

# 基于墩头轮廓钛合金铆接夹具的优化设计<sup>\*</sup>

符文科,马贵春,王 迎

(中北大学机电学院,太原 030051)

**[摘要]** 针对某型号机在弹塑性理论和逆向工程的基础上,采用普通铆接方式,通过计算和数值模拟对铆接的夹具进行优化设计。结果表明,此夹具的优化设计可使铆接后的干涉量均匀度大大提高,残余应力分布更合理且得出了铆接后干涉量检测的重要评估手段,为飞机制造过程中工艺的优化和装配效率的提高提供重要参考价值。

**关键词:** 钛合金; 优化设计; 铆接夹具

## Optimal Design of Titanium Alloy Riveting Fixture Based on Heading Outline

FU Wenke, MA Guichun, WANG Ying

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**[ABSTRACT]** Based on the theory of elastic-plasticity and the reverse engineering of a certain model, the riveted fixture is optimized by calculation and numerical simulation through ordinary riveting method. The results show the optimum design of this fixture can greatly increase the uniformity of interference after riveting, make residual stress distribution more reasonable even come to an important assessment tools for detecting the amount of interference after riveting, and provide an important reference value for the aircraft manufacturing process optimization and assembly efficiency improvement.

**Keywords:** Titanium alloy; Optimal design; Riveting fixture

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.06.105

随着航空制造业的发展,我国迫切需要发展出新一代军、民用飞机。由于新一代飞机性能的要求极为苛刻,具有更高的气动性和整体性,存在飞机整体成型制造工艺要求极高、成本较大、成型困难等缺点。就目前来说,结构的连接无法避免,尽管不断有新型连接工艺出现,但机械连接仍是飞机装配的主要连接方式,其中铆接连接占飞机装配的60%以上,且飞机事故频发的原因之一就是铆接处材料失效。因此,铆接质量的好坏直接影响着飞机的性能和寿命。普通铆接干涉配合由于铆接后上下夹层板应力分布不均匀、铆钉杆干涉量成梯形分布,国内外学者针对普通铆接的不足,进行了新的铆接工艺研究。电磁铆接等工艺应运而生,大大提高了铆接的装配效率和质量。由于新工艺的研究在国内尚处于起步阶段,在实际生产中对于多数型号机的应用仍然有一定的局限性,开敞性较差,自动化水低且对于铆钉成形后的干涉量没有一个正确的评估手段。因此,本文在普通铆接的基础上,结合弹塑性理论的基本知识、数值模拟、逆向工程,通过控制墩头的形状和尺寸来对铆接夹具进行优化设计,进而改善普通铆接的不足<sup>[1-2]</sup>。

\* 基金项目: 山西省科技攻关项目(20140321008-03)。

## 1 过程分析

### 1.1 普通铆接的不足

某型号机普通铆接中存在的缺陷有以下几点:

(1) 铆接过程中上下板层的应力分布不均匀,下夹层板因受到墩头的影响,应力分布均匀度大于上夹层板。

(2) 铆接后由于受到孔壁间隙和夹层板的摩擦作用,铆钉材料不能完全充盈在孔隙中,多余的材料被阻挡在夹层外,形成大尺寸墩头。

(3) 通过对普通铆接后干涉量地测量,发现铆接形成后的干涉量分布极不均匀,呈梯形分布,越靠近墩头处的干涉量越大。

(4) 铆接过程中,时间短,材料变形的非线性对于铆钉形成后的墩头形状尺寸难以控制,标准的墩头尺寸难以形成。

(5) 铆接后对于干涉量地检测需要对铆接件抛切处理,采用横切法进行干涉量检测,这种检测方法效率低、误差大,严重制约飞机装配的总效率。

### 1.2 铆接夹具的优化过程

文献 [3-4] 结合弹塑性力学的基本知识,证明在墩头形成后墩头轮廓为二次曲线,在此基础上根据墩头形成轮廓如图 1 所示,可以设其墩头曲线为二次函数(轮廓 A、C 曲线):

$$f(x)=ax^2+bx+c \quad (1)$$

由于铆钉在形成中属于塑形成形,根据塑形力学基本知识和体积不变原理:铆钉在成形后与铆钉之前的体积相同,即铆钉形成后墩头的体积与孔隙内部的体积之和为铆钉形成前的体积,如式(2)所示,得出铆钉变形后的直径  $d_1$  与体积的关系,如式(3)所示。

$$\frac{\pi h d^2}{4} = V + \frac{\pi t d_1^2}{4} \quad (2)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{\pi h d^2 - 4V}{\pi t}} \quad (3)$$

传统的铆接结构件通常采用绝对干涉量、相对干涉量来衡量,即绝对干涉量为铆钉变形后的直径  $d_1$  与铆钉初始孔径  $D_0$  的差值;相对干涉量为绝对干涉量与铆钉初始孔径的比值,如式(4)所示,本文中的干涉量若无特殊说明,均为相对干涉量。

$$I = \frac{d_1 - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (4)$$

结合公式(3)、(4),则求出墩头的体积,如式(5)所示:

$$V_1 = \frac{\pi h d^2 - (I D_0 + D_0)^2 \pi t}{4} \quad (5)$$

由墩头的轮廓结合公式(1)和数学积分公式可得墩头体积,如式(6)所示:

$$V = \pi \int_0^{h_0} (f(x))^2 dx \quad (6)$$

其中,  $\pi$  为圆周率;  $h$  为铆钉长度;  $t$  为铆接件夹层厚度;  $V_1$  为式(5)计算的墩头体积;  $V$  为式(6)计算的墩头体积;  $d$  为铆钉直径;  $h_0$  为墩头高度。

由于在实际生产中夹具不但能减少飞机装配的辅助时间、提高生产效率,且对于铆接的质量和飞机性能的提高有着重要影响。但现存型号机的夹具结构简单,

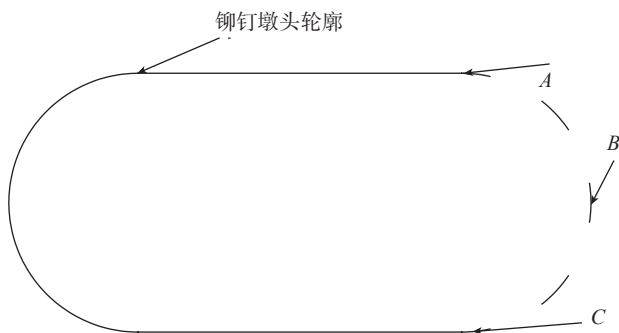


图1 墩头轮廓平面图

Fig.1 Heading outline plan view

则在此夹具结构的基础上针对普通铆接的不足,通过控制墩头轮廓数据点来对夹具进行优化设计。

根据文献 [4-6] 铆钉在成形后,墩头所形成的尺寸可作为衡量其是否标准的条件之一,铆钉的墩头直径在  $(1.5 \pm 0.1)d$ ; 并且铆钉的高度必须大于  $d0.4\text{mm}$ 。通过对铆钉的 ANSYS 数值模拟,在铆钉形成后,利用 ANSYS LS-Prepost 后处理软件在铆钉的墩头轮廓上扑获边界数据点导入 MATLAB 中进行二次拟合,求出轮廓曲线函数,利用公式(6)求出墩头体积,调整墩头高度直到利用公式(6)计算的体积  $V$  和公式(5)计算的体积  $V_1$  相等,再将所有的墩头数据点导入 CATIA 中,利用 CATIA 的逆向模块 Digitized Shape Editor 进行点群建模,通过 CATIA 中模块的互换将点群映射到面进而拉伸成曲面、旋转成墩头腔体,经细节修饰后建立优化的铆接夹具模型(图 2 和图 3)。传统铆接夹具如图 2(a)和图 3(a)所示,取一半为研究对象,使上下夹层板紧密相合,防止铆接过程中由于压铆力等因素影响而发生错位移动,影响铆接质量;经数值计算、ANSYS 数值模拟和逆向工程设计出的优化夹具如图 2(b)和图 3(b)所示。

## 2 实例分析

采用钛合金沉头铆钉结构件来进行夹具优化设计实例分析,由于钛合金铆钉冷塑性差、成形困难,屈服比高故铆接后成形最佳干涉量在 0.8%~1.0%<sup>[7]</sup>。

在本文中为研究方便取铆接后的干涉量 0.9% 为实例中的标准干涉量。具体铆钉和夹层件的尺寸如图 2 所示,结合公式(5)求出在干涉量为 0.9% 下的墩头体积为  $43.910\text{mm}^3$ 。

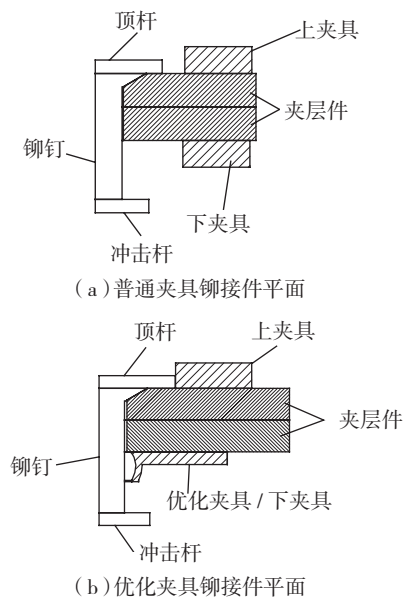


图2 铆接件的夹具平面示意图

Fig.2 Schematic plan view of clamp riveting pieces

### 2.1 ANSYS有限元分析

由于模型是轴对称,所以利用 CATIA 对零件进行 1/4 建模如图 4 所示,具体模型尺寸如表 1 所示,装配再导入 ANSYS 前处理,进行模型材料属性的定义如表 2 所示,网格的划分、载荷和边界条件的施加、沙漏控制和能量控制、K 文件的求解等<sup>[8-11]</sup>。

### 2.2 墩头曲线获取

利用 ANSYS LS-Prepost 后处理软件在形成的墩头

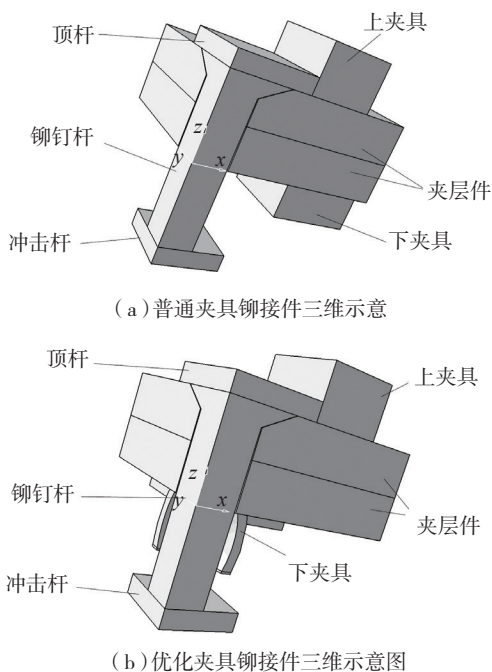


图3 铆接件夹具三维示意  
Fig.3 Rivet clamp 3-D representation

表1 模型具体尺寸

模型名称	具体尺寸
铆钉直径 $d/\text{mm}$	4
初始孔隙 $D_0/\text{mm}$	4.16
沉头角度 $\alpha/(\text{°})$	120
夹层厚度 $t/\text{mm}$	5
上夹层厚度 $t_2/\text{mm}$	2.5
沉头孔深度 $t_1/\text{mm}$	1
铆钉长度 $h/\text{mm}$	9

表2 材料的性能参数

部件	钛合金	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$
铆钉头 / 夹层	TC4	110	0.34	0.0045	9000	950
铆钉杆	Ti-45Nb	62	0.34	0.00583	414	448

注:  $E$  为杨氏弹性模量,  $\mu$  为泊松比,  $\rho$  为材料密度,  $A$  为材料的屈服强度,  $B$  为材料的拉伸强度。

边界获取数据点如图 5 所示,将此数据点导入 MATLAB 中进行二次函数拟合求出墩头曲线函数,利用公式(6)求出墩头体积  $V$ ,调整墩头参数直到求出的墩头曲线函数求出的体积与公式(5)求出的体积  $V_1$  相等。因此,在此实例中墩头的曲线函数为  $y=-0.011x^2+0.0931x+2.4855$ ;墩头高度为 2.12mm,墩头直径为 5.8mm。

### 2.3 墩头轮廓型腔模型建模

墩头形成为轴对称结构,为研究方便取模型的 1/4,将获得标准的墩头数据点导入 CATIA 逆向模块 Digitized Shape Editor 得出墩头点云如图 6 (a) 所示,通

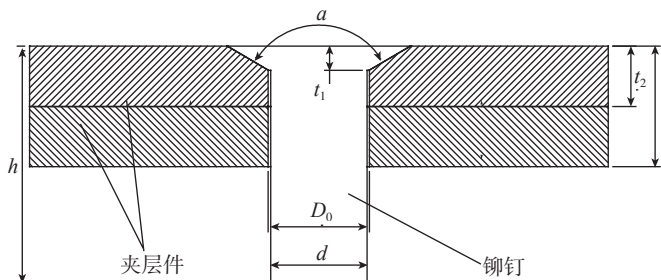


图4 铆接件和铆钉平面示意图  
Fig.4 Rivets and rivet schematic plan view

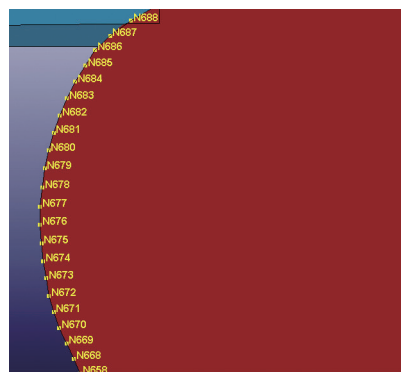


图5 边界数据点

Fig.5 Boundary data points

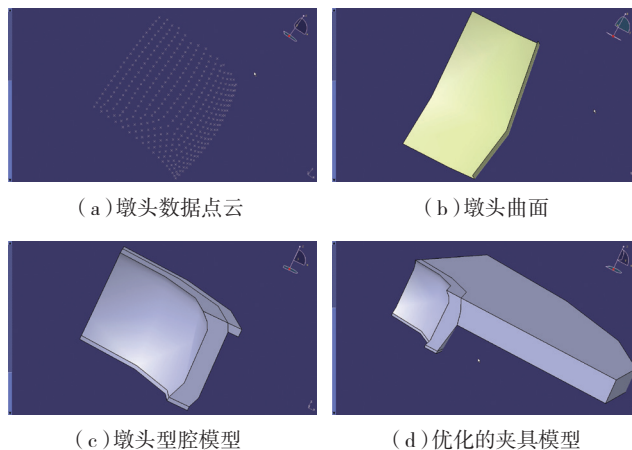


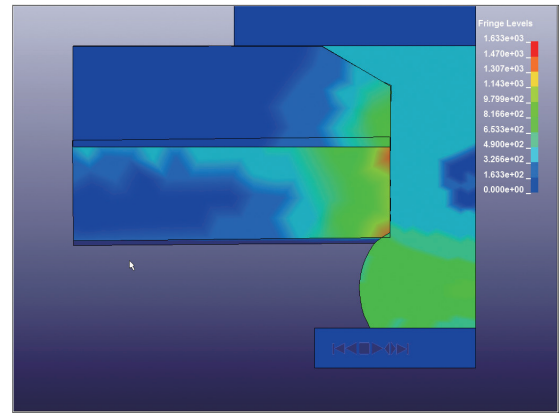
图6 夹具模型

Fig.6 Clamp model

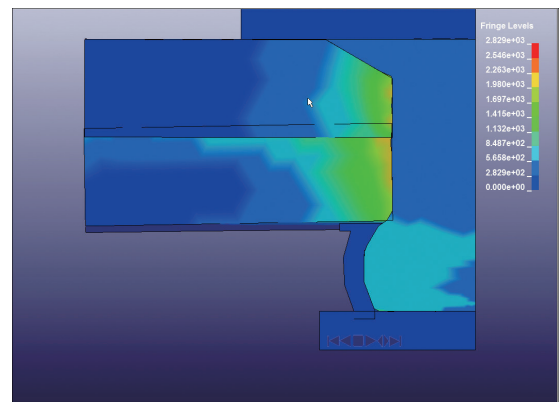
过 CATIA 模块切换将点云拉伸成曲线如图 6 (b)所示,形成墩头型腔模型如图 6 (c)所示,经细节修饰后夹具的模型如图 6 (d)所示。

### 2.4 结果对比分析

本文将通过普通铆接的不足来对比分析普通铆接夹具和优化夹具,进而来验证优化后的夹具可以大大提高铆接的装配质量(图 7 和图 8)。在应用普通夹具的铆接中,由于下夹层板的阻挡和钉空隙的摩擦作用造成钉杆的材料不能完全充盈,如图 7 (a)所示,在钉孔中由此造成上下夹层板的应力不能均匀分布在干涉区域中,如图 8 (a)所示;而优化后的铆接夹具由于其限制了铆钉墩头的膨胀范围,使墩头在特定的尺寸和形状中成形,钉杆材料则均匀地流向钉孔中,使钉孔中的铆钉材料完全充盈,如图 7 (b)所示,在其中并且上下夹层板的应力均匀分布在干涉区域如图 8 (b)所示。利用后处理软件分别测出铆钉测量点的径向位移并利用式(4)计算出各个测量点的干涉量,具体的干涉量数据测量点如图 9 所示。所测干涉量值如图 10 所示,普通铆接夹具的干涉量沿着墩头轴向呈梯形分布,墩头处的干涉量达到最大 4%,由此沿铆钉头逐渐递减,分布极为不均匀,墩头处的干涉量与铆钉头处的干涉量相差较大,严重影响铆接的装配质量;但优化后的铆接夹具所测的干涉量则均匀分布在 0.9% 这条直线上下,墩头处的干涉量与铆钉头处的干涉量几乎无差距,基本符合预



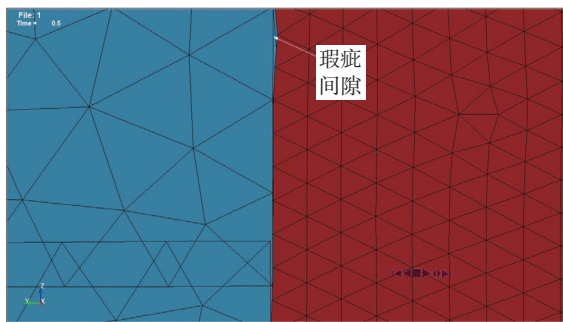
(a) 普通夹具应力云图



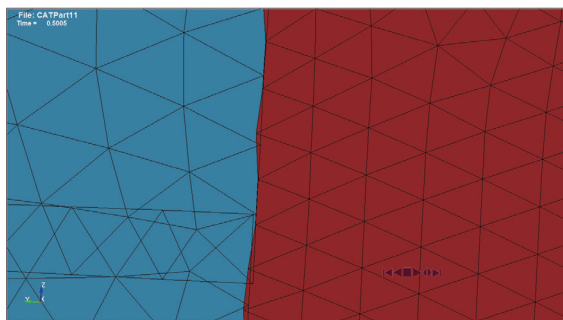
(b) 优化夹具应力云图

图8 铆接后应力云图

Fig.8 Stress cloud after riveting



(a) 普通夹具的充盈状态



(b) 优化夹具的充盈状态

图7 铆接后钉杆充盈状态

Fig.7 Filling state of shank after riveting

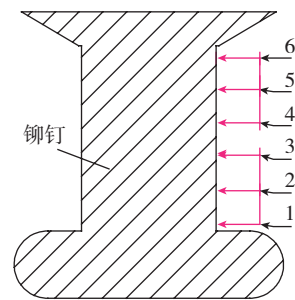


图9 干涉量数据测量点位置

Fig.9 Measurement point position of interferometric data

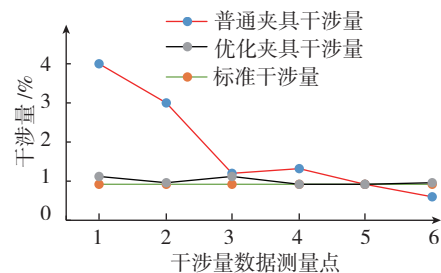


图10 不同铆接夹具的干涉量

Fig.10 Interference amount of different riveting fixtures

先设定的标准干涉量(除个别点外),可能是由于铆钉成形属于材料的大变形,网格容易发生畸变,但这种误差不影响结果分析。由于铆接夹具是基于墩头体积的逆向设计,因此从图 10 中可以看出,优化后的铆接夹具可以作为铆接特定干涉量评估手段且该方案正确。

### 3 结论

通过对某型号机铆接夹具的简单优化设计得出:

(1) 铆钉成形中,铆钉杆完全充盈在钉孔中,克服了在铆接过程中因种种因素而造成的铆钉钉杆偏移、墩头形状和尺寸不合格。

(2) 铆接后,铆钉干涉量的均匀度显著提高,上下夹层板的残余应力分布均匀合理,大大提高了铆接的装配质量,有利于提高结构件的疲劳寿命。

(3) 得出了衡量铆接干涉量的重要评估手段,有效提高了铆接的装配效率,省去了较为繁琐的数据测量工作量、时间和成本,对于飞机的批量化生产有重要意义。

### 参考文献

- [1] 邓将华,李春峰.电磁铆接技术研究概况及发展趋势[J].锻压技术,2006,31(5):10-14.
- [2] 曹增强.铆接技术发展状况[J].航空工程与维修,2000(6):41-42.
- [3] 曹增强.铆接技术发展状况[J].航空工程与维修,2000(6):41-42.
- [4] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [5] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [6] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [7] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [8] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [9] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [10] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [11] 梁康.飞机壁板铆接结构干涉量计算及工艺验证[D].南京:南京航空航天大学,2013.

究[J].兵器材料科学与工程,2012,35(3):27-30.

SU Shiwei, CAO Zengqiang, ZHANG Zhe, et al. Electromagnetic riveting process of titanium alloy structure[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(3):27-30.

[9] 张利军,王幸运,郭启义,等.钛合金材料在我国航空紧固件中的应用[J].航空制造技术,2013(16):129-133.

ZHANG Lijun, WANG Xiangyun, GUO Qiyi, et al. Application of titanium alloy materials in China's aviation fasteners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16):129-133.

[10] 张岐良,曹增强,秦龙刚,等.钛合金电磁铆接数值模拟[J].稀有金属材料与工程,2013,42(9):1832-1837.

ZHANG Qiliang, CAO Zengqiang, QIN Longgang, et al. Numerical simulation of electromagnetic riveting for titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9):1832-1837.

[11] 冯晓旻.电磁铆接过程的有限元分析[D].南京:南京航空航天大学,2009.

FENG Xiaomin. Finite element analysis of electromagnetic riveting process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2009.

通讯作者:符文科,在读硕士研究生,研究方向为航空制造工艺装备的研究(钛合金铆接方向),E-mail:773070203@qq.com。

(责编 古京)

(上接第94页)

technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(20):64-66.

[7] 陈礼顺,王彦岭,卢建红,等.航空发动机封严技术的研究和应用进展[J].航空制造技术,2008(8):82-84.

CHEN Lishun, WANG Yanling, LU Jianhong, et al. Development of study and application of aeroengine sealing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(8):82-84.

[8] SPORER D, FORTUNA D, 李晓娜.涡轮发动机蜂窝钎焊的材料选择[J].现代焊接,2015(6):1-5.

SPORER D, FORTUNA D, LI Xiaona. Selecting materials for brazing a honeycomb in turbine engines[J]. Modern Welding, 2015(6):1-5.

[9] 吕江,何立东,王晨阳,等.蜂窝密封在小功率汽轮机轴端密封上的应用[J].润滑与密封,2015(6):90-94.

LÜ Jiang, HE Lidong, WANG Chenyang, et al. Application of honeycomb seal on shaft-end seal of low power stream turbines[J]. Lubrication Engineering, 2015(6):90-94.

[10] 王宏伟,李庆芬,朱兆军,等.钛蜂窝体制备及压缩性能研究[J].宇航材料工艺,2007,37(4):42-45.

WANG Hongwei, LI Qingfen, ZHU Zhaojun, et al. Fabrication and compression properties of Ti honeycomb[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(4):42-45.

[11] 董希勤.铝蜂窝结构件制造工艺与铝箔强度[J].宇航材料工艺,1994(4):30-33.

DONG Xiqin. Processing of aluminium honeycomb structure and strength of aluminium foil[J]. Aerospace Materials & Technology, 1994(4):30-33.

通讯作者:江乐天,工程师,本科,研究方向为焊接及电解自动化,594993219@qq.com。

(责编 古京)