

压力管道内部裂纹缺陷的锁相红外热成像检测研究

苑东健

(潍坊市特种设备检验研究院, 山东 潍坊 261000)

【摘要】通过本文的研究,可以有效地提高压力管道的安全运行。以具有大曲率结构的压力管道内部裂纹缺陷的锁相红外热像探测难题为研究对象,通过数值仿真,研究载荷频率对轴向裂纹、环形裂纹缺陷识别的影响规律,建立基于温度相差峰值和展宽的最佳检测频率,探讨不同深度裂纹缺陷探测时,温度相差与热源频率之间的相关性。对其进行深入的研究将为解决大弯曲构件下的裂纹缺陷检测提供新的思路,并提出了一种新的检测技术。为该方法在管道安全检测领域的应用奠定基础。

【关键词】压力管道; 裂纹缺陷; 锁相红外热成像; 检测; 安全性

引言:

现有的锁相红外热成像研究主要集中在平面和分层复合结构表面和内部缺陷的检测,而对具有代表性的管道表面和内部缺陷检测的研究还很少。锁相红外热成像技术在压力管道探测工程中的应用,是迫切需要解决的难题。为此,本文面向压力管道无损检测的实际需求,拟开展基于锁相红外热成像检测的压力管道内裂纹缺陷识别方法研究,着重研究不同类型裂纹分布、检测条件等对裂纹识别的影响规律,为锁相红外热成像检测技术在压力管道中的应用奠定基础。

一、压力管道的缺陷

(一) 腐蚀破坏

在企业的日常生产过程中,所用的生产原材料具有一定的腐蚀性,在长时间的使用过程中,压力管道的内壁会持续受到侵蚀,从而导致其承载能力下降。

腐蚀破坏又可以分为以下几类:

第一,均匀腐蚀,即管道表面出现的腐蚀程度基本保持一致,主要是由电化学腐蚀或化学腐蚀引起,可通过测厚的方式来判断腐蚀程度。

第二,点腐蚀,也就是腐蚀部位多为局部或某一位置,其腐蚀深度比较大、隐蔽性强、破坏力强,需要采用非破坏性检测方法进行故障辨识。

第三,缝隙腐蚀,其形成机理是:在接缝处被腐蚀性液体冲蚀或渗入,在浓度差异的影响下,形成了相对集中的锈蚀区,这类锈蚀量较大,可以用

肉眼来鉴别。

第四,应力腐蚀,这一腐蚀问题是由内拉应力与腐蚀介质联合作用引起的,受温度的影响比较大,由于具有很高的隐蔽性,通常采用非破坏性检测方法进行。

(二) 脆性破坏

脆性破坏也是压力管道失效的一种常见失效模式,其根本原因是,在低压、低温条件下,管线的抗拉强度下降,当受到外力或内力时,极易产生裂纹,再受力后,脆性破坏面将逐步扩展,断裂处也会产生裂纹,从而导致压力泄漏,甚至引发爆炸,给生产人员的生命和财产带来极大的危害。

(三) 疲劳破坏

为了提高化工物料在单位时间内的输送速率,需要在压力管路上进行合适的增压,比如输送压缩空气、压缩液体,通过增压输送,达到工艺的基本要求。此外,压力管道在使用期间还会承受多种载荷,当其超出承压能力,并持续一段时间后,就极易发生疲劳破坏,也就是管道发生变形、断裂、裂纹等,这种情况可以用肉眼来鉴别,也可以采用磁粉检测等方法确定问题所在,从而提高对故障问题的及时发现。

(四) 蠕变破坏

压力管道在使用期间,由于受多重载荷作用,会发生拉伸变形,超过其抗拉强度后,即发生蠕变损伤。在此基础上,提出了一种基于塑性变形的新方法。对于这类故障,可以采用目测的方法,也可

以采用无损检测的方法,对管道内部的损伤状况进行检查,以便能够及时地进行处理,将危害问题造成的不利影响降到最低。

(五) 磨损破坏

在使用过程中,也可能发生磨损失效。压力管道所输送的物料大都具有很大的摩擦系数,在长时间的运行中,由于输送介质所产生的摩擦,会对管壁产生一定的作用,从而导致管壁的壁厚持续减薄。当管道的强度达不到承受压力要求时,就会从磨损严重的位置开始发生失效,并且在失效过程中伴随着大量的塑性变形,断裂处还会产生撕裂状态,并夹杂着部分碎屑,危及现场工人的生命安全。

二、锁相热成像检测方法

(一) 温度场仿真方法

锁相红外热成像缺陷检测方法的原理是在工件表面施加周期性激励热源。其示意图如图1所示在循环热流条件下,试件中的缺陷区与未缺陷区会形成不同的热响应特性,进而对试件进行有效识别。红外成像中反射的表面温度场信息与周期激发热源的频率、缺陷的尺度和深度等密切相关。

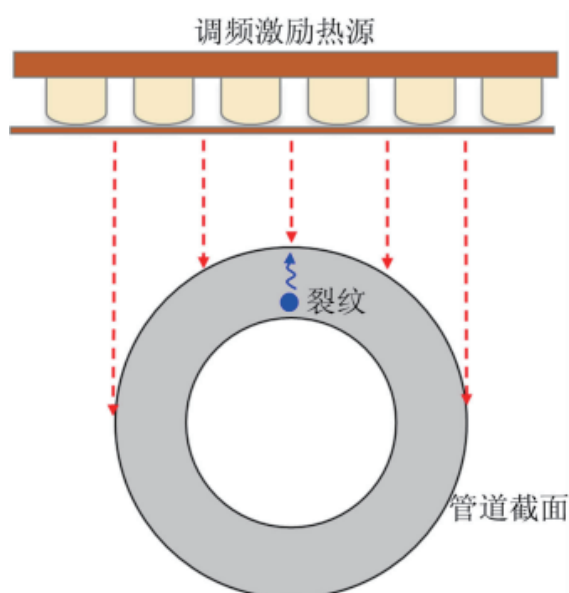


图1 周期性激励热源加载在管道试验件示意

拟通过构建周期热源作用下圆柱试件的温度场模拟模型,并对其进行数值模拟。

在圆柱坐标系下,管道试验件热传导能量方程

如式(1)所示:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

周期性热流加载所形成的边界条件如式(2)

所示:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = q_0 (1 - \cos \omega t) \cos \theta, 0 \leq \theta \leq \pi \quad (2)$$

其他表面均假设为对流传热边界,初始条件如式(3)所示:

$$T|_{t=0} = T_{am} \quad (3)$$

拟采用有限元方法,对试件进行有限元分析,得到试件在不同工况下的温度场和温度场的变化规律,建立试件内部缺陷与温度场之间的关联模型。

(二) 相位检测方法

从公式(1)到(2)可以看出,在周期性热源的作用下,试件的表面温度信号也会发生周期性变化。试件内侧有一种缺陷,其内部热阻对其温升幅度及相位有一定的影响。为此,拟从周期特性出发,利用逆问题分解方法,将温度信号幅值与相位信息转化为相位信息,从而实现对材料内部缺陷的识别。

在周期性激励的作用下,表层温度的变化包括常值热流引起的直流部分和周期性热流引起的交流部分。在实际测量中,由于受到温升直流分量、红外测试系统噪声等因素的影响,地表温度场的相位信息很难被有效提取。

因此,拟利用信号处理中的相位锁定技术,构造一个与待测量信号频率相同的参考符号,通过对待测量信号的互相关操作,将参考信号和待测信号的同频成分按一定的相位差输出,通过对不同频率的干扰噪声进行融合,从而实现对温度的高精度测量。

三、工程实例仿真设置

(一) 模型概述

以油气输送中常见的压力管道为研究对象,通过研究不同裂纹分布和检测条件对管内温度场的影响规律,为管道内壁缺陷的检测提供依据。该中空圆筒导管具有6.5厘米的内径 r_0 、7.5厘米的外径 r_1 和60厘米的长度 L 。内裂缝型缺陷可分为两种类型:1.轴向裂缝-空气间隙缺陷,长10厘米,截面

边长2毫米；2. 环状裂隙空气间隙，其截面直径为2 mm，外径为7 cm，圆环对应的圆心角为 30° ，周向坐标为 $\theta=0\sim 30^\circ$ 。

利用COMSOL软件对周期性热源作用下的圆管管道进行数值模拟，并对其进行数值计算。将非固体区设为空气媒质，在不考虑空气对流传热的情况下，只考虑压力管道的热传导。计算区域以压力管线的全部网格点和空气间隙附近的局部网格为网格，网格总数为1124400个。

（二）参数设置

拟采用周期热源频率范围为0.01~0.05 Hz，热源加载时间随着频率的变化而变化，以40~100秒为间隔，2个探测周期，200个测点。对于周期性热源，其热流密度幅值 q_0 取20 kW/m²，在测试时不会造成过热影响，并且能够在被测物体上形成可测的温度响应。针对纵向裂缝，设计3种不同位置（ $H_0=2、4、6$ mm）的模态拟合曲线，研究周期热源频率对缺陷深度的影响。

四、结果分析

（一）轴向裂纹检测分析

图2是在周期加热源频率 $f_0=0.05$ Hz的情况下（ $\theta=-90^\circ\sim 90^\circ$ ）的压力管道试件的俯视图，并且表面温度幅度 A 表示在图2（a）中；相位差异 $\Delta\Phi$ 分布的计算结果见图2（b），其中的凹陷形状设定为轴向裂纹，裂纹深度为 $H_0=4$ mm，周向角为 0° 。

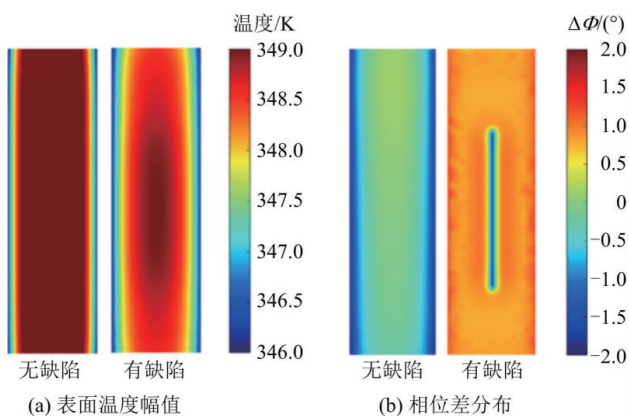


图2 压力管道试验件俯视图

通过对无缺陷情况的分析，发现在 $\theta=(-60^\circ\sim 60^\circ)$ 范围内，表层温度振幅和相位差近

似均匀，超出这个区间，则由于大曲率表面周期性加热的边界效应，使其表现出不均匀的分布。基于这一点，仅将 $\theta\in(-60^\circ\sim 60^\circ)$ 范围作为有效分析区。从图3（a）可以看出，最大温差不会超过0.5 K，而且温差扩散范围比裂缝所处的面积要大得多，因此，只根据温度幅值的分布并不能有效区分轴向裂纹。同时，在图3（b）中，一个不寻常的、带负相位差的线性区出现在有损伤图像的中心（ $\theta=0^\circ$ ），它与顶视图上相应的位置吻合。这表明，用锁相方法测得的表面温度相差，可以用来鉴别表面以下方管内部的裂纹缺陷。

从图2（b）可以看出，裂缝缝隙的分辨精度与裂隙不均匀区的宽度有关，裂缝缝隙越大，裂缝缝隙的判别精度就越高。为此，有必要进一步考察加载热源频率对相位差峰值和相位差幅值不一致区域宽度的影响规律。在不同频率的热源作用下（ $f_0=0.01、0.02、0.04、0.05$ Hz）带内轴向裂缝的压力管道表面温度相位差分布，其结果显示在图4中，并且有类似于图2的缺陷信息。在加载温度的0.01~0.05 Hz范围内，由轴向裂纹缺陷引起的相位差异仍然比较显著。沿着A—A方向（ $z=20$ 厘米）截取截面，图3给出了在两种情况下，在不同频率加载热源的情况下，这一截面的相位差与周向角之间的关系。

1. 在正常工作状态下，低频（0.01 Hz）对应的相位偏差也表现出不同程度的不一致性，其根源在于周向方向上的热传导效应，随着热源频率的增加，相位差值分布更加均匀，并逐步向 0° 方向移动。

2. 在存在轴向裂纹的情况下，相位差剖面图在 $\theta=0^\circ$ 附近有一个明显的相位差值峰值，峰值位置所对应的区域与凹陷位置重合。为了对相位差异常区的宽度进行量化描述，引入相位差峰值展宽（也就是相位差峰值1/2的地方，两个位置之间的距离）作为判别空间分辨率的特征参量。

3. 当热源频率由0.01 Hz上升到0.05 Hz时，相位差的峰值幅值由 0.67°C 上升到 2.06°C ，而在0.05 Hz时，最小值为 0.72 cm。周向热传导的影响将使裂缝扩展到更远的区域，在图5中得到的裂缝扩展

比实际裂缝宽 (0.2 cm) 要大。在 0.01~0.05 Hz 频率范围内, 外加热源频率 0.05 Hz, 得到了最大相位差和最小宽度的最优识别方法。

综上所述可以看出, 在某一深度处, 有一个最优的加载温度区间, 太低或太高都会使识别结果不理想。当工作频率太低、受热时间太长、热渗透深度太大, 整个管道都会进入非稳态导热的正常阶段, 热传导的不均匀性会降低, 导致表面相位差异检测结果偏小, 而裂纹在相位图上的展宽也不显著。如果频率太高, 热作用时间太短, 一侧表面温度变化对深度不敏感, 会造成缺陷的漏检; 而在管内, 由于局部热量不被充分利用, 导致管内高温区向边界低温区传热, 横向不对称热传导现象显著, 在近界区会出现“伪缺陷”。经计算模拟, 可确定最佳频率, 供实际应用时参考。

(二) 环形裂纹检测分析

在不同加热频率下, 用于管道内壁裂纹识别的研究

($f_0=0.01, 0.02, 0.04, 0.05$ Hz) 的带内侧环形裂纹 ($H_0=4$ mm, $z=20$ mm) 的压力管道表面温度相位差值分布的计算结果。当负载热源的频率在 0.01 至 0.05 Hz 时, 可以识别由环形裂纹凹陷引起的温度相差。

(三) 不同深度轴向裂纹检测分析

面向不同深度裂纹缺陷的探测需要, 研究不同深度下裂纹缺陷检测中的相位偏差与声源频率之间的关系。其中, 浅部 ($H_0=2$ 毫米)、中层 ($H_0=4$ 毫米) 和深层 ($H_0=6$ 毫米) 的温度相差 ($f_0=0.01\sim 1.0$ Hz) 的计算曲线。

1. 缺陷引起的温度相位差的绝对值随频率增大而增大, 然后减小; 温度相位差绝对值的极大值对应的频率速率和凹陷深度相关。对于浅层凹陷 ($H_0=2$ 毫米), 温度相位差绝对值在 $f_0=0.08$ Hz 时达到极大值; 对中间层 ($H_0=4$ 毫米), 温度相差的幅值在 $f_0=0.04\sim 0.05$ Hz 范围内最大; 当深度缺陷 ($H_0=6$ 毫米) 出现时, 温度相差的绝对值在 $f_0=0.03$ Hz 时最大;

2. 缺陷识别的基底依赖于缺失位置和无缺失位置之间的温度相差。在同一热源频率下, 当缺陷深

度增大或减小时, 温度相差的绝对值会下降, 即当缺陷深度增加或减小时, 对应的热源频率区间也随之减小, 如浅层缺陷 ($H_0=2$ mm) 可以在 $f_0<0.1$ Hz 时识别, 而深层 ($H_0=6$ mm) 只能在 $f_0<0.04$ Hz 时才能识别。

五、结论

1. 针对大曲率结构下的压力管中存在的一些难点问题, 采用有限元法和相锁法, 开展基于有限元法的圆柱形管内壁损伤识别的数值仿真研究, 并结合实验数据, 研究不同类型裂纹分布、检测条件等对裂纹识别结果的影响规律。

2. 锁相热像的温度相位差峰值与峰值展宽反映出裂纹的影响范围, 可以用来评价缺陷识别的有效性。针对所提出的轴向、环状裂纹等典型缺陷, 通过温度相位差和峰宽分析, 获得特定深度缺陷识别的最优热源激发频率。

3. 热源激发的频率区间与缺陷深度有很大关系, 同一频率下, 随着间隙深度的增大和减小, 温度相位差绝对值将降低识别精度。针对不同深度 ($H_0=2, 4, 6$ mm), 得到了最佳激励频率范围 ($f_0<0.1$ Hz, $f_0<0.08$ Hz, $f_0<0.04$ Hz, 为未知缺陷条件下的缺陷探测实验奠定基础。

4. 提出的锁相热成像缺损检测方法, 已经在平板试件和 R 角试件的内凹检测项目中得到验证, 并在此基础上进行了相应的验证和工程应用, 进行了相应的验证。

参考文献:

- [1] 柳银海. 影响压力管道安装焊接质量的原因及其控制措施[J]. 大陆桥视野, 2020 (6): 115-116.
- [2] 郭义帮. 氨制冷系统压力管道检验及安全性[J]. 中国设备工程, 2020 (15): 158-159.
- [3] 李伟明. 压力管道元件 (法兰) 埋藏缺陷成因探讨[J]. 质量技术监督研究, 2019, 0 (6): 35-37.
- [4] 王峰涛. 探讨火力发电厂压力管道安装前检验重点分析及建议[J]. 科技与创新, 2020 (10): 59-60.
- [5] 韩筑. TSG07-2019 中压力管道安装许可主要变化的探讨[J]. 特种设备安全技术, 2020 (4): 48-52.