

钛合金锥形构件变温热拉深成形壁厚均匀性控制

王安阳¹ 卢振² 蒋少松² 王晨曦²

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110000; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)



摘要: 针对现有钛合金等温拉深过程中壁厚均匀性差的问题, 开发了变温热拉深成形新技术, 结合等温热拉深成形有限元分析及变温热拉深成形工艺试验, 分析了变温拉深成形的工艺优势。成形试验在热成形机中进行, 模具凹模与板料在热成形机中加热至成形温度(700~800℃), 通过向凸模内通入冷却介质来控制凸模温度(低于板料温度), 热拉深过程冷凸模底部与板料中心接触, 板料在变形的过程中温度降低至屈服温度以下后不再变形, 未接触到凸模的板料继续变形, 解决了锥形构件热拉深过程底部过度减薄的难题。工艺试验发现采用变温热拉深成形的 TC4 钛合金锥形件, 底部与边缘部分厚度偏差在 10% 以内, 底部减薄现象得以改善, 有效地控制了底部中心附近的厚度, 使变形更均匀。

关键词: 钛合金锥形件; 变温热拉深; 冷凸模热凹模; 壁厚均匀性

Control of Wall Thickness Uniformity in Variable Temperature Hot Drawing of Titanium Alloy Conical Components

Wang Anyang¹ Lu Zhen² Jiang Shaosong² Wang Chenxi²

(1. Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110000; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: In order to solve the problem of poor uniformity of wall thickness in the process of isothermal drawing of titanium alloy, a new technology of variable temperature hot drawing is developed in this paper. Combining with the finite element analysis of isothermal hot drawing and the process test of variable temperature hot drawing, the advantages of variable temperature deep drawing are analyzed. The forming experiment is carried out in the hot forming machine. The die and sheet metal are heated to the forming temperature (700~800℃) in the hot forming machine. The temperature of the punch (lower than the sheet metal temperature) is controlled by injecting cooling medium into the punch. The bottom of the cold punch contacts with the sheet metal center in the process of hot drawing. The sheet metal will not deform after the temperature drops below the yield temperature and does not contact the punch. As a result, the problem of excessive thinning at the bottom of the conical component during hot drawing is solved. The process test shows that the thickness deviation between the bottom and the edge of TC4 titanium alloy conical parts formed by variable temperature hot drawing is less than 10%, and the thinning phenomenon at the bottom is improved. The thickness near the bottom center is effectively controlled, which makes the deformation more uniform and improves the performance of the formed parts.

Key words: titanium alloy conical parts; variable temperature hot drawing; cold punch and hot die; wall thickness uniformity

基金项目: 国家自然科学基金(51675126)。

作者简介: 王安阳(1986), 工程师, 材料加工工程专业; 研究方向: 航空钣金工艺、大型钛合金零件的扩散连接/超塑成形和热成形。

收稿日期: 2020-12-19

1 引言

钛合金因具有高比强度、低密度、耐腐蚀、耐高温等优点^[1], 广泛应用于航空航天领域。在航空航天领域中, 许多重要零部件通常由钛合金制成^[2-3]。TC4 钛合金是一种 ($\alpha+\beta$) 型钛合金, 综合性能优良, 对于航空航天工业中某些特殊零件的需求, 需要采用钛合金的热拉深成形工艺技术。

传统的热成形工艺中, 对于薄壁和大表面积为特征的板类构件, 由于在拉深过程中坯料易发生较大的变形, 导致坯料与模具接触的部分过薄, 使变形不均匀且抗拉强度下降, 拉深高度不足, 产生开裂等现象, 不利于提高产品的质量和生产效率。

自上世纪 50 年代英国学者 Alexander Parks 发明了铜板拉深工艺以来^[4], 该工艺不断发展和应用, 国内外众多学者对拉深工艺进行了广泛深入的研究。国外学者^[5]研究了 Ti-6Al-4V 合金板材在不同温度下的成形性能, 进行了拉深试验, 发现在 150℃ 以下材料的成形性很差, 在 150~400℃ 以上, 极限拉深比为 1.8, 远小于其它结构合金。德国学者^[6]观察了一种用于制造排气系统部件的近 α 钛合金在热拉深过程中的行为, 发现此类合金的热成形有时会导致不利的 α -情况, 这是母材中氧的富集, 从而削弱了构件的疲劳强度。

随着我国航空航天工业的迅猛发展, 零件的拉深工艺应用也越来越普遍, 国内学者^[7]利用拉深成形工艺制造了非对称椭球型面零件, 把难以成形的零件变得容易成形, 降低成形难度。首都航天机械公司^[8]通过有限元分析技术以典型的盒类零件拉深过程为研究对象, 预测了板料成形过程中减薄、拉裂、起皱等缺陷, 同时分析了缺陷产生的原因, 优化了板料成形工艺参数。沈阳航空工业学院^[9]设计制造了导弹包装箱拉深模具, 在同一套模具上实现了箱体和箱盖零件的拉深成形, 拉深的箱体和箱盖零件完全合格, 有效地降低了生产成本。

目前, 研究钛合金板材的热拉深成形的工作鲜见报道, 热拉深成形锥形结构零件及零件壁厚尺寸分布的研究颇少, 圆锥零件在工业上有着广泛的应用, 但锥形件的成形是板料成形过程中复杂困难的领域之一。本文采用冷凸模、热凹模的工艺对 TC4 钛合金进行热拉深成形试验, 设计并制造了控制构件壁厚均匀性变温热拉深成形装置; 应用有限元模拟软件 ABAQUS/CAE 对 TC4 板材传统等温热拉深工艺过程

进行有限元数值模拟, 分析了板材成形过程壁厚分布情况。另外, 测量了采用冷凸模、热凹模工艺技术制造的 TC4 钛合金成形件底部中心附近的厚度, 对比传统等温热拉深成形工艺制造的成形件, 研究钛合金薄板成形情况, 为提高热拉深成形工艺性能提供理论参考。

2 实验材料与方法

实验材料选用由宝鸡钛业股份有限公司提供的 TC4 钛合金板材, 厚度为 2.5mm。其化学成分见表 1。

表 1 TC4 钛合金化学成分 (% , 质量分数)

Ti	Fe	C	N	O	Al	V
余量	≤0.30	0.1	0.05	0.2	5.5~6.8	3.5~4.5

实验所用热拉深成形装置如图 1 所示, 包括热成形压力机、模具和气体冷却器, 其中模具包括模板、固定板、进气管、出气管、凸模和凹模; 模板装配在热成形压力机上侧热压板上, 凹模装配在热成形压力机下侧热压板上, 凸模通过固定板与模板密闭固定, 凸模内部设有空腔, 模板内部设有进气管和出气管, 进气管的一端伸入凸模的空腔内, 并靠近凸模底部, 进气管的另一端与气体冷却器出气口连通, 出气管的一端伸入凸模的空腔内, 出气管的另一端与气体冷却器进气口连通。

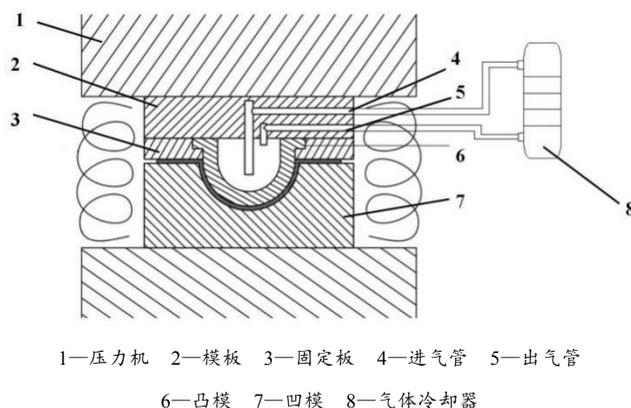


图 1 热拉深成形装置

使用线切割机从钛合金板上切下半径 $r=205\text{mm}$ 的圆形坯料进行变温热拉深。实验所用热拉深模具如图 2 所示, 将模具安装在热成形压力机上, 将热成形压力机加热至热成形温度 700℃, 放入钛合金板料, 保温 50min, 然后通过进气管向凸模通入冷却气体氦气, 当凸模温度降至底部预成形温度 300℃ 时, 控制热成形压力机下行

速度为 15mm/s, 进行拉深成形, 凸模和凹模闭合后, 停止通入冷却气体, 保压 20min, 凸模升温至热成形温度 700℃; 开模, 取出成形零件, 冷却至室温, 检验验收零件。

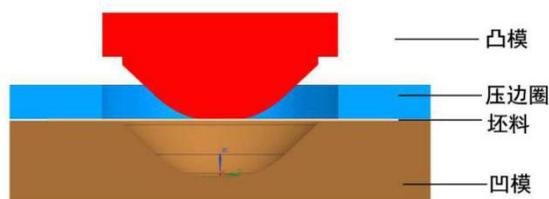


图2 热成形模具结构示意图

3 结果与讨论

3.1 传统等温热拉深有限元数值模拟

借助 ABAQUS/CAE 数值模拟软件模拟分析传统的热拉深方法制造 TC4 钛合金板材的热拉深成形过程。

拉深成形过程的几何模型建立如图 3 所示。拉深几何模型主要包括凸模、凹模、压边圈和坯料。为了提高计算效率, 设定凸模、凹模、压边圈为刚体, 坯料则为可变形壳体。此模拟是基于实际生产加工的环境为恒温环境, 故在数值模拟分析中不考虑温度场的变化情况。



图3 拉深几何模型

坯料拉深成形是带有接触边界的材料和几何非线性问题。动态显式算法在处理接触问题时较静态隐式算法容易的多, 它能明显地计算出接触力和摩擦力, 避免长时间的迭代运算, 特别是在三维复杂接触成形问题时, 优势明显, 可以大大缩短计算时间^[10]。对 TC4 钛合金板材传统等温热拉深成形的数值模拟采用了动态显式的计算方法。

图 4 为传统等温热拉深过程中壁厚尺寸分布云图, 从云图可以看出, 随着凸模的下行, 底部中心附近处网格畸变较大, 经历拉深变形后壁厚减薄最大, 此处是钛合金件最容易拉裂的部位, 具体厚度尺寸数据如

表 2 所示。

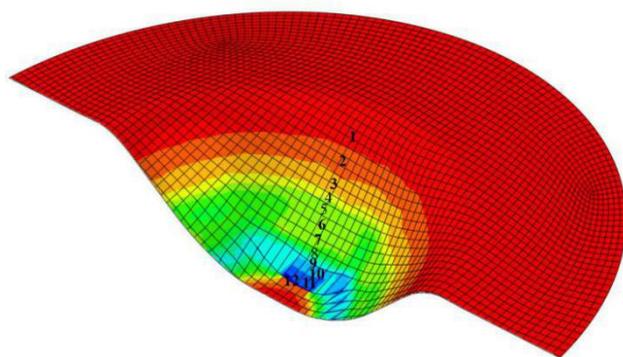


图4 拉深过程中壁厚尺寸分布情况云图

表2 传统热拉深钛合金零件厚度数据

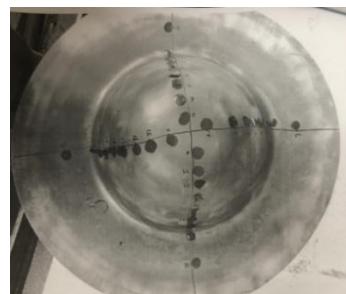
测试点	测量结果/mm	测试点	测量结果/mm
1	2.50	7	1.58
2	2.35	8	1.43
3	2.20	9	1.28
4	2.04	10	1.12
5	1.89	11	0.97
6	1.74	12	0.82

3.2 变温热拉深件壁厚分布

对于薄板零件来说, 壁厚尺寸的分布可以影响零件的强度, 坯料在拉深成形过程中, 坯料的壁厚尺寸一直在发生着变化^[11], 图 5 是由变温热拉深成形装置及采用冷凸模、热凹模工艺制造的钛合金零件。



a 钛合金零件



b 标记厚度测量点的钛合金零件

图5 热拉深钛合金零件图

利用厚度仪在等距的位置测量变温热拉深制备的钛合金零件的测量数据如表 3 所示。底部中心附近厚度平均为 2.13mm, 中位数为 2.15mm, 边缘厚度平均在 2.21mm, 中位数为 2.2mm, 两部分厚度相差不大, 由于在拉深成形时, 通过冷却氦气对凸模降温,

减少了板材与上凸模接触部分的变形度, 增加了板材底部圆弧处的厚度, 缓解了由于厚度分布不均匀带来的开裂现象, 实现成形件的均匀变形, 底部减薄现象得以改善, 有效地控制了底部中心附近的厚度, 使变形更均匀。

表 3 变温热拉深钛合金零件厚度测量数据

测试点	测量结果/mm	测试点	测量结果/mm	测试点	测量结果/mm	测试点	测量结果/mm
0	2.20	0	2.20	0	2.20	0	2.14
1	2.15	8	2.16	15	2.09	22	2.08
2	2.15	9	2.15	16	2.09	23	2.04
3	2.15	10	2.15	17	2.10	24	2.09
4	2.20	11	2.20	18	2.15	25	2.15
5	2.20	12	2.20	19	2.20	26	2.20
6	2.33	13	2.20	20	2.20	27	2.09
7	2.36	14	2.36	21	2.31	28	2.31

4 结束语

a. 开发了一种控制构件壁厚均匀性变温热拉深成形装置及其成形方法, 上凸模的气道将循环氦气通入凸模中空结构腔里降低上模具温度, 减少板材与上凸模接触部分的变形度, 增加板材底部圆弧处的厚度, 实现成形件的均匀变形。

b. 采用冷凸模、热凹模的工艺制备的钛合金零件进行变温拉深时, 在底部中心附近厚度平均为 2.13mm, 中位数为 2.15mm, 边缘厚度平均在 2.21mm, 中位数为 2.2mm, 两部分厚度相差不大, 底部减薄现象得以改善。

c. 板材零件的厚度偏差为 $\pm 0.20\text{mm}$, 有效控制板材底部减薄现象, 成形均匀, 避免产品开裂的现象。

参考文献

- 1 Kotkunde N, Deole A D, Gupta A K, et al. Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2014, 60: 540~547
- 2 冯颖芳. 世界钛及钛合金的应用研究进展[J]. 世界有色金属, 2012(4): 54~57
- 3 赵永庆, 葛鹏, 辛社伟. 近五年钛合金材料研发进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(Z1): 527~534, 557~558
- 4 Pearce R. Formability of Metallic Materials-2000 A D[M]. Chicago: American Society for Testing and Materials, 1982
- 5 Kotkunde N, Deole A D, Gupta A K, et al. Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2014, 60: 540~547
- 6 Nawaya T, Von Hehl A, Wagner S, et al. Hot deep drawing processing of titanium sheet metal parts for high temperature applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(4): 1~6
- 7 孙建中, 刘胜, 郭博闻, 等. 非对称椭球型面零件的成型工艺方法及研究[J]. 航天制造技术, 2016(2): 24~26
- 8 白金鑫, 李旭东, 朱达. 有限元模拟技术在航天钣金成形中的应用[J]. 航天制造技术, 2011(3): 59~62
- 9 张凌云, 李振军. 导弹包装箱拉深成形工艺方案及模具设计[J]. 航天制造技术, 2003(3): 13~15
- 10 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 11 赵振铎, 刘清津. 筒形件多次拉深壁厚尺寸变化规律研究[J]. 锻压技术, 1997(3): 22~26