

基于有限元的多层波纹管制成数值模拟及应用

简翰鸣, 宋珂, 袁杏, 杨斌, 张柳锋, 冯苏乐, 竺叶青

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: 对运载火箭增压输送系统管路用外径为 $\Phi 60$ mm、壁厚为 0.35 mm 的双层波纹管的整体液压成形过程进行有限元数值仿真, 通过在有限元分析软件中设置不同的边界条件, 模拟多层波纹管的成形压力和壁厚减薄量等关键工艺参数及成形结果。通过对目标多层波纹管整体液压成形进行工艺试验, 对有限元分析结果进行验证。结果表明: 波纹管液压成形压力应使管坯材料应力大于屈服强度, 方可顺利成形出波纹管产品, 即成形压力应大于 10 MPa; 具体成形压力的选择应根据波形饱满程度、最大等效应力值及壁厚减薄量综合考虑, 故选择 15 MPa 作为成形压力; 波纹管壁厚在波峰处的减薄量最大, 并由波峰至波谷递减, 最小壁厚为 0.57 mm。

关键词: 多层波纹管; 液压成形; 成形压力; 壁厚减薄量; 多层结构

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.034

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0260-06

Numerical simulation and application on multi-layer bellows forming based on finite element

Jian Hanming, Song Ke, Yuan Xing, Yang Bin, Zhang Liufeng, Feng Sule, Zhu Yeqing

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

Abstract: The finite element numerical simulation of the integral hydroforming process for double-layer bellows with the outer diameter of $\Phi 60$ mm and the wall thickness of 0.35 mm for the pipeline of launch vehicle booster delivery system was carried out. Then, by setting different boundary conditions in the finite element analysis software, the key process parameters such as forming pressure and wall thickness reduction of the multi-layer bellows and the forming results were simulated. Furthermore, the finite element analysis results were verified by the process experiment of the integral hydroforming for target multi-layer bellows. The results show that the hydroforming pressure of bellows should make the stress of tube blanks greater than the yield strength to form the bellow products smoothly, namely, the forming pressure should be greater than 10 MPa. The appropriate forming pressure should be selected according to the fullness of waveform, the maximum equivalent stress value and the wall thickness reduction. Thus, 15 MPa is selected as the forming pressure. The wall thickness reduction is greatest at the peak, and the reduction decreases from the peak to the trough, and the minimum wall thickness is 0.57 mm.

Key words: multi-layer bellows; hydroforming; forming pressure; wall thickness reduction; multi-layer structure

波纹管为运载火箭动力系统管路中的重要零部件, 主要起到补偿管路、贮箱等因温度变化而引起的位移以及角度变化的作用, 对避免动力系统管路在运载火箭加注、飞行等环节局部受力过大, 保持动力系统管路的可靠性具有重要作用。

多层结构波纹管可在提高产品疲劳寿命性能的同时, 允许波纹管层间滑移, 从而获得更小的刚度。为了保证波纹管产品的可靠性及刚度要求, 运载火箭动力系统管路用波纹管多采用多层薄壁结构, 具

有较大的成形难度。而波纹管产品的成形质量对波纹管性能具有直接影响, 若出现产品壁厚过小, 各波形尺寸差异较大, 波纹管波形出现尖波、方波或起皱失稳, 以及多层波纹管层间不贴合等现象, 则将对波纹管的极限承压性能、疲劳性能和刚度等产生较大影响, 难以保证产品在严酷工况下的可靠性^[1-4]。

针对多层波纹管的成形, 目前的主要工艺方法有连续单波机械胀形、滚压成形、连续单波液压成形和整体液压成形等。对于质量要求较高的波纹管产品, 一般采用整体液压成形的方式以保证波纹管的波形一致性、波形饱满程度以及表面质量^[5-7]。

针对多层波纹管整体液压精密成形, 本文通过

收稿日期: 2023-03-11; 修订日期: 2023-04-28

作者简介: 简翰鸣 (1992-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: jianhanming@sina.com

对比研究有限元仿真的不同参数设置, 并进行实物的成形对比试验, 验证了单元设置及接触类型设置对波纹管成形仿真结果的影响, 并验证了液压成形压力等工艺参数对波纹管波形外观及壁厚减薄量的影响。

1 波纹管整体液压成形原理

波纹管整体液压成形过程为: 首先, 安装模片、垫块及管坯, 如图 1 所示; 而后进行管坯的液压胀形, 在胀形至模片间的管坯微微鼓起后, 卸载压力, 拆除垫块, 此时模片卡在管坯上; 继续对管坯进行液压胀形, 同时下压模片合模, 得到波纹管产品, 如图 2 所示^[8], 其中 P 为管坯内压。

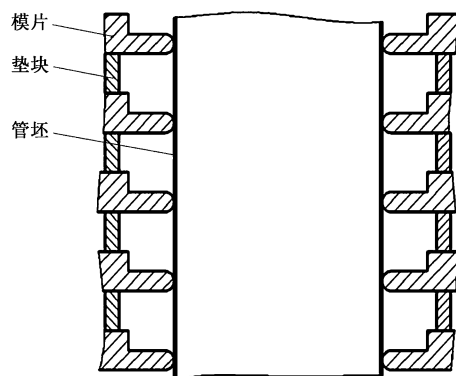


图1 波纹管整体液压成形模具结构

Fig. 1 Die structure of integral hydroforming for bellows

2 目标产品工艺分析

CZ-6A 动力系统新研 DN60 波纹管如图 3 所示, 产品为双层结构, 单层壁厚为 0.35 mm, 材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。为保证产品性能, 要求层间紧密贴合。该波纹管的成形选用整体液压成形工艺, 原材料采用整体无缝管坯, 其制造工艺流程如图 4 所示。

波纹管管坯原材料选用外径为 $\Phi 60$ mm、壁厚为 0.35 mm 规格的无缝管, 通过管坯胀形制作外层管坯, 而后进行套装。

波纹管液压胀形时的主要工艺参数为预胀形及挤压成形过程的内压力。管坯液压胀形时, 使材料开始产生屈服的应力可根据式 (1) 计算^[9]。

$$P_s = \frac{2t_0}{d} \times R_{eL} \quad (1)$$

式中: P_s 为引起管坯材料屈服的应力值; t_0 为管坯多层结构的总壁厚; d 为管坯内径; R_{eL} 为管坯材料的屈

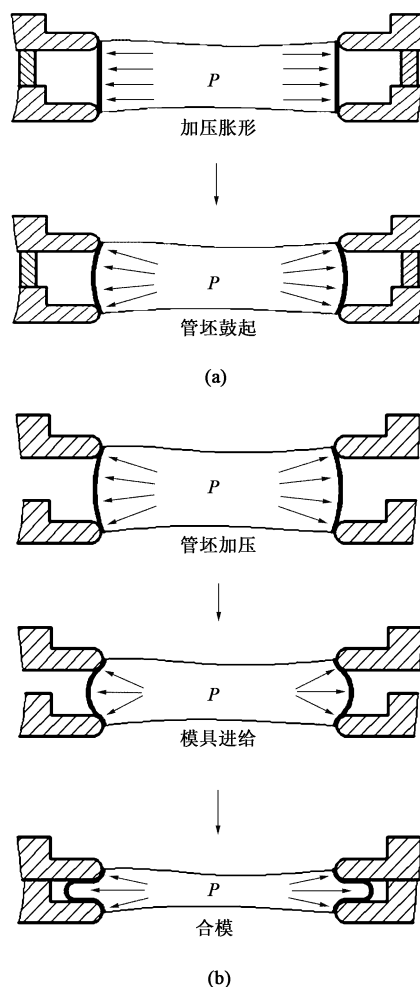


图2 波纹管整体液压成形过程

(a) 管坯胀形 (b) 波纹管成形

Fig. 2 Process of integral hydroforming for bellows

(a) Tube blank bulging (b) Forming of bellows

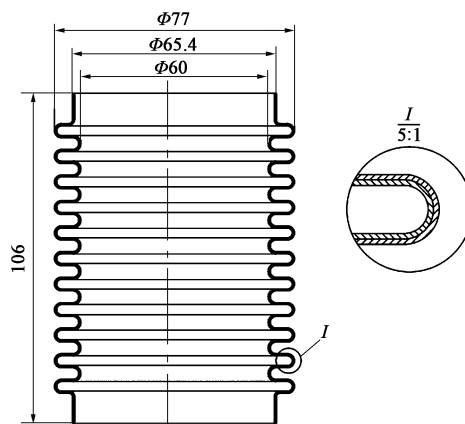


图3 DN60 波纹管的产品结构

Fig. 3 Product structure of DN60 bellows

服强度。

将 $t_0=0.7$ mm、 $d=\Phi 59.3$ mm、 $R_{eL}=218$ MPa 带入式 (1), 可计算出使管坯开始产生屈服的应力为



图 4 DN60 波纹管的制造流程

Fig. 4 Manufacturing process of DN60 bellows

5.15 MPa, 则波纹管的成形压力需要至少大于约 5 MPa, 方可使管坯产生塑性变形, 具体的成形压力可通过有限元模拟确定。

3 成形过程数值模拟

为研究管坯预胀形和波纹管挤压成形所需的压力, 对波纹管成形过程进行仿真分析。

3.1 有限元模型建立

波纹管为回转体零件, 管坯及模具建模时选择回转体类型进行截面建模。设置管坯特征为 SHELL, 根据管坯壁厚建立截面; 由于模具在成形过程中的变形量可以忽略不计, 设置模具类型为解析刚体, 提取模具外轮廓建立模具截面, 并设置参考点。

波纹管在整体液压成形过程中, 每个波的受力情况基本相同, 为了减少运算量, 选择单波成形过程进行研究, 装配的双层管坯及成形模具如图 5 所示。

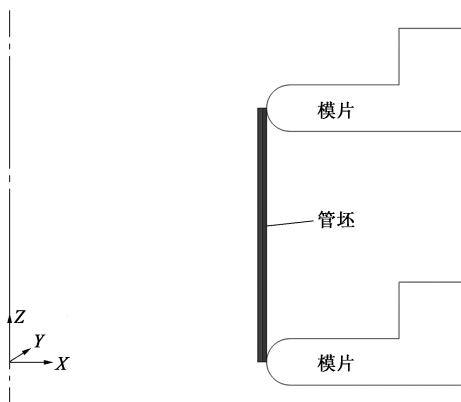


图 5 模型建立

Fig. 5 Model building

波纹管成形过程中变形量较大, 涉及材料塑性变形, 需设置材料的弹、塑性属性, 如表 1 和图 6 所示。

表 1 材料弹性属性

Table 1 Elastic properties of material

参数	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa
数值	164599	0.3	218

波纹管成形过程选用静态隐式分析进行, 根据波纹管的实际成形过程, 设置管坯胀形及波纹管成形两个分析步, 由于波纹管成形过程中管坯的变形

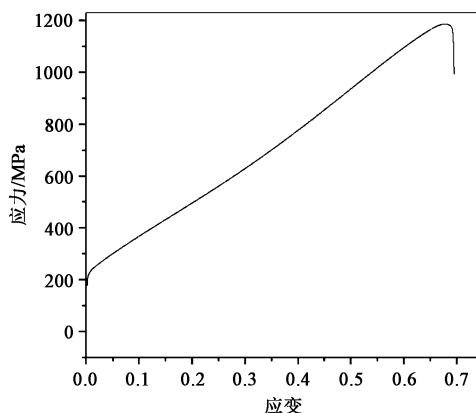


图 6 材料塑性属性

Fig. 6 Plastic properties of material

量较大, 各分析步开启几何非线性设置。

根据波纹管成形过程设置边界条件。设置下端模具为固定约束, 同时约束上端模具及管坯上、下端面在竖直方向的位移。将管坯层间接触、管坯与模具的接触摩擦因数均设置为 0.2。对内层管坯施加法向压力。在模具下压过程中, 由于内压作用管坯将在模片间形成波纹。

管坯网格划分使用四边形网格, 为保证结果收敛, 并提高结果精度, 设置管坯壁厚方向划分 4 层网格, 单元类型选择轴对称一阶减缩实体单元 CAX4R。模具采用解析刚体, 无需进行网格划分^[10-12]。管坯网格划分结果如图 7 所示。

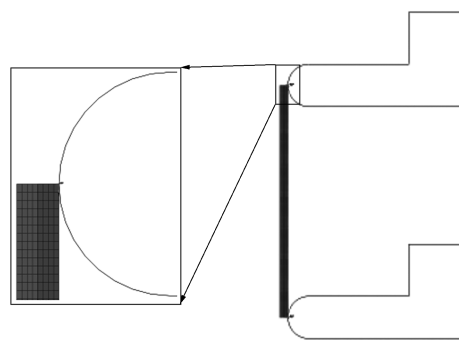


图 7 管坯网格划分

Fig. 7 Grid meshing of tube blank

3.2 成形压力分析

首先, 选取管坯预胀形及波纹管挤压成形的内压为 5 MPa 进行分析, 得到的成形结果如图 8 所示。在 5 MPa 成形压力作用下, 管坯预胀形时的最大等效应力为 220 MPa, 刚进入塑性阶段, 与式 (1) 计算的理论分析结果接近。但管坯仅有局部进入了塑性变形, 在后续挤压成形时由于内压不够, 管坯未贴模, 成形质量不佳。

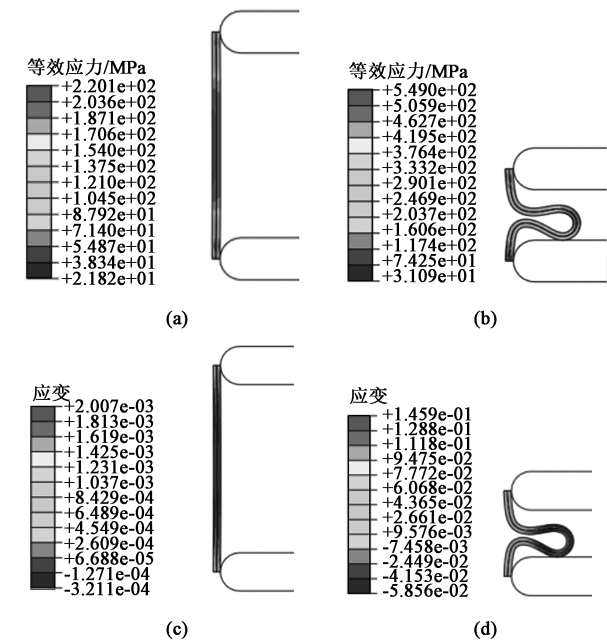


图 8 成形压力为 5 MPa 时的成形结果

(a) 管坯预胀形等效应力 (b) 挤压成形等效应力
(c) 管坯预胀形应变 (d) 挤压成形应变

Fig. 8 Forming results at forming pressure of 5 MPa

(a) Equivalent stress of tube blank pre-bulging
(b) Equivalent stress of extrusion forming (c) Strain of tube blank pre-bulging (d) Strain of extrusion forming

选取管坯预胀形及波纹管挤压成形的内压力为 10 MPa 进行分析，得到成形结果如图 9 所示。在

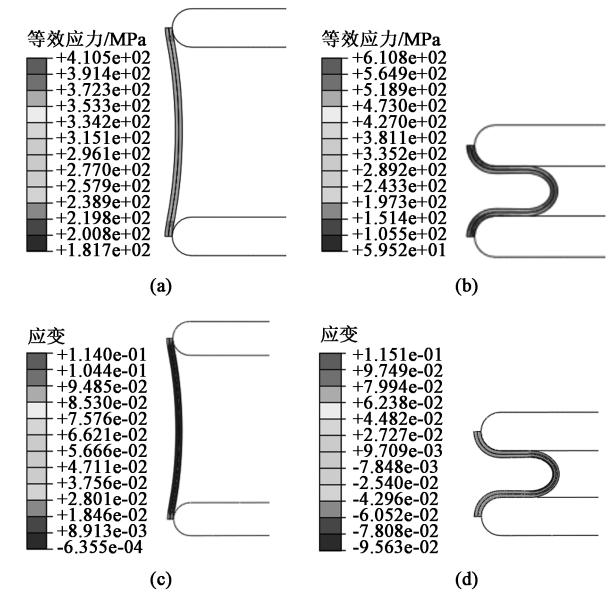


图 9 成形压力为 10 MPa 时的成形结果

(a) 管坯预胀形等效应力 (b) 挤压成形等效应力
(c) 管坯预胀形应变 (d) 挤压成形应变

Fig. 9 Forming results at forming pressure of 10 MPa

(a) Equivalent stress of tube blank pre-bulging
(b) Equivalent stress of extrusion forming (c) Strain of tube blank pre-bulging (d) Strain of extrusion forming

10 MPa 成形压力作用下，管坯基本进入塑性阶段，波纹管的成形效果良好。波纹管最大应力处及最大减薄处均位于波峰位置，最大等效应力为 610 MPa，最小壁厚为 0.60 mm。

继续加大成形压力，波纹管的成形效果及最大等效应力如表 2 所示。

表 2 不同成形压力下的波纹管成形效果

Table 2 Forming results of bellows under different forming pressures			
成形压力/ MPa	成形效果	最大等效 应力/MPa	双层最小 壁厚/mm
10		610	0.60
15		650	0.57
20		690	0.55
25		733	0.53
30		779	0.51

当成形压力大于 30 MPa 时，由于最大等效应力较大，同时最小壁厚较薄，材料伸长率接近 40%，波纹管存在成形开裂风险，故不继续进行分析。

从表 2 可以看出，不同成形压力作用下的波纹管

的成形外形接近,但低成形压力时波峰形状略尖,高成形压力时波峰相对圆滑饱满。综合考虑应力、壁厚等因素,选择 15 MPa 作为成形压力。

3.3 壁厚分布分析

根据 15 MPa 成形压力的有限元仿真成形结果,进一步分析管坯壁厚分布,选取如图 10 所示的测量位置进行壁厚测量,结果如图 11 所示。

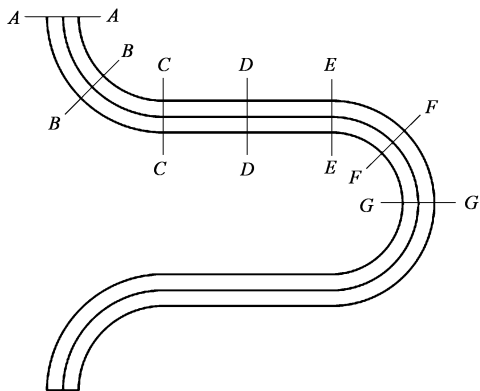


图 10 波纹管壁厚测量位置

Fig. 10 Measuring positions of wall thickness for bellows

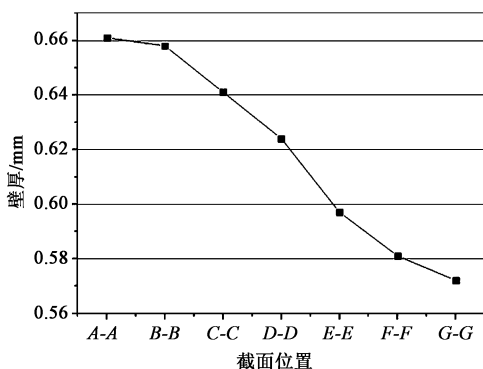


图 11 DN60 波纹管壁厚仿真结果

Fig. 11 Simulation results of wall thickness for DN60 bellows

根据图 11 所示结果,波纹管成形时壁厚从波谷位置至波峰位置依次减薄,在波峰、波谷圆弧段的减薄速率较低,在波面平直处的减薄速率较高。

4 工艺试验

通过以上分析,选取 15 MPa 的成形压力,在 BCJ-60 波纹管成形机上成形波纹管,如图 12 所示。

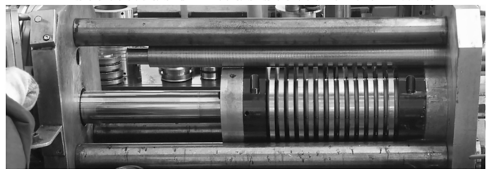


图 12 DN60 波纹管成形试验

Fig. 12 Forming experiment of DN60 bellows

按此参数生产的波纹管产品,各尺寸满足图纸要求,对波纹管进行剖切并按图 10 所示的截面位置测量壁厚,结果见图 13 和图 14。波纹管波峰饱满,双层紧密贴合、无间隙,壁厚的变化规律与仿真结果一致。

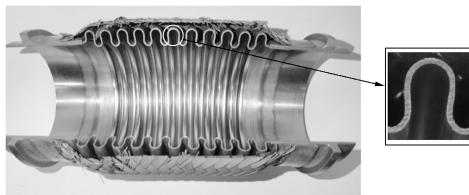


图 13 DN60 波纹管剖切截面

Fig. 13 Cutting section of DN60 bellows

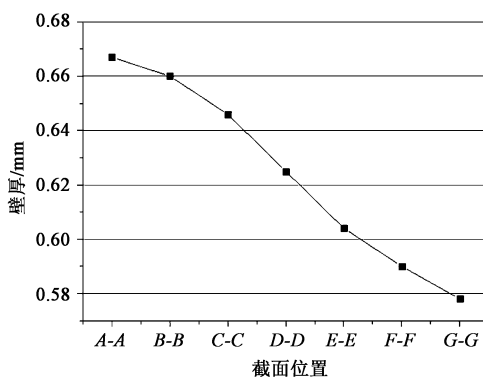


图 14 DN60 波纹管壁厚测量结果

Fig. 14 Measuring results of wall thickness for DN60 bellows

5 结论

(1) 针对产品要求,选择整体液压成形工艺对波纹管进行成形,通过仿真确定了液压成形工艺参数,并通过试验进行了验证,实现了目标双层薄壁波纹管的成形。

(2) 建立了波纹管整体液压成形有限元分析模型,发现波纹管液压成形压力应使管坯材料应力大于屈服强度方可顺利成形出波纹管产品,具体成形压力的选择应根据波形饱满程度、最大等效应力值及壁厚减薄量综合考虑。

(3) 波纹管成形后的壁厚的减薄规律为:在波峰处减薄量最大,减薄量由波峰至波谷的递减。

参考文献:

- [1] 樊大钧. 波纹管设计学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
Fan D J. Bellows Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
- [2] 徐开先. 波纹管类组件的制造及其应用 [M]. 北京: 机械工业

- 出版社, 1998.
- Xu K X. Manufacture and Applications of Bellows Components [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [3] 马伟, 李德雨, 钟玉平. 波纹管的发展与应用 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2004, 25 (4): 28-31.
- Ma W, Li D Y, Zhong Y P. Development and application of bellows [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2004, 25 (4): 28-31.
- [4] 郎振华. 多层 S 型波纹管力学性能分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- Lang Z H. Mechanical Property Analysis of Multilayer S-shape Bellows [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [5] 黄乃宁. 特种金属波纹管研制 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003.
- Huang N N. Research on Metal Bellows of Special Purpose [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2003.
- [6] 张大林, 黄乃宁, 张文良, 等. 大口径阀门用精密金属波纹管成形工艺 [J]. 阀门, 2014, (2): 13-15, 31.
- Zhang D L, Huang N N, Zhang W L, et al. Forming process of large-diameter precision metal bellows for valves [J]. Valve, 2014, (2): 13-15, 31.
- [7] 唐顺强. 波纹管机械胀形模具的原理及结构特点 [J]. 工程设备与材料, 2016, (12): 103-104.
- Tang S Q. The principle and structural features of mechanical bulging mold for bellows [J]. Engineering Equipment and Materials, 2016, (12): 103-104.
- [8] 简翰鸣, 赵淘, 卜星, 等. 薄壁多层不锈钢波纹管整体成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 81-88, 111.
- Jian H M, Zhao T, Bu X, et al. Integral forming technology of thin-walled multiply stainless steel bellows [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 81-88, 111.
- [9] 罗益民, 王紫旻, 赵淘, 等. 大直径小弯曲半径薄壁不锈钢弯头胀形研究 [J]. 上海航天, 2020, 37 (S2): 253-258.
- Luo Y M, Wang Z M, Zhao T, et al. Study on bulging of thin-walled stainless steel elbow with large diameter and small bending radius [J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37 (S2): 253-258.
- [10] 郭煜敬, 王志刚, 金光耀, 等. 液压成形波纹管减薄率的数值模拟研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47 (1): 58-62.
- Guo Y J, Wang Z G, Jin G Y, et al. Numerical simulation research on thickness reduction ratio of the bellows [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47 (1): 58-62.
- [11] 彭赫力, 张小龙, 李中权, 等. 波纹管液压成形数值模拟和实验 [J]. 制造技术研究, 2015, (2): 23-25, 30.
- Peng H L, Zhang X L, Li Z Q, et al. Numerical simulation and experiment of bellows hydroforming [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, (2): 23-25, 30.
- [12] 叶梦思. 基于有限元分析的 Ω 形波纹管液压成形研究及波纹管轻量化设计 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- Ye M S. Research on Hydroforming of Toroidal Bellows and Lightweight Design of Bellows Based on Finite Element Analysis [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.

(上接第 136 页)

● 正文的“引言”部分不编号, 亦不列出“引言”二字, 直接陈述即可; 一级标题用“1, 2, …”排序; 二级标题用“1.1, 1.2, …, 2.1, 2.2, …”排序; 三级标题用“1.1.1, 1.1.2, …”排序。

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其在正文中引用、的顺序, 分别用阿拉伯数字顺序编码。

● 图片、表格应随文给出, 先见文后见图、表。

● 图题 (包括 (a)、(b) 等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。

● 照片或灰度图应反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如 $5\ \mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用“[序号]”标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用“, 等 (, et al)”表示; 无论中外署名、一律姓 (首字大写) 先名后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码-终页码.

[2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译. 版本. 出版地: 出版社, 出版年.

[4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年.

[5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R]. 地名: 责任单位, 出版年.

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [D]. 所在城市: 保存单位, 年份.

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008-02-03).

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径 <http://...>, 发表或更新日期 (如, 2008-02-03).

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年.

3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: <http://www.fstjournal.net/>

《锻压技术》编辑部