

钛合金压气机盘的高速锤模锻

尹维城 唐志今

一、前言

压气机盘是航空发动机的重要零件,对其质量有着严格的技术要求,随着发动机推重比的增加和使用温度的提高,近年来采用热强钛合金TC-11来制造压气机盘。

模锻压气机盘,可用水压机,也可用各种锻锤,由于压气机盘尺寸比较大,须使用大型锻压设备,如直径500毫米的盘,要用万吨以上模锻水压机或10~16吨级的模锻锤锻造,这些设备数量有限,建造投资和使用费用较大,是否还有其它设备也能生产压气机钛合金盘呢?为此,我们开展了高速锤模锻钛合金盘的工艺研究。

高速锤是以高压氮气突然膨胀释放能量推动锤头高速运动作功的锻压设备,由于锤头运动速度高(~ 20 米/秒),根据 $E = \frac{1}{2}MV^2$ 的关系,就可以在锤头质量(M)相同的情况下获得较大的动能(E),同样,在相同的能量级别时,高速锤就可制造得比较小巧。高速锤也是对击锤,上下锤头在空间撞击,传到地面的振动少,它不需要大的地基,对厂房的要求也不高,因此它具有简易可行,制造、使用成本低的优点。

高速锤的使用在我国已积累了一定的经验,高速锤挤压和模锻的TC-4钛合金压气机叶片、风扇叶片已进行过长期的试车考验,实践证明其质量是可以完全符合使用要求的。但是采用高速锤模锻钛合金压气机盘在国内外尚无先例,盘件能否成形以及高速变形下的热效应是否影响锻件质量仍然是引起人们关注的问题,我们通过在高速锤上研制TC-11钛合金盘的实践,得到了肯定的结论。

本文根据航空工业部六二一研究所和三〇

三五厂的共同工作整理而成。

二、研制对象、原材料和设备

研制对象为某发动机用压气机盘,其外径为515毫米,轮缘高100毫米,轮辐厚20毫米,属中等复杂外型模锻件,尺寸如图1,模锻件外形如图2。材料为TC-11热强钛合金,使用坯料的化学成分列于表1。

模锻用坯料为环形,尺寸为 $\phi 450 \times \phi 250 \times 90$ 毫米,组织和机械性能符合TC-11钛合金压气机盘用并(环)坯专用技术条件要求。

模锻设备为100吨·米高速锤,这是我国自行设计制造的能量最大的一台高速锤,为快放油式,整体铸钢框架结构,打击速度15米/秒,最大打击能量100吨·米,设备外型见图3。

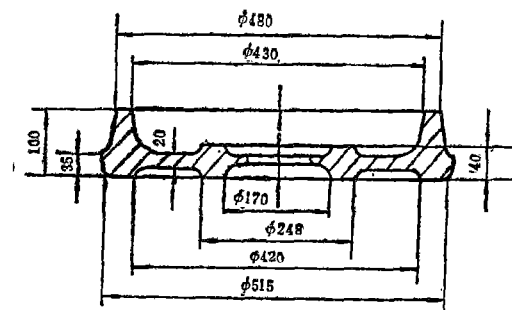


图1 模锻盘尺寸

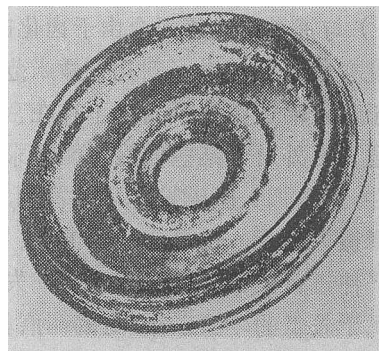


图2 模锻件外形

表 1 原材料的化学成分(%)

项 目	Ti	Al	Mo	Zr	Si	Fe	C	O	H	N
炉号143—95	余	6.44	3.30	1.71	0.28	0.073	0.03	0.070	0.0025	0.009
炉号143—123	余	6.30	3.42	1.8	0.30	0.058	0.03	0.043	0.0044	0.009
技术条件要求	基	5.8~7.0	2.8~3.8	0.8~2.0	0.20~0.35	≤0.25	≤0.1	≤0.15	≤0.012	≤0.05

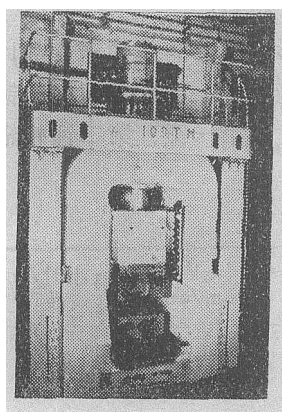


图 3 100吨·米高速锤

坯料润滑为FR-S玻璃防护润滑剂, 模具润滑为水剂石墨润滑剂。

模锻Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ均在一付模具内进行, 每火用设备最大能量打一锤。

模锻盘采用双重退火热处理, 退火制度如下:

950^{±10}℃, 保温1.5小时, 空冷;

530^{±10}℃, 保温6小时, 空冷。

三、模锻工艺及锻件热处理

模锻坯料采用电炉加热, 温度为960^{±10}℃, 工艺顺序如下:

坯料吹砂——预热——喷涂润滑剂——加热——模锻Ⅰ——加热——模锻Ⅱ——车毛边——吹砂——清理——预热——喷涂润滑剂——加热——模锻Ⅲ——热处理——车毛边——检验。

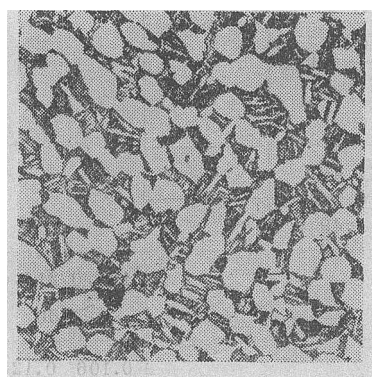
四、模锻盘的组织 and 机械性能

在100吨·米高速锤上共模锻三批14件盘, 锻件热处理后每批抽取一件剖切检查其组织和机械性能。第二批盘已加工成零件待试车, 下面列出第三批盘的试验结果:

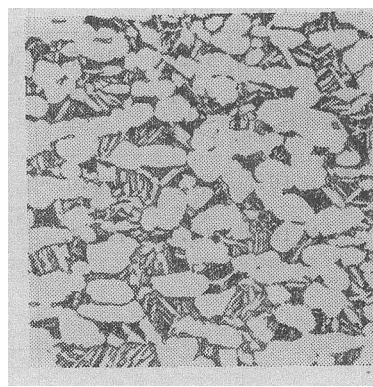
盘件的高、低倍组织见图4、图5;

盘件的机械性能见表2、表3。

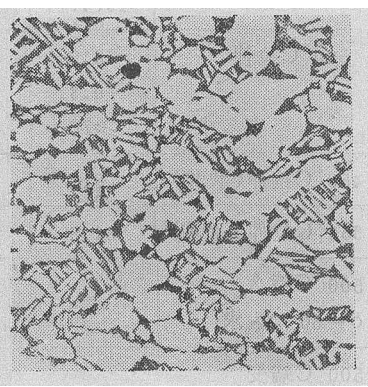
性能试样均取自轮缘弦向, 表中未提出指标项目者, 为技术条件以外的补充性能。



轮 缘



轮 辐



轮 毂

500×

图 4 高速锤模锻盘的高倍组织

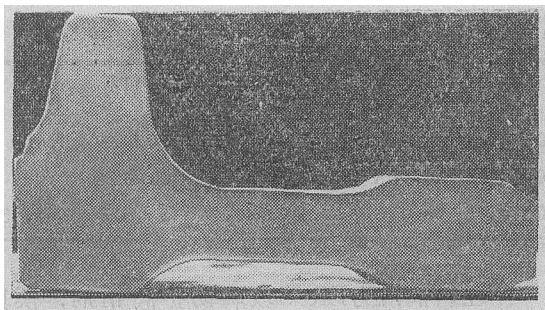


图 5 高速锤模锻钛盘的低倍组织

五、高速锤模锻钛盘的工艺和质量分析

1. 模锻工艺特点

在100吨·米高速锤上模锻 TC-11 钛合金压气机盘工艺上有如下特点:

1) 每锤次的变形量和总的变形程度都比较大。这是由于设备能量大, 模锻时每打一锤坯料都有较大的变形, 如第一锤、第二锤轮辐

表 2 高速锤模锻盘的机械性能

试验项目	σ_b kg/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	δ_5 %	ψ %	σ_b^H kg/mm ²	K	α_k kg-m/cm ²	τ 小时/ ε 残 %
室温拉伸	109.9	100.1	15.8	45.2	168.7	$\frac{\sigma_b^H}{\sigma_b} = 1.54$	5.81	
	107.3	97.4	15.7	46.8	163.9		5.13	
	107.2	97.6	16.9	48.7	166.5		5.47	
要 求	105/125	≥ 90	≥ 8	≥ 23		≥ 1.3	≥ 3	
500°C100小时 热稳定	109.0	100.4	16.9	44.3		$\frac{\psi_{100}}{\psi_0} = 0.96$		
	109.5	101.0	16.9	45.3				
要 求	≥ 105		≥ 8	≥ 20				
500°C100小时 $\sigma=35$ 热稳定	108.1		14.7	42.4		$\frac{\psi_{100}^{85}}{\psi_0} = 0.90$		
	107.2		15.2	43.6				
	107.3		15.6	40.3				
500°C500小时 热稳定	108.2	102.4	16.6	39.9		$\frac{\psi_{500}}{\psi_0} = 0.82$		
	108.0	102.3	17.8	36.6				
	107.7	102.4	15.6	38.7				
500°C拉伸	78.0		19.6	52.9	110.7	$\frac{\sigma_b^H}{\sigma_b} = 1.42$		
	79.3		16.6	47.1	115.3			
要 求	≥ 70		≥ 12	≥ 40				
450°C拉伸(平均)	78.1		16.7	52.4	116.0	1.49		
350°C拉伸(平均)	81.8		16.0	48.4	122.1	1.49		
500°C持久 $\sigma=60$ 要求								188.0 214.0 ≥ 100
500°C蠕变 $\sigma=35$								0.106 0.124 0.130
100 小时 要求								≤ 0.2

表 3 高速锤模锻盘的疲劳性能

试 验 项 目	试 验 条 件	循 环 次 数
恒应变低周疲劳	恒应变量: 0.3%	1904, 2028
	1.0%	1323, 1161
	1.2%	777, 1005
恒应力交变低周疲劳	室温: $\sigma_{max} = 73$	9912, 8828, 8107
R=0.1	$\sigma_{min} = 102$	1622, 1583, 1774
	500 C $\sigma_{max} = 67.7$	1981, 2239, 2111
高周旋转疲劳	室温: $\sigma = 54$	$> 1 \times 10^7$

处变形程度均达30~40%，第三锤变形程度也大于20%，实际压下量第一锤为30~40毫米，第二锤为18~26毫米，第三锤大于6毫米，总压缩变形程度为70%。因此经过足够变形的坯料通过随后的热处理，得到良好的组织和性能。

2) 采用环形坯料模锻，有利于金属流动成形，既降低了变形抗力，又保证锻件获得良好的金属流线。坯料、锻件及其变形应力分布见图6。

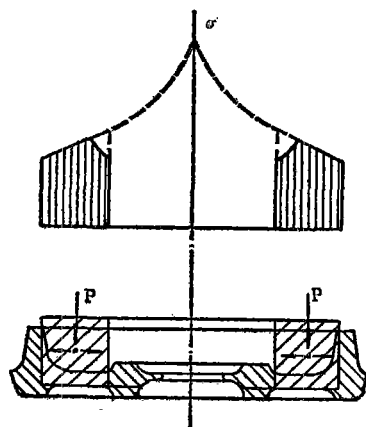


图 6 模锻盘坯料及变形应力分布

坯料受压缩时金属向环内、环外两个方向流动，与用圆饼毛坯模锻比较，避免了中心部位的高应力（图中虚线所示），降低了金属流动的变形抗力，同时金属的双向流动，消除了变形死区，提高了组织均匀性。

3) 采用加热一次只打一锤的方式模锻。由于100吨·米高速锤回程较慢，两次打击之间有一定时间间隔，坯料温降大，打第二锤势必变形量不大而变形抗力激增，这对受力框架的

安全使用是不利的。一火只打一锤，能保证较高的变形温度，此时材料具有较高塑性和较低变形抗力，处于最佳变形条件，可得到最大的变形。根据设备特点，采用一火打一锤的工艺，对锻件成形和设备安全使用都是有利的。

2. 模锻盘的组织分析

从图4、图5可知，高速锤模锻盘的组织是优良的，其低倍上流线沿外形分布，无肉眼可见清晰晶粒，呈毛玻璃状，高倍组织是初生 α 和 β 转变的双态组织，这类组织是通常在两相区加热变形得到的典型组织，具有优良的综合机械性能。

采用高速锤模锻，曾担心高速变形热效应可能引起锻件温升使组织过热，从盘件性能和组织检查结果来看，并未发现这种现象。高速变形下产生的热，由于每火只打一锤而未能积累，加热温度又严格控制在相变点以下30℃，可能是未出现热效应影响的重要原因。

高倍组织显示轮缘部位初生 α 呈等轴状，轮辐和轮毂部位有部分初生 α 成条状，这是由于不同部位变形方式不同形成的，轮缘是径向和轴向的综合变形，无明显方向性，而轮辐、轮毂以压缩变形为主，金属沿径向流动，因此晶粒沿径向伸长。初生 α 这种排列方向，与压气机盘工作时的离心力方向一致，相当于承受纵向拉伸，可说它是与工作状态相适应的。

3. 模锻盘的机械性能

正如表2、表3数据表明，高速锤模锻盘

表 4 常规设备模锻盘与高速锤模锻盘性能对比*

生产方式	10吨锤模锻盘**					高速锤模锻盘				
项 目	σ_b	$\delta_5\%$	$\psi\%$	σ_b^H	K	σ_b	$\delta_5\%$	$\psi\%$	σ_b^H	K
室温拉伸	108.7	16.2	42.6	169.3	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.56$	108.1	16.2	46.7	166.4	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.54$
350°C拉伸	82.2	17.8	48.6	120.9	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.47$	81.8	16.0	48.4	122.1	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.49$
450°C拉伸	77.4	15.0	52.8	116.0	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.50$	78.1	16.7	52.4	116.0	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.49$
500°C拉伸	78.8	17.3	53.6	113.0	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.43$	78.6	18.1	50.0	115.1	$\sigma_b^H/\sigma_b=1.46$
500°C热稳定					ψ_n/ψ_0					ψ_n/ψ_0
100小时	109.5	17.5	41.3		0.92	109.2	16.9	44.8		0.96
500小时	108.4	16.3	36.5		0.81	108	16.6	38.4		0.82
100小时 $\sigma=35$	108.6	13.6	41		0.91	107.5	15.2	42.1		0.90
500°C蠕变	$\varepsilon_{残}\%$					$\varepsilon_{残}\%$				
100小时 $\sigma=35$	0.119					0.120				
低周疲劳	循环次数					循环次数				
室 $\sigma_{max}=73$	6658					8949				
温 $\sigma_{max}=102$	1613					1660				
500°C $\sigma_{max}=67.7$	1493					2110				
室温高周疲劳 σ_{-1}	55					54				

*—表列数据均为平均值;

**—摘自预鉴定全面性能数据。

的机械性能是良好的,数据稳定,指标符合技术条件要求,室温至500°C,有足够的强度;无缺口敏感, σ_b^H 与 σ_b 之比均大于1.4;热稳定性好,试样在500°C下暴露100小时、500小时,或加应力暴露100小时后,室温拉伸的断面收缩率降低很少;抗蠕变性能好,500°C应力35公斤/毫米²下保持100小时的残余延伸率平均值为0.119%;疲劳性能优良。

采用常规设备模锻的TC-11钛合金同类压气机盘已通过长期试车考验并投入了批生产,以试车盘的全面性能数据为标准来评定高速锤模锻盘的性能水平是具有说服力的,两种工艺模锻盘的同项性能对比列于表4;数据表明,二者的强度、塑性、热稳定性、持久、蠕变等的水平是一致的。因此可以认为高速锤模锻的TC-11压气机盘是能够满足使用要求的。

六、结 论

1. 在100吨·米高速锤上模锻TC-11钛合金压气机盘成功的实践表明,这是一种成形性能好,产品质量符合使用要求的新工艺技术,它为航空钛盘及其他类似大型锻件的试制生产提供了一条新的工艺方法和可能途径,具有创新意义。

2. 采用环形坯料模锻,变形量大、成形性好,锻件易充满,组织均匀,未发现高速变形热效应的有害影响,一火打一锤的工艺可保证锻件质量和设备使用安全。

3. 高速锤模锻的TC-11钛合金压气机盘,组织和机械性能优良,各项指标均符合技术条件要求,与常规设备模锻的同类盘比较,性能水平相同。