

轮胎材料与结构的研究进展

刘 勇,杨卫民

(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:从材料和结构两方面综述了轮胎的发展历史,重点介绍了子午线轮胎的现状 & 最新研究进展,同时指出我国轮胎研究水平与国外的差距。轮胎骨架材料从帆布经棉帘线、人造丝、锦纶发展到钢丝和芳纶,生胶从 NR 发展到各种 SR,轮胎结构从斜交轮胎发展到子午线轮胎;子午线轮胎结构设计理论先后出现了最佳滚动轮廓理论、平衡轮廓理论、应力分散理论、燃料高效理论、预应力轮廓理论、动态模拟最佳轮廓理论、预应力和动平衡轮廓设计理论和轮胎整体结构优化设计理论等。高性能子午线轮胎成为轮胎的发展方向,我国必须加强这方面的研究。

关键词:轮胎;骨架材料;橡胶;结构设计理论;有限元分析

中图分类号: TQ336.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2002)03-0131-05

随着人类环保意识的逐步增强、高速公路的快速发展及计算机技术的突飞猛进,人们对轮胎的性能提出了更高的要求,出现了环保、智能等功能轮胎。为了紧跟这一科技发展趋势,在新一轮的竞争中站稳脚跟,我国政府已把“高等级子午线轮胎及配套专用材料和专用关键设备制造”列入《当前国家重点鼓励发展的产业、产品和技术目录》中。北京市也在“九五”重点攻关项目的基础上将“轿车子午线轮胎材料性质与复合结构对其动态性能影响的研究”列为科技新星项目。在此情况下,我们对轮胎材料 & 结构的发展历史及研究进展、现状进行了充分的调研,现对所得资料简要介绍如下。

1 轮胎的发展历史

1885 年,英国人汤姆生(Thomson R W)首次发明了空气轮胎;1888 年英国人登普(Dunlop J B)发明了充气轮胎,并取得了专利,开创了轮胎制造技术新纪元;此后威尔奇(Welch C K)发明了有钢丝圈结构的轮胎,同时开始采用内胎。登普和威尔奇两家公司于 1890 年开始联合生产带钢丝圈的充气轮胎,并由自行车轮胎发展到汽车

轮胎。这两家公司于 1893 年首次采用棉帘线制造轮胎,这大大提高了轮胎的使用寿命和行驶性能。中国则于 1931 年在上海开始生产汽车轮胎^[1]。

1.1 骨架材料

充气轮胎骨架材料最初是用帆布,成型比较困难,制造出的轮胎质量也很差,特别容易脱层。1892 年登普提出用无纬线的织物试制轮胎的设想,威尔奇根据无纬帘布的特点,用棉帘线试制轮胎成功,但棉帘线强力低、抗冲击性能差、制造的轮胎质量大、消耗燃料多。1938 年美国开始采用人造丝代替棉帘线制造轮胎,从而大大提高了轮胎质量。1942 年具有强力高、密度小、弹性好、吸湿率低及冲击强度高优点的锦纶帘线开始用于军用汽车轮胎的制造,它也是目前斜交轮胎最为理想的骨架材料。子午线轮胎出现以后钢丝帘线受到重视,从性能价格比看,目前还没有哪种帘线能与之竞争。芳纶是 20 世纪 70 年代研究成功的新型骨架材料,兼备了钢丝帘线和锦纶帘线的优异性能,是轮胎工业理想的骨架材料,但由于其价格昂贵,至今尚未大量应用^[1]。

1.2 结构

从轮胎结构方面看,最先出现的是斜交轮胎,其特点是胎体帘布层帘线按一定角度相互交叉排列。该种轮胎的优点是胎体坚固、负荷变形小、胎侧不易损伤、转向与制动性能良好等。但由于其

基金项目:北京市科技新星计划资助项目(954811600)

作者简介:刘勇(1973-),男,山东阳谷人,北京化工大学在读硕士研究生,主要从事轮胎材料、结构和性能仿真等方面的研究。

结构不合理,存在原材料消耗多、磨损大、抓着性差、滚动阻力大、行驶温升高及进一步改进的潜力小等缺点,不能满足汽车发展对轮胎日益提高的性能要求^[2]。斜交轮胎至今仍在大量使用,但从20世纪60年代中期开始,其在国际上所占的比例已逐步下降,虽然在某些国家仍为主流产品,但有被淘汰的趋势。

子午线轮胎是由法国米其林轮胎公司于1946年6月最先制造出来的^[3],与斜交轮胎相比,子午线轮胎的结构特点是胎体帘线与轮胎径向成0°角,相邻层的帘线不是相交而是相互平行,胎面与胎体之间有起箍紧作用的带束层。子午线轮胎相对斜交轮胎具有减振、耐磨、抓着性能好、行驶温度低及使用寿命长等优点。由于子午线轮胎显著的结构优势和突出的技术经济效果,从20世纪60年代中期开始得到迅速发展,成为当今轮胎工业的发展方向。

美国等少数国家于20世纪70年代重点发展带束斜交轮胎。其结构特点是胎体帘线排列与斜交轮胎相似,缓冲层与子午线轮胎的带束层相仿,胎体和缓冲层的帘线角度都介于斜交轮胎与子午线轮胎之间。由于带束斜交轮胎的结构不及子午线轮胎合理,性能不如子午线轮胎优异,美国于20世纪80年代初彻底放弃对其发展,开始全力发展子午线轮胎,以追赶西欧在轮胎子午化方面所做的研究。目前带束斜交轮胎已很少见到。

轮胎结构除了以上3种外,还有活胎面轮胎、拱形轮胎和椭圆形轮胎等^[4],不过数量较小,应用不广,影响不大。

2 子午线轮胎的研究现状

随着材料科学的飞速发展,适于制造轮胎的新材料不断涌现。轮胎胎体已由棉帘线、人造丝、锦纶发展到聚酯、钢丝以及芳纶帘线^[2,5~10],其中芳纶帘线由于其独特的高强度和高模量而日益受到重视^[11~15]。胎面用胶则从NR发展到SBR和BR等以及各种橡胶的并用,S-SBR以其低滚动阻力和高耐磨性能得到了轮胎行业的重视^[16],最近关于集成橡胶在轮胎胎面中应用的文章也比较多见^[17]。补强剂也从最初的炭黑发展到了白炭黑、PF系列补强树脂、活性硅粉和短纤维等,其

中白炭黑因其能降低轮胎滚动阻力且具有良好的环保性而在轮胎行业得到越来越多的应用^[18~24]。其它助剂,如硫化剂、分散剂、防焦剂、防老剂和促进剂等的发展更为迅速。

在结构方面,轮胎行业从20世纪80年代中期开始在子午线轮胎设计理论上投入了大量资金和力量进行研究,各大轮胎公司都相继提出了各自的轮胎设计理论和分析技术,例如普利司通公司的RCOT(最佳滚动轮廓理论)、固特异公司的NCT(平衡轮廓理论)、米其林公司的TRX(应力分散理论)及XFE(燃料高效理论)、住友公司的PSP(预应力轮廓理论)及东洋公司的DSOC(动态模拟最佳轮廓理论)等^[25]。这些理论的一个共同特点就是从轮胎的实际使用状况出发,精确而系统地对轮胎中各种部件、各种材料进行受力分析,尽量使轮胎中的应力分布合理化,达到最佳的材料-应力分配。不仅可以分析轮胎的静态性能,而且发展了轮胎的动态性能分析技术,可以对轮胎的疲劳寿命、滚动阻力、能耗、发热状况和温度分布、磨损及操纵性能等一系列主要动态性能进行分析、预测和优化。在研究轮胎设计理论和分析技术方面处于世界领先地位的米其林、普利司通和固特异这3家公司以雄霸世界轮胎销售额前3名的事实说明了轮胎设计理论与分析技术研究对轮胎生产企业的影响巨大。

虽然20世纪60年代初我国就开始研制子午线轮胎,但由于种种原因,发展速度缓慢,轮胎子午化率一直很低。总体而言,我国子午线轮胎生产技术处于第1代(有内胎)和部分第2代(无内胎)水平上,也有企业正在开发低断面第3代子午线轮胎。由于国内子午线轮胎的设计技术大多处于传统水平,是经过反复试验摸索得到的一种类比的设计结果,因而在开发新产品速度及档次方面都处于被动地位。近几年来虽然北京橡胶工业研究设计院、华南理工大学、哈尔滨工业大学、清华大学以及一些较大的轮胎生产企业(如上海轮胎公司)等在轮胎的设计技术等方面做了一些研究工作,但研究成果不仅与国际上的动态三维分析研究水平存在较大差距,而且由于缺乏产、学、研之间的沟通合作,加上研究成果本身不配套,因此在国内轮胎生产企业中尚未得以实际应用。目

前国内轮胎行业中,绝大多数企业所使用的产品设计方法仍是国外在20世纪70年代时采用的主要依赖设计人员的经验与感觉的平衡外轮廓设计法,因此在产品设计阶段无法对开发中的产品性能和质量进行较全面而准确的分析、预测和优化。这不但导致产品的开发周期过长,投资较大,而且难以保证产品的性能和质量,更难用来开发高性能的新型轮胎产品。因此,必须在吸收当今世界最先进的分析技术的基础上,从高点出发,尽快开发出我国自己的、先进的、成套的轮胎设计理论、轮胎性能分析技术和轮胎设计技术,并尽快应用到高性能子午线轮胎系列的开发与生产中去。

3 子午线轮胎的最新研究进展

3.1 材料

我国的张立群等^[26]通过研究认为,利用分子设计技术将不同结构性能的分子链组合在一起而得到一种具有优良综合性能的集成橡胶技术将逐渐受到人们的重视。集成橡胶等新型胎面用胶与特殊结构的炭黑、白炭黑、短纤维、玻璃微珠、胶粉等新型补强体系以及双层胎面、发泡胎面轮胎是绿色轮胎的研究发展方向^[17]。日本的Naohiko K等^[27]研究短纤维增强橡胶(SFRR)在轮胎中的应用发现,SFRR只能提高胶料在短纤维取向方向上的模量,故在轮胎部件中应用SFRR可增加轮胎在指定方向的刚性,并能通过改变胎侧厚度等来减小轮胎质量的同时保证轮胎适当的刚性;SFRR是在不增加轮胎能耗的基础上提高胶料模量的,这与使用炭黑补强不同。我国的王同英、张清水^[14]通过实验对芳纶帘线性能及其在轮胎中的应用进行研究发现,芳纶帘线具有动态模量高、弹性好、滞后损失小等特性;芳纶帘线子午线轮胎具有质量小、速度高、滚动阻力小等特点;芳纶缓冲层工程机械轮胎具有突出的耐刺扎性能,而且行驶里程高。德国的Blume A, Goerl U和Wrana C等^[18,22,28]分别对白炭黑及白炭黑/硅烷体系在胎面胶中替代传统炭黑的作用、机理及测试方式进行了研究,使轮胎的滚动阻力、湿抓着力、耐寒性和使用寿命等性能同时得到提高。

为开发新型胎面胶以满足高性能子午线轮胎的要求,人们进行了多方面的尝试和努力,并取得

了一些可喜的成果,相继开发出一些新型胎面用橡胶。

(1) 苯乙烯-异戊二烯-丁二烯橡胶(SIBR)

SIBR是美国固特异轮胎和橡胶公司于1990年开发的组成及微观结构可控的优良胎面材料^[29]。SIBR大分子链由特定的不同链段组成,具有多个玻璃化温度和宽范围的阻尼峰值,因此具有Nordsiek K H所提出的胎面胶理想模型的特征——低温性能好、常温抓着力优良、滚动阻力小、高温下热行为好,故SIBR有着“集成橡胶”之称。SIBR的开发成功是人们利用高分子设计和计算机模拟技术开发新型胎面材料的实例,有着良好的应用前景。

(2) 环氧化天然橡胶(ENR)

Baker C S L等^[30]曾系统地研究了3种不同环氧化程度的ENR(ENR50, ENR25和ENR10)的性能,发现NR经过环氧化后其耐油性能、气密性和湿抓着力可同时得到改善。当胶料填充白炭黑后其滚动阻力降低,特别是ENR25,其滚动阻力小于NR,湿抓着力优于充油丁苯橡胶(OESBR),是一种性能优良的胎面材料。另外,ENR的玻璃化温度随着环氧化程度的增大而呈线性提高,这对并用ENR来改善胎面胶的综合性能具有重要意义。近十几年来,有关ENR及其共混物的研究相当活跃。

(3) 3,4-IR

3,4-IR是为提高轮胎的湿抓着力而开发的。湿抓着力的大小主要取决于轮胎与路面的摩擦力,而摩擦力主要取决于滞后损失(与材料的玻璃化温度有关),因此轮胎的牵引性能受胎面胶玻璃化温度的影响。理论上提高轮胎的湿抓着力有两种办法,一是使聚合物具有多个相互重叠的玻璃化温度,以满足“集成橡胶”模型;二是并用玻璃化温度较高的聚合物,使共混物成为具有两相的不相容体系,其动态性能损耗峰正好落在轮胎湿抓着力所要求的温度区间内。在湿路面上胎面胶的湿抓着力与所用橡胶的玻璃化温度成正比,因此并用玻璃化温度较高的橡胶能改善胎面胶的湿抓着力,而IR的玻璃化温度(-10℃)相对较高,故与其并用可以明显提高胎面胶的湿抓着力^[31]。

3.2 结构

在轮胎结构领域,我国的何晓玫^[32]于 1997 年提出了 PDEP-S 理论,即预应力和动平衡轮廓设计理论——第 2 代(Prestressed and Dynamic Equilibrium Profile——Second)。其核心内容是在不改变模型内胎体轮廓线的形状来实现对带束层和胎圈施加压力的同时,控制带束层和胎体及胎圈部分的压力分担率,使轮胎在动态下达到最佳平衡轮廓。1999 年隆有明^[33]提出了比较先进的轮胎整体结构优化设计理论——TECO 理论,该理论首次提出了子午线轮胎箍紧因数的计算方法,得出无带束层子午线轮胎的几何特征式;首次将胎圈与钢丝圈结构结合起来研究,得出 L 型胎圈结构中不同结构钢丝圈具有不同爆破压的原因。杨卫民^[34]提出了一套子午线轮胎“动态仿真综合分析系统 CASDS”,利用该系统可通过理论与实践相结合的办法,建立起高度拟实的、物理与力学性质“全息”的轮胎模型。澳大利亚的 Weiss M^[35]用有限元方法研究了子午线轮胎不同材料和结构组合的 5 种带束层结构(见图 1),通过分析这 5 种结构的径向位移变化、应变能密度及刚度发现,图 1(d)结构的轮胎具有较好的高速性能和乘坐舒适性,但产生的滚动阻力却较图 1(a)稍高;通过计算发现,带束层宽度、带束层折叠边宽度、胎冠中心部的增强层、花纹深度、帘线角度等都对滚动阻力有很大影响,因此优化轮胎结构设计在减小轮胎质量的同时可以大幅度提高轮胎的高速耐久性和乘坐舒适性。日本普利司通公司的 Abe A 等^[36]根据 GUTT 理论将有限元法与优化技术结合起来,通过优化每种橡胶的杨氏模量来优化设计及降低轮胎的滚动阻力。美国福特公司

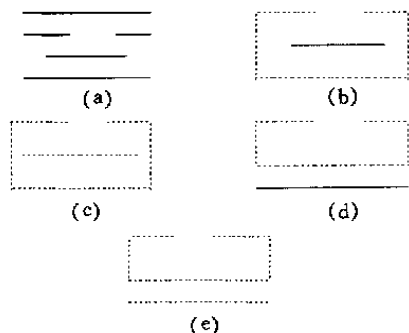


图 1 不同材料和结构组合的 5 种带束层
锦纶;—钢丝; 芳纶

的 Kao B G^[37]采用 9 600 个单元 70 080 个自由度的有限元轮胎模型对轮胎受到冲击的瞬态特性进行了分析。

带束层作为子午线轮胎的主要受力部件,其结构与材料对轮胎的性能影响极大,因此各国研究机构纷纷投入大量的人力和物力针对其某一方面的特性进行研究^[35,38~44]。

随着计算机技术的飞速发展,利用计算机进行轮胎设计和轮胎性能仿真成为 20 世纪 80 年代以来轮胎研究的重要课题。在这方面研究所取得的进展使人们在投入制造前能够更加有效地把握轮胎的力学和热学特性,从而可以较好地预测成品轮胎的各种使用性能,为轮胎设计开发提供理论依据。

从当今轮胎结构分析与设计技术的发展趋势来看,把在国际上发展非常迅速的三维有限元结构分析技术、非线性动力响应分析技术和计算机辅助设计技术引入到轮胎分析与设计中,对轮胎的三维静、动态性能进行仿真分析和轮胎设计是轮胎分析与设计技术发展趋势。最近几年,国内外在轮胎三维有限元分析方面更为深入,如考虑复杂的组分结构、大变形及大应变、非线性和各相异性材料、刚度差较大的增强复合材料、接触问题(包括轮胎与路面接触及轮胎与轮辋接触)以及动态负荷条件等,能更真实地模拟轮胎的工作性能,为轮胎结构优化设计提供了强大的理论工具^[45~49]。

此外,随着环保意识的增强,人们对轮胎噪声的产生机理、仿真方法和应用软件、花纹形状和排列方式等进行了大量研究^[50~52]。随着高科技的发展,特别是电子学的发展以及人们对轮胎性能要求的不断提高,国外的大轮胎公司已开始研制和生产在轮胎中内置计算机芯片的智能轮胎^[53]。

4 结语

随着科技发展,轮胎的材料和结构及研究理论也在迅速发展,我国的轮胎产量和质量与国际先进水平相差不太大,但国内生产力量分散,且质量是靠引进先进生产线及相关技术来保证的,而技术引进是有限的,任何一家国外公司都不会将其新产品的设计理论与技术的关键卖给我们。因

此,仅靠引进技术和设备,我国的轮胎产品将永远无法与国外的高性能新型轮胎产品抗衡。加入WTO,国外大轮胎公司纷纷抢滩中国市场以及中国经济逐步融入世界经济之中,我们必须在借鉴国外先进技术的基础上,走独立开发的道路,大力培养年轻人才,将轮胎从材料和结构两方面结合起来考虑,重点开发提高轮胎综合性能的新技术,使我国的轮胎行业迅速跻身世界强手之林。

参考文献:

- [1] 彭 迈,林惠音,俞 淇. 轮胎结构设计[M]. 广州:华南理工大学,1992. 1-3.
- [2] 霍玉云. 橡胶制品设计与制造[M]. 青岛:青岛化工学院,1989. 1 188.
- [3] 赵旭升,贾德民. 国内外子午线轮胎发展概况[J]. 化工进展,1998,17(3):6-8.
- [4] 潘 玮,李 戎,段菊兰. 各种轮胎帘子线纤维的发展[J]. 纺织导报,1999(5):91-93.
- [5] 张宗富. 浅谈帘线假定伸张值[J]. 轮胎工业,1997,17(2):69-72.
- [6] 高称意. 我国轮胎帘布行业的发展历程与现状[J]. 橡胶工业,1999,46(9):558-563.
- [7] 李 冰. 橡胶的织物增强[J]. 合成橡胶工业,1998,21(2):123-126.
- [8] 周 建,李 龙. 橡胶复合材料用帘子线性能特征[J]. 化工新型材料,1998(7):22-23.
- [9] Agresti S, Bizzarri A. Reinforcement for truck tire belts[J]. Tire Technology International, 1998, 101-102.
- [10] Shellenbarger R M, Henning G N, Keefe R L. Aramid reinforced tires[J]. Automotive Engineering, 1991, 99(8):23-24.
- [11] Jelsma B. Designing new technology with aramid fibre[J]. Tire Technology International, 1997, 59-60.
- [12] 郑元锁,宋月贤,王有道,等. 芳纶短纤维的劈裂对复合材料性能的影响[J]. 橡胶工业,1998,45(8):462-466.
- [13] Jelsma B. Exploeration of aramid fibre potentiality[J]. Tire Technology International, 1996, 146-148.
- [14] 王同英,张清水. 芳纶帘线性能及在轮胎中的应用研究[J]. 轮胎工业,1998,18(9):531-534.
- [15] Manley K, Barry M. Benefits of solution polymerized SBR[J]. Tire Technology International, 1998, 78-82.
- [16] 刘 力,张立群,冯予星. 绿色轮胎研究的发展[J]. 橡胶工业,1999,46(4):245-248.
- [17] 王福坤. 轮胎的最新技术动向[J]. 世界橡胶工业,2000,27(1):56-60.
- [18] Wrana C, Eisele U, Kelbch S. Measurement and molecular modeling of rolling resistance in tire treads[J]. Kautschuk Gummi und Kunststoffe, 2000, 53(3):126-128.
- [19] Freund B, Forster F. Low rolling resistance tread compounds[J]. Kautschuk Gummi und Kunststoffe, 1996, 49(11):9.
- [20] Okel T A, Waddell W H. Silica properties/ rubber performance correlation, Carbon black-filled rubber compounds[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67(2):217-236.
- [21] Goerl U, Andrea H, Arndt M, et al. Investigations into the silica/ silane reaction system[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1997, 70(4):608-623.
- [22] Goerl U. 25 years of organosilanes in tire applications[J]. Kautschuk Gummi und Kunststoffe, 1998, 51(5):416-424.
- [23] 梁守智,谢遂志,薛虎军,等. 充气轮胎理论基础[M]. 北京:北京橡胶工业研究设计院,1990. 493-564.
- [24] Yukio Nakajima. 最佳轮胎轮廓理论及其应用[J]. 姚岐轩译. 轮胎工业,1998,18(8):462-467.
- [25] 刘 勇,杨卫民. 轮胎结构设计理论研究进展[J]. 弹性体,2001,11(1):45-49.
- [26] 周彦豪,张立群,李 晨,等. 短纤维/ 橡胶复合材料及其制品研究开发的新进展[J]. 合成橡胶工业,1998,21(1):1-6.
- [27] Naohiko K. 短纤维增强橡胶在轮胎中的应用[J]. 王晓冬译. 轮胎工业,1997,17(6):357-359.
- [28] Blume A. Analytical properties of silica—a key for understanding silica reinforcement[J]. Kautschuk Gummi und Kunststoffe, 2000, 53(6):948-3 276.
- [29] Halasa A, Gross B, Hsu B, et al. SIBR for high performance tires[J]. European Rubber Journal, 1990, 172(6):35-38.
- [30] Baker C S L, Gelling I R, Newell R. Epoxidized nature rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1985, 58(1):67-85.
- [31] 游长江,贾德民,赵旭升,等. 高性能轮胎用橡胶复合材料应用理论研究进展[J]. 轮胎工业,2000,20(7):387-395.
- [32] 何晓玫,刘天臣,吴桂忠. 低断面轿车子午线轮胎 PDEP-S 设计理论[J]. 轮胎工业,1997,17(3):148-152.
- [33] 隆有明. 轮胎整体结构优化设计理论 TECO 及其推广应用[J]. 上海化工,1999,24(18):17-21.
- [34] 杨卫民. 子午线轮胎的三维非线性有限元分析和性能仿真的研究[D]. 北京:北京化工大学机电工程学院,1998.
- [35] Weiss M, Tsujimoto S, Yoshinaga H. Belt construction optimization for tire weight reduction using the finite element method[J]. Tire Science and Technology, 1993, 21(2):120-134.
- [36] Abe A, Kamegawa T, Nakajima Y. Optimum Young's modulus distribution in tire design[J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(3):204-219.
- [37] Kao B G, Nuthukrishnan M. Tire transient analysis with explicit finite element program[J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(4):230-244.

(上接第 135 页)

- [38] 潮 阳. 高强度钢丝帘线在全钢载重子午线轮胎带束层中的应用[J]. 轮胎工业, 1999, 19(11): 653-655.
- [39] 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎结构有限元分析应用于轮胎结构优选 带束层宽度的优选[J]. 轮胎工业, 2000, 20(6): 337-344.
- [40] 朱兴元, 谢志民, 闫相桥, 等. 子午线轮胎带束层弹性常数预报[J]. 轮胎工业, 1998, 18(1): 20-23.
- [41] 闫相桥, 王友善, 乌大琨, 等. 子午线轮胎带束层中应力的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(8): 463-467.
- [42] Kabe K, Morikawa T. A new tire construction which reduces ply steer[J]. Tire Science and Technology, 1991, 19(1): 37-65.
- [43] Ager T J, Davis P A, Stubbs S M, *et al.* Braking, steering and wear performance of radial-belted and bias-ply aircraft tires[J]. SAE 910169, 1992, 1-5.
- [44] Pidaparti R M V. Torsional analysis of a steel cord-rubber tire belt structure[J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(4): 339-348.
- [45] Gawa H, Furuya H. A study on the contour of the truck and bus radial tire[J]. Tire Science and Technology, 1990, 18(4): 236-261.
- [46] Tseng N T, Pelle R G, Warholc T C. Finite element simulation of destructive tire testing[J]. Tire Science and Technology, 1991, 19(1): 2-22.
- [47] Yavari B, Tworzydlo W W, Bass J M. A thermomechanical model to predict the temperature distribution of steady state rolling tires[J]. Tire Science and Technology, 1993, 21(3): 163-178.
- [48] Fujikawa T, Funazaki A, Yamazaki S. Tire tread temperatures in actual contact areas[J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(1): 19-41.
- [49] Brockman R A, Braisted W R. Critical speed estimation for aircraft tires[J]. Tire Science and Technology, 1994, 22(2): 121-144.
- [50] 杨 立, 金新航. 轮胎花纹噪声仿真系统[J]. 轮胎工业, 1998, 18(2): 82-85.
- [51] 杨光大, 陈理君. 轮胎花纹噪声仿真频谱评判法[J]. 轮胎工业, 1998, 18(3): 145-147.
- [52] 陈理君, 钟克洪, 张晓红, 等. 基于遗传算法的低噪声轮胎花纹节距排列优化方法[J]. 轮胎工业, 2000, 20(2): 76-80.
- [53] 叶可舒, 钟 莹. 国外轮胎新产品信息调研[J]. 轮胎工业, 1998, 18(6): 323-329.

收稿日期: 2001-10-15