翼型翅片管矢量弯管实验研究

赵 越 边洪录 许爱军 郝晓明 侯 振 陈 旭 张开虎 (北京卫星制造厂有限公司,北京 100092)

摘要:针对航天领域的热控产品中翼型翅片管的精密数控弯曲成形需求,进行了工艺试验研究。本文设计了 一种用于翅片翼型管数控弯曲的模具,对翼型翅片管弯管过程中的弯曲回弹、管路长度延伸问题进行了实验分析, 并根据实验结果建立数学模型,拟合得到翼型翅片管精确数控弯曲工艺补偿量计算公式。采用该计算公式对翼型 翅片管典型结构进行成形实验,获得较高的成形精度。翼型翅片管成形精度的提高,直接支撑了在一定空间精度 约束下设计更长的单根管路,对减少管-管焊装过程中的焊缝数量,提高翼型翅片管使用的可靠性具有积极意义。

关键词: 翅片管; 矢量弯管; 回弹补偿; 延伸补偿

中图分类号: V261 文献标识码: A

Experimental Study on Vector Bending of Finned Tubes

Zhao Yue Bian Honglu Xu Aijun Hao Xiaoming Hou Zhen Chen Xu Zhang Kaihu (Beijing Spacecrafts, Beijing 100092)

Abstract: Conduct process experimental research on the precision vector bending requirements of finned tubes in aerospace thermal control products. This paper designs a mold for CNC bending of finned tubes, and conducts experimental analysis on issues such as springback compensation and extension compensation during the forming process of finned tubes. A mathematical model was established to fit the experiment data, forming a calculation formula for precise bending process compensation of finned tubes. The mathematical model was used for bending experiments on typical structures of finned tubes, and high forming accuracy was achieved. The improvement of the forming accuracy of finned tubes directly supports the design of longer single tube for thermal control products under certain spatial constraints, which has a positive significance in reducing the number of weld seams and improving product reliability.

Key words: finned tubes; vector bending; springback compensation; extension compensation

1 引言

以载人飞船和在轨空间站为代表的大型航天器 常采用管肋式流体回路辐射器在太空中进行辐射散 热^[1-2]。管肋式辐射器技术成熟、可靠性高,其主体结 构为翼型翅片管与辐射蒙皮焊接成形^[3-4]。制造过程 中,翼型翅片管的精确弯曲成形是管肋式辐射器制造 的主要难点。

矢量数控弯管技术自上世纪70年代被提出以来, 经过数十年的发展,在航空航天、核电、汽车制造等 多种行业中应用日益广泛。目前,对等径圆截面导管 的矢量数控弯曲有较多的研究,包括弯曲回弹量、延伸量的补偿方法^[5-6],下料尺寸的精确计算^[7],管路焊装的刻线装配方法^[8],以及矢量数控弯管的仿真系统研究^[9]等。但对带有翅片翼型管的矢量数控弯管尚未有研究报道。翼型翅片管在热控领域中广泛使用,例如: 槽道热管、加热管路、热控辐射器管路等。因此,对 翼型翅片管数控弯制的难点进行研究具有重要工程应 用意义。解决翼型翅片管的数控精密弯制问题,可考 虑设计相应的弯制模型,同时采用试验方法对成形过 程的回弹和延伸进行测量,并建立补偿模型。

目前常规矢量数控弯管机通常用于弯制等径圆截

面导管,虽然对等径圆截面导管矢量数控弯制的研究 报道较多,有成熟的回弹和延伸量工艺补偿模型,也 有相应的仿真软件,但对于翼型翅片管而言,需要针 对特殊管体结构开发适应的弯管模具,用于装夹弯制 翼型翅片管。而且,在管路弯曲过程中,受材料变形 回弹的影响,弯曲半径会大于模具半径,造成长度延 伸,弯曲角度也会大于设定角度,导致弯曲管件与理 论模型的偏差。

本文以某辐射器管路成形为例,针对铝合金翼型 翅片管的矢量数控弯曲需求,设计了一种可弯制翼型 翅片管的成形模具,对翼型翅片管弯管过程中的弯曲 回弹、长度延伸问题进行了实验分析,根据实验结果 建立数学模型,得到复杂形状翼型翅片管精确数控弯 制补偿量计算公式,并采用翼型翅片管典型结构进行 弯管试验,弯管精度满足使用要求,效果显著,为其 他翼型翅片管产品弯管提供了工程借鉴意义。

2 实验设备及材料

2.1 试验设备

使用EATON数控弯管机进性翼型翅片管的弯曲实验,该数控弯管机最大弯曲角度190°,弯曲速度90°需10~13 s,最大弯曲半径R750 mm。

2.2 试验材料

翼型翅片管材料为3A21(O)铝合金,该材料因良好 的塑性和耐腐蚀性能,广泛应用于航天热控管路。其 材料室温力学性能如表1所示。

材料	弹性模量	屈服强度	抗拉强度	伸长率	断面收缩率				
	E/GPa	$\sigma_{0.2}$ /GPa	$\sigma_{\rm b}/{\rm GPa}$	δ_{10} /%	ψ /%				
3A21(O)	71000	50	130	23	70				

表1 3A21(O)铝合金力学性能

翼型翅片管截面图如图1所示。该翼型翅片管外径 18 mm、内径14 mm、翅片宽40 mm、翅片厚1.5 mm。



图1 翼型翅片管截面图

3 模具设计

传统数控弯管机装夹模具三维模型如图2所示,主 要由轮模和夹模以及辅助配件组成,针对弯曲等径圆 截面导管,模型轮模和夹模的截面如图3a所示。翼型 翅片管由中心圆管和两侧翅片组成,在装夹时需考虑 两侧翅片的干涉,以及限制翅片在成形时的失稳起皱。 改进的装夹工装如图3b所示,即在轮模和夹模中开翅 片避让槽,同时为便于脱模,将轮模分成上下两层并 用销钉限位,在每次弯曲后松开轮模压紧螺钉,进行 脱模,下一次弯曲时进行锁紧。



图 2 传统数控弯管机装夹模具三维模型



弯曲模具实物图如图4所示,通过图中的翅片避让 槽能够将翼型翅片管被轮模和夹模紧密包裹,以限制 管体在弯制时发生滑动,并减少翅片在弯制时发生起 皱变形。



图 4 翼型翅片管装夹模具图

4 角度回弹补偿

大量实验和研究表明,等径圆截面导管的回弹角 度△*C*_(i)与理论弯曲角度*C*_{0(i)}呈不过原点的直线关系, 即:

 弹率。

翼型翅片管的回弹关系参照等径圆截面导管的回 弹关系进行试验。弯曲过程如图5所示。



图 5 翼型翅片管弯曲

设定试验弯曲角度及实验数据如表2所示,试验时 选用同批次管材。回弹量拟合图如图6所示。

弯管工况	模具半径 R55 mm, 翼型管规格 40 mm×Φ18 mm									
θ/()	20	30	40	50	60	70	80	90		
θ'/(°)	19.5	29.4	38.8	48.3	57.9	67.6	77.2	86.7		
回归直线		θ =1.0429× θ '+0.4584								
标准差	0.27406									

表 2 回弹试验数据



根据试验结果,发现在工程弯角范围内,同批次 带翅片翼形管,其弯曲角θ与回弹后成形角θ'之间呈严 格的直线关系,该直线不过原点。因此等径圆管的回 弹补偿方法也可适用于翼型翅片管。

按拟合得到的回弹补偿公式,以成形角25°、35°、45°、55°、65°、75°、85°为例,计算弯曲角为25.61°、36.04°、46.47°、56.90°、67.33°、77.76°、88.19°。按照该弯曲角进行弯曲,图7a为25°成形角,图7b为85°成形角,成形后弯曲段内侧翅片受压缩应力影响出现起皱增厚趋势,但起皱变形受到轮模凹槽的限制。成形测试结果如表3所示。





b 85°弯曲角

图 7 弯曲试验结果

	表3 精确成形测试结果							
弯管工况	模具半径 R55 mm, 翼型管规格 40 mm×Φ18 mm							
设计值 θ_1	25	35	45	55	65	75	85	
补偿值 θ_1'	26.6	36.0	46.5	56.9	67.3	77.8	88.2	
测量值 θ_2	25.3	34.7	45	55.1	65.2	74.8	85	
偏差值 $ riangle heta$	0.3	0.3	0	0.1	0.2	0.2	0	

对于不同批次的翼型翅片管可采用试弯法计算式 (1)中K、b,参考等径圆管,通常在正式弯制产品前, 在装配好模具的矢量数控弯管机上进行C₀₍₁₎(20 9和 C₀₍₂₎(120 9的角度弯曲试验,采用非接触式激光测量机 对弯曲角度进行测量,得到实际弯曲角度C₁与C₂。根 据角度回弹量的线性关系,可以求出:

$$K = 1 - (C_2 - C_1) / C_{0(2)} - C_{0(1)}$$
(2)

$$b = C_{0(1)} - C_1 - K C_{0(1)} \tag{3}$$

在正式弯管时,为保证管路的实际弯曲角度与理 论模型的角度重合,需要按对设定的弯曲角度进行补 偿,设定角度等于理论角度与补偿角度相加,即设定 角度跟*C*_(i)为:

$$C_{(i)} = C_{0(i)} + \triangle C_{(i)} \qquad 1 \leq i \leq n-1 \tag{4}$$

5 直线段缩减

在翼型翅片管弯制成形时,由于回弹引起的弯曲 半径增加以及弯制过程中中性层内移引起的管体总长 延伸,管体的直线段位置必须进行相应的缩减,保证 弯曲段相对位置,以实现管路的安装位置与理论模型 相符(实际使用时,通常对管路弯曲半径的精度不作 严格要求)。

试验件选用同批次管材,试验方法与回弹试验相同,直线段缩减拟合图如图8所示。采用样板切线方法测量弯曲成形的直线段延伸量(弯曲弧度前段直线段与后段直线段延伸量的平均值)试验结果如表4所示。



首线铅延伸量试验数据

恚⊿

弯管工况	模具半径 R55 mm, 翼型管规格 30 mm×Φ18 mm								
θ'/(°)	19.5	19.5 29.4 38.8 48.3 57.9 67.6 77.2 86.7							
$\triangle l/mm$	0.4	0.51	0.64	0.7	0.79	0.86	0.94	0.99	
回归直线	riangle l =0.0087 $ heta'$ +0.26								
标准差	0.06552								

根据上述试验,可得如下结论:在工程角范围内, 对于同批次翼型翅片管,其延伸量Δ*l*与成形角θ'均呈 直线关系。



b 测量过程

图 9 翼型翅片管典型结构特征弯管试验

c 测量结果

根据延伸量拟合结果以及某型号翼型翅片管的典型结构特征进行弯管试验,该试件由4个角度为90°的弯曲段组成,零件数控弯管成形后采用摄影测量仪对成形后的管件进行测量,并将点云数据与模型进行对

比,如图9所示,图中所测量点与理论模型偏差均小于 0.7 mm,具有较高的成形精度。

6 结束语

本文针对翼型翅片管矢量数控弯管成形需求,综 合利用模具设计、回弹量补偿、直线段延伸量修正等 措施,解决了翼型翅片管的矢量数控弯管成形精度较 低的问题。主要结论如下:

a. 本文以传统矢量弯管设备为基础,通过增加避 让槽的方式设计了适用于翼型翅片管的型材弯管的分 体式模具,实现弯曲过程中对管体弯曲半径的限定以 及对翅片起皱的有效控制,具有通用性和拓展性。

b. 采用实验数据拟合方法获得翼型翅片管弯曲角 度回弹量和直线段延伸量并进行拟合,在同一模具前 提下,弯曲角度回弹值和直线度段延伸量与弯曲角度 均呈不过原点的直线,具有良好的工程应用性。

c. 采用摄影测量仪对本文计算方法进行数控弯曲 管件进行测量,该管件形状静电与理论模型偏差均小 于0.7 mm,具有较高的成形精度。

参考文献

- 刘述运. 俄罗斯"联盟-TM号"号运输飞船热控制度保障系统[J]. 载人 航天信息, 1997(10): 4-10.
- [2] Persson J. Columbus active thermal control equipment development[R]. SAE 2005-01-2769.
- [3] 丰茂龙,范含林,黄家荣,等.单相流体回路辐射器性能优化方法[J].中 国空间科学技术,2012,12(6):62-67.
- [4] 黄家荣,范宇峰,禹颂耕,等.神舟七号飞船单相热控流体回路在轨性 能评价[J]. 航天器工程,2009(7): 37-40.
- [5] 王立新. 矢量弯管[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 王呈方. 弯管机冷弯管子回弹与伸长规律的实验研究[J]. 中国造船, 1993(4): 71-82.
- [7] 舒送,许宜军,黄卫华,等. 航空数控弯管精确下料计算与程序实现[J].现代制造工程,2016(2): 84-88.
- [8] 王成,任杰轩,邓琳蔚,等.一种基于数控弯管仿真的管路刻线方法[J].兵工自动化,2019,38(9):26-30.
- [9] 熊威,甘忠. 空间弯管仿真与回弹补偿[J]. 中国机械工程, 2013, 24(23): 3249-3254.