

工艺参数对 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压塑性性能的影响

魏巍¹, 罗雄¹, 范俊明², 陈刘斌², 吴明霞³, 唐凯³

(1. 成都市特种设备检验检测研究院, 四川 成都 610299; 2. 成都格瑞特高压容器有限责任公司, 四川 成都 610400;
3. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 使用 DEFORM 有限元软件对不同工艺参数条件下的 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压成形过程进行了模拟, 研究了旋压温度、进给比和旋轮圆角半径对成形过程中塑性性能的影响。结果表明: 旋压温度升高, 而成形过程中气瓶表面所受的等效应力减小, 而不同温度时各采样点的等效应变基本相同; 进给比降低, 等效应变增大, 且对等效应力影响显著, 进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时各采样点间的应力值变化较为均匀; 旋轮圆角半径越小, 等效应力在深度方向上减小的程度更大, 半径 R 为 60 和 80 mm 时旋轮对气瓶表面产生的等效应力变化较大, R 为 100 mm 时的等效应力变化较小且工件具有更好的均匀性。综上所述, TC4 钛合金高压气瓶的最佳热旋压工艺参数为: 旋压温度为 950°C 、进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、旋轮圆角半径为 100 mm。

关键词: 钛合金; 高压气瓶; 热旋压; 进给比; 旋压温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.020

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0143-08

Influence of process parameters on plastic properties for non-mandrel hot spinning of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

Wei Wei¹, Luo Xiong¹, Fan Junming², Chen Liubin², Wu Mingxia³, Tang Kai³

(1. Chengdu Special Equipment Inspection and Testing Institute, Chengdu 610299, China;

2. Chengdu Great High Pressure Vessel Co., Ltd., Chengdu 610400, China;

3. School of Manufacturing Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The non-mandrel hot spinning process of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinders under different process parameter conditions was simulated by DEFORM finite element software, and the influences of spinning temperature, feed ratio and roller fillet radius on the plastic properties during the forming process were studied. The results show that when the spinning temperature increases, the equivalent stress on the gas cylinder surface during the forming process decreases, but the equivalent strains at each sampling point are basically the same at different temperatures. When the feed ratio decreases, the equivalent strain increases, and the effect on the equivalent stress is significant. When the feed ratio is $3 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, the stress value changes are relatively uniform between the sampling points. The smaller the fillet radius of roller, the greater the reduction degree of equivalent stress in the depth direction, the change of the equivalent stress caused by the roller on the surface of gas cylinder is great when the radius R is 60 and 80 mm, and the change of the equivalent stress is small when R is 100 mm and the workpiece has better uniformity. In conclusion, the optimal hot spinning process parameters for TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinders are the temperature of 950°C , the feed ratio of $3 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, and the roller fillet radius of 100 mm.

Key words: titanium alloy; high-pressure gas cylinder; hot spinning; feed ratio; spinning temperature

钛合金高压气瓶因耐腐蚀性能好、力学性能优异以及密度小等优点, 被广泛应用于舰船运输、深海装备、石油钻采等领域^[1-3]。随着现代工业和军

工国防的快速发展, 要求钛合金气瓶具有高强度、大容积、大口径、抗疲劳和耐腐蚀等更高的综合性能^[4-5]。

钛合金气瓶加工过程中的变形抗力较大, 一般为普通合金钢的 2~3 倍^[6], 且对温度的变化极为敏感, 随成形温度的下降, 变形抗力剧烈上升。同时, 与其他合金材料相比, 钛合金对应变速率也极为敏感^[7], 随应变速率的增加, 其变形抗力明显增

收稿日期: 2023-05-23; 修订日期: 2023-08-27

作者简介: 魏巍 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 18708185844@163.com

通信作者: 唐凯 (1992-), 男, 博士研究生

E-mail: tangkai0516@163.com

大^[8-9]。此外,钛合金的热传导系数较小,在高应变速率下发生较大的塑性变形时,容易因变形热效应导致工件局部温度超过旋压温度范围,从而影响工件的力学性能,因此,对钛合金高压气瓶的制造工艺有着较高的要求。

由于钛合金的塑性较差,因此,钛合金高压气瓶通常采用热旋压方式加工。在旋压成形中,无芯模热旋压成形的工艺参数复杂,涉及材料非线性、几何非线性和复杂边界接触条件的非线性^[10-13],难以通过试验研究和理论分析法来解决此类问题。故本文以 TC4 钛合金为对象,采用 DEFORM 有限元软件,研究钛合金气瓶无芯模热旋压过程中旋压温度、进给比和旋轮圆角半径等关键工艺参数对钛合金塑性性能的影响。

1 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压模拟

1.1 几何模型的建立

首先,构建 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压的几何模型,模型由旋轮、管坯、夹具这 3 部分构成。其中,旋轮直径为 $\Phi 610$ mm、管坯壁厚为 30 mm、管坯外径为 $\Phi 475$ mm、管坯总长度为 1500 mm。将管坯设置为塑性体,旋轮和夹具设置为刚体,其装配位置关系如图 1a 所示。为了简化运算,在 DEFORM 中采取相对运动等效转化的方式,使管坯和夹具保持静止,并将实际过程中旋轮的弧线进给运动和管坯沿中心轴线的旋转运动均等效为旋轮的运动,使旋轮绕管坯做螺旋线进给运动,从而对管坯进行旋压。

TC4 钛合金高压气瓶的旋压过程总共 13 个道次。旋压过程中,旋轮沿着不同的轨迹向管坯中心线收拢,管坯材料因受挤压产生缩颈伸长而形成瓶嘴状,其成形线的模拟轨迹如图 1b 所示。

1.2 模型基本参数

旋压过程中,旋轮圆角半径、进给比和旋压温度等参数的选取如表 1 所示。旋轮与管坯表面的摩擦因数设置为 0.1;为限制夹具与管坯的相对运动,将其接触面的摩擦因数设置为 1,且表面接触关系设置为不可分离;采用剪切摩擦模型;TC4 钛合金选用 DEFORM 材料库中的 Ti-6Al-4V 材料模型。

然后,对旋压管坯进行网格划分,采用四面体网格,共划分 100000 个网格,并在管坯工件的成形

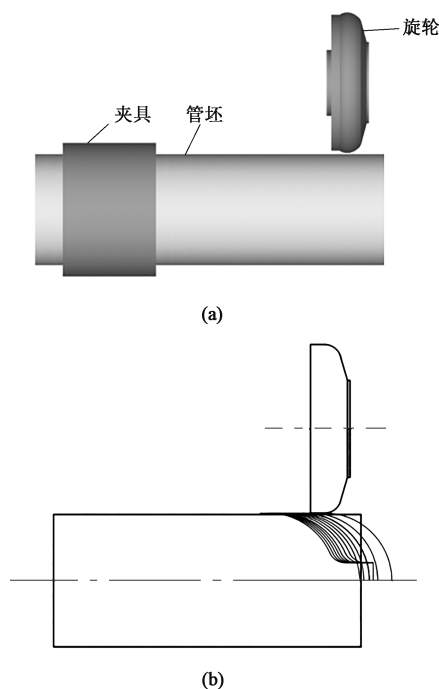


图 1 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压的几何模型

(a) 仿真模型 (b) 旋轮不同道次的成形轨迹

Fig. 1 Geometric models of non-mandrel hot spinning for TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

(a) Simulation model (b) Forming trajectories of roller in different passes

表 1 TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压成形的相关参数
Table 1 Related parameters of non-mandrel hot spinning for TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

参数	数值		
进给比/(mm·r ⁻¹)	1.5	3.0	6.0
旋轮圆角半径 R/mm	60	80	100
旋压温度/℃	940	950	960

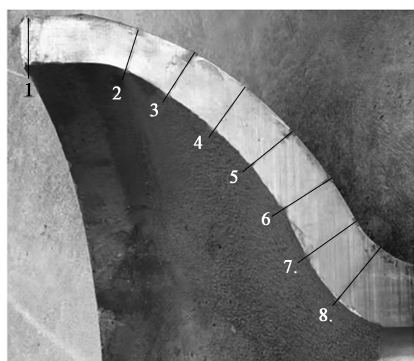
部分对其进行网格细化,以提高计算结果的准确性。由于实际旋压过程中要采用乙炔火焰对预加热管坯进行补热,且旋压过程中存在变形热和摩擦热,因此,可近似认为旋压过程是一个等温成形过程,故旋轮、管坯和夹具之间未设置热交换。

2 旋压过程的数值模拟与分析

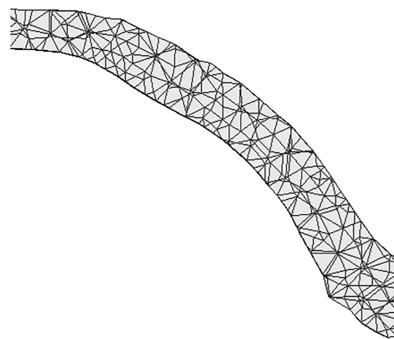
对比分析数值模拟结果(进给比为 3.0 mm·r⁻¹、旋轮圆角半径为 80 mm、旋压温度为 960 ℃,与生产过程中的工艺参数一致)和实际生产过程中成形气瓶的剖开截面的旋压成形效果,发现其厚度变化

一致(图2)。在剖面上选取不同位置进行厚度测量,并与仿真结果上同一位置处提取的厚度数据

(图3)进行对比,其偏平均误差百分比为6.5%,说明仿真结果具有高度的可靠性。



(a)



(b)

图2 TC4钛合金高压气瓶周向截面选取(a)和仿真模拟结果(b)

Fig. 2 Circumferential section selection (a) and simulation results (b) of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

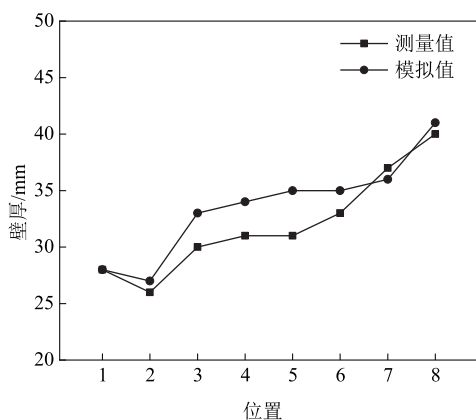


图3 TC4钛合金高压气瓶壁测量和模拟厚分布对比

Fig. 3 Comparison of wall thickness distributions of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinders between measurement and simulation

但由于钛合金高压气瓶热旋压过程中的成形道次较多,现选取其中第7道次的成形过程进行模拟仿真和分析。在第7道次初始情况中保持相同间隔设置5个采样点($P1 \sim P5$),如图4所示,对上述采样点在第7道次的最大等效应力、最大等效应变及应变速率等数据进行分析。

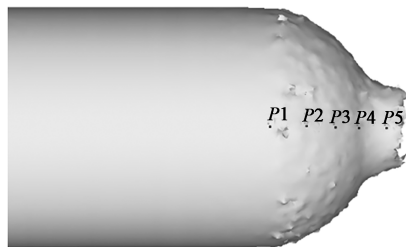


图4 TC4钛合金高压气瓶热旋压成形数值模拟表面采样点

Fig. 4 Sampling points on surface TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder in numerical simulation of hot spinning

2.1 旋压温度对成形过程中塑性性能的影响

TC4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^[14-15]。热旋压成形的温度应在再结晶温度以上,TC4钛合金在850℃发生动态再结晶^[16-17]。

TC4钛合金热压缩变形组织的相关研究表明,低于900℃变形时再结晶体积分数较低,所以,旋压变形温度应选取在900℃以上^[18-19],故在DEFORM有限元软件中分别设置指定变形温度的恒定温度场。旋压温度分别设定为940、950和960℃,工件在此条件下进行热旋压,且进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、旋轮圆角半径为80 mm。

不同旋压温度时钛合金气瓶成形过程中各采样点的最大等效应力模拟结果如图5a所示。由图5a可知,旋压温度对钛合金气瓶成形的最大等效应力影响显著,旋压时的最大等效应力随着旋压温度的升高而减小。最大等效应力减小说明材料的塑性提高,有利于工件的变形,但过高的旋压温度会使工件的硬度降低,影响工件的使用寿命。旋压过程中,最大等效应力从肩部位置向瓶嘴位置先增大后减小,940和960℃时在 $P3$ 采样点位置出现了应力的最大值,分别为233和185 MPa,而950℃旋压时应力最大位置在 $P2$ 采样点,为208 MPa。总体而言,各采样点在不同旋压温度时的最大等效应变的差异不大,如图5b所示。

管坯第7道次成形表面的等效应变累计云图见图6。由图6可知,不同旋压温度时钛合金气瓶成形过程中的等效应变分布情况接近,均从肩部位置

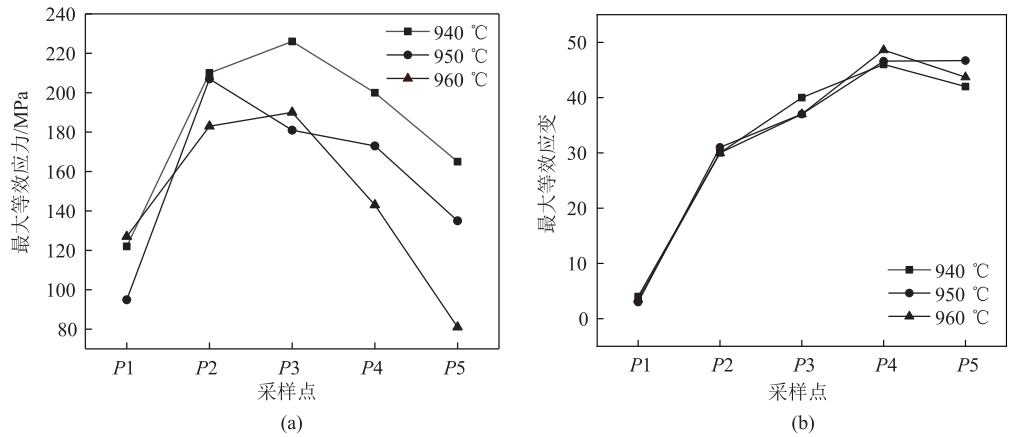


图 5 旋压温度对 TC4 钛合金高压气瓶塑性性能的影响

(a) 最大等效应力 (b) 最大等效应变

Fig. 5 Effect of spinning temperature on plastic properties for TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

(a) Maximum equivalent stress (b) Maximum equivalent strain

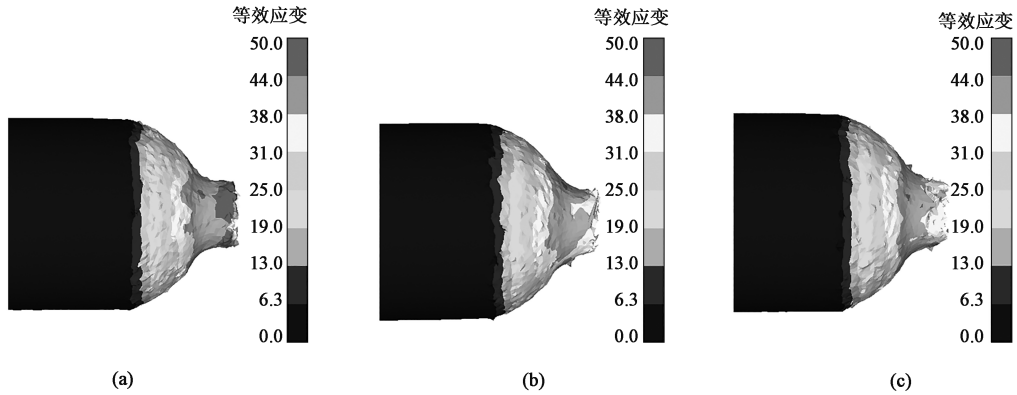


图 6 TC4 钛合金高压气瓶热旋压过程中不同旋压温度下的等效应变云图

(a) 940 °C (b) 950 °C (c) 960 °C

Fig. 6 Equivalent strain nephograms of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder at different spinning temperatures during hot spinning process

向瓶嘴位置增加, 且应变分布范围也接近, 但在 940 °C 时瓶嘴末端的应变更大。

不同旋压温度时管坯第 7 道次旋压后的损伤云图如图 7 所示。由图 7 可知, 随着旋压温度的降低,

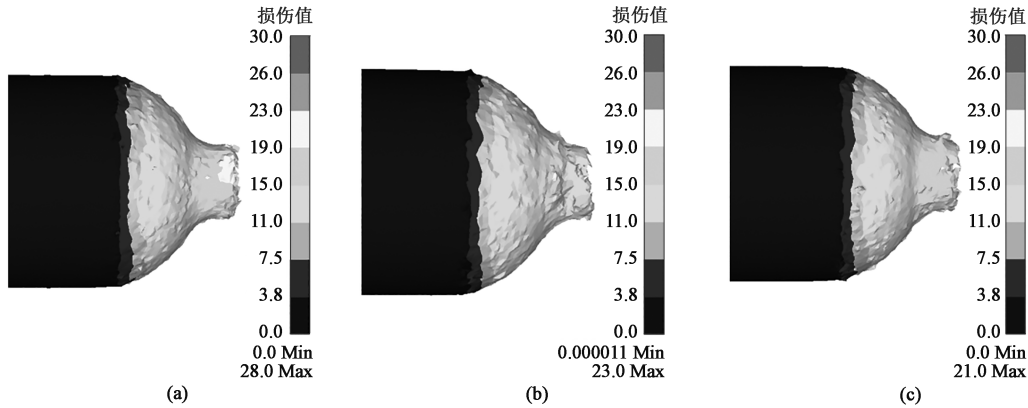


图 7 TC4 钛合金高压气瓶热旋压过程中不同旋压温度下的损伤云图

(a) 940 °C (b) 950 °C (c) 960 °C

Fig. 7 Damage nephograms of TC4 titanium alloy high-pressure cylinder at different spinning temperature during hot spinning process

气瓶旋压过程中的损伤越大, 但 950 和 960 $^{\circ}\text{C}$ 时的损伤情况较为接近, 其最大值分别为 23.0 和 21.0。而当温度为 940 $^{\circ}\text{C}$ 时, 瓶嘴末端的损伤程度明显增大, 其最大值达到了 28.0, 此时易在瓶嘴处产生裂纹, 故旋压温度选取 950 $^{\circ}\text{C}$ 较为合适。

2.2 进给比对成形应力及应变的影响

进给比是旋轮沿轴向做弧线进给的速度, 合适的进给比可以避免旋压过程中的切向震动而引起的起皱现象, 从而提高表面质量。旋压过程中的进给比分别选为 1.5、3.0 和 6.0 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$, 旋压温度设置为 960 $^{\circ}\text{C}$, 旋轮圆角半径为 80 mm。对不同的进

给比进行模拟, 以研究其对钛合金气瓶塑性性能的影响, 并确定最佳进给比。

如图 8a 所示, 不同进给比时成形过程中的最大应力值差异较大。当进给比为 1.5 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时, 各取样点之间的最大等效应力值的变化规律不显著; 当进给比为 6.0 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 相邻采样点之间的应力值变化较大; 当进给比为 3.0 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时, 相邻采样点之间的应力值差异较小, 变化较为均匀, 成形过程中作用在表面的应力的变化幅度小, 可以提高表面残余应力分布的均匀性, 并减小应力集中带来的缺陷, 从而提高表面成形质量。

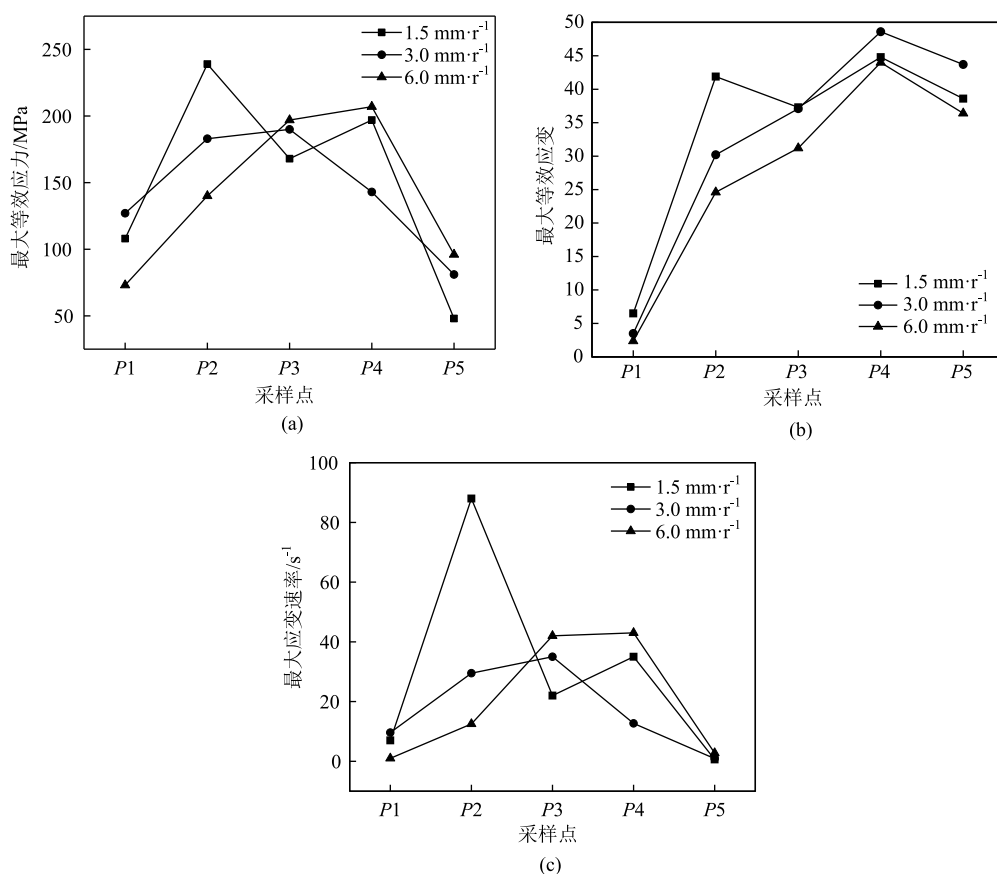


图 8 进给比对 TC4 钛合金高压气瓶热旋压塑性性能的影响

(a) 最大等效应力 (b) 最大等效应变 (c) 最大应变速率

Fig. 8 Effect of feed ratio on plasticity properties of hot spinning for TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder

(a) Maximum equivalent stress (b) Maximum equivalent strain (c) Maximum strain rate

第 7 道次成形时, 不同进给比时各采样点处的最大等效应变如图 8b 所示。由图 8b 可见, $P1 \sim P2$ 采样点处的最大等效应变值呈现出随进给比的增加而降低的特点, 但当进给比为 1.5 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时, 在 $P3 \sim P5$ 采样点处的最大等效应变值出现波动, 低于 3.0 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时的应变值峰值。

图 8c 为不同进给比时第 7 道次成形过程中各采

样点的最大应变速率。由图 8c 可见, 在 1.5 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 的应变速率时各采样点之间的变化较大, 而进给比为 3.0 $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时各采样点的应变速率变化小, 成形过程中具有更好的表面质量均匀性, 有利于提高气瓶强度。

不同进给比时 TC4 钛合金第 7 道次旋压完成后的等效应变分布如图 9 所示。由图 9 可见, TC4 钛

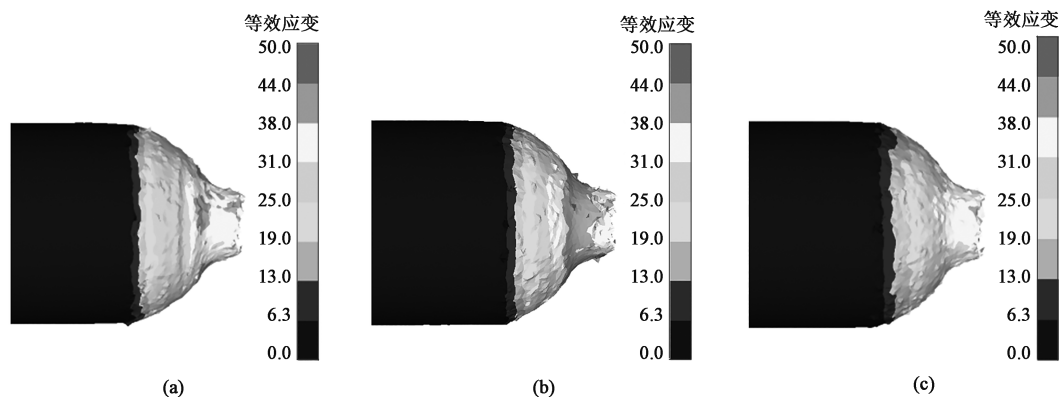


图 9 TC4 钛合金高压气瓶热旋压成形过程中不同进给比下的等效应变云图

(a) $1.5 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ (b) $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ (c) $6.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$

Fig. 9 Equivalent strain nephograms of TC4 titanium alloy high-pressure gas cylinder under different feed ratios during hot spinning process

合金在热旋压过程中,从瓶身到瓶嘴的等效应变逐渐增加,但随着进给比的增加,瓶嘴处的应变的增加幅度提高;但进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时应变的增加效果最显著,颈部位置的应变达到了 38 以上;进给比为 $6.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时颈部位置的应变仅为 31 左右,应变幅值分布并没有随着进给比的增大而一直增大;进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时有较为稳定的应变速率,且等效应变大、成形效果较好,即为最优进给比。综上所述,进给比取 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 更合适。

2.3 旋轮圆角半径对应力及应变的影响

钛合金高压气瓶旋压过程中,旋轮圆角的弧形成形面对管坯材料进行挤压使其收拢成形。旋轮圆角半径 R 分别取值为 60、80 和 100 mm,旋压温度设置为 960°C ,进给比均为 $3 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$,旋轮弧形成形面半径对钛合金高压气瓶塑性性能的影响模拟结果如图 10 所示。

由图 10a 可见,不同旋轮圆角半径的最大等效应变在 P_1 、 P_2 采样点处基本一致, $P_3 \sim P_5$ 采样点处应变的差异较大, R 为 80 mm 时的等效应变最大。由图 10c 可见, R 为 60 mm 时成形圆中各采样点间的应变速率相差较大, R 为 80 和 100 mm 时的应变速率的变化较为平缓。

不同旋轮圆角半径下采样点的最大等效应力幅值如图 10b 所示。可见, R 为 60 mm 时的等效应力的变化幅度较大,其最大值在 P_3 点处,达到了 210 MPa,而 P_1 点处的最大等效应力仅为 60 MPa; R 为 80 和 100 mm 时成形圆的最大等效应力变化幅度小,尤其是在 $P_1 \sim P_4$ 采样点处, R 为 100 mm 时所产生的最大等效应力基本一致,其应力值在 160 MPa 左右。图 10c 所示的应变速率的变化规律与等效应力相似, R 为 100 mm 时应变速率变化较

小,更为均匀和稳定。

图 11 为 TC4 钛合金热旋压时第 7 道次成形过程中滚轮到达中部位置时接触截面应力云图。可见,随着深度的增加,应力幅值从表层向内部逐渐降低,但不同旋轮圆角半径下旋压过程中的等效应力分布情况相差较大,随着半径增大,等效应力下降的幅度逐渐减小。结合图 10b 分析可知,旋轮圆角半径越小,表层应力幅值越大,但影响范围小,易导致应力分布不均,使得表层材料的移动速度远远大于内部材料,因此,容易出现裂纹等缺陷。由于旋轮圆角半径的减小会使得坯料流经旋轮圆角时产生的接触压力变大和流动阻力增大,壁厚减薄率增加,法兰区的周向压应力明显增大,从而导致旋轮圆角半径较小时单边法兰约束的旋压出现严重起皱现象而无法成形^[20]。旋轮圆角半径 R 为 100 mm 时的应力分布状态较为均匀,沿深度方向应力较小,成形过程中可以获得更为均匀的组织。结合前述分析,选择 $R=100 \text{ mm}$ 为最优旋轮圆角半径参数。

3 结论

(1) TC4 钛合金气瓶热旋压过程中,随着旋压温度的升高,成形气瓶表面的等效应力减小;不同旋压温度时,各采样点处的等效应变基本相同;随着旋压温度的降低,成形过程中的损伤累积增大,950 和 960°C 时的损伤值差异不大,但 940°C 时的损伤值远大于以上温度,易产生裂纹等缺陷,故 950°C 为最优的旋压成形温度。

(2) TC4 钛合金气瓶热旋压过程中,等效应变随着进给比的降低而增大,进给比降低对等效应力影响显著。进给比为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时,各采样点间的等效应

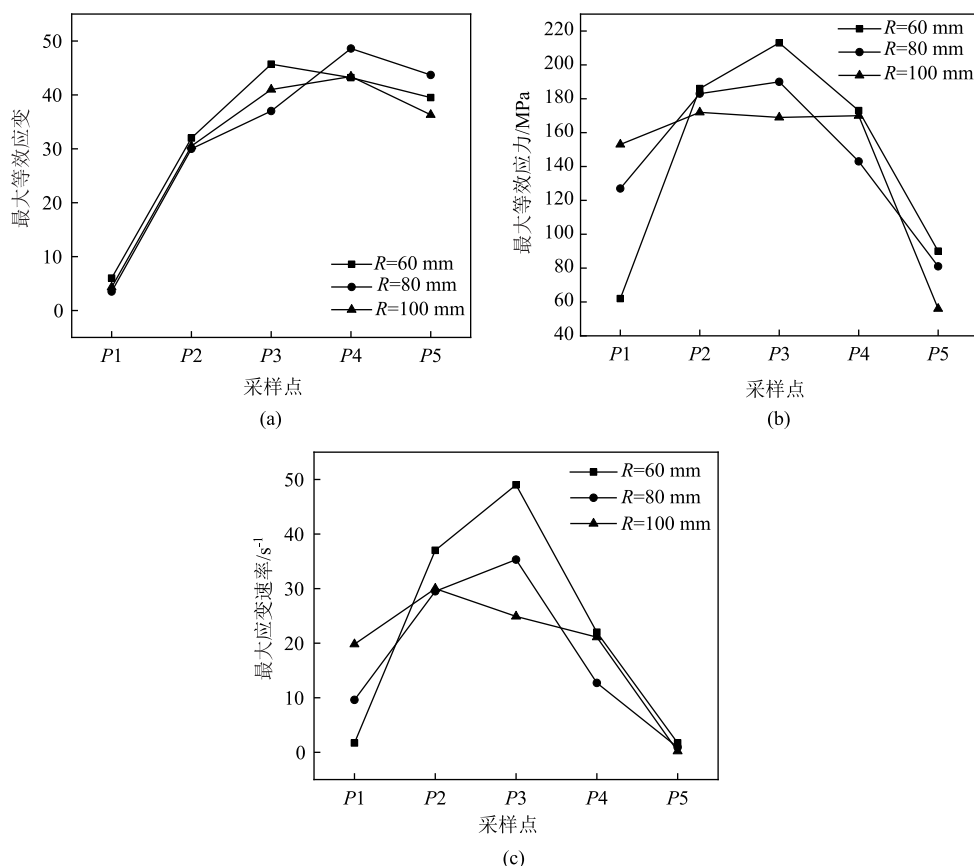


图 10 TC4 钛合金热旋压时旋轮圆角半径对塑性性能的影响

(a) 最大等效应变 (b) 最大等效应力 (c) 最大应变速率

Fig. 10 Effect of roller fillet radius on plastic properties during hot spinning for TC4 titanium alloy

(a) Maximum equivalent strain (b) Maximum equivalent stress (c) Maximum strain rate

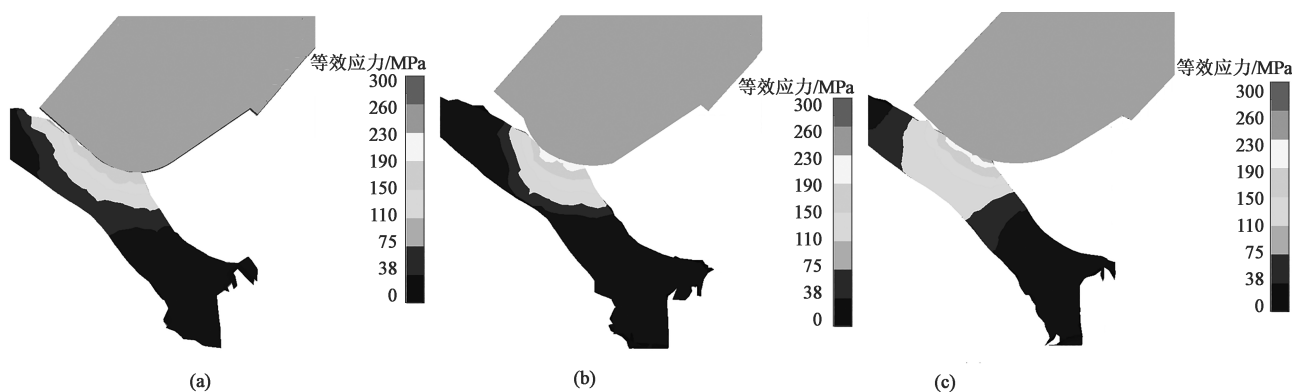


图 11 TC4 钛合金热旋压过程中不同旋轮圆角半径时的等效应力云图

(a) $R=60$ mm (b) $R=80$ mm (c) $R=100$ mm

Fig. 11 Equivalent stress cloud diagrams of TC4 titanium alloy with different roller fillet radiuses during hot spinning process

力变化较大；进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 时，各采样点间的等效应力值差异较小且变化较为均匀，有利于提高气瓶的表面成形质量，故最优进给比为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 。

(3) TC4 钛合金气瓶热旋压过程中，不同旋轮圆角半径下的等效应变基本一致；旋轮圆角半径 R 为 60 和 80 mm 时气瓶表面产生的等效应力在不同

采样点间的变化较大，而旋轮圆角半径为 100 mm 时的等效应力变化较小；成形圆角半径越小，等效应力在深度方向上减小的程度越大；旋轮圆角半径为 100 mm 时热旋压气瓶具有更好的均匀性，故最优旋轮圆角半径为 100 mm。

(4) TC4 钛合金高压气瓶无芯模热旋压的最优

旋压工艺参数为: 旋压温度为 950 ℃、进给比为 $3 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、旋轮圆角半径为 100 mm。

参考文献:

- [1] 李立善, 于斌. TC4 钛合金球形高压气瓶赤道缝电子束焊接研究 [J]. 航天制造技术, 2009, (6): 30-32.
Li L S, Yu B. Study of electron beam welding process for high-pressure sphere tank of TC4 titanium alloy [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009, (6): 30-32.
- [2] 于斌, 靳庆臣, 何俊, 等. 高压球形气瓶焊缝结构设计与焊接工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2010, 40 (4): 30-32.
Yu B, Jin Q C, He J, et al. Welding line design and welding process of sphere high-pressure vessel [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40 (4): 30-32.
- [3] 那晓菲, 王卫民, 樊亚军, 等. 超塑球形气瓶用 TC4 钛合金管材的制备工艺 [A]. 第十四届全国钛及钛合金学术交流会论文集 (下册) [C]. 上海: 科学出版社, 2010.
Na X F, Wang W M, Fan Y J, et al. Preparation technique of TC4 alloy pipe used for superplastic gas bottle [A]. Proceedings of the 14th National Academic Exchange Conference on Titanium and Titanium Alloys (Volume II) [C]. Shanghai: Science Press, 2010.
- [4] 张海, 欧阳瑞洁, 张永红, 等. 钛合金气瓶疲劳试验壳体开裂失效分析 [J]. 压力容器, 2021, 38 (7): 77-80, 86.
Zhang H, Ouyang R J, Zhang Y H, et al. Cracking failure analysis of a titanium alloy pressure vessel in hydraulic fatigue test [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38 (7): 77-80, 86.
- [5] 陆子川, 张绪虎, 微石, 等. 航天用钛合金及其精密成形技术研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2020, 50 (4): 1-7.
Lu Z C, Zhang X H, Wei S, et al. Research progresses of titanium alloys and relevant precision forming technology for the aerospace industry [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50 (4): 1-7.
- [6] 方秀荣, 王自亮, 杨锦辉, 等. TC4 钛合金锻件疲劳寿命分析及其仿真模型修正 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 1-9.
Fang X R, Wang Z L, Yang J H, et al. Fatigue life analysis and simulation model modification on TC4 titanium alloy forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 1-9.
- [7] Tseng J C, Huang W C, Chang W, et al. Deformations of Ti-6Al-4V additive-manufacturing-induced isotropic and anisotropic columnar structures [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101322.
- [8] Su J Q, Wang J Y, Mishra R S, et al. Microstructure and mechanical properties of a friction stir processed Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 573: 67-74.
- [9] Bai J J, Li W, Liang Y L, et al. High temperature compressive deformation behavior of TC4 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (5): 121-126.
- [10] 田辉, 黄海青, 陈国清, 等. 强旋工艺参数对 TC4 钛合金筒形件旋压成形的影响 [J]. 航天制造技术, 2009, (5): 14-17.
Tian H, Huang H Q, Chen G Q, et al. Effects of power spinning processing parameters on cylinders of TC4 alloy [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009, (5): 14-17.
- [11] Wang B H, Cheng L, Li D C. Study on very high cycle fatigue properties of forged TC4 titanium alloy treated by laser shock peening under three-point bending [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106668.
- [12] Liu Y D, Zhou Y S, Shi W T. Experimental research on variable parameter forming process for forming specimen of TC4 titanium alloy by selective laser melting [J]. Materials, 2022, 15 (18): 6408-6408.
- [13] Lyu N, Liu D, Hu Y, et al. Research on the evolution of residual stresses in the manufacturing process of TC4 alloy profile rolled ring [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: 106269.
- [14] 陈胜川, 李建锋, 朱宝辉, 等. 径向锻造加工率对 TC4 钛合金管材组织与性能的影响 [J/OL]. 热加工工艺, 2024 (13): 134-137 [2023-11-06]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212970>.
Chen S Q, Li J F, Zhu B H, et al. Effect of radial forging processing rate on microstructure and properties of TC4 titanium alloy tube [J/OL]. Hot Working Technology, 2024 (13): 134-137 [2023-11-06]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212970>.
- [15] 何宇鑫, 马玉娥. 高温下 TC4 合金的黏塑性本构模型研究 [J]. 西北工业大学学报, 2023, 41 (1): 65-72.
He Y X, Ma Y E. The viscoplastic constitutive model of TC4 alloy under high temperature [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41 (1): 65-72.
- [16] 王双礼, 张起, 乔恩利, 等. 退火温度对 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 热处理, 2023, 38 (1): 33-36.
Wang S L, Zhang Q, Qiao E L, et al. Effects of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Heat Treatment, 2023, 38 (1): 33-36.
- [17] 王情情, 刘战强, 程延海, 等. 基于多尺度晶粒细化演变的 TC4 加工表层硬度预测 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2023, 51 (2): 35-46.
Wang Q Q, Liu Z Q, Cheng Y H, et al. Hardness prediction of TC4 machined surface based on the evolution of multi-scale grain refinement [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2023, 51 (2): 35-46.
- [18] 李东宽, 郭岩, 杨立新, 等. TC4 钛合金两相区的热变形行为及微观组织 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (2): 114-119.
Li D K, Guo Y, Yang L X, et al. Thermal deformation behavior and microstructure of TC4 titanium alloy in two-phase region [J]. Foundry Technology, 2022, 43 (2): 114-119.
- [19] 李洪波, 王琳, 田锋, 等. TC4 钛合金薄壁筒形件反挤压成形及微观组织演化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (10): 19-26.
- [20] 刘若凡, 于忠奇, 赵亦希, 等. 法兰约束条件下铝合金杯形件的旋压成形性能 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (1): 105-110.
Liu R F, Yu Z Q, Zhao Y X, et al. Formability of flange constraint spinning for aluminum cup part [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53 (1): 105-110.