

文章编号:1671-6833(2007)04-0039-04

夹杂对粉末冶金 CT 试样断裂性能影响的计算研究

崔伟华, 温志勋, 侯乃先

(西北工业大学 工程力学系, 西安 710072)

摘 要: 采用 GURSON 本构方程对含夹杂粉末冶金材料紧凑拉伸试样进行了有限元分析, 模拟了裂尖与夹杂的相互作用对基体的损伤及裂纹扩展性能的影响。圆形夹杂对基体材料的损伤及裂纹扩展性能是最保守的形状, 对于椭圆形夹杂, 硬夹杂在椭圆横向受力较为安全, 而软夹杂则相反, 在椭圆纵向受力对基体的损伤更小。

关键词: 夹杂; GURSON 本构方程; 损伤; 裂纹扩展

中图分类号: V 256

文献标识码: A

0 引言

粉末高温合金由于其组织均匀、热加工性能优良, 被广泛用于制造高推比、高效率发动机的压气机盘、涡轮盘和其他航空、航天高温部件^[1-4]。由于这种材料在制备过程中易带人非金属夹杂, 严重影响了合金的材料性能^[5-10]。这类非金属夹杂目前还不能在现有的粉末制造和处理过程中完全消除, 所以在目前的条件下非金属夹杂在粉末高温合金中允许以一定的尺寸和聚集程度存在。迄今为止, 有关含夹杂粉末冶金材料力学性能的研究大都属于实验研究。

相对于夹杂与基体的界面黏结强度, 作者将夹杂分为硬夹杂与软夹杂两种, 将断裂强度高于界面黏结强度的称为硬夹杂, 反之称为软夹杂。在受力过程中软硬夹杂有不同的破坏方式, 则对基体的性能产生不同的影响。作者采用 Gurson 模型^[11], 考虑了夹杂物与基体的不同结合方式, 从理论上揭示夹杂的形状大小及夹杂与基体的结合方式对 CT 试样断裂性能影响的机理。为研究不同类型的夹杂对粉末冶金材料的损伤及裂纹扩展破坏的影响, 采用数值模拟的方法分析拉伸试件在包含三种不同纵横比的夹杂时的材料断裂性能。

1 GURSON 塑性本构方程

为克服经典塑性理论的缺陷, Gurson 首先提

出了空穴的塑性势^[11]:

$$\phi = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_m^2} + 2f \cosh \left\{ \frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_m} \right\} - (1 + f^2) \quad (1)$$

式中: σ_e 是宏观的等效应力, σ_m 是微观等效应力, f 为空穴体积率。

考虑到每一空穴周围的非均匀应力场和相邻空穴之间的相互作用及空穴长大聚合引起的承载能力损失, Tvergaard 和 Needleman 给出修正的塑性势

$$\phi = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_m^2} + 2q_1 f^* \cosh \left\{ \frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_m} \right\} - [(1 + q_1 f^*)^2] = 0 \quad (2)$$

式中: q_1 为考虑到空穴周围非均匀应力场和相邻空穴之间相互作用的修正系数; 而 f^* 为考虑空穴长大聚合引起的承载能力的损失。且

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_v - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (3)$$

f_c 是 f 的一个临界值, 当 f 达到 f_c 时, 空穴开始聚合, 随后材料的应力承载能力便迅速衰减。 f_f 是应力承载能力完全丧失时的空穴率。由 (3) 式可知, 相应的 $f^* = f_v^*$; 并由 (2) 式可知 $f_v^* = 1/q_1$ 。

Gurson 提出的含孔洞材料的屈服条件为:

$$\phi = (q/\sigma_y)^2 + 2q_1 f^* \cosh \{ -3q_2 p / 2\sigma_y \} - [(1 + q_1 f^*)^2] = 0 \quad (4)$$

式中: σ_y 为相应于等效塑性应变的全密度基体材

收稿日期: 2006-07-16; 修订日期: 2007-11-01

基金来源: 国家自然科学基金资助项目 (10472094, 50375124); 国防科技工业项目技术基础科研项目 (Z142006B001); 博士点基金 (N6CJ0001)

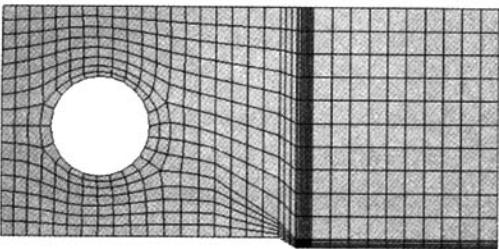
作者简介: 崔伟华 (1976-), 女, 山东潍坊人, 西北工业大学博士研究生, 主要从事粉末冶金的力学性能研究。E-mail: cwhnpu@yahoo.com.cn

料的屈服应力, q 为 MISE 应力, p 为静水压力, q_1 、 q_2 、 q_3 为 Tvergaard 引入的与 Gurson 模型相吻合的计算常数, 分别是孔洞体积分数的压力系数。

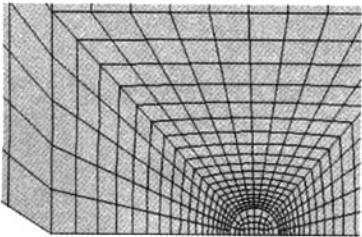
2 数值模拟

2.1 有限元计算模型

紧凑拉伸试样的有限元网格如图(1)所示, 由于结构的对称性, 取 1/2 模型进行计算, 距离试样切口 0.2 mm 处存在夹杂, 夹杂与基体的结合方式定义为简单接触, 考虑到硬夹杂和软夹杂在变形过程中分别与基体有不同的作用机制, 分别计算了夹杂与基体的 4 种不同的接触方式: ①完好接触, 在整个变形过程中, 夹杂始终与基体黏接在一起; ②部分接触, 夹杂在变形过程中与基体逐渐脱离; ③夹杂中心处含有裂纹; ④夹杂与基体完



(a) 1/2 模型的有限元网格图



(b) 切口与夹杂细化网格图

图 1 计算模型的有限元网格图

Fig. 1 Finite element mesh for the CT specimen

全脱离, 可将夹杂去除, 将其作为孔洞处理。

分别计算了 3 种尺寸的夹杂, 相同体积的夹杂有 3 个纵横比(受力方向为纵向), 由于纵横比的不同, 夹杂可分为圆形与椭圆形两种。各个形状夹杂的编号如表 1 所示。

表 1 夹杂类型与尺寸

Tab. 1 Inclusion types and dimension

纵横比	圆夹杂直径/mm			夹杂分类
	0.02	0.05	0.1	
1	i1	i2	i3	I 型
5	i4	i6	i8	II 型
0.2	i5	i7	i9	III 型

计算了在应力强度因子 $K = 130 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时各不同尺寸夹杂的应力应变响应及损伤分布。

2.2 数值模拟的材料参数

计算时基体应用 ABAQUS 软件中弹塑性材料, 弹性模量 $E = 2.52 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, $\sigma_s = 1168 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 1530 \text{ MPa}$, $\varepsilon_b = 0.304$; 并在材料中考虑应用 Gurson 模型(2)、(4)式, 模型的参数如下^[12]: $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1$, $q_3 = 2.25$, 修正相对密度 $f_0 = 0.05$; 空穴形核参数: $\varepsilon_N = 0.3$, $S = 0.1$, $f_N = 0.04$, 夹杂成分 Al_2O_3 按弹性材料处理^[2], 弹性模量 $E = 3.9 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25$ 。

3 计算结果分析

3.1 等效塑性应变

根据文献[13]在一定的距离内等效塑性应变(PEEQ)达到某一个临界值的时候, 则裂纹生成。当夹杂与基体完好接触即接触方式为①时, I型与Ⅲ型夹杂的最大 PEEQ 均出现在切口处, 且随着夹杂尺寸的增大而增大, 而Ⅱ型夹杂的最大 PEEQ 出现在夹杂与基体的接触界面, 如图 2 所示。

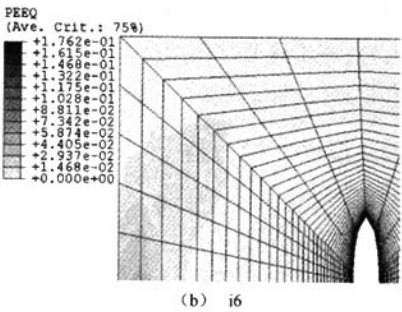
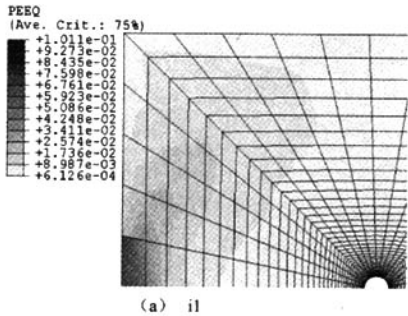


图 2 夹杂与基体完好结合时基体切口与夹杂间的等效塑性应变分布图

Fig. 2 Distribution of PEEQ between notch and inclusion for inclusion - matrix bonding

对于其它各种接触方式,最大等效塑性应变都出现在界面结合处.在加载过程中,软夹杂由于强度过低会产生破裂,硬夹杂则容易从界面结合处与基体分离,只有在加载初期,夹杂与基体才处于①种接触方式下,对各种类型的夹杂,基体都将在夹杂与基体的界面结合处最先出现裂纹源.

3.2 损伤分布

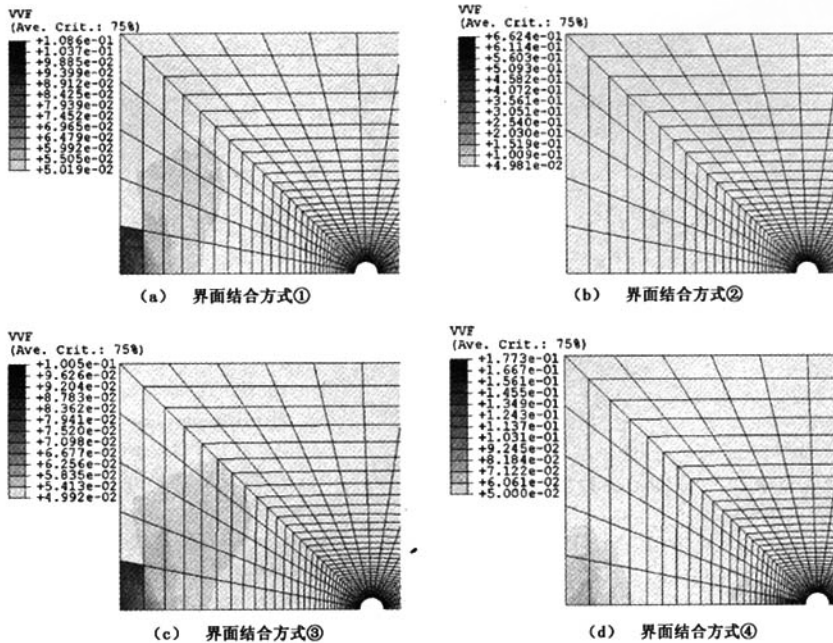


图3 不同的界面结合情况下 i1 夹杂的孔洞体积分数

Fig.3 Void's volume fraction distribution of inclusion i1 for different interface contact types

在加载的初期,夹杂与基体在界面强度的作用下完好结合即在①种接触方式,对于 I 型与 III 型夹杂,夹杂最大的 Mises 应力出现在夹杂中心部位,易产生夹杂破裂而接近于③种接触方式,III 型夹杂损伤由切口部位向结合界面处发展,孔洞体积分数也急剧增大,而 I 型夹杂损伤仍然集中在切口处;II 型夹杂最大的 Mises 应力出现在夹杂与基体结合部位而造成夹杂与基体脱离而接近于②种界面结合方式,在荷载的作用下夹杂与基体继续脱离形成较大的孔洞.在各种不同的接触方式下,III 型夹杂与基体的相互作用而形成基体孔洞体积分数的增长是最大的.

3.3 夹杂大小及形状对裂纹扩展性能的影响

在拉伸情况下 CT 试样用 J 积分表征 I 型裂纹扩展性能.当夹杂与基体完好结合的时候,切口处的围线积分为一定值,与夹杂的大小及形状无关,只有当夹杂与基体完全脱离形成孔洞时,夹杂的大小及纵横比对 J 积分有较大的影响,如图 4

所示,对于同一个夹杂来说,在有孔洞的时候 J 积分最大,如图 4(d).

4 结论

基于 Gurson 塑性理论来研究含夹杂的粉末冶金材料的细观力学行为,能够很好地处理由夹杂引起孔洞形成的材料损伤与裂纹扩展破坏之间的关系.作者将这种理论引入有限元计算中,用单元的成核损伤来模拟粉末冶金材料 CT 试样在拉伸状态下裂纹萌生和扩展的机制.模拟结果表明夹杂的大小和纵横比与基体的界面接触方式对材料的损伤及裂纹扩展性能有着显著影响,从而也对粉末冶金材料的使用寿命有明显的影

响.在加载过程中软夹杂易产生破裂,硬夹杂易从界面结合处与基体脱离.对于软夹杂采用第 II 种类型即长椭圆形夹杂,而对于硬夹杂采用第 III 种类型即扁椭圆形更加安全.

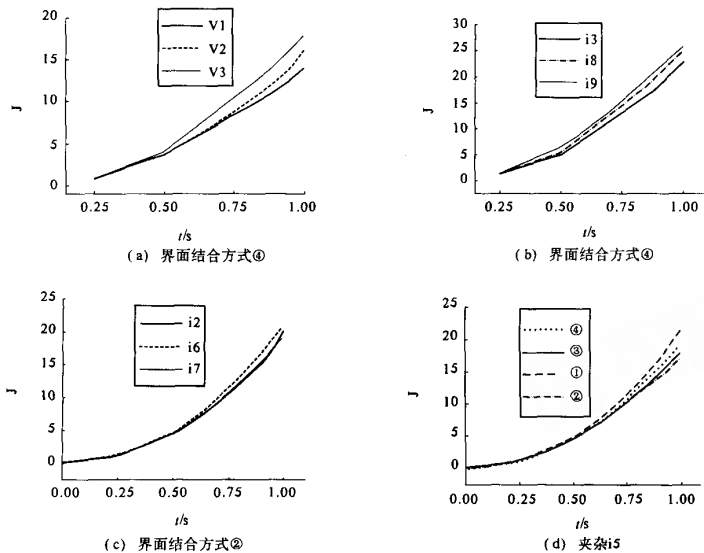


图4 夹杂大小形状及不同的界面接触方式对J积分的影响

Fig.4 Effect of inclusion size aspect ratio and different interface contact type on J integral:

参考文献:

- [1] 张麦仓,董建新,张丽娜,等. PM Rene 95 合金中夹杂物的微观力学行为[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 149-152.
- [2] 何承群,余泉茂,胡本英. FGH 合金 LCF 断裂寿命与夹杂特征关系的研究[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 247-252.
- [3] 国为民,吴剑涛. FGH95 镍基高温粉末合金中夹杂及其对合金疲劳性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2000, 10(3): 23-26.
- [4] 冯莉萍,黄卫东,林鑫,等. FGH95 合金激光成形定向凝固显微组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 181-187.
- [5] 姚萍屏,熊翔,袁国洲,等. 铜对粉末冶金航空刹车材料物理力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(51): 81-83.
- [6] 李元元,张大童,罗俊明,等. 高铝锌基合金粉末冶金材料及其摩擦学特性初探[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 117-121.
- [7] RISTINMAA M. Void growth in cyclic loaded porous solid[J]. Mechanics of Materials, 1997, 26(2): 227-245.
- [8] SHAMBLE S E, CHANG D R. Effect of inclusions on LCF life of HIP plus heat treatment metal Rene 95[J]. Metal Trans B, 1985, 168(5): 775-786.
- [9] YOKOMAKU T. Effects of defects and microstructure on the elevated temperature fatigue properties of P/M superalloy Mer176[J]. J Soc Mat Sci, 1990, 39(2): 188-198.
- [10] BUSSAC A D. Prediction of competition between surface and internal fatigue initiation in PM alloys[J]. Fat Fract Engng Mater Struct, 1994, 17(9): 1319-1328.
- [11] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the cup2cone fracture in a round tensile bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(2): 157-169.
- [12] 王万鹏,岳珠峰,杨治国. 含夹杂粉末冶金材料拉伸试件的损伤分析[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 949-955.
- [13] ZHAO L G, O'DOWD N P, BUSSO E P. A coupled kinetic-constitutive approach to the study of high temperature crack initiation in single crystal nickel-base superalloys[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54: 288-309.

Effects of Inclusion on Fracture Behavior of PM Materials

CUI Wei-hua, WEN Zhi-xun, HOU Nai-xian

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The isolated inclusion behavior in the compact tension (CT) specimens has been analyzed by GURSON constitutive model. Emphasis was placed on the effect of the interaction between crack tip and inclusion on matrix damage and crack propagation. Generally, the elliptical inclusion does much more damage than the round inclusion. For elliptical inclusion, hard inclusion is more secure under transverse load, but otherwise for soft inclusion.

Key words: inclusion; GURSON constitutive model; damage; crack propagation