

温度对脉冲涡流壁厚检测影响的实验研究

孙健¹ 向安² 来园凯^{2*}

1.沧州大化股份有限公司聚海分公司, 河北 沧州 061199

2.天津舜捷安科技有限公司, 天津 300110

[摘要]温度变化会影响被测构件的磁导率和电导率,继而影响脉冲涡流信号特征,因此在不同温度下利用脉冲涡流技术检测得到的壁厚值会发生变化:温度越高检测得到的壁厚值越低。文中通过实验分析得到不同温度下脉冲涡流晚期信号斜率和计算壁厚与温度的关系,并拟合得到不同温度下 20#碳钢的壁厚校准公式。

[关键词]脉冲涡流;晚期信号斜率;壁厚校准

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20189

中图分类号: TP27

文献标识码: A

Experimental Study on the Influence of Temperature on Pulse Eddy Current Wall Thickness Detection

SUN Jian¹, XIANG An², LAI Yuankai^{2*}

1. Juhai Branch of Cangzhou Dahua Co., Ltd., Cangzhou, Hebei, 061199, China

2. Tianjin Shunjiean Technology Co., Ltd., Tianjin, 300110, China

Abstract: Temperature changes can affect the magnetic permeability and conductivity of the tested component, which in turn affects the characteristics of pulse eddy current signals. Therefore, the wall thickness values detected using pulse eddy current technology will change at different temperatures: the higher the temperature, the lower the wall thickness values detected. The slope of the late stage pulse eddy current signal at different temperatures was obtained through experimental analysis, and the relationship between wall thickness and temperature was calculated. The wall thickness calibration formula for 20 # carbon steel at different temperatures was fitted.

Keywords: pulse eddy current; late signal slope; wall thickness calibration

引言

利用脉冲涡流(Pulsed Eddy Current, PEC)检测技术对带保温层的金属管道或设备壁厚进行检测,是近几年发展起来的一种新型的非接触式无损检测技术。与传统涡流检测技术不同,脉冲涡流检测技术采用方波作为激励方式,激励能量更强,具有很好的穿透性能,能够穿透几十甚至上百毫米的包覆层(保温层和保护层),可实现在不拆除保温层的情况下对承压管道或设备的不停机检测,已在炼油化工等行业中得到了广泛使用^[1]。

出于传输介质特性需要,化工和炼化行业中大量的压力容器和管道处在高温或低温环境中。温度的变化在一定程度上会影响到材质的电磁特性,从而影响到脉冲涡流信号特征,对利用脉冲涡流技术检测壁厚结果带来不利,容易造成误判。因此,研究温度对脉冲涡流信号的影响、进而研究温度对脉冲涡流检测壁厚结果的影响规律,对提高脉冲涡流检测技术在不同温度情况下的检测精度具有重

要意义。

现有文献对提离高度^[2,3]、保护层材质^[4,5]等影响脉冲涡流信号的研究较多,但对温度影响脉冲涡流信号研究较少。本文首先对温度影响脉冲涡流信号机理进行了简单分析,然后对不同温度下 20#碳钢的脉冲涡流信号进行了分析和比较,最后得到不同温度下 20#碳钢的壁厚拟合公式。

1 温度对脉冲涡流信号影响机理

脉冲涡流信号是一组随时间衰减的感应电压信号,包括瞬间关断电流激发出的一次磁场信号和被检构件涡流产生的二次磁场信号。由文献资料^[6-8]可知,铁磁性材料脉冲涡流早期信号为一次磁场和二次磁场的叠加信号,难以从中提取出被测构件的信息;中期信号满足逆幂函数衰减规律,是涡流在被测构件中传输产生的二次磁场信号;后期信号满足指数函数衰减规律,是涡流在被测构件中扩散产生的二次磁场信号。

文献^[9]对以脉冲涡流晚期信号斜率作为壁厚测量特

征值的技术原理进行了分析,得到如式(1)中晚期信号斜率与壁厚值的关系式:

$$\left| \frac{d \ln V_e(t)}{dt} \right|_{t \gg 0} \approx \frac{1}{\tau_d} = \pi^2 / \mu \sigma d^2 \quad (1)$$

式中, $V_e(t)$ 为晚期信号近似式, μ 为试件的磁导率, σ 为试件的电导率, d 为构件厚度。由式(1)可知, 脉冲涡流晚期信号在单对数坐标系(X 轴为时间, Y 轴为感应电压的对数值)中表现为直线段, 且其斜率的绝对值与壁厚的平方近似成反比。因此在单对数坐标系中, 晚期信号斜率的绝对值可以作为脉冲涡流壁厚测量的特征值。这一结论与文献^[10,11]中的结论保持一致。本文后续实验均以脉冲涡流晚期信号斜率作为表征壁厚的特征值。

观察式(1)可知: 脉冲涡流晚期信号斜率除与壁厚的平方值近似成反比外, 还与被测构件的磁导率和电导率近似成反比。由于温度的变化在一定程度上会影响到材质的电磁特性(即电导率和磁导率), 因此温度变化也会影响到壁厚检测的准确性。当壁厚值一定时, 被测构件的磁导率和电导率越大反映出来的脉冲涡流晚期信号斜率绝对值会越小。

根据文献^[12], 温度对被测构件电磁特性的影响主要表现为: 在居里温度 T_c 以下, 铁磁性材料的磁导率 μ 随温度 T 的变化表现为普通晶体的特征, 即随着温度的升高, 铁磁材料的磁导率会逐渐增大, 但变化幅度不大; 当温度达到居里点 T_c 以后, 磁导率会产生突变, 磁导率显著下降并趋于顺磁性。铁磁材料的电导率会随着温度的升高而降低, 温度越高时正离子的振幅越大, 阻碍作用越强, 电导率越低。

由于材料在现场的使用过程中其温度不可能超过居里温度, 考虑到在居里温度以下时被测构件的电导率变化大于磁导率变化, 因此在温度越高时被测构件脉冲涡流晚期信号斜率的绝对值越大, 反映在壁厚上则会显示壁厚减薄。

当传感器直接接触被测构件时, 被测构件温度的增高也会引起传感器温度的增高, 传感器的温度升高也有可能引起脉冲涡流信号的变化, 甚至会引起传感器的损坏。但脉冲涡流检测技术是一种非接触式的无损检测方法, 可以在不拆除保温层的情况下进行检测, 这时传感器的温度升高基本可以忽略不计。因此, 本文在后续的实验中采用不拆除保温层的方式进行实验。

2 不同温度下 20#碳钢脉冲涡流信号特征

为对不同温度下脉冲涡流信号特征进行分析, 选用 1000mm (长) × 300mm (宽) × 8mm (厚) 的 20#碳钢板作为实验样板。实验中先将样板温度加热到 500℃ (见图

1a), 然后逐步降温进行温度梯度的信号检测(温度梯度为 40℃)。实验设备为天津舜捷安科技有限公司的 SJAET-PEC 型脉冲涡流检测仪, 使用探头为天津舜捷安科技有限公司的 P3 探头, 取样过程中在实验样板上铺上约 100mm 保温层和 0.5mm 厚的不锈钢皮(见图 1b)。



(a) 实验样板加热过程



(b) 实验样板铺上保温层

图 1 实验样板

实验后将不同温度的脉冲涡流信号绘制于单对数坐标系中(见图 2), 并将提取得到的晚期信号斜率绝对值和依据晚期信号斜率绝对值计算得到的不同温度下壁厚值列于表 1 中。

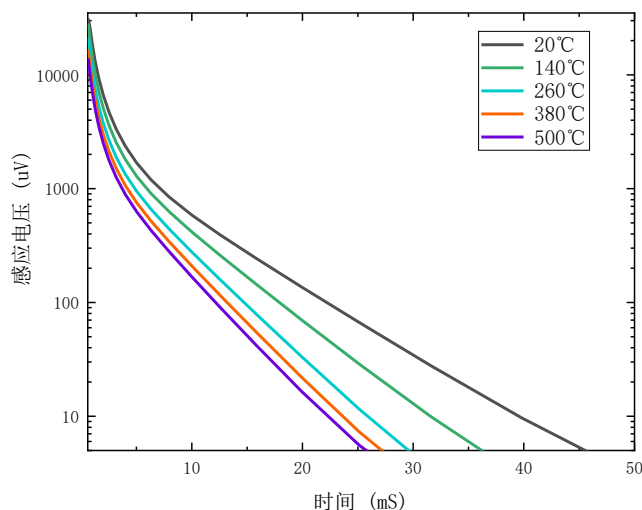


图 2 不同温度下的脉冲涡流信号(单对数坐标系)

表 1 不同温度下的特征值和计算壁厚

温度	20℃	60℃	100℃	140℃	180℃	220℃
特征值	0.140	0.165	0.180	0.190	0.202	0.209
计算壁厚 (mm)	7.95	7.30	6.99	6.80	6.60	6.49
温度	260℃	300℃	340℃	380℃	420℃	460℃
特征值	0.216	0.221	0.225	0.230	0.234	0.237
计算壁厚 (mm)	6.38	6.30	6.24	6.17	6.12	6.08

从图 2 分析,当温度变化时脉冲涡流信号发生了较大的变化:温度越高信号衰减速度越快,在单对数坐标系中表现为晚期信号直线段的斜率绝对值越大,与前文的分析保持一致。

表 1 中的特征值即为脉冲涡流信号的晚期信号斜率绝对值,随温度增加特征值逐渐增大,但温度越高增加的幅值越小。由于壁厚的平方与特征值近似成反比,因此计算壁厚随温度增加逐渐减小,且温度越高计算壁厚增加的幅值越小,如:温度从 20℃ 增加到 60℃ 时,计算壁厚从 7.95mm 降低至 7.30mm,降低了 0.65mm;温度从 420℃ 增加到 460℃ 时,计算壁厚从 6.12mm 降低至 6.08mm,降低了 0.04mm。

从表 1 数据可知:利用脉冲涡流技术进行检测时,温度越高计算得到的壁厚值越低,在实际检测中由于温度带来的壁厚变化容易被误解为缺陷的出现,因此需要对温度和壁厚的关系进行拟合得到不同温度下的壁厚校准公式,以避免壁厚温度引起的数据误解读。

3 不同温度下的壁厚的校准公式

为了对温度变化引起的壁厚变化进行校准,以 20℃ 计算得到的壁厚值为标准壁厚,计算不同温度下壁厚与标准壁厚的差值,并以温度对数值为 X 轴、以壁厚差值为 Y 轴可得到图 3 中的散点图。对不同温度对数值与壁厚差值数据进行线性拟合,得到相关系数达到 0.9990 的线性拟合曲线(红色曲线)。

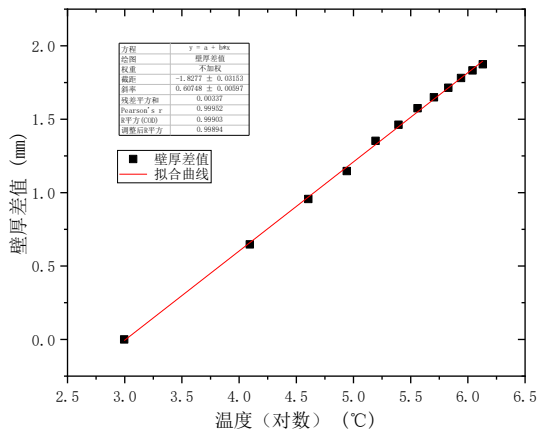


图 3 计算壁厚差值与温度对数值之间的拟合关系

由图 3 可知,当以 20℃ 时测得的壁厚为标准壁厚时,温度与壁厚的关系符合如下公式:

$$d_{\text{实}} = d_t + a \cdot \ln(t) + b \quad (2)$$

式中: $d_{\text{实}}$ 为校准壁厚,单位为 mm; d_t 为温度为 t 时测量壁厚值,单位为 mm; t 为测量时的温度,单位为℃; a 和 b 为系数,在这里 a=0.6075, b=-1.8277。

利用上式对表 1 中不同温度下的测量壁厚进行校准,可得到各温度下的校准壁厚如表 2。从表 2 可知,经校准后,最大壁厚为 7.98mm,最小壁厚为 7.93mm,其波动范围仅 0.67%,符合实际工程的需要。

表 2 利用公式计算校准壁厚

温度	20℃	60℃	100℃	140℃	180℃	220℃
测量壁厚 (mm)	7.95	7.30	6.99	6.80	6.60	6.49
校准壁厚 (mm)	7.95	7.96	7.96	7.98	7.93	7.94
温度	260℃	300℃	340℃	380℃	420℃	460℃
测量壁厚 (mm)	6.38	6.30	6.24	6.17	6.12	6.08
校准壁厚 (mm)	7.93	7.94	7.95	7.95	7.96	7.97

4 结语

由于温度变化会影响被测构件的磁导率和电导率,继而影响脉冲涡流信号特征,因此在不同温度下利用脉冲涡流技术检测得到的壁厚值会发生变化:温度越高检测得到的壁厚值越低。本文通过实验分析得到不同温度下脉冲涡流晚期信号斜率和计算壁厚与温度的关系,并拟合得到不同温度下 20# 碳钢的壁厚校准公式。

[参考文献]

- [1]武新军,张卿,沈功田.脉冲涡流无损检测技术综述[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1698-1712.
- [2]翟方昊,袁梦,巩家伟.金属坑蚀大提高脉冲涡流成像检测方法[J].仪表技术与传感器,2026,11(21):86-90.
- [3]田亚团.基于脉冲涡流技术的提高高度和壁厚检测[J].压力容器,2024,41(7):71-78.
- [4]南海,杨晓雨,张志明等.用于镀锌铁皮保护层下检测的脉冲涡流技术研究[J].石油化工腐蚀与防护,2024,41(1):25-29.
- [5]蔡勤,李继承,戚政武等.基于脉冲涡流(瞬变电磁)技术的带包覆层压力管道壁厚检测研究[J].热加工工艺,2023,52(2):21-26.
- [6]沈功田,李健,武新军.承压设备脉冲涡流检测技术研究及应用[J].无损检测,2010,32(2):173-178.
- [7]陈兴乐,雷银照.铁磁平板脉冲涡流场感应电压时域近似式[J].电工技术学报,2015,30(10):14-19.
- [8]VAN DEN BERG S M. Modelling and inversion of

pulsed eddy current data [Z]. Delft: Delft University of Technology, 2003: 31-38.

[9]田亚团,向安,来园凯.基于脉冲涡流晚期信号斜率的不锈钢壁厚测量[J].无损检测,2022,44(3):18-21.

[10]殷雪峰,刘红军,崔建杰.脉冲涡流检测技术新进展[J].广州化工,2020,48(23):6-8.

[11]Faris Nafiah, Mohammad O. Tokhi, Shiva Majidnia, et al. Pulsed eddy current: feature extraction enabling in-situ

calibration and improved estimation for ferromagnetic application [Z]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39:52.

[12]柯海.脉冲涡流测厚信号斜率法研究[D].武汉:华中科技大学,2013.

作者简介: 孙健(1979—),男,河北沧州人,工程师,河北科技大学材料成型及控制工程专业毕业,现就职于沧州大化股份有限公司聚海分公司,从事化工设备检维修工作。