文章编号: 1004-0609(2013)S1-s0364-04

# 响应面设计在钛合金超塑性上的应用

席 兵<sup>1,2,3</sup>, 巨建辉<sup>2</sup>, 王蕊宁<sup>3</sup>

(1.西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055; 2. 西北有色金属研究院, 西安 710016;3. 西部钛业有限责任公司, 西安 710201)

摘 要: 钛合金具有比强度高、中温性能好、耐腐蚀、无磁、焊接性能好等特点,是一种重要的金属材料。采用
 Minitab 软件中的响应面设计建立 TC4 钛合金在超塑性高温拉伸的网络模型,利用该模型可获得该合金的最佳伸长率、变形条件和各影响因素间的显著性效果,为超塑成形的热加工工艺和质量控制提供理论依据。
 关键词: TC4 钛合金;超塑性;伸长率;响应面设计
 中图分类号: TG146.2
 文献标志码: A

## Application of response surface design in superplastic titanium alloy

XI Bing<sup>1,2,3</sup>, JU Jian-hui<sup>2</sup>, WANG Rui-ning<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

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

3. Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

**Abstract:** Titanium alloy has high intensity, good medium temperature performance, corrosion resistance, no magnetic, good welding performance characteristic, and it is a kind of important the metal materials. Based on the Minitab software of response surface, the superplastic high temperature tensile network model of TC4 titanium alloy was establistled and the model was used for the alloy to obtain optimal elongation, deformation condition and the factors of significant effect. This can provide a theoretical basis for the superplastic forming of thermal processing and quality control. **Key words:** TC4 titanium alloy; superplastic; elongation; design of response surface

超塑性已被公认为材料科学的一个新分支,而且 判明超塑性是材料的普遍潜在属性,不仅合金乃至金 属间化合物和陶瓷一类硬脆性高温结构材料,只要满 足一定的内在和外在条件,都能将其潜在的超塑性开 发出来<sup>[1]</sup>。

TC4 钛合金名义成分为 Ti-6Al-4V,属于 α+β 型 钛合金,由于它具有良好的综合性能、成形性能和焊 接性能等优势,因此成为钛合金工业中的王牌合金, 该合金实用量占全部钛合金的 50%以上<sup>[2]</sup>。目前,对 于 TC4 钛合金的超塑性研究较多,包括变形机理、超 塑性先进成形技术等<sup>[3-4]</sup>。但钛合金在变形时抗力大, 热力容差小等特点,变形参数对组织和性能影响较大。 而超塑性的影响因素较多,且很多因素很难把握,如 本文作者利用 Minitab15 响应面设计中的中心复 合设计方法讨论钛合金在超塑性高温拉伸时晶粒尺 寸、变形温度、应变速率对伸长率的影响,通过本次 实验找出最佳的超塑性变形试验条件及分析各影响因 素间的交互作用对超塑性变形行为的影响,为超塑成 形的热加工和质量控制提供理论依据。

### 1 响应面设计原理

响应面设计分析法作为一种新的回归分析法,目

何确定它们之间的关系,成为钛合金超塑成形领域的 一个重要课题。

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTCG01-17)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 王蕊宁, 高级工程师, 博士; 电话: 029-86968630; E-mail: zulingxiaoxiao@163.com

 $\sigma$ 

前在材料研究中的数学分析中广泛应用<sup>[5]</sup>。通过 Minitab 软件中的 DOE(design of experiment)进行响应 曲面设计,设计类型为中心复合设计,因子数:3(晶 粒尺寸、变形温度、应变速率),输入3个变量的最大、 最小值。中心复合设计是响应曲面设计的一种,是在 2 水平全因子和部分试验设计的基础上发展出来的一 种试验设计方法,它是2水平全因子和部分试验设计 的拓展,通过对2水平试验增加一个零点和两个轴向 点(相当于增加了3个水平),从而可以对评价指标(输 出变量)和因素间的非线性关系进行评估,它常用于在 需要对因素的非线性影响进行测试的试验。由于中心 复合设计在考察相等因素数的情况下试验的次数要比 正交设计和均匀设计多,因此得到的非线性拟合模型 的预测性通常也要比正交设计和均匀设计好<sup>[6-7]</sup>。

利用响应面设计中的中心复合设计钛合金超塑性 高温拉伸试验,影响超塑性行为的因素(输入因子)为 晶粒尺寸 X<sub>1</sub>、变形温度 X<sub>2</sub>、应变速率 X<sub>3</sub>,评价指标(输 出因子)为钛合金超塑性高温拉伸伸长率。中心复合设 计原理图见图 1,假设每一个影响因素的中心点为 0, 所设计值均匀的分布在中心点周围,3 个变量(*n*=3), 立方体上的每一个点表示中心复合设计值。当立方体 上每一个点代表某一水平时,每一个轴对应相应的影 响因素。在本次研究中,包括 2<sup>n</sup>(2<sup>3</sup>=8)因素点, 2*n*(2×3=6)轴点和 6 个中心点,共进行试验次数 2<sup>3</sup>+2×3+6=20。



图1 中心复合设计原理图

Fig.1 Theory picture of central composite design

# 2 TC4 钛合金本构关系

### 2.1 本构方程

目前较常用的就是 Backofen 所提出的可以描述 超塑性流动特征的方程(称为超塑性本构方程),这种 方程反映了稳定状态下变形时流动应力与应变速率之 间的关系,公式如下所示:

$$= K\dot{\varepsilon}^m \tag{1}$$

式中: σ为流动应力; έ为应变速率; K为材料系数, 其值取决于材料的成分、结构以及试验的温度; m为 流动应力对应变速率敏感性指数,是材料超塑性能的 重要特征,它反映了材料在拉伸变形过程中的抵抗缩 颈发展的能力,一般超塑性材料的 m 在 0.3~0.9 之间, 多数在 0.4~0.8 之间<sup>[8-9]</sup>。

#### 2.2 本构关系建立

对超塑性本构关系的影响因素很多,其中晶粒尺 寸、变形温度、应变速率对超塑性性能的影响最大, 且应变速率敏感性指数 *m* 和伸长率反映超塑性的大 小<sup>[10]</sup>。结合 TC4 钛合金超塑性高温拉伸变形中流变应 力的变化规律,主要研究晶粒尺寸  $X_1$ 、变形温度  $X_2$ 、 应变速率  $X_3$ 对超塑性高温拉伸伸长率的影响。本文试 验参数  $X_1$ 最大值 9 µm,最小值 3 µm;  $X_2$ 最大值 1 000 ℃,最小值 800 ℃,  $X_3$ 最大值 1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>,最小值 1×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>。将实验数据分为编码数据和非编码数据, 具体数据分类方式如表 1 所示。

表1 TC4 合金超塑性影响因素和不同编码水平下的非编码 值

 Table 1 Factors and uncoded (actual) values of variables at different coded levels on superplastic of TC4 alloy

	Countral		Unc	Uncode values		
Factor	Sym	of c	of coded level			
	Uncode	Coded	-1	0	1	
Grain/µm	$x_1$	$X_1$	3	6	9	
Deformation temperature/°C	<i>x</i> <sub>2</sub>	$X_2$	800	900	1 000	
Strain rate/10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	$x_3$	$X_3$	1	5.5	10	

#### 2.3 试验结果分析

表2列出了TC4合金在中心复合设计下的超塑性 高温拉伸编码与非编码试验组,利用 Minitab 软件中 的响应面设计建立的网络关系模型预测伸长率,分析 实验过程获得的真实伸长率与预测值的吻合程度以及 本文所建立的网络的拟合方程,获得TC4合金超塑性 高温拉伸时伸长率的最大值及各影响因素间的显著性 大小,通过这些结果预测来满足塑性加工的误差要求。

分析是使用已编码单位进行的,利用 Minitab 软件中的响应面设计得出超塑性高温拉伸伸长率 *Y* 的估计回归系数,见表 3。由表 3 可得超塑性高温拉伸伸长率 *Y*<sub>1</sub> 拟合方程为式(2)。

### 表2 TC4 合金在中心复合设计下的超塑性高温拉伸编码与 非编码试验组

 Table 2
 Central composite design consisting of experiments

 for study of three experimental factors in coded and actual level
 with experimental results

Tavt	Code	ed lev	el of	Actual level of		variables	
ICAL	Vä	ariabl	es	Atti	variables		
number	$X_1$	$X_2$	<i>X</i> <sub>3</sub>	$d(x_1)/\mu m$	$t(x_2)/^{\circ}\mathbb{C}$	$\dot{\varepsilon}_3(x_3)/10^{-4} \mathrm{s}^{-1}$	
1	0	0	0	6	900	5.5	
2	-1	-1	-1	3	800	1	
3	1	0	0	9	900	5.5	
4	1	-1	-1	9	800	1	
5	-1	1	1	3	1 000	10	
6	-1	-1	1	3	800	10	
7	1	1	1	9	1 000	10	
8	-1	1	-1	3	1 000	1	
9	-1	0	0	3	900	5.5	
10	0	0	0	6	900	5.5	
11	0	0	0	6	900	5.5	
12	0	0	1	6	900	10	
13	0	0	0	6	900	5.5	
14	0	0	-1	6	900	1	
15	0	0	0	6	900	5.5	
16	0	1	0	6	1 000	5.5	
17	1	1	-1	9	1 000	1	
18	1	-1	1	9	800	10	
19	0	-1	0	6	800	5.5	
20	0	0	0	6	900	5.5	

**表3** 伸长率 A 的估计回归系数

<b>Huble b</b> Elongation futio if evaluate regression elementen	Table 3	Elongation	ratio A	evaluate	regression	coefficient
--	---------	------------	---------	----------	------------	-------------

Term	Coefficient	Standard error	т	D	
I CI III	Coefficient	of coefficient	1	1	
Constant	0.497 273	0.073 74	6.744	0.000	
$X_1$	-0.010 000	0.067 83	-0.147	0.886	
$X_2$	-0.010 000	0.067 83	-0.147	0.886	
$X_3$	-0.020 000	0.067 83	-0.295	0.774	
$X_1 \times X_1$	0.081 818	0.129 35	0.633	0.541	
$X_2 \times X_2$	-0.018 182	0.129 35	-0.141	0.891	
$X_3 \times X_3$	-0.168 182	0.129 35	-1.300	0.223	
$X_1 \times X_2$	-0.050 000	0.075 84	-0.659	0.525	
$X_1 \times X_3$	-0.000 000	0.075 84	-0.000	1.000	
$X_2 \times X_3$	-0.000 000	0.075 84	0.000	1.000	

注: T为T检验; P为显著性效果。

对式(2)中X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>分别求一阶导数并令其一阶 导数为零,计算出编码值的最佳变量值为X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>。 非编码值(真实值)与编码值存在一个等式(3)关系。本 次试验非编码值(真实值)与编码值存在一个等式 (4)~(6)关系。

TC4 钛合金超塑性高温拉伸伸长率拟合方程为:  $Y_1=0.49-0.01X_1-0.01X_2-0.02X_3+0.081X_1^2-0.018X_2^2-0.168X_3^2-0.05X_2X_3$  (2)

$$X_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_i} \tag{3}$$

式中:  $X_i$  为求一阶导数计算出的编码值;  $x_i$  为对应的 非编码值(真实值/计算值);  $x_i^0$  为中心点的非编码值 (所选的中心值);  $\Delta x_i$  为编码值 0、1 所对应的非编码 值之差;

晶粒尺寸: 
$$X_i = \frac{x_i - 6}{3}$$
 (4)

变形温度: 
$$X_i = \frac{x_i - 900}{100}$$
 (5)

应变速率: 
$$X_i = \frac{x_i - 5.5}{4.5}$$
 (6)

通过式(4)~(6)计算可获得 TC4 钛合金超塑性高温 拉伸的最佳变形参数,对最佳变形参数重复进行试验 获得的结果与理论值进行验证,研究真实值与预测值 的吻合程度。最后利用 Minitab 软件中的等值线图和 等高线图分析三个影响因素之间的交互作用对钛合金 超塑性变形行为的影响。该方法的研究对钛合金超塑 成形在过程中变形参数的选取具有重要意义。

### 3 结论

1) 利用响应面设计建立了 TC4 钛合金超塑性在 不同影响因素(晶粒尺寸、变形温度、应变速率)下获 得最佳伸长率的关系网络模型。

2)通过响应曲面设计方法拟合数学模型,判断网络的预测值与试验结果吻合程度。描述 TC4 合金超塑性变形过程伸长率的变化规律,并分析各影响因素间的交互作用。

3)该模型可用来反应 TC4 钛合金不同影响因素 (晶粒尺寸、变形温度、应变速率)下获得大伸长率的 关系,并对实际热加工生产有很好的指导作用。

#### REFERENCES

[1] 宋玉泉. 超速拉伸变形的力学解析[J]. 机械工程学报, 2003,

39(10): 64-72.

SONG Yu-quan. Mechanical analysis of superplastic tensile forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 64–72.

 [2] 赵永庆,陈永楠. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙:中南大学 出版社, 2012: 4-6.
 ZHAO Yong-qing, CHEN Yong-nan. Phase transformation and

heat treatment of Titanium alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 4–6.

- [3] 王 敏, 蔺成效. Ti-6Al-4V 合金超塑性变形时的组织演化[J].
   稀有金属材料与工程, 2012, 41(7): 1176-1180.
   WANG Min, LIN Cheng-xiao. Microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy during superplastic deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(7): 1176-1180.
- [4] 丁 华,张凯锋. 材料超塑性研究的现状与发展[J]. 中国有 色金属学报, 2004, 14(7): 1059-1066.
   DING Hua, ZHANG Kai-feng. Current status and developments in superplastic studies of materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1059-1066.
- [5] 徐 颖,李明利,赵选民,卢凤纪.响应曲面回归分析法—— 种新的回归分析法在材料研究中的应用[J].稀有金属材料与 工程,2001,30(6):428-431.

XU Ying, LI Ming-li, ZHAO Xuan-min, LU Feng-ji. The response curved surface regression analysis technique—The application of a new regression analysis technique in materials research [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(6): 428–431.

[6] DILER E A, IPEK R. An experimental and statistical study of

interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on the flexural strength of Al–SiCp composites by P/M using central composite design[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 548: 43–55.

- [7] CHO II-Hyoung, ZOH Kyung-Duk. Photocatalytic gradation of azo dye (Reactive Red 120) in TiO<sub>2</sub>/UV system: Optimization and modeling using a response surface methodology (RSM) based on the central composite design[J]. Dyes and Pigments, 2007, 75: 533–543.
- [8] 吴诗淳. 金属超塑性变形理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 98-105.
   WU Shi-chong. The theory of metal superplastic deformation

[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1977: 98–105.

 [9] 何景素,王燕文. 金属的超塑性[M]. 北京:科学出版社, 1986: 32-33.
 HE Jing-su, WANG Yan-wen. Metal superplastic[M]. Beijing:

HE Jing-su, WANG Yan-wen. Metal superplastic[M]. Beijing: Science Press, 1986: 32–33.

[10] 赵文娟, 丁 桦, 周 舸, 曹富荣, 侯红亮. TC21 合金超塑性 本构关系的 BP 人工神经网络模型[J]. 锻压技术, 2009, 34(4): 138-142.

ZHAO Wen-juan, DING Hua, ZHOU Ge, CAO Fu-rong, HOU Hong-liang. Constitutive relationship model of TC21 alloy during superplastic deformation based on BP artificial neural network[J]. Forging & Tamping Technology, 2009, 34(4): 138–142.

(编辑 杨幼平)