

# 压气机铝合金叶片的剥蚀 和硬质阳极化

四二〇厂 易富津 万立群

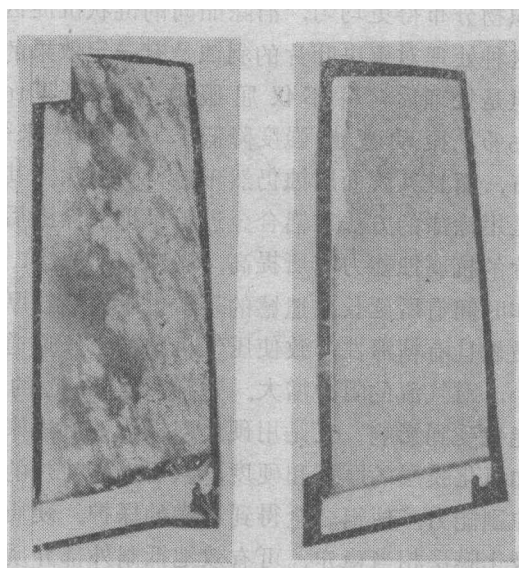
压气机铝合金叶片是采用 LY2 材料制造的。这种材料的机械性能较好，但是其耐腐蚀性很差。原型机铝合金叶片是以铬酸阳极化膜防护的。这种膜层较薄，在工作过程中受强气流的冲刷极易遭到破坏，于是叶片很快地产生剥蚀（晶间腐蚀），以至折断。对于在海洋大气条件下使用的发动机来说，叶片的腐蚀尤为严重。因此，发动机不得不提前返修和更换零部件。

从压气机的工作要求来说，其零部件应具有光滑度高、抗冲刷性好、耐腐蚀性强的表面。考虑到这些综合性能，结合普通硬质阳极化后铝合金疲劳强度降低的特性，我们对 LY2 铝合金叶片的硬质阳极化开展了实验和应用，并且收到了较为理想的结果。

本文主要阐述压气机铝合金叶片的剥蚀以及用硬质阳极化的方法加以防护的问题。

## 一、铝合金叶片的腐蚀

众所周知，所谓腐蚀就是金属由于受外部介质的化学作用或电化学作用而引起的一种破坏。LY2 铝合金叶片的腐蚀也是如此，是在工作过程中受大气中有害介质的浸蚀而形成的。从腐蚀形式来说，它是属于局部腐蚀，是从表面开始，出现点状腐蚀，继而沿着平行于表面的晶界发展，产生灰白色的腐蚀粉末，使金属由表面一层一层分开，鼓包，最后一片一片地剥落下来，使零件遭受严重的破坏。这种腐蚀被称作剥蚀。实际上它是一种晶间腐蚀。叶片的剥蚀如图 1 所示。



a. 铬酸阳极化的 b. 涂漆的

图 1 铝合金叶片的剥蚀形态

LY2 铝合金叶片的剥蚀是有其外因和内因的。从外因来说，与所受的外部腐蚀介质的作用和所受的应力有关。叶片工作时除承受较大的振动应力外，还受干燥和潮湿大气或海洋大气的作用。大气中的水蒸气沉积在金属表面上形成较薄的水膜，一部分水发生电离，产生氢离子，和空气中的氧原子夺去铝的电子，游离的铝离子跟水或氧原子结合生成一种氧化物或氢氧化物，形成腐蚀。从内因来说，合金的腐蚀是与其化学成分、晶粒形状、晶粒相位和沉淀物分布情况有关。LY2 铝合金含铜量较高，为 2.6~3.2%，其析出物  $\text{CuAl}_2$  沉积在晶间。这种析出相是不稳定的。当多相铝合金表

面出现腐蚀时表面层  $Al_2O_3$  与晶间沉积物  $CuAl_2$  形成一组微电池。这里  $Al_2O_3$  的正电位值相当显著地大于  $CuAl_2$ ，成为阴极。在大阴极—小阳极微电池中由于阳极电流密度很大，加速了晶间腐蚀的进行。如果发动机在潮湿大气和海洋大气中工作，LY2铝合金叶片的晶间腐蚀就更加迅速，更加剧烈。

为了提高LY2铝合金叶片的抗蚀能力，近些年来，一般采用下列三种方法。一是用热处理（过时效）的方法来改变合金的组织，使沉积物分布得更均匀，消除晶间的链状沉淀区。这种处理对解决叶片的剥蚀是有一定效果的，但是处理后材料不仅屈服强度降低了10~15%，振动疲劳强度降低了1公斤/毫米<sup>2</sup>左右，而且其表面腐蚀仍然不能得到消除。其次是用涂漆的方法对铝合金进行保护。涂漆后叶片的抗腐蚀能力有所提高，剥蚀有所减缓，工作时间有所延长。遗憾的是，由于漆层较厚，质软且有粘滞性，致使压气机中的空气通道减小，对气流的阻力增大。这样，发动机的性能也受到影响。三是用硬质阳极化的方法来增加氧化膜层的厚度和硬度，从而提高叶片的抗冲刷能力，使铝合金得到可靠的保护。硬质阳极化膜层相当稳定，可有效地抵制外部介质的浸蚀，排除引起剥蚀的外部因素。但是在氧化膜层较厚时可降低变形铝合金的疲劳强度，因此硬质阳极化工艺在受力的零部件上的应用便受到了一定的限制。如果硬质阳极化时选择工艺方法适宜，材料疲劳强度的降低也是可以得到补偿的。

## 二、防护膜层性能的试验

为了测试各种防护膜层的性能选取了压气机第二级铝合金叶片作为试件，并按下列五种方法进行处理：①铬酸阳极化。试件于30~40克/升铬酸电解液中在35℃的温度下以0.3~1安/分米<sup>2</sup>的电流密度处理60分钟。膜层厚度4微米；②试件喷丸和铬酸阳极化后喷涂环氧磁漆；③硫酸硬质阳极化。试件喷丸后于240

~280克/升硫酸电解液中在9℃的温度下以3安/分米<sup>2</sup>的电流密度处理60分钟。膜层厚度45微米；硬度HV=300公斤/毫米<sup>2</sup>；④试件不经喷丸而进行混合酸硬质阳极化。这种阳极化是在含草酸甘油的硫酸电解液中采用不对称整流电流进行的。工艺参数：溶液温度8℃，电流密度3安/分米<sup>2</sup>，电流正负值之比8:1，处理时间40分。膜层厚度30微米，硬度HV=370公斤/毫米<sup>2</sup>；⑤试件喷丸后按第四种方法进行混合酸硬质阳极化。

经过上述不同方法处理的试件分别进行振动疲劳试验、腐蚀试验和冲刷试验。

### 1. 振动疲劳试验

采用等振幅试验法在脉冲气体激振试验器上进行振动疲劳试验。选取叶片振幅23毫米（全振幅）作为各组对比试验的统一参数，以经受振动循环次数N的大小作为叶片抗振动疲劳性能的对比参数。试验结果列于表1。

表1 试件的振动疲劳试验结果

处 理 方 法	表面残余应力 公斤/毫米 <sup>2</sup>	频率 赫	平均循环 次数N × 10 <sup>5</sup>
铬酸阳极化	-16.8*	257	2.49
涂漆	—	261	5.36
混合酸硬质阳极化	-7.2	256	0.68
喷丸后混合酸硬质阳极化	-28.8	257	2.26

\* 数字前的符号“-”表示压应力。

从表1可看出，经喷丸和铬酸阳极化后涂漆的试件抗疲劳性能最高。喷丸后进行混合酸硬质阳极化处理的试件抗疲劳性能比未经喷丸的高很多，并且接近于铬酸阳极化处理的。由此看来，硬质阳极化会使变形铝合金的疲劳强度降低，而喷丸和涂漆可使其提高。对疲劳强度起不利影响是硬质阳极化工艺的一大缺点。在硬质阳极化时如果采用喷丸和不对称整流法，并将膜层厚度和硬度控制在最合适的范围，这种不利的影响也可减小到最低程度。

### 2. 腐蚀试验

经过不同方法处理的试件采用盐雾法和浸

泡法进行腐蚀试验。

(1) 盐雾法试验 将试件放于盐雾试验箱中, 使其与水平面成  $45^\circ$  角。试验条件: 温度  $45 \pm 1^\circ\text{C}$ , 相对湿度大于 95%, 每小时喷雾 15 分, 停喷 45 分。喷雾溶液为人造酸性醋酸海水, 其成分(克/升):  $\text{NaCl}$ —24.53;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

—4.09;  $\text{KCl}$ —0.695;  $\text{KBr}$ —0.101;  $\text{SrCl}_2$ —0.025;  $\text{MgCl}_2$ —5.20;  $\text{CaCl}_2$ —1.16;  $\text{NaHCO}_3$ —0.201;  $\text{H}_3\text{BO}_3$ —0.027;  $\text{NaF}$ —0.003。用冰醋酸将溶液调至  $\text{pH}$  2.5~3。盐雾腐蚀试验结果列于表 2。

表 2 试件的盐雾腐蚀试验结果

处 理 方 法	腐 蚀 开 始		腐 蚀 严 重	
	经过时间 小 时	表面状况	经过时间 小 时	表 面 状 况
铬酸阳极化	90	微小腐蚀点	300	呈片状的严重腐蚀, 面积超过 50%
涂漆	1300	微小腐蚀点	超过 1600	
硫酸硬质阳极化	90	微小腐蚀点	800	呈片状的大腐蚀点, 有堆积状的腐蚀产物
混合酸硬质阳极化	500	轻微腐蚀点	1000	呈片状的严重腐蚀, 面积占 50%, 有堆积状的腐蚀产物
喷丸后混合酸硬质阳极化	300	小腐蚀点	1000	呈片状的严重腐蚀, 面积占 50%, 有堆积状的腐蚀产物

(2) 浸泡法试验 试件浸入与盐雾腐蚀试验相同的醋酸海水中, 并每升加有 5 毫升  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 10 克  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的试液中进行试验。溶液温度为室温。试件每天早晨浸入试液, 经过 10 小时后取出, 用蒸馏水冲洗, 然后在空气中放置 14 小时。腐蚀时间以浸泡的总时间计算。试件浸泡腐蚀试验后的表面状况如图 2~4 所示。

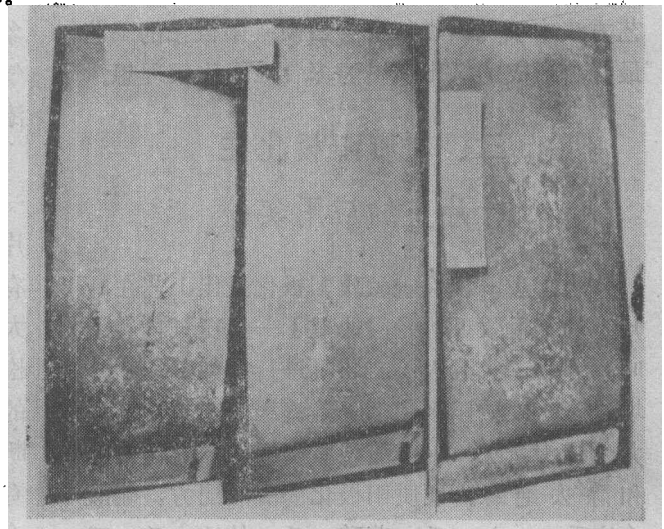
从表 2 和图 2~4 可看出, 在五种处理方法中铬酸阳极化试件的耐腐蚀性能最低, 盐雾试验时经 90 小时开始腐蚀, 300 小时严重腐蚀; 浸泡试验时经 16 小时 30 分便产生严重的片状腐蚀。可是用其余四种方法处理的试件耐腐蚀性能都很高。



图 2 铬酸阳极化处理的试件, 浸泡 16 小时 30 分



图 3 涂漆的试件, 浸泡 100 小时



a. 混合酸法 (喷丸的)      b. 混合酸法 (未喷丸)      c. 硫酸法 (喷丸的)

图 4 硬质阳极化处理的试件, 浸泡 100 小时

### 3. 冲刷试验

为了测定防护膜层抗气流冲刷能力,采用了砂流喷射试验法。这时使砂流垂直作用于试件表面上,对防护膜层进行冲刷,直至露出基体金属(开始导电即为终点)。试验用砂的粒度为40目,压力为2公斤/毫米<sup>2</sup>,砂咀距离为45毫米。冲刷试验结果见表3。

表3 试件的抗冲刷性能

处 理 方 法	膜层抗冲刷时间, 秒
铬酸阳极化	10
涂漆	43
硫酸硬质阳极化	160
混合酸硬质阳极化	203
喷丸后混合酸硬质阳极化	210

试验结果表明,铬酸阳极化膜层由于很薄,其抗冲刷能力极低,仅能承受10秒钟的冲刷。涂漆的试件由于漆膜质软,抗冲刷能力也不高。而按不同方法硬质阳极化处理的三组试件,由于氧化膜层具有足够的厚度和硬度,所以其抗冲刷能力都相当高。这一点对提高铝合金叶片的工作寿命是极其重要的。

从对以上几种试验所取得结果的综合分析,可得出这样的结论,即在所试验的几种工艺方法中喷丸后进行混合酸硬质阳极化的工艺最好,形成的氧化膜层的综合性能比较理想。

## 三、硬质阳极化在叶片上的应用实验

为了进一步检查硬质阳极化最佳工艺在叶片上的实用效果,专门处理了一批压气机转子叶片(第二~五级),装机进行台架试车和外场试飞。硬质阳极化的工艺流程是:抛光、喷丸、棒头绝缘、混合酸硬质阳极化、封孔处理和除去绝缘。硬质阳极化的溶液配方:硫酸(比重1.84)20%,草酸2%,甘油5%;工艺参数:电流密度2.5~3安/分米<sup>2</sup>,电流正负值之比8:1,溶液温度8~12℃,处理时间

30分。在阳极化过程中用压缩空气不断搅拌电解液。叶片在硬质阳极化后用重铬酸钾溶液进行封孔处理。这时所获得的阳极化膜层是比较均匀,比较致密的(见图5),膜层厚度25~35微米,硬度HV330~400公斤/毫米<sup>2</sup>。硬质阳极化后选取第三级叶片进行振动疲劳试验,测得疲劳极限为14公斤/毫米<sup>2</sup>(循环次数 $N=2 \times 10^7$ ),与铬酸阳极化处理的相同。

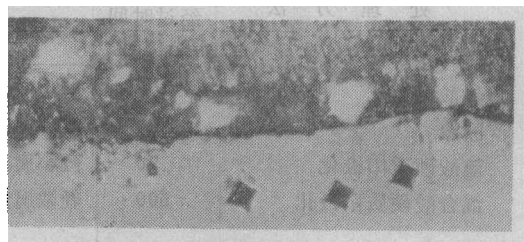


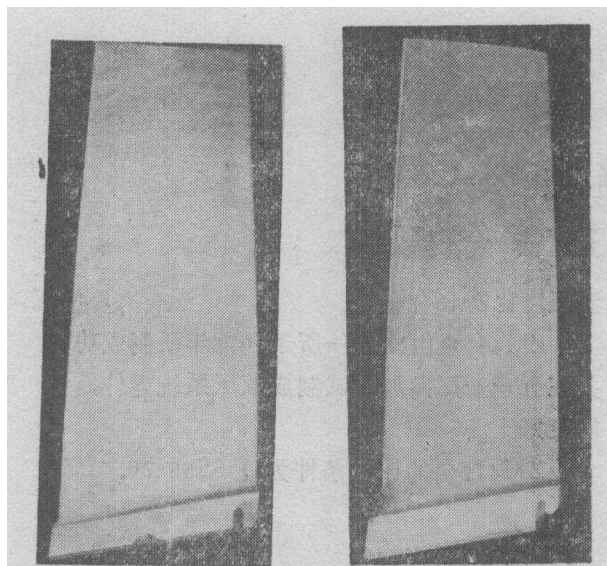
图5 硬质阳极化膜层 ×500

### 1. 台架试车

按上述工艺条件处理的第二~五级铝合金叶片,选取半台份,装于长期试车的发动机上进行台架试车。经过150小时后分解检查,所有的硬质阳极化叶片都是完好的,没有产生裂纹、折断。经过超声波仪器检查,没有发现伤波讯号。叶片上的氧化膜层仍然保持光滑、完整,没有出现鼓包、分层、剥落、腐蚀等现象。可是同台发动机上另外半台份涂漆叶片受气流冲刷已有部分叶片(第五级)的叶尖失去漆层。

### 2. 外场试飞

将经过混合酸硬质阳极化处理的铝合金叶片装于小批发动机上,在不同的地区(其中有沿海地区)进行试飞。经过三年多的时间,大部分发动机的工作时间达到了200小时。分解检查结果表明,所有硬质阳极化叶片都是完好的,经受住了长期考验,没有产生裂纹、折断。叶片上的氧化膜仍然保持光滑、完整,没有出现腐蚀、冲蚀、鼓包、分层、剥落等缺陷(只在个别叶片上出现轻微的腐蚀点)。硬质阳极化叶片工作前后表面状况的对比如图6所示。



a. 经过200小时工作的      b. 未工作的

图 6 硬质阳极化叶片工作前后的外观

硬质阳极化处理的第三级叶片工作 200 小时 51 分后进行了振动疲劳试验，测得剩余疲劳强度为 13 公斤/毫米<sup>2</sup>，其曲线示于图 7。第三级叶片长期工作后疲劳强度的降低并不显著。

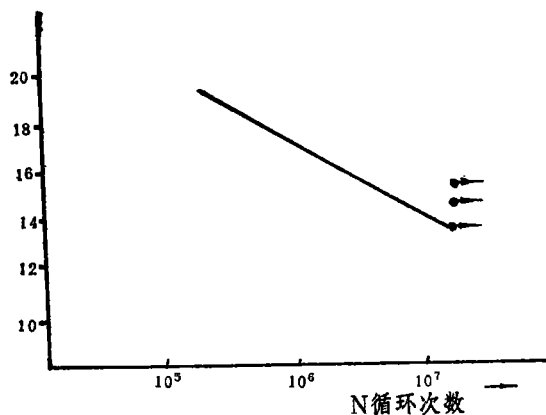


图 7 工作200小时51分后的第三级叶片的剩余疲劳极限曲线

从台架试车和外场试飞的结果来看，经过硬质阳极化处理的铝合金叶片经受住了严格条件的实际考验，收到了良好的效果。

## 四、结 语

1. LY2 铝合金叶片产生剥蚀的原因，主要是合金中存在不稳定的晶间析出相，在外部介

质的浸蚀作用下，在晶间产生强烈的电化学腐蚀。这种腐蚀利用防腐性能好，抗冲刷性能高的膜层是完全可以解决的。

2. 试验结果表明，在所试验的几种工艺中最佳的是喷丸后在含草酸、甘油的硫酸电解液中硬质阳极化。采用这种处理方法时在 LY2 铝合金上可形成综合性能比较理想的氧化膜层，它可有效地从外部防止叶片产生剥蚀。

3. 用最佳工艺条件处理的铝合金叶片经受住了 150 小时台架试车和 200 小时外场试飞的长期考验，结果是令人满意的。这种工艺用于涡喷型发动机压气机铝合金叶片的防护是可行的。

4. 硬质阳极化所生成的氧化膜层较厚，较硬。因此，铝合金叶片在硬质阳极化处理时其榫头和螺纹部分必须绝缘。

注：本文中的部分试验数据是六二一所提供的。

~~☆~☆~☆~☆~☆~☆~

(上接第40页) 质耐火材料的特点和良好的综合性能，是我国目前最优良的精铸壳型耐火材料之一。用铝矾土合成料代替石英和刚玉制壳具有重大的技术效果和经济价值。

2) 铝矾土合成料可用于无余量精铸零件和定向凝固叶片等精密铸件的生产，也可用于一般熔模铸造，有利于提高铸件质量和尺寸精度。

3) 铝矾土合成料壳型线膨胀率比刚玉和石英为小，在设计模具时应予考虑。

## 参 考 文 献

- [1] 铝矾土混合料用于熔模壳型试验总结，三三一厂，1975年。
- [2] 熔模铸造壳型材料及铸件表面质量的控制，六二一所，1979年。
- [3] 铝矾土在定向凝固高温壳型上的应用，六二一所，1976年。
- [4] 合成莫来石制造现状，(日)前田义行。