

火箭发动机用薄壁合金管涡流特性分析

伍 颂 赵建华

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 为了保证火箭发动机用薄壁合金管的可靠性,通过涡流检测参数的编程计算,具体分析了材料的主要涡流特性,制定了正确的火箭发动机用薄壁合金管检测方法。结果表明,此分析方法具有一定的工程应用价值。

关键词 无损检测,涡流,特性分析,薄壁合金管

Eddy Current Characteristic Analysis for Thin Wall Alloy Tubes in Rocket Engines

Wu Song Zhao Jianhua

(Aerospace Research Institute of Material and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract To assure reliability of thin wall alloy tubes in rocket engines, main characteristics of eddy current in the tube material are analyzed in detail, and correct testing methods are established by programming and computing test parameters of the eddy current. Experimental results indicate that these methods are useful for engineering applications.

Key words Non-destructive testing (NDT), Eddy current, Characteristic analysis, Thin wall alloy tube

1 前言

某型号火箭发动机喷管延伸段由特殊高温合金管焊接成型,管材尺寸 $\Phi 5.8 \text{ mm}$ (外径) $\times 0.33 \text{ mm}$ (壁厚) $\times 3\ 800 \text{ mm}$ (长度),电导率约 1.7% IACS,属于非磁性薄壁管。由于发动机工作条件苛刻,要求合金管材具有良好的变形能力以及耐高低温、抗冲刷特性。管材内部及表面存在的应力裂纹、腐蚀凹坑、金属夹杂和表面损伤等缺陷,对管材使用的可靠性有严重影响,甚至会造成整台发动机失效,必须对全部管材实施高标准严格的涡流无损检测。

设计单位制定的判废标准为 $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 通孔当量,超过了目前国军标^[1]中关于金属管材的检测灵

敏度最高级别;因此分析非磁性薄壁管的涡流特性,设计检测参数和制定检测方法,是保证管材质量的基础。

2 管材涡流检测基本原理

当金属管材进入通有交变电流的检测线圈时,管壁上将感应出涡流,产生的涡流磁场又会影响检测线圈阻抗分量。当管材没有缺陷时,涡流场相对稳定;当管壁上有缺陷时,涡流场发生畸变,引起检测线圈阻抗快速变化,分析不同状态下的管材涡流特性,对比线圈阻幅值、相位变化的程度,进一步判定缺陷的当量尺寸和深度。

收稿日期:2002-09-12;修回日期:2002-12-04

伍颂,1968年出生,高级工程师,主要从事无损检测方面的研究工作
宇航材料工艺 2003年 第2期

2.1 检测线圈填充系数的计算

检测小直径的非磁性薄壁管一般使用的外穿式探头(也称环绕式探头),下式定义了检测线圈的填充系数 η 计算公式^[2]:

$$\eta = (d_a/D)^2 \quad (1)$$

式中: d_a 为被检管材外径; D 为检测线圈中绕组内径。

由于填充系数越接近于 1, 检测灵敏度越高, 因此在条件允许的范围内, 检测线圈的绕组内径应尽可能接近于被检管材外径。考虑管材厚度在允许范围内变化(0.30 mm ~ 0.36 mm) 和手动探头移动的平滑性, 研究中采用的检测线圈绕组内径为 5.9 mm。按式(1)计算出的检测线圈填充系数 ≈ 0.97 。

2.2 非磁性薄壁管极限频率的计算

用于计算非磁性薄壁管涡流特性的贝塞尔函数解的宗数 A 由下式定义^[3]:

$$A = \frac{f\mu_r\sigma d_i W}{5066} \quad (2)$$

式中: f 为检测频率; μ_r 为管材的相对磁导率, 对于非铁磁性管材, 相对磁导率为 1; σ 为管材的电导率; d_i 为管材的内径; W 为管材的壁厚。

如果使用环形线圈检测, 应当选择检测频率 f 使式(2)中的宗数 A 等于 1, 导出的频率 f 称为薄壁管材的极限频率 f_g :

$$f_g = \frac{5066}{\mu_r\sigma d_i W} \quad (3)$$

将被检管材的物理参数 $\mu_r = 1$, $d_i = 5.14$ mm, $W = 0.33$ mm, $\sigma = 1.02$ m/ $\Omega \cdot \text{mm}^2$ 带入式(3), 得到此种管材的极限频率 $f_g = 293$ kHz。

2.3 非磁性薄壁管材的信号复平面

设管材壁厚 W 与管材外径 d_a 的比值恒定, 我们编程计算了不同填充系数时, 非磁性薄壁管阻抗的归一化复平面, 如图 1 所示。

从图 1 中的阻抗变化轨迹线分析, 位于水平分量最右端的点可得到最大的检测灵敏度(相当于管材中涡流所引起的最大损耗), 最高的检测灵敏度出现在频率比 $f/f_g = 1$ 处, 因此, 可以将管材的检测频

率设定为 300 kHz。

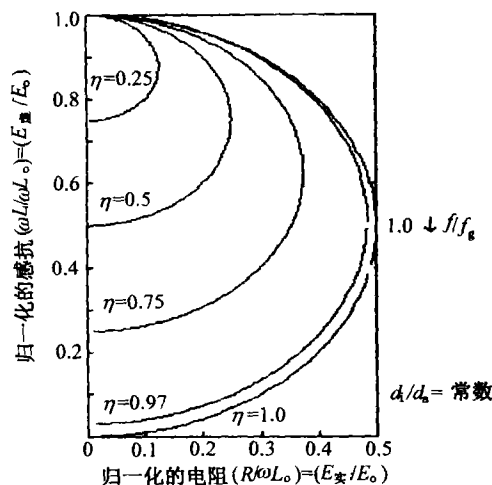


图 1 非铁磁性薄壁管的归一化信号复平面
Fig. 1 Normalized impedance plane diagram of non-ferromagnetic thin wall tube

对磁性薄壁管在填充系数小于 1 的条件下进行检测时, 线圈填充系数的减小将降低检测灵敏度, 下面给出了计算线圈阻抗和感抗分量的表达式。

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} = \frac{E_{虚}}{E_0} = 1 - \eta\mu_{有效(实)}; \quad \frac{\omega L}{\omega L_0} = \frac{E_{实}}{E_0} = 1 - \eta\mu_{有效(虚)} \quad (4)$$

通过设定的检测频率比(f/f_g)可由下式直接计算出有效磁导率的实部和虚部分量。

$$\eta\mu_{有效(虚)} = \frac{f/f_g}{1 + (f/f_g)^2}; \quad \eta\mu_{有效(实)} = \frac{1}{1 + (f/f_g)^2} \quad (5)$$

将有效磁导率的这些分量带入式(4), 就计算出非铁磁性薄壁管材的涡流信号, 通过电子线路显示在屏幕上, 由此建立了非磁性薄壁管涡流特征信号分析基础。

3 缺陷在阻抗平面图中显示

绝大多数无损检测手段都采用的是当量对比法检测, 涡流检测也是如此。管材涡流密度的变化规律是判别缺陷当量尺寸的首要依据, 不仅依靠阻抗平面图中相对幅值参数, 还要结合阻抗平面图中相位角滞后的相对趋势, 综合评判缺陷是否超标。

3.1 缺陷深度与信号幅度的关系

涡流场的趋肤效应使涡流密度自管外壁向内壁按指数规律衰减, 越靠近检测线圈涡流密度越大, 检测灵敏度越高。涡流密度变化可按式(6)计算^[4]; 检

测频率下的标准渗透深度,可按式(7)计算^[1]:

$$J_x = J_0 e^{-x\sqrt{\pi f \mu_r \sigma}} = J_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi f \mu_r}{\rho}}} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r}} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中: J_x 为距外壁距离 x 处的涡流密度; J_0 为外壁表面涡流密度; δ 为在频率 f 下的标准渗透深度; x 为距外壁距离; μ 为磁导率; σ 为电导率; ρ 为电阻率; f 为检测频率。

利用式(6)和式(7),带入被检管材的参数 $\mu = \mu_r \times \mu_0 = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\rho = 9.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$,分别在不同的检测频率下(100 kHz、300 kHz、600 kHz),编程^[5]计算出距表面涡流密度的变化曲线和不同频率下的标准渗透深度,如图2所示。

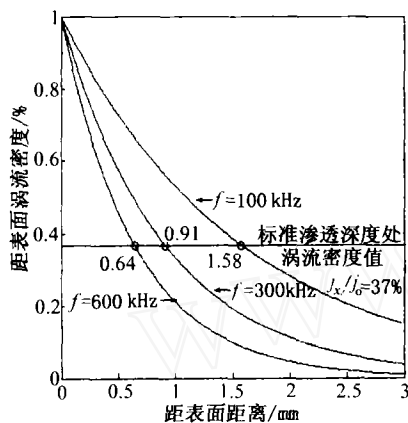


图2 涡流密度渗透曲线

Fig.2 Penetration curve of eddy current density

由图2可见:100 kHz的标准渗透深度为1.58 mm;300 kHz的标准渗透深度为0.91 mm,600 kHz的标准渗透深度为0.64 mm。由于(6)式和(7)式是在填充系数为1的情况下推导出来的,但实际检测时的填充系数小于1,将产生微弱的提高效应,使实际的标准渗透深度减小,但当管壁厚度只有0.33 mm时,管材内外表面的涡流密度分布可以满足同时检测内外表面缺陷的要求。

3.2 缺陷深度与信号相位的关系

涡流相位角自外壁向内按渗透距离成线性滞后,可按下式计算^[2]:

$$\theta_x = \frac{x}{\sqrt{\pi f \mu_r \sigma}} \quad (8)$$

式中: θ_x 为相位角滞后。

宇航材料工艺 2003年 第2期

根据不同检测频率计算的相位角滞后曲线,如图3所示。可以通过相位角滞后曲线,估算缺陷深度,估计精度一般为10%~20%。另外,由于薄壁管的管壁很薄,内壁出现缺陷时,涡流密度几乎下降到0,因此相位滞后角接近90°,这点应在实际检测中特别注意。

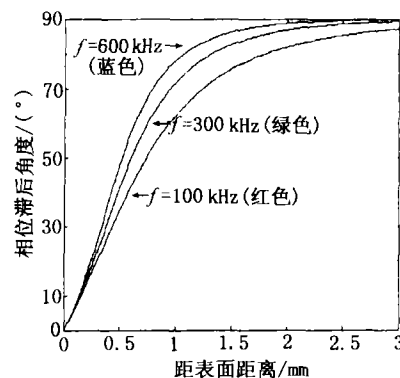


图3 不同检测频率的相位角滞后曲线

Fig.3 Phase angle curve at different testing frequencies

4 实际检测和验证

实验研究采用ET-255电脑多频涡流探伤仪,检测频率范围:100 Hz~1 MHz,具有信号分析功能,能自动计算、显示涡流信号阻抗信息(相位和幅值);检测线圈使用外穿(环绕式)探头,操作方便、缺陷定位简单;线圈绕组差动形式连接可抵消探头抖动、温度变化、尺寸不均匀等缓慢变化信号的影响,对裂纹缺陷等突变信号反映灵敏。

根据检测要求制作出的对比试样上有3个通孔(0.3 mm、0.4 mm、0.6 mm),孔伤的涡流轨迹如图4所示,从图中可以看到,不同当量尺寸的缺陷信号幅度不同,但相同的缺陷类型具有相同的相位角。

使用计算的检测参数,对一定批量的管材进行涡流检测,证明检测效果良好,能够发现超标缺陷。其中:外表面缺陷涡流轨迹如图5所示;对相位角分析判定位于内表面的缺陷,使用IW-3内窥镜检测系统(日本OLYMPUS,配 $\Phi 2.7 \text{ mm} \times 1.2 \text{ m}$ 光纤内窥镜),进行管材内表面检查并进行拍照,结果基本对应,内表面缺陷的涡流轨迹与内窥镜检测照片见图6;另外,对怀疑是穿透裂纹的缺陷,进行小焦点X射线照相(德国SEIFERT160,焦点 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$),验证结果一致。

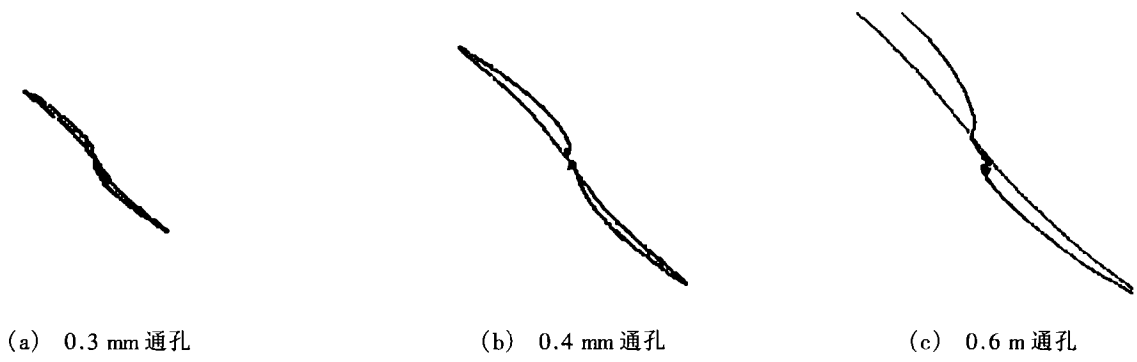


图 4 标准试样上通孔的涡流轨迹

Fig.4 Eddy current track of body size hole in standard



图 5 管材外表面缺陷的涡流轨迹

Fig.5 Eddy current track of the surface discontinuity in tube

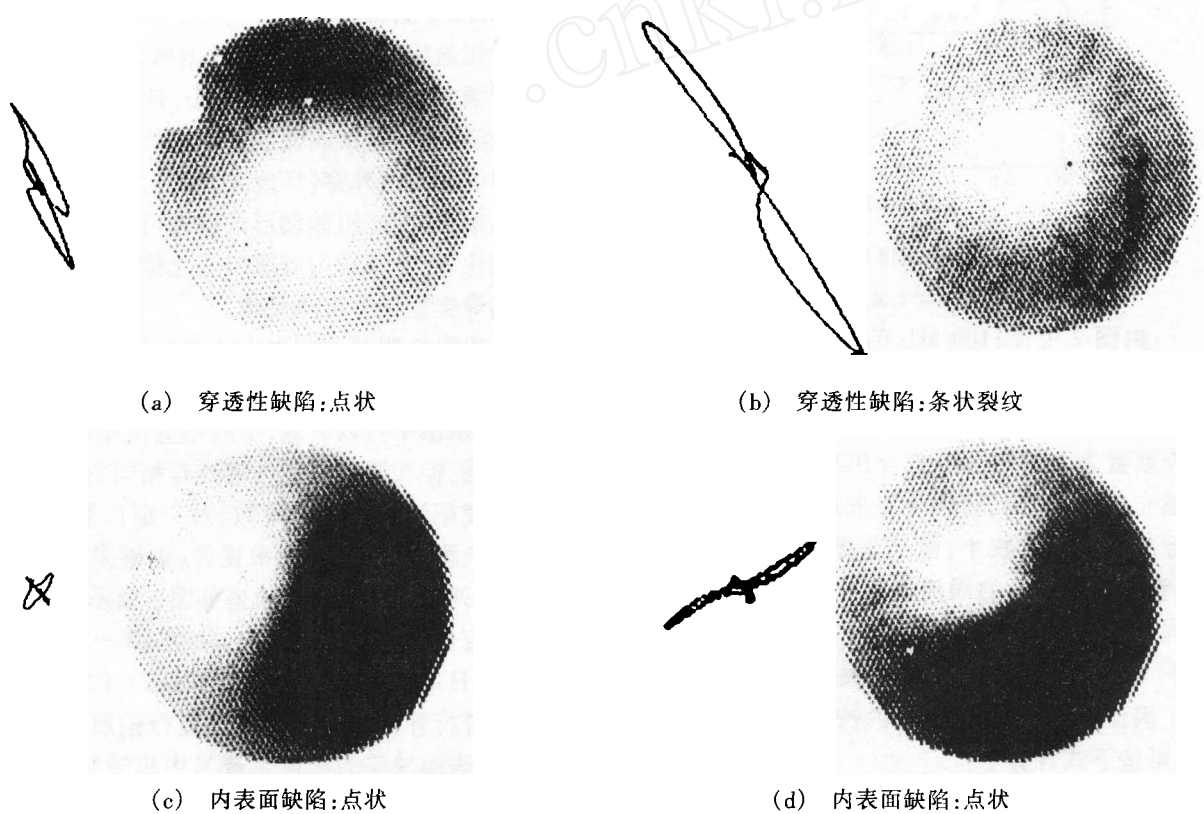


图 6 内表面缺陷的涡流轨迹图与内窥镜照片

Fig.6 Eddy current track of the inner surface discontinuity and photographs of endoscope

5 结论

涡流检测是材料无损检测领域中重要而广泛使用的方法之一,利用原理模型,用计算机编程实现非磁性薄壁管涡流检测参数的计算,并分析其主要涡流特性,对检测管材内部及表面缺陷的参数设置,具有工程应用价值。

由于涡流场的分布是极其复杂的,计算公式是在设定了部分特定条件下推导出来的,因此检测参数的设定需要在工作中根据实际情况进行重复验证和适当调整。

参考文献

- 1 国防科学技术工业委员会. 涡流检验方法 GJB2908—97, 1997: 18
- 2 中国人民解放军空军航空工程部. 中国航天维修 NDT II 级教材. 1989: 87
- 3 美国无损检测学会. 电磁卷/美国无损检测手册. 1999: 268
- 4 厦门涡流检测研究所. ET—255 电脑多频涡流探伤仪使用说明书. 1992: 20
- 5 中国水利水电出版社. MATLAB5.1 全攻略宝典. 2001: 80 ~ 82

(编辑 任涛)

铸造高温合金返回料过滤净化技术

铸造高温合金采用真空熔炼,这对去除非金属杂质有利,但坩埚使用耐火材料易与金属液中活性元素发生反应,形成难以还原的氧化物类型的非金属杂质,使合金受污染。因此控制非金属杂质的生成和减少其在合金中的含量是人们极为关注的问题。

本成果采用泡沫陶瓷过滤网将精炼的金属液流过滤系统,使杂质受到阻挡、吸附和烧结三个物理化学作用,而使合金得到净化。返回料滤净后可稳定提高中温持久性能,改善合金的低周疲劳性能,具有明显的蠕变三阶段特性,满足使用性能要求。

本成果不仅可用于铸造高温合金母合金生产,而且可推广到铸钢、铸铁生产中去。既能应用于叶片生产,也能在普通铸件中使用。应用过滤净化技术,解决了返回料积压问题,减少资金的积压,其经济效益和社会效益巨大。

(北京航空材料研究院, 010-62560261-501)

超细微孔金属过滤器

本成果采用粉末冶金方法制造的超细微孔金属过滤器,是用于气体净化的新型高效过滤器,其过滤元件有管状板状等类型,其材质为铁基、镍基、不锈钢、青铜等。可根据使用要求,设计制造孔径从几微米至几十微米,过滤气体量从每分钟几立方米至几十立方米不同规格的过滤器。镍基过滤器过滤精度为:能滤除大于 $0.3\ \mu\text{m}$ 的细菌和微尘;过滤效率大于 99.99%;阻力:在额定流量下,初始压降小于 0.02 MPa。性能已达到国内同类产品水平。并已用于电子、原子能、医药、味精制造等工业部门的超净空气过滤和无菌空气过滤。

(核工业部 857 厂, 0816-21857-2133)

· 李连清 ·