

TA15 钛合金小圆角梯形截面环热成形技术

Hot Forming Technology of TA15 Titanium Alloy Small Rounded Trapezoidal Cross Section-Ring Part

中航工业北京航空制造工程研究所 张涛 姜波 孙宾 朱宪彬
沈阳铸造研究所 史昆

[摘要] 针对 TA15 材料的小圆角梯形截面环形零件提出了热压胀形的工艺方案。采用沿零件毛坯回转中心轴向加载、锥体胀芯压迫锥面胀块径向移动的成形方法,设计出多层结构组合胀形的热成形模具,通过试验分析胀芯的载荷增量与成形后零件壁厚的分布关系,以及不同的载荷增量对于成形零件截面圆角的影响。最终得出合理的载荷增量与胀芯进给曲线。

关键词: TA15 钛合金 小圆角 梯形截面 热压胀形

[ABSTRACT] Hot bulge forming process scheme is proposed for TA15 titanium alloy rounded corners trapezoidal cross-section ring parts. Using the forming method along blank rotary center axial loading and the conical mold pressuring the other conical mold motion, a multilayer structure combination bulging hot forming die is designed. Through the experiment, the relation of vertebral module load increment and the parts thickness distribution and different load incremental effect on the formed parts section rounded corners are analyzed. Finally, the reasonable load increment and vertebral displacement curve are obtained.

Keywords: TA15 titanium alloy Small rounded corner Trapezoidal cross Hot bulge forming

TA15 是近 α 相钛合金,该合金具有比 TC4 更高的室温和高温强度,良好的热稳定性及焊接性,长时间 (3000h) 工作温度可达 500°C ,主要用于 500°C 以下的飞机、发动机、导弹的承力件及结构件^[1-3]。但由于其工艺塑性较差,难以成形复杂型面的小弯曲半径零件。因此对于此类钣金零件的成形技术一直在探索和研究。

本文所研究的 TA15 环形件是航空发动机上的重要零件,具有材料强度高、截面圆角小、形状复杂等特征。传统的钣金工艺成形困难,基于钛合金热成形的工艺特点提出一种采用多层结构组合模具热压胀形的工艺技术,通过试验分析整套工艺的可行性及成形工艺中主要参量对于成形后零件圆角及壁厚的影响。

1 零件特征

零件是以图 1 所示的剖面为母轮廓的环形件,其截面类似梯形,截面的底面与上平面成一小角度,4 个转折圆角为 $R4$ ($2\delta\sim 3\delta$)。由于转折圆角小,已经达到 TA15 热成形工艺范围内的圆角成形极限^[4],而且零件直径大,圆度要求高。

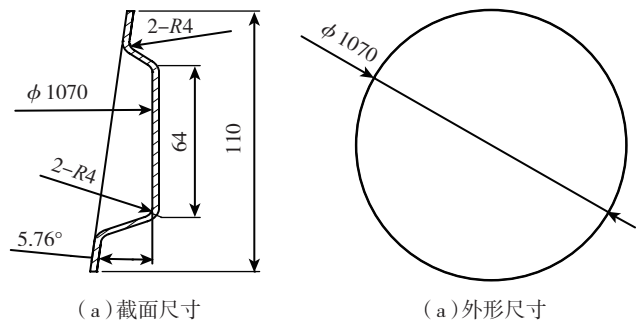


图1 小圆角梯形截面环的外形特征

Fig.1 Basic feature of small rounded trapezoidal cross section-ring part

2 成形工艺分析

2.1 热压胀形工艺方案

基于钛合金材料常温下弹性模量低、屈强比高、变形抗力大等特点,钛合金板材主要采用热成形工艺^[5]。针对此种零件的具体结构及 TA15 钛合金常高温成形性能(见表 1),提出在高温下采用多层组合模具的热压胀形的成形工艺方案。

表1 TA15室温及高温的成形性能

温度 / $^{\circ}\text{C}$	最小弯曲半径	极限拉伸系数	极限翻边系数	变形抗力 / MPa
20	4.0~7.0 δ	—	1.2~1.35	930~1130
700~900	2.0~3.5 δ	1.3~1.6	1.5~1.7	457~157

2.2 多层组合胀形模具的结构

模具结构较复杂,分为胀芯、内胀块、外胀块、约束环、底板 5 个主要部分。其中,胀芯为锥体;内胀块的内型面是与胀芯锥面偶合的锥形面,外形面的主要型面

为零件内型面,相当于耦合模的阳模,由以回转中心圆周对称的 20 个部分组成;外胀块的内型面为零件的外形面,相当于耦合模的阴模,外形面亦为锥面,由以回转中心圆周对称的 10 个部分组成;约束环的内型面与外胀块耦合,起到对内外胀块径向移动的限位作用;底盘为整个模具的承载结构,同时起到内胀块的水平导向作用。模具的具体结构如图 2 所示。

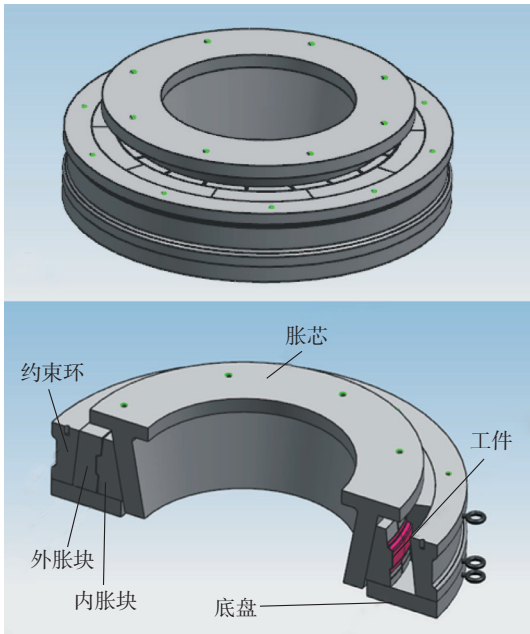


图2 模具结构
Fig.2 Structure of die

2.3 多层组合胀形模具的主要尺寸

根据胀芯锥面与胀瓣的位移与配合关系,分瓣-组合模具的主要尺寸可由下式确定(见图 3):

$$R > R_1, \quad (1)$$

$$\Delta R = \Delta L \cdot \tan \theta, \quad (2)$$

$$\Delta L \leq L_1 \leq L_0, \quad (3)$$

$$R_2 \geq R_0, \quad (4)$$

$$R_0 = R_L \cdot D, \quad (5)$$

其中, R 为内胀块圆锥面大端直径; R_1 为胀芯圆锥面小端直径; ΔL 为胀芯压下量; θ 为胀芯和胀瓣的配合锥角; R_0 为装模后的毛坯外径; R_2 为外胀块的小端直径; R_L 为设计要求的零件半径; D 为模具在成形温度下的缩比系数。 R_0 可直接算出,其他量

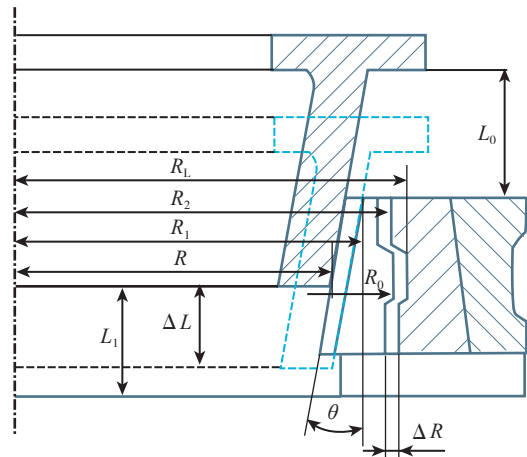


图3 成形模具剖面
Fig.3 The section plane of forming die

值则由式(1)、(3)、(4) 3 个不等式关系确定。

2.4 成形工艺原理

多层组合胀形模具采用可动楔形锥体与锥面体的相对位移的工作原理。成形工艺原理如图 4 所示,成形过程可分为 4 个阶段:(1)焊接成环形的毛坯料装入内胀块与外胀块之间,放入胀芯;(2)沿毛坯轴向加载,锥形胀芯导入内胀块的直径逐渐增大,对内胀块施加径向的离心方向的压力,内胀块沿径向向外移动,此时毛坯在内胀块的约束下沿周向及母线方向拉伸(图 5(a));(3)在压力作用下,随着胀芯向下的位移,毛坯料的直径逐渐增大,当毛坯直径增大到与外胀块的内型面直径相当时,外胀块就对毛坯施加径向的向心方向的压力,毛坯在内外胀块的共同作用下成形出梯形面的大致轮

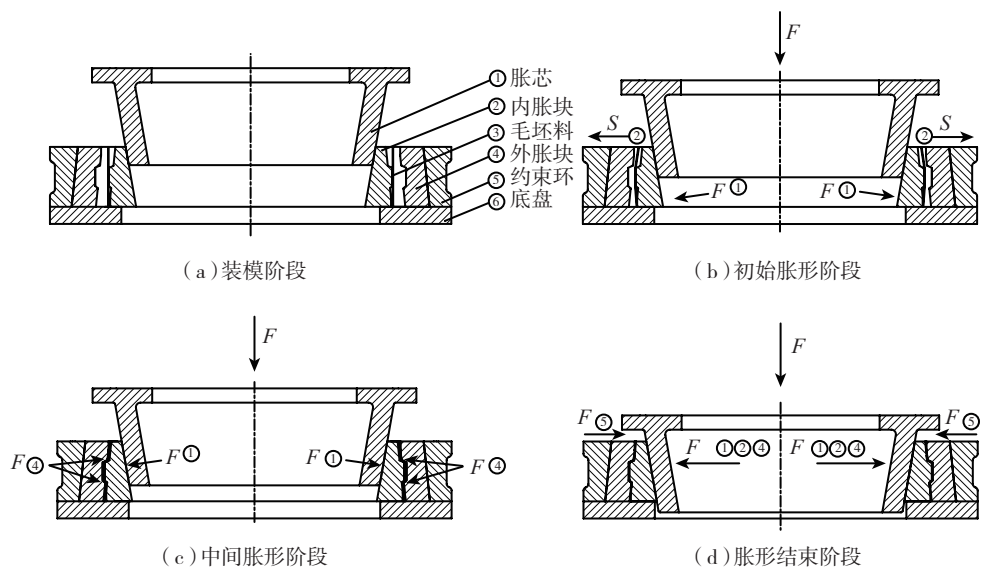


图4 热胀形过程
Fig.4 Hot bulge forming process

图4 热胀形过程

Fig.4 Hot bulge forming process

廓,此时,毛坯的中部位置被周向拉伸,在上下端坡面位置被径向剪切,同时随着直径的逐渐变大,受剪应力的位置也受径向的压应力,因此,这个阶段毛坯料受力情况复杂,成形非常困难,(图5(b));(4)继续对胀芯施加压力,外约束环对内外胀块的反作用力抵消了所受的压力,限制了内胀块的移动,毛坯不再随压力的增大继续变形。内胀块的外型面与外胀块的内型面完全偶合,成形过程结束。

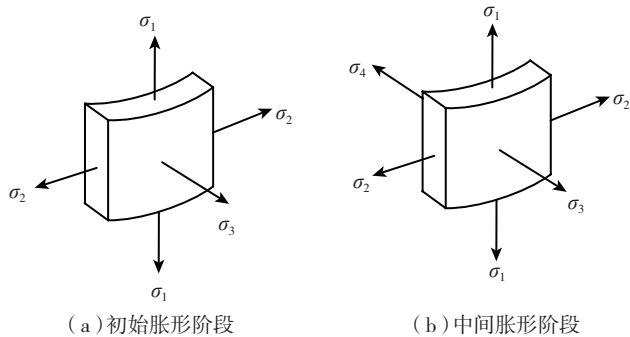


图5 毛坯局部受力情况

Fig.5 Blank local stress distribution

3 试验过程及分析

TA15 条形板材经氩弧焊接成封闭圆环,共 3 件试件,表面均涂覆 T1# 防氧化涂料与石墨润滑剂;试验设备为 RX-400T 平台加热式压力机,成形温度为 800℃,平台与模具均采用铂铑铂 K 型热电偶测温,累积温度误差范围为 $\pm 3.0^\circ\text{C}$ 。

由于此种成形工艺有对材料局部拉伸的特点,而且在变形过程中材料的流动应力会随着变形速率以及毛坯受力条件的改变而发生变化,宏观上表现为材料变形抗力的改变,并且成递增的趋势。因此成形应采用逐步加压的方式。为分析载荷增量对成形后零件的成形型面精度、成形圆角影响和零件壁厚的分布规律,采用 3 种不同的加载方式(见表 2)成形。把成形后的零件分别沿母线切开,每 3mm 间距为测量点测量壁厚,并用检验样板测量型面及 R 角。通过 MINITAB 做出壁厚分布曲线,比较 3 者的异同及各自特点。

3 种加载方式成形的零件型面精度均能满足设计要求,且壁厚分布存在相同的趋势:均在圆角处有明显

表2 设备加载方式

序号	初始压力/t	载荷增量/(t·次 ⁻¹)	加载频率/(min·次 ⁻¹)
试件 1	20	10	10
试件 2	20	20	10
试件 3	20	30	10

减薄(3、7、22、25 测点,图 6)。但不同的加载方式成形后的零件圆角及壁厚变化不尽相同:试件 1 的壁厚分布较均匀;试件 2 壁厚分布较试件 1 减薄量有所增加;试件 3 壁厚减薄量最大。而在平直段壁厚变化不大。成形后 3 个试件的转折圆角分别为 R4~R5.5、R4.5~R5.5、R4.5~R6。

从 3 种加载方式等到的不同的试件分析:载荷增量

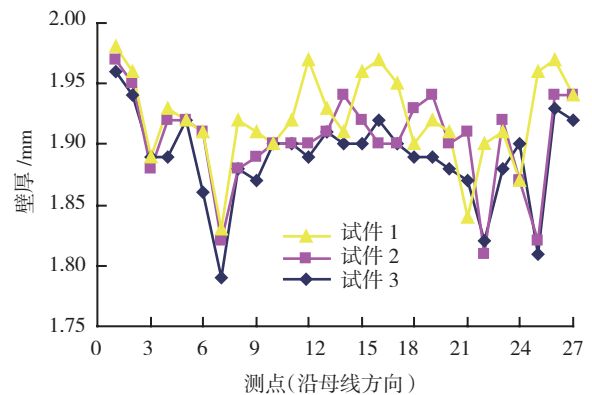


图6 试件壁厚分布

Fig.6 Thickness distribution of parts

对成形试件壁厚有明显影响,载荷增量越大,试件的壁厚减薄量越大。这是因为材料的应变速率随载荷增量的增大而增大,而此时材料的流变应力并未明显减小,因此出现单位截面上的材料被拉伸的现象,材料减薄甚至产生缩颈。

随着载荷增量的增大,材料的应变速率呈上升趋势,此时材料的流变应力也随着应变速率的提高而增大^[6]。而在其他工艺参数(成形温度、保温时间等)没有明显差异的情况下,在大应变速率下成形时零件内部会产生较大的应力^[7]。成形后的零件在残余应力的作用下产生回弹变形,圆角的精度差。因此试件 3 的圆角较试件 1、试件 2 的圆角大。

通过试验可以得出:在较小的载荷增量与较小的变形速率(宏观上体现为较小的胀芯进给速率)条件下,试件型面精度高、圆角小、壁厚均匀性好,以此为依据得出合理的载荷增量与胀芯进给量的关系,见图 7。试验得到零件见图 8。

4 结论

(1)通过设计合理的多层结构组合模具,采用热压胀形的工艺方法,能够成形出 TA15 小圆角梯形截面环形件。经试验验证此种成形工艺可行。

(2)成形过程中的工艺参数对成形后的零件圆角、壁厚有一定影响。施加于模具的载荷增量对零件的壁

(下转第 102 页)

夹具图:(a)为筒体焊接夹具;(b)为筒体与端框焊接夹具。

(2)适合的焊接工艺参数。

焊接过程的热源输入对工件的热作用具有局部性和时变性,其作用结果是:在被焊工件上形成了不均匀的温度场,温度分布的不均匀性是引起焊接残余应力和焊接变形的根源^[2-3]。因此,为减小焊接变形,减小焊接过程的热源输入,在行标所规定的范围内,尽量选择小电流,同时减少焊接时间,控制焊缝宽度不宜过宽等,都是有利于控制焊接变形的。针对 TC1 材料的氩弧焊接,选择表 1 所示焊接参数。

表1 焊接参数

焊丝 / mm	焊接电流 / A	电弧长度 / mm	氩气流量(正面) / (L·min)	氩气流量(背面) / (L·min)
TC1 (φ 1.5~2)	60~80	1.5~2.0	10~12	3~6

(3)合理的焊接顺序和预变形方法。

在焊接零件筒体 5 条纵焊缝时,采用了间隔焊缝焊接的焊接顺序;同时,在焊接前修配并倒 1×45° 坡口时,保证焊缝后焊处的间隙值略大于先焊处的间隙值。这些在焊接过程中,所采用合理的焊接顺序以及预变形的的方法,也可以有效地起到减小焊接变形的作用。

(4)焊后整体热校形。

焊接完成后,零件喷涂保护剂并在一定温度下进行热校形,相当于对零件整体进行二次成形,有利于校正焊接变形,释放焊接应力、改善焊缝的力学组织性能。

3 结论

零件加工完成后,经过测量机的测量,筒体型面与零件数模对比误差在 0.3mm 以下;零件的焊接间隙以及错位(边)量在 0.4mm 以下,满足零件各项制造技术要求;同时,对焊缝进行 X 光检测,未发现裂纹、气孔、夹杂、未熔合和未焊透等现象存在,满足零件所要求的 II 级焊缝标准。

因此,对于大直径钛合金薄壁筒形焊接零件,按照以上工艺方案,采用对筒体热成形进行回弹补偿与焊接变形控制措施相结合的方法,可以有效地控制最终零件焊接变形,提高零件的制造精度。

参考文献

[1] 李其民. 钛合金双曲薄板焊接结构件的焊接变形. 焊接质量控制与管理, 2009, 38(1):55-57.
 [2] 拉达依 D. 焊接热效应. 北京: 机械工业出版社, 1997.
 [3] 田锡唐. 焊接结构. 北京: 机械工业出版社, 1982.

(责编 亿霖)

(上接第 99 页)

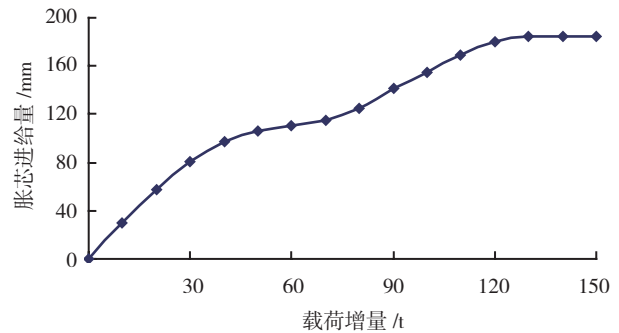


图7 载荷增量与胀芯进给量曲线

Fig.7 Load increment and vertebral displacement curve



图8 成品零件及剖面

Fig.8 Finished part and section of part

厚分布影响较大,载荷增量越大零件圆角处的壁厚的减薄量越大、零件壁厚越不均匀。同时,载荷增量的增加也导致成形后的零件圆角呈增大的趋势。

(3)通过试验得出:初始成形时,载荷增量以 10t/(10min·次⁻¹)递增,当胀芯进给量达到 100mm 时,应将加载参数调整为 10t/(20min·次⁻¹),胀芯进给量到 125~130mm 后,载荷增量以 10t/(10~15min·次⁻¹)为宜,当载荷增量累计至 130t 时,胀形过程结束。此工艺参数下成形的零件壁厚分布较均匀,圆角较小。

参考文献

[1] 鹿靖,王玉会,张旺峰. 组织形态对近 α 型 TA15 钛合金拉伸性能的影响. 金属热处理, 2011, 36(6):25-26.
 [2] 王金友,葛志明,周彦邦. 航空用钛合金. 稀有金属, 2004, 28(1):239-240.
 [3] 李兴无,沙爱学,张旺峰,等. TA15 钛合金及其在飞机结构中的应用前景. 钛工业进展, 2003, 20(4/5):90-95.
 [4] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册·钛合金 铜合金. 北京: 中国标准出版社, 2002:568-574.
 [5] 张涛,李琦,何露,等. TC2 钛合金异型件热成形工艺研究. 航空制造技术, 2011(16):57-58.
 [6] 李雄,庞克昌,计波,等. BT20 钛合金热变形流变应力的模型预测. 机械工程材料, 2007, 31(7):54-55.
 [7] 王占山. 塑性加工金属学. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 129-130.

(责编 良辰)