

钛合金曲面类零件的热冲压工艺

胡 云¹, 林 彬²

(1. 常州信息职业技术学院 智能装备学院, 江苏 常州 213164; 2. 格力博(江苏)股份有限公司, 江苏 常州 224199)

摘要: 为了解决钛合金钣金件成形困难、易起皱、易破裂等问题, 以异形曲面钛合金钣金件为研究对象, 给出了热成形工艺方案。首先采用热冲压预制零件的主体部分, 然后采用热校形工艺调整头部折弯边角度; 进一步通过正交试验方法建立了正交试验组, 采用极差分析法确定了各因素影响程度的主次关系, 并得到了最优的工艺参数水平组合; 最后, 通过试验验证了工艺参数的有效性。研究表明: 成形温度对钣金件成形质量的影响较大, 温度过低, 容易起皱, 温度过高, 软化严重, 成形精度不高, TA15 钛合金的最优成形温度为 670 ℃; 最优工艺参数组合下, 钣金件厚度较均匀, 最大偏差仅为 0.1 mm, 说明热冲压成形工艺可以满足钛合金曲面类零件的厚度要求。

关键词: 钛合金; 热冲压成形; 热校形工艺; 异形曲面钣金件; 成形温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.013

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0095-04

Hot stamping process of titanium alloy curved surface parts

Hu Yun¹, Lin Bin²

(1. Department of Intelligent Equipment, Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China;

2. Globe (Jiangsu) Co., Ltd., Changzhou 224199, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult forming, easy wrinkling and easy cracking of titanium alloy sheet metal parts, for the special-shaped curved surface sheet metal parts of titanium alloy, the hot forming process scheme was given. Firstly, the main part of parts was prefabricated by hot stamping, and then the bending angle of head was adjusted by hot sizing process. Furthermore, the orthogonal test groups were established by orthogonal test method, and the primary and secondary relationship for the influence degree of each factor was determined by range analysis method to obtain the optimal combination of process parameters. Finally, the effectiveness of the process parameters was verified by tests. The research results show that the forming temperature has a great influence on the forming quality of sheet metal parts. If the temperature is too low, it is easy to wrinkle. If the temperature is too high, the softening is serious, and the forming accuracy is not high. The optimum forming temperature of TA15 titanium alloy is 670 ℃. Under the optimal process parameters, the thickness of sheet metal parts is relatively uniform, and the maximum deviation is only 0.1 mm. Thus, the hot stamping process can meet the thickness requirements of titanium alloy curved surface parts.

Key words: titanium alloy; hot stamping; hot sizing process; special-shaped curved surface sheet metal parts; forming temperature

钛和钛合金是一种非常重要的金属材料, 具有耐腐蚀性好、比强度高、中温性能好、可焊接、无磁性等优点, 在航空、航天、特种作业等领域的应用比较广泛^[1-3]。但是, 钛合金仍具有一些缺点, 例如: 冷成形抗力大、塑性差、回弹大、常温不易成形, 因此, 通常采用热成形方法来加工钛合金钣金结构件^[4-5]。以钛合金薄板为例, 其成形过程是一个非常复杂的力学过程, 需要考虑一系列非线性问题, 包括: 几何、材料、边界条件等。在整个热

成形过程中, 受摩擦因数、变形速度、成形温度等因素的影响, 成形零件的表面精度、几何尺寸和力学性能均会出现不同程度的偏差^[6-7]。通常情况下, 钛合金板材热成形过程中最常见的缺陷主要是破裂、起皱、回弹。目前, 普遍使用有限元法来实现热成形工艺参数优化, 并分析应力、应变的变化趋势, 从而预测起皱、破裂等缺陷是否出现以及出现的位置。通过有限元分析可以发现, 钛合金板材越厚越容易起皱, 板材越薄越容易破裂^[8-10]。但是, 有限元分析建模过程比较理想化, 往往无法准确模拟热成形过程。为解决此问题, 本文以 TA15 钛合金曲面钣金件为研究对象, 利用正交试验法来优化热成

收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2022-09-10

作者简介: 胡 云 (1975-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 274054523@qq.com

形参数，并通过试验来验证参数的合理性和准确性。

1 零件工艺分析

TA15 钛合金是一种近 α 型钛合金，铝元素含量比较高，其名义成分可表示为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。文中所用试验件为 1.5 mm 厚度的 TA15 钛合金板材。其几何特征可描述为：成形零件为一种异形曲面钣金件，外形尺寸约为 450 mm×320 mm×50 mm，如图 1 所示。

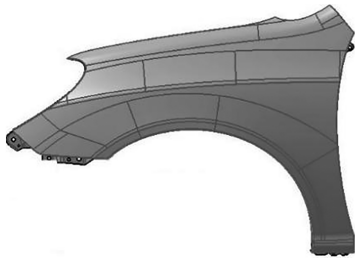


图 1 零件图
Fig. 1 Part drawing

零件外形比较复杂，其成形具有以下难点：

- (1) 钛合金钣金件冷冲压时回弹明显，无法保证零件的尺寸精度，因此，需要采用热冲压成形。
- (2) 试验件主体为曲面而非平面，需要专门设计成形模具。

本文设计了如下成形方案，即首先采用热冲压预制零件的主体部分，然后采用热校形工艺调整各角度至精确值。

2 正交试验参数优化

通常情况下，钛合金板材热冲压成形质量的好坏仅仅使用单一指标评价是不合理的，因此，需进行多指标评价。另外，热冲压成形质量受诸多因素影响，不同因素对指标的影响也不尽相同^[11]。文中以最大增厚率和最大减薄率为评价指标，通过正交试验研究成形温度、变形速度、摩擦因数对评价指标的影响。为便于分析，不考虑各因素之间的相互作用，建立正交试验组。同时，利用极差分析法对各指标的影响因素进行主次排名，综合分析出最佳工艺参数组合。各影响因素水平如表 1 所示。不同试验方案及其对应的试验结果如表 2 所示。

基于极差分析法对最大增厚率和最大减薄率这两个评价指标进行综合分析，其中，最大增厚率和最大减薄率均是越小越好。计算和分析结果如表 3 所示，其中， $k_j(j=1, 2, 3, 4)$ 为评价指标在某因素 j 水平

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	A 变形速度/(mm·min ⁻¹)	B 成形温度/℃	C 摩擦因数
1	1	550	0.1
2	2	600	0.2
3	3	650	0.3
4	4	700	0.4

表 2 正交试验方案及其结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal test

方案	因素			评价指标	
	A 变形速度/(mm·min ⁻¹)	B 成形温度/℃	C 摩擦因数	最大增厚率/%	最大减薄率/%
1	1	1	1	6.45	19.18
2	2	1	2	6.12	21.85
3	3	1	3	6.18	20.66
4	4	1	4	5.45	26.54
5	1	2	2	5.86	16.88
6	2	2	1	6.24	15.53
7	3	2	4	5.86	20.15
8	4	2	3	6.55	18.22
9	1	3	3	5.72	13.76
10	2	3	4	5.48	15.84
11	3	3	1	6.15	15.87
12	4	3	2	6.25	18.31
13	1	4	4	16.14	13.53
14	2	4	3	6.08	15.47
15	3	4	2	19.28	16.87
16	4	4	1	5.75	15.01

下的试验结果之和， $K_j(j=1, 2, 3, 4)$ 为评价指标在某因素 j 水平下的试验结果的平均值^[12]。

由表 3 可以看出，成形温度（影响因素 B ）对最大增厚率和最大减薄率的影响最大，但是较优工艺参数是不同的。根据最大增厚率得到的最佳成形温度为 650 ℃，而最大减薄率对应的最佳成形温度为 700 ℃。综合考虑，选择较优工艺参数水平为 B_3 ，即成形温度为 650 ℃。

变形速度（影响因素 A ）对最大减薄率的影响仅次于成形温度，最优工艺参数为 1 mm·min⁻¹；但是，其对最大增厚率的影响最小，对应最优工艺参数为 2 mm·min⁻¹。综合考虑，选择较优工艺参数水平为 A_1 ，即变形速度为 1 mm·min⁻¹。

表 3 极差分析结果
Table 3 Range analysis results

指标	<i>k</i> 值和 <i>K</i> 值	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
最大增厚率/%	<i>k</i> ₁	34.17	24.20	24.59
	<i>k</i> ₂	23.92	24.51	37.51
	<i>k</i> ₃	37.47	23.60	24.53
	<i>k</i> ₄	24.00	47.25	32.93
	<i>K</i> ₁	8.54	6.05	6.15
	<i>K</i> ₂	5.98	6.13	9.38
	<i>K</i> ₃	9.37	5.90	6.13
	<i>K</i> ₄	6.00	11.81	8.23
	极差	3.496	7.843	5.355
	影响因素主次顺序	<i>B>C>A</i>		
最大减薄率/%	较优组合	<i>B</i> ₃ <i>C</i> ₃ <i>A</i> ₂		
	<i>k</i> ₁	63.35	88.23	65.59
	<i>k</i> ₂	68.69	70.78	73.91
	<i>k</i> ₃	67.50	63.78	72.72
	<i>k</i> ₄	78.08	60.88	76.06
	<i>K</i> ₁	15.84	22.06	16.40
	<i>K</i> ₂	17.17	17.70	18.48
	<i>K</i> ₃	16.88	15.95	18.18
	<i>K</i> ₄	19.52	15.22	19.02
	极差	3.84	7.03	2.49
	影响因素主次顺序	<i>B>A>C</i>		
	较优组合	<i>B</i> ₄ <i>A</i> ₁ <i>C</i> ₁		

摩擦因数（影响因素 *C*）对最大增厚率的影响仅次于成形温度，最优工艺参数为 0.3；但是，其对最大减薄率的影响最小，对应最优工艺参数为 0.1。综合考虑，选择较优工艺参数水平为 *C*₃，即摩擦因数为 0.3。

综上所述，文中认为较优工艺参数组合为 *B*₃*A*₁*C*₃，即成形温度为 650 ℃、变形速度为 1 mm·min⁻¹、摩擦因数为 0.3。

3 试验分析

为验证所述工艺参数组合的有效性，进行了相关试验研究。使用的热成形设备如图 2 所示，具体型号为 RX-400，台面尺寸为 2000 mm×1500 mm。根据正交试验可知，成形温度为 650 ℃、变形速度为 1 mm·min⁻¹、摩擦因数为 0.3 时，可以得到比较理想的钛合金钣金件。采用该工艺参数组合进行试验，并采用超声波测厚仪来测量成形后的钣金件

的厚度，重点关注变形最大区域和易起皱、易破裂区域，选取 10 个测量点，如图 3 所示，测量结果如表 4 所示。从测量结果可以看出，所得钣金件的厚度比较均匀，最大偏差仅有 0.1 mm，可以满足厚度要求。

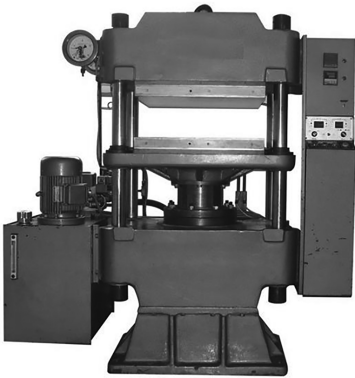


图 2 热成形设备
Fig. 2 Hot forming equipment

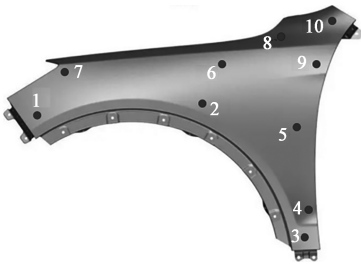


图 3 实物厚度测量点
Fig. 3 Measurement points for physical thickness

表 4 钣金件厚度测量结果（mm）
Table 4 Measured results of thickness for sheet metal part（mm）

序号	板材厚度	实际测量厚度	偏差
1	1.50	1.42	-0.08
2		1.45	-0.05
3		1.54	0.04
4		1.60	0.10
5		1.40	-0.10
6		1.58	0.08
7		1.41	-0.09
8		1.60	0.10
9		1.46	-0.04
10		1.56	0.06

此外，随着成形温度的升高，钛合金钣金件的成形质量得到改善，但是如果成形温度过高容易造成钛合金过度软化，进而影响钣金件尺寸。

通过反复试验发现,成形温度对钣金件成形质量的影响比较大。成形温度过低,容易起皱;成形温度过高,钛合金软化严重,成形精度不高。综合考虑生产成本,文中对成形温度进行优化,即最优成形温度为 670 ℃。

4 结语

以异形曲面钛合金钣金件成形为研究对象,在确定成形工艺方案的前提下,利用正交试验实现了参数优化。钛合金钣金件的较优工艺参数组合为:成形温度为 650 ℃、变形速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.3。通过多次试验,将成形温度调整为 670 ℃。试验结果表明:钣金件厚度比较均匀,最大偏差仅有 0.1 mm,可以满足厚度要求。

参考文献:

- [1] Grun P A, Uheida E H, Lachmann L, et al. Formability of titanium alloy sheets by friction stir incremental forming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99 (5-8): 1993-2003.
- [2] 傅垒, 王宝雨, 孟庆磊, 等. 铝合金热冲压成形质量影响因素 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44 (3): 936-941.
Fu L, Wang B Y, Meng Q L, et al. Factors affecting quality in hot stamping of aluminum alloy [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44 (3): 936-941.
- [3] 周强, 李细锋, 陈军, 等. TC4 钛合金电致塑性 V 型弯曲性能的试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (5): 52-56.
Zhou Q, Li X F, Chen J, et al. Experimental study on electroplastic V-bending properties of TC4 titanium alloys [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (5): 52-56.
- [4] 张涛, 李琦, 何露, 等. TC2 钛合金异型件热成形工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2011, (16): 57-59.
Zhang T, Li Q, He L, et al. Research on hot forming of abnormality part of titanium alloy TC2 [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, (16): 57-59.
- [5] 李轩颖, 徐雪峰, 付春林, 等. 某型飞机钛合金钣金件热冲压成形工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 92-97.
Li X Y, Xu X F, Fu C L, et al. Optimization of hot stamping process parameters for a certain type of aircraft titanium alloy sheet metal parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 92-97.
- [6] 王继, 徐雪峰, 黄芳, 等. TC4 钛合金在中低温下(超)塑性及微观组织研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (1): 40-43.
Wang J, Xu X F, Huang F, et al. Research on (super) plasticity and microstructure of TC4 alloy at medium-low temperature [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (1): 40-43.
- [7] Abbassi F, Pantal O, Mistou S. Effect of ductile damage evolution in sheet metal forming: Experimental and numerical investigations [J]. Key Engineering Materials, 2010, 948 (446): 157-169.
- [8] 张保军, 杨合, 郭良刚, 等. 基于虚拟正交试验的 Inconel690 合金大口径厚壁管挤压工艺仿真 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (3): 488-493.
Zhang B J, Yang H, Guo L G, et al. Virtual orthogonal experiment study on needle piercing extrusion process of Inconel 690 alloy large-diameter thick-walled tube [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (3): 488-493.
- [9] Momeni A, Abbasi S M. Effect of hot working on flow behavior of Ti-6Al-4V alloy in single phase and two phase regions [J]. Materials & Design, 2010, 31 (8): 3599-3604.
- [10] 王大刚, 贾春丽, 杨微, 等. 大型复杂钛合金边梁零件热成形工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2015 (17): 120-121, 130.
Wang D G, Jia C L, Yang W, et al. Research on hot forming of large-complex beam part of TC4 titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, (17): 120-121, 130.
- [11] Gheysarian A, Abbasi M. The effect of aging on microstructure, formability and springback of Ti6Al4V titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, (26): 374-382.
- [12] 朱小兵, 花俊, 肖晓青, 等. 基于数值模拟的 TC11 钛合金旋压过程应力应变分析 [J]. 航空制造技术, 2014, (2): 60-62.
Zhu X B, Hua J, Xiao X Q, et al. An analysis of stress and strain of TC11 titanium alloy during spinning process based on numerical simulation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, (2): 60-62.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部