

$(\alpha+\beta)$ 两相钛合金显微组织的定量分析和表征

曾卫东¹, 王凯旋¹, 赵永庆², 周建华³, 王晓英³, 徐斌³, 周义刚¹

(1. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072;

2. 西北有色金属研究院, 西安 710016;

3. 宝山钢铁股份有限公司 特殊钢分公司, 上海 200940)

摘要: 基于体视学方法, 结合计算机图形处理, 建立一套钛合金显微组织定量测量和表征的方法。对钛合金中片层和等轴两类典型组织进行定量表征, 其参数包括: 片层 α 的厚度、体积分数、形态、取向, 初生 α 相尺寸、体积分数, 总 α 相体积分数。分析实例表明, 建立的钛合金显微组织定量表征方法精度高、重现性好, 为后续建立显微组织—力学性能预测模型奠定了基础。

关键词: 两相钛合金; 体视学; 显微组织; 定量分析

中图法分类号: TM273

文献标志码: A

Quantification of microstructural features in $(\alpha+\beta)$ titanium alloys

ZENG Wei-dong¹, WANG Kai-xuan¹, ZHAO Yong-qing², ZHOU Jian-hua³, WANG Xiao-ying³, XU Bin³, ZHOU Yi-gang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

3. Special Steel Branch, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: Based on the three-dimensional stereology and graphics softwares, a process for quantifying the microstructure of $(\alpha+\beta)$ titanium alloys was developed, the parameters include, thickness, volume fraction, morphology, and orientation of α -laths, colony size, grain size, colony size, Feret ratio of α -laths, mean diameter and volume fraction of primary α phase. The developed models and methods are verified with some examples. The results show that the process is fairly accurate to build a robust expert system to model the correlation between the microstructure and property of titanium alloys.

Key words: titanium alloy; stereology; microstructure; quantitative analysis

随着航空工业对钛合金构件性能要求的日益提高, 要求进一步控制工件显微组织中的组织形态、相的比例、晶粒大小和分布、晶内缺陷消除程度等, 以达到其最优化配合。显微组织是金属材料微观特征中最为本质的部分, 其与工艺参数和材料性能之间关系的研究一直是材料科学与工程的核心内容。对金属显微组织特征进行定性分析, 虽也可说明金属材料的某些性能特征, 但比较精确地描述组织和性能之间的

关系, 就不能仅仅满足于鉴别金相组织和对组织特征的大致估计, 还需要测量及计算出能准确表征金相组织特点的某些参数, 以确立它们之间更为本质的定量关系。显微组织的定量分析是建立显微组织演变模型和显微组织—力学性能定量关系模型的基础。近年来, 国内外学者在钛合金显微组织的定量分析和表征方面开展了研究工作, 取得了一定进展, 但很多分析均借助于昂贵的商业化图像分析仪(软件), 其推广性和适

用性不是很好,制约了相关科学研究的进展^[1]。

本文作者借助大众图像分析软件 Image-Pro Plus 5.0,建立了一套钛合金显微组织定量分析表征的方法。对钛合金中片层和等轴两类典型组织定量表征的参数包括:片层 α 的厚度、体积分数、片层形态、片层取向;初生 α 相尺寸、体积分数,片层 α 相厚度、形态,总 α 相体积分数。并结合实例进行分析。

1 数字图像预处理

随着计算机技术的高速发展,传统胶片形式的金相照片已被数字图像所取代,适应数字照片环境下的定量金相分析是时代发展的趋势。与模拟图像不同的是,数字图像并不通过某种物理量(如光、电等)的强弱变化来记录图像上各点的灰度信息;数字图像完全用数字来记录图像的灰度信息。例如,在256级灰度图像中,“0”代表纯黑色,“255”代表纯白色,中间的数字表示由黑到白的过渡色。而二值化图像可以看作灰度图像的一个特例,其数字矩阵 F 仅由0、1两个值构成。在进行金相定量分析时,为了尽可能准确地分析显微组织的几何形态和光密度数据,消除系统干扰的影响,有必要对二维图像进行一系列预处理,包括二值化、滤波、腐蚀、膨胀、开闭运算等图像处理^[2]。

2 片层组织的定量分析

对于片层组织,本文对以下参数进行了定量分析:片层 α 相体积分数、厚度、形态,丛域尺寸大小, β 晶粒尺寸。

2.1 片层 α 相体积分数

为了充分发挥计算机处理图形的优势,采用截面法测体积分数^[2]。步骤如下:对金相照片进行灰度、腐蚀、膨胀和二值化等图像预处理,得到清楚的图像边界,保真度高的二值化图像,如图1(a)所示;计算机图像处理软件分离计数,自动对 α 相进行计数标定,选择面积为对象的测量参数。计算机自动测量所求参数,并可导入后台数据库进行数据处理,如图1(b,c)所示。求得 α 相的面积 A 和总面积 A_T ,根据体视学公式 $V_V=A_A=A_T/A$,求得 α 相体积分数。经定量金相分析,图1(a)所示为钛合金组织中片层 α 相的体积分数为43.65%。

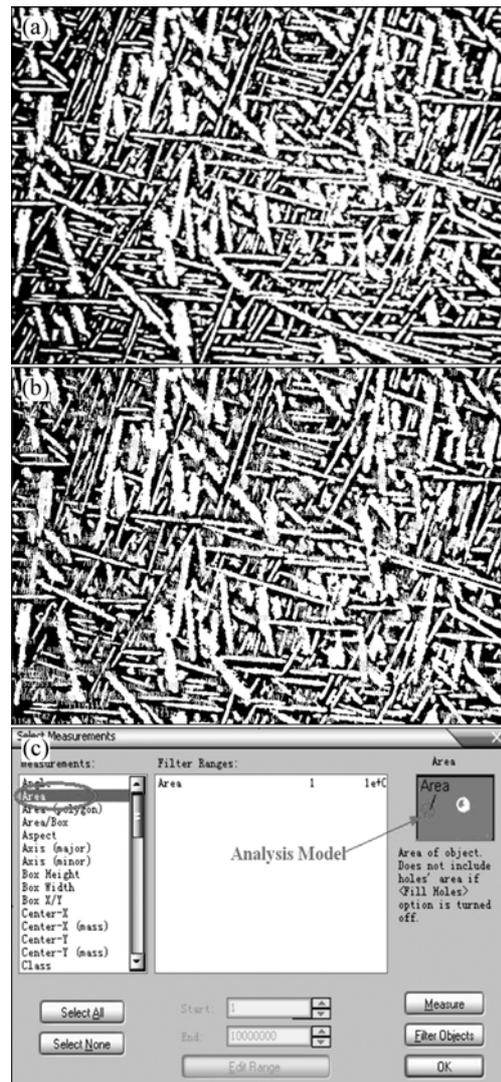


图1 片层 α 相体积分数的定量分析

Fig.1 Quantitative analysis of volume fraction for α phase: (a) Binary image; (b) Separation and counting statistics; (c) Selecting analysis parameters

2.2 片层 α 相厚度和形态定量分析

由于 α 相在三维空间中方向的随机性,在二维图像中不可能区分其宽度和厚度,故在此将 α 相的宽度和厚度均以厚度名义定义。TILEY等^[3]对Ti-6Al-4V钛合金的 α 片层厚度进行了研究。他们应用Adobe Photoshop[®] 7.0中的Fovea Pro[®]3.0商业插件,采用截线法完成。具体步骤如下:在照片上画上一组平行等间距的栅格线,被 α 相边界相截,并获得短小的截线。然后进行栅格旋转,并重复以上步骤得到多组不同的截线长度。但是,片层厚度是宽度方向上的最小距离, TILEY方法的测量数据必然大于真实数据。因此,在结果处理时引入了一个修正常数1.5,即厚度 $\lambda=\lambda_{\text{mean}}/1.5$,可求得片层厚度 λ 。本文作者认为该修正

常数可能与钛合金显微组织结构分布的混乱度有关, 并不普遍适用。

在基于计算机和自动化图形软件基础上, 本文作者建立了定量分析片层组织厚度和片层形态的方法, 详解步骤如下: 在金相照片中随机选择定量分析区域, 如图 2(a)所示, 并进行数字图像预处理; 为了合理区分灰度图像中由于灰度区别不大以及加工过程中导致相互粘连的相邻相, 并保证图像尽量地不失真, 结合手动分离 α 相^[2]; 对 α 相分离计数, 选择分析参数, 分别为 Width 和 Feret ratio。片层 α 相厚度和形态的定量分析结果如图 2(b)和(c)所示。

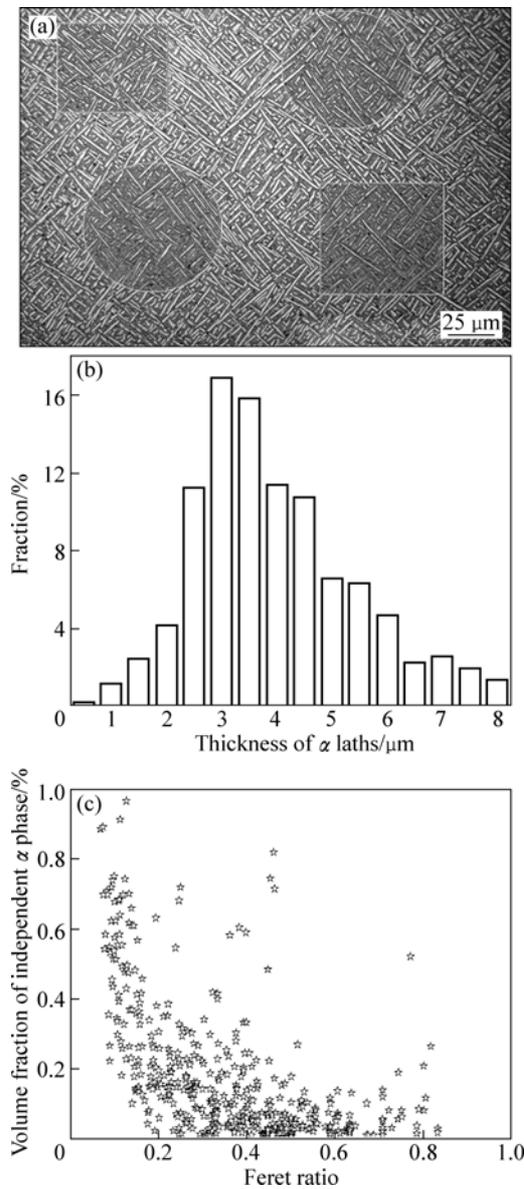


图 2 钛合金显微组织金相照片和定量分析结果
Fig.2 Metallograph and quantitative analysis results of titanium alloy: (a) OM image; (b) Thickness distribution; (c) Feret ratio distribution

2.3 β 晶粒和丛域大小定量分析

定量描述颗粒(晶粒)尺寸的方法有很多, 在二维截面上测量颗粒平均直径是常用的方法, 但在不知颗粒精确的三维形状时, 用此种方法来描述颗粒尺寸大小具有一定的片面性。参数 S_v 可直接表征颗粒的大小, 表示在单位体积内, 颗粒的外表面积大小。单位体积内颗粒外表面积越大, 说明颗粒尺寸越小, 这是一个可以直接描述组织参数的三维参数。但是, 三维参数在传统金相制备中并不能直接测量获得, 通过应用体视学公式 $S_v=4LA/\pi=2P_L$, 可通过测量低维参数 P_L 来间接得到高维参数 S_v ^[4]。 β 晶粒定量分析如图 3(a)所示。丛域是指魏氏组织内相同取向的紧邻 α 条的集合, 丛域的三维形态是非常复杂的, 而且不易重构。在所得金相照片上, 随机画直线, 并在丛域界限处用点进行标注, 计算平均截线长度 P_L , 即为所求丛域尺寸大小^[3], 结果如图 3(b)所示。

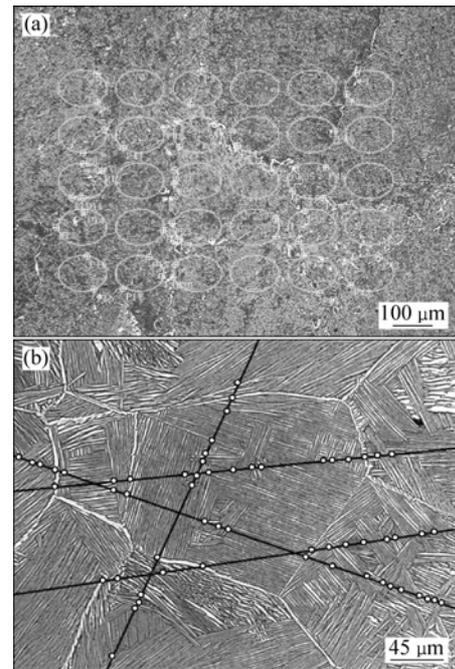


图 3 类组织晶粒尺寸和丛域尺寸定量分析
Fig.3 Quantitative analysis of grain size and colony size for type microstructure: (a) Grain size; (b) Colony size

3 等轴组织的定量金相分析

对等轴组织的定量分析参数包括: 等轴 α 相尺寸、体积分数, 所有 α 相体积分数, 片层 α 次生相厚度、形态。将初生 α 相和次生 α 相的图像进行分离, 定量分析初生 α 相必须分离出等轴 α 相, 分离后并对分析对象进行后续处理。步骤如下^[4]:

- 1) 在金相照片中随机选择定量分析区域, 并进行

数字图像预处理。由于二次相非常细小，灰度区别不明显，所以需要增大对比度，以区分 α/β 相，如图4(a)。

2) α 相分离计数，并选择分析参数。定量分析初生 α 相时，为合理分开初生相和二次相，从钛合金金相组织特点上看，初生相截面大，呈等轴状分布；而二次相呈细针状，截面窄。本文设定两个特征阈值依据式(1)进行分离初生相，如图4(b)所示：

$$f(\alpha \in A) = (S_{初} \geq S_{门槛}) \cap (D_{初} \geq D_{门槛}) \quad (1)$$

式中： A 是集合初生相， $S_{初}$ 、 $D_{初}$ 分别是初生相截面积和平均直径， $S_{门槛}$ 、 $D_{门槛}$ 分别是初生相截面积和平均直径的阈值。而若分离细针状的二次相，则应取相反的门限值来进行分离，如图4(c)所示。

平均截线的长度可用来近似估计等轴 α 相的三维形状尺寸，即过重心的截线平均长度。根据体视学公

式 $D_{sphere}=(1/\pi)d_{mean}$ ，可计算三维组织参数 D_{sphere} 。图5所示为平均截线的分析模型。图6所示为图4所示钛

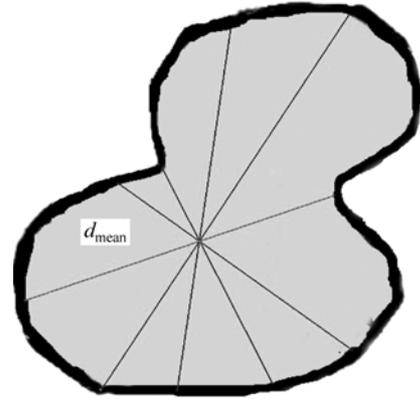


图5 平均截线的分析模型

Fig.5 Analysis model of measuring average diameter

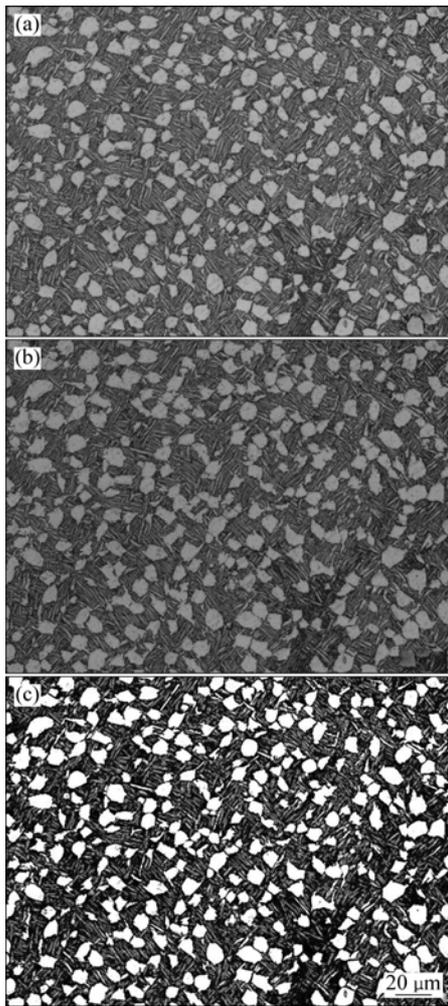


图4 钛合金显微组织金相照片(a)，初生 α 相分离(b)，片层 α 相分离(c)

Fig.4 Optical microstructures of titanium alloy (a), initial α phase separation (b) and α -laths separation (c)

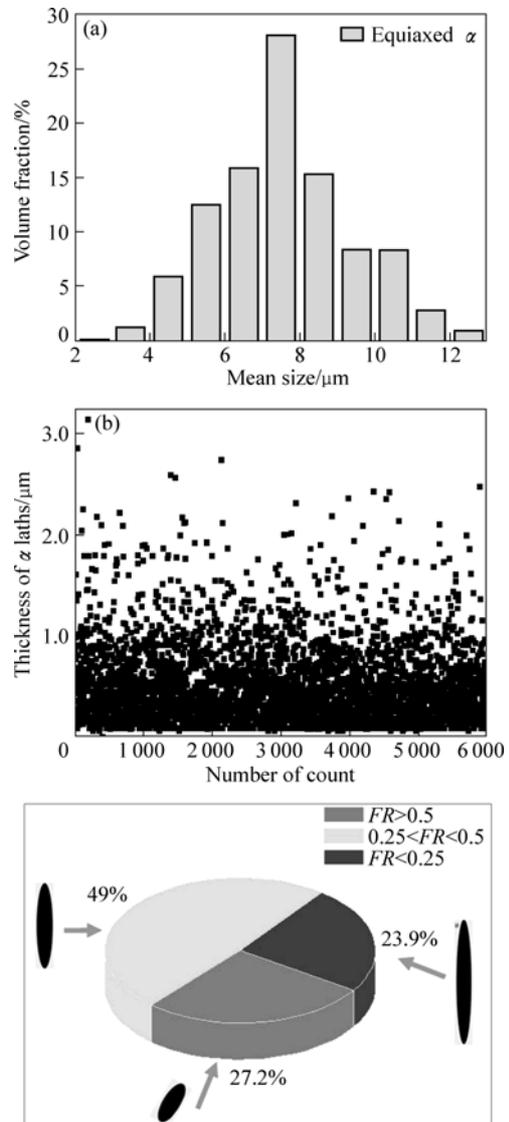


图6 钛合金组织的定量分析结果

Fig.6 Quantification results of titanium alloy: (a) Primary α size; (b) Thickness of α -laths; (c) Shape distribution of α -laths

合金组织的定量分析结果:等轴 α 相的体积分数为24.62%, α 相总体积分数为64.33%,初生 α 相的尺寸分布如图6(a)所示,次生 α 厚度和形态分布如图6(b)和(c)所示。

4 结语

基于体视学方法,提出了适用于钛合金3种组织类型的定量金相分析方法。利用数字图像特点,通过图像预处理、对象分离、模型建立等手段,对两相钛合金的组织参数进行定量化描述。结合实例分析,表明该方法效果理想,精度高,重现性好。

REFERENCES

- [1] 王凯旋. TC17 钛合金片层组织演变与性能关系的定量研究[D]. 西安:西北工业大学,2010.
WANG Kai-xuan. Quantitative study on the relationship of

lamellar microstructure evolution and properties of TC17 titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.

- [2] 王凯旋, 曾卫东, 邵一涛, 赵永庆, 周义刚. 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, 39(3): 398-403.
WANG Kai-xuan, ZENG Wei-dong, SHAO Yi-tao, ZHAO Yong-qing, ZHOU Yi-gang. Quantification of microstructural features in titanium alloys based on stereology[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 39(3): 398-403.
- [3] TILEY J, SEARLES T, LEE E, KAR S, BANERJEE R, RUSS J C, FRASER H L. Quantification of microstructural features in α/β titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 372: 191-198.
- [4] 邵一涛. 神经网络建模方法在钛合金专家系统中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2010.
SHAO Yi-tao. Study of neural network modeling method in the application of titanium expert system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.

(编辑 袁赛前)