

DOI: 10.7652/xjtuxb201808008

利用图像信息熵差检测炉渣碳质量分数

邢超¹, 张晓明², 赵亚琳¹, 王昭¹, 高建民³

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西省特种设备检验检测研究院, 710048, 西安;
3. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了快速准确地检测反映锅炉燃烧效率的重要指标炉渣碳质量分数, 实时掌握锅炉燃烧工况, 针对目前炉渣碳质量分数高精度检测法检测时间长而快速视觉检测法准确率低的问题, 提出了一种基于机器视觉技术的锅炉炉渣碳质量分数检测方法。该方法通过采集炉渣图像, 基于图像信息建立图像信息熵差与炉渣碳质量分数之间关系模型, 再根据此关系模型, 获得待测炉渣的碳质量分数。实验结果表明, 与传统的灼烧失重法比较, 检测时间少, 所提方法的平均偏差小于2%, 满足目前检测精度要求; 与目前存在的视觉检测方法相比, 提出的方法检测结果不受拍摄光照环境的影响, 精度显著提高。该研究为进一步实现炉渣碳质量分数的实时在线检测打下了基础。

关键词: 碳质量分数; 炉渣图像; 信息熵差; 关系模型; 光照环境

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)08-0049-05

Detection of Carbon Content in Boiler Slag Based on Image Information Entropy Difference

XING Chao¹, ZHANG Xiaoming², ZHAO Yalin¹, WANG Zhao¹, GAO Jianmin³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi'an 710048, China;

3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is of great significance to detect slag carbon content rapidly and accurately for boiler combustion condition monitoring, boiler automated controlling, and reduction of energy consumption and emission. We present a new method for detecting carbon content of boiler slag based on machine vision technology, which is simple, fast and accurate. The slag images are acquired and then the carbon content of the slag is obtained according to the relationship model established here. Then the relation between slag image and slag carbon content is constructed via the information entropy difference of slag image and reference image. Experiment verifies that the average deviation of the proposed method is less than 2%, and the method spend shorter detection time than the traditional weight loss method, so the new method meets the detection requirements. Especially, the detection results are unaffected by the illumination environment, enabling real-time testing of the slag carbon content.

Keywords: carbon content; slag image; information entropy difference; relationship model; illumination environment

燃煤工业锅炉是生产、生活中最常见的耗能设备,每年消耗标准煤约4亿t,约占全国煤炭消耗总量的1/4左右,然而目前国内锅炉热效率低于国际先进水平15%左右^[1]。开展锅炉能效测试,推动企业提高节能减排增效,是实现可持续发展的重要途径^[2]。其中,对炉渣碳质量分数进行快速准确地检测,有助于实时掌握锅炉燃烧工况并及时进行相应调整,既可以提高能源利用率,又为进一步实现燃煤锅炉的自动控制奠定基础。

目前,锅炉炉渣碳质量分数检测方法较多,灼烧失重法^[3]作为国家标准检测方法较为常用,将炉渣和飞灰烧失质量所占比例作为炉渣的碳质量分数。这种离线方法检测炉渣碳质量分数能够保证检测精度较高,但该方法耗时长,无法实现炉渣碳质量分数的快速或在线检测。Pan等利用激光诱导离解光谱仪定量分析飞灰碳质量分数^[4],所测结果与灼烧失重法平均误差小于0.1%,但其对周围气压变化较为敏感^[5]。微波测碳法^[6]经研究得出,微波能量被炉渣粉吸收的程度与炉渣碳质量分数相关。付玉存建立了煤烟中飞灰碳质量分数与微波衰减及相位之间的关系模型^[7],由此得到飞灰碳质量分数,得到检测结果的平均误差小于1%,该方法虽然检测速度较快,但当煤质不同时,关系模型系数发生变化,检测结果受到影响,而且针对炉渣而言,炉渣密度的均匀性也会影响炉渣碳质量分数检测准确性。徐赛坤以SLR-ANFIS方法建立出水温度、炉膛温度等自变量与燃煤锅炉灰渣碳质量分数的非线性测量模型,与灼烧失重法相比平均误差为5.2%,能够实现碳质量分数的在线测量,但精度有待提高^[8]。

除上述检测技术外,为了实现快速实时检测,也出现了少数基于机器视觉的检测方法。周昊等通过图像处理得到灰渣厚度信息以探究煤结渣问题^[9]。付钦学通过灰度阈值将图像二值化后分为未完全燃烧碳与灰分两部分,利用未完全燃烧碳部分在总像素中的占比衡量碳质量分数,但是灰度图像易受光照环境影响,自适应阈值随之发生变化,导致结果不稳定,因此图像需在特定环境中获取^[10]。

从视觉上看,炉渣图像一般表现为信息杂乱分散,分析其统计特性正是反映图像此类特征的一种方式。图像信息熵反映了图像某种特征的统计特性,是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标。本文基于机器视觉技术,通过研究,提出一种利用图像信息熵差检测炉渣碳质量分数的方法,实现快速准确的检测的目的,并且无需在特定光照环境下获取

图像,适用于不同环境中的炉渣检测。

1 检测方法与原理

基于机器视觉的炉渣碳质量分数检测方法首先要获得炉渣样本图像,对图像信息进行处理,建立图像信息与炉渣碳质量分数之间的关系模型,再根据此模型得到待测炉渣碳质量分数。

1.1 图像采集

同一物体在不同的光照环境下拍摄的灰度图像具有一定的差异,为避免由此造成的检测结果误差,本文提出了一种利用参考物来消除环境光照影响的方法。方法对环境光不作特定要求,在任意光照条件下,调节相机参数,只要有足够的照度,对炉渣样品和参考物分别采集图像,在后续图像处理中消除背景光的影响。

另外,由于经过喷水结块原始炉渣粒度大小不均,导致采集到的图像中关于碳质量分数信息不完整,从而很难建立图像信息与碳质量分数关系模型。本文在炉渣排出后对其进行烘干、粉碎预处理后再进行拍摄,图像采集装置如图1所示。

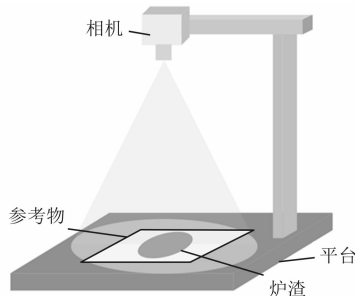


图1 炉渣图像采集装置示意图

1.2 炉渣碳质量分数与图像关系模型

1.2.1 信息熵概念 熵的概念于1865年由德国物理学家克劳修斯提出,最初被应用于热力学中,是衡量一个系统能量转换后的状态数,即不确定程度,状态数越大熵值越大。1948年香农提出了信息熵的概念,从平均意义上反映信息的统计特性,定义为自信息量的期望 $E(I(x_i))$,其中自信息量 $I(x_i)$ 指某一信源发出某一消息信号所含有的信息量,数值上定义为该事件发生概率的对数的负值^[11]。对于灰度图像来说,图像信息熵即反映了图像灰度的统计特性。图像信息熵^[12]的表达式为

$$h = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \lg(p(i)) \quad (1)$$

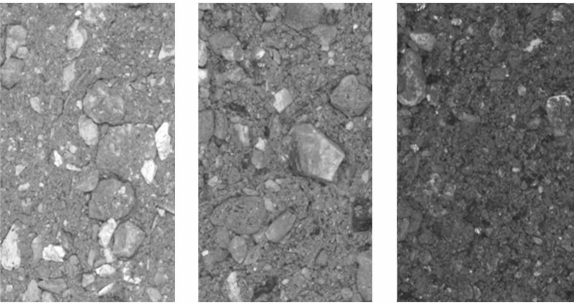
式中: L 为图像的最大灰度级; $p(i)$ 为图像中灰度为 i 的像素概率。

假设,已知图像自信息量分别为 $I(x_i)$ 、 $J(x_i)$,由信息量及期望的可加性,得

$$E(W(x_i)) = E(I(x_i) + J(x_i)) = E(I(x_i)) + E(J(x_i)) \quad (2)$$

那么可知,图像信息熵同样具有可加性。

1.2.2 利用信息熵差消除环境光照的影响 在同一光照环境下,如果炉渣的碳质量分数不同,获得的图像灰度分布不同。图 2 为相同环境下不同碳质量分数的炉渣图像,图像中炉渣碳质量分数是通过灼烧失重法检测得到的。碳质量分数不同,图像信息杂乱程度不同,对应的图像信息熵也随之改变^[13],因此可以利用图像信息熵反映炉渣碳质量分数的变化。



(a) $w(C)=0\%$ (b) $w(C)=14.87\%$ (c) $w(C)=37.90\%$

图 2 不同碳质量分数的炉渣图像

若没有人为设定的拍摄环境,炉渣碳质量分数在线检测总会受到光照环境的影响,这里通过设置不同的相机曝光时间模拟光照环境变化。灼烧失重法所测得的炉渣样本碳质量分数变化范围为 $0\% \sim 50\%$,将相同的样本采集图像后,计算各自的信息熵。

图 3 反映了不同相机曝光时间下信息熵随着碳质量分数的变化趋势。从中可以看出:每一种光照环境下信息熵都随炉渣碳质量分数的增加而减小,这是由于碳质量分数越小,图像灰度范围越大,杂乱程度越剧烈,相应地信息熵就越大;对于同一炉渣样本,曝光时间增加,图像信息熵值也随之增加。这说明信息熵虽然可以反映炉渣碳质量分数的大小,但是也容易受到光照环境的影响,对于碳质量分数的在线或实时检测是不利的。因此,为保证获得准确的碳质量分数预测结果,需要消除光照环境不同所带来的影响。

从 1.2.1 小节可知信息熵具有可加性,那么可以考虑通过此性质消除由于不同光照环境的影响而导致的图像信息变化。假设在某一光照环境下,首先拍摄一幅炉渣图像,此图像中包含了炉渣受光照环境影响的信息,然后在与炉渣相同位置处拍摄一幅参考物图像,此图像中包含了该参考物受相同光

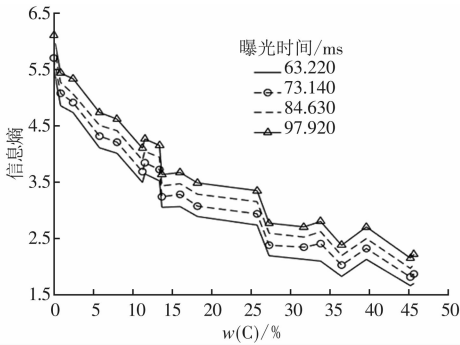
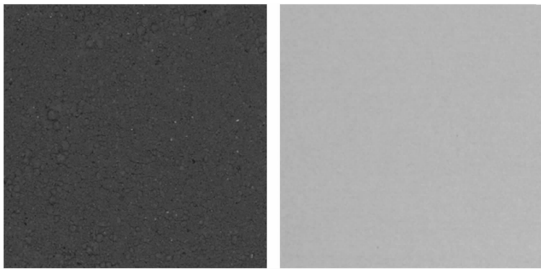


图 3 不同曝光时间图像信息熵与炉渣碳质量分数的关系

照环境影响的信息。由于信息熵的可加性,将二者图像相同区域的信息熵作差,所得到的即为消除此光照环境后的信息熵。如此,无论光照环境如何变化,仅需在同一位置引入参考物图像的信息熵,得到炉渣图像与参考物图像的信息熵差,即可消除环境光不同造成的影响。本文中参考物选用一张平整洁净并具有漫反射特性的白纸。图 4 为同一光照环境下某一炉渣图像及参考物图像。



(a) 炉渣样本图像 (b) 参考物图像

图 4 某炉渣样本图像及参考物图像

对于上述相同炉渣样本,在引入参考物图像信息熵后,可得到不同光照环境下的炉渣图像信息熵差随炉渣碳质量分数变化趋势,如图 5 所示。与图 3 对比可以看出,同一光照环境下,炉渣信息熵差随炉渣碳质量分数的变化趋势仍然相同,不同的是,对于不同光照环境下,同一炉渣样本的图像信息熵差相差不大,这说明了引入参考图像信息熵可以一定程度消除不同环境光照的影响。

1.2.3 建立炉渣碳质量分数与图像关系模型 如果找到图像信息熵差与炉渣碳质量分数之间的变化规律,那么可以通过图像信息熵差预测炉渣碳质量分数的大小。根据上节得到的图像信息熵差随炉渣碳质量分数变化趋势,可假设关系模型为多项式曲线函数,定义为

$$\Delta h = a_0 + a_1 w + a_2 w^2 + \dots + a_k w^k \quad (3)$$

式中: Δh 为炉渣图像信息熵差,这里可采用不同曝

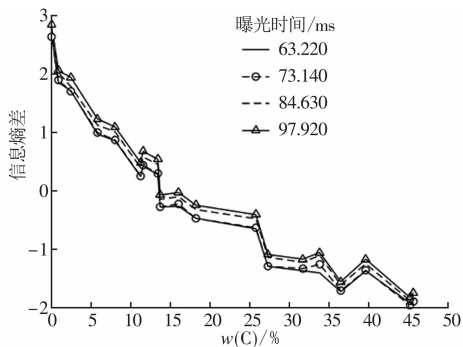


图 5 不同曝光时间图像信息熵差与炉渣碳质量分数的关系

光时间下的信息熵差均值; w 为灼烧失重法得到的碳质量分数值; $a_0, a_1, \dots, a_k$ 为 k 次多项式系数。该关系模型的可靠性依赖于炉渣样本的数量、碳质量分数的准确性以及碳质量分数的变化均匀度。利用灼烧失重法测得的样本碳质量分数经过最小二乘法拟合得到各项系数,最终信息熵差当 $w(c)$ 的具体关系式为

$$\Delta h = -4.357 \times 10^{-5} w^3 + 0.0046 w^2 - 0.1851 w + 1.659 \quad (4)$$

将式(4)函数曲线绘制成图形,如图 6 所示。

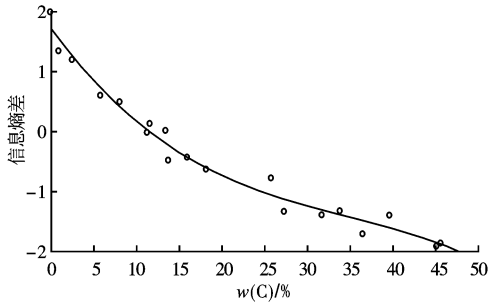


图 6 炉渣图像信息熵差与碳质量分数的关系

为了衡量上述关系曲线式(4)的优劣,通常采用拟合度相关统计量来评价:包括误差平方和、均方根误差,二者越接近 0 越好;式(4)的确定系数越接近 1 越好。对应在本模型中,误差平方和、均方根误差、方程的确定系数分别为 0.248 6、0.128 7、0.989 4,说明模型选择 3 次多项式拟合所得到的结果较好。

2 实验结果与分析

在自然光照条件下,对锅炉炉渣通过烘干、研磨装置预处理,保证炉渣粉碎颗粒在 2 mm 以内,平铺于炉渣图像采集装置中,采集炉渣图像以及参考物图像。由于本文方法能够消除环境光照影响,因此对相机参数要求并不严格,实验所用相机为德国 SVS evo8051MFLGEA 工业相机,分辨率为 3 296

$\times 2\,472$ 像素,为保证图像质量不过曝或过暗,光圈大小、曝光时间适中,即光圈值为 5.6,曝光时间为 84.630 ms。截取至少两个不同区域的待测炉渣及参考物图像像素,分析炉渣及参考物图像的信息熵差,取平均值。通过已建立的炉渣图像信息熵差与炉渣碳质量分数之间的关系模型,得到该炉渣碳质量分数结果,整体检测流程如图 7 所示。

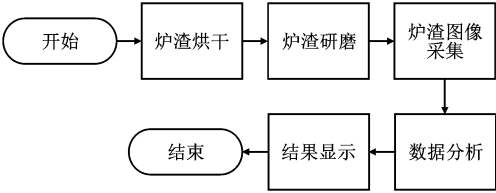


图 7 炉渣碳质量分数检测流程示意图

在此实验中,不仅对比了本文方法与已有基于图像处理检测方法在不同光照环境影响下的检测结果,而且将本方法的检测结果同灼烧失重法检测结果进行了准确度比较。

2.1 与现有基于图像处理的检测方法对比

本文方法与目前已有的基于图像处理的方法如灰度图法、二值化方法加以对比,同时也引用参考物法消除背景光。图 8 为引入本文相同参考物后得到的灰度差与炉渣碳质量分数的变化趋势,从中可以看出,灰度差与碳质量分数为递增关系,但是当光照环境改变后,灰度差也发生变化,受环境光影响比较大。通过自适应阈值法对炉渣灰度图像进行二值化后^[14],得到的二值化阈值与炉渣碳质量分数的变化关系见图 9。从图中可以看出,二值化阈值与炉渣碳质量分数呈现不显著的递减关系,同时也存在着对光照环境敏感的现象,说明二值化方法不能较好地反映碳质量分数变化情况。与图 5 相比,显然以上两种方法都没有本文提出的方法效果好。

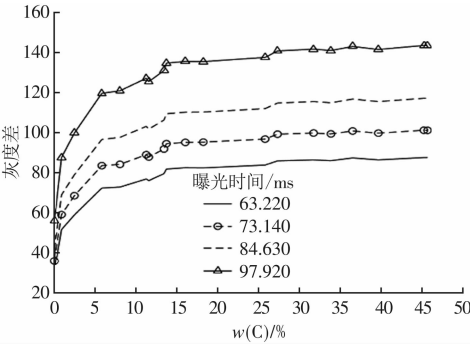


图 8 灰度差与炉渣碳质量分数的关系

2.2 与灼烧失重法对比

同灼烧失重法比较,利用所建立的关系模型以

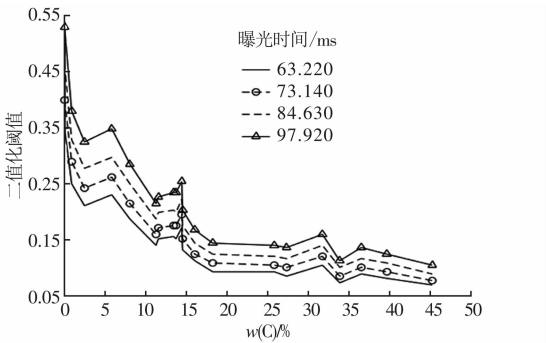


图 9 二值化阈值与炉渣碳质量分数的变化关系图

及待测炉渣样本对本文方法的准确性加以检验。按着《飞灰和炉渣的样品采集和制备》^[15]标准得到若干待测样本,利用灼烧失重法得到较准确的碳质量分数,由于灼烧时间的影响,完全检测一个样本时间约若干小时。采用前面所述方法在室内自然光环境下采集炉渣图像以及相应参考物图像,计算二者信息熵差值,再利用本文 1.2.3 小节建立的关系模型,反推出待测炉渣样本的碳质量分数分别为 3.03%、10.9%、21.68%、33.99%、43.02%,整个检测过程仅需几分钟。如表 1 所示,利用本文方法与灼烧失重法的检测 $w(C)$ 的平均误差在 1.09%,满足炉渣碳质量分数检测领域的精度要求,由此验证了本论文检测方法的相对准确性。

表 1 待测炉渣碳质量分数的检测结果对比

信息熵差	$w(C)/\%$		检测误差/ $\%$
	灼烧失重法	本文方法	
1.133 8	2.44	3.03	0.59
0.065 4	11.52	10.9	0.62
-0.938 5	23.45	21.68	1.77
-1.430 2	31.65	33.99	2.34
-1.798 1	42.87	43.02	0.15

3 结 论

本文基于机器视觉技术,研究了一种快速准确的燃煤工业锅炉炉渣碳质量分数实时在线检测的方法。其中,以炉渣图像及参考图像的信息熵差作为评价指标,建立其与炉渣碳质量分数之间的关系模型,实现待测炉渣碳质量分数的检测。本文方法检测结果能够满足目前炉渣碳质量分数的检测精度,并且适用于不同的光照环境检测,对实时了解锅炉燃烧工况及实现锅炉燃烧的自动化控制具有重要的使用价值。

参考文献:

[1] 林火灿. 烧煤也可以清洁高效 [EB/OL]. (2015-12-02) [2017-11-10]. <http://finance.huanqiu.com/roll/2015-12/8086287.html>.

[2] 李学洪,卞清泉,姬新峰,等. 工业锅炉固体未完全燃烧热损失快速测试方法 [J]. 节能与环保, 2011 (3): 60-61.

LI Xuehong, BIAN Qingquan, JI Xinfeng, et al. Rapid test for the heat loss of solid uncompleted combustion in industrial boiler [J]. Energy Conservation and Environment Protection, 2011(3): 60-61.

[3] 国家能源局. 火力发电厂燃料试验方法: 第 6 部分 飞灰和炉渣可燃物测定方法: DL/T 567.6—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[4] PAN Gang, DONG Meirong, YU Jianhua, et al. Accuracy improvement of quantitative analysis of unburned carbon content in fly ash using laser induced breakdown spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta: Part B Atomic Spectroscopy, 2017, 131: 26-31.

[5] 亓洪兴,舒嵘,吕刚,等. 基于激光诱导离解光谱的物质成分分析技术 [J]. 激光与红外, 2007(4): 314-317.

QI Hongxing, SHU Rong, LÜ Gang, et al. Elemental analysis technique based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. Laser & Infrared, 2007(4): 314-317.

[6] 王建华. 微波技术在煤渣含碳量检测中的应用 [J]. 节能, 2000(2): 39-40.

WANG Jinghua. The microwave technology in the detection of carbon content in coal slag [J]. Energy Conservation, 2000(2): 39-40.

[7] 付玉存. 飞灰含碳量微波检测技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 16-22.

[8] 徐赛坤,花义锋,汪思源,等. 基于 SLR-ANFIS 的灰渣含碳量软测量建模研究 [J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 43-45.

XU Saikun, HUA Yifeng, WANG Siyuan, et al. Research on soft measure of carbon content in coal ash based on SLR-ANFIS [J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(12): 43-45.

[9] 周昊,林阿平,周斌,等. 基于图像处理的灰渣温度场及生长特性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47 (4): 669-674.

ZHOU Hao, LIN Aping, ZHOU Bin, et al. Characteristic of ash deposit growth and temperature field by image processing [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(4): 669-674.

(下转第 123 页)