

英国航空钛合金锻件的质量控制

葛 志 明

近几年来,通过对英国罗·罗公司材料技术条件的研究和英国钛合金锻件的解剖分析工作,证实英国航空钛合金锻件的质量水平较高。他们的质量控制办法也是有效的。现以斯贝发动机 Ti-679 合金的压气机盘和隔圈锻件为例,对英国 $\alpha + \beta$ 钛合金航空锻件的质量控制方法作一简要分析,以供国内借鉴。

合金化学成分的内控规范

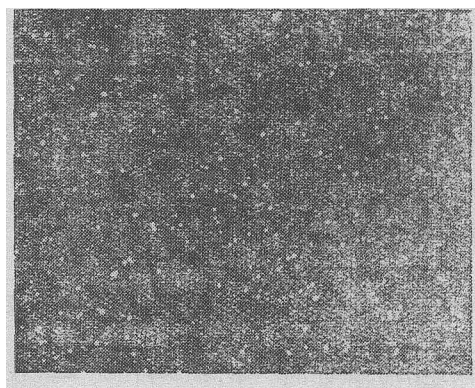
英国生产钛合金锻坯的帝国金属公司 (IMI) 十分重视一次自耗电极的制备质量,除了制备电极的原材料有技术标准外,合金元素的加入方法已不采用传统的“合金包”方式,而是采用合金元素和钛颗粒在滚筒中大混料的方法,使组成一次自耗电极的每个小块电极都已经是“成分均匀”的“合金”。英国用得最多的是钠还原钛,这种钛是颗粒状的,且直径都小于 5 毫米,这对混料的均匀性是很有利的。英国也用海绵钛,必须将其破碎到直径不大于 12~13 毫米的颗粒,美、日等国也是这样要求的。因为真空自耗电极电弧炉熔炼时的熔池很有限,是边熔边凝固的连续过程,所以一次电极成分不均匀,必然导致铸锭的成分偏析。当然,采用多次熔炼也可以提高铸锭成分的均匀性,但这是很不经济的。

对 Ti-679 这样的热强钛合金来说,氧、氮等间隙元素杂质是需要严格控制的,因为它们对热稳定性和疲劳寿命产生不利的影响,而这两个性能对航空发动机的转动零件是很重要的。英国早期虽然技术条件中规定过允许的最高氧含量为 0.25%,但近年已降低为 0.20%。

而且,实际上从对 Ti-679 盘和隔圈锻件的化学分析结果来看,氧含量都在 0.15% 以下,氮在 0.02% 以下。

对于氢含量,他们对处在不同热加工阶段的产品规定了不同的控制标准。对 Ti-679 的盘和隔圈材料,规定锻坯不高于 0.006%,模锻件不高于 0.010%。这是因为在加热或腐蚀检查过程中钛是要吸氢的,所以只有严格控制冶金半成品的氢含量,才能使最终的航空零件的氢含量不超过发生氢脆的临界含量 (0.015%)。

值得注意的是对 Ti-679 合金中硅含量的控制。早期的技术条件规定为 0.1~0.3%,近年更改为 0.1~0.5%,表面上是放宽了,但实际他们生产的航空锻件的这个合金的硅含量仍控制在 0.22% 左右,一般在 0.18~0.25% 范围内波动,因为只有这样才能保证合金中硅化物细 (一般要求颗粒不大于 1 微米) 而且分布均匀,如图 1 所示。如果合金中的硅含量高,则硅化物就要粗化,分布也不均匀,对性能也有不利的影响。可见,针对压气机盘 Ti-679 合金



× 400

图 1 Ti-679 合金中的硅化物分布

的硅含量，在技术条件规定的范围内还应有一个最佳成份的控制。

锻坯的质量控制

帝国金属公司的锻坯生产采用铸锭轴向拔长的锻造工艺。直径为533或600毫米的铸锭首先在 β 区进行开坯，一般第一火的变形量控制在10%左右，先锻成方坯，然后锻成一定尺寸的圆棒锻坯或通常“熔检”用直径为150~160毫米的锻坯。对于 $\alpha + \beta$ 型两相钛合金（Ti-679也可归到这一类），从铸锭到交货尺寸锻坯的多火次锻造过程中，必须控制不少于两火的 $\alpha + \beta$ 锻造，其变形量应不小于50%。以保证交货锻坯的组织由等轴初生 α 和 β 转变组织所组成。

锻坯经机加工后，要进行超声波探伤和表面腐蚀，检查冶金缺陷和晶粒度。超声波探伤的标准采用IMI公司企标G.S.T.02。

锻坯“熔检”的内容包括宏观组织、显微组织和机械性能的检验。

按规定锻坯生产厂要在相应于铸锭的头、尾部位各取一个横向切片，检查宏观组织。宏观晶粒度的标准采用AMS2380，要求晶粒度不超过20级（图2）。

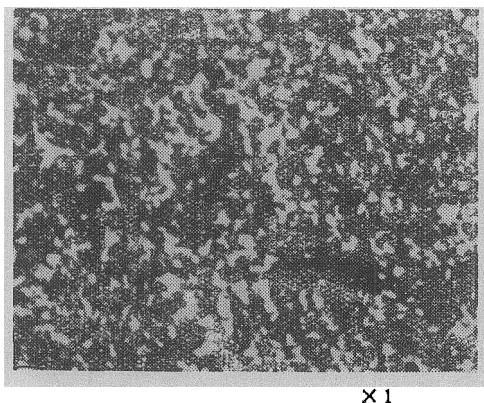


图2 Ti-679合金锻坯允许的最大宏观晶粒度

锻坯的机械性能“熔检”方法如下：在宏观组织切片相邻的部位切取一片厚度约为38毫米的试片，在 $\alpha + \beta$ 区加热后，以3:1的锻

比锻扁到约13毫米厚，热处理（900℃，1小时，油淬+500℃，24小时，空冷）后剖开，检查显微组织、氢含量和罗·罗公司材料技术条件MSRR8613所规定的各项机械性能，包括室温拉伸，室温缺口拉伸，450℃拉伸，450℃蠕变等，性能指标与锻件的要求相同。显微组织中的等轴初生 α 的比例要求不少于24.5%（图3）。

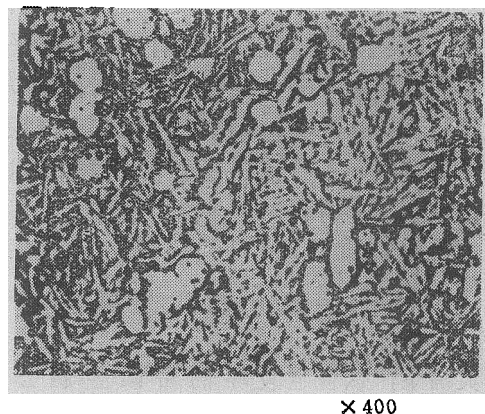


图3 含等轴初生 α 为24.5%的Ti-679合金的显微组织

模锻件的质量控制

合格锻坯到锻造厂后，按需要的尺寸下料，锻成饼坯。锻饼是在 $\alpha + \beta$ 区进行的，锻比一般不小于3:1。锻饼时如锻坯的高度/直径比不大于2，则不需要模具；高度/直径比大于2.5，甚至达到3以上时，就需要用模具将锻坯逐步锻成饼坯。

饼坯在全面机加工后逐个进行超声波探伤，按罗·罗公司的QAS0202标准，要求缺陷反应不超过 $\phi 0.6$ 的当量平底孔。

由饼坯模锻成盘和隔圈时，一般都在 $\alpha + \beta$ 区进行多火次的模锻，而且在模锻过程中必须保证锻件任何部份的实际温度都不超过技术条件规定的最高热加工温度，对Ti-679合金来说，这个温度就是925℃。超过这个温度，锻件显微组织中的初生 α 量就要减少到24.5%以下，这是不允许的。因此，必须避免局部的剧

烈变形和由此而引起的温升。解决这个问题的办法是采用预锻，一般应设计专门的预锻模，预锻模设计中既要考虑到最后一火模锻时工件各部位的变形量应大体相同，又要考虑合理的流线分布。当然，工件加热时的表面保护（玻璃润滑保护涂层）以及模锻时的润滑和隔热措施（衬垫玻璃布或云母片等）也是获得优质钛合金模锻件所必需的。

模锻件热处理（900℃，1小时，油淬+500℃，24小时，空冷）后应检查组织与性能。在工艺定型之前，要进行首批批准试验，检查内容有流线、宏观晶粒度、显微组织（包括等轴初生 α 含量和硅化物的分布）、氢含量以及在不同部位和取向上试样的全面机械性能。流线图与全面机械性能的项目和取样图，均按罗·罗公司材料技术条件MSRR9951的要求。

模锻件的流线应沿锻件的外廓分布，除毛边出口处外，其余部位应呈封闭型。模锻件宏观组织应是细晶粒组织，呈毛玻璃状，无清晰晶界可见。

模锻件各部位的显微组织应由等轴初生 α 和 β 转变组织所组成，其中等轴初生 α 的比例应不小于24.5%（图3）。合金中的硅化物应细而分布均匀（图1）。

模锻件不同取样位置的机械性能应符合罗·罗公司材料技术条件MSRR8613的规定（见表1）。技术条件规定以外的其它性能，也应达到合金应有的水平。

通过首批批准试验和工艺定型以后，锻件的日常检验按规定只需逐件检查表1所列的性能、显微组织和氢含量。盘件在中心的试验环上取样，隔圈在中心部位的冲孔底片上取样。无论工艺有变动时或无变动时都要定期按首批批准试验项目进行全面检查。

表1 Ti-679合金压气机盘和隔圈锻件技术条件MSRR8613规定的性能指标

室温拉伸，不小于				450℃拉伸，不小于				σ_b^N/σ_b	蠕变残余变形 %*
σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ		
公斤/毫米 ²		%		公斤/毫米 ²		%		不小于	不大于
113.2	99.4	8	25	83.6	60.1	10	1.3	1.3	0.10

* 蠕变性能在锻坯熔检试片上测定，蠕变试验的条件：450℃，39.2公斤/毫米²，100小时。

模锻件实物的解剖分析结果

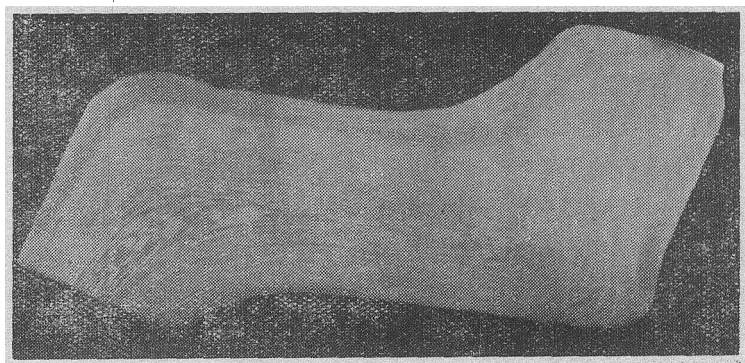
英国航空钛合金锻件的实际情况，以优质合金公司锻造的Ⅲ级间隔圈为例，经解剖表明，基本性能（表2）符合MSRR8613规定（表1）。其它性能也达到Ti-679合金应有的水平，如450℃持久强度在80公斤/毫米²以上，光滑试样的室温旋转弯曲疲劳强度（ 2×10^7 ）达60公斤/毫米²，断裂韧性达115.4公斤·毫米^{-3/2}。

隔圈的宏观组织见图4，流线和宏观晶粒度符合要求。隔圈各部位的显微组织均匀一

表2 Ti-679隔圈锻件的实际性能

取样部位	室 温 拉 伸				450℃ 拉 伸				$\frac{\sigma_b^N}{\sigma_b}$	蠕变 残余 变形 %*
	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ		
	公斤/毫米 ²		%		公斤/毫米 ²		%			
主向	113.5	102.2	14.4	41.8	86	63.4	12.5	50.7	1.65	0.08
高向	113.7	101.7	14.1	42.4	—	—	—	—	—	—

* 蠕变试验条件：450℃，39.2公斤/毫米²，100小时。



×1

图4 Ti-679隔圈锻件的宏观组织

致，如图 5 所示，可以看到其等轴初生 α （亮块）实际控制在 50% 左右，由此可推得隔圈锻件的实际模锻温度控制在 900℃ 左右，符合技术条件的规定。

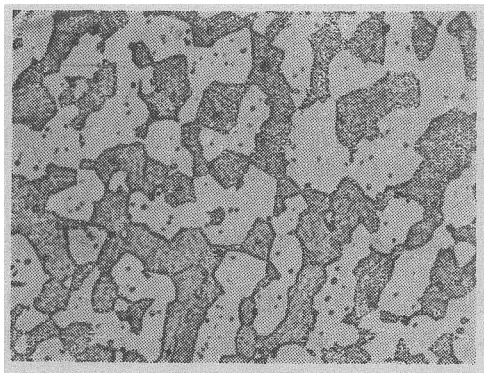


图 5 Ti-679隔圈锻件的显微组织 ×500

表 3 Ti-679合金隔圈的主要成份

元 素	Sn	Zr	Al	Mo	Si	Ti
分析结果，%	11.07	4.85	2.33	1.03	0.21	余量
技术条件	10.5~	4.0~	2.0~	0.8~	0.1~	余量
规定，%	11.5	6.0	2.5	1.2	0.5	

表 4 Ti-679合金隔圈的杂质含量

杂质元素	Fe	C	O	N	H	Y
分析结果，%	0.036	—	0.093	—	0.0038	—
技术条件规定 不大于	0.2	0.08	0.20	0.05	0.01	0.001

隔圈化学成份的分析结果见表 3 和表 4。从表中可以看到，合金成份符合技术条件规定和本文前面所阐明的原则。

通过以上分析，可以认为：①英国航空钛合金锻件的质量控制有一套比较科学和严格的制度；②英国航空钛合金锻件质量控制的重点是实行严格的工艺控制。同时几乎可以说是层层设卡，以便将不合格件尽可能在前面的工序挑出来，而不采用在成品件上总检查、算总账的劳民丧财的办法；③我们通过斯贝发动机钛合金锻件的试制，要研究英国航空钛合金锻件质量控制的经验，从中吸取有益的部分，以便把我国航空钛合金锻件的质量控制制度健全起

来，提高到新的水平。目前，国内在试制航空钛合金大锻件过程中，偏析、夹杂、组织不合要求和均匀的问题较多，其原因都与整个生产工艺过程的质量控制不严有关。因此要获得高质量的航空钛合金锻件，必须注意下面几个方面：

1. 用于压气机盘等重要航空零件的热强钛合金，尤其是 α 稳定元素含量高的合金，对氧、氮、碳、氢，乃至铁等的杂质元素的含量必须严格控制，因为它们对合金的热稳定性和工作寿命是非常有害的。

2. 提高冶金质量，解决偏析、夹杂问题。目前迫切需提高一次电极的制备质量，包括精选海绵钛和中间合金，细化海绵钛的颗粒度，改革传统的“合金包”加合金元素和用钨极氩弧焊来焊接一次电极的方法，提高一次电极的致密度。必要时也可考虑进行三次熔炼。从长远看，大容量凝壳炉熔炼并浇注钛合金锭的方法对解决偏析问题的效果会更好些，为此目的，苏联已设计十吨凝壳炉冶炼钛合金。

3. 在航空钛合金大锻件的生产中，迫切需提高锻坯的质量。没有高质量的锻坯，就谈不上高质量的模锻件。英国采用在 1800 吨快锻水压机上使铸锭轴向直接拔长的锻坯生产工艺（对该工艺的细节了解尚少）。苏联则对压气机盘等重要模锻件的锻坯，推荐换向反复锻拔和 β 锻造、 $\alpha + \beta$ 锻造交替进行的办法，以达到彻底破碎铸态组织，细化锻坯的宏观和显微组织的目的。

4. 模锻件质量控制的关键是要获得均匀的、符合要求的宏观组织和显微组织。因为在钛合金中，机械性能对组织是十分敏感的，所以控制住了组织，模锻件的性能就有了保证。而正是这一点往往被人们所忽视。

5. 从铸锭、锻坯、饼坯到模锻件等各个工序，要安排适当的无损检测项目，包括超声波探伤，X 射线透视和表面腐蚀或着色检查等。对于重要航空零件，必须坚持高标准严要求，切实保证质量。