

β 钛合金环形管热推扩质量分析与控制

赵恒章^{1,2}, 肖林¹, 赵彬², 毛小南², 孙军¹, 奚正平²

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了研究 β 钛合金环形管热推的各种质量问题, 进行了 β 钛合金环形管的热推制实验, 并采用网格法和有限元法对成形过程进行了分析, 研究了实验中诸多质量问题 (如起皱、开裂、壁厚不均等) 产生的原因, 并提出了相应的控制措施。结果表明, 羊角芯模、扩径比、温度场、速度等都是影响环形管质量的重要因素, 各影响因素相互作用, 需协调控制。协调控制原则: 羊角芯模、扩径比为设定因素, 温度场为关键因素, 推制速度为协调因素。

关键词: β 钛合金; 环形管; 热推扩; 分析与控制

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)04-0995-05

钛合金具有高的比强度、优异的耐蚀性、无磁性等优点, 用其制作的管路系统及压力容器在航空航天、舰船、核工业及石油、化工等领域逐渐得到了广泛的应用。热推扩成形工艺可实现大弯曲角, 具有壁厚均匀、外形美观的特点, 是环形管成形的首选工艺^[1-3]。

随着新一代航空、航天飞行器高速、远程、轻质和提高燃油效率等方向的跨越式发展, 对环形压力容器提出了更高要求, 环形管作为其关键部件, 要求具有更高的强度。 β 钛合金具有最高的强度, 因而成为开发和应用研究的重点方向之一, 在国际上的研究和应用活跃。以 Ti-1023、Ti-15-3、Ti40、TB8、 β -C、 β 21s 等为代表的 β 钛合金已在航天、航空等领域获得广泛应用^[4-6]。一些新型 β 钛合金在老牌合金基础上进行了优化, 综合性能更加优异, 已开始在航空航天等领域进行应用研究。用 β 钛合金制备的环形管无需缠绕即可获得耐高压, 应用前景广泛。因此, 研制 β 钛合金环形管有着迫切的需求背景。影响钛环形管热推扩成形质量的因素除原材料本身的性能外, 主要与芯模的几何形状、加热温度、推制速度及扩径比有关。目前, 一些学者^[7-10]分析了扩径比、加热温度、推制速度等对成形质量的影响规律, 但大多集中在工艺参数优化等方面, 没有深入分析推制过程中出现起皱、开裂、壁厚不均、畸变等质量问题的起因及控制措施, 而有些质量问题不是单一因素引起的, 而是多因素交互作用的结果, 尤其对于难变形的 β 钛合金, 如何防止和控制质量问题的出现, 提高成品率急需进一步研究。本工作结合实验和有限元模拟研究了 β 钛合金环形管

推制的各种质量问题, 提出了相应的控制原则和措施, 为成形出高精度、高质量的 β 钛合金环形管奠定了基础。

1 实验

以新型 β 钛合金 Ti26 合金、Ti1300 合金进行了不同扩径比、推制速度、推制温度和不同相对弯曲半径的热推扩实验, 并进行了相应的有限元分析。实验用管坯采用挤压法制备的管坯机加而成。

中频感应加热推扩成形工艺原理如图 1 所示。把钛合金管坯套在拉杆上, 由推力档圈推进。直管坯在进入羊角芯棒变形区前, 在加热线圈交变磁场的作用下快速升温, 受推力 P 及芯模阻力的作用, 坯料沿着芯模同时产生周向扩径和轴向弯曲的联合变形, 将小直径的直管坯推制成大直径的环形管。推制过程中, 内弧金属因扩径作用向外弧流动, 因而该工艺能有效的防止外弧壁厚减薄、内弧壁厚增厚。热推扩过程中, 采用感应加热, 属于非均匀温度场, 金属材料在流动过程中受推制速度、扩径比、相对弯曲半径等交互作用, 经常出现起皱、开裂、壁厚不均等问题。

采用红外测温仪测量推制温度场, 用超声波测厚仪测量推制出的钛环形管壁厚。

2 结果及讨论

2.1 热推扩变形规律

为了清楚的掌握变形规律, 采用网格法对成形过程进行分析。推制前的直管坯在车床上划上等分的正

收稿日期: 2014-04-21

作者简介: 赵恒章, 男, 1974 年生, 博士生, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078, E-mail: zhaohz@126.com

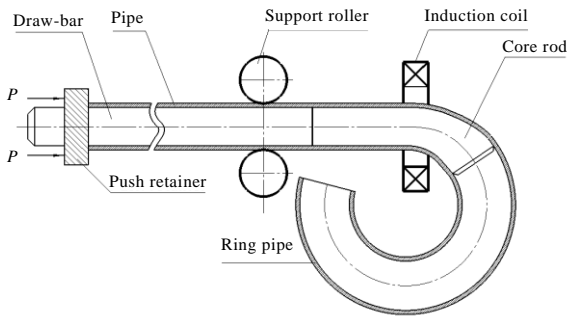


图1 钛合金环管推制示意图

Fig.1 Schematic diagram of titanium ring pipe forming

方形网格线，沿管坯圆周刻划的一组相互平行的回转刻线称为经线；沿管坯母线方向分布，并在空间保持平行的一组刻线称为纬线。推制前后网格线的变化情况如图 2 所示。不难看出，变形后的网格线同原规则整齐的网格线相比发生明显地变化：全部纬线均由原来的直线变为弯曲的弧线，原先直管坯上相互平行的各回转经线，已不再平行，变成以环形管的中心为原点，沿环形管的弯曲半径方向呈放射状；网格由原来的正方形变成内弧短、外弧长的扇形；经向伸长、纬线缩短的比例沿内弧向外弧方向逐渐减小，外弧的正方形网格几乎没有发生变化。因此可以得出：热推成形过程中，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。弯曲变形使金属在压应力作用下向内弧堆积，偏心扩径使金属在环向拉应力作用下向外弧流动。保证弯曲变形量与偏心扩径量在环形管成形过程中按一定比例，金属周向流动与环向流动的协调性和连续性是该技术的关键。

2.2 环形管起皱

起皱问题是管件弯曲成形过程中的常见问题，主要发生在内弧，图 3 为 Ti26 合金推制时出现的起皱及有限元模拟结果。起皱均发生在环形管内弧部位，起皱发展至环形管中径部位处截止，起皱有时候表现出非连续的多处间断发生。一般来说，起皱主要发生在相对弯曲半径 (R/D_w , R 为环半径, D_w 为环断面直径)

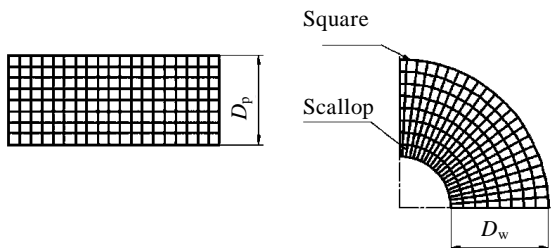


图 2 变形前后网格线变化情况

Fig.2 Shape of the mesh before and after deformation

较小的情况下，尤其是急弯管件。这主要是由于相对弯曲半径小，内弧金属弯曲变形大，推制阻力大，金属流动不畅所致。从图 2 可以看出，环中径沿内弧方向网格受压比较明显，环中径沿外弧方向网格变化不明显，说明应变量从内弧向外弧逐渐减小，因而起皱一般也就止于中径附近。因此，要防止起皱，必须减小推制阻力，使金属向两侧流动时顺畅。

对于既定的钛环形管，相对弯曲半径是确定的，那么，根据壁厚不减薄理论和体积不变原理，扩径比在一定程度上也是确定的，仅在很小的范围内变化。一般钛扩径比在 1.2~1.35 为宜，可以根据相对弯曲半径的大小进行调整。对于急弯管头，扩径比应适当增大，能加快金属由内弧向外弧流动速度，一定程度上有利于防止起皱，但扩径比增大，导致推制阻力也增大，又容易引起起皱。因此，在扩径比增大时，应配合推制工艺参数的调整，如慢速推制、局部补热等。

由以上分析可知，防止起皱的主要因素只有推制温度和推制速度。图 4 为成形过程中温度分布，表明了以感应线圈为中心，沿推制方向管坯轴向的温度分布情况。可以看出，温度分布极不均匀，而且温度峰值并不在感应线圈内，而是沿前进方向偏离，本实验偏离了约 15 mm。当加热功率增加时，整个温度曲线上移，反之功率下降时，温度下移。对于 β 钛合金，相变点之下其性能差异较大，热推扩过程中容易引起失稳起皱，而在相变点以上， β 钛合金性能变化不大，且为单相组织，组织性能相对比较均匀。因此，推制温度应选择相变点以上 20~50 °C。

推制温度一定的情况下，推制速度对成形过程中的温度场影响较大，直接影响温度沿环管的轴向分布。推制速度增大，温度峰值下降，温度峰值向远离加热线圈的方向偏离；推制速度降低时则相反。同时，推制速度过大，也造成推制阻力增大，引起起皱。图 5 是推制速度为 4.25 mm/s 时出现的起皱。

2.3 环形管开裂

环形管在推制过程中一般不发生开裂，但对于难变形合金，如高温合金、 β 钛合金，有时也会发生开裂。图 6 为 Ti300 合金管坯未进行均匀化处理推制时



图 3 环形管起皱

Fig.3 Corrugate on ring pipe

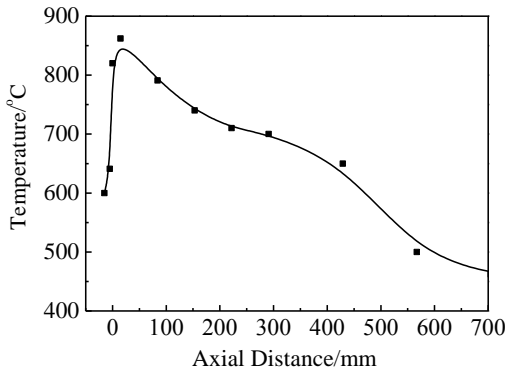


图 4 钛合金环形管轴向温度分布

Fig.4 Axial temperature distribution of titanium ring pipe

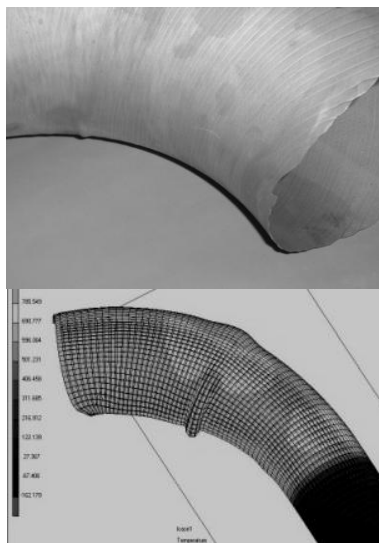


图 5 推制速度为 4.25 mm/s 时出现起皱

Fig.5 Corrugate on ring pipe at V=4.25 mm/s

出现的开裂现象。热推过程内弧金属在扩径力的作用下向外弧流动，补偿外弧处壁厚的减薄，因此环管成形中壁厚相对比较均匀，不易开裂。但当扩径比过大时，内弧金属向外弧流动过多，导致内弧壁厚减薄，外弧壁厚增大，加上温度场不均匀，就会出现过度拉薄撕裂。因此，防止开裂最重要的是控制温度场，防止产生局部异常高温带。推制前要调整好感应线圈的位置，使感应线圈中心与管坯中心对正。此外，控制管坯组织性能的均匀性也很重要，最好选择经过均匀化处理过的管坯进行推制。管坯内外表面的金属异物也容易在感应加热条件下产生局部异常高温点，管件局部减薄导致撕裂。

2.4 壁厚不均和断面畸变

壁厚不均是导致管件不合格的重要因素。起皱、



图 6 环形管开裂

Fig.6 Cracking on ring pipe

开裂等质量问题在推制过程中就能发现和改正，并且通过有效控制措施可以避免。而壁厚不均、断面畸变在成形过程中不能在线监测，只能等冷却后测量发现，给生产带来很大的不便。壁厚不均和断面畸变与羊角芯模、扩径比、推制温度、推制速度诸多因素有关，且控制措施与环管的规格尺寸也息息相关，因此，只能在一定程度上进行控制。国标规定壁厚偏差普通弯管在 15% 以内，而对于高压弯头，要求在 10% 以内。

根据热推扩变形规律可知，成形过程中由于弯曲变形，金属向内弧流动，内弧壁厚增厚；扩径变形使得内弧金属向两侧流动，一定程度使内弧壁厚减薄。如果要使得壁厚均匀，就要保证在一定应变速率的条件下，弯曲变形量与扩径变形量保持其协调性和连续性。研究表明^[11]，羊角芯模中心线是保证弯曲变形与扩径变形协调性和连续性的重要因素，采用阿基米德螺线作为羊角芯模的中心线，壁厚均匀性可控制在 7.3% 以内。弯曲变形量的大小是由相对弯曲半径决定的，是由环管的规格尺寸确定的，要实现扩径变形量与其比例协调，必须通过扩径比来实现。假设推制过程中壁厚不变，根据体积不变原理，可推导出环形管曲率半径计算公式，进一步可推导出相对弯曲半径与扩径比的关系：

$$R_w = \frac{d_0}{2} \left(\frac{d_w}{d_w - d_0} \right) \quad (1)$$

式中， R_w 为环管曲率半径， d_0 为直管坯的直径， d_w 为环管断面直径。

$$K = \frac{1}{2} \frac{R_w}{d_w} + 1 \quad (2)$$

式中， K 为扩径比， $K=d_w/d_0$ ， R_w/d_w 为相对弯曲半径。

由以上公式计算的扩径比只是初步的设计依据，具体扩径比要根据环管的具体规格和材料性能进行调整，对于钛合金来说，根据实验经验，扩径比一般选

择在 1.2~1.35 之间为宜。图 7 是扩径比对壁厚的影响。

羊角芯模和扩径比设计好后, 仅是从理论上实现了壁厚均匀, 要获得真正的等壁厚, 必须进行推制温度和推制速度的协调控制。图 8、图 9 分别说明了温度和速度对壁厚均匀性的影响情况。环形管断面畸变主要表现为椭圆度超差。图 10 说明了环管尺寸与推制温度的关系。从图 7、图 9、图 10 可以看出, 在距离端口附件壁厚、椭圆度均存在超差, 长度 50~80 mm, 这部分需切除掉。切除部分的长短与推制速度和温度

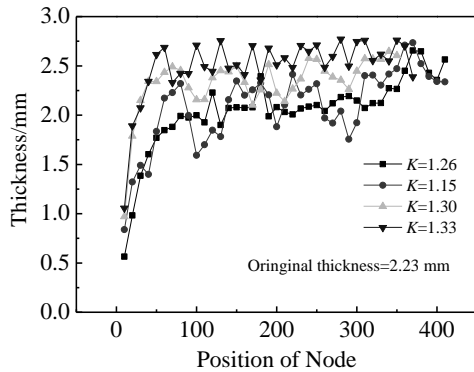


图 7 不同 K 值时的内弧壁厚

Fig.7 Distribution of inside wall thickness in different K

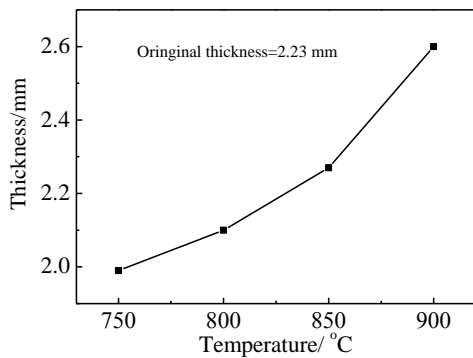


图 8 成形温度对壁厚的影响

Fig.8 Curve of pipe thickness at different temperatures

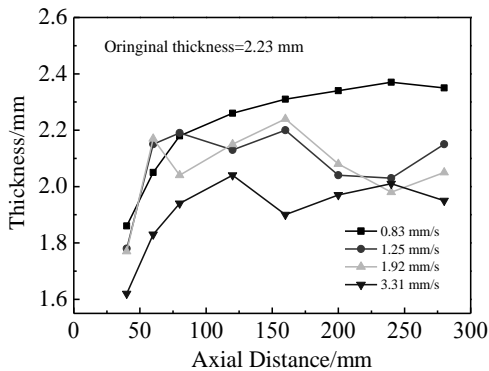


图 9 推制速度对壁厚的影响

Fig.9 Curves of pipe thickness at different velocities

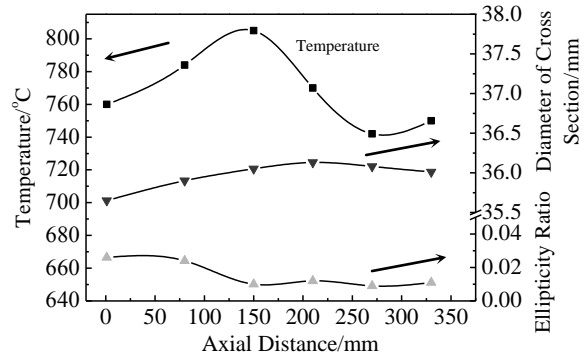


图 10 不同温度的断面尺寸分析

Fig.10 Dimension analysis of cross section at different temperatures

有关, 但关系不大。因此, 在计算直管坯长度时, 应考虑端口切除部分, 适当加长直管坯料。

3 结 论

β 钛合金作为难变形合金在环形管推制中易出现起皱、开裂、壁厚不均和截面畸变等质量问题。 β 钛合金推制前应进行组织均匀化处理。羊角芯模、扩径比、温度、推制速度都是影响环形管质量的重要因素, 并且交互作用。其控制应遵循以下原则: 首先确认羊角芯模和扩径比是否符合弯曲变形和扩径变形的协调性和连续性, 根据环管尺寸确定扩径比。在模具确定的基础上进行温度和推制速度 2 个重要工艺参数的协调控制。温度的高低由材料性能决定, 温度场覆盖的范围则是由环管规格尺寸确定。推制速度大小则由扩径比确定, 并为温度场服务。

参考文献 References

[1] Zhao Bin(赵 彬), Duan Wensen(段文森), Yang Yingli(杨英丽). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 27(S3): 453

[2] 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

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

[4] Shang Guoqiang(商国强), Zhu Zhishou(朱知寿), Chang Hui(常 辉). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2011, 35(2): 286

[5] Ge Peng(葛 鹏), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉). *Materials Review*(材料导报)[J], 2005, 19(12): 52

- [6] Wen Jianhong(汶建宏), Yang Guanjun(杨冠军), Ge Peng(葛鹏). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2008, 25(1): 33
- [7] Miao Tiande(苗天德). *Acta Mechanica Sinica*(力学学报)[J], 1979, 3: 230
- [8] Lu Xiaoyang(鹿晓阳), Shi Baojun(史宝军), Xu Bingye(徐秉业). *Metal Forming Machinery*(锻压机械)[J], 1998, 6: 19
- [9] 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
- [10] Zhao Hengzhang(赵恒章), Yang Yingli(杨英丽), Zhao Bin(赵彬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S3): 216
- [11] Dai Yi(戴毅), Zeng Weidong(曾卫东), Yang Yingli(杨英丽). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S3): 330

Quality Analysis and Control of Ring Pipe Hot Push-Expanding of β Titanium

Zhao Hengzhang^{1,2}, Xiao Lin¹, Zhao Bin², Mao Xiaonan², Sun Jun¹, Xi Zhengping²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

Abstract: To study the forming quality during ring pipe hot push-expanding, the hot push-expanding experiments of β titanium alloy were carried out, and the process of hot push-expanding was analyzed by a mesh method and a finite element method. Moreover, the causes of quality defects, such as corrugate, cracking, wall unevenness, and ellipticity, were discussed. The results show that ram-horn mandrel, expanding ratio, temperature and velocity are important parameters which influence the forming quality of ring pipe. They interact with each other and need a coordinated control. The coordinated control principle is that the ram-horn mandrel and the expanding ratio should be set, the temperature is a key factor, and the velocity is a coordination factor.

Key words: β titanium; ring pipe; hot push-expanding; analysis and control

Corresponding author: Zhao Hengzhang, Candidate for Ph. D., Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: zhaohz@126.com