

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.022

回转窑筒体热损失测量系统的研究^{*}

张 荣 刘小燕 武伟宁 鲁新月
(湖南大学 电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘 要:以回转窑筒体的红外热图为基础,通过分析回转窑筒体辐射与对流机理,给出了实际回转筒体热损失的计算模型,并采用 LabVIEW 编程语言,设计开发了一套回转窑筒体热损失测量软件。最后,以某水泥回转窑为例,对所提出的方法进行了测试与分析。结果表明,该系统能获取筒体感兴趣区域的轴向温度并正确计算出对应的筒体热损失功率;筒体的辐射热耗与对流热耗大小相当,且煅烧区筒体的热损失约占输入热功率的 4%。研究成果为回转窑的节能生产、过程参数优化奠定了基础。

关键词: 回转窑;红外热图;热损失;传热模型

中图分类号: TQ172.622; TP311.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research on heat loss measurement system for rotary kiln shell

Zhang Rong Liu Xiaoyan Wu Weining Lu Xinyue
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A system based on the infrared image and the heat transfer mechanism of radiation and convection is developed to measure the heat loss of rotary kiln through the kiln shell, with which the models of the total heat loss is derived for heat loss calculation. By using LabVIEW programming language, a software is then developed to measure the heat loss. The effectiveness of the proposed method is tested by using a cement rotary kiln as example. It is shown that, the system is able to capture the axial temperature of the kiln shell of interest and calculates the corresponding heat loss correctly. It is also found that the heat loss through radiation has similar magnitude to the heat loss through convection, and the heat loss in the burning zone is about 4% of the total input thermal energy into the kiln. The result of the present work has potential usage in the energy-saving production and optimization of process parameters.

Keywords: rotary kiln; infrared image; heat loss; heat transfer model

0 引 言

回转窑是一种大型的工业生产主机设备,主要用于对固体颗粒做物理、化学等处理,广泛应用于水泥、钢铁冶金、有色冶炼、化工等工业部门^[1-2]。以水泥回转窑为例,其主体是一个倾斜的长圆筒,物料由窑尾喂料器进入转筒内,之后通过转筒的倾斜及旋转运动缓慢地传输到窑头,期间,物料在燃料燃烧产生的高温区域完成干燥和煅烧等一系列物理化学反应,成为熟料。在整个生产过程中,回转窑的外壁温度可以达到 400 ℃ 以上^[3]。大量

的热量以对流和辐射的方式经由回转筒外壁传递到周围环境,造成较大的能量损失。研究显示,在水泥窑中,这种损失约占总输入热能 12% ~ 15%^[4-6]。Chakrabarti^[7]通过分析某菱镁矿回转窑 128 d 的热损失数据发现,在封闭和露天的情况下窑筒体热损失占总热耗的比例分别达到了 24.8% 和 34.7%。因此,对回转窑筒体热损失进行监测具有重要意义。

目前,对于回转窑的传热过程有较多研究。文献[3-4,8-9]对回转窑内的传热机制进行了分析,并给出了筒体表面的热损失计算公式,但是在实际计算过程中由于无法准确获取筒体表面温度而采用了近似值,一定程度上

降低了计算结果的准确性。随着红外热成像技术的发展与应用,回转窑筒体温度的实时测量得以实现^[10-11]。通过红外摄像头对回转窑筒体表面进行线扫描,获取筒体表面温度场并以红外热图的形式保存,当采样周期与筒体旋转周期一致时,每张红外热图刚好包含了窑筒体表面的全部温度信息,使筒体热损失的在线准确计算成为可能。

为此,本文根据回转窑筒体传热机理,提出一种基于红外热图的筒体热损失计算方法,采用工业常用的软件平台 LabVIEW^[12-14],设计开发一种通用的回转窑筒体热损失测量系统,为回转窑筒体热损失的回收利用及生产参数的优化奠定基础。本文首先分析了回转窑筒体的传热机理,给出了热损失的计算模型,继而设计实现了热损失测量软件系统,最后以某水泥回转窑为例,对系统进行了综合测试,并给出分析结果和结论。

1 回转窑筒体热损失计算模型

根据传热过程中的物理本质不同,热的传递方式主要分为热对流、热辐射和热传导3种^[15]。回转窑在运转工作时,其筒体的热损失主要发生在窑筒体表面与周围空气之间,主要为辐射热耗和对流热耗。

1.1 辐射热耗

辐射换热是各种工业炉、锅炉等高温热力设备中重要的换热方式。任何温度高于绝对零度的物体,都会通过红外辐射的方式,不停地向外散发能量,这种能量传递的方法称之为辐射换热,物体辐射换热的能力与物体表面温度及物体的发射率相关。通常情况下物体的发射率会随着温度不断变化,为了简化计算,参照文献[4]取筒体发射率 ε 近似值为0.8,结合回转窑实际工作环境,使用辐射传热方程对回转窑筒体表面的辐射传热功率 Q_{rad} 进行计算:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_{\text{sk}}^4 - T_{\text{ak}}^4) \quad (1)$$

式中: T_{sk} 、 T_{ak} 分别表示回转窑筒体温度区域均值和环境温度(绝对温度), σ 是史蒂芬-玻尔兹曼常数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), A 为感兴趣区域的面积。在实际计算时,由于回转窑筒体表温度存在较大差异,为保证计算结果的准确性,本文将回转窑筒体沿轴向方向分为 n 个小区域($A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$),根据各区域的筒体温度均值 $T_{\text{sk},i}$ 分别计算出该区域热辐射功率,然后再进行累加求和,获得筒体的热辐射功率,即:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_i (T_{\text{sk},i}^4 - T_{\text{ak}}^4) \quad (2)$$

1.2 对流热耗

运动流体与壁面直接接触,由于温差使两者之间发生热量传递,这种现象称为对流换热。回转窑窑筒体表面温度远高于周围空气温度,与周围空气存在着对流换

热。本文在计算对流热耗 Q_{con} 时采用以下标准方程:

$$Q_{\text{con}} = \sum_{i=1}^n h_i A_i (T_{\text{s},i} - T_{\text{a}}) \quad (3)$$

式中: h_i 为回转窑第 i 段区域对应的对流换热系数,反映了筒体与周围环境之间的对流换热的强弱,通常情况下,如果回转窑工作在封闭的环境中,会采用自由对流换热系数,如果是在露天环境下,则应用强制对流换热系数。考虑到当前大部分回转窑均工作在露天环境下,参照文献[8],本文采用的对流换热系数计算公式如下:

$$h_i = \frac{0.11 \lambda_i Pr_i^{0.36}}{D} (0.5 Re_{w,i}^2 + Re_i^2 + Gr_i)^{0.35} \quad (4)$$

式中: λ_i 、 Pr_i 分别为定性温度下的空气热导率和普朗特数。 $Re_{w,i}$ 、 Re_i 、 Gr_i 分别为转动雷诺数、雷诺数和格拉晓夫数,与空气的物理参数(粘滞系数 v_i ,热膨胀系数 β_i 、风速 V)、回转窑参数(直径 D 、转速 ω)有关:

$$Re_{w,i} = \frac{\pi D^2 \omega}{v_i} \quad (5)$$

$$Re_i = \frac{VD}{v_i} \quad (6)$$

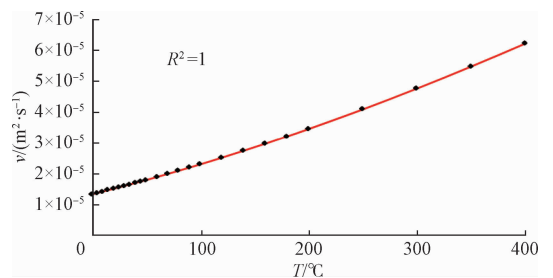
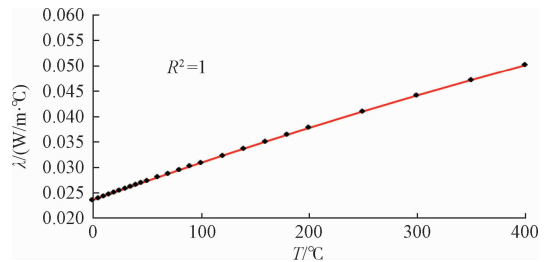
$$Gr_i = \frac{g \beta_i D^3}{v_i^2} (T_{\text{s},i} - T_{\text{a}}) \quad (7)$$

1.3 模型参数的选择

由以上分析可知,回转窑筒体的热损失 Q_{lost} 由辐射热耗和对流热耗组成,综合式(2)和(3),可知:

$$Q_{\text{lost}} = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{con}} \quad (8)$$

在筒体热损失计算过程中,需要热导率 λ 、运动粘滞系数 v 、普朗特数 Pr 等特性参数,这些参数的大小与定性温度 T (筒体与空气的平均温度)有关,可以采用数据表查找法^[16]得到其近似值。为了方便计算,本文对 $T = 0 \sim 400 \text{ } ^\circ\text{C}$ 条件下的特性参数进行了最小二乘多项式拟合,图1所示,获得了高置信度($R^2 = 1$)的特性参数计算公式如式(9)~(11)。



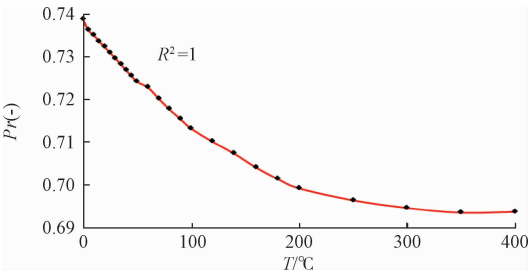


图 1 空气热物理特性参数(λ , ν , Pr)拟合曲线
Fig.1 Fitting curves of air thermal physical properties parameter (λ , ν , Pr)

$$\lambda = (4.641 \cdot 10^{-9} T^3 - 2.522 \cdot 10^{-5} T^2 + 0.07562 T + 23.64) \times 10^{-3} \quad (9)$$
$$\nu = (1.358 \cdot 10^{-11} T^4 - 4.173 \cdot 10^{-8} T^3 + 1.021 \cdot 10^{-4} T^2 + 0.087 \cdot T + 13.38) \times 10^{-6} \quad (10)$$
$$Pr = 1.381 \cdot 10^{-14} T^5 - 1.528 \cdot 10^{-11} T^4 + 5.472 \cdot 10^{-9} T^3 - 2.059 \cdot 10^{-7} T^2 - 2.724 \cdot 10^{-4} T + 0.7364 \quad (11)$$

2 筒体热损失测量系统设计

根据第 1 节提出的回转窑筒体热损失计算模型,本文采用图形化编程软件 LabVIEW 设计开发一套用于热损失测量的软件系统,实现参数设置、红外热图读取与显示、筒体热损失自动计算、结果显示保存等主要功能,系统界面设计图及系统结构如图 2 和 3 所示。下面将就各模块的功能及设计过程分别进行介绍。

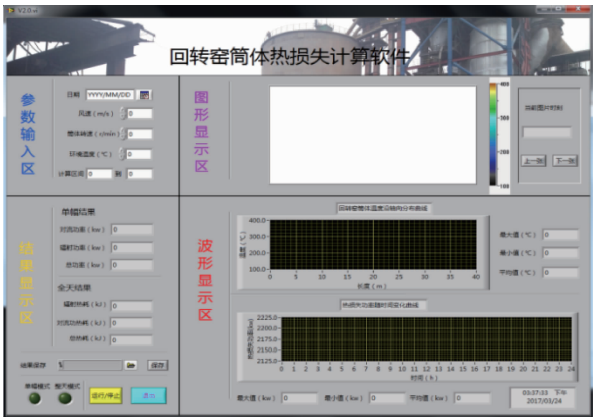


图 2 回转窑筒体热损失测量系统界面设计
Fig.2 Interface design of heat loss measurement system of rotary kiln

2.1 参数设置模块

参数设置模块主要功能是测量参数的输入,包括:用户感兴趣的起止日期与时段(根据这一参数,系统将读取对应时间的筒体红外热图)、感兴趣的筒体区间位置、环

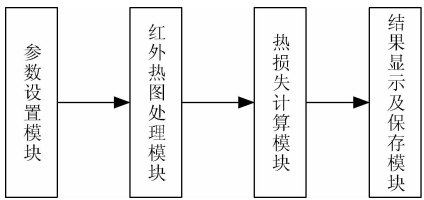


图 3 系统结构
Fig.3 Structure of system

境温度、风速、回转窑转速。

2.2 红外热图处理模块

该模块根据用户给出的时段,自动读取相应时段中红外扫描系统保存的红外热图,并显示在图像区,红外采集系统及红外热图如图 4、5 所示。同时,根据红外热图及用户选择的感兴趣区域,获取对应区域的温度场原始数据。

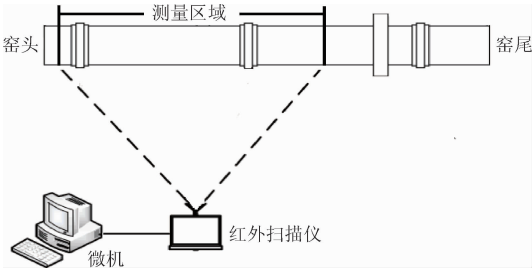


图 4 红外扫描系统
Fig.4 Schematic diagram of infrared scanning system

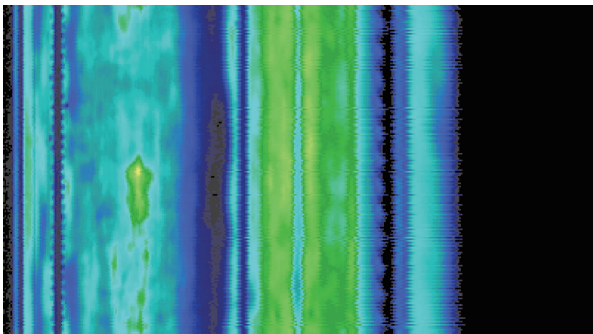


图 5 回转窑筒体红外热图示例
Fig.5 Example of infrared heat image of rotary kiln shell

2.3 筒体热损失计算模块

热损失计算模块是测量系统的核心部分,其主要功能是根据筒体的原始温度,计算筒体轴向温度分布,并根据参数输入模块中的参数,采用式(2)和(3)计算出对流热耗和辐射热耗,计算流程如图 6 所示。

热损失计算部分包括单幅热损失计算和全天热损失计算,单幅热损失计算根据选取的红外热图,计算对应时刻的热损失功率;全天热损失计算是根据选取日期,对当

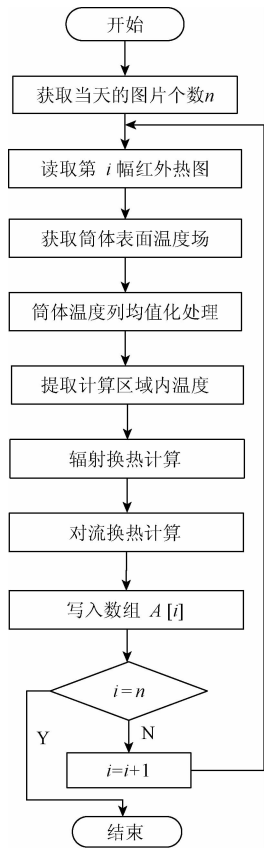


图 6 热损失计算流程

Fig. 6 Flow chart of heat loss calculation

天不同时刻计算筒体热损失功率以及总热损失。在计算筒体轴向温度分布时,将筒体分为若干段,将每一段筒体圆周温度均值作为该段筒体表面温度,结合红外热像仪的红外扫描成像方式,模块对筒体温度数据进行列均值化处理,得到筒体温度沿轴向分布情况。

2.4 结果显示及保存模块

结果的显示包括实时热损失功率、全天热损失数值以及热损失功率随时间变化曲线。用户可在结果显示区查看当前时刻的辐射热损失和对流热损失功率,查看当天的总热损失。波形显示区给出了热损失功率随时间的变化曲线,方便用户的观察与分析。

在 LabVIEW 中计算的数据会保存在内存的缓冲区内,当数据量过大时,严重影响程序运行速度。因此,在设计数据保存模块时,采用 LabVIEW 与 Excel 的通信的方式,保存计算结果。

3 系统测试与结果分析

在完成测量系统整体设计之后,本文以江西某水泥厂回转窑(图 7)为例,对系统功能进行测试。该回转窑直径 4 m,长 60 m,筒体的倾斜角为 2.29°,筒体标准设定

转速为 3.8 r/min。测试当天(2014 年 4 月 28 日)环境温度为在 15~26 ℃,风力在 3 级左右(3 级风的范围为 3~5 m/s)。该回转窑配备的红外热像仪扫描的有效筒体区域约为 40 m,红外热图保存间隔约为 10 min。系统测试过程中,将水泥窑煅烧区设为感兴趣区域(长度为 20 m,在红外热图中对应的轴向位置为 38~263 pixels,如图 8 所示)。在确定计算参数后,选取 0~24 点的红外热图进行系统测试,测量结果如图 9 所示。



图 7 水泥回转窑实物

Fig. 7 The photo of cement rotary kiln

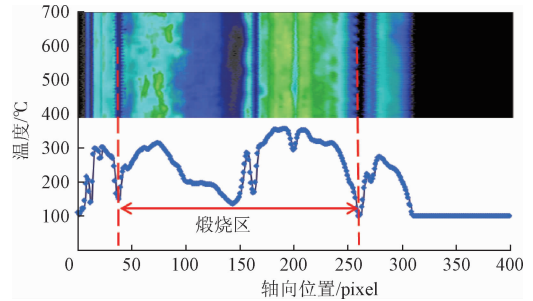


图 8 筒体轴向温度变化曲线示例

Fig. 8 Example of axial temperature change curve of kiln shell

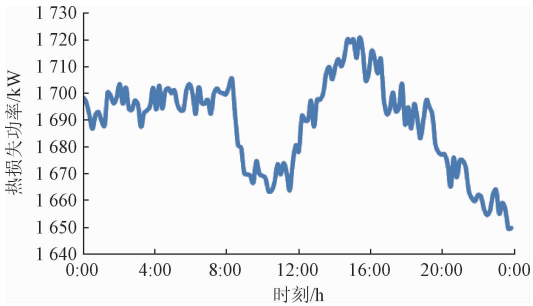


图 9 筒体热损失随时间变化曲线

Fig. 9 Change curve of kiln shell thermal loss with time

本文研究过程中收集了该回转窑一个月(2015 年 4 月 28 日~2015 年 5 月 28 日)的红外热图,采用本文开发的系统,对回转窑不同时期的筒体热损失进行了测量。4 月 28 日~5 月 4 日的热损失计算结果如图 10 所示。

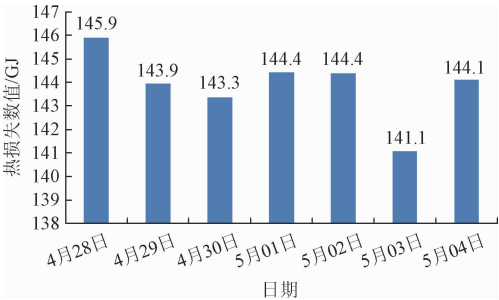


图 10 测试对象 1 周的热损失情况

Fig. 10 The heat loss of the test object in one week

从图 9 和 10 可以看出,同一回转窑在不同日期的热损失存在差异,同一天中热损失功率也是随着时间不断波动的。这是由于回转窑工艺复杂,不同的操作工人对回转窑有不同的操作控制方式(给煤量、喂料量等),使窑内工况和窑筒体表面温度发生变化,进而影响热损失的大小。

为了对回转窑筒体热损失中的辐射和对流热损失做出进一步分析,表 1 给出了采用本软件对该回转窑 4 月 28 日的热损失计算结果。从表中可以看出,该回转窑的对流热损和辐射热损数量相当,煅烧区域(占整个窑长的 1/3)在当天的热损失平均功率约为 1 690 kW,约占回转窑总输入功率的 4%(煤的燃烧热值为 22 990 kJ/kg,给煤量为 6.6 t/h,总输入热功率为 42 148 kW),这与文献 [4,5,6,17] 的研究结果(12% ~ 15%,计算区域为整个窑长)基本相符,表明了本系统测量结果的合理性。

表 2 将本文测量结果与其他学者的研究结果进行了对比分析。文献[18]在计算筒体热损失时,仅考虑了对流换热情况,认为辐射换热可忽略不计。但是,本例中的水泥窑筒体热损失测量结果表明,辐射热耗与对流热

表 1 热损失计算结果

Table 1 Calculation results of heat loss

时刻	辐射功率/kW	对流功率/kW	热损失总功率/kW
0:01	928	770	1 698
1:01	923	767	1 690
2:02	931	772	1 704
3:03	927	769	1 696
4:04	925	769	1 694
5:05	930	771	1 701
6:05	930	770	1 700
7:06	925	767	1 692
8:07	932	770	1 703
9:08	909	760	1 670
10:09	908	761	1 668
11:09	912	763	1 674
12:10	925	767	1 692
13:11	930	768	1 698
14:12	940	773	1 713
15:13	942	772	1 713
16:13	941	772	1 713
17:14	932	769	1 700
18:15	923	764	1 687
19:16	928	767	1 695
20:17	914	760	1 674
21:17	913	760	1 672
22:18	902	755	1 657
23:18	898	752	1 650
平均值	924	766	1 690

耗大小相当(分别为 923 和 766 kW),不可忽略不计。此外,文献[3]在计算热损失时,假设筒体温度恒定不变(400 ℃),得出的计算结果是对筒体热损失的大致估计。而本文的测量系统根据红外热像仪实测温度场,实现对筒体任意段、任意时期热损失(热辐射和热对流)的在线计算和统计,相对来说更为准确、方便。

表 2 热损失计算结果对比

Table 2 Comparison of heat loss calculation results

窑尺寸	计算长度/m	筒体温度/℃	传热过程	热损失功率/kW	来源
φ4 × 60	20(煅烧区)	红外热像仪(100 ~ 345)	辐射 + 对流	924 + 766	本文
φ4	20(煅烧区)	假设值(400)	辐射 + 对流	2 500	文献[3]
φ4 × 56	18(煅烧区)	红外测温仪(200 ~ 300)	对流(忽略辐射)	1 086	文献[18]

4 结 论

本文根据回转窑筒体传热机理,从对流和辐射两个方面分析了回转窑筒体热损失情况,给出了水泥窑筒体热损失的计算模型。在此基础上,以回转窑筒体的红外热图为基础,采用 LabVIEW 设计了一套回转窑筒体热损失测量系统。最后以某水泥回转窑为例,对系统进行了

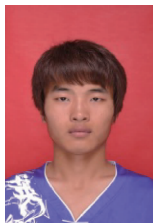
测试,验证了系统的有效性。结果表明,该系统能获取筒体感兴趣区域的轴向温度并正确计算出对应的筒体热损失功率。初步分析表明,水泥回转窑筒体的辐射热耗与对流热耗大小相当,且煅烧区筒体的热损失约占总输入热功率的 4%。本文的研究成果可以为回转窑过程参数优化、余热回收等研究提供依据。

参考文献

[1] YIN Q, DU W J, JI X L, et al. Optimization design and

- economic analyses of heat recovery exchangers on rotary kilns[J]. *Applied Energy*, 2016, 180(10):743-756.
- [2] ATMACA A, YUMRUTAS R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1-2):435-444.
- [3] CAPUTO A C, PELAGAGGE P M, SALINI P. Performance modeling of radiant heat recovery exchangers for rotary kilns [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (14-15):2578-2589.
- [4] ENGIN T, ARI V. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems: A case study [J]. *Energy Conversion & Management*, 2005, 46 (4): 551-562.
- [5] MADLOOL N A, SAIDUR R, RAHIMB N A, et al. An exergy analysis for cement industries: An overview[J]. *Renewable & Sustainable Energy Review*, 2012, 16(1): 921-932.
- [6] KARAMARKOVIC V, MARAŠEVIC M, KARAMARKOVIC M, et al. Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(2):470-480.
- [7] CHAKRABARTI B K. Investigations on heat loss through the kiln shell in magnesite dead burning process: A case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(12): 1339-1345.
- [8] GOROG J P, ADAMS T N, BRIMACOMBE J K. Regenerative heat transfer in rotary kilns [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1982, 13(2): 153-163.
- [9] SHAHIN H, HASSANPOUR S, SABOONCHI A. Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 114(4):110-121.
- [10] 赵仁涛, 张雨, 铁军. 红外热成像技术在铜电解电流分布测量中的应用[J]. *红外技术*, 2015, 37(11): 981-985.
- ZHAO R T, ZHANG Y, TIE J. Application of infrared thermal imaging technology in the measurement of copper electrolysis current distribution[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(11):981-985.
- [11] GUO ZH Y, DAI SH SH, LIU J S, et al. Research on application of polynomial fitting technique in rotary kiln infrared temperature measurement system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 79(11):160-164.
- [12] 胡为, 庄奕琪, 包军林, 等. 红外探测器低频噪声长时间监测系统设计与实现[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(2):265-271.
- HU W, ZHUANG Y Q, BAO J L, et al. Design of long-time monitoring system for low frequency noise of infrared detector [J]. *Journal of Electronic Measurement & Instrumentation*, 2015, 29(2):265-271.
- [13] 徐琪, 刘平, 曾禹乔. 基于LabVIEW的单向阀振动信号采集关键技术设计[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(11):118-121.
- XU Q, LIU P, ZENG Y Q. Key technology design of one-way valve vibration signal acquisition based on LabVIEW [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(11):118-121.
- [14] 马新强, 姜金辉, 黄丹羽. 基于LabVIEW的梁分布动载荷识别系统设计与实现[J]. *国外电子测量技术*, 2016, 35(12):83-87.
- MA X Q, JIANG J H, HUANG D Y. Design and implementation of beam dynamic load identification system based on LabVIEW [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(12):83-87.
- [15] MARIAS F. A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(6):813-825.
- [16] CENGEL Y A. *Heat Transfer: A Practical Approach*[M]. New York: MacGraw Hill, 2003.
- [17] KABIR G, ABUBAKAR A I, EL-NAFATY U A. Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant[J]. *Energy*, 2010, 35(3):1237-1243.
- [18] YIN Q, CHEN Q, DU W J, et al. Design requirements and performance optimization of waste heat recovery systems for rotary kilns[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93(2):1-8.

作者简介



张荣, 1992年出生, 湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为复杂过程建模与控制。
E-mail: 491854434@qq.com

Zhang Rong was born in 1992. And he is a M. Sc. candidate in Hunan University. His main research direction is modeling and control of complex processes.



刘小燕(通讯作者), 1973年出生, 湖南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、复杂过程建模与控制。
E-mail: xiaoyan.liu@hnu.edu.cn

Liu Xiaoyan (Corresponding author) was born in 1973. And she is a professor and Ph. D. supervisor in Hunan University. Her main research direction is image processing, modeling and control of complex processes.