

TB6 钛合金筒形件强力旋压成形工艺模拟

朱恩锐, 崔霞, 郭陆陆, 欧阳德来

(南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 建立了 TB6 钛合金筒形件旋压成形工艺模型, 运用有限元软件对不同工艺参数下工件的变形过程进行了模拟, 分析了工件在旋压过程中的受力和变形特性, 并研究了减薄率 (30%~45%)、变形温度 (900~1050 ℃)、主轴转速 (3~6 r·s⁻¹) 和旋轮进给率 (1.0~2.5 mm·s⁻¹) 等工艺参数对旋压过程中等效应力、等效应变的影响规律。结果表明: 变形温度和主轴转速对工件成形质量的影响较小, 旋轮进给率和减薄率对成形质量的影响较大。随着旋轮进给率的增大, 外径圆度精度呈 V 形分布; 随着减薄率的增大, 工件的最大等效应力和等效应变均随之增大。综合优选出的最佳的旋压工艺参数组合为: 减薄率为 30%、变形温度为 1000 ℃、主轴转速为 4 r·s⁻¹、旋轮进给率为 2 mm·s⁻¹。

关键词: 钛合金; 旋压; 筒形件; 减薄率; 主轴转速; 旋轮进给率; 变形温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.016

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0126-09

Simulation on power spinning process for TB6 titanium alloy cylindrical parts

Zhu Enrui, Cui Xia, Guo Lulu, Ouyang Delai

(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The spinning process model of TB6 titanium alloy cylindrical parts was established, and the deformation process of workpiece under different process parameters was simulated by finite element software. Then, the force and deformation characteristics of workpiece during the spinning process were analyzed, and the influence laws of process parameters such as thinning rate (30%~45%), deformation temperature (900~1050 ℃), spindle speed (3~6 r·s⁻¹) and wheel feeding rate (1.0~2.5 mm·s⁻¹) on equivalent stress and equivalent strain during the spinning process were studied. The results show that the deformation temperature and the spindle speed have little influence on the forming quality of workpiece, while the wheel feeding rate and the thinning rate have significant influence on the forming quality. With the increasing of the wheel feeding rate, the roundness accuracy of outer diameter shows V-shaped distribution, and with the increasing of the thinning rate, the maximum equivalent stress and the equivalent strain of workpiece increase accordingly. Thus, the optimal combination of spinning process parameters obtained by comprehensive optimization is the thinning rate of 30%, the deformation temperature of 1000 ℃, the spindle speed of 4 r·s⁻¹, and the wheel feeding rate of 2 mm·s⁻¹.

Key words: titanium alloy; spinning; cylindrical part; thinning rate; spindle speed; wheel feeding rate; deformation temperature

TB6 钛合金的名义成分为 Ti-10V-2Fe-3Al, 具有断裂韧性好、密度小、各向异性小和耐高温、耐腐蚀等优点^[1], 广泛应用于航空领域, 如制造主起落架、横梁、滑轨、接头等零部件^[2]。

筒形件广泛应用于航天航空、国防军工等领域, 是导弹壳体、飞机副油箱、炮管和搅拌机转筒等重要的零部件, 其通常采用旋压加工成形。旋压可以

细化材料的晶粒并形成纤维状, 改善材料的力学性能^[3]。钛合金变形阻力大, 塑性加工能力差, 随着钛合金筒形件精度要求的日益提高, 工件锻造质量难以达标, 旋压成形的效率越来越低。目前, 旋压工艺参数往往依靠经验来决定, 并没有一个明确的标准。采用有限元数值模拟的方法分析旋压参数对旋压过程的影响, 可以有效地降低成本并提高旋压成功率。

国内外许多学者对工件的旋压成形进行了大量研究。张坦等^[4]建立了 Hastelloy C276 高温合金薄壁筒形件的弹塑性有限元模型, 研究了减薄率、芯模转数等工艺参数对反旋成形内径偏差和壁厚偏差的影响规律。周宇等^[5]基于有限元软件 Abaqus 分析了旋轮数量对 2219-O 铝合金带筋筒体内筋填充的影

收稿日期: 2022-04-18; 修订日期: 2022-07-17

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金资助项目 (51761029)

作者简介: 朱恩锐 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 287148134@qq.com

通信作者: 崔霞 (1979-), 女, 博士, 副教授

E-mail: Cuixia2000@163.com

响规律。吕伟等^[6]通过模拟和实验相结合的方法,研究了带螺旋内筋薄壁筒形件的旋压变形特征,分析了旋压力作用下不同区域的应力、应变特征。张媛琦等^[7]对 AZ91 镁合金筒形件进行了多道次的强力旋压,研究了减薄率对筒形件力学性能的影响。Han D 等^[8]综合考虑各种热效应建立了 TA15 钛合金的旋压模型,研究了该合金在不同机械载荷和热载荷下的变形机制。但是,目前关于关键工艺参数对 TB6 钛合金筒形件旋压成形影响的相关研究较少。

本文基于有限元仿真软件模拟 TB6 钛合金筒形件的旋压成形过程,探究变形温度、减薄率、主轴转速和旋轮进给率对旋压工件的影响,分析钛合金筒形件在旋压过程中等效应力、等效应变的变化及工件表面变形情况,综合优选出最佳的旋压成形工艺参数组合,从而为缩短研发周期、提高旋压成功率提供理论依据。

1 有限元建模

1.1 几何模型建立

采用反旋的方式模拟筒形件的旋压成形过程,模型由旋轮、工件和芯模 3 部分构成。为缩短计算时间,简化了模型,工件类型选取为三维可变形实体,旋轮和芯模选取为三维解析刚体^[9],装配后如图 1 所示。由于在有限元软件中使变形部件旋转运动在理论上是不完善的,因此,采用等效转化方式,使工件与芯模静止不动,工件套在芯模上,旋轮绕工件进行旋转,沿螺旋线进给,工件金属在旋轮的挤压下产生塑性应变流动。

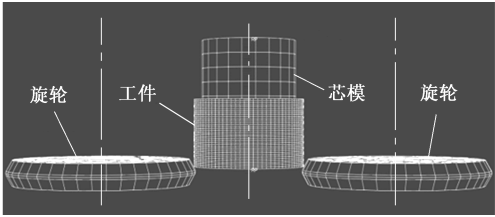


图 1 模型装配图
Fig. 1 Assembly diagram of model

1.2 模型基本参数

创建旋轮、工件和芯模的几何模型,尺寸如表 1 所示,工艺参数选取如表 2 所示。TB6 钛合金的密度为 $4650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比为 0.33,弹性模量为 107 GPa,屈服强度为 1170 MPa,旋轮与芯模的摩擦因数为 0.15,与工件的摩擦因数为 0.1,接触传

表 1 模型几何尺寸
Table 1 Dimensions of model

参数	数值
芯模内径/mm	Φ120
芯模高度/mm	150
芯模外径/mm	Φ140
工件内径/mm	Φ120
工件高度/mm	80
旋轮半径/mm	120
旋轮高度/mm	30
旋轮间夹角/(°)	180
旋轮圆角半径/mm	5
旋轮成形角/(°)	30
旋轮后角/(°)	25

表 2 旋压工艺参数选取
Table 2 Selection of spinning process parameters

参数	数值
减薄率/%	30, 35, 40, 45
变形温度/℃	900, 950, 1000, 1050
主轴转速/($\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$)	3, 4, 5, 6
旋轮进给率/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5

热系数为 $1450\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{℃})^{-1}$ 。

通过 Thermecmaster-Z 型热模拟实验机在 900~1050℃条件下对 TB6 钛合金进行等温恒应变速率热压缩实验,获取流变数据后导入材料属性中的塑性模块,确保有限元模型塑性流动的准确性。

1.3 分析步和网格划分

分析步类型为动力、温度-位移和显示 3 种,为了提高计算效率,采用质量放大技术减少计算时间。网格的质量对结果的计算效率和精度有较大影响,六面体网格在大变形时不易产生畸变并且分析精度高,故工件采用八结点热耦合六面体单元类型划分网格,共划分 21000 个网格。采用 ALE 网格自适应技术,自动调整算法提升计算的精度,使得网格在变形过程中变化平滑,材料流动更均匀,避免工件网格过度变形导致求解器中断。

1.4 有限元模型的可靠性验证

虽然使用质量放大技术可以减少模型计算时间,但是需要验证选择的质量放大系数是否满足变形材料的动能在大部分仿真时间区域内为内能的 5%~10%,超过则认为模型失真^[10]。图 2 为当质量放大系数选用 10000 时模型动能与内能的比值变化曲线。

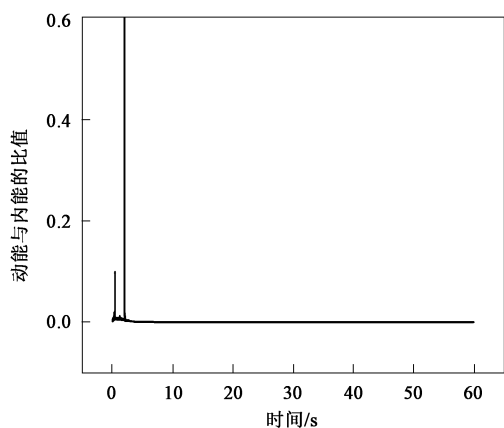


图 2 动能与内能的比值

Fig. 2 Ratio of kinetic energy to internal energy

由图 2 可知,在旋压进程达到 10%之前,曲线产生了较多的波动,这是由于工件与旋轮刚接触,摩擦产生了振动。两者接触稳定后,振动减少,曲线逐渐稳定下来,稳定后曲线的比值远小于 0.05,故选取的模型质量放大系数是恰当的。

2 数值模拟结果与分析

旋压过程中,旋轮在工件上沿螺线前进,工件的等效应力随之发生变化,最大等效应力产生于二者的接触面上,旋轮离开后,等效应力逐渐减小。旋轮下方的金属产生塑性变形,上方的金属产生一定的弹塑性变形,材料出现隆起现象。旋压成形后,壁厚的分布是否均匀反映了工件成形质量的好坏,通常采用外径圆度精度和壁厚偏差来衡量。在工件的底部、1/4 高度、1/2 高度和 3/4 高度处分别截取横向截面,每个截面上选取 4 处测量壁厚值,间隔为 90°,计算同截面 4 个位置的壁厚均值,4 个截面壁厚均值的最大值与最小值之差即为壁厚偏差。对于壁厚为 5~20 mm 的工件,壁厚偏差应小于 0.2 mm。外径圆度精度大小为旋压成形后工件的外径与理想外径之间的最大偏差与最小偏差差值的 1/2,对于壁厚大于 2 mm、内径小于为 $\Phi 150$ mm 的筒形件,其外径圆度精度值小于 0.2 mm 时为质量合格^[11]。选取外径圆度精度最大处的路径以检验旋压工件是否合格,如图 3 所示。为了查看工件同一母线上的等效应变情况,绘制图 4 中选取的路径的等效应变变化曲线。工艺参数对旋压加工过程有较大影响,合理的工艺参数可以有效地提高旋压成功率。本文重点分析表 2 中的 4 个工艺参数对旋压工件的影响,控制其他参数不变,每次仅分析 1 个参

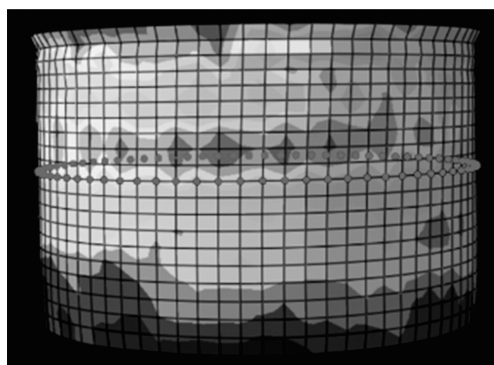


图 3 外径圆度精度路径

Fig. 3 Path of outer diameter roundness precision

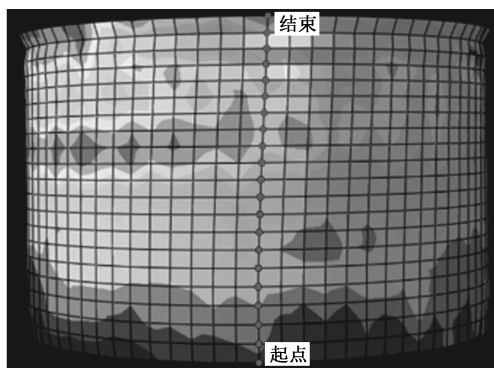


图 4 等效应变路径

Fig. 4 Path of equivalent strain

数对成形结果的影响。

2.1 减薄率

减薄率指壁厚减薄量与工件初始壁厚的比值,对工件成形质量和旋压力的大小有着巨大影响。减薄率的选取要恰当,减薄率过大,筒形件会出现鳞状剥离和周向断裂等现象,过小则容易产生裂纹和褶皱^[12]。在变形温度为 1000 °C、主轴转速为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 、旋轮进给率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,分别选取减薄率为 30%、35%、40% 和 45% 进行分析对比。

图 5 为不同减薄率下筒形件截面的等效应力云图。由图 5 可知,等效应力随着减薄率的增加而增大,工件旋压完成后在顶端堆积了部分金属,此处网格产生了较大的变形。这是由于在旋压过程中,随着材料堆积和隆起的增加,工件与旋轮接触的面积相对增大,使得旋轮的压下量增大,旋压完成的区域中,堆积和隆起又逐渐减少,最终旋压完成时将堆积留在了工件顶端^[13]。

图 6 为不同减薄率下沿路径的等效应变曲线,由图 6 可知,筒形件在不同减薄率下的等效应变曲线变化相近。旋轮沿着工件轴向进给时,工件受到

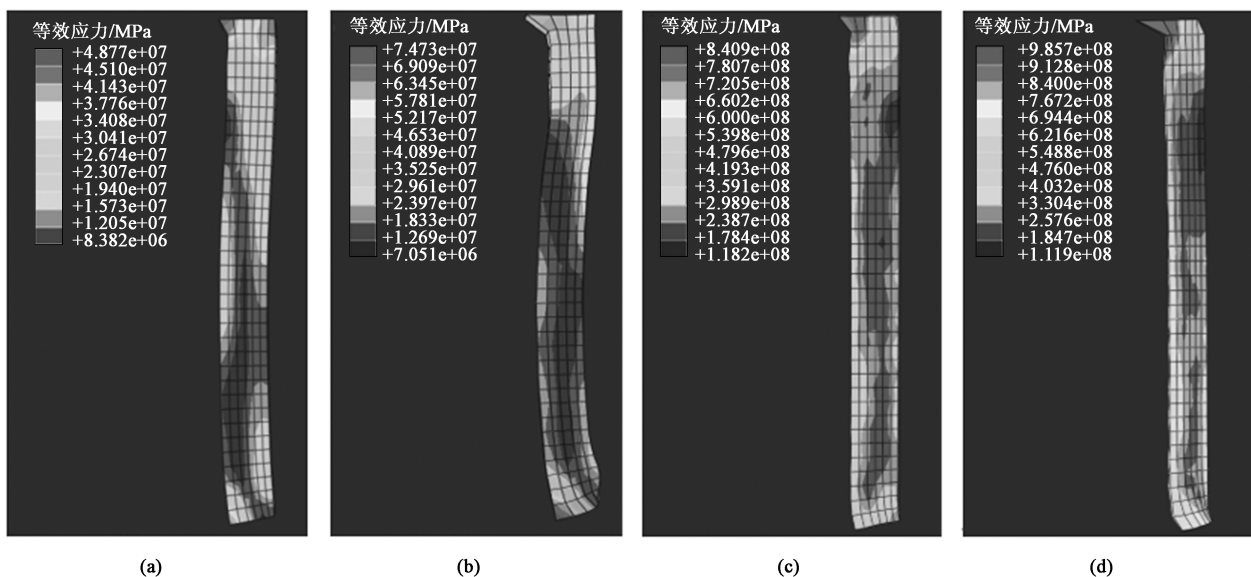


图5 不同减薄率下工件的等效应力云图

(a) 30% (b) 35% (c) 40% (d) 45%

Fig. 5 Equivalent stress cloud maps of workpiece under different thinning rates

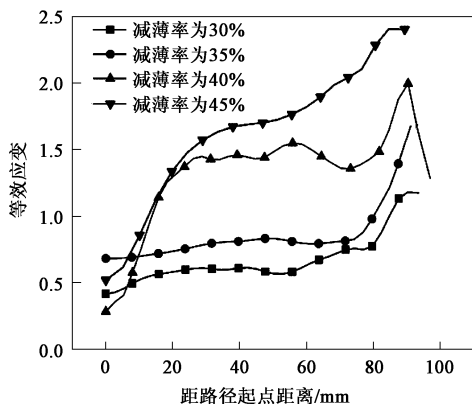


图6 不同减薄率下沿路径的等效应变

Fig. 6 Equivalent strain along path under different thinning rates

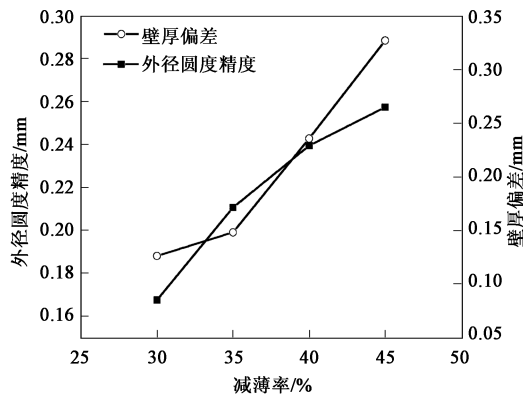


图7 不同减薄率下工件的壁厚偏差和外径圆度精度

Fig. 7 Wall thickness deviation and outer diameter roundness precision of workpiece under different thinning rates

巨大的轴向压力, 等效应力增大的同时, 等效应变也随之增大, 产生弹塑性大变形。旋轮继续进给, 筒形件与芯模接触紧密, 变形速度变缓, 等效应力减小。随着减薄率的增加, 筒形件的等效应变随之增大, 等效应变过大, 则易导致工件产生破裂缺陷, 不利于工件的成形。图7中, 外径圆度精度和壁厚偏差均随着减薄率的增加而增大, 当减薄率为40%和45%时, 壁厚偏差大于0.2 mm, 仅当减薄率为30%时, 外径圆度精度符合加工质量要求, 故减薄率应选取为30%。

2.2 变形温度

TB6 钛合金具有熔点高、激活能大等特点, 常温下的组织稳定, 难以旋压成形, 通常采用加热的

方式降低其变形抗力后再进行后续加工。热旋压成形的温度应在再结晶温度以上, TB6 钛合金在850 ℃发生动态再结晶^[14], 前期TB6钛合金热压缩变形组织结果表明, 低于900 ℃变形时再结晶体积分数较低, 所以旋压变形温度选取在900 ℃以上。故在有限元软件中分别将变形温度设定为900、950、1000和1050 ℃, 设置指定变形温度的恒定温度场, 工件在此条件下进行模拟加工。

变形温度对筒形件旋压时等效应力的影响如图8所示。由图8可知, 变形温度对筒形件的等效应力有着重要影响, 旋压时的最大等效应力随着变形温度的升高而减小。等效应力减小说明材料的塑性有所提高, 有利于工件的变形, 但过高的

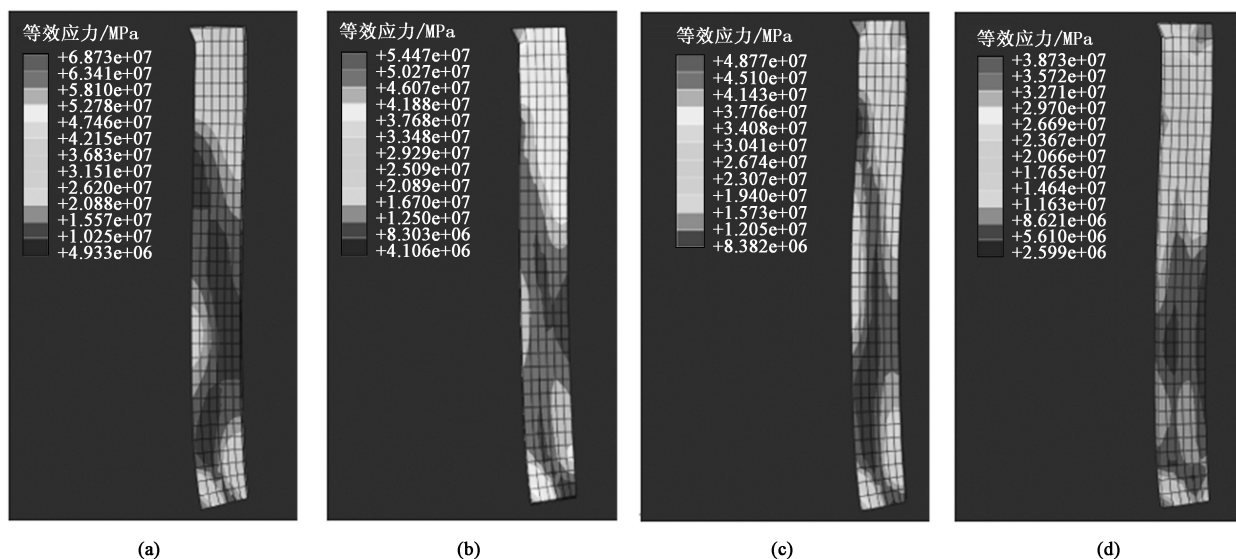


图 8 不同变形温度下工件的等效应力云图

(a) 900 °C (b) 950 °C (c) 1000 °C (d) 1050 °C

Fig. 8 Equivalent stress cloud maps of workpiece under different deformation temperatures

变形温度会使工件的硬度降低,影响工件使用寿命。

从图 9 可以看出,当减薄率为 30%、主轴转速为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 、旋轮进给率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,工件在 950、1000 和 1050 °C 这 3 个变形温度下,沿路径的等效应变曲线几乎重叠,均低于 900 °C 时的等效应变曲线。但结合图 10 可知,在 900 和 1000 °C 这两个变形温度下外径圆度精度均为合格的,在 1000 和 1050 °C 这两个变形温度下壁厚偏差均小于 0.2 mm,故变形温度选取为 1000 °C 较为合适。

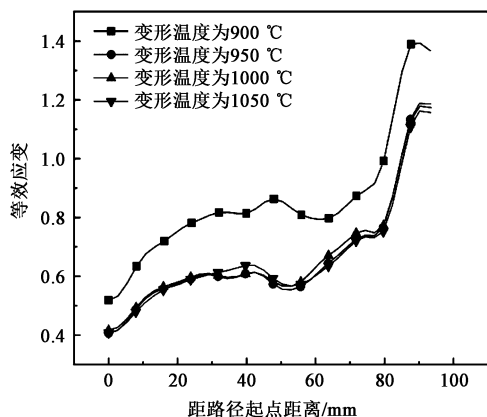


图 9 不同变形温度下沿路径的等效应变

Fig. 9 Equivalent strain along path under different deformation temperatures

2.3 主轴转速

主轴转速是指芯模每秒钟转动的圈数,适当地

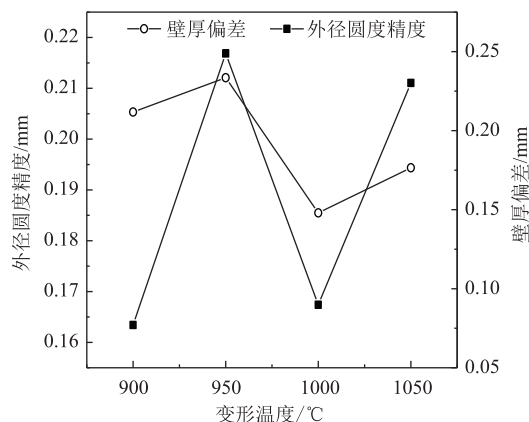


图 10 不同变形温度下工件的壁厚偏差和外径圆度精度

Fig. 10 Wall thickness deviation and outer diameter roundness precision of workpiece under different deformation temperatures

优化主轴转速可以提升生产效率并改善零件表面的粗糙度,避免工件边缘起皱。根据实际生产时的转速范围,在减薄率为 30%、变形温度为 1000 °C、旋轮进给率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,分别选取主轴转速为 3、4、5 和 $6 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行有限元模拟,分析主轴转速对工件旋压过程的影响。

图 11 为不同主轴转速下工件的等效应力云图。由图 11 可知,在旋压成形时主轴转速对工件的等效应力影响较小。通过比较不同条件下的外径圆度精度和等效应变曲线选取出最合适的主轴转速。图 12 中,主轴转速为 5 和 $6 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,等效应变曲线有较大的波动,这是由于主轴转速过高,摩擦生热产

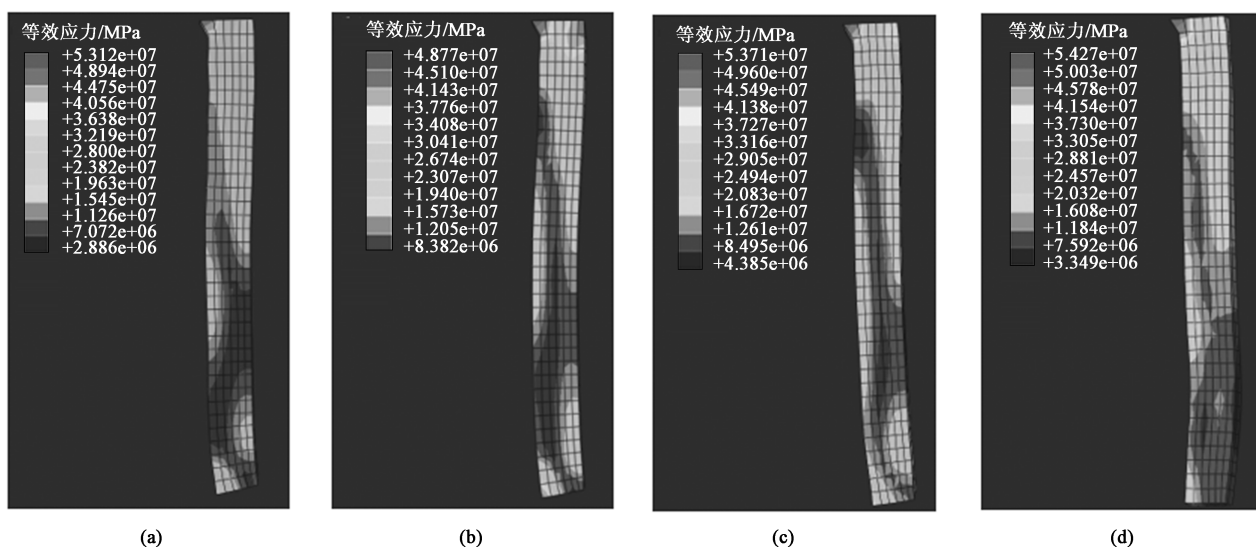


图 11 不同主轴转速下工件的等效应力云图

(a) $3 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $5 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $6 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 11 Equivalent stress cloud maps of workpiece under different spindle speeds

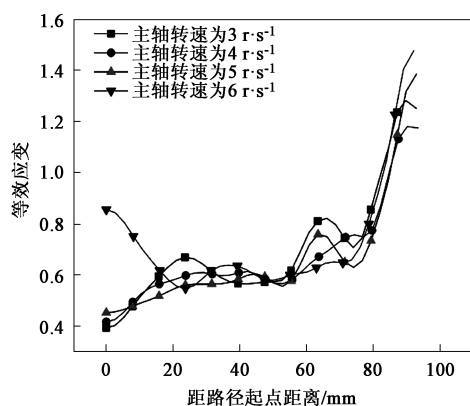


图 12 不同主轴转速下沿路径的等效应变

Fig. 12 Equivalent strain along path under different spindle speeds

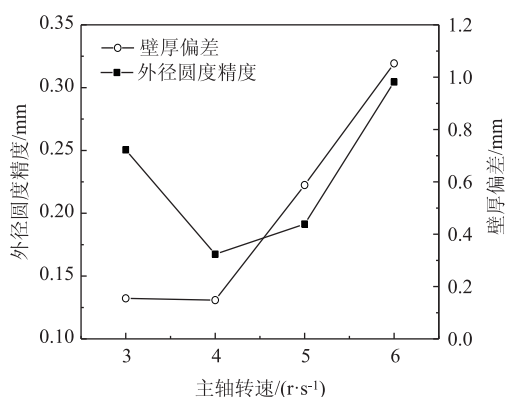


图 13 不同主轴转速下工件的壁厚偏差和外径圆度精度

Fig. 13 Wall thickness deviation and outer diameter roundness precision of workpiece under different spindle speeds

出的热量过多,导致工件软化程度更高。现实中,虽然高转速可以使得工件在单位时间内变形的区域增加,限制材料变形时的周向流动,但也更容易引起机床震动。主轴转速为 $3 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,由于单位时间内旋转圈数过少,导致工件等效应变不均匀,工件表面质量不合格。图 13 中,随着主轴转速的增加,壁厚偏差逐渐增大,这与张坦等^[4]的研究结果相一致。壁厚偏差仅在主轴转速为 3 和 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时合格,外径圆度精度仅在主轴转速为 4 和 $5 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时小于 0.2 mm ,故主轴转速选取为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.4 旋轮进给率

旋压时,旋轮进给率对工件表面光洁度、旋压力、工件尺寸的精度均具有重要的影响。旋轮进给率越大,单位时间内旋轮在工件上前进的距离越大,加工时间越短,有利于提高旋压效率。

当减薄率为 30%、变形温度为 1000°C ,主轴转速为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,旋轮进给率对筒形件旋压时等效应力的影响如图 14 所示。由图 14 可知,旋压时工件的等效应力随着旋轮进给率的提高而增大,这是因为:提高旋轮进给率会导致材料的变形速率增加,变形抗力增大。图 15 中,不同旋轮进给率下沿路径的等效应变趋势相似。旋轮沿着母线前进的同时,工件也在不断的发生弹塑性变形,金属堆积越来越多,旋轮与工件之间的作用力与反作用力越来越大,变形难以全部释放,使得等效应变逐渐增大。从图 16 可以看出,壁厚偏差仅在旋轮进给率为 1.5 和 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时符合加工质量要求。当旋轮进给率小于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,旋轮加工工件的时间较长,工件变形充分,工件周向的塑性流动随着旋轮进给率的

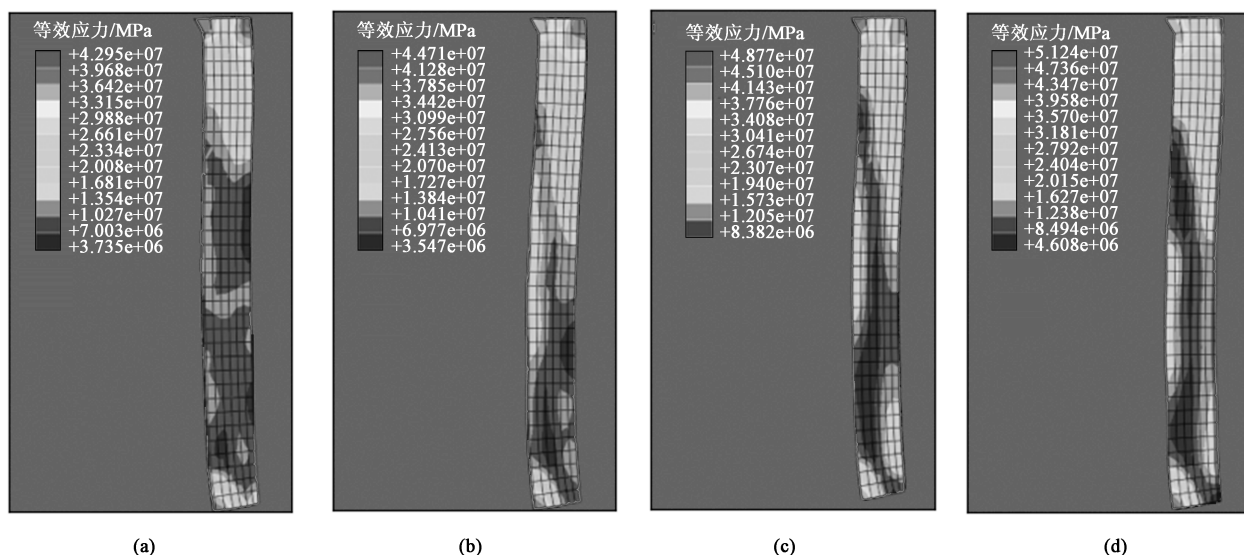


图 14 不同旋轮进给率下工件的等效应力云图

(a) $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $2.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 14 Equivalent stress cloud maps of workpiece under different wheel feeding rates

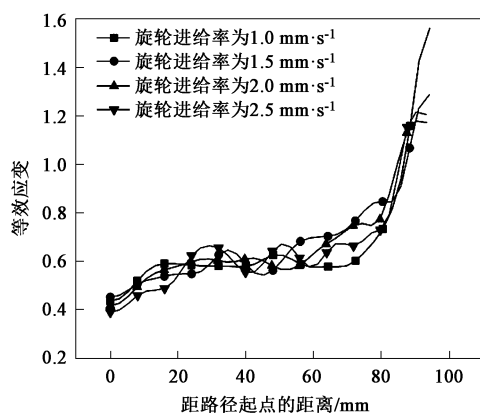


图 15 不同旋轮进给率下沿路径的等效应变

Fig. 15 Equivalent strain along path under different wheel feeding rates

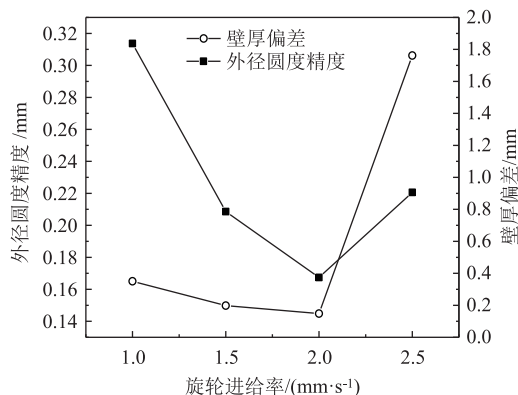


图 16 不同旋轮进给率下工件的壁厚偏差和外径圆度精度

Fig. 16 Wall thickness deviation and outer diameter roundness precision of workpiece under different wheel feeding rates

增大而减少, 外径圆度精度减小^[15-16]。但是, 当旋轮进给率为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 外径圆度精度反而增大, 这是由于: 在过大的旋轮进给率下, 旋轮在工件上停留的时间较短, 对工件表面的挤压不够充分, 单位时间内材料流动量较大, 产生堆积现象, 使得表面光洁度降低, 故旋轮进给率宜选取为 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.5 最佳参数组合

在减薄率为 30%、变形温度为 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、主轴转速为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 和旋轮进给率为 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 模拟加工结果如图 17 所示。可以看出, 筒形件模型的等效应力分布较为均匀, 网格无大面积变形, 加工后的表面光洁度较高, 外径圆度精度及壁厚偏差均小于 0.2 mm , 符合加工质量要求, 具有较好的加工结果。

3 结论

(1) 在 TB6 钛合金筒形件旋压过程中, 最大等效应力产生于与旋轮接触的工件表面上, 旋轮上方出现隆起现象, 随着旋轮沿母线方向前进, 隆起部分上移, 旋压完成后在工件顶端堆积部分金属。

(2) 随着减薄率的增加, 工件的最大等效应力和等效应变均随之增大, 减薄率选取 30% 为宜。随着变形温度的提高, 筒形件的塑性提高, 最大等效应力减小, 有利于工件的变形, 变形温度选取 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 较为合适。主轴转速对旋压成形时工件的

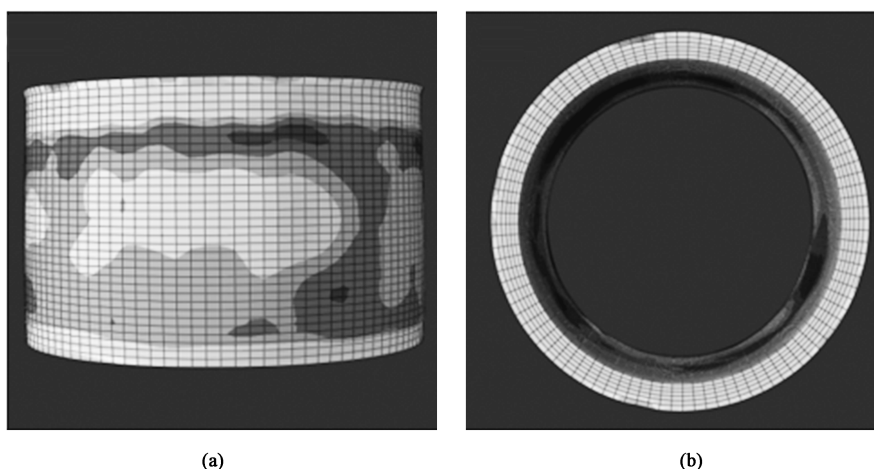


图17 模拟加工结果

(a) 侧视图 (b) 俯视图

Fig. 17 Results of simulated machining

(a) Side view (b) Vertical view

等效应力和等效应变影响较小,但不合适的主轴转速会让工件边缘起皱,影响工件成形,结果表明主轴转速选取为 $4 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 最佳。旋轮进给率对工件成形有着较大影响,随着旋轮进给率的增大,外径圆度精度分布呈 V 形,即呈先减小后增大的趋势。在一定范围内增加旋轮进给率可以提高工件加工效率,改变工件表面质量, $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为最合适的旋轮进给率。

参考文献:

- [1] 易湘斌,张俊喜,李宝栋,等. 高温、高应变率下 TB6 钛合金的动态压缩性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (4): 1220-1224.
Yi X B, Zhang J X, Li B D, et al. Dynamic compressive mechanical properties of TB6 titanium alloy under high temperature and high strain rate [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (4): 1220-1224.
- [2] 周松,张新钰,回丽,等. 含缺陷的 TB6 钛合金疲劳性能研究和强度评估 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (12): 39-43, 49.
Zhou S, Zhang X Y, Hui L, et al. Fatigue performance research and strength evaluation of TB6 titanium alloy with defects [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (12): 39-43, 49.
- [3] 卢彦林,王昊群. 基于 1060 铝合金筒形件旋压加工数值模拟 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (10): 39-42.
Lu Y L, Wang H Q. Numerical simulation on spinning manufacturing for 1060 aluminum alloy cylinder part [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46 (10): 39-42.
- [4] 张坦,李新和,魏准,等. 工艺参数对大径厚比薄壁筒形件旋压成形质量的影响研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24

(2): 75-81.

Zhang T, Li X H, Wei Z, et al. Influence of process parameters on the flow forming quality of thin-walled tube with large diameter-thickness ratio [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 75-81.

- [5] 周宇,赵勇,于忠奇,等. 交叉内筋薄壁筒体错距旋压成形数值仿真 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56 (1): 62-69.
Zhou Y, Zhao Y, Yu Z Q, et al. Numerical simulation of stagger spinning of cylindrical part with cross inner ribs [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56 (1): 62-69.
- [6] 吕伟,詹梅,王鹏,等. 带螺旋内筋薄壁筒形件旋压变形特征 [J]. 宇航材料工艺, 2021, 51 (4): 104-108.
Lyu W, Zhan M, Wang P, et al. Deformation mechanism in flow forming of thin-walled tube with helical grid-stiffened ribs [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51 (4): 104-108.
- [7] 张媛琦,王文先,陈洪胜,等. AZ91 筒形件旋压的组织演化及微/纳力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (2): 580-586.
Zhang Y Q, Wang W X, Chen H S, et al. Microstructure evolution and micro/nano mechanical properties of AZ91 tube spinning [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (2): 580-586.
- [8] Han D, Zhan M, Yang H. Deformation mechanism of TA15 shells in hot shear spinning under various load conditions [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (2): 243-248.
- [9] 杜驰,韩冬,李增辉,等. D406A 钢大直径圆筒强力旋压数值模拟研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (3): 96-100.
Du C, Han D, Li Z H, et al. Numerical simulation research of power spinning process for D406A steel large diameter cylinder [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology,

- 2016, 51 (3): 96–100.
- [10] 晏畅, 肖刚锋, 夏琴香, 等. 锥筒形件剪切-拉深复合旋压成形可旋性表征方法研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 94–100.
- Yan C, Xiao G F, Xia Q X, et al. Research on characterization method of spinnability in shear-deep drawing composite spinning for conical cylindrical part [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 94–100.
- [11] 朱慧安. TC21 钛合金筒形件旋压过程与织构演化有限元模拟研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
- Zhu H A. Finite Element Simulation Study on Tube Spinning Process and Texture Evolution of TC21 Titanium Alloy [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [12] 张涛, 樊文欣, 郭代峰, 等. 筒形件旋压的力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (13): 157–159.
- Zhang T, Fan W X, Guo D F, et al. Research on mechanical properties of cylindrical workpieces spinning [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (13): 157–159.
- [13] 胡强, 闫亮明, 杜青春, 等. 两旋轮旋压首道次压下率对轮毅旋压成形的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 134–142.
- Hu Q, Yan L M, Du Q C, et al. Effect of the first pass reduction rate on spinning forming of hub during two wheels spinning [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 134–142.
- [14] Bao R Q, Huang X, Cao C X. Deformation behavior and mechanisms of Ti-1023 alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, (2): 274–280.
- [15] 肖刚锋, 张义龙, 夏琴香, 等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压时成形质量及组织性能研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 190–196.
- Xiao G F, Zhang Y L, Xia Q X, et al. Research on forming quality, microstructure and properties for Ni-based super alloy conical-cylindrical parts during deep-drawing spinning [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 190–196.
- [16] 郭亚明, 徐恒秋, 薛秀琴, 等. 2A12 铝合金薄壁壳体强力旋压成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 143–150.
- Guo Y M, Xu H Q, Xue X Q, et al. Power spinning process of thin-walled shell parts for 2A12 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 143–150.

《温室气体碳核算方法与报告要求 第 XX 部分：锻造企业》等 5 项锻压领域国家标准研制项目获批立项

2022 年下半年, 由全国锻压标准化技术委员会组织申报的《温室气体碳核算方法与报告要求 第 XX 部分：锻造企业》等 5 项国家标准研制项目获得国家标准化管理委员会批准立项, 详见表 1。

表 1 5 项锻压领域国家标准研制项目

标准项目名称	牵头起草单位	制定/修订
温室气体碳核算方法与报告要求 第 XX 部分：锻造企业	东风锻造有限公司、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、江苏太平洋精锻科技股份有限公司、湖北三环锻造有限公司、重庆大江杰信锻造有限公司、广东韶铸锻造有限公司、江苏龙城精锻集团有限公司、邯郸峰驰精密制造有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、贵州安大航空锻造有限责任公司、芜湖禾田汽车工业有限公司、洛阳智能农业装备研究院有限公司、江苏威鹰机械有限公司、景德镇明兴航空锻压有限公司、广东韶铸精锻有限公司、广东长盈精密技术有限公司、振宏重工（江苏）股份有限公司、重庆工程职业技术学院等。	制定
钢质模锻件金属流线取样要求及评定	湖北三环锻造有限公司、华中科技大学、江苏太平洋精锻科技股份有限公司、东风锻造有限公司、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、武汉理工大学、浙江索特重工有限公司、湖北文理学院、湖北三环车桥有限公司、广东韶铸锻造有限公司、方盛车桥（柳州）有限公司、郑州精益达汽车零部件有限公司、江苏龙城精锻集团有限公司、江苏森威精锻有限公司、江苏飞船股份有限公司、江苏威鹰机械有限公司、洛阳智能农业装备研究院有限公司、景德镇明兴航空锻压有限公司、高安市瑞克斯机械有限公司、浙江万鼎精密科技股份有限公司等。	制定
大型曲面箱底旋压成形 工艺规范	西北工业大学、四川航天长征装备制造有限公司、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、北京宇航系统工程研究所、上海航天精密机械研究所、西安航天动力机械有限公司、成都航天长征机械有限公司、西安博赛旋压科技有限公司、四川空分设备（集团）有限责任公司、广东博赛数控机床有限公司等。	制定
民用航空数字化锻造车间集成规范	天津市天锻压力机有限公司、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、北京航空材料研究院、首都航天机械公司、北京航空航天大学、机科发展科技股份有限公司、天津大学、天津职业技术师范大学、山西金瑞高压环件有限公司、景德镇明兴航空锻压有限公司等。	制定
钛合金板材超塑成形和扩散连接件 通用技术规范	中国航空制造技术研究院、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国航天科工集团第三研究院第一五九厂、西北有色金属研究院、哈尔滨工业大学、宝钛集团有限公司等。	制定