

基于有限元法的航空轮胎瞬态冲击性能分析

刘肖英,焦志伟,何雪涛,杨卫民*

(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:利用 Abaqus 软件建立航空子午线轮胎三维有限元模型,研究航空轮胎冲击地面瞬间橡胶基体和骨架材料的等效应力。结果表明:轮胎冲击地面时,轮胎与轮辋接触部位受力大于轮胎与地面接触部位,更容易发生疲劳失效;骨架材料中带束层帘布等效应力最大,是主要承载部件,冠带层等效应力较小,主要吸收胎面方向的冲击;胎面胶和带束层在胎肩部位出现等效应力峰值,胎面接地中心区域出现低应力区。

关键词:航空轮胎;瞬态冲击性能;有限元分析

中图分类号:TQ336.1;V226+.8;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2014)09-0539-05

航空轮胎是飞机的主要零部件之一,在飞机着陆瞬间承受巨大的负荷和冲击作用。为了获得最大限度的缓冲性能和乘坐舒适性,一般航空轮胎的下沉率都比较大,也就是压缩变形较大,这对航空轮胎的结构和材料提出了更高的要求^[1]。利用有限元方法模拟航空轮胎着陆过程的力学性能不仅能有效地预测其使用性能,还能缩短航空轮胎结构优化设计的研发周期和降低开发成本。但是目前国内有关航空轮胎有限元分析的研究较少,杨礼芳等^[2]利用有限元法成功建立了某型航空子午线轮胎有限元模型,并较好地模拟了其刚度特性。本工作将成熟的有限元分析技术引入航空轮胎领域,通过分析工作条件下冲击地面瞬间航空轮胎的力学性能,找出其危险部位,进而进行轮胎性能优化,以提高飞机降落时的安全程度。

的锦纶帘布组成,由内到外依次变短,每层帘布与轮胎子午方向夹角为 75°,相邻两层带束层交叉排列。最外侧是一层芳纶冠带层,芳纶纤维膨胀率比锦纶低,增强了胎体的整体结构性,提高了翻

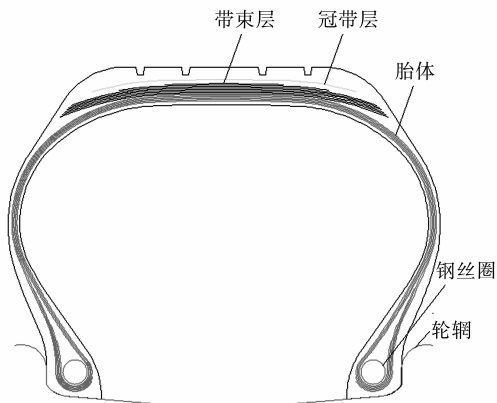


图 1 46/17R20 航空轮胎轮廓和骨架材料二维图

1 航空轮胎有限元模型

1.1 几何模型

基于 46/17R20 航空轮胎,通过对断面轮廓尺寸的测量,利用 AutoCAD 绘制了轮胎外轮廓二维图,研究航空轮胎的骨架材料结构,包括胎体、带束层、冠带层和钢丝圈 4 部分,如图 1 所示。胎体由 6 层锦纶帘布组成,4 层反包,2 层胎体正包胎圈,如图 2 所示。带束层由 8 层长度不相同

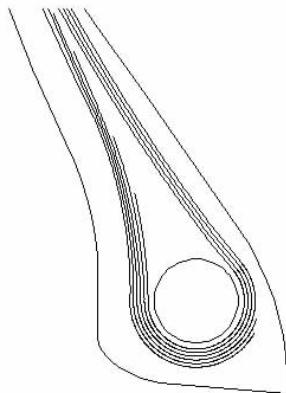


图 2 胎体反包和正包胎圈示意

作者简介:刘肖英(1989—),女,山东聊城人,北京化工大学在读硕士研究生,主要从事航空轮胎力学性能分析研究。

* 通信联系人

新率,且便于废旧轮胎回收加工^[3]。钢丝圈结构是中心一根直径较大的钢丝外围周向排布了4层直径较小的钢丝,钢丝圈紧密地排布成圆形,层与层之间、钢丝与钢丝之间没有挂胶,本研究将其简化为实体结构。

1.2 材料模型

橡胶材料具有超弹性、不可压缩性和大变形等力学特性,其应力-应变关系表现为明显的非线性,本文采用 Yeoh 材料模型(考虑剪切模量随变形变化)描述橡胶的力学行为,其应变能函数如下^[4]:

$$W = A_{10}(I_1 - 3) + A_{20}(I_1 - 3)^2 + A_{30}(I_1 - 3)^3$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

式中, I_1 是主伸长比的第一不变量, λ_i ($i=1,2,3$) 为3个主伸长比; A_{10} , A_{20} 和 A_{30} 为测量得到的材料常数,通过修改3个系数来表征不同的橡胶材料。

胎体、带束层、冠带层以及胎圈材料的应力-应变表现为线性关系,选用弹性模型。

1.3 有限元模型

一般来说,飞机的着陆过程包括下滑、拉平、平飞、飘落和滑跑5个阶段,接地瞬间飞机机头与地面并不平行而是有一定的仰角,因此,轮胎冲击地面并非竖直而是倾斜冲击。飞机飘落到起落架的主轮胎接地时,航空轮胎是以 $10^\circ \sim 15^\circ$ 夹角冲击地面的^[5]。

为了使模拟条件更加符合实际工作情况,建立倾斜路面来保证轮胎接地时与地面的夹角。考虑航空轮胎结构上的对称性,将航空轮胎的二维断面轮廓导入 Abaqus,建立了二维有限元模型,如图3所示。其中橡胶基体采用 CGAX4H 对称实体杂交单元,胎体帘布等骨架材料选用 SFM-GAX1 型线性单元,骨架材料以 rebar 单元的形式嵌入橡胶基体中,实现橡胶与骨架材料的结合。考虑钢丝圈钢丝是紧密排列且周围没有挂胶,钢丝圈采用实体单元。通过 command 命令对二维有限元模型进行旋转得到三维航空轮胎模型,与轮胎接触的轮辋和地面采用分析刚体类型的三维模型,轮胎与轮辋、轮胎与地面通过 surface to surface 类型的接触对形式进行装配,三维轮胎与轮辋、地面有限元模型如图4所示。



图3 轮胎二维有限元模型

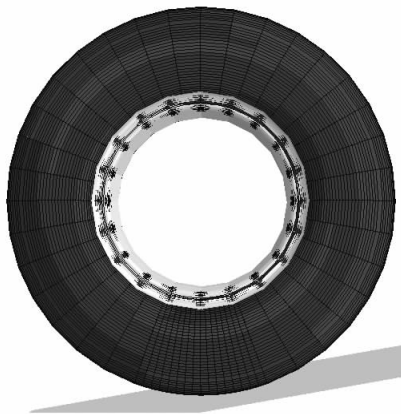


图4 三维轮胎、轮辋、地面有限元模型

2 有限元分析结果与讨论

2.1 橡胶基体

橡胶基体等效应力分析结果如图5所示。由图5可见,橡胶基体胎圈部位承受的等效应力最大为1.056 MPa,胎面胶最大等效应力为0.7516 MPa,表明轮胎承载时,轮胎与轮辋接触部位受力比轮胎与地面接触部位大,更容易发生疲劳失效。为了分析胎面受力特点,沿胎面宽度方向提取一定数量的节点应力,绘制的应力曲线如图6所示。

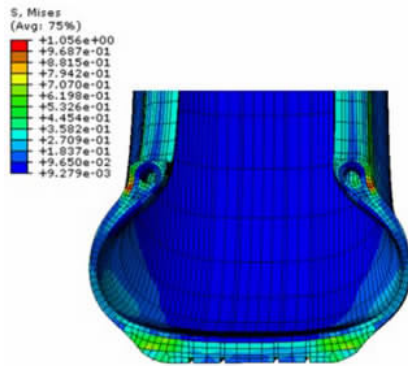


图5 橡胶基体等效应力云图

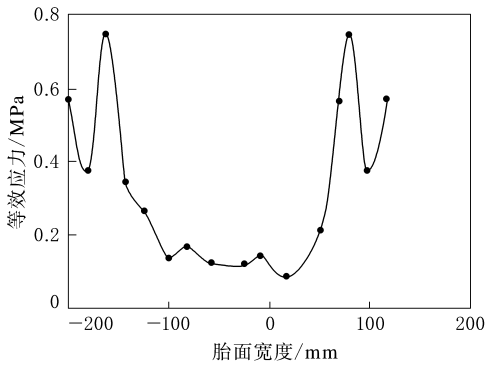


图 6 橡胶基体等效应力曲线

由图 6 可见,胎面中心接地区域等效应力约为 0.2 MPa,两侧胎肩部位等效应力约为 0.8 MPa,胎面接地中心区应力明显低于胎肩应力。这表明航空轮胎冲击地面时两侧胎肩被压平,紧密接触地面并承载,胎面接地中心区域未能与地面充分接触。因此,航空轮胎工作时出现胎肩过度磨损,并扩展到胎面区域,最后整个胎冠区域磨损严重,造成轮胎报废。

2.2 带束层

8 层带束层帘布在接地中心区胎面宽度方向上节点等效应力如图 7 和 8 所示。8 层帘布上节点位置相互对应,1[#]~7[#]带束层(由外到内)应力变化规律相同,胎面中心区应力基本不变且相对较小,到达胎肩部位时应力迅速增大到最大值;不同带束层帘线等效应力由内到外依次减小;8[#]带束层各点等效应力与其他 7 层不同之处在于应力增大到峰值后开始下降,该峰值约出现在 6[#]带束层端点部位,大小与其最大值相同。由此可知,本航空轮胎最内部 2 层带束层帘布受力最大,工作时最先发生失效,然后依次扩展到外层带束层。

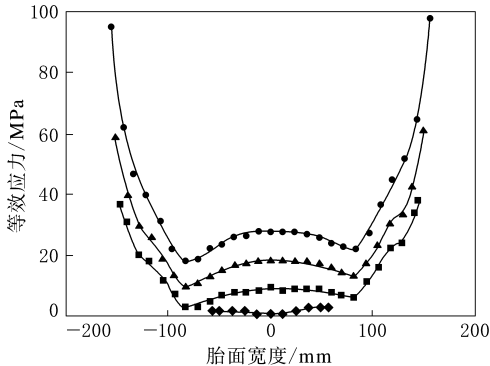
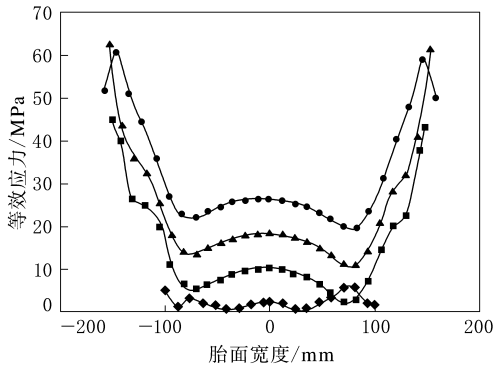


图 7 奇数带束层等效应力曲线



◆—2[#]带束层;■—4[#]带束层;▲—6[#]带束层;●—8[#]带束层。

图 8 偶数带束层等效应力曲线

因此为了保证飞机安全着陆,航空轮胎设计 8 层带束层结构是必要的。

2.3 胎体帘布层

为了研究胎体反包和正包帘布的应力特点,沿轮胎周向选取一个单元宽度的胎体帘布进行研究,其等效应力云图如图 9 所示。由图 9 可见,最内层反包和正包端点部位的最外层应力较大,是胎体的危险部位。

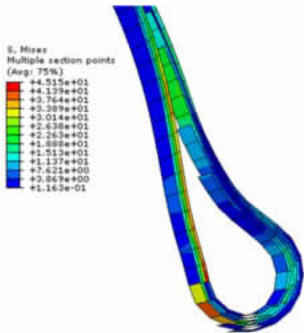
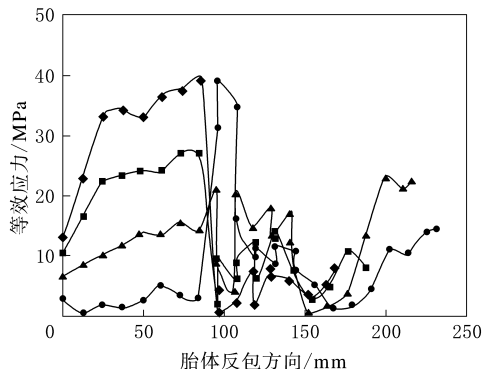


图 9 胎体帘布等效应力云图

4 层胎体反包帘布的等效应力分布规律如图 10 所示。由图 10 可见,外侧有正包胎体帘布的反包胎体帘布部分应力由内到外逐渐增大,相反,外侧无正包胎体帘布的反包胎体帘布部分应力由内到外逐渐减小,且外侧有正包胎体帘布的反包帘布部分应力明显小于外侧无正包胎体帘布的反包胎体帘布。这说明外侧正包胎体帘布的存在减小了内部反包胎体帘布的应力,并且作用效果明显;反包胎体帘布最内层应力大,生产时可选用强度更大的材料,以保证安全性。最外层反包胎体帘布在正包胎体端点部位应力出现最大值,该最大值与最内层反包胎体帘布最大值相同,其余部位各节点应力很小。可以看出,正包胎体帘布从



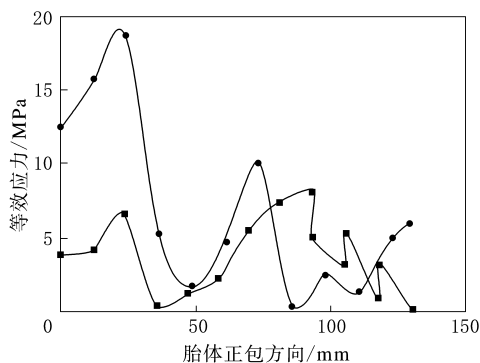
由内到外 4 层反包胎体帘布:◆—1;■—2;▲—3;●—4。

横坐标 0 点为在最外层反包胎体帘线反包终点的内部对应节点。

图 10 反包胎体帘布等效应力曲线

有到无的变化使得与其相邻的反包胎体帘布应力急剧增大,因此正包高度对内部反包胎体应力产生了显著影响。

正包胎体帘布等效应力分布如图 11 所示。由图 11 可见,外层正包帘布平均等效应力大于内层帘布。对比图 10 和 11 可知,反包胎体帘布应力明显大于正包胎体帘布,说明正包胎体不是主要承载骨架,但可以保护反包帘布,并显著降低反包帘布的应力。



■—内层;●—外层。横坐标 0 点为反包胎体帘线的反包
最高点在正包胎体帘线上的对应点。

图 11 正包胎体帘布等效应力曲线

2.4 冠带层

冠带层接地区域等效应力曲线如图 12 所示。由图 12 可见,轮胎工作时,胎肩到端点部位应力较大,中心接地区应力较小;整体上冠带层应力明显小于带束层应力,说明冠带层并不是主要受力部件,所起的主要作用是吸收胎面方向的冲击力,减少带束层的损伤。

本航空轮胎各部分的等效应力最大值(MPa)

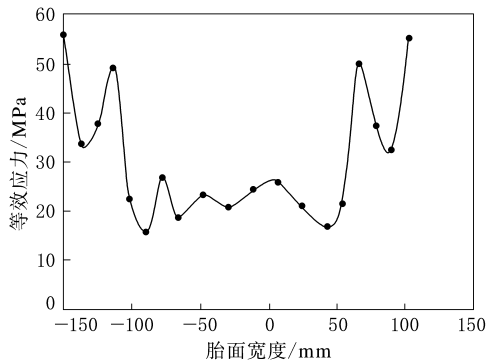


图 12 冠带层接地区域等效应力曲线

如下:胎面胶 0.751 6,胎圈胶 1.056,胎体 50.14,冠带层 56.51,带束层 98.49。骨架材料的等效应力最大值是橡胶基体材料的数十倍,说明骨架材料的主要作用是承载,橡胶基体主要起缓冲作用。胎圈胶最大应力大于胎面胶,表明轮胎冲击地面时与轮辋接触的橡胶材料最易发生失效,是危险部位。骨架材料中带束层受力最大,是主要的承载部件。

3 结论

航空轮胎冲击地面时橡胶基体中与轮辋接触部位受力大于与地面接触部位,更容易发生疲劳失效,其余部位基体应力相对较小;骨架材料中的带束层帘布等效应力最大,是主要承载部件;胎圈处正包帘布保护内部反包胎体帘布,大大降低了反包胎体帘布应力;冠带层应力明显低于带束层,用以缓冲并保护内部带束层;胎面胶和带束层在胎面接地中心出现低应力区,而胎肩部位应力最大,说明冲击瞬时胎面出现翘曲现象。

参考文献:

- [1] 盛保信. 航空轮胎充气尺寸与飞行安全[J]. 现代橡胶技术, 2005, 31(3): 5-8.
- [2] 杨礼芳, 魏小辉, 印寅. 某型航空子午线轮胎刚度仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2013, 5(3): 146-151.
- [3] 邓海燕. 航空轮胎从 N2G 向“芳纶化+子午化”的发展[J]. 橡胶科技市场, 2004, 5(20): 1-3.
- [4] Yeoh O H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.
- [5] 聂磊. 民用飞机重着陆智能诊断技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

Finite Element Analysis on Instantaneous Impact Performance of Aircraft Tire

LIU Xiao-ying, JIAO Zhi-wei, HE Xue-tao, YANG Wei-min

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A 3D finite element model of aircraft radial tire was established by using Abaqus software, and the equivalent stress of rubber and reinforcing material in the moment of landing was studied. The result showed that, the contact stress of rim flange was higher than that of the tread rubber at the aircraft touchdown instant, so the contact area between rim and tire was more prone to fatigue failure. The equivalent stress of belt was the highest in all of the reinforcing material, which became the main load-bearing part. The equivalent stress of cap belt was lower, and it mainly absorbed the tread impact. For the tread and belt, the peak value of equivalent stress appeared in the tire shoulder, and the stress in the center of ground contact area was low.

Key words: aircraft tire; instantaneous impact performance; finite element analysis

横滨新增超高性能轮胎产品线

中图分类号: TQ336.1; U463.341 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2014年7月1日报道:

横滨轮胎公司(YTC)新增一款全天候超高性能轮胎产品至 Advan 旗舰产品线。28个规格的 Advan Sports A/S 轮胎(见图1)于2014年7月1日在美国销售,年内还将推出其余的7个规格。



图1 Advan Sports A/S 轮胎

横滨营销和产品规划总监 Andrew Briggs 说:“Advan Sports A/S 轮胎具有动态全天候性能,我们将其设计为运动型豪华轿车轮胎,具有全天候超高性能。”

Sports A/S 轮胎现有规格为17~20英寸,

适用于奥迪、宝马、雷克萨斯、奔驰、英菲尼迪和保时捷等高性能汽车。

Andrew Briggs 称,驾驶者可体会到该轮胎在各种天气条件(干燥、雨天和小雪)下的优异操纵性、牵引力和平稳安静的驾驶舒适性。

Sports A/S 轮胎是 Advan 产品线提供的第1个在 W 和 Y 速度级别下 8 万 km 的胎面磨损里程保证的超高性能轮胎。

横滨公司表示, Sports A/S 轮胎具有先进的胎面胶,提供全天候优异的耐磨性能,先进的聚合物能使胎面在寒冷天气下保持柔软,同时胎面中额外添加的白炭黑提供优越的湿滑路面和冬季抓着力性能。

此外,3条直花纹沟排除胎面积水从而提高轮胎的潮湿和雪地牵引力,蛇形花纹沟提供较强的雪地剪切力。波浪形刀槽花纹提供额外的湿地操纵性能,Z形花纹沟提高雪地牵引力。

超大外部胎肩花纹块改善轮胎的干地性能,如更好的转弯性能,二合一大花纹块提高轮胎的刚度,从而提高侧向稳定性。

优化的接地印痕有助于均衡压力分布,使轮胎行驶里程延长,更耐磨。

(肖大玲摘译 吴淑华校)