

# TC2 薄壁钣金异型环快速制造工艺

高昌前<sup>1</sup>, 张涛<sup>1,2,3</sup>, 陈福龙<sup>1,2,3</sup>, 李均红<sup>4</sup>, 谭军<sup>4</sup>

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;

3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024;

4. 四川成发航空科技股份有限公司, 成都 610503)

**[摘要]** 对某种柔性的薄壁 TC2 钛合金异型环, 传统的制造工艺由下料、拼焊、成形、机械加工、表面处理等工序组成。针对该工艺流程繁复、制造成本高的问题, 提出一种不用成形的快速制造方法。该方法利用异形环平直母线可精确展开的特征, 对其不同半径的锥面逐步展开后合理叠加成精确的展开图形, 依图形下料并对焊成环。此方法仅需下料和焊接, 无需成形和机械加工, 流程简单, 为该类零件的低成本、快速制造提供了新途径。

**关键词:** 薄壁; 钛合金; 直母线; 异型环

## Rapid Manufacture Technology of the Thin-Wall Titanium Alloy Abnormity Ring

GAO Changqian<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2,3</sup>, CHEN Fulong<sup>1,2,3</sup>, LI Hunhong<sup>4</sup>, TAN Jun<sup>4</sup>

1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of digital Plasticity Forming and Equipment, Beijing 100024, China;

4. Sichuan Chengfa Aero Science & Technology CO., LTD, Changdu 610503, China)

**[ABSTRACT]** A flexible abnormity rings of thin-wall TC2 titanium alloy, the traditional manufacturing process consists of cutting, welding, forming, machining, surface treatment etc. The without forming rapid manufacturing method was putted forward to change the situation of traditional complicated technological process and high cost. The method was to use the characteristics of the abnormity ring straight generatrix can be carried out accurately, the different radius of cone was carried out and added gradually and accurately, according to the graph cutting and welding, without forming and machining, the process was simple. It provides a new way to such parts as the low cost and rapid manufacturing.

**Keywords:** Thin-wall; Titanium alloy; Straight generatrix; Abnormity ring

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.09.075

航空发动机上的环形件种类较多, 其中钣金结构的零件多采用成形、焊接、校形及机械加工等组合工艺制造<sup>[1-5]</sup>。这类组合工艺能够避免锻造和铸造的组织缺陷, 发挥出板材优良的机械性能。但制造流程复杂, 多种工艺的叠加使得产品精度难以控制。尤其是制造周期长、生产效率低的特点, 制约了部件产量乃至整机的批量生产。本文针对某种薄壁钛合金异型环, 利用该类零件平直母线的特点, 提出一种不用成形的无余量制造方法。该方法摒弃了传统的焊接、成形机械加工等工序组成的制造工艺, 通过对处于同一平面、不同半径的曲线按同一锥角精确展开, 在相切位置依次叠加, 并偏置出变直径的扇形坯料, 最后对焊成环。此方法实现了钛合金薄壁异型环的低成本、快捷制造。

## 1 零件特征

某类零件为航空发动机后部的环形零件, 其典型特征是变曲率、等锥度、薄壁结构。材料为 TC2 钛合金, 厚度 1.2mm, 外形尺寸见图 1。

这种零件在制造之初采用的是焊接、热校形、机加相结合的传统工艺方法, 主要流程见图 2。由于零件尺寸较大, 使用的成形、机加设备都是大型的专用设备, 其中热校形的设备是平台尺寸为 2000mm × 1500mm 的 FCC-400t 热成形机, 机械加工采用 2000mm × 1800mm 台面的大型卧镗/铣机床, 仅热校形及机械加工工序就耗时近两周。费用达数千元。传统的制造工艺特点导致该零件的研制成本高昂, 而且无法按时批量交付。

为解决上述问题,通过传统流程中周期长的工序及零件的外形分析,观察到其母线具有平直的特点,材料不发生塑性变形也可满足该零件的尺寸要求。而成形的毛坯需进行余量加工。如果取消成形可尝试精确计算近净制造。因此提出采用展开叠加并进行对焊的快速制造方法。

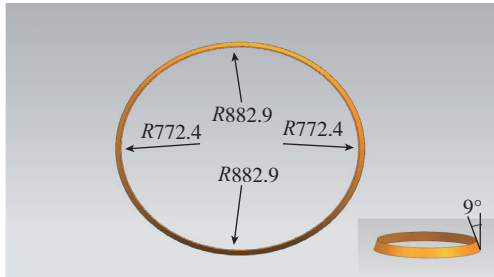


图1 薄壁异型环的外形尺寸  
Fig.1 Sizes of abnormality ring

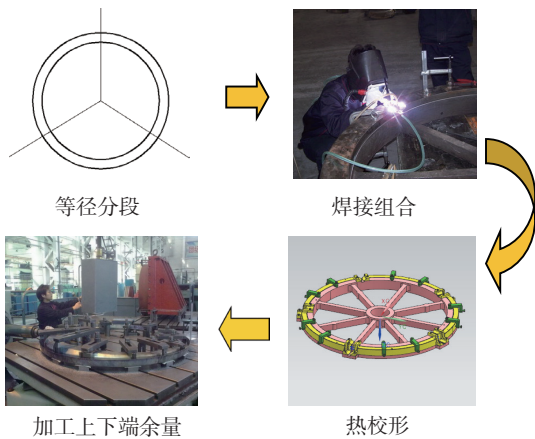


图2 传统的制造流程(部分)  
Fig.2 Traditional manufacturing process

## 2 展开毛坯的确定方法

### 2.1 展开半径的计算

等径锥面曲线的展开公式为:

$$r_{\text{零件}} / \sin\theta = R_{\text{展开}} \quad (1)$$

$$r_{\text{零件}} \times 2\pi = R_{\text{展开}} \times \theta \quad (2)$$

通过公式(1)和(2)能够分别计算出  $R_{772.4\text{mm}}$  及  $R_{882.9\text{mm}}$  的展开半径  $R_{\text{展开}}$  及展开向心角  $\theta_{\text{展开}}$ 。这样就确定了零件中不同半径曲面的展开尺寸。但这个展开尺寸仅是零件的部分展开尺寸,或者说是分段的、不连续的展开尺寸。如何将这些分段的尺寸正确地组合成完整的毛坯是精确展开的关键。

### 2.2 曲线相切展开

将零件等效成在中性层位置无厚度的曲面,那么构成这个曲面中的两条线如果在曲面上相切,这个曲面展开后(不发生塑性变形的前提下),两条线仍然相切。基

于此,将计算出的2种展开半径在同一直线上重合,中心距为  $R_{1\text{展开}} - R_{2\text{展开}}$ ,各自以  $O_1$  与  $O_2$  作圆  $R_{1\text{展开}}$  与  $R_{2\text{展开}}$ ,然后以重合线为起点,分别取角度  $\theta_{1\text{展开}}$  和  $\theta_{2\text{展开}}$ ;这样一段展开线段确定,如图3(a)所示。其他展开线段以其中的一段展开半径为基准,方法与前述一致。展开的过程中应按原有的顺序连接,注意圆心的正确偏移,图3(b)中  $O_3'$  和  $O_3''$  因为圆心确定错误导致展开曲线相交,这样确定的曲线绕成环后将不在同一平面。因此需保证相邻展开曲线的圆心在同一基准直线上,避免出现展开曲线相交的情况。采用此方法不仅局限于2种相切锥面的展开,可以应用于多种半径相切平直母线的锥面展开,见图4。

将得出的曲线偏移零件母线高度,并以相应切点和圆心连线,便得到展开料尺寸。然后将毛坯两端对焊,可得到变曲率的锥面环,如图5所示。

由于这种方法采用的是直接精确切割至零件尺寸,因此焊接后无需后续加工。属于近净制造方法,省去了成形、机加工序,可实现该型零件的快速、低成本制造。该方法能否达到预想的目的,下面进行试验验证。

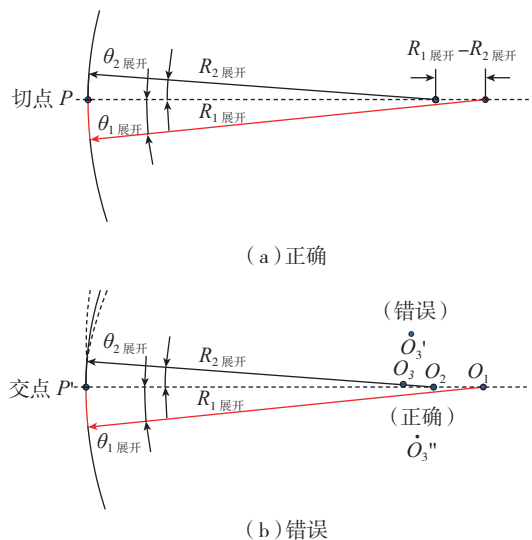


图3 两种相切曲线的展开方法  
Fig.3 Spreading method of two tangent curves

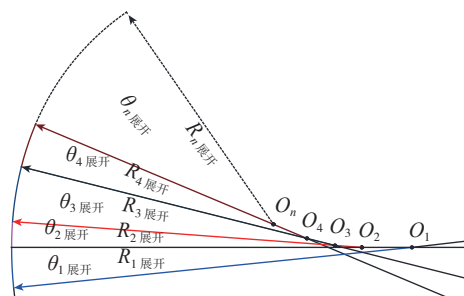


图4 多种直径的相切曲线展开  
Fig.4 Spreading of variable tangent curves

### 3 试验验证

试验中采用三坐标高压水切割设备对 TC2 钛合金板材进行切割,高压水切割设备型号为 SQ3018,设备加工精度为  $\pm 0.1\text{mm}$  (材料厚度  $\leq 2\text{mm}$ ),切割速度  $3\text{mm/s}$ 。由于板材尺寸为  $\delta 1.2\text{mm} \times 2000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ,而展开料总长超过  $5000\text{mm}$ ,因此将展开料尺寸分 3 段切割,为减小变形量,更准确地验证展开料尺寸,应采用变形量小的焊接方式。文献 [6-10] 中阐述了钛合金薄板采用激光焊可以较好地控制变形。因此,展开料的拼焊采用激光焊接。激光焊设备型号为 JKH5106-4000,功率为  $1200\text{W}$ ,焊接速度为  $600\text{mm/min}$ ,氩气流量为  $10\text{L/min}$ 。

焊后试件如图 6 所示,试验中焊接了 4 个异形环,采用型面检具检验试件的周长  $L$  (内部),万能角度尺测量试件锥角  $\theta$ ,高度尺测量试件高度  $H$ ,检测结果见表 1。

从 4 个试件的检验结果上看,试件的展开长度、锥角及高度均满足设计值。其中展开长度与理论值偏差  $\leq 0.5\text{mm}$ ,锥角与理论值偏差  $\leq 18^\circ$ ,高度与理论值偏差  $\leq 0.1\text{mm}$ 。

采用此快速制造工艺后,原有的焊接、成形、机械加工制造工艺的整个周期为 21 天,现有工艺的周期仅为 5 天。减少到原来的 25%。此外,研制成本也大大减少,仅为原来的 20%。取得了良好的技术和经济效益。改进前后的制造周期对比见图 7。

该工艺也不仅仅局限于钛合金,也可以应用于其他

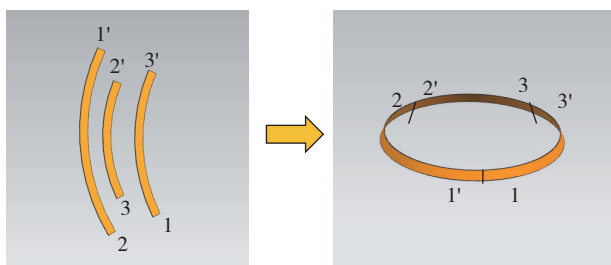


图5 改进后的制造流程

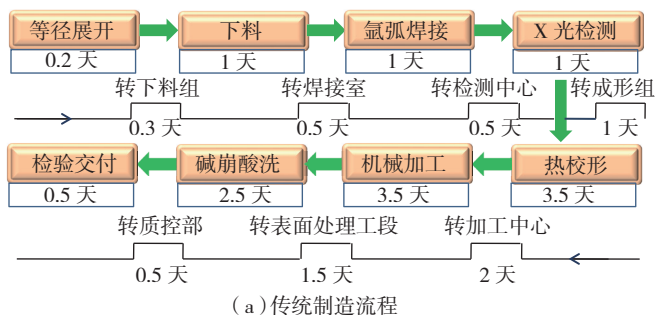
表1 异形环的外型尺寸

试件外形	$L/\text{mm}$	$\theta/(\text{ }^\circ)$	$H/\text{mm}$
理论值	5019.7	9	35
设计值	$5019.7_0^{+2.8}$	$9 \pm 0.5$	$35 \pm 0.15$
1#	5020.2	$9^\circ 18'$	35.10
2#	5019.9	$8^\circ 55'$	35.08
3#	5020.3	$9^\circ 12'$	35.08
4#	5020.1	$9^\circ 10'$	35.06

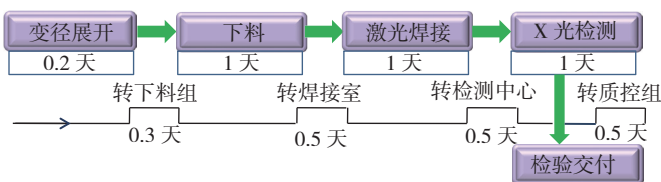


图6 拼焊后异形环

Fig.6 Abnormity ring after welding



(a) 传统制造流程



(b) 现有制造流程

注:  $\square$  为非增值工序/时间,  $\rightarrow$  为可增值工序/时间

图7 传统及现有详细制造流程对比

Fig.7 Comparison of traditional and existing complete manufacturing processes

材料。主要针对薄板、大直径环平直母线环类件,对于厚度在  $2\text{mm}$  以下,最小曲率半径与厚度比在 300 以上的平直母线环均可采用此种工艺。但对于厚板、小直径环的零件,由于材料刚性强,在装配或使用时会产生局部应力集中,因此不宜使用。

### 4 结论

(1) 采用精确展开计算,直接裁切拼焊的方法制造的异形环周向、锥角、高度等主要尺寸精度均满足设计及装配要求,而且减少了成形工序、节省了大量的工装及设备使用费用,显著提高了零件研制周期,表明该方

法是加工 TC2 薄壁钛合金异型环的优异制造工艺。

(2) 该方法也适用于其他金属材料的薄壁钛合金异型环制造,使用时建议壁厚小于 2mm、最小曲率半径与壁厚比在 300 以上为宜。

## 参考文献

- [1] 曾元松. 航空钛合金成形技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014:404-406.
- ZENG Yuansong. Aeronautical sheet metal forming technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014:404-406.
- [2] 姚少非, 谢兰生, 郭刚. TC4 钛合金筒形件热校形工艺研究[J]. 中国制造业信息化, 2012,41(11):72-75.
- YAO Shaofei, XIE Lansheng, GUO Gang. Research on hot sizing technology of TC4 titanium alloy cylindrical workpiece[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012,41(11):72-75.
- [3] 陈荣平, 黄瑞, 王勇超, 等. 大直径钛合金薄壁筒形件制造工艺研究[J]. 航空制造技术, 2013(16):100-102.
- CHEN Rongping, HUANG Rui, WANG Yongchao, et al. Research on manufacturing process of large diameter titanium alloy thin walled tube[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16):100-102.
- [4] 周兆锋, 董小飞, 祝小军, 等. TC4 钛合金环热应力校形的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2010(12):71-73.
- ZHOU Zhaofeng, DONG Xiaofei, ZHU Xiaojun, et al. Hot sizing experiment study of titanium alloy ring[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(12):71-73.
- [5] 郎利辉, 王永铭, 段新民, 等. 复杂薄壁微小截面环形件的充液成形技术研究[J]. 锻压技术, 2011(2):34-38.
- LANG Lihui, WANG Yongming, DUAN Xinmin, et al. Research on multi-step hydroforming of complicated thin wall circular part with small section[J]. Forging & Stamping Technology, 2011(2):34-38.
- [6] 温鹏, 张旭东, 陈武柱, 等. 薄板激光焊时失稳变形及其控制[J]. 焊接学报, 2006(9):99-102.
- WEN Peng, ZHANG Xudong, CHEN Wuzhu. Buckling distortion of laser welded thin plates and its control by dynamic cooling[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(9):99-102.
- [7] 何小东, 史交齐, 冯耀荣. BT20 钛合金激光焊接残余应力场及热处理研究[J]. 热加工工艺, 2005(5):45-47.
- HE Xiaodong, SHI Jiaoqi, FENG Yaorong. Study on residual stress field in laser beam welding joints of BT20 titanium alloy and its heat treatment[J]. Hot Working Technology, 2005(5):45-47.
- [8] 程东海, 黄继华, 林海凡, 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009(2):103-106.
- CHENG Donghai, HUANG Jihua, LIN Haifan, et al. Microstructure and mechanical analysis of Ti-6Al-4V laser butt weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009(2):103-106.
- [9] 梁春雷, 李晓延, 巩水利, 等. TC4 钛合金薄板激光焊接接头疲劳性能研究[J]. 材料工程, 2006(4):48-51.
- LIANG Chunlei, LI Xiaoyan, GONG Shuili, et al. Study on fatigue property of Laser welded joints of TC4 titanium alloy sheet[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(4):48-51.
- [10] 张建, 杨锐. 激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J]. 中国激光, 2012(1):71-74.

ZHANG Jian, YANG Rui. Control of laser power during titanium alloy thin plate welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012(1):71-74.

通讯作者: 张涛, 高级工程师, 研究方向为金属制造成形, E-mail: zt0202@163.com.

(责编 铃兰)

(上接第74页)

support technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(18):77-78.

[4] 刘俊堂, 张永辉. 三维设计推动飞机数字化研制技术的全面应用[J]. 航空制造技术, 2012(6):38-39.

LIU Juntang, ZHANG Yonghui. Three-dimensional design promotes application of digital technology in aircraft development [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(6): 38-39.

[5] 许松林, 龚文秀, 王惠玲. 基于模块的飞机产品结构管理[J]. 航空工程进展, 2013(2):220-221.

XU Songlin, GONG Wenxiu, WANG Huiling. Product structure management of aircraft based on modularity[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013(2): 220-221.

[6] 黄阳, 杨后川. 基于 PLM 的产品结构管理技术研究[J]. 制造业自动化, 2013(4): 69-70.

HUANG Yang, YANG Houchuan. Study of product structure management system based on PLM[J]. Manufacturing Automation, 2013(4): 69-70.

[7] 王庆林. 飞机构型管理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 164-168.

WANG Qinglin. Aircraft configuration management[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012: 164-168.

[8] 徐根红, 李长杰, 倪炎榕, 等. 基于成熟度的飞机工装协同设计管理研究与应用[J]. 机械制造, 2013, 51(589): 74-75.

XU Genhong, LI Changjie, NI Yanrong, et al. Research and application of aircraft tooling collaborative design management based on the maturity [J]. Machinery, 2013, 51(589): 74-75.

[9] 屈卫刚, 刘俊堂. 管路系统全三维关联设计技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2015(1/2): 90-92.

QU Weigang, LIU Juntang. Research and application of tubing system design technology based on full-3D and relational design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(1/2): 90-92.

[10] 孙炜, 许旭东, 徐志强. 基于 VPM 的并行工程在飞机研制过程中的研究初探[J]. 航空制造技术, 2013(13): 50-51.

SUN Wei, XU Xudong, XU Zhiqiang. Initial research of concurrent engineering based on VPM in aircraft production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13): 50-51.

[11] 田宪伟. 基于 MBD 的构型管理在飞机研制中研究与应用[J]. 航空制造技术, 2015(S2): 7-8.

TIAN Xianwei. Research and application of configuration management based on MBD in aircraft production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S2): 7-8.

通讯作者: 屈卫刚, 高级工程师, 研究方向为计算机辅助设计及数据管理, E-mail: qwg603@21cn.com.

(责编 海山)