

图像识别技术在电解铝生产中的研究与应用

张立娟¹ 李东亮²

(1.平顶山工业职业技术学院机电工程学院; 2.河南科技大学机电工程学院)

摘 要 针对阳极钢爪表面黏附物测量难度较大这一问题,将黏附物的体积与阳极钢爪体积之比定义为阳极钢爪的黏附指数,并通过分析数学模型将阳极钢爪的黏附指数转化为与黏附物直径相关的物理量,通过分析常用的灰度图阈值分割方法的局限性,设计一种基于 RGB 三通道的阈值分割方法。算法处理结果对比表明,基于 RGB 三通道的阈值分割方法具有较分明的二值化处理效果。给出了图像采集系统的设计、图像处理流程以及系统软件编写流程,并利用编程平台完成视觉处理算法设计。试验结果表明,该方法可以准确测量阳极钢爪黏附指数。

关键词 阳极钢爪;黏附指数;单目视觉;图像识别;灰度图

中图分类号 TP391.41;TG146.21;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and Application of Image Recognition Technology in Electrolytic Aluminum Production

Zhang Lijuan¹, Li Dongliang²

(1.School of Mechatronics Engineering, Pingdingshan Polytechnic College;

2.School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology)

Abstract: Aiming at the practical problems that the surface adhesion of the anode steel claw is difficult to measure, the ratio of the volume of the adhered material to the volume of the anode steel jaw was defined as the adhesion index of the anode steel claw, which was then converted to the physical quantities related to the diameter of the adherents by analyzing the mathematical model. In order to explore the limitations of commonly used gray scale threshold segmentation methods, a three-channel threshold segmentation method based on RGB was designed. The comparison of algorithm processing results indicates that the method has a comparative advantage on clear binarization effect. The design of the image acquisition system, the image processing flow and the system software writing flow were provided, and the programming platform was adopted to complete the design of visual processing algorithm. The software verification results reveal that the method can measure the adhesion index of anode steel claws accurately.

Key Words: Anode Steel Claw, Adhesion Index, Monocular Vision, Image Identification, Grayscale

阳极钢爪在电解铝生产中十分重要^[1],其与铝导杆以及阳极炭块一同构成阳极组装机,是电解槽与阳极母线之间的连接组件,不仅要保证大容量的电流通过,还要起到支撑与连接铝导杆的作用。在铝电解的过程中,由于阳极钢爪长期处于高温电解质中,其表面会形成1~3 mm厚的铁锈,以及3~15 mm厚的坚硬的电解质层^[2],在阳极导杆再利用过程中,一般要对钢爪表层的电解质、铁锈等进行清理作业。根据相关研究表明^[3],表面附着大量电解质或者氧化铁等物质的阳极钢爪会在铝电解过程中一方面产生额外的电压降,增加电

解铝的耗电量,另一方面由于阳极炭块与钢爪是通过浇注的磷铁相连接,其表面附着物将显著降低磷铁的附着

力。
在实际的电解铝生产过程中^[4~6],阳极钢爪的清理作业存在难度大、耗时长、效率低等问题,若要求阳极钢爪表面附着物量过低时,将面临巨大的阳极钢爪清理工作量,导致生产成本大幅提高,以及生产效率大幅下降。引入阳极钢爪黏附指数,定义为阳极钢爪表面黏附物的体积与阳极钢爪体积之比。为保证企业的生产任务以及控制生产成本,综合考虑阳极钢爪表面附着物对电压

收稿日期:2021-04-02;修改稿收到日期:2021-05-06
第一作者简介:张立娟,女,1978 出生,副教授,河南平顶山(467000),E-mail:9428532@qq.com
引用格式:张立娟,李东亮. 图像识别技术在电解铝生产中的研究与应用[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):968-973.
ZHANG L J, LI D L. Research and application of image recognition technology in electrolytic aluminum production[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):968-973.

降、磷铁与钢爪结合力以及阳极钢爪清理作业难度的影响,当将阳极钢爪黏附指数设定为适当值时,可以适当增加电能的消耗,从而大幅降低阳极钢爪的清理工作。

目前,阳极钢爪的黏附指数的测定,大多依靠经验估算,不能保证黏附指数的测量精度^[7]。机器视觉检测是一种非接触测量方式,通过选用高精度图像采集系统和采用亚像素级定位算法,机器视觉检测技术可以达到较高的检测精度。本课题采用分析数学模型将阳极钢爪的黏附指数转化为与黏附物直径相关的物理量,分析常用的灰度图阈值分割方法的局限性,设计一种基于RGB三通道的阈值分割方法,通过机器视觉的检测方法对阳极钢爪的黏附指数进行测量。

因图像采集设备受到电磁噪音、光环境的影响而产生干扰噪音,影响后续目标轮廓的提取精度,所以在对采集图像进行分析之前一般要去噪处理。由于本课题主要介绍一种测量阳极钢爪黏附指数的图像算法,故对于比较成熟的图像去噪预处理算法不做详述。

1 图像识别采集系统搭建

通过图像采集系统完成对阳极钢爪的图像采集,然后通过图像处理算法分区域计算出独立阳极钢爪的黏附指数。将表面已清理干净阳极钢爪的黏附指数 S^* 设定为0,并将此时阳极钢爪的体积 V^* 设定为初始体积,然后将测量得到的表面未清理干净的阳极钢爪的体积 V_i 与 V^* 相结合求出该阳极钢爪的黏附指数 S_i ,将符合要求的表面黏附物最多的阳极钢爪的黏附指数设定为黏附指数阈值 S_K ,那么所有黏附指数小于 S_K 的

阳极钢爪均不必清理即可再次使用,黏附指数大于 S_K 的阳极钢爪则必须经过清理后再进行换极作业。

图1为阳极钢爪的图像采集系统,采用直角坐标系。在实际工作中,钢爪因为直接接触粘稠物,可能会导致粘稠物附着在钢爪表面,使钢爪直径变大,影响钢爪的正常工作,所以在图像中为4个钢爪划分4个检测区域,分别测量4个阳极钢爪的黏附指数。

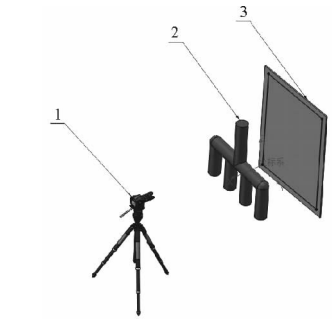


图1 图像采集系统的位置
Fig.1 Position of the image acquisition system
1.CCD相机 2.待测钢爪 3.绿色背景板

2 采集图像的处理与信息提取

2.1 ROI的选定

机器视觉图像处理过程中,从被处理的图像中以几何形状的方式勾勒出需要处理的研究区域,称为感兴趣区域,缩写为ROI(region of interest)^[8]。ROI技术可以忽略不需要处理的图像,大大提高图像处理效率。

在图像中,每一个像素的数学表达为 $[R,G,B]_{ij}$,整个图像的数学表达为:

$$K = \begin{bmatrix} [R,G,B] & \cdots & \cdots & \cdots & [R,G,B] \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [R,G,B] & \cdots & \cdots & \cdots & [R,G,B] \end{bmatrix}_{m \times n}$$

ROI技术选区的数学表达为:

$$K_{ROI} = \begin{bmatrix} [R,G,B] & \cdots & \cdots & \cdots & [R,G,B] \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & [R,G,B] & [R,G,B] & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [R,G,B] & \cdots & \cdots & \cdots & [R,G,B] \end{bmatrix}_{p \times l};$$

$$\begin{aligned} K_{ROI} &\in K; \\ p &\leq m; \\ l &\leq n; \end{aligned}$$

通过CCD相机采集到阳极钢爪的图像,利用ROI

技术分别选定图2中A~D 4个研究区域。通过对这4个区域的图像进行处理,将得到阳极钢爪4个钢爪头的黏附指数分别为 S_A, S_B, S_C, S_D 。因为这4个研究区域的处理方法相同,故只就其中一个区域的处理方法进

行阐述。

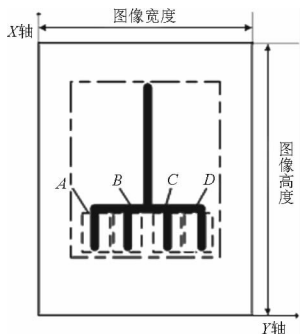


图 2 ROI 技术选定 4 个不同研究区域

Fig.2 Research areas(A, B, C, and D) selected by ROI technology

2.2 阈值选定及二值化处理

在机器视觉的处理过程中,往往需要将目标物体与背景板分割出来,从而分析目标物体的特有信息。对于背景与目标物体色域差异较大的情况时,为提高图像处理算法的效率,往往对采集图像以灰度图像的格式进行处理^[9],一般利用自适应阈值分割法 OSTU 对灰度图像进行二值化处理,当背景板与目标物体的色域差异较大时,该方法可以取得非常理想的效果。但在实际操作的过程中,发现若要保证背景板与目标物体色域的绝对差异,则需要比较高的硬件支持,且由于被测物体相互之间存在差异,也很难适用于大批量的机器视觉测量工作^[10]。

2.3 基于灰度图的阈值分割

灰度图中任意一点的像素值都介于 $[0 \sim 255]$ 之间,在对灰度图进行二值化处理时,需要选定一个合适的阈值将目标物体与背景分离,在图像处理过程中比较常用的是 OSTU 阈值分割法。

OSTU 阈值分割法在数学上被称为最大类间方差法,该图像处理算法是在灰度直方图的基础上利用最小二乘法推导出来的,可以达到图像的目标与背景的较理想分割。

将图像 $I_{M \times N}$ 在位置 (x, y) 处的灰度值设为 $f(x, y)$,假设图像灰度级为 L ,则 $f(x, y) \in [0, L-1]$ 。如果图像中灰度级 i 的所有像素个数为 f_i ,那么第 i 级灰度所占的比例为:

$$p(i) = \frac{f_i}{M \times N} \quad (1)$$

式中, $i = 0, 1, \dots, L-1$, 并且 $\sum_{i=0}^{L-1} p(i) = 1$ 。

用阈值 t 将图像中的所有像素按灰度级划分为两类,即背景 C_0 和目标物体 C_1 。背景 C_0 的灰度值范围为 $0 \sim t-1$, 目标物体 C_1 的灰度值范围为 $t \sim L-1$ 。背景

C_0 和目标物体 C_1 对应的像素值分别为: $\{f(x, y) < t\}$ 和 $\{f(x, y) \geq t\}$ 。

背景 C_0 部分像素个数所占比例为:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t-1} p(i) \quad (2)$$

目标 C_1 部分像素个数所占比例为:

$$\omega_1 = \sum_{i=t}^{L-1} p(i) \quad (3)$$

其中, $\omega_0 + \omega_1 = 1$, 图像中背景 C_0 部分的平均灰度值为:

$$\mu_0(t) = \sum_{i=0}^{t-1} i \times \frac{p(i)}{\omega_0} \quad (4)$$

图像中目标 C_1 部分的平均灰度值为:

$$\mu_1(t) = \sum_{i=t}^{L-1} i \times \frac{p(i)}{\omega_1} \quad (5)$$

图像的总平均灰度值为:

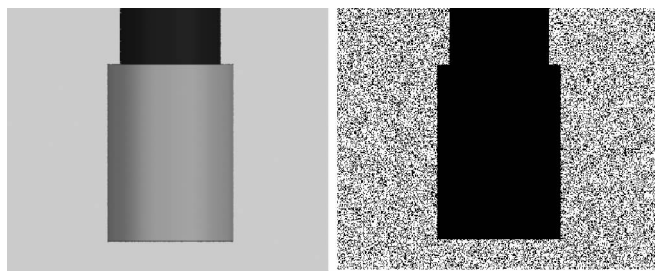
$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} i \times p(i) \quad (6)$$

所以,图像中背景和目標物体的类间方差为:

$$\delta^2(k) = \omega_0 (\mu - \mu_0)^2 + \omega_1 (\mu - \mu_1)^2 \quad (7)$$

令 k 的取值从 $0 \sim L-1$ 变化,对比不同 k 值下的类间方差,当 $\delta^2(k)$ 最大时所对应的 k 值就是最佳阈值。

经过 OSTU 阈值分割法选出的阈值对高速相机采集的原始钢丝绳图像进行二值化,前后对比效果见图 3。



(a) 灰度图 (b) 经 OSTU 阈值分割后

图 3 经过 OSTU 阈值分割前后对比图

Fig.3 Comparison diagram before and after OSTU threshold segmentation

2.4 基于 RGB 三通道的阈值分割

由于灰度图像的阈值分割方法对测量环境和测量对象的要求比较严格,所以本课题将采用 RGB 图像的格式进行图像算法的设计,并设计一种基于 RGB 三通道的阈值选定方法。

图 4 为通过图像采集系统得到的 RGB 图像的示意图,图中每一个像素点均含有 R、G、B 3 个通道的像素值,且 3 个通道的像素值区间均为 $[0 \sim 255]$, $b(i, j)$ 为

RGB 图像中的像素点, i 为图像的行坐标, j 为图像的列坐标, $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$ 分别为该点的红色、绿色、蓝色通道的分量, 其中绿色背景板上的像素点可以确定为:

$$\begin{cases} R(i, j) = 0 \\ G(i, j) = 255 \\ B(i, j) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

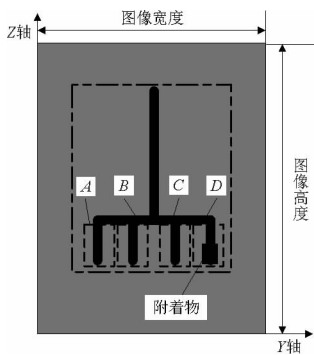


图 4 钢爪附着物示意图

Fig.4 Schematic diagram of steel claw attachment

定义一个 $m \times n$ 的矩阵 A , m 为研究区域的高度 (单位为像素), n 为研究区域的宽度 (单位为像素), $a_{(i, j)}$ 为矩阵 A 中的元素:

$$K = \begin{cases} a_{(i, j)} = 0, R(i, j) = 0 \wedge G(i, j) = 255 \wedge B(i, j) = 0 \\ a_{(i, j)} = 1, -(R(i, j) = 0 \wedge G(i, j) = 255 \wedge B(i, j) = 0) \end{cases} \quad (9)$$

二值化处理见图 5, 矩阵 A 转化为:

$$K_{ROI} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}_{m \times n}$$

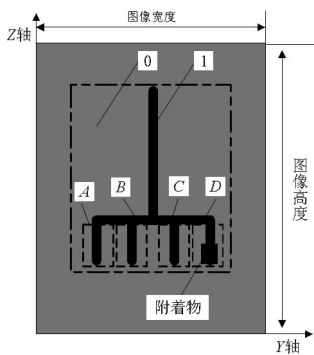
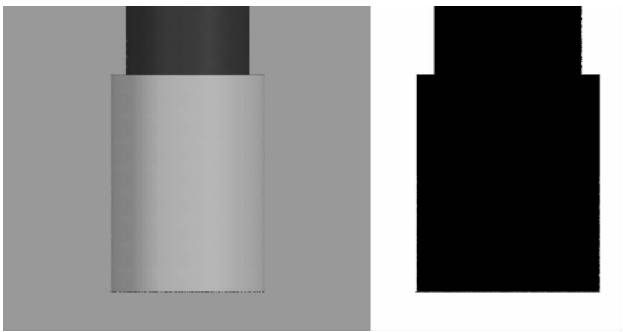


图 5 图像二值化

Fig.5 Image binarization

并根据基于 RGB 三通道的阈值进行二值化处理前后对比效果见图 6。



(a) 钢爪爪头 (b) 二值化处理后的钢爪爪头

图 6 RGB 阈值分割前后对比图

Fig.6 Comparison diagram before and after RGB threshold segmentation

2.5 阳极钢爪黏附指数的计算方法

阳极钢爪的黏附指数是判定其表面附着物含量重要参数, 本课题将通过图像计算阳极钢爪的黏附指数。

表面清理前后的阳极钢爪图像示意图见图 7 和图 8, 假设干净的钢爪头的体积为 V_1 , 直径为 d_1 , 长度为 L , 表面有黏附物的阳极钢爪图像示意图见图 8, 假设表面有黏附物的钢爪头的体积为 V_2 , 直径为 d_2 , 长度为 L , 那么表面有黏附物的阳极钢爪头的黏附系数。

$$\begin{aligned} S &= (V_2 - V_1) / V_1 \\ V_1 &= (\pi \times d_1^2) \times L / 4 \\ V_2 &= (\pi \times d_2^2) \times L / 4 \end{aligned} \quad (10)$$

因此

$$S = (d_2^2 - d_1^2) / d_1^2 \quad (11)$$

因此通过测量干净的钢爪头的直径 d_1 和表面有黏附物的钢爪头的直径 d_2 来间接推导出其黏附系数 S 。

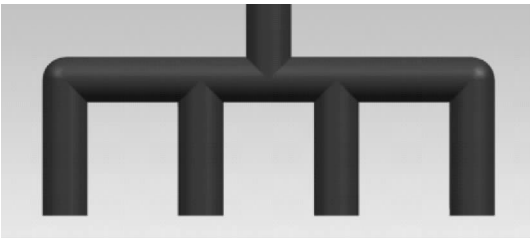


图 7 表面已清理干净的阳极钢爪示意图

Fig.7 Schematic diagram of the anode steel claws with cleaned surfaces

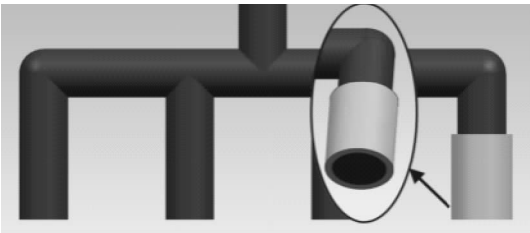


图 8 表面有黏附物的阳极钢爪示意图

Fig.8 Schematic diagram of the anode steel claw with adhesion on the surface

3 阳极钢爪黏附指数的图像测量方法

以某阳极钢爪爪头直径为例进行阐述阳极钢爪爪头直径的图像测量方法。利用 ROI 技术对相机采集到的阳极钢爪图像进行区域提取后的钢爪爪头并根据基于 RGB 三通道的阈值进行二值化处理后的图像见图 9。

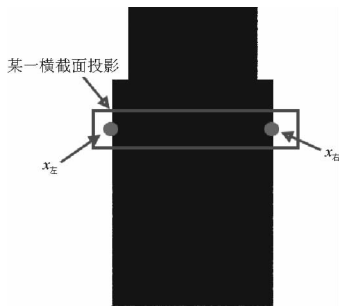


图 9 二值化处理后的钢爪爪头图像

Fig.9 Image of steel claw head after binarization

3.1 钢爪附着物轮廓线横坐标提取

利用基于 RGB 三通道的阈值进行二值化处理得到的与 ROI 所选取的钢爪爪头图像相对应的相同维度的 01 矩阵 A , 行数为 m , 列数为 n 。01 矩阵 A 中的每一行像素都作为阳极钢爪的一个横截面投影, 根据以下方法求出每一行数值的左侧轮廓的横坐标。

$$x_{\text{左}} = j, b(i, j-1) = 0 \wedge b(i, j) = 1 \quad (12)$$

那么左轮廓线的横坐标为 $x_{\text{左}}$ 。同理

$$x_{\text{右}} = j, b(i, j) = 1 \wedge b(i, j+1) = 0 \quad (13)$$

那么右轮廓线的横坐标为 $x_{\text{右}}$ 。则该截面阳极钢爪的直径为:

$$d = (x_{\text{右}} - x_{\text{左}}) / \lambda \quad (14)$$

式中, λ 为图像与实际距离的比例因子。

首先测定干净的阳极钢爪的直径 d_1 , 并根据测量未清理的阳极钢爪得到的直径 d_2 , 代入式(11)即可求解出某一横截面阳极钢爪的黏附系数。

3.2 算法验证软件设计与图像处理算法验证

通过编写图像检测的软件验证该图像处理算法的准确性, 阳极钢爪黏附指数的图像测量软件处理流程图 10。

图像处理算法验证步骤为。

第 1 步: 首先加载 1 张已清理干净的阳极钢爪的图片, 在界面下放的状态栏中显示图像的高度和宽度信息, 并利用基于 RGB 三通道选定的阈值进行二值化处理, 然后根据边缘检测算法检测出左右极点的横坐标, 同时计算出第 200 行图像矩阵对应的阳极钢爪的直径为 143(像素), 见图 11。

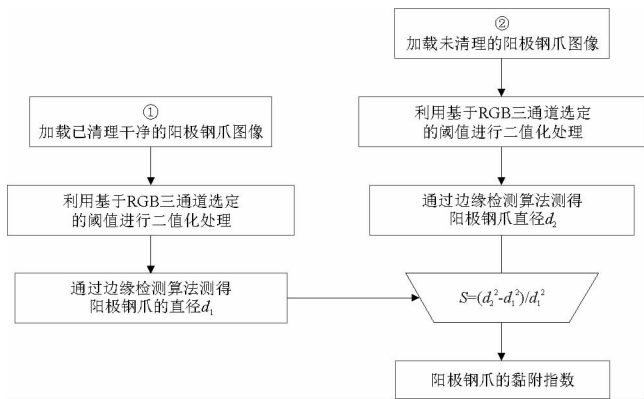


图 10 软件编写流程图

Fig.10 Flow chart of software writing

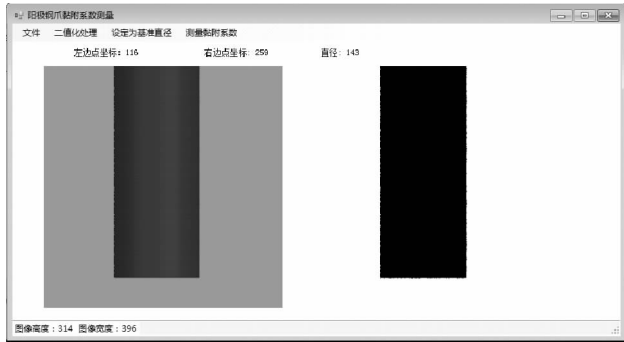


图 11 设定基准直径

Fig.11 The reference diameter setting

第 2 步: 将第 1 步测量得到的干净的阳极钢爪的直径设定为基准直径, 并在界面下方的状态栏中显示 (见图 12), 然后加载一张未清理的阳极钢爪的图像, 利用与第一步同样的图像处理方法测量出第 200 行图像矩阵对应的阳极钢爪的直径为 179(像素), 并通过阳极钢爪黏附指数的数学模型计算出阳极钢爪的黏附指数为 0.566。

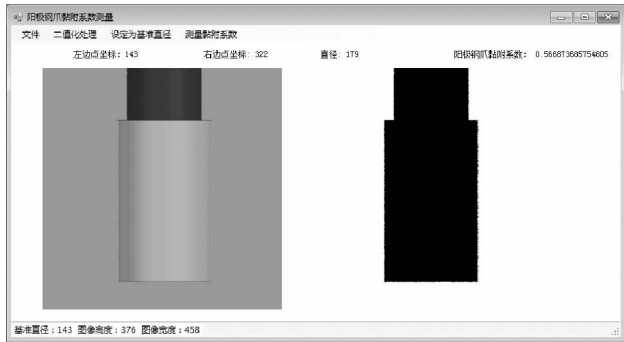


图 12 测量钢爪黏附指数

Fig.12 Measurement of steel claw adhesion index

4 异形阳极钢爪黏附指数的计算方法

针对异形阳极钢爪的黏附指数的计算可以在二值化处理后的钢爪爪头图像中, 多次使用 ROI 技术选取 n 个截面, 分别计算出 n 个截面所对应的黏附指数 S_i ,

那么异形钢爪的黏附指数 S 等于 n 个截面的平均黏附指数。即：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (15)$$

图 13 为二值化处理后的异形钢爪爪头示意图,在二值化处理后的异形钢爪爪头图像中选取 7 个截面,分别计算 7 个截面多对应的黏附指数,即 $S_1、S_2 \cdots S_7$,那么异形钢爪的黏附指数:

$$S \approx \frac{S1 + S2 + \cdots + S7}{7} \quad (16)$$

异形钢爪黏附指数数的测量精度受二值化后选取的截面数量的影响,可以通过增加截面数量的方式来提高异形钢爪黏附指数的计算精度。

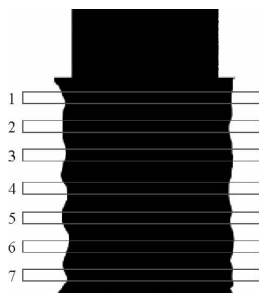


图 13 二值化处理后的异形钢爪爪头示意图
Fig.13 Image of special shaped steel claw head after binarization

5 结 论

针对阳极钢爪黏附指数测量难度较大这一问题,提出一种基于机器视觉技术的非接触式阳极钢爪黏附指数测量方法,从软件算法验证的结果可以表明,基于

RGB 三通道的阈值可以有效地解决普通灰度图中二值化易出现的目标物体与背景分割不完全的问题,且根据所设计的图像处理算法可以准确计算出阳极钢爪任意截面的黏附指数。针对异形阳极钢爪,通过 ROI 技术在单个阳极钢爪图像中选取多个横截面,并分别计算出各横截面所对应的黏附指数,然后计算所有横截面所对应的黏附指数的平均值即为异形阳极钢爪的黏附指数。

参 考 文 献

- [1] 姜海涛,周平,汤昌廷.阳极钢爪保护环在铝电解生产中的应用与研究进展[J].轻金属, 2016(1): 34-38.
- [2] 李东, 谢刚, 姚云,等. 铝工业阳极钢爪腐蚀机理及其防腐[J]. 轻金属, 2014(2): 34-40.
- [3] 傅长宏, 周剑飞. 阳极铸钢爪截面与槽电压关系的研究[J]. 轻金属, 2012(9): 33-36.
- [4] 史生文, 张维民. 预焙铝电解槽阳极钢爪自焙保护环优化技术[J]. 轻金属, 2005(9): 39-41.
- [5] 赵红军. 预焙阳极炭块相邻碗孔之间开槽技术节能降耗的作用[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(1):92-94.
- [6] 王希靖, 李经纬, 张昌青,等. 电解铝阳极导杆铝-钢相位摩擦焊工艺及力学性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 83-86.
- [7] 刘韶军, 王库. 基于机器视觉的棉种破损检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 186-189.
- [8] 陈居现, 高昆, 邵晓光,等. 基于人眼视觉注意和图像聚类分析的 ROI 提取方法[J]. 光学技术, 2015, 41(5): 400-403.
- [9] 孙力. 基于 ROI 与自适应 Ostu 相结合的图像分割算法[J]. 现代电子技术, 2011, 34(6): 1-3.
- [10] QIN Q D. Study on the thermal field distribution of steel claws for anode in aluminium electrolysis cell[A]. 2nd International Conference on Materials Science and Engineering Technology (MSET 2015) [C]. Trans. Tech. Publications, Engineering and Industry Technology, 2015.

(编辑:栗万仲)

青岛科大可充镁金属电池领域取得系列进展

近来,青岛科技大学化学学院副教授周新红团队在镁金属负极表面成功设计并构筑了一种铋基人工界面保护层,该保护层不仅有效抑制了常用镁电解液体系在镁金属负极上有害的分解反应,而且促进了均匀的镁沉积行为,抑制电池内短路的发生。更为重要的是,改性后镁金属负极匹配各种转化型正极后的全电池性能都表现优异,证明了该保护层的实用化价值。

除了上述最新成果,近年来,周新红团队及其合作者们在高性能及高安全的可充镁电池研究方向上做了大量系统深入的前瞻性研究,尤其在新型镁电解质体系开发和镁金属负极界面改性两大方向都取得了重要的阶段性进展,得到了国际同行的高度认可。

在新型镁电解质体系方面:周新红团队及其合作者创新性地提出了硼基大阴离子镁盐的设计理念,并以此为指导,合成得到一系列具有高离子电导率、非亲核性和宽电化学窗口等优异性能的镁电解液体系。同时,基于团队自己开发的硼基镁电解液,构建了高能量密度的镁-硫、镁-硒电池体系,实现了高倍率、长循环的优异电池性能。此外,研究人员通过硼氢化镁与聚四氢呋喃端羟基的原位交联反应,在玻璃纤维骨架上构建了一种能够可逆地沉积溶解镁的凝胶聚合物电解质体系。该凝胶电解质不仅能在宽温区(−20~60 ℃)内正常工作,并且展现出优异的安全性能。

在镁金属负极界面研究方面,周新红团队首次发现一种纯锂盐电解液体系能直接用作导镁电解液,并首次证实了,在电化学循环过程中,伴随着部分锂盐的分解,镁金属负极表面原位形成了稳定的导镁固体电解质界面相,引起研究人员们的广泛关注。另外,基于铝中心阴离子镁盐设计,通过阴离子-溶剂配位作用来调控分子轨道能级,成功构建了稳定的导镁固体电解质界面相,极大地提高了电池的可逆性以及长循环稳定性。

(摘自中国有色网)