

TC2钛合金薄壁型材下陷成形工艺参数分析及优化

张明杰 齐立春 黄利军 李雪飞 吴泽浩

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

文 摘 采用试验和计算机模拟相结合的方法,对TC2钛合金薄壁型材的单边下陷成形工艺开展研究。通过在室温至600℃范围内对TC2合金型材的热拉伸变形行为进行分析,建立了该型材热拉伸的Johnson-Cook本构模型。在此基础上,对L截面TC2钛合金型材的单边下陷过程进行计算机模拟,分析了下陷过程中型材应力、应力三轴度的分布。结果表明,下陷区L拐角处容易产生应力集中,由于变形前段该区域的应力三轴度 $R_d > 0$,呈拉应力状态,因此微裂纹容易在应力集中处形核并沿型材纵向扩展。通过对成形温度、下陷段长度和过渡圆角半径进行优化,得到最佳工艺参数条件为成形温度300℃,下陷区长度21 mm,过渡圆角半径49 mm。

关键词 钛合金薄壁型材,下陷成形,本构模型,应力状态,有限元仿真

中图分类号: TG316.1

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.01.006

Parameter Analysis and Optimization of Subsidence Deformation for Thin-walled TC2 Alloy Profiles

ZHANG Mingjie QI Lichun HUANG Lijun LI Xuefei WU Zehao

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract In this paper, the subsidence deformation processing of the thin-walled TC2 alloy profile was studied by thermal tensile tests and computer simulations. First, the hot tensile deformation behavior of the TC2 alloy profile was analyzed in the temperature range from room temperature to 600 °C. Then, Johnson-Cook constitutive model was used to describe the hot tensile deformation behavior. Through computer simulations, the distributions of stress and stress triaxiality during subsidence deformation were analyzed. The results show that stress concentration is easy to occur at the corner of L in the subsidence area, and it is tensile stress due to the stress triaxial $R_d > 0$ of the area before deformation. With the increasing deformation, the crack extends in lengthwise direction of the profile. By optimizing the forming temperature, the length of the subsidence area and the transition radius, the best subsidence deformation processing parameters for the TC2 alloy profile are deformation temperature is 300 °C, length of subsidence deformation zone is 21 mm, interim fillet radius is 49 mm.

Key words Titanium alloy profiles, Subsidence deformation, Constitutive model, Stress state, Finite element simulation

0 引言

钛合金型材是一种具有特定截面的长条状金属制品,可通过点焊、氩弧焊或铆接的方式与舱体、壁板等结合,以提高其机构强度,具有结构效益较高的特点,被广泛应用于飞机长桁、发动机隔框、连接接头、角材等承力或次承力结构件。目前国内钛合金型材制备工艺主要有热挤压和轧制,具备生产L形、T形、Z形、U形等多种截面钛合金型材的能力,可满足不同结构的工艺需要^[1-3]。型材使用过程中与壁

板多采用面(型材)-面(壁板)、边(型材)-面(壁板)方式结合。面-面结合时,在壁板搭接部位的台阶处结合难度较大,点焊后虚接部位在内应力作用下容易开裂,影响结合强度。为了满足结合强度要求,型材在上述部位结合前需要根据台阶高度对结合面进行下陷成形,以达到提高焊点结合强度,减少焊后残余应力的目的。

下陷成形是对型材侧边进行压制,进而成形出台阶的一种加工方法,分冷下陷和热下陷两种加工

收稿日期:2022-04-22

基金项目:航材院钛合金型材应用研究项目(KZ82171509)

第一作者简介:张明杰,1984年出生,博士,高级工程师,主要从事钛合金研发与加工工艺的研究工作。E-mail:zmj_aecc@126.com

方式^[4-5]。冷下陷多用于轻质金属,优点是成形后零件表面质量好,尺寸精度高;热下陷多用于难变形材料,可减小变形后的回弹量和残余应力^[6-7]。研究表明无论采用何种加工方式,型材下陷过程中塑性变形主要集中在下陷段,而其他部分的变形量较小,可忽略不计。因此,型材下陷加工应力集中程度较高,下陷深度、成形温度、下陷段长度等参数下陷加工影响很大,若参数选用不恰当,下陷区域就容易产生裂纹、褶皱等加工缺陷,影响零件性能。此外,钛合金强度高、变形后容易回弹,进一步加大了钛合金型材下陷成形的难度。

本文以机体结构件广泛采用的TC2钛合金为目标,选择截面为等边L形的薄壁型材下陷典型件作为研究对象,对该型材的单侧边下陷成形工艺进行研究,利用计算机模拟的方法分析下陷深度、温度等参数对型材整体应力状态的影响,优化加工参数,达到提高零件成形质量的目的。

1 型材本构模型

钛合金多采用两相区热加工成形,以获得良好的强度和塑性匹配,但钛合金热变形抗力大,属于难变形材料,因此钛合金型材挤压成形一般采用温度在相变点以上的单相区挤压成形。热挤压成形后的TC2钛合金型材的显微组织照片如图1所示,组织呈现出单相区大变形后的魏氏组织特征。

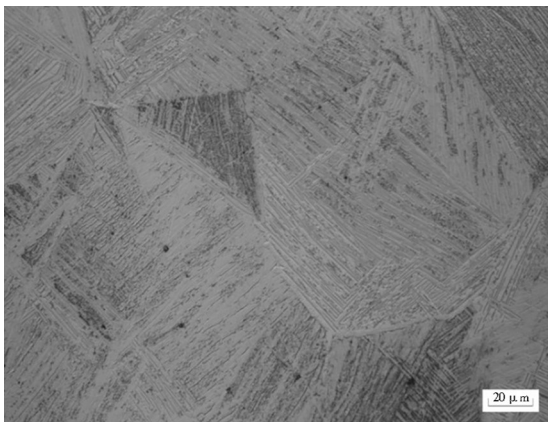


图1 TC2合金型材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC2 alloy profile

计算机模拟作为一种高效的研究手段,多用于材料的变形行为研究,但其计算结果受材料模型准确度影响较大,模型越精确,计算结果与真实情况吻合度就越高。为了揭示TC2钛合金型材下陷过程中下陷区的应力和应变分布与下陷深度、下陷温度、过渡圆角等成形参数之间的关系,需要有限元材料模型能准确描述TC2合金下陷过程中的变形行为,以提高下陷计算机模拟结果的计算精度。型材下陷成形属于钣金加工的一种,成形过程中下陷区主要受

拉应力作用,因此,首先通过热拉伸试验建立了TC2型材热拉伸本构模型。试验所用拉伸试样均从型材上直接切取,拉伸温度分别为室温、100、200、300、400、500和600℃,拉伸速率为0.5 mm/s。不同温度下TC2合金型材的拉伸变形行为见图2。

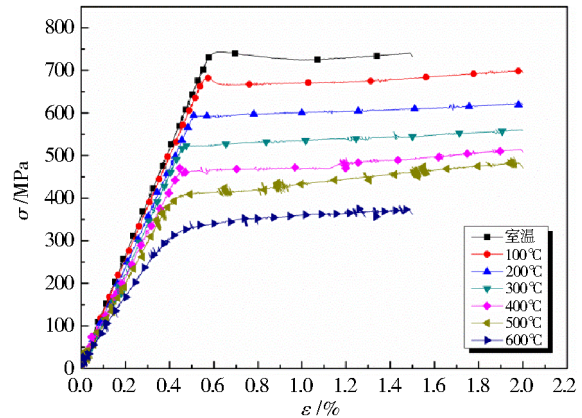


图2 TC2合金型材在不同温度下的应力-应变曲线

Fig. 2 The true stress vs. true strain curves of TC2 alloy profile under different temperatures

Johnson-Cook模型适用于描述大多数金属材料在高温、大变形条件下的变形行为^[8-9],因此本文采用该模型来构建TC2合金型材的热拉伸变形行为与变形参数之间的关系。Johnson-Cook模型的结构形式如下^[10]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_r} \right) \right] \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (1)$$

式中, ε 为塑性应变, $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率, $\dot{\varepsilon}_r$ 为参考速率, T_r 为参考温度, T 为变形温度, T_m 为材料的熔点, A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料相关的常数。经过多次线性拟合,得到TC2合金型材的热拉伸本构模型为:

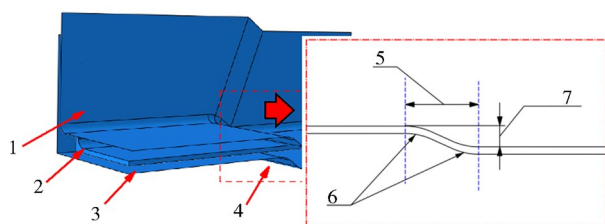
$$\sigma = (712 + 9.775\varepsilon^{-0.209})(1 - T^{*0.766}) \quad (2)$$

2 下陷有限元模型

钛合金下陷成形试验在自由锻液压机上进行,下陷前将模具放置在压机下平砧上,用热料将模具预热到200℃,同时利用电阻炉将TC2合金等边L型材坯料加热至指定下陷温度,保温20 min。下陷时,将型材毛坯快速从加热炉转移至模具型腔内,利用压机上平砧作用下陷模具,完成型材的下陷成形。若进行冷下陷成形则无需对模具和型材毛坯加热,室温下可直接将型材毛坯放置在模具型腔内下陷成形。钛合金型材下陷零件的外廓尺寸初步设计为:纵向长度150 mm,侧边宽度31 mm,壁厚1.6 mm,下陷段的长度14 mm,下陷深度4.5 mm,过渡圆角半径7 mm。

根据典型件建立的下陷有限元模型见图3,图中型材位于上模与下模之间,型材的非下陷侧边与模具之

间的距离为0.5 mm,下陷侧边与模具接触。考虑到型材壁厚较薄,下陷过程中型材对模具的影响较小,因此本文仅保留下陷模具型面的几何形状,忽略质量、材质厚度等因素,简化为平面几何。简化后的上、下模具均设定为刚体,有限元网格采用具有四节点的四边形单元,单元尺寸为1 mm。模型中型材的外廓与实物完全相同,设定为弹塑性可变形体,网格采用具有八节点的六面体单元,壁厚方向每个单元的尺寸为0.4 mm,纵向、横向每个单元的尺寸均为1 mm。



注:(1)上模;(2)型材;(3)下模;(4)下陷区域;(5)下陷段长度;(6)过渡圆角;(7)下陷深度。

图3 型材下陷成形有限元模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of finite element model of subsidence forming of profiles

以下结合下陷成形试验对型材冷、热下陷过程分别进行有限元模拟,其中冷下陷时,模具与型材设定的温度均为室温(25 °C);热下陷时,模具设定初始温度场为200 °C,型材设定的加热温度分别为200、300、400和500 °C。

3 结果及分析

研究表明型材下陷时塑性变形主要发生在下陷区域,该区域内产生的应力值明显高于其他部位,容易形成应力集中。图4为TC2钛合金薄壁型材下陷形成的纵向裂纹,裂纹萌生于下陷区域的过渡圆角处并沿型材纵向扩展。

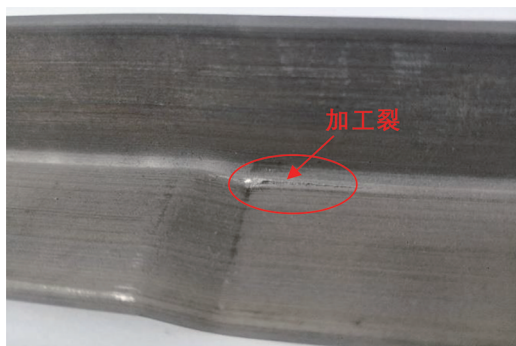


图4 下陷加工过程中产生的裂纹缺陷

Fig. 4 Crack defect generated by subsidence deformation

裂纹萌生的位置和扩展趋势表明,下陷过程中型材内部除了受压应力作用外,局部位置还受拉应力作用,导致裂纹从拉应力集中处形核。因此,型材下陷成形除了要考虑残余应力对零件成形精度的影响,还要考虑下陷过程中应力、应变等状态参数的分

布,针对不同下陷深度优化下陷区长度、过渡圆角、下陷温度等参数,防止加工缺陷的产生。

3.1 下陷过程的型材变形特征

TC2钛合金L截面薄壁型材单边下陷成形过程模拟结果见图5,下陷变形过程中存在三个塑性变形区,分别位于下陷段的两个过渡圆角处和垂直下陷区的立面。当下陷变形量较小时,型材与上模接触部位最先发生塑性变形,但应力峰值位于型材下陷区域的L形拐角附近。所述应力集中区域与图3中开裂位置基本相同,这表明下陷裂纹形核起始于下陷初始阶段的应力集中区。随着下陷变形量的逐渐增大,L形拐角附近的高应力区沿着型材纵向、过渡圆角和未成形的立面延伸。当下陷量达到最大时,整个下陷区、垂直下陷区的立面以及型材L形拐角处均为高应力区,该区域以下陷区为中心,呈放射状分布。

应力状态能够表示材料变形时内部承受应力的情况,材料受到的应力状态不同,其内部产生的塑性变形失稳情况也不同。而应力状态参数是用来反应材料受力时应力状态的指针,可以描述材料的塑性变形规律和损伤情况^[11-12]。常见的应力状态参数有应力三轴度 R_d 、软性系数 α 、罗的参数 μ 等^[13],其中应力三轴度 R_d 与应力状态有较好的对应关系,被广泛用于描述材料受力情况。应力三轴度 R_d 可表示为:

$$R_d = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

式中, σ_1 为第一主应力, σ_2 为第二主应力, σ_3 为第三主应力, σ_m 为静水应力, $\bar{\sigma}$ 为等效应力。当 $R_d > 0$ 时,材料内部以拉应力为主;当 $R_d < 0$ 时,材料内部以压力为主;当 $R_d = 0$ 时,材料为纯剪切应力状态。

钛合金型材单边下陷变形过程中应力三轴度的分布情况见图6,图中 $R_d < 0$ 的压应力区域和 $R_d > 0$ 的拉应力区域以下陷区域为中心对称分布。变形初期,型材垂直下陷区的立面、L形拐角局部以及下陷区非下陷一侧底面的应力三轴度 $R_d > 0$,呈拉应力状态,其余部位的 $R_d < 0$,呈压应力状态。随着下陷量的增大,应力三轴度 $R_d > 0$ 和 $R_d < 0$ 区域的面积逐渐增大,其中高应力三轴度 $R_d > 0$ 区分布于垂直下陷区的立面、下陷区非下陷一侧的过渡圆角和底面;低应力三轴度 $R_d < 0$ 区分布于垂直下陷区非下陷一侧的立面、下陷区下陷一侧的过渡圆角和底面。两个过渡圆角产生了不同的应力状态,一个以拉应力主,另一个以压应力为主,随着变形量的增加,应力状态的差别越加明显。

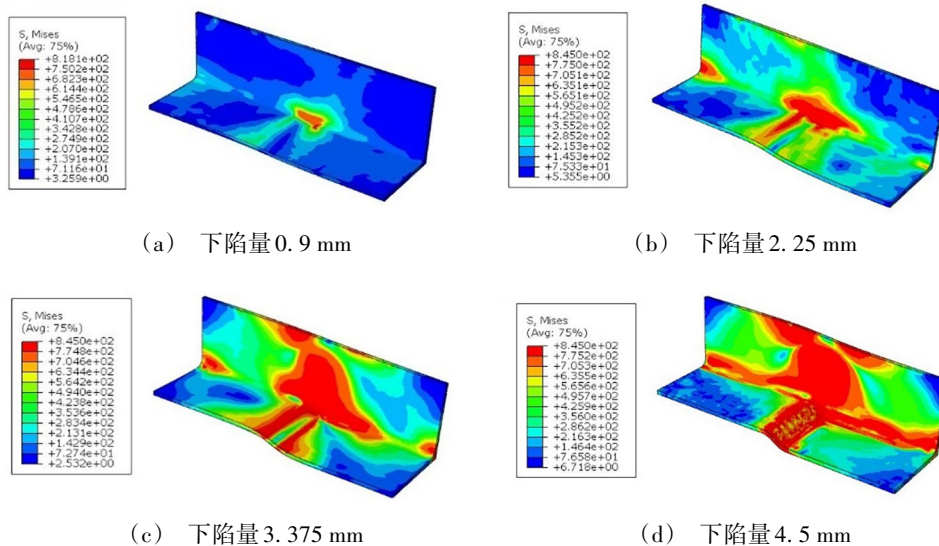


图5 室温下成形过程中的等效应力分布

Fig. 5 Distribution of equivalent stress during subsidence deformation under room temperature

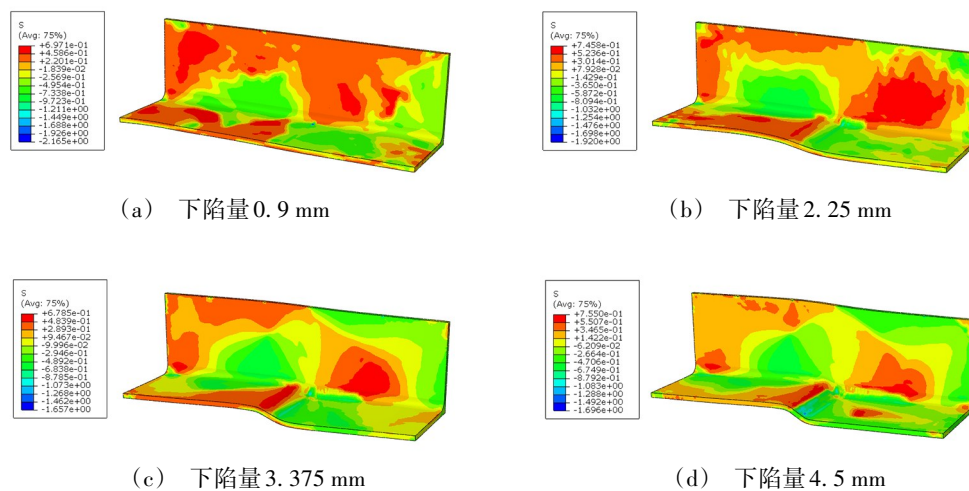


图6 下陷变形过程中的应力三轴度分布

Fig. 6 Distribution of stress triaxiality during the subsidence deformations

从上述应力三轴度的分布可以看出,型材下陷区域周围是拉应力和压应力共同作用区域,在拉应力状态区域内,应力集中时型材表面的微裂纹、麻点、拉道等缺陷容易形成宏观裂纹。

结合图5中应力分布情况可以看出,型材下陷段的L形拐角处的应力值始终较高,由于该区域的应力三轴度在变形初期大于零,因此该区域产生的产生裂纹会沿着型材呈纵向扩展,这与图4中裂纹扩展情况相符。

3.2 温度对下陷加工的影响

从图2可以看出,TC2合金热变形特征与其他金属材料基本相同。随着变形温度的升高,TC2合金的屈服强度和抗拉强度迅速降低,600℃条件下的应力

峰值仅为室温下的一半,因此提高加工温度有助于降低下陷过程中产生的应力集中程度,避免产生裂纹等加工缺陷。除此之外,采用热下陷成形可有效降低弹性应变能,减少变形后的回弹量。为了研究钛合金型材热下陷后回弹变形规律,本文在室温到500℃范围内,对TC2合金L型材热下陷卸载后的尺寸变化进行了模拟分析。

不同温度下TC2合金型材下陷成形后尺寸变化趋势见图7,图中下陷区附近的尺寸偏差较小,仅在-0.2~0.2mm间波动(回弹变形量<4.5%),温度低于300℃时产生正偏差,而温度高于300℃时产生负偏差。比较而言,型材两端的尺寸偏差较大,在-0.5~0.4mm间波动(回弹变形量<11.2%),温度<100℃和>300℃时产生负偏差,100~300℃间为正偏差。室温下陷后

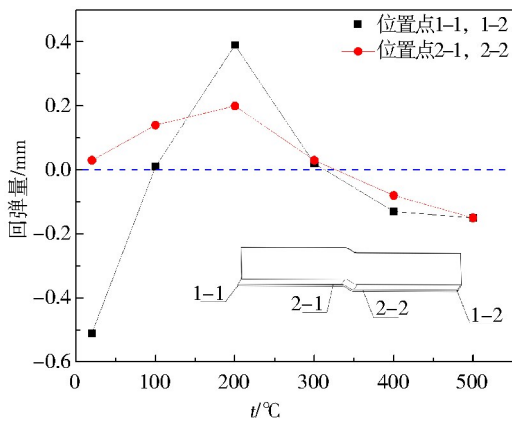


图7 不同温度下陷变形后回弹量的分布趋势

Fig. 7 Distribution trend of subsidence deformation under different temperatures

型材内残余应力较大,回弹导致零件发生明显的翘曲变形,导致下陷区和型材端面的变形量差值最大,达到0.5 mm。随着温度升高,两个位置之间的尺寸偏差逐渐减小。在300 °C温度下,成形后下陷区和端面之间的尺寸差值最小且回弹量接近于零。因此,将TC2等边

L型材加热300 °C后再进行下陷成形,有利于减少零件回弹变形引起的尺寸偏差。

3.3 参数优化与验证

以上L截面型材下陷过程显示,下陷区、下陷区垂直的立边、L形拐角三处应力值较高且均存在应力三轴度大于零的区域,在拉应力作用下容易产生沿型材纵向扩展的裂纹。为了降低下陷过程中应力集中程度,以下针对下陷区长度和过渡圆角半径对下陷过程的影响开展进一步分析。图8显示了下陷深度4.5 mm,过渡圆角为7 mm,下陷温度300 °C条件下,不同下陷区长度对应力及残余应力分布的影响。图中随着下陷区长度的增加,下陷区的应力集中程度下降明显,具体表现为从整个下陷区的高应力逐渐转变为仅在过渡圆角处存在高应力的变化趋势。除此之外,该区域内残余应力也有明显降低。总体而言,下陷区垂直的立边和L形拐角两处的应力和残余应力分布受下陷区长度的影响较小,高应力区域减小不明显。根据下陷区最小化原则,最佳下陷段长度为21 mm。

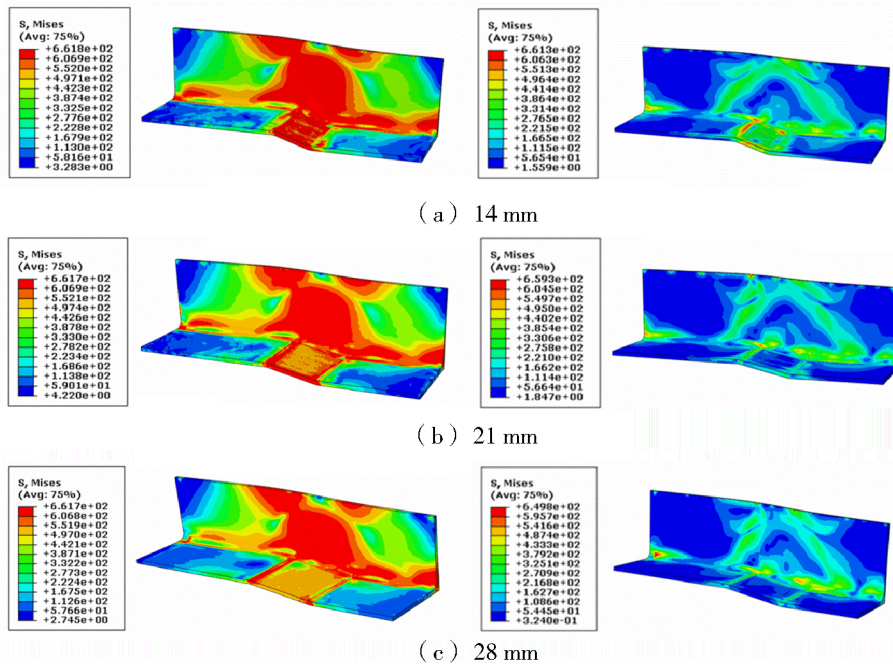


图8 不同下陷区长度条件下下陷成形中的应力和残余应力分布

Fig. 8 Distribution of stress and residual stress during subsidence deformation at the different deformation lengths

下陷过程中过渡圆角半径对型材应力分布的影响如图9所示,随着圆角半径的增大,过渡圆角位置的高应力区面积逐渐减小,应力值逐渐降低。卸载后该区域的残余应力值也有明显降低。当过渡圆角半径达到49 mm(下陷段长度限定的最大圆角半径)时,下陷区的应力集中程度得到缓解,卸载后基本上不存在残余应力。然而,过渡圆角半径的变化对下

陷区立边的应力分布影响不大,随着圆角半径的增大,高应力区面积和应力值均无明显变化。

基于以上分析,针对单边下陷深度4.5 mm的TC2合金等边L型材典型件,本文确定的最佳下陷区长度为21 mm,过渡圆角半径为49 mm,加工温度为300 °C。采用最佳下陷工艺参数成形的TC2合金等边L型材典型件如图10所示,型材下陷区表面光滑

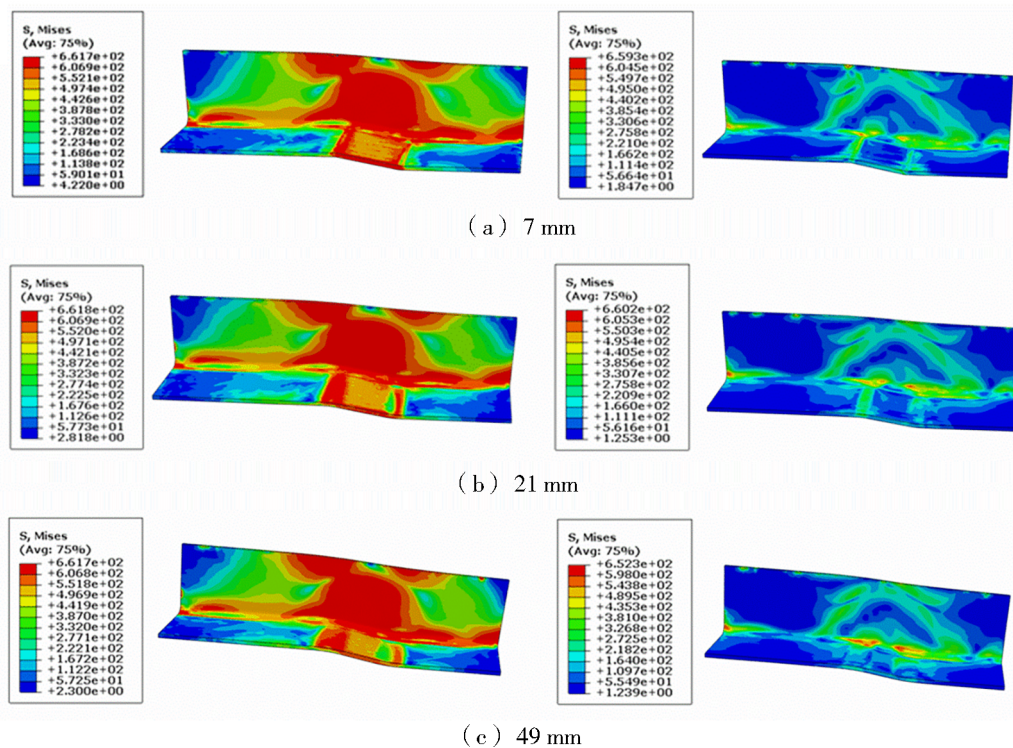


图9 不同过渡圆角半径条件下下陷成形中的应力和残余应力分布

Fig. 9 Distribution of stress and residual stress during subsidence deformation at the different interim fillet radius

过渡,无加工缺陷。



图10 TC2合金L截面型材下陷成形典型件

Fig. 10 Typical subsidence deformation part for TC2 alloy profile with L section

4 结论

(1)在L截面型材单边下陷过程中,下陷区L拐角处容易产生应力集中。变形前段该区域的应力三轴度 $R_d > 0$,呈拉应力状态,因此微裂纹容易在应力集中处形核并沿型材纵向扩展。

(2)TC2合金热拉伸变形特征表明,热下陷有利于减轻下陷变形过程中产生的应力集中程度,减少变形后的回弹量,但热下陷后的型材受到热应力的影响,容易产生翘曲,对零件的整体尺寸精度影响较大。

(3)下陷区长度和过渡圆角半径对型材下陷区加工应力和残余应力分布影响较大,随着下陷区长度和过渡圆角半径的增加,下陷区加工应力和残余应力的峰值面积明显减小。针对本文下陷深度4.5 mm的TC2合金L截面型材,最佳工艺参数为成形温

度 300 °C,下陷段长度 21 mm,过渡圆角半径 49 mm。

参考文献

- [1] 邓同生,李尚,卢娇,等. 钛合金型材精密挤压技术国内外研究现状[J]. 锻压技术,2018,43(6):1-9.
- [2] 马忠贤,冯军宁,胡志杰. 钛及钛合金型材研究进展[J]. 世界有色金属,2016(24):52-53.
- [3] 韩志仁,杜松宸,孟祥韬. 基于有限元分析与试验的型材下陷成形回弹[J]. 沈阳航空航天大学学报,2018,35(6):14-19.
- [4] 谭学明,吴建军,张深,等. 型材下陷成形回弹补偿算法[J]. 航空制造技术,2014,57(Z1):107-110.
- [5] 吴继森. 7075铝合金型材下陷热成形工艺[J]. 航空制造技术,2004,47(1):77-78.
- [6] WU J S. Hot Forming process of recesses in 7075 Al alloy profiles [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47

(1):77-78.

[6] 吴建军,刘伟萍,何文华,等. 2099 铝锂合金型材热压下陷模具结构优选[J]. 航空制造技术,2016,59(13):43-49.

WU J J, LIU W P, HE W H, et al. Tool development for hot joggle forming of 2099 Al-Li alloy profile [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59 (13): 43-49.

[7] 夏琦. 硬态挤压型材下陷冷成形工艺研究及应用[J]. 航空制造技术,2015,58(17):114-116.

XIA Q. Research and application of hard joggle in extruded stock by cold forming [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(17): 114-116.

[8] KOTKUNDE N, DEOLE A D, GUPTA A K, et al. Comparative study of constitutive modeling for Ti-6Al-4V alloy at low strain rates and elevated temperatures [J]. Materials and Design, 2014, 55: 999-1005.

[9] WANG F Z, ZHAO J, ZHU N, et al. A comparative study on Johnson-Cook constitutive modeling for Ti-6Al-4V alloy using automated ball indentation (ABI) technique [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633(5): 220-228.

[10] MOĆKO W, ADAM B. Application of opticalfield

analysis of tensile tests for calibration of the Rusinek-Klepaczko constitutive relation of Ti6Al4V titanium alloy [J]. Materials and Design, 2015, 88(25): 320-330.

[11] 李庆华,冀方冉,李付国. 塑性变形中应力状态与应力状态参数的关系[J]. 锻压技术,2014,39(3):122-126.

LI Q H, JI F R, LI F G. Relationship of stress state and stress state parameters in plastic deformation [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(3): 122-126.

[12] 陈爱国,王开明,邢信慧,等. 单调荷载下 Q345 钢焊缝金属的延性断裂性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 88-97.

CHEN A G, WANG K M, XING G H, et al. Ductile fracture behavior of weld metal for Q345 steel under monotonic loading [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 88-97.

[13] 马凯,李智慧,汤安民. 金属材料断裂与应力状态参数的关系[J]. 西安理工大学学报,2007(2):201-204.

MA K, LI Z H, TANG A M. The relation between fracture of metal material and stress state parameter [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007(2): 201-204.