薄壁扁平不锈钢管的涡流检测工艺

张晓红　胡文刚　张　琳　刘　伟　杨　帆
（首都航天机械有限公司，北京　100076）

文　摘　针对航天专用不锈钢薄壁扁平管涡流检测过程中存在的工艺难题，通过分析管材扁平成型工艺特点，采用涡流检测线圈的等效填充系数计算方法，结合涡流分布特性制作异型外穿过式涡流检测线圈，根据型面检测灵敏度差异制定合理的检测工艺，有效实现了不锈钢薄壁扁平管的涡流检测。通过破坏性试验及飞行试验，对检测工艺的可靠性进行了验证。该检测工艺已成功应用于各型号不锈钢薄壁扁平管的涡流检测中。

关键词　涡流检测，不锈钢薄壁扁平管，等效填充系数，缺陷
中图分类号：TG115.28　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.03.016

Eddy Current Testing Technology Applied to Thin-Walled Flat Tubes

ZHANG Xiaohong　HU Wengang　ZHANG Lin　LIU Wei　YANG Fan
（Capital Aerospace Machinery Company Limited，Beijing　100076）

Abstract　For the technical problems in eddy current testing of stainless steel thin-walled flat tube，the equivalent filling coefficient calculation method of eddy current testing coil was adopted by analyzing the characteristics of flat pipe forming process. According to the sensitivity difference of the profile，a reasonable testing process was developed，and the eddy current testing of the stainless steel thin-walled flat pipe was effectively realized. Destructive tests and flight tests verify the reliability of the inspection process. The eddy current testing technology has been applied to several types of thin-walled flat tubes.

Key words　Eddy current，Stainless steel thin-walled flat tube，Equivalent filling coefficient，Defects.

0　引言

不锈钢薄壁扁平管专用于航天飞行器分离动作组件的制造。薄壁扁平管的制造工艺由圆管在压力机上使用专用模具逐段压制而成。由于管体压制成形的变形量大而且不对称，因此在管体拉拔成型过程中有可能出现内折、内结疤、翘皮、划伤、磨损等缺陷，并随着成型过程不断被放大、延展，为确保成型后薄壁扁平管的质量，需要对管材进行全面的无损检测。

涡流无损检测在金属管材质量检测应用中具有检测灵敏度高、检测效率高、成本低等优势，已经在航空航天等领域中获得广泛应用。与常规金属圆管涡流检测相比，检测不锈钢薄壁扁平管时存在着的磁场分布不均匀、周向检测灵敏度差异、标准的穿过式差动检测线圈不适用等难题，需要针对上述难题进行涡流检测工艺试验。

本文主要介绍这种薄壁异形管子的涡流检测方法，从检测线圈、对比样管的设计，到检测工艺参数确定的整个试验过程，并通过破环性验证，该方法能够有效发现材质缺陷，保证产品质量。

1　薄壁扁平管的特点及检测方案

1.1　薄壁扁平管的特点

不锈钢薄壁扁平管选用直径 Φ13～Φ16 mm，壁厚0.8～1.2 mm的1Cr18Ni9Ti无缝圆管制造。圆管经扁平压制并校直成型后，设计部门要求不锈钢薄壁扁平管100%进行涡流检测，不允许出现裂纹、凹坑、折叠、严重划伤等缺陷。

1.2　检测方案

金属管材涡流检测通常采用外穿过式涡流检测方法，在保证足够线圈填充系数的条件下，针对裂纹、划伤、凹坑等缺陷的检测灵敏度高，并有效避免管材尺寸微小变形、管材运动过程中抖动等影响。

由于产品批量小及现有涡流检测设备能力，采用手动检测模式实施检测。由于扁平管截面形状的

收稿日期：2019-03-15

第一作者简介：张晓红，1969年出生，工程师，主要从事涡流、超声检测工艺技术研究工作。E-mail：zhangxh50185@126.com

特殊性，致使涡流磁场分布不均匀，这将导致产品截面灵敏度差异，使得评判标准不一致的结果，为此需要计算涡流检测线圈的等效填充系数，并结合涡流分布特性制作专用的异型外穿过式检测线圈，根据管材截面灵敏度差值控制要求制定涡流检测工艺。

2 检测工艺

2.1 检测线圈

常规金属圆管检测用外穿过式线圈，其填充系数越高、涡流检测灵敏度就越高[1]。实际操作中推荐的填充系数需要大于0.7才能保证足够高的检测灵敏度。

不锈钢薄壁扁平管属于异性尺寸管材，长短轴尺寸存在很大差异，如果使用圆管检测线圈，会出现由于长轴面位置距离线圈远而检测灵敏度大幅度降低的情况。为达到不同尺寸扁平管各面检测灵敏度一致的要求，订制了等效填充系数＞0.8的特殊型面绕组的扁平管专用手动检测线圈。检测线圈与被检扁平管间的等效填充系数线圈的按公式(1)计算：

$$\eta = \frac{S_1}{S_2} \tag{1}$$

式中，η为填充系数，S_1为管材截面面积，S_2为线圈截面面积。

2.2 对比样管

根据薄壁扁平管形状尺寸、壁厚尺寸和检测要求不同，用于调试涡流检测仪检测灵敏度用的对比样管也选用与实际产品有相同或相似的合金成分、表面状态、热处理状态、电磁特性等。在实际检测工作中，选取某一批次送检扁平管，任意截取一段无影响正常检测本底噪声和缺陷的管子，制作检测对比样管。与常规金属圆管涡流检测用对比样管不同，为保证扁平管截面径向长轴、短轴双向灵敏度的均匀性，以及轴向分辨率，在对比样管管壁的不同方向、不同位置上制作了一组通孔形人工缺陷。如图1所示，是以壁厚为δ=0.85 mm扁平管制作的对比样管，它是采用机械加工方式制作了4个Φ0.6 mm人工通孔。

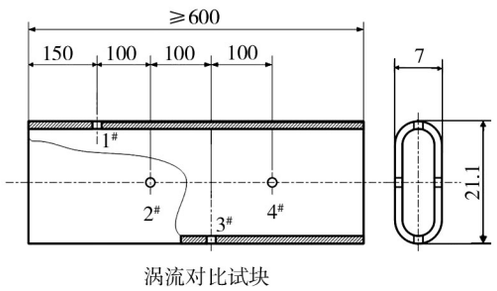


图1 对比样管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contrast tset

2.3 检测工艺参数设置

2.3.1 检测频率

根据涡流表面密度计算公式，当被检材料的组织成分、热处理状态、涡流检测仪、检测线圈等要素确定后，检测频率的设置将直接影响检测灵敏度和检测深度，因此结合被检管材特征选择最佳检测频率，对于提高缺陷的检测灵敏度是至关重要的[2]。

选择60～300 kHz的检测频率分别对对比样管进行检测，部分检测数据见表1。表1的检测数据表明，当检测频率＞300 kHz时，受到涡流趋肤效应的影响，涡流密度已无法覆盖管材的全壁厚，无法满足管壁下表面区域的检测灵敏度要求；当检测频率为60 kHz时，等效提离效应产生相位角区分不直观、不明显。试验最终确定的最佳检测频率为150 kHz，此检测频率可以较灵敏地分辨出Φ0.6 mm人工通孔信号和干扰信号，同时满足整个管壁厚度范围内的检测灵敏度要求。

表1 检测数据

Tab. 1 Test data

频率/kHz	壁厚全覆盖	样管人工缺陷		表面压痕		内表面干扰	
		相位角/(°)	幅值/%	相位角/(°)	幅值/%	相位角/(°)	幅值/%
60	是	60	36	47	45	180	100
150	是	60	35	28	51	69	53
250	是	60	35	14	56	80	26
300	否	–	–	–	–	–	–

2.3.2 初始相位角

管壁中涡流密度的分布与涡流透入深度有关，对于同一当量尺寸的缺陷，其涡流响应信号幅值与其所处的深度存在良好的对应关系[3]。

当设定对比样管上人工缺陷信号显示初始相位角为60°时，扁平管中不同深度的缺陷信号相位将与初始相位角有较为显著的偏差，有利于检测人员在阻抗平面图中判别缺陷当量尺寸并预估缺陷的

深度。

2.3.3 检测速度

涡流检测仪的信号采集频率、采集精度、管材和检测线圈之间的相对移动速度都影响着缺陷检出和检测结果的可靠性。经试验确定手动检测速度应不大于50 mm/s，同时在缺陷评定过程中，尽可能保持使用对比样管调试检测灵敏度时检测速度与扁平管检测时的一致。

2.3.4 报警门槛值

由于扁平管径向截面结构的特殊性，使得管壁周向的涡流磁场分布不均匀，使得扁平管长轴、短轴方向检测灵敏度存在差异。试验表明，扁平管长轴方向灵敏度比短轴方向低2 dB，因此，在实际检测过程中，是以长轴方向的人工缺陷幅值报警设置闸门。

3 试验验证

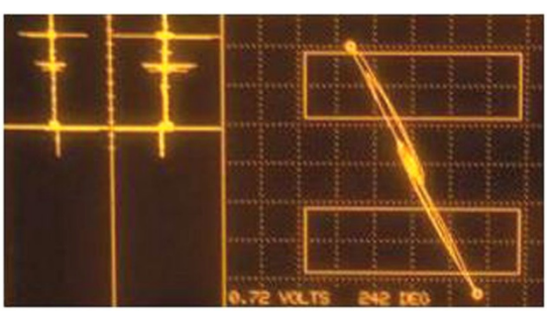


图2 典型缺陷的涡流信号示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical signal

按设定的检测参数进行检测，观察涡流仪屏幕上的涡流信号幅值和相位角，直到屏幕上出现“8”字形轨迹的检测图像，并且其幅值超过设定闸门信号，可初步判定有缺陷存在。进而在报警的缺陷位置左右连续移动检测线圈，若报警信号始终固定在某一个位置，找出其信号幅值最强显示并标注在工件的对应位置，判定为点状缺陷。典型的缺陷涡流检测信号如图2所示，缺陷处呈现出明显的“8”字形信号轨迹。为了验证涡流检测工艺的可靠性及检测结果的正确性，在薄壁扁平管的涡流无损检测结束后，将部分具有涡流信号的扁平管进行了冶金分析，确认了在检测标注缺陷位置处的管壁内侧，发现了由于氧化皮夹渣造成的结疤缺陷，以及压入性机械损伤，如图3所示。

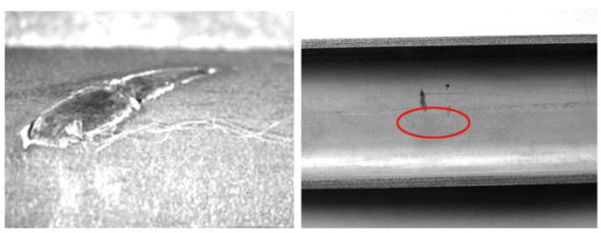


图3 薄壁扁平管缺陷示意图

Fig. 3 Schematic diagram of drawback of thin-walled flat tubes

4 结论

针对薄壁扁平管的结构特点，通过设计检测线圈、对比样管，解决了扁平管截面灵敏度差异问题，并通过工艺试验，确定合理的检测参数，将常规圆管涡流检测方法应用于异形管材的检测中，实现了薄壁扁平管涡流检测的工程化应用，也获得了飞行试验成功的实际验证。

参考文献

[1] 钱其林，苏李广. 涡流检测[S]. 国防科技工业无损检测委员会，2004.

[2] 彭凤群，徐可北，张晓霞，等. GJB2908-97涡流检测[S]. 国防科学技术工业委员会，1997.

[3] 徐可北，周俊华. 涡流检测[M]. 机械工业出版社，2004.