基于图像增强的生球粒度识别方法研究

覃德波[1]，陈天宇[2a]，余正伟[2b]，张学锋[2a]，熊大林[2b]，钱 磊[1]，龙红明[2b]
(1. 安徽长江钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243181；
2. 安徽工业大学 a. 计算机科学与技术学院；b. 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032)

摘要： 为了提高铁矿球团制备过程中粒度大小和分布检测的准确性和即时性，本文通过计算机视觉技术，开发一种生球粒度识别系统。该系统通过摄像头采集圆盘造球机出球区的实时图像，采用四重增强和高斯滤波进行图像增强和降噪，然后采用霍夫圆检测算法进行生球数量和粒度识别。结果表明：四重图像增强结合高斯滤波可以有效降低图像中的噪声，霍夫圆检测能够快速准确识别生球数量和粒度分布，生球和合格球数量识别的准确度分别达到96.29%和90.61%。本文研究成果对提高生球合格率和降低人员劳动强度具有积极作用。

关键词： 铁矿球团；生球；粒度检测；图像增强；高斯滤波；霍夫圆检测
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0082－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.089

Research on recognition method of fresh pellets particle size based on image enhancement

QIN Debo[1], CHEN Tianyu[2a], YU Zhengwei[2b], ZHANG Xuefeng[2a],
XIONG Dalin[2b], QIAN Lei[1], LONG Hongming[2b]
(1. *Anhui Changjiang Iron & Steel Co., Ltd., Ma'anshan* 243181, *Anhui*, *China*;
2. *a. School of Computer Science and Technology*; *b. School of Metallurgical Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243032, *Anhui*, *China*)

Abstract: In order to improve the accuracy and immediacy of particle size and distribution detection during the preparation of fresh pellets, a fresh pellets size recognition system is developed through computer vision technology. The system acquires real-time images of the ball outlet area of the disc ball maker through a camera, uses quadruple enhancement and Gaussian filtering for image enhancement and noise reduction, and then uses the Hough circle detection algorithm for fresh pellets number and particle size identification. The results show that the quadruple image enhancement combined with Gaussian filtering can effectively reduce the noise in the image, and the Hough circle detection can quickly and accurately identify the fresh pellets number and particle size distribution, and the accuracy of fresh pellets number and qualified fresh pellets number identification reaches 96.29% and 90.61%, respectively. The research results of this paper have a positive effect on improving the qualification rate of fresh pellets and reducing the labor intensity of personnel.

Key words: iron ore pellets; fresh pellets; particle size detection; image enhancement; Gaussian filtering; Hough circle detection

收稿日期： 2021－03－26；**修回日期：** 2021－09－07
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51774005)
作者简介： 覃德波(1981—)，男，高级工程师，从事铁前工艺技术的生产管理和研究工作。
通讯作者： 余正伟(1984—)，男，博士，从事铁矿粉造块节能环保技术和复杂资源综合利用方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁矿球团是高炉炼铁、直接还原和熔融还原的主要原料之一，其主要生产过程是将磨矿、选矿得到的细粒铁精矿添加黏结剂和水制备成生球，再进行干燥、预热、焙烧、均热、冷却等操作，得到合格球团矿[1-2]。添加了黏结剂的铁精矿在圆盘造球机中滚动成球，并进行分区、分级，当其粒度长大到一定尺寸范围时，在离心力的作用下被甩离球盘。合理的粒度及分布是保证生球质量的重要指标[3]。当前，生球粒度检测主要依靠造球工通过肉眼观察或取样筛分，然后手动调节造球的加水量、圆盘转速和出球区的边缘高度来控制粒度。这种操作模式调控主观性大，对造球工的经验和精力要求高，不合格生球质量分数较高，不利于生产效率的提高、生产质量的稳定以及工人劳动强度的降低。

在新一轮科技革命和产业变革的大背景下，钢铁工业正逐步实现装备自动化、控制智能化和智能组网平台化[4]。铁矿球团作为钢铁工业基础原料生产工序[5]，自动化、智能化水平不高，尤其是造球工序。造球工序实现智能化的第一步是准确及时地检测生球粒度及其分布，其核心问题是检测生球中圆形目标的大小和数量。目前，对于生球粒度在线检测已有部分研究，如：温春友等[6]通过数字图像处理技术，利用水线分割可以大体上检测出生球的粒度分布；夏召红等[7]通过基于小波变换算法，利用边缘检测比较真实地反映实际生球的粒度分布；孙星星等[8]提出基于引导滤波与 Log 算子的图像增强算法，使检测的图像噪声更小，并与实际值更为接近；唐庆博等[9]提出一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法，通过 Soble 边缘检测等预处理方法，减少了 Hough 变化的计算量；秦长泽等[10]提出基于改进分水岭算法的生球图像分割方法，可以有效地分割图像中的生球。上述研究是通过对生球分割、边缘检测和图像增强等操作，仍存在检测的准确性和即时性不高的问题。

本文通过调整检测装置出球口的倾斜角度和背景颜色，采用四重图像增强算法对图像进行处理，得到生球的粒度分布等数据，达到设备稳定运行、提高生球合格率、提产降耗的目的。

1　生球粒度识别系统

生球粒度识别系统主要由造球盘、摄像系统、保护装置、光源和工控机等设备组成。球盘内生球高速运动，相互挤压重叠，其粒度识别难度较大。球盘出球区是制备好的生球从球盘转移至皮带的中间区域，该区域生球运动速度较慢、离散程度高，比较适合获取图像。摄像系统拍摄出球区的高清图像，这些图像被传输到服务器的处理单元后，由处理系统对其进行分析处理和计算，并得到生球平均粒度和分布率等信息。

1.1　生球图像获取

生球图像获取装置示意如图 1 所示。将出球口的背景色改造为白色，用以提高生球对比度；并将出球口设置一定倾斜角度，以强化生球的离散，降低检测难度。在预处理时，对图像进行四重增强，提高背景的亮度，凸显生球的特征，更有利于使用霍夫圆算法对生球进行粒度检测，使结果更为准确。该装置可以完成对生球图像的采集和处理，再通过光电转化器将图像信息传输至工控机或服务器，供图像处理系统使用。

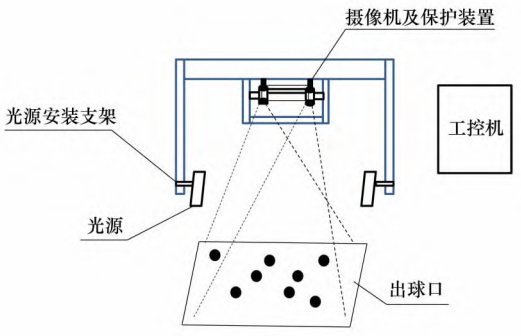


图 1　生球检测装置结构示意

Fig. 1　Schematic diagram of fresh pellet detection device

1.2　系统控制

系统使用计算机图像处理技术来处理图像，通过 QCustomPlot 软件来绘制折线图[11]，实时

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

显示当前处理的图像，并将重要的数据存储在数据库中和显示在用户界面上。程序流程如图2所示。启动程序后，通过图像处理模型检测出图像中生球的平均粒度、生球总数，以及小球、合格球和大球的百分比等参数。系统已添加鼠标响应函数，可以获取任意一点对应的坐标值和任意时间段内生球的粒度分布，这可减少误差，让整个造球过程更加智能。

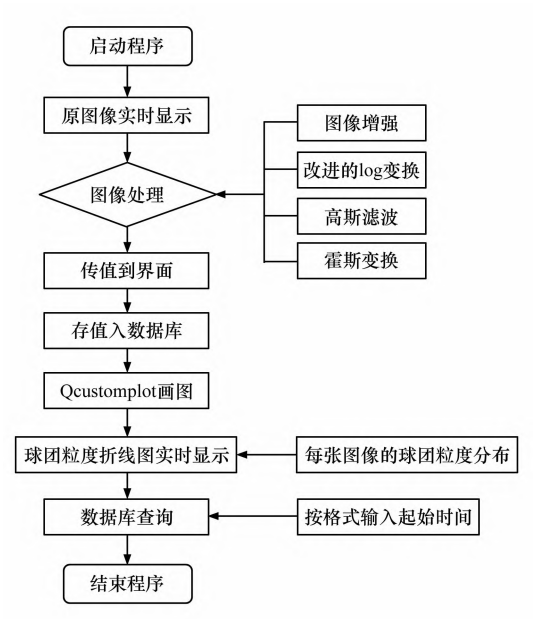


图2 软件系统的工作流程示意

Fig. 2 Flow chart of the software system

2 图像处理方法与结果分析

常见的图像增强算法有直方图均衡化、拉普拉斯、Log变换和伽马变换等，本文图像处理方法为图像四重增强、高斯滤波以及霍夫圆变换(Hough)方法[12]。

2.1 图像四重增强

2.1.1 增强原理

(1) 对图像使用形态学闭操作。先对图像进行膨胀操作，再进行腐蚀操作，可以消除小的孔洞，分割图像中的独立元素，让图像更加的平滑。数学公式如下:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \tag{1}$$

式中: A代表原始图像; B代表结构元素; A·B图像代表形态学闭操作; ⊕代表膨胀运算; ⊖代表腐蚀运算。

(2) 像素点线性相加操作。将1张和原图大小一致的空白图像初始化，对原图进行像素点操作，用线性数学公式对每一个像素点进行操作，以达到增加整个图像的亮度和对比度、消除图像中的随机噪声、图像亮度增强的效果。将小于0的像素点设置为0，大于255的像素点设置为255，像素相加的数学公式如下:

$$g(x,y) = af(x,y) + b \qquad a>0 \tag{2}$$

式中: $g(x,y)$为输出图像; $f(x,y)$为输入图像; a为像素点放大的倍数; b为每个像素点增加的常数。

(3) 使用改进的Log变换进行图像增强。将图像的低灰度值部分扩展，显示出低灰度部分更多的细节，将其高灰度值部分压缩，减少高灰度值部分的细节，从而达到增强图像低灰度部分的目的。改进的Log变换方法的数学表达式:

$$s = \log(a + r) \qquad a \geqslant 1 \tag{3}$$

式中: s为处理完后的每个像素点; a为对低灰度区域扩展的控制值; r为未处理前图像的每个像素点。

由于图像中生球的像素值偏低，通过改进的对数变换，调节a的值减小低像素区域的扩展幅度，避免图像中低灰度值被过度扩展而失真，提升图像中生球和背景的对比度。

(4) 进行拉普拉斯图像锐化处理。拉普拉斯算子是最简单的各向同性微分算子，具有旋转不变性。一个二维图像函数的拉普拉斯变换是各向同性的二阶导数:

$$f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{4}$$

式中: $f(x,y)$为二维图像函数; x,y为二维像素坐标值。

为了更适合于数字图像处理，将该方程表示为离散形式:

$$f = [f(x+1,y) f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1)] - 4f(x,y) \tag{5}$$

拉普拉斯算子还可以表示成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

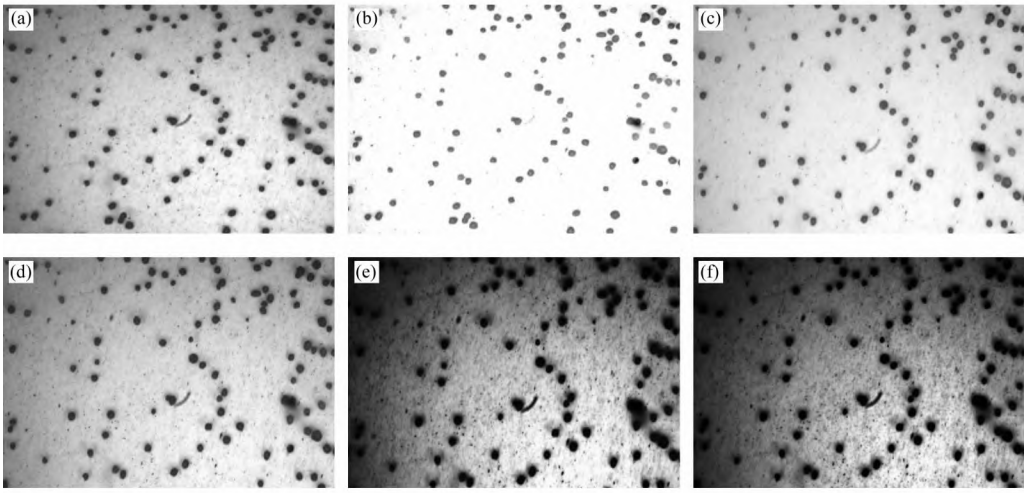
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

该方法选择拉普拉斯算子对图像进行锐化处理：先将图像进行灰度突变，再将拉普拉斯图像与原始图像叠加而生成锐化图像。这种方法既可以产生拉普拉斯锐化处理的效果，又能保留背景信息，突出图像中的细节，增加图像中生球的轮廓和边缘特征，有利于后续检测。

2.1.2　增强效果分析

将原图和进行本文算法、Log 变换、拉普拉斯图像锐化，以及直方图均衡化和伽马变换后得到的结果进行对比，结果如图 3 所示。由图 3(a) ~(d) 可知：原图经过 Log 变换处理后，较暗区域的对比度有所提升，暗部细节增强；图像的低灰度值部分扩展，显示出低灰度部分更多的细节；将图像高灰度值部分压缩，高灰度值部分的细节减少，低灰度部分得到加强；经拉普拉斯锐化后，图像的边缘和细节得到加强；对比度提高后，图像的噪声同时提高。

将图像灰度统计的直行图进行均衡化，拉大图像灰度比较集中区域的灰度间距，从而使灰度分布均匀。伽马变化主要用于图像的校正，对漂白或过黑的图片进行修正。由图 3(e)、(f) 可知：经直行图均衡化后，图像的整体颜色加深，灰度增强，整体对比度增强；经伽马变换后，图像对比度增加，整体颜色加深，灰度增强，但噪声显著增加，均没有达到理想的预处理效果。



(a) 原图；(b) 图像四重增强；(c) Log 变换；(d) 拉普拉斯图像锐化；(e) 直方图均衡化；(f) 伽马变换

图 3　图像增强算法效果

Fig. 3　Effect of image enhancement algorithm

将直方图均衡化等增强算法与本文的四重图像增强算法进行对比，发现四重图像增强算法集合了多种算法的优点，很大程度上提高了图像的背景亮度，消蚀了部分噪声，凸显了生球的特征和轮廓，可为后续生球检测创造良好的条件。

2.2　高斯滤波

生球图像中大多数噪声均属于高斯噪声，本文使用高斯滤波方法，对图像进行降噪处理。

一维高斯分布函数：

$$G(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{6}$$

式中：$G(x)$ 为图像噪声的一维高斯函数；x 为一维像素坐标值；π 为圆周率；σ 为像素值标准差；σ^2 为像素值方差。

二维高斯分布函数：

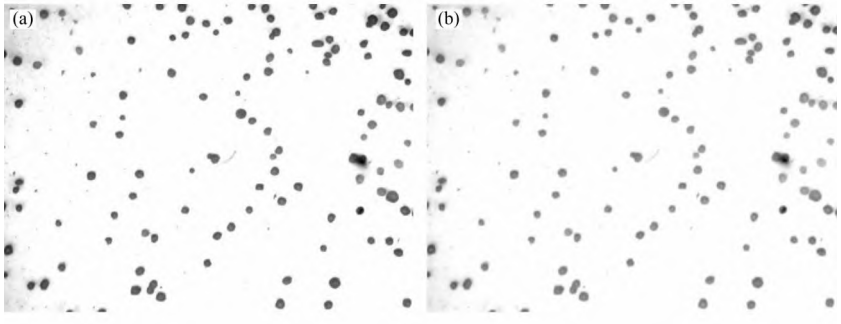
$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

式中：$G(x,y)$ 为图像噪声的二维高斯函数；x，y为二维像素坐标值；π 为圆周率；σ^2 为像素值方差。

高斯滤波是根据高斯函数的形状来选择权值的线性平滑滤波方式，高斯滤波后图像被平滑的程度取决于标准差。本文先对图像进行四重增强，然后采用 OpenCV 提供的 GaussianBlur 函数进行高斯滤波处理。在图像处理过程中，设

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定合适的阈值，其中 size 的取值为(9,9)，高斯滤波在横向和竖向的滤波系数都为 2。滤波结果如图 4 所示。由图 4 可知，经过高斯滤波后，图像中的高斯噪声会减少，很多肉眼无法看到的小噪点被消除，这有利于后期的霍夫圆检测算法对生球信息的判断。



(a) 高斯滤波前；(b) 高斯滤波后

图 4 高斯滤波前、后比较

Fig. 4 Imige comparison before and after Gaussian filtering

2.3 霍夫圆变换

2.3.1 检测步骤

对现场出球区的图像采用四重增强和高斯滤波后，采用 HoughCircles 函数对滤波后的图像进行圆检测。HoughCircles 函数检测生球的步骤[13]：首先检测出生球的中心，对预处理后的图像进行边缘检测，计算出图像的梯度，从而确定生球的中心；然后检测出生球的半径，计算某一个生球中心到边缘的距离，这些距离就是该中心所对应生球的半径；对每一个生球完成以上步骤，就会得到所有生球的半径。检测效果如图 5 所示。由图 5 可知，霍夫圆变换能够比较好地适用于大量生球的检测，且受到图像中噪点的影响较小。

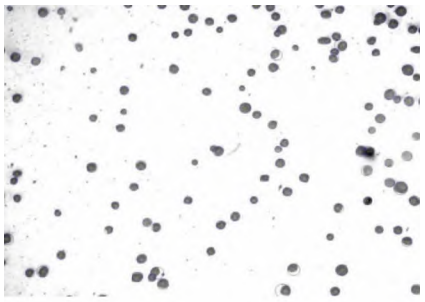


图 5 高斯滤波后霍夫圆检测效果

Fig. 5 Imige of Hough circle detection after Gaussian filtering

2.3.2 检测结果

不同处理方式下图片能够被识别出的生球数量如表 1 所示。由表 1 可知，四重增强处理后霍夫圆识别的生球个数与实际数量接近，生球数量检测准确率达到 96.29%，能较好满足检测需求。这说明四重增强处理霍夫圆识别与其他处理方式相比，明显更适合用于生球的数量检测。

表 1 不同图像处理方式下图片中的生球个数

Table 1 The number of pellets in picture under different treatment methods

图片数量	未处理	直方图均衡化	伽马变化	拉普拉斯图像锐化	Log 变换	四重增强	原图球团个数
1	197	126	141	198	205	210	211
2	184	131	143	183	192	197	196
3	537	475	219	552	594	615	654
4	534	451	222	553	579	596	633
5	218	164	170	220	222	223	225
6	359	241	183	371	386	388	409
7	408	288	256	411	422	426	434
8	229	140	118	238	246	251	256

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

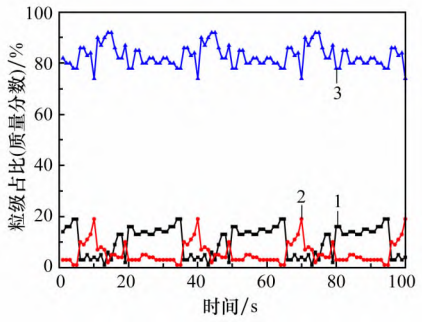
进一步对表 1 各个粒度区域的球团数量进行统计，得出 10 ~ 20 mm 的生球数量如表 2 所示。由表 2 可知，四重增强处理方式加霍夫圆识别能很好地降低图像噪声，识别出大量合格生球，检测的准确度达到 90. 61% 。

表 2　不同图像处理方式下图片中的合格生球数

Table 1　The number of qualified pellets in picture under different treatment methods

图片数量	未处理	直方图均衡化	伽马变化	拉普拉斯图像锐化	Log 变换	四重增强	原图生球个数
1	138	15	22	137	144	153	187
2	142	54	63	139	148	150	180
3	394	324	73	439	451	464	518
4	464	383	173	486	497	518	560
5	200	119	127	188	190	191	206
6	319	202	137	327	331	333	352
7	367	233	192	368	367	370	393
8	183	85	79	190	201	205	235

100 s 内生球的生成趋势如图 6 所示。由图 6 可知：采用四重增强、高斯滤波和霍夫变换算法实时处理图像，能够准确识别生球数量和粒度。该图可直观反映生球中合格球及大球、小球的分布情况，实现识别图像、统计数据的用户界面可视化，使系统能根据生球粒度及分布自动调控造球加水量、圆盘转速和进料量，为造球过程的智能化奠定良好基础。



1—+20 mm(大球) ; 2—-10 mm(小球) ;

3—10 ~ 20 mm(合格球)

图 6　生球粒度分布

Fig. 6　Size distribution of green pellets

3　结　论

(1) 本文开发了一种高效、稳定的生球粒径检测系统。该系统通过图像采集装置实时获取生球图像，采用计算机对图像进行增强和霍夫圆检测等操作，可以在不影响生产的前提下较为准确地检测生球的粒度及其分布。

(2) 生球粒度识别系统主要由造球盘、摄像系统、保护装置、光源和工控机等设备组成。摄像系统负责采集实时的成球图像；处理系统接收图像信息后，对图像进行分析处理和计算；系统可将计算出的生球平均粒度及分布存入数据库并显示在用户界面上，支持查询某个时间段内的生球图像及相关统计数据。

(3) 本文四重图像增强算法相对于 Log 变化、直方图均衡化、拉普拉斯算法和伽马算法更适合用于生球数量和粒度检测。采用图像增强和高斯滤波处理后，使用霍夫圆检测算法可以很好地检测出生球的粒度和分布信息，实现造球过程可视化，为造球工序智能化奠定良好的基础。

参考文献:

[1] 毛传刚. 基于机器视觉的圆盘造球机生球粒径在线检测方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学,2019.
MAO Chuangang. Machine vision based method for on-line measurement of the pellet size in disc pelletizer [D]. Changsha: Hunan University,2019.

[2] 余海钊,廖继勇,范晓慧. 带式焙烧机球团技术的应用及研究进展 [J]. 烧结球团,2019,45(4) : 47 - 54; 70.
YU Haizhao,LIAO Jiyong,FAN Xiaohui. Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster [J]. Sintering and Pelletizing,2019,45(4) : 47 - 54; 70.

[3] 叶匡吾. 我国球团生产的现状和展望 [J]. 烧结球团,2003,28(1) : 1 - 4.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

YE Kuangwu. Present situation and prospect of pellet production in China [J]. Sintering and Pelletizing,2003,28(1):1 – 4.

[4] 孙彦广. 钢铁工业数字化、网络化、智能化制造技术发展路线图 [J]. 冶金管理,2015(9):4 – 8.
SUN Yanguang. Development roadmap of digital, networked and intelligent manufacturing technology for iron and steel industry [J]. Metallurgy Management,2015(9):4 – 8.

[5] 许满兴,张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势 [J]. 烧结球团,2017,42(2):25 – 30;37.
XU Manxing,ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):25 – 30;37.

[6] 温春友,邵志勇. 基于数字图像处理的球团矿粒度检测 [J]. 烧结球团,2004,29(2):38 – 40.
WEN Chunyou,SHAO Zhiyong. A measuring method of pellets diameter based on digital image processing [J]. Sintering and Pelletizing,2004,29(2):38 – 40.

[7] 夏召红,谢元旦,马英海,等. 基于小波变换的球团矿粒度检测 [J]. 科技信息(科学教研),2007(35):101 – 102.
XIA Zhaohong,XIE Yuandan,MA Yinghai,et al. An online-measurement method of pellets diameter based on wavelet transform [J]. Science & Technology Information,2007(35):101 – 102.

[8] 孙星星,郑俊褒,曹志玲. 基于引导滤波与 LoG 算子的安检图像增强算法 [J]. 软件导刊,2020,19(8):226 – 229.
SUN Xingxing,ZHENG Junshuang,CAO Zhiling. Security image enhancement based on guided filter and Lo Goperator [J]. Software Guide,2020,19(8):226 – 229.

[9] 唐庆博,唐超,张恒浩. 一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法 [J]. 航空计算技术,2017,47(3):58 – 61.
TANG Qingbo,TANG Chao,ZHANG Henghao. An improved accurate circle detection method based on Hough transform [J]. Aeronautical Computing Technique,2017,47(3):58 – 61.

[10] 秦长泽,刘琼. 基于改进分水岭算法的球团矿图像分割 [J]. 武汉科技大学学报,2015,38(2):134 – 137.
QING Changze,LIU Qiong. Image segmentation of pellet ore based on improved watershed algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology,2015,38(2):134 – 137.

[11] 徐瑶. Qt 中基于 QCustomPlot 实现曲线绘制和显示的研究 [J]. 科技视界,2019,(25):54 – 55.
XU Yao. Qt based on QCustomPlot curve drawing and display research [J]. Science & Technology Vision,2019(25):54 – 55.

[12] AMMAR M K,JAGDISH C P. A novel enhanced cuckoo search algorithm for contrast enhancement of gray scale images [J]. Applied Soft Computing Journal,2019,85(12):105749.

[13] 崔远. 一种改进的 Hough 圆检测快速算法 [J]. 电子世界,2017(6):9 – 10.
CUI Yuan. An improved fast algorithm for Hough circle detection [J]. Electronics World,2017(6):9 – 10.

[14] 焦圣喜,肖德军,阚一凡. 霍夫变换算法在圆心视觉定位中的应用研究 [J]. 科学技术与工程,2013,13(14):4089 – 4093.
JIAO Shengxi,XIAO Dejun,KAN Yifan. Research on the application of hough transform algorithm in the visual localization of center of circle [J]. Science Technology and Engineering,2013,13(14):4089 – 4093.

(上接第81页)

[12] FORSMO S P E,HÄGGLUND A. Influence of the olivine additive fineness on the oxidation of magnetite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing,2003,70(1 – 4):109 – 122.

[13] WANG Y,ZHANG J,LIU Z. Mineralogical characteristics and isothermal oxidation kinetics of ironsand pellets [J]. Metals,2019,9(2):265.

[14] 李明. 首钢京唐球团矿降 FeO 含量的生产实践 [J]. 山东冶金,2015,37(4):6 – 7.
LI Ming. Practice of decreasing the FeO content in pellets in Shougang Jingtang [J]. Shandong Metallurgy,2015,37(4):6 – 7.

[15] 王宝海. 磁铁矿球团氧化非等温动力学 [C]//2010 年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会. 北京:中国金属学会,2010.
WANG Baohai. Study on thermal analysis kinetic of oxidation reaction of magnetite concentrate pellets [C]//2010 National Ironmaking Production Technology Conference and Annual Ironmaking Conference. Beijing: Chinese Society of Metals,2010.

[16] 李尉,付贵勤,储满生,等. 红格钒钛磁铁矿氧化物相转变及非等温氧化动力学 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(4):517 – 521.
LI Wei,FU Guiqin,CHU Mansheng,et al. Phase transformation and non-isothermal oxidation kinetics of Hongge vanadium-bearing titanomagnetit [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2017,38(4):517 – 521.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net