

一种无缝柱形钛内衬的旋压工艺研究

温涛¹, 张绪虎¹, 任飒爽², 赵磊¹, 阴中炜¹

(1. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2. 北京航天长征科技信息研究所, 北京 100076)

摘要: 针对无缝钛内衬收口旋压创新性地提出“反旋轨迹设计+内表面压力打磨”的工艺方案, 研制出封头内、外型面均满足设计要求、内表面无较深褶皱(尤其 R 角处较光滑)、壁厚为 0.6 mm 的无焊缝柱形钛内衬。同时, 详细阐述了旋压工艺参数如旋压方式、旋压道次及旋压温度等的设计和实际工艺过程。

关键词: 无焊缝; 钛内衬; 收口旋压

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)S2-292-05

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性好、优良的高低温性能等特性, 近年来用其制备的结构部件(如钛合金气瓶及其为内衬的复合材料气瓶)在航空航天领域获得了广泛应用^[1-4]。由于钛及钛合金的塑性较差, 收口旋压后的钛气瓶或内衬的内表面易出现较深褶皱和裂纹等缺陷, 影响产品服役, 为便于处理内表面缺陷, 目前钛合金内衬和气瓶的成形方式多数为“旋压或锻造+焊接的制造模式^[3, 5-7]”, 如德国 MT 空间研究所采用“凹面净近成形技术”将 TC4 板材分别旋压成形为两个椭球封头并分别与直筒段焊接, 最终获得 $\Phi 1160$ mm 的复合材料气瓶内衬^[7]; 中国航天 703 所采用模锻工艺制备 TA7 半球并将其焊接后获得 $\Phi 320$ mm 的 20 L 低温气瓶。焊缝的存在导致了不连续、强度降低、脆裂和拉应力集中等缺陷, 影响了气瓶或内衬的气密性和耐压性能^[8, 9]。采用无芯模收口旋压技术可以获得无焊缝的钛合金气瓶或内衬, 从根本上消除了传统气瓶或内衬生产中与焊缝有关的缺陷, 提高了其服役期间的可靠性, 但目前此工作国内外均鲜有报道。

通过有限元软件如 Marc、Ansys 等可以模拟收口旋压时旋轮运动轨迹、旋轮压下量、进给比、旋轮圆角半径等工艺参数, 从而为旋压工艺的制定及优化提供有力支撑^[8-11]。本实验借助数值模拟手段, 介绍一种无焊缝柱形钛内衬的收口旋压成形过程, 以期解决长期以来焊缝对气瓶或内衬的困扰, 提升产品服役期间的可靠性。

1 实验方法

收口旋压设备如图 1 所示。坯料为经过精密机械加工 TA1ELI 无缝管坯 (Fe: 0.10%、C: 0.03%、N: 0.012%、H: 0.008%、O: 0.10%, 余量为 Ti, 质量分数), 其内径约为 233 mm、壁厚约为 7 mm。为消除管坯内应力, 收口旋压前使用真空炉对其进行完全退火处理。通常, 合金的完全退火温度介于其再结晶温度与相变温度之间, 对于 TA1ELI, 其相变温度约为 890 °C, 再结晶温度为 550~650 °C^[12], 为获得细小晶粒、较好的性能并达到完全退火效果, 将完全退火温度确定为 800 °C、保温时间为 2 h, 然后炉冷到室温。

TA1ELI 管坯经完全退火处理后, 后续进行收口旋压及机械加工。精加工后的钛内衬还将进行内压、气密及疲劳试验考核, 其中内压试验要求液压加压至 0.15 MPa, 保压 3 min, 期间无泄漏或漏气现象发生; 气密试验要求加压至 0.10 MPa, 保压 3 min, 期间同样要求无泄漏或漏气现象发生; 疲劳试验要求循环加载、卸载 200 次, 期间不发生任何形式的失效现象。



图 1 收口旋压设备

Fig.1 Machine of necking spinning

收稿日期: 2017-08-11

作者简介: 温涛, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 航天材料及工艺研究所, 北京 100076, 电话: 010-68383316, E-mail: wentao0323@163.com

2 工艺过程

2.1 旋压方式的选择

旋压方式的选择是钛内衬成形及缺陷控制的关键要素之一。首先设计了包含 3 组曲线的正旋收口组合轨迹，分别为斜线轨迹拉锥、圆弧轨迹封底以及椭球轨迹收口，如图 2 所示。

采用 3 组曲线组合轨迹收口后获得的钛内衬内表面质量较差，褶皱较深且无法通过打磨手段改善或消除，如图 3 所示。

分析可知，第一组拉锥曲线后内表面即产生了较多的泪痕状突起及褶皱，如图 4a 所示；将管坯一端收锥、另一端开口以打磨掉收锥部分的褶皱，然后继续进行封底及收口程序，最终可获得内表面较好的内衬，如图 4b 所示。

以上结果确认了拉锥过程是内衬产生褶皱的主要阶段，但采用“一端收锥、另一端开口打磨”的方式不能满足两端收口的要求；另外，使用 3 组曲线组合轨迹收口，加热时间长，效率低、能耗大。

根据塑性变形理论，反旋工艺可使材料呈现更高的塑性变形能力^[13]。另外，旋压过程是一个体积变形过程，同时也是一个热激活过程，它们的关系如（1）和（2）式所示^[13]：

$$V = A \exp \left[-\frac{E_v}{RT} \right] \quad (1)$$

$$E_v = \alpha W \quad (2)$$

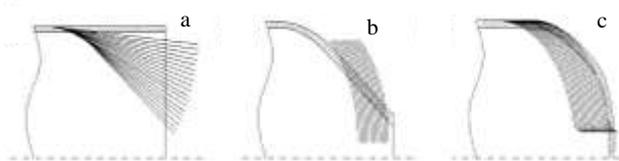


图 2 正旋组合轨迹

Fig.2 Combined trajectories of direct spinning: (a) tapering by diagonal trajectories, (b) back covering by circular trajectories, and (c) necking by ellipsoidal trajectories



图 3 采用正旋组合轨迹收口后的内衬内表面

Fig.3 Internal surface of lining by combined trajectories after necking

式中： E_v 为体积变形激活能， V 为旋压变形过程中体积变量； W 为单位体积金属塑性变形所需的功； R 为气体常数； T 为温度； A 、 a 均为常数。

在温度相同的条件下， W 值越小， E_v 值也越小，相应的 V 值越大，即旋压变形过程越容易进行。正旋拉锥阶段和反旋收口阶段的 W 值分别如（3）和（4）式所示^[13]：

$$W = \int_0^\gamma r d\gamma = \sigma \frac{\text{ctg } \alpha/2}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$W = \sigma \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{1-\varphi_t} \quad (4)$$

式中： $\alpha/2$ 为半锥角； φ_t 为壁厚减薄率。

正旋时， $\alpha/2$ 由 3° 逐渐增大至 45°；每一道次均需要较大的 W 才能变形，多道次累积后 W 处于较高水平；而反旋时，由于旋压毛坯最终厚度约为 6.7 mm，近似原厚度约 7 mm，每道次壁厚变化不显著，其道次壁厚减薄率 $\varphi_t \approx 0$ ，所需的 W 几乎为零，多道次累积后仍然处于较低水平。综上所述，相对于正旋，反旋时的 W 值较小且小很多，其旋压变形过程相对容易，因此选择反旋工艺进行收口。

2.2 旋压道次及压下量的选择

旋压道次较多时，单道次的压下量相对较小，这将有利于旋压过程的进行，但同时会增加坯料厚度上的变化不均，导致其精度变差，甚至造成坯料内表面因变形不充分而出现裂纹^[14, 15]；另外道次较多将造成管坯强度较大幅度增加，导致旋压后续阶段无法进行。

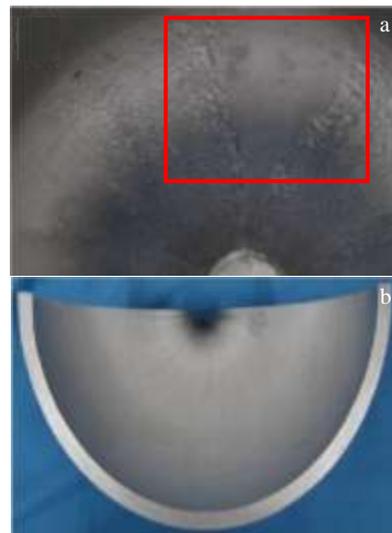


图 4 内衬内表面拉锥后以及拉锥后打磨再继续封底和收口照片

Fig.4 Internal surface of lining: (a) image after tapering and (b) image of back covering and necking which was polished after lining

旋压道次较少时，单道次的压下量则相对较大，易导致坯料畸变增大，表面出现鼓包、裂纹等缺陷^[1, 16]。

另外，数值模拟结果显示：收口轨迹最后几道次与中间道次压下量相同时，旋压过程中在旋轮前端将有大量的金属堆积，导致旋压过程不能进行，如图 5 所示。造成这种情况的原因是收口到一定程度，口部收缩时壁厚增加的阻力增大，强迫表面金属轴向位移，从而产生金属堆积，因此在收口旋压的最后几道次必须确保较小的单道次压下量。

借助有限元软件模拟结果及试旋结果，最终设计并确定了 17 道次的反旋收口曲线，且前 15 道次的单道次压下量为 6 mm，最后 2 道次的单道次压下量为 2 mm，如图 6 所示。

2.3 旋压温度的选择

旋压温度的选择是旋压成形及缺陷控制的另一个关键要素。温度较低时，金属的变形抗力较大，在旋压时易产生裂纹^[3]，且还导致金属倾向于向自由端流动，造成管嘴端伸展较长而无法成形，如图 7a 所示。温度较高时，旋压过程中易产生堆积、隆起、变形后晶粒增大及表面氧化加剧等缺陷；且易造成坯料内、外表面温度梯度过大，导致其由于变形不均而产生密

集型裂纹^[17]；另外，温度较高还将导致金属过多地向固定端流动，同样使得管嘴无法成形，甚至造成管嘴 R 角位置出现失稳，如图 7b、7c 所示。针对上述情况，将数值模拟分析结果与试旋结果相结合，最终将起旋温度定为 800 ℃；另外，收口旋压的前 12 道次使用 3 把火焰枪加热、后续的 5 道次使用 2 把火焰枪加热以避免旋压温度过高所造成的不良影响。

2.4 主轴转速及进给比的选择

主轴转速较高将提高旋压效率，但过高的转速易引起机床振动，降低工件的精度。主轴旋转一周时旋轮沿轴线移动的距离称为进给比。进给比较大时易造成金属在旋轮前隆起和堆积；而进给比较小时，由于弹性变形的缘故使很小的变形量分布于沿壁厚方向不同的流动面上，从而导致易出现夹层现象^[15, 16]。同样将有限元软件模拟结果与试旋结果相结合，最终确定主轴转速为 200 rpm/min；进给比为 2.5~3 mm/rpm。

采用上述工艺进行收口旋压后，可以获得外表面和内表面质量都较好的无缝柱形钛内衬，其内表面尽管比较粗糙，但无明显褶皱，如图 8 所示。

将打磨工装（将纱带上粘贴不锈钢垫片以增加其刚度）伸入到管嘴 R 角位置附近并对其打磨处理约 20 min 后，钛内衬毛坯内表面比较光滑，几乎无褶皱，尤其是 R 角位置非常光亮，如图 9 所示。

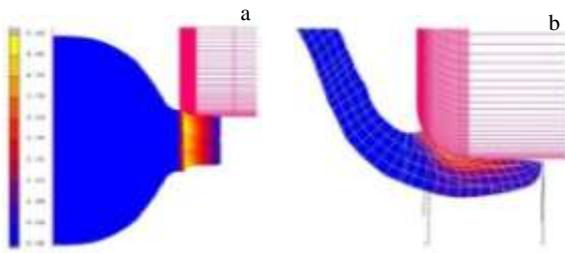


图 5 反旋第 16 道次数值模拟

Fig.5 Numerical simulation of 16th pass by backward spinning: (a) image of full view and (b) image of fractionated gain

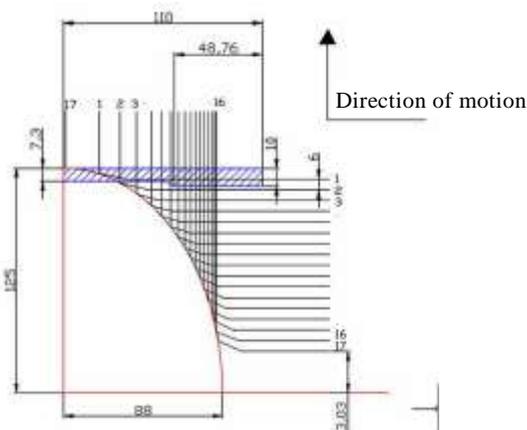


图 6 反旋收口轨迹示意图

Fig.6 Schematic diagram of necking trajectories by backward spinning



图 7 不同旋压温度对应的型面

Fig.7 Images of moulding surface with different spinning temperatures: (a) situation at low temperature and (b, c) situation at high temperature

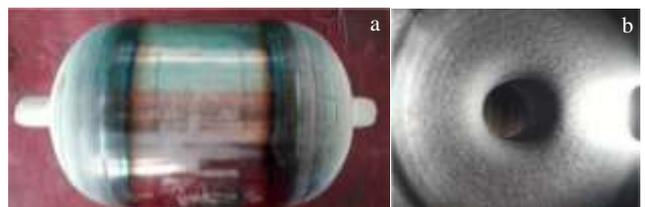


图 8 收口旋压后的内衬型面

Fig.8 Lining images of moulding surface after necking spinning: (a) exterior moulding surface and (b) internal moulding surface

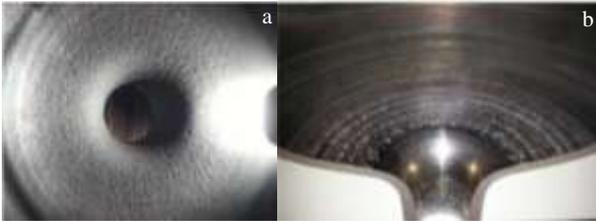


图 9 收口旋压后内衬的内型面

Fig.9 Lining images of internal moulding surface after necking spinning: (a) internal moulding surface without polishing and (b) the anatomic image of liner after polishing

钛内衬刚度较好, 收口旋压后内衬毛坯件的圆度、直线度也较好, 机械加工相对容易且最终可获得壁厚为 0.6 mm 的无焊缝钛内衬, 如图 10 所示。

精加工后的钛内衬进行了内压、气密及疲劳试验, 其中在内压、气密试验保压期间未发生泄漏或漏气现象; 在疲劳试验期间无异常情况发生, 顺利通过考核试验。



图 10 机加工后的钛内衬

Fig.10 Ti-lining image after machining work

3 结 论

1) 采用“反旋轨迹设计+内表面压力打磨”的工艺方案, 制造出封头内外型面均满足设计要求、内表面无较深褶皱(尤其 R 角处较光滑)、壁厚为 0.6 mm 的无焊缝柱形纯钛内衬, 并通过内压、气密及疲劳试验考核。

2) 800 °C 保温 2 h 的完全退火处理可消除 TA1ELI 管坯的残余应力, 获得较好的旋压性能。

3) 采用数值模拟与试旋相结合的方式确定并优化旋压工艺参数: 使用 17 道次的反旋轨迹, 起旋温度 800 °C, 主轴转速 200 rpm/min, 进给比为 2.5~3 mm/rpm。

参考文献 References

- [1] Xu Wencheng(徐文臣), Shan Debing(单德彬), Chen Yu(陈宇) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2008, 33(3): 56
- [2] Wang Xiangdong(王向东), Lu Fusheng(逯福生), Jia Xiang(贾翊). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2008(2): 5
- [3] Zhang Cheng(张成), Yang Haicheng(杨海成), Han Dong(韩冬) et al. *Journal of Solid Rocket Technology*(固体火箭技术)[J], 2013, 36(1): 127
- [4] Zhang Hengda(张恒大). *Doctoral Dissertation*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006
- [5] Liang Baixiang(梁佰祥), Yang Minghui(杨明辉), Yang Yihui(阳意慧) et al. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*(机电工程技术)[J], 2004, 33(10): 12
- [6] Jia Yinghui(贾英辉), Li Li(李莉), Zhang Wencheng(张文成). *China Science and Technology Information*(中国科技信息)[J], 2007(22): 299
- [7] Hegels J. *The 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*[C], Hartford, USA, 2008: 4941
- [8] Zhang Tao(张涛), Lin Gang(林刚), Zhou Jinglong(周景龙). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2001(5): 26
- [9] Xia Qinxiang(夏琴香), Chen Jiahua(陈家华). *Journal of South China University of Technology*(华南理工大学学报)[J], 2006(2): 1
- [10] Wu Songlin(吴松林), Li DeQiang(李德强), Shao Fei(邵飞) et al. *Development and Application of Materials*(材料开发及应用)[J], 2012(8): 7
- [11] Zhang Tao(张涛), Jia Yinghui(贾英辉), Shi Haifang(时海芳). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2011, 36(3): 58
- [12] Ye Hong(叶宏). *The Metal Materials and Heat Treatment*(金属材料与热处理)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 225
- [13] Zhang Tao(张涛). *The Technology of Spinning*(旋压成形技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 186
- [14] Tian Hui(田辉), Huang Haiqing(黄海青), Chen Guoqing(陈国清) et al. *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2009, 10(5): 14
- [15] Mou Shaozheng(牟少正), Han Dong(韩冬), Yang Yingli(杨英丽) et al. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*(锻压设备与制造技术)[J], 2009, 2: 98
- [16] Xue Song(薛松). *Doctoral Dissertation*(博士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002, 95
- [17] Yang Yingli(杨英丽), Guo Dizi(郭荻子), Zhao Yongqing(赵永庆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 625

Spinning Processing Technology of Seamless Cylindrical Titanium Liners

Wen Tao¹, Zhang Xuhu¹, Ren Sashuang², Zhao Lei¹, Yin Zhongwei¹

(1. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

(2. Beijing Institute of Aerospace Long March Scientific and Technical Information, Beijing 100076, China)

Abstract: A creative process scheme of designing reverse spinning trajectories and polishing internal surface by pressure was proposed for seamless cylinder Ti-liners of necking spinning. The head plates of Ti-liner can meet design demands besides internal and exterior moulding surface, and the wall thickness of Ti-liner is 0.6 mm whose internal surface dose not deep rucks, and is smooth in the location of R angle. The processing parameters of the designed and actual spinning process such as spinning mode, spinning passes, and spinning temperature was also elaborated

Key words: seamless; Ti-liner; necking spinning

Corresponding author: Wen Tao, Ph. D., Senior Engineer, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, P. R. China, Tel: 0086-31-68383316, E-mail: wentao0323@163.com