

融合异质刺激过滤的金相图像等轴 α 相识别^①

窦 燕^{②*} 王丽盼^{**} 张启飞^{***}

(^{*} 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

(^{**} 燕山大学河北省软件工程重点实验室 秦皇岛 066004)

(^{***} 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 针对钛合金金相图像存在噪声、晶界 α 相和片层组织与等轴 α 相颜色极为相似而导致“误识别”的问题,提出了一种融合异质刺激过滤的金相图像中等轴 α 相识别算法。该算法主要包含两大部分:(1)结合数学形态学和异质刺激理论设计实现了异质刺激模板,对晶界 α 相和片层组织进行了有效的过滤;(2)提出了一种结合距离变换和数学形态学的前景和背景标记方法,对等轴 α 相和其他组织进行了精确的标记,利用标记分水岭算法对金相等轴 α 相进行识别。实验结果表明,该算法过滤了金相图像中大部分的晶界 α 相和片层组织,并最大程度地降低了对等轴 α 相边缘区域的影响。与大津算法、最大熵算法、模糊 C 均值聚类算法对等轴 α 相的识别效果相比,本文算法提高了等轴 α 相的识别准确率。

关键词 金相图像识别; 异质刺激; 数学形态学; 标记分水岭算法

0 引言

微观组织形态是金属材料宏观性能的决定性因素,基于表面腐蚀和光学摄影的金相图像是金属材料微观组织形态分析中应用最广泛的手段^[1],随着图像处理技术的引入和发展,金相图像分析的过程不断简化,在一定程度上避免了人工评定带来的主观误差^[2]。国内外学者已将多种图像处理算法运用于金相图像的识别,包括神经网络算法^[3,4]、聚类算法^[5]、分水岭算法^[6]等。图像分割算法是金相图像组织识别的研究方向之一,其中分水岭算法具有复杂度低、易拓展等特点,且识别出的组织轮廓是闭合的,在图像分割领域深受青睐。分水岭算法是一种基于拓扑理论的数学形态学分割算法,通常将图像看作是一幅地形图,某个像素的灰度值看作是该像素位置处的“海拔高度”,每一个局部灰度极小值

的聚集区域即为某个组织区域,组织区域的边界即为分水岭。肖闻宇等人^[7]针对硬质合金图像组织粘连的问题,提出了基于数学形态学的标记分水岭算法。针对铁谱图像中磨粒的识别问题,Wang 等人^[8]提出了一种结合标记分水岭和改进的灰度聚类的融合方法,但上述算法处理的图像中不存在和目标组织相似的其他金相组织结构,因此进行目标组织的识别可以取得较好的效果。

为了解决多种灰度值相似的组织共存时的金相图像识别问题,本文提出了融合异质刺激过滤的金相图像等轴 α 相识别算法,利用形状等纹理特征过滤与目标组织相似的其他金相组织结构,然后对前景和背景区域进行智能标记,并利用标记分水岭算法进行识别提取。实验表明,该算法有效地解决了非目标组织的干扰问题,提高了金相图像识别的准确率。

① 国家自然科学基金(51675467)和河北省自然科学基金(E2019203560)资助项目。

② 女,1968 年生,博士,教授;研究方向:机器视觉与模式识别;联系人,E-mail: douyan@ysu.edu.cn
(收稿日期:2020-09-09)

1 图像分析与预处理

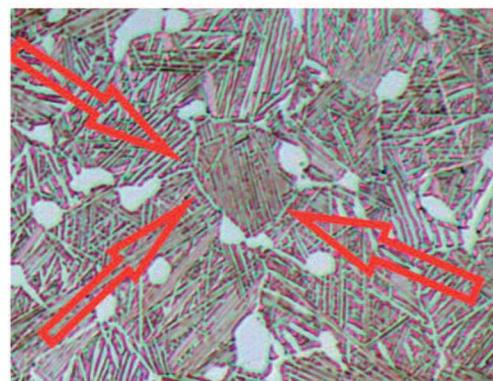
TA15 钛合金金相图像中存在两种组织:等轴 α 相和 β 相转变组织。等轴 α 相是本文需要识别出的目标组织。 β 相转变组织由晶界 α 相、残余 β 相和片层组织组成。在 β 相转变组织中,晶界 α 相存在于等轴 α 相之间的狭长连接区域,时有时无且有时断裂;残余 β 相极其微小,需要特殊的手段才可以检测出来,在本文的目标组织识别中几乎无影响。在制备金相图像的过程中,由于热变形过程中的不完全溶解以及冷却速度不同的原因,依据片层组织的厚度大致可划分为 3 种形态,即粗大片层组织、针状片层组织和细针状片层组织。晶界 α 相和片层

组织(下文统称“干扰组织”的灰度值和等轴 α 相的灰度值相似,是造成等轴 α 相识别困难的主要原因。

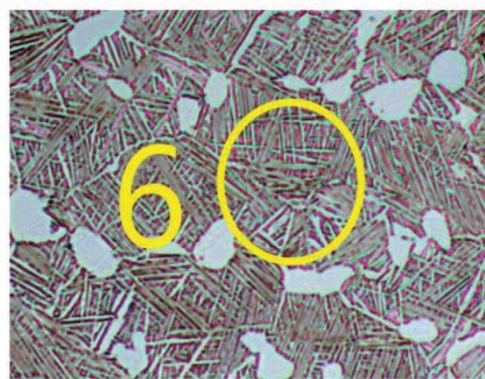
图 1 所示为 TA15 钛合金金相图像,其中图 1(a)为 TA15 钛合金金相图像的完整图像,尺寸为 2560×1920 像素,其中白色块状组织即为目标组织等轴 α 相,箭头指向的组织为“晶界 α 相”,对应的放大图像如图 1(b)所示。标号 1~5 的圆圈、标号 6 的圆圈、标号 7 的圆圈内的组织分别为“粗大片层组织”、“针状片层组织”、“细针状片层组织”,针状和细针状片层组织对应的放大图分别如图 1(c)和图 1(d)所示,放大图像的尺寸均为 640×480 像素。



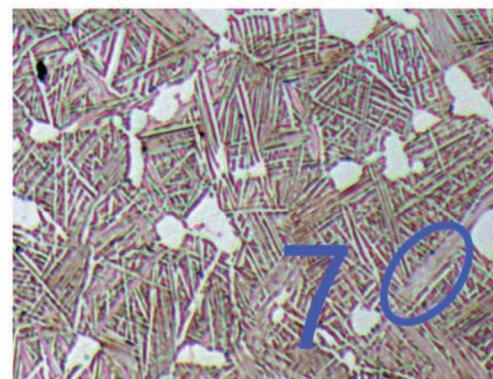
(a) TA15 钛合金金相图像完整图



(b) 晶界 α 相



(c) 针状片层组织



(d) 细针状片层组织

图 1 TA15 钛合金金相图像

在任意的图像中几乎都存在噪声,而噪声在图像识别任务中会降低识别准确率,因而需要进行去除噪声的预处理操作。在 TA15 钛合金金相图像

中,除了普遍存在的高斯噪声外,由于腐蚀不均匀和溶解过程中组织和杂质的不完全溶解,组织的边缘粗大、断裂,组织内部存在黑色的“斑点”。

对图 1(a)进行多种滤波处理,通过峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)、结构相似性(structural similarity, SSIM)两项评价指标评价滤波效果。滤波方法有高斯滤波、中值滤波和双边滤波,各个指标数值如表 1 所示。从计算结果来看,双边滤波在 PSNR 和 SSIM 两个指标中最大。

表 1 滤波效果评价指标

滤波算法	PSNR/dB	SSIM/dB
高斯滤波	27.3352	0.8753
中值滤波	29.1740	0.8972
双边滤波	30.8900	0.9224

双边滤波是一种结合了空间邻近度和像素灰度值相似度的一种折中处理。因此为了尽可能在保留边缘信息的前提下去除噪声,弱化边缘和黑色“斑点”对金相图像组织识别的影响,本文选取双边滤波进行去噪声处理,效果如图 2 所示,其中图 2(a)、图 2(b)分别为完整滤波效果图和矩形框区域的放大示意图。

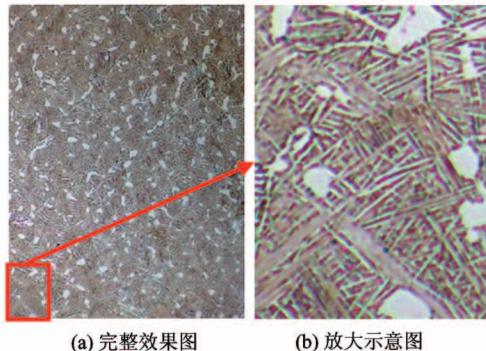


图 2 双边滤波效果图

2 本文方法

金相图像种类繁多、复杂多样,图像中一般包含两种或者两种以上的组织。应用标记分水岭算法进行等轴 α 相识别时,为了准确识别某一特定的组织,不仅需要对前景和背景进行准确的标记,还需要依据干扰组织的“长条型”形状特征进行有效过滤,简要流程如下。

首先对金相图像进行去除噪声预处理;然后结

合数学形态学和异质刺激的原理构造过滤模板,对干扰组织进行过滤处理;最后计算预处理的滤波图像的梯度图,利用前景和背景标记图进行分水岭变换识别出等轴 α 相。本文算法的流图如图 3 所示。

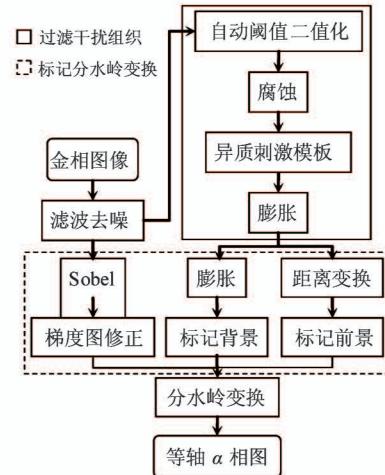


图 3 算法流程图

2.1 干扰组织过滤

在 TA15 钛合金金相图像中,等轴 α 相是需要识别出的目标,视之为前景,其他区域则视为背景。本文使用大津算法^[9]处理图 2 得到二值图像,如图 4 所示,其中图 4(a)、图 4(b)分别为二值图像的完整效果图和矩形框区域的放大示意图,白色区域表示前景,黑色区域表示背景。

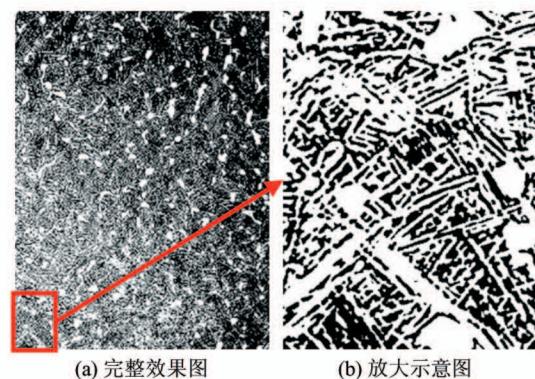


图 4 二值图

可以发现前景区域中包含了干扰组织,因此需要对前景区域中的干扰组织进行过滤。由于等轴 α 相呈现块状,干扰组织呈现“长条型”,而数学形态学是基于形状的一系列图像处理方法,所以本文采用基于数学形态学过滤干扰组织。最基本的形态学

操作有两种,分别是腐蚀和膨胀。腐蚀和膨胀算法组合使用可以过滤掉线型区域和小面积的黑色“斑点”,具体方法为:(1)先腐蚀,过滤干扰组织等干扰信息;(2)再膨胀,恢复等轴 α 相被损坏的边界信息。

腐蚀是将图像与核进行卷积,核的中心点对应的位置的像素值设置为“在限制条件下求得核所覆盖区域的最小值”,其中限制条件为当核覆盖区域像素值均为 1 时,中心点像素值才设为 1,否则中心像素设为 0。膨胀是腐蚀的反操作,将图像与核进行卷积后,核的中心点对应位置的像素值为“核所覆盖区域的最大像素值”,即核覆盖区域的像素值存在 1 时,中心点像素就设为 1。此处的像素值“1、0”对应图像中的白色区域、黑色区域。用核 K 对图 I 进行腐蚀和膨胀的数学表达式分别如式(1)、式(2)所示。

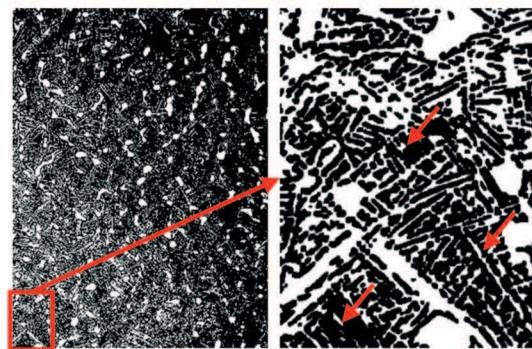
$$I \ominus K = \{(x, y) \mid (K)_{(x, y)} \subseteq I\} \quad (1)$$

$$I \oplus K = \{(x, y) \mid (\hat{K})_{(x, y)} \cap I \neq \emptyset\} \quad (2)$$

式中, x 、 y 分别为图像中某位置点所在的行数和列数, (x, y) 表示和核 K 符合条件的位移。核卷积模板 K 的形状有矩形、十字型、椭圆形,大小一般为奇数边长的正方形,在其内部用数字 1 构造相对的形状,即形状内的像素值设为 1,形状外的像素值设为 0。

对图 4(a) 进行腐蚀的效果如图 5 所示,进行膨胀的效果图如图 6 所示,其中图 5(a) 和图 6(a)、图 5(b) 和图 6(b) 分别为各自的完整效果图和矩形框区域的放大示意图。

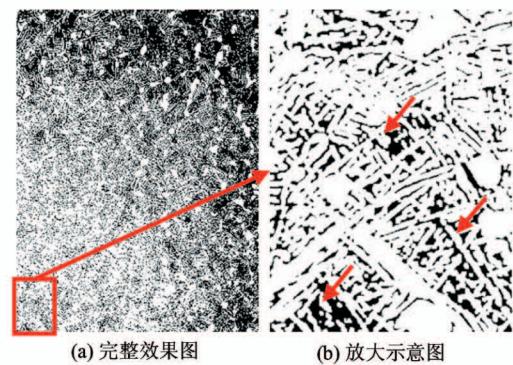
观察图 5 和图 6 中箭头指向的位置,可以发现腐蚀操作后,图中残留了众多属于干扰组织的细小



(a) 完整效果图

(b) 放大示意图

图 5 腐蚀效果图



(a) 完整效果图

(b) 放大示意图

图 6 膨胀效果图

圆点和线条,使得膨胀恢复等轴 α 相边缘信息的同时未能有效过滤掉干扰组织。

2.2 异质刺激过滤模板

为了进一步过滤这些小圆点和细线条,本文引入格式塔理论中的异质刺激^[10]的概念,即在接近闭合或闭合的区域内部绝对是同质的,则在该区域内部的不同的物质,将其记为“异质”,该异质会成为刺激眼球的焦点物质,其过程被称为“异质刺激”。基于异质刺激的概念,本文构建了一个两条互相垂直的最长直径大小为 7×7 的异质刺激模板。以核卷积模板为基础,从两个方面融入“异质刺激”理论:模板形状,是一个类圆形模板,可覆盖 37 个像素点;模板像素值,由外向内共 4 层,各层的像素值分别为 1、2、3、4。异质刺激模板如图 7 所示。

		1	1	1		
	1	2	2	2	1	
1	2	3	3	3	2	1
1	2	3	4	3	2	1
1	2	3	3	3	2	1
	1	2	2	2	1	
	1	1	1			

图 7 异质刺激滤波模板

在等轴 α 相识别中,“异质”为 TA15 钛合金金相图像中干扰进行“等轴 α 相”识别的干扰组织,采用上述的异质刺激模板沿图像进行漂移过滤,将模板中的“异质”过滤掉。由于干扰组织的形状属长

条型,为了更好地过滤干扰组织,被判定为“异质”的组织通常存在两种闭合状态,即接近闭合状态和理想闭合状态。如图 8 所示,图中数字 1 代表白色,0 代表黑色,外边框围绕区域为异质刺激过滤模板覆盖区域,内边框围绕的区域是模板覆盖区域的“异质”。其中图 8(a)是接近闭合状态的一种情况,图 8(b)是理想闭合状态。

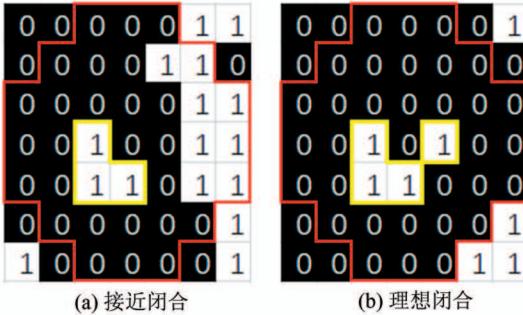


图 8 闭合状态图

本文依次按照以下两条准则判断闭合状态,当两条准则同时满足时,“异质”才会触发算法中的异质刺激效应而被过滤掉。

(1) 层内同质。最外层和次外层的点集合内的像素值分别收敛,收敛度量值定义如式(3)所示。

$$Conv_i = \frac{\sum_{v \in V_i} v}{N_i} \quad (3)$$

其中, i 表示层数,由外向内层号分别为 1、2、3、4; v 表示像素值, V_i 表示第 i 层的点的像素值集合; N_i 表示异质刺激模板第 i 层的点的数量,各层数值见式(4), V_i 表示异质刺激模板的第 i 层覆盖区域的像素值集合,定义如式(5)所示。

$$N_{1-4} = 16, 12, 8, 1 \quad (4)$$

$$V_i = \{I(x + m, y + n) \mid (m, n) \in D_i\} \quad (5)$$

其中, D 代表异质刺激模板,则 D_i 表示异质刺激模板第 i 层的数值集合。

(2) 层间同质。最外层和次外层的像素值的相似程度,相似程度的度量值定义如式(6)所示。

$$similar = |Conv_1 - Conv_2| \quad (6)$$

利用异质刺激模板对图 4 的二值图中的干扰组织进行过滤的效果如图 9 所示,其中图 9(a)、图 9(b)分别为完整过滤效果图和矩形框区域的放

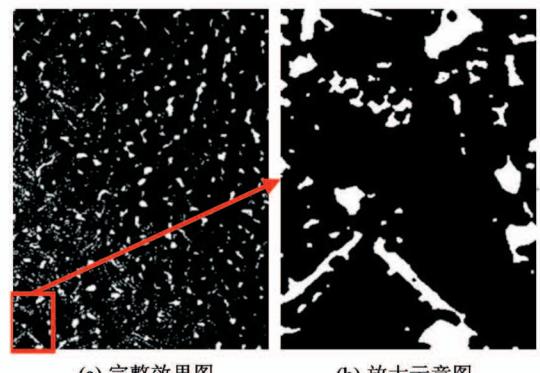


图 9 最终过滤效果图

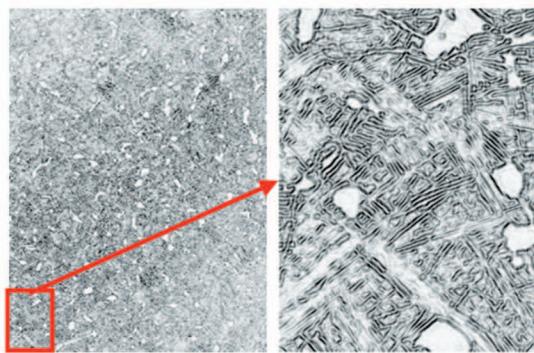
大示意图。

与图 6 的数学形态过滤效果图进行比较,可以看出本文构造的异质刺激模板对干扰组织有明显的过滤效果。“异质”物质存在的接近闭合状态是理想闭合状态的一个过渡状态。实验过程中的图像中白色区域的像素值为 255, 黑色区域的像素值为 0, 因此收敛度量值和相似度量值的值域均为 [0, 255]。当相似度量值为 0 时, 代表相最高相似度, 数值越大, 相似度越低。大量实验发现, 当干扰组织的收敛域和相似域的下限分别大于 20 和 100 时, 等轴 α 相的边缘区域也会被过滤掉; 当收敛域和相似域的上限分别小于 3 和 50 时, 对干扰组织的过滤效果并不明显。

2.3 标记分水岭识别

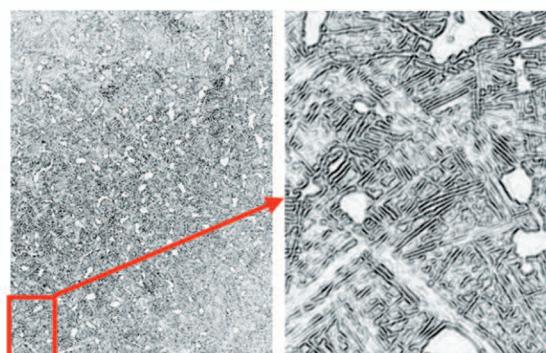
在对分水岭算法应用的研究中发现, 将分水岭算法应用在梯度图像上比直接应用在原始图像上, 可以得到更精确的识别结果^[11]。由于 Sobel 算子结合了高斯平滑和微分求导, 更具有抗噪性, 所以选用 Sobel 算子计算滤波图像的梯度图。此外, 滤波图像为了尽可能保留边缘信息仍留有部分噪声, 需要进一步减少梯度图像中的噪声, 本文采用文献[12]中的基于信息熵最大的梯度图修正算法。Sobel 梯度图、修正梯度图如图 10、图 11 所示, 其中图 10(a)、图 10(b)为 Sobel 梯度图的完整效果图和矩形框区域的放大示意图, 图 11(a)、图 11(b)分别为修正梯度图的完整效果图和矩形框区域的放大示意图。

基于标记图的方法可以直接有效地抑制分水岭算法的欠分割、过分割问题^[13], 即“欠识别”和“过



(a) 完整效果图 (b) 放大示意图

图 10 Sobel 梯度



(a) 完整效果图 (b) 放大示意图

图 11 修正梯度图

识别”问题。标记图一般应用于二值图像中,目标为白色,背景为黑色,对应的灰度值分别为 255、0。标记方式主要有数学形态学^[14]和距离变换等。前者可以分别对前背景进行标记,但误差较大;后者可以精确地标记高灰度值目标的核心区域,但不能对背景进行标记。为了集合两者的优点,本文提出了一种基于数学形态学和距离变换的融合标记方法,分别对背景和前景进行标记,具体方法如下。

对二值图进行距离变换得到距离图像并归一化,查找轮廓得到目标核心区域,即为前景标记图,

其中目标和背景标记值分别为 128、0;对二值图进行膨胀,等轴 α 相的区域会膨胀,标记此时图像中依旧为黑色的区域为背景,其中目标和背景标记值分别为 0、255;最后叠加前景标记图和背景标记图,得到最终标记图,其中目标标记值为 128、背景标记值为 255、不确定区域标记值为 0。标记图示例如图 12 所示,图 12(a)、(b)、(c) 分别是前景标记图、背景标记图、最终标记图,图中分别包含上下两张图像,箭头指向的图像为矩形框区域的放大示意图。

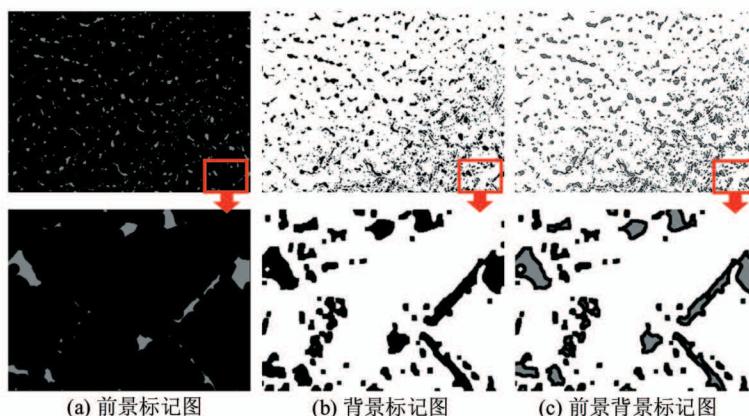


图 12 标记图示例

3 实验结果分析

本文的实验平台 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-6500 CPU @ 3.2 GHz, 操作系统为 Windows 7 旗舰版, 运行环境为 Visual Studio 2013 和 OpenCV 3.0, 语言为 C++。

3.1 标记分水岭对比实验

为了方便展示, 本文使用超像素均匀标记法、距离变换标记法、数学形态学标记法、本文融合标记法, 共 4 种标记方法对小尺寸的 TA15 钛合金相图像进行标记, 尺寸为 512×512 像素, 如图 13(a) 所示, 将得到的标记图应用于分水岭算法得到组织轮廓图分别如图 13(b)、(c)、(d)、(e) 所示。可以

发现超像素均匀标记法出现了严重的过识别问题,距离变换标记法的欠识别问题严重,均不能有效识别出目标区域;数学形态学标记法较为精确地识别出了目标区域,但同时识别出了众多不是目标的小区域,本文融合标记法在一定程度上减少了非目标区域的过识别问题。

为了验证本文算法用于金相图像等轴 α 相识别的优越性,将本文算法与 GT (ground truth) 图、大

津算法、最大熵算法、模糊均值聚类算法进行等轴 α 相识别的效果比较,如图 14 所示。图中分别包含上下两张图像,箭头指向的图像为矩形框区域的放大示意图。图 14(a) 为要处理的 TA15 钛合金金相图像原图,图 14(b) 为手工绘制的 GT 图,上述算法的识别效果分别对应图 14(c)、(d)、(e)、(f),可以发现本文算法对等轴 α 相可以进行有效识别。

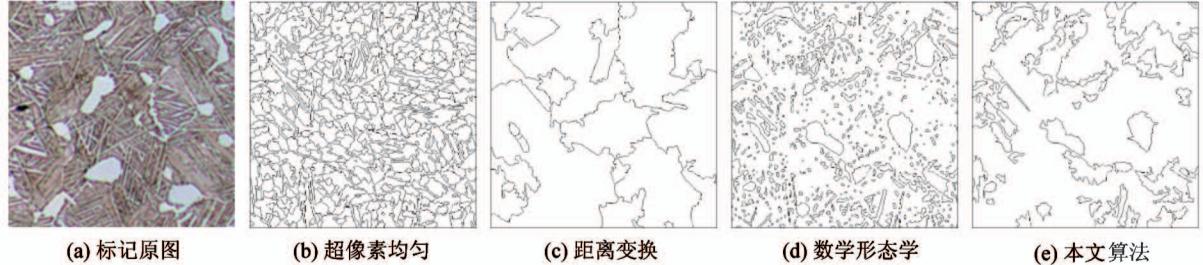


图 13 不同标记方法的组织轮廓图

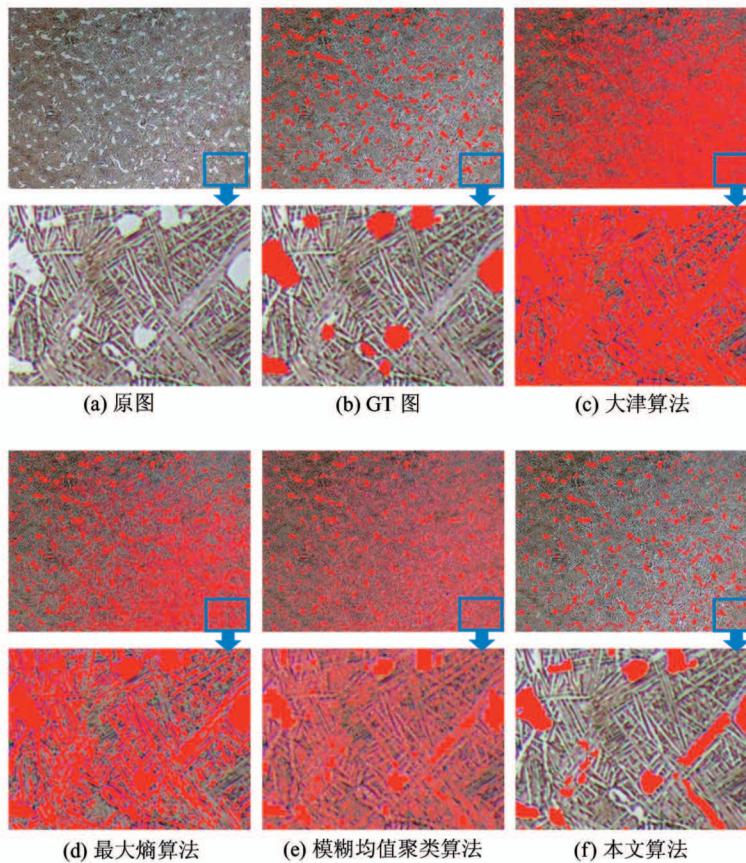


图 14 金相图像等轴 α 相识别图比较

3.2 本文算法性能分析

为了验证本文算法的有效性和准确性,对该类

金相图像的多幅图像进行处理得到识别结果,并将识别结果转换成对应的图,与 GT 图进行比较。比

较的评价标准为识别精度 (Acc)、精度 (Pre) 和灵敏度 (Sen), 范围都在 0~1 之间, 数值越接近 1, 表明识别效果越好, 三者分别定义如式(7)~(9)。

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (7)$$

$$Pre = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

$$Sen = \frac{TP}{TN + FN} \quad (9)$$

式中, TP 表示同时在实验识别图和 GT 图的目标区域中的像素点个数; TN 表示同时在实验识别图和 GT 图的背景区域中、也在 GT 图中背景区的像素点个数; FP 表示不在实验识别图、却在 GT 图的目标区域的像素点个数; FN 表示不在 GT 图、却在实验识别图中目标区域的像素点个数。本文对 8 幅同类型的 TA15 钛合金金相图像的实验识别图进行比较分析, 结果如图 15 所示。可以看出本文算法的识别精度平均值在 96% 以上, 大部分图中的精度在 80% 以上, 灵敏度在 77% 以上, 已满足金相图像的分析要求, 导致均匀精度和灵敏度相较于识别精度偏低 (包括图中 Pre 存在 40.20% 的突变情况) 的原因有两个:(1)粗大型片状组织的面积与等轴 α 相十分相近;(2)部分细针状片层组织区域一般包含很多个细针状片层组织, 整体来看, 不仅所占面积大, 内部灰度值分布也均匀。

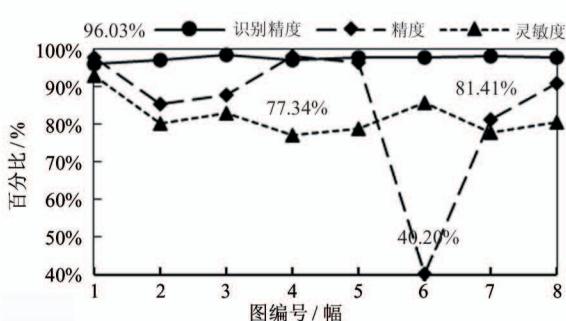


图 15 金相图像识别图与 GT 图对比折线图

4 结 论

本文分析了 TA15 钛合金金相图像的特点及造成识别准确率低的关键问题, 提出了一种融合异质刺激过滤的金相图像等轴 α 相识别算法。研究结论如下。

(1) TA15 钛合金金相图像中存在噪声等问题, 尤其是颜色相似的干扰组织和晶界 α 相共存导致不能准确地识别出目标区域。

(2) 双边滤波可以在对图像降噪的同时, 最大程度地降低对等轴 α 相边缘区域的影响, 提高了图像的质量和信息完整性。

(3) 基于异质刺激理论设计实现了异质刺激模板, 并结合数学形态学对干扰组织进行了有效的过滤。

(4) 计算滤波图像的梯度图, 利用距离变换、轮廓检测以及数学形态学得到前景和背景标记图像, 进行分水岭变换识别等轴 α 相。

本文提出的方法提高了等轴 α 相识别精度, 但金相图像中的粗大型片层组织和细针状片层组织占有的面积越大, 识别精确度越低, 所以利用金相组织的专业特性进行组织间的有效分类将是下一步的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 贺建超, 张田仓, 何胜春. Ti600/TC17 钛合金惯性摩擦焊接头组织与力学性能研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 95-100
- [2] 全珂, 张华, 栾忠涛, 等. 金相图像智能分析技术综述及石油管材金相智能分析系统设计 [J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(4): 1-7
- [3] de Albuquerque V H C, de Alexandria A R, Cortez P C, et al. Evaluation of multilayer perceptron and self-organizing map neural network topologies applied on microstructure segmentation from metallographic images [J]. NDT and E International, 2009, 42(7): 644-651
- [4] Ma B Y, Ban X J, Su Y, et al. Fast-FineCut: grain boundary detection in microscopic images considering 3D information [J]. Micron, 2019, 116: 5-14
- [5] Chen L, Han Y, Cui B, et al. Two-dimensional fuzzy clustering algorithm (2DFCM) for metallographic image segmentation based on spatial information [C] // The 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering, Shanghai, China, 2015: 519-521
- [6] Chen L, Jiang M, Chen J X, et al. Image segmentation using iterative watershed plus ridge detection [C] // The 16th IEEE International Conference on Image Pro-

- cessing, Cairo, Egypt, 2009: 4033-4036
- [7] 肖闻宇, 滕奇志, 何海波. 基于形态学的硬质合金图像分割算法 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (S2): 277-279
- [8] Wang J Q, Yao P P, Liu W L, et al. A hybrid method for the segmentation of a ferrograph image using marker-controlled watershed and grey clustering [J]. *Tribology Transactions*, 2016, 59(3): 513-521
- [9] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66
- [10] Koffka K. 格式塔心理学原理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2019: 101-102
- [11] 贾新宇, 江朝晖, 魏雅鹏, 等. 相对颜色空间下梯度
- 分层重构的分水岭分割 [J]. 计算机科学, 2018, 45 (S2): 212-217
- [12] 周小明. 基于小波去噪和梯度校正的分水岭图像分割技术研究 [J]. 数学杂志, 2019, 39(4): 583-588
- [13] Rajyalakshmi U, Rao S K, Prasad K S, et al. Supervised classification of breast cancer malignancy using integrated modified marker controlled watershed approach [C] // IEEE 7th International Advance Computing Conference, Hyderabad, India, 2017: 584-589
- [14] Chen D F, Xu T. Watershed segmentation using curvelet and morphological filtering [C] // The 2nd International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, China, 2009: 1-5

Metallographic equiaxed α -phase recognition fused with heterogeneous stimulation filtering

Dou Yan*, Wang Lipan**, Zhang Qifei

(* School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(** Key Laboratory of Hebei Software Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(*** School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Aiming at the problem of ‘misidentification’ caused by the existence of noise in the metallographic image of titanium alloy and the fact that some of the grain boundary of α -phase and the lamellar tissue are very similar to the equiaxial α -phase in color, a novel equiaxed α -phase recognition algorithm fused with heterogeneous stimulation filtering is proposed. The algorithm mainly consists of two parts: (1) Combining with mathematical morphology and heterogeneous stimulus theory, the heterogeneous stimulus template is designed and realized to filter the grain boundary of α -phase and lamellar structure effectively; (2) A foreground and background marking method combined with distance transformation and mathematical morphology is proposed, and the equiaxial α -phase and other microstructure are accurately marked, and the metallographic equiaxial α -phase is identified by marking watershed algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm can filter most of the grain boundary of α -phase and the lamellar structure and the influence of the edge region of the equiaxial α -phase is reduced to the greatest extent. Compared with Otsu algorithm, maximum entropy algorithm and fuzzy C-means clustering algorithm, the proposed algorithm in this paper improves the recognition accuracy of equiaxial α -phase.

Key words: metallographic image recognition, heterogeneous stimulation, mathematical morphology, marking watershed algorithm