

Al/SiC 复合材料室温下阻尼特性的数值模拟^①

徐东辉

(西安交通大学力学系, 西安 710049)

张忠明 王锦程 杨根仓

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要 利用有限元方法对 Al/SiC 复合材料的阻尼特性进行了数值模拟, 指出室温下 Al/SiC 复合材料的阻尼主要由增强颗粒与基体材料间弹性模量的不同造成, Al/SiC 复合材料的损耗因子为纯铝的 10 倍。通过计算表明, 对于较硬的增强颗粒, 弹性模量越高, 材料整体阻尼性能越好。

关键词 有限元 复合材料 阻尼

中图法分类号 TB331

对金属基复合材料阻尼特性的研究时间虽不长, 但却取得了不少成果, 其中多是探究阻尼产生的金属物理机制^[1-3]。1994 年 Zhang Jinmin 等人^[4]在总结前人研究成果的基础上, 结合自己的研究, 对金属基复合材料阻尼的产生作了较深入的探讨。目前, 国内在该领域的研究多是从实验方面进行的^[5], 尽管人们利用金属物理理论对阻尼机制进行了较深入的研究, 得到了不少新的认识, 但至今还未见到一套科学的, 且操作性较强的理论和方法来指导阻尼材料的制备和生产。而且, 以往的研究比较注重温度改变对阻尼的影响, 室温下的材料阻尼特性并未受到特别的关注, 而阻尼材料多在室温或与室温相似的环境中服役, 因此, 研究室温下的材料阻尼特性更为重要。

本文从细观力学观点出发, 利用有限元方法对室温下 SiC/Al 复合材料的阻尼特性进行数值模拟, 研究增强颗粒的体积分数及其本身物理性能的改变对材料整体阻尼性能的影响。

1 数值模拟

1.1 方法的选择

材料阻尼值的测定, 通常采取对被测物体

施加外力令其产生振动, 通过测振动衰减的方法得到阻尼值, 具体公式如下^[6]:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{A_i}{A_{i+n}} \right| \quad (1)$$

式中 δ 为对数衰减率, A_i 和 A_{i+n} 为材料激励后第 i 周和第 $i+n$ 周的振幅。

另一种方法是对材料施加循环载荷, 如图 1 所示, 材料的阻尼可通过迟滞环表示出来。迟滞环所围的面积就是材料在一次循环中消耗的能量 (ΔW), 它与材料的最大贮能 (W) 的比值称为比阻尼能力 Ψ , 表达式如下^[7]:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

式中

$$\Delta W = \oint \sigma_d \varepsilon \quad (3)$$

$$W = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma_d \varepsilon \quad (4)$$

表示材料阻尼能力的参数除了对数衰减率 δ 和比阻尼能力 Ψ 外, 还有损耗因子 η 和损耗角 ϕ , 当阻尼值不大时 ($\tan \phi < 0.1$), 它们之间有如下关系成立^[8]:

$$\eta = \phi = \tan \phi = \delta / \pi = \Psi / 2\pi \quad (5)$$

由于有关系式 (5), 本文对材料阻尼的数值模拟将采用给材料施加循环载荷的办法, 通过计算迟滞环的面积来得到材料的阻尼值。

① 国家自然科学基金资助项目 59671026 及博士后科研基金资助项目 徐东辉, 男, 32 岁, 副教授, 博士 收稿日期: 1998-03-25; 修回日期: 1998-05-21

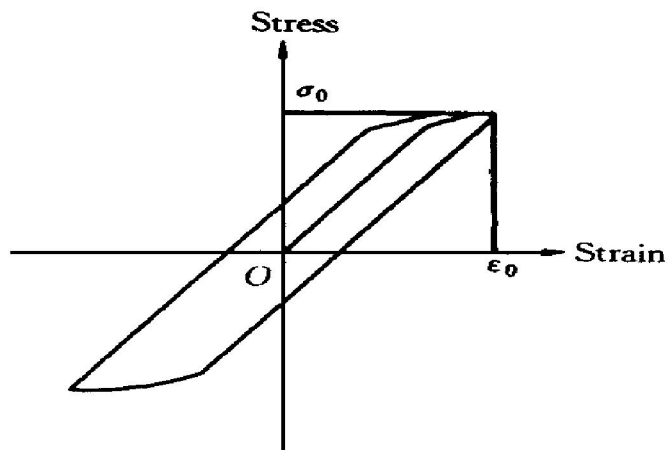


图1 循环载荷示意图

Fig. 1 Sketch of cyclic load

1. 2 模型的建立

室温下且外加载荷不大时,晶界和相界不易开动,因此,基体和增强颗粒可分别被视为各向同性的均匀材料。同时,加入基体的增强颗粒在体积分数不高时,可认为它们均匀地弥散于基体中,这样我们就可选取一代表性体积单元如图2,沿 y 向施加循环载荷,运用胞元法进行计算。由于加载及胞元几何形状的对称性,实际计算时,只选胞元的区域的25%进行计算以减少计算量(如图2所示)。

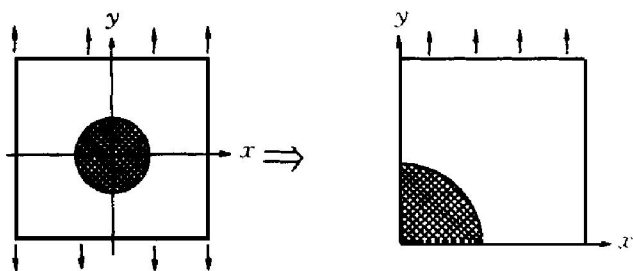


图2 胞元示意图

Fig. 2 Sketch of cell

所研究区域的位移边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} U_x|_{x=0} &= 0 \\ U_y|_{y=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 U_x 和 U_y 分别为 x 和 y 向的位移。沿 y 向施加的循环载荷为均匀的面力,加载初期为拉伸载荷。把加载过程分为若干步,那么第 i 步胞元的平均应力和平均应变可表示成:

$$\left. \begin{aligned} \{E\}_i &= \frac{1}{V} \int_V \{\epsilon\}_i dV \\ \{E_e\}_i &= \frac{1}{V} \int_V \{\epsilon_e\}_i dV \\ \{E_p\}_i &= \{E\}_i - \{E_e\}_i \\ \{\Sigma\}_i &= \frac{1}{V} \int_V \{\sigma\}_i dV \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 下标 i 代表第 i 步, $\{E\}_i$, $\{E_e\}_i$ 和 $\{E_p\}_i$ 为第 i 步胞元的平均应变、平均弹性应变和塑性应变向量。 $\{\Sigma\}_i$ 为第 i 步胞元的平均应力向量。 $\{\epsilon\}_i$, $\{\epsilon_e\}_i$ 和 $\{\sigma\}_i$ 为第 i 步胞元内的局部应变,局部弹性应变和局部应力向量。

由于基体为各向同性的弹塑性体,它的流动应力和塑性应变的关系可表示为:

$$\sigma_y = \sigma_y^0 + H(\bar{\epsilon}_p)^n \quad (8)$$

式中 σ_y 为流动应力, σ_y^0 为初始屈服应力, H 为硬化系数, $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变。增强颗粒为SiC,其初始屈服应力极高,在整个加载过程中可视为弹性体。胞元体局部总应变可表示成为:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_e\} + \{\epsilon_p\} \quad (9)$$

式中 $\{\epsilon_p\}$ 为局部塑性应变向量。

局部应力的表达式为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (10)$$

式中 $[D]$ 在弹性区为 $[D]_e$, 在弹塑性区为 $[D]_{ep}$, $[D]$ 是一个与弹性模量及塑性流动关系有关的量,对于不同问题它们的表达式是不同的,这些都可在一般的有限元书中找到,这里不再赘述。

胞元在循环外力的作用下能量耗散的计算可根据式(3)变为

$$\Delta W = \int \{\Sigma\}^T d\{E\} \quad (11)$$

加载过程被分为若干步,式(11)可写成为

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (\{\Sigma\}_{i-1}^T + \{\Sigma\}_i^T) / 2 \cdot \Delta\{E\}_i \quad (11)'$$

式中 n 为总的加载步,上标 T 表示转置, $\Delta\{E\}_i$ 的表达式为

$$\Delta\{E\}_i = \{E\}_i - \{E\}_{i-1} \quad (12)$$

并且已知

$$\{\Sigma\}_0 = \{0\} \quad \{E\}_0 = \{0\} \quad (13)$$

应用同样的方法可以计算胞元的最大贮能 W :

$$W = \sum_{i=1}^{n'} (\{ \Sigma \}_{i-1}^T + \{ \Sigma \}_i^T) / 2 \cdot \Delta \{ E \}_i \quad (14)$$

式中 n' 是应变达到 ε_0 时所需的加载步数 (如图 1 所示)。

由于用迟滞环计算损耗因子的方法只适用于塑性变形较小的情形^[8], 因此, 本文计算中对胞元整体的塑性变形加以限制: $\bar{E}_p \leq 0.15 \times 10^{-2}$ 。 $\bar{E}_p$ 为胞元等效塑性变形, 这里所考虑的问题为平面应变问题。

2 数值模拟结果

本文计算以碳化硅增强纯铝复合材料为例, 材料参数为^[4]: $\sigma_{Y1}^0 = 35 \text{ MPa}$, $E_1 = 70 \text{ GPa}$, $n = 0.25$, $H = 157.2 \text{ MPa}$, $\sigma_{Y2}^0 = 500 \text{ MPa}$, $E_2 = 440 \text{ GPa}$, $d = 9 \mu\text{m}$ 。 σ_{Y1}^0 和 σ_{Y2}^0 , n , H 的物理意义如式 (8) 所表示, 下标 1 代表基体 Al, 2 代表 SiC 增强相, d 为 SiC 颗粒的平均尺寸。图 3 为上述复合材料的损耗因子 η 与 SiC 颗粒体积分数 V_p 的关系曲线。图中实心圆点为数值模拟结果。计算时, 在体积分数的

0~20% 的区间内选取了 24 个点进行计算, 空心小圆为实验结果^[4]。体积分数为 0 时, 对应的点为纯铝的损耗因子的值。从图中可以观察到, 随着 SiC 体积分数的增加, 损耗因子先增加, 达到一定值后开始下降。在实验给出的值中, 最大值出现在 $V_p = 5\%$ 处, 模拟结果最大值出现在 $V_p = 4.6\%$ 附近。SiC 的加入, 提高了材料整体的阻尼特性, 特别是在 SiC 的体积分数较低时 ($V_p < 5\%$), 材料的损耗因子对 SiC 体积分数的改变更为敏感。同时, 从数值模拟结果与实验结果的比较中可以看出, 模拟结果较好地反映了损耗因子随 SiC 体积分数改变而变化的关系。

3 讨论

在计算模型中我们视基体和增强颗粒为均匀的各向同性体, 而且, 外加循环载荷低于纯铝的屈服应力, 因此, 造成 Al/SiC 复合材料的阻尼性能优于纯铝的主要原因是增强颗粒的弹性模量与基体的不同。当受外力时, 复合材料在两相边界附近产生应变的不匹配, 在弱相 (铝基) 产生塑性变形, 从而消耗外加振动的能量, 提高了阻尼特性。所以, 室温下 Al/SiC 复合材料中, 增强颗粒与基体材料间弹性模量的不同是使材料产生阻尼的主导原因。

于是, 我们可以设想, 增强颗粒弹性模量的改变将会改变复合材料整体的阻尼特性。图 4 给出的是增强材料弹性模量分别为 $E_2 = 440 \text{ GPa}$, 300 GPa 和 180 GPa 时损耗因子 η 与体积分数 V_p 的关系。从中可以看出, 随着增强材料弹性模量的降低, 损耗因子 η 也随着降低。也可以反过来讲, 当基体材料一定时, 增强颗粒弹性模量值越高, 复合材料整体阻尼特性越好。但不是体积分数越高越好, 这是因为复合材料阻尼性能的提高依赖于弱相中的塑性变形。增强颗粒的加入, 引入了增强颗粒与基体弹性模量的不匹配; 同时, 由于增强颗粒的屈服应力很高, 也使可发生塑性变形的区域相对减少, 当增强颗粒的体积分数达到一定值时

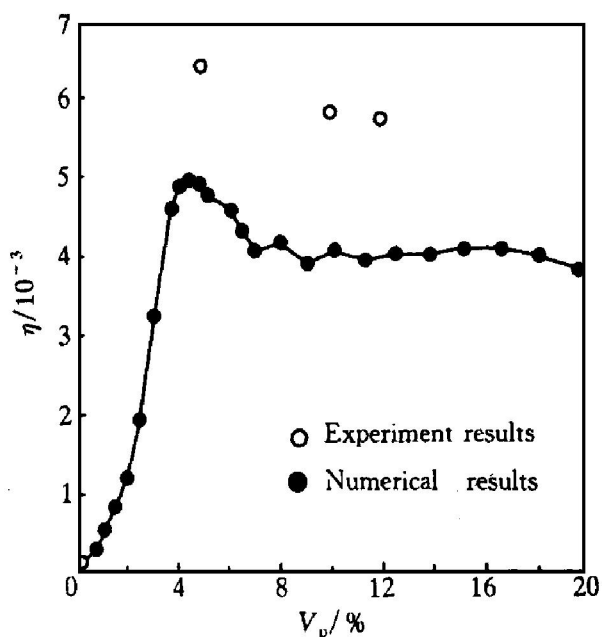


图3 损耗因子与 SiC 体积分数的关系

Fig. 3 Relation of loss factor and volume fraction of SiC

($V_p = 4.6\% \sim 5.0\%$), 这种作用开始逐渐占了上风, 材料整体的阻尼特性也开始随增强材料体积分数的增加而下降。

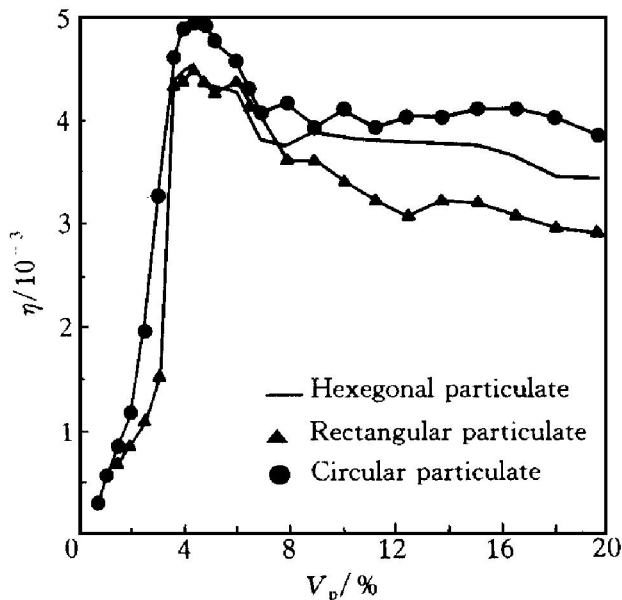


图4 弹性模量对阻尼特性的影响

Fig. 4 Influence of elastic module on damping property

同时, 我们注意到, 在加载过程中由于计算模型的限制, 增强颗粒内部没有塑性和滑动出现, 因此, 计算结果不适于第二相颗粒较软

(如石墨) 的金属基复合材料, 对于第二相较软的情形, 须考虑用“混合法则”^[4]。另外, 实验结果是在 0.1 Hz 振动下测得的, 计算模型为准静态, 这是造成两者差别的原因, 但这并不影响我们对材料整体特性的认识。

REFERENCES

- 1 Kawabe H. J De Physics, 1989, C5: 941.
- 2 Mori T. Acta Mater, 1983, 31 (2): 275.
- 3 Parrini L. Acta Mater, 1996, 44 (10): 3895.
- 4 Zhang Jinmin *et al.* Materials Science and Engineering, 1994, R13: 325.
- 5 Pang Shaoping *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8 (3): 69.
- 6 Weaver W Jr, Timoshenko S P and Young D H. Vibration Problems in Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1990: 52.
- 7 McClintock F A and Argon A S. Mechanical Behavior of Materials. Reading Addison-Wesley, 1966: 471.
- 8 Wolfenden A and Wolla J M. In: Everatt R K and Arsenault R J eds. Metal Matrix Composites: Mechanisms and Properties. Boston: Academic Press, 1991: 287.

NUMERICAL SIMULATION FOR DAMPING PROPERTY OF COMPOSITE Al/SiC AT ROOM TEMPERATURE

Xu Donghui¹, Zhang Zhongming², Wang Jincheng² and Yang Gencang²

¹ Department of Engineering Mechanics,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China

² State Key Laboratory of Solidification Processing,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China

ABSTRACT Finite element method was employed to simulate the damping behavior of the composite Al/SiC. From the results, it was concluded that the damping of the composite Al/SiC was mainly generated from the difference of elastic module between the enhanced particles and matrix under room temperature. The loss factor of Al/SiC is as 10 times high as that of pure aluminum. Moreover, it was deduced and proved that the damping property of the composite could be more improved if the elastic module of the enhanced particles were higher and the enhanced particles were relatively hard.

Key words finite element method damping composite

(编辑 何学锋)