

滚动轮胎温度场分布及温度控制研究进展

张 岩, 李庆领

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:介绍滚动轮胎生热机理、温度场分布及温度控制研究进展。温度场分布试验研究方法主要有接触法、非接触法和对流换热计算, 模拟计算包括有限元法和数值计算法; 滚动轮胎的温度控制方法包括热传导、强制对流换热、胎体修改以及热管技术和冷却剂等。

关键词:滚动轮胎; 生热; 温度场; 温度控制

中图分类号: TQ336.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2014)04-0251-05

最新统计数据表明, 目前全球汽车总保有量已突破 10 亿辆。预计到 2050 年, 这一数字将升至 25 亿辆。随着我国经济的快速发展和人民生活水平的不断提高, 汽车已经逐渐进入人们的日常生活。截至 2012 年年底, 我国机动车保有量为 2.4 亿辆, 其中汽车达到 1.2 亿辆。

随着汽车性能的不断提高和高速公路的快速发展, 汽车的行驶速度有了较大提高。而汽车轮胎的温度随着行驶速度的提高而升高。轮胎温度的升高又会对轮胎材料的动态性能带来影响, 易造成胎面分层和热氧老化等可能直接导致爆胎的严重安全问题。值得注意的是, 即使安装了较为先进的轮胎检测系统或定期对轮胎进行常规检查, 也无法完全捕捉到这种潜在的轮胎安全隐患。

轮胎的充气压力随温度而变化, 由温度变化引起的轮胎充气压力异常同样可能导致爆胎。充气压力过低会导致不正常磨损或轮胎内部损伤; 充气压力过高则易使胎圈受到不平路面的冲击而变形, 从而导致爆胎。轮胎的生热不仅影响其使用性能, 对汽车油耗也有很大影响。轮胎的能量损失占轿车总能量损失的 5%, 占载重汽车总能量损失的 10%^[1]。因此, 轮胎温度场模拟计算及温度控制研究对轮胎的使用寿命、行车安全及结构设计乃至节能减排等都具有十分重要的意义。

作者简介: 张岩(1980—), 男, 山东菏泽人, 青岛科技大学在读博士研究生, 主要从事传热设备和节能技术研究。

1 滚动子午线轮胎的生热机理

从微观角度看, 轮胎生热是由连续的运动变形过程中带来的连续压缩-拉伸或扭转造成橡胶分子间的摩擦引起的, 这种运动变形即滞后效应。在轮胎滚动和弯曲的过程中, 一部分动能由于滞后效应而转化为热, 从而带来轮胎的温升现象^[2]。当外界条件改变时, 例如负荷和速度增大、充气压力降低、道路起伏和多弯等, 则轮胎的应变加剧, 从而提高了滞后生热率。轮胎的滞后效应被认为是影响轮胎温升的主要因素, 且胎体不同部位的生热率不同, 这种差异性使得轮胎生热建模变得异常复杂。

轮胎胎体与路面接触面的摩擦力带来的生热是造成轮胎温升的另一个原因。这种摩擦力的大小取决于路面的粗糙度和轮胎滑动速度。不同工况下轮胎的生热行为研究表明, 轮胎的负荷相比速度、充气压力和滑动角度对轮胎的温度影响更为显著^[2]。由于橡胶材料的导热性差, 轮胎的温升与胎面的厚度有直接关系, 因此当轮胎的生热速度大于向周围空气散热的速度时, 聚集的热量使带束层的温度升高。随着轮胎工作温度的升高, 橡胶材料的强度降低并发生热疲劳老化, 最终导致轮胎失效。

不同工况下轮胎生热的主要影响因素各有不同。在车辆正常行驶条件下, 材料的粘性损耗生热是导致轮胎温度升高的最主要因素, 而因摩擦产生的热量只占很小比例, 并且都在轮胎的外表面, 比较容易扩散到周围环境, 对轮胎温度场的影

响较小;但当车辆处于急转弯或急剧变速等情况时,轮胎会与路面、轮辋发生剧烈摩擦并产生大量的热,导致接触表面的温度急剧上升,同时显著影响到轮胎内部的温度分布。

钢丝帘布层增强了轮胎的强度和刚度,改善了散热条件,适应高速行驶。但是,当轮胎欠压行驶时,轮胎与地面接触面积增大,摩擦生热将大幅提高,同时胎体内的钢丝与胶料之间也发生摩擦生热,最终导致轮胎受热状态急剧恶化。当轮胎在路面上自由滚动行驶时,一般只需考虑胎体和帘布层因滞后生热引起的轮胎温度升高;对于轮胎抱死滑行状态,应以接触地面产生的摩擦热为主;在急转弯或急剧变速的情况下,轮胎与路面产生明显的相对滑动,则应同时考虑上述两种生热情况,若速度很高,则主要以摩擦生热机理为主。

较为广泛的轮胎生热研究方法是基于轮胎橡胶材料机械性能测试基础上获取材料在周期加载条件下的应力-应变关系模型。影响胶料粘弹损耗特性的因素很多,但限于试验条件和时间,材料测试不可能考虑所有因素,而只能探讨一些主要因素对胶料粘弹损耗特性的影响。由此获得的计算结果具有一定的局限性。

2 滚动轮胎温度场分布

轮胎在确定工况下运行足够长时间后就逐渐进入稳态滚动状态,其内部的温度场分布也将趋于稳定状态,此时的温度场是稳态滚动温度场,目前国内外的轮胎温度场分析主要是指稳态滚动温度场分析^[3]。通过改变胎面花纹、各部位的几何形状、尺寸和胶料优化可降低轮胎的生热率。稳态滚动轮胎温度场研究分为试验研究和模拟计算等。

2.1 试验研究

2.1.1 接触法

接触法包括静态法和动态法。静态法一般是在试验停止后对轮胎进行测温,主要用于测量胎冠和胎肩处的温度。采用探针式热电偶,通过导轮控制,探针可以自动插入既定测温点,插入深度为12~16 mm,以使其插入胎体外层帘布与胎面基部胶的交界处。此法不仅测温快捷,而且能准确测量试验前后的温度。

动态法一般是在轮胎滚动时测量。首先在轮

胎内部开孔,将热电偶预先埋入轮胎测温点或者将热电偶从气门嘴插入,并通过滑环装置将其引出,测定轮胎内部空气的温度。采用动态法要在轮胎上开孔,轮胎在受力滚动时,必然会产生应力集中,测出的温度与实际温度有出入,因此需对测量结果加以修正。

自20世纪中期以来,一些国外学者开始从试验的角度研究轮胎在不同工况下的生热和温度分布规律。P. R. Willett^[4]通过打孔放置热电偶的方法测量了轮胎带束层端部的稳态温度;考察了轮胎胶料物理性能对轮胎内部温升的影响,并基于试验建立了大量经验公式。F. S. Conant^[5]试验研究了轮胎耐久性能与温度之间的关系,在进行轮胎耐久性试验的同时采用预埋热电偶的方法测量轮胎的内部温度,结果表明轮胎的使用寿命随着内部温度的上升而显著缩短。

王泽鹏^[6]进行了汽车轮胎非稳态温度场的有限元分析与试验研究,采用MTS RW860轮胎性能实验机,在轮胎上打孔测量轮胎内部温度点,分析了轮胎在额定工况下的温度场变化。何春明等^[7]采用一种脉冲频率调制的时分多路遥测系统测量轮胎温度,该装置温度信号的传输采用了红外线无线光通信技术,热电偶温度传感器用镍铬-镍硅线配对焊接而成,将传感器的感温点热电偶焊接点置于待测点,由引线将信号接入发射器。

2.1.2 非接触法

初亮等^[8]利用轮胎转鼓实验台和M90B型红外测温仪等设备,对轮胎在不同速度和负荷条件下的表面稳态温度场进行了测试,得到各种条件下的轮胎表面稳态温度场的分布以及温升随时间变化的规律。赵子亮等^[9]在室内轮胎转鼓实验台上用红外测温系统测量整个轮胎外表面温度,分析了基于滚动状态轮胎稳态热状况,对试验数据进行了回归分析,建立了稳态时轮胎表面温升与工作条件(速度、负荷、充气压力及环境温度)单因素变化回归方程,并分析了稳态时轮胎内部温度场分布。王晓军等^[10]采用NEC TH51红外热像仪对滚动轮胎胎侧的温度场进行实时测量,根据轮胎温度场的单向解耦分析思想,形成了一个基于ABAQUS软件的轮胎稳态温度场分析方法。李勇等^[11]采用转鼓试验和红外热像仪对不同工

况下的轮胎表面温度进行了测量,探讨了升温和冷却过程中轮胎表面温度场的分布规律及相应机理,并通过设计正交试验分析了负荷、充气压力和速度对轮胎稳态温度的影响,确定了影响轮胎表面温度的主次因素。

2.1.3 轮胎的对流换热

由于受到流体的流动状态、物理性质及固体表面的几何参数等因素的影响,对流换热过程是非常复杂的热量传递方式。理论上,对流换热系数可以通过求解控制方程组获得固体表面附近的流场和温度场分布情况后计算得出。但在实际研究中,由于控制方程组的复杂性使得方程求解的难度较大,因而多数学者采用试验研究。由于胎面与地面的接触导热较为复杂且没有成熟的计算模型,在计算轮胎对流换热时计及胎面的相关研究较少,而主要集中在对胎侧热边界的研究。

马连湘^[12]采用蔡升华热质比拟法测定风洞内旋转圆盘表面的平均对流换热系数,并根据此试验结果确定了对流换热系数。A. L. Browne等^[13]通过试验考察了空气流速和表面粗糙度等因素对橡胶块表面对流换热系数的影响。D. J. Schuring^[14]认为轮胎处于热平衡状态时不再吸收热量,轮胎因粘性损耗产生的热量完全向外界传递,因此单位时间内通过轮胎外表面向外传递的热量等于滚动阻力的功率。

上述研究的对流换热系数大多是基于旋转圆盘对流换热试验得到的。但实际的胎侧外表面是由不同位置具有不同曲率的曲面构成的,并非一个平面,通过这种假设直接由平面试验得出的结果来确定胎侧表面对流换热系数必然会带来误差。为了避免这种简化带来的误差,B. S. Oh等^[15-16]直接使用热流计测量滚动过程中轮胎胎侧表面对流换热系数,试验结果证实了胎侧的对流换热系数分布不仅与半径相关,还与胎侧的曲率相关。

T. G. Ebbott等^[17]首次提出了根据实测的轮胎表面温度来反演对流换热系数的方法,轮胎胎面在轮胎滚动过程中既与空气接触又与路面接触,包括了对流换热和接触导热两种形式。应当指出的是,即使忽略胎面与地面的接触导热,空气掠过胎侧的对流换热系数与空气掠过胎面的对流换热系数由于流动方式的差异性和换热表面的几

何因素不同也应有所不同,且胎面与地面的接触导热和对流换热相比并未小到可以忽略的程度。由于滚动轮胎在不同工况下与地面的接触面积可视为常量,因此当滚动轮胎温度场处于稳态时可以等效为任意时刻轮胎与地面的接触导热是恒定的。因此,可以将滚动轮胎的散热分为3个部分:①胎侧、胎面与胎内表面的对流换热;②胎面与地面的接触导热、胎体与轮辋结合部位的导热;③轮胎向周围环境的热辐射。

2.2 模拟计算

随着计算机的飞速发展及数值计算法的日益成熟,使采用数值计算法分析轮胎内部的温度场分布成为可能。有限差分法和有限元法是广泛应用的两种近似方法。

赵子亮等^[18]根据轮胎尺寸、材料性质和工作条件,对滚动轮胎进行了合理假设,建立了滚动轮胎热平衡状态下的简化传热数学模型,利用有限元处理方法和非线性有限元软件,建立了滚动轮胎稳态温度场的二维有限元模型。吴福麒等^[19]对不同负荷、初始充气压力及扁平率下子午线轮胎稳态温度场进行了有限元分析,指出随着负荷的增大,整个轮胎的温度场都呈上升趋势;随着初始充气压力的增大,胎侧区域的温度场呈下降趋势;初始充气压力对胎冠区域温度场的影响较小,不同扁平率轮胎的胎肩部均为截面上温度最高的区域,随着扁平率的降低,胎肩和胎冠部位的温度明显下降,但胎侧和胎圈部位的温度几乎没有变化。李杰等^[20]建立了滚动轮胎热平衡状态下的简化传热数学模型,进行了稳态温度场仿真计算,获得了胎体内部的稳态温度场分布,分析了轮胎的速度、几何结构参数和材料特性参数对轮胎最高温升的影响,通过回归分析建立了轮胎速度与最高温升的经验计算公式。宋君萍等^[21]建立了分析滚动子午线轮胎稳态温度场的有限元模型,采用 Galerkin 加权余量法求解轮胎的导热偏微分方程,得到轮胎内部温度场分布情况。

3 滚动轮胎的温度控制

国内外学者提出的轮胎散热技术大致可分为5类:①热传导;②强制对流换热;③冷却剂;④轮胎胎体修改;⑤热管技术。

3.1 热传导

通过轮胎温度场分布的相关研究可知,轮胎行驶过程中稳态温度场中的最高温度分布在轮胎的带束层。有学者提出通过强化轮胎胎体向胎腔的传热技术达到控制轮胎温度的目的。

J. J. Groezinger 等^[22]提出一种热量传输单元,将热量由传热流体从轮胎底部换热传出。热量传输单元由摩擦力驱动,吸收工作流体并将其传给温度相对较低的轮辋,从而达到散热的目的。L. C. Mote^[23]将金属带附于轮胎胎体的内侧表面,金属带的两端穿过胎腔与轮辋接触且部分伸出到周围空气中以实现散热。试验证明这种方法有效地提高了整体换热系数。

以上方法虽然在原理上较为简单,但都需要改变轮胎的结构设计,且强化传热的程度相对较低,工作流体无相变且传热金属与轮胎的接触面积受限,向周围空气中的散热并没有明显增强,没有考虑到金属材料的防腐蚀以及工作流体对橡胶复合材料的影响等。

3.2 强制对流换热

对流换热是一种导热与热对流同时存在的复杂热传递过程,影响对流换热的因素归纳起来分为5个方面:流体流动的起因(强制对流和自然对流)、流体的相变、流体的流动状态、流体的物性条件和换热表面的几何因素^[20]。通过改变一种或多种影响因素,在轮胎胎体内部或胎体外侧提高强制对流换热同样可以达到提高轮胎散热的目的。

F. O. Skidmore^[24]提出一种在胎腔内部制造强制对流,通过在胎面安装数个凸起的螺旋状肋片提高胎面、胎侧与轮辋区域之间热传递的技术。J. H. Becker^[25]提出通过空气导管和漏斗将周围的空气引导入空气翼子板或旋转的轮胎面来增强对流。

3.3 轮胎胎体修改

S. Hsu^[26]提出一种将轮胎通过钩子状结构紧固到轮辋上的设计,轮胎内部热量通过轮胎内部胎侧的带有散热钉状散热翅片的管子进行换热。W. E. Rayman^[27]则设计了一种两部分组配的轮胎结构,轮胎胎面可以脱离胎体以达到降低带束层温度的目的。

3.4 热管技术、冷却剂及其他

热管是一种具有高热性能的传热元件,依

靠自身内部液体工质的相变传输热量,具有传热效率高、等温性能好、热流密度可以自动调节、热流方向具有可逆性、热二极管与热开关特性和结构可以按需要灵活布置及高可靠性等特点^[28]。

L. R. Ocone^[29]提出一种类似于热管散热的轮胎散热技术。通过在轮辋与轮毂之间安装一个腔体用以盛放工作流体,接触轮胎内表面的流体受热发生相变,蒸汽由于向心力的作用沿径向移动与温度较低的环境空气接触后凝结。此时,由于密度增大凝结的工作流体受向心力作用沿径向向外移动,从而形成一个连续的换热循环过程。

4 结语

轮胎生热主要是由连续的运动变形过程带来的压缩-拉伸或扭转造成橡胶分子间的摩擦力以及轮胎胎体与路面接触面的摩擦力造成的,不同工况下轮胎生热的主要因素各有不同。

轮胎温度测量仪器包括探针式热电偶、数字式热电偶和脉冲频率调制遥测系统等,温度场研究方法包括实际测温试验研究和有限元模拟计算。

滚动轮胎温度控制包括热传导、强制对流换热、轮胎胎体修改以及热管技术等方法体系。在轮胎中加入工作流体的相变传热具有极大的发展潜力,在工作温度和压力条件下,能够完成蒸发和冷凝循环且对轮胎胶料没有影响的工作流体的选择是极其重要的。

滚动轮胎温度场分析越来越受到工程界的关注。由于研究目标的状态较为复杂、影响因素多以及相应的理论发展相对不完善等诸多因素制约,至今仍未形成较为可靠、有效的分析方法。因此滚动轮胎稳态温度场的分析方法和新思路仍是当前轮胎科学界与工程界亟待解决的重要研究课题。

参考文献:

- [1] Ebbott T G, Hohman R G, Hohman R L, et al. Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(1-3): 2-21.
- [2] Lin Y J, Hwang S J. Temperature Prediction of Rolling Tires by Computer Simulation[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 67(3): 235-249.
- [3] 吴福麒. 轮胎稳态温度场的有限元分析[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2009.

- [4] Willett P R. Heat Generation in Tires Due to the Viscoelastic Properties of Elastomeric Components[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1974, 47(2): 363-375.
- [5] Conant F S. Tire Temperature[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1971, 44(2): 397-439.
- [6] 王泽鹏. 汽车轮胎非稳态温度场的有限元分析与试验验证[J]. 汽车技术, 2010(6): 48-51.
- [7] 何春明, 张承宁, 郑慕侨. 用于实时测量负重轮胎温度场的红外遥测系统[J]. 兵工学报坦克装甲车与发动机分册, 1996, 61(1): 8-12, 18.
- [8] 初亮, 李杰, 王庆年, 等. 高速滚动轮胎表面稳态温度场的实验研究[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 22-26.
- [9] 赵子亮, 王庆年, 李杰, 等. 基于滚动状态轮胎温度场的稳态热分析[J]. 机械工程学, 2001, 37(5): 30-34.
- [10] 王晓军, 李伟, 夏源明. 基于实验的数值反演的滚动轮胎稳态温度场的有限元分析[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 1-9.
- [11] 李勇, 左曙光, 段向雷, 等. 基于试验的轮胎温度场分布及影响因素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1249-1253.
- [12] 马连湘. 滚动轮胎温度场的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [13] Browne A L, Wickliffe L E. Parametric Study of Convective Heat Transfer Coefficients at the Tire Surface[J]. Tire Science and Technology, 1980, 8(3-4): 37-67.
- [14] Schuring D J. The Rolling Loss of Pneumatic Tires[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1980, 53(3): 600-727.
- [15] Oh B S, Kim Y N, Kim N J, et al. Internal Temperature Distribution in a Rolling Tire[J]. Tire Science and Technology, 1995, 23(1): 11-25.
- [16] Assaad M C, Kimble B, Huang Y M, et al. Thin-film Heat Flux Sensor for Measuring the Film Coefficient of Rubber Components of a Rolling Tire[J]. Tire Science and Technology, 2008, 36(4): 275-289.
- [17] Ebbott T G, Hohman R L, Jeusette J P, et al. Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(1): 2-21.
- [18] 赵子亮, 王庆年, 李幼德, 等. ANSYS 在滚动轮胎稳态温度场分析中的应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 15-20.
- [19] 吴福麒, 李子然, 李兵, 等. 扁平化对子午线轮胎稳态温度场影响的有限元分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1125-1130.
- [20] 李杰, 王庆年, 赵子亮, 等. 高速滚动汽车轮胎稳态温度场分布的数值研究[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 256-259.
- [21] 宋君萍, 刘丽, 马连湘. 滚动轮胎稳态温度场的有限元计算[J]. 橡胶工业, 2006, 53(3): 161-165.
- [22] Groezinger J J, Anders G A. Tire Cooling by Fluid Transfer Element[P]. USA: USP 4 620 580, 1986-11-04.
- [23] Mote L C. Method of and Means for Prolonging the Life of Pneumatic Tires[P]. USA: USP 2 948 321, 1960-08-09.
- [24] Skidmore F O. Tire Cooling Structure [P]. USA: USP 4 381 026, 1983-11-06.
- [25] Becker J H. Air Duct for Cooling Rotating Tires[P]. USA: USP 6 260 911, 2001-07-17.
- [26] Hsu S. Vehicle Tire with Air Circulation Arrangement[P]. USA: USP 6 343 635, 2002-02-05.
- [27] Rayman W E. Two Piece Tire with a Convective Cooling System[P]. USA: USP 6 619 351, 2003-09-16.
- [28] 王军. 热管技术在化学反应器中的应用研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.
- [29] Ocone L R. Wheel Assembly with Tire Cooling Means[P]. USA: USP 3 675 699, 1972-07-12.

收稿日期: 2013-10-30

兰州石化开发 20 余种橡胶新品

中图分类号: TQ333.1; TQ333.7 文献标志码: D

2013 年, 兰州石化公司合成橡胶厂大力开发新产品, 生产新、特、优、专产品 20 多种, 其中耐热、耐寒、阻燃和高抗冲击等新产品受到市场欢迎。

该厂立足现有丁苯橡胶(SBR)和丁腈橡胶(NBR)装置, 加大合成橡胶新、特、专产品的研发和生产力度, 完成了环保型 NBR(3305E)和硬质 NBR(1704, 2707 和 3604)的工业化生产。根据客户需求, 定制生产充油 SBR(1778E)及液体橡胶等新产品。2013 年生产橡胶专用料 14 300 t, 占橡胶总产量比例达 8.62%, 创历史最好水平。

SBR1778E 致癌物含量低, 有效降低了后加工过程对人体的伤害和环境污染, 是一种环保型

橡胶产品, 但此前国内尚未大批量生产。了解到这一市场信息后, 该厂立即组织产品研发, 在 10 万 $t \cdot a^{-1}$ 的 SBR 装置上严格按照环保型橡胶技术经济指标配方组织生产, 产品满足了用户要求, 成为企业新的效益增长点。

2013 年该厂开发了 4 个新牌号 NBR 产品, 全部通过质量检测。其中, 利用 5 万 $t \cdot a^{-1}$ 的 NBR 装置开发的 NBR3305E 完全满足用户对产品环保性的要求。

该厂还凭借在特殊牌号橡胶产品研发上的优势, 通过改变凝聚温度、洗涤槽搅拌速度和洗涤水流量等条件, 生产出硬质 NBR1704, NBR2702 和 NBR3604 等产品, 满足了特种领域的需要。

(摘自《中国化工报》, 2014-02-28)