

TC4 叶栅环等温锻造成形工艺研究

Study on Forming Process of Isothermal Forging of TC4 Blade

首都航天机械公司 王兵 孟凡起 张龙飞 李建洲 魏博深
湖北汽车工业学院 杨全涛

[摘要] 以 TC4 叶栅环零件为研究对象,采用三维有限元模拟软件 DEFORM-3D 对叶栅环的等温锻造成形过程进行数值模拟,对成形工艺方法进行实物验证,得到了满足使用要求的 TC4 叶栅环零件。研究结果表明:等温锻造成形技术可成形出 TC4 叶栅环零件。

关键词: TC4 钛合金 叶栅环 等温锻造 数值模拟 试验研究

[ABSTRACT] TC4 blade object is researched in this paper. The isothermal forging process is simulated using three-dimensional finite element code DEFORM-3D to study the influences of forming scheme. With methods of physical experiment, the experiment of isothermal forging is carried out, the parts meet the use requirement. The results show that components, such as the TC4 blade can be precisely forged by the technology of isothermal forging.

Keywords: TC4 titanium alloy Blade Isothermal forging Numerical simulation Experimental research

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.117

钛合金具有密度低、高强、高韧、高模量、耐高温等特性,在军工、民用等领域得到了广深的应用。但由于钛合金的锻造温度范围窄,变形抗力受温度和变形速度的影响较大,所以,用一般的锻造方法难以获得理想的微观组织和力学性能,材料的利用率不高,并且不利于后续机加工操作^[1]。

随着航天技术的发展,产品结构设计在整体化、轻质化方面有了更高的要求。钛合金以高强、高韧、高模量、耐高温等特性在航天产品上的运用越来越多,但 TC4 在热加工过程中变形抗力较大,锻造温度范围窄,充型难度大,属于难加工材料,而且价格昂贵^[2]。

等温锻造是利用材料在超塑性状态下金属流变应力降低,使锻造压力大大降低,从而降低加工设备吨位,同时可直接成形形状复杂、精度较高的零件。

因此,等温锻造是提高钛合金流动性,降低变形抗力最有效的加工方法之一。为了满足航天钛合金材料使用要求,采用等温锻造的方式直接成形钛合金零件的

方法非常必要^[3-4]。目前,国内外众多学者都围绕着钛合金的等温锻造成形工艺进行了研究,Argyris^[5]、Yang^[6]等人用三维刚塑性有限元软件 DEFORM-3D,对钛合金的等温锻造成形进行了数值模拟研究。

1 成形工艺及方案

叶栅环是某航天型号发动机中的关键部件,材料为 TC4,服役工况复杂,其模型如图 1 所示。其几何形状较为复杂,尺寸精度要求较高,最薄壁尺寸为 4mm,最深壁厚 20mm,在锻造工艺中属典型的薄壁件。此零件传统的制造工艺是采用自由锻造制坯,然后机械加工至零件尺寸,这种制造工艺不仅浪费原材料,同时机械加工周期长,难度大。为此,借助于等温锻造成形技术,直接通过锻造的方式成形出 TC4 支架零件毛坯,然后通过极少量机加工工时成形最终零件。本文采用数值模拟和物理试验相结合的方法研究支架零件的等温锻造成形工艺,制定省时高效的成形工艺技术。

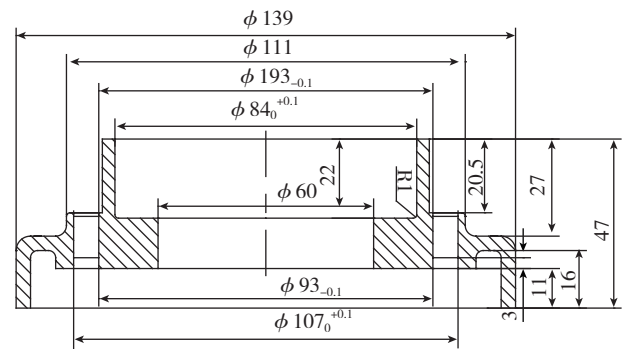


图1 叶栅环零件模型图
Fig.1 Part drawing of blade

2 数值模拟

2.1 模型建立及边界条件

叶栅环的形状较为复杂,等温锻造过程中影响因素较多,本课题采用 PRO/E 软件建立坯料和模具的三维几何模型(图 2),利用 DEFORM-3D 软件进行数值模拟。零件材料为 TC4 钛合金,材料的本构关系由试验获得(图 3),材料的其他参数通过查阅相关资料获得。模拟过程中,模具定义为刚体,温度设定在 970℃,坯料温度

定为 970℃；模具与零件、零件与试验环境以及模具与试验环境定义为绝热。由于锻造过程是一个高温的大变形过程,因此可以忽略坯料的弹性变形。坯料采用刚塑性材料模型,坯料与模具之间的摩擦采用剪切摩擦模型,摩擦因子可以取 0.2^[5]。模拟开始时,坯料划分的单元网格为 50000 个。在变形过程中,利用 DEFORM -3D 自动对坯料重新划分网格,以解决模拟过程中网格畸变过大的问题。

根据坯料及零件尺寸,上模的垂直行程为 24.4mm,结合等温锻造成形的工艺特点,考虑实际生产效率,同时结合现有设备的生产条件,初步确定上模压下速度为 0.5mm/s。

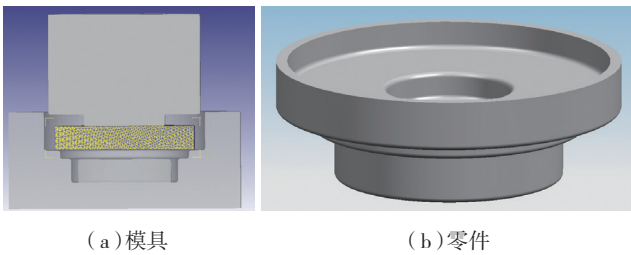


图2 三维模型图
Fig.2 3D model

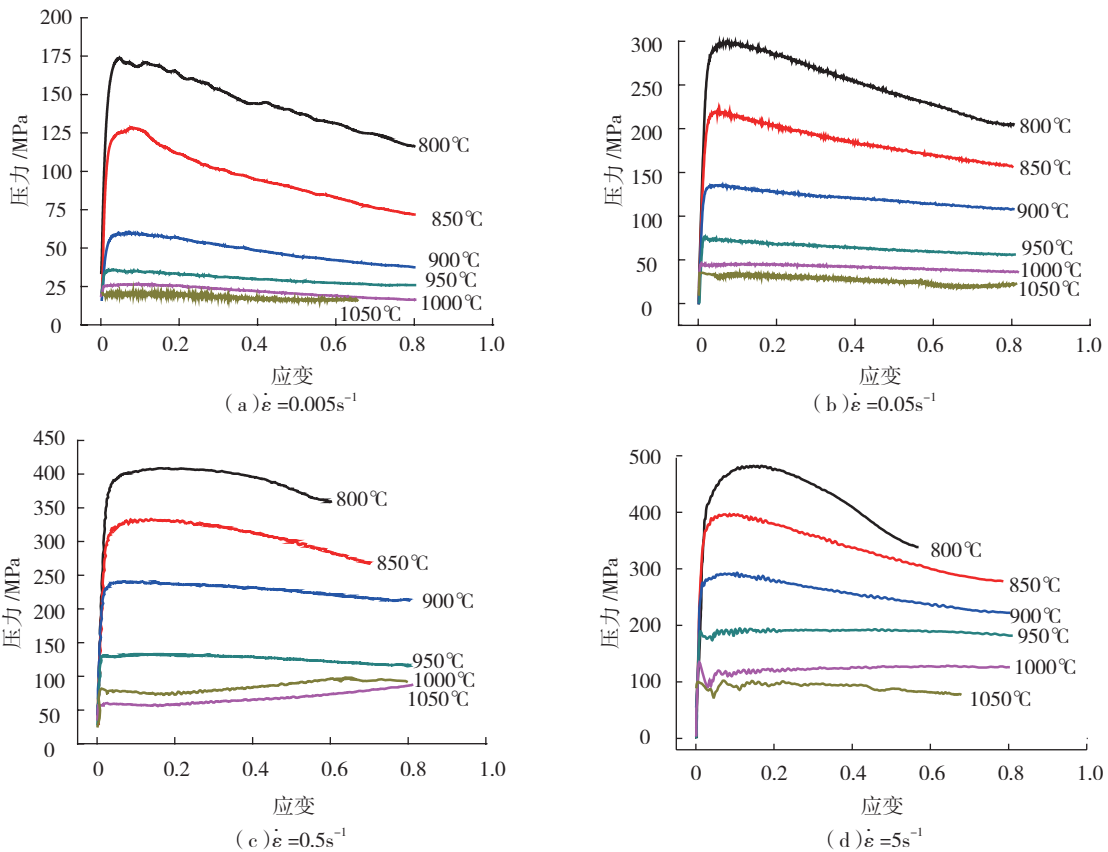


图3 TC4材料本构关系
Fig.3 Constitutive relation of TC4

2.2 数值模拟过程

叶栅环等温锻造成形,是通过上、下模的挤压作用而成。根据成形过程中金属的流动变化情况,将叶栅环的成形过程分为 4 个阶段:第一阶段为上凹成形阶段,第二阶段为镦粗阶段,第三阶段为上下环面成形阶段,第四阶段为下环填充阶段,具体如图 4 所示。

在上凹成形阶段,坯料受模具的作用,中间部分受到压力作用,坯料从整体上看是产生小型弯曲变形,变形程度较小。上模的继续下行,到达第二阶段,此时坯料受到模具的下压产生镦粗变形。在第三阶段,坯料与模膛的接触面积逐渐加大,金属填充模膛,具有典型模锻成形的特点。在最后阶段,模膛已经大部分填充完整,只有少许边角处存在缺肉,在随后的继续成形过程中,模膛处全部填充完成,成形过程完毕。

3 数值模拟结果分析

成形过程的 4 个阶段,载荷增长率有着明显的差异:第一阶段增长率最小,随后其增长率随阶段递增,在第四阶段增长率急速增长。成形过程载荷曲线及速度场分别如图 5、6 所示。第一阶段成形过程中,受压部位投影面积小,径向方向金属流动阻力小,故载荷小,增长幅

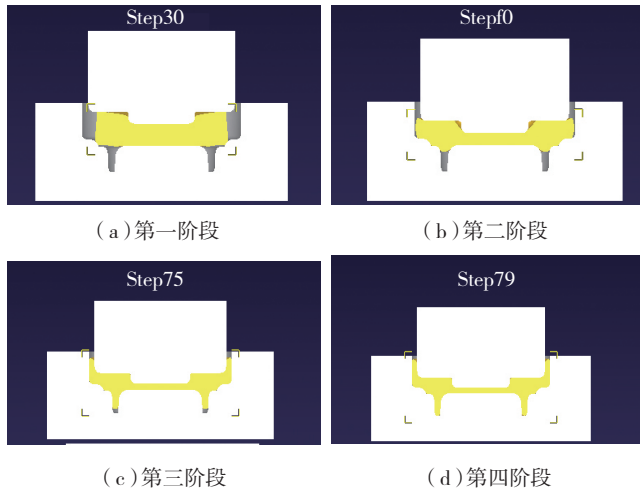


图4 锻造成形过程

Fig.4 Forging forming process

度较慢,第二阶段时金属径向摩擦阻力增大,载荷增长较快,当金属与模具型腔侧壁接触后,径向流动阻力加大,金属开始充填上、下环模具型腔。在经历了第二阶段后,坯料已经与模具型腔侧壁完全接触,金属径向充填完成,迫使更多金属向上、下环模具型腔流动,由于该两处模具型腔较窄,金属充填阻力也很大,导致载荷急剧上升。当金属基本充满上、下环型腔后,多余金属形成纵向飞边,载荷继续增大。上述分析表明第三阶段是金属模具型腔充填的关键阶段,充不满、折叠等缺陷的产生也是发生在该阶段;而第四阶段载荷增加较大,对模具寿命影响较大,应该尽量缩短第四阶段。

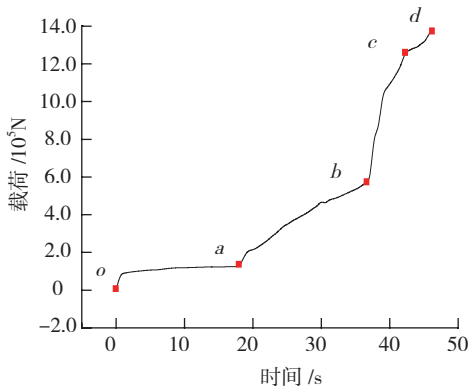


图5 叶栅环成形过程载荷曲线

Fig.5 Load curve of blade forming process

4 试验验证

为验证有限元仿真结果,确定支架的锻造工艺方案及参数,在 630t 等温锻件液压机上开展锻造工艺试验,成形模具材质选用高温镍基合金 K3。在成形时,坯料与模具均通过加热系统加热至 970℃,成形过程中采用氮化硼(BN)类润滑剂,通过浸润方式涂在毛坯上,成形

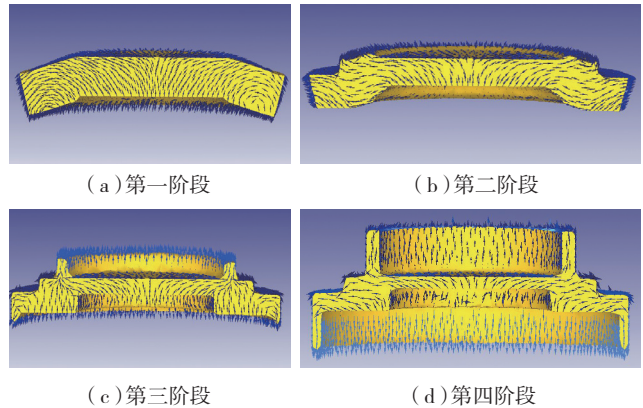


图6 速度场分布情况

Fig.6 Distribution of velocity field

后的锻件如图 7 所示。从图中可以看出,接头锻件各部分区域充模完整,表面质量完好,表面粗糙度 R_a 不大于 $3.2\mu\text{m}$,尺寸精度满足图纸要求,只需进行少许车加工即可满足使用要求。



图7 叶栅环实物图

Fig.7 Physical picture of blade

5 结论

针对 TC4 叶栅环等温锻造成形问题,本文以数值模拟为研究方法,对成形过程进行模拟分析,分析了金属的流动规律以及各阶段成形力分布特点,有助于工件变形机理的深入研究,预测工艺缺陷,为实际生产提供较优的工艺参数,提高研究效率。通过试验预生产的方式进行物理试验研究,结合前期分析的结果进行模具结构及工艺参数,得到了满足使用要求的 TC4 钛合金锻件。采用等温锻造可生产表面光洁、外形精确的航天用钛合金精密锻件,锻件的金属流线分布更合理,满足受力要求;等温锻件的材料用量可减少 60%~80%,提高材料利用率,减少加工工时。

参考文献

- [1] 孟庆通,庞克昌,周建华. 钛合金机匣精锻件等温锻造技术. 中国有色金属学报, 2010(10):862-864.
- [2] 蒋骏. 钛合金零件制造技术. 北京: 国防工业出版社, 1991.

(下转第 126 页)

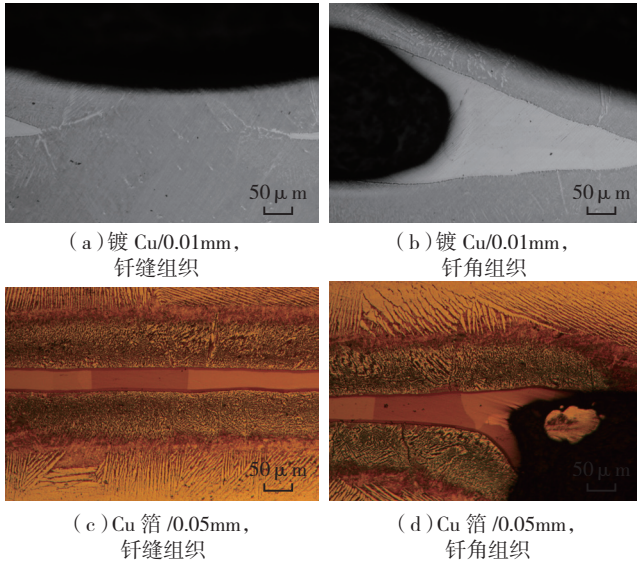


图3 Cu钎料的TA2纯钛真空钎焊接头组织
Fig.3 Microstructure of CP Ti TA2/ Cu joints vacuum brazed at 960°C for 60 minutes

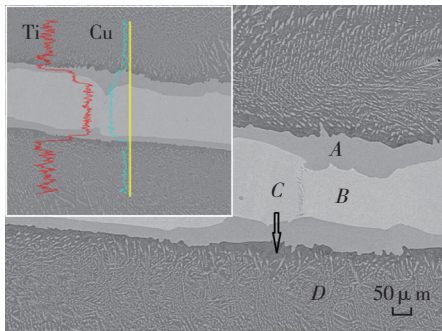


图4 Cu钎料箔的TA2纯钛真空钎焊接头SEM像
Fig.4 SEM image of CP Ti TA2/ Cu foil joints vacuum brazed at 960°C for 60 minutes

SEM能谱分析显示,图4中A相的成分接近 Ti_2Cu ,应为 Ti_2Cu 相;B相的成分接近 $TiCu$,应为 $TiCu$ 相;C相和D相都为高Ti低Cu固溶体相,应为针状 $\alpha + \alpha'$ 组织。从图5的Ti-Cu二元合金相图可知,用Cu作钎料在960°C进行钎焊,是利用了Ti-Cu的共晶反应:

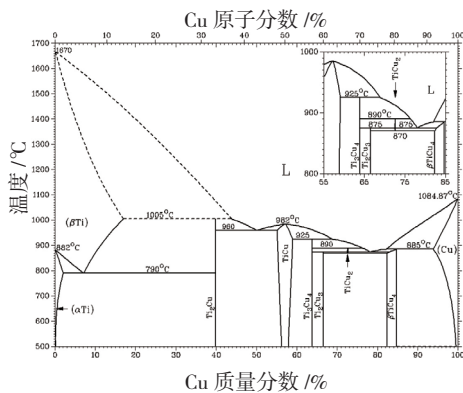


图5 Ti-Cu二元合金相图
Fig.5 Ti-Cu Binary equilibrium diagram



当钎焊时高温扩散形成的共晶液相,没能通过扩散和相互溶解,使共晶点成分明显改变,穿越 Ti_2Cu 成分点向富Ti端靠近,那么,在钎缝中心必然会形成 $Ti_2Cu + TiCu$ 的化合物组织。因此,降低接头间隙,减少钎料用量,延长保温时间,对提高接头塑形是必不可少的。

3.3 热交换器的钎焊

根据上述试验结果,考虑到实际零件为内腔T形接头,粉状钎料不易使用,必须要使用箔状钎料形式,但是国内Ti基非晶箔状钎料的价格昂贵,每公斤大约要4-5万元,而且现货钎料难得,需要定做,周期长。为满足零件的钎焊要求,采用Cu作钎料在960°C/60min条件下的真空工艺方案,对图1中所示的热交换器进行真空钎焊。经实体零件解剖,钎缝致密,钎着率100%,见图1。TA2的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变温度为885~900°C^[4],在960°C进行钎焊,母材晶粒有所长大。钎焊的热交换器检漏和耐压试验,满足技术要求。

4 结论

与用纯Cu钎料相比,用Ti-Zr-Ni-Cu钎料钎焊钛热交换器可以更容易地得到等温凝固钎缝组织。而用纯Cu钎料,则价格低,也可得到致密的成形漂亮的钎焊接头,但代价是接头的塑形较低。

参考文献

- [1] Shapiro A, Rabinkin A. State of the art of titanium-based brazing filler metals. *Welding Journal*, 2003 (10):36-43.
- [2] LAN S W. Laminated Brazing Filler Metals for titanium assemblies. *Welding Journal*, 1982, (10):23 ~ 28.
- [3] CHANG C S, JIA B. Application of roll welding to brazing. *Welding Journal*, 2003, (10):28-31.
- [4] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

(责编 早春)

(上接第119页)

- [3] 吴伏家, 尹晓霞, 超长瑞. TC4钛合金等温锻造过程的数值模拟和实验研究. *锻压技术*, 2009(10):147-150.
- [4] 曲银化, 孙建笠, 孟祥军. 钛合金等温锻造技术研究进展. *钛工业进展*, 2006, 23(1):6-9.
- [5] Argyris J H, Doltsinis J S, Luginsland. Three-dimension thermomechanical analysis metal forming processes//Proc.Int. Workshop Simulation of Metal Forming Processes by the Finite Element Method. Stuttgart, 1985.
- [6] Yang D Y, Lee N K, Yoon J H. A three dimension of isothermal turbine blade forging by the rigid-Viscoplastic finiteelement method. *Journal of Material Engineering and Performance*, 1993, 2:119-124.

(责编 谷雨)