

钛合金环形管成形模具参数优化

戴毅¹, 曾卫东¹, 杨英丽², 赵恒章², 赵彬^{1,2}, 周义刚¹

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 在 MSC/Superform 有限元模拟软件和弹塑性有限元理论的基础上, 建立了钛合金环形管成形过程的计算机模拟系统。选取阿基米德螺旋线为牛角芯模中心线设计模具, 采用中频感应加热方法, 对阿基米德常数、扩径比、弯曲角度等模具参数进行优化模拟。分析可得: (1) 阿基米德螺旋系数的合理选取能够保证获得较好的壁厚均匀性, 模拟得到本工艺较佳系数为 1.0; (2) 扩径比太大, 容易出现起皱、减薄等缺陷; 扩径比偏小, 腹部增厚、壁厚均匀性降低, 本工艺合适的扩径比为 1.33; (3) 弯曲角度太小, 弯管成形过程变形剧烈, 成形后弯管的力学性能等不能较好满足要求; 弯曲角度太大, 变形过程平稳, 但随着推制阻力的增大导致推制困难, 本工艺较佳弯曲角度为 40°。通过正交试验方法验证得到: 在上述参数条件下可以获得壁厚均匀、耐高压、等强度的钛合金环形管。

关键词: 钛合金; 环形管; 壁厚均匀; 参数优化

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1801-06

钛环形管是一种广泛应用在航空、航天领域的特殊部件, 用它制成的钛环形气瓶具有体积小、质量轻、能承受高压等优点, 具有广阔的应用前景^[1]。其耐高压、等强度的设计目标对钛环形管的壁厚均匀性提出了严格的要求。若采用传统的弯曲方式, 不可避免地存在背部受拉减薄、腹部受压增厚的问題, 难以满足高性能钛环形管壁厚均匀性的要求。牛角芯模热推弯管工艺将扩径与弯曲变形有机结合, 是解决传统弯曲变形壁厚不均匀性的最有效的成形方法之一^[2]。

牛角芯模设计是热推弯管成形工艺中最重要的研究内容。前苏联科学院院士得列日尔第一次给出了芯棒和管坯直径设计的经验公式^[3]。国内苗天德从理论上推导了牛角芯模弯管成形过程的塑性解递推公式, 给出了牛角芯模、管坯尺寸和推制工艺参数的经验公式^[4], 但其只能应用于冷加工。鹿晓阳在塑性弯曲工程理论的基础上, 提出描述弯管变形特征的 4 个假设, 推导出牛角芯模中心线的解析公式^[5], 但其研究对象主要是大口径厚壁钢管。近年, 西北有色金属研究院周伟^[6]等提出了采用阿基米德螺旋线作为牛角芯模中心线的设计方法, 但其弯管成形数值模拟过程中未考虑温度场的影响。

如前所述, 尽管国内外学者在牛角芯模设计上做

了不少工作, 但目前设计还处于传统的“炒菜式”设计阶段。此外, 牛角模具设计需要反复试制和打磨, 周期长, 精度差^[7], 很难满足实际生产要求, 迫切需要成熟理论来指导实践。本研究基于弹塑性有限元理论, 采用 MSC/Superform 有限元软件, 对阿基米德常数、扩径比、弯曲角度等模具参数进行数值模拟优化分析, 为牛角芯模的设计提供理论和实验依据。鉴于以往数值模拟过程中未考虑温度场变化对热推弯管成形的影响, 本实验采用了实际工况中应用的中频感应加热方式。

1 热推弯管工艺简介

热推弯管工艺原理^[8]如图 1 所示。将管坯从末端套在牛角芯模的芯杆上, 固定芯杆尾端, 然后采用液压或机械推进机构推进管坯。在牛角芯模前端被推进的管坯由感应加热器连续加热后, 进入扩径变形段后同时发生弯曲变形和扩径变形, 最后通过定径段整形获得符合设计的成形弯管。弯管成形过程中, 管坯紧贴牛角芯模推出, 因此牛角芯模几何形状和尺寸直接影响成形中金属流动规律和塑性变形机理, 是决定弯管成形质量的主要工艺参数。

牛角芯模分为过渡段、扩径变形段和定径段 3 部

收稿日期: 2008-12-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2007CB613807); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-07-0696); 国家科技支撑计划 (2007BAE07B03)

作者简介: 戴毅, 男, 1982 年生, 硕士生, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88494298, E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn

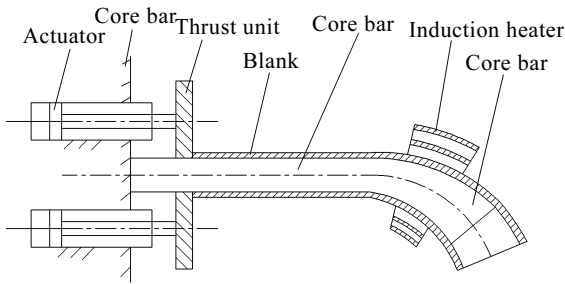


图 1 中频感应弯管示意图

Fig.1 Outline of pipe bending using induction heating

分, 如图 2 所示。过渡段是指进入变形阶段之前的部分, 对坯起支撑、定位作用; 管坯进入扩径变形段同时发生扩径和弯曲变形; 定径段的作用在于平整工件, 使弯管的外径与曲率满足要求。

2 有限元模型的建立

2.1 牛角芯模中心线设计

牛角芯模设计主要是进行牛角芯模中心线设计。其中: 过渡段中心线为直线, 定径段为圆弧, 扩径变形段中心线设计是中心线设计的关键。牛角芯模类型一般是依据其中心线形式划分的, 传统的牛角芯模有单半径牛角芯模和双半径圆弧芯模, 即轴线由一条或两条确定曲率的圆弧构成, 如图 3 所示。

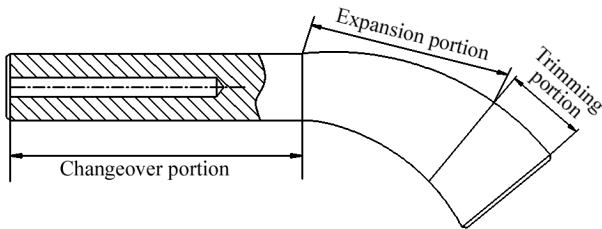


图 2 牛角模具示意图

Fig.2 Schematic figure of core bar

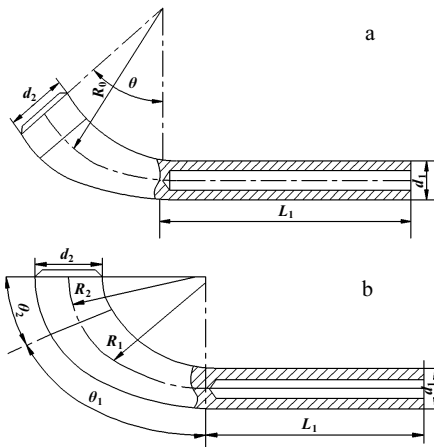


图 3 传统牛角芯模示意图

Fig.3 Sketch map of conventional core bar: (a) single arc and (b) double arc

热推弯管成形过程中, 直管坯从过渡段推进至扩径变形段和定径段时, 坯料曲率由近似无穷大变化到成品管曲率。传统的牛角芯模是由曲率固定的单、圆弧中心线设计得到的, 在整个推制过程, 坯料曲率半径会发生剧烈突变, 变形的连续稳定性很难保证。为了使推制过程更加平稳连续, 本研究选取曲率连续变化的阿基米德螺旋线作为牛角芯模中心线。阿基米德螺旋线方程:

$$r=a\theta$$

式中, r 为极半径, a 为阿基米德常数, θ 为极角。其曲率方程为:

$$K = \frac{2 + \theta^2}{a(1 + \theta^2)\sqrt{1 + \theta^2}} \quad (2)$$

由阿基米德螺旋线曲率方程可以看出, 阿基米德螺旋线的曲率半径随极角的增加连续、缓慢变化, 可克服传统多段圆弧连接曲率半径不连续变化的缺点, 而且瞬时圆心在不断变化, 是一个偏心的运动轨迹。

2.2 有限元模型

本研究采用阿基米德螺旋线为牛角芯模中心线, 建立直径 99 mm, 壁厚 2.32 mm, 弯曲半径 152 mm 的环形管有限元模型进行模拟分析。

有限元建模过程: 在 CAD INTERFACE 模块中以 IGS 格式读入牛角芯模几何尺寸, 利用 MESH GENERATION 模块对牛角芯模进行网格划分。材料从 MATERIAL PROPERTIES 模块加载, 钛管材料为 Ti-6Al-4V, 模具材料为高温合金 GH4169, 其中模具热物性参数^[8]选择为: 模具比热容 $C_d=440 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$, 对流热交换系数 $h_{\text{air}}=0.006 \text{ N}/\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C}$, 工-模界面热交换系数 $h_c=8.37 \text{ N}/\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C}$ 。考虑到模具在推制过程中变形很小, 假定模具为理想刚塑性热传导材料^[9], 选用 8 节点六面体单元 (ELEMENT 43), 管坯采用 8 节点六面体单元 (ELEMENT 7), 可同时进行变形和传热的热力学耦合分析, 有限元模型如图 4 所示。

因弯管推制过程中需要对管坯施加一个相对移动的热源^[10], 如何实现中频感应加热的边界条件是本研究热推弯管工艺数值模拟有限元分析的关键。为此作者专门开发了模拟中频感应加热的用户子程序, 根据管坯所在位置通过控制系数调节热流量, 其中热流量的分布函数是根据感应线圈的形状尺寸和位置来确定

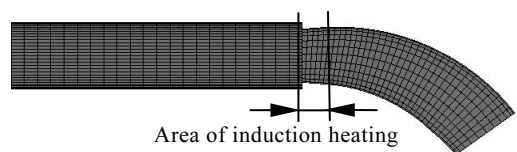


图 4 环形管有限元模型

Fig.4 Finite element model of ring pipe

的。感应线圈位置在扩径变形段前端，感应线圈宽度为 25~40 mm。其他初始条件和边界条件设定如下：模具的过渡段和管坯的初始温度均为 20 °C，模具的扩径变形段和定径段均为 800 °C；模具和坯料之间采用接触传热，模具和坯料与周围环境之间的对流和辐射分别采用 Film 和 Radia 实现。

3 分析与讨论

壁厚均匀性是评价弯管成形工艺的重要技术指标。在弯管标准^[11]中规定：

$$\Delta t = \frac{t - t_{\min}}{t} \times 100\%$$

式中， Δt 为壁厚减薄率， t 为坯料壁厚， t_{\min} 为成品管壁厚。对一般的管件 $\Delta t \leq 12.5\%$ ，对高压管 $\Delta t \leq 10\%$ （本研究中环形管采用高压管标准）。

针对管件结构以及热推成形工艺特点，在成形过程中由于管壁背部和模具分离，厚度基本保持不变^[12]，所以在轴向方向用腹部厚度数据来分析。在成形后弯管轴向上从头部至尾部每隔 10 mm 取 40 个数据点进行轴向分析；而在环向由腹部至背部每隔 4.5° 选取 40 个特征点来分析弯管成形过程中环向分布规律，如图 5 所示。

3.1 阿基米德螺线常数优化

阿基米德螺线常数 a 反映了极径随极角的变化规律，其值大小决定了牛角芯模的形状。为了分析阿基米德常数 a 值对钛环形管厚度分布均匀性的影响，选定扩径比为 1.33，弯曲角为 40°，选取 $a=0.8$ 、 $a=1.0$ 和 $a=1.2$ 的 3 种情况对比分析。

从图 6 壁厚分布图看出：弯管腹部壁厚在头部前端约 80 mm 前剧烈减薄，最小壁厚只有 0.6 mm，当分布趋于稳定后，基本上保持原始管坯壁厚尺寸；当 $a=0.8$ 时，弯管废料段腹部的壁厚变化比较小，当阿基米德常数增加到 1.2 时，弯管废料段的长度明显减小，但腹部壁厚变化相对较大，稳定后腹部尺寸公差减小。

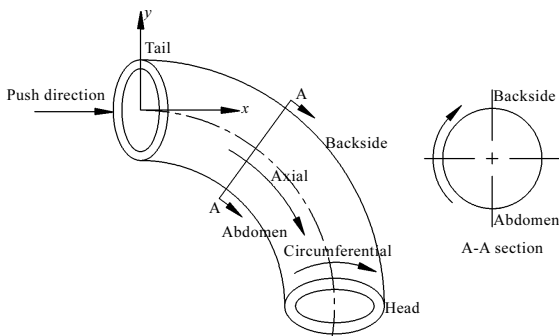


图 5 数据点采集示意图
Fig.5 Location of digital point

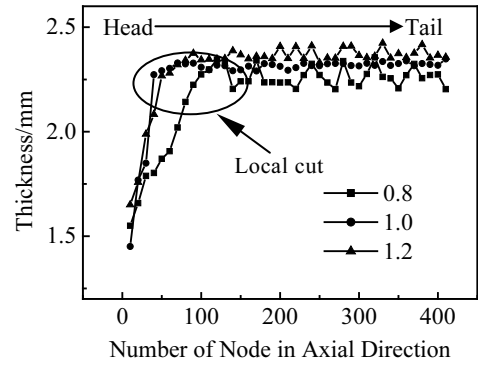


图 6 不同阿基米德常数弯管腹部壁厚分布图
Fig.6 Thickness change in axis direction with different Archimedes constants

阿基米德常数为 1.0 时，与 0.8、1.2 时相比，壁厚分布更加趋于均匀。

图 7 中可以更清楚地看出沿环向厚度的变化：当阿基米德常数取 0.8、1.2 时背腹部厚度差较大，厚度差相差 0.05 mm 左右，而阿基米德常数为 1.0 时接近弯管环向厚度差最小。

分析原因可知：弯管推制前端由于缺少材料约束作用，容易发生材料沿圆周方向向弯管背部流动，造成管壁急剧减薄，所以成品弯管总有一截长约 80 mm 的废料。阿基米德螺线的常数 a 对钛环形管的成形过程有较大影响。当 a 值较小时，阿基米德螺线的曲率半径变化小，弯管推制时阻力较小，不容易发生起皱现象，但内外层分布不均匀；当 a 值较大时，曲线的曲率半径变化大，弯管推制时阻力较大，容易发生起皱现象，甚至在弯管头部腹部出现 45° 剪切撕裂减薄的现象，造成产品报废，如图 8 所示，因此可得本工艺中较佳系数取为 1.0。

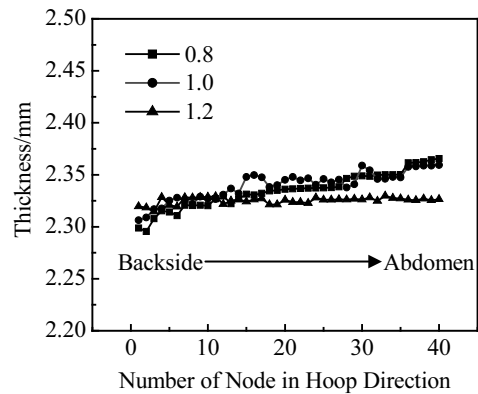


图 7 不同阿基米德常数环向壁厚分布图
Fig.7 Thickness change in hoop direction with different Archimedes constants

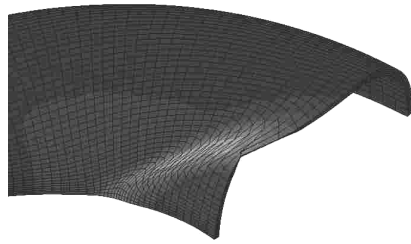


图 8 局部畸变现象

Fig.8 Localized distortion

3.2 扩径比优化分析

所谓扩径比(λ),从模具而言是指牛角芯模扩径变形段最大截面直径与最小截面直径之比。以阿基米德常数为 1.0 和牛角芯模的弯曲角度为 40° 为条件的有限元分析结果进行扩径比优化分析。

图 9 为不同扩径作用下弯管壁厚环向分布:当扩径比较小, $\lambda=1.15$ 时,存在明显的腹部增厚、背部减薄现象,腹部最大增厚率达到 18.8%,背部最大减薄率最大达 15.3%;当 $\lambda=1.33$ 时,环向壁厚分布比较均匀,壁厚变化率控制在 0.8%左右;但当扩径比增大到 1.40 时,甚至出现了背部增厚、腹部减薄的现象。

图 10 为不同扩径比条件下腹部壁厚沿轴向分布图。当 $\lambda=1.15$ 时,腹部壁厚分布明显增厚,最大增厚率为 11.6%;当 $\lambda=1.40$ 时,腹部壁厚整体上有轻微减薄现象,同时由于推制阻力变大,有发生起皱的趋势;扩径比为 1.33 时腹部壁厚分布相对均匀,基本保持壁厚不变,壁厚变化率为 0.6%,完全符合高压管的壁厚均匀性要求。

分析原因可得:热推成形过程中同时发生弯曲变形和扩径变形,弯曲变形时腹部金属受压增厚,而背部金属受拉减薄,扩径变形的特点则使腹部金属沿环向由腹部向背部流动。所以扩径比大小直接影响成形

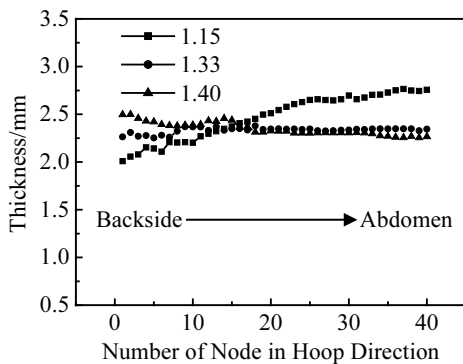


图 9 不同扩径比环向壁厚分布图

Fig.9 Thickness change in hoop direction with different expanding diameter ratios

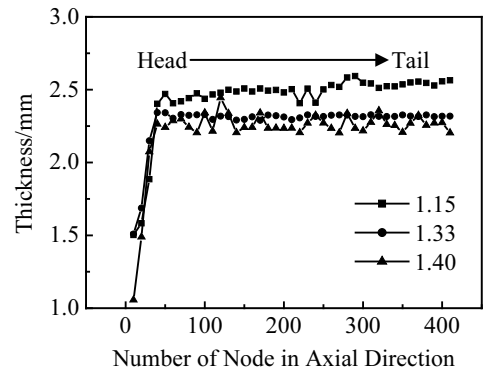


图 10 不同扩径比弯管腹部壁厚分布图

Fig.10 Thickness change in axis direction with different expanding diameter ratios

过程中腹部金属向背部流动的幅度是否可以抵消弯曲变形时的腹部增厚幅度,从而影响弯管壁厚均匀性。扩径作用较小时腹部金属向背部流动的趋势不足以抵消弯曲变形时的腹部增厚,随着扩径比的增大使得推制阻力和扩径力都增大,推制过程相对困难,同时也使得扩径作用效果大于弯曲变形时腹部增厚效果,甚至出现腹部减薄,背部增厚的现象。因此,本工艺中合适的扩径比为 $\lambda=1.33$ 。

3.3 弯曲角度优化分析

牛角芯模的弯曲角度是模具弯曲扩径变形段中心线上起点到终点之间的法线方向之间的夹角。传统推弯过程中一般取 45° 弯曲角度^[13],结合本工艺特点,在确定扩径比为 1.33、阿基米德常数为 1.0 条件下选取 30° 、 40° 、 50° 进行优化分析。

热推弯管成形过程实质上是弯曲变形和扩径变形相互竞争的过程,随着弯曲角度每增加 1° ,弯曲变形量和扩径增加量增大,如何使得弯曲变形量和扩径变形量协调以保证壁厚均匀性,弯曲角度的合理选取就显得至关重要。

从图 11 不同弯曲角度环向壁厚分布可以看出:当弯曲角度为 30° 时,壁厚分布由背部向腹部呈增厚趋势,越靠近腹部位置的壁厚波动越大;弯曲角度增大到 50° 时,壁厚波动更大,甚至出现局部壁厚剧烈增大现象,出现明显起皱;但当弯曲角度为 40° 时,壁厚分布从背部至腹部都比较均匀,壁厚变化率为 0.45%左右。

分析原因可知:当弯曲角度较小时,扩径弯曲变形过程较快,金属流动剧烈,坯料在经历剧烈的扩径弯曲变形后达到需求尺寸,这就必然增加了弯管壁厚分布相对不均匀性,壁厚分布波动厉害;但当弯曲角度过大时,虽然推制变形过程变得平缓,变形相对均匀,但坯料与模具接触面增多,推制阻力也随之增大,

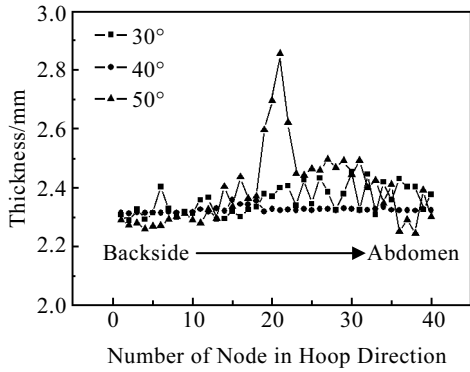


图 11 不同弯曲角度下环向壁厚

Fig.11 Thickness in hoop direction at different bending angles

甚至出现起皱等缺陷 (如图 12 所示), 壁厚均匀性也会随之降低。本试验通过优化模拟得到: 当弯曲角度合适时, 既能使成形过程平缓推进, 又能确保推制阻力不会太大出现起皱现象, 保持较好的壁厚均匀性。

3.4 推制试验验证

采用以上优化参数结果即阿基米德常数为 1.0、扩径比 $\lambda=1.33$ 、弯曲角度 $\theta=40^\circ$ 进行试验验证。

图 13 为对环形管腹部、背部壁厚分布测量数据分布图。结果表明: 背部壁厚分布相当均匀, 腹部壁厚在去除前端严重截面畸变段废料后, 管壁最大增厚率为 1.96%, 管壁最大减薄率为 1.3%, 达到高压气瓶壁厚均匀性要求^[14], 基本能够实现等强度、减重的目的。

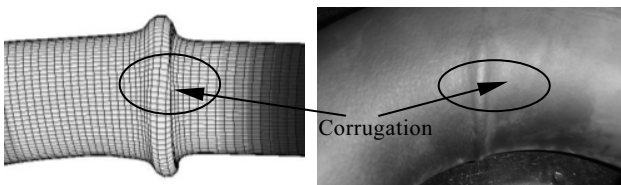


图 12 环形管起皱现象

Fig.12 Wrinkle of the ring pipe

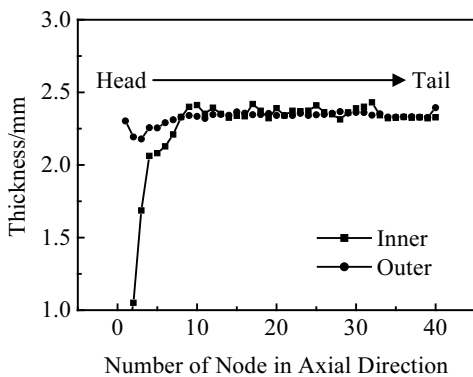


图 13 管壁厚度分布曲线

Fig.13 Wall thickness distribution curves of ring pipe

4 结 论

1) 采用阿基米德螺旋线作为牛角芯模中心线的设计方法, 有利于保证环形管的壁厚均匀性。

2) 阿基米德常数较小, 前段废料长, 环向壁厚差大; 阿基米德常数太大, 环向壁厚尺寸公差小, 本试验阿基米德常数 a 取 1.0 比较合适。

3) 扩径比太大, 容易出现起皱、减薄等缺陷; 扩径比偏小, 壁厚均匀性降低。本试验合适的扩径比为 1.33。

4) 弯曲角度太小, 弯管成形过程变形剧烈, 成形后弯管的力学性能不能较好满足要求; 弯曲角度太大, 变形过程平稳, 但推制困难。本工艺中较佳弯曲角度为 40° 。

5) 在上述参数条件下可以获得壁厚均匀、耐高压、等强度的钛合金环形管。

参考文献 References

[1] Li Xuetong, Wang Minting, Du Fengshan. *Journal of Iron and Steel Research*[J], 2006, 13(5): 25

[2] Gu Yujiong(顾煜炯), Yao Jian(姚 健), Zhou Zhaoying(周兆英). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 1994, 30(12): 543

[3] Editing and Publishing Committee. *Manual of Mechanical Engineering(机械工程手册)*[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1980

[4] Miao Tiande(苗天德), Tang Renji(汤任基), Zhang Jianguo(张建国). *Acta Mechanica Sinica(力学学报)*[J], 1979(3): 230

[5] Lu Xiaoyang(鹿晓阳), Xu Bingye(徐秉业). *Metal Forming Machinery(锻压机械)*[J], 1998(4): 19

[6] Zhou Wei(周 伟), Zhou Lian(周 廉), Yu Zhentao(于振涛). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(6): 1002

[7] Dai Hongwei(戴红卫), Duan Wensen(段文森). *Titanium Industry Process(钛工业进展)*[J], 1999, 1: 30

[8] Zhong Hu. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1998, 102: 103

[9] Li Lintao(李林涛). *Dissertation of Master's Degree(硕士论文)*[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006: 20

[10] Baudin S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 153: 128

[11] GB/T3624. *Titanium and Titanium Alloys Pipe(钛及钛合金管)* [S]. 1995

[12] Li Lintao(李林涛), Zeng Weidong(曾卫东). *Forging &*

- Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2006(6): 131
- [13] Zhao Bin(赵彬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(S): 1002
- [14] Xu Zhiqiang(许志强), Li Xuetong(李学通), Du Fengshan(杜凤山). *Journal of Yanshan University*(燕山大学学报)[J], 2003, 27(2): 122

Optimization of Die Parameters for Titanium Ring Pipe Formation

Dai Yi¹, Zeng Weidong¹, Yang Yingli², Zhao Hengzhang², Zhao Bin^{1,2}, Zhou Yigang¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: A computer simulation system of the ring pipe bending process of titanium alloys was established using MSC/Supershape finite element simulation software on the basis of elastic-plastic finite element theory. The Archimedes spiral was selected as the center axis of the ox-horn die with small bending radius for maintaining the continuity of the curvature radius. Optimization simulation of die parameters such as Archimedes constant, expanding diameter ratio and bending angle was carried out by mid-frequency induction heating method. The conclusions are as follows: (1) the reasonable Archimedes constant can ensure the sound uniformity of the wall thickness and the optimized constant was 1.0 according to the simulation; (2) the too higher expanding diameter ratio would induce easily some defects such as crinkles and thickness-decrease, while the too lower ratio would induce thickness-increase of the abdomen and uniformity-decrease of the wall-thickness; thus the preferred ratio value was 1.33 for the process; (3) if the bending angle was too small, the pipe bending progress was severe and the mechanical properties of the obtained pipe could not satisfy the requirements well; if the angle was too large, the bending progress was stable, but the thrust became difficult as the increase of the thrust resistance; therefore, the preferred bending angle was 40° for the process. The titanium ring pipe with uniform wall thickness, high-voltage-resistance and equal strength was obtained using the above mentioned parameters, detected by the orthogonal test.

Key words: titanium alloy; ring pipe; uniform wall-thickness; parameter optimization

Biography: Dai Yi, Master, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494298, E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn