

特约专栏

## 钛合金的定量研究进展

赵永庆<sup>1</sup>, 曾卫东<sup>2</sup>, 林 成<sup>3</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(3. 辽宁工业大学, 辽宁 锦州, 121001)

**摘 要:** 钛合金因其优异的综合性能受到国内外研究者和使用者的青睐, 其基础和应用技术研究的核心是针对“合金成分-工艺-组织-性能”之间关系的研究。以往钛合金的成分设计、工艺-组织-性能间关系的研究都是定性的, 获得了良好的结果, 并得到了实际应用。“合金成分-工艺-组织-性能”之间的定量关系研究是近几年国内外钛合金研究的一个热点, 已取得一定的进展。综述了高强钛合金的成分定量设计、工艺-组织-性能间定量关系建立的研究进展, 主要包含高强钛合金成分的定量设计方法、微观组织的定量表征方法、组织与性能定量关系建立、工艺与性能的定量关系建立等, 并通过实际验证。

**关键词:** 钛合金; 定量表征; 微观组织; 力学性能; 加工工艺

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0535-10

## Development of Quantitative Research in Titanium Alloys

ZHAO Yongqing<sup>1</sup>, ZENG Weidong<sup>2</sup>, LIN Cheng<sup>3</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** Because of excellent comprehensive properties, titanium alloys draw wide attentions from researchers and users. The key research direction is the relationship among composition, processing, microstructure and properties. The design of composition and the relationship among processing, microstructure and property were qualitatively analyzed in the past, and good results were achieved. In recent years, the quantitative relationships among composition, processing, microstructure and properties were studied, and some results were achieved. This paper interviews the development of quantitative design of composition for high strength titanium alloy and the research of quantitative relationship among processing, microstructure and property, mainly including the quantitative design method of composition for high strength titanium alloy, quantitative characterization for microstructure, quantitative relationship between microstructure and properties and quantitative relationship between processing and properties, and the quantitative relationships, were tested and verified.

**Key words:** titanium alloy; quantitative characterization; microstructure; mechanical properties; processing

### 1 前 言

钛合金的基础和应用技术研究涉及到合金成分、熔炼、锻造加工、焊接、成型工艺等多个方面, 最终的研究都归集到“合金成分-工艺-组织-性能”的研究, 或是某一个方面的单一研究, 或是相互之间关系

的研究。目前, 国内外开展的钛合金“成分-工艺-组织-性能”研究基本上是定性研究, 如合金成分设计的Al当量、Mo当量经验设计法和d电子理论设计法等。研究获得了合金元素对钛合金性能的影响规律, 确定了为获得某种组织需采用的某种锻造方法或热处理方法, 为获得某一性能需要对应的某种组织等等。例如, 要获得钛合金网篮组织需采用 $\beta$ 锻造或 $\beta$ 热处理, 获得等轴组织需采用两相区锻造, 要获得具有较高断裂韧性的材料组织应为网篮组织, 要获得具有较好强度和塑性匹配的材料组织应为等轴组织等

收稿日期: 2014-07-25

第一作者及通讯作者: 赵永庆, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, Email: trc@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.01

等, 如表 1 所示。这些定性的研究成果推动了钛合金产品质量的提高、稳定与应用推广。但获得这些定性研究成果需要大量的实验数据做支撑, 成本代价高。随着科学技术的进步, 钛合金“成分-工艺-组织-性

能”的定量研究日益受到钛科技工作者的重视, 通过近 5 年的研究, 已取得初步的研究成果。本文主要综述钛合金“成分-工艺-组织-性能”定量研究的进展, 以期对钛合金的深入研究提供借鉴。

表 1 钛合金典型组织性能特点的定性比较

Table 1 Qualitative comparison for properties of typical microstructures in titanium alloys

Structure type	Strength at RT	Plasticity at RT	Attack toughness	Fracture toughness	Fatigue limit	Duration strength	Creep resistance
Widmann-statten	Higher	Lower	Lower	Higher	Lower	Higher	Higher
Basket-weave	High	Low	Middle	High	Middle	High	High
Bi-modal	Low	High	Middle	Low	Middle	Low	Low
Equiaxed	Low	Higher	Higher	Lower	Higher	Lower	Lower

Note: RT means room temperature

## 2 高强钛合金成分的定量设计

在不同热处理条件下, 高强钛合金通过发生不同的相变产生不同的组织, 而不同的组织具有不同的强化机制, 从而产生了不同的强化效果。因此, 利用合金价电子结构参数计算钛合金抗拉强度及延伸率的关键, 是建立钛合金价电子结构参数统计值与钛合金强化机制的关系, 即强化系数的计算, 以及建立钛合金价电子结构参数统计值与相变的关系, 即强化权重的计算<sup>[1-4]</sup>。然后以基体强度、延伸率为基值, 利用强化系数及强化权重就可实现钛合金抗拉强度及延伸率的理论计算。在此研究基础上, 获得了钛合金抗拉强度和延伸率的理论计算公式。抗拉强度的理论计算公式<sup>[1]</sup>如式(1), 延伸率的理论计算公式<sup>[3-4]</sup>如式(2)

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \sigma_b^{\beta-Ti} \cdot C^{\beta} + \sigma_b^{\alpha-Ti} \cdot C^{\alpha} \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\sigma_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti-M_i-(Al-M_i)} \\ &+ \Delta\sigma_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_{bp}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\sigma_{bp}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti-M_i} + \Delta\sigma_{bp}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti} \\ &+ \Delta\sigma_{bp}^{\alpha-Ti/\beta-Ti}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\sigma_{bs}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti-M_i} + \Delta\sigma_{bs}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti} \\ &+ \Delta\sigma_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti} + \Delta\sigma_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti-M_i-(Al-M_i)}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_b^{\alpha-Ti-S_i} + \Delta\sigma_b^{\alpha-Ti-S/\alpha-Ti-S_i} + \Delta\sigma_b^{\alpha-Ti-S/\alpha-Ti}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中第 1 项为基体  $\beta$ -Ti 的强度值, 第 2 项为基体  $\alpha$ -Ti 的强度值, 第 3 项为  $\beta$  相固溶体固溶及界面强化强度增量, 第 4 项为初生  $\alpha$  相固溶及界面强化强度增量, 第 5 项为次生  $\alpha$  相固溶及界面强化强度增量, 第 6 项为杂质元素固溶及界面强化强度增量。

$$\begin{aligned} \delta_b &= \delta_b^{\beta-Ti} \cdot C^{\beta} + \delta_b^{\alpha-Ti} \cdot C^{\alpha} \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\delta_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\delta_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti-M_i-(Al-M_i)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \Delta\delta_b^{\beta-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\delta_{bp}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\delta_{bp}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti-M_i} + \Delta\delta_{bp}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti} \\ &+ \Delta\delta_{bp}^{\alpha-Ti/\beta-Ti}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\delta_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)} + \Delta\delta_{bs}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti-M_i} + \Delta\delta_{bs}^{\alpha-Ti-M_i/\alpha-Ti} \\ &+ \Delta\delta_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti} + \Delta\delta_{bs}^{\alpha-Ti-M_i(Al-M_i)/\beta-Ti-M_i-(Al-M_i)}) \\ &+ \sum_{i=1}^n (\Delta\delta_b^{\alpha-Ti-S_i} + \Delta\delta_b^{\alpha-Ti-S/\alpha-Ti-S_i} + \Delta\delta_b^{\alpha-Ti-S/\alpha-Ti}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中第 1 项为基体  $\beta$ -Ti 的延伸率值, 第 2 项为基体  $\alpha$ -Ti 的延伸率值, 第 3 项为  $\beta$  相固溶体固溶及界面强化产生的延伸率降低量, 第 4 项为初生  $\alpha$  相固溶及界面强化产生的延伸率降低量, 第 5 项为次生  $\alpha$  相固溶及界面强化产生的延伸率降低量, 第 6 项为杂质元素固溶及界面强化产生的延伸率降低量。

选用二元系  $\beta$  钛合金 Ti-10Cr 验证了钛合金抗拉强度、延伸率理论计算公式的可靠性。按照钛合金抗拉强度、延伸率理论计算公式, 计算了 Ti-10Cr 经  $\beta$  相区固溶处理 + 水淬及在  $\alpha + \beta$  相区固溶处理 + 水淬处理后的抗拉强度、延伸率, 计算结果见表 2。从计算结果看, Ti-10Cr 合金抗拉强度、延伸率理论计算值与实验测试值符合较好, 验证了理论公式的合理性, 由此发明了高强钛合金成分定量设计方法<sup>[5]</sup>。针对设定的两个不同强度级别要求的目标钛合金, 开展定量计算(表 3), 定量设计出两种超高强钛合金的合金成分。

表 2 Ti-10Cr 合金室温抗拉强度、延伸率的实验值与理论值

Table 2 Theory computative values and testing values of tensile strength at RT and elongation for Ti-10Cr alloy

Testing values			Theory computative values		
State	$R_m$ /MPa	A/%	State	$R_m$ /MPa	A/%
700 °C/1 h + WQ	1 040	15.5	Solution from $\alpha + \beta$ phase zone followed by quenching	1 047	14.6
730 °C/1 h + WQ	1 150	9.5		1 130	11.3
760 °C/1 h + WQ	1 130	7.5		1 154	11.8
900 °C/1 h + WQ	1 000	15.0	Solution from $\beta$ phase zone followed by quenching	1 002	17.2
	980	17.0			

表3 两种新型高强钛合金成分定量设计结果

Table 3 Result of quantitative design of composition for two high strength titanium alloy

Alloy	Target value		Computative value	
	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$
Ti-1600	1 650	8	1 639	7.7
Ti-1500	1 550	8	1 567	7.9

针对定量设计的两种新型钛合金,按照常规制备的方法,采用0级海绵钛,Al-Mo、Al-V、Al-Sn等中间合金及原子能级Zr,高纯电解Cr,Fe等,采用真空自耗电弧炉两次熔炼,得到25 kg铸锭。经铸锭开坯锻造及棒材轧制后得到 $\phi 22$  mm的棒材,热处理后测试钛合金的室温力学性能,测试结果如表4所示。可以看出,设计的钛合金强度准确度超过98%,延伸率的准确度超过93%。说明两种新型钛合金的成分定量设计是成功的。

表4 定量设计的两种高强钛合金试验验证的力学性能

Table 4 Mechanical properties of two high strength titanium alloys designed by quantitative method

Alloy	$R_m/\text{MPa}$		$A/\%$	
	Target value	Testing value	Target value	Testing value
Ti-1600 <sup>[6]</sup>	1 650	1 650	8	8.3
Ti-1500 <sup>[7]</sup>	1 550	1 580	8	8.5

### 3 钛合金显微组织定量表征

众所周知,钛合金的性能是由微观组织形态所决定的,不同的组织对应于不同的力学性能,而微观组织形态主要取决于合金的化学成分、变形工艺和热处理规范。不同的锻造工艺和热处理制度会使钛合金中 $\alpha$ 和 $\beta$ 相的比例、形态和相界面有较大的差别。按照晶内 $\alpha$ 相的形状变化, $\alpha+\beta$ 型钛合金的显微组织大致分为4类:等轴组织、网篮组织、混合组织和魏氏组织,针对该4类组织进行了定量表征研究。

#### 3.1 数字图像预处理技术

定量金相分析时,首先要将拍摄到的金相图片进行图像处理,然后对二维组织特征参数进行测量和计算,最后应用体视学公式将二维组织特征参数转换为三维组织特征参数。为了尽可能准确有效地分析显微组织的几何形态和光密度数据,需要消除系统干扰的影响,因此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。

对显微组织数字图像的二值化处理、腐蚀、膨胀等图像处理技术进行了研究,针对钛合金热成形显微组织不易测量的特点,提出了图像处理中 $\alpha$ 相手工分离的原则,避免了传统多次腐蚀膨胀等图像处理技术造成的信

息失真,实现了互相独立 $\alpha$ 相组织单元的完全分离,保证了定量分析数据的可靠性和可重复性<sup>[8-10]</sup>。图1所示为钛合金显微组织特征数字图像预处理示意图,图2所示为二值化后 $\alpha$ 相手工分离示意图。

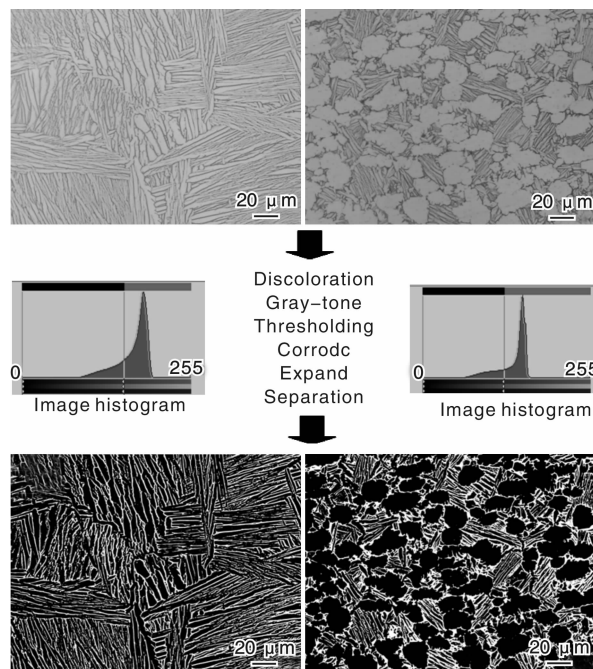


图1 钛合金显微组织特征数字图像预处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image pre-treatment of microstructures for titanium alloy

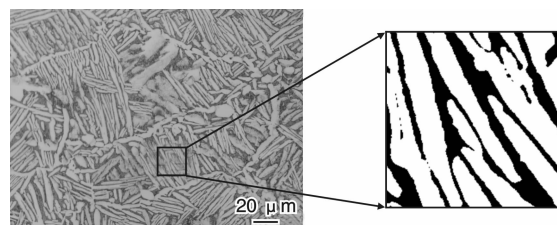
图2 二值化后 $\alpha$ 相手工分离示意图

Fig. 2 Schematic diagram of manual split for binary image

#### 3.2 等轴组织和混合组织的特征参数定量表征

针对等轴组织和混合组织的显微组织特征,建立了一套可行性较好的定量测量分析模型与方法,实现了众多显微组织特征的定量分析,包括等轴 $\alpha$ 相尺寸、等轴 $\alpha$ 相体积分数、所有 $\alpha$ 相体积分数、片层 $\alpha$ 次生相厚度、片层 $\alpha$ 次生相形态等<sup>[3,8-10]</sup>,为定量研究钛合金显微组织演变行为、显微组织与力学性能关系提供了契机。

**片层 $\alpha$ 相厚度的测量** 建立了一套较为严格、可靠的钛合金典型显微组织特征参数的定量分析方法与模型。提出了采用平均截距法,利用图形数学运算方法测量丛域内 $\alpha$ 条的平均厚度的新思路<sup>[9-10]</sup>,降低了传统

随机划线法因人为因素带来的误差,提高了测量数据的可靠性。图 3 所示为片层  $\alpha$  相厚度的测量模型。

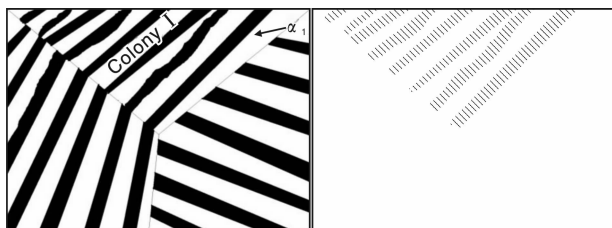


图 3 丛域内  $\alpha$  条厚度测量模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement of colony  $\alpha$  lamellae thickness

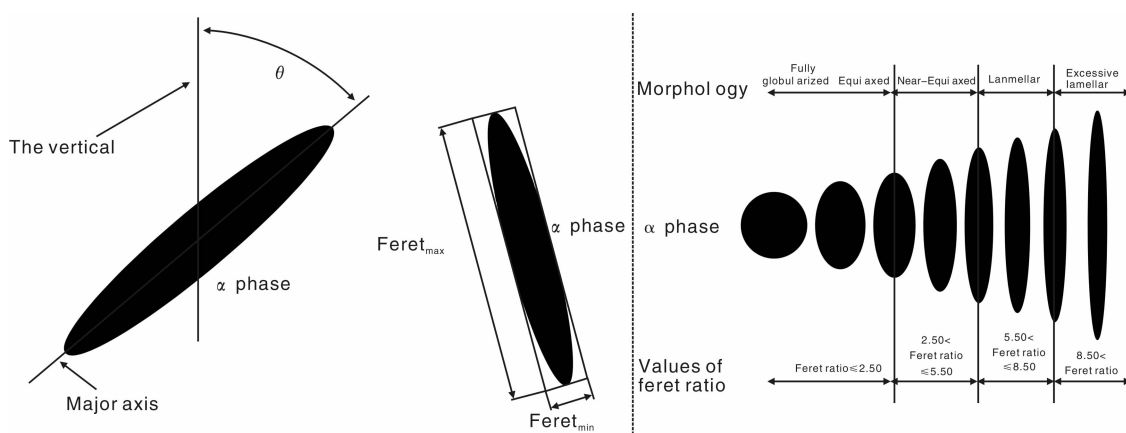


图 4 钛合金显微组织中  $\alpha$  相的统一表征模型

Fig. 4 Characterization method of  $\alpha$  phase in different microstructures

TC17 钛合金在热加工过程中  $\alpha$  相的动态演变规律,突破了国内外目前仅以球化或未球化概念来定性描述的局限。

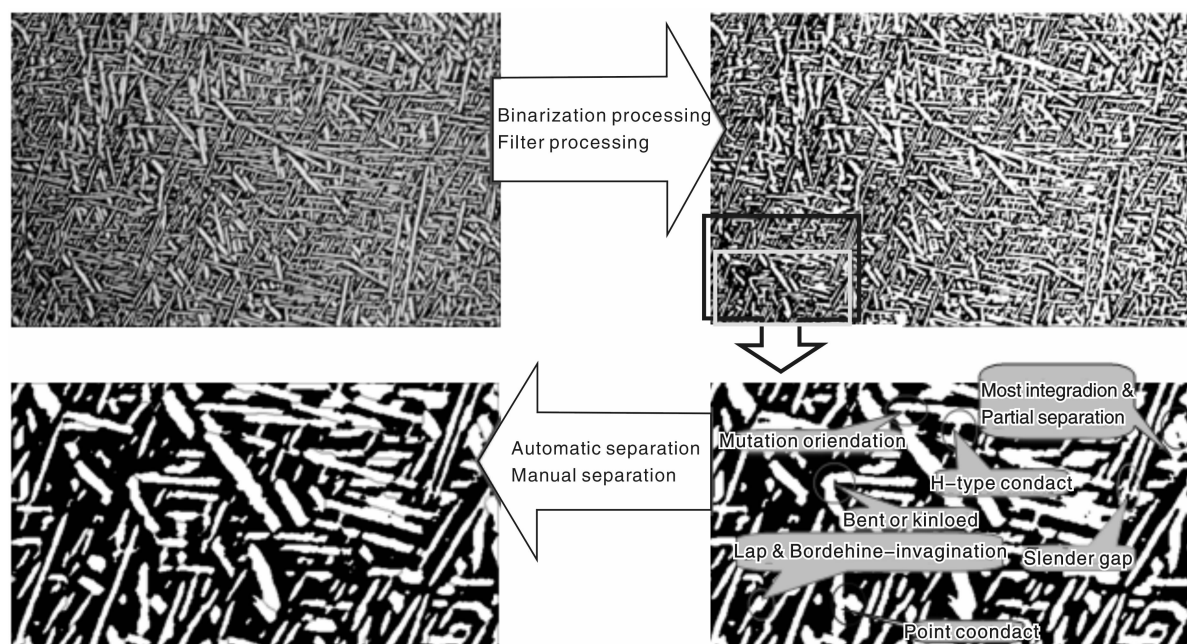
**$\alpha$  相体积分数的测量** 对独立的  $\alpha$  相进行厚度、 $Feret_{max}$ 、 $Feret_{min}$  以及取向参数  $\theta$  等参数的测量是保证其数据有效性的前提。然而,实际金相图像中一些相邻  $\alpha$  相趋于相接(相界灰度梯度减小),以及  $\alpha$  相的三维空间分布用二维图像的记录以及拍摄受设备分辨率限制或拍摄质量较差,通常无法使其中一些金相性质相互独立的  $\alpha$  相图像单元完整分离显示。另外,在热变形中,尤其是垂直于金属流动方向分布的  $\alpha$  片层往往出现很大的形状变化(如弯折),直接统计出的  $\alpha$  相宽度等数值将被夸大而失去物理意义。所以,在对图像进行二值化、腐蚀、膨胀和  $\alpha$  相自动分离等处理的基础上,对  $\alpha$  相进行手工分离处理十分必要。一方面,避免了因经多次腐蚀、膨胀处理造成图像严重失真;另一方面,统计的  $\alpha$  相对象也较为真实地反映了其金相性质。为了实现  $\alpha$  相图像单元的“解体”,并保证  $\alpha$  相的金相独立性,提出了在图像处理过程中应遵循的手工分离  $\alpha$  相的原则(图 5): ①相邻  $\alpha$  相间有细长间隙(Slender gap)须对其分

**$\alpha$  相形态参数的表征** 针对目前国内外对钛合金典型显微组织中  $\alpha$  相的形态参数缺乏统一表征模式的缺憾,考虑到定量描述的连续性和简便性,提出了以参数 Feret Ratio 大小来描述  $\alpha$  相形态的演变,以  $\alpha$  相的主轴与垂直方向的夹角  $\theta$  来描述  $\alpha$  相的取向分布<sup>[8-10]</sup>,从而建立了能定量描述钛合金热变形过程中不同  $\alpha$  相形态之间组织演变以及  $\alpha$  相取向行为的统一表征模型(图 4),实现了从定量层次上认识和研究钛合金工艺-组织-性能的关系。

该模型已成功地应用于定量描述具有片状  $\alpha$  组织的

离; ②相邻  $\alpha$  相间是点、短接触(Point contact)须对其分离; ③相邻  $\alpha$  相间的接触处取向有突变(Mutation orientation)须对其分离; ④相邻  $\alpha$  相呈现搭接(Lap)形式或接触边界长度方向有明显的内凹(Borderline Invagination)须对其分离; ⑤针(片)状  $\alpha$  相具有明显弯折(Bent or kinked)现象须在弯折处对其分离; ⑥多个  $\alpha$  相呈 H-型连接(H-type contact)须在接触处对其分离; ⑦两个同取向  $\alpha$  相整体融合在一起而局部有分离(Most integration & Partial separation),沿取向对其分离。

相邻  $\alpha$  相间有细长间隙的情况主要表现为其他取向  $\alpha$  相穿插,或者近似取向的相邻  $\alpha$  相在边界处局部灰度差较小;  $\alpha$  相间呈点、短接触的情况可考虑是取向差异很大的相邻  $\alpha$  相边界处局部灰度差较小,或者是其他取向  $\alpha$  相穿插造成的现象; 相邻  $\alpha$  相间的接触处取向有突变可认为是  $\alpha$  相端部在二维空间的图像重叠; 相邻  $\alpha$  相间接接触边界长度方向有明显的内凹现象说明  $\alpha$  相边界各自具有独立性需要分离,在宽度方向上的内凹现象可认为是  $\alpha$  相在水平方向解体分离的过渡状态而不必分离; 针(片)状  $\alpha$  相具有明显弯折现象可认为是  $\alpha$  相在热变形中的明显屈曲现象(在测量

图5  $\alpha$ 相剥离解体过程示意图Fig. 5 Schematic diagram of  $\alpha$  phase split processing

厚度时, 如果不对其弯折处进行分离势必会极大地夸大 $\alpha$ 相厚度); 两个同取向 $\alpha$ 相整体融合在一起而局部有分离的现象可认为是 $\alpha$ 相在二维空间的图像重叠。通过以上原则实现 $\alpha$ 相图像单元的“解体”, 从而保证了其显微特征的定量获取。

根据体视学原理, 对比分析了面积测量法、截线法、计点法等体积分数测量方法, 确定选择面积测量法, 其在计算机上比较容易实现, 可反映出整个视野中的平均比率, 也避免了截线法中截线的选取问题。为了区分钛合金混合组织中的初生 $\alpha$ 相和次生 $\alpha$ 相, 通过Image-Pro Plus软件特征参数(宽度、面积、形态等)筛选过滤(Filter Objects)功能, 在二值化处理的基础上, 采用特征过滤阈值区分初生 $\alpha$ 相和次生 $\alpha$ 相, 从而实现各自体积分数的定量分析。图6为TC11钛合金显微组织中初生 $\alpha$ 相和次生 $\alpha$ 相的筛选过滤效果图。

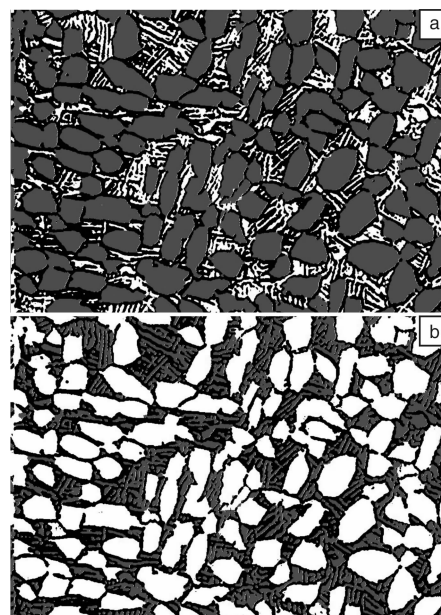
### 3.3 网篮组织和魏氏组织的特征参数定量表征

网篮组织特征参数主要包括 $\beta$ 晶粒尺寸、丛域尺寸大小、 $\alpha$ 片层厚度、 $\alpha$ 相体积分数和片层 $\alpha$ 形态。这些参数影响着裂纹萌生、裂纹扩展过程, 从而影响着钛合金的力学性能。

**$\beta$ 晶粒尺寸的测量<sup>[11-13]</sup>** 晶粒大小一般可以用晶粒的平均面积、平均直径等来表示。已提出晶粒度采用平均截距法测量。测量时用随机直线(或者曲线)多次截取晶粒, 若测量线总长度为 $L$ , 截过的晶粒数为 $N$ , 则连续分布相的晶粒大小 $L_N$ 为:  $L_N = L/N$ 。具体测量步骤如图7所示。提取出晶界之后, 在图像中随机画出多

条截线(从理论上讲, 截线数量越多且截取的晶粒数量越多, 测量数据有效性越高), 并在截线与 $\beta$ 晶粒晶界相交处作标记点, 统计各测试线上的晶粒个数 $N$ (截线端点尽量位于晶界, 避免不完全通过晶粒带来的计算误差)。

**丛域尺寸的测量<sup>[11-13]</sup>** 钛合金中魏氏组织的特征是 $\alpha$ 相以集束形式成丛域出现。丛域是指同取向的紧邻

图6 初生 $\alpha$ 相(a)和次生 $\alpha$ 相(b)体积分数的测量Fig. 6 Measurement of volume fraction of primary  $\alpha$  phase (a) and second  $\alpha$  phase (b)

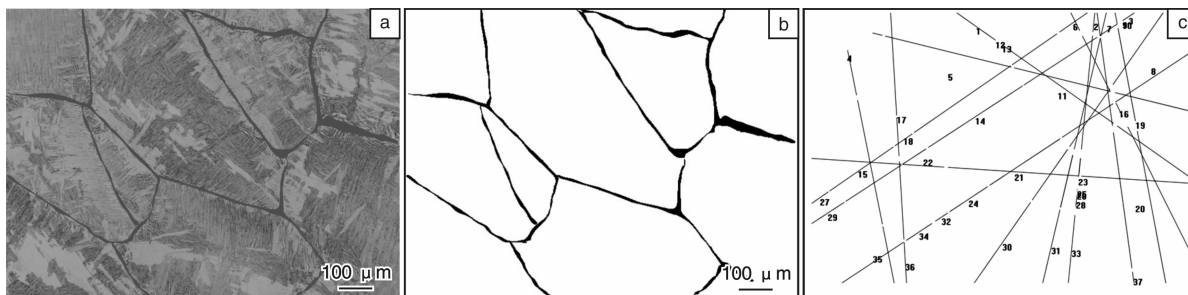


图 7 晶粒尺寸的测量: (a) 原始图像, (b) 晶界提取, (c) 截取线段的测量

Fig. 7 Measurement of grain size: (a) original image, (b) grain boundary split, and (c) measurement of intercepted line

$\alpha$  条的集合。相邻丛域因  $\alpha$  条取向不同而产生明显边界, 故可采用与测量晶粒尺寸相同的方法, 利用平均截距法对丛域大小进行测量(图 8)。在所得金相照片上, 随机画直线, 并在丛域与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。但在目前对丛域的三维形貌缺乏研究的情况下, 依据在二维图像中用平均截距法得到的丛域尺寸来描述丛域的三维空间信息还缺乏有力的依据, 所以, 上述丛域大小仅是丛域的二维名义尺寸。

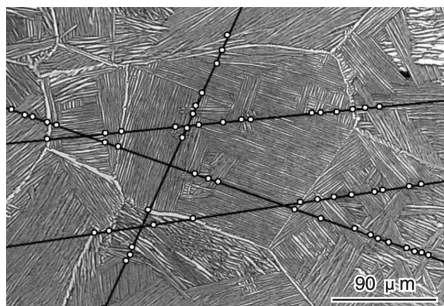


图 8 应用截线法测量丛域尺寸

Fig. 8 Measurement of colony size by mean intercept

在钛合金制备加工过程中的显微组织表征、演变和数学建模等方面, 作者研究团队首次应用体视学和定量金相原理, 基于定量图像软件分析平台, 建立了一套较为严格、可行的钛合金显微组织定量分析方法与模型, 实现了对钛合金显微组织中相的体积分数、 $\beta$  晶粒大小、 $\alpha$  条的厚度及丛域尺寸、 $\alpha$  条的形态及位向分布等特征参数的定量描述, 建立了等轴组织、混合组织和网篮组织特征参数定量表征模型; 采用 Feret Ratio 建立了网篮、混合及等轴等典型钛合金组织类型中  $\alpha$  相的统一表征模型, 从而为量化研究钛合金显微组织演变及工艺-组织-性能之间的关系奠定了基础。

#### 4 钛合金显微组织 - 力学性能关系模型建立

建立钛合金数据库专家系统的一个重要步骤是建立

微观组织和工艺参数与力学性能关系的定量分析模型, 从而可以依据显微组织和工艺参数预测合金的性能。定量地分析各种组织特征参与与材料 3 大要素(成分、工艺、性能)中各变量之间的关系, 这也是揭示钛合金本质的有效途径之一。

已建立起一套针对钛合金不同典型显微组织特征参数的定量测量、分析模型与方法, 提出了多个钛合金显微组织特征参数, 为实现定量分析组织与性能之间关系奠定了坚实的基础。然而, 由于钛合金性能与众多显微组织特征参数之间存在着高度非线性关系, 采用以往的经验回归方法, 利用少数简化的显微组织特征参数很难准确地建立组织与性能的定量关系。

在实现对钛合金显微组织定量分析和参数化描述的基础上, 提出了利用软计算方法(包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法等)建立钛合金显微组织与性能关系定量分析模型的思路<sup>[13-17]</sup>。根据长期实践中得到的显微组织对力学性能影响的定性规律及热加工工艺对组织特征的影响程度, 提出了定量关系模型及显微组织信息预处理过程中组织特征参数评价取舍的原则, 选择对性能影响显著的显微组织特征参数作为显微组织的代表信息进行定量分析, 同时剔除影响较小的次要显微组织特征参数。图 9 为钛合金显微组织中不同形态(Feret Ratio)  $\alpha$  相。

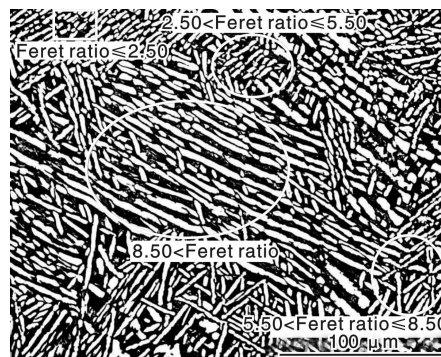


图 9 钛合金显微组织中的不同形态  $\alpha$  相

Fig. 9 Different Feret Ratio  $\alpha$  phase within titanium alloy microstructure

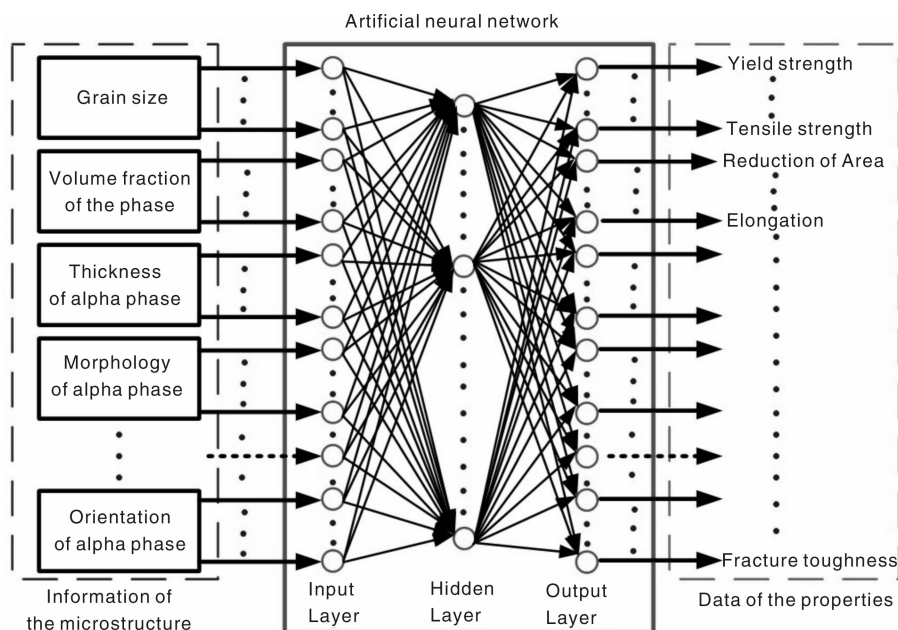


图 10 钛合金显微组织与性能定量关系的神经网络模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of artificial neural network model for predictions of mechanical properties for titanium alloys through the microstructure information

以 Ti17 合金为例来说明钛合金组织-性能关系的人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 模型的建立: 首先基于 BP 神经网络技术建立了钛合金组织与室温拉伸力学性能的定量关系模型(图 10), 提出了以钛

合金显微组织特征参数为输入变量、以预测性能为输出变量的显微组织与性能定量关系模型构建思想和方法。发现该模型对钛合金抗拉强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率均具有较高的预测精度(如图 11), 并采用面

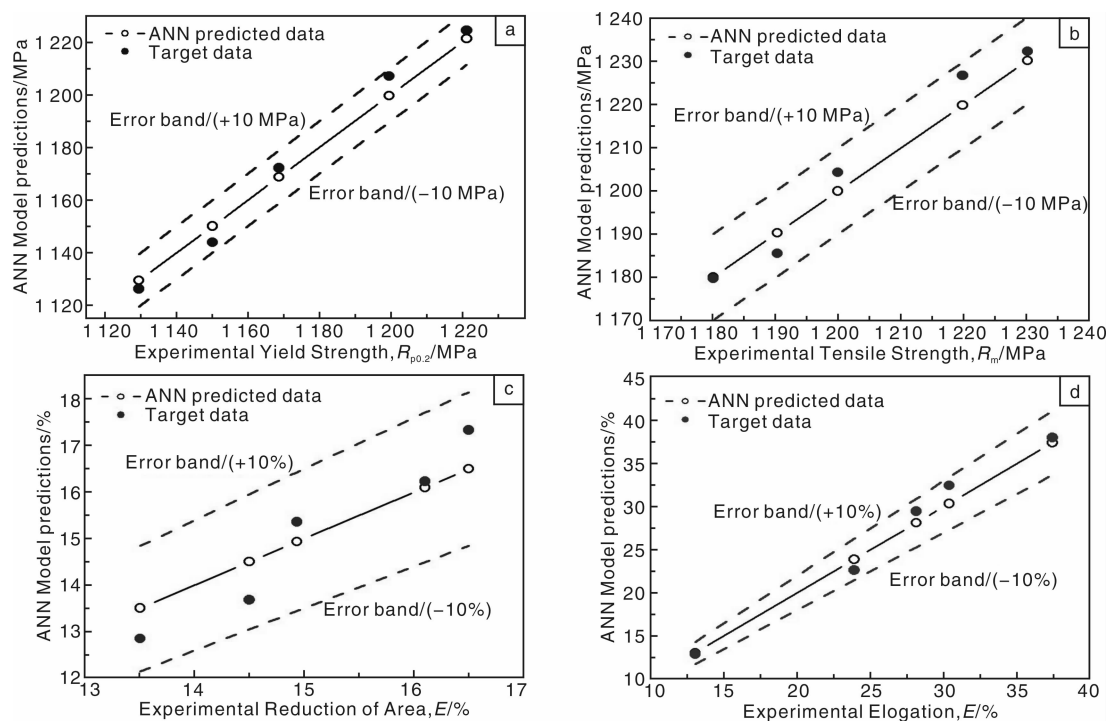


图 11 TC17 合金的组织-性能关系 ANN 模型预测误差分析: (a) 屈服强度, (b) 抗拉强度, (c) 断面收缩率, (d) 延伸率

Fig. 11 Comparison of predictions from ANN model and experimental data for mechanical properties at RT of TC17 alloy: (a) yield strength, (b) tensile strength, (c) reduction of area, and (d) elongation



向对象的设计方法,成功地建立了制备加工过程中组织-性能的预测专家系统。

## 5 钛合金工艺参数-力学性能关系模型建立

钛合金工艺参数与力学性能关系模型研究是建立钛合金数据库专家系统的重要内容之一,一直是材料科学工作者所关注的焦点。然而,由于存在数据信息繁琐、数学模型难于建立、数值推理运算复杂等难题,采用传统经验和回归方法建立工艺参数与力学性能之间的关系模型是相当困难的。

利用 ANN 技术在处理非线性问题方面的优势,解决了 ANN 建模的关键技术,利用在钛合金实际生产中积累的工艺-组织-性能关系的数据信息,确定了定量关系模型中工艺参数的评价与取舍原则。以 TC11 合金模锻件为例,采用 BP 神经网络和模糊神经网络建立了一套能对钛合金的力学性能进行预测、对工艺参数进行优化的关系模型<sup>[17-24]</sup>,该模型具有较高的精度和优异的泛化能力。

以国内某型号发动机 TC11 钛合金压气机盘件为

研究对象,收集了不同炉号、不同批次、不同锻造方式及锻后热处理等热加工工艺参数下的力学性能数据 90 组,采用 ANN 技术建立了 TC11 钛合金工艺参数-力学性能关系预测模型。将锻造温度、锻造方式及锻后冷却方式作为神经网络模型的输入参数,将抗拉强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率等室温拉伸、500 ℃ 高温拉伸性能作为输出参数。输入层和隐含层的传递函数是正切型 S 型函数,隐含层和输出层的传递函数为对数型 S 型函数,网络训练函数采用 Bayesian Regulation,并结合动量梯度下降学习函数 learn\_gdm 训练,目标误差为  $10^{-3}$ ,目标迭代步数为 5 000 步。

图 12 为 TC11 钛合金室温拉伸试验数据与神经网络模型预测数据的线性相关性分析结果。从图 12 中可以看出,线性相关性系数  $\geq 0.9$ ,与斜率为 1 的直线非常接近,最大相对误差为 8.59%。图 13 为 TC11 钛合金 500 ℃ 高温拉伸试验数据与神经网络模型预测数据的线性相关性分析结果,可以看出,抗拉强度的线性相关性系数低于 0.9,而延伸率和断面收缩率的线性相关性系数都大于 0.9,其中断面收缩率高达 0.98。

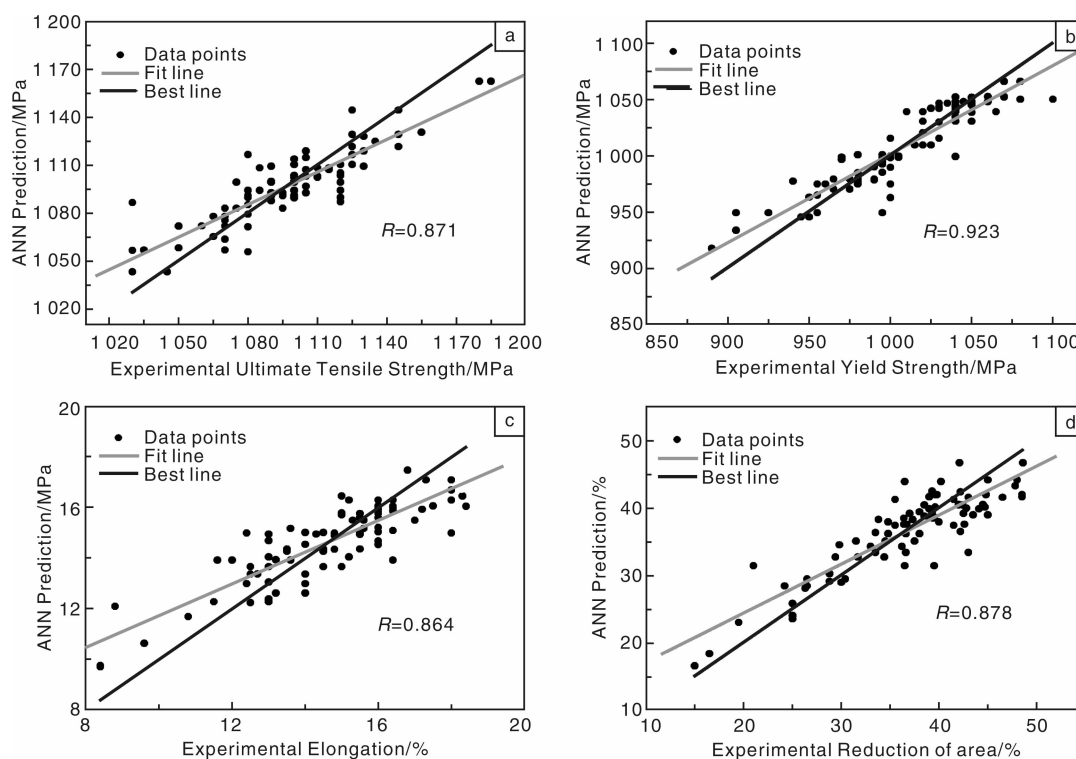


图 12 TC11 合金室温拉伸试验数据和神经网络模型预测数据的线性相关性分析: (a) 抗拉强度, (b) 屈服强度, (c) 延伸率, (d) 断面收缩率

Fig. 12 The correlation between the predicated values from regression and experiment datas for mechanical properties at RT of TC11 alloy: (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation, and (d) reduction of area



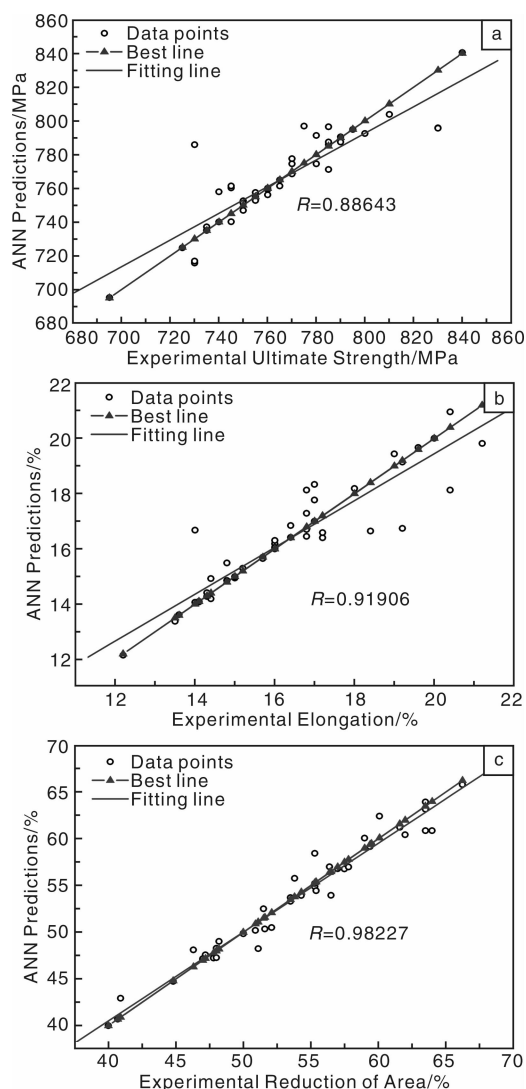


图13 TC11 合金高温拉伸性能(500 °C)试验数据和神经网络模型预测数据的线性相关性分析: (a) 抗拉强度, (b) 延伸率, (c) 断面收缩率

Fig. 13 The correlation between the predicated values from regression and experiment datas for mechanical properties of TC11 alloy tensiled at 500 °C: (a) tensile strength, (b) elongation, and (c) reduction of area

## 6 结 语

目前, 钛合金的成分设计、工艺-组织-性能间关系的研究逐步由定性研究向定量研究转变, 并已获得一定的进展, 如高强钛合金的成分定量设计、微观组织的定量表征方法、工艺-组织-性能间定量关系研究模型建立, 必将推动钛合金基础研究和应用发展。

## 参考文献 References

- [1] Lin Cheng(林 成), Yin Guili(尹桂丽), Liu Zhilin(刘志林), *et al.* 高强钛合金抗拉强度的理论计算[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2010, 39(7): 1 189–1 194.
- [2] Cheng Lin, Guili Yin, Yongqing Zhao, *et al.* Analysis of the Effect of Alloy Elements on Martensitic Transformation in Titanium Alloy with the Use of Valence Electron Structure Parameters [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 125: 411–417.
- [3] Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东), Lin Cheng(林 成). 钛合金数据库系统的开发、显微组织定量表征及亚稳 $\beta$ 钛合金的成分理论设计研究[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2009, 28(6): 51–55.
- [4] Lin Cheng, Liu Zhilin, Zhao Yongqing. Theoretical Research on Phase Transformation in Metastable  $\beta$ -titanium Alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40A: 1 049–1 058.
- [5] Lin Chen(林 成), Zhao Yongqing(赵永庆), Liu Zhilin(刘志林). *Quantitative Method for Titanium Alloy Compositions*(钛合金成分定量设计方法): China, ZL200910248943. 5[P]. 2010–06–30.
- [6] Zhao Yongqing(赵永庆), Guo Ping(郭 萍), Lin Cheng(林 成). *A 1 600 MPa Scale High Strength Titanium Alloy*(一种 1 600 MPa 级高强钛合金): China, ZL200910124037. 4[P]. 2009–08–12.
- [7] Zhao Yongqing(赵永庆), Guo Ping(郭 萍), Lin Cheng(林 成). *A 1 500 MPa Scale High Strength Titanium Alloy*(一种 1 500 MPa 级高强钛合金): China, ZL200910124038. 9[P]. 2009–08–15.
- [8] Zhao Yongqing, Zeng Weidong, Yu Sun. Quantification of Microstructural Features and Application of Artificial Neural Network in Correlation of Microstructure and Property of Ti-Alloys[C]// *Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference on Titanium*. Beijing: 2011: 964–967.
- [9] Wang Kaixuan(王凯旋), Zeng Weidong(曾卫东), Shao Yitao(邵一涛), *et al.* 基于体视学原理的钛合金显微组织定量分析[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2009, 38(3): 398–404.
- [10] Wang Kaixuan, Zeng Weidong, Zhao Yongqing, *et al.* Quantitative Analysis on Microstructural Evolution of Lamellar  $\alpha$  Phase in Titanium Alloy during Hot Working[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(4): 565–569.
- [11] Wang Kaixuan, Zeng Weidong, Zhao Yongqing, *et al.* Dynamic Globularization Kinetics during Hot Working of Ti17 Alloy with Initial Lamellar Microstructure[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 2 559–2 566.
- [12] Wang Kaixuan(王凯旋), Zeng Weidong(曾卫东), Zhao Yongqing(赵永庆). 钛合金显微组织与性能定量关系模型[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2011, 40(5): 784–787.
- [13] Wang K X, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* Flow Behaviour and Microstructural Evolution of Ti-17 Alloy with Lamellar Microstructure during Hot Deformation in  $\alpha + \beta$  Phase Field[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(1): 21–28.
- [14] Sun Y, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* Modeling Constitutive Relationship of Ti40 Alloy Using Artificial Neural Network[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1 537–1 541.
- [15] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Zhao Yongqing, *et al.* An ANFIS Model for the Prediction of Flow Stress of Ti600 Alloy during Hot Deformation Process [J]. *Computational Materials Science*,

- 2011, 50 (7): 2 273 – 2 279.
- [16] Sun Y, Zeng W D, Han Y F, *et al.* Modeling the Correlation between Microstructure and the Properties of the Ti-6Al-4V Alloy Based on an Artificial Neural Network[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(29–30): 8 757 – 8 764.
- [17] Sun Y, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* Modeling the Correlation of Composition-Processing-Property for TC11 Titanium Alloy Based on Principal Component Analysis and Artificial Neural Network[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(11): 2 231 – 2 237.
- [18] Sun Y, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* Development of Constitutive Relationship Model of Ti600 Alloy Using Artificial Neural Network[J]. *Computational Materials Science*, 2010, (48): 686 – 691.
- [19] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Zhao Yongqing, *et al.* Modeling of Constitutive Relationship of Ti-25V-15Cr-0.2Si Alloy during Hot Deformation Process by Fuzzy-Neural Network[J]. *Material and Design*, 2010, (31): 4 380 – 4 385.
- [20] Sun Y, Zeng W D, Zhang X M, *et al.* Prediction of Tensile Property of Hydrogenated Ti60 Titanium Alloy using Artificial Neural Network[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 20 (3): 335 – 340.
- [21] Han Y F, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* A Study on the Prediction of Mechanical Properties of Titanium Alloy Based on Adaptive Fuzzy-Neural Network[J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (6): 3 354 – 3 360.
- [22] Sun Yu (孙宇), Zeng Weidong (曾卫东), Zhao Yongqing (赵永庆). 基于 BP 神经网络的 TC11 钛合金工艺-性能模型预测[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2011, 40(11): 1 951 – 1 955.
- [23] Sun Y, Zeng W D, Han Y F, *et al.* Determination of the Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of the Ti-6Al-4V Alloy Using an Artificial Neural Network[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 60(7): 239 – 244.
- [24] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Zhang Xueming, *et al.* Modelling the Relationship between Hydrogen Content and Mechanical Property of Ti600 Alloy by Using ANFIS[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(8): 5 705 – 5 714.