

界面性能对哑铃状短纤维 增强复合材料增强效果的影响*

孙雪坤¹⁾ 秦荣山¹⁾ 刘东民¹⁾ 周本濂^{1,2)} ✓ 7833

1) 中国科学院金属研究所, 沈阳 110015

2) 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110015

摘 要 采用有限元方法分析哑铃状短纤维及平直短纤维增强复合材料, 重点探讨界面剪切强度对两种材料模型增强效果的影响, 对哑铃状材料模型的适用性进行了研究. 数值计算中将材料看作理想弹塑性体, 沿界面划出一薄层界面单元, 从而引入了界面性能的影响. 通过对铜丝/锡材料的分析可以看出, 界面剪切性能对两种材料模型的增强效果有很大影响, 特别是在弱界面情况下采用哑铃状短纤维模型可大大提高增强效果.

关键词 复合材料界面, 哑铃状短纤维, 有限元法

金属基和陶瓷基短纤维增强复合材料具有高温下化学稳定性好、比模量及比强度高、易于制造等优点, 常被用来获得高性能的复合材料, 在工程界越来越受到重视. 金属基复合材料的增强和陶瓷基复合材料的增韧是工程上亟待解决的两大难题. 哑铃状仿骨材料模型是从仿生的角度提出来的, 并已进行了初步的研究^[1].

短纤维增强复合材料的力学行为中, 载荷从基体向纤维的传递效率决定了复合材料的承载能力, 即界面强弱决定短纤维的增强效果. 如界面结合过弱, 载荷将无法传递; 而结合过强, 将导致韧性降低. 于是, 人们追求“最佳界面设计”. 文献〔2, 3〕采用理想粘接界面模型, 但使用中, 界面状态一旦变化, 将偏离最佳点并继续恶化, 于是, 人们设想能找到一种对界面状态不敏感而承载良好的所谓“最差界面设计”. 文献〔4, 5〕采用非理想粘接界面模型, 计算出金属基复合材料的有效弹性模量, 而文献〔6〕初步分析了弱界面条件下哑铃状短纤维增强效果好于平直短纤维的原因, 但未给出各种界面条件下的差异.

本文采用有限元方法分析不同界面条件下哑铃状短纤维材料模型和平直短纤维材料模型的极限强度, 从而比较两种材料模型的增强效果, 供材料设计与制备时参考. 分析中沿界面划出一薄层界面单元, 并用界面剪切强度进行失效判断, 从而引入界面性能的影响. 数值计算中将材料看作理想弹塑性体, 采用增量加载, 每一载荷步中用 Mises 屈服准则判断单元的状态, 从而较真实地模拟模型的承载过程.

* 国家自然科学基金重点资助项目59431040

收到初稿日期: 1996-01-31, 收到修改稿日期: 1996-09-18

本文通讯联系人: 孙雪坤, 博士后, 沈阳(110015) 中国科学院金属研究所

1 分析方法

1.1 有限元分析理论

由弹性理论可知, 弹性体的虚功方程为

$$\int_{V_0} \delta \varepsilon_{ij} \cdot \sigma_{ij} \cdot dv = \int_{V_0} \delta u_i \cdot P_{oi} \cdot dv + \int_{A_{oi}} \delta u_i \cdot q_{oi} \cdot dA \quad (1)$$

其中, V_0 , A_{oi} 分别为弹性体的体积和表面积; P_{oi} , q_{oi} 分别是集中载荷和分布载荷; u_i , ε_{ij} 和 σ_{ij} 分别是位移、应变和应力分量. 将上述方程进行等参元离散, 引入轴对称条件, 并采用增量法求解, 可以得到轴对称条件下有限元分析的基本公式(详见文献〔7〕).

1.2 界面单元的处理

本文研究哑铃状及平直短纤维增强复合材料模型, 沿纤维方向受拉伸载荷, 仅分析单个纤维增强模型. 分析中将基体及纤维当成理想弹塑性体, 且沿界面划出一薄层单元. 该界面单元采用基体材料的性能参量, 但其单元厚度为基体单元厚度的 $1/10$. 由于分析中沿纤维方向拉伸, 界面应力很小, 因此采用界面的剪切强度进行界面单元的失效分析.

采用以下原则计算两种材料模型的极限载荷:

- (1) 某一横截面的基体屈服且界面单元全部失效, 则材料模型失效, 得到极限载荷;
- (2) 某一横截面的基体和纤维均屈服, 则材料模型失效, 得到极限载荷.

2 数值计算结果及讨论

采用文献〔6〕中的哑铃状短纤维及平直短纤维增强复合材料模型, 沿纤维方向均匀加载. 钢丝/锡材料中钢丝的参量为: $E=200$ MPa, $\nu=0.3$, $\sigma_s=678$ MPa; Sn 的参量为: $E=40$ MPa, $\nu=0.33$, $\sigma_s=10$ MPa. 采用四边形等单元. 界面单元厚度为基体单元厚度的 $1/10$, 用界面的剪切强度进行界面单元的失效判断, 从而模拟界面的失效过程.

图 1 为不同界面剪切强度下两种材料模型的极限强度曲线. 可将每条曲线分为 3 段, 对哑铃状短纤维增强复合材料模型: $\tau_f < \tau_{D1}$, $\tau_{D1} < \tau_f < \tau_{D2}$ 和 $\tau_f > \tau_{D2}$ (其中 τ_f 为界面剪切强度); 对于平直纤维材料模型: $\tau_f < \tau_{P1}$, $\tau_{P1} < \tau_f < \tau_{P2}$ 和 $\tau_f > \tau_{P2}$. 从中可以看出以下几点:

(1) 当 $\tau_f < \tau_{D1}$ 时 (对平直纤维, $\tau_f < \tau_{P1}$), 模型的极限强度取决于基体的屈服强度, 且 $\tau_{D1} \ll \tau_{P1}$.

(2) 当 $\tau_{D1} < \tau_f < \tau_{D2}$ 时 (对平直纤维, $\tau_{P1} < \tau_f < \tau_{P2}$), 模型的极限强度取决于界面的剪切强度, 且随界面剪切强度的提高而提高.

(3) 当 $\tau_f > \tau_{D2}$ 时 (对平直纤维, $\tau_{P1} > \tau_{P2}$), 模型的极限强度取决于纤维的屈服强度, 且 $\tau_{D2} \ll \tau_{P2}$.

从图 1 还可以看到, 当 $\tau_f < 1.0$ MPa 时, 哑铃状材料模型的极限强度高于平直纤维模型; 当 $\tau_f > 1.0$ MPa 时, 结果相反.

图 2 为哑铃状材料模型(相对于平直纤维模型)的极限强度提高率-界面剪切强度曲线. 从

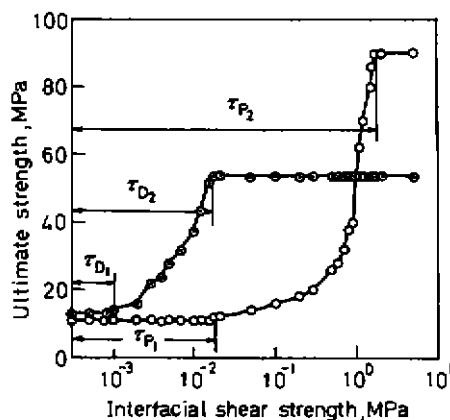


图 1 两种材料模型极限强度与界面剪切强度的关系

Fig.1 Ultimate strength vs interfacial shear strength for two models

- dumbbell-shaped short-fibre model
- plain fibre model

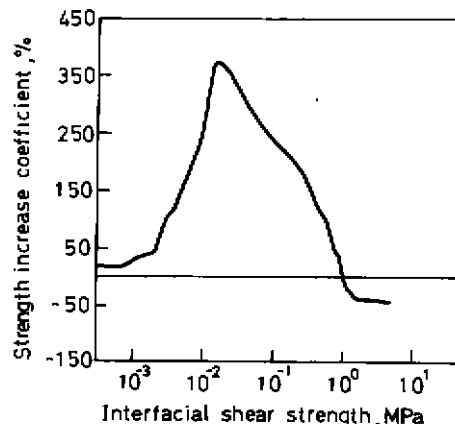


图 2 哑铃状短纤维增强复合材料模型强度提高率与界面剪切强度的关系

Fig.2 Strength increase coefficient vs interfacial shear strength for dumbbell-shaped short-fibre reinforced composite

中可以看出: 在弱界面条件下($\tau_f < 1.0$ MPa), 用哑铃状短纤维替代平直纤维可提高复合材料的强度, 且在某一界面条件下能够获得最佳的改进效果; 在较强界面条件下($\tau_f > 1.0$ MPa), 用哑铃状短纤维替代平直纤维不能提高复合材料的强度, 且适得其反。

3 结 论

(1) 哑铃状及平直短纤维两种材料模型的极限强度, 随界面剪切强度而变化, 其变化曲线均分为 3 个阶段: 界面极弱时 (哑铃状纤维 $\tau_f < \tau_{D1}$, 平直纤维 $\tau_f < \tau_{P1}$), 极限强度的大小取决于基体屈服强度; 界面较弱时 (哑铃状纤维 $\tau_{D1} < \tau_f < \tau_{D2}$, 平直纤维 $\tau_{P1} < \tau_f < \tau_{P2}$), 极限强度的大小取决于界面剪切强度; 界面较强时 (哑铃状纤维 $\tau_f > \tau_{D2}$, 平直纤维 $\tau_f > \tau_{P2}$), 极限强度的大小取决于纤维的屈服强度。

(2) 弱界面条件下($\tau_f < 1.0$ MPa), 用哑铃状短纤维替代平直纤维可大大提高复合材料的强度。

(3) 较强界面条件下($\tau_f > 1.0$ MPa), 用哑铃状短纤维替代平直纤维将降低复合材料强度。

参 考 文 献

- 1 田晓滨, 赵晓鹏, 周本濂. 金属学报, 1994; 30: B180
- 2 Fukuda H, Chai T W. *J Comp Mater*, 1981; 15: 79
- 3 Chon C T, Sun C T. *J Mater Sci*, 1980; 15: 931
- 4 Broutman L J, Agarwal B D. *Polymar Eng Sci*, 1974; 14: 581
- 5 Agarwal B D, Nansal R K. *Fibre Sci Technol*, 1979; 12: 149
- 6 赵晓鹏, 田晓滨, 周本濂, 李世红. 金属学报, 1994; 30: B187
- 7 徐次达, 华伯浩. 固体力学有限元理论、方法及程序. 北京: 水力电力出版社, 1983: 152

EFFECT OF INTERFACE PROPERTY ON STRENGTHENING EFFICIENCY OF DUMBBELL- SHAPED SHORT-FIBRE REINFORCED COMPOSITE

SUN Xuekun¹⁾, QIN Rongshan¹⁾, LIU Dongmin¹⁾, ZHOU Benlian^{1,2)}

1) *Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015*

2) *International Centre for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences,
Shenyang 110015*

(Manuscript received 1996-01-31, in revised form 1996-09-18)

ABSTRACT The finite element method was adopted to analyze the dumbbell-shaped and plain short-fibre reinforced composites. Emphasis was put on discussing the effect of interface property on strengthening efficiency of two models. The adaptability of dumbbell-shaped short-fibre model was also studied. The elastic-plastic model was used to make the numerical calculation and one layer of interface element was divided so that the effect of interface property was introduced. From the analysis of steel wire reinforced tin composite, it was revealed that the interface property affects the strengthening efficiency of two models heavily. Especially under the condition of weak bonding interface, the dumbbell-shaped short-fibre model could increase the strengthening efficiency greatly. The analysis method and numerical results could be used as a reference to the design of short-fibre reinforced composites.

KEY WORDS composite interface, dumbbell-shaped short-fibre, finite element method

*Correspondent: SUN Xuekun, postdoctor, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences,
Shenyang 110015*