

颗粒填充复合材料强韧化效应的力学分析¹⁾

卢锡年 张 芮

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 颗粒填充复合材料中基体微损伤形式对材料韧性产生决定性影响. 本文通过二相或三相材料中基体应力分布的分析计算, 结合损伤萌生的力学条件, 对颗粒填充的强韧化效应作出定性分析. 计算结果表明, 若颗粒刚度高于基体, 随着颗粒模量的提高, 开裂与银纹趋势逐步增强, 由此可知单纯使用硬粒子填充难以实现增韧. 但若粒子与基体间有柔性界面相存在, 基体屈服趋势将随界面厚度迅速增长, 它将在损伤引发机制的竞争中占据优势, 成为损伤的主导形式, 并由此可成功地实现材料的强韧化.

关键词 应力分析, 细观损伤, 材料强韧化

引 言

高性能工程塑料是具有良好发展前景的新型结构材料, 通过颗粒填充对现有工程塑料进行改性是提高其力学性能的有效手段. 已有研究表明, 改性工作中强化与韧化效应往往难以兼顾. 例如, 橡胶粒子的加入大幅度地提高了材料韧性, 但材料的刚度及强度明显下降. 能否通过粒子填充同时获得强化与韧化效应, 是当前广为关注的问题. 本文将通过力学分析探讨实现这一目标的可能性.

已有研究工作表明, 材料韧性与损伤机制有密切关系. 在材料形变破坏过程中, 若大量消耗变形能的损伤机制(如基体屈服)占据优势, 材料通常具有良好韧性. 反之, 若低耗能损伤机制(如脱粘与开裂)起主导作用, 材料韧性不高. 损伤形式取决于材料内部应力状态. 本文通过有限元计算, 分析颗粒填充材料中与损伤形式相关的应力分布, 着重考察粒子与基体相对刚度, 以及柔性界面层对应力分布的影响, 并进一步讨论它们与材料性能的关系.

1 应力分布的数值计算

本文采用轴对称有限元法计算基体应力分布. 计算程序是在李国琛教授提供的轴对称大变形有限元程序基础上编制的^[1]. 图 1(b) 中给出 1/4 胞元的等应变三角单元网格图, 其中共有 486 个单元, 271 个节点. 界面单元分层数为 2. 球形粒子以简单立方方式均匀分布于基体中, 取图 1(a) 所示胞元进行分析. 圆柱体半径 $r = 1$, 圆柱体高 $h = 2r$. 图中包覆着界面层 I 的刚性粒子 P 埋入圆柱形基体 M 内, 并在 Z 方向受到均匀位移加载. 由于应力分布的轴对称性, 只需取胞元中 ORSN 面作分析计算. 考虑胞元间约束条件, SN 需保持直边.

¹⁾ 国家自然科学基金及中国科学院力学研究所 LNM 开放实验室资助课题.

1994-05-22 收到第一稿, 1994-11-02 收到修改稿.

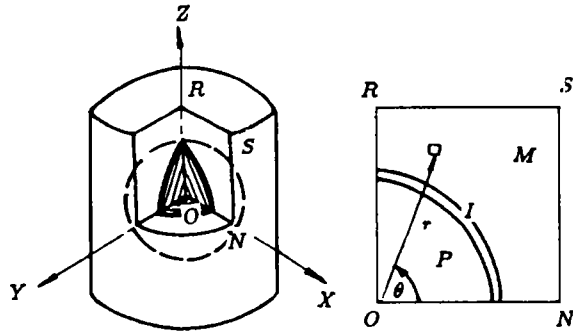


图 1(a) 轴对称有限元计算模型
Fig.1(a) Axisymmetric finite element model (with interfacial layer)

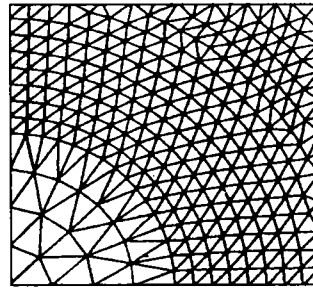


图 1(b) 轴对称有限元网格划分
Fig.1(b) Axisymmetric finite element mesh

若不考虑界面相的存在, 即界面相体积含量 $V_I = 0$, 计算中选取一系列粒子与基体模量比, 以反映从刚硬粒子逐步过渡为柔软粒子的情况, 并选择相应的泊松比. 材料参数详见表 1. 在含柔性界面层材料的问题中, 考虑粒子为刚硬的无机材料, 基体为大品种塑料, 界面层为弹性体, 则三者模量定为 $E_P:E_m:E_I=35:1:0.05$, 三者泊松比取为 $\nu_P:\nu_m:\nu_I=0.23:0.40:0.48$.

实验观察表明, 颗粒填充复合材料受力时, 损伤机制主要有基体与粒子间的脱粘、开裂、银纹及基体屈服三种形式. 因此在计算结果中选择反映决定界面脱粘的界面法向应力 σ_n^0 ^[2], 导致银纹引发的最大主应力 σ_1 ^[3] 以及与基体屈服相关的有效应力 σ_e ^[4]. 当计算参数改变时, 三种应力最大值的相对消长, 将决定何种损伤机制在材料形变破坏过程中占据主导地位.

2 不含界面层材料中应力分布

若界面层厚度与粒径相比小得可以忽略, 可作为两相模型处理. 设粒子的体积含量 V_p 为 30%, 计算得到表 1 及表 2 中的结果.

表 1
Table 1

E_p/E_m	20/1	5/1	2/1	0.5/1	0.2/1	0.05/1
ν_p/ν_m	0.23/0.40	0.40/0.40	0.40/0.40	0.40/0.40	0.48/0.40	0.48/0.40
E_c/E_m	2.17	1.66	1.25	0.84	0.73	0.65

表 2
Table 2

E_p/E_m	20/1	5/1	2/1	0.5/1	0.2/1	0.05/1
$(\sigma_n^0/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$	2.16(0.78, 88°)	1.81(0.78, 88°)	1.37(0.78, 88°)	0.65(0.78, 83°)	0.514(0.78, 77°)	0.316(0.78, 48°)
$(\sigma_e/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$	1.81(1.0, 88°)	1.56(1.0, 88°)	1.25(1.0, 88°)	1.34(0.78, 8°)	1.57(0.78, 8°)	1.97(0.78, 8°)
$(\sigma_1/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$	2.22(0.83, 88°)	1.88(1.0, 88°)	1.41(1.0, 88°)	1.43(0.78, 8°)	1.74(0.78, 8°)	2.33(0.78, 8°)

注: r, θ 含义参看图 1.

See Fig.1 for the definition of r, θ .

表 1 给出复合材料总体模量随粒子模量的变化. 其中 E_c 为复合材料的杨氏模量, 它可通过有限元计算取得. E_m, E_p 分别为基体, 粒子的杨氏模量; ν_m, ν_p 分

别为基体与粒子的泊松比. 表 2 给出基体应力最大值随粒子模量变化, 以及用 (r, θ) 标明的最大应力出现的地区. 其中 σ_n^0 是沿界面法向应力. σ_e, σ_1 分别为等效应力及第 1 主应力, σ_0 为作用在胞元顶面上 σ_z 的平均值.

从表 2 中数据看到, 在粒子刚度高于基体的情况下, $\sigma_n^0, \sigma_e, \sigma_1$ 的最大值位于粒子极区方向. 随着粒子刚度增大, $(\sigma_n^0)_{\max}$ 及 $(\sigma_1)_{\max}$ 以高于 $(\sigma_e)_{\max}$ 的速度同步增长, 表明硬粒子填充材料有较强的产生脱粘开裂与银纹的倾向. 若粒子相对柔软, 随着粒子刚度减小, $(\sigma_n^0)_{\max}$ 值急剧下降, $(\sigma_1)_{\max}, (\sigma_e)_{\max}$ 大幅度提高, 这意味着基体屈服或银纹将迅速取代脱粘开裂, 成为主要的损伤形式. 从计算应力分布图中可看到, σ_1 及 σ_e 的最大值出现在粒子赤道方向, 这与实验现象是一致的. Argon 等人在文献 [5] 中即已指出, 柔软粒子共混材料在粒子赤道部位确有大量银纹产生.

3 含界面层材料中应力分布

若界面层具有一定厚度, 计算模型中除粒子与基体外需考虑界面层作为第 3 相的存在. 设粒子体积含量仍为 30%, 对于不同界面相含量的材料计算得到以下结果.

表 3
Table 3

δ/d	0	0.01	0.02	0.03	0.05
V_I	0	1.8	3.8	5.8	10
E_c/E_m	2.27	1.58	1.38	1.25	1.06
ν_c	0.337	0.379	0.385	0.390	0.394

表 3 中给出材料的模量、泊松比与界面厚度的关系. 其中, δ 为界面厚度, d 为粒径, V_I 为界面相的体积百分含量, E_c, ν_c 分别为复合材料的模量及泊松比, E_m 为基体材料的模量.

图 2—图 7 分别给出含界面相材料中法向应力 σ_n , 最大主应力 σ_1 及等效应力 σ_e 在基体内的等值线图, 并与不含界面相的情况相比较. 由图可见, 柔性界面层对 σ_n 影响不大, 但它改变了 σ_1 及 σ_e 的分布情况, 尤以对 σ_e 的影响更为明显.

表 4 中列出对应于不同界面层厚度情况下基体材料中 σ_n^0, σ_e 及 σ_1 的最大值, 并同时用 (r, θ) 标出最大应力所处位置. 从表中数据看到, 除对应于 $V_I = 0$ 的 σ_e 值以外, 其余最大应力值均位于粒子极区方向紧靠界面处. σ_n^0 及 σ_1 的最大值随界面厚度变化不大, 但值得注意的是, 薄的柔性界面层 ($\delta/d = 0.01$) 可使 σ_e 的最大值明显增大, 且该值随着界面厚度的增加迅速提高.

表 4
Table 4

$V_I(\%)$	$(\sigma_n^0/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$	$(\sigma_e/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$	$(\sigma_1/\sigma_0)_{\max}(r, \theta)$
0	2.23(0.783, 88°)	1.86(1.0, 88°)	2.26(0.783, 83°)
1.8	2.29(0.803, 83°)	2.34(0.803, 88°)	2.30(0.803, 83°)
3.8	2.22(0.822, 83°)	2.60(0.822, 88°)	2.22(0.822, 83°)
5.8	2.13(0.838, 83°)	2.72(0.838, 88°)	2.13(0.838, 83°)
10	1.93(0.872, 83°)	2.83(0.872, 88°)	1.93(0.872, 83°)

注: r, θ 含义参看图 1.

See Fig.1 for the definition of r, θ .

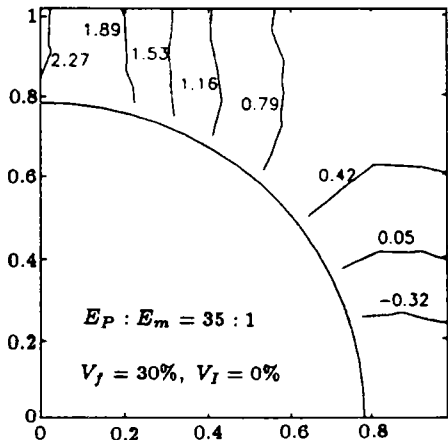


图2 σ_n/σ_0 在无界面层情况下的等高线分布图
Fig.2 Contours of constant σ_n/σ_0 (without interfacial layer)

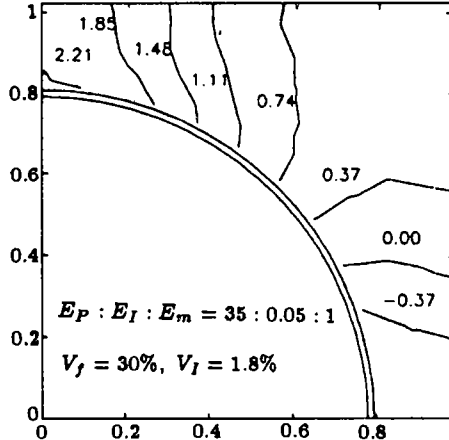


图3 σ_n/σ_0 在有界面层情况下的等高线分布图
Fig.3 Contours of constant σ_n/σ_0 (with interfacial layer)

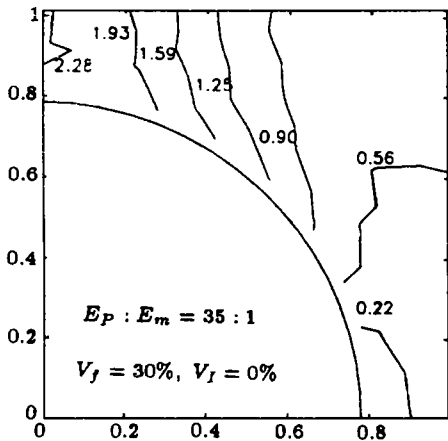


图4 σ_1/σ_0 在无界面层情况下的等高线分布图
Fig.4 Contours of constant σ_1/σ_0 (without interfacial layer)

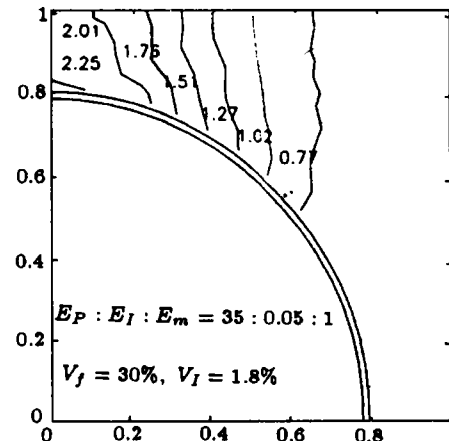


图5 σ_1/σ_0 在有界面层情况下的等高线分布图
Fig.5 Contours of constant σ_1/σ_0 (with interfacial layer)

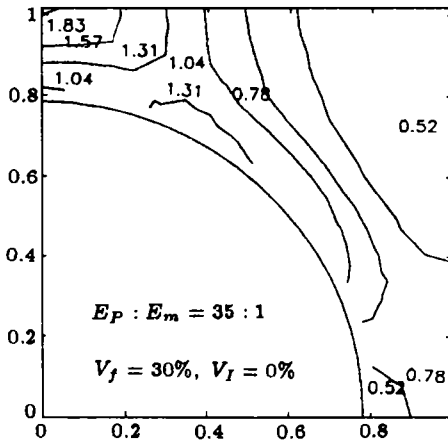


图6 σ_e/σ_0 在无界面层情况下的等高线分布图
Fig.6 Contours of constant σ_e/σ_0 (without interfacial layer)

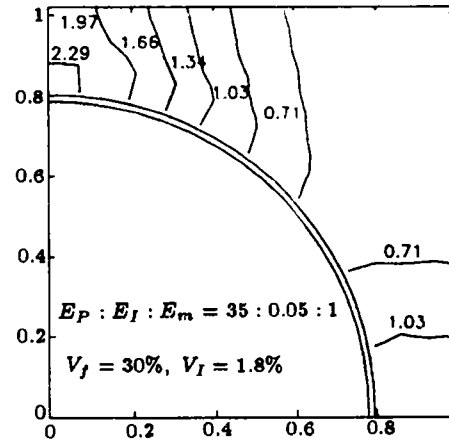


图7 σ_e/σ_0 在有界面层情况下的等高线分布图
Fig.7 Contours of constant σ_e/σ_0 (with interfacial layer)

4 结 论

颗粒填充复合材料中应力分布的数值计算结果表明, 在界面厚度不计的情况下, 柔性粒子填充复合材料具有强烈的基体屈服与银纹发生趋势, 因此通过柔性粒子填充改性易于实现材料韧化. 但由于不可避免地伴随着刚度与强度的下降, 该途径难以实现材料强韧的目标. 若改用相对刚硬的粒子, 随着粒子刚度增大, 损伤过程中产生脱粘开裂与银纹的趋势强于基体屈服, 这对材料韧性提高是不利的.

若在刚硬填充粒子与基体间存在柔性界面层, 材料具有明显的基体屈服倾向. 此时复合材料的总体模量仍高于基体, 这就意味着材料将同时得到增韧与增强. 因此采用柔性界面层包覆刚性粒子进行填充改性可成为实现材料强韧化的有效途径.

参 考 文 献

- 1 刘洪秋, 卢锡年, 李国琛. 第二届高分子材料形变、损伤与破坏学术讨论会论文集. 1992: 97
- 2 Lu S, Yan L, Zhu X, Qi Z. *J Mat Sci*, 1992, 27: 4633
- 3 Matsushige K, Radcliffe SV, Bar E. *J Mat Sci*, 1975, 10: 833
- 4 Bowden PB, Jukes JA. *J Mat Sci*, 1972, 7: 52
- 5 Argon AS, Cohen RE, Gebilloglu OS. Proceedings of ICM-5, 1987, 1:3

A FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF TOUGHENING AND REINFORCING EFFECTS ON PARTICLE-FILLED MATERIALS

Lu Sinien Zhang Rui

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract The microscopic stress distribution in particle-filled material is studied by axisymmetric finite-element method. In this work, the second-phase particle in the form of spheres is modelled as elastic with or without a ductile interphase between matrix and inclusion. Detail parametric analysis of the effects of the Young's modulus of particles and the thickness of interfacial layer on the stress distribution are discussed.

The results of numerical calculation indicate that debonding has a strong tendency to be initiated when the rigidity of particle is higher than that of the matrix. Thus the toughness of material is difficult to be enhanced. But if this rigid particle is coated with a ductile layer, the stress field in the matrix will be strongly affected. As the result, matrix yielding becomes the dominant mode of microdamage. Then both the toughening effect and the reinforcing effect on the particle-filled material can be improved.

Key words stress analysis, microdamage, toughening, reinforcing