

轮胎离合器中轮胎结构的非线性有限元分析

徐福帅, 王 基, 郑建华

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:采用 MARC 软件建立轮胎离合器中轮胎的轴对称非线性有限元模型, 对轮胎变形、应力分布及影响传扭性能的因素进行分析。从应力分布及轮胎抱紧摩擦瓦块时的接触宽度和接触压力等方面考察了几何外形、帘线角度和密度及帘线层数等结构要素对轮胎性能的影响。结果表明, 轮胎的结构参数设计应使帘布层逐渐张紧, 束缚、变形处于适中的过渡状态, 避免束缚过弱或过强。

关键词:轮胎离合器; 轮胎结构; 非线性; 有限元分析

中图分类号: TQ336.5; O241.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2012)12-0733-07

轮胎离合器中的轮胎元件是一种“类轮胎”产品, 而非普通概念中的“汽车轮胎”, 是一种橡胶内夹 10 层帘布结构, 此轮胎的力学模型涉及复杂的材料非线性、接触非线性、几何非线性, 采用传统意义上的数值方法很难模拟其复杂的结构及工况, 近年来随着大型非线性有限元软件的不断完善, 有限元数值仿真已逐渐成为轮胎设计和分析的有效手段。目前国内外基于有限元法的轮胎设计理论已有很多(如 DSOC 和 GUTT 等理论)^[1]。

本工作借助 MSC. MARC 中强大的非线性处理功能对轮胎结构进行有限元分析, 考察结构要素对轮胎性能的影响, 以期为轮胎结构设计提供帮助。

1 轮胎的非线性特点及处理方法

1.1 材料非线性及处理方法

轮胎结构及材料组成如图 1 所示, 内、外层橡胶及内夹帘布采用不同的有限元模型来模拟。

橡胶材料具有超弹性、不可压缩性和大变形等独特的力学性能, 是一种典型的非线性材料。对于超弹性近似不可压缩材料, 通常采用唯象学模型中的 Mooney-Rivlin 模型^[2-4]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

基金项目: 武器装备科研基金支持项目(ZJJ/G2010-0198/B198)

作者简介: 徐福帅(1986—), 男, 河南安阳人, 海军工程大学在读硕士研究生, 主要从事船舶设备及工程研究。

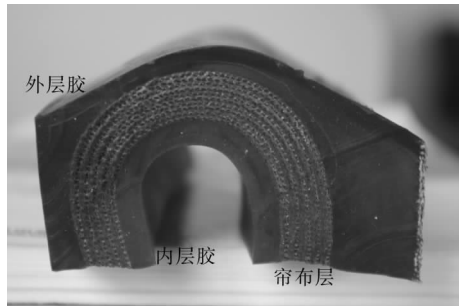


图 1 轮胎断面结构

式中, W 为应变能密度, I_1 和 I_2 分别为第一和第二偏应变变量, C_{10} 和 C_{01} 为超弹性材料常数。

此模型在描述拉伸应变不超过 100%、压缩应变不超过 30% 的变形状态时精确度较高^[4]。经过初步试验, 轮胎在各种工况下的变形不超过此范围。

帘布是一种帘线与橡胶压延而成的帘线-橡胶复合材料, 呈现复杂的各向异性和非线性, 它通过特殊的缠绕工艺与橡胶及其他帘布层硫化粘合成轮胎。目前普遍采用的有限元模型主要有层合壳模型和加强筋模型两种。层合壳模型^[5]又称层状复合材料结构的壳单元模型, 本质上是一种特殊的平均值方法, 在有限元分析中只能获得平均效应。而加强筋模型^[5-6]是一种将加强筋和基体材料分别用加强筋单元和实体单元表示的有限元处理方法, 在基体单元中可以包括多层不同方向的加强筋层, 同时基体和加强筋材料可由各自的本构模型来描述, 因此运用加强筋模型对复合

材料进行分析可以分别得到基体和加强筋的力学性能。本研究在仿真计算中采用膜 Rebar 单元来建立帘布层模型。Rebar 层的形状和空间位置与基体单元相同,不需输入单元方向类型和沿有关单元边厚度方向,但排列角度需根据实际定义^[7]。

1.2 接触非线性及处理方法

此轮胎的接触非线性主要体现在充气-抱紧过程中轮胎与摩擦瓦块的接触边界是一个随加载和轮胎变形而变化的非线性过程。在 MARC 软件中提供的接触算法有^[8]:基于拉格朗日乘子法或罚函数法的接触界面单元-间隙单元法;基于罚函数方法,通过用户子程序 USPRNG 施加非线性弹簧的非线性弹簧法;基于直接约束的接触迭代算法。其中直接约束法是解决接触问题的通用算法,尤其是对大面积接触以及事先无法预知接触发生区域的接触问题,该方法能根据物体的运动约束和相互作用自动探测接触区域,施加接触约束。本研究将采用此方法处理接触问题。

1.3 几何非线性及处理方法

轮胎离合器的离合间隙在 10 mm 左右,轮胎在充气压力的作用下会产生较大变形,这种含有大位移、大变形的变形过程会导致几何非线性。在涉及几何非线性问题的有限元法中,通常采用增量分析方法,在 MARC 中有总体 Lagrange (TL)和更新 Lagrange (UL)两种增量有限元格式。为使轮胎大变形计算更准确,本研究采用 UL 方法。

2 轮胎的有限元模型

2.1 网格划分

根据轮胎几何形状和承受载荷具有轴对称的特点,在假设被任意通过对称轴的平面截开的轮胎横截面沿圆周方向的变形恒为零的情况下,可将其简化为轴对称问题。本研究旨在分析轮胎的结构性能,在不影响结果准确性的前提下尽可能简化几何模型。轮胎离合器中外钢套、轮胎、摩擦块之间的装配如图 2 所示,摩擦瓦块通过圆柱销固定在轮胎内表面上,轮胎充气膨胀带动摩擦块径向移动接触抱紧内轮毂,当把内轮毂及摩擦瓦块定义为刚性体时,在轴对称模型中省略摩擦块的存在,内轮毂用一条刚性直线来表示,以此来描

述轮胎内表面与摩擦块在充气过程中的接触问题。轮胎轴对称网格模型如图 3 所示。



图 2 轮胎离合器中外钢套、轮胎、摩擦块之间的装配

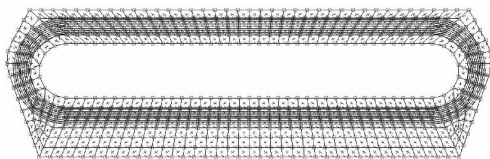


图 3 轮胎轴对称网格模型

橡胶材料单元采用基于 Herrmann 公式的四节点不可压缩的 80 号单元来模拟。轮胎内夹 10 层帘布层的分布如图 1 所示,每层帘布厚 1 mm,从里到外帘布层中帘线角依次重复为 $\pm 45^\circ$,采用 166 号膜 Rebar 单元模拟帘线,通过 MESH GENERATION-AUTOMESH-2D REBAR-MESHING 操作划分帘线单元的同时将帘线单元嵌入橡胶基体单元中。共划分四边形橡胶单元 470 个,加强筋单元 1 165 个,共 1 731 个节点。

2.2 材料参数

橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 本构模型,对橡胶进行单轴拉伸试验,通过 MARC 软件中的试验曲线拟合模块,将试验所得的应力-应变数据进行拟合得到模型参数: $C_{10}=0.48$, $C_{01}=0.12$ 。

帘线通常是各向异性材料,但在实际计算中往往只需要纵向弹性模量、泊松比和剪切模量,而忽略横向弹性模量和泊松比,因为帘线-橡胶复合材料的多数性能受这两个因素的影响较小^[9]。帘线的弹性模量为 2.9 GPa,泊松比为 0.38。

2.3 边界条件及加载方式

此轮胎的接触边界主要是外胎面固定于壳体的接触和内表面与摩擦块的抱紧接触,将外钢壳

体、摩擦块及内轮毂定义为刚性体,采用直接约束法处理接触问题。对轮胎轴对称模型的外边界线上的节点施加零位移约束,内边界的接触在 contact 操作中,将轮胎可能发生接触的内边界单元定义为变形体,定义代表摩擦块及内轮毂的直线为刚性体,然后通过接触表定义两者的接触行为。

将试验得到的压力-时间数据通过定义 table 及 edge load 操作加载在内腔线上,以此模拟轮胎充气过程。随时间(分 17 步)加载曲线如图 4 所示。

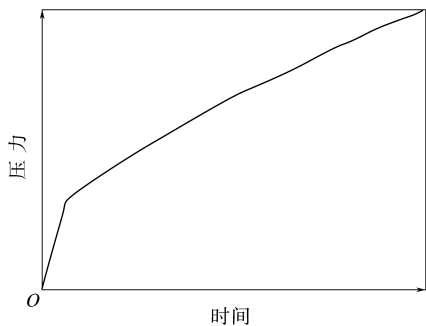


图 4 压力-时间曲线

3 结果与分析

3.1 轮胎应力分布

轮胎抱紧内轮毂后的变形及等效应力分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,胎肩部位(图中 1, 2, 3 和 4 部位)是轮胎应力集中的主要区域,与这些部位橡胶老化、龟裂程度比其他部位严重的实际情况相符,且应力集中区域主要是这些部位的帘布层,除胎肩外,靠外帘布层(部位 5)也存在较大的应力。上述 5 个部位(1, 2 与 3, 4 对称)在结构设计时需重点关注。轮胎左下部局部放大如图 6 所示。

3.2 传扭能力的影响因素

传递扭矩(M)的计算公式^[10]如下:

$$Q = 2\pi R_1 B(p_2 - p_1) \quad (2)$$

$$M_{\max} = (Q - F)\mu R \quad (3)$$

式中 Q ——摩擦块作用于摩擦鼓轮的正压力;

R_1 ——鼓轮半径;

B ——轮胎压紧摩擦块的接触宽度;

p_2 ——储气瓶中的空气压力;

p_1 ——摩擦块与摩擦鼓轮开始接触时所需

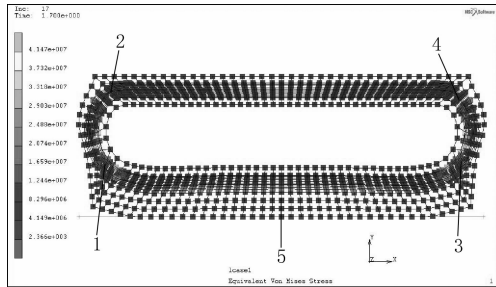


图 5 轮胎变形及应力分布

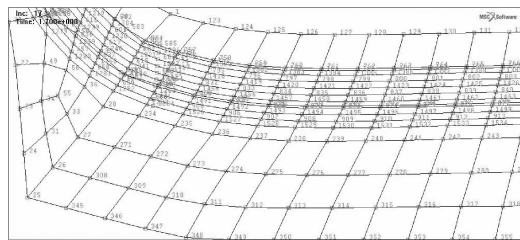


图 6 轮胎左下部局部放大

要的空气压力;

F ——轮胎弹性部分质量在旋转时产生的离心力;

μ ——摩擦因数;

R ——充气抱紧后轮胎内边界半径。

在假设摩擦块为刚体的情况下,正压力 Q 与轮胎抱紧摩擦块的压紧力 N 相等,此时传递扭矩的公式为

$$N = 2\pi RBP \quad (4)$$

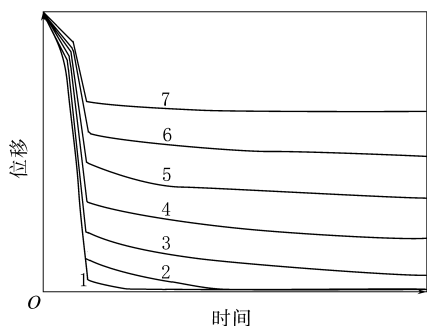
$$M_{\max} = (N - F)\mu R = 2\pi R^2 BP\mu - F\mu R \quad (5)$$

式中 P ——轮胎压紧摩擦块的压紧压力(p_2 与 p_1 之差)。

可见 R, B, P, μ 和 F 均是重要影响参数。本研究讨论的轮胎结构参数主要是对 P 和 B 产生影响,此时可假设 R, μ 和 F 不变,采用 $C = P \times B$ 的值来衡量不同结构参数下的传扭能力。从充气后的几何形状(见图 5)来看,轮胎的内胎面并不能完全与摩擦块抱紧接触,这主要是由于轮胎这种充气结构导致的,它类似于一种特殊的充气膜结构,在充气过程中是一种趋于应力均匀的最小曲面(一般为球状)的变形^[11],这种变形规律导致轮胎两端上翘、内表面不能完全接触。

为了研究轮胎充气变形规律及其对传递扭矩的影响,在计算结果中重点分析内胎线左端点至接触边界点(节点 25, 345~350)的位移和节点

力,做出各节点的径向(y向)位移随加载时间(分17步)的变化曲线,如图7所示。



1~7—分别为节点 25,345~350。

图7 节点 25,345~350 位移-时间曲线

从图7可以看出,随着充气压力的增大,各节点径向位移开始时迅速增大,而后增速急速放缓,进入一个缓慢增大的过程,这是一个典型的非线性过程,且越靠近端点的节点,其径向位移后半阶段的增速越缓,端点(即节点25)在第6载荷步后增大率几乎变为零,直至加载结束径向位移基本保持不变,表明这种结构下轮胎内表面不可能完全接触摩擦块。

节点349~354上加载结束时的反力分别为 9.60×10^3 , 1.98×10^4 , 2.58×10^4 , 2.91×10^4 , 3.04×10^4 和 3.06×10^4 N,平均值为 2.42×10^4 N。由此可以看出,越靠近边界点接触力越小,且在整个接触线上接触力不能均匀分布,表明轮胎充气过程的这种变形规律将对充气压力产生压紧压力(P)的效果产生负面影响。

读取接触边界点横坐标,由对称性计算得 $B=2X=2 \times 0.085=0.17$ (m),此时的传扭能力值为 $C=P \times B=2.42 \times 0.17=0.411$ 4。

3.3 几何外形对轮胎性能的影响

在不影响推动摩擦块压紧轮毂的功能实现的前提下,对原轮胎外形加以改动,使其外形规则简单,如图8所示,这种形状规则的轮胎生产工艺简单,生产效率较高,在一定程度上降低了生产成本。

对比图5和8可以发现,规则外形轮胎的应力集中于腔顶部位,面积较大。帘布层应力值有所减小,应力分布较均匀,与橡胶部分存在明显差异。由此可见,规则外形轮胎更易发生应力集中,

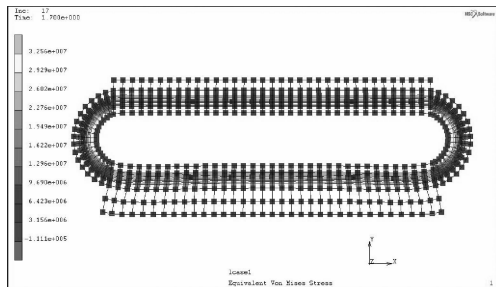


图8 规则轮胎的变形及应力分布

帘布层与橡胶应力值差异明显,这意味着发生撕裂、脱层等疲劳破坏的风险较大。规则轮胎的接触宽度 $B=2X=0.22$ m,传扭能力 $C=P \times B=2.39 \times 0.22=0.525$ 8,比原型轮胎的传扭能力有所增大。对于摩擦式离合器,设计传扭性能时不仅要满足动力系统的要求,还要考虑它对传动系统其他部件所起的过载保护作用。综合考虑,原轮胎的使用性能更佳。

规则轮胎节点349~354上加载结束时的反力分别为 8.10×10^3 , 1.87×10^4 , 2.52×10^4 , 2.89×10^4 , 3.08×10^4 和 3.14×10^4 N,平均值为 2.39×10^4 N。

3.4 帘线铺设角度对轮胎性能的影响

帘线铺设角度是指帘线轴向与轮胎周向之间的夹角,简称为帘线角。通过更改 Rebar 定义菜单中的角度一项,分别取 20° , 35° , 55° 和 70° ,其他条件保持不变进行对比计算,分析帘线角对轮胎性能的影响。不同帘线角下轮胎变形及应力分布如图9所示。

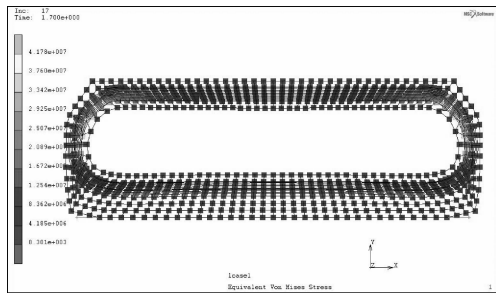
在 20° , 35° , 45° , 55° 和 70° 不同帘线角下,接触力平均值分别为 2.77×10^4 , 2.60×10^4 , 2.42×10^4 , 2.25×10^4 和 2.10×10^4 N。

对比图9(a)~(d)得出,随着帘线角的增大,帘布层应力由较均匀分布状态逐渐变为局部应力集中,应力集中面积逐渐变小,帘布层应力值与橡胶部分差异变弱,但应力最大值呈现先减小后增大规律,由此推得单角度(α)帘布层以 $\pm\alpha$ 交错粘合时,以 45° 时的应力集中值最小。

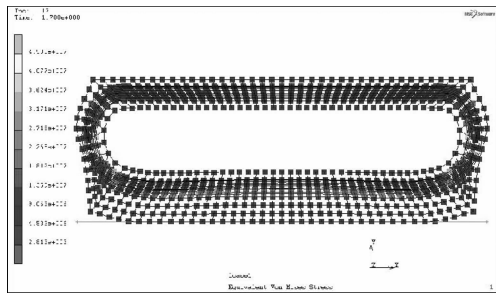
在帘线角增大过程中,外形变化量与接触力逐渐变小,这表明帘布层束缚性随帘线角增大是逐渐增强的。

3.5 帘线密度对轮胎性能的影响

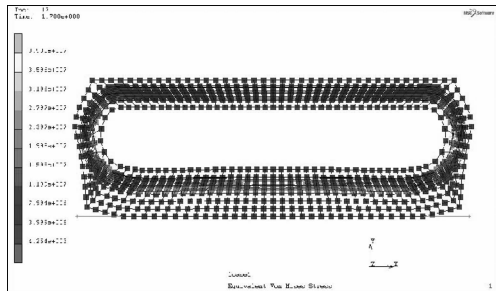
轮胎横截面上帘布层单位长度内的帘线根数



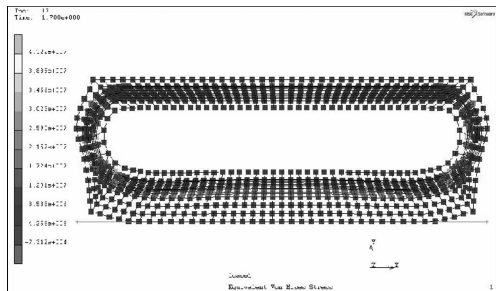
(a)20°



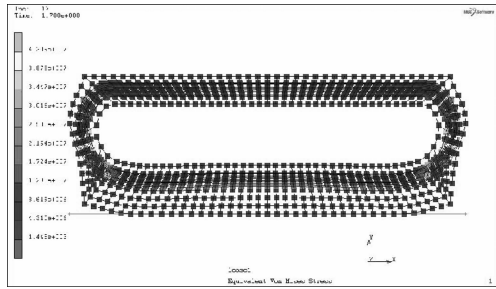
(a)800 根 · m⁻¹



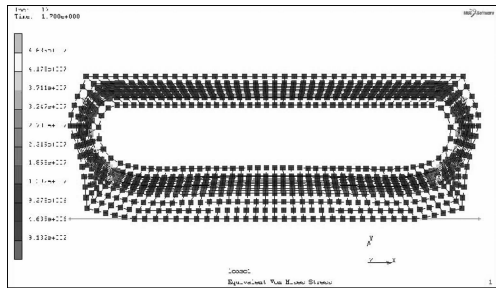
(b)35°



(b)900 根 · m⁻¹



(c)55°



(d)70°

图 9 不同帘线角下轮胎变形及应力分布

为帘线密度(根 · m⁻¹)。使 Rebar 菜单中 # RE-BARS/LENGTH 值分别为 800,900 和 1 000,其他条件保持不变进行对比计算。不同帘线密度下轮胎变形及应力分布如图 10 所示。

在 800,900 和 1 000 根 · m⁻¹不同帘线密度下,接触力平均值分别为 2.44×10^4 , 2.43×10^4

图 10 不同帘线密度下轮胎变形及应力分布和 2.42×10^4 N。

从图 10 可以看出,应力分布规律基本相同,但随着帘线密度的增大,应力集中值逐渐减小,接触宽度保持不变,接触力逐渐减小。此轮胎所用帘线的直径在 1 mm 左右,因此饱和(最大)密度为 1 000 根 · m⁻¹。该轮胎所用帘布层帘线密度为饱和密度,因为大密度有助于减小应力,而且帘布层中的帘线为单角度排列,密度小意味着帘线间距大,当帘布层应力分布不均匀时,易发生帘布层撕裂、帘线抽出等破坏。

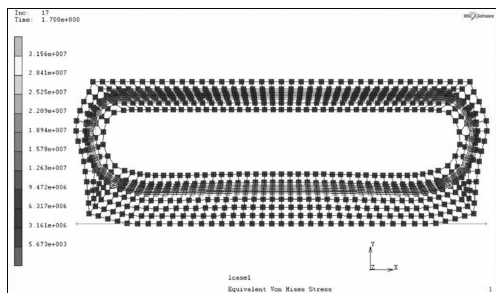
3.6 帘布层数对轮胎性能的影响

不同帘布层数下轮胎变形及应力分布如图 11 所示。

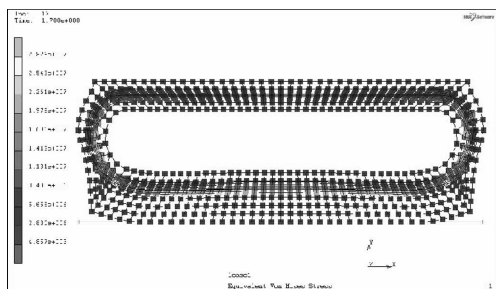
在 6,8 和 10 不同帘布层数下,接触力平均值分别为 2.51×10^4 , 2.47×10^4 和 2.42×10^4 N。

从图 11 可以看出:随着帘布层数的减小,帘布层应力值先减小后增大,整个帘布层应力趋于均匀,与橡胶部分逐渐出现明显差异;接触宽度保持不变,接触力逐渐增大。

帘布层在轮胎中起承受负荷、固定尺寸保持形状(简称固型)作用。作为主要承载结构的帘布层,当其承载减小时往往导致橡胶部分受力增大;对于轮胎离合器这种利用轮胎变形推动摩擦瓦块



(a) 6 层



(b) 8 层

图 11 不同帘布层数下轮胎变形及应力分布

压紧内轮毂实现结合的情况,帘布层的固型作用对于必要变形在一定程度上反而是一种束缚,这种束缚会抵消一部分充气压力的作用,束缚越强,抱紧接触力越小。轮胎中与帘布层有关的结构要素发生变化时,一般均对以上两种功能产生影响,从而引起性能变化。此外,在解释某些变化规律时还必须考虑帘布层的变形状态,对于帘布层这种各向异性材料通常忽略其承压能力,视为承拉材料。在轮胎中它的变形过程为:物理变形→逐渐张紧→自身形变。帘布层张紧过程也是帘布层应力趋于均匀的过程,张紧过程往往成为变化规律的转折点。

综合上述讨论,可以把轮胎划分为 3 种状态:

①帘布层束缚弱、易张紧、轮胎易变形,具体表现为轮胎变形大、接触力大,帘布层张紧后承载大、应力分布均匀、应力值较大;②帘布层逐渐张紧,束缚、变形处于适中的过渡状态;③帘布层束缚强、整体承载大,轮胎不易变形,表现为轮胎变形小、接触力小,帘布层局部张紧出现应力集中、应力集中值较大。

帘布层相关结构参数变化对轮胎性能的影响可从引起以上状态的变化来解释。第 1 种状态会加剧轮胎疲劳破坏,第 3 种状态会带来较大的充

气阻力,因此参数设计应使轮胎处于第 2 种状态,避免束缚过弱或过强。

4 结论

本研究分析了轮胎所包含的非线性问题并给出处理方法,运用 MARC 分析软件建立轮胎的轴对称非线性有限元模型,对轮胎应力分布及影响传扭性能的因素进行分析,然后从应力分布及轮胎抱紧摩擦瓦块时的接触宽度和接触压力几方面,考察了几何外形、帘线角度和密度、帘布层数等结构要素对轮胎性能的影响,得出以下结论。

(1)胎肩部位是最主要的应力集中区域,此部位的橡胶老化及龟裂程度较其他部位严重与此有关,设计时需重点关注。

(2)运用充气膜结构理论可解释轮胎两端上翘变形的原因,这种上翘会减小轮胎与摩擦瓦块的接触宽度,减小轮胎抱紧接触力,对轮胎离合器的传扭性能产生负面影响。

(3)外形规则的轮胎有助于简化工艺、降低成本,同时传扭能力增大(接触面积及压力均增大),但是应力集中区域面积增大,帘布层应力与橡胶部分差异明显,发生撕裂、脱层等破坏的风险增大。设计传扭性能时不仅要满足动力系统要求,还要考虑其对传动系统其他部件所起的过载保护作用。

(4)结合计算结果、帘布层在轮胎中所起作用及帘布层在充气加载中的变形过程,可将轮胎划分为 3 种状态,帘布层相关结构参数变化对轮胎性能的影响可从引起上述状态的变化来解释,轮胎的参数设计应使其处于帘布层逐渐张紧,束缚、变形处于适中的过渡状态,避免束缚过弱或过强。

参考文献:

- [1] 李丽娟,刘锋,苏秀平,等. 轮胎结构力学设计理论研究进展[J]. 轮胎工业,2000,20(10):579-600.
- [2] 于同隐 何曼君,卜海山,等. 高聚物的粘弹性[M]. 上海:上海科学技术出版社,1986:124-130.
- [3] Mooney M J. A Theory of Large Elastic Deformation[J]. Journal of Applied Physics,1940,11(6):582-592.
- [4] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467-471.
- [5] 洪宗跃,吴桂忠. 子午线轮胎有限元分析 第 1 讲 有限元在轮胎设计中的应用发展概况[J]. 轮胎工业,2005,25(10):634-638.
- [6] 尹伟奇,姚振汉,薛小香,等. 加强筋模型在轮胎有限元分析

- 中的应用[J]. 橡胶工业, 2004, 51(9): 543-548.
- [7] 陈火红, 于军泉, 席源山. MSC. Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 306-308.
- [8] 陈火红, 杨剑, 薛小香, 等. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 243-245.
- [9] 洪宗跃, 吴桂忠. 子午线轮胎有限元分析 第 4 讲 帘线-橡胶复

- 合材料[J]. 轮胎工业, 2006, 26(1): 55-61.
- [10] 陈国钧, 曾凡明. 现代舰船轮机工程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001: 344-345.
- [11] 易发安, 胡加珠, 岳艳芳. 索网和膜结构的最小曲面分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 167-171.

收稿日期: 2012-06-23

Nonlinear Finite Element Analysis of Tire Structure in Pneumatic Clutch

XU Fu-shuai, WANG Ji, ZHENG Jian-hua

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The axisymmetric non-linearity finite element analysis model of the tire in pneumatic clutch was set up by using MSC. MARC software to analyze the deformation, stress distribution and influence factors of torque transmission performance for the tire. The influence of structure elements, including geometric shape, cord angle and density, and number of cord layers, on the tire properties was investigated by analyzing the stress distribution, and the contact area and contact pressure when the tire tightly contacted with friction block, and so on. The results showed that in the design of tire structure parameters the tension between cord layers had to be increased gradually, and very weak or very strong bonding should be avoided.

Key words: pneumatic clutch; tire structure; nonlinearity; finite element analysis

第八届中国橡胶基础研究研讨会 在沈阳化工大学召开

中图分类号: TQ330.1 文献标志码: D

由国家自然科学基金委员会、中国化工学会橡胶专业委员会、北京化工大学北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室主办, 沈阳化工大学承办的第八届中国橡胶基础研究研讨会于 2012 年 11 月 1—2 日在沈阳化工大学隆重召开。研讨会得到了确成硅化学股份有限公司、辽宁胜友橡胶科技有限公司、美国 TA 仪器公司、中国台湾高铁检测仪器有限公司和中国聚合物网的大力支持。来自国家自然科学基金委员会、中国化工学会橡胶专业委员会、北京化工大学、沈阳化工大学、华南理工大学、青岛科技大学、四川大学、海南大学、上海交通大学、大连海事大学、山东大学、中国石油化工股份有限公司、中国石油吉林石化研究院、中石化北化院燕山分院、中石化兰州化工设计研究院、航天材料及工艺研究所、软控股份有限公司、山东玲珑轮胎股份有限公司等 46 家单位从事橡胶基础和应用研究的 129 位专家学者出席了研讨会。

研讨会开幕式由沈阳化工大学副院长王长松教授主持, 沈阳化工大学校长逢玉俊致欢迎词, 中

国石油化工股份有限公司科技开发部庄毅处长, 研讨会组委会主席、北京化工大学张立群教授和国家自然科学基金委员会材料与工程部有机高分子材料处马劲处长致辞, 共同祝贺研讨会的召开。

本届研讨会的特色是面向橡胶领域中的基础科学及应用基础科学问题进行交流。在为期 2 天的研讨会上, 专家学者共作了 48 项专题报告, 围绕“橡胶合成的技术方法”“非石油原料路线制备合成橡胶”“多相多组分橡胶复合材料的结构与性能”“橡胶制品设计的新方法”“橡胶行业的重大需求以及橡胶在国家安全方面的应用”等议题展开研讨, 展示了相关领域最新研究成果和对橡胶基础研究的思考和创新性观点。

为了明确未来橡胶基础研究和行业发展方向, 筹备好下一届中国橡胶基础研究研讨会, 会议特邀国内高等院校及科研院所的专家学者召开了橡胶基础研究战略研讨会。同时, 针对 2012 年国家自然科学基金有机高分子材料领域资助概况, 马劲处长作了详细的介绍和解析。会议决定, 第九届中国橡胶基础研究研讨会由海南大学承办, 将于 2013 年 10 月 20 日—11 月 10 日择日在海南三亚召开。

(本刊编辑部 贺年茹 马 晓)