TC4 叶栅环等温成形规律研究

王　兵[1]　　刘　飞[2]　　常永甫[1]　　李彦忠[1]　　李金祥[1]

（1　首都航天机械公司,北京　100076）

（2　天津航天长征技术装备有限公司,天津　300462）

文　摘　针对高肋、薄壁钛合金叶栅环的结构特点,借助三维有限元模拟方法,分析了等温成形中始锻温度、下压速度和摩擦因子对叶栅环成形质量的影响规律。选取优化后的工艺参数进行物理实验研究,结果表明,始锻温度为920℃,下压速度为0.5 mm/s,摩擦系数为0.1时的工艺条件下,可以得到满足质量要求的等温锻件。

关键词　钛合金,有限元,等温成形,工艺参数

中图分类号:TG316　　DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.05.019

Regularity of Isothermal Forging of TC4 Blade

WANG Bing[1]　　LIU Fei[2]　　CHANG Yongfu[1]　　LI Yanzhong[1]　　Li Jinxiang[1]

（1　Capital Aerospace Machinery Company, Beijing　100076）

（2　Tianjin aerospace long march technology equipment co. LTD, Tianjin　300462）

Abstract　Based on the structure feature of high-rubbed and thin-walled titanium alloy blade, the effects of the initial forging temperature, velocity and friction factor were studied with the method of FEM simulation, Selecting the optimized process parameters for physical experiment, the results show that under the conditions of initial forging temperature of 920℃, press speed of 0.5mm/s, friction coefficient of 0.1, the isothermal forging products can meet the quality requirements.

Key words　Titanium alloy, FEM, Isothermal foring, Process parameter

0　引言

钛合金材料是以低密度、高比强度、耐高温性能良好等特点而广泛应用于军工领域。在钛合金零件的成形加工方面虽然取得了一定的进展,钛合金属于难加工材料,锻造温度窄,变形抗力大,充填能力差,原材料成本高,常规的锻造成形方法不利于材料利用率和生产周期的提高,同时难以保证材料的力学性能和组织性能[1-2]。等温锻造是提高钛合金塑性成形时流动性、降低变形抗力最有效的加工方法之一。等温锻造成形方法生产钛合金锻件,易于成形零件的结构和尺寸,利于保证组织和性能[3]。

本次研究的叶栅环零件净重0.83 kg,采用传统的自由锻造方法成形时毛坯重约4.5 kg,约80%以上的原材料被机加工掉,造成贵金属的浪费。同时,结合钛合金材料的特性,机加工困难,生产效率低,从而导致该产品的生产制造周期长。本文主要研究了钛合金叶栅环的等温成形技术,通过等温锻造生产出的零件,辅助以少量机加工序,成形最终零件尺寸,保证零件质量的一致性和稳定性。

1　工艺分析及有限元模型

某航天型号发动机上用叶栅环零件如图1所示,最薄壁厚尺寸为4 mm,最深壁厚高度20 mm,最大厚高比达到5,在锻造工艺中属于典型薄壁件,叶栅环零件等温锻造成形时锻造比大,变形复杂。

TC4叶栅环等温锻造成形的数值模拟模型如图2所示,坯料为Φ28 mm规格的棒料。采用三维数值模拟技术进行建模分析计算,根据钛合金等温成形工艺及实际生产情况,初步确定边界条件中的始锻温度为920℃,摩擦因子$m=0.1$,下压速度为0.5 mm/s,模具设定为刚体,和工作同温且与外界隔热。

收稿日期:2017-08-30

第一作者简介:王兵,1986年出生,工程师,主要从事锻造方面的研究。E-mail:wb55wb@126.com

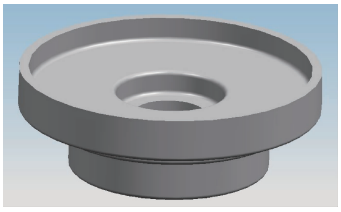


图 1　TC4 钛合金叶栅环零件图

Fig. 1　Drawing of TC4 titanium alloy cascade ring part

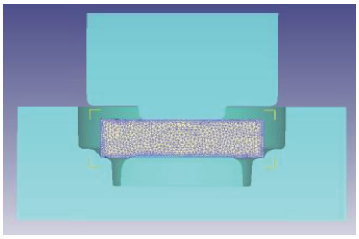


图 2　数值模拟模型

Fig. 2　Numerical simulation model

2　工艺参数对成形影响规律研究

在等温成形过程中，各个工艺参数对叶栅环的成形质量都有着一定的影响，为研究各因素对成形的影响规律，利用 DEFORM-3D 数值分析软件，选用二分之一镜像结构模型，采用单因素轮换法，对影响成形质量较大的因素：始锻温度、下压速度和摩擦因子三个边界条件进行研究研究，分析各因素的影响规律[4]。

2.1　锻造温度对等温成形的影响规律

图 3 为上模速度为 0.5 mm/s，摩擦因子 $m=0.1$ 下等效应变分布图与载荷行程曲线。由图 3(a)可以看出，随着锻造温度的升高变形均匀化程度逐渐提高，有利于提高制件的整体力学性能的统一性。不同温度的等效应变分布图具有相似的分布，叶栅环颈拐角处变形较大。

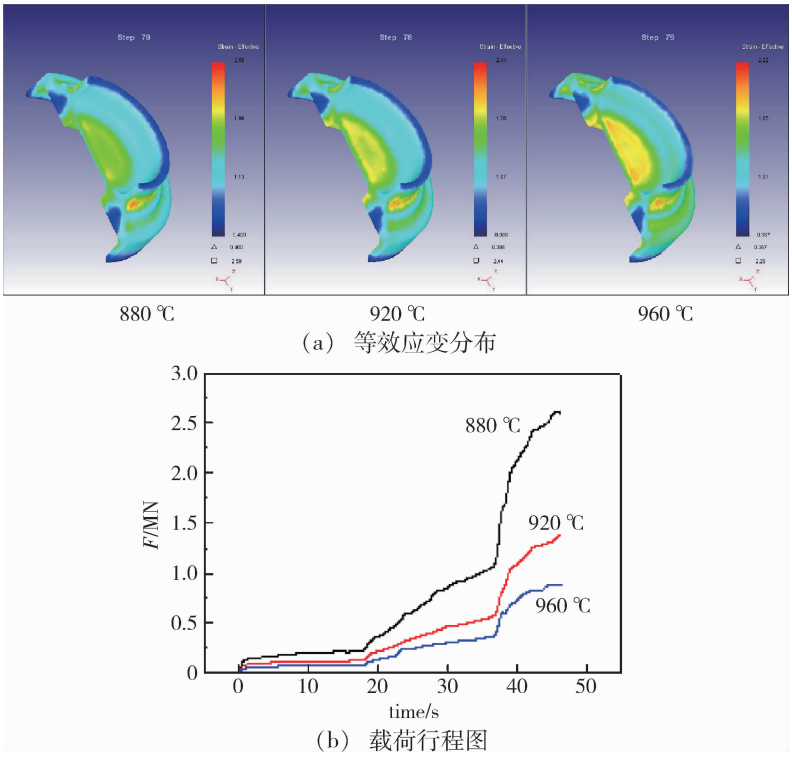


图 3　上模速度为 0.5 mm/s，摩擦因子为 0.1 时的等效应变分布及载荷行程曲线

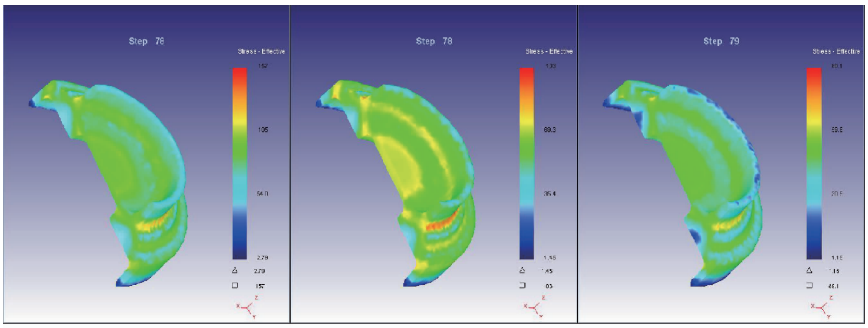
Fig. 3　Equivalent strain distribution map and load stroke curve under top speed of 0.5mm/s and the friction coefficient of 0.1

由图 3(b)可以看出，在不同的锻造温度下，载荷行程曲线具有相同的变化趋势，载荷均随着行程的增大而增大。但在相同的上模速度和摩擦因子下，880、920、960℃时的终锻载荷分别为 2.6、1.3、0.8 MN，载荷降低了 69.2%。这是因为较高的温度导致合金热激活作用增加，原子平均动能增大，晶体产生滑移的临界剪切应力相应减小，且随着温度的升高，动态回复和再结晶也更容易的发生，抵消了一部分由于塑性变形造成的加工硬化，因而材料流动应力降低，降低了载荷，有利于零件的成形。提高锻造温度将使得锻件变形更均匀，降低设备吨位的需求，有利于零件的成形和提高模具的使用寿命，但是过高的变形温度也会使锻件组织和性能产生不利影响。

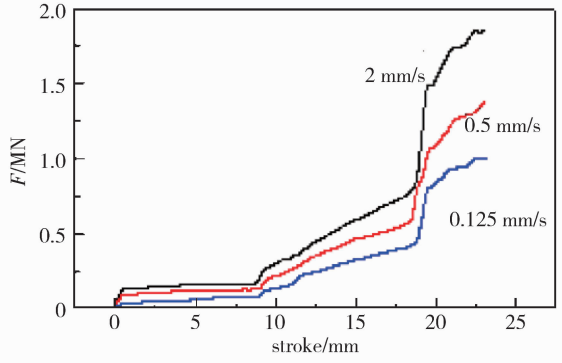
2.2　下压速度对等温成形过程的影响规律

图 4 是变形温度为 920℃，摩擦因子为 0.1 时不同上模速度的等效应力分布图与载荷行程曲线。由图 4(a)可以看出，上模速度由 2 mm/s 减低

到0.125 mm/s时最大等效应力由157 MPa降低为89.1 MPa。这表明TC4合金的变形抗力具有非常显著的正应变速率依赖特性,随着应变速率的降低其变形抗力迅速降低。当上模速度较大时,材料内部没有足够的时间进行回复和再结晶,从而导致等效应力迅速提高,与此同时等效应力的差值也随之显著的提高。上模速度的减小,最大等效应力及其差值也随之降低,有利于变形的继续进行。



(a) 等效应力分布图



(b) 载荷行程曲线

图4 变形温度为920℃,摩擦因子为0.1时的等效应力分布图及载荷行程曲线

Fig. 4 Equivalent stress distribution map and load stroke curves at deformation temperature of 920℃ and factor friction 0.1

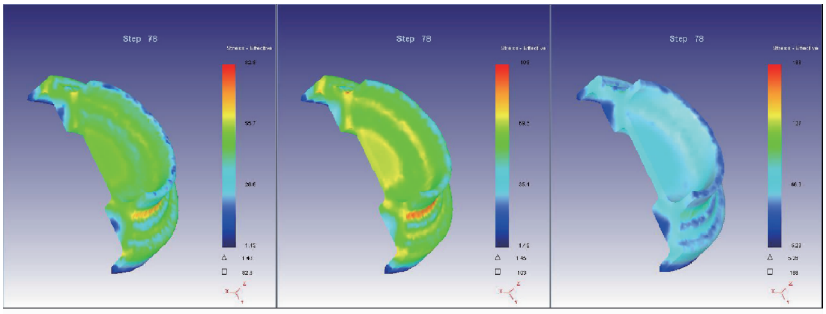
由图4(b)可以看出上模速度为2、0.5、0.125 mm/s时,终锻载荷分别为0.18、0.13、0.1 MN、,载荷降低了44.4%。当上模速度较大时,变形时间短,材料没有足够的时间进行回复和再结晶,从而导致等效应力的提高和不均匀。因此,降低上模速度对降低成形载荷,减小设备吨位有较大帮助。

2.3 摩擦条件对等温成形过程的影响规律

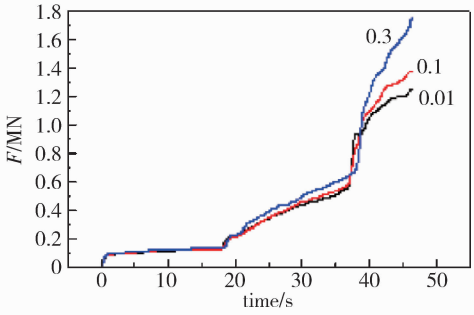
图5为变形温度为920℃,上模速度为0.5 mm/s时不同摩擦条件下的等效应力图与载荷行程曲线。由图5(a)可以看出,当摩擦因子为0.01时,等效应力为82.8 MPa;而当摩擦因子为0.3时,等效应力增大到188 MPa。可见,随着摩擦因子的增大,等效应力相应增大,其变形抗力也随摩擦因子的增加而增大。

由图5(b)可以看出,不同摩擦条件下载荷曲线趋势大致相同,当摩擦因子由0.01变为0.3时,前三阶段载荷差别只变化了不到10%,在变形最后阶段载荷才出现了较大差异。在变形末期,摩擦系数由0.3变0.1时,减小了22%,有了较大的减少,但摩擦系数为0.01和0.1时,载荷的差别仍然只有8%,改善不明显。这是由于在成形末期,变形主要集中在较窄的环状模具型腔的填充,摩擦的作用变得明显,造成成形载荷上升。摩擦系数越大,这种作用越明显,故造成了载荷的较大差别。因此,在进行大型零件的锻造时,应该尽可能多的改善模具的润滑条件。考虑到摩擦系数0.01和0.1之间改善不明显,实际锻造中可采用0.1从而降低润滑成本并满足使用要求。

综上所述,锻造温度越低、锻造速度越快及摩擦系数越大时,等效应力越大,等效应变差值越大,终锻载荷就越大,越不利于成形过程。因此,在符合实际生产要求的情况下,应选取尽可能高的温度,尽可能小的速度及尽可能小的摩擦系数,考虑到过随后的机械性能,生产效率的要求、模具材料使用温度及摩擦条件的限制,优化后的参数选定为:锻造温度为920℃,上模下压速度为0.5 mm/s,坯料与模具的摩擦系数为0.1以下。



(a) 等效应力图



(b) 载荷行程曲线

图 5 变形温度为 920℃,上模速度为 0.5mm/s 时的等效应力图及载荷行程曲线

Fig. 5 Equivalent stress map and load stroke curve deformation temperature 920℃ and top speed 0.5mm/s

3 物理实验结果

物理实验的生产工艺流程为:模具炉膛加热—坯料加热—保温—涂润滑剂—压制成形—取件。成形工装模具及锻件如图 6 所示。对图 6(b)中实物进行研究检验,锻件部位无缺陷,成形质量完好。对叶栅环进行热处理后取样检测力学性能得到的性能指标如表 1,从表中看出,性能指标满足设计需求。

在物理实验过程中,所选用的氮化硼(BN)是一种在钛合金等温锻造中广泛应用的润滑剂,一般常用钛合金圆滑压缩法测定摩擦系数,TC4 在等温锻造条件下选用 BN 润滑剂时,用圆环压缩法测定的摩擦系数为 0.057[5],这一系数优于模拟中摩擦系数值所要求的 0.1,满足理论要求。



(a) 成形模具图 (b) 锻件图

图 6 成形模具及锻件实物图

Fig. 6 Forming die and forging material

表 1 TC4 钛合金叶栅环力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of TC4 Titanium alloy blade ring

数据来源	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	尺寸精度/mm	Ra/mm
技术要求	895	825	≥10	±0.2	3.2~6.3
测试结果	1027	928	14.4	±0.2	6.3

4 结论

(1)对于高肋薄壁结构的叶栅环零件,通过数值模拟与物理实验的方式开展了等温成形工艺的研究分析。

(2)通过数值模拟研究,研究了始锻温度、下压速度和摩擦因子对成形过程的影响规律,三者的最佳工艺参数分别为:920℃、0.5 mm/s 和 0.1 以下。

(3)在数值模拟的基础上,制定了实际生产的成形工艺,最终得到的零件满足设计使用需求。

参考文献

[1] 王兵,孟凡起,张龙飞. TC4 叶栅环等温锻造成形工艺研究[J]. 航空制造技术,2015,17:117-119.

[2] 李 梁,孙健科,孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业发展,2004,5.

[3] 王晓英,周建华,庞克昌. 上海钢研[J]. 航空用钛合金等温锻件研制,2005,2:8-11.

[4] 李 飞,吴伏家. TC4 钛合金等温锻造工艺数值模拟[A]. 机械工程与自动化,2008,4(2):74-75.

[5] 曲银化,孙建科,孟祥军. 钛工业进展[J]. 钛合金等温锻造技术研究进展,2006,23(1):6-9.