

DOI: 10.3901/JME.2021.12.217

双相钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织特征的 定量表征方法*

谢峰¹ 马亮¹ 刘玉磊^{1,2} 杨东¹

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院 合肥 230601;

2. 合肥水泥研究设计院有限公司 合肥 230051)

摘要: 如何快速、准确地对钛合金的微观组织含量、尺寸、分布和形态进行表征是实现其组织定量调控的关键。为实现这一目标,以钛合金 Ti-6Al-4V 的等轴组织为研究对象,针对钛合金中粘连组织轮廓具有不规则性而不易进行组织分割的问题,通过采用改进的快速特征点检测与绘制模板圆相结合的方法,对其切削加工后的表面微观组织图像中的粘连组织进行分割;进而采用定向度和圆形度参数来描述钛合金微观组织的分布情况和形态,并对其体积分数和晶粒尺寸进行定量表征,以便更完整地描述钛合金微观组织的特征信息。采用该方法研究钛合金 Ti-6Al-4V 的组织随切削速度的变化情况,验证该方法的可行性和有效性。所研究的改进的快速特征点检测与绘制模板圆相结合的方法可为材料的微观组织定量表征提供一种新思路和新方法。

关键词: 钛合金; 粘连组织分割; 特征点检测; 组织定量表征

中图分类号: TH142

Quantitative Characterization Method of Microstructure Characteristics of Dual-phase Ti-6Al-4V Alloy

XIE Feng¹ MA Liang¹ LIU Yulei^{1,2} YANG Dong¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Anhui University, Hefei 230601;

2. Hefei Cement Research & Design Institute Corporation Ltd., Hefei 230051)

Abstract: How to quickly and accurately characterize the microstructure content, size, distribution and morphology of titanium alloy is the key to realize the quantitative control of its microstructure. In order to achieve this goal, the equiaxed microstructure of the titanium alloy Ti-6Al-4V is taken as the research object. Aiming at the problem that the contour of adhesive microstructure titanium alloy is irregular and difficult to be segmented, the improved fast feature point detection method combined with template circle drawing is adopted to segment the adhesive microstructure in the surface microstructure image after cutting. Furthermore, the orientation and roundness parameters are used to describe the distribution and morphology of the microstructure of titanium alloy, and the volume fraction and grain size are quantitatively characterized to describe the characteristic information of the microstructure of titanium alloy more completely. Finally, the microstructure of Ti-6Al-4V Alloy with cutting speed is studied by this method, and the feasibility and effectiveness of this method are verified. The improved fast feature point detection method combined with template circle drawing provides a new idea and method for quantitative characterization of material microstructure.

Key words: titanium alloy; segmentation of adhesive microstructure; feature point detection; quantitative characterization of microstructure

* 国家自然科学基金(51975003)和安徽省自然科学基金(1908085QE230)资助项目。20201105 收到初稿, 20210507 收到修改稿

0 前言

钛合金 Ti-6Al-4V 材料性能优异,其强度高、韧性和塑性良好并能经受高温,因而在航空、卫星和船舶等领域得到广泛的应用^[1-3]。对于钛合金材料而言,其微观组织特征影响着钛合金零部件工作的可靠性和使用寿命,所以为了能够实现对钛合金微观组织的定量调控,就必须采用适当的方法对钛合金微观组织进行准确的表征及评价。但由于钛合金 Ti-6Al-4V 图像中存在着许多粘连组织,而组织特征的定量表征目标是独立组织,因此在这之前需要对粘连组织进行分割。

目前针对粘连体的研究,MOLNAR 等^[4]针对重叠的细胞,提出了一个“近圆气体”活动轮廓模型和相对应的数据模型,并将此活动轮廓模型与数据模型结合对重叠细胞进行分割。匡芳君等^[5]通过改进的分水岭算法,避免了分割时出现过分割问题,并结合了分水岭算法和极限腐蚀,成功实现分割稻米的粘连颗粒。上述方法可以有效实现对有规则形状的粘连物体地分割,但对钛合金 Ti-6Al-4V 而言,其粘连相并非是单个独立相构成,而是由两个或多个独立相构成,考虑到其组织形状不规则,因此上述解决方法对于钛合金 Ti-6Al-4V 中的粘连相的分割并不合适。

分割后的钛合金微观组织特征的定量表征研究,目前主要集中于含量和尺寸两个特征方面。LUO 等^[6]观察了变形工艺参数对钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织演变和组织参数的影响,结果显示随着钛合金微观组织变形程度的增加,初生 α 相的晶粒尺寸表现出先减小后略有增大的趋势,而体积分数变化较小;廖聪豪等^[7]对钛合金 Ti-6Al-4V 在激光抛光后的电化学腐蚀性进行了研究,结果表明晶粒的细化导致自腐蚀电流密度增大,进而使得材料的耐蚀性降低;彭美旗等^[8]通过分析固溶温度对钛合金 Ti-6Al-4V 中转变 β 区体积分数的影响,指出随着固溶温度的升高,转变 β 区的体积分数增加,进而导致钛合金的塑性降低。由于钛合金微观组织的分布和形态对钛合金的性能影响较大^[9-10],因而对钛合金的微观组成相的组织形态和分布情况利用相应的参数来进行表征,可更好地描述其微观组成相的特征信息。

基于上述考虑,本文提出改进的快速特征点检测与绘制模板圆相结合的方法对钛合金图像中的粘连组织进行分割,然后进行微观组织特征的定量表

征。在用体积分数和晶粒尺寸表征微观组织含量和尺寸的基础上,提出采用定向度和圆形度表征微观组织的分布和形态特征。

1 钛合金 Ti-6Al-4V 的微观组织

1.1 试验材料的选择

本文选择钛合金 Ti-6Al-4V 作为试验材料,对其性能与其微观组织间存在的定量关系进行研究,工件材料选择使用自由锻造工艺成形的,具有 $\alpha+\beta$ 两相钛合金 Ti-6Al-4V 的等轴组织。利用扫描电子显微镜对钛合金表面进行拍摄,可得到如图 1 所示的钛合金表面显微结构特征图像。钛合金的 α 相和 β 相分别为图像中的暗灰色区域和亮灰色区域。通过能量色散 X 射线光谱仪鉴定后,可得到其主要的化学成分(表 1)^[11]。

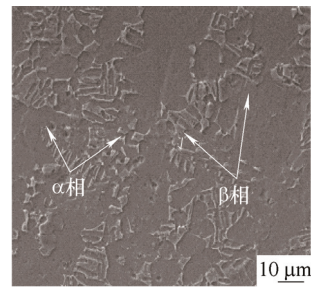


图 1 Ti-6Al-4V 表面微观组织图像

表 1 Ti-6Al-4V 的主要化学成分(质量分数) %

元素	Ti	Al	V	Fe	O
质量分数	89.37	6.36	3.93	0.17	0.16

1.2 钛合金 Ti-6Al-4V 切削后的组织图像

钛合金 Ti-6Al-4V 的切削加工试验是在立式加工中心(DAEWOOACE-V500)上进行的,铣刀采用的则是具有四槽变螺旋角(38° 和 41°)的铣刀,另外切削试验采用干切削^[12]的加工方式。本文根据某型航空发动机外壳所采用的切削参数,分析切削参数对钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织特征参数变化的影响,试验所选择的因素水平如表 2 所示。

表 2 切削试验参数

试验编号	切削速度 $v_c/(m/min)$	每齿进给量 $f_z/(mm/z)$	侧吃刀量 a_e/mm	铣削深度 a_p/mm
NO.1	20	0.03	1.5	5
NO.2	50	0.03	1.5	5
NO.3	80	0.03	1.5	5
NO.4	110	0.03	1.5	5

对切削加工试验得到的钛合金微观组织样品进行抛光、蚀刻和图像采集, 采集设备为 HIROX SH-300 型扫描电镜 Mini-SEM。由于采光不均匀等原因, 采集到的图像中会存在一些噪声, 因此在对微观组织特征进行定量表征之前, 需要对图像进行预处理。最终得到的钛合金微观组织的二值化图像如图 2 所示。

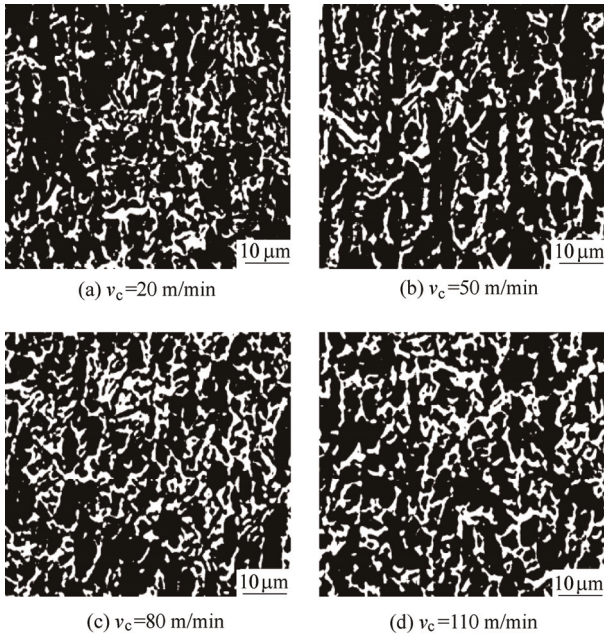


图 2 Ti-6Al-4V 微观组织的二值化图像

从图 2 可以看出, α 相和 β 相存在于钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织的二值化图像中。而 α 相和 β 相分别占据二值化图像中的黑色部分和白色部分。独立相和粘连相的几何结构共同构成了组成相, 而粘连相是由多个独立相粘连形成。由于钛合金 Ti-6Al-4V 若要对其特征进行定量表征则需保证其微观组织是独立的组织。因此, 要达到能够准确地描述钛合金 Ti-6Al-4V 的组织特征就需要先对粘连组织相进行分割。因此, 首先要分离钛合金 Ti-6Al-4V 的独立相和粘连相, 然后再分割粘连相, 使其相互独立。

2 钛合金 Ti-6Al-4V 粘连相的分割

图 3 为从图 2d 中任意选取的一个粘连 β 相, 观察图 3 可知, 粘连 β 相的粘连位置为轮廓上凹陷的位置, 该位置附近的曲率发生最大变化, 用图 3 中的凹点来表示该位置。如图 3 所示为钛合金 Ti-6Al-4V 中粘连相某一粘连位置处的凹点。对于粘连 β 相来说, 要想实现对其进行分割, 需要准确的找出粘连位置附近的曲率发生最大变化的点, 然后

将这样的凹点进行连接, 形成一条线。



图 3 粘连相粘连位置处的凹点

2.1 Shi-Tomasi 算法

凹点属于微观组织图像中组织轮廓上的特征点, Shi-Tomasi 算法^[13]是目前使用较为广泛的特征点检测算法。其优点是稳定性好且检测到的是像素级的特征点, 方便后续形成分割线。因此, 针对钛合金 Ti-6Al-4V 粘连 β 相的特征点的检测, 本文通过 Shi-Tomasi 算法进行图 3 中粘连相粘连位置处凹点的检测。

采用 Shi-Tomasi 算法检测图像中的特征点时, 首先设该图像在点 (x, y) 处的灰度值为 $f(x, y)$, 然后以该点为中心建立一个 $m \times m$ 的窗口 $g(x, y)$, 窗口平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 后产生的灰度变化见式(1)

$$I(\Delta x, \Delta y) = \sum_{(u,v) \in g(x,y)} g(u,v) [f(x,y) - f(x+\Delta x, y+\Delta y)]^2 \quad (1)$$

式中, $g(u, v)$ 是窗口 $g(x, y)$ 的加权函数。

当平移量 $\Delta x, \Delta y$ 较小时, 可以对 $f(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 进行泰勒展开, 得到式(2)

$$\begin{aligned} f(x+\Delta x, y+\Delta y) &\approx \\ f(x,y) + f_x(x,y)\Delta x + f_y(x,y)\Delta y = \\ f(x,y) + \begin{bmatrix} f_x(x,y) & f_y(x,y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $f_x(x, y)$ 和 $f_y(x, y)$ 分别表示 $f(x, y)$ 在 x, y 方向上的梯度值。

将式(2)代入式(1)可得

$$\begin{aligned} I(\Delta x, \Delta y) &= \sum_g (f(x,y) - f(x+\Delta x, y+\Delta y))^2 \approx \\ \sum_g \left\{ \begin{bmatrix} f_x(x,y) & f_y(x,y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right\}^2 = \\ \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} M(x,y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $M(x, y)$ 为 $I(\Delta x, \Delta y)$ 的自相关矩阵。

Shi-Tomasi 算法的原理是取自相关矩阵 $M(x, y)$ 的两个特征值 λ_1 和 λ_2 中的较小值, 如果该值大于预设的阈值, 则保留该特征点, 称之为 Shi-Tomasi 角点。Shi-Tomasi 算法进行特征点检测的响应函

数为

$$R_{(\text{Shi-Tomasi})} = \min(\lambda_1, \lambda_2) \quad (4)$$

2.2 改进的快速特征点检测算法

Shi-Tomasi 算法虽然具有稳定性好特点,但由于该算法在检测时要计算待测点的自相关矩阵和对应梯度值,对特征点的提取过程中计算量过大,并且容易检测到伪特征点。为了将特征点的检测精度和提取速度进行提高,本文提出采用 Shi-Tomasi 算法和 FAST 算法^[14]相结合的改进快速特征点检测法,即先用 FAST 算法对图像中的待测点进行预检测和筛选,然后使用 Shi-Tomasi 算法对筛选后的点进行再检测。

FAST 算法具有计算速度快、抗旋转变换能力好的特点。其原理为:假定待测点的初始灰度值为 h ,然后以该点为圆心绘制半径为 3 像素的圆形模板,绘制的圆形模板覆盖了图 4 中的待测点邻域内的 16 个点。为了检测待测点是否为特征点,设定一个阈值 z ,当圆形模板覆盖区域中灰度值小于 $h-z$ 或者大于 $h+z$ 的连续像素点数目为 t (t 一般为 12),则认为待测点为特征点^[15]。因此,可以根据 FAST 算法的原理对特征点进行判断。

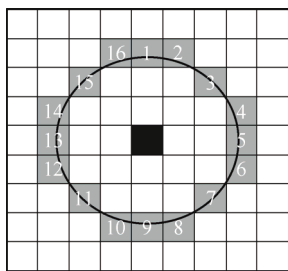


图 4 FAST 算法特征点检测模板

改进的快速特征点检测算法的步骤如下。

(1) 根据 FAST 算法基本原理处理图像中所有的像素点,得到特征点集合,取阈值较小的值。

(2) 计算 7×7 待测特征点领域内的每个像素点的相关梯度值 f_x^2 , f_y^2 和 $f_x f_y$, 并利用 3×3 的高斯窗口函数分别求其自相关矩阵 M ; 并计算每个自相关矩阵 M 中较小的特征值,即 R 值,对不在 7×7 待测特征点领域内的像素点,其 R 值全为 0。

(3) 响应函数的 R 值大于预设阈值的像素点被用于非极大值抑制,若 R 值在 5×5 邻域内为局部极大值,并且其值大于阈值,那么该像素点为采用改进的快速特征点检测出的特征点。

本文通过对图 2 中的粘连 β 相分别采用上述三种算法进行特征点检测,来验证改进的快速特征点检测算法的速度和效果,其结果如表 3 所示。

表 3 三种特征点检测算法的比较

检测算法	检测图像	检测点个数	特征点检测耗时/s	正确率 (%)
FAST 算法	图 2a	587	1.12	75
	图 2b	642	1.23	72
	图 2c	850	1.53	74
	图 2d	879	1.60	76
Shi-Tomasi 算法	图 2a	445	3.68	87
	图 2b	526	3.80	86
	图 2c	683	3.99	88
	图 2d	741	4.04	85
改进的快速特征点检测算法	图 2a	419	1.71	90
	图 2b	491	1.77	94
	图 2c	652	1.90	91
	图 2d	703	2.05	92

从表 3 数据结果得出,与 FAST 算法相比,改进的快速特征点检测算法在检测钛合金中粘连相特征点的用时长,但与 Shi-Tomasi 算法相比则用时较短。从算法的正确率上来看,改进的快速特征点检测算法的平均正确率也比 FAST 算法与 Shi-Tomasi 算法高,基本能够达到 90% 以上,说明改进的快速特征点检测算法可以有效地检测出图像中的特征点。

2.3 粘连相的分割

粘连相的分割是采用改进的快速特征点检测算法来检测粘连 β 相的特征点,其结果如图 5 所示。



图 5 粘连 β 相的特征点检测图

从图 5 中可以看出,在粘连 β 相的特征点检测图中,既检测到了指示粘连位置的凹点,也检测到了与粘连位置无关的凸点。为了分割粘连相,需要去除凸点而保留凹点,为此定义凹度 C ,凹度 C 是由 ZHONG 等^[16]在进行分割水稻图像中的接触米粒问题而提出的。凹度 C 的定义公式为

$$C(j) = \frac{A_j}{L} \quad (5)$$

式中, j 为组织轮廓上的特征点, L 为以特征点 j 为圆心的半径为 5 像素的圆的周长(示意图见图 6a), A_j 为圆处于组织轮廓内的弧长。

图 6b 为粘连 β 相上各个特征点凹度的值 C 。

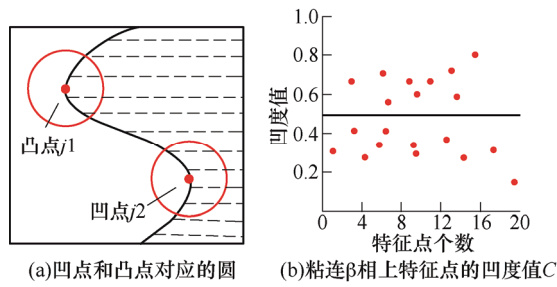
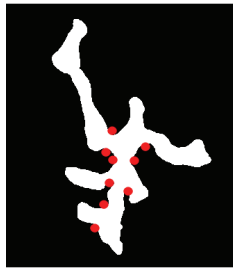
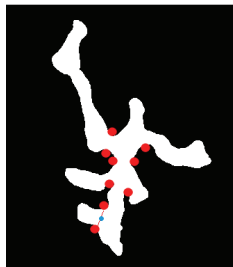


图6 特征点的分类方法

根据式(5)分析图 6a 可得, 凸点对应的 C 值较小, 凹点对应的 C 值较大。图 5 中粘连 β 相上特征点的 C 值主要分布在 0.5 两侧, 如图 6b 所示。现设定 0.5 作为阈值, 然后对凸点和凹点进行分类, C 值大于 0.5 的特征点为凹点, C 值小于 0.5 的特征点为凸点。根据上述方法进行去除凸点, 结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 凸点全部被去除, 只留下了凹点, 这些凹点都分布在粘连 β 相的粘连位置处。

图7 去除凸点粘连 β 相的凹点

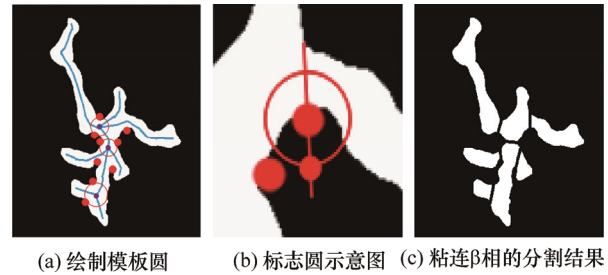
将凹点两两配对形成分割线, 能够实现对粘连 β 相的分割。然而任意两个凹点进行随机配对, 都无法保证其形成的分割线的正确性。因此, 根据上述的问题, 本文采用以骨架线的三角点为绘制模板圆的圆心, 配对粘连 β 相轮廓上的凹点。将粘连 β 相轮廓上粘连位置处的一对凹点进行连线, 其示意图如图 8 所示。

图8 粘连 β 相分割线示意图

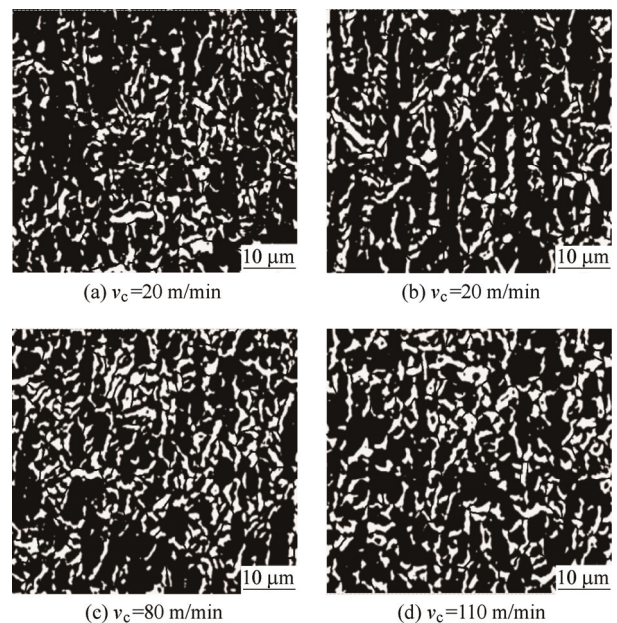
粘连 β 相内部形成的分割线以小圆点作为其中点, 同时小圆点也作为粘连 β 相在此位置的组织中点, 因此, 先确定粘连 β 相在此位置的组织中点是凹点形成正确分割线的必要条件。而分割线的中点是通过绘制粘连 β 相的骨架线^[17]获得的。内切圆的

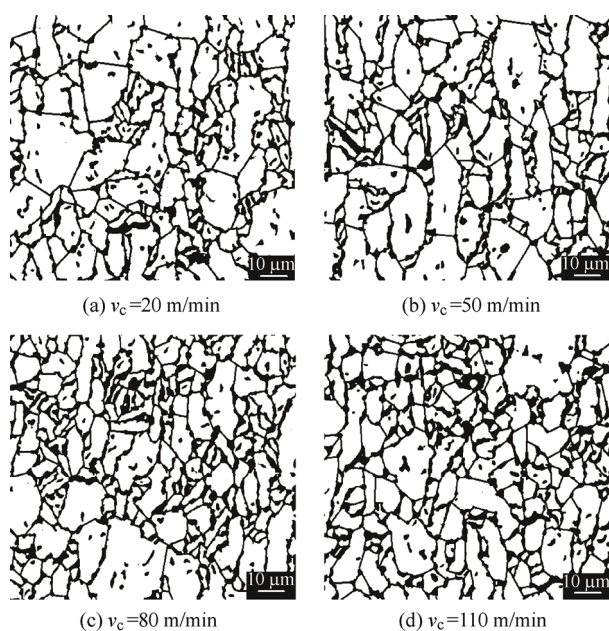
圆心构成了微观组织的骨架线。三角点为骨架线上汇交点。由图 9a 可知, 独立 β 相相互粘连的位置是由三角点表示的。以粘连 β 相中的三角点为圆心并以该点到最近边界的距离为半径画模板圆(图 9a), 若该点处发生粘连, 且粘连位置处的两个凹点在模板圆的轮廓上出现, 便进行凹点配对。

针对粘连位置有一个凹点的情况, 则采用绘制标志圆的方式继续进行配对。如图 9b 所示为以 5 像素为半径画圆, 进行配对形成分割线。如图 9 所示, 分割结果表明粘连 β 相被正确分割。

图9 粘连 β 相的分割方法

为对该方法进一步验证, 对图 2 中的钛合金粘连 β 相和对图像进行反相后得到的粘连 α 相按上述方法进行分割, 分割后的图像如图 10 和图 11 所示。现采用人工查找法统计图 2a~2d 中相互粘连的独立 β 相有 242、296、451 和 399 个, 相互粘连的独立 α 相有 223、265、284 和 237 个; 采用本文的自动分割法对 10a~10d 的独立 β 相进行分割, 该数目分别为 213、257、384 和 349, 图 11a~11d 中的独立 α 相的数目分别为 195、237、243 和 204。结果表明, 该方法下的分割正确率能够达到 85%。

图10 分割粘连 β 相后的钛合金 Ti-6Al-4V 图像

图 11 分割粘连 α 相后的钛合金 Ti-6Al-4V 图像

3 钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织特征定量表征

3.1 体积分数

体积分数表示的为微观组织图像中待测量相所对应的体积,它是用来表征待测量相自身含量的关键参数。通过对钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织图像中 α 相与 β 相两类相对应的体积分数采用面积测量法^[18]进行表征,其公式如式(6)所示

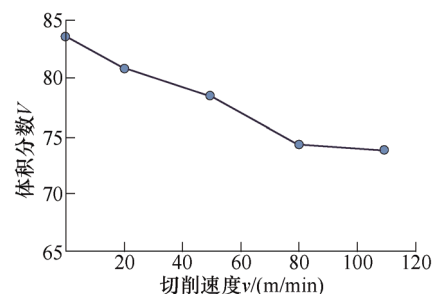
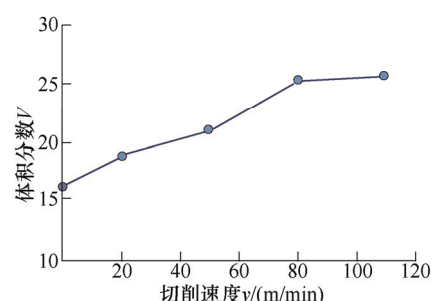
$$V = \frac{V_1}{V_2} \quad (6)$$

式中, V_1 表示钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织图像中待测量相的轮廓内的像素数, V_2 表示整个图像对应的像素数。

面积测量法的结果显示,钛合金 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料)中 α 相所对应的体积分数为 83.8%,而在切削速度逐渐提高的 NO.1~NO.4 试验中,图像中的 α 相体积分数分别为 81.4%、79.0%、74.7%和 74.1%;此外,钛合金 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料) β 相所对应的体积分数为 16.2%,而在 NO.1~NO.4 的试验中,图像中的 β 相体积分数分别为 18.6%、21.0%、25.3%和 25.9%。对上述测量结果进行整理并绘制变化曲线如图 12 所示。

由图 12 可以看出, α 相体积分数随着切削速度的增加而减少, β 相的体积分数则相反。 α 相和 β 相体积分数的变化情况是因为切削引起的

高温变化导致了钛合金 Ti-6Al-4V 中的 α 相部分转变为 β 相,切削速度 80 m/min 到 110 m/min 之间两类相体积分数的微小下降和提高是因为 α 至 β 相变的速率在切削速度超过 80 m/min 以后开始变缓。

(a) α 相对应的体积分数与切削速度的关系(b) β 相对应的体积分数与切削速度的关系图 12 Ti-6Al-4V 微观组织图像中 α 相与 β 相对应的体积分数与切削速度的关系

3.2 晶粒尺寸

钛合金 Ti-6Al-4V 中 α 相与 β 相的尺寸大小是由晶粒尺寸进行表征的,平均截距法和平均面积法可以用来测量 α 相和 β 相的晶粒尺寸。由于 α 相和 β 相形状和分布具有不规则性,平均截距法中的随机直线和平均面积法中的随机椭圆并不能完全覆盖 α 相和 β 相,因此测量结果会存在一定的误差。长短轴比法是用待测相的最长轴和最短轴的比值来表征其晶粒尺寸,待测相的长短轴可以被准确测量,因此这种方法能够避免上述两种方法出现的误差。本文采用长短轴比来表征晶粒尺寸,长短轴比 L 如式(7)所示

$$L = \frac{L_L}{L_S} \quad (7)$$

式中, L_L 表示 Ti-6Al-4V 微观组织图像中待测量相的最长轴的长度值, L_S 则表示 Ti-6Al-4V 微观组织图像中待测量相的最短轴的长度值。

采用长短轴比法测量的 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料)和 NO.1~NO.4 试验中 α 相与 β 相对

应的长轴长度值和短轴长度值如表 4 所示。

表 4 Ti-6Al-4V 中 α 相与 β 相的长短轴比 L

	试验编号	长轴长度 $L_L/\mu\text{m}$	短轴长度 $L_S/\mu\text{m}$	长短轴比 L
α 相	原材料	9.91	5.05	1.96
	NO.1	10.39	5.39	1.93
	NO.2	9.65	4.98	1.94
	NO.3	8.92	4.65	1.92
	NO.4	8.74	4.69	1.90
β 相	原材料	4.48	2.24	2.00
	NO.1	4.37	2.23	1.96
	NO.2	4.65	2.31	2.01
	NO.3	4.53	2.28	1.99
	NO.4	4.99	2.46	2.03

表 4 中的数据显示, 钛合金 Ti-6Al-4V 原材料与切削试验后 α 相对应 L 值分别为 1.96、1.93、1.94、1.92 和 1.90; β 相方面, 原材料与试验 NO.1~NO.4 中 β 相对应的 L 值分别为 2.00、1.96、2.01、1.99 和 2.03。 α 相与 β 相对应的 L 值在试验中变化不大, 可见与钛合金 Ti-6Al-4V 原材料相比, 切削加工后相的尺寸大小并未发生明显变化。

3.3 定向度

定向度是常用的表征待测图像中目标物体的排列导向的参数, 对应的衡量指标为概率熵 H_m 。概率熵 H_m 主要用在土粒的微观组织结构对应的定量分析^[19-20]。由于土粒在形态分布方面与钛合金 Ti-6Al-4V 的组成相相似, 本文因此考虑将其引入到对 α 相与 β 相排列导向的分析中。概率熵 H_m 如式(8)所示

$$H_m = -\sum_{h=1}^n P_h \ln P_h \quad (8)$$

式中, n 为钛合金微观组织排列方向的定向角区间数, P_h 为微观组织在某一定向角区间中出现的概率。概率熵 H_m 在 0 到 1 之间取值, H_m 值越大, 说明微观组织图像中 α 相和 β 相的排列分布方向越混乱, 即有序性越差, 反之则说明 α 相和 β 相的对应的有序性越强。

根据式(8)测量的钛合金 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料)的 α 相定向度的值为 0.40, 而在 NO.1~NO.4 试验中的 α 相定向度的值分别为 0.43、0.45、0.48 和 0.50; 钛合金 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料)的 β 相定向度的值为 0.49, 而在 NO.1~NO.4 试验中的 β 相定向度的值则分别为 0.51、0.54、0.57 和 0.58。对上述数据进行整理并绘制变化曲线如图 13 所示。观察图 13 可知, 钛合金

Ti-6Al-4V 中 α 相和 β 相所对应的定向度变化趋势相似, 均与切削速度变化成正比, 即有序性变差。

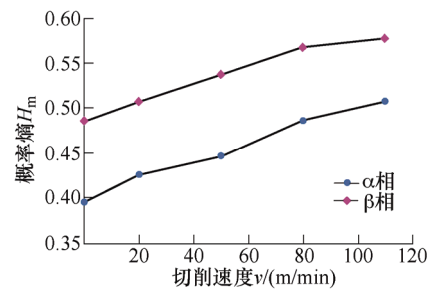


图 13 Ti-6Al-4V 中 α 相和 β 相的定向度与切削速度的关系

3.4 圆形度

当钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织形态特征发生改变时, 钛合金对应的塑形与硬度等机械性能亦随之改变, 因此对钛合金组成相的形态特征进行表征同样是有必要的^[21]。圆形度 R 是表征微观组织图像中待测目标接近圆形程度的参数, 本文采用圆形度 R 对 α 相和 β 相的形态进行表征, 其表达式如式(9)所示

$$R = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (9)$$

式中, S 为钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织图像中待测量相对应的面积(即轮廓包围的像素数), L 为钛合金 Ti-6Al-4V 微观组织图像中待测量相对应的周长(即轮廓上的像素数)。圆形度 R 在 0 到 1 范围内取值, 其值越小, 即表示形状越接近圆。

钛合金 Ti-6Al-4V 原始微观组织图像(原材料)和表 2 中四次不同试验样品中 α 相和 β 相的面积、周长和圆形度按照上述方法进行测量, 测量数据如表 5 所示。

表 5 Ti-6Al-4V 微观组织图像中 α 相和 β 相对应的圆形度

	试验编号	平均面积	平均周长	圆形度
α 相	原材料	7 483	421	0.53
	NO.1	7 681	419	0.55
	NO.2	8 207	418	0.59
	NO.3	8 559	417	0.62
	NO.4	8 643	415	0.63
β 相	原材料	2 021	255	0.39
	NO.1	2 208	254	0.43
	NO.2	2 393	253	0.47
	NO.3	2 516	251	0.50
	NO.4	2 589	250	0.52

表 5 表明, α 相和 β 相在原始微观组织图像和切削试验后的图像中的圆形度分别为 {0.53, 0.55, 0.59, 0.62, 0.63} 和 {0.39, 0.43, 0.47, 0.50, 0.52}, 数据表明随着切削速度的不断增加, α 相和 β 相对应的圆形度逐渐变大。产生上述变化的原因

为图像中等轴相的数量随着切削速度的增加而增加,片层相数量则不断减小,等轴相短而粗的形状与圆形更为接近,因此圆形度不断变大。

4 结 论

本文采用改进的快速特征点检测和绘制模板圆的方法,研究等轴态双相钛合金 Ti-6Al-4V 中 α 相和 β 相的分割与特征定量表征,主要结论如下。

(1) 由于 Shi-Tomasi 算法对微观组织图像中的粘连相进行特征点检测时存在检测速度较低且检测到伪特征点的情况,提出采用 Shi-Tomasi 算法与 FAST 算法相结合的改进快速特征点检测方法对粘连相的特征点进行检测。研究结果表明,相比较 Shi-Tomasi 算法的数据结果,该方法的平均检测速度提高了 52%,且平均检测正确率能达到 90%。

(2) 通过检测粘连相特征点中凹点的位置,并绘制骨架线以骨架线的三角点为圆心绘制模板圆的方法能够自动分割钛合金 Ti-6Al-4V 图像中的粘连 α 相和 β 相,结果表明采用绘制模板圆法,分割正确率可以达到 85%。

(3) 通过长短轴比方法和面积法测量了钛合金 Ti-6Al-4V 中 α 相和 β 相的晶粒尺寸和体积分数,结果表明,随着切削速度的增加, α 相体积分数会随之减少, β 相则相反。

(4) 通过圆形度和定向度对 α 相和 β 相的形态特征和分布情况进行描述,结果表明,随着切削速度的增加, α 相和 β 相的圆形度和定向度也随之增加。

参 考 文 献

- [1] SHOICHI K, SHO Y, AKIRA U. Improvement of fatigue properties of Ti-6Al-4V alloys under four-point bending by low temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 120: 134-140.
- [2] MIRONO S, SATO Y S, KOKAWA H. Friction stir welding and processing of Ti-6Al-4V alloys: a review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 58-72.
- [3] BUCIUMEANU M, BABHERI A, SHAMSA-EI N, et al. Tribocorrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V biomedical alloy[J]. Tribology International, 2018, 119: 381-388.
- [4] MOLNAR C, JERMYN I H, KATO Z, et al. Accurate morphology preserving segmentation of overlapping cells based on active contours[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32412.
- [5] 匡芳君, 徐蔚鸿, 王艳华. 基于改进分水岭算法的粘连大米图像分割[J]. 粮食与饲料工业, 2010(8): 45-47. KUANG Fujun, XU Weihong, WANG Yanhua. Image segmentation of adhering rice based Oil the improved watershed algorithm[J]. Cereal & Feed Industry, 2010(8): 45-47.
- [6] LUO Jiao, LI Miaoquan, YU Wixin. Microstructue evolution during high temperature deformation of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1323-1328.
- [7] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电化学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 81-87. LIAO Conghao, ZHOU Jing, SHEN Hong. Electrochemical corrosion behaviors before and after laser polishing of additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 81-87.
- [8] 彭美旗, 程兴旺, 郑超, 等. 转变 β 区体积分数对双态组织 TC4 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响规律[J]. 稀有材料与金属, 2017, 46(8): 2227-2233. PENG Meiqi, CHENG Xingwang, ZHENG Chao, et al. Effects of volume fraction of transformed β matrix on dynamic mechanical properties and sensitivity of adiabatic shear banding in bimodal microstructures of TC4 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(8): 2227-2233.
- [9] 杨东. 基于长疲劳寿命的钛合金 Ti-6Al-4V 铣削加工表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2017. YANG Dong. Milling induced surface integrity and its effects on fatigue life of the titanium alloy Ti-6Al-4V[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [10] INDRANI S R, TAMIRISAKANDALA S, MIRACLE D B, et al. Microstructural effects on the mechanical behavior of β -modified Ti-6Al-4V alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(15): 4983-4993.
- [11] YANG Dong, LIU Zhanqiang. Quantification of microstructural features and prediction of mechanical properties of a dual-phase Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials, 2016, 9(8): 628.
- [12] KIM T O, AW K T. Thermal modelling of a dry revolving vane compressor[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 232(1): 012055.
- [13] SHE Xiangyang, WANG Haowei. Study on method of multi-feature reduction based on rough set in passenger counting[C]//International Conference on Industrial, Wuhan, China, 2016: 307-310.
- [14] GOTO H, OSAWA E. Corner flapping: a simple and fast algorithm for exhaustive generation of ring

- conformations[J]. Journal of American Chemical Society, 1989, 111(24): 8950-8951.
- [15] EDWARD R, TOM D. Machine learning for high-speed corner detection[C]//European Conference on Computer Vision, Berlin: Springer, 2006: 430-443.
- [16] ZHONG Qufa, ZHOU Ping, YAO Qingxing, et al. A novel segmentation algorithm for clustered slenderparticles[J]. Computers and Electr-onics in Agriculture, 2009, 69(2): 118-127.
- [17] 颜廷秦, 周昌雄, 刘淑芬. 一种距离场约束下的普适细化算法[J]. 南京大学学报, 2013, 49(2): 189-195.
- YAN Tingqin, ZHOU Changxiong, LIU Shufen. A universal thinning algorithm restricted by distance[J]. Journal of Nanjing University, 2013, 49(2): 189-195.
- [18] 王凯旋, 曾卫东, 邵一涛, 等. 基于体视学原理的钛合金显微组织定量分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 398-403.
- WANG Kaixuan, ZENG Weidong, SHAO Yitao, et al. Quantification of microstructural features in titanium alloys based on stereology[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 398-403.
- [19] 施斌. 粘性土微观结构定向性的定量研究[J]. 地质学报, 1997(1): 36-44.
- SHI Bin. Quantitative research on the orientation of microstructures of clayey soil[J]. Acta Geologica Sinica, 1997(1): 36-44.
- [20] 李康, 贾超, 狄胜同. 德州地区土体固结过程微观结构的显微观测分析[J]. 试验力学, 2019, 34(1): 38-46.
- LI Kang, JIA Chao, DI Shengtong. Microscopic observation and analysis of microstructure evolution during consolidation process of soil taken from Dezhou area[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1): 38-46.
- [21] LI Cong, CHEN Jian, LI Wei, et al. Study on the relationship between microstructure and mechanical property in a metastable β titanium alloy[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2015, 627: 222-230.
-
- 作者简介:** 谢峰(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为仿生刀具设计, 工业 4.0 及刀具故障诊断技术。
E-mail: jeexf199@163.com.
- 马亮, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为先进控制技术及其应用。
E-mail: 1959615005@qq.com.
- 刘玉磊, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为钛合金加工材料表面图像处理。
E-mail: 849361042@qq.com.
- 杨东, 男, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为钛合金等难加工材料高速切削加工表面完整性。
E-mail: me_yangdong@yeah.net