

文章编号:1000-6893(2010)11-2282-06

基于 Cantor 集理论粗糙表面刹车副温度场研究

薛晶, 李玉忍, 刘卫国, 田广来

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

Research on Temperature Field of Brake Dicks with Rough Contact Surfaces Based on Cantor Set Theory

Xue Jing, Li Yuren, Liu Weiguo, Tian Guanglai

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 为保证飞机着陆安全,避免热衰退现象影响制动性能,研究了飞机刹车副表面粗糙度对温度场的影响。将 Cantor 集理论应用到接触形貌分析中,按照体守恒原理建立刹车副粗糙表面接触模型,考虑其对刹车副材料热物理性能的影响,建立极坐标下刹车副温度场有限元模型。用 ANSYS 对其进行仿真分析。仿真结果更接近刹车副经验温度,证明了所建立的刹车副温度场模型合理、可行,为刹车副温度场分析、计算和研究提供了理论支持。

关键词: 计算机仿真; 飞机; 刹车; 温度分布; 表面形貌; Cantor 集

中图分类号: V226 **文献标识码:** A

Abstract: High heat energy is generated among brake dicks by friction during aircraft braking. The contact surfaces of brake disks are rough rather than flat, causing hot spotting easily. This may accelerate brake wear and fatigue damage and jeopardize the security of airplane landing. This article builds a contact model of brake surfaces with Cantor set theory based on volume conservation, and studies its effect on the thermal physical parameters of brake materials. The temperature field is calculated using the finite element model in polar coordinates. The numerical simulation results by ANSYS are in good agreement with empirical values, and provide evidence for the validity of the model. It is a theoretical support for the study of the temperature field of aircraft brake disks.

Key words: computer simulation; aircraft; braking; temperature distribution; surface morphology; Cantor set

飞机在制动过程中,主要依赖刹车副的相互摩擦产生制动效果,虽然宏观上刹车副之间的接触是完全的,然而实际上由于材料表面并非绝对光滑,而是存在无数微凸体,因此制动过程中飞机刹车副之间仅部分微凸体相互摩擦产生热,如果某一微凸体承担不适当的温度,将引起热弹性的不稳定。这会加速摩擦材料热降解、制动器的磨损及疲劳破坏,降低摩擦因数,严重削弱材料的机械性能,影响飞机制动的安全性,因此研究飞机刹车副瞬态温度场的时候对表面形貌的处理就非常重要。

关于粗糙表面微接触问题很早就开始研究了,现在已经提出的模型有^[1]:GW 模型、PW 模型、CEB 模型、H 模型、ZMC 模型等,大部分用于研究接触表面的机械摩擦特性。近十余年,越来越多的研究关注粗糙表面热特性,尤其是对使用性能和寿命紧密相关的热应力^[2]和热磨损^[3]方

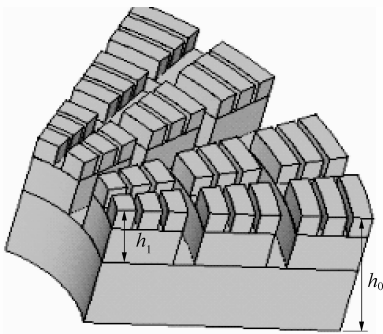
面,而这两方面的性能与接触表面的最高温度和平均温升关系紧密。J. A. Greenwood^[4]提出了几种插值公式计算移动热源产生的最大温升,但是没有介绍接触物体的热分配问题。X. Tian 等^[5]使用坐标变换提出了半无限体和椭球热源接触的最大温升和平均温度的关系。J. Bos 等^[6]首先通过匹配区域各点温度求出热分配系数,然后使用影响系数方法分析了椭球接触时均匀分布、半椭圆热分布,此方法适用于接触两物体相对运动情况。L. Qiu 等^[7]提出了一种影响系数方法计算润滑接触表面温度,其中热分配情况是通过匹配表面 2D 网格各个节点温度获得的。R. Komanduri 等^[8-9]建立了半无限体稳态带状热源接触表面摩擦热模型。对每个接触体假设一个特定的函数表达式逼近热分配函数。最近, A. Kadiric 等^[10]应用影响系数方法计算线接触温度分配系数在各个节点上定义,通过解系统方程得到具体值,使之与接触表面各节点温度匹配。D. G. Bansal^[11]考虑

圆形接触区域具有均匀分布压力或 Heratzipan 接触压力情况下,假设分别产生均匀或半球摩擦热分布。接触体之间的热分配由接触区域每个节点处的温度方程决定,此方法相对确定方法^[10]有很多好处。随后 D. G. Bansal^[12]继续深入研究提出了确定接触表面半无限体接触的稳态温升方法,却限制于稳定条件。

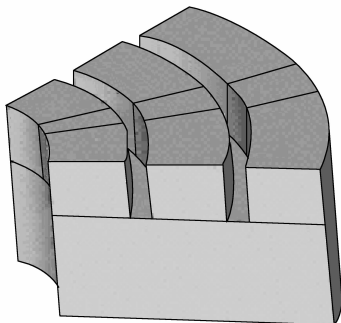
本文应用 Cantor 集理论,考虑摩擦的塑性形变,按照体守恒建立飞机刹车副粗糙表面的 Cantor 集接触模型,以此为基础用有限元法建立 C/C 飞机刹车副的温度场计算方程。通过理论分析与计算,得到了刹车副的温度场分布,分析了接触表面的粗糙形貌的重要性,提高了温度场的分析和计算精度。

1 飞机刹车副表面的 Cantor 集接触模型

接触表面 Cantor 集轮廓和表面如图 1(a)所示,共生过程如下^[13]:在径向和圆周方向上,第 n 代微凸体的径向长度、角度是第 $n-1$ 代的 f_r 、 f_θ 倍($f_r < 1, f_\theta < 1$),均分为 s_r 、 s_θ 份;厚度方向上,第 n 代微凸体的厚度是第 $n-1$ 代的 f_z 倍($f_z < 1$)。对于粗糙表面 f_r 、 f_θ 和 f_z 参数的获得在文献^[14]中有详细介绍。



(a) Cantor 表面形貌



(b) 摩擦后的表面形貌

图 1 粗糙表面形貌

Fig. 1 Rough surface profile

用数学表达式表示为

$$\left. \begin{aligned} r_n &= f_r r_{n-1} = f_r^n r_0 \\ \theta_n &= f_\theta \theta_{n-1} = f_\theta^n \theta_0 \\ h_n &= f_z h_{n-1} = f_z^n h_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: r_n 、 θ_n 和 h_n 分别为第 n 代微凸体的径向长度、圆周角度和高度; r_0 、 θ_0 和 h_0 分别为径向长度、角度和高度的初始值。

由此可知,单个 $n-1$ 代微凸体上 n 代微凸体体积和 $V_{n,n-1}$ 为

$$V_{n,n-1} = \frac{1}{2} \frac{f_\theta^n}{s_\theta^{n-1}} \frac{f_r^n}{s_r} r_0 \theta_0 h_0 (f_z^n - f_z^{n+1}) \cdot \left[2s_r r_{n-1,0} + \frac{f_r^n}{s_r^{n-2}} r_0 + s_r \frac{f_r^{n-1} - f_r^n}{(s_r - 1)^{n-1}} r_0 \right] \quad (2)$$

式中: $r_{n-1,0}$ 为此 $n-1$ 代微凸体起始半径。

对于所有 $n-j$ 代微凸体上 n 代微凸体体积和 $V_{n,n-j}$ 为

$$V_{n,n-j} = \frac{1}{2} \frac{f_\theta^n}{s_\theta^{n-(j+1)}} \frac{f_r^n}{s_r} \theta_0 r_0 h_0 (f_z^n - f_z^{n+1}) \cdot \left[2s_r^{j+1} r_{n-j,0} + r_0 \sum_{k=0}^j \frac{f_r^{n-k}}{s_r^{n-(j+2)-k}} - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{f_r^{n-1-k}}{s_r^{n-(j+2)-k}} + r_0 s_r^{j+1} \sum_{k=1}^{j+1} \frac{f_r^{n-k} - f_r^{n-k+1}}{(s_r - 1)^{n-k}} \right] \quad (3)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n-1$; $r_{n-j,0}$ 为 $n-j$ 代微凸体起始半径的最小值。

当飞机处于制动时,开始时相互滑动速度最大,刹车压力大,因此对于 C/C 复合材料的刹车盘,可以在短时间内形成稳定摩擦膜^[15],此外由于从摩擦试验中可以看到刹车副表面有凹痕,因此,假设对于 Cantor 集模型的第 1 代微凸体始终存在,且此时第 1 代微凸体表面积大于刹车压力下的临界面积。则第 2 代微凸体至第 n 代微凸体的体积和 $V_{n>1}$ 为

$$V_{n>1} = \frac{1}{2} \theta_0 r_0 h_0 (1 - f_z) \left\{ 2r_{in} (f_\theta f_r f_z)^2 \cdot \frac{(f_\theta f_r f_z)^{n-1} - 1}{f_\theta f_r f_z - 1} + \frac{r_0 s_r f_r}{f_r - s_r} \left[\frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2}{(s_r)^n} \cdot \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^{(n-1)} - (s_r)^{(n-1)}}{f_\theta f_r^2 f_z - s_r} - \frac{f_r}{s_r} \cdot (f_\theta f_r f_z)^2 \frac{(f_\theta f_r f_z)^{(n-1)} - 1}{f_\theta f_r f_z - 1} \right] - \frac{r_0 s_r}{f_r - s_r} \left[\frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2}{(s_r)^n} \cdot \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^{(n-1)} - (s_r)^{(n-1)}}{f_\theta f_r^2 f_z - s_r} - \frac{f_r}{s_r} \cdot (f_\theta f_r f_z)^2 \frac{(f_\theta f_r f_z)^{(n-1)} - 1}{f_\theta f_r f_z - 1} \right] - \frac{r_0 (1 - f_r) (s_r - 1)}{(f_r - s_r + 1)} \left[(f_\theta f_r f_z)^2 \frac{(f_\theta f_r f_z)^{n-1} - 1}{f_\theta f_r f_z - 1} - \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2 (f_\theta f_r^2 f_z)^{n-1} - (s_r - 1)^{n-1}}{(s_r - 1)^n (f_\theta f_r^2 f_z - s_r + 1)} \right] \right\} \quad (4)$$

式中: r_{in} 为 0 代微凸体内径, 即刹车副内径。

微凸体无穷共生, 式(4)中 $n \rightarrow \infty$ 时则为第 2 代以上所有级别微凸体的体积和, 即

$$V = \lim_{n \rightarrow \infty} V_{n>1} = \frac{1}{2} \theta_0 r_0 h_0 (1 - f_z) \cdot \left\{ -2r_{in} \frac{(f_\theta f_r f_z)^2}{f_\theta f_r f_z - 1} + \frac{r_0 s_r f_r}{f_r - s_r} \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2}{f_\theta f_r^2 f_z - s_r} \cdot \left[\frac{f_\theta^2 f_r^3 f_z^2}{s_r (f_\theta f_r f_z - 1)} - \frac{1}{s_r} \right] - \frac{r_0 s_r}{f_r - s_r} \cdot \left[\frac{f_\theta^2 f_r^3 f_z^2}{s_r (f_\theta f_r f_z - 1)} - \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2}{f_\theta f_r^2 f_z - s_r} \frac{1}{s_r} \right] + \frac{r_0 (1 - f_r) (s_r - 1)}{(f_r - s_r + 1)} \left[\frac{(f_\theta f_r f_z)^2}{f_\theta f_r f_z - 1} - \frac{(f_\theta f_r^2 f_z)^2}{f_\theta f_r^2 f_z - s_r + 1} \frac{1}{s_r - 1} \right] \right\} \quad (5)$$

假设摩擦过程塑性形变, 产生的磨削遵守体守恒定律, 填补于第 1 代微凸体间, 如图 1(b) 所示, 则可填补体积 V_{space} 为

$$V_{space} = \frac{1}{2} (1 - f_z) h_0 f_r r_0 (2r_{in} + r_0) (1 - f_\theta) \theta_0 \quad (6)$$

由于 V 和 V_{space} 都只与表面参数相关, 因此两者的大小比较主要取决于各个参数, 现假定:

(1) 若 $V - V_{space} < 0$, 第 1 代微凸体向“凹”进部分填补, 直至“凹”状只存在于径向方向, 此时第 1 代微凸体的下降高度 h' 为

$$h' = \frac{2(V_{space} - V)}{f_\theta \theta_0 f_r r_0 (2r_{in} + r_0)} \quad (7)$$

则最终这个特殊的表面层高度 H 为

$$H = h_1 - h' = f_z h_0 - h' \quad (8)$$

(2) 若 $V - V_{space} > 0$, 多余部分添加到“凹”状的两端, 使得最终的形状与第 1 种情况相同, 此时第 1 代微凸体上升的高度 h'' 为

$$h'' = \frac{2(V - V_{space})}{f_\theta \theta_0 f_r r_0 (2r_{in} + r_0)} \quad (9)$$

则最终这个特殊的表面层高度 H 为

$$H = h_1 + h'' = f_z h_0 + h'' \quad (10)$$

2 Cantor 集模型对接触层参数的影响

考虑 Cantor 集接触模型对接触层各热物理参数的影响, 按照各个参数的物理意义, 可得

接触层平均密度 ρ' 为

$$\rho' = \rho_c f_\theta f_r + \rho_g (1 - f_\theta f_r) \quad (11)$$

接触层平均比热容 c' 为

$$c' = \frac{c_c \rho_c f_\theta f_r + c_g \rho_g (1 - f_\theta f_r)}{\rho_c f_\theta f_r + \rho_g (1 - f_\theta f_r)} \quad (12)$$

接触层径向平均热传导系数 k' 为

$$k' = k_c f_r + k_g (1 - f_r) \quad (13)$$

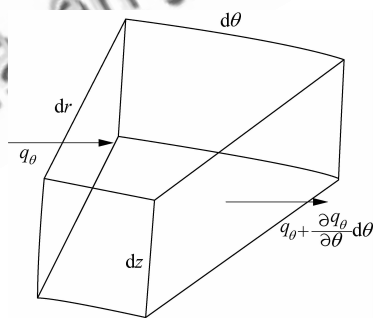
式中: ρ_c, c_c, k_c 分别为刹车材料的密度、比热容、热传导系数; ρ_g, c_g, k_g 分别为空气的密度、比热容、热传导系数。

3 刹车副温度场模型

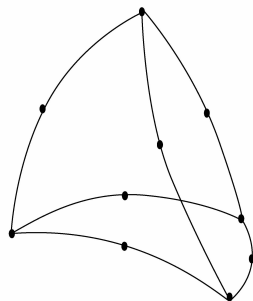
在极坐标下, 刹车副内每个单元内热流状态 (如图 2(a)) 热传导方程如下:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \frac{1}{2} (2r + dr) dr d\theta dz = \left[q_\theta - \left(q_\theta + \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} d\theta \right) \right] dr dz + \frac{1}{2} \left[q_z - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \right] (2r + dr) dr d\theta + \left[q_r d\theta dz - \left(q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta dz \right] + \dot{q} \frac{1}{2} (2r + dr) dr d\theta dz \quad (14)$$

式中: q_θ, q_z, q_r 分别为沿 θ, z, r 方向流进单元的热流密度; c 为比热容; ρ 为密度; \dot{q} 为热生成率; T 为瞬时温度; t 为时间变量。



(a) 极坐标系下热流状态



(b) 曲边四面体

图 2 传导方程模型

Fig. 2 Model of conduction equation

结合傅里叶定律可得

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} k_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} k_\theta \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (15)$$

式中: k_r 、 k_θ 和 k_z 分别为 r 、 θ 和 z 方向的导热系数。

由于刹车盘是曲边的,为了适应边界条件,取微元体为曲边四面体,共有 10 个节点(图 2(b)中实心黑点)综合考虑计算精度和计算量,令在微元体内温度沿各轴线性变化,则 $T = T(r, \theta, z, t)$ 可写成

$$T = \mathbf{S}(r, \theta, z) \boldsymbol{\Phi}(t) \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}$ 为节点温度表示的列向量,与时间有关; \mathbf{S} 为形函数,只与坐标有关。

考虑热生成率,模型余差方程为

$$R^e = \iiint_V \mathbf{S}^T \left[k_r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{k_\theta}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \right] dV \quad (17)$$

式中: R^e 为单元的余差。

热辐射的净热量传递可以用斯忒藩-玻尔兹曼方程来计算:

$$\bar{Q} = \varepsilon \sigma A F (T^4 - T_e^4) \quad (18)$$

式中: \bar{Q} 为热流率; ε 为黑度; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数; A 为辐射面的面积; F 为形状系数; T_e 为环境的热力学温度。

结合对流和热辐射边界,边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T - T_e) + \bar{Q} \quad (19)$$

式中: Γ 为边界表面; \mathbf{n} 为边界表面的法向量; \mathbf{h} 为各方向表面对流换热系数构成的向量; \mathbf{k} 为各方向热传导系数构成的向量; \bar{Q} 为 \bar{Q} 在各方向的投影构成的向量。

以此为定解条件,求余差积分方程,整理后得到整体刚度矩阵,使用欧拉方程来进行时间积分,最终可整理为

$$\left(\frac{1}{\theta \Delta t} \mathbf{Z} + \boldsymbol{\Theta} \right) \boldsymbol{\Phi}^{p+1} = \mathbf{X} + \mathbf{Z} \left(\frac{1}{\theta \Delta t} \boldsymbol{\Phi}^p + \frac{1 - \theta}{\theta} \dot{\boldsymbol{\Phi}}^p \right) \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\Theta}$ 、 \mathbf{Z} 为 4×4 阶常数矩阵; \mathbf{X} 为由热生成率积分得到的向量; θ 为 Euler 系数; Δt 为时间步; $\boldsymbol{\Phi}^p$ 为第 p 个时间步时物体温度的向量; $\dot{\boldsymbol{\Phi}}^p$ 第 p 个时间步时温度对时间导数的向量。

式(20)为系统方程描述,可求出各个节点在

离散时间点上的温度。

4 仿真结果及分析

以某飞机为例,7 个 C/C 刹车副制动,规格为: $r_{in} = 111.125 \text{ mm}$, $r_o = 68 \text{ mm}$, 表面参数如下^[14]: $f_r = 0.949 5$, $f_\theta = 0.867 8$, $f_z = 0.932 2$, 飞机能量为 45.46 MJ, 跑道为干燥状态,制动时飞机的刹车速度为 240 km/h, 刹车压力为 12.5 MPa, 运用以上算法,用 ANSYS 进行仿真研究,其仿真结果如下。

图 3 为分别采用 Cantor 集接触表面和绝对平面接触表面情况下最高温度出现时刹车副温度场侧视图,可以看出应用 Cantor 集接触模型时表面最高温度为 904.139 °C,而不考虑表面粗糙度情形下,最高温度为 892.374 °C。刹车副温度场测量十分困难,对于此制动条件,刹车副表面最高温度的经验值一般为 930 °C 左右,由于 Cantor 集接触模型建立的过程也是基于统计信息 f_r 、 f_θ 和 f_z ,是一种平均化接触模型,不存在过高的微凸体,但是对温度场的影响还要看统计模型的处理过程,根据参数估计值比实际值偏大还是偏小,以判断温度场是偏低或偏高,但总体来说采用本文所建立的 Cantor 集接触模型会更加接近于实际情况。

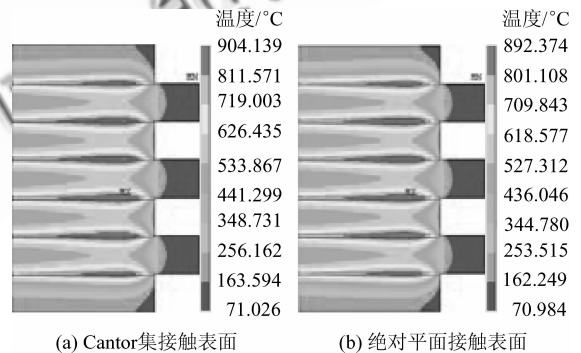


图 3 最高温度出现时的温度场分布
Fig. 3 Temperature field of brake disks at appearance of highest temperatures

图 4 显示了两种情况最高温度出现时,热流密度的分布情况,可以看出当采用本文所建立的 Cantor 集接触模型时,流出的热流密度相对较小,这是因为此时接触层的参数受到影响,热传递系数和比热容降低,使得热流传递产生收缩,没有两个光滑平面直接接触时传热效果好;但两种情况下热流方向大致相同,这基本符合刹车的实际情况。

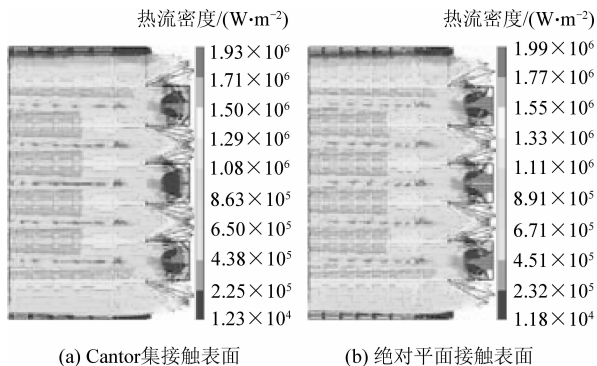


图4 最高温度出现时热流密度分布

Fig. 4 Thermal flux of brake disks at highest temperature appearances

图5为出现最高温度时,4个表面的径向映射温度,从图中可以看出由于接触面的粗糙峰存在,Cantor集接触模型顶面(摩擦发生面)温度要高于其底部平面的温度,这主要是由于实际的摩擦热产生在Cantor集接触模型表面上,热传递效果不佳。

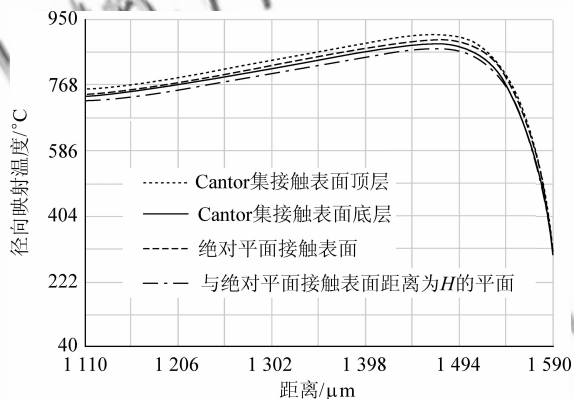


图5 最高温度出现时各平面的径向映射温度

Fig. 5 Radial mapping temperatures at highest temperature appearances

图6是各个表面最高温度随时间变化的曲线,通过对比可以看到,由于Cantor集接触层的存在,顶层与底之间的温差要大于接触为绝对平面的情况,随着时间的增加,各表面的最高温度相差不大,这是因为随着时间的增加,热量慢慢从接触表面向刹车副内部流动,粗糙峰表面温度与平均表面温度相差不大所致。总的来说,接触表面的粗糙形貌对温度场有一定影响。仿真结果表明接触表面粗糙度的存在对热流大小影响较大,影响刹车副的机械性能,因此在计算模型中考虑接触表面的粗糙度,对刹车副温度场进行分析是必要的。所建立的计算模型合理,可以较真实地反

映刹车过程的温度场变化。

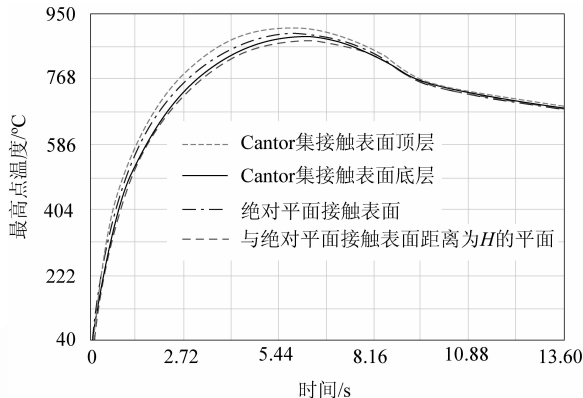


图6 各层最高点温度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of different highest temperatures with time

5 结论

采用Cantor集理论,按照体守恒建立刹车副粗糙表面接触模型,将其应用到温度场计算,以此为基础,用有限元法求解刹车副温度场计算模型。

(1) 应用所建立的Cantor集接触模型计算刹车副温度场是一种新的尝试,从计算结果来看,其较好地接近于刹车副的经验温度,可以用于分析粗糙形貌对温度场分布影响。

(2) 此模型思路清晰,作为考虑接触过程中塑性变形的一种平均化模型,更加适用于工程实际情况。

(3) 在三维有限元计算模型基础上,考虑接触表面的粗糙形貌,可以比较真实地模拟刹车副的温度场,为飞机刹车副的设计、试验和工程应用提供理论依据,也为研究热弹性不稳定性打下良好的基础。

参考文献

- [1] Horng J H, Wei C C, Tsai H J, et al. A study of surface friction and particle friction between rough surface[J]. Wear, 2009, 267(5-8): 1257-1263.
- [2] Wang Q, Liu G. A thermoelastic asperity contact model considering steady-state heat transfer[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(4): 763-770.
- [3] Vernersson T. Temperatures at railway tread braking. Part 1: modeling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(2): 167-182.
- [4] Greenwood J A. An interpolation formula for flash temperatures[J]. Wear, 1991, 150(1-2): 153-158.
- [5] Tian X, Kennedy F E. Maximum and average flash temperatures in sliding contacts[J]. Journal of Tribology, 2003, 25(1): 1-10.

- 1994, 116(1): 167-174.
- [6] Bos J, Moes H. Frictional heating of tribological contacts [J]. Journal of Tribology, 1995, 117(1): 171-177.
- [7] Qiu L, Cheng H S. Temperature rise simulation of three-dimensional rough surfaces in mixed lubricated contact [J]. Journal of Tribology, 1998, 120(2): 310-318.
- [8] Komanduri R, Hou Z B. Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems [J]. Wear, 2001, 251(1-12): 925-938.
- [9] Komanduri R, Hou Z B. Tribology in metal cutting some thermal issues[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(4): 799-815 .
- [10] Kadirc A, Sayles R S, Ioannides E. Thermo-mechanical model for moving layered rough surface contacts[J]. Journal of Tribology, 2008, 130(1): 011016.1-011016.14.
- [11] Bansal D G, Streater J L. A method for obtaining the temperature distribution at the interface of sliding bodies [J]. Wear, 2009, 266(7-8): 721-732.
- [12] Bansal D G, Streater J L. Design curves for temperature rise in sliding elliptical contacts[J]. Tribology International, 2009, 42(11-12): 1638-1650.
- [13] Warren T L, Krajcinovic D. Random cantor set models for the elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces[J]. Wear, 1996, 196(1-2): 1-15.
- [14] 薛晶, 李玉忍, 刘卫国. 粗糙表面 Cantor 集分形对温度场影响分析[J]. 计算机工程与应用(待发表).
Xue Jing, Li Yuren, Liu Weiguo. Study on temperature field of rough surface with cantor set[J]. Computer Engineering and Applications (in press). (in Chinese)
- [15] 李江鸿, 熊翔, 张红波, 等. 不同刹车压力下 C/C 复合材料的摩擦性能与摩擦面研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 9-13.
Li Jianghong, Xiong Xiang, Zhang Hongbo, et al. Study of friction properties and friction surfaces of carbon/carbon composites at different braking pressure[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(4): 9-13. (in Chinese)

作者简介:

薛晶(1982—) 女, 博士研究生。主要研究方向: 飞机刹车装置的温度场计算, 机体数学模型。

Tel: 029-88433159

E-mail: xuejing0413@163.com

李玉忍(1962—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 电力电子与电力传动、电力系统及其自动化、飞机电源系统检测与控制。

E-mail: Li_yuren@nwpu.edu.cn

刘卫国(1960—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 运动控制及伺服系统技术、电机智能控制与测试技术、稀土永磁电机理论及应用、微特电机设计理论。

E-mail: lwgll@nwpu.edu.cn

(编辑: 蔡斐, 杨冬)