

摘 要

目前在 SMA 中所用的纤维大多数是木质素纤维、聚丙烯腈纤维和玄武岩矿物纤维,但是不同纤维 SMA 混合料各种路用性能怎样,国内外还缺乏系统研究,同时对于如何选择纤维、不同纤维对 SMA 路用性能的影响以及如何评价纤维在混合料中的作用等缺乏较深入的研究报道,也缺乏有效的性能评价手段与方法。

本文通过动态剪切流变试验(DSR)和简支梁弯曲蠕变试验(BBR)评价了纤维沥青胶浆的技术性能。试验表明纤维的加入能够改善沥青混合料的高温性能,同时纤维的加入也降低了沥青胶浆的低温抗裂性能。

以 SMA-10 为例,通过车辙试验及动、静态蠕变试验和恒高度重复剪切试验(RSCH)评价不同纤维对 SMA 高温性能的影响。试验表明车辙试验、动态蠕变试验和恒高度重复剪切试验有较好的相关性,其结果能较好地反映不同纤维对 SMA 高温性能的影响,而动态蠕变试验得出的粘弹性常数可以用来进行沥青面层车辙的预估。矿物纤维相对其它两种纤维来说,对 SMA 的高温性能改善较大。

通过四点弯曲疲劳实验,研究不同纤维对 SMA 疲劳寿命的影响,并建立疲劳寿命曲线和疲劳寿命回归方程。聚丙烯腈纤维更多的增加了 SMA 的疲劳寿命。

关键词: 纤维; 动态蠕变; 动稳定度; RSCH; 疲劳寿命

Abstract

Wood fibre and acrylic fibre and basalt mineral fibre are often used in SMA at present. However, the systematic research on the SMA performance with varied fibre for road use has not been carried worldwide. Effective method for evaluation of the performance is necessary for choosing the fibres based on its' functions in the mixture.

In the paper, Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Bending Beam Rheometer (BBR) are used to evaluate the technic performance of fiber asphalt. With the fibre added to the asphalt mixture, the performance at high temperature are enhanced but low temperature reduced.

The sample of SMA-10 is taken here for rut test and static creep test and dynamic creep test and Repeated Shear Test at Constant Height (RSCH) to evaluate the performance of SMA at high temperature with different fibre. Results of these experiments are well related and give the indications on the performance of SMA. Moreover, the viscoelastic constant obtained after the cyclic compression test can be used for the pre-evaluation of rut. The mineral fibre can highly improve the performance of SMA at high temperature contrasted to other two types of fibres.

After studying the influence on fatigue of SMA with different SMA through four point bending beam fatigue test, fatigue life curve and regression equation are established. Acrylic fibre is the fibres which can increase the fatigue life most.

Keywords: fiber; dynamic creep test; RSCH; fatigue life

长沙理工大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：王辉 日期：07年4月28日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密□，在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密☒。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：王辉 日期：07年4月28日

导师签名：邹辉 日期：07年5月25日

第一章 绪论

1.1 问题的提出

改革开放几十年来，我国的高速公路从无到有，公路通达深度和覆盖面积有了很大提高。特别是自 1998 年以来，党中央和国务院把加快包括公路在内的基础设施建设作为扩大内需的重点，国家每年都投入巨资进行公路建设，高等级公路得到了迅速发展。按照我国公路发展规划，在今后的若干年内，我国将重点建设以高速公路为主的国家交通干线网络。沥青混凝土路面在高等级公路建设中占主导地位，我国建成的高速公路路面约 75% 采用了沥青混凝土。随着交通量的增长，车辆的大型化和超载严重，沥青路面更面临着严峻的考验。例如，炎热季节重载车辆作用下所造成的车辙、推拥的永久变形，冬季低温开裂和半刚性基层开裂的反射性裂缝，在雨季及春融季节造成的坑槽、松散等水损坏破坏，路表抗滑性能迅速下降，以及局部龟裂等等都在一些高速公路上显现出来。新建高速公路沥青路面产生早期损坏的原因，除了设计、施工方面的原因外，材料性能差是很重要的原因^[1]。

沥青玛蹄脂碎石混合料（SMA）是一种由沥青、纤维稳定剂、矿粉及少量细集料组成的沥青玛蹄脂填充的间断级配的粗集料骨架间隙的沥青混合料。以其优良的抗车辙性能和抗滑性能闻名于世。SMA 的出现，为很好的解决目前沥青路面的低温抗裂性、高温稳定性及抗滑与渗水性能之间的矛盾，提供了一个非常有效的途径，可延长道路使用寿命、减少温缩裂缝、提高行车舒适性。

纤维作为一种传统的纺织材料，从形状上说，是一种比较柔韧的细而长的物质。一般的说，纤维的长度与直径之比一般大于 1000: 10。SMA 中纤维的加入，有效地改善沥青路面的高温稳定性、疲劳耐久性，并且具有低温抗拉和防止反射裂缝的作用。

由于改性沥青及纤维的使用使 SMA 路面造价比普通沥青混凝土面层高 25~30%。而纤维的价格从几千元到上万甚至十几万元不等，其对工程成本有重要的影响，因此在保证质量的前提下选择合适的纤维可以有效的降低工程造价。目前在 SMA 中所用的纤维大多数是木质素纤维、聚丙烯腈纤维和玄武岩矿物纤维，但是不同纤维对 SMA 混合料路用性能有哪些方面的改进，国内外还缺乏这方面的资料，虽然有不同纤维的作用机理及纤维用量的研究报道，但是对于如何选择纤维、不同纤维的比较以及如何评价纤维在混合料中的作用等等更加缺乏较深入的研究报道，同时缺乏有效的性能评价手段与方法。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 纤维种类及应用

纤维在沥青混合料中的使用最初目的是用于预防路面的反射裂缝。1960 年,加拿大多伦多大学的 Davis, N.M 发表了《水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝防治措施研究》一文中,首次系统研究了纤维作为添加材料改善沥青路面抗反射裂缝性能。1961 年 Tons 和 Egons 在“第 290 号公路研究公报”上提出了沥青加铺层中使用金属织物的思想。但普通的棉质纤维和金属丝易受环境影响而发生腐蚀,使用寿命受到限制。1962 年 Tamburro, D.A 尝试使用了温石棉纤维,并分析了温石棉纤维对沥青路面性能的影响。1963 年 Zuehlke, G.H 正式在“第 24 号公路研究档案”中系统分析了短切石棉纤维在混合料中的马歇尔试验和抗弯拉性能的作用效果。到了 20 世纪 80 年代初,由于石棉纤维对环境有污染而被禁用,聚合物纤维(如聚脂纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维等)、木质素纤维、玻璃纤维得到广泛应用。同时纤维织物或纤维格栅也开发应用于沥青混合料中。1980 年, Dykes, J. W 讨论了纤维织物的抗反射裂缝性能。1983 年, Yandell, W.O 在 AAPT(Association of Asphalt Paving Technologist)上讨论了纤维织物对延长路面使用寿命的作用。1985 年 Brown, S.F 对格栅加强路面进行了系统研究,与此同时 Kennepohl 和 Gerhand 对纤维格栅加强沥青路面的设计方法和应用进行了系统阐述。随后纤维和纤维织物在沥青混合料中得到推广应用,其使用目的由最初的抗反射裂缝的产生转变到对沥青混合料综合性的改善:使用场合也由最初的沥青加铺层发展到各式各样的沥青混合料中(如 SMA 路面、薄层或超薄层的沥青混凝土、多孔性沥青混凝土(OGFC)、稀浆封层等)。目前,在美国和西欧等国家仍在大面积使用和研究纤维对沥青混合料的加强改性作用。同时开发形成了自己的纤维产品和纤维添加设备,为纤维沥青混合料的普及提供了方便。

我国对纤维沥青混合料的研究较晚,到 90 年代初由于 SMA 路面结构的出现需要添加纤维,才引起人们对纤维类产品的关注。1995 年引入国外聚酯纤维,使我们认识聚酯纤维可以提高沥青混合料的高温性能、低温性能、耐老化性能、水稳性能,其中对抵抗路面产生的反射裂缝有较好作用。随后西安公路学院、吉林省公路局、同济大学、交通部科研所先后都对一些纤维素纤维和木质素纤维对多空沥青路面和多碎石沥青混合料使用性能的进行研究。1998 年孙学高沥青混合料中添加钢纤维做成钢纤维沥青路面,并申请专利。长安大学的陈华鑫、朱朝辉、丁智勇等对掺木质纤维和博尼纤维的 AC、AK 的路用性能进行研究^{[2][3][4]}。

纤维几乎成了 SMA 的必须成份,原因与 SMA 使用较多的矿粉与沥青结合料有关。归纳起来,它有以下作用^{[5][6]}:

①加筋作用。纤维在混合料中呈三维分散存在,可以起到加筋作用。

②分散作用。如果没有纤维，用量颇大的沥青矿粉很可能成为胶团，它不能均匀地分散在集料之间，铺筑在路面上将清楚地看见“油斑”存在。纤维可以使胶团适当分散。

③吸附及吸收沥青的作用。在 SMA 混合料中加入纤维稳定剂的作用在于充分吸附（表面）及吸收（内部）沥青，从而使沥青用量增加，沥青油膜变厚，提高混合料的耐久性。

④稳定作用。纤维使沥青膜处于比较稳定的状态，尤其是在夏天高温季节，沥青受热膨胀时，纤维内部的空隙还将成为一种缓冲的余地，不致成为自由沥青而泛油，对高温稳定性也有好处。

NCAT 的研究表明，掺加纤维防止沥青析漏的功效比聚合物改性的效果要好得多。相反，对抗车辙能力来说，纤维的作用远不如聚合物改性沥青。

目前用于 SMA 的纤维主要有木质素纤维、矿物纤维和有机合成纤维，其中木质素纤维的使用最为普遍，关于这方面的研究也最多，其次为有机合成纤维和矿物纤维。下面按照纤维的种类对研究应用现状进行简单的总结：

1、玻璃纤维

玻璃是由若干种金属和非金属的氧化物构成，对玻璃性能影响较大的有 SiO_2 、 Na_2O 、 Li_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 BeO 、 TiO_2 、 ZrO_2 等多种氧化物，将以上氧化物进行不同组合，可得到不同类型的玻璃纤维：E—玻璃（无碱玻璃）、C—玻璃（中碱玻璃）、高强玻璃纤维、AR—玻璃纤维（耐碱玻璃纤维）、A—玻璃（高碱玻璃）、E-CR 玻璃（无硼无碱玻璃）和 D—玻璃（低介电玻璃纤维）等。

玻璃纤维曾在国内外的水泥混凝土和塑料中广泛使用，如制成的玻璃钢与玻璃纤维水泥混凝土等均是玻璃纤维产品。而玻璃纤维在沥青中若直径较粗，因刚度过大，脆性增强，在交叉作用下易折断，耐久性差；过细虽然柔性增大，但受热后，易结团，不易分散。沥青路用上很少使用玻璃纤维产品。

2、聚酯纤维

聚酯纤维在 80 年代中期被用于混凝土中，它可以适当地提高混凝土压缩、流动和撕裂强度。美国 PETROFLEX 聚酯纤维也被用于沥青混合料中，用量为 0.15%-0.3%。据宾夕法尼亚州立大学的研究和在公路中的应用实践，聚酯纤维使得混合料的性能得到普遍提高，疲劳寿命提高了 25-45%，车辙减小了 45-53%。

美国的 Reed B.Freeman 等人通过马歇尔试验对掺有聚酯纤维的沥青混合料的各种性能作了分析，发现聚酯纤维（用量 0.3-0.5%）的加入可使混合料的间接抗拉强度降低 3%-15%，湿抗拉强度增加 2-13%，混合料的韧度随纤维的含量的增加而增加，干燥时增加 26%。潮湿时增加 100%。

3、木质素纤维

木质素是针叶树类、阔叶树类和草类植物的基本化学组成之一，还存在于几乎所有维管植物之中。木质素是植物细胞中一类复杂的芳香聚合物，它是纤维素的粘合剂，以增加植物体的机械强度。日本的八洪义和曾对木质素的定义如下：木质素是在酸作用下难以水解的相对分子质量较高的物质，主要存在于木质化植物的细胞中，强化植物组织。其化学结构是苯丙烷类结构单元组成的复杂化合物，含有多种活性官能团。

木质素本来是一种白色或接近无色的物质，但由于经过不同的分离、制备过程，呈现出深浅不一的颜色。木质素纤维的一个主要的缺点是易吸水腐烂、不耐磨、不耐热。它的大量使用，虽然也考虑了其对混合料性能、生产工艺等的影响，但出于经济的考虑也是一个关键的因素。

德国 JSR 是世界上著名的木质素纤维生产商，该公司生产松散木质素纤维已有二十余年的历史，生产颗粒纤维也有十余年的历史。美国 NCAT 和 AASHTO 还为 SMA 用的木质素纤维规定了质量标准。

在我国也有部分单位如吉林省公路局宝恒科技发展有限责任公司，研制了松散的木质素纤维，并已经在吉林和山东省的一些工程中得到应用，取得了良好的效果。

4、聚丙烯腈纤维

聚丙烯腈纶（Acrylic Fibers）是指由聚丙烯腈或丙烯腈含量占 85% 以上的线型聚合物所制成的纤维，我国常将它称为腈纶。

20 世纪 30 年代初，德国 Hoechst 化学公司和美国 Du Pont 公司已着手聚丙烯腈纤维的生产试验，并于 1950 年正式投产。它是将丙烯腈与共聚单体（丙烯酸甲酯、亚甲基丁二酸）进行聚合，生成聚丙烯腈树脂，经溶剂（硫氰酸钠、二甲基丙矾、二甲基甲酰胺、硝酸、氯化锌等）溶解，形成粘度适宜的纺丝液，用湿法或干喷湿法进行纺丝，经凝固浴成型，水洗、牵伸、热定型、上油、卷绕等工序获得的。如果将聚丙烯腈纤维再加工处理尚可得到聚丙烯腈基碳纤维。

作为纤维的聚丙烯腈，其分子量更大，一般大于 10000 以上，因而要求其分散性小，低分子组分含量少，这样纤维性能越强。其耐热性能较好，一般在 170℃~180℃ 时颜色不会发生改变，若聚合物中含有杂质，会加速热分解和颜色的变化。作为道路用的聚丙烯腈纤维其加工工艺有所差异，更应注意道路交通特点和自身稳定性，注重纤维对路用性能的改善，德兰尼特就是这种沥青专用纤维。

德兰尼特（Dolanit AS）是英国科特尔斯公司（Fasewerk Kelheim GmbH）在德国 Hoechst 的工厂与一家大型道路公司合作开发的专门用于沥青混合料改性的腈纶纤维，是经过干法生产，使得纤维分子链长度更长，由 5 万~7 万个分子聚合而成，大分子链纵向排列更有序。纤维截面呈花生状，表面是均匀的纵向结构。

Dolanit AS 在国内外已得到广泛应用，我国目前已在上海外环一期工程、上

海陆嘉滨路、广深珠高速公路、湖北东湖关山路、河北石黄高速公路、京津塘高速公路、102 国道玉田改线、湖北军山桥面铺装、昆明市园通北路及深圳平西公路等地均已采用德兰尼特纤维，并取得了明显效果。

5、矿物纤维

在矿物纤维中，最早使用的是石棉纤维。石棉纤维相对于其他纤维，价格较为便宜，但由于环保以及危害人体健康问题，已经禁止使用石棉纤维。

现在以玄武岩为原料，经过特定的预处理后，在 1600℃ 高温熔融提炼抽丝制成的矿物纤维已逐渐开始使用。

自 1991 年美国乔治亚州率先采用矿物纤维修建州际公路 I-85 SMA 沥青路面以来，美国 40 多个州已广泛采用矿物纤维修建高速公路与市政道路。

乔治亚州曾于 1994 年规定，州界内的所有州际公路及高速公路采用 SMA 面层并搭配 OGFC 摩耗层，且一律采用矿物纤维。

近年，国内对矿物纤维的研究和应用逐渐增多，国内的粤赣高速公路、长沙的三汊矶大桥桥面等也逐渐采用玄武岩矿物纤维。

对矿物纤维与木质素纤维、有机合成纤维孰优孰劣，有不同的观点。有看法认为矿物纤维与集料（纤维主要是玄武岩做的）属同一种材料，耐老化，特别是有利于沥青混合料的再生利用。而木质素纤维则有可能在使用过程中老化，且在再生过程中燃烧成灰尘。而且在美国的一些州，矿物纤维的使用量大量增加，有的州从再生角度出发，已经开始限制木质素纤维的使用。有机合成纤维品种不同，性能不一，尤其是弹性模量差异极大，因而对混凝土的增强、增韧和阻裂效果也不尽相同。高弹性模量的纤维主要是提高复合材料的强度和阻裂能力，而低弹性模量的纤维主要是提高复合材料的应变能力、韧性、以及抗冲击性能等，难以选择^{[7][8]}。

1.2.2 试验评价方法

随着 SMA 的广泛使用，沥青胶浆性能的研究逐渐兴起。美国的 E.Ray Brown 等人对 SMA 沥青玛蹄脂做了详细的研究，他将细集料（0.075~2.36mm）、矿粉、沥青和纤维组成的混合料称为粗玛蹄脂，将没有细集料只有矿粉、沥青和纤维组成的混合料称为细玛蹄脂，对粗玛蹄脂进行了弯曲梁流变试验、回弹模量、间接拉伸试验、布氏旋转粘度试验，细玛蹄脂进行了 Superpave 沥青结合料试验，结果表明二者性能有很好的相关性。他还研究了不同填料对沥青玛蹄脂性能的影响，研究结果表明，影响玛蹄脂性能的因素不仅仅是填料的细度，还应该包括填料的物理和化学性能。另外，美国 AASHO 根据 E. Ray Brown 教授的研究成果还提出了沥青玛蹄脂的技术指标和技术要求。

德国的 G.Huber 通过采用落锤仪测定了锥入沥青玛蹄脂的深度，并根据有关

公式计算出剪切强度，结果表明采用这种方法能很好地区分不同沥青玛蹄脂的性能

华南理工大学的张肖宁等人，利用动态剪切流变仪（DSR）研究了沥青胶浆性能以及矿粉和纤维对沥青胶浆性能的影响。研究结果表明，矿粉与纤维可以显著提高沥青胶浆的高温性能，但是，不适当的增加矿粉与纤维用量将会使沥青胶浆的疲劳性能受到损伤。

长安大学的刘丽采用 SHRP 试验中动态剪切流变试验（DSR）和 Brookfield 旋转粘度试验来测试沥青胶浆的技术性能。将基质沥青和不同粉胶比情况下的各种沥青胶浆进行锥入度试验及其相关性进行研究^[9]。

沥青混合料在高温条件下或长时间承受荷载作用，沥青混合料会产生显著的变形，其中不能恢复的部分成为永久变形，车辙就是沥青路面永久变形破坏的最主要的形式之一。据调查，由永久变形引起沥青混凝土路面损坏所占比例有愈来愈大的趋势。研究沥青路面车辙成为了沥青路面高温稳定性的一个主要课题。在交通发达国家，沥青混凝土路面永久变形预测或有关参数确定已成为沥青混凝土路面设计中的一项重要控制指标和研究方向。在我国，沥青混凝土路面车辙已日益受到重视，并进行了大量的研究，动稳定度检验已成为混合料设计的必须检验的指标。

据试验路调查和观测，对于沥青层较厚的沥青路面，路表面的永久变形（车辙）大部分来自沥青层本身，并且集中在沥青层上面部 7~15cm 范围内。在 1962 年的第一届 CSDAP（国际沥青路面结构设计会议）上，壳牌石油公司提出了第一个同时考虑疲劳和车辙的沥青路面结构设计方法，这个方法是通过限制路基顶面的垂直压应变来控制车辙的。

1972 年 Hofstra 等人研究发现，沥青路面的车辙变形，从上至下逐渐减小车辙主要产生在沥青层内。19 届世界道路会议多数国家认为用马歇尔方法来预估混合料性状是不够的，有 8 个国家主要关心抗塑性变形能力，采用车辙试验来评价沥青混合料的抗车辙性能。

1990 年 Krugler 将车辙问题主要分为三种类型：(1)路面上过大的交通固结；(2)由于混合料稳定性不佳引起塑性变形；(3)表层下沥青剥离引起的不稳定。1998 年张登良将车辙产生划分为 3 个阶段：①开始阶段的压密过程；②沥青混合料的流动；③矿质骨架的重新排列及矿质骨架的破坏。

目前沥青混合料高温性能试验的方法，包括试验室圆柱试件的单轴静载、动载、重复试验，三轴静载、动载、重复试验，径向静载、动载、重复试验，简单剪切的静载、重复加载和动力试验，此外还有中空圆柱试件的动力、剪切试验，棱柱形梁试件的弯曲蠕变试验，小型模拟试验设备的车辙试验，大型环道、直道试验设备的足尺路面高温性能试验和现场试验路面的加速车辙试验等^{[10][11]}。

对高温性能的评价主要有以下几种：

(1)经验性评价

用于沥青路面高温稳定性评价的最简便最直观的方法是以高温（一般采用60℃）抗压强度与常温20℃抗压强度的比值来衡量，由于采用无侧限抗压强度与路面结构中沥青混合料处于的三向受力状态存在较大的差异，故得到的试验结果与路用性能的相关性太差，后被马歇尔试验所取代。

最早沥青混合料设计方法是维姆法与马歇尔设计法。马歇尔方法模拟的受力模式有一定侧限，有容许流动值，虽然难以计算侧压力大小与变化，但作为一种经验法，它简单、容易掌握。而且长期以来，人们对此方法已经积累了丰富的资料，根据经验还是可以对一般沥青混合料的稳定性做出粗略的判断，所以目前还一直沿用。但马歇尔的缺点是有目共睹的，其稳定度和流值是一种经验指标，不能确切地反映沥青混合料永久变形产生的机理。而且实践表明：即使沥青混合料的稳定度、流值都满足技术标准，沥青路面也不能避免产生车辙。特别是对于目前出现 SMA 之类的骨架类型的混合料，其稳定度指标也已失去意义。马歇尔试验的稳定度与流值在评价路面高温稳定性方面存在严重的局限性，据第十九届世界道路会议对英国、法国、意大利、加拿大等16个国家的调查资料表明，大多数国家认为用马歇尔方法设计的沥青混合料的稳定度和流值指标，与实际路面的永久变形相关性不好，因此要求车辙试验机进行补充试验。我国“七五”期间也进行了大量研究，发现沥青混合料的马歇尔稳定度无多大差别，而车辙试验结果相差较大，所以在衡量沥青混合料高温稳定性上逐渐被车辙试验所取代。

(2)高温抗剪切评价

为防止沥青面层出现推挤、拥包、剪切等破坏，我国公路设计规范对沥青路面采用了高温抗剪切验算，根据层状弹性理论，最不利的剪切损坏发生在水平荷载作用下路表面轮缘处。根据此理论以面层破裂面上可能产生的剪应力 τ_a 应不大于沥青混合料的容许剪应力 τ_R 为验算条件，即：

$$\tau_a \leq \tau_R$$

(3)永久变形评价方法

柔性路面的永久变形是路面在重复交通荷载作用下产生竖向垂直变形而逐渐出现的。由于压密和剪切变形的综合作用导致了轮迹带纵向沉陷伴随两侧隆起的发展，从而产生永久变形^{[12][13]}。

①蠕变试验

通常对材料施加一定水平的荷载或应力时，材料将产生变形，当外力撤消后，若变形立即全部恢复，那么这种材料成为弹性材料，但完全弹性材料是极少的，大多数材料（像沥青混合料）在外力的长时间作用下，作为响应的变形也会随着时间的增加而不断增长，在取消外力后变形随着时间的增长而逐渐恢复，但有一部分

变形会永久存在，这种力学性质被称为蠕变，这种材料被成为粘弹性材料，沥青及沥青混合料都是典型的粘弹性材料，尤其在高温下，粘弹性表现的更为突出，沥青路面的车辙或永久变形就是沥青混合料粘弹性性能的直接反映。

蠕变试验采用单轴、三轴静载、单轴重复加载及三轴重复加载四种试验方式。动态三轴压缩剪切蠕变试验可测得蠕变劲度模量、回弹模量、泊松比、永久变形与荷载作用次数的关系等，但试验设备复杂，试验要求高，在工程实践中推广的可能性甚小。单轴静载蠕变试验是一种相对简单的试验方法，经过多年的试验研究，一些研究者已提出了沥青混合料蠕变劲度极限值，但由于各研究者采用的试验条件不同，其试验结果差异较大，同时由于试验结果不具有普遍性，应用还受到各种条件的限制，尽管我国亦对单轴静载蠕变试验进行了较多的研究，基于试验结果变异性较大的原因，没能提出相应的蠕变劲度极限值。

②车辙试验（轮辙试验）

目前最令道路界认可的还属由英国运输和道路研究试验所（TRRL）最初开发的车辙试验，该方法直观，对沥青路面车辙形成过程模拟性好，不需要太高精度的试验设备，操作过程不复杂，很容易应用于工程实际。但主要的缺陷在于不能获得材料的基本力学参数，是一种经验性的工程试验，不能用于路面计算。

我国现行试验规程规定采用动稳定度来评价沥青混合料的车辙试验结果。动稳定度指标虽然与沥青混合料的永久变形存在一定的相关性，并不能完全反映沥青混凝土路面实际发生的永久变形。在对沥青混合料进行车辙试验的过程中也会经常发现动稳定度与永久变形不一致的情形，当对两种沥青混合料进行比较时，动稳定度大的其永久变形也大。另一方面，目前确定动稳定度的时间段为 45min~60min，对应的轮载作用次数为 1890 次~2520 次，此时的作用次数应该说还远远不够。此外，目前世界各国对室内车辙试验永久变形指标，除法国外均没有明确的要求。室内车辙试验所测得的永久变形值主要用来对不同沥青混合料的抗永久变形能力进行相对比较，至于室内车辙试验永久变形量与路面容许车辙深度之间的关系仍有待进一步的研究。由此看来，适当延长车辙试验的时间并以试件的永久变形来评价沥青混合料的高温稳定性是我国现行技术规范、试验规程亟待解决的问题。

评价沥青混合料的高温稳定性好坏应结合路面容许车辙及车辙试验结果进行，在沥青路面结构设计过程中，沥青路面容许车辙深度是主要的车辙控制指标，从保证车辆安全、快速、舒适的角度出发，它直观的反映了沥青路面的服务性能。如美国地沥青协会（AI）提出的容许车辙深度为 13mm，美国 SHRP 研究计划成果提出的容许车辙深度为 12.5mm，我国“七五”攻关项目“高等级公路半刚性基层、重交通道路沥青面层和抗滑表层的研究”专题提出的容许车辙深度是在设计年限内不超过 15mm。

③简单剪切试验

通常认为, 沥青路面的第二阶段永久变形主要是由于沥青混合料塑性剪切流动引起的, 美国 SHRP 战略公路研究计划推荐的简单剪切试验就是用于考察沥青混合料的抗剪切流动性能, 这种试验方法是由土的直剪试验方法发展而来, 并进一步考察了沥青混合料的特殊性质, 增加了垂直的动力荷载及温度控制, 可测定试件的复数剪切模量, 相位角及应变等。单剪试验仪可主要进行两种试验, 恒高度重复单剪试验 (RSCH) 和剪切频率扫描试验 (FSCH)。由于单剪试验基本上消除了体积变形, 试验结果能突出反映混合料产生永久变形 (车辙) 机理, 因而, 能较有效地应用于比较和预估各种沥青混合料的抗永久变形的性能。但相对而言, 设备较复杂, 能否推广有待进一步研究。

美国战略公路研究计划 (SHRP) 的沥青研究项目总经费 5000 万美元中有 949 万美元用于永久变形的研究上。该研究以加利福尼亚大学的贝克莱分校 Monismith 教授为中心, 最后提出了 A-318 及 A-415 两篇研究报告, 成为 Superpave 的主要组成部分。在研究过程中, 采用了轴向压缩蠕变、轴向压缩重复荷载、剪切时蠕变、剪切重复荷载、径向蠕变等试验方法来研究沥青混合料的永久变形特性, 以后在扩大试验中又使用了恒高度简单剪切试验、单轴应变试验、体积试验、频率扫描试验、恒高度简单剪切重复荷载试验等。这个方法移植于土壤材料的直剪试验方法, 可以通过提供重复或动力荷载, 测定试件的回弹剪切模量、动力剪切模量、剪切阻尼响应等。美国公路战略研究计划结合交通量, 气候条件等因素试图根据新的破坏模型和车辙预估模型, 编制新的计算机软件进行永久变形的预估。虽然比三轴试验要简单些, 但需要的试验设备还是比较复杂, 迄今为止, 已取得了部分成果, 目前这项工作还在研究中。

沥青混合料疲劳性能研究经历了 50 多年的发展, 涌现出许多好的试验方法和分析方法, 并取得了大量的研究成果。这为优化路面结构设计、指导和规范沥青路面和养护工作起着重要而积极的作用。然而, 由于影响沥青混合料疲劳性能的因素众多, 通常很难在一项疲劳性能试验研究中将所有的影响沥青混合料疲劳性能的因素都考虑进来。在早期的研究中, 通常只考虑了沥青混合料疲劳性能的几项因素, 其适用性在很大程度上受到了限制。

在著名的美国战略公路研究计划中, 沥青混合料疲劳性能的研究仍然被列为其中一项重要课题。SHRP 与 1994 年发布了“沥青混合料的疲劳响应”的沥青混合料疲劳研究报告^[14]。在该报告中, 通过对多种试验方法的比较, 选定了控制应变模式的四点弯曲疲劳试验作为其实验室内疲劳试验的标准方法。并按全因素试验设计方法, 考虑的影响因素包括沥青品种、沥青用量、石料类型、空隙率以及应变水平, 通过疲劳试验对各种影响因素、实验室内疲劳响应和预期路面使用性能之间的关系进行了研究。在此基础上提出了针对疲劳开裂破坏的混合料设计分

析体系。

SHRP 在压实沥青混合料重复弯曲疲劳寿命测定的标准试验方法 (SHRP-M-009) 中还给出累积消散能及消散能累积到破坏时的计算方法。但是正如 C.L.Monismith 等人在“沥青混合料疲劳反应综述”SHRP-A-312 一文中所指出的: 至今为止, 仅在弯曲疲劳试验上考虑使用消散能理论, 尚需进一步研究它能否用于其它类型疲劳试验和沥青路面疲劳设计中。也有相当多的研究人员们正致力于在沥青混合料疲劳性能研究中引用断裂力学、粘弹力学的理论结合采用先进的研究设备, 从裂纹扩展规律的角度探讨疲劳性能。

国内的研究工作起步相对较晚, 但也做了大量的研究工作。在“七五”国家重点科技项目(攻关) 75-24-01-01 专题中, 交通部重庆公路科学研究所采用国产单家寺 70#, 90#和用作对比的阿尔巴尼亚 70#沥青, 采用先进的 MTS 材料试验系统, 进行了 LH-20 I 型沥青混凝土的室内疲劳试验研究^[15]。1993 年哈尔滨建筑大学在交通部科研项目“沥青路面设计指标与参数的研究”中, 又利用茂名 70#沥青、胜利 100#沥青、辽河 140#沥青等 3 种沥青分别进行了中粒式和粗粒式沥青混凝土(共 6 种) 系统的室内疲劳试验研究。研究成果已经纳入了公路沥青路面设计规范中。2000 年同济大学在交通部科技项目“沥青混合料动态性能参数标准”的研究过程中, 对高等级公路常用的 3 种进口沥青制作粗、中、细粒式 7 种沥青混合料进行了应力控制模式的劈裂及部分弯拉疲劳试验研究, 取得了一定的成果。所有的这些研究成果, 对我国的公路建设发挥了重要作用。

1.3 论文研究的内容

本文基于长沙城市道路薄层 SMA 沥青混合料设计施工关键技术这一课题, 对不同纤维对 SMA-10 的性能影响进行试验研究。目的是为了选择合适的纤维以及评价纤维在混合料中的作用, 同时为 SMA 性能评价提供有效的手段与方法。

1、采用 SHRP 试验中动态剪切流变试验(DSR)和简支梁弯曲蠕变试验(BBR)来评价不同纤维沥青胶浆的技术性能。

2、采用残留稳定度试验和冻融劈裂试验评价不同纤维对 SMA-10 水稳性能的影响。

3、通过车辙试验、动、静态蠕变试验、恒高度重复剪切试验评价不同纤维对 SMA-10 高温性能的影响。

4、通过四点弯曲疲劳试验评价不同纤维对 SMA-10 疲劳性能的影响, 并得到相应的疲劳寿命回归方程。

5、通过实验, 选择合适的纤维和有效的性能评价方法。

第二章 沥青混合料设计

2.1 SMA 混合料设计基本思想

我国的 SMA 设计主要是参考美国的 SMA 设计方法提出来的。美国的方法主要是采用 Superpave 的旋转式搓揉压实机的设计方法和马歇尔试验设计方法，我国目前采用的是马歇尔试验设计方法。从本质上说，这种方法是一种体积设计方法。与常规沥青混合料相比，SMA 在材料组成上有其鲜明的特点，即 SMA 是一种断级配骨架型密实混合料。它是由大比例的碎石构成坚固的石石接触、相互嵌挤的骨架结构，并有丰富的沥青玛蹄脂填充粗集料骨架结构的空隙。因此，SMA 混合料可以看作由两部分组成：粗集料骨架结构与填充骨架结构的沥青玛蹄脂。故本文 SMA 的设计重点在矿料各部分的级配和沥青用量及纤维的选择上^{[16][17]}。

2.2 SMA-10 沥青混合料配合比设计

2.2.1 设计步骤

设计方法主要分为 5 个步骤^{[18][19]}：

- 1、SMA 材料选择；
- 2、确定初试级配；
- 3、确认所选择级配的最小 VMA 及最小沥青用量；
- 4、选择最佳沥青用量 OAC，确认混合料的空隙率；
- 5、评价 SMA 的水稳定性和析漏情况。

2.2.2 原材料试验

SMA-10 的粗集料为镇江生产的玄武岩碎石，石屑（0-3mm）为望城的石灰岩，矿粉采用石灰石粉，纤维分别采用上海捷漫贸易发展有限公司生产的路用木质纤维素、玄武岩矿物纤维和德兰尼特 AS 聚丙烯腈纤维。沥青采用江阴市宝利沥青有限公司生产的 SBS 改性沥青。对粗细集料和矿粉，按照《公路工程集料试验规程》的要求，测定其毛体积密度、表观相对密度。粗集料试验结果见表 2.1。对 SBS 改性沥青，按照试验结果见表 2.2。粗集料试验结果见表 2.3。木质纤维、聚丙烯腈纤维的技术指标见表 2.4^{[20][21]}。

表 2.1 矿料密度试验结果

材 料	13.2 mm	19.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	矿粉
表观密度 (g/cm ³)	2.938	2.938	2.921	2.734	2.656	2.606	2.582	2.570	2.621
毛体积密度 (g/cm ³)	2.817	2.825	2.790	2.517	/	/	/	/	/

表 2.2 SBS 改性沥青试验结果

指 标	单 位	试验结果	JTG F40-2004 规范要求 (I-D)
针入度 25℃, 100g, 5s	0.1mm	69.6	40~60
针入度指数 PI		+0.42	≥0
延度 5℃, 5cm/min	cm	36.54	≥20
软化点 TR&B	℃	62.3	≥60
运动粘度 135℃	Pa.s	2.8	≤3
闪点	℃	320	≥230
溶解度	%	99.5	≥99
密度(15℃)	g/cm ³	1.011	实测记录
弹性恢复 25℃	%	85.7	≥75
旋转薄膜加 热试验 163℃, 5h	质量变化	%	≤1.0
	针入度比 25℃	%	≥65
	延度 5℃	cm	≤15

表 2.3 粗集料玄武岩试验结果

指 标	单 位	试验结果	JTG F40-2004 规范要求
石料压碎值	%	8.1	≤26
洛杉矶磨耗损失	%	9.7	≤28
表观相对密度	—	2.85	≥2.60
吸水率 (13.2~16mm)	%	0.2	≤2
吸水率 (9.5~13.2mm)	%	0.4	≤2
吸水率 (4.75~9.5mm)	%	0.5	≤2
针片状颗粒含量			
其中颗粒大于 9.5mm	%	4.5	≤12
其中颗粒小于 9.5mm	%	15	≤18
水洗法小于 0.075mm 颗粒含量	%	0.6	≤1
软石含量	%	1.2	≤3
粘附性 (SBS 改性沥青)	级	5	≥5

表 2.4 木质纤维技术指标

技术指标	测试值
纤维素含量	75%~80%
PH 值	7.5±1
纤维密度 (g·cm ⁻³)	1.6
最大纤维长度/mm	5
平均纤维长度/mm	1100
平均纤维厚度/μm	46

聚丙烯腈纤维技术指标

技术指标	测试值
纤度/dtex	1.9
纤维直径/μm	约 14
切取长度/mm	6
纤维密度	1.18
纤维数/g	8.7 亿
最大拉伸率/%	8~12
抗拉强度/MPa	500~90

矿物纤维技术指标

技术指标	测试值
PH 值	7
纤维长度/mm	6
纤维直径/μm	5
纤维密度/(g/cm ³)	2.55

2.2.3 矿料级配组成设计

对于 SMA-10 的配合比设计按照《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）中的有关条文进行。为研究不同纤维对 SMA-10 的影响，不同纤维的添加量都选择为沥青混合料总质量的 3%。在各项设计指标满足要求的前提下，确定 SMA-10 的级配，级配见表 2.5。

表 2.5 SMA-10 级配设计

材料	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	0.06mm	0.03mm	0.15mm	矿粉	水泥
百分比	5.0	58.0	14.0	4.5	3.5	2.0	1.5	9.5	2.0

2.2.4SMA-10 混合料设计的检验

表 2.6 SMA-10 马歇尔试验结果

纤维类型	最佳油石比	矿料有效相对密度 (g/cm ³)	理论密度 (g/cm ³)	毛体积密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	矿料间隙率 VMA (%)	沥青饱和度 VFA (%)	稳定度 (kN)	流值 (mm)	VCA _{mix} (%)	VCA _{doc} (%)
木质纤维	5.9	2.805	2.559	2.452	3.9	17.3	77.5	7.256	3.019	39.7	42.5
聚丙烯腈	5.8	2.805	2.550	2.458	3.9	17.3	77.5	6.972	3.557	39.7	42.5
矿物纤维	5.8	2.805	2.554	2.450	3.8	17.3	78.0	6.783	3.247	39.7	42.5

2.3 本章小结

(1)根据《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）中的相关条文，利用长沙市政提供的原材料，进行 SMA-10 配合比设计。

(2)为更好的比较不同纤维对 SMA-10 的影响，本文选择了在相同纤维掺量（沥青混合料总质量的 3%）和相同级配进行配合比设计。

第三章 纤维沥青胶浆试验与分析

和基质沥青相比,在沥青中掺加纤维,其微观结构成了非均质,性能将产生变化。其空间随机分布的纤维网络将对沥青的流动产生内摩擦阻力,即增加粘度。纤维的“增粘”作用将有效地提高沥青胶泥的抗剪切变形能力从而提高沥青路面抗车辙变形能力。一些研究表明,矿粉的“增粘”作用非常有限,因而提高沥青胶泥和沥青混合料抗剪切变形能力的作用有限。基于这种考虑,本文选择采用沥青胶浆进行试验,分析不同纤维对沥青性能的影响。简单照搬常规纯沥青的针入度、延度和软化点试验来评价纤维沥青胶浆的技术性能是不合适的,数据离散性大,试验再现性差。沥青材料的流变学是研究沥青流动与变形的一门学科,它实际上是研究沥青材料的弹性、粘性以及流动变形的科学,也是对沥青进行深入研究理论工具,无论是高温性能、低温性能、疲劳性能都可以借助于流变学理论得到更完善的解释。美国 1987-1993 年完成的 SHRP 研究计划中对沥青结合料高温和低温性能的研究就是基于流变学思想进行的,并且提出了新的沥青结合料流变性质测试方法。本研究采用 SHRP 试验中动态剪切流变试验(DSR)和简支梁弯曲蠕变试验(BBR)来测试沥青胶浆的技术性能,运用流变学思想来研究沥青胶浆的性能^{[22][23]}。

3.1 动态剪切流变试验分析

利用美国 SHRP 设备动态剪切流变仪(DSR),通过测定沥青材料的复数模量(G^*)和相位角(δ)来表征沥青材料的粘性和弹性性质。其中复数剪切模量 G^* 是材料重复剪切变形时总阻力的度量,包含弹性(可恢复)部分和粘性(不可恢复)部分。相位角 δ 是可恢复和不可恢复变形的相对指标, δ 越大,材料塑性越大,弹性越差; δ 越小则反之。根据美国 SHRP 规范,定义 $G^*/\sin\delta$ 作为车辙因子,其值大则表示沥青的弹性性质显著,若 G^* 增大, $\sin\delta$ 减小,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 将增大,有利于增强沥青材料的抗永久变形能力^{[24][25]}。

3.1.1 试验原理

DSR 试验采用应力控制模式,应力控制的 DSR 是施加固定的扭矩,由于沥青结合料的劲度不同,在所推荐的频率下维持摆动所需的扭矩将不同,劲度大的沥青胶浆需要的扭矩也大。SHRP 的 Superpave 系统推荐采用此法测定沥青结合料的高温性能。

复数模量 G^* 及相位角 δ 按下式计算:

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^2} \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{\theta \cdot r}{h} \quad (3.2)$$

$$G^* = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (3.3)$$

$$\delta = 2\pi f \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

式中：T—最大扭矩；

r—摆动板半径（12.5mm）；

h—试样高度（1mm）；

θ —摆动板的旋转角；

τ_{max} 、 τ_{min} 、 γ_{max} 、 γ_{min} —试样承受的最大或最小剪应力、剪应变；

Δt —滞后时间。

3.1.1 纤维沥青胶浆试验与分析

为研究不同纤维沥青胶浆的性能，在进行纤维沥青胶浆试验中，将纤维与沥青按 1:20 的比例配成纤维沥青胶浆。

纤维沥青胶浆的制备在室内只需用玻璃棒人工搅拌即可。首先将原样沥青加热到 130℃ 左右，将按一定比例称量的纤维分次加入，不断搅拌，直到纤维与沥青胶浆混合均匀即可。之所以分次加入主要考虑以下两方面的因素：①防止纤维结团。特别是颗粒状木质纤维，分散较困难，如果不分次加入，纤维颗粒易结团而影响纤维沥青胶浆的均匀性。②如果一次掺加量太多，会给搅拌带来困难。

试验频率 $\omega = 10 \text{ rad/s}$ ，约等于 1.59Hz。试样直径为 25mm，厚度为 1mm，试验方法为 AASHTO 标准 TP5^[26]。

试验温度从 64℃ 以 6℃ 增量递增，测得的相位角 δ 以及抗车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 的结果如表 3.1 所示：

表 3.1 DSR 试验结果

纤维类型	64℃		70℃		76℃		82℃		88℃	
	$G^*/\sin \delta$ (KPa)	δ (度)	$G^*/\sin \delta$	δ	$G^*/\sin \delta$	δ	$G^*/\sin \delta$	δ	$G^*/\sin \delta$	δ
原样沥青	3.41	70.7	1.90	71.2	1.09	71.5	0.635	71.9		
木质纤维	17	60.7	9.72	61.5	6.07	62.9	3.84	64.4	2.32	65.8
聚丙烯腈	15.0	60.5	9.31	61.9	5.65	63.0	3.44	64.2	2.04	65.5
矿物纤维	10.6	60.2	6.74	61.4	4.29	63.2	2.74	65.7	1.73	68.5

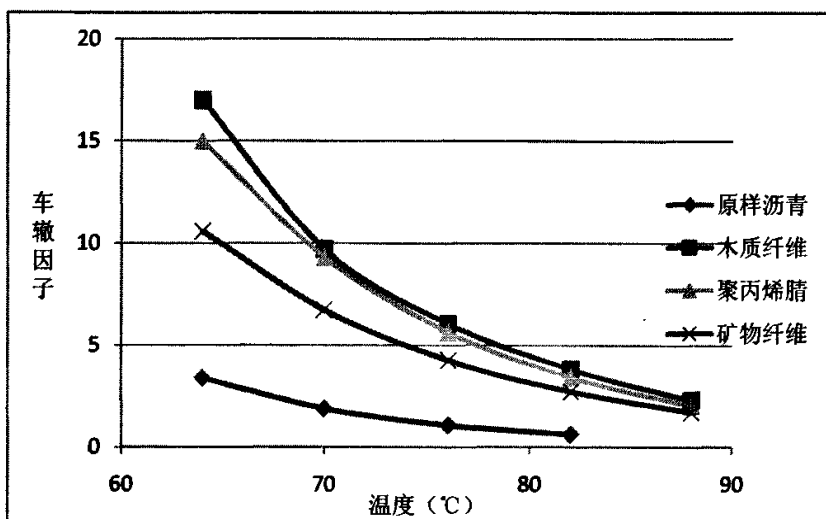


图 3.1 车辙因子与温度的关系

在动态剪切试验中，车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 反映了沥青材料的抗永久变形性能，即 $G^*/\sin \delta$ 越大，高温时流动变形越小，抗高温性能越强。为此，本文测试不同纤维沥青胶浆在相同温度下车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 的大小，以判断各纤维沥青胶浆的高温性能。从图 3.1 可以看出，纤维沥青胶浆抗车辙因子远大于纯沥青抗车辙因子，说明纤维加入后，使沥青变硬，抗车辙能力得到提高。由此可见，纤维的加入有利于车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 的增加，而改善了胶浆的高温性能。从表 3.1 看，随着试验温度的升高，各纤维沥青胶浆车辙因子迅速降低，与原样沥青相比，各沥青胶浆的温度敏感性增大。纤维的加入，使纤维沥青胶浆的温度敏感性增加。矿物纤维胶浆的曲线较其它两种纤维胶浆更为平滑，其车辙因子对温度的敏感性较低。随着温度的升高，纤维种类对沥青高温性能的影响逐渐降低，其主要原因是纤维对沥青的吸附作用减弱，纤维胶浆中的自由沥青增多。从三种纤维的分散性来说，矿物纤维在沥青中的分散性最好，使纤维沥青胶浆形成良好的复合材料；颗粒状的木质纤维分散十分困难，使其沥青胶浆中有成团部分，对实验的结果可能造成一定的影响。同时木质纤维的内部中空结构吸收了一部分沥青，使其胶浆中的自由沥青含量少于另两种纤维，所以其车辙因子较大。

另外，在 SHRP 沥青分级的 PG 标准中，用 DSR 评价旋转薄膜烘箱老化前后的高温性能是根据 $G^*/\sin \delta > 1.0\text{kPa}$ （原样沥青）和 2.2kPa （经旋转薄膜烘箱老化后）的临界温度将沥青分成不同的等级。临界温度越高，表明此沥青胶浆抵抗高温流动变形的能力越强。由于沥青中加入纤维，使沥青的粘度大为增加，使纤维胶浆经旋转薄膜进行老化的试验十分困难，因此，本文未进行不同纤维沥青胶浆的老化后 DSR 试验。

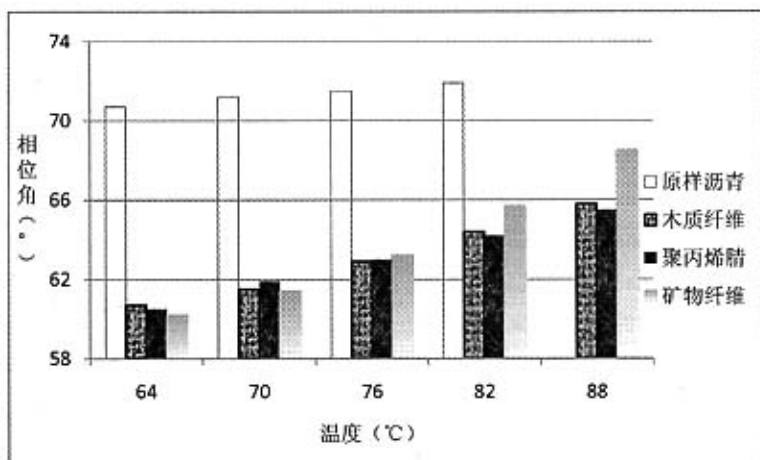


图 3.2 沥青胶浆相位角与温度关系图

相位角 δ 越大，即 $\tan \delta$ 越大，表示在荷载作用下模量的粘性成份越大，也就是变形不可恢复的部分越大，越容易产生永久变形。从图 3.2 沥青胶浆相位角的比较图中可以看出，纯沥青和纤维沥青胶浆的相位角相差较大，说明了纤维添加后，使纯沥青的弹性增加。在 64℃ 时矿物纤维胶浆的 δ 角最小，表明此温度下矿物纤维胶浆的弹性成分较大。但是随着温度的升高，矿物纤维胶浆的相位角增大较快，其弹性部分向粘性转化较多。

3.2 简支梁弯曲蠕变试验 (BBR)

沥青的低温流变特性是影响沥青混合料低温抗裂性能的关键单因素，同时也是决定沥青路面是否出现低温开裂的本质原因。目前评价沥青结合料低温抗裂性能的指标众多，如：Frass 脆点、针入度指数和当量脆点、低温延度、测力延度、低温粘度、低温蠕变劲度，等等。其中以 Superpave 沥青结合料规范中采用弯曲梁流变仪 BBR 得到的蠕变劲度 S 和蠕变斜率 m 及直接拉伸仪 DTT 得到的破坏应变最为引人注目^{[27][28][29]}。

在 Superpave 沥青性能规范中，对于沥青的低温性能评价，主要由弯曲梁流变仪 BBR 和直接拉伸仪 DTT 来完成。其中 BBR 的使用频率更多一些。因此，本文选用 BBR 试验来评价不同纤维胶浆的低温抗裂性能。

3.2.1 试验原理

将尺寸为 101.6mm×12.7mm×6.4mm 的沥青小梁放在两个简支梁上。通过计算机对试件施加荷载，保持 240s，记录沥青小梁的挠度，由计算机绘出挠度与时间关系曲线，并计算出蠕变劲度和 m 值^{[30][31]}。

应用经典的梁分析理论计算蠕变劲度 $S(t)$ 。

$$S(t) = PL^3 / 4bh^3 \delta(t) \quad (3.5)$$

式中：\$S(t)\$—时间等于 60s 时的蠕变劲度；

\$P\$—施加的恒定荷载，(N)；

\$L\$—简支梁的间距，(m)；

\$b\$—小梁的宽度，(m)；

\$h\$—小梁的高度，(m)；

\$\delta(t)\$—随时间 \$t\$ 变化的跨中挠度，(m)。

由式 (3.5) 可以计算得到 \$t=60s\$ 时沥青的劲度模量。蠕变劲度原是在路面最低温度下加载 2h 测定的，但 SHRP 研究者应用时温等效原理将温度提高 \$10^{\circ}\text{C}\$，加荷时间缩短为 60s，所测劲度与前者是相等的，然而却可大大节省试验时间。\$m\$ 值为双对数坐标图上劲度与时间关系曲线某一时间所对应的斜率，如图 3.3。

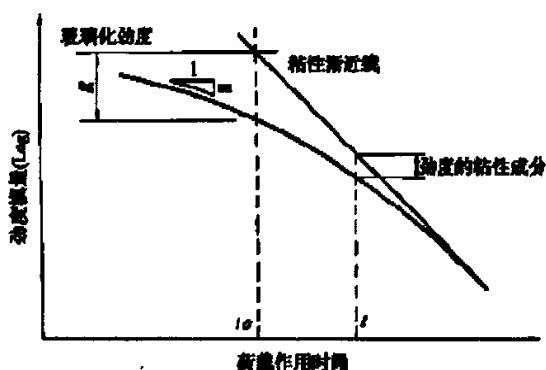


图 3.3 弯曲蠕变曲线

在低温下，沥青为弹性体，如果沥青材料的蠕变劲度太大，则呈现脆性，路面容易开裂，因此，为防止路面开裂破坏，需要限制沥青材料的蠕变劲度，规定不大于 300MPa。

SHRP 研究认为，表征沥青低温劲度随时间的变化率 \$m\$ 值越大越好。这意味着当温度下降而路面出现收缩时，沥青结合料的响应将如同降低了劲度的材料，从而导致材料中的拉应力减小，低温开裂的可能性也随之降低。要求测量时间为 60s 时，\$m\$ 值应大于或等于 0.30。

3.2.2 纤维沥青胶浆试验数据与分析

本研究中 BBR 试验采用的是美国 CANNON 公司生产的弯曲梁流变仪，试验方法为 AASHTO 标准 TP1-93。采用的是将纤维与沥青按 1:20 的比例配成纤维沥青胶浆经压力老化 20 小时后的试样。

(1) 温度与蠕变劲度的变化规律

蠕变劲度 \$S\$ 表征的是沥青的柔性，蠕变劲度越大，表示柔性越差，容许变形

较小。沥青胶浆的劲度随温度的下降而迅速上升。

表 3.2 不同纤维沥青胶浆 BBR 试验 S 值 (MPa)

	-12℃	-18℃
原样沥青	73.5	251
木质纤维	107	408
聚丙烯腈	103	316
矿物纤维	130	320

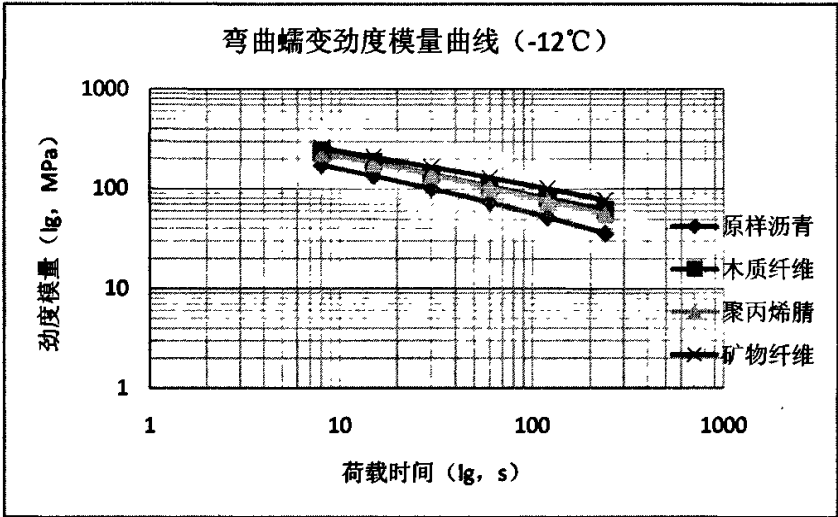


图 3.4 不同纤维胶浆弯曲蠕变劲度模量曲线

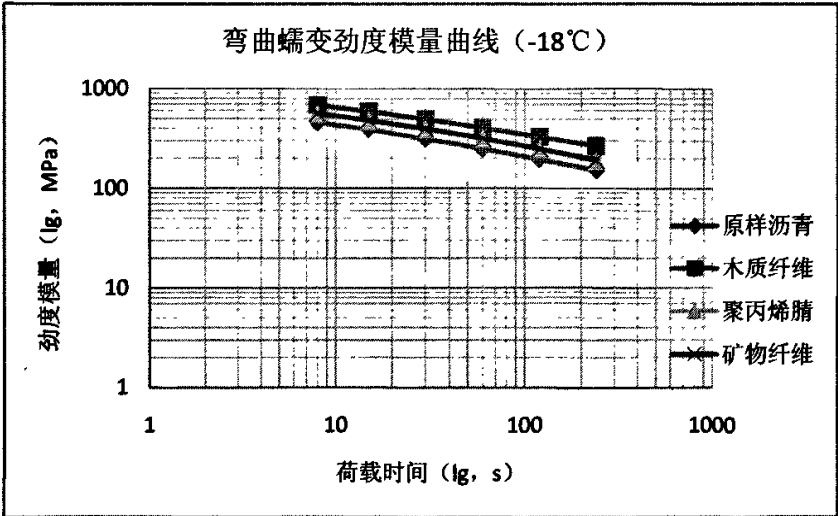


图 3.5 不同纤维胶浆弯曲蠕变劲度模量曲线

由上表 3.2 和图 3.4、3.5 中的数据可以看出，纤维的加入使沥青的蠕变劲度增加，柔性降低。-12℃时，不同纤维对沥青的劲度模量影响相差不大。但是在-18℃时，木质纤维胶浆的劲度模量迅速增加，聚丙烯腈和矿物纤维胶浆劲度模量则相

差不多，说明木质纤维胶浆的低温性能较差。

(2)温度与 m 的变化规律

蠕变斜率 m 表征沥青的松弛能力， m 值越大，松弛能力越强，往往具有较好的低温性能。

表 3.3 不同纤维沥青胶浆 BBR 试验 m 值

	-12℃	-18℃
原样沥青	0.482	0.339
木质纤维	0.399	0.288
聚丙烯腈	0.428	0.331
矿物纤维	0.360	0.301

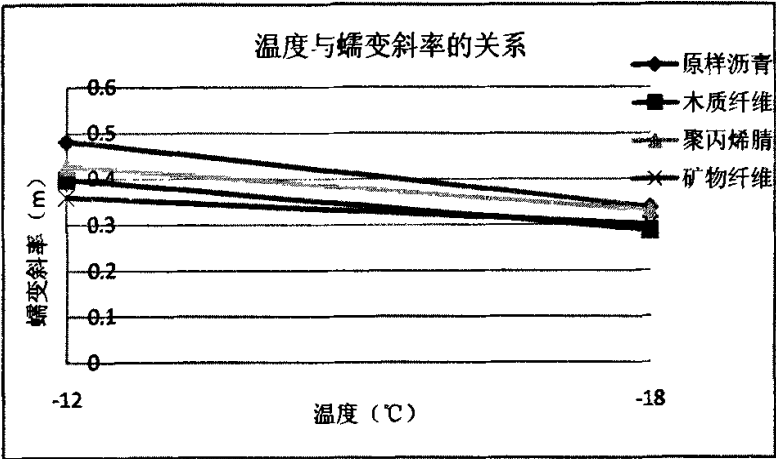


图 3.6 温度与蠕变斜率的关系

从上表 3.3 及图 3.6 可以看出，纤维并没有改善沥青的低温松弛性能，反而使其性能有所降低。在温度下降时，不同纤维沥青胶浆的蠕变斜率都随着温度的下降而减小。以木质纤维胶浆的性能最差。

3.3 本章小结

本章主要通过动态剪切流变仪分别测出各纤维沥青胶浆的复数模量 G^* 和相位角 δ ，进而得出抗车辙因子 $G^*/\sin \delta$ ，由此来评价不同纤维沥青胶浆的粘弹性质和高温性能；通过筒支梁弯曲蠕变试验（BBR）测出蠕变劲度 S 和蠕变斜率 m ，由此来评价不同纤维沥青胶浆的低温性能。最后得出以下结论：

1、纤维的加入能够改善沥青胶浆的高温性能，且纤维种类不同，改善的效果也不相同。从动态剪切性能来看，由于木质纤维的内部中空结构吸收了一部分沥青，使其胶浆的自由沥青含量少于另两种纤维，所以其车辙因子较大，同时颗粒状的木质纤维分散十分困难，使其沥青胶浆中有成团部分，对实验的结果可能造

成一定的影响。

同原样沥青相比较，不同纤维的其高温稳定性能均有明显的改善，但是温度敏感性增大。随着温度的升高，纤维对沥青的吸附作用减弱，纤维胶浆中的自由沥青增多，纤维种类对沥青高温性能的影响逐渐降低。

2、从蠕变劲度 S 来看，纤维的加入并没有改善沥青的蠕变劲度，随着温度的降低，木质纤维胶浆的蠕变劲度迅速增大，柔性降低。从蠕变斜率 m 来看，纤维也降低了沥青胶浆的低温松弛性能。木质纤维胶浆与其它两种纤维胶浆来说低温性能较差。

第四章 纤维对 SMA-10 性能影响的试验研究

4.1 不同纤维 SMA-10 水稳定性

沥青路面是附着了沥青的集料粘结在一起的集合体,对沥青路面来说,沥青必须与集料牢牢地粘结,沥青膜不产生剥离是非常重要的性质。为了建造稳定耐久的沥青路面,沥青与集料的粘附性和抗剥离性能是比较主要的性能。

所谓沥青路面的水损害破坏,即我们常说的沥青路面的水稳定性,是指沥青路面在水存在的条件下,经受交通荷载和温度胀缩的反复作用,一方面水分逐步侵入到沥青与集料的界面上,同时由于水动力的作用,沥青膜渐渐地从集料表面剥离,并导致集料之间的粘结力丧失而发生的路面破坏过程。“粘附性”和“粘结力”是经常当作同义词使用,但严格地讲,两个词的含义是有区别的。“粘附性”是指沥青对集料表面的附着性能。“粘结力”是集料与集料(包括矿粉)之间通过沥青的粘结作用产生的抵抗分离的能力。

沥青路面水损坏的机理和特征,可以从其破坏的发展历程看出:

- ①在开始阶段,水分侵入沥青与集料的界面,以水膜或水汽的形式存在,影响沥青与集料的粘附性;
- ②在反复荷载的作用下,沥青膜与集料开始剥离;
- ③随着水的进一步侵入,集料开始松散,掉粒;
- ④最终,沥青路面水损害处发展成坑槽。

因此,评价沥青混合料的水稳定性(即抗水损害的能力)具有非常重要的意义。沥青混合料的水稳定性应分别用马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比评价。

4.1.1 残留稳定度试验

残留稳定度试验按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)^[21]的规定进行,一组马歇尔试件在 60℃热水中恒温 30min 后测其稳定度,另一组马歇尔试件在 60℃水中恒温 48h 后测其稳定度,再将二者进行对比来评价混合料的水稳性。试件的浸水残留稳定度按下式计算:

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \times 100 \quad (4.1)$$

式中: MS_0 —试件的浸水残留稳定度(%);

MS_1 —试件浸水 48h 后的稳定度(KN);

MS —试件浸水 30min 后的稳定度(KN)。

SMA-10(木质素纤维)及 SMA-10(聚丙烯腈纤维)和 SMA-10(矿物纤维)

的残留稳定度如表 4.1 和图 4.1 所示。

表 4.1 不同纤维 SMA-10 残留稳定度试验结果

纤维类型	MS (KN)	MS ₁ (KN)	MS ₀ (%)
木质纤维	6.137	5.434	88.5
聚丙烯腈纤维	6.234	5.480	87.9
矿物纤维	6.197	5.410	87.3

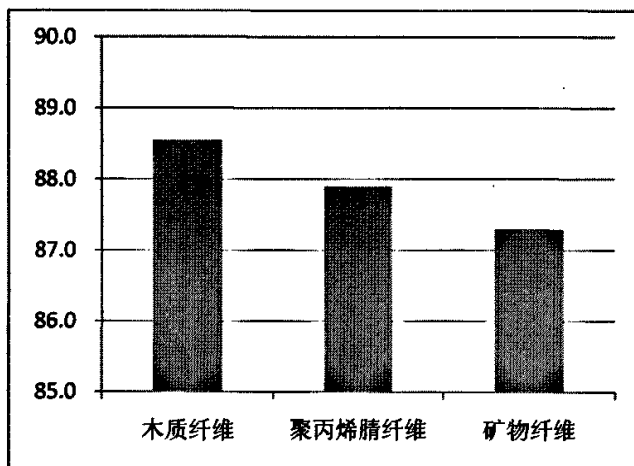


图 4.1 不同纤维 SMA-10 残留稳定度比较

残留稳定度反映的是水对沥青与集料之间粘附效果的破坏作用能力。纤维的加入可以增加混合料中结构沥青含量，减少自由沥青含量，提高沥青与集料的粘结作用力，加强沥青混合料中沥青与集料形成的界面膜抵抗水分剥离作用的能力，提高沥青混合料的残留稳定度。

从表 4.1 和图 4.1 的三种纤维残留稳定度比较来看，不同纤维 SMA 的残留稳定度相差不大，木质素纤维的作用较好，这与木质素纤维的加入使混合料最佳沥青用量增加较多有关。

4.1.2 冻融劈裂试验

试件成型与马歇尔成型方法一致，其正反面各击 50 次。饱水分两组进行，第一组在 25℃ 水中浸泡 2h 后测试。第二组饱水过程如下：^[21]

- ①常温下 (25℃) 浸水 20min;
- ②0.09MPa 浸水抽真空 15min;
- ③-18℃ 冰箱中置入 16h;
- ④60℃ 水浴中恒温 24h;
- ⑤25℃ 水中浸泡 2h。

利用自动劈裂强度试验仪，分另组测出第一、二组试件的劈裂强度为 R_1 和 R_2 。并用劈裂强度比来评价沥青混合料的冻稳定性：

$$TSR = \frac{R_2}{R_1} \times 100 \quad (4.2)$$

式中：TSR—劈裂强度比（%）；

R_1 —第一组试件的劈裂强度（MPa）；

R_2 —第二组试件的劈裂强度（MPa）。

SMA-10（木质素纤维）及 SMA-10（聚丙烯腈纤维）和 SMA-10（矿物纤维）的残留稳定度如表 4.2 和图 4.2 所示。

表 4.2 不同纤维 SMA-10 冻融劈裂试验结果

纤维类型	R_1 (MPa)	R_2 (MPa)	TSR (%)
木质纤维	0.462	0.427	92.4
聚丙烯腈纤维	0.486	0.450	92.6
矿物纤维	0.617	0.566	91.7

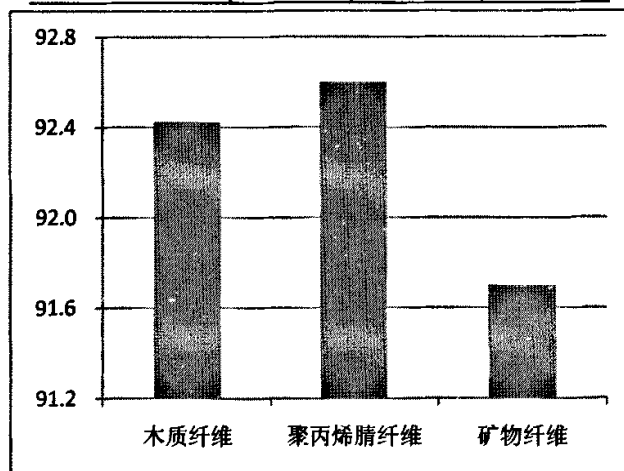


图 4.2 不同纤维 SMA-10 冻融劈裂试验结果

混合料中加入纤维后，由于纤维的吸附和对沥青的吸收作用，使混合料在保证同一空隙率的情况下增加了沥青用量，也就是增加了结构沥青的含量，较多的沥青与相应矿粉形成的沥青胶浆能有效地提高混合料抵抗冻融循环作用的破坏能力。由表 4.2 和图 4.2 可以看出，虽然从劈裂强度比看矿物纤维较低，但是其冻融前后的劈裂强度远高于另两种纤维 SMA-10。劈裂强度反应了沥青混合料的水稳性。因此可以认为对冻融劈裂试验来说矿物纤维 SMA-10 的冻稳定性较好。

4.2 不同纤维对 SMA-10 的高温稳定性影响研究

4.2.1 沥青路面的高温稳定性分析

高温稳定性是指在夏季气温较高情况下，在交通荷载作用下沥青路面抵抗车辙、推移、拥包等永久变形的能力。沥青混合料的特点就是强度和抗变形能力随

着温度的升降而变化,温度高的时候,沥青的粘滞度降低,矿料之间的粘结力削弱,导致路面的抗剪强度不足,导致矿料在外力作用下发生滑移与错位,细集料相对集中,并产生剪切破坏。

在夏季高温,在渠化交通的重交通路面,尤其是在停车地点和行车变速的路段上,由于行车的启动与制动,加速与减速,路面可能受到很大的水平作用力(可达到 $0.6\text{MPa}\sim 0.8\text{MPa}$),大体上与垂直应力相当,并且在车辆的重复荷载作用下发生变形累积,在这种情况下,若沥青混合料的高温稳定性不足,路面就会产生较大的剪切变形,出现常见的车辙。因此我们需要提高沥青混合料的高温下的抗剪切能力。

车辙就是沥青路面在汽车荷载反复作用下垂直方向永久变形的积累,可以分为两大类:(1)失稳性车辙,这类车辙是目前研究的主要对象,它是由于沥青路面结构层在车轮荷载的作用下其内部材料的流动产生横向位移而产生,通常发生轮迹处。(2)结构性车辙,这类车辙是由于路面在交通荷载作用下产生整体永久变形而产生,这类变形主要是由变形有基层传递到面层。对于第一类车辙,其产生发展的内在因素是材料本身,因此需考虑材料自身性能改善加以防治。对于第二类车辙的防治,需要从路面整体结构加以改善,提高路面结构抵抗荷载作用下产生累积变形的能力,特别是对采用柔性基层的路面结构物,对基层、面层需提高其抵抗能力。

车辙形成可以简单的分为三个阶段:一是开始的压密过程,这主要是沥青混合料被碾压后,由于在汽车荷载作用下和在高温作用下,处于半流动的沥青及沥青胶浆被挤进矿料间隙中,骨料进行重新排列形成一定的骨架结构。二是沥青混合料的流动,在车轮荷载下进一步作用下,沥青和沥青胶浆产生流动,从而是沥青混合料的网络骨架结构失稳,逐步造成压缩变形。三是结构重新排列和破坏,在高温下,处于半固态的沥青混合料,由于沥青及胶浆在荷载作用下首先流动,混合料中粗骨料组成的骨架逐渐为荷载主要承担者,再加上沥青润滑作用,硬度较大的矿料颗粒在荷载直接作用下会沿着矿料间接触面滑动,促使沥青及胶浆向其富集区流动,以至流向混合料的自由面,特别是骨料间沥青和胶浆过多,这一过程更明显。

由于影响沥青高温性能的因素各异,同样可用于沥青混合料高温性能试验的方法也很多,通常包括试验室圆柱试件的单轴静载、动载、重复试验,三轴静载、动载、重复试验,径向静载、动载、重复试验,简单剪切的静载、重复加载和动力试验,此外还有中空圆柱试件的动力、剪切试验,棱柱形梁试件的弯曲蠕变试验,小型模拟试验设备的车辙试验,大型环道、直道试验设备的足尺路面高温性能试验和现场试验路面的加速车辙试验等。

本试验采用车辙试验,动、静态蠕变试验及恒高度重复剪切试验来评价不同

纤维对沥青混合料的高温稳定性的影响。

4.2.2 车辙试验

车辙试验方法最初由英国 TRRL 开发的,由于试验方法本身比较简单,试验结果直观且与实际沥青路面的车辙相关性甚好,因此得到了广泛的应用。车辙试验是一种模拟实际车轮荷载在路面上行走而形成车辙的工程试验方法。从广义上讲包括了室内往复车辙试验,旋转车辙试验,大型环道试验、直道试验、野外现场加速加载试验等都可认为是属于车辙试验的范畴,这些试验最基本的和共同的原理就是通过采用车轮在板块状试件或路面结构上反复行走,观察和检测试块或路面结构的响应,用动稳定度或车辙深度来表征试验结果。

车辙试验是评价沥青混合料在规定温度条件下抵抗塑性流动变形能力的方法,通过板块状试件与车轮之间的往复相对运动,使试块在车轮的重复荷载作用下产生压密、剪切、推移和流动,从而产生车辙。车辙试验是一种工程试验方法,试验结果可用于建立经验公式来预测沥青路面车辙深度,或用于检测沥青混合料的抗车辙能力。车辙试验的最大的特点是能够充分模拟沥青路面上车轮行驶的实际情况,在用于试验研究时,还可以改变温度、荷载、试件厚度、尺寸、成型条件等等,以模拟路面的实际情况,搞清楚各种因素变化对车辙变形的影响。目前,世界上广泛采用的是室内小型往复式车辙试验机进行沥青混合料抗车辙性能试验,在进行车辙试验时,可观察到轮辙形成的全过程。

试验选用木质纤维、聚丙烯腈纤维和矿物纤维进行试验,试验是根据最佳沥青用量下的马歇尔试件密度计算用料量,成型 300mm×300mm×50mm 的车辙试模。使用直径 200mm、宽 50mm 的包橡胶实心轮胎,轮压 0.7MPa。试验温度 60℃,加载轮运行速度为 42 次/min。车辙试验通常进行 60min 或最大变形到 25mm 为止,动稳定度 DS_I (次/mm)按下式计算。

$$DS_I = \frac{(t_2-t_1) \times 42}{d_2-d_1} \tag{4.3}$$

式中: d_1 —荷载轮作用时间 t_1 (一般为 45min) 时的永久变形, mm;

d_2 —荷载轮作用时间 t_2 (一般为 60min) 时的永久变形, mm。

试验结果如表 4.3 图 4.3、4.4 所示。

表 4.3 不同纤维 SMA-10 沥青混合料车辙试验

纤维类型	动稳定度 (次/mm)
木质纤维	3669
聚丙烯腈纤维	3835
矿物纤维	4947

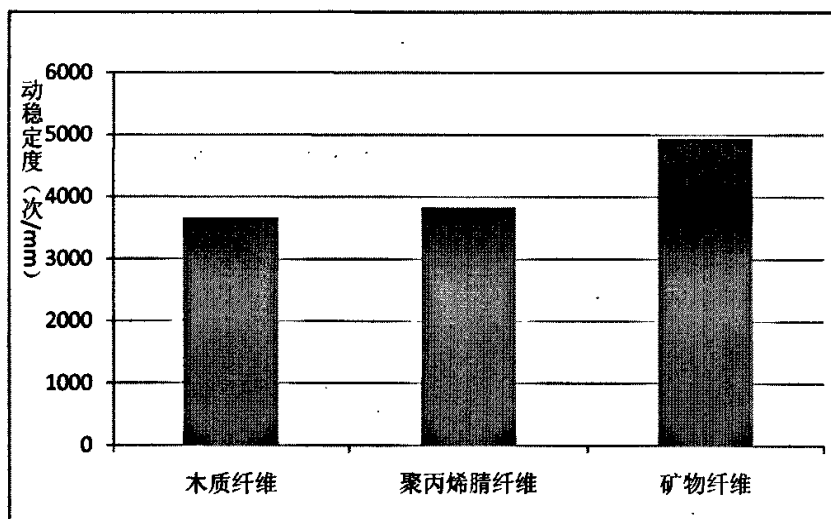


图 4.3 不同纤维 SMA-10 沥青混合料动稳度比较

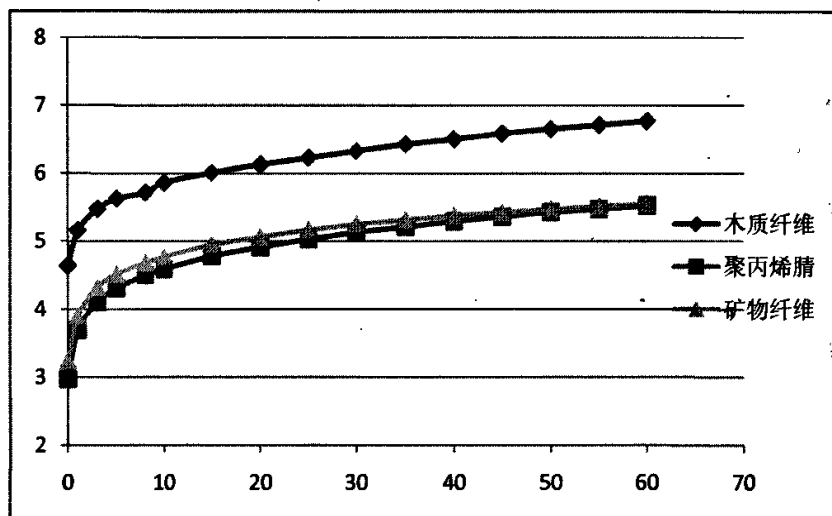


图 4.4 不同纤维沥青混合料车辙试验变形曲线

由于动稳定度的大小与混合料的级配、集料以及结合料性质、板的成型方式（碾压温度、次数）等有关，故仅做简单的线性化处理，统一选取最后 15 min 的变形量是不太合适的。另外，动稳定度愈大要求位移传感器的读数精度也越高，而一般位移传感器的读数精度为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。动稳定度对于车辙板变形的“敏感”性对动稳定度的影响很大，动稳定度越大，其影响越大。为了解决上述在评价混合料高温性能中存在的问题，本研究对车辙试验数据处理做了进一步改进。将车辙板碾压变形的数据采集下来，然后对该数据进行数据分析，以一定的保证率选取车辙量随时间呈线性变化的最小时间点 t ，然后回归一个直线方程（回归直线方差 R 不小于 0.98），求得直线斜率 k 值，再由回归方程计算动稳定度。

表 4.4 不同纤维沥青混合料车辙试验回归方程

纤维种类	回归方程	相关系数	动稳定度 (次/mm)
木质纤维	$y=0.012x+6.057$	0.998	3500
聚丙烯腈	$y=0.010x+4.882$	0.993	4200
矿物纤维	$y=0.008x+5.043$	0.996	5250

回归方程可表示为:

$$Y=kX+b \quad (4.4)$$

k 越小, 车辙的动稳定度越大; b 可以表示为车辙试件的早期变形量, b 越小, 混合料的压实效果越好。

从表 4.3、4.4 及图 4.3 可以看出, SMA-10 (矿物纤维) 的动稳定度明显大于另外两种纤维混合料。说明矿物纤维与另外两种纤维比较有较好的抗车辙性能。

4.2.3 动、静态蠕变试验试验

4.2.3.1 沥青混合料蠕变试验综述

通过对材料施加一定水平的荷载或应力时, 材料将产生变形, 若这个变形不随时间增加而增大, 且撤消外力后, 变形立即全部恢复, 那么这种材料称为弹性体。但完全弹性的材料是极少的, 大多数材料在外力的长时间作用下, 作为响应的变形也会随时间的增加而不断增长, 在取消外力后变形随时间的增长而逐渐恢复甚至一部分变形会永远保持, 这种力学行为称为蠕变。这类材料称为粘弹性材料。沥青混合料是典型的粘弹性材料, 尤其在高温下, 粘弹性表现得更为突出。沥青路面的车辙或永久变形就是沥青混合料粘弹性能的直接反映。

由于马歇尔稳定度和流值是混合料稳定性的一种经验性指标, 它不能确切地反映永久变形产生的机理, 近年来, 国际上有以蠕变试验取代它的趋势。蠕变试验既可以区别混合料的稳定性, 指导混合料组成设计, 又可以预估车辙量, 为路面结构设计提供依据, 因而受到众多研究者的青睐。

材料的蠕变过程可以分为三个阶段, 第一阶段是压密阶段, 材料空隙减少, 体积应变增大, 变形速率逐渐减小, 称为迁移蠕变; 第二阶段的变形速率保持稳定, 是等速期, 也称稳定蠕变阶段; 第三阶段材料结构逐渐损坏, 强度丧失, 造成整体破坏, 变形急剧增大是破坏阶段的开始, 也称加速蠕变阶段。蠕变破坏通常定义为稳定蠕变与加速蠕变的分界点, 此时的时间经历称之为蠕变寿命, 可用该点的应力和应变描述蠕变破坏。

根据粘弹性理论定义的疲劳及蠕变破坏的破坏点及破坏寿命的概念, 对沥青混合料的变形曲线进行处理后发现, 疲劳及蠕变试验的应力水平一破坏时间数值在双对数坐标下显示良好的线性关系, 据此可建立疲劳与蠕变之间的联系。另一方面蠕变试验可以区别沥青混合料的稳定性, 指导混合料组成设计、预估车辙量, 为路面结构设计提供依据。因此蠕变试验可以将疲劳与车辙联系起来, 这是其它

试验不能比拟的。

蠕变试验主要有以下三种：

- (1)单轴应力试验：无侧限圆柱试件的蠕变、重复或动力加载；
- (2)三轴应力试验：有侧限圆柱试件的蠕变、重复或动力加载；
- (3)径向试验：圆柱试件的蠕变或重复加载。

由路用沥青混合料的实际受力状况可知，三轴重复压缩剪切蠕变试验是最为理想的，但是三轴试验设备非常复杂，推广较困难，应用较少。由此本文选用动、静态蠕变进行研究。

4.2.3.2 单轴静载蠕变

单轴静载蠕变试验以壳牌（shell）法最具代表性。壳牌推荐的静态蠕变试验条件为：试验温度： $T=40^{\circ}\text{C}$ ，施加应力： $\sigma_0=0.1\text{MPa}$ ，试验时间： $t=60\text{min}$ ；预载： 0.002MPa 。当一圆柱形试件在轴向施加一瞬时荷载，并保持荷载大小不变，经过一段时间后再立即卸载，使试件变形恢复，由此可得到蠕变曲线^{[32][33]}。

静载蠕变试验所施加的应力可表示为一个跳跃函数：

$$\sigma = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \sigma_0 & (t > 0) \end{cases} \quad (4.5)$$

蠕变劲度可由下式计算求解：

$$S_{mx}(t, T) = \sigma_0 / \varepsilon(t, T) \quad (4.6)$$

式中： $\varepsilon(t, T)$ ——温度 T 下随时间增长的轴向应变。

通过直接在蠕变试验过程中测量试件的变形来获得。式中实际上已包括了上述弹性、粘性和粘弹性三部分的综合影响，可满足工程应用的要求。

1、沥青混合料静态蠕变试验方案设计

试验条件^[34]：

(1)试验温度：

为了使蠕变试验可以与沥青混合料的高温性能建立联系，因此选取的试验温度为 60°C 。

(2)施加应力：

采用统一的应力水平， $\sigma_0=0.1\text{MPa}$ 。

(3)时间：

加载 3600s ，卸载 3600s ，以利于变形的充分恢复。

(4)预载：

试验前施加预载 0.01MPa ，预压三分钟，以防偏心受压。

(5)平行试验：

每个温度采用三个试件进行平行试验。

进行静载蠕变试验。

- (1)对试件端面进行处理，使试件表面平整，防止局部受力；
- (2)将试件置于环境箱中保温 4 小时；
- (3)对保温后的试件进行预压；
- (4)对试件进行加载、卸载，每隔 100 秒钟采集一次数据。

2、沥青混合料静态蠕变试验分析

不同纤维 SMA-10 的静态蠕变曲线如下图 4.5~4.7。

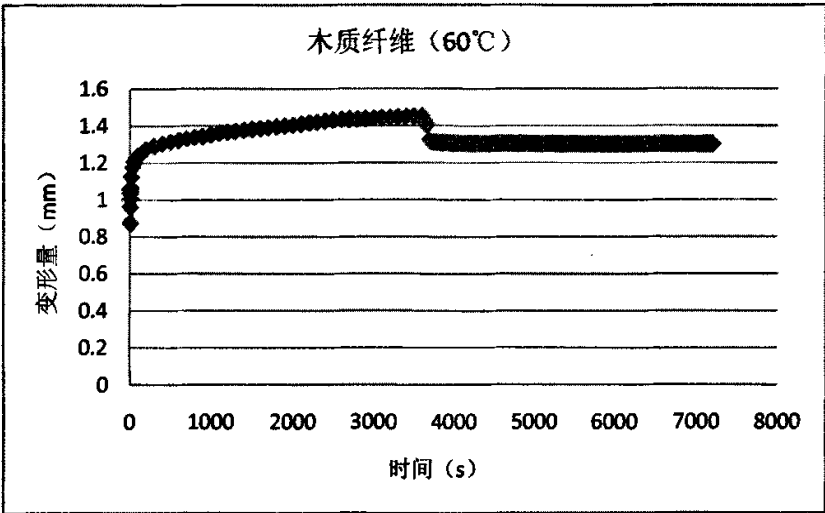


图 4.5 木质纤维 SMA-10 静态蠕变试验曲线

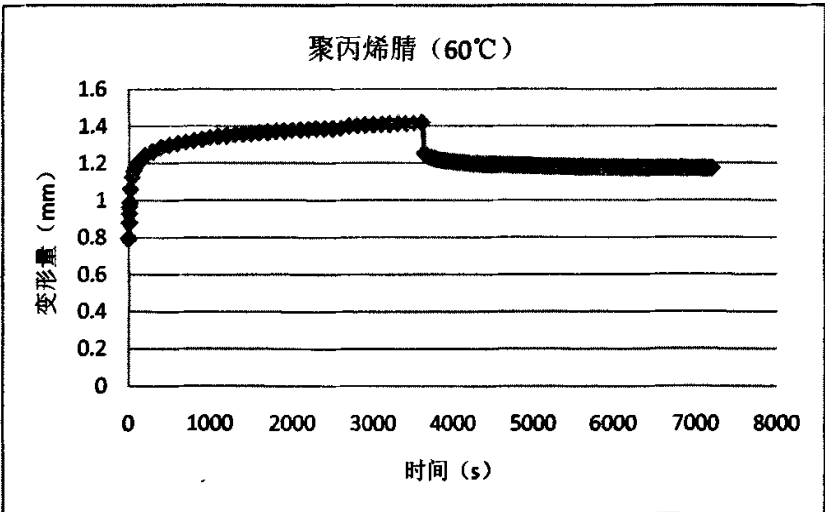


图 4.6 聚丙烯腈 SMA-10 静态蠕变试验曲线

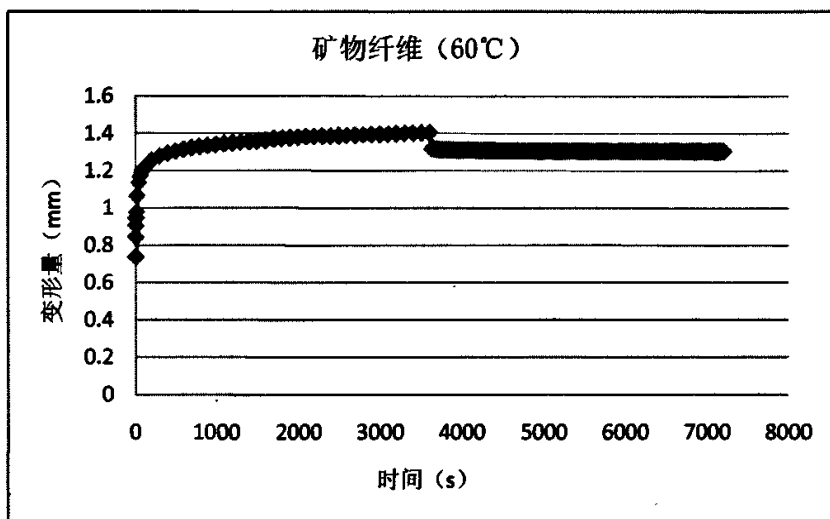


图 4.7 矿物纤维 SMA-10 静态蠕变试验曲线

表 4.5 不同纤维 SMA-10 卸载后永久变形量

纤维种类	永久变形量 (mm)
木质纤维	1.301
聚丙烯腈	1.171
矿物纤维	1.307

由图 4.5~4.7 的蠕变曲线可见，沥青混合料是一种粘弹塑性体，其变形是荷载作用时间的函数，由瞬时弹性变形、粘弹性变形和粘塑性变形组成。卸载后弹性变形立即恢复，粘弹性变形随时间逐渐恢复，粘塑性变形因不能恢复而成为永久变形。沥青混合料的永久变形是沥青路面车辙的主要来源。从图中蠕变曲线的变化可以发现，随着加载时间的延长，蠕变曲线的斜率由大到小逐渐稳定，这表明沥青混合料对变形的抗力逐渐增大，致使进一步的变形更加困难，即所谓的“固结效应”。这一规律非常重要，车辙试验结果以及大量沥青路面实际观测表明，车辙的增加速率越来越小，因此在进行车辙预估时必须充分考虑到这一效应。从试验结果上看，矿物纤维、聚丙烯腈及矿物纤维对同一级配的沥青混合料影响较小。从表 4.5 中可以看出，卸载后 SMA-10（聚丙烯腈）的塑性变形量最小，相对另外两种纤维混合料有较好的粘弹性能。

对蠕变曲线加载段进行回归分析，结果见下图 4.8~4.10。

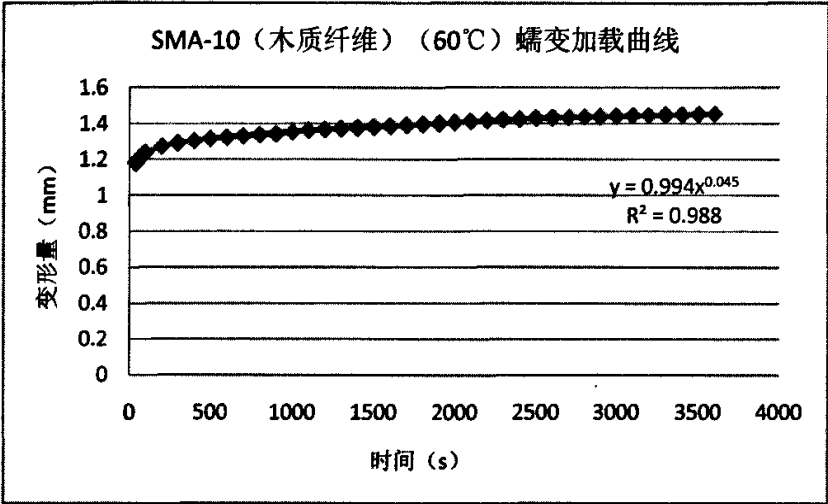


图 4.8 SMA-10（木质纤维）（60℃）蠕变加载曲线

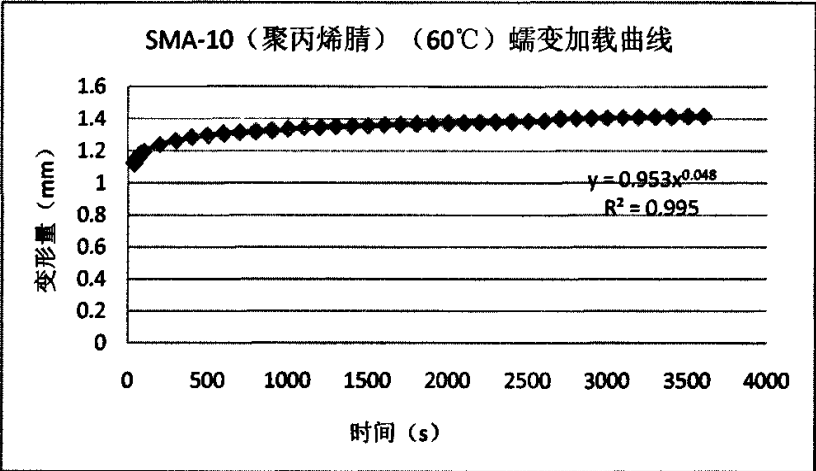


图 4.9 SMA-10（聚丙烯腈）（60℃）蠕变加载曲线

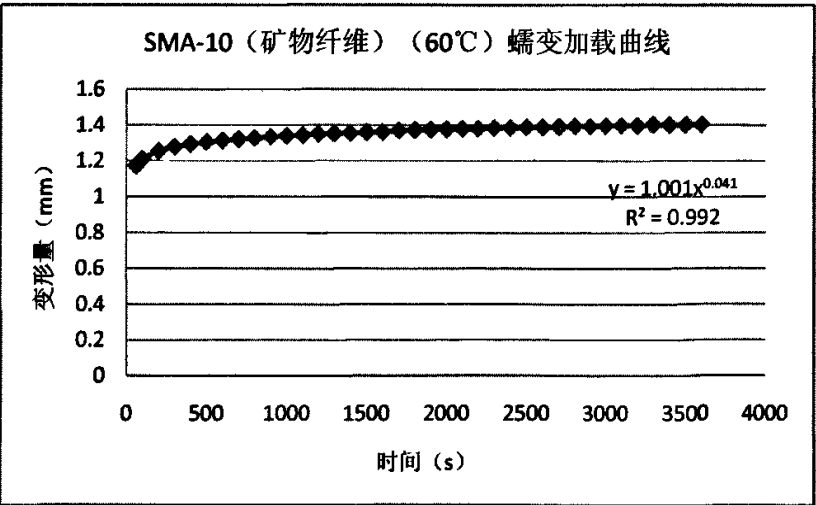


图 4.10 SMA-10（矿物纤维）（60℃）蠕变加载曲线

表 4.6 蠕变曲线回归分析

试验温度	纤维种类	回归系数		相关系数
		A	B	R
60℃	木质纤维	0.994	0.045	0.988
	聚丙烯腈	0.953	0.048	0.995
	矿物纤维	1.001	0.041	0.992

由以上图 4.8~4.10 及表 4.6 可知,不同纤维沥青混合料蠕变加载曲线回归方程形式均为幂函数形式:

$$y = At^B \quad (4.7)$$

其中: y ——蠕变变形量 (mm)

t ——加载时间 (s)

可以看出永久变形越大,蠕变模量越小,其高温抗车辙性能愈差,反之其高温性能愈好。

对于蠕变试验来讲,劲度模量是很重要的参数。劲度模量在车辙预估方法中有重要作用,在此利用蠕变试验结果计算劲度模量并进行回归分析。

$$S(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (4.8)$$

$\sigma_0 = 0.1\text{MPa}$ 是定值

因此 60℃,加载 3600s 时,不同纤维 SMA-10 卸载时的劲度模量见下表 4.7,同理可求出卸载 3600s 时的劲度模量。

表 4.7 60℃ 加载 3600s 及卸载 3600s 时不同纤维的劲度模量

试验温度	纤维种类	劲度模量 (MPa) 加载 3600s	劲度模量 (MPa) 卸载 3600s
60℃	木质纤维	44.89	50.72
	聚丙烯腈	45.68	54.23
	矿物纤维	46.06	48.58

从上表可以看出,不同纤维的 SMA-10 的劲度模量相差不大,并且在加载及卸载后不同纤维 SMA-10 表现出不同的性能。

4.2.3.3 动态蠕变试验

1、沥青混合料蠕变试验方案设计

试验条件^{[35][36][37][38]}

(1)试验温度:

为了使蠕变试验可以与沥青混合料的高温性能建立联系,因此选取的试验温度为 60℃。

(2)施加应力：

施加周期为 2s，压强 $\sigma_0=0.1\text{MPa}$ 的脉冲方波动态荷载；

(3)次数：

重复荷载加载 3600 次；

(4)预载：

试验前施加预载 0.01MPa，预压三分钟，以防偏心受压；

(5)平行试验：

每个温度采用三个试件进行平行试验。

进行动态蠕变试验。

(1)对试件端面进行处理，使试件表面平整，防止局部受力；

(2)将试件置于环境箱中保温 4 小时；

(3)对保温后的试件进行预压；

(4)对试件进行加载、卸载，每次采集一次数据。

2、沥青混合料的蠕变规律

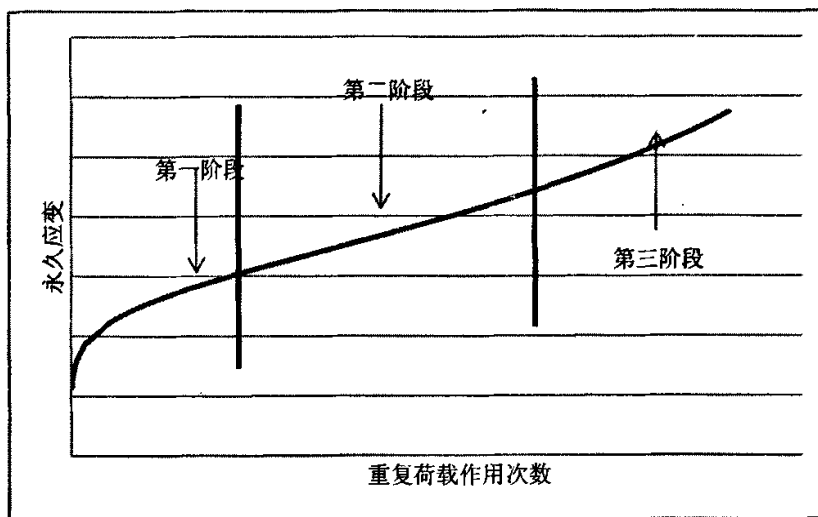


图 4.11 沥青混合料的蠕变规律

图 4.11 显示了沥青混合料的蠕变规律。在该图中，永久应变曲线由初始阶段、第二阶段和第三阶段组成。在初始阶段，永久应变的累积非常迅速，但其累积率是逐渐降低的。发展到第二阶段，永久应变的累积率相等。随着荷载的重复作用，永久应变继续发展至第三阶段，又开始迅速增长，而且增长率是变大的。

3、动态蠕变试验结果和分析

动态蠕变永久变形试验的结果示于图 4.12~4.13。同样可以看出，动态蠕变永久变形试验能容易地区分出不同纤维对 SMA-10 沥青混合料高温性能的影响。

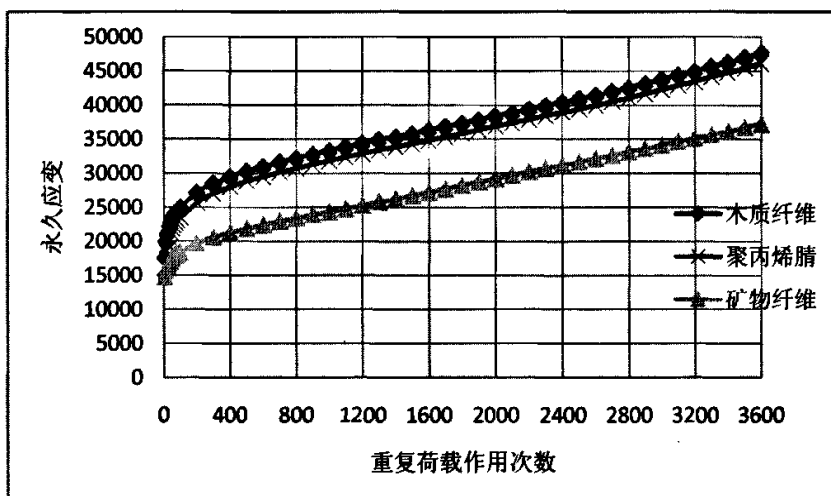


图 4.12 不同纤维 SMA-10 动态蠕变试验结果比较

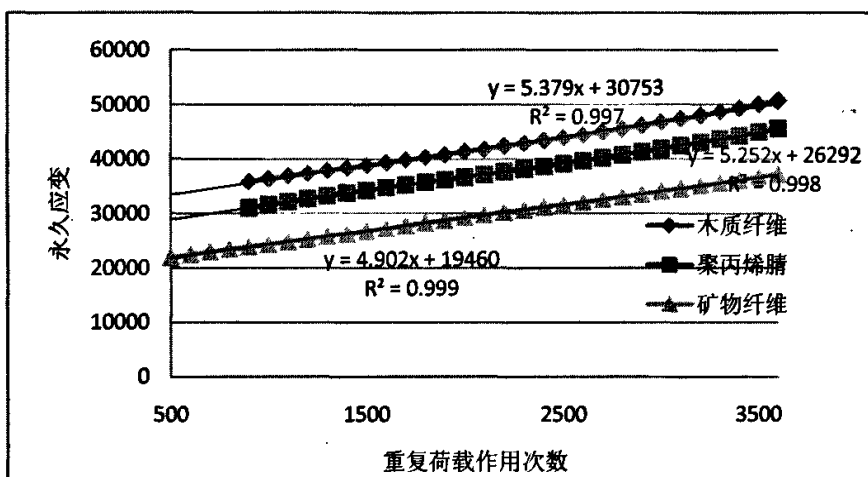


图 4.13 不同纤维 SMA-10 第二阶段永久应变累积曲线及回归方程

表 4.8 第二阶段永久应变累积曲线回归方程

纤维种类	回归方程	相关系数
木质纤维	$y=5.379x+30753$	0.997
聚丙烯腈	$y=5.252x+26292$	0.998
矿物纤维	$y=4.902x+19460$	0.999

从图 4.12、4.13 可以看出在蠕变曲线的第二阶段三种纤维 SMA-10 混合料的走向基本一致，体现出较好的相关性。从回归方程上看，第二阶段的永久应变的回归方程表现为： $y=kx+b$ 的形式， k 为蠕变速率，表现为第二阶段的蠕变变形的稳定性， k 越小，第二阶段的永久变形越小； b 与第一阶段的永久积累变形有关， b 越大，第一阶段的永久变形越大。

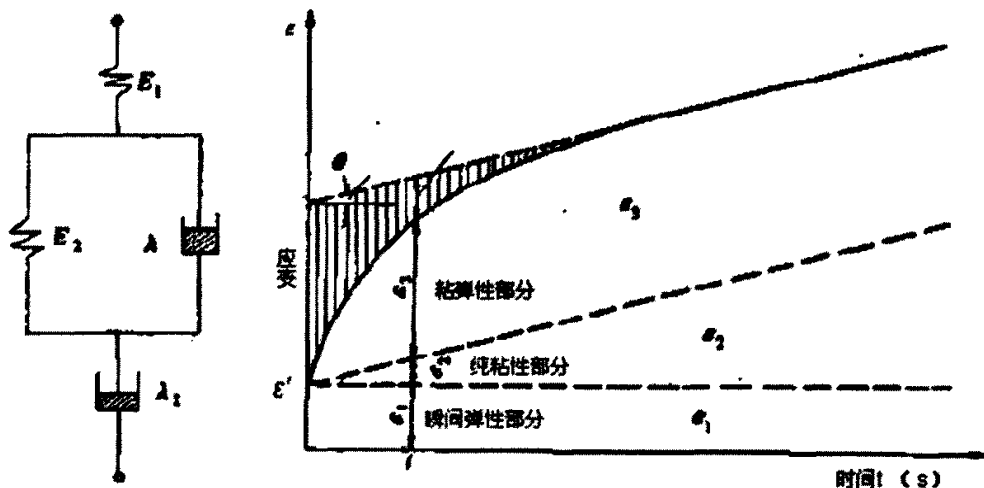


图 4.14 Burgers 模型的 4 元件和用 Burgers 模型分析蠕变试验变形曲线
由图 4.14 的应变时间关系曲线可以看出，总蠕变由三部分组成^{[10][39]}：

$$\text{瞬时弹性应变} \quad \varepsilon_1 = \sigma/E_1 \quad (4.9)$$

$$\text{纯粘性应变部分} \quad \varepsilon_2 = (\sigma/\lambda_1)t \quad (4.10)$$

$$\text{粘弹性变形部分} \quad \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right) \quad (4.11)$$

总的蠕变应变为上述三部分变形之和：

$$\varepsilon(t) = \sigma/E_1 + (\sigma/\lambda_1)t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right) \quad (4.12)$$

其中 $\varphi(t) = \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right)$ 称为蠕变函数，因为它是时间的函数。而 $\tau_k = \frac{\lambda_2}{E_2}$ 称为延迟时间，它表示粘弹性体中粘性体和弹性体的强度的比例。

从图 4-14 的变形-时间曲线上量取瞬时变形，计算瞬时应变 ε' 即 ε_1 ，并由式 (4.9) 计算瞬时弹性模量 E_1 ：

$$E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} = \frac{\sigma}{\varepsilon'} \quad (4.13)$$

在这一模型中去掉瞬时弹性应变，则剩余的应变为：

$$\delta(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_1 = (\sigma/\lambda_1)t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right) \quad (4.14)$$

由式 (4-12) 求取延迟弹性模量 E_2 。当式 (4-12) 中的时间无限长时：

$$[\varepsilon]_{t \rightarrow \infty} = \sigma/E_1 + (\sigma/\lambda_1)t + \frac{\sigma}{E_2} \quad (4.15)$$

此式相当于图 4-14 中曲线为直线部分延长至无限长而不进入破坏期的情况，将直线部分向反方向延长，与纵坐标相交得应变 ε'' ，则

$$E_2 = \sigma / \varepsilon'' - \varepsilon' \quad (4.16)$$

E_2 为 Burgers 模型中延迟元件弹簧的弹性模量。由应变—时间曲线稳定期时间无限长 (t_{end}) 处的直线斜率求取粘性系数 λ_1 。由于式 (4.12) 中 E_1 及 E_2 都已经求出， $[\varepsilon]_{t \rightarrow \infty}$ 就成为时间 t 的函数。蠕变曲线稳定期的应变速率可以表征沥青混合料的蠕变特性，由此利用应变—时间曲线最末一段的斜率 $\tan\theta$ ，可以得到串联粘壶的粘度为：

$$\lambda_1 = \sigma / \tan\theta \quad (4.17)$$

为了得到延迟元件中粘壶的粘度，由式 (4.14)

$$-\delta(t) + (\sigma/\lambda_1)t + \frac{\sigma}{E_2} = \frac{\sigma \cdot e^{-\frac{t}{\tau_k}}}{E_2} \quad (4.18)$$

两边取对数，有

$$\log \left\{ -\delta(t) + (\sigma/\lambda_1)t + \frac{\sigma}{E_2} \right\} = \log \frac{\sigma}{E_2} - \frac{t}{\tau_k} \log e \quad (4.19)$$

将上式左边对 t 绘图，将得到如图 4.15 所示对数坐标上的直线。

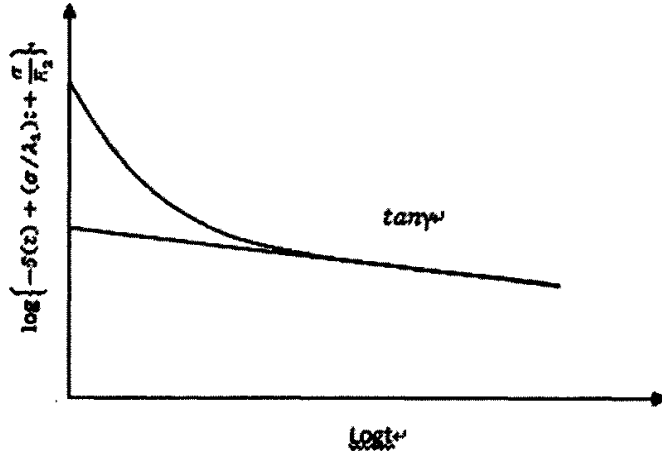


图 4.15 $\tan\gamma = -\frac{\log e}{\tau_r}$ 曲线

记这一直线的斜率为 γ ，则

$$\tan\gamma = -\frac{\log e}{\tau_r} \quad (4.20)$$

因此

$$\tau_k = \frac{\lambda_2}{E_2} = -\frac{\log e}{\tan\gamma}, \quad \lambda_2 = -\frac{0.4343}{\tan\gamma} E_2 \quad (4.21)$$

由此可以确定动态蠕变试验的几个粘弹性常数，如下表 4-10 所示。

表 4.9 不同纤维 SMA-10 蠕变试验动态粘弹性常数

试验温度	纤维类型	延迟时间 $\tau_k(s)$	Maxwell 元件		Kelvin 元件	
			瞬时弹性 (E_1) (MPa)	纯粘性系数 (λ_1) (Pa·s)	延迟弹性 (E_2) (MPa)	粘性系数 (λ_2) (Pa·s)
60℃	木质纤维	109	5.99	1.86×10^4	7.11	7.75×10^8
	聚丙烯腈	148	6.55	1.90×10^4	9.07	1.34×10^9
	矿物纤维	148	6.74	2.03×10^4	21.61	3.20×10^9

伯格斯模型在卸载后瞬时弹性变形 σ/E_1 立即回复,而蠕变变形 $(\sigma/\lambda_1)t$ 不能恢复,成为永久变形。松弛时间 τ_k 由材料的性质所决定:粘度愈小,松弛时间, τ_k 也就愈短;高粘度流变体有较长的松弛时间,而弹性固体则无应力松弛现象。因此,可以用瞬时弹性、延迟弹性及延迟时间比较不同纤维 SMA-10 的高温性能。对比表 4.9 中的瞬时弹性与延迟弹性及延迟时间,可知 SMA-10 (矿物纤维)有较好的高温性能。并且表中的数据较好的反应了不同纤维对 SMA-10 的性能的影响。

4.2.4 恒高度重复剪切试验

4.2.4.1 剪切试验机理分析

剪切试验评价沥青混合料高温性能主要其于以下几点^{[40][41]}:

(1)在试验过程中,沥青混合料试件体积几乎不变。通过垂直传感器控制竖向位移,保证了试件的高度不变,试件顶部、底部用环氧树脂粘结阻止试件侧向变形,从而使得试件在高温条件下产生塑性剪切流动而体积不变。

(2)通过 RSCH 试验施加的重复剪切荷载很好地模拟实际交通条件,反映了沥青路面高温永久剪切变形的过程。

(3)提高沥青混合料高温稳定性最主要的方面就是减少其膨胀或变形。在剪切应变作用下,沥青混合料趋向于膨胀。如果膨胀被限制,那么限制应力就产生。沥青混合料产生的限制应力越大,越能保持试件的稳定。

在恒定高度的剪切试验中,轴向应力作为限制应力,保持试件稳定。轴向应力的大小依赖于沥青混合料膨胀量的大小,随着剪切应变的增加,由于膨胀将会产生较大的轴向应力。如在高温的条件下沥青混合料内部没有形成稳定的骨架结构或者骨料间沥青胶浆粘结力不够,在重复剪切作用下沥青混合料内部产生的限制应力就不能保持试件稳定,那么沥青混合料体积就会改变,从而产生永久变形。

(4)试件采用旋转压实机成型,较好地模拟了实际碾压情况,且能按要求成型不同的沥青混合料试件,制作方便、容易,能得到大量有用的数据。

因此本文通过剪切试验考察不同纤维 SMA-10 塑性剪切流动变形过程,对不同纤维 SMA-10 高温稳定性的机理进行分析,对试验结果进行规律总结。

4.2.4.2 剪切试验机简介

剪切试验机（SST）是一套液压伺服闭环试验系统，包括加荷系统，试验控制和数据采集系统，环境控制箱和液压系统，如图 4.16。试验机的加荷系统能对试件施加垂直、水平和侧向压力，通过试验控制和数据采集系统对整个试验过程进行控制，环境控制箱为试验提供要求的试验温度，而液压系统则为不同试验要求提供轴向和水平剪切荷载。



图 4.16 Superpave 剪切试验机

剪切试验所用试件采用旋转压实机按 AASHTO TP-4 标准方法成型试件。试件的空隙率为 4.0% 左右。为了保证试件的符合要求，对于公称最大直径为 12.5mm 的沥青混合料，制备试件时首先模制成 70 mm 高的试件，然后锯切成厚约 40 mm 的试件。通过切除两端压实不够均匀部分，保持两端面平整、平行。由于旋转压实机能严格控制沥青混合料试件的密度和空隙率，使得试验结果具有可比性。

试件切割后用大约 135g 的环氧树脂分别涂于试件的底部与端部，采用 35KPa 的轻轻压实试件 5 分钟，剔除多余的环氧树脂，20 分钟后，从剪切试验装置中移去试件，养生 20 小时后进行试验。试验时首先将试件在规定的温度下保温 2~4 小时，后从环境箱中立即取出试件，装上水平传感器与垂直传感器，如图 4.17。继续在环境箱保温 20~60 分钟后进行试验，如图 4.18。

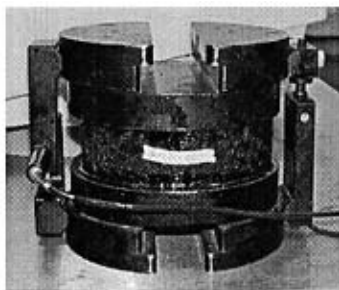


图 4.17 装上传感器的试件

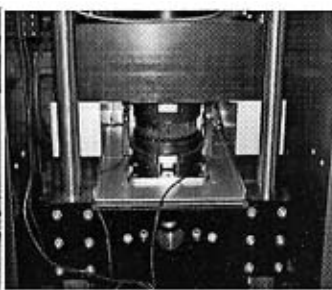


图 4.18 试件在环境箱内

4.2.4.3 恒高度重复剪切试验（RSCH）

恒高度重复剪切试验在保持试件高度不变的前提下，采用半正弦剪切应力对试件进行重复剪切，各次脉冲之间有一定间歇时间。试验得到沥青混合料的不同剪切次数下的剪切变形，计算得到沥青混合料的永久性剪切应变 γ 等参数。RSCH 试验同时提供轴向荷载与水平剪切荷载，在试验室较好地模拟车轮荷载反复作用沥青路面，它是评价沥青混合料高温特性较好的试验方法之一，试验得到各项指标能够较好地反映沥青混合料的高温性能。

RSCH 试验时，施加重复的半正弦剪切应力 $69 \pm 5\text{KPa}$ （对于直径为 150mm 的试件大约为 1220N 的剪切荷载），其中：施加荷载时间为 0.1s ，卸载时间为 0.6s ，这样一次循环称为一个周期。在测试过程中，通过垂直 LVDT 的反馈信号来控制垂直促动筒伺服阀，提供为保持试件高度不变而需要的适当大小的轴向荷载^[42]。

4.2.2.4RSCH 试验规律分析

RSCH 试验是在保持试件高度不变的前提下，通过施加的半正弦剪切应力 $69 \pm 5\text{KPa}$ 对试件进行重复剪切试验来模拟车轮荷载反复作用沥青路面，其中：施加荷载时间为 0.1s ，卸载时间为 0.6s ，频率为 1.43Hz ，剪切次数 5000 次，得到了永久剪切应变随重复剪切次数的变化关系。

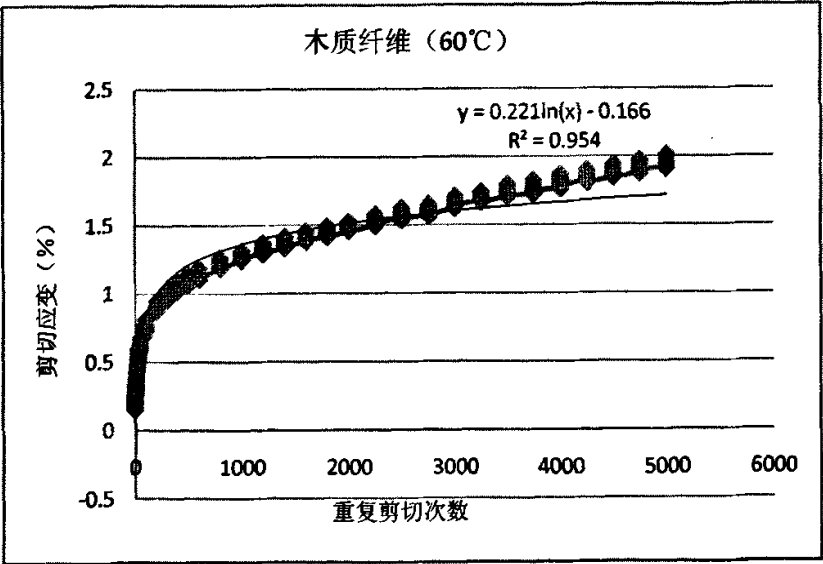


图 4.19 木质纤维重复剪切次数与永久剪切应变关系图

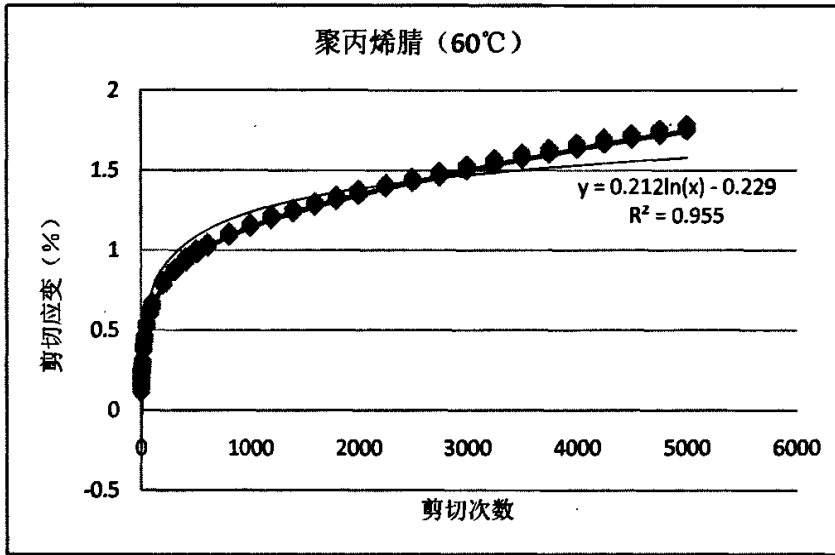


图 4.20 聚丙烯腈重复剪切次数与永久剪切应变关系图

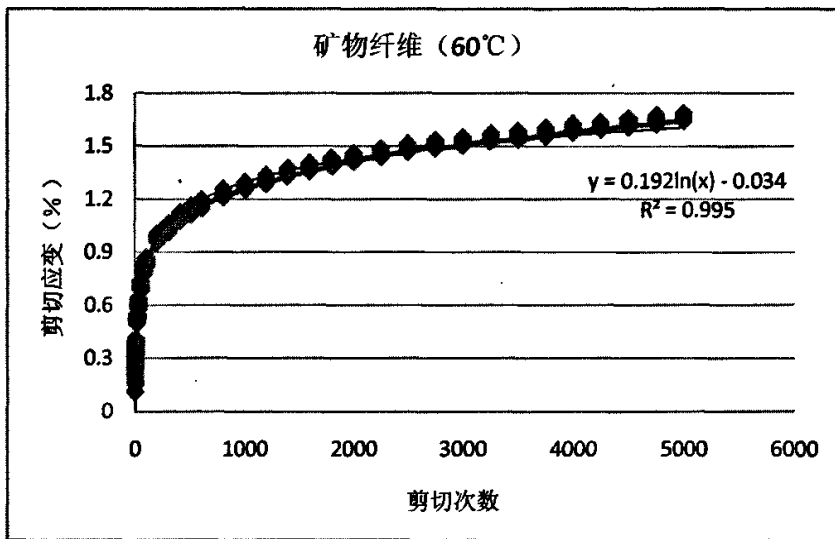


图 4.21 矿物纤维重复剪切次数与永久剪切应变关系图

上图 4.19~图 4.21 分别为 SMA-10(木质纤维)、SMA-10(聚丙烯腈)、SMA-10(矿物纤维)的永久剪切应变与重复剪切次数的关系图，试验条件为：最佳油石比、空隙率 4%和温度 60℃。从图可以看出，随着重复剪切次数的增加，沥青混合料剪切变形增加，永久剪切应变也随之增加。并且剪切次数的对数与永久剪切应变存在较好的相关性，将图进行拟和可得到公式：

$$y = A \ln(N) + B \quad (4.22)$$

表 4.10 三种纤维 SMA-10 RSCH 试验的拟和方程及相关系数

混合料类型	拟和方程	相关系数
木质纤维	$Y=0.221\ln(x)-0.166$	0.954
聚丙烯腈纤维	$Y=0.2123\ln(x)-0.1007$	0.9554
矿物纤维	$Y=0.192\ln(x)-0.034$	0.995

RSCH 试验的永久剪切应变的发展有两个明显的阶段，在两个阶段存在一个转折点 A，其中在转折点前的阶段永久剪切应变急剧增加，曲线图形较陡。在转折点后的阶段永久剪切应变增加变缓，曲线图形较缓。可用 K_1 、 K_2 表示曲线起终点的斜率。且存在切线方程：

$$Y=KX+B \quad (4.23)$$

其中： K —曲线的斜率。

在这里， K 反映了沥青混合料第二阶段剪切变形曲线的斜率， B 为剪切变形曲线的截距。 K 越小，说明第二阶段随着重复剪切次数的增加，永久剪切应变越趋于稳定，沥青混合料有较好的抗剪切能力； B 越小，稳定剪切变形阶段出现得越早，初始剪切应变则越小，则最后的永久剪切应变越小，沥青混合料抗剪切能力越好，高温稳定性好。

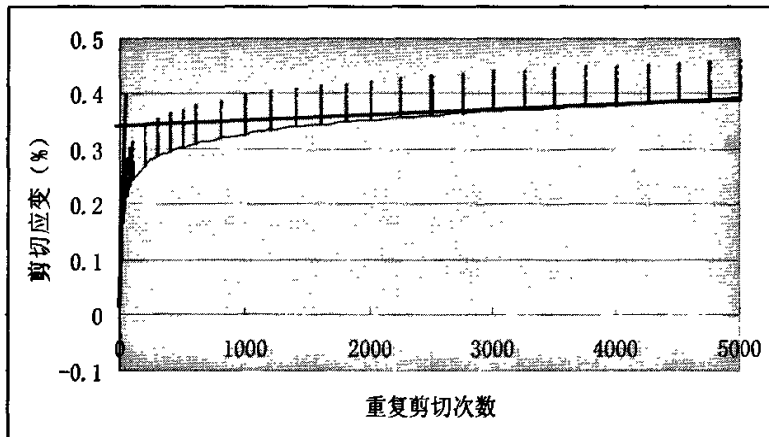


图 4.22 典型的重复剪切次数与永久剪切应变的关系图

从上面图可以看出，变形发展的第一阶段时间较短，速度较快。这一阶段的变形主要是沥青混合料粗颗粒位置重新调整，其速率用 K_1 表示。 K_1 越大说明这种混合料粗颗粒间位置重新调整越多；第二阶段，主要是沥青混合料稳定阶段的塑性流动变形，变形的速度减少。 K_2 越大说明混合料抗剪切能力差；转折点 A 所对应的剪切次数 (N) 反映了第一阶段的长短，即沥青混合料粗颗粒被调整的时间，还能反映剪切应变趋于稳定阶段的开始位置。

RSCH 试验得到的指标 K_1 、 K_2 、 N 和 γ 分别反映了重复剪切试验开始、进行、

结束三个阶段沥青混合料的高温抗剪切能力，指标之间相互联系，可较好地评价沥青混合料高温永久剪切变形的全过程。

表 4.11 恒高度重复剪切试验结果

纤维类型	最佳油石比	曲线两端的切线方程	K ₁ (mm/次)	K ₂ (mm/次)	N (次)	γ (%)
木质纤维	5.9	Y=7.34E-05X+0.508	7.34E-05	9.82E-07	273	1.74
		Y=9.82E-07X+1.51				
聚丙烯腈	5.8	Y=1.01E-04X+0.383	1.01E-04	9.43E-07	245	1.07
		Y=9.43E-07X+1.39				
矿物纤维	5.8	Y=1.93E-04X+0.374	1.93E-04	8.56E-07	199	0.99
		Y=8.56E-07X+1.45				

表 4.11 中的 SMA-10（矿物纤维）的 K₂ 和 γ 最小，SMA-10（聚丙烯腈）次之，SMA-10（木质纤维）最大，说明 SMA-10（矿物纤维）高温抗剪切能力最好。

4.2.5 不同纤维对 SMA-10 高温性能影响分析及比较

各试验结果汇总如表 4.12。

表 4.12 各试验结果汇总

纤维 类型	马歇尔试验 (60℃)		动稳 定度 (60℃, 次/mm)	静态蠕变 试验	动态蠕变试验		重复剪切试验 (RSCH)	
	稳定度 (KN)	流值 (mm)		劲度模量 (60℃, MPa)	瞬时 弹性 (MPa)	延迟 弹性 (MPa)	60℃	
							Y (%)	k ₂ (10 ⁻⁷)
木质纤维	7.256	2.619	3500	44.89	5.99	7.11	1.74	9.82
聚丙烯腈	6.972	3.557	4200	45.68	6.55	9.07	1.07	9.43
矿物纤维	6.58	3.247	5250	46.06	6.74	21.61	0.99	8.56

从表 4.12 可以看出，车辙动稳定度与马歇尔稳定度均满足规范要求，但很明显车辙动稳定度、马歇尔稳定度及流值和沥青混合料性能试验结果排序是不一致的。因此马歇尔稳定度只能在沥青混合料配合比设计中选择最佳沥青用量时使用，不能作为沥青混合料高温性能的指标。静态蠕变试验虽然可以得出不同纤维 SMA-10 的劲度模量，但是之间的差别并不明显，而且与其它实验比较，没有较好的相关性。而动态蠕变试验与车辙试验及恒高度重复剪切试验间有较好的相关性，动态蠕变试验的延迟弹性部分较好的体现了不同纤维 SMA-10 之间高温性能的差别，车辙的动稳定度也明显地反应了不同纤维对 SMA 高温性能的影响，恒高度重复剪切试验结果的评价指标体现了不同纤维混合料之间的区别。对于不同纤维混合料来说车辙试验的动稳定度和动态蠕变试验的粘弹性常数及恒高度重复剪切实验的 γ 和 k₂ 值都可以用来评价不同纤维对 SMA-10 高温性能的影响。

4.3 不同纤维 SMA-10 的疲劳性能试验

4.3.1 疲劳试验方法的选择与评价

疲劳试验方法的选择与评价主要是通过比较目前室内较为流行的包括间接拉伸、梯形悬臂梁和四点弯曲在内的疲劳试验方法，目的是为本项目的研究选择一种合理可行的沥青混合料疲劳试验方法^[43]。

自前实验室内沥青混合料的小型疲劳试验（也称试件疲劳试验）方法众多，包括有旋转法、扭转法、简支主点或四点弯曲法、悬臂梁弯曲法、弹性基础梁弯曲法、直接拉伸法、间接拉伸法、三轴压力法、拉一压法和剪切法等。而在全球范围内开展较为普遍的试验方法主要是间接拉伸法（即劈裂疲劳试验）、梯形悬臂梁弯曲法和四点弯曲法。

美国 SHRP 研究计划对上述三种试验方式进行过详细的评价，SHRP 研究计划主要对上述三种试验方式进行了影响因素敏感性、试验可靠性及合理性三个方面的评价与分析。影响因素敏感性分析主要用于评价试验方法对沥青混合料各影响因素变化的敏感程度，即反映各试验方法区分试验参数变化的能力。在 SHRP 研究计划中，考虑的疲劳试验影响因素包括沥青种类、沥青含量、集料类型、空隙率、温度和应力水平。从劲度模量和疲劳寿命变化百分比来看，四点弯曲疲劳试验与间接拉伸疲劳试验对沥青类型变化的敏感程度大致相当。对于其他影响因素，总体上四点弯曲疲劳的敏感程度最好，其后依次为梯形悬臂梁弯曲疲劳和间接拉伸疲劳。在 SHRP 研究计划中，主要通过比较不同温度下的平均劲度模量和平均疲劳寿命值进行各试验方法的合理性评价，具体评价结果列于下表 4.13。

表 4.13 不同试验方法平均劲度模量和疲劳寿命水平

评价指标		四点弯曲	梯形悬臂梁弯曲	间接拉伸
平均劲度模量（psi）	0℃	2454700	1978100	3712400
	20℃	425100	1063100	1211300
平均疲劳寿命	0℃	5834000	488800	214900
	20℃	34500	245600	108100

上述试验结果表明，间接拉伸疲劳与四点弯曲疲劳的试验结果相差非常大。通过间接拉伸方式获得的平均劲度模量要比四点弯曲高出 60~70%，而四点弯曲疲劳试验获得的平均疲劳寿命却是间接拉伸疲劳的 27 倍。造成这一现象的主要原因可能是间接拉伸疲劳试验过程中，在试件受力两端产生了明显的永久变形，从而显著地缩短了沥青混合料的疲劳寿命。而梯形悬臂梁疲劳试验所得的劲度模量和疲劳寿命似乎均对温度不太敏感，这有可能是梯形悬臂梁疲劳加载速度过快所引起的，而 SHRP A-003A 研究计划的早期调查表明沥青混合料实际的温度敏感性比梯形悬臂梁疲劳试验结果高。在经过综合分析评价之后，SHRP A-003A 研

究项目最终选定了四点弯曲疲劳试验作为其沥青混合料疲劳性能研究的标准试验；同时制订了四点弯曲疲劳试验标准草案（即 SHRP M-009 标准）^{[44][45]}。

综合考虑上述各试验方法的优缺点以及试验方法的比较结果，从满足科学研究要求的角度出发，兼顾实际操作及应用的可行性在本研究项目中，本文采用四点弯曲疲劳试验方式作为沥青混合料疲劳性能研究的标准疲劳试验方式。

4.3.2 四点弯曲疲劳试验方法介绍

长沙理工大学四点弯曲疲劳试验设备由英国的沥青混合料试验设备生产商 Copper Research Technology Limited 生产。



图 4.23 沥青混合料试验系统

本研究所采用的四点弯曲疲劳试验夹具整体结构如下图 4.24 所示。

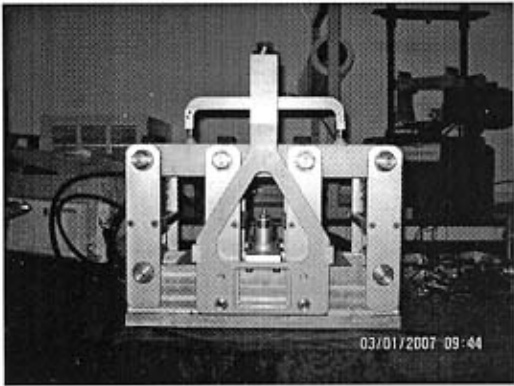


图 4.24 四点弯曲疲劳试验夹具

其液压伺服加载装置为整个疲劳试验系统提供动力荷载，可根据要求输出不同频率、不同振幅以及不同形状的动力波形。力传感器能够准确测定所施加的荷载大小，测量精度为 1N，最大测量荷载为 25kN，在疲劳试验过程中，可对试件所受到的荷载进行实时动态的监控。夹具接头用于连接加载系统与疲劳试件夹具，

起到传递动态荷载的作用。

位移传感器用于监测试件的变形量，测量精度达到 0.001mm。在应变控制疲劳试验模式中，位移传感器实时监控试件的变形量，并将位移信号反馈至控制系统，并由控制系统调整加载系统工作状态，以达到在每个荷载循环中准确控制试件应变量的目的。

试件夹头用于夹持试件，中间的两个夹头通过夹具接头与加载系统相连，并在疲劳试验时，将动态荷载传递至试件，使试件发生期望变形。

4.3.3 疲劳试件的制备

试件的制作可以说是沥青混合料性能评价过程中的最为关键的环节之一，试件制作质量的好坏将直接影响到整个试验结果的准确性，特别对于用于疲劳试验的试件而言，则更应重视试件制作的质量。而制备四点弯曲疲劳试件的主要步骤则包括混合料拌和、碾压和试件切割三个过程。本研究所采用的集料均经过水洗筛分，在烘箱中以 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘干至恒重，并按照试验要求的级配严格进行配料，所有配制好的矿料在烘箱中预热至高于拌和温度约 15°C ，在拌和机内的拌和时间约为 240 秒。

由于轮碾成型方式被认为是模拟实际路面状况的最佳的成型方法，因而，本研究用的所有疲劳试件均采用轮碾成型设备进行碾压成型。碾压成型的试板尺寸为 $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。

碾压成型后的试板，置于高精度金刚石双面锯内，采用双面同步切割技术，切割成 $400\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的标准四点弯曲小梁试件。

4.3.4 四点弯曲疲劳试验步骤

1、四点弯曲疲劳试验步骤具体如下：

(1)试件养护

用于本研究的所有沥青混合料小梁试件均在环境温控箱内在试验温度下养护 4 小时以上，以确保试件在进行疲劳试验之前达到试验温度。所采用的环境温控箱为气冷式，通过垂直方向循环输入一定温度的气流以达到控制温度的目的，控温精度为 1°C ，控温范围为 $-20^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 。

(2)设定试验参数

在控制软件中输入试验参数，试验参数包括：试验模式（应变控制方式或应力控制方式）、试验波形（正弦波或偏正弦波）、试件尺寸、试验温度、试验破坏准则（应变控制模式下可输入的百分比来控制），取初始劲度模量 50% 为破坏临界点）、试验荷载水平（应力或应变水平）、试验频率（ $5 \sim 30\text{Hz}$ ）。

(3)试件安装

将养护好的试件送入四点弯曲疲劳夹具内，通过定位板确定各夹头间距，夹

紧夹头，并将位移传感器放置在试件上表面。

(4)进行疲劳试验当完成试验参数设定后，通过计算机控制启动疲劳试验，读取第 100 个加载循环时劲度模量作为试件的初始劲度模量。试验过程当中，计算机控制系统自动控制加载，读取力传感器和位移传感器数值，在屏幕上实时显示各参数的变化情况，并按一定加载间隔自动记录试验数据。所记录试验数据包括：加载次数、应力值、劲度模量、模量百分比、滞后角、耗散能等。当所测得的劲度模量下降至初始劲度模量的 50% 时，试验自动停止。

2、试验参数计算方法

四点弯曲疲劳试验结果的计算方法如下：

(1)最大拉应力 (KPa)

$$\sigma_t = \frac{LP}{wh^2} \times 10^6 \quad (4.24)$$

其中：L—弯曲梁试件跨径 (mm)；

P—峰值荷载 (KN)；

W—弯曲梁试件宽度 (mm)；

h—弯曲梁试件高度 (mm)。

(2)最大拉应变 (mm)

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (4.25)$$

其中：δ—弯曲梁试件中心点最大变形 (mm)；

$$a = L/3$$

(3)弯拉劲度模量 (MPa)

$$S_{\min} = \frac{1000\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (4.26)$$

(4)滞后角 (度)

$$\phi = 360 fs \quad (4.27)$$

其中：f—加载频率 (Hz)；

s—应变峰值滞后于应力峰值的时间 (秒)

(5)单位荷载循环内的耗散能 (KPa)

$$D = \pi \sigma_t \varepsilon_t \sin(\phi) \quad (4.28)$$

(6)累积耗散能 (KPa)

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (4.29)$$

其中：D—第 i 次加载循环的耗散能

4.3.5 外部因素（试验条件）的选择与评价

1、应变水平因素的选择与确定

对于控制应变的沥青混合料四点弯曲疲劳试验，应变水平的大小直接反映了试件发生弯曲变形的程度。而对于实际路面而言，路面的变形程度反映了车轮荷载作用力的大小，路面受车载作用的变形程度的大小直接影响到实际路面的疲劳寿命。实验室内疲劳试验应变水平在一定程度上代表了实际路面所承受的车辆荷载作用大小程度。在沥青混合料疲劳试验过程中，应变水平的大小应控制在一个合理的范围内。应变水平过大则会导致疲劳寿命过短，与实际路面的疲劳破坏行为不相符；而应变水平过小，则会使得试验周期过长甚至出现无法达到疲劳破坏点的现象（即试件在小应变水平下，劲度模量无法衰减至初始劲度模量的 50 %）。室内疲劳试验结果与实际路面的疲劳寿命（即发生疲劳破坏时刻的累计当量轴载作用次数）之间由于荷载间歇时间、裂缝扩展速率、轮迹横向分布等因素的影响存在一个修正关系，美国地沥青协会的疲劳方程中采用了 18.4 倍的修正系数，而英国诺丁汉大学的研究则认为沥青路面达到临界状态时用的修正系数应为 77。本文选取 200、300、400 微应变作为疲劳控制应变^[43]。

2、试验温度水平的选择与确定

环境温度的变化对于实际沥青路面而言，主要表现在沥青层模量以及裂缝扩展速率的变化。对于应变控制方式进行的沥青混合料疲劳试验，发生疲劳破坏的判断依据与沥青混合料的劲度模量相关（即假定疲劳破坏时刻沥青混合料的劲度模量为初始劲度模量的 50%）；而温度差异引起的沥青层模量变化又会直接影响到沥青层在车辆荷载作用下发生的应变值，从而影响到沥青路面的疲劳寿命。因而有必要在实验室内通过调整试验温度水平进行沥青混合料疲劳性能的研究。沥青路面的疲劳破坏主要发生在路面的中间范围温度，这是目前世界各国的道路研究人员普遍认同的观点。早在 1993 年，哈尔滨建筑大学就在交通部科研项目“沥青路面设计指标与参数的研究”中，根据国内各地区的气温资料，最终计算得出了我国沥青混合料疲劳当量温度为 15℃。因此本实验取 15℃作为实验温度。

3、加载波形和试验频率水平的选择与确定

德国学者 G.Leykauf 和 W.J.Kawohl 唯其相关研究中指出，荷载波形的变化（如正弦波、矩形波、三角形波或半正弦波）对沥青混合料的疲劳寿命没有太大的影响。同时，国内外有大量的试验研究证明，移动的车轮荷载对路面产生接近于正弦曲线的应力应变效应。因而，本论文直接选用无间歇时间的偏正弦波作为标准加载波形。

在无间歇时间的加载方式下，试验频率的变化直接表现为荷载在沥青混合料试件上的作用时间的变化。对于实际路面而言，加载时间与行车速度有直接的关

系，国外有不少学者研究过加载时间与车速的关系。通常研究认为试验频率在 10Hz（即加载时间为 0.016s）时，对应于沥青混合料路面表面大致相当于 60～65km/h 的行车速度，对基层表面而言则行车速度还应略有增加，增加幅度随沥青面层厚度增加而增加。因此，本论文选取 10Hz 作为试验频率^{[46][47]}。

4.3.6 不同纤维 SMA-10 试验结果分析

不同纤维 SMA-10 试验结果包括：初始劲度模量值、疲劳寿命（取劲度模量衰减至初始劲度模量的 50% 的荷载循环次数）和滞后角。结果见下表 4.14。

表 4.14 不同纤维 SMA-10 试验结果

纤维种类	应变水平	初始劲度模量 (MPa)	疲劳寿命 (万次)	滞后角 (度)
木质纤维	200	7716	33.70	12.88
	300	7514	4.57	14.23
	400	7257	1.31	14.72
聚丙烯腈	200	7139	63.34	11.47
	300	6779	18.26	14.16
	400	6784	3.50	14.88
矿物纤维	200	6975	57.83	12.3
	300	7082	8.33	13.39
	400	6986	2.28	13.06

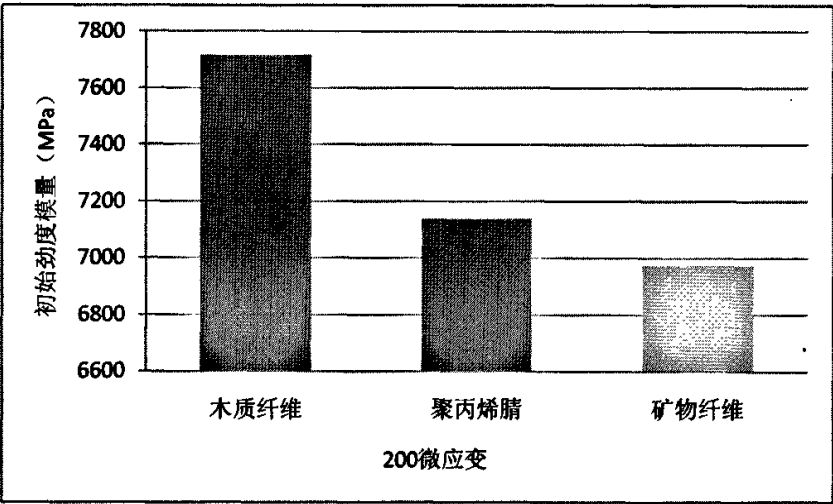


图 4.25 200 微应变水平下初始劲度模量对比

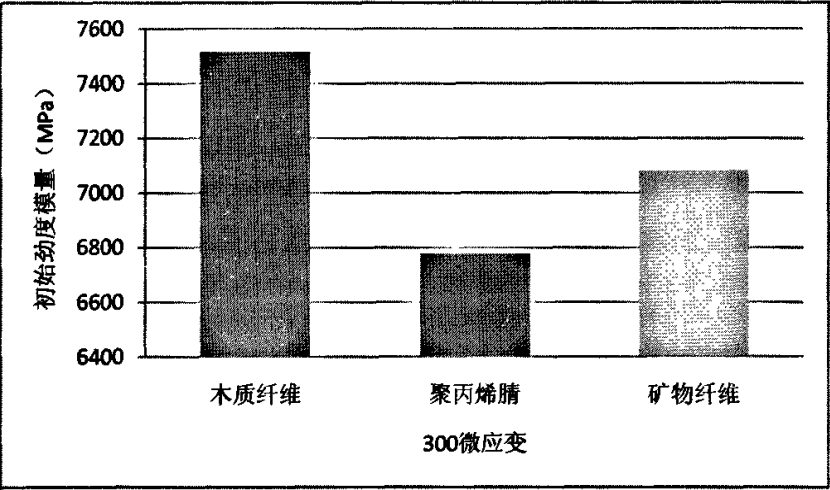


图 4.26 300 微应变水平下初始劲度模量对比

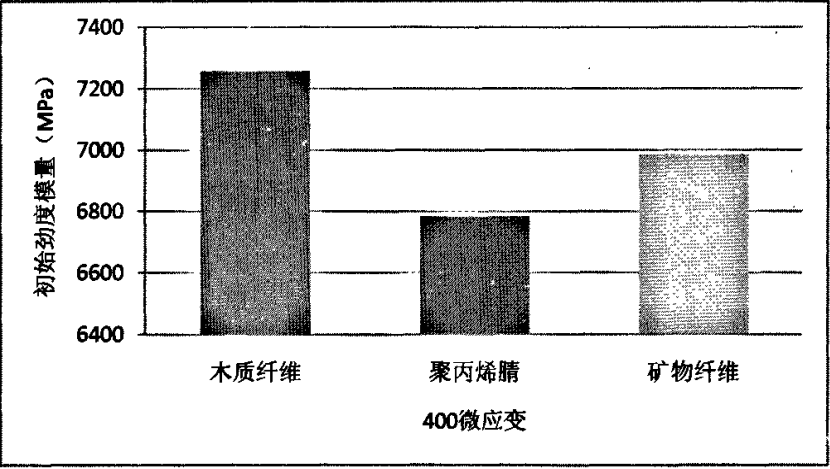


图 4.27 400 微应变水平下初始劲度模量对比

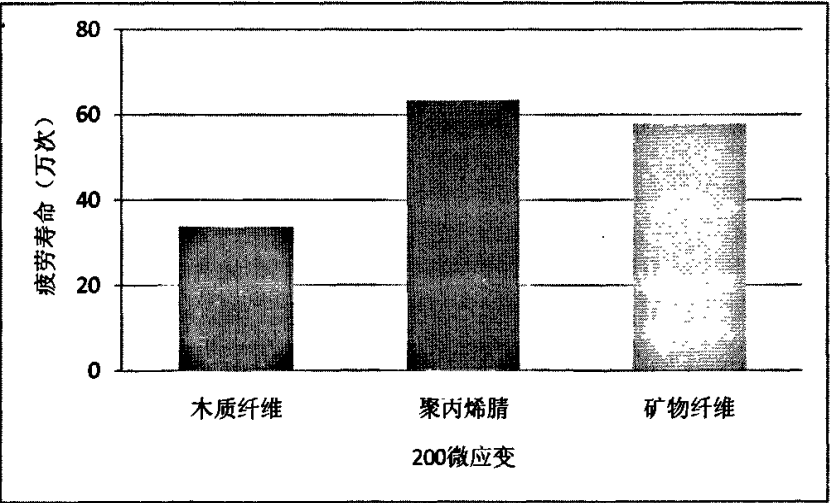


图 4.28 200 微应变水平下疲劳寿命对比

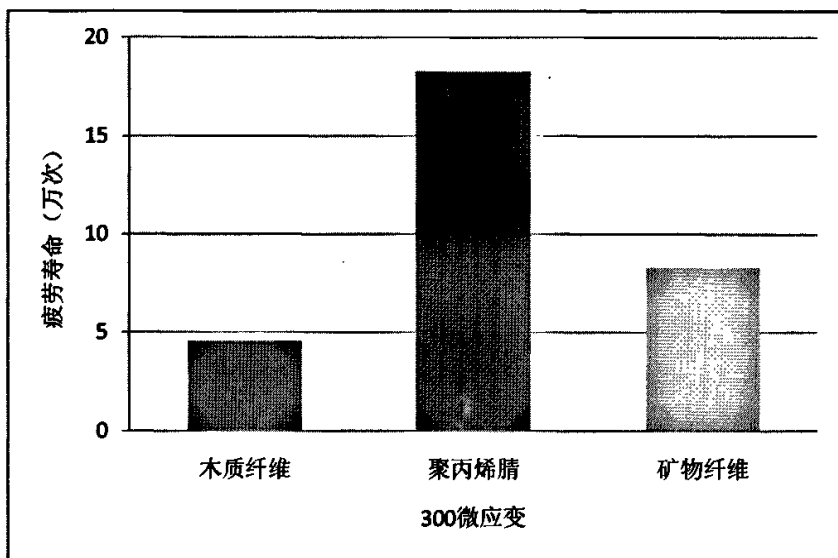


图 4.29 300 微应变水平下疲劳寿命对比

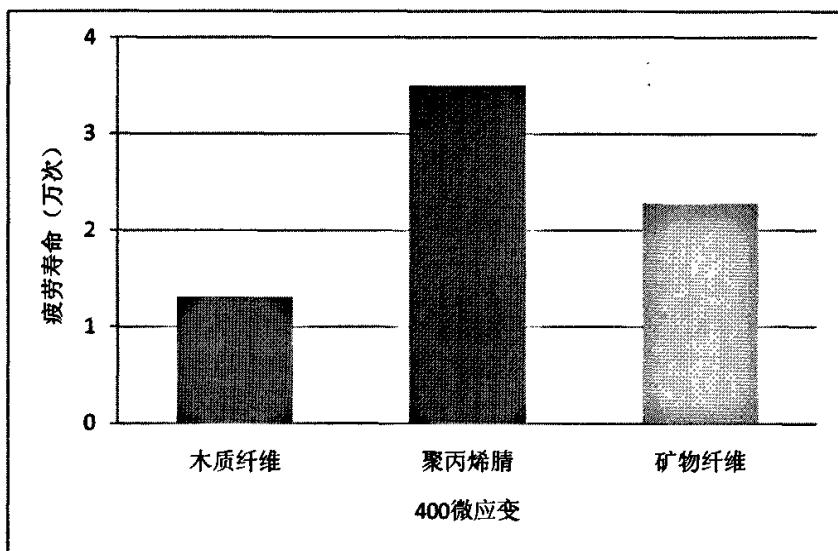


图 4.30 400 微应变水平下疲劳寿命对比

沥青混合料的动态弯拉劲度模量大小在很大程度上反映了行车过程中沥青路面抵抗变形和承受荷载的能力。从表 4-14 和图 4-25~4-30 可以看出，随着应变水平的增加，沥青混合料的初始劲度模量和疲劳寿命迅速降低。在三种应变水平下 SMA-10 (木质纤维) 的初始劲度模量都要大于 SMA-10 (矿物纤维) 和 SMA-10 (聚丙烯腈)。从疲劳寿命上来看，聚丙烯腈明显有助于沥青混合料疲劳寿命的增加。虽然木质纤维沥青混合料的初始劲度模量要大，但是其疲劳寿命相对较差。滞后角是反映沥青混合料材料的粘弹比大小的指标，滞后角越大，混合料越倾向于粘性，反之则越倾向于弹性。从三种纤维 SMA-10 的滞后角来，三种纤维 SMA-10 的粘弹性能差别不大。

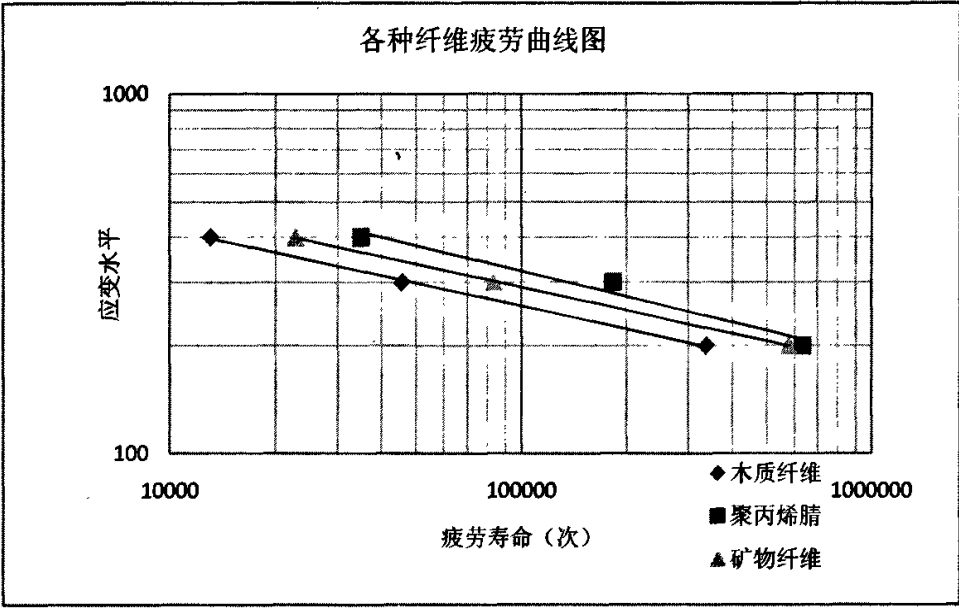


图 4.31 不同纤维 SMA-10 疲劳曲线图

表 4.15 不同纤维 SMA-10 疲劳寿命回归结果

纤维种类	疲劳方程	相关系数 R^2
木质纤维	$y=3.36 \times 10^{10} x^{-4.76}$	$R^2=0.988$
聚丙烯腈	$y=2.05 \times 10^{10} x^{-4.38}$	$R^2=0.968$
矿物纤维	$y=2.93 \times 10^{10} x^{-4.76}$	$R^2=0.989$

注：y=疲劳寿命（次）；x=应变水平（微应变）

表 4.15 可以看出，疲劳寿命的回归方程表现为下面的形式：

$$N_f = A\varepsilon^B \tag{4.30}$$

式中： N_f —疲劳寿命（次）；

ε —应变水平（微应变）。

在双对数坐标轴上，A 越大，疲劳寿命曲线越靠上，同样应变水平下，疲劳寿命越大；B 越大疲劳寿命曲线的斜率越大，同样应变水平下，疲劳寿命越小。从图 4-31 可以看出，疲劳寿命和应变水平表现出较好的相关性，回归曲线的走向大致相同，SMA-10（聚丙烯腈）的疲劳寿命优于 SMA-10（矿物纤维）和 SMA-10（木质纤维）。

4.4 本章小结

本章对不同纤维 SMA-10 的水稳定性、高温稳定性和疲劳性能进行了试验研究。得到以下几点：

(1)从残留稳定度来看，不同纤维对混合料的抗水损害能力影响并不大，木质

纤维抗水损害能力略好，这与木质纤维的添加使沥青用量增多有关。对冻融劈裂试验来说矿物纤维 SMA-10 的冻稳定性较好。

(2)对车辙试验的 45~60min 的位移进行回归分析，减少由于位移突变带来的动稳定的误差。从动稳定度数据上来看。SMA-10（矿物纤维）的高温性能最好。

(3)通过静态蠕变得出不同纤维 SMA-10 在 60℃时蠕变加载曲线回归方程的一般形式： $y = At^B$ 。并且通过蠕变试验结果计算不同纤维 SMA-10 加载及卸载后的劲度模量。从劲度模量上看，不同纤维 SMA-10 的高温性能差不多。虽然静态蠕变试验可以得出劲度模量等参数，但是不能有效地反映不同纤维 SMA-10 高温性能的差异。

(4)通过动态蠕变试验得到的粘弹性常数可以有效地评价不同纤维 SMA-10 的高温性能，并且可以用来进行车辙预估。

(5)通过恒高度重复剪切试验得到的指标 K_2 、 N 和 γ 比较了三种纤维 SMA-10 的高温抗剪切能力，SMA-10（矿物纤维）的高温性能好于另两种纤维。

(6)对不同纤维的高温稳定性的试验进行了对比分析：

纤维 类型	马歇尔试验 (60℃)		动稳 定度 (60℃, 次/mm)	静态蠕变 试验	动态蠕变试验		重复剪切试验 (RSCH)	
	稳定度 (KN)	流值 (mm)		劲度模量 (60℃, MPa)	瞬时 弹性 (MPa)	延迟 弹性 (MPa)	60℃	
							γ (%)	k ₂ (10 ⁻²)
木质纤维	7.256	2.619	3500	44.89	5.99	7.11	1.74	9.82
聚丙烯腈	6.972	3.557	4200	45.68	6.55	9.07	1.07	9.43
矿物纤维	6.58	3.247	5250	46.06	6.74	21.61	0.99	8.56

车辙动稳定度与马歇尔稳定度均满足规范要求，但很明显车辙动稳定度、马歇尔稳定度及流值和沥青混合料性能试验结果排序是不一致的。因此马歇尔稳定度只能在沥青混合料配合比设计中选择最佳沥青用量时使用，不能作为沥青混合料高温性能的指标。静态蠕变试验虽然可以得出不同纤维 SMA-10 的劲度模量，但是之间的差别并不明显，而且与其它实验比较，没有较好的相关性。而动态蠕变试验与车辙试验及恒高度重复剪切试验间有较好的相关性，动态蠕变试验的延迟弹性部分较好的体现了不同纤维 SMA-10 之间高温性能的差别，车辙的动稳定度也明显地反应了不同纤维对 SMA 高温性能的影响，恒高度重复剪切试验结果的评价指标体现了不同纤维混合料之间的区别。对于不同纤维混合料来说车辙试验的动稳定度和动态蠕变试验的粘弹性常数及恒高度重复剪切试验的 γ 和 k_2 值都可以用来评价不同纤维对 SMA-10 高温性能的影响。

(7)通过四点弯曲疲劳试验，得出 SMA-10 的疲劳寿命的回归方程表现为： $N_f = A\epsilon^B$ 。并且从疲劳寿命上看聚丙烯腈更多的增加了 SMA 的疲劳寿命。

第五章 结论及进一步设想

5.1 主要结论

本文通过大量的室内试验比较分析了木质纤维、聚丙烯腈纤维和矿物纤维对 SMA-10 性能的影响, 得出以下主要结论:

1、本文通过动态剪切流变仪 (DSR) 和简支梁弯曲蠕变试验 (BBR) 研究了纤维种类对沥青胶浆的影响。试验表明纤维的加入能够改善沥青胶浆的高温性能, 且纤维种类不同, 改善的效果也不相同。从动态剪切性能来看, 由于木质纤维的内部中空结构吸收了一部分沥青, 使其胶浆的自由沥青含量少于另两种纤维, 所以其车辙因子较大, 同时颗粒状的木质纤维分散十分困难, 使其沥青胶浆中有成团部分, 对实验的结果可能造成一定的影响。同原样沥青相比较, 不同纤维的其高温稳定性能均有明显的改善, 但是温度敏感性增大。随着温度的升高, 纤维对沥青的吸附作用减弱, 纤维胶浆中的自由沥青增多, 纤维种类对沥青高温性能的影响逐渐降低。从蠕变劲度 S 来看, 纤维的加入并没有改善沥青的蠕变劲度, 随着温度的降低, 木质纤维胶浆的蠕变劲度迅速增大, 柔性降低。从蠕变斜率 m 来看, 纤维也降低了沥青胶浆的低温松弛性能。木质纤维胶浆与其它两种纤维胶浆来说低温性能较差。

2、从残留稳定度来看, 不同纤维对混合料的抗水损害能力影响并不大, 木质纤维抗水损害能力略好, 这与木质纤维的添加使沥青用量增多有关。对冻融劈裂试验来说矿物纤维 SMA-10 的冻稳定性较好。

3、对车辙试验的 45~60min 的位移进行回归分析, 减少由于位移突变带来的动稳定的误差。从动稳定度数据上来看, SMA-10 (矿物纤维) 的高温性能最好。

4、通过静态蠕变得出不同纤维 SMA-10 在 60℃ 时蠕变加载曲线回归方程的一般形式: $y = At^B$ 。并且通过蠕变试验结果计算不同纤维 SMA-10 加载及卸载后的劲度模量。从劲度模量上看, 不同纤维 SMA-10 的高温性能差不多。虽然静态蠕变试验可以得出劲度模量等参数, 但是不能有效地反映不同纤维 SMA-10 高温性能的差异。

5、通过动态蠕变试验得到的粘弹性常数可以有效地评价不同纤维 SMA-10 的高温性能, 并且可以用来进行车辙预估。

6、通过恒高度重复剪切试验得到的指标 K_2 、 N 和 γ 比较了三种纤维 SMA-10 的高温抗剪切能力, SMA-10 (矿物纤维) 的高温性能好于另两种纤维。

7、对不同纤维的高温稳定性的试验进行了对比分析:

不同纤维 SMA-10 高温稳定性试验

表 5.1

试验方法		木质纤维	聚丙烯腈	矿物纤维
DSR (64℃)	$G^*/\sin \delta$ (MPa)	17.0	15.0	10.6
	δ (度)	60.7	60.5	60.2
马歇尔试验 (60℃)	稳定度 (KN)	7.256	6.972	6.580
	流值 (mm)	2.619	3.557	3.247
车辙试验 (60℃)	动稳定度 (次/mm)	3500	4200	5250
静态蠕变试验 (60℃)	劲度模量 (加载 3600s, MPa)	44.89	45.68	46.06
	劲度模量 (卸载 3600s, MPa)	50.72	54.23	48.58
动态蠕变试验 (60℃)	瞬时弹性 (E_t , MPa)	5.99	6.55	6.74
	粘性系数 (λ_1 , Pa·s)	1.86×10^4	1.90×10^4	2.03×10^4
	延迟弹性 (E_2 , MPa)	7.11	9.07	21.61
	粘性系数 (λ_2 , Pa·s)	7.75×10^8	1.34×10^8	3.20×10^8
重复剪切试验 (60℃)	γ (%)	1.74	1.07	0.99
	k_2 (10^{-7})	9.82	9.43	8.56

从表 5.1 可以看出, DSR 的试验结果与混合料的其它高温性能试验的相关性较差。虽然 DSR 试验体现了纤维的加入对沥青粘弹性性质的影响,但是由于不同纤维在沥青中分散的难易及纤维的结构不同使结果有一定的误差,得到的车辙因子不能反映纤维胶浆对混合料性能的影响,并且可以认为纤维对混合料性能的影响不仅仅通过沥青来反映。

动态蠕变试验与车辙试验及恒高度重复剪切试验间有较好的相关性,动态蠕变试验的延迟弹性部分较好的体现了不同纤维 SMA-10 之间高温性能的差别,车辙的动稳定度也明显地反应了不同纤维对 SMA 高温性能的影响,恒高度重复剪切试验结果的评价指标体现了不同纤维混合料之间的区别。对于不同纤维混合料来说车辙试验的动稳定度和动态蠕变试验的粘弹性常数及恒高度重复剪切实验的 γ 和 k_2 值都可以用来评价不同纤维对 SMA-10 高温性能的影响。

8、通过四点弯曲疲劳试验,得出 SMA-10 的疲劳寿命的回归方程表现为下面的形式:

$$N_f = A\varepsilon^B$$

并且从疲劳寿命上看聚丙烯腈更多的增加了 SMA 的疲劳寿命。

9、从三种纤维的抗水损害、高温性能和疲劳性能的试验可以看出,矿物纤维具有较好的高温性能,聚丙烯腈纤维的抗疲劳性能较好。

5.2 进一步研究设想

由于受时间、人力和物力等限制,本论文对不同纤维的 SMA-10 性能影响的试验的研究只作初步探讨,通过纤维胶浆和 SMA 的水稳定性、高温稳定性及疲

劳试验评价了不同纤维对 SMA-10 性能的影响，但是试验数量偏少试验结果分析不足，今后还应从以下几方面作深入研究：

- 1、研究不同纤维、沥青及粉胶比三者之间的关系。
- 2、研究不同级配下不同纤维对沥青混合料性能的影响。
- 3、研究不同级配、不同温度下的动态蠕变试验，以建立粘弹性的力学模型，用以路面车辙的预估。
- 4、对影响沥青混合料的疲劳寿命的其它因素进行研究，以建立相应的疲劳寿命的模型。
- 5、对使用不同纤维沥青路面跟踪调查，观察其耐久性能和裂缝，评价不同纤维的实际使用效果。

参考文献

- [1] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防. 北京: 人民交通出版社, 2001.4, 3-6
- [2] 陈华鑫. 纤维沥青混凝土路面研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2002.2, 17-32
- [3] 朱朝辉. 外掺纤维沥青混合料的路用性能研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2004.6, 3-5
- [4] 丁智勇. 纤维沥青混合料应用研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2004.4, 26-29
- [5] 沈金安, 李福普. SMA 路面设计与铺筑. 北京: 人民交通出版社, 2003.10, 31-38
- [6] 张万磊, 孙雪伟, 唐建亚. SMA 矿物纤维用量比选与评价. 现代交通技术. 2006.04: 8-11
- [7] Reed B Freeman, James L Burati' JR, Polyester fibers in asphalt paving mixtures [J], AAPT, 1996,
- [8] Soroushian, Parviz Enhanced processing of cellulose fiber-reinforced cement composites. Michigan State University, MI USA Inorg.-Bonded Wood Fiber Compose Mater Vol.127No. 17, 1997
- [9] 刘丽. 沥青胶浆技术性能及评价方法研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2004.04, 30-33
- [10] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能. 北京: 人民交通出版社, 2001, 329-330
- [11] 赵可, 卢永贵, 魏如喜. SMA 高温稳定性研究. 中国公路学报, 2004. 02: 1001-7372(2004)02-0011-0, 11-17
- [12] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法. 上海: 同济大学出版社, 2001.01, 36-98
- [13] 姚祖康. 对国外沥青路面设计指标的评述(续). 公路, 2003, 04: 0049-07
- [14] Tayebali, A.A., J.A. Deacon, J.S. Coplantz, J.T. Harvey, and C.L. Monismith. *Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes*. SHRP-A-404, Strategic Highway Research Program, Nation Research Council. 1994
- [15] 交通部重庆公路科学研究所. 沥青混合料和半刚性基层材料疲劳特性的研究. 重庆: 交通部重庆公路科学研究所, 1990
- [16] 希朋赛. 沥青玛蹄脂碎石研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2004.6: 15-28
- [17] 李文胜. 关于 SMA-10 设计级配问题的研究. 公路与汽运, 2003.06:

1671-2668(2003)06-0045-0, 45-48

- [18] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范 (JTG F40-2004). 北京: 人民交通出版社, 2004
- [19] 李德超. SMA 混合料配合比设计方法研究. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2003.4, 20-45
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路工程集料试验规程 (JTG E42-2005). 北京: 人民交通出版社, 2005
- [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 (JTJ 052-2000). 北京: 人民交通出版社, 2005
- [22] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹性力学原理及应用. 人民交通出版社. 2006.04, 143-147
- [23] 赵丽华, 孔永健, 尚彦宇. 纤维对沥青结合料性能改善的研究和分析. 城市道桥与防洪. 2005.06: 1009-7716(2005)06-0153-0, 153-156
- [24] 张争奇, 李平, 王秉纲. 纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响. 长安大学学报 (自然科学版). 2005.05: 1671-8879(2005)05-0015-0, 15-18
- [25] 智家明, 蔡军, 黄绍龙, 陈蔚, 王兵. 德兰尼特 AS 纤维沥青胶浆性能的 DSR 方法评价. 国外建材科技. 2005.03: 12-14
- [26] Method for determining the rheological properties of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). AASHTO Provisional Standards TP5-98
- [27] E. Brown Prithvi S. Kandhal. Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCTA Report November, 2001
- [28] 谢宜宏. 纤维对沥青玛蹄脂性能的影响分析. 湖南交通科技. 2005.02: 1008-844X(2005)02-0013-0, 13-16
- [29] 封基良. 沥青 BBR 小梁试验的流变分析. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). 2006.02: 205-208
- [30] Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel. ASTM INTERNATIONAL. 2004
- [31] Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). ASTM INTERNATIONAL. 2004
- [32] 李静. 沥青混合料温度稳定性与路面设计. [长安大学硕士论文]. 西安: 长安大学, 2001.06, 35-45
- [33] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数. 北京: 人民交通出版社. 2002.1, 42-47
- [34] Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test EUROPEAN STANDARD Ref. No. prEN 12697-25:2002 E

- [35] 黎霞, 田小革. 用动蠕变试验确定沥青混凝土动态粘弹性参数. 国外公路. 2002.02: 1003-6512(2000)01-0046-0, 46-48
- [36] 石宁, 陈佩茹, 周富杰. 沥青混合料永久变形特性简单性能试验的初步验证. 公路. 2003.06: 0451-0712(2003)06-0132-04, 132-135
- [37] Witczak M W, et al. Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C. 2002
- [38] Zhou Fujie Tom Scullion and Sun Lijun. A Three-Stage Model for Characterizing the Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixtures. Tentatively Accepted for Publication in Journal of Transportation Engineering, 2002
- [39] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用. 北京: 人民交通出版社. 2006.04, 127-129
- [40] Jorge B.Sousa. Mansour Solaimanian and Shmuel L. Weissman. Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height) [R]. An Optional Superpave Mix Design Tool, SHRP-A-698, 1982, 1 (1): 696-774
- [41] 欧阳岚. 沥青混合料剪切性能试验研究. [长沙理工大学硕士论文]. 长沙: 长沙理工大学. 2006.04, 20-30
- [42] AASHTO 2000. AASHTO Designation TP7-94, Standard test for determining the permanent shear strain and stiffness of asphalt mixtures using the Superpave Shear Tester (SST), 2002, 1-11
- [43] 虞将苗. 沥青混合料疲劳性能研究. [华南理工大学博士论文]. 广州: 华南理工大学. 2002, 9-13
- [44] Tayebali, A.A., J.A. Deacon, J.S. Coplantz, J.T. Harvey, and C.L. Monismith. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, SHRP-A-404, Strategic Highway Research Program, National Research Council. 1994, 37-46
- [45] SHRP Designation M-009. Determining the Fatigue Life of Compacted Bituminous Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. SHRP-A-003A, Strategic Highway Research Program, National Research Council. 1994, 28-51
- [46] G M Rowe, M G Bouldin. Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures. 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, 2000.
- [47] 张志祥, 陈荣生, 白琦峰. LSM 沥青混合料疲劳极限的试验研究. 公路交通科技. 2006.04: 1002-0268 (2006) 04-0019-0, 19-22

致 谢

本文是在导师邵腊庚教授的精心指导下完成的。从师数载,导师渊博的学识、严谨的治学态度、诲人不倦的学者风范,给我留下了深刻的印象,将使我受益终生。求学期间,导师不仅在学习上给予我深刻的教诲,为我创造了良好的科研环境和学习条件,同时在生活上也给予悉心的关怀和照顾。导师崇高的人格和为科学、为事业奋斗终生的精神以及乐观的人生态度始终激励着我。在此,谨向导师及其家人致以崇高的敬意和深深的感谢!

研究生学习期间,得到了公路工程学院李宇峙教授、黄云涌副教授、李闯民教授及谢军老师的支持与帮助。在此向上述老师表示衷心的感谢和诚挚的谢意!

三年来,诸多师兄、师姐、师弟、师妹们在生活与学习中给予许多关照与鼓励,使我渡过了愉快的研究生生活,对本文的写作给予了无私的帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

多年求学路上,一直得到亲人的关爱与支持,他们给予的无尽的爱是我前进的动力,并使我学有所成。

由于时间仓促,本人水平有限,文中缺点和错误在所难免,恳请各位批评指正。

王 辉

二〇〇七年三月

附 录 A

一、攻读硕士学位期间参与的科研项目

- 1、填石路基试验检测技术与质量评价方法
- 2、长沙市城市道路薄层 SMA 沥青混合料设计及施工质量监控
- 3、广西高等级公路沥青路面结构设计及路面材料与施工工艺研究
- 4、湖南省高速公路沥青路面车辙病害调查
- 5、赣定高速公路沥青路面缺陷病害处治与沥青路面方案设计

二、攻读硕士学位期间所发表的论文

王辉，邵腊庚. 沥青混合料抗剪性能研究. 华东公路，2007.01：0082-04