

用有限元分析软件Abaqus模拟子午线轮胎胎侧裂口扩展情况

林娟颖, 刘晓颖*, 蔡伯阳

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:用有限元分析软件Abaqus模拟分析不同胎压下子午线轮胎胎侧裂口的扩展情况。结果表明:随着胎压增大,J积分最大值增大;当胎压较小时,J积分最大值出现在裂口尖端方向0°附近,J积分最大值近似线性增长;当胎压较大时,裂口扩展方向发生变化,J积分最大值的增长速度明显放缓并趋于极值。

关键词:子午线轮胎;胎侧;裂口;有限元分析;Abaqus;J积分

中图分类号:TQ336.1;O242.21 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-5448(2017)04-20-05

轮胎作为汽车、飞机等运输工具的重要组成部分之一,主要功能是支撑负荷、传递制动力、驱动力和转向力,以及缓冲减振等^[1]。轮胎性能直接影响汽车行驶的安全性、经济性、舒适性及运输效率。轮胎充气压力(胎压)对汽车的性能和动力有着至关重要的作用。如果胎压不适当,会给车辆造成极大的安全隐患,易出现爆胎,引发事故。因此,胎压对轮胎应力-应变分布的影响是重点研究的问题。

目前很多学者对橡胶开裂问题进行了研究。李志超等^[2]基于开裂能理论,对橡胶制品进行疲劳分析。结果表明,当橡胶制品处于复杂应力状态下,其开裂方向以及疲劳寿命不仅与最大开裂应变能有关,与最小开裂应变能也有密切的关系。李凡珠等^[3]基于橡胶材料的应力-应变曲线,通过有限元分析软件Abaqus对17种高弹性本构模型进行拟合,并分析了含裂口的纯剪切试样裂口尖端的J积分(路径无关积分)。结果表明,不同高弹性本构模型的J积分值差别较大。杜秀华等^[4]通过有限元方法,对橡胶组件进行疲劳分析,对裂口成核法、裂口扩展法和S-N曲线法进行总结,并分析了这3种方法的选择依据。杨荣华等^[5]基于断裂力学的

方法和理论,结合弹性体等效应力计算方法,用软件Abaqus分析了橡胶球铰的疲劳裂口扩展。结果表明,橡胶球铰经过200万次疲劳试验后无明显裂口,未出现失效破坏。姚鸿等^[6]对天然橡胶疲劳裂口扩展形态进行追踪,研究炭黑用量对天然橡胶开裂形态的影响。结果表明,天然橡胶裂口扩展速率随着炭黑用量增大而降低。刘霞^[7]通过疲劳裂口增长试验,分析防老剂对填料填充丁苯橡胶(SBR)胶料疲劳裂口扩展的影响。结果表明,研究防老剂对SBR胶料疲劳裂口扩展影响的试验温度必须达到临界温度(如80℃)以上。王智宇等^[8]通过软件Abaqus对橡胶-钢丝粘界面进行有限元分析,分析粘界面开裂前和沿裂口扩展方向的层间应力-应变。结果表明,粘界面应变能释放率随裂口长度增加而先增大后减小,且存在极值。

以上研究对象多为纯胶胶料或单一材质的橡胶制品,目前对于由多种材质组合而成的轮胎裂口扩展情况研究较少。轮胎在使用过程中如果出现裂口,不仅会加速损坏,缩短使用寿命,还会影响行驶安全。

本工作以175/70 R1477S子午线轮胎为研究对象,采用软件Abaqus研究不同胎压下胎侧裂口的扩展情况。

1 断裂力学与J积分

经半个多世纪的发展,断裂力学作为一个研

基金项目:福建省青年基金资助项目(2017J05006);泉州市科技项目(2014Z115);华侨大学科研启动基金资助项目(11BS412);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511303044)

作者简介:林娟颖(1993—),女,福建福州人,华侨大学在读硕士研究生,主要从事机械设计和理论及仿真模拟等方面的研究。

*通信联系人

究领域已经相当成熟。通过对断裂力学的研究,人们更充分地认识和理解材料中裂口的产生、扩展和最终破坏过程,并为结构损伤容限设计提供了理论基础。

断裂力学中有3个最基本的参数,即应力强度因子、J积分和应变能释放率。其中J积分描述的是由于裂口的存在所吸收的能量,J积分作为一个处理非线性断裂问题的参数,基于能量守恒定律,对裂口尖端应力奇异性的依赖程度相对较小,即不需要对裂口尖端的单元进行特殊处理^[9-10]。

J积分路径是任意一个围绕裂口尖端的逆时针回路,如图1所示。

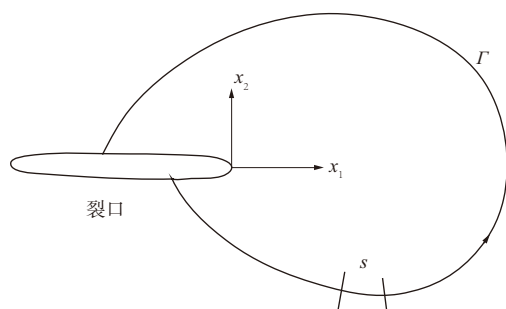


图1 J积分路径

J积分的计算公式见式(1)。

$$J = \int_{\Gamma} \left(\omega dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) ds \quad (1)$$

式中, J 为J积分值, Γ 为路径, ω 为应变能密度因子, T_i 为张力矢量分量, u_i 为位移矢量分量, s 为 Γ 上的弧长。

ω 和 T_i 的计算公式分别见式(2)和式(3)。

$$\omega = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$T_i = \sigma_{ij} n_j \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量, ε_{ij} 为应变张量, n_j 为 Γ 的外法线单位法向矢量。

2 子午线轮胎胎侧裂口的有限元分析

2.1 建立数学模型

轮胎的损坏形式很多,如爆破、内裂、脱层、裂口和胎圈钢丝刺出等,子午线轮胎胎侧裂口外观如图2所示。本工作主要针对子午线轮胎胎侧裂口进行有限元模拟分析。

建立子午线轮胎胎侧裂口的数学模型,需在胎侧内部靠近帘布层处预制一个长度为0.5 mm的

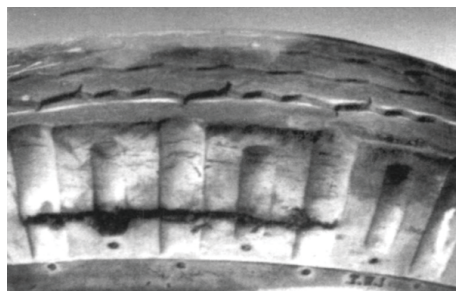


图2 子午线轮胎胎侧裂口外观

裂口,并在此基础上进行裂口扩展趋势分析,通过不同角度的裂口尖端的J积分来确定裂口附近应力-应变的趋势,分析裂口的扩展趋势与稳定性。因轮胎具有对称性,只需对半个子午线轮胎进行分析即可。

含预制裂口的子午线轮胎网格划分与预制裂口网格局部细化如图3和4所示。以垂直方向作为裂口扩展的参考方向,以逆时针旋转的方向为裂口尖端角度的正方向,分别以 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 为裂口尖端方向角度建立数学模型。

2.2 有限元分析

2.2.1 材料本构选取

子午线轮胎主要材料为橡胶,胎面胶、胎侧

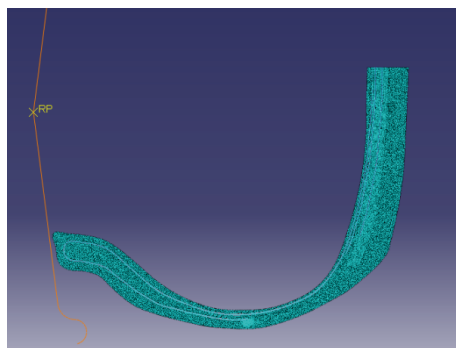


图3 含预制裂口的子午线轮胎网格划分

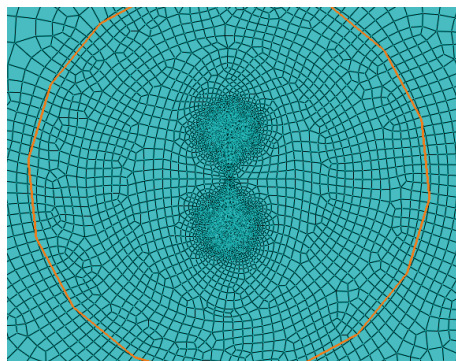


图4 预制裂口网格局部细化

胶、胎体胶、三角胶均用超弹性材料Neo Hooke模型表征,其密度为 $1.1 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2.2 边界条件与胎压

在实际使用中,轮胎与轮毂接触且相对静止,而轮毂可视为刚体,所以对轮毂施加全约束。在充气条件下,对轮胎与轮毂接触的位置先进行接触分析。

本工作选取的子午线轮胎正常胎压为0.25 MPa,因此施加0.16~0.34 MPa的胎压。

2.2.3 有限元分析结果

在软件Abaqus中定义裂口相关参数后,通过相应模块定义输出变量即可得到J积分。两个裂口尖端位置及方向见图5,Crack1和Crack2分别代表裂口尖端1和2。

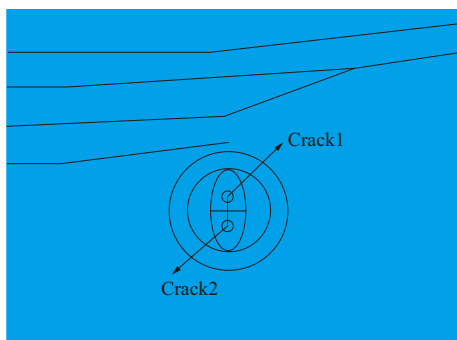


图5 裂口尖端位置及方向

正常充气轮胎的Mises应力见图6,胎压为0.24 MPa时的裂口见图7。

从图6可以看出,正常充气轮胎的最大应力位置在轮胎与轮毂接触处。从图7可看出,胎压为0.24 MPa时,裂口已明显扩展。

针对不同裂口尖端方向,用软件Abaqus分别对不同胎压下的轮胎进行模拟仿真,得到J积分值,结果如图8—10所示。

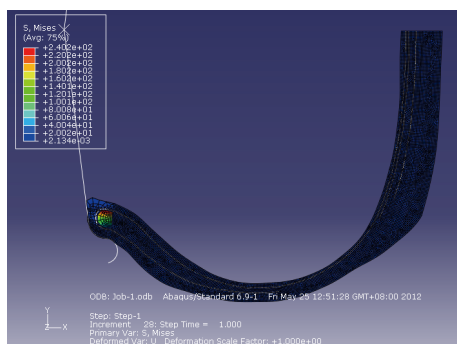


图6 正常充气轮胎的Mises应力

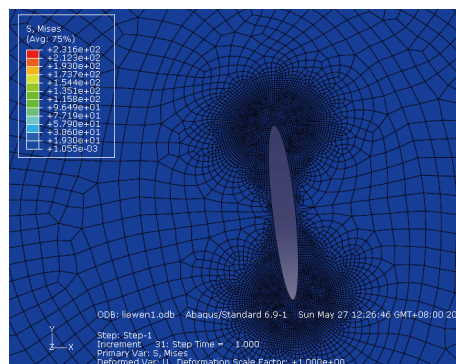
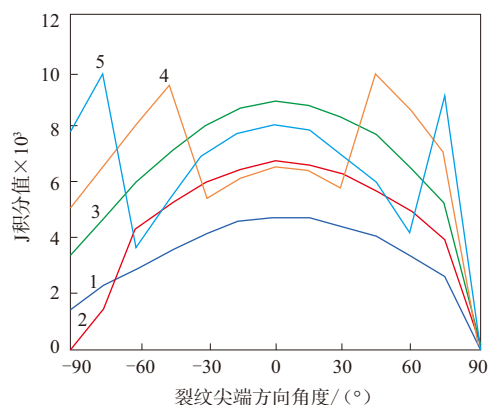
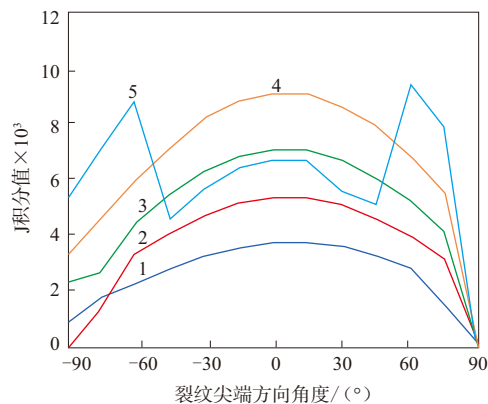


图7 胎压为0.24 MPa时的裂口



胎压 (MPa): 1—0.16; 2—0.20; 3—0.24; 4—0.28; 5—0.34。

图8 Crack1的J积分值



注同图8。

图9 Crack2的J积分值

从图8可以看出:在胎压为0.16,0.20,0.24 MPa时,J积分最大值都出现在裂口尖端方向 0° 附近,且随着胎压增大,J积分值相应增大;当胎压为0.28和0.34 MPa时,J积分最大值对应的裂口尖端方向改变(分别在裂口尖端方向 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 75^\circ$ 附近),说明裂口扩展方向发生变化,且胎压增大,裂口扩展角度增大。

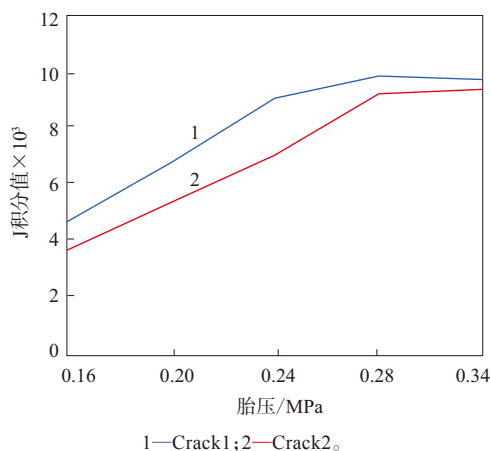


图10 Crack1与Crack2的J积分最大值随胎压的变化趋势

从图9可以看出:在胎压为0.16, 0.20, 0.24, 0.28 MPa时, J积分最大值都出现在裂口尖端方向 0° 附近, 且随着胎压增大, J积分值相应增大; 当胎压为0.34 MPa时, J积分最大值对应的裂口尖端方向改变(在裂口尖端方向 $\pm 60^\circ$ 附近), 说明裂口扩展方向发生变化。

从图8和9还可以看出, 随着胎压增大, J积分最大值增大, 但都小于极值0.01, 由此可以很好地预测子午线轮胎在胎侧裂口存在下保持工作能力的最佳胎压。

从图10可以看出:随着胎压增大, J积分最大值增大; 当胎压小于0.24 MPa时, Crack1与Crack2的J积分最大值近似线性增长; 当胎压大于0.24 MPa时, J积分最大值的增长速度明显放缓, 趋于0.01。

3 结论

通过软件Abaqus模拟分析了不同胎压下子午线轮胎胎侧裂口的扩展趋势, 通过计算求出J积分值, 得出如下结论。

(1) 随着胎压增大, J积分最大值增大, 但不超过0.01。

(2) 当胎压较小时, J积分最大值出现在裂口尖端方向 0° 附近; 当胎压较大时, 裂口扩展方向发生变化。

(3) 当胎压较小时, J积分最大值近似线性增长; 当胎压较大时, J积分最大值的增长速度明显放缓并趋于极值。

本工作为防止子午线轮胎胎侧裂口迅速扩大提供了理论基础, 为调整子午线轮胎正常工作胎压和出现胎侧裂口时的胎压提供了指导, 对工程人员进行子午线轮胎结构优化设计和新型子午线轮胎开发起到积极作用。

参考文献:

- [1] 黄永祥. 轮胎使用损坏分析[J]. 轮胎工业, 2011, 31(1): 46-53.
- [2] 李志超, 危银涛, 金状兵, 等. 基于裂口形核理论的橡胶制品疲劳研究[J]. 弹性体, 2014, 24(6): 28-34.
- [3] 李凡珠, 张树柏, 刘金朋, 等. 本构方程对橡胶材料裂口尖端J积分有限元分析结果的影响[J]. 合成橡胶工业, 2015, 38(1): 30-35.
- [4] 杜秀华, 韩佳轩, 叶卫东. 橡胶构件疲劳寿命的研究方法概述[J]. 橡胶工业, 2014, 61(2): 121-125.
- [5] 杨荣华, 丁智平, 黄友剑, 等. 橡胶球铰疲劳裂口扩展寿命预测[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(2): 48-53.
- [6] 姚鸿, 翁更生, 刘衍朋, 等. 炭黑对天然橡胶疲劳裂口扩展形态的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(12): 78-83.
- [7] 刘霞. 防老剂对含填料SBR胶料疲劳裂口扩展行为的影响[J]. 世界橡胶工业, 2016, 11(1): 5-9.
- [8] 王智宇, 王安稳. 橡胶-钢粘接界面断裂问题非线性有限元分析[J]. 海军工程大学学报, 2014, 4(1): 6-9.
- [9] Rice J R. Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture[J]. Fracture: An Advanced Treatise, 1968, 3(2): 191-311.
- [10] 冷毅, 李青侠, 刘胜, 等. 基于无线传感器和CAN总线的直接式轮胎压力监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 711-717.

收稿日期: 2017-02-16

Simulation of Crack Propagation of Radial Tire Sidewall by Finite Element Analysis Software Abaqus

LIN Juanying, LIU Xiaoying, CAI Boyang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The crack propagation of radial tire sidewall under different tire pressures was simulated by

finite element analysis software Abaqus. The results showed that as the tire pressure increased, the maximum value of J integral increased. When the tire pressure was low, the maximum value of J integral appeared near the direction of the crack tip 0° and the maximum value of J integral increased approximately linearly. When the tire pressure was high, the crack propagation direction changed, and the growth rate of the J integral value slowed down and J integral value tended to the extreme value.

Key words: radial tire; sidewall; crack; finite element analysis; abaqus; J integral

软控荣获全球制造安全卓越奖

中图分类号:TQ330.4 文献标志码:D

2017年2月22日,第4届全球制造安全卓越奖亚太区颁奖仪式在北京隆重举行,软控股份有限公司作为亚太区唯一获此殊荣的企业,接受了罗克韦尔自动化有限公司副总裁、安全及传感业务总经理Elik Fooks先生代表评选委员会的颁奖。

软控股份是全球橡胶机械行业的领军者,主要为橡胶轮胎生产企业提供各种关键装备及应用软件,并广泛涉足自动化物流、物联网、化工装备、橡胶新材料等领域。自2010年软控股份向中高端市场转型以来,机械设备产品的安全设计水平 and 安全管理(包括客户施工现场和软控车间的安全管理)能力逐步提升,已得到整个行业的广泛认可。

据软控研究院相关负责人介绍,自2012年开始,软控股份的国际高端客户逐渐增多,这些客户对设备除了功能性等基本需求外,还提出了设备安全性、可靠性、可维护性(RMS)等多方面的要求。也正是在与高端客户的互动过程中,安全理念在软控股份逐步深入人心。在软控股份,无论是设计制造还是现场管理,设备安全作为首要考虑的因素,覆盖了设备从厂内安装、调试到客户端使用、维护等全生命周期。不仅如此,软控股份还有专门的团队在持续开展设备可靠性、可维护性、数值模拟仿真技术、流体技术、输送技术等基础技术的研究,并加以应用,从设计根源上发现、解决并预防设备显性故障以及潜在风险问题。通过系统工程的应用,保障产品研发一次成功并在客户端使用稳定、表现优异。软控股份的上辅机、小料

秤、成型机、裁断机、内衬层、硫化机、炼胶装备等产品均已进入国际高端市场。

该负责人还谈到,基于高端客户的需求,加之与罗克韦尔自动化、德国TUV等合作伙伴的深入合作,软控股份已形成了符合国际市场要求、切合产品实际应用的企业标准,并以此来指导新一代产品的研发和升级,而且已同诸多国际高端客户建立了共同研发的机制。目前,软控股份的核心产品中,满足CE标准的安全解决方案覆盖率已达到100%。基于此,软控股份可针对不同地域以及客户的实际情况,对解决方案进行演绎、升级,快速满足高端客户对产品设计的需求。

据了解,软控股份作为中国机械安全标准化技术委员会委员单位,参与了多项全国机械安全基础标准的制修订工作,同时培养了一支专业化的机械安全工程师队伍,拥有极其丰富的安全解决方案策划经验和安全项目实施经验,结合德国TUV等国际认证公司的权威标准解读,可以为各行业提供安全风险评估、产品安全解决方案策划、产品认证、安全工业服务等方面的机械安全项目服务。

全球制造安全卓越奖始于2013年,由世界最大的工业安全服务与方案供应商罗克韦尔自动化发起,旨在表彰基于三大关键支柱(坚实的安全文化基础、妥善执行的规程以及通过资金投入实现现代安全防护和自动化技术的有效利用)建立综合性安全方案的企业,评选由来自ISO/IEC以及其他一些国际组织的专家完成,宝洁、通用、固特异等公司曾获该奖项。

(黄丽萍)

欢迎在《橡胶科技》《橡胶工业》《轮胎工业》上刊登广告