

# TC9 钛合金模锻叶片热加工变形及校正

新艺机械厂 陈思觉

TC9 钛合金模锻叶片热加工变形是钛合金热加工的一大关键。本文研究锻造和热处理综合条件对钛合金热加工变形的影响,并提出防止或减少叶片变形的措施及变形校正需要注意的问题。这些对钛合金叶片的热加工提供了宝贵的经验。

## Hot-working Deformation of Died Blades of Titanium Alloy TC9 and Its Correction

Chen Sijue

(Guizhou Xinyi Machinery Factory)

The hot-working deformation of died blades of titanium alloy TC9 is a key problem of the hot-working of the titanium alloy. This paper aims to study the effect of the comprehensive conditions of the forging deformation of the titanium alloy. Our goal has been to provide an introduction to the measures for preventing or decreasing the blade deformation and to the problem of the deformation correction. And this case has provided a valuable experience for the hot-working of titanium alloy blades.

我厂用 TC9 钛合金制造航空发动机压气机整流叶片。由于缺乏实际经验,在生产过程中存在很多问题,最突出的是叶片锻坏的扭曲变形。根据不断的摸索与试验,生产工艺得到及时的更新,从而提高了产品质量,降低了生产成本,收到明显的技术、经济效益。现将我们走过的生产过程及经验总结如下。

### 一、生产工艺与过程

整流叶片热加工工艺的主要工序是顶锻→预锻→终锻→切边→校正→热处理。锻造加热温度为 960℃,于 RJX-50 电炉中加热,模锻在 16000kN 压力机上进行。锻后热处理为双重退火(第一次退火为 980℃/1h 空冷,第二次退火为 530℃/6h 空冷)。

原始及不断改进后的生产工艺见表 1。

表 1 几种生产工艺制度

工 艺	工 艺 内 容
I	原模锻工艺→850℃/30min 校正→980℃/1h 空冷+530℃/6h 空冷
II	原模锻工艺→850℃/30min 校正→980℃/1h 空冷→冷校正→530℃/6h 空冷
III	冷原模锻工艺→950℃/30min 校正→980℃/1h 空冷+530℃/6h 空冷
IV	原模锻工艺→980℃/1h 校正→530℃/6h 空冷

### 二、生产结果与分析讨论

整流叶片经模锻成形,终锻毛坯的毛边较厚,利用余热在 1600kN 冲床上切边(不低于 700℃)。经过切边的叶

片,型面透光有变化,为满足锻件图的变形要求,施以校正。起初认为校正工序的压下量不大,选择在 850℃ 加热,利用 16000kN 压力机进行模压校正,见工艺 I。模压校正工序之后,叶片各截面的透光均符合技术要求。但高温(980℃)退火之后,发现叶身型面变化,扭曲变形超差的较多,见表 2。再进行低温(530℃)退火,由于加热温度低,叶片表面热应力较之高温退火时低得多,不致因热应力而引起较明显的残余变形。

表 2 三级整流叶片经 850℃ 模压校正加高温退火的变形情况

批次号	投产件数	合格件数	变形超差件数	合格率(%)
0T3	115	87	28	76
1T3	100	68	32	68
2T3	89	56	33	63
累计数	304	211	93	69

从表 2 可知,采用 850℃ 校正,叶片高温退火的变形大,超差的数量占 30%。其主要原因是校正的加热温度低,根据 TC9 钛合金的工艺塑性图,合金在 900℃ 以下塑性低,其变形抗力大,校正叶片的残余应力增加。由于叶片外形复杂,叶身截面变化大,加之钛合金导热性差,致使叶片在高温退火加热时产生的热应力较大。由校正引起的锻造残余应力与退火加热时产生的热应力叠加,如果方向一致,热处理变形势必增大。

为了挽救上述超差叶片,曾在高温退火后进行冷校正,见工艺 II。即对超差叶片以大安装板定位,用专用搬手夹住小安装板,往型面透光相反方向扭动。经校正

合格后再进行低温退火。但是, 经冷校叶片由于发生了晶格的歪扭, 在零件内引起有害的残余应力, 校正次数愈多, 残余应力愈大。而低温退火的加热温度低, 金属原子的扩散能力不足, 由校正带来的有害的残余应力不能彻底消除。当电解加工叶身型面后, 由于叶盆和叶背去掉的加工余量不同, 使得叶身表面出现新的应力分布, 打破原来叶盆、叶背的应力平衡, 导致新的叶身型面透光超差。据统计, 由于冷校正原因, 而在电解加工后发现型面透光超差所造成的废品占 10% 左右。

工艺Ⅲ与工艺Ⅰ所不同的是提高了模压校正温度, 是在合金的再结晶温度 (900℃) 以上 (950℃) 加热, 在加热过程中终锻件得到再结晶退火, 消除锻造残余应力 (尤其是第二类、第三类残余应力), 又使得热变形与再结晶同时进行。由于再结晶, 合金内部的晶格畸变得到完全恢复, 内应力完全消除, 因此, 由模压校正引起的残余应力小, 相应地使叶片热处理变形减小。这一分析, 通过实践得到证实。抽查三级整流叶片于 950℃ 模压校正与高温退火的变形情况见表 3。

表 3 950℃ 校正与高温退火叶片的变形统计

批次号	投产件数	合格件数	变形超差件数	合格率(%)
0T8	149	142	7	95
1T8	154	139	15	90
2T8	148	130	18	88
3T8	103	99	4	96
累计数	554	510	44	92

按工艺Ⅲ处理的叶片, 其变形超差小, 仅占 8% 左右。对于变形超差叶片, 还可以通过调整机械加工工艺,

进行挽救。工艺Ⅲ已成为目前生产普遍使用的一种工艺。

为了进一步提高热加工质量, 尤其是减少较大锻坏的变形量, 我们还研究了高温退火与校正相结合的工艺, 见工艺Ⅳ。进行了工艺Ⅳ与工艺Ⅲ的对比试验。首先是测定了各工艺条件下叶片的室温拉伸、硬度、冲击; 500℃ 瞬时拉伸; 500℃ / 100h 热暴露后室温拉伸 (热稳定性); 500℃ (580MPa) 持久拉伸等性能, 见表 4。其次是抽查按工艺Ⅳ所生产的一级整流叶片锻坏的变形情况, 见表 5。

从表 4 可知, 工艺Ⅳ与工艺Ⅲ的力学性能均能满足技术要求。但工艺Ⅳ较工艺Ⅲ无论室温或高温强度都偏高, 塑性偏低, 对其它性能影响较小。这主要与形变强化有关。高温形变时, 形成许多分布均匀的晶体缺陷, 在低温退火 (或称时效) 中, 将以这些晶体缺陷为核心, 分解析出新的弥散相, 使强度值提高。

从表 5 可知, 工艺Ⅳ生产叶片变形小, 是解决叶片热处理扭曲变形的有效方法。该工艺不足的是生产叶片中, 有的单面硬度偏高, 最高硬度可达 HB (d) 2.9mm (要求 HB (d) = 3.2~3.7), 从偏高表面至心部其硬度值是递减的, 不合格区距离不大于 2mm。叶片表面硬度偏高, 为切削加工带来困难, 据不完全统计, 在铣削叶片安装板时, 在高速钢刀具材料与切削参数一定的条件下, 加工正常叶片的刀具寿命是加工表层硬度偏高叶片的 1~10 倍。

产生叶片表面硬度偏高的主要原因是在高温模压校正后, 脱模之前有的叶片有粘模现象。需要人工拨动方能脱模。由于模具钢的热传导能力比空气大得多, 因而叶片与模壁紧贴一方, 冷却速度快, 使得合金组织中二次  $\alpha$  析出不充分,  $\beta$  相的过饱和程度增加。处于淬火状态的  $\beta$  相在第二次退火 (或称时效) 的过程中充分分解析出更多的三次  $\alpha$  质点呈弥散分布, 使合金表层的强度、硬度提高。

表 4 抽查工艺Ⅲ与工艺Ⅳ的力学性能

热处理方式		工艺Ⅲ				工艺Ⅳ				技术要求
测试项目	批次号	1T1	2T1	1T3	平均	1T4	2T4	1T7	平均	
室温拉伸	$\sigma_b$ (MPa)	1122	1127	1098	1116	1254	1205	1176	1212	>980
	$\delta_5$ (%)	19	18	20.5	19	14	12	16	14	>8
	$\psi$ (%)	55	40	55.5	50	51.5	43	46	47	>25
硬度	HB(d)mm	3.2	3.35	3.4	3.3	3.35	3.3	3.3	3.3	3.2 / 3.7
冲击	$\alpha_k$ (kJ / m <sup>2</sup> )	4.6	4.3	4.6	4.5	4.1	4.1	3.7	4.0	>2.9
500℃ 拉伸	$\sigma_b$ (MPa)	776	794	780	783	904	905	911	907	>685
	$\delta_5$ (%)	22.4	20.2	23.8	22	17.5	18.6	20	18.7	>10
	$\psi$ (%)	69.2	68.5	72.2	70	65.2	62.5	68.2	65	>40
热稳 500℃ 定 100h	$\delta_5$ (%)	17.5	15.5	16	16.3	12	16	17	15	>7
	$\psi$ (%)	50.5	33.5	41		36.5	32	31.5		>15
持久	500℃ 580MPa / mm <sup>2</sup> 持续 100h30min	未断	未断	未断	未断	未断	未断	未断	未断	>100h
备注	金相组织按评级图均小于或等于 3 级, 符合技术要求									

(下转第 53 页)

## 颜鸣皋教授献身祖国材料科学 40 周年 专场学术报告会在京举行

北京航空材料研究所科学技术委员会于 1990 年 9 月 25 日举行专场学术报告会, 祝贺我国著名航空材料科学家、现任第五届国际材料力学行为会议理事会主席颜鸣皋教授 70 诞辰和献身祖国材料科学研究与教学 40 周年。航空航天部、航空航天科学技术研究院有关领导张彦仲、朱伯贤、张耀等、中国金属学会、中国航空学会、航空航天大学、北京理工大学、洛阳工学院、冶金部钢铁研究总院等单位的负责人、教授、专家以及颜鸣皋教授的好友应邀出席报告会。

北京航空材料研究所顾问、原所长矫世同在会上介绍了颜鸣皋教授 70 年不寻常的经历和 40 年来在材料科学与工程领域所作出的贡献。与会者赞扬了颜鸣皋教授在新中国成立后毅然放弃在美国的优厚生活待遇和良好工作条件回国献身材料科学的崇高爱国主义精神, 高度评价了他在学术上取得的成就, 并祝愿他健康长寿, 为我国的经济建设和航空航天事业作出新的贡献。国家自然科学基金委员会副主任师昌绪、中国科学院沈阳金属研究所也发来贺电。

颜鸣皋教授在会上作了题为《变幅载荷下材料疲劳裂纹扩展行为》的主题报告, 他介绍了北京航空材料研究所与德国宇航院材料所进行的在变幅载荷下几种飞机结构材料的疲劳裂纹扩展行为及其寿命预测方法, 阐述了铝和钛合金在不同类型超载下的迟滞效应与扩展机制, 并对寿命预测模型、线性累积法、恒  $Sop$  模型和改进后模型的预测结果与实测数据进行了对比和讨论。

航空航天大学陈昌麟教授、北京航空材料研究所科技委主任李成功、美籍华人吴昶先生等学者、专家也在会上宣读了自己在材料研究方面的学术论文。

(朱荃芳)

### 普·惠公司计划研制带整体叶片的转子

先进的战术战斗机的高性能燃气涡轮发动机要求较高的推力重量比, 采用带整体叶片的转子可减轻重量。普·惠公司已承担 IN 100 高温合金压气机带整体叶片的转子的研制, 并已列为美国的空军莱特航空实验室制造技术 (MANTECH) 计划的一部分。等轴锻转子计划采用两种方法: 一是将转子锻造成带超过尺寸的整体叶型的近净形转子, 在热处理前将转子热弯曲成最后形状; 另一种方法是将转子锻造成实心的带整体叶片 (保留叶型之间的材料) 近净形转子。这两种转子上的叶型用电化学加工成型。最后将确定哪种方法最经济有效。

计划还包括如何去除、修理和更换叶片的方法。修理程序包括去除叶片和叶片残核的焊前准备、锻焊上超尺寸的更换叶片, 然后用磨削或电火花作最后精加工。

(赵金凤)

## 欢 迎 订 阅

### 1991 年《世界有色金属》

《世界有色金属》(半月刊) 是经国家科委、新闻出版署批准, 由中国有色金属工业总公司主办的公开发行业务, 主要报道国内外发展有色金属工业的方针政策; 有色金属工业各领域的发展趋势, 经营管理及综合述评; 有色金属产品在各个相关行业的市场开发状况; 有色金属工业各种新技术、新工艺、新设备、新产品; 有色金属资源、投资、生产、消费、价格、成本、能源、环保等各方面的最新信息; 有关的学术交流、国外考察、科技合作、技术引进与消化, 国外反映等; 并配合国内外有色金属工业的发展现状, 出版不定期专刊或特刊。

《世界有色金属》(半月刊) 是涉及有色金属工业各领域的综合性技术经济情报刊物, 内容广泛, 信息快, 适合各级领导, 管理干部和科研、生产、设计、教学等单位科技人员、师生及广大技术工人阅读。

本刊每月 1、15 日出版, 每期待价 1.00 元, 全年订费 24.00 元, 欢迎单位和个人订阅。订户银行汇款请汇至“中国有色金属工业总公司技经中心财务科”, 开户银行: 中国工商银行北京市新街口分理处, 帐号: 890053-04。邮局汇款, 请寄本刊编辑部, 地址: 北京市西直门内大街西章胡同 9 号, 邮政编码: 100035。

《世界有色金属》编辑部

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~  
(上接第 21 页)

实践证明, 对表层硬度偏高的叶片采用重复热处理, 方能使硬度表里一致。但叶身型面的变形将有所增加。

表 5 抽查工艺 IV 生产锻坯的变形情况

批次号	投产件数	合格件数	变形超差件数	合格率(%)
GT3	120	116	4	97
HT3	115	110	5	96

### 三、几点意见

1. TC9 钛合金模锻叶片在热加工过程中产生的变形是由于锻造残余应力和热处理过程中的热应力引起的。

2. 锻坯冷校正后, 即使经过低温退火, 叶片内部仍保存较大的残余应力, 会影响成品叶片的型面稳定。锻坯不宜冷校正。

3. 锻坯热校正, 若在再结晶温度以下加热, 合金的塑性低、变形抗力大、锻造残余应力大, 会增大热处理变形。相反, 热校正再结晶温度以上加热, 在加热过程中终锻件得到再结晶退火, 消除残余应力, 使得热变形与再结晶同时进行, 能减少锻造残余应力。

4. 采用高温退火与校正相结合的工艺, 是解决叶片热处理扭曲变形的有效方法。不足之处在于局部表层容易产生硬度偏高现象, 影响机械加工, 使用上受到一定限制。