

钛合金弧板类零件冲压成型回弹仿真计算

雒亚涛, 王相勇

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 采用板料成型仿真软件 Pamstamp 对钛合金 Ti-15-3 材料弧板零件冲压成型回弹进行仿真计算, 预测了不同阴模型面圆弧尺寸冲压成型后的回弹量。依据计算结果优选的阴模型面圆弧尺寸设计了成型模具, 并进行了冲压成型试验。零件试验件型面尺寸与设计型面尺寸最大相差 0.15 mm, 满足不大于 0.2 mm 的要求。结果表明: 采用仿真软件 Pamstamp 进行回弹仿真计算对 Ti-15-3 材料弧板成型模具设计和零件快速制造是可行的; 采用本计算结果减少了模具返修次数, 降低了成本, 提高了钣金成型质量和生产效率。

关键词: 钛合金; 回弹仿真; 模面优化

中图分类号: V463-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 02-0072-05

Simulating calculation for spring-back magnitude of titanium alloy plates with arc formed by stamping

LUO Ya-tao, WANG Xiang-yong

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The simulation software Pamstamp is used to perform a simulating calculation for the spring-back magnitude of Ti-15-3 titanium alloy plates with arc formed by stamping to predict the resilience value of Ti-15-3 titanium alloy plates stamped with different size female die. The forming die was designed according to the calculation and optimization results of female die surface arc. The maximal profile difference between test specimen and designed part is 0.15 mm, which meets the requirement being less than 0.2 mm. The result shows that it is feasible to use the simulation software Pamstamp to perform the spring-back simulation calculation for design of arc plate dies and rapid manufacture of parts. The method can reduce number of die repair, lower the cost, promote the arc plate forming quality and improve the production efficiency.

Keywords: titanium alloy; spring-back simulation; die surface optimization

收稿日期: 2013-08-15; 修回日期: 2013-11-20

作者简介: 雒亚涛 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为钣金冲压技术

0 引言

钛合金 Ti-15-3 板材具有屈强比高、耐高低温、抗腐蚀及重量轻的特点, 常用于制造液体火箭发动机贮箱和气瓶箍带等零组件。但是其冷成型时回弹大, 采用试验迭代法确定回弹量需要进行大量试验, 周期长, 浪费大。板料冲压成型中的回弹问题一直是冲压成型领域关注的重点问题, 为补偿回弹造成的成型偏差, 需要反复调整成型工艺和修正模具。为了更快地确定冲压件的回弹量, 提高其成型质量和成型精度, 必须对回弹量进行准确地预测, 有限元仿真技术成为研究回弹问题的强有力的工具。

本文以某型号弧板为典型零件, 利用板料成型仿真软件 Pamstamp 对其冲压成型和回弹过程进行模拟计算。模拟结果中零件壁厚分布的均匀程度说明其成型过程中受力均匀情况, 受力越均匀, 预测的回弹量越准确。通过对零件成型过程的回弹量进行预测, 使原来需要经过多次实物试验才能确定的回弹量经过模拟计算就能确定, 减少了模具返修次数, 降低了成本, 提高了钣金成型质量和生产效率。

1 弧板冲压成型有限元仿真

1.1 弧板成型方法及初始阴模圆弧尺寸选择

弧板是液体火箭发动机安装座中的重要零件, 与座板焊接组成安装座, 用于固定推进剂贮箱和气瓶等组件。如果弧板型面与产品型面贴合不好, 会出现线接触而导致应力集中, 严重时可使弧板与贮箱的固定带断裂。弧板材料为 Ti-15-3, 其性能参数如表 1 所示。

表 1 常温下钛合金 Ti-15-3 材料性能参数

Tab. 1 Ti-15-3 performance parameters at normal temperature

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	泊松比	厚向异 性系数
4.76	88	835	945	0.33	0.718

弧板类零件常采用冲压成型方法加工, 模具结构主要由阴模和阳模组成, 阳模通过上模板与

模柄相连, 阴模与下模板连接, 如图 1 所示。

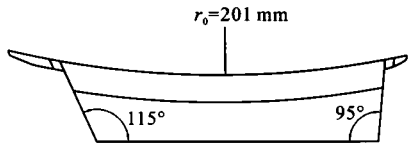


图 1 弧板零件

Fig. 1 Plate part with arc

设计某典型弧板零件冲压成型模具时, 根据经验确定初始阴模型面圆弧尺寸 $r_{\text{阴}1}=137\text{ mm}$, 零件厚度为 2.0 mm , 零件型面理论值 $r_0=201\text{ mm}$, 与样件间隙要求不大于 0.3 mm 。用此模具冲压典型弧板零件, 冲压成型后, 零件型面与样板间隙实测最大值为 1 mm , 最大间隙值在型面中间部分, 说明零件型面尺寸比样板型面 r_0 小, 零件型面尺寸小是因为阴模型面圆弧尺寸 $r_{\text{阴}1}$ 偏小导致的, 见图 2。

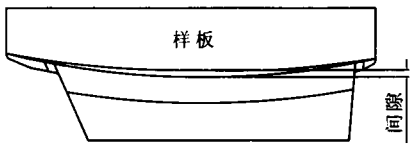


图 2 零件与样板间隙图

Fig.2 Clearance between part and template

1.2 成型过程仿真求解方法

板料冲压成型仿真的求解方法有动力显式和静力隐式两种算法。动力显式算法计算时间步长小, 计算时间短, 不涉及平衡迭代过程和解的收敛性问题, 无须构造刚度矩阵, 广泛应用于板料冲压成型的分析计算。静力隐式算法计算时间步长大, 用于处理无条件稳定线性问题, 以及材料非线性和一般集合非线性的静力问题, 需要线性逼近迭代求解, 构造刚度矩阵, 因而用于求解回弹问题。本文将 Pmstamp 动力显式算法与静力隐式算法相结合, 对弧板的成型过程采用动力显式算法进行仿真, 对回弹过程采用静力隐式算法进行模拟并预测回弹量。

1.3 有限元建模和参数设置

根据材料回弹经验公式 (1), 阴模型面 $r_{\text{阴}1}$ 一般比零件型面 r_0 小 $45\sim65\text{ mm}$, 此处分别假设阴模型面 $r_{\text{阴}2}=145\text{ mm}$, $r_{\text{阴}3}=150\text{ mm}$, $r_{\text{阴}4}=160\text{ mm}$, 目

的是确定回弹后最接近理论值的阴模 $r_{\text{阴}}$ 值:

$$r_{\text{阴}} = r_0 - (45 \sim 65) \quad (1)$$

式中: r_0 为零件型面尺寸, mm; $r_{\text{阴}}$ 为阴模型面尺寸, mm。

根据阳模计算公式 (2), 分别设定阳模型面尺寸 $r_{\text{阳}}$:

$$r_{\text{阳}} = r_{\text{阴}} + Z \quad (2)$$

式中: $r_{\text{阳}}$ 为阳模型面尺寸, mm; Z 为阴模和阳模间隙, mm。

采用 UG 软件建立阴模和阳模, 将建好的弧板弯曲模型通过标准的 IGES 格式导入到 Pam-stamp 中, 对其进行网格划分。网格划分时采用自适应网格优化法, 在计算初期, 使用较粗的单元网格, 随着计算的逐步进行, 在某些需要更细密网格描述的区域, 将网格进一步细分。网格最大单元尺寸 20, 允许的最小单元尺寸 0.1, 两相邻网格单元之间的夹角超过 10° , 则这 2 个单元被细分, 最大自适应网格细化级数 4。自适应网格优化法在保证足够大的计算时间步长的前提下, 板料网格的粗细能进行合理分配, 使单元数量控制在足够小的规模内, 以尽可能小的计算耗费获得更好的计算结果。对已划分好的网格进行检查, 删掉不合格的单元, 修补有缺陷的网格, 得到模具和板料的模型。

阳模和阴模均视为刚体, 板料为变形体, 采

用四边形 Belytschko-Tsay 薄壳单元; 材料模型采用 HILL48 准则, 即各向异性硬化准则; 接触算法为非线性罚函数法 (Accurate); 接触类型为主从面接触类型, 主接触面为模具, 从接触面为板料, 从接触面上的节点不允许穿透主接触面, 但主接触面上的接触节点可以穿透从接触面。

模具和板料之间的摩擦使用的是经典的库伦摩擦定律。当摩擦力小于 $\mu \cdot N$ 时不发生滑动, 当摩擦力等于 $\mu \cdot N$ 时, 滑动产生。 N 为法向接触力, μ 为摩擦系数, 按常规普通润滑状态 (工业冲压成型), 取 0.12。

模拟参数设置: 阴、阳模间隙按公式 (3) 计算

$$Z = 1.1 t \quad (3)$$

式中 t 为零件厚度, mm。

冲压类型选择单动方式冲压, 冲压速度设置为 10 mm/ms。

1.4 成型壁厚分布仿真

将模型提交给求解器 (Solver) 进行求解, 阴模 $r_{\text{阴}2}$, $r_{\text{阴}3}$ 及 $r_{\text{阴}4}$ 成型零件壁厚分布情况见图 3。

从图 3 可知, $r_{\text{阴}2}=145$ mm 成型的零件最大厚度为 2.114 mm, $r_{\text{阴}3}=150$ mm 成型的零件最大厚度为 2.096 mm, $r_{\text{阴}4}=160$ mm 成型的零件最大厚度为 2.105 mm。虽然不同 r 值成型后零件最大厚度相差不大, 相比较 $r_{\text{阴}3}$ 厚度变化最小, 且最均匀, 其变形及受力情况更均匀。

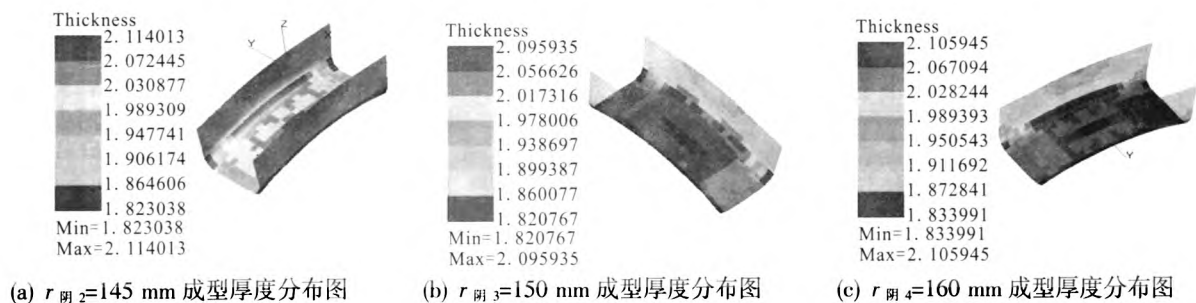


图 3 成型厚度分布图

Fig. 3 Thickness distribution of stamped plate

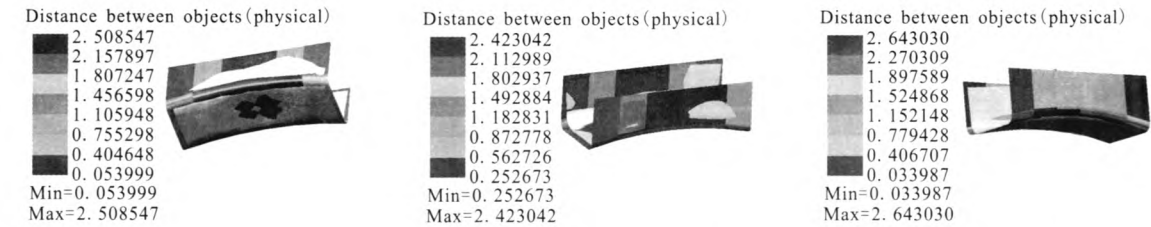
1.5 弧板成型回弹有限元仿真

1.5.1 回弹仿真

将不同 r 值模具成型仿真后的零件结果导入回弹仿真 Springback 中, 定义板料属性, 其网格

均匀细化级数为 1, 网格自适应优化最大细化级数为 4。定义计算方式为隐式计算 Implicit, 回弹计算所需的约束点为自动添加。阴模 $r_{\text{阴}2}$, $r_{\text{阴}3}$ 及 $r_{\text{阴}4}$ 计算的零件回弹前后比较见图 4, 成型后

零件所有型面与回弹后零件所有型面最大相差值 比较见表 2。



(a) $r_{阴2}=145\text{ mm}$ 零件回弹前后比较 (b) $r_{阴3}=150\text{ mm}$ 零件回弹前后比较 (c) $r_{阴4}=160\text{ mm}$ 零件回弹前后比较

图 4 零件回弹前、后比较

Fig. 4 Comparison of parts before and after spring-back

表 2 回弹前后零件所有型面最大相差值比较

Tab. 2 Maximum value difference comparison

	零件 $r_{阴2}=145\text{ mm}$	零件 $r_{阴2}=150\text{ mm}$	零件 $r_{阴3}=160\text{ mm}$
最大相 差值/mm	2.508 5	2.423 0	2.643 0

1.5.2 结果分析

将 3 种不同 $r_{阴}$ 值模具 ($r_{阴2}$, $r_{阴3}$, $r_{阴4}$) 的零件回弹仿真后情况与设计图纸进行比较, 分别比较零件 r_0 值和弯曲截面。具体数值见表 3。

表 3 最大相差值比较

Tab. 3 Comparison of maximum difference values

	$r_{阴2}$ 零件 回弹后	$r_{阴3}$ 零件 回弹后	$r_{阴4}$ 零件 回弹后
与标准零件 r_0 最大差值/mm	1.2	0.7	1.5
与标准零件弯曲 截面最大差值/mm	1.1	0.6	1.6

根据表 3 可知, $r_{阴3}$ 模具的零件回弹后与标准零件比较, 型面部分最大相差 0.7 mm, 弯曲截面部分最大相差 0.6 mm, 均是相差最小的, 得出 $r_{阴3}$ 的弧面与标准零件各型面最贴近的结论。

通过成型及回弹仿真得出的结论, 确定冲压成型模具阴模按 $r_{阴3}$, 阳模按公式 (3) 计算为 $r_{阳}=152.2\text{ mm}$ 设计制造, 其零件回弹后型面与理论型面最为接近。

2 模面优化及试验验证

2.1 模面优化

实际工程中, 冲压件成型回弹控制都是通过经验和反复试验确定, 仿真模拟可以在模具的设计阶段预测实际冲压件成型过程中的回弹量, 然后通过修改模具形状使回弹后的零件形状符合设计要求, 这就是模具型面优化法, 即模具型面补偿法。弧板的回弹采用模具型面补偿法进行控制优化, 优化后阴模圆弧面 $r_{阴}=150\text{ mm}$, 阳模圆弧面 $r_{阳}=152.1\text{ mm}$ 。

2.2 试验验证

使用返修后模具试加工典型弧板零件, 设备为 63 t 液压机, 加工 5 件零件, 用切内样板检查零件型面尺寸 r , 间隙均在 0.15 mm 以内, 达到设计图纸间隙小于 0.2 mm 要求。该模具应用到实际生产中, 加工了多个批次的弧板零件, 型面尺寸均合格。

3 结论

1) 采用板料成型仿真软件 Pamstamp 可对钛合金 Ti-15-3 材料弧板零件冲压成型回弹进行仿真计算, 通过构造 3 种不同 r 值的阴模和阳模弧板冲压模具, 对 3 种模具生产零件的成型回弹模拟进行研究, 预测了不同 r 值模具的冲压成型过程和零件回弹情况。

2) 依据仿真计算结果确定了最佳阴模 r 值并进行制造, 生产的弧板冲压成型试验件尺寸符

合设计图纸要求。表明采用仿真软件 Pamstamp 进行回弹仿真计算对 Ti-15-3 材料弧板成型模具设计、制造和冲压工艺设计具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] 段磊, 蔡玉俊, 莫国强, 等. 汽车覆盖件成形回弹仿真及模面优化研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(2): 34-38.
- [2] 彭必有, 傅建. 冲压回弹仿真结果的工艺知识发现技术研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(3): 33-36.
- [3] 陈剑鹤, 于云程. 冷冲压工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 钟毓敏. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 李尚健. 金属塑性成形过程模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 卢险峰. 最优化方法应用基础[M]. 上海: 同济大学出版

社, 2003.

- [7] 李浣泉. 金属板料成形有限元模拟基础 -PAMSTAMP2G (Autostamp)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 王远钟, 董定福, 俞芙芳. 数值模拟波动压边力对拉深件成形质量的影响[J]. 塑性工程学报, 2005 (6): 46-50.
- [9] 武晓红. 日本冲压模具的技术特点[J]. 模具技术, 1999 (4): 48-50.
- [10] 肖景荣, 姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] 王孝培. 冲压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] HYUN D I, OAK S M, KANG S S, et al. Estimation of hole flangeability for high strength steel plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002 (130-131): 9-13.
- [13] LIN S C, TSENG F, CHIENG C C. Numerical simulation of the stamping process through microchannels[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003 (258): 179-185.

(编辑: 张永秀)

(上接第 71 页)

参考文献:

- [1] 何永红. 壳体类高效数字化制造研究[J]. 航空精密制造技术, 2010 (2): 29-31.
- [2] 谢国明, 曾向阳, 王学平. UGCAM 实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 安杰, 邹显章. UG 后处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 周济, 周艳红. 数控加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] 韩鸿莺, 张秀玲, 毕毓杰. 数控加工技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

- [6] 郑联语, 汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 424-428.
- [7] 刘雄伟, 张定华. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 黄毓荣, 顾蕊. Unigraphics Solutions Inc UG 多轴铣制造过程培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 张继红, 高佑芳, 王恩俊. 基于 CAM 的数控加工后置处理方法的研究与实践[J]. 机电产品开发与创新, 2007 (1): 188-189.
- [10] 陈皓晖, 刘华明, 孙春华. 国内外叶轮数控加工发展现状[J]. 航天制造技术, 2002 (2): 45-48.

(编辑: 张永秀)