复合材料学报 第26卷 第1期 2月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 1 February 2009

文章编号：1000-3851(2009)01-0113-05

C/C复合材料飞机刹车盘的三维温度场

雷宝灵，易茂中*，徐惠娟
（中南大学 粉末冶金国家重点实验室，长沙 410083）

摘　要： 针对C/C复合材料飞机(B757)刹车盘制动过程中温度测量过程复杂和温度场难于表征的问题，采用有限元方法结合惯性台实验对其温度场进行了分析研究。根据刹车盘制动原理和传热原理，确定了温度场有限元分析中的载荷、边界条件和加载过程。通过仿真后处理形象地描述了制动过程中刹车盘温度场的变化，直观地表现了温度场分布状态。结果表明：在正常着陆的能量条件下中间静盘处测温点在46 s时达到最高温度659℃；承压盘和压紧盘的测温点则在48.5 s时达到最高温度，整个过程各点温度先升高后降低，中间静盘的热负荷最大，温升最快，承压盘次之，压紧盘最小。对比实验测量与仿真结果，两者吻合较好，证实温度场的有效性。

关键词： C/C复合材料；刹车盘；温度场；测温；有限元
中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A

3-D temperature field for C/C composite braking discs

LEI Baoling, YI Maozhong*, XU Huijuan
(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The temperature fields of C/C composites braking discs (B757) were studied by the finite element method and experiment, as they were difficult to measure and reveal during the braking process. The loads, boundary conditions and loading processes in the finite element analysis of temperatures were discussed according to the heat transfer theory and braking principle of the braking discs. The postprocessing of simulation describes the temperature fields of braking discs during braking clearly and visually. The results show that the temperature of the midial stator rises to the maximum 659℃ at 46 s; the temperature of the pressure bearing disk and pressurizing disk rises to the maximum at 48.5 s and the temperature of each test point increases firstly and then decreases in the whole braking process, while the midial stator endures the biggest thermal load, followed by the pressure bearing disk and the pressurizing disk endures the least thermal load. The simulation results are consistent with the experiment data, which verifies the validity of the temperature field results.

Keywords: C/C composite; braking discs; temperature field; temperature test; finite element

C/C复合材料刹车盘以其重量轻、寿命长、摩擦性能稳定、高温下强度高、热膨胀系数低、热容量大、抗热震性好等优点，在现代飞机制动上已逐步取代金属刹车副。飞机制动过程中大量的动能转化为刹车动静盘之间接触表面的热能，热量由摩擦表面逐渐向基体内部传递从而形成温度梯度，温度梯度的存在导致热应力产生，对刹车材料的破坏起主要作用；此外高温还使C/C复合材料有较严重的氧化和氧化磨损[1]，对刹车副的使用寿命、热库周围部件的承受能力有重要影响。因此有必要对C/C复合材料飞机刹车盘温度场作深入研究。

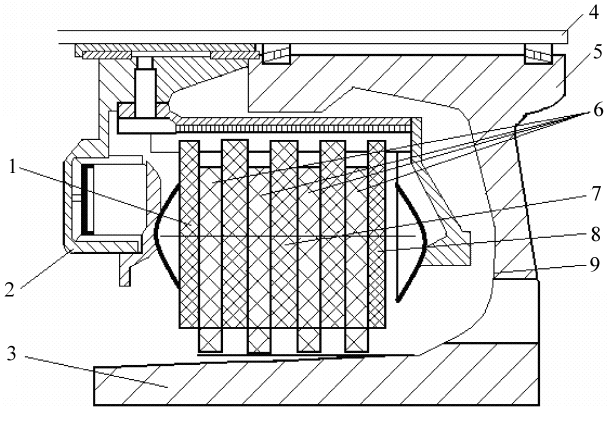
刹车盘摩擦表面温度的产生和扩散是一个复杂的过程。近年来很多学者对此进行了研究，但是由于测量摩擦表面实际温度存在困难，刹车装置的瞬态温度场的研究还不够完善。早期对摩擦温度场的研究多将刹车副简化成二维模型[2]，这种模型只能对整个温度场有一个大致的描述，不能反映实际的温度场分布状态。最近关于刹车盘温度场的研究主要集中在汽车、火车刹车过程，利用有限元方法计算了刹车盘温度场的变化，介绍了热载荷的求解以及边界条件的确立，得出瞬态温度场与刹车材料的热物性能密切相关[3-4]，制动材料[5]和制动条件[6]

收稿日期： 2007-12-25；**收修改稿日期：** 2008-03-12
基金项目： 国家重点基础研究项目(2006CB600906)
通讯作者： 易茂中，博士，教授，博士生导师，研究方向：C/C复合材料、材料摩擦学、材料表面工程　E-mail：yimaozhong@126.com

对制动过程温度场及应力场的影响也尤为重要，此外，摩擦表面温度分布及最高温度对刹车材料的破坏起主要作用，与加载条件密切相关[7]。飞机刹车过程与汽车、火车制动过程在结构、材料以及最高温度上都存在很大差异。目前飞机刹车片用的摩擦材料主要是粉末冶金材料和 C/C 复合材料，有关飞机刹车温度场的研究集中在粉末冶金材料[8-10]。本文中利用有限元软件仿真飞机(B757)刹车过程温度场变化，对比仿真与地面惯性台实验结果，观察仿真结果中刹车盘的温度变化过程，从而有利于更进一步的热应力分析以及飞机刹车材料的设计。

1　实验方法

实验装置如图 1 所示，刹车副由 4 个动盘、3 个静盘、1 个压紧盘和 1 个承压盘组成，动盘与静盘、压紧盘和承压盘采用交错分布的方式进行工作，4 个动盘通过外花键与轮毂连接，随机轮转动；静盘则通过内花键装在与起落架相对固定的扭力筒上，刹车副不工作时，动、静盘摩擦面间有一定间隙，处于“脱开”状态；制动时，动、静盘分别沿轮毂的花键套和花键轴滑动，通过压紧盘对刹车副施压，使动、静盘相互压紧而产生摩擦力矩，达到制动效果。从图 1 可知，盘式刹车副只承受轴向载荷，结构简单工作可靠，机轮轴无附加弯矩。测温点分别布在中间静盘(MS)、压紧盘(PD)和承压盘(PB)的中径处。在 HJDS-Ⅱ型动态模拟试验机正常着陆下的能载水平进行实验并测温。



1—Pressurizing disk ; 2—Pressure bearing seat; 3—Thermal fusible plug; 4—Axle; 5—Flange; 6—Rotor; 7—Midial stator; 8—Pressure bearing disk; 9—Heat insulation layer

图 1　盘式刹车装置示意图

Fig. 1　Disk brake assemblage

2　仿真模拟

根据传热学理论，柱坐标系中轴对称结构的不稳定热传导方程如下[11]：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk_r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{1}$$

边界条件和初始条件为

$q_n = h(T - T_\infty)$　　on Γ_1

$q_n = q_n^*$　　on Γ_2

when $t = 0$，$T = 25℃$

式中：ρ、c、k_r和k_z分别是材料的密度、比热、r 和 z 方向的热传导；h 是对流换热系数，经计算得到。q_n^* 为由摩擦引起的热流密度；Γ_1、Γ_2是对流和热流密度边界。

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程，在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，对非稳态温度场进行离散化，并进行单元分析及总体合成得到瞬态热平衡，以矩阵形式表达为

$$([\boldsymbol{C}]+[\boldsymbol{K}]+[\boldsymbol{H}])\{\boldsymbol{T}\}=\{\boldsymbol{q}\}+\{\boldsymbol{h}\} \tag{2}$$

式中：$[\boldsymbol{C}]$为整体热容矩阵；$[\boldsymbol{K}]$是整体热导矩阵；$[\boldsymbol{H}]$是整体边界对流矩阵；$\{\boldsymbol{T}\}$是整体温度向量；$\{\boldsymbol{q}\}$是整体热流向量；$\{\boldsymbol{h}\}$是整体边界对流向量。

2.1　建　模

采用 ANSYS 有限元分析软件进行刹车盘三维立体建模，观察刹车盘各个方向上的温度分布变化，作出测温点处温度变化曲线并与试验结果对比。ANSYS 温度场分析过程：实体建模—网格划分—加载与计算—后处理显示结果。

以所有刹车盘组成的制动装置为研究对象，由于其轴对称结构，取刹车盘的 1/8 建模，划分网格如图 2 所示。

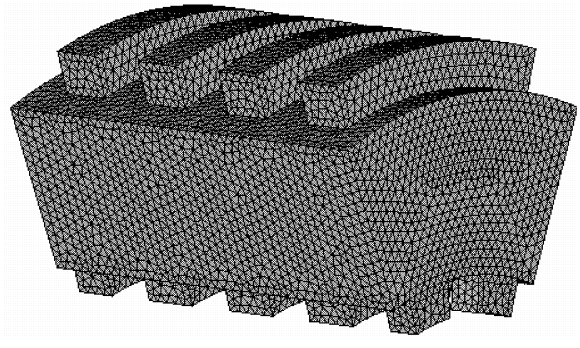


图 2　刹车盘的三维立体模型

Fig. 2　Three-dimensional model of braking discs

2.2 定解条件

2.2.1 对流换热系数

能量传递存在 3 种基本方式：导热、对流和热辐射。在模拟刹车试验中，除了导热散热，摩擦刹车盘与空气的对流换热为其主要的散热途径，热辐射传递的热量可以忽略不计。对流换热系数与材料无关，而与周围流体的温度、流体的物性参数、壁面的温度和壁面外形等参数相关。

表面换热系数取决于流体流动状态，流体物理性质、壁面温度以及壁面的几何形状，即

$$h = Nu\lambda / l_0 \tag{3}$$

其中：Nu 为努谢尔特数；l_0 为固体壁面特征尺寸(m)；λ 为流体导热系数(W/(m·K))。

本研究中涉及到圆柱扰流。

(1)动盘外表面

刹车过程中刹车盘外表面与空气属于受迫流动换热状态，对于圆柱扰流问题，努谢尔特数根据下述经验公式计算[12]：

$$Nu = \begin{cases} 0.193Re^{0.618}Pr^{1/3} & 4\times10^3 < Re < 4\times10^5 \\ 0.026Re^{0.805}Pr^{1/3} & 4\times10^5 < Re < 4\times10^7 \end{cases} \tag{4}$$

其中，Pr 为普朗特数。

(2)动盘内表面及静盘表面

整个过程中动盘内表面及静盘表面属于有限空间的自然对流传热[12]

$$Nu \approx 0.2(Gr_\delta Pr)_m^{1/4} \qquad 10^3 < Gr_\delta Pr < 10^9 \tag{5}$$

其中：Gr 为格拉晓夫数；下角标“δ”为夹层厚度；下角标“m”表示以 $t_m = \frac{1}{2}(t_{\omega,1} - t_{\omega,2})$ 作为定性温度；$t_{\omega,1}$、$t_{\omega,2}$ 分别为夹层两端的温度。

2.2.2 热流密度的计算

为了便于模拟计算，假设摩擦过程中材料的密度保持恒定，且在整个过程压力分布均匀。摩擦面热流密度随时间、半径的变化如下：

$$q(r,t) = \eta\mu p(r,t)v(r,t) = \eta\mu p(r,t)\omega(t)r \tag{6}$$

式中：$q(r,t)$ 为 t 时刻刹车盘表面上半径为 r 处吸收的热流密度；η 为转化到刹车盘的热能份额(由于试验采用相同材料制备的动、静盘，所以 η 取0.5)；μ 为摩擦因数，通过实验测量得到；$p(r,t)$ 为 t 时刻刹车盘表面上半径为 r 处的比压，通过压紧盘所施加的油压计算得到；$v(r,t)$ 为 t 时刻刹车盘表面上半径为 r 处的线速度；$\omega(t)$ 为 t 时刻刹车盘的角速度，$\omega(t) = v(t)/r$。

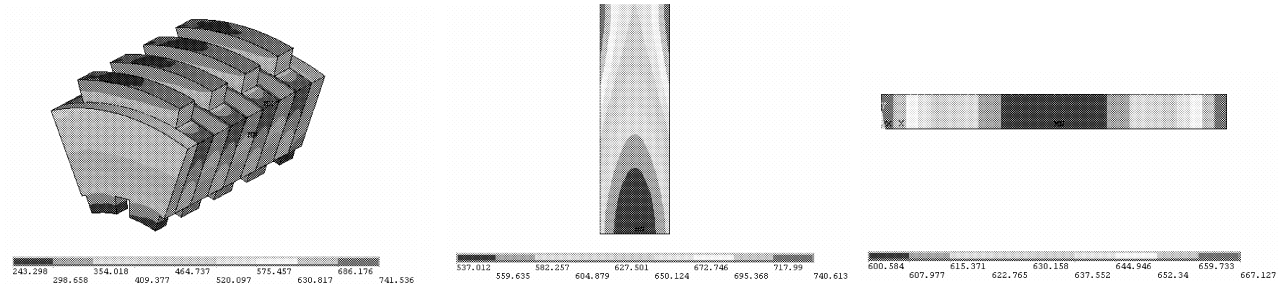
2.3 热物性能

根据 GJB330A－2000 固体材料比热测试方法测得 C/C 复合材料的比热随温度变化关系。由于导热系数与比热和热扩散率相关，采用激光闪光法在 JR－3 热物性测试仪上测得热扩散率，结合前面的比热可以求得导热系数随温度变化关系。将比热、导热系数和密度作为材料性能输入进行模拟计算。

3 结果与讨论

利用 ANSYS 软件，对飞机刹车副在正常着陆情况下制动过程中三维瞬态温度场进行数值仿真。仿真起始时间(t＝0 s)为飞机加速开始时刻，最高温度时刻刹车盘温度场分布结果如图 3 所示，其中图 3(a)、3(b)、3(c)分别为整套刹车副的 1/8 部分、中间静盘半纵截面和中间静盘中径面的的温度分布云图；图 4 为 3 个测温点温度-时间关系曲线图，其中图 4(a)为仿真计算结构，图 4(b)为实验测量结果。

由图 3(a)可以看出在最高温度时刻整个刹车副的温度在 243.298～741.536℃之间呈梯度分布。动盘的温升最快，静盘次之，承压盘和压紧盘温升最慢，这主要是因为动盘的厚度比静盘薄，在吸收



(a) 3-D temperature field (b) Half section of midial stator (c) Middle radius section of midial stator

图 3 刹车盘制动过程最高温度时刻的温度场分布

Fig. 3 Temperature fields of braking discs at the time of t_{max} during braking

同样热量的情况下温升快，而承压盘和压紧盘只有一面接受摩擦热，另一面散热效果好，所以温升小而慢。从图 3(b)可以看到，中间静盘的轴向温度梯度分布尤为明显，基体内部与摩擦表面相差约 120℃，热量从摩擦表面扩散到基体内部并逐渐变小；径向温度变化不那么明显，在跨度相对较大的情况下内外径温度相差 100℃，内外径温差主要是由于各半径处热流密度不同引起的，根据式(6)，热流密度 $q(r, t)$与半径 r 成正比，因此半径越大热流密度越大即摩擦产生的热量越大导致材料温升越大。图 3(c)所示为中间静盘中径面的最高温度分布云图，由于中心对称结构只取了中径面的一段。从图 3(c)可以清楚地看到中径面温度梯度分布，热量由两端摩擦面向基体内部传递，温度在 600.584～667.127℃之间。而在结构上动盘上面和静盘下面各有一部分花键没发生接触，无热量产生，同时还有热量经刹车盘流向刹车壳体。热量从发生摩擦的部分流向这部分造成接触面上半径较大处的中间部分温度偏高，四周的温度偏低。同时也能看出空气的对流换热远不如结构内部热传导对温度场分布的影响大。

由图 4 可以看出，中间静盘处测温点在 46 s 时达到最高温度 659℃；承压盘和压紧盘的测温点则在 48.5 s 时达到最高温度。整个过程先增大后减小。制动过程中，机轮的速度逐渐减小，由式(7)可知接触面摩擦产生的热量随刹车时间的增长而变小，同时部分热量通过刹车壳体、空气传走，内部热传导促使刹车装置内温度梯度逐渐减小，整体温度下降。因此刹车装置内部最高温度随时间变化升高得越来越慢，达到最高值后开始缓慢下降。

对比图 4(a)、4(b)可以看到，仿真计算结果与实验测量结果基本一致。相同点：中间静盘的温升情况基本一致，即最高温度和达到最高温度的时间均相吻合；不同点：承压盘和压紧盘的仿真计算温升比实验测量结果稍高；3 个测温点达到最高温度后温度下降的趋势实验结果比仿真结果快。造成以上差异的原因是飞机刹车装置结构复杂，部分外界条件无法考虑周全，另外实验中刹车结束后动、静盘“脱开”，散热条件变好，这就导致刹车盘达到最高温度后降温较快。

综合图 3 和图 4，仿真模拟 C/C 复合材料飞机刹车过程在尽可能多考虑真实边界条件后较好地吻合了实验测量结果。通过图 3 可以清晰地看到某一时刻刹车盘各个部位、方向的温度场分布，甚至可以视频观看整个刹车过程的温度场变化，这有助于分析刹车盘的受热破坏和刹车效率。从而对刹车装置的优化设计起指导作用。

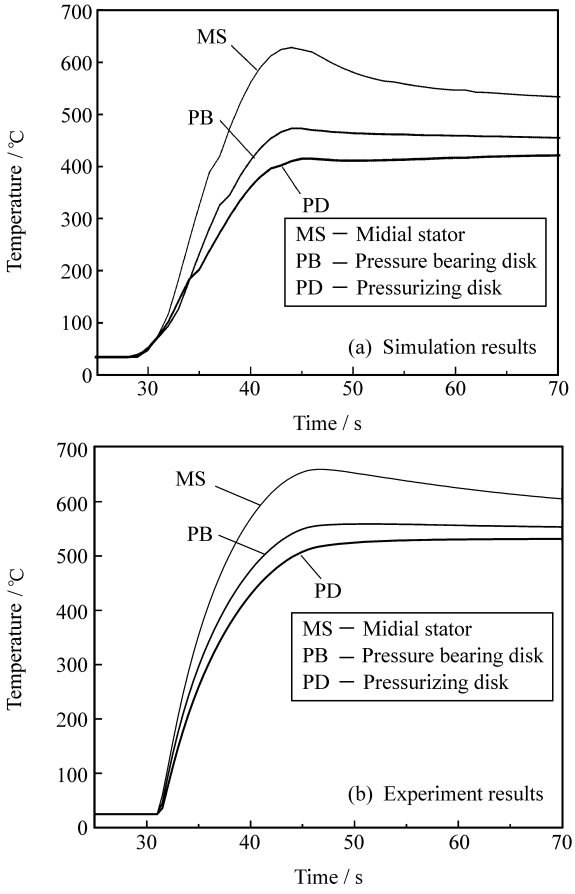


图 4　刹车盘制动过程测温点的温度-时间关系曲线

Fig. 4　Temperature - time curves of different temperature testing points of braking discs

4　结　论

(1) 采用 ANSYS 有限元分析软件仿真模拟 C/C 复合材料飞机刹车盘瞬态温度场问题。在分析中，采用一个统一的有限元模型来进行热分析，阐述了相关热载荷计算方法和关键参数的确定。

(2) 综合惯性台实验测量结果与仿真模拟结果，得出了比较真实的温度场分布云图。温度从摩擦表面到基体内部、从外径到内径均呈降低趋势的梯度分布。刹车盘的最高温度出现在摩擦表面较大半径处，最高温度随着刹车时间先升后降。

(3) 温度场的得出有利于分析刹车盘的破坏和刹车装置的优化设计。

参考文献：

[1] 易茂中，葛毅成，刘　槟，黄启中，熊　翔，黄伯云.航空刹车副用C/C复合材料的氧化行为[J].有色金属学报，2002，12(1)：101-105.

Yi Maozhong，Ge Yicheng，Liu Bin，Huang Qizhong，Xiong Xiang，Huang Baiyun. Oxidation behaviour of C/C composite for airplane brake disc [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2002，12(1)：101-105.

[2] El Abdi R，Smarout H. Anisothermal modeling applying to brake discs [J]. International Journal of Non-linear Mechanics，1999，34(5)：797-805.

[3] 鲁国富，郭世永. 盘式制动器瞬态温度场的数值模拟[J]. 机械研究与应用，2006，19(1)：31-35.

Lu Guofu，Guo Shiyong. Numerical simulation of transient temperature field of disc-pad brake [J]. Mechanical Research & Application，2006，19(1)：31-35.

[4] 丁　群，谢基龙. 基于三维模型的制动盘温度场和应力场计算 [J]. 铁道学报，2002，24(6)：34-38.

Ding Qun，Xie Jilong. The temperature field and stress field calculation of brake disc based on 3-dimension model [J]. Journal of the China Railway Society，2002，24(6)：34-38.

[5] 陈德玲，张建武，周　平. 高速轮轨列车制动盘热应力有限元研究 [J]. 铁道学报，2006，28(2)：39-43.

Chen Deling，Zhang Jianwu，Zhou Ping. FEM Thermal stress analysis of high speed locomotive braking discs [J]. Journal of the China Railway Society 2006，28(2)：39-43.

[6] 赵海燕，张海泉，汤晓华，林　健，蔡志鹏. 快速列车盘型制动热过程有限元分析[J].清华大学学报，2004，54(5)：589-592.

Zhao Haiyan，Zhang Haiquan，Tang Xiaohua，Lin Jian，Cai Zhipeng. Thermal FEM analysis of passenger railway car brake discs [J]. J Tsinghua Univ：Sci & Tech，2005，45(5)：589-592.

[7] Gao C H，Lin X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model[J]. Journal of Material Processing Technology，2002，129(1/3)：513-517.

[8] 姚萍屏，汪　琳，熊　翔，黄伯云. 粉末冶金航空刹车副温度场的研究[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2005，10(4)：241-246.

Yao Pingping，Wang Lin，Xiong Xiang，Huang Baiyun. Research on temperature field of powder metallurgy aviation brake assemblage[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy，2005，10(4)：241-246.

[9] 李　涛，吴瑞祥. 飞机刹车装置的三维瞬态温度场的分析[J]. 机械工程师，2006(6)104-107.

Li Tao，Wu Ruixiang. 3-D transient temperature field analysis for aircraft brake system [J]. Mechanical Engineer，2006(6)：104-107.

[10] 周　萍，简正柱，姚萍屏. 飞机制动过程中刹车副温度场的数值模拟[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2007，12(5)：305-309.

Zhou Ping，Jian Zhengzhu，Yao Pingping. Numerical calculation and research on temperature field of brake for aircraft during braking[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy，2007，12(5)：305-309.

[11] Choi Ji-Hoon，Lee In. Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes [J]. Wear，2004，257(1/2)：47-58.

[12] 王补宣. 工程传热传质学 [M]. 北京：科学出版社，1998：139-226.

Wang Buxuan. Engineering heat and mass transfer [M]. Beijing：Science Press，1998：139-226.