

钛合金拉杆缩口增厚成形实验研究

危立明¹, 李文宇², 万晨戈³, 谢君¹, 徐雪峰³, 杨大伟², 李林杰²

¹南昌航空大学工程训练中心, 江西 南昌

²南昌航空大学航信息工程学院, 江西 南昌

³南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2024年5月14日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

拉杆作为飞行器的重要承力连接构件, 对零件机械性能有较高要求。针对传统拉杆飞机拉杆制造存在强度低、质量重、使用寿命短等问题, 采用缩口增厚成形方法对TA18钛合金薄壁管进行工艺探索。通过研究不同温度下钛合金缩口增厚成形工艺, 结果分析了600°C、700°C和800°C薄壁拉杆的成形质量、壁厚分布规律, 最后对零件传力区和增厚区的金相组织进行观察。结果表明温度为700°C缩口增厚成形的零件质量最好, 壁厚分布符合预期目标, 轴向压力使材料组织出现明显的晶粒细化现象。

关键词

缩口成形, 钛合金, 管端增厚, 微观组织

Experimental Study on Necking and Thickening Forming of Titanium Alloy Tie Rods

Liming Wei¹, Wenyu Li², Cheng Wan³, Jun Xie¹, Xuefeng Xu³, Dawei Yang², Linjie Li²

¹Engineering Training Center, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

³School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: May 14th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

Tie rods, as an important load-bearing connecting component of aircraft, have high requirements

文章引用: 危立明, 李文宇, 万晨戈, 谢君, 徐雪峰, 杨大伟, 李林杰. 钛合金拉杆缩口增厚成形实验研究[J]. 材料科学, 2024, 14(6): 905-910. DOI: 10.12677/ms.2024.146102

on the mechanical properties of parts. Aiming at the traditional tie rod aircraft tie rod manufacturing problems such as low strength, heavy quality and other problems, the use of necking thickening molding method of TA18 titanium alloy thin-walled tube to explore the process. Through the study of different temperatures under the titanium alloy necking thickening forming process, the results of the analysis of 600°C, 700°C and 800°C thin-walled tie rod forming quality, wall thickness distribution law, and finally on the parts of the force transfer zone and the thickening area of the metallurgical organization of the observation. The results show that the temperature of 700°C necking thickening forming parts of the best quality, wall thickness distribution in line with the expected target, axial pressure to make the material organization of the grain refinement phenomenon is obvious.

Keywords

Necking Molding, Titanium Alloy, Tube End Thickening, Microstructure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从上世纪 90 年代开始,我国的航空航天领域进入飞速发展的黄金时期,装备制造研究的能力得到了质的提升。飞机拉杆作为硬式机械操纵系统的主要部件,要承受拉、压力,因此对其机械性能有较高标准和要求[1] [2]。传统拉杆由于两端直径小中间直径大的结构特点,成形先进行缩口,后期需采用焊接或铆接等手段连接在其他结构件上,这种复合成形出的拉杆零件易造成强度低和质量重等问题。针对这些问题,国外提出一种新的整体式拉杆成形方法,利用缩口增厚成形工艺先对拉杆进行精锻缩口增厚,然后对增厚区攻螺纹再配合螺栓使用[3] [4]。国内对缩口增厚工艺探索还在起步阶段,彭俊阳[5]等研究了缩径过程中壁厚分布以及最大轴向力的变化规律,通过实验对变形区内壁厚变化规律进行分析比较,最终发现缩径系数与最终壁厚值成反比,且当极限缩径系数为 0.79 管壁增厚最大。Guo [6]等分析在水平双向挤压下的后桥变形规律,通过理论计算、数值模拟和实验研究发现缩径变形伴随着管壁增厚,并通过控制温度场的分布来控制后桥不同位置壁厚的方法。张亚[7]研究了不同工艺参数对管材壁厚增厚的影响,通过正交实验方法确定了各工艺参数的影响的主次关系,并提出一种可以通过改变温度场实现减小缩口系数和控制壁厚增厚与分布的新方法。Lu [8]等报道了铜管端颈旋压成形过程中,发现管壁厚度沿 z 轴下沉段逐渐增大,结果表明合适的工艺可以使缩口管端壁厚增厚。邱泽宇[9]首次对 5A02 铝合金缩口增厚成形方法,采用先大锥角后小锥角的多道次对 5A02 薄壁铝合金管端进行缩口增厚成形,得到缩口区壁厚增厚率达到 306%的成形件。

国内外大多数文献都以较厚管材或变形抗力较小的金属进行研究,而对于高强度薄壁钛合金管缩口增厚的相关研究较少。因此,本文以直径为 22 mm、厚度为 1 mm 钛合金管作为研究对象,开展缩口增厚成形工艺试验,通过研究不同温度下钛合金缩口增厚成形工艺,分析零件的成形质量、壁厚分布规律,并对零件传力区和增厚区的组织性能进行观察分析,为高强度飞机拉杆高效轻量化制造提供参考。

2. 缩口增厚成形原理

管材缩口增厚成形基本原理如图 1 所示。图中成形的管坯被分别划分为传力区、缩口区和增厚区。

传力区为待变形区, 该处材料在推头施加的推力 F 作用下, 管材向前进给并产生轴向压缩和径向变形的倾向, 由于凹模内壁在缩口区的限制会产生朝着管内的径向压力, 管端处在凹模的缩口区发生塑性变形。此时管材实现了缩径部分成形并随着推头的运动持续前进, 当管材端口到达增厚区并与凹模底部接触时, 表明管材的缩口成形阶段已完成。随着推头继续进给, 增厚区的材料开始径向流动, 此时增厚区的管壁开始增厚。根据材料塑性成形前后体积不变原则, 在整个缩口增厚成形过程中的管材体积不会突然增大或减少, 而是材料发生了转移, 管材的材料不断从传力区向缩口区和增厚区转移, 直至推头进给停止, 管材缩口增厚成形完全结束。

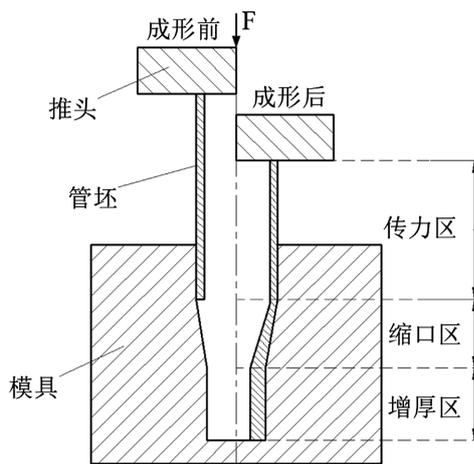


Figure 1. Principle of necking and thickening process
图 1. 缩口增厚成形原理

2.1. 试验材料

TA18 钛合金(Ti-3Al-2.5V)是一种低合金化近 α 型的钛合金, 具有良好的室温、高温力学性能和耐腐蚀性能。最高工作温度约为 315°C , 熔化温度为 $1700^{\circ}\text{C}\sim 1726^{\circ}\text{C}$, 相转变温度为 $925^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 密度为 4.48 g/cm^3 , 其化学成分如表 1 所示。试验采用的原材料为宝钛集团有限公司生产的 TA18 钛合金无缝薄壁管, 管直径 $D = 20\text{ mm}$, 壁厚 $t = 1\text{ mm}$, 实验管坯长度设计 250 mm 。

Table 1. Chemical composition of TA18 titanium alloy (wt%)

表 1. TA18 钛合金的化学成分(质量分数, %)

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
2.5~3.5	1.5~3.0	0.25	0.12	0.08	0.05	0.015	余量

2.2. 试验方案

在钛合金薄壁管缩口增厚成形试验中, 加热温度的选择十分关键, 根据钛合金成形特性, 选择较为合适的加热温度为 600°C 、 700°C 、 800°C ; 根据体积不变原理的计算规则是将管坯的增厚区增厚体积和缩口区增厚体积相加等于材料进给量的原始体积, 本文零件管端增厚区增厚目标大于 3 mm , 所以计算出管坯进给量为 60 mm 。缩口增厚成形于成形实验在万能试验机上进行, 管坯的进给速度的选择 2 mm/min 。为了研究零件组织性能, 分别在传力区和增厚区中间部位轴向和径向截面切割并对其进行金相制样。制好样后打磨抛光, 使用凯勒试剂($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1.5:3:45.5$)进行腐蚀, 腐蚀时间为 $10\sim 20\text{ s}$, 最后采用金相显微镜对试样组织进行观察。

3. 结果与分析

3.1. 成形质量

为了探索温度对钛合金薄壁管差温缩口增厚成形的影响，在不同温度下进行缩口增厚成形实验，实验成形的零件如图 2 所示。从图中可以发现，在成形温度为 600℃ 的条件下，管坯缩口完成后，传力区发生了失稳弯曲起皱现象；而 800℃ 成形零件与凹模接触的传力区表面有较为明显的划痕。致上述原因是钛合金在 600℃ 时，材料变形抗力大，管坯缩口成形后需要更大的轴向压力进行增厚，当轴向力一直增大，导致管坯传力区在没有支撑的区域应力集中，在径向应力超过材料的屈服强度时管坯在该区域发生失稳剪切变形，另外成形温度过高，材料软化严重，成形或取件过程中管坯表面极易被划伤。在三种温度下，零件在 700℃ 缩口增厚成形时无明显刮痕以及失稳现象，成形质量最佳。

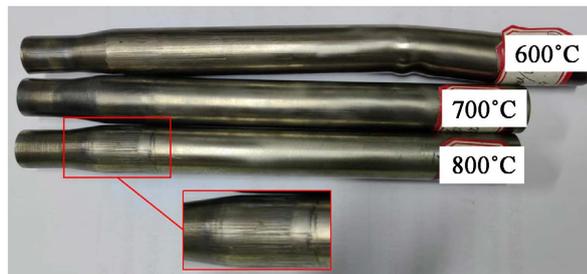


Figure 2. Parts formed at different temperatures
图 2. 不同加热温度下的成形零件

3.1. 壁厚分布规律

如图 3 为各温度条件下管端壁厚分布，数据收集是通过管坯轴向从点 A 到点 D 壁厚每隔 5 mm 测量一次得到。从图中可知，600℃ 成形的零件由于在增厚前就因为钛合金变形抗力太大导致失稳，所有区

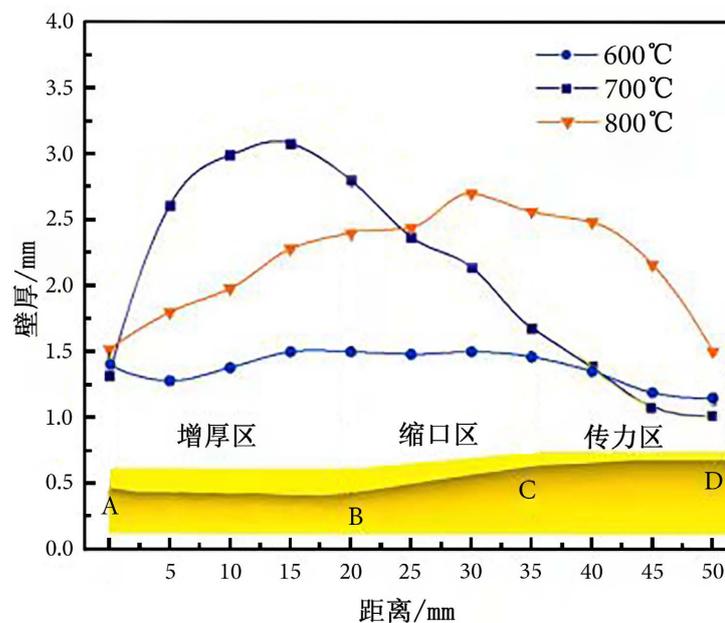


Figure 3. Distribution of wall thickness
图 3. 壁厚分布

域壁厚基本无太大变化。其它零件都有明显增厚，但是 800℃的零件增厚集中在传力区和缩口区，只有 800℃的零件增厚集中在增厚区。这是由于成形温度较高时，材料在缩口区的塑性较好，在材料流动时，缩口区受摩擦阻力的影响，导致材料在此处就发生堆积增厚，而 700℃对比另外两种温度更适合成形零件，壁厚分布效果也更符合预期。

3.1. 微观组织

如图 4 为 TA18 钛合金薄壁管缩口增厚成形零件传力区和增厚区部位试样，经过金相显微镜放大 500 倍后的组织。从 4(a)传力区截面的组织可以发现，这个部位的试样组织为分布均匀的等轴晶粒，晶粒的轮廓清晰分明。这表明管坯的传力部分材料强度高，轴向压力的施加未让该部位的材料发生大变形，组织依然保持初始的等轴晶粒。图 4(b)为增厚区试样组织，该区域有许多长条形的晶粒比缩口区的明显减少，而且出现了与传力区形状相似的等轴晶粒；从晶粒大小来看，增厚区晶粒明显比传力区小很多。这是由于管材成形时，增厚区在轴向载荷作用下，位错密度大量增大相互交缠，晶粒之间发生交互作用形成不均匀组织；同时由于增厚区温度高易发生回复再结晶，以及晶粒异常粗化长大现象，所以增厚区的平均组织晶粒要比传力区小。

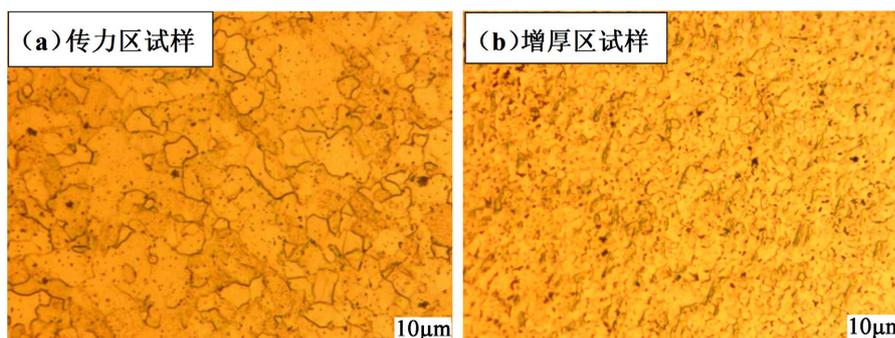


Figure 4. Metallographic microstructure
图 4. 金相微观组织

4. 结论

1) 在不同温度条件下差温缩口增厚成形中，温度太低管坯材料变形抗力大，易发生失稳弯曲起皱缺陷，而温度太高材料软化严重容易出现严重划痕，对比另外两种温度薄壁钛合金拉杆成形温度为 700℃时更满足零件质量要求。

2) 温度影响薄壁钛合金管的壁厚分布，温度低难成形，温度过高材料在传力缩口区变形抗力小易在此堆积，难以流动到预期区域。因此三种加热温度中，700℃成形的零件材料分布最佳。

3) TA18 钛合金管缩口增厚差温成形工艺时，在轴向压力和温度作用下能使材料组织出现明显的晶粒细化现象，提升材料强度和稳定性。

基金项目

基金项目：国家自然科学基金资助项目(编号：52265052)；国家科技重大专项(编号：J2019-VI1-0014 0154)；江西省自然科学基金(编号：20224BAB214050)。

参考文献

[1] 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.

- [2] 杨合, 孙志超, 詹梅, 等. 轻量化材料与构件精确塑性成形先进技术研究进展[C]//宝钢科协. 第三届宝钢学术年会论文集(Baosteel BAC 2008). 2008.
- [3] Kwan, C.-T., Fang, C.-H., Chiu, C.-J., Chen, S.-W. and Wen, H.-W. (2004) An Analysis of the Nosing Process of Metal Tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **23**, 190-196. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1648-4>
- [4] 沈国丽, 蒲丽娟. 飞机铝合金收口拉杆的设计研究[J]. 机械工程师, 2015(4): 189-190.
- [5] 彭俊阳, 付渊, 陈景松, 王勇, 王仲仁. 缩径过程中的壁厚变化实验[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(3): 60-63.
- [6] Guo, Y., Xu, C., Han, J. and Wang, Z. (2019) New Technique of Precision Necking for Long Tubes with Variable Wall Thickness. *Frontiers of Mechanical Engineering*, **15**, 622-630. <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0565-7>.
- [7] 张亚. 变温度场下管材缩口变形规律及增厚成形工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 机械科学研究总院, 2015.
- [8] Lu, L., Tang, Y., Fang, W. and Cheng, J. (2013) Pipe Reduction of Miniature Inner Grooved Copper Tubes through Rotary Swaging Process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **23**, 377-384. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(13\)62473-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(13)62473-5).
- [9] 邱泽宇, 徐雪峰, 付春林, 肖洁, 熊光利. 5A02 铝合金薄壁管材热挤压缩径增厚成形试验研究及优化[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(5): 7-14.