

# 基于正交试验的TC4钛合金激光成形连接工艺参数优化

玄明昊, 邢本东, 苏亚东, 王向明

(航空工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

**[摘要]** 为减少 TC4 钛合金激光成形连接件连接区缺陷, 提高连接件连接质量, 采用正交试验法对 TC4 钛合金激光成形连接工艺参数进行优化, 以抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和内部缺陷等为综合评定指标, 根据数理统计原理分析各工艺参数对连接质量的影响程度, 为后续成形连接试验件力学性能研究提供近优工艺参数。优化结果表明, 线能量密度  $0.5\text{W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ 、坡口角度  $70^\circ$ 、扫描路径  $+60^\circ \sim -30^\circ$  为近优工艺参数, 且各参数中线能量密度对连接试验件的拉伸性能影响显著。利用优化后的工艺参数进行试验, 可获得满足国家标准的连接件, 研究表明该方法可为合理选择成形连接工艺参数和保证连接质量提供参考依据。

**关键词:** TC4 钛合金; 激光成形连接; 正交试验; 工艺参数优化; 增材制造

## Optimization of Process Parameters for Ti-6Al-4V Titanium Alloy Laser Beam Welding Based on Orthogonal Experiment

XUAN Minghao, XING Bendong, SU Yadong, WANG Xiangming

(AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

**[ABSTRACT]** In order to reduce the defects in the joint area of Ti-6Al-4V titanium alloy laser-formed joints and improve the joint quality, orthogonal test method is used to optimize the process parameters. The comprehensive assessment indicators include tensile strength, yield strength, elongation and internal quality. And the influence degree of each process parameter is analyzed by mathematical statistics, which provides near-optimal process parameters for the study of mechanical properties of subsequent forming joints. The result shows that: when the line energy density is  $0.5\text{W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ , groove angle is  $70^\circ$ , scan path is  $+60^\circ \sim -30^\circ$ , we got the near-optimal evaluation result. And the linear energy density of each parameter has a significant effect on the tensile property of the joint specimens. The joints can meet the national standard when the optimized process parameters are used. The result shows that the method can provide a reference for reasonable selection of the joint forming process parameters and ensure the quality.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; Laser beam welding; Orthogonal experiment; Optimization of process parameter; Additive manufacturing

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.064

Ti-6Al-4V 钛合金 (TC4 钛合金) 作为一种典型的  $\alpha-\beta$  两相钛合金, 具有优异的综合性能, 长时间的工作温度可达  $400^\circ\text{C}$ , 在航空和航天工业中获得最广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。采用传统电弧焊焊接钛合金时, 由于电弧集中性差, 能量密度低, 热输入大, 易出现粗大晶粒和连接区脆化现象, 导致连接区综合力学性能下降, 热影响区性能恶化, 同时伸长率和韧性远低于母材, 而且焊接过程中易产生气孔、熔合不良等缺陷, 带来连接件质量低等问题<sup>[3-4]</sup>。相比传统焊接激光成形连接, 具有能量密度高连接速度快等优点, 使得接头热影响区小、材料变形少、晶粒尺寸小、连接区组织与母材组织差异小, 近似于“无痕”连接, 同时具有低成本及快速响应等优点。目前,

激光成形连接主要应用于送粉工艺连接送粉制件的大型主承力构件上<sup>[5-6]</sup>, 因此, 对 TC4 钛合金激光成形连接的工艺性的研究很有必要, 若对各参数组合进行全面试验, 则试验量大, 时间成本经济成本高, 采用正交试验法设计工艺参数方案, 可以很大程度减少试验数量, 提高效率。本文采用正交试验法对 TC4 钛合金激光成形连接进行工艺参数设计。

## 1 试验件制备与试验方法

### 1.1 制备母材

采用 BLT-S310 设备铺粉工艺制备 TC4 钛合金板状母材, 尺寸规格如图 1 所示。

## 1.2 坡口形式

采用 V 形坡口加工 70°、80°、90° 3 种坡口形式,如图 2 所示。

## 1.3 热处理制度

母材选用 600℃ 真空热处理,保温 4h,随炉冷却;连接后试验件选用 800℃ 真空热处理,保温 4h,随炉冷却。

## 1.4 试验方法——正交试验法

在科学研究和工业化生产过程中往往有众多因素影响目标产品的生产,需要研究多个因素对产品指标的效应。若采用多因素完全方案,因素的数量为  $m$ ,因素的水平数都为  $q$ ,则多因素完全试验方案的次数  $n=q^m$ ,

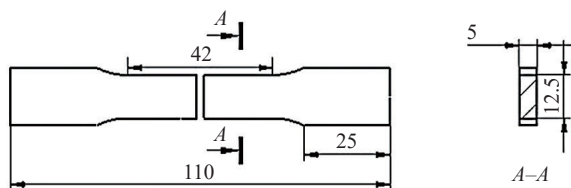
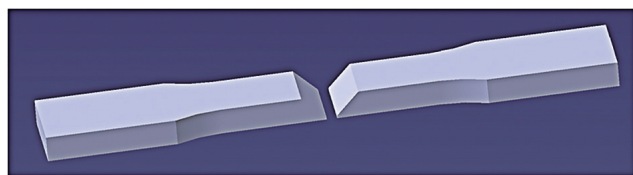


图1 母材尺寸  
Fig.1 Size of base metal

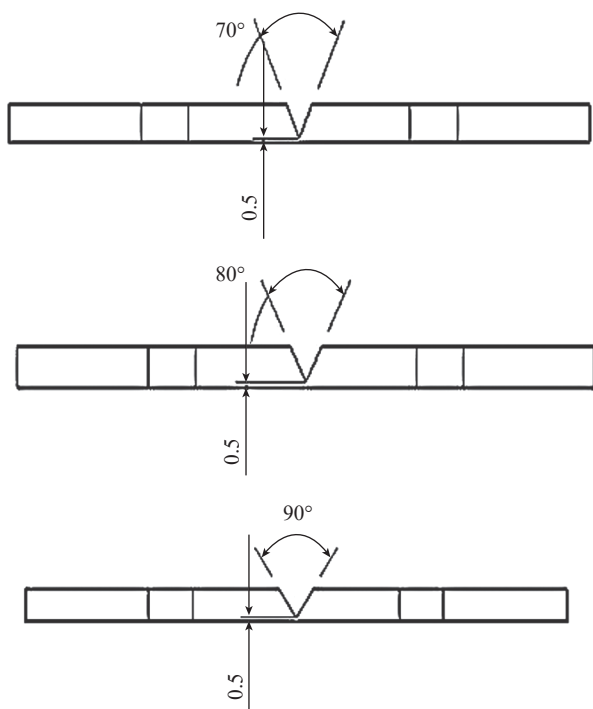


图2 坡口形式及角度  
Fig.2 Form and angle of groove

虽然因素完全试验方案可以综合研究各因素的简单效应、主效应和因素间的交互效应,但是从试验次数的计算式显然可以发现,随着因素数量和因素水平的增多,试验的次数将急剧增多,不仅会给研究带来极大的工作量,而且也会浪费大量的原料和时间。正交试验则是采取部分试验来代替全面试验的方法,挑选出有代表性的试验点来进行试验,通过对代表性的试验结果进行分析,了解全面试验的情况,以实现工艺的优化。正交试验法<sup>[7-8]</sup>不仅可以根据正交表确定出因素的主次效应顺序,而且可应用极差分析、方差分析对试验数据进行分析,分析出各因素对指标的影响程度,从而找出最优参数组合,实现试验的目的<sup>[9-12]</sup>。

## 1.5 激光成形连接

针对线能量密度、坡口角度、扫描路径,增加误差项设计  $L_9(3^4)$  正交试验工艺参数方案如表 1 所示,按照工艺参数方案表进行激光成形连接,连接前后试验件如图 3 所示。

## 2 缺陷检测

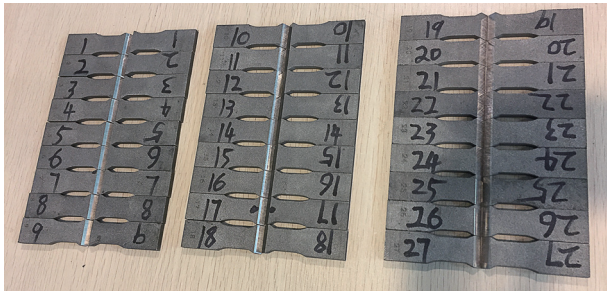
采用 M300B 超声波扫描显微镜对试验件连接区进行缺陷检测。检测结果比较稳定,结果表明 V 形坡口成形连接件的连接区并无明显连续缺陷,可以进行后续拉伸试验,其中第 1 组、4 组、7 组参数下的缺陷情况要好于其他组参数(以第 9 组参数结果为例),如图 4 所示。

由缺陷检测结果可以明显看出熔合区的气孔缺陷要明显少于母材,其中线能量密度较小的几组参数的连接区基本没有明显气孔,而其他组参数在连接区也会出现少量气孔缺陷,由缺陷检测结果可以初步推断线能量密度为  $0.5 \text{ W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$  的几组参数的连接质量好于其他组参数。

表1 正交试验工艺参数方案

Table 1 Technical parameter scheme of orthogonal test

序号	误差项	线能量密度 / ( $\text{W} \cdot \text{min} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	坡口角度 / ( $^{\circ}$ )	扫描路径 / ( $^{\circ}$ )
1	1	0.5	70	$\pm 45$
2	1	0.8	80	$+60 \sim -30$
3	1	1.0	90	短边方向
4	2	0.5	80	短边方向
5	2	0.8	90	$\pm 45$
6	2	1.0	70	$+60 \sim -30$
7	3	0.5	90	$+60 \sim -30$
8	3	0.8	70	短边方向
9	3	1.0	80	$\pm 45$



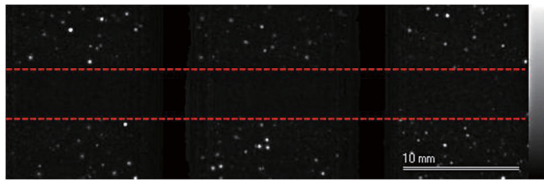
(a) 激光成形连接前试验件



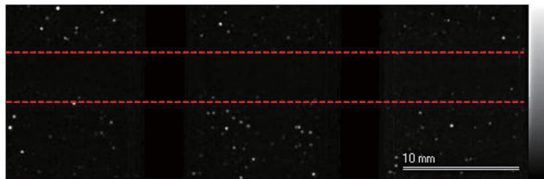
(b) 激光成形连接后试验件

图3 激光成形连接前后试验件

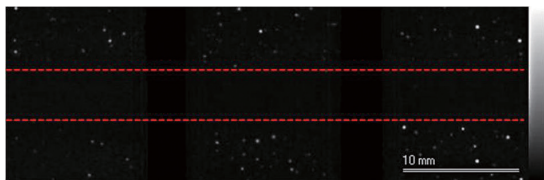
Fig.3 Test parts before and after laser forming connection



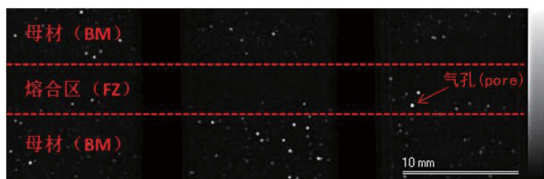
(a) 第1组



(b) 第4组



(c) 第7组



(d) 第9组

图4 第1、4、7、9组参数缺陷检测结果

Fig.4 Defect detection results of first, fourth, seventh, ninth sets

### 3 正交试验结果分析

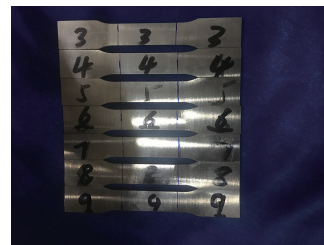
对进行过缺陷检测合格的9组参数下27个拉伸试验件进行拉伸试验,拉伸试验前后试验件如图5所示。断裂断口均在连接区附近,如图6所示,拉伸数据可以反映连接质量,相同参数的试验结果取均值整理试验数据,如表2所示。

#### 3.1 极差分析

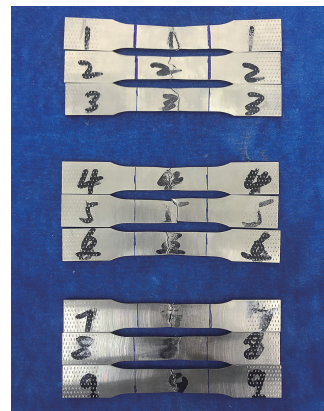
对抗拉强度、屈服强度、断后伸长率指标进行正交试验法的极差分析见表3~5。

分析试验结果,得到如下结论:

(1) 各因素对抗拉强度和屈服强度的影响程度排



(a) 断裂前拉伸试验件



(b) 断裂后拉伸试验件

图5 断裂前后拉伸试验件

Fig.5 Tensile test parts before and after fracture

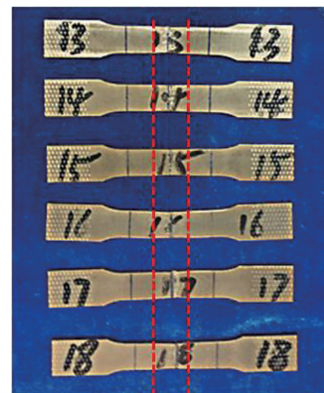


图6 拉伸试验件断口位置

Fig.6 Fracture location of tensile test parts

表2 拉伸试验数据  
Table 2 Tensile test data

试样编号	抗拉强度均值 /MPa	屈服强度均值 /MPa	断后伸长率 /%
LS1	998	925	10.2
LS2	1000	925	8.3
LS3	967	893	6.2
LS4	990	913	8.3
LS5	985	910	8.0
LS6	982	910	8.2
LS7	997	923	7.7
LS8	988	920	8.0
LS9	972	892	7.8
均值	986	912	8.1
国标	≥ 895	≥ 825	≥ 8

表3 正交试验抗拉强度极差分析结果  
Table 3 Extremum analysis of tensile strength by orthogonal test

项目	误差项	线能量密度 / (W·min·mm <sup>-2</sup> )	坡口角度 / (°)	扫描路径
均值 1	988.333	995.000	989.333	985.000
均值 2	987.333	991.000	987.333	993.000
均值 3	983.000	973.667	983.000	981.667
极差	2.666	21.333	6.333	11.333

表4 正交试验屈服强度极差分析结果  
Table 4 Extremum analysis of yield strength by orthogonal test

项目	误差项	线能量密度 / (W·min·mm <sup>-2</sup> )	坡口角度 / (°)	扫描路径
均值 1	914.333	920.333	918.333	910.000
均值 2	912.000	919.333	910.000	919.333
均值 3	911.667	898.333	909.667	908.667
极差	2.666	22.000	8.666	10.666

表5 正交试验断后伸长率极差分析结果  
Table 5 Extremum analysis of elongation after fracture by orthogonal test

项目	误差项	线能量密度 / (W·min·mm <sup>-2</sup> )	坡口角度 / (°)	扫描路径
均值 1	8.233	8.733	8.800	8.667
均值 2	8.167	8.100	8.133	8.067
均值 3	7.833	7.400	7.300	7.500
极差	0.400	1.333	1.500	1.167

序为：线能量密度 > 扫描路径 > 坡口角度；各因素对断后伸长率的影响程度比较接近，差距很小。

(2) 综合考量抗拉强度、屈服强度、断后伸长率指标，可以确定近优参数为：线能量密度 0.5W·min/mm<sup>2</sup>、坡口角度 70°、扫描路径 +60°~ -30°。

### 3.2 方差分析

对抗拉强度、屈服强度、断后伸长率进行正交试验法方差分析，见表 6~8。

分析试验结果，得到如下结论：

(1) 线能量密度对抗拉强度和屈服强度具有显著影响，扫描路径具有一定影响，坡口角度影响较小；坡口角度和线能量密度对断后伸长率有一定影响，扫描路径影响较小，但三者的影响程度总体偏小且相差不大。

(2) 方差分析结果与极差分析结果基本一致，证明

表6 正交试验抗拉强度方差分析结果  
Table 6 ANOVA analysis of tensile strength by orthogonal test

项目	自由度	偏差平方和	F 比	显著性
误差项	2.000	14.222	1.000	很小
线能量密度	2.000	771.556	54.251	显著
坡口角度	2.000	62.889	4.422	较小
扫描路径	2.000	203.556	14.313	一定

注： $F_{0.10}(2,2)=9$ ， $F_{0.05}(2,2)=19$ ， $F_{0.01}(2,2)=99$ 。

表7 正交试验屈服强度方差分析结果  
Table 7 ANOVA analysis of yield strength by orthogonal test

项目	自由度	偏差平方和	F 比	显著性
误差项	2.000	12.667	1.000	很小
线能量密度	2.000	926.000	73.103	显著
坡口角度	2.000	144.667	11.421	一定
扫描路径	2.000	202.667	16.000	一定

注： $F_{0.10}(2,2)=9$ ， $F_{0.05}(2,2)=19$ ， $F_{0.01}(2,2)=99$ 。

表8 正交试验断后伸长率方差分析结果  
Table 8 Analysis of variance of elongation after fracture by orthogonal test

项目	自由度	偏差平方和	F 比	显著性
误差项	2.000	0.276	1.000	很小
线能量密度	2.000	2.669	9.670	一定
坡口角度	2.000	3.389	12.279	一定
扫描路径	2.000	2.042	7.399	较小

注： $F_{0.10}(2,2)=9$ ， $F_{0.05}(2,2)=19$ ， $F_{0.01}(2,2)=99$ 。

试验整体具有较高的稳定性。

综合缺陷检测结果与对抗拉强度、屈服强度、断后伸长率指标的极差分析和方差分析可以得到近优工艺参数为线能量密度  $0.5W \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ 、坡口角度  $70^\circ$ 、扫描路径  $+60^\circ \sim -30^\circ$ ，其中线能量密度对抗拉强度、屈服强度有显著影响，各参数对断后伸长率均没有显著影响，且影响程度相当。

#### 4 微观组织检测分析

采用 Stemi2000-C 体式显微镜对成形连在明显的划分出熔合区(FZ),热影响区(HAZ)及母材区(BM)<sup>[13]</sup>。

由图7可以看出,熔合区呈明显的柱状晶生长模式,晶粒粗大。这是由于高能量密度激光直接作用在熔合区,为晶体生长提供了足够的自由能,使得新熔化的TC4钛合金在晶核上外延生长。熔合区材料的力学性能方面体现各向异性,裂纹在Z轴方向扩展速度快,因此当受到X轴方向的拉力,更容易在熔合区发生断裂。热影响区晶粒尺寸稍小,但仍大于母材区,这是由于激光热量对热影响区的母材进行退火,使得其晶粒尺寸长大。该区域能量密度较低,散热方向比较平均,形成较粗大的等轴晶,力学性能较差。母材部分组织由激光选区熔化工艺制备,能量密度低,形成致密细小的等轴晶。

对比近优参数和第6组参数下成形连接件连接区,如图8所示,可以发现近优参数下试验件连接区的热影响区明显小于第6组参数试验件。

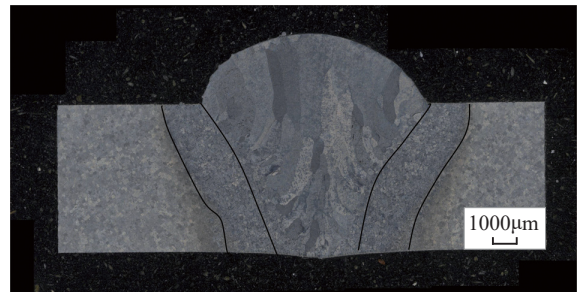
采用 Axiover 200MAT 金相显微镜对近优参数和第6组参数下试验件熔合区微观组织进行检测,如图9所示。对比组织检测结果可以发现,两组参数下试验件熔合区的柱状晶均含有针状马氏体组成的网篮组织,针状马氏体主要为  $\alpha'$  相,这是由于连接过程中熔合区冷却速度极快,合金元素来不及扩散,  $\beta$  相通过共格切变形成过饱和的  $\alpha$  固溶体,即六方结构的马氏体  $\alpha'$ 。线能量密度的增加会使熔合区得到更加粗大的柱状晶,严重增加

连接区脆性,影响力学性能。

$0.5W \cdot \text{min}/\text{mm}^2$  参数可以提供足够的激光能量密度,并使连接区组织成形过程稳定,晶粒细小,热影响区小,综合力学性能好。由于采用V形坡口,坡口角度越小,试验件连接区两侧组织差距越小,拉伸过程受力更加均衡,力学性能更加稳定,由于本试验采用试验件尺



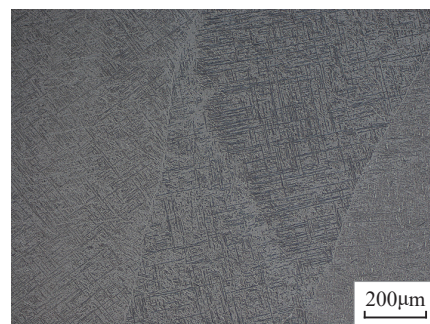
(a) 近优参数试验件连接区



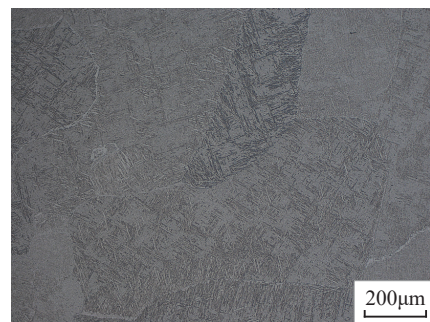
(b) 第6组参数试验件连接区

图8 连接区的对比

Fig.8 Comparison of joint area



(a) 近优参数熔合区微观组织



(b) 第6组参数熔合区微观组织

图9 熔合区微观组织对比

Fig.9 Comparison of fusion zone microstructure

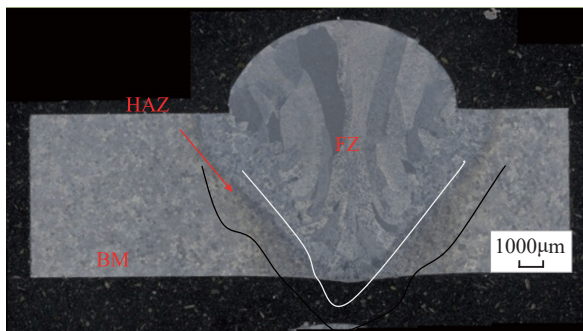


图7 试验件连接区

Fig.7 Joint area of test parts

寸较小,因此熔合区体积小,扫描路径对试验结果影响不明显,近优参数采用较小的坡口角度,进一步减小了扫描路径对试验结果的影响程度。

## 5 验证试验

由于通过正交试验法所得到的近优工艺参数均未在9组参数试验中出现,因此还要进行验证试验。在近优参数下进行成形连接并对试验件进行拉伸试验,试验得到在线能量密度  $0.5\text{W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ 、坡口角度  $70^\circ$ 、扫描路径  $+60^\circ \sim -30^\circ$  下,抗拉强度为  $1014\text{MPa}$ ,屈服强度为  $926\text{MPa}$ ,断后伸长率为  $8.5\%$ ,综合力学性能好于之前9组试验结果,即线能量密度  $0.5\text{W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ 、坡口角度  $70^\circ$ 、扫描路径  $+60^\circ \sim -30^\circ$  为优化后的近优工艺参数。

## 6 结论

(1) 综合考量缺陷检测、微观组织检测结果和对抗拉强度、屈服强度、断后伸长率指标进行正交试验法的极差分析、方差分析,得到近优参数线能量密度为  $0.5\text{W} \cdot \text{min}/\text{mm}^2$ 、坡口角度为  $70^\circ$ 、扫描路径  $+60^\circ \sim -30^\circ$ 。

(2) 对于抗拉强度和屈服强度指标,线能量密度对试验结果具有显著影响,各参数的影响程度排序为线能量密度 > 扫描路径 > 坡口角度。对于断后伸长率指标,各参数对试验结果影响程度相当,均没有显著影响。

(3) 近优参数对应的成形连接试验件热影响区较小,连接区组织晶粒更加致密细小,具有更好的综合力学性能。

(4) 试验结果数据稳定,方差分析和极差分析的结果基本相一致,通过正交试验法优化得到的近优参数下的拉伸试验结果均好于之前9组参数,证明正交试验法是行之有效的工艺参数优化方法。

## 参考文献

[1] 张翥,谢永生,赵云豪,等. 钛材塑性加工技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.

ZHANG Zhu, XIE Yongsheng, ZHAO Yunhao, et al. Plastic processing technology for titanium materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[2] 朱知寿. 航空结构用新型高性能钛合金材料技术研究与进展[J]. 航空科学技术, 2012(1): 9-13.

ZHU Zhishou. Research and development of advanced new type titanium alloys for aeronautical applications[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012(1): 9-13.

[3] 张启良. TC4钛合金激光焊接工艺优化及接头组织性能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2014.

ZHANG Qiliang. Optimization of laser welding process and research on microstructure and properties of joints of TC4 titanium

alloy[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014.

[4] HUAIXUE L, BAIYING H, FAN S, et al. Microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by selective laser melting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42: 209-212.

[5] 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.

WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. Chinese Laser, 2009, 36(12): 3204-3209.

[6] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.

WANG Huaming. Laser manufacturing of high performance large metal components: some material foundation problems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.

[7] 董如何,肖必华,方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用[J]. 安徽建筑工业学院学报:自然科学版, 2004, 12(6): 103-106.

DONG Ruhe, XIAO Bihua, FANG Yongshui. Theoretical analysis method and application of high performance orthogonal experimental design[J]. Journal of Anhui Construction Industry Institute: Natural Science Edition, 2004, 12(6): 103-106.

[8] 滕海英,祝国强,黄平,等. 正交试验设计实例分析[J]. 药学服务与研究, 2008, 8(1): 75-76.

TENG Haiying, ZHU Guoqiang, HUANG Ping, et al. Analysis of orthogonal experiment design example[J]. Pharmaceutical Care and Research, 2008, 8(1): 75-76.

[9] 毛志伟,徐伟,周少玲,等. 基于田口方法旋转电弧焊接工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2016, 45(11): 169-173.

MAO Zhiwei, XU Wei, ZHOU Shaoling, et al. Optimization of rotating arc welding process parameters based on taguchi method[J]. Hot Working Process, 2016, 45(11): 169-173.

[10] 熊然,韩冬,胡春海,等. 基于正交试验的2219铝合金电子束焊接工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 217-219.

XIONG Ran, HAN Dong, HU Chunhai, et al. Optimization of electron beam welding process parameters for 2219 aluminum alloy based on orthogonal test[J]. Hot Working Process, 2013, 42(9): 217-219.

[11] VIJIAN P, ARUNACHALAM V P. Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1-3): 161-166.

[12] KUMAR A, MOTWANI J, OTERO L. An application of Taguchi's robust experimental design technique to improve service performance[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 1996, 13(4): 85-98.

[13] YANG X G, LI S L, QI H Y. Tensile properties and failure analysis of Ti-6Al-4V joints by electron beam welding[J]. Rare Metals, 2016, 35(6): 450-455.

通讯作者:王向明,博士,研究员,研究方向为飞机结构设计与先进制造技术, E-mail: 280023927@qq.com。

(责编 铃兰)