



现代橡胶技术丛书  
XIANDAI XIANGJIAOJISHU CONGSHU

丛书主编 游长江

# 轮胎

■ 杨慧 游长江 主编

LUNTAI



化学工业出版社



现代橡胶技术丛书  
XIANDAI XIANGJIAOJISHU CONGSHU

丛书主编 游长江

# 轮胎

LUNTAI

■ 杨慧 游长江 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分6章。第1章轮胎的种类主要介绍了智能轮胎、绿色轮胎、安全轮胎、翻新轮胎等的种类和特点；第2章轮胎的原材料主要介绍了用于轮胎的生胶、硫化体系、补强填充体系、防护体系、软化增塑体系的品种、性质和作用原理；第3章轮胎的结构与配方主要介绍了子午线轮胎和斜交轮胎的结构以及各部位胶料的配方设计方法；第4章轮胎的制造工艺主要介绍了轮胎生产的传统工艺以及新工艺、新技术；第5章轮胎标记主要介绍了轮胎的规格、负荷、速度标志等表示方法；第6章轮胎的质量检测主要介绍了轮胎质量检测的方法、轮胎常见缺陷和原因分析。

本书可供橡胶工业从事橡胶制品科研、设计、生产、应用、管理等方面人员使用，也可供高等院校、高职院校、中专学校有关专业的教师、学生阅读和参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

轮胎/杨慧, 游长江主编. —北京: 化学工业出版社, 2013.3

(现代橡胶技术丛书)

ISBN 978-7-122-16220-5

I. ①轮… II. ①杨…②游… III. ①TQ336.1  
IV. ①TQ336.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 311926 号

---

责任编辑: 赵卫娟

文字编辑: 徐雪华

责任校对: 王素芹

装帧设计: 韩 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 14 字数 280 千字 2013 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

---

随着社会的发展，人们对轮胎的速度性能、操纵稳定性、安全性和乘坐舒适性等要求越来越高，轮胎制造的新工艺和新技术也不断涌现。

本书共分6章。第1章轮胎的种类主要介绍了智能轮胎、绿色轮胎、安全轮胎、翻新轮胎等特殊性能轮胎的种类和特点，以及传统轮胎的种类；第2章轮胎的原材料主要介绍了生胶材料、硫化体系、补强填充体系、防护体系、软化增塑体系以及骨架材料的品种、组成、性质和作用原理；第3章轮胎的结构与配方主要介绍了轮胎的结构、斜交轮胎和子午线轮胎各部位胶料的配方设计方法；第4章轮胎的制造工艺主要介绍了轮胎传统加工工艺和新工艺、新技术；第5章轮胎标记主要介绍了轮胎的规格、轮胎的负荷、速度标志等表示方法；第6章轮胎的质量检测主要介绍了轮胎质量检测的方法、轮胎常见缺陷及原因分析。

本书第1章、第3章、第5章由杨慧编写；第2章、第4章、第6章由王国志编写，全书由杨慧、游长江审定并组织编写。

本书在编写过程中，得到了华南理工大学、河源职业技术学院、徐州工业职业技术学院、广州橡胶工业制品研究所有限公司、中国兵器工业集团第五三研究所、株洲时代新材料科技股份有限公司、广州市华南橡胶轮胎有限公司、北京万源瀚德汽车密封系统有限公司、广州胶管厂有限公司、青岛橡六集团有限公司橡六输送带厂、广州加士特密封技术有限公司、湛江市汇通药业有限公司等单位及其专家、教授、工程技术人员的大力支持和帮助。

徐州工业职业技术学院翁国文教授、聂恒凯教授等橡胶专家提出了许多宝贵的意见，在此特别鸣谢。

由于参加编写的单位和个人很多，在此恕不一一列举，谨向他们表示衷心的感谢。

尽管全书经过认真校订，但由于编写人员多、资料来源与编者水平的局限，难免有不妥和疏漏之处，敬请读者指正。

编 者

2012年12月

# 目 录

<b>第 1 章 轮胎的种类</b> .....	1
1.1 特殊性能轮胎 .....	1
1.1.1 智能轮胎 .....	1
1.1.2 绿色轮胎 .....	5
1.1.3 安全轮胎 .....	13
1.1.4 翻新轮胎 .....	19
1.1.5 其他轮胎 .....	26
1.2 传统轮胎 .....	28
1.2.1 按用途不同分类 .....	28
1.2.2 按结构不同分类 .....	29
1.2.3 按花纹不同分类 .....	32
1.2.4 按胎体骨架材料不同分类 .....	33
1.2.5 按有无内胎分类 .....	33
1.2.6 按规格大小分类 .....	34
1.2.7 按气压不同分类 .....	34
参考文献 .....	34
<b>第 2 章 轮胎的原材料</b> .....	36
2.1 轮胎用橡胶材料 .....	36
2.1.1 天然橡胶 .....	36
2.1.2 顺丁橡胶 .....	40
2.1.3 丁苯橡胶 .....	42
2.1.4 丁基橡胶 .....	45
2.1.5 其他橡胶 .....	47
2.2 轮胎中的骨架材料 .....	58
2.2.1 纤维骨架材料 .....	58
2.2.2 钢丝骨架材料 .....	63
2.3 硫化配合剂 .....	65
2.3.1 轮胎用硫化剂 .....	65
2.3.2 轮胎用硫化活性剂 .....	71
2.3.3 轮胎用促进剂 .....	73

2.3.4	轮胎用防焦剂.....	76
2.4	轮胎中常用的补强填充剂.....	77
2.4.1	炭黑.....	77
2.4.2	白炭黑.....	86
2.4.3	填充剂.....	90
2.5	轮胎中常用的增塑剂.....	91
2.5.1	石油系增塑剂.....	92
2.5.2	煤焦油系列增塑剂.....	94
2.5.3	松油系列增塑剂.....	96
2.5.4	脂肪油系列增塑剂.....	96
2.5.5	合成酯类增塑剂.....	97
2.5.6	塑解剂.....	100
2.6	其他原材料.....	101
2.6.1	防护体系.....	101
2.6.2	偶联剂.....	108
2.6.3	抗静电剂.....	109
2.6.4	阻燃剂.....	110
	参考文献.....	111
<b>第3章</b>	<b>轮胎的结构与配方</b> .....	<b>113</b>
3.1	轮胎的结构.....	113
3.1.1	胎面.....	113
3.1.2	胎体.....	115
3.1.3	胎圈.....	118
3.2	轮胎胶料配方.....	120
3.2.1	胎面胶配方.....	124
3.2.2	黑色胎侧胶配方.....	127
3.2.3	钢丝包胶胶料配方.....	129
3.2.4	内衬胶胶料配方.....	133
3.2.5	胎体胶胶料配方.....	133
	参考文献.....	139
<b>第4章</b>	<b>轮胎制造工艺</b> .....	<b>140</b>
4.1	传统工艺.....	140
4.1.1	混炼.....	140
4.1.2	挤出.....	153
4.1.3	压延.....	160
4.1.4	轮胎成型.....	173

4.1.5 硫化 .....	183
4.2 新工艺新技术 .....	185
4.2.1 指挥、控制、通讯及制造一体化系统(米其林 C3M 技术) .....	185
4.2.2 积木式成型法(大陆 MMP 技术) .....	186
4.2.3 集成加工精密成型单元技术(固特异的 IMPACT 技术) .....	187
4.2.4 积木式集成自动化系统(倍耐力 MIRS 技术) .....	188
4.2.5 数码轮胎模拟技术(邓禄普的数码轮胎技术) .....	189
4.2.6 其他轮胎制造新工艺、新技术、新理论 .....	189
参考文献 .....	192
<b>第 5 章 轮胎标记</b> .....	<b>193</b>
5.1 轮胎的规格表示方法 .....	193
5.1.1 斜交轮胎的规格表示方法 .....	193
5.1.2 子午线轮胎的规格表示方法 .....	193
5.1.3 无内胎载重轮胎的规格表示方法 .....	194
5.2 轮胎的负荷表示方法 .....	194
5.2.1 层级 .....	194
5.2.2 负荷指数 .....	194
5.3 速度标志 .....	197
5.4 其他标志 .....	197
参考文献 .....	199
<b>第 6 章 轮胎的质量检测</b> .....	<b>200</b>
6.1 轮胎质量检测的方法 .....	200
6.1.1 外观检测 .....	200
6.1.2 X 射线检测 .....	200
6.1.3 均匀性检测 .....	202
6.1.4 静平衡检测 .....	207
6.2 轮胎常见缺陷及原因分析 .....	209
6.2.1 胎面缺陷及原因分析 .....	209
6.2.2 带束层缺陷及原因分析 .....	209
6.2.3 胎体缺陷及原因分析 .....	213
6.2.4 胎圈缺陷原因分析及改进措施 .....	214
参考文献 .....	215

# 第 1 章 轮胎的种类

轮胎是车辆、农业机械、工程机械和飞机等的重要部件之一，主要作用是支撑负载机械质量，传递牵引力、制动力和侧向力，减轻和吸收机械在行驶时来自路面的振动和冲击，保证机械与路面的附着性能，适应机械的行驶性能并降低行驶时的噪声。

随着社会的发展，人们对轮胎的速度性能、操纵稳定性能、安全性能和乘坐舒适性等要求越来越高，具有特殊性能的轮胎不断涌现。

## 1.1 特殊性能轮胎

### 1.1.1 智能轮胎

智能轮胎是指能够收集、传输有关自身技术性能状况及所处环境的所有信息，并对这些信息做出正确判断和处理的轮胎。

#### 1.1.1.1 智能轮胎的功能

智能轮胎中的“智能”指未来轮胎将不再是车辆上被动的橡胶复合体，而是车辆控制系统中影响车辆驾驶安全性和舒适性的重要组成部分，能为车内和外部用户的控制系统提供数据信息。

(1) **轮胎充气内压监测** 充气内压严重影响轮胎使用性能。法国米其林集团调查表明，商用车辆故障 20% 源于轮胎慢性漏气。英国交管部门调查表明，轮胎欠压引起的交通事故占有所有交通事故的 6%。美国交管部门也发现，超过三分之二的汽车存在不同程度的轮胎欠压现象。

轮胎气压不足将无法承载额定负荷，并导致轮胎早期损坏，还影响操作性能正常发挥。当额定充气内压为 700kPa 时，气压不足将导致滚动阻力增加 2%；对驱动轴轮胎而言，相当于油耗增加了 0.5%，磨损增加了 5%。如果轮胎长期在气压不足状态下行驶，将损害轮胎的结构完整性和胎体可翻性。因此，监测轮胎充气内压并使之维持良好状态，应是智能轮胎的首要功能。通过安装轮胎充气内压监测装置，即可达到上述目的。一旦发现轮胎充气内压不足，该装置立刻向驾驶员发出警报，提示驾驶员停车检查轮胎或由车载电脑自动作出应急处置。

(2) **追溯性记录** 追溯性记录即历程可追溯性记录，就是说，轮胎在制造→



出厂→使用（包括维修、翻新）→报废等全过程的每一个阶段均形成资料，而且该资料是可以随时提档查阅的。

历程可追溯性记录资料一般应包括以下内容：①轮胎的身份，亦即轮胎的产品资料，通常包括轮胎品牌、生产序列号、DOT 代码（美国交通部认证代码）或 ECE 代码（欧盟认证代码）、生产厂厂址、生产日期等；②轮胎的户籍，亦即装车资料，通常包括汽车主轴号码、轮辋号码等；③轮胎的使用资料，包括历次出车时轮胎的温度、充气内压、速度、受力、变形等数据，以及历次翻新、修补情况等；④轮胎报废资料，包括报废原因、报废日期等。

**(3) 自动补充轮胎内压** 既然轮胎充气内压如此重要，仅仅及早发现轮胎漏气、气压不足是不够的，还应及时让逐渐瘪下去的轮胎鼓起来。把车载气泵系统与轮胎有机地结合起来，无疑是智能轮胎的发展方向之一。

一旦轮胎漏气，车载计算机将根据轮胎内压监测装置提供的数据信息，自动启动车载气泵，向轮胎内充气，使轮胎保持合理的充气内压。在北美地区，已有多家公路运输公司开始在车上装备自动充气装置，利用预存的高压空气来补充轮胎内压，确保所有轮胎保持合理的充气压力。空气流经控制箱进入车轴套管，再进入轴端的旋转联管节，最后进入需要补充内压的轮胎内腔。控制箱有测量、校准轮胎气压的功能。不过，这种装置的结构非常复杂，价格十分昂贵，而且必定增大车轮总成的重量。

**(4) 轮胎温度监测** 轮胎温度历程监测同样重要，因为这与轮胎胎体的耐久性和轮胎使用寿命密切相关。轮胎使用性能的优劣是以吨·公里/小时来衡量的，并受到额定负荷和额定速度的制约。有人认为，智能轮胎应当能够记录轮胎的使用历程，至少应记录温度峰值或时间/温度历程。探测、传输轮胎此类数据由植入轮胎内的集成电路片完成，而配套的接收器/数据读出器则装在驾驶室内。

### 1. 1. 1. 2 智能轮胎的研究方法

智能轮胎的研究可以分为智能轮胎设计、智能轮胎传感器设计、智能通信、智能数据处理和决策等方面。

**(1) 智能轮胎设计** 智能轮胎设计目前的研究主要集中于轮胎表面物理和化学结构的仿真设计，如 UNI-T 技术。UNI-T 技术由三项核心技术组成，能使轮胎保持良好的工作状态并延长使用寿命。

① 计算机优化元件系统 COCS (computer optimized component system) COCS 能提供轮胎的优化设计方法，包括轮胎的外形、材料、结构和胎面等，获得前所未有的轮胎滚动效果。

② O 形胎圈技术 (O-bead) O 形胎圈技术保证生产的每个胎圈都更加近似于圆，从而使得轮胎能够更好地滚动。

③ 长链炭黑技术 (long link carbon) 炭黑是橡胶的主要补强材料，长链炭黑能提高胎面耐磨性能，以延长胎面寿命和节省燃料。

**(2) 智能传感器设计** 最早也是最常用的方法是基于 Hall 传感器的轮胎摩

擦因数测量方法。德国 Darmstadt 大学的研究组分析了目前的三种常用监测摩擦因数的传感器。试验结果表明,该方法可以通过局部解耦获得所需的滑动摩擦信息。这三种传感器与其他同类传感器都有两个缺点:存在附加 Hall 效应干扰和必须安装适于 Hall 元件的电源和电路。使用 InAs/GaSb 异质结构制造 Hall 元件来提高电子的迁移能力,可以提高表征 Hall 敏感性的电压,降低传感器的能耗,相应的电路系统可以使用更长时间。

另一种方法是基于被动辐射表面声波(SAW)传感器的测量方法。这种方法在轮胎表面嵌入表面波传感器,传感器是由几毫米厚的薄石英板制成。工作原理是用石英压电晶体将压力信号转化为相应的频率信号,以测量移动中的汽车轮胎压力、温度和抓着力。SAW 传感器能够完全被动式地工作,并且能够在恶劣的环境下工作,特别适合用于系列轮胎的监测系统。

常见的轮胎传感器也可测量轮胎胎内温度和载重量。将一种带有感应器的气阀安装在轮胎胎面和侧壁上,该气阀能监测轮胎压力,测量轮胎内的温度。每条轮胎的载重量也可通过压力传感器自动测出。载重量过大会增大对轮胎的压力,使胎内温度升高,从而破坏轮胎部件之间的黏合力。在监控轮胎压力和温度的同时,通过收集到的传感器信息,还可以附带对车辆悬挂系统进行故障监测以及对导航系统的数据进行校正。

**(3) 智能通信** 智能轮胎通信是将传感器采集到的数据经过初步处理后通过车内现场总线传送到相应的处理系统。

固特异公司进行了“RFID”的智能轮胎数据处理和通信研究。主要集中于轮胎编号、温度和压力的被动测量三方面。强调建立被动式(无需电池)集成传感器,来达到故障监测和延长轮胎使用寿命的目的。其中基本测量电路传出的数据通过耦合线圈传递到收发机上,然后由收发机进行广播通信,相应的数据可以传递给与用户服务器相连的特定接收器,并通过用户服务器进行进一步的传递和通信。

**(4) 智能数据处理和决策** 目前智能轮胎的智能水平仍有待进一步提高,该方向也是最有发展潜力的研究方向。对于传感器传回的频率数据,可以采用多种分析方法进行处理,尽量减少噪声的影响,然后对其进行故障模式等识别。在近十多年来,ABS 防抱死系统在汽车中的应用越来越广泛。如果轮胎在路面状况发生滑动而抱死,可以降低刹车压力来使其重新转动,也还可以根据相应的数据计算出路面的状况信息。然而目前的技术在发现抱死时已经太迟,难以进行有效的反应。因此研制智能轮胎往往与设计智能 ABS 系统联系起来,能在出现故障时根据该数据迅速采取相应的减压措施。当问题非常严重时,则应当通知司机尽快到最近的汽车维修点修理。

### 1.1.1.3 智能轮胎的种类

**(1) Unisteel 智能轮胎** 美国固特异轮胎公司推出的 Unisteel 智能轮胎,可在遇到轮胎气压偏离设定值、轮胎温度超过设定值、轮胎脱离车轴的情况下自动

报警。

Unisteel 智能轮胎的监测装置是一小块单片集成电路，它能自动测量轮胎的温度和气压等数据。信号发射装置是一个超微发送器，与单片集成电路组配在一起，将测得数据用特定代码发送出去，信号接收装置在接收到信号后译成数字显示在液晶显示器上。监测装置和信号发射装置在轮胎制造过程中埋入轮胎胎侧内。

(2) MEMS 智能轮胎 法国米其林轮胎公司推出的 MEMS 智能轮胎由 4 个大部分组成：①感应片，在轮胎成型工序被置入轮胎内侧，在轮胎的整个寿命期发挥作用；②接收器，接收感应片传导过来的信息，并将信息传送到连接装置；③连接装置，将接收器传送过来的信息输入便携式贮存装置；④便携式贮存装置，贮存被监测轮胎的所有数据并加以显示。

(3) CGT 智能轮胎 德国大陆-通用轮胎公司推出的 CGT 智能轮胎主要由磁化轮胎、胎侧扭矩传感器（简称 SWT）和车载电子控制系统三个部分组成，其中 SWT 是关键部件。SWT 的关键技术是在胎侧胶料中掺入金属粉末，使胶料在轮胎行驶过程中被磁化，交替形成正极和负极，从而能够把轮胎受力变形情况以某种可测信号反映出来，该信号被埋置于轮胎胎侧胶内的传感器捕获，并被传输到装在驾驶室内的电子监测仪，即时由车载电子计算机转换为数据，应用于汽车动态控制。SWT 传感器的精确信息有助于驾驶员缩短制动距离，在弯道和各种不良路面上更好地控制车辆。

(4) ITT 智能轮胎 芬兰诺基亚轮胎公司推出的 ITT 智能轮胎基本上由微型轻量化传感器和接收装置两部分构成。ITT 智能轮胎的工作原理是传感器装在轮胎内腔（固定在轮辋上），负责测量轮胎气压和温度，实时将数据传送到接收装置，并在轮胎充气压力或轮胎温度超过设定值时，向接收装置发出警报信号。接收装置可以是手机，也可是车载电脑，甚至可以装在汽车维修中心的独立显示屏上。

(5) SAW 技术智能轮胎 德国 Darmstadt 大学提出使用 SAW（surface acoustic wave，声表面波）传感器测量轮胎气压和温度等参数。使用声表面波传感器测量轮胎温度和气压，不需在轮胎内使用电源，实现了无源化，维护简单；减小了传感器质量，消除了轮胎的动态负载，并且能够适用于轮胎内恶劣的工作环境。

轮胎表面嵌入表面波传感器，可测量车辆行驶中的轮胎气压和温度，并将数据通过 RF 信号传送到中央处理单元，如有异况则及时报警。工作原理是中央处理单元通过天线发出 RF 脉冲信号，嵌在轮胎表面的传感器通过天线接收 RF 脉冲信号并转换为声表面波，声表面波在传感器里传播时收集有关数据后再次被转换为 RF 信号，并通过天线发射出去，中央收发单元接收信号并对其进行提取判断。信号的发送和接收由中央处理单元控制，发送和接收共用一个天线。

## 1.1.2 绿色轮胎

绿色轮胎采用新技术设计,具有弹性好、滚动阻力小、耗油低、生热低、耐磨、耐穿刺、承载能力大、乘坐舒适等优点。与传统轮胎比,凸显了环保、节能、新工艺、新材料等多方面的优势。

### 1.1.2.1 绿色轮胎的特点

(1) **环保性** 传统轮胎中一般都添加了有致癌作用的橡胶配合剂,这些配合剂随着胎面磨损散发在空气中,严重污染了环境。同时世界上每年有数亿条轮胎被废弃,占据了大量空间,难以分解,对环境造成了极大威胁,被人们称为黑色污染。随着人们环保意识的不断提高,在继续努力降低滚动阻力的同时,开始重视使用对环境无污染的原材料制造轮胎,并努力延长轮胎的行驶里程,以减小废旧轮胎的数量。大量的汽车使用绿色轮胎,在节油和减少污染方面发挥了巨大作用。绿色轮胎的广泛应用将每年为全球节省百万桶石油,并显著减少二氧化碳排放量。

当前世界上轮胎制造技术迅速发展,使轮胎制造更加精确和高效,生产工艺更加环保。采用先进生产技术,如采用低温连续混炼工艺、微波硫化工艺等,产生的能耗比传统工艺下降30%~50%。世界上已开发出无需镶钉和防滑链的冬季轮胎,可以明显减小轮胎对路面的破坏和降低噪声,也有利于环保。

(2) **节能性** 传统轮胎是以顺丁橡胶、丁苯橡胶和天然橡胶制成的,在汽车行驶温度升高的条件下,材料的结构和性能都发生改变,车轮滚动的阻力也在增加。绿色轮胎与普通轮胎相比,减轻了轮胎重量,减少了复合材料的能耗(滞后损失)。所以,绿色轮胎与同等规格的轮胎相比,滚动阻力可降低22%~35%,并因此减少汽车燃料消耗3%~8%,使汽车二氧化碳的排放量有所下降,其他性能如耐磨耗、低噪声、干湿路面抓着力等均保持良好水平。

(3) **安全性** 绿色轮胎通过优化胎体设计,以绝佳的弹性胎面改进汽车在光滑路面的抓地性能,使驾驶更平稳、制动距离更短,大大提高了驾驶安全性。研究证明,绿色轮胎产生的摩擦力可以减少汽车在湿滑或结冰路面上15%的刹车距离,使汽车的冬季驾驶性能提高10%~15%。这对减少事故率和人员伤亡有着重大的意义。

### 1.1.2.2 绿色轮胎的设计

设计绿色轮胎最切实可行的途径是减小轮胎的滚动阻力。轮胎的模具、花纹设计和轮胎结构和材料均对轮胎滚动阻力有影响。克服轮胎滚动阻力消耗的燃油占汽车总油耗的14.4%,而仅由胎面产生的滚动阻力就占轮胎滚动阻力的49%。降低胎面的滚动阻力并保证抗湿滑性能良好将是绿色轮胎最基本的要求。绿色轮胎的设计技术主要是选择合适的胶种和配合剂,改进胎面胶料配方,减薄胎体,优化轮胎轮廓。当然计算机辅助设计技术的应用和聚合物分子定向设计成果的推

出，将加速绿色轮胎开发进程。

(1) 绿色轮胎的结构设计 轮胎结构大体可分为两种，即子午线结构和斜交结构。子午线轮胎胎体帘线排列与斜交轮胎不同。子午线轮胎帘布层和带束层的胎冠角不同，帘布层间不是相互交叉排列，而是与外胎断面接近平行，像地球子午线形式排列，帘布层帘线角度小，一般为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，胎体帘线间无维系交点，当轮胎在行驶过程中冠部应力增大时，会造成周向伸张，胎体呈辐线状裂口，因此子午线轮胎带束层采用接近周向排列的大角度帘线层，与胎体帘线角度成 $90^{\circ}$ 相交，一般取 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，形成一条几乎不可能伸张的刚性环形带，把整个轮胎箍紧，限制胎体的周向变形，承受整个轮胎 $60\%\sim 70\%$ 的内应力。子午线轮胎结构合理，受力变形与帘线排列一致，无错位现象，内摩擦较小，比斜交轮胎性能优越。帘布层数少；用胶量少；耐磨性、牵引性及缓冲性好；耐刺穿性能好，行驶温度低，稳定及安全性能好，行驶里程及经济效益高。

由于子午线轮胎结构合理，使得在行驶中轮胎的路面抓力大、效果好，装有子午线轮胎的汽车与装有斜交轮胎的汽车相比，其耐磨性可提高 $50\%\sim 100\%$ ，滚动阻力降低 $20\%\sim 30\%$ ，可以节约油耗约 $6\%\sim 8\%$ 。同样车型选用子午线轮胎比选用斜交轮胎操纵性好，有较好的驾驶舒适性。综上所述，子午线胎体结构是绿色轮胎结构设计的首选方法。

当轮胎断面宽增大时，滚动阻力呈下降趋势。因为轮胎断面宽增加，使胎侧部刚性减小，对滚动阻力影响较小的侧部的变形增加，而对滚动阻力影响较大的胎面部的变形减小。另外，随着轮胎断面宽度的加宽，胎面、带束层等主要部位的能量损失减小。因此加大轮胎断面宽度对降低滚动阻力有利。如果胎圈部的填充胶条高度增高，则滚动阻力亦增加。因为随着填充胶条高度增高，产生滞后损失的物质体积增加，胎侧下部的能量损失亦增加。而且，填充胶条高度增加会因胎侧的刚性增加而使胎侧部变形减小，而对滚动阻力影响较大的胎面部的变形相对增大，这会导致滚动阻力增加。因此，胎体结构设计是向低断面方向发展。

胎面半径增大时，可降低轮胎的滚动阻力。这是因为胎面半径增大时轮胎产生平面接地屈挠变形，使因轮胎断面方向的屈挠变形所产生的应变能变小。也就是说，滚动阻力随着胎面半径的增大而减小，这主要得益于胎冠部和带束层能量损失减小。

今后绿色轮胎胎面结构应朝如下方向发展。

① 双层胎面。双层胎面轮胎具有高速、稳定、耐磨及生热低等优点，一般是由胎面和胎面基部两部分构成，其胎面与胎面基部胶具有不同的动态模量和损耗因子( $\tan\delta$ )。有关文献指出，胎面动态模量大于胎面基部动态模量( $\geq 8.5\text{MPa}$ )， $\tan\delta$ 大于0.12，胎面基部厚度与胎面厚度之比为0.25~0.70。

② 发泡胎面。发泡胎面是由发泡橡胶制成的，除胎面胶的一般组分外，还含有结晶型间同立构1,2-聚丁二烯(粉末状，平均粒径为60nm)，再配合发泡剂、抗氧剂等其他助剂。使用发泡胎面制备的轮胎在干、湿路面上特别是在冰面

上具有良好的制动和牵引性能，即使在炎热的夏季也完全能够保持驾驶稳定性、耐久性和低油耗，因此是绿色轮胎胎面胶的发展方向。

普利司通生态轮胎设计技术可大幅度降低滚动阻力，且可提高耐磨性。普利司通在研究开发轮胎省燃料费技术过程中，主要着眼于轮胎的偏心变形。通过开发新的轮胎形状，加大这种偏心变形，可大幅度降低对车辆燃料有很大影响的轮胎滚动阻力，而且可进一步提高耐磨性。通过采用可大幅度降低轮胎能量损失的轮胎新形状，可抑制因改变材料（为了降低滚动阻力）而引起的滚动阻力下降。

## (2) 绿色轮胎的材料选择

### ① 橡胶材料

a. 天然橡胶。天然橡胶（NR）是非极性橡胶，本身具有优良的电性能，但在非极性溶剂中易溶胀，其耐油、耐有机溶剂性差。NR 分子中含有不饱和双键，所以其耐热氧老化、耐臭氧化和抗紫外线性都较差，限制了它的应用。

NR 通过改性可大大扩展 NR 的应用范围。环氧化天然橡胶（ENR）是天然橡胶经化学改性制得的特种天然橡胶。与 NR 相比，ENR 具有完全不同的黏弹性和热力学性能，如具有优良的气密性、黏合性、耐湿滑性和良好的耐油性。ENR 与极性填充剂（如白炭黑）结合良好。在无填充剂时，ENR 硫化胶仍能保持 NR 所具有的高模量和拉伸强度。ENR50 具有良好的耐油性和阻尼性，在轮胎胎面胶中应用时，在没有偶联剂的情况下，ENR 与白炭黑强的相互作用是提高滚动阻力和湿抓着力综合性能的重要因素。ENR25 与白炭黑/炭黑填充剂混合可获得最佳的耐磨性。

接枝天然橡胶中目前研究得最多的是甲基丙烯酸甲酯（MMA）与 NR 接枝共聚，MMA 接枝 NR 伸长率大，硬度高，具有良好的抗冲击性能、耐屈挠龟裂、动态疲劳性能、黏合性和较好的可填充性。工业上主要用来制造具有良好抗冲击性能的弹性制品，如无内胎轮胎中的气密层等。如果与丁苯橡胶共混，可用作胎圈三角胶胶料，其生胶强度以及与钢丝圈的黏合力明显提高，并能增加钢丝圈的挺性，保持钢丝圈的形状稳定。

b. 溶聚丁苯橡胶。溶聚丁苯橡胶（SSBR）被广泛用于绿色轮胎胎面胶。在 SSBR 生产过程中，添加化学品能够改变聚合物链节终端，显著增强聚合物与炭黑之间的相互作用，改善炭黑的分散性，减小填料与填料之间的相互作用，减小 Payne 效应，从而降低轮胎滚动阻力。

法国米其林公司生产的环保绿色轮胎多采用 SSBR 作为胎面胶。第二代 SSBR 的滚动阻力比乳聚丁苯橡胶（ESBR）减小 20%~30%，抗湿滑性能提高 3%，耐磨性改善 10%，节省燃油 3.6%~6.2%。第三代 SSBR 通过分子设计和链结构的优化组合，最大限度地提高了橡胶的综合性能。

第三代 SSBR 主要有三种形式：其一是大分子链中引入异戊二烯链段制成的苯乙烯-异戊二烯-丁二烯共聚物，即集成橡胶（SIBR），它集良好的低温性能、低滚动阻力和高抓着力性能于一身，是迄今为止性能最为全面的二烯烃类合成橡

胶, 被称为极具市场潜力的新型胎面胶种。其二是含有渐变式序列结构分布的嵌段型 SSBR, 它较好地平衡了抗湿滑性和滚动阻力, 兼顾了物理性能与加工性能。其三是硅烷改性 SSBR, 它增强了橡胶与二氧化硅等白色补强剂之间的亲和性, 配合时可不用或少用钛酸酯等昂贵的偶联剂, 这种非污染型产品可满足日益严格的环保要求, 符合现代轮胎的发展方向。

c. 聚异戊二烯橡胶。聚异戊二烯橡胶的新品种 3,4-聚异戊二烯橡胶(玻璃化温度高)与天然橡胶、丁苯橡胶、聚丁二烯橡胶并用可改善抓着性能。采用异戊二烯与丁二烯的共聚物、异戊二烯与苯乙烯、丁二烯的三聚物制造的胎面胶具有良好的滚动阻力与湿路抓着力综合平衡性能。中国发明专利 ZL95110352.0 介绍了采用负载钛催化异戊二烯本体沉淀聚合方法直接合成出反式 1,4-聚异戊二烯(TPI)粉料的新技术。在胎面胶中以 20~25 质量份 TPI 取代等量丁苯橡胶制造的轿车和轻型载重半钢子午胎, 获得了综合行驶性能良好, 而且百公里油耗试验燃油消耗降低 2.5% 左右的效果。

d. 聚丁二烯橡胶。聚丁二烯橡胶的最大用量是用于子午线轮胎胎侧。胎侧是发生各种屈挠的部位, 该部位起到缓冲路面冲击的作用。目前, 大多数轮胎都是低断面轮胎, 这种轮胎要以非常窄的胎侧经受很大的变形, 而且需要有最佳的耐割口增长性能。配合有 6PPD(对苯二胺)的天然橡胶/顺丁橡胶(BR)并用胶(50:50)具有最佳的耐龟裂增长性, 而且具有令人满意的抗损伤性能和长的使用寿命。

聚丁二烯橡胶与溶聚丁苯橡胶并用可用于节油轮胎胎面胶。具有这种胎面胶的轮胎有最佳的抓着力与磨耗的综合平衡性能, 还有较低的滚动阻力, 能节省燃料 5%。这种技术是用白炭黑和硅烷补强的 BR/SSBR 并用胶。虽然可以采用不同的丁苯橡胶, 但对全白炭黑配方而言, 最理想的是含 25% 苯乙烯和 75% 乙烯基的充油丁苯橡胶, 例如商品名为 BUNA5025-1 HM 的丁苯橡胶。BR 用量提高到 40% 可保持耐磨性, 而溶聚丁苯橡胶和白炭黑则可降低滚动阻力, 提高轮胎的雪地和湿路面抓着力。通常, 只能以少量的 BR 与天然橡胶并用作为载重汽车新胎胎面胶, 因为新胎胎体会产生膨胀。但是, 一旦胎体不再产生膨胀, 用 BR 与炭黑丁苯母炼胶(BMB)并用作为预硫化翻新胎面胶可提高胎面的寿命。

e. 聚氨酯弹性体。聚氨酯弹性体与其他橡胶相比具有更优异的耐磨性能、较高的抗撕裂强度和伸长率, 而且硬度范围宽。此外它的吸振、减震效果好, 负重容量非常大, 并具有极理想的耐油和耐其他化学药品性能。浇注型聚氨酯弹性体是目前最耐磨的弹性体, 它具有高耐磨、可着色、高耐切割性、优良的耐油及耐化学品等优点, 而且对人体无毒害作用, 又能完全生物降解, 还不必添加炭黑和芳烃油, 是制造绿色轮胎胎面的理想材料。

米其林公司的 PAX 漏气保用轮胎配备了新的轻量聚氨酯辅助支撑环。这种辅助支撑环通过注射成型制得, 支撑环的质量比原来的橡胶支撑环轻 4kg 左右。这种安装有聚氨酯辅助内支撑环的漏气保用轮胎被米其林公司称为第二代漏气保

用轮胎。

橡胶轮胎的胎面必须添加炭黑和有致癌作用的芳烃油，它们随着胎面磨损而散发在空气中，严重污染环境。但是，采用聚氨酯作为轮胎翻新材料可解决上述问题。

聚氨酯翻新轮胎的关键技术之一是采用纳米技术提高聚氨酯弹性体的热稳定性，使其最高使用温度达到 $120^{\circ}\text{C}$ ；二是研制出成本低廉、使用方便、效果好的橡胶表面处理剂和黏合剂，使聚氨酯胎面与普通橡胶能牢固地黏合在一起。采用聚氨酯胎面翻新的轮胎实际行驶里程可比普通轮胎高 $1\sim 2$ 倍，同时能消除大量的炭黑和芳烃油对环境的污染，是提高翻新胎性能的新途径。

聚氨酯翻新胎的优越性有：a. 胎面材料不含有毒害作用的填充油；b. 不含炭黑，胎面磨损时能保持环境清洁；c. 能够完全生物降解，不会导致环境污染；d. 滚动阻力低，可节省汽车燃油消耗；e. 与普通天然橡胶轮胎相比，具有优良的耐溶剂油、耐燃油和耐化学品性能，是油库、码头等特殊车辆轮胎的理想选择。

② 骨架材料 骨架材料选择合理可以在保持轮胎轮廓稳定和满足支撑负荷的同时减轻轮胎质量、降低汽车噪声、提高轮胎使用寿命等。骨架材料除钢丝帘线外主要是各种纤维帘线。环保型轮胎用帘线的研究与应用重点向高强度和轻量化方向发展。目前主要集中在高强力人造丝、新型锦纶、玻璃纤维和芳纶等方面。

a. 高强力人造丝。荷兰 Acordis AKZO 公司开发了高强力人造丝——Bocell，可用于生产泄气保用轮胎。

b. 高强度聚酰胺纤维。杜邦公司研制出的 HYTEN 高强度聚酰胺纤维作为子午线轮胎胎体补强层，则可使轮胎具有良好的耐久性和低生热性，而且可降低轮胎质量。固特异公司使用大直径 HYTEN 帘线作为缓冲层和胎体帘布层试制了斜交航空轮胎。用这种帘线制造的航空轮胎可节约 $17\%$ 左右的纤维和 $45\%$ 左右的橡胶，而且可稳定轮胎结构，减少轮胎产生驻波、内部帘布层剪切变形和生热。高强度聚酰胺纤维被用作轻型载重轮胎的增强材料时可降低 $20\%$ 的原料消耗，原材料成本比人造丝降低 $35\%$ 。

c. 玻璃纤维。玻璃纤维强度高、耐热、尺寸稳定，可用于子午线轮胎缓冲层和斜交轮胎保护层，其综合物理机械性能最接近于金属帘线。如果用玻璃纤维作轮胎的胎面保护层，可使胎面的抗切割性能提高 $10$ 倍。

d. 钢丝。钢丝的最大特点是强度高，是轿车轮胎、子午线轻型载重轮胎、子午线载重轮胎和公共汽车轮胎带束层常用的主要材料。目前，轮胎用钢丝骨架材料的发展主要体现在新技术、新产品（新结构钢丝帘线）方面。钢丝帘线强力的提高可使轮胎在确保一定强度的情况下，节省钢丝帘线用量以使轮胎质量和滚动阻力减小，油耗降低。

近年来，高强度钢丝帘线在国外轮胎制造业被大量使用，其强度超出普通钢



丝帘线 20%~40%。美国固特异公司的超强钢丝帘线不仅强度高 (达 3.5GPa), 而且还具有较普通钢丝帘线耐疲劳性能好的特点。该公司获得专利的超强钢丝帘线已用于全钢结构一级方程式赛车高机动性能轮胎和泄气保用轮胎中。其中采用超强钢丝帘线的泄气保用轮胎尺寸稳定性好, 在零压力时能以 89km/h 的速度继续行驶 80km。提高钢丝帘线强度的下一步开发目标是帘线强度达 4.0GPa 的超高强度钢丝。另外, 美国固特异公司为泄气保用轮胎专门开发了超细超强钢丝, 这种钢丝在 25mm 内可排 7000 根。

e. 芳族聚酰胺纤维。芳族聚酰胺纤维具有很高的热稳定性, 不溶解, 不燃烧, 在 400~430℃ 下才发生氧化降解, 熔点高 (500℃), 模数高, 强力高, 而且在高温下的强度也高。

用芳纶作为轮胎骨架材料有如下优点: 减轻重量, 从而提高燃料效率, 达到最佳经济效益; 提高耐切割能力, 从而使轮胎更加抗外物损伤; 减少钢丝用量或者不用钢丝, 降低废胎回收加工难度, 有利于再资源化。德国邓禄普公司最近成功地开发出带束层和钢丝圈都不采用钢丝而使用芳族聚酰胺纤维 (凯夫拉) 的超轻量轮胎。名为 SP SPORT8000 ULW 的这种轮胎可减轻重量 30%, 每条可减轻 3kg (从 11.6kg 减至 8.6kg)。这种轮胎除重量轻外, 还具备节约燃料费, 提高乘坐舒适性、轮胎的接地性能和翻新性能的优点。

### ③ 补强填充体系

a. 炭黑。新品种炭黑在保持轮胎胎面胶低滚动阻力的前提下, 提高了轮胎的耐磨性, 使轮胎综合性能得到提高, 推动了绿色轮胎的发展。高性能炭黑特征是粒径小、结构适宜、聚集体分布尺寸较窄、表面活性高。低滞后损失炭黑共同的特征是结构高, 聚集体尺寸分布较宽, 表面活性高。

纳米结构炭黑用经改进的炉法工艺制造。与传统的 ASTM 炭黑相比, 纳米结构炭黑具有更高的表面活性。较高表面活性主要与高度无序交联的较小结晶粒子有关。这种结晶粒子具有大量的棱边, 使其成为具有特别高表面能的活性场, 活性场会使炭黑与聚合物产生很强的机械/物理化学作用。提高填充剂与聚合物的相互作用可降低动态变形下的滞后损失和生热。填充有 52 份 ASTM N356 炭黑和相应的 E-1670 纳米结构炭黑的载重汽车轮胎天然胎面胶可大幅度降低滞后损失和生热, 从而可降低滚动阻力。由于纳米结构炭黑的 DPB 值较低, 所以硫化胶的 300% 定伸应力稍低。

b. 白炭黑。白炭黑又称水合二氧化硅、活性二氧化硅和沉淀二氧化硅。分子式  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。它为高度分散状的无定形粉末或絮状粉末, 质轻, 具有很高的电绝缘性、多孔性和吸水性。其原始颗粒粒径小于  $3\mu\text{m}$ , 所以表面积大。通过使用特殊的聚合物和白炭黑/硅烷体系, 可以获得高的湿路面牵引性能和湿路面刹车性能, 并通过降低滚动阻力使燃料消耗降低 5%。在欧洲的原装胎市场 (OEM), 用于轿车轮胎胎面胶配方的白炭黑/硅烷填充体系已经达 80% 以上。现代冬季轮胎性能的大幅度提高主要也依赖于在胎面胶中采用白炭黑/硅烷。