

Cr17Ni2 不锈钢叶片应力腐蚀 敏感性的电化学检测

钟培道

一、前言

涡轮喷气发动机的一级压气机转子叶片系用Cr17Ni2不锈钢制造。生产中曾一度将原来的模锻→校正→调质处理改为模锻→校正→回火。由于用1040℃校正和随后的空冷淬火（有时是堆冷）取代了原来的1040℃固溶和油冷淬火，使淬火冷速变慢。Cr₂₃C₆在淬火缓冷过程中沿晶界析出，引起晶界区贫铬，导致叶片在使用中遭受点腐蚀和应力腐蚀损伤，酿成多起飞行事故〔1〕。

现行评定钢的应力腐蚀敏感性的方法都是取样试验，需要破坏零件，不仅费时而且昂贵。如采用下面介绍的非破坏方法进行检测，则可经济地排除零件断裂隐患，确保使用安全。

二、检测原理和仪器

1. 检测原理

金属电化学腐蚀的本质是由于金属表面电化学性质的不均匀性所造成的。经调质处理的Cr17Ni2钢叶片，碳化铬呈弥散状态均匀地分布在基体中，铬的浓度差小，在电解液中显示不出明显的电位差。空冷校正工艺生产的叶片，由于淬火冷速缓慢，碳化铬在缓冷过程中沿晶界析出（见图1）。由此引起晶界区贫铬，小面积的贫铬区和大面积的富铬区在电解液中形成腐蚀电池。贫铬区作为阳极遭受腐蚀。这两种热处理状态的叶片，用JH-2型恒电位仪

测定的极化曲线表现出明显的差异（见图2）。

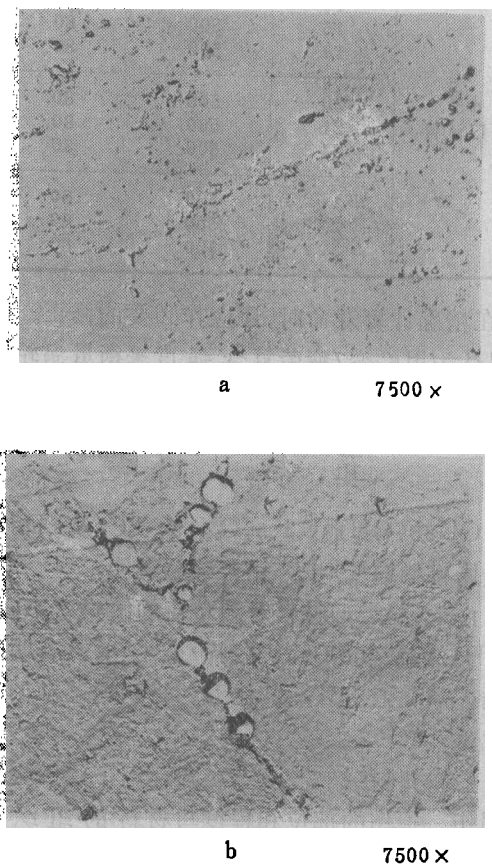


图1 调质处理与空冷校正叶片的碳化铬形态分布
a—调质处理叶片； b—空冷校正叶片。

调质处理的叶片，在很宽的施加电压范围内表现出钝态，见曲线A；空冷校正工艺生产的叶片，只在很窄的施加电压范围内表现出钝态，见曲线B。

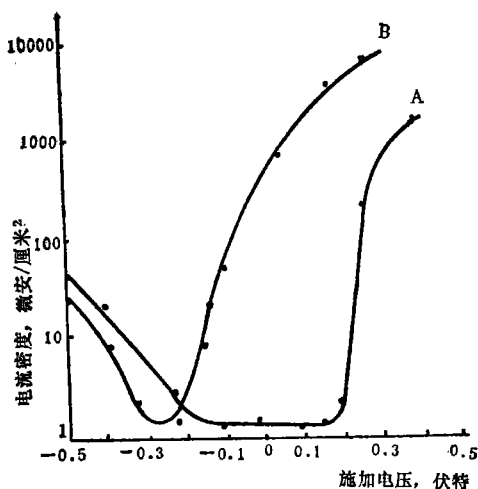


图 2 不同热处理状态的叶片的电流特性曲线
A—调质热处理工艺； B—空冷校正工艺。

2. 检测仪器

根据上述原理研制成的检测仪如图3所示。它主要由TW824电极探头、电流表、电压表等组成。TW824型Ag-AgCl电极的端部装有饱含0.2N的NaCl溶液的棉花球，与被检叶片的表面相接触，形成电化学腐蚀电池，另一端可接在叶片的任意部位上，形成一闭合回路。通过测定电流值的大小来标定零件抗腐蚀性能的优劣〔2〕。在一定的外加电压下，如果叶片表面钝化膜不被溶液中的氯离子击穿，就不会出现腐蚀电流值，这表明零件抗蚀性能好；反之，如果表面钝化膜被击穿，出现腐蚀电流值，则表明零件具有一定的腐蚀敏感性。

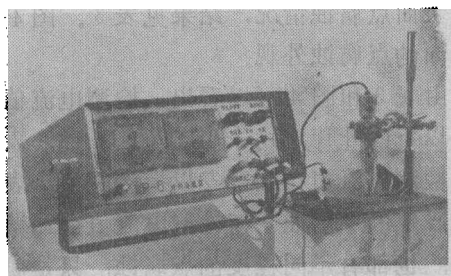


图 3 检测仪的外形与检测叶片的情形

需要指出的是，检测电流值的大小，只表示叶片抗点腐蚀能力的高低，并不直接反映抗

应力腐蚀性能的好坏。由于点腐蚀是Cr17Ni2钢叶片应力腐蚀破裂的主要诱发因素，即应力腐蚀断裂起源于点腐蚀坑，因此抗点腐蚀性能的高低也就间接地表示叶片抗应力腐蚀性能的好坏。

检测仪中的关键部件是电极探头。它是一个特制的Ag-AgCl电极，起传感器的作用。在传递交换电荷的过程中，电极本身的电位不发生变化，保持平衡的可逆过程。要求它有稳定的电位和固定的内阻，不易污染且能经久耐用。

三、检测参数的确定

检测过程中施加电压的大小、电解液的浓度、环境温度、零件表面状态以及检测时间等参数对检测结果均产生影响。因此只有选择合适的检测参数，确定正确的检测条件，才能使检测结果准确、稳定和可靠。

在多次反复试验的基础上，确定了如下检测参数和条件〔3〕：

1. 施加电压——50毫伏；
2. 电解液——0.2N的NaCl；
3. 检测时间——3分钟；
4. 检测环境温度——最好在 $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 的恒温条件下进行，亦可采用温度补偿的办法〔4〕；
5. 被测零件的表面状态——检测零件的表面应经磨削和抛光，其光洁度要求在 $\nabla 8$ 以上，且不得有明显的划伤、氧化膜、烧伤或过热，不得有油污和肉眼可见的腐蚀坑；
6. TW824型Ag-AgCl电极参数——在 25°C 的0.2N NaCl电解液中，与饱和甘汞电极相比，其电势应为 31 ± 1.5 毫伏，电导值应为 420 ± 20 微姆欧〔4〕。

四、检测法的可靠性

为了验证用测定零件腐蚀电流值的大小来区分其抗腐蚀性能好坏这一方法的可靠性，进

行了以下试验。

1. 断裂叶片电流值的测定

资料〔1〕指出：叶片是因点腐蚀叠加应力腐蚀导致疲劳失效，应力腐蚀是沿晶型断

裂，晶界上有 Cr_{23}C_6 析出而使晶界区贫铬，降低了叶片的抗腐蚀性能。表 1 为对 7 个断裂叶片所测定的电流值。由此看出，断裂叶片的电流值都很高，和所遭受的腐蚀损伤相吻合。

表 1 断裂叶片电流值的检测结果

| 叶 片 号 | 裂 纹 形 貌 | 检 测 电 流 值 (微 安) |
|---------|---------|-----------------|
| 8184—41 | 沿 晶 破 裂 | 25~28 |
| 8184—42 | 沿 晶 破 裂 | 26~28 |
| 121112 | 沿 晶 破 裂 | 26~29 |
| 91143 | 沿 晶 破 裂 | 27~29 |
| 910181 | 沿 晶 破 裂 | 26~28 |
| 91230 | 沿 晶 破 裂 | 25~27 |
| 9182 | 沿 晶 破 裂 | 25~26 |

2. 不同淬火冷速试验

将 $\text{Cr}_{17}\text{Ni}_2$ 钢试样在 1040°C 下固溶，保温 30 分钟，然后按油冷、空冷和灰冷三种方式冷至室温，再经 530°C 回火处理。首先检测其腐蚀电流，然后分别进行冲击、腐蚀性能试验，并测定碳化铬的析出量，其结果一并列入表

2 中。

表 2 的数据表明，随着淬火冷速的减慢，冲击值下降，抗腐蚀性能变差，检测电流值增大。这不仅证明淬火冷速对 $\text{Cr}_{17}\text{Ni}_2$ 不锈钢的抗腐蚀性能有着十分明显的影响，而且也证明了检测电流值与 Cr_{23}C_6 析出量成正比。检测

表 2 不同淬火冷却速度试样的检测结果

| 试 样 编 号 | 冷 却 方 式 | 冲 击 值 (公斤·米/厘米 ²) | 腐 蚀 失 重 (毫克/厘米 ²) | 应 力 腐 蚀 | | Cr_{23}C_6 析 出 量 (%) | 检 测 电 流 值 (微 安) |
|------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------|---|--------------------|
| | | | | 施 加 应 力 公斤/毫米 ² | 至 破 断 时 间 (天) | | |
| 01 | 油 冷 | 9.0 | 0.66 | 68 | 19 | 0.09 | < 2 |
| 02 | 空 冷 | 6.8 | 1.03 | 68 | 18 | 0.29 | 18~19 |
| 03 | 灰 冷 | 5.9 | 2.72 | 68 | 4 | 0.58 | 27~29 |

电流值大， Cr_{23}C_6 析出量多，抗腐蚀性能差，反之，检测电流值小， Cr_{23}C_6 析出量少，抗腐蚀性能良好。这与检测法所依据的理论相符合。

3. 点腐蚀倾向试验

将检测过的叶片，按电流值大小分为三组，每组 6 片。悬挂在同一个交替轮上，轮子 30 分钟转一周，其中 5 分钟浸入溶液中，25 分钟置于空气中。溶液为 3% 的 NaCl ，温度为 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 。试验连续进行 150 小时后取下，观察

叶片表面点腐蚀情况，结果见表 3。图 4 为叶片表面的点腐蚀外观。

由表 3 和图 4 可以看出，检测电流值在 2 微安以下的叶片，均未出现点腐蚀，表面完好；检测电流值在 25 微安以上的叶片，表面均出现严重的点腐蚀；而检测电流值在 20 微安左右时，也都有不同程度的点腐蚀，只是腐蚀点的数量少些。

同样的试验，反复进行了三次，都得到同样的结果，没有发现例外情况。这表明用这种

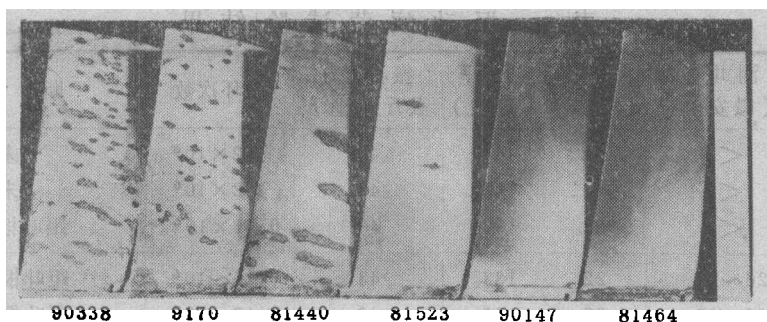


图 4 不同检测电流值的叶片的点腐蚀外观

非破坏性的电化学检测方法能够测定Cr17Ni2钢叶片抗点腐蚀性能的优劣。

表 3 Cr17Ni2钢叶片点腐蚀试验结果

| 组别 | 叶 片 号 | 检测电流值 (微安) | | | 腐蚀点数量 (个) | | |
|-----|--------|---------------|----|----|--------------|----|----|
| | | 叶根 | 叶中 | 叶尖 | 叶盆 | 叶背 | 总数 |
| I | 90170 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| | 81454 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| | 90147 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| | 100107 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| | 2B9 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| | 81464 | <2 | <2 | <2 | 无 | 无 | 无 |
| II | 81285 | 20 | 19 | 20 | 14 | 6 | 20 |
| | 81545 | 20 | 18 | 20 | 19 | 6 | 25 |
| | 81440 | 22 | 22 | 22 | 7 | 6 | 13 |
| | 10053 | 22 | 20 | 20 | 30 | 5 | 35 |
| | 81523 | 20 | <2 | <2 | 2 | 1 | 3 |
| | 81601 | 20 | 21 | 18 | 5 | 4 | 9 |
| III | 81440 | 30 | 28 | 28 | 34 | 7 | 41 |
| | 814952 | 28 | 27 | 25 | 24 | 9 | 33 |
| | 81430 | 28 | 32 | 28 | 28 | 11 | 39 |
| | 81625 | 29 | 30 | 28 | 31 | 12 | 43 |
| | 90338 | 31 | 30 | 28 | 60 | 31 | 91 |
| | 9170 | 28 | 30 | 28 | 43 | 12 | 55 |

4. 应力腐蚀试验

应力腐蚀试验是在交替轮上进行的，其试验条件与点腐蚀试验相同。取10片检测电流值大小不同的叶片，先经点腐蚀倾向试验，然后在每个叶片的进气边上切取宽 10 毫米、长110毫米的试样，表面不加工，保持其原始使用状

态，用三点弯曲法加载到68公斤/毫米²，试验结果见表 4。

表 4 应力腐蚀试验结果

| 组别 | 叶片号 | 检测电流值 (微安) | | | 腐蚀点 数量 (个) | 施加应力 公斤/毫米 ² | 至破断 时间(天) | |
|-----|--------|---------------|----|----|------------------|----------------------------|--------------|-----|
| | | 叶根 | 叶中 | 叶尖 | | | 单片 | 平均 |
| I | 1F75 | <2 | <2 | <2 | 无 | 68 | >48 | |
| | 30119 | <2 | <2 | <2 | 无 | 68 | >48 | >48 |
| | 110219 | <2 | <2 | <2 | 无 | 68 | >48 | |
| | | | | | | | | |
| II | 7014 | 22 | 22 | 20 | 25 | 68 | 7 | |
| | 110468 | 20 | 22 | 20 | 10 | 68 | 11 | |
| | 110489 | 20 | 21 | 21 | 3 | 68 | 45 | 18 |
| | 12095 | 19 | 17 | 14 | 8 | 68 | 10 | |
| III | 110125 | 27 | 30 | 28 | 73 | 68 | 7 | |
| | 120201 | 27 | 26 | 28 | 33 | 68 | 5 | 6.7 |
| | 30143 | 29 | 28 | 30 | 78 | 68 | 8 | |

从表 4 的数据看出：检测电流值稳定在 2 微安以下的叶片，在给定的条件下，多于48天没有出现断裂；检测电流值大于25微安的叶片，均在较短的时间内出现应力腐蚀断裂，断口特征为沿晶；检测电流值在20微安左右者，也都出现断裂，只是断裂时间比第三组长些。

5. 振动疲劳试验

在使用过约50小时的发动机上，选取不同电流值的叶片，进行振动疲劳对比试验。试验前叶片表面不经任何处理，保持原使用状态。试验结果见表 5。试验结果表明：检测电流值小的叶片，在同样的应力作用下，振动疲劳寿

表 5 振动疲劳试验结果

| 叶片号 | 检测电流 (微安) | 振 幅 (毫米) | 频 率 (赫芝) | 振动应力 公斤/毫米 ² | 循环次数 | 断 裂 部 位 |
|-------|--------------|-------------|-------------|----------------------------|--------------------|----------|
| 9068 | <2 | 22 | 143 | 43 | $>2 \times 10^6$ | 未 断 |
| 9051 | <2 | 22 | 142 | 43 | $>2 \times 10^6$ | 未 断 |
| 90123 | <2 | 22 | 139 | 43 | 0.51×10^6 | 距叶根50毫米处 |
| 90272 | 26~29 | 22 | 133 | 43 | $0.25 \sim 10^6$ | 距叶根25毫米处 |
| 90218 | 22~27 | 22 | 136 | 43 | $0.17 \sim 10^6$ | 距叶根15毫米处 |
| 90318 | 26~27 | 22 | 143 | 43 | $0.68 \sim 10^6$ | 距叶根25毫米处 |

注：断口分析证明，90123叶片属机械损伤断裂。

寿命比电流值大的叶片长。这说明检测电流值大的叶片，抗腐蚀性能差，经使用后，表面腐蚀损伤严重，因而疲劳寿命明显缩短。断口分析表明，疲劳裂纹都起源于沿晶应力腐蚀损伤

处〔3〕。

6. 金相组织分析

对具有不同检测电流值、不同抗蚀性能的叶片进行了光学金相和电子金相观察。发现检

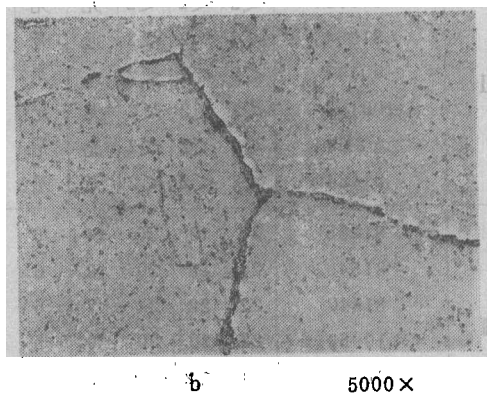
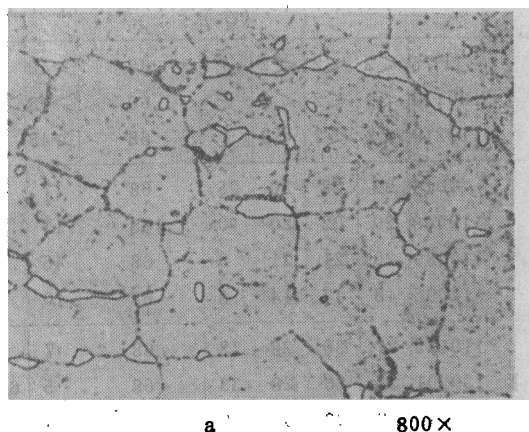


图 5 检测电流值大于25微安的叶片晶界上的碳化物形态

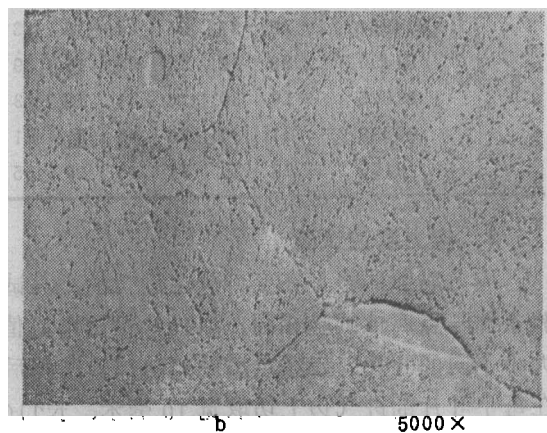
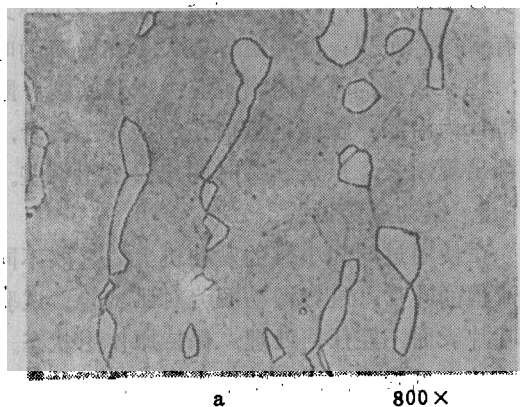


图 6 检测电流值小于2微安的叶片晶界上的碳化物形态

测电流值大的叶片, 晶界上有粗大的碳化物颗粒, 呈连续的网状分布, δ -铁素体有少许分解现象, 如图 5 所示。检测电流值稳定在 2 微安以下的叶片, 晶界上没有粗大的碳化物颗粒, 基体上的碳化物弥散细小, δ -铁素体没有分解现象, 见图 6。

表 2 的 Cr_{23}C_6 定量分析表明, 对抗蚀性能起不良作用的碳化物主要是在淬火缓冷过程中析出的。对只经淬火而未经回火的试样所作金相的观察同样发现, 晶界上的粗大碳化物颗粒是在淬火缓冷过程中析出的〔3〕。

正是由于这种粗大的碳化物颗粒沿晶界析出, 使叶片表面呈现出不均匀的电化学性质, 因而抗蚀性能差, 检测电流值高。

上述试验结果证明: 在不破坏叶片完整性, 不影响其使用性能的前提下, 此方法能够准确地将碳化铬析出严重、抗蚀性能差的零件检测出来。

五、检测法的重现性

作为一种检测方法, 除了要求准确可靠之外, 还要求重现性好。

为了鉴定本方法的重现性, 对经过腐蚀和振动疲劳试验而确定为抗腐蚀性能良好、中等及较差的三种类别的叶片, 各取二片。由不同的操作人员, 分别用三台仪器, 对每片叶片的九个部位各测试一点, 每个叶片前后共测 54 个点, 其结果见表 6。从表 6 数据看出: 除了个别数据有出入外, 检测电流的大小与叶片的实际抗腐蚀性能的优劣具有很好的一致性; 不同人员用不同仪器对同一叶片的不同部位的三次检测数据具有良好的重现性。值得注意的是, 被

表 6 不同类别叶片的检测结果

| 叶片类别 | 叶片号 | 检测次数 | 检测部位 | | | | | | | | |
|--------|--------|------|--------------|----|----|--------------|----|----|--------------|----|----|
| | | | 叶 根 (微 安) | | | 叶 中 (微 安) | | | 叶 尖 (微 安) | | |
| 抗蚀性能良好 | 9068 | I | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| | | II | 8 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| | | III | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| | 1F75 | I | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| | | II | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| | | III | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| 抗蚀性能较差 | 110489 | I | 17 | 22 | 15 | 19 | 19 | 19 | 16 | 18 | 15 |
| | | II | 18 | 18 | 17 | 20 | 21 | 17 | 18 | 18 | 17 |
| | | III | 19 | 21 | 18 | 17 | 19 | 19 | 17 | 18 | 17 |
| | 01228 | I | 21 | 23 | 22 | 21 | 21 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| | | II | 20 | 19 | 20 | 21 | 21 | 19 | 19 | 18 | 19 |
| | | III | 22 | 22 | 21 | 19 | 21 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 抗蚀性能差 | 120201 | I | 27 | 31 | 30 | 30 | 32 | 31 | 28 | 30 | 30 |
| | | II | 29 | 31 | 31 | 28 | 31 | 29 | 26 | 26 | 27 |
| | | III | 29 | 32 | 31 | 30 | 31 | 29 | 28 | 27 | 27 |
| | 90218 | I | 31 | 22 | 25 | 29 | 29 | 25 | 25 | 24 | 31 |
| | | II | 30 | 28 | 27 | 26 | 28 | 25 | 27 | 26 | 24 |
| | | III | 29 | 27 | 31 | 28 | 28 | 28 | 26 | 26 | 27 |

测零件的表面状态、环境温度和电极参数等应予严格控制, 才能获得准确可靠的检测结果。

六、结 论

1. 实验结果表明, 本方法所测定的叶片电流值大小与其碳化铬析出量的多少和抗腐蚀性能的好坏之间有着良好的对应关系。检测方法是可靠的。

2. 生产现场试用表明, 检测仪器的使用性能基本稳定, 检测数据的重现性良好并经有关单位鉴定通过。

3. 用该方法对正在服役的零件进行无损检测, 可将抗腐蚀性能低劣的零件挑出, 不仅可以避免不必要的浪费, 而且还可以有效地提高发动机的使用安全性并经有关单位鉴定通过。

参加本工作的有江宏德、何显璆、王震谷等同志, 并得到吴培远、吴荣贵、涂柏林、张学铎等同志的支持与配合。在此表示谢意。

参 考 资 料

- 〔1〕涡轮喷气发动机一级压气机叶片断裂原因研究, 六二一所, 1977年。
- 〔2〕A.N. Wendelbo, A Potention-static Determination of Stress Corrosion Susceptibility in 431 Stainless Steel, 1968.
- 〔3〕Cr17Ni2 不锈钢叶片应力腐蚀敏感性的电化学检测研究总结, 六二一所, 1979年。
- 〔4〕TW824 型 Ag-AgCl 电极在检测 Cr17Ni2 不锈钢零件应力腐蚀敏感性中的应用, 六二一所, 1979年。

ZGCr17Ni2 空心叶片测厚仪

一二〇厂 曲应泉

提高现代涡轮喷气发动机性能的重要措施之一, 就是提高燃气温度和增压比。然而, 燃气温度的提高, 会使发动机涡轮零件的热负荷随之增大, 从而对叶片材料提出更高的热性能要求。但是叶片材料高温性能的提高是有一定限度的。而带异形冷却通道叶片的出现大大改善了其冷却性能, 提高了发动机的功率。

对采用陶瓷型芯或石英型芯真空铸造的精密化的叶片来说, 难于保证冷却通道壁厚的技术要求。我厂所用的一种带冷却通道的叶片材料为 ZGCr17Ni2, 叶片壁厚尺寸为 $2.0^{+0.1}_{-0.5}$ 毫米。这种叶片采用陶瓷型芯精密铸造。由于叶片纵向较长难于保证叶片壁厚的规定尺寸, 所以对精铸后和加工后的叶片要百分之百测量, 以保证叶片质量。

尽管测量叶片异型孔壁厚的方法很多, 例如: 超声波法、X射线法、热电法、电感法、电磁波法、涡流法、磁性法或同位素法等, 然而具体的测量方法则要根据叶片壁厚尺寸的技术要求、基体材料和冷却通道的形状加以确定。

但是, 快速准确、费用低廉的方法仍是可取的。一般地说, 单边测量方法总比双边测量方法先进, 这是因为它不需要在孔内放入任何其它物体。某机所用的一种空心叶片材料, 是一种具有磁性的不锈钢, 为了测量这种叶片的壁厚, 我们研制了磁性单边测厚仪。这种测厚仪的使用方法简便, 测量结果可靠。

测量原理如下(见图1)。

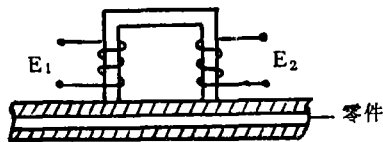


图 1 测量原理示意图

把一“Π”形测头与叶片组成一闭合磁路, 当在其初级通一交流电时, 初级线圈内即有电流流过, 并且在此闭合磁路内产生同一频率磁