

NICALON SiC/Al 预制丝热膨胀特性研究

万红 杨德明

(材料科学与应用化学系)

摘要 本文研究了 NICALON SiC 束丝纤维增强铝预制丝在 15~400℃ 温度区间内的热膨胀特性。研究表明预制丝两次热循环后得到的膨胀曲线不一致, 该曲线在 15~400℃ 范围的平均热膨胀系数分别为 $3.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $4.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。本文对预制丝的热膨胀行为进行了理论分析和探讨, 计算值和实验值较为符合。

关键词 金属基复合材料, 预制丝, 热膨胀系数

分类号 TG142. 76

1 理论分析

金属基复合材料 (MMC) 作为一种新型的结构和功能材料, 除要具有高的比强度、比刚度外, 还要有良好的高温性能及尺寸稳定性。

纤维增强金属基复合材料的热膨胀特性不同于基体金属和增强纤维。与增强纤维相比, 金属往往具有低刚度和强度、较大的热膨胀系数, 而纤维的刚度和强度较高, 热膨胀系数较低。它们复合在一起后, 在温度变化的环境中使用, 各组元的热响应特性不同, 从而使复合材料具有较为独特的热膨胀特性。R. A. Schapery 根据能量原理, 研究了复合材料热膨胀行为, 得出公式^[1]:

$$\alpha_c = (E_f \times V_f \times \alpha_f + E_m \times V_m \times \alpha_m) / (E_f \times V_f + E_m \times V_m) \quad (1)$$

式中, E 、 V 、 α 分别是弹性模量、体积分数、热膨胀系数; 下标 m 、 f 、 c 分别代表纤维、基体和复合材料。李览淦、王鸿华等人^[2,3]研究了碳纤维增强铝基复合材料的热膨胀性能, 魏克泰等^[4]研究了 SiC 纤维增强铝板材的热膨胀性能, 他们的研究没有考虑复合材料在制造过程中产生的残余热应力对复合材料热膨胀性能的影响。

本文以 NICALON SiC 束丝纤维增强纯铝预制丝为研究对象, 将预制丝在 15~400℃ 范围内进行了两次热循环, 改变了丝内部残余热应力的大小, 并在理论上分析了两次热膨胀曲线不一致的原因及预制丝的热膨胀过程, 计算结果与实验值较为接近。

2 实验研究

试样是 NICALON SiC 束丝纤维与 L2 纯铝复合而成的预制丝, 纤维与基体的性能见

表 1^[5]. 预制丝的截面近似于圆形, 直径为 $\phi 0.52\text{mm}$.

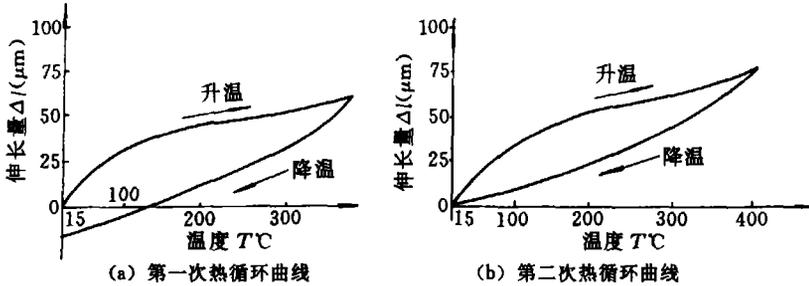
表 1 SiC 纤维与 L2 铝的主要性能

材 料	弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	抗拉强度 (MPa)	在复合材料中 所占体积百分数%
NICALON SIC	180~200	3.1×10^{-6}	2,500~3,000	42
L2 铝	69.58	25.1×10^{-6}	100	58

用西德产 Leiz 热膨胀仪测量预制丝的热膨胀曲线。实验用标样为 $\phi 3\text{mm}$ 的铜柱, 长 50mm, 升温区间为室温 T_0 至 400°C , 升温速率为 $2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 。升温区间及升温速率的选定是分别根据 SiC/Al 复合材料的可能使用温度 (低于 400°C) 及仪器所能达到的最低升温速率而确定的。预制丝第一次升温 400°C 后, 随炉冷却到室温, 然后进行第二次升温, 并随炉冷却。炉冷所需时间约为 2~3 小时, 由于预制丝直径较小, 故将若干段丝捆扎成束, 两端仔细磨平, 制成直径约 3mm, 长 50mm 的热膨胀试样, 室温 $T_0=15^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果与讨论

预制丝两次热循环后的曲线见附图。



附图 预制丝两次热循环后温度—伸长量关系曲线

比较附图(a)、(b)可以发现预制丝在相同条件下两次热循环后分别得到的热膨胀曲线不重合, 从曲线形状上看, 预制丝的热膨胀和收缩过程可分为两个阶段: 热膨胀系数或收缩系数较大阶段, 热膨胀系数或收缩系数较小阶段。各阶段热膨胀系数大小见表 2。

表 2 预制丝的热膨胀系数

温度区间 $^{\circ}\text{C}$	第一次循环 $\alpha_1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	温度区间 $^{\circ}\text{C}$	第二次循环 $\alpha_2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
15—74	9.32	15—103	8.81
74—400	2.1	103—400	2.69
15—400	3.2	15—400	4.1

预制丝在 $15\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的温度区间内, 平均热膨胀系数远低于纯铝的热膨胀系数, 这说明纯铝与 SiC 纤维复合后, 具有良好的尺寸稳定性。

由表 2, 预制丝第一次循环过程中, 第一阶段 (即膨胀量增长较快阶段) 比第二次循环的短, 且第一次热循环后留下了一定的残余变形量, 约 $15\mu\text{m}$, 第二次热循环的曲线闭合, 无残余变形量, 分析原因, 认为是预制丝两次热循环过程中, 内部的残余热应力的大小不同。预制丝在制造过程中, 从制造温度 ($\sim 700^{\circ}\text{C}$) 冷却到室温时, 由于 SiC 纤维与铝基体的热膨胀系数相差很大, 它们产生不同的收缩, 结果在基体铝中产生径向压缩

应力和轴向、切向拉伸应力，纤维中产生了轴向、径向和切向压缩应力，残余应力的水平会超过基体铝的屈服强度，而使基体发生塑性变形。由于预制丝内部存在着残余应力及基体的塑性变形，使得预制丝在第一次热循环后，仍有残余应变，且使得两次循环曲线不一致。可以认为第一次循环后的残余应变大小等于制造过程中残余热应力使基体产生的塑性变形量的大小。经第一次热循环过程中的随炉冷却，残余热应力大部份消除，而使热循环后的残余应变趋于零。

现考察预制丝的热膨胀过程。在升温过程中，随着温度的升高，纤维和基体之间的残余热应力逐渐减小，随着温度的进一步升高，在基体中的热应力逐渐为零，而后又重新生成，此时的热应力与开始时的热残余应力方向相反。当热应力达到基体的屈服应力时，基体产生塑性变形，热膨胀曲线斜率发生变化，热膨胀由第一阶段进入第二阶段。随着温度的更进一步提高，基体产生塑性流动，而使热膨胀曲线的斜率又有所变化。在第一阶段，纤维和基体均处于弹性变形，基体和纤维对复合材料的热膨胀均有贡献，因而复合材料具有较高的热膨胀系数。在这一阶段，如果用 R. A. Schapery 公式计算复合材料在弹性段的理论热膨胀系数：

$$\alpha_c = \frac{\alpha_m V_m E_m + \alpha_f V_f E_f}{V_m E_m + V_f E_f} = 10.5 \times 10^{-6} (/^{\circ}\text{C})$$

但如果考虑实际热膨胀过程中热应力对复合材料热膨胀性能的影响，又有

$$\alpha_c = \frac{1}{\Delta T} \left(\alpha_m \cdot \Delta T + \frac{\sigma_m}{E_m} \right) = \frac{1}{\Delta T} \left(\alpha_f \Delta T + \frac{\sigma_f}{E_f} \right) \quad (2)$$

若不考虑复合材料中原有的残余应力大小，在热膨胀时，基体中产生的压应力使复合材料实际膨胀量低于理论计算值。若考虑复合材料中原有的残余应力大小，比较两次循环的结果，由公式(2)也可知，基体中残余轴向拉应力及纤维中残余轴向压应力均使第一次循环与第二次循环的热膨胀系数不同。当热膨胀进入第二阶段后纤维仍处于弹性阶段，而基体开始产生塑性变形，这时复合材料的热膨胀系数主要取决于 SiC 纤维，因而它的热膨胀系数降低。

根据以上分析，我们来计算热膨胀过程中基体发生弹、塑性转变的温度点 T_p 。

假定基体在预制丝制造过程中产生的残余热变形量为 ϵ_0 ，在热循环过程中，基体与纤维完全结合，那么热循环时，有下列等式成立：

$$\begin{cases} \epsilon_m = \epsilon_0 + \alpha_m (T_p - T_0) + \sigma_m / E_m, & \epsilon_m = \epsilon_f \\ \sigma_f = \alpha_f (T_p - T_0) + \sigma_f / E_f, & V_f \sigma_f + V_m \sigma_m = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(3)式中， ϵ 、 α 、 E 、 σ 、 V 分别代表应变、热膨胀系数、弹性模量、应力、体积分。下标 m 、 f 分别为基体、纤维， T_0 为室温 15°C 。当基体中 $\sigma_m = \sigma_{0.2} = -80\text{MPa}$ 时，基体开始屈服，则由(3)式可推得：

$$T_p = T_0 + \frac{1}{\alpha_f - \alpha_m} \times \left(\frac{\sigma_m \times (E_m V_m + E_f V_f)}{E_m E_f V_f} + \epsilon_0 \right) \quad (4)$$

在第一次热循环时， $\epsilon_0 = \Delta l / l = 15\mu\text{m} / 50\text{mm} = 3 \times 10^{-4}$ ，由(4)式得： $T_p^{(1)} = 78.78^{\circ}\text{C}$

在第二次热循环时， $\epsilon_0 = 0$ ，由(4)式得： $T_p^{(2)} = 99.45^{\circ}\text{C}$ 。

实验测得的 T_p 值分别为 74°C 、 103°C ，它们与计算值都十分接近，这说明，基体中残

余应变量的大小是影响复合材料热膨胀过程中弹性段长短的主要因素。

对于热循环过程中的降温曲线而言,预制丝中的热应力变化规律正好与升温过程相反,如降温速度快,热残余应力大,收缩系数较大阶段短,降温速度慢,热残余应力小,收缩系数较大阶段长,因此,降温速度对降温曲线有影响。

4 结 论

通过对 NICALON SiC 束丝纤维增强铝预制丝热膨胀性能的研究,得出以下结论:

(1) NICALON SiC/AL 预制丝在 15~400℃ 区间里具有较低的热膨胀系数,说明它具有良好的尺寸稳定性。

(2) 预制丝的热膨胀过程可分为二个阶段:基体弹性段和基体塑性段。在前一阶段里,复合材料的热膨胀系数较高。

(3) 预制丝的热膨胀特性与基体内部的残余热应力有关。当基体有一定的残余拉应力时,复合材料在热循环后存在一定的残余变形量,且基体发生弹性变形的阶段缩短。

参 考 文 献

- 1 赵渠森编译. 复合材料. 北京: 国防工业出版社, 1979: 45
- 2 李贤淦, 王文龙, 徐志庆. 碳/铝复合材料与热膨胀性能. 复合材料学报, 1989, (3): 16~19
- 3 王鸿华, 李贤淦, 吴人洁. T300/LD₂ 热循环时产生滞后环原因及改善方法探讨. 第五届全国复合材料学术会议文集, 西安, 1988: 1221~1227

A Study of the Thermal Expansion Property of NICALON SiC/Al Preformed Wire

Wan Hong Yang Deming

(Department of Material Science and Applied Chemistry)

Abstract

The thermal expansion property of NICALON SiC multifilaments reinforced Al preformed wire has been measured in the range of 15—400℃. The thermal expansion processes are made two times for one sample and the expansion curves of the first and second time are different. The averaged thermal expansion coefficients are respectively $3.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ and $4.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ for the first and second thermal expansion processes. The thermal expansion performance has been analysed theoretically and the calculated values are approximately in agreement with the experimental data.

Key words metal matrix composite, preformed wire, thermal expansion coefficient