

航空发动机制造中涡流分选技术的应用

谢建红¹, 吕 健¹, 赖迎庆¹, 石 剑¹, 周位洲², 桂咏梅¹, 焦 博¹

(1. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412000; 2. 中国航发湖南通用航空发动机有限公司, 株洲 412000)

摘要: 针对航空发动机制造中出现的混料问题, 在不分解发动机的前提下, 提出采用涡流分选技术对问题零件进行原位检测。设计了一种原位检测专用探头, 通过试验, 证明其具有良好的检测效果。

关键词: 航空发动机; 混料; 涡流分选; 原位检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)10-0056-03

Application of eddy current separating technology in aero-engine manufacturing

XIE Jianhong¹, LYU Jian¹, LAI Yingqing¹, SHI Jian¹, ZHOU Weizhou², GUI Yongmei¹, JIAO Bo¹

(1. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China;

2. AECC Hunan General Aviation Engine Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Aiming to solve the mixture problem in aeroengine manufacturing, the eddy current separating technology was proposed to realize the in-situ testing of problematic parts under the condition of without disassembling the aeroengine. A special probe for the problematic parts in-situ testing was designed. The experiment results indicate that this probe has good detection effect, and has been used successfully.

Key words: aero-engine; mixture; eddy current separating; in-situ testing

某型发动机活动环为火焰筒电嘴活动座上的零件, 由于其工作环境温度较高, 所以采用具有优良抗氧化性的固溶强化镍基抗氧化合金 GH3044 制作。通过排查, 发现某一批用于加工活动环的棒料中混入了 1 根 0Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢棒料, 从而导致部分活动环的材料不符。而 0Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢高温抗氧化性不足, 使用时存在高温条件下氧化速率过快引起的变形、开裂等问题, 从而导致零件失效。因此, 为了确保航空发动机的安全飞行, 不仅需要对这两种材料加工的零件进行危害性分析, 还需要采取一种有效的材料分选方法对装用问题批次零件的发动机进行原位检测, 以建立装用错误材料零件的清单。

涡流检测作为一种常规的无损检测方法, 具有检测速度快、适用性强、重复性好等特点, 已被广泛

应用于航空航天等领域^[1-2]。涡流检测的适用性不仅表现在其可用于缺陷检测, 材料分选也是其重要应用领域^[3-4], 因此笔者采用了涡流分选技术对涉及的问题零件进行材料分选。试验结果表明: 该方法具有良好的检测效果。

1 涡流分选原理

根据电磁场理论可导出半无限平面导体的涡流分布密度公式为

$$\begin{cases} I_x = I_0 \exp[-(1+j) \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma} x] \\ I_0 = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma} H_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_x 为被检导体表面下深度为 x 处的涡流分布密度; I_0 为被检导体表面的涡流分布密度; j 为单位虚量, 表示涡流信号的相位在涡流透入深度增加的同时, 随时间呈负指数函数规律产生滞后; f 为激励频率; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; σ 为电导率; H_0 为磁场强度。

对于半无限平面导体, 在被检导体表面下深度为 x 处涡流信号的相位角为

收稿日期: 2019-12-10

作者简介: 谢建红(1991—), 硕士, 工程师, 主要从事航空发动机的涡流检测和相关技术工作

通信作者: 谢建红, 247500323@qq.com

$$\theta(x) = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma x} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以看出,对于非铁磁性导电材料,其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$,在相同的检测频率 f 和磁化条件 H_0 下,被检导体表面的涡流密度与被检对象电导率的平方根成正比,即电导率越高,在被检对象表面激励产生的涡流密度越大,检测线圈的涡流信号也就越强。涡流信号相位也有相同的变化规律,即电导率越高,感应信号相位角越大。因此,可以通过对比分析不同非铁磁性导电材料的涡流信号在幅值和相位上的差异,来实现材料分选。

2 涡流分选试验

2.1 对比试件

为了保证试验结果的可靠性,分选试验所用对比试件(见图 1)应满足以下要求:① 一件是按图纸要求用正确材料制成的正确件,另一件是用混入的错误材料制成的错误件;② 对比试件必须与待检零件的热处理状态和表面处理状态一致;③ 应用光谱分析法等手段确定对比试件的材料。



图 1 对比试件外观

2.2 分选试验

经过研究对比试件的形貌特征,并结合试件在发动机上的安装情况,仅能选择试件的圆柱内表面作为检测面,因此分选试验应选用如图 2 所示的钩式绝对式涡流探头。



图 2 分选试验探头外观

连接探头和仪器,按表 1(DIV 为设备自带表示幅值的方式)调试涡流仪的工作参数,保持调试后仪器的状态不变,将探头置于 GH3044 对比试件的待检面进行提离测试,得到一个提离信号,然后将探头置于 0Cr18Ni10Ti 对比试件的待检面进行提离测试,得到对应的提离信号,两次提离测试的信号如图 3 所示。

对比分析两次提离测试的试验结果,可以看出

两种材料的提离信号不仅在幅值上有较大区别,且有一个明显的相位差,与上一节的理论相吻合,这说明涡流分选技术能够有效实现对 GH3044 和 0Cr18Ni10Ti 的材料分选。不过需要注意的是,涡流分选技术仅适用于已知材料牌号的材料分选,并不能对材料的具体成分进行定性分析,且实际检测时需将待检件涡流信号与对比试件的涡流信号对比试件进行比对。

表 1 涡流分选试验参数

试验参数	数值	试验参数	数值
频率/kHz	500	x 轴灵敏度/DIV	0.5
增益/dB	24.8	y 轴灵敏度/DIV	0.2
低通滤波/Hz	200		

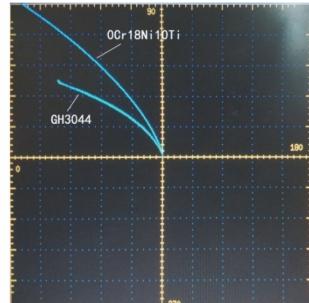


图 3 两次提离测试信号

3 工程应用

通过理论分析与试验验证,可知涡流分选技术能有效实现问题零件的分选。但是,如果要在不拆卸的情况下进行原位检测,还存在待检部位不可视、检测空间狭小的问题。

基于原位检测的实际需求,笔者在原有探头的基础上,采用弯管器对探头进行约 90°的弯曲处理,弯曲后探头形状如图 4(a)所示,其可适应有限的检测空间;设计制作原位检测专用工装,再与探头配合得到原位检测专用探头[见图 4(b)],以此解决待检部位不可视的问题。

为了验证专用探头的有效性,选用 1 件正确件(材料为 GH3044)和 1 件错误件(材料为 0Cr18Ni10Ti)装到发动机上,以模拟外场的检测工况,然后进行原位检测,得到如图 6 所示的检测信号。结果表明,笔者设计的原位检测专用探头使用非常方便,仅需将探头安装至指定位置,即可在不可视的状态轻松实现问题零件的原位检测,具体检测步骤如下所述。

(1) 连接探头与仪器,按表 1 调试涡流仪的工作参数,保持调试后仪器的状态不变,开始工作。

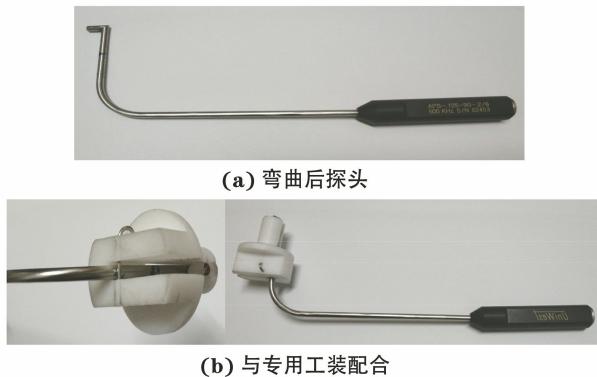


图 4 原位检测专用探头

(2) 运用零点校准按钮,当探头离开零件时,将信号起始点调回零位。在工作过程中,当发现零位有明显漂移时,应及时校准。

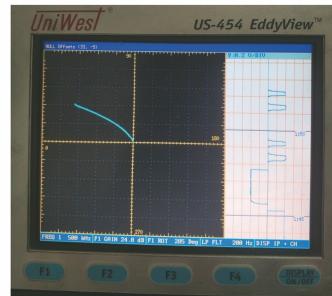
(3) 在 GH3044 对比试件上进行提离测试,得到一个提离信号,而后在 0Cr18Ni10Ti 对比试件上进行提离测试,得到对应的提离信号。

(4) 将专用探头插入至发动机上的指定位置进行提离测试,当提离信号的幅值和相位与 GH3044 对比试件的一致时(由于零件自身允许的差异,以及探头轻微偏移等因素,提离信号的幅值和相位会有微小的波动范围),被检件可判断为“正确件”[见图 5(a)]。当提离信号的幅值和相位与 0Cr18Ni10Ti 对比试件的一致时,该被检件可判断为“错误件”[见图 5(b)]。

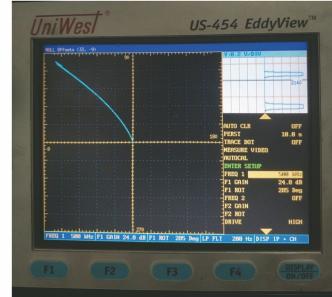
(5) 在检测过程中,应不定期采用对比试件校准仪器。

4 结语

综上可知,利用涡流分选技术可实现问题零件的原位检测。采用上述检测方法对外场所有涉事的



(a) 正确件



(b) 错误件

图 5 实际检测信号

发动机进行了涡流分选普查,检出了所有错误件,并建立了装用错误材料零件的发动机清单,以便采取针对性的应对措施。

参考文献:

- [1] 秦峰. 航空涡轮叶片缺陷的扫查式涡流检测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [2] 田武刚, 潘孟春, 罗飞路, 等. 某型航空发动机篦齿盘裂纹的原位涡流检测 [J]. 测试技术学报, 2008(3): 241-244.
- [3] 钱艺铭. 废旧破碎冰箱铜、铝混合颗粒涡流分选研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [4] 张德浩. 废旧有色金属涡电流分选技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

(上接第 3 页)

表 1 三维应力和主应力的计算结果

应力分量/MPa		主应力及其与坐标轴方向角			
σ_{11}	-378.9	主应力/MPa	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$\theta_3/(^\circ)$
σ_{22}	-519.60	σ_1	-231	112.0	90.00
σ_{33}	-258.00	σ_2	-405	22.9	90.80
σ_{12}	-1.30	σ_3	-519	89.6	0.42
σ_{23}	-0.88				89.8
σ_{31}	-62.30				

分析中,当预期应力和测试结果偏离较远时,应考虑主应力和切应力的作用。

参考文献:

- [1] GB/T 7704—2017 无损检测 X 射线应力测定方法 [S].
- [2] 牛兴华, 王正君, 解宁, 等. 磨削表面层残余应力的三维试验研究 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(5): 383-385.