

钛合金风扇叶片高速锤模锻工艺和性能

三〇三五厂 上海钢铁研究所 六二一研究所

一、前言

试制涡轮风扇发动机, 风扇叶片的锻造是关键工艺之一。该发动机共有 I、II 级风扇和 I 级静子等三种大型锻造叶片, 单台 122 件, 这三种叶片有下述三个共同特点:

1. 尺寸大: 如 I 级风扇叶片零件长 419 毫米, 最大弦宽 124 毫米, 扭角约 46° , 叶型薄, 最大厚度为 4~8.28 毫米。II 级风扇和 I 级静子叶片的尺寸略小于它, 这都是我国尚未生产过的大型航空叶片。

2. 形状复杂: 风扇叶片的外观如图 1 所示。

由于在风扇叶片叶型上有减震的阻尼凸台和静子叶片除榫头外还有叶冠, 锻造成形的难度较大。

3. 材料新: 这三种叶片都采用 TC-4 (Ti-6 Al-4V) 钛合金, 而这种材料在我国刚刚开始生产使用, 对其锻造工艺、组织和性能均不很熟悉。

按通常的锻造方法应选用压力为 500 吨以上的平锻机制坯, 10 吨以上 (或相当能量的机械压力机) 的模锻锤模锻。这些设备承制厂没有, 特别是 10 吨以上模锻锤, 在我国数量有限, 任务繁重, 安排钛合金叶片的大量试验和

生产较为困难, 而且其条件也不易保证叶片的质量, 因此, 条件不允许选用传统的模锻工艺方法, 而必须探讨新的模锻工艺。

高速锤锻造是五十年代发展起来的一项新工艺。由于高速锤打击速度高 (20 米/秒), 变形时间极短 (千分之几秒), 可以产生较大的惯性力和降低摩擦系数, 有利于金属的流动和充填。同时打击能量还可以预选和比较准确的控制, 因此适合于锻造外形复杂、尺寸要求较精确的锻件。

高速锤的另一个特点是建造速度快, 其投资也比同吨位的其它锻压设备少得多, 而且对厂房和地基的要求不高, 较为经济。

考虑到上述诸因素和工厂现有的生产条件, 决定采用高速锤模锻工艺。

在试制过程中, 吸取了兄弟单位用高速锤试锻另一种风扇叶片的初步经验, 侧重在工艺和性能方面做些工作, 经过反复试验, 终于用高速锤模锻 I、II 级风扇叶片和 I 级静子叶片获得成功。叶片的单面加工余量为 2 毫米, 冶金质量完全满足技术条件的要求, 按照制定的工艺能稳定地进行生产, 至今, 这三种叶片已锻造了 3500 余件。

叶片经过电解和铣切加工至成品后, 已通过了 700 小时试车考验, 中途经二次分解, 均未发现问题, 准备继续进行长期试车。

二、高速锤模锻工艺

高速锤模锻风扇叶片的工艺流程如下:

圆棒下料—端面抛光腐蚀检查—车外圆—超声波探伤—加热、顶锻—车杆部锥体 (仅静

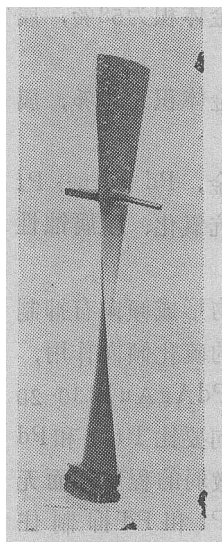


图 1 风扇叶片外观

子叶片)一加热、预锻一吹砂清理一喷涂润滑剂一加热、终锻一去毛边一热处理一检验一交付加工。

其中加热、顶锻工序根据所需工步数需反复进行。

现将主要工艺因素的确定说明如下。

1. 原材料冶金质量的检验

为了控制原材料的冶金质量,增加了对原材料的端面腐蚀和超声波探伤工序,这是对符合技术条件要求的原材料进行的补充检验。由于我国生产钛合金棒材的历史不长,在原材料中发现还存在有偏析、孔洞、夹渣等冶金缺陷,为了确保叶片质量而必须逐件进行。

一种冶金缺陷是由 Al、V 等合金元素或 O、N 等间隙元素的偏析在材料内部形成的发白亮条,低倍腐蚀后目视可见,高倍组织如图 2 所示,它是在 $\alpha + \beta$ 组织基体上以单相 α 形态出现的组织,不能由变形消除而只能随变形方向变化宏观形状,在棒材中以纵向条、线状出现,因此,通过腐蚀棒材的两端就可把它检查出来。

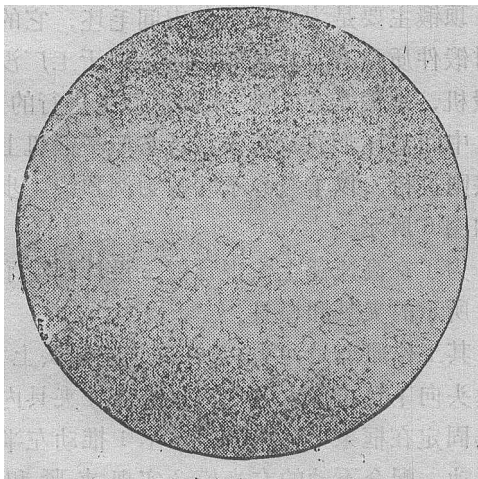


图 2 亮条组织 ×200

亮条的成份、硬度与基体均有一定的差别,目前对性能的影响尚不清楚,它存在于产品中对安全使用可能是潜在的隐患。

另一种冶金缺陷是通过超声波探伤检查发现的孔洞和异金属夹杂物,如图 3、4 所示。

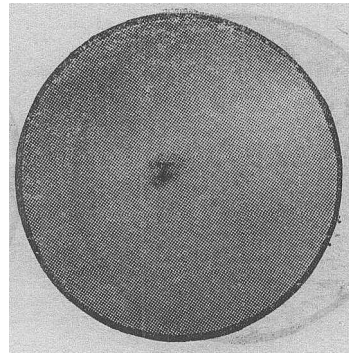


图 3 孔洞



图 4 异金属夹杂 ×100

以某批投产 1735 件为例,腐蚀发现有亮条料占 8%,超声波探伤发现有缺陷料占 5%,由此可见,目前增加对原材料的补充检验工序是完全必要的。

2. 锻造的加热

由于钛合金具有 $\alpha + \beta/\beta$ 的同素异构转变以及高温下与气体的亲和力较强,因此加热温度的确定及炉内气氛的影响是重要的问题。

众所周知,加热温度对钛合金组织有着明显的影响。图 5 示出了 TC-4 钛合金在相变前后的组织变化,试样为同一炉号的,分别为热轧和在 980℃、990℃ 加热保温 30 分钟后空冷的,由于处于相变前后,虽然只差 10℃,但组织明显不同。

钛合金的相变温度是由合金的成份等因素决定的,由于每炉材料的成份不尽相同,所以

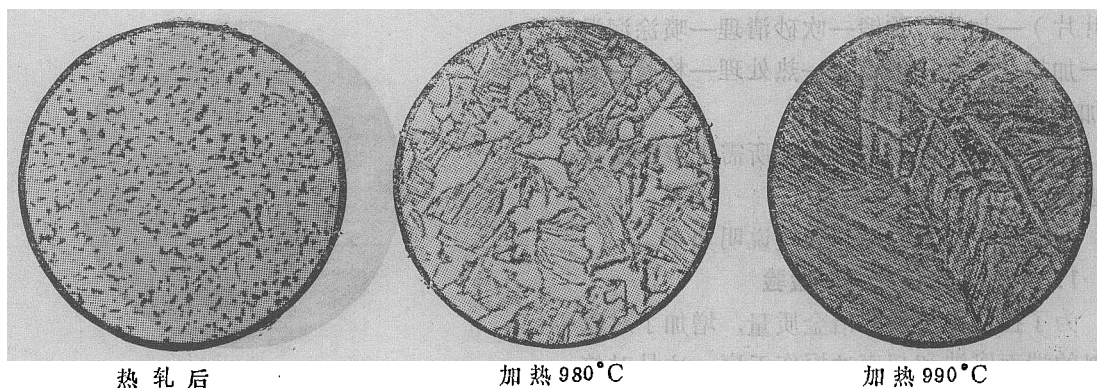


图 5 加热温度对 TC-4 钛合金组织影响 $\times 500$

各炉材料的相变温度也是不一致的，据初步统计，TC-4 钛合金的相变温度在 $950 \sim 1000^\circ\text{C}$ 范围，因此就不能规定一个对每炉材料都合适的加热温度。为此对每炉材料投产前均取样做不同温度下的加热试验，通过观察组织变化来确定其相变温度，然后规定锻造加热温度在每炉材料的实际相变温度以下 30°C 。这样可以避免某些相变温度较低的炉号材料在加热时发生过热，而对某些相变温度较高的炉号材料，可以相应地提高锻造加热温度，有利于成形。

我们用箱式电炉加热锻坯，一般说来，这种炉子能够满足钛合金的加热要求。为了查明加热时气体对材料的实际影响，我们测定了试样加热后氧、氮气体的渗入深度。考虑到氧、氮气体沾污金属而在其表面形成硬的 α 脆性层，将一块试样随锻件在炉中反复加热 6 次，总保温时间为 6 小时，测定其硬度变化情况，测试结果见表 1。

从表 1 的硬度变化看出，距表面深度 0.11 毫米以后硬度跟中心是一致的，也就是气体渗入的深度仅为 0.11 毫米左右。因此，在电炉加热的条件下，对加工余量大于 0.1 毫米的锻件，可以忽略氧、氮渗入的影响。

钛合金在加热时，在一定条件下气体中的氢能迅速向材料内部扩散，当氢含量达到一定量时可能导致材料在室温下的脆性。因此技术条件对氢含量有严格的规定。我们前后三次测定了叶片的实际含氢量，分别为 0.0068%、0.0061% 和 0.0070%，测定结果都表明其含量在技术条件允许范围 ($< 0.015\%$) 内。由此证明用电炉加热锻造叶片，可以满足生产要求，而不必再采用真空退火除氢处理。

3. 高速锤顶锻制坯

顶锻主要是为模锻制备中间毛坯，它的质量对锻件质量有着直接的影响。由于工厂没有平锻机，顶锻是在 30 吨-米高速锤上进行的。

中间毛坯形状及工步设计参照平锻机上顶锻法则进行，以 I 级静子叶片为例顶锻工步设计如图 6 所示。

为了在高速锤上实现顶锻，设计制造了如图 7 所示的夹具和模具。

其工作原理是冲头 4 装在高速锤锤头上，随着锤头向下打击和上升，夹紧模装在夹具内。夹具固定在框架中，由油缸活塞 1 推动左半模 2 运动，配合不动的右半模 3 实现夹紧和松开，夹紧力为 10~15 吨。顶锻时将加热好的棒

表 1

至表面距离 毫 米	0.01	0.035	0.06	0.085	0.11	0.135	0.16	0.21	中 心
显微硬度 HD	519	493	433	433	441	395	394	363	360/400

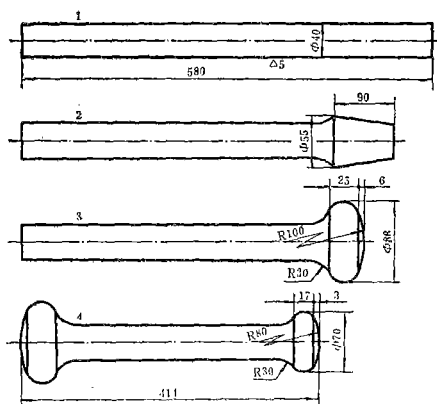


图 6 静子叶片中间毛坯顶锻工步

- 1—下料、扒皮； 2—顶锻；
3—一端成型； 4—两端成型。

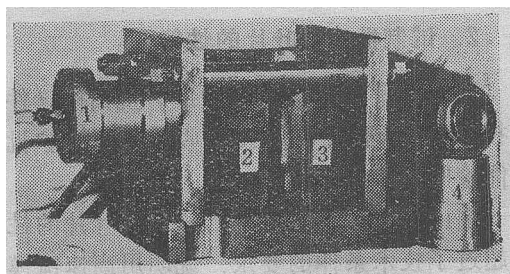


图 7 用于高速锤顶锻的夹具和模具

- 1—油缸活塞； 2—左半模；
3—右半模； 4—冲头。

料贴于右半模 3，随后左半模 2 夹紧，锤头打击，上升，左半模 2 松开取出棒料。

由于使用的高速锤为机械脱落式，不能连击，锤头上升较慢，故加热一次只能进行一个工步，生产效率还比较低，但作为代替平锻机制坯的一次尝试，还是成功的。

顶锻件的外形及流线均能满足要求。I 级风扇叶片顶锻中间毛坯外形及纵剖面低倍组织见图 8。

4. 预锻和终锻

由于风扇叶片尺寸大，外形复杂，考虑到设备能量、锻件外形及表面质量等诸因素，模锻时决定采用预锻、终锻两道工序。为了节省模具，预锻和终锻在一付锻模的同一模槽里进行。风扇叶片锻模见图 9。

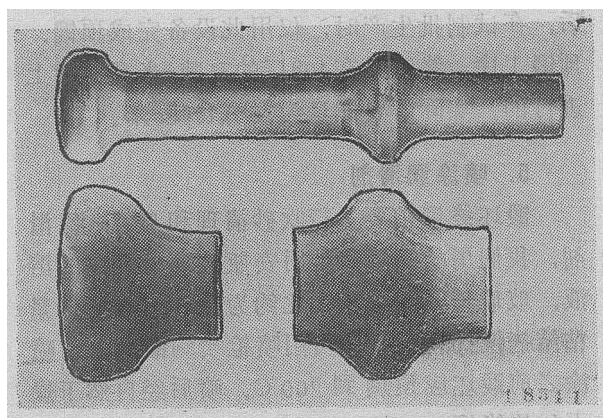


图 8 I 级风扇叶片顶锻中间毛坯及纵剖面低倍组织

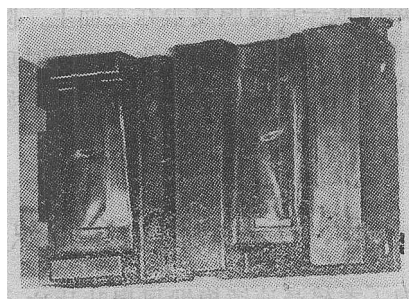


图 9 I 级风扇叶片锻模

预锻时轻打，变形量为 30~40%。经过预锻的坯料在终锻时放入模槽定位方便准确，可提高终锻的操作速度，减少温降，有利于成形。

通过实践，我们感到是否需要预锻，并不完全决定于设备能量是否足够，预锻对改善锻件组织均匀性是有利的。如 I 级静子叶片在 30 吨-米高速锤上模锻能量足够，一锤完全可以成形，但叶身横切面组织出现明显的形变线和不变形区，如图 10 所示。因此，对静子叶片也采取预锻和终锻，以便得到均匀的组织。

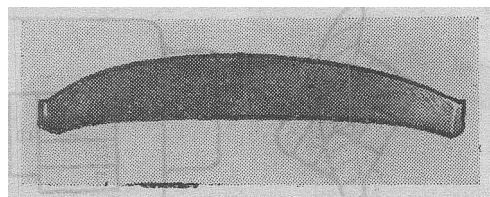


图 10 未经预锻的静子叶片叶身低倍组织

风扇叶片在 30 吨-米高速锤上模锻终锻时，设备能量不够，用超负荷锻出了叶片试验件

后，在试制批生产时，仅用此设备完成顶锻、预锻工序，终锻是在408厂的75吨-米高速锤上进行的。实际需要能量为35~40吨-米。

5. 喷涂润滑剂

锻坯终锻前要进行吹砂清理和喷涂润滑剂，我们用的润滑剂是用安瓶玻璃粉配制的溶液，玻璃粉与水按重量比约为1：1，再加少量粘结剂搅拌均匀，即可用喷枪喷到锻坯上。喷涂之前锻坯应预热到200℃，喷后经自然干燥再加热终锻。

喷涂安瓶玻璃溶液的作用是坯料加热时把玻璃熔融成一层薄膜复盖在表面上，防止金属与空气直接接触以减少氧化。模锻时玻璃薄膜处于变形金属与模槽壁之间，起到良好的润滑作用，有利于金属流动成形。

三、叶片的性能和组织

为了考核高速锤模锻风扇叶片这一新工艺的适用性，必须了解高速锤模锻叶片的组织和性能，下面以I级风扇叶片为例加以说明。

1. 叶片的全面性能

对试锻叶片，按图11所示方向和位置取样，测试了全面性能，试验结果列于表2。

从表2性能数据看出，技术条件要求的是纵向性能，实际上风扇叶片的纵向和横向性能都达到了技术条件的要求。由于叶片不要求检查400℃性能，表中该项要求指标取自原材料技术条件YB766-70。

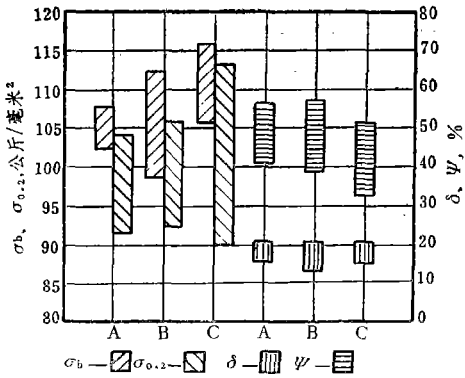


图12 试制批生产的三种叶片综合性能统计

- A—I级风扇叶片，共15炉批；
- B—II级风扇叶片，共9炉批；
- C—I级静子叶片，共13炉批。

2. 试制批生产叶片的性能

风扇叶片锻件交付时，每炉批抽检一件，按技术条件8 II/YGH116验收，现将37炉批的性能检验结果示于图12。

图12表明，试制批生产的三种叶片的性能都超过了技术条件的要求，说明用高速锤模锻工艺进行生产，叶片性能是稳定可靠的。

3. 与国内外同类叶片性能的比较

为了衡量高速锤模锻风扇叶片的性能水平，在表3和表4分别列出国内外用其它工艺模锻的同类叶片的性能及国内外钛合金锻件技术条件的性能指标以资比较。

从表2、3和4的数据对比看出，高速锤模锻风扇叶片的性能都不低于国内外用其它工艺生产的同类叶片的性能水平。作为验收标准

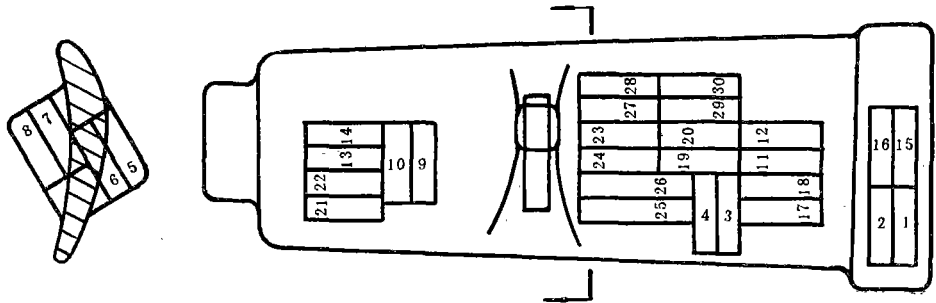


图11 I级风扇叶片性能取样示意图

表 2

试样号	室 温 性 能					400°C 瞬 时			400°C 持 久	室 温 拉 伸	室 温 疲 劳***
	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %	ψ %	a 公斤·米 厘米 ²	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	$\sigma=58$ 公斤/毫米 ² τ 小时	$\sigma=119$ 公斤/毫米 ² τ 小时	$\sigma_{-1}=47$ 公斤/毫米 ² n 次
要求	≥ 95	≥ 85	≥ 10	≥ 30	≥ 4	≥ 63			≥ 100	$\geq 5^{**}$	
1	96.5	88.0	14.5	56.5	横向						
2	95.5	91.5	13.5	51.0							
3	103.0	92.5	12.0	56.0							
4	102.5	93.5	11.5	50.5							
5	98.5	90.5	10.0	50.5							
6	101.0	90.0	12.5	51.5							
7	102.0	98.5	12.5	51.0							
8	99.5	91.5	11.0	41.5	纵向						
9	102.0	95.5	12.5	55.0							
10	101.5	96.0	10.5	55.5							
11	105.0	97.0	12.5	51.5							
12	104.0	97.5	11.5	50.5							
13	104.5	99.0	11.0	50.5							
14	102.5	95.5	11.5	56.0							
15			横	5.6	纵向						
16			向	5.8							
17			纵	5.5							
18			向	5.5							
19					纵向	69.5	17.3	67.2			
20						70.2	18.3	63.1			
21						72.5	17.5	64.5			
22						72.5	16.7	64.5			
23									$>470^*$ 220^*		
24											
25									纵	21:30'	
26									向	21:30'	
27											$>2.03 \times 10^7$
28										纵	$>2.04 \times 10^7$
29										向	$>2.11 \times 10^7$
30											$>4.41 \times 10^7$

* 400°C持久性能, 先用应力 58公斤/毫米²拉100小时未断, 再增加应力至64公斤/毫米²继续试验。

** 系仿照美国材料锻件标准 AMS4928F 进行的室温缺口应力断裂试验。要求在应力为119公斤/毫米²条件下持续时间多于5小时为合格。每超过5小时可增加应力7公斤/毫米²继续试验, 实际拉断时间为21.5小时, 应力递增至147公斤/毫米², 超过规定指标。

*** 为光滑试样旋转疲劳, 应力选自国产 TC-4 钛合金棒材全面性能数据。

表3 国内外模锻风扇叶片的机械性能

叶片名称	试样位置、方向	室 温 拉 伸				来 源
		σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	$\delta, \%$	$\psi, \%$	
前风扇叶片	榫头 横 向	95.4	88.4	15.3	41.3	西德特殊钢厂精锻前 风扇钛合金 (Ti-6 Al-4V) 叶片试验报 告
		96.1	89.1	15.3	46.2	
	叶身 横 向	99.6	90.7	12.7	36.0	
		100.5	93.0	14.3	41.3	
	叶身 纵 向	99.6	92.0	13.3	41.3	
		103.9	96.1	13.3	38.8	
I级风扇叶片	榫头 横 向	104.0	100.5	16.6	47.3	美国 JT3D-3B 发 动机叶片实物性能测定 (发动机已飞行过, 时间不详, 由四二〇 厂测试)
		105.2	101.0	19.3	47.3	
	叶身 纵 向	105.5	102.0	13.3	47.3	
		107.0	104.0	16.7	55.6	
	榫头 横 向	101.0	94.6	17.2	51.4	
		101.5	93.8	17.4	36.5	
II级风扇叶片	叶身 纵 向	105.5	101.0	16.0	41.9	国产发动机模锻风扇 叶片 (10吨锤模锻, 六二一所测试)
		103.5	97.8	16.0	43.0	
	叶身 纵 向	100.0	91.0	13.3	20.0	
	叶身 纵 向	101.2	99.1	12.6	41.9	
		99.0	96.7	11.8	41.4	
风扇叶片	叶身 纵 向	101.2	98.8	12.6	39.5	

表4 国内外钛合金锻件技术条件性能指标比较

技术条件名称	室 温 性 能 (不 小 于)					来 源
	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	σ_k 公斤·米/厘米 ²	
8 II/YG116	95	85	10	30	4	风扇叶片技术条件
Q/6s48-74	92	/	10	20	3 *	钛合金锻件技术条件*
PWA1215A	91.4	84.4($\sigma_{0.1}$)	10(δ_4)	25		锻件材料标准**
RRMS 328	94.5	85	6	25		锻件材料标准***
AMTY368-58	95	/	10	30	4	苏联锻件标准

* 三机部六二一所。

** 美国普拉特·惠特尼公司。

*** 英国罗·罗公司。

的技术条件指标来看, 我们的指标还比英、美的高, 因此满足技术条件要求的高速锤模锻的风扇叶片是能够可靠工作的。

4. 高速锤模锻叶片的金相组织

钛合金叶片的金相组织, 在很大程度上取

决于原材料的组织 and 锻造时的加热温度及变形程度。高速锤模锻风扇叶片工艺由于对原材料增加了补充检验, 有效地防止了材料缺陷进入锻件。各锻造工序均有一定的变形程度及总的变形比较大, 改善了合金组织, 加热时严格控

制温度以防止过热，因此能够保证叶片得到优良的组织。

从检验结果来看，高速锤模锻叶片的低倍组织致密，纵向流线与外廓基本一致，无裂纹、折叠、夹杂等冶金缺陷，晶粒细小，典型的组织见图13。

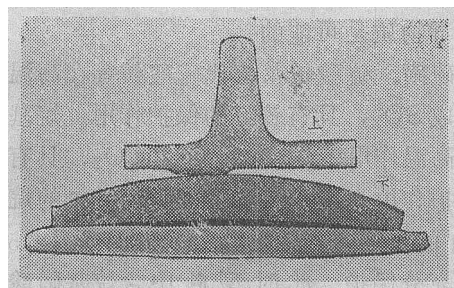


图 13 风扇叶片低倍组织

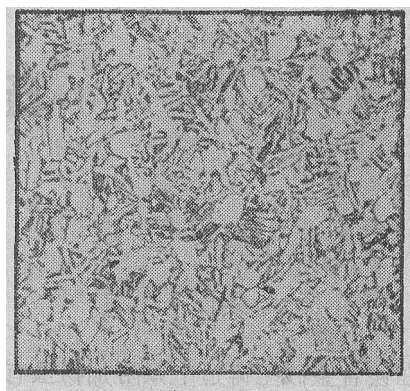
上一阻尼台纵剖面； 下一叶身横剖面。

高倍组织为部份等轴 α 和 β 的转变组织，没有因过热而出现的原始 β 晶界。典型的高倍组织见图14。高、低倍组织均符合技术条件的要求。

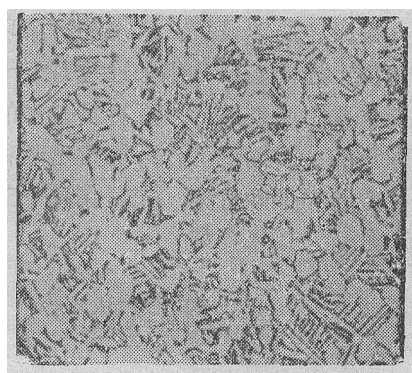
四、结 束 语

高速锤模锻风扇叶片是一项新工艺技术，国外关于这类叶片的锻造工艺报导甚少，我们在没有大型模锻设备的条件下用高速锤成功地锻造了三种大尺寸的钛合金叶片，解决了缺乏大型锻压设备的叶片试制问题，有着一定的经济和现实意义。

叶片的性能和组织满足技术条件要求，而



叶身部分



榫头部分

图 14 风扇叶片的高倍组织 $\times 500$

且也不低于国内外用其它工艺生产的同类叶片的性能水平，因此高速锤模锻风扇叶片工艺可以用于生产，本工艺也可供类似锻件模锻的参考。

(尹维城 执笔)

会议动态

航空用密封剂及基胶鉴定会

一九七九年七月十六日至二十日，化工部、石油部、三机部联合在四川省温江县召开了XS-1胶膜、JLG-111(08胶)、XM-15密封剂、XM-16密封剂、

XM-17密封剂、低分子顺丁橡胶、XM-22密封剂、JLY-215(04胶)五种航空用密封材料及三种配套基胶鉴定会。会议审议了有关的研究报告、技术条件、工艺说明书等技术文件，使用单位提出了使用结论意见。会议还通过了技术鉴定报告，上述八种材料均鉴定定型，转入正式生产或试产。这将大大有利于我国航空工业的加速发展。

(陆本立)