

热膨胀性能对炭/炭复合材料在制动摩擦过程中热应力场的影响

郭 瑞, 徐惠娟, 易茂中, 雷宝灵

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 测量以纯树脂炭、粗糙层热解炭和光滑层热解炭为基体的 3 种炭/炭复合材料的热膨胀系数, 并采用有限元分析软件, 模拟这 3 种炭/炭复合材料在飞机正常着陆能量条件下的热应力场, 研究热膨胀系数对炭/炭复合材料热应力场及其摩擦性能的影响。结果表明: 3 种炭/炭复合材料在 z 方向上的热膨胀系数大于在 x 和 y 方向的, 且热膨胀系数均随着温度的升高而逐渐增大, 其中, 基体为粗糙层热解炭的炭/炭复合材料的热膨胀系数最小, 纯树脂炭试样的次之, 光滑层热解炭试样的最大; 在制动过程中, 炭/炭复合材料摩擦表面产生的热应力与材料的热膨胀系数相关, 材料的热膨胀系数越大, 产生的热应力越大; 过大的热应力使纯树脂炭试样具有相对稳定的摩擦曲线, 在较大热应力的作用下, 光滑层热解炭试样的摩擦曲线不稳定, 影响其摩擦性能。

关键词: 炭/炭复合材料; 热膨胀系数; 热应力场; 摩擦性能

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

Effect of thermal expansion on stress field of C/C composites during braking

GUO Rui, XU Hui-juan, YI Mao-zhong, LEI Bao-ling

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The coefficient of thermal expansion (CTE) of three C/C composites with resin carbon matrix, rough lamination pyrocarbon matrix, and smooth lamination pyrocarbon matrix were measured, the finite element analysis software was applied to calculating the stress field of three different C/C composites under the conditions of normal landing energy, and the influence of CTE on the stress field and frictional behavior during braking was studied. The results show that CTE in direction z is larger than that in directions x and y , and CTE becomes larger with the increase of temperature. CTE of the sample with rough lamination pyrocarbon matrix is the smallest, and that of the sample with smooth lamination pyrocarbon matrix is the largest. Correspondingly, the larger the thermal stress, the larger the CTE. Furthermore, large thermal stress makes the sample with resin carbon have a relatively stable friction curve. But the sample with smooth lamination pyrocarbon matrix has unstable friction curve, which influences its frictional behavior.

Key words: C/C composites; thermal expansion coefficient; thermal stress field; frictional behavior

炭/炭复合材料作为飞机制动材料始于 20 世纪 70 年代初期, 由于其具有高比强、高比模、低密度、优良的导热性能和摩擦性能以及高承载能力、使用寿命长等突出优点, 在 20 世纪 80 年代后期, 已广泛用于干线飞机和军用飞机上, 这是飞机制动技术上的重大

突破^[1-4]。

随着炭/炭制动材料的广泛应用, 人们对其摩擦磨损行为的研究也越来越深入, 但是, 由于一些测试手段的限制, 难以动态测量材料在制动过程中产生的热应力。因此, 对刹车副在制动过程中产生的热应力进

行仿真模拟具有工程价值。在实际工况中,刹车副在三维空间的热传递方式及其热物性参数都对其温度场和热应力场有较大的影响。然而,在前人进行的三维模型研究中,大多将制动材料的导热系数、比热容及热膨胀系数等热物性参数作为常数处理,忽略了热物性参数变化对温度场和热应力场的影响^[5-7]。刹车副在制动过程中由动能转化为热能,伴随着剧烈的温升,当物体在受热膨胀过程中受到约束或各部分的温度变化不均匀,使得物体的热变形不能自由进行时,将会在物体中产生热应力。由于高温产生的热应力可能导致一些不利情况的发生,例如材料的断裂和永久变形,所以,热膨胀系数是一个重要的热物性参数,直接影响材料受热后热应力的分布状态。作为飞机刹车副的炭/炭复合材料必须具有较高的几何稳定性,即较低的热膨胀系数^[8]。因此,本文作者以具有不同基体炭结构的炭/炭复合材料作为研究对象,研究其热膨胀系数随温度的变化规律,运用有限元分析软件进行三维瞬态热应力场仿真,并研究热膨胀系数对热应力分布的影响。此外,由于热应力使得摩擦表面接触压力改变,本文作者还研究热应力对材料摩擦性能的影响。

1 实验

1.1 试样制备

以纤维体积分数为30%的准三维针刺整体毡为坯体,分别经过热固性树脂浸渍固化或化学气相渗透增密工艺得到具有不同基体炭结构的3种试样。其中,1[#]试样为纯树脂炭基体,2[#]试样为粗糙层热解炭基体,3[#]试样为光滑层热解炭基体,密度为1.72~1.75 g/cm³,并最终经过2300 °C的热处理。3种试样的基本性能如表1所列。从表1可以看出,粗糙层热解炭试样的石墨化度最高,树脂炭试样的次之,而光滑层热解炭试样的最低。

表1 3种试样的基本性能

Sample No.	Microstructure of matrix	Composite bulk density/(g·cm ⁻³)	Graphitization degree/%
1	Resin carbon matrix	1.72~1.75	49.9
2	Rough lamination pyrocarbon matrix	1.72~1.75	62.6
3	Smooth lamination pyrocarbon matrix	1.72~1.75	27.2

1.2 热物性能测定

根据 GJB330A—2000 固体材料比热容测试方法测定材料的比热容。采用激光闪光法在 JR-3 热物性测试仪上测定材料的轴向和径向热扩散率,其样品尺寸为 $d 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,测量温度从室温到 800 °C。根据比热容和热扩散率计算材料的热导率。

热膨胀系数的测量采用日本理学公司生产的 TAS 100 型热分析仪。其工作原理是在可控制温度程序下,材料受热发生膨胀或收缩,推动电感位移传感装置,产生电信号,并通过电路和数据采集系统,将电信号转换为数值信号,由此精确地测量出热膨胀系数。测量试样的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,测量过程中以氩气作为保护气体,测量温度从室温到 1100 °C,升温速率为 3 °C/min。

1.3 摩擦实验方法

本实验采用缩比试样模拟飞机在正常着陆条件下的能载水平,在 MM-1000 摩擦试验机上采用摩擦热冲击方法进行环-环制动实验,试样为外径 75 mm、内径 45 mm 和厚 16 mm 的圆环。实验参数为:压力 0.6 MPa、线速度 25 m/s、惯量 0.3 kg·m²。

2 应力场的仿真模拟

2.1 有限元模型

利用有限元分析软件求解制动盘在正常着陆工况下的瞬态传热问题。在制动盘分析中,采用一个统一的有限元模型来进行热分析和结构分析,通过直接耦合合法进行计算,即将每一时刻计算所得节点温度作为体载荷施加在试样结构分析模型上进行热应力场的求解,所以,热模型和结构模型之间不需要数据处理转化,既减少了计算量又提高了计算精度^[9]。本文作者采用 SOLID98 热分析单元建立试样的三维模型,由于试环呈轴对称结构,所以,取半个圆环建模并划分网格,如图1所示。

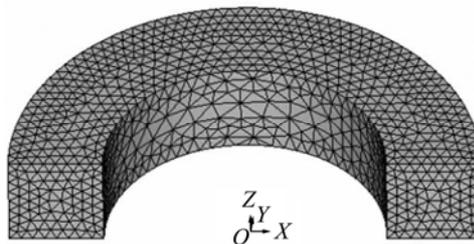


图1 试样的三维有限元模型

Fig.1 3D finite element model of sample

2.2 热传导方程

根据传热学理论,对于无内热源的各向异性材料,其热传导方程如下^[6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为热传导时间; ρ 为材料的密度; c 为材料的比热容; k_x 、 k_y 和 k_z 分别为材料在 x 、 y 和 z 方向的热导率。

2.3 位移约束

位移约束又称 DOF 约束,是对模型在空间中的自由度的约束。本实验中,由于试样原本是一个完整的圆环,为了计算简便,模拟时只取其半个圆环,但是,为了保证试环所对称半圆环计算的准确性,需约束其纵截面处的自由度,取 $U_y=0$,即限制物体在垂直于两个纵截面方向上的位移,如图 2 所示。

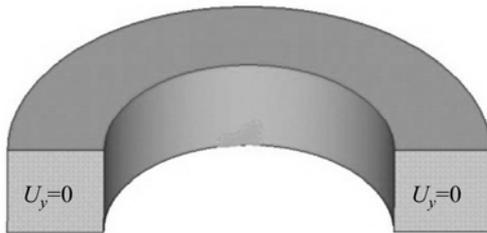


图 2 试样施加的位移约束

Fig.2 Displacement constraint on sample

2.4 热应力场的计算

在制动过程中,试样处在力场和温度场的共同作用下,应力与变形的有限元方程为

$$[K]\{\delta\} = \{R\}_T + \{R\} \quad (2)$$

式中: $[K]$ 为总刚度矩阵; $\{R\}$ 为机械载荷; $\{R\}_T$ 为温度变化引起的载荷; $\{\delta\}$ 为节点位移,即机械载荷与温度共同作用下的结构变形,根据叠加原理求得。

在实际制动过程中,试样所受的机械载荷包括:由于旋转产生的离心力、振动载荷及压装载荷等作用产生的应力^[10]。热应力则是由于节点温度的提高使试样内不均匀膨胀受到约束而产生的应力。热应力的计算公式为

$$\sigma = \alpha E (T - T_0) \quad (3)$$

式中: σ 为热应力, MPa; α 为热膨胀系数; E 为弹性模量, GPa; T_0 为初始温度, ; T 为某时刻温度, 。

3 结果与讨论

3.1 热膨胀系数

图 3 所示为 3 种试样在 z 、 x 和 y 方向上的热膨胀系数曲线。从图 3 可以看出,在本实验所测量的温度区间内,3 种试样的热膨胀系数均随着温度的升高而呈上升的趋势。这是由于热膨胀系数的大小直接反映原子间结合能的大小,不同晶体结构类型的材料由于原子间的结合能不同,具有不同的热膨胀系数,结合力大,热震动幅度就小,因而热膨胀小;在高温下,晶格振动被激化,所以,随着温度的升高,原子振动在宏观上表现为材料的热膨胀现象,即随着温度的升高,热膨胀系数增大^[11]。无论在 z 方向还是 x 和 y 方向上,总是 3[#] 试样的热膨胀系数最大,2[#] 试样的最小。这是由于 3[#] 试样为光滑层的热解炭结构,其石墨化度较小,有序度低,大量晶格排列错综复杂,相互搭界,相同温升提供的能量使得这些晶格振动较大,导致其

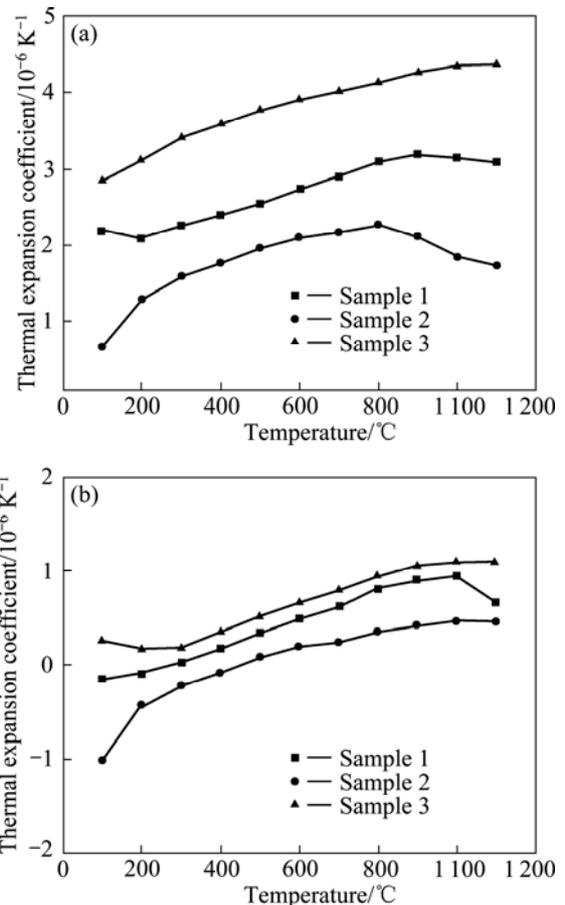


图 3 3 种试样在不同方向上的热膨胀系数

Fig.3 Thermal expansion coefficients of three samples in different directions: (a) Direction z ; (b) Directions x and y

热膨胀系数最大；而2[#]试样为粗糙层热解炭结构，其石墨化度最大，晶格排列有序度较高，互成角度的石墨片层面趋向于平行，石墨片层面间距较小，原子间的结合能增大，所以，其热膨胀系数较小^[11]。

炭/炭复合材料是由碳纤维、围绕碳纤维以层状方式生长的热解炭或树脂炭以及孔洞组成，其热膨胀性能受晶体的大小影响不明显，但是，明显受到晶体方向的影响^[12]。这是因为石墨晶体环层面内碳原子之间为较强的共价键，键能约为400 kJ/mol，而相邻石墨片层间为较弱的范德华力，平均键能只有54 kJ/mol，所以，石墨晶体的热膨胀性能表现为各向异性，垂直于石墨片层面的热膨胀系数远大于平行于石墨片层面的热膨胀系数。所以，炭/炭复合材料的热膨胀与预制体内碳纤维的排布密切相关，若预制体具有各向异性，则热膨胀性能也具有各向异性^[12]。从图3可以看出，3种试样在 z 方向上的热膨胀系数大于 x 和 y 方向上的，而且总体上来看， z 方向上的热膨胀系数之间的差值较大，而在 x 和 y 方向上的差值较小。其原因是碳纤维体积分数仅为30%，复合材料中绝大部分是热解炭或者树脂炭，且在 z 方向上，材料属于相邻石墨片层结构，具有较弱的范德华力，随温度的增加，原子比较活跃，所以，在 z 方向上热膨胀系数的差值较大；但是，在 x 和 y 方向上，材料属于石墨晶体环层面内碳原子，具有较强的键能，随温度的升高，碳原子较稳定，所以，三者的热膨胀系数差别不大。

3.2 热应力场结果分析与讨论

徐惠娟等^[13]利用有限元分析软件仿真了本实验中的3种炭/炭复合材料在制动过程中的瞬态温度场，并通过模拟制动实验验证了仿真计算结果与实验测量的温度场结果的正确性。本实验运用有限元软件，采用直接耦合方法计算求解，得到3种试样的热应力场分布。

图4所示为3种试样在制动过程中摩擦表面出现最大热应力时的整体热应力分布图。从图4可以看出：1[#]试样摩擦表面外径处的热应力在制动开始2.3 s时最大，约为6.37 MPa；2[#]试样的摩擦表面外径处的热应力在1.4 s时出现最大值，约为3.06 MPa；3[#]试样摩擦表面外径处的热应力在2.7 s时出现最大值，约为6.45 MPa。3种试样的最大热应力均出现在试环摩擦表面靠近外径处，这主要是因为热流密度和对流换热引起的。根据热流密度的公式： $q(r, t) = \eta \mu p(r, t) v(r, t) = \eta \mu p(r, t) \omega(t) r$ ，可以看出，热流密度与试样的半径成正比，半径越大，热载荷越大，即产生的热量越多，导致摩

擦材料温度升高越快，且内、外径温差增大；又由于试样样件外径处与空气接触，散热较快，会产生较大的温度差，所以，产生的热应力最大。此外，3种试样在 z 方向上靠近厚度的一半处产生了局部应力集中，其原因是在制动过程中，试样表面的温度最高，受热膨胀量相应最大，其受热形变量也较大，而在整个制动过程中试样底部温度变化较小，膨胀形变量较小，试样受热形变量也较小，使得试样在 z 方向上靠近其厚度的一半处产生了局部应力集中^[9]。

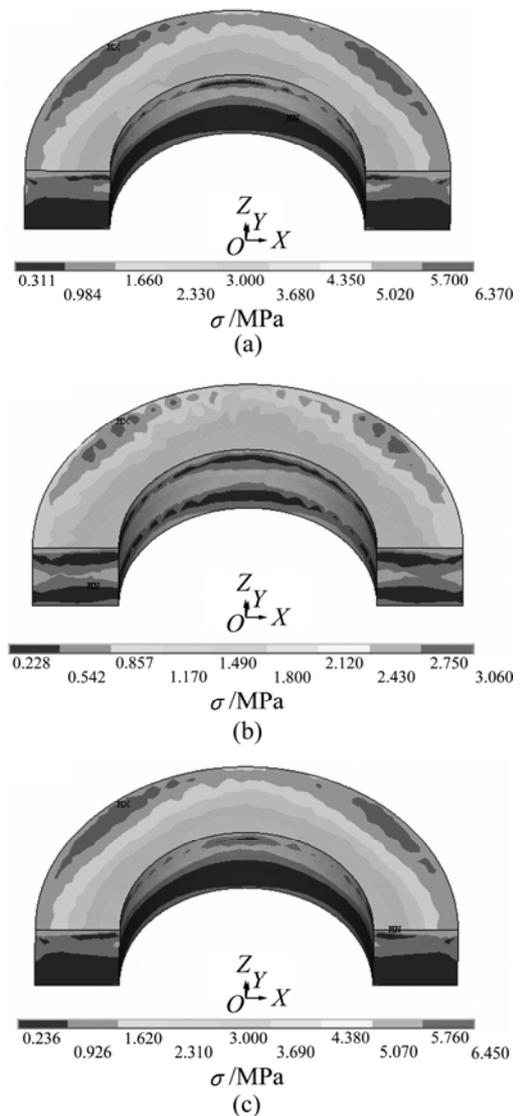


图4 3种试样在不同时刻的热应力分布云图

Fig.4 Thermal stress distribution of three samples at different times: (a) Sample 1 at 2.3 s; (b) Sample 2 at 1.4 s; (c) Sample 3 at 2.7 s

图5所示为3种试样摩擦表面中径处的热应力变化曲线。从图5可以看出，随着制动过程的进行，热应力先迅速增大后逐渐减小，这是因为在制动开始阶

段, 摩擦表面迅速升温且在短时间内温度来不及扩散到试样内部, 使得温度梯度增大及热应力迅速增加。随着制动过程的进行, 温度逐步向试样内部扩散, 试样的最高温度随时间的延长而升高的幅度越来越小, 达到最高值后开始缓慢下降^[14], 致使温度梯度减小, 热应力开始下降。此外, 1[#]和 3[#]试样的热应力较接近, 1[#]试样摩擦表面中径处的热应力在 2.7 s 时最大, 其值为 4.62 MPa; 3[#]试样中径处的热应力在 2.9 s 时最大, 其值为 4.83 MPa; 而 2[#]试样中径处的热应力在 1.6 s 处出现最大值, 其值为 2.11 MPa。

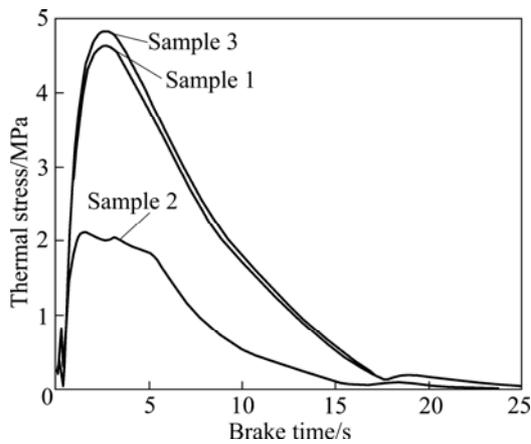


图 5 3 种试样摩擦表面中径处热应力随时间的变化曲线
Fig.5 Relationship between thermal stress at middle radius on friction surface of three samples and brake time

综合图 3、4 和 5 可知, 3[#]试样的热膨胀系数最大, 且其在制动过程中产生的热应力最大; 2[#]试样的热膨胀系数最小, 产生的热应力最小, 即随着热膨胀系数的减小, 试样在制动中产生的热应力也越小。这是因为在制动过程中, 试样摩擦表面的升温速度远大于热量传递的速率, 从而在轴向和径向产生了较大的温度梯度, 这使得试样各处膨胀量不同, 由于受到约束而不能自由膨胀, 所以, 在温度较高的区域产生较大的压应力, 而在温度较低的区域产生的压应力较小。由于 3 种试样热膨胀系数的不同, 在温度较高的区域向温度较低的区域膨胀时所受的约束不同, 3[#]试样的热膨胀系数最大, 受到约束相应较大, 产生的热应力最大; 2[#]试样的热膨胀系数最小, 所受到的约束也最小, 因此, 产生的热应力最小。

3.3 热应力对摩擦性能的影响

3 种试样在制动速度为 25 m/s 时的摩擦曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 1[#]和 2[#]试样的摩擦因数均在制动开始阶段迅速升高至峰值, 这是因为当刹车开

始时, 在较高的法向载荷下, 由于表面微凸体的互相嵌入, 要发生微凸体变形才能克服摩擦力, 由于微凸体的立即断裂而生成新的碎屑粒子, 这一过程会导致摩擦力的上升, 使刹车曲线开始时出现摩擦因数峰^[15]。从图 6 可以看出, 1[#]和 2[#]试样的摩擦曲线形状类似, 在峰值以后摩擦因数保持较大值且曲线平稳。2[#]试样的热膨胀系数较小, 在制动过程中产生的热应

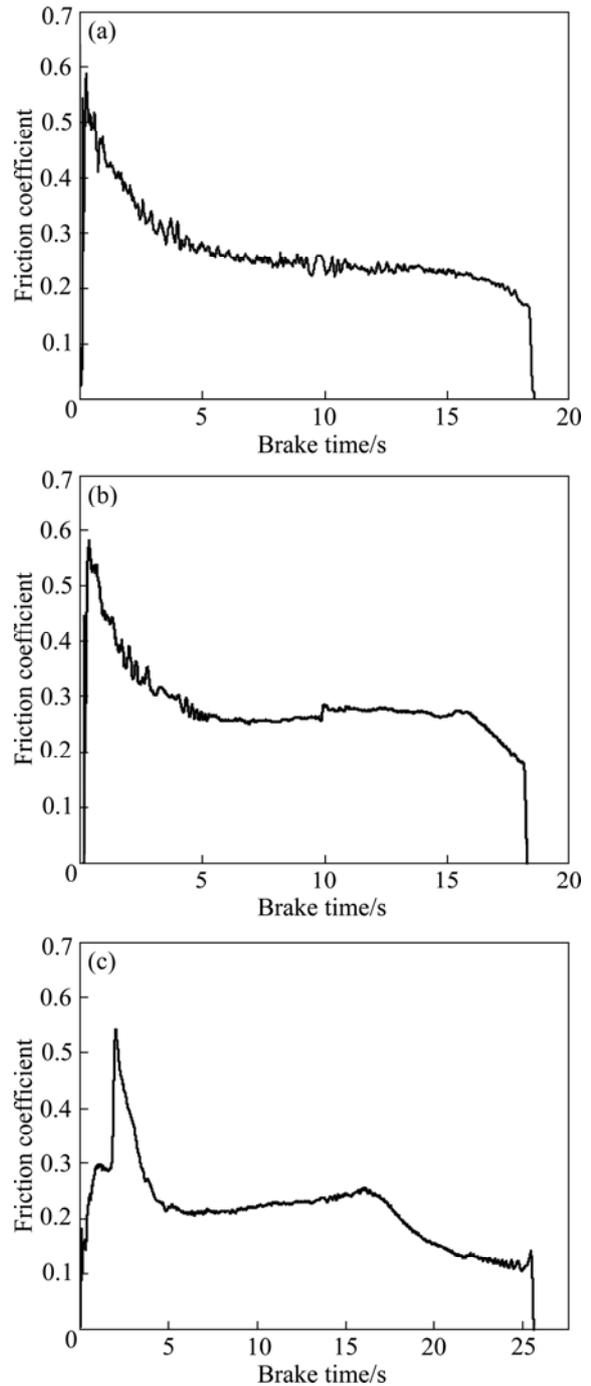


图 6 3 种试样的摩擦曲线
Fig.6 Friction curves of three samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

力较小,且其基体炭结构为粗糙层热解炭,微晶较容易变形,摩擦表面容易形成稳定的摩擦膜,使其具有较好的摩擦性能。 $1^{\#}$ 试样为纯树脂炭结构,其热膨胀系数居中,但是,热应力却与 $3^{\#}$ 试样的接近,这是由于 $1^{\#}$ 试样的导热性能不佳,在摩擦表面产生的最高温度及试环的温度梯度均大于 $2^{\#}$ 试样的,这样导致摩擦表面产生较大的热应力,促进纤维和树脂炭的石墨化(即应力石墨化作用)^[13, 16],从而使其具有相对稳定的摩擦曲线。

由图6可见, $3^{\#}$ 试样的摩擦曲线不同于 $1^{\#}$ 和 $2^{\#}$ 试样的,随着制动过程的进行,摩擦因数变化较大且摩擦曲线不稳定,不及 $1^{\#}$ 和 $2^{\#}$ 试样的摩擦曲线线形好。这是由于热膨胀系数的不同影响了热应力场的分布,其中, $3^{\#}$ 试样的热膨胀系数最大,在制动过程中产生6.45 MPa的应力,约为 $2^{\#}$ 试样的2倍,如此大的应力容易破坏摩擦表面形成的摩擦膜。此外,材料的结构与摩擦性能也有直接关系, $3^{\#}$ 试样的基体炭结构为光滑层热解炭,由于光滑层热解炭在制动过程中微晶变形较难,对热应力破坏的摩擦膜修复较慢,不能产生连续、完整的摩擦膜,致使其摩擦曲线不稳定,制动性能较差。

4 结论

1) 分别测量了以纯树脂炭、粗糙层热解炭和光滑层热解炭为基体的3种炭/炭复合材料的热膨胀系数。3种炭/炭复合材料的热膨胀系数均随温度的升高而逐渐增大。其中,基体为粗糙层热解炭的炭/炭复合材料热膨胀系数最小,纯树脂炭试样的次之,光滑层热解炭试样的最大。

2) 采用有限元分析软件对飞机正常着陆条件下3种炭/炭复合材料的热应力场进行仿真模拟。结果表明:热膨胀系数越大,摩擦表面的最大热应力也越大;3种材料产生的最大热应力分别为纯树脂炭试样6.37 MPa、粗糙层热解炭试样3.06 MPa、光滑层热解炭试样6.45 MPa。

3) 纯树脂炭试样在较大热应力的作用下产生了应力石墨化,使其具有相对稳定的摩擦曲线;粗糙层热解炭试样在制动过程中产生的热应力较小,具有较好的摩擦性能;而光滑层热解炭试样在制动过程中产生较大的热应力,且微晶变形较难,导致其摩擦表面不能形成完整、稳定的摩擦膜,影响了材料的摩擦性能。

REFERENCES

- [1] FITZER E. The future of carbon-carbon composites[J]. Carbon, 1987, 25(2): 163-190.
- [2] SAVAGE G. Carbon-carbon composites[M]. London: Chapman & Hall, 1993: 309-323.
- [3] HUTTON T J, MCENANCY B, CRELLING J C. Structural studies of wear debris from carbon-carbon composite aircraft brakes[J]. Carbon, 1999, 37(6): 907-916.
- [4] SHIN H K, LEE H B, KIN H S. Tribological properties of pitch-based 2-D carbon-carbon composites[J]. Carbon, 2001, 39(6): 959-970.
- [5] 王文静, 谢基龙, 刘志明, 缪龙秀, 郑明军. 基于循环对称结构制动盘的三维瞬态温度场仿真[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 131-134.
WANG Wen-jing, XIE Ji-long, LIU Zhi-ming, MIAO Long-xiu, ZHENG Ming-jun. 3-D transient temperature field analysis and calculation for brake disc with cyclic symmetric structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(12): 131-134.
- [6] GAO C H, LIN X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional mode[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 129: 513-517.
- [7] 杨莺, 王刚. 机车制动盘三维瞬态温度场与应力场仿真[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(19): 1257-1260.
YANG Ying, WANG Gang. 3-D transient temperature field and stress field simulation of brake disc[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2005, 24(19): 1257-1260.
- [8] 刘涛, 罗瑞盈, 李进松, 张宏波, 侯亮亮. 炭/炭复合材料的热物理性能[J]. 碳素技术, 2005, 5(24): 28-32.
LIU Tao, LUO Rui-ying, LI Jin-song, ZHANG Hong-bo, HOU Liang-liang. Thermophysical properties of carbon/carbon composites[J]. Carbon Techniques, 2005, 5(24): 28-32.
- [9] 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 De-ling, ZHANG Jian-wu, ZHOU Ping. FEM thermal stress analysis of high-speed locomotive braking discs[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 39-43.
- [10] 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, 2001, 23(6): 34-38.
DING Qun, XIE Ji-long. The temperature field and stress field calculation of brake disc based 3-dimension model[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(6): 34-38.
- [11] 赵建国, 李克智, 李贺军, 孙国栋, 王闯. 炭/炭复合材料热膨胀性能的研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(6): 1-4.

- ZHAO Jian-guo, LI Ke-zhi, LI He-jun, SUN Guo-dong, WANG Chuang. Thermal expansion property of carbon/carbon composite [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(6): 1-4.
- [12] ZHAO Jian-guo, LI Ke-zhi, LI He-jun, WANG Chuang. The influence of thermal gradient on pyrocarbon deposition in carbon/carbon composites during the CVI process[J]. Carbon, 2006, 44(4): 786-791.
- [13] 徐惠娟, 易茂中, 熊翔, 黄伯云, 雷宝灵. 不同基体炭结构的炭/炭复合材料在制动过程中的温度场研究[J]. 无机材料学报, 2009, 24(1): 133-138.
- XU Hui-juan, YI Mao-zhong, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun, LEI Bao-ling. Study on temperature field of C/C composites with different carbon matrix during braking[J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(1): 133-138.
- [14] 雷宝灵, 易茂中, 徐惠娟. C/C 复合材料飞机刹车盘的三维温度场[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1): 113-117.
- LEI Bao-ling, YI Mao-zhong, XU Hui-juan. 3-D temperature field of C/C composite braking discs[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 113-117.
- [15] 李江鸿, 熊翔, 巩前明, 黄伯云. 不同基体炭 C/C 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 446-451.
- LI Jiang-hong, XIONG Xiang, GONG Qian-ming, HUANG Bai-yun. Friction and wear properties of carbon/carbon composites with different matrix carbon[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 446-451.
- [16] 尹健, 张红波, 熊翔, 黄伯云. 碳纤维增强树脂炭复合材料微观结构与烧蚀性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(1): 1-5.
- YIN Jian, ZHANG Hong-bo, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun. Microstructure and ablation performance of resin-based C/C composites[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2005, 36(1): 1-5.

(编辑 陈卫萍)