

# 薄壁不锈钢管数控绕弯成形 数值仿真及工艺研究

冯苏乐, 简翰鸣, 李年富, 王业伟, 徐爱杰, 杨学勤

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** 针对航天某型号薄壁弯管成形难度大、尺寸精度低等问题, 提出了数控绕弯成形替代拼焊成形, 分析数控绕弯工艺特点及参数确定方法。建立模型对成形工艺参数进行有限元仿真, 分析弯曲速度及芯头直径缩减量对不锈钢管成形影响, 并通过试验得到优化的工艺参数。结果表明弯曲速度为 8mm/s、减小芯头缩减量为 0.6mm 时, 成形零件截面畸变不超过 4%, 最小壁厚 0.65mm, 弯曲后管材产生形变强化效果, 组织更为细密, 成行排列的方向性更明显, 提高了零件强度。

**关键词:** 运载火箭; 不锈钢薄壁弯管; 一体化成形; 有限元模拟; 工艺改进

**中图分类号:** TB332/O341      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-4080 (2019) 04-0041-08

## Numerical Simulation and Technological Research of Numerical Control Bending in Thin-Walled Stainless Steel Tube

FENG Sule, JIAN Hanming, LI Nianfu, WANG Yewei, XU Aijie, YANG Xueqin

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** To deal with the difficulty of forming certain aerospace type thin-walled elbow with low dimensional accuracy, this paper puts forward a new method of numerical control bending forming instead of tailor-welded forming, and analyses the characteristics of numerical control bending and the rule of technological parameters. Finite element simulation model is established to analyze the influence of bending speed and core diameter reduction on forming and optimized parameters are obtained by experiments. The result shows that under the the process parameter of bending speed 8mm/s and core diameter reduction 0.6mm, the forming distortion rate does not exceed 4% with the minimum wall thickness of 0.65mm. Fiber tissue is compacted and the directionality of row arrangement is more obvious which formed the deformation strengthening effect to improve the strength of thin-walled elbow.

**Key words:** Launch vehicle; Stainless steel thin-walled elbow; Integral seamless forming; Finite element simulation; Process improvement

**收稿日期:** 2019-04-10; **修订日期:** 2019-05-19

**基金项目:** 上海航天技术研究院工艺研究项目 (712-SY-08)

**作者简介:** 冯苏乐 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为金属塑性成形和计算机仿真。

E-mail: fengsuleshikeke@sina.com

## 0 引言

不锈钢薄壁弯管具有强度高、轻量化等特性，在运载火箭增压输送系统管路中得到广泛应用。传统弯管成形工艺为模具压制半边管后对焊成形，存在焊后变形大、尺寸精度低、手工校形和修配工作量大等问题，如图1所示；而采用数控绕弯工艺可有效解决传统工艺成形难题。近年来，国内外学者针对数控绕弯过程缺陷开展了大量研究，林艳等<sup>[1]</sup>研究了薄壁弯管成形过程中容易产生的缺陷形式，并给出了成形方法；鄂大辛等<sup>[2]</sup>通过大量弯管工艺试验，分析了不锈钢等管材弯曲成形过程中材料变化，截面畸变等缺陷；武世勇等<sup>[3]</sup>采用ANSYS等数值模拟软件对弯管零件成形进行有限元分析，并对成形后的产品尺寸与数值模拟结果进行对比验证；国外AI-Qureshi等<sup>[4]</sup>采用弹塑性理论对弯管成形进行分析，得出了近似公式用以预测回弹及残余应力。本文采用理论分析与试验结合的方法，利用有限元仿真软件Dynaform对弯管成形工艺参数进行研究，实现了薄壁不锈钢弯管一体化成形。

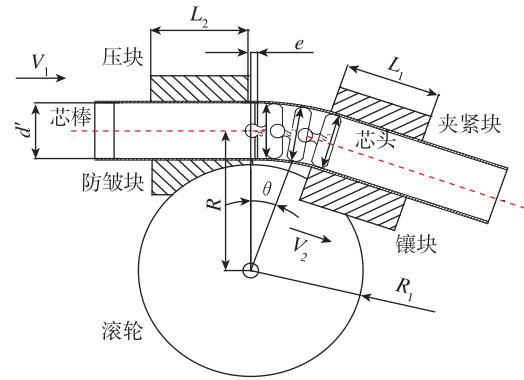


图1 传统拼焊工艺制得的弯管  
Fig. 1 Traditional tailor welded elbow

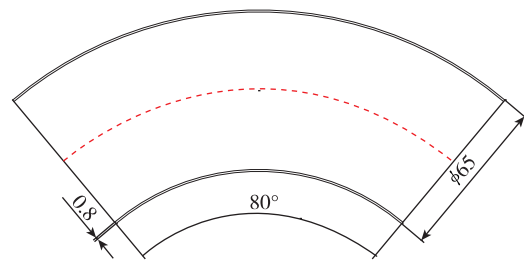
## 1 成形工艺分析

数控绕弯成形原理如图2(a)所示。管材一端由夹紧块压紧在弯曲轮镶块上，在管材与弯曲轮切点附近外侧装有压块，内侧装有防皱块，管件内部有芯棒与芯头支撑，当弯曲轮绕机床主轴转动时，管件就绕弯曲轮逐渐弯曲成形<sup>[5]</sup>。该方法可以一次整体成形出弯管零件，消除了两条焊缝，避免了焊后变形和焊接缺陷的产生<sup>[6]</sup>。

本文试验的弯管零件壁厚为0.8mm，管材外径为 $\phi 65$ mm，相对弯曲半径为 $1.8D$ （ $D$ 为管材外径），属于薄壁小弯曲半径弯管，如图2(b)所示，材料为1Cr18Ni9Ti不锈钢。在现有的数控绕弯方法中，针对小弯曲半径薄壁管（壁厚 $<1$ mm）



(a) 数控弯曲成形原理



(b) 产品尺寸示意图

图2 数控弯管示意图

Fig. 2 Schematic diagram of numerical control bending

极易产生起皱、畸变、开裂等缺陷，从而影响产品质量。其中，壁厚减薄率及型面畸变量常作为衡量弯管质量的重要指标之一，壁厚减薄率为 $\Delta t = (t - t') / t \times 100\%$ （ $t$ 为原始壁厚， $t'$ 为弯曲后最小壁厚），截面畸变率为 $\Delta D = (D - D') / D \times 100\%$ （ $D$ 为管材外径， $D'$ 为弯曲后纵向管径<sup>[7]</sup>）。针对运载火箭增压输送系统弯管零件，其产品质量要求相对普通弯管更高，即截面畸变率要求 $\leq 5\%$ ，产品减薄率 $\leq 20\%$ ，同时要求零件表面无起皱等缺陷。因此，如何控制零件变形，保证材料流动均匀，避免弯曲过程出现上述缺陷成为本文研究的重点。

针对产品结构尺寸，确定了成形工艺参数，包括：夹块尺寸 $L_1$ ，压块/防皱块尺寸 $L_2$ ，芯棒伸出量 $e$ ，芯棒直径 $d'$ ，弯曲速度 $V_1$ 、 $V_2$ ，毛坯尺寸 $Q$ ，芯头直径 $d$ 等。

1) 夹块尺寸 $L_1$ 根据公式 $L_1 = (2 \sim 3) D$ ，确定 $L_1 = 130$ mm。

2) 压块/防皱块尺寸 $L_2$ 根据式(1)确定

$$L_2 = \frac{2\pi R_1}{360} \alpha + 1.6D \quad (1)$$

式中， $\alpha$ 为所弯管材最大弯曲角度， $D$ 为管材外

径,  $R_1$  为弯曲轮弯曲半径。通过计算得到  $L_2=230\text{mm}$ 。

3) 芯棒伸出量  $e$  根据式 (2)<sup>[8]</sup> 确定

$$e = \sqrt{2(R + d_0/2)x - x^2} \quad (2)$$

式中,  $R$  为相对弯曲半径, 单位为 mm;  $d_0$  为管材内径, 单位为 mm;  $x$  为管材内壁与芯棒间隙,  $x$  一般取  $(9\% \sim 12\%)t$  ( $t$  为管材壁厚), 单位为 mm。通过计算得到  $e=5.45\text{mm}$ 。

4) 芯棒直径  $d'$  根据公式  $d' = d_0 - x$ , 确定  $d'=63.32\text{mm}$ 。

5) 毛坯尺寸  $Q$  按零件理论展开尺寸加夹块余量, 得到  $Q=600\text{mm}$ 。

减薄率和畸变量不仅和材料的力学性能参数有关, 还与芯头直径缩减量、弯曲速度等工艺参数有关。在初始工艺参数设置条件下, 本文主要研究弯曲速度、芯头直径缩减量等工艺参数对成形过程的影响。

1) 弯曲速度  $V$  包括助推速度  $V_1$  和夹块弯曲速度  $V_2$ , 为保证弯曲过程变形均匀, 一般要求  $V=V_1=V_2$ 。针对薄壁管弯曲成形, 分析弯曲速度  $V$  对零件减薄及型面畸变情况的影响。

2) 由于零件弯曲角度大且壁薄, 因此为防止产生截面畸变, 需要多个芯头弯曲成形, 而每个芯头的直径不尽相同, 单个芯头直径  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  应距离芯棒由近至远而逐渐减小, 因此缩减量  $\delta$  定义为  $\delta=d_1-d_2=d_2-d_3$ , 该缩减量对于零件壁厚及畸变的控制尤为重要, 因此本文研究缩减量  $\delta$  对零件壁厚及畸变程度的影响。

## 2 仿真分析

### 2.1 数值模拟模型建立

数控绕弯过程是集材料非线性、几何非线性和边界条件非线性的大位移、非稳态塑性成形过程<sup>[9]</sup>。利用有限元分析软件 Dynaform 以及与之相配套的有限元求解器 LS-DYNA, 对弯曲成形过程进行有限元仿真。首先对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢力学性能进行分析, 在完成单向拉伸性能试验后利用板材成形性能实验机 BHB-80 对材料成形极限测试, 由试样获得的极限应变点, 进行二次曲线最小二乘拟合, 得到拟合的 FLD 曲线见公式 (3)<sup>[10]</sup>, 并将材料性能数据导入有限元分析软件中进行仿真。仿真成形模型包括芯棒、芯头、防皱块、弯曲轮、压块、夹紧块和镶块构成<sup>[11]</sup>, 如图 3

所示。1Cr18Ni9Ti 的拟合 FLD 曲线为

$$\begin{cases} y = 36.2 + 0.528x - 0.0143x^2, & x \geq 0 \\ y = 36.2 - 1.13x - 0.0240x^2, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

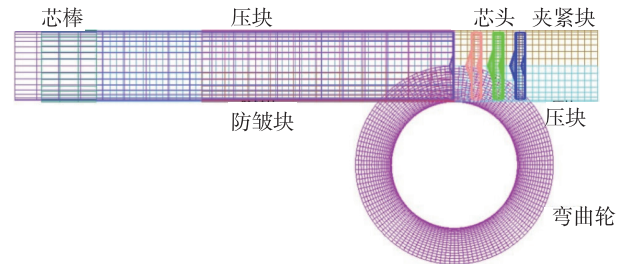


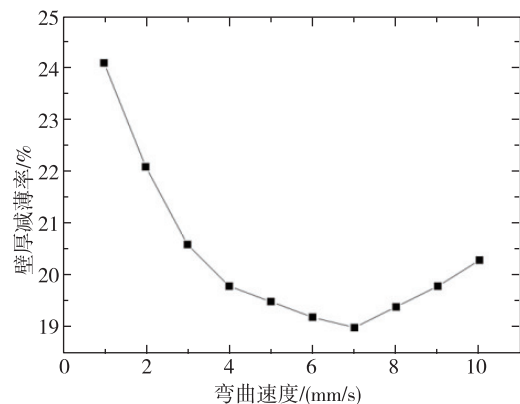
图3 弯管成形有限元模型

Fig. 3 Finite element analysis model

### 2.2 模拟结果

分别分析弯曲速度  $V=1\text{mm/s} \sim 10\text{mm/s}$  条件下弯曲后管材的壁厚减薄和畸变情况, 图 4 为数值模拟计算结果。从图 4 中可知, 管材壁厚减薄率首先随弯曲速度的增加迅速下降, 当弯曲速度增加到  $7\text{mm/s}$  时, 管子壁厚变薄率减小至  $19\%$ ; 此后随着弯曲速度的增加, 管子壁厚增厚趋势有所上升, 而截面畸变率在  $3\% \sim 6.4\%$  之间趋于平缓变化。这表明弯曲速度的适当增加有利于促进变形区材料的流动补充, 减少局部大变形的可能性, 降低零件弯曲过程减薄率, 但过快的弯曲速度将增大助推力和摩擦力, 导致减薄趋势上升, 而截面畸变程度与弯曲速度的关系不大。

芯头直径缩减量对零件壁厚及畸变程度的变化如图 5 所示, 从图 5 中可知, 当芯头直径缩减量  $\delta$  从  $0.1\text{mm}$  增大至  $1.0\text{mm}$  过程中, 初始阶段随着  $\delta$  的增加, 壁厚减薄率在逐渐减小。当  $\delta$  达到  $0.7\text{mm}$  时壁厚减薄趋于平缓, 此时壁厚最大减薄率为  $18\%$ 。



(a) 壁厚减薄率

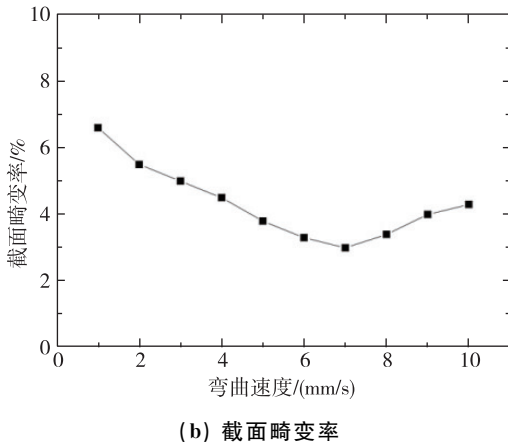
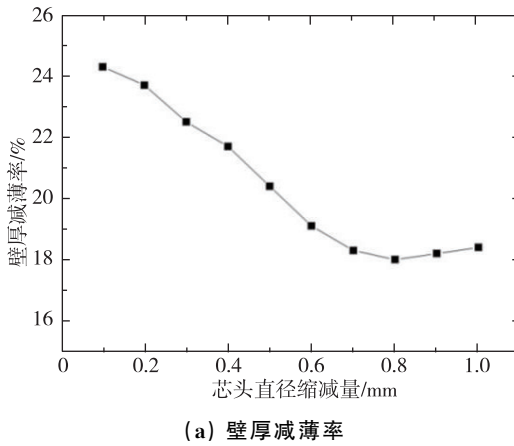
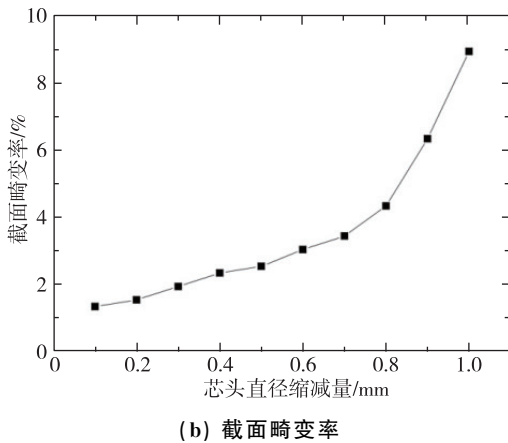


图4 弯曲速度对成形质量的影响

Fig. 4 Effect of bending speed on forming quality



(a) 壁厚减薄率



(b) 截面畸变率

图5 芯头直径缩减量对成形质量的影响

Fig. 5 Effect of core diameter reduction on forming quality

截面畸变率随着 $\delta$ 的增加呈现逐步上升趋势,由最初的1% ( $\delta=0.1\text{mm}$ )逐步增加至5% ( $\delta=0.8\text{mm}$ ),随着 $\delta$ 继续增加截面畸变率开始迅速增

大。这是由于随着芯头缩减量的增加,弯曲过程中芯头与管壁的间隙逐渐增大,摩擦阻力减小导致零件壁厚减薄率降低,但间隙的增大造成管材内部支撑不足使截面畸变趋于严重,根据模拟结果,当 $\delta$ 在 $0.6\text{mm}\sim 0.8\text{mm}$ 范围内时,可使材料减薄与截面畸变达到相对平衡。

综上所述,相对于弯曲速度指标,芯头直径缩减量 $\delta$ 对零件成形过程中的壁厚减薄及截面畸变影响更大。

### 3 弯曲成形试验

#### 3.1 试验条件

在数值模拟基础上,利用CNC单模液压弯管机W27YPC-74(见图6)进行了弯管试验。初始工艺参数设置如下:管坯尺寸为 $\varphi 65\text{mm}\times 0.8\text{mm}\times 600\text{mm}$ ,弯曲半径为 $122.5\text{mm}$ ,弯曲角度设定为 $80^\circ$ ,芯棒伸出量调整为 $5\text{mm}$ ,芯棒参数为 $\varphi 63.4\text{mm}\times 300\text{mm}$ ,芯头采用铰链连接,个数为3。

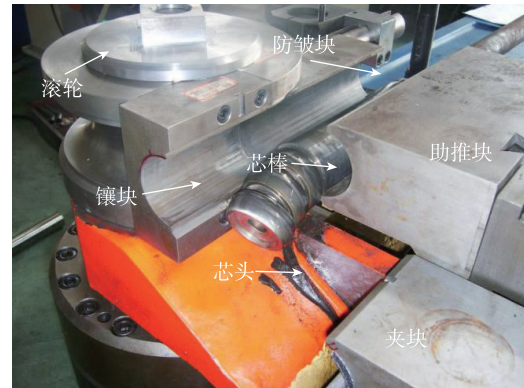


图6 数控绕弯试验模具

Fig. 6 Numerical control bending device

#### 3.2 工艺参数优化

在初次试验过程中,为便于后续修模,设定芯头缩减量为0,即各芯头直径保持一致,在此条件下,试验不同弯曲速度对成形过程的影响,当助推速度 $V_1$ 大于夹块速度弯曲速度 $V_2$ 时,造成管材内侧产生较大的起皱变形,如图7(a)所示。调整助推速度 $V_1$ 与夹块速度弯曲速度 $V_2$ 匹配后,管材起皱变形消除,如图7(b)所示。根据实验可知,当 $V_1=V_2=8\text{mm/s}$ 时,成形零件壁厚相对均匀,此时零件减薄量在25%左右,截面畸变率为2%。



(a) 当  $V_1 > V_2$  时产生中部起皱



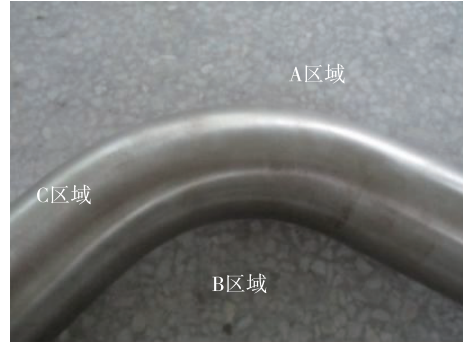
(b) 当  $V_1 = V_2$  时起皱消除

图 7 成形过程起皱缺陷及消除

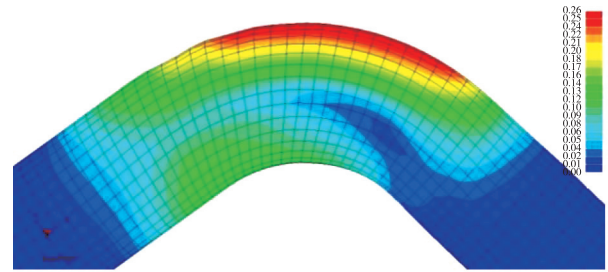
Fig. 7 Wrinkle defects in forming and elimination

在第一步基础上，进一步修模试验不同芯头直径缩减量  $\delta$  对成形过程的影响。当  $\delta$  为 0.3mm 时，经过试验零件的减薄量降低至 22%，而截面畸变率增大至 3%；进一步增加  $\delta$  至 0.6mm 时（如图 8 所示），产品弯曲后最小壁厚 0.65mm，壁厚减薄量为 18.8%，最大截面畸变量为 4%，在满足零件壁厚条件下，管材外侧受到芯头的有效支撑，变形相对较均匀，两指标相对均衡，满足设计要求；再增大  $\delta$  至 1.0mm 时（如图 9 所示），此时零件截面畸变率迅速增大至 7%，由于外侧管壁无法受到有效支撑，弯曲后零件产生较大程度畸变。

最终成形的合格产品如图 10 所示。



(a) 试验结果



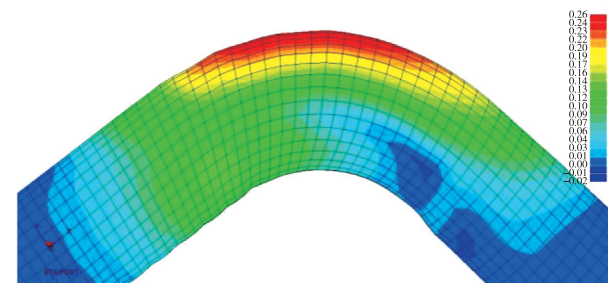
(b) 模拟结果

图 8 芯头直径缩减量  $\delta 0.6\text{mm}$  试验结果

Fig. 8 Test of core diameter reduction 0.6mm



(a) 试验结果



(b) 模拟结果

图 9 芯头直径缩减量  $\delta 1.0\text{mm}$  试验结果

Fig. 9 Test of core diameter reduction 1.0mm



图 10 合格弯管零组件

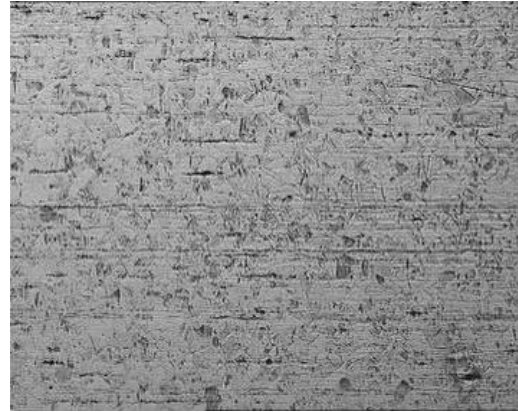
Fig. 10 Bending forming tube

### 3.3 显微组织分析

为分析成形后材料内部显微组织的变化情况，分别在弯管 A 区域、B 区域以及母材 C 区域（对应位置见图 8 (a)）进行取样，如图 11 所示。从图 11 中可以看出，非变形区材料晶粒呈均匀分布，在变形区域 A（管材外侧），材料受到拉应力作用，晶粒沿压延方向伸长，组织更为细密，成行排列的方向性更明显，加上弯曲变形的存在，形成形变强化效果，相对母材区域该处强度得到提高；在变形区域 B（管材内侧），由于材料受到压应力作用，纤维状组织方向性排列不明显，形变强化导致零件强度得到提高。



(a) A 区域



(b) B 区域



(c) C 区域

图 11 不同区域显微组织 (200X 显微镜, 浸蚀剂: FeCl<sub>3</sub> 溶液)Fig. 11 Microstructure of different regions (200X microscope, corrosion: FeCl<sub>3</sub> solution)

### 3.4 产品试生产

在工艺试验基础上，开展了弯管零件试生产工作，并针对试生产过程中遇到的实际问题进行了归纳总结，形成了如下经验要点：

- 1) 根据管材规格选择合适的芯头，一般芯头与管材单面间隙为 0.1mm~0.3mm；
- 2) 各芯头应按直径从大至小进行装配，距离芯棒最近球节直径最大，依次排列；
- 3) 各芯头与卡环装配应保证牢固、可靠，避免产生偏心、阻塞；
- 4) 当最小芯头磨损至直径小于管径 10% 以上时，需更换芯头；
- 5) 不锈钢数控弯曲试生产过程中常见的质量缺陷和解决方法，具体如表 1 所示。

表1 不锈钢数控弯曲试生产过程中常见的质量缺陷和解决方法  
Tab.1 Common quality defects and solutions in stainless steel NC bending

缺陷特征	产生原因	解决方法
破裂	1) 夹紧力太大或不均匀	1) 调整夹紧力
	2) 模具与管材间的间隙过小	2) 调整模具间隙
	3) 弯曲速度过快	3) 适当减小弯曲速度
	4) 助推进给速率过低	4) 减小弯曲转速
	5) 模具圆角毛糙	5) 抛光滑模具圆角
	6) 模具夹合面毛糙	6) 抛光滑夹合面
	7) 球节转向阻塞	7) 重新安装球节, 保证各球节转向灵活
	8) 芯头直径缩减量小	8) 适当增加芯头直径缩减量
	9) 管材内部润滑不足	9) 改善润滑条件
	10) 管材(表面质量、性能)不符合要求	10) 调换管材, 对偏硬的材料进行弯曲前的退火处理
起皱	1) 夹紧力太小或不均	1) 调整夹紧力
	2) 弯曲轮与助推块不平整	2) 调整弯曲轮与助推块平行度
	3) 助推进给速率超过弯曲转速	3) 减小助推进给速率, 与弯曲转速匹配
	4) 防皱块安装位置不当	4) 重新安装防皱块, 与弯曲轮中心线重合
	5) 夹块摩擦力不够	5) 夹块垫砂纸或进行磨砂处理增大摩擦力
型面有弹性畸变	1) 弯曲角度过大	1) 适当减小弯曲角度
	2) 内部球节支撑不够	2) 增加内部球节数量
	3) 芯头直径缩减量过大	3) 适当减小芯头直径缩减量
	4) 管材存在椭圆	4) 弯曲后增加校形
过度减薄	1) 助推速率相对弯曲转速小	1) 调整助推与弯曲速率
	2) 夹紧力过大	2) 调整夹紧力
	3) 管材内部润滑不足	3) 改善润滑条件
	4) 毛坯安装不当	4) 将管壁最厚的标记部位作为弯曲外侧
	5) 芯头直径缩减量小	5) 适当增加芯头直径缩减量
零件表面有压痕、凹坑	1) 模具圆角粗糙有接刀痕迹	1) 打磨掉接刀痕迹, 抛光凹模圆角
	2) 管材或模具表面未擦干净	2) 擦干净管材表面和模具工作面
	3) 模具硬度不够, 有金属粘连物	3) 提高模具硬度或更换模具材料
	4) 助推块与夹紧块、防皱块错位	4) 重新安装模具, 保证助推块与夹紧块、防皱块接触面重合

#### 4 结论

本文研究了芯头缩减量、弯曲速度等工艺参数对数控绕弯的影响, 得到在弯曲速度为 8mm/s, 减小芯头缩减量为 0.6mm 时, 成形零件截面畸变不超过 4%, 最小壁厚 0.65mm。成功制得了不锈钢薄壁弯管零件, 采用改进工艺具有如下优势:

1) 零件成形可靠性高。采用数控弯曲可以一次整体成形出弯管零件, 消除了两条焊缝, 消除了焊接过程中产生的焊接变形和焊接缺陷, 且成形零件壁厚均匀, 整体质量好, 可靠性高。

2) 成形工序少。采用数控弯曲成形工艺, 减少了钣金修配、半边管纵缝焊接、焊后钳工修配等 4 道工序, 将原先 11 道成形工序减少为 7 道。

3) 成形精度高。数控弯曲成形工艺可以避免传统弯曲工艺中容易出现的起皱和截面畸变等失效形式, 可以提高大多数弯管的成形精度, 如图 12 所示, 从而整体提升火箭产品质量可靠性。



(a) 压焊成形



(b) 数控弯曲成形

图 12 不同工艺方法零件外观对比  
Fig. 12 Appearance comparison between  
different forming methods

### 参考文献

- [1] 林艳, 杨合, 李恒, 等. 薄壁管数控弯曲过程中失稳起皱的主要影响因素 [J]. 航空学报, 2003, 24 (5): 456-461.
- [2] 鄂大辛, 宁汝新, 唐承统, 等. 壁厚变形对弯管最小相对弯曲半径的影响 [J]. 锻压技术, 2006 (1): 90-93.
- [3] 武世勇, 石伟, 刘庄. 缠绕式弯管工艺对管壁厚度影响的数值分析 [J]. 锻压技术, 2002, 27 (1): 35-38.
- [4] Al-Qureshi H A, Russo A. Spring-back and residual stresses in bending of thin-walled aluminium tubes [J]. Materials & Design, 2002, 23 (2): 217-222.
- [5] 陈钱, 雷君相. 芯模参数对高强度薄壁管数控弯曲成形质量的影响 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (11): 158-163.
- [6] 方军, 鲁世强, 王克鲁, 等. 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管材数控弯曲截面畸变有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (5): 71-76.
- [7] 林兵兵, 徐雪峰, 王高潮, 等. 薄壁管数控绕弯成形壁厚减薄的主要影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (1): 131-136.
- [8] 王连硕, 王冬兰, 邢伟荣. 弯管模具的设计及工艺探讨 [J]. 山西机械, 2000 (3): 61-63.
- [9] 陆英豪. 弯管工艺参数对成形质量影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [10] 董文倩, 张小龙. 常用宇航钣金材料成形极限图实验 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (3): 41-45.
- [11] 徐建美, 王克鲁, 方军, 等. 间隙对 0Cr21Ni6Mn9N 不锈钢管材数控弯曲截面质量的影响 [J]. 锻压技术, 2014, 39 (5): 132-137.

引用格式: 冯苏乐, 简翰鸣, 李年富, 等. 薄壁不锈钢管数控绕弯成形数值仿真及工艺研究 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (4): 41-48.

Citation: Feng S L, Jian H M, Li N F, et al. Numerical simulation and technological research of numerical control bending in thin-walled stainless steel tube [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (4): 41-48.