

TC4 钛合金复杂方锥形件热介质成形工艺仿真研究

Numerical Research on Forming Technology of Complicated Taper-Shaped Part of TC4 Titanium Alloy by Thermal Deep Drawing With Heated Media

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 郎利辉 刘康宁 蔡高参 郭 禅

[摘要] 利用热介质成形技术对 TC4 钛合金复杂方锥形零件进行了拉深过程计算分析,并与传统热冲压工艺的模拟结果进行了对比。结果表明,热介质成形工艺中运用柔性的固体颗粒介质代替刚性凸模,能有效改善成形零件的壁厚均匀性,降低起皱趋势,提高成形质量。

关键词: TC4 钛合金 方锥形件 热介质成形 数值模拟

[ABSTRACT] Numerical simulation analysis of TC4 titanium alloy taper-shaped part is carried out by using the technology of thermal deep drawing with heated media, the optimal process scheme can be achieved and the result shows that by substituting the rigid punch with solid granules in the process of deep drawing, the uniformity of the wall thickness of the forming part can be improved effectively and the tendency towards wrinkling is reduced thus the forming quality of the part could increase greatly.

Keywords: TC4 titanium alloy Taper-shaped part Deep drawing with heated media Numerical simulation

近年来,随着结构轻量化的需求不断增加,轻质合金薄壁类结构件在汽车、航空航天等领域得到了愈加广泛的应用,但现有成形技术存在诸多局限性,不能满足加工要求。为解决这一难题,研究者提出了多种成形工艺以提高此类难变形材料的成形性。

热介质成形工艺是 21 世纪初由 Vollertsen 教授^[1]提出的一种柔性成形方法,其利用耐高温固体或液体介质代替传统意义上的凸模(或凹模),在高温状态下对复杂薄壁类难成形材料进行加工。该技术能大大提高板材的成形性^[2],适用于成形如镁合金、铝合金及钛合金等常温下低塑性材料。

TC4 钛合金是一种中等强度 $\alpha+\beta$ 两相细晶钛合金^[3-4],具有比强度高、耐热性能好、抗腐蚀等特点,在航空航天领域中得到了广泛应用。传统钛合金板材成形方法主要有超塑成形及热冲压工艺^[5],超塑成形方法可成形出较为复杂的薄壁类零件,但基于气胀成形的该成形方法加工耗时长、模具设计复杂、减薄严重、壁厚均匀

性差^[6];热冲压工艺对模具工装要求较低,但只能成形具有简单几何外形的零件。

本文在 TC4 钛合金热单向拉伸试验基础上对 TC4 复杂锥形件的热介质成形工艺进行了分析,对成形过程展开了工艺模拟的数值计算。在对比传统热冲压工艺基础上,验证了热介质成形工艺对提高钛合金板材成形性的作用。

1 方锥形零件成形工艺分析

1.1 零件特性分析

研究的成形零件如图 1 所示,材料为 TC4 双相钛合金,零件高度为 60mm,最小圆角半径为 5mm,经曲面展开计算得毛坯料直径为 170mm。试验所用材料为 TC4 钛合金板材,厚度为 1mm。不同温度下其真实应力-真实应变曲线如图 2 所示。方锥形件典型工艺缺陷为零件悬空区的起皱,如图 3 所示。

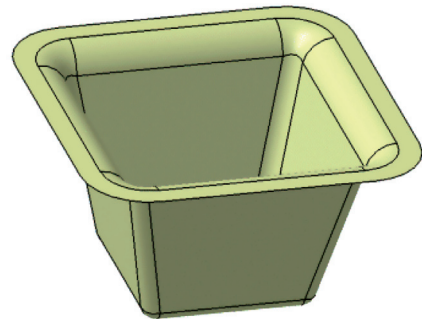


图1 方锥零件图

Fig.1 3D model of taper-shaped part

1.2 零件成形工艺分析

基于 ABAQUS 软件,本文对传统热冲压工艺进行了验证性计算,选用 ABAQUS/Explicit 动态显式算法。设定不同温度(400℃、600℃、700℃)及不同压边间隙(1.05mm、1.1mm、1.15mm),考查不同参数设定条件下成形效果,得到 9 组工艺参数下最小壁厚分布,如图 4 所示。可见当温度为 600℃,压边间隙为 1.1mm 时,零件具有最小减薄率。

图 5 所示为上述条件下最终成形零件的壁厚分布云图;图 6 所示为沿零件对角线壁厚分布曲线,明显看

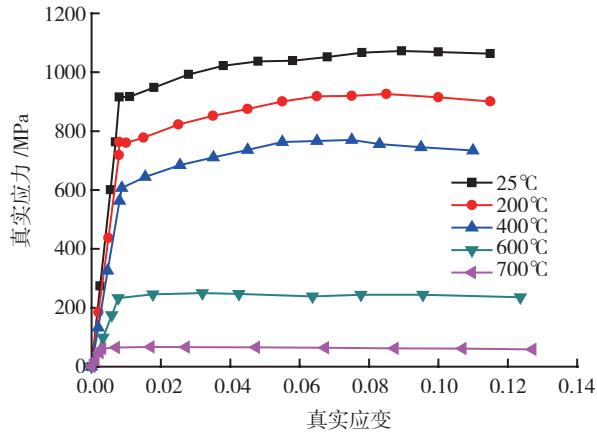


图2 TC4钛合金不同温度条件下真实应力-真实应变曲线
Fig.2 True stress vs. true stress curves of TC4 titanium alloy under different temperatures

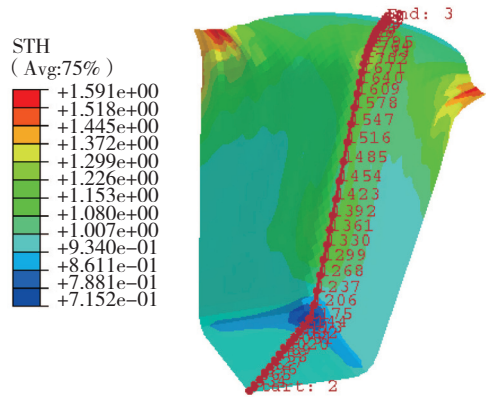


图5 最终成形零件的壁厚分布云图 (温度600°C, 压边间隙为1.1mm)
Fig.5 Wall thickness distribution of final formed part

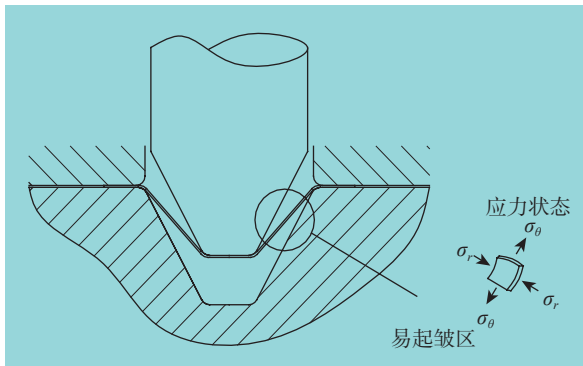


图3 传统热冲压工艺起皱缺陷图示
Fig.3 Wrinkle defects of traditional hot stamping

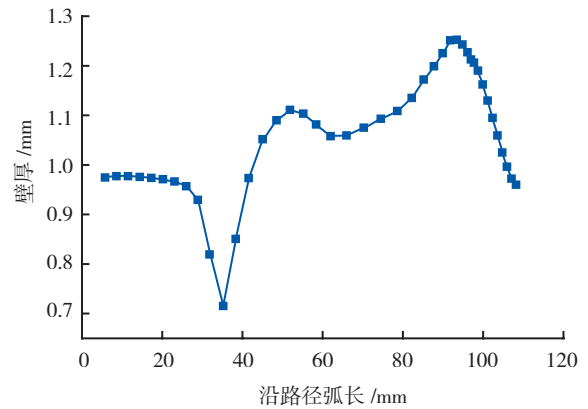


图6 沿节点路径壁厚分布曲线
Fig.6 Wall thickness distribution curve along specific node path

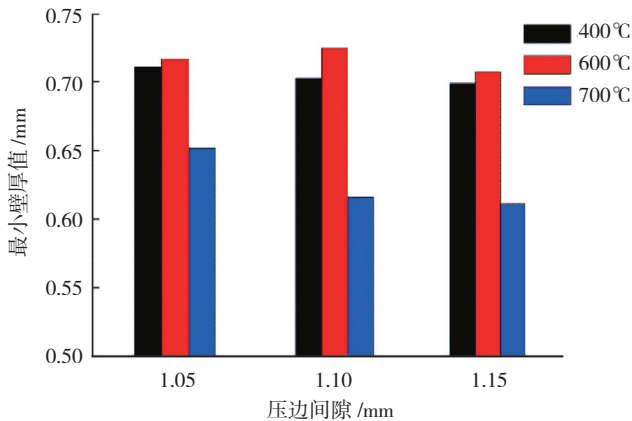


图4 不同工艺参数下最小壁厚分布柱状图
Fig.4 Bar graph of minimum wall thickness comparison under different process parameters

到热冲压工艺所成形零件壁厚均匀性较差,在凸模底端圆角区域壁厚值急剧下降,减薄率达 30%,实际成形过程中此处极易拉裂。

另外,在拉深过程中,由于板料未贴模处会出现悬空受力状态,因此易出现起皱现象。图 7 所示为凸模位

移为 45mm 时距离凹模上表面不同深度处坯料截面轮廓曲线。从图上可以看出,在距离凹模上表面深度为 10~40mm 段,凸模与凹模间水平方向存在较大间隙,坯料内外两侧无任何厚向支撑,起皱较为严重,影响了最终成形零件的表面质量,图 8 为凸模位移 45mm 时距凹模上表面不同深度板材轮廓曲线。

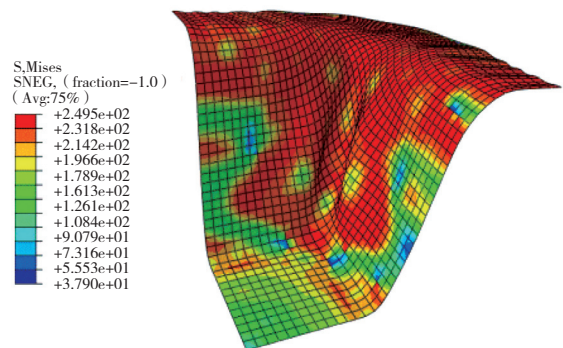


图7 凸模位移45mm时等效应力分布云图
Fig.7 Equivalent stress distribution of part (punch stroke: 45mm)

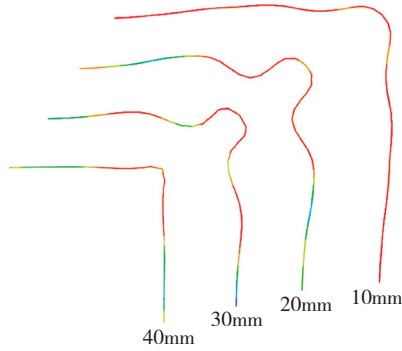


图8 凸模位移45mm时距凹模上表面不同深度板材轮廓曲线
Fig.8 Horizontal profile of part at different distances from the upper surface of die mould (punch stroke: 45mm)

2 方锥形零件热介质成形工艺仿真

2.1 热介质成形工艺数值模拟

由第2小节分析可知,传统热冲压工艺难以满足此方锥形零件的加工需要。钛合金最佳成形温度一般高于 500℃,而导热油最高耐热温度不超过 350℃,因此常规充液成形工艺中所广泛采用的液压油不再满足钛合金热介质成形要求,须采用低熔点合金、粘性介质或非金属陶瓷颗粒作为成形介质。出于安全性及密封性考虑,选择非金属陶瓷颗粒作为传力介质。

图9所示为热介质成形过程示意图,采用具有流动性的固体颗粒介质代替刚性凸模,在成形过程中,柔性凸模随着材料的变形而不断改变底部外形轮廓,保证了板材在厚度方向保持适当法向应力支撑,降低起皱趋势,提高成形性。

建立如图10所示的热介质成形过程计算模型,其中,压边圈与凹模间固定间隙,压边圈中央部分的空腔中填满具有流动性的固体颗粒材料,颗粒粒度 0.117mm~0.14mm^[7],材料流动规律可用土力学中Drucker-Prager 岩土模型表征^[8]。假定颗粒材料压力作用下的变形流动行为与温度无关,通过固体颗粒介质常温传压性

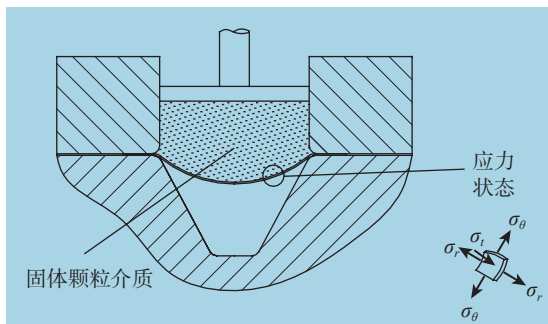


图9 热介质成形过程示意图
Fig.9 Diagram of the process of deep drawing with heated media

能试验,得到 Drucker-Prager 模型参数如表1所示。

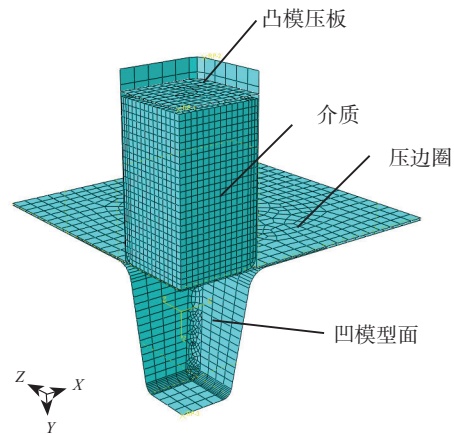


图10 热介质成形过程1/4模型
Fig.10 One-quarter calculation model of process of deep drawing with heated media

表1 Drucker-Prager模型参数^[9]

β	X	ν	c/MPa
34.1	0.82	0.45	0

注: β 颗粒材料内摩擦角, X 为三轴拉伸屈服应力与三轴压缩屈服应力之比, ν 为泊松比, c 为材料内聚力。

2.2 模拟结果分析

对比不同温度(400℃、600℃、700℃),不同压边间隙(1.05mm、1.1mm、1.15mm)条件下最小壁厚分布柱状图(见图11),可见在温度为600℃,压边间隙为1.1mm条件下,零件具有最好的成形性能。该工艺参数条件下最终成形零件的壁厚沿径向分布曲线如图12~13所示。

可以看到,相比于传统热冲压过程,热介质成形技术所成形零件具有较好的壁厚均匀性,其最大减薄率仅为17%,优于热冲压工艺30%的减薄率。

中间加载过程中距离凹模上表面不同高度处的

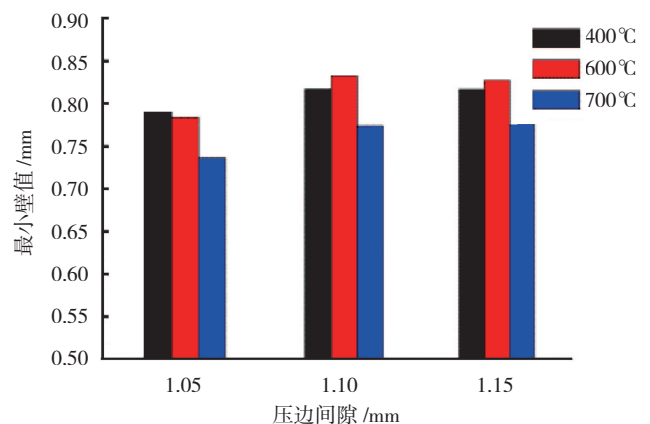


图11 不同工艺参数下最小壁厚分布柱状图
Fig.11 Bar graph of minimum wall thickness comparison under different process parameters

板料界面曲线如图 14~15 所示(图示零件拉深深度为 47.68mm),可以看到,在成形中间阶段,由于坯料内侧流动性的介质对零件给予了足够的厚向支撑,降低了周向压应变的影响及失稳趋势,截面形状自由过渡,没有发生起皱现象。

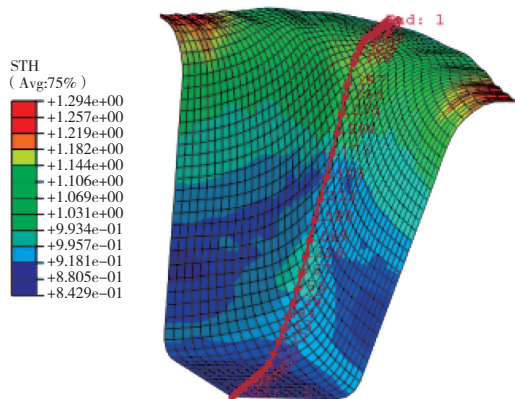


图12 最终成形零件壁厚分布云图

Fig.14 Wall thickness distribution of final formed part

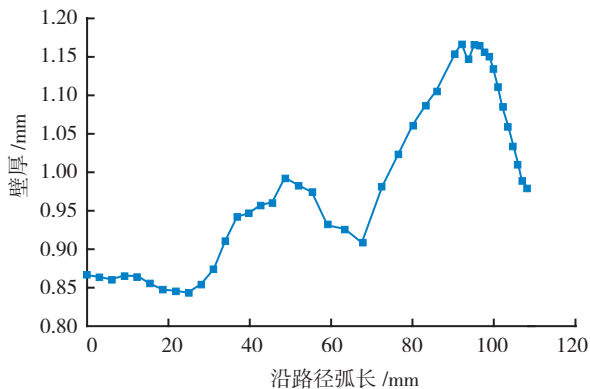


图13 沿节点路径壁厚分布曲线

Fig.15 Wall thickness distribution curve along specific node path

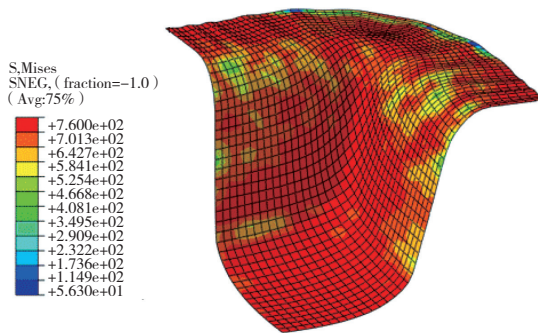


图14 拉深深度47.68mm时等效应力分布云图

Fig.14 Equivalent stress distribution of part (drawing depth: 47.68mm)

3 结论

(1) 热介质成形工艺在成形常温下难成形材料如

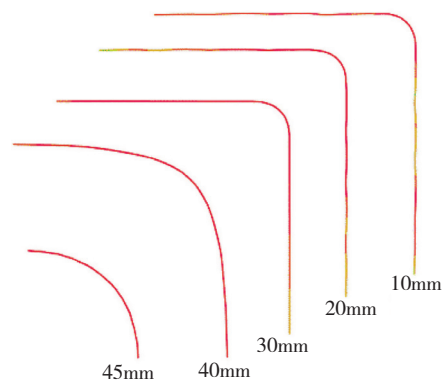


图15 拉深深度47.68mm时距凹模上表面不同深度板材轮廓曲线
Fig.15 Horizontal profile of part at different distances from the upper surface of the die mould (drawing depth: 47.68mm)

镁合金、钛合金等零件时具有突出优势;

(2) 定性分析及数值计算可知,相比于传统热冲压工艺,热介质成形工艺板料厚度方向由于存在具有流动性固体颗粒介质的支撑作用,能有效降低零件起皱趋势,提高零件成形质量;

(3) 热介质成形工艺能较好地避免传统热冲压过程中零件凸模圆角附近的破裂现象,并且传力介质作为柔性凸模能显著降低零件减薄率,改善零件壁厚分布均匀性,提高材料成形性。

参考文献

[1] Vollertsen F. Hydroforming of Aluminum Alloys Using Heated Oil[C]. Proceedings of the Ninth International Conference on Sheet Metal, Leuven, 2001: 157-164.

[2] Lang L H, Danckert J, Nielsen K B. Numerical and Experimental Investigation into the Hydromechanical Deep Drawing without a Draw Die Using the Strong Anisotropic Materials Proceedings of IDDRG2003. Bled, Slovenia, 2003: 65088.

[3] 王荣华,陈明和,陈国亮,等. TC4 钛合金盒形件超塑成形工艺. 热加工工艺, 2008, 37(11): 46-48.

[4] 郭天文. TC4 钛合金板材热拉深成形数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[5] 袁清华,张文明,黄重国,等. TC4 盒形钣金零件气压成形工艺的研究. 稀有金属, 2009, 33(4): 478-483.

[6] 黄锐. TC4 复杂盒形件超塑胀形加载曲线优化控制. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 103-106.

[7] 董国疆,赵长财,曹秒艳,等. 高压状态下固体颗粒介质侧压应力系数试验. 塑性工程学报, 2010, 17(003): 124-128.

[8] Gr ü n e r M, Merklein M. Numerical simulation of hydro forming at elevated temperatures with granular material used as medium compared to the real part geometry. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 279-282.

[9] 曹秒艳,赵长财,董国疆. 镁合金板材颗粒介质拉深工艺参数数值模拟. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 2992-2999.

(责编 小城)