

文章编号 1004-924X(2011)10-2541-09

金相图像的晶界恢复与重建

蒋明星^{1,2*}, 陈国华¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

2. 华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642)

摘要:针对定量金相分析中金相图像的晶界恢复与重建以及数学形态学在图像处理中的特殊作用,从理论上证明了传统膨胀运算对图像灰度连续性的影响及影响程度与结构元素尺寸的关系,并对传统的膨胀运算的定义做了改进,据此提出了多尺度测地膨胀算法并以此恢复和重建金相图像的晶界。首先依据改进的膨胀运算对金相图像进行预处理;然后用多尺度迭代腐蚀和多尺度测地膨胀方法得到晶粒的种子;最后用条件粗化方法对晶粒的种子进行区域生长、产生晶界线。实验结果表明,与传统的重复测地膨胀方法以及基于微分运算的图像分割等方法相比,本方法不仅可快速恢复与重建晶界线,而且获取的晶界线更加清晰准确、连续光滑。

关键词:晶相图;晶界恢复;晶界重建;膨胀;灰度连续性;多尺度测地膨胀

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2541

Restoration and reconstruction of grain boundary in metallographical image

JIANG Ming-xing^{1,2}, CHEN Guo-hua¹

(1. *School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;*

2. *College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)*

** Corresponding author, E-mail: Jiang-mx-scau@163.com*

Abstract: According to the restoration and reconstruction of the grain boundaries in a metallographical image and the important role of mathematical morphology in image processing, the influences of traditional dilation of mathematical morphology on the gray-scale continuity of an image was demonstrated theoretically, and the relationship between the degree of influence and the sizes of structural elements was discussed. Then, an improved definition for the traditional dilation was proposed. A multi-scale geodesic dilation algorithm was presented to restore and reconstruct the grain boundaries based on the improved definition of dilation. First, the metallographical image was preprocessed based on the improved definition of dilation. Second, the seeds of the grains in the metallographical image were gotten by the methods of multi-scale iterative erosion and geodesic dilation. Finally, the grain boundaries in the metallographical image were obtained by the algorithm of conditioned dilation. Experimental re-

收稿日期:2011-02-15;修订日期:2011-03-18.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(No. 7006700)

sults show that the proposed algorithm is not only faster than the traditional methods of geodesic dilation in the restoration and reconstruction of the grain boundary, but also can obtain the grain boundaries with more clearness, accuracy, continuity and smoothness.

Key words: metallographical image; grain boundary restoration; grain boundary reconstruction; dilation; gray continuity; multi-scale geodesic dilation

1 引言

金相图像的晶界恢复与重建是定量金相分析的难点和重点,而晶界恢复与重建的关键又在于对金相图像合理、有效和准确地分割。目前,图像分割尤其是对粘连目标的分割方法有多种。例如, H. K. Mebatsion^[1] 等用基于傅里叶分析算法对粘连的谷粒进行了有效分割; Lu BB^[2] 用水平集方法实现了对晶界的自动识别和图像分割; 肖春霞^[3] 等用水平集方法实现了对纹理图像的有效分割, 获得了纹理目标区域及其光滑的边界; Obara B^[4] 利用图像颜色系统变换实现了对粘连岩石颗粒的分割, 得到了较连续、光滑的颗粒边界; 汤力琨^[5]、廖正全^[6] 等利用凹点检测方法实现了对粘连晶粒的分割; 邓仕超^[7] 等应用 Canny 算法和灰度等高线提取金相组织封闭边缘, 获得了单像素宽边缘, 边缘的定位较准确; 张俊华^[8] 等用图切分算法实现了对颈部淋巴结的超声图像的有效分割。上述图像分割方法在图像分割特别是对粘连目标的分割方面取得了一定的成果, 但也存在一些不足。如有些方法对边界连续的目标分割效果较好, 而对边界不连续的目标(如某些晶粒)的分割效果欠佳; 有些方法避免了过分割现象却产生了欠分割现象; 还有些方法对目标边界定位较准确但获得的边界却不够连续、光滑; 也有的方法分割线的切入点的确定标准带有主观性, 使得粘连晶粒分割线的确定带有主观性。

在金相图像的分割方法中, 较常用的方法是基于数学形态学图像处理方法。与上述方法相比, 该方法抗噪性能更强, 获取的边界更加准确、连续和光滑, 因而在金相图像分割方面具有明显的优势, 受到科研工作者高度重视。Tolosa SC^[9] 等用随机分水岭方法实现了对核燃料芯块晶粒的有效分割; 袁天云^[10] 等用基于数学形态学的水域生长方法实现了对粘连的近似圆形目标的自动分割; 李新城^[11] 等用基于数学形态学分水岭算法对

粘连晶粒进行分割; 刘双科^[12] 等将数学形态学算子与微分梯度算子相结合, 实现了对晶粒的提取与标识。但是, 基于数学形态学的金相图像分割方法的效果与结构元素的选取、形态学运算的组合形式有关, 也与数学形态学两种最基本的运算膨胀、腐蚀对图像灰度的影响有关。这些问题(关系)一旦处理不好, 在分割复杂多变的金相图像时, 会造成边界定位不准、边界不连续不光滑以及过分割或欠分割现象^[13], 从而影响定量金相分析的准确性。因此, 本文从研究膨胀运算对金相图像灰度连续性的影响入手, 探索边界定位准确、连续性和光滑性好、过分割和欠分割现象少的金相图像分割方法。

2 膨胀对图像灰度连续性的影响

根据数学形态学理论, 1D 图像 $f(x)$ 被结构元素 $b(x)$ 膨胀的定义为^[13]

$$(f \oplus b)(s) = \max_{\substack{s-x \in D_f \\ x \in D_b}} \{f(s-x) + b(x)\}, \quad (1)$$

不失一般性, 设图像灰度为连续的尖峰 $f(x)$, 结构元素为半圆 $b(x)$, 其方程如下

$$f(x) = \begin{cases} k(x-a), & a \leq x \leq \frac{a+c}{2}, \\ -k(x-c), & \frac{a+c}{2} < x \leq c. \end{cases} \quad (k > 0, 0 < a < c), \quad (2)$$

$$b(x) = \sqrt{r^2 - x^2}, \quad -r \leq x \leq r, \quad (0 < r \leq \frac{c-a}{2}), \quad (3)$$

其图形如图 1(a), (b) 所示。为了计算膨胀结果, 需先确定 s 的取值范围, 然后再根据 s 的取值, 确定函数 $y(x) = f(s-x) + b(x)$ 的自变量 x 的取值范围, 进而求出 $(f \oplus b)(s)$ 的值。由

$$\begin{cases} s-x \in D_f \\ x \in D_b \end{cases}.$$

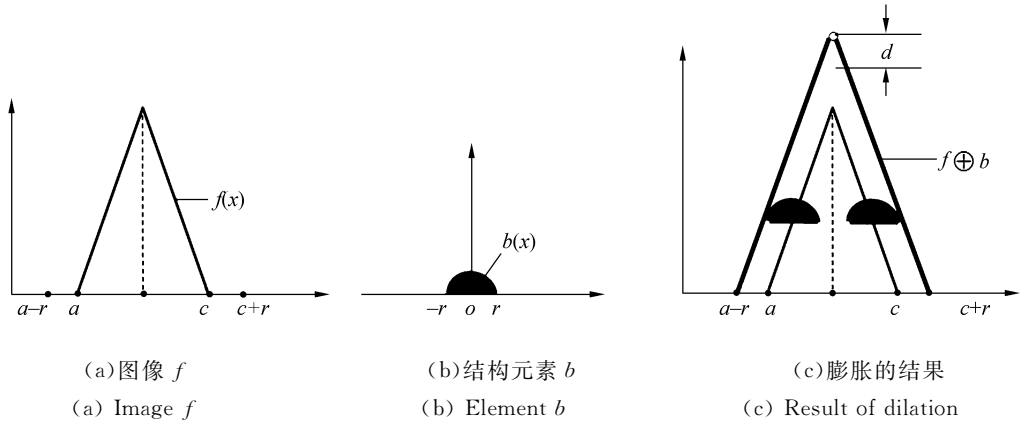


图 1 连续尖锋形灰度的膨胀运算及其结果示意图

Fig. 1 Results of dilation to continuous broken line type gray-scale

得 s 的取值范围为

$$a-r \leq s \leq c+r.$$

设 s 为满足条件 $a-r \leq s \leq c+r$ 的任一数,由

$$\begin{cases} s-x \in D_f \\ x \in D_b \end{cases}$$

得函数 $y(x) = f(s-x) + b(x)$ 的自变量 x 的取值范围

$$\begin{cases} -r \leq x \leq r \\ s-c \leq x \leq s-a \end{cases}.$$

分如下 5 种情况讨论:

(1) 当 $s = a-r$ 时

$$(f \oplus b)(s) = \max_{x=-r} \{f(s-x) + b(x)\} = 0;$$

(2) 当 $a-r < s < a+r$ 时

$$(f \oplus b)(s) = \max_{-r \leq x \leq s-a} \{f(s-x) + b(x)\} =$$

$$\begin{aligned} & \max_{-r \leq x \leq s-a} \{k(s-a) - kx + \sqrt{r^2 - x^2}\} = \\ & \max \{k(s-a) + kr, \sqrt{r^2 - (s-a)^2}, k(s-a) + \sqrt{1+k^2}r\} = k(s-a) + \sqrt{1+k^2}r. \end{aligned}$$

(3) 当 $a+r \leq s \leq c-r$ 时

$$(f \oplus b)(s) = \max_{-r \leq x \leq r} \{f(s-x) + b(x)\}.$$

其中

$$f(s-x) + b(x) = \begin{cases} -k[(s-x) - c] + \sqrt{r^2 - x^2} = \\ k[(s-x) - a] + \sqrt{r^2 - x^2} = \\ \begin{cases} k(c-s) + kx + \sqrt{r^2 - x^2}, & -r \leq x \leq s - \frac{a+c}{2} \\ k(s-a) - kx + \sqrt{r^2 - x^2}, & s - \frac{a+c}{2} < x \leq r \end{cases} \end{cases}.$$

① 当 $a+r \leq s < \frac{a+c}{2}$ 时,

$$\begin{aligned} (f \oplus b)(s) &= \max_{-r \leq x \leq r} \{f(s-x) + b(x)\} = \\ & \max \left\{ \frac{c-a}{2}k + \sqrt{r^2 - \left(s - \frac{a+c}{2}\right)^2}, k(s-a) - kr, \right. \\ & \left. k(s-a) + \sqrt{1+k^2}r \right\} = k(s-a) + \sqrt{1+k^2}r. \end{aligned}$$

② 当 $\frac{a+c}{2} < s \leq c-r$ 时,仿(1)可得

$$(f \oplus b)(s) = \max_{-r \leq x \leq r} \{f(s-x) + b(x)\} = k(c-s) + \sqrt{1+k^2}r.$$

③ 当 $s = \frac{a+c}{2}$ 时,仿(1)可得

$$(f \oplus b)(s) = \max_{-r \leq x \leq r} \{f(s-x) + b(x)\} = \frac{c-a}{2}k + r.$$

(4) 当 $c-r < s < c+r$ 时,仿(2)可得

$$(f \oplus b)(s) = \max_{s-c \leq x \leq r} \{f(s-x) + b(x)\} = k(c-s) + \sqrt{1+k^2}r;$$

(5) 当 $s = c+r$ 时,仿(1)可得

$$(f \oplus b)(s) = \max_{x=r} \{f(s-x) + b(x)\} = 0.$$

综合(1)~(5)可得

$$(f \oplus b)(s) = \begin{cases} 0, & s = a-r \\ k(s-a) + \sqrt{1+k^2}r, & a-r < s < \frac{a+c}{2} \\ \frac{c-a}{2}k + r, & s = \frac{a+c}{2} \\ -k(s-c) + \sqrt{1+k^2}r, & \frac{a+c}{2} < s < c+r \\ 0, & s = c+r \end{cases}, \quad (4)$$

即连续的尖锋形灰度经膨胀后仍是尖锋形灰度,但在顶点 $s = \frac{a+c}{2}$ 处间断,破坏了灰度的连续性,

如图 1(c) 所示。在间断点 $s = \frac{a+c}{2}$ 处灰度突变 (减小) 的幅度为 $d = (\sqrt{1+k^2}-1)r$, 与 r 成正比。

如果图像灰度为连续的圆弧 $f(x)$, 结构元素为半圆 $b(x)$, 其方程如下

$$\begin{cases} f(x) = \sqrt{R^2 - x^2} & (-R \leq x \leq R) \\ b(x) = \sqrt{r^2 - x^2} & (-r \leq x \leq r, 0 < r \leq \frac{R}{4}) \end{cases}$$

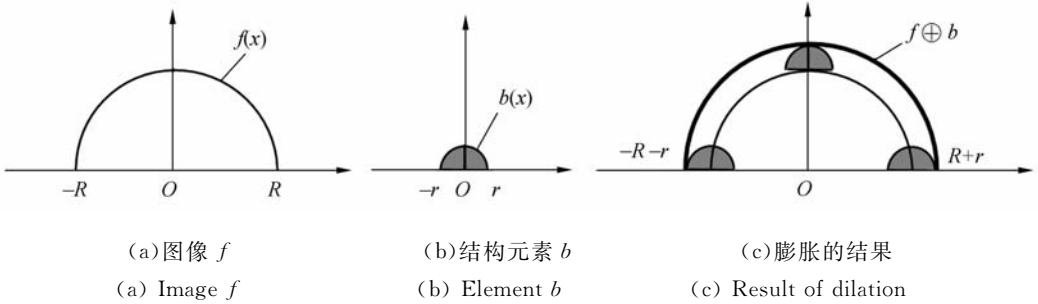


图 2 连续圆弧形灰度的膨胀运算及其结果示意

Fig. 2 Results of dilation to continuous arc type gray-scale

真正的边界点是灰度方差极大值的局部极值点^[14], 灰度尖峰顶点是灰度极大值, 经膨胀后顶点处灰度突变 (减小), 不利于图像边界的准确定位。为了尽可能使膨胀后的灰度不间断, 或有间断时在间断点处灰度突变的幅度足够小, 可以采

取如下两种方法来处理:

$$(f \oplus b)(s) = \sqrt{(R+r)^2 - s^2} \quad (-R-r \leq s \leq R+r), \quad (5)$$

即 $f(x)$ 膨胀的结果是半径 $R+r$ 的半圆弧, 如图 2(c) 所示。可见, 膨胀运算保持圆弧形灰度的连续性。

取如下两种方法来处理:

(1) 在作膨胀运算时尽量选择小尺寸结构元素, 以减小其对连续的尖峰形灰度连续性的影响程度。

(2) 对灰度膨胀运算定义做如下改进:

$$(f \oplus b)(s') = \begin{cases} \sup_{a-r \leq s \leq s'} \left\{ \sup_{\substack{s-x \in D_f \\ x \in D_b}} \{f(s-x) + b(x)\} \right\}, & a-r \leq s' < \frac{a+c}{2} \\ \sup_{s' \leq s \leq c+r} \left\{ \sup_{\substack{s-x \in D_f \\ x \in D_b}} \{f(s-x) + b(x)\} \right\}, & \frac{a+c}{2} \leq s' \leq c+r \end{cases} \quad (6)$$

根据上确界的性质可知, 此时式(4)化为:

$$(f \oplus b)(s') = \begin{cases} k(s'-a) + \sqrt{1+k^2}r, & a-r \leq s' < \frac{a+c}{2} \\ k(c-s') + \sqrt{1+k^2}r, & \frac{a+c}{2} \leq s' \leq c+r \end{cases} \quad (7)$$

这样从理论上把间断点 $s = \frac{a+c}{2}$ 去掉了。在实际操作中, 要对膨胀 (特别是当结构元素尺寸较大时) 后的灰度进行插值, 以尽量减小尖峰顶点处灰度突变的幅度。

3 多尺度测地膨胀与晶界的恢复重建

3.1 相关概念

3.1.1 测地距离与测地圆

定义 1^[15] 设 X 是任意形状的物体, x 和 y 是 X 中任意两点, 则连接 x 和 y 且含于 X 之中的最短通路的长度称为 x 和 y 的测地距离, 记为 $d_X(x, y)$ 。

定义 2^[16] 集合

$$B_X(x, r) = \{y | y \in X, d_X(x, y) \leq r\}, \quad (8)$$

称为圆心在点 x , 半径为 r 的测地圆。

3.1.2 测地膨胀与多尺度测地膨胀

定义 3^[13] 设 X 是一幅图像(点集), A 是 X 的一个子图像(子集), r 是一个正数. 则称点集

$$D_X^r(A) = \{x | x \in X, B_X(x, r) \cap A \neq \emptyset\} \quad (9)$$

为 A 在 X 中用 B 进行的 r 次测地膨胀. 显然有

$$D_X^r(A) = \bigcup_{x \in A} B_X(x, r), \quad (10)$$

$$D_X^1(A) = (A \oplus B) \cap X = A \oplus B; X, \quad (11)$$

其中 $A \oplus B; X$ 又叫作 A 在条件 X 下的条件膨胀.

定义 4^[13] 设 X 是一幅图像(点集), A 是 X 的一个子图像(子集), 则称点集:

$$A \oplus \{B\}; X = [[[A \oplus B] \cap X] \oplus B] \cap X] \oplus B] \dots \quad (12)$$

为 A 在 X 中重复测地膨胀. 这里, $\{B\}$ 代表迭代地用 B 膨胀 A , 直到不再有变化.

定义 4 中的结构元素 B 是单一尺度的, 对于大尺度的 X 和小尺度的 A , 为了提高膨胀效率, 可将上述单一尺度结构元素序列 $\{B\}$ 换成不同尺度结构元素序列 $\{B_k\}$, 且令 $Y_0 = A, Y_k = (Y_{k-1} \oplus B_k) \cap X, k = 1, 2, \dots, n$, 则式(12)变为

$$Y_n = A \oplus \{B_k\}; X = [[[A \oplus B_1] \cap X] \oplus B_2] \cap X] \oplus B_3] \dots \quad (13)$$

本文构造的这种测地膨胀称为 A 在 X 中多尺度测地膨胀. 由此可见, 重复测地膨胀是测地膨胀的推广, 而多尺度测地膨胀是重复测地膨胀的推广.

3.2 晶界的恢复与重建

3.2.1 晶界恢复与重建的思路和方法

恢复与重建晶界的关键是对晶粒(包括粘连晶粒)实施准确、有效分割, 使相邻晶粒之间产生晶界线. 整个过程分 4 个步骤:

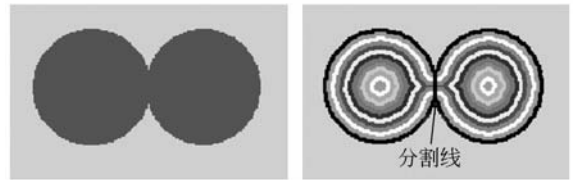
(1) 对原始图像进行预处理, 得到二值图像.

(2) 对二值图像进行距离变换(多尺度迭代腐蚀). 腐蚀反复进行, 每腐蚀一次, 晶粒缩小一“层”, 直到晶粒完全消失之前的一次为止, 最后剩下的即为晶粒的“核”, 如图 3(b)所示. 图中不同颜色代表晶粒被腐蚀掉的各“层”, 其中最里“层”即为“核”. 这里要用数组记录腐蚀的次数和腐蚀的结果.

(3) 计算最终腐蚀集合, 得到晶粒的“种子”. 首先, 从最外“层”开始, 依次对被腐蚀掉的各“层”进行多尺度测地膨胀(在层内反复条件膨胀直至结果不再有变化), 使每一“层”复原(由于膨胀并

不是腐蚀的逆运算, 故这里的复原并不是完全复原). 然后, 计算每一“层”腐蚀前与腐蚀后又复原的结果之差, 这个差相当于图 3(b)中各“层”之间的分界线; 这些分界线和最里“层”的“核”一起构成晶粒的“种子”, 这也是要计算的最终腐蚀集合.

(4) 产生分割线(晶界线). 从最里“层”的“种子”开始, 对“种子”进行条件粗化实现种子区域的生长, 使每“层”复原, 从而使晶粒复原. 在进行条件粗化时, 选用 12 个可限制晶粒之间产生连接的多结构元素, 保证晶粒复原后相互分离, 产生的晶界线(分割线)如图 3(b)中最外层的黑色线所示.



(a) 晶粒 (b) 晶粒分割结果
(a) Grains (b) Results of segmentation

图 3 晶界线产生过程示意图

Fig. 3 Processes of production of grain boundaries

3.2.2 晶界恢复与重建的实现

(1) 金相图像的预处理

首先, 对原始金相图像 I 进行数学形态学运算 $((I \ominus S_1) \oplus S_2) \oplus S_3) \ominus S_4$, 除去图像中的噪声和填充孤立的细小的孔洞. 上述膨胀运算采用小结构元素, 并对膨胀的结果进行线性插值, 以降低灰度膨胀对运算结果的影响. 这里 S_1 和 S_4 取半径为 5 的圆形结构元素, S_2 和 S_3 取半径为 1 的圆形结构元素, 运算结果如图 6(b)所示.

其次, 对去噪与填孔的图像进行 Otsu 处理, 得到最优阈值 $T = 0.5647$, 再按阈值对该图像进行二值分割, 得到二值图像 X , 如图 6(c)所示.

(2) 距离变换

设 B_k 是半径为 r_k 的圆形结构元素, 令 $Y_0 = X, Y_k = Y_{k-1} \ominus B_k (k = 1, 2, \dots, n)$, (14) 这里 $n = \max\{m | Y_m \neq \emptyset\}$ 是多尺度迭代腐蚀的最大次数. 如果每腐蚀一次后将剩余的像素值加 1, 则距离图像(如图 6(d)所示)为

$$J = \bigcup_{k=1}^n Y_k, \quad (15)$$

这里取 $r_1 = 2, r_k = 1 (k \geq 2)$, 算得 $n = 51$.

(3) 计算最终腐蚀集合

假设 $\{B_{kl}\} (k = 0, 1, \dots, n, l \in \mathbf{Z}^+)$ 为半径为

r_{kl} 的圆形结构元素序列,第 k 次多尺度迭代腐蚀的结果为 Y_k ,对 Y_k 进行多尺度测地膨胀,结果为 U_k ,则

$$U_k = (Y_{k+1} \oplus \{B_{kl}\}); Y_k \quad (k=0,1,\dots,n, l \in \mathbf{Z}^+)$$

计算 U_k 的流程图如图 4 所示。

令

$$E_k = Y_k - U_k, (k=0,1,\dots,n) \quad (17)$$

$$K = \bigcup_{k=1}^n E_k, \quad (18)$$

则 K 为最终腐蚀的集合,即“种子”(seed),如图 6(e)所示。结构元素序列的半径要根据金相图像的特点(如晶粒的粗细)来选取,本文取 $r_{01} = 2, r_{kl} = 1(k \geq 1, l \geq 2)$ 。

此外,最终腐蚀中的每一个最终连通成分相当于晶粒的“种子”,对应于距离图像拓扑表面中的山峰区域(极大值区域),其图像如图 6(f)所示。

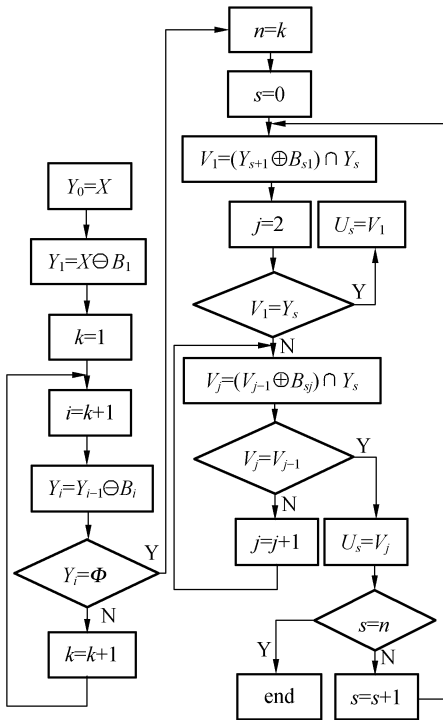


图 4 多尺度测地膨胀流程图

Fig. 4 Flow graph of multi-scale geodesic dilation

(4) 产生分割线

从种子开始区域生长直到恢复原始尺寸但不使各区域相连,本文用如图 5 所示的 12 个多结构元素对种子进行条件粗化。从最终腐蚀的第 n 步结果开始增加像素。首先,将图 5 中的第一个结

构元素的中心与包围种子且与种子相邻的一个像素重合,如果在结构元素分别为 1 和 0 的地方种子区像素也分别为 1 和 0,结构元素为 \times 的地方种子区像素可以是 1 也可以是 0,那么就给与结构元素中心重合的这个像素赋一个值 1,这样种子区域在尺寸上就增加了一个像素。再对其余 11 个结构元素进行同样操作,使种子区像素再增加,种子在对应腐蚀范围内(层内)生长。12 个结构元素都使用一遍后,所得结果是将一个像素宽的区域加在种子周围。对 12 个结构元素全部使用一遍后还可使用第二遍、第三遍,直到该种子区域在对应的腐蚀范围内不再发生变化为止,这时该种子的生长过程结束。每一个结构元素都有 0 像素,在种子生长时,要求结构元素的 0 像素与种子相匹配以避免生长的区域相连接,使晶粒相互分离、产生分割线,如图 6(g)所示。

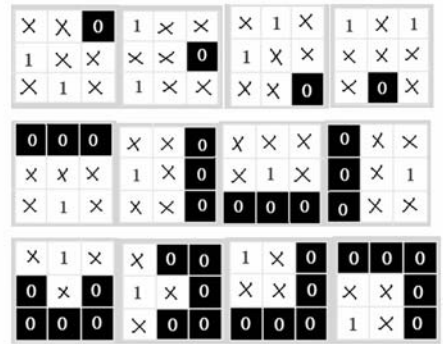
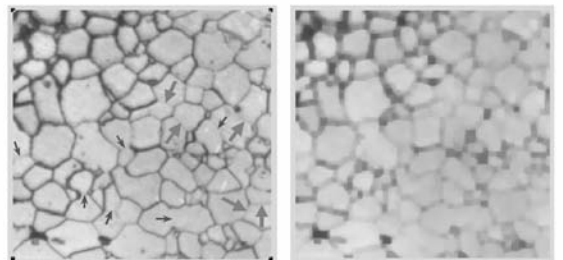


图 5 用于产生分割线的结构元素

Fig. 5 Structural elements applied in segmentation

(5) 对晶界的恢复与重建

用形态学逻辑与运算,将分割线叠加在原始图像上,实现对晶界恢复与重建,结果如图 6(h)所示。

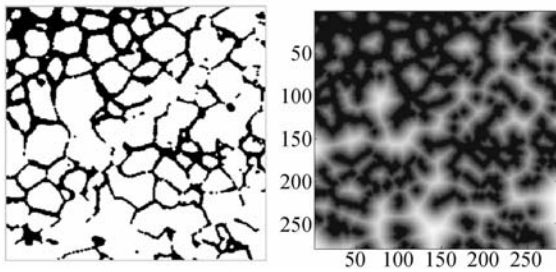


(a) 原始金相图像

(b) 去噪与填孔结果

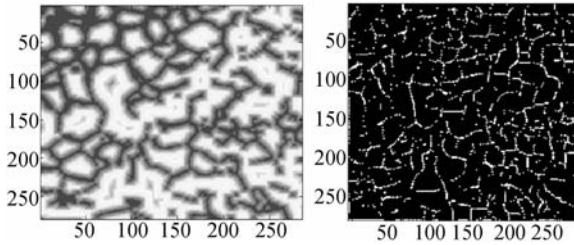
(a) Origin image

(b) Results of eliminating noise and fill holes



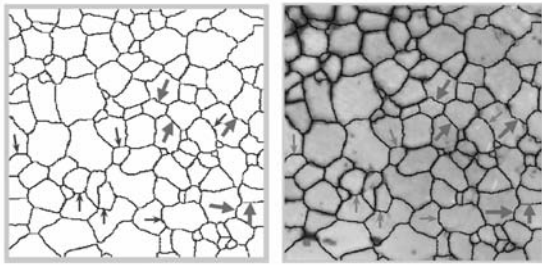
(c) 二值图像 (d) 距离变换结果

(c) Binary image of (b) (d) Results of distant transformation



(e) 最终腐蚀结果 (f) 区域极大值

(e) Results of final erosion (f) Regional maxima



(g) 分割线 (h) 晶界恢复与重建的结果

(g) Results of segmentation (h) Final results

图 6 金相图像晶界恢复与重建结果

Fig. 6 Results of restoration and reconstruction of grain boundaries

在图 6(a),(g),(h)中,大箭头所指晶界是原始金相图像中模糊的晶界,经过本算法处理后,得到了较好恢复;小箭头所指晶界是原始金相图像中丢失的晶界,经过本算法处理后,也已经复原;其它没有标示的晶界是原始图像中比较清晰的晶界,经过本算法处理后,得到了较好的保持。

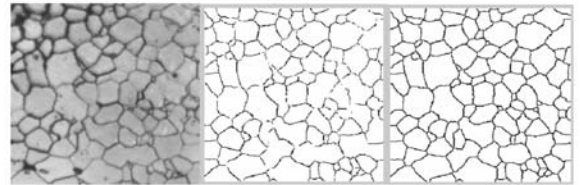
本方法中,在对原始图像进行膨胀运算时采用修改了的定义,消除了运算对金相图像灰度的不利影响,提高了晶界恢复与重建的准确性。此外,在计算最终腐蚀集合时,用多尺度迭代腐蚀取代了传统的单一尺度迭代腐蚀;用多尺度测地膨

胀取代了传统的单一尺度重复测地膨胀,缩短了程序运行时间,提高了图像处理的效率。表 1 给出了采用本文算法与传统的重复测地膨胀完成对第一幅金相图像晶界恢复与重建过程中每一步所用的时间对比,图 7 给出了其结果图像的对比。表 2 给出了用这两种方法完成对第二幅金相图像晶界恢复与重建过程中每一步所用时间对比,图 8 给出了其结果图像的对比。

表 1 两种算法运行时间对比(1)

Tab. 1 Comparison of running time by two algorithms (1) (s)

运行步骤	预处理	距离变换	最终腐蚀	产生分割线	合计
本文算法	28	106	198	311	643
传统算法	15	68	524	477	1084



(a) 原始图像 (b) 传统方法 (c) 本文方法
(a) Origin image (b) Results by traditional methods (c) results by proposed method in this article

图 7 两种方法对金相图像分割结果对比(1)

Fig. 7 Comparison of results by two methods(1)

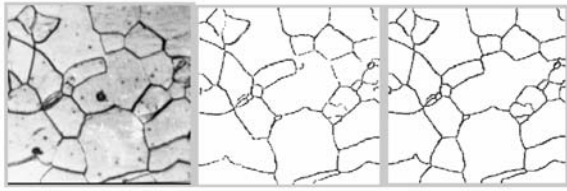
表 2 两种算法运行时间对比(2)

Tab. 2 Comparison of running time by two algorithms (2) (s)

运行步骤	预处理	距离变换	最终腐蚀	产生分割线	合计
本文算法	13	49	96	143	301
传统算法	7	31	253	226	517

此外,分别用 Canny 算法和 Craph-cut 算法对第一幅金相图像实施分割,结果如图 9 所示。

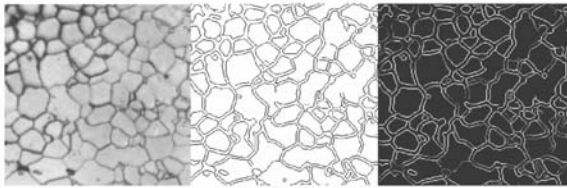
从上述图像可知,与传统测地膨胀方法和 Canny 算法及 Craph-cut 算法相比,本文提出的算法所获取的晶界线更加准确(无双像素边界)、清晰、完整、连续和光滑,过分割和欠分割现象更加少见。



(a) 原始图像 (b) 传统方法 (c) 本文方法
(a) Origin image (b) Results by traditional methods (c) results by proposed method in this article

图 8 两种方法对金相图像分割结果对比(2)

Fig. 8 Comparison of results by two methods(2)



(a) 原始图像 (b) Canny 方法 (c) Graph-cut 方法
(a) Origin image (b) Results by Canny operator (c) Results by Graph-cut

图 9 Canny 和 Graph-cut 算法对第一幅图像分割结果

Fig. 9 Results of segmentation by Canny and Graph-cut

4 结 论

本文从理论上证明了传统膨胀运算对图像灰度连续性的影响及影响程度与结构元素尺度的关系。结果表明,对于圆形结构元素来说,图像中连续的尖峰形灰度经膨胀运算后在顶点处出现断点,在间断点处其灰度突变(减小)的幅度与结构元素的尺寸成正比;而连续的圆弧形灰度经膨胀运算后仍是连续的圆弧形灰度,保持了灰度的连续性。通过选择小尺度的结构元素或修改膨胀运算的定义可减小膨胀运算对连续的尖峰形灰度连续性的影响,降低“削峰”效应。

文中基于改进的膨胀运算的多尺度测地膨胀算法对金相图像进行了晶界恢复和重建,结果表明该方法是一种快速、准确和有效的方法。与传统测地膨胀方法相比,本算法所获取的晶界线更加准确、清晰、完整、连续和光滑,过分割和欠分割现象更少,程序运行速度提高了约 45%,较好地解决了定量金相分析中的难点问题。

参考文献:

- [1] MEBATSION H K, PALIWAL J. A Fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(1):66-74.
- [2] LU B B, CUI M, LIU Q, *et al.*. Automated grain boundary detection using the level set method [J]. *Computers and Geosciences*, 2009, 35(2):267-275.
- [3] 肖春霞, 初雨, 张青. 高斯混合函数区域匹配引导的 Level Set 纹理图像分割[J]. *计算机学报*, 2010, 33(7):1295-1304.
XIAO CH X, CHU Y, ZHANG Q. Texture image segmentation using level set function evolved by Gaussian mixture model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(7):1295-1304. (in Chinese)
- [4] OBARA B. A new algorithm using image colour system transformation for rock grain segmentation [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 91:271-285.
- [5] 汤力琨. 金相组织图像分析中关键算法研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 28-53.
TANG L K. *Research of some key algorithms in metallographic image analysis system* [D]. Graduate Sichuan University, 2005: 28-53. (in Chinese)
- [6] 廖正全, 滕奇志, 罗代升. 合金图像分割算法研究 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(12):3326-3328.
LIAO ZH Q, TENG Q ZH, LUO D SH. Research of metallographic image segmentation algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(12): 3326-3328. (in Chinese)
- [7] 邓仕超, 刘铁根, 萧泽新. 应用 Canny 算法和灰度等高线的金相组织封闭边缘提取 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):2315-2323.
DENG SH CH, LIU T G, XIAO Z X. Extraction of enclosing image edge for metallographic structure based on Canny and grayscale contour line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(18): 2315-2323.

(in Chinese)

- [8] 张俊华,江源源,董怡,等. 基于椭圆形状约束的图切割对颈部淋巴结的超声图像分割算法[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(5):430-434.
ZHANG J H, WANG Y Y, DONG Y, *et al.*. Ultrasonographic segmentation of cervical lymph nodes based on the graph cut with elliptical shape constraint [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2008, 21(5):430-434. (in Chinese)
- [9] TOLOSA S, BLACHER S, DENIS A, *et al.*. Two methods of random seed generation to avoid over-segmentation with stochastic watershed; application to nuclear fuel micrographs [J]. *Journal of Microscopy-oxford*, 2009, 236(1):79-86.
- [10] 袁天云,姜志国,孟如松. 目标分割图中粘连对象的自动切割和分离[J]. 中国体视学与图像分析, 2003,8(1):40-43.
YUAN T Y, JIANG ZH G, MENG R S. Automatic splitting and separating overlapped objects in target-segmented image [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2003,8(1):40-43. (in Chinese)
- [11] 李新城,王有鹏,朱伟兴,等. 基于形态学的金相组织图像晶界复原方法[J]. 计算机工程与设计, 2008,29(14):3807-3809.
LI X CH, WANG Y P, ZHU W X, *et al.*. Metallurgical microstructure image restoration method based on morphology [J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29 (14): 3807-3809. (in Chinese)
- [12] 刘双科,王建飞. 材料显微组织中的晶界识别与提取[J]. 中国体视学与图像分析, 2008, 13(2): 134-137.
LIU SH K, WANG J F. Recognition and edge-extraction of grain boundary in materials' microstructure [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2008, 13(2):134-137. (in Chinese)
- [13] 章毓晋. 图像工程(中册)图像分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:367-428.
ZHANG Y J. *Image Processing (II) Image Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:367-428. (in Chinese)
- [14] 夏涛,黄士科,陈海清. 基于局部灰度分析的红外图像轮廓跟踪算法[J]. 激光与红外, 2006,36(2): 151-154.
XIA T, HUANG SH K, CHEN H Q. Contour tracking for infrared image based on the characteristic analysis of the local gray level [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(2):151-154. (in Chinese)
- [15] WANG X S, QI D W, LI Y X. Edge detection of decayed wood image based on mathematical morphological double gradient algorithm [C]. 2008 *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008,1(6):1226-1231.
- [16] JIANG J A, CHUANG C L, LU Y L, *et al.*. Mathematical-morphology-based edge detectors for detection of thin edges in low-contrast regions [J]. *Institution of Engineering and Technology Image Processing*, 2007,1(3):269-277.

作者简介:



蒋明星(1960—),男,湖南宁远人,博士研究生,讲师,主要从事工业安全与风险评价技术、金相图像处理技术的研究。E-mail:Jiang-mx-scau@163.com



陈国华(1967—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,1996年于南京化工大学获得博士学位,主要从事工业安全与风险评价技术、安全管理信息系统等领域的教学和科研工作。E-mail:mmgh-chen@scut.edu.cn