

导行波检测新技术专题(二)—— 导行波检测新技术一百问

周在杞¹, 周 宇²

(1. 苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004; 2. 苏州阿尔斯通高压电气开关有限公司, 苏州 215129)

中图分类号: TG 115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)08-0015-02

问题 1 什么是行波?

答: 行波的定义: 某一物理量的空间分布形态随着时间的推移, 在振幅不变的情况下, 向一定的方向行进(不断向前推进)所形成的波, 且其传播方向为无限, 故称行波。电力线路在输送电能时是以电磁波的形式传播的, 在忽略电阻和电导的情况下, 其线性行波传播速度接近于光速。行波波长是指行波相位差正好等于 2π 的两点之间的距离。

问题 2 什么是导行波?

答: 相对于自由空间中的电磁波而言, 导行波是指由传输线波导所导引向一定方向传输的电磁波。探头是一种导行波与自由空间波之间的转换器件或换能器。发射探头将传输线送来的导行波的能量有效地转换成向空间传播的电磁波的能量, 其可以均匀地向周围辐射电磁波能量, 也可以向特定方向的空域辐射电磁波能量。导行电磁波的普通例子就是沿着普通平行线或同轴传输线传送的波, 或沿波导管传送的波。在许多实际情况下, 无线电波的传播都是导行波, 即波是沿着导体面或介质面传播。因此, 导行波是全部或绝大部分电磁能量被约束在有限横截面内沿确定方向传输的电磁波; 常用导体和介质的边界作为约束手段, 如金属波导管、介质线、同轴线等; 封闭的金属管使电磁波局限在管内传输。凡截止波长大于工作波长的模式都可以是导行波。开波导的导行波又称表面波, 其场随

着与边界的距离的增加而衰减; 介质中挖空的导管也能传输表面波。常见的导行电磁波的结构有传输线、微带线、波导、波束波导和光波导等结构。导行波除了在上述结构中沿轴向传输外, 还可沿径向或周向传输, 如径向波导, 由地球表面和电离层构成的环球波波导等。导行电磁波的场分布可用模式表示, 常采用单模传输, 如同轴线用 TEM 模、矩形波导用 TE_{10} 模等表示。导行波的传输特性取决于导行结构及其所传输的模式; 传输模式以衰减较小、容易控制、便于检测为选择原则。

问题 3 电磁频谱是如何划分的?

答: 根据电磁场理论, 电流流过导体, 导体周围会形成磁场; 交变电流通过导体, 导体周围会形成交变的电磁场, 这就是电磁波的定义。在电磁频谱中, 无线电波波长 $0.3\text{ mm} \sim 3\,000\text{ m}$, 包括长波、中波、短波、射频波、微波和亚毫米波; 红外线波长为 $0.75\text{ }\mu\text{m} \sim 0.3\text{ mm}$; 可见光波长为 $0.4 \sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$; 紫外线波长为 $10\text{ nm} \sim 0.4\text{ }\mu\text{m}$; X 射线波长为 $0.1 \sim 10\text{ nm}$; γ 射线波长为 $0.001 \sim 0.1\text{ nm}$; 宇宙射线波长小于 0.001 nm 。高频、超高频电磁波统称之为射频电磁波。

问题 4 导行波传输线理论是什么?

答: 导行波传输线理论是基于麦克斯韦方程, 专门涉及电磁导行波传输线的理论。其所反映的是变动的电场和磁场可以相互激发而形成电磁波的过程。电磁场是一种特殊性质的物质, 而能量又是物质的主要属性, 因而电磁波的传播过程, 也就是电磁波能量的传播过程。

收稿日期: 2014-02-19

作者简介: 周在杞(1941—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为超声波和微波检测新方法。

问题 5 电磁波在传输线内传播的特性是什么?

答:对于电磁波的 TE 波、TM 波,当波沿 z 方向传播时,这种模式称为传播模式;场沿 z 方向指数衰减,波导内没有波的传播,这种模式称为非传播模式。也就是,当工作频率比截止频率高或工作波长比截止波长短时,电磁波才可以在波导传输线内传播,为传播模式;反之,电磁波不能在波导传输线内传播,为非传播模式。这和传播 TEM 波的导波传输线系统不同,TEM 波传播模式是没有截止频率和截止波长的,因此,在双导线传输线中,既可传播高频电磁波,也可传播低频电磁波以至稳恒电流。而波导则呈现出高通滤波器的特性;对给定的模式,只有频率高于模式截止频率的波才能在波导内传播。空心金属波导管内部,由于不能维持二维静电场,故不能传输 TEM 波。

问题 6 导行波检测是一门什么样的技术?

答:导行波检测就是通过射频电磁波在管道、管束或管线内壁的传播,基于传输线理论,根据不连续点或缺陷与电磁波参数的相关性原理来检测缺陷具体方位及其距离管口位置的长度的技术,可应用于防堵异物的探测、腐蚀减薄测定和不连续点的检测中。

问题 7 导行波检测所用的频段属于什么范围?

答:电磁波的频谱范围较广,从具有电离作用的 X 射线、 γ 射线,到用于广播通信的射频电磁波等高频电磁场,再到日常使用的 50~60 Hz 的电力线发出的极低频电磁场,都属于电磁波的范畴。广泛应用的射频识别,其 ISM(开放给工业、科学、医学机构使用的)频率为 6.78, 13.56, 27.125, 40.68, 433.92, 869.0, 915.0 MHz 及 2.45, 5.8, 24.125 GHz。按照电磁频谱上的电磁波分布,应用于检测的导行电磁波,其频率在上述射频范围,它也包括部分超高频电磁波。所谓微波检测是指超高频(300 MHz~300 GHz)的电磁波的空间波族的具体应用,除了微波探伤仪、测厚仪、湿度计等检测仪器装备的研制外,最典型的就探地雷达或地质雷达在国内外机场、考古、勘察、土木工程中的成功应用。

问题 8 在低频段时电磁波有什么应用?

答:在电力工业中,日常使用的 50~60 Hz 的电力线发出的极低频电磁波,用行波方式可发现输电线路暂态过程中短路或断路故障,且可以定位。针对不连续点,电磁波的行波会出现相位突变情况。根据这一原理可将信号相位检测用于故障测距的定位,其利用小波变换提取信号相位,并通过相位模极大值的计算确定信号突变点。检测时,输入信号为阶跃函数;若阶跃幅度为 0.5 V,则模拟产生时域反射(TDR)信号。仪器的 X 轴为单次输入阶跃信号造成的模拟信号的反射。这些信号的电长度,即代表被测不同平行导线发生故障点的距离。

问题 9 导行波检测技术与超声导波检测技术有什么区别?

答:超声导波检测技术是利用机械振动的低频扭曲波或纵波对管路、管道进行长距离检测,包括对地下埋管在不开挖状态下的长距离检测技术。超声导波(也称为制导波)的产生机理与薄板中的兰姆波激励机理相类似,也是由于在空间有限的介质内多次往复反射并进一步产生复杂的叠加干涉以及几何弥散形成的。在一般管壁厚度下要产生适当的波型,需要使用较低的频率。通常使用的频率小于 100 kHz,其优点是能传播 20~30 m 长距离,适合检测在役管道的内外壁腐蚀以及焊缝缺陷。只是超声导波目前还不能确定管子断面的精准方位。超声导波检测的局限性主要表现在需要通过试验选择最佳频率以及对比试样管。因为防腐带层能引起导波有较大的衰减,对于外壁带有涂防锈油的防腐包覆带或浇有沥青层等的管道检测,超声导波可检范围将明显缩短。另外,超声导波通过弯头后,回波信号的检出灵敏度和分辨力会受到影响,因此在一次检测距离段不宜有过多弯头。

而导行波是由传输线波导所引导向一定方向传输的电磁波。使用导行波检测技术,可以确定管子内壁断面的不连续缺陷的精准方位。

总之,国内目前研究相当火热的超声导波与导行波技术是完全不一样的两回事。超声导波是机械振荡,而电磁导行波则是电磁振荡。这是两者本
(下转 37 页)

近焊缝末端一侧,造成这一现象的原因,主要是由于焊缝冷却是从始端向终端逐渐冷却的,从而造成焊缝末端应力集中度较高,导致起裂位置偏右靠近焊缝末端。

4 结论

(1) 采用声发射检测技术可监测焊接冷裂纹的产生及扩展过程。利用声发射撞击-时间历程图能够准确判别冷裂纹起裂点,利用声发射信息,可将试件焊后冷裂纹产生及扩展过程分为焊接冶金过程、冷裂纹孕育过程、起裂点、微裂纹汇聚过程、主裂纹延迟扩展过程的“一点四过程”。

(2) 利用声发射撞击-时间、幅度-时间分布图,能够准确判别冷裂纹的起裂点,并确定相应的起裂时间。采用线定位与三角定位相结合的方法,可以确定起裂位置。

(3) 通过对不同板厚和不同拘束焊缝长度的焊接试件冷裂纹产生及扩展过程的声发射监测结果

分析可知,随着焊件板厚的增加,拘束度增加,其冷裂纹产生得越早,冷裂倾向越大;随焊件拘束焊缝长度的增加,拘束度增加,其冷裂纹产生得越早,冷裂倾向越大。

参考文献:

- [1] 张元杰,彭云,马成勇,等. Q890 高强钢焊接淬硬倾向和冷裂纹敏感性[J]. 焊接学报,2013,34(6):53-58.
- [2] 李亚江. 焊接缺陷分析与对策[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [3] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 戴光. 声发射检测技术在中国——庆祝中国机械工程学会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测,2008,30(7):389-396.
- [5] 窦艳涛,庞思勤,徐小力,等. 汽车起重机结构件焊接缺陷破坏过程的声发射监测[J]. 无损检测,2013,35(6):32-36.

(上接 16 页)

质的区别。现在国内有些同仁误将电磁导行波当作超声导波,存在概念误区:以为用磁致伸缩原理产生的超声导波就是电磁导波;而仅将压电效应产生的机械振动导波列作超声导波。

问题 10 与超声波技术比较,两者特性有什么不同?

答:导行波与超声波特性比较主要有:

(1) 传播速度(v)

$$\text{导行波} \quad v = C/n \quad (1)$$

$$\text{超声波} \quad v = (m/\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: m 为模量; v 为传播速度, m/s; C 为真空中光速, m/s; ρ 为密度, kg/m³; n 为折射率。

(2) 垂直入射下反射系数(R)

$$\text{导行波} \quad R = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (3)$$

$$\text{超声波} \quad R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

式中: Z 为声阻抗, Ω ; n 为折射率; λ 为波长, m。

下标 1, 2 分别表示第一介质, 第二介质, 下同。

(3) 垂直入射下透射系数(T)

$$\text{导行波} \quad T = \frac{2n_2}{n_2 + n_1} \quad (5)$$

$$\text{超声波} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

(4) 来自小气隙处的反射(R_g)

$$\text{导行波} \quad R_g = \frac{\pi(n^2 - 1)d}{n\lambda} \quad (7)$$

$$\text{超声波} \quad R_g = 100\% \quad (8)$$

式中: d 为小气隙大小, m。

(5) 来自 $\lambda/4$ 气隙处的反射($R_{1/4}$)

$$\text{导行波} \quad R_{1/4} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \quad (9)$$

$$\text{超声波} \quad R_{1/4} = 100\% \quad (10)$$

(6) 波束宽度, 横向分辨率(B_w)

$$\text{导行波} \quad B_w = 2\lambda r/D \quad (11)$$

$$\text{超声波} \quad B_w = 2lr/D \quad (12)$$

式中: r 为任意距离, m; D 为合成孔径(导行波)、压电晶片孔径(超声波), m; l 为超声波脉冲宽度, m。

(未完待续)