

摘要

由于电动车在绿色环保、使用便捷性等方面的优点，近年来得到了快速的发展，电动车将逐步成为国内居民继自行车、摩托车后一个主要代步产品。轮胎作为电动车的一个重要部件，需求也随之加大，目前电动车轮胎已经成为很多轮胎制造商的主要产品之一。随着电动车轮胎的快速发展，电动车轮胎的一些特殊性能需求逐渐增多，耐刺穿性能是其中重要的性能需求。电动车的速度比较快，在行驶过程中轮胎的突然损坏，不仅造成财产损失，而且还会影响到人身安全。因此研发具备较高耐刺穿性能的电动车轮胎，已成为市场上的一个迫切要求。

在轮胎的制作过程中，可以通过改变轮胎胎面胶的性能和增加轮胎缓冲层来提高轮胎的耐刺穿性能。由于提高胎面胶的性能涉及到的因素比较多，而且很难均衡其他方面的综合性能，因此在实际轮胎的生产过程中主要是增加缓冲层来提高轮胎的耐刺穿性能。轮胎缓冲层根据结构不同可以分为短纤维增强型和长纤维帘布型缓冲层。论文分别针对这两类缓冲层，从结构、制备工艺、配方等角度进行相应地研究和分析，得到能够满足性能、经济性、生产效率等要求的电动车轮胎缓冲层。

在短纤维增强缓冲层制备研究过程中，着重研究了利用芳纶短纤维增强的轮胎缓冲层的性能。从芳纶短纤维的配方组份、缓冲层的厚度、硫化时间等角度研究了对缓冲层及其最终轮胎成品性能的影响。在试验设计方面引入了均匀设计方法，在数据处理方面进行了数学建模、回归分析，并根据最优计算得到了最佳的芳纶配方份数为3份，最佳缓冲层厚度为1mm，最佳硫化时间为16分钟。通过实际的校验能够较好地验证结果。在长纤维帘布缓冲层的制备研究过程中，研究了利用芳纶帘布并配合相应的结构设计，得到了满足性能、经济性要求的最佳帘布层级和结构设计方案。在研究的过程中，引入了计算机辅助设计工具，进行了三维仿真设计和结构参数计算，简化了传统的设计过程。

综合两种缓冲层的制备过程和最优参数基础上，结合工厂实际工装设备条件，最终选定了两层级的芳纶长纤维帘布型缓冲层作为电动车轮胎缓冲层。应用该缓冲层后的电动车轮胎在性能上达到了预期设计，同时能够充分利用现有的生产设备。

关键字：电动车轮胎，芳纶，增强，缓冲层，均匀设计，计算机辅助设计

ABSTRACT

In recent years, motor bicycle get a fast development for its advantage of convenient and the green environmental protection. The electric bicycle will become a main tool of transportation gradually after bicycle and motorcycle. The tire is an important part of the electric bicycle that develops immediately and continuously. The electric bicycle tire has already become one of the main products of many tire manufactories, currently. Along with the fast development of the electric bicycle tire, some special function requirement of the electric bicycle tire increase gradually. Bearing to pierce function is an important function requirement. The speed of the electric bicycle requirement is quicker than bicycle, more risk will be when tire is damaged suddenly, resulting in not only the property lose, but also the human body safety. Therefore develop to have higher bear to pierce of electric bicycle tire, have become a market of a request urgently.

There are two methods to raise a tire to bear to pierce function in the manufacture process of the tire. One is improving performance of surface tire rubber. Another is increment tire buffer layer of the tire structure. Balanced other aspects, it is very difficult at improving performance of surface tire rubber, so in actually the production line of the tire mainly is increase the buffer layer to raise a tire to bear to pierce function. The tire buffer layer has two types according to the structure dissimilarity: the short fiber strengthens type buffer layer and the buffer layer with the long fiber curtain type. Here, the research and analysis two category types motor bicycle tire buffer layer from structure factor, the making craft factor and the formulation factor etc., are carried out to get can satisfy request of function, economy, and produce efficiency, respectively.

In the short fiber enhanced buffer layer making research process, it is emphasized to study to make use of a short fiber of the PPTA to strengthen of the function of the tire buffer layer research. Aspect of the formulation set of the short fiber from the PPTA, the thickness, vulcanized time etc., all this factor influence to the function of the buffer layer and its end tire. Introduce a uniform design method, mathematical modeling and regression analysis in the data deal, and got that the best PPTA amount is 3 sets, the best buffer layer thickness is 1

mm, the best and vulcanized time is 16 minutes. In the making research process of long fiber curtain buffer layer, it is studied to make use of the PPTA curtain type buffer layer, according to structure design, we make sure the best structure that got contented function, economy etc.. Introduce the CAD tools in the process of study, including carry on 3D emulation design and the structure parameter calculation. It does simplify traditional design process.

Base on two kinds of making processes of buffer layers and the actual work that combines factory equips to have a condition, two layers PPTA long fiber curtain type buffer layer as motor bicycle tire buffer layers are selected. Made the motor bicycle tire meet performance request, meanwhile its can make use of an existing production equipments well.

Key word: Electric bicycle tire, PPTA, Strengthen, Buffer layer, Uniform design, CAD

独创性声明

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

学位论文作者签名: 王杳亚 签字日期: 2009 年 5 月 26 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分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、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 王杳亚

导师签名:

单词英

签字日期: 2009 年 5 月 26 日

签字日期: 2009 年 5 月 26 日

学位论文作者毕业后去向:

工作单位: 杭州中策橡胶有限公司

电话: 13777468509

通讯地址: 杭州市海潮路 1 号

邮编: 310016

第一章 绪论

1.1 前言

轮胎是指在各种车辆或机械上装配的接地滚动的圆环形弹性橡胶制品。它通常安装在金属轮辋上，能支承车身，缓冲外界冲击，实现与路面间的接触并保证车辆的行驶性能。轮胎常在复杂和苛刻的条件下使用，它在行驶时承受着各种变形、负荷、力以及高低温作用，它必须具有较高的承载性能、牵引性能、缓冲性能。同时，还要求具备高耐磨性和耐屈挠性，以及低的滚动阻力与生热性。

电动车因其具有省力、快捷、绿色环保、方便等优点，近年来受到广大消费者的喜爱与使用，市场上使用量不断扩大。根据中国电动车网的统计，我国电动车内销产量1998年是58600台，到2007年产量达到2130万，年均增长43.2%，电动车将逐步成为国内居民继自行车后的另一个主要代步产品。作为电动车的一个重要部件——轮胎，它的需求也随之不断加大，在国内比较大的几家自行车轮胎企业每年都是以35%左右的速度在发展电动车轮胎。

对电动车轮胎各方面性能的研究成了这些企业的生存之道，只有不断地根据市场需要研制新品，真正确保消费者人生安全才能使企业处于领先地位，产量才能不断扩大发展。根据市场调研及与国际先进厂家交流，发现很有必要研制一种防刺轮胎。在市场调研中发现电动车轮胎在使用过程中由于受到马路黑心钉、玻璃等杂物刺伤漏气的现象很多，由于电动车的速度又比自行车速度快，这样会对消费者的人生安全带来较大的麻烦，为此有必要研发高性能的防刺电动车轮胎。

1.2 轮胎介绍

自从1845年汤姆森首次提出充气轮胎专利以来，轮胎经历了很大变化。早期的轮胎是用平纹帆布制得的单管式胎面无花纹轮胎，充气压力也较高。20世纪20年代，帘布取代了帆布，不久低压轮胎问世。30年代起低压轮胎推广应用。40年代开发成功钢丝轮胎及无内胎轮胎。50年代初，子午线轮胎投入商品化生产。后者由于具有优异的行驶性能、缓冲性能及节油性能，已成为世界轮胎发展的主流。

轮胎通常由外胎、内胎、垫带三部分组成，安装在金属轮辋上（图1.1）。无内胎轮胎不需要内胎，胎体内层有气密性好的橡胶层，但需配专用的轮辋。世界各种轮胎

的结构，都向无内胎、子午线结构、扁平（轮胎断面高与宽的比值小）和轻量化的方向发展。

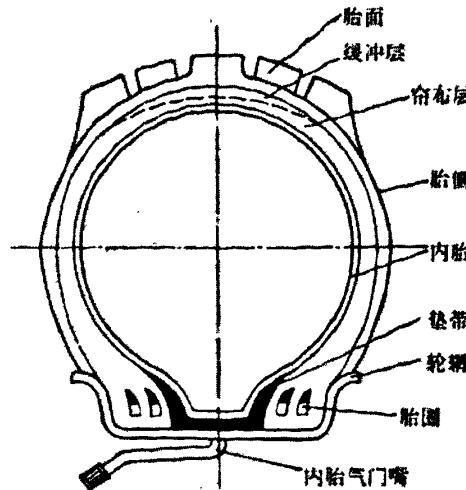


图 1.1 轮胎与轮辋装配断面图

外胎是能承受各种作用力的壳体，由胎面、胎侧、缓冲层（或带束层）、帘布层及胎圈组成。胎面：缓冲层（或带束层）或帘布层以上的冠部胶层，是轮胎与路面接触的部位。胎侧：轮胎侧部帘布层外面的胶层，用于保护胎体。帘布层：胎体中由并列挂胶帘子线组成的布层，是轮胎的受力骨架层，用以保证轮胎，使其具有必要的强度及尺寸稳定性。缓冲层（或带束层）：缓冲层为斜交轮胎胎面与胎体之间的胶布层或胶层，用于缓冲外部冲击力，保护胎体，增进胎面与帘布层之间的粘合；带束层为子午线轮胎或带束斜交轮胎的胎面基部下，沿胎面中心线圆周方向箍紧胎体的材料层，其主要作用在于保证冠部的周向刚性并防止轮胎外径方向的膨胀与变形。胎圈：轮胎安装在轮辋上的部分，由胎圈芯和胎圈包布等组成。胎圈朝向胎里的一边称胎趾，与轮辋接触的一边称胎踵。胎圈的主要作用在于将轮胎固定于轮辋之上，并在汽车运行时抵抗使外胎脱离轮辋的作用力。内胎是带有气门嘴的环形胶管，用于保持轮胎的充气压力。垫带主要用于保护内胎与轮辋的着合面，不受轮辋磨损的环形胶带。

轮胎主要可按三种方法分类。

按轮胎用途分类：如轿车轮胎、载重汽车轮胎、农业轮胎、工程机械轮胎、工业车辆轮胎、摩托车轮胎、马车轮胎、力车轮胎、飞机轮胎、炮用轮胎和坦克轮胎等。

按轮胎胎体结构分类：可分为斜交轮胎、子午线轮胎、带束斜交轮胎三大类。斜

交轮胎(图1.2)中帘布层和缓冲层各相邻层的帘线相互交叉,且与胎面中心线呈小于90°角排列。子午线轮胎中胎体帘布层与胎面中心线呈90°角或接近90°角排列,并以带束层箍紧胎体(图1.3)。子午线轮胎还包括活胎面子午线轮胎,即胎面与带束层胶合成一个圆环,再套在胎体上。带束斜交轮胎为以带束层箍紧斜交轮胎胎体的充气轮胎。图1.4就是自行车、电动车轮胎的结构示意图。

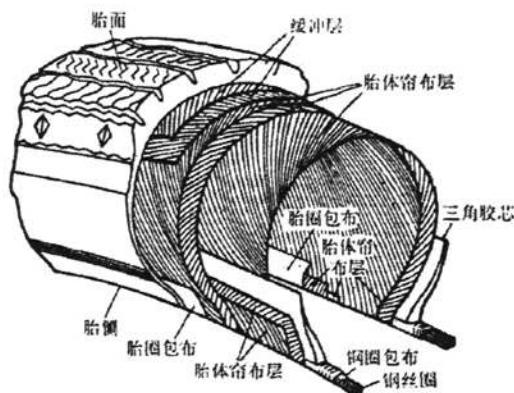


图1.2 斜交胎轮胎结构示意图

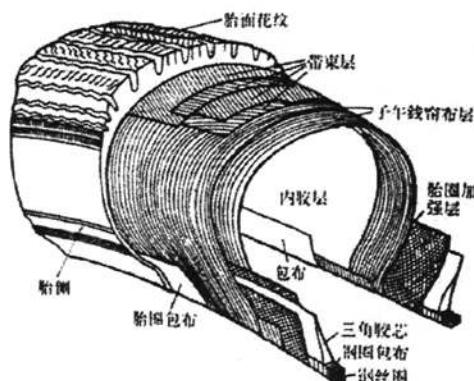


图1.3 子午胎轮胎结构示意图

按轮胎胎面花纹可分为:普通花纹轮胎、混合花纹轮胎和越野花纹轮胎。按帘子线材料可分为棉帘线胎、人造丝胎、尼龙胎、聚酯胎、玻璃纤维胎和钢丝胎。按断面形状可分为圆形、扁平形、拱形、椭圆形和三角形轮胎。按允许行驶速度又可分为普通胎、高速胎和超速胎等。

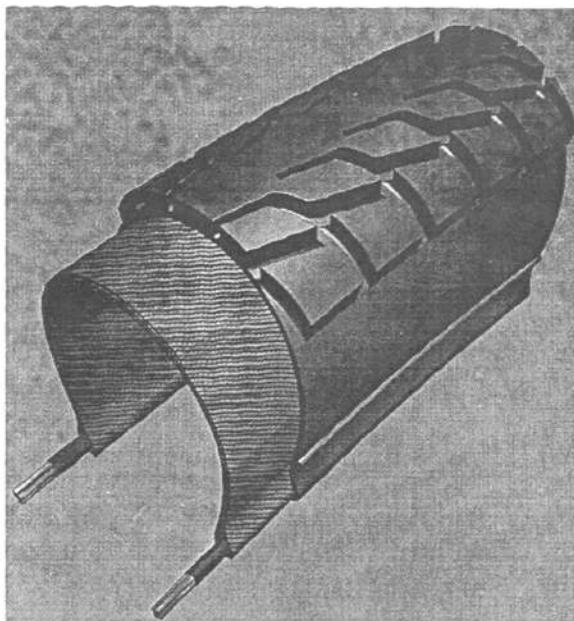


图 1.4 自行车、电动车轮胎结构示意图

轮胎的规格以外胎外径 D、胎圈内径或轮辋直径 d、断面宽 B 及扁平比(轮胎断面高 H / 轮胎断面宽 B)等尺寸加以表示，单位一般为 inc(1inc=2.54cm)。中国各种轮胎规格的表示如下：斜交轮胎中轿车斜交轮胎又按不同扁平比分为 95 系列（即 $H/B \approx 0.95$ ）普通断面斜交轮胎、88 系列低断面斜交轮胎及 82 系列超低断面斜交轮胎。载重子午线轮胎的规格表示代号包括 B(断面宽, in)、R(子午线结构)、d(轮胎内径, in)。如 9.00R20 即断面宽 9in, 轮胎内径 20in, 子午线结构。轿车子午线轮胎也是以“R”表示子午线结构，不过轮胎断面宽均以 mm 为单位，如 165R14。近年来，随着轿车车速的不断提高及低断面轮胎的发展，在轿车子午线轮胎规格标志中，一般都增加了扁平比系列标志，多数还加有速度极限标志。国际上轿车子午线轮胎的速度极限分为三级：S 级 (180km / h), H 级 (210km/h), V 级(210km/h 以上)。例如轿车子午线轮胎规格为 185/70HR15 者，即：断面宽为 185mm, 扁平比为 0.70, 速度极限为 210km/h, R 为子午线结构，轮辋直径为 15inc。

1.3 轮胎缓冲层

根据轮胎介绍中的解释，缓冲层是介于胎面胶和帘布层之间的带有或不带有帘线的胶片。主要作用是吸收从胎面方向传来的冲击力，减少帘布层的损伤和承受轮胎在

行驶时或突然停止时由于惯性作用而产生的剪切应力。胶料应具有良好的导热性、耐老化性，多次变形下的耐疲劳性和低的生热性，以及在高温下保持一定的物理机械性能等。帘线的强力和耐疲劳等性能必须高于帘布层，目前全钢丝帘线轮胎和半钢丝帘线已广泛应用于各种轮胎中。

缓冲层从结构角度来看主要可以分为两类。一类是利用短纤维直接在胶料中进行混炼增强，添加相应的添加剂后压片出型制成缓冲层，我们称之为短纤维增强型缓冲层^[1]。这种类型的缓冲层相应的性能较低，但是由于其生产效率较高，一般应用于人力车轮胎和电动车轮胎中较多，部分的摩托车轮胎中也有相应地应用。另一类是利用长纤维，也就是帘布复上胶以后作为缓冲层，我们称之为长纤维（帘布）增强型缓冲层，这种方式在机动车轮胎上应用比较广泛，尤其是在子午胎上缓冲层（带束层）。这种类型的缓冲层由于其生产的过程比较长，生产的效率相对来说要低一些，生产的成本较高。

1.3.1 胶料

无论是短纤维增强型缓冲层还是长纤维（帘布）增强型缓冲层，胶料均是缓冲层的重要组成部分。缓冲层胶料的主要作用是作为缓冲层和轮胎其他层之间的粘合，并承担一定的强度性能要求，它是轮胎行驶中承受剪切应力最大的部位，并起缓冲和分散应力的作用。因此，要求缓冲层胶料定伸应力高、回弹性好、生热低、抗剪切性能好、粘合性好，并具有良好的耐热和耐疲劳性能。缓冲层胶一般采用 NR 与 BR 并用，也可采用三胶并用，如 NR / BR / SBR1500(75 / 20 / 5)。在用长纤维帘布时考虑到胶与布的粘合性能，所以采用帘布复胶胶料^[2]。

1.3.2 增强材料

增强材料是短纤维增强型缓冲层中主要的组成部分，对增强胎体强度起主要作用就是增强材料。一般增强材料采用短纤维类材料，一些无机材料，如炭黑等也有类似的作用。目前采用的短纤维类材料包括芳纶短纤维、尼龙短纤维、聚酯短纤维等。

1.3.3 帘布

帘布在缓冲层的应用主要是作为骨架材料应用在长纤维（帘布）增强型缓冲层，

帘布作为骨架材料主要承担胎体强度性能，一般生产过程中用到的帘布包括芳纶帘布、尼龙帘布、钢丝帘布等。

帘布是充气轮胎的骨架，轮胎的骨架是由几层挂胶帘布贴合而成，它承受了作用于轮胎上的大部分负荷。对于普通结构轮胎，帘布层数一般是偶数，一般有4到18层；子午线轮胎的层数是奇数。用作帘布层主要材料帘线的要求是：强度高、伸长率低、与橡胶的粘着性好、耐热性和耐屈挠疲劳性优良。材质有棉、人造丝、聚酰胺、聚酯、芳香族聚酰胺、钢丝等，每根帘线都应当由帘布胶隔离，以防止帘线的相互摩擦，并使线与线、层与层间牢固粘合，构成一个耐屈挠而富有弹性的整体。

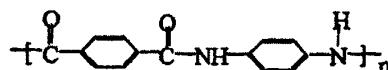
1.3.4 其他添加剂

缓冲层中除了橡胶和增强材料以外还包括了其他各种助剂，包括像无机填料、炭黑、补强剂、硫化剂、促进剂等。

1.4 轮胎缓冲层增强短纤维材料和帘布材料

1.4.1 芳纶

芳纶，是芳香族聚酰胺纤维的简称，其中商用的芳纶主要分为两种：聚对苯二甲酰对苯二胺（PPTA）纤维即对位芳纶和聚间苯二甲酰间苯二胺纤维即间位芳纶。芳纶纤维是高强度、高模量、耐高温和耐化学介质的新一代工业纤维，用作橡胶增强材料可显著提高复合材料的模量和高温强度。PPTA 纤维在我国又称为芳纶 1414，其化学结构如下所示：



在其分子结构中，酰胺基团被苯环隔开且与苯环行成 π 共轭，具有极高的内旋位能，分子链呈刚性直链，即在同一平面内，沿主链方向有强的共轭键作用，链与链之间的 $-CO-$ 和 $-NH-$ 形成共价键，通过范德华力聚集在一起。这样的分子结构使 PPTA 纤维具有高强、高模、耐冲击、耐高温、耐腐蚀、耐曲挠等优异性能。

1) 国内外芳纶发展状况

自 20 世纪 60 年代由美国杜邦 (DuPont) 公司成功地开发出芳纶纤维并率先产业化后，在 30 多年的时间里，芳纶纤维走过了由军用战略物资向民用物资过渡的历程，

价格也降低了将近一半。现在国外芳纶无论是研发水平还是规模化生产都日趋成熟。在芳纶纤维生产领域，对位芳酰胺纤维发展最快，产能主要集中在日本和美国、欧洲。如美国杜邦的 Kevlar 纤维，荷兰阿克苏诺贝尔（Akzo Nobel）公司（已与帝人合并）的 Twaron 纤维，日本帝人公司的 Technora 纤维及俄罗斯的 Terlon 纤维等。间位芳酰胺纤维的品种有 Nomex、Conex、Fenelon 纤维等。美国的杜邦是芳纶开发的先驱，他们无论在新产品的研发、生产规模上，还是在市场占有率上都是世界一流水平，仅他们生产的 Kevlar 纤维，目前就有 Kevlar - 49、Kevlar - 29 等十多个牌号，每个牌号又有数十种规格的产品^[4]。杜邦公司在去年宣布将扩大 Kevlar 纤维的生产能力，该扩建项目预计在今年年底完工。帝人、赫斯特等芳纶生产的知名企也不甘示弱，纷纷扩产或联合，并积极开拓市场，希望成为这个朝阳产业的生力军。

德国 Acordis 公司近期开发出高性能超细对位芳纶（Twaron）产品，它既不燃，也不会熔融，还有很高强度和极大抗切割能力，主要可用于生产涂层及非涂层织物、针织产品和针刺毡等既耐高温又抗切割的各种纺织服装装备。Twaron 超细长丝的细度仅为职业安全服常用对位芳纶的 60%，用它织造手套，其抗切割能力提高 10%，用它生产梭织物和针织产品，其手感更柔和，使用更舒适。Twaron 防切割手套主要用于汽车制造业、玻璃工业及金属零部件生产厂，还能为森林工业生产护腿用品，为公共运输行业提供防破坏装备等。利用 Twaron 的阻燃耐热性，可为消防队提供防护套装和毡毯等装备，以及为铸造、炉窑、玻璃厂等高温作业部门提供耐热防火服，以及生产飞机座舱阻燃防火包覆材料。用这一高性能纤维还能创造汽车轮胎、冷却软管、V 型皮带等机件、光学纤维电缆和防弹背心等防护装备，还能代替石棉做摩擦材料和密封材料等^[4]。

据有关部门统计，芳纶纤维世界总需求量在 2001 年为 36 万吨/年，而在 2005 年将达到 50 万吨/年。全球对芳纶的需求呈现不断增长的态势，芳纶作为一种新兴的高性能纤维进入了飞速发展的时期。与海外芳纶纤维产业的红红火火相比，芳纶的国产化才刚刚起步。由于芳纶纤维在我国的发展起步较晚，国外公司对核心技术的封锁垄断等原因，目前我国芳纶纤维的技术水平、产品档次及生产能力都与国外发达国家存在着一定的差距。近几年，我国电子、建筑、轮胎工业迅速发展，使得我国芳纶用量迅猛增长。造成我国芳纶国产化如此艰难的原因主要有两点：一是生产的技术瓶颈难以突破；二是大部分原料需要进口，特别是国产的溶剂不能过关。但正是因为它在国内是新生事物，市场还远远没有饱和，才值得我们去关注、去开发。目前我国芳纶生

产的发展已提到了议事日程，芳纶被列入国家鼓励发展的高新技术产品目录之中，政府也将“芳纶纤维在工程轮胎、同步带中应用技术开发”列为我国“十五”橡胶工业重大研究和产业化课题^[3,4]。

2) 芳纶的合成

芳纶的合成主要有两种工艺方式：两步法工艺和一步法工艺。传统的两步法芳纶生产工艺是生产原料在极性溶剂——N-甲基吡咯烷酮 (NMP) 中经溶液低温缩聚，制得芳纶聚合物。如 Kevlar 纤维制备，先由对苯二胺和对苯二甲酰氯在 NMP 中低温缩聚，制得聚对苯二甲酰对苯二胺聚合物，然后把聚合物溶于浓硫酸中配成纺丝浆液，再用干喷湿纺法获得长丝。若想获得短纤维，把长丝切短即可。两步法芳纶纺丝过程复杂，生产成本较高。由于硫酸具有腐蚀性，对设备材料要求较高，更重要的是浓硫酸的存在会使纤维在纺丝过程中降解，这就限制了纤维的强度和模量。为了缩短流程、简化工艺，人们探索由聚合物的 NMP 溶液直接纺丝制纤维的一步法新工艺，并取得了进展。日本帝人公司和德国赫司特公司利用一步法制得了芳纶长丝，日本旭化成公司利用该法获得了芳纶短纤维^[4]。

3) 芳纶长纤维（帘布）

芳纶长纤维可直接用于轮胎骨架材料的制备，利用芳纶纤维制成的芳纶帘线织成的帘布作为骨架材料的轮胎具有：质量轻，从而提高燃料效率，达到最佳经济效益；高耐切割能力，从而使轮胎更加抗外物损伤；减少钢丝用量或者不用钢丝，不仅提高轮胎的耐曲绕性能而且降低废胎回收加工难度，有利再资源化等优点，逐渐应用在载重汽车、公共汽车轮胎及飞机轮胎中作为重要的骨架材料^[3]。

近年来芳纶与尼龙、聚酯混合纺织的帘布也不断得到开发，应用到轮胎、运输带、三角带等橡胶制品中。采用芳纶与聚酯、芳纶与锦纶 66 进行复合捻线，开发生产芳纶复合帘布，芳纶/聚酯和芳纶/锦纶复合帘布的粘合性能和耐疲劳性能优于芳纶，用这两种复合帘布作为轮胎的胎体骨架材料，具有较高的性价比，可以满足绿色环保轮胎的生产。

随着人类对芳纶优异性能的不断开发研究，它的应用研究报道也越来越多，估计在今后的十年内，芳纶即将成为继尼龙、聚酯纤维后轮胎骨架材料的一种。

4) 芳纶浆粕短纤维

芳纶浆粕 (PPTA - Plup) 是对位芳纶的差别化产品，外观类似木材纸浆微纤维，平均长度 2mm 左右，平均比表面 $6\text{m}^2/\text{g}$ 以上，呈浅黄色，比较容易吸湿，需密封保

存。

芳纶浆粕的制造方法是利用对位芳纶刚性伸直链大分子结构容易产生纵向原纤化的现象，把芳纶长丝切断后在弱酸性水中分散进行机械叩解和打浆，纤维被撕裂而原纤化，表面产生微纤状羽毛，所以在纺丝切断之前的工序，与生产对位芳纶长丝基本相同，后面增加切断、悬浮分散、叩解及脱水干燥等几个工序。还有一种比较简单的生产方法，利用 PPTA 低温溶液缩聚时，在外力场作用下，刚性大分子链沿作用方向取向并生长堆砌结晶，聚集成微原纤结构，直接通过沉析、中和、叩解生成浆粕^[4]。

1.4.2 尼龙长纤维（聚酰胺纤维）

尼龙(Nylon)纤维学名为聚酰胺(polyamide)纤维，聚酰胺纤维是第一个合成高分子聚合物商业化的合成纤维制品，在 1937 年由美国杜邦公司卡罗瑟斯(Caarothers)研究发明聚六甲基己二酰胺(即尼龙 66)，因而开启了合成纤维的第一页，至今仍是聚酰胺纤维的代表。

聚酰胺纤维最突出的优点为耐磨性较其它纤维优越，其次为它的弹性佳，其弹性回复率可媲美羊毛，还有其质轻，比重为 1.14g/cm^3 ，在已商业化的合成纤维中仅次于聚丙烯(丙纶，比重小于 1 g/cm^3)，而较聚酯纤维(比重 1.38 g/cm^3)轻，因此聚酰胺纤维可加工成细匀柔软且平滑的丝，可供织造成美观耐用的织物，同聚酯纤维一样也具有耐腐性、不怕虫蛀、不怕发霉的优点。聚酰胺纤维的缺点为耐旋光性稍差，如在室外长时间受日照时，则易生黄，强度下降，但与聚酯丝相比尼龙的保型性较差，因此织物不够挺拔，纤维表面光滑，有蜡状感，关于这些缺点近年来已研究出各种改善措施，如加入耐光剂以改善其耐旋光性，或制成异型断面以改善外观及光泽。

目前尼龙主要有尼龙 6 及尼龙 66 纤维，两者占聚酰胺纤维 95%以上，其物理性能虽然有差异，但在一般用途上，其外观、手感、强力及耐磨性都十分接近，从其平织布及针织布亦难分好坏，因而往往可互相替代，但如从成本考虑，则尼龙 6 较占优势。尼龙 6 长丝收缩率较尼龙 66 略高，较适合针织物及起绒织物。尼龙 6 因具较低软化点，因此较尼龙 66 柔软，但其卷曲变形较困难，故尼龙 66 加工丝卷缩坚牢度较尼龙 6 优越，故如做裤袜材料，尼龙 66 要比尼龙 6 弹性佳，也较耐穿。因尼龙 66 熔点较尼龙 6 高且缩率较低，因此，用于轮胎帘布时比尼龙 6 制成轮胎能耐高速行驶，轮胎亦可行驶较长里程。

聚酰胺纤维可制成长纤或短纤，其用途如下。

长纤：聚酰胺长纤可单独使用，也可与其它纤维交织，也可假捻加工成加工丝供针织或平织用途，在内衣用途可用于男女儿童服装、被套面料、袜子、雨衣等。另聚酰胺纤维用于航天员外衣的外层及内里，利用其高度强度来保护航天员不受外层空间陨石袭击，在家饰布可用于窗帘布、浴帘布及雨伞布等，在产业用途可用于渔网、滤布、缆绳、轮胎帘布、输送带衬布及降落伞布等。由于其强力高、耐冲击、耐磨性佳，用于轮胎帘布制成轮胎后其行驶里程较以往轮胎帘布行驶里程高，据实验证明聚酰胺轮胎帘布轮胎可行驶约三十万公里，而以往轮胎帘布轮胎仅能行驶约十二万公里，使用于轮胎帘布的聚酰胺长纤以尼龙 66 为大宗，其占尼龙 66 纤维使用量约 50%^[5]。

短纤：聚酰胺短纤与长纤相比在美国其使用量约占 21%，在地毯用纤维中，短纤维占 90%以上，而聚酰胺纤维又占地毯纤维用量 53%，另外其可与其它纤维混纺用于袜子、华达呢布料、凡立丁布料、毛毡、滤布等。

1.4.3 聚酯帘布

聚酯纤维是以聚酯（PET，聚对苯二甲酸乙二醇酯）为主要原料，添加一定的功能母料，可溶于苯酚-四氯乙烷、邻氯苯酚等溶剂，吸湿性极小，能耐酸，化学稳定性高于聚酰胺，且有良好的耐光性能。纤维在-40℃ ~ +250℃的温度内不脆化、不变形，每根纤维都是独立的，与同时是石油产品的沥青有极强的吸附性，在介质中有良好的吸附性和分散性。聚酯纤维除具有普通聚合物纤维细度大、强度高、易分散的特点，还具有突出的耐高温性能。

聚酯帘线随着聚酯工业丝的发展也得到很大的发展，近几年来聚酯纤维在轮胎中应用越来越广泛，尤其是在轿车子午线轮胎中，胎体帘布基本都是用高模低缩的聚酯帘线，提高轮胎的挺性和胎体强度^[5]。

1.5 轮胎缓冲层制备过程

1.5.1 短纤维增强型缓冲层制备过程

如图 1.5 所示意，短纤维增强型缓冲层制备过程主要包括了橡胶塑炼、下片、胶片接取、增强剂混炼、压片、冷却、截断等过程。



图 1.5 短纤维增强型缓冲层制备过程示意图

1.5.2 长纤维（帘布）增强型缓冲层制备过程

如图 1.6 所示，长纤维（帘布）增强型缓冲层制备过程包括了浸胶、帘布伸张、压延、裁断、卷取等过程，胶料的准备过程和帘布的生产过程未包含在示意图中。



图 1.6 长纤维（帘布）增强型缓冲层制备过程示意图

1.6 电动车轮胎易产生的问题

1.6.1 电动车轮胎子口烧边

轮胎子口是跟轮辋直接接触的重要部位，无论是钩边轮胎还是直边轮胎与轮辋的紧密结合都是通过胎圈与轮辋的合理配合设计完成的，钢丝圈是胎圈的主要骨架材料，钢丝圈在子口部位与轮胎是硬对硬摩擦，中间隔了一层帘布，有的厂家还设计有包布。在这个硬对硬的摩擦中受损最厉害当然是夹在钢丝和轮辋之间的帘布和包布，当帘布被磨破时，钢丝不再被帘布包裹，从轮胎胎圈里逃脱出来，轮胎报废。这种破损一般都是沿轮胎子口圆周方向细细长长的一条。

造成帘布破损一方面是由于帘布和包布夹在钢丝与轮辋间，受到挤压和磨损造成，另一方面是由于尼龙的耐切割性能较差，而且经过高温硫化后尼龙帘布的强度有所降低。

1.6.2 电动车轮胎刺破造成内胎漏气

电动车轮胎的破损不仅仅是厂家设计制造方面的原因，也不止由于钢丝与轮辋硬摩擦造成的子口帘布早期破损的原因。有时候由于电动车行驶环境造成的问题也很多。例如，电视报纸经常报道的路面上人为的黑心钉、玻璃杂质等硬物扎破轮胎表面，刺伤轮胎内胎造成漏气等。

而且现在有关黑心钉的报道越来越多，严重影响着人们的生活和安全。这不仅影响人们正常的工作生活还威胁到了消费者的人生安全。为此各个轮胎厂家纷纷出招研制防刺轮胎，但是能真正起到防刺效果的轮胎没有，一般都是加厚胎面厚度使黑心钉的长度不足以刺到内胎，有几个外资企业研制的防刺轮胎在展销会上都是用一块订满铁钉的木板来验证轮胎的防刺效果。

1.6.3 电动车轮胎脱层

由于电动车轮胎相对于自行车轮胎速度载荷等都是有了较大的提高，那么它存在脱层的可能也就比自行车轮胎大。在力车胎系列中一般自行车轮胎只有两层帘布，存在脱层的现象不多，只有在采用多层帘布的摩托车轮胎及农用手拉车轮胎比较容易出现脱层现象。在研制防刺电动车轮胎时由于多加了一层防刺用的缓冲层，也需要考虑脱层现象。

脱层一般是发生在不同帘布层之间或者布与胶之间，一般都是通过检测布与布、布与胶之间的粘合力来表示的，但是由于电动车轮胎各层之间相对较薄，制备检测样品难度较大，还有一种可行的直观的检验办法是通过机床里程耐久试验综合体现。

1.7 研究思路

针对电动车轮胎应用过程易遭遇刺破的安全问题，为提高轮胎耐刺性能，研究以多种材料、多种方式增强轮胎缓冲层后的耐刺效果。通过对比尼龙短纤、聚酯短纤（均为人工剪切尼龙、聚酯帘布得到）、芳纶浆粕混炼到用作缓冲层的胎面胶料中制备缓冲层，再成型到电动车轮胎中，试验表明芳纶浆粕的耐刺效果最佳。

为进一步提高轮胎的耐刺性能，直接用尼龙、聚酯及芳纶覆胶帘布作为耐刺层，做对比研究并得出结论。两层耐刺帘布在轮胎冠部交错重叠形成棱形网状结构，能有效阻止锐器刺穿轮胎，起到轮胎“防弹衣”的效果。

第二章 实验部分

2.1 原料

2.1.1 芳纶浆粕

芳纶浆粕（PPTA - Plup）是对位芳纶的差别化产品，外观类似木材纸浆微纤维，平均长度 2mm 左右，平均比表面积 $6\text{m}^2/\text{g}$ 以上，呈浅黄色，见图 2.1。比较容易吸湿，需密封保存。

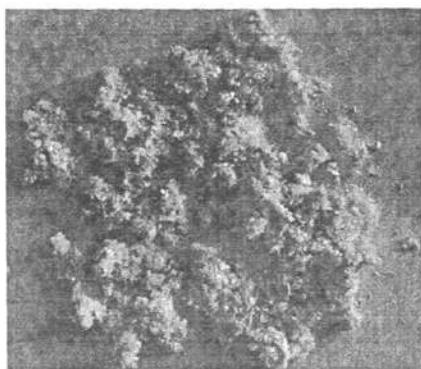


图 2.1 芳纶浆粕

本文研究所用的芳纶浆粕采用美国杜邦公司生产的 Kevlar 短纤维，作为补强材料填充到作为缓冲层的胎面胶中，提高轮胎的耐刺性能。胎面胶在填充芳纶浆粕后的显微镜照片如图 2.2。



图 2.2 芳纶浆粕填充的胎面胶

2.1.2 芳纶帘布

本研究所用的芳纶帘布为山东海龙博莱特化纤有限责任公司提供的 1680dext/2

- 72145 帘布，即：经线为纤度 1680dtex 的双股芳纶线加捻，每 10cm 纬线长度里有 72 根帘线，门幅 1.45m。

2.1.3 尼龙帘布

本研究所用的尼龙帘布为公司正常生产用的 930dtex/2 - 130137 帘布，即经线纤度为 930dtex 的双股尼龙帘线加捻，每 10cm 纬线长度里有 130 根帘线，门幅 1.37m。

2.2 主要设备

电动车轮胎制作所需的主要设备及其特征以及使用条件，参见表 2.1。

表 2.1 主要设备特征及使用条件

作业名称	设备名称及规格	简要特征及使用条件
生胶过烘	烘房	排管结构
生胶切胶	立式单刀液压切胶机	油压 3~4.5MPa, 行程 680mm, 电机功率 5.5kW
生胶破胶	φ560×φ510×800 破胶机	带沟槽，前轮转速 12.4r/min, 速比 1:1.2, 电机功率 40/50kW
胶料混炼	F370×(6-60) 密炼机	密炼室总容量 395L (四棱转子), 工作容量 296L, 转子转速 6-60r/min, 转子速比 1:1.16, 主电机功率 DC1250kW, 过载倍数 2.0, 持续 15 秒
胶料压片	XKY-660 压片机	前辊转速 14.5r/min, 后辊转速 15.4r/min, 电机功率 110kW
帘布压延	XY-4Γ-1730 压延机 (φ610×1730×4) φ570×1800 双八辊烘布机 φ570×1800 八辊冷却机	直流主机功率 160kW, 转速 100~1000r/min, 侧上、中、下辊筒速比 1:1.4:1.4:1, 辊筒工作线速 5.4~54m/min
胎面出型	φ90/φ60 双复合冷喂料挤出机	螺杆长径比 14:1, 转速 0-60r/min, φ90 最大挤出能力 300kg/h, 电机功率 55kW φ60 最大挤出能力 200 kg/h, 电机功率 22kW
帘布裁断	XAL1450 立式裁布机	一次最大送布长度 1050mm, 裁断角度 0~45°, 裁断次数 20、29、38 次/min, 电机功率 4kW
外胎成型	弹簧反包成型机	工作气压 0.61Mpa, 电机功率 1.5kW
外胎硫化	多层水压硫化机	高压水压力 10Mpa

		低压水压力 2.5~3MPa 压缩空气压力 1.3~1.7Mpa 蒸汽压力 0.7~1.02MPa 气动压力 0.4~0.5MPa
力车轮胎胎体强度测试机	<p>压头：金属圆柱形压头，其端部为直径 $8.0\text{mm}\pm0.1\text{mm}$ 的角度 60° 半球。</p> <p>备注：在本文中需要测试耐刺缓冲层，把压头由半圆球改角度 30° 的圆锥。如下图：</p> <p>圆柱型压头 圆锥型压头</p>	升降速度 $25\text{mm/min}\sim300\text{mm/min}$ 速度精度 $\pm2.5\text{mm/min}$ 行程精度 $\pm0.2\text{mm}$
力车轮胎耐久性能测试机	<p>转鼓：外径 $790\text{mm}\pm10$、宽度 150mm 的铁制品，表面粗糙度 ∇ (6.3)。</p> <p>障碍物：粗糙度 ∇ (6.3)、宽度 $10\text{mm}\pm0.1\text{mm}$、高度 $5\text{mm}\pm0.1\text{mm}$ 的长方形铁块，角曲率半径为 $1.0\text{mm}\pm0.05\text{mm}$。</p> <p>转鼓表面与轴方向平行有两个长度与转鼓宽度相等的障碍物，并以等距离、对称的安装在转鼓的外周上。</p>	负荷精度 $\pm2\%$ 速度精度 $\pm2\text{km/h}$
橡胶拉力试验机	TH5000 橡胶拉力试验机	最大负荷 5000N ，测试精度 $<\pm0.5\%$

2.3 性能表征

对于缓冲层增强轮胎耐刺效果的好坏可以用轮胎胎体强度来评价。把缓冲层应用到轮胎制成耐刺轮胎后，用轮胎的胎体强度性能表征评价耐刺性。和缓冲层性能相关的轮胎表征还有粘合性能（表征轮胎帘布层和缓冲层以及缓冲层和胎冠之间粘合性能）、机床耐久性性能（表征应用缓冲层之后的综合性能）。单纯对增加组分后的缓冲层材料，可以通过胶料的300%定伸强度、扯断强度、扯断伸长率、撕裂强度等来反应胶料的各项性能^[11]。

如上所述一般缓冲层的相关性能表征一般可以纳入到制成轮胎成品后的相关的性能来进行表征，其中相关的主要性能表征包括：轮胎强度（表征防刺穿强度）、粘合性能（表征轮胎帘布层和缓冲层以及缓冲层和胎冠之间粘合性能）、耐久性性能（表征应用缓冲层之后的综合性能）^[11]。本次试验采用的电动车轮胎型号是（16X2.50）。

2.3.1 电动车轮胎强度试验

缓冲层的主要作用是吸收从胎面方向传来的冲击力，减少帘布层的损伤和承受轮胎在行驶时或突然停止时由于惯性作用而产生的剪切应力。因此胎体强度是表征轮胎缓冲层性能的重要指标，根据不同类型的轮胎，有不同的国家标准的试验方法来描述。一般采用破坏能来表征相关的强度性能，如电动车轮胎采用的测试标准 GB/T 9749-1997^[11,12]。

先把硫化后轮胎停放24h以上，再安装在GB/T 7377规定的标准轮辋上，并充气至350kPa，在实验室温度25±10℃下停放不少于3h，再将停放后的轮胎气压重新调整至350±20kPa。然后将轮胎外周长大致分为四等份，四个等份点处作为测试点，逐个进行试验。试验时要求压头垂直于胎面，以50±2.5mm/min的速度压入中心线附近的花纹块，并记录轮胎破坏瞬间的压力和压头压入轮胎的深度（行程），如压头已经触及轮辋而轮胎尚未破坏，则取压头触及轮辋瞬间的压力和行程。试验过程中，当内胎泄气时，应重新换上内胎，继续做其他点的试验。

每个试验点的破坏能由下列式子计算得出： $W = (F \times P) / 2000$

式中：W表示破坏能，单位为J；F表示压力，单位为N；P表示压进的行程，单位为mm。

四个试验点的计算中值为轮胎的破坏能。

2.3.2 电动车轮胎耐久性能试验

电动车轮胎耐久性能测试采用的是 GB/T 9762-1997 测试标准，主要的测试过程如下：轮胎硫化后应停放 24h 以上，配上相应规格的内胎，安装在 GB/T 7377 规定的标准轮辋上，并充以推荐气压，在试验室温度 $25\pm10^{\circ}\text{C}$ 下，停放 3h 以上。将停放后的轮胎再调整至推荐气压（当推荐气压为 340kPa 及其以下时，允许公差为 $\pm 10\text{kPa}$ ；为 340kPa 以上时，允许公差为 $\pm 20\text{kPa}$ ）。将上述准备好的轮胎安装在耐久试验机上，并以 GB/T 7377 规定的推荐负荷加压于轮胎，启动转鼓带动轮胎转动，并在 5min 内达到 $40\text{km/h}\pm 2\text{k/m}$ 的试验速度。直至达到 GB/T 1702 或 GB/T 1703 规格的里程数，立即停机，检查外观，测量气压与主要尺寸。试验过程中不应有脱圈、爆胎现象的发生，试验完毕，轮胎不应有脱层，帘布断裂及胎面磨损等现象发生^[12]。

2.3.3 电动车轮胎粘合性能试验

电动车轮胎缓冲层粘合性能测试采用的是 GB/T1702-1997 标准中的 7.7 章节中说明的测试方式进行测试。主要测试过程如下：从轮胎上截取与胎面胶相连，并与帘布径向平行，宽约 15mm 的试样，切去一端胎圈部位，并在该部位的布层与胎面胶边缘处剥开一段后，与经线成直角取 10mm 宽的帘布层，撕去两侧多余的帘线，大体削去胎面胶后即为试片。用橡胶拉力试验机的上夹具夹住胎侧胶一端，在实验室条件下，拉力机以 25mm/min 的下降速度进行试验。试验时，要用自动记录装置记录，求出曲线上各峰定点的平均值即为粘附强度，试验结果取 3 个试样的平均值^[11]。

第三章 芳纶短纤维增强型轮胎缓冲层制备

3.1 前言

国内电动车轮胎制造行业目前已经有一些利用芳纶纤维或者其他纤维来制作轮胎缓冲层的试验。前面已经讲到电动车轮胎的缓冲层主要的有两种方式来实现：一种是利用各种长纤维帘布作为骨架材料，然后在骨架材料上附上一层胶料制成缓冲层，这种方案的帘布材料主要包括了尼龙、聚酯，还有现在开始使用的芳纶，这种方式的缓冲层在传统的轮胎生产过程中常常利用；另外一种缓冲层的做法是利用各种短纤维增强材料与胶料共混，直接压片制成缓冲层，这种方式由于其生产工艺简化，生产效率提升潜力比较大，目前已经有一些厂家在积极试验。本章将针对芳纶短纤维增强防刺电动车轮胎缓冲层制备过程研究，分别从相关生产配方、工艺和结构设计等角度来研究讨论制成轮胎缓冲层的最佳方案。

3.2 制备过程

短纤维增强缓冲层制备过程主要包括炼胶、过程中逐步加入相应的增强材料和添加剂、压片出型等几个工艺过程。

炼胶过程主要包括了橡胶的塑炼和混炼过程，在混炼过程中逐步添加相应的增强材料和添加剂，在这个过程中主要的影响因素是炼胶时间、加压时间及炼胶温度，为排除这些因素的影响，在增加增强材料组分的同时这些因数控制在同一水平。完成混炼过程之后直接进行压片处理制成对应规格电动车轮胎的缓冲层^[4,5]。

3.2.1 缓冲层胶料的混炼

在容量 1500 克的小型密炼机中混炼，混炼程序：将经过一段塑炼的橡胶和芳纶短纤放入小型密炼机中加压密炼 1min，往密炼机中加入细料后加压密炼 0.75min，加入白炭黑、SI69 后继续加压密炼 0.25min，加入炭黑后继续加压密炼 1min，加入油料后继续加压密炼 0.5min 后排胶，密炼好的胶料经过开炼机下片。

3.2.2 缓冲层的制备

影响短纤维缓冲层增强轮胎耐刺性的因素除了增强材料组分，还有缓冲层的厚度以及轮胎的硫化时间，所以在制备缓冲层时考虑不同厚度的缓冲层。

把混炼后的缓冲层在开炼机上压片，制成不同厚度的胶片，再根据工艺设计（参见第六章），裁剪成不同宽度的缓冲层胶片待用。

3.2.3 芳纶短纤增强缓冲层制作轮胎后耐刺原理

电动车外胎在增加一层缓冲层后，铁钉等锐器能够刺穿胎面胶，但是在碰到高强度的缓冲层时，在内压的支撑下，缓冲层的强度更高，铁钉难刺穿，从而保护了内胎，不会瘪胎，如图 3.1 所示。

如何解释

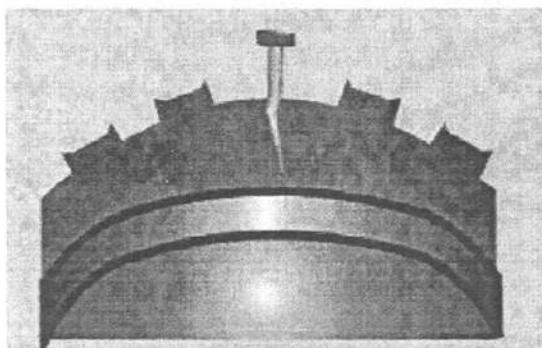


图 3.1 芳纶浆粕短纤增强的缓冲层

3.3 芳纶短纤维增强型轮胎缓冲层配方设计

配方基于 C180（目前生产过程中应用的胎面配方）基本配方，并在基本配方的基础上分别改变芳纶短纤维份数，探寻合适的配方组成、追求良好的耐刺性能，但不影响粘合性能和耐久性能。

配方中芳纶短纤维份数分别设定为 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5，共计十个水平。

3.3.1 缓冲层芳纶短纤维组份对电动车轮胎性能的影响

试验考察了芳纶短纤维份数的变化对电动车轮胎性能的影响。在缓冲层的影响因素中，缓冲层增强材料组份的变化对轮胎的性能有着重要的影响，尤其是对于胎体强

度性能影响尤其显著。但是组份的增加对于粘合性能和总体耐久性能有不利的影响。

图 3.2 反映的是缓冲层配方中芳纶组份的变化对电动车轮胎胎体强度影响的关系图。

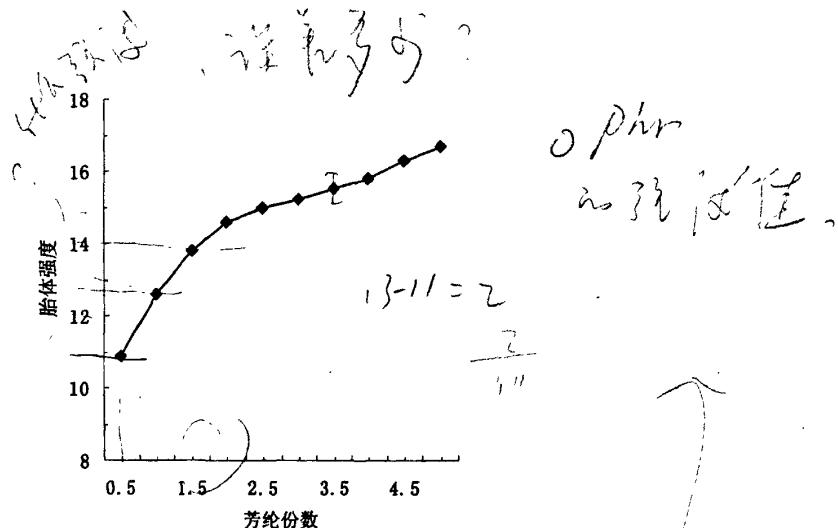


图 3.2 芳纶份数与胎体强度关系图

可见随着芳纶短纤维增强材料的增加，胎体强度提高。

图 3.3 反映的是缓冲层配方中芳纶组份的变化对电动车轮胎粘合性能影响的关系图。

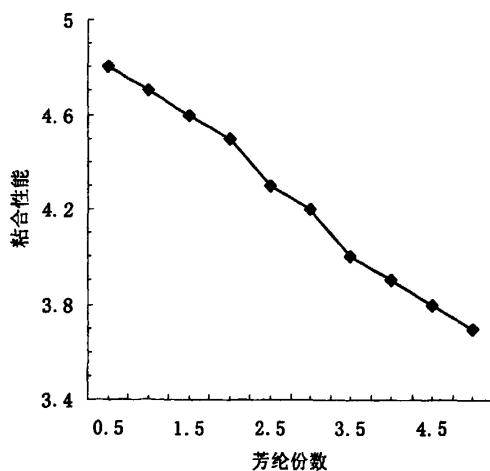


图 3.3 芳纶份数与粘合性能关系图

由图 3.3 图可以明显看出，芳纶短纤维增强材料对粘合性能随着组份的递增，粘

合性能的下降非常明显。

在对轮胎耐久性的试验过程中发现，对于芳纶组份为 5 的情况试验出来的轮胎。在试验的过程中出现了轮胎胎冠脱层。这表面过量的芳纶短纤维的填充由于缓冲层硬度增加和粘合性下降，最终导致轮胎的早期脱层。

3.3.2 缓冲层厚度对电动车轮胎性能的影响

缓冲层厚度是影响电动车耐刺性能的很重要的因数。厚度越厚，耐刺性能越好，缓冲效果也越好。但是，从经济上考虑，轮胎越厚的成本越高，而且从综合性能来讲也不是越厚越好。缓冲层厚的轮胎在使用过程中胎体生热快，易造成脱层等问题。

图 3.4 体现了缓冲层厚度和胎体强度之间的关系，随着缓冲层厚度的递增，胎体强度有比较明显的提高。

图 3.5 体现了缓冲层厚度和粘合性能的关系，从图中可以看出，缓冲层的厚度对粘合性能的影响不是很突出。在轮胎设计过程中，缓冲层的厚度受到结构因素的影响，不能过厚，因此缓冲层厚度一般需要综合考虑强度性能、结构设计因素以及经济性能等综合考虑来选定。

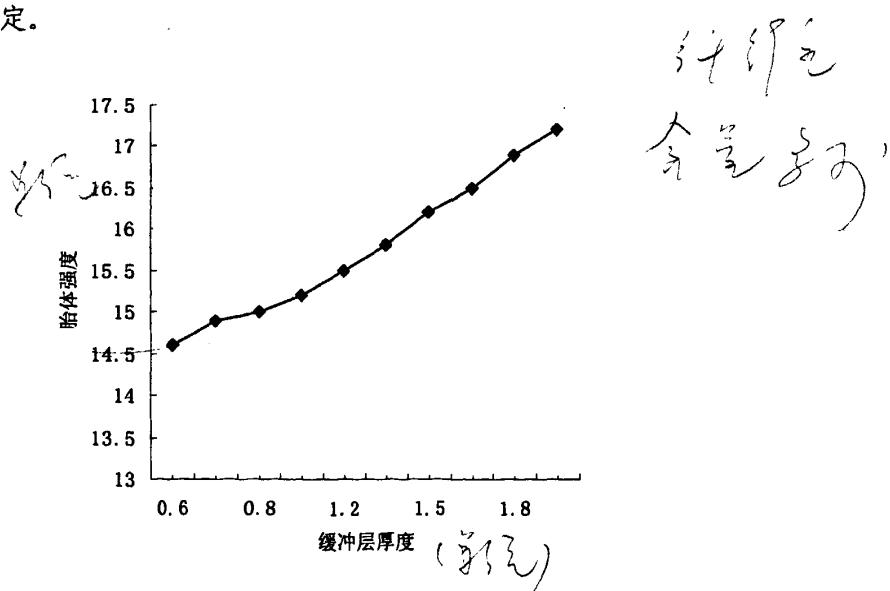


图 3.4 缓冲层厚度与胎体强度关系图

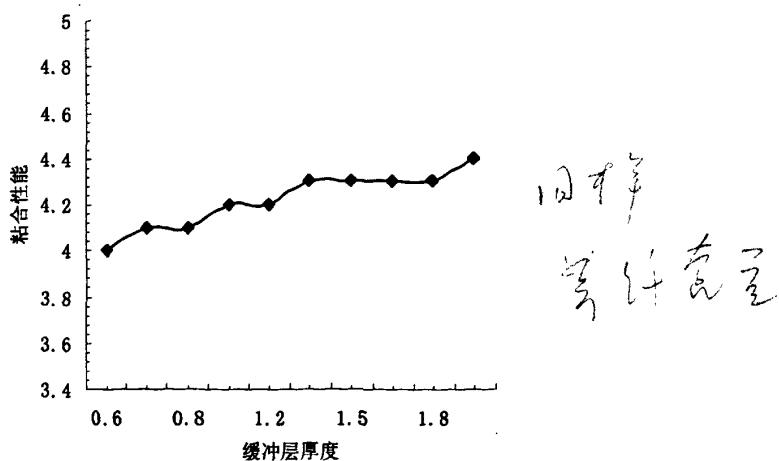


图 3.5 缓冲层厚度与粘合性能关系图

3.3.3 硫化时间对电动车轮胎性能的影响

硫化时间对轮胎的性能影响比较显著，主要的问题是硫化时间过短引起的欠硫和硫化时间过长引起的过硫，这两种情况都会引起轮胎相关性能的下降，在生产实际过程中需要避免类似情况的发生。图 3.6 描述了胎体强度和硫化时间之间的关系情况，在正常的硫化区间内相关的性能比较均匀，在欠硫和过硫的情况下相关的性能损失比较明显。

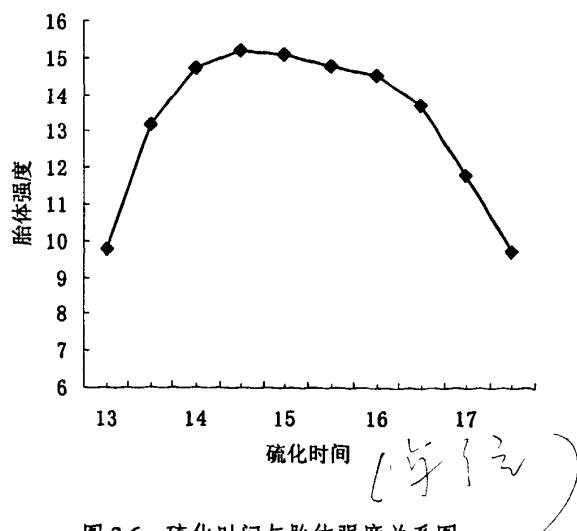


图 3.6 硫化时间与胎体强度关系图

图 3.7 描述了硫化时间和粘合性能之间的关系，同样在正常的硫化时间区间内，相关的性能比较均匀。在欠硫和过硫的情况下相关的性能损失明显。

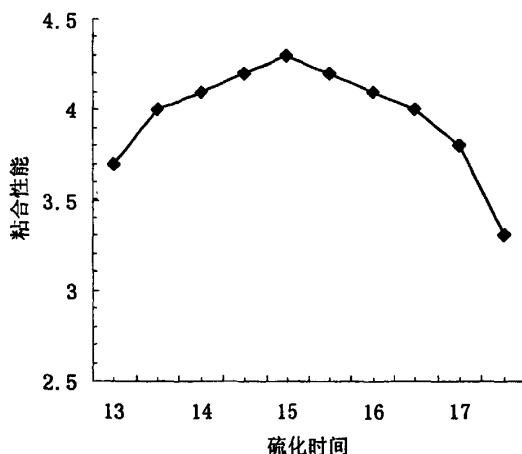


图 3.7 硫化时间与粘合关系图

3.4 本章小结

通过考察芳纶短纤维增强材料组份、缓冲层厚度、成型轮胎时的硫化时间等对最终成品轮胎性能的影响，得到如下结论：

(1) 增强材料芳纶短纤维对最终成品轮胎的胎体强度性能影响显著，但对轮胎成型的工艺性有一定的负面影响；随着芳纶增强材料组份的增加，轮胎的缓冲层和其他层级之间的粘合性能会有一个持续下降的过程，并最终导致轮胎综合性能的不合格；在单独考察芳纶短纤维组份对最终产品性能的影响，基于目前生产 C180 配方的最佳芳纶短纤维组份的水平为 3 份时，能够比较好地满足性能需求。

(2) 缓冲层厚度对相关的强度性能的影响比较明显，综合考虑到相关结构因素情况，缓冲层厚度在 0.8~1mm 左右比较合适。

(3) 硫化时间的区间对性能的影响比较集中，在正常的硫化时间区间内，性能影响不是很显著，最终确定的硫化时间为 15~16min。

第四章 均匀设计法在芳纶短纤维增强型轮胎缓冲层配方及工艺 设计中的应用

4.1 前言

轮胎的制造是一个复杂的过程，其中涉及到炼胶、成型、硫化等各个复杂的步骤，试验一次的成本很高。为了节省人力、物力，利用试验设计方法——均匀设计法对芳纶短纤维增强轮胎缓冲层配方及工艺设计进行了优化。力图用最少的试验次数确定最佳的主要组份及其主要工艺条件。试验方法本质上就是在试验的范围内给出挑选代表点的方法，这对提高工作效率，降低试验成本来说，具有重要的意义。

均匀设计是我国统计学家中国科学院应用数学研究所方开泰教授和中科院院士王元教授将数论与多元统计相结合创立的一种供多因素、多水平实验用、可减少实验次数的全新的最优试验设计方法^[14]。均匀设计抛开了正交设计中的“整齐可比性”而只考虑试验点的“均匀分散性”，即布点均匀，代表性好，大大减少了试验次数，每个因素、每个水平只做一次试验，达到以最少的试验次数确定主导因素，并确定主导因素之间的优势关系。这一方法结合统计调优，把所得的数据进行整理、分析、判断，用逐步回归法建立回归方程，并进行方差分析和显著性检验，通过方程预报、等值线图、曲线图等数学方法，揭示出隐含于数据中的信息，找出试验条件间的最佳组合，可实现用最少的试验次数和最短的试验时间，达到寻找最佳效果的目的，是一种稳健的回归设计模型。由于均匀设计不再具有整齐可比的特点，因而不能像正交试验那样，通过简单的方差分析方法来处理所得的数据，而必须借助计算机来进行更为复杂数据分析处理，目前国内已有比较成熟的软件支持这些分析，如 SPSS、SAS、MathLab 等。

均匀设计方法，主要就是使用均匀设计表来安排试验。均匀设计表的表头形式为 $U_n(q^s)$ ，其中 U 代表均匀设计； n 表示试验次数； q 表示水平数； s 表示该表最多可安排的因素数。除此之外，在均匀设计的基础上，还引用了一种新颖的回归建模方法——数据处理组合方法(又称 GMDH 方法)，较好地解决了均匀设计中由于试验次数少而无法非线性建模的困难^[14, 15]。

4.2 配方及工艺参数设计

由上章提到的相关电动车轮胎的性能表征我们可以看到,对于电动车轮胎耐久性能这个表征来说只有通过和不通过两种情况,而不通过意味着不管是胎体强度和粘合性能如何优异均无法判定为合格。因此在讨论相关配方和工艺条件对性能的影响时,把该性能表征单独提取出来进行单独的检验,假如某组试验数据未能通过耐久性测试,那将直接剔除该组数据。

对于电动车轮胎来说主要的性能指标包括胎体耐久性能、强度性能和粘合性能,这三个指标目前均有相应的国标规定。在日常的生产中,针对这三个性能指标,我们尽可能在减少成本的基础上尽量满足。

在影响芳纶短纤维增强型轮胎缓冲层配方和工艺因素中,根据经验我们选取如下因素作为本次均匀设计中的因素:配方中芳纶短纤维份数(x_1)、缓冲层厚度(x_2)、硫化时间(x_3)。

根据已有经验结合具体生产实际情况,每个因素选择 10 水平来进行试验。

配方中芳纶短纤维份数(x_1)(份数): 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5.

缓冲层厚度(x_2)(mm): 0.6、0.7、0.8、0.9、1、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5.

硫化时间(x_3)(min): 13、13.5、14、14.5、15、15.5、16、16.5、17、17.5.

如果采用全面试验的方法,至少需要做 10^3 次试验;如果采用正交设计法,则也需要做 10^2 次试验。本试验由于周期长,跨度大,又涉及到具体生产设备的占用,均匀设计法体现了它的优越性,仅需要 10 次实验就综合了 3 个变化因素,效果又与其他方法相近。

根据上述条件利用 10 水平 8 因素的均匀表和相应的使用表来产生最终的 10 水平 3 因素的均匀设计表来安排试验。表 4.1 是 $U^*_{10}(10^8)$ 均匀表^[14, 15]。

均匀表需要与相对应的使用表结合起来使用产生需要的均匀设计表,表 4.2 为 $U^*_{10}(10^8)$ 的使用表。

表 4.1 $U_{10}^*(10^8)$ 均匀表

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	7	9	10
2	2	4	6	8	10	3	7	9
3	3	6	9	1	4	10	5	8
4	4	8	1	5	9	6	3	7
5	5	10	4	9	3	2	1	6
6	6	1	7	2	8	9	10	5
7	7	3	10	6	2	5	8	4
8	8	5	2	10	7	1	6	3
9	9	7	5	3	1	8	4	2
10	10	9	8	7	6	4	2	1

表 4.2 $U_{10}^*(10^8)$ 均匀表的使用表

S	列号							D
2	1	6						0.1125
3	1	5	6					0.1681
4	1	3	4	5				0.2236
5	1	3	4	5	7			0.2414
6	1	2	3	5	6	8		0.2994

根据本次试验的因素数为 3 选取 1、5、6 列形成的本次采用的试验表，见表 4.3。

表 4.3 本次试验均匀设计表

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	7	9	10
2	2	4	5	8	10	3	7	9
3	3	5	9	1	4	10	5	3
4	4	8	1	5	9	6	3	7
5	5	10	4	9	3	2	1	6
6	6	1	7	3	8	9	10	5
7	7	3	10	6	2	5	2	4
8	8	5	2	10	7	1	6	3
9	9	7	5	3	1	8	4	2
10	10	9	8	7	6	4	3	1

按照均匀设计方法，具体试验过程操作按照第三章的试验过程进行试验。先按照工艺过程制造出相应短纤维增强型轮胎缓冲层，然后将制成的缓冲层具体应用到轮胎制备中。可以看出，每个因素的每个水平做一次且仅做一次试验，这反映了试验安排的均衡性。表 4.4 是根据均匀设计表形成的试验数据表。

表 4.4 本次试验数据安排表

编号	芳纶短纤维份数(x_1)	缓冲层厚度(x_2)	硫化时间(x_3)
1	[1] 0.5	[5] 1	[7] 16
2	[2] 1	[10] 1.5	[3] 14
3	[3] 1.5	[4] 0.9	[10] 17.5
4	[4] 2	[9] 1.4	[6] 15.5
5	[5] 2.5	[3] 0.8	[2] 13.5
6	[6] 3	[8] 1.3	[9] 17
7	[7] 3.5	[2] 0.7	[5] 15
8	[8] 4	[7] 1.2	[1] 13
9	[9] 4.5	[1] 0.6	[8] 16.5
10	[10] 5	[6] 1.1	[4] 14.5

4.3 试验结果处理以及最优条件的选定

在均匀试验设计的基础上，引用了一种回归建模方法——GMDH，较好地解决了均匀设计中由于试验次数少而无法非线性建模的困难。GMDH (Group Method of Data Handling) 方法是前苏联乌克兰科学院 A.G Ivaknenko 运用多层神经网络原理和品种改良假说，以 K—G 多项式（图 4.1）为基础提出的一种复杂的非线性系统的识别方法——数据处理组合法，简称 GMDH 方法^[14, 15, 16]，方法示意图见图 4.2。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

图 4.1 K—G 多项式

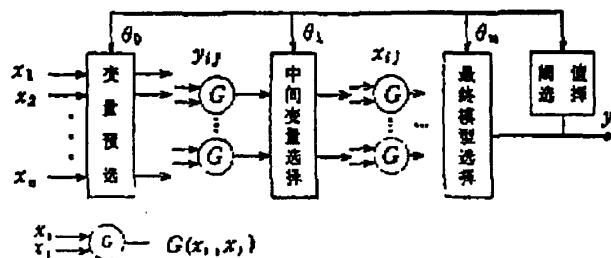


图 4.2 基本型 GMDH 方法示意图

图 4.2 中 G 称为部分多项式，它是两个输入变量的完全多项式， $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 分别为每层的模型评价准则值， y_{ij} 是由部分模型计算得到的输出，部分模型是通过拟合实测数据辨识得到的； x_{ij} 称为中间变量，是从 y_{ij} 中按每层的模型评价准则值选出来的，作为下一层的输入。假定通过 m 层得到最终模型，且假定部分多项式都是二阶的，则最终模型是 2^m 阶结构的多项式。最终模型的质量不仅与中间变量的选择有关，更与构成中间变量的部分表达式的形式有关。

4.3.1 在均匀设计中用 GMDH 方法建立模型的步骤

- ①根据均匀设计进行试验数据测试；
- ②将试验数据分成拟合和检验 A、B 两组。
- ③对任意两个因素 x_i, x_j 进行组合。

选用部分表达式为 $G(x_i, x_j) = a_0 + a_1x_i + a_2x_j + a_3x_ix_j + a_4x_i^2 + a_5x_j^2$

④用检验组 B 的数据接 MSE(均方误差)准则评价优劣:

$$MSE = \frac{\sum |y - G(xi, xj)|}{(x, y) \in B}$$

选出若干比较好的模型进入下一层计算, 若该层的 MSE 比上一层的大, 则用最好的模型作为最终模型; 否则以该层模型作为输入项作为输入重复③、④两步过程。进过计算机运算, 最终确定二次回归模型可以比较好地拟合数据。

最终确定模型为:

$$y = p_1 + p_2x_1 + p_3x_2 + p_4x_3 + p_5x_1^2 + p_6x_2^2 + p_7x_3^2 + p_8x_1x_2 + p_9x_1x_3 + p_{10}x_2x_3$$

4.3.2 建立均匀设计实验的回归方程

表 4.5 为本试验结果表。

表 4.5 本次试验数据安排表

编号	芳纶短纤维 份数, (x_1)	缓冲层厚 度 mm, (x_2)	硫化时间 min, (x_3)	胎体强度试验 数据(y_1)	粘合性能试验 数据(y_2)	耐久性能
1	0.5	1	16	13.16	5.2	通过
2	1	1.5	14	13.97	5.2	通过
3	1.5	0.9	17.5	13.84	4.9	通过
4	2	1.4	15.5	15.16	5	通过
5	2.5	0.8	13.5	14.74	4.7	通过
6	3	1.3	17	15.42	4.5	通过
7	3.5	0.7	15	15.63	4.2	通过
8	4	1.2	13	15.38	4.5	通过
9	4.5	0.6	16.5	15.89	5.2	通过
10	5	1.1	14.5	16.14	3.7	通过

对短纤维增强型缓冲层制备工艺采用二次回归, 即对表 4.5 的数据进行模型的回归分析: $y = p_1 + p_2x_1 + p_3x_2 + p_4x_3 + p_5x_1^2 + p_6x_2^2 + p_7x_3^2 + p_8x_1x_2 + p_9x_1x_3 + p_{10}x_2x_3$ 。

根据均匀设计法的实验结果对胎体强度性能(y_1), 进行回归计算, 得到回归方程:

$$y_1 = 51.32 - 5.92x_1 - 43.258x_2 - 0.711x_3 + 0.302x_1^2 + 11.442x_2^2 + 0.014x_3^2 + 4.577x_1x_2 - 0.051x_1x_3 + 0.257x_2x_3 .$$

用上述回归方程对以上 10 个试验的性能指标分别进行计算，计算结果 y_{1c} 与实验结果 y_1 如表 4.6 所示，其中 e_1 为残差， $e_1 = y_{1c} - y_1$ 。回归模型的计算结果与实验结果的比较见表 4.6，残差点图见图 4.3。

表 4.6 回归模型的计算结果与试验结果的比较

水平	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_1	13.16	13.97	13.84	15.16	14.74	15.42	15.63	15.38	15.89	16.14
y_{1c}	13.21	13.96	13.84	15.14	14.69	15.50	15.68	15.41	15.85	16.13
e_1	0.05	-0.01	0.00	-0.02	-0.05	0.08	0.05	0.03	-0.04	-0.01

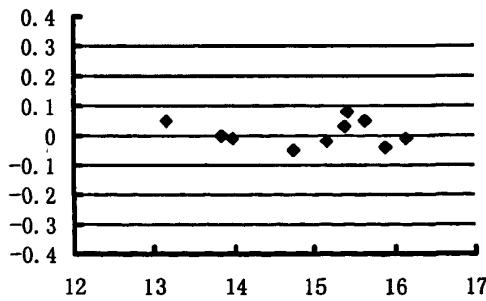


图 4.3 残差点图

为了确认所选的模型是否合适，数据是否可靠，需要用回归诊断来证实。进行回归诊断的主要工具是残差。用残差 e_1 对 y_1 作图称为残差点图 4.3。从图中可以看出，残差较小，且在 0 附近波动。说明建立的模型在描述胎体强度方面有较好效果。

对于粘合性能(y_2)，根据以往实际经验，基胶配方固定后的主要影响因素是芳纶份数，因此下面针对芳纶份数建立回归方程： $y_2 = 4.743 + 0.084 x_1 - 0.144 x_1^2 + 0.017 x_1^3$ 。

用上述回归方程对以上 10 个试验的性能指标分别进行计算，计算结果 y_{2c} 与实验结果 y_2 如表 4.7 所示，其中 e_2 为残差， $e_2 = y_{2c} - y_2$ 。回归模型的计算结果与实验结

果的比较见表 4.7, 残差点图见图 4.4。

表 4.7. 回归模型的计算结果与试验结果的比较

水平	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_2	4.80	4.70	4.60	4.50	4.30	4.20	4.00	3.90	3.80	3.70
y_{2c}	4.75	4.70	4.60	4.47	4.32	4.16	4.00	3.86	3.75	3.69
e_2	-0.05	0.00	0.00	-0.03	0.02	-0.04	0.00	-0.04	-0.05	-0.01

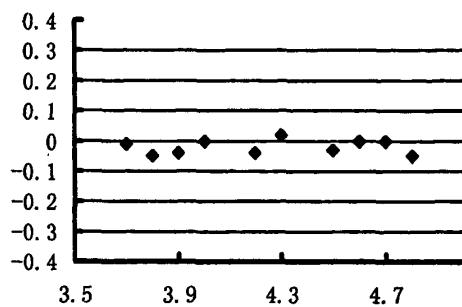


图 4.4 残差点图

用残差 e_2 对 y_2 作图称为残差点图 4.4。从图中可以看出, 残差较小, 且在 0 附近波动。该回归方程模拟芳纶份数对粘合性能影响关系效果较好。

4.3.3 寻求制备缓冲层的最佳芳纶组份及部分最佳工艺条件

在加工成本尽量低, 同时兼顾满足胎体强度性能指标和粘合性能指标的情况下分析回归方程, 可以得到小试范围内的比较合适的芳纶组份及主要工艺参数如下: 芳纶组份 x_1 为 3 份, 缓冲层厚度 x_2 为 1mm, 硫化时间选择在 15min。利用回归方程得到相应的胎体强度为 15.3, 得到的粘合性能为 4.15。在上述条件制成试验轮胎, 测得胎体强度性能为 15.5, 粘合性能为 4.2, 考虑到其他干扰因素, 基本上得到了比较好的验证, 也基本符合了性能要求。

4.4 本章小结

(1) 将均匀设计法应用于芳纶短纤维增强型缓冲层制作，并引用了回归建模方法——数据处理组合法，仅用较少的试验次数就优化了主要增强材料的配方组份和一些工艺条件。

(2) 分析回归方程，在能够达到性能指标，同时追求最佳经济性的基础上，得到合适的芳纶份数为 3 份，缓冲层厚度为 1mm，硫化时间为 15min。

(3) 通过试验对利用均匀设计数据形成回归方程测算得到的最佳值进行了验证，结果良好，这说明了均匀设计法的可行性。

(4) 利用 SPSS 等工具方便引入试验数据的处理，大大简化处理的过程，提高了效率。

答：通过实验验证
均匀设计法可行
均匀设计法
数据处理组合法
芳纶份数为 3 份
缓冲层厚度为 1mm
硫化时间为 15min
通过试验验证

第五章 芳纶长纤维（帘布）轮胎缓冲层制备及计算机辅助结构设计

5.1 前言

跟第三、四章不同，本章将针对利用各种长纤维帘布来作为骨架材料，然后在骨架材料上附上一层胶料制成缓冲层，从相关工艺和结构设计的角度来研究讨论制成轮胎缓冲层的最佳方案^[18]。

轮胎结构设计是轮胎制造前的一项工作，是决定轮胎质量的关键环节，轮胎结构设计在国内目前有两种设计方法：一种是采用静态薄膜网络理论为基础与经验相结合的设计方法；另一种是近年来运用系统的理论，按轮胎在负荷下产生的应力应变规律应用计算机设计的方法。轮胎结构设计分二个阶段进行：第一阶段为技术设计，任务是收集为设计提供依据的技术资料；确定轮胎的技术性能要求；设计外胎外轮廓曲线、内轮廓曲线和胎面花纹；设计内胎、垫带和水胎(或胶囊)断面曲线；绘制外胎、内胎和垫带设计总图。第二阶段为施工设计，任务是根据技术设计确定成型机头型式、直径、绘制材料分布图。并制定外胎、内胎、垫带及水胎(或胶囊)施工标准表；提出外胎、内胎及水胎(或胶囊)制造附属工具的技术要求^[19]。

在完成上述二个阶段的设计任务后，提出技术设计和施工设计说明书。在轮胎结构设计中面临着两个问题：一、如何进行结构的优化设计，提高轮胎的质量；另一个是如何提高设计效率，加速新产品的开发。计算机是解决这些问题行之有效的工具，利用计算机辅助设计有相当大的优越性，利用 CAD 系统进行轮胎辅助设计，无论是图形精度、设计水平还是工作效率，都将有很大提高。近几年来，随着计算机应用的日益普及，CAD 的发展非常迅速，它已经渗透到各个领域中。国内外一些大型的橡胶轮胎制造公司都很关注应用 CAD 设计，这不仅缩短了轮胎开发周期而且缩短了开发费用，例如：避免了模具多次修改的费用、设计的轮胎图纸可以直接进行模具加工的 CNC 计算等等。

5.2 长纤维（帘布）轮胎缓冲层制备过程

5.2.1 帘布压延附胶工艺

1) 胶料的热炼

混炼后的帘布胶(C560)，由于塑性均匀程度和温度低，不能直接用于压延，必须先在开炼机上进行热炼。热炼一般分两步即粗炼和精炼，粗炼在较低温度(45~55℃)，使混炼胶受较强的机械作用而提高塑性和均匀性；精炼在较高温度(65~75℃)，使已经软化的胶料达到一定的温度，以提高胶料的热流动性。

2) 压延方式

帘布附胶有两种方式即贴胶和压力擦胶。贴胶也称平贴法，是使帘布和胶片同时通过等速回转的辊筒间隙，在辊筒的压力作用下，贴合成为有一定厚度的胶帘布。该方法的优缺点见表 5.1。

表 5.1 帘布贴胶工艺的优缺点

优点	缺点
操作控制较容易，生产效率较高	胶料不能很好地渗入到布缝内，胶与布间的附着性较差
胶帘布外观质量易控制，并对帘布的损伤较小	胶料中气泡不能完全排除，胶帘布有气泡
胶帘布受到伸张较小、较匀，耐疲劳性高	/
压延工艺损耗较小	/

压力擦胶也称半擦胶法，是利用中下辊间存胶的压力，将胶料挤压到帘布缝中去，有少部分薄胶层贴附于帘布表面。该方法的优缺点见表 5.2。

表 5.2 帘布压力擦胶工艺的优缺点

优点	缺点
胶料渗透到帘线间的程度好，胶与布的附着强度高	压延张力控制不好时，胶帘布外观质量缺陷较多，工艺损耗率偏高
可借助余胶回转而排除胶料中卷入的空气	操作要求严格，掌握较佳工艺难，尤其是控制存胶量及其形态难
胶帘布伸张较大，压延后有效面积利用率提高	/

压力擦胶作业通常要求如下要点：首先，胶料的可塑度适当大些，一般为

0.57 ± 0.03 ，过低易造成胶帘布破损，过高又容易使胶帘布变黏；其次，辊间余胶以直径约为 $\varnothing 20\text{mm}$ 左右呈纺垂形的滚动状态为佳，使其对帘布面挤压压力相等。

5.2.2 帘布根据工艺设计裁断卷取

根据电脑辅助设计计算出来的施工参数，裁断一定宽度和角度的帘布，并把帘布条沿纬线搭接后卷取在帘布筒，待轮胎成型时使用。

帘布角度是根据轮胎设计理论计算而得，即先把成品轮胎的角度设定为 $48\text{--}52^\circ$ 为最佳力学角度，根据这个角度依据轮胎在成型硫化时的角度变化过程推算出帘布的角度。

帘布宽度则是根据轮胎帘布在成型硫化过程中每个微分段（在实际计算时按每隔 2mm 来微分轮胎胎里曲线）的伸张值计算而得，这在轮胎设计中有一个专门的公式。

5.3 计算机辅助设计

计算机辅助绘图及设计是计算机图形学中的一个分支。计算机辅助绘图就是将我们所要求的图样在计算机的控制下自动地画出来；而计算机辅助设计则是使用计算机来辅助进行任何一种单一零件、分系统或全系统的设计。通常人们要求将绘图系统与整个设计过程联系起来，在设计过程中，计算机及时地输出计算结果并显示图形，供设计人员审视，从而命令计算机不断地进行修改，直至满足要求为止。这种交互式设计系统，通常称为计算机辅助设计系统——CAD 系统（即 Computer—Aided Design System）。CAD 在轮胎结构设计中的应用，就是指这样的系统。

5.3.1 硬件设备

CAD 硬件系统主要由计算机和自动绘图机两大部分组成。计算机的主要任务是将源程序进行编译、计算、加工成自动绘图机能够接收的信息，而自动绘图机则根据计算机提供的信息转化成相应机构的动作，从而作图。

5.3.2 软件系统

目前 CAD 软件应用已经比较普遍，CAD 软件可以分为结构设计 CAD 软件，三

维仿真 CAD 软件、工艺参数设计 CAD 软件。

结构设计 CAD 软件方面，国内应用的已经非常广泛，国外的软件如 Auto CAD、Solid Work、Pro E、UG；国内的软件如电子图板等。目前工厂中使用了 Auto CAD，我们选用的结构设计方面的设计软件是 Auto CAD。

三维仿真 CAD 在轮胎相关部件的结构设计中的作用越来越重要，一些传统的 CAD 软件也提供了三维建模的功能，目前我们选用的是 Solid Work 来进行三维建模的工作。

工艺参数设计方面的 CAD 软件由于具有很强专业性，一般都是由生产应用厂家自行研发，通用软件比较少。在本论文中的采用的工艺参数设计 CAD 软件和计算程序包均是由本厂完成。

5.3.3 轮胎设计的基本理论

研究主要涉及到电动车轮胎的成型鼓直径和宽度的设计，从而推算出帘布的角度和宽度。

成型鼓直径 d 的大小一般是根据轮胎钢丝圈再确定，钢丝圈直径除以 π 即得成型鼓直径。成型鼓宽度 B_s 值的计算是需要微分胎里曲线后，在计算出每个微分段的直径，分别计算出该段的帘线伸张系数，再利用公式： $b_0 = \frac{b \cdot \cot \alpha_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sin^2 \alpha_0} - \sigma_n^2}}$ 计

算出成品轮胎断面轮廓的展开宽度，然后通过 $\sum b_0$ 计算出整个断面的在成型鼓上的展开宽度，从而得出成型鼓宽度。式中 b 是成品轮胎断面内轮廓（胎里曲线）的一个等分宽度（微分宽度）， α_0 是帘布的裁断角度， σ_1 是指帘线的假定伸张值，与压延工艺的方法有关，若采用三辊压延机张力很小的情况下则取值稍大，取 1.04，四辊压延机一般选取 1.02-1.01， b_0 是成型鼓上相应外胎断面内轮廓等分段宽度， σ_n 是指胎里

等分段平均直径与成型鼓直径的比值，即 $\sigma_n = \frac{D_n}{D_0}$ ， D_n 胎里等分段平均直径， D_0 成型鼓直径。

5.4 计算机结构仿真模拟防刺轮胎

为提高轮胎设计的效率和准确性，在设计轮胎前期一般采用 SolidWork 或 AUTOCAD 进行仿真模拟。在本次缓冲层设计时，对于它的宽度、厚度及位置做多个方案的仿真模拟，便于讨论分析。

5.4.1 结构设计考虑因素

电动车轮胎在行驶过程中由于速度相对于自行车轮胎速度快，碰到硬物时冲力大，在较差例如有尖头的石块的农村路面、黑心钉、玻璃等的路况中比较容易造成轮胎刺破，内胎漏气。给使用者造成很大的安全隐患和不便，为此根据市场需求研制耐刺轮胎。

耐刺轮胎一般发生刺穿的是胎冠部位，自行车轮胎一般胎肩和胎冠的高度 h 比较大，在负载情况下，轮胎在下沉以后，轮胎的胎肩还是稍高于胎冠，不直接接触地面，在转弯时接触地面，所以我们在考虑耐刺性时一般考虑到轮胎的胎冠负载下沉后的接地部位，耐刺层宽度也是考虑到肩部不到的位置为准。

耐刺层的数量，根据前期的试验情况发现，使用单层的帘布做耐刺层效果不佳。主要是因为帘布的经线间隙大，一层帘布没有形成网孔，而是板栅状，间隙还是比较容易刺穿的，因此耐刺层一定要形成网孔结构。

5.4.2 计算机辅助防刺轮胎缓冲层结构设计

正如前面介绍的计算机辅助成型工艺设计有许多个方面，例如轮胎成型鼓宽度的设计计算、胎面挤出形状的分析计算、施工参数如帘布裁断角度、帘布宽度等。增加缓冲层的宽度到底是选取多少好？根据前面仿真模拟设计中确定，选取缓冲层宽度为肩部之间的宽度最佳。成型完胎胚在放到轮胎模具中硫化时，由于受到水胎或胶囊的里内压挤压与轮胎模具贴合。在这个过程中，轮胎各部分发生很大变化，产生拉伸变形并相对位移。

电动自行车采用弹簧反包机成型，采用平鼓式成型鼓。成型胎胚示意图见图 5.1。

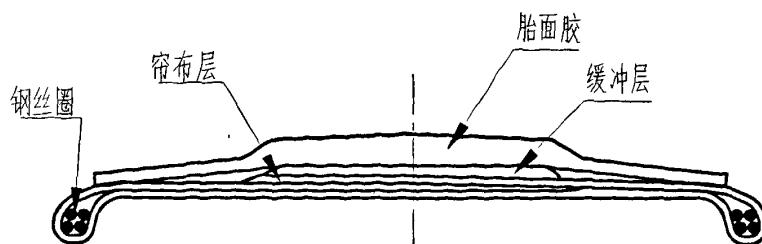


图 5.1 成型胎胚示意图

在电动自行车轮胎硫化前一般需要在一个鼓型撑胎机上依靠机械力把胎胚中间部分顶成轮胎的断面形状，见图 5.2。

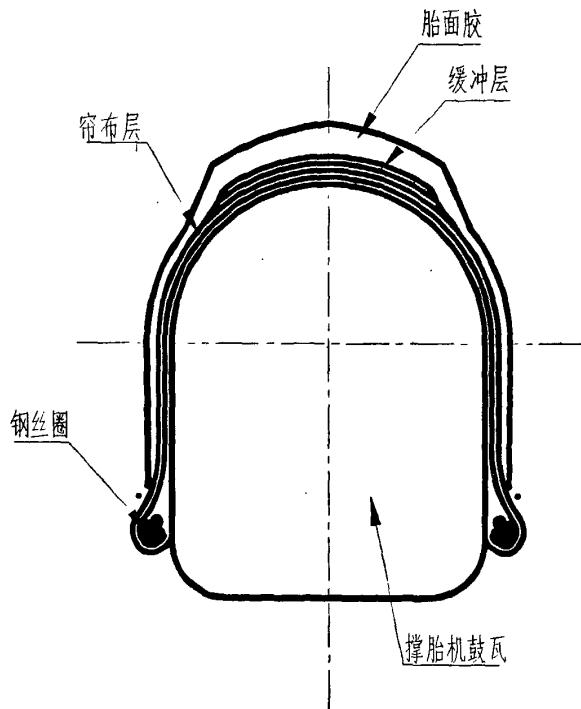


图 5.2 撑胎机撑胎示意图

在这个过程中，轮胎的帘布、钢丝圈钢丝排列、胎面形状都发生了不同程度的变化，帘布的帘线发生伸张拉伸，中间搭接部分宽度变小。同样胎面胶也发生了伸张变形，冠部胶料拉伸明显，厚度变小宽度加大。针对这个变化，我们一般是采用微分原理对轮胎进行分析计算。对成品轮胎通过材料分析后，作出合理的胎里曲线，对胎里曲线按每单元 2mm 从胎里顶部开始分割直到钢丝圈底部，见图 5.3。

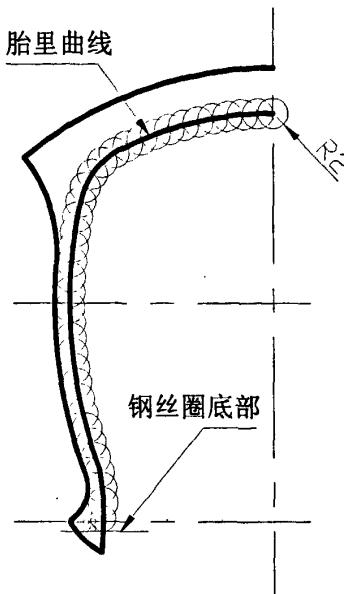


图 5.3 成型长度计算示意图

计算测绘出各微分点的直径，通过平衡轮廓公式计算出各个微分距离的成型长度。计算过程可利用 EXCEL 方便快捷，具体如下：

- ①根据轮胎设计可知：着合直径 $DY=311$ 、成型鼓直径 $D_0=308.1$ 、胎里顶径=418；
- ②取帘布假定伸张值 $\delta_1=1.02$ 、成品胎冠角度 $\alpha=52^\circ$ ；
- ③帘布伸张值 $\delta=418/308.1 = 1.36$ ；
- ④再由 $\sin\alpha_0=\sin\alpha \cdot \delta_1/\delta$ 计算，得到帘布裁断角度 $\alpha_0=36^\circ$ 。

计算过程和结果见表 5.3。根据计算可以得出，成型鼓宽度取 174mm，帘布宽度取 $2 \times 174 + 32 = 380$ mm。

同理可以通过对成品轮胎缓冲层分布情况（图 5.4）计算出施工所需的缓冲层在成型鼓上的帘布展开宽度，具体如下：

- ①根据轮胎设计可知：着合直径 $DY=311$ 、帘布筒直径 $D_0=308.1$ 、胎里顶径=418；
- ②取帘布假定伸张值 $\delta_1=1.02$ 、成品胎冠角度 $\alpha=52^\circ$ ；
- ③帘布伸张值 $\delta=418/308.1 = 1.36$ ；
- ④再由 $\sin\alpha_0=\sin\alpha \cdot \delta_1/\delta$ 计算，得到帘布裁断角度 $\alpha_0=36^\circ$ 。

表 5.3 成型鼓宽度计算过程和结果

序号	DY	$\delta n = DY/D_0$	δn^2	b	$\delta_i^2 / \sin^2 \alpha_0$	$B2 = \sqrt{\delta_i^2 / \sin^2 \alpha_0 - \delta n^2}$	$b_0 = b * \text{Ctg}(34) / B2$
1	418	1.412	1.994	2	3.327	1.154	2.569
2	417.7	1.411	1.992	2	3.327	1.156	2.567
3	417.5	1.410	1.989	2	3.327	1.157	2.564
4	417.0	1.409	1.985	2	3.327	1.158	2.560
5	416.4	1.407	1.979	2	3.327	1.161	2.555
6	415.7	1.404	1.972	2	3.327	1.164	2.548
7	414.7	1.401	1.963	2	3.327	1.168	2.540
8	413.8	1.398	1.954	2	3.327	1.172	2.531
9	412.5	1.394	1.942	2	3.327	1.177	2.520
10	410.9	1.388	1.927	2	3.327	1.183	2.507
11	409.4	1.383	1.913	2	3.327	1.189	2.495
12	407.6	1.377	1.896	2	3.327	1.196	2.479
13	405.1	1.369	1.873	2	3.327	1.206	2.460
14	402.0	1.358	1.845	2	3.327	1.217	2.436
15	398.5	1.346	1.813	2	3.327	1.231	2.410
16	395.0	1.335	1.781	2	3.327	1.243	2.385
17	390.8	1.320	1.743	2	3.327	1.259	2.357
18	386.8	1.307	1.708	2	3.327	1.272	2.331
19	382.9	1.293	1.673	2	3.327	1.286	2.306
20	378.9	1.280	1.638	2	3.327	1.299	2.283
21	374.9	1.267	1.604	2	3.327	1.313	2.260
22	370.9	1.253	1.570	2	3.327	1.325	2.238
23	366.9	1.240	1.537	2	3.327	1.338	2.217
24	362.9	1.226	1.503	2	3.327	1.350	2.196
25	359.5	1.215	1.475	2	3.327	1.361	2.180
26	354.9	1.199	1.438	2	3.327	1.374	2.158
27	351.0	1.186	1.406	2	3.327	1.386	2.140
28	347.0	1.172	1.374	2	3.327	1.397	2.123
29	343.1	1.159	1.343	2	3.327	1.408	2.106
30	339.2	1.146	1.313	2	3.327	1.419	2.090
31	335.3	1.133	1.283	2	3.327	1.430	2.075
32	331.5	1.120	1.254	2	3.327	1.440	2.060
33	327.6	1.107	1.225	2	3.327	1.450	2.046
34	323.8	1.094	1.197	2	3.327	1.460	2.032
35	319.8	1.080	1.167	2	3.327	1.470	2.018
36	315.8	1.067	1.138	2	3.327	1.479	2.005
37	311.8	1.053	1.110	2	3.327	1.489	1.992
38	308.5	1.042	1.086	2	3.327	1.497	1.673
					$2\sum b_0 =$	174.02	

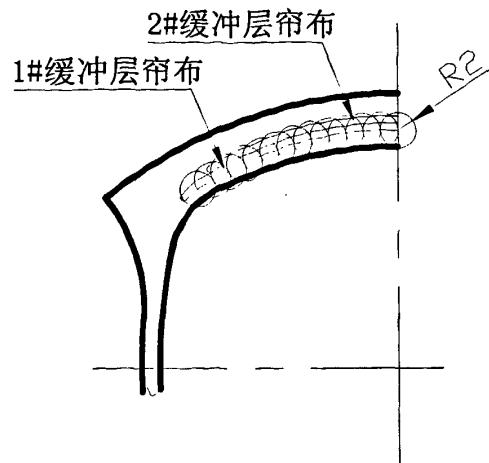


图 5.4 缓冲层长度计算示意图

把上述各值代入平衡轮廓计算公式，计算出各微分段帘布成型长度求和，见表 5.4。

表 5.4 帘布成型宽度计算过程和结果

序号	DY	$\delta n = DY/D_0$	δn^2	b	$\delta_1^2 / \sin^2 \alpha_0$	$B2 = \sqrt{\delta_1^2 / \sin^2 \alpha_0 - \delta n^2}$	$b_0 = b * \text{Ctg}(34) / B2$
1	418	1.357	1.841	2	3.327	1.219	2.433
2	417.7	1.356	1.838	2	3.327	1.220	2.431
3	417.5	1.355	1.836	2	3.327	1.221	2.429
4	417.0	1.354	1.832	2	3.327	1.223	2.426
5	416.4	1.352	1.827	2	3.327	1.225	2.422
6	415.7	1.349	1.820	2	3.327	1.228	2.416
7	414.7	1.346	1.812	2	3.327	1.231	2.410
8	413.8	1.343	1.804	2	3.327	1.234	2.403
9	412.5	1.339	1.792	2	3.327	1.239	2.394
10	410.9	1.334	1.779	2	3.327	1.244	2.384
11	409.4	1.329	1.766	2	3.327	1.249	2.374
12	407.6	1.323	1.750	2	3.327	1.256	2.362
13	405.1	1.315	1.729	2	3.327	1.264	2.346
						$2 \sum b_0 =$	62.5

根据计算得出：第一层缓冲层帘布宽度取 65mm。

同理推算出第二层缓冲层宽度取 45mm.

5.5 本章小结

介绍轮胎帘布压延及裁断等生产方式。利用轮胎设计原理和设计软件，计算出试验轮胎 16×2.50 耐刺轮胎所需要的耐刺缓冲层帘布的宽度，即：第一层缓冲层帘布宽度取 65mm，第二层缓冲层宽度取 45mm。

第六章 芳纶增强防刺轮胎缓冲层材料对比应用和性能测试

6.1 前言

本文主要是研究芳纶帘布在轮胎冠部作缓冲层的耐穿刺性能的研究。这几年作为轮胎骨架材料的应用研究报告也逐年增加，但国内没有在自行车及电动车轮胎上的使用研究的相关报道，但有芳纶生产厂家对国外同行使用的介绍。

把采用两层普通尼龙 6 力车轮胎帘布作为耐刺缓冲层、两层芳纶帘布作为耐刺缓冲层以及单层芳纶帆布做耐刺缓冲层做对比试验，验证芳纶帘布、帆布的耐刺增强效果，并选取最佳方案^[18]。

6.2 胎样品生产制作概述

帘布、帆布在压延机上擦胶后，裁成有 45°角度和一定宽度的帘布条，在轮胎成型时放到胎面和帘布层中间作缓冲层。试验轮胎选用 16×2.50 规格，每个方案分别试作 9 条，具体方案见表 6.1。

表 6.1 试验轮胎选材、规格方案

序号	品种	规格	宽度 (mm)	
			第一层	第二层
1	芳纶帆布	1100dtex / 1×1	65	1
2	尼龙帘布	930dtex/2 - 130137	65	45
3	芳纶帘布	1680dext/2 - 72145	65	45

备注：1、由于受国内生产芳纶帘布、帆布规格的限制，芳纶帘布、帆布规格只选用能购买到的品种；2、由于帆布经纬线均是芳纶线，所以只要选用一层即可，而帘布纬纱强度低，在初步试验时选用一层时效果不明显，后采用两层帘布交叉成型^[8,18,20]。

6.3 胎体强度、防刺穿性能

采用胎体强度试验判别轮胎耐穿刺性能，并国标 Ø8 圆棒压柱的圆头改为 60°圆锥，按标准充气压力 350kPa 条件下测试，每个试样采用 6 条轮胎做胎体强度试验，

结果见表 6.2。

表 6.2 各轮胎试验方案结果

轮胎编号 序号	1	2	3	4	5	6	平均
1 (芳纶帆布)	17.8	17.1	18.3	16.9	18.1	17.4	17.6
2 (尼龙帘布)	15.2	14.4	13.9	14.2	14.7	13.3	14.3
3 (芳纶帘布)	未压穿						

从试验结果来看，使用芳纶帆布或两层芳纶帘布作缓冲层的轮胎耐刺能力相对于普通帘布制做缓冲层的轮胎都有较大幅度的提高，尤其是使用两层芳纶帘布的轮胎，压头行程压到轮辋为止都没有把轮胎刺穿。试验结果与预期设想比较符合，利用芳纶的高强度，耐刺穿性能来提高轮胎的防刺能力。在前期的试验准备过程中也试过使用一层芳纶 1680dext/2 - 72145 帘布作缓冲层，但是耐刺效果不佳，分析认为利用两层芳纶交叉成网格的防刺效果会比较好，所以调整方案选用两层芳纶帘布作为缓冲层。同样的网状结构，尼龙帘布制做缓冲层的轮胎耐刺能力较差，因为芳纶帘线的强度比尼龙帘线高，帘线本身有较好的耐切割刺穿性能，压柱比较难刺穿。

6.4 机床耐久性能

每个方案还各安排三条轮胎做机床里程试验，验证增加缓冲层后帘布间的粘合力下降对轮胎综合性能的影响。机床试验发现使用芳纶帆布方案的轮胎有脱层起泡现象。因为芳纶帆布的附胶过程是贴胶，与帘布的压力擦胶不同，前面在制备时讲到采用贴胶工艺时不容易把胶料里的气泡赶出，而且胶料渗透到帆布间隙的胶料少，影响芳纶帆布与胶料的粘合性能。经解剖轮胎，也发现 1100dtex/1×1 帆布由于织物间隙小，胶料在织物间隙中的渗透量少，再加上芳纶本身与橡胶的粘合性比尼龙差，造成帆布与胶料粘合不够，粘着力大幅度下降，表现为轮胎在耐久试验中胎冠脱层。

6.5 经济性及综合性能（生产效率）比较

考虑到使用芳纶帆布轮胎的粘合性差，容易造成使用过程中脱层，所以选用两层

芳纶帘布的方案制造防刺轮胎。在增加两层芳纶帘布作耐刺缓冲层后，电动车轮胎的耐刺性确实得到很大的提高，能够保证在行驶使用过程中不被刺穿，提高轮胎的安全性能。

在推广使用两层缓冲层的过程中也遇到了一些生产上、经济上的问题。在生产过程中由于要多加两层帘布成型速度放慢，产量下降；硫化时，由于芳纶的模量较尼龙的高，在放入水胎整胎过程中比较困难。另外由于芳纶目前的价格还是比较高的，而且用于加工帘布的芳纶都是对位芳纶（1414），国内还没有纤维的生产能力，依靠从美国杜邦、日本帝人进口，所以价格比较高，目前在增加这两层芳纶帘布后轮胎成本需要增加一倍。

6.6 本章小结

本章主要介绍了芳纶帘子布在胎冠缓冲层中的应用的研究，主要是研究芳纶帘布在轮胎冠部作缓冲层的耐穿刺性能的研究。使用芳纶帆布或两层芳纶帘布作缓冲层的轮胎耐刺能力相对于普通帘布制做缓冲层的轮胎都有较大幅度的提高，尤其是使用两层芳纶帘布的轮胎，压头行程压到轮辋为止都没有把轮胎刺穿。试验结果与预期设想比较符合。

第七章 结论

本论文在前人研究的基础上，分别针对短纤维增强型缓冲层和长纤维（帘布）型缓冲层，从结构、配方、工艺条件等角度进行了分析，力图找出在满足各方面性能要求和经济性要求的情况下最佳结构、配方和工艺条件，为下一步全厂耐刺穿轮胎的大规模生产应用做好基础准备。在短纤维增强型缓冲层的主要成分最佳配方和工艺条件设计中，引入了均匀设计法。在保证试验效果的同时大大减少了试验的次数，提高了效率，降低了试验成本。在长纤维帘布型缓冲层设计过程中，充分利用了计算机辅助设计，在结构参数设计、¹三维仿真等方面大大提高了效率。在对比短纤维增强缓冲层和长纤维帘布型缓冲层性能、工艺性、成本、设备的复用性等角度，最终选定了芳纶长纤维帘布型缓冲层作为耐刺穿轮胎的缓冲层。在一系列试验过程中我们得到了如下的结论：

- 1、芳纶短纤维增强型缓冲层的主要影响因素是：芳纶短纤维增强材料的份数，份数的增加对胎体强度的增强有明显的作用而对粘合性能则有反作用。在综合考虑两种性能，确定基于 C180 配方的最佳芳纶份数为 3 份。
- 2、在正常的硫化时间区间内硫化时间对短纤维增强型的缓冲层的影响，并不显著，在发生欠硫和过硫的情况下相关的性能损失比较明显。试验确定了最佳的硫化时间为 15min 左右。
- 3、在芳纶短纤维增强型缓冲层最佳配方和工艺条件设计过程中引入了均匀设计法的概念，并引入了数据处理组合法来进行回归建模，同时分析回归方程，得出了最佳的芳纶份数和相关的工艺条件。
- 4、在芳纶长纤维帘布型缓冲层的应用设计过程中，利用计算机辅助设计，确定了最佳的缓冲层帘布层级和帘布宽度。

参考文献

- [1] 张立群, 金日光, 周颜豪等. 短纤维补强技术在橡胶工业中的应用, 橡胶工业, 1995, 42(3): 169-174, 190
- [2] Tsimpris C W. Compounding with para-aramid fiber engineered elastomers, Rubber world, 2001, 224(1): 35-40
- [3] 王同英, 陈振宝, 张清水. 轮胎用芳纶帘线的性能研究, 轮胎工业, 2002, 22(8): 476-480
- [4] 张勋民, 蒋化学. 对位芳纶浆粕在轮胎胎面中的应用, 橡胶工业骨架材料中外技术论坛, 2008年5月, 郑州
- [5] 杜邦公司. Applications of Kevlar in Tires, 橡胶工业骨架材料中外技术论坛, 2008年5月, 郑州
- [6] 廖子龙. 芳纶的市场需求与芳纶浆粕的应用, 高科技纤维与应用, 2008, 33(3): 36-39
- [7] 高称意. 纤维骨架材料的现状和新材料开发动向, 橡胶工业, 2004, 51: 371-375
- [8] 李汉堂. 轮胎用纤维骨架材料的发展, 合成技术及应用, 2007, 22(2): 42-47
- [9] 王曙中. 芳纶浆粕的现状及其应用前景, 高科技纤维与应用, 2003, 28(3): 14-17, 35
- [10] 王维相, 翁亚栋. 芳纶在橡胶制品中的应用概况, 橡胶工业, 2004, 51: 436-439
- [11] 夏启元, 蔡树奎等. 力车轮胎及内胎国家标准, GB/T1702~1703-1997
- [12] 杨海英, 黄德辉, 沈同祝, 单学沛, 张正方. 力车轮胎耐久性能试验方法(转鼓法) GB/T 9762-1997
- [13] 杨海英, 黄德辉, 沈同祝, 单学沛, 张正方. 力车轮胎强度性能试验方法 GB/T 9749-1997
- [14] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表, 科学出版社, 1994
- [15] 高齐圣, 隋树林, 范汝良, 程宝家, 孟宪德, 纪奎江. 数据处理组合法在橡胶配方设计回归建模中的应用, 合成橡胶工业, 1997, 20(3): 169-170
- [16] 徐田军, 王桂增. GMDH 中部分表达式的构成及改进方法, 自动化学报, 1994,

20(4): 470-475

- [17] 庄富山, 钟碧. 改进型 GMDH 算法在常压塔预报模型的应用, 化工自动化及仪表, 1989, (6): 23-27, 39
- [18] 高称意. 轮胎用骨架材料的性能及其与轮胎性能的关系, 产业用纺织品, 2003, 21(8): 26-27
- [19] 朱国军, 王景琦. 轮胎成型鼓的微型计算机辅助设计, 橡胶技术与装备, 1985, (5): 417-418
- [20] 橡胶工业手册第四册
- [21] 张燕. 轮胎用纤维骨架材料的应用现状和发展趋势, 轮胎工业, 2008, 28: 323-326
- [22] Abdel-Bary E M, El-Nesr Eman M, Helaly F M. Effect of gamma radiation-grafted aramid chopped fibers as the reinforcing filler in styrene-butadiene rubber mixtures, Polymers for Advanced Technologies, 1997, 8(3): 140-145
- [23] Datta R, Peters M. Reduced hysteresis in truck tread compounds by using aramid short fibers, Rubber World, 2003, 229(2): 30-33
- [24] Datta R N. Reduced hysteresis in truck tread compounds by using aramid short fibers, Rubber Chemistry and Technology, 2006, 79(1): 26-38
- [25] Datta Rabin N. Aramid for tire tread applications, Research Disclosure, 2003, (474): 1052-1053
- [26] Ahmad Ishak, Baharum Azizah, Abdullah Ibrahim. Effect of extrusion rate and fiber loading on mechanical properties of twaron Fiber-Thermoplastic Natural Rubber (TPNR) composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006, 25(9): 957-965
- [27] Anon. Aramid derivative has huge potential for tyres, Technical Textiles International, 2006, 15(2): 12
- [28] Datta R. Verbesserung der Cut-/Chip-/Chunk-Bestandigkeit von Lkw-Reifen durch Einsatz von para-Aramid-Kurzfasern (Improvement of the cut-/chip-/chunk resistance of truck tires by use of p-aramide short fibers). Gummi, Fasern, Kunststoffe, 2005, 58(2): 109-114
- [29] Datta R N. Reduced hysteresis in truck tread compounds by using aramid short

- fibers, Rubber Chemistry and Technology, 2006, 79(1): 26-38
- [30] Datta R N, Pierik S C J. Improving cut/chip/chunk resistance by using sulfron 3000, KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 2007, 60(6): 328-330
- [31] Datta R N. Improved hysteresis in truck tread compounds by using aramid short fibers. Presented at the 165th meeting of the Rubber Division, American Chemical Society 2004: 1-19

致谢

论文是在单国荣教授的悉心指导下完成的，论文从开题、资料查找、修改到最后定稿都给我悉心的指导。同时，他十分注重对我们的全面培养，使我在实验技能、科研方法和解决问题的能力等方面得到了很大的提高，培养了独立思考能力和动手能力。导师严谨的治学态度和孜孜不倦的研究精神是学生学习的榜样。在此向导师表示衷心的感谢。

在试验环节中得到了公司的大力支持，提供了试验设备和相关的原材料；同时还得到了公司同事的大力支持，在此对公司及各位同事表示感谢。

王香亚

2009年4月16日