

基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化

张 焱 南君芳 孙 朋 李伟鹏 闫帅康

(三门峡市国投金城冶金有限责任公司, 河南 三门峡 472500)

[摘 要] 铜电解精炼过程中, 电解液温度、电解液循环速度、添加剂用量、电流密度等参数是决定铜品质的关键工艺参数, 然而这些参数的控制都根据人工经验来判断, 缺乏一定的合理性。本文提出使用人工大猩猩部队优化算法来对电解精炼过程中的控制参数进行优化, 以期获得最优的参数配比。实验表明, 采用通过人工大猩猩部队优化算法得到的最优参数配比, 阴极铜品质显著提高, 且电能消耗降低了 6.173%。基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化模型可以精准地对铜电解工艺因素进行调控, 克服了人为经验控制的主观性和不能保证达到最优的缺点。

[关键词] 电解精炼; 优化算法; 温度; 添加剂; 电流密度

[中图分类号] TQ153.14 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2024)03-0071-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.012

0 前言

铜作为基础金属材料, 在各个领域的应用广泛且重要。随着科技的快速发展, 对铜等基础金属材料的需求日益增长, 对其品质的要求也不断提高。这些客观因素推动了铜电解精炼工艺的不断优化和改进。铜电解精炼是获取阴极铜的主要过程^[1]。但是阴极铜的品质受到多方面因素的影响, 如电解液铜含量、电解液温度、电解液循环量、电流密度等^[2], 不同的因素又相互制约。因此, 如何精准地调控各种影响因素是提高阴极铜品质的关键环节。

优化算法凭借其简单且容易实现的特点, 广泛应用于各种复杂问题的优化中。优化算法将被优化问题看作黑盒^[3], 专注于输入和输出, 不考虑所有优化问题的结构知识。这使得优化算法能够有效解决那些由于缺乏导数或其他相关信息而无法使用确

定性方法解决的问题。张加云等^[4]建立基于遗传算法的精炼微碳铬铁能耗系统优化模型, 对钢铁冶炼过程中的生产参数进行优化, 使单位电耗达到最低, 为企业提供优化策略。姚伟鹏^[5]针对冶金系统电气组的 PID 控制问题, 通过分析 PID 控制参数存在的不足, 采用粒子群算法求解, 达到非线性冶金电气稳压控制系统的稳定运行。唐庆利等^[6]针对配料过程中的各种约束条件, 使用遗传算法中的惩罚函数进行分级处理, 使得配料求解更加符合烧结生产的要求, 实现烧结配料的智能化。程思凡等^[7]针对气化炉这一多变量、大滞后、非线性和强耦合系统设计了一种自适应 PID 控制算法, 通过在线辨识参数, 确定系统模型, 再以自适应遗传算法寻优出合适的 PID 参数值, 改善了控制效果, 提高了气化炉的安全性及稳定性。综上所述, 目前已有众多学者研究优化算法与冶金工艺的结合。因此, 本文使用大猩猩优化算法对电解精炼过程中的控制参数进行优化, 以期获得最优的参数配比。

1 铜电解精炼的影响因素

铜电解是一种电化学过程, 旨在通过电解精炼方法将铜含量 99% 的粗铜提纯为阴极铜。这一过程中, 以厚板粗铜作为阳极, 以薄片纯铜作为阴极, 使用的电解液为硫酸和硫酸铜的混合溶液。电解过程开始后, 粗铜阳极溶解成 Cu^{2+} , 并在电场的作用下向阴极迁移。在阴极处, 铜离子获得电子并被还原成纯铜, 这一过程也被称为电解铜的沉积。与此

[收稿日期] 2023-12-24

[作者简介] 张焱(1985—), 男, 河南三门峡人, 主要从事湿法冶金技术研究。

[引用格式] 张焱, 南君芳, 孙朋, 等. 基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(2): 71-75, 82.

ZHANG Ye, NAN Junfang, SUN Peng, et al. Optimization of copper electrolysis process based on artificial gorilla troops optimizer[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 71-75, 82.

同时,粗铜中的杂质,如铁和锌等,也会以离子形式溶解出来(如 Zn^{2+} 和 Fe^{2+})。由于这些杂质离子的析出电位较 Cu^{2+} 高,通过适当调节电位差,可以防止它们在阴极上析出,从而保证阴极铜的纯度。

影响铜电解过程槽电压的因素包括电流密度、硫酸铜浓度、极距、添加剂量、杂质含量和电解液温度等。这些因素的微小变化不仅直接影响电解过程中的能源消耗,还深刻影响最终铜电解产品的质量。为了提高产品质量的同时降低生产成本,需要调整铜电解过程中的各项工艺参数。结合企业实际生产情况,电解液温度、电解液循环速度、添加剂量和电流密度是影响能源消耗的可控因素。因此,建立铜电解过程的能源消耗数学模型,科学控制这些参数,实现电解工艺条件的优化,既可以减少能源消耗,又能提升铜电解产品的品质。然而,目前铜电解生产工艺参数主要依靠经验确定,并且各参数之间存在强耦合和非线性关系,难以准确建立能源消耗的数学模型。因此,本文提出使用大猩猩优化算法来优化电解精炼过程中的控制参数,以期获得最优的参数配比。

1.1 电解液温度

提高电解液温度对电解过程有着重要的影响。首先,有助于降低电解液的黏度,使阳极泥更容易沉淀,同时提高各种离子的扩散速率,从而增强电解液的导电性,降低电解槽的电压降,最终降低铜电解生产的电能消耗。其次,提高电解液温度还有助于消除阴极附近铜离子贫化的问题,确保铜在阴极上均匀析出,同时减少杂质在阴极上放电的可能性。然而,需要注意的是,过高的电解液温度可能会加速添加剂的分解,导致电解液中铜离子浓度升高,蒸发损失增加,并可能引发车间条件的恶化。因此,在提高电解液温度时,必须综合考虑各种因素,确保在优化铜电解生产的同时,不会引发其他问题或增加额外的能源消耗。

1.2 电解液循环速度

在铜电解过程中,电解液必须保持持续循环,以确保电解槽内的电解液温度和浓度均匀分布。在电解槽内不同深度,铜离子的浓度存在差异,最大差异可达 10 g/L 。在同一深度,阴极和阳极附近铜离子浓度也不同,这种差异随电流密度增加而增大,随电解液循环速度增加而减小。因此,保持较高的循环速度有利于减小浓差极化,降低电解槽的电压。然而,若电解液循环速度过快,则不利于阳极泥的沉

降,可能增加贵金属的损失,并有时会导致阴极质量下降,产生大量长粒子。因此,在电解液循环过程中,要选择合适的电解液循环速度,在保证消除阴极附近铜离子过度贫化的基础上,保持电解液的清透明亮,防止溶液出现浑浊。电解液循环速度的选择,主要取决于电流密度,电流密度越大,要求的循环速度越大。

1.3 添加剂用量

添加剂可以调节阴极铜表面的平滑度,有效地减少粒子铜的生成。目前,国内主要使用的添加剂有骨胶、干酪素、盐酸、硫脲等。相关研究^[8]表明添加剂对阴极板的极化有较大的影响,适量的添加剂能够引起阴极的高度极化。当添加剂过量时,电解铜表面会形成堆积的六面体闪星结晶,这些结晶相对粗糙,表面的电铜颗粒坚硬而有韧性,不容易脱落,而添加剂不足时,就会失去对粒子铜生成的抑制作用,电铜较为柔软,轻敲薄阴极时会发出空洞的“扑扑”声,阴极表面也会较为粗糙。因此,精确确定添加剂的用量可以有效地调整阴极铜生成的结晶形状。

1.4 电流密度

电流密度通常指阴极电流密度,即单位阴极板面积上通过的电流强度。提高电流密度会导致阴极、阳极电位差增大,同时增大电解液的电压降、接触点和导体上的电压损失,从而提高槽电压和电解的直流电耗。

随着电流密度的提高,阴极附近电解液中含铜浓度贫化程度加剧。为了减小阴极附近的浓差极化,需增大电解液的循环速度,这会导致电解液中阳极泥的沉降速度减小,从而增加电解液中阳极泥的悬浮程度,而且在高电流密度下,促使阳极不均匀溶解及阴极不均匀沉积的因素会得到加强,所产阴极表面比较粗糙。这两个因素的作用导致阳极泥机械粘附于阴极的可能性增加。因此,在高电流密度下,必须相应地调整添加剂的使用情况,或使用更有效的新添加剂,提高电解液的温度,以保证阴极铜的质量。

综上所述,在阳极板电解精炼铜的过程中,电解液温度、电解液循环速度、添加剂用量和电流密度等因素对阴极铜的品质有着较大的影响,且这些因素之间又相互制约、互相影响。

2 人工大猩猩部队优化算法

群智能优化算法具有参数简少、易于实施、无需

梯度信息等优势。通过模拟自然界中动植物的求偶、觅食等行为,这些算法能够在合理的时间内,在复杂的约束条件下找到问题的最佳解决方案。其中,人工大猩猩部队优化算法(Artificial Gorilla Troops Optimizer, GTO)是由 Abdollahzadeh 等^[9]于2021年提出的一种新型元启发式优化算法。GTO算法是根据大猩猩的集体生活方式和社交方式提出的一种群智能优化算法。大猩猩生活在一个称为“部队”的群体中,由成年雄性或银背大猩猩群体和几只成年雌性大猩猩及其后代组成,银背大猩猩是群体的核心,负责做出所有决定,调解战斗,确定群体行动,指导其他大猩猩寻找食物来源,并为群体的安全福祉负责。在GTO算法中,五种不同的算子用于模拟大猩猩的群体行为,主要分为两个阶段:探索阶段和开发阶段。探索阶段采用了三种不同的机制,即迁移到未知位置、迁移到其他大猩猩位置以及迁移到已知位置;开发阶段包括跟随银背大猩猩和竞争成年雌性大猩猩两种社会行为。

在探索阶段,大猩猩的位置更新方式见式(1)~(3)。

$$GX(t+1) = (ub - lb) \times r_1 + lbrand < s \quad (1)$$

$$GX(t+1) = (r_2 - C)X_r(t) + L \times Hrand \geq 0.5 \quad (2)$$

$$GX(t+1) = X(t) - L \times (L \times (X(t) - GX_r(t)) + r_3 \times (X(t) - GX_r(t)))rand < 0.5 \quad (3)$$

式中: $GX(t+1)$ 代表下一次迭代中大猩猩的候选位置, $X(t)$ 是大猩猩的当前位置;其中, r_1 、 r_2 、 r_3 和 $rand$ 是取值为(0,1)的随机值; s 为算法的超参数,通常设定为0.03,该参数决定了大猩猩迁移到未知位置的概率; ub 和 lb 分别代表变量的上限和下限; X_r 和 GX_r 是从种群中随机选择的大猩猩个体位置。 C 、 L 、 H 分别用公式(4)、(5)、(6)表示。

$$C = [\cos(2 \times r_4) + 1] \times \left(1 - \frac{It}{MaxIt}\right) \quad (4)$$

$$L = C \times l \quad (5)$$

$$H = Z \times X(t) \quad (6)$$

式中: It 表示当前迭代次数, $MaxIt$ 表示总迭代次数; r_4 是一个取值为(0,1)之间的随机数; l 是一个取值在(-1,1)之间的随机数; Z 是问题维度中取值范围在 $[-C, C]$ 内的随机数。

在开发阶段,大猩猩选择跟随银背大猩猩的机制,其行为如式(7)所示。

$$GX(t+1) = L \times M \times (X(t) - X_{silverback}) + X(t) \quad (7)$$

$$M = \left(\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GX_i(t) \right|^g \right)^{\frac{1}{g}} \quad (8)$$

$$g = 2^L \quad (9)$$

式(7)中, $X_{silverback}$ 是银背大猩猩(最佳解)的位置; M 由式(8)表示;式(8)中, $GX_i(t)$ 表示第 i 个候选大猩猩在第 t 次迭代时的位置, N 代表大猩猩的总数, g 由式(9)表示。

大猩猩在开发阶段选择竞争成年雌性大猩猩机制,其行为如式(10)所示。

$$GX(t+1) = X_{silverback} - (X_{silverback} \times Q - X(t) \times Q) \times A \quad (10)$$

$$Q = 2 \times r_5 - 1 \quad (11)$$

$$A = \beta \times E \quad (12)$$

$$E = \begin{cases} N_1, & rand \geq 0.5 \\ N_2, & rand < 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式(10)中, Q 用于模拟冲击力,其表示方式如式(11)所示, A 表示冲突中暴力程度的系数,其表达式见式(12);在式(11)中, r_5 是一个取值在(0,1)之间的随机数;式(12)中, β 是优化操作前给定的参数值; E 用于模拟暴力对解的维度的影响,其表达式如式(13)所示,如果 $rand \geq 0.5$, E 将等于正态分布和问题维度中的随机值;反之, E 将等于正态分布中的随机值。

3 人工大猩猩部队算法优化铜电解工艺

本文提出基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化模型,找到最佳控制参数,避免人为主观经验的影响。本文将黑猩猩的个体位置设为各权重的取值范围; $x_i = [p, i, d]$ 为第 i 只大猩猩的位置。之后在控制稳定的基础上,通过罚函数法^[10]构造一个新的目标函数来对控制波动进行惩罚,惩罚函数如公式(14)所示。

$$F_{new} = fobj(x) + \xi \sum_{i=1}^n \Phi(g_i(x)) \quad (14)$$

$$\text{其中, } \Phi(g_i(x)) = \begin{cases} |g_i(x)|, & g_i(x) \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $fobj(x)$ 为影响因素的控制效果; $g_1(x)$ 为电解液温度; $g_2(x)$ 为电解液循环速度; $g_3(x)$ 为添加剂用量; $g_4(x)$ 为电流密度,且 $58 < g_1(x) < 65$ °C; $25 < g_2(x) < 30$ L/min; $30 < g_3(x) < 70$ mg/L; $20\ 000 < g_4(x) < 30\ 000$ A/m²。

由式(14)可知,目标函数值越小,改进参数的效果越好。由此,本文要寻找目标函数的最小值,其

过程算法如下:

1. 输入 $s = 0.03, w = 0.8, \beta = 3$
2. 构造目标函数 $F_{new} = fobj(x) + \xi \sum_{i=1}^n \Phi(g_i(x))$
3. 初始化黑猩猩种群位置 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]$
4. while($t < T$)
5. 计算所有黑猩猩的适应度 F_{new} , 并设置适应度值最好的大猩猩为银背大猩猩 $x_{silverback}$
6. if $rand < p$
7. $Gx_{t+1} = (ub - lb) \times r_1 + lb$
8. else if $rand > 0.5$
9. $Gx_{t+1} = (r_2 - C) \times x_{tr} + L \times H$
10. else
11. $Gx_{t+1} = x_t - L \times (L \times (x_t - x_{tr} + r_3 \times (x_t - x_{tr})))$
12. end if
- //开发阶段
13. if $C \geq W$
14. $Gx_{t+1} = L \times M \times (x_t - X_{silverback}) + x_t$
15. else
16. $Gx_{t+1} = x_{silverback} - (x_{silverback} \times Q - x_t \times Q) \times A$
17. end if
18. end while
19. 输出 $x_{silverback}$
20. 使用 $x_{silverback}$ 作为最佳权重对比对铜电解过程中的影响因素进行控制。

算法流程如图 1 所示。

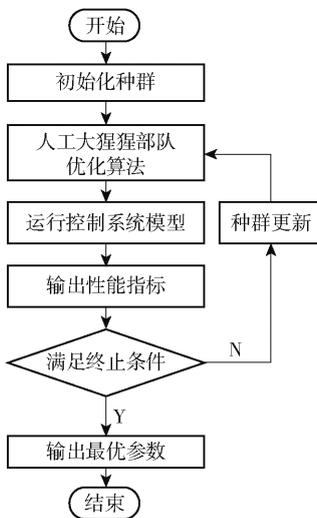


图 1 算法流程图

4 试验

本文基于 intel(R) Core(TM) i5-10400f、CPU

2.90 GHz、16 GB 内存以及 Windows 11 (64 位) 的操作系统,对所提出的算法进行仿真试验,编程软件为 MATLAB R2019a。输入控制参数 ($s = 0.03, w = 0.8, \beta = 3$),之后算法开始执行迭代;当算法收敛时,输出最优大猩猩向量位置(即企业工程优化的最优权重配比)。其中向量的每一维度代表某一种控制参数的具体值。试验结果如图 2 所示。

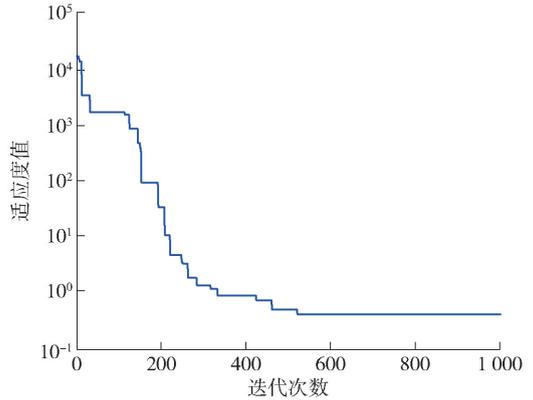


图 2 铜电解影响因素优化

如图 2 所示,算法在迭代 520 次以后就收敛了,说明设计的基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化模型可以有效地找到一个适合本企业实际生产过程中影响电解铜品质的因素配比。最终通过 50 次重复迭代试验后(重复试验 50 次以后,取目标函数最小的一次),得到一个较为适合本企业实际生产的最优因素权重值配比,结果见表 1。

表 1 最优因素权重值配比

参数	电解液温度/℃	添加剂用量/ mg · L ⁻¹	电流密度/ A · m ⁻²	电解液循环速度/L · min ⁻¹
数值	61	40	28 300	28

在确定了最优参数配比后,使用该参数对整个生产流程进行了改进优化,实际生产的情况如图 3 所示。

如图 3 所示,当电流密度、添加剂用量、电解液循环速度、电解液温度与实际生产不匹配时,如未改造之前电解液温度取 55 ℃,此时电解液的蒸发损失较小,车间的劳动空气质量条件较好,但是阴极铜析出的时间增加为 16 d;当添加剂使用过量时,阴极铜表面会生成大量的粒子铜,阴极铜的品质下降,企业利润受损。采用经过算法优化得到的参数配比后,阴极铜的品质显著有效提高,可



(a) 优化前

(b) 优化后

图3 阴极铜表面

以达到99.9985%的A级铜,提高企业利润率,有助于企业长久发展。

适宜的参数配比也能有效降低电解液中的杂质含量,从而降低电解液的电阻,提高电流的使用效率。图4为改进前后电解车间用电量的对比。

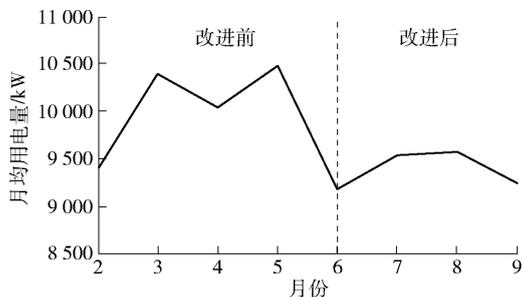


图4 月均耗电量

6月份之后企业采用最优参数配比,由图4可知,改进后电解车间的用电量显著下降,6—9月的平均用电量下降了6.173%,说明采用最优铜电解参数改进后,能够有效降低企业成本。

5 结论

合适的电解液温度、电解液循环速度、电流密度、添加剂用量是铜电解生成高品质铜的关键。基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化模型可以精准地对铜电解工艺因素进行调控,克服了人为经验控制的主观性和不能保证达到最优

的缺点。实验结果表明,基于人工大猩猩部队优化算法的铜电解工艺优化模型可以有效地找到适合企业生产的参数配比。

[参考文献]

- [1] RADIVOJEVI M, REHREN T, PERNICKA E, et al. On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37(11): 2775–2787.
- [2] 华莹珂. 铜电解精炼过程光纤光栅测温研究[J]. *有色设备*, 2021, 35(6): 27–30.
- [3] MIRJALILI S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems [J]. *Neural Computing and Applications*, 2016, 27(4): 1053–1073.
- [4] 张加云, 张永娟, 王宁. 基于遗传算法的冶金企业能耗优化[J]. *铁合金*, 2017, 48(3): 17–21.
- [5] 姚伟鹏. 改进粒子群算法优化PID的冶金电气控制研究[J]. *中国锰业*, 2016, 34(6): 201–202.
- [6] 唐庆利, 张建良, 李克江, 等. 烧结配料优化方法及算法对比分析[J]. *中国冶金*, 2017, 27(5): 6–13.
- [7] 程思凡, 吴慕遥, 秦琳琳, 等. 基于自适应遗传算法的气化炉氧碳比控制[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(7): 281–286.
- [8] 程庆, 李宁, 潘钦敏, 等. 电解铜箔添加剂的研究进展及应用现状[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(12): 69–79.
- [9] ABDOLLAHZADEH B, GHAREHCHOPOGH F S, MIRJALILI S. Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2021, 36(10): 5887–5958.
- [10] FABIEN B C. Some tools for the direct solution of optimal control problems [J]. *Advances in Engineering Software*, 1998, 29(1): 45–61.

(下转第82页)

the mixed biomass and coal. In this paper, typical biomass straw and bituminous coal were used as raw materials, and the influence of different mixing ratios, burning temperature and time on the sintering characteristics of the combustion ash of mixed biomass and coal was deeply studied. The results indicated that the higher the mixing ratio of corn stalk, the more obvious the deashing effect was. The ash content of rice straw mixed with bituminous coal was higher than that of corn straw mixed with bituminous coal, which was mainly caused by the different chemical compositions and structure of the two kinds of straw biomass. Under the same sintering temperature and biomass mixing ratio, the effect of sintering time on ash content was not obvious. With the increase of burning temperature, the lower the ash content of the mixed ash samples obtained from the thermal conversion of mixed corn straw and bituminous coal, the more obvious the ash removal effect. When the mixing proportion of corn straw increased from 25% to 75%, the ash morphology varied from irregular shape or honeycomb structure to obvious melting and bonding phenomenon. The slagging tendency of the mixed combustion ash was enhanced by the increase of the ignition temperature, while the effect of the burning time on the microstructure of the ash sample was small.

Key words: corn straw; rice straw; biomass; bituminous coal; co-firing; sintering characteristics

(上接第 75 页)

Optimization of Copper Electrolysis Process Based on Artificial Gorilla Troops Optimizer

ZHANG Ye, NAN Junfang, SUN Peng, LI Weipeng, YAN Shuaikang
(SDIC Jincheng Metallurgy Co., Ltd, Sanmenxia 472500, China)

Abstract: In the process of copper electrolytic refining, electrolyte temperature, electrolyte circulation speed, the amount of additives and current density are the key process parameters that determine the quality of copper. However, the control of these parameters is judged according to artificial experience, which lacks certain rationality. This paper proposed to use the artificial gorilla troops optimizer to optimize the control parameters in the copper electrolytic refining process in order to obtain the optimal parameter ratio. Experiments show that the quality of cathode copper is significantly improved and the power consumption is reduced by 6.173% by using the optimal parameters obtained by the artificial gorilla troops optimizer. The copper electrolysis process optimization model based on the artificial gorilla troops optimizer can accurately regulate the copper electrolysis process factors, and overcome the subjectivity of human experience control and the disadvantage of not being able to guarantee the optimal.

Key words: electrolytic refining; optimization algorithm; temperature; additives; current density