边界追踪及 Freeman 码在定量金相中的应用

于 洋 刘二莉 周铁涛 刘培英

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 根据不同情况,对多相合金中的颗粒状第二相进行二值化、颗粒分割、孔洞填充以及滤波等一种或多种图像预处理,得到离散的多目标黑白二值图像. 为了统计分析多个颗粒,提出了多目标边界追踪算法,利用八连通边界追踪得到的每个颗粒的唯一标志点及其边界的 Freeman 码,由此可以获得体积分数、周长、面积、形状因子、平均自由程等第二相的特征参数. 实验结果表明,在完成要求的预处理工作之后,该算法在离散多目标统计中实用有效.

关 键 词: 定量金相; 图像处理; 边界追踪; Freeman 码; 体视学

中图分类号: TP 3-05

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2004)08-0767-04

Application of boundary-tracing and Freeman code in quantitative metallography

Yu Yang Liu Erli

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhou Tietao Liu Peiying

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The grainy second phase of multi-phase alloy was processed by various image pretreatments according to different conditions to obtain binary image of the discreet multi-object. These image pretreatments include two-value transformation, grain segmentation, hole-filling and filtering. To analyze the multi-object, a boundary tracing algorithm for multi-object was presented. With the algorithm, the Freeman code of every grain's boundary was produced by 8 direction boundary tracing, thus the second phase characteristic parameters, such as volume fraction, perimeter, area, shape factor, mean free path etc, were obtained. The experiment results show that the algorithm is effective for discreet multi-object analysis by having done the above-mentioned pretreatments.

Key words: quantitative metallography; image processing; boundary-tracing; Freeman code; stereology

随着体视学理论研究的深入,特别是现代图像分析技术和计算机技术的发展,使得定量金相的自动图像分析技术在材料领域得到越来越广泛的应用.

在实际使用的金属材料中,最常见的是多相组织的合金. 而对于单相组织合金与多相组织合金中的基体相,其具有连续晶界的网络拓扑结构,主要特征参数就是晶粒度. 由于其表现形式与分布在基体中的第二相(一般为离散、孤立的粒子状)有本质的区别,所以笔者对二者采用了不同的分析方法. 对于合金组织和性能,基体相固然重要,但变化最大的、对性能影响最敏感的,常常是第二相的数量、大小、形状和分布[1]. 本文只讨论第二相分布特征的计算.

收稿日期: 2003-04-21

作者简介: 于 洋(1978-),男,山东菏泽人,硕士生, freshyy@163.com.

利用计算机进行定量分析,这必然涉及如何将图像描述成计算机“理解”的语言,而边界追踪后获得的 Freeman 码[2]就可以提供描述目标图像的足够信息. 本文正是研究在定量金相分析系统开发过程中所需的多目标边界追踪算法,利用 Freeman 码提取晶粒的数量、面积、周长、形状因子等特征参数.

1 预处理

在进行边界追踪之前,有以下预处理工作是必须的.

1) 二值化. 设定一个阈值 T[3~4],将图像分为两部分.

$$g(x,y)=\begin{cases}1 & f(x,y)\geqslant T\\ 0 & f(x,y)<T\end{cases}$$

其中 $f(x,y)$ 为输入灰度图;$g(x,y)$ 为输出的二值图.

2) 颗粒分割. 将粘连的颗粒分开,数学上满足两个区域的交集为空. 多次统计发现目标图像中粘连的颗粒所占的比例较小,所以采用数学形态学中的开运算实现.

3) 缺陷填充. 填充封闭区域内部的空洞,数学上满足单连通条件. 采用种子填充算法即可实现.

4) 如果存在噪声,则要去除噪声. 采用高斯滤波,可有效去除噪声.

2 边界追踪算法设计

有以下几个前提条件:

1) 它是基于 8—邻域(如图 1 所示)的边界追踪. 即若 A 是 B 的邻点,则 A 相对 B 有 8 种可能的方向.

3	2	1
4	*S*	0
5	6	7

S—目标点

图 1 8—邻域

2) 规定孤立点的 Freeman 为空.

3) 只考虑封闭图形. 事实上,在边界追踪时,非封闭图形(如直线、非封闭曲线)均被看作封闭图形的特例. 从其追踪出的 Freeman 码也很容易看出,链码的总个数必为偶数,且后一半链码是前一半链码的逆[5]. 如图 2 所示,为一非封闭曲线的像素级放大图. 通过边界追踪得到的链码为

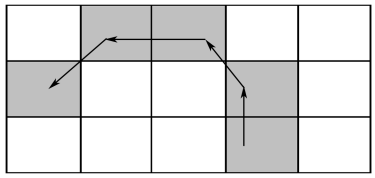


图 2 曲线的 Freeman 码示意图

$$A_8=a_1a_2a_3a_4a_5a_6a_7a_8=23451076$$

则有 $$a_5a_6a_7a_8=(a_1a_2a_3a_4)^{-1}$$

为了叙述的方便,定义两个名词:

左下角点(left-low point):就是某个点的 8—邻域中,4、5、6、7 方向的像素都是背景点(即属性为 1),称该点为左下角点.

下左角点(low-left point):所有左下角点中,位于最下方的那个点.

显然,下左角点是左下角点的一个特例,同时它们还属于边界点.

对于单个目标的边界追踪算法[6],其原理为:从下到上,从左到右水平扫描,找到的第一个黑点必是下左角点. 以它为起始点,定义初始的搜索方向为沿左上方(3 方向),如果左上方的点是黑点,则为边界点,否则搜索方向顺时针旋转 45°. 这样直到找到一个黑点为止,然后把这个黑点作为新的边界点,在当前搜索方向的基础上逆时针旋转 90°,继续用同样的方法搜索下一个黑点,直到返回最初的边界点为止. 如图 3 所示.

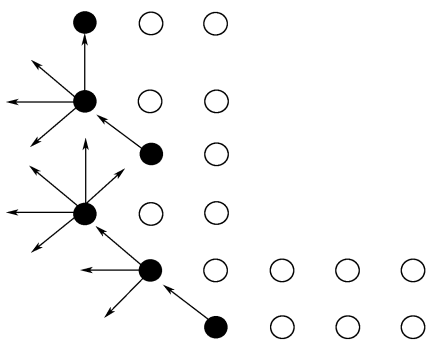


图 3 边界追踪原理

因为在定量金相分析中所研究的都是大量晶粒,所以必须获得晶粒的唯一标识以区别其他晶粒,并且涉及到以什么样的数据结构存储各个晶粒信息的问题. 所以上述算法显然是不适用于多个晶粒的特征提取. 因此在原有算法的基础上对其进行了推广. 为讨论算法的可行性,先证明一个命题:对于一个边界连续的单连通的有界闭区域 D,它的左下角点有可能是不唯一的,但它的下左角点却是有且仅有一个.

对于左下角点的不唯一性,很容易举出反例,不再证明. 现只证明第 2 部分,证明如下:

下左角点存在性:

设边界函数为 $y=f(x)$,因为 D 为有界区域,所以存在闭区间 $[x_a, x_b]$,使得 $\forall p \in D$ 均有 $p_x \in [x_a, x_b]$,其中 p_x 表示点 p 的 x 坐标. 又因为 $y=f(x)$ 连续,所以 $y=f(x)$ 在 $[x_a, x_b]$ 上也连续,y 必有最小值 $y_{\min}$.

过 $y_{\min}$ 作一条水平线与区域 D 相交,交点所构成的集合记作 $C=\{p_1, p_2 \cdots, p_n\}$,显然 $p_{iy}=y_{\min}$ $(i=1,2,\cdots,n)$,其中 p_{iy} 表示 p_i 点的 y 坐标,所以集合 C 中必存在一点 p_k 满足

$$p_{kx} = \min\{p_{1x}, p_{2x}, \cdots, p_{nx}\}$$
$$1 \leqslant k \leqslant n \qquad k \in \mathbf{N}$$

则 p_k 即为所求点. 存在性得证.

下左角点唯一性:

因为 $p_1, p_2, \cdots, p_n$ 必为互不相同的点,而 $p_{iy}=y_{\min}(i=1,2,\cdots,n)$,所以 $p_{1x}, p_{2x}, \cdots, p_{nx}$ 两两互不相等,p_{kx} 是唯一的,点 p_k 是唯一的. 唯一性得证.

因为在经过预处理后的每个晶粒是满足上述命题条件的,所以以晶粒的下左角点为唯一标识是可行的. 多目标的边界追踪算法思想如下:

1) 搜索整幅图像,记录所有的左下角点,存于 LeftLowPoint 数组,它是进行边界追踪的起始点.

2) 以 LeftLowPoint 数组中的元素为起始点进行边界追踪,记录下与之对应的所有边界点,存于 Edge 数组.

3) 由前面讨论知,同一个图形的左下角点是不唯一的,所以有可能对同一个图形进行多次边界搜索,这样将耗费大量的时间. 因此在步骤 2) 完成之后,把 LeftLowPoint 中的点与 Edge 中的点相比较,相同的删除,这样,LeftLowPoint 就变成一个动态减少的数组,保证了同一个边界只搜索一次. 最终,LeftLowPoint 中的个数恰好等于所有晶粒的个数,其中的元素就是每个目标的下左角点,这也正是下左角点唯一性的应用——用来统计晶粒的个数.

3　金相参数的测量

主要参数的测量基本上是在一次边界追踪完成的,有的虽然没有完成,但为下一步测量已经做好了准备.

1) 晶粒总数. 前面已经讨论过.

2) Freeman 码. 下左角点和所有的边界点都存在,根据 8—邻域的定义可以得到 Freeman 码.

3) 周长. 周长的定义[7]有 5 种,本文采用基于链码的定义.

4) 面积. 不同的定义,面积的值是不同的. 考虑到当存在多种不同类型的晶粒时,如果灰度差别不大,甚至没有差别时,需要通过形状因子——圆度来区分,这里采用基于链码定义的面积. 而在计算不同类别的体积分数时,则需要计算基于像素定义的面积[8]. 这里计算两种面积,均可以通过链码实现.

5) 形心位置. 通过链码计算对 x, y 轴的一阶矩[5]可求得.

6) 平均直径[1]. 在边界追踪时,同一边界的点赋予相同的标记,通过随机线测量,可以统计出平均直径.

7) 此外,根据链码信息,还可以求得平均自由程、水平、垂直方向的 Feret 径[1],晶粒的转折度等参数,此处不再详述.

4　应用实例

以某金相照片为例,截取了其中一部分(212×169,倍率 100),其中追踪前(见图 4)是经过预处理以后的照片,追踪后(见图 5)提取了轮廓信息.



图 4　追踪前的颗粒

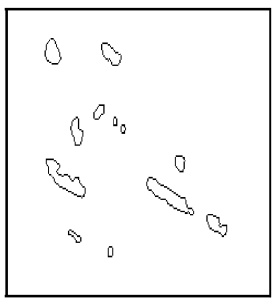


图 5　追踪后的颗粒边界

表 1、表 2 分别列出了追踪后所测得的整体参数和个体参数. 从表中可以看到,形状因子能够很好地表达出晶粒的形状特征,这对于不同类别晶粒的分类有很重要的意义,而形心位置则为下一步晶粒的定位提供了参数.

表 1 整体参数

测量次数	体积分数	晶粒数	平均直径/mm
1	0.047 588	12	0.061 927

表 2 个体参数

晶粒序号	周长	面积(链码)	面积(像素)	形状因子	形心坐标
1	18.243	22.500	32.000	1.177 018	77,152
2	31.556	37.500	52.000	2.113 160	45,142
3	58.042	134.500	161.000	1.993 182	173,135
4	112.569	347.000	396.000	2.905 994	130,116
5	108.569	324.000	370.000	2.895 030	36,105
6	32.728	69.500	85.000	1.226 428	140,95
7	49.799	121.000	144.000	1.630 969	46,74
8	15.657	16.000	24.000	1.219 212	89,73
9	14.828	14.000	22.000	1.249 834	82,68
10	30.142	57.000	71.000	1.268 421	67,61
11	53.698	147.500	170.000	1.555 687	78,24
12	48.870	154.500	176.000	1.230 120	25,23

上述个体参数中,均为无量纲,对于周长、面积和形心坐标,如果需要知道物理尺寸,则需要通过标定获得.

5 结 束 语

定量金相分析中,对晶粒的研究,很大程度上要涉及到晶粒几何性质的统计、分析. 提取晶粒边界的链码,可以获得丰富的信息. 而边界追踪正是获得链码的关键步骤. 所以边界追踪算法对后期的金相分析有很大的影响. 本文提出了一种多目标物体的边界追踪算法,配合前期的预处理工作,可以达到满意的效果.

参考文献 (**References**)

[1] 秦国友. 定量金相[M]. 成都:四川科学技术出版社,1987
Qin Guoyou. Quantitative metallography[M]. Chengdu:Sichuan Science Technology Press,1987(in Chinese)

[2] Choo C Y, Freeman H. An efficient technique for compressing chain-coded line drawing images[C]. Signals,Systems and Computers[A],1992,2:717 ~ 720

[3] Otsu N. A threshold selection method from grey-level histogram [J]. IEEE Trans System Man Cybernet,1979,SMC-9:62 ~ 66

[4] Kittiler J,Illingworth J. Minimum error thresholding[J]. Pattern Recognition,1986,19(1):41 ~ 47

[5] 徐建华. 图像处理与分析[M]. 北京:科学出版社, 1992
Xu Jianhua. Image process and analysis[M]. Beijing: Science Press,1992(in Chinese)

[6] 何 斌,马天予,王运坚 等. Visual C+ 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001
He Bin,Ma Tianyu,Wang Yunjian,*et al*. Visual C+ digital image process[M]. Beijing: Peoples Posts & Telecommunications Publishing House,2001(in Chinese)

[7] 郭海涛,孙大军,张殿伦,等. 数字图像目标圆度的计算方法[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2001, 18(2): 53 ~ 55
Guo Haitao, Sun Dajun, Zhang Dianlun. *et al*. The methods of calculating a object circularity in a digital image[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University,2001,18(2): 53 ~ 55(in Chinese)

[8] 李 波,刘东华,梁光明,等. 一种计算任意形状封闭区域面积的新方法[J]. 国防科技大学学报,2002, 24(4):61 ~ 64
Li Bo,Liu Donghua,Liang Guangming,*et al*. A new algorithm for calculating the area of arbitrary enclosed shape[J]. Journal of National University of Defense Technology,2002,24(4): 61 ~ 64(in Chinese)