

钛合金稳定化退火工艺试验

新艺机械厂 陈思觉

通过钛合金稳定化退火工艺试验与研究,说明稳定化退火能够消除或减少机械加工的残余应力,以保证零件使用时型面和尺寸的稳定性;能够消除或减少钛合金因抛光过热所产生的“白斑”,提高产品质量;能够少量除氢,避免合金氢脆。同时,稳定化退火对合金的组织、性能及零件变形无明显影响。

Process Test of Stabilization Annealing of Titanium Alloy

Chen Sijue
(Xin Yi Machinery Factory)

Through the process test and the study of stabilization annealing of titanium alloy, We have known that the stabilization annealing can eliminate or decrease the residual stress caused by machining so as to ensure the stability of profile and dimensions during the application of parts, remove or reduce the "white plague" of titanium alloy caused by overheating during polishing so as to improve the quality of products, and decrease the hydrogen content to certain extent so as to alleviate the danger of hydrogen embrittlement. Meanwhile, there are no distinct effects on the structure, properties of the alloy, and the deformation of parts.

一、前 言

TC9 或 TC11 钛合金用于涡轮喷气发动机压气机叶片的生产起步较晚,其冷、热加工的工艺不够成熟。根据钛合金独特的性能,并引用耐热钢叶片的生产经验,开展了钛合金叶片生产的各项试验。本文研究钛合金半成品叶片的低温真空退火工艺。根据试验与分析选择了最佳退火制度。通过实际应用,达到了预期的设计目标,取得了较明显的技术经济效益。

二、工艺试验参数的选择

编制钛合金叶片稳定化退火工艺时,参照了耐热钢叶片的稳定回火工艺。本文称钛合金稳定化退火而不叫稳定回火是因为 TC9 和 TC11 钛合金叶片采用双重退火制度,实际上包含了再结晶退火(也相当于固溶处理)时效过程。钢叶片稳定回火的温度选择在稍低于回火温度,保温时间 2h,空冷。因此,初步将稳定化退火温度选择在稍低于双重退火中第 2 次退火的温度,采用 520℃,在保温时间上开展用 2h 与 6h 的工艺对比试验。又依据钛合金只能在真空下加热并保持一定时间,方能把氢从合金中脱出的要求,退火加热安排在真空炉中进行。为保持零件表面的光亮与不氧化,要求工件室温入炉,抽真空后升温并控制零件保温时的真空度 >0.066 帕 (Pa)。保温后,在真空气氛中随炉冷却至 200℃ 以下出炉。

三、试验结果

1.不同工艺状态的叶片表面残余应力的测定

取同材料、同一批加工叶片,按未处理、520℃ 保温 2h 与 6h 退火 3 种状态,在叶背中间部位用西门子公司 D500 型 X 射线衍射仪测定表面残余应力,结果见表 1。

表 1

工艺条件	编号	残余应力 (MPa)	应力均值 (MPa)	备注
未处理	1	-127.4	-153.0	应力 测定 方法: $\sin^2\psi$ 法测, 定晶 面 Ti (114)
	2	-131.7		
	3	-200.0		
520℃, 2h	4	-134.2	-129.1	
	5	-93.6,-79.8,76.0		
	6	-170.0		
520℃, 6h	7	-2.2	-38.7	
	8	-13.5		
	9	-104.6		

2.不同时间退火后的叶片上“白斑”的消除

将 10 片含“白斑”的叶片,分成两组进行 2h 与 6h 的稳定化退火,再经腐蚀后,观察消除“白斑”情况,见表 2。

3.叶片不同处理前后的氢含量分析

取 8 片同材料、同状态的叶片，用惰性气体脉冲色谱法分析叶片排气边的氢含量，结果见表 3。

表 2

白斑 状况 叶片编号	工艺条件		520℃, 2h		520℃, 6h	
			退火前	退火后	退火前	退火后
1 / 6			叶盆、 背有 白斑	基本 消除	叶盆、 背有 白斑	局部 未消除
2 / 7			叶盆、 背有 白斑	基本 消除	叶盆、 背有 白斑	叶背 局部 未消除
3 / 8			叶背 严重 白斑	未消除	叶背 严重 白斑	未消除
4 / 9			叶盆、 背有 白斑	局部 消除	叶盆、 背有 白斑	消除
5 / 10			叶盆、 背有 白斑	局部 未消除	叶盆、 背有 白斑	消除

表 3

含氢 量 (%) 编号	工艺条件		520℃, 2h		520℃, 6h	
			退火前	退火后	退火前	退火后
1 / 3			0.0034	0.0037	0.0031	0.0033
2 / 4			0.0053	0.0050	0.0031	0.0033
5					0.011	0.010
6					0.017	0.013
7					0.013	0.011
8					0.012	0.011

4.叶片真空退火前后型面的透光检查

用 10 片 I 级大叶片检查 520℃，6h 退火前、后的叶身型面透光。结果叶身各截面的透光变化不大。最大透光为 0.02mm，小于技术条件所规定的 0.03mm 的要求。

5.稳定化退火叶片组织与性能的检查

按钛合金叶片专用技术条件，测定 520℃，6h 退火后叶片的室温拉伸、硬度、500℃ 瞬时拉伸、500℃ 100h 热暴露后室温拉伸、500℃ 580MPa 持久等力学性能与金相组织，结果均符合技术要求。

四、分析讨论

从表 1 可知，未处理的叶片表面为压应力，其应力值不高。这与叶身只进行电解和抛光有关。因为利用电化学作用的电解加工不会产生加工应力，当机械抛光时，零件表面受到压缩，加工之后，表面形成残余压应力。据分析，由抛光引起的残余应力不会降低叶片的疲劳性能。但抛光难免产生过热，由于受热局部表面和中心的加热及冷却速度不一致，热胀冷缩的程度不同，产生热应力，零件上局部形成残余拉应力。假若同一零件有两种应力，既有压应力又有拉应力，会明显降低材料的疲劳性能。因此，

消除残余应力，可以保持零件在使用过程中型面和尺寸的稳定，并使合金的性能稳定，提高零件工作的可靠性。

在 520℃ 下保温 2h 或 6h，消除残余应力的效果不尽相同。2h 退火作用较小，6h 退火消除应力显著。这是因为退火前叶片中存在的残余应力在加热时被释放。在相同温度下，保温时间愈长，残余应力释放愈多。

表 1 所列数据分散，说明影响钛合金产生残余应力的因素很多，除与零件的加工、表面状态有关外，还与合金内部的组织形态、相分布有关。

抛光所产生的过热，通常是在不遵守工艺规程、操作不当的情况下出现的。譬如加在磨轮上的压力过大，未及时变换抛光的位置等，在砂轮与叶片表面接触区迅速发热，由于钛的导热系数小，阻碍零件表面所产生的热量的扩散，这就引起小体积范围内的显著温升而导致发生过热。

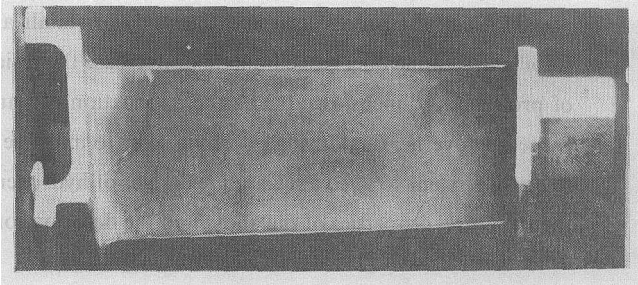


图 1 叶片“白斑”的外观形貌 (1:1)

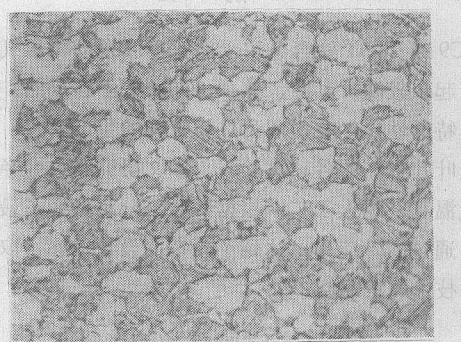


图 2 叶片“白斑”区组织 ×500

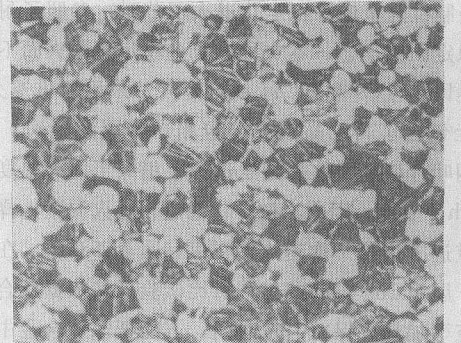


图 3 叶片正常区组织 ×500

过热是常见缺陷。按理，通过氧化色可以鉴别。氧化变色一般由浅黄至蓝紫色。由于氧化膜很簿，经反复抛光，提交时常不见氧化色。但经氢氟酸腐蚀，可以显示过

热区的“痕迹”，一经腐蚀，过热处表面呈现与其它腐蚀表面不同的颜色。由于过热处不易腐蚀，呈现斑块状白色区。故过热区又俗称“白斑”。而正常腐蚀表面呈现银灰色，见图1（注：叶片上下安装边呈白色为未经腐蚀的表面，叶身根部发白区为过热区）。图1所示叶片白斑区组织见图2，正常组织见图3。

从图2、3可以看出，过热（白斑）区与正常区组织相比，除承受腐蚀能力有差别外，其初生 α 含量稍有降低，说明叶片抛光所产生的过热程度较轻。实践证明，采用稳定退火可以消除由于轻微过热产生的“白斑”，见表2。表2还说明在520℃加热，保温6h比2h退火消除“白斑”的效果要好。

严重的“白斑”（通常“白斑”在叶盆、叶背有对称性即为“穿透性白斑”）。会使合金局部富氧致使成分、组织（见图4）、性能有所改变，且无法用热处理加以挽救。

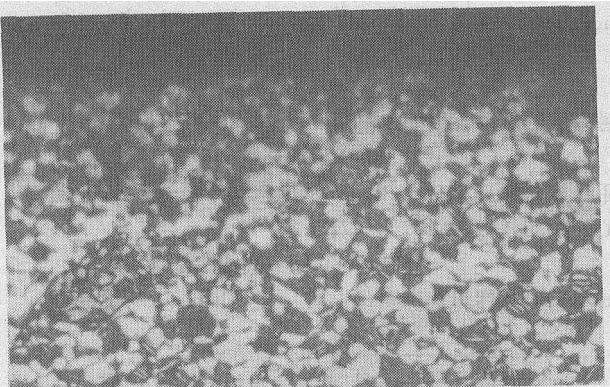


图4 严重“白斑”区横截面组织 ×500

用图像仪在“白斑”处的横截面上，对表层与心部分别测3个视场的初生 α 相含量，结果见表4。

表4

初生 α 相含量(%) 检查位置	视场号	1	2	3
表 层		24.5	17	20.7
心 部		41.0	44.8	38.0

通过表4也说明严重白斑处表层初生 α 相含量明显减少。而在低温条件下，合金只有从亚稳 β 相中析出次生 α ，不可能增加初生 α 相含量。因此，不能通过稳定退火把严重白斑予以消除。

从表3可知，当钛合金氢含量不高时（一般小于0.01%），低温（520℃）真空退火，无论保温2h或6h，在退火后其氢含量无明显变化。当氢含量大于0.01%时，经过6h的低温除氢，氢含量略有下降。下降缓慢的原因是除氢温度低，化合态的氢（TiH）未分解，固溶态氢原子的活动性差，氢扩散缓慢，溶入氢难于从合金中脱出。

520℃保温6h退火的叶片，通过检测退火前后的型面透光，以及退火后合金的组织与性能，表明稳定退火工艺对合金的组织与性能与叶片变形无明显影响。分析原因是

钛合金叶片已经过双重退火，其组织与性能稳定。再在第2次退火温度以下退火，不会改变合金的组织与性能。又由于加热温度低，温度梯度小，因热应力影响的叶片变形小。

五、生产应用实例

根据工艺试验结果及分析，制定了稳定化退火工艺（利用真空热处理炉，520℃保温6h，炉冷）已投入批生产。抽查第6级压气机叶片（3FT9批次），通过稳定化退火消除“白斑”缺陷的统计见表5。

表5

零件号	批次号	叶片总数 (片)	真空稳定化退火	
			处理前白斑数 (片)	处理后白斑数 (片)
2361	3FT9	549	69	17

从表5可知，549片半成品叶片，第1次腐蚀检查时发现69片含有“白斑”，占13%。通过稳定化退火并再次腐蚀检查，只发现17片有白斑。即退火消除白斑52片，占白斑总数的75%。不难看出，由于采用退火，使产品合格率由87%提高至97%，生产成本大大下降。

检查3级压气机叶片4T8批次真空稳定化退火的氢含量见表6。从表6可知，有的批次，在退火前氢含量超过技术要求。然而氢含量对钛及钛合金塑性和韧性的影响极大，如果氢含量超过0.015%，钛及钛合金的塑性和韧性明显下降，产生“氢脆”。4T8批次叶片通过真空稳定化退火，使合金氢含量降低30~40ppm，满足了氢含量要求。由此说明：尽管低温除氢效果不大，当合金氢含量按技术要求超越不多时，增加1次低温除氢，对挽救叶片是有益的。

表6

工 艺	编 号	处理前氢含量 (%)	处理后氢含量 (%)	技术要求 (%)
520℃,6h	1	0.018	0.015	≤0.015
	2	0.016	0.012	≤0.015

六、结 论

根据钛合金稳定化退火工艺试验及研究和生产实际应用，可以得到以下结论：

1. 钛合金稳定化退火能消除或减少机械加工的残余应力，可以保持零件在使用过程中型面和尺寸的稳定；能减少因抛光过热所产生的“白斑”，可以提高产品合格率，降低生产成本；原氢含量较高时，稳定化退火能适当除氢，降低合金的氢含量。
2. 稳定化退火工艺于520℃加热，保温6h比保温2h对消除机械加工的残余应力和减少因抛光过热所产生的白斑的效果要好。
3. 稳定化退火工艺对合金的组织、性能和叶片型面透光无明显影响。