

# 红外成像技术在转炉钢渣检测中的应用

申屠理锋, 唐安祥

(宝山钢铁股份有限公司研究院自动化所, 上海 201900)

**摘要:**介绍了热红外成像技术在转炉钢渣检测中的应用,叙述了红外成像技术的热成像原理和黑体辐射定律,分析了转炉钢渣检测的红外辐射原理,阐述了转炉出钢红外图像的特征,给出了图像处理的相关技术及实现算法,同时介绍了检测系统的结构组成及应用效果。

**关键词:**红外热成像;图像处理;转炉钢渣;检测

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.013

## Application of infrared thermal imaging technology in converter slag detection

SHEN-TU Li-feng, TANG An-xiang

(Automation Research Dept, Baosteel Co. Ltd. Research Institute, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** This article introduces the application of infrared thermal imaging technology in converter slag detection, describes the infrared thermal imaging principle and the blackbody radiation law, analyzes the infrared radiation principle of the converter slag detection, elucidates the characteristics of the converter tapping infrared image, the image processing technology and algorithm, and discusses the structure and effect of the measurement system.

**Key words:** infrared thermal imaging; image processing; converter slag; measurement

### 1 引言

红外成像技术是现代科学中的前沿学科,最早是在20世纪60年代应用于军事领域,随着计算机技术、图像处理技术的迅速发展以及红外成像单元精度的不断提高,红外成像技术的应用领域不断扩大,特别是在冶金行业的检测和控制中发挥着积极的作用<sup>[1]</sup>。

在转炉炼钢生产过程中,当冶炼结束开始出钢后,钢水从出钢口流入钢包中,钢水和钢渣在炉中的液位逐渐下降,在转炉出钢末期,钢渣也会随钢水一起流出,过多的钢渣不仅会降低钢水质量,而且容易堵塞出钢口,加速钢包耐火层的磨损,缩短设备的使用寿命。因此,必须及时检测出转炉下渣情况,以便及时挡渣或停止出钢。目前,国内钢厂大多采用肉眼观测钢流颜色和流态来判断是否下渣,由于转炉

生产现场的强光和烟雾的影响,使人工判渣的精度不高。本文提出了一种采用红外热成像技术来实现对转炉钢渣检测的方法<sup>[2]</sup>。

### 2 红外成像技术

#### 2.1 热红外成像原理

理论上,自然界中一切高于热力学零度( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的物体,都不断地发射红外辐射,同时这种辐射都载有物体的特征信息。这为利用热红外成像技术判别各种被测目标的温度高低和热分布场提供了客观的基础。热红外成像技术就是利用物体自身各部分红外热辐射的差异,把物体不可见的红外热辐射转换为可见的热图像的技术<sup>[3]</sup>。

**作者简介:**申屠理锋(1979-),男,工程师,硕士,主要从事冶金测控与图像处理专业的研究。E-mail:shutul@baosteel.com

**收稿日期:**2012-04-18; **修订日期:**2012-05-03

由黑体辐射定律可知,物体的辐射率与红外光谱的波长和热力学温度有关。同时,对于一定的温度,黑体的光谱辐射率有一极大值,相对于这个极大值的波长称为峰值波长,用 $\lambda_{\text{MAX}}$ 表示。根据普朗克辐射定律可知,热力学温度越高,峰值波长越短,辐射能量向短波端集中, $\lambda_{\text{MAX}}$ 与 $T$ 成反比,其关系如公式(1)所示,这就是维恩位移定律:

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{2898}{T} \quad (1)$$

由于自然界中绝对的黑体是不存在的,所以在实际应用中,引入了物体发射率 $\varepsilon$ ,它与物体的材料性质等因素有关,取值介于0~1之间。物体总的辐射能量与热力学温度之间的关系如公式(2)所示:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

其中, $W$ 为物体全辐射率; $\varepsilon$ 为物体的发射率; $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼比例系数( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ )。

所以,可以通过测量物体的辐射率来确定其温度,热红外成像技术就是通过测量被测目标的辐射率从而得到物体温度分布的。

## 2.2 转炉钢渣检测的红外辐射原理

转炉炼钢过程是一个氧化过程,同时也是造渣的过程,炼钢过程中会生成钢渣,钢渣的成分主要由非金属氧化物(如 $\text{MnO}$ , $\text{SiO}$ 等)和其他杂质( $\text{P}_2\text{O}_5$ )组成,其发射率比较大,而液态钢水的发射率较低,钢渣和钢水的发射率和波长的关系如图1所示<sup>[2]</sup>。

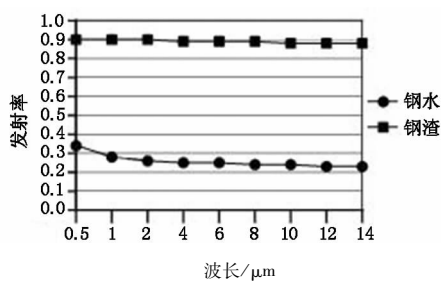


图1 钢水和钢渣的发射率与波长关系图

Fig. 1 emissivity and wavelength diagram of the molten steel and slag

从图1可知,钢渣的发射率在0.9左右且随波长的改变发射率变化不大,钢水的发射率随波长的增大而减小,在波长大于 $1.5 \mu\text{m}$ 后,发射率在0.25左右且趋于平稳。

转炉在出钢时,钢水和钢渣的温度约为 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 即 $1873 \text{ K}$ ,根据公式(1)可知,该温度所对应的峰值波长 $\lambda_{\text{MAX}} = 2898/1873 = 1.55 \mu\text{m}$ ,所以大部分红外辐射能量集中在波长大于 $1.5 \mu\text{m}$ 的波段中,在该

波段中钢水和钢渣的发射率相差较大,由公式(2)可知,钢水和钢渣的总红外辐射率就会有所差别,再经过红外成像系统的检测,将这种辐射率的差别转换为红外热图像的差别,就能实现对钢渣和钢水的识别区分,实现钢渣的检测。

## 3 转炉红外图像钢渣检测系统

### 3.1 系统组成及原理

如图2所示为转炉红外图像钢渣检测系统的结构原理图,整个系统主要由红外热像仪、光端机、计算机、图像采集卡和控制软件等组成。其中,红外热像仪采用近红外固体电荷耦合器件(CCD)作为探测元件,工作波段为 $1.4 \sim 3 \mu\text{m}$ 的近红外大气窗口,该波段适合于测量 $1000 \text{ K}$ 以上的高温对象。

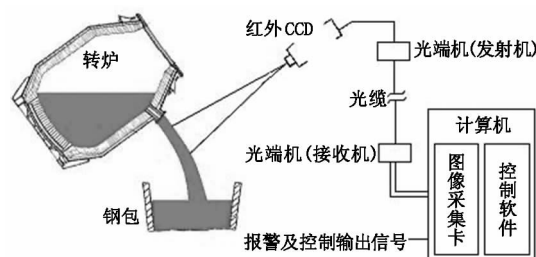


图2 系统结构原理图

Fig. 2 principle graph of system structure

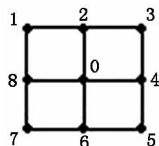
钢水从转炉出钢口流入钢包的过程中向外不断的发出红外辐射,红外热像仪检测到红外辐射并转换成电信号,在经过光缆传输到计算机,然后由图像采集卡采集将模拟视频信号转换为红外数字图像,这样系统控制软件就能对数字图像进行处理、分析并实现对钢渣的检测,当检测到钢渣含量超过设定报警线后,发出报警并控制转炉停止浇注。

### 3.2 转炉钢流红外图像处理技术

#### 3.2.1 图像预处理及增强

红外热图像是通过探测物体热辐射来成像的,其反应的是被测物体表面温度的分布,而那些非被测目标也会发出红外热辐射形成干扰。特别是转炉炼钢生成现场,存在很多高温热源,发出大量的红外热辐射,会对红外图像的成像质量造成影响,如高温金属粉尘的影响会在红外图像上生成很多的散粒噪声等。同时,红外辐射在传输过程中会受到大气的吸收和随机散射作用的影响,与可见光图像相比,红外图像的对比度、清晰度和分辨率都要低。由于红外图像具有这些特征,必须要对原始图像进行预处理,去掉环境的干扰,提高图像质量,才能为后续识别检测处理做好准备<sup>[4-5]</sup>。

针对转炉红外图像散粒噪声的干扰,本文采用加权空间滤波方法进行处理,滤波器采用的是  $3 \times 3$  方形领域,即中心点像素和邻近 8 个点像素的加权组合值作为该点的像素值。其计算公式如下:



$$p'_0 = k_1 p_0 + k_2 (p_2 + p_4 + p_6 + p_8) + k_3 (p_1 + p_3 + p_5 + p_7) \quad (3)$$

其中,  $p_0 \sim p_8$  分别是像素点 0~8 的像素值;  $K_1, K_2, K_3$  分别是对应点的加权系数。这种加权空间滤波方法,既能保证中心计算点像素的特征,同时也能消除散粒噪声的影响,通过调整各个点的加权值系数,达到最理想的效果,本系统中  $K_1, K_2, K_3$  分别选为 40%, 10%, 5%。处理结果如图 3 所示,其中图 3(a) 是原始红外图像,图 3(b) 是经过滤波处理后的图像。

针对转炉出钢红外图像对比度、清晰度比较低的情况,本文采用分段灰度变换来实现对图像的增强处理。灰度变换方法是图像增强的重要手段,它使图像的动态范围加大,使图像的对比度扩展,图像更加清晰,特征更加明显,其基本原理是指对图像上各个像素点的灰度值  $x$  按照某一函数关系  $f(x)$  变换到  $y$ 。根据转炉红外图像钢渣检测系统拍摄到的图像分析,大部分面积都是温度较低的背景环境,这部分图像所对应的像素点的灰度值相对较低,而系统所要检测的钢流以及转炉出钢口和钢包则温度较高。针对这一特点,采用的分段灰度变换公式如下:

$$f(i, j) = \begin{cases} 0 & g(i, j) < M \\ ag(i, j) + b & g(i, j) \geq M \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $g(i, j)$  是指像素点  $(i, j)$  的灰度值;  $M$  是灰度分段界限;  $f(i, j)$  是计算后新的灰度值,  $a, b$  分别指变换系数。本系统中,分段界限选取比背景环境灰度值略大一点,这样就能将背景环境对应的图像像素去除,同时通过对钢流图像灰度拉伸变换,提高红外图像的对比度和清晰度。经过增强处理后的图像结果如图 3(c) 所示。

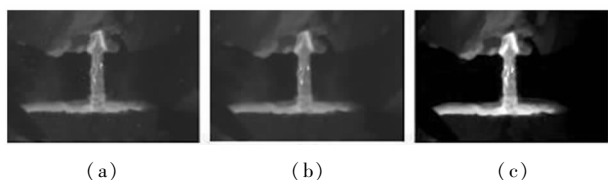


图 3 图像预处理及增强效果图  
Fig. 3 image pre-processing and enhancement image

### 3.2.2 图像分割及钢渣识别

图像分割是指将图像中有意义的对象与背景分离,也就是把图像中需要检测的对象提取出来。转炉出钢红外图像在经过滤波消噪和增强处理后,需要对图像中的目标特征即钢流图像进行提取,从而识别出钢渣并计算当前含量。主要分两个步骤来完成,首先通过图像分割提取出有效钢流区域,然后在有效钢流区域中提取出钢渣部分并计算其所占含量百分比<sup>[6-7]</sup>。

由于转炉出钢过程中,出钢口位置会随出钢过程的变化而转动,从而导致钢流的位置发生移动。为了提取有效钢流确定所在区域,需要对图像进行分割处理,即通过给定的一个阈值,将图像进行二值化处理。公式如下:

$$f(i, j) = \begin{cases} 0 & f(i, j) < K \\ 1 & f(i, j) \geq K \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $f(i, j)$  是指像素点  $(i, j)$  的灰度值;  $K$  是阈值。

从图 3(c) 可知,转炉出钢红外图像在经过滤波消噪和增强处理后,消除了噪声干扰并提高了图像对比度,钢渣和钢流都能比较明显的区分。通过给定阈值  $K_1$ ,按照公式(5)对图像进行处理后,得到二值化图像如图 4(a) 所示,由于转炉出钢口和钢包温度都比较高,对应像素的灰度值也较大,在经过二值化处理也被当作目标提取出来,但它们与钢流的形状有明显的差别,在分别通过对图像进行水平和垂直投影处理后,就能确认有效钢流区域所在的位置,如图 4(b) 所示。

得到有效钢流区域后,再给定阈值  $K_2$ ,按照公式(5)对图像进行处理后,得到二值化图像如图 4(c) 所示,其中白色部分就是钢渣所在的区域。得到了有效钢流和钢渣区域后,通过计算各自的面积(各自像素点的数量就是对应的面积),就可以计算出当前钢渣所占的百分比含量,从而实现对钢渣的实时检测。

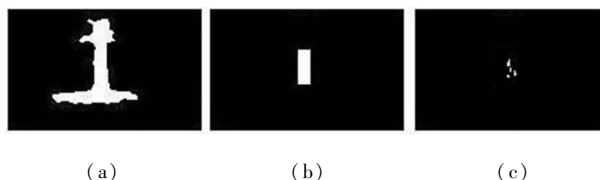


图 4 图像分割及钢渣识别效果图

Fig. 4 image segmentation and slag identification image

### 3.3 系统应用及效果

转炉红外图像钢渣检测系统于 2009 年 3 月在宝钢炼钢厂二炼钢成功应用。并于 2011 年 11 月成功推广应用到宝钢罗泾炼钢厂,今年 3 月又推广应

用到韶钢炼钢厂。经过现场使用验证,使用该系统自动检测转炉钢渣后,转炉出钢末期不再需要人工判渣,完全由系统自动判渣,判渣命中率由原来人工判渣时的 82.4% 提高到 99.3%,钢水回磷量由 0.0019% 降低到 0.0015% 以下,同时熔剂和脱氧剂的使用量也同比下降了 18%,系统性能稳定,工作可靠,不但减轻了转炉操作工的劳动强度,改善了工作环境,同时提高了转炉生产的自动化水平。

#### 4 结束语

红外成像技术是随计算机技术、图像处理技术和传感器技术发展起来的前沿技术。转炉钢渣检测技术已成为现代转炉生产和质量控制的重要技术之一,为了提高转炉出钢钢水的纯净度,改善钢水质量,有必要使用转炉钢渣检测系统。本文提出了应用红外热成像技术来检测转炉出钢钢渣含量,设计并开发了转炉红外图像下渣检测系统,并通过对转炉出钢红外图像进行去噪、增强、分割和钢渣识别等一系列图像处理,实现了转炉钢渣含量的自动检测。实践表明,基于红外热成像技术的转炉钢渣检测系统能自动精确实时的检测钢渣含量,解决了人工判渣的弊端,提高了钢水纯净度,实现了转炉出钢的自动化控制。

#### 参考文献:

- [1] Xing Suxia. Infrared thermal imaging and signal processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 76 - 120. (in Chinese)
  - [2] Feng Jie. BOF steelmaking production[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 25 - 79. (in Chinese)
  - [3] Sun Xiaogang, Li Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(2): 101 - 104. (in Chinese)
  - [4] An Chengbin, Ren Hongliang. Infrared image enhancement technology for staring infrared imager[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(6): 455 - 456. (in Chinese)
  - [5] Martienz D. Implicit motiom compensated noise reduction of motion video scenes[J]. Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Proc., 1985: 375 - 378.
  - [6] Silverman J. Signal processing algorithms for display and enhancement of IR images[J]. SPIE, 1993: 440 - 450.
  - [7] Yang Zhiling. Visual C++ Digital image acquisition processing and practical applications[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003: 486 - 545. (in Chinese)
- 邢素霞. 红外热成像与信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 76 - 120.
- 冯捷. 转炉炼钢生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 25 - 79.
- 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101 - 104.
- 安成斌, 任宏亮. 凝视焦平面热像仪的红外图像增强技术[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 455 - 456.
- Martienz D. Implicit motiom compensated noise reduction of motion video scenes[J]. Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Proc., 1985: 375 - 378.
- Silverman J. Signal processing algorithms for display and enhancement of IR images[J]. SPIE, 1993: 440 - 450.
- 杨枝灵. Visual C++ 数字图像获取处理及实践应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 486 - 545.