

Ti-10V-2Fe-3Al 合金护板接头 等温精锻件及模具结构特点

南昌航空工业学院 王家宣 陈玉秀 袁宝歧 张国新 杜忠权

Ti-10V-2Fe-3Al 合金是一种高强、高韧近 β 型钛合金,它具有非常优良的热加工工艺性能,在国外被广泛用于飞机结构零件上。本文介绍采用等温精密模锻方法研制的国产某型号飞机用 Ti-10V-2Fe-3Al 合金护板接头精锻件成形特点,及其模具结构、加热及保温方式和模具选材等有关问题及体会。

The Forging Characteristic of Isothermal Finish Forging of Ti-10V-2Fe-3Al Guard-plate Joint and the Structure Characteristic of the Die

Wang Jiakuan Chen Yuxiu Yuan Baoqi Zhang Guoxin Du Zhongquan
(Nanchang Institute of Aero-Technology)

Ti-10V-2Fe-3Al is a high strength, high ductility approach β titanium alloy. It has excellent properties of hot-working process, and is widely used in the structural parts of aeroplane in foreign countries. This paper deals with the forging characteristic of finish forging of Ti-10V-2Fe-3Al guard-plate joint, and the structure, heating, heat preservation pattern and material select on of the die. The alloy was developed by the method of isothermal finish die forging, used for certain domestic aeroplane.

一、前言

等温锻造是一项新的工艺方法,它大多用于航空航天工业中的飞机、航天器等结构件及国防工业中的关键零件的制造,可使得锻件达到接近零件的形状(Near-Net-Shape)要求,减少材料消耗,降低加工周期、成本;该工艺结合热机械处理(Thermomechanical processing)能获得综合力学性能最优化的钛合金等温锻件,但在模具材料、模具制造和模具加热装置等方面的成本投入,比常规锻造方法要高,从而给应用带来一定困难。

随等温锻造工艺研究的不断深入,研究者们从以下3方面着手解决这种工艺的推广应用问题:一是从模具材料方面入手,研制出适于该工艺要求的、热强性好的模具材料,以解决钛合金、高温合金等难变形金属等温锻成形问题;二是研制具有良好的热加工性的高强、高韧结构合金,降低锻造温度,保证能选用价格较低的模具材料(如Ti-10V-2Fe-3Al合金等),使这类合金等温锻造所用模具成本不致太高,为其采用等温锻工艺创造条件;三是从工艺本身入手,根据锻件材料不同的热加工性能和现有的模具材料使用条件,同时考虑锻件的结构和变形特点,合理选择工艺方法,如热模锻造(Hot-die-forging)、等温锻造(Isothermal-forging)、超塑性等温锻造(Gatorizing)等工艺方法,生产出形状复杂、无余量或小余量的锻件。

本课题以复杂程度很高的薄腹板、高筋类、飞机用

Ti-10V-2Fe-3Al(以下简称Ti-1023)合金护板接头锻件为研究对象,采用等温精锻工艺方法成形。在研究过程中,对模具结构设计、模具加热与保温、模具选材和成形工艺等方面进行了研究与探讨,并取得了一定的经验,为Ti-1023合金在我国航空航天飞行器上的推广应用奠定了基础。

二、护板接头零件与锻件

1. 护板接头零件特点

护板接头零件为某型飞机上一结构件,原工艺采用10块30CrMnSiA板材经焊接组合成为一腹板弯曲多支承筋的零件,如图1所示。整个工艺需数套工装和夹具,并

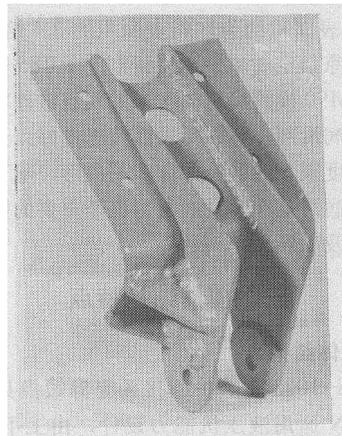


图1 护板接头零件照片(原工艺)

经十几道工序才能完成。

2. 护板接头等温精锻件特点

根据原零件设计要求，将护板接头改为 Ti-1023 合金整体件后，该零件属于薄腹板、高筋类、高复杂系数锻件。锻件设计采用小余量（仅供机铣）、无斜度和局部小斜度以及较高的尺寸精度：单面余量范围为 0.2~0.5mm，斜度为 $30' \sim 1^\circ$ ，公差按 GB180-76 标准选取，锻件形状复杂系数为 0.128。因此，该锻件的成形难度是非常大的，如图 2 所示。

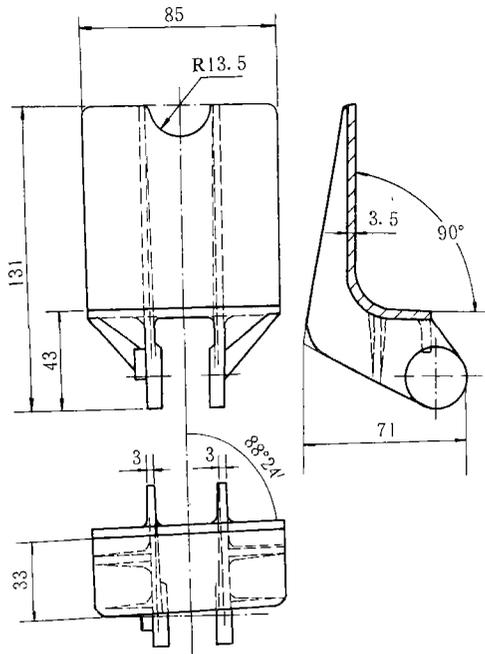


图 2 锻件示意图

3. 锻件成形特点

由于 Ti-1023 合金的热加工性较好，可在 $780^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 之间进行锻造。采用组合凹模闭式模锻方法，锻件由简单毛坯经一次挤压成形，整个锻造过程需时 10min 左右。整个成形过程由正挤、侧向挤、反挤复合而成。经检验，模膛的各个部位均已充满，无明显缺陷。经测量， 90° 腹板反挤高厚比为 17.2；单面侧向挤压最大高厚比为 6.25；正挤压深度为 38mm；各部分变形程度均在 90% 以上，锻件新生表面积约为坯料表面积的 2.4 倍。在成形中，由于采用了北京航空材料研究所研制的 FR85 防护等温锻造润滑剂和 FRM90 模具润滑剂，未发现有锻件粘模现象，锻模出模顺利，润滑剂裹覆锻件表面情况良好。这说明，薄腹高筋、变形程度很大的锻件如欲顺利成形，除了工艺参数合理以外，锻件润滑剂和模具润滑剂也是重要的因素。图 3 为护板接头锻件及毛坯。

三、模具结构特点

1. 模具总体结构

图 4 为 Ti-1023 合金护板接头等温锻模具总装图。该模具按 3000kN 通用液压机能力设计，由上下模座 10、7，可换凹模 8 及活动压头 16，加热装置 6，控温装置及隔热

保温装置等 5 大部分组成。利用该模具可在现有不加改造的液压机横梁下行速度情况下，使锻件成形。如果工艺需要，也可以在液压机经过改造以后，速度达到可控条件下进行超塑性等温锻造。

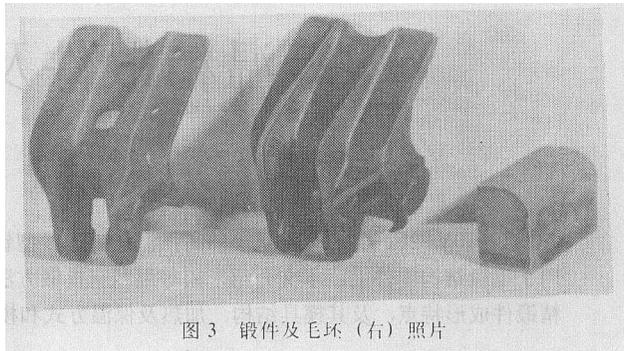


图 3 锻件及毛坯（右）照片

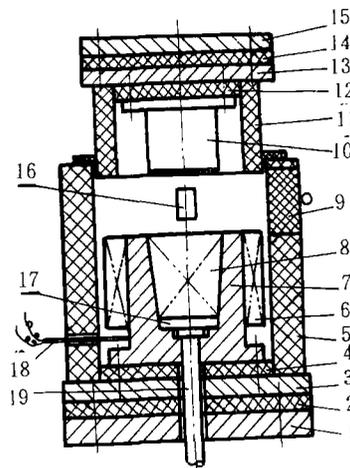


图 4 模具总装示意图

1-下底板；2-隔热层；3-下安装板；4-隔热层；5-下保温罩；6-加热器；7-下模座；8-组合凹模；9-炉门；10-上模座；11-上保温罩；12-隔热层；13-上安装板；14-隔热层；15-上底板；16-活动压头；17-垫板；18-热电偶；19-顶杆

2. 模具设计的几个特点

(1) 通用模座

钛合金等温锻模具投资成本比常规锻造模具高一个数量级。除特殊情况应采用专用模具外，最好尽量采用通用模具，以减少锻件生产的平均成本。结合航空产品的小批量多品种生产的特点，和 Ti-1023 护板接头锻件的具体成形要求，通用模座按 3000kN 通用液压机最大使用能力来设计，如图 5 所示。该模座结构同时还考虑到为了采用铸造方式制造，应尽可能使横截面积不要变化太大。此外，模座与凹模采用锥面配合以便承受凹模的径向与轴向压力。

下模座设计时，按 3000kN 液压机最大使用能力，根据 Ti-1023 合金在锻造温度下的流动应力，计算出所能锻出的锻件最大水平投影面积（直接受压面积） F ，考虑到锻件的形状不同，取折中情况，将 F 折算成正方形 $a = \sqrt{F}$ ，取其

对角线长 $L=1.414a$ ，加上组合凹模最小壁厚 S' （一般 $>10\text{mm}$ ），考虑到某些锻件的形状，可用加一层组合凹模垫套，套厚 S_1 ，以上尺寸构成组合凹模外径 D_2 ，如图 6 所示。在此基础上，根据挤压凹模强度理论计算，确定下模座壁厚 S ，便得到模座外径 D_1 为：

$$D_1 = D_2 + 2S \\ = 1.414\sqrt{F} + 2S' + 2S_1 + 2S \quad (1)$$

下模座内锥面为 5° 。上模座外径应小于 D_2 。

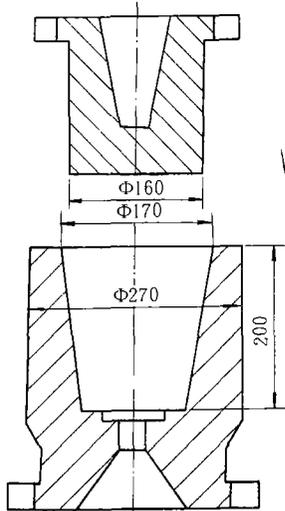


图 5 上下模座示意图

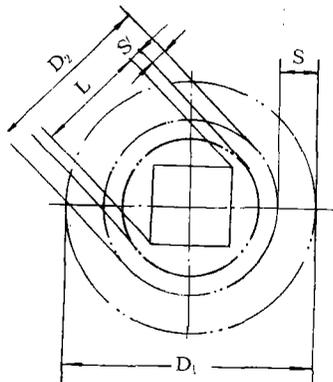


图 6 下模尺寸关系示意图

(2) 组合凹模与活动压头

在许多等温锻实例中，锻件都在上下模的型腔中成形，在锻造过程中为了避免上下模错移，只有通过在上模上设置导向机构，来解决这一问题，但这势必增加了模具结构的复杂性和装配精度。采用闭式模锻方法可以解决这一问题。闭式模锻使整个毛坯在组合凹模中成形，活动压头只起中间传递压力的作用，同时是闭式型腔的一部分，这样，在放置活动压头时只要一般定位即可，从而简化模具结构和操作，图 7 为 Ti-1023 护板接头的等温锻组合凹模与活动压头。锻造结束后，将组合凹模与活动压头取出，在专用装置上将它们

分开，取出锻件。

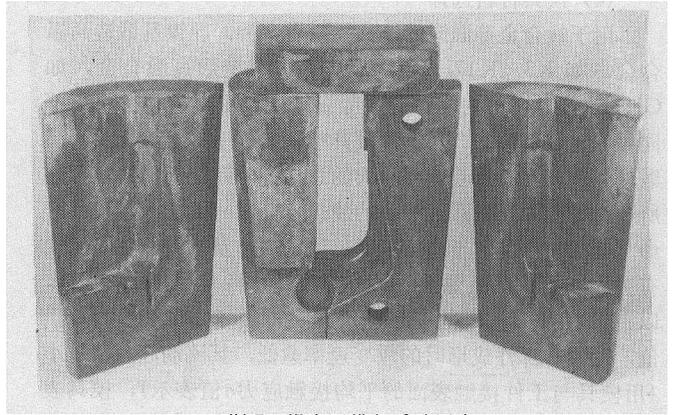


图 7 组合凹模与活动压头

在通用模具中，组合凹模是可更换的，这样便可生产出形状不同的锻件。锻件成形的尺寸精度和表面质量，是通过组合凹模型腔来保证的，除了合理分模和保证加工精度外，型腔尺寸的确定是一个重要环节。通常，等温锻造大余量锻件时，模具型腔尺寸的热胀量是通过经验公式计算得到，即：

$$K = (\alpha_{\text{模}} - \alpha_{\text{钛}}) \cdot T \quad (2)$$

用此公式计算出的热胀量并不适用等温精锻件设计要求，因而必须采用下式计算：

$$\beta = \frac{1 + \alpha_{\text{钛}} \cdot T}{1 + \alpha_{\text{模}} \cdot T} \quad (3)$$

该式是在考虑了钛合金和模具材料的热膨胀系数不同，而在锻件温度条件下又要求钛合金毛坯和模具型腔的热尺寸必须相等的条件推导出来的，因此，可得到锻后能保证锻件设计尺寸的模具型腔尺寸（制模尺寸）为：

$$D_{\text{模}} = \beta \cdot D_{\text{钛}} \quad (4)$$

(2) ~ (4) 式中：

$\alpha_{\text{模}}$ 、 $\alpha_{\text{钛}}$ ——分别为模具材料和钛合金在锻造温度时的线胀系数；

T ——锻造温度 ($^\circ\text{C}$)；

K 、 β ——分别为经验热胀率和理论热胀率；

$D_{\text{模}}$ 、 $D_{\text{钛}}$ ——分别为模具型腔尺寸和钛锻件冷尺寸

通过该式计算确定的型腔尺寸，在锻件冷却后，各部分尺寸均落在设计尺寸的公差范围内。

(3) 加热装置与高效隔热垫

钛合金因成分不同，其等温锻造温度大都在 $760^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ 之间。对于 Ti-1023 合金护板接头，采用的是低于相变点温度以下的锻造方法，锻造温度在 $780^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 之间，模具采用电阻丝加热，ZWK 可控硅控温器控温，整个模具只采用一个下加热器，如图 4 所示。加热器功率为 12kW 。为提高加热效率和减少热量损失，除采用上下保温罩 5 和 11 构成的封闭加热装置外，在上下模隔热层 2、4、12、14 的设计中，选用了国内现有耐火材料，经合理组合、压装，使得模座在温度为 850°C ，加热时间为 8h 的情况下，模具上下底板 1 和 15 在夏季时的温度低于 50°C ，冬季时低于 30°C 。这一设计，将传统的等温锻模具水冷系统

取消,因而提高了模具加热效率,减少了能量损耗。

(4) 模具材料选择

用于钛合金等温锻的模具材料有2类,即镍基锻造高温合金,如K3、K17、K9、K12等,和变形高温合金,如GH118等。在国内外钛合金等温锻生产中,这些材料都不同程度地被采用。合理选用模具材料,对于降低钛合金等温锻件生产成本,有着非常重大的意义。除此之外,还应考虑所选材料在等温锻造过程中的使用寿命,一般情况,模具寿命与其工作温度和工件成形时的流动应力及应变速率等因素有关。在等温锻造温度下,要求模具材料有足够的热强性,以克服模具工作时的变形和磨损,即要求有足够的 $\sigma_{0.2}$ 值;同时,工件成形时的应变速率愈低,其流动应力值越小(用模具与工件接触表面的平均接触应力 $\bar{\sigma}$ 值表示),模具表面磨损便愈慢,模具发生变形的可能性也愈小。式(5)表示这两者的关系:

$$K_1 = \frac{\sigma_{0.2}}{\bar{\sigma}} \quad (5)$$

该式表明: K_1 值愈大,模具的磨损速度愈慢,抗变形能力愈强,寿命愈长,如图8所示。

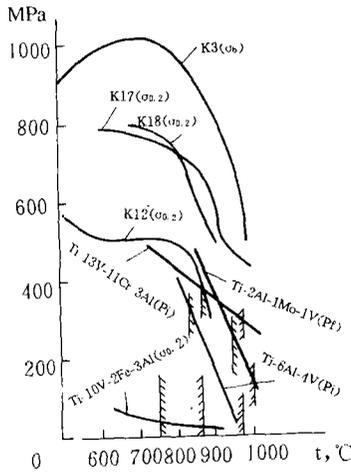


图8 模具材料与钛合金的高温强度比较

Ti-1023合金属于近 β 型钛合金, β 相变点大大低于其它工程实用型钛合金,在760℃~850℃具有非常好的锻造性能,若在 $10^{-4}s^{-1}$ 应变速率条件下,可得到极低的流动应力,并呈现出超塑性状态,对模具寿命是极为有利的。在护板接头锻件研制时,考虑到材料的经济性,上下模座和组合凹模均选用了K12镍基铸造高温合金,在液压机现行加压速度为3.5mm/s的条件下,模座外壁温度为900℃,组合凹模平均为820℃时,变形所施压力逐渐加至1350kN,模座与组合凹模均经受住了考验。只是受单向压应力的活动压头发生了墩粗变形;在更换了K17材料后,便解决了这个问题。由此可见,上述选材方法,具有一定的指导意义。

四、结 论

1. Ti-1023合金护板接头锻件具有非常复杂的外形,

属于薄腹、高筋类典型锻件,它的研制成功,为我国在航空航天领域及其它部门推广应用Ti-1023合金取代30CrMnSiA结构钢,迈出了一步。

2. 设计的模具隔热层,大大提高了模具加热效率和隔热效果,模座外壁温度为900℃时,模具底板温度在50℃以下,因而可将传统的模具水冷系统取消。

3. 采用封闭式模腔、单加热器加热下模,升温快,温度稳定,能够保证Ti-1023合金锻件的组织和性能要求。

4. 组合凹模选用K12材料,可以保证Ti-1023护板接头锻件成形。但对于受单向载荷较大的零件,建议选用更好的材料(如K3或K17等)。

5. 模具结构简单,造价低廉,通用性强,很适合航空锻件小批量多品种的生产特点。

黄懋衡副教授在本研究工作中,对液压机进行了改造设计。参加本课题研究的还有熊洪森、万联耀、王高潮、李志华等,在此对他们表示衷心地感谢!

(参考文献略)

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※

大型立式真空淬火电炉通过技术鉴定

由航空设计研究院、贵阳黔江机械厂及云马飞机制造厂等单位共同研制的适合航空零件进行真空热处理的大型多功能立式真空淬火电炉,已由航空航天部委托部科学技术研究院主持,于1991年5月在贵阳进行了技术鉴定。

这台工作尺寸为 $\Phi 600\text{mm} \times 1400\text{mm}$ 、最高工作温度为950℃、最大装炉量为200kg、极限真空度达 $4.8 \times 10^{-3}\text{pa}$ 的具有真空油淬、真空气淬和真空硝酸盐浴等温淬火等多种功能的真空炉,经云马飞机制造厂两年多的生产使用,证明其能满足航空结构钢的真空油淬、真空等温淬火及气淬的工艺要求,可以用于航空超高强度钢制造的起落架、机翼梁、结合螺栓等重要受力构件的真空热处理。

与会专家认为:该炉采用工件垂直加热和淬火的立式结构,填补了我国大型立式真空淬火设备的空白,为同类设备的开发提供了经验,为发展立式真空炉系列打下了良好的基础。该炉在设计思想和结构处理上,具有独特的风格:设置中间室防止加热室污染;采用惯性吊具实现工件的自动装卸;利用回充惰性气体提高压强、减小等温淬火时硝酸盐蒸气的污染等,达到了国内先进水平。会议一致认为:该真空炉的研制是成功的,同意通过鉴定。

鉴定会由部科学技术研究院戚道结高工主持,部热处理中心主任王广生高工任鉴定委员会主任,全国热处理学会副秘书长吴颖思、西炉所刘学文高工为副主任;贵州省热处理学会常务副主任委员李克君高工及部内一批知名热处理专家参加了鉴定会。

(袁培柏)