

大飞机钛合金薄壁管道零件冷成形关键技术研究

Study on Key Technology of Cold Forming Thin-Walled Duct Part of Large Aircraft With Titanium Alloy

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 张纪春 王永军
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 白颖

[摘要] 介绍了钛合金薄壁管道零件成形工艺方法和焊接技术。研究了钛合金薄壁管道零件渐进折弯成形技术,并进行数值模拟,结果表明成形后的零件与标准尺寸零件误差仅为 1.8%。

关键词: 钛合金 薄壁管道 渐进折弯 数值模拟

[ABSTRACT] Forming and welding technique method of titanium alloy thin-wall duct parts are introduced. The studies focus on multiple-step air-bending forming technology and numerical simulation of the thin-walled duct parts. The results show that forming error is only 1.8%.

Keywords: Titanium alloy Thin-walled duct Multiple-step air-bending Numerical simulation

1 钛合金板料冷成形研究现状

钛合金用量在大型飞机机体材料中不断扩大。其中 β 型钛合金板料冷成形具有成本低的优势及良好的综合性能,不仅能够减轻飞机重量,而且可以有效降低大型飞机的制造成本。

适合于冷成形的 β 型钛合金板料主要有 Ti-15-3 和 β -21S 钛合金。Ti-15-3 合金是一种亚稳定 β 型钛合金,其名义成分为 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti-15-3)。屈强比接近 1,在室温下使用固溶状态的板材可成形形状较为简单或中等复杂的钣金件。C-17 飞机的发条式弹簧就是用固溶态 Ti-15-3 合金带取代全硬态 301 不锈钢制造,由此使每架飞机的重量减轻 18kg 左右。波音 777 飞机使用 Ti-15-3 合金代替 21-6-9 钢制造的灭火器罐,使每架飞机减重 23kg 左右^[1-5]。图 1 为利用橡皮液压成形技术制造的飞机阻力伞梁^[6]。

β -21S 合金(Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si)也是一种亚稳态 β 型合金,其成形性能类似于 Ti-15-3 合金,但改善了抗氧化性和抗腐蚀性。与常规的钛合金相比, β -21S 的抗腐蚀性提高 100 多倍,而且具有优异的热稳定性。因此 β -21S 合金被应用于通风管道以及发动

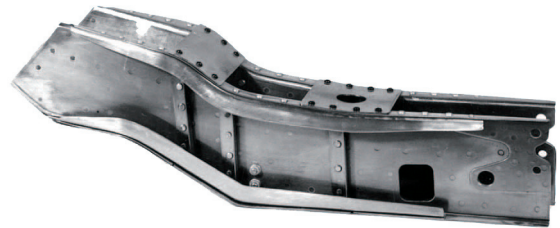


图1 钛合金阻力伞梁
Fig.1 Decelerating umbrella beam

机的衬套和喷管,可使每架飞机减轻 162kg^[7]。

目前国内外主要针对 β 钛合金组织演变、力学性能、橡皮成形锥面回弹开展研究^[8-13],本文总结了钛合金管件成形工艺方法,分析了其冷成形关键技术,并对其渐进折弯成形进行了研究。

2 钛合金薄壁管道零件成形工艺方法

国外先进飞机的引气管路、液压管路、燃油管路等都广泛采用了钛合金制造。目前钛合金管件的类型主要有冷无缝管、热轧无缝管、热挤压管和焊管 4 种,对中、高强钛合金无缝管,则采用温轧技术,即在轧管机上安装感应加热装置,一般温度控制在再结晶温度以下 100℃左右。但是由于我国在中、高强度钛合金管材温轧生产技术方面尚不成熟,高强度钛合金薄壁管件的研制还处于探索阶段。鉴于无缝钛管的加工工序多,生产周期长、效率低、成本高,可采用钛焊管。钛焊管生产效率高,其性能与无缝钛管几乎无差别,因此各国都在发展自己的钛焊管生产体系^[14]。钛焊管工艺首先通过钛板滚弯、折弯等成形管状,最后利用焊接工艺焊接成管道零件。针对大曲率半径钛合金筒类零件,可采用板料冷滚弯成形工艺。板料滚弯成形是应用三滚弯板机连续不断对板材进行 3 点弯曲。其成形原理如图 2 所示,上滚轮在与板料垂直方向向下移动,板材受到上滚轮的挤压而发生向下的塑性弯曲变形,接着两下轮转动,板材和滚轮之间的摩擦力使得板材不断前进,完成板材的自动进给。单曲率钛合金筒类零件(见图 3)采用冷滚弯工艺成形不仅满足设计要求,且节约大量费用^[15]。小

曲率半径钛合金管道零件(见图4)滚弯成形时回弹量大,成形后的零件很难达到尺寸要求。

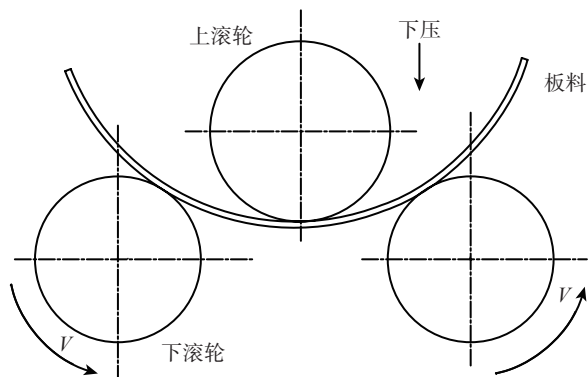


图2 板料滚弯成形原理图

Fig.2 Diagram of sheet metal roll-bending forming



图3 钛合金板料滚弯试件

Fig.3 Titanium alloy roll-bending specimen



图4 飞机管道零件

Fig.4 Duct part of aircraft

3 钛合金管道渐进折弯技术研究

渐进折弯就是在传统的折弯成形的基础上,进行多次折弯迭代,多次圆弧半径逼近,达到最终产品零件所要求的半径,渐进折弯成形过程如图5所示^[16]。通过控制每一道次的板料的进给量和凸模向下位移来对其进行回弹补偿和修正,从而控制成形精度,最终得到准确的成形尺寸。

3.1 渐进折弯回弹控制

板料在弯曲的过程中,板料内外缘表层纤维进入塑性状态,而板料中心处于弹性状态,当凸模上移后,板料就会出现回弹。图6为板料折弯回弹示意图。

影响钛合金折弯回弹的因素很多,各种因素相互作用影响,密切相关。回弹值与材料的屈服强度 σ_s 成正比,也与相对弯曲半径成正比,当相对弯曲半径较大时,虽然变形程度很小,但材料断面中心部分会出现很大的弹

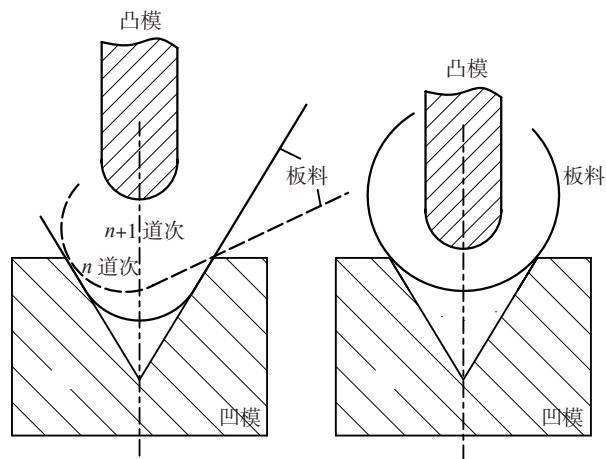


图5 管道零件渐进折弯成形示意图

Fig.5 Schematic of multiple-step incremental air-bending forming

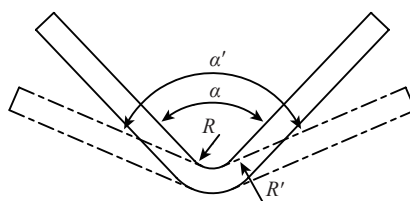


图6 板料折弯回弹

Fig.6 Springback of sheet metal bending

性区,回弹值较大;因此在折弯过程中选择半径小的凸模有助于减小回弹。模具结构对板料回弹也有较大的影响,当凸模半径一定时,V形模具与U形模具在折弯过程中受力不同,V形模具折弯时板料是限制性弯曲,材料始终受凸模和凹模的压缩作用,回弹值小;U形模具折弯时是自由弯曲,回弹值大^[17]。因此,渐进折弯时V形模具有利于减小回弹。

3.2 有限元渐进折弯成形模拟

有限元仿真技术随着航空制造工艺的不断发展,被越来越多的应用于生产实践中。

本文应用ABAQUS软件对钛合金板料成形直管道零件渐进折弯进行模拟仿真,其分析流程如图7所示。

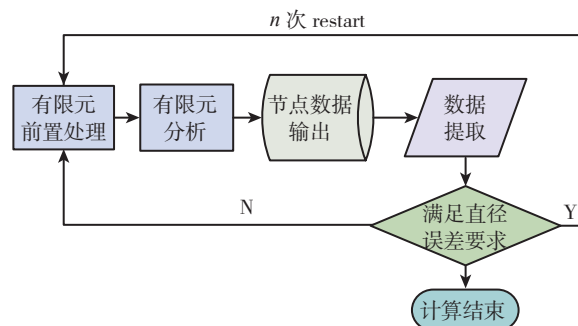


图7 钛合金板料渐进折弯成形有限元分析流程

Fig.7 Flow chart of titanium alloy sheet multiple-step incremental air-bending forming in FEM simulation

首先建立渐进折弯仿真模型,对模型进行前置处理,如对板料赋材料属性,设置分析步,定义边界条件,划分网格等。其次,将分析模型提交求解器进行求解计算。最后,将求解后的节点数据输出,进行数据处理,得出管道零件直径,判断直径是否在误差要求之内并进行迭代,直到模拟成形的直径符合要求为止,最终得出合格管道零件。

3.3 前处理设置

根据实际尺寸,通过简化建立凸凹模及板料几何模型,并在板料两端留有余量,其装配关系如图8所示。板料厚度定义为0.8mm,弹性模量E为7.7E4MPa,泊松比0.3,密度4.77E-006kg/mm³,材料应力应变关系曲线如图9所示。板料与凸凹模具之间的摩擦类型定义为库伦摩擦,摩擦系数均为0.12。模型网格划分采用线性缩减积分S4R单元类型,厚度方向积分点选择7个。

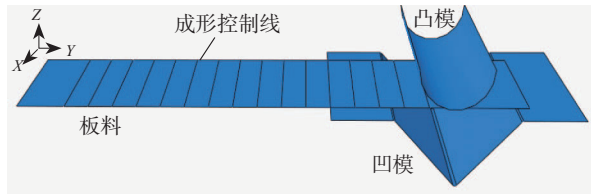


图8 直管道渐进折弯成形有限元模型

Fig.8 Shell FE model of straight duct multiple-step incremental air-bending forming

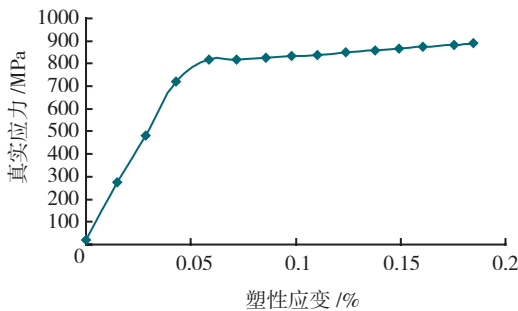


图9 Ti-15-3材料真实应力-塑性应变关系曲线

Fig.9 True stress-plastic strain curve of Ti-15-3

模拟管道零件渐进折弯成形的关键在于对模型边界条件的定义,在模拟过程中应保持凹模固定不动,凸模只在Y方向上移动,板料在分析步中逐渐向前移动一定的位移量。由于模拟计算时采用的是显示算法,计算时考虑了质量矩阵M,会产生惯性力的影响,因此必须恰当地设定凸模的移动速度。如果凸模的下降速度过大,会造成板料的惯性作用明显增加,使得计算结果脱离实际,导致结果失真。板料的移动边界条件是通过约束板料的成形控制线完成,用N条控制线将板料切割成N+1块,在每个分析步中设置相对应的控制线的边界条

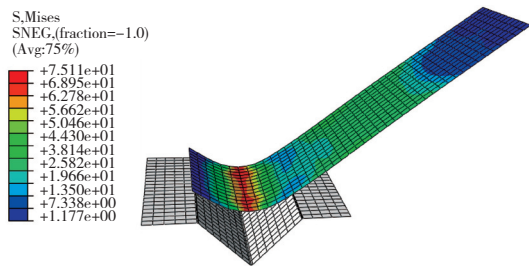
件,从而完成板料的移动、变形及回弹约束。

3.4 显示求解计算

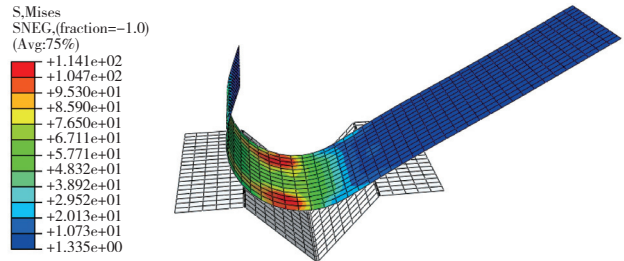
采用Abaqus/Explicit动力显式求解器进行求解。动力显式算法不须求解联立方程组和形成总刚度矩阵,问题大为简化、求解较省时,而且采用基于时间的中心差分法使得计算方程显式化,避免了迭代计算和因非线性而引起的收敛问题。

3.5 模拟结果输出

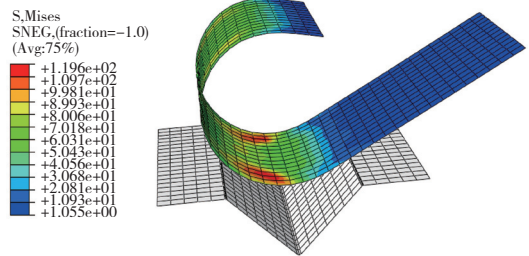
图10为钛合金薄壁管道零件渐进折弯成形回弹后的Mises应力云图。将成形后板料轮廓节点坐标输出,



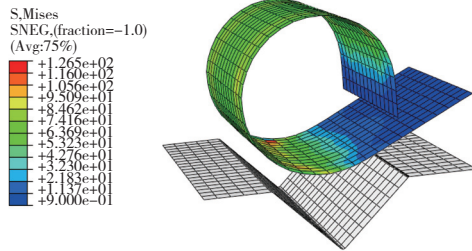
(a) 第1条控制线成形结果



(b) 第6条控制线成形结果



(c) 第10条控制线成形结果



(d) 第14条控制线成形结果

图10 钛合金薄壁管道零件渐进折弯成形回弹后的Mises应力云图
Fig.10 Mises stress distribution of titanium alloy thin-walled duct after springback of multiple-step incremental air-bending forming

进行数据提取,得到经过任意三点形成圆弧的直径尺寸,与标准直径的尺寸误差为 1.8%。

4 钛合金管道零件焊接技术

飞机环境控制系统的输气管道零件经过上述的渐进折弯成形后,必须将管件之间的缝隙进行焊接,如图 11 所示。在焊接之前,必须对板料两侧的余量进行切除,由于薄壁管道零件刚性差,切削定位困难,需要专门的工装和工艺才能保证管件纵缝的光洁度,以利于缝隙的焊接。

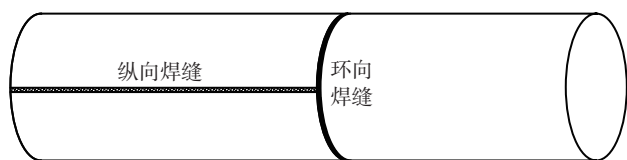


图11 两管件焊接示意图
Fig.11 Two ducts welding diagram

目前钛合金中最常用的熔焊方法有 TIG 焊接,电子束焊接和激光焊接等^[18-19]。激光焊接(LBW)具有高的能量密度和焊接速度,变形小及容易实现自动化等优点,是一种新的焊接技术。电子束焊具有与激光焊接同样的优点,但它最大的缺陷是需要真空下焊接^[20]。但是钛合金薄壁管件在焊接过程中,由于高度集中的瞬时热输入和随后的快速冷却,必然会在焊接工件上产生相当大的焊接残余应力^[21],导致失稳变形十分严重,出现如图 12 所示,管件的角变形、弯曲以及焊缝处的波浪变形。钛合金在焊接过程中容易发生氧化,必须进行惰性气体保护,一般使用高纯氩气进行保护就可以防止氧化。另外,由于 β 型钛合金中常存在 Al、Mo、V、Cr、Mn、Si 等合金元素,冷裂倾向明显,易引起接头脆化。焊接接头的脆化现象使焊接结构承载能力下降,严重时出现脆断,造成非常严重的焊接事故^[22]。

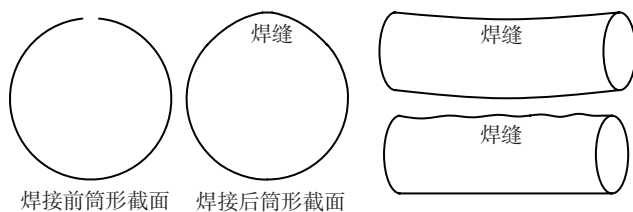


图12 焊接后变形管件
Fig.12 Deformed welding ducts

5 结束语

本文主要讲述了钛合金薄壁管道零件冷成形及焊接工艺中的关键技术。采用渐进折弯成形工艺可以有

效避免回弹大,提高成形精度;利用有限元数值模拟可为生产提供有效的工艺参数,提高生产效率,缩短生产周期。

参考文献

- [1] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用. 稀有金属快报, 2006(1):17-21.
- [2] 黄金昌. β 钛合金在飞机中的应用. 钛工业进展, 1999(2): 32-34.
- [3] Hirowo G, Suzuki, Hideki, et al. Deformation characteristics of Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al at elevated temperature. ISIJ International, 1991, 31(8):814-819.
- [4] 王庆如, 张庆玲, 陈玉文. Ti-15-3 合金的性能数据. 材料工程, 1996(11):17-21.
- [5] Boyer R R. Aerospace applications of beta titanium alloys. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 1994, 46(7): 20-23.
- [6] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. Materials Science and Engineering, 1996, A213: 103-104.
- [7] Bania P J. Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 1994, 46(7):16-19.
- [8] 王庆如, 张庆玲, 戴美云, 等. Ti-15-3 钛合金的应用研究. 材料工程, 1996, 12: 16-19.
- [9] 王庆如, 马济民, 张庆玲. Ti-15-3 合金时效性能研究. 航空材料学报, 1998, 18(1):7-14.
- [10] Ma J M, Wang Q R. Aging characterization and application of Ti-15-3 alloy. Materials Science and Engineering, 1998, A243: 150-154.
- [11] 孙永娜, 林莺莺, 吴向东, 等. TB5 钛合金凸凹零件橡皮成形锥面回弹试验研究. 材料科学与工艺, 2010, 18(增刊 1): 34-38.
- [12] 王庆如, 张庆玲, 陈玉文, 等. Ti-15-3 合金的超塑性及应用. 材料工程, 1998(2):9-12.
- [13] 王鼎春. 高强钛合金的发展与应用. 中国有色金属学报, 2010, 20(1):958-963.
- [14] 江志强, 杨合, 许旭东, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景. 塑性工程学报, 2009, 16(4):44-50, 84.
- [15] 王玉庭. TA7 钛合金蒙皮冷滚成形探讨. 宇航材料工艺. 1987(4):13-16.
- [16] 付泽民, 莫健华, 韩飞. 金属板材多道次渐进折弯成形的回弹补偿. 华中科技大学学报, 2010, 38(5):105-108.
- [17] 蒋桂芝, 马红梅. 弯曲件回弹问题分析. 机械研究与应用, 2010(3):60-62.
- [18] Qi Y L, Deng J, Hong Q, et al. Electron beam, welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet. Materials Science and Engineering, 2000, 280(1):177-181.
- [19] 张小明. 钛及钛合金的焊接. 稀有金属快报, 2001(5): 17-20.
- [20] Kristensen J K. Force technology, denmark. trends and developments within welding and allied processes. Welding in the World, 2002(46):1-22.
- [21] 何小东, 张建勋, 巩水利, 等. 钛合金薄板激光和钨极氩弧焊残余应力测试研究. 材料工程, 2003(12):7-10.
- [22] 魏晓棠. 钛合金的钨极氩弧焊. 钛工业进展, 2008, 25(6): 38-41.

(责编 小城)