

H62铜螺旋波纹管增量成形研究*

王成^{1,2}, 余耀晖^{1,2}, 王辉^{2,3}, 程旋^{1,2}, 魏文斌^{1,2}, 郭训忠^{1,2}

(1. 南京航空航天大学材料学院, 南京 210016;
2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 210016;
3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 为研究 H62 铜螺旋波纹管的成形方式和成形极限, 开展管材增量成形的 ABAQUS 模拟与试验研究。首次采用管材增量成形方式加工螺旋波纹管, 通过模拟与试验相结合的方式, 优化管材增量成形的各工艺参数, 结合理论分析提高 H62 铜螺旋波纹管的成形精度及成形极限。试验结果表明, 当工具头的单次进给量为 0.50mm, 主轴转速为 15r/min, 工具头的轴向进给速度为 5mm/s 时, 螺纹深度极限提高。当螺纹深度为 2.5mm 时, 波纹管的成形质量最好, 当螺纹深度大于 6mm 时, 成形质量显著下降。

关键词: H62 铜管; 增量成形; 螺旋波纹管; 有限元模拟; 成形极限; 成形质量

Research on Incremental Forming of H62 Copper Spiral Corrugated Tube

WANG Cheng^{1,2}, YU Yaohui^{1,2}, WANG Hui^{2,3}, CHENG Xuan^{1,2}, WEI Wenbin^{1,2}, GUO Xunzhong^{1,2}

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 210016, China;
3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to study the forming method and forming limit of H62 copper spiral corrugated tubes, ABAQUS simulation and experimental research on tube incremental forming are carried out. For the first time, the spiral corrugated bellows are processed by the incremental tube forming method. Through the combination of simulation and test, the process parameters of the incremental forming of the tube are optimized, and the forming precision and forming limit of the H62 copper spiral corrugated tube were improved by theoretical analysis. The test results show that when the single feed of the tool head is 0.50mm, the spindle speed is 10r/min, and the axial feed speed of the tool head is 6.7mm/s, the thread depth limit is increased. When the thread depth is 2.5mm, the forming quality of the bellows is the best, and when the thread depth is more than 6mm, the forming quality is remarkably lowered.

Keywords: H62 copper tube; Incremental forming; Spiral bellows; Finite element simulation; Forming limit; Forming quality

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.098

H62 铜螺旋波纹管是换热器重要的部件, 因为其有良好的换热性能和耐腐蚀性能, 被广泛应用于航空航天、石油化工、动力及海水淡化等换热设备上^[1-3]。螺旋波纹管的塑性成形方式主要有轧制、拉拔、挤压等, 但

是这些方式都有一定的局限性, 需要特殊的模具, 增加了波纹管的成形成本和生产周期。本文通过增量成形的方式成形 H62 铜螺旋波纹管, 管材增量成形技术是近几年发展的新型塑性成形技术^[4-6], 它属于柔性制造的一种, 通过不同工具头与管材的协调运动完成整体成形。管材增量成形是一种新型的成形方式, 利用工具头沿特定的运动轨迹, 逐点或逐层碾压材料形成三维几

* 基金项目: 航空科学基金(2016ZE52047); 江苏高校优势学科建设工程。

何的特征,实现材料连续、局部塑性成形的加工方法^[7]。这种塑性成形方式不需要专用模具,成形方式简单,可以缩短制造周期,提高螺旋波纹管的成形质量。通过研究 H62 铜螺旋波纹管,对管材增量成形工艺参数进行优化,为后期试验提供合理工艺参数。

本文通过 ABAQUS 有限元模拟和试验相结合,根据有限元模拟的结果确定具体试验参数。通过控制设计工具头的单次进给量和运动轨迹,完成 H62 铜螺旋波纹管的整体塑性成形,并对成形质量进行分析,修正成形工艺参数。

1 增量成形原理

管材增量成形的原理如图 1 所示。管材的一端由旋压机的卡盘固定,另一端由尺寸匹配的尾顶穿入,工具头固定在对应的基座上,工具头的个数由成形波纹管的形状决定。旋压机的主轴带动卡盘旋转,管材也相应地转动,工具头沿管材轴线方向做直线运动,通过管材转动和工具头直线运动的复合完成管材表面螺旋凹槽的成形。成形波纹管的螺纹间距、螺纹压痕的导程、升角取决于主轴转速和工具头的运动轨迹。为了提高管材的成形性能,可逐步增大压入深度,以提高均匀变形程度、减小截面畸变以及消除局部起皱等成形缺陷。管材增量成形具有成形效率高、成形构件质量好、结构轻量化等优点。

2 增量成形模拟研究

在 H62 铜螺旋波纹管增量成形过程中,为了研究各工艺参数对最终管材成形质量及成形极限的影响,基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了增量成形的三维弹塑性有限元模型。H62 铜管有良好的力学性能,冷成形优异,散热性能良好,用于各种散热导管及螺旋波纹管,H62 铜管的真应力-应变曲线如图 2 所示。本文选取外径 40mm、壁厚 1mm 的 H62 铜管作为模拟和试验研究的

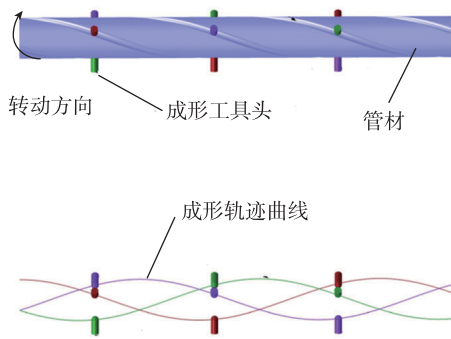


图1 管材增量成形原理

Fig.1 Tube incremental forming principle

管材,其相关参数如表 1 所示。

管材增量成形的成形机理比板材渐进成形的机理更加复杂。在成形过程中,工具头的圆弧面和管材的圆弧面接触,初始变形时看成点接触,随着变形的继续,接触情况变得复杂,变形区和未变形区的分界处变得不明显^[8]。

在 H62 铜管材增量成形过程中,工具头的单次进给量及管材与工具头之间的摩擦系数对螺旋波纹管的成形极限和成形质量有重要的影响。通过 ABAQUS 有限元仿真可以提前预测成形过程中的缺陷产生位置,分析缺陷产生原因,为后期试验提供合理的技术参数^[9-10]。不同单次进给量时模拟参数如表 2 所示,首先针对工具头不同单次进给量在相同波纹管螺纹深度的情况下,单次进给量对成形后最大螺纹深处管材壁厚、成形螺纹整

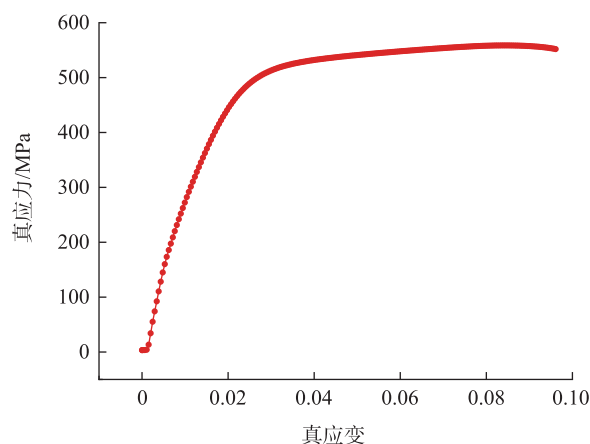


图2 H62铜管真应力-应变

Fig.2 H62 copper tube true stress-strain

表1 H62铜管相关参数

Table 1 H62 copper tube related parameters

密度 /(g·cm ⁻³)	杨氏模量 /GPa	屈服强度 /MPa	加工硬化 指数	强度系数 /MPa	泊松比
8.50	119.94	500.10	0.0708	667.36	0.33

表2 不同单次进给量时模拟参数

Table 2 Simulation parameters for different single feeds

主轴转速 /(r·min ⁻¹)	工具头轴向速度 /(mm·s ⁻¹)	工具头单次 进给量/mm	螺纹深度 /mm
15	5.00	0.30	3.00
15	5.00	0.50	3.00
15	5.00	0.60	3.00
15	5.00	1.00	3.00
15	5.00	1.50	3.00
15	5.00	3.00	3.00

体回弹以及成形后应力的影响。

当螺旋波纹管的螺纹深度一定,工具头的单次进给量不同时,有限元模拟的等效应变云图如图3所示。

随着工具头单次进给量的增加,螺旋波纹管增量成形后期,管材的应力集中情况严重,工具头前端发生严重的金属材料堆积现象。如图4所示,当工具头的单次进给量为3mm时,成形初期管材变形量增加,成形后期工具头前端与管材接触区域发生严重的材料堆积行为。这种现象导致成形后的螺旋波纹管质量下降,严重的材料堆积行为将导致管材破裂。

根据模拟结果,当工具头的单次进给量不同时,随着螺纹深度的增加,成形区域管材壁厚先增加后减小,当螺纹深度一定时,成形区域管材壁厚随着单次进给量的增大而减小。根据模拟结果,当螺纹深度大于6mm时,成形区域螺纹处开始出现微裂纹,螺旋波纹管成形

质量急剧下降,当螺纹深度大于7mm时,成形后期材料堆积严重,管材发生破裂,如图5所示。

当工具头的单次进给量相同都为0.50mm,螺纹深度为2.5mm时,通过有限元模拟对不同摩擦系数情况进行分析,不同摩擦系数时的模拟参数如表3所示,通过模拟分析不同摩擦系数时成形H62铜螺旋波纹管的

最大螺纹深处管材壁厚分布、成形螺纹整体回弹以及成形后应力的分布情况。

通过对有限元模拟的等效应力结果进行分析,发现随着工具头前端与管材接触区域摩擦系数的增大,增量

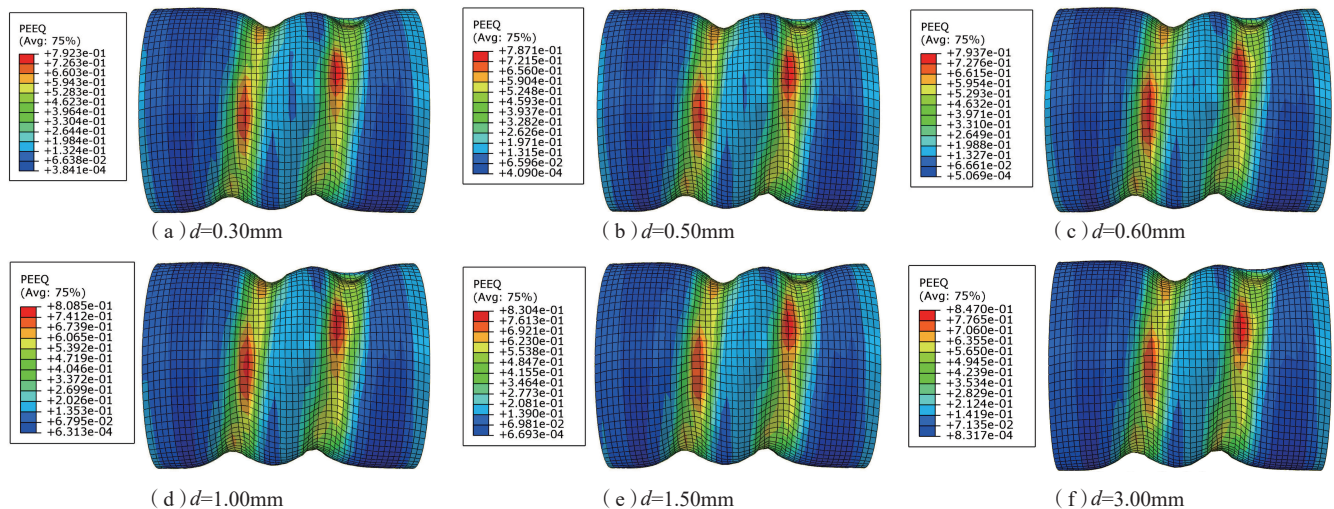


图3 不同单次进给量时模拟应变云图

Fig.3 Simulated strain cloud diagram for different single feeds

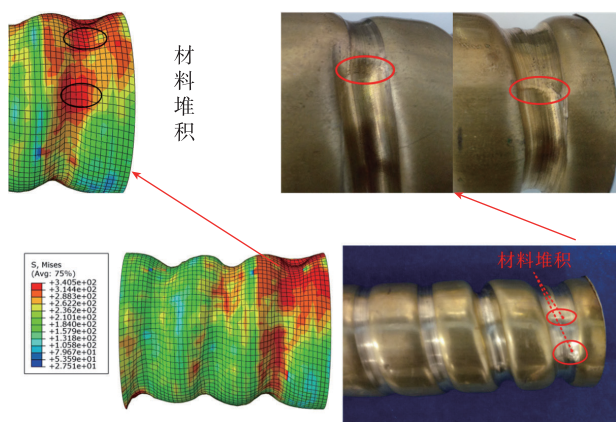


图4 成形后期发生材料堆积现象

Fig.4 Material accumulation occurs in later stage of forming

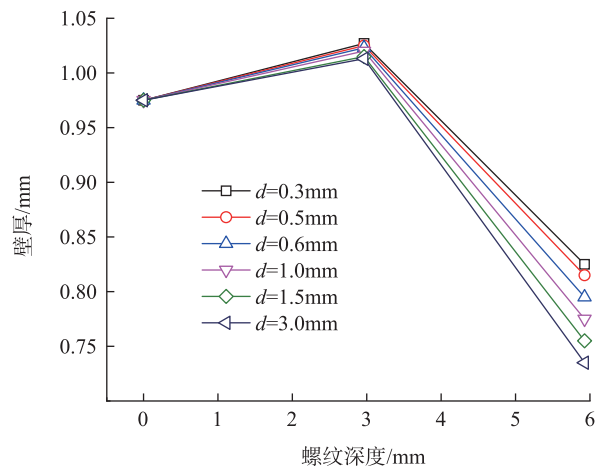


图5 工具头单次进给量与壁厚关系

Fig.5 Relationship between single feed of tool head and wall thickness

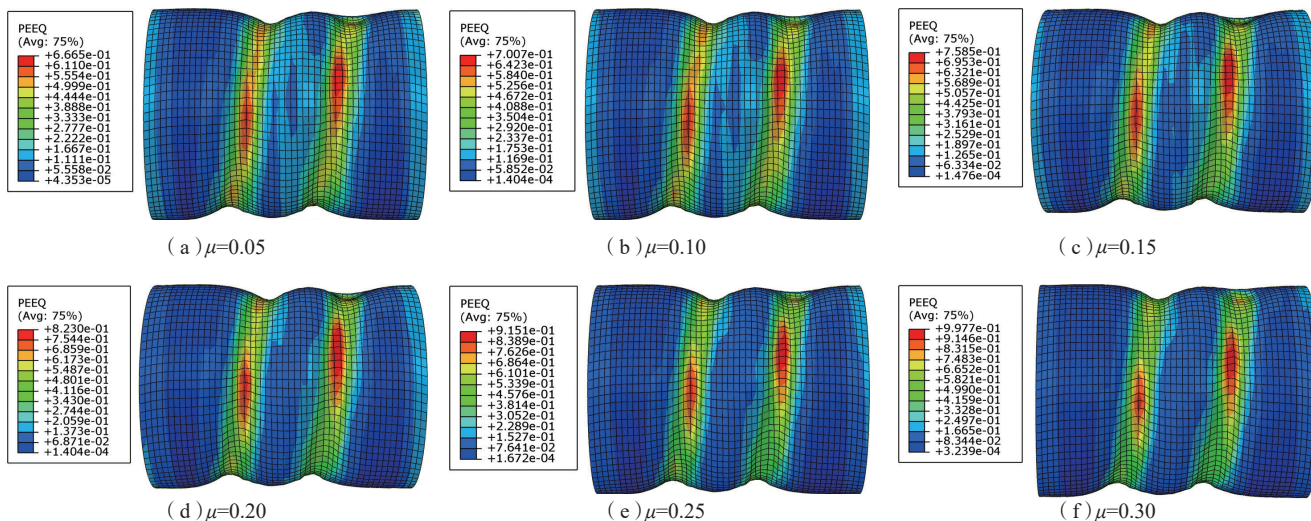


图6 不同摩擦系数时模拟应变云图

Fig.6 Simulated strain cloud diagram with different friction coefficients

表3 不同摩擦系数时的模拟参数

Table 3 Simulation parameters for different friction coefficients

主轴转速 /(r·min ⁻¹)	工具头轴向 速度/(mm·s ⁻¹)	工具头单次进 给量/mm	摩擦 系数	螺纹深度 /mm
15	5.00	0.50	0.05	2.50
15	5.00	0.50	0.10	2.50
15	5.00	0.50	0.15	2.50
15	5.00	0.50	0.20	2.50
15	5.00	0.50	0.25	2.50
15	5.00	0.50	0.30	2.50

成形的成形力增大,摩擦系数对管材成形后的残余应力分布情况影响不大。

根据模拟结果, H62 铜增量成形螺旋波纹管时,在摩擦系数不同的情况下,随着螺纹深度的增加,成形后螺纹最深处的管材壁厚分布情况如图 7 所示。管材壁厚随着螺纹深度的增加先增加后减小,当螺纹深度较大时,摩擦系数越大,壁厚减薄情况越严重。

3 增量成形试验

为了完成增量成形 H62 铜螺旋波纹管,设计了图 8 所示的工具头,工具头前端为直径 8mm 的光滑半球头,工具头通过基座被固定在旋压机床上,其可以沿着管材轴线左右运动。成形工具头的形状简单,可以通过其加工不同长度、螺纹深度、螺纹间距的螺旋波纹管。

管材增量成形需要特制的增量成形设备,德国的一些学者已经首次研发了多种管材增量成形装备^[11-12]。鉴于现有条件,通过对已有的旋压机床进行改进以满足管材增量成形的条件,在现有的旋压机床上增加了成形

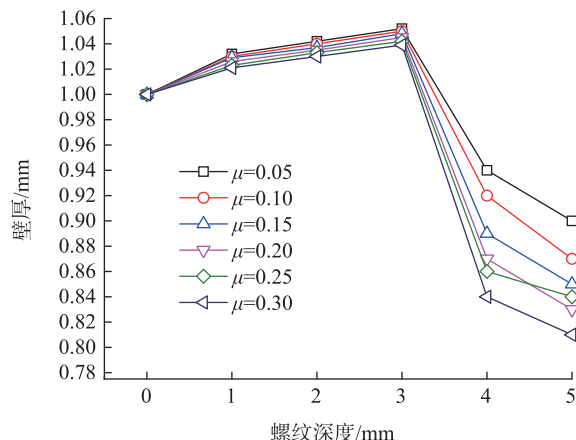


图7 不同摩擦系数与管材壁厚关系

Fig.7 Relationship between different friction coefficient and wall thickness of tube

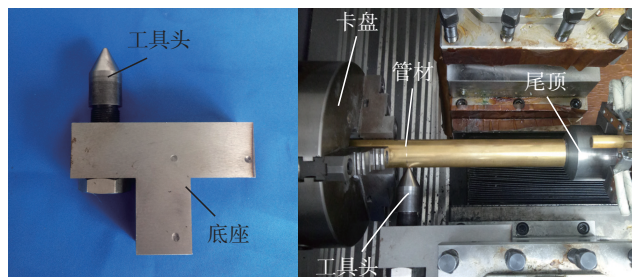


图8 增量成形工具头及装置

Fig.8 Incremental forming tool head and device

工具头和与管材内径匹配的尾顶装置。卡盘带动管材转动,工具头沿管材轴线匀速运动,通过二者的相互匹配完成各种螺旋波纹管的加工,试验装置如图 8 所示。

图 9 所示为不同工具头单次进给量时,螺旋波纹管

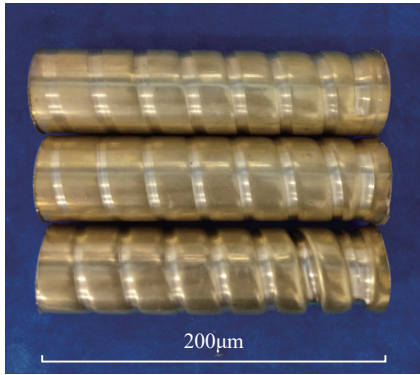


图9 H62铜螺旋波纹管试验结果
Fig.9 H62 copper spiral bellows experiment results

的增量成形结果。试验过程中分别针对无润滑、润滑油润滑、二硫化钼润滑、石墨颗粒润滑 4 种不同的条件进行,通过试验结果发现,当使用二硫化钼作为润滑剂时,增量成形后的管材表面质量最好,成形极限也得到了提高。在相同摩擦条件下成形 H62 铜螺旋波纹管时,当工具头的单次进给量为 0.5mm 时,成形过程中工具头前端无明显材料堆积现象,成形质量较好。

4 结论

(1) H62 铜螺旋波纹管增量成形时,随着单次进给量的增加,可以使成形更加均匀,提高材料的整体流动性,但是成形过程力也随之增加,表面成形质量下降。根据试验和模拟结果得出,当工具头的单次进给量为 0.50mm,螺纹深度为 2.5mm 时,波纹管的成形质量较好。

(2) 当成形螺旋波纹管的螺纹深度大于 6mm 时,波纹管的表面质量急剧下降,螺纹最深处开始出现微裂纹,工具头前端材料堆积情况严重,此时壁厚减薄率急剧增加。

(3) 根据增量成形试验,针对无润滑、润滑油润滑、二硫化钼润滑、石墨颗粒润滑 4 种不同的条件,相对于无润滑,当使用二硫化钼润滑时,螺纹深度极限可提高。二硫化钼使工具头与管材表面的滑动摩擦转变为颗粒间滚动摩擦,而且其颗粒比石墨颗粒小,减小了摩擦系数。此外,当工具头前端做成滚动球头形式时,增量成形极限与成形质量可进一步提高。

参考文献

[1] 吴志伟,钱才富,王薪.螺旋波纹管及其换热器的发展综述[J].化工机械,2018(1): 1-5.
WU Zhiwei, QIAN Caifu, WANG Xin. Summary of the development of spiral bellows and its heat exchanger[J]. Chemical Machinery, 2018(1): 1-5.

[2] 熊立贵,杨湘洪.换热器铜管高效集成加工技术装备研究[J].机床与液压,2018(4): 60-64.
XIONG Ligui, YANG Xianghong. Research on high efficiency integrated processing technology equipment of copper tubes in heat exchangers[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2018(4): 60-64.

[3] 崔海亭,姚仲鹏.强化型管壳式热交换器的研究现状及发展[J].化工机械,1999(3): 168-170.
CUI Haiting, YAO Zhongpeng. Research status and development of reinforced shell and tube heat exchangers[J]. Chemical Machinery, 1999(3): 168-170.

[4] BECKER C, STAUPENDAHL D, HERMES M, et al. Incremental tube forming and torque superposed spatial bending – a view on process parameters[J]. Steel Research International, 2012, Special Edition: 415-418.

[5] PARK J J, KIM Y H. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130(4): 42-46.

[6] GRZANCIC G, HIEGEMANN L, KHALIFA N B. Investigation of new tool design for incremental profile forming[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 1767-1772.

[7] 张伟,朱虎,杨忠凤.金属板材单点渐进成形技术的研究进展[J].工具技术,2009,43(5): 8-12.
ZHANG Wei, ZHU Hu, YANG Zhongfeng. Research progress on single point progressive forming technology of sheet metal[J]. Tool Technology, 2009, 43(5): 8-12.

[8] 詹梅,石丰,邓强,等.铝合金波纹管无芯模缩径旋压成形机理与规律[J].塑性工程学报,2014(2): 108-115.
ZHAN Mei, SHI Feng, DENG Qiang, et al. Forming mechanism and rules of mandrelless neck-spinning on corrugated pipes[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014(2): 108-115.

[9] 徐银丽.异型薄壁壳体强力旋压成形机理及规律的三维有限元分析[D].西安:西北工业大学,2006.
XU Yinli. Three-dimensional finite element analysis of the mechanism and law of strong spin forming of special-shaped thin-walled shell[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[10] 詹梅,马上官.筒形件旋压有限元分析中芯模和旋轮相对运动的处理方法[J].精密成形工程,2011(6): 107-111.
ZHAN Mei, MA Shanguan. Method for processing relative motion of core mold and rotating wheel in cylindrical member spinning finite element analysis[J]. Precision Forming Engineering, 2011(6): 107-111.

[11] GRZANCIC G, BECKER C, KHALIFA N B. Basic analysis of the incremental profile forming process[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2016, 138(9): 091002.

[12] GRZANCIC G, BECKER C, HERMES M, et al. Innovative machine design for incremental profile forming[J]. Key Engineering Materials, 2014, 622-623: 413-419.

通讯作者:郭训忠,博士,副教授,主要研究方向为金属塑性成形工艺及装备, E-mail: guoxunzhong@nuaa.edu.cn.

(责编 铃兰)