

小曲率半径薄壁钛合金筒形件冷辊弯技术研究

韦超 曹雪峰 姜恒 董文倩 徐新阳 孙锡建

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)



摘要: 针对小曲率半径薄壁TC4钛合金筒形件冷辊弯成形的技术难题, 完成了理论计算、有限元分析、卷板机设计及试制、工艺试验等研究内容。试验结果表明, 卷板机加工筒形件的质量满足自动焊接要求。本研究成果已成功应用于某航天产品生产, 实现了TC4钛合金筒形件的优质、高效、绿色加工。

关键词: 小曲率半径; 钛合金; 冷辊弯

Study on Technology of Cold Roll Bending Thin-walled Tube-shaped Titanium Alloy Parts with Small Curvature Radius

Wei Chao Cao Xuefeng Jiang Heng Dong Wenqian Xu Xinyang Sun Xijian

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

Abstract: Aiming for the problems of technology of cold roll bending thin-walled tube-shaped titanium alloy parts with small curvature radius, the research contents included theoretical calculation, FEA, design and trial production of the bending machine, as well as process test. The test result indicated that the quantity of the tube-shaped parts, produced by the bending machine, can meet the requirement of automatic welding. This research result has been successfully used in the manufacture of aerospace products. This technology is high quality, efficiency, and green machining.

Key words: small curvature radius; titanium alloy; cold roll bending

1 引言

TC4 钛合金具有高比强度、耐腐蚀、耐高温等优点, 在航天、航空领域应用日益广泛。采用 TC4 薄板弯曲成筒状再焊接纵缝的筒形件是一种常见结构形式。TC4 钛合金弹性模量小, 常温下加工回弹严重, 易出现加工硬化, 因此板焊结构的 TC4 筒形件精确成形十分困难, 冷成形质量往往难以满足设计要求。

针对大曲率半径的钛合金筒形件, 国外有成熟的三辊冷辊弯卷板机, 国内也有单位引进并应用于工程生产。针对小曲率半径的钛合金筒形件, 市场尚无适用的冷成形设备, 国内通常采用“热辊弯+热校形”、“逐段压弯+热校形”或“强力旋压”等工艺方法加工该类零件, 存在工艺复杂、设备昂贵、生产周期长、

能耗高等不足。为满足某航天产品零件的研制需要, 开展了小曲率半径薄壁钛合金筒形件的冷辊弯成形技术研究, 并研制出专用的卷板机。

2 卷板机结构形式确定

常见的卷板机结构形式包括对称三辊式、不对称三辊式、四辊式、水平下调式、横竖上调式等。由于需成形零件(见图 1)的 TC4 钛合金板材厚度仅 1.5mm, 内径 210mm, 综合考虑筒形件的校形要求, 最终选用四辊式的卷板机结构形式(见图 2)。与三辊相比, 四辊卷板机有更加灵活多样的弯曲功能, 具备双向预弯边、剩余直边短、板料对中方便等一系列优点。

作者简介: 韦超(1983-), 工程师, 机械设计专业; 研究方向: 非标自动化工艺装备研制。

收稿日期: 2013-10-30

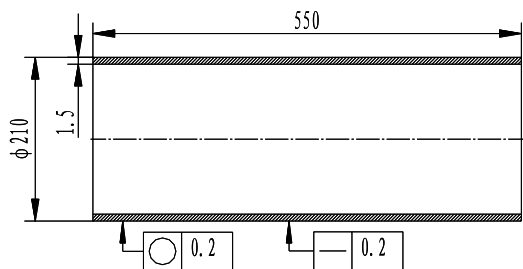


图1 产品零件图

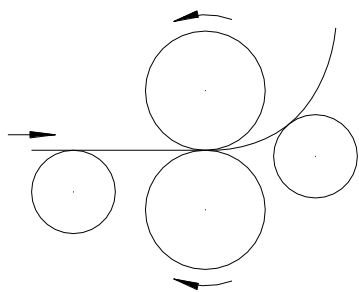


图2 四辊卷板机结构示意图

3 几何参数理论计算及成形过程仿真

3.1 几何参数理论计算

四辊卷板机的成形能力主要由上辊、下辊、侧辊的直径及相互位置关系决定。在本研究中,根据待加工零件的尺寸及材料力学性能,利用文献[1]的计算方法反推出各辊的直径及位置关系等几何参数。

3.2 成形过程仿真

利用有限元软件 ABAQUS 对钛合金卷圆过程进行数值模拟,验证冷辊弯成形的工艺可行性,并为卷板机的结构强度分析提供载荷边界条件。

3.2.1 有限元模型的建立

采用理论计算获得的几何参数分别建立上辊、下辊、2个侧辊、钛板的几何模型,并在 ABAQUS 装配模块的整体坐标系下将上述模型装配起来。其中,钛板的材料模型选用弹塑性本构模型,其本构关系为本单位在钛合金本构模型研究中建立的拟合数学表达式。

分析时假设各成形辊都是不产生变形的刚体,只有钛板发生塑性变形。因此,在网格划分时,各成形辊均选用 4 节点 4 边形壳单元 (R304),钛板选用可变形的 4 节点 4 边形壳单元 (S4R),该单元具有沙漏控制盒缩减积分功能。

成形时各成形辊与钛板始终是接触的,本次分析共建立 4 个接触对,分别为钛板与上辊、钛板与下辊、

钛板与 2 个侧辊;采用库伦摩擦模型^[2]模拟成形辊与钛板的接触摩擦行为,并假设各接触对之间的摩擦系数保持不变。

最终建立的三维有限元模型如图 3 所示。

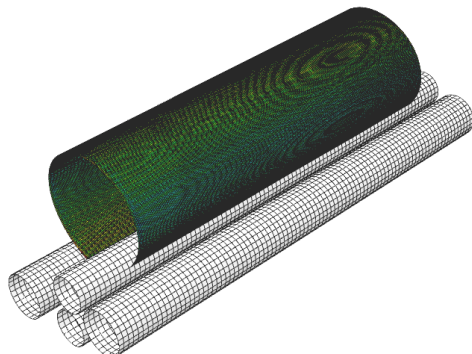


图3 有限元模型

3.2.2 有限元分析及结果

钛合金筒形件辊弯成形是多次渐进成形过程,因此将整个仿真分为 9 个分析步(含初始步),每次侧辊移动 5mm,共进行 8 次辊弯仿真,直至钛板辊弯成筒状。每次成形仿真结束后,将钛板形状、相关单元、节点和应力应变信息导入 ABAQUS/Standard 模块中,采用静态隐式算法进行回弹计算,计算时回弹时间为 4s。为了控制模型的收敛性,初始时间步的步长设为 0.001,最小步长设为 10^{-5} 。

数值模拟结果如图 4 所示,结果表明采用冷辊弯方法可以成形小曲率半径薄壁钛合金筒形件。同时,从图中可明显看到辊弯后钛板存在直边现象,该直边段直接影响后续的纵缝焊接。因此在辊弯卷圆之前,必须对钛板的两端进行预弯处理。

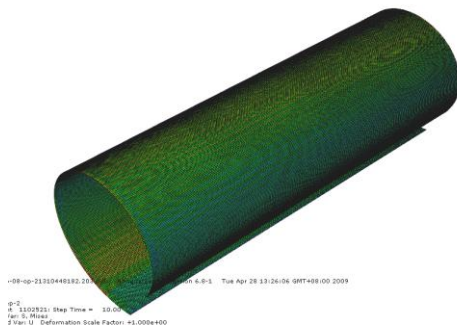


图4 模拟结果

通过数值模拟,还得到了上辊、下辊、侧辊在成形时所受载荷,受力从小到大依次为:下辊、侧辊、上辊。利用该载荷作为边界条件,采用 Pro/Mechanic

软件对各成形辊进行结构分析,结果显示理论计算得出的上辊直径不能满足卷制钛板的刚度要求。因此,本研究对传统的四辊卷板机结构形式进行修正,即在上辊上方增加 1 根从动辊(见图 5)以提高整个上辊刚度。

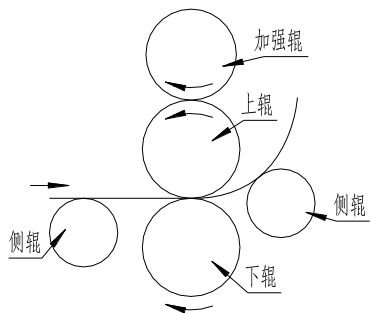


图 5 各成形辊位置示意图

4 卷板机结构设计

卷板机的结构示意图如图 6 所示。主要结构件包括上辊组件、下辊及升降装置、翻转卸料装置、左安装座、上下辊驱动装置、右安装座、侧辊及升降装置。

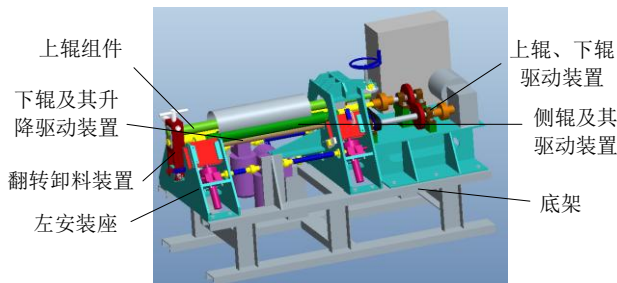


图 6 卷板机结构示意图

上辊组件由上辊、加强辊、双孔轴承座等组成。上辊的尾部与联轴器连接,主驱动电机的转动通过齿轮传动传递到上辊;上辊上方的加强辊为从动辊,依靠与上辊的摩擦力转动。

下辊的升降通过伺服电机驱动。与上辊一样,下辊为主动辊,在下辊的尾部安装有同步带轮,主驱动电机的转动通过同步带传递给下辊。为了保证转动速度相同,上辊和下辊依靠同一台主驱动电机驱动。

侧辊及升降装置共有 2 套,在卷板机上对称布置,采用伺服电机带动侧辊升降。

5 卷板机控制系统设计

卷板机的控制系统主要功能是控制上下辊、侧辊精确运动并进行数据信号交互,从而实现卷圆、校圆过程的自动化。

控制系统的硬件包括一体化控制器、伺服机构(伺服电机+伺服驱动)、变频器、变频电机、无线操作盒、触摸屏、激光传感器、限位传感器等。系统原理框图见图 7。



图 7 卷板机控制系统示意图

一体化控制器是系统核心,负责系统的现场通讯、数据处理、运动控制盒 IO 过程控制,选用安川 MP2200 运动控制器,伺服电机用于驱动侧辊、下辊的升降;选用安川公司的 SGMGV-09DD6C 伺服电机,配套 SGD7V-7R6A 伺服驱动器,触摸屏既有参数及信息设置显示功能,也有虚拟按键进行系统执行步骤的操作;选用欧姆龙公司的 KYM-080T-B 触摸屏,无线操作盒主要在人工手动控制设备时使用;选用阿尔法公司的 EZB68 无线控制盒,激光传感器提供钛板边界位置信号,保证加工时工件和设备安全;选用松下公司的 EX-L212-P 传感器,接近位置传感器用于提供侧辊运动的上下极限位置信号;选用松下公司的 GX-HL15 传感器。

6 试验验证

在理论计算、有限元分析、卷板机设计的基础上,本项目完成了卷板机原理样机试制。利用该设备开展 TC4 钛板端头预弯、卷圆等工艺试验。

6.1 端头预弯

研究中,采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板(厚度 1.2mm)和 TC4 钛板(厚度 1.5mm)进行了端头预弯对比试验。结果表明,TC4 钛板回弹严重,直线段长度约 40mm,远长于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板(15mm)。该试验结果与(下转第 22 页)

