

# 切削工艺对荧光检测的影响

## Influence of Cutting Technology on Fluorescence Detection

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 吴伟东 姜绍西 张平

**[摘要]** 通过对叶片缺陷理化检测分析,确定了叶片的缺陷为铸造显微缩松,经过对叶片缺陷表面的各种加工工艺试验,发现了大磨削切深量对显微缩松的荧光检测灵敏性有一定的影响,其根本原因是在磨削力的作用下,导致缺陷通向检测表面的开口因材料变形而闭合。而采用无切削力的线切割加工替代粗磨工艺,可以大大降低对荧光检测灵敏性的影响。

**关键词:** 荧光检测 缺陷 显微缩松 叶片

**[ABSTRACT]** Through the analysis of the blade defects chemical and physical test, the defects of the blade for casting is microloose, after all the processing process test of the blade surface defects, the large amount of grinding is found the influence on the fluorescent detecting of microloose, the basic reason is under the action of forces in the grinding, defect to the detection of surface open is closed due to deformation of material. So using wire cutting machining without cutting force instead of rough grinding, the defects to surface of the electric processing fluorescence detection is reduced greatly.

**Keywords:** Fluorescence detection Defect Microloose Blade

某机涡轮叶片批产已经几十年,近年来,在零件成品入库前及试车后的荧光检验时,常常发现大量的缺陷,这些缺陷特征与铸造缺陷相近。叶片机械加工的技术人员一直将缺陷发现滞后归因于无损检测本身的检测灵敏度及操作者的操作。但无损检测专家并不认可这种观点。因此要解决该问题,需要对缺陷性质和荧光检测滞后的原因进行分析研究。只有原因清晰,才能寻找出现象的根源,并能制定出可行的解决措施。为此针对叶片缺陷进行解剖分析,并针对有缺陷的叶片,进行了一系列的切削工艺验证和荧光检测试验。

### 1 叶片加工工艺

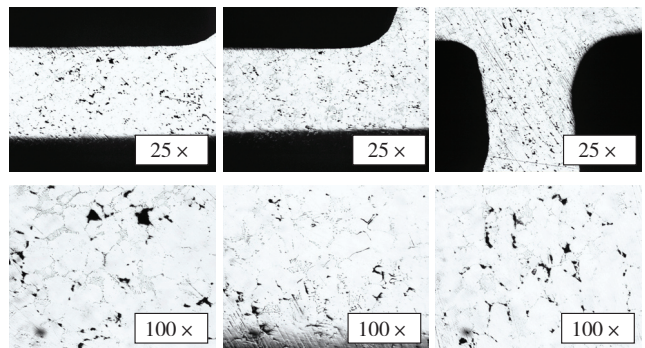
该叶片采用的是精密无余量铸造毛料,叶片材料为DZ22定向凝固高温合金,研制和应用几十年。叶片结构设计、铸造工艺及加工工艺较成熟。对成品和试车后的叶片缺陷进行统计发现,缺陷主要集中在叶片榫头的榫头端面部位,荧光检测显示为典型的点状缺陷。该部

位的加工工艺:毛料→磨榫齿→粗磨榫齿端面→精磨榫齿端面→……→消除应力→……→荧光检验→钎焊叶尖盖板→热处理(固溶、实效)→电弧渡→荧光检验→入库。

从统计的14片榫头端面缺陷分布看,缺陷多集中在榫头端面靠近榫头背向侧和排气边侧的部位。

### 2 缺陷检测分析

从榫头端面有缺陷的叶片中,挑选几片叶片进行缺陷金相分析,见图1。



(a) 07F4-4号叶片 (b) D54-2号叶片局部1 (c) D54-2号叶片局部2

图1 叶片榫头端面局部缺陷25倍和100倍金相图

Fig.1 Local defects of blade root end at metallographic phase diagram of 25 times and 100 times

从3个典型件的缺陷金相图片看,缺陷呈点状分布,缺陷四周为不规则形状,这是一种典型的显微缩松铸造缺陷,也称为显微疏松。产生这种缺陷的主要原因是枝晶间或晶界处空隙的凝固补缩不足引起的,当合金的凝固温度范围很宽时,极易产生这类缺陷。每个点状缺陷的最大开口尺寸及深度从几 $\mu\text{m}$ 到几百 $\mu\text{m}$ 不等。这种尺寸的缺陷完全在荧光检测范围之内,荧光检测不可能检测不出,因此必然存在影响荧光检测的因素存在,需要进一步验证。

### 3 验证影响无损检测的工艺方法

除荧光检验者的操作技能外(操作者均具有多年的荧光检验经验和资质),影响渗透显示因素有渗透检验的灵敏度、渗透检验类型、检测表面切削工艺、渗透前检测表面状态等。根据缺陷类型和尺寸,现生产线上的三级灵敏度荧光检验工艺基本可以检测出这种类型的缺陷,且在进行首次荧光检验前,无其他特殊的影响荧

光检验灵敏性的其他表面检测方法。因此影响该类缺陷检测因素最有可能的是检测表面状态。需要对检测表面状态进行分析。叶片榫头端面缺陷表面采用普通磨削工艺,加工中分粗、精磨两次完成,粗磨后为精磨留0.5余量,采用46#棕刚玉砂轮,精磨砂轮转速为1440r/min,工艺中没有规定精磨每刀磨削量的大小。加工工艺对检测表面可产生以下影响:

(1)引起缺陷开口封闭。

(2)在缺陷开口附近或缺陷内造成杂物残留堵塞缺陷到表面的通道。

(3)缺陷中残留磨削液阻碍荧光渗透剂的渗入。

根据磨削工艺及荧光前的清洗条件,基本不存在后两种影响因素,缺陷的开口被封闭有可能是影响缺陷检测的直接原因。曾有资料指出,有些加工工艺会掩盖或减弱缺陷指示,但目前还没有找出磨削能影响荧光显示的有关资料信息。因此针对该材料叶片,进行了一系列加工方法对荧光检测灵敏性影响的试验,包括磨削工艺试验。试件是从已检测出有缺陷的叶片中选出的,采用多种工艺方法对有缺陷的叶片表面进行切削,并再次进行荧光检测,验证先前有缺陷的部位是否有缺陷显示消失或减弱现象。试验工艺见表1。

表1 检测表面加工工艺与荧光显示的影响

零件号	加工方法及工艺	荧光指示变化
151-1	喷丸: $\phi 0.3$ 钢球,喷射压力:0.2MPa,时间:2min	荧光显示基本消失
116-3	平磨:棕刚玉砂轮,转速1500r/min,缺陷表面去除量0.05,无冷却	荧光显示基本无变化
D56-2	平磨:棕刚玉砂轮,转速1500r/min,缺陷表面去除量0.06,无冷却	荧光显示基本无变化
A88-3	平磨:棕刚玉砂轮,转速1500r/min,缺陷表面去除量0.08,无冷却	荧光显示范围变大
7F4-4	干吹砂:河砂,吹砂压力6个大气压,时间10min	荧光显示基本消失
8299	湿吹砂:河砂,吹砂压力3个大气压,时间10min	荧光显示减弱
D54-2	湿吹砂:河砂,吹砂压力3个大气压,时间5min	荧光显示减弱

从零件表面处理前后荧光显示对比看,喷丸和干吹砂对缺陷表面的荧光显示影响显著,基本上掩盖了缺陷。湿吹砂能减弱缺陷表面的荧光显示。平磨量为0.06和0.08时对缺陷显示影响不明显,而平磨量0.08的磨削表面缺陷显示范围变大,这可能是加工暴露出新缺陷的缘故。总之,每次磨削量在0.1以下的磨削加工,对表面缺陷的掩盖不明显。

### 3.1 染色荧光检验

为了验证是否是由于加工方法,造成了表面缺陷荧

光显示消失或减弱,采用本单位内的染色荧光再次对喷丸、干吹砂和湿吹砂三种加工表面状态的叶片进行检验。从染色荧光显示照片看,喷丸和干吹砂表面局部有点状染色荧光显示,说明叶片榫头端面存在缺陷,且染色荧光与后乳化荧光对缺陷检测的灵敏度有差别,相对检验时所用的三级灵敏度得后乳化荧光检验,染色荧光的灵敏度更高些。同时也可以看出喷丸和干吹砂加工并不是完全掩盖缺陷,其掩盖程度取决于加工工艺参数及检验方法的灵敏度。

### 3.2 再次验证磨削加工对缺陷显示的影响

在前一次的验证中没有发现磨削对缺陷显示有明显掩盖现象。通过生产现场调研发现,工人在磨削叶片时,每次磨削量与验证时的磨削量不同,实际每次的磨削均大于0.1。与无损专家研讨分析后决定,采用大磨量再次进行磨削试验。本次共试验6片有荧光显示的叶片和一个试块。试验的磨削量见表2。

表2 磨削余量与荧光显示的影响

零件号	磨削工艺参数,棕刚玉砂轮,转速1500r/min	荧光指示变化
116-3	平磨:缺陷表面一次去除0.1,冷却	荧光显示显著减弱
A88-3	平磨:缺陷表面一次去除0.25,冷却	荧光显示减弱
8299	平磨:缺陷表面一次去除0.4,冷却	荧光显示减弱
7F4-1	平磨:缺陷表面一次去除0.5,冷却	荧光显示显著减弱
151-1	平磨:缺陷表面一次去除0.6,冷却	荧光显示显著减弱
7F4-4	平磨:缺陷表面一次去除0.6,冷却	荧光显示显著减弱
179-1	线切割分割叶片缺陷部位,人工研磨切割块	切面无荧光显示

从荧光显示可以看出,相对磨削前的荧光显示,采用大磨削量加工缺陷表面后两种荧光显示明显减弱。说明当磨削量增加后,磨削加工对表面缺陷存在掩盖现象,随着每次磨削量的增加,掩盖的程度也增大,对3级灵敏度的后乳化荧光检验来说,甚至完全掩盖。同样染色荧光显示的缺陷比后乳化荧光多,再次说明染色荧光较后乳化荧光灵敏度高。

### 3.3 对试件电抛光试验

为了验证上一节中,荧光显示减弱原因是否与部分缺陷被加工掉了有关,采用无切削力的电抛光工艺,对其中的两件叶片及切割试块进行表面电抛光,抛光工艺参数见表3。从荧光显示可明显看出,经过电抛光后,缺陷显示明显增加,这就证明随磨削量增加,显微疏松缺陷的确被掩盖。对于后乳化的三级灵敏度检验方法来说,缺陷可能完全掩盖而无法检测出。同时荧光显示可以看出,经过电抛光后切割表面出现缺陷显示,而先前的检测没有显示,说明研磨加工也能掩盖显微疏松。

表3 电抛光参数

零件号	电抛光工艺参数	荧光指示变化
151-1	抛光液为硫酸,时间 25min	荧光显示显著增加
7F4-4	抛光液为硫酸,时间 15min	荧光显示显著增加
179-1	线切割切块: 抛光液为硫酸,时间 25min	切面有荧光显示

### 3.4 解决表面缺陷掩盖的工艺方案和验证

对于后乳化荧光检测方法来说,磨削加工对 DZ22 材料叶片表面显微疏松缺陷有掩盖效果,说明在磨削力的作用下,缺陷通往检测表面的开口可能因材料变形而堵塞,影响了荧光渗透剂进入缺陷中。为了进一步验证这种推断,对前面试验的几组叶片检测表面进行了线切割加工,切掉厚度约 1mm 厚检测试片。因为线切割加工无切削力,不存在因切削力而掩盖缺陷的外在条件。在显微镜下对比试片厚度方向表面上的磨加工和电加工表面缺陷状态,分析两种加工工艺下缺陷状态的差别。同时磨掉叶片 0.1~0.2 余量的电加工表面,磨削时每次精磨 0.05 磨削量,并重新检测叶片及试块缺陷。图 2 是榫头检测试片及纵向厚度处的系列金相图,图 3 是局部系列高倍金相图,图 4 是有显微疏松缺陷的磨削表面,经过多次热处理循环后的金相图。从图 2~4 可以验证以下几个问题:

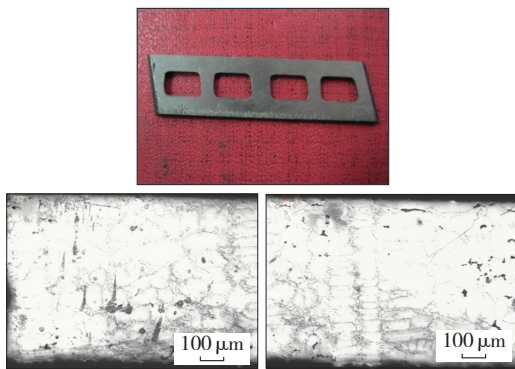


图2 试片及纵向厚度处系列金相图

Fig.2 Vertical thickness of specimen at series of metallographic phase diagram

(1) 试片纵向上在两端处(零件表面)的组织致密,缺陷很少,中间部位显微缺陷较多。

(2) 磨削表面(见图 3 左上角和右上角)的缺陷组织,有明显的因加工变形而导致开口闭合的状态,而线切割电加工表面的缺陷均有开口通向表面。因此可以进一步证实磨削加工可以掩盖缺陷显示。而电加工不影响表面缺陷显示。

(3) 电加工表面的重熔层厚度约在 0.02 左右。

(4) 经过热处理循环后,因磨削引起的缺陷闭合开

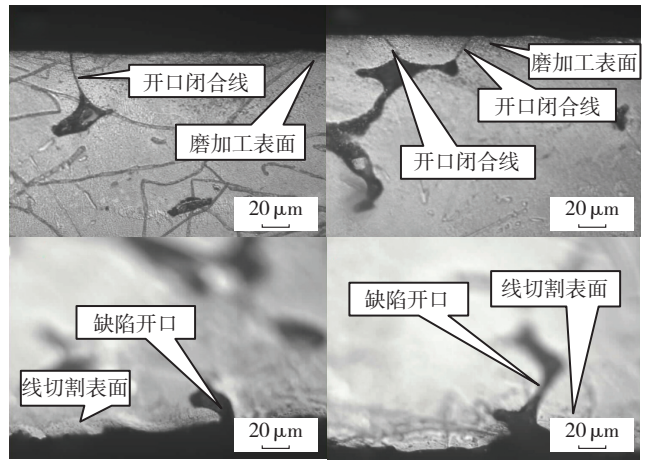


图3 试片局部缺陷高倍金相(线切割表面与磨削表面对比)

Fig.3 Local defects of high magnification metallographic specimen

( wire cutting surface and grinding surface in contrast )

口被重新打开,见图 4。

这与上一节的分析完全吻合,所以采用线切割方法替代原工艺中的粗磨榫头端面工序,为精磨留 0.15 左右的余量,在线切割后以每次磨削量约 0.05 精磨去除。通过对磨后的叶片及切割掉的试片进行荧光检测,每片叶片榫头端面的缺陷分布状态和范围与其切割下的试片缺陷基本对应,荧光显示无明显差别。同时切割掉 1mm 厚度后,有的叶片缺陷数量减少,有的增加,说明榫头端面缺陷在叶片径向也有一定的深度范围。

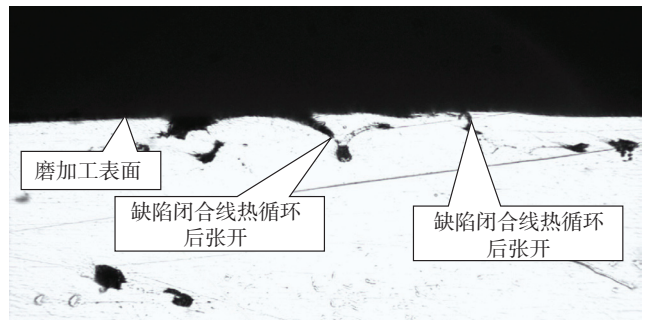


图4 磨削的试片经过4次热处理后表面缺陷状态

Fig.4 Surface defects of grinding specimen after 4 times heat treatment

## 4 讨论分析

通过以上的试验分析及验证,对 ZD22 材料来说,磨削工艺对其显微疏松类缺陷有掩盖效果,从叶片的工艺看,工艺流程中含有消除应力、钎焊、热处理、电弧镀 4 次热加工,在多次冷热循环后,缺陷的闭合部分逐渐张开,因此在最后的一次荧光检验时才陆续的发现这些缺陷。若要在叶片单件加工中及时发现缺陷,需将机加工

(下转第 91 页)

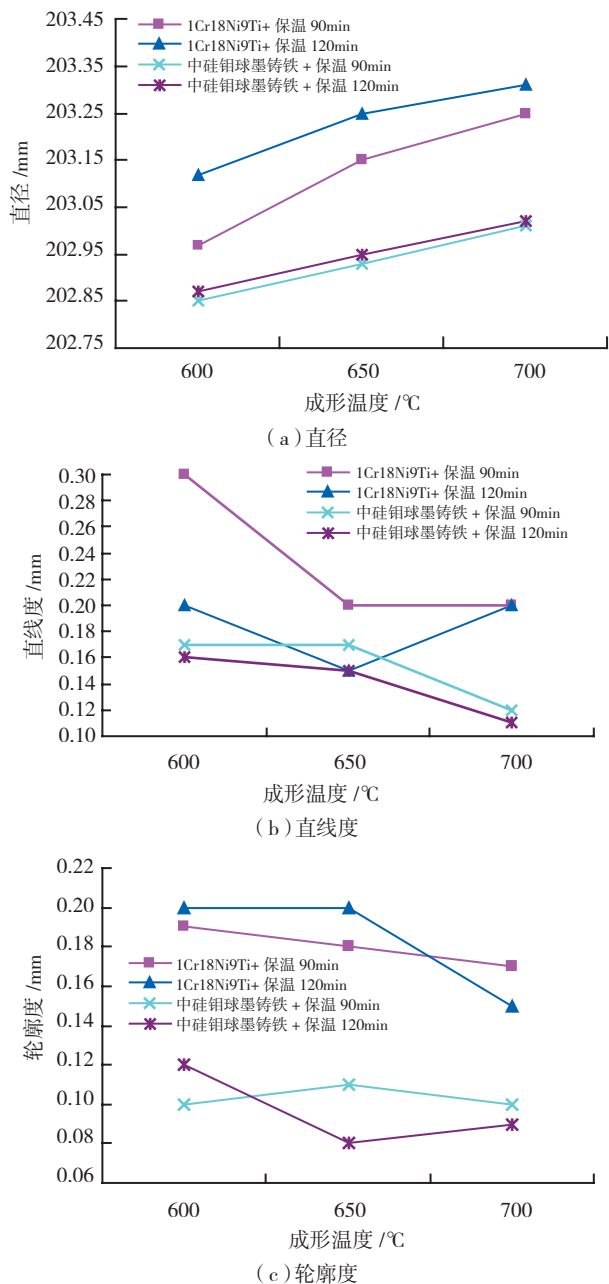


图2 参数对零件精度的影响

Fig.2 Effects of parameters on precision

形温度下(600℃~700℃)TC4合金应力释放的程度与温度强正相关,与保温时间弱正相关。根据文献[6],材料温度升高时,应力松弛速度加快。胀形温度与保温时间在某种程度上存在一定的交互作用,通过不同参数的匹配,可以成形出相同尺寸的试件。图2(a)中,1Cr18Ni9Ti的模具材料,当成形温度700℃、保温时间90min的试件与成形温度650℃、保温时间120min的试件直径相同。这说明成形温度与保温时间有一定的交互作用,可以通过调整这两个参数达到相同的直径尺寸。

## 4 结论

(1)分瓣热胀形是高精度钛合金筒形件的一种有效成形方法,分瓣热胀形 $\phi 200\text{mm} \times 700\text{mm}$  TC4钛合金筒形件直径精度可以达到 $\pm 0.03\text{mm}$ ,直线度精度可以达到0.11~0.17mm。

(2)分瓣热胀形筒体在分瓣处的轮廓度较其他位置精度差,通过调整工装结构以及重复错位胀形的方式能有效地提高轮廓度精度。

(3)分瓣热胀形时,模具材料与TC4钛合金的膨胀系数正差越小,TC4钛合金筒体成形后的尺寸波动越小精度越高。

(4)在600℃~700℃范围内,不同的分瓣热胀形温度与保温时间组合,可以获得相同直径及精度的TC4钛合金筒体。

## 参考文献

- [1] 罗皎,李森泉,李宏,等. TC4高温变形行为及其流动应力模型. 中国有色金属学报,2008,8(18):1395-1396.
- [2] 王明伟,张立文,戚林,等. 钛合金筒形件真空热胀形数值模拟. 大连理工大学学报,2008,1(48):58-59.
- [3] 肖军杰,李东升,李小强,等. 刚模热胀形TC1半球零件试验与数值模拟研究. 锻压技术,2011,6:28-29.
- [4] 沈宁福,张东捷,李仲达,等. 新编金属材料手册·不锈钢铸铁. 北京:科学出版社,2003:165-197.
- [5] 理有亲,林兆荣,陈春奎,等. 钛板冲压成形技术. 北京:国防工业出版社,1986:169-170.
- [6] 刘勇,尹钟大,朱景川. 温度、应力及晶粒度对TC4合金应力松弛性能的影响. 稀有金属材料与工程,2003,32(8):643-645.

(责编 良辰)

(上接第88页)

艺中的粗磨改为线切割,留0.15左右的精磨量,精磨时每次以小磨削量0.05左右为宜。或者在线切割后就进行荧光检验,是可以100%发现缺陷的。否则只能在后续工序或试车后发现缺陷。

通过对高低涡叶片的各种切削工艺对缺陷显示影响的验证分析可以得出以下结论:(1)高涡叶片的缺陷为铸造显微疏松缺陷,对于三级灵敏度得后乳化荧光检验方法而言,该缺陷检测受磨削量工艺影响。(2)通过调整高涡叶片加工工艺,即将粗磨改为线切割,并留0.15左右的余量,精磨时采用0.05左右的小磨削量,精磨后或在线切割后采用三级灵敏度得荧光检测,完全可以检测出铸造显微疏松缺陷。(3)对于磨削余量较大的零件表面,要检测出零件缺陷,需要经过多次的热循环后,才有可能最终检测出表面缺陷。若工艺中无热循环的工艺,零件的表层缺陷又可能漏检,需要用户及无损检测人员特别关注这种现象。

(责编 亦非)