

时效制度对LY2合金压气机叶片剥蚀敏感性的影响

国营黎明机械公司

谢严鑫 周景华

一、前言

由LY2高温铝合金挤压棒材采用锻压方法生产的压气机叶片，在我国南方沿海地区使用过程中经常出现剥蚀而失效，往往达不到规定的使用寿命，有时只有几个月，就要提前返厂更换铝叶片，并曾两次由于严重剥蚀，造成转子铝叶片在空中折断，成为压气机叶片生产中的一大质量关键。

剥蚀只出现于叶身，初期表现为鼓泡，鼓泡到一定程度，表面阳极化膜被胀破，于是腐蚀介质迅速沿胀破处渗入金属内部，形成层（片）状剥落，见图1a。从鼓泡剥蚀处取样进行金相检验，可以看出铝叶片剥蚀实质上是一种晶界腐蚀，见图1b。

为解决压气机铝合金叶片的剥蚀故障，空军和部属各有关单位都进行了大量试验工作。

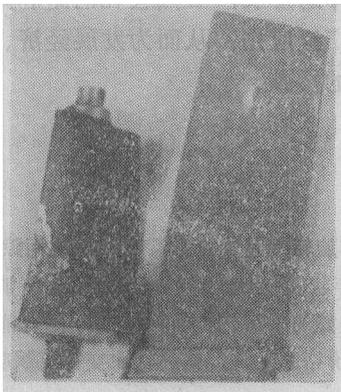
本文介绍了通过调整LY2合金时效制度，消除剥蚀敏感性，使LY2压气机叶片的使用寿命成倍增长的试验结果。

二、试验方法

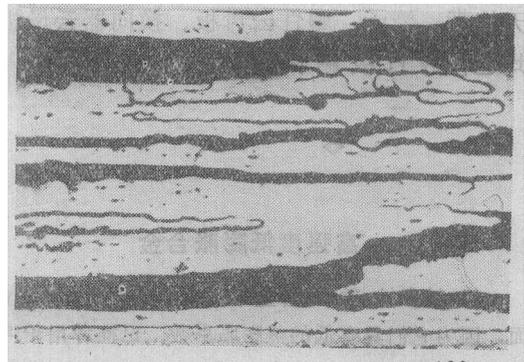
压气机铝合金叶片技术条件对LY2合金化学成分和经500°C室温水淬，170°C16小时时效后力学性能的要求，列于表1中。

表1 LY2合金压气机叶片的化学成分和力学性能

化学成分，%			σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5 %	270°C 8公斤/毫米 ² 持久寿命 小时
Cu	Mg	Mn	公斤/毫米 ²			
2.6~ 3.2	2.0~ 2.4	0.45~ 0.7	≥ 40	≥ 28	≥ 10	≥ 50



a. 叶片表面出现鼓泡(右)、剥蚀(左)的外貌



b. 叶片剥蚀处的显微组织

图1 LY2压气机叶片在南方沿海地区工作一个寿命后的外貌及显微组织

采用喷雾法和浸泡法进行剥蚀试验。喷雾法 (Romans) 采用 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 喷雾 15 分钟 = 停喷 45 分钟间断喷雾循环, 昼夜工作, 试验周期 7 天。

浸泡法是我们自行研制的, 浸泡溶液的成分如下:

ASTMD1141—52 人造海水 (或 3% NaCl)
 NH_4NO_3 1%
 H_2O_2 (30%) 10 毫升/升
 HAC (或 HNO_3) 调至 $\text{pH}=3.0$

试验条件: 室温连续浸泡 3 天

上述成分为酸性人造海水 (简称 AAP 人造海水)。从 1973 年至今长期实践证明, 在室温 AAP 人造海水中连续浸泡出现的剥蚀形貌, 与我国南方沿海地区实际服役环境下出现的剥蚀形貌基本一致, 并且在室温连续浸泡 3 天不出现剥蚀或只出现轻微剥蚀的铝叶片, 在我国南方沿海地区长期服役, 至今没有一件出现剥蚀。

棒材的弯曲疲劳试验在 HY 型疲劳试验机上进行。叶片的振动疲劳极限在激振式磁力振动台上测定, 考虑到离心力的影响, 所测数据应再按古德曼全疲劳图进行修正。

采用在室温 AAP 人造海水中连续浸泡 3 天后试样的 σ_b 值对于未经浸泡试样的 σ_b 值之比, 计算剩余强度极限百分率 ($\sigma_b\%$), 作为评价合金晶界腐蚀敏感性的定量指标。

金相试样在浸蚀前和浸蚀后都应进行观察, 采用 Keller 试剂 (HF 1.0 毫升, HCl 1.5 毫升, HNO_3 2.5 毫升, H_2O 95 毫升) 浸蚀, 浸蚀时间 30~60 秒。

三、试验结果

1. 对晶界腐蚀敏感性的影响

试验对比了下列时效制度对 LY2 合金晶界腐蚀敏感性的影响: 1) 自然时效 221 天; 2) 120°C 8 小时; 3) 170°C 16 小时; 4) $185\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时; 5) 120°C 8 小时 + $185\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时。

自然时效时间所以选取长达 221 天, 是因为我们事先曾对自然时效 30 天的 LY2 合金压气机

叶片进行过剥蚀试验, 结果不出现剥蚀, 金相检验也没有发现晶界腐蚀; 而自然时效 125 天的 LY2 叶片则出现剥蚀。金相检验也出现晶界腐蚀。

晶界腐蚀敏感性试验结果, 绘于图 2 中。

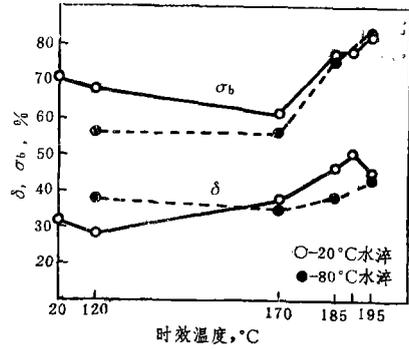


图 2 时效制度对 LY2 晶界腐蚀敏感性的影响
 时效保持时间: 20°C 221 天, 120°C 8 小时, 170°C 16 小时, $185\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时。

由图可见:

(1) LY2 合金采用 170°C 16 小时时效, 对应于晶界腐蚀敏感性最大值, 这时 $\sigma_b\%$ 只有 61%; $185\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时时效, $\sigma_b\%$ 上升到 78% 以上, 这时晶界腐蚀敏感性大大减轻或没有晶界腐蚀敏感性, 叶片也都不出现剥蚀。

(2) 提高淬火水温使 LY2 合金晶界腐蚀敏感性增加, 但随时效温度升高, 时间延长, 提高淬火水温对 LY2 合金晶界腐蚀敏感性的不利影响会逐渐减弱。

(3) $185\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时时效的 LY2 叶片不出现剥蚀, 但 120°C 8 小时 + 185°C 24 小时时效的 LY2 叶片却出现剥蚀, 而 120°C 8 小时 + $190\sim 195^\circ\text{C}$ 24 小时时效的 LY2 叶片不出现剥蚀。试验还证明, 两阶段时效并不能提高 LY2 合金的力学性能, 所以图 2 中没有绘入两阶段时效试验数据。

2. 对力学性能和剥蚀敏感性的影响

$190 \pm 5^\circ\text{C}$ 时效 8~48 小时后 LY2 合金力学性能和叶片剥蚀敏感性变化绘于图 3 和 4 中。随时效时间延长, 室温和高温力学性能虽然不断下降, 但即使 190°C 48 小时时效, 仍高于叶

表 2 190°C时效LY2合金持久断裂寿命

时效时间 小时	试验温度 °C	恒加应力 公斤/毫米 ²	持久断裂时间	
			小时 : 分	小时 : 分
24	200	20	46 : 01	48 : 40
48	200	20	28 : 30	38 : 25
48	200	18	88 : 10	89 : 50
48	270	8	98 : 10	105 : 50

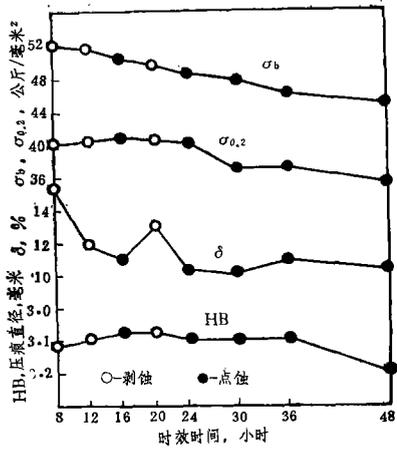


图 3 190°C时效保持时间对LY2 φ16毫米挤压棒室温性能的影响

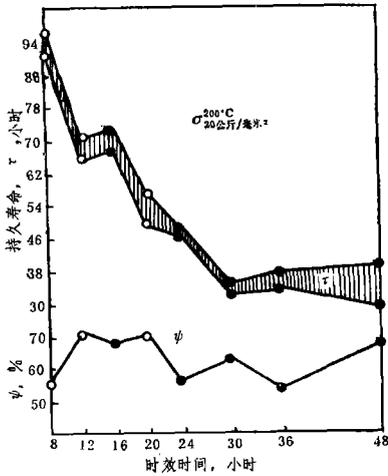


图 4 190°C时效保持时间对LY2 φ16毫米挤压棒持久寿命的影响

片技术条件要求的水平。

为了在较短时间内比较出结果，持久试验采用200°C20公斤/毫米²测定断裂时间。190°C48小时时效的LY2合金在不同试验条件下的持久断裂时间列于表2中。

采用190°C24小时时效的LY2模锻叶片从1975年投入批生产以来，没有出现由于室温或高温力学性能不合格而报废的时效炉批。

3. 对疲劳强度的影响

压气机铝叶片失效的主要形式是剥蚀，断裂的主要形式是疲劳，所以抗剥蚀能力和叶片疲劳强度是表征其质量的两项最重要指标。

从LY2φ20毫米挤压棒材取样，测得170°C16小时时效，HB，d=3.2毫米；190°C24小时时效，HB，d=3.1毫米。疲劳曲线如图5所示。由图看出，LY2合金采用190°C24小时时效，由于σ_b比170°C16小时时效约低10%，大应力低循环疲劳强度低于170°C16小时时效，但两者疲劳极限都是18公斤/毫米²。

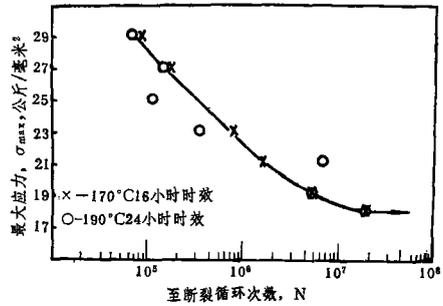


图 5 LY2 φ20毫米挤压棒旋转弯曲疲劳曲线

190°C24小时时效的LY2模锻叶片，采用两种方案进行表面处理：一种是铬酸阳极化，膜厚3~5μ，再涂漆；另一种是混酸阳极化，膜厚30μ，不涂漆。两种叶片各取50%分装在四台压气机上，发往海南岛地区试用一年多，服役满200小时后，返厂分解检验，没有一件叶片出现鼓泡和剥蚀。

以上三级转子叶片的剩余疲劳极限和剩余疲劳强度系数K列于表3中。从表中数据看出190°C24小时时效，铬酸阳极化3~5μ，再涂漆

表 3 LY2三级转子叶片的剩余疲劳强度

时效制度	表面处理和阳极化膜厚度	工作寿命, 小时	表面状态	σ_{-1} 公斤/毫米 ²	K*, %
170°C16小时	铬酸阳极化3~5 μ , 涂7011漆	0	新叶片	16.5	—
170°C16小时	铬酸阳极化3~5 μ , 涂7011漆	200	有剥蚀	9.0	54.5
190°C24小时	铬酸阳极化3~5 μ , 涂7011漆	200	无剥蚀	15.5	93.9
190°C24小时	混酸阳极化30 μ , 不涂漆	200	无剥蚀	9.0	54.5

* 剩余疲劳强度系数 $K = \frac{\text{工作过叶片的振动疲劳极限}}{\text{新叶片的振动疲劳极限}} \times 100\%$

的LY2模锻叶片K=93.9, 是目前国内生产的各类叶片中K值最高的叶片, 若将阳极化膜厚度增加至30 μ , 则使K值下降至54.5。

4. 补充时效的影响

当LY2叶片经170°C16小时时效后, 再在170°C时效48小时以上, 进行剥蚀试验时就不再出现剥蚀。如果采用190°C补充时效, 则只要10~12小时就不再出现剥蚀, 补充时效后LY2合金的力学性能列于表4中。

从表4数据看出, 170°C16小时+190°C12小时时效的LY2合金, 其室温和高温力学性能与淬火后直接进行190°C24小时时效相同。我们建议对以往装机的170°C16小时时效的LY2叶片, 在翻修时进行一次190°C12小时补充时效处理, 以消除剥蚀敏感性, 延长LY2叶片的使用寿命。这一建议已被一些有关单位采用。

四、 讨 论

1. 剥蚀产生原因

从LY2合金挤压棒材取样作剥蚀试验, 多数出现不均匀剥蚀, 粗晶环区域不剥蚀, 条带状晶粒结构区域才出现剥蚀。模锻叶片无论是实际服役中出现的还是剥蚀试验时出现的剥蚀, 一般都只出现于叶身, 叶片锁根无剥蚀或只出现轻微剥蚀。比较叶身和叶片锁根显微组织可以看出, 叶身晶粒结构呈层片状, 每个晶粒层片的厚度一般不超过0.1毫米(图1b), 而其长和宽有时可达几十毫米, 用肉眼即可看到。叶片锁根晶粒结构则不呈层片状。

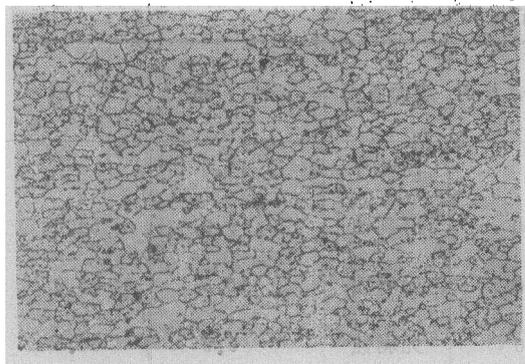
采用6.5吨米高能高速锤挤压成型的LY2合金叶片试验件, 其叶身与锁根晶粒结构均不呈层片状(图6), 淬火后采用170°C16小时时效作剥蚀试验, 尽管出现严重晶界腐蚀, 但不出现剥蚀。

以上对比表明, 晶粒结构与剥蚀敏感性有明显的对应关系, 层片状晶粒结构是铝叶片产生剥蚀的一个必要条件。

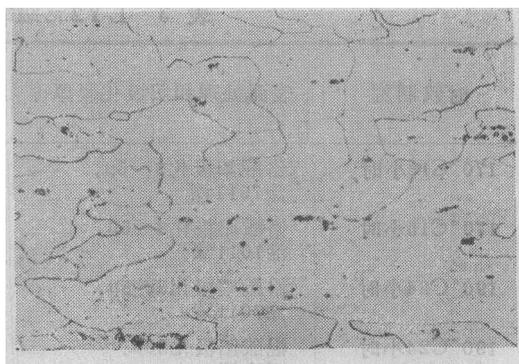
根据对故障叶片的金相检验, 发现剥蚀的

表 4 补充时效后LY2合金的力学性能

时效制度	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ %	200°C 18公斤/毫米 ² 持久断裂时间 小时:分
	公斤/毫米 ²			
170°C16小时+190°C12小时	47.0	38.5	10.0	118:25
	48.5	39.5	12.0	125:35
170°C16小时+190°C24小时	44.5	35.5	11.0	97:00
	45.5	37.5	11.5	112:00
190°C24小时	48.0	39.5	10.0	118:05
	48.5	40.0	10.5	136:10



a. 叶身 (沿挤压方向) ×200



b. 锁根 ×200

图 6 高速锤250°C挤压的LY2叶片显微组织

实质是晶界腐蚀。所以铝叶片剥蚀产生原因，可以归结为是一种层片状晶粒结构条件下的晶界腐蚀。

那么有没有必要把以上形成剥蚀的两个因素全部排除掉呢？

我们比较了LY2合金两种晶粒结构平板模拟试样的力学性能，一种试样采用曲轴压力机模压，其晶粒结构呈层片状，另一种试样采用高能高速锤挤压，其晶粒结构与图6a相同，不呈层片状。两种试样厚度均为4毫米，淬火后均采用190°C24小时时效，剥蚀试验都未出现剥蚀。力学性能试验结果列于表5。

表 5 LY2合金两种晶粒结构试样的力学性能

试样的 成型工艺	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5 %	200°C 20公斤/毫米 ² 持久断裂时间 小时:分
	公斤/毫米 ²			
高能高速 锤挤压	59.5	38.7	12	15:06
曲轴压力 机模压	50.0	44.2	10	43:15

从表5中可见，模压试样的层片状晶粒结构，由于绝大多数晶界都与工作应力方向平行，只有少数晶界与工作应力方向垂直，后者又被大量平行晶界所分割，并不连成一线，这种晶粒结构的持久寿命，比高能高速锤挤压试样的细晶粒结构高得多。

2. 过时效和剥蚀敏感性的消失

出现和不出现剥蚀的LY2叶片显微组织是有明显区别的。从图7可以看到：

(1) 出现剥蚀的显微组织，基体是亮的，晶界清晰呈黑色，即试样表面在金相浸蚀剂作用下，优先腐蚀晶界，晶内只受轻微腐蚀(图7a)。

(2) 不出现剥蚀的显微组织，基体是黑的，晶界不清晰(图7b)或晶界区反而呈白色。190°C24小时时效的叶片，在白色晶界区中还能看到黑色晶界线(图7c)，195°C24小时时效的叶片，在白色晶界区中甚至找不到黑色的晶界线(图7d)，即试样表面在金相浸蚀剂作用下，不是优先腐蚀晶界，而是均匀全面腐蚀，或甚至优先腐蚀晶内。

以上情况与图2~4是一致的。LY2合金采用185~195°C24小时时效剥蚀敏感性消失的原因，显然是由于晶界腐蚀敏感性消失或大大减轻，从而出现了腐蚀类型的转化，由优先腐蚀晶界过渡到一般均匀腐蚀。

我们把LY2合金在190°C24小时时效称为过时效，这只是一种习惯说法，与170°C16小时时效相比，实际硬度与屈服极限反而都有所升高。我们推测这时晶内GP(S)区并没有消失，也没有发生S'→S转变，但沿晶析出的S'发生集聚，达到或接近如Kent等所提出的每平方微米晶界面析出相数小于25个，从而晶

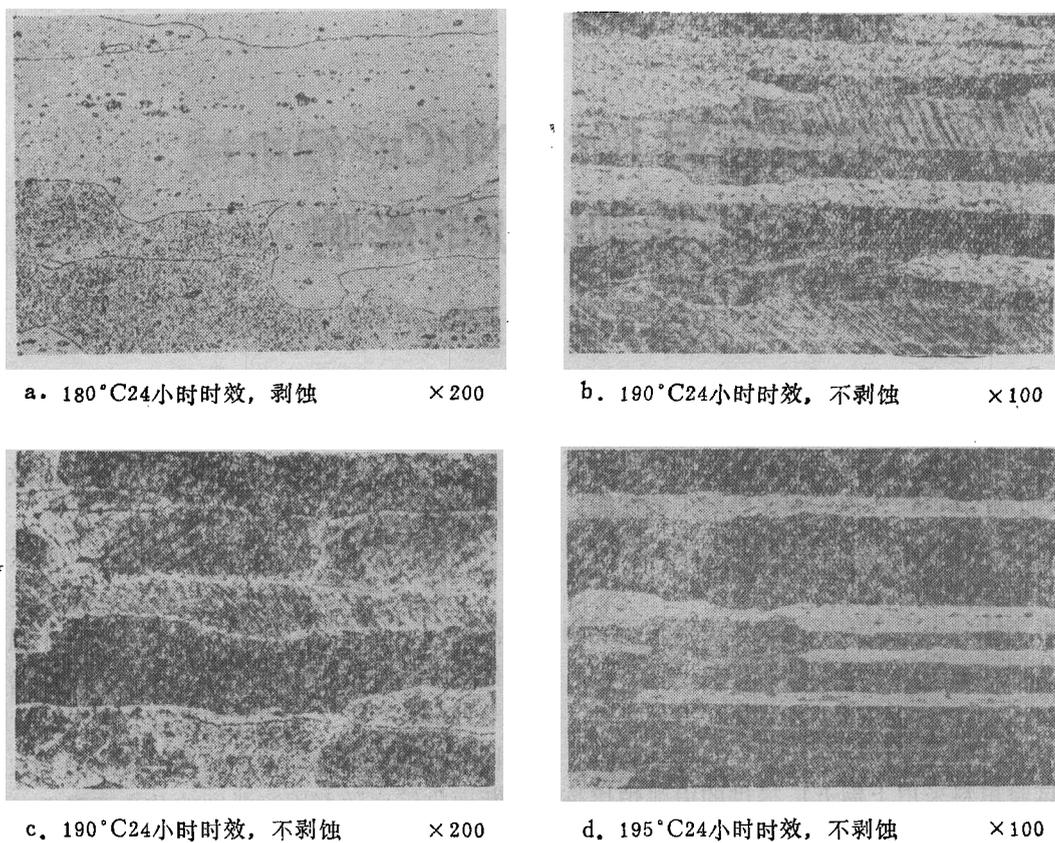


图 7 时效制度对LY2模锻叶片显微组织的影响

界腐蚀倾向消失或大大减轻。但试验中还发现,过时效并不能使LD6合金晶界腐蚀倾向消失或减轻,所以我们认为Kent等提出的只要沿晶析出相数 $N < 25$ 个/ μ^2 ,铝合金就没有晶界腐蚀倾向,而不问析出相电化学性质如何的说法是不全面的。关于铝合金晶界腐蚀机制,还有待采用透射电镜和显微电化学方法作进一步研究。

五、结 论

1. 铝叶片剥蚀是一种层片状晶粒结构条件下的晶界腐蚀,只有当这两个条件同时存在时,铝叶片才会出现剥蚀。

2. 层片状晶粒结构是模锻铝叶片的特点,这种晶粒结构虽然是铝叶片产生剥蚀的原因之一,但对于改善叶片的高温力学性能却是非

常有益的。

3. 将LY2模锻叶片的时效制度由原来170°C16小时,改为190°C24小时,铝叶片剥蚀敏感性消失。原因是由于合金晶界腐蚀倾向消失或大大减轻,从而出现了腐蚀类型转化,由晶界腐蚀过渡到一般均匀腐蚀。

4. 采用 $190 \pm 5^\circ\text{C}$ 24小时时效、喷丸、铬酸阳极化和涂漆的LY2模锻叶片,从1975年投入批生产以来,质量稳定,在我国南方沿海地区大批试用,情况良好,至今尚未发现一件叶片鼓泡、剥蚀,显著提高了铝叶片的使用寿命。

(参考文献从略)

(本试验工作得到六二一所涂柏林、杨景成等同志的大力协助,并多次提出有益的建议,特此致谢。——作者)