不同滑移条件下的航空轮胎热力耦合仿真研究

安 爽,吴 健*,李彦斌,粟本龙,王友善

[哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所,山东 威海 264209]

摘要:对橡胶轮进行有限元仿真分析,建立同时考虑摩擦生热与滞后生热的热力耦合流程,根据着陆过程中航空轮胎的滑移率随温度变化曲线,研究不同滑移率下橡胶轮的温度场分布规律。结果表明:随着滑移率的减小,橡胶轮接触区表面的温度逐渐降低,橡胶轮内部生热温度分布范围不断扩大,生热温度逐渐升高;在滑移率从0.8减小到0.2的过程中,橡胶轮整体温度场的最高温度出现在外表面接触区,且随着滑移率的减小,橡胶轮的最高温度逐渐降低。

关键词:航空轮胎;橡胶轮;滑移率;热力耦合;有限元仿真 中图分类号:TQ336.1;O241.82 文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2023)10-0634-05 DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2023.10.0634



(扫码与作者交流)

航空轮胎是保证飞机起飞和着陆安全性的 重要部件。在着陆过程中,由于从飞行状态急剧 过渡到地面滚动状态,航空轮胎受到高速、高压作 用,轮胎切向速度与飞机水平速度的巨大差异迫 使轮胎起转加速,滑移率由1迅速减小到0^[1]。当对 飞机施加刹车时,轮胎由于刹车力矩的作用导致 其相对跑道表面开始滑移,滑移率对刹车性能产 生较大影响^[2]。由此可见,在着陆滑跑过程中航空 轮胎处于不断变化的滑移条件下,轮胎发生滞后 生热与摩擦生热,轮胎材料的力学性能随温度发 生变化,温度升高会加剧胎面磨损,极端条件下甚 至发生爆裂事故,威胁着陆安全^[3-4]。因此对航空 轮胎在着陆滑跑过程中的热力耦合进行分析具有 重要意义。

国内外学者针对航空轮胎的生热及热力耦合 进行了大量研究。D. WHICKER等^[5]首次提出双 向耦合的方法,考虑了应力应变场与温度场之间 的相互影响。A. K. KONDÉ等^[6]研究了航空轮胎 在中低速转弯时的热力耦合,假设表面摩擦是唯 一热源,将稳态力学分析与瞬态热问题相结合。 B. YAVARI等^[7]的模型是在单向耦合基础上,提 出一种简易方法来研究同时考虑内部耗散生热

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52075119);国家自然 科学基金重大项目(51790502)

作者简介:安爽(1998一),女,山东日照人,哈尔滨工业大学 (威海)硕士研究生,主要从事航空轮胎热力耦合仿真研究。

*通信联系人(wujian@hitwh.edu.cn)

与接触摩擦生热的动态非线性热力耦合问题。 T. LINKE等^[8]采用高速线性测试仪,以100%恒定 滑移率测试胎面块试样,再利用试验台对航空轮 胎的热行为进行研究,在机场跑道上通过改变负 荷、速度和轮胎滑移角进行实测,结果表明轮胎 滑移角对温度的影响最大,其次是速度和负荷。 A.A. ALROQI等^[9-10]利用Ansys软件中结构热瞬态 耦合分析方法,将航空轮胎主起落架建模为质量-弹簧系统,在接触区域内取胎面总牛热速率平均 值表示单位面积的摩擦生热,模拟航空轮胎接地 起转阶段的动态特性和胎面温度,比较不同预旋 转速度对胎面温度的影响。I. ROSU等^[11-12]研究了 航空轮胎从高速滚转至起飞时的热演化过程,在 转鼓试验机上进行了滚动试验,研究打滑角、速度 和负荷对轮胎胎面热演化的影响。何燕^[13]同时考 虑轮胎因滞后生热和胎面与地面摩擦生热两种因 素的作用,建立温度场计算的数学物理模型,结果 表明在轮胎的起动阶段,摩擦生热对轮胎温度场 的影响不能忽略,但当轮胎进入稳态行驶阶段后 摩擦生热对温升的影响很小,可以忽略不计。张 猛^[14]对航空轮胎着陆稳态滚动过程的温度场进行 了研究,分析对比单向耦合与双向耦合的航空轮 胎温度场、胎面胶的磨耗等,最终发现高温主要分 布在胎肩以及胎面与密封胶中间的区域,其中胎 肩区域最高。陈平[15]重点研究纵向滑移及侧偏工 况轮胎状态参数对轮胎温度特性的影响,揭示轮 胎热机耦合力学特性机理。

不同滑移率下轮胎既有滚动又有滑动,滚动导致轮胎内部滞后生热,滑动导致胎面摩擦生热。本工作针对不同滑移率提出一种同时考虑滞后生热与摩擦生热的热力耦合方法,利用橡胶轮试样的有限元仿真验证此方法的可行性,研究不同滑移率下轮胎的温度场分布情况,为航空轮胎模型在不同工况下的热力耦合仿真提供理论依据。

1 橡胶轮有限元仿真

根据实验室已有橡胶轮建立相应有限元模型,利用Abaqus软件建立二维有限元模型[如图1(a)所示],橡胶部件单元类型为CAX4HT,共有1620个单元,设置材料力学性能参数及传热系数、比热容等热学参数,对二维模型进行夹具夹紧过程的仿真。

将二维模型旋转得到三维有限元模型[如图1 (b)所示],建立刚性面与三维模型接触特性。设置 接触属性,刚性面与橡胶轮之间的摩擦因数设为 0.7,对刚性路面绑定参考点并施加竖直向上的负 荷进行接触加载模拟,可以通过设置负荷、边界条 件等进行滚动和滑动的模拟。

2 橡胶轮温度场研究

2.1 热力耦合流程

橡胶轮滑动时生热来源于接触面间的摩擦损耗,需要导出仿真结果中接触表面所有节点的切向应力,以计算节点摩擦生热率;橡胶轮滚动时生 热来源于橡胶轮内部的滞后生热,因此需要导出 内部节点的应力应变数值,以计算滞后生热率。

基于有限元分析的热力耦合方法可分为直 接耦合法和间接耦合法。直接耦合法使用一个模 型,直接采用具有温度和位移自由度的耦合单元, 同时得到热分析和力分析结果;间接耦合法将力 学与热学分开,先建立力学模型,然后计算出生热 速率,将生热速率以热源的形式定义到热学模型 中计算稳态时的温度场分布。本工作将直接耦合 法与间接耦合法相结合,采用如图2所示的流程进 行热力耦合分析。

首先提取三维滚动和滑动工况下的应力应变和切向应力,在Python中计算生热率,再将生热率



(a)二维模型



图1 橡胶轮的有限元模型





结果用关键词Dflux写入inp文件,从而将热源附加到每个相应节点上,使用Coupled Temperature-displacement分析步进行热力耦合分析,得到温度场分布结果。

2.2 不同滑移率下有限元仿真的建立

滑移率是指在运动过程中滑动成分所占的比例,飞机着陆时轮胎由静止迅速起转。

着陆时航空轮胎的滑移率与时间的关系曲线 如图3所示,水平速度为220 km • h⁻¹。从图3可以





当滑移率减小时,运动过程中滑动成分占比 减小,转动成分占比增大,轮胎同时存在摩擦生热 与滞后生热。为探究温度场分布与不同滑移率之 间的关系,在滑移率-时间曲线上取4个离散点,即 滑移率分别为0.2,0.4,0.6和0.8。

航空轮胎水平速度为220 km • h⁻¹, 对应滚动 角速度为120 rad • s⁻¹, 由于采用橡胶轮进行近似 模拟,则橡胶轮滚动时的角速度取120 rad • s⁻¹,对 应橡胶轮线速度为4.8 m • s⁻¹,不同滑移率即滑动 和滚动成分占比不同,则摩擦生热计算中的相对 速度等效为滑动成分占比与4.8 m • s⁻¹的乘积,滞 后生热计算中的滚动周期由等效角速度计算,等 效角速度为滚动成分占比与120 rad • s⁻¹的乘积, 将计算后的两种生热率同时施加给橡胶轮相应节 点并进行温度场仿真。

3 结果分析与讨论

利用Abaqus软件进行有限元仿真,在相同负荷、不同滑移率下橡胶轮Z-X方向和Y-X方向的温度场分布分别如图4和5所示。

从图4可以看出,橡胶轮的温度场主要分布在 接触区表面及橡胶轮内部,橡胶轮外表面由摩擦 生热产生的温度会向橡胶轮内部传递,橡胶轮内 部由滞后生热产生的温度会向外部传递。随着滑 移率的减小,橡胶轮滚动成分占比增大,内部生热 分布范围不断增大,生热温度逐渐升高。从整体









温度场来看,橡胶轮的最高温度始终出现在外表 面接触区,且随着滑移率的减小,橡胶轮的最高温 度也逐渐降低。

从图5可以看出,随着滑移率的减小,橡胶轮 外表面接触区的温度逐渐降低,这是由于滑动成 分占比减小,导致摩擦生热率减小。

4 结论

航空轮胎在不同滑移条件下具有不同的生热 行为,本工作以橡胶轮为研究对象,近似模拟航空 轮胎着陆时不同滑移率工况,仿真分析不同滑移 率下橡胶轮的温度场分布规律,得出以下结论。

(1) 随着滑移率的减小, 橡胶轮接触区表面的 温度逐渐降低,橡胶轮内部生热温度分布范围不 断扩大,生热温度逐渐升高。

(2) 在滑移率从0.8减小到0.2的过程中,橡胶 轮整体温度场的最高温度出现在外表面接触区,且 随着滑移率的减小,橡胶轮的最高温度逐渐降低。

参考文献:

- [1] 张明. 飞机地面动力学若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天 大学,2009
- [2] 姜皓. 轮胎滑移对飞机刹车的影响分析[J]. 装备制造技术, 2015 (8):90-92
- [3] 王洁,李钊,李子然.制动工况下不同滑移率轮胎胎面的磨耗行为 研究[J]. 橡胶工业, 2021, 68(8): 563-568.
- [4] 吴健,陈达,陈龙,等.复杂工况下航空轮胎胎体帘线力学性能研 究[J]. 轮胎工业, 2020, 40(7): 401-405.
- [5] WHICKER D, BROWNE A L, SEGALMAN D J, et al. A

thermomechanical approach to tire power loss modeling[J]. Tire Science and Technology, 1981, 9(1): 3-18.

- [6] KONDÉ A K, ROSU I, LEBON F, et al. Thermomechanical analysis of an aircraft tire in cornering using coupled ale and lagrangian formulations[J]. Central European Journal of Engineering, 2013, 3 (2):191-205.
- [7] YAVARI B, TWORZYDLO W W, BASS J M. A thermomechanical model to predict the temperature distribution of steady state rolling tires[J]. Tire Science and Technology, 1993, 21 (3):163-178.
- [8] LINKE T, WANGENHEIM M, LIND H, et al. Experimental friction and temperature investigation on aircraft tires[J]. Tire Science and Technology, 2014, 42(3): 116-144.
- [9] ALROOI A A, WANG W, ZHAO Y. Aircraft tire temperature at touchdown with wheel prerotation[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54 (3):926-938.
- [10] ALROQI A A, WANG W. The prevention of aircraft tires overheating by pre-rotating the wheels[C]. 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). New York: IEEE, 2016: 443-447.
- [11] ROSU I, ELIAS-BIREMBAUX H L, LEBON F, et al. Experimental and numerical simulation of the dynamic frictional contact between an aircraft tire rubber and a rough surface[J]. Lubricants, 2016, 4(3): 29
- [12] ROSU I, ELIAS-BIREMBAUX H L, LEBON F. Finite element modeling of an aircraft tire rolling on a steel drum: experimental investigations and numerical simulations[J]. Applied Sciences, 2018,8(4):593
- [13] 何燕. 轮胎非稳态温度场的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [14] 张猛. 着陆过程航空轮胎热-力学特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工 业大学,2019.
- [15] 陈平. 轮胎热机耦合力学特性及建模研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

Thermal-mechanical Coupling Simulation of Aircraft Tire under Different Slip Conditions

AN Shuang, WU Jian, LI Yanbin, SU Benlong, WANG Youshan [Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China]

Abstract: The finite element simulation analysis was carried out for the rubber wheel, and a thermalmechanical coupling process considering the friction heat build–up and the hysteresis heat build–up was established. According to the variation curve of the slip rate of aircraft tires with temperature during landing, the temperature field distribution of the rubber wheel under different slip rates was studied. The results showed that with the decrease of the slip rate, the surface temperature of the contact area of the rubber wheel gradually decreased, the distribution range of the heat build–up temperature inside the rubber wheel increased continuously, and the heat build–up temperature increased gradually. In the process of decreasing the slip rate from 0. 8 to 0. 2, the maximum temperature of the overall temperature field of the rubber wheel appeared in the contact area of the outer surface, and as the slip rate decreased, the maximum temperature of the rubber wheel gradually decreased.

Key words: aircraft tire; rubber wheel; slip rate; thermal-mechanical coupling; finite element simulation

益阳橡机两项金属加工工艺获奖

近日,第四届金属加工工艺创新论坛暨金属 加工工艺创新奖颁奖典礼、金属加工工艺征文大 赛颁奖典礼在湖北武汉举行。益阳橡胶塑料机械 集团有限公司(简称益阳橡机)的"密炼机转子体 高效铣削毛坯工艺设计"和"转子体堆焊合金焊接 程序离线优化"论文分获"金属加工工艺创新奖" 和"金属加工工艺征文大赛一等奖"。

"密炼机转子体高效铣削毛坯工艺设计"通过 理论与实践的结合,实现对密炼机产品的关键核 心工件转子体加工工艺的创新,满足了密炼机转 子体的加工需求,实现了密炼机转子体毛坯件大 批量的高效生产。

"转子体堆焊合金焊接程序离线优化"提高了 离线自动化编程的效率和质量,保证了程序的通 用性。这项创新技术使密炼机转子体焊道及节点 排布更均匀,焊接基准与毛坯一致,焊接路径及节 点更标准,并且焊枪角度可根据实际焊接情况进 行统一调整,以达到更优的焊接状态。

(摘自《中国化工报》,2023-08-23)

神马帘子布精算"节流账",深挖"盈利点"

中国平煤神马集团帘子布公司(简称神马帘 子布)大力实施增效工程,精算"节流账",深挖"盈 利点",2023年1—7月节约费用4 000余万元。

2023年以来,神马帝子布以"揭榜挂帅"项目 活动为契机,对生产中长期存在的突出质量问题 进行重点攻关,并每月对"揭榜挂帅"项目实施进 度进行跟踪考核,确保项目稳步推进。2023年前7 个月,神马帘子布产品不良率同比下降0.11%,累 计质量损失额同比降低近600万元。

神马帘子布从大处着眼、小处入手,千方百计 降低运行成本,利用废气替代蒸汽循环使用,2023 年4月中旬以来,已节约资金近400万元。同时,在 细旦丝12系列生产的4个区段,将过去使用4对辊 纺丝改为3对辊纺丝。在直捻机项目改造中,该公 司对拆卸下来的相关配件进行再利用。

神马帘子布还强化过程管控,降低油剂、棉纱、 胶料等原材料的实际消耗及采购成本,2023年前6 个月降低大宗原材料及包装采购成本约290万元。

(摘自《中国化工报》,2023-08-22)