

摘要

反射裂缝问题是新建半刚性基层沥青路面的主要病害之一，应用土工合成材料防治沥青路面反射裂缝是一种行之有效的工程措施。聚酯玻纤防裂布是新近发展起来的一种新型土工合成材料，由聚酯纤维和玻璃纤维复合而成，在聚酯纤维土工布的表面经编纵横交错的玻璃纤维束，它融合了聚酯纤维的韧性和玻璃纤维的强度，铺设在道路结构中起到防裂隔水的效果。

本文首先结合聚酯玻纤布的材料构成，重点分析了聚酯玻纤布的主要技术指标，并与两种常用的防裂土工织物（玻纤防裂布、聚酯长丝无纺布）进行比较，总结聚酯玻纤布强度大、延伸率低、与沥青相容性好、耐高温、耐腐蚀的优点。

其次，通过一系列室内试验（斜剪试验、小梁弯曲试验、低温弯曲试验、疲劳试验），分别评价了聚酯玻纤布复合沥青混合料的层间粘结性能、弯曲性能、低温抗裂性能、疲劳性能。认为面层基层之间加入聚酯玻纤布后会降低层间粘结强度，但仍然满足抵抗层间剪应力的要求；加入织物后沥青混凝土小梁的弯拉强度有所下降，但是可以明显提高沥青混合料抵抗变形破坏的能力，混合料级配对于土工织物的加筋效果并无明显的影响；聚酯玻纤布复合沥青混合料在低温下仍能表现出良好的粘弹性能，抵挡更大的变形破坏，且在破坏后仍能承担较大的荷载水平，具有优良的低温抗裂性；聚酯玻纤布在不同的应力水平均能提高沥青混合料的疲劳破坏寿命。

本文还通过分析沥青路面典型病害（包括裂缝病害和水损坏）的产生机理，结合聚酯玻纤布的材料特性，提出聚酯玻纤布的两大作用——防裂和隔水，阐述聚酯玻纤布防治沥青路面病害的原理，并介绍聚酯玻纤布防裂隔水层的设置方法。

最后，结合试验路工程，总结聚酯玻纤布施工技术，并对试验路工程进行了后期检测，为聚酯玻纤布的进一步推广应用总结经验、提供依据。

关键词：聚酯玻纤布 反射裂缝 路用性能 防裂隔水层 施工技术

Abstract

Reflective cracking is one of the major diseases of the semi-rigid asphalt pavement, the application of geosynthetics to prevent reflective cracking is an effective engineering measures. Fiberglass-polyester paving mat is a new type of geosynthetics, which is composite of polyester fibers and glass fiber. It combines the toughness of polyester fiber and the strength of glass fiber, laying in the road structure to prevent cracking.

firstly, combined with material composition, this paper is focusing on the analysis of the major technical indicators of fiberglass-polyester paving mat, and comparing with the two commonly used geotextile for cracking prevention (fiberglass anti-cracking mat, polyester filament non-woven geotextile), and summing up the advantages of high strength, low extension rate, compatibility with asphalt, and high temperature resistance, corrosion resistance.

Secondly, through a series of test (skew shearing test, beam bending test, low temperature beam bending test, beam fatigue test), this paper respectively evaluates the interlayer cohesiveness, bending performance, low temperature bending performance and fatigue performance of fiberglass-polyester paving mat. it is concluded that, interlayer cohesiveness is reduced by adding fiberglass-polyester paving mat, but still meets the requirement of shear resistance between pavement layers; the asphalt concrete beam flexural strength decreases after adding fabric, but the ability to resist deformation and damage of the asphalt concrete is clearly improved, and the mixed aggregate gradation for the Geotextile reinforcing effect has been no obvious impact; fiberglass-polyester paving mat composite asphalt mixture can still display good viscoelastic properties at low temperatures, to resist greater deformation and damage, and endure a greater load levels after destroy, with an excellent low temperature crack resistance; fiberglass-polyester paving mat can improve the fatigue life of asphalt mixture at different stress levels.

This paper also analyzes the generating mechanism of the typical asphalt

pavement diseases (including cracking and water damage), combined with material properties of fiberglass-polyester paving mat, and raises two major roles for fiberglass-polyester paving mat which is anti-cracking and water insulation. This paper also introduces the layer setting of the fiberglass-polyester paving mat in construction projects.

Finally, combined with the test project, the paper sums up construction process for fiberglass-polyester paving mat anti-cracking and water insulation layer, and takes measurement after filling, concludes the experiences and provides the basis for the wider application of fiberglass-polyester paving mat.

Keyword : fiberglass-polyester paving mat, reflective cracking, road performance, anti-crack and water insulation layer, construction process

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

钟明

2009年3月20日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：新洲

2009 年 3 月 20 日

第一章 绪论

1.1 研究背景

沥青混凝土路面的平整性好,行车平稳舒适,噪音低,因此成为我国各级道路建设优先选用的路面结构形式。而半刚性基层具有强度大,稳定性好及刚度大等特点,被广泛用于修建高等级公路沥青路面的基层或底基层。在我国已建成的高速公路中,90%以上是半刚性基层沥青路面,在国道主干线建设中,半刚性基层沥青路面也是主要的路面结构形式。

半刚性基层材料通常是指石灰土、水泥土、石灰粉煤灰土、石灰粉煤灰碎石、水泥结碎石等各类无机结合料稳定材料,这类材料在我国各级各类道路中被广泛用作路面结构的基层、底基层。它具有较高的抗压强度和抗压回弹模量值,并具有一定的抗弯拉强度,因此半刚性基层沥青路面的弯沉较小,且拥有较强的荷载分布能力。另外,由于半刚性基层刚度较大,使得其上的沥青面层弯拉应力相对减少,从而提高了沥青面层抵抗行车荷载引起疲劳破坏的能力。因此,半刚性基层具有很好的力学性能、较好的板体性及整体性,能够满足高等级公路具有“足够的强度、适宜的刚度和耐久性、较小的变形”的技术要求。

但半刚性基层也有其自身的缺点,半刚性材料容易在温度变化及水分散失时产生很大的收缩变形,形成基层的温缩裂缝及干缩裂缝。半刚性基层上铺筑沥青面层后,在路面荷载和温度变化的作用下,基层的收缩裂缝会反射到沥青面层上。我国高等级公路的交通量大,重载多,反射裂缝更为严重,对国内已建成的高速公路使用情况调查表明,不论南方还是北方,反射裂缝通常在通车一、两年后就开始出现,并且是导致高等级公路早期损坏的主要原因。

另外,在各种旧水泥混凝土路面的改建方案中,沥青混凝土加铺层是实际工程中最常用的措施之一。由水泥混凝土路面作为承重基层,加铺沥青面层,不仅能够改善行车的舒适性,也利于路面破坏时的快速修补。但是,由于水泥混凝土路面接裂缝的存在,在温度变化和交通荷载的作用下,沥青加铺层在接裂缝附近不可避免地产生应力集中,当该温度变化和交通荷载综合作用下的结构应力超过沥青混凝土的强度时产生裂纹,随着温度变化和交通荷载的重复作用,裂纹扩展贯通至加铺层顶面或底面,形成反射裂缝。

由此可见无论是新建的半刚性基层沥青路面，还是旧水泥混凝土加铺沥青路面，反射裂缝问题都是影响沥青路面使用性能的重要因素。反射裂缝的存在，不仅破坏了路面结构的整体强度，而且一旦地表水沿反射裂缝向下渗透，易导致沥青面层剥落，基层强度降低，严重影响路面的使用寿命。

我国《公路沥青路面设计规范》规定的设计年限为 15 年，但是现在某些道路在使用了不到十年，甚至更短的时间，就由于破坏严重而不得不进行大修翻修。这种情况大大影响了公路行业的形象，国家投入如此之大，而修出来的道路却是如此的不耐用；更重要的是，由于路面耐久性的不足，增加了公路建设的重复投入，造成资源的浪费，同时路面翻修也会影响到客流货流的运转流通，阻碍地区经济的发展。因此近年来，交通部及公路科研单位也不断加大对沥青路面反射裂缝病害的研究，并提出了一系列的工程措施来防治沥青路面的反射裂缝问题，在实体工程中也取得了一定的成果。

应用土工合成材料是防治路面早期损坏的重要工程措施之一，但是由于土工合成材料品种广泛，工程性质也各不相同，使用效果良莠不齐。近年来发展出一种新型的土工合成材料——“聚酯玻纤布”，是聚酯纤维和玻璃纤维的复合物，由于其优良的性能而受到道路部门的关注，但是我们对于这种新型材料的认识还不成熟，施工经验也不足，因此加强对聚酯玻纤布材料的研究是十分必要的，本文即是在这样的课题背景下开展对聚酯玻纤布隔水防裂性能的研究，希望通过这些研究加深对聚酯玻纤布的认识，总结施工经验，为各地公路部门的应用提供一些参考意见。

1.2 土工合成材料的工程应用状况

土工合成材料是一种新型的建筑材料。它以人工合成的聚合物，如塑料、化纤、合成橡胶等为原料，制成各种类型的产品，置于土体内部、表面或各层土体之间，发挥加强或保护土体的作用。在路面工程应用中，可铺放在路面各结构层的内部和各层之间，起到加筋或者隔离的作用。土工合成材料可以分为土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料等类型，已被广泛应用与土木工程的各个领域。

国外对土工合成材料的应用已有多年的历史，1930 年美国北卡罗来纳州首次使用棉纺织品加固路基土。1958，美国人 R.J.Barrett 在佛罗里达州首次将透水

性合成纤维有纺织物铺设在护岸混凝土块下，作为防冲刷保护层，因而他被称为“土工织物之父”。60年代起，合成纤维土工织物在美国、欧洲和日本被逐渐推广应用。1963年土工织物正式应用于日本国营铁道的土建工程中。这期间所采用的土工织物主要是有纺织物，大部分用于护岸工程中，但是这种有纺织物强度具有很大的方向性，而且价格较高，限制了它的发展。60年代末期欧洲出现非织造型的无纺布，其特点是纤维排列任意性，强度无明显的方向性。无纺布的应用为土工织物的发展带来了新的生命，1968至1970年相继应用于法国和英国的无铺面道路以及德国的护岸工程。20世纪70年代，美国使用聚丙烯（PP）针刺无纺布解决沥青路面开裂问题。整个70年代是土工合成材料从幼年成长为壮年的时代，应用的范围发展到水利、公路、铁路海港、建筑等各个领域。

随着土工合成材料在工程应用领域中的不断拓展，逐渐发展出了一门新型的边缘学科，它以岩土力学为基础，与石油化工及纺织工程紧密联系，并且应用于交通土建工程的各个领域。1977年，在巴黎召开“织物在岩土工程中的应用国际会议”，此次会议后来被看成是第一届国际土工织物会议。后来在1982年、1986年、1990年分别在美国拉斯维加斯、奥地利维也纳、荷兰海牙召开了第二、第三、第四届国际土工织物会议。此外还有很多地区性或专门性的国际会议，这些会议大大促进了土工合成材料的应用和发展。1995年5月，美国联邦公路管理局（FHWA）为了推广和规范土工织物在路面结构和沥青路面加铺层中的应用，专门出版了土工织物设计和施工指南，其中对土工织物的类型和特性进行了详细的介绍，并且专门介绍了土工织物在路面结构和沥青加铺层中的应用，内容涉及土工织物的选型、设计、费用分析到具体的施工步骤。

我国应用土工合成材料的历史比较短暂，合成材料在我国的应用始于60年代中期，主要用于渠道、河流、堤岸的防冲防渗。20世纪80年代开始，从国外引进的许多生产设备和技术资料推动了我国土工织物的生产与应用。1981年，铁路部门采用美国、英国的无纺布，首先用于路基层，以解决路基翻浆冒泥问题。1983年，江苏省引进日本化纤模袋，用于航道护坡工程；河北省采用法国罗纳普朗克公司生产的针刺无纺布，用于水库过滤层。20世纪90年代以来，土工织物由于所具有的功能和特性以及在实际工程中的应用效果，引起全国各行各业的极大兴趣，尤其是在水利水电建设部门应用范围广、应用量大，如三峡水电工程、秦山核电站、京杭大运河等工程。在公路方面随着理论研究的深

入，测试技术、设计水平、施工方法的不断提高，土工织物开始在一些大型工程、重点工程中得以应用，并获得了较好的经济效益和社会效益。

1986年10月在天津召开了“土工织物学术讨论会”和“土工合成材料技术协作网”第一次网员大会，这次会议标志着土工合成材料在我国的应用进入了一个飞速发展的阶段。不同的工程领域也根据应用情况的不同编写了土工合成材料在各自领域的技术规范。在公路方面，交通部1996年颁布了《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》，其中涉及土工合成材料的应用问题，1998年颁布了《公路土工合成材料应用技术规范》和《公路土工合成材料试验规程》，使土工合成材料在公路工程中的应用从逐渐摸索阶段跨入了大面积推广、规范化应用阶段。

聚酯玻纤布是近年发展起来的新型土工合成材料，拥有聚酯纤维的韧性及玻璃纤维的强度，在道路工程中一般设置于沥青面层和基层之间或者沥青加铺层和旧路之间，起到隔水防裂的作用，这一新型产品自上市以来就以其优良的性质吸引了道路建设及养护部门的注意，在国内外一系列工程实践中得以应用，取得了较好的路用效果，表1.1列出了聚酯玻纤布在国内外的部分工程实例：

表 1.1 聚酯玻纤布国内外工程应用情况

时间	工程地点	工程内容	工程效果
2001.08	美国密苏里州，堪萨斯城邦	土工织物与聚酯玻纤布（1500m ² ）罩面（1.95in）对比	整体除少量裂缝以外，聚酯玻纤布路用性能良好
2001.05	美国密苏里州，贝尔顿	土工织物与聚酯玻纤布实施的路面（1000m ² ）对比	至今无明显区别
2002.09	美国伊利诺斯州，芝加哥	土工织物与聚酯玻纤布实施的路面（4000m ² ）对比	在城市道路实施，工作路用性能很好，但土工织物施工较不方便
2003.11	沪宁高速镇江支线改建工程	铺设聚酯玻纤布，加铺沥青罩面	未铺设聚酯玻纤布的路面在三个月和六个月的时候就出现裂缝，而铺设聚酯玻纤布的罩面日前应用效果良好。

第一章 绪论

2005.09	山西省石黄高速公路晋州段养护工程	在间隔 15m 以上的半刚性基层的收缩裂缝采用聚酯玻纤布贴缝处理；对于面层横向反射裂缝则铣刨 5cm 左右的沥青面层，然后铺设聚酯玻纤布和沥青混合料。	未铺聚酯玻纤布的路面在 3 个月和 6 个月的时候就出现裂缝，而铺聚酯玻纤布的罩面应用效果良好。
2005.04	河南省开(封)商(丘)高速公路开封段改扩建	原新、旧路面拼接缝和裂缝采用聚酯玻纤布进行加固	通过聚酯土工布的铺设能有效防止和减缓裂缝的产生，其比改建工程前期采用铺设玻纤格栅防止裂缝的效果更明显
2007	广西南友高速公路养护工程	对病害路段面层进行铣刨，铺设聚酯玻纤布防治反射裂缝，加铺沥青层	经半年行车作用，质量稳定，没有发现新的裂缝病害
2007.8	江苏 205 国道淮阴段水毁抢修工程	在半刚性基层和沥青混合料间加铺聚酯玻纤布,防止反射裂缝产生和水破坏	:通过聚酯玻纤布的铺设能有效防止和减缓裂缝的产生，路况质量得到有效提升，效果较之前铺设玻纤格栅更好

1.3 土工合成材料防治沥青路面病害的研究现状

1.3.1 国外研究现状

20 世纪 80 年代初英国诺丁汉大学布朗教授和加拿大滑铁卢大学汉斯教授，经过三、四年的试验和研究，首次将 10000m² 土工格栅用于已裂缝的水泥混凝土路面的沥青罩面加筋，以控制反射裂缝。

一些研究者（Barksdale 等）表示土工织物在阻止反射裂缝和温度损坏方面效果甚微，但在理想的状态下也有一些成功的例子，减少水渗入路面结构，并与下层产生隔离，从而大大改善路面性能。

美国的几个州和英国在旧水泥混凝土路面加铺沥青罩面层的工程中，采用

土工材料加筋沥青混凝土来增加其抗拉强度,从而防治由于旧水泥板的移动而引起的开裂。Michigan 和 California 州在沥青混凝土罩面层与旧水泥板之间设置了钢筋网。Michigan 州的试验路证明,钢筋网能有效地控制反射裂缝的产生。但这种效果在 California 州以及澳大利亚的试验中并不明显。Florida 州的试验路表明,在一半深度处设置加筋的沥青混凝土罩面层在减少裂缝方面只有部分的成功。英国在 A30 号公路上的试验表明,当罩面层很薄时,加筋土工网格只能延缓反射裂缝的出现的时间,在使用后期基本上没有效果。

在美国已有多条试验路证明,在旧路面板与沥青罩面层之间设置土工织物,对防治反射裂缝是有一定效果的。Virginia 州把 0.9m 宽、非编织的聚丙烯土工织物铺设在旧混凝土板可开裂处,而后加罩 3.2cm 的沥青罩面层。通车八个月后的观测结果是,铺设土工织物的路段上反射裂缝有所减少,但在旧混凝土板传荷能力不足的路段处,土工织物的防反效果并不好。同时研究人员还发现:土工织物的防反效果与接缝的传荷能力有很大的关系;在竖向位移差 $>0.05\text{mm}$ 的接缝上罩面时,反射裂缝将出现得很快。较小的竖向位移差可以延缓反射裂缝的出现,但随着车辆轴重和频率的增加,裂缝将迅速产生。Iowa 州在一段旧水泥路面上,板长为 6-7m,采用土工织物来防治沥青罩面层可能出现的反射裂缝。观测结果证明这种措施是有效的,而且在较长的水泥板上土工织物的防治效果相对更好。North Dakota 州的试验路结果表明,各种防反措施中,以土工织物的防治效果最好,即便是出现反射裂缝,其严重程度(以反射裂缝长度与旧水泥板对应裂缝长度的比值来表征)也是很轻的。North Carolina 州试验路的结果表明,土工织物防治反射裂缝的效果与地理位置有很大的关系。在六条试验路上采用相同的土工织物,其中四条没有多少效果。

在应用土工合成材料的沥青罩面设计方面,国外也形成了一些理论成果,比较有代表性的有两类:一类是以 Barksdale 为代表,认为使用土工合成材料并不减少罩面厚度,罩面设计按 AASHTO(美国州公路及运输管理人员协会)设计方法进行,即与未铺土工合成材料时相同,但在设计方法中采用排水系数考虑排水作用。鉴于我国在这方面的研究还不深入,《公路土工合成材料应用技术规范》(JTJ/T 019-98)也对此进行了借鉴,即“规定路面结构及厚度的设计仍与未铺土工合成材料时相同”。

另一类是以美国地沥青协会 AI(Asphalt Institute)为代表,认为使用土工合成材料可以减少沥青罩面厚度。AI 认为,土工织物尤其是无纺布物能充分吸收

乳化沥青,所以防水是主要功能,但是,试验表明土工织物的模量越高寿命越长,因此认为加筋与防水作用的界线并不明显。由此 AI 发展了基于防水和基于加筋的两种减薄沥青罩面层厚度的设计方法。

按照主要设计目的的不同, AI 分别给出了基于加筋和基于防水的沥青罩面设计方法。基于加筋的罩面设计:这种方法的关键是根据试验或经验确定土工织物防治裂缝反射的有效性: $FEF = N_r/N_n$, 式中: FEF 为土工织物有效性参数; N_r 为土工织物加筋情况下,引起破坏所需的荷载重复次数; N_n 为不加筋情况下,引起破坏所需的荷载重复次数。由试验得出 FEF 后,就可以对罩面设计方法进行修正,以适应于加筋的情况。设计交通量如下: $DTN_r = DTN_n/FEF$, 式中: DTN_r 为加筋条件下的设计交通量; DTN_n 为不加筋时的设计交通量。美国地沥青协会基于土工织物加筋的设计步骤如下: (1) 确定土基 CBR 值; (2) 确定最初交通量 ITN; (3) 确定设计期内调整系数,估计交通量增长率; (4) ITN 与调整系数相乘,确定 DTN; (5) 由“基于加筋的沥青罩面层厚度设计图”确定满足路基条件、设计交通量和道路使用年限的沥青混凝土的总厚度 h_{an} ; (6) 确定现有道路的等效厚度 h_e ; (7) 得到需要的沥青罩面厚度 $h_{an}-h_e$; (8) 用修正后的 DTN_r 重复上述步骤,得到加筋时沥青混凝土总厚度 h_{ar} ; (9) 对比两个厚度的经济性,最终确定实施方案。

基于土工织物防水的设计步骤如下: (1) 确定代表回弹弯沉; (2) 确定最初交通量 ITN; (3) 确定设计使用年限内的最初交通量调整参数; (4) ITN 和调整参数相乘得到 DTN; (5) 输入代表回弹弯沉、DTN, 根据“保证设计弯沉值的沥青罩面厚度设计图”得出罩面厚度; (6) 对于使用土工织物时,土工织物作为防水层,将代表回弹弯沉作如下修正: $RRD = (X+2S)fC$, 式中: RRD 为代表回弹弯沉; X 为贝克曼梁测定回弹弯沉值的算术平均值; S 为标准差; f 为温度调整系数; C 为与土基含水量有关的经验调整参数,一般取 1.0~1.25,土工织物的防水性越高 C 值越小,反之, C 值越大。(7) 对不使用土工合成材料的情况重复上述步骤,并对比使用与不使用土工织物的经济性。^[6]

1.3.2 国内研究现状

土工合成材料在道路路面工程中的应用主要是为减少或降低反射裂缝的发生。在推广应用的进程中,国内广大公路科研者也取得了许多关于土工材料,

尤其是土工织物在路面工程中应用的科研成果。[7-12]

1985年和1989年林绣贤等人以断裂力学有限元和三维光弹模型试验为研究手段,对半刚性基层上沥青路面混凝土的反射裂缝进行了深入的研究,认为低模量高变形率的材料作为夹层,可大幅度降低裂缝尖端应力集中系数,起到防止反射裂缝的作用,而各种防治措施又以土工织物的效果最好。

1992年,郭忠印、江雪兴等对玻璃纤维布防治沥青路网裂技术,采用弹性地基上的梁为模型,进行了理论分析,为玻璃纤维布在沥青混凝土路面养护中的应用奠定了基础。

于宝明的应力分析表明土工布满铺路面时,厚、弹模低、变形率大的土工织物可以显著降低沥青混凝土层底的温度应力,对于荷载产生的有效应力却有增加的趋势。

周德云使用三维有限元对土工织物合理铺筑方式的研究表明,在旧道面接缝处铺设有限宽度的土工织物夹层,既能利用土工织物的低模量,又可以不使路面结构的整体连续性受到破坏,从而达到降低加铺层温度应力和荷载应力的目的。

周志刚、郑健龙利用基于线弹性断裂力学的有限元方法,对土工筋材防治半刚性基层沥青路面反射裂缝的加筋作用进行分析计算结果表明,这种加筋作用主要降低裂缝处拉应力集中,对剪应力集中影响不大,同时提出了加筋材料和应力吸收薄膜的界定范围,土工筋材与结构层的结合状态对其加筋作用影响很大,应尽量保证土工筋材与结构层之间完全联结。

周富杰等人对土工网、土工格栅、土工布、聚胺脂改性的卷材(APP)和特种金属网格进行了3种试验温度(-3℃、15℃、60℃)下的小梁弯曲试验评价混合料的抗裂性能,结果显示,除土工布外,其它措施对防治荷载型反射裂缝基本上都是有效的,其中特种金属网格的防治效果最为显著。

在研究复合式路面结构设计理论时,许志鸿、李淑明、蔡喜棉等运用有限元程序和三维模型,分析了水泥混凝土路面与沥青面层复合后反射裂缝形成的机理及土工织物的应用效果。

黄岩等人通过室内试验证明织物加筋沥青面层可有效提高沥青混凝土的疲劳性能,疲劳寿命的提高主要体现在裂缝扩展阶段。

目前对于土工织物土工膜的应用主要集中在防水性能方面,在路面体系中起到隔离的作用,如在雨水较多的地区防止路表水渗入路面内部,盐渍土地区

防止盐分随毛细水上升到路表。土工格栅主要用于加筋沥青面层，但是由于土工格栅与面层之间是点线接触，因此加筋效果有限。聚酯玻纤布是一种新型的土工合成材料，是玻璃纤维和聚酯纤维的复合体，具有玻璃纤维的强度及聚酯纤维的柔韧性，在路面体系中可以同时起到隔水和防裂的双重效果，目前正在国内外道路工程尤其是加铺工程得到广泛的推广应用。尽管已经有一部分实体工程的应用，但目前国内外对聚酯玻纤布的研究还刚刚处于起步阶段。

东南大学尹应梅、倪富健等利用 MTS 和 UTM 试验系统对聚酯玻纤布复合沥青混合料试件进行应力控制和应变控制的疲劳试验，并引入了能量指标对混合料的疲劳性能进行了对比分析，认为聚酯玻纤布可以有效提高沥青混合料的疲劳性能。进行了室内荷载型反射裂缝模拟试验，认为聚酯玻纤布可以延缓裂缝的出现，显著降低裂缝的扩散速度，提高混合料抵抗反射裂缝的能力，同时试验中发现，聚酯玻纤布复合沥青混凝土小梁的自下而上发展的裂缝数量多而小，且时间出现裂缝后，聚酯玻纤布并没有破坏，依然有防水和隔离的效果。

重庆交通大学李林健通过建立二维、三维有限元模型，从反射裂缝产生机理、加筋材料一般作用机理入手，结合聚酯玻纤布材料特性，充分考虑沥青材料粘弹性的特殊性质以及环境因素，阐明了聚酯玻纤布的作用机理。

1.4 本文主要研究内容

本文结合“新建沥青混凝土路面中聚酯玻纤布防裂隔水层的技术开发及应用研究”项目，开展对聚酯玻纤布作为沥青道路防裂隔水层的性能及应用研究，主要研究内容如下：

1. 收集整理有关土工合成材料工程性质的资料，结合聚酯玻纤布的技术指标，分析聚酯玻纤布的特点，总结聚酯玻纤布的工程特性；
2. 通过室内剪切试验、小梁弯曲试验、疲劳试验等试验结果，分析聚酯玻纤布复合沥青混凝土的粘结性能、弯曲性能、低温抗裂性能、疲劳性能等路用性能；
3. 分析沥青路面反射裂缝的产生机理，以及路面水损坏的成因，结合聚酯玻纤布的材料特性及路用性能，阐述聚酯玻纤布的防裂隔水机理，并提出聚酯玻纤布在路面结构中的设置方式；
4. 结合实体试验路工程，总结聚酯玻纤布施工中的问题及注意事项，并对

聚酯玻纤布的工后使用效果进行评价；

第二章 聚酯玻纤布的工程性质

2.1 土工合成材料的工程性质

2.1.1 土工合成材料的分类

土工合成材料的种类繁多，早期曾将其分成土工织物（Geotextile）和土工膜（Geomembrane）2类，分别代表透水和不透水合成材料。近些年来大量的以聚合物为原料的其他类型的土工合成材料纷纷问世，复合材料、特种材料产品大量涌现，已经超出了“织物”和“膜”的范畴。1983年J.E.Fluegel建议使用“土工合成材料”（Geosynthetics）一词来概括各种类型的材料。当今，比较一致的看法是把土工合成材料分成4大类，即土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合型土工合成材料。

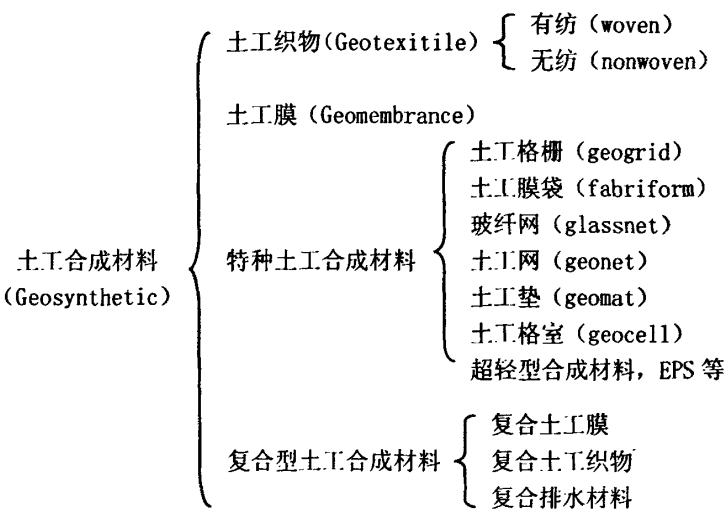


图 2.1 土工合成材料分类汇总图

(1) 土工织物

土工织物的主要原料有聚丙烯、聚酯、聚酰胺等，按照制造工艺的不同可分为有纺和无纺土工织物。有纺织物由两组平行的呈正交或斜交的经线和纬线交织而成。其主要缺点是沿经线和纬线的强度高，与经纬线斜交方向的强度低。但它仍具有不少优点，如弹模较大、延伸率较小、孔隙均匀。在加筋和滤层方面使用较广。无纺织物现在是土工织物的主流产品，是把纤维做定向的或随意的排列，再经过加工而成的织物。按照联结纤维的方法不同，可分为化学（粘合剂）联结、热力联结和机械（针刺）联结三种。无纺织物的主要优点是强度没有显著的方向性，对变形的适应性较大。

（2） 土工膜

土工膜采用的聚合物主要有聚氯乙烯（PVC）和聚乙烯（PE），它们是一种高分子化学柔性材料，比重较小，延伸性较强，适应变形能力高，耐腐蚀，耐低温，抗冻性能好。大量工程实践表明，土工膜的不透水性很好，具有突出的防渗和防水性能，弹性和适应变形的能力很强，能适用于不同的施工条件和工作应力，而且具有良好的耐老化能力，处于水下和土中的土工膜的耐久性尤为突出。

（3） 特种土工合成材料

特种土工合成材料是指近年发展起来的一些具有特殊性能，能够满足岩土工程上某些特定要求的土工合成材料。

□ 土工格栅

土工格栅常用作加筋土结构的筋材或复合材料的筋材等。土工格栅分为塑料类和玻璃纤维类两种类型。塑料类土工格栅是经过拉伸形成的具有方形或矩形的聚合物网材，按其制造时拉伸方向的不同可分为单向拉伸和双向拉伸两种。由于土工格栅在制造中聚合物的高分子会随加热延伸过程而重新排列定向，加强了分子链间的联结力，达到了提高其强度的目的。玻纤类土工格栅是以高强度玻璃纤维为材质，有时配合自粘感压胶和表面沥青浸渍处理，使格栅和沥青路面紧密结合成一体。由于土石料在土工格栅网格内互锁力增高，它们之间的摩擦系数显著增大，土工格栅埋入土中的抗拔力由于格栅与土体间的摩擦咬合力较强而显著增大，因此它是一种很好的加筋材料。

② 土工膜袋

土工膜袋是一种由双层聚合化纤织物制成的连续（或单独）袋状材料，利用高压泵把混凝土或砂浆灌入膜袋中，形成板状或其他形状结构，常用于护坡

或其他地基处理工程。膜袋根据其材质和加工工艺的不同,分为机制和简易膜袋两大类。机制膜袋按其有无反滤排水点和充胀后的形状又可分为反滤排水点膜袋、无反滤排水点膜袋、无排水点混凝土膜袋、铰链块型膜。

③ 土工网

土工网是由合成材料条带、粗股条编织或合成树脂压制的具有较大孔眼、刚度较大的二维结构或三维结构的网状土工合成材料。用于软基加固垫层、坡面防护、植草以及用作制造组合土工材料的基材。

④ 土工网垫和土工格室

土工网垫和土工格室都是用合成材料特制的三维结构土工合成材料。前者多为长丝结合而成的三维透水聚合物网垫,后者是由土工织物、土工格栅或土工膜、条带聚合物构成的蜂窝状或网格状三维结构,常用作防冲蚀和保土工程,刚度大、侧限能力高的土工格室多用于地基加筋垫层、路基基床或道床中。

⑤ 聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)

聚苯乙烯泡沫塑料(即EPS)是近年来发展起来的超轻型土工合成材料。它是在聚苯乙烯中添加发泡剂,用所规定的密度预先进行发泡,再把发泡的颗粒放在筒仓中干燥后填充到模具内加热形成的。EPS具有质量轻、耐热、抗压性能好、吸水率低、自立性好等优点,常用作铁路路基的填料。

(4) 复合型土工合成材料

土工织物、土工膜、土工格栅和某些特种土工合成材料,将其两种或两种以上的材料互相组合起来就成为土工复合材料。土工复合材料可将不同材料的性质结合起来,更好地满足具体工程的需要,能起到多种功能的作用。如复合土工膜,就是将土工膜和土工织物按一定要求制成的一种土工织物组合物。其中,土工膜主要用来防渗,土工织物起加筋、排水和增加土工膜与土面之间的摩擦力的作用。又如土工复合排水材料,它是以无纺土工织物和土工网、土工膜或不同形状的土工合成材料芯材组成的排水材料,用于软基排水固结处理、路基纵横排水、建筑地下排水管道、集水井、支挡建筑物的墙后排水、隧道排水、堤坝排水设施等。路基工程中常用的塑料排水板就是一种土工复合排水材料。准确地说,本文所研究的聚酯玻纤布也是一种复合土工合成材料,它结合了土工织物和玻纤格栅的特点,土工织物浸透沥青起到隔水的作用,玻璃纤维束在沥青面层层底起到加筋、隔离的作用。

2.1.2 土工合成材料的工程作用

土工材料在岩土工程中可以起到多方面的作用，概括起来有以下六种：

(1) 排水作用

有些土工合成材料如织物是多孔隙透水介质，埋在土中可以汇集水分，并将水排出土体。它们不仅可以沿垂直平面的方向排水，也可以沿其平面方向排水，即具有水平排水功能。现已广泛应用于土坝、路基、挡土墙和软土地基的排水固结。

(2) 过滤作用

为防止土中细颗粒被渗流潜蚀（管涌现象），一般都使用级配粒料做过滤层，而有纺和无纺织物都能取代常规的粒料做过滤层，起过滤作用。在过滤层要求不是很高的情况下，一般选用无纺织物作为过滤层。

(3) 隔离作用

在岩土工程中，不同的粒料层之间经常发生相互混杂现象，使各层失去应有的性能。将土工合成材料铺设在不同粒料层之间，可以起隔离、排水和防止地基承载力恶化的作用。用作隔离层的土工织物要满足两方面的要求：一方面能够阻止较细的颗粒材料侵入较粗的颗粒材料中去，并保持一定的渗透性；另一方面，需要具备足够的强度，以承担由于荷重产生的各种应力和应变，抵抗不均匀沉降。土工合成材料的隔离作用在公路、铁路软土路基处理中有很好的效果，如在软弱地基上铺设碎石粒料基层时，在层间铺设土工织物，可有效地防止层间土料相互贯入和控制不均匀沉降。

(4) 加筋作用

某些土工合成材料具有较高的拉伸强度和良好的整体性能，以适当方式将其设置在工程结构体中作为加筋材料，可以将外荷载通过土工材料传递到相邻的结构层中，限制结构体的变形，改善或增强某些结构层次（如土基）的稳定性，提高结构体的承载能力。此类加筋土工材料一般要求较高的抗拉强度和模量，同时要求良好的蠕变性，摩擦性和耐久性。

(5) 防护作用

利用土工合成材料的整体性，可以扩散比较集中的应力，防止结构体受外力作用破坏，起到防护作用。此类防护材料主要应用于河道整治、护岸、护底工程，以及海岸防潮、道路坡面防护等工程方面，用来防止水流海流的冲刷侵

蚀、防止低温引起的土体冻胀等。

(6) 防渗作用

通常是利用土工合成材料的均匀性、防渗性，将其设置与不同的结构层之间，起到结构防渗的作用。

需要指出的是，上述土工合成材料的六个功能并不是绝对独立的，有时一种土工合成材料应用于某一项工程中，同时具备上述的几种功能，有的是主要的，有的是次要的。例如，在公路路堤底部的碎石层和软土地基之间放置土工合成材料，就同时具有加筋、隔离、过滤和排水的作用，其中加筋和隔离作用是主要的，其他则次之。

2.1.3 土工合成材料的主要技术指标

为了合理选择和应用土工合成材料，了解材料的工程性质，世界各国都致力于发展土工合成材料的试验方法，确定土工材料的设计参数，推广土工合成材料的规范化应用。美国材料与试验学会（ASTM）、英国标准研究所（BSI）、德国土工织物标准委员会（GSCG）、美国联邦公路管理局（FHWA）等等机构都提出过相应的测试标准。

我国土工合成材料技术协作网于1988年组织编写了“土工织物测试方法参考标准”，1991年由南京水利科学研究所主编，联合其他十家高等院校或科研单位合作编写了《土工合成材料测试手册》，后来在此基础上由交通部组织，交通部重庆公路科学研究所主编，河南省交通厅、长沙交通学院、江苏省交通科学研究所共同参编，收集、比较了国内外常用的公路土工合成材料试验方法，吸收了有关科研成果以及历届土工合成材料学术会议论文集，最终编写出了《公路土工合成材料试验规程》（JTJ/T 060-98），并由交通部颁发，自1999年2月1日起在全国各级公路部门中推广施行，同时颁发了《公路土工合成材料应用技术规范》，以指导土工合成材料在公路工程中的规范化应用。

根据《公路土工合成材料试验规程》（JTJ/T 060-98），应用于道路工程中的土工合成材料，其主要的技术指标包括厚度、单位面积质量、熔熔点、抗拉强度和断裂延伸率、握持强度、梯形撕裂强度、顶破强度，其中前三项反映了土工合成材料的物理特征，后四项反映了土工合成材料的力学特征，主要是针对土工合成材料不同破坏形式的强度指标。

(1) 厚度

土工织物的厚度是指在2KPa压力下的厚度测定值。无纺布和某些复合材料，受压力后厚度变化很大。常用的各种土工织物的厚度一般为0.1-5mm。

(2) 单位面积质量

单位面积土工织物所具有的质量，多数土工织物厂家的材料型号即是根据单位面积质量来分类。单位面积质量是土工织物一个重要的物理指标，往往较大单位面积质量的土工织物拥有较大的抗拉强度、顶破强度等力学性能。

(3) 熔融点

由于沥青混合料摊铺温度一般在140-160℃，如果采用改性沥青，施工温度还要更高一些。在高温条件下，土工织物将会发生熔融现象。各种材料的熔融点为：聚丙烯175℃，聚乙烯1750℃，聚酯和聚酰胺250℃，玻璃纤维>1000℃。有时温度虽未达到熔融点，但高温有可能使土工织物材料中聚合物高分子结构发生变化，影响材料的弹性模量和强度。

(4) 抗拉强度和断裂延伸率

土工织物的抗拉强度为单位宽度的土工合成材料试样在外力作用下拉伸时所能承受的最大拉力。延伸率为对应于最大拉力时的应变量。抗拉强度和延伸率是土工织物的主要力学性能指标，通过条带拉伸试验测定。土工织物在受力过程中截面变化较大，故抗拉强度指标值以单位宽度上所受的力来表示，而非习惯上的单位面积上所承受的力。抗拉强度测定值与织物试样的宽度、形状、约束条件等有关。《公路土工合成材料试验规程》中给出了两种测定方法，主要区别在试样的宽度上，一种是200mm另一种是50mm，分别称之为宽条拉伸试验和窄条拉伸试验。

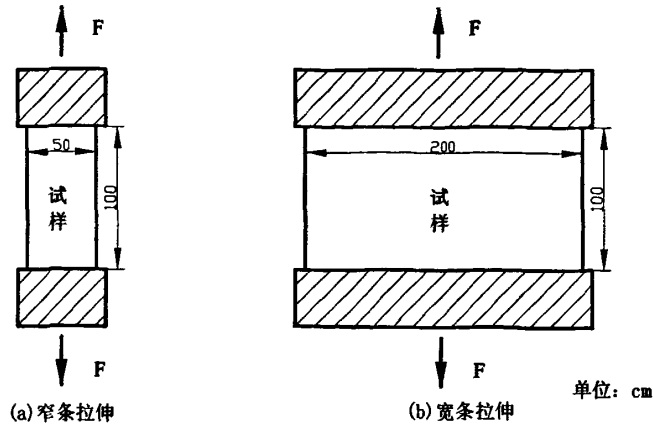


图 2.2 直接拉伸试验示意图 (阴影部分为夹具)

(5) 握持强度

握持强度是指土工合成材料试样在握持拉伸过程中所能承受的最大拉力。所谓握持拉伸是握持试验两端部分宽度而进行的一种拉力试验，它的强度由两部分组成：一部分为试样被握持宽度的抗拉强度，另一部分为相邻纤维提供的附加抗拉强度。握持强度反映土工织物分散集中力的能力。据研究，握持强度与条带拉伸强度之间没有简单的对比关系。

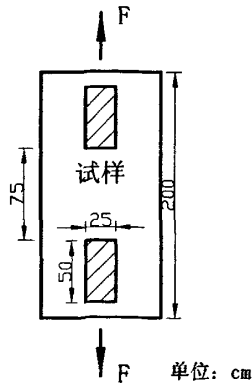


图 2.3 握持拉伸试验示意图 (阴影部分为夹具)

(6) 梯形撕裂强度

撕裂强度为土工合成材料试样在撕裂过程中抵抗扩大破损裂口的最大拉

力。撕裂强度反映了试样抵抗扩大破损裂口的能力，可以评价不同土工布被扩大破损程度的难易。

(7) 顶破强度

为保证土工织物在施工过程中不被破坏，控制顶破强度显得尤其重要。测试顶破强度的试验一般有以下三种：

① Mullen 胀破试验

也称液压顶破试验或薄膜顶破试验。将土工织物平坦地覆盖在可扩张的薄膜上，在其一侧施加液压，使薄膜连通试样扩张直到试样破坏，最大液压即为材料的胀破强度。试验可以模拟凹凸不平的荷载对土工织物的挤压作用。胀破试验采用液压加荷，试样受力均匀，与其他顶破试验相比，结果比较稳定，但是它的不足之处在于试样太小、试验设备昂贵，而且受薄膜限制不适用于较高强度及延伸率较大的材料。目前大多数国家参照美国 ASTM D-3786 建议的标准进行试验。

② 圆球顶破强度

在垂直于织物平面的方向施加荷载，使织物逐渐扩张直至破坏，其最大压力称为圆球顶破强度。圆球顶破强度试验可以模拟细集料对土工织物的顶压作用，该性能指标可以用来评价土工织物在公路工程中抵抗细集料顶破和施工压力的能力。我国纺织部门及国外一些国家基本上是按照美国 ASTM D-3787 建议的标准进行试验。

③ CBR 顶破试验

CBR 顶破试验模拟粗集料对土工织物的顶破作用，它采用土工试验中常用的 CBR 试验设备。这一方法的特点是可以利用土工试验的一起，因此应用较为普遍。

2.2 聚酯玻纤布的工程性质

2.2.1 聚酯玻纤布的材料构成

聚酯玻纤防裂布是继土工布、土工格栅、条带聚合物之后发展起来的一种新型土工合成材料。聚酯玻纤布是聚脂纤维和玻璃纤维的复合物，在聚酯纤维土工布的表面经编纵横交错的玻璃纤维束，它融合了聚酯纤维和韧性和玻璃纤

维的强度，是用于沥青路面建设和改造中防治反射裂缝、水破坏及增强路面承载能力的新型复合土工材料。

本文试验中还采用了一种玻纤防裂布，是一种采用特殊编织工艺制成的玻璃纤维网状结构材料。这种材料具有很高的耐热性和优异的耐寒性，抗拉强度大，弹性好，膨胀系数低，耐磨性能强，抗撕裂强度优良，并有很高的化学稳定性。图 2.4 和 2.5 为本文试验中所采用的聚酯玻纤布和玻纤防裂布。

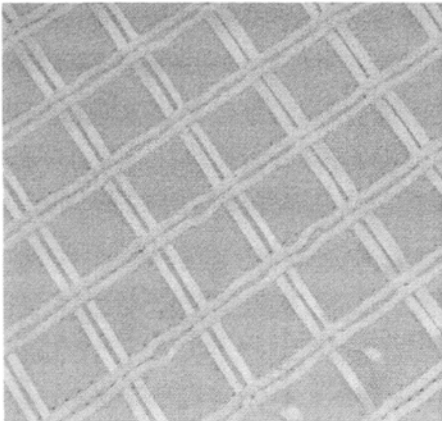


图 2.4 聚酯玻纤布

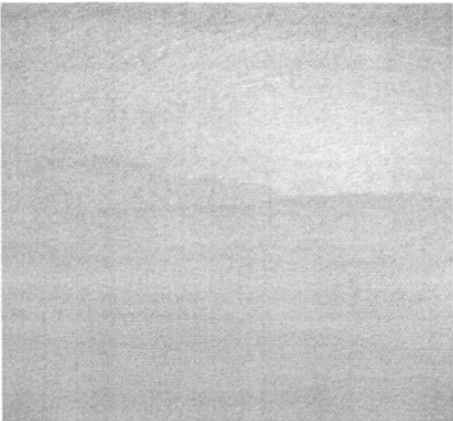


图 2.5 玻纤防裂布

2.2.2 聚酯玻纤布的主要技术指标

表 2.1 为材料供应商提供的本文试验研究所用的聚酯玻纤布及普通玻纤防裂布的材料参数检测报告，同时引用一种单位面积质量相当的聚酯长丝无纺土工布的技术指标数据进行比较：

表 2.1 三种土工材料的主要技术参数

检测项目		单位	聚酯玻纤布	玻纤防裂布	聚酯长丝无纺布
单位面积质量		g/m^2	344.7	138.3	140
厚度		mm	1.49	0.97	1.9
抗拉强度	纵向	N/5cm	2547.5	541	310
	横向		2519.5	238	230
拉伸延伸率	纵向	%	2.0	1.6	54
	横向		2.0	1.0	62

第二章 聚酯玻纤布的工程性质

握持强度	纵向	N	2586	189	780
	横向		2543	181	530
握持延伸率	纵向	%	2.1	1.6	60
	横向		1.8	1.8	65
梯形撕裂强度	纵向	N	-	17	580
	横向		-	17	730
胀破强度		KPa	478	395	1420

注：聚酯玻纤布和玻纤防裂布的试验数据来自供应商，检测单位为上海勘测设计研究院，检测结果仅对来样负责；聚酯长丝无纺布的数据来自郭忠印、黄岩等人《织物加筋沥青面层的研究报告》。

不同类型不同原材料的土工合成材料表现出不同的技术指标，由表中数据可以看出：

(1) 相同质量水平下，玻纤防裂布比聚酯长丝无纺布要薄，一方面玻璃纤维的密度比其他有机纤维的密度要大，另一方面编织工艺的不同使得玻纤防裂布中的纤维排列较聚酯长丝无纺布更为致密。聚酯玻纤布由玻璃纤维束组成的网格和聚酯纤维布复合而成，因此其厚度介于玻纤防裂布和聚酯长丝无纺布之间，但是它的单位面积质量是三者中最大的一个。

(2) 聚酯玻纤布由于有经编玻璃纤维束的加筋作用，因此抗拉强度很大，同时延伸率很小，玻纤防裂布的原材料主要是玻璃纤维丝因此断裂延伸率值也是很小的，而聚酯长丝土工布的断裂延伸率比较大，一般在 50%-70%。此外，聚酯玻纤布和聚酯长丝无纺布的抗拉强度无明显方向性，但是玻纤防裂布由于纤维丝的排列方式而表现出一定的方向性。

(3) 握持强度方面，聚酯玻纤布的拉伸强度主要由玻璃纤维束提供，因此其握持强度也比较大；而玻纤防裂布的纤维之间是通过某种粘结剂粘结成型的，而且它的抵抗变形能力较差，因此其握持强度也比较小；聚酯长丝无纺布的延伸率比较大，相邻纤维之间的联结比较紧密，也能比较好的分散集中应力。

(4) 与握持强度一样，各自的材料性质导致玻纤防裂布的梯形撕裂强度比聚酯长丝无纺布小。而聚酯玻纤布材料组成形式使其不适宜进行梯形撕裂试验，因此缺少这方面的数据。

(5) 聚酯长丝无纺布的延伸率较大，使其胀破强度比聚酯玻纤布和玻纤防

裂布都要大。

2.2.3 聚酯玻纤布的工程特性

根据对聚酯玻纤布主要技术指标的分析，总结其具有如下工程特性：

- (1) 强度大，且没有方向性；
- (2) 延伸率低，没有长期蠕变性，保证了材料能够长期使用；
- (3) 与沥青和沥青混合料具有良好的相容性，聚酯玻纤布的熔点在 230℃ 以上，在 230℃ 时其物理化学特性稳定，所以，在 170℃ 热铺沥青混凝土下稳定性不受任何影响；
- (4) 化学稳定性好，经过特殊处理后的聚酯玻纤布能防止各类化学侵蚀，抵制生物侵蚀和气候变化。
- (5) 聚酯玻纤布与粘层油形成防水层，即使面层出现裂缝，也能有效防止表面水下渗，保证基层材料免于水损坏。
- (6) 可以粉碎和再生使用，铣刨时会被粉碎成非常小的纤维而增进再生料 (RAP) 的性能。

2.3 本章小节

(1) 土工合成材料主要包括四大类：土工织物、土工膜、特种土工合成材料和复合土工合成材料，应用于工程中可以起到排水、过滤、加筋、隔离、防护、防渗等作用。

(2) 土工合成材料主要的技术指标包括厚度、单位面积质量、熔融点、抗拉强度和断裂延伸率、握持强度、梯形撕裂强度、顶破强度，其中前三项反映了土工合成材料的物理特征，后四项反映了土工合成材料的力学特征。

(3) 聚酯玻纤布是一种新型的复合土工合成材料，是聚脂和玻纤的复合物，融合了聚酯纤维和韧性和玻璃纤维的强度，具有强度大、延伸率低、与沥青相容性好、耐高温、耐腐蚀的优点、用于沥青路面建设和改造中可以防治反射裂缝、抵抗水破坏、增强路面承载能力。

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

聚酯玻纤布铺设在道路结构中主要起到防裂隔水的作用。隔水作用的体现需要聚酯玻纤布吸收适量的沥青粘层油，同时保证层间粘结良好，因此本文设计斜剪试验以研究粘贴聚酯玻纤布后的层间粘结性能。面层层底铺设聚酯玻纤布后会对沥青混凝土的路用性能造成何种影响，本章将通过小梁弯曲试验、低温弯曲试验、疲劳试验，分别评价聚酯玻纤布复合沥青混合料的弯曲性能、低温抗裂性能、疲劳性能，为聚酯玻纤布的工程应用提供依据。

3.1 原材料及试验级配

3.1.1 原材料

3.1.1.1 沥青

本文试验研究中混合料所用沥青和粘层油沥青同为中海油 AH-70#沥青，具体技术指标如下：

表 3.1 中海油 AH-70#沥青的技术指标

测试项目		单位	实测结果	技术要求
针入度（25℃，100g，5s）		0.1mm	67	60~80
针入度指数 PI		—	0.084	-1.5~1.0
延度（15℃，5cm/min）		cm	>150	≥100
软化点（环球法）		℃	49.7	44~54
闪点（COC）		℃	295	260
含蜡量（蒸馏量）		%	1.78	≥3
密度（15℃）		g/cm ³	1.011	实测
溶解度（三氯乙烯）		%	99.90	≥99.0
TFOT 后 残留物	质量损失	%	0.1	≥0.8
	针入度比，25℃	%	62	≥55

	延度, 5℃	cm	120	实测
--	--------	----	-----	----

3.1.1.2 集料

本文试验用粗集料和细集料均采用石灰岩碎石，经筛分后各档逐级称量回配。矿粉由石灰岩磨制而成。集料技术指标性能试验根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005) 进行，其性能指标见表 3.2

表 3.2 集料技术指标

试验项目	压碎值 (%)	粘附性	洛杉矶磨耗值 (%)	针片状含量 (%)
试验结果	26	四级	28	12
规范要求	≤28	≥四级	<30	<15

3.1.1.3 土工织物

本文试验用到两种土工布：聚酯玻纤布和普通玻纤防裂布，均由南通东南工程材料有限公司，具体技术指标如表 2.1 所示。

3.1.2 试验级配

本文试验用到两种沥青路面中下面层常用的沥青混合料级配：AC-20 和 AC-25，级配组成如表 3.3 所示：

表 3.3 试验级配组成

筛孔尺寸 (mm)	通过百分率 (%)			
	AC~20		AC~25	
	级配范围	试验级配	级配范围	试验级配
31.5	100	100	100	100
26.5	100	100	90~100	93
19	95~100	93	75~90	78
16	75~90	82	65~83	68
13.2	62~80	66	57~76	60
9.5	52~72	55	45~65	50
4.75	38~58	32	24~52	30

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

2.36	28~46	22	16~42	20
1.18	20~34	15	12~33	15
0.6	15~27	11	8~24	11
0.3	10~20	8	5~17	8
0.15	6~14	6	4~13	6
0.075	4~8	5	3~7	5

本试验研究采用中海油 AH-70#沥青按照《公路沥青路面施工技术规范》对混合料进行配合比设计，以 0.5%的间隔上下变化沥青用量，各配置 5 组不同的油石比成型马歇尔试件，分别测定其稳定度和流值，测定并计算空隙率、饱和度及矿料间隙率，最终确定最佳沥青用量，结果见下表 3.4：

表 3.4 混合料配比试验结果

混合料级配类型	AC-20	AC-25
最佳沥青用量 (%)	3.7	3.3
毛体积密度 (g/cm ³)	2.434	2.447
空隙率 (%)	3.8	3.8
矿料间隙率 VMA (%)	12.7	11.9
马歇尔稳定度 (KN)	8.99	9.65
流值 (0.1mm)	30.3	46.2

3.2 层间粘结性能研究

3.2.1 试验目的

聚酯玻纤布通过粘层油与基层面层结合成整体，目前的施工工序一般都是首先清理基层顶面，喷洒一定量粘层油，铺设聚酯玻纤布，再铺筑沥青混凝土。粘层油品种包括普通热沥青，乳化沥青及改性乳化沥青等。粘层油用量必须适中，如果粘油用量过大，有可能造成路面在使用过程中的层间滑动，甚至泛油；如果粘油用量过小，聚酯玻纤布无法完全浸透沥青，影响聚酯玻纤布夹层的隔水效果，还会导致粘结不牢，使得路面结构出现层间脱空的问题。

本文在生产厂家推荐的粘层油用量基础上，选择不同的粘油用量，成型复

合试件，进行剪切试验，以分析聚酯玻纤布的粘结性能。

3.2.2 试验方法

对于粘层油用量标准的确定，黄岩等人进行的“织物加筋沥青面层的研究”中介绍了一种试验确定方法^[19]：将织物样品浸在平底盘的热沥青中 1min（油温约 120℃），取出后冷却，上下垫吸油片，用热熨斗压熨以除去多余的油分，剩下的即为织物的吸油量 Q_s 。根据公式（3.1）估算沥青粘层油用量：

$$Q=0.33+Q_s+Q_c \quad (3.1)$$

式中： Q ——粘层油用量（ L/m^2 ）

Q_s ——织物吸油量（ L/m^2 ）

Q_c ——修正值，根据路表状况确定（ L/m^2 ）见表 3.5

表 3.5 不同路面状况时的修正沥青粘层油用量

路面状况	光滑	平整无孔	稍有孔，稍氧化	稍有孔，氧化	不平整，多孔，氧化
Q_c (L/m^2)	-0.08~0.08	0.08~0.20	0.20~0.32	0.32~0.45	0.41~0.53

注：氧化是针对沥青面层而言

这种试验方法看似简单但实际操作起来比较麻烦，而且压熨时的压力标准无法统一，导致试验出来的织物吸油量结果与实际情况有不小的出入。所以现在对于土工织物的粘层油用量，生产厂家一般根据织物的厚度以及工程经验提供一个推荐值，本文所采用的聚酯玻纤布推荐粘层油用量为 $0.6-1.2kg/m^2$

路凯冀、王旭东在《沥青路面层间粘结强度试验研究方法》一文中介绍了目前国内外在研究沥青路面层间粘结性能所采用的试验方法^[20]，并将这些方法按照其力学模型，总结为四类：a) 直剪试验，b) 拉伸试验，c) 无限制剪切试验，d) 斜剪试验。具体受力模型如图 3.1 所示。b 法的加载模式与实际路面在车辆荷载下的层间受力状态相差较远，一般用于评价桥面铺装与钢板之间的粘结性能。c 法的可以看作是竖向力为零的直剪试验，也可以看作是 α 角为零的斜剪试验，即强度包络线在纵轴上的截距。因此，无法通过 c 法得到强度包络线，而实际路面受力又是在有竖向压力的情况下。a 法、d 法可以分别通过变化垂直压力和倾斜角度来得到强度包络线上的几个点，进而得到强度包络线。

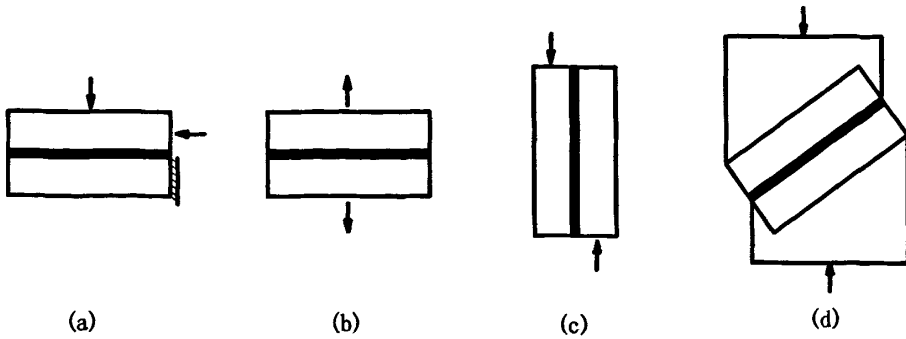


图 3.1 各剪切试验力学模型示意图

对于本文的试验而言，我们只是想通过粘结性能的好坏确定一个粘层油的最佳用量，因此不需要得到层间的强度包络线。结合实验室现有条件，最终选择斜剪试验作为评价层间粘结性能的试验方法。

试验采用 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 水泥混凝土—沥青混凝土复合试件，选择 5 个粘层油用量，分别是 0.6、0.9、1.2、1.5、 1.8kg/m^2 ，每个油量使用 3 个平行试件。试件成型过程：首先利用实验室现有水泥混凝土块，用切割机将其切割成 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}$ 高的小块；采用 70# 普通热沥青作为粘层油，按照不同的粘油用量，在混凝土表面涂刷粘油，将剪好尺寸 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 聚酯玻纤布粘在水泥混凝土块表面；试验采用级配 AC-20 沥青混合料，由于模具无法进行机械压实，只能采用人工夯实沥青混合料，因此根据压实度为 95% 计算沥青混合料用量，拌合完成后倒入模具中，注意防止混合料的离析，人工夯实沥青混合料；试件成型完成后，静置一天，脱模备用。

斜剪试验的剪切角为 40° ，下图 3.2 是斜剪试验的受力模型图，图 3.3 为正在进行的斜剪试验。试验在压力试验机上进行，试验温度为室温 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，为模拟刹车状态选择加载速率为 50mm/min ，试验中手动控制。记录试件破坏时的荷载 F ，根据下式 (3.2) 计算粘结层抗剪强度 τ ：

$$\tau = \sin 40^\circ \times F/S \quad (3.2)$$

式中： τ ——层间抗剪强度

F ——试件破坏荷载

S ——试件横截面积

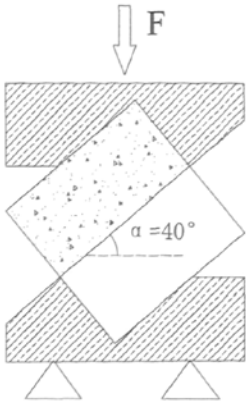


图 4.2 剪切试验试件受力模型图

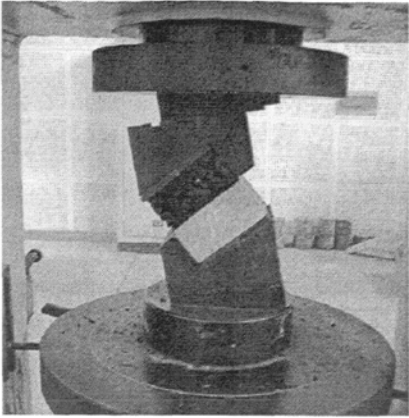


图 4.3 斜剪试验现场图

3.2.3 试验结果及分析

斜剪试验结果见表 3.6，图 3.4：

表 3.6 斜剪试验结果汇总表

粘层油用量 (kg/m^2)	试验剪切破坏荷载 F (KN)			平均剪切破坏荷载 (KN)	层间抗剪强度 (MPa)
0.6	12.4	13.4	11.3	12.4	0.92
0.9	15.2	17.6	16.4	16.4	1.22
1.2	17.0	19.5	18.4	18.3	1.36
1.5	15.7	13.7	15.3	14.9	1.11
1.8	9.7	8.4	9.5	9.2	0.69

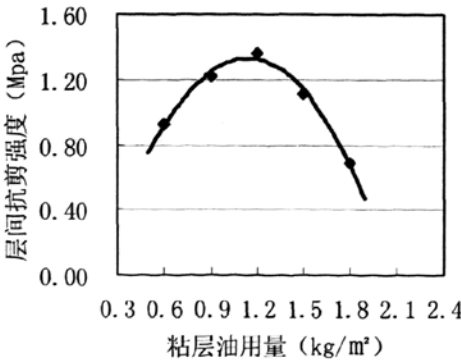


图 3.4 层间抗剪强度-粘层油用量关系图

由试验结果可以得到以下结论:

(1) 随粘层油用量增大层间抗剪强度存在一个峰值, 以层间抗剪强度为 y 值, 粘层油用量为 x 值, 对试验数据进行三次多项式的数据拟合得到拟合方程 $y = -0.04x^3 - 1.33x^2 + 3.17x - 0.50$, 相关系数 $R^2 = 0.99$, 根据方程粘层油用量在 1.14kg/m^2 时层间抗剪强度达到峰值 1.33MPa 。

(2) 由拟合曲线可以看出, 层间抗剪强度随粘层油用量增加达到峰值之前上升速度较慢, 峰值之后下降较快, 这是因为油量较少的情况下, 尽管粘层油无法完全浸渍聚酯玻纤布, 但是聚酯玻纤布与基底之间还是能够通过粘层油粘结在一起, 且聚酯玻纤布本身抵抗变形的能力很强, 因此仍然能提供较大的层间抗剪强度; 但是随着油量的进一步增加, 油膜厚度变大, 聚酯玻纤布与基底之间不能完全接触被油膜隔开, 而导致抗剪强度大幅下降。从本文的试验结果来看, 材料供应商提供的粘层油用量推荐值还是比较合理的, 当然本文试验采用的基底材料为水泥混凝土块, 实际工程中仍需考虑具体的基底形式。由于油量过大会导致层间接触不良, 因此施工中必须注意控制粘层油的用量, 不宜过大, 并且在喷洒粘层油的时候务必保持喷洒的均匀性, 谨防条带状喷洒, 导致部分区域粘油不均匀而形成软弱区域。

(3) 根据已有研究成果显示, 紧急刹车条件水平力系数 f 取 0.5 的情况下, 沥青层层底剪应力不超过 0.4MPa ^[21], 本文试验结果显示最大层间抗剪强度达到 1.33MPa , 完全满足抵抗层间滑移的要求。尽管如此, 施工中铺设沥青面层的作业面是在聚酯玻纤布上, 要求施工车辆必须慢速行驶, 严禁急刹车急转弯, 避免影响聚酯玻纤布的粘结性能。

(5) 由剪切破坏后的试件可以看出, 破坏面均是位于聚酯玻纤布-基底界面上, 这是因为一方面施工工序造成聚酯玻纤布与基底之间的沥青膜较厚, 另一方面沥青面层集料与聚酯玻纤布之间比较容易相互嵌挤粘结形成整体。这就要求我们在施工时必须注意基层顶面的清洁, 以保证基顶与聚酯玻纤布之间的粘结性能。

3.3 弯曲破坏性能研究

3.3.1 试验目的

聚酯玻纤布具有聚酯纤维和玻璃纤维的双重优点,铺设在沥青面层的下面不仅可以作为隔离水分的夹层,更可以改善沥青混合料的弯拉性能。一方面,聚酯纤维提供的韧性保证了聚酯玻纤布复合沥青混合料能够承担更大的变形破坏,另一方面,玻璃纤维束的高抗拉强度由对沥青混合料起到了加筋的作用。为了研究分析织物加筋对于沥青混合料的弯曲性能的影响,采用纯沥青混合料,聚酯玻纤布复合沥青混合料,普通玻纤防裂土工布复合沥青混合料成型小梁试件,对其进行跨中加载小梁弯曲试验。

3.3.2 试验方法

试验采用 AC-20, AC-25 两种沥青混合料级配,作为对比设置纯沥青混合料,聚酯玻纤布复合沥青混合料及普通玻纤防裂布复合沥青混合料三种结构形式。根据《公路沥青及沥青混合料试验规程》碾压成型 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 50\text{mm}$ 车辙板,对于土工材料复合沥青混凝土车辙板的成型有两种方法:一是直接将裁剪好的土工织物铺设在车辙板模具底部,装入沥青混合料后碾压成型;二是直接成型沥青混凝土车辙板,脱模后再在车辙板底部粘贴土工织物。两种成型方法各有优缺点,前者的优点在于符合施工现场的实际情况,缺点在于土工织物较厚的情况下会降低沥青混凝土小梁的有效高度,影响对比试验的精度;后者的优点在于不同类型的混凝土小梁试件差异性较小,缺点在于和实际施工工序不一致,会影响土工织物的加筋效果。聚酯玻纤布加筋作用主要通过玻璃纤维束嵌挤粘贴在沥青混凝土底部实现的,所以本文最终采用第一种方法成型车辙板。

车辙板成型完成后,隔日脱模,在切割机上切割成 $250\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的沥青混合料小梁,试验规程规定的试件尺寸为 $250\text{mm} \times 35\text{mm} \times 30\text{mm}$,但是本文采用的级配最大公称粒径较大,因此选择 $250\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的试件尺寸。每块车辙板切割 5 个小梁作为平行试件,小梁弯曲试验在 MTS 试验机上进行,试验温度 15°C ,加载速率 50mm/min ,试验数据自动记录。

沥青混合料小梁弯曲试验的破坏模型如图 3.5 所示,主要表现为三种破坏模式: I 型破坏是脆性破坏,应力应变呈线性关系,破坏表现为突然的破断,一到破坏点后立即丧失承载能力; III 型破坏是混合料发生流动变形时的柔性破坏,

在荷载作用和试件变形过程中,材料既有应力松弛,又发生蠕变变形,应力应变关系呈曲线形式,应力达到最大值时,材料已明显产生裂缝,实际上已经破坏,因此定义曲线的峰值为破坏点,过峰值以后,试件仍有一定的承载能力;Ⅱ型破坏是介于Ⅰ型和Ⅲ型之间的过渡类型,应力应变曲线在保持一段直线关系后在接近峰值时产生类似于屈服点的转折或微小的曲线,过了峰值之后即使并非马上断裂也只能维持极短时间而破断。试件破坏的模式与试验温度和加载速率有关。

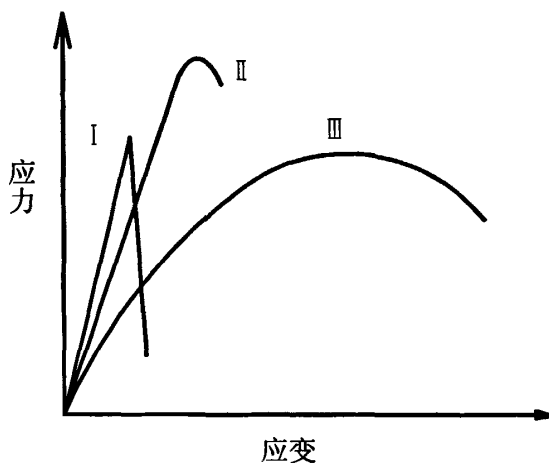


图 3.5 应力应变曲线的三种破坏形状

评价沥青混合料弯曲性能的指标包括破坏弯拉强度、破坏弯拉应变以及劲度模量,这些评价指标都是试验温度和加载速率的函数,但是本文欲评价的是聚酯玻纤布及玻纤防裂布对沥青混合料弯曲性能的影响,因此选择同样的试验温度(15℃)同样的加载速率(50mm/min)进行小梁弯曲破坏试验。

3.3.3 试验结果及分析

根据试验结果计算小梁弯拉强度 R_b , 弯拉应变 ε_b , 劲度模量 S_b , 应变能密度 dW/dV , 计算公式如下:

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{3LP_b}{2bh^2} \\ \varepsilon_b &= \frac{6hd^2}{L^2} \\ S_b &= \frac{R_b}{\varepsilon_b} \\ \frac{dW}{dV} &= \int_0^{\varepsilon_0} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \end{aligned} \tag{3.3}$$

式中：b——跨中断面试件宽度（mm）；
h——跨中断面试件高度（mm）；
L——试件跨径（mm）；
P_b——试件破坏时的最大荷载（N）；
d——试件破坏时的跨中挠度（mm）；
σ_{ij}——应力；
ε_{ij}——应变；
ε₀——临界应变。
小梁弯曲试验结果列表如下：

表 3.7 AC-20 级配小梁弯曲试验结果汇总（15℃）

试件类型	试件编号	弯拉强度 R _b (MPa)	弯拉应变 ε _b	劲度模量 (MPa)	应变能密度 (KPa)
1#	1-1	5.149	0.0134	383.0	50.38
	1-2	5.429	0.0120	451.3	51.76
	1-3	5.639	0.0192	293.7	80.53
	1-4	5.097	0.0145	350.4	54.57
	1-5	5.402	0.0173	312.0	67.97
	平均值	5.343	0.0153	358.1	61.04
2#	2-1	4.855	0.0248	196.2	78.57
	2-2	5.660	0.0201	281.1	76.23
	2-3	5.395	0.0192	281.6	69.45
	2-4	4.646	0.0319	145.5	86.72

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

	2-5	5.840	0.0203	287.6	83.30
	平均值	5.279	0.0233	238.4	78.85
3#	3-1	4.081	0.0207	197.1	61.67
	3-2	3.889	0.0253	153.9	71.62
	3-3	4.301	0.0323	133.1	94.94
	3-4	4.622	0.0194	238.8	65.13
	3-5	4.915	0.0207	237.1	66.73
	平均值	4.362	0.0237	192.0	72.02

注：试件编号 1#为纯沥青混合料小梁，2#为聚酯玻纤布复合沥青混合料小梁，3#为普通玻纤防裂土工布复合沥青混合料小梁，以下皆同此编号。

表 3.8 AC-25 级配小梁弯曲试验结果汇总（15℃）

试件类型	试件编号	弯拉强度 R_b (MPa)	弯拉应变 ϵ_b	劲度模量 (MPa)	应变能密度 (KPa)
1#	1-1	4.451	0.0119	375.6	34.40
	1-2	4.044	0.0117	347.1	32.13
	1-3	5.052	0.0179	282.2	59.86
	1-4	4.460	0.0169	263.7	55.81
	1-5	3.930	0.0208	189.0	55.29
	平均值	4.387	0.0158	291.5	47.50
2#	2-1	3.583	0.0252	141.9	59.55
	2-2	3.843	0.0193	199.3	40.61
	2-3	4.891	0.0231	212.1	70.51
	2-4	4.203	0.0305	137.8	73.57
	2-5	3.758	0.0303	124.0	64.88
	平均值	4.055	0.0257	163.0	61.82
3#	3-1	3.036	0.0218	139.0	38.51
	3-2	3.728	0.0196	190.2	50.55
	3-3	3.834	0.0220	174.6	60.72
	3-4	4.161	0.0251	165.5	71.15
	3-5	3.390	0.0289	117.2	58.79

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

	平均值	3.630	0.0235	157.3	55.94
--	-----	-------	--------	-------	-------

选择典型试件的试验数据绘制荷载-位移关系图，如图 3.6，图 3.7

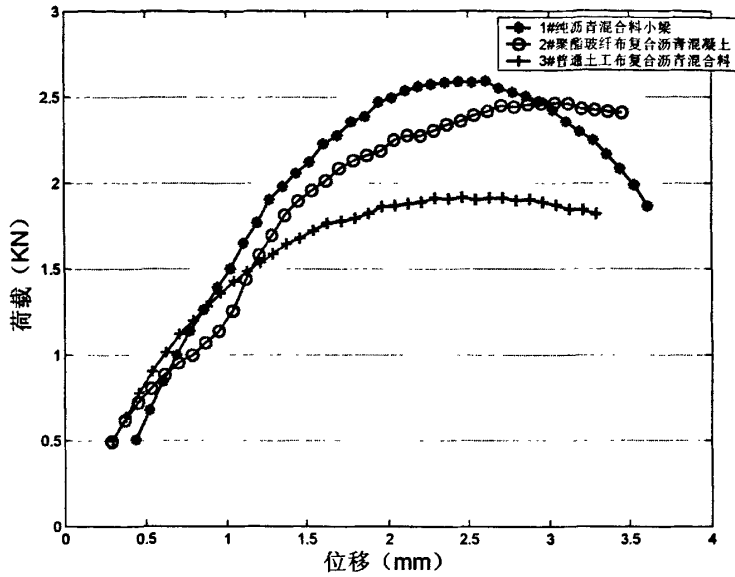


图 3.6 AC-20 小梁弯曲试验荷载-位移图 (15°C)

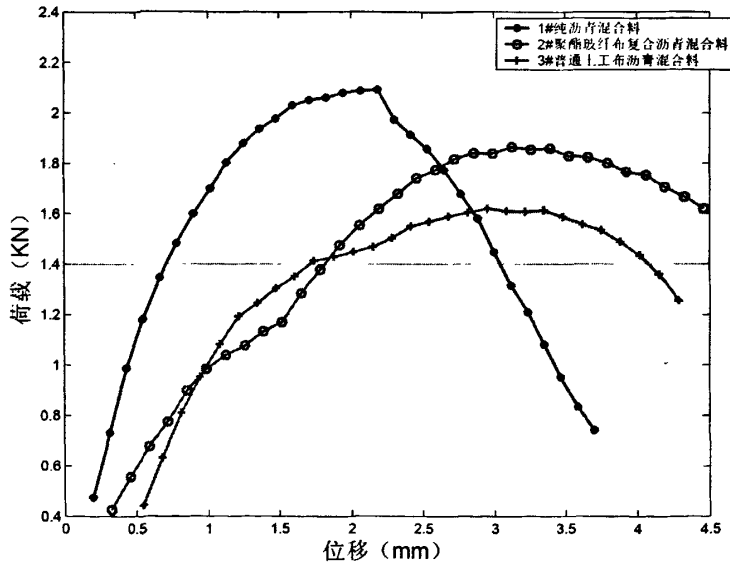


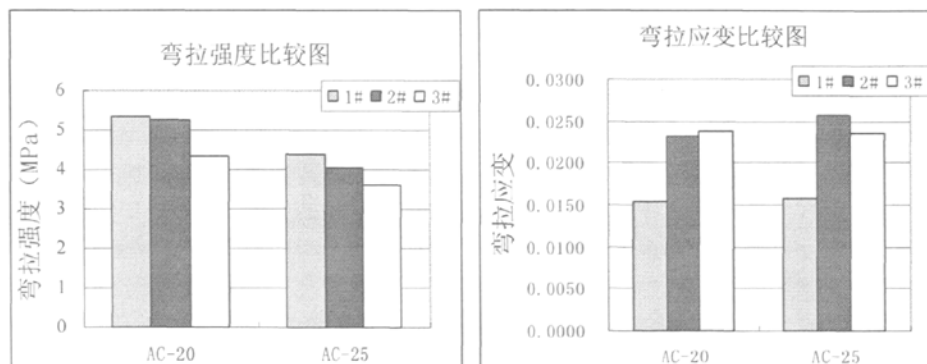
图 3.7 AC-25 小梁弯曲试验荷载-位移图 (15°C)

由试验结果可以得到以下结论:

(1) 各种沥青混合料小梁的弯拉强度指标: $1\# > 2\# > 3\#$, 弯拉应变指标: $2\#, 3\# > 1\#$, 劲度模量指标: $1\# > 2\# > 3\#$ 。加入织物后小梁的弯拉强度有所下降, AC-20 级配下 2# 比 1# 下降 1.0%, 3# 比 1# 下降 18.1%, AC-25 级配下 2# 比 1# 下降 7.6%, 3# 比 1# 下降 17.3%, 我们分析这种情况的出现有可能是由于加入织物后减少了小梁试件的有效高度, 导致强度下降, 但是聚酯玻纤布有明显的加筋作用弥补了这一部分的强度缺失。

(2) 加入织物后试件破坏时的极限弯拉应变得到了大幅的提升, AC-20 级配下 2# 比 1# 增加了 52.0%, 3# 比 1# 增加了 54.7%, AC-25 级配下 2# 比 1# 增加了 62.3%, 3# 比 1# 增加了 48.5%, 这说明加入织物后可以明显提高沥青混合料抵抗变形破坏的能力。

(3) 将 AC-20 级配和 AC-25 级配的各项弯拉试验数据进行比较, 如下图 3.8 所示。1# 纯沥青混合料公称粒径较大的 AC-25 级配在弯拉强度, 弯拉模量方面都比 AC-20 有所降低, 但是极限弯拉应变方面几乎没有什么变化。不同类型的混合料在两种级配下基本上表现出同样的特征, 上文所述弯拉强度, 弯拉应变的变化比率亦非常近似, 而且两种级配的荷载-位移图形状基本相同并无本质的区别, 因此我们认为混合料级配对于土工织物的加筋效果并无明显的影响。



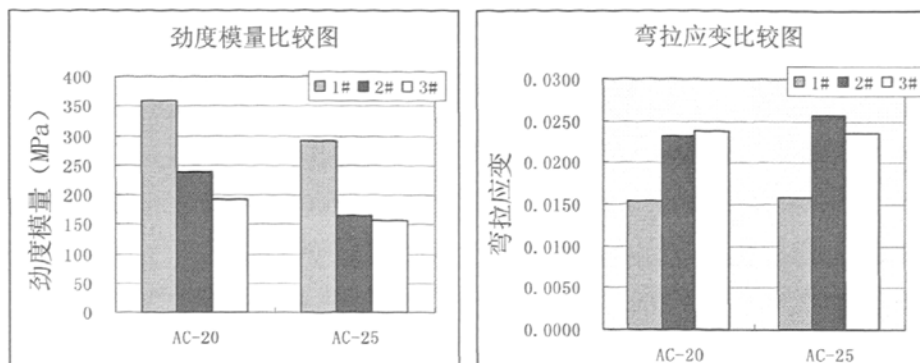


图 3.8 AC-20 与 AC-25 不同级配类型弯拉试验数据比较图

(4)由荷载-位移曲线可以看出,纯沥青混合料小梁在破坏后荷载迅速下降,而织物加筋的小梁在破坏后仍能继续承担较大的荷载,织物良好的韧性增强了沥青混合料承担荷载的能力。

3.4 低温抗裂性能研究

3.4.1 试验目的

沥青混凝土在低温条件下,材料显示出较为明显的弹性特征,模量会大幅上升,抵抗荷载能力也会得到提升,但抵抗变形破坏的能力下降,容易在温度骤降的条件下,来不及松弛应力而产生温度裂缝。聚酯玻纤布的高抗拉强度和材料的韧性在低温条件下会发挥更大的作用,为评价聚酯玻纤布对沥青混合料低温抗裂性能的影响,对于 AC-20 级配进行了-10℃的小梁弯曲试验。

3.4.2 试验方法

对于沥青混合料的低温抗裂性能目前国内外有许多种评价方法,较为常用的有温度应力试验、J 积分试验、低温劈裂试验、弯曲蠕变试验、低温小梁弯曲试验,现将这些试验分述如下:

约束试件温度应力试验(The thermal stress restrained specimen test)又称冻断试验,由美国俄勒冈州立大学开发。试件尺寸为 25cm×5cm×5cm,试件端部

与夹具用环氧树脂粘结,从要求的试验温度以 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度冷却,测定冷却过程中温度应力的变化过程曲线,直至断裂破坏。TSRST 试验能够模拟实际温度变化,重复性很好,其评价沥青混合料低温抗裂性能采用的主要指标有:破断温度、破坏强度、转折点温度、温度应力曲线斜率。

J 积分试验利用切口小梁进行弯曲试验,是基于断裂力学基础发展起来的评价沥青混凝土低温抗裂性能的试验方法,用切口小梁模拟含有微裂缝的材料,将弹塑性断裂力学中的断裂判据 J 积分作为沥青混合料的低温抗裂性能的评价指标。J 积分的临界值 J_{Ic} 越大表明沥青混合料的低温抗裂性能越好。

间接拉伸试验即通常所说的劈裂试验,它是通过加载条加静载于圆柱形试件的轴向,试件按一定的变形速率加载(变形速率模拟路面中温度荷载作用),施加的压缩荷载,垂直、水平变形通过 LVDT 得到。我国现已将该试验方法列入《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052)中作为标准的试验方法。其对加载速率规定如下:对于 15°C 、 25°C 等采用 $50\text{mm}/\text{min}$ 加载,对 0°C 或更低温度建议采用 $1\text{mm}/\text{min}$ 作为加载速率。其评价指标有劈裂强度、破坏变形及劲度模量等。

低温弯曲蠕变试验是“八五”攻关专题提出的评价沥青混合料低温抗裂性能的试验方法。本方法通过测定沥青混合料试件在规定温度和加载应力水平条件下弯曲蠕变的应变速率,以评价沥青混合料的变形能力。评价沥青混合料低温性能是一般采用 0°C 作为试验温度

低温小梁弯曲试验也是国内评价沥青混合料低温性能的常用方法,在 -10°C 条件下进行小梁弯曲试验,主要评价指标有弯拉强度,破坏弯拉应变,低温劲度模量,应变能密度。本文需评价聚酯玻纤布复合沥青混合料的低温抗裂性能,而小梁弯曲试验所采用的试件可以通过在梁底粘贴聚酯玻纤布很好地模拟实际沥青混凝土与聚酯玻纤布的层位关系,因此本文采用低温小梁弯曲试验来评价聚酯玻纤布对沥青混凝土低温抗裂性能的影响。

在低温条件下,要想获得好的沥青混合料技术性能,就必须有较高的强度和较大的变形,但这二者对于材料来说,不可能同时增大,这就说明不能采用单一指标来评价沥青混合料的低温抗裂性能,即不能说沥青混合料在低温时破坏强度大,或者应变大,其低温抗裂性就好。低温下沥青混合料可看作弹性材料,其破坏过程是一个能量耗散的过程。外力对材料所作的功可以转化成如下形式的能量:作为弹性应变能被储存;裂纹发生、发展产生新表面时转化为表

面能。一般情况下,沥青混合料储存的弹性应变能越多,低温抗裂性能就越好。

根据材料损伤准则,材料损伤过程包括裂缝的引发,亚临界状态增长和最后终止 3 个阶段。假定材料破坏形式与单位体积内能量状态相对应,那么材料损伤就可以用应变能密度函数 dW/dV 表示,计算公式为: $dW/dV = \int_0^{\epsilon_0} \sigma_y d\epsilon_y$, 表现在应力-应变图上即是材料发生破坏之前曲线下方的包络面积。材料临界应变能密度愈大,材料发生破坏所需能量也就越大,材料性能就愈好。

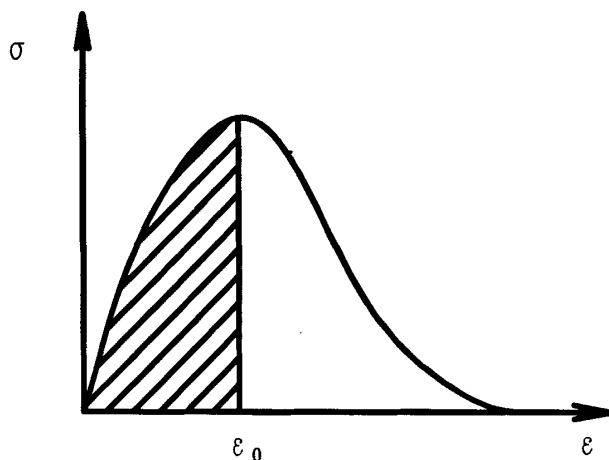


图 4.9 应变能密度示意图

3.4.3 试验结果及分析

试件准备及试验方法同上节所述 15℃ 的小梁弯曲试验,试验温度为 -10℃。试验数据如下所示:

表 3.9 AC-20 级配小梁弯曲试验结果汇总 (-10℃)

试件类型	试件编号	弯拉强度 R_b (Mpa)	弯拉应变 ϵ_b	劲度模量 (MPa)	应变能密度 (KPa)
1#	1-1	—	—	—	—
	1-2	6.903	0.0031	2236.1	12.56
	1-3	6.758	0.0039	1732.7	14.76
	1-4	6.583	0.0041	1593.6	15.33

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

	1-5	6.507	0.0033	1978.1	11.12
	平均值	6.688	0.0036	1885.1	13.44
2#	2-1	—	—	—	—
	2-2	6.570	0.0058	1132.8	21.06
	2-3	6.322	0.0067	949.8	22.08
	2-4	7.200	0.0055	1300.2	23.97
	2-5	6.166	0.0048	1275.0	15.53
	平均值	6.565	0.0057	1164.5	20.66
3#	3-1	6.345	0.0034	1880.0	12.28
	3-2	7.334	0.0038	1955.7	14.94
	3-3	6.226	0.0038	1660.3	11.80
	3-4	6.554	0.0047	1409.4	18.43
	3-5	5.975	0.0048	1244.7	14.16
	平均值	6.487	0.0041	1630.0	14.32

注：1-1、2-1 试件由于试验结果不佳被舍去

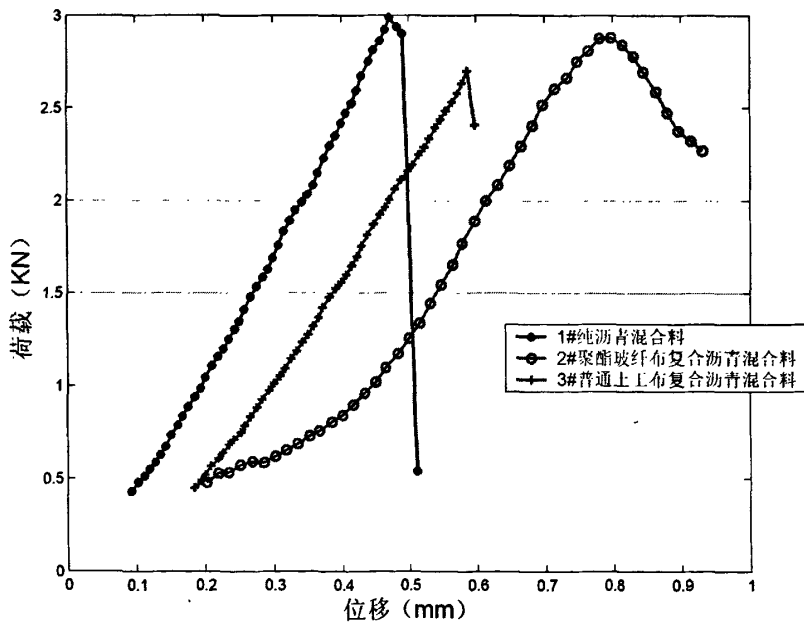


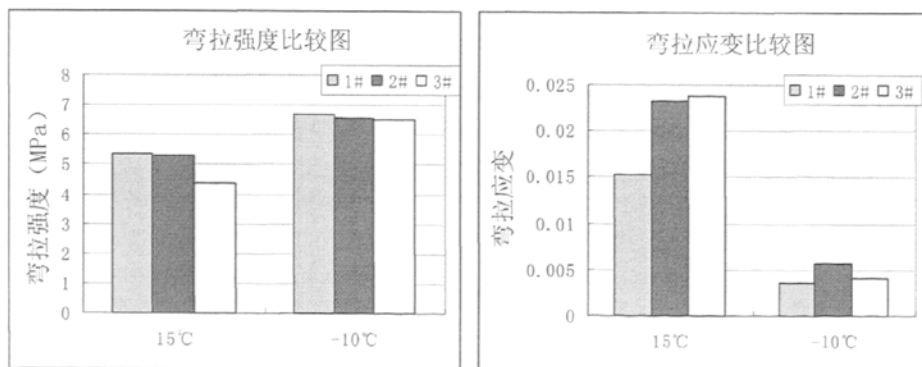
图 3.10 AC-20 小梁弯曲试验荷载-位移图 (-10°C)

由试验结果可以得到以下结论:

(1) 对比-10℃与 15℃的荷载-位移曲线发现, 在低温条件下, 纯沥青混合料和普通玻纤防裂土工布复合沥青混合料已经明显表现出弹性材料的性质, 即在破坏前破坏曲线呈现出明显的直线段, 且荷载达到最大值发生破坏之后迅速下降, 而聚酯玻纤布加筋的沥青混合料则在低温下仍能表现出良好的粘弹性能, 抵挡更大的变形破坏, 且在破坏后仍能承担较大的荷载水平。

(2) 从应变能密度指标来看, 15℃时, 2#比 1#增加了 29.2%, 3#比 1#增加了 18.0%; -10℃时, 2#比 1#增加了 53.7%, 3#比 1#增加了 6.5%。由此可见, 在两种试验温度下, 土工织物加筋沥青混合料的弯曲性能均优于纯沥青混合料, 但在低温条件下, 普通玻纤防裂土工布由于厚度不足拉伸强度较小基本表现不出明显的加筋效果, 而聚酯玻纤布凭借其较大的拉伸强度和抵抗变形能力仍能大大提高沥青混合料的低温抗裂性能。

(3) 将 AC-20 级配在 15℃和-10℃下小梁弯曲试验数据进行对比, 如下图 4.11 所示。可以看出沥青混合料的弯曲性能随温度变化很大, 温度降低, 弯拉强度变大, 弯拉应变降低, 弯拉模量提高, 弯曲应变能密度降低, 加入聚酯玻纤布后并不改变这方面的特性, 但是聚酯玻纤布复合沥青混合料的劲度模量的增长幅度明显不及另外两种, 这主要还是因为聚酯玻纤布为沥青混合料提供了更强的抵抗变形破坏的能力。



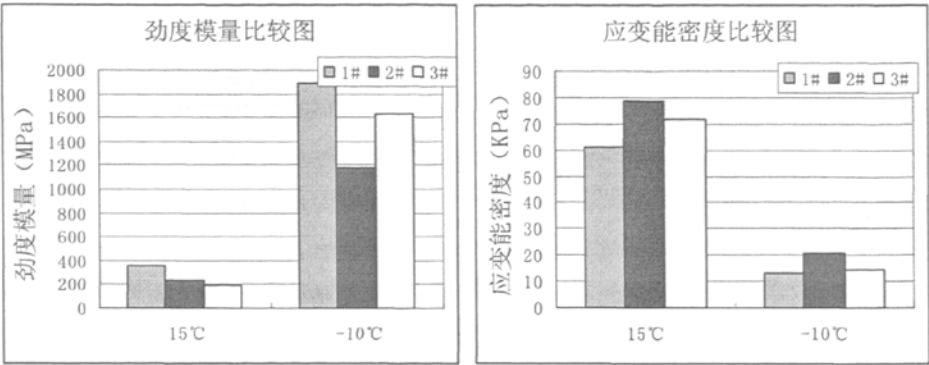


图 4.11 AC-20 级配下不同温度小梁弯曲试验数据对比图

3.5 疲劳性能

3.5.1 试验目的

路面使用期间经受车轮荷载的反复作用，长期处于应力应变交迭变化状态，致使路面结构强度逐渐下降。当荷载重复作用超过一定次数之后，在荷载作用下路面内产生的应力就会超过强度下降后的结构抗力，使路面出现裂纹，产生疲劳断裂破坏。设置聚酯玻纤布夹层后，改善了沥青混合料面层的弯曲性能，同时也会改变它的疲劳性能。为此本文进行了纯沥青混合料、聚酯玻纤布复合沥青混合料、玻纤防裂布复合沥青混合料的小梁疲劳试验，以评价聚酯玻纤布及玻纤防裂布对沥青混合料疲劳性能的影响。

3.5.2 试验方法

沥青混合料的疲劳试验方法大致可以分为四类：

第一类是实际路面在真实汽车荷载作用下的疲劳试验破坏，以美国著名的 AASHTO 试验路为代表；

第二类是足尺路面结构在模拟汽车荷载作用下的疲劳试验研究，包括环道试验和加速加载试验，主要有澳大利亚和我国交通部公路科研所的加载设备 (ALF)，南非国立道路研究所的重型车辆模拟车 (HVS)，美国华盛顿州日立大学

的室外大型环道和重庆公路科学研究所的室内大型环道试验;

第三类是试板试验法;主要是通过轮辙试验以模拟车轮在路面上的作用,了解裂缝产生和扩展的形式。

第四类是试验室小型的疲劳试验研究。先将沥青混合料制作一定形状的试件,然后按某种方式模拟沥青路面的受力状态进行疲劳试验。此试验方法的特点在于沥青混合料制备比较方便,试件尺寸小,试验周期短,温度、荷载等因素易于控制,便于进行大量试验,可以排除其他影响因素得出沥青混合料的疲劳规律。前三类方法耗资大、周期长、开展得并不普遍。因此,大量采用的还是周期短、费用小的室内小型疲劳试验方法。室内小型疲劳试验常采用简单弯曲试验,其中又有中点加载或三分点加载、旋转悬臂梁和梯形悬臂梁三种试验方式。此外还有劈裂试验、弹性基础梁弯曲试验、三轴压力试验等。

中点加载弯曲试验试件和成型方法,可参见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000),小梁尺寸为 $250\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$,试验在 MTS (Material Test System)-810 试验机上进行,试验温度由环境箱控制,加载频率一般为 $1 \sim 10\text{Hz}$,加载波形多为正弦波、半正弦波或者矩形波。荷载最大值一般取试件极限强度的 $0.1 \sim 0.5$ 倍。加载方式采用应力控制,中点加载,支座间距(小梁的跨径)为 200mm 。

三分点加载试验设备主要包括加州理工大学伯克莱分校和美国沥青协会使用的两种。前者采用的小梁试件尺寸为 $381\text{mm} \times 38.1\text{mm} \times 38.1\text{mm}$;后者采用的小梁试件尺寸为美国公路战略研究计划提出的压实沥青混合料重复弯曲疲劳寿命测定的标准试验方法 (SHRPM-004) 制定,试件尺寸为 $381\text{mm} \times 50.8\text{mm} \times 63.5\text{mm}$,试验温度 200°C ,加荷频率 $5 \sim 10\text{Hz}$,采用应变控制模式,测定试件劲度降低到初始劲度 50% 的荷载循环次数。

旋转悬臂是英国诺丁汉大学采用的疲劳试验设备。试验时试件竖向安装在旋转悬臂轴上,荷载作用于试件顶部,使整个试件都受到恒定的弯曲应力作用。一般试验温度为 10°C ,旋转速率为 1000r/min 。诺丁汉大学还开发了三轴疲劳试验,其试件为圆柱体,直径 100mm ,高 200mm ,试验时施加轴向正弦波荷载作用。

壳牌石油公司和比利时的研究者以及法国 LCPC 采用梯形梁疲劳试验。梁粗的一端固定,另一端受到正弦变化的应力或应变作用。正常情况下疲劳破坏出现在中部,而不应出现在端部。范迪克(Van Dijk)采用的试件其粗的一端尺寸为 $55\text{mm} \times 20\text{mm}$,顶端尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$,高度为 250mm 。

英国道路与运输研究实验室(TRRL)采用无反向应力的单轴拉伸试验,加载频率为 25Hz,荷载持续时间为 40ms,间歇时间从 0~1s 不等。

劈裂疲劳试验又称为间接拉伸疲劳试验,该试验是沿圆柱形试件的垂直径向作用平行的重复压缩荷载,可采用马歇尔试件,试件直径 100mm,高 63.5mm,施加荷载的压条宽为 12.5mm,这种加载方式在沿垂直径向面、垂直于荷载作用方向产生均匀拉伸应力,试验易于操作,为广大研究人员所采用。

疲劳试验包括应力控制和应变控制两种不同的加载模式。应力控制方式是指在反复加载过程中所施加荷载(或应力)的峰谷值始终保持不变,随着加载次数的增加最终导致时间断裂破坏。这种控制方式一般是以试件完全破坏作为疲劳损坏的标准。应变控制方式是指在反复加载过程中始终保持挠度或试件底部应变峰谷值不变。由于在这种控制方式下,试件通常不会出现明显的断裂破坏,一般以混合料劲度下降到初始劲度 50%或更低为疲劳破坏标准。究竟哪种加载模式能够更好地反映实际路面疲劳特性,目前学界对此尚无定论。有研究认为应变控制荷载模式可能更适用于较薄的路面,应力控制荷载模式可能更适用于较厚的路面,但是如何确定薄厚路面的界限也受到很多因素的影响。

本文最终选择跨中加载小梁疲劳试验作为评价各种沥青混合料疲劳性能的试验方法,试验设备为 MTS810 材料试验系统,主要控制标准如下:

(1) 加载方式: 三点跨中加载,跨径 200mm

(2) 控制方式: 应力控制疲劳试验

(3) 加载频率: 10Hz

(4) 加载波形: 正弦波,由于荷载波形完全处于压力一侧,也将其成为半正矢波。为避免长时间加载可能出现试件脱空,造成对试件的冲击作用,试验设置正弦波荷载的最小荷载为最大荷载的 2%。

(5) 试验温度: 15℃

(6) 疲劳破坏判断标准: 以沥青混合料小梁裂缝迅速发展,承载能力迅速下降作为疲劳破坏的标准。

(7) 试件个数: 三种沥青混合料类型,轮碾成型标准车辙板,切割成 250mm×50mm×50mm 的小梁,根据沥青混合料小梁的破坏强度,选择 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 五个应力比,每个应力比 3 个平行试件。

3.5.3 试验结果及分析

试验过程中，记录实际荷载计算弯拉应力值，以及疲劳破坏次数（疲劳寿命），试验数据如下：

表 3.10 1#纯沥青混合料疲劳试验数据

应力水平	弯拉应力 σ (MPa)	疲劳寿命 (次)	对数疲劳寿命	平均值	变异系数 (%)
0.2	1.113	13112	4.118	4.050	2.19
	1.087	12074	4.082		
	0.986	8897	3.949		
0.3	1.405	6363	3.804	3.827	0.70
	1.517	6620	3.821		
	1.492	7176	3.856		
0.4	2.136	3533	3.548	3.497	4.91
	2.002	2018	3.305		
	1.966	4333	3.637		
0.5	2.614	1815	3.259	3.141	3.55
	2.505	1091	3.038		
	2.464	1333	3.125		
0.6	3.005	791	2.898	2.763	4.30
	2.914	473	2.675		
	2.986	521	2.717		

表 3.11 2#聚酯玻纤布复合沥青混合料疲劳试验数据

应力水平	弯拉应力 σ (MPa)	疲劳寿命 (次)	对数疲劳寿命	平均值	变异系数 (%)
0.2	1.163	22966	4.361	4.300	1.40
	1.016	19874	4.298		
	1.101	17403	4.241		
0.3	1.613	11403	4.057	3.923	3.48
	1.592	8461	3.927		
	1.574	6080	3.784		

第三章 聚酯玻纤布复合沥青混合料路用性能研究

0.4	2.074	3080	3.489	3.469	1.36
	2.14	2600	3.415		
	2.06	3184	3.503		
0.5	2.531	1971	3.295	3.259	1.48
	2.675	1898	3.278		
	2.64	1600	3.204		
0.6	2.952	1449	3.161	2.968	5.66
	3.072	726	2.861		
	3.187	760	2.881		

表 3.12 3#普通玻纤防裂布复合沥青混合料疲劳试验数据

应力水平	弯拉应力 σ (MPa)	疲劳寿命 (次)	对数疲劳寿命	平均值	变异系数 (%)
0.2	0.906	22916	4.360	4.261	2.09
	0.877	15391	4.187		
	0.912	17196	4.235		
0.3	1.304	12916	4.111	3.977	3.38
	1.352	9519	3.979		
	1.358	6954	3.842		
0.4	1.752	3255	3.513	3.418	2.46
	1.812	2458	3.391		
	1.908	2244	3.351		
0.5	2.215	1431	3.156	2.891	8.77
	2.106	447	2.650		
	2.226	737	2.867		

注：3#普通玻纤防裂布复合沥青混合料小梁由于试件不足仅做四个应力比的疲劳试验

根据沥青混合料疲劳理论，在应力控制疲劳试验中，应力与疲劳寿命成双对数线性关系，疲劳方程形式为：

$$N_f = K \sigma^{-n} \text{ 或 } \lg N_f = a - b \lg \sigma \tag{3.4}$$

式中：Nf ——疲劳破坏时的荷载重复作用次数

σ ——弯拉应力

K、n ——试验所确定的参数

图 3.12、图 3.13、图 3.14 为 3 种混合料类型的疲劳曲线，表 3.13 列出了三种混合料类型的疲劳方程。

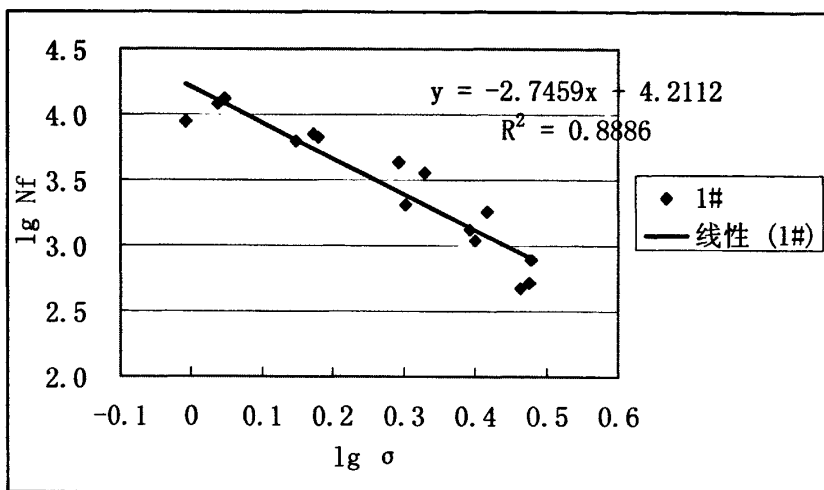


图 3.12 1#纯沥青混合料双对数疲劳曲线

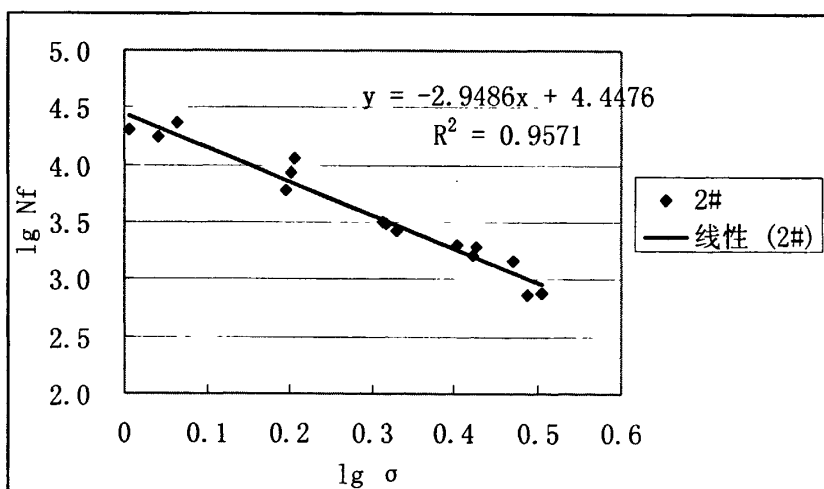


图 3.13 2#聚酯玻纤布复合沥青混合料双对数疲劳曲线

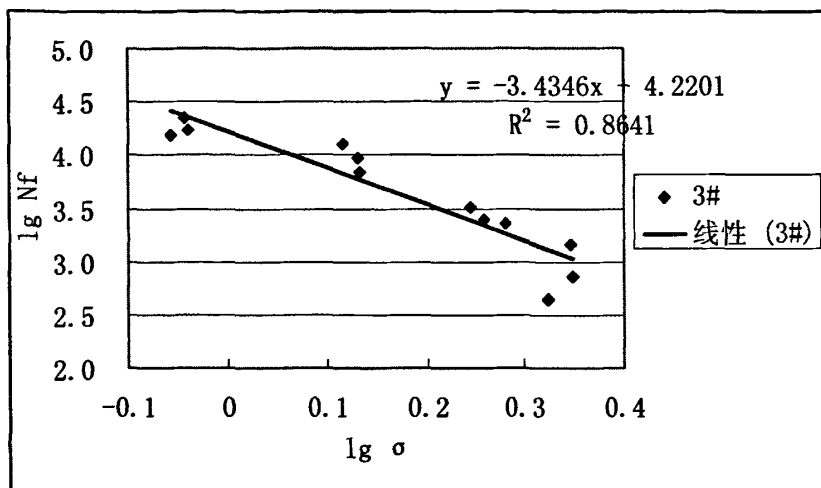


图 3.14 3#普通玻纤防裂布复合沥青混合料双对数疲劳曲线

表 4.13 三种混合料类型的疲劳方程

混合料类型	疲劳方程 ($\lg N_f = a - b \lg \sigma$)	相关系数
1#纯沥青混合料	$\lg N_f = 4.2112 - 2.7459 \lg \sigma$	0.8886
2#聚酯玻纤布复合沥青混合料	$\lg N_f = 4.4476 - 2.9486 \lg \sigma$	0.9571
3#玻纤防裂布复合沥青混合料	$\lg N_f = 4.2201 - 3.4346 \lg \sigma$	0.8641

由数据拟合情况来看，应力水平和疲劳寿命之间在双对数坐标下满足良好的线性关系。沥青混合料疲劳方程中的参数 a 、 b 分别表征疲劳性能的某方面特征。 a 值为疲劳曲线在 y 轴上的截距，反映了疲劳曲线线位的高低， a 值越大，疲劳曲线线位越高，混合料疲劳性能越好。 b 值为疲劳曲线的斜率，反映疲劳寿命对荷载水平的敏感性， b 值越大，疲劳曲线斜率越大，疲劳寿命对于荷载水平的变化越敏感。由表 3.13 中列出的疲劳方程，根据 a 值的大小得出疲劳性能优劣的顺序：2#>3#>1#，根据 b 值的大小得到疲劳寿命对荷载的敏感性程度：3#>2#>1#。由疲劳曲线可知，聚酯玻纤布在不同的应力水平均能提高沥青混合料的疲劳破坏寿命，玻纤防裂布在低应力水平能明显提高沥青混合料的疲劳性能，但是在高应力水平下它的疲劳寿命却比较短。

3.6 本章小节

本章通过斜剪试验、小梁弯曲试验、低温小梁试验、小梁疲劳试验对聚酯玻纤布复合沥青混合料的路用性能进行评价，主要结论如下：

(1) 加入聚酯玻纤布后会降低层间粘结强度 (1.33MPa)，但仍然满足抵抗层间剪应力的要求 (0.4MPa)。层间剪切强度—粘层油用量曲线可用三次多项式 $y = -0.04x^3 - 1.33x^2 + 3.17x - 0.50$ 进行拟合，层间剪切强度达到峰值之前上升较慢，峰值过后迅速下降。斜剪试验破坏面位于聚酯玻纤布和水泥混凝土基底之间，说明此层较为软弱。

(2) 加入织物后小梁的弯拉强度有所下降，AC-20 级配下 2# 比 1# 下降 1.0%，3# 比 1# 下降 18.1%，AC-25 级配下 2# 比 1# 下降 7.6%，3# 比 1# 下降 17.3%，这种情况的出现有可能是由于加入织物后减少了小梁试件的有效高度，导致强度下降，但是聚酯玻纤布有明显的加筋作用弥补了这一部分的强度缺失。加入织物后试件破坏时的极限弯拉应变得到了大幅的提升，AC-20 级配下 2# 比 1# 增加了 52.0%，3# 比 1# 增加了 54.7%，AC-25 级配下 2# 比 1# 增加了 62.3%，3# 比 1# 增加了 48.5%，这说明加入织物后可以明显提高沥青混合料抵抗变形破坏的能力。混合料级配对于土工织物的加筋效果并无明显的影响，不同类型的混合料在两种级配下基本上表现出同样的特征。

(3) 在低温条件下，纯沥青混合料和普通玻纤防裂土工布复合沥青混合料已经明显表现出弹性材料的性质，即在破坏前破坏曲线呈现出明显的直线段，且荷载达到最大值发生破坏之后迅速下降，而聚酯玻纤布加筋的沥青混合料则在低温下仍能表现出良好的粘弹性能，抵挡更大的变形破坏，且在破坏后仍能承担较大的荷载水平。从应变能密度指标来看，15℃ 时，2# 比 1# 增加了 29.2%，3# 比 1# 增加了 18.0%；-10℃ 时，2# 比 1# 增加了 53.7%，3# 比 1# 增加了 6.5%，在低温下普通玻纤防裂布提高沥青混凝土低温抗裂性的能力非常有限，而聚酯玻纤布凭借其优良的拉伸强度和抵抗变形能力仍能大大提高沥青混合料的低温抗裂性能。

(4) 应力水平和疲劳寿命之间在双对数坐标下满足良好的线性关系，疲劳方程分别是：1# 纯沥青混合料 $\lg N_f = 4.2112 - 2.7459 \lg \sigma$ ；2# 聚酯玻纤布复合沥青混合料 $\lg N_f = 4.4476 - 2.9486 \lg \sigma$ ；3# 普通玻纤防裂布复合沥青混合料 $\lg N_f = 4.2201 - 3.4346 \lg \sigma$ 。比较疲劳方程中的参数可知，聚酯玻纤布在不同的

应力水平均能提高沥青混合料的疲劳破坏寿命，玻纤防裂布在低应力水平能明显提高沥青混合料的疲劳性能，但是在高应力水平下它的疲劳寿命却比较短。

第四章 聚酯玻纤布防裂隔水层作用机理

国内外进行了大量的有关沥青路面早期损坏现象的调查研究, 这些损坏的表现形式和成因错综复杂, 各研究机构对于病害类型的分类方法也是多种多样。一般来说, 沥青路面早期病害可以分为四类: 裂缝类、变形类、表面损坏类及水损坏。聚酯玻纤布夹层防治沥青路面病害有两大作用, 一是利用聚酯玻纤布的高抗拉强度和良好的变形韧性改善沥青面层的性能, 防治沥青路面裂缝的产生与发展, 即防裂作用; 一是与粘层油材料相结合形成一层不透水的夹层, 防止路表水进入道路结构内部造成水损坏, 即隔水作用。本章主要通过分析沥青路面典型病害(包括裂缝病害和水损坏)的产生机理, 结合聚酯玻纤布的材料特性, 阐述聚酯玻纤布防治沥青路面病害的原理。

4.1 聚酯玻纤布防裂机理

4.1.1 反射裂缝的产生与发展

沥青路面反射裂缝问题是各国道路工作者普遍关心的问题。半刚性基层在温度湿度等环境条件的作用下, 容易产生温缩、干缩裂缝, 沥青面层底面在基层裂缝处容易产生应力集中效应, 在车辆荷载及环境荷载的反复作用下, 基层裂缝会反射到沥青面层上来, 造成面层的开裂, 这种裂缝我们通常称为反射裂缝。沥青加铺层在原沥青路面的开裂处或者原水泥混凝土路面的接缝处也容易产生反射裂缝。

(1) 温度荷载反射裂缝

路面暴露在外界环境中, 在低温条件下, 沥青面层和基层都会产生温度收缩, 产生温度应力。由于基层的应力在裂缝处不连续, 导致沥青面层底部在基层裂缝处出现应力集中现象, 同时承受它本身以及旧沥青路面所产生的温度应力。

沥青面层温缩开裂有两种情况: 一种是由于季节性的气温骤降, 在有约束的沥青层内产生的温度应力超过沥青混凝土的抗拉强度时造成的开裂。在一般情况下, 由于沥青混合料具有良好的应力松弛性能, 温度升降产生的变形不至

于产生过高的温度应力，但是当气温骤降时，由于沥青混合料的应力松弛赶不上温度应力的增长，超过混合料的极限拉伸应变，便产生开裂。

另一种情况是温度疲劳裂缝。在昼夜温差比较大的地区，由于气温的反复升降导致沥青混合料产生温度应力疲劳，混合料的极限拉伸应变减小，应力松弛性能降低，最后在并不太大的温度应力下便发生开裂。

(2) 车辆荷载反射裂缝

基于断裂力学的研究分析认为：在典型路面结构下，半刚性基层弹性模量和厚度都大于沥青面层，当车辆荷载相对于基层裂缝面为对称加载时，基层的穿透裂缝表现为闭合裂缝，即沥青面层底面在基层裂缝处受压应力作用，不会出现受拉开裂现象；车辆荷载非对称加载时，裂缝尖端的剪应力具有明显奇异性，导致沥青面层出现反射裂缝。但是，如果仅考虑交通荷载作用的话，半刚性基层中的穿透裂缝一般不会出现试问扩展，在交通荷载的重复作用下，有可能因为裂缝的疲劳扩展而形成反射裂缝。

沥青路面反射裂缝的发展模式主要有两种：张开型和剪切型。温度荷载导致的反射裂缝主要是张开型，车辆荷载导致的反射裂缝包括张开型和剪切型，见图 4.1 所示。

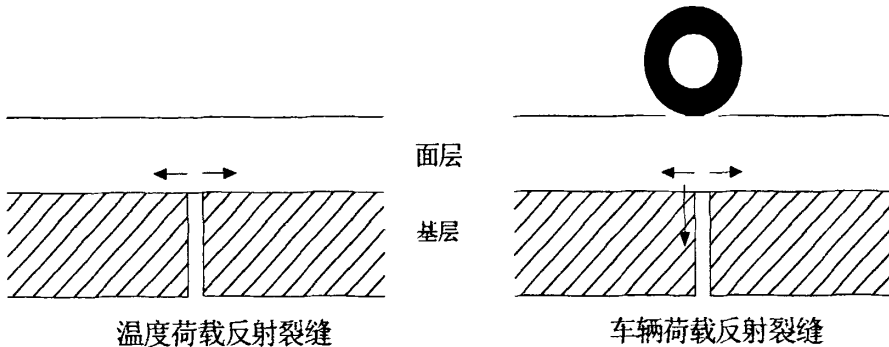


图 4.1 两种反射裂缝发展模式示意图

4.1.2 聚酯玻纤布防治反射裂缝

在半刚性基层表面设置聚酯玻纤布，能够改变沥青层在车辆荷载和温度作用下的受力状态，大幅度降低基层裂缝处沥青层的应力集中，从而阻碍反射裂缝的产生和发展。

普通土工织物厚度很小，它们在垂直方向对路面的力学贡献很小，只是改变沥青层底面水平方向的力学特性，其力学性质类似于薄膜，因此在计算中不宜将其作为一个独立的结构层次考虑，可按薄膜问题处理，即忽略垂直于中面的应力与应变，只考虑平行于中面的应力，且不随厚度变化，不能承受剪力和弯矩。长安大学胡长顺、曹东伟基于薄膜单元理论对水泥混凝土板上加铺沥青面层进行了力学响应分析^[27]，计算结果表明，层间设置土工织物后，AC 层剪应力与弯沉差将会减小，而沥青层底弯沉值和表面弯沉值几乎没有变化。总体上，层间设土工织物后沥青层底的应力和位移变化很小。分析原因在于沥青混凝土和水泥混凝土材料的模量较大，而土工织物的弹性模量和厚度都很小，故增加土工织物单元刚度后的总体刚度改变不大，所得的最后结果变化也不大。由此可以看出普通土工织物对于路面力学响应的贡献并不明显。

但是聚酯玻纤布区别于普通土工织物之处就在于，它结合了土工织物和土工格栅的双重优点，既具有良好的韧性能提高沥青混合料抵抗变形破坏的能力，同时还具有较高的抗拉强度，能够全面提高路面材料强度与刚度，改变路面结构的应力分布状态。其力学作用主要体现在以下几个方面：

(1) 聚酯玻纤布并不是依靠自身的较大变形来扩散应力，其防裂作用实质是一种隔离功能，它分隔了半刚性基层和沥青面层，避免了沥青层直接处于裂缝尖端的应力集中区域，而由抗拉强度较高的织物本身承受较大的拉应力，从而阻碍了裂缝的迅速扩展。有研究认为，在保证抗拉强度满足要求的前提下，土工织物延伸率 ϵ 越小其防裂效果越好^[29,30]。因此，聚酯玻纤布这样高强度，低延伸率的土工材料，拥有良好的防裂效果；

(2) 温缩裂缝主要是由于温度骤降，混合料的应力松弛赶不上温度应力的增长，层底的弯拉应变超过极限弯拉应变而造成的。加铺聚酯玻纤布后，沥青面层和基层之间不再直接接触，层间结合能力受到削弱，基层裂缝出在低温收缩时产生的位移可以通过聚酯玻纤布夹层吸收，不在沥青面层底部产生较大的拉应力，降低沥青面层底部在基层裂缝处的应力集中现象，同时提高沥青面层的应力松弛能力，抵抗温缩荷载疲劳破坏。

(3) 温度型反射裂缝一般沿基层裂缝面发展，车辆荷载型反射裂缝的扩展方向与基层裂缝面一般呈 20° 夹角，聚酯玻纤布能增大基层内垂直裂缝沿界面向水平方向发展的可能性，从而延缓裂缝反射到路表的时间。

4.2 聚酯玻纤布隔水作用

4.2.1 水对路面结构的破坏作用

路面结构长期暴露在外界环境中，雨水、雪水等对沥青路面的破坏极大。路表水通过面层空隙、裂缝或破损处渗入路面结构内部，由于半刚性基层材料比较致密，在路面排水条件不好的情况下，这部分水会滞留在半刚性基层顶面，在大量快速行车作用下，产生很大的动水压力，冲刷基层材料表层的细料形成浆体，浆体通过裂缝被行车挤压到路表面，造成唧浆现象。在渗入水的浸泡和冲刷作用下，沥青面层与基层逐渐分离，半刚性基层强度降低，进而引发沥青路面的结构性破坏。旧路加铺沥青面层的路面结构同样会因为路表水的渗入造成层间脱落而发生破坏。

4.2.2 聚酯玻纤布的隔水作用

聚酯玻纤布吸收沥青粘层油后，在道路结构中会形成一个不透水的隔离层。通常将此隔离层设置于沥青面层和基层或加铺层与旧路之间，以防止路表水渗入面层基层界面，保护基层材料不受侵蚀。本文之前提到过，聚酯玻纤布会在一定程度上削弱面层基层的粘结强度，但是层间粘结性能的试验结果证明，剪切试验的破坏面位于基层材料和聚酯玻纤布之间，而聚酯玻纤布与沥青面层材料之间的粘结性能是良好的，因此聚酯玻纤布隔离层可以阻止路表水渗入基层，并且降低水对界面条件的破坏作用。

为良好的实现聚酯玻纤布隔水夹层的作用，在实际操作中需要注意以下几点：

(1) 聚酯玻纤布本身是透水的，只有吸收饱和的沥青粘层油才能成为隔水夹层，因此粘层油的用量一定要适量，过大导致粘结不足层间滑移，过小则会使聚酯玻纤布的隔水效果无法完全发挥。

(2) 聚酯玻纤布对基层顶面的平整性要求很高，如果基层顶面凹凸不平，可能会导致聚酯玻纤布在施工过程中发生破损，影响隔水效果。

(3) 聚酯玻纤布的隔水作用具有双向性，它不仅阻隔路表水下渗到基层，而且它还阻隔道路内部残留的水上升到面层，这就要求在铺设聚酯玻纤布之前

一定要保证基顶的清洁、干燥，雨雪天气严禁施工，否则这些水分就会积聚在基顶和聚酯玻纤布之间难以挥发。

4.3 聚酯玻纤布防裂隔水层设置方式

基于以上分析，聚酯玻纤布铺设在道路结构中可以表现出优良的性能，但是具体到工程中，聚酯玻纤布还有各种铺设方式。

4.3.1 铺设层位

土工织物应用路面结构中一般都是设置于面层与基层之间，也有部分工程将土工织物设置在沥青路面的中上面层之间，以提高路面的高温稳定性，抵抗车辙和拥包，但是这种设置方法仍然有待理论和实践的检验。

4.3.2 铺设宽度

聚酯玻纤布的设置方式可以按照铺设宽度分为两种：满铺和贴缝。

(1) 满铺

满铺方式一般出现在新建半刚性沥青混凝土路面中，聚酯玻纤布沿整个路面宽度满幅铺设。这种铺设方式的优点在于保持了路面结构的整体性、连续性，路面各点的应力状态较为一致；缺点在于施工要求较高，成本较大。

(2) 贴缝

新建半刚性基层沥青路面还可以采用贴缝处理的方法，首先在基层顶面按一定间距（10~15m）预切缝，灌缝处理后在裂缝处粘贴一定宽度聚酯玻纤布。防裂机理主要是通过锯缝释放半刚性基层因温度下降及水份散发收缩受阻而产生的拉应力提供预定的不连续的断面位置，从而控制随意裂缝的出现，同时，利用切缝上的土工合成材料在一定程度上缓解裂缝处沥青应力集中，消除沥青加铺层反射裂缝的产生。

贴缝处理方法更多的出现在旧路加铺工程中，在旧沥青路面的裂缝处或旧水泥混凝土路面的接缝处粘贴一定宽度的聚酯玻纤布起到防裂隔水的作用。

贴缝处理的优点在于可以节约成本，铺设具有针对性；缺点在于由于铺设面积的限制，与基层的粘结力较弱，容易在面层施工过程遭到破坏。

4.4 本章小节

(1) 聚酯玻纤布夹层可以通过加筋沥青面层，隔离面层基层接触，降低基层裂缝处应力集中，增大基层裂缝沿界面向水平方向发展的可能性来有效抑制缓解半刚性基层沥青路面的反射裂缝现象。同时削弱面层基层约束条件，减少温缩裂缝的产生和发展。

(2) 聚酯玻纤布吸收粘层油形成一个不透水的隔离层，可以阻隔路表水通过面层中的孔隙或微小裂缝渗入道路内部，破坏基层，防止发生沥青路面水损坏。

(3) 聚酯玻纤布一般铺设在面层和基层或加铺层与旧路界面上，按照铺设宽度有满铺和贴缝两种铺设方式。

第五章 聚酯玻纤布施工技术研究

道路工程中,有很多新材料新技术在理论上可以归纳出很好的结论,在室内试验中可以表现出优良的性能,一旦付诸实际工程中就会出现这样那样的问题,这一方面与新材料新技术的应用经验较少有关,同时也是相关部门不重视施工技术的结果。本文根据大量的工程实例,结合本项目的试验路工程,对于聚酯玻纤布的施工技术进行了总结,同时归纳出施工中易出现的问题,以资参考。

5.1 试验路介绍

结合“新建沥青混凝土路面中聚酯玻纤布防裂隔水层的技术开发及应用研究”项目,课题组选择在上海市南汇区西乐路(人民西路至下盐公路路段)进行聚酯玻纤布试验路工程,工程于2007年11月25日—11月26日实施完成。

试验路段位于上海市东南部,处于亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季低温干燥,附近道路水损及裂缝病害比较严重。西乐路为城市快速路,全长2.5公里,正常路段红线宽32m,机动车道宽16m,交叉口附近正常渠化加宽。基层为新建三渣基层,在未来产生的温缩和干缩裂缝将考验聚酯玻纤布的防反性能;面层为5cm厚AC-13型沥青混合料,厚度较薄,在自然环境和车辆荷载的作用下将造成路表水的下渗,届时聚酯玻纤布的隔水作用也将得到发挥。

试验段使用了三种玻纤布类型:

A1: 该种聚酯玻纤布抗拉强度较高,韧性很好,一方面施工中可以较好的适应各种基层顶面,另一方面也利于其在最终的路面结构中形成一个完整且独立的功能层。

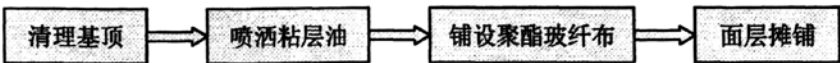
A2: 普通玻纤布,材质较脆,易撕裂,抗顶破强度亦不是很好,铺设完成后,在车辆荷载的碾压下容易起毛,尤其是使用乳化沥青时,在潮湿环境中这种现象更为显著,甚至会导致布的破损。

B1: 该种材料由于厚度较薄,加筋强度不足,且生产工艺导致其为三层聚酯薄膜叠加而成,在面层施工车辆的作用下,很容易出现玻纤加筋被拉断、聚

酯薄膜被层层带起的现象。

5.2 聚酯玻纤布施工技术

聚酯玻纤布的施工工序大致包括四个步骤：



5.2.1 清理基顶

基顶的清洁状况严重影响聚酯玻纤布与基层顶面的粘结效果，进而影响聚酯玻纤布的路用性能，因此必须对基顶进行认真彻底的清理工作。施工工序如下：

（1）人员分为两组，前排用扫帚粗扫，后排用鼓风机鼓吹灰尘；两组人员应相隔一定距离，防止前排工人吸入大量灰尘；

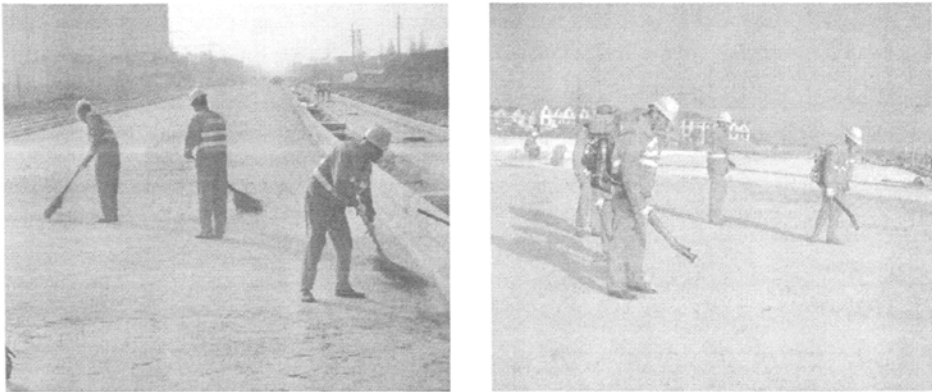


图 5.1 路基顶面初扫

（2）第一次清扫完毕后，进行二次清扫，此次清扫主要针对基层顶面的不平处。仍然分为两组，前排负责用铁锤砸掉凸起部分，并用铁锹铲出路面范围；后排继续吹扫，对凹凸部分进行重点鼓吹。

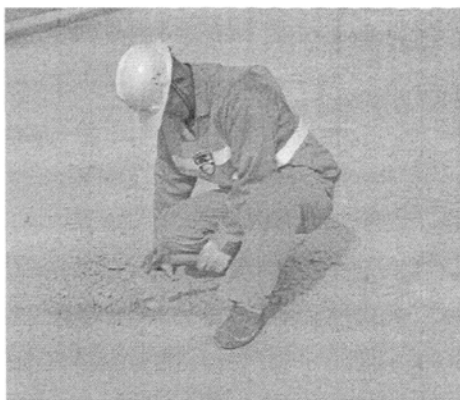


图 5.2 砸掉凸起部分



图 5.3 用铁锹铲出路面范围



图 5.4 重点鼓吹前后对比

(3) 清扫完毕后，基层顶面的坑洞、麻面和裂缝均显现出来。对于较大的坑洞需进行铣刨和补平工作；当裂缝的宽度大于 6mm 时，则必须进行灌缝填补。

5.2.2 喷洒粘层油

粘层油可选择普通热沥青、乳化沥青、改性乳化沥青等。

(1) 应根据聚酯玻纤布的宽度确定沥青喷洒宽度；喷洒粘层油的横向范围宜比防裂布宽 5~10cm。

(2) 喷洒速度应配合防裂布铺设速度，不宜过快，不得使沥青洒布车与防裂布距离过远。

(3) 洒布热沥青粘结料时, 热沥青最佳温度应保持在 165~180℃; 风速太大时, 影响施工质量, 应尽可能减少施工。

(4) 洒布热沥青粘结料时要喷洒均匀, 用量适宜且计量准确。

5.2.3 铺设聚酯玻纤布

在喷洒热沥青的同时做好铺设聚酯玻纤布的准备, 一旦喷洒, 立即铺设。本次施工采用人工铺设的方式。

(1) 人工铺设时, 一定要在开始的时候对准方向, 遇到偏移较多的情况, 必须裁剪, 重新定向, 搭接, 再继续铺设。如果裁剪较多, 不但费工费时费料, 而且也影响了布的整体性。

(2) 防裂布纵向接缝搭接宽度为 5~10cm, 横向接缝搭接宽度为 10~15cm, 横向接缝搭接方向应当为摊铺沥青混凝土的方向, 将后一端压在前一端之下。搭接宽度不宜过宽, 以避免搭接处夹层变厚, 而使面层与基层结合力减弱, 导致面层出现起鼓、脱离、位移等不良情况, 所以应将搭接过宽部分裁减掉。

(3) 铺装后立即用刷子和滚筒碾压, 以保证铺装防裂布能及时与沥青牢固粘结在一起; 若铺装时发生褶皱或打折现象, 应当及时用工具刀切开褶皱部位, 然后在铺设方向上再搭接起来, 用粘结料胶结并压实, 以保证防裂布与粘结料的良好粘接。

(4) 应尽量封闭交通。

(5) 雨天禁止沥青喷洒和玻纤布铺设。

(6) 交叉口和加宽处为倾斜加宽, 需裁减才能铺满。铺设时应尽量少裁减。



图 5.5 聚酯玻纤布铺设过程

5.2.4 面层摊铺

面层摊铺与普通沥青混凝土摊铺施工基本相同，但由于工作面是在聚酯玻纤布上，因此需特别注意以下几点：

- (1) 必须在粘层油冷却和乳化沥青破乳之后进行摊铺，以保证聚酯玻纤布与基层的粘结效果。
- (2) 应尽量避免施工车辆的急刹车和急拐弯现象，防止将防裂布粘起。

5.3 施工中存在的问题及解决方案

本次聚酯玻纤布试验路工程的施工过程比较顺利，铺设效果也比较理想，但在整个实施过程中，由于经验的匮乏还是暴露出很多典型的问题，下面本文将对这些问题进行重点的阐述。

- (1) 聚酯玻纤防裂布为玻璃纤维及其他材料混合制造，对人体皮肤易产生刺激作用，操作人员在进行作业使用时一定要使用防护手套，以免纤维刺入皮肤。
- (2) 基层顶面的清理工作必须受到足够的重视，国内有很多道路面层发生破坏都是由于施工中的层间污染造成的，对于这种土工织物夹层的施工更需注意基层顶面的清洁性。此外织物夹层的施工对于基层顶面还提出一个更高的要

求，即是基顶的平整性，因为基顶上凸起部分和凹陷部分都有可能导致施工中聚酯玻纤布的破损，从而丧失其隔水的效果。

（3）粘层油的选择

粘层油品种包括热沥青、乳化沥青、改性乳化沥青及其他粘结剂。

热沥青的优点在于其可以较快的形成一定粘度，利于布的粘结成型，其缺点在于由于粘度大沥青洒布车可能会出现喷洒不均匀的情况。有时因为喷头堵塞，洒布车过去之后，洒布的沥青并不是一个面，而是呈条纹状，另外在洒布不连续的地方往往会滴下很多油，这些不足一方面导致聚酯玻纤布的粘结不均匀，另一方面也会造成沥青路面的局部泛油，严重的地方甚至在面层摊铺的时候下面淤积的粘层油就会泛到表面上来。而且热沥青的施工受季节限制，冬季施工气温较低，沥青洒布完成后，如不尽快铺设聚酯玻纤布，其温度迅速下降，粘度大幅上升，影响聚酯玻纤布的铺设过程。



图 5.6 条纹状喷洒



图 5.7 局部泛油

乳化沥青的优点在于其施工时粘度较小便于施工，铺设过程中容易调整布的铺设方向。破乳完成后粘度恢复，从而使聚酯玻纤布良好粘结在基层顶面。其缺点在于现在乳化沥青的质量参差不齐。含水量较大，部分品种的布（如本试验路工程中的 A2）浸水之后强度明显降低，出现起毛、破损的现象。要求尽量使用快凝型乳化沥青，如使用慢凝型则破乳时间较长，破乳后粘度不足。施工中一定要等待乳化沥青完全破乳，粘度恢复之后才能行驶施工车辆进行面层摊铺，这样有可能会影响工程进度。

（4）由于喷洒粘层油和铺设聚酯玻纤布的施工衔接要求比较紧凑，因此最

好在施工准备时根据路面尺寸及布的尺寸设计具体的铺设方案，使用石灰或者线头在路面上画出具体的铺设位置。设计方案应考虑到搭接，一般搭接 10cm 比较合适，搭接形式考虑面层施工方向，以免被施工机械带起。

(5) 目前市场上尚未出现较好的土工织物铺设机械，因此一般情况下只能采用人工铺设。施工单位必须注重施工人员专业能力及团队配合素质的培养。铺设过程中难免发生偏移、褶皱的现象，这时需要进行裁剪搭接的工作，在此特别提出搭接宽度不宜过大，因为搭接宽度过大必然导致该区域织物厚度过大，粘结效果下降。对于粘结不佳的部分，应采取一定的措施，如喷洒粘层油重新粘结，或使用铆钉固定等。

(6) 由于面层摊铺的作业面位于聚酯玻纤布之上，施工车辆应尽量保持匀速缓慢行驶，严禁急刹车急转弯。在本次试验路工程中，我们发现聚酯玻纤布抵抗施工车辆破坏的能力还是较强的。

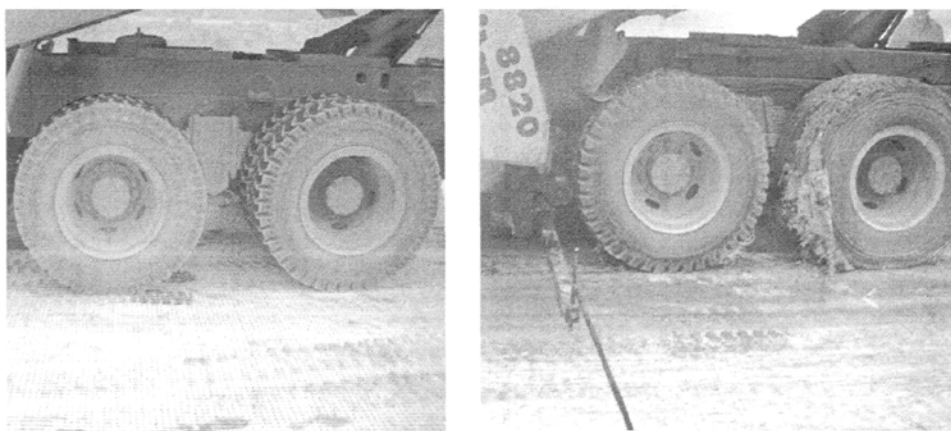


图 5.8 面层施工车辆对土工布破坏情况对比图（左为 A1 聚酯玻纤布，右为 A2 普通玻纤防裂布）

5.4 工后检测及效果评价

试验路自施工完成投入使用至今，已经历一个冬季和一个夏季的环境考验及车辆荷载的反复作用，课题组于 2008 年 11 月 21 日对其进行工后使用情况的检测，以评价聚酯玻纤布在新建沥青道路中防裂隔水的使用效果，为项目的进一步研究提供依据。具体的检测项目包括：路面使用情况调查、路面弯沉、渗

水系数

(1) 路面使用情况调查

课题组对于整个试验段进行了全面的路面使用情况调查，并根据施工期间所调查的基层裂缝的位置重点进行了裂缝调查，全段未发现任何裂缝、车辙等病害，只是在局部地区有少许泛油现象，整体路面性能良好，说明聚酯玻纤布在短期内能够很好的实现防治沥青路面早期损坏的目标，对于其长期性能仍需进一步加强观测和调查才能得出结论。

(2) 路面弯沉

路面弯沉是路面在垂直荷载作用下，产生的垂直变形,反映路面结构的承载能力，表征路面整体刚度大小的指标。课题组使用贝克曼梁弯沉仪分别在铺设聚酯玻纤布路段和未铺设聚酯玻纤布路段测定了路面回弹弯沉，结果如下表：

表 5.1 路面回弹弯沉测定结果表

路面类型	无聚酯玻纤布	有聚酯玻纤布
代表弯沉值	14.0	4.4

由测定结果可以看出，铺设聚酯玻纤布的路面回弹弯沉值比未铺设聚酯玻纤布的路段小，说明聚酯玻纤布对于沥青面层确实有加筋的作用，可以有效提高路面承载能力。

(3) 渗水系数



图 5.9 现场渗水试验

在行车道上选择两个测点进行了渗水试验，测得渗水系数为 455ml/min，这个数值对于 AC-13 的面层而言偏大，我们分析主要原因是试验路工程是在冬季进行施工的，施工温度较低导致沥青面层压实度不足，空隙率较大。由于面层厚度较薄（5cm），试验中发现水从试验区域外围的沥青面层中渗出，说明聚酯玻纤布还是起到了良好的隔水作用。

5.5 本章小节

本章结合项目试验路的实际施工情况，对聚酯玻纤布的施工技术进行了总结和分析，得到以下结论：

（1）聚酯玻纤布的施工工序主要包括清理基层、喷洒粘层油、铺设聚酯玻纤布、面层摊铺四个步骤。

（2）为保证良好的粘结性能，一定要对基层顶面进行仔细的清理，为聚酯玻纤布的铺设提供一个平整清洁的工作面。

（3）粘层油品种包括热沥青、乳化沥青、改性乳化沥青及其他粘结剂，喷洒粘层油的关键在于喷洒均匀、适量。

（4）聚酯玻纤布的铺设需要注意搭接、避免出现褶皱。

（5）面层摊铺的施工车辆应尽量保持匀速缓慢行驶，严禁急刹车急转弯。

（6）经过一年时间的使用期，课题组对试验路进行了路面使用情况、路面回弹弯沉及渗水系数的工后检测，检测结果表明在短期内聚酯玻纤布可以有效抑制路面早期损坏的出现，提高路面承载能力。

第六章 结论与展望

6.1 本文主要结论

本文结合“新建沥青混凝土路面中聚酯玻纤布防裂隔水层的技术开发及应用研究”项目，对聚酯玻纤布的工程性质进行分析，结合聚酯玻纤布复合沥青混凝土路用性能的室内试验研究，阐述聚酯玻纤布作为沥青道路防裂隔水层的机理及作用，并结合试验路工程对聚酯玻纤布的施工技术进行了总结，通过以上研究工作，得到以下主要结论：

(1) 聚酯玻纤防裂布是继土工布、土工格栅、条带聚合物之后发展起来的一种新型土工合成材料。聚酯玻纤布是聚脂纤维和玻璃纤维的复合物，在聚酯纤维土工布的表面经编纵横交错的玻璃纤维束，它融合了聚酯纤维和韧性和玻璃纤维的强度。

(2) 聚酯玻纤布具有强度大、延伸率低、与沥青相容性好、耐高温、耐腐蚀的优点、用于沥青路面建设和改造中可以防治反射裂缝、抵抗水破坏、增强路面承载能力。

(3) 加入聚酯玻纤布后会降低层间粘结强度(1.33MPa)，但仍然满足抵抗层间剪应力的要求(0.4MPa)。层间剪切强度—粘层油用量曲线可用三次多项式 $y = -0.04x^3 - 1.33x^2 + 3.17x - 0.50$ 进行拟合，层间剪切强度达到峰值之前上升较慢，峰值过后迅速下降。斜剪试验破坏面位于聚酯玻纤布和水泥混凝土基底之间，说明此层较为软弱。

(4) 加入织物后小梁的弯拉强度有所下降，AC-20 级配下 2# 比 1# 下降 1.0%，3# 比 1# 下降 18.1%，AC-25 级配下 2# 比 1# 下降 7.6%，3# 比 1# 下降 17.3%，这种情况的出现有可能是由于加入织物后减少了小梁试件的有效高度，导致强度下降，但是聚酯玻纤布有明显的加筋作用弥补了这一部分的强度缺失。加入织物后试件破坏时的极限弯拉应变得到了大幅的提升，AC-20 级配下 2# 比 1# 增加了 52.0%，3# 比 1# 增加了 54.7%，AC-25 级配下 2# 比 1# 增加了 62.3%，3# 比 1# 增加了 48.5%，这说明加入织物后可以明显提高沥青混合料抵抗变形破坏的能力。混合料级配对于土工织物的加筋效果并无明显的影响，不同类型的混合料在两

种级配下基本上表现出同样的特征。

(5) 在低温条件下, 纯沥青混合料和普通玻纤防裂土工布复合沥青混合料已经明显表现出弹性材料的性质, 即在破坏前破坏曲线呈现出明显的直线段, 且荷载达到最大值发生破坏之后迅速下降, 而聚酯玻纤布加筋的沥青混合料则在低温下仍能表现出良好的粘弹性能, 抵挡更大的变形破坏, 且在破坏后仍能承担较大的荷载水平。从应变能密度指标来看, 15℃时, 2#比 1#增加了 29.2%, 3#比 1#增加了 18.0%; -10℃时, 2#比 1#增加了 53.7%, 3#比 1#增加了 6.5%, 在低温下普通玻纤防裂布提高沥青混凝土低温抗裂性的能力非常有限, 而聚酯玻纤布凭借其优良的拉伸强度和抵抗变形能力仍能大大提高沥青混合料的低温抗裂性能。

(6) 应力水平和疲劳寿命之间在双对数坐标下满足良好的线性关系, 疲劳方程分别是: 1#纯沥青混合料 $\lg N_f = 4.2112 - 2.7459 \lg \sigma$; 2#聚酯玻纤布复合沥青混合料 $\lg N_f = 4.4476 - 2.9486 \lg \sigma$; 3#普通玻纤防裂布复合沥青混合料 $\lg N_f = 4.2201 - 3.4346 \lg \sigma$ 。比较疲劳方程中的参数可知, 聚酯玻纤布在不同的应力水平均能提高沥青混合料的疲劳破坏寿命, 玻纤防裂布在低应力水平能明显提高沥青混合料的疲劳性能, 但是在高应力水平下它的疲劳寿命却比较短。

(7) 聚酯玻纤布夹层可以通过加筋沥青面层, 隔离面层基层接触, 降低基层裂缝处应力集中, 增大基层裂缝沿界面向水平方向发展的可能性来有效抑制缓解半刚性基层沥青路面的反射裂缝现象。同时削弱面层基层约束条件, 减少温缩裂缝的产生和发展。

(8) 聚酯玻纤布吸收粘层油形成一个不透水的隔离层, 可以阻隔路表水通过面层中的孔隙或微小裂缝渗入道路内部, 破坏基层, 防止发生沥青路面水损坏。

(9) 聚酯玻纤布一般铺设在面层和基层或加铺层与旧路界面上, 按照铺设宽度有满铺和贴缝两种铺设方式。

(10) 聚酯玻纤布的施工工序主要包括清理基层、喷洒粘层油、铺设聚酯玻纤布、面层摊铺四个步骤。为保证良好的粘结性能, 一定要对基层顶面进行仔细的清理, 为聚酯玻纤布的铺设提供一个平整清洁的工作面。粘层油品种包括热沥青、乳化沥青、改性乳化沥青及其他粘结剂, 喷洒粘层油的关键在于喷洒均匀、适量。聚酯玻纤布的铺设需要注意搭接、避免出现褶皱。面层摊铺的施工车辆应尽量保持匀速缓慢行驶, 严禁急刹车急转弯。

6.2 待研究的问题

本文对于聚酯玻纤布这种新型土工合成材料进行了一些试验、理论及实践的工作，但是仍存在大量问题需要进一步深入研究，有如下若干问题：

(1) 聚酯玻纤布在道路结构中实际上是通过吸收沥青粘层油发挥作用的，因此对于聚酯玻纤布的材料特性仍需考察浸渍沥青之后的力学指标，而本文由于试验条件的限制，无法完成这方面的工作。

(2) 聚酯玻纤布实际上是一种复合土工合成材料，它的主要技术指标仍需进一步的研究。如厚度指标，由于聚酯玻纤布的编织工艺是在聚酯无纺布上经编玻璃纤维束，因此其厚度包括了一部分玻璃纤维束的高度，但是实际上在工程中这一部分厚度基本不吸收沥青粘层油，而且是嵌锁在沥青混凝土料中的；再如梯形撕裂指标根本不适宜用于聚酯玻纤布，如何评价它抵抗扩大破损裂口的能力。

(3) 对于聚酯玻纤布提高高温稳定性的研究，从理论上讲，聚酯玻纤布的玻璃纤维网格可以提高沥青混凝土粒料之间的嵌锁能力，从而提高沥青混凝土抵抗推移变形的能力，但是如何采用试验方法进行评价仍需进一步研究。

(4) 本文对于聚酯玻纤布防裂隔水的机理主要是结合病害机理和材料特性两方面进行阐述的，仍需加强对聚酯玻纤布在道路结构中力学响应的分析。现在力学分析比较流行的方法是有限元，但是聚酯玻纤布不同于普通的土工织物，如何选择合适的单元模型模拟聚酯玻纤布还需更进一步的工作。

(5) 仍需结合大量的实体工程，以总结聚酯玻纤布的施工经验，并通过长期的检测工作检验聚酯玻纤布的长期路用性能。

致谢

时光荏苒，研究生生涯眨眼而过，在这篇凝聚两年半心血的论文结束之际目，有太多的话要讲、太多的事要回忆、太多的人去感谢、去怀念。

首先感谢恩师薛明教授，老师为人随和、治学严谨，每一个见过老师的人都忘不了他那慈爱的笑容和渊博的知识。在学习上薛明老师给予我更高的要求 and 希望，在生活上老师给予我更多的关心和爱护，薛明老师的教诲让我终生受益。同时，对研究生学习期间的传授我知识的各位老师表示感谢。特别是张宏超老师，李淑明老师，实验室蔡师傅，感谢你们对我研究过程中的答疑和试验过程中的帮助。

非常感谢 304 的各位同学，感谢张玲玲、余世敏、刘勇、许鹰、程箭、贾晓阳等诸位师兄师姐对我论文的帮助，感谢郑茂、黄明、李昆等诸位师弟对我试验的帮助。你们的关心和帮助使我受到极大的鼓舞，让我的生活充满了暖暖的友情，在此谨向你们表示我深深的谢意！

特别感谢郭仪南、兰伟、王太鑫、朱玮玮、粟俊、刘晓旭、谭瑜等兄弟姐妹，感谢你们陪我度过这六年多终生难忘的大学生活，无论走到哪里，我们的心都在一起！

衷心感谢最疼爱我最支持我的父亲母亲，谢谢你们，祝你们身体健康！

2009 年 3 月 于同济园

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[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 5
- [2]沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 5
- [3]交通部重庆公路科学研究所. 公路土工合成材料试验规程(JTJ/T 060-98) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [4]交通部重庆公路科学研究所. 公路土工合成材料应用技术规范(JTJ 019-98) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [5]郑健龙, 周志刚, 张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法[M]. 人民交通出版社, 2002. 12
- [6]王协群, 王钊. 土工合成材料用于防治路面反射裂缝的设计[J]. 中外公路, 2003(6).
- [7]周志刚, 张起森, 郑健龙. 交通荷载作用下土工格栅防止沥青路面开裂的桥联效应[J], 中国公路学报, 1999(12)
- [8]周富杰, 孙立军, 张南鹭, 谈至明. 五种措施防治反射裂缝效果的试验室评价[J], 同济大学学报, 1998(1)
- [9]李淑明, 许志鸿, 蔡喜棉. 土工织物对复合式路面结构内力影响分析[J]. 中国公路学报, 2006(1)
- [10]黄岩, 郭忠印, 黄彭等. 织物加筋沥青混凝土的疲劳性能[J], 公路交通科技, 1999(4)
- [11]倪富健, 尹应梅. 聚酯玻纤布复合沥青混合料疲劳性能[J], 交通运输工程学报, 2005(03)
- [12]李林建. 聚酯玻纤布防反射裂缝力学机理研究[D], 重庆: 重庆交通大学, 2008
- [13]郭忠印, 潘正中. 土工织物在路面工程中的应用技术综述[J]. 公路, 2000(9)
- [14]周富杰. 防止反射裂缝的措施及其分析[D]. 上海: 同济大学, 1998
- [15]薛成. 采用聚酯玻纤布对反射裂缝及新、旧路面拼接缝进行病害防治[J]. 公路, 2006(4)
- [16]杨德生. 沥青加铺层在旧水泥混凝土路面应用中防止反射裂缝常用措施分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008(12)
- [17]尹应梅. 聚酯玻纤布在高速公路罩面工程中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005
- [18]白琦峰. 半刚性基层沥青路面反射裂缝防治措施对比研究[D]. 南京: 东南大学, 2005
- [19]郭忠印, 黄岩等. 织物加筋沥青面层的研究.
- [20]路冀凯, 王旭东. 沥青路面层间粘结强度试验方法研究. 中国公路学会 2006 年学术论文集(上)
- [21]戴震. 沥青路面结构受力机理分析[D]. 南京: 东南大学, 2004
- [22]交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTJ 052-2000) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [23]李美江, 王旭东. 沥青面层层间粘结状况对水损坏的影响分析[J], 公路交通科技, 2008(03)
- [24]郝培文, 张登良, 沥青混合料低温抗裂性能评价指标的研究[J], 公路, 2000(5)
- [25]葛折圣, 黄晓明, 许国光. 用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J], 东南

- 大学学报 (自然科学版), 2002 (4)
- [26] 陆长兵, 周清, 程庆松. 大粒径沥青混合料的疲劳性能研究[J]. 公路交通科技, 2005 (9)
- [27] 曹东伟, 胡长顺. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001 (1)
- [28] 张起森, 郑健龙, 刘益河. 半刚性基层沥青路面的开裂机理[J]. 土木工程学报, 1992 (2)
- [29] 胡长顺, 曹东伟, 刘悦等. 土工织物在 PCC-AC 结构中应用的理论与实践[J]. 公路, 2000 (9)
- [30] 蒋应军, 戴经梁. 土工织物在道路工程防裂中的应用[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2007 (7)
- [31] 蒋应军, 薛航, 薛辉, 陈忠达. 半刚性基层预锯缝及铺土工布的路面防裂措施[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2006 (3)
- [32] 李海军, 黄岩, 李树高. 土工织物复合沥青路面的试验研究[J], 山东交通科技, 2000 (4)
- [33] S. A. Perez, J. M. Balay, P. Tamagny, Ch. Petit, Accelerated pavement testing and modeling of reflective cracking in pavements, Engineering Failure Analysis 14 (2007)
- [34] D. V. Ramsamooj, An innovative technique for using polymer composites in a airport pavement rehabilitation, Composites. Part B, Engineering, 2001, vol. 32
- [35] Jun Zhang, Victor C. Li, Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 3, March 2002
- [36] R. Berghahn, J. Brandsch, O. Piringer, H. J. Pluta, and T. Winkler, On the Suitability of Fiberglass Reinforced Polyester as Building Material for Mesocosms, Ecotoxicology and Environmental Safety 43, 267-273 (1999), Environmental Research, Section B

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

钟洲, 男, 1984 年 11 月 30 日

2006 年 7 月毕业于同济大学交通工程专业, 获工学学士学位

2006 年 9 月入同济大学读硕士研究生, 就读道路与铁道工程专业

已发表论文:

- [1] 薛明, 钟洲, 郭建辉. 盐渍土地区公路边坡防护处治技术. 公路交通科技 (应用技术版). 2007 (9)
- [2] 薛明, 钟洲, 赵阳. 盐渍土地区公路构筑物防腐混凝土及防腐涂层施工技术. 公路交通科技 (应用技术版). 2008 (9)