

反应熔体渗透 C/SiC 复合材料的摩擦性能

The Friction Properties of Reactive Melt

Infiltration C/SiC Composites

张军战, 徐永东, 张立同, 成来飞, 姜广鹏, 楼建军

(西北工业大学 超高温结构复合材料国防科技重点实验室, 西安 710072)

ZHANG Jun-zhan, XU Yong-dong, ZHANG Li-tong,

CHENG Lai-fei, JIANG Guang-peng, LOU Jian-jun

(National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 以不同结构类型及密度的 C/C 复合材料为预制体, 采用反应熔体渗透法制备了 C/SiC 复合材料, 研究了不同结构 C/SiC 复合材料的密度、组分含量、热扩散系数与摩擦性能相互之间的关系。结果表明随着碳含量的降低, 复合材料的密度增加; 短切纤维 C/SiC、低密度针刺 C/SiC 与高密度针刺 C/SiC 复合材料的平均摩擦系数分别为: 0.28, 0.28 与 0.42; 随着热扩散系数的增加, 复合材料的摩擦稳定性系数升高; 并且对于短切纤维 C/SiC, 摩擦实验后基本形成了连续光亮的摩擦面。

关键词: 反应熔体渗透; C/SiC; 摩擦性能; 热扩散系数

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)07-0032-04

Abstract: Taking C/C composites of different structure and density as preform, C/SiC composites were prepared by reactive melt infiltration. The relationship among density, component content, thermal diffusion coefficient and friction properties of C/SiC composites was studied. Results show that the density of C/SiC composites increases with the decrease of carbon content; that the average coefficient of friction of short fiber C/SiC, low density needle punched C/SiC and high density needle punched C/SiC composites are 0.28, 0.28 and 0.42, respectively; that the friction stability increases with the increase of thermal diffusion coefficient; and that successive slippery friction surface is formed for short fiber C/SiC composites after friction test.

Key words: reactive melt infiltration; C/SiC; friction property; thermal diffusion coefficient

刹车盘是飞机安全起降的关键性制动部件, 其制动刹车是通过刹车盘的摩擦和磨损, 将飞机的动能转变为热能并将热量吸收及散发掉, 从而逐步降低飞机的速度, 直至停止运动达到制动的目的^[1]。C/SiC 陶瓷基复合材料作为一种新型的刹车材料, 与传统的金属和半金属刹车材料相比, 其具有密度低、摩擦系数稳定、磨损量小、制动比大和使用寿命长等突出优点; 与 C/C 复合材料相比, C/SiC 复合材料具有优良的抗氧化性能及摩擦系数高而且稳定等突出优点, 从而显著提高了使用温度和减少刹车系统的体积, 大大提高了刹车的安全性, 所以其作为新一代刹车材料具有广阔的应用前景^[2]。德国宇航院(DLR)的 Krenkel 等人^[3,4]从 1988 年开始研究 C/SiC 刹车材料, 现已成功应用到保时捷 911 Turbo 高档轿车上, 美国的 Aircraft Braking Systems Corporation 等四大公司^[5]及国内的

中南工业大学^[6]也对 C/SiC 刹车材料进行了研究。

本工作以不同结构类型及密度的 C/C 复合材料为预制体, 采用反应熔体渗透法(Reactive Melt Infiltration, RMI)制备 C/SiC 复合材料, 研究不同结构及密度 C/SiC 复合材料的摩擦性能, 探讨 C/SiC 复合材料的密度、组分含量、热扩散系数与摩擦性能之间的关系。

1 实验过程

1.1 试样制备

C/C 预制体分为三种: 短切纤维 C/C 预制体、低密度与高密度针刺 C/C 预制体(密度分别为 $0.5\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 与 $1.3\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 其中短切纤维 C/C 预制体为碳纤维经酚醛树脂、酒精、丙酮的混合溶液浸渍缠绕、短切后热压成型, 然后于 900°C 氩气气氛下热处理碳化得到; 针刺 C/C 预制体为针刺碳毡(原始密度分别为

$0.2\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 与 $0.5\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 经化学气相沉积 (CVI) 碳基体得到。最后采用反应熔体渗透法制备得到 C/SiC 复合材料, 其中熔体渗透温度 1650°C , 时间 2h。

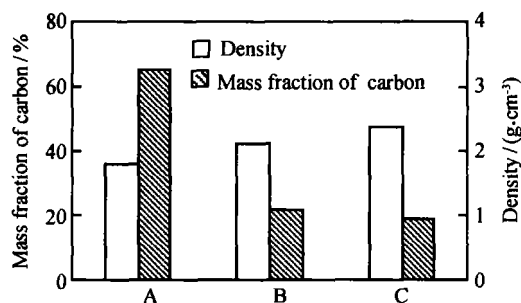
1.2 性能测试

采用阿基米德排水法测试试样的密度, NETZSCH STA 409C 热重-差热分析仪测试碳含量, NETZSCH LFA 427 型激光导热仪测试热扩散系数, 试样尺寸 $\phi 12.7\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。采用 MM1000 摩擦试验机模拟飞机刹车并测试摩擦性能, 实验条件: 初始速度 8000r/min , 刹车压力 82N/cm^2 。

2 结果与分析

2.1 密度及组分含量

C/SiC 复合材料的密度及碳含量如图 1 所示。可以看出不同结构 C/SiC 复合材料的密度不尽相同: 短切纤维 C/SiC 复合材料的密度为 $1.80\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 而由不同密度针刺碳毡得到的针刺 C/SiC 复合材料的密度分别为 $2.11\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $2.38\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 并且随着碳含量的降低, 复合材料的密度增加。这是因为在反应熔体渗透制备 C/SiC 复合材料的过程中, 反应熔体渗透的速率与原始 C/C 预制体的结构、孔隙率及孔径大小等有密切关系。由于本工作所采用的 C/C 预制体结构不同, 密度及孔隙率也存在着差异, 而在相同的反应熔体渗透工艺条件下, 针刺 C/C 预制体由于引入了垂直于纤维铺层方向的纤维束, 其渗透比较容易, 且反应形成的碳化硅含量较多, 所以针刺 C/SiC 复合材料的碳含量较少, 密度较大; 而两种针刺结构 C/SiC 复合材料密度的差别在于其原始 C/C 预制体的密度不同, 所以造成了它们密度的不同。



A—short fiber C/SiC; B—low density needle

punched C/SiC; C—high density needle punched C/SiC

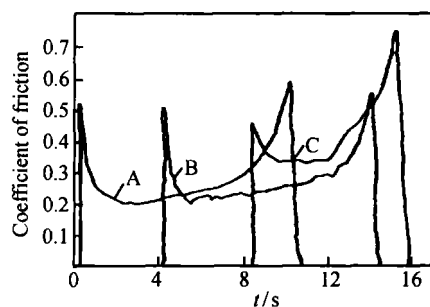
图1 C/SiC 复合材料的密度及碳含量

Fig. 1 The density and carbon content of C/SiC composites

2.2 摩擦性能

三种不同密度及组分含量 C/SiC 复合材料在模拟飞机刹车时的刹车曲线如图 2 所示。可以看出三种材

料的刹车曲线形状基本相同, 均可分为三个阶段: 在刹车的初始阶段, 摩擦系数急剧上升达到一最大值; 接下来随着速度的降低, 摩擦系数减小并基本达到平稳; 在刹车即将停止的最后阶段, 摩擦系数又急剧上升, 出现“翘尾”现象。此外, 由图 2 还可以看出, 三种材料出现的“抬头”、“翘尾”程度有所不同: 短切纤维 C/SiC 与低密度针刺 C/SiC 基本相同, 而高密度针刺 C/SiC“抬头”较低, 但“翘尾”却较高。这是由于除了密度及组分含量影响摩擦性能外, 复合材料的导热性能对摩擦性能有十分重要的影响。由图 3 复合材料垂直于摩擦面的热扩散系数曲线可以看出, C 组高密度针刺 C/SiC 由于 SiC 含量最高、密度最大且引入了垂直于摩擦面的纤维束而热扩散系数最大, 而短切纤维与低密

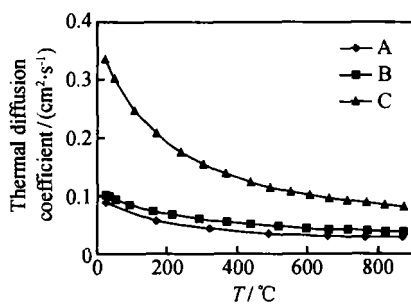


A—short fiber C/SiC; B—low density needle

punched C/SiC; C—high density needle punched C/SiC

图2 C/SiC 复合材料的摩擦曲线

Fig. 2 The friction curve of C/SiC composites



A—short fiber C/SiC; B—low density needle punched

C/SiC; C—high density needle punched C/SiC

图3 C/SiC 复合材料的热扩散系数

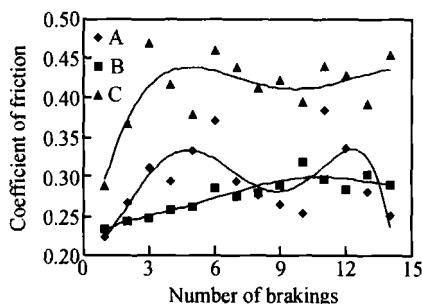
Fig. 3 Thermal diffusion coefficient of C/SiC composites

度针刺 C/SiC 相差不大且较小; 并且随着温度的升高, 热扩散系数均减小, 但高密度针刺 C/SiC 的热扩散系数减小幅度较大, 而短切纤维与低密度针刺 C/SiC 减小幅度较小。由于刹车实验时, 随着刹车速度的降低, 刹车盘表面的温度升高, 不良的导热性能将导致刹车盘出现局部热点, 从而造成摩擦系数不稳定, 在刹车的后段摩擦系数急剧上升。因为随着温度的升高, 高密度针刺 C/SiC 复合材料的热扩散系数减小幅度较大,

而其平稳阶段时的摩擦系数又较高, 所以使得其刹车曲线最后“翘尾”现象比较严重。

2.3 刹车次数对摩擦系数的影响

由图 4 平均摩擦系数与制动刹车次数的曲线可以看出, 随着制动刹车次数的增加, 在开始时摩擦系数均增大; 并且对于短切纤维 C/SiC, 随着刹车次数的增加, 摩擦系数继续增加, 当达到一最大值(0.37)后摩擦系数减小; 对于低密度针刺 C/SiC 来说, 随着刹车次数的增加, 摩擦系数也随着增加, 但增加幅度较小, 且增加到一最大值(0.32)后基本达到稳定; 而对于高密度针刺 C/SiC 来说当摩擦系数增加到最大值后略有波动, 其波动幅度小于 0.08。这是因为在最初的几次刹车过程中, 刹车对偶处于磨合过程, 由于摩擦表面粗糙度及表面吸附水分的影响, 所以摩擦系数较低且上升, 之后摩擦系数将达到平稳阶段。三种复合材料摩擦系数达到平稳的制动刹车次数不同, 说明复合材料本身的性质——结构及其均匀性、组分含量及表面形貌等不同, 所以摩擦表面磨合的次数也不相同。



A—short fiber C/SiC; B—low density needle punched C/SiC; C—high density needle punched C/SiC

图 4 C/SiC 复合材料摩擦系数和制动次数的关系

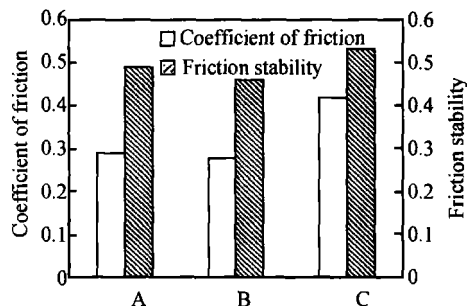
Fig. 4 The relationship between coefficient of friction and number of brakings of C/SiC composites

图 5 是三种 C/SiC 复合材料的平均摩擦系数与摩擦稳定性系数 S , 其中

$$S = \mu_p / \mu_{max}$$

式中: S —摩擦稳定性系数; μ_p —平均摩擦系数; μ_{max} —最大摩擦系数。

由图 5 可以看出, 短切纤维 C/SiC、低密度针刺 C/SiC 与高密度针刺 C/SiC 的平均摩擦系数分别为 0.28, 0.28 和 0.42, 高密度针刺 C/SiC 的平均摩擦系数最大。结合图 2 可以看出, 由于摩擦系数不同, 其刹车时间也不相同, 高密度针刺 C/SiC 的刹车时间最短, 这说明随着摩擦系数的增加, 刹车时间减小, 刹车距离变短。此外, 由图 5 还可以看出短切纤维与低密度针



A—short fiber C/SiC; B—low density needle

punched C/SiC; C—high density needle punched C/SiC

图 5 C/SiC 复合材料的摩擦系数与摩擦稳定性系数

Fig. 5 The coefficient of friction and friction stability of C/SiC composites

刺 C/SiC 的摩擦稳定性系数相差不大, 分别为 0.49 与 0.46, 而高密度针刺 C/SiC 摩擦稳定性系数为 0.53, 大于短切纤维与低密度针刺 C/SiC, 这是因为在制动刹车时, 刹车盘的动能主要转换为热能, 而导热性能好的材料能及时将热量散发出去, 不会造成局部的热点, 从而摩擦稳定性好。正是由于高密度针刺 C/SiC 的热扩散系数较大, 所以其摩擦稳定性系数较高。

2.4 摩擦表面形貌

三种 C/SiC 复合材料摩擦实验后的表面宏观形貌如图 6 所示。由图 6 可以看出, 对于短切纤维 C/SiC 复合材料来说, 其摩擦表面较光亮且基本形成了连续的摩擦面; 而对于针刺 C/SiC, 摩擦表面较暗未形成连续的摩擦面; 并且经 14 次刹车实验后, 低密度针刺 C/SiC 复合材料的静盘已断裂, 且周向分布有细小的疲劳裂纹, 而高密度针刺 C/SiC 复合材料也出现了径向裂纹。这是因为三种 C/SiC 复合材料的组分含量有所不同(图 1), 短切纤维 C/SiC 的碳含量较高(65%), 纤维体积分数较大, 纤维增韧效果较明显, 复合材料韧性较好; 而两种针刺 C/SiC 复合材料的纤维体积分数较低, 且在反应渗透过程中部分纤维已与熔融硅反应, 纤维受到了损伤, 所以其碳含量也较少, 使得复合材料呈现出一定的脆性, 最终造成了复合材料的断裂及径向裂纹。

3 结论

(1) 短切纤维 C/SiC、低密度针刺 C/SiC 与高密度针刺 C/SiC 复合材料的密度分别为 1.80, 2.11 与 2.38 g · cm⁻³, 并且随着碳含量的降低, 复合材料的密度增加。

(2) 短切纤维 C/SiC、低密度针刺 C/SiC 与高密度针刺 C/SiC 复合材料的平均摩擦系数分别为 0.28, 0.28 及 0.42; 并且随着摩擦系数的增加, 刹车时间减

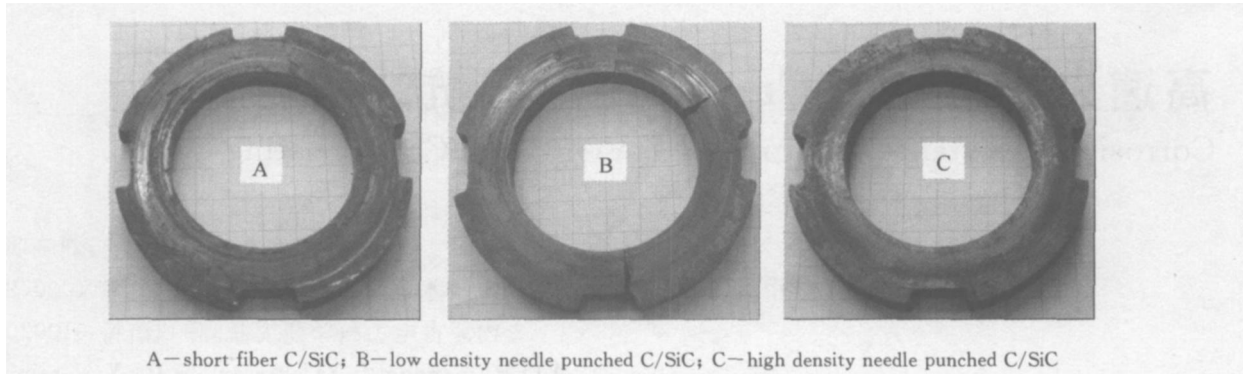


图 6 C/SiC 复合材料刹车后的表面形貌

Fig. 6 The surface morphology after braking of C/SiC composites

小, 刹车距离变短。

(3) 由于高密度针刺 C/SiC 的 SiC 含量最高、密度最大且引入了垂直于摩擦面的纤维束而热扩散系数最大, 并且复合材料的摩擦稳定性系数随着热扩散系数的增加而升高。

(4) 随着纤维含量的增加, 复合材料的韧性提高; 并且对于短切纤维 C/SiC, 摩擦实验后基本形成了连续光亮的摩擦面。

参考文献

[1] 路易斯 B 纽曼著. 摩擦材料最新进展[M]. 张元民, 汤希庆译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

[2] 高列义. 多孔 C/C 预制体的制备和 C/SiC 材料的摩擦性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

[3] KRENKEL W, HEIDENREICH B, RENZ G. C/G-SiC composites for advanced friction systems[J]. Adv Eng Mater, 2002, 4

(8): 427- 436.

[4] KRENKEL W. Cost effective processing of CMC composites by melt infiltration(LSI-process) [J]. Ceram Eng Sci Proc, 2001, 22: 443- 454.

[5] SUNDAR V, MARK P, TERENCE W, et al. C/SiC materials evaluation for aircraft applications[A]. Proceedings of the 4th Int Conference on HTCM C[C]. Munich, Germany: Wiley Annee, 2001. 802- 808.

[6] 马云柱, 熊翔, 黄伯云, 等. C/C 复合材料熔融渗硅研究[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(1): 49- 52.

基金项目: 教育部跨世纪人才培养计划基金(2002) 资助
收稿日期: 2005-04-24; 修订日期: 2005-04-20
作者简介: 张军战(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向: 航空制动用 C/SiC 复合材料, 联系地址: 西北工业大学超高温复合材料国防科技重点实验室(710072)。

(上接第 31 页)

(2) 制备复合材料减振环时, 如果采用最经济和常用仿形加工的缠绕方法, 则纤维束的缠绕倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 。

(3) 复合材料减振器在一定负载范围内, 属于线性减振器, 能量耗散系数小。

(4) 复合材料减振器的能量耗散性能可以通过改变弹性环的数量, 以及将不封闭环和封闭环有机的结合在一起来实现。

(5) 复合材料减振器的使用寿命完全可以满足工程实际的需求。

(6) 复合材料减振环的最大振动应力幅值为 $\sigma_{max} \approx 3.5 \text{ N/mm}^2$ 。

参考文献

[1] 王荣国, 武卫莉, 谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 1- 25.

[2] 郭全贵, 宋进仁. B₄C/C 复合材料高温氧化过程中的结构变化模型的研究[J]. 碳素, 1998, (3): 7- 12.

[3] 张少辉, 陈花玲. 国外纤维增强树脂基复合材料阻尼研究综述[J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 58- 62.

[4] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping studies in fiber-reinforced composites - a review [J]. Composite Structures, 1999, 46: 41- 51.

[5] IOANA C, FINEGAN R F. Analytical modeling of damping at micromechanical level in polymer composites reinforced with coated fibers [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 1077- 1084.

[6] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990. 159- 171.

收稿日期: 2004-06-07; 修订日期: 2004-12-11
作者简介: 姜洪源(1960-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向: 金属橡胶技术、新型带传动及特种阻尼技术研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学 424 信箱(150001)。