

# 高温合金铸件显微组织分析中 值得注意的问题

郑运荣 蔡玉林

**编者按：**在一次发电用地面涡轮事故发生后，该单位走访了一些燃气机的生产和使用部门。从一级涡轮叶片断裂区的外观和喷出的残片看来，怀疑过热的可能性大，于是委托六二一所对一、二级涡轮叶片作过热检查。作者按罗、罗公司提出的发动机过热检查的标准程序，以 $\gamma'$ 在不同温度下的稳定性作为评定依据进行了过热检查。结果也有许多现象类似于过热。作者又对没有使用过的叶片的不同部位进行了无损金相检查，发现大型铸件由于截面尺寸效应对组织影响的程度比想象的要大得多。通过进一步试验，确认事故叶片组织的变化不是超温引起的。铸造叶片存在偏析，但在特定条件下这种差别有多大，这就要求细心观察，多做试验，不断总结。从这一角度出发，该文所提出的问题有值得借鉴的地方。

## 一、试验材料及方法

试验用材料是IN-738和U-500铸造高温合金大型涡轮叶片，其分析成分如表1。

所有涡轮叶片按使用状态要求进行标准的热处理。对IN-738叶片热处理范围为：1120℃/2小时，空冷+843℃/24小时，空冷处理；对U-500叶片为1120℃/4小时，空冷+1080℃/

24小时，空冷+760℃/16小时空冷处理。

为研究两种合金中 $\gamma'$ 的固溶与析出，IN-738叶片在1000~1230℃；U-500在1000~1180℃各种温度下热处理，每种处理温度的间隔为20℃，保温30分钟。

原始状态和不同热处理状态下的试样用光学显微镜和透射电镜对 $\gamma'$ 相的形貌及分布状态进行观察。

表1 铸件的化学成分

合 金	化 学 成 分 (重 量 %)											
	Cr	W	Co	Mo	Al	Ti	Nb	Ta	C	B	Zr	Ni
IN-738	15.95	2.50	8.15	1.70	3.44	3.50	0.81	1.75	0.11	0.011	0.08	余
U-500	18.95	—	18.90	4.30	3.10	2.95	—	—	0.07	0.006	0.01	余

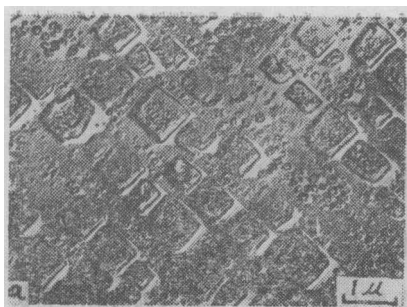
## 二、试验结果

### 1. 枝干区和枝晶间区 $\gamma'$ 稳定性的差异

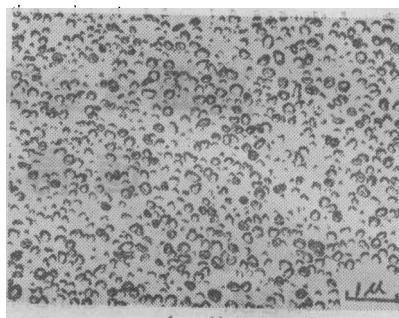
IN-738和U-500都是抗热腐蚀较好的铸造合金。前者的高温强度高于后者，而后的抗热腐蚀性优于前者。两种合金都主要以 $\gamma'$ 相强化。IN-738的 $\gamma'$ 总量约50%，U-500约35%

(体积)。在铸态下，枝晶干与枝晶间区的 $\gamma'$ ，大小有明显区别，枝干区的 $\gamma'$ 更细，而枝晶间区的更粗。经标准热处理后，不同区域的 $\gamma'$ 对温度的作用反应也不同。图1、2分别示出经标准热处理后涡轮叶片的显微组织。

由图1可以看出，IN-738叶片经标准热处理后的显微组织中枝晶间区B与枝干区A是不同的。在B区有两种尺寸的 $\gamma'$ ：大的立方

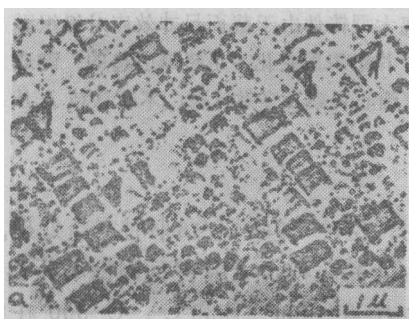


a. 枝晶间区B

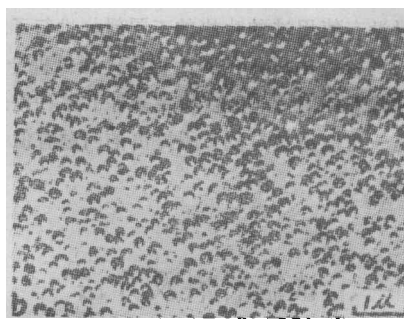


b. 枝晶干区A

图 1 IN-738涡轮叶片榫头中心的显微组织



a. 枝晶间区B



b. 枝晶干区A

图 2 U-500叶片榫头的显微组织

状 $\gamma'$ 的平均尺寸为0.58微米,在立方 $\gamma'$ 之间分布着球状 $\gamma'$ ,这种小 $\gamma'$ 尺寸变化很大(0.02~0.15微米);在A区只有一种平均大小约0.12微米的球状 $\gamma'$ 。出现这种组织是由于在1120℃热处理时对晶干区来说已达完全固溶处理温度,冷却时形成均匀的 $\gamma'$ 并在843℃时效处理时稍微长大(图1b),但对枝晶间区由于 $\gamma'$ 更加稳定,1120℃还未达完全固溶温度,所以除了小 $\gamma'$ 回溶并在冷却时析出细 $\gamma'$ 以外,大部分 $\gamma'$ 粗化成规则的方形(图1a)。

图2的U-500叶片经标准热处理后的显微组织中,B区有三种尺寸的 $\gamma'$ :立方形的 $\gamma'$ 平均大小为0.4微米,第二种 $\gamma'$ 是平均大小约0.12微米的球形 $\gamma'$ ,第三种是200~500 Å的极小球状 $\gamma'$ 。在A区则只有后两种尺寸和形态的 $\gamma'$ 。形成这种组织的原因是1080℃处理对枝干区已达 $\gamma'$ 完全固溶的温度,1120℃对枝晶间区的粗 $\gamma'$ 来说已达完全固溶温度,但在1080℃时析出

粗的立方状 $\gamma'$ ,在760℃时析出更细的 $\gamma'$ 。

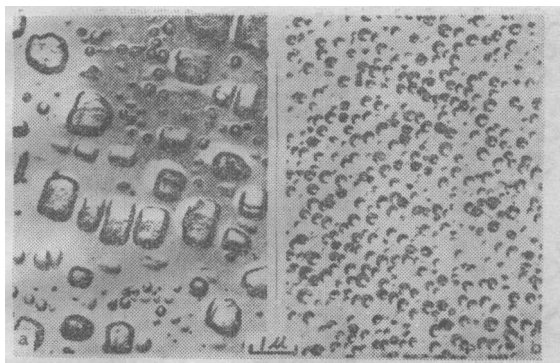
为了进一步搞清枝干区和枝晶干区 $\gamma'$ 的固溶温度,两种合金分别在不同温度下进行热处理,结果如下。

#### 1) IN-738合金

温度低于1000℃的短时保温对两种 $\gamma'$ 无明显影响。随着温度进一步的提高,B区的小 $\gamma'$ 开始回溶,聚集长大;A区的 $\gamma'$ 变化不明显。在1050℃时,B区的立方状 $\gamma'$ 有些变圆角,它们之间的小 $\gamma'$ 数量大大减少,尺寸明显增加。在此温度下A区的细 $\gamma'$ 也开始溶解并继续长大(图3)。

1100℃时,B区原来的 $\gamma'$ 完全固溶。A区的 $\gamma'$ 大部分固溶,少数聚集或大的 $\gamma'$ 。在试样冷却过程中,到处析出小的 $\gamma'$ (图4)。

1130℃时,枝晶干区A的 $\gamma'$ 几乎完全溶完,在此区域内,全部是冷却时析出的尺寸为300 Å左右的特细 $\gamma'$ 。枝晶间B区大 $\gamma'$ 由于回溶其尺



a 枝晶间区

b 枝晶干区

图 3 IN-738叶片经1050°C/30分钟，空冷处理

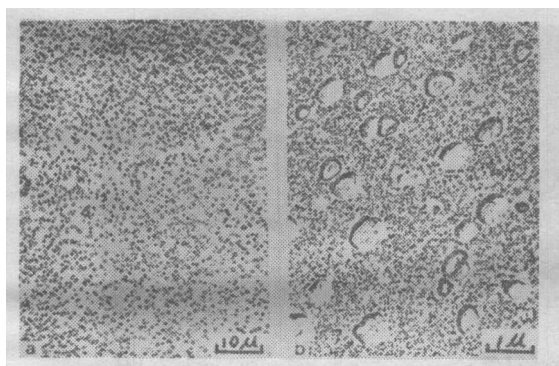


图 4 IN-738叶片经1100°C/30分钟，空冷处理

寸和数量均有所减小。

温度高于1130°C时，枝晶间区B的粗 $\gamma'$ 显著固溶。到1170°C时枝晶间区的粗 $\gamma'$ 尚未固溶完全。由于铸造偏析造成 $\gamma'$ 固溶区成分的不匀，很难在这样短的时间内消除，结果从枝晶干到

枝晶间很长的地方（几十微米的范围）重新析出的 $\gamma'$ 尺寸相差十分明显。枝晶干区A的 $\gamma'$ 约500 Å左右（图5c）。在A与B之间有一过渡区C（图5a），该区 $\gamma'$ 平均大小超过1000 Å（图5b）。可见固溶后重新析出的 $\gamma'$ 大小也受偏析的影响。

枝晶间区的粗 $\gamma'$ 到1200°C左右才全部固溶，但由于未充分均匀化，所以不同区域重新析出的 $\gamma'$ 大小仍有明显差别。

## 2) U-500合金

温度达1000°C时，无论枝晶干区或枝晶间区的第三种 $\gamma'$ 消失，第二种 $\gamma'$ 稍微回溶并聚集，第一种 $\gamma'$ 则不变。到1050°C时枝晶间区第二种 $\gamma'$ 数目大大减少，尺寸明显增大。枝晶干区的第二种 $\gamma'$ 的分布变得稀疏。这是第二种 $\gamma'$ 明显回溶的迹象（图6）。

1070°C时，无论A区或B区的第二种 $\gamma'$ 都完全固溶，在冷却过程中析出尺寸为100~300 Å的特细 $\gamma'$ 。在此温度下第一种 $\gamma'$ 也开始回溶变成圆形，尺寸也变小（图7）。

温度升高到1110°C时，第一种 $\gamma'$ 也完全固溶，在以后冷却过程中析出500 Å左右的细 $\gamma'$ （图8）。

上述结果表明，由于枝晶偏析的影响使IN-738合金的 $\gamma'$ 固溶温度相差约80°C，即枝晶干区 $\gamma'$ 完全固溶温度为1120°C，枝晶间区为1200°C；对U-500合金上述温度相差达40°C（1070~1110°C）。

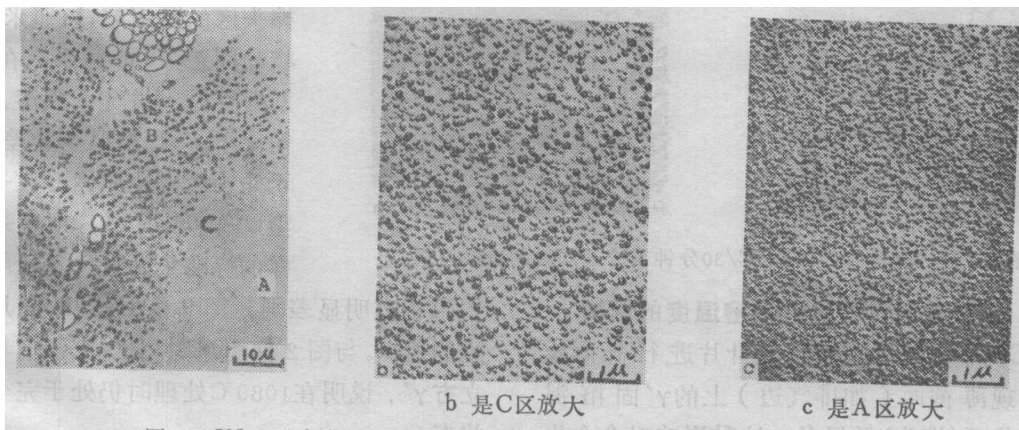
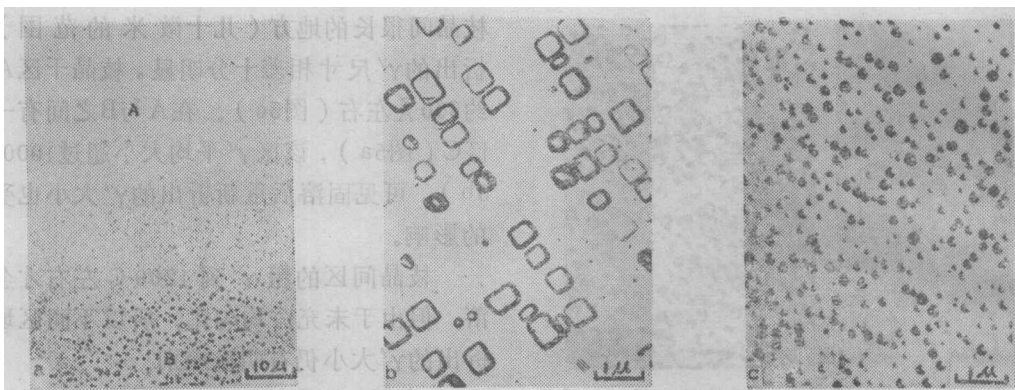


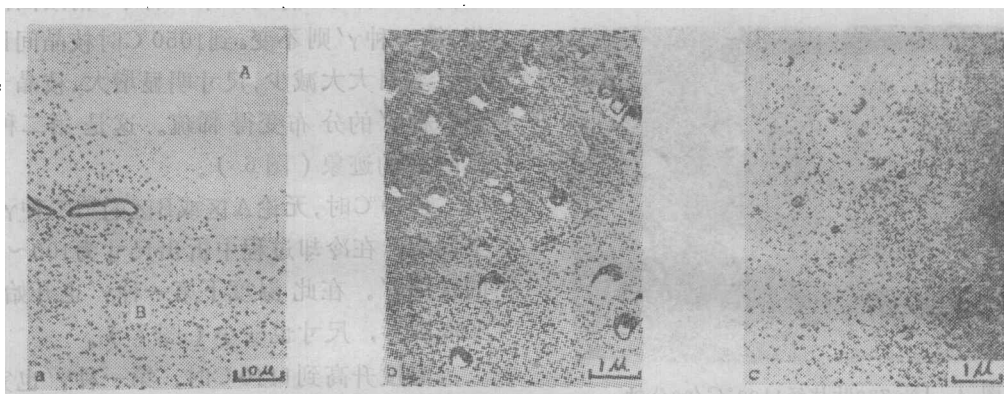
图 5 IN-738叶片经1170°C/30分钟空冷处理后不同区域 $\gamma'$ 大小的比较



b 是B区放大

c 是A区放大

图 6 U-500叶片经 1050°C/30 分钟处理后的组织



b 是B区放大

c 是A区放大

图 7 U-500叶片经 1070°C/30 分钟空冷处理后的组织

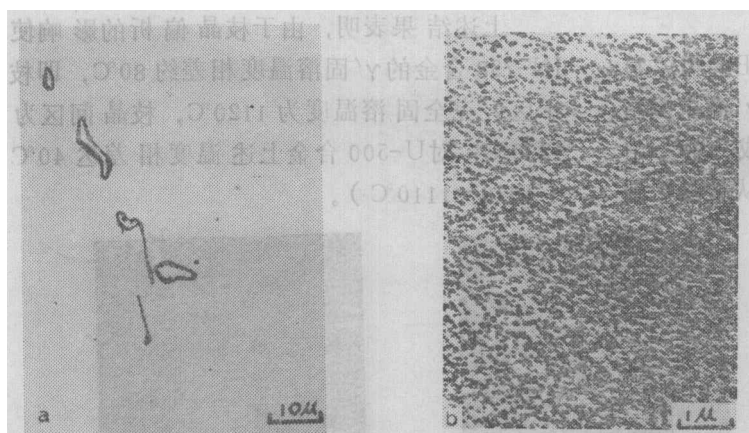


图 8 U-500叶片经 1110°C/30 分钟空冷处理后的显微组织

## 2. 铸件截面尺寸对 $\gamma'$ 固溶温度的影响

对不同截面尺寸的涡轮叶片进行全面检查,发现薄截面(如排气边)上的 $\gamma'$ 固溶温度比厚截面(榫头)低得多。这种影响对合金化

程度低的合金如U-500更为明显。试验结果表明:大型U-500叶片排气边厚度不超过2毫米,其枝晶间距 $<80$ 微米,在1080°C热处理时 $\gamma'$ 就完全固溶了;榫头区的厚度超过1厘米,平均枝晶间距为330微米,在1110°C处理时 $\gamma'$ 才完全固溶,两种情况下 $\gamma'$ 固溶温度相差30°C,正是由于上述原因,在一个大型U-500叶片中,即使采用同样的标准热处理,不同部位的

$\gamma'$ 形貌有明显差别。图9是U-500叶片排气边的组织。与图2榫头组织相比,它没有粗大的立方 $\gamma'$ ,说明在1080°C处理时仍处于完全固溶状态。

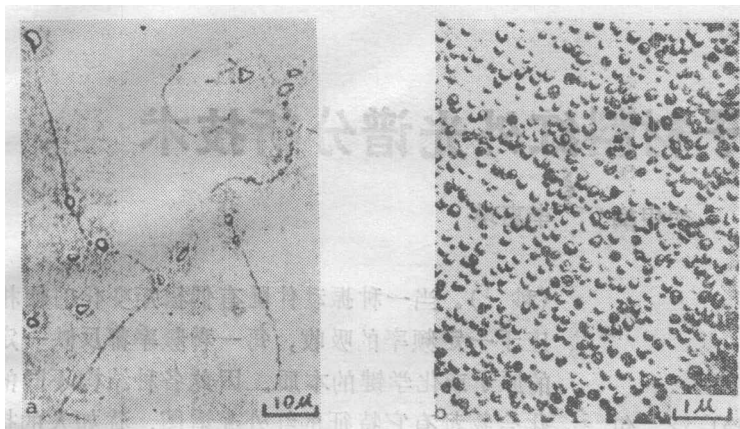


图 9 U-500叶片排气边显微组织

IN-738 叶片也有类似的现象，不过由于该合金含有较高体积百分数的  $\gamma'$ ，所以  $\gamma'$  更加稳定，上述的截面尺寸效应只有在截面相差悬殊的情况（如薄壁空心叶片）下才明显表现出来。McColvin 用薄壁 IN-738 叶片做热处理试验，已清楚反映出  $\gamma'$  的固溶温度与截面尺寸有关。

### 三、结果讨论

上述同一合金铸件由于枝晶偏析使枝干和枝晶间  $\gamma'$  稳定温度相差达  $80^{\circ}\text{C}$ ，不同厚度截面上的  $\gamma'$  稳定温度差别达  $30^{\circ}\text{C}$ 。这种情况在实用中应引起足够的重视。

#### 1. 发动机的过热检查

燃气涡轮在运转期间涡轮叶片叶身受热区会发生显微组织的变化。随着时间的增长和温度的不同，叶身材料的性能产生幅度不同的变化。通常这些变化是在容许范围以内的，所以发动机仍可继续使用。如果发动机在运转时发生了过热（即超温使用）则会严重损伤叶片材料的显微组织。一般地说，过热检查的基本步骤是取叶片榫头中心部分的显微组织作为使用前合金的原始组织状态，然后把叶片叶身不同部分的显微组织与之对比，根据两者之间的差异推断叶片过热情况。因为高温合金中  $\gamma'$  相对温度的作用最敏感，所以常以  $\gamma'$  相的溶解、析

出和长大作为基准。这对变形合金是行之有效的。但对铸造合金来说，由于它的  $\gamma'$  相的稳定温度受枝晶偏析和截面尺寸效应的影响，因而制订过热标准时，叶片的薄厚截面应分开制订，检查时叶片的薄截面与相应薄截面的过热标准比较，厚截面与相应厚截面的过热标准比较。

#### 2. 固溶处理规范的选择

在研究铸造合金固溶处理规范时，常选取浇注上、下圆盘作为材料，由于凝固条件与铸造零件不同，所以很难用一组试样就能反映零件的  $\gamma'$  固溶温度。对  $\gamma'$  总量  $< 40\%$ （体积）的铸造合金更是如此。为此，必须分别选取零件有代表性的部位取样进行热处理，以确定相应部分  $\gamma'$  的固溶温度，据此再选择零件合适的固溶处理工艺。

除以上两方面问题外，近年来较多地研究了细  $\gamma'$  尺寸和含量对机械性能的影响。如何正确地确定细  $\gamma'$  的尺寸也还有些技术上的难点。严格地讲，在任何一种固溶处理状态下，很难用单一的  $\gamma'$  大小作为衡量参数。

在本试验中，通过实例证明了铸造合金显微组织分析的复杂性，这些问题是不难理解的。但在实际应用中由于受各种因素的制约（例如我们总希望能用最少的电镜照片、用不太重要的试料以及尽可能少的试样就能获得所需要的结果），往往又对此问题不够重视。我们通过这个试验做了较为系统的比较才真正认识到，铸件上什么部位的显微组织只代表在此凝固条件下合金的组织，为此，对形状复杂的铸件必须不同部位多取试样分析；在用电镜观察时应尽可能多取一些视场，以防止片面性。我们认为，铸件不同部位的枝晶大小直接反映了该部位的凝固速度和枝晶偏析的程度，因此，同一合金在枝晶大小相当时，其显微组织的对比才

（下转第 8 页）

事实是配制后经存放10天以上,性能更好。至于原因何在,正在试验研究中。

### 三、胶接件性能及应用试验

胶接件进行了不同温度(100℃、130℃、150℃)和盐雾试验,及与不同金属的胶接试验。

#### 1. 不同温度下的老化试验

国外有人认为胶粘剂中硅烷偶合剂的胶接头耐老化很可靠,经过三年时间在正常的大气湿度变化情况下胶接强度下降得最小,而在室温和94℃下强度大有提高。我们的实验也证明了在100~150℃范围内热老化三天后强度几乎不下降这一突出的耐老化性能,见图8。

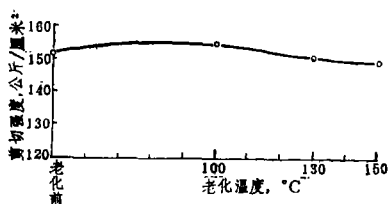


图8 不同温度老化对剪切强度的影响  
(老化时间72小时)

#### 2. 盐雾试验

氯磺化聚乙烯橡胶和硅烷胶粘剂的耐老化是众所周知的,但产品在我国南方沿海使用还须具有耐盐雾性能。我们进行了不同时间的盐雾试验,条件为:5%盐水,38±1℃喷8小时停16小时为一个循环。试验结果见图9。

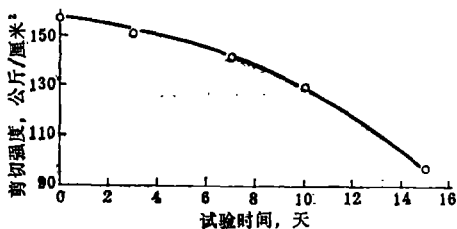


图9 盐雾试验时间对剪切强度的影响  
(试片在10天以后浸泡盐水里)

#### 3. 607-1胶液在压气机转子上的应用

压气机转子是由前部的导风轮与后部的叶轮间夹以胶条用607-1胶液粘于两边的钢与铝

合金上经热硫化成型。粘接是从叶片根部宽5.4毫米到尖端1.4毫米,粘接面小,配合尺寸的同心率要求准确至千分之三,因此成型难度是很大的。我们采用607-1胶粘接,硫化罐内硫化,由三七〇厂设计出合适夹具,成功地解决了产品成型工艺(见图10)。成型后的产品应经受高温150℃和高速33500转/分(比斯贝发动机的转速12640转/分高一倍多)的苛刻使用条件其胶接强度达到140公斤/厘米²的要求。所用成型方法操作简便,胶接效果良好,与成型件同时制成的试片胶接强度及尺寸均能满足要求。

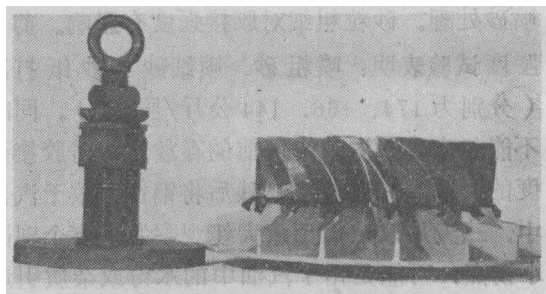


图10 硫化解解的夹具和压气机导风轮

性能试验和试用表明,607-1胶液用于某些橡胶与金属的胶接产品是一种简便可靠的粘接材料。

兴 兴 兴 兴

(上接第33页)

是有意义的。

### 四、结 论

1. IN-738大型铸造涡轮叶片在短时热处理时,枝干区和枝晶间区 $\gamma'$ 相固溶温度相差约80℃,U-500叶片相差约40℃。

2. 大型U-500铸造叶片最薄截面和最厚截面的 $\gamma'$ 相完全固溶温度相差达30℃(1080~1110℃)。

3. 在解决与 $\gamma'$ 大小和固溶、析出有关冶金问题时应考虑到枝晶偏析和截面尺寸效应带来的影响,只有在相同枝晶大小的情况下才可以进行显微组织的定量比较。

(参考文献从略)