

一种发射率可矫正的红外热成像全局检测方法*

冯 强¹ 刘彦麟² 夏 慧² 伍剑波² 赵焰峰¹ 汤宏宇¹ 何雨洁¹ 廖 江¹

(1. 四川科特检测技术有限公司 德阳 618300; 2. 四川大学机械工程学院 成都 610065)

摘 要: 在无损检测领域中, 红外热成像检测具有重要地位。在利用红外热成像技术检测缺陷的过程中, 受加工工艺和周围环境的影响, 待检测设备的表面粗糙度各有殊异, 材料表面的发射率不均, 导致温度采集误差较大。针对该问题, 结合热辐射基本定律探究出一种发射率可矫正的红外热成像全局检测法, 意在矫正材料的表面发射率, 降低检测过程中可能出现的缺陷错检漏检等安全性问题的风险。其仿真和实验结果表明, 一方面使用红外热成像法检测时, 表面粗糙度不同会严重干扰检测的准确性, 具体影响为粗糙度越大, 检测出的辐射温度越高; 另一方面使用分离温度法可以实现矫正物体表面由于粗糙度不同带来的发射率不同的影响, 仿真和实验结果表明矫正准确度可达 70% 左右, 最高可以达到 75% 以上。基于此矫正检测方法能够有效实现基于红外热成像技术的全局检测, 减少发射率对红外热像仪检测精度的影响, 提高检测精度, 同时也可以极大程度上提高缺陷检测的效率。

关键词: 管道腐蚀; 缺陷检测; 红外热成像检测; 发射率矫正

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4017

Emissivity-correctable global detection method for infrared thermography

Feng Qiang¹ Liu Yanlin² Xia Hui² Wu Jianbo² Zhao Yanfeng¹ Tang Hongyu¹ He Yujie¹ Liao Jiang¹

(1. Sichuan KETE Test Technology Co., Ltd., Deyang 618300, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In the field of NDT, infrared thermal imaging testing has an important place. In the use of infrared thermal imaging testing to detect defects in the process, by the processing technology and the influence of the surrounding environment, the surface roughness of the equipment to be detected are different, the emissivity of the surface of the material is not uniform, resulting in a large error in temperature acquisition. To address this problem, a global detection method for infrared thermography with correctable emissivity is explored in conjunction with the fundamental law of thermal radiation. The intention is to correct the surface emissivity of the material and to reduce the risk of safety issues such as misdetection and omission of defects that may occur during the inspection process. The simulation and experimental results show that: on the one hand, when using infrared thermography detection, the surface roughness is different and it will seriously interfere with the accuracy of the detection, the larger the roughness, the higher the detected radiation temperature; on the other hand, the use of the separation of temperature method can be achieved by correcting the surface of the object, which results from the roughness of the different emissivity that brought about by the different impact of the different simulation, experimental results show that the corrective accuracy of up to 70% or so, and can reach a maximum of more than 75%. Based on this corrective detection method, it can effectively achieve global detection based on infrared thermal imaging technology, reduce the impact of the emissivity on the detection accuracy of infrared thermal camera, improve the detection accuracy, and greatly improve the efficiency of defect detection.

Keywords: pipeline corrosion; defect detection; infrared thermal imaging detection; emissivity correction

0 引言

目前无损领域中,红外热成像技术占据十分重要的地位。就目前的技术而言,国内外的无损检测技术主要为激光、超声和红外热成像 3 种检测方法。相比于激光和超声,红外热成像具有非接触、缺陷信息直观、检测精度较高、对人体无伤害等优点,无论是对于运输管道的壁厚减薄,还是叶片裂缝,抑或是钢轨裂纹等缺陷检测都大有裨益。因此红外检测技术在航空航天、建筑机械、冶金石化、石油化工等领域得到了广泛的发展和应用^[1-5]。

而在利用红外热成像实际检测缺陷的过程中,经常会出现材料表面的粗糙度参差错落的现象,导致材料表面的热发射率产生非规律性的变化,在红外热图中会表现为虚假的温度信息,这对缺陷的检测精度造成了十分严重的影响,极大地增加错检漏检等安全性事故发生的风险。为了抑制表面粗糙度对红外检测精度的影响,陈武卿等^[6]阐述了在实际计量检定工作中的发射率修正问题及其重要性,计算出部分发射率修正值,并对其修正值进行了分析;而后石健等^[7]研究了 SUS304 钢在单轴拉伸塑性变形过程中表面粗糙度与目标发射率的关系以提高红外热像仪图像及测温精度,陈震等^[8]在 2018 年针对红外与可见光图像配准的准确性与鲁棒性问题,提出一种基于 R-MI-rényi 测度的由粗到精红外与可见光图像配准方法,具有较高的配准精度和效率、较好的鲁棒性;朱志星等^[9]设计了一种基于 RM-6A 红外热敏电阻的发射率在线测量系统,解决燃气轮机、航空发动机以及大量工业现场发射率测量易受强背景辐射影响,发射率难以准确测量的实际工程难题;刘军等^[10]提出一种基于蒙特卡洛模型的钢包腔体有效发射率校正的钢包温度测量方法。建立钢包腔体蒙特卡洛有效发射率计算模型,通过发射率校正将钢包红外测温的亮度温度校正为真实温度。闫勇刚等^[11]在 2022 年提出一种非均匀性校正性能联合测试方法,能够在保证 NETD 的情况下,有效提高 IRFPA 非均匀性校正性能,成功改善红外光学成像系统质量;同年,Chen 等^[12]通过红外探测器接收目标辐射的能量,并获得与目标表面热分布场相对应的热图像,实现高精度测量;潘冬等^[13]利用红外热像仪和激光扫描仪构建的三维热成像系统,提出了基于参考体的方向发射率校正方法;吕贤亮等^[14]利用红外热像法与电学法的温度补偿方法理论对热发射率进行矫正从而提高红外热成像的检测精度;米松涛等^[15]在 2024 年通过分析表面粗糙度对表面红外发射率的影响,提出一种基于发射率修正模型的红外测温补偿方法以提高红外测温精度;Li 等^[16]利用物理过程建模和热特征提取以及热模式重建技术提出了一

种发射率校正算法,解决热成像技术在空间和时间域的模式观测问题。根据热特征的平均归一化进行校正,大大提高无损检测的检测效率。

为了突破发射率不均对红外热成像检测精度的限制,本文提出了一种热发射率可矫正的红外热成像的全局检测法,利用该检测方法可以在不影响检测精度的同时直接对不光洁表面进行红外热成像检测,通过 PC 端对输入的红外热像图做全局处理,进而直接输出矫正后的红外热像图,用户端可以直接根据红外热像图的温度场判断缺陷所在位置,实现安全检测。针对不光洁表面的缺陷检测问题,利用 MATLAB 对温度数据进行分析处理,并在此基础上进行仿真和实验验证。

1 理论分析

1.1 粗糙度对热发射率的影响

对于粗糙表面对热发射率的影响,首先从主动测温角度看,如图 1 所示,当入射辐射照射到物体的粗糙表面时,该表面特性会导致辐射发生多次漫反射。这种漫反射现象并非简单的单次反射,而是在表面上的多次无序弹跳,增加了物体对辐射能量的吸收能力。其次从主动辐射角度看,如图 2 所示,粗糙表面相对于光滑表面具有更大的实际辐射面积。由于辐射能量的释放与辐射表面的面积成正比,导致粗糙表面释放更多的辐射能量,而粗糙表面提供了更多的有效辐射点。因此,粗糙表面不仅增大了物体的辐射面积,还相应地提高了其发射率。不论是从主动测温还是主动辐射的角度分析,粗糙表面都会使物体的发射率增大。

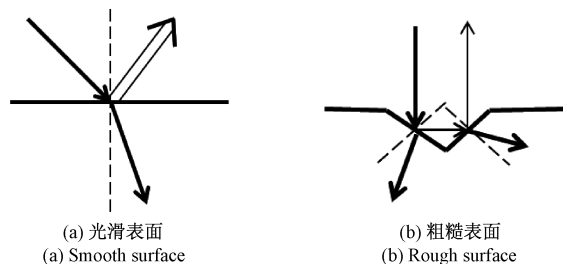


图 1 入射辐射对发射率的影响

Fig. 1 Effect of incident radiation on emissivity

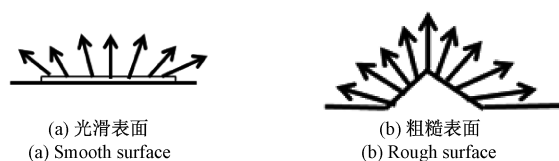


图 2 主动辐射对发射率的影响

Fig. 2 Effect of active radiation on emissivity

1.2 热发射率对温度的影响

根据热力学第三定律可知,自然界中所有温度高于绝对零度的物体都可以产生热辐射^[15]。而红外热像仪能通过使用光电设备来检测和测量物体发射出的热辐射,并在辐射与表面温度之间建立相互联系。由热像仪测量的物体表面温度的计算公式为:

$$T_0^n = \tau_\alpha [\varepsilon T_0^n + (1 - \alpha) T_u^n] + \varepsilon_a T_a^n \quad (1)$$

其中, T_0^n 表示由热成像仪测量出来的辐射温度, T_u 表示物体表面的实际温度, T_a 表示环境温度, T_u 表示大气温度, ε 表示物体表面的发射率, α 表示物体表面的吸收率, τ_α 表示大气的透射率, ε_a 表示大气的吸收率。一般来说,所测量的物体都属于灰体,可以近似认为 $\varepsilon = \alpha$, 而在大气中,可以近似认为 $\varepsilon_a = 1 - \tau_\alpha$ ^[17-20]。由式(1)可知,通过红外热像仪测量出的辐射温度值与物体表面的实际温度值与被测物体表面发射率息息相关。因此,物体表面的热发射率会影响红外热像仪的测温精度。

1.3 热发射率的矫正原理

由斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知:

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

式中: ε 为物体的热发射率,斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$, T 为物体的热力学温度,单位为 K。

假设某物体的初始温度为 T_0 , 温度达到最高值时的温度为 $T_{\max}$, 物体与外界进行热传递,最终达到热平衡状态时的温度为 T_{ba} 。其对应的热辐射强度分别为 E_{b0} 、 $E_{b\max}$ 、 E_{bba} 。

根据研究数据显示,物体的温度对于热发射率的影响并不大,也就是说,可以认为物体表面温度的变化并不会影响给热发射率^[16]。于是可以认为物体表面的热发射率 ε 和斯蒂芬-玻尔兹曼常数 σ 都是不随温度变化的常值,想要将温度变量进行分离,思路为构建分式将常数项进行约分。

根据以上分析,构造一个比值变量 k ,令:

$$k = \frac{E_{b\max} - E_{b0}}{E_{bba} - E_{b0}} = \frac{\varepsilon \sigma T_{\max}^4 - \varepsilon \sigma T_0^4}{\varepsilon \sigma T_{ba}^4 - \varepsilon \sigma T_0^4} \quad (3)$$

将式(3)中相同的常数项约去,得:

$$k = \frac{T_{\max}^4 - T_0^4}{T_{ba}^4 - T_0^4} \quad (4)$$

此时比例值 k 仅与温度值有关,而与物体的热发射率无关,实现温度分离的目的。需要特殊说明的是, T_{ba} 为达到热平衡状态时的温度,即在一次检测过程结束后,试件经过足够长时间冷却,在热扩散作用后,试件表面的重新回到热平衡状态时的温度。在检测的过程中,试件会吸收焦耳热,而这部分的热量无法全部释放。所以必然有 $T_{ba} > T_0$ 。显然,加热到最大值时的温度 $T_{\max} > T_0$,

也一定有 $T_{\max} > T_{ba}$, 所以 k 为一个大于 1 的正数。

为了更好地实现在 MATLAB 上的计算,将式(3)看作数据分析中的矩阵变化。在式(4)中, T_0 为初始温度,可以直接由热成像仪采集数据, T_{ba} 也可以在一段时间后直接由热成像仪采集。在相同环境下,相同的试件在加热同样的时间的情况下, T_0 和 T_{ba} 基本没有太大的变化。不妨将式(4)写为:

$$k = \frac{1}{T_{ba}^4 - T_0^4} \times T_{\max}^4 - \frac{T_0^4}{T_{ba}^4 - T_0^4} \quad (5)$$

$$\text{令 } a = \frac{1}{T_{ba}^4 - T_0^4}, b = -\frac{T_0^4}{T_{ba}^4 - T_0^4} \quad (6)$$

$$k = a T_{\max}^4 + b \quad (7)$$

在一次检测中, a 和 b 均为常值。从表达式中可以看出, k 与热发射率 ε 无关, k 只受被测对象材料表面的热量分布的影响。即实现温度的分离,消除热发射率的影响。

2 仿真模型的建立与分析

2.1 仿真对象

采用 COMSOL Multiphysics 6.1 软件进行仿真模型的建立与分析,仿真对象为铁磁性试件板,上下两面分别为光滑面和粗糙面,以粗糙面模拟外表面。粗糙面获得方式为利用软件 COMSOL Multiphysics 在组件-定义中建立随机函数 $m1$,并设置以下几个参数:变元数为 2,平均值为 0,分布为均匀分布,范围为 1 mm。该随机函数 $m1$ 表示为在 xoy 平面内的 z 轴上随机均匀分布范围为 ± 0.5 mm,平均值为 0 的若干组随机数。接着对随机函数 $m1$ 进行参数化曲面操作,范围是 $x[0, 100]$, $y[0, 100]$,使生成的随机点在 xoy 平面内连接成光滑的曲面 $ps1$,在对长宽为 100×100 mm 的板件模型的 5 mm 高度处用曲面 $ps1$ 进行分割域操作,删掉分割后的上部分多余实体,留下表面不规则的板件试件,即获得粗糙的表面试件。根据上述方法,通过改变随机函数 $m1$ 的分布范围,可以获得的不同粗糙度的表面试件。其结构图如图 3 所示,(图中 T 为试件厚度, L 为试件长度, W 为试件宽度)。

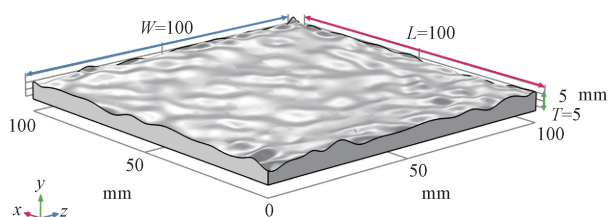


图3 仿真试件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of simulated specimen

2.2 消除粗糙度对热发射率的影响

应力场仿真选择传热模块中的固体传热,建立有限元仿真模型,在仿真过程中,设置一面为热源,其中热源的热通量密度设置为分段函数,在 0~5 s 的时间内,热通量密度为 35 000 W/m²,仿真加热过程;在 5 s 之后,热通量密度为 0,仿真冷却过程。加热面除外的所有表面均设置为对流热通量,其传热系数为 $h=5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$,外部环境温度为 293.15 K,如表 1 所示为热源函数 Qb 的大小,单位是 W/m²。模拟试件在加热 5 s 后,在空气中冷却的场景。假设 200 s 后试件处于热平衡状态。其中,表面辐照度 G 指的是单位时间内投入到单位面积上的总

辐射能,包含表面共辐射 G_m 、外照射 G_{ext} 、环境辐射 G_{amb} 。表面辐射度 J 指的是单位之间内离开单位表面积 of 的漫反射和发射辐射。用公式表示为 $J = \rho_d G + \varepsilon n^2 \sigma T^4$ 。其中, T 为仿真处的红外热成像仪的辐射温度。所以分别取仿真试件粗糙上表面的初始温度,加热最高温度,以及热平衡时的表面辐照度 G 和表面辐射度 J 。结果如图 4 和 5 所示。

表 1 热源函数表达式

Table 1 Heat source function expression		
起始/s	结束/s	函数
0	5	35 000
5	200	0

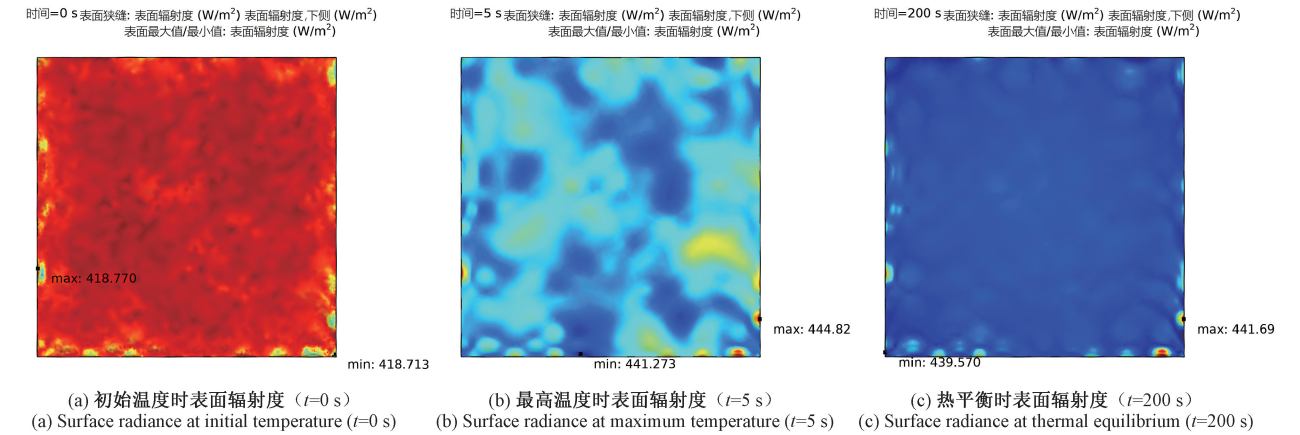


图 4 不同时刻的表面辐射度 G 图像

Fig. 4 Surface radiance G image at different moments

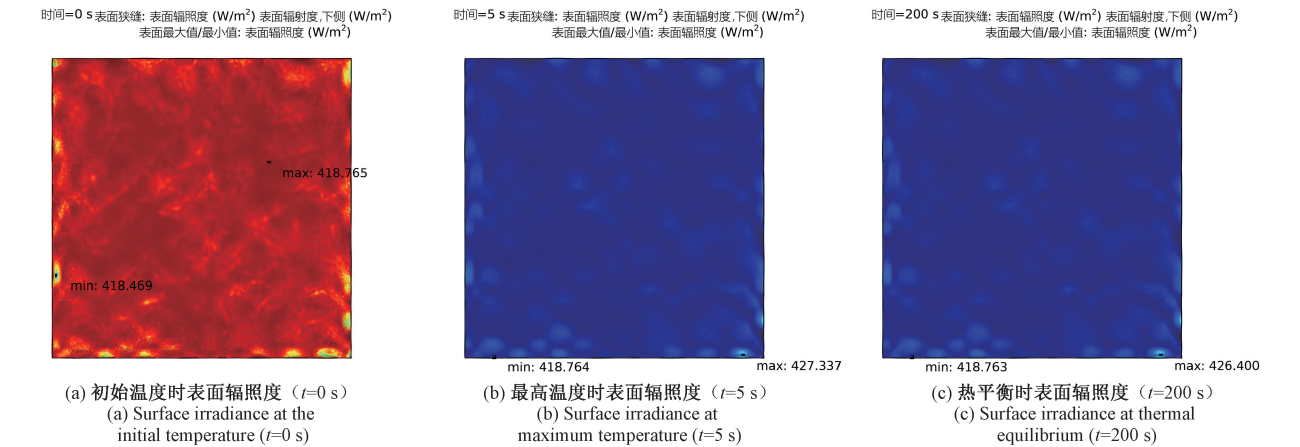


图 5 不同时刻的表面辐照度 J 图像

Fig. 5 J image of surface irradiance at different moments

由于物体外表面凹凸不平,于是相对于平滑底面的相对高度也不相等。根据热传导定理,5 s 时传到物体上表面的温度也不相等。因此矫正后得到的图像应该与实际的仿真温度一致,而不是完全相同。为了更好地看出结果,导出加热 5 s 时试件的表面温度信息,并将矫正

后的根据辐射度得到的温度信息与根据热传导公式得出的温度信息进行比对。具体对比的方式为,将二者的温度数据首先进行归一化处理,再取二者相减后的绝对值,利用 MATLAB 绘出图像。如图 6 为加热 5 s 时间后试件的仿真温度分布结果。图 7(a) 为加热 5 s 后根据表面辐

照度 G 和表面辐射度 J 计算得出的辐射温度值,用来仿真红外热成像仪拍摄出的温度值。图 7(b)为针对图 7(a)对其使用温度分离法得出的矫正后图像。图 7(c)为对比实际传热的仿真温度结果图。由图可见,图 7(c)中大部分结果都趋于一致,为了更好地评价矫正效果,在仿真过程中,计算仿真修复前所有像素点温度值的标准差为 0.075 752,对比温度后的标准差为 0.022 582,数据的分散程度显著降低,矫正准确度可达 70%左右。由仿真结果可以看出利用该方法可以很好的修正由于材料表面粗糙度不同而带来的热发射率不同的问题。

3 实验验证

3.1 实验设备

为了进一步验证该热发射率矫正方法的可行性,下面进行实验验证。根据图 8 所示的热成像检测方案模型

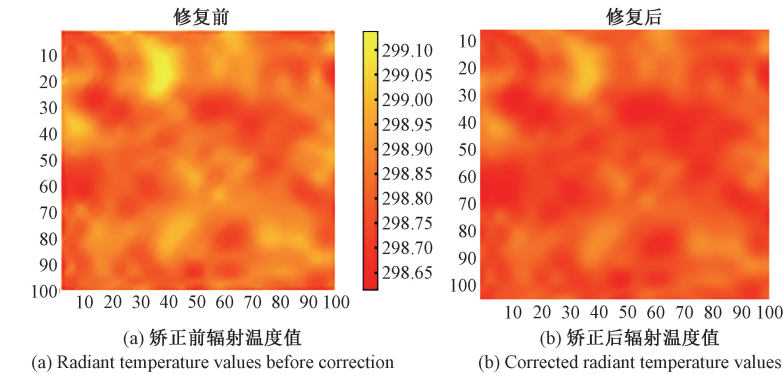


图 7 MATLAB 温度结果
Fig. 7 Graph of MATLAB temperature results

图建立实验系统。主要包括:加热平台(热源)、热成像系统、粗糙度不同的 5 块试件板,其中试板材料为 45 钢,表面粗糙度分别为 Ra0.8、Ra1.6、Ra3.2、Ra6.3、Ra12.6,如图 8(a)所示。热成像仪型号为 FLIRA655sc 光谱范围为 7.5~14.0 μm ,采集频率为 50 Hz,分辨率为 640×120 pixels。整体实验系统如图 8(b)所示。

3.2 消除粗糙度对热发射率的影响实验

首先,通过热成像仪采集初始时、最高温度时和热平衡时的辐射温度,将其传输 MATLAB 中,利用分离温度法对实验数据进行处理,其具体步骤如下:

- 1) 将所有的实验设备如图 9 所示固定好,打开红外热成像仪与 PC 端通过数据线连接,将试件调整到画面的正中间;
- 2) 通过红外热成像仪记录室温状态下,不同粗糙度试件在初始时,最高温度时和热平衡时的辐射温度;
- 3) 将 3 种时间点的信息传输到 MATLAB 中,根据上

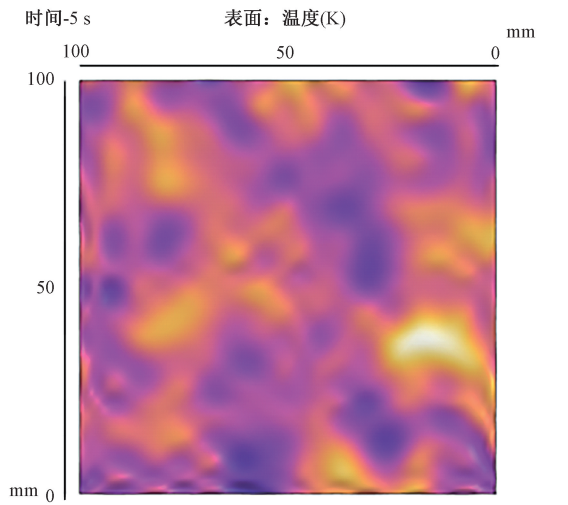


图 6 最高温度时仿真温度分布结果
Fig. 6 Simulation temperature distribution results at the highest temperature

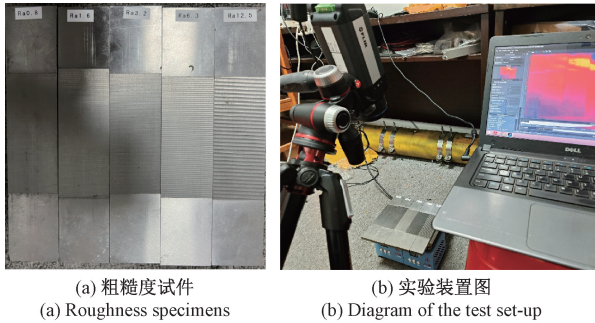


图 8 实验系统图
Fig. 8 Diagram of the test system

- 述方法进行修正;
- 4) 观察不同粗糙度试件修正前后的温度变化,并分析结论。
- 图 9(a)为修正前的红外热图,图 9(b)为修正后的

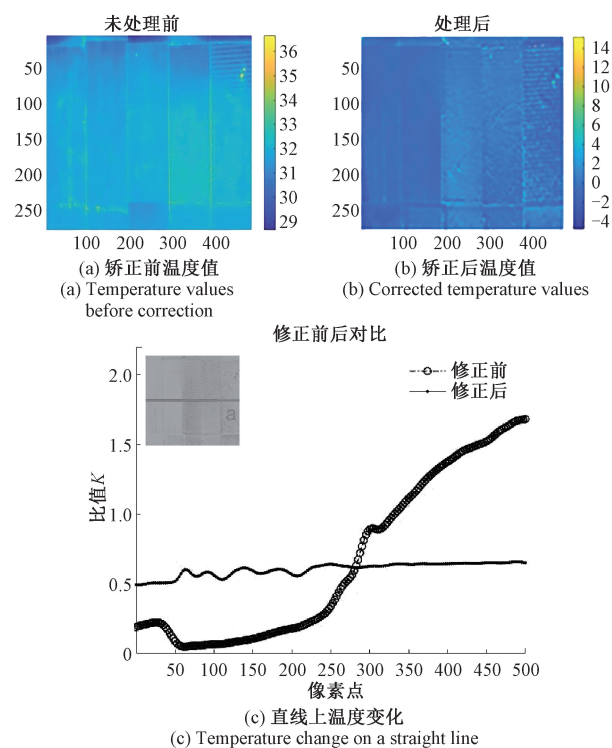


图 9 实验结果图

Fig. 9 Graph of experimental results

红外热图。前后对比可知,前者不同粗糙度时的温度也会呈现出不同值,经过矫正后,温度基本呈现一致状态。为了更好地比较数据矫正前后的效果,分别取矫正前后所有像素点的温度值数据,利用 MATLAB 软件做标准差计算,结果显示:矫正前试件所有像素点温度值的标准差为 1.283 6,而矫正后试件所有像素点温度值的标准差为 0.324 7。标准差减小说明矫正后数据点相对于平均值的分散程度减少,达到温度矫正的目的,矫正准确度可达 75%。由此得出本文中提出的温度分离法可以很好矫正由于表面发射率不同带来的影响。为了进一步证明该结论,了解温度数据的具体变化,分别提取矫正前与矫正后试件板上直线 a 数据标准归一化后的温度值并绘制直线 a 上的温度变化曲线。观察不同粗糙度试件直线上的矫正前后温度变化。如图 9(c) 所示,未经矫正时,粗糙度越高,温度也越高。矫正后,温度基本一致。结合上述实验结果,基本验证本论文提出的一种发射率可矫正的红外热成像全局检测方法的可实施性。

4 结 论

本文针对材料表面粗糙度会对表面热发射率造成影响从而降低红外热像仪检测精度这一问题,结合热辐射基本定律探究出一种发射率可矫正的红外热成像全局检

测法——分离温度法进行热发射率矫正。仿真和实验结果表明,使用红外热成像法检测时,表面粗糙度不同会严重干扰检测的准确性,具体影响为粗糙度越大,检测出的辐射温度越高;同时使用分离温度法可以实现矫正物体表面由于粗糙度不同带来的发射率不同的影响,仿真和实验结果表明矫正准确度可达 75% 左右。本文提出的方法能够高效实现红外热成像的全局检测,对实现红外热成像内部腐蚀检测的非接触性、高效率性大有裨益,同时极大程度上提高检测效率,有效避免漏检、错检等安全事故。为红外热成像检测法的高精度检测奠定了基础,提高了现场作业的安全性和效率。

参考文献

- [1] 刘保生,刘宇翔,丁克峰. 红外成像技术在供热管道漏水检测中的应用[J]. 城市勘测, 2022, (4): 178-180, 185.
LIU B SH, LIU Y X, DING K F. Application of infrared imaging technology in water leakage detection of heating pipeline[J]. Urban Survey, 2022, (4): 178-180, 185.
- [2] 黄启人,杨达,李家兴,等. 浅析红外热成像检测技术在压力容器和压力管道检测中应用[J]. 中国设备工程, 2019, (24): 102-103.
HUANG Q R, YANG D, LI J X et al. Analysis of infrared thermal imaging detection technology in pressure vessel and pressure pipeline detection [J]. China Equipment Engineering, 2019, (24): 102-103.
- [3] 李泉成,曹江涛,姬晓飞. 光流增强的红外成像气体泄漏检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 50-56.
LI Q CH, CAO J T, JI X F. Infrared imaging gas leak detection method with optical flow enhancement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 50-56.
- [4] 聂磊,武丽丽,黄一凡,等. 基于红外图像分析的 TSV 内部缺陷识别方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023, (1): 38-43.
NIE L, WU L L, HUANG Y F, et al. TSV internal defects identification methods research based on infrared image analysis [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023, (1): 38-43.
- [5] 隋峰,马镜,李文博,等. 基于傅里叶红外光谱技术的现场应急气体检测研究与应用[J]. 分析仪器, 2024, (1): 1-6.
SUI F, MA J, LI W B, et al. Research and application of on-site emergency gas detection based on Fourier transform infrared spectroscopy technology [J]. Analytical Instrumentation, 2024, (1): 1-6.
- [6] 陈武卿,赵亿坤,张文毅. 辐射温度计检定中发射率修正问题探讨[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(S1):

- 100-102.
- CHEN W Q, ZHAO Y K, ZHANG W T. Discussion about emissivity correction in radiation temperature measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(S1): 100-102.
- [7] 石健, 王朋, HIDETOSHI S. SUS304 钢表面粗糙度对红外图像的影响[J]. 实验力学, 2012, 27(2): 148-154.
- SHI J, WANG P, HIDETOSHI S. Effect of SUS304 steel surface roughness on infrared image [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(2): 148-154.
- [8] 陈震, 杨小平, 张聪炫, 等. 基于 R-MI-rényi 测度的可见光与红外图像配准[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 1-8.
- CHEN ZH, YANG X P, ZHANG C X, et al. Infrared and visible image registration based on R-MI-rényi measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 1-8.
- [9] 朱志星, 叶林, 任宏宇, 等. 基于 RM-6A 红外热敏电阻的发射率在线测量系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020, (11): 74-78, 90.
- ZHU ZH X, YE L, REN H Y, et al. Research on online emissivity measurement system based on RM-6A infrared thermistor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020, (11): 74-78, 90.
- [10] 刘军, 刘郁聪, 次英, 等. 基于蒙特卡洛腔体有效发射率校正的钢包温度测量[J]. 仪表技术与传感器, 2021, (12): 102-105.
- LIU J, LIU Y C, CI Y, et al. Measurement of ladle temperature based on Monte Carlo cavity effective emissivity correction [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021, (12): 102-105.
- [11] 闫勇刚, 王耿, 彭志勇, 等. 红外焦平面阵列非均匀性校正性能的综合评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 170-176.
- YAN Y G, WANG G, PENG ZH Y, et al. Joint assessment of non-uniformity correction performance of infrared focal plane array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 170-176.
- [12] CHEN M, TIAN S, HE F, et al. Modeling and calibration of active thermal-infrared visual system for industrial HMI[J]. Electronics, 2022, 11(8): 1230.
- [13] 潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华. 基于方向发射率校正的红外测温补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 213-220.
- PAN D, JIANG ZH H, GUI W H. An infrared temperature compensation method based on directional emissivity correction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 213-220.
- [14] 吕贤亮, 王义才, 李旭, 等. 红外热像法发射率校正及电学法温度补偿方法[J]. 电子工艺技术, 2023, 44(3): 25-27.
- LYU X L, WANG Y C, LI X, et al. Emissivity correction by infrared thermal imaging and temperature compensation by electrical method [J]. Electronics Process Technology, 2023, 44(3): 25-27.
- [15] 米松涛, 张玉存, 付献斌, 等. 基于发射率修正模型的红外测温补偿方法[J]. 计量学报, 2024, 45(2): 164-169.
- MI S T, ZHANG Y C, FU X B, et al. An infrared temperature measurement compensation method based on emissivity correction model [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(2): 164-169.
- [16] LI K, TIAN G Y, AHMED J. Emissivity correction and thermal pattern reconstruction in eddy current pulsed thermography[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2646.
- [17] 黄学斌. 红外热像检测技术在承压设备检验中的应用[J]. 石油化工设备, 2014, 43(4): 76-82.
- HUANG X B. Application of infrared thermography detection technique in pressure equipment inspection [J]. Petro-Chemical Equipment, 2014, 43(4): 76-82.
- [18] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- LIAO P P, ZHANG J M. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer [J]. Infrared Technology, 2017, 39(2): 173-177.
- [19] 赵玥. 距离及视场角对近红外热像仪精度影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- ZHAO Y. The study about the effect of the distance and the angle of vision on the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [20] 张树养. 影响红外测温的主要因素分析研究[J]. 工业计量, 2023, 33(5): 16-20.
- ZHANG SH Y. Analysis and research on the main factors affecting infrared temperature measurement [J]. Industrial Metrology, 2023, 33(5): 16-20.

作者简介



冯强, 毕业于南昌航空大学测控技术与仪器专业工学学士学位, 现为四川科特检测技术有限公司三级工程师, 主要研究方向为特种设备检测、无损检测、腐蚀防护等。

E-mail: ktfq@cnpc.com.cn

Feng Qiang receive a B. Sc. degree in measurement and control technology and instrumentation from Nanchang Aviation University. He is now a third-level engineer at Sichuan Kete Testing Technology Co., Ltd. His main research interests include special equipment testing, non-destructive

testing, corrosion protection, etc.



刘彦麟, 现为四川大学本科生物, 主要研究方向为涡流热成像检测。

E-mail: 151896097@qq.com

Liu Yanlin is now an undergraduate at Sichuan University, China. Her main research interest includes eddy current thermal imaging

detection.



夏慧 (通信作者), 2018 年于四川大学获得机械设计制造及其自动化学士学位, 2023 年于四川大学获得机械工程博士学位, 现为四川大学实验师, 主要研究方向为涡流热成像检测。

E-mail: xh@scu.edu.cn

Xia Hui (Corresponding author), received the B. Sc. degree in Mechanical Design and Manufacturing and Automation from Sichuan University, China, in 2018, and the Ph. D. degree in Mechanical Engineering from Sichuan University, China, in 2023. She is now an experimentalist at Sichuan University, China. Her main research interest includes eddy current thermal imaging detection.



伍剑波, 2009 年于华中科技大学获得机械设计制造及其自动化学士学位, 2010 年于华中科技大学获得精密仪器及机械硕士学位, 2014 年于华中科技大学获得测试计量技术及仪器博士学位, 现为四川大学教授、博士生导师, 主要研究方向为涡流热成像检测、漏磁检测、巴克豪生噪声检测等。

E-mail: wujianbo@scu.edu.cn

Wu Jianbo received his B. Sc. degree in Mechanical Design, Manufacturing, and Automation from Huazhong University of Science and Technology in 2009, M. Sc. degree in Precision Instrument and Machinery from Huazhong University of Science and Technology in 2010, and Ph. D. degree in Measuring and Testing Technologies and Instruments from Huazhong University of Science and Technology in 2014, respectively. He is now a professor and supervisor for Ph. D. student in Sichuan University. His main research interests include eddy current thermal imaging detection, magnetic flux leakage detection and Barkhausen noise detection.



赵焰峰, 现为川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院三级工程师。2012 年毕业于西南石油大学油气田材料与应用硕士专业, 主要研究方向为油气田腐蚀监测与防护。

E-mail: zhaoyf_ajy@cnpc.com.cn

Zhao Yanfeng is a third-level engineer at the Safety and Environmental Protection Quality Supervision and Inspection Research Institute of Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. He received a M. Sc. degree in oil and gas field materials and applications from Southwest Petroleum University in 2012. His main research interests include oil and gas field corrosion monitoring and protection.



汤宏宇, 毕业于南昌航空大学无损检测技术专业, 现为四川科特检测技术有限公司国际事业部副经理, 主要研究方向为特种设备检测、无损检测、腐蚀防护等。

E-mail: tanghy_kt@cnpc.com.cn

Tang Hongyu graduated from Nanchang Aviation University with a college degree in non-destructive testing technology. He is now a deputy manager of international business division of Sichuan Kete Testing Technology Co., Ltd. His main research interests include special equipment inspection, non-destructive testing, corrosion protection, etc.



何雨洁, 毕业于四川师范大学成都学院文学学士学位, 现为中国石油集团川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院中级机械工程师, 主要研究方向为特种设备检测、无损检测等。

E-mail: Heyi_kt@cnpc.com.cn

He Yujie received a B. Sc. degree in Art from Chengdu College of Sichuan Normal University. She is now working as an intermediate mechanical engineer in Safety and Environmental Quality Supervision and Testing Institute of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Her main research interests include special equipment testing and nondestructive testing, etc.



廖江, 毕业于四川轻化工学院电子工程系机电一体化专业, 现为四川科特检测技术有限公司工程师、德阳市安全管理专家组成员, 主要研究方向为钻修井检测检验、石油钻采安全管理技术、企业安全管理系统建设等。

E-mail: Liaoj_kt@cnpc.com.cn

Liao Jiang graduated from the Department of Electronic Engineering of Sichuan Institute of Light Chemical Technology, majoring in mechatronics, and is now an engineer of Sichuan Kete Testing Technology Co., Ltd. and a member of the Deyang Safety Management Expert Group. His main research interests are drilling and workover testing and inspection, oil drilling and production's safety management technology, and enterprise safety management system construction.