

# 薄壁小弯曲半径钛合金管材弯曲技术研究

## Study on Bend Forming Process for Titanium Alloy Tube With Thin-Walled and Small Radius

中航工业北京航空制造工程研究所 李鹏亮 孙宾 张志  
中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室 李云飞

**[摘要]** 钛合金管材弯曲成形是一项复杂的型材成形技术,尤其是薄壁小弯曲半径管材,内弧起皱和外弧拉裂、减薄等成形缺陷很难克服。针对某型发动机钛合金薄壁管件的特点,采用推弯成形工艺,并通过试验获得了满足设计要求的零件。结果表明,推弯成形工艺很好解决了钛合金薄壁小弯曲半径管材外弧减薄、断裂等问题,成形零件精度高,表面质量好。

**关键词:** 薄壁 小弯曲半径 钛合金管材 推弯成形

**[ABSTRACT]** The bending process of titanium alloy tube is a quite complex technology. According to the tube with thin-walled and small radius, it is difficult to avoid the defects which include inner-wall wrinkling, outer-wall tensile crack and wall thinning. On the basis of the titanium alloy thin-walled tube of the aeroengine, the push-bending technology is proposed and the part is manufactured successfully through engineer test. The results prove that push-bending technology can solve the problem such as inner-wall wrinkling, outer-wall tensile crack of titanium alloy tube with the features of thin-walled and small radius. The part has good surface quality.

**Keywords:** Thin-wall Small radius Titanium alloy tube Push-bending

钛合金作为一种先进的轻量化结构材料,具有优异的综合性能,其密度小、比强度高、抗蚀性能优异、焊接性能良好,因此在航空、航天、汽车、船舶、能源等行业具有日益广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

钛合金管材弯曲工艺是一项十分复杂的工艺过程,受到管材材料性能、管壁厚因子、弯曲工艺、模具设计制造水平等诸多因素的影响<sup>[3]</sup>。在薄壁管材弯曲加工时,由于几何变形的特殊性和复杂性,尤其是薄壁管材规格参数和成形工艺参数的苛刻,内壁起皱、外壁拉裂和横截面形状畸变等成形缺陷很难克服,尤其是内壁起皱<sup>[4]</sup>。本文针对某型发动机钛合金薄壁管件的特点,采用推弯成形工艺,获得了满足设计要求的零件,为该技术在钛合金薄壁管材零件成形中的应用起到一定的指导作用。

## 1 结构特点及难点分析

某型发动机钛合金薄壁弯管零件如图1所示。

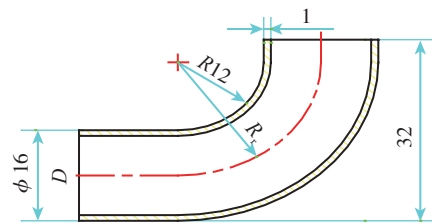


图1 薄壁管零件示意图

Fig.1 Diagram of thin-walled tube

薄壁管材料为  $\pi\tau-7M$  (俄罗斯牌号),其材料力学性能为:  $\sigma_b=470\sim 665\text{MPa}$ ;  $\sigma_{0.2} \geq 375\text{MPa}$ ;  $\delta_5 \geq 20\%$ ; 零件的技术要求为: 外径  $D=16\text{mm}$ ; 壁厚  $t=1\text{mm}$ ; 弯曲半径  $R=12\text{mm}$ 。

### 1.1 工艺分析

查询俄方提供的有关标准,  $\pi\tau-7M \phi 16$  管材常温时最小弯曲半径  $R_{\min}=45\text{mm}$ 。

可见,该零件具有以下特点:

- (1) 零件的弯曲半径小:  $R=12\text{mm}$ ,仅为极限弯曲半径  $R_{\min}$  的 27% ;
- (2) 相对弯曲半径  $R_t/D=1.25$ ,仅为常规弯曲的 37.9%。

因此,零件的实际成形技术指标超过了材料的成形极限,制造该零件具有较高的技术难度。

### 1.2 弯管法的缺陷分析

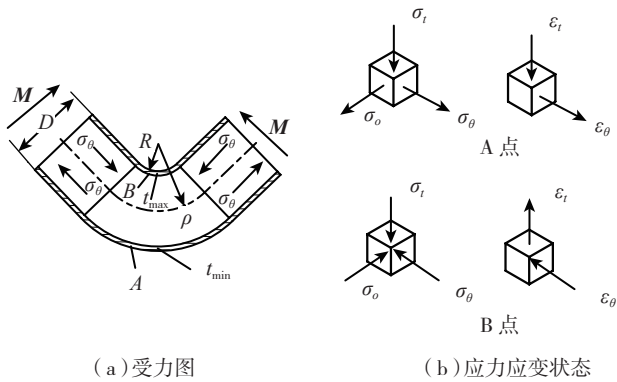
弯管的常见缺陷是弯曲区内侧起皱,外侧减薄甚至破裂,弯曲时受力状态是造成弯管缺陷的主要原因。

管材弯曲时内外侧材料的受力及应力应变状态如图2所示: 图中  $A$  点表示弯曲区外侧(拉伸区)应力应变状态,  $B$  点表示弯曲区内侧(压缩区)应力应变状态<sup>[5-6]</sup>。

由图2可见管材弯曲时中性层内侧的材料受压应力作用,而中性层外侧的材料受拉应力作用。由应力应变分析可知,在中性层外侧的材料受切向拉伸应力,使管壁减薄;中性层内侧的材料受切向压缩应力,使管壁增厚。由于位于弯曲变形区最外侧和最内侧的材料受

切向应力最大,使其管壁厚度的变化也最大。当变形程度过大时,最外侧管壁会产生裂纹、最内侧管壁会出现折皱,弯曲后断面也易发生畸变而成为近似椭圆形。

以该薄壁管零件为例,假设管材的中性层在弯曲时长度不变,根据零件的几何尺寸计算可知:由直管弯曲成如图1所示的零件状态时,弯曲区管材的内侧材料将被压缩到原长的59%,而外侧的材料将被拉伸到原长的140%。可见管材的内、外侧材料的应变均超过了其本身的塑性极限 $\delta_s \geq 20\%$ 。因而管材弯曲时内侧必然出现皱折,而外侧材料必然被拉伸变薄直至破裂。同时由于外侧的拉应力有使中性层内移的趋势,最终造成弯曲区横截面畸变而成椭圆。



(a)受力图 (b)应力应变状态

图2 管材弯曲时受力及应力应变状态示意图

Fig.2 Diagram of force, stress and stain states of tube for bending

## 2 弯曲方案的选择

由以上管材弯曲零件的特点和受力分析可知,管材弯曲时最常见的问题是弯曲区内侧起皱和外侧减薄破裂及弯曲区横截面椭圆度过大。

出现以上问题显然是管材弯曲时受力状态,材料变形超过其自身性能极限所致。解决以上存在的问题,用常规的压弯法、滚弯法或绕弯法显然是不切实际的。因为这几种方法均不能改变管材弯曲区的受力状态。由此可见制造该管形零件必须从改变弯曲时管材的受力状态入手,才能解决现存的工艺技术问题。

由材料力学理论可知,材料的塑性除与其自身组织结构有关外还与其所受压应力状态有关。压应力数目愈多其塑性愈好。其原因是在压应力状态下材料的变形由晶间错位转变为晶内错位,材料的变形机理发生了本质改变。因而小弯曲半径管的弯曲如果在压应力状态下或较小的拉应力状态下进行,问题将可望得到解决。

基于上述理论分析,如何减小小弯曲区外侧拉应力,建立压应力状态将是解决问题的关键。管材在弯曲过程中如果采用内、外约束的推弯将从根本上改变管材弯曲区的受力状态,从而减小弯曲区外侧拉应力,建立静

水压力状态。具体做法是在管材的内部填以塑性较强、一定的抗压强度的填料并作为推弯时的传力介质,从而起到柔性约束作用。填料对管材的内壁形成由内向外的挤压力,在管材的外壁采用刚性约束,即用刚性型腔套在管材外面对管材外壁形成由外向内的压应力。管材受冲头压力作用下行,管材外壁与凹模型腔摩擦,受与管材运动相反的摩擦力,在管材轴向形成附加压应力,该压应力与造成形变的拉应力叠加,减小了弯曲区外侧拉应力,提高了材料塑性极限。原理见图3。

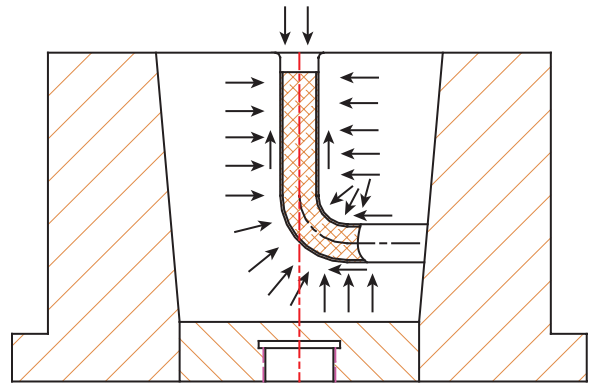


图3 管材推弯受力状态示意图

Fig.3 Diagram of tube for push-bending

## 3 工艺试验

### 3.1 端头形状

由图3可知,管材在冲头压力的作用下将下行,端头A点首先与凹模直段与弯曲区的连接点接触并受到沿弯曲半径方向的推力,管材外壁受与管材运动相反的摩擦力。

试验表明,管材毛坯采用平端头是不合理的。宜采用带工艺补偿的端头(图4)。

带工艺补偿端头的优点是:(1) $\alpha$ 斜角具有导向作用,减小了弯曲初始时的变形抗力;(2)与管壁发生摩擦产生轴向力,部分抵消了弯曲区外侧受到的拉应力,使该部分材料变薄趋势减缓;(3)弥补了管材外侧材料的延伸率不足;(4)同时使内侧弯曲时材料的压缩率降低,在填料所产生的内压力的综合作用下起到消皱作用。

试验表明, $\alpha$ 斜角的大小应小于 $45^\circ$ ,最佳角度为 $\alpha=40^\circ \pm 2^\circ$ 。

### 3.2 填料

弯曲时管内的填料起着重要的作用。填料的选择应考虑其流动性、安全性和宜取出清洗的特性。常规弯管法一般选用石英砂作填料,但在本工艺中不宜采用。因为如用石英砂作填料,则要求其密封在管坯中,这样将给管坯的制造造成困难;再则如在成形中石英砂填料

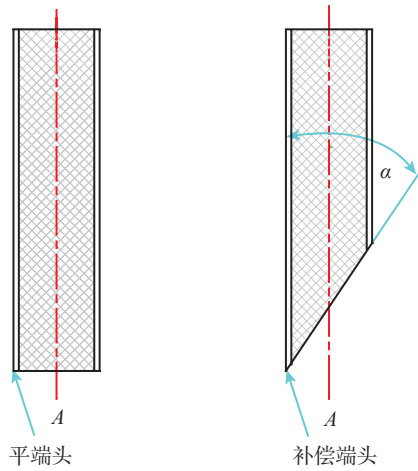


图4 弯管毛坯示意图

Fig.4 Diagram of tube blank

落入凹模,由于其具有的高硬度,很容易将凹模型腔损坏。除石英砂外,作填料的材料还可以用低熔点合金(如铅、锌、锡)及其合金。通过分析发现  $\pi T-7M$  钛合金常温下塑性较好,分别用铅、锡作填料在常温下进行推弯试验均获得了满意结果。

### 3.3 润滑

由于在推弯时管坯外壁与凹模间将产生较大的摩擦力,因而良好的润滑是保障挤压顺利进行的重要条件。当润滑不良时,特别是弯曲区内侧润滑不良时将增

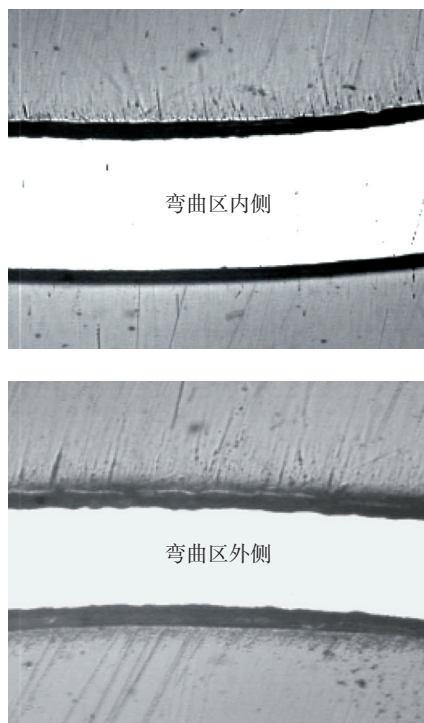


图5 弯曲区内、外侧解剖显微照片

Fig.5 Metallograph of bending section including inner and outer flank

大变形抗力,造成内侧弯曲区材料堆积,达不到要求的弯曲长度。试验表明,有机润滑脂在高压下的润滑效果并不好,胶体石墨与润滑脂的混合体效果较好,能满足管材弯曲要求。

## 4 试验结果

采用内外约束的推弯法,成功的制造出了钛合金薄壁小弯曲半径管件。经几何尺寸测量表明,弯曲区外侧材料减薄量为管料壁厚的 20%,满足技术条件要求的减薄量不大于壁厚 20% 的指标。弯曲区内侧材料未见起皱现象,增厚 10%。弯曲区横截面的椭圆度满足技术条件规定。经微观检查,在弯曲区内外侧均未发现裂纹。显微照片见图 5,弯曲后零件的实物照片见图 6。



图6 薄壁小弯曲半径钛合金管实物

Fig.6 Tube after push-bending

## 5 结论

- (1) 本研究采用的管材弯曲技术对薄壁小弯曲半径钛合金管弯曲成形是可行的。
- (2) 采用推弯成形工艺,由于内压力的作用,可以很好地解决弯曲过程中的减薄、起皱、椭圆度大的问题。
- (3) 该工艺技术不需要昂贵的专用设备,只通过模具设计和利用普通的液压设备即可进行生产。生产效率高、模具寿命长,操作简单,成本低。

### 参考文献

- [1] 杨健. 钛合金在飞机上的应用. 航空制造技术, 2006(11): 41-43.
- [2] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用. 北京: 化学工业出版社, 2005: 287-293.
- [3] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44-45.
- [4] 刘劲松, 张兴华, 刘海, 等. 薄壁钢管内胀推弯成形数值模拟及实验研究. 锻压技术, 2012, 37(2): 63-64.
- [5] 胡世光, 陈鹤峥. 板料冷压成形的工程解析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 73-77.
- [6] 王同海. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998: 27-35.

(责编 良辰)