

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.020

子午线轮胎胎圈裂纹的有限元分析

张宁, 林娟颖, 刘晓颖, 邢立杰, 郝艳华
(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 轮胎内部的稳定对汽车行驶的安全性起着极其重要的作用, 气压过高和过低都会影响车身稳定性, 从而引发交通事故。米其林公司发明的子午线轮胎具有操纵稳定性好、滚动阻力小、耐磨性好、高速性能好等卓越的使用性能, 使其成为众多企业和研究机构研究和优化的方向。针对子午线轮胎在充气工况下胎圈裂纹扩展趋势及扩展角度问题, 建立了子午线轮胎有限元模型, 确定了模型材料、边界条件及载荷情况。运用有限元软件对子午线轮胎充气过程进行动态仿真, 得出充气完成时刻的 Mises 应力分布图。分析结果表明: 轮胎在充气完成时刻的最大应力发生在胎圈部; 在轮胎胎圈部分易产生裂纹处出现不同初始倾角的等长裂纹, 计算出裂纹尖端周围沿不同方向扩展时的 J 积分值。根据所得数据判断裂纹尖端的开裂方向, 并分析出裂纹尖端正方向的 J 积分和裂纹尖端开裂方向随初始倾角的变化规律: 裂纹尖端在一定区间内开裂, 且开裂方向及 J 积分峰值随初始倾角周期性波动。有限元分析结果与实际轮胎胎圈裂纹损坏情况基本一致, 加深了对轮胎损伤机理内在本质规律的理解, 为工程人员进行轮胎结构优化以及开发新型轮胎起到一定的理论指导作用。

关键词: 汽车工程; 子午线轮胎; 有限元法; J 积分; 胎圈裂纹; 裂纹扩展

中图分类号: TQ336.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 04-0144-07

Finite Element Analysis on Bead Crack in Radial Tire

ZHANG Ning, LIN Juan-ying, LIU Xiao-ying, XING Li-jie, HAO Yan-hua

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

Abstract: The stability of the inside of tire plays a very important role in the vehicle safety, both high air pressure and low air pressure affect the stability of vehicle body, thus causing traffic accidents. The radial tires of Michelin company have excellent operating stability, small rolling resistance, good wear resistance, good high-speed performance, etc., which makes it the research and optimization direction of many enterprises and research institutions. Aiming at the problem of radial tire bead crack propagation tendency and expanding angle under the condition of inflation, a finite element model of radial tire is established to determine the material, boundary condition and load of the model. The dynamic simulation of radial tire inflation process is carried out by using FE software, and the Mises stress distribution at the inflation completion time is obtained. The analysis result shows that (1) the maximum stress of tire at the completion time of inflation occurs in the bead; (2) in the tire bead part it is easy to produce different initial angled isometric cracks where cracks are prone to occur, and the J integral values when the crack extending around crack tip along different directions are calculated. According to the obtained data, the crack orientation of the crack tip is determined, and the change rules of the J integral of the forward direction of the crack tip and the crack tip orientation with the initial dip angle are analyzed. It shows that the crack tip cracks in a certain

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51575196); 福建省青年基金项目 (2017J05006); 华侨大学科研启动基金项目 (11BS412); 华侨大学专业学位研究生课程案例库建设项目 (18YJC25); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目 (17014080027)

作者简介: 张宁 (1992-), 男, 福建屏南人, 硕士研究生. (240377825@qq.com)

interval, the crack direction and the J integral peak fluctuate with the initial dip angle. The FE analysis result is basically the same as the actual tire bead crack damage, and it deepened the understanding of the inherent essential law of tire damage mechanism, which can be used as a theoretical guidance for the engineers to optimize the tire structure and develop new tires.

Key words: automobile engineering; radial tire; finite element method; J integral; bead crack; crack propagation

0 引言

轮胎作为汽车、飞机、工程机车等交通工具中唯一与地面直接接触的部件,其主要功能是支撑机身的重量,在行驶过程中起到传动并控制转弯的作用,并且轮胎内充填的空气能够有效缓冲路面的冲击力。因此,保持轮胎内部气压的稳定对汽车行驶的安全性能起着至关重要的作用。胎压过高不仅会影响轮胎的减震性能,还会加大轮胎与地面的摩擦力,形成早期磨损;胎压过低不仅容易导致左右胎压不均匀,影响车身的稳定性和安全性,而且会引起轮胎的不均匀磨损,当轮胎高速运转时,会因过度发热而引起爆胎,容易引发交通事故。因此,分析轮胎充气过程、充气完成时刻及轮胎滚动情况下的应力应变分布情况是国内外学者一直研究的重点^[1]。

1 相关研究概述

众所周知,1948年,法国米其林公司申请了子午线轮胎的专利,这一想法为轮胎行业开辟了一条崭新的道路,开启了一场真正的技术革命。子午线轮胎由于具有操纵稳定性好、滚动阻力小、耐磨性好、生热低、耐疲劳性能好、高速性能好等优势,因此具有卓越的使用性能,这促使国内外各大研究机构及企业在子午线轮胎的研究上投入大量的科研力量。

关于轮胎力学问题的探讨,第一篇较为系统的研究论文是美国的相关学者于1952年发表的。随后,英、美、日、德、前苏联、捷克等国家渐渐开始重视轮胎力学问题。其力学分析理论的发展经过了网格理论、薄膜理论、薄壳理论到有限元分析理论,其分析结果越来越趋于完善。

最初的网格理论,如崔胜民^[2]通过神经网络理论建立的轮胎侧向力神经网络模型,其研究结果表明,此模型具有精度高的特点,为轮胎力学的研究提供了一定的基础。通过网格分析法能近似地计算轮胎变形及应力分布情况,但忽略了帘线外附橡胶对轮胎的作用力,也忽略了胎圈部和多层结构对轮

胎变形的影响,因此结果并不准确。针对网格模型存在的不足,薄膜理论考虑了橡胶对轮胎的作用,比之网格理论,薄膜理论更加近实际情况。贺海留等^[3]在分析薄膜理论的基础上,估计了子午线轮胎的临界速度,并以此研究轮胎径向阻尼对车轮临界速度的影响。结果表明,应用薄膜理论估计出的子午线轮胎临界速度具有真实可靠性。宋贤海^[4]以网格理论与薄膜理论结合的薄膜网格理论设计了轮胎轮廓,此方法设计的轮胎成品性能较以往有很大的提升。由于当时有限元发展受到科学技术的限制,有限元建模与求解需要花费大量的时间与费用,为了解决这个问题,袁春元等^[5]以网格理论、薄膜理论、层合板理论为依据,设计了汽车空气弹簧橡胶气囊结构,并通过ABAQUS进行了有限元分析,结果吻合且提高了效率。但薄膜理论在轮胎上的分析应用十分有限,不能分析轮胎的几何形状、材料性能及载荷突变等情况,因此并没有太多的优越性。接着便出现了薄壳理论,在薄膜理论的基础上考虑了弯曲因素,但由于轮胎结构比较复杂,薄壳理论无法直接应用于轮胎分析中。

随着计算机技术的发展,有限元法以其自身强大的优势广泛应用于各个行业中,胡小弟等^[6]采用有限元法对不同车辆及其轮载作用力的均匀和非均匀分布情形下沥青路面的力学响应进行了分析,比较了轮胎作用于路面的不规则、不均匀性对路面的力学影响的差异。黄晓明等^[7]应用ANSYS建立了包括橡胶胎面和柔性路面结构的有限元模型,探讨了车辆处于自由滚动和紧急制动过程中在不同轮胎路面界面摩擦系数下的胎面、路表的变形特性和接触应力分布状态、摩擦特性。20世纪70年代,美国和日本各大公司就已采用有限元法来分析轮胎结构中的力学问题。随后,有限元法在轮胎中的应用越来越普遍。如路永婕等^[8]根据全钢载重子午线轮胎12.00R20的实际结构,应用有限元法建立了轮胎的三维模型,并通过轮胎径向刚度的测试验证了模型的有效性。在数值模拟中分析了轮胎在一定充气压力时,在不同垂直载荷和牵引速度的作用下,与地面

在接触区域的变形情况、应力分布、摩擦应力分布等滚动接触规律。结果表明,轮胎与地面的接触应力分布存在明显的非均匀性,轮胎接地面积和地面总反力随着滚动速度的升高而增大。Cheng 等^[9]为了研究轮胎耐磨性的影响因素,对子午线轮胎进行了三维非线性有限元分析。结果表明,当载荷增加时,摩擦力由轮胎内大外小转为内小外大,并且随着帘线角度的增加,其最大摩擦力先减小后增大,最大值出现在胎肩处。Zhang 等^[10]通过有限元分析方法,对子午线轮胎进行三维有限元建模,模拟了装配、收缩、充气压力和垂直载荷工况下的轮胎接地过程,并用试验结果验证了有限元分析结果的真实性。Li 等^[11]利用 ANSYS Workbench 软件分析了不同受力情况下带束层的变形与应力分布情况。R&D Center 研究了子午线轮胎爆胎压力的数值预报问题,针对某载重子午线轮胎建立了轴对称有限元模型并确定了其爆破压力,并通过相关测试验证了有限元分析结果^[12]。Palanivelu 等^[13]为研究轮胎的噪声产生机理及解决轮胎噪声传播的现象,用显式有限元分析法对滚动轮胎进行了模态分析,并用试验证明了其仿真结果的正确性。Ozaki 等^[14]利用有限元分析方法进行了基于各向异性摩擦相互作用模型的轮胎行驶性能有限元分析。Wei 等^[15]通过建立 FE 轮胎模型,对轮胎越过不同尺寸的障碍物进行了有限元动态分析,研究了不同结构和材料特性轮胎对其弹性性能的影响。

子午线轮胎的主要部件是:胎面、帘布层、带束层、胎体、胎圈、胎圈包布、钢圈丝等。胎圈部位的刚性能否满足要求对轮胎的行驶性能起着关键性的作用,并且国内外研究对象大多为单一材质橡胶制品,对于由多材质组合而成的橡胶轮胎裂纹扩展情况研究较少。本研究运用断裂力学理论和 J 积分理论研究 175/70 R1477S 型子午线轮胎(其中 175 表示轮胎名义断面宽度为 175 mm,70 表示轮胎扁平率为 70%,S 表示速度级别标志,R 表示轮胎结构标志(子午线轮胎),14 表示轮辋名义直径)胎圈裂纹在充气工况下的扩展趋势。

2 子午线轮胎有限元模型

在有限元分析过程中,定义材料的各种特征参数是必不可少且非常重要的一步。橡胶是一种非线性、不可压缩的或近似不可压缩的超弹性材料,反映其应力-应变关系的模型称为本构方程。

对于各向同性材料,假设 I_1, I_2, I_3 分别为右

Cauchy - Green 变形张量 C 的第 1、第 2、第 3 基本不变量^[16],对于初始无应力构型的超弹性材料,应变能函数 W 可表示为:

$$W(C) = W(I_1, I_2, I_3), \quad (1)$$

$$I_i = \text{tr} C = C:I, \quad (2)$$

式中 tr 为张量。

本研究采用的 Neo - Hookean 模型是最常用橡胶材料的本构模型。可压缩橡胶材料的 Neo - Hookean 模型为:

$$W(C) = \frac{1}{2}\mu (\ln J)^2 - \frac{1}{2}\mu (I_1 - 3), \quad (3)$$

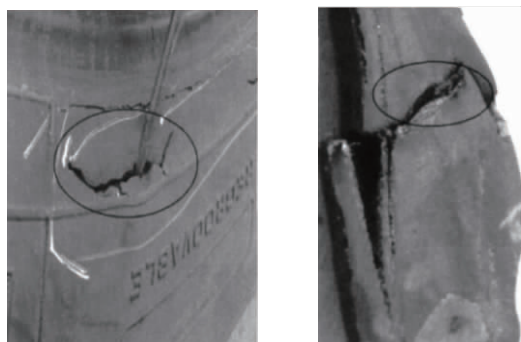
式中, J 为材料体积比; μ 为材料的应力量纲常数。

变形时,多数橡胶材料可看成是不可压缩的,此时 $J = 1$,不可压缩橡胶材料的 Neo - Hookean 模型^[17]为:

$$W(C) = \frac{1}{2}\mu (I_1 - 3). \quad (4)$$

2.1 子午线轮胎有限元模型的建立

子午线轮胎的胎体帘线呈径向排列,胎体帘布层数较少,胎侧柔软,胎圈刚性不足,行驶过程中胎圈受力又大,因此,胎圈容易出现裂口损坏,如图 1 所示。



(a) 胎圈穿洞破裂

(b) 胎圈撕裂

图 1 子午线轮胎胎圈损坏图

Fig. 1 Radial tire bead damage

运用断裂力学理论、 J 积分理论和有限元分析理论研究子午线轮胎胎圈处初始裂纹方向对裂纹发展趋势的影响,分析在充气工况下载重子午线轮胎胎圈处的变形特征。考虑轮胎结构的对称性,本研究只建立子午线轮胎的 1/4 模型,如图 2 所示。

2.2 子午线轮胎有限元分析

2.2.1 材料本构选取

以子午线轮胎为对象,其胎面胶、胎边胶、胎肩垫胶、三角胶和内面胶的主要成分均为橡胶。橡

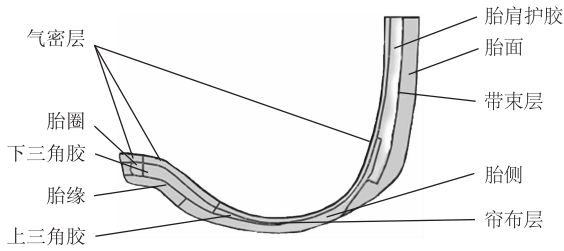


图2 子午线轮胎有限元模型

Fig. 2 FE model of radial tire

胶为超弹性材料, 其主要的参数如表1所示。

表1 轮胎橡胶构件主要材料常数

Tab. 1 Main material constants of tire rubber components

材质	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	主要参数
胎面胶	Neo Hooke	1.1×10^3 $C10 = 0.671, D1 = 0.03$
胎边胶	Neo Hooke	1.1×10^3 $C10 = 0.336, D1 = 0.06$
内面胶	Neo Hooke	1.1×10^3 $C10 = 0.503, D1 = 0.04$
三角胶	Neo Hooke	1.1×10^3 $C10 = 1.006, D1 = 0.02$

注: $C10 = G/2$, G 为初始剪切模量; $D1 = 2/K$, K 为初始体积模量。

2.2.2 边界条件及载荷

在轮胎行驶过程中, 轮毂与轮胎相对静止且相互接触, 轮毂可视为刚体。因此, 对轮毂进行全约束, 在充气条件下, 对轮胎与轮毂进行接触分析, 并对轮胎内侧施加 0.24 MPa 的均布载荷, 模拟充气完成时轮胎内侧的加载情况。

2.2.3 有限元分析结果

轮胎充气完成时的 Mises 应力分布云图如图3所示。可以看出, 轮胎充气完成时刻的最大应力发生在胎圈部。



图3 充气完成时轮胎 Mises 应力分布云图 (单位: MPa)

Fig. 3 Nephogram of tire Mises stress distribution when inflation is completed (unit: MPa)

3 子午线轮胎含胎圈裂纹的有限元分析

3.1 建立胎圈裂纹

分别建立等长、初始倾角分别 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的子午线轮胎胎圈裂纹有限元模

型。建模时裂纹尖端1固定, 定义裂纹与模型纵坐标在第3象限有一定的初始倾角, 角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 裂纹长度不变。通过 Job 模块计算裂纹尖端1沿不同方向扩展时的 J 积分, 以充气完成时的 J 积分值作为研究数据。

3.2 含裂纹尖端的网格划分

通过在裂纹处分割区域、控制节点疏密分布获得的近似辐射状网格, 可以在不影响计算精度的同时提高求解速率。图4为裂纹处细化后的网格图。

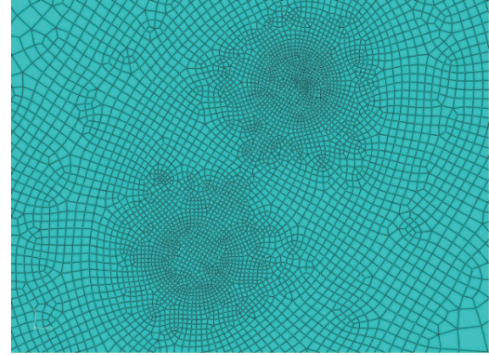


图4 裂纹处的网格划分

Fig. 4 Mesh division at crack

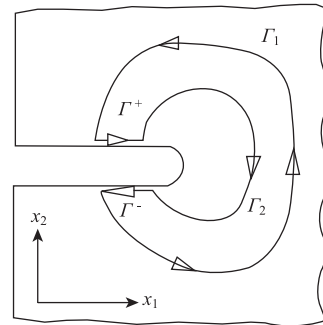
3.3 有限元计算结果及分析

3.3.1 J 积分理论

J 积分方法是弹塑性断裂力学的一种基本方法, 1967 由 Cherepanov 和 1968 年由 Rice 分别独立提出。图5所示的线性或线弹性体平板开有一穿透切口, 围绕切口端点按逆时针方向做一围线 Γ , 沿此围线作式(5)积分:

$$J = \int_{\Gamma} \left[W(\varepsilon) dx_j - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} ds \right], \quad (5)$$

这个积分就叫做 J 积分, 式中 $W(\varepsilon)$ 为平面体内的应变能密度; T_i 为作用在平面体上的张力; u_i 为位移; s 为沿的弧长; x_i, x_j 为图中所示的坐标。

图5 J 积分的定义Fig. 5 Definition of J integral

J 积分能够定量表征裂纹尖端的应力和应变场强度,可作为裂纹或缺口顶端应变场的平均度量。近年来, J 积分已被推广应用于三维非线性弹性体的有限变形问题、有体积力和温度作用的问题以及考虑惯性力的问题,还被用来进行蠕变和疲劳裂纹扩展的分析。本研究以 J 积分为指标,研究子午线轮胎胎圈处初始裂纹方向对裂纹发展趋势的影响,分析在充气工况下载重子午线轮胎胎圈处的变形特征。

3.3.2 同一裂纹尖端不同积分路径的 J 积分

图6为对于同一裂纹尖端沿某方向扩展时不同积分路径的 J 积分。可以看出,积分路径中最靠近裂纹尖端的 J 积分初始段(图6中最下方)明显孤立,其余的几条相对集中,这与史守峡等^[18]关于不同积分路径对 J 积分的影响的研究结果相符合。为保证计算精度,积分区域要离开裂纹尖端,剔除接近裂纹尖端的数据能够增加计算结果的精度。

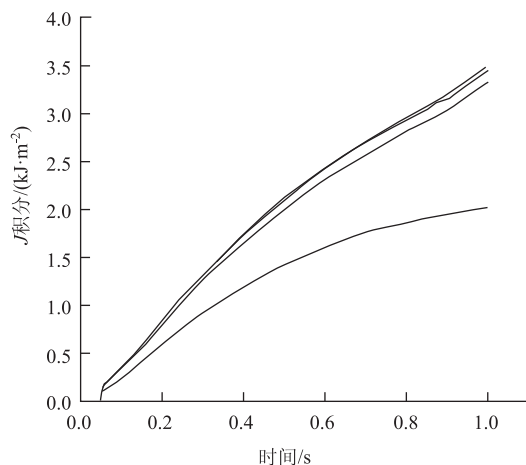


图6 基于不同路径的 J 积分

Fig. 6 J integral based on different paths

因此,在下面的分析中,以相对集中的几条路径的 J 积分平均值作为该裂纹尖端沿该方向扩展的 J 积分值。

3.3.3 不同初始倾角裂纹尖端的 J 积分

建立等长、初始倾角 θ 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的胎圈裂纹有限元模型,以裂纹尖端1为坐标原点建立坐标系,如图7所示,计算裂纹尖端1沿不同方向的 J 积分,在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间每隔 10° 取1组数据。

图8为由裂纹建立的局部坐标系。在以裂纹尖端1为原点,裂纹尖端2为 y 方向建立的坐标系中, r 为裂纹尖端1周围 J 积分的方向。不同倾角裂纹尖端的 J 积分均需重新建立此坐标系。

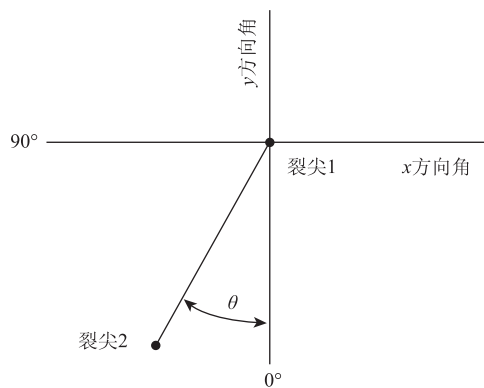


图7 裂纹坐标系

Fig. 7 Coordinate system of crack

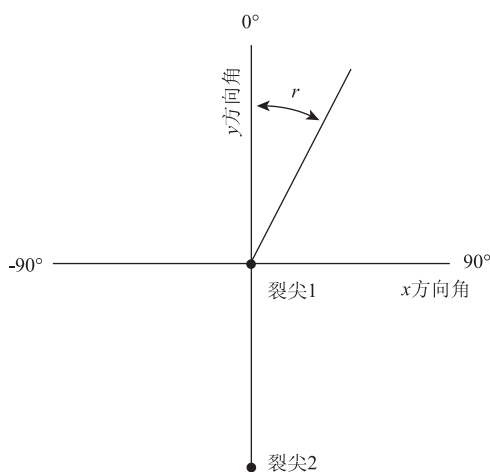


图8 裂纹局部坐标系

Fig. 8 Local coordinate system of crack

经计算,不同初始倾角裂纹尖端的 J 积分分布如图9所示,与 J 积分相关的角度参数如表2所示。

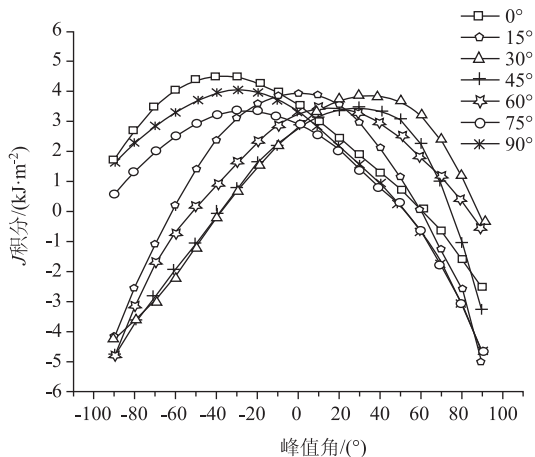


图9 不同初始倾角裂纹尖端的 J 积分

Fig. 9 J integral of crack tip with different initial inclinations

表2 与 J 积分相关的角度参数Tab. 2 Angle parameters related to J integral

初始倾角/ (°)	达到峰值的 角度/(°)	裂纹尖端的开裂 方向/(°)	裂纹与开裂方向 的夹角/(°)
0	-40	-40	140
15	5	5	175
30	40	40	140
45	25	25	155
60	20	20	160
75	-30	30	150
90	-25	25	155

从图9和表2可以看出:

(1) J 积分沿不同方向变化曲线为开口向下的抛物线,随着积分方向角度 r 的增大, J 积分先增大后减小。

(2) 在内压作用下,当裂纹初始倾角为 15° , 30° , 45° , 60° 时, J 积分峰值在第1象限,说明裂纹尖端1易向裂纹右侧发生裂纹失稳扩展现象。在内压作用下,当裂纹初始倾角为 0° , 75° , 90° 时, J 积分峰值在第2象限,说明裂纹尖端1易向裂纹左侧发生裂纹失稳扩展现象。

(3) 当初始倾角为 0° 时, J 积分值最大,说明初始倾角为 0° 时轮胎表面最容易发生裂纹扩展。

(4) 当裂纹尖端开裂方向角 $r=0^\circ$ 时,不同初始倾角裂纹尖端的 J 积分处于 $3\sim 4\text{ kJ/m}^2$ 之间,变化很小,说明裂纹初始倾角在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内变化对裂纹尖端正方向的 J 积分影响不大或二者无内在联系。

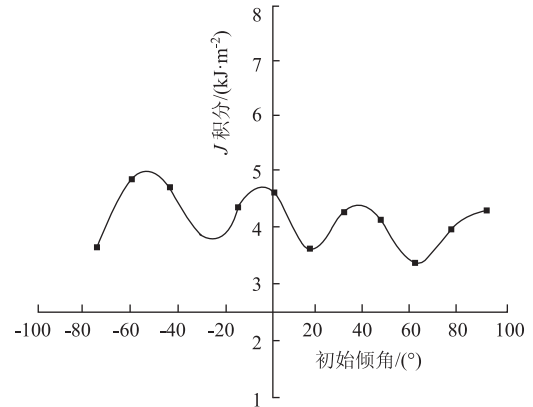
3.3.4 裂纹尖端开裂方向随初始倾角的变化

图9表示了不同倾角裂纹尖端1沿不同方向的 J 积分。由于裂纹沿着 J 积分最大的方向扩展,在 J 积分峰值点处作垂线,与横坐标相交处的 r 值即为裂纹尖端的开裂方向。因此,从 0° 到 90° 按顺序变化,裂纹与开裂方向的夹角大约为 140° , 175° , 140° , 155° , 160° , 150° , 155° 。总结以上几组数据, r 值在区间 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 的概率为100%。

裂纹尖端 J 积分峰值随初始倾角的变化如图10所示。可以看出,裂纹初始倾角在 $-75^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,裂纹尖端 J 积分峰值随初始倾角上下浮动,表现出一定的周期性,其周期大约为 45° 。

4 结论

本研究运用有限元软件ABAQUS分析了子午线

图10 不同初始倾角 J 积分峰值Fig. 10 Peak J integral with different initial dip angles

轮胎在充气工况下胎圈裂纹的开裂特征。通过计算 J 积分,研究了裂纹尖端正方向的 J 积分和裂纹尖端开裂方向随初始倾角的变化规律。通过有限元分析,得出以下结论:

裂纹尖端 J 积分沿不同方向变化曲线呈开口向下的抛物线。裂纹初始倾角在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内的变化对裂纹尖端正方向的 J 积分影响不大或二者无内在联系。

裂纹初始倾角在 $-75^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,裂纹尖端的开裂方向处于区间 $[-45^\circ, 45^\circ]$,即裂纹与开裂方向的夹角不小于 140° ;裂纹尖端 J 积分峰值上下浮动,表现出一定的周期性,其周期大约为 45° 。

通过运用有限元分析软件模拟仿真轮胎开裂,计算出 J 积分,为弹塑性断裂分析打下基础,使工程人员加深了对轮胎损伤机理内在本质规律的理解和判断,为预防轮胎损坏提供一定的理论基础和参考依据,这将为轮胎结构的优化设计以及新型轮胎的开发开辟一条极有价值之路。

参考文献:

References:

- [1] CASEY D B, AIREY G D, GRENFELL J R. A Comparison of Uniform and 3-D Tyre Contact Pressure Representations Using a Finite Element Method [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 2402 - 2410.
- [2] 崔胜民. 神经网络理论在轮胎力学建模中的应用 [J]. 农业机械学报, 1995 (3): 147 - 148.
CUI Sheng-min. Application of Neural Network Theory in Tire Mechanics Modeling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1995 (3): 147 - 148.
- [3] 贺海留,刘欣然. 轿车子午线轮胎临界速度的估算

- [M]. 北京: 北京橡胶工业研究设计院, 2006: 15 - 36.
- HE Hai-liu, LIU Xin-ran. Estimation of Critical Speed of RADIAL tire for Passenger Cars [M]. Beijing: Beijing Rubber Industry Research and Design Institute, 2006: 15 - 36.
- [4] 宋贤海. 薄膜网络理论在 155R12TL 轮胎结构设计中的应用 [J]. 轮胎工业, 1998 (3): 148 - 151.
- SONG Xian-hai. Application of Film Network Theory to Structure Design of 155R12TL Tire [J]. Tire Industry, 1998 (3): 148 - 151.
- [5] 袁春元, 周孔亢, 吴琳琪, 等. 汽车空气弹簧橡胶气囊的结构分析方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (9): 221 - 225.
- YUAN Chun-yuan, ZHOU Kong-kang, WU Lin-qi, et al. Structural Analysis Method of Automotive Air-spring Rubber Air-bag [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (9): 221 - 225.
- [6] 胡小弟, 孙立军. 不同车型非均布轮载作用力对沥青路面结构应力影响的三维有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (1): 1 - 5.
- HU Xiao-di, SUN Li-jun. The Stress Response Analysis of Asphalt Pavement Structure under Non-uniform Distributed Tire Pressure of Different Vehicles with 3D Finite Element Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20 (1): 1 - 5.
- [7] 黄晓明, 代琦, 平克磊. 轮胎胎面与柔性路面摩擦接触的数值分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 16 - 20.
- HUANG Xiao-ming, DAI Qi, PING Ke-lei. Numeric Analysis of Friction Contact between Tread and Flexible Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 16 - 20.
- [8] 路永婕, 杨绍普, 李韶华. 载重子午轮胎与路面相互作用的分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (12): 12 - 16.
- LU Yong-jie, YANG Shao-pu, LI Shao-hua. Analysis of Interaction between Truck Radial-ply Tire of Heavy Duty Vehicle and Road Surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (12): 12 - 16.
- [9] CHENG G, WANG W D. Pb Finite Element Analysis for Profile Wear of Rolling Radial Tire with Camber Angle [J]. Advanced Materials Research, 2010, 148 - 149: 200 - 203.
- [10] ZHANG J, WANG G L, FU N J, et al. Finite Element Analysis of Some Radial Tire [J]. Advanced Materials Research, 2012, 490 - 495: 2414 - 2418.
- [11] LI L, WANG Y. The Finite Element Analysis of Steel Cord in Radial Tire's Belt Ply [J]. Key Engineering Materials, 2012, 501: 495 - 499.
- [12] JEONG K M. Prediction of Burst Pressure of a Radial Truck Tire Using Finite Element Analysis [J]. World Journal of Engineering & Technology, 2016, 4 (2): 228 - 237.
- [13] PALANIVELU S, RAO K V N, RAMARATHNAM K K. Determination of Rolling Tyre Modal Parameters Using Finite Element Techniques and Operational Modal Analysis [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 64 - 65: 385 - 402.
- [14] OZAKI S, KONDO W. Finite Element Analysis of Tire Traveling Performance Using Anisotropic Frictional Interaction Model [J]. Journal of Terramechanics, 2016, 64: 1 - 9.
- [15] WEI C, OLATUNBOSUN O A. Transient Dynamic Behaviour of Finite Element Tire Traversing Obstacles with Different Heights [J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56: 1 - 16.
- [16] WEI C, OLATUNBOSUN O A. The Effects of Tyre Material and Structure Properties on Relaxation Length Using Finite Element Method [J]. Materials & Design, 2016, 102: 14 - 20.
- [17] 朱艳峰, 刘锋, 黄小清, 等. 橡胶材料的本构模型 [J]. 橡胶工业, 2006, 53 (2): 119 - 125.
- ZHU Yan-feng, LIU Feng, HUANG Xiao-qing, et al. Constitutive Model of Rubber Materials [J]. China Rubber Industry, 2006, 53 (2): 119 - 125.
- [18] 史守峡, 刘建百. 有限元分析平面应力非线性橡胶材料的 J 积分 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 19 (4): 7 - 12.
- SHI Shou-xia, LIU Jian-bai. Calculation of J-integral for Plane Stress Rubber Materials I Mode Crack by Using Gao's Energy Function [J]. Journal of Harbin Engineering University, 1998, 19 (4): 7 - 12.