全钢载重子午线轮胎稳态温度场与耐久性能的关系分析

樊军伟[1],姜　震[2*],周海超[2],李　昭[1],王国林[2],杨　建[1,2]

(1. 风神轮胎股份有限公司,河南 焦作　454003;2. 江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江　212013)

摘要:对全钢载重子午线轮胎稳态温度场和温度梯度进行分析和计算,结合实际轮胎耐久性能测试结果和断面破坏形式,得出轮胎稳态温度场与耐久性能的关系。结果表明:轮胎断面破坏区域裂纹方向与该区域温度梯度模的最大值反方向高度吻合;轮胎寿命与轮胎破坏区域最高温度呈反比关系。

关键词:全钢载重子午线轮胎;稳态温度场;耐久性能;有限元分析

中图分类号:TQ336. 1;O241. 82　　**文章编号**:1006-8171(2019)10-0579-04

文献标志码:A　　**DOI**:10. 12135/j. issn. 1006-8171. 2019. 10. 0579

国内载重轮胎市场面临着超压、超载的恶劣使用环境[1],对载重子午线轮胎的耐久性能提出了更高要求。特别是在高速行驶中,轮胎每分钟要承受300次以上的周期变形,轮胎温度可升高到130 ℃,甚至高达150 ℃[2-3],温度升高会影响橡胶材料的物理性能,缩短轮胎的疲劳寿命,热是引起橡胶类制品破坏的主要因素之一。K. Muniandy等[4]通过对影响橡胶疲劳寿命因素的研究发现温度升高会加快橡胶材料的疲劳和老化,加速轮胎的破坏。Y. Liu等[5]和B. L. Lee等[6]发现带束层复合材料温度与疲劳寿命之间存在一定线性关系。薛虎军[7]发现生热低、导热好、耐热性能好的轮胎具有更长的寿命。王国林等[8]系统研究了轮胎橡胶热学参数对温度场的影响,可为橡胶配方设计提供参考。 F. Stadlbauer等[9]采用热成像技术研究了橡胶裂纹扩展方向与温度之间的关系。

温度梯度在轮胎疲劳寿命分析和预测方面的研究目前还鲜有报道。本工作采用有限元方法对两种载重子午线轮胎进行温度梯度分析计算,结合实际轮胎耐久性能测试结果和断面破坏形式,建立温度梯度与耐久性能和断面破坏形式的关系,从而为高耐久性能轮胎的结构设计提供理论指导。

1　轮胎稳态温度场有限元分析

以11. 00R20和12. 00R20全钢载重子午线轮胎为研究对象,针对轮胎稳态温度场进行分析,分析流程如图1所示。

轮胎稳态温度场分析包括轮胎各部位热学参数测定、轮胎静态加载及滚动有限元分析和轮胎温度场有限元分析3个步骤,均基于Abaqus软件完成,具体的分析过程见文献[10-12]。

轮胎温度场仿真结果如图2所示。

由图2轮胎温度场计算结果可知,两种规格轮胎胎肩和胎圈处都是高温区域。在轮胎的行驶过程中,胎肩部位产生较大的热量,胎圈部位也因为频繁压缩变形而生热;热量积累一定时间后,胎圈内部聚集的热量散发不出去,造成轮胎温度升高。轮胎的主要破坏部位大都集中在胎肩和胎圈处,这与轮胎的温度场分布情况一致。

2　轮胎温度场与耐久性能的关系

2. 1　温度场与裂纹方向的关系

以12. 00R20全钢载重子午线轮胎为例,其温度场计算结果如图3(a)所示。提取胎圈处的温度场,发现高温区域位于胎圈的胎体反包端部,与实际破坏断面的疲劳破坏区域具有很高的一致性,

作者简介:樊军伟(1983—),男,河南焦作人,风神轮胎股份有限公司工程师,学士,主要从事轮胎研发工作。

*通信联系人(1396766658@qq. com)

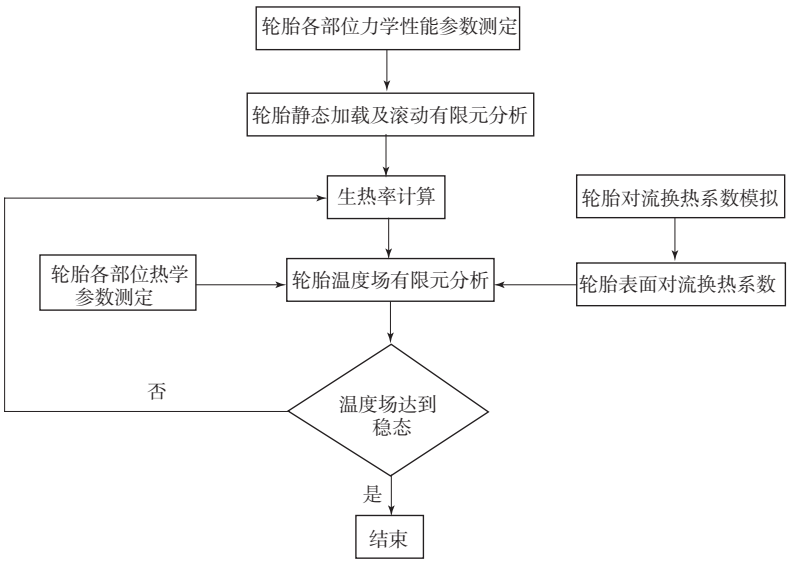
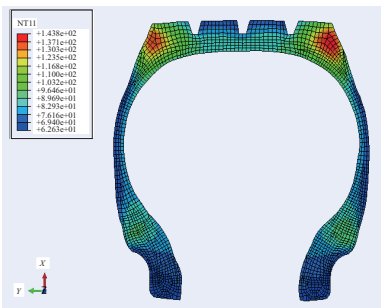
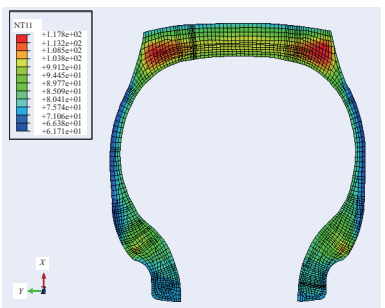


图1 轮胎稳态温度场分析流程

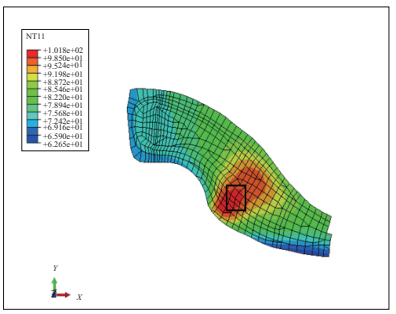


(a)11.00R20

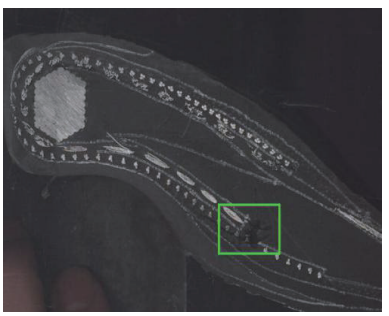


(b)12.00R20

图2 轮胎断面温度分布



(a)胎圈处的高温区域



(b)轮胎初始破坏部位

图3 初始破坏位置的判断

如图3(b)所示。

根据温度场的分析结果进行温度梯度(T_G)计算,提取节点坐标(x,y)及其对应的温度值,运用插值法将其描述为二元函数$z=f(x,y)$,用MATLAB编程进行曲面拟合,其中x,y为坐标,z为该坐标上的温度值,此曲面被平面$z=c$所截得的等温曲线方程为

$$\begin{cases} z=f(x,y) \\ z=c \end{cases} \tag{1}$$

等温线$f(x,y)=z$上任一点(x,y)处的T_G如下:

$$T_G=\frac{\partial f}{\partial x}i+\frac{\partial f}{\partial y}j \tag{2}$$

温度梯度与等温线的关系为：函数$z=f(x,y)$在点$P=(x,y)$的梯度方向与等温线$f(x,y)=z$在该点处的方向相同，且从数值较低的等温线指向数值较高的等温线，梯度的模为法线方向导数的最大值。

提取轮胎胎圈破坏的温度计算结果并计算该区域的温度梯度，分析轮胎疲劳裂纹方向与温度梯度的关系。胎圈处的T_G二维矢量图、T_G模最大值及其方向的计算结果见图4。

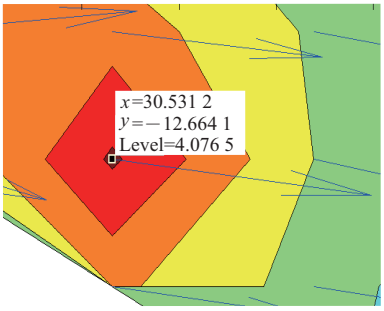


图4　胎圈处 T_G 二维矢量图

T_G模最大值方向为温度上升最快方向，反之则为温度下降最快方向。有限元模型上标注的T_G模最大值方向与实际断面裂纹方向的对比见图5。由图5可以发现，T_G模最大值的反方向与该处裂纹方向高度吻合，可见，裂纹方向与温度下降的最快方向是一致的。

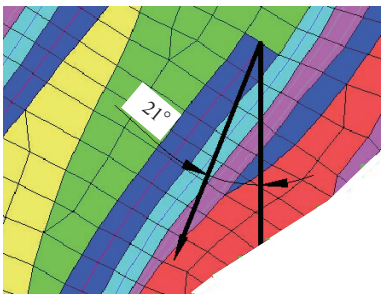
对其余11条经耐久性试验破坏的轮胎进行相应的分析，结果见表1。由表1可知，无论是胎圈还是胎肩，轮胎初始破坏部位都位于高温区域附近，且裂纹方向与温度下降的最快方向（T_G模的最大值反方向）一致。因此，用T_G对轮胎进行疲劳寿命评价具有有效性。

2.2　温度与轮胎疲劳寿命的关系

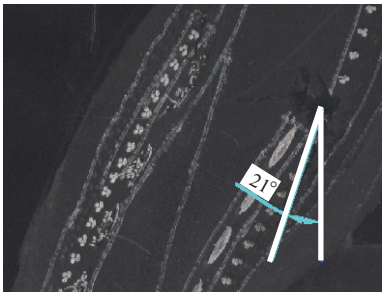
选取11.00R20和12.00R20两种类型共12条全钢载重子午线轮胎，统计破坏区域的最高温度，研究破坏部位的最高温度与轮胎疲劳寿命之间的关系，结果见表2。由表2可知，轮胎疲劳寿命与破坏区域的最高温度成反比，即温度越高，疲劳寿命越短。

3　结论

（1）采用数值仿真方法进行载重子午线轮胎温度场的计算，得到轮胎二维断面温度分布图，可视化呈现了轮胎稳态温度场的分布特性，结果显示胎肩和胎圈为轮胎破坏的主要区域。



（a）T_G模最大值方向



（b）实际断面中的裂纹方向

图5　裂纹方向判断

表1　11.00R20和12.00R20轮胎的裂纹方向

轮胎编号	温度梯度角度/(°)	裂纹方向角度/(°)	是否对应
11.00R20			
1	13	13	是
2	13	13	是
3	29	29	是
4	15	15	是
5	37	37	是
6	9	9	是
12.00R20			
1	10	10	是
2	35	35	是
3	82	82	是
4	13	13	是
5	20	20	是

（2）根据温度场仿真结果，计算了轮胎断面的温度梯度，对比分析了有限元分析结果与轮胎耐久性试验断面，发现破坏区域的裂纹方向与该区域的温度梯度模的最大值反方向高度吻合；轮胎寿命与轮胎破坏区域最高温度呈反比关系，温度越高，轮胎寿命越短。

表2 11.00R20和12.00R20轮胎疲劳寿命统计

轮胎编号	破坏部位	破坏区域最高温度/℃	裂纹是否沿梯度方向	寿命/h
11.00R20				
1	右侧胎肩	120.3	是	53.9
2	右侧胎肩	143.8	是	35.8
3	左侧胎肩	105.5	是	64.3
4	右侧胎圈	101.8	是	45.1
5	左/右侧胎圈	102.0/103.7	是	44.5
6	左侧胎圈	107.1	是	40.2
12.00R20				
7	左/右侧胎圈	98.8/96.2	是	96.3
8	右侧胎圈	101.6	是	85.7
9	右侧胎圈	94.7	是	107.0
10	左侧胎肩	108.5	是	93.5
11	左侧胎肩	112.5	是	88.4
12	右侧胎肩	121.5	是	83.6

参考文献：

[1] 冯希金. 轮胎疲劳寿命研究的进展[J]. 橡胶科技市场，2005，3(6)：8-12.

[2] 李治国. 高性能轮胎胎面胶用ESBR复合材料动态力学性能及导热性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2012.

[3] Kerchman V，Shaw C. Experimental Study and Finite Element Simulation of Heat Build-up in Rubber Compounds with Application to Fracture[J]. Rubber Chemistry and Technology，2003，76(2)：386-404.

[4] Muniandy K，Ismail H，Othman N. Effect of Filler Loading on Thermal Aging and Fatigue Life of Rattan Powder Filled Natural Rubber Composites[A]. 2011 National Postgraduate Conference[C]. NJ USA：IEEE，2011：1-4.

[5] Liu Y，Wan Z，Tian Z，et al. Fatigue of Unidirectional Cord-Rubber Composites[J]. Tire Science and Technology，1999，27(1)：48-57.

[6] Lee B L，Liu D S，Chawla M，et al. Fatigue of Cord-Rubber Composites[J]. Rubber Chemistry and Technology，1994，67(5)：761-774.

[7] 薛虎军. 充气轮胎配方设计 第10讲 轮胎的生热及其对寿命的影响[J]. 轮胎工业，1995，15(10)：620-626.

[8] 王国林，徐海青，梁晨，等. 轮胎胶料热物性参数对温度场的影响研究[J]. 橡胶工业，2017，64(7)：435-440.

[9] Stadlbauer F，Koch T，Planitzer F，et al. Setup for Evaluation of Fatigue Crack Growth in Rubber：Pure Shear Sample Geometries Tested in Tension-compression Mode[J]. Polymer Testing，2013，32(6)：1045-1051.

[10] 孙砚田，王国林，梁晨，等. 计及外流场的子午线轮胎温度场建模方法[J]. 机械科学与技术，2017，36(7)：985-990.

[11] 王国林，董大鹏，何志刚，等. 全钢载重子午线轮胎稳态温度场试验及仿真分析[J]. 橡胶工业，2009，56(9)：557-561.

[12] 佟林宝. 基于ABAQUS的轮胎稳态滚动温度场分析软件的开发及研究[D]. 广州：华南理工大学，2016.

收稿日期：2019-05-05

Analysis on Relationship between Steady-state Temperature Field and Durability of Truck and Bus Radial Tire

FAN Junwei[1]，*JIANG Zhen*[2]，*ZHOU Haichao*[2]，*LI Zhao*[1]，*WANG Guolin*[2]，*YANG Jian*[1,2]

（1. Aeolus Tyre Co.，Ltd，Jiaozuo 454003，China；2. Jiangsu University，Zhenjiang 212013，China）

Abstract：The steady-state temperature field and temperature gradient of truck and bus radial tire were analyzed and calculated，and the relationship between the steady-state temperature field and durability of tire was obtained by combining the actual test results of tire durability and the failure form of the cross section. The results showed that the crack direction in the failure zone of the tire cross section coincided with the reverse direction of the maximum temperature. The tire life was inversely proportional to the maximum temperature in the tire failure zone.

Key words：truck and bus radial tire；steady-state temperature field；durability；finite element analysis

欢迎订阅《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》杂志