎石，碾压成型，以保证表面有足够的粗糙度。表 3-9、3-10 分别为粗集料、细集料以及预拌碎石的相关指标<sup>[15][16]</sup>。

表 3-9 英国集料级配的技术要求

粗集料 (mm)	规范要求 (%)	细集料 (mm)	规范要求 (%)
14	100	>2.36	
10		0.6	0~25
6.3	<40	0.212	5~35
5		0.075	10~30
3.35		<0.075	40~60

表 3-10 英国预拌碎石技术要求

筛孔尺寸 (mm)	规范要求 (%)	材料性能	试验方法	技术指标
14	>70	集料压碎值/%	BS812: 110	<16
10		针片状含量/%	BS812: 105	<25
5		集料磨耗值/%	BS812: 113	<11

英国 Mastic 的胶结料采用 60<sup>#</sup>~70<sup>#</sup>普通石油掺配 50%~70%的 TLA 拌制而成,其 TLA 的含量明显高于德国、日本的浇注式沥青混凝土。表 3-11 为英国沥青技术指标<sup>[15]</sup>, 表 3-12 列出了英国掺配 TLA 的沥青胶结料基本技术要求。

表 3-11 英国沥青技术指标

技术指标	规范	普通石油沥青	沥青砂胶		
			B 型	T50 型	
			S 级	S 级	H 级
针入度(25℃,5s)0.1mm	BS2000:49	60~80	20±5	20±5	12±3
软化点(R&B) ℃	BS2000:58	44~45	65±10	65±10	80±10
受热损失(163℃,5h) %	BS2000:45	<0.8	≤2.0	≤2.0	≤2.0
溶解度(三氯乙烯) %	BS2000:47	>99.0	>95	75~79	75~79
矿物质(灰份)含量 %	BS2000: 223	-	≤4	16.5~20	16.5~20

S 级:B 型和 T50 型用于街道、行车场顶部、人行道以及其它类似用途; H 级:T50 型用于汽车站或者交通非常繁忙的道路路面。

表 3-12 英国混合沥青标准

技术指标		针入度等级					
		35		50		70	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
针入度(25℃,100 g,5s)	0.1mm	35±7		50±10		70±10	
溶解度(三氯乙烯)	%	75	79	75	79	75	79
灰分	%	16	19	16	19	16	19
TFOT	质量损失 %	0.5		0.5		0.5	
后残留物	针入度降低 (25℃,100 g,5s) %	20		20		20	

英国对 Mastic 混合料的设计主要依据硬度指数(Hardness Number)、轮辙深度以及车辙率,其技术指标如表 3-13 所示。

表 3-13 英国浇注式沥青混凝土性能指标

性能指标	试验方法	技术要求
硬度数	BS5284	15~25
车辙率(mm/h)	BS598	≤5.0
车辙深度(mm)	BS598	≤7.0

### 3.2.4 国内浇注式沥青混凝土的研究概况

国内采用浇注式沥青混凝土铺装的主要有江阴长江大桥、香港青马大桥,采用了英国的单层 Mastic; 台湾高屏溪大桥、新东大桥、大直桥采用了日本成套的浇注式沥青混凝土技术; 胜利黄河大桥、安庆长江大桥以及东海大桥采用了下层浇注上层 SMA 的铺装方案,其浇注式沥青混凝土参考了德国和日本的相关技术,并进行了改进。但是到目前为止,我国还没有

浇注式沥青混凝土的设计与施工规范，对浇注式沥青混凝土的研究应用还处于探索阶段。

国内安庆长江大桥钢桥面铺装下层采用 GA10 浇注式沥青混凝土，其配合比如表 3-14 所示<sup>[17]</sup>。

表 3-14 安庆大桥浇注式沥青混凝土的级配范围

筛孔尺寸 (mm)	通过百分率 (%)
13	100
9.5	80~100
4.75	63~80
2.36	48~63
1.18	38~52
0.6	32~46
0.3	27~40
0.15	24~36
0.075	20~30

安庆长江大桥采用改性硬质沥青与湖沥青进行掺配作为胶结料，改性沥青以及掺配后沥青的主要性能如表 3-15、表 3-16 所示<sup>[17]</sup>。

表 3-15 安庆长江大桥浇注式沥青混凝土硬质沥青性能

技术指标	技术要求	试验方法
针入度(25℃, 100g, 5s) 0.1mm	20~40	JTJ052-2000
软化点 (R&B) ℃	≥90	
延度 (5℃, 5cm/min) cm	≥10	
RTFOT (180℃)		
质量损失 %	≤1.0	JTJ052-2000
针入度比 %	≥65	
延度 (5℃, 5cm/min) cm	≥10	

表 3-16 安庆长江大桥混合后沥青性能

技术指标	技术要求	试验方法
针入度 (25℃ 100g, 5s) 0.1mm	20~30	JTJ052-2000
软化点 (R&B) ℃	≥100	
延度 (25℃, 5cm/min) cm	≥20	

安庆长江大桥浇注式沥青混凝土铺装主要参照德国和日本的技术要求，并根据安庆大桥的实际情况进行了改进。表 3-17 为安庆长江大桥浇注式沥青混凝土性能要求<sup>[17]</sup>。

表 3-17 安庆长江大桥浇注式沥青混凝土性能要求

技术指标	技术要求
刘埃尔流动性 (240℃)	秒 ≤20
贯入度 (60℃)	mm 1~4
贯入度增量 (60℃)	mm ≤0.4
动稳定度	次/mm ≥800
低温弯曲应变	≥6.0×10 <sup>-3</sup>

### 3.3 本次试验研究级配设计流程

从以上各国的相关研究可以看出, 各国浇注式沥青混合料的配合比设计要求不尽相同。而我国尚没有统一的浇注式沥青混凝土设计与施工规范, 因此本试验研究根据沥青混凝土配合比设计的原则, 在参考上述各国, 特别是德国和日本的相关研究基础上, 根据相关试验结果确定沥青含量, 并成型试件进行试验, 综合评价第二章内确定的几种沥青应用在浇注式沥青混凝土中的效果。

浇注式沥青混凝土的设计配合比设计试验的主要原则, 是确保各种集料按照比例混合后, 可以符合规范所订级配范围, 再以不同沥青用量制作试件, 以求出符合规范值内的适当沥青含量。以下是日本浇注式沥青混凝土的设计程序<sup>[26][27]</sup>。

- 1、将直馏沥青及湖沥青与已加热的骨料放入一般拌合机内搅拌, 从拌合机的出料温度应低于 180~220℃。
- 2、将混合料放入已加热到 220℃的特制拌合锅内, 持续加热搅拌 1 小时, 使其温度达到 220~260℃。
- 3、将混合料倒入容器内进行刘埃尔流动性试验, 并同时制作贯入试验所需试件。
- 4、在温度 220~260℃范围内测定三个温度的贯入秒数, 利用内插法求出 240℃的 Lucer 流动性。
- 5、将不同沥青含量试样之 240℃Lucer 流动性(秒)及贯入试验结果数据制作成图, 并将试验点以圆滑曲线连接。
- 6、依所制作流动性对沥青含量及贯入深度对沥青含量之两个图, 求出流动性为 20 秒以下及贯入量为 1 至 4mm 之间所对应的沥青用量。
- 7、将 6 所求得之沥青用量增减 0.5%, 组成不同沥青用量的三种浇注式沥青混合料, 进行车辙试验与弯曲试验。
- 8、由车辙试验所求出的动稳定度在 350 次/mm 以上, 且 -10℃弯曲试验求得的弯曲应变大于  $8 \times 10^{-3}$  的适当沥青含量, 作为浇注式沥青混合料的配比设计沥青用量。

本研究的配合比设计方法参照以上步骤, 同时也进行了简化, 具体步骤如下:

- 1、通过试验检测符合技术要求的铺装原材料(粗集料、细集料、矿粉等);
- 2、参照国内外的规范确定各集料的混合比例, 进行级配设计;
- 3、确定试拌沥青用量, 进行配合比试拌;
- 4、根据试拌试件的流动性、贯入度和贯入度增量, 确定初始沥青用量;
- 5、以初始沥青用量±0.5%制作试件, 进行流动性试验和贯入度试验, 确定沥青用量;
- 6、以确定的沥青用量成型试件, 进行车辙试验和低温弯曲试验进行配合比检验;
- 7、若混合料性能检验合格, 则以上述混合料参数作为配合比设计值, 否则重复以上步骤直至满足要求。

以上浇注式沥青混凝土配合比设计的步骤流程如图 3-1:

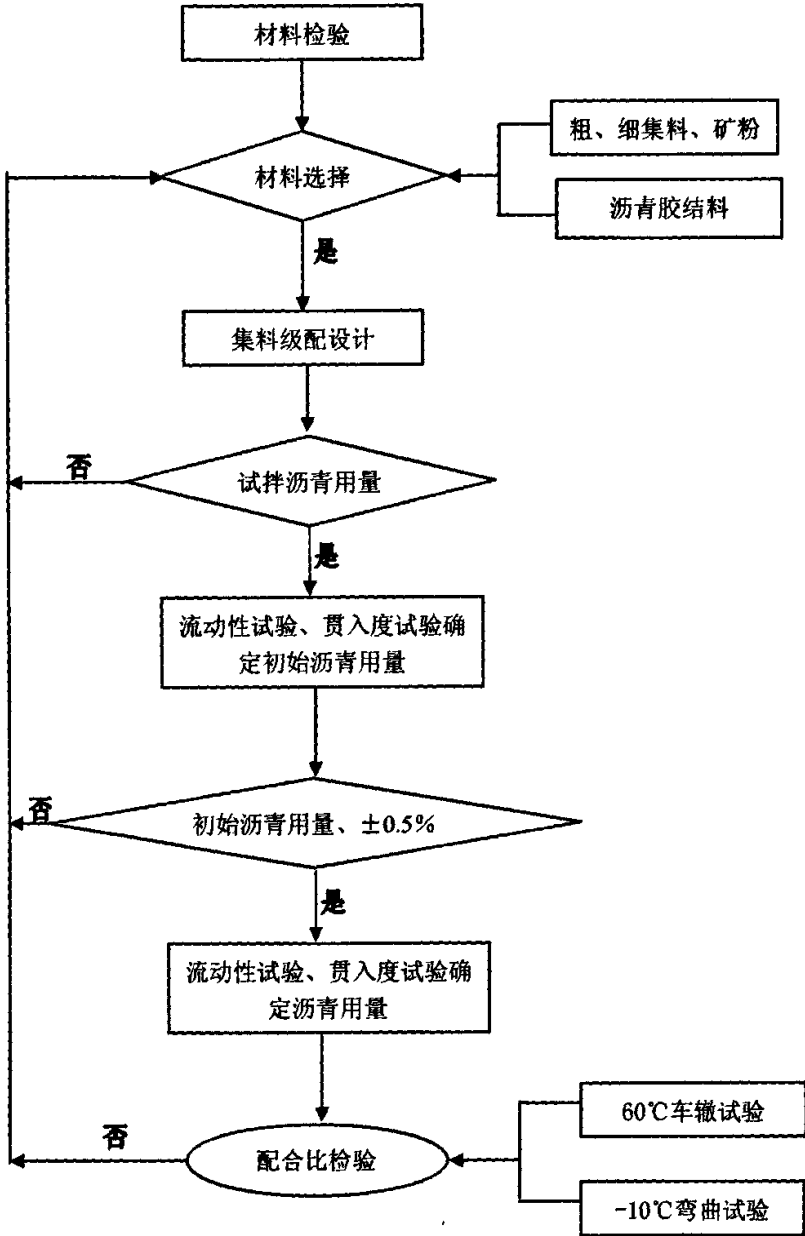


图 3-1 浇注式沥青混凝土配合比设计流程

### 3.4 试验技术指标的确定

目前我国还没有浇注式沥青混合料的性能评价指标规范。因此本研究在参照德国、日本相关技术指标的基础之上，又重点研究了我国安庆大桥浇注式沥青混凝土提出的相关指标，提出了以下的设计指标如表 3-18 所示，同时伴随着试验的进行相应的微调，以适用在实验室条件下，浇注式沥青混凝土的配合比设计。

浇注式沥青混凝土属于悬浮密实型结构的沥青混凝土，混合料具有细集料含量高、矿粉



含量高、沥青含量高等特点，在混合物中骨料是处于悬浮状态，这就决定了浇注式沥青混凝土高温抗剪切能力有限，抗车辙能力不强。而且本研究建议浇注主要用于铺装下层，且厚度控制在 30mm 左右，因此建议本研究的混凝土车辙试验动稳定度检验大于 350 次即可。

日本与安庆大桥桥面铺装的低温弯曲试验均参照了日本的《铺装试验方法便览》，试件尺寸为 300×100×50mm，而本研究为了充分利用当前的试验条件，同时便于以后此方面研究的开展，建议采用国内的试验方法，试件尺寸为 250×30×35mm，因此两种试验结果必然存在差异，因此本研究在低温指标的确定上主要参照国内的标准进行，并根据试验结果适当调整。

表 3-18 本研究的浇注试验配合比设计指标

技术指标		试验条件	技术要求
贯入度 试验	贯入度 mm	40℃, 52.5kgf, 5cm <sup>2</sup>	0.8~2.0
	贯入度增量 mm		0.4
车辙试验 次/mm		60℃, 0.7MPa	≥350
低温极限弯曲 ×10 <sup>-3</sup>		-10℃, 50mm/min	≥1.2

### 3.5 本次浇注式沥青混凝土配合比设计

#### 3.5.1 试验所用材料的检测

本研究采用的集料为玄武岩，该材料性能优良，曾成功的应用在钢桥面铺装中，其主要的技术指标见 3-19。

表 3-19 集料的性能

试验指标	玄武岩	技术要求	试验方法
洛杉矶磨耗值 %	12.1	≤22.0	T0317-2000
压碎值 %	9.6	≤12.0	T0316-2000
磨光值 BPN	51	≥48	T0321-1994
针片状含量 %	2.1	≤5.0	T0312-2000
表观密度 g·cm <sup>-3</sup>	3.004	≥2.65	T0304-2000
抗压强度 MPa	178	≥120	T0213-1994
与沥青粘附性 级	4	≥4	T0616-1993

本研究所采用的集料共有 5 种，表 3-20 是这 5 种材料的筛分结果。

表 3-20 玄武岩分计筛余百分率 (%)

集料	筛孔尺寸 (mm)								
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
1#	100								
2#		100							
3#			83.6	14.8	1.6				
4#			1.4	45.6	40.6	10.5	1.9		
5#						40.6	33.3	20.8	5.3

浇注式沥青混凝土矿粉含量高，矿粉的质量对沥青混凝土的质量影响较大。本研究采用石灰石矿粉做浇注式沥青混凝土的填料，表 3-21 是此次所用矿粉的技术性能，各项性能均满足规范的要求。与玄武岩矿粉或其他填料相比，石灰石矿粉具有以下优点：

- 1、石灰石呈弱碱性，与沥青的粘附性较好；
- 2、材质比玄武岩稍轻，因而相同质量的石灰石矿粉其比表面积比玄武岩更大，这有利于吸收混合料中富余沥青；
- 3、材料加工方便。

表 3-21 矿粉的技术指标与技术要求

试验指标		实测值	技术要求	试验方法	
视密度	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.800	$\geq 2.5$	T0352-2000	
亲水系数		0.67	$\leq 1$	T0353-2000	
含水率	%	0.14	$\leq 1$	T0343-2000	
加热安定性		不变质	不变质	T0355-2000	
塑性指数	%	2.1	$\leq 4$	T0354-2000	
粒度范围	0.3mm	%	100	$\geq 90$	T0351-2000
	0.15mm	%	100	—	
	0.075mm	%	97.8	$\geq 80$	

本研究的胶结料共有 3 种，胶结料 I 型为本研究的重点，国产直馏硬质沥青与 30%TLA 混合；胶结料 II 型为改性硬质沥青 PmB45 与 30%TLA 混合；III 型为德国产改性硬质沥青 PmB25。这几种沥青的性能已经在第二章中进行了相应的研究，此处不在赘述。

### 3.5.2 确定试验研究级配

参照沙庆林院士对密实式沥青混凝土的分类，密实式沥青混凝土可分为传统连续式密级配沥青混凝土，粗集料断级配沥青混凝土，细集料断级配沥青混凝土三种。按照幂函数组成的矿料级配，由于已使用了近百年，所以俗称其为传统连续式密级配，像我国的 AC 型沥青混凝土属于此类；矿料中，粗集料占一半以上，同时又不能用一个幂函数拟合矿料级配曲线时，称作粗集料断级配沥青混凝土，主要典型的是 SMA、SUP；而像英国的浇注式沥青混凝土(Mastic)，德国的浇注式沥青混凝土(gussasphalt)等<sup>[29]</sup>则属于细集料断级配沥青混凝土，矿料中，细集料占一半以上，同时不能用一个幂函数拟合矿料级配曲线时，称作细集料断级配沥青混凝土。

浇注式沥青混凝土混合料级配设计，国内目前还没有具体的设计和施工规范。因此，本研究综合考察了德国、日本、英国，以及国内相关项目的混合料级配，图 3-2 为各国典型的浇注式沥青混凝土级配曲线。

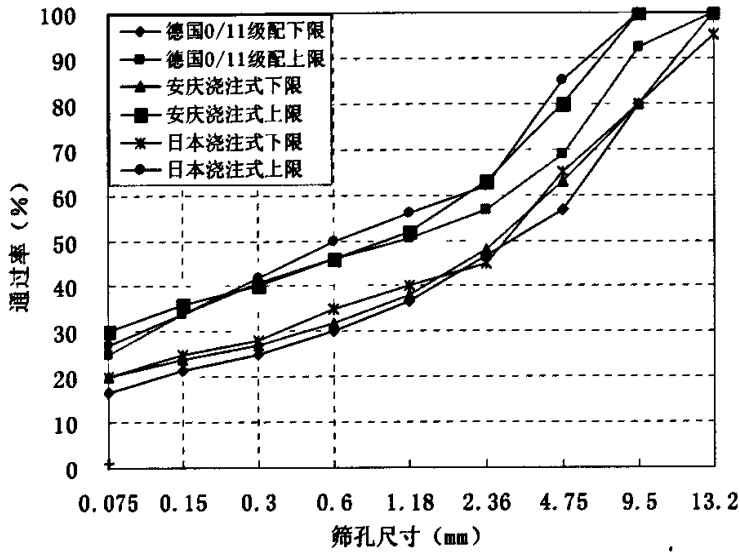


图 3-2 国内外浇注式沥青混凝土级配曲线

从中可以看出各国的浇注式沥青混凝土中 2.36mm 筛孔通过率均维持在 50%左右, 矿粉用量均在 20~30%之间, 一般取为 23~24%。

香港青马大桥和江阴大桥是参照英国级配标准进行的设计, 而安庆大桥则参照了德国、日本的经验。我国台湾省的中央大学、中华大学以及台湾建工学院的科研人员在参照日本的技术与经验的基础上, 通过系统的室内试验研究与室外试验段验证, 设计出的浇注式沥青混合料级配如图 3-3 所示。

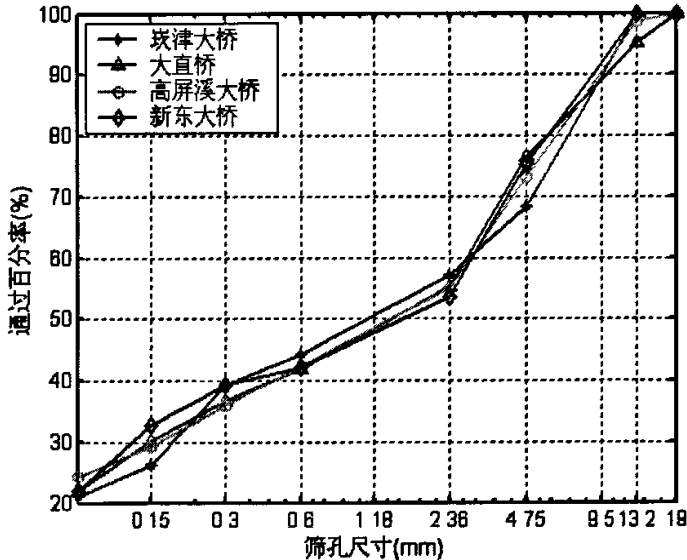


图 3-3 台湾浇注式沥青混凝土级配

本研究在参考国内外的浇注式沥青混凝土级配的基础上, 确定了此次研究的级配。图 3-4 为本次级配曲线与日本规范和安庆大桥桥面铺装的级配的对比。

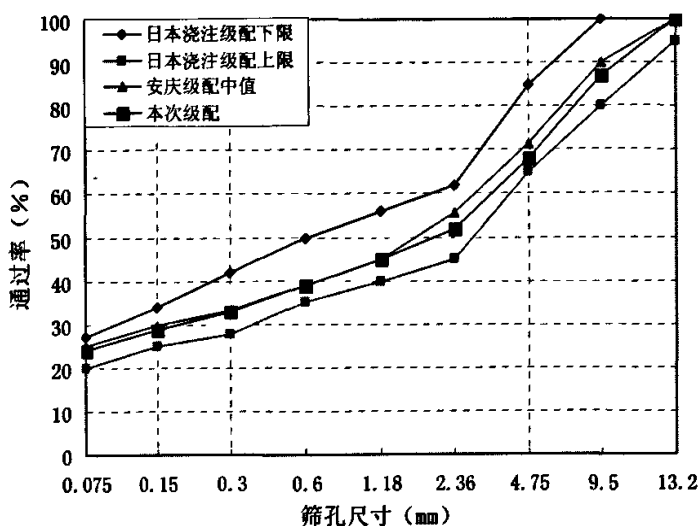


图 3-4 本研究级配曲线

### 3.5.3 确定试验研究沥青用量

浇注式沥青混凝土的沥青用量的确定不同于普通的马歇尔配合比设计, 主要根据马歇尔稳定度和流值, 浇注式沥青混凝土沥青用量主要由流动性和贯入度试验结果确定, 其后采用车辙试验和低温弯曲试验进行配合比检验。

流动性主要由刘埃尔流动度试验确定, 主要用于评价浇注式沥青混凝土的工作和易性。流动性高则施工和易性佳, 但是在有路拱及纵坡度的状况之下, 易导致流动过度, 聚积于低处, 或溢出边模, 并且一般情况下流动性太高, 混合料的沥青含量比较大, 混合料的热稳定性较差; 若流动性过低, 除施工和易性不佳外, 其与结构接触的界面, 亦不易充分渗入, 有可能无法达到水密性的要求。故流动性需加以适当的设计, 以使施工质量达到要求标准。日本规定以 3~18 秒为宜, 试验所用仪器图如图 3-5。

流动性试验的主要试验步骤为: 将特定温度混和料倒入适当容器中, 以一特制之标准重锤(1kg) 放入容器中, 测量其贯入试样 50mm 时, 所需之时间, 以秒表示, 即为 Lucre 流动值。

本次试验由于缺少该种试验仪器, 同时考虑到本研究主要以室内试验为主, 因此适当简化该步骤, 主要以观察为主, 要求拌和完毕的浇注式沥青混凝土可以自动流淌成型, 无需碾压为标准, 同时也要求在未达到出料温度以前, 混合料不能出现过度流动, 若出现则说明用油偏大, 要适当降低油石比。

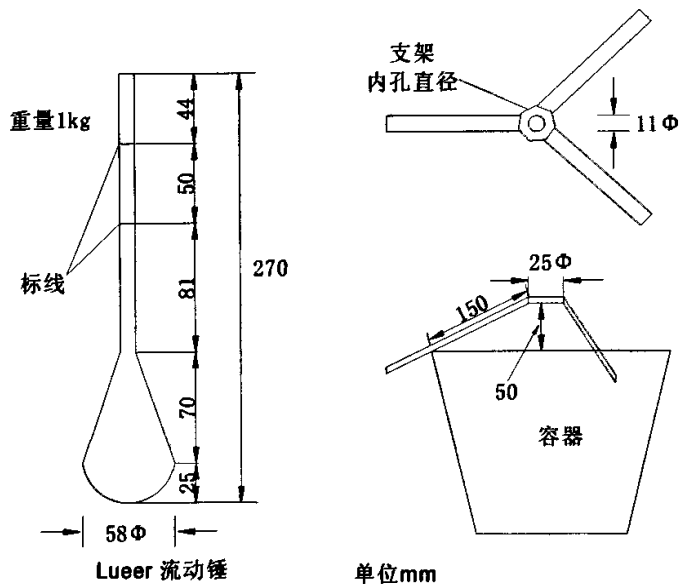


图 3-5 刘埃尔流动度试验仪器

贯入度(Indentation)试验是测试浇注式沥青混凝土的静态稳定性,测定铺装完成后,浇注式沥青混凝土温度降至一般路面温度时的稳定性,类似于马歇尔配合比设计中的马歇尔试验,是浇注式沥青混凝土混合料设计的基础<sup>[30]</sup>。贯入度试件成型过程中要严格控制成型时间和成型温度,具体控制过程如下:

- 1、配料,按设计级配称取 900 克矿料(包括 TLA 中的灰份);
- 2、保温,在 180~200℃烘箱中保温至少 6 小时;
- 3、首先将集料投入 180~200℃拌锅内拌和均匀,若需添加 TLA 则先加入敲细的 TLA,拌和至 TLA 完全融化为止;
- 4、添加已加热的矿粉,并搅拌均匀,温度控制在 180~200℃左右;
- 5、添加沥青,沥青需加热至 170℃左右,搅拌 5 分钟以上,;
- 6、升温,将混合料升温至 220~240℃,时间控制在 45 分钟左右;
- 7、成型试件,从拌锅内取出混合料,在试模中成型并抹平,如图 3-5 所示。

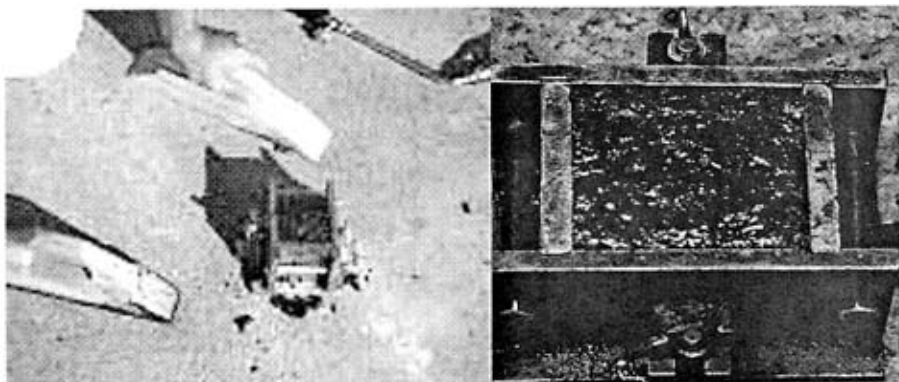


图 3-5 贯入度试件成型及成型完试件

贯入度试验方法<sup>[26]</sup>：

贯入度试验采用图 3-6 所示贯入度仪，贯入度试件为 70.7×70.7×70.7mm，贯入杆直径为 25.2mm，加载重量为 50kgf (490N)，记录 30 分钟贯入量及 60 分钟的贯入量增量。试验的具体步骤如下：

- 1、将试件脱模，将试件的侧面作为测试面，再约束其它几个面；
- 2、将试件一起放到预先设定温度的水浴中保温一个小时，再进行贯入度试验；
- 3、将灌入杆垂直放在试件的中央；
- 4、粗加 2.5kgf 的荷载（灌入杆和承重平台的重量）将该荷载 10 分钟时的灌入量调整为 0；
- 5、在没有冲击力的情况下，将 50kgf 的荷载放在承重台上，记录 1 分，2 分，3 分，4 分，5 分，6 分，7 分，8 分，9 分，10 分，20 分，30 分，40 分，50 分和 60 分的贯入量。

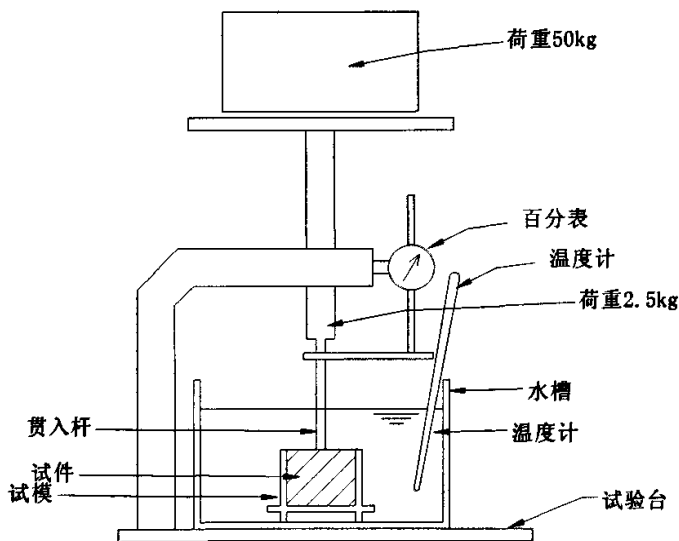


图 3-6 贯入度仪

参照上述试验流程，首先确定试拌油石比为 8.0% 分别成型 3 种浇注式沥青混合料。表 3-22 为试拌时成型试件的性能。

表 3-22 采用试拌油石比 8.0 时成型贯入度试件的结果

胶结料类型	流动性	40℃贯入量 (0.01mm)	40℃贯入度增量 (0.01mm)
I 型	易拌和、易流动	73.5	17.5
II 型	不易拌和、未成型	-	-
III 型	易拌和、油多	91.5	8

从上表可以看出，试拌油石比取为 8.0% 时，对 I 型混合料比较合适，暂取 8.0% 为初始油石比，±0.5% 制作试件；对于 II 型混合料，提高油石比至 9.5% 后，有较好的效果，取 9.5% 为初始油石比，±0.5% 制作试件；对于 III 型混合料，8.0% 油石比偏大，因此降低沥青用量，取 7.7% 为初始油石比，±0.3% 制作试件。

采用上述沥青用量分别成型贯入度试件，进行贯入度及贯入度增量试验，结果如表 3-23 所示。

表 3-23 贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	油石比(%)	前 30 分钟贯入度 (0.01mm)	后 30 分钟贯入度增量 (0.01mm)
I 型	7.5	59	13
	8.0	73.5	17.5
	8.5	94.5	17.5
II 型	9.0	73	11
	9.5	95	14
	10.0	130.5	26
III 型	7.4	52.5	6.5
	7.7	78.5	9.5
	8.0	91.5	8

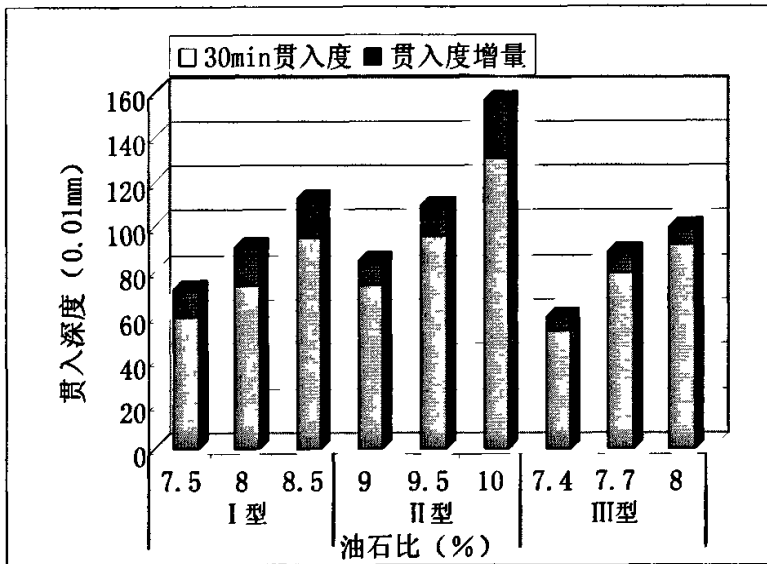


图 3-7 贯入度试验结果

从贯入度试验结果可以看出：

- 1、贯入度随油石比的增大而增大，且其值在 0.5mm~1.3mm 内变化；
- 2、贯入度增量与油石比的关系不明显，且其值均小于 0.4mm，III 型浇注的增量最小。
- 3、根据贯入度试验结果以及成型时的和易性，确定 I 型浇注的油石比为 8.5%，II 型浇注的油石比为 9.5%，III 型浇注的油石比为 7.7%。

### 3.5.4 配合比检验

在实验室内成型设备与现场大型的施工器具有很多差距，但为了更好模拟实际工程情

况，在成型车辙板和弯曲试验试件的时候，参考国内外浇注式沥青混凝土现场施工的程序，并采用专用的浇注式沥青混凝土拌和机进行成型，通过试验发现拌和完毕的混合料有良好的流动性，拌和也比较均匀。其主要的试验条件和拌和程序如下：

- 1、将沥青加热至 170℃，集料和矿粉加热的 180℃，湖沥青破碎成小块，不需预先加热；
- 2、拌锅温度升至 180~190℃，将集料加入拌锅中拌匀；
- 3、加入湖沥青进行拌和，直至湖沥青完全融化；
- 4、加入矿粉；
- 5、加入沥青拌和约 1 分钟，将混合料盛入预热至 180~190℃的浇注式沥青专用拌和机内；
- 6、混合料在拌和机内拌和 45 分钟以上，温度升至 220~240℃；
- 7、出料，成型试件

#### 3.5.4.1 车辙试验

本研究参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000)，进行配合比高温性能检测，试验温度为 60℃，轮压为 0.7MPa。试验结果如下表 3-24 所示。

表 3-24 车辙试验结果

胶结料类型	试件	60min 车辙深度 (mm)	动稳定度 (次/mm)	平均
I 型	1	14.37	354	367
	2	12.88	380	
II 型	1	12.14	405	400
	2	12.55	395	
III 型	1	10.88	413	429
	2	9.06	445	

我国普通沥青混凝土的动稳定度要求大于 800 次/mm，从试验结果可以看出采用硬质沥青生产的浇注式沥青混合料的动稳定度不大，达不到我国对普通沥青混凝土动稳定度的要求。但是结果可以满足日本对钢桥面浇注式沥青混凝土提出的大于等于 350 次/mm 的要求。参照本研究前述确定的配合比检验中高温抗车辙性能指标，本研究确定的配合比动稳定度均大于 350 次/mm，满足设计要求。

#### 3.5.4.2 -10℃低温弯曲试验

我国沥青路面低温缩裂的发生大都在 0~-10℃以下，“七五”攻关试验结果表明，沥青混合料在 0℃~-10℃左右开始变脆，其 0℃时劲度模量差别较大，到-10℃以下开始趋于一定值，即 0℃~-10℃之间可明显区别不同沥青的低温性能<sup>[31]</sup>。日本道路协会铺装试验方法便览 3-5-7 的规定，用于评价低温拉伸性能，可采用-10℃试验，我国《公路改性沥青路面施工技术规范》(JTJ036)对低温抗裂性能的弯曲试验温度也采用-10℃。

本研究在浇注式沥青混凝土配合比检验过程中采用-10℃弯曲试验评价混合料的低温性能，测定混合料在规定温度和加载速率时弯曲破坏的力学性质。

本研究参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000, T0715-1993) 进行，试验温度为-10℃，试件为轮碾成型后的板切割而成，尺寸为 250×30×35mm，计算跨径为 200mm，加载速率为 50mm/min.。日本钢桥面铺装便览里面规定的试件尺寸为 300×100×50mm，试验温度何加载速率与本试验相同。表 3-25 为本次试验的结果。



表 3-25 低温弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯拉应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.17	1.21	9247.12
	2	10.96	1.35	8115.80
	3	12.04	1.23	9755.60
II 型	1	12.68	1.72	7372.09
	2	12.94	1.69	7661.01
	3	12.28	1.75	7001.08
III 型	1	13.90	1.68	8286.74
	2	12.09	1.43	8479.91
	3	12.62	1.54	8180.58

三种浇注式沥青混凝土的低温弯拉应变均大于  $1.2 \times 10^{-3}$ , 满足试验本研究前述确定的配合比检验中低温弯曲性能的指标。改性硬质沥青的低温弯曲性能要优于国产直馏硬质沥青。

通过配合比检验, 上述三种浇注式沥青混凝土, 在高低温性能方面均有可以满足试验初期提出的要求, 本次配合比设计确定的沥青用量是可行的。

### 3.6 本章结论

本章通过参照国内外浇注式沥青混凝土的研究成果, 在综合分析基础上, 提出本研究浇注式沥青混凝土配合比设计的流程以及设计控制指标, 同时通过室内试验分别对采用三种胶结料的浇注式沥青混凝土进行了配合比设计, 确定试验沥青用量, 为于下一步的性能测试打好基础。

## 第四章 浇注式沥青混凝土的性能研究

### 4.1 概述

桥面铺装材料比普通的沥青混合料性能要求更高,它要求铺装材料与钢板随从变形性能好,与钢板粘结性能好,高温稳定性、低温抗裂性、抗疲劳性能也要较好,而且还要满足行车安全舒适,便于施工,易于维修等要求<sup>[32][33]</sup>。因此本次试验主要从以下几个方面开展研究,以综合考证浇注式沥青混凝土的性能<sup>[27]</sup>:

1、施工和易性能:由于浇注式沥青混凝土的显著特点是依靠自身的流动性密实成型,如果混合料和易性不佳,则不能达到规定的密实度和平整度,各项使用性能也无法得到保证,同时混合料的流动性也不能太高,否则容易发生离析。

2、高温抗车辙性能:沥青混合料的抗车辙性能随温度升高而降低,为了防止桥面铺装沥青混合料在高温季节,特别是在高温重载情况下不产生诸如车辙、波浪、推移、拥包等病害,铺装层应具有良好的高温稳定性和抗流变性能。

3、低温抗裂性:由于沥青混合料自身的粘弹性特征,其在低温状况下劲度模量较大,抗变形能力较差,在车辆荷载的作用下,极易产生裂缝。钢桥面铺装材料,不仅要考虑低温时由于钢桥面板的收缩产生的裂缝,而且还要考虑在车辆荷载的作用下加劲肋和横隔板顶部产生较大的负弯矩导致的受拉开裂,这种效应在低温时尤为显著。

4、抗疲劳性能:由于大跨径钢桥桥面铺装一般采用薄层沥青混凝土,且铺装层直接铺筑在只有 12mm 或 14mm 厚的柔性桥面板结构上,在车辆荷载的作用下,沥青铺装层将承受反复的疲劳效应,这种效应将明显强于支撑在坚强路基和基层结构上的公路沥青混凝土,因此,桥面铺装用沥青混凝土必须具有更好的抗疲劳性能。

路用性能是相互影响、相互制约的,照顾某一方面的性能往往会以牺牲另一方面的性能为代价,比如高温稳定性与低温抗裂性、高温稳定性与施工和易性等等。本研究以考察浇注式沥青混凝土的高温性能为主,同时兼顾其弯曲性能和抗疲劳性能,以利于国产硬质沥青在我国高温重载条件下桥面铺装中的使用。

根据上一章所确定的油石比, I 型浇注的油石比为 8.5%, II 型浇注的油石比为 9.5%, III 型浇注的油石比为 7.7%, 分别成型试件,进行贯入度试验,车辙试验,弯曲试验和疲劳试验,综合评价几种浇注式沥青混凝土的性能。

### 4.2 贯入度性能研究

贯入度试验实际上是一种单轴蠕变试验,贯入度试验结果既可以作为浇注式沥青混凝土配合比设计的控制性指标之一,又可以像分析蠕变试验结果那样,通过计算材料的蠕变速率,建立流变模型,获得流变参数,评价材料的高温流变性能。贯入度类似于蠕变试验中确定的蠕变柔量,表示在单位应力下试件的变形,蠕变柔量越大,则意味着试件在单位荷载条件下的变形越大。在路面设计过程中,有学者就提出过可以采用 1000s 的蠕变柔量 ( $J_{1000}$ ) 作为路面的设计参数,浇注式沥青混凝土的设计采用了 1800s 时的贯入深度值作为设计的指标。

贯入度试验方法源于德国,在德国主要采用贯入度及贯入度增量试验结果来评价浇注式沥青混凝土的力学性能,所采用的试验设备和方法与日本的一致,日本只对浇注式沥青混凝土

土的贯入度有要求,对贯入度增量不作规定<sup>[2][25]</sup>。贯入度试验试件可以使用室内制作的试件或者使用现场切割的试件。

德国、日本的浇注式沥青混凝土贯入度试验的温度多为 40℃,安庆大桥规定浇注式沥青混凝土 60℃时的贯入度为 1.0~4mm,贯入度增量应小于 0.4mm。本研究在测试了 40℃的贯入度及贯入度增量的同时,又进行了 60℃的试验,以便与 40℃的结果进行对比研究。同时本研究也绘制了典型的浇注式沥青混凝土贯入度试验曲线,对混凝土的贯入深度发展规律进行了研究。

#### 4.2.1 60℃贯入度试验

按照上一章确定的成型方法分别成型不同油石比的浇注式沥青混凝土试件。将试件脱模,放到预先 60℃的水浴中保温一个小时,进行 60℃贯入度试验,考察浇注式沥青混凝土的高温抗压性能,同时与 40℃的贯入度试验结果进行对比。图 4-1 为刚成型好的试件和贯入度试验结束后的试件,试验结果如表 4-1 所示。

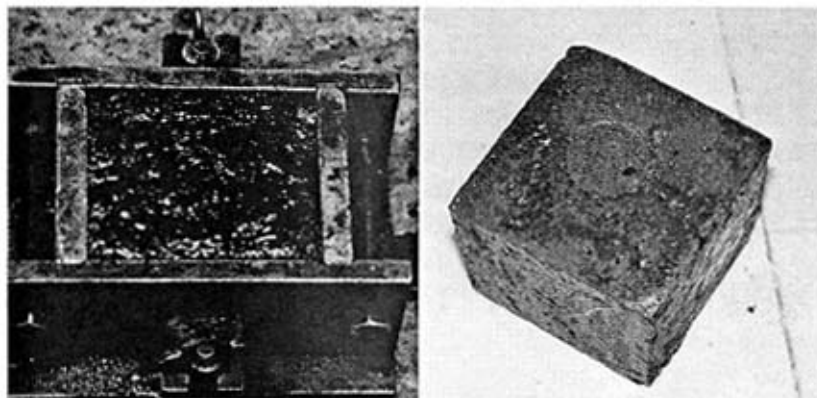


图 4-1 贯入度试件

表 4-1 60℃贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	油石比(%)	前 30 分钟贯入度 (0.01mm)	后 30 分钟贯入度增量 (0.01mm)
I 型	7.5	149	15
	8.0	161	17
	8.5	185	36
II 型	9.0	166	15
	9.5	240	21
	10.0	315	23
III 型	7.4	80	7
	7.7	91	11
	8.0	112	11

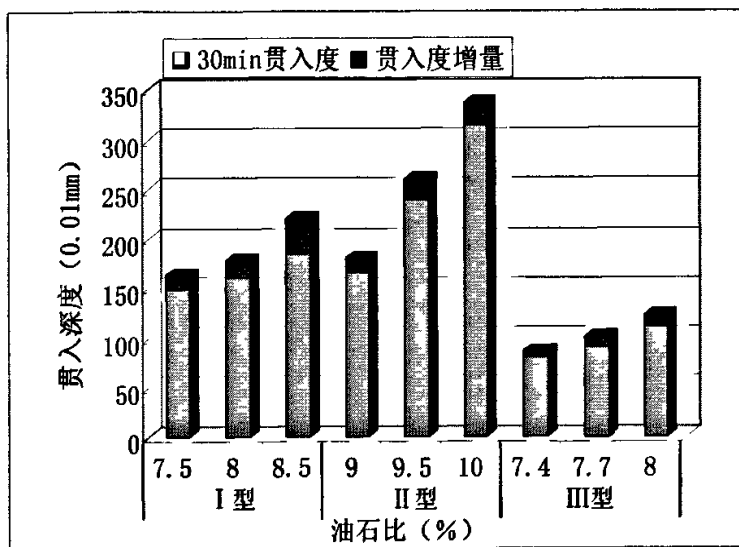


图 4-2 60℃贯入度试验结果

从 60℃贯入度试验结果可以看出，混合料的贯入度随油石比的提高而明显增大，尽管温度提高了，但本研究制作的浇注式沥青混凝土贯入度和贯入度增量依然满足前述确定的试验标准。混合料的贯入度随着沥青用量的增加而增大，与 40℃有类似的试验结果；同时增大的幅度也变大，更加有利于区分油石比对浇注贯入度性能的影响。60℃贯入度增量的变化依然不明显，因此不能有效的判定采用不同油石比对浇注性能的影响。

从结果也可以看出III型的贯入度结果远小于I型，II型，贯入度增量结果也是如此，III型浇注的高温性能优于I型和II型浇注。

#### 4.2.2 在确定沥青用量情况下 40℃与 60℃贯入度试验对比

采用第三章确定的沥青用量分别成型贯入度试件，进行 40℃与 60℃贯入度试验，结果如表 4-2 所示。图 4-3 为不同温度贯入度结果对比。

表 4-2 贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	40℃		60℃	
	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)
I型	94.5	17.5	185	36
II型	95	14	240	21
III型	78.5	9.5	91	11

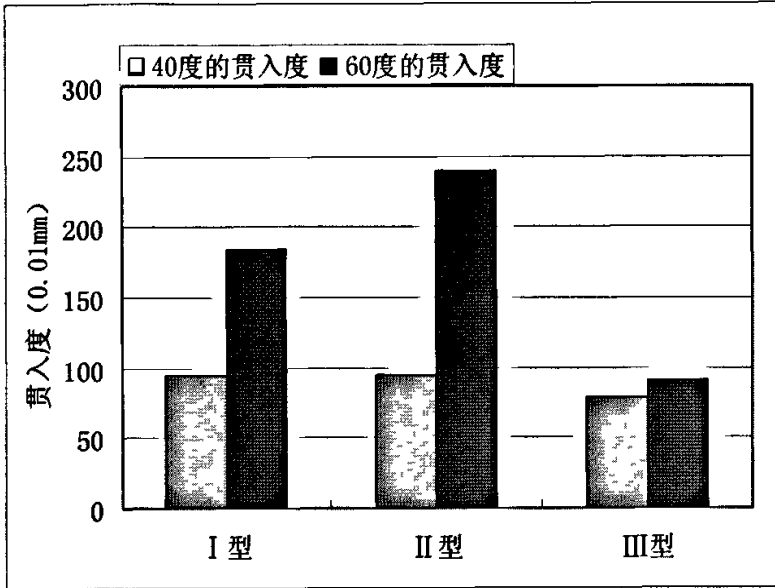


图 4-3 不同温度贯入度结果对比

从试验结果可以看出，在确定沥青用量条件下，60℃的贯入度比40℃的贯入度结果有较大的增长，II型浇注增长更加明显，贯入度增加了2.5倍，III型的贯入度增长最小。由此可以看出提高试验温度会影响浇注式沥青混凝土的贯入度，提高试验温度可以更加明显的确定不同浇注式沥青混凝土的贯入度性能。III型浇注温度敏感性最低，提高温度对它的贯入度性能影响不大。

#### 4.2.3 贯入度试验曲线对比

试验中也记录了贯入深度随时间变化的曲线。图4-4为I型浇注40℃与60℃的贯入度曲线对比，图4-5为40℃三种浇注的贯入度曲线对比。

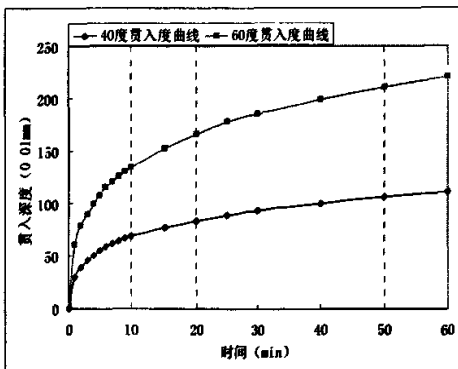


图 4-4 I型浇注贯入度曲线

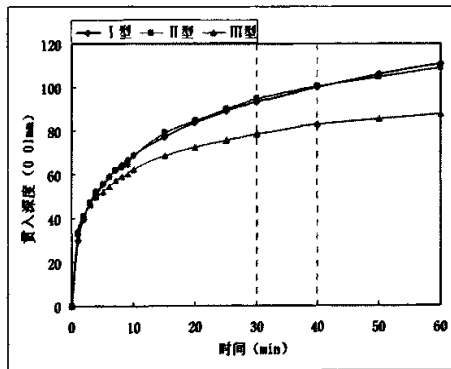


图 4-5 三种浇注的贯入度曲线对比

从I型浇注贯入度试验曲线可以看出，提高温度会影响贯入深度的发展曲线，60℃的贯入度初期发展比40℃的发展更快，但后期曲线发展趋势类似。同一试验温度，贯入深度的发展曲线是类似的，三种浇注在40℃的贯入度曲线在初期变化相差不大，但是后期I型与II型浇注增长较快，贯入度曲线类似，其贯入度性能相同，III型浇注曲线增长较慢，抵抗变

形的能力较好。

贯入度试验结果表明,提高试验温度高温情况下,会影响浇注式沥青混凝土的贯入度性能,有利于更好的区分不同不同沥青用量,不同浇注类型的性能,因此建议在进行混合料设计和性能研究的过程中,试验温度采用 60℃。在高温情况下,III型浇注的性能优于 I 型、II 型浇注,且III型浇注温度敏感性较低,受温度的影响较小。

### 4.3 高温抗车辙性能研究

浇注式沥青混凝土的高温抗车辙性能是本研究的重点。

浇注式沥青混凝土由于其细集料和矿粉含量高、沥青用量大,其高温抗车辙性能是其致命的弱点,同时作为钢桥面铺装材料,要经受钢桥面特有的交通条件,气候条件的考验,因此对浇注式沥青混凝土铺装的高温抗车辙性能要求很高。

#### 4.3.1 试件成型

本研究采用专用浇注式沥青混凝土拌和机制作车辙试件,参照配合比检验的成型条件和程序,成型车辙试件尺寸为 300×300×50mm。

采用上述成型的步骤,发现拌和结束后沥青混凝土均匀,有较好的流动性,无需碾压,仅用木刮刀抹平即可。图 4-6 为成型的浇注式沥青混凝土车辙板,车辙板表面光滑细密,完全不透水。图 4-7 为三种浇注板的一个切面,可以明显看出粗集料在混合料中分散均匀,拌和效果良好。

从板的切面也可以看出浇注式沥青混凝土是一种悬浮密实的结构,集料之间被沥青与矿粉的组成的玛蹄脂填充。虽然胶结料具有较高的粘聚力,但粗集料间未形成骨架,混合料摩阻角较小接近于 0,这就注定了浇注式沥青混凝土的高温稳定性差,抗剪切性能相对于粗集料嵌挤型沥青混凝土差。

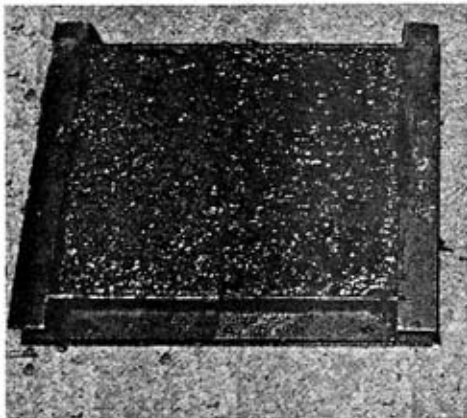


图 4-6 浇注式沥青混凝土车辙板

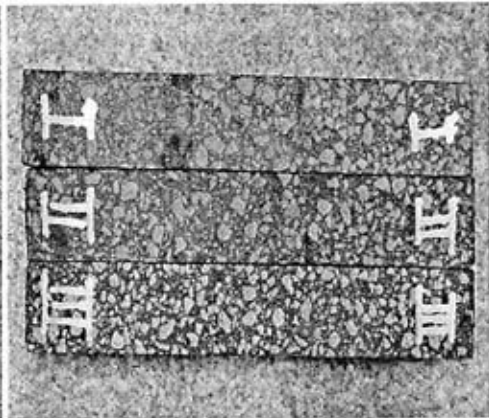


图 4-7 板的切面

#### 4.3.2 车辙试验

目前国内外大多采用室内车辙试验来评价沥青混合料的高温性能,根据试验结果,各国提出了两种不同的评价指标:动稳定度和相对变形指标,这两个指标都反映了沥青混合料在

高温条件下的抗变形能力。

本研究参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000), 评价沥青混合料的高温抗车辙能力, 试验温度为 60℃, 轮压为 0.7Mpa, 轮载作用次数为 2520 次。试验同时考虑 60min 钟的车辙深度和动稳定度两个指标, 考察 3 种浇注的抗车辙性能。试验结果如下表 4-3 所示。

表 4-3 车辙试验结果

胶结料类型	45min 的车辙深度 (mm)	60min 的车辙深度 (mm)	动稳定度 (次/mm)
I 型	12.59	14.37	354
II 型	10.59	12.14	405
III 型	9.36	10.88	413

从上面的结果可以看出: (1) 上述三种浇注的高温抗车辙能力普遍不高, 均不满足我国规定的普通沥青动稳定度大于 800 的要求, 但满足日本钢桥面铺装规范对钢桥面铺装的规定, 动稳定度大于 350 次/mm 的要求。(2) 三种浇注的车辙深度均较大, 抵抗车辙的能力有限, III 型车辙深度最小, I 型车辙深度最大, 与贯入度试验结果类似。(3) 为满足我国高温重载的交通条件, 三种浇注的高温抗车辙能力均有待提高。

#### 4.3.3 浇注式沥青混凝土与 AK-13A 抗车辙性能的对比

图 4-7 为典型浇注车辙曲线与 AK-13A 车辙曲线的对比图, 我们可以清楚的看出浇注式沥青混凝土和 AK-13A 沥青混凝土的抗车辙性能存在明显的差异。

传统的沥青混凝土的车辙发展曲线有典型的两阶段特征, 初期发展较快, 然后进入一个稳定期, 车辙深度增加缓慢, 集料的骨架效用起到了较大的作用; 而浇注式沥青混凝土车辙深度发展速度始终保持一个较快的发展水平, 车辙包含了混合料的压密和剪切流动两部分, 其中以剪切流动为主。图 4-9 为试验后的车辙板, 可以看出浇注式沥青混凝土车辙剪切流动的趋势, 混合料向试验车轮两侧流动, 在轮迹两侧有明显的隆起, 同时以车轮折返点为中心, 向板的中间和两侧流动。

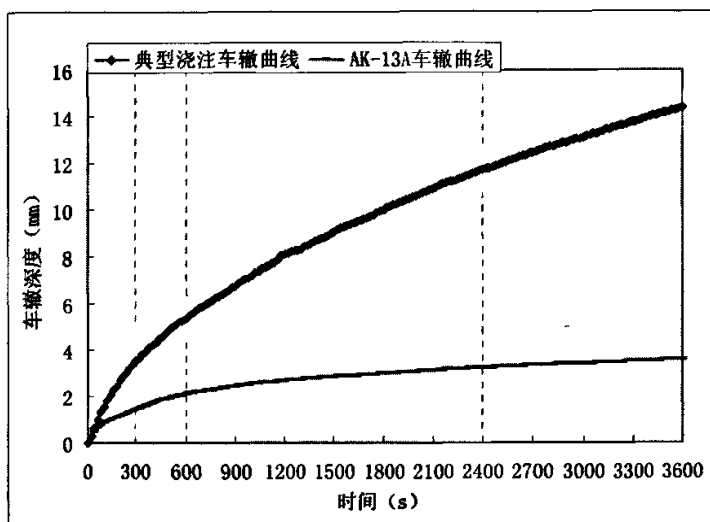


图 4-8 典型浇注车辙曲线

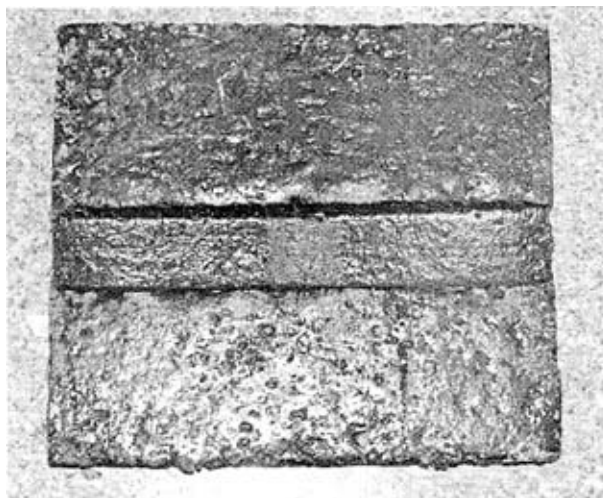


图 4-9 试验后车辙板

浇注式沥青混凝土中细集料和矿粉含量多、沥青用量大，粗集料偏少，沥青与矿粉组成的玛蹄脂是抵抗车辙的主要因素，因此改善胶结料的高温性能是提高浇注式沥青混凝土高温抗车辙性能的重要途径。文献<sup>[34]</sup>给出了改善浇注式沥青高温稳定性的几项技术措施，(1)改变沥青胶结料的配比 (2)降低可溶性沥青总量 (3)适当增加粗集料用量 (4)适当调整中间集料用量(5)适当调整矿粉用量( $<0.075\text{mm}$ )，将改善胶结料的性能放在了首位。

本研究下一步将主要对 I 型浇注即国产直馏硬质沥青的抗车辙性能进行研究，通过复合改性的方式提高其抗车辙能力。

#### 4.4 弯曲性能研究

钢桥面铺装要求铺装材料与钢板随从变形性能好，不仅要考虑低温时由于钢桥面板的收缩产生的裂缝，而且还要考虑在车辆荷载的作用下加劲肋和横隔板顶部产生较大的负弯矩导致的受拉开裂，因此铺装材料的抗弯性能也是浇注式沥青混凝土铺装设计的一个重要依据<sup>[33]</sup>。本研究采用 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ 的弯曲试验评价混合料的抗弯性能。

试验参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000) 进行，试件为浇注式混合料成型后的车辙板切割而成，尺寸为  $250 \times 30 \times 35\text{mm}$ ，计算跨径为  $200\text{mm}$ ，加载速率为  $50\text{mm}/\text{min}$ 。表 4-4 为 $-10^{\circ}\text{C}$ 弯曲试验结果、表 4-5 为 $0^{\circ}\text{C}$ 弯曲试验结果、表 4-6 为 $15^{\circ}\text{C}$ 弯曲试验结果。

表 4-4  $-10^{\circ}\text{C}$ 弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯拉应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.17	1.21	9247.12
	2	10.96	1.35	8115.80
	3	12.04	1.23	9755.60
II 型	1	12.68	1.72	7372.09
	2	12.94	1.69	7661.01
	3	12.28	1.75	7001.08



III型	1	13.90	1.68	8286.74
	2	12.09	1.43	8479.91
	3	12.62	1.54	8180.58

表 4-4 0℃弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯拉应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.24	1.70	6613.16
	2	11.47	1.76	6506.33
	3	9.95	1.52	6548.88
II 型	1	14.31	1.87	7636.20
	2	14.67	2.01	7309.37
	3	14.11	1.77	7961.47
III型	1	15.80	2.02	7833.13
	2	17.06	2.28	7488.22
	3	15.60	2.06	7563.80

表 4-5 15℃弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯拉应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.16	2.09	5347.79
	2	10.78	2.36	4573.82
	3	9.36	2.29	4081.64
II 型	1	9.87	9.51	1037.35
	2	8.49	10.85	782.48
	3	9.81	10.98	893.66
III型	1	10.07	8.06	1248.94
	2	9.86	8.79	1122.25
	3	10.27	8.15	1259.18

从-10℃弯曲试验结果可以看出,三种浇注的抗弯拉强度相差不大,但是极限弯拉应变 II 型>III型> I 型,劲度模量正好相反, II 型<III型< I 型。

15℃的常温弯曲试验也有类似的结果,三种浇注的抗弯拉强度相差不大,但是极限弯拉应变和劲度模量却有了明显的差别, II 型、III型的极限弯拉应变明显大于 I 型, II 型、III型的模量明显小于 I 型。

三种浇注在 0℃的抗弯拉强度有较大的差别, III型> II 型> I 型,而极限弯拉应变和劲度模量差别不大。这主要与胶结料的性能有关, I 型浇注的胶结料为直馏硬质沥青,沥青性能随温度的变化是直线的,而 II 型、III型浇注的胶结料为改性沥青,由于有一定量聚合物的加入,沥青的性能随温度变化是曲线的,最终表现的混合料的性能也就有了差别。

图 4-10 是三种浇注在不同温度的极限弯曲应变。随着温度的升高,浇注式沥青混凝土的最大弯曲应变变大,弯曲变形能力增强。II 型浇注变化最为明显,受温度的影响最大, III 型浇注次之。

在某一温度下,采用改性沥青的浇注式沥青混凝土的最大弯曲应变优于仅采用直馏硬质沥青的浇注,在温度稍高的情况下,此结果更为明显。改性沥青浇注式沥青混凝土的弯曲变

形能力优于直馏硬质沥青。

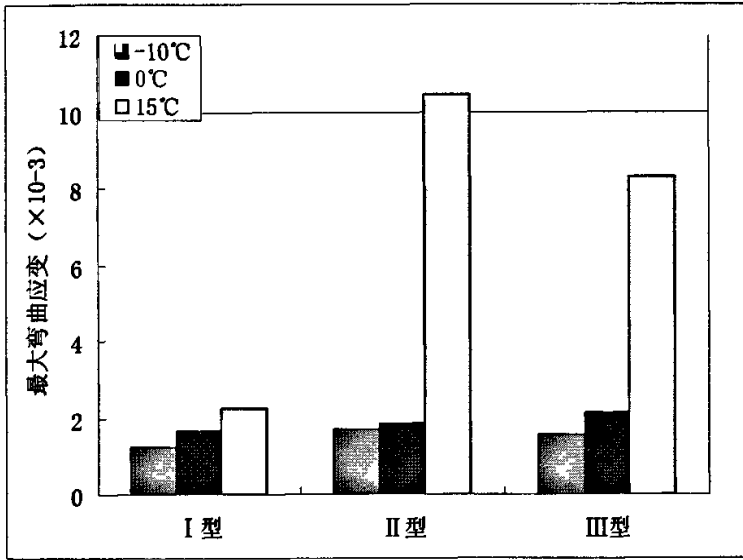


图 4-10 三种浇注在不同温度的极限弯曲应变

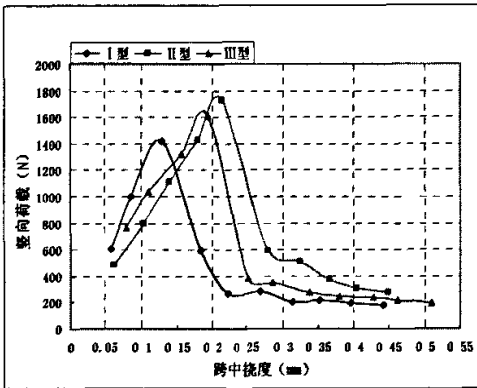


图 4-11 -10°C弯曲曲线

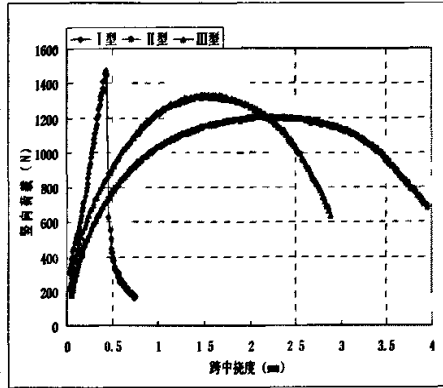


图 4-12 15°C弯曲曲线

图 4-11、4-12 为-10°C和 15°C三种类型浇注的弯曲曲线，弯曲试验曲线反映的是小梁在试验过程中竖向荷载和跨中挠度之间的关系，根据试验的曲线可以看出：

1、浇注式沥青混凝土在低温(-10°C)状况下，无论是直馏硬质沥青还是改性硬质沥青，浇注试件均处于明显的弹性状态，在试件没有破坏以前，竖向荷载和跨中挠度基本保持一条直线，即材料处于弹性状态，曲线具有明显的峰值；

2、常温(15°C)状况下，试验曲线较为平缓，弹性阶段不明显，材料表现为一种弹塑性状态，改性硬质沥青即 II型、III型浇注的塑性性质更为明显，而且可以推断随着温度的升高，混合料的塑性状态会更明显。

3、鉴于在 15°C时，浇注式沥青混合料的弯曲性能已经表现为一种弹塑性状态，其弯曲变形的能力随温度增加会相应的增大，更高温度的弯曲试验也没有必要在进行下去。这也符合钢桥面铺装设计时考察混合料高温抗车辙，低温抗弯曲的研究思路。

综上所述，三种浇注式沥青混凝土均具有较好的抵抗弯曲变形的性能，但采用改性沥青的浇注的弯曲性能比直馏硬质沥青的性能更好。尤其本研究专门配制的复合改性 PmB45 沥

青的弯曲性能最为优良。

## 4.5 抗疲劳性能研究

沥青混合料疲劳破坏机理极其复杂,影响沥青混合料疲劳寿命的因素众多,并且各因素之间相互作用。美国 SHRP 项目疲劳研究报告 A-003A 最终结论也以疲劳试验来评价沥青混合料的疲劳性能<sup>[35]</sup>。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,目前以弯拉试验以及间接拉伸试验(即劈裂试验)应用最为广泛<sup>[36][37]</sup>,SHRP 工作者将上述方法进行了优缺点对比及相应排序,认为重复弯曲试验最能代表实际路面的受力状况,试验结果可直接用于设计,是疲劳试验的首选方法,本研究采用弯拉疲劳试验研究沥青混合料的抗疲劳性能。

沥青混合料室内小梁试件疲劳试验的荷载控制模式通常有两种,即控制应力的疲劳试验和控制应变的疲劳试验。控制应力的疲劳试验是指在重复加载的疲劳试验过程中,保持应力不变,疲劳破坏是以试件的疲劳断裂作为准则,达到疲劳破坏的重复荷载的作用次数为疲劳寿命。控制应变的疲劳试验是指在重复加载的疲劳试验过程中,保持应变不变。由于控制应变的疲劳试验没有明显的破坏现象,通常人为定义当混合料的劲度达到初始劲度的一半时作为破坏准则,此时重复荷载的作用次数为疲劳寿命。

荷载模式在反映沥青混合料疲劳特性方面有显著差异。其中最主要的表现在以下两方面<sup>[35]</sup>:

1、由应力控制的疲劳试验得到的疲劳寿命要比应变控制的疲劳试验得到的疲劳寿命小得多。这是因为在控制应力的荷载模式中,由于材料劲度随着加载次数的增加而逐渐减小,为了保持各次加载时的常量应力不变,每次加载实际作用于试件的变形就要增加;而在控制应变的荷载模式中,为了保持每次加载的常量应变不变,每次加载时作用于试件的实际应力在不断减小。因此,采用不同的荷载控制模式,试件的实际受荷状况是不同的。显然,对于相同的材料,在初始应力、应变条件相同的情况下,采用控制应变荷载模式,裂缝的发生和扩展速度远远小于应力控制模式,试件达到破坏的荷载作用次数要大于应力控制模式的疲劳试验的作用次数。SHRP 研究表明:在相同条件下,应变控制模式的疲劳试验所得到的疲劳寿命 $\approx 2.4$ 倍应力控制模式的疲劳寿命。

2、在给定的应力(或应变)水平下,控制应力的疲劳试验,较高劲度的混合料具有较大的疲劳寿命。控制应变的疲劳试验,较高劲度的混合料却表现了较小的疲劳寿命。这是因为在控制应力的加载模式中,由于材料劲度增加时,为了保持各次加载时的常量应力不变,每次加载实际作用于试件的变形就要减小;而在控制应变的加载模式中,为了保持每次加载的常量应变,每次加载时作用于试件的实际应力在不断增大。

对于室内小型试验,车轮荷载的加载时间可以根据 VanderPoel 的公式来确定  $t=1/(2\pi f)$ ,当加载频率为 10Hz 时,与国外大多数研究所选择的加载频率相同,加载时间为  $t=1/(2\pi f)=0.016s$ ,0.016s 的加载时间对沥青混合料路面表面大致相当于 60~65km/h 的行车速度。中国现行的《公路工程技术标准》规定的汽车专用公路的计算行车速度范围为 40~120km/h,可见选择 10Hz 的荷载频率是合适的。

本研究采用 UTM 小梁疲劳设备进行,如图 4-13 所示。试验采用半正弦应变控制模式,加载频率为 10Hz,疲劳试验温度为 15℃。

采用 UTM 小梁疲劳设备可以记录材料的疲劳寿命以及疲劳过程的累计应变能,通过这两个指标可以比较不同材料采用相同试验条件时抗疲劳性能的优劣。UTM 中累计耗能是通过计算在整个疲劳过程中,所有应力应变滞后回路面积的总和,作为达到破坏时的总能耗

$W_F$  [43]:

$$W_F = \sum_{i=1}^{N_F} W_i$$

式中:

$N_F$ ——达到破坏时的荷载重复作用次数,即通常所说的疲劳寿命;

$W_F$ ——达到破坏时的总耗散能,即累计耗散能;

$W_i$ ——应力应变曲线中应力、应变曲线所围成的曲线面积。

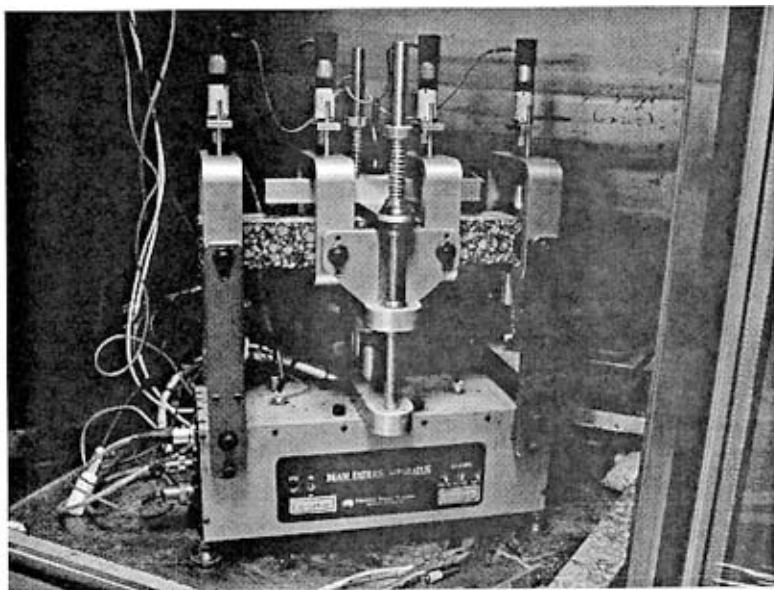


图 4-13 UTM 小梁疲劳试验装置

试件的制备:按照车辙试验的方式成型试件,试件采用改进的车辙模子成型,车辙板的尺寸为  $300 \times 400 \text{mm} \times 70 \text{mm}$ ,然后切割成小梁  $63.5 \times 50 \times 400 \text{mm}$  的小梁,以备试验用。

由于浇注式沥青混凝土在  $15^\circ\text{C}$  的抗弯刚度相差比较大(国产硬质沥青浇注式沥青混凝土的抗弯刚度达到了  $15000 \text{MPa}$  左右,而 PmB45 浇注式沥青混凝土的抗弯刚度仅为它的一半左右),且远远大于普通沥青混凝土的抗弯刚度  $5000 \text{MPa}$  左右,同时设备的最大功率有限,且连续工作时间不宜过长,综合考虑荷载大小和试验时间两个因素,本研究采用以下试验策略:尽量采用较大的微应变减少试验加载的时间;试验采用两个指标作为结束的标准(1)测试刚度降到初始刚度一半,(2)试验作用时间控制在 10 小时左右。表 4-6 为疲劳试验结果。

表 4-6 疲劳试验结果

胶结料类型	微应变 ( $\mu\epsilon$ )	初始刚度 (MPa)	结束刚度 (MPa)	累计作用次 数	累计应变能 (MPa)
I 型	400	17500	8750	307390	97.747
	500	无法加载			

II型	500	8542	6012	281450	157.604
	700	8460	4226	305950	298.936
III型	700	10020	5010	414420	397.204
	800	8260	4127	323890	363.448

I型浇注成型的小梁刚度比较大,约为II型、III型浇注的一倍,采用控制应变的加载模式,从累计作用次数还是累计应变能两个指标均可以看出,II型、III型的抗疲劳性能明显优于I型浇注,III型浇注的抗疲劳性能最优。

同时,与AK-13A的小梁疲劳结果进行比较可以发现,浇注式沥青混凝土的疲劳性能明显优于AK-13A,浇注式沥青混凝土的初始刚度远远大于AK-13A,从荷载作用次数以及累应变能两方面,浇注的疲劳性能均明显优于AK<sup>[39]</sup>。表4-7为AK-13A抗疲劳性能试验结果<sup>[40]</sup>。

表 4-7 AK-13A 抗疲劳性能试验结果

微应变 ( $\mu\epsilon$ )	初始刚度 (MPa)	结束刚度 (MPa)	累计作用次数	累计应变能 (MPa)
400	4788	2359	260490	61.806

这一试验结果与理论分析结果是一致的,沥青混合料空隙率由大到小其抗疲劳性能逐渐增强,这是因为空隙率越大,沥青混合料内部空隙与微裂缝就越多在荷载反复作用下就愈易引发微裂缝的扩展破坏,从而使疲劳性能降低<sup>[41]</sup>。浇注式沥青混凝土空隙率接近于0,因此抗疲劳性能特别优良。

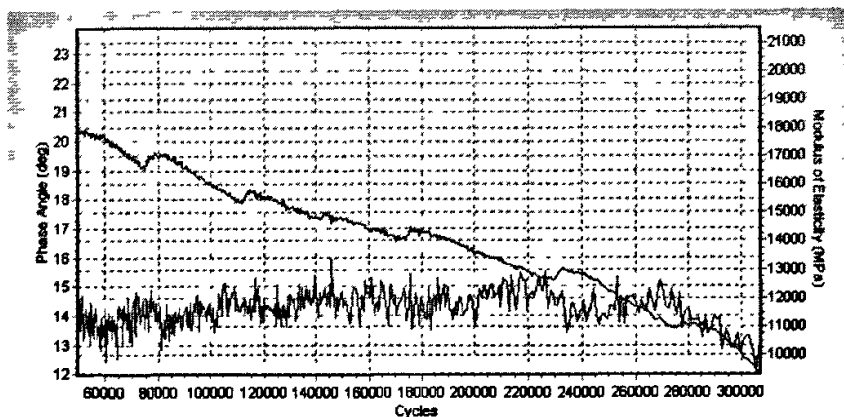


图 4-14 直馏硬质沥青浇注疲劳曲线 (模量 (细线) 和相位角)

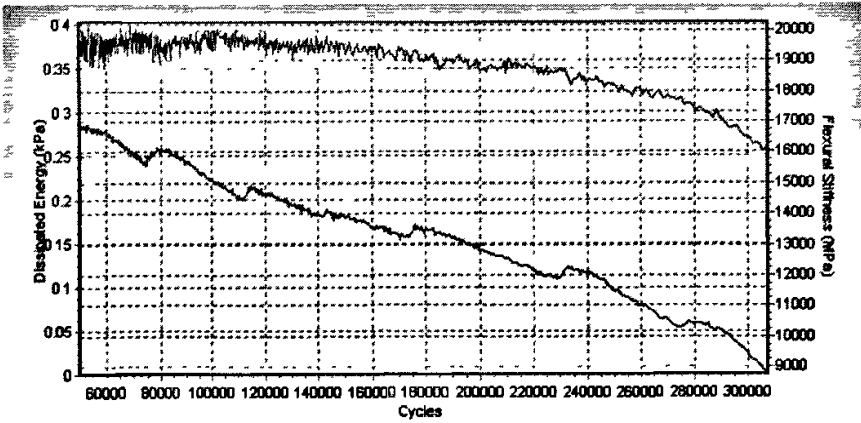


图 4-15 直馏硬质沥青浇注疲劳曲线（刚度（细线）和耗散能）

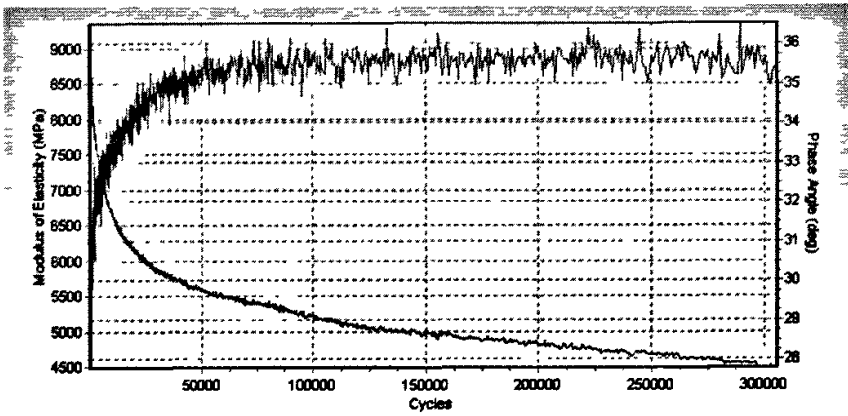


图 4-16 典型改性硬质沥青浇注疲劳曲线(模量（细线）和相位角)

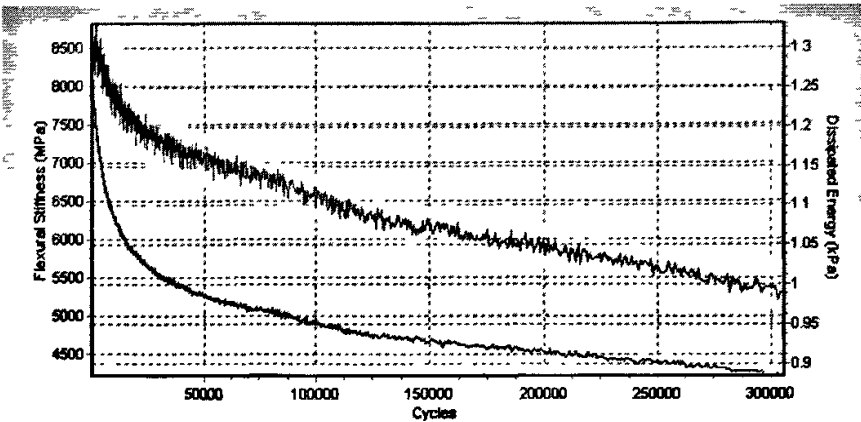


图 4-17 典型改性硬质沥青浇注疲劳曲线（刚度（细线）和耗散能）

图 4-14、4-15、4-16、4-17 为典型浇注疲劳曲线，分别描述了小梁的模量、相位角、刚度与耗散能与荷载作用次数的关系。根据疲劳试验曲线可以看出：

1、直馏硬质沥青与改性硬质沥青在刚度、模量、相位角、耗散能几个方面，随循环次数作用呈献出不同的发展趋势。直馏硬质沥青的刚度和模量随循环次数的增加，是一个线性

下降的过程,而改性硬质沥青则存在不同的疲劳阶段,开始阶段刚度和模量下降较快,然后是一个平稳的阶段,可以预计还将存在一个迅速破坏的阶段。

2、直馏硬质沥青的相位角明显小于改性沥青,直馏硬质沥青的相位角在循环加载过程中基本保持在一个稳定的状态,整个过程变化不大,改性硬质沥青相位角在循环加载过程中初期随加载次数的增多而逐渐增大,增长较快,后期基本保持在一个稳定的状态,与混合料的模量和刚度基本上同时达到一个稳定的发展阶段。

3、直馏硬质沥青的耗散能在循环加载过程中是一个缓慢降低的过程,初期速度较慢,后期降低速度变快,改性硬质沥青的耗散能在循环加载过程中随加载次数的增多也是逐渐减小,但初期较快,后期较慢。

通过试验发现,浇注式沥青混凝土由于其高沥青含量,低空隙率,混合料的抗疲劳性能明显优于普通的沥青混凝土,因此较其他类型的混凝土更适宜于钢桥面这种类型的铺装。同时改性硬质沥青浇注式混凝土的疲劳性能优于直馏硬质沥青,III型好于II型,好于I型。在浇注式沥青混凝土中采用改性硬质沥青更加有效。

## 4.6 本章结论

本章通过贯入度试验、高温车辙试验,弯曲试验和疲劳试验综合评价了三种浇注式沥青混凝土的性能,通过试验可以发现,三种材料的高温性能较其它类型混凝土差,但低温性能和抗疲劳性能优良,明显优于普通的沥青混凝土,且改性沥青的性能较直馏硬质沥青的性能优,改性硬质沥青浇注式沥青混凝土更加适合于钢桥面铺装。

## 第五章 国产直馏硬质沥青浇注式沥青混凝土的改进研究

### 5.1 概述

如何协调沥青混合料的各项路用性能及防水性能,是钢桥面铺装设计的难点,设计不当往往也是钢桥面铺装出现早期破坏的原因之一。如果采用单层桥面铺装,铺装层的高温稳定性、抗开裂性、变形追随性、防水性等各种性能间此消彼长的矛盾的协调将集中在一层,难以解决。为综合平衡混合料的各项路用性能,考虑到我国钢桥面铺装使用条件较国外更为苛刻,钢桥面铺装宜采用双层结构。铺装下层侧重于混合料的抗开裂能力、防水性能以及与钢板的变形随从性,铺装上层则侧重于实现铺装的抗车辙能力及抗滑性能。

浇注式沥青混凝土抵抗高温车辙的性能主要依靠沥青胶结料的性能,高温抗车辙性能不足是其弱点。加之我国特殊的气候和交通条件(高温,重载),对沥青混凝土的高温性能有更高的要求。综合以上两个因素,本研究的浇注式沥青混凝土建议在铺装下层,因此对其高温抗车辙性能要求有限提高即可,不苛求,同时也力争保证不影响或者适当的提高其弯曲性能和抗疲劳性能。

根据相关研究,掺加改性剂可以有效改善沥青混凝土的抗车辙性能,尤其是对像浇注式沥青混凝土主要依靠沥青胶结料与矿粉组成玛蹄脂抵抗车辙变形的材料,更加有效。本研究使用了两种不同类型的改性剂进行了对比试验,改性剂 A 易于添加到沥青当中,采用简单的搅拌工具就可以获得较稳定的改性沥青且性能稳定,它可以显著提高沥青的软化点,降低沥青的针入度,同时可以降低浇注式沥青混凝土的拌和温度;改性剂 B 为当前常用的一种改性剂,可以明显改善沥青的高低温性能,但是较难与沥青进行拌和,需要专门的高速剪切设备进行混合。

### 5.2 掺加改性剂后沥青的性能

将改性剂 A 和改性剂 B 按照推荐的加入量,添加到国产直馏硬质沥青中去。改性剂 A 易于与沥青混合,采用简单的搅拌设备,就可以获得均匀稳定的改性沥青;改性剂 B 较难与沥青混合,为了获得均匀稳定的改性沥青,需采用专用的高速剪切机,将沥青与改性剂研磨 45 分钟以上,通过试验可以发现,也可以获得均匀稳定的改性沥青。掺加改性剂以后,沥青的主要性能指标如表 5-1 所示。

表 5-1 掺加改性剂后硬质沥青的性能

试验指标	直馏硬质沥青	直馏硬质沥青+3%A	直馏硬质沥青+2%B
软化点    ℃	62.2	77.5	67.5
针入度    0.1mm	25.4	19.0	24.0
延度(25℃) cm	>150	92.5	58.8
TFOT			
质量损失   %	0.04	0.02	0.03
针入度比   %	83	85	75
延度(25℃) cm	>150	39.3	28.2



为了提高硬质沥青抵抗高温车辙的能力,也是与不参加改性剂的硬质沥青的性能进行对比,本研究在掺加改性剂的同时,依然加入 30%的湖沥青,进行复合改性,掺加湖沥青后胶结料的性能如表 5-2 所示。

表 5-2 硬质沥青掺加 TLA 后的性能

试验指标	直馏硬质沥青+30%TLA	直馏硬质沥青+3%A+30%TLA	直馏硬质沥青+2%B+30%TLA
软化点 ℃	65.2	83.5	77.8
针入度(25℃) 0.1mm	21.4	14.8	16.7
延度(25℃) cm	26.0	15.5	13.6

从试验结果可以看出改性剂 A、B 与湖沥青复合改性对沥青性质均有较大的影响:

- (1) 改性剂 A、B 均可以提高沥青的软化点,但改性剂 A 的效果好于改性剂 B,湖沥青的加入可以继续提高改性沥青的软化点,且效果很明显。
- (2) 改性剂 A、B 使针入度减小,改性剂 A 效果更明显,湖沥青使混合沥青的针入度进一步减小。
- (3) 改性剂 A、B 对硬质沥青的延度均有较大的影响,改性剂 B 影响更加明显。湖沥青的加入使改性沥青的延度进一步降低,但延度试验过程中试验所需要的拉力明显变大。
- (4) 老化结果表明,几种沥青的质量损失满足我国对改性沥青±1.0%的要求,同时老化使沥青的针入度降低,延度降低,老化对改性剂 A 改性的沥青的延度影响更加明显。

改性剂 A、B 与湖沥青的加入改变了硬质沥青的一些性能,使硬质沥青的软化点升高,针入度降低,延度降低。改性剂的加入使沥青变的更硬,达到了研究的目的——降低硬质沥青的针入度,提高其软化点。老化对改性直馏硬质沥青的影响很大,浇注式沥青的长时间高温拌和的生产条件对沥青必将有较大的影响,因此实验室内试件的成型对该老化过程的模拟很重要。

### 5.3 确定沥青用量

采用与前面试验相同的集料和级配,确定掺配改性剂 A 的浇注式沥青混凝土即 IV 型,和掺配改性剂 B 的浇注式沥青混凝土即 V 型的沥青用量。参照第四章的结论本次沥青用量的确定采用 60℃贯入度试验确定,并与 40℃的贯入度结果进行对比。

#### 5.3.1 确定沥青用量

根据试拌结果,确定 IV 型、V 型的初始沥青用量为 9.0%,±0.5%分别成型贯入度试件,进行贯入度及贯入度增量试验,结果如表 5-3 所示。

表 5-3 60℃的贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	油石比(%)	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)
IV 型	8.5	185	22
	9.0	237	17
	9.5	272	30
V 型	8.5	143	17
	9.0	176	17
	9.5	230.5	26

根据贯入度试验结果以及成型时的和易性, IV型在油石比取为 8.5%时, 便具有较好的流动性, 易成型, 油石比为 9.0%用油偏大, 因此确定IV型的油石比取为 8.5%; 对于V型油石比为 9.5%流动性偏大, 油石比为 9.0%时较易成型, 因此取油石比为 9.0%。

表 5-4 为IV型、V型浇注在 40℃的贯入度和贯入度增量试验结果。两种浇注的贯入度均小于 4mm, 后 30 分钟的贯入度增量也小于 0.4mm, 满足德国和日本等国规范要求。

表 5-4 40℃的贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	油石比(%)	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)
IV型	8.5	87.5	19.5
	9.0	91.5	22
	9.5	102	26
V型	8.5	62	15
	9.0	80	14
	9.5	90.5	20

### 5.3.2 配合比检验

本研究参照第三章确定的配合比设计流程, 通过 60℃的车辙试验和-10℃低温弯曲试验对IV型、V型进行配合比检验。

#### 5.3.2.1 车辙试验

车辙试验参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000) 要求进行, 试验温度为 60℃, 轮压为 0.7MPa。试验结果如下表 5-5 所示。

表 5-5 车辙试验结果

胶结料类型	试件	60min 车辙深度 (mm)	动稳定度 (次/mm)	平均
IV型	1	7.377	630	647
	2	6.385	663	
V型	1	3.204	1393	1370
	2	3.491	1346	

从试验结果可以看出, 对国产硬质沥青进行复合改性可以显著提高浇注式沥青混凝土的高温抗车辙性能。IV型的动稳定度达到 647 次/mm, 已接近我国普通沥青混凝土的动稳定度大于 800 次/mm 的要求, 而V型的动稳定度为 1370 次/mm, 可以满足我国普通沥青混凝土的动稳定度大于 800 次/mm 的要求。动稳定度试验结果均满足配合比检验指标确定的大于等于 350 次/mm 的要求。

#### 5.3.2.2 低温弯曲试验

低温弯曲试验参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000) 进行, 试验温度为-10℃, 试件为轮碾成型后的板切割而成, 尺寸为 250×30×35mm, 计算跨径为 200mm, 荷载速率为 50mm/min。表 5-6 为本次试验的结果。

表 5-6 低温弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯拉应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
IV型	1	10.93	1.28	8507.31
	2	12.54	1.22	10275.23
	3	11.39	1.21	9449.22
V型	1	11.55	1.45	7980.85
	2	12.58	1.64	7670.81
	3	12.25	1.70	7217.61

两种混合料的低温性能满足配合比检验确定的指标。V型混合料低温性能明显优于IV型混合料。

通过配合比检验，采用复合改性的国产硬质沥青生产的浇注式沥青混凝土，在高低温性能方面均有较好的效果，确定的沥青用量是可行的。

### 5.4 贯入度性能研究

采用上述配合比设计确定的沥青用量分别成型贯入度试件，进行 40℃ 与 60℃ 贯入度试验，并与 I 型浇注进行对比，结果如表 5-7 所示。图 5-1 为不同温度贯入度结果对比。

表 5-7 贯入度及贯入度增量试验结果

胶结料类型	40℃		60℃	
	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)	贯入度(0.01mm)	贯入度增量(0.01mm)
I型	94.5	17.5	185.0	36.0
IV型	87.5	19.5	184.0	22.0
V型	80.0	14.0	176.0	17.0

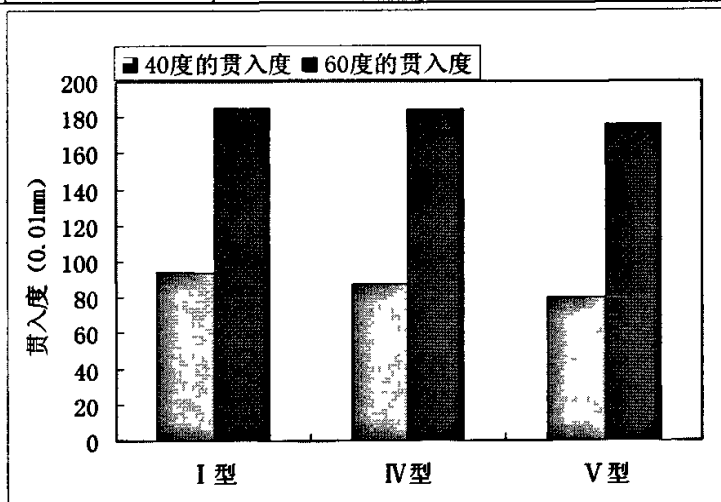


图 5-1 不同温度贯入度结果对比

添加改性剂使得浇注式沥青混凝土的贯入度有所降低,但结果并不明显。浇注式沥青混凝土的空隙率接近于0,混合料的压密变形的潜力不大,贯入度的降低也主要反映了混合料抗剪切流动能力的提高。从图5-1还可以看出,V型浇注的贯入度性能稍优于IV型浇注。

图5-2为三种浇注式沥青混凝土40℃的贯入度曲线。从结果可以看出三种混合料的贯入深度随时间发展的曲线形状相似,试验开始阶段贯入深度增长较快,后期发展变缓。综合两种温度的贯入度结果以及40℃贯入深度发展曲线可以看出:添加改性剂改善了浇注式沥青混凝土的贯入度性能,V型贯入度性能优于IV型。

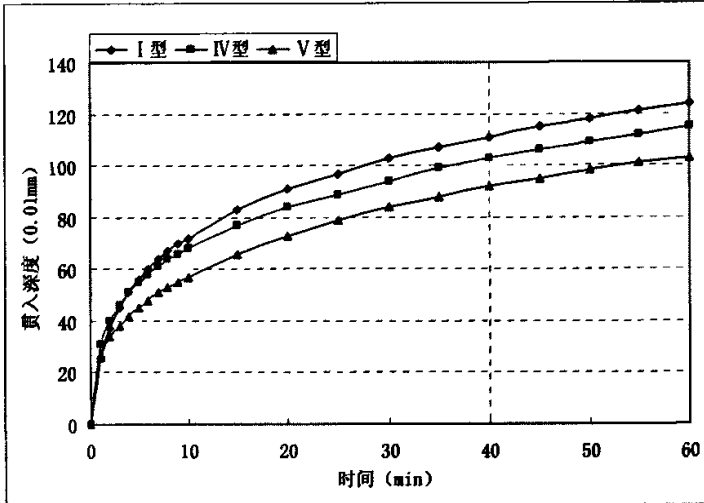


图5-2 40℃三种沥青混凝土的贯入度曲线

## 5.5 高温抗车辙性能研究

国外的研究表明:沥青混合料的高温性能有60%来源于集料,另外40%来源于沥青胶结料。因此,对于浇注式沥青混凝土这种级配偏细,沥青含量高的混凝土类型,沥青胶结料性能的改善对于钢桥面铺装的抗车辙能力有重要意义。

对于SMA及密级配改性沥青混凝土,现场调查及车辙试验均表明这类混合料车辙形成存在着上述的2个阶段。对于浇注式沥青混凝土,研究表明,其车辙破坏的形成主要是材料的抗剪能力不足导致的。浇注式沥青混凝土空隙率一般在1%以下,交通压密现象对形成车辙的贡献可以忽略不计。由于沥青混合料的粘弹性来源于沥青胶结料,这说明选用合适的抗剪能力强的沥青胶结料,可以在一定程度上减小铺装车辙量,甚至防止铺装出现车辙。

本研究对采用前述确定的复合改性沥青的浇注式沥青混凝土的抗车辙能力进行了重点的研究。考察复合改性对硬质沥青浇注式沥青混凝土抗车辙能力的改善状况。

### 5.5.1 试件成型

本研究采用专用浇注式沥青混凝土拌和机制作车辙试件,参照配合比检验时的成型条件和程序进行,可以较好的模拟现场施工时高温长时间拌和对沥青的影响。

### 5.5.2 车辙试验

本研究参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000), 评价沥青混合料的高温抗车辙能力, 试验温度为 60℃, 轮压为 0.7MPa, 轮载作用次数为 2520 次。试验同时考虑 60min 钟的车辙深度和动稳定度两个指标, 对比三种浇注的抗车辙性能。试验结果如下表 4-3 所示。

表 5-8 车辙试验结果

胶结料类型	45min 的车辙深度 (mm)	60min 的车辙深度 (mm)	动稳定度 (次/mm)
I 型	12.59	14.37	354
IV 型	6.38	7.38	630
V 型	3.02	3.49	1346

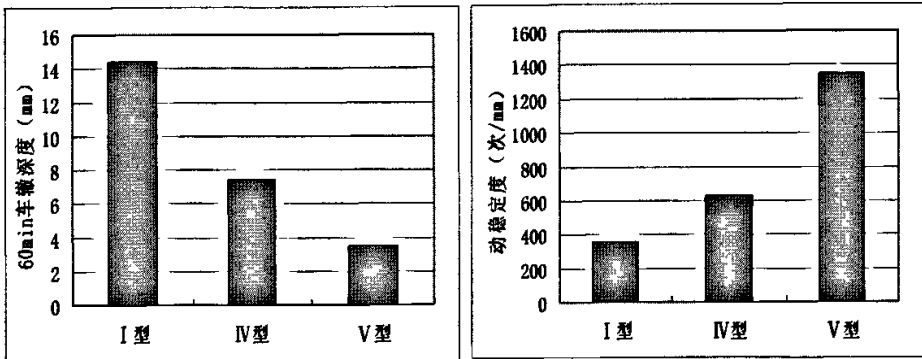


图 5-3 掺加改性剂后抗车辙性能对比

添加改性剂可以显著改善浇注式沥青混凝土的高温抗车辙性能, 添加改性剂后, 浇注式混合料 60min 的车辙深度和动稳定度两个指标都得到了明显改善。IV 型浇注 60min 的车辙深度降低为 I 型浇注的一半, V 型浇注 60min 的车辙深度降低为 I 型浇注的四分之一; 而 IV 型浇注的动稳定度比 I 型浇注提高了一倍左右, V 型浇注的动稳定度比 I 型浇注提高了两倍左右。图 5-4、图 5-5 分别为 IV 型浇注、V 型浇注车辙图片, 从两张图片也可以明显看出掺加改性剂车辙深度变浅, 轮辙边上的隆起高度变小。

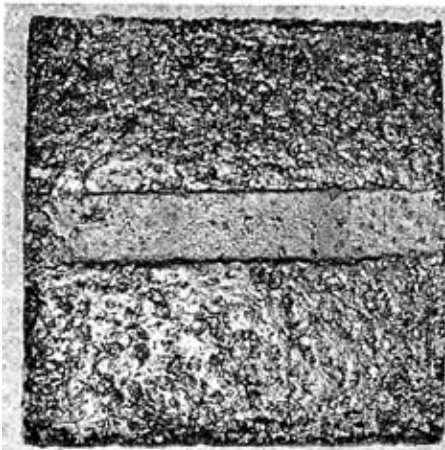


图 5-4 IV 型浇注车辙图片



图 5-5 V 型浇注车辙图片

改性剂改善了沥青混凝土的抗剪切流动的性能,提高了浇注式沥青混凝土的抗车辙性能。但浇注式沥青混凝土依然没有达到 SMA, AK 等骨架结构的混凝土的抗车辙性能要求,这与浇注式沥青混凝土的自身特性有关。本研究参照国内外的设计经验认为,浇注作为一种悬浮密实结构,粗集料未形成骨架,且主要用于铺装的下层,层厚控制在 3cm 左右,因此其动稳定度达到 800 次/mm (我国普通沥青混凝土动稳定度要求),试验 1 小时后车辙深度控制在 6mm 左右,满足本研究提出的混合料抗车辙性能有限提高的目的。

根据高温车辙试验结果,在直馏硬质沥青中添加适量的改性剂可以改善其抗车辙性能,改性剂 B 的对直馏硬质沥青的在高温车辙方面改性效果要优于改性剂 A。

## 5.6 弯曲性能研究

在一般情况下,沥青混合料的高温稳定性与低温弯曲性是相互矛盾的,片面提高某一方面的性能,就可能对另一方面性能造成影响。只有全面提高胶结料的性能,才能同时改善混合料的高温性能和弯曲性能,以满足钢桥面铺装的需要。

本研究采用低温  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$  三种温度下的弯曲试验评价混合料的抗弯曲变形的能力。试验参照我国公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ052-2000) 进行,试件采用车辙板切割而成,尺寸为  $250\times 30\times 35\text{mm}$ ,计算跨径为 200mm,荷载速率为 50mm/min。表 5-9、5-10、5-11 为不同温度的弯曲试验的结果。

表 5-9  $-10^{\circ}\text{C}$  弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯曲应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.17	1.21	9247.12
	2	10.96	1.35	8115.80
	3	12.04	1.23	9755.60
IV 型	1	10.93	1.28	8507.31
	2	12.54	1.22	10275.23
	3	11.39	1.21	9449.22
V 型	1	11.55	1.45	7980.85
	2	12.58	1.64	7670.81
	3	12.25	1.70	7217.61

表 5-10  $0^{\circ}\text{C}$  弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯曲应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.24	1.70	6613.16
	2	11.47	1.76	6506.33
	3	9.95	1.52	6548.88
IV 型	1	11.36	1.32	8598.83
	2	11.72	1.45	8100.52
	3	11.48	1.37	8381.27
V 型	1	9.02	2.13	4227.44
	2	8.68	1.68	5161.05
	3	9.95	1.95	5092.41

表 5-10 15℃弯曲试验结果

胶结料类型	试件	抗弯拉强度 (MPa)	极限弯曲应变 ( $\times 10^{-3}$ )	劲度模量 (MPa)
I 型	1	11.16	2.09	5347.79
	2	10.78	2.36	4573.82
	3	9.36	2.29	4081.64
IV 型	1	9.81	2.22	4423.76
	2	9.52	1.84	5180.18
	3	9.68	2.11	4587.68
V 型	1	10.45	2.01	5185.44
	2	10.25	1.69	6080.52
	3	10.59	1.85	5717.82

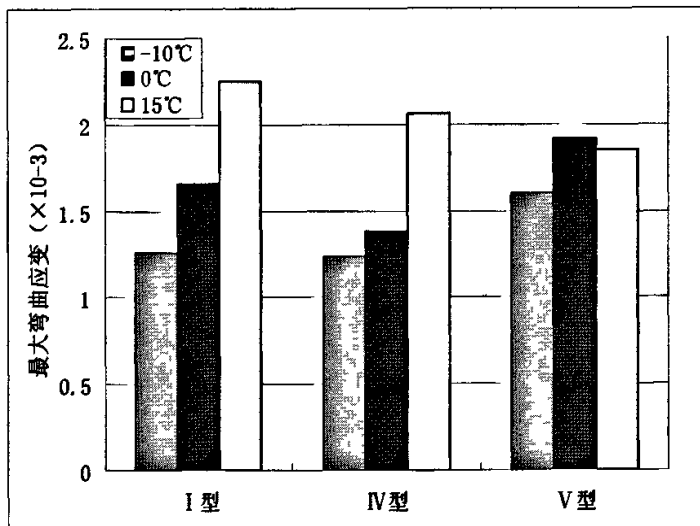


图 5-6 极限弯曲应变

从前面的试验结果以及极限弯曲应变的对比可以看出：

1、根据-10℃低温弯曲试验结果，改性剂 A 对国产硬质沥青的-10℃低温性能没有影响，而改性剂 B 可以提高国产硬质沥青的-10℃低温弯曲性能，在改善硬质沥青的低温性能方面，改性剂 B 优于改性剂 A。

2、从15℃的弯曲试验结果可以看出，改性剂 A、B 对硬质沥青的极限弯曲应变性能都有不利的影响，改性剂 A 的影响略小于改性剂 B。但添加改性剂后浇注的劲度模量都有一定的提高。

3、0℃弯曲的试验结果没有什么规律性，改性剂 A 使浇注式沥青混合料的极限弯曲应变变小，劲度模量增大；而改性剂 B 使混合料的极限弯曲应变变大，劲度模量变小。

4、从结果也可以看出温度升高，浇注的弯曲抗弯曲应变性能也随之提高，I 型浇注弯曲性能提高更加明显。改性剂的加入使这种变化不明显，抵抗弯曲变形的能力随温度升高变化的幅度变小。

改性剂 A 的加入为改变直馏硬质沥青的抗弯曲变形性能，掺加改性剂 A 后混合料的抗弯曲变形的能力能随温度的变化依然是直线的；而改性剂 B 的加入则改变了这种规律性，

改性剂 B 可以同时改善国产硬质沥青的高低温性能。

掺加改性剂对沥青的 15℃ 的极限弯曲应变性能有不利的，这与前面胶结料 25℃ 延度的结果类似。图 5-7 为掺加改性剂后沥青 25℃ 延度的结果，可以看出改性剂对硬质沥青 25℃ 延度有不利的的影响。因此，对于直馏硬质沥青掺加少量的改性剂以后，25℃ 的延度可以反映 15℃ 极限弯曲应变性能的变化。

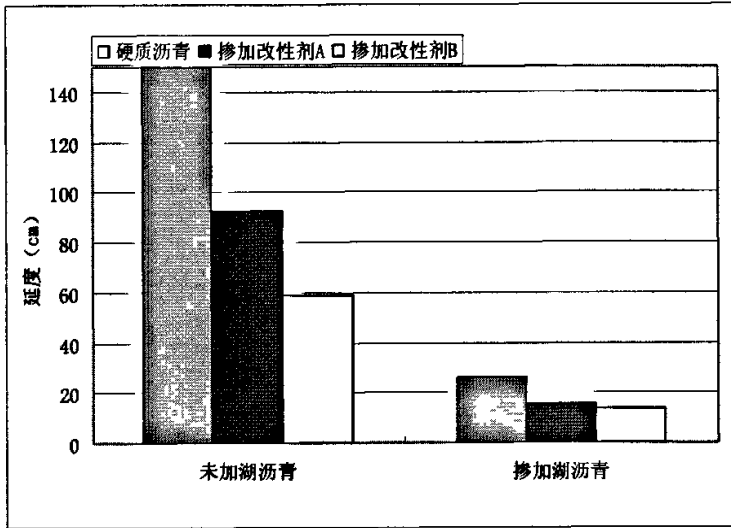


图 5-7 改性剂对硬质沥青 25℃ 延度的影响

## 5.7 抗疲劳性能研究

浇注式沥青混凝土的抗疲劳性能优良。添加改性剂以后，浇注式沥青混合料的高温性能显著提高，是否对其抗疲劳性能造成一定的影响也是本研究的一个重点。

试验采用 UTM 小梁疲劳试验设备进行，试验按照车辙试验的方式成型试件，试件采用改进的大车辙模子成型，车辙板的尺寸为 300×400mm×70mm，然后切割成 63.5×50×400mm 的小梁，以备试验用。

直馏硬质沥青混合料的刚度很大，通过试验发现初始刚度在 15000MPa 左右，同时由于仪器的加载能力有限，当微应变定为 500 $\mu\epsilon$  时，已超过设备的加载极限。因此本次疲劳的加载策略为定微应变加载，微应变确定为 400 $\mu\epsilon$ ，当小梁刚度降为初始刚度一半的时候试验结束。表 5-11 为疲劳试验参数设置的汇总。

表 5-11 疲劳试验参数设置

试验参数		参数设置
试件尺寸		63.5×50×400mm
试验温度		15℃
加载设置	加载方式	四点加载
	控制方法	半正弦应变控制
	应变大小	400×10 <sup>-6</sup>
	加载频率	10Hz



表 5-12 为本次疲劳试验的试验结果。三种类型的胶结料的抗弯刚度均比较大, 改性剂的加入没有改变混合料在 15℃ 的刚度。改性剂可以提高硬质沥青的抗疲劳性能, 累计作用次数、累计应变能均有所提高。同时, 也可以看出采用改性剂 B 的效果要稍好于改性剂 A。

表 5-12 疲劳试验结果

胶结料类型	初始刚度(MPa)	结束刚度 (MPa)	累计作用次数	累计应变能 (MPa)
I 型	17500	8750	307390	97.747
IV型	15247	7520	344780	107.338
V 型	16852	8420	385080	114.658

图 5-8、5-9 为添加改性剂后, 浇注混合料小梁在循环加载作用过程中, 模量、相位角、刚度与耗散能随加载时间变化的趋势。

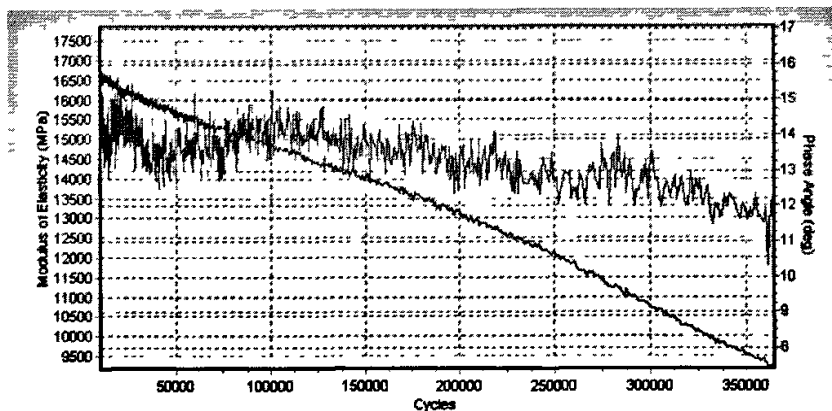


图 5-8 掺加改性剂后浇注疲劳曲线 (模量 (细线) 和相位角)

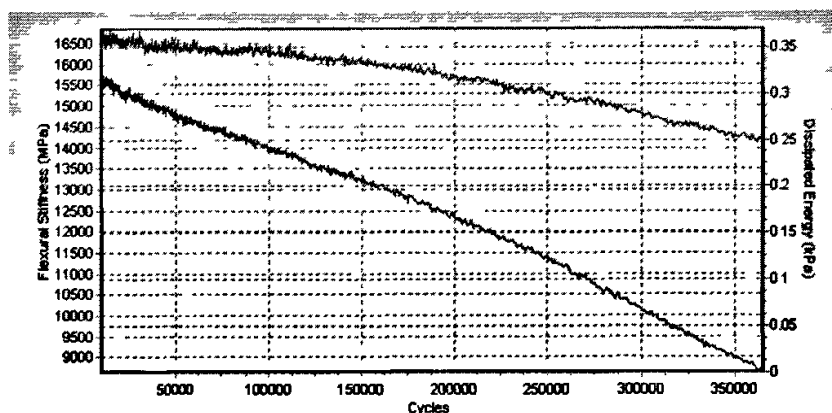


图 5-9 掺加改性剂后浇注疲劳曲线 (刚度 (细线) 和耗散能)

改性剂延缓了混合料的疲劳破坏过程, 改善了沥青混合料的抗疲劳性能。掺加改性剂后, 浇注式沥青混凝土的刚度和模量随加载次数的增加, 逐渐降低, 依然是一个线性变化的过程, 与直馏沥青类似, 而没有像前面提到的改性硬质沥青那样出现一个疲劳的稳定期, 因此改性

剂对浇注式混凝土的抗疲劳性能有一定的改善,但效果一般。同时对模量和耗散能的影响也是如此。添加改性剂后,沥青混合料的相位角依然在 12~14 度之间,与硬质沥青混合料的相同。

出现上述现象的主要原因可能是改性剂未对直馏硬质沥青的性质产生本质的改变,一般聚合物改性剂的掺加量 3%以上,而本次改性剂 B 的掺加量仅为 2%,改性剂未能在沥青中形成有效的网格结构;而改性剂 A 掺加量虽然为 3% (产品说明推荐),但其主要为一种润滑剂类型的材料,不会在沥青中形成有效网格,只会稳定原有沥青网格结构。

## 5.8 本章结论

本章通过复合改性的方式,改善沥青胶结料及浇注式沥青混凝土的性能。胶结料试验结果表明,改性剂可以降低直馏沥青的针入度,提高直馏沥青的软化点,同时对沥青延度也有一些影响,改性剂 A 较改性剂 B 更容易与沥青混合。浇注式混凝土性能试验结果表明,改性剂 B 可以显著改善浇注的高温性能及低温性能,而改性剂 A 可以改善浇注的高温性能,但并不影响浇注的低温性能,改性剂 A 与 B 均可以改善浇注混凝土的疲劳性能,但效果一般。

## 第六章 结论及进一步研究设想

### 6.1 结论

借鉴国内外硬质沥青的研究应用情况,本研究进行了大量的室内试验,深入研究了采用硬质沥青的浇注式沥青混凝土的性能。参照德国、日本、以及国内浇注式沥青混凝土的一些研究成果,通过实验室的对比试验研究,得到如下研究结论:

1、通过对沥青胶结料进行广泛调查和性能试验研究基础上,参照国内外浇注式沥青混凝土胶结料的性能要求,初步确定国产直馏硬质沥青、实验室自行配制的 PmB45 沥青、以及德国进口 PmB25 作为本研究的胶结料,此三种沥青的性能可以满足相关规范的要求。

2、参照德国、日本、英国等成熟的浇注式沥青混凝土的设计经验和指标,进行配合比设计,确定了本研究三种胶结料类型浇注的配合比,并通过贯入度试验、高温车辙试验,弯曲试验和疲劳试验综合评价了此三种浇注式沥青混凝土的性能,通过试验可以发现,三种材料的高温抗车辙能力均有限,但低温弯曲性能和抗疲劳性能优良;改性沥青的性能较直馏硬质沥青性能优,尤其是在抵抗弯曲变形和抗疲劳两个方面。

3、为进一步提高国产直馏硬质沥青浇注式沥青混凝土的高温性能,本研究通过复合改性的方式,改善沥青胶结料以及浇注式沥青混凝土的性能。试验结果表明,改性剂可以降低直馏硬质沥青的针入度,提高直馏沥青的软化点,改性剂 A 较改性剂 B 更容易与沥青混合。改性剂 B 可以显著改善浇注的高温性能及低温性能,而改性剂 A 可以改善浇注的高温性能,但并不影响浇注的低温性能。因此,具体采用采用何种改性剂还要视工程的具体需要来确定。

4、通过对比试验及结果分析,考虑国内的现有状况,在浇注式沥青混凝土中采用 PmB45 作为胶结料,混合料的弯曲性能和疲劳性能均较优,但其高温抗车辙性能尚有待提高。同时直馏硬质沥青作为一种在国外应用较为成熟的材料,若要在国内使用,建议进行复合改性以满足国内工程实际的要求。

### 6.2 进一步研究设想

浇注式沥青混凝土在国内的应用尚处于探索阶段,各种规范和标准还不完善,因此本研究在参考国内外成功例子的基础上进行了许多探索,由于时间及设备等方方面面的问题,本研究尚存在很多不足,以下是进一步研究的一些思路:

1、当前国内常用的沥青为普通 70<sup>#</sup>沥青以及改性 70<sup>#</sup>沥青,对 50<sup>#</sup>、30<sup>#</sup>等较硬沥青的应用研究尚处于起步阶段,能否采用常规的指标来评价此种沥青,能否采用常规的沥青混合料设计方法对采用此种沥青的混合料进行设计,还需要进行广泛的研究。

2、我国现阶段浇注式沥青混凝土的设计方法和试验方法尚没有统一的规范,像本次试验研究主要参考了德国、日本的相关资料,因此为了更好的推广应用浇注式沥青混凝土,建议相关部门应尽快制定相关设计和试验的规范。

3、本研究侧重于胶结料对浇注式沥青混凝土性能影响的评价,缺少集料以及矿粉对混合料性能影响的研究。

4、本研究主要进行了相应的室内试验,缺少实体工程或者足尺加速路面试验进行验证,也缺少对现场施工质量控制体系以及现场施工方法进行的研究,这是浇注式沥青混凝土进一步研究的重点。

## 参考文献

- 1 Bernhard Steinauer , Karen Scharnigg , Vergleichende Untersuchungen des Tieftemperaturverhaltens und der Standfestigkeit Von Gussasphalten mit Verschiedenen Bindemitteln[R], Institut für Strassenwesen Aachen, 2004
- 2 多田宏行, 橋面舗装の設計と施工[M], 東京: 鹿島出版会, 1996, 390-395
- 3 李洪涛, 黄卫, 浇注式沥青混凝土在日本钢桥面铺装上的应用[J], 华东公路, 1999, 3: 39-42
- 4 交通部, JTJ F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S], 北京: 人民交通出版社, 2004
- 5 J.-F. Corté, Development and uses of hard grade asphalt and of high modulus asphalt mixes in France[J], TRB, 2001.1
- 6 陈军, 中下面层沥青混凝土抗车辙性能研究[D]: [硕士学位论文], 南京: 东南大学交通学院, 2004
- 7 南京长江第二大桥建设指挥部, 东南大学, 南京长江第二大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装技术及应用[R]: [内部资料], 2000
- 8 I.J.Dussek, Well (Trinidad Lake Asphalt) Lid, Mastic asphalt (and gussasphalt) surface courses[C], In: Cliff Nicholls , Asphalt Surfacing, London and New York: E & FN Spon an imprint of Routledge, 1998
- 9 张力, 陈仕周, 钢桥面铺装技术的研究与发展公路[J], 公路, 2001, 1: 2-5
- 10 Nunn D.E.S.A.H. Morris. Trials of Orthotropic Bridge Deck Panels under Traffic Loading[R] , Transport and Road Research Laboratory Report LR627, TRRL, Crowthorne, 1974
- 11 袁宏伟, 封晨辉, 浇注式沥青混凝土在钢桥桥面铺装中的应用[J], 中外公路, 2003.3: 40-49
- 12 楊金澤, 邱垂德, 鋼床鉄鋪面材料特性研究[R], 台湾建工院资料
- 13 樊叶华等, 浇注式沥青混凝土钢桥面铺装养护对策分析[J], 中外公路 2005.1: 81-83
- 14 Herausgegeben von Bearbeitet von Eigenschaften Von Gemischen aus Straßenbaubitumen und Trinidad Epuré、Zugabemengen Von Trinidad Epuréverschiedene Asphaltmischgüter[S], In Laborhanduch für Trinidad Naturasphalt, BitLabo r, Ausgabe 2001: 9-10
- 15 江苏省长江大桥建设指挥部, 东南大学交通学院, 英国国家标准 (BS) BSI 标准出版物 [S]: [内部资料] 南京: 东南大学交通学院, 1999
- 16 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 东南大学交通学院, 江阴长江大桥钢桥面浇注式沥青混凝土铺装研究[R]: [内部资料], 南京: 东南大学交通学院, 2000
- 17 重庆交通科研设计院, 安庆长江大桥桥面铺装试验研究报告[R], 2004: 38
- 18 王天普, 高等级道路沥青生产工艺开发与产品应用[J], 炼油设计, 2001, 7: 18-21
- 19 黄卫东, 吕为民, 李套岭, 国外聚合物改性沥青的研究与应用[J], 国外公路, 1999, 4
- 20 Von Georg Sütterlin, Rapperswil Eine Strafe wird zum Segen In der Karibik liegt das grösste natürliche Asphaltvorkommen der Welt[EB/OL], <http://www.trinidad-lake-asphalt.com/>
- 21 沈金安. 特立尼达湖改性沥青的性能[J], 国外公路, 2000, 3: 30-32
- 22 沈金安, 特立尼达湖沥青及其应用前景[J], 国外公路, 2000, 2: 28-31
- 23 Trinidad Lake Asphalt (TLA) [EB/OL], <http://www.trinidadlakeasphalt.com/>
- 24 贾渝, 高性能沥青路面 Superpave 技术实用手册[R]: [内部资料], 南京: 江苏省交通科学研究院, 2002
- 25 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Asphaltstraßen , ZTV

- Asphalt - StB 01, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt[S], 2001
- 26 日本道路協會, 鋪裝試驗法便覽[S], 昭和六十三年十一月
- 27 樊叶华, 大跨径钢桥面浇注式沥青混凝土铺装技术研究[D]: [硕士学位论文], 南京: 东南大学交通学院, 2003
- 28 樊叶华, 杨军等, 国外浇注式沥青混凝土钢桥面铺装综述[J], 中外公路, 2003, 6: 1-4
- 29 沙庆林, 提高沥青路面使用性能和耐久性的最关键因素[J], 中外公路 2005, 2: 17-19
- 30 潘承緯, Guss 瀝青混凝土成效特性之研究[D]: [碩士學位論文], 臺灣: 臺灣國立中央大學土木系, 2002
- 31 交通部, JTJ052-2000 公路沥青及沥青混合料试验规范[S], 北京: 人民交通出版社, 2000
- 32 余叔藩, 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, 1997, 3: 32-40
- 33 陈先华, 黄卫等, 大跨径钢箱梁桥面铺装沥青混合料设计方法的思考[J], 公路, 2004, 8: 34-38
- 34 邓学钧, 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: 1-7
- 35 交通部重庆公路所译, 沥青混合料的疲劳响应[R], SHRP 项目 A-003 报告
- 36 倪富健等, 城市道路交叉口沥青混合料路用性能试验研究[J], 东南大学学报, 2003, 11
- 37 许志鸿, 李淑明, 高英, 沥青混合料疲劳性能研究[J], 交通运输工程学报, 2001, 1
- 38 葛折圣, 黄晓明, 沥青混合料应变疲劳性能的试验研究[J], 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 34-37
- 39 黄卫, 邓学钧, C.L monismith, 能量方法分析沥青混合料的疲劳性能[J], 中国公路学报, 1994, 7 (3): 23-28, 35
- 40 张锐, 沥青添加剂特性及其混合料性能研究[D]: [硕士学位论文], 南京: 东南大学交通学院, 2005
- 41 郝培文, 张景涛, 张登良等, 不同级配类型沥青混合料抗疲劳特性研究[J], 石油沥青, 1998, 12 (2): 20-24
- 42 Yangjun, Gharabaghy Cyrus, Steinauer Bernhard, Study on high temperature behaviour of gussasphalt [J], Journal of Southeast University(English Edition), 2002, 18(4): 297-301
- 43 UTM 试验设备帮助文件[EB / OL], <http://www.ipco.com.au/>

## 致 谢

感谢导师杨军教授为我创造的良好环境,使我有机会接触并参与到沥青混凝土材料研究的前沿。导师严谨的治学态度、广博的专业知识、虚怀若谷的高尚品德及诲人不倦的学者风范将使我终生受益。在攻读硕士学位期间,杨老师在学习生活各个方面给予了我无微不至的关怀和教诲,在此向您致以最诚挚的感谢!

感谢学科的各位老师对我学业做人方面给予的诸多指导,也感谢试验中心的试验员王根成、刘明莉、李佳乐、周登阳等在试验期间提供的便利和帮助。

感谢师兄们的指导和帮助,感谢学友于良溟、万军、袁登全、郭勇以及学弟学妹杨国涛、史啸、崔娟、尹朝恩、戴鹏、朱浩然、陆海珠、张涛、李松对我的学习和试验工作的帮助和支持。

最后,谨以此文献给抚育我长大成人的父母,感谢他们给我的一切,感谢他们给我创造的学习环境,他们的期待和鼓励永远是我前进的动力。

同时也将此文献给天下所有关爱我的人,向你们致以最真挚的谢意和最美好的祝愿!

潘友强

2006年1月