

文章编号: 1007-1482(2008)02-0134-04

· 论著 ·

材料显微组织中的晶界识别与提取

刘双科, 王建飞, 司顺阁, 李建福, 韩静涛

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 本文针对材料制备、加工和热处理过程中涉及材料显微组织晶界结构的识别与提取问题, 采用晶界特征提取、晶界断点修复等形态学图像处理方法, 获得了晶界特征和晶粒几何形态学信息, 并建立了相应的图像定量分析及数据库。

关键词: 晶界; 图像分析; 材料显微组织

中图分类号: TG 115.21

文献标识码: A

Recognition and edge-extraction of grain boundary in materials
microstructure

LIU Shuangke WANG Jianfei SI Shunge LI Jianfu HAN Jingtao

(Beijing University of Science and Technology Beijing 100083, China)

Abstract: All of material preparation, processing and heat-treatment are related to microstructure evolution of materials. The quantitative information of microstructure materials is very important in present technology processing. A method of quantitative image processing techniques such as edge-extraction and breakpoint repairing was established by original image of PZT microstructure and a database of geometrical morphology information of microstructure was obtained.

Key words: grain boundary; image analysis; microstructure

由于加热炉的复杂性, 数学模拟是加热炉研究和预测的主要手段。目前的模型对加热炉炉腔温度分布的预测较好, 但是对于加热料坯内部温度分布的预测, 还存在较大的差异。因而这个问题近年引起了多数学者的关注^[1-3]。从材料显微组织与传热关系的角度出发^[4], 以材料内部晶粒为传热单元, 研究加热过程料坯内部传热机制是解决加热料坯内部温度预测的重要途径之一。因此, 有必要充分研究金相组织结构特征, 以提供材料制备、加工和热处理过程的许多定性和定量信息^[5], 从而达到提高料坯加热质量, 降低炉子燃料消耗的目的。

本文将对 PZT 陶瓷材料的显微组织原始图像, 采用形态学图像处理方法, 增强晶界和修复晶界断点, 然后提取包括晶界特征, 晶粒分布, 晶粒形状、大小, 晶粒的取向等的几何形态学信息, 并建立有序晶

粒的几何形态学信息数据库, 以期用于料坯内部传热机制研究。

1 晶界的增强及其二值化

材料显微组织特征分析包括晶粒分布, 晶界的特征, 晶粒形状、大小, 晶粒的取向, 以及晶粒内出现的亚结构等。图像处理与分析技术, 特别是形态学图像处理技术, 被认为是材料晶粒组织分析的有效方法。形态学图像处理技术, 是基于描述图像基本特征和基本结构的元素与元素、部分与部分间的关系理论, 以实现以对图像的增强、分割、边缘检测、结构分析及界线填充等处理。图 1 是组分为 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 的 PZT 陶瓷合金材料。在 800℃ 烧结温度时, 通过 SEM 电镜扫描得到的截面原始灰度图像。图 1 中部的白色长虚线所示位置是图 2 中

收稿日期: 2008-02-18

作者简介: 刘双科 (1962-), 男, 陕西凤翔人, 博士, 北京科技大学副教授, 主要从事多相流与图像技术的研究。

E-mail: liusk@me.ustb.edu.cn

原始图像灰度分布曲线的数据提取位置^[6]。图2中虚线所示的灰度曲线显示的若干分叉波峰对应于原始图中的相应的晶粒分界处的灰度分布,可以看出图1原始图像中晶界灰度变化与图2中虚线所示的若干分叉波峰相一致,晶界处的这种灰度分布的双叉峰的存在说明,原图的灰度分布曲线不足以准确确定晶界中心线位置。

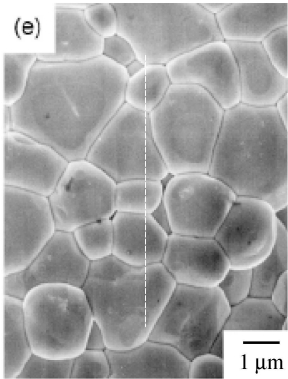


图1 PZT材料显微组织原始图像 (172×224×8 bit)

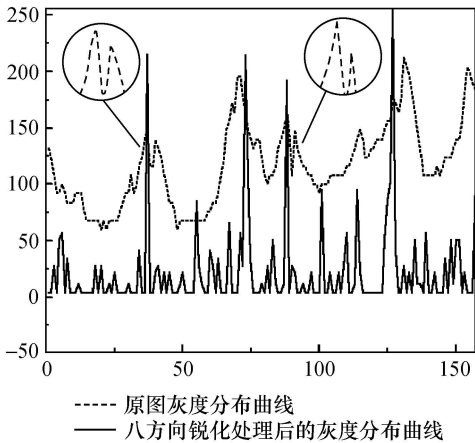


图2 八方向锐化处理前后的灰度分布比较

八方向锐化处理方法就是采用梯度值法进行锐化和增强晶界。梯度值就是图像灰度在其最大灰度变化率方向上的单位距离所增加的灰度量。本文采用一种简单的高频滤波增强方法,即罗伯特(Roberts)的梯度公式。

$$G(x,y)=\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\approx$$
$$|f(x,y)-f(x+1,y)|+|f(x,y)-f(x,y+1)|$$
(1)

式(1)中, $f(x,y)$ 表示原图中像点的灰度, $G(x,y)$ 表示晶界锐化增强后输出图像中像点的灰度, $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)$ 和 $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)$ 分别表示 x 方向和 y 方向各自的相邻像素的灰度差值。式(1)表示当原始图像灰度变化缓慢的晶

粒内部,其输出图像锐化增强的幅度很小;而在晶界所在像素附近,由于灰度变化较大,通过式(1)计算的锐化增强值也较大。通过图像锐化处理可以使晶界的轮廓线,包括图像的噪声等细节都会变得更清晰,从而达到锐化增强的目的。

图3是经过八方向锐化增强后的图像,图中部的白色长虚线是图2中实线所示的灰度变化曲线数据的提取位置,图3处理过程采用的八方向锐化模板如(2)式所示。

$$H=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$
(2)

把原始图像图1经过八方向锐化增强后,变为晶界限较为分明的图3所示的图像;本文选择八方向锐化处理方法,可以从图2所示的虚线表示图1中部的白色的长虚线所示的原始图像灰度分布曲线,与八方向锐化处理后的灰度分布曲线的对比,说明采用八方向锐化处理后,原始图像中晶界的灰度分布双叉波峰,锐化成为梯度很大的单峰波形,而且单峰顶点对应于接近256灰度级的一个白色像素,由单峰顶点划分的晶粒分界线,也形成了如图3所示的由单一白色像素组成的白色晶界线划分的金相组织图像。然而,锐化也增强晶界线以外的噪声,这些被增强的噪声需要消除。

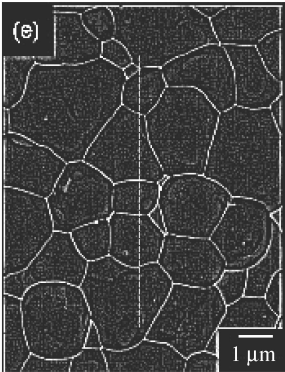


图3 八方向锐化处理后的结果 (172×224×8 bit)

为了便于晶界及晶粒定量信息的提取,有必要把灰度图转化为二值图。图4是灰度图图3的二值化的结果,其阈值分割采用迭代求最佳阈值的方法,该方法按下式进行迭代,即

$$T_{i+1}=\frac{1}{2}\left\{\frac{\sum_{k=0}^{T_i}h_k\cdot k}{\sum_{k=0}^{T_i}h_k}+\frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1}h_k\cdot k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1}h_k}\right\}.$$
(3)

式(3)中,初始阈值 T_0 取图像灰度分布的中值, L 为图像中灰度级总数。另外, k 为灰度值, h_k 为灰度为

k 值的像素数。式(3)迭代结束的条件,当 $T_i+1=T_i$ 时的 T_i 的值,定为分割阈值。图 4 中存在点状椒盐噪声,可以采用中值滤波器、形态学滤波器等不同的方法除去;但是为了保存线状晶界以及类似线状的晶粒内亚结构等有用信息,本文采用只消除斑点的斑点擦除法,该方法采用 8 连通邻域像素模型对图 4 进行边缘搜寻,把边缘封闭的斑点像素数与先设定的斑点像素阈值进行比较,其阈值设定为 3 个像素。小于给定阈值的斑点直接擦除,大于给定阈值的斑点保留。如图 5 所示,既消除了噪声斑点,又保留了晶粒内部类似棒状的亚结构信息。

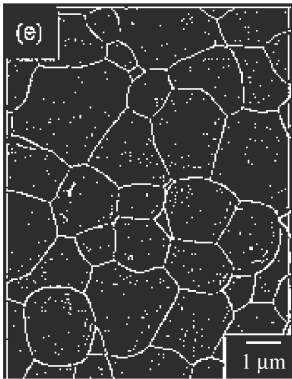


图 4 对图 3 阈值分割的处理结果

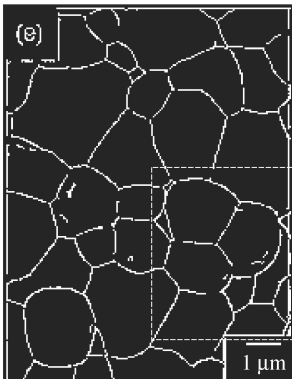


图 5 对图 4 消除噪声后的结果

2 晶界的断点修复

由于材料显微组织演变过程晶粒结构发展的不完整性以及观察样品制备精度等问题,使得材料显微组织图像存在晶界模糊、小晶粒或晶粒内的亚结构难以辨认等问题,因而晶界的边缘提取和晶粒分割是包括材料显微组织图像处理在内的所有具有纹理特征图像处理的难题。

一个封闭的晶粒边界和连接不间断的晶格结构是提取材料显微组织晶粒结构特征的前提。然而,图 5 所示的二值化图像,粗略勾画出了晶界,但是存

在多处断点,需要修复;图中右下方的白色虚线框所划定区域是图 6 所选择的断点修复区域。本文采用形态学图像处理方法中的膨胀与腐蚀的技巧,即先膨胀使得断点接合,然后再腐蚀,腐蚀细化到只保留膨胀边界的一个像素组成的中间线。图 5 是膨胀处理过程中的图像例,如图所示暂时间断的晶界,随着继续膨胀,可以使其连接缝合;但是,膨胀的结果会使相邻晶粒发生如图 6 所示的粘连现象,需要进行分离处理。图 6 是对粘连的晶粒,通过腐蚀细化进行分离处理过程的图像例。

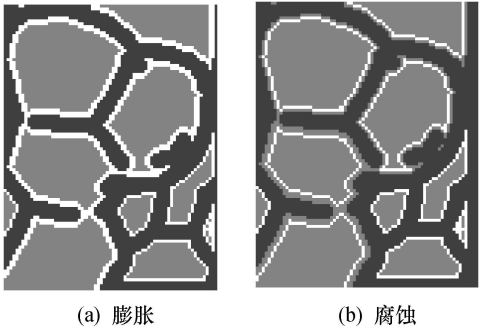


图 6 对图 5 局部膨胀与腐蚀的处理结果

3 晶粒空间分布及其标记

对材料显微组织的晶粒、组织生成物等的数量、形貌、大小、分布、取向等的观察和研究,有助于反映和表征复杂的材料显微组织。这些特征量的分析与统计,需要显微组织中各个晶粒的形貌特征、类别数量、大小分级、位置分布,以及长大过程的晶粒追踪测量等。图 7 是晶粒识别与修复后的结果,如图 7 所示,符号“+”的位置表示包括图像周边不完整晶粒在内的所有晶粒的形心位置,如图 8 所示,每一个晶粒进行标记编号,并按编号自动建立每一个晶粒几何形态学数据文件库。该文件中的晶粒数据有:晶界边界点的坐标,晶粒的形心坐标、晶粒的面积、晶粒的边界周长。

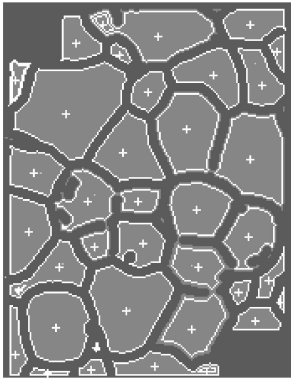


图 7 晶粒结构识别与修正的结果

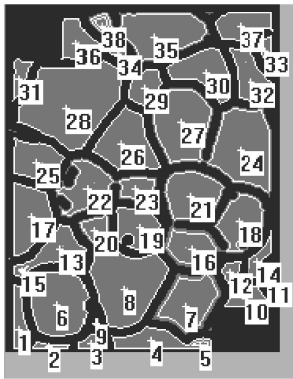


图 8 晶粒标记结果

4 晶粒的几何形态学数据库建立

研究加热料坯组织演化—传热之间关系时，建立以晶粒为传热单元的机理模型，需要料坯组织结构中每一个晶粒的几何形态学数据信息。因此，建立晶粒的几何形态学数据库是需要的。表 1 是依据图 8 中的晶粒编号，列出的完整晶粒的几何形态学信息列表。

表 1 序列晶粒信息库

序号	面积 (μm^2)	周长 (μm)	等效直径 (μm)	分布坐标
6	3.45	74	23.57	(1.33, 9)
7	2.5	50	15.93	(5.12, 9)
8	5.5	34	10.83	(3.33, 8.52)
12	2.48	56	17.83	(6.57, 8)
13	0.74	34	10.83	(1.48, 7.29)
18	1.84	48	15.29	(6.76, 6.38)
19	0.5	24	7.64	(3.81, 6.12)
20	2.56	50	15.92	(2.42, 6.71)
21	2.46	54	17.2	(5.38, 5.66)
22	0.8	30	9.55	(2.24, 5.48)
23	3.75	76	24.2	(3.67, 5.38)
26	3.5	62	19.74	(3.24, 4)
27	3.6	28	8.92	(5.09, 3.33)
28	7.2	26	8.28	(1.57, 3)
29	2	54	17.2	(4.09, 2.29)
30	0.9	30	9.55	(5.81, 1.81)
32	0.4	23	7.32	(7.19, 2.09)
34	4.06	38	12.1	(3.19, 1.24)

5 结论

材料制备、加工和热处理过程中涉及到材料显微组织演变以及晶界特征的识别与提取问题，本文通过形态学图像处理方法对 PZT 陶瓷合金材料的显微组织图像进行了处理，得到下面的结论：

- (1) 材料组织原始图像灰度变化分析表明，晶粒间的晶界存在灰度分布波峰顶部的分叉现象，这一现象表明晶界的材质结构和光学图像结构需要进一步研究。
- (2) 八方向锐化处理方法可以较好的避免了因原始图像中晶界灰度变化曲线呈分叉波峰而带来难以确定晶界中心线的问题。在此预处理基础上，采用膨胀与腐蚀等形态学图像处理方法，可以实现对晶界的识别与提取。
- (3) 所建立晶粒及晶格的几何形态学数据库，提供了部分材料组织的定量化信息。

参考文献：

[1] 程秀玲,李胜玉,单水维.基于软测量的钢坯内部温度场分布研究[J].南方金属, 2007, 158: 11—13.

[2] 蒋受宝,蒋绍坚,彭 锐,等.钢坯加热温度特性数学解析[J].工业炉, 2008, 30(1): 23—2

[3] Qiang Yu, Sven K. Esche. A multi-scale approach for microstructure prediction in thermomechanical processing of metals[J]. J Materials Processing Technol. 2005, 169: 493—502.

[4] Yu W, Banks P, Palmiere EJ. cellular automata modeling of grain coarsening during reheating-2 abnormal grain growth [J]. J Univ Science Technol. 2005, 12 (1): 26.

[5] 刘国权,刘胜新,黄启今,等.金相学和材料显微组织定量分析技术[J].中国体视学与图像分析, 2002, 7 (4): 248—251.

[6] 刘双科,王建飞,朱彩兰,等.颗粒成像特性的研究[J].中国体视学与图像分析, 2006, 11(1): 45~48.