

TC4 板材折弯临界板厚的分析与计算

Calculation of TC4 Sheet Critical Thickness in Bending Process

中航工业北京航空制造工程研究所 廖金华 赵冰 张荣霞
空军驻华北地区军事代表室 高志勇

[摘要] 通过对钛合金 TC4 板材在 750℃ 折弯的应力计算与有限元分析, 预测了板材在利用工装折弯时不出现裂纹的情况下其临界板厚, 并通过工艺试验进行了验证; 结果均表明, 在利用圆角为 R2.25 的凸模对 TC4 板材在 750℃ 折弯时, 材料外层不出现裂纹的临界厚度为 1.33 mm。

关键词: 钛合金 板材折弯 临界板厚 表面裂纹

[ABSTRACT] The sheet bending behavior of TC4 titanium alloy is studied by stress calculating and FEM method. So, the critical thickness of titanium alloy for bending process is obtained. At last, sheet bending experiments are carried out to verify the calculation results. It indicates that the surface cracks of TC4 sheet will not appear at 750℃ while the bending radius is 2.25mm and the sheet thickness is no more than 1.33mm.

Keywords: Titanium alloy Sheet bending process Critical thickness Surface crack

板材的折弯是利用折弯模具或工装使板材局部发生变形的一种工艺方法, 在飞机及发动机中均存在大量的钛合金折弯结构件。为提高结构件质量, 本文针对 TC4 板材折弯常见的变形区域外侧存在裂纹的问题, 通过力学计算与有限元分析, 预测了利用工装折弯时在变形 TC4 材料外侧不出现裂纹的情况下板材的最大厚度, 并进行试验验证。

1 材料与方法

1.1 材料

在本文中, 折弯所用 TC4 板材为宝钛提供, 符合 GB/T3621-94 标准的 4 种规格板材, 其厚度分别为 1.0mm、1.2mm、1.3mm、1.5mm, 长 × 宽均为 500mm × 500mm, 在 700℃ ~ 750℃ 利用顶部半径为 R2.25 的 V 型凸模将板材折弯成 V 形零件。

1.2 试验方法

先对折弯成形过程进行应力计算和有限元计算。预测材料折弯其外层出现裂纹时的材料厚度, 然后采用试验研究方法进行验证。

取 4 种规格的材料各 15 张, 在表面涂敷 Ti-1 涂

料, 并在垂直板材轧制方向上标出折弯方向后, 在 700~750℃ 之间装料, 预热 1~2min, 启动压力机加压 10~20t, 以 1.0mm/s 速度下压合模, 保温 1~3min, 取出零件; 成形件经碱崩与酸洗后, 对整个折弯区域进行荧光检测, 并在变形区域的两端及中间取金相试样, 检测其裂纹及微裂纹情况。

2 板材折弯变形的力学分析及临界厚度计算

折弯时材料变形区主要表现为内侧材料的压缩与外侧材料的伸长。由于变形区域较宽, 其变形区域材料的宽厚比大 (≥ 300), 属于平面应变状态。其应力状态为: 周向应力外侧为拉应力、内侧为压应力; 在径向, 材料弯曲时, 各纤维层之间相互压缩, 从而层与层之间产生径向压应力, 在内外表面, 径向压应力为零, 并由表及里逐渐增大, 至中性层达到最大值; 在材料宽度方向上, 由于属于平面应变状态, 宽度方向上的应力为径向应力与周向应力之和的一半, 具体而言, 外侧为压应力, 内侧为拉应力。

材料折弯时, 外表面的切向拉应力最大, 产生的切向变形也最大。当变形超过极限变形程度时, 板材就会沿折弯线方向发生破裂, 出现裂纹。以强度条件计算, 则等效应力为:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

根据平面变形, $\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)^{1/2}$, 代入(1)式, 在材料屈服时满足:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 1.115\sigma_s \quad (2)$$

根据文献 [3], 材料的屈服极限与允许的断面收缩率 q 和板材强度极限存在如下关系:

$$\sigma_s = \sigma_b \cdot \frac{1}{1-q} \cdot \left(\frac{\varepsilon_2}{q} \right)^{\frac{q}{1-q}} \quad (3)$$

其中, ε_2 为变形区一点的切向应变。代入(2)式, 则有:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 1.115\sigma_b \cdot \frac{1}{1-q} \cdot \left(\frac{\varepsilon_2}{q} \right)^{\frac{q}{1-q}} \quad (4)$$

在此, 假定材料弯曲后厚度为 t 时, 其外表面刚好不发生破裂, 即在材料的外表面, 等效应力 $\bar{\sigma} = \sigma_b$ 。同时, 在外侧材料表面, $\sigma_1 = 0$, 由上述关系式可推出:

$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_2$ 。另外,在外表面满足: $\varepsilon_2 = \frac{t}{2r+t}$ (未考虑中性层内移)。则代入(4)式有:

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_2 = 1.115\sigma_b \cdot \frac{1}{1-q} \cdot \left(\frac{t}{(2r+t)q}\right)^{\frac{q}{1-q}} \quad (5)$$

根据参考文献[5]中TC4合金材料在700℃~750℃力学性能曲线,抗拉强度 $\sigma_b=78\text{MPa}$,断面收缩率 $q=51\%$ 计算,将折弯的凸模圆角R2.25(即公式中内侧半径 $r=2.25$)代入公式(5),可得 $t=1.33\text{mm}$ 。

通过上述计算表明,在不考虑材料变形硬化且材料变形区域受力均匀的情况下,根据材料在750℃的抗拉强度与断面延伸率,采用R2.25的凸模进行折弯变形时,折弯板材不出现裂纹的临界厚度为1.33mm。

3 板材折弯的有限元分析

为了进一步研究折弯成形过程,鉴于变形区域材料的宽厚比大(≥ 300),为简化计算,针对4种厚度板材,建立了二维有限元模型。有限元模型中单元选区为四边形单元,单元数为326个。

板料材料参数为:成形温度700℃;弹性模量:70000MPa;泊松比:0.3;屈服强度 $\sigma_s:73\text{MPa}$;抗拉强度 $\sigma_b:78\text{MPa}$;延伸率:25%;凸模下移速度:1mm/s。

对这四种板厚材料折弯变形分析表明,应力整体分布趋势类似,最大等效应力集中在图1和图2所示的3个区域之内。以T1.3(即板厚为 $\delta 1.3$ 板材)为例,在整个成形过程中,成形初始阶段凸模中心线处等效应力最大,200步左右(分析应力分布规律共443步)达到最大为 $\sigma_i=76.3\text{MPa}$,两边4mm以内的板料(图1中1所示区域)等效应力都大于 $\sigma_i=73\text{MPa}$;随后最大应力区域逐渐向凸模中心线两侧移动,最终,凸模底部圆角与直线段相切的区域应力最大为 $\sigma_i=76\text{MPa}$,如图2中2所示区域等效应力都大于 $\sigma_i=73\text{MPa}$,其次,凹模上端过度圆角处等效应力也比较大,如图2中3所示区域等效应力大于 $\sigma_i=73\text{MPa}$ 。

分析表明,在成形的结束阶段,随着壁厚的增大,最大应力区逐渐远离中心线。4种板材试验的3个区域最大等效应力见表1。除T1.5的1区最大等效应力 $> \sigma_b$ 外,其余所有区域的等效应力都小于材料的抗拉强度,折弯

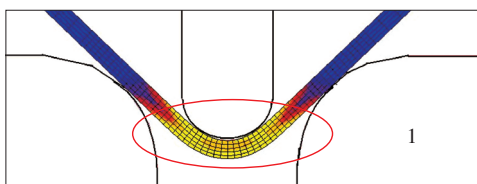


图1 T1.3、200步时等效应力分布

Fig.1 T1.3 equivalent stress distribution of step 200

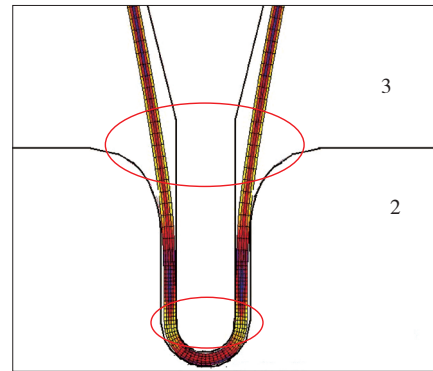


图2 T1.3最终等效应力分布

Fig.2 T1.3 final equivalent stress distribution

表1 4组试验最大等效应力比较

试验号	1区最大等效应力	2区最大等效应力	3区最大等效应力	σ_s	σ_b
T1	77	75.5	73.1	73	78
T1.2	76.6	73.4	73.2		
T1.3	76.3	76	73.2		
T1.5	78.4	73.6	73.2		

注: T1、T1.2、T1.3和T1.5分别代表板厚为1.0mm、1.2mm、1.3mm和1.5mm的板材。

过程中不会产生裂纹,但在折T1.5时,折弯的圆角顶部区域产生裂纹。

4 验证试验结果

对于T1.5的板材折弯件,共送检14件,表面都有多处裂纹。

对于T1.0、T1.2和T1.3板材的折弯件,各送检15件,荧光检测与金相分析都未发现存在裂纹或敏纹。

结果表明,厚度在1.33mm以下的3种规格折弯结构件,其变形区域均不存在裂纹。

5 结论

(1) 利用圆角为R2.25的凸模对TC4板材在750℃折弯,折弯材料厚度为1.33mm时,材料外侧等效应力刚好达到材料的抗拉强度,材料不出现裂纹,即材料不出现裂纹的临界厚度为1.33mm。

(2) 以强度条件导出的公式

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_2 = 1.155\sigma_b \frac{1}{1-q} \cdot \left(\frac{1}{2r/t+1}/q\right)^{\frac{q}{1-q}}$$

可对TC4板材的折弯裂纹进行有效的预测、判断。

参考文献

[1] 管英平,赵军. 板材弹塑性弯曲应力应变中性层位置关系探讨. 塑性工程学报,2002,9(2):39-41.

(下转第118页)

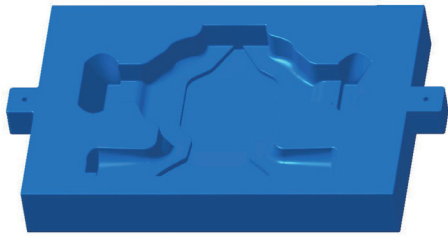


图5 防火罩超塑成形模具三维数学模型(下模)

Fig.5 Fire cover 3D model of superplastic forming die (under die)

2.3 分割成形工装设计实例

2.3.1 ARJ21 飞机防护罩加工现状分析

防护罩焊接件主要是由图6(中)4个零件组成,整个部件的材料为钛合金,由于部件呈斜圆锥型,曲率大,所以热成形难度大、回弹严重。为了提高零件加工质量,需要对零件成形工装进行必要的改进。

2.3.2 工艺数模设计

相对焊接难度而言,4个零件热成形难度要大很多,所以可以通过减小零件曲率的方式来降低

零件热成形难度。为此,可将防护罩的四个零件重新进行合理的工艺分割,也就是将四个零件在其曲率最大处进行分割,形成八个单独的零件再分别进行加工,这样,每个零件的曲率变小了,零件热成形的加工难度降低了,同时,保证了零件的加工精度,为后续零件的准确焊接奠定了基础,并且在很大程度上消除了焊接引起的内应力,防护罩分割后生成的工艺数模见图6(下)

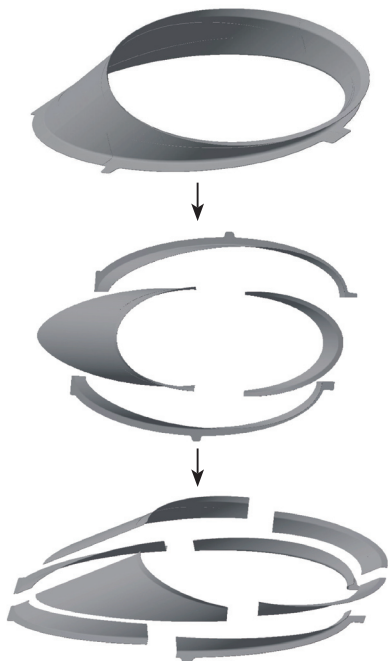


图6 防护罩三维数学模型(上、中)及工艺数模(下)

Fig.6 3D model (top, middle) and process model(down) of protective cover

所示。

2.3.3 热成形模具设计

针对8个被分割的零件,为了提高生产效率,热成形模具也采取了对称设计。图7为4个零件中曲率最大的零件被分割后生成的2个零件的热成形模具下模部分,这样的模具在实际生产中应用效果良好。

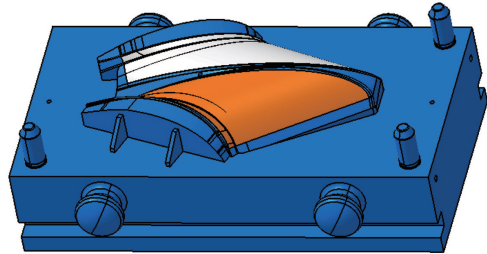


图7 防护罩热成形模具三维数学模型

Fig.7 3D model of hot forming die protective cover

3 结论

在飞机大曲率复杂钛合金零件加工过程中,对成形工装进行合理的设计将有助于提高零件加工的质量,同时,也会在一定程度上节约能源。除航空领域外,在其他行业钛合金零件制造中,成形工装设计也将越来越影响着零件加工的质量,这也是未来制造业发展的一个重要方面。

参考文献

- [1] 李鹏亮,张志. 钛合金热成形模具. 航空制造技术,2012(21):94-97.
- [2] 郑双. 飞机机加件三维工艺模型数字化定义[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2012.
- [3] 缪林久. 钛及其合金焊接缺陷的产生及防止. 大众科学,2006(3):58-59.
- [4] 李梁,孙建科,孟祥军. 钛合金超塑性研究及应用现状. 材料开发与应用,2004,19(6):34-38.
- [5] 赵林博,徐珊珊. 钛合金超塑成形工艺及应用. 科技创新导报,2011(19):59.
- [6] 杨建. 民用飞机机体用钛合金的新技术探讨. 航空制造技术,2011(13):51-53.

(责编 深蓝)

(上接第108页)

- [2] 江茨,罗文波,等. 关于理想塑性板材弯曲变薄理论解的矛盾及原因分析. 塑性工程学报,2002,13(1):26-28.
- [3] 柳建安,舒丽萍. V形件自由弯曲应力分析和最大弯矩计算公式. 中南林业科技大学学报,2007,27(3):141-144.
- [4] 毛云生. 板材弯曲伸长的理论研究. 武汉理工大学学报,2002,26(5):592-595.
- [5] 梁炳文. 板金成形性能. 北京:机械工业出版社,1995.

(责编 日午)