

热变形 Ti-15-3 合金再结晶晶粒的分形分析

张 青, 李 萍, 薛克敏

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 根据分形几何学理论, 分析热变形 Ti-15-3 合金固溶处理后的再结晶组织。分别采用小岛法和盒维数法计算出晶粒的分形维数, 并探讨分形维数、晶粒尺寸与变形条件之间的关系。结果表明: 再结晶晶粒形态具有自相似性, 表现出典型的分形特征; 且随着变形程度、变形速率的增加和变形温度的降低, 再结晶晶粒尺寸减小, 分维增大。分形理论的应用为非规则热变形组织的定量研究提供了一种新的方法。

关键词: Ti-15-3 合金; 热变形; 再结晶组织; 分形

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

Fractal analysis of recrystallized grains of Ti-15-3 alloy after hot deformation

ZHANG Qing, LI Ping, XUE Ke-min

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The fractal theory was applied to analyze the recrystallized microstructure of Ti-15-3 alloy after hot deformation and solution treatment. Slit Island Method and Box Counting Method were used to calculate the fractal dimension of grains. The influence of processing parameters on fractal dimension and grain size was studied. The results show that the shapes of recrystallized grain boundaries are self-similar. The fractal dimension of grain boundaries increases with increasing deformation degree and strain rate whereas decreases with increasing deformation temperature. It might provide a new method for quantified study on irregular hot deformation microstructure.

Key words: Ti-15-3 alloy; hot deformation; recrystallized microstructure; fractal

钛合金热变形分析及组织演变的研究是近年来各国学者研究的热点^[1-3]。合金在变形及后续热处理过程中会产生再结晶及晶粒长大等一系列复杂变化。再结晶行为和规律的研究是制定热加工工艺和固溶热处理工艺规范的重要环节。晶粒形貌是表征合金显微组织和性能的重要指标之一, 但经典体视学在定量描述晶粒等不规则形貌时存在一定困难。而分形几何的创立为人们认识自然界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, 具有广阔的应用前景。

20 世纪末国外就已将分形理论应用于热变形金属的研究中^[4-6], 并取得一定成果。目前, 国内关于材料分形的研究大多仅限于对材料本身分形特征的分析、形变组织断面分维的计算及材料力学性能的研究等方面^[7-8], 热变形组织分维的研究仍处于起步阶段。本文作者在热模拟压缩实验的基础上, 结合图像处理技术, 对 Ti-15-3 合金在热变形并固溶处理后的再结晶组织进行研究, 采用分形维数定量描述不同变形条件下 Ti-15-3 合金再结晶晶粒的边界形貌, 初步揭示再结晶组织的分形特征与各变形参数之间的关系。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50405020)

收稿日期: 2006-08-30; 修订日期: 2007-05-20

通讯作者: 张 青, 博士研究生; 电话: 0551-3256886; E-mail: zhangqing7214@yahoo.com.cn

1 实验

实验所用材料为西北有色金属研究院熔炼的铸锭经锻造后固溶处理的 Ti-15-3 合金棒料,其化学成分为(质量分数, %): V 15.6, Cr 3.4, Sn 2.8, Al 3.4, Fe 0.13, C 0.03, N 0.02, O 0.13, 余量为 Ti。将 Ti-15-3 合金棒料加工成直径为 8 mm, 长度为 12 mm 的圆柱试样, 在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上进行恒变速率等温压缩实验。压下量为 20%~60%, 应变速率分别为 0.01、0.1 和 1 mm/s, 变形温度为 750~900 °C, 间隔为 50 °C。将变形后立刻淬火的试样在箱式电阻炉中于 800 °C 固溶处理保温 20 min 后水淬。然后在通过轴线的部位用线切割沿纵截面剖开, 将试样研磨抛光后腐蚀制成金相样品, 采用金相显微镜观察其组织。由于压力面间摩擦的影响, 试件变形不均匀。为了能够较真实地反映变形材料的微观组织变化, 选取试样中心部位的一小块面积进行分析, 典型的显微组织金相照片如图 1 所示。

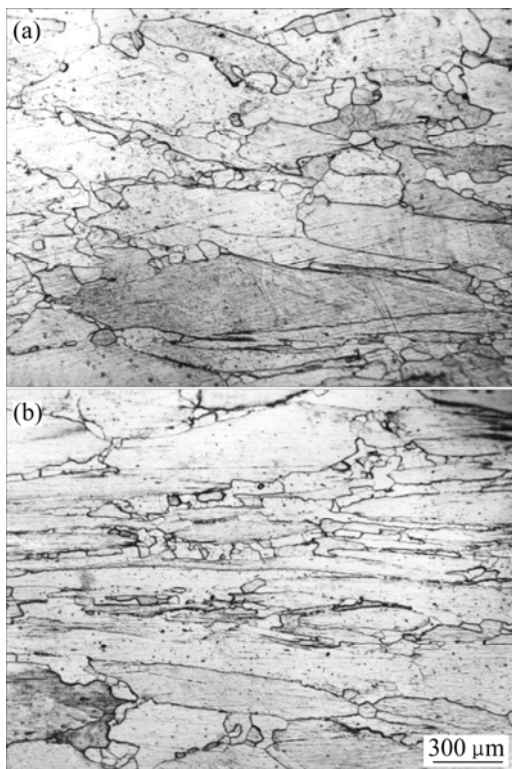


图 1 热变形及固溶处理后 Ti-15-3 合金的微观组织

Fig.1 Microstructures of Ti-15-3 alloy after hot deformation and solution treatment: (a) $t=750^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=40\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{mm/s}$; (b) $t=800^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=60\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{mm/s}$

2 再结晶组织分维计算

通常情况下, 自然界的大多数分形集并非严格自相似, 而是在一定标度范围内整体与部分之间的自相似性, 即统计意义上的自相似。大量研究表明, 金相组织的晶粒具有分形结构, 可以用分形维数对其形貌进行描述^[9-11]。分维作为表征图像不规则和复杂程度的一种度量, 与人视觉对图形粗糙程度的感知是一致的, 分维值越大, 图像表面越不规则, 越粗糙; 反之, 越趋于平坦光滑。适合组织分维的测量方法主要有改变观察尺度求维数、盒维数法和小岛法等。本文作者分别采用小岛法和盒维数法计算热变形 Ti-15-3 合金固溶处理后再结晶晶粒的分维。

2.1 图像处理

计算再结晶组织的分形维数, 关键是计算晶粒的特征值。那么, 首先要提取晶粒边界, 即需对灰度图像进行二值化。本文作者采用 MATLAB 软件进行处理, 在二值化处理过程中, 首先设定两个不同的阈值 θ_1 和 θ_2 ($\theta_1 < \theta_2$), 当某个点的像素值小于等于 θ_1 或大于等于 θ_2 时, 将其置为 0, 反之则置为 1。最终把具有多个灰度值的图像变换成仅有 0 和 1 两个灰度值的黑白图像, 如图 2 所示。

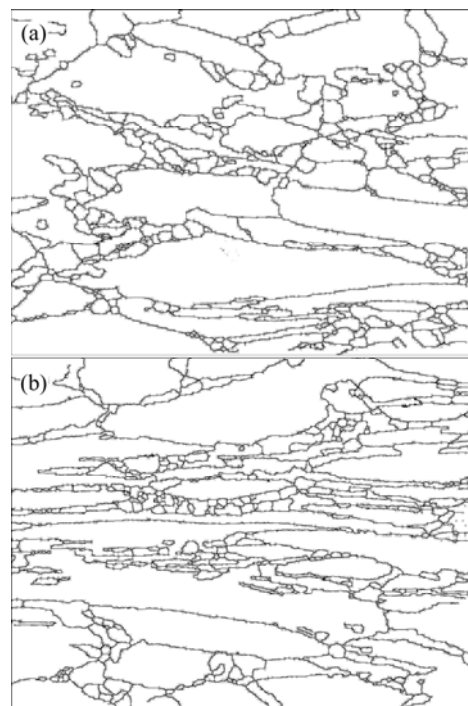


图 2 微观组织的二值图

Fig.2 Binary images of microstructure: (a) $t=750^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=40\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{mm/s}$; (b) $t=800^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=60\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{mm/s}$

2.2 测量方法

2.2.1 小岛法

对于形状不规则的几何图形, 周长 P 与面积 A 之间有 $P^{1/D} \propto A^{1/2}$, 其中 D 为分形维数, 对于给定的测量码尺, 可表示为

$$P^{1/D} = \alpha A^{1/2} \tag{1}$$

式中 α 为常数, 对式(1)两边取对数, 得出:

$$\ln P = \beta + (D/2)\ln A \tag{2}$$

式中 β 为常系数。在一固定测量码尺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, 则拟合直线斜率的 2 倍即为该图形的分形维数^[12]。

在处理好二值图片中选取 50 个以上边界清晰的再结晶晶粒, 提取出每个晶粒边界并采用在 MATLAB 上自行编写的程序计算其周长 P 和面积 A , 最后将得到的周长面积数据在双对数坐标中作图, 即可得再结晶组织的分形维数, 结果如图 3 所示。

2.2.2 盒维数法

采用盒维数法进行分析时, 主要是用边长为 r 的

正方形网格分割分形图像, 测量时, 用一系列不同尺度的盒子组成的坐标网格来覆盖要研究的分形结构。对于每一尺度 r , 计算出含有分形图形的盒子总数 $C(r)$, 盒子总数与尺度 r 的关系为:

$$C(r) = \alpha r^{-D} \tag{3}$$

式中 α 为常数, D 为分形结构的盒维数, 则盒维数 D 可按式计算:

$$\ln C(r) = \delta - D \ln r \tag{4}$$

式中 δ 为常数。对 $\ln r$ 、 $\ln C(r)$ 的值做线性回归, 拟合直线斜率的负数即为盒维数值。

图像在计算机中存储是以像素为单位的, 在盒维数中, 网格的大小可以用像素数来表示, 如 2×2 个像素矩阵就代表一个小网格, 通过改变小像素矩阵的维数来实现网格尺度的变化, 即在金相图片的二值图上调整像素矩阵的大小, 对出现再结晶晶粒边界的“方格”进行计数。在本研究中, 对每副图像均采用了超过 30 种不同的尺寸进行统计计算, 所得结果如图 4 所示。

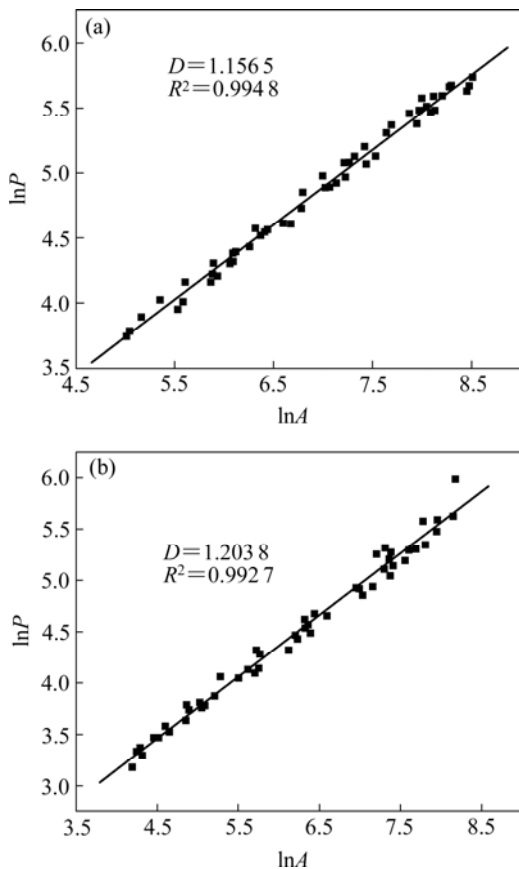


图 3 $\ln P - \ln A$ 拟合曲线

Fig.3 Fitting lines of $\ln P$ vs $\ln A$: (a) $t=750\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon=40\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ mm/s}$; (b) $t=800\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon=60\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ mm/s}$

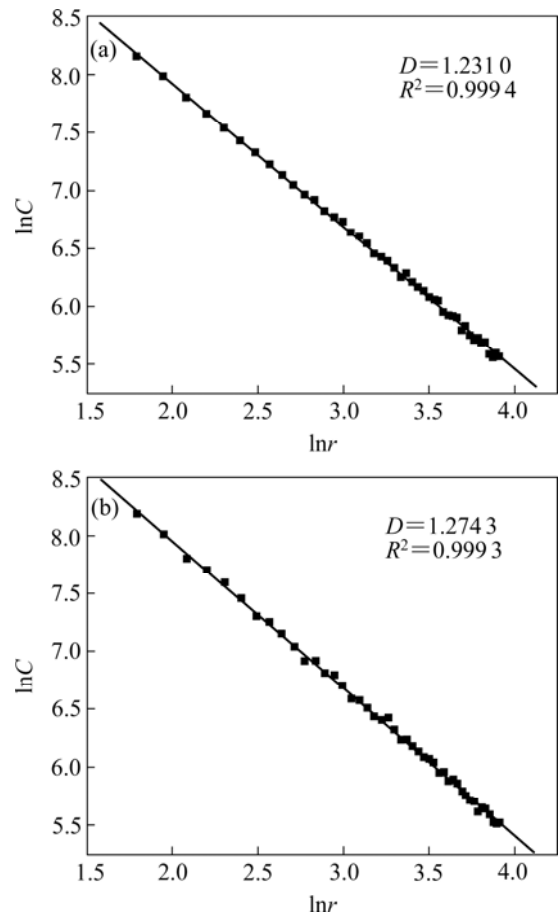


图 4 $\ln r - \ln C$ 拟合曲线

Fig.4 Fitting lines of $\ln r$ vs $\ln C$: (a) $t=750\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon=40\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ mm/s}$; (b) $t=800\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon=60\%$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ mm/s}$

3 结果与讨论

3.1 两种计算方法的比较

从图3和4所得结果可知,两种方法获得的数据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(R^2)均在0.98以上。这表明Ti-15-3合金热塑性变形并固溶处理后的再结晶显微组织确实具有典型的分形特征,可以采用分形维数这一特征参数来描述其组织形貌。

图5所示为变形量为60%时分别采用小岛法与盒维数法测得的数据值。可以看出,小岛法和盒维数法测得的分形维数值并不相同,但其反映的规律是一致的,这说明两种方法虽然表达方式有所不同,但本质上都是对研究对象复杂性和不规则性的描述,因而实质上是统一的。

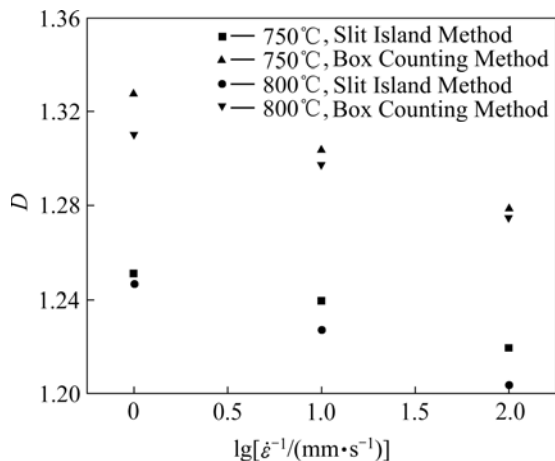


图5 小岛法与盒维数法对Ti-15-3合金再结晶组织分形维数计算结果的比较

Fig.5 Comparison of fractal dimensions adopting Slit Island Method and Box Counting Method

3.2 分形的物理意义

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,其影响因素众多而复杂,本质上是非线性的,而非线性的物理本质是耗散性,耗散性又是随机性的后果,因此,显微组织的演变具有分形性质。从其演变的动力学机制来看,自相似图形的生成机制是相同的,对于变形后固溶组织的再结晶过程,每一步的形核与长大过程都是彼此相似的,因此,从动力学角度看,该组织也具有自相似性。

分形维数与拓扑维数之差 $D-d$ 是系统无序程度

的度量, $D-d$ 越大,系统的混乱度越大,即系统的熵越大。本研究计算得出的再结晶晶界的分形维数均在1~2之间。由于该分维的测量是在平面内进行, $D-1$ 表示晶粒边界的曲折程度,该值越大,则晶界的弯曲程度越大,也即 D 越大,晶界的复杂程度越大。

分维的变化是材料内禀特性变化的表现,而材料微观组织变化又与变形条件紧密相关。因此,通过组织分维的研究,可以从一个新的角度去认识变形条件与微观组织之间的关系。一些研究表明,金属晶粒边界的分维随晶粒尺寸的减小而增大^[13-15]。本文作者在分维计算的基础上,对Ti-15-3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。

3.3 变形速率的影响

图6所示为变形量60%时分形维数及晶粒尺寸随应变速率变化的情况。

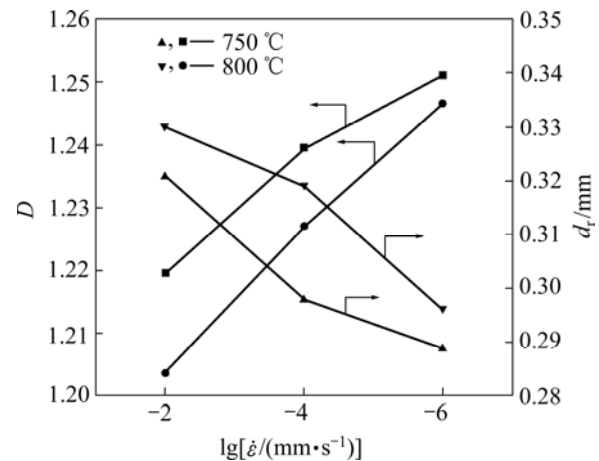


图6 变形速率对分形维数及晶粒尺寸的影响

Fig.6 Influence of strain rate on fractal dimension and grain size

由图6可以看出,随着应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的增大,晶粒尺寸减小,分形维数增大。这是由于Ti-15-3合金属于高层错能金属,在变形过程中产生明显的动态回复现象。当变形速率较低时,由于回复进行得较为充分,同时发生少量的动态再结晶,形变储能消耗较大,在随后的固溶处理过程中,剩余的能量不足以产生大量的静态再结晶,静态再结晶程度小,尺寸较大。且前面已形成的动态再结晶晶粒有足够的时间长大,晶界趋于平直,分形维数较小。随着应变速率的增加,形变组织中位错来不及相消,动态回复程度降低,位错密度增大,积聚的形变储存

能大, 再结晶驱动力随之增大, 加速后期固溶处理过程中静态再结晶的进程, 形成较多细小的再结晶晶粒, 因而晶界的弯曲程度较大, 分形维数相应增大。

3.4 变形温度对分维的影响

变形程度为 60% 时温度对固溶处理后 Ti-15-3 合金再结晶组织的分形维数和晶粒尺寸的影响如图 7 所示。由于合金高温变形的微观机制是热激活过程, 动态回复主要是由位错攀移和交滑移过程控制的。在相对较低的变形温度下变形, 原子扩散能力较弱, 动态软化程度小, 大变形带的形成增加了固溶处理时再结晶的形核位置, 因而再结晶晶粒细化, 分形维数较大。随着温度的升高, 原子活动的动能增加, 依赖于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快, 依赖于扩散的位错开动(如位错的攀移)易于进行, 热激活能的作用增强, 晶界迁移更容易, 动态回复的充分进行消耗了大量的变形能, 因而固溶处理过程中只有少量的静态再结晶产生, 晶粒尺寸较大, 同时, 高温变形过程中形成的少量动态再结晶晶核在固溶处理时也将继续长大, 因此, 晶界趋于平直化, 分形维数相应减小。

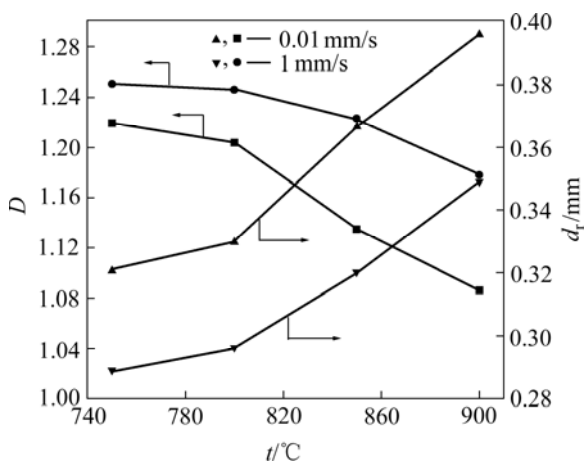


图 7 变形温度对分形维数及晶粒尺寸的影响

Fig.7 Influence of deformation temperature on fractal dimension and grain size

3.5 变形程度对分维的影响

图 8 所示为不同变形程度对 Ti-15-3 合金固溶处理后再结晶组织的分形维数和晶粒尺寸的影响。由图可以看出, 随变形程度的增大, 晶粒尺寸减小, 分形维数增大。这是由于变形程度较小时, 合金中储存的畸变能少, 在随后固溶处理的过程中再结晶形核率低, 单

位体积形成的晶核数量少, 再结晶尺寸较大, 边界较为平坦。随着变形程度的增加, 形变储存能也越大, 固溶处理后静态再结晶程度增大, 晶粒细化, 晶界复杂程度增加, 从而晶界的分维也较大。

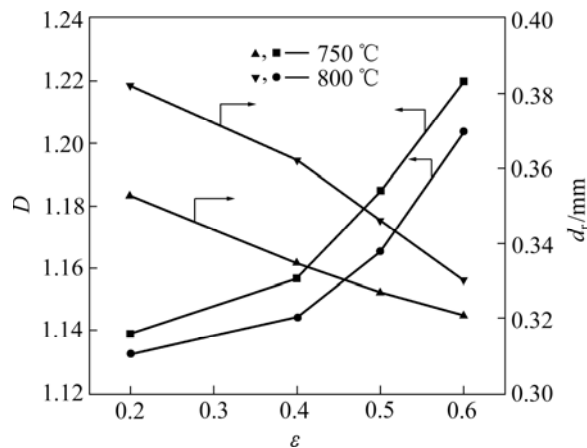


图 8 变形程度对分形维数及晶粒尺寸的影响

Fig.8 Influence of deformation degree on fractal dimension and grain size

由以上分析可知, 在热变形 Ti-15-3 合金固溶处理的过程中, 再结晶程度大时, 形成的再结晶晶粒小, 界面能大, 晶界曲率大, 因而分维值较大; 再结晶程度较小时, 所形成的再结晶晶粒能够充分生长, 晶粒在长大的过程中, 为使系统界面能趋于最低而使晶界趋向于向曲率中心移动, 从而使之平直化, 分形维数值相应较小。

4 结论

1) 热变形 Ti-15-3 合金固溶处理后的再结晶组织具有典型的统计自相似性, 可以用分形维数表征其不规则程度。

2) 不同测量方法测得的分形维数值并不相同, 但表现出来规律是一致的。

3) 变形工艺参数对再结晶组织分维有一定的影响。随着变形程度、变形速率的增加和变形温度的降低, 再结晶晶粒的尺寸减小, 分维增大。

4) 分形维数反映再结晶晶粒的复杂程度, 分维越大, 晶界的弯曲程度越大, 再结晶组织越复杂。采用分形维数对金属变形显微组织进行定量研究, 制定合理的加工工艺, 可以提高变形金属的组织性能和性能提供更为科学的理论依据。

REFERENCES

- [1] 冯亮, 曲恒磊, 赵永庆, 等. TC21 合金的高温变形行为[J]. 航空材料学报, 2004, 24(4): 11-13.
FENG Liang, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, et al. High temperature deformation behavior of TC21 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(4): 11-13.
- [2] 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.
SHA Ai-xue, LI Xing-wu, WANG Qing-ru, et al. Influence of hot deformation temperature on microstructure and mechanical properties of TC18 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(8): 1167-1172.
- [3] LI Miao-quan, XIONG Ai-ming, HUANG Wei-chao, et al. Microstructural evolution and modeling of the hot compression of a TC6 titanium alloy[J]. Materials Characterization, 2003, 49: 203-209.
- [4] Hornborgen E. Fractal analysis of grain boundaries in hotworked poly-crystals[J]. Zeitschrift fur-Metallkunde, 1987, 78: 622-625.
- [5] Kruhl J H, Nega M. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer[J]. Geologische Rundschau, 1996, 85: 38-43.
- [6] Takahashi M, Nagahama H, Masuda T. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter[J]. Journal of Structural Geology, 1998, 20: 269-275.
- [7] Ribeiro L M F, Horowitz A L, Jeuino G A, et al. Fractal analysis of eroded surfaces by digital image processing[J]. Materials Letters, 2002, 56: 512-517.
- [8] 王炳成, 任朝晖, 任立义, 等. 剪切痕迹表面形貌的分形描述[J]. 机械设计与制造, 2003, 6: 106-107.
WANG Bing-cheng, REN Zhao-hui, REN Li-yi, et al. Fractal geometry description of the surface appearance of the shearing trace[J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, 6: 106-107.
- [9] 郭洪民, 杨湘杰. 凝固微观组织的多层次模拟[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 929-933.
GUO Hong-min, YANG Xiang-jie. Multiscale modeling of solidification microstructure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2004, 14(6): 929-933.
- [10] Glass H J, de With G. Fractal characterization of the compaction and sintering of ferrites[J]. Materials Characterization, 2001, 47: 27-37.
- [11] 王鲁, 程兴旺, 王富耻, 等. 钨合金微观组织分形特征研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2001, 6(3): 149-156.
WANG Lu, CHENG Xing-wang, WANG Fu-chi, et al. Fractal characteristics of tungsten alloy microstructure[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2001, 6(3): 149-156.
- [12] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 111-138.
ZHANG Ji-zhong. Fractal[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 111-138.
- [13] 邢鹏飞, 翟玉春, 田彦文, 等. WS₂颗粒的分形特征[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(2): 36-41.
XING Peng-fei, ZHAI Yu-chun, TIAN Yan-wen, et al. Fractal characteristic of WS₂ particles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(2): 36-41.
- [14] 周捷, 王印培. 晶粒度的分形特征研究[J]. 理化检验: 物理分册, 2000, 36(2): 107-110.
ZHOU Jie, WANG Yin-pei. Investigation on the fractal characters of grain size[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2000, 36(2): 107-110.
- [15] Colás R. On the variation of grain size and fractal dimension in an austenitic stainless steel[J]. Materials Characterization, 2001, 46: 353-358.

(编辑 龙怀中)