

晶须增强锌铝合金复合材料拉伸断口分形^①

刘越^{†, ††} 李会莉^{††} 翟玉春^{††} 毕敬[†]

† (中国科学院金属研究所, 沈阳 110015) †† (东北大学材料测试中心, 沈阳 110006)

摘 要 分析研究了挤压复合温度对 $K_2O \cdot 6TiO_2_w$ / ZA-27 合金复合材料的拉伸断口分形维数的影响规律及与拉伸断裂功之间的关系。研究发现该复合材料的拉伸断口具有统计自相似性, 可以用分形维数来描述, 自相似性的测量步长范围在 0.185~ 3.750 μm 之间为最佳。复合材料拉伸断口分形维数同拉伸断裂功之间有良好的对应关系, 分形维数随拉伸断裂功的增加呈线性增大。

关键词 复合材料 拉伸断口 分形维数

中图法分类号 TB323

分形维数(简称分形)^[1]由 Mandelbrot 于 1977 年最先提出。自然界中有两种最为基本的对称性, 第一是几何对称性(晶体的空间对称性就是其中一种), 第二是标度对称性^[2]。标度对称性即为某一空间尺度内, 几何形状具有自相似性, 研究几何形状标度对称性的最有力工具就是分形(Fractal Dimension), 分形为描述“无规”几何形状提供了有效的方法^[3, 4]。本文分析研究挤压复合温度对 $K_2O \cdot 6TiO_2_w$ / ZA-27 合金复合材料的拉伸断口分形的影响, 以及与拉伸断裂功之间的相互关系。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料制备

通过 Extrusion Casting 技术制备了 $K_2O \cdot 6TiO_2_w$ / ZA-27 合金复合材料^[5, 6], 获得的复合材料晶须体积分数为 25%。拉伸试样从铸态复合材料铸锭上截取。抗拉强度测试在 Instron 1343 型材料试验机上进行, 拉伸速率为 2 mm/min。

1.2 复合材料断口分形测量方法比较

目前测量材料断口表面分形的方法^[7, 8]较多, 如周长-面积法(小岛法), 周长-最大直径法, 垂直剖面法, 二次电子扫描线法, 二次电子灰度法, 显微干涉-图像处理法, 扫描隧道显微镜法等。其中周长-面积法, 垂直剖面法和二次电子扫描线法应用的较为普遍。不同的方法从不同的侧面来描述断口表面的粗糙程度, 获得的断口表面分形维数值也不完全相同。各种测量方法各有所长, 一般应根据试样的实际情况来选择适当的测量方法。

扫描电镜的入射电子束轰击断口表面时, 激发二次电子。如被激发的二次电子全部被接收, 并忽略背散射电子的影响, 那么线扫描图象的相对高度变化反映扫描位置处试样表面二次电子信号强度的变化。将断口形貌与二次电子扫描线、图像叠加在一起, 可以发现扫描线的每次突变在相应的断口上与一个边棱(晶界棱或韧窝边棱)对应。因此, 二次电子扫描线的高低起伏反映线扫描位置断口的凹凸情况。

根据分形曲线, $L = L_0^D \xi^{1-D}$ 可得

$$\lg L = D \lg L_0 + (1 - D) \lg \xi = \text{const} + (1 - D) \lg \xi \quad (1)$$

在图像分析仪上, 用不同的码尺 ξ 测量二

① 辽宁省自然科学基金资助项目 95- 167 收稿日期: 1998- 01- 04; 修回日期: 1998- 07- 02

刘越, 男, 38 岁, 高级工程师, 博士后

次电子扫描线的长度 L ，做 $\lg L - \lg \xi$ 双对数线，由斜率求得其分形维数值。这种方法已引起人们越来越多的关注^[9]。根据复合材料断口实际情况，本文采用二次电子扫描线法测量 $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 合金复合材料断口表面的分形维数。

1.3 复合材料拉伸断口分形测量步骤

不同挤压复合温度的复合材料拉伸断口在 SEM-505 型扫描电镜上观察，在每个断口上随机选择 3 个视场，测量断口表面的二次电子扫描线，断口断面上不同区域和方向的二次电子扫描线分别被输入德国 Kontron 公司制造的 2PS500 型图像分析仪中，选取不同码尺测量曲线的长度 L 。测量码尺 ξ 分别选择为：0.187, 0.563, 0.750, 1.125, 1.500, 2.250, 3.000, 3.750, 4.500, 6.000, 9.000, 12.000, 13.500, 18.750, 24.000 μm 。再由 $\lg L$ 和 $\lg \xi$ 做双对数曲线，根据式(1)计算出 $\lg L - \lg \xi$ 曲线的斜率(K)，得出拉伸断口的分形维数 $D = 1 + K$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 复合材料拉伸断口分形

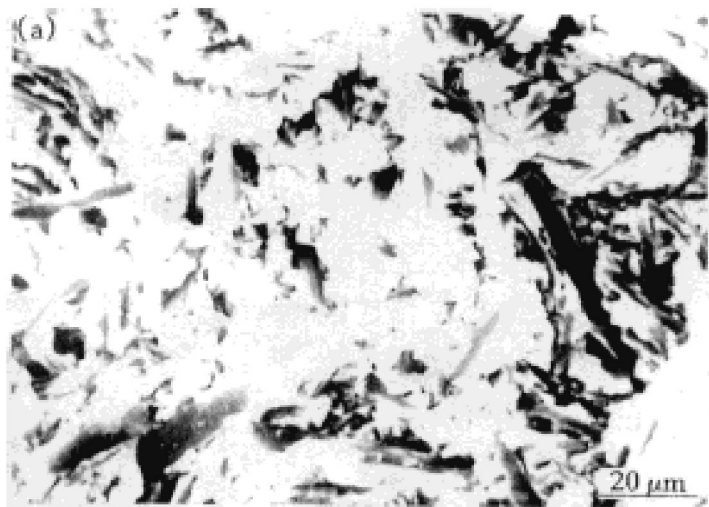


图 1 为 $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 合金复合材料不同挤压复合温度的拉伸断口 SEM 像和与之相对应的二次电子扫描线 $\lg L - \lg \xi$ 双对数线。结果表明， $\lg L - \lg \xi$ 双对数曲线在两个区域段明显呈线性关系，测量码尺在 0.185~ 3.750 μm 范围时所得分形维数为 D_1 ，测量码尺在 3.750~ 24.000 μm 范围时所得分形维数为 D_2 。

因为该复合材料拉伸断口微观结构特征与它的拉伸断裂功有关，当测量码尺 $\xi \geq 3.750$ μm 时，分形曲线上小于 3.750 μm 的细节难于包括在 L 的测量之中。此时分形只反映较大尺度的微观结构对断口的影响。当测量码尺 $\xi \leq 3.750$ μm ，分形反映了较小尺度微观结构对断口的影响。一般测量码尺在 0.185~ 3.750 μm 时，线性关系良好，明显呈直线，即在此测量步长范围之内，复合材料拉伸断口具有明显的自相似性，所以当测量码尺较小时，用分形来定量标定 $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 合金复合材料拉伸断口特征是可行的。而测量码尺在 3.750 μm 以上时，由于测量点的线性关系不太理想，分形值较分散。测量码尺在 0.185~ 3.750 μm 时的分形维数 D_1 是微裂纹在基体中萌生过程绕过晶须聚集扩展过程的反应；测量步长在

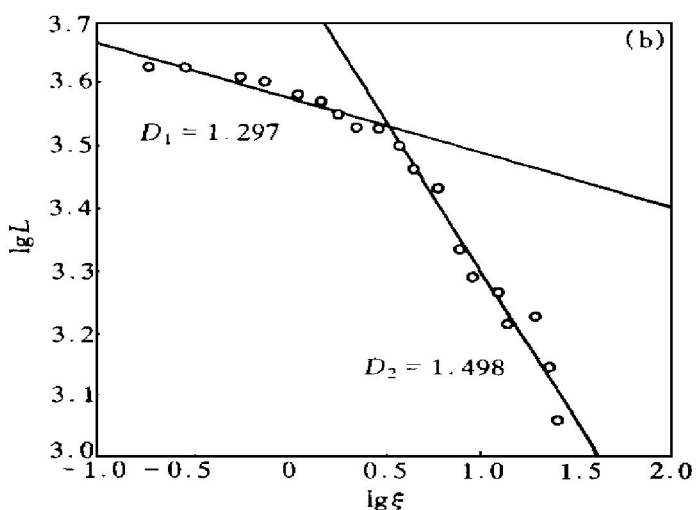


图 1 复合材料拉伸断口形貌和对应的二次电子扫描线 $\lg L - \lg \xi$ 双对数曲线(挤压复合温度 680 $^{\circ}C$)

Fig. 1 Tensile fractograph of composites and its correlated scanning curves of $\lg L - \lg \xi$ being extrusion casting at 680 $^{\circ}C$
(a) —Tensile fractograph; (b) —Curves of $\lg L - \lg \xi$

3. $750\mu\text{m}$ 以上的分形维数 D_2 不能反映断口的微小细节。晶须增强金属基复合材料的断裂功主要消耗在微孔绕过晶须聚集的过程中, 所以断裂功与 D_1 有相应的对应关系。

2.2 D_1 同拉伸断裂功之间的关系

复合材料拉伸断口分形同拉伸断裂功之间的关系见图2, 随着复合材料拉伸断裂功的增加, 其断口分形维数近似呈线性增加:

$$D = 0.0021w + 0.78 \quad (2)$$

式中 w —复合材料拉伸断裂功;

D —复合材料拉伸断口分形维数。

比较图2可以发现, 复合材料拉伸断口分形维数的变化趋势同拉伸断裂功是一致的, 这说明采用二次电子扫描线法测量复合材料的拉伸断口分形是合理的, 而且分形比较客观地反映了复合材料的拉伸断裂过程。

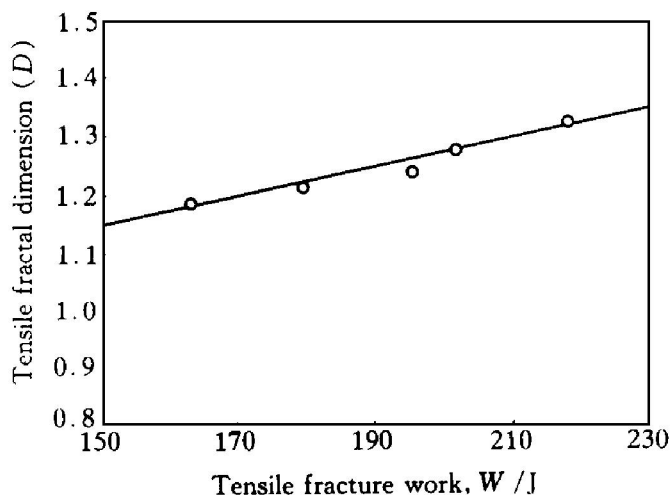


图2 拉伸断口分形与拉伸断裂功的关系

Fig. 2 Relationship between tensile fractal dimension and tensile fracture work

2.3 复合材料拉伸断口分形与挤压复合温度的关系

根据分形几何学, 分形值的提高, 意味着材料断裂时, 裂纹扩展的路径较为曲折, 而裂纹扩展路径愈曲折, 材料断裂时所消耗的能量也就愈大。

由图3所示的复合材料拉伸断口分形与挤压复合温度的关系可以发现, 挤压复合温度较低时, 界面反应和扩散不充分, 晶须/基体界

面结合不好, 复合材料拉伸时, 裂纹扩展的阻力较小, 扩展路径平直, 分形值较低; 当挤压复合温度较高时, 界面反应剧烈, 界面反应物覆盖了晶须的表面, 由于粗大的界面反应物易于开裂, 裂纹扩展的路径也较为平直, 分形值也较低。

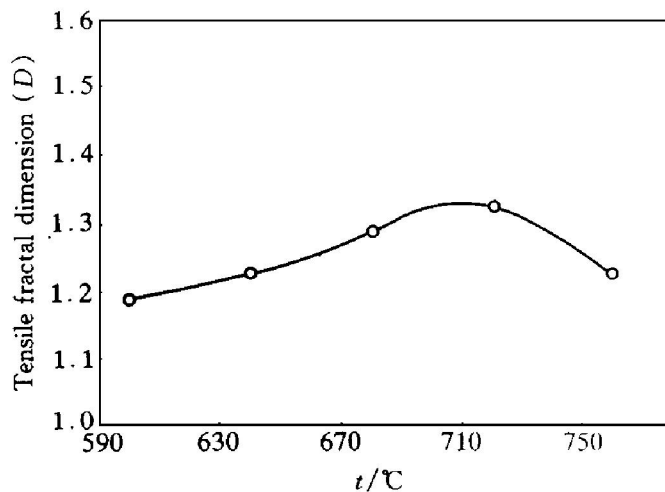


图3 拉伸断口分形与挤压复合温度的关系

Fig. 3 Relationship between tensile fractal dimension and temperature of extrusion casting

由图3中可以看出, 当挤压复合温度从 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 拉伸断口分形值逐渐增加, 并在 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值, 当复合温度大于 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后, 复合材料拉伸断口分形随挤压复合温度的升高而下降。挤压复合温度为 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时的复合材料之所以分形值最高, 主要是因为界面反应程度适宜, 晶须/基体界面结合比较好, 裂纹扩展阻力较大, 故拉伸断裂功也就最大。

综上所述, 对于 $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{TiO}_2 / \text{ZA-27}$ 合金复合材料, 挤压复合温度选取 $680 \sim 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时获得的复合材料的界面结合良好, 拉伸断裂功最高, 断口分形维数最大。

2.4 复合材料拉伸断裂机制

上述分析表明, $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{TiO}_2 / \text{ZA-27}$ 合金复合材料在拉伸断裂过程中, 裂纹在扩展中遇到晶须时, 若晶须长轴同主裂纹的扩展方向夹角较小, 则晶须上所承受的载荷较小, 裂纹可

以在基体内扩展;若晶须长轴与主裂纹的扩展方向夹角较大,则晶须上所承受的载荷较大,裂纹以通过晶须的断裂而扩展。由于晶须的强度远大于基体合金的强度,所以裂纹绕过晶须扩展将是界面结合适中时裂纹扩展的主要机制。

3 结论

(1) $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 复合材料的拉伸断口具有统计自相似性,可以用分形几何来描述。自相似性的测量步长范围在 0.185~ 3.750 μm 之间为最佳。

(2) $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 复合材料拉伸断口分形同拉伸断裂功之间有良好的对应关系,分形随拉伸断裂功的增加呈线性增加。

(3) 不同的界面反应程度将导致裂纹扩展机制的不同,从而影响到复合材料的断裂韧性和断口分形。对 $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 合金复合材料而言,存在一个最佳的挤压复合温度(即 680~ 720 $^{\circ}C$)。

REFERENCES

- 1 Mandelbrot B B, Passoja D E and Paulty A J. *Nature*, 1984, 308(19): 721.
- 2 Kaye B H. *Fractal Ramble* (分形漫步). Shenyang: Northeastern University Press, 1995.
- 3 Mecholsky J J and Mackin T I. *J Mater Sci Lett*, 1988, 7: 1145.
- 4 Richards L Z and Dempsey B D. *Scripta Metall*, 1988, 72: 687.
- 5 Liu Yue(刘越) and Zhai Yuchun(翟玉春). *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金), 1998, 5: 13.
- 6 Liu Yue(刘越), Chen Suiyuan(陈岁元), Chen Jiaquan(陈家权) *et al.* *Journal of Northeastern University*(东北大学学报), 1998, 19(3): 236.
- 7 Pande C S and Richards L E. *Acta Metall*, 1987, 35: 1633.
- 8 Mandelbrot B B and Banerjik. *Mater Sci Eng*, 1986, 80: 1.
- 9 Long Qiwei(龙期威) and Mu Zhaiqin(穆在勤). *Science in China (Series A)* (中国科学, A 辑), 1994, 24(1): 94.

TENSILE FRACTAL DIMENSION OF POTASSIUM TITANATE WHISKER REINFORCED ZA-27 ALLOY COMPOSITES

Liu Yue^{†, ††}, Li Huili[†], Zai Yuchun^{††} and Bi Jing[†]

[†] *Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, P. R. China*

^{††} *Center of Materials Testing, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China*

ABSTRACT The tensile properties were measured by using Instron tensile machine. The fracture surface of $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 composites was studied by using fractal geometry. The results on fractal dimension of tensile surface showed that the fracture surface of $K_2O \cdot 6TiO_2$ / ZA-27 composites has statistics self-similar property and can be investigated and described by fractal dimension. There exist good corresponding relations between tensile fracture work of composites and fractal dimension of fracture surface. The micro-mechanism of tensile fracture of composites was also discussed.

Key words composites tensile fracture fractal dimension

(编辑 黄劲松)