

# 波纹管液压成形数值模拟和实验

彭赫力 张小龙 李中权 徐爱杰 石正波 冯苏乐

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)



**摘要:** 针对波纹管压弯和焊接复合成形压痕严重和可靠性不高的现象, 提出了波纹管液压成形方法。阐述了波纹管液压成形原理, 建立了波纹管液压成形有限元模型, 对不同压强条件下波纹管的成形状态进行了数值模拟, 结果表明: 模具圆角半径为 5mm 时, 波纹管完全贴模的压强为 40MPa, 该条件下波纹管的厚度分布均匀, 最大减薄率为 10%。采用波纹管液压成形机对旋压管坯进行了液压成形实验, 结果表明: 成形压强为 40MPa 时, 波纹管完全贴模, 壁厚分布较均匀, 最小壁厚满足设计要求。以波纹管各波区的厚度减薄率为对象, 对波纹管液压成形数值模拟和成形实验进行了对比分析, 结果表明: 数值模拟和成形实验之间的最大厚度减薄率偏差仅为 1.4%, 对比结果验证了有限元模型的正确性。

**关键词:** 波纹管; 液压成形; 厚度减薄率; 数值模拟

## Numerical Simulation and Experiment of Bellows Hydroforming

Peng Heli Zhang Xiaolong Li Zhongquan Xu Aijie Shi Zhengbo Feng Sule

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

**Abstract:** The bellows hydroforming method was proposed to avoid the indentation and improve the responsibility of bellows formed by ribbon and welding. The principle of bellows hydroforming was elaborated, the finite element model of bellows hydroforming was set up, and numerical simulations of forming status for bellows with different forming pressure were carried out. The results show that the forming pressure is 40MPa of bellows match the die when the radio of die is 5mm, the thickness of bellows is uniform and maximum thickness thinning ratio is 10%. The hydroforming experiment of spinning tube were carried out on the hydroforming machine of bellows. The experimental results show that the bellows match the die adequately when the pressure is 40MPa, and the minimum wall thickness meets the design requirement. The contrast of thickness thinning ratio of bellows between numerical simulation and forming experiment are analyzed. The results show that the deviation of maximum thickness thinning ratio is only 1.4%, which verified the correctness of finite element model of bellows hydroforming.

**Key words:** bellows; hydroforming; thickness thinning ratio; numerical simulation

### 1 引言

管材液压成形是以管材为毛坯, 在管坯的两端施加载荷, 管坯在内部液体的作用下与模具内表面贴合, 从而得到所需形状零件的一种塑性成形技术<sup>[1]</sup>。与传统的冲压工艺相比, 管材液压成形技术在减轻结构重量、减少模具数量、提高刚度和强度、降低生产

成本方面具有明显的技术和经济优势, 是一种先进的轻质高强构件制造技术<sup>[2~6]</sup>, 在汽车、航空航天等领域得到越来越广泛的应用。

铝合金波纹管是运载火箭贮箱箱体内增压输送管路系统中的一个零件, 它主要起到输送氧化剂, 隔绝燃料剂的作用。目前采用压弯+焊接成形工艺存在的主要问题如下: 波纹管成形过程中压弯模上逐次压

弯成形。而平板压筋后其型面拱曲严重，导致其在压弯弯曲模上逐次压弯时无法与模具型面完全贴合而产生晃动，从而使得成形后的型面偏扭较为严重，成形精度差；波纹管在逐次压弯弯曲过程中，其凸筋表面会产生较深的模具压痕和挤压伤，如图1所示；波纹管弯曲成形后出现的轴向偏扭及大量的表面缺陷，需要通过校正予以消除。但由于波纹管管径小，长度长，不具备校形的操作空间，因此，校形难度高，校形工作量及劳动强度极大，目前，一个波纹管校形工作量要占去零件全部加工量的80%左右，生产效率低，导致零件加工周期延长，劳动力成本增加；校形过程中不可避免产生大量的噪音，工作环境较差，而长期在噪音污染环境下工作的操作人员，听力下降明显，使人的身心健康受到严重影响；波纹管的纵缝焊接是在零件弯曲成形后进行的，受到零件高低起伏外形影响，无法进行自动焊接，目前只能采用手工焊接，手工焊接全凭焊接人员个人的实际经验操作，焊接稳定性较差，一次补焊率仅为40%~50%，焊接可靠性不高。在这种背景下，本文提出了波纹管液压成形技术，通过数值模拟和成形实验进行研究。



图1 压弯+焊接成形的波纹管

## 2 波纹管液压成形数值模拟

### 2.1 波纹管液压成形原理

管件液压成形工艺过程如图2所示。

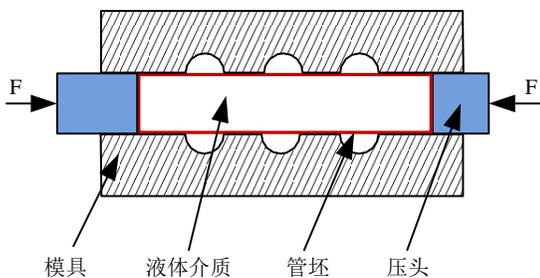


图2 波纹管液压成形原理

### 2.2 有限元模型

以铝合金管材为研究对象，其内径 $\Phi 232\text{mm}$ ，壁厚2mm，长700mm，半径300mm，材质为5A06，密度 $2780\text{kg/m}^3$ ，弹性模量67GPa，泊松比0.33，屈服强度101MPa。有限元模型由凹模、管坯和压头组成，均采用四边形壳单元S4R划分网格。数值模拟时，考虑到模型的对称性，建立1/2有限元模型，如图3所示。对管坯施加对称约束，采用均布压力代替液体压强进行仿真分析。

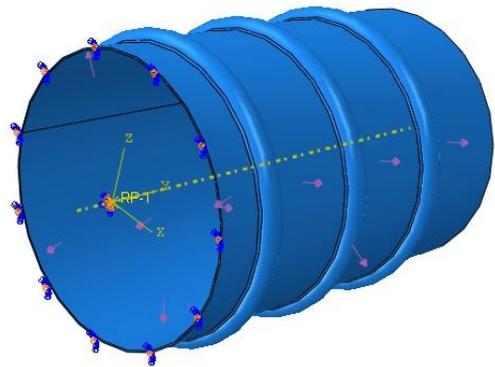


图3 波纹管液压成形有限元模型

### 2.3 数值模拟结果

为了探索波纹管液压成形的合适成形压强，当模具圆角半径为5mm时，对管坯在不同压强条件进行数值模拟，图4为不同液体压强条件下波纹管沿标记线OA的z向坐标分布曲线，由图可知，液体压强为20MPa、25MPa、30MPa和35MPa时，管坯都未实现完全贴模；当液体压强增大到40MPa时，管坯完全贴模。

液体压强40MPa时，波纹管的厚度分布如图5所示，由图可知，波纹区材料减薄量较大，最小厚度为1.80mm，最大减薄率为10%，厚度分布较均匀。

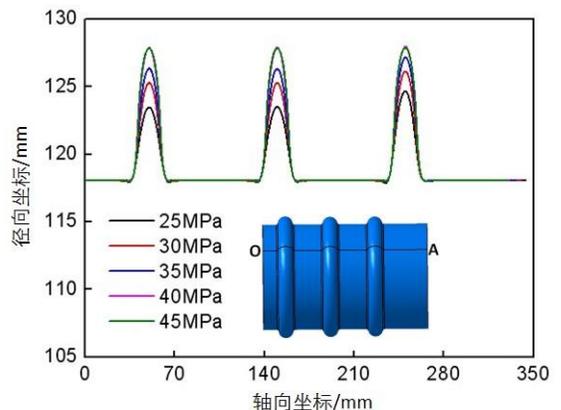


图4 不同压强条件时波纹管沿标记线OA的径向坐标

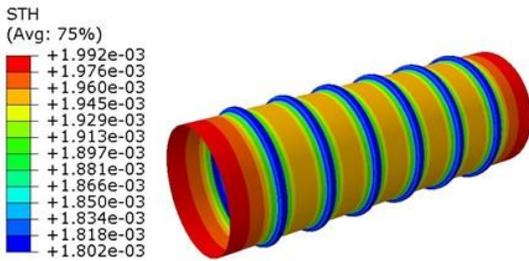


图5 波纹管厚度分布

### 3 波纹管液压成形实验

#### 3.1 实验毛坯的制备

旋压试验选用 5A06 管材，旋压前需要对管坯的内形面机加工，以保证管坯内形面的质量，为此管坯的内径定为 226mm，外径 268mm，壁厚 21mm，长度 320mm。旋压前将坯料的内径机加工至  $\Phi 230.5\text{mm}$ ，外径加工至  $\Phi 262.5\text{mm}$ ，壁厚 16mm，长度 310mm。管坯最终尺寸为外径  $\Phi 236\text{mm}$ ，内径  $\Phi 232\text{mm}$ ，壁厚为 2mm。经计算总变形量 14mm，总变形率 87.5%，由于变形量较大，旋压分五次完成，并在各道次旋压之间增加退火工序，旋压管坯如图 6 所示。管坯外表面旋压后经过抛光处理，表面质量尚可，内表面有明显的旋压纹路，但手感不明显。

采用超声波测厚仪对旋压的管坯壁厚进行测量，检测其壁厚的均匀程度，在筒坯高度方向检测 A、B、C、D、E、F、G 七处，每处周向检测 8 个点位，检测数据见表 1。从表中数据可以看出，同一标记点不同测量高度处的壁厚最大差值为 0.03mm；同一测量高度处不同标记点之间的壁厚最大差值为 0.02mm，由此可知，旋压管坯的壁厚均匀较好。

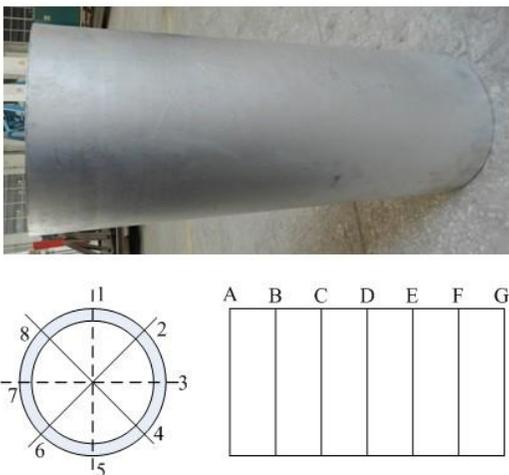


图6 旋压管坯及其壁厚测量位置

表1 旋压管坯测量数据

mm

测量点	A	B	C	D	E	F	G
1	2.02	2.02	2.01	2.01	2.00	2.00	2.02
2	2.03	2.03	2.03	2.02	2.02	2.01	2.02
3	2.03	2.02	2.03	2.02	2.01	2.02	2.03
4	2.02	2.01	2.02	2.01	2.01	2.01	2.02
5	2.03	2.02	2.01	2.01	2.02	2.01	2.02
6	2.03	2.03	2.02	2.01	2.00	2.01	2.02
7	2.02	2.03	2.03	2.01	2.00	2.00	2.01
8	2.03	2.02	2.02	2.02	2.01	2.00	2.01

#### 3.2 成形实验

在波纹管液压成形机上开展成形实验研究，试验压力为 40MPa，管坯和模具之间加黄油润滑。实验结果如图 7 所示，经测量，波面与理论样板基本贴合。



图7 波纹管液压成形件

#### 3.3 实验结果

对液压成形的波纹管进行纵向剖切，对其波纹区域进行测量，壁厚测量点如图 8 所示。得到的实测值如表 2 所示。从表 2 中可以看出，波纹管最小壁厚位于鼓波圆弧面上端。管坯初始壁厚以 2.02mm 计算，旋压成形波纹管最小壁厚为 1.79mm，最大减薄率为 11.4%，满足设计要求。

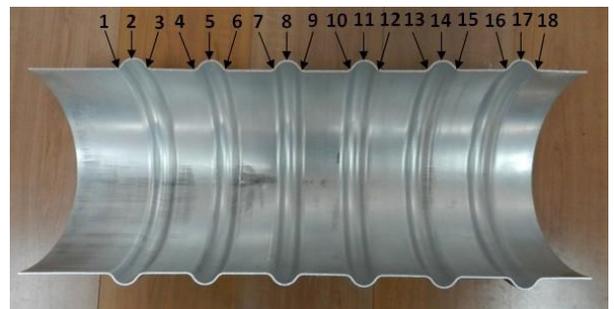


图8 波纹管壁厚测量点

(下转第 30 页)