

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.001

聚乙烯管道缺陷的红外热成像模拟 及实验研究*

邱 旭¹, 钟舜聪^{1,2,3*}, 朱志彬^{4,5}, 伏喜斌⁵

- (1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;
2. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350002;
3. 华东理工大学 承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237;
4. 福州大学石油化工学院, 福建 福州 350108;
5. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对聚乙烯(PE)管道内部缺陷检测中存在的问题,利用了有限元法模拟了PE管道的瞬态传热过程。计算模型中,在管道的内表面施加恒热流边界条件,内部缺陷会对管道表面的温度分布产生影响,从而建立起了温度分布与缺陷的大小和位置之间的关系。为了验证有限元模拟热像图,搭建了基于电加热棒热激励方式的聚乙烯管道红外热成像实验平台,该平台采用高灵敏度高速红外热像仪作为检测设备。通过模拟和试验,比较研究了不同深度、不同直径的缺陷的温度随位置的变化曲线。研究表明,实际试验结果和有限元模拟结果基本吻合,验证了模拟结果的正确性;也说明了有限元数值计算方法可以作为研究红外热成像技术的一种手段,为基于红外热成像技术的聚乙烯管道内部缺陷检测技术提供了数值模型。

关键词: 聚乙烯管道; 内部缺陷; 红外热成像; 有限元模拟; 无损检测和评价

中图分类号: TH878; TN215

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1513-05

Infrared thermography simulation and experiments of polyethylene pipe defects

QIU Xu¹, ZHONG Shun-cong^{1,2,3}, ZHU Zhi-bin^{4,5}, FU Xi-bin⁵

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350002, China;
3. Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
4. School of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
5. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

Abstract: Aiming at defect detection of polyethylene(PE)pipes, finite element method was used to simulate transient heat transfer in PE Pipes. In the computational model, constant heat flux boundary condition was applied to the internal surface of the PE pipes. The internal defects would affect the temperature distributions on the external surface of PE pipes and, therefore the relationships between the

收稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005077);教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20133514110008);国家卫生和计划生育委员会科研基金资助项目(WKJ-FJ-27);国家质检总局科技计划资助项目(2011QK216);福建省杰出青年基金资助项目(2011J06020);福建省质量技术监督局科技资助项目(FJQI2013095, FJQI2012024);福建省高等学校学科带头人培养计划资助项目(闽教人[2013]71号)

作者简介: 邱 旭(1989-),男,贵州遵义人,主要从事无损检测方面的研究. E-mail: 244116233@qq.com

通信联系人: 钟舜聪,男,研究员,博士生导师. E-mail: zhongshuncong@hotmail.com

temperature distributions and the sizes and positions of defects were established. An infrared thermography system with thermal excitation by an electrical heating bar, was built for the verification of the FE model for defect detection of PE pipes. A high speed infrared camera with high sensitivity was employed as a detector. The temperature curves at the positions of defects with different dimensions were obtained and compared. The FE simulation results well agreed with the one obtained from the infrared imaging experiments. The results indicate that finite element numerical method can be an effective method to analyze infrared imaging, it can provide the numerical model for thermal imaging based defect detection and precise theoretical foundations of using infrared thermography in non-destructive testing.

Key words: polyethylene (PE) pipes; internal defect; infrared thermography; finite element simulation; nondestructive testing and evaluation

0 引 言

聚乙烯(PE)管道具有经济实用、安装方便、质量轻、耐腐蚀、耐低温、高韧性、比强度高、抵抗刮痕能力强等优点^[1],被广泛用于天然气管道、城市煤气管道、城市输水管道。PE管道也是一种抗震性能优良的管道,在1995年日本的神户地震中,PE燃气管道和供水管道是唯一幸免的管道系统。正因为如此,日本震后大力推广PE管道在燃气领域的使用。发展至今,聚乙烯已是由多种工艺生产的、具有多种结构和特性及多种用途的系列品种树脂,已占世界合成树脂产量的三分之一,居第一位^[2]。

聚乙烯管道的连接以热熔对接为主,热熔对接质量受人为主观因素的影响较大,因此,聚乙烯管道热熔接头处可能存在各种不同的缺陷,主要包括裂纹、未熔合面缺陷、气孔、夹杂等^[3]。PE管道的内部缺陷对其安全性能有着致命性的影响,因此,对PE管道内部缺陷的检测有着非常重要的意义。要提高聚乙烯管道的安全性,必须提供有效可靠的接头缺陷无损检测方法。目前,对PE管道缺陷的检测方法有超声检测、微波检测等。浙江大学郑津洋教授团队^[4-5]和徐家怡等人^[6]将超声相控阵技术应用于聚乙烯管道电熔接头缺陷的检测,取得了较好的成果;Frederick^[7]和Hagglund^[8]等将超声相控阵技术应用于热熔接头的缺陷检测,可对缺陷位置作出初步的判定;祝新伟等人^[9]利用微波检测技术对聚乙烯管道热熔接头缺陷进行了缺陷检测,验证了微波检测可以初步判断聚乙烯管道热熔接头是否存在缺陷以及缺陷类型。

红外热像技术利用红外辐射原理,通过测取目标物体表面的红外辐射能,将被测物体表面的温度分布转换为形象直观的热像图^[10]。红外热成像在工业领域的应用主要是无损检测、安全评估、在线监测等。红外热成像有诸多优点,如非接触测量、检测速度快、能够大面积、远距离检测、能够检测内部缺陷,检测目标范围广、检测结果直观形象等,因此被广泛用于无

损检测领域^[11]。

本研究将红外热成像无损检测技术用于聚乙烯管道内部缺陷的检测。笔者利用ABAQUS有限元软件模拟PE管道的瞬态传热过程,建立起温度分布与缺陷的大小和位置之间的关系,搭建基于加热棒热激励方式的聚乙烯管道红外热成像实验平台,对有限元模拟结果进行验证。

1 热传导理论及有限元模拟

1.1 热传导理论

热量传递依靠3种基本方式:热传导、热对流和热辐射,热传导和热对流需要接触,而热辐射是一种非接触的传热方式。

假设热量从平壁的一侧传递到另一侧,热传导示意图如图1所示。

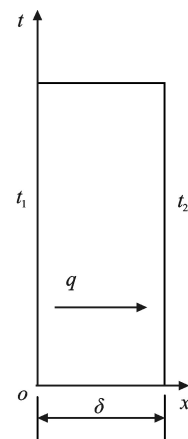


图1 热传导示意图

平壁的左侧温度为 t_1 ,右侧温度为 t_2 ,平壁厚度为 δ 。假设温度只在 x 方向传递,那么通过该壁面的导热热流量(Φ)或者热流密度(q)可以用如下傅里叶定律来定量描述:

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

或

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

式中: A —与热流密度垂直方向上的导热面积; λ —材料的导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 负号—热量传递方向, 和温度升高的方向相反。

式(1,2)称为导热热流速率方程。

在一维平壁稳态导热的情况下, 如果导热系数等于常数, 通过对傅里叶定律的表达式积分就可以得到:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (3)$$

式(3)说明, 通过一维平壁垂直于热流方向上单位面积的导热热流量与两壁之间的温差 (Δt) 成正比, 与平壁的厚度 (δ) 成反比。

若是三维各向同性的连续介质, 局部热流密度是数值上与该点的温度梯度成正比, 方向相反。其数学形式表达式为:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \quad (4)$$

傅里叶定律又被称为导热热流速率方程, 它的一般表达式为:

$$\vec{q} = -\lambda \left(\frac{\partial x}{\partial y} \vec{i} + \frac{\partial x}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial x}{\partial y} \vec{k} \right) \quad (5)$$

在管道的内壁施加第三类边界条件, 即给定流体的温度和它与物体表面间的对流换热系数, 其数学表达式可以写为:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \Big|_w = h(t_w - t_f) \quad (6)$$

根据导热微分方程与边界条件, 再结合初始条件, 就能求解导热物体的温度分布。基于这个原理, 本研究建立聚乙烯管道缺陷的瞬态热传导模型。

1.2 有限元模型

本研究利用 ABAQUS 有限元软件模拟带缺陷的聚乙烯管道的瞬态热传导过程。聚乙烯管道公称直径 $\Phi 100$, 壁厚 10 mm, 在管道内壁设置轴向深度不变、直径分别为 10 mm、8 mm、6 mm, 周向孔径不变, 深度分别为 6 mm、5 mm、3 mm 的孔。

带缺陷的聚乙烯管道图如图 2 所示。

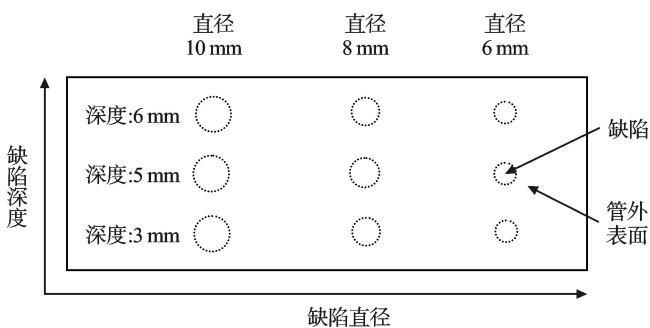


图2 聚乙烯管道的缺陷设计

聚乙烯管道的材料参数如表 1 所示。

表 1 聚乙烯管道的材料参数

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
952	0.53	2 300

本研究在管道内外壁施加恒热流边界条件, 整个聚乙烯管道施加温度初始载荷。采用六面体二次热传导单元 DC3D20, 分析时间为 120 s。

有限元模型如图 3 所示。

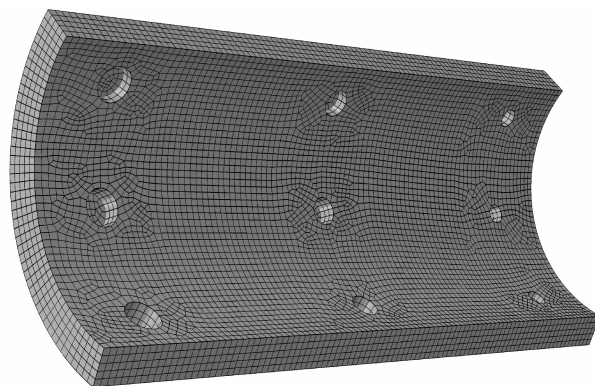


图3 聚乙烯管道的缺陷设计

加热 120 s 后有限元模拟热像图如图 4 所示 (图中的单位为 K)。

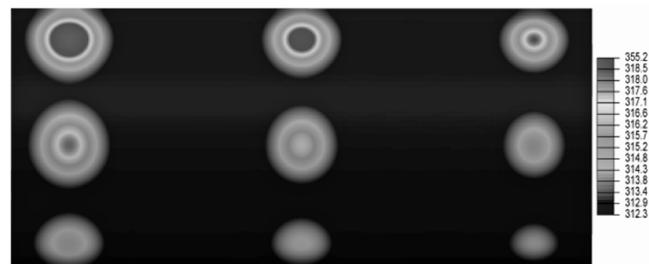


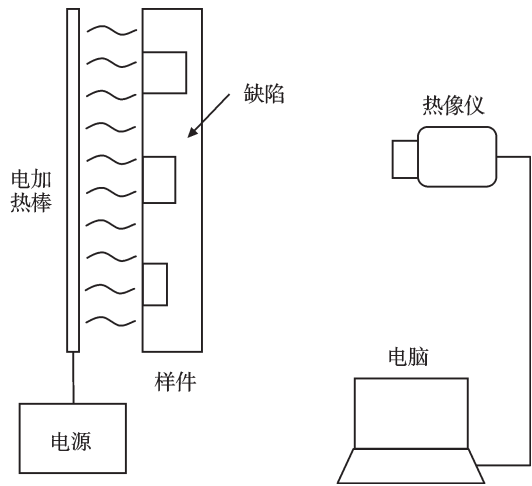
图4 PE管道表面的有限元模拟热像图

由图 4 可以看出, 对于相同的缺陷深度, 缺陷直径越小, PE 管道的表面温度越低; 对于相同缺陷直径, 缺陷深度越深, PE 管道的表面温度越高。这个现象可以由公式(3)来解释, 如果热流密度 q 不变, 缺陷深度越深, 其壁厚 δ 就越薄, 最终导致温差 Δt 越大。

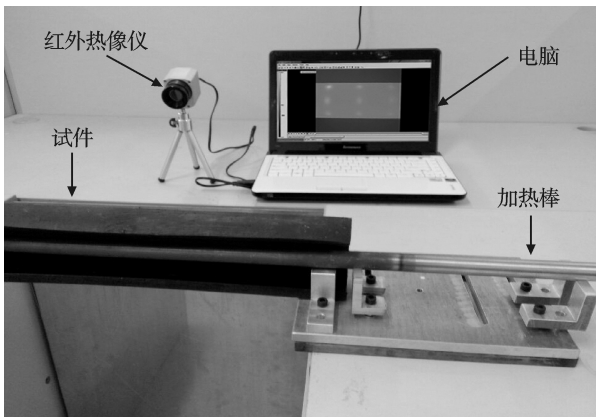
2 实验及结果讨论

为了验证有限元模型, 本研究搭建了一套与有限元模型相对应的基于红外热成像技术的聚乙烯管道内部缺陷检测的实验系统。实验系统包括红外热像仪、电加热棒、试件以及支架, 实验平台如图 5 所示。

实验中所用的红外热像仪为德国 Optris 公司的 PI450 红外热像仪, 工作波段为 $7.5 \mu\text{m} \sim 13 \mu\text{m}$, 温度检测灵敏度在室温下为 40 mk, 热像仪的空间分辨力为



(a) 聚乙烯管道缺陷的红外热成像检测实验系统示意图



(b) 实验系统实物图

图 5 实验平台

384×288 像素。热激励源为电加热棒,恒温加热,加热时间为 120 s。

试验用的人工试件尺寸是直径 100 mm,壁厚为 10 mm 的聚乙烯管道。制备样品的时候,本研究为了加工如图 2 的系列人工缺陷,将管道剖开,在管道内壁加工与模拟模型同样的孔。人工试件的内壁表面如图 6 所示。

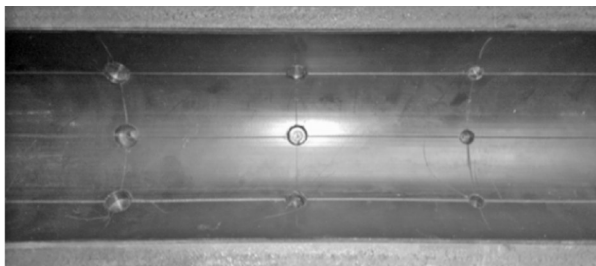


图 6 有内部缺陷的聚乙烯管道人工试件

试验开始之前笔者先把加热棒预热一段时间,再将其伸到 PE 管中加热,作为一种新的热激励方式。带有缺陷的 PE 管加热 120 s 红外热像仪拍到实验热像图如图 7 所示(图中的单位为℃)。

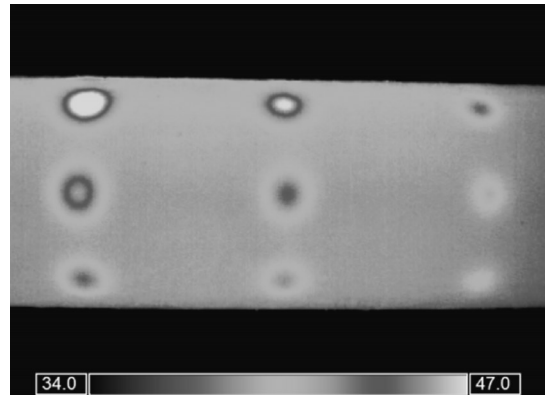


图 7 管道表面的实验热像图

对比图 4 的有限元模拟热像图,可以定性判断实验结果和模拟结果具有同样的温度变化趋势:对于相同缺陷直径,缺陷深度越深,PE 管道的表面温度越高。对于相同的缺陷深度,缺陷直径越小,PE 管道的表面温度越低。由于缺陷的影响,缺陷处温度高于周围温度,故能将缺陷的位置与形状很好地呈现出来。因此,红外热成像技术对聚乙烯管道内部缺陷检测具有很好的识别能力。

为了进一步定量验证有限元模拟和实验热像图,本研究还比较研究了不同深度、不同直径的缺陷的轴线位置其温度随位置的变化曲线。

热像图中深度为 5 mm、直径分别为 10 mm、8 mm、6 mm 的缺陷在 120 s 时随位置的变化曲线如图 8 所示。

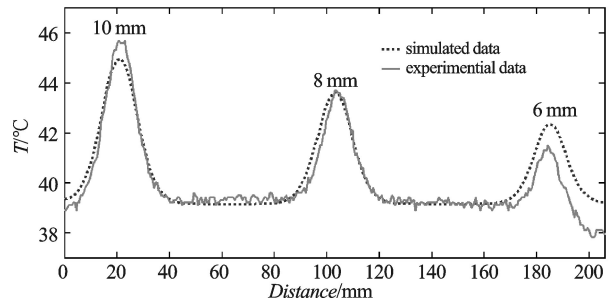


图 8 缺陷深度为 5 mm、直径分别为 10 mm、8 mm、6 mm 的缺陷的轴线位置其温度随位置的变化曲线

图 8 中虚线表示模拟结果,实线表示实验结果,3 个峰值分别表示 3 个缺陷位置对应的外表面中点的温度值。可以看出,缺陷直径越大,温度越高;并且有限元模拟的和实验的温度变化曲线基本吻合。

缺陷直径均为 8 mm,深度分别为 6 mm、5 mm、3 mm 的 3 个缺陷的轴线位置在加热 120 s 时温度随位置变化的曲线如图 9 所示。

从图 9 中可以得到,缺陷大小不变,深度越深,温度越高,这较好的验证了公式(3)中热流密度 q 不变,温差 Δt 与壁厚 δ 成正比这一理论。

从图 9 中还可以看出,深度越浅,缺陷处的温度变

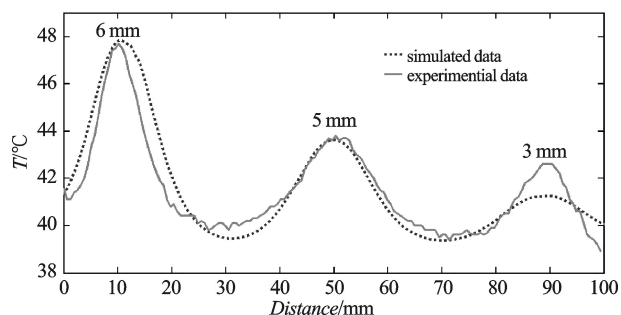


图9 直径均为8 mm,深度分别为6 mm、5 mm、3 mm的缺陷在加热120 s时温度随位置变化的曲线

化越缓。类似地,有限元模拟的和实验的温度变化曲线吻合性较好,表明了有限元热传导模拟具有较高的模拟精度和可靠性,同时验证了有限元数值计算方法可以作为研究红外热成像技术的一种手段。

3 结束语

本研究利用ABAQUS有限元软件模拟PE管道的瞬态传热过程,在管道的内表面施加恒热流边界条件,内部缺陷会对管道表面的温度分布产生影响,从而建立起温度分布与缺陷的大小和位置之间的关系。

为了验证有限元模拟热像图,本研究搭建了基于电加热棒热激励方式的聚乙烯管道红外热成像实验平台对有限元模拟结果进行验证。

结果表明:实验结果和模拟结果基本吻合,说明了有限元数值计算方法可以作为研究红外热成像技术的一种手段,为基于红外热成像技术的聚乙烯管道内部缺陷检测技术提供了数值模型。

从红外热成像试验结果可知,红外热成像技术可以很好地对聚乙烯管道内部缺陷进行检测和识别,可以应用于聚乙烯管道无损检测和定量评价。

参考文献 (References):

- [1] O'CONNOR C, DENTON G N. The nature of polyethylene pipe failure[J]. *Pipeline & Gas Journal*, 2012, 239(12): 76-77.
- [2] 熊道华. PE管道性能及其使用范围分析研究[J]. *非开挖技术*, 2008(1): 154-156.
- [3] 祝新伟, 潘金平, 谭连江, 等. 微波扫描法检测聚乙烯管道热熔接头缺陷初探[J]. *压力容器*, 2013, 30(2): 73-76.
- [4] ZHENG J, SHI J, GUO W. Development of nondestructive test and safety assessment of electrofusion joints for connecting polyethylene pipes [J]. *Journal Pressure Vessel Technology*, 2012, 134(2): 1-6.
- [5] SHI J, ZHENG J, GUO W, et al. A model for predicting temperature of electrofusion joints for polyethylene pipes [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2009, 131(6): 3-8.
- [6] 徐家怡, 王 丽. 聚乙烯管道焊接接头的超声波检测[J]. *煤气与热力*, 2011, 31(12): B29-31.
- [7] FREDERICK C, PORTER A, ZIMMERMAN D. High-Density Polyethylene Piping Butt-Fusion Joint Examination Using Ultrasonic Phased Array[C]. ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, 2009.
- [8] HAGGLUND F, SPICER M, TROUGHTON M. Development of Phased Array Ultrasonic Inspection Techniques for Testing Welded Joints in Plastic (PE) Pipes[C]. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012: 16-20.
- [9] 祝新伟, 潘金平, 谭连江. 聚乙烯管道热熔接头冷焊缺陷的微波检测和真密度测试研究[J]. *压力容器*, 2013, 30(9): 54-59.
- [10] 李国华, 吴立新, 吴 森, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 227-230.
- [11] AVDELIDIS N P. A Look On Thermography: from Passive to Active NDT & E surveys [C]. *Proceeding of SPIE*, 2007: 1-9.

[编辑: 罗向阳]

本文引用格式:

邱旭, 钟舜聪, 朱志彬, 等. 聚乙烯管道缺陷的红外热成像模拟及实验研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(12): 1513-1517.

QIU Xu, ZHONG Shun-cong, ZHU Zhi-bin, et al. Infrared thermography simulation and experiments of polyethylene pipe defects[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(12): 1513-1517.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>