

民用飞机管路件弯曲工艺分析

Analysis of Tube Bending Process for Civil Aircraft

黄建科 李明仁 / Huang Jianke Li Mingren

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

运用有限元数值模拟方法来模拟工艺过程、指导工艺试验、辅助工艺参数选择是有效提高设计效率的重要途径。采用有限元法对 Ti-3Al-2.5V 导管弯曲这一典型导管制造工艺进行了过程分析,为合理选取导管弯曲半径和弯曲角度提供依据,也为在导管弯曲工艺设计中引入有限元数值分析方法提供借鉴。

关键词:有限元;数值模拟;导管弯曲

中图分类号:V261

文献标识码:A

[Abstract] Using the finite element numerical simulation method to simulate the process, guide the process test and select process parameter is an important way to improve the design efficiency. This paper analyzes a typical tube manufacturing process for Ti-3Al-2.5V tube bending with finite element method, in order to provide the basis for reasonable selection of tube bending radius and bending angle. Finite element numerical analysis method is also introduced into the tube bending process design for reference.

[Key words] finite element; numerical simulation; tube bending

0 引言

民用飞机中的管路件广泛分布于动力燃油、液压、电气和环控等系统中。管路系统连接结构形式及性能的好坏直接影响着飞机液压、燃油、环控系统的使用性能、寿命和可靠性。

管材塑性加工是以管材为毛坯,通过各种塑性加工手段制造导管零件的加工技术,管材弯曲成形是管材塑性加工中最主要的成形方式。传统的导管弯曲加工采用导管取样的方式进行,通常导管生产的制造依据是导管标准实样。随着数字化制造技术的迅速发展,导管的数控弯曲技术已逐步代替了传统的弯管工艺,从而满足了对导管弯曲高精度、高性能、高效率 and 数字化的加工要求。近年来,国内飞机导管数字化制造技术发展迅速,面向制造的产品数字化建模^[1]、导管三维快速建模^[2]、导管数控弯曲过程建模与有限元仿真技术在各大飞机制造厂开始应用^[3-4]。

本文采用有限元数值计算方法对导管弯曲这一典型工艺进行了过程分析,为合理选取导管弯曲半径和弯曲角度提供依据,也为在导管弯曲工艺设计

中引入有限元数值分析方法提供借鉴。

1 导管弯曲工艺分析

导管弯曲成形过程是多因素耦合交互作用的复杂物理过程,涉及力学的三大非线性问题:几何非线性,即坯料在成形过程中产生的大位移、大转动或大变形;物理非线性,即材料非线性;边界非线性,即模具与工件产生的接触摩擦引起的非线性关系。采用有限元法可在计算机上模拟分析导管弯曲成形时从管坯到制件的全过程,可以预报变形过程的重要宏观参数(载荷、位移等)及工件内的场变量(应力、应变等),可以给出成形过程中管坯几何形状、尺寸和性能的变化情况,预测各种缺陷的产生和发展趋势。

在金属导管弯曲过程中,由于弯曲段外侧受拉状态明显,此时弯曲段外侧导管的壁厚明显减薄,如果导管设计参数不合理或者工艺参数设置不合理则在弯曲段外侧极易出现破裂的现象,如图 1 所示。

导管弯曲段外侧的管壁在弯曲过程中随着弯曲角度的逐渐增大而持续减薄,最终导管弯曲段外

侧发生破裂。因此管壁减薄率是表征导管破裂现象的重要指标。由于导管所在系统的设计要求不同,管壁减薄率的要求也不相同。承受高压的液压系统对管壁减薄率的要求要严格一些,低压或非压力系统则要低一些。这是因为对于压力系统来说,导管的受力状态更为严酷。航空制造工程手册规定^[5],对于低压导管,管壁减薄率不得大于导管公称厚度的25%;对于高压导管,管壁减薄率不得大于导管公称厚度的20%。通过工艺试验和生产实践经验的积累,可以看出:在导管弯曲工艺过程中,导管的弯曲半径和弯曲角度是对管壁减薄率影响最大的两个参数。以下将采用有限元法来模拟导管弯曲工艺过程,分析导管的弯曲半径和弯曲角度对管壁减薄率的影响趋势,从而得到一些规律性的结论。



图1 导管破裂图

2 导管弯曲的有限元模型建立

数控弯管成形是通过将导管安装在数控弯管机上,配合相应的弯曲模、夹块、压块、防皱块和芯棒等模具,使得导管随弯曲模一起转动,当导管被拉过压块时,压块将导管绕弯在弯曲模上。本文采用商用有限元软件ETA/dynaform5.7.1中的Rotary Bending模块快速建立管材弯曲网格模型,有限元模型如图2所示。有限元模型提交给LS-DYNA进行计算,在ETA/Post 18.0中查看后处理结果。有限元模型中采用Ti-3Al-2.5V钛管材,管径为12.7mm,壁厚为0.66mm。

3 导管弯曲的数值模拟结果分析

3.1 导管弯曲过程的受力状态分析

在数控弯管机上进行弯管操作时,导管弯曲半径(R_b)一般采用的是导管公称外径(D_n)的倍数,导

管经过弯曲模后绕弯至规定的弯曲角度(θ)。图3和图4分别给出了弯曲半径(R_b)为导管公称外径(D_n)的3倍,弯曲角度(θ)为 90° 时的最大主应力和最小主应力分布情况。

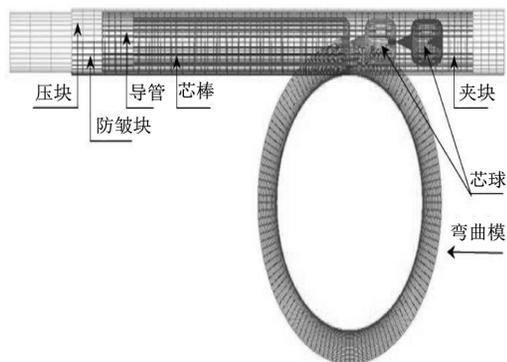


图2 有限元模型图

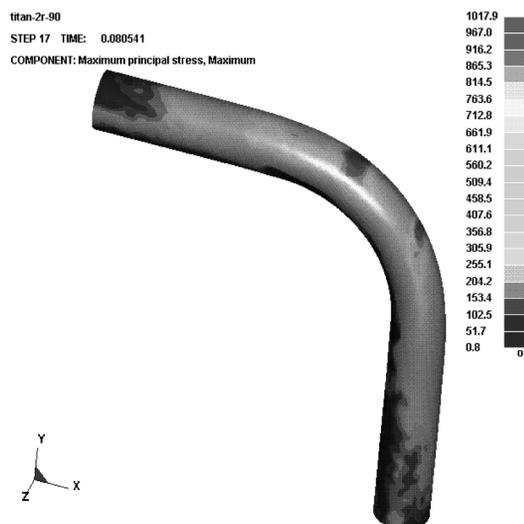


图3 最大主应力($R_b = 3D_n, \theta = 90^\circ$)

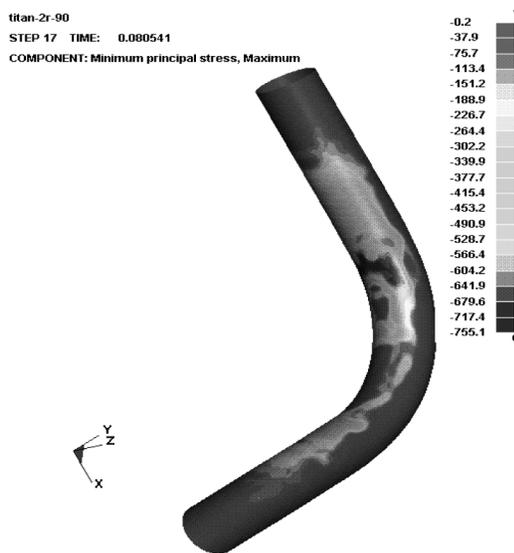


图4 最小主应力($R_b = 3D_n, \theta = 90^\circ$)

从图3可以看出,导管弯曲外侧的最大主应力峰值达到1 017.9Mpa,为明显的受拉状态;从图4可以看出,导管弯曲内侧的最小主应力峰值达到-755.1Mpa,为明显的受压状态。

3.2 导管弯曲过程的壁厚变化分析

壁厚减薄率是导管发生破裂的重要指示性参数,因此分析弯曲过程的相关参数对导管破裂的影响就要分析到底哪些参数会显著影响壁厚减薄率的变化。在导管弯曲工艺过程中,导管的弯曲半径和弯曲角度是对管壁减薄率影响最大的两个参数。当固定其中一个参数时,通过有限元的模拟分析,可以得到另一个参数对管壁减薄率影响的相关规律。

图5和图6分别给出了弯曲角度(θ)为 90° ,弯曲半径(R_b)分别为3倍和4倍导管公称外径(D_n)时的壁厚减薄率的分布情况。比较图5和图6可以看出,在同样的弯曲角度下($\theta=90^\circ$),弯曲半径(R_b)为3倍导管公称外径(D_n)时,导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率为17.0%,而弯曲半径(R_b)为4倍导管公称外径(D_n)时,导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率为8.9%,由此可以看出,在同样的弯曲角度下,弯曲半径越小,壁厚减薄率越大。弯曲半径的适当增加可以显著降低导管的壁厚减薄率。此外,图5中导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率已经达到17.0%,接近航空制造工程手册规定的20%的上限值,因此Ti-3Al-2.5V钛管材(管径为12.7mm,壁厚为0.66mm)的最小弯曲半径为3倍的导管公称外径(D_n),这一结论与设计标准中对同规格Ti-3Al-2.5V钛导管推荐的最小弯曲半径优选值是一致的。同时AS33611中对于同规格Ti-3Al-2.5V钛导管的弯曲半径规定为最小弯曲半径为3倍导管公称外径,推荐优先选择弯曲半径为4倍导管公称外径,有限元模拟的结果与AS33611的要求也吻合。

图7给出了弯曲角度(θ)为 48° ,弯曲半径(R_b)为4倍导管公称外径(D_n)时的壁厚减薄率的分布情况,此时导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率已经达到8.9%,与图6对比可以看出,弯曲半径(R_b)不变时,当弯曲角度(θ)增加到某一临界值(模拟显示此临界值为 48°)后,导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率不再增加,而是壁厚减薄的范围增大了。

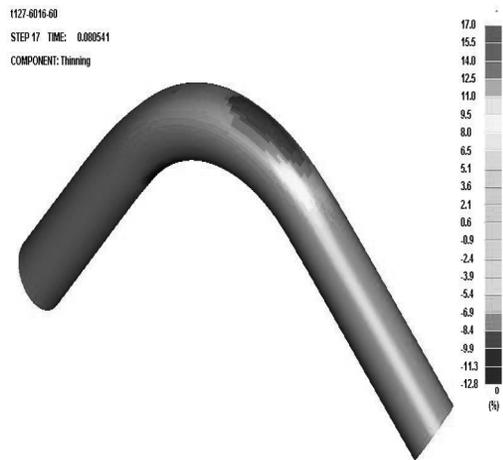


图5 壁厚减薄率($R_b=3D_n, \theta=90^\circ$)

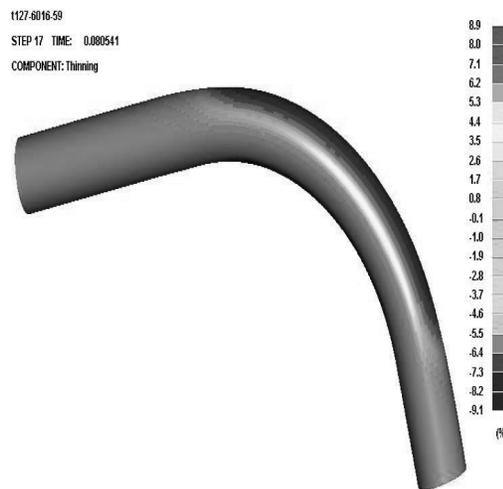


图6 壁厚减薄率($R_b=4D_n, \theta=90^\circ$)

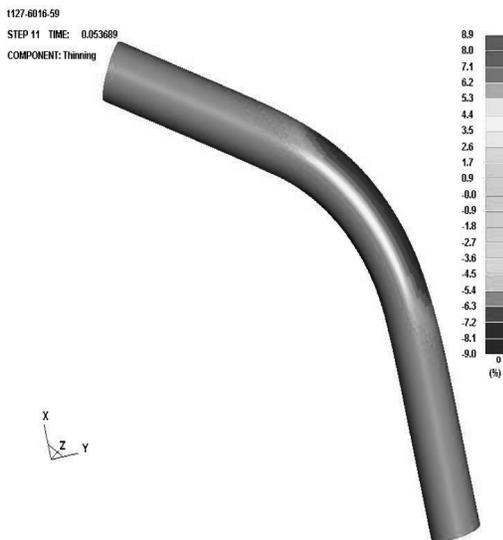


图7 壁厚减薄率($R_b=4D_n, \theta=48^\circ$)

图8给出了最大弯曲角度(θ)为 90° ,弯曲半径(R_b)为4倍导管公称外径(D_n)时导管弯曲段外侧的最大壁厚减薄率随着弯曲角度增加的变化情况。

从图中可以看出,当导管沿着某一弯曲半径($R_b = 4D_n$)绕弯的过程中,在最初阶段,壁厚是随着弯曲角度的增加而持续减薄的,但当弯曲的角度超过某一特定值时(模拟显示此临界值为 48°),壁厚的减薄量不会继续增大,而是变薄的范围开始扩大(参见图6和图7的对比)。

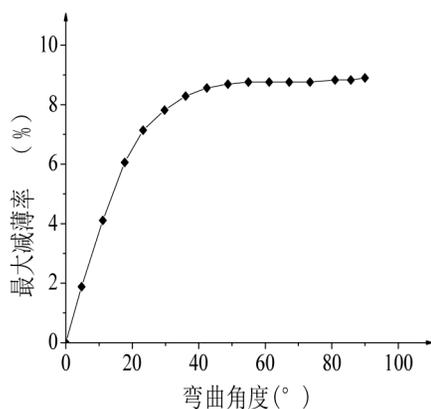


图8 最大壁厚减薄率与弯曲角度的关系
($R_b = 4D_n, \theta = 90^\circ$)

综上所述,弯曲半径和弯曲角度共同影响着导管的壁厚减薄情况。在同样的弯曲角度下,弯曲半径越小,壁厚减薄量越大。因此,如果弯曲角度不大,就可以考虑在满足可制造性要求的情况下选取小一些的弯曲半径,以节省设计空间。此外,在弯曲半径确定的情况下,由于导管最大壁厚减薄率与弯曲角度的关系图上存在一个临界点,当弯曲角度超过这一临界角度时,导管最大壁厚减薄率不会再

增加,因此参数选择时可以不考虑导管破裂的危险,而主要考虑可能出现的其它形式的缺陷。

4 结论

管路件加工工艺参数的选择和加工过程的控制是提高导管零件加工质量的重要因素。随着计算机技术的快速发展,借助有限元等数值计算方法来优化加工工艺参数选择和加工过程控制是提高加工质量的一条有效途径。本文通过数值计算方法来模拟导管弯曲工艺,可以较直观地掌握导管弯曲工艺过程中的规律,从而显著减少工艺试验的次数,节省人力和物力,从而有效提高管路系统的设计和制造效率。

参考文献:

- [1] 宁汝新,刘检华,唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报,2006,42(7):132-136.
- [2] 李振强,侯清海,王永军,等. 导管三维快速建模及模型预处理技术研究[J]. 制造业自动化,2007,29(3):15-18.
- [3] Yang He, Gu Ruijie, Zhan Mei, et al. Effect of frictions on the cross section quality of thin-walled tube NC bending[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(4):878-886.
- [4] 李恒,杨合,寇永乐,等. 大口径薄壁小弯曲半径数控弯管有限元建模和实验[J]. 锻压技术,2006,31(5):136-139.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会主编. 航空制造工程手册—飞机钣金工艺[M]. 北京:航空工业出版社,1992.

(上接第31页)

初步确定客机主要总体参数的方法。该方法只需输入商载、航程和飞行性能要求,以及较少的预估参数,就可计算出翼载、推重比和重量特性。根据该方法,应用MATLAB编程工具开发了相应计算程序。该计算程序具有良好用户界面,可辅助设计人员快速确定客机主要总体参数。算例验证表明,由该计算程序确定的总体参数与参考机型具有较好的一致性,可用于客机概念设计中的主要总体参数的第一轮初估。

参考文献:

- [1] Hays A P. Spreadsheet method for aircraft design[R]. AIAA 89-2059.
- [2] Raymer D P. Modern use of spreadsheet methods for aircraft design, sizing, and performance analysis[R]. AIAA 2004-534.

- [3] Howe D. Aircraft conceptual design synthesis [M]. 1st Edition. London, UK: Professional Engineering Publishing Limited, 2000.
- [4] Scholz D. Preliminary sizing [EB/OL]. (March 16,2010) [April 29,2014]. <http://www.ProfScholz.de>.
- [5] 余雄庆,徐惠民,昂海松. 飞机总体设计[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [6] Laurence K L. Subsonic aircraft: evolution and the matching of size to performance [R]. NASA RP-1060, 1980.
- [7] Raymer D P. Aircraft design: a conceptual approach[M]. 5th Edition. Reston: AIAA, 2012.
- [8] Roskam J. Airplane design: part 1 [M]. Kansas, USA: Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1985.
- [9] Torenbeek E. The initial calculation of range and mission fuel during conceptual design [R]. Report LR-525, Delft: Delft University of Technology, 1987.