第 12 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 12 No. 4
1995 年 12 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Dec. 1995

球形粒子填充复合材料微观应力场的有限元分析

张 芮 卢锡年
(中国科学院力学研究所，北京 100080)

摘 要 本文采用有限元分析方法，对颗粒填充复合材料进行了受力分析。考虑了粒子间相互作用后，给出了相应的基体内部应力场分布形式。定性地分析了产生界面脱粘、银纹及剪切屈服等损伤破坏形式的力学条件，并把计算结果与具体实验做了比较，取得了较好的一致性。

关键词 填充粒子，界面脱粘，银纹，屈服，有限元分析

1 前 言

目前，对已有高分子材料改性以获得性能优异的工程材料是材料科学的重要课题之一。在改性研究中，材料的强化与增韧始终是两个主要的目标。一般认为，加入柔性粒子可能增韧[1]，而加入刚硬粒子则可能使材料强化[2,3]，近期非弹性增韧概念的提出则为实现材料的强韧提出了又一条新的研究途径[4]。

粒子填充产生的力学效应与填充后材料内部应力分布及由此产生的细观损伤和演化密切相关。为此本文采用轴对称有限元模型，对球型粒子填充复合材料内部应力场作了分析计算，并讨论了粒子相对刚度对应力分布产生的影响。

2 计算模型及边界条件的处理

当填充二相粒子按一定的体积百分数随机地分布在基体中时，从统计观点看，它们呈现周期性分布。现考虑单轴拉伸情况下的试件，当球形填充粒子均匀分布其中时，分析模型可以简化为圆柱形基体中含有一个球形粒子，如图 1(a)所示。这样就可以把一个实际是三维的问题转化为轴对称问题，它对简化计算是十分必要的。用轴对称方法计算得到的结果与三维方法得到的结果，在粒子浓度不高时相差无几。考虑到模型的对称性，计算时只取整体的四分之一。有限元网格划分如图 1(b)所示。

为使计算程序简化，假设圆柱体半径 AB 和母线长 AD 相等并为 1，粒子半径 R_0 与其体积百分含量 V_f 之间的关系可以表示为

本文于 1994 年 3 月 7 日收到修改稿，1993 年 10 月 25 日收到初稿
国家自然科学基金资助项目(5933060—0/2)；中科院 LNM 开放实验室资助项目

$$R_0 = (\frac{3}{2}V_f)^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

在计算过程中,当模型承受 Y 向拉伸载荷时,考虑到球形粒子间的相互作用,同时保证各胞元之间不发生相互侵入现象,模型中 BC 边应保持直边。因此,计算时在图 1(b)所示的计算模型上采用了位移加载方式。即给定 AB 边一个 Y 向恒定位移 y_0,然后试探给出 BC 边上一个恒定 X 向位移 x_0。在单向拉伸条件下,BC 边上的计算应力 σ_x 应为零。作为近似,可取沿 BC 边 σ_x 的平均值为零,即

$$\bar{\sigma}_x\int_{BC}\sigma_x dy = 0 \tag{2}$$

如果按事先 BC 边上给出的位移 x_0 边界条件计算出在 BC 边上 $\bar{\sigma}_x$ 不等于零,则应重新给定 BC 边上的位移值 x_0,直到满足 $\bar{\sigma}_x=0$ 为止。具体计算时该过程是由一个迭代程序来完成。至于 AD 和 DC 边的边界条件,由对称性它们相应的法向位移应为零。在内界面 EF 的两侧,分别使用粒子和基体的材料性质,并假设 EF 面上所有位移条件连续。此外,在整个计算过程中假设粒子和基体均处于线弹性状态。

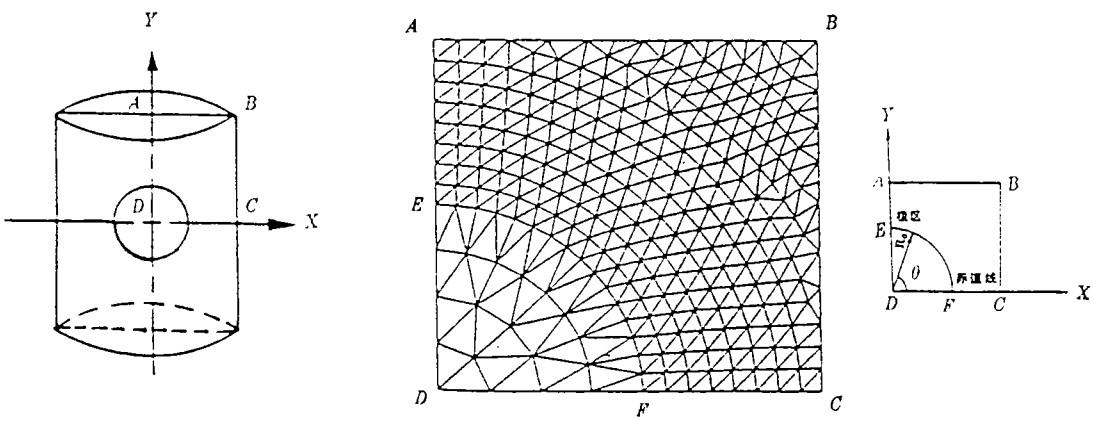


图 1　(a) 轴对称有限元计算模型图　　(b) 轴对称有限元网格划分

3　计算结果分析

为研究用不同性质粒子填充后基体内的应力场,在计算过程中设定了不同的粒子与基体杨氏模量比。粒子模量 E_p 与基体模量 E_m 比值的变化范围从 35 到 0.05,即反映从刚性粒子到柔性粒子的过渡情况。粒子含量均为 10%。参照各种材料的杨氏模量及泊松比数据,选定计算中所用材料参数。若基体为大品种塑料 HDPE 或 PP($E_m=1.5$GPa, $\nu_m=0.40$),则刚性无机粒子($E_p/E_m\geqslant 10$)的泊松比选用 $\nu_p=0.23$,柔性粒子($E_p/E_m<0.2$)的泊松比选 用 $\nu_p=0.48$,介于这两者之间的各种有机粒子,其泊松比均选择为 $\nu_p=0.40$。实验观察发现,单向拉伸时损伤和破坏大都首先发生在粒子与基体相接的界面靠近基体一侧,所以在本文中主要考虑基体内最靠近粒子的一层单元内的各种应力分量,并认为在不考虑界面层厚度的情况下,该层单元内的应力就是界面处的应力。在计算中,取计算应力与外载应力的比值作为计算结果,所以它实际反映的是一种应力集中系数。卢锡年等在文献[3]中指出,玻璃微珠填充高密度聚乙烯材料在承受拉伸载荷时,首先在粒子极区发生界面脱粘,如照片 1 所示。通常认为脱粘现象由界面处的法向拉伸应力 σ_n 引起。由计算结果可知,当基体中含刚性粒子时(例如 $E_p/E_m=35$),在 $\theta=$ 90°即粒子极区附近界面法向应力 σ_n/σ_0 达到最大,如图 2 所示。当粒子的刚度逐渐减小时,粒

子极区的 σ_n/σ_0 也逐渐减小。如果粒子的刚度减到低于基体材料，则在 $\theta=90°$ 附近处 σ_n/σ_0 会由原来的拉应力变为压应力，而原来对刚性粒子来说是压应力的区域（$\theta=0°$ 附近）则变为拉应力区域。所以对用刚、柔粒子填充的复合材料来说，在承受同样外载时其内部应力场有很大差异，从而导致损伤破坏的部位及形式根本不同。

由图 3 可以看到，随着粒子与基体刚度比的不同，界面处第一主应力 σ_1/σ_0 呈现不同的分布。对于柔性粒子来说，拉伸主应力在 $\theta=0°$ 即在粒子赤道线上达到最大，粒子相对基体越软，此处 σ_1/σ_0 值越大。Bear 等在文献[5]中提出，当主拉伸应力 σ_1 达到某一临界值时才能引发银纹，而与所施加的静水压力无关。因此，在单向拉伸条件下，通常首先在粒子赤道附近引发银纹，这与 Argon 等对高抗冲聚苯乙烯（柔性橡胶粒子与聚苯乙烯的混合体）观察到的实验结果相吻合，如下页照片 2 所示（摘自文献[6]）。

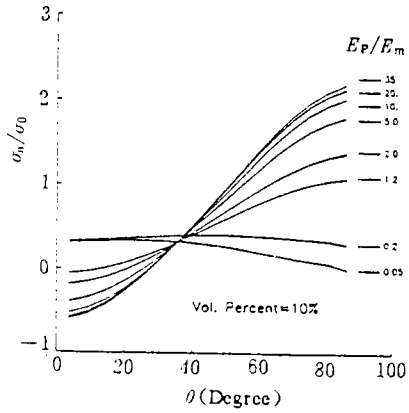


图 2 法向应力沿界面分布

对于高分子聚合物的屈服问题，Bowden 在文献[7]中给出了详尽的介绍。一般认为当 von Mises 应力 σ_e 达到屈服极限 σ_{es} 产生屈服。与一般金属材料不同的是聚合物的屈服极限 σ_{es} 不是一个常数，它与当时材料所受的静水压力有关，见文献[8,9]。由图 4 可以看出：对刚性粒子来说，σ_e/σ_0 在 $\theta=50°$ 左右时达到最大值，对柔性粒子来说，则在 $\theta=0°$ 附近达到最大值。

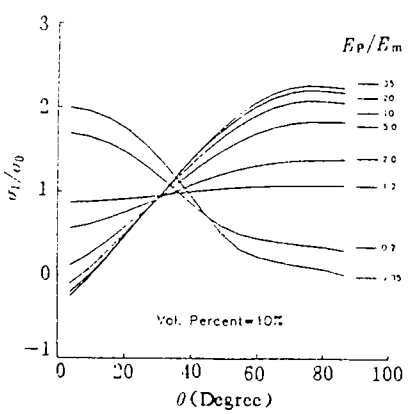


图 3 第一主应力沿界面分布

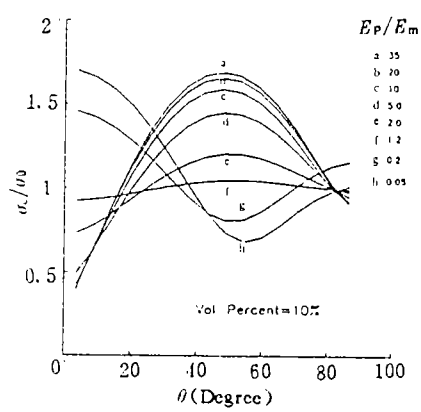


图 4 等效应力沿界面分布

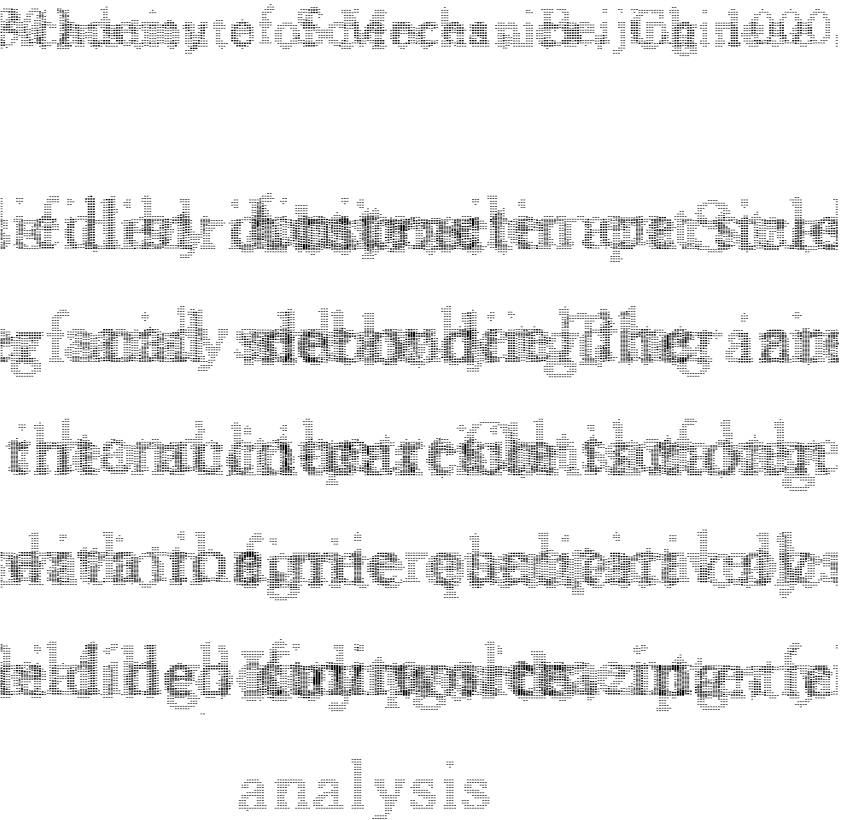
4 结 论

通过对以上刚、柔性粒子复合材料内部应力的有限元分析，可以得到以下结论：

（1）含刚性粒子的复合材料，受拉伸载荷时界面处的法向应力 σ_n 在粒子极区附近达到最大值，而等效应力 σ_e 则在 $\theta=50°$ 左右取最大值。界面处首先脱粘还是屈服则取决哪种应力先达到极限值。

（2）含柔性粒子的复合材料，在受拉伸载荷时，第一拉伸主应力 σ_1/σ_0 在粒子的赤道线附

Lu Xinian Zhang Rui



analysis