

基于表面红外热像的运行中脱硫塔壁厚定量检测研究

刘宏林¹, 韩玉军², 史勇³, 孔松涛³, 王堃³

(1. 中国核电工程有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450000; 2. 东方希望重庆水泥有限公司, 重庆 408200;
3. 重庆科技学院, 重庆 401331)

摘要: 本文采用共轭梯度方法, 根据脱硫塔表面的红外热像对运行中的脱硫塔壁厚进行了检测。由于脱硫塔内部检测环境恶劣, 壁厚检测所需要的脱硫塔内壁面热流亦采用共轭梯度法反演得到。首先通过数值实验, 验证了本方法的可行性。然后, 依据红外热像进行反演, 发现脱硫塔存在筒体腐蚀, 防腐涂层脱落和减薄等问题。利用后续的停机检修, 对问题区域进行了复核, 亦证实了以上部位的异常, 表明了本文所提出的基于表面红外热像的脱硫塔壁厚定量检测方法的有效性和准确性。

关键词: 红外热像; 脱硫塔; 壁厚; 定量检测

中图分类号: TB21 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)11-1135-05

Wall Thickness Quantitative Detection of Desulfurization Tower in Operation Based on Surface Infrared Thermal Image

LIU Honglin¹, HAN Yujun², SHI Yong³, KONG Songtao³, WANG Kun³

(1. Zhengzhou Branch of China Nuclear Power Engineering Corporation Ltd, Zhengzhou 450000, China;

2. Oriental Hope Chongqing Cement Co. Ltd, Chongqing 408200, China;

3. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: In this study, the wall thickness of the desulfurization tower during operation was measured using the conjugate gradient method according to the infrared thermogram of the tower surface. Because of the harsh detection environment inside the desulfurization tower, the inner-wall heat flow, which was needed for wall thickness detection, was also obtained by inversion of the conjugate gradient method. First, the feasibility of the proposed method was verified using numerical experiments. Subsequently, based on the infrared thermal image inversion, it was found that the desulfurization tower had some problems, such as the corrosion of the cylinder, the falling off of the anticorrosive coating, and the thinning. In the subsequent downtime maintenance, the problem area was rechecked, and the anomalies mentioned above were confirmed, which indicated the effectiveness and accuracy of the quantitative detection method for the wall thickness of the desulfurization tower based on the surface infrared thermal image proposed in this study.

Key words: infrared thermal image, desulfurization tower, wall thickness, quantitative detection

0 引言

湿法烟气脱硫利用石灰石浆液吸收烟气中的 SO_2 , 具有高效率和高可靠性等优势, 已成为当前火电厂和化工厂脱硫的主力技术^[1]。但是火电厂运行过程中, 由于煤燃烧和 SO_2 氧化, 特别是在选择性催化还原脱硝系统中催化剂作用下, SO_2 会更有利于氧化生成 SO_3 , 造成烟气中 SO_3 浓度显著增加^[2-3]。烟气进入脱硫塔系统后, 温度迅速冷却至酸露点以下, 形

成细小 SO_3 酸雾, 而单脱硫塔的 SO_3 脱除效率仅为30%~40%^[4]。

烟气中的 SO_3 、 SO_2 、HF及其它酸性物质会导致塔体金属发生化学腐蚀, 脱硫塔内还存在电化学腐蚀、磨蚀、结晶腐蚀、垢下腐蚀和氯离子腐蚀^[5]。在以上多种方式的共同作用下, 受到内涂玻璃鳞片、聚烯烃共聚物、改性聚脲或纳米复合涂料等物质防护的脱硫塔仍可能发生腐蚀。

目前, 对脱硫塔的检测主要有外观损伤、钢材厚

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-10-05.

作者简介: 刘宏林(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事核电站, 火电项目的设计研究工作。E-mail: airo0424@163.com.

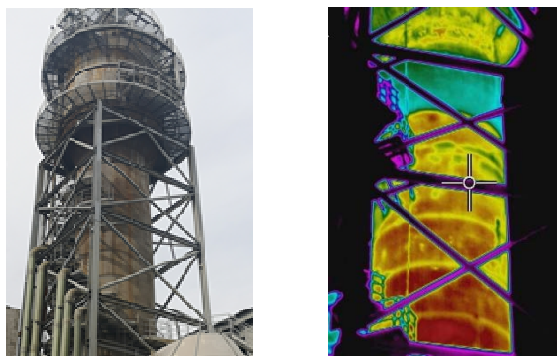
通信作者: 王堃(1980-), 男, 副教授, 主要研究方向为流体传热及传热学反问题。E-mail: 3938630@qq.com.

度、力学性能、焊缝缺陷检测和构件变形等项目^[6]。以上检测项目能够有效对停机后的脱硫塔健康状态进行评测。但是，对运行中的脱硫塔腐蚀状态进行有效检测未见文献报道。结合脱硫塔运行参数和结构参数，本文提出了采用传热学反演的方法根据表面红外热像进行运行中脱硫塔壁厚定量检测，并以某厂的烟气脱硫塔为对象进行了实验验证。

1 脱硫塔传热模型

研究对象为图1所示的脱硫塔，其内部环境复杂，无法布置有效的温度测量装置；脱硫过程是一个包含了传热、传质和化学反应的复杂过程，难以准确地用数学语言描述。为了建立脱硫塔的传热模型，本文进行以下简化：

- 1) 脱硫塔为轴对称结构，内壁面热流沿周向分布均匀；
- 2) 脱硫塔内部有玻璃鳞片防腐涂层，涂层质地均匀且热物性参数为各向同性；
- 3) 烟气和石灰浆液对脱硫塔的传热，可等效为对脱硫塔内壁施加有沿轴向分布的加热热流；
- 4) 忽略脱硫塔内部喷嘴和支撑结构对脱硫塔壁面温度分布的影响；
- 5) 忽略脱硫塔内壁和防腐涂层的接触热阻；
- 6) 忽略脱硫塔的轴向导热；
- 7) 脱硫塔的温度场为稳态。



(a) 可见光图 (b) 红外热像图
(a) Visible light picture (b) Infrared picture

图1 某厂工作中的脱硫塔

Fig.1 Desulfurization tower in work

脱硫塔浆液区是腐蚀的重灾区，本文以浆液区段为研究对象，简化后的脱硫塔浆液区如图2所示，具体几何参数及热物性参数见表1。脱硫塔内壁 s_1 存在轴向分布热流，外表面 s_2 与环境存在对流换热，且 s_2 面上的温度可以直接测量，其他表面 s_3 绝热。记 $\mathbf{x}=(\phi, \theta, z)$ 为空间坐标向量，脱硫塔温度场的控制方程为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda(\mathbf{x}) r \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} (\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial \phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

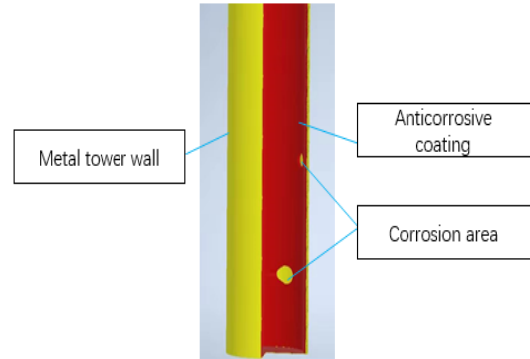


图2 脱硫塔浆液区

Fig.2 Desulfurization tower tap

边界条件为：

$$-\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial n} = q(z) \quad \mathbf{x} \in s_1 \quad (2)$$

$$-\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial n} = h(T(\mathbf{x}) - T_f) \quad \mathbf{x} \in s_2 \quad (3)$$

$$-\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial n} = 0 \quad \mathbf{x} \in s_3 \quad (4)$$

式中： $q(z)$ 为内壁沿轴向 z 的热流密度分布； h 为表面 s_2 的对流换热系数； T_f 为环境温度； n 为表面的外法线方向。

表1 脱硫塔几何参数及热物性参数

Table 1 Geometric parameters and thermophysical parameters of desulfurization tower

Material	Thickness / mm	Diameter / mm	Thermal conductivity / [W/(m·K)]
Anticorrosive coating	4	5520	0.35
The tower wall	14	5528	48.85

若已知脱硫塔的几何结构和热边界条件，利用有限元法（finite element method, FEM）求解公式(1)~(4)，可以确定脱硫塔的温度场 $T(x)$ ，作为壁厚检测的基础。

2 基于反问题的脱硫塔壁厚检测

运行中脱硫塔壁厚 d 是影响脱硫塔表面温度分布的关键因素之一，如果脱硫塔壁面腐蚀减薄，则传热热阻减小，在腐蚀部位对应的塔外表面形成局部高温区域，如图1(b)所示。因此，可通过求解导热反问题根据脱硫塔表面红外热像进行脱硫塔壁厚检测。

2.1 壁厚检测方案

在如图2所示的脱硫塔表面热像图中，选取高温

区域的 K 个温度测点, 依据此测量信息 T_k^{mea} ($k=1, 2, \dots, K$) 采用共轭梯度方法 (conjugate gradient method, CGM) 求解多变量稳态传热反问题^[7-8], 进行壁厚 d 的反演; 由于脱硫塔为薄壁结构, 热扩散效应较弱, 则外表面高温区域可看作与内壁腐蚀区域接近。为了便于问题讨论, 在本文中, 内壁腐蚀区域用圆柱近似。

然而, 壁厚反演过程中正问题的计算需要已知脱硫塔内壁热边界条件如热流 $q(z)$ 。而内壁热流 $q(z)$ 难以直接测量。如果直接同时反演壁厚和内壁热流 $q(z)$, 可能因为测量信息不能够同时对壁厚和热流具有较大的灵敏度, 造成检测系统的病态程度加剧。

因此, 检测方案包括了两步: 先进行内壁热流定量识别, 再定量识别壁厚。内壁热流可采用 CGM 反演得到: 在脱硫塔外表面高温区域附近同等高度的温度正常区域沿周向选取 M 个测点, 以该测点的温度信息 T_m^{mea} ($m=1, 2, \dots, M$) 反演该位置处的脱硫塔内壁热流 q ; 内壁热流沿高度方向变化, 但是周向分布均匀, 以第一步反演得到的内壁热流 q 作为壁厚反演中正问题的已知热边界条件, 以高温区域的温度测量信息作为壁厚反演的依据, 提高了测量信息对壁厚的灵敏度, 有利于削弱壁厚检测问题的病态程度。

2.2 共轭梯度算法

利用共轭梯度算法求解壁厚反问题, 通过迭代优化使得目标函数 $J(d)$ 足够小或者达到最大迭代步 i_{max} , 对应的壁厚 d 即为所求。目标函数 $J(d)$ 可表示为:

$$J(d_i) = \sum_{k=1}^K [T_k^{\text{cal}}(d_i) - T_k^{\text{mea}}]^2 \leq \varepsilon \quad (5)$$

式中: T_k^{mea} 为在脱硫塔红外热像图上提取的第 K 个温度测量值; d_i 为第 i 次迭代得到的壁厚的猜测值; $T_k^{\text{cal}}(d_i)$ 是根据 d_i 进行正问题计算得到的第 k 个测量位置处的温度计算值。 K 为在红外热像图上提取的温度测量值的数目。停机标准 ε 可由下式表示:

$$\varepsilon = K\sigma^2 \quad (6)$$

式中: σ 为测量误差的标准差。

CGM 沿着已知点处的梯度所构造出的共轭方向迭代搜索目标函数的极小点, 迭代过程中对壁厚猜测值的修正可表示为:

$$d_{i+1} = d_i - \alpha_i \gamma_i \quad (7)$$

式中: α_i 为搜索步长; γ_i 为搜索方向。

搜索步长 α_i 表示为:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{k=1}^K [T_k^{\text{cal}}(d_i) - T_k^{\text{mea}}] \nabla T_k^{\text{cal}}(d_i) \gamma_i}{\sum_{k=1}^K \nabla T_k^{\text{cal}}(d_i) \gamma_i} \quad (8)$$

搜索方向 γ_i 可由下式表示:

$$\gamma_i = \nabla J(d_i) + \beta_i d_{i-1} \quad (9)$$

式中: $\nabla J(d_i)$ 为目标函数的梯度; β_i 为共轭系数, 可根据式(10)计算:

$$\beta_i = [\nabla J(d_i) / \nabla J(d_{i-1})]^2 \quad (10)$$

利用 CGM 根据红外热像图中正常区域温度反演该位置处的脱硫塔内壁热流 q , 其过程可参考公式(6)~(10), 在此就不一一赘述。

2.3 迭代求解流程

应用 CGM 根据脱硫塔红外热像图反演壁厚的计算步骤如下:

- 1) 根据红外热像图, 对异常区域进行辨识;
- 2) 反演异常区域脱硫塔内壁热流 q ;
- 3) 给出壁厚初始猜测值 d_0 ;
- 4) 通过求解公式(1)~(4), 得到测点处的计算温度 T_k^{mea} ($k=1, 2, \dots, K$), 并代入公式(5):

$$J(d_i) = \sum_{k=1}^K [T_k^{\text{cal}}(d_i) - T_k^{\text{mea}}]^2 \leq \varepsilon \quad (11)$$

如果满足上述条件, d_i 即为所求, 停止迭代; 否则继续;

- 5) 按公式(8)~(10)对 CGM 里的参数进行更新;
- 6) 根据公式(7)更新壁厚 d 的猜测值, 并返回步骤 4)。

3 脱硫塔检测结果及分析

选取环境温度 $T_f = 20^\circ\text{C}$, 对流换热系数 $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。异常区域温度测点数量 $K = 3$; 正常区域温度 $M = 2$ 。考虑到实际测量过程中, 温度测量误差是无法消除的, 通过现场标定, 测量误差 $\sigma = 0.055^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0.01$ 。

1) 数值实验验证

为了验证检测系统的有效性和精确性, 本文先进行脱硫塔内部缺陷检测的数值实验。在数值实验中, 脱硫塔的热边界条件、几何参数和热物性参数均与实际过程相同, 假设真实壁厚 $d_e = 16 \text{ mm}$ 。

数值实验中设置不同大小的测量误差, 以考察测量误差对缺陷检测结果的影响。实验结果如表 2 所示。

表 2 不同测量误差时的检测结果

Table 2 The detection results of the different measurement errors

Measurement error σ	Detect wall thickness d/mm	Relative error/ %
0.055	15.92	0.50
0.1	16.35	2.19
0.2	17.14	7.13

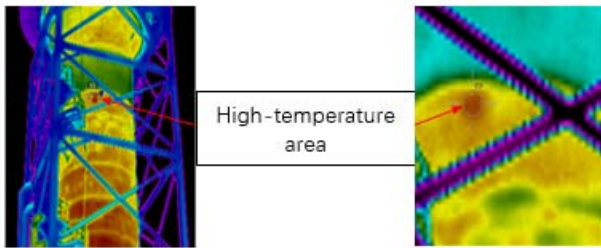
从表 2 可以看出, 随着测量误差的增大, 壁厚检

测结果的精确性下降。如 $\sigma=0.2^{\circ}\text{C}$ 时，相对误差为7.13%，在工程上可以接受。

2) 依据现场红外热像反演

① 高温区域 1

如图3所示，高温区域1的最高温度为 48.2°C ，区域的最大温差为 1.4°C 。利用基于导热反问题的脱硫塔壁厚检测方法，对高温区域1的壁厚进行计算，结果为 $d=14.6\text{mm}$ ，即该区域玻璃鳞片厚度为 0.6mm 。考虑到计算误差，可判定为防腐涂层已磨损殆尽或脱落，若不处理，塔壁金属将受到快速腐蚀。在检测后30天左右，脱硫塔停机检修，发现高温区域1的防腐涂层已脱落，证实了本方法的正确性。



(a) Infrared image of the tower (b) Local enlargement picture

图3 高温区域1对应的红外热像图

Fig.3 Infrared image of the high temperature region 1

② 高温区域 2

如图4所示，高温区域2的最高温度为 48.3°C ，区域的最大温差为 1.2°C 。对高温区域2的壁厚进行反演： $d=15.8\text{mm}$ ，即该区域防腐涂层厚度为 1.8mm ，可判定为防腐涂层已减薄。

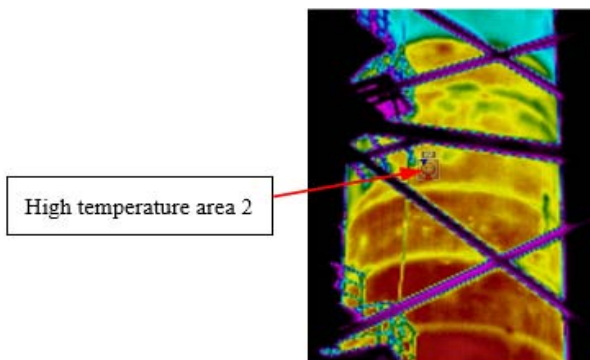


图4 高温区域2对应的红外热像图

Fig.4 Infrared image of the high temperature region 2

③ 高温区域 3

如图5所示，高温区域3的最高温度为 48.1°C ，区域的最大温差为 3.7°C 。对高温区域3的壁厚进行反演： $d=6.5\text{mm}$ 。表明该区域脱硫塔金属塔壁已发生腐蚀，减薄了 7.5mm ，应尽快排查、检修。

4 结论

本文采用导热反问题的方法，根据红外热像图对运行中的脱硫塔壁厚进行了检测。其中，脱硫塔壁厚和脱硫塔内壁面热流的反演均采用共轭梯度法。首先通过数值实验，验证了本方法的可行性。然后，依据红外热像进行反演，发现脱硫塔筒体腐蚀1处，防腐涂层脱落1处，防腐涂层减薄1处。在后续的停机检修对上述部进行了复核，均验证了上述检测结果，表明了基于表面红外热像的脱硫塔壁厚定量检测方法的有效性和准确性。

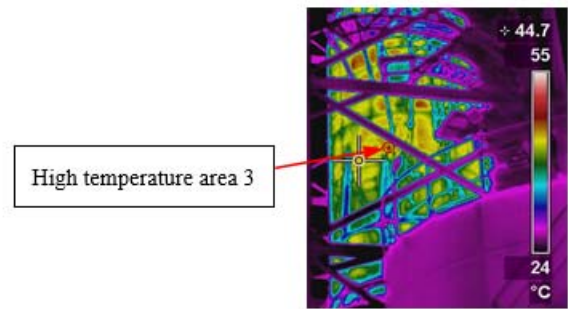


图5 高温区域3对应的红外热像图

Fig.5 Infrared image of the high temperature region 3

防腐涂层厚度的不一致，脱硫塔内介质分布的不均匀，红外热像仪精度以及环境等因素，可能会给壁厚检测结果引入误差，造成识别精度下降。如何提高壁厚检测精度，仍是下一步研究的方向。

参考文献:

[1] 杜佳, 齐晓辉. 影响燃煤电厂湿法烟气脱硫效率的主要因素[J]. 化学工程与装备, 2019(3): 263-264.
DU Jia, QI Xiaohui. Main factors affecting wet flue gas desulfurization efficiency in coal-fired power plants[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2019(3): 263-264.

[2] Benson L B. Use of magnesium hydroxide for reduction of plume visibility in coal-fired power plants[C/OL]. *Proceedings of the EPA-DOE-EPRI-A and WMA Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium*. [2021-04-08]. http://www.carmeusena.com/files/files/TechPapersReports/lb_20paper_no_2097.pdf.

[3] Ahn J, Okerlund R, Fry A, et al. Sulfur trioxide formation during oxy-coal combustion[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011(5): S127-S135.

[4] 潘丹萍, 吴昊, 鲍静静, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及SO₃ 酸雾脱除作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4356-4362, 4519.

- PAN Danping, WU Hao, BAO Jingjing, et al. Study on removal of fine particles and SO₃ acid fog from flue gas by wet desulfurization system in power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, **36**(16): 4356-4362, 4519.
- [5] 梁志超. 湿法烟气脱硫塔腐蚀及重点区域防护对策[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, **31**(4): 66-69.
- LIANG Zhichao. Corrosion of wet flue gas desulfurization tower and protection countermeasures in key areas[J]. *Total Corrosion Control*, 2017, **31**(4): 66-69.
- [6] 王艳平, 李书奇, 封云. 某脱硫塔火灾后检测鉴定及加固处理[J]. *工程质量*, 2019, **37**(11): 45-49.
- WANG Yanping, LI Shuqi, FENG Yun. Detection, identification and reinforcement treatment of a desulfurization tower after fire[J]. *The Quality of The Project*, 2019, **37**(11): 45-49.
- [7] 朱丽娜, 王广军, 陈红. 采用共轭梯度法求解多变量稳态传热反问题[J]. *中国电机工程学报*, 2011, **31**(8): 58-61.
- ZHU Lina, WANG Guangjun, CHEN Hong. The conjugate gradient method is used to solve multivariable steady-state inverse heat transfer problem[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, **31**(8): 58-61.
- [8] 闫光辉, 杨立, 范春利. 基于红外测温的电气控制柜内部元件热缺陷温度与方位的三维反问题识别[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(11): 2909-2915.
- YAN Guanghui, YANG li, FAN Chunli. Three dimensional inverse problem identification of thermal defect temperature and orientation of internal components of electrical control cabinet based on infrared temperature measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 2909-2915.