

文章编号:1673-9981(2011)01-0031-04

# TB8 合金再结晶组织的分形特征

张青<sup>1</sup>, 李萍<sup>2</sup>, 薛克敏<sup>2</sup>

(1. 安徽职业技术学院机械系, 安徽 合肥 230011; 2. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**以 TB8 合金的热塑性变形显微组织为研究对象, 在计算机图像处理分析技术的基础上, 计算不同条件下再结晶组织的分形维数, 并探讨了分形维数与变形条件之间的关系. 结果表明: TB8 合金再结晶组织具有典型的分形特征, 随着变形温度升高和应变速率的降低, 分形维数减小.

**关键词:** TB8 合金; 热变形; 再结晶组织; 分形

**中图分类号:** TG146

**文献标识码:** A

在金属热变形过程中, 材料微观组织的变化在很大程度上决定了产品的机械性能, 晶粒形貌是表征合金显微组织及性能的重要指标之一. 因此, 热变形材料微观组织的研究成为各国学者的研究重点<sup>[1-3]</sup>. 在经典体视学中, 通常采用定量金相法测量晶粒的平均尺寸、数量及体积分数等参量, 虽然这些几何参量可有效地表征材料的显微组织, 但几乎所有合金材料的显微组织都是非规则的, 在对它们进行体视学分析或定量研究时, 往往是将晶粒的形状假设为六面体(二维)或十四面体(三维), 而分形几何的创立, 则为人们认识这些自然界中广泛存在的不规则几何形貌及复杂的物理现象, 提供了强有力的工具.

分形结构是复杂系统演化后的产物, 随机性、耗散性和非线性是产生分形结构的物理机制, 在显微组织演变过程中影响因素众多而复杂, 本质上它们是非线性的, 而非线性的物理本质是耗散性, 耗散性又是随机性的后果, 所以显微组织的演变具有分形特征. 从显微组织演变的动力学机制来看, 自相似图形的生成机制是相同的, 对于变形组织的再结晶过程及每一步的形核与长大过程, 都是彼此相似的, 变形组织也是自相似的, 可采用分形对它们进行定量描述. 分形为金属显微组织的定量描述及热加工工艺的合理制定, 提出了一种更为科学的方法.

## 1 试验部分

### 1.1 原料及方法

以 TB8 合金为研究对象, 其化学成分为 Ti-15.3Mo-2.9Nb-2.9Al-0.08Fe-0.18Si-0.10O-0.03C-0.011N-0.01H. 在变形量  $\epsilon$  为 40%, 变形温度为 750~1100 °C 及变形速率  $\dot{\epsilon}$  分别为 0.01, 0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 条件下, 在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上进行压缩试验. 首先对 TB8 合金进行热压缩, 待其变形后立刻淬火, 然后用金相显微镜观察其显微组织, 用以 Matlab 软件为平台自行开发的图像处理及分形分析程序, 对 TB8 合金热塑性变形的显微组织进行研究, 计算在不同变形条件下再结晶组织的分形维数, 初步揭示组织分形特征与变形工艺参数之间的关系.

### 1.2 图像处理

计算显微组织的分形维数, 关键是对晶界的特征值进行计算. 首先要提取晶粒边界, 即对灰度图像进行二值化. 在二值化处理过程中, 先设定两个不同的阈值  $\theta_1$  和  $\theta_2$  ( $\theta_1 < \theta_2$ ), 当某个点的像素值小于等于  $\theta_1$  或大于等于  $\theta_2$  时, 将其置为 0, 反之则置为 1.

收稿日期: 2010-09-06

作者简介: 张青(1972—), 女, 河南商丘人, 博士, 讲师.

最终把具有多个灰度值的图像转换成仅有0和1两个灰度值的黑白图像。

图1和图2为不同变形条件下TB8合金显微组织的图像处理实例图。

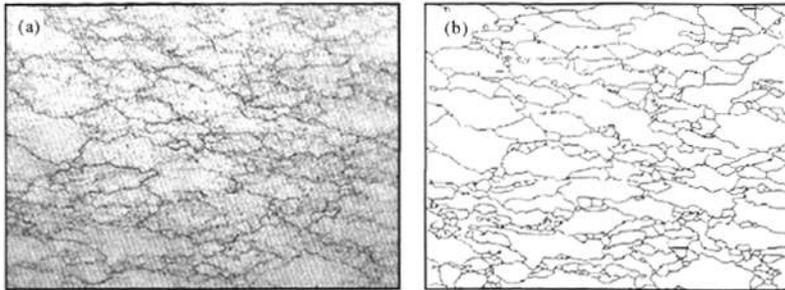


图1 在  $t=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon=40\%$  和  $\dot{\epsilon}=0.01\text{ mm/s}$  条件下 TB8 合金显微组织图像处理实例图

(a)灰度图; (b)二值化黑白图

Fig.1 Image processing examples of TB8 alloy's microstructure when  $t=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon=40\%$  and  $\dot{\epsilon}=0.01\text{ mm/s}$

(a)gray image; (b) binary image

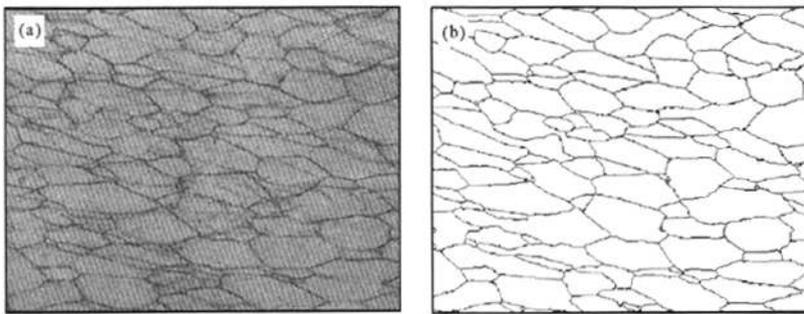


图2 在  $t=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon=40\%$  和  $\dot{\epsilon}=0.1\text{ mm/s}$  变形条件下 TB8 合金显微组织图像处理实例图

(a)灰度图; (b)二值化黑白图

Fig.2 Image processing examples of TB8's microstructure when  $t=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\epsilon=40\%$  and  $\dot{\epsilon}=0.1\text{ mm/s}$

(a) gray image; (b) binary image

## 2 再结晶组织分维的计算

大量研究表明<sup>[4-5]</sup>,金相组织具有分形结构,可以采用分形维数对其进行定量描述.分形维数简称为分维,是定量刻画分形体复杂结构的特征参数,表征了分形体的不规则程度.分形维数越大,其客体就越复杂.所以,可以用分形维数对显微组织形貌进行客观、全面地表征.测量组织分维的方法有多种,其中小岛法适合于测算独立封闭图形的分维,且测算过程相对简单,因而本文采用该法计算 TB8 合金动态再结晶晶粒的分维.

### 2.1 小岛法基本原理

对于形状不规则的几何图形有:

$$P^{1/D} \propto A^{1/2}. \quad (1)$$

式(1)中  $D$  为分维,  $P$  和  $A$  分别为分形图形的周长和面积.对于给定的测量码尺  $\epsilon$ ,式(1)可变换成:

$$P^{1/D} = \alpha A^{1/2}. \quad (2)$$

式(2)中  $\alpha$  为常数.对式(2)两边取对数,得出:

$$\ln P = \beta + (D/2) \ln A. \quad (3)$$

式(3)中  $\beta$  为常数.在固定  $\epsilon$  条件下,测量一系列大小不同的具有自相似性图形的周长和面积,并作  $\ln P - \ln A$  图.所拟合直线的斜率的 2 倍,即为该图形的分维<sup>[6]</sup>.

2.2 分维的测算

在处理好的二值图片中均匀选取 50 个以上边界清晰的再结晶晶粒,提取晶粒边界,用在 Matlab 上自

行编写的程序计算它们的周长  $P$  和面积  $A$ ,以得到的周长及面积的数据在双对数坐标中作图,即可得再结晶组织的分维(图 3)。

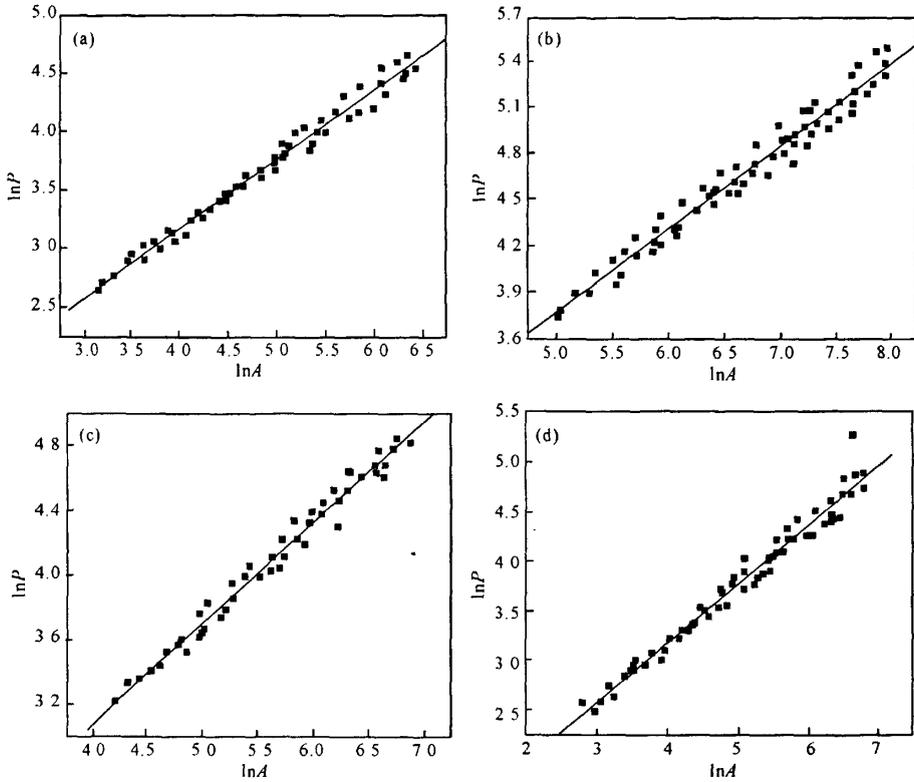


图3 lnP-lnA 拟合直线图  
(a) 900 °C, 0.01 s<sup>-1</sup>; (b) 1000 °C, 0.01 s<sup>-1</sup>; (c) 1000 °C, 0.1 s<sup>-1</sup>; (d) 1100 °C, 0.1 s<sup>-1</sup>

Fig. 3 Fitting lines of lnP vs lnA

从图 3 可以看出,采用小岛法所获得的结果均符合分形理论的幂率关系,绝大部分点分布在线性相关性较好的直线附近,相关系数均在 0.98 以上.这表明 TB8 合金再结晶组织具有典型的分形特征,可用分维这一特征参数来描述其组织形貌。

2.3 变形参数对分维的影响

研究表明<sup>[7-8]</sup>,金属晶粒边界的分维随晶粒尺寸的减小而增大.本文在分维计算的基础上,对 TB8 合金再结晶晶粒的分维、尺寸与变形条件之间的关系进行了初步探讨,以便建立新的微观组织形貌与变形条件之间的关系。

图 4 为不同变形条件下再结晶组织分维  $D$  与

晶粒尺寸  $d$  之间的关系.从图 4 可以看出,随变形温度升高和应变速率的降低,再结晶晶粒尺寸增大,分维减小.这是由于合金高温变形的微观机制是热激活过程,在相对较低的变形温度下,原子扩散能力较弱,随温度的升高,原子活动的动能增加,原子间相互作用的临界剪切应力减弱,各种点缺陷的扩散加剧,扩散的位错易于进行,从而使变形组织内部积聚的位错密度降低,产生动态再结晶所需要的变形储存能减少,造成再结晶晶粒的数量较少、尺寸较大、晶界平直度好、分维减小.当应变速率较高时,形变组织中的位错来不及相消,使位错密度增加,导致形变激活能较大,从而形成了数量较多的细小再结晶晶粒;随着变形速率的降低,变形激活能也降低,使

生成的新晶粒有充分的时间长大,造成晶界曲率减小,分维减小.所以,为获得较好的显微组织,保证变形的顺利进行,需要减小显微组织的分维,即在变形量一定时,适当提高变形温度和降低变形速率.

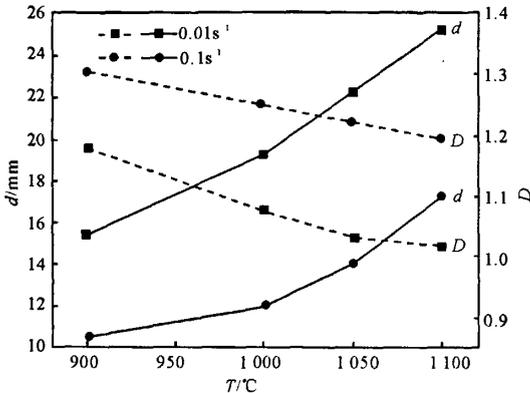


图4 不同变形条件下再结晶晶粒尺寸及分形维数

Fig.4 Grain sizes and Fractal dimensions of recrystallized structure under different deformation condition

### 3 结论

(1)基于 Matlab 软件平台,开发了计算机图像处理与分析程序,在不同热塑性变形条件下对 TB8 合金的金相显微组织图像进行了处理,实现了对晶粒的面积、晶界的长度等组织特征值的测算.

(2)采用小岛法计算出热变形条件下,合金再结晶组织的分形维数.结果表明,TB8 合金再结晶组织的晶界形貌具有典型的分形特征,可采用分形维数对其进行定量描述.

(3)变形工艺参数直接影响着合金再结晶组织的分形维数.随着变形温度的升高和应变速率的降低,分形维数逐渐减小.

#### 参考文献:

- [1] 沙爱学,李兴无,王庆如,等.热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2005,15(8):1167-1172.
- [2] 李治华,吴迪,赵宪明,等.低碳钢热变形奥氏体的再结晶行为[J].钢铁研究学报,2006,15(5):46-49.
- [3] 杨永明,杜凤山,王敏婷.辊楔横轧空心件热变形时微观组织的研究[J].热加工工艺,2009,38(23):30-35.
- [4] GLASS H J, WITH G D. Fractal characterization of the compaction and sintering of ferrites[J]. Materials Characterization, 2001, 47: 27-37.
- [5] 林继兴,高光亮.基于 Matlab 的 A356 铝合金半固态初生相分形维数表征[J].热加工工艺,2009,38(13):25-27.
- [6] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995:111-138.
- [7] 邢鹏飞,翟玉春,田彦文,等. WS<sub>2</sub> 颗粒的分形特征[J].中国有色金属学报,1996,6(2):36-41.
- [8] COLA'S R. On the variation of grain size and fractal dimension in an austenitic stainless steel[J]. Materials Characterization, 2001, 47: 353-358.

## Fractal feature of recrystallized structure of TB8 alloy

ZHANG Qing<sup>1</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, XUE Ke-min<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230011, China; 2. Institute of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Microstructure of TB8 alloy during hot deformation is studied in this paper. On the basis of computer image processing technology, the fractal dimensions of recrystallized structure under different conditions are calculated and the influence of processing parameters on fractal dimensions is studied. The result shows that the recrystallized structure of TB8 alloy has a typical fractal characteristic. The fractal dimensions decrease with the increase of deformation temperatures and the decrease of strain rates.

**Key words:** TB8 alloy; hot deformation; recrystallized structure; fractal