

TC4 钛合金气瓶热旋压成形技术研究

郑帮智^{1,2}, 冯兆龙^{1,2}, 刘永胜^{1,2}, 王泽龙^{1,2}

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

摘要:通过数值仿真方法构建了 TC4 钛合金气瓶热旋压成形的数值仿真模型, 并通过试验验证了该模型的可靠性。在热模拟试验中, 以 0.1 、 1 、 10 s^{-1} 三种应变速率为条件, 详细探究了 TC4 材料在 $700\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的流变应力分布。综合数值仿真分析, 深入研究了成形温度、主轴转速、进给速度等关键工艺参数对 TC4 钛合金成形的影响, 并最终制定了气瓶热旋压成形工艺。通过多道次 TC4 钛合金热旋压成形试验, 进一步验证了所提出工艺的可行性, 为 TC4 钛合金气瓶的制造提供了科学而可行的技术路线。

关键词:旋压成形; TC4; 数值仿真; 钛合金

中图分类号: TF823, TG306

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)02-0061-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Research on hot spinning and pressure forming technology of TC4 titanium alloy gas cylinders

ZHENG Bangzhi^{1,2}, FENG Zhaolong^{1,2}, LIU Yongsheng^{1,2}, WANG Zelong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: This study employs numerical simulation methods to construct a simulation model of the hot spinning and pressure forming of TC4 titanium alloy gas cylinders, and the reliability of the model is verified through experimental validation. In thermal simulation experiments conducted at three strain rates of 0.1 , 1 s^{-1} and 10 s^{-1} , the rheological stress distribution of TC4 material at temperatures ranging from $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ is extensively investigated. Through comprehensive numerical simulation analysis, the study delves into the influence of key process parameters such as forming temperature, spindle speed, and feed rate on the shaping of TC4 titanium alloy. Ultimately, a thermal spinning and pressure forming process for gas cylinders is formulated. The feasibility of the proposed process is further validated through multiple iterations of TC4 titanium alloy hot spinning and pressure forming experiments. This research provides a scientifically sound and viable technological pathway for the manufacturing of TC4 titanium alloy gas cylinders.

Key words: spinning and pressure forming, TC4, numerical simulation, titanium alloy

0 引言

近年来, TC4 钛合金在石油化工、氢能、海洋船

舶、武器装备和航空航天等领域广泛应用。美国 ALVIN 深海调查船采用 TC4 材料制备高压氧气瓶, 而印度维克拉姆·萨拉巴伊太空中心和俄罗斯科学

收稿日期: 2024-02-27

作者简介: 郑帮智, 1988 年出生, 男, 四川人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 材料成形、材料动态性能测试与仿真, E-mail: zbz315@126.com。

院分别采用 TC4 制备高压气瓶用于卫星发射和科学研究。在我国,“蛟龙号”耐压壳体采用 TC4 ELI 进行制备,成功完成作业型载人潜水器下潜 7 062 m 的世界纪录。然而,传统的钛合金压力容器制备方式通常采用锻压+焊接,存在焊接疲劳失效、低制备效率和高成本等问题^[1-4]。为解决这些问题,笔者采用先进旋压成形工艺进行气瓶制备,可实现高效成形,减少甚至避免切削加工,具备良好的经济性。

目前,气瓶旋压成形技术在钢、铝及其合金材料上的应用已经相当成熟。由于钛合金材料通常具有较低的弹性模量,冷成形性较差,在塑性成形后往往会出现较大的回弹现象,因此通常采用热成形的方式。当前,国内外研究机构对钛合金气瓶的旋压成形研究相对有限,有关钛合金旋压成形的研究主要集中在简单的减径成形方面。吕昕宇、汪发春等学者^[5-6]借助数值仿真方法,专注于 TC4 钛合金筒形件的加热旋压成形工艺研究,分析了加热温度、旋轮形状、旋压道次、旋轮进给比、壁厚减薄率等工艺参数对 TC4 钛合金旋压成形的影响规律。同时,还就旋压过程中可能出现的破裂、起皱、扭曲、扩径等现象提出了解决方案;李启军等^[7-8]利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对大尺寸薄壁曲母线 TC4 钛合金构件进行了旋压成形计算,分析了旋压不同阶段坯料应力应变状态和缺陷产生的原因。国

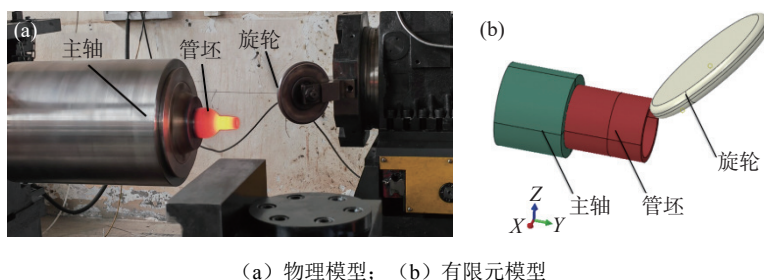
内一些高校和科研院所也在进行钛合金气瓶旋压成形方面的研究,例如,赵国伟等^[9]学者进行了半球形航天气瓶旋压成形技术研究,结合 LS-DYNA、Marc 等数值仿真软件分析了成形道次、成形温度等工艺参数的影响规律,并进行了缺陷分析;张敏聪等^[10]采用大变形弹塑性有限元数值模拟方法,分析了 TC4 钛合金高压气瓶球形封头的拉伸成形过程,明确了钛合金球形件在拉伸成形过程中的回弹规律。总体而言,从文献研究内容来看,钛合金气瓶的研发仍处于初级阶段,尚未形成成熟的制备工艺和较广泛的应用场景。

笔者以 TC4 无缝管为基体,主要研究了钛合金高压气瓶一体旋压成形技术。借助有限元仿真软件 ABAQUS/Explicit 开展了钛合金高压气瓶成形数值建模方法及成形工艺优化研究,结合多道次热旋成形试验对仿真结果进行了验证。

1 有限元模型的建立

1.1 建模及材料参数

有限元模型按实际生产物理模型进行建模,物理模型通常比较复杂,如图 1 所示,包括机床基座、紧固件、传动系统、控制系统、进给系统等。相对于物理模型而言,有限元模型应做简化处理,模型中只需要给定和管坯成形相关的部件即可。



(a) 物理模型; (b) 有限元模型

图 1 钛合金热旋压成形示意

Fig. 1 Schematic diagram of titanium alloy hot spinning and pressure forming

如图 1(b) 所示,采用 ABAQUS 前处理模块建立钛合金气瓶旋压成形数值仿真模型,并采用 ABAQUS/Explicit 显式求解器进行求解。简化有限元仿真模型,在有限元模型中只需要建立与管坯发生接触的部件,即只需建立主轴、管坯、旋轮即可。为提升求解经济性,通常将主轴和旋轮等不参与变形的部件设置为刚体,同时在分析步中进行 Mass Scaling 质量缩放设置。模型中将管坯设置为变形体,并采用 C3D8R 六面体网格单元。

管坯材料采用 TC4 钛合金,该材料具备优异的

力学性能以及热加工性,同时还兼具良好的抗腐蚀能力,因此能很好地满足特定环境下气瓶类零件成形和防腐等方面的要求。TC4 材料的力学性能参数如表 1 所示。

鉴于钛合金气瓶的旋压成形过程属于热变形过程,且受到成形温度和成形速率的影响,选择采用 GLEEBLE 热模拟试验。在该试验中,分别进行了在 0.1 、 1 、 10 s^{-1} 三种速率下,温度范围为 $700\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热压缩试验,并成功获得了相应的应力-应变曲线,如图 2 所示。

表 1 TC4 材料力学性能
Table 1 Mechanical properties of TC4

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	泊松比	弹性模量/MPa	密度/(t·mm ⁻³)
928	1 103	15.5	0.34	110 000	4.5×10 ⁻⁹

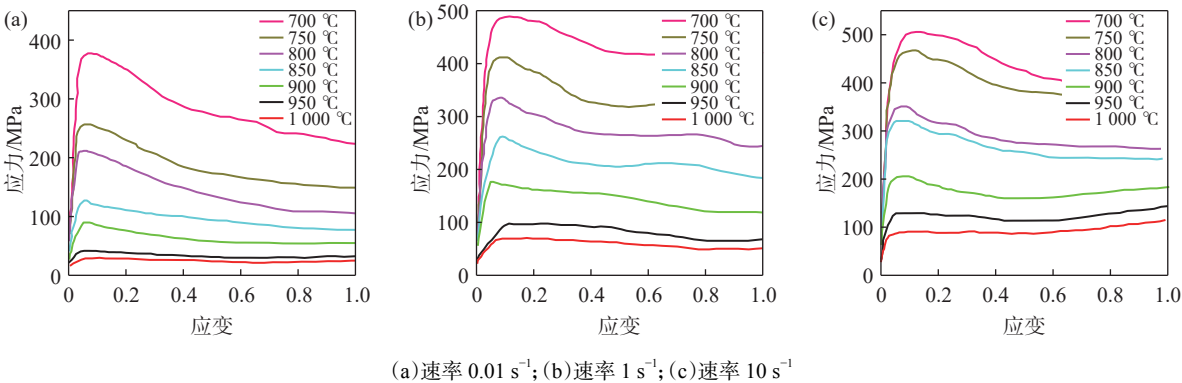


图 2 TC4 钛合金在不同应变速率和不同温度下的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of TC4 titanium alloy at different strain rates and temperatures

从图 2 中可以看出,材料在开始加载时加工硬化作用明显,应力急剧上升,当到达峰值应力后,随着应变的增加开始出现材料软化。在 700~900 °C 呈动态再结晶状态;在 950~1 000 °C 时呈动态回复状态。在 950~1 000 °C 高温下,随变形量的增大,材料的流动应力基本不变,说明动态再结晶导致的软化和加工硬化相互抵消,流动应力趋于水平。在较低的变形温度(700~900 °C)下,随变形量增大,流变应力明显下降,说明随着变形的进行,动态回复和动态再结晶所起的软化作用逐渐大于加工硬化作用。

1.2 边界条件

文中 TC4 钛合金气瓶热旋压数值仿真模型中的边界条件主要指主轴、管坯以及旋轮三者之间的接触、摩擦以及运动关系。

1.2.1 接触及摩擦关系处理

TC4 钛合金气瓶热旋压成形是管坯在旋轮多道次往复作用下连续变形并最终形成产品的过程。随着各道次旋轮与管坯之间相对运动的变化,旋轮与管坯间的接触区域成非线性变化,接触条件复杂,主轴、管坯、旋轮三者之间均采用罚函数摩擦模型进行处理,摩擦系数设置为 0.25^[11-12]。

1.2.2 运动关系处理

在图 1(b) 中,分别建立了主轴、管坯、旋轮三

种部件。其各种部件在运动关系处理上各有差异。在数值仿真模型中,主轴的主要作用是固定管坯,并使管坯在成形过程中能保持一定旋转速度。因此,主轴的运动加载条件只需要给定沿自身轴线方向的旋转角速度即可,而管坯本身只需要和主轴进行固连即可,无需给定额外运动。

模型中主要关注旋轮运动,TC4 钛合金气瓶为多道次热旋压成形。在 ABAQUS 中需采用幅值曲线定义曲母线运动,约束给定在旋轮的参考点上。

1.3 工艺参数

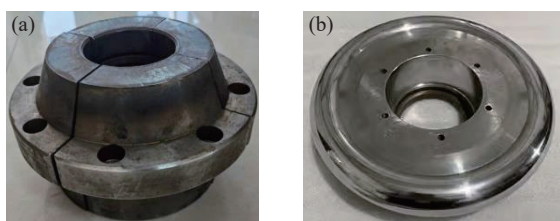
工艺参数主要涉及管坯尺寸、成形道次、旋轮形貌、成形温度、主轴转速、进给速度等。具体参数如表 2 所示。

试验过程中采用红外测温枪测试管坯加热部位的温度,测试头、中、尾三个点,保证温度误差控制在±5 °C 范围内。考虑到 TC4 钛合金材料的热成形特点,设计耐热性较高的分体式旋压夹具以及专用旋轮,两者材料均采用热作模具钢 H13 进行制备,如图 3 所示。

管坯采用 TC4 无缝管,外径 65 mm,壁厚 5 mm,无缝管两种毛坯长度分别为:185 mm 和 255 mm (数值仿真时采用较长管坯),如图 4(a) 所示。钛合金气瓶热旋压成形采用 7 道次曲母线轨迹,如图 4(b) 所示。

表 2 TC4 钛合金气瓶热旋压成形工艺参数
Table 2 Process Parameters for Hot Spinning and Pressure Forming of TC4 Titanium Alloy Gas Cylinders

主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给道次/次	加热方式	进给速度/(mm·s ⁻¹)	道次进给量/mm	加热温度/°C
250~400	7	火焰	5~8	2	700~900



(a)分体式旋压夹具;(b)专用旋轮

图 3 旋压模具示意

Fig. 3 Schematic diagram of spinning and pressure forming die

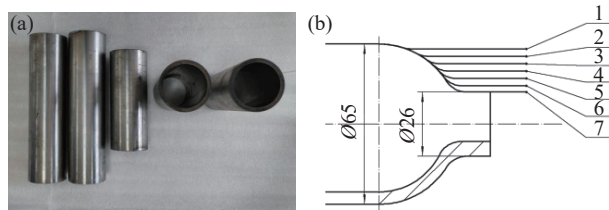
2 仿真分析

2.1 温度对成形的影响

成形温度是指 TC4 钛合金气瓶管坯的加热温度,温度分别选取 700、800、900 °C 进行数值仿真。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着温度的增加,TC4 钛合

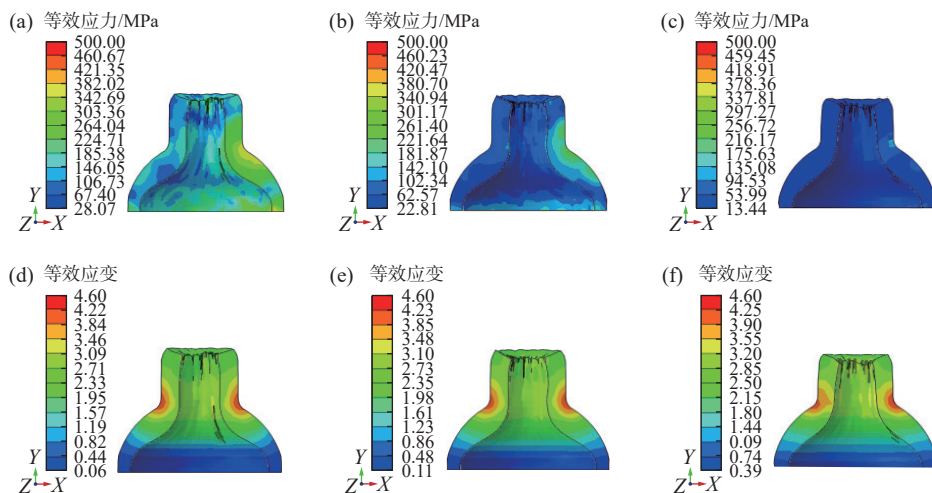
金气瓶的成形应力呈现逐渐降低的趋势,说明在较高的温度下,气瓶成形时所承受的应力较低,成形效果更好。与此同时,随着温度的升高,气瓶的应变呈现出增加的趋势,表明在更高的温度下,TC4 钛合金气瓶会经历更大的形变。因此,温度在 TC4 钛合金气瓶的成形过程中扮演着至关重要的角色,对其成形特性和最终性能产生着显著影响。



(a)旋压试验用 TC4 管坯;(b)成形轨迹设计

图 4 TC4 钛合金气瓶管坯及成形道次轨迹示意

Fig. 4 Schematic diagram of TC4 titanium alloy gas cylinder blank and forming pass trajectory



(a)700 °C 应力分布;(b)800 °C 应力分布;(c)900 °C 应力分布;(d)700 °C 应变分布;(e)800 °C 应变分布;(f)900 °C 应变分布

图 5 不同温度下的应力应变云图分布

Fig. 5 Distribution of stress-strain cloud maps at different temperatures

2.2 主轴转速对成形的影响

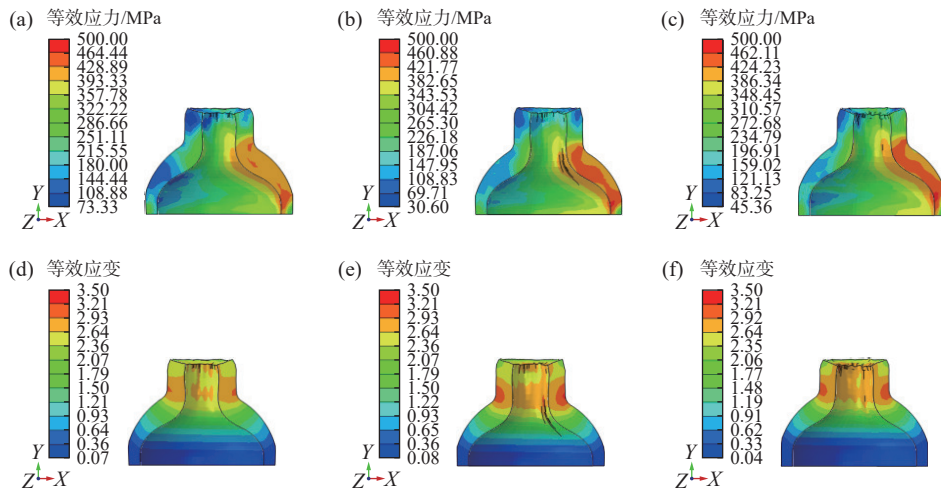
TC4 钛合金气瓶热旋压成形主轴转速分别选取 250、300、400 r/min 进行数值仿真,仿真应力应变云图如图 6 所示。根据图 6 的观察结果,我们可以得出结论,在不同的主轴转速下,气瓶缩口旋压的应力和应变的数值差异并不显著。这表明,在一定范围内,主轴转速对于气瓶缩口旋压成形的效果影响不是很大。

这种现象是由多种因素导致的。首先,气瓶缩口旋压过程中,主要受到的力和变形是由工艺参数(如旋压头的设计和气瓶的材料特性)决定的,而不是主轴转速的变化所引起的。其次,在试验设置

中,主轴转速选择了一定范围,超出该范围可能会产生更明显的影响,但在所选范围内变化较小,因此影响不太显著。这个观察结果对于气瓶缩口旋压工艺的优化和控制具有实际意义。它表明,在一定范围内,可以在不太关注主轴转速的情况下进行气瓶缩口旋压。

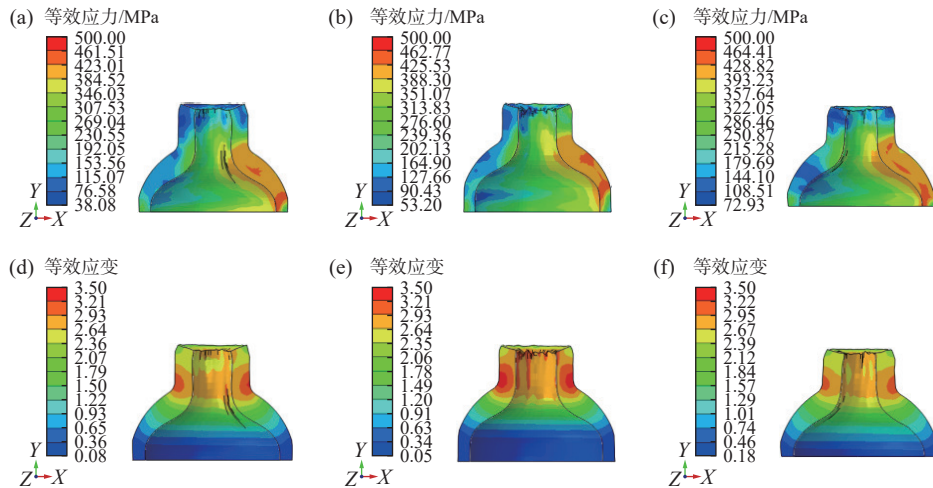
2.3 进给速度对成形的影响

采用多道次旋压成形技术进行 TC4 钛合金气瓶成形,由于旋轮需要进行曲母线运动,在设定旋轮进给速度时,运动速度近似为直线进给速度。仿真模型中旋轮进给速度分别选取 6、12、20 mm/s。仿真应力应变云图如图 7 所示。



(a)250 r/min 应力分布; (b)300 r/min 应力分布; (c)400 r/min 应力分布; (d)250 r/min 应变分布; (e)300 r/min 应变分布; (f)400 r/min 应变分布

图6 不同主轴转速下的应力应变云图分布
Fig. 6 Distribution of stress-strain cloud maps at different spindle speeds



(a)6 mm/s 应力分布; (b)12 mm/s 应力分布; (c)20 mm/s 应力分布; (d)6 mm/s 应变分布; (e)12 mm/s 应变分布; (f)20 mm/s 应变分布

图7 不同进给速度下的应力应变云图分布
Fig. 7 Distribution of stress-strain cloud maps at different feed rates

观察图7的应力应变云图,发现不同进给速度下气瓶的应力和应变区别并不明显,表明进给速度对成形效果的影响不显著。然而,进一步比较图7(d)~(f),可以发现随着成形进给速度的增加,气瓶端部的增厚逐渐显著。这是由于高进给速度导致材料流动速度加快,推动更多材料到气瓶端部,或者是冷却时间减少,使端部材料没有足够时间冷却固化,从而形成增厚现象。因此,尽管在应力应变云图上无法直接观察到进给速度对气瓶成形的影响,但端部增厚的变化提示高进给速度可能会产生更显著的影响。

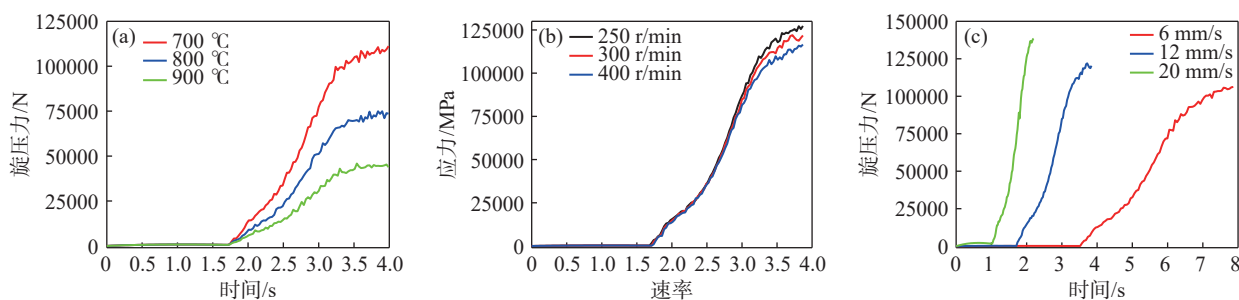
2.4 成形温度、主轴转速、进给速度对成形力的影响

旋压成形力的大小直接影响旋轮寿命以及成形

效果。根据上述不同成形温度、主轴转速、进给速度下的 TC4 钛合金气瓶热旋压成形数值仿真模型分析,提取道次旋轮成形力,如图8所示。根据图8(a)的数据,可以观察到成形旋压力随着温度的升高而呈现下降趋势。这一趋势表明,在一定范围内,随着温度的增加,成形过程中施加在材料上的旋压力减小。进一步观察图8(b)所示的不同主轴转速下的旋压轮成形力曲线,发现成形力随着主轴转速的提高而下降。这一现象表明,主轴转速的增加在一定程度上降低了成形过程中的旋压力,可能由于增加的转速导致了更有效的材料流动或者减少了摩擦阻力。此外,从图8(c)中的旋压力曲线可以观察到,随着进给速度的加快,旋压力也随之增大。这表明较高的进给速度可能导致更多的材料被迅速加

工,从而增加了成形过程中施加在材料上的力量。综合而言,这些观察结果揭示了在成形过程中温度、

主轴转速和进给速度对成形力的影响,为进一步优化成形工艺提供了重要参考。



(a)不同温度; (b)不同主轴转速; (c)不同进给速度

图 8 不同温度、主轴转速、进给速度对成形力的影响

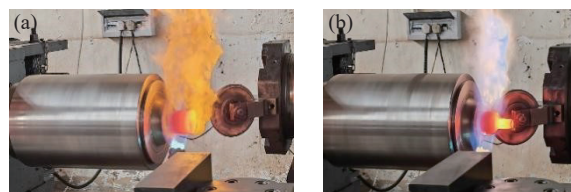
Fig. 8 Influence of different temperatures, spindle speeds, and feed rates on forming force

综上所述,在进行 TC4 钛合金气瓶旋压参数选择时,需要综合考虑加热温度、主轴转速以及进给速度等关键因素。结合上述分析,取成形温度:800 °C、主轴转速:400 r/min、进给速度:6 mm/s 作为试验参数依据,以实现更有效的 TC4 钛合金气瓶旋压成形。

3 试验研究

根据上述数值仿真分析结果以及优选的成形工艺参数,开展 7 道次 TC4 钛合金热旋压缩口成形试验,成形试验情况如图 9 所示。在图 9 中给出了钛合金气瓶热旋压成形过程,管坯在旋轮和主轴共同

作用下,经过 7 道次减径成形,最终得到钛合金气瓶毛坯件,如图 10 所示。经测量,旋压成形后的钛合金气瓶外观尺寸满足设计要求。



(a)加热; (b)成形

图 9 TC4 钛合金气瓶热旋压成形试验

Fig. 9 Experimental of TC4 titanium alloy gas cylinder hot spinning and pressure forming



(a)气瓶外观; (b)气瓶剖切; (c)仿真测量结果; (d)试验测量结果

图 10 TC4 钛合金气瓶热旋压成形试验结果

Fig. 10 Experimental results of TC4 titanium alloy gas cylinder hot spinning and pressure forming

进一步观察气瓶仿真与试验剖切图 10(c)~(d)可知,经过 7 道次旋压成形后,缩口处和圆弧过渡处材料均呈现明显增厚的状态,这有助于后续加工,并提升气瓶的整体强度。值得注意的是,对比试验结果与数值仿真成形结果,两者一致性较好,充分验证了旋压成形工艺的可行性和有效性。这一观察结果为深入理解旋压成形过程中的材料变形提供了试验性的支持,并在气瓶制备中具有重要指导意义。

4 结论

1)通过 GLEEBLE 热模拟试验,研究了 TC4 材料在 700 ~ 1 000 °C, 0.01、1、10 s⁻¹ 速率下的应力应变特性,结果表明:700 ~ 900 °C 随着变形量增大,应力下降;而在 950 ~ 1 000 °C 高温下,随变形量的增大,流动应力趋于水平。

2)结合 TC4 钛合金气瓶热旋压数值仿真模型,分析了主轴转速、旋轮进给速度、旋压温度对成形

效果的影响: 主轴转速越高, 旋压成形力越小; 进给速度越快, 旋压成形力越大; 管坯加热温度越高, 旋压成形力越小。

3) 试验确定了旋压温度为 800 ℃、主轴转速为 400 r/min、旋轮进给速度为 6 mm/s 的工艺参数

组合。通过钛合金气瓶热旋压成形试验, 并与仿真结果进行对比分析, 验证了所确定工艺参数组合的有效性, 两者结果之间的一致性较高, 为钛合金气瓶的高效成形提供了可靠的工艺指导。

参考文献

- [1] FENG Y Q, JIA S X, WANG W Q, *et al.* Development of TC4 ELI titanium alloy hemisphere shell for manned submersible[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(1): 19-22.
(冯雅奇, 贾松孝, 王伟琪, 等. 深潜器载人舱用 TC4 ELI 钛合金半球壳的研制[J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 19-22.)
- [2] LI J. Design and simulation of 40MPa high pressure gas bottle made of TC4[D]. Huazhong University of Science & Technology, 2005.
(李杰. 40MPa 钛合金高压气瓶的设计及仿真[D]. 华中科技大学, 2005.)
- [3] MENG X J, SHI J. Application of titanium alloys for naval vessels[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(4): 23-26.
(孟祥军, 时锦. 漫谈钛合金在舰船上的应用[J]. 钛工业进展, 2003, 20(4): 23-26.)
- [4] QIN P, LI Z Q, WANG F F. Automatic argon arc welding process for titanium alloy cylinders used in a certain type of missile[J]. Welding Technology, 2012, 41(11): 27-29.
(秦平, 李中强, 王方方. 某型导弹用钛合金气瓶自动氩弧焊工艺[J]. 焊接技术, 2012, 41(11): 27-29.)
- [5] LÜ X Y, HOU H L, ZHANG S H, *et al.* 3D elastic plastic FEM simulation of TC4 alloy flow forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2005, 30(6): 38-41.
(吕昕宇, 侯红亮, 张士宏, 等. TC4 合金流动旋压三维弹塑性有限元模拟[J]. 锻压技术, 2005, 30(6): 38-41.)
- [6] WANG F C, YU Z D, LI X K, *et al.* Experimental research on hot-spinning of TC4 titanium alloy tube[J]. Die Mould Manufacture, 2017, 17(12): 1040-1042.
(汪发春, 于志德, 李兴凯, 等. TC4 钛合金筒形件的热旋成形工艺研究[J]. 模具制造, 2017, 17(12): 1040-1042.)
- [7] LI Q J, LÜ H J, WANG Q, *et al.* FEM numerical simulation of spinning processing for thin TC4 alloy workpiece with curvilinear shape[J]. Journal of Tiangong University, 2008, 27(2): 61-65.
(李启军, 吕宏军, 王琪, 等. 薄壁曲母线 TC4 钛合金构件热旋模拟与试验研究[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(2): 61-65.)
- [8] LI Q J, FAN K C, WANG Q, *et al.* Factors influencing spinforming of large-diameter, thin-walled TC4 alloy tube[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 86-88.
(李启军, 范开春, 王琪, 等. 大尺寸薄壁钛合金筒体旋压成形质量影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 86-88.)
- [9] ZHAO G W. Research on spinning forming technology of spherical gas cylinder[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
(赵国伟. 某型号内胆旋压成型技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.)
- [10] ZHANG M C. The FEM simulation on forming process of high pressure vessel of titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
(张敏聪. 钛合金高压容器成形过程的有限元模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.)
- [11] ABAQUS Inc. ABAQUS analysis user's manual[M]. Version 6.12, Providence: ABAQUS Inc., 2010.
- [12] GUO H F, SUN T, LI J L. Tribological properties of TC4 alloy under different friction conditions[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(10): 40-43.
(郭华锋, 孙涛, 李菊丽. 不同摩擦条件下 TC4 钛合金摩擦学性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 40-43.)