

钛合金薄壁弯管热气胀工艺变形行为

付坤宁¹, 杨小克², 杨 波³, 郑凯伦⁴

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国航天科工三院 航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000;

3. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043; 4. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对 TC4 钛合金薄壁弯管弯曲过程中的内侧起皱、外侧开裂、横截面畸变和弯曲回弹等成形缺陷, 提出了钛合金薄壁弯管热气胀成形工艺, 解决了以上成形缺陷, 并通过调控工艺参数控制 TC4 钛合金的应变硬化与应变速率硬化的协同作用, 提升了薄壁弯管的壁厚均匀性。在此基础上, 开展了 TC4 钛合金薄壁弯管的热气胀成形实验。最终成形出满足产品使用要求的 $\Phi 206\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times R495\text{ mm}$ 的 TC4 钛合金薄壁弯管, 最大不圆度仅为 0.25%, 最大减薄率为 16.88%。结果表明: 在 TC4 钛合金薄壁弯管热气胀成形过程中, 控制成形温度及应变速率等主要工艺参数, 可以提高薄壁弯管的成形精度和壁厚均匀性, 显著改善成形弯管的产品质量。

关键词: 钛合金管材; 热气胀成形; 应变硬化; 应变速率硬化; 变形均匀性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.017

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0123-07

Deformation behavior of titanium alloy thin-walled bent tube during hot gas bulging process

Fu Kunning¹, Yang Xiaoke², Yang Bo³, Zheng Kailun⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Aerospace Hiwing (Harbin) Titanium Industry Co., Ltd., The Third Academy of China CASIC, Harbin 150000, China;

3. Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd. AECC, Shenyang 110043, China;

4. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: For the forming defects of inner wrinkling, outer cracking, sectional distortion and bending springback of TC4 titanium alloy thin-walled bent tube during bending process, the hot gas bulging process of titanium alloy thin-walled bent tube was proposed and the above forming defects were solved. The wall thickness uniformity of thin-walled bent tube was improved by adjusting the process parameters to control the cooperative regulation of strain and strain rate hardening for TC4 titanium alloy. Based on the above theory, the hot gas bulging experiment of TC4 titanium alloy thin-walled bent tube was carried out. Finally, the TC4 titanium alloy thin-walled bent tube of $\Phi 206\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times R495\text{ mm}$ which met the product use requirements was formed with the maximum out-of-roundness of 0.25% and the maximum thinning rate of 16.88%. The results show that during the hot gas bulging process of TC4 titanium alloy thin-walled bent tube, the forming accuracy and wall thickness uniformity of thin-walled bent tube can be improved by controlling the main process parameters such as forming temperature and strain rate to significantly improve the product quality of formed bent tube.

Key words: titanium alloy tube; hot gas bulging; strain hardening; strain rate hardening; deformation uniformity

钛合金具有高比强度和良好的耐腐蚀性能, 由其制造的钛合金薄壁构件被广泛应用于航空、航天

领域^[1]。特别是管状部件被大量装配在航天、航空系统的管路中, 因此, 其成形质量直接决定了飞行器的安全^[2]。薄壁(径厚比>50)管材在弯曲过程中更容易发生失稳, 产生褶皱和截面畸变等成形缺陷。因此, 目前此类薄壁弯管主要通过先将板材冲压为两个半管, 再拼焊在一起的方法制造^[3]。这个过程中不可避免地产生了两条轴向焊缝, 并由此产生了产品质量差、生产周期长和材料利用率低等问题。

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5200052525)

作者简介: 付坤宁(1991-), 男, 博士研究生

E-mail: 19b909110@stu.hit.edu.cn

通信作者: 郑凯伦(1988-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhengkailun@dlut.edu.cn

为降低焊缝风险,并响应航空、航天构件整体化的发展需求,部分研究人员通过采用在管内增加填充物的方法进行弯曲,如:宋鸿武等^[4]通过颗粒介质辅助推弯工艺成形了 0Cr18Ni9 不锈钢薄壁弯管($\Phi 144\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times R208\text{ mm}$);苑世剑等^[5]通过充液压弯工艺成形了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢薄壁弯管($\Phi 182\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times R360\text{ mm}$)。但是,此类方法并不适用于 TC4 钛合金薄壁管的弯曲成形。TC4 钛合金管材在室温变形时,塑性差、变形抗力高且易回弹^[6],因此,多采用热成型的方式进行弯曲,但该类方法使用的填充物,如水、低熔点合金和沙子等,由于自身的物理特性又或是支撑内压不可控等客观因素的制约,不适用于 TC4 钛合金薄壁弯管的弯曲成形。

热气胀成形是近些年来发展起来的一种塑性成形工艺,主要应用于金属薄壁构件的高温成形^[7]。使用热气胀成形 TC4 钛合金薄壁弯管,可使管坯在变形过程中处于双拉应力状态,从根本上解决拉弯、压弯和推弯等成形方法中由于管材内外侧所受应力状态不同而导致的内侧起皱和外侧减薄等成形缺陷。因此,本文以航空管路系统中外径 D 为 $\Phi 206\text{ mm}$ 、壁厚 t_i 为 1.5 mm 、弯曲半径 R 为 495 mm 、弯曲角度为 35° 的 TC4 钛合金弯管为研究对象,基于 TC4 钛合金的应变和应变速率硬化机制,研究了热气胀工艺参数对 TC4 钛合金薄壁弯管尺寸精度及壁厚均匀性的影响。彻底解决了 TC4 钛合金薄壁弯管制造过程中的起皱、开裂及截面畸变等常见成形缺陷,并通过对成形过程中成形温度及应变速率的调控提升了薄壁弯管的壁厚均匀性。

1 TC4 钛合金薄壁弯管双调热气胀成形技术原理

TC4 钛合金在温成形过程中,流变应力随着应变的增加而增加,即发生应变硬化和应变速率硬化,简称“双硬化机制”。这一现象的发生有助于提升板材塑性加工过程中的变形均匀性,显著消除板材成形过程中的局部颈缩。对于 TC4 板材的高温变形过程,应变硬化及应变速率硬化均与温度和变形速率有关。因此,为最大限度地降低热加工过程中局部减薄对 TC4 钛合金薄壁构件产品质量的影响,需建立 TC4 钛合金双硬化窗口,便于制定最优的工艺路线以控制 TC4 钛合金板材的应变及应变速率硬化特性。

1.1 TC4 钛合金的硬化机制

金属材料变形过程中,不但要考虑成形温度对其的影响还要考虑应变速率的影响,林建国等^[8]提出了综合考虑成形温度及应变速率的金属材料新型成形工艺窗口,根据金属材料塑性变形过程中微观组织的演变,将工艺区间分为 3 个区间,即弹塑性变形区、弹-粘塑性区和粘塑性区,如图 1 所示,其中 T 为成形温度, T_m 为熔点。

TC4 钛合金的弹塑性变形区域通常位于曲线 1 的上方,此时 TC4 钛合金的流变应力可以表示为式 (1)。在此区域内,TC4 钛合金在塑性变形过程中由于温度较低且变形速率较快 ($650\text{ }^\circ\text{C}/0.001\text{ s}^{-1}$),因此,位错密度随应变的增加而增大,并在晶粒内部可以观察到大量滑移带^[9]。TC4 钛合金在此条件下发生以位错塞积为主要变形机制的弹塑性变形,此时应变速率硬化可以忽略不计,即应变速率硬化指数 $m\approx 0$ 。

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

式中: σ 为真实应力; K 为强度系数; ε 为真实应变; n 为应变硬化指数。

TC4 钛合金的弹-粘塑性变形区域通常位于曲线 1 和曲线 2 之间。在此区域内应变硬化和应变速率硬化同时发生,即 $n\neq 0$ 且 $m\neq 0$,此时 TC4 钛合金的流变应力可以表示为式 (2)。一般认为 TC4 钛合金在此区域内既能发生位错塞积又能发生晶粒滑移或旋转,丁嘉健等^[10]通过 TC4 钛合金的等温拉伸实验 ($800\text{ }^\circ\text{C}/0.004\text{ s}^{-1}$) 证实了这一变形机制。

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} 。

TC4 钛合金的粘塑性变形区域位于曲线 2 的下方。此时应变硬化可以忽略不计,即 $n\approx 0$,TC4 钛合金的流变应力可以表示为式 (3)。此时的主要变形机制为晶粒滑移或旋转。Alabort E 等^[9]使用原位扫描电镜观察到了 TC4 钛合金高温变形过程中 ($900\text{ }^\circ\text{C}/0.0002\text{ s}^{-1}$) 的晶粒滑移现象,并证实在此实验条件下几乎无位错塞积产生的滑移带。

$$\sigma = K\dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

在充分考虑成形温度及应变速率对 TC4 钛合金硬化行为影响的基础上,结合文献 [9] 和文献 [10] 确定了 TC4 钛合金的 3 种硬化行为 (应变硬化、应变 & 应变速率硬化、应变速率硬化) 的典型工艺条件。

1.2 TC4 钛合金板材的均匀变形理论

材料塑性变形过程中的硬化特性可以显著减少局部颈缩和失效,是提升金属板材变形均匀性的重

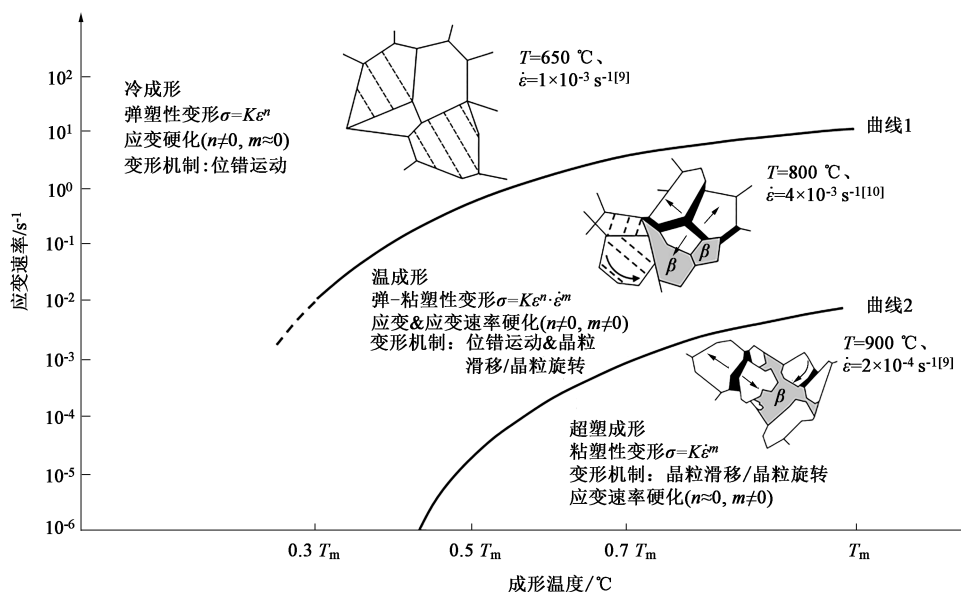


图1 成形温度及应变速率对 TC4 钛合金变形机制的影响

Fig. 1 Effect of forming temperature and strain rate on deformation mechanism of TC4 titanium alloy

要参数^[11]。基于已经被证实的 TC4 钛合金热变形过程中的硬化特性, 计算了不同成形温度及应变速率下 TC4 钛合金的应变硬化指数 n 值和应变速率硬化指数 m 值, 并采用 Fields-Backofen 模型对 TC4 钛合金的真实应变-真实应力曲线进行了描述, 结果如图 2 和图 3 所示。

从图 2 中可以看出, 当应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 成形温度显著影响 TC4 钛合金的变形抗力及硬化行为。TC4 钛合金的变形抗力随着成形温度的上升而显著降低, 在此过程中真实应力-真实应变曲线的斜率减小, 并随成形温度的上升逐渐变得平缓, 当成形温度为 800 °C 时硬化机制和软化机制达到动态平衡, 曲线近似一条直线, 这表明 TC4 钛合金的硬化行为减弱了。

1952 年, Hill R^[12] 考虑应变硬化对板材成形性的影响, 率先提出了预测板材均匀应变 ε_u 的计算公式 (式 (4))。在此基础上, Hart E W^[13] 考虑了应变速率对板材变形均匀性的影响, 在式 (4) 中引入应变速率硬化指数 m 值, 从而得到式 (5)。图 2b 为使用式 (4) 和式 (5) 预测的 TC4 钛合金板材在不同成形温度下的均匀应变, 可以看出 TC4 钛合金板材的变形均匀性随成形温度的上升而下降, 与此同时应变速率硬化却能显著提升 TC4 钛合金热变形过程中的变形均匀性。

$$\varepsilon_u = 2n \quad (4)$$

$$\varepsilon_u = 2n/(1-m) \quad (5)$$

图 3 为 750 °C 时不同应变速率下 TC4 钛合金的

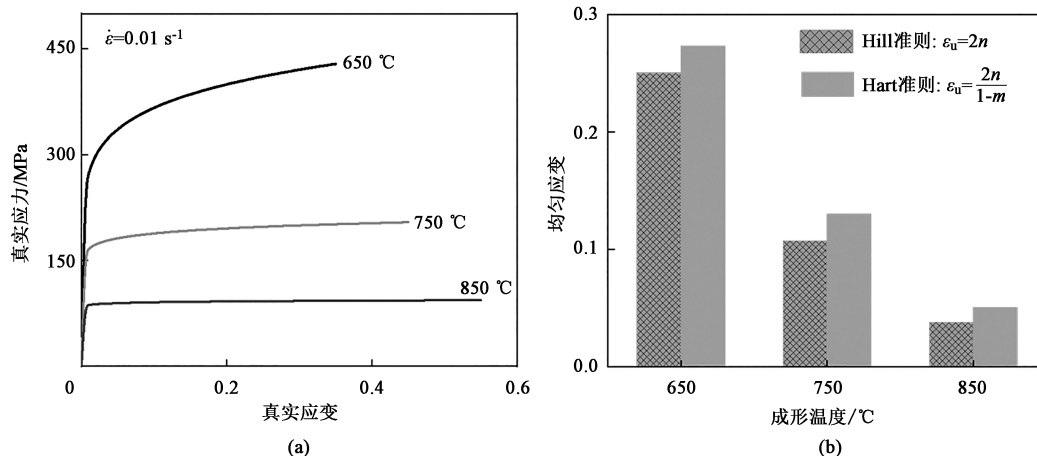


图2 成形温度对 TC4 钛合金真实应变-真实应力曲线 (a) 和均匀应变 (b) 的影响

Fig. 2 Effect of forming temperature on true stress-true strain curves (a) and uniform strain (b) for TC4 titanium alloy

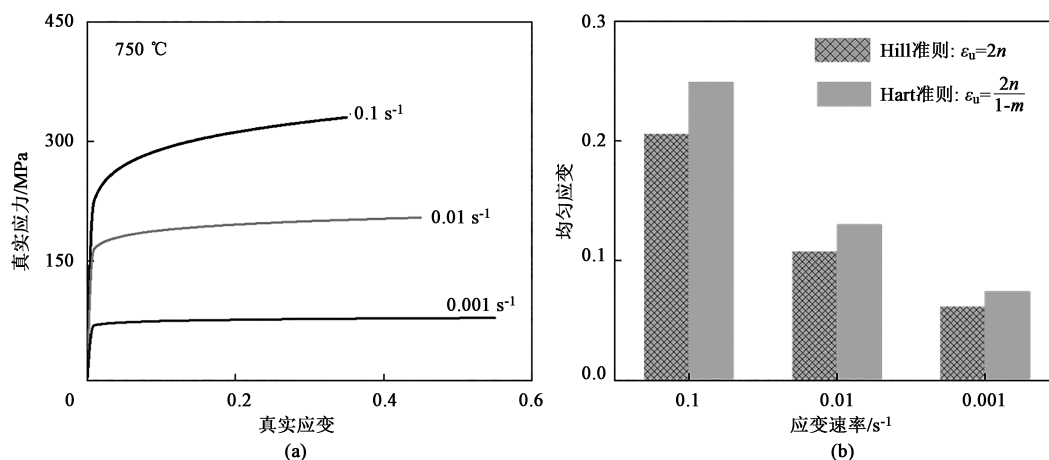


图3 应变速率对 TC4 钛合金真实应力-真实应变曲线 (a) 和均匀应变 (b) 的影响

Fig. 3 Effect of strain rate on true stress-true strain curves (a) and uniform strain (b) for TC4 titanium alloy

真实应力-真实应变曲线,可以看出 TC4 钛合金板材在热变形时,其变形抗力随应变速率的降低而降低,并且材料的硬化能力下降,并由此导致了均匀应变的降低。

2 实验材料与方法

2.1 材料与构件

技术协议规定弯管外侧壁厚不得小于 1.3 mm,经计算实验所用的管坯壁厚不得小于 1.58 mm,因此,实验使用壁厚为 1.6 mm、外径为 $\Phi 171$ mm、长度为 379.5 mm 的 TC4 钛合金管材,热处理状态为 M 态,其化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy
(% , mass fraction)

Al	V	Fe	H	C	N	O	Ti
6.10	4.20	0.15	0.007	<0.01	<0.01	0.13	余量

本研究以航空管路系统中典型的弯管零件为研究对象,其外径为 $\Phi 206$ mm、壁厚为 1.5 mm、弯曲半径为 495 mm、弯曲角度为 35°,利用式 (6) 计算其弯曲难度系数 BF ,为 55.50^[14]。弯曲后不得起皱和开裂,表面光滑平整,弯管截面圆度在 0.5 mm 以下,壁厚公差不得大于 0.1%D。

$$BF = \frac{D/t_i}{R/D} = \frac{D^2}{Rt_i} \quad (6)$$

式中: D 为弯管的外径; t_i 为弯管的壁厚; R 为弯管的弯曲半径。

该弯管零件具有以下成形难点: (1) 弯管的弯曲半径约为 $2.4D$,壁厚与直径比仅为 0.007。在弯曲过程中极易出现弯管内侧起皱、外侧开裂和截面畸变等成形缺陷; (2) 弯管使用的材料为 TC4 钛合金,高的屈弹比会导致钛合金管材在弯曲成形后产生显著回弹,这将严重影响产品的尺寸精度。

本文设计了如下成形方案:采用热气胀的方法一次成形大尺寸 TC4 钛合金薄壁弯管,在充分保证尺寸精度的同时,通过调控工艺参数实现 TC4 钛合金应硬化与应变速率硬化的协同作用,在提高钛合金塑性、降低回弹的同时,成形出壁厚均匀的薄壁弯管构件。

2.2 热气胀成形实验

图 4a 为自行研制的 TC4 钛合金薄壁弯管热气胀设备。该装置主要包括单动压力机、高温加热单元和内压控制系统 3 部分。实验前预先在 TC4 薄壁钛管两端焊接厚度为 4 mm 的 TC4 钛合金圆形封板,封板直径为 $\Phi 167.8$ mm。实验时,首先将焊好封板的薄壁管坯放置在模具中,如图 4b 所示;然后安装上模并合模,将模具整体放入 250 t 热成形压力机上;最后连接好气路并开始加热,本实验使用 15 MPa 氩气瓶作为气源。

本研究开展了不同成形温度及应变速率下的 TC4 钛合金薄壁管胀形实验。选取 3 个实验条件 (650 °C/ 2.14×10^{-3} s⁻¹, 785 °C/ 1.61×10^{-3} s⁻¹, 885 °C/ 7.14×10^{-5} s⁻¹),分别对应 TC4 钛合金发生的 3 种硬化行为 (应变硬化、应变 & 应变速率硬化、应变速率硬化) 的典型工艺条件。

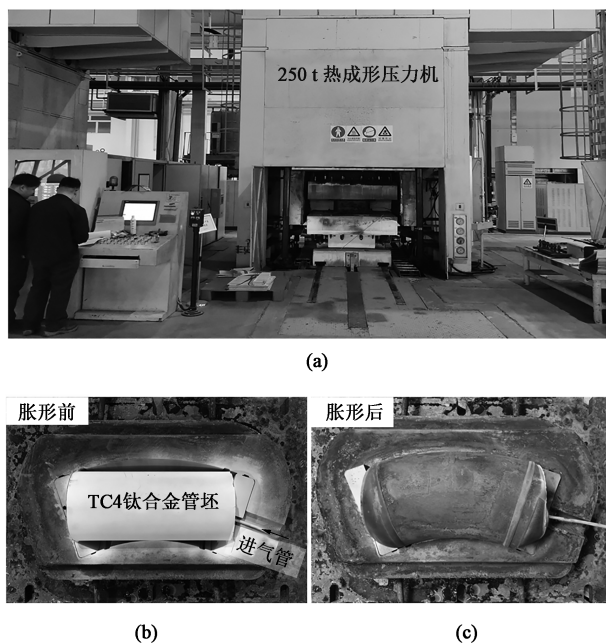


图4 TC4钛合金弯管热气胀工艺装置
(a) 实验装置 (b) TC4钛合金管坯及实验模具
(c) 热气胀成形后的TC4钛合金薄壁弯管

Fig. 4 Device of hot gas bulging process for TC4 titanium alloy bent tube

(a) Experimental device (b) Experimental dies and TC4 titanium alloy tube blank (c) TC4 titanium alloy thin-walled bent tube after hot gas bulging

3 结果与讨论

3.1 成形试样

图5为3种典型工艺条件下的TC4钛合金热气胀成形的弯管。可以看出: 当成形温度为650℃时, 由于TC4钛合金的变形抗力较大, 管坯几乎未发生塑性变形, 因此, 未成形出所需的零件。根据热气胀成形原理, 管坯发生塑性变形所需的理论屈服内压 p 如式(7)所示:

$$p = \frac{2\sigma_s t_0}{D_0} \quad (7)$$

式中: t_0 为原始管坯壁厚; D_0 为原始管坯外径; σ_s 为材料在特定温度与应变速率下的流动应力。

根据式(7)计算出TC4钛合金在650℃/2.14×10⁻³ s⁻¹条件下(图5a)热气胀成形的理论屈服内压为5.72 MPa。但实际胀形时, 当内压为2 MPa时, 封板连接处即发生开裂漏气, 因此, 难以成形出满足尺寸要求的零件。随着成形温度的提升和应变速率的降低, TC4钛合金的变形抗力大幅降低, 在785℃/1.61×10⁻³ s⁻¹条件下(图5b)热气胀成形所需的理论屈服内压仅为0.96 MPa。因此, 当内压为1 MPa时, 可以成形出满足尺寸要求的零件。图5c为885℃/7.14×10⁻⁵ s⁻¹条件下热气胀成形的

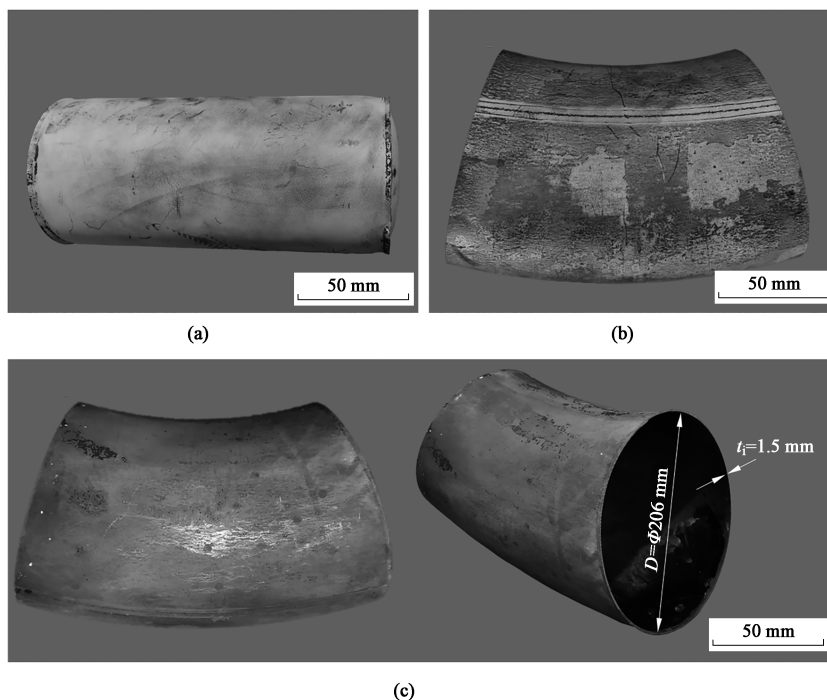


图5 3种典型工艺条件成形的TC4钛合金薄壁弯管零件

(a) 650℃/2.14×10⁻³ s⁻¹ (b) 785℃/1.61×10⁻³ s⁻¹ (c) 885℃/7.14×10⁻⁵ s⁻¹

Fig. 5 TC4 titanium alloy thin-walled bent tube parts formed by three typical process conditions

TC4 钛合金弯管, 目视外形尺寸与 $785\text{ }^{\circ}\text{C}/1.61 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 条件下成形的弯管无区别, 经测量所成形的弯管外径为 $\Phi 206\text{ mm}$ 、弯曲半径为 495 mm 、弯曲角度为 35° 。

3.2 成形精度

为比较工艺参数对 TC4 钛合金弯管尺寸精度的影响, 使用 GOM Scan1 光学三维扫描仪对 $785\text{ }^{\circ}\text{C}/1.61 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 和 $885\text{ }^{\circ}\text{C}/7.14 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 这两个工艺条件下成形的弯管进行了三维扫描, 其尺寸精度分布如图 6a 所示。从图 6a 中可以看出, 在 $885\text{ }^{\circ}\text{C}/7.14 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 条件下成形的 TC4 钛合金弯管的尺寸精度更高。对此可能的原因是: 成形温度上升, 材料的屈弹比下降, 因此, 出模后的回弹更小。众所周知, 截面畸变是弯管常见的成形缺陷之一, 通常用式 (8) 计算弯管的截面不圆度 Δ , 从而定量地描述弯

管类零件的截面畸变。

$$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% \quad (8)$$

式中: D_{\max} 和 D_{\min} 分别为弯管横截面的最大和最小直径。

由图 6b 可以看出, 最大不圆度通常位于中心横截面, 并且向两端逐渐减小; 在 $885\text{ }^{\circ}\text{C}/7.14 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 条件下弯管的最大不圆度为 0.25% , 略低于 $785\text{ }^{\circ}\text{C}/1.61 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 条件下的 0.32% , 因此, 在 $885\text{ }^{\circ}\text{C}/7.14 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 条件下成形的弯管的成形精度更高。但两种实验条件制备的 TC4 钛合金薄壁弯管均满足产品使用要求。相比于拉弯、推弯和充液压弯等传统管材弯曲工艺, 使用热气胀成形的薄壁弯管的尺寸精度最高, 特别适合制造具有较高尺寸精度要求的航空构件。

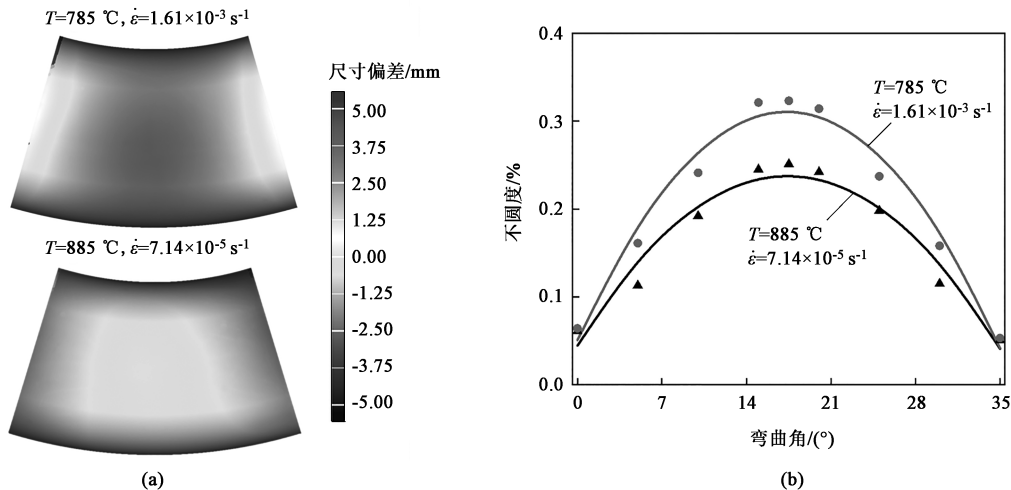


图 6 成形温度 (a) 及应变速率 (b) 对 TC4 钛合金薄壁弯管成形精度的影响

Fig. 6 Effect of forming temperature (a) and strain rate (b) on forming accuracy of TC4 titanium alloy thin-walled bent tube

3.3 壁厚分布

使用线切割沿分模线对 TC4 钛合金弯管进行切割, 并沿分模线用千分尺测量其内外侧壁厚。图 7 为不同工艺条件下制造的 TC4 钛合金弯管弯曲内外侧壁厚的变化规律。从图 7 中可以看出, 弯管的内侧和外侧在热气胀过程中均发生了不同程度的减薄, 这是因为热胀形过程中管坯轴向和环向均受到拉应力。成形条件为 $785\text{ }^{\circ}\text{C}/1.61 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 和 $885\text{ }^{\circ}\text{C}/7.14 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 时, 弯管的最大减薄率分别为 16.88% 和 21.88% , 由此可以看出: 降低成形温度并提高成形速度使 TC4 钛合金在温成形的工艺区间成形, 有利于通过应变 & 应变速率硬化的发生提高板材的变形均匀性, 从而有效抑制集中减薄的发生。

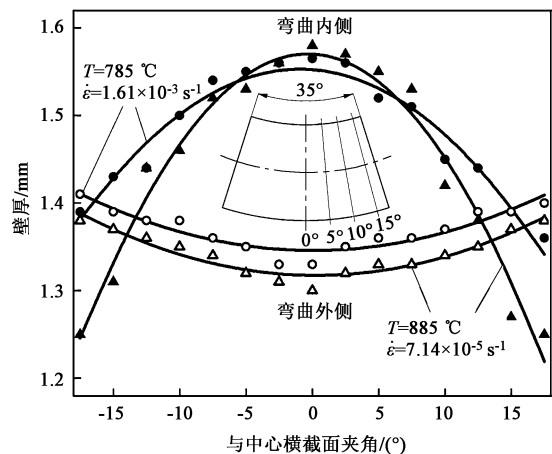


图 7 TC4 钛合金薄壁弯管的壁厚分布

Fig. 7 Wall thickness distributions of TC4 titanium alloy thin-walled bent tube

4 结论

(1) 提出了钛合金薄壁弯管热气胀成形工艺,通过柔性气体协同加载使管坯在变形过程中处于双拉应力状态,这从根本上解决了 TC4 钛合金薄壁弯管塑性成形过程中的内侧起皱、外侧开裂、横截面畸变和弯曲回弹等常见成形缺陷。

(2) 基于构建的 TC4 钛合金成形工艺窗口,通过调控工艺参数控制 TC4 钛合金应变硬化与应变速率硬化的协同作用,提升了薄壁弯管的壁厚均匀性。

(3) 通过热气胀实验,成形出 $\Phi 206 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times R495 \text{ mm}$ 的 TC4 钛合金薄壁弯管,证实了在温变形区间成形时,TC4 钛合金既能发生应变硬化和应变速率硬化又能大幅降低材料变形抗力,在满足产品尺寸精度的前提下,提高 TC4 钛合金弯管的壁厚均匀性,相比于冷成形及超塑性成形,最大减薄率提升 5%。

参考文献:

- [1] Williams J C, Boyer R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components [J]. *Metals*, 2020, 10 (6): 705.
- [2] Zhu L, Li N, Childs P R N. Light-weighting in aerospace component and system design [J]. *Propulsion and Power Research*, 2018, 7 (2): 103-119.
- [3] Wang K H, Wang L L, Zheng K L, et al. High-efficiency forming processes for complex thin-walled titanium alloys components: State-of-the-art and perspectives [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, 2 (3): 032001.
- [4] Song H W, Xie W L, Zhang S H, et al. Granular media filler assisted push bending method of thin-walled tubes with small bending radius [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 198: 106365.
- [5] Hu L, Teng B G, Yuan S J. Effect of internal pressure on hydro bending of double-layered tube [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226 (10): 1717-1726.
- [6] Wang L, Wang Z L, Zhang S Y, et al. Springback prediction model of Ti-6Al-4V tube warm bending based on modified JC model considering variable temperature field [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, 1270 (1): 012048.
- [7] Wang K H, Liu G, Zhao J, et al. Experimental and modelling study of an approach to enhance gas bulging formability of TA15 titanium alloy tube based on dynamic recrystallization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259: 387-396.
- [8] Zhou W B, Lin J G, Balint D S, et al. Clarification of the effect of temperature and strain rate on workpiece deformation behaviour in

metal forming processes [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 171: 103815.

- [9] Alabort E, Kontis P, Barba D, et al. On the mechanisms of superplasticity in Ti-6Al-4V [J]. *Acta Materialia*, 2016, 105: 449-463.
- [10] 丁嘉健, 刘家河, 杨展铭, 等. TC4 钛合金板材高温热拉伸性能的研究 [J]. *科技创新与应用*, 2019, 2045 (11): 41-45.
- Ding J J, Liu J H, Yang Z M, et al. Study of high temperature tensile properties of TC4 titanium alloy sheets [J]. *Technology Innovation and Application*, 2019, 2045 (11): 41-45.
- [11] Min J, Stoughton T B, Carsley J E, et al. Compensation for process-dependent effects in the determination of localized necking limits [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 117: 115-134.
- [12] Hill R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1952, 1 (1): 19-30.
- [13] Hart E W. Theory of the tensile test [J]. *Acta Metallurgica*, 1967, 15 (2): 351-355.
- [14] Mentella A, Strano M. Rotary draw bending of small diameter copper tubes: Predicting the quality of the cross-section [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226 (2): 267-278.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部