

# 基于 Logistic 回归模型的钛合金件激光直接成形工艺参数分析

孔 源<sup>1,2</sup> 刘伟军<sup>1</sup> 王越超<sup>1</sup> 王靖震<sup>1,2</sup> 杨 光<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

<sup>3</sup>沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136

**摘要** 如果使用激光金属直接成形方法制备金属零件时,能够通过最优的工艺参数来有效地控制金属成形件内部的不同区域及成形件与基板间的温度梯度和能量分布,使成形件内部产生缺陷的几率减小,会极大地提升成形件的力学性能。针对激光金属直接成形方法制备金属零件内部是否存在缺陷的二分类问题,通过使用正交旋转实验设计的方法进行工艺实验,得到不同参数下的钛合金激光金属直接成形试样是否存在内部缺陷情况。对实验结果进行 Logistic 回归建模,使用 Logistic 回归模型计算的工艺参数进行验证实验,样件内部未发现内部缺陷,说明 Logistic 回归模型结果与实际结果有较高的一致性。Logistic 回归模型对激光金属直接成形工艺参数的选择具有积极的指导意义。

**关键词** 激光技术;Logistic 回归模型;正交旋转试验设计;金属件激光直接成形;钛合金

**中图分类号** TN249;TG146.2;TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1103005

## Analysis of Process Parameters about Direct Laser Metal Deposition Shaping Process of Titanium Alloys Based on Logistic Regression Model

Kong Yuan<sup>1,2</sup> Liu Weijun<sup>1</sup> Wang Yuechao<sup>1</sup> Wang Jingzhen<sup>1,2</sup> Yang Guang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Shenyang University of Aeronautics & Astronautics, Shenyang, Liaoning 110136, China

**Abstract** When machining metal parts with laser metal deposition shaping (LMDS) method, if the temperature gradients and energy distributions of different areas inside cladding layer and that between cladding layer and substrate can be effectively controlled with optimal process parameters, then the probability of internal defects of cladding layer can be reduced, and the mechanical properties will be greatly improved. To the problem whether the metal parts made by LMDS contain internal defects, rotatable orthogonal experiments are designed for acquiring the distributions of internal defects of the metal parts under different process parameters. A logistic regression model is built based on these experimental data. Finally an authentication test is taken with the process parameters calculated by the logistic regression model, and no internal defects are found. The results show that the logistic regression model is in good agreement with the actual situation. The logistic regression model proposed in this paper is proved to have the guiding significance for selecting LMDS process parameters.

**Key words** laser technique; Logistic regression model; rotatable orthogonal experiment design; direct laser metal deposition shaping process; titanium alloys

**OCIS codes** 030.6600; 160.3900; 140.3390

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-08-11

作者简介: 孔 源(1984—),男,博士研究生,主要从事数值模拟、金属成形工艺等方面的研究。E-mail: ykong@sia.cn

导师简介: 刘伟军(1969—),男,博士,研究员,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: wjliu@sia.cn

# 1 引 言

激光快速成形技术是 20 世纪 90 年代中期开始出现并迅速发展起来的一项新的先进制造技术。它实际上就是使用激光熔覆的方法将钛合金金属粉末材料按照二维轮廓信息逐层堆积,最终形成三维实体零件。该技术一经出现,就成为西方发达国家激光加工领域研究的热点。美国率先在 F-22 和 F/A-18E/F 飞机上采用了 TC4 钛合金激光快速成形件<sup>[1,2]</sup>。目前,激光直接成形技术也已成为我国激光加工界的研究热点,西北工业大学、北京有色金属研究总院、清华大学和北京航空航天大学等单位取得了一定的研究成果<sup>[1~8]</sup>。

激光金属直接成形(LMDS)是一项工艺性较强的技术,该技术所涉及的工艺参数主要包括激光功率密度、扫描速度、送粉量、基板预热温度、环境温度、粉末粒度、粉末形状和光斑半径<sup>[1~5]</sup>等,而这些工艺参数与成形件质量密切相关,成形件内部成形质量严重影响成形件力学性能。如果通过适当的工艺参数选择,使人们能够有效地控制金属成形件内部的不同区域及成形件与基板间的温度梯度和能量分布,使成形件内部产生内部缺陷的几率减小,将是很有意义的。

针对大部分关于钛合金激光直接成形工艺的论

文只是分别说明单个参数对成形件质量影响的现状,本文将钛合金激光金属直接成形的工艺实验与 Logistic 正交旋转回归模型相结合,利用正交实验设计的方法,对实验先进行科学的规划设计,从而避免了大量的重复实验,之后进行一系列的正交实验。然后对实验结果数据采用 SPSS 统计软件进行 Logistic 回归分析,把成形件内部是否存在缺陷(气孔、裂纹等,标准参看 GB/T7233.1-2009)<sup>[11]</sup>作为二分类因变量,把对成形件成形质量可能有影响的相关工艺参数作为自变量,建立工艺参数与成形质量之间影响因子关系的数学模型,并以此数学模型来指导以后的钛合金激光金属直接成形工艺参数的选择。

## 2 钛合金激光金属直接成形工艺实验

### 2.1 实验方法

为测试钛合金激光金属直接成形各工艺参数(激光功率、扫描速度、基板预热温度、送粉率)对成形件宏观质量的综合影响,在不同的实验参数配合下对单道多层(薄墙)进行正交实验,实验粉末材料(球形粉)和基板材料均为 TC4(Ti-6Al-4V),其化学组分如表 1 所示。实验采用的实验系统如图 1 所示。

表 1 TC4 的材料成分(质量分数,%)

Table 1 Material composition of TC4 (mass fraction, %)

Elements	H	O	Al	N	C	V	Si	Fe	Ti
TC4	≤0.009	≤0.16	≤6.02	≤0.027	≤0.056	≤4.00	≤0.039	≤0.15	bal

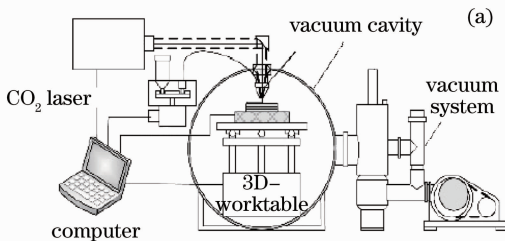


图 1 钛合金激光金属直接成形系统。(a)系统结构框图;(b)设备实物图

Fig.1 Frame of LMDS system. (a) Schematic diagram; (b) photo of titanium alloy LMDS

### 2.2 实验步骤

在实验之前对粉末材料在 150 °C 左右的真空条件下(小于等于 10 Pa)进行烘干处理,减少吸潮对熔覆质量可能带来的影响;同时对基材表面用砂纸打磨并用无水乙醇和丙酮依次清洗干净后与粉末一同干燥。将真空腔体压强抽到 10<sup>-2</sup> Pa 时充入氩气。激光快速成形工艺参数如下:激光功率(Q) 1800~2200 W;扫描速度(V)5~8 mm/s;送粉率为

1~5 g/min;基板预热温度 20~400 °C;光斑直径 2 mm,环境温度 20 °C,载气压力为 0.3 MPa,Z 轴单层行程 ΔZ 为 0.2 mm,载气流量为 3 L/min,粉末入射角度为 53°,粉末形状为球形,粒度为 -100~+200 目(75~150 μm)。进行 23 组工艺实验,保持预热温度 3 h 后,在真空箱内自然冷却。之后从真空箱体中取出,制备金相试样,采用光学显微镜观察熔覆层内部缺陷形貌,如图 2 所示。



图 2 23 组正交实验样件

Fig. 2 Samples of 23 orthogonal experiments

### 3 Logistic 回归分析与实验设计

#### 3.1 Logistic 回归分析理论

在钛合金激光金属直接成形过程中有无内部缺陷与各个工艺参数变量之间关系的分析中,对于定量分析研究,线性回归模型分析是应用最广泛的统计分析方法,但是当因变量是一个二分类变量时线性回归就不适用了<sup>[9,10]</sup>。比如,本文中的激光金属直接成形所得到的成形件内部有面积型缺陷(裂纹)在厚度方向小于 5 mm 的裂纹或者非面积型缺陷(气孔)尺寸小于厚度的 10% 时视为无缺陷( $y=1$ ),而非面积型缺陷(气孔)尺寸大于厚度 10% 或者面积型缺陷(裂纹)厚度大于 5 mm 时视为有缺陷( $y=0$ ) (参看 GB/T7233.1-2009),此时就要用到非线性回归模型进行分析。通常用到的是 Logistic 回归模型。

Logistic 模型的累积分布函数可表示为

$$P(y=1|x) = P[\epsilon \leq (\alpha + \beta x)] = \frac{1}{1 + \exp(-\epsilon)}. \quad (1)$$

该函数称为 Logistic 函数,具有 S 型的分布。式中  $\epsilon$  被定义为一系列影响事件发生概率的因素的线性函数,  $\epsilon = \alpha + \beta x$ , 其中  $x$  为自变量,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为回归截距和回归系数。

当有  $k$  个自变量时,相应的 Logistic 回归模型可表示为

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k. \quad (2)$$

#### 3.2 正交旋转实验设计

回归分析是在实验数据的基础上进行的。对于影响钛合金激光金属直接成形的成形件质量的四个可能的因素来说,如果要全面地进行实验,实验数目会非常多。本文采用四因素二次旋转正交实验(1/2 实施)设计方法,按正交表格求得二分类因变量  $y$

在相应自变量激光功率  $P$ 、送粉量  $m$ 、基板温度  $T$ 、扫描速度  $V$  取不同值情况下的仿真实验数据。然后对所得实验数据用 Logistic 回归分析方法求得它们之间的数学模型。

经过正交实验设计后,用 Logistic 回归分析方法将会得到的四因素二次模型为

$$\hat{y} = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \beta_0 + \sum_{j=1}^4 \beta_j X_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=j+1}^4 \beta_{jk} X_k X_j + \sum_{j=1}^4 \beta_{jj} X_j^2, \quad (3)$$

式中的  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jk}, \beta_{jj}$  分别是零次、一次、交互和二次项的系数。 $X_j$  为各因素的水平值,用  $X_{1j}$  和  $X_{2j}$  来表示  $X_j$  的下限和上限,分别称为因素的下水平、上水平。为了得到二次正交旋转实验设计表,还需要对  $X_j$  进行编码,即是对  $X_j$  的实验水平  $X_{0j}, X_{1j}, X_{2j}$  和  $X_{3j}$  进行正交线性变换。

$$X_{0j} = \frac{1}{2}(X_{1j} + X_{2j}), \quad (4)$$

$$\Delta_j = \frac{1}{2}(X_{2j} - X_{1j}), \quad (5)$$

式中  $X_{0j}$  称为  $X_j$  的基准水平(CK),  $\Delta_j$  表示  $X_j$  的变化范围。设

$$Z_{kj} = \frac{X_{kj} - X_{0j}}{\Delta_j}, k = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

$$Z'_{ij} = Z_{ij}^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ij}^2. \quad (7)$$

确定星号臂  $r^2$  长度  $r = \sqrt[4]{m_c} = 1.682; m_0$ : 各因素都取零水平的中心实验的重复次数,这里为 7;  $p$ : 因素个数,这里为 4;  $m_c$ : 实验的实验次数为  $2^{p-1} = 8; N$ : 正交次数,这里为 23。

确定金属激光直接成形工艺参数的变化范围,根据变化范围确定实验点。表 2 为四因素五水平编码表。表 3 为所得到的二次正交旋转实验设计表。

表 2 四因素五水平编码表  
Table 2 Coding table of 4 factors and 5 levels

Levels	Factors			
	Laser power /W	Scanning velocity /(mm/s)	Substrate temperature /°C	Powder feed rate /(g/min)
Upper asterisk arm (+1, 682)	2200	8	400	7
Upper levels (+1)	2119	7	366	5.9
Zero levels (CK)	2000	5.5	210	4.35
Lower levels (-1)	1881	4	54	2.8
Lower asterisk arm (-1, 682)	1800	3	20	1.7
Spacing $\Delta_j$	119	1.5	156	1.55

表 3 四因子正交旋转(1/2 实施)实验表  
Table 3 Four-factor orthogonal rotation (1/2 operation) test table

Number	$Z_0$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_1Z_2$	$Z_1Z_3$	$Z_1Z_4$	$Z_2Z_3$	$Z_2Z_4$	$Z_3Z_4$	$Z'_1$	$Z'_2$	$Z'_3$	$Z'_4$	y
1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	0.406	0.406	0.406	0.406	1
2	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.406	0.406	0.406	0.406	0
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.406	0.406	0.406	0.406	0
4	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.406	0.406	0.406	0.406	1
5	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.406	0.406	0.406	0.406	0
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.406	0.406	0.406	0.406	0
7	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.406	0.406	0.406	0.406	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.406	0.406	0.406	0.406	0
9	1	-1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.234	-0.594	-0.594	-0.594	0
10	1	1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.234	-0.594	-0.594	-0.594	0
11	1	0	-1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	2.234	-0.594	-0.594	0
12	1	0	1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	2.234	-0.594	-0.594	0
13	1	0	0	-1.682	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	2.234	-0.594	0
14	1	0	0	1.682	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	2.234	-0.594	1
15	1	0	0	0	-1.682	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	2.234	1
16	1	0	0	0	1.682	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	2.234	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	1
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	0
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	1
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	0
22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	1
23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	-0.594	1

## 4 实验分析结果

### 4.1 数据的 Logistic 回归分析

针对表 3 数据,应用 SPSS 统计软件,用 Logistic 回归分析的方法进行数据处理,建立回归模型为

$$\hat{y} = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = -8.806 + 11.315Z_3 - 30.199Z_4 + 7.097Z_1Z_2 - 23.598Z_1Z_3 + 15.638Z_1Z_4 - 7.655Z_1^2 - 7.655Z_2^2. \quad (8)$$

表 4 为 SPSS 统计软件输出的分类表。

表 4 分类表  
Table 4 Table of classification

Value of observations	Prediction			
	y		Correct percentage	
	0.00	1.00		
y	0.00	11	3	78.6
	1.00	0	9	100.0
Total percentage				87.0

由 Logistic 回归模型分类表 4, 可以看出 Logistic 回归模型对实验数据的敏感度即正确的预测事件发生的案例数与观测的事件的发生总数之比为 100%, 指定度即正确预测的事件未发生数与观测事件未发生数的总数之比为 78.6%, 总正确率即正确预测的案例数和案例数总数之比为 87%。

又根据 SPSS 统计软件输出的 Logistic 回归模

型, 卡方统计性检验, 模型卡方统计检验值为  $\chi^2$  (chi-square)=21.228, 对应的显著水平为 Sig 小于 0.003, 可见 Logistic 回归模型卡方统计性显著, 可以认为所得到的 Logistic 回归模型自变量能对因变量进行很好的解释。

将(6)式和(7)式代入(8)式得到用自变量  $X_i$  表示的回归方程

$$P = 1 / \{1 + \exp[-(-1283.247 + 1.78X_1 - 42.6X_2 + 2.075X_3 - 189.48X_4 + 0.04X_1X_2 - 0.001X_1X_3 + 0.085X_1X_4 - 0.0005X_1^2 - 3.4X_2^2)]\}. \quad (9)$$

#### 4.2 Logistic 回归模型验证

为了验证回归模型的有效性, 再进行一次实验, 将实验结果(如图 2 所示)与回归方程计算结果作对比分析。实验步骤如 2.2 节中所述,  $X_1$  选取为 2000 W 和  $X_2$  选取为 5.5 mm/s,  $X_3$  选取为 350 °C,  $X_4$  在这里选取为 3 g/min。代入(9)式得:

$$P = 1 / \{1 + \exp[-(-1283.247 + 1.78X_1 - 42.6X_2 + 2.075X_3 - 189.48X_4 + 0.04X_1X_2 - 0.001X_1X_3 + 0.085X_1X_4 - 0.0005X_1^2 - 3.4X_2^2)]\} = 99.17\%$$

$P$  为说明钛合金激光金属直接成形件模型无内部缺陷的概率为 99.17%, 应该判断成形件内部无缺陷。

图 3 为工艺参数  $X_1$  选取为 2000 W 和  $X_2$  选取为 5.5 mm/s,  $X_3$  选取为 350 °C,  $X_4$  选取为 3 g/min 的实验样件(分别为 200 层薄墙和空心叶片)。图 4 为薄墙件的金相图, 扫描层数为 200, 其他工艺参数与 2.2 节中一致。由图中可以看出成形件组织均匀致密, 没有气孔、裂纹等内部缺陷, 同时可以看到枝

晶生长方向沿着加工方向, 组织细密均匀, 晶粒细小, 等轴晶/柱状晶较多。成形层粉末以 Ti-6Al-4V 为主要成分, 可以有效提高其与钛合金基板 Ti-6Al-4V 的浸润性, 实现钛合金基体与成形层之间良好过渡。高能量激光束扫过预置涂层, 熔化的涂层合金进入钛合金基体表层熔化形成的微小熔池中, 由于二者浸润性良好, 故成形层与钛合金基体能够形成良好的冶金结合, 结合面具有很高的强度。这与

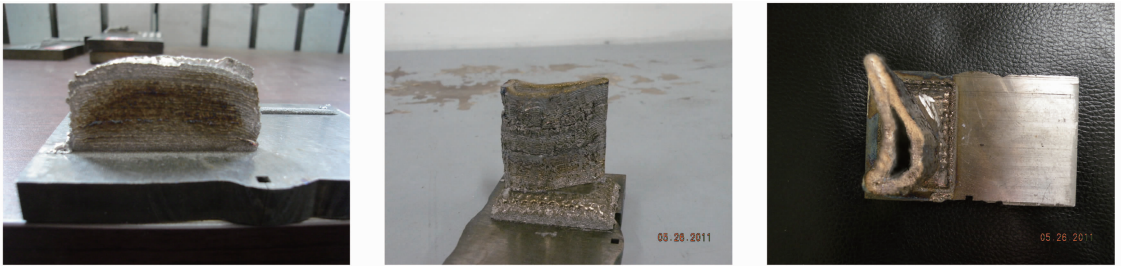


图 3 TC4 工艺实验成形件图  
Fig. 3 Photographs of TC4 coating

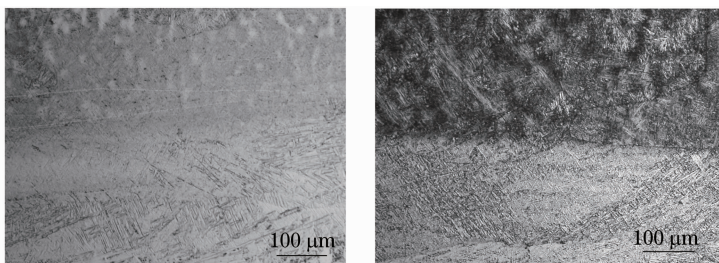


图 4 工艺实验成形件的横截面光学显微照片  
Fig. 4 Optical-micrograph of the transverse cross-section of the LDMS TC4 coating

Logistic 回归模型所得出的结论一致。可见 Logistic 回归模型与实验结果有较高的一致性。

通过所建立的 Logistic 回归模型,可以了解钛合金激光金属直接成形方法工艺参数的选择对成形件质量的影响,为激光金属直接成形工艺参数选择提供方便,具有实际工程应用参考价值。

## 5 结 论

从所建立的 Logistic 回归模型可以看出,送粉量  $m$  对成形件质量影响较大,这主要是针对成形件内部是否产生气孔来说的。而激光功率  $Q$ 、扫描速度  $V$ 、基板预热温度  $T$  这 3 个参数,主要影响成形件内裂纹的产生。由于在成型气氛中的氧含量得到控制时,钛合金在激光快速成形过程中一般不出现裂纹。所以对成形件内部质量的影响比较小,这也与模型相对应。给出了一种钛合金激光金属直接成形工艺实验参数选择的新方法。计算结果与实验结果具有较高的一致性,对于钛合金激光金属直接成形工艺参数的选择具有一定的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Huaming. Research progress on laser surface modifications of metallic materials and laser rapid forming of high performance metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, **23**(5): 473~478  
王华明. 金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光金属直接成形技术研究进展[J]. *航空学报*, 2002, **23**(5): 473~478
- 2 Wang Huaming, Zhang Suquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3204~3209  
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- 3 Li Peng. Direct Laser Fabrication of 3-Dimensional Metal Parts Based on Laser Cladding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005  
李 鹏. 基于激光熔覆的三维金属零件激光直接制造技术研究

- [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
- 4 Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(2): 211~215  
张凤英, 陈 静, 谭 华等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(2): 211~215
- 5 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(10): 1839~1843  
张霜银, 林 鑫, 陈 静等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(10): 1839~1843
- 6 Yang Guang, Liu Weijun, Wang Wei *et al.*. Research on process of titanium alloy laser rapid prototyping [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010, (6): 50~53  
杨 光, 刘伟军, 王 维等. 钛合金激光快速成形工艺研究[J]. *制造技术与机床*, 2010, (6): 50~53
- 7 Zhang Lijun, Gao Bo, Wang Zhongyi *et al.*. Evaluation of bond characteristics between porcelain and titanium fabricated by rapid laser forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1273~1277  
张丽君, 高 勃, 王忠义等. 激光快速成形纯钛与瓷的结合性能研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1273~1277
- 8 Guan Taihong, Gao Bo, Lü Xiaowei *et al.*. Effect of technologic parameters on phases of bioceramic coating prepared by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2717~2721  
关泰红, 高 勃, 吕晓卫等. 激光快速成形工艺参数对生物陶瓷复合涂层物相组成的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2717~2721
- 9 Wang Jichuan, Guo Zhigang. Logistic Regression Models: Methods and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001  
王济川, 郭志刚. *Logistic 回归模型——方法与应用* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- 10 Geng Jinhua, Gao Qisheng, Ren Jingxi *et al.*. Community satisfaction model based on logistic regression [J]. *Control and Decision*, 2007, **22**(11): 1305~1308  
耿金花, 高齐圣, 任敬喜等. 基于 Logistic 回归的社区满意度模型[J]. *控制与决策*, 2007, **22**(11): 1305~1308
- 11 National Standardization Technical Committee. GB/T7233. 1-2009. Quantities and Units GB/T7233. 1-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009  
国家标准化技术委员会. 量和单位 GB/T7233. 1-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009

栏目编辑: 宋梅梅