

# 钛合金导管的涡流检测

刘国增

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 通过对大批量的钛合金管材进行涡流检测, 从涡流检测原理以及影响因素等方面分析了缺陷信号、噪声信号的产生以及差异, 通过多次调试试验得到了各种规格管材的检测参数, 其中对检测结果影响比较大的频率、增益进行了多次对比试验, 得到了最佳参数范围, 为管材的可靠性判断提供了依据。

**关键词:** 管材; 涡流检测; 可靠性判断

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 03-0048-04

## Eddy current testing of Ti alloy ducts

LIU Guo-zeng

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Based on the eddy current testing for a mass of Ti alloy ducts, the generation and difference of defect signal and noise signal are analyzed in terms of eddy current testing principle and influencing factors. Testing parameters of ducts with various sizes were obtained through several times of debugging tests. Several comparison tests on frequency and gain were conducted because of their significant influence on testing results. The optimal parameter range was acquired for reliability judgement of the ducts.

**Keywords:** duct; eddy current testing; reliability judgement

## 0 引言

钛的熔点高、密度小、强度大、耐热、耐腐蚀、具有良好的焊接和低温性能, 作为理想的工程材料广泛应用于航天、航空等领域。

在液体火箭发动机中, 钛管的应用最为广泛, 主要应用在高温、耐冲击、燃料导流等关键部位, 因此钛管的质量和安全性可靠性直接影响着

发动机的安全可靠。为了更好地解决管材可靠性的检测, 引进了管材涡流探伤设备。经过大量调试试验得到了各种规格管材的涡流检测参数, 为其性能可靠性判断提供了依据。

## 1 涡流检测原理

涡流检测的基本原理为电磁感应原理。由高频振荡器供给交变电流激励检测线圈 (探头), 线

收稿日期: 2010-12-20; 修回日期: 2011-03-15

作者简介: 刘国增 (1983—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机无损检测

圈中的交变电流激发交变的磁场。当载有交变电流的检测线圈接近被检的金属试件时, 由于检测线圈磁场的作用, 在试件表面和近表面将感应出涡流, 涡流又产生自己的磁场, 涡流磁场的作用是削弱和抵消激励磁场的变化。涡流的大小、相位和流动轨迹与试件的电磁特性、几何尺寸和缺陷等因素有关, 因此通过测定检测线圈的阻抗变化即可获得被检件有无缺陷的质量信息。

交变电流通过导线时, 导线周围变化的磁场会使电流分布不均匀, 表面的电流密度大, 越往中心处越小, 按负指数规律衰减, 这种电流主要集中在导体表面的现象称为集肤效应。

涡流密度衰减到其表面值  $1/e$  时的透入深度为标准透入深度, 也称集肤深度, 它表征涡流在导体中的集肤程度, 用符号  $\delta$  表示, 单位  $m$ 。由半无限大导体中电磁场的麦克斯韦方程可以导出距离导体表面  $x$  深度处的涡流密度为

$$I_x = I_0 e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} x}$$

式中:  $I_0$  为半无限大导体表面的涡流密度,  $A$ ;  $f$  为交流电流的频率,  $Hz$ ;  $\mu$  为材料的磁导率,  $H/m$ ;  $\sigma$  为材料的电导率,  $S/m$ 。

则标准透入深度为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

该公式为涡流检测的最基本依据, 透入深度和检测频率成反比, 而灵敏度又和检测频率成正比, 这种矛盾在实际工作中根据检测需要来选择侧重点。

## 2 检测方案及试验

### 2.1 检测方案选择

ET-555 全数字电脑多频涡流探伤仪可实现自动检测和手动检测两种功能。根据送检材料的长度、数量来选择检测方案。

#### 2.1.1 批量检测方法

对于长度长、数量比较大的批次产品, 选择自动与手动结合的方式, 检测步骤如下:

1) 选用自动检测进行筛选, 把合格品和显示有超标信号的产品分开;

2) 将有超标信号的产品再次检测, 确认检测结果。标记超标信号出现的范围, 对于超标信号出现频繁的产品, 直接筛选出来;

3) 精确标记超标信号位置, 在自动检测确定的范围内, 将设备调到手动模式, 对超标信号进行精确定位。

#### 2.1.2 手动检测方法

对于传动装置无法正常传输的材料, 进行手动检测, 检测步骤如下:

1) 固定好探头, 调零后, 匀速的拉动管材并观察屏幕显示的信号;

2) 对于出现超标信号的部位, 在附近重新调零检测, 确认并标记。对于信号显示幅度比较大但是不超标的位置也进行重新调零检测, 确认信号是否超标。

### 2.2 检测试验

依据 GJB4540-2002 《航天推进系统用钛管材料规范》制作标准样管, 直径大于  $8\text{ mm}$  的钛管采用不大于  $\Phi 0.6\text{ mm}$  的通孔, 直径小于  $8\text{ mm}$  的钛管采用不大于  $\Phi 0.3\text{ mm}$  的通孔。样管规格分别为  $\Phi 6 \times 1$ ,  $\Phi 8 \times 1$ ,  $\Phi 10 \times 1$ ,  $\Phi 12 \times 1$ ,  $\Phi 12 \times 1.5$ 。试验条件为:

1) 仪器: ET-555 型涡流探伤仪, 具有阻抗平面分析技术功能;

2) 探头: 差动结构穿过式探头;

3) 传动架: ETS-5/30 涡流检测传动设备;

4) 检测速度:  $15\text{ m/min}$ 。

每一规格批次的管材用相应的标准样管校准设备, 设定频率、相位、增益、报警范围框。选择相应直径的导向套, 让标准样管连续通过探头, 通过观察通孔信号的零点漂移来调整设备的对中情况。

### 2.3 检测参数选择

依据相关标准制作的各规格的标准样管, 通过标准样管的校验以及有关产品涡流检测的规范, 确定钛合金管材的参数范围。

制作标准样管的材料的噪声信号较小, 而实际检测的材料由于表面粗糙度、成型划痕、材料

组织以及长度都会对信号显示造成影响。

依据标准透入深度公式, 将所检管材壁厚设为透入深度, 可以求出检测频率 $f$ 的最大值。检测频率小于最大值才能覆盖所检管材的壁厚, 频率越小, 灵敏度越低, 同时对噪声信号的响应度越低。如图 1 是在高频下出现的自然缺陷信号, 图 2 是低频率下的自然缺陷信号, 由图可见满足灵敏度要求下低频率时缺陷信号的细节显示更加清晰。

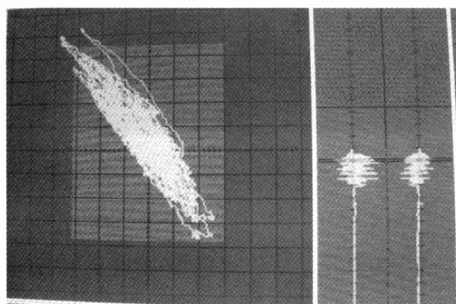


图 1 高频下的自然缺陷信号

Fig. 1 Natural defect signal at high frequency

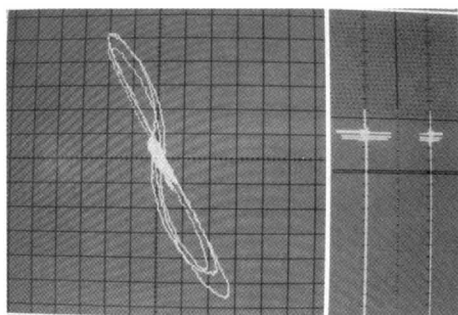


图 3 高增益显示

Fig. 3 High gain display

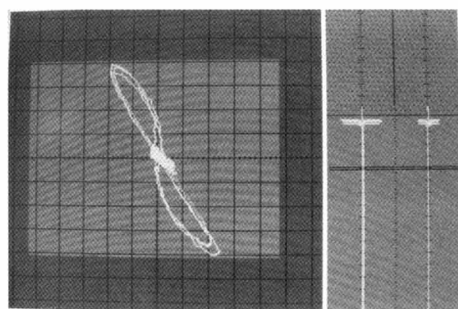


图 4 低增益显示

Fig. 4 Low gain display

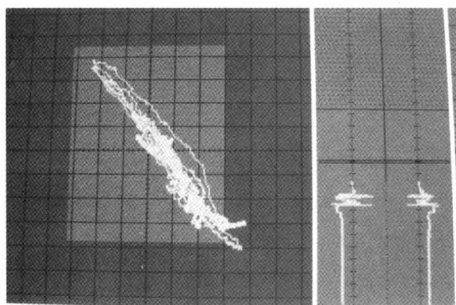


图 2 低频下的自然缺陷信号

Fig. 2 Natural defect signal at low frequency

### 2.3.1 增益

管材涡流检测结果是用标准缺陷试样标定的, 不同的设备具有不同的信号放大装置, 反映到设备参数上就是增益 $G$ 。合理的 $G$ 值是使设备具有易于观察的信噪比。图 3 显示的是接近满屏显示的标准样管, 可以看见零点处由于漂移及震动影响显示比较大, 图 4 是增益降低后的显示, 零点相对比较小而清晰。

### 2.3.2 相位及噪声

通孔缺陷的相位出现在 $40^\circ$ 位置时, 依据内外壁缺陷的出现时延可以知道, 内壁缺陷出现在图像左侧, 外壁信号出现在图像右侧。因此对于不同厚度的试样, 可通过相位调节, 使其通孔信号的相位位于 $40^\circ$ 位置, 如图 5 所示。

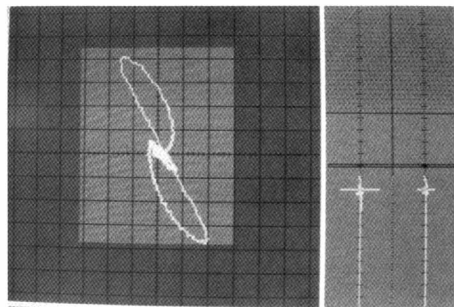


图 5 标准样管通孔信号

Fig. 5 Through-hole signal of standard duct sample

管材传动时的震动等影像因素具有一定的随即性, 依据概率分布原理, 当通过探头的合格管材达到一定长度时, 噪声信号、震动影响信号是

以原点为圆心, 平均噪声为半径的圆形显示。因此选择合适的导向装置, 提高传动装置的对中程度, 可有效降低由于震动所产生的零点漂移, 从而提高临界缺陷的识别率, 如图 6 为长度 2 m 的合格产品的零点漂移及噪声显示。

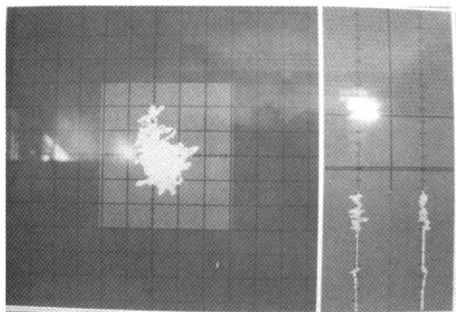


图 6 正常的合格产品信号

Fig. 6 Normal signal of qualified product

### 2.3.3 垂直/水平分量比

垂直/水平分量比  $V/H$  是调节图像在屏幕上显示的垂直和水平比例, 通过调整比例可以区分面积状缺陷和线状缺陷。

### 2.4 参数调整

经过每个规格各 5 个批次, 每批次约 200 m 的检测调试, 调整得到了各个参数的具体数值, 检测结果与相关单位的检测结果一致, 但是, 非超标缺陷的识别灵敏度更高, 同时缺陷定位的准确度更高。

## 3 结论

根据每个规格各 5 个批次的试验结果, 可以得出以下结论:

1) 所采用涡流设备自动化程度高, 传送速度

稳定, 周向灵敏度高, 一次检测结果的可靠性高;

2) 所制定的检测方法稳定, 检测结果的重现率达到 100%, 设备的检测灵敏度可以达到相关标准的要求;

3) 由于具有稳定可靠的自动传输设备, 因此传送、振动、对中以及填充系数所引起的零点漂移很小, 标准样管连续通过探头时通孔信号稳定、工作效率高。

### 参考文献:

- [1] 徐可北, 周俊华. 涡流检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 刘浪飞, 林秀和, 彭大暑. 薄壁铝合金小径管的涡流检测 [J]. 无损检测, 1999, 21(7): 316-317.
- [3] 王尧, 彭秀荣, 林春文. 小径管内壁腐蚀状况的无损检测技术 [J]. 无损检测, 1999, 21(7): 300-302.
- [4] 魏惠元. 小口径钛管涡流探伤技术 [J]. 无损探伤, 1999 (5): 9-11.
- [5] 高亮, 刘自强. 凝汽器铜管多频涡流检测 [J]. 湖北电力, 2000, 24(1): 22-23.
- [6] 段权, 程光旭. 在役压力容器疲劳裂纹的涡流无损检测方法研究 [J]. 化工机械, 2000, 27(4): 208-210.
- [7] 曹文浩, 徐强. 锅炉钢管涡流探伤验收标准的探讨 [J]. 锅炉制造, 2000(2): 49-51.
- [8] 吴伯铭, 陈浩时, 胡静霞. 检测速度及其稳定性对涡流检测的影响 [J]. 上海冶金高等专科学校校报, 2000, 21(1): 25-28.
- [9] 张姚. 多频涡流检测合成塔换热列管 [J]. 无损探伤, 2000 (6): 36-37.
- [10] 张会云, 严仍春, 楼敏珠. 阻抗平面显示技术在涡流检测信号处理中的应用 [J]. 无损检测, 2003, 25(1): 44-47.

(编辑: 陈红霞)