

钛合金轮圈旋压的有限元模拟与试验

FEM Simulation and Experiment on Spinning Process of Titanium Alloy Wheel Rim

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 单德彬 徐文臣
北京星航机电设备厂 周祥

[摘要] 应用 ANSYS/LS-DYNA 软件对钛合金轮圈的旋压过程进行了有限元数值模拟,并开展了 TC4 钛合金热旋翻边的试验研究,基于此确定了钛合金轮圈合理的热旋成形方案。

关键词: TC4 钛合金 轮圈 热旋 有限元模拟 起皱

[ABSTRACT] The spinning process of wheel rim is simulated by the FEM software of ANSYS/LS-DYNA, and the experimental research is conducted on hot-spinning flange of TC4 titanium alloy, based on which the proper hot spinning scheme of wheel rim of titanium alloy is determined.

Keywords: TC4 titanium alloy Wheel rim Hot spinning FEM simulation Wrinkle

钛合金轮圈作为太空着陆器上的重要承力构件(见图1),具有质量轻、强度高、耐热和耐腐蚀等优点,但是其径厚比大,零件质量要求高,且钛合金回弹严重,使得其成形难度较大^[1-3]。如果采用冲压工艺进行钛合金轮圈的翻边成形,由于轮圈两侧均需翻边,翻边模具结构较为复杂,对成形设备要求较高,不适合钛合金轮圈单件、小批量和多品种的生产特点。若采用旋压工艺翻边成形,所需旋压力较小,模具简单,成本低,适合单件、小批量生产^[4-6],因此通过旋压工艺成形钛合金轮圈具有较大的可行性。然而,由于钛合金轮圈壁厚较薄,且钛合金冷成

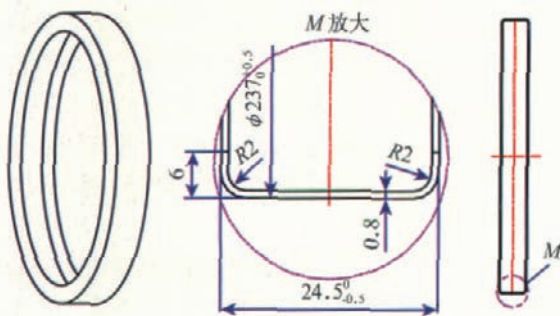


图1 TC4钛合金轮圈零件图
Fig.1 TC4 alloy wheel rim

形性差,热旋翻边必须采用热旋方式进行^[7-8]。钛合金在热旋过程中容易产生起皱、裂纹等成形缺陷,直接影响到钛合金轮圈的成形质量。为此,本课题采用 ANSYS/LS-DYNA 软件开展了 TC4 钛合金轮圈热旋翻边过程的有限元模拟,研究了工艺参数对旋压变形的影响规律,分析了翻边缺陷的形成原因,并基于此开展钛合金热旋翻边的试验研究,获得了钛合金轮圈合理的热旋工艺方案,成形出了完全合格的 TC4 钛合金轮圈。

1 钛合金轮圈热旋翻边的有限元分析

1.1 有限元模型的建立

钛合金轮圈旋压翻边的成形原理如图2所示,坯料和芯模随主轴旋转,旋轮按照预定轨迹(直线、圆弧、渐开线或双曲线等)运动,坯料经过单道次或多道次旋压达到零件要求的形状尺寸。由于旋轮按一定的轨迹实现径向和轴向进给,旋轮相对于坯料的运动轨迹为一空间螺旋线,且旋轮发生自转,变形过程较为复杂。为了便于有限元计算并保证精度,对旋压翻边的模拟计算作了如下简化和假设。

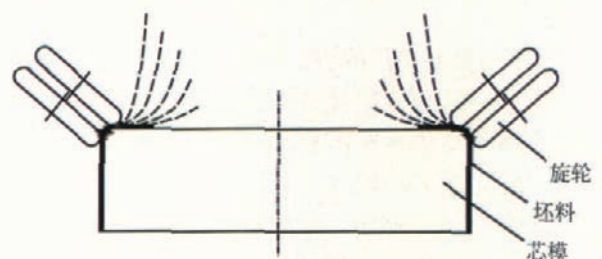


图2 轮圈旋压翻边原理
Fig.2 Spinning process of wheel rim

- (1) 芯模和坯料相对静止,旋轮沿空间螺旋线进给,忽略旋轮自转及芯轴重力和惯性力的影响;
- (2) 因为试验过程在相对较窄的温度区间内进行,忽略温度变化的影响;
- (3) 坯料被芯模和夹具固定的部分难以变形,故对该区施加全约束。

由于轮圈直径较大($\phi 236 \sim 316\text{mm}$)而壁厚较小(0.8mm),为确保计算精度兼顾计算效率,采用壳单

元划分网格;旋轮和芯模为刚性体,网格也采用壳单元划分,但其网格划分的密度较坯料稀疏以提高计算速度^[9-10],划分的网格模型如图3所示。采用ANSYS/LS-DYNA动力显式有限元软件对钛合金轮圈的旋压翻边过程进行弹塑性有限元模拟,TC4钛合金的材料模型参数如表1所示,选取的工艺参数和边界条件如表2所示。

表1 TC4钛合金材料的模型参数

参数名称	参数数值	参数名称	参数数值
密度 / (kg·m ⁻³)	4 440	弹性模量 /MPa	18 000
屈服强度 /MPa	445	切变模量 /MPa	200

表2 工艺参数和边界条件

参数名称		参数数值	参数名称		参数数值
坯料	直径 /mm	236	芯模	直径 /mm	236
	厚度 /mm	0.8		圆角半径 /mm	2
旋轮	直径 /mm	300	摩擦	动摩擦系数	0
	圆角半径 /mm	8		静摩擦系数	0.3
翻边长度 /mm		6.8~18.8	进给比 / (mm·r ⁻¹)		0.1~8.0



图3 轮圈旋压成形的有限元模型

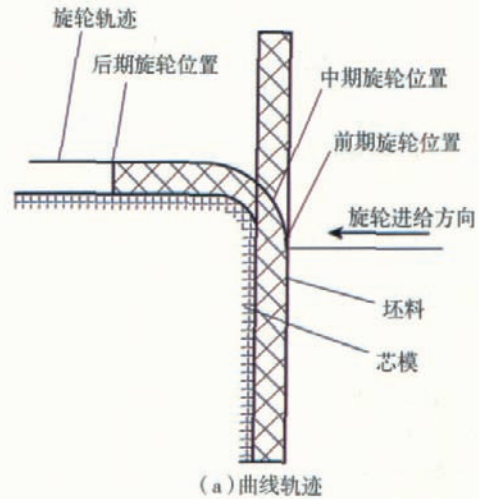
Fig. 3 FE model of spinning process of wheel rim

1.2 旋压参数对旋压翻边变形的影响

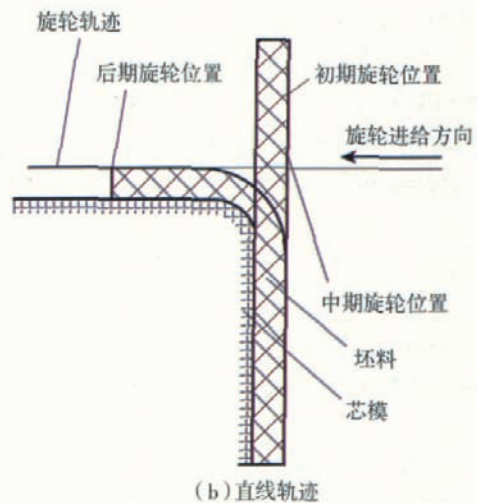
在旋压翻边过程中,旋压轨迹、翻边长度和进给比等因素对零件质量有着直接的影响,通过有限元模拟来研究旋压工艺参数对翻边质量的影响,有利于钛合金轮圈合理热旋工艺的制定。考虑到零件要求的翻边长度较小(6mm),本课题重点研究钛合金轮圈一道次热旋翻边成形的可能性。

1.2.1 不同旋压轨迹对翻边过程的影响

根据零件形状尺寸的要求,分别采用曲线轨迹和直线轨迹进行旋压翻边过程的有限元模拟。采用曲线轨迹时旋轮从轮圈外表面圆弧起点处起旋,旋轮先走圆弧轨迹后沿平行于芯模端面的直线轨迹进给,如图4(a)所示;采用直线轨迹时旋轮直接沿平行于芯模端面的直线进给,如图4(b)所示。图5为在坯料翻边部分边长7.8mm、进给比0.1mm/r条件下采用不同轨迹翻边时的局部变形图,图6和图7分别为旋压后期不同旋压轨



(a)曲线轨迹



(b)直线轨迹

图4 旋压翻边轨迹示意图

Fig.4 Roller trajectories in spinning process

迹翻边时的应力、应变及减薄率的对比结果。

从图5可以看出,随着旋压过程的进行,塑性变形区逐步扩大,当翻边长度为7.8mm时采用圆弧轨迹和直线轨迹均可一道次翻边成形。从图6可以看出,旋压轨迹的不同导致金属的变形流动不同,其应力、应变和壁厚的变化也有所不同。曲线轨迹下切向压应力随着距约束端距离的增大而逐步增大,而直线轨迹下坯料边缘处的切向压应力要小得多,且采用直线轨迹时坯料的厚向应变和切向应变的变化小于曲线轨迹的情况。从壁厚减薄率看,曲线轨迹时壁厚减薄率要大于直线轨迹时的壁厚减薄率(见图7)。这说明当翻边部分长度较小时,采用曲线轨迹翻边时的变形量较直线轨迹时要大,且各区变形不如直线轨迹时均匀。这是因为采用曲线轨迹旋压时紧靠约束端的部位先变形,然后向远离约束端的外边缘扩展,而采用直线轨迹时旋轮首先接触坯料翻边段的中间部分,然后向两侧移动(见图4),而正是由于

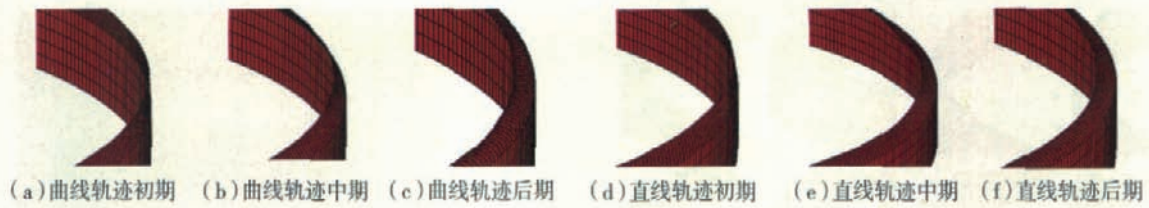
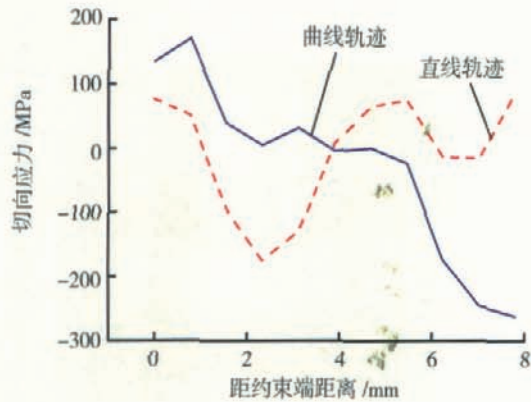
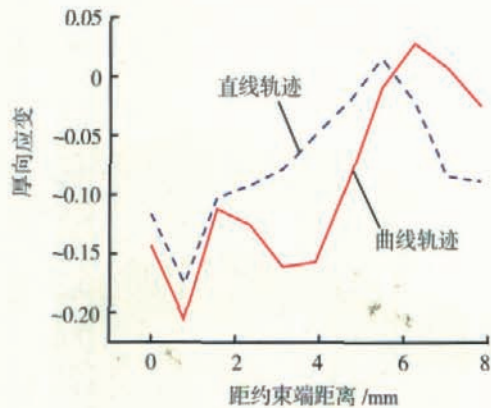


图5 不同轨迹、不同时期坯料翻边变形图

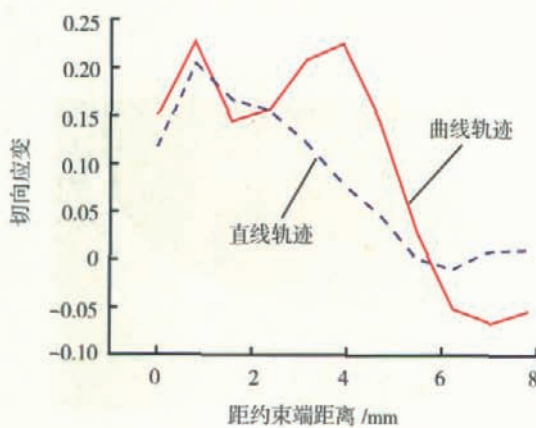
Fig.5 Deformed mesh in various stages and different roller trajectories



(a) 切向应力



(b) 厚向应变



(c) 切向应变

图6 成形后期不同轨迹的应力、应变比较

Fig.6 Comparison of stress and strain in the final spinning stage and different roller trajectories

不同旋轮轨迹的翻边部分各区屈服顺序不同,引起了旋压过程的变形差异。据此分析可知,采用曲线轨迹时零件外边缘处更易出现起皱现象。

1.2.2 不同翻边长度对翻边过程的影响

在钛合金轮圈的翻边过程中,采用单道次还是多道次成形取决于单道次翻边的有效长度。当轮圈所需直边长度小于单道次翻边有效长度时只需一道次翻边,否则需进行多道次翻边。为此,本课题采用曲线轨迹和直线轨迹分别在不同翻边长度下进行单道次翻边过程的有限元模拟,设定进给速度为 0.1mm/s,翻边结果如图 8 所示。由图可以看出,在相同的旋轮轨迹和进给速度下,当翻边部分较短时坯料翻边质量良好,而翻边部分较长时容易产生起皱等缺陷,使得单道次旋压变形不能顺利完成。不同旋轮轨迹和不同进给比下的模拟结果均出现了相似的变形特点,当翻边长度超过 10mm 时坯料的起皱趋势更加明显。因此,钛合金轮圈旋压翻边时在保证零件尺寸的前提下应选择较小的坯料翻边长度,从而避免起皱等缺陷的产生。

1.2.3 不同进给比对翻边过程的影响

由于进给比是影响零件成形质量的重要工艺参数,本课题在翻边长度 7.8mm,进给比 0.05mm/r、1mm/r、4mm/r、8mm/r 的条件下进行了钛合金轮圈的旋压翻边模

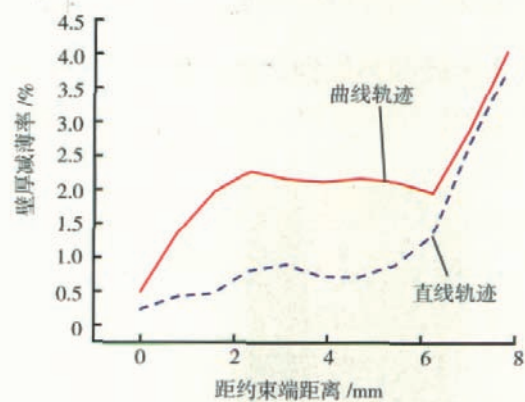


图7 成形后期不同轨迹壁厚减薄率比较

Fig.7 Comparison of wall reduction ratio in the final spinning stage and different roller trajectories

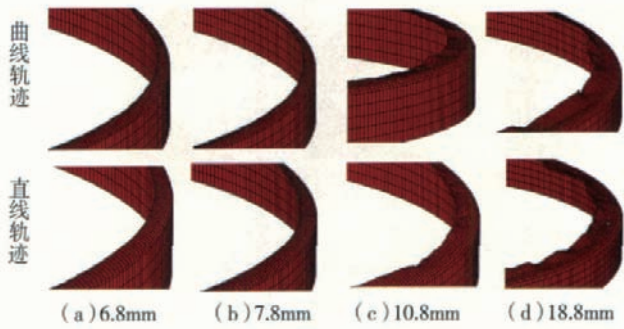


图8 曲线和直线轨迹下不同翻边长度变形图

Fig.8 Deformed mesh of various flange length in curved and linear trajectory

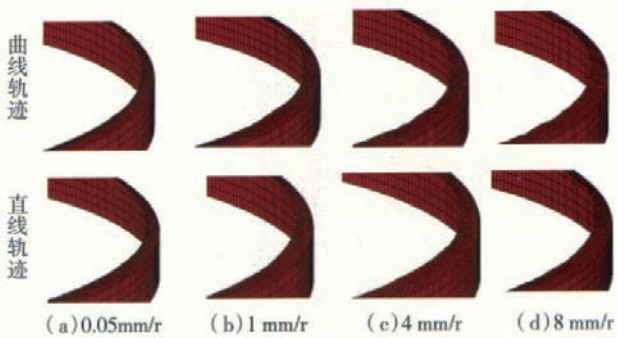


图9 曲线和直线轨迹下不同进给比的变形图

Fig.9 Deformed mesh of various feed ratio in curved and linear trajectory

拟,图9为采用曲线和直线轨迹翻边时坯料的局部变形图。从图中可以看出,进给比较小时,翻边质量良好;随着进给比的增大坯料出现起皱趋势,且曲线轨迹下起皱趋势较直线轨迹严重。根据前面的分析可知,这主要是由于采用曲线轨迹旋压时坯料外端受到的切向压应力更大,坯料厚向减薄和切向压缩较直线轨迹时更严重所致。因此,在旋压翻边过程中应选择较小的进给比,而对翻边部分较短的坯料采用直线轨迹将有利于抑制起皱。

2 钛合金轮圈热旋翻边的试验研究

钛合金轮圈的热旋翻边试验在一台双旋轮数控旋

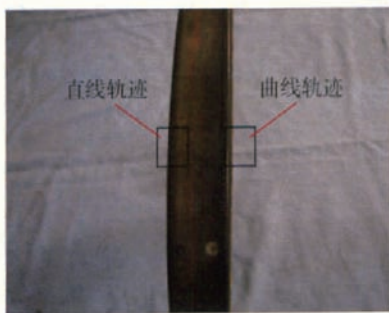


图10 不同旋轮轨迹成形出的合格零件

Fig.10 Well-formed wheel rim in different trajectories



(a) 13 mm/min



(b) 35mm/min

图11 不同进给速度旋压翻边的零件
Fig.11 Spun workpieces in different feed ratios



(a) 大于坯料壁厚



(b) 小于坯料壁厚

图12 不同旋轮与芯模间隙下的成形缺陷
Fig.12 Spinning defects in different gaps between the roller and mandrel

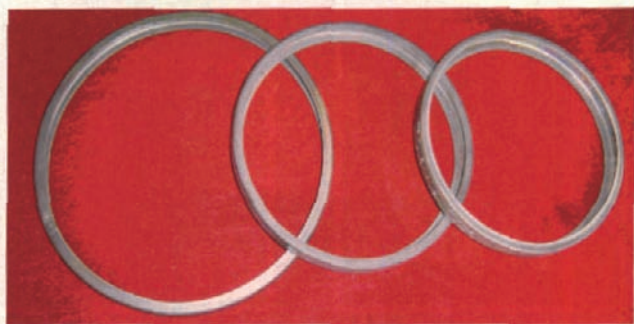


图13 成形出的合格零件
Fig.13 Well-formed spun wheel rims

压机上进行,设备精度高、编程灵活,可有效保证复杂旋压件的精密成形。由于图1所示的TC4钛合金轮圈所需翻边部分长度较小(6mm),所以本试验重点研究钛合金轮圈一道次热旋翻边成形的可行性。由于钛合金轮圈两侧均有直边,翻边模具采用分瓣式组合模具。热旋过程先一侧翻边,然后掉头进行另一侧翻边,坯料采用火焰加热。

2.1 热旋工艺参数对成形质量的影响

根据钛合金轮圈尺寸要求,考虑到加工余量,将单边翻边长度定为8mm,采用不同轨迹进行了热旋翻边试验,试验结果如图10所示。该轮圈的左侧采用直线轨迹翻边成形,右侧采用曲线轨迹成形。试验结果表明,无论采用直线轨迹还是曲线轨迹均可取得良好的翻边效果,这与图4的模拟结果较为吻合。由于采用直线轨迹翻边时的变形较曲线轨迹更均匀,且贴模效果很好,所以可采用直线轨迹进行单道次普旋成形钛合金轮圈,同时可提高成形效率。通过模拟结果可知,当进给比较小时零件翻边质量较好,随着进给比的增大翻边部分容易出现起皱现象。为此,本课题在主轴转速150r/min、进给速度分别为13mm/min和35mm/min的条件下进行了热旋试验,试验结果如图11所示。试验结果表明,在较小的进给比条件下翻边出的零件直边平整、表面平滑(图11(a)),在较大的进给比下翻边时轮圈出现起皱现象(图11(b)),这与模拟结果趋势一致。因此,钛合金轮圈热旋翻边时进给比不能过大,以保证均匀贴模并防止起皱。

此外,旋轮与芯模的间隙大小对钛合金轮圈的成形质量有着重要的影响,图12为不同间隙翻边成形的热旋试验件。当旋轮与芯模的间隙大于坯料壁厚时,翻边部分受到较大的切向压缩,零件边缘容易出现起皱现象(图12(a));当旋轮和芯模的间隙过小时,成形出的零件直边部分壁厚会减薄,当过度减薄时还容易出现剪裂现象(图12(b))。因而,考虑到坯料的起皱与回弹,旋轮与芯模间隙应比坯料厚度略小以抑制坯料起皱。但间隙不可过小,需控制在一定的范围内。试验研究表明,

控制间隙小于坯料厚度的10%左右较为合适。

2.2 钛合金轮圈的热旋翻边工艺

根据TC4钛合金轮圈的结构特点,考虑其热旋翻边缺陷的产生原因,旋轮采用直线轨迹和小的进给比(0.1mm/r左右),翻边间隙选取值略小于坯料厚度以提高坯料的贴模性,并通过合理控制热旋温度,成形出了质量良好的钛合金轮圈,如图8所示。由此说明,钛合金轮圈有限元模拟和试验研究的结果是较为可靠的,本课题采用钛合金热旋翻边成形工艺是较为合理的。

3 结束语

翻边部分外缘较大的切向压应力是造成边缘起皱的原因,当翻边长度较小时采用直线轨迹和曲线轨迹均可成形出合格的钛合金轮圈,但采用直线轨迹时坯料的变形量较曲线轨迹稍小,变形更为均匀,坯料边缘所受的切向压应力更小,翻边部分更不易起皱。随着翻边长度的增加和进给比的增大,坯料起皱趋势增强;旋轮与芯模间隙过小时坯料容易过度减薄甚至剪裂,间隙过大零件边缘容易起皱。当坯料翻边长度较小时,采用分瓣式组合模具结构,并选取直线轨迹、较小的进给比、适当的翻边长度(不超过10mm)及略小于坯料壁厚的间隙(小于壁厚的10%左右)进行单道次热旋翻边,可以成形出完全合格的钛合金轮圈零件。

参考文献

- [1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. Mater. Sci. Eng. A, 1996 (213): 103-114.
- [2] Gorynin I V. Titanium Alloys for Marine Application. Mater. Sci. Eng. A, 1999 (263): 112-116.
- [3] 楼贯涛. 钛合金的研究应用现状及其发展方向. 钛工业进展, 2003(2): 9-13.
- [4] 日本塑性加工学会. 旋压成形技术, 陈敬之译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] Wong C C, Dean T A, Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. Inter. J. Mach. Tool. Manu., 2003 (43): 1419-1435.
- [6] Yao Jianguo, Murata Makoto. An Experimental Study Paraxial Spinning of One Tube End. J. of Mater. Process. Technol. 2002 (128): 324-329.
- [7] 毛柏平, 汪发春, 赵云豪, 等. 钛合金旋压性能的试验研究. 稀有金属. 2004, 28(1): 271-273.
- [8] Shan Debin, Lu Yan, Li Ping, et al. Experiment study on process of cold-power spinning of Ti-15-3 alloy. J. of Mater. Process. Technol., 2001, 115(3): 380-383.
- [9] 张涛, 林刚. 碟形容器封头冷旋压过程三维有限元数值分析. 机械工程学报. 2002, 38(7): 136-139.
- [10] 龚曙光. Ansys 基础应用及范例分析. 北京: 机械工业出版社. 2003.

(责编 小颖)