

轮胎结构轮廓的优化依据

胡立平

(黑龙江省牡丹江市太平路西菜园街牡丹江书画院综合楼 157000)

摘要:简要论述充气轮胎的性能优化与轮胎及其局部结构和材料属性的基本关系。强调对于橡胶-帘线复合材料,不仅要重视其力学和热学的各向异性,还必须同时关注其拉压不同性和耐疲劳性的各向异性,掌握其破坏力学的相关属性;阐明轮胎静态结构力学分析对动态性能优化的重要性以及动态性能优化的基本原则;简要分析轮胎常规受力变形与结构性能之间的关系,并讨论了轮胎的行驶面、胎肩部位、胎侧部位和胎圈部位等局部结构的基本优化原则。

关键词:轮胎;结构设计;平衡轮廓;滚动轮廓;模拟分析

中图分类号:TQ336.1⁺1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)05-0262-08

现代轮胎结构设计理论凭借众多交叉学科技术的支撑使轮胎设计水平得到迅速提升,其复杂性和实施难度也相应提高。对实际工作状况的轮胎包括其组成部件的宏观轮廓和微观结构以及轮胎与车辆的匹配、与路面的接触性能等进行全面细致的定量分析构成了现代设计技术的基础,本文拟从宏观视角入手,讨论性能优化与轮胎及其部件的结构和材料属性的基本关系,力求初步廓清现代设计理论用于轮胎结构轮廓优化的基本依据和把握原则。

1 关注橡胶-帘线复合材料的疲劳损坏特性

橡胶与纤维或钢丝帘线的复合材料所呈现的力学和热学特性的各向异性被普遍重视,但对其疲劳损坏属性的各向异性及拉压不同性却往往关注不足甚至忽视,这也是周期性应力、应变优化理论(CSSOT)在问世之初颇受关注和赞赏的主要价值所在。事实上除了外力冲击、刺扎、割划或轮胎自身存在先天质量缺陷等少数情况,正常使用轮胎的早期损坏一般都是由于材料疲劳损坏所致,表现为橡胶与帘线界面剥离、橡胶基体撕裂或老化破坏。

橡胶-帘线复合材料的拉压不同性与各向异性如图1所示。

作者简介:胡立平(1960—),男,黑龙江林口县人,哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院轮胎研究所顾问,高级工程师,主要从事轮胎结构设计理论研究和CAD软件开发工作。

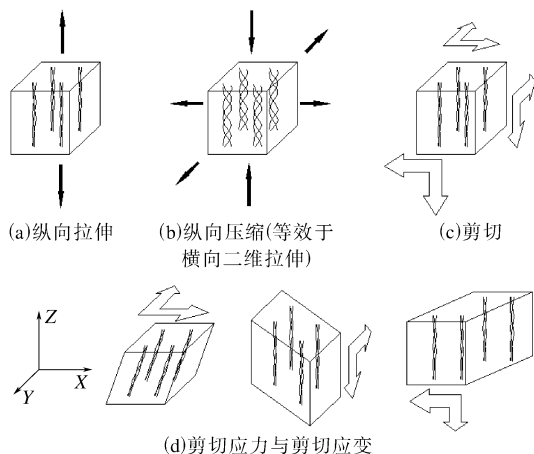


图1 橡胶-帘线复合材料的拉压不同性与各向异性

1.1 纵向拉压特性

橡胶-帘线复合材料在沿其帘线伸展方向拉伸时的抗张强度、伸张模量最高,同时由于应力主要由帘线承担因而橡胶-帘线界面和橡胶基体的应变都很小,因此也呈现最好的耐疲劳性能;而在压缩时,抗压模量和抗压强度表现都很低,同时也呈现极差的耐疲劳性能,因为帘线强度得不到充分发挥,并且产生帘线结构受迫松散、橡胶-帘线剥离及帘线缝隙间橡胶基体撕裂的倾向,如图1(a)和(b)所示。

1.2 横向拉压特性

橡胶-帘线复合材料的横向拉伸效应类似于纵向压缩,因此无论是一维还是二维的横向拉伸,其强度和耐疲劳性能都很差,如图1(b)所示。

橡胶-帘线复合材料的横向一维压缩也呈现

较差的强度和耐疲劳性能,因其等效于另外两个维度的二维拉伸,而其中的一个维度也是横向。

橡胶-帘线复合材料的横向二维压缩则呈现高强度、高模量和最佳的耐疲劳性能,因为横向二维压缩等效于纵向拉伸。

由以上简述可知橡胶-帘线复合材料疲劳特性的各向异性和拉压不同性及其与3个正应力(3个维度6个方向)之间的关系。

1.3 对剪切应力的敏感性

橡胶-帘线复合材料的剪切疲劳特性与6个剪切应力之间的关系也很容易理清,如图1(c)和(d)所示。6个剪切应力加上正反方向则有12个,其中8个都直接作用于橡胶基体并对橡胶-帘线界面构成剥离趋势,只有垂直切割帘线平面内的剪切应力能够得到帘线的直接抵抗,但考虑到大变形是这种材料工作中的常态,则也会随剪切变形的发展而放大其破坏力。

简言之,橡胶-帘线复合材料对剪切应力特别是除了垂直于帘线的平面以外的剪切应力极为敏感,在剪切应力、应变作用下的耐疲劳损坏性能较差。

可见对于橡胶-帘线复合材料,正应力有鲜明的利弊之分,而剪切应力大都是危险应力。

1.4 骨架材料不连续部位特性

在骨架材料不连续部位,3个正应力和6个剪切应力都极易产生破坏作用,是橡胶-帘线复合材料强度和耐疲劳性能的最薄弱部位。

但在三维等效压缩的情况下,该部位可以表现出高强度。此时该部位相当于处在各向同性的压力之中,实际上其高强度表现只是材料的体积稳定性即不可压缩性的体现,并非该部位的独有属性。橡胶-帘线复合材料的任何部位包括橡胶基体部分也同样具有这一属性。

1.5 对产品性能优化的引申意义

显而易见帘线的作用是强化力学性能,对橡胶-帘线复合材料承载各种应力的能力具有决定性影响。如果帘线未有效承担应力,即应力直接作用于橡胶-帘线界面或橡胶基体时,则橡胶-帘线复合材料不能发挥出期望的属性,必然表现出近似橡胶的性能。帘线所起的作用并不像“骨架”而更像“筋脉”,其屈挠刚度很低,对纵向抗压能力

的贡献更是以负面为主,实际利用的主要是其远远高于橡胶的抗张强度和伸张模量。因此在产品设计中,必须同时顾及材料的力学和破坏力学特性的各向异性包括拉压不同性,才能扬长避短合理发挥其性能优势。

轮胎是同时承担车辆全部负荷、操纵力和路面对车辆3个方向反作用力的部件,因此不能试图控制减小轮胎的总应力。规划轮胎及其材料的结构、形状和不同材料间的相互搭配,以合理的受力方式分担各种负荷,同时控制不利因素的影响到最低限度,才是结构设计优化的目的和手段。从对橡胶-帘线复合材料特性的考虑出发,在优化设计中应关注如下方面:

(1)合理承担纵向拉伸或横向二维压缩状态的应力、应变及应变能;

(2)尽量减少或避免纵向压缩或横向拉伸方式的应力、应变及应变能;

(3)尽量减少或避免剪切应力特别是垂直于帘线的平面以外的各种剪切应力、剪切应变及应变能;

(4)骨架材料不连续部位(例如帘线端点)尽量避免所有的应变和应变能。

由此可见,子午线轮胎比斜交轮胎具有更突出的结构合理性:子午方向橡胶-帘线复合材料的胎体在单纯充气压力负荷下恰好只承担纵向拉伸力和横向准二维压缩力,并且不存在层间剪切应力,带束层承担的周向张力也接近纵向拉伸力。如果仅根据前述结论推理,则带束层完全采取 0° 角结构更为完美。

前述说明中都特别强调了应变能,是因为“控制应变能密度最小化”的观点颇为流行,而滥用这一观点并不妥当。由前述讨论可知,以笼统的应变能密度最小作为评判轮胎结构部位耐疲劳性能的判据并不具有普适性,实际上仅适用于反包帘布和带束层端点等骨架材料不连续部位,其他情况下则必须依据应力类型的不同对其“应变能密度”区别对待,只有特定的应变对应的应变能才适合用作研判耐疲劳性能的判据。当然如果仅是以判定生热即滞后损失为目的,则适用于轮胎的所有部位,但也要与具体材料的粘弹性结合使用。在采用有限元方法对轮胎各部位进行模拟分析时

也必须注意这一点,以免对分析结果的判读和评定出现错误。

2 对轮胎结构轮廓的考量

2.1 3个最具参照意义的静态轮廓

2.1.1 设计结构轮廓

设计结构轮廓体现设计意图,也受设计者主观随意性的影响,是无任何负荷(即不受外力亦无内应力)情况下轮胎的初始结构轮廓,对使用中的轮胎结构轮廓与性能表现有决定性影响。

2.1.2 充气平衡轮廓

充气平衡轮廓是标准充气压力下轮胎形状稳定时的结构轮廓,即轮胎只承担充气压力负荷时的稳定轮廓。充气压力负荷导致预应力即初始内应力的产生,其大小及分布取决于设计结构轮廓、轮辋与充气压力。

显而易见充气平衡轮廓状态对使用中轮胎的结构轮廓和性能表现影响巨大。每个设计轮廓(包括材料布置设计)都对应有唯一的平衡轮廓,但原则上每个平衡轮廓都可以有无数的设计轮廓与之对应,当然预应力(包括拉压、屈挠及剪切)分布则各不相同。

斜交轮胎的平衡轮廓主要取决于胎体骨架,子午线轮胎的平衡轮廓取决于胎体、带束层和胎圈增强材料的共同作用。平衡轮廓的径向曲率是连续变化的,其形状既不是圆也不是椭圆,因此必须注意:无论是用圆代替普通断面轮胎的平衡轮廓,还是用椭圆代替宽断面轮胎的平衡轮廓,其误差都是很大的。

2.1.3 垂直静负荷平衡轮廓

垂直静负荷平衡轮廓是轮胎在标准充气压力、标准负荷、垂直静态加载和平面承载下达到下沉量稳定时的结构轮廓,是工作中轮胎的一种静止状态,相当于施加了静态垂直负荷的充气平衡轮廓。显然其状态取决于轮胎的设计结构、充气压力和垂直负荷。

2.2 轮胎的滚动轮廓结构

行驶中的轮胎结构轮廓有无穷多的变化,但遵循有限的规则,变形范围有限。上述3种静态基本轮廓就为轮胎动态轮廓结构变化规律的探索提供了最好的出发点。

2.2.1 滚动轮廓的特点

滚动轮胎接地区域的冠部被压平,在平直路面上以不太高的速度平稳行驶时其瞬时结构轮廓与垂直静负荷平衡轮廓很相似,即在大部分行驶情况下轮胎的接地轮廓都接近于垂直静负荷状态。而轮胎旋转的离心力、侧偏角及侧倾角、路面坡度及不平度导致的不平衡力及冲击力、变形滞后导致达不到平衡状态以及驱动、制动、转弯等操控因素,则使滚动轮胎的接地轮廓结构变得极为复杂,变化万端。

行驶中轮胎远离接地区域的部分与垂直静负荷下远离接地区域的部位相似,大约占整周轮胎的3/4,接近充气平衡轮廓的状态。这也是以平衡轮廓为核心的轮胎结构设计理论曾经能够大幅度提升轮胎性能的主要原因。当然该区域受垂直负荷的影响还是与充气平衡轮廓略有差异,但影响很小,只有很轻微的偏离,而轮胎高速旋转的离心力与变形滞后则会明显加大其偏离程度,当速度极高时还可以引发驻波。

行驶中与接地区域邻近的部位,其结构轮廓状况则显然介于接地区域和远离接地区域之间的过渡状态,即大部分时候处于静负荷接地轮廓和充气平衡轮廓之间。

2.2.2 对设计结构轮廓优化的指导意义

由前述讨论可知,优化轮胎动态性能的起点应是使轮胎的静负荷接地轮廓与充气平衡轮廓都拥有良好的力学性能表现,因为尽管滚动轮胎的结构轮廓千变万化,而上述2个轮廓则是其中出现频度最高、靠近变形极端的两个基本常态;进一步优化才是更细致地针对加速度、转弯、高速行驶等常规基本操控功能导致的各种轮胎结构轮廓,以及根据应力场、应变场和温度场的模拟分析结果,均衡追求轮胎整体结构轮廓及其所有局部微观结构都具有良好力学与热学性能的综合表现。

要使充气平衡轮廓与负荷接地轮廓具有一致的优越性能并且二者相互转化过程中的能量壁垒尽量小,在保证优越性能的前提下使二者的结构轮廓一致或充分接近无疑是最有效的规划。但二者的整体结构轮廓因为轮胎的周期性大变形不可能很接近,因此区别对待轮胎轮廓结构的不同区域就成为唯一具有实际操作意义的优化手段。

(1)将胎冠、胎肩和胎圈部位划归为应力承载区,胎侧部位则列为应变消化区。

(2)对于应力承载区,在保证结构性能合理的前提下,设计轮廓优化的努力方向是进一步使其充气平衡轮廓和负荷接地轮廓的结构尽可能接近,以减少其结构性能发挥受周期性变形的影响,并尽可能降低变形幅度;而对应部位的设计轮廓则应尽量居于二者之间,以进一步降低应力交变幅度。

(3)对于应变消化区,则在满足结构性能需要的前提下,较大幅度地容许其设计结构轮廓、充气平衡轮廓和负荷接地轮廓之间的差异。即令胎侧区域尽可能多地分担轮胎的整体变形。

上述是针对滚动轮胎的充气平衡轮廓与负荷接地轮廓交变效应的基本优化手段,也是适用于其他复杂轮廓性能优化的基本原则。

2.3 常规受力变形与结构轮廓的关系

2.3.1 负荷下的屈挠变形

轮胎在垂直负荷下滚动时,胎体帘布内外层帘线及橡胶将承受附加的(充气压力负荷以外的)经向和周向的伸张、压缩与剪切循环变形,其幅度与负荷、充气压力、速度及轮胎结构密切相关。

经向附加应力、应变:胎冠外层压缩、内层伸张,胎肩及胎侧则外层伸张、内层压缩。减小行驶面拱度、胎冠和胎体厚度可以降低其幅度。

周向附加应力、应变:胎冠中部外层压缩、内层伸张,接地边缘部位则外层伸张、内层压缩。减小胎冠厚度、减少胎体层数可降低其幅度。

附加的剪切应力、应变在邻近接地印痕长轴端部增大、接地中心部位减小。增大帘线角度使趋近经向可降低其幅度,子午线结构可消除胎体层间剪切力。

被压平的冠部产生接地印痕,有利的印痕是面积大、近似矩形而非椭圆。前者可通过增大印痕横轴长度即增大轮胎断面宽度实现,后者可通过适当降低行驶面拱度实现,而借助于子午线轮胎带束层的作用可以使行驶面拱度大幅降低。

2.3.2 驱动/制动时的胎体受力变形

胎圈与胎冠之间强大的扭转力矩使胎体产生巨大的附加应力、应变。驱动/制动时不同轮胎胎体骨架材料的效应对比如图2所示。

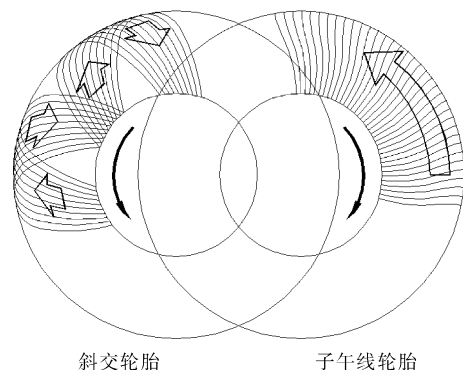


图2 驱动/制动时不同轮胎胎体骨架材料的效应对比

斜交轮胎从胎圈到胎冠之间的胎体帘线呈大角度交叉状态,其作用部分类似于力车轮毂上的辐条,具有如下效应:①胎圈与胎冠相对旋转模量大,转矩角度小,驱动力及制动力的传递滞后小,纵向稳定性好;②有利于驱动或制动时发挥帘线的伸张强力,但无论驱动或制动时帘线的附加应力、应变都是一半伸张而角度方向与之相对的另一半压缩,整体强度利用率低,耐疲劳性能下降;③同位处相邻各层伸张与压缩交错,导致剪切力大幅增大,是降低胎体耐疲劳性的重要因素;④同一层或同一根表现为一端伸张一端压缩,使包括胎冠中心处也产生层间剪切应力,是导致胎冠脱层的重要因素。

子午线轮胎胎体帘线排列呈辐射状态,具有如下特点^[1]:①应力、应变分布相对均匀,材料强度发挥得一致性好;②层间剪切力小,胎体帘线没有附加的纵向压缩效应,有利于耐疲劳性能提高;③胎冠与胎圈相对旋转模量小,旋转角度大,导致驱动力/制动力的传递滞后效应大,纵向稳定性差,有效改善手段是降低断面高度;④周向剪切变形较大并在同层内相邻帘线间产生剪切应力,最大剪切应力集中在胎圈部位,是导致胎圈部位发生早期疲劳损坏的主要原因之一,有效改善手段是以适当的三角胶和胎圈加强层提高胎圈部位的周向刚度。

2.3.3 侧向力作用下的胎体、胎面变形

轮胎侧向力作用下的接地印痕及其轨迹如图3所示。

斜交轮胎结构使胎体在侧向力作用下的变形范围和整体变形幅度都比较小,表现为侧向稳定性好;但变形主要集中于接地区域及其周围,应力

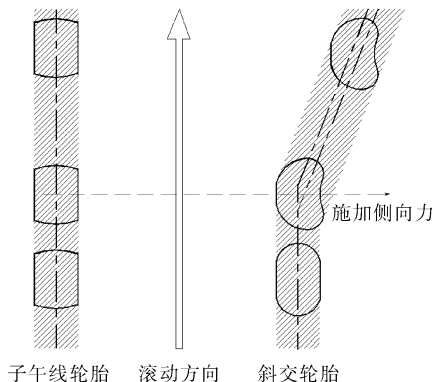


图3 轮胎侧向力作用下的接地印痕及其轨迹

相对集中,产生明显的附加伸张和压缩,层间剪切力增大,导致滚动状态耐疲劳性能下降;同时接地印痕形状扭曲,胎面磨损加剧且易产生不规则磨损,滚动中易产生横向漂移,导致转弯灵敏性低,操纵稳定性差。

子午线轮胎胎体在侧向力作用下的变形范围大,应力、应变分布较均匀,因而滚动状态耐疲劳性能好;但由于其整体变形幅度大,表现为侧向稳定性差,有效改善手段是降低断面高度;而接地印痕形状在带束层的作用下基本维持不变,不仅使磨损性能保持稳定,也提高了行驶方向的稳定性,表现为转弯灵敏性高、操纵稳定性好。

2.3.4 速度效应

轮胎的滚动阻力约90%源于滞后损失,相应能耗导致的轮胎材料升温、耐疲劳性能下降直接限制了其速度上限,减少滞后损失和改善散热性能成为能够同时提高轮胎高速性能和节能性能的主要手段。从结构设计角度降低滞后损失需要控制结构材料的各种应力和变形总量尽可能小,前者需要优化结构轮廓使应力及其分布更为合理,例如子午线轮胎比斜交轮胎的结构更有优势等;对于后者,由于大变形是轮胎的优异特性之一而不可避免,因此实际具有可操作性的手段就是区别对待轮胎的不同结构部位,使其材料厚重部位在滚动中的变形尽可能小,材料最薄的胎侧区域则尽量多地承担轮胎的大变形,从而使总应变能减少,间接降低滞后损失的总量。优化手段完全与第2.2.2节中讨论的优化原则一致。

对速度上限的另一个限制是轮胎的驻波临界速度,与轮胎的质量分布密度呈负相关,因此对于

高速轮胎的结构优化还必须同时考虑胎体的轻量化。无内胎化显然能够在减小质量、降低滞后损失和提高散热性能三方面同时获益。

2.4 基本优化方向

综上所述有关轮胎结构设计优化方面的基本常识,清晰可见已提倡20多年的充气轮胎子午化、扁平化和无内胎化的理论依据。其中扁平化包含低断面化和宽断面化两方面,加上前述提及的行驶面平坦化、胎体薄壁化(包括胎冠减薄、胎体层数减少等)、质量轻量化,则可称之为七化一体。

3 局部结构与性能优化

3.1 行驶面的优化

3.1.1 要点

行驶面的主要性能包括耐磨、耐疲劳性能、抓着力、滚动阻力和防护性等。显而易见,行驶面的轮廓、厚度、张力状态、胎面胶材料与花纹形式、带束层材料与结构等都对其具有重要影响。而胎面胶的滞后损失占轮胎整体滞后损失近一半,即占滚动阻力近45%,显然其结构优化对于打造绿色轮胎品质也具有关键意义。

3.1.2 平坦化

由前述讨论可知,行驶面最基本的结构优化首先是平坦化,即充气平衡轮廓状态的行驶面平坦化,这是使行驶面的充气平衡轮廓与负荷接地轮廓充分接近的唯一途径。行驶面平坦化可以同时改善耐磨、耐疲劳性能,并提高抓着力、降低滚动阻力。例如最佳滚动轮廓理论(RCOT)的着眼点即在于此。实际上RCOT理论解决的所谓胎面皱曲现象就是由于传统设计的平衡轮廓行驶面拱度以及胎肩轮廓结构与负荷接地轮廓结构相差过大,加之轿车轮胎一般采用纵向花纹并且充气压力较低所致。

3.1.3 兼顾磨损性能

边际效应导致行驶面的边缘往往比中间部位更易磨损,要保证磨损均匀性就很难做到完全平坦化,只能在维持均匀磨损与追求平坦化之间寻找平衡点,通过结构优化设计使其平衡点尽量趋近于平坦化。而影响这一平衡点的最主要因素则是带束层结构、胎体轮廓和充气压力。同时需关

注,行驶面是直接磨蚀橡胶基体的耗损部件,其磨耗性能受胎面胶的内应力影响很大,使充气平衡轮廓的胎面胶处于无伸张或略有周向压缩状态可提高其耐磨性能。对于子午线轮胎,借助带束层的作用可使胎面胶基本不伸张,而对于斜交轮胎,则要结合平衡轮廓与设计轮廓的整体构思进行设计,控制其外径膨胀率不大于1。

3.1.4 胎冠减薄

减薄包括胎面胶、带束层和胎体帘布层在内的胎冠总厚度,是优化行驶面包括胎冠整体结构轮廓的另一个基本方面,可以改善耐疲劳性能、降低滚动阻力、提高高速性能。但显然胎面胶的减薄受到磨损寿命的制约,由此可见研发高性能胎面胶新材料的重要性,这也是聚氨酯成为轮胎专家青睐的热点的原因之一。

3.1.5 兼顾胎肩部位

行驶面边缘接近胎肩部位,因此优化设计还必须兼顾胎肩部位的结构性能。为减少行驶面屈挠变形向胎肩部位的传递,应使行驶面的充气平衡轮廓曲线各段具有不同或渐变的曲率,并在行驶面边缘部位即紧邻胎肩区域拥有足够大的曲率半径或为直线,使该部位行驶面的经向屈挠变形得以最大限度地减小,从而降低对胎肩部位的影响。这种优化方法对载重子午线轮胎胎肩部位的耐疲劳性能具有更为明显的改善效果,因此设计中通常不再像传统方法那样只用单纯一条圆弧,或虽采用三段弧拟合但行驶面边缘部位弧段却采用比中间弧段更小的曲率半径,而是对多段曲线拟合而成的行驶面轮廓边缘部位的曲线采用更大的曲率半径,甚至直接采用直线。

胎面胶材料与花纹、带束层材料及结构对行驶面乃至轮胎整体性能都有直接或间接的重要而复杂的影响,这里不再赘述。

3.2 胎肩部位优化

3.2.1 要点

胎肩部位厚度大、骨架材料不连续点多,是刚性胎冠与柔性胎侧的过渡区、接地面的边缘部位,承受循环屈挠、剪切等变形,生热多散热难,易发生热疲劳老化导致早期胎肩脱层、开裂,帘线端部位易受各种类型应变的破坏产生初始裂纹。因此减薄胎肩厚度、增加散热花纹沟以减少生热、提

高散热性及减少胎肩部位在滚动中的变形并将无法避免的变形尽量转移分散到相邻的胎侧已成为胎肩部位结构优化的重要常识。显然这些优化手段都在前述讨论的原则范畴之内,而减薄厚度、减少变形以及转移分散变形的方法技巧则都依赖于对滚动状态精确的定量分析。

3.2.2 基本原则

对于中低速轮胎,胎肩部位优化的基本原则仍然是使其充气平衡轮廓与负荷接地轮廓趋于一致,以最大限度地降低滚动中的周期性应力、应变幅度。而从相邻结构关系的角度,胎肩部位是更易发生早期损坏的相对薄弱区域,应让承受变形能力相对强的相邻部件协助保护胎肩,将部分变形转移分散到胎侧即是如此;必要时也可将应变转移分散一部分给胎冠,例如在第3.1.5节中曾提及的使行驶面边缘的平衡轮廓曲线为直线,则胎肩相应部位的经向屈挠变形就被转移分散到胎冠中部,因为与胎冠相接部位的胎肩变形很难转移分散到相隔较远的胎侧部位,而对于胎冠而言,则仅相当于把该部分屈挠变形从承受应变能力相对较弱的胎冠边缘部位转移到相对较强的胎冠中部。

对于高速轮胎,离心力的作用使胎肩部位的轮廓结构发生明显改变,优化的基本原则应该是根据其额定最高速度、最常使用速度和负荷能力等情况,使其旋转平衡轮廓与滚动接地轮廓尽量接近。可见最佳结构轮廓并无普适性,而是与具体的使用速度和负荷等条件相对应。

3.2.3 相关讨论

例如为提高载重子午线轮胎的经济性和耐久性开发的预应力轮廓理论(PSP)及其升级版PSP-F理论都是通过追求充气平衡轮廓行驶面的平坦化以及胎肩部位和胎圈部位在滚动变形过程中的稳定性而实现性能优化的典型实例,而在PSP-F理论中则是进一步使暂时平衡轮廓与永久平衡轮廓统一起来。

对于胎肩内部的带束层端点部位耐疲劳性能的结构性研判,应变能最小化优化轮廓设计理论(STEM)显然是行之有效的,可以在有限元模拟分析和数值优化过程中以总应变能密度最小化作为判据。

3.3 胎侧部位优化

3.3.1 要点

胎侧部位的主要功能之一是尽可能多地承担轮胎的大变形并减少胎圈和胎肩部位的应变,因此不严格追求其充气平衡轮廓或旋转平衡轮廓向负荷滚动轮廓靠近,容忍其在滚动中产生较大的交变屈挠变形。另一方面,胎侧部位还承担把车辆的全部负荷以及各种操纵力由胎圈传递到行驶面的任务;再结合橡胶-帘线复合材料的属性,胎侧部位的结构优化结果必将具备薄、柔、韧的特点:薄以降低屈挠变形时的附加伸张与压缩从而提高耐疲劳性能、减少滞后损失即降低滚动阻力;柔以降低屈挠应力并进一步减少滞后损失;韧则使之具备承担负荷的能力。

3.3.2 相关讨论

尽管对胎侧部位轮廓形状的限制相对宽松,但仍然需要其结构轮廓有利于扬长避短地发挥材料属性,维持设计轮廓的平滑流畅避免出现折线是最基本的要求之一。大统一轮胎技术(GUTT)当初所举的205/60R15最佳轮廓求解实例就颇具借鉴意义,虽然在当时的背景下GUTT理论及其所举的实例都具有显著的进步意义,其有限元分析技术与数值优化方法也已达到很高的水平,但该例在胎侧部位优化处理方面无疑存在明显的瑕疵。GUTT理论用于低断面轮胎(205/60R15)示意图见图4。

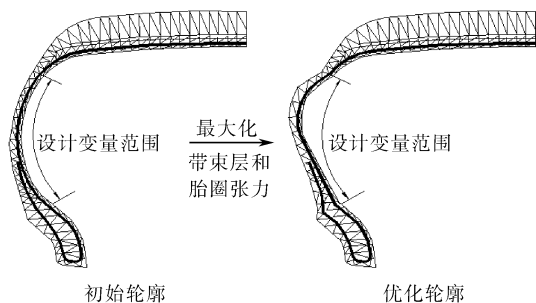


图4 GUTT理论用于低断面轮胎(205/60R15)示意

该例在有关胎侧结构设计方面给出了两点关键信息,其一是为了保护胎肩和胎圈部位的结构稳定性可以部分牺牲胎侧部位的形状稳定性,使胎侧发挥胎圈与胎肩的结构稳定器作用,这一点与前述讨论的优化原则完全相符;其二,胎侧与胎肩和胎圈的不平滑连接特别是胎侧与胎圈结合部

位胎体帘布出现的明显折线暴露出该优化过程存在严重缺陷。子午线轮胎胎侧是骨架帘线全部呈径向排列的橡胶-帘线复合材料,只宜承担径向的伸张和横向的二维压缩,而折线处不仅应力集中而且无疑在帘线张力作用下还将产生横向拉伸效应。因此实际设计中在钢丝圈以上的任何位置都要避免胎体帘布出现折线,这一原则也同样适用于斜交轮胎。

GUTT理论在该例中的失误至少暴露出了约束条件或优化判据设定的失当,说明在以有限元技术和数值优化方法为手段、以结构轮廓为设计变量、以耐久性或其他轮胎性能为目标函数的优化过程中,约束条件的设定和优化判据的选取都是至关重要的。

例如对子午线轮胎的胎侧包括其邻近胎圈部位的耐久性能进行研判,就不适合采用STEM理论等应变能最小化原则作为约束条件或判据,因为胎侧所承担的负荷主要转化为径向张力与拉伸应变,其对应的应变能显然属于良性负荷。实际上侧向屈挠特别是相邻帘线之间的剪切应力与剪切应变才是对其耐久性最具威胁的破坏性因素,而其相邻帘线之间最频繁的剪切应力主要来源于侧向交变屈挠,最大剪切应力又主要来源于驱动和制动时胎圈与胎冠的相对旋转即周向剪切应变,其复杂性由此可见一斑。因此必须在兼顾材料属性、结构功能和实际工作状态三方面的基础上透彻解析其疲劳破坏机制,才能正确设定约束条件和判据。

3.4 胎圈部位优化

3.4.1 要点

胎圈部位厚度大、部件多、配置复杂、受力巨大、刚度高低过渡悬殊,是制造缺陷、初始裂纹、早期损坏、疲劳破坏、结构设计瑕疵的高发区。其基本功能是固定轮胎于轮辋,以传递车辆的负荷与操纵力,其中包括固定胎体帘布,使其有效发挥骨架材料承担负荷的作用;另一方面的作用是保护帘线端点等薄弱部位避免产生初始裂纹以提高耐久性。最常见的错误功能定位是依靠胎圈部位的整体强度改变平衡轮廓从而改变应力分布状态,例如提高设计水平轴的位置以期降低胎圈部位所受的应力;其次是将提高子午线轮胎的侧向

稳定性作为胎圈部位的主要功能,而相应的正确方法应该是低断面化。

3.4.2 基本原则

同理可知,胎圈部位优化的基本原则同样应该是维持其自身结构形状稳定,而非追求对轮胎整体轮廓形状的影响,对此可以简单概括为“维稳不维形”。将胎圈部位的设计结构定位于负荷接地轮廓与充气平衡轮廓之间,并使负荷接地轮廓与充气平衡轮廓尽量接近,是贯彻“维稳不维形”的基本举措,可有效降低胎圈部位在负荷滚动过程中的交变应力和应变;辅之以适当的三角胶和胎圈加强层以提高其侧向和周向刚度,可以进一步降低其滚动中的应变幅度。除了这些最基本的优化手段,还需特别关注胎圈与轮辋之间采取过盈配合模式也非常有助于提高胎圈部位的耐久性,因为钢丝圈与轮辋对胎体帘布的夹持作用可以大幅度降低反包帘布的残余张力从而使反包高度得以显著降低,这一点对于全反包结构的子午线轮胎,特别是全钢载重子午线轮胎尤为重要,能够更好地保护帘线端点以减少胎圈部位早期损坏的发生。由此可见,无内胎化还可以间接起到改善胎圈部位结构性能的重要作用。

3.4.3 相关讨论

最佳张力控制理论(TCOT)是比较著名的重点针对载重子午线轮胎胎圈部位的轮廓优化设计理论,对改善胎圈部位特别是有内胎全钢载重子午线轮胎胎圈部位的耐久性有较明显的效果,但其阐述却存在一定问题。实际上 TCOT 理论推崇的较为挺直的即曲率半径更大的胎圈部位能够在一定程度上起到前述的“维稳”效果,因而有助于改善胎圈部位的耐久性,并非其所解释的提高了胎圈部位经向张力所致。TCOT 与 RCOT 理论都是建立在薄膜理论基础上的轮胎轮廓优化设计理论,显然在此处误用了拉普拉斯方程:

$$\frac{q_m}{\rho_m} + \frac{q_t}{\rho_t} = P$$

式中, q_m 和 q_t 分别为薄膜上任意一点 2 个相互正交的主方向的膜张力,对应为子午线轮胎周向和经向的张力, ρ_t 和 ρ_m 分别为两个主方向的曲率半径, P 为该点膜张力产生的附加压力。

由于子午线轮胎胎体没有周向排布的骨架材料,周向张应力对平衡充气压力的贡献近似为零,拉普拉斯方程简化为

$$q_m / \rho_m = P$$

即

$$q_m = \rho_m P$$

由此得出恒定充气压力下帘线张力与曲率半径成正比。但此结论显然不适用于胎圈部位,因为主要依靠厚实材料特别是硬质三角胶维持的胎圈部位坚挺的形状包括其曲率半径,已经不再是单纯的帘线张力与充气压力平衡的结果,因此该结论在胎圈处不成立,即增大胎圈部位的曲率半径并不能直接提高该部位胎体帘线的张力。对于这一点其实不难理解,正如绳索的张力与其绕过滑轮的半径无关。由此亦可见,面对众多驳杂的轮胎结构轮廓优化设计理论,若采用其中的某种模型用于模拟分析或数值优化,必须预先对其合理性进行科学审慎的评判。

胎圈部位是子午线轮胎结构性能优化的瓶颈区域之一,上述讨论仅限于概观,从实用角度无疑还需要更深入细致的专题讨论。

4 结语

本文通过尽可能简洁明了的梳理归纳,概略探讨了性能优化与轮胎结构轮廓和材料属性的基本关系。目的是尽可能以较为宽广的视角解读轮胎结构优化的方向与方法方面的宏观问题。

参考文献:

- [1] 胡立平. 子午线轮胎的受约束平衡轮廓与计算机辅助设计 [J]. 轮胎工业, 1994, 14(9): 3-12.

收稿日期: 2012-12-04

一种斜裁包边装置

中图分类号: TQ330.4 文献标志码: D

由潍坊市华东橡胶有限公司申请的专利(公开号 CN 202573019U, 公开日期 2012-12-05)“一种斜裁包边装置”, 涉及的斜裁包边装置包括

底盘和两个定位辊, 底盘下设有调节装置, 两个定位辊与底盘之间分别设有角度调整装置, 底盘出料端设有蝶形包边盘。该斜裁包边装置避免了包边时易产生的气泡和褶皱现象。

(本刊编辑部 马 晓)