

试制 TC9 钛合金叶片 的几个工艺问题

一七〇厂 黄福贻

一、前言

TC9 钛合金是一种马氏体型 $\alpha+\beta$ 两相合金, 是国内外热强性能较高的合金之一。用这类合金制造航空发动机叶片, 在国外已有较成熟的工艺, 但具体的工艺报导甚少, 而在国内还是刚刚开始。

为在发动机上以该合金取代 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢叶片, 自1970年开始在部内外有关单位的协作配合下, 用不同冶金厂的热轧、热挤压棒材进行了一系列的试制工作。在试制过程中, 遇到的主要问题是热稳定性能一直满足不了技术要求。经多年的努力, 终于用国产(宝鸡有色金属加工厂) TC9 钛合金棒材试制出发动机四至六级压气机工作叶片, 顺利地通过了200小时的试车考验。这一试制成果为使用国产高温钛合金制作压气机转子叶片迈开了可喜的一步, 同时也将为使用同类的高温钛合金奠定基础。

二、叶片的模锻工艺

1. 叶片工艺的主要流程

下料—扒皮(超声波探伤)—加热、顶锻—打磨—加热、模压、切边—打磨—加热、校正—热处理—吹砂(酸洗)、机加至铄叶肩—消除应力退火—机加至粗抛光—腐蚀、目视检查—机加至成品—荧光检验—X光检验—入库。

2. 模锻工艺的主要参数

叶片用炉号539-20211、539-602030、539-602032 TC9 钛合金棒材, 其相变点为1030℃。

顶锻: 电炉加热 $960\pm 10^{\circ}\text{C}$; 所用设备3.5"卧锻机; 操作速度是毛料从出炉门至顶锻最后工序完毕, 控制时间 ≤ 15 秒。

模压、切边: 电炉加热 $960\pm 10^{\circ}\text{C}$; 所用设备1600吨曲轴压力机、160吨切边冲床; 操作速度是毛料从出炉门至切边完毕, 控制时间 ≤ 25 秒。

校正: 电炉加热 $800\pm 10^{\circ}\text{C}$; 所用设备同模压。

在模锻过程中采用二硫化钼润滑剂润滑锻模。锻模预热 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 。在顶锻、模压切边工序中控制操作速度的目的是为了保证停锻温度不低于 850°C 及控制余热切边。

热处理工艺:

叶片锻件: $980\pm 10^{\circ}\text{C}/1$ 小时, 空冷+ $530\pm 10^{\circ}\text{C}/6$ 小时, 空冷。

半成品叶片消除应力退火: $530\pm 10^{\circ}\text{C}/2$ 小时, 空冷。

三、叶片锻件的冶金质量

采用上述工艺生产的叶片锻件, 几何尺寸符合锻件图(单面余量为0.8至1.2毫米), 表面质量良好, 组织性能满足技术要求。由图1可见叶片获得了所要求的有一定数量的等轴初生 α 。这种组织对确保叶片的综合性能(特别是热稳定性和疲劳性能)是很有益处的。

表1 叶片机械性能

熔炼炉号	叶片级别	室温性能						热稳定性能*				500°C拉伸			500°C持久	
		σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	a_k	d	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	σ_b	δ	ψ	应力	
		公斤 毫米 ²	公斤 毫米 ²	%	%	公斤·米 毫米 ²	毫米	公斤 毫米 ²	公斤 毫米 ²	%	%	公斤 毫米 ²	%	%	62	公斤 毫米 ²
539-20211	四级	116	109	18.5	52	4.15	3.3	119	112.5	18.5	37.5	81.2	20	64	>100小时	
		116	109	18.5	47	4.0	3.3	118	111	18	41.5	82	20	71.5		
539-602030	五级	107	98	14.5	48	4.82	3.35	107	94	17.5	36	72	18	72	>100小时	
		107	96.5	19	42.5	4.67	3.35	109	98.5	15	47	77.8	16	68		
539-602032	六级	109	98	15.5	42.5	5.34	3.3	111	100	18.5	46.5	73.3	14.6	73	>100小时	
		109	99.5	16	51	4.56	3.4	108	100.5	16.5	40.5	76	17	68		

注：拉力试棒为 $\phi 3.0$ 毫米；冲击试样为 5×5 毫米。二者均为叶片榫头横向试样。

* 系试样经 $500^\circ\text{C} \times 100$ 小时加热后的室温拉伸性能。

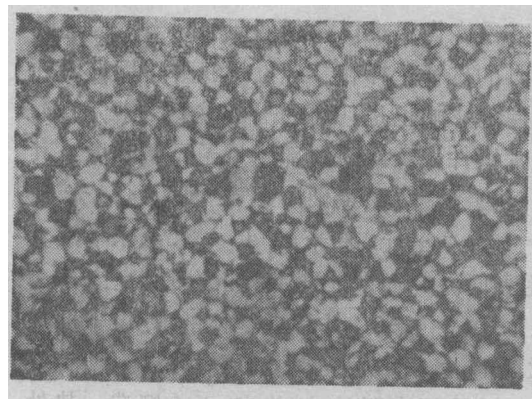


图1 叶片显微组织 $\times 450$

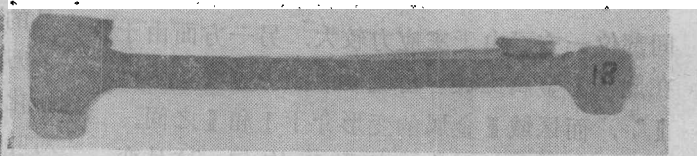


图2 叶片纵向低倍

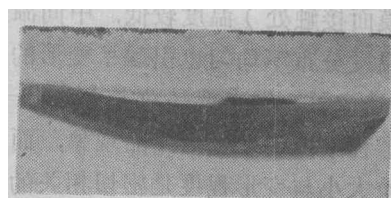


图3 叶片横向低倍

叶片的机械性能见表1，尽管试棒为 $\phi 3.0$ 毫米横向（在叶片榫头切取）拉伸小试样，而性能指标（尤其塑性）仍然很好，满足技术要求。

四、试制中遇到的问题

叶片在试制过程中遇到的问题较多，关于原材料方面的问题在此不一一介绍，而只就试制中遇到的主要工艺环节产生的问题作一简述。

1. 变形带

叶片锻件在进行低倍检查时，发现在纵向中间部位呈现较平直的一“白条”（图2）和横向中间段较平直、二端各向叶盆、背开叉的“白条”（图3），高倍观察“白条”区晶粒

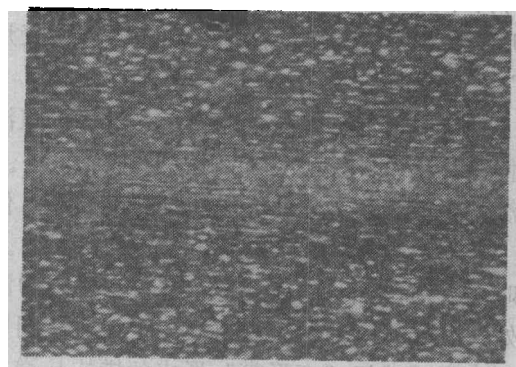


图4 “白条”的显微组织 $\times 200$

很细且被拉长（图4）。

所谓“白条”，实为变形所引起的“变形带”。我们从横向低倍（图3）上可看出，它

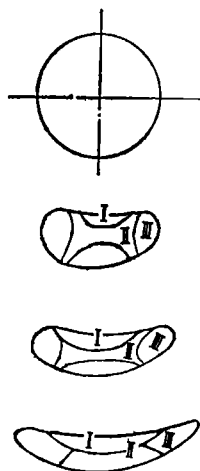


图 5 叶片横向变形示意图

与锻粗试验的变形集中于对角线部份是一样的。众所周知，棒材模压叶片时，叶片的横向变形示意图如图5。当金属变形时，由于叶盆、背面金属与模具表面接触存在着摩擦力，而且钛合金本身存在着严重的粘模现象，尤其当模具表面光洁度较低（旧模具）润滑不良时，将促使摩擦力增大，阻碍金属的流动，使表面层处于“难变形区Ⅰ”。而中间部位一方面由于主应力较大，另一方面由于在此区内金属比较容易流动即成为“易变形区Ⅱ”，而区域Ⅲ金属的变形介于Ⅰ和Ⅱ之间。这样就造成了各部位的变形不均匀，这是变形不均匀的原因之一。其二是由于金属的表层（尤其与模面接触处）温度较低，中间温度较高。这种温度分布不均匀也引起了变形的不均匀，其后果造成了金属内部晶粒大小的不一致。在锻造过程中由于发生再结晶现象，而再结晶后的晶粒大小与变形程度是密切相关的，变形程度愈大，晶粒愈细小。因此在变形程度大的叶片中间部位晶粒细小，这一细小晶粒区在叶片低倍试片上呈现为所谓“白条”即“变形带”。

对“变形带”区同“非变形带”区的室温拉伸和热稳定性能进行了对比（见图6a、b）。虽然“变形带”区的性能能满足技术要求，但比“非变形带”区的性能低（塑性更明显）。同时，表面腐蚀时“变形带”在叶盆、叶背的露头处要出现腐蚀坑，这对疲劳性能有不利影响。克服或减轻“变形带”形成的措施是增加预锻工序，保持模具表面良好的光洁度，加强锻造润滑和选择合适的模锻温度。

2. α 脆化层

提供机械加工的叶片锻件，其表面一度只

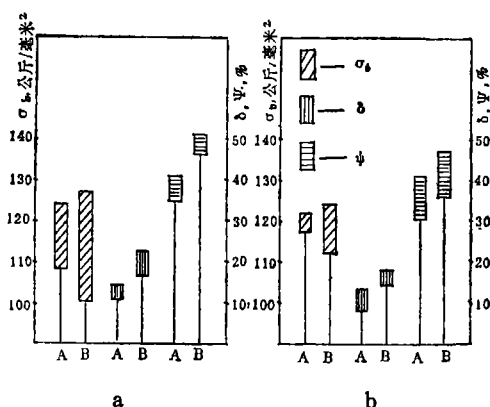


图 6 “变形带”区与“非变形带”区性能的比较
a—室温性能比较；b—热稳定性能比较；
A—变形带； B—非变形带。

经吹砂清理，因此在拉削棒头工序中，遇到了刀具的严重烧伤和难以拉削的问题。当然，这除了刀具的材料选择和合理设计以外，锻件表面硬化层的影响也是其中的一个重要因素。我们对叶片锻件从表面向内部测量了显微硬度。其结果见图7。表层最硬，距表面0.04毫米处 $HV = 545.5$ 公斤/毫米² ($d = 2.8$ 毫米)，直至距表面0.24毫米处 $HV = 390$ 公斤/毫米² ($d = 3.2 \sim 3.25$ 毫米)才接近基体的硬度（即在要求的 $d = 3.2 \sim 3.5$ 范围内）。

α 脆化层主要是在热加工（锻造、热处理

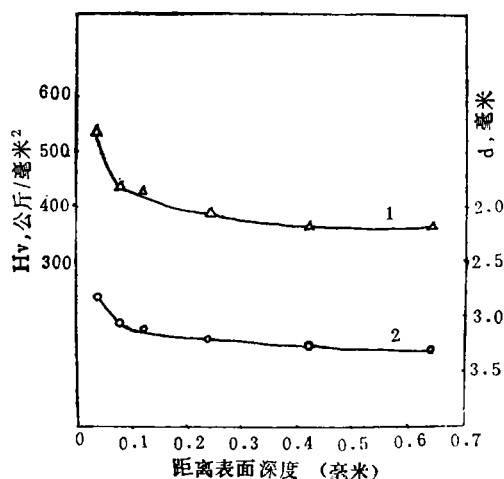


图 7 距离表面不同深度的硬度

1—维氏硬度；2—布氏硬度。

理) 工序中经过多次的或长时间的高低温加热过程中形成的富氧层。实践证明, 这一富氧层虽然很薄, 但十分坚硬而又结实, 单一的吹砂是不能清理掉的。这一表层如不及时除去, 不仅影响叶片锻件表面缺陷的检查, 而且将对机加带来严重的影响。因此叶片锻件表面的清理除吹砂外, 随后进行酸洗是十分必要的。

3. 氢、氧含量

我们取炉号539-602032棒材, 从原材料到

成品叶片, 以不同工艺路线, 对加工过程中可能增(减)氢、氧的工序进行了试验对比。试验结果如图8所示。由图8可见, 这三种工艺路线生产的叶片, 其氢、氧含量的变化有如下共同点: 第一、从原材料到叶片电解工序, 氢、氧含量变化规律相同, 即原材料制成叶片锻件时, 由于热加工工序(锻造、热处理)的多次加热, 使叶片锻件的氢、氧含量急剧上升; 而叶片一旦经过电解工序后, 氢、氧含量

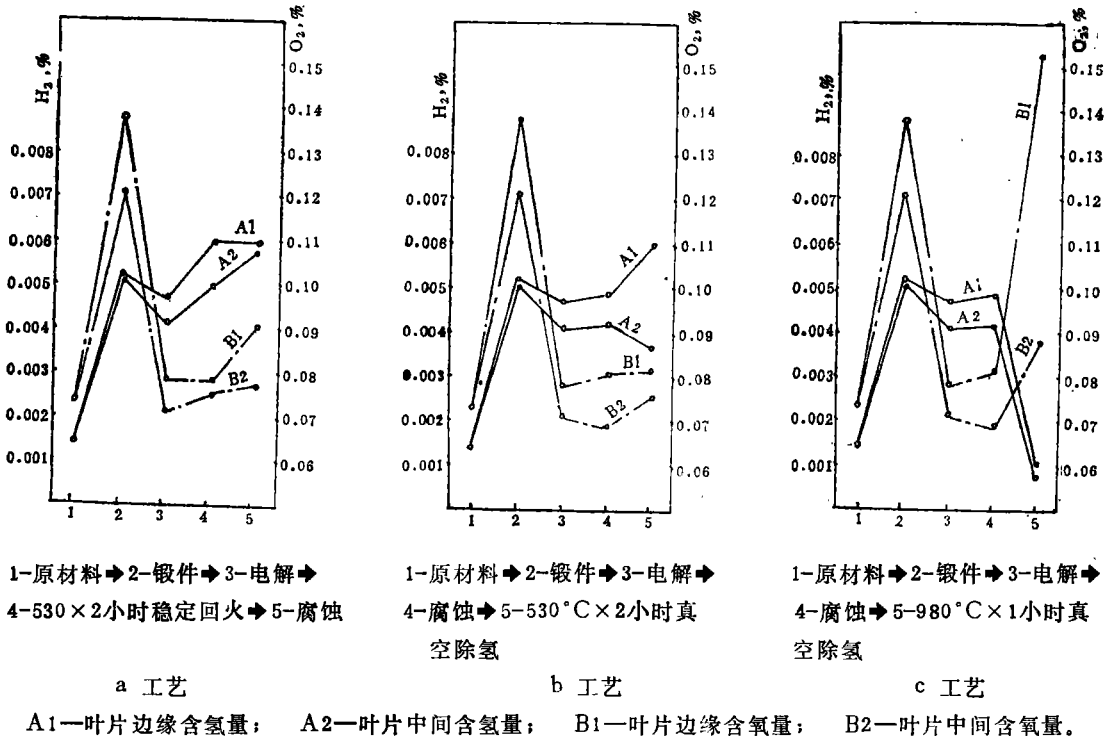


图8 不同工艺路线工序叶片的氢氧含量

显著下降; 第二、在所有的工序中, 叶片边缘的氢、氧含量始终比叶片中间部位的高; 第三、叶片经过腐蚀后氢含量有所增加。另外, 由a、b这两种工艺可看出, 530℃×2小时真空除氢效果不明显, 而且氧含量有所增加。当采用980℃×1小时真空除氢时, 起到了除氢的作用, 使氢急剧下降(比原材料的氢含量还低), 但氧含量有所增加, 尤其叶片边缘的氧含量大幅度地上升(比叶片锻件的氧含量还高), 而且这一高温处理将给叶片的组织性能

及叶型的变形带来不利的后果。而a工艺的成品叶片虽然腐蚀后氢、氧含量比原材料高, 但均在规范(YB761-70)允许的范围内, 因此我们最终采用了图8a工艺。

五、结 论

综上所述, 对相变温度为1030℃的国产TC9钛合金棒材, 采用模锻加热温度为960±(下转第23页)

通 ϕ 。此时，二次绕组产生的电势大小为：

$$E_2 = -\frac{4.44 \phi N_2 \cdot f}{10^8} \text{ (伏)} \quad (1)$$

式中：

N_2 ——二次绕组圈数；

f ——初级绕组磁化频率；

而 $\phi = B A$ (A 为磁体截面积， B 为磁感应密度) 这样 (1) 式可写成下式：

$$E_2 = -\frac{4.44 B \cdot N_2 \cdot f \cdot A}{10^8} \text{ (伏)} \quad (2)$$

而 B 是导磁率和磁势的函数。如果磁势和磁路长度以及磁体的导磁率不变，则上式二次绕组的感应电压与磁体截面 A 成正比关系。因为测头的磁体截面不变，即感应电势仅与叶片截面厚度变化成正比关系。这样，我们可通过二次电压的大小间接测量出叶片厚度。测头材料选用皮莫合金，厚度为1毫米，其他尺寸见图2。

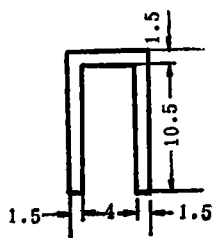


图2 测头尺寸

磁势与激磁频率是重要的。磁势的选择原则是，要使不同厚度的叶片都有反映。考虑到测量边缘的要求，我们选取激磁频率为20赫芝。这具测厚仪的主要技术性能为：

- ①测量范围：1.5毫米以下；
- ②测量误差： $\pm 7\%$ ；
- ③边缘影响：不大于0.5毫米；
- ④测量接触面积： 1.5×1.0 毫米²。

探头与叶片的接触测量面积为 1.5×1.0 毫米²。接触测量面积愈小，叶片测量点数就愈多，漏检区域也就愈少。而测量结果是探头两端点间厚度的平均值。这两端点间的距离愈小则准

确性愈高。但是探头两端点的距离与测量范围有关，距离越短，测量范围的上限也愈低。

叶片壁厚与仪器示值关系示于图3。

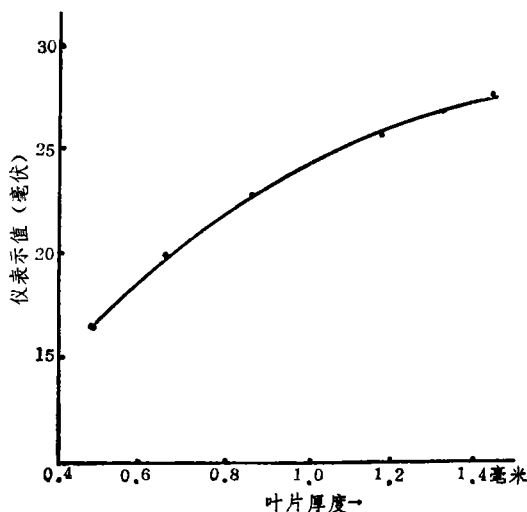


图3 叶片壁厚与仪器示值关系曲线

为保证叶片导磁率的稳定，测量是在热处理之后进行。我们经过多次使用，测量结果是可靠的。

~ ~ ~ ~

(上接第27页)

10℃、校正加热温度为 $800 \pm 10^\circ\text{C}$ 、热处理为 $980 \pm 10^\circ\text{C} \times 1$ 小时空冷 + $530 \pm 10^\circ\text{C} \times 6$ 小时空冷工艺生产的叶片，其组织性能能满足技术条件要求。因此，我们认为这一工艺是当前试制、生产TC9钛合金叶片较为合理切实可行的工艺制度之一。

× × × ×

在TC9钛合金叶片试制期间，宝鸡有色金属加工厂、抚顺钢厂、六二一所、011基地第二指挥部及第二设计所等兄弟单位和上级机关的同志同我厂的工人、技术人员一起付出了辛勤的劳动，对此表示感谢。