

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006239

基于热成像的埋地热力管道缺陷检测试验研究*

张艳博^{1,2},任瑞峰^{1,2},梁鹏^{1,2},姚旭龙^{1,2},王帅^{1,2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院 唐山 063009; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室 唐山 063009)

摘要:为了研究埋地热力管道缺陷检测、泄漏定位问题,根据相似性原理搭建埋地热力管道泄漏试验平台,利用红外热像仪对3种不同工况的埋地管道上方地表进行探测,分析热力管道上方地表红外热像、最大差值辐射温度和差值温度分布变化特征。结果表明,埋地管道泄漏时,红外热像上漏点周围会呈现椭圆形高温区、温度梯度区与自然温度区,高温区内温度最大点往往对应漏点的位置,温度梯度区代表泄漏的影响范围。管道泄漏时最大差值辐射温度升温速率最快,分别是管道保温层破损和管道无破损的2倍和4倍,其差值温度分布直方图由正态分布演变为偏态分布。所提出的根据热像图的像素计算埋地管道泄漏影响区域的实际面积以及根据最大温度点的坐标确定泄漏点位置的方法,可实现管道泄漏影响评估和漏点准确定位。

关键词:热力管道;泄漏检测;红外辐射;图像处理;定量分析

中图分类号: TH811 TU995.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Experimental study on flaw detection of buried heat pipeline based by infrared thermal

Zhang Yanbo^{1,2}, Ren Ruifeng^{1,2}, Liang Peng^{1,2}, Yao Xulong^{1,2}, Wang Shuai^{1,2}

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;

2. Hebei Provincial Key Lab of Mine Development and Safety Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract:The defect monitoring, leak identification and location of buried thermal pipeline are studied in this article. According to the similarity principle, the leakage test platform is established. The infrared thermal imager equipment is used to observe the surface above the buried pipeline under three different working conditions. The variation characteristics of temperature distribution of infrared thermal image, maximum difference radiation temperature and difference of the surface above the heated pipeline are analyzed. Results show that the infrared thermal image appears high temperature area, temperature gradient area and natural temperature region around the leakage when the pipeline leaks. The maximum temperature point in the high temperature zone usually corresponds to the location of the leakage point. The temperature gradient area represents the scope of the spill. In addition, the maximum radiation temperature raises fast when the pipeline leaks. The rate is 2 times and 4 times of damaged insulation layer and non-damaged pipeline, respectively. The temperature distribution histogram is changed from normal distribution to positive skew distribution. According to the pixels of the thermal image, the proposed method can calculate the actual area of the affected area of buried pipeline leakage. According to the coordinates of the maximum temperature point, the location of the leakage point can realize pipeline leakage impact assessment and accurate leak location.

Keywords:heat distribution pipeline; leakage detection; infrared thermal; picture processing; quantitative analysis

0 引言

管道泄漏会导致严重的经济损失与环境污染等问题,也会影响人们的生活质量,及时找到热力管道的泄漏

位置对于供热系统节能和运行保障十分重要。目前我国供热管道多采用直埋铺设,可用于管道缺陷检测的无损检测技术主要有声发射检测^[1]、涡流检测^[2-3]、温度检测(光纤传感器,热红外成像)^[4-5]、超声导波检测^[6]等,这些技术在实际应用中各有优势和局限性^[7-8]。

收稿日期:2020-04-03 Received Date: 2020-04-03

* 基金项目:国家自然科学基金(51904105)、河北省高等学校科学技术研究(QN2020221)项目资助

红外热成像技术对目标和特征的检测是基于物体及其周围环境反射或发射的电磁辐射的变化,不同的材料有不同的热特性,发射与反射的辐射能力有一定差异,红外热像仪通过测量该物体发出辐射能的变化,并将其转换成可以根据热像图颜色的暖冷判断其温度高低的热像图。相对于传统的检测方法,红外热成像技术具有非接触性无损检测、快速实时、在线监测等优点,在埋地管道无损检测与探伤方面具有广阔的应用前景。

在管道及缺陷检测方面, Richards 等^[9]对比分析了在无损检测中,热红外成像技术相比于探地雷达与多光谱分析的优势。周建民等^[10]通过结合红外热波技术、有限元以及支持向量机等方法,对复合材料进行缺陷检测,将实验数据与仿真结果进行对比分析,证实了所提出的分层缺陷检测的可行性。王卓等^[11]利用红外热成像,使用自制电涡流系统作为主动热激励源对管道内壁的缺陷深度进行检测,验证了自制系统模型的可行性与精确度。张强等^[12]使用红外热像仪对管道内部的腐蚀缺陷进行检测,建立了腐蚀程度与热像温度的近似线性相关关系。马炬等^[13]通过脉冲涡流热红外检测铁质部件的内部缺陷,结合所提出的红外图像综合处理方法,与传统算法相比取得了较好的效果。

在埋地管道检测方面,赵石彬等^[14]将主动式的红外热波无损检测技术用于检测预埋聚丙烯管道的3种预设缺陷(腐蚀、结垢和裂纹),证明了其可行性与有效性。Bach 等^[15]使用被动红外热成像对埋地管网进行泄漏检测,并对影响红外热成像检测效果的多个因素进行了分析。徐晓扉等^[16]使用红外热像仪对自制沉管接头泄漏模型进行监测,实验结果表明通过红外辐射的变化可以判断是否发生渗漏。吴国忠等^[17]利用红外热像仪研究了在不同的泄漏量,管道埋深,管内介质温度以及土壤物性条件等对地下管道泄漏对地表温度场的影响。

综上所述,热红外成像技术在管道的无损检测方面已经取得了一定的进展,但是影响检测结果的因素比较多,情况比较复杂。实际工程中管道外部会包裹导热系数较小的保温层,保温层在外力作用下会出现破损现象,也会导致热量通过破损处向外传递而引起地表温度异常,因此有时会出现检测出地表温度异常,但经开挖后并不是管道泄漏所导致的情况。且目前对于红外热像图的检测结果大多是基于视觉的定性分析,对于热像某一区域的辐射温度场的定量描述较少。为分析比较保温层破损与管道泄漏的热红外特征差异,通过搭建的室内埋地管道泄漏传热试验模型,对管道外部保温层是否破损以及管道泄漏状态下的埋地管道进行热红外检测,通过对管道泄漏的红外数据进行图像处理以及定量描述,为后续红外无损检测提供一定的理论参考。

1 热传导理论

热量传递主要依靠3种基本方式:热传导、热对流和热辐射。热传导和对流需要接触,而辐射是非接触的热量传递方式。管道泄漏时,水分与介质之间大部分能量通过传导的方式进行,一部分能量通过对流的方式与周围空气进行热交换。

傅里叶定律又被称为热传导定律,一般表达式为:

$$q = -k \Delta T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: k 为热传导系数; q 为热流密度, T 为温度。上式表明,在 k 与 q 一定时,三维空间中, x, y, z 任一方向出现异常,该方向的微分不连续都会导致 T 的变化。

根据斯特藩-玻尔兹曼定律有:

$$\phi = \varepsilon' A \sigma T^4 \quad (2)$$

式中: ε' 为表面辐射系数; A 为辐射面积; σ 为常数; T 为温度。在 A 与 ε' 一定时,温度 T 的变化会引起辐射通量的变化。可知内部热量的变化同时会引起表面热辐射的变化。

2 管道泄漏传热简化概念模型

图1所示为埋地管道泄漏传热简化概念模型,该模型表达了泄漏过程中的水与热的扩散过程^[15]。管道泄漏传热过程可以看作非周期性的非稳态导热过程,即周围介质的温度随着时间推移不断升高,温度变化波及的范围持续扩大,在经历一定时间之后,周围介质温度逐渐接近管内水温,最终系统内部达到热平衡,此时温度分布保持稳定。

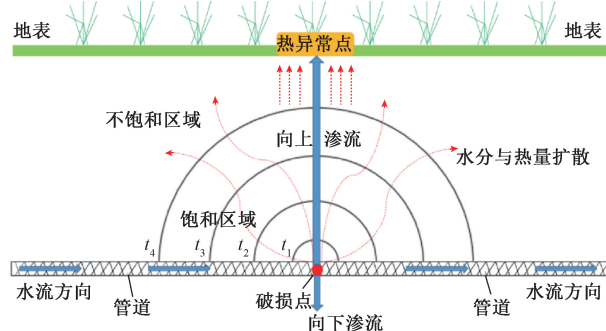


图1 管道泄漏传热简化概念模型

Fig. 1 Simplified conceptual model of pipeline leakage heat transfer

一般情况下,换热会伴随着泄漏而发生,热交换与热传导会引起温度场的变化。在管道内液体比周围介质温度高时,由泄漏压力产生的水力梯度会带着热量向四周扩散蔓延,在重力与渗流场的作用下与周围土壤进行热交换。水流入周围介质中不断填充空隙使其达到饱和,

泄漏量的增加会使热影响区域也不断扩大,在附近土壤在达到饱和以后会继续向外膨胀。在热行为方面,地表的温度不仅会受其热物性、蒸发率以及大气辐射的影响,土壤与渗透水的相互作用也会对温度产生影响,因为非饱和和含水土壤的有效导热系数随着含水量的增加而增大^[18]。这种情况下可以将泄漏的传热问题简化为两个主要部分:1)在饱和土基质中,从缺陷到其边界的对流;2)通过不饱和土基质从边界到地表的热传导。若埋管的介质若比较均匀,则辐射方向的温度传递也会比较规律,会形成以泄漏点为中心半径不断扩大的近似圆形温度场,而温度场区域中心会有明显的高温集中。

因泄漏点为中心点正上或正下方的渗流量大于蔓延向四周的流量,由达西定律可得管道泄漏正上方的热量更多,温度变化强烈。同时,热量扩散到地表,等温线被地面切割,会出现管道垂直上方温度较高,管道四周越远温度越低的现象。若管道泄漏量保持不变,一定时间后温度场分布逐渐稳定,达到一个新的平衡状态。

3 试验设计

在实际工程中,埋地热力管道直径为0.8~1.2 m,埋深为1~1.5 m,为减少管道散热,管道外层加有30~60 mm导热系数较小的保温层。为了保证试验段管道在结构上与实际埋地管道大致相似,依据实际物理模型搭建简易试验平台进行模拟试验,试验包括水循环系统、加热系统、红外数据采集系统、埋地管道模拟系统,试验模型如图2所示。

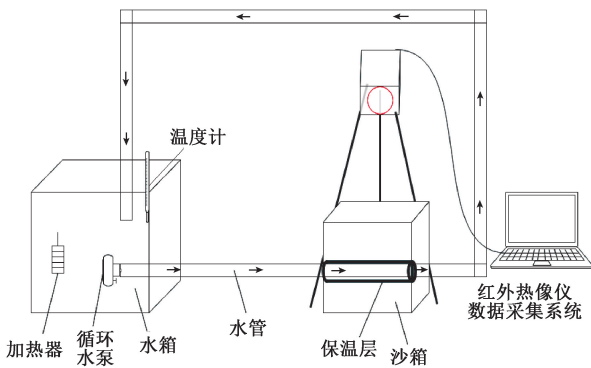


图2 试验模型

Fig. 2 Experimental model

水循环系统包括水箱、水泵、管道与流量计,加热系统包括加热器与温度计,数据采集系统包括红外热像仪与数据采集电脑,管道埋地模拟系统包括沙箱、管道以及保温层。试验系统中,管道直径为25 mm,保温层厚度5 mm,水箱尺寸为0.6 m×0.6 m×1.0 m,沙箱尺寸为0.8 m×0.6 m×0.6 m(长×宽×高),水箱外部包裹一层泡

沫棉以维持水温稳定;沙箱内介质采用砂砾、砂土和有机土以任意比例混合尽量与实际现场保持一致;红外热成像设备采用德国Infra Tec Image IR 8325红外热像仪,像素为640×512,空间分辨率为1 mrad,温度灵敏度±0.02℃。

试验室温23℃,管道固定埋深为20 cm,水温范围为50℃~60℃,管内水流速为10 L/min,分别对保温层无破损,保温层上方破损以及管道上方破损泄漏3种工况进行热红外监测。在实验过程中,为尽可能满足现场条件,使得土壤与空气充分对流,沙箱不封顶。试验依靠水泵提供的压力进行水循环。试验开始前使用加热系统将水箱内水加热至所需温度,期间对试验系统进行调试,室内使用空调保持环境温度稳定,当沙箱表面的温度场近似稳定后连接水泵同时使用热像仪开始观测,试验时将红外热像仪安置在沙箱正上方1.5 m处,垂直于观测面,用三脚架固定,观测时间为10~60 min,待试验系统温度场近似稳定时停止试验;每种工况结束后更换介质,防止影响下一次观测效果。3种工况的实际图如图3所示。

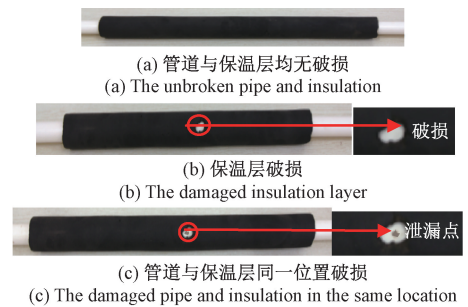


图3 不同工况图

Fig. 3 Diagram of different working conditions

该试验在室内进行,热红外检测环境较好。在实际检测中,热红外检测会受到诸多因素的影响,如管内热媒温度、大气辐射、外界温度变化迅速等,同时缺陷引起的地表温度异常往往会因大气波动的影响而有一定的滞后性。在检测时为减弱大气辐射的影响,使用热红外检测一般在夜间、凌晨或阴天等太阳辐射较弱且风力较小的时候进行。

4 试验结果分析

4.1 红外热像图降噪与增强

红外热像仪是获取地表温度数据最可靠的温度测量设备之一,能提供良好的可视化和全面的热分布信息。但红外热像仪采集的原始数据含有多种噪声如脉冲噪声,周期性噪声等会导致图像可读性差,有效信息识别率低,影响后期的数据分析,所以对原始数据进行一系列的降噪与增强处理,以提取其有效信息。

在后期图像分析中,需要关注由于热传导产生的温

度场的变化,首先对图像作背景差分计算以去除其背景环境噪声,将第一帧图像作为背景图像,采集的所有原热像图与之相减,并对计算后的数据进行标准化以统一量纲便于分析比较,计算后的结果可以一定程度反映温度场的增量与分布,差分计算公式为:

$$f_k(x, y) = f_k(x, y) - f_0(x, y) \quad (3)$$

式中: k 为红外图像序列 ($k = 1, 2, 3 \dots$); $f_0(x, y)$ 为初始状态下的第一帧红外图像矩阵。

标准化计算公式为:

$$x' = (x - \mu) / \sigma \quad (4)$$

式中: x' 为标准化数据; x 为样本原始数据; μ 为样本数据均值; σ 为样本数据标准差。

但图像差分计算并不能对图像进行去噪与增强处

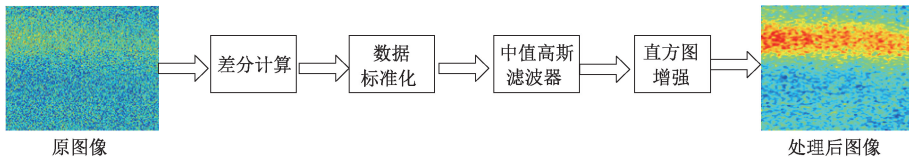


图4 图像处理过程

Fig. 4 Image processing

4.2 不同工况下埋地热力管道红外热像对比分析

利用红外热像仪对埋地热力管道在3种工况下进行连续监测,获得3种工况下埋地热力管道的红外热像随时间演化序列,如图5所示。

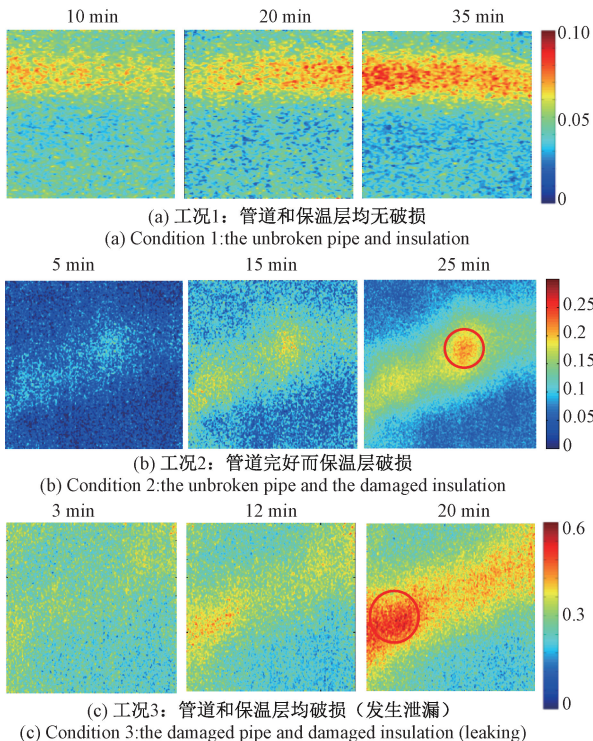


图5 不同工况下埋地热力管道红外热像演化图

Fig. 5 Infrared thermal image of different working conditions

理,针对图像中存在的脉冲噪声与周期性噪声,与其他经过测试的滤波器(如均值滤波器和维纳滤波器)相比,先后使用中值滤波和高斯滤波可以产生更为平衡、真实的图像输出,因此采用中值滤波和高斯滤波对红外图像进行降噪处理,再对降噪后的图像使用直方图变换增强,以提升图像整体亮度并增大对比度,增加其可读性^[19]。

直方图变换函数为:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=1}^k p_r(r_j) = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n} \quad (0 \leq r_j \leq 1) \quad (5)$$

式中: $p_r(r)$ 表示给定图像中的灰度级的概率密度函数; $k = 1, 2, \dots, L$; s_k 是输出像中的亮度值,它对应于输入图像中的亮度值 r_k 。

红外热像图处理过程及处理前后图像对比如图4所示。

从图5可以看出:

工况1:埋地管道内存在流动的高温热水,其水温相比于四周介质温度较高,因此管道可看作为一个异常热源。在管道和保温层均无破损条件下,管道内高温水的热量均匀向外扩散,反映在热像图上,则可以看到一条明显的高温条带,如图5(a)所示,该条带宽度近似与管道孔径相同,其方位与管道走向相同。随着时间的推移,管道、保温层、沙土系统内部存在持续传热导效应,在系统热传导达到平衡后,该高温异常条带清晰,可以明显的判断出管道的走向及状态。

工况2:当管道完好而保温层破损时,在保温层破损处管道直接与周围介质接触,破损部位的管道向周围强烈散热,局部热传导效应增强,导致管道保温层破损处局部温度较高,从而在热像上形成局部高温异常区域,如图5(b)中选中区域所示。

工况3:当管道和保温层同一位置均破损时,即管道内热水出现泄漏,可以看出与工况2条件下的热像特征类似,在管道泄漏位置同样出现了局部高温异常区域,如图5(c)中区域所示,相比工况2,高温异常区域温度和范围均增大。这是由于管道发生泄漏时,短时间内,水温与介质温差较大,尤其管内热液体与周边介质的热交换释放热量增多。随着水分的渗流,水中的水蒸气也随着扩散,与周边土壤进行热对流,且水汽在扩散过程中,周围砂土的含水率增加,导热系数随之变大^[18],水分含量上升在周围介质所形成的液岛会减少固体颗粒间的接触从

而降低接触电阻, 辐射换热效应增强。从微观角度看, 分子及原子的热运动也会对物体向周围辐射的红外能量产生影响, 分子、原子热运动的剧烈程度宏观上表现为物体表面温度的高低及热辐射能量的多少^[20]。因此, 当管道破损出现泄漏时, 同时存在热传导、热对流以及辐射换热, 红外辐射能量增多, 故热像中高温异常更加明显。

图 6 所示为 3 种工况下热像最大差值辐射温度 (ΔT) 随时间的变化曲线。分析发现, 在初期一小段时间内 (图 6 阶段①所示), 3 种工况下热像最大差值辐射温度近似同步变化, 温度相差不大。此后, 3 种工况下最大差值辐射温度出现不同的变化趋势 (图 6 阶段②所示), 工况 1 管道无破损条件下系统内部为稳态传热, 最大差值辐射温度小幅度升温到一定值后近似平稳变化; 工况 2 和工况 3 由于保温层破损或管道破损泄漏, 最大差值辐射温度首先快速升温, 随后升温速率减小, 最后温度逐渐趋于稳定。

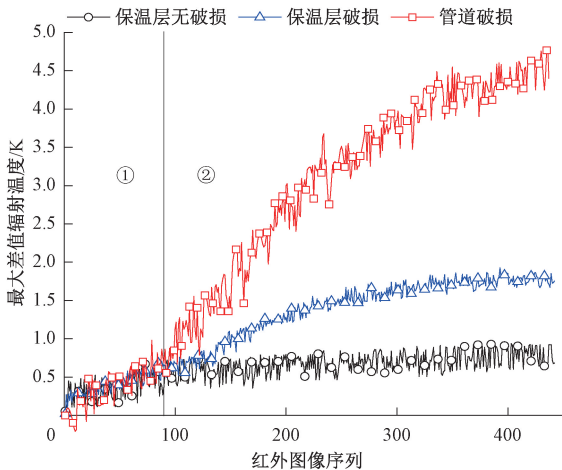


图 6 最大辐射温度
Fig. 6 Maximum radiation temperature

分别计算 3 种工况下最大差值辐射温度 (ΔT) 从开始监测到稳定时的升温幅度和升温速率, 工况 1~3 3 种工况下最大差值辐射温度 (ΔT) 升温幅度分别是 0.8、1.7 和 4.6 K, 升温速率分别是 0.005、0.01 和 0.02。整体而言, 可以看出工况 1 条件下最大差值辐射温度升温幅度和速率均较小, 工况 2 和工况 3 均出现明显的升温幅度和较高的升温速率, 相比之下, 工况 3 管道破损泄漏时最大差值辐射温度升温幅度更高, 分别是工况 1 和工况 2 的 5.75 和 2.7 倍, 同时升温速率也更快, 分别是工况 1 和工况 2 的 4 倍和 2 倍。

基于上述分析可以发现, 埋地热力管道和保温层均无破损时, 红外热像上出现与管道宽度、走向相近的高温条带, 高温条带内温度分布均匀, 无明显异常区域, 最大差值辐射温度小幅度升温后近似平稳变化。在保温层破损无泄漏或管道破损出现泄漏时, 热像上高温条带内会

出现温度分异现象, 破损位置出现局部高温异常, 最大差值辐射温度首先快速升温, 随后升温速率减小, 最后温度逐渐趋于稳定。由监测时间可知, 系统内部温差越大, 检测出缺陷的时间会越短, 相比之下, 管道破损出现泄漏时最大差值辐射温度的升温速率较快, 幅度较高。

因此, 利用热像中局部高温异常现象, 可以对埋地热力管道的破损情况进行监测和识别, 同时结合最大差值辐射温度的升温幅度和速率, 可以准确判断是保温层破损无泄漏还是管道破损出现泄漏引起的高温异常。

4.3 管道泄漏局部热像演化分析

1) 表面温度场演化过程

管道上方破损泄漏时局部表面温度场热像演化如图 7 所示。由图 7 分析可得, 管道破损发生泄漏后, 系统的整体温度会上升。泄漏初期 (1~180 s), 温度变化主要集中在破损部位上方, 影响范围较小, 热像图无明显温度分层; 随着时间的推移, 同时在温度场、流场以及热传导的共同作用下, 系统内部高温区域温度场近似椭圆或圆形扩大, 过程中中心不断出现高温集中区域并向四周扩散, 高温区域温度场逐渐出现分层现象 (300~600 s); 但在能量输入保持稳定时, 随着传热面和浸润面的增大, 能量逐渐供给不足, 同时液体渗透速度变慢, 因而区域扩大速度逐渐减缓, 最后范围保持稳定 (750~1 050 s)。在泄漏点附近, 温度较高, 距离泄漏位置较远的区域温度较低, 且温度变化会因热量的到达需要时间而具有一定的滞后性, 热像表现为由中心向外侧温度逐层递减, 周围呈现出一定的温度梯度, 边缘温度较为稳定。

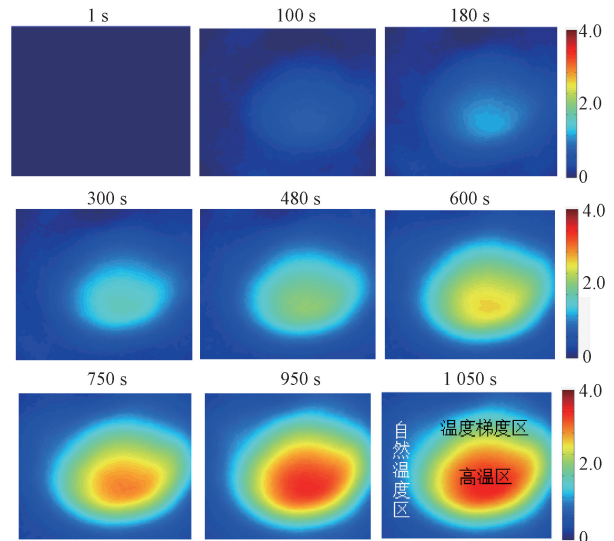


图 7 管道泄漏局部热像图

Fig. 7 Local thermal image of pipeline leakage

由图 7 分析可得, 管道泄漏后非稳态温度场在达到热平衡后大致分为 3 个区域: (1) 高温区: 在破损缺陷附近的区域

周围介质温度较高更接近管内液体温度;(2)温度梯度区:在高温区域外侧,温度变化较为明显;(3)自然温度区:远离缺陷的介质所受影响较小,温度与无缺陷时相差较小。

2) 不同时刻红外辐射特征定量描述

选取4个时刻的红外热像图(100, 350, 600, 900 s),绘制管道泄漏不同时刻的辐射温度三维分布图及频率分布直方图,通过温度场的变化反映管道不同泄漏量的红外辐射特征,如图8所示。

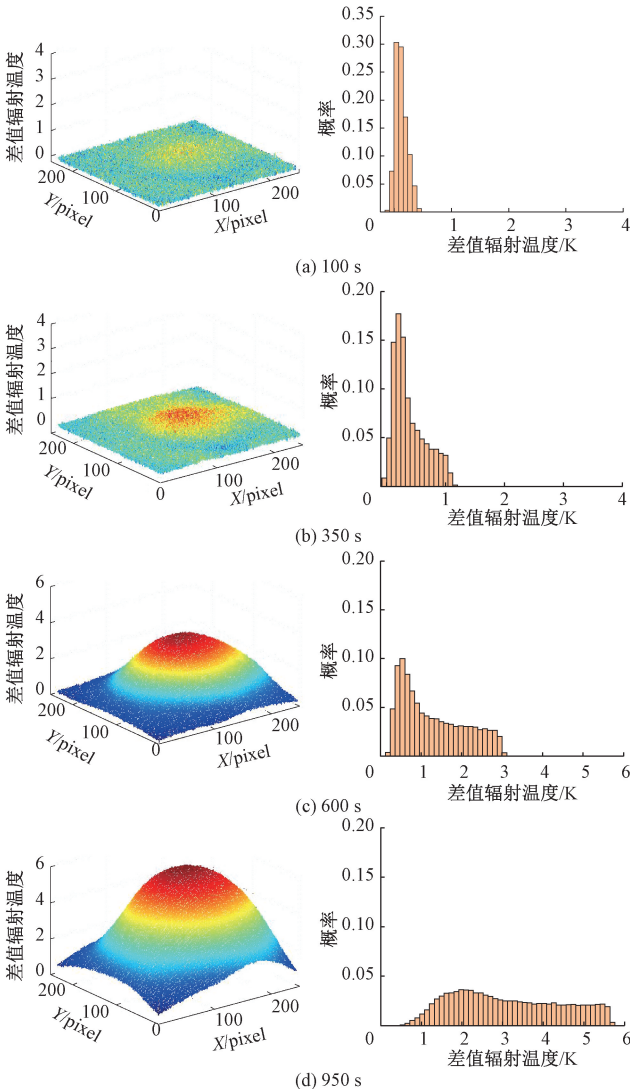


图8 红外温度场统计特征

Fig. 8 Statistical characteristics of infrared temperature field

当管道破损泄漏时,水分的渗流会导致土壤湿度的改变,随着水分与热量的扩散,系统内部发生热湿迁移。在起始阶段(100 s),差值辐射温度分布范围较小,主要在 $-0.1 \sim 0.5$ K,检测的高温辐射区域较小,热像中心温度较高,此时砂土整体处于干燥状态,沙粒间主要填充为空气,导热率较低,且热量传到表面需要一定的时间,故

此阶段表面辐射温度变化不明显,高温点较少,整体温度较低,高低温度对比不明显,基本无分异现象,直方图近似呈现高斯分布。

在350 s时,热量传至表面,整体温度相比初始阶段小幅度上升,温度分布范围扩大至 $0 \sim 1.2$ K,高温区域面扩大,高低温对比度增强,温度场开始出现分异现象;随着砂土在充水环境下的不断饱和,有效导热率与热扩散速率变大,以及液态水、水蒸气和水分相变换热量的增加等多种因素影响使得热变化加快,同时因前中期管内热水与周围介质温差较大,能量输入较快,因而该阶段升温迅速,至中期时(600 s),温度分布范围扩大为 $0 \sim 3$ K,温度场出现明显起伏,泄漏点处温度最高,向四周逐层递减,高温点出现概率渐趋相等。

泄漏后期(950 s),系统达到稳态时,温差进一步增大,温度分布范围增大为 $0 \sim 6$ K,且范围内高温点呈现均匀分布,即不同温度带的面积近似相等;在泄漏一定时间之后,周围沙土接近饱和,导热率趋于稳定,且热影响区域内砂土温度升高,四周介质与泄漏液体温差缩小,温度上升速度会不断减小,温度分布逐步稳定,温度场与湿度场在热湿迁移中达到相对平衡状态。泄漏中后期,温度直方图近似呈现正偏态分布。

由三维温度场分布图以及温度频率分布直方图分析可得,随着泄漏量的增加,4个时刻辐射温度的最大值分别为0.5, 1.2, 3.2, 5.7 K,依次增大;温度分布范围不断扩大,热像图内高温点逐渐增多,不同温度范围内的高温点出现概率近似相等;温度场分异现象逐渐明显,高温区、温度梯度区与自然温度区可辨识度提高,温度分布概率由正态分布逐渐演变为正偏态分布。

5 泄漏水影响面积计算与泄漏点的定位

5.1 泄漏水影响面积的估算

通过计算红外热像图内的单个像素面积大小,再统计选定区域内的像素个数可以大致估算出该平面区域的实际面积。影响面积的计算过程如图9所示。

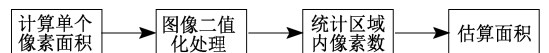


图9 影响面积估算过程

Fig. 9 Area estimation process

红外热像仪的最小观测尺寸面积计算公式为^[21]:

$$s = D^2 = (IFOV \times L)^2 \quad (6)$$

式中: s 为单个像素面积; D 为最小观测尺寸; $IFOV$ 为热像仪空间分辨率; L 为观测距离。

通过MATLAB对图像进行阈值分割与二值化处理,之后编写统计函数提取范围内的像素总数。在管道泄漏

过程中,渗漏水的高温也会使周围较小范围内的介质温度上升,从而反映到热像图上,使得检测的辐射高温区域增大(图 10(a)区域①边缘),但相比于湿润锋到达的区域轮廓较为模糊。为提高渗漏水影响面积估算的准确性,通过多次的阈值调整,只对温度梯度区域内较为明显的轮廓(图 10(a)区域①)进行二值化提取。

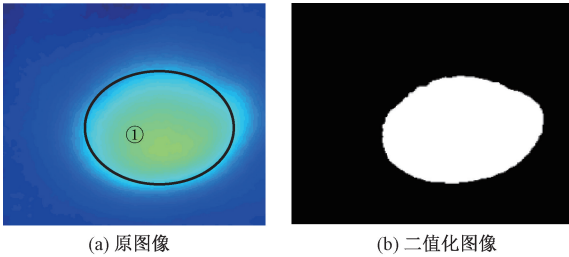


图 10 面积提取

Fig. 10 Area of extracting

实际面积估算公式为:

$$S = s \times n \tag{7}$$

式中: S 为实际面积; n 为统计的区域内的像素总数。

该热像仪空间分辨率为 1 mrad,观测距离 1.5 m,计算得像素边长 $D = 1.5 \text{ mm}$,则热像图每个像素面积为 $(1.5 \text{ mm})^2 = 2.25 \text{ mm}^2$ 。图 10(b) 所示二值化图像中的白色区域为所提取的渗漏水影响区域,所提取像素个数为 45 503,则渗漏水影响区域的实际面积为:

$$S = 2.25 \times 10^{-6} \times 45\ 503 = 0.102\ 4 \text{ m}^2$$

为分析渗漏水影响面积的变化趋势,每隔 1 min 选取一张热像图计算其渗漏水影响面积,绘制其增长曲线与增长速率,如图 11 所示,影响面积的变化可大致分为 3 个阶段:快速扩大期,增长减缓期,保持稳定期。管道泄漏时,初始阶段水压驱动水在小范围内迅速流动,且初期系统内部温度与湿度差异较大,能量输入较快,故而影响面积快速增加;随着砂土湿度的增加,密度增大,孔隙度减小,渗透性降低,水扩散减缓^[22],导致影响面积增长速度降低,但影响范围会在持续充水状态下继续扩大,经过有限的时间之后渗透性趋近于 0,面积基本不再变化。另一方面渗漏水流速与压力不变,能量输入一定时,随着传热面与浸润面的扩充,能量供给不足,面积增长速度下降,一定时间后,面积增长速率趋近于 0,保持不变。

热红外检测作为遥感检测的手段之一,可以搭载不同的平台(如无人机、车载等)实现动态监测,通过热像图对选定区域面积快速估算可以为红外热像仪动态检测渗漏水的影响范围提供参考。

5.2 渗漏水位置的确定

通过 MATLAB 绘制温度场分布三维图,可同时确定温度最高点的像素坐标,如图 12 所示。所标记的最大温度像素平面坐标为 (165, 152), Z 轴为最大温度值。综上

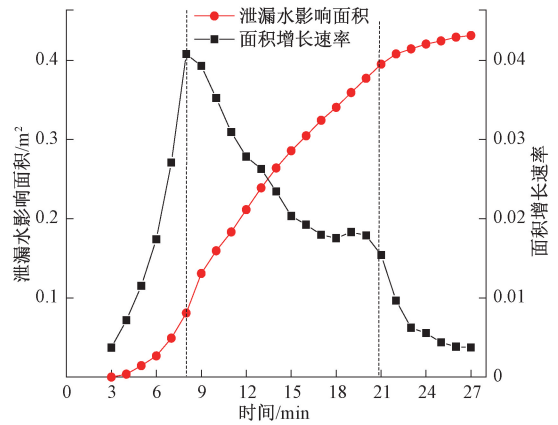


图 11 渗漏水影响面积增长趋势

Fig. 11 Area growth trend of water leakage

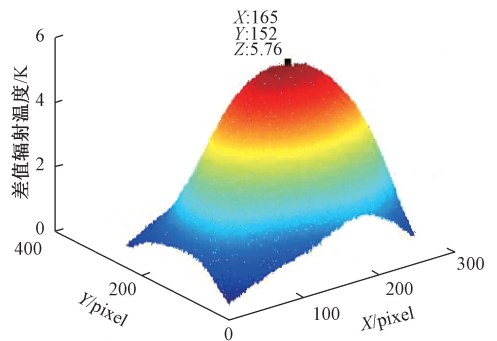


图 12 最大值及坐标

Fig. 12 Maximum and coordinates

分析,最高温点坐标大致为渗漏水点所在位置,因此依据单个像素的边长以及坐标,计算出最大温度点距离观测边缘的实际距离,可大致确定渗漏水的位置。 X, Y 方向距离观测边缘的实际距离分别为:

$$X = 165 \times 1.5 \text{ mm} = 247.5 \text{ mm} \approx 0.248 \text{ m}$$

$$Y = 152 \times 1.5 \text{ mm} = 228 \text{ mm} = 0.228 \text{ m}$$

具体位置如图 13 所示。

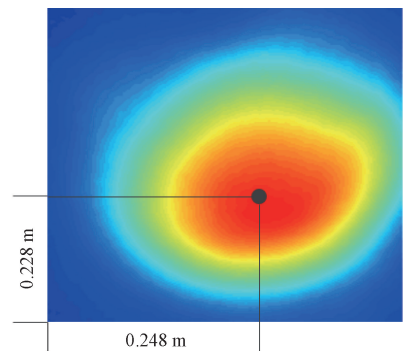


图 13 渗漏水点实际位置

Fig. 13 The actual location of the leak point

6 结 论

1) 使用红外热像仪对埋地热力管道上方表面进行监测,当管道完好无破损时,红外热像显示为一条与管道走向相同、温度均匀分布的高温条带;若管道存在缺陷时,与管道走向相同的温度条带上会显示局部异常高温区域,温度明显高于其他区域,形状近似椭圆形,故可根据地表温度场是否存在高温异常区域来判断管道是否存在缺陷。

2) 当埋地热力管道存在缺陷时,若红外热像图显示的高温异常区域面积维持不变且温度保持稳定,可判断为保温层破损;若高温异常区域面积及最高温度在一定时间内持续增大,升温速率与升温幅度均比较大,且区域内温度梯度明显,可判断管道发生破损泄漏。

3) 当埋地热力管道发生泄漏时,地表热像监测的温度场表现为离泄漏点越近,温度越高,且随着时间的推移,逐渐形成以泄漏点为中心的高温区、温度梯度区与自然温度区3个特征区域,整体温度场的温度频率分布直方图逐渐由正态分布演变为正偏态分布。

4) 通过计算热像图内单个像素的面积来估算热像仪监测范围内局部区域的实际面积,提出了基于红外热像图温度场的估算埋地热力管道泄漏水影响区域面积的方法,可以为动态监测管道泄漏的影响范围提供参考;同时通过捕捉热像图中最高点温度的坐标,可计算出泄漏点距离观测边缘的距离,以此确定泄漏点的具体位置。

与本文所设计的试验系统相比,实际工程的埋地管道深度较大,检测到地表温度异常的时间会更长,但是试验系统与实际结构相似,所以不同工况下所得红外的空间特征结果与温度变化趋势基本一致,可根据不同的特征判断管道是否存在缺陷以及管道是否破损发生泄漏。

参考文献

- [1] 李帅永,夏传强,杨丽丽.不同方向的气体管道泄漏声发射信号模态特性分析[J]. 仪器仪表学报,2018,39(5):195-204.
- LI SH Y, XIA CH Q, YANG L L. Modal characteristics of leakage-induced acoustic emission in different directions of gas pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 195-204.
- [2] 张伟,李焱骏,师奕兵,等.石油管道脉冲远场涡流信号特征分析与处理[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):

12-20.

ZHANG W, LI Y J, SHI Y B, et al. Feature analysis and processing of pulsed remote field eddy current signal in oil pipes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 12-20.

- [3] 徐志远,肖奇.基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(2): 80-87.

XU ZH Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy currents [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(2): 80-87

- [4] 陈述,李素贞,黄冬冬.埋地热力管道泄漏土体温度场光纤监测[J]. 仪器仪表学报,2019,40(3):138-145.

CHEN SH, LI S ZH, HUANG D D. Monitoring of soil temperature field due to leakage of buried thermal pipeline using distributed fiber optic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 138-145

- [5] 许滨华,何宁,何斌,等.基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8):20-30.

XU B H, HE N, HE B, et al. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 20-30.

- [6] 杨理践,邢燕好,张佳,等.电磁超声导波在管道中螺旋向传播的机理研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 60-69.

YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Research on spiral propagation mechanism of electromagnetic ultrasonic guided wave in pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 60-69

- [7] 卢泓方,吴晓南.国外天然气管道检测技术现状及启示 [J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 103-111.

LU H F, WU X N. The status quo of natural gas line pipe inspection technologies abroad and its implications for China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 103-111

- [8] PARK S, LIM H, TAMANG B, et al. A Preliminary study on leakage detection of deteriorated underground sewer pipes using aerial thermal imaging [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020: 1-12.

- [9] RICHARDS J A. Inspection, maintenance and repair of

- tunnels: International lessons and practice [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, 13(4):369-375.
- [10] 周建民,陈超,涂文兵,等. 红外热波技术、有限元与SVM相结合的复合材料分层缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3):29-38.
ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wave technology, finite element and SVM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3):29-38.
- [11] 王卓,张云伟,喻勇,等. 主动热激励式红外热成像管道缺陷深度检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(9):201-208.
WANG ZH, ZHANG Y W, YU Y, et al. Depth test of pipeline defects by active thermal excitation and infrared thermography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9):201-208.
- [12] 张强,郭桐,张玄. 基于红外热像的供热管道内壁腐蚀诊断及预测研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(4):462-468.
ZHANG Q, GUO T, ZHANG X. Research on diagnosis and prediction of corrosion in heating pipe wall based on infrared thermal image testing[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(4):462-468.
- [13] 马炬,邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7):137-144.
MA X, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7):137-144.
- [14] 赵石彬,张存林,伍耐明,等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(2):456-460.
ZHAO SH B, ZHANG C L, WU N M, et al. Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2):456-460.
- [15] BACH P M, KODIKARA J K. Reliability of infrared thermography in detecting leaks in buried water reticulation pipes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017:1-15.
- [16] 徐晓扉,付石峰,白云. 沉管接头突发渗漏水的红外监测模型试验[J]. *岩土力学*, 2014, 35(8):2426-2432.
XU X F, FU SH F, BAI Y. Model test of infrared monitoring sudden leakage of immersed tube joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(8):2426-2432.
- [17] 吴国忠,邢畅,王玉石,等. 地下管道泄漏过程地表温度场红外检测实验[C]. 第十一届全国渗流力学学术大会论文集, 2011:379-384.
WU G ZH, XING CH, WANG Y SH, et al. Experimental research on infrared Detection of Ground Temperature Field in Buried Pipeline Leakage Process[C]. *Proceedings of the 11th National Percolation Mechanics Congress*, 2011:379-384.
- [18] 隋晓凤,于明志,彭晓峰. 含湿沙导热系数的测试与实验研究[J]. *热科学与技术*, 2009, 8(1):20-24.
SUI X F, YU M ZH, PENG X F. Experimental study on thermal conductivity measurement of wet sands [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2009, 8(1):20-24.
- [19] 赵耀宏,史泽林,罗海波,等. 自适应红外图像直方图均衡增强算法[J]. *光电工程*, 2008, 35(3):97-101.
ZHAO Y H, SHI Z L, LUO H B, et al. Self-adaptive histogram equalization enhancement algorithm for infrared image[J]. *Opto Electronic Engineering*, 2008, 35(3):97-101.
- [20] 赵龙灿,孟永乐,于润桥,等. 非开挖热力管道磁-温梯度差检测技术研究[J]. *暖通空调*, 2017, 47(4):109-112,28.
ZHAO L C, MENG Y L, YU R Q, et al. Magnetic-thermal gradient difference test technology for non-excavation heating pipelines [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(4):109-112,28.
- [21] 豆海涛,黄宏伟,薛亚东. 隧道渗漏水红外辐射特征模型试验及图像处理[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S2):3386-3391.
DOU H T, HUANG H W, XUE Y D. Model test on infrared radiation feature of tunnel seepage and image processing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S2):3386-3391.
- [22] 李达,汪时机,李贤,等. 非饱和砂质黏性紫色土一维渗透特性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(2):373-380.
LI D, WANG SH J, LI X, et al. Experimental study on

one-dimensional permeability of sandy clayey purple soil at unsaturated condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (2): 373-380.

作者简介



张艳博, 1997 年和 2000 年于河北理工学院获得学士和硕士学位, 2008 年于中国矿业大学(北京)获得博士学位, 现为华北理工大学教授, 主要研究方向为岩土工程。

E-mail: fzdn44444@163.com

Zhang Yanbo received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hebei Institute of Technology in 1997 and 2000, respectively, and received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology (Beijing) in 2008. He is currently a professor at North China University of Science and

Technology. His main research interest includes geotechnical engineering.



梁鹏(通信作者), 2012 年于郑州科技学院获得学士学位, 2015 年于华北理工大学获得硕士学位, 现为华北理工大学讲师, 主要研究方向为声发射、热红外监测技术及应用。

E-mail: hnlp87@163.com

Liang Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhengzhou Institute of Science and Technology in 2012, and received his M. Sc. degree from North China University of Science and Technology in 2015. He is currently a lecturer at North China University of Science and Technology. His main research interests include acoustic emission, thermal infrared monitoring technology and application.