

# 高强钛合金等壁厚弯管制备研究

赵恒章,张永强,侯红苗,毛小南

(西北有色金属研究院,西安 710016)

**[摘要]** 传统的弯曲工艺由于属于等径弯曲,弯管壁厚存在外侧减薄、内侧增厚的现象。扩径弯曲工艺可以从根本上解决弯管成形中的壁厚不均问题,实现等壁厚,但工艺复杂,成形质量受多种因素影响。高质量钛弯管在要求高强度的同时要求内、外侧壁厚均匀。在理论分析的基础上,进行了高强钛合金热推扩径弯曲试验,研究了成形过程中的金属流动规律,给出了弯曲变形量与扩径量之间的比例关系,制备出了 1300MPa 级的高强钛合金等壁厚弯管,壁厚相对壁厚公差约为 6%。该研究对于钛合金的弯曲加工有一定指导价值。

**关键词:** 高强钛合金;弯管;等壁厚;扩径弯曲;成形

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.03.014



赵恒章

工学博士、高级工程师,主要从事钛合金管材、管件、异型件等研究,现在西北有色金属研究院钛合金研究所工作,承担和参与了 10 余项科研课题研究工作,所研制的钛合金样品多用于航空航天、兵器等领域,目前获中国国防科学技术进步奖三等奖 1 项,有色金属行业二等奖 1 项,获多项专利,发表论文 10 余篇。

钛合金作为一种先进的轻量化结构材料,具有无磁、耐腐蚀性优异、疲劳强度和抗裂纹扩展能力好、焊接性能良好等优点,其弯管构件易于满足轻量化、强韧化和低耗高效等要求,在航空、航天、舰船、高铁、石油化工、汽车等行业具有日益广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。我国航空、航天飞行器高速、远程、轻质和提高燃油效率的跨越式发展,对钛弯管从材料、尺寸精度以及结构方面提出了更高的要求:材料方面钛合金强度需要更高级别,以获得高耐压,实现存贮量的增加,达到远程目的;薄壁(弯管外径  $D$ /弯管壁厚  $t \geq 20$ )、壁厚均匀,以满足轻量化及安全可靠要求;小弯曲半径(弯曲半径  $R/D \leq 2$ )、大弯曲角度( $\geq 90^\circ$ ),以满足结构和安装空间需要。同时,为保证飞行器的稳定性和安全性,弯管成形质量必须非常高。因此,实现钛合金薄壁管材的小弯曲半径大弯曲角度的弯曲成形,保证弯管壁厚的均匀性,成为高质量高强钛合金弯管制备和应用的发展方向。

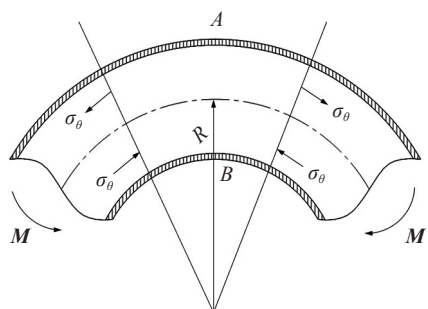
传统弯曲工艺中的等径弯曲不可避免地使弯管存在内侧增厚、外侧减薄的壁厚不均现象<sup>[6-7]</sup>。管材扩径弯曲工艺理论上可以制备出壁厚均匀的弯管,该工艺采用成形模具(羊角芯棒)使管材在扩径变形的同时发生弯曲变形,在周向扩径力的作用下,金属材料沿弯管内侧向两侧和外侧流动,从而避免内侧壁增厚和外侧壁减薄。该工艺过程复杂,成形质量受羊角芯棒模具结构、温度、速度等多种因素影响。目前各参数的确定及交互因素的控制原则,缺乏成熟系统的理论指导,处于反复试验和经验水平,难以有效解决钛合金弯管成形中出现的壁厚不均、起皱、开裂、截面畸变等质量问题<sup>[8-10]</sup>。因此,采用理论+模拟+试验的方法,研究等壁厚钛合金弯管成形技术,制备出高质量的钛合金弯管,具有重要的理论和工程应用价值。

## 理论分析

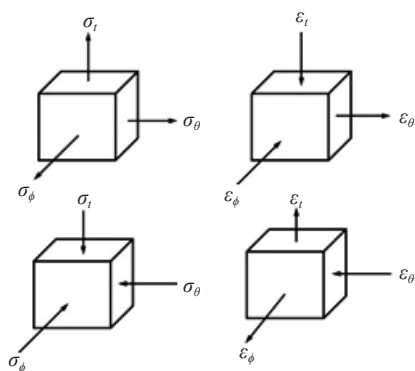
管材弯曲时承受弯曲力矩,当施

加弯曲力矩为  $M$  时,受力情况如图 1 所示 ( $\delta_\theta, \delta_r, \delta_\phi$  为切向应力、壁厚方向应力及轴向应力)。弯曲时,弯管外侧金属材料承受拉应力使得外弧伸长壁厚减薄,内侧金属受到压应力使得内弧缩短壁厚增厚。

由金属塑性变形的体积不变特点可知,轴向应变  $\varepsilon_\phi$ 、切向应变  $\varepsilon_\theta$  和壁厚方向应变  $\varepsilon_r$  之和等于零,即  $\varepsilon_\phi + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0$ 。那么,管径不变 ( $\varepsilon_\phi = 0$ )



(a) 受力状态



(b) 应力应变状态

图1 管材弯曲时的受力及应力应变状态

Fig.1 Stress and strain state of pipe bending

的传统弯曲方法必然导致  $\varepsilon_r \neq 0$ ,因此,外层金属减薄、内侧金属增厚的现象无法从根本上解决。要从根本上解决壁厚不均匀的问题,需要  $\varepsilon_r = 0, \varepsilon_\phi = 0$ ,这样管坯外径的变化在所难免。由于管材弯曲过程中,  $\varepsilon_\theta < 0$ ,必然要求  $\varepsilon_\phi > 0$ 。基于以上分析,扩径弯曲工艺是解决弯管壁厚不均问题的有效方法。但扩径弯曲模具除了要选择合适的扩径比外,还要设计合适的轮廓曲线,使得内侧金属在弯曲时能够向外侧流动。扩径比不当还会引起外侧壁厚的减薄,此外推制速度和温度也是控制壁厚均匀性的重要工艺参数。

钛合金由于强度高、硬化速率快,应采用热推扩径弯曲变形。即在管材扩径弯曲成形工艺中采用中频感应进行局部加热,弯曲过程中通过羊角芯棒在扩径变形的同时,实现管材的弯曲,生产中采用推制机进行连续推制。其工艺过程见图 2。成形时芯杆与羊角芯棒焊接在一起,直管坯内表面及芯棒表面涂刷润滑剂,调节好推制速度及感应加热器参数,到设定温度后,启动推制机,在推力和推板的作用下,直管坯沿着羊角芯棒发生扩径弯曲变形,当完全脱离羊角芯棒后,即获得所需要的成品弯管。一般情况下,羊角芯棒外径与成品弯管内径相同。

热推扩径弯曲工艺具有以下

特点:

(1) 成形过程中,在弯曲变形的同时发生了扩径变形,因而成品弯管的直径要大于管坯直径,其变化程度用扩径比来衡量;

(2) 扩径弯曲成形中,内侧金属向外侧流动,因而该工艺可成形出急弯 ( $R \approx D$ ) 的弯管;

(3) 通过改变管坯长度,可在同一羊角芯棒上一次推制出相同口径的不同弯曲角度的弯管,如  $45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 、近  $360^\circ$  等多种弯曲角度的弯管,生产效率高;

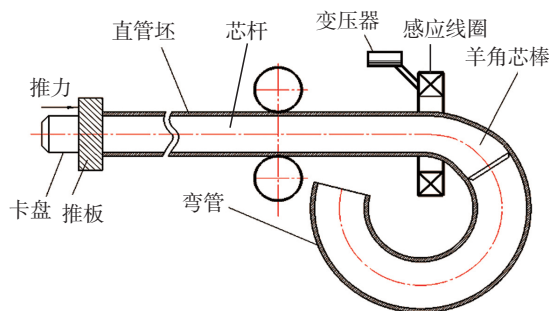
(4) 通过感应加热实现局部加热,除可进行碳钢、合金钢、不锈钢等材质弯管成形以外,更有利于钛合金、高温合金等难变形金属的弯管成形;

(5) 弯管推制机和感应加热器都是专用设备,该工艺一次性投资大,适合大批量生产。

### 试验及方法

Ti-1300 合金是一种新型  $\beta$  钛合金,具有良好的可锻性和高淬透性,该合金时效相应显著,在 1300MPa 强度级别具有良好的强韧性匹配,具有良好的应用前景<sup>[11-12]</sup>。本文以 Ti-1300 合金为研究对象,采用中频感应加热,进行热推扩径弯曲成形试验。

成形设备选用 DN250 中频加热



(a) 工艺过程示意图



(b) 工艺过程实物图

图2 热推扩径弯曲工艺过程

Fig.2 Process of hot push expanding-bending

弯头推制机,推制机由弯头推制机主机、液压泵站、中频电源和中频线圈调整架组成。加热电源部分恒功率输出,采用独有的稳压技术,即使进线电压波动±10%,仍能保持中频输出功率稳定。推制采用两支油缸推制,运行平稳,推制速度可通过流量阀进行调整。设备成形规格范围:Φ15~250mm;弯曲半径:1D~6D;壁厚:2~20mm;材质:碳钢、合金钢及不锈钢等。

成品弯管:Φ100×3-R150×120°,外径100mm,壁厚3mm,弯曲半径150mm,弯曲角度120°。所研制的弯管属于大口径、薄壁( $D/t=100/3=33.3 > 25$ ),大弯曲角(120°),且 $R/D=1.5$ ,对于高强钛合金,成形难度相当大。

成形前在直管坯内壁涂刷添加鳞片的二硫化钼乳液,以减少管坯内壁与羊角芯棒之间的摩擦力。摩擦力过大,容易引起弯管内侧起皱。感应线圈为设计制备的直径为φ250mm的双匝感应线圈。推制速度120mm/min,推制温度830℃。采用红外线测温仪进行温度测量(误差±5℃),测量位置为感应线圈加热位置。

管坯尺寸及扩径比的确定。根据热推扩径弯曲工艺的理论分析,要实现弯管内侧壁厚的不减薄,必须通过偏心扩径和偏心弯曲变形使弯管中性层的位置平移到弯管外侧,因而弯曲后弯管的外侧弧长应与直管坯的长度相等。即:

$$L=L_p \quad (1)$$

式中, $L$ 、 $L_p$ 分别为弯管外侧弧长、直管坯长度。

根据成形过程金属体积不变原理,有:

$$V=V_p \quad (2)$$

式中, $V$ 、 $V_p$ 分别为弯管体积、直管坯体积。

管坯为圆柱体,其体积为:

$$V_p = \frac{\pi}{4} \times (D_p^2 - d_p^2) \times L_p \quad (3)$$

式中, $D_p$ 、 $d_p$ 分别为直管坯外径、内径。

弯管可看作是圆环体,体积为:

$$V = (D_w^2 - d_w^2) \times \frac{\pi}{4} \times R \times \theta \quad (4)$$

式中, $D_w$ 、 $d_w$ 分别为弯管外径、弯管内径; $R$ 、 $\theta$ 分别为弯管弯曲半径、弯曲角度。

根据式(2)~(4)可得:

$$(D_w^2 - d_w^2) \times R \times \theta = (D_p^2 - d_p^2) \times L_p \quad (5)$$

由弧长公式,弯管外侧弧长为:

$$L = \left( R + \frac{D_w}{2} \right) \times \theta \quad (6)$$

由式(1)、(5)、(6)可得:

$$D_p = \frac{D_w(2R+t)}{2R+D_w} \quad (7)$$

通过式(6)、(7)可分别计算直管坯的外径和长度:

$$L_p = \left( R + \frac{D_w}{2} \right) \times \theta = \left( 150 + \frac{100}{2} \right) \times \frac{2}{3} \pi \approx 420(\text{mm})$$

$$D_p = \frac{D_w(2R+t)}{2R+D_w} = \frac{100 \times (2 \times 150 + 3)}{2 \times 150 + 100} \approx 76(\text{mm})$$

通过式(7)可以推导出扩径比为:

$$K = \frac{D_w}{D_p} = \frac{2R+D_w}{2R+t} \approx 1.3 \quad (8)$$

## 结果与讨论

采用网格法物理模拟热推扩径弯曲成形过程,研究金属流动规律。图3是成形前在直管坯外表面刻印的正方形坐标网格,网格尺寸为5mm×5mm。变形后的网格线如图4所示。

为了更清楚地描述扩径弯曲前后网格的变化情况,绘制了图5所示的示意图。可以看出,成形后的网格线发生了明显变化:全部纬线(沿母线方向)均由原来的直线变为弯曲弧线,原先在直管坯上相互平行的各回转经线(沿圆周方向),已不再平行,而是以弯管弯曲中心为原点,沿弯管的弯曲半径方向呈放射状;网格形状由原来的正方形变成内弧短、

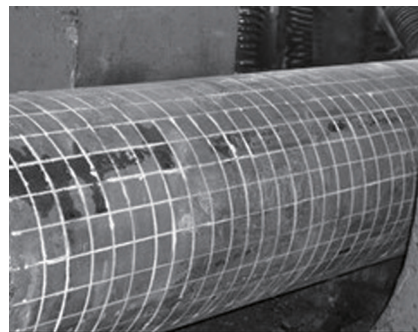
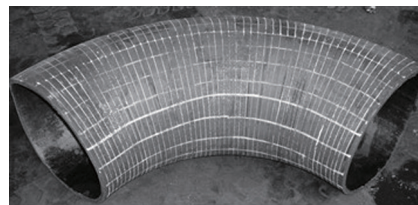
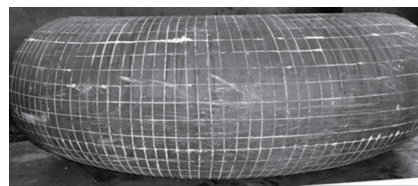


图3 成形前刻画的网格线  
Fig.3 Grid lines before forming

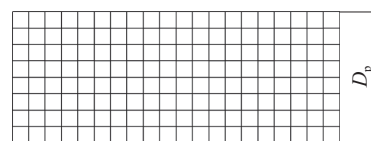


(a) 弯管内侧

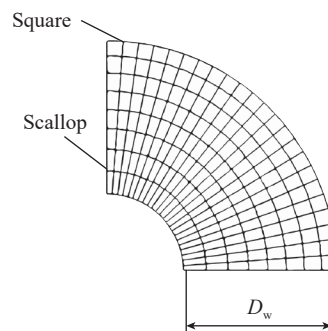


(b) 弯管外侧

图4 变形后的网格线  
Fig.4 Grid lines after forming



(a) 成形前



(b) 成形后

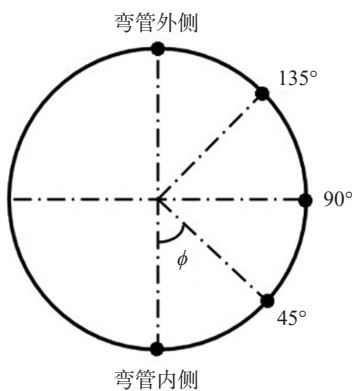
图5 成形前后网格线变化  
Fig.5 Variations of mesh before and after forming

外弧长的扇形；经线伸长、纬线缩短的比例沿内弧向外弧方向逐渐减小，而外弧的正方形网格仍然是正方形，几乎没有发生变化。因此可以得出，扩径弯曲过程中，中性层平移到了外弧，不但发生了弯曲变形，而且发生了偏心扩径变形。扩径弯曲成形过程实际上是弯曲变形与偏心扩径变形的叠加，弯曲变形使内弧管壁在弯曲压应力作用下增厚，偏心扩径发生在弯管内弧一侧，它使内弧金属在环向拉应力作用下向外弧流动，使得管壁减薄，因此只要弯曲变形量与偏心扩径量在弯管成形过程中保持一定的比例，就可以保证弯管壁厚的均匀性。在成形过程中，弯管内弧金属在环向扩径力和轴向弯曲压应力的作用下，从内弧沿两侧向外弧对称流动，为保证弯管内弧金属塑性流动过程和外弧金属弯曲变形过程的协调性和连续性，弯管内、外弧之间的金属网格必须呈等腰梯形。

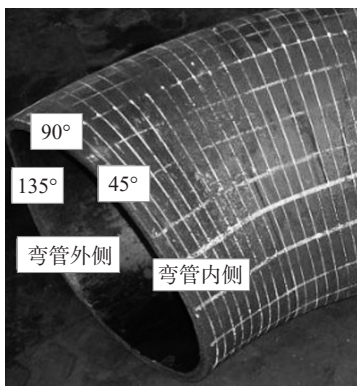
网格尺寸的变化特征点位置(图6)及其应变如表1所示。可以看出，内弧的网格变化最剧烈，轴向产生压缩变形，网格缩短；径向产生拉伸变形，网格伸长，从外到内金属变形程度逐步加剧。

可以看出， $\varepsilon_\phi \geq 0$ ，发生了扩径变形； $\varepsilon_\theta \leq 0$ ，发生了压缩变形；

$\varepsilon_\phi \approx |\varepsilon_\theta| \gg |\varepsilon_r|$ ，周向应变量和轴向应变变量远大于弯管厚度方向的应变变量，壁厚方向基本没有发生变形，周向的扩径拉伸和轴向的弯曲压缩为



(a) 示意图



(b) 实物图

图6 网格尺寸测量特征点位置  
Fig.6 Feature point location of grid

表1 网格尺寸变化及其应变  
Table 1 Grid size change and its strain

项目	测点1 (弯管内侧)	测点2 (45°)	测点3 (90°)	测点4 (135°)	测点5 (弯管外侧)
$L_\phi/\text{mm}$	7.49	6.88	5.76	5.28	5
$L_\theta/\text{mm}$	3.13	3.42	4.16	4.56	5
$\varepsilon_\phi$	0.404	0.319	0.141	0.054	0
$\varepsilon_\theta$	-0.468	-0.380	-0.184	-0.092	0
$\varepsilon_r$	-0.064	-0.061	-0.043	-0.038	0

注： $L_\phi$ 、 $L_\theta$ 为网格周向边长及网格轴向边长； $\varepsilon_\phi$ 、 $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_r$ 为轴向、切向、壁厚方向应变。

主要变形；变形过程为纯剪比例变形过程。

从实际情况来看， $\varepsilon_r \neq 0$ ，弯管各部位的壁厚并不相等。由厚度方向的应变  $\varepsilon_r$  可以求得环形管的实际壁厚(式(9))，以检测壁厚减薄量是否超差。

$$t = 5e^{\varepsilon_r} \quad (9)$$

当  $|\varepsilon_r|$  最大时，即弯管壁厚减薄或增厚的最大值，将  $\varepsilon_r = -0.064$  代入式(9)得：

$$t = 5e^{-0.064} = 4.69(\text{mm})$$

弯管壁厚最大变化量  $\Delta = 0.31\text{mm}$ ，相对壁厚公差约为6%，壁厚相当均匀。

### 结论

(1) 扩径弯曲成形工艺是解决弯管弯曲过程中壁厚不均的有效方法，可以实现等壁厚弯管的制备。

(2) 扩径弯曲成形是弯曲变形与偏心扩径变形的叠加。弯曲变形使得弯管内弧受压壁厚增厚，外弧受拉减薄，而偏心扩径变形使得金属从内弧一侧向外弧流动，弯曲变形量和扩径量存在一定的比例关系。

(3) 相对弯曲半径  $R/D$  与扩径比存在如下关系： $R/D \approx 1/(2K-1)$ 。

### 参考文献

[1] 赵永庆, 马朝利, 常辉, 等. 1200MPa级新型高强度钛合金[J]. 中国材料进展, 2016, 35(12): 914-918.

ZHAO Yongqing, MA Chaoli, CHANG Hui, et al. New high strength and high toughness titanium alloy with 1200MPa[J]. Materials China, 2016, 35(12): 914-918.

[2] 张美娟, 南海, 鞠忠强, 等. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 13-19.

ZHANG Meijuan, NAN Hai, JU Zhongqiang, et al. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.

- [3] 叶勇,王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. 材料导报, 2012, 26(20): 360-363.
- YE Yong, WANG Jinyan. An overview on application status and processing technology development of titanium alloy[J]. Materials Review, 2012, 26(20): 360-363.
- [4] 赵蒙, 李萍, 李成铭, 等. TA15 钛合金高温变形过程的介观模拟计算[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 927-931.
- ZHAO Meng, LI Ping, LI Chengming, et al. Mesoscale simulation on plastic deformation of TA15 titanium alloy at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 927-931.
- [5] ADIB A M L, BAPTISTA C A R P, BARBOZA M J R, et al. Aircraft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1605-1617.
- [6] 李鹏亮, 孙宾, 张志, 等. 薄壁小弯曲半径钛合金管材弯曲技术研究[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 113-115.
- LI Pengliang, SUN Bin, ZHANG Zhi, et al. Study on bend forming process for titanium alloy tube with thin-walled and small radius[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 113-115.
- [7] 古涛, 鄂大辛, 任颖, 等. 管材弯曲壁厚变形的有限元模拟与试验分析[J]. 模具工业, 2006, 32(4): 17-20.
- GU Tao, E Daxin, REN Ying, et al. Finite element simulation and experimental analysis of wall thickness deformation in the process of pipe bending[J]. Die & Mould Industry, 2006, 32(4): 17-20.
- [8] 黄丽丽, 鹿晓阳. 碳钢弯管的热推制成形过程数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(5): 80-85.
- HUANG Lili, LU Xiaoyang. Finite element simulation of hot-pushing pipe-bending process for carbon steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(5): 80-85.
- [9] 廖勇刚, 余心宏, 孙现龙. 塑性变形理论在小半径弯管中的应用[J]. 锻压技术, 2006(4): 115-118.
- LIAO Yonggang, YU Xinhong, SUN Xianlong. Plastic deformation theory application in pipe bending with small bending radius[J]. Forging and Stamping Technology, 2006(4): 115-118.
- [10] 陶杰, 刘红兵. 金属管件冷成形技术研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(4): 1-5.
- TAO Jie, LIU Hongbing. Reviewing of cold forming technology for T-shape tube and elbow[J]. Machine Building & Automation, 2009, 38(4): 1-5.
- [11] 赵恒章, 肖林, 赵彬, 等.  $\beta$  钛合金环形管热推扩质量分析与控制[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 995-999.
- ZHAO Hengzhang, XIAO Lin, ZHAO Bin, et al. Quality analysis and control of ring pipe hot push-expanding of  $\beta$  titanium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 995-999.
- [12] 赵映辉, 葛鹏, 赵永庆, 等. Ti-1300 合金的热变形行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 46-49.
- ZHAO Yinghui, GE Peng, ZHAO Yongqing, et al. Hot deformation behavior of Ti-1300 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 46-49.

通讯作者: 赵恒章, E-mail: 89061561@qq.com。

## Preparation of High Strength Titanium Alloy Elbow With Equal Wall Thickness

ZHAO Hengzhang, ZHANG Yongqiang, HOU Hongmiao, MAO Xiaonan  
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**[ABSTRACT]** In the process of conventional bending, the inner-arc side of pipe is always subjected to compress and the outer-arc side is subjected to tension during bending, as a result, non-uniform thickness of the pipe is often produced. The expanding-bending technology is an efficient way to solve this issue. However, this technology has a complex process and the forming quality might be affected by many factors. High quality titanium elbow requires high strength and uniform wall thickness. On the basis of theoretical analysis, the hot expanding-bending technology test of high strength titanium alloy was carried out. The flow law of metal in the forming process was studied. The proportional relationship between the bending deformation amount and the expansion diameter was given. Finally, the uniform thickness of 1300MPa grade elbow were obtained through the hot expanding-bending technology by means of inducing heating, and the relative wall thickness tolerance of the wall thickness was about 6%. This study is of certain guiding value for the bending process of titanium alloy.

**Keywords:** High-strength titanium alloy; Elbow; Equal wall thickness; Expanding-bending; Forming

(责编 逸飞)