

文章编号: 0253-2239(2010)02-0456-05

# 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测

赵石彬<sup>1</sup> 张存林<sup>2</sup> 伍耐明<sup>3\*</sup> 段玉霞<sup>1</sup> 李艳红<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191; <sup>2</sup> 首都师范大学物理系, 北京 100048  
<sup>3</sup> 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100191; <sup>4</sup> 北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

**摘要** 由于聚丙烯管道所处的工作环境恶劣, 长期使用后极易形成内壁腐蚀、结垢和裂纹等缺陷, 导致管道的性能降低, 引发事故, 因此对聚丙烯管道进行严格的无损检测是十分必要的。将红外热波无损检测技术用于预埋有三种缺陷(腐蚀、结垢和裂纹)的聚丙烯管道的无损检测; 对红外热像仪采集的数据进行处理, 得到典型时刻的热图和温度对数-时间曲线。通过分析典型时刻热图的灰度随时间变化的情况和曲线的斜率变化, 对三种缺陷类型进行定性分析, 并对缺陷进行定位。利用图像处理软件测量出了腐蚀面积。实验结果表明, 红外热波无损检测技术可以快速、直观和有效的检测聚丙烯管道的三种常见缺陷。

**关键词** 红外热波; 无损检测; 聚丙烯管道; 缺陷

中图分类号 TG115.28 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0456

## Infrared Thermal Wave Non-Destructive Inspection for Defects of Polypropylene Pipeline

Zhao Shibin<sup>1</sup> Zhang Cunlin<sup>2</sup> Wu Naiming<sup>3</sup> Duan Yuxia<sup>1</sup> Li Yanhong<sup>4</sup>

<sup>1</sup> School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048 China

<sup>3</sup> School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>4</sup> School of Information Science Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** After long-term service in rugged environment, polypropylene pipeline easily forms defects such as corrosion on the wall, deposition and crack. The defects greatly reduce the performance of the pipeline and easily cause accidents. The rigorous non-destructive inspection to the polypropylene pipeline must be carried. Infrared thermal wave non-destructive inspection technology was applied to detect three kinds of flaws which were embedded in polypropylene pipeline. Data which was collected by IR camera was processed, the typical time thermograph and the curve of logarithmic temperature-time can be extracted. Via to analyzing the time-variation gray scale of typical time thermograph and the slope coefficient of curve, the type and the information of position of flaws can be obtained. Utilizing the software of image processing, the area of corrosion can be calculated. The results indicated that this technology can make fast, direct-viewing, effective examination for the polypropylene pipeline with 3 kinds of common flaws.

**Key words** infrared thermal wave; non-destructive inspection; polypropylene pipeline; defect

收稿日期: 2008-11-15; 收到修改稿日期: 2009-01-10

基金项目: 国家 973 计划(2006CB605305), 国家自然科学基金(10502035)和北京市教育委员会科技发展计划面上项目(KM200710028007)资助课题。

作者简介: 赵石彬(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事红外热波无损检测方面的研究。E-mail: zhao\_shibin2002@163.com

导师简介: 张存林(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹及红外波谱与成像等方面的研究。

E-mail: cunlin\_zhang@mail.cnu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: wnm@buaa.edu.cn

## 1 引言

1990 年以来,国际上积极开展红外热波无损检测技术的研究,目前已经发展成为一种新兴的无损检测技术,被广泛应用航空航天领域。在美国红外热波检测技术已经是排名超声和射线检测技术之后的常规无损检测技术。同时,该技术也广泛应用于其他领域,如汽车、船舶、压力容器、管道、核工业和新材料研究等。此技术适用于所有金属和非金属材料的检测,且速度快,直观、使用安全,并可定量测量,特别适用于复合材料和现场检测,目前已经开始在世界范围逐步推广<sup>[1~10]</sup>。本文尝试将红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道的缺陷和损伤检测。

聚丙烯塑料管(PP-R)是一种新型节能管道产品,大量用于城市排水给水管网。由于其工作环境恶劣,长期使用会出现内壁腐蚀、裂纹和结垢等缺陷。腐蚀使管壁变薄,结构强度变小,管道的应力集中处容易出现疲劳裂纹;腐蚀和裂纹缺陷的出现使管道渗漏,降低了管网输水能力,增加输水电耗,造成水资源的浪费。以上两种缺陷都可以使管道的承压能力降低,容易出现爆管现象;结垢使水中细菌数、有机碳、铁、锌、锰、钙和有机物等含量增加,甚至超过国家规定值,严重影响了供水水质<sup>[3]</sup>。为了保证管道的安全运行和饮用水的水质,需要一种安全、快速、无污染和易于现场实施的用于此类管道的无损检测方法。本文将红外热波无损检测技术用于含有腐蚀和裂纹预埋缺陷的聚丙烯管的无损检测与定量评估,检测结果表明该无损检测技术能够有效的检测聚丙烯管道的常见缺陷和损伤。

## 2 基本原理

红外热波无损检测技术是一种创新性的无损检测技术,其核心是针对各类试件设计和选择不同特性的热源对试件进行周期、脉冲和阶梯等函数形式的加热;采用现代红外成像技术,在计算机控制下进行时序热波信号探测和数据采集;使用根据热波理论模型和现代图像处理理论模型而研制的专用计算机软件进行实时图像信号处理和分析。脉冲激励红外热波检测系统是一种采用闪光灯脉冲对被检工件进行主动控制式加热,利用红外热像仪探测、显示和记录其表面红外辐射及其变化的系统。通过该系统可以获取材料的均匀性信息及其表面下的结构信息,以此达到检测和探伤目的如图 1 所示<sup>[2~5]</sup>。

图 2 所示为脉冲激励红外热波检测热图序列示

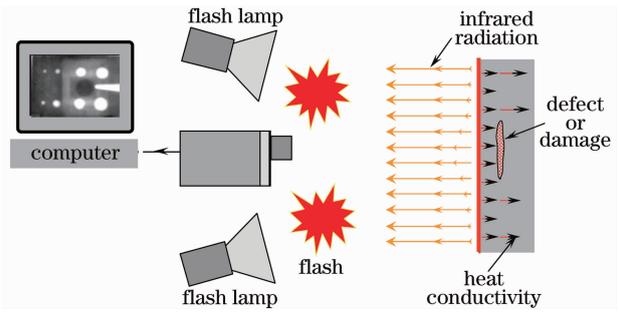


图 1 红外热波无损检测技术原理图

Fig. 1 Schematic of infrared thermal wave non-destructive inspection

意图,热图序列前几帧是脉冲闪光前的表面温度分布记录。每次实验根据实验条件即采集时间和频率得到  $N$  帧(频率 $\times$ 时间)热图序列。通过分析实验所得的动态热图序列可以直观的看到不同深度损伤或缺陷的显现过程<sup>[4~6]</sup>。

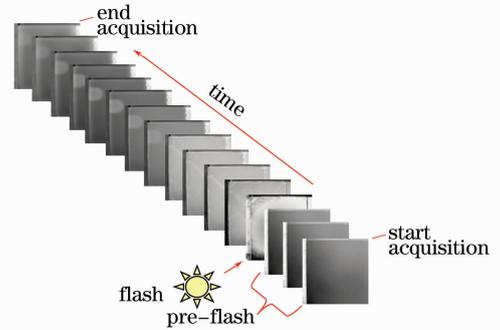


图 2 红外热波无损检测热图序列示意图

Fig. 2 Schematic of thermograph sequence in infrared thermal wave non-destructive inspection

## 3 实验设备

红外热波无损检测系统装置由热激励系统、红外热像仪和计算机组成。热激励系统由两电容电源、闪光灯和防光泄露遮罩组成,脉冲闪光灯最大能量可达 9.6 kJ 如图 3 所示。红外热像仪为瑞典的 ThermaCAMTMSC3000,探测波长为  $8\sim 9\ \mu\text{m}$ ,具有制冷型量子阱红外光子探测器和内循环制冷器。热像仪采集到的热图序列通过电缆线传送到计算机,由图像处理软件进行实时处理或后期处理。

## 4 实 验

取长度 139 mm,外径 32 mm,壁厚 3 mm 的一段聚丙烯塑料管如图 4 所示。选取塑料管的管口位置,将宽 3 mm,长 25 mm 的两条黑色胶带,贴在管的内壁,使其十字交叉[图 5(a)],模拟管内壁结垢;



图 3 红外热波无损检测系统

Fig. 3 System of the infrared thermal wave non-destructive inspection

在管的另一端内壁选取一个部位,用烧热的铁片使其  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  面积的方形区域熔化变薄,模拟管内壁腐蚀[图 5(b)];在管内壁选取一个位置用车床在内壁沿管的轴向方向加工一条长  $20\text{ mm}$ ,宽  $2\text{ mm}$  狭缝,模拟管壁出现裂纹[图 5(c)]。



图 4 聚丙烯塑料管试件实物图

Fig. 4 Photograph of polypropylene pipeline

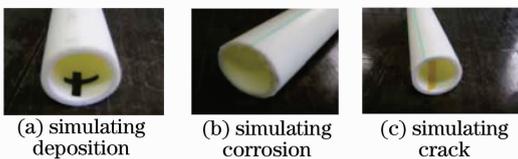


图 5 聚丙烯塑料管试件管壁缺陷可见光照片

Fig. 5 Photograph of defects in polypropylene pipeline

实验中将试件放在与热像仪镜头垂直的平面内,缺陷部位正对热像仪视场中心;依据试件和缺陷的材料导热性质、尺寸,结合时间极值方程<sup>[7]</sup>,实验中选用  $45^\circ$  广角镜头,实验参数设置如下:采集时间  $20\text{ s}$ ,采集频率  $60\text{ Hz}$ 。启动设备分别对上述三种缺陷进行检测。通过后续数据处理,得到时序热图序列。

## 4.1 结垢缺陷的检测结果及分析

### 4.1.1 热图序列

图 6 是从对结垢缺陷的原始热图序列中选取的几幅典型热图,热图下面对应的时间是该幅图的拍摄时间(脉冲闪光时刻为记为  $0$  时刻),单位为  $\text{s}$ 。

热图中的灰度值随时间的变化代表温度的变化。在热图中初始时刻没有明显的灰度值差异,这是因为此时热量在均匀的管理中传播;在  $3\text{ s}$  时刻的热图上可以看出热量在贴有黑色胶带区域的传导受到阻隔,表现为灰度值高的热异常区域,该时刻的热图可以显示出缺陷的形状;在  $5\text{ s}$  时刻的热图中内管壁上的模拟缺陷的形状已经看的非常清楚,随着时间的推移,这种热异常越来越明显( $8\text{ s}$  时刻热图)随后缺陷区域聚集的热量开始非缺陷区域扩散,缺陷的轮廓逐渐模糊( $16\text{ s}$  时刻热图),直到最后几乎完全消失。

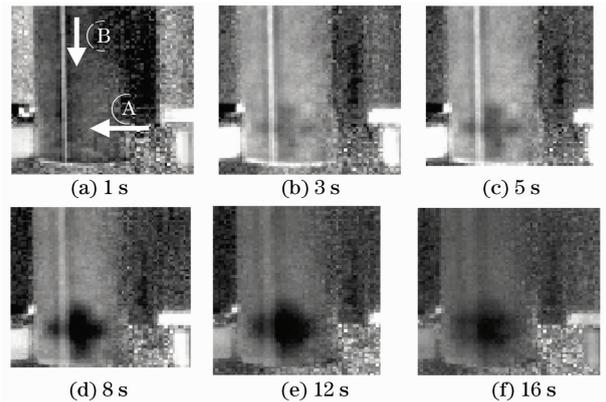


图 6 检测试件结垢缺陷得到的典型时刻的原始热图

Fig. 6 Raw images of polypropylene pipeline with deposition

### 4.1.2 曲线

为了更清楚的区分缺陷区域和非缺陷区域,通常在热图中选择已知的非缺陷区域(参考区域),即图 6 中  $1\text{ s}$  时刻热图中的箭头 B 所指区域;然后选择疑似缺陷区域(特征区域),即图 6 中  $1\text{ s}$  时刻热图中的箭头 A 所指区域;做出这两个区域对应的辐射强度-时间曲线如图 7 所示。图 7 中横坐标为时间,纵坐标正比于温度的辐射强度。A 曲线为特征区域的曲线,B 曲线为参考区域的曲线。

在系统专用软件中移动图 7 中曲线的左面的竖虚线可以看清楚 A 曲线与 B 曲线的偏离,绘图软件自动显示此位置对应的时刻。将竖虚线移动至竖实线的位置,可以读出选定的特征区域偏离参考区域的初显时刻,即热量传播到界面的时刻为  $3\text{ s}$ ,正好与热图中热异常区域出现的时刻吻合;曲线的斜率表示的温度随时间变化率,从 A 曲线的斜率变化可以看出:热量传播到管内壁后的时刻曲线的斜率开始变小,即温度的变化减慢,由此可知热量在特征区域受到阻隔,热传导变慢,说明胶带的导热性比管壁差,验证了对 4.1.1 中的分析结果。

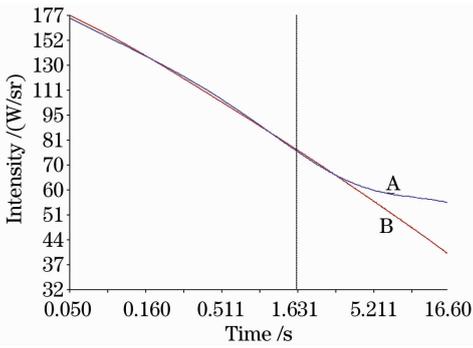


图 7 对数辐射强度-时间曲线

Fig. 7 Curve of logarithmic radiation intensity-time

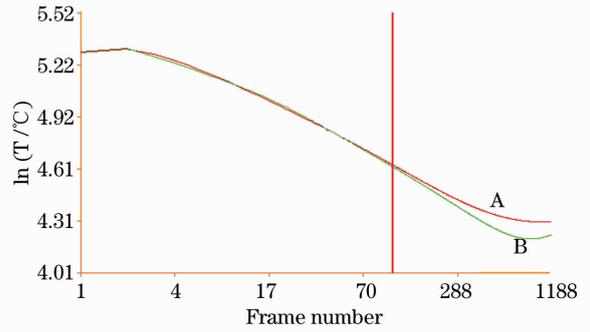


图 9 对数温度-时间曲线

Fig. 9 Curve of logarithmic temperature-time

### 4.2 模拟腐蚀缺陷的检测结果及分析

#### 4.2.1 热图序列

图 8 是从检测腐蚀缺陷的一阶微分热图序列中选取的几幅典型时刻热图,从选取的热图序列中可以看出随着时间的变化,图像中显示出热异常区域,这个区域就是缺陷所在的区域。在热图上形成“亮斑”,说明热量在缺陷区域聚集,由此可知空气的传热系数比管材的导热系数差。

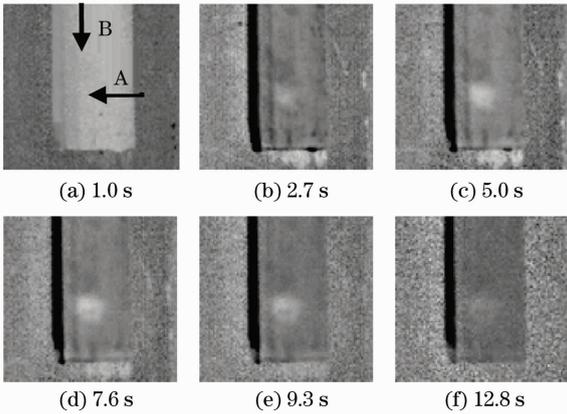


图 8 检测试件腐蚀缺陷时得到的典型时刻的一阶微分热图

Fig. 8 First-order differential images of polypropylene pipeline with corrosion

#### 4.2.2 曲线

在图 8 中的 1s 时刻的热图中分别选择特征区域 A 和参考区域 B,分别作出它们对应的曲线如图 9 所示。从 A 曲线与 B 曲线的偏离点后曲线的斜率变化可以看出含缺陷区域的温度随时间的变化率变小,说明热量在传播的过程中受到阻隔,缺陷区域的导热性差于正常区域的导热性。在缺陷的制造过程中,缺陷处材料的密度改变了,所以这种导热性的差异是源于缺陷处的空气,还是源于缺陷处材料密度的改变,需进一步利用实验来确定。

#### 4.2.3 尺寸测量

图 10 是在试件的原始热图序列中选取的缺陷显示清晰的 1 frame 热图。利用设备的软件功能实现缺陷尺寸测量的具体方法是,先测量出试件两点间的实际距离(长、宽、高或有标记的两点间的距离等任一数据),用标尺对热像图上的相应位置做相同尺寸的标定,用标定后的标尺量得的待测缺陷的尺寸就是缺陷的大小。缺陷的实际尺寸为 10 mm × 10 mm 方形区,测量结果为如图 9 所示,由于三维热扩散的影响,测得的缺陷尺寸比缺陷的实际尺寸要大一些。

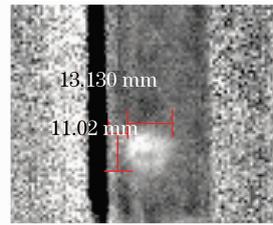


图 10 腐蚀区域面积的测量结果

Fig. 10 Measurement results of the corrosion area

### 4.3 裂纹缺陷的检测结果及分析

#### 4.3.1 热图序列

如图 11 所示是从检测裂纹缺陷的原始热图序

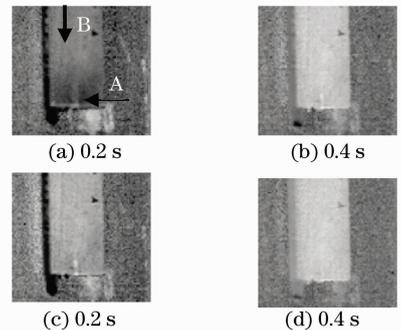


图 11 检测试件裂纹缺陷时得到的典型时刻的原始热图  
Fig. 11 Raw images of polypropylene pipeline with crack in typical moment

列中选取的几幅典型时刻热图,从图 11 中可以看出裂纹在 0.2 s 时刻就已经出现(图 11 中箭头 A 所指区域),随着时间的推移,并且越来越明显,直至最后消失。因为裂纹距外管壁很近,所以裂纹在序列热图中很快出现。

#### 4.3.2 曲线

在图 11 中的 0.2 s 时刻的热图中分别选择特征区域 A 和参考区域 B,分别作出它们对应的曲线如图 12 所示。从 A 曲线与 B 曲线的偏离点后曲线的斜率变化可以看出含缺陷区域的温度随时间的变化率变小,热量在传播的过程中受到阻隔,从而验证了 4.3.1 中对热异常出现的原因分析。

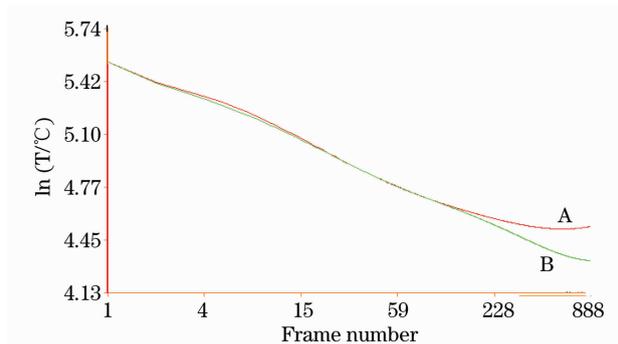


图 12 对数温度-时间曲线

Fig. 12 Curve of logarithmic temperature-time

## 5 结 论

用红外热波无损检测技术对聚丙烯塑料管的三种模拟缺陷进行检测,可以看出该技术能以直观易懂的图像形式展现出被检材料内部的缺陷情况。原始图像和一阶微分图像能较清楚的显现出轮廓及温度变化过程,还可做缺陷尺寸测量。但由于热图对材料导热性差异的敏感,也可能会对某些试件缺陷造成误判。需要针对不同的材料设计标准缺陷试件和实验最佳条件,多次对比实验,为针对聚丙烯管道

的定量红外热波无损检测提供数据和理论依据,进一步的研究还可实现精确温度定标和缺陷智能化判读等。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Xun, Jin Wanping, Zhang Cunlin *et al.*. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology[J]. *NDT*, 2004, **26**(10): 497~501  
王 迅,金万平,张存林等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. *无损检测*, 2004, **26**(10): 497~501
- 2 Wang Xun. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and compo site [D]. Master Thesis: Wayne State Univ, 2001. 30~35
- 3 Li Yi, Zhang Zhonghe. Handbook of Water-Feeding and Discharge Designing[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006, **4**: 638~641  
李 艺,张中和. 北京市政工程设计研究总院主编,给水排水设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006, **4**: 638~641
- 4 D. W. Tang, G. H. He, B. L. Zhou. Effects of finite absorption depth and infrared detector non-linearity on thermal diffusivity measurement of thin films using the flash method[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**: 4249~4253
- 5 M. J. Verrilli, G. Ojard, T. R. Barnett *et al.*. Evaluation of post-exposure properties of SiC/SiC combustor liners tested in the RQL sector rig[J]. *Ceram. Engng. Sci. Proc*, 2002, **23**(3): 551~562
- 6 J. G. Sun, M. J. Verrilli, R. Stephan *et al.*. Nondestructive evaluation of ceramic matrix composite combustor components [J]. *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, 2002, **22**: 1011~1018
- 7 G. Busse. Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal[J]. *Appl. Phys. Letter*, 1979, **35**(4): 759~760
- 8 L. D. Favro, G. M. Newaz, R. L. Thomas *et al.*. Progress in thermosonic crack detection for nondestructive evaluation[C]. *DARPA Prognosis Bidder's Conference*, 2002, **12**: 25~26
- 9 L. D. Favro, Han Xiaoyan, Quyang Zhong *et al.*. Thermosonic imaging of cracks and delaminations [J]. *Progress in Nature Science*, 2001, **11**: 133~136
- 10 G. Sun, Xun Wang, Z. J. Feng *et al.*. Imaging and Quantitative Measurement of Corrosion in Painted Automotive and Aircraft Structures [M]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, 2000. 603~607