

不同冷却方式下 SiC_p/356Al 复合材料的热应力分析

张建云 王寅 崔霞 周贤良

(南昌航空大学材料科学与工程学院,南昌 330063)

文 摘 采用 ANSYS 有限元软件,分析不同冷却方式下 SiC_p/356Al 复合材料的热应力,通过对水冷、空冷和炉冷不同冷却方式对其热应力进行数值模拟,研究其热应力随降温时间的变化规律。结果表明,不同的冷却方式, SiC_p/356Al 复合材料热应力随降温时间的变化规律不同。水冷时,热应力迅速达到最大值,其后有一定降低;空冷时,热应力先增大,后稍有下降,再逐渐增大;炉冷时,热应力逐渐增大。室温时, SiC_p/356Al 复合材料水冷残余热应力最大、炉冷最小。

关键词 铝基复合材料,有限元方法,热应力

Thermal Stress Analysis of SiC_p/356Al Composite Under Different Cooling

Zhang Jianyun Wang Yin Cui Xia Zhou Xianliang

(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract Thermal stress of SiC_p/356Al composite under different cooling was analyzed with finite element method. Thermal stresses of SiC_p/356Al composite under water cooling, air cooling and furnace cooling were simulated numerically by using ANSYS software. The varying principles of thermal stress of SiC_p/356Al composite with time under different cooling were investigated. The value of residual thermal stress of SiC_p/356Al composite at room temperature was numerically simulated. The results show that the varying principles of thermal stress of SiC_p/356Al composite are different under different cooling. Under water cooling, the thermal stress of composite approaches maximum rapidly, and then decreases to a certain extent. Under air cooling, the thermal stress of composite increases firstly, then decreases a little, after that increases gradually. At room temperature, the residual thermal stress of SiC_p/356Al composite after water cooling is maximum, after furnace cooling is minimum.

Key words Aluminum matrix composite, Finite element method, Thermal stress

0 引言

SiC_p/Al 复合材料由于其较高的比强度、较低的密度、低的热胀系数及高的热导率,在航空航天等领域具有广泛的应用前景^[1-4]。但是, SiC_p的热胀系数与铝基体的差异较大,因此,在复合材料从制备及其后的二次加工温度的冷却过程中会有热应力的产生,冷至室温时,复合材料内部必然会存在残余热应力^[5-7]。这种热应力的存在对复合材料的尺寸稳定性会产生不利影响。本文选取 SiC_p/356Al 复合材料为对象,采用有限元方法分析其不同冷却方式下的热应力,通过对其热应力进行数值模拟,研究其热应力随降温时间的变化规律及冷至室温时的残余应力

值。

1 材料及方法

采用无压渗透法制备 SiC_p/356Al 复合材料^[8], 356Al 合金的共晶温度为 558℃, SiC_p为近球形颗粒,制备工艺为:900℃保温 2 h,随炉冷却至 500℃后空冷至室温。SiC_p的体积分数为 50%, SiC_p/356Al 复合材料的显微组织见图 1。从图 1 可见, SiC_p/356Al 复合材料组织均匀致密,颗粒与基体界面结合紧密。356Al 为铝硅合金,由于硅的存在有效地抑制了铝与碳化硅的界面反应产物 Al₄C₃的产生,所以其边界干净。356Al 合金和 SiC_p的性能见表 1。水冷过程中温度随时间的变化关系参考文献[9]的测试结果,空冷

收稿日期:2008-12-11;修回日期:2009-03-31

基金项目:江西省自然科学基金资助(2007GZC1634);江西省教育厅科技基金资助(GJJ08233)

作者简介:张建云,1958 年出生,教授,博士,主要从事金属基复合材料研究。E-mail: jyzhang699@163.com

及炉冷过程中温度随时间的变化关系利用测温仪进行测试。

在有限元分析中,模型的建立仅考虑平面应力,近球形 SiC_p 简化为球形,复合材料有限元模型如图 2 所示,根据颗粒增强复合材料的对称性,取 1/4 二维模型进行有限元模拟(阴影区域);复合材料有限元模型边界条件如图 3 所示,其热应力分析基本假设如下:(1)增强颗粒在复合材料中均匀分布;(2)基体与增强颗粒界面为理想粘合状态;(3) SiC_p 为完全弹性行为。

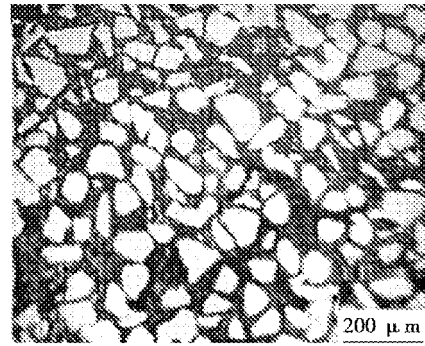


图 1 $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料显微组织

Fig. 1 Microstructure of $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ composite

表 1 356Al 合金和 SiC_p 的性能^[10-14]

Tab. 1 Properties of 356Al alloy and SiC_p

材料	$t/^\circ\text{C}$	$\alpha/10^{-6}\cdot\text{K}$	E/GPa	σ_y/MPa	ν	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\lambda/W\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$C_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
356Al	25	21.4	69	120	0.33	2.7	237	880
	100	21.8	67	98	0.33	2.7	240	880
	200	22.3	58	65	0.33	2.7	237	880
	300	23.4	49	22	0.33	2.7	233	880
	400	24.3	37	13	0.33	2.7	226	880
	500	25.1	21	7	0.33	2.7	219	880
SiC_p	25	3.50	400		0.20	3.2	147	640
	100	3.55	400		0.20	3.2	147	640
	200	3.62	400		0.20	3.2	147	640
	300	3.76	400		0.20	3.2	147	640
	400	3.91	400		0.20	3.2	147	640
	500	4.17	400		0.20	3.2	147	640

因 356Al 合金的共晶温度为 558°C , 选取零应力状态的参考温度为 500°C , 水冷模拟复合材料固溶处理的冷却, 空冷模拟复合材料制备的冷却, 炉冷模拟复合材料退火处理的冷却。采用 ANSYS 9.0 有限元软件模拟不同冷却方式下, $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料从 500°C 冷至室温 (20°C) 热应力随时间的变化以及冷至室温时的热残余应力值。设定 $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料中 SiC 体积分数为 50%, 复合材料模型的有限元网格见图 4, 图 4 中的 A 点为复合材料有限元模型 SiC_p 和基体界面处基体一侧的一点, B 点为基体内一点。

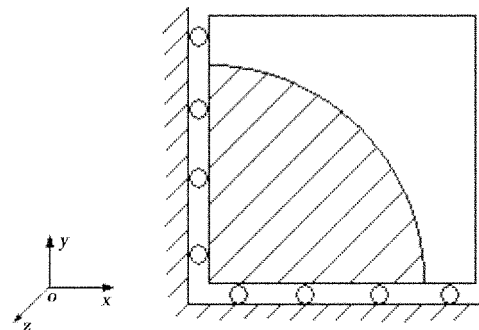


图 3 复合材料有限元模型边界条件

Fig. 3 Boundary condition of finite element model of composite

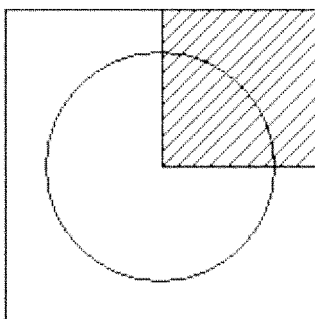


图 2 复合材料有限元模型

Fig. 2 Finite element model of composite

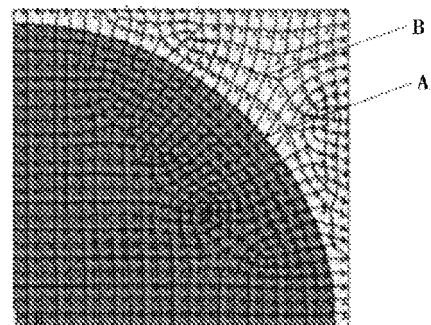


图 4 复合材料有限元模型网格

Fig. 4 Mesh of finite element model of composite

2 结果与分析

2.1 水冷过程中复合材料热应力

在水冷过程中, $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料的温度随时间的变化^[9]见图5。水冷过程中,在前1 s内,试样降温快,而后,降温较平缓,直到11 s温度降至室温,冷却过程结束。在水冷过程中, $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料中A、B点(图4)的热应力随时间的变化见图6。可见水冷过程中复合材料热应力迅速达到最大值,其后有一定的降低,并趋于稳定。且界面处A点的热应力要明显大于基体内B点的热应力。

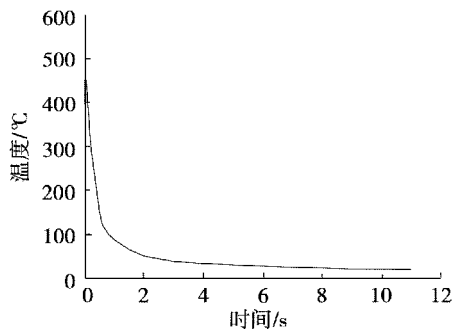


图5 水冷过程中温度随时间变化

Fig.5 Temperature changing with time under water cooling

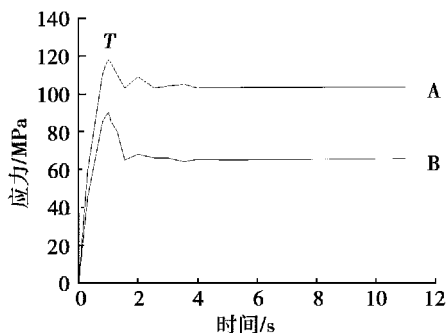


图6 水冷过程热应力随时间的变化

Fig.6 Change of thermal stress with time under water cooling

由于 SiC_p 与铝合金基体之间的热胀系数差异较大,二者的界面是这一差异的突变区,复合材料中由热胀系数差异引起的热应力首先在该区域产生并积累,因而导致A点的热应力要明显大于B点。在图6中的 T 时刻之前,热应力随水冷时间的增加迅速上升,在 T 时刻达到最大值,其后又有降低,这是因为水冷开始瞬间温度迅速降低,随即所产生的热应力也骤然增大,温度很快就低于 100°C ,从而A点热应力此时超过了此温度时的基体合金屈服强度,基体合金内部发生塑性变形,热应力得到部分释放,热应力有一定的降低,而B点热应力的下降是受A点热应力下降的影响所致。其后温度降低不多,并趋于室温,所以热应力也趋于稳定。冷至室温时复合材料残余热应力云图见图7,A点的残余热应力为 103 MPa ,B点热

残余应力为 61 MPa 。

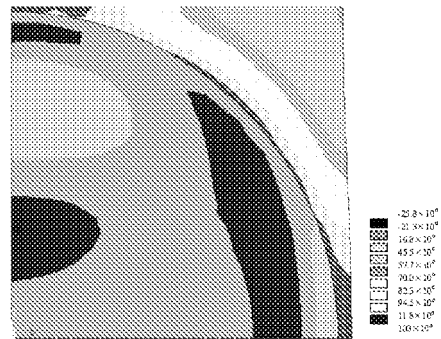


图7 水冷后残余热应力分布云图

Fig.7 Residual thermal stress nephogram after water cooling

2.2 空冷过程中复合材料热应力

在空冷过程中, $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料的温度随时间的变化如图8所示。在空冷过程中, $\text{SiC}_p/356\text{Al}$ 复合材料中A、B点的热应力随时间的变化见图9。

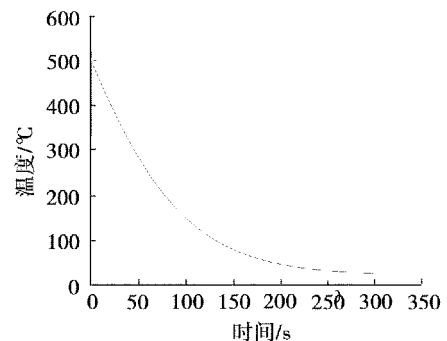


图8 空冷过程中温度随时间变化

Fig.8 Temperature changing with time under air cooling

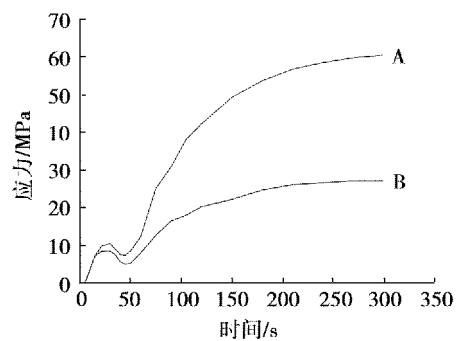


图9 空冷过程热应力随时间的变化

Fig.9 Change of thermal stress with time under air cooling

由图9可见,空冷过程中复合材料热应力先增大,其后稍有下降,再逐渐增大。这是因为在空冷的初期,复合材料温度降低的较快,热应力增加也较快,但温度还处在较高的区间,在较高的温度区间基体合金的屈服强度也较低,此时复合材料的热应力超过基体合金的屈服强度,塑性变形释放部分热应力,应力有一定降低,但随时间的增加,温度的继续降低,复合

材料的屈服强度也会增加,热应力又会增加。冷至室温时复合材料残余热应力云图见图 10,A、B 点的残余热应力分别为 60 和 27 MPa。

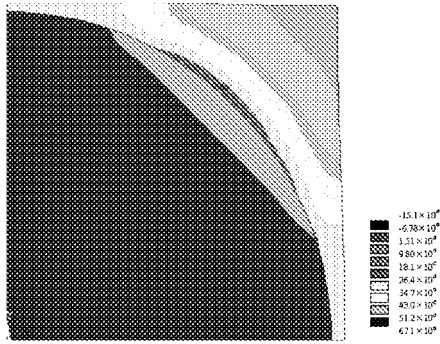


图 10 空冷后残余热应力分布云图

Fig. 10 Residual thermal stress nephogram after air cooling

2.3 炉冷过程中复合材料热应力

在炉冷过程中, SiC_p/356Al 复合材料温度随时间的变化见图 11,A、B 点的热应力随时间的变化见图 12。

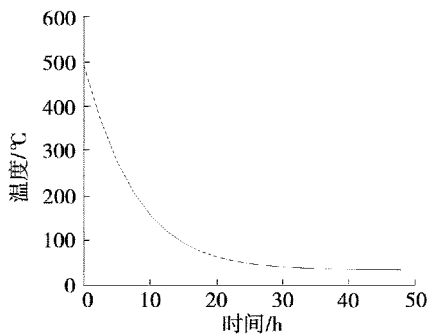


图 11 炉冷过程中温度随时间变化

Fig. 11 Temperature change with time under furnace cooling

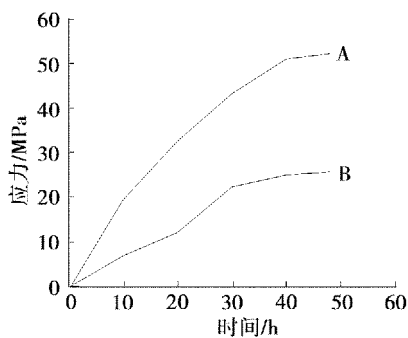


图 12 炉冷过程中热应力随时间的变化

Fig. 12 Change of thermal stress with time under furnace cooling

由图 12 可见,炉冷过程中复合材料热应力是逐渐增大的。这是因为在炉冷过程中,复合材料温度降低慢,热应力增加也慢,由于铝基体合金在高温阶段的屈服强度较低,热应力积累到一定的值可通过塑性变形适时释放。因而在冷至低温段热应力积累也就

较少。冷至室温时复合材料残余热应力云图见图 13,A、B 点的残余热应力分别为 58 和 26 MPa。

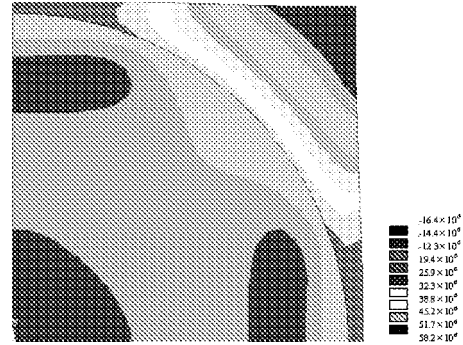


图 13 炉冷后残余热应力分布云图

Fig. 13 Residual thermal stress nephogram after furnace cooling

由此可见,冷却方式不同, SiC_p/356Al 复合材料热应力随降温时间的变化规律也不相同。冷至室温时,其残余热应力的大小顺序为:水冷 > 空冷 > 炉冷, F. Teixeira – Dias^[15] 等人的研究也得出类似结果。另外,不管是哪种冷却方式,冷至室温时,复合材料中 SiC_p 与基体的界面处基体一侧的残余热应力远大于基体内部的残余热应力。

3 结论

(1) 冷却方式不同, SiC_p/356Al 复合材料热应力随降温时间的变化规律也不相同。水冷时,热应力迅速达到最大值,其后有一定的降低。空冷时,热应力先增大,其后稍有下降,再逐渐增大。炉冷时,热应力是逐渐增大的。

(2) 冷至室温时, SiC_p/356Al 复合材料残余热应力的大小顺序为:水冷 > 空冷 > 炉冷。

参考文献

- 1 田大垒,王杏,关荣锋等. 电子封装用 SiC_p/Al 复合材料的研究现状及展望. 电子与封装,2007;7(3):11 ~ 15
- 2 樊建中,肖伯律,徐骏等. SiC_p/Al 复合材料在航空航天领域的应用与发展. 材料导报,2007;21(10):98 ~ 101
- 3 Warren H, Darrell R. Aluminum metal matrix composites. Advanced Materials & Processes,2004;(2):39 ~ 42
- 4 Carl Zweben. Advanced materials for optoelectronic packaging. Optoelectronics, 2002;(9):37 ~ 40
- 5 Fei W D, Hu M, Yao C K. Thermal expansion and thermal mismatch stress relaxation behaviors of SiC reinforced aluminum composite. Materials Chemistry and Physics,2002;77:882 ~ 888
- 6 吴晶,李文芳,蒙继龙. 金属基复合材料的热残余应力力学模型研究进展. 材料科学与工程学报,2003;21(2):289 ~ 292
- 7 黄斌,杨延清. 金属基复合材料中热残余应力的分析方法及其对复合材料组织和力学性能的影响. 材料导报,2006;20(5):413 ~ 415

(下转第 77 页)