

# 苏联航空燃气涡轮发动机用材梗概

胡福田 傅 媛

六十年代以来，苏联航空发动机获得了较快的进展，近年来又出现了高推重比燃气涡轮发动机，所选用的材料也有很大变化，下面仅就苏联航空燃气涡轮发动机用材情况，作一简要介绍。

## 一、轴向式压气机用材料

**进气装置** 根据进气装置所承受温度的高低，选择不同材料。例如，承受温度 $t \leq 250^\circ\text{C}$ ，选用硬铝板材； $t \leq 500^\circ\text{C}$ 时，改用钛合金板材； $t > 500^\circ\text{C}$ 时，则选用1X18H9T不锈钢板材。

**压气机盘** 也是根据承受温度的高低和其它工作条件，选择不同的材料，经模锻和机械加工而成。承受温度在 $250^\circ\text{C}$ 以下的压气机盘，采用的材料是AK2、AK4-1、BД17铝合金，其中AK4-1变形铝合金系由AK4合金经变质处理而得，化学成分是：1.9~2.5%Cu、1.4~1.8%Mo、 $\leq 0.2\%$ Mn、1.0~1.5%Fe、

1.0~1.5%H，具有高的强度，热状态下具有较好的塑性、焊接性和切削加工性。热处理规范是： $525 \sim 535^\circ\text{C}$ 淬火， $170^\circ\text{C}$ 人工时效16小时。BД17铝合金的化学成分是：2.6~3.2%Cu、2.0~2.4%Mg、0.45~0.7%Mn，抗腐蚀性高于AK4-1，热变形时的塑性高，锻造和模锻温度为 $350 \sim 450^\circ\text{C}$ ，焊接性能较好，且有良好的切削加工性能。

承受温度为 $450 \sim 550^\circ\text{C}$ 的压气机盘，采用BT3-1和BT10钛合金，后者在 $500 \sim 550^\circ\text{C}$ 下使用。BT3钛合金的化学成分为4.0~6.2%Al、2~3%Cr，具有高的抗腐蚀性和高的强度，在 $850 \sim 1050^\circ\text{C}$ 下可进行热变形加工。锻造或模锻之后，为了消除冷作硬化并使性能均匀，可在 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ 进行退火处理。BT3-1钛合金的化学成分是4.0~6.2%Al、1.5~2.5%Cr、1.0~1.8%Mo，添加钼可使其组织稳定，具有高的热强性。也可以选用OXH3M、30XГCA、

## 几点看法

1. 由于基体树脂NR-150结构中引入了 $(\text{CF}_3)_2\text{C}=\text{六氟异丙叉基团}$ ，因而改进了原来聚酰亚胺树脂的流动性，使之成为可溶性聚酰亚胺，便于加工成型，且NR-150在完全亚胺化后不溶不熔，适合作复合材料的粘结剂。

2. 这类聚酰亚胺是非结晶无定形聚合物，充分固化后基本上无链间交联，本质上属线型结构，固化后仍然是热塑性的。在聚合物熔点或玻璃化温度以上施加压力时仍具有熔融流动性，故以它为基体树脂制造的复合材料可以达到很低的孔隙率。

3. 由于NR-150分子结构中具有高键能的C-F键和F原子的屏蔽效应即C链外是F原子形成的保护层，因此这类树脂表现出突出的高低温使用性能和化学稳定性。与过去的聚酰亚胺相比，以NR-150为基体树脂的复合材料具有优良的韧性和机械强度，性能再现性好，并具有优异的热氧化稳定性。

综上所述，NR-150这类含氟聚酰亚胺树脂与高模量的石墨纤维制成的复合材料是一种孔隙率低，具有优良的热机械性能的高温结构材料，适用于超音速飞机喷气发动机喷管鱼鳞片，也有资料报导可作风扇叶片及其它靠近发动机的耐高温部件。

18XHBА、40XHBА以及13X14BΦPA钢。最后一种钢，一般用于制造承受温度为500℃的最后几级压气机盘。

**工作叶片** 承受温度不超过250℃的工作叶片，通常选用AK4-1或BД17铝合金，在此温度下，也有采用玻璃钢的；承受温度为450~550℃时，一般改用BT8 1、BT8、BT10钛合金或用13X12HBIΦA (ЭИ961)、13X14HBΦPA (ЭИ736)、X17H2(ЭИ268)及513Л (ЭИ736Л) 铬钢。而13X12HBMΦA (ЭИ961) 宜用于制造承受温度达600℃的燃气涡轮发动机零件；13X14HBΦPA(ЭИ736) 宜用于制造承受温度达550℃的叶片、盘、轴、拉紧螺栓等；X17H2 (ЭИ268) 宜用于制造承受温度达500℃的压气机叶片；513Л(ЭИ736Л) 宜用于制造承受温度达550℃的压气机叶片及其它零件。为了提高叶片毛坯的疲劳强度，应进行模锻；叶片的最后工序是机械加工和电化学加工。在某些情况下可以采用精密模锻，以降低加工余量，锁槽部分仍要机械加工或电化学加工，叶身要进行抛光处理。

鉴于燃气涡轮发动机在地面工作时，容易吸进尘土、砂子、雪、冰等，导致工作叶片损坏，并降低其疲劳强度，故压气机前几级叶片常常是用钢制的。

**整流叶片** 所用材料通常与工作叶片相同。由于整流叶片承受的载荷低于工作叶片，故可用Д1硬铝板材和20XГСА、30XГСА、X17H2钢来制造。

**压气机机匣** 根据工作条件和承受温度的情况，选用AЛ4或AЛ5铝合金铸造而成，并经热处理强化；承受温度较高者，则采用钛合金板材或钢板焊接而成。

压气机轴零件，例如前轴承机匣，如果温度不超过200℃，一般采用镁合金制成。但温度高于200℃时，镁合金的机械性能明显下降，必须改用其他材料。

**压气机轴** 用18XHBА、30XГСА、40XHMA、12X2H4A合金制成。密封装置零

件选用10号软碳钢，这种钢在退火状态及正火状态下，均具有高的塑性。

**离心式压气机零件** 轴和旋转的导向装置采用AK2、AK4及BД17铝合金冲压而成。而固定的导向装置则选用Д1硬铝板材。压气机和进气口某些部分采用AЛ4和AЛ5铝硅合金铸造。高速飞行时，导向装置和盘承受温度高于250℃，为此，盘件则用BT3、BT10钛合金制造，而固定的导向装置，选用BT3-1钛合金板材。

轴的材料是18XHBА、12X2H4А、40XHMA钢。

## 二、燃气涡轮零件用材料

燃气涡轮叶片的工作条件是非常苛刻的，须承受高交变拉伸载荷，而弯曲应力减低，易引起材料疲劳。没有采取空气冷却技术的叶片，其受热温度为750~880℃。

涡轮盘和叶片及压气机盘和叶片，要承受很高的离心力。涡轮盘和叶片承受的离心力可达80~250KN，超音速压气机叶片承受的离心力可达80~100KN。

**工作叶片** 采用ЭИ437Б、ЭИ617、ЭИ598、ЭИ867、ЖС6-К、ЖС6-КП、ЭИ929镍基耐热合金制成。ЭИ929(ВЖ36-300)合金用于制造在850~950℃下工作的燃气涡轮叶片，此种叶片是模锻的，允许变形度为45%。电渣重熔和真空电弧重熔的ЭИ929合金，具有较好的塑性，在1000~1170℃下的冲击韧性提高2~4倍。ЖС6-КП合金用于制造在900~1000℃下工作的燃气涡轮叶片，于热状态下变形，模锻叶片允许变形度为20%。这种合金可于变形状态使用，也可以于铸造状态使用，具有高的瞬时强度。其机械性能与温度的关系见表1。

当燃气温度超出材料容许的温度时，可采用冷却叶片（如空心叶片）或选用其它更耐热的材料，如钼基或铌基合金，但目前尚未实际应用。铌合金的主要问题是极易产生强烈氧化，其防护涂层尚未彻底解决。

**涡轮导向叶片** I级涡轮导向叶片承受的温度高,故采用镍基耐热合金(ЖС3、АНВ-300、ЖС6-К)和钴基合金(ЛК4)制造。ЖС3(ЭИ618)是复杂合金化的镍铬钼合金,其中添加了钛、铝和硼。可以用于铸造涡轮导向叶片,但很少用于燃气涡轮工作叶片。此合金在1000°C下具有高的热强性。ЖС3及此类型的其它合金在800°C以下的塑性很低,难以进行切削加工。铸造叶片应进行热处理,1150°C淬火,空冷。ЛК4是复杂合金化的钴铬钼合金,难以压力加工和切削加工,通常采用精密铸造制成涡轮导向叶片(见表2)。

II级涡轮导向叶片通常采用镍基耐热合金ЭИ437А和ЛК4制造。

涡轮螺旋桨发动机的III、IV、V级导向叶片采用X23H18(ЭИ417)铬镍钢制造;涡轮导向器装置的其余零件则用X23H18(ЭИ417)、

1X18H9T(ЭЯ1Т)钢。ЭИ417(X23H18)钢中铬和镍的含量比1X18H9(ЭЯ1)钢高,从而显著提高了热强性和耐热性。此种钢在水中淬火后,就形成奥氏体组织,并提高了塑性,各种焊接性能良好。

**固定涡轮导向叶片的底板** 用ЖС3合金和X23H18钢制成。

**螺栓** 用ЭИ388、ЭИ481钢制造,螺纹镀铜,以避免腐蚀和“烧损”。

**涡轮盘** 一般用ЭИ481耐热钢制造。如果涡轮盘承受更高的温度,则用ЭИ437Б、ЭИ698合金,而封严圈则采用ЭИ415钢。

**涡轮机匣** 采用ЭИ961、ВЖ102、ЭИ417、X18H9T(ЭЯ1Т)合金。螺栓和螺帽用ЭИ388钢制造。

**涡轮轴** 采用18ХНВА、40ХНМА、13Х14НВФРА(ЭИ736)合金。

表1 几种镍基耐热合金机械性能(N/mm<sup>2</sup>)与温度的关系

试验温度 °C	ЭИ 929			ЖС6-К			ЖС6-КП		
	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$
20	1000~ 1200	—	—	900~ 1000	—	270	1250~ 1400	—	420
800	800~ 900	450~ 520	360	900~ 940	510~ 530	—	1100~ 1250	460~ 480	390~ 400
900	550~ 700	210~ 230	300	750~ 800	320	290	750~ 800	270~ 290	340~ 380
1000	250~ 320	—	—	500~ 570	150~ 160	—	450~ 500	100~ 110	—

表2 导向叶片合金机械性能(N/mm<sup>2</sup>)与温度的关系

试验温度 °C	ЖС3			АНВ-300			ЛК4		
	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_b$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{-1}$
20	750	—	—	950	—	—	700	—	240~ 280
750	—	400	—	800	400	280	—	—	—
850	520	200	—	700	240	300	—	—	—
900	400	100	—	—	—	—	270	70	—
1000	—	—	—	—	—	210	—	—	—

### 三、燃烧室零件用材料

制造燃烧室零件用的材料,应根据零件承

受温度的高低来确定。

**外套** 飞行速度 $M > 2$ 时,外套承受的温

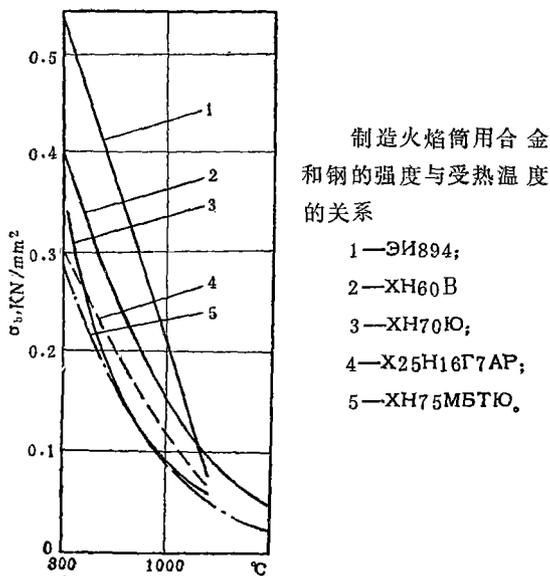
度达到500℃, 选用1X18H9T (Я1T) 钢或ВЖ102钢。

**火焰筒** 承受温度为800~900℃的火焰筒采用下列材料: X20H80T (ЭИ435)、XH75МБТЮ (ЭИ602)、XH38BT (ЭИ703)、XH60B (ЭИ868)、ЭИ894、XH70Ю (ЭИ652)、X25H16Г7АР (ЭИ835)、X24H25T (ЭИ813)。上述某些合金的机械性能见下图。

在900℃下工作的火焰筒, 用X20H80T (ЭИ435)、XH75МБТЮ (ЭИ602)、XH38BT (ЭИ703) 合金制造。

在950℃下工作的火焰筒, 用ЭИ894制造。

在950~1100℃下工作的火焰筒, 用XH60B (ЭИ868) 制造。



#### 四、排气装置零件用材料

**涡轮螺旋桨发动机导向装置** 用1X18H9T (Я1T) 钢。

**可调尾喷口零件** (带加力的涡轮喷气发动机) 高速飞行 ( $M=3$ ) 时, 采用耐热合金ВЖ-98及OT4-1钛合金。OT4-1钛合金制成厚0.5~5毫米的板材, 它是BT4钛合金的改型, 具有更高的工艺塑性和高的热强性,

表3 OT4-1合金机械性能与温度的关系

试验温度 °C	$\sigma_{0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta$ %
20	500	660	22
350	260	340	27
400	250	320	22

无脆性倾向, 适用于制造在500℃下工作的焊接件和模锻件。为避免氧化和产生脆性, OT4-1钛合金在氩气保护中焊接, 但点焊技术不过关, 零件易于产生裂纹, 所以苏联多用铆接代替点焊, 其机械性能与温度的关系见表3。

#### 五、润滑密封装置零件用材料

**环** 用含锡量高的锡青铜Бр018和Бр0С16-5或用含碳量高的铸铁ХМ制造。

**支承环衬套** 用38ХМЮА渗氮钢; 外衬套用12ХН3А或18ХНВА渗碳钢。

**橡胶密封圈** 由肖氏硬度为60~70的耐热和耐热橡胶制成。

#### 六、减速器零件用材料

**渗碳齿轮** 由12ХН3А、12Х2Н4А、18ХНВА钢制成。

**渗氮齿轮** 由38ХМЮА制成。

**减速器轴** 由18ХНВА制成。

**螺栓、销钉** 由40ХНМА制成。

**减速器壳体** 由АЛ5铝合金制成。

#### 七、耐高温珐琅涂层

耐高温珐琅涂层可用作燃烧室、燃气涡轮发动机可调喷口调节片等零件的保护层, 也可作电绝缘层, 还可用于封闭疏松通孔。零件表面应仔细除油并经喷砂后用喷漆器或浸涂法涂上珐琅, 置于15~20℃空气中干燥, 再置于烘干箱内在100~150℃下烘干, 随后放在电炉内1200℃下焙烧。焙烧时间取决于涂层的厚度和所用珐琅的类别。焙烧后, 零件表面不得有气泡和裂纹。

众所周知, 对航空产品来说, 合理地选材, 正确地使用各种合金及其它结构材料, 是特别重要的, 将有助于提高工业经济管理水平, 延长燃气涡轮发动机的使用寿命, 以及改善其工作性能和可靠性。

在考虑航空燃气涡轮发动机零件的材料时, 应尽量选择比强度高的材料, 以求得在其它条件相同的情况下, 有可能提高结构强度和可靠性并降低重量。