

应用理论

高速低断面轿车子午线轮胎冠带层力学性能研究*

邴文光 胡幼学

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 应用有限元分析方法,以 205/60HR15 高速低断面子午线轮胎为计算实例,研究冠带层的力学性能及其对轮胎整体结构的影响。分析了在相同的充气压力下,冠带条、冠带层及无冠带结构轮胎的受力情况和各部件及轮胎整体的变形。结果表明,高速低断面轿车子午线轮胎的冠带层在充气状态下能分担一部分带束层帘线应力,同时也在一定程度上制约了轮胎外直径的增大。

关键词 有限元法,子午线轮胎,冠带层,力学性能

轿车轮胎的发展主要有三大趋势:子午化、扁平化和无内胎化。子午化和无内胎化在欧洲一些工业发达国家基本上已经 100% 完成,扁平化近 10 年来发展很快。据资料统计,世界客运量中 76% 是由轿车承担的,提高高速行驶时轿车轮胎的安全性和操纵稳定性、降低油耗等因素迫使轿车子午线轮胎加快了扁平化的进程。

钢丝带束层作为子午线轮胎的主要结构部件之一,承受了子午线轮胎的绝大部分充气应力和外载应力,控制着轮胎充气状态下的轮廓形状以及使用条件下的轮胎变形。但是由于充气压力和高速旋转时离心力作用下轮胎产生的应力导致钢丝带束层直径增大,也就是交叉的带束层之间发生一定量的剪切变形——菱形网格效应,此效应致使钢丝带束层径向增大、宽度变窄,给钢丝-橡胶界面施加了较高的应力。尤为严重的是在带束层的边部,带束层裁断端因无黄铜镀层而与橡胶粘合较薄弱,而从受力分析方面来看,如图 1 和 2 所示,当轮胎仅承受充气负荷时,其钢丝带束层的张力呈凸弧形,而当轮胎承受载荷时,带束层张力的分布发生转移,除在冠部出现凹弧形外,在胎肩部位还出现了驼峰。这

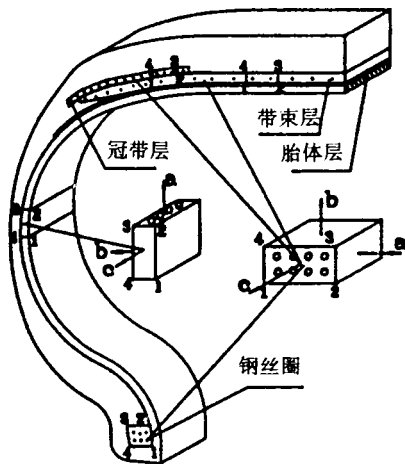


图 1 冠带层结构示意图

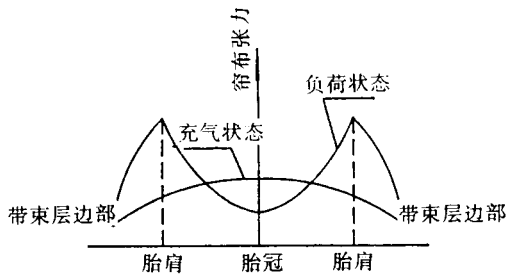


图 2 冠带层张力分布

* 本文节选自邴文光硕士研究生论文“高速低断面轿车子午线轮胎冠带层力学性能研究”。

是因为接地面的支撑力将冠部带束层的张力大部分抵消了,垂直加载后冠部受压缩,必然导致带束层边部亦即胎肩部位伸张,因此充气压力及外载转化过来的应力便很自然地转移到胎肩部位。这就是为什么高速轿车子午线轮胎胎肩部位出现崩花、裂口乃至爆破的主要原因^[1]。

为平抑带束层张力在胎肩部位出现的峰值,减小钢丝-橡胶界面的应力,尤其是带束层边部的界面应力,必须严格地限制带束层的径向膨胀。在胎面与钢丝带束层帘布之间加设增强层,由此便产生了高速低断面轿车子午线轮胎的冠带层结构^[2]。冠带层通常是指置于钢丝带束层之上、胎冠胶之下的 0°带束层,如图 1 所示。一般情况下轿车轮胎冠带层的材质为尼龙帘线。

在胎肩部位对称地加两个冠带条,或者整个地加一个冠带层能大幅度地降低出现在胎肩处的钢丝带束层的应力峰值。因为冠带的作用,在很大程度上分担了胎肩处带束层的应力,同时也改善了轮胎其它部位的应力应变状况,提高了高速下钢丝带束层的稳定性,使得高速低断面轿车子午线轮胎结构更趋合理与完善,并且在延长轮胎使用寿命的同时,可使轮胎的行驶速度大大提高。

本课题研究的目的,在于结合轮胎设计的具体实例——205/60HR15,定性(充气压力负荷下定量)地描述冠带层(或冠带条)是怎样以及在何种程度上改善轮胎应力分布的。也就是旨在通过应用非线性有限元法的分析计算,对高速低断面轿车子午线轮胎冠带层(条)的力学性能进行分析和探讨,以期对加冠带层后轿车子午线轮胎的力学性能作出更合理的解释。可以说本课题所研究和探讨的问题,对指导子午线轮胎的结构设计有着十分重要的意义。

1 数学模型的建立及有限元法理论基础

1.1 轴对称力学模型的建立

本文只研究充气状态下轮胎的力学性能,载荷是轴对称的,故可只取任意正切断面进行研究,又由于轮胎的正切断面仍具有对称性,故可只取其一半进行分析。

由于轮胎是一个双曲面旋转壳体,用圆柱坐标系(r, θ, z)推导应力-应变关系更为方便,如图 3 所示,对称轴为 z 轴, r 为断面上一点到 z 轴的垂线,即径向; θ 方向为轮胎的旋转方向,即周向。所有应力-应变都与 θ 无关,只是 r 和 z 的函数。任一点的位移只有两个方向的分量:沿 r 方向的径向位移 u 和沿 z 方向的位移 v 等于 0,故轴对称问题属二维问题。

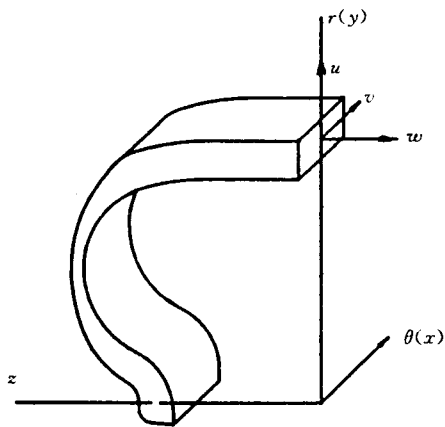


图 3 柱坐标系与位移分量

1.2 边界条件

图 4 为充气轮胎受力的简化模型。在胎冠处只能沿 $r(y)$ 方向自由移动,为简支约束,即 $u \neq 0$; z 方向因为受到对称性条件的限制而无位移,即 $w = 0$;胎圈部位与刚性的轮辋相接触,没有相对滑动,为铰支约束,即 $u = 0, w = 0$ 。

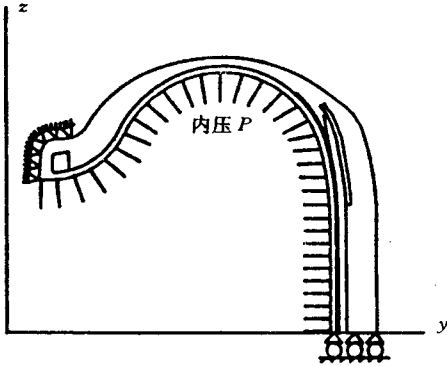


图4 轮胎受力简化模型

1.3 网格划分

在进行有限元网格划分时(参见图5),采用轮胎结构设计中实际的材料分布图作为各部位几何参数的基础,并在此基础上作些简化处理。

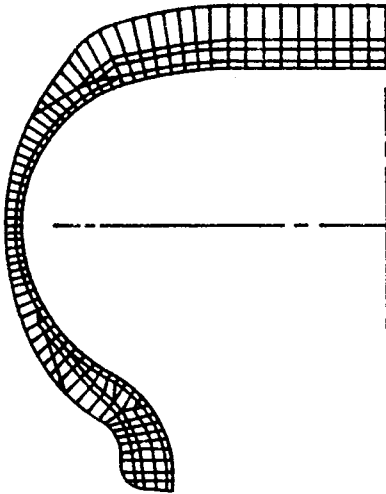


图5 轮胎FEM网格划分

1.4 轮胎非线性有限元理论基础

有限元法是将连续问题离散化的一种方法,它利用最小位能原理,把问题化为一个变分问题(即求泛函极值的问题),再经过离散化得到计算格式而求解。有限元法实际上是古典变分法[能量法或里兹(Ritz)法]的一种变体。由于对具有复杂形状的区域,光滑的坐标函数(必须满足某些边界条件)实际上无法

选取,所以里兹法等此时已很难使用。而有限元法由于通过离散化处理,用构造分块光滑的(有时是近似的)坐标函数克服了这个困难。有限元法由于节点配置的方式比较任意,对于具有复杂形状的物体可使边界节点完全落在区域的边界上,而在边界上给出最好的逼近。

有限元法分析中的非线性通常包含两个方面,其一是位移与应变关系的非线性,其二是应力与应变关系(材料特性)的非线性,也就是材料特性不是常数,而是一个函数表达式。轮胎在充气负荷下即使产生较大的变形,仍属于“小应变”问题,故其应力-应变关系仍可用常数表示。轮胎的非线性主要表现在第一方面,这主要是由几何大变形引起的。

2 橡胶、帘线及其复合材料的力学性能

轮胎中使用的材料概括起来有3种:其一是纯胶料(不含帘线,如胎面胶、胎侧胶、胎圈胶、三角胶等部位)材料;其二是纯骨架(几乎不含橡胶,如钢丝圈部位)材料;其三是橡胶-帘线复合材料(如带束层和胎体帘布层)。橡胶、帘线及橡胶-帘线复合材料力学性能的测量和计算的准确性,对应用非线性有限元程序 NFAP 求解轮胎的应力、应变及变形问题的成败有直接影响。

测量是计算的基础。相对而言,橡胶及帘线的物理参数较易通过实验测得,而橡胶-帘线复合材料(柔性复合材料)的力学性能参数往往需要借助于一些包含着种种理想假设的经典理论,在对组分材料进行实验测试的基础上由公式计算得出^[3-5]。

3 程序计算结果的处理及分析

3.1 程序输出数据处理

NFAP 有限元程序计算输出的结果是以总体坐标表示的单元节点的位移 u, w 和 Cauchy 应力,而工程上常常需要知道诸如胎体帘布层的应力分布如何、带束层的法向位

移是多大,以及每根帘线(包括胎体层、带束层和冠带层帘线)受多大拉力等问题。故此,从轮胎及其部件的力学结构特点出发,根据单元受力平衡原理,推导出一系列计算公式。

(1)带束层(冠带层同, $\theta=0$)帘线力的计算

$$T_i = \frac{\sigma_{x3} A_i}{\cos^2 \theta V_i} \tag{1}$$

式中 σ_{x3} 是带束层周向应力。

(2)胎体帘线力的计算

$$T_i = \sigma \left[1 - (1 - V_i) \frac{E_r}{E_s} \right] \frac{A_i}{V_i} \tag{2}$$

式中主应力 $\sigma = \sigma_{x1} \cos \alpha + \sigma_{x2} \sin \alpha$

(3)位移

计算给出的位移 u 和 w 是以总体坐标表示的相对于原始形状的变形量。充气后轮胎断面各节点的新坐标为:

$$y' = y + u$$

$$z' = z + w$$

3.2 受力分析

这里只分析带束层、胎体及冠带层的受力状况,图 6 给出了上述部位的帘线力、主应力及剪切力曲线。

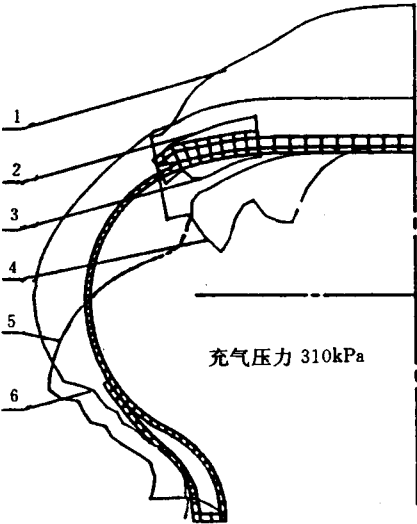


图 6 轮胎受力分析图

1—带束层帘线力;2—冠带层帘线力;3—冠带层剪应力;4—带束层剪应力;
5—胎体剪应力;6—胎体帘线力

3.2.1 带束层受力分析

(1)帘线力。无论是在充气状态还是在使用状态,加载给轮胎的应力主要是由带束层承担的,因此带束层帘线力要比胎体帘线力大得多。带束层帘线力在胎冠中心处最大,先是缓缓下降,当接近中部宽度的 1/2 时,转为直线减小,在边部帘线力最低。方案比较表明,加冠带后带束层的帘线力(及主应力)有所降低。

(2)剪切力。带束层的剪切应力是沿层间分布的,是带束层脱层、错位的主要原因。由于轴对称,剪切应力值在胎冠中心为 0,而在边部较大,另一方面,带束层边部为裁断端,钢丝与橡胶的粘合比较薄弱,因此,相对来说,轮胎肩部较易发生破坏。

3.2.2 胎体受力分析

胎体帘布层是使轮胎具有强度、韧性和弹性的主要因素。它承受轮胎行驶中作用于外胎上的法向、侧向及切向应力所引起的周期性变形,有时还要承受强烈的振动和冲击。因此,轮胎的使用寿命取决于帘布层的耐疲劳强度和抵抗几种负荷的能力。

(1)胎体帘线力。对充气轮胎而言,胎体帘线所受的力在胎侧附近最大,而在胎肩到上胎侧之间较小。可以设想在工作状态下,轮胎受垂直负荷后胎体应力还要向胎肩集中(见图 2)。

另外,计算中还发现,由于受充气压力的直接作用,内层胎体的帘线力比同部位外层的要大,但是在接近高模量部件(胎圈、带束层)的位置时,外层胎体帘线力却高于内层胎体的帘线力。这可能是因为在这些部位外层胎体的应变受到了更多的限制。

(2)剪切力。轮胎胎体的剪切应力分布在帘布层之间所有的界面上。一般认为胎体的剪切应力是作为充气压力的函数而发展起来的帘线张力的直接结果。其规律是在胎冠、胎侧和胎圈附近剪切应力最小(近似为 0),而在上、下胎侧出现峰值。

3.2.3 冠带层受力分析

冠带层受力也与带束层有大致相同的趋势,只是在量值上远小于后者。这主要是因为冠带层的模量比带束层的低得多,而轮胎的应力基本上是按单元模量来分配的。计算方案中,方案1是冠带条结构,方案2无冠带,方案3是整冠带层的。

结果表明,方案3比方案1更能发挥冠带的箍紧作用,更有效地限制了外直径的增大。然而,这只是在充气状态下的研究结果,事实上,实际使用中的轮胎承受高速旋转的离心力及垂直负荷,不同于静态问题,整冠带层必然会增加更多的质量(并且是在回转半径最大的位置),增大离心力;另一方面,垂直加载后轮胎应力将如图2那样重新分布,这种情况下,方案1结构会显示出其优越性而更有意义。

4 结论与讨论

4.1 研究得出的结论

(1)研究表明,子午线轮胎的冠带层能分担一部分带束层帘线应力,限制轮胎外直径的增大。尽管在充气状态下其作用不十分明显,但可以预见,轮胎在高速运转并有垂直载荷情况下,冠带层将起更重要的作用。

方案对比表明,充气条件下整冠带层在效果上优于冠带条,因此超高速(V和Z级)轮胎应选用整冠带层结构;冠带条结构能节省原材料,并能减轻轮胎重量,而且也能分担带束层力,尤其是对胎肩部位带束层起到保护作用。

(2)宽断面轮胎的带束层帘线力主要集中在胎冠中部1/2区域内,因此胎肩部位胎体帘线力和剪应力都较大;而且带束层的剪应力在胎肩部位达到最大。上述因素是轮胎发生肩裂、肩空和肩部崩花、掉块的主要原因。这也说明冠带层宽度一定要宽到延伸过肩部,带束层最好也延伸过肩部,才能更有效地防止工作状态下轮胎发生的破坏。

(3)应力分析表明,轮胎的径向应力主要是由胎体承担的;周向应力主要是由带束层及胎圈承担的;侧向应力主要是由胎体承担的。

(4)应力分析进一步说明了胶料集中部位对轮胎承受应力方面的贡献很小,但帘布层中的基体橡胶却是使帘布层具有抗剪切能力的主要因素。

4.2 值得探讨的问题

(1)工作中的轮胎有垂直载荷,且有接地面和线速度,因此,严格地讲,行驶中的轮胎不具有任何对称性。尤其是高速胎,周期性的屈挠使胶料和帘布层产生很高的热量,高温又造成各部件的热应力,比如冠带层中尼龙帘线具有热收缩性,故其热应力的效应是箍紧带束层的。总之,对于上述问题,仅仅依靠二维有限元计算是无能为力的。开发和利用三维轮胎有限元对前述问题作叠加处理将会获得轮胎应力、应变(变形)更精确的解。

(2)为使轮胎非线性有限元法分析得到普及和深入,必须较好地解决现存的一些障碍性问题,它们直接关系到计算结果和结论的可靠性。例如,轮胎材料特性的输入问题有待进一步研究解决。各种方案计算与成品实测结果对比发现,理论计算的轮胎外直径比实测值要大,而断面宽比实测值较小。这说明依靠对单纯材料进行实验,再按复合材料理论公式计算出来的轮胎复合材料的模量和泊松比不够精确。这是因为现有的复合材料理论是建立在刚性材料基础上的,而轮胎中使用的帘线-橡胶复合材料是柔性的,二者存在很大的差异。

(3)轮胎充气硬化问题需进一步研究探讨^[6]。随着充气压力的提高,轮胎迅速硬化,而当逐渐降低充气压力时,硬化现象随之消失。轮胎的充气硬化基本上是可逆的,这一点与橡胶的老化硬化有本质区别。

轮胎充气硬化后模量变化很大。当充气

(下转第732页)

(上接第 718 页)

达到一定压力时,材料近于刚性,此时,即使压力进一步提高,轮胎的变形(尤其是径向变形)也不会明显增加,甚至不变;但是这时应力却随充气压力提高而急剧增加。

探讨充气硬化问题的目的在于求出硬化过程中材料模量及泊松比与充气压力的函数关系。

参考文献

- 1 张士齐. 轮胎力学与热学. 北京:化学工业出版社, 1988:112—116
- 2 施庆秋. 子午线轮胎的 0° 带束层结构. 轮胎工业, 1991;11(5):3—8
- 3 Ridha R A. Computation of stresses, strains and deformations of tires. Rubber Chemistry and Technology, 1980;53(4):849—900
- 4 Ridha R A *et al.* Contact loading of a rubber disk. Tyre Science and Technology, 1985;13(1):3—15
- 5 Kenny T M & Stechschulte R A. Application of finite element analysis in tire design. Tyre Science and Technology, 1988;16(2):96—117
- 6 许叔亮. 充气轮胎有限元分析初探. 化工部北京橡胶工业研究设计院, 硕士研究生论文, 1983

收稿日期 1995-07-10