

# 斯贝发动机高压一级涡轮叶片

## 真空扩散钎焊和修复

四三〇厂 任耀文

真空扩散钎焊是兼顾扩散焊和钎焊的优点而发展形成的连接工艺。它与真空扩散焊比较,最大的优点是不需要加压,大大地简化了真空设备;而且在高温停留时间比扩散焊短,缩短了钎焊周期。它与一般真空钎焊比较,可把焊料的用量降到最低,焊后不需加工;同时由于在高温停留时间较长,使钎缝内中间相的含量降到最低,从而获得最大的强度和塑性。另外,在真空钎焊方法难以获得最大焊透率的情况下,采用这种方法能够获得满意的效果。用这种连接工艺来制造和修复可焊性差的斯贝发动机高压一级涡轮叶片,具有一定的实际意义。本文仅就真空扩散钎焊工艺在我厂试制的斯贝MK202发动机高压一级涡轮叶片制造和修复方面的应用情况,作一简要介绍。

### 一、概 述

从国外引进的斯贝MK202发动机的高压一级涡轮叶片,是用镍基高温精密铸造合金制造的。这种材料牌号为MAR-M-002,主要合金元素为:10%钨,10%钴,9%铬,5.5%铝,1.5%钛,2.5%钼,1.5%铪,0.5%钨,0.13%碳,0.05%锆,0.015%硼,镍余量。该合金除固溶强化、 $\gamma'$ 相沉淀强化外,因钨能大量进入 $\gamma'$ 相而增加 $\gamma'$ 相的强化作用;另外,较高的Al、Ti、Nb、Ta、Hf含量使之形成的金属间化合物( $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{Ni}_3\text{Ti}$ 等)还能进行弥散强化。所以这种材料的中温综合机械性能非常好,高温热强性和热稳定性能也很好。用它精铸成的涡轮叶片是薄壁空心的。由

于精铸工艺的要求,在叶冠端面上留有异型孔。异型孔下端是锯齿状的五条气道,需要在异型孔上钎焊一个 $9 \times 5 \times 0.48$ 毫米的平行四边形盖板。盖板材料为Nimonic 75镍基耐热合金。盖板上有两个直径为1.7毫米的孔,用来调节冷却气体流量。叶片正常工作温度为 $775^\circ\text{C}$ (叶身 $\frac{1}{2}$ 处的平均温度)。由于高温和带有硫化物和氯化物的燃气腐蚀,叶片工作大约1000小时后,会在进气或排气边缘出现热腐蚀或热裂纹。罗·罗公司在制造和修理这种叶片时,采用了较先进的真空扩散钎焊工艺取得了良好的效果。

### 二、叶片的可焊性分析

1. 这种叶片的母材是MAR-M-002铸造合金,采用熔焊工艺,可能出现下列问题:

(1) 母材导热性较差,焊接时局部加热到高温,将在热影响区内产生较大的热应力,进而引起热裂纹;

(2) 由于熔池温度很高,施焊过程很容易引起低熔点合金的蒸发逸损,致使焊缝和热影响区的组织性能都受影响;

(3) 母材中Ti、Al含量高(二者总量为7%),形成的粘性氧化物能导致焊接裂纹。

2. 由于受接头形式及叶形的限制,接触焊难以施焊。

3. 一般真空钎焊,高温停留时间短,钎料的合金化作用较差,容易在钎缝处出现合金元素的偏析或出现中间金属化合物相,使接头强度变低。而且钎料难于填置,钎料量不好控

制，真空钎焊后的多余焊料难以去除。

4. 综合上述三条，选用了高温真空下的长时间扩散钎焊。它可在不影响母材组织和机械性能的情况下，获得致密接头（图1）。其强度在800℃时为母材的90%，在800℃以上时为母材的100%。可见真空扩散钎焊工艺对于这种涡轮叶片的连接是一种极好的方法。

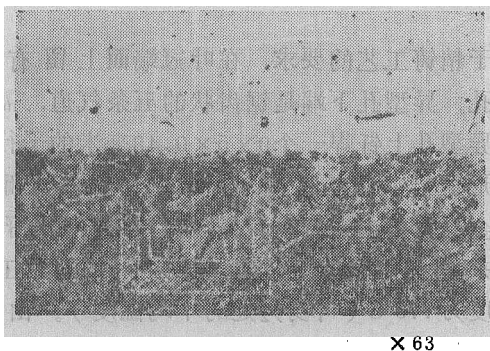


图 1

间隙0.1毫米，AMDRY915钎料，真空度： $8 \times 10^{-5}$ 托，钎焊温度： $1190 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温时间：60分钟。

### 三、叶片真空钎焊的工艺特点

#### 1. 优质粘带钎料的选用

从前，罗·罗公司选用NK5钎料在电阻焊定位后进行这种叶片的真空钎焊。采用这种方法时，要用点焊定位夹具，往往形成较高的装配应力，钎焊间隙也难以保持均匀；同时配合表面还需制备成微形波纹以利于钎料的填充；还需要在盖板四周注射膏状钎料，对钎料的填充性能要求苛刻。同时，钎焊中一旦内部形成没有钎料的“空穴”，便无法重新补焊。另外，这种膏状钎料的用量难以精确控制，而钎焊后多余钎料的去除又非常困难。尤其重要的是，这种方法形成的钎缝不致密（图2）。

鉴于上述原因，罗·罗公司后来改用了美国合金金属公司制造的一种高纯度低碳类的AMDRY915镍基粘带钎料。这种钎料的化学成分是：碳 $\leq 0.03\%$ ，硅3.8~5.0%，硼2.2~3.2%，铬12~14%，钴 $\leq 1.0\%$ ，镍余量。

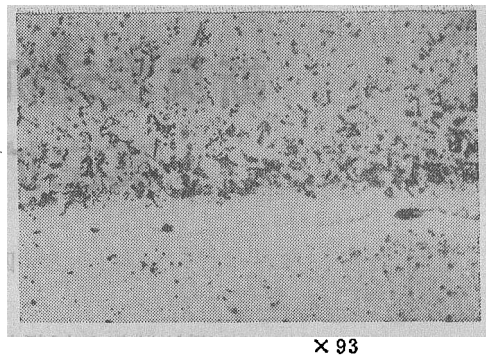


图 2

间隙0.1毫米，NK5钎料，真空度： $8 \times 10^{-5}$ 托，钎焊温度： $1170 \pm 5^\circ\text{C}$ ，保温时间：20分钟。

它具有高的抗剪强度，极好的抗氧化耐腐蚀性能，兼具极好的抗硫化物、氯化物浸蚀的性能。它是用一种透明的有机塑胶体作为粘结剂，将AMDRY915粉调成软膏，碾压成0.1毫米厚的薄带且在其一面还刷涂一层胶粘剂，并用塑料薄膜覆盖，以保护钎料。使用时把纸和保护薄膜去掉，切割成一定的形状，放在被连接零件的结合面之间。胶粘剂可起定位作用。这种钎料除具有上述优点外，还有以下特点：良好的工艺特性；在截面大于0.3毫米厚的、铝和钛含量较高的沉淀硬化型合金上具有良好的钎焊润湿性；自身的定位作用可避免装配应力；钎料用量可以精确控制；钎料的润湿、填充、流动和扩散条件极好。这就大大地降低了出现内部缺陷的几率，使得钎缝非常致密，且钎缝圆根小而光滑，又无多余钎料溢流，扩散钎焊后无需加工。

AMDRY915粘带钎料的选用，为在叶片制造时形成高度完整的优质接头提供了良好的条件。

#### 2. 高效除油和清洗方法的运用

##### (1) 三氯乙烯蒸气除油

三氯乙烯( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ )是一种高效溶剂，在室温下溶油能力是汽油的4倍，在50℃以上是汽油的7倍。除油时把工件置于三氯乙烯蒸气层中（这种蒸气层是由于三氯乙烯蒸气

分子密度比空气大而形成的), 借蒸气与冷零件接触时凝聚成的液体, 溶解其上的油污。由于要除油的零件始终与干净的三氯乙烯接触, 因而已溶解了油污的三氯乙烯不会对零件产生污染, 保证除油的良好效果。加上除油速度快, 而且废液又可借助蒸馏法回收, 因此这种除油方法具有高效、快速和经济三大优点。

## (2) 化学清洗

对于大部分其它零件, 经蒸汽除油后就可直接进行装配和钎焊。而对于这种由易于在表面生成稳定氧化膜的材料制成的叶片, 还要先在阿觉克斯185溶液( $C_6H_{11}O_7Na + NaOH + H_2O$ )中清洗, 继而在硝酸溶液中清洗, 以彻底去除表面复杂而稳定的氧化膜, 增大叶片表面张力, 为钎料的充分润湿和扩散造成良好的条件。

## 3. 粘结剂装配定位的运用

对于炉中钎焊, 装配工序是十分重要的。刚性定位(电阻焊、氩弧焊、夹具等)将会造成一定的装配应力, 同时定位焊点往往影响钎料的安放或填充。而叶片除利用粘带钎料上的胶实行自身定位外, 同时还采用TENSOL-6粘结剂定位。这种粘结剂定位方法的奥妙在于, 粘结剂本身在较低温度下( $370^{\circ}C$ 左右)便挥发尽净, 而起定位作用的“胶粘力”却依然存在, 即使钎料在悬置状态也不会掉下来。粘结剂挥发的气相不会污染真空气氛, 对母材也无害。用它来固定处于自由状态的钎料丝或其它小零件, 是很有实际意义的。

## 4. 合理的加热/冷却速率的制定和工艺参数的精确控制

由于母材导热性差( $1000^{\circ}C$ 时导热系数为3.71), 同时为了防止钎料中的粘结剂和胶粘剂挥发太快而降低真空度或引起盖板位移, 在粘结剂完全挥发的温度( $370^{\circ}C$ )以下, 必须以缓慢的速度( $300^{\circ}C$ /小时左右)加热, 而在钎料熔化温度( $950\sim 1065^{\circ}C$ )范围内, 为了避

免合金元素的偏析和满足母材本身热处理的需要, 可以用较快的速度加热。具有定速加热、自动保温程序器和多种冷却方式的伊普森VFC-524-R(S)自动真空炉为我们提供了方便的条件。该设备加热速率可在 $0\sim 2000^{\circ}C$ /小时之间选择和自动控制, 并有真空冷却、高纯惰性气体冷却、气体风扇冷却三种方式可供选择。温度均匀性控制在 $1200\pm 5^{\circ}C$ 范围内, 监控零件温度的几根热电偶, 可以精确地控制零件温度。

## 四、新叶片的真空扩散钎焊

### 1. 工艺过程

(1) 三氯乙烯蒸气除油: 叶片在除油槽的蒸气层中放置5~10分钟。

(2) 化学清洗: 先在 $95^{\circ}C$ 的30%阿觉克斯185溶液中清洗2分钟, 并以清水冲洗, 然后在室温下的25% $HNO_3$ 溶液中清洗5分钟, 并以热清水冲洗。

(3) 烘干: 在 $150\sim 200^{\circ}C$ 的烘箱中干燥30分钟。

(4) 装配: ①剥除附着在钎料两面的纸和塑料保护膜; ②将盖板按一定方向贴在粘带钎料上; ③用刀片切除盖板四周多余的钎料, 仅留0.5毫米宽的余边; ④用不锈钢镊子把带有钎料的盖板放在叶冠端面上的适当位置上(如图3所示), 并使钎料余边不致堵住两侧的出气孔, 然后用直径1.3毫米的芯棒将盖板

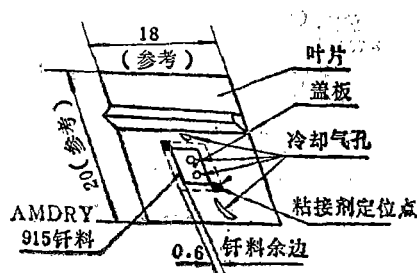


图3 叶片钎焊前装配示意图

上两个气孔处的钎料层除去,以防钎料流入冷却气孔;⑤在平行四边形盖板长的对角线两端用TENSOL-6号粘结剂定位(如图3所示)。

(5)装炉:叶片如图4所示,放在带有一定斜度的氧化铝陶瓷座上装入真空炉加热室的均温区,并安放控制温度的热电偶。

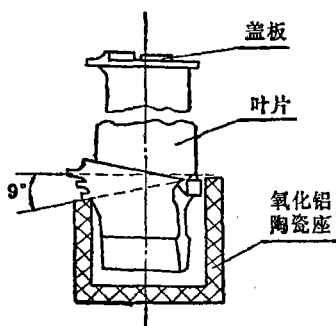


图4 叶片装炉示意图

(6)抽真空:在室温下抽真空,使炉内压强降到 $8 \times 10^{-5}$ 托(见图5)。

(7)加热:当炉内压强降到要求程度时,按 $300^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速率加热到 $450^\circ\text{C}$ ,保温15分钟;然后以 $800^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速率加热到 $950^\circ\text{C}$ ,保温30分钟或更长时间,以使温度均匀和恢复真空度;最后,以 $400^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速率加热到 $1190 \pm 10^\circ\text{C}$ 。以上的加热保温均由设备自动进行(见图5)。

(8)保温:在钎焊温度下(指控温热电

偶指示的值),保温1小时,让钎料和母材的原子互相充分扩散,把加热过程中形成的中间金属相降到最低限度,使钎缝的显微组织与母材没有明显界线(见图2),以获得真空钎焊得不到的致密接头。

(9)冷却:为了防止气流扰动液态钎料,在钎料固相线温度以上实行真空冷却,直到 $950^\circ\text{C}$ ;然后充进高纯氩气( $99.99\% \text{Ar}$ ,  $\text{O}_2 \leq 10 \text{ppm}$ ),并启动真空室中的风扇进行搅拌,以提高冷却速率( $200^\circ\text{C}/\text{分}$ )。

(10)卸载:在炉内温度降到 $150^\circ\text{C}$ 以下后,再次充填普通纯氩气,打开炉门并取出零件。

## 2. 质量验收

经真空扩散钎焊后的叶片,按专用质量验收标准(QAS 0453)进行验收,该标准的主要内容是:

(1)目视检验:盖板是否发生位移。钎料是否溢流到不需要钎焊的部位。盖板四周钎缝是否完整连续;若不连续,其长度不允许超过周长的10%;

(2)双目放大镜检验:如图6所示,观察钎缝的收缩量是否超过其宽度;

(3)荧光检验:检查叶片表面和钎缝有无裂纹或其它表面缺陷;

(4)X光透视:检查钎料是否流入冷却孔,如果流入则叶片报废。

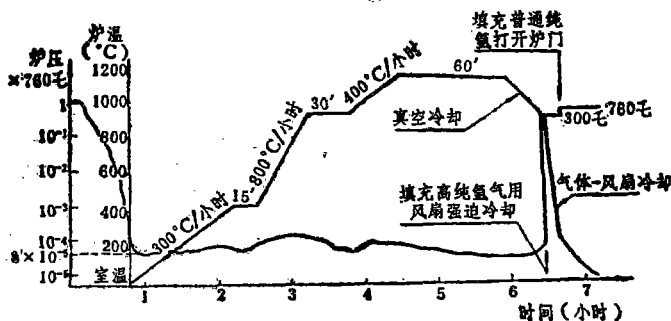


图5 涡轮叶片真空扩散钎焊时的真空度和温度曲线

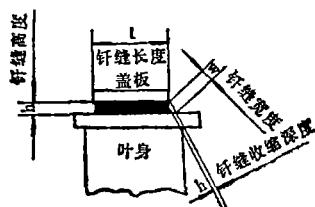


图6 钎缝放大示意图

### 3. 一般缺陷及补救措施

叶片真空扩散钎焊后,其合格率一般较高。但有时也会出现盖板移位;偶尔由于叶片清洁度不够,还会使盖板四周焊缝的完整性不好。对于后一种缺陷可采用局部钎修的办法加以修复。其办法是用AMDRY915粉状钎料与TENSOL-6粘结剂调成软膏,用尼龙注射器注射到缺陷部位,进行局部钎修。其工艺参数与新制造时不同的是,保温时间由原来的1小时改为20分钟。这种局部补钎法,对真空扩散钎焊后形成的完好钎缝不会产生任何不利影响,因为粘带钎料所形成的焊缝的重溶温度提高了53℃。另外,对于盖板偏移的缺陷,可以通过把盖板磨掉,重新真空扩散钎焊一个新盖板来进行补救,这种方法最多允许进行两次。

## 五、叶片真空扩散钎焊修复工艺

叶片在发动机上工作,在高温和热气流的强烈作用下,叶身的进气和排气边缘都可能出现热腐蚀和热裂纹,扩散钎焊上去的盖板也会受燃气中的氯化物或硫化物的腐蚀而变薄。由于高温氧化,合金中的铬含量会降低,从而导致热强性降低。对于这些缺陷,罗·罗公司也是采用真空扩散钎焊工艺进行修复的。实践证明,不论从经济性,还是从可靠性来讲,这种方法都是理想的。主要修复方法如下:

#### 1. 重新钎焊盖板

对于因腐蚀而变薄的盖板,修复时应把变薄的盖板磨掉,重新钎焊一个新盖板。其工艺方法和新制件的相同。

#### 2. 热损区钎涂修补

(1)对于腐蚀较严重的部位,修补程序是:

①采用机加工或用手工打磨的方法,把腐蚀部位磨掉,选择合适的材料(C242)加工一个镶块与其配合,然后用塞尺检查镶块与叶片配合的间隙,并保证不大于0.05毫米;

②三氯乙烯蒸气除油;

③如图7所示,在镶块两端以钨极氩弧焊定位或用夹具定位,然后在配合接缝的一侧注射NICROBRAZ125膏状钎料(14%铬,3%硼,4.5%铁,4.5%硅,0.7%碳,镍余量),并在钎料四周涂NICROBRAZ绿色阻流剂(水溶性甲基纤维素),防止钎料漫流;

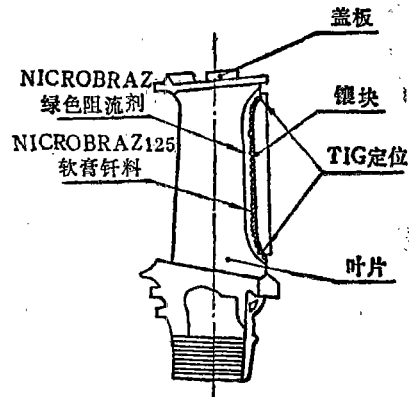


图7 在叶片上钎补镶块示意图

④装炉扩散钎焊:真空度为 $1 \times 10^{-4}$ 托,温度为 $1150 \pm 5^\circ\text{C}$ ,保温4小时;

⑤热处理:在氩保护气氛中加热到 $1040^\circ\text{C}$ ,保温16小时;

⑥手工打磨多余钎料,使镶块与叶片原型面圆滑过渡;

⑦质量验收:目视检验时,在没有注射钎料的另一侧,应能看到完整的钎料痕迹。最后进行荧光检验。

(2)对于腐蚀不严重的部位,修补程序是:首先在腐蚀部位涂上一定量的软膏钎料或贴上粘带钎料,并在不需要钎焊的部位涂阻流剂,然后进行真空扩散钎焊。钎焊工艺参数与新制件相同。如果出现裂纹或钎缝不致密的情况,还可再次进行补焊。此种试验是在我厂生产的WDZ-1型涡轮起动机的涡轮叶片上进行的,叶片材料为K3镍基铸造合金。

#### 3. 裂纹补焊

高压一级涡轮叶片上的裂纹中的“脏物”不易去除,加之叶身部位渗过铝,钎料难以润湿,所以一般采用磨掉裂纹,另补镶块的方法

# 1Cr18Ni9Ti冷拉钢丝的去应力回火

三七二厂 周维礼

1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢主要以固溶状态使用,不能通过热处理强化,虽然强度不高,但具有优良的抗腐蚀性能,已广泛用于强度要求不高但能耐腐蚀的产品中,特别是化工产品。随着工业(如航空、造船等)的发展,要求不锈钢不仅耐腐蚀,还应具备较高的强度。半奥氏体沉淀硬化不锈钢虽能得到高强度,但其抗腐蚀性能不如奥氏体型不锈钢。

奥氏体不锈钢虽不能热处理强化,但能加工强化,大变形量后强度可达200公斤/毫米<sup>2</sup>,所以冷变形奥氏体不锈钢也广泛应用于要求强度高并且耐腐蚀的产品中。不锈钢冷变形后虽可强化,但增加了对应力腐蚀的敏感性,本文叙述了选择去应力回火温度所作的试验。

## 试验条件及结果

试验用料为大连钢厂生产的 $\phi 3$ 毫米

修复。另外,罗·罗公司的高压二级渗铝叶片、火焰筒燃气导管(由C263, C242, C1023等含高Al、Ti的镍基铸造合金制成)上的热裂纹,采用真空扩散钎焊法修复,并已列为常规修理方法之一。我们在试验时,因无实物试件,仅以K3材料的试片作过人工模拟裂纹的补焊试验,这与实际情况相差甚远。现将罗·罗公司修复高压一级涡轮导向叶片的方法简述如下:对于从发动机上拆下的叶片用氧化铝湿吹砂,将氧化铝砂粒去除干净,在显微镜下找出裂纹部位,并按裂纹宽度选用钎料。对于宽0.13~0.25毫米的裂纹,使用NICROBRAZ171钎料(10%铬,12%钨,3.5%硅,2.5%硼,3.5%铁,0.4%碳,镍余量);对于宽0.13毫米以下的裂纹,使用NICROBRAZ125钎料。大于0.25

1Cr18Ni9Ti不锈钢冷拉钢丝,化学成分见表1。

表 1

C	Cr	Ni	Mn	Ti	Si	P	S
0.08	17.60	10.34	1.50	0.54	0.47	0.018	0.010

试验选用回火温度(°C)为:100、200、300、400、500、600、700等七个温度点,保温时间均为2小时,空气冷却。100°C、200°C两个温度在恒温箱里处理,后五个温度点则用马弗炉。

不同温度回火对1Cr18Ni9Ti冷拉钢丝性能的影响见表2和图1。

拉伸性能是在ZD10/90电子拉力机上测定的。一般腐蚀试验是在10%的盐酸水溶液中于室温条件下进行的,腐蚀时间为48小时。电阻率的测定使用精度为0.1微伏的UJ30型电位

毫米的裂纹,不允许补焊。这种补焊技术的关键在于去除裂纹中的氧化物和碳化物,较理想的方法是:

(1)用三氯乙烯蒸气除油;

(2)在三氯乙烯( $C_2H_3Cl_3$ )液体介质中进行超声波清洗(超声场频率 $f=20$ 千周/秒,清洗20~30分钟);

(3)真空净化处理:真空压强 $1 \times 10^{-4}$ 托以下,温度1180°C,保温20分钟。

对于净化后的叶片,选择合适的软膏钎料用尼龙注射器,将钎料注射到裂纹上。在裂纹周围涂NICROBRAZ绿色阻流剂。补焊工艺参数:真空度 $10^{-4}$ 托,钎焊温度1170°C,保温20分钟。裂纹是否补焊完好要经荧光检验鉴定。

(参考文献略)