基于智能算法的炼焦配煤优化方法*

芦建文[1],付利俊[2],江 鑫[2],贾晓宗[3]

(1. 包头钢铁(集团)有限责任公司信息服务中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢金属制造有限责任公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 炼焦生产过程中,配合煤作为主要原料,不仅决定着焦炭的质量,而且决定着炼焦企业的成本与利润。目前炼焦企业主要采用人工经验调整单种煤配比的方式进行配煤,缺乏科学的依据,难以实现高性价比的配煤方案,以优化炼焦配煤结构。文章以焦炭质量为约束条件,以配合煤成本价格为优化目标,采用人工神经网络预测焦炭质量,模拟退火算法优化单种煤配比。达到了降低配合煤成本、提高焦炭质量、降低冶金焦炭成本、提升企业效益的目的。

关键词: 模拟退火算法; 配合煤; 焦炭质量指标; 多层神经网络

中图分类号: TP183 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)01-0013-03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.01.004

Optimization Method of Coal Blending for Coking Based on Intelligence Algorithm

Lu Jian-wen[1], *Fu Li-jun*[2], *Jiang Xin*[2], *Jia Xiao-zong*[3]

(1. *Information Service Center of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Inner Mongolia Baotou Steel Metal Manufacturing Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the production process of coking, blending coal as the main raw material determines not only quality of coke, but also cost and profit of coking enterprises. At present, the adjustment for proportion of single coal with experiences is mainly applied for coal blending in coking enterprises, which lacks scientific basis, so it is difficult to achieve high cost-effective coal blending scheme to optimize the coal blending structure for coking. In this paper, it is introduced the purposes of reducing cost of blending coal, improving coke quality, reducing cost of metallurgical coke and improving benefit of enterprises are achieved by using artificial neural network to predict coke quality and using simulated annealing algorithm to optimize proportion of single coal with coke quality as the constraint condition and cost price of blending coal as the optimization objective.

Key words: simulated annealing algorithm; blending coal; quality index of coke; multi-layer neural network

* **收稿日期:** 2020-10-14

作者简介: 芦建文(1969-),男,山西省朔州市人,硕士,高级工程师,现从事计算机与自动化工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在焦化厂炼焦生产过程中，需要将不同种类的单种煤按照一定比例配成配合煤，再装入焦炉进行炼焦。配合煤的配比不仅决定了焦炭的质量，而且决定了炼焦企业的成本与利润。然而由于单种煤种类繁多、品位参差不齐、库存大小不同、价格差异较大，因此对于一定的配合煤质量指标，存在多种不同的配煤方案，其成本也各有差异。有时为了保证配合煤的质量要求，在配煤时大量使用优质煤，也造成了资源的浪费[1]。因此计算出所有可行的配煤方案，并基于库存、价格、配比最低要求等相关约束条件给出成本最低的配煤方案，是需要解决的关键技术问题。目前一般是由人工经验根据配合煤质量指标要求计算各单种煤的配比，对成本进行粗略估算并选取成本较低的方案，难以进行精确计算并给出最优方案。

1 焦炭质量预测优化配煤比

焦化配煤工程师的传统方法是依据单种煤的各项技术指标，结合以往配煤经验，初步确定单种煤配比。按配比线性加权计算配合煤的各项质量指标，再利用简单的一元线性回归等计算方法来预测或者估算焦炭的各项质量指标。通过不断的调整各单种煤的配比来满足焦炭质量指标。在这一过程中，配煤工程师更多的是依赖配煤经验，没有合适的寻优计算方法，很难同时做到既能满足焦炭质量指标，又能找到成本最低的配煤方案。况且采用一元线性回归的方法也无法准确的预测焦炭各项质量指标，尤其是冶金焦炭的热态性能指标，即反应性（CRI）和反应后强度（CSR）[2]。

本文为焦化配煤工程师提供了满足焦炭质量预测的配煤优化方法。首先采用多层神经网络构建焦炭质量预测模型，模型的预测误差要求小于5%。为焦化配煤工程师提供配煤智能辅助优化软件。采用软件与配煤经验相结合的方式来优化各单种煤的配比。配煤工程师按照配煤经验调整单种煤的配比以及结焦时间等炼焦生产工艺参数的一项或者多项，配煤智能辅助优化软件按照配煤工程师提供的单种煤配比计算配合煤的质量指标，并以配合煤的质量指标与炼焦工艺参数作为焦炭质量预测模型输入变量。焦炭质量预测模型计算并预测此输入变量的焦炭质量，计算出配合煤的价格。焦化工程师可以查看焦炭质量预测结果是否满足要求，以此为依据不断修改完善配煤比。

2 模拟退火算法优化配煤比

在满足用户给定的焦炭质量指标原则下，将企业的经济指标（即配合煤成本最低）作为配煤比的优化目标，将配合煤的各项质量指标、配比范围、价格情况等作为约束条件，建立配煤优化模型，并采用智能优化方法对其进行求解。优化模型将按照最优、次优给出5个优化方案供用户选择。

以配煤成本为目标函数，从而构建配煤优化模型。配合煤成本函数是根据单种煤的成本及配比确定的，设单种煤种数为 n，第 $j(j=1,2,\cdots,n)$ 种单种煤的成本价为 C_j，其配比为 x_j，则成本函数的表达式如下所示：

$$\min f(x) = \sum_{j=1}^{n} C_j x_j \tag{1}$$

对于配煤过程来说，配合煤的每一项质量指标都有一个上下限，即

$$I_v \leqslant W_v \leqslant H_v \tag{2}$$

式中，v 表示考察的配合煤质量指标的约束个数；W_v 为第 v 项配合煤的质量指标；H_v、L_v 则分别表示对应的上限和下限。本系统所采用的指标为配合煤的灰分 A_d、挥发分 V_{daf}、硫分 $S_{t,d}$、黏结指数 G、胶质层厚度 Y，故取 $v=1,2,\cdots,5$。本系统假设配合煤质量指标与单种煤质量指标成线性关系，因此配合煤质量指标为各单种煤质量指标与各自的配比的乘积之和，即：

$$\begin{cases} W_1 = A_{d1}x_1 + A_{d2}x_2 + \cdots + A_{dx}x_n \\ W_2 = V_{daf1}x_1 + V_{daf2}x_2 + \cdots + V_{dafn}x_n \\ W_3 = S_{t,d1}x_1 + S_{t,d2}x_2 + \cdots + S_{t,dx}x_n \\ W_4 = G_1x_1 + G_2x_2 + \cdots + G_nx_n \\ W_5 = Y_{t1}x_1 + Y_{t2}x_2 + \cdots + Y_mx_n \end{cases} \tag{3}$$

式中，W_1 为配合煤灰分质量指标；W_2 为配合煤挥发分质量指标；W_3 表示配合煤硫分质量指标；W_4 和 W_5 则分别为配合煤的黏结指数质量指标和胶质层厚度质量指标。此外，单种煤的配比之和为100%，即：

$$\sum_{j=1}^{n} x_j = 100\% \tag{4}$$

为了得到最优的配煤方案，本项目采用智能优化方法来对目标函数进行优化求解。在各种基于数据的求解算法中，模拟退火算法 SA（Simulate Anneal）是一种基于热力学的退火原理建立的随机搜索算法，它根据 Metropolis 准则接受新解，所以除接受优化解外，还会在一定范围内接受恶化解，因而可以从局部最优的“陷阱”中跳出，相对其它算法更有

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可能求得优化问题的整体最优解，同时又不失简单性和通用性，可满足配煤优化问题的求解效率[3]。其理论基础如下：

$$\min f(x) \tag{5}$$

$$s.t.\begin{cases} L_1(x) = L_v - W_v \leqslant 0 \\ L_2(x) = W_v - h_v \leqslant 0 \\ L_3(x) = \sum_{j=1}^{n} x_j - 1 = 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中：$f(x)$ 表示配合煤的成本函数；W_v 为第 v 项配合煤的质量指标；H_v、L_v 则分别表示对应的上限和下限；x_j 为各单种煤配煤比例。在以上这些约束条件的限制下，可以保证配煤的计划性并满足焦化厂的煤质指标要求。一般情况下，满足这些约束条件的解很多，这些解都称为“可行解”。故本系统选取模拟退火算法，在这些解中寻找出经济最优的配煤方案。

经过模拟退火算法的初始温度的选取、邻域的选取、接受准则的确定、抽样稳定准则、温度衰减函数、算法终止准则等具体步骤求得最优解。其中需要注意的是，初温越大，获得高质量解的几率越大，但相应需要的计算时间也将增加。因此，初温的确定应折中考虑优化质量和优化效率；温度下降的基本原则是保证温度下降徐徐进行，否则会发生淬火现象。即如果温度下降过快，有可能错过最优解，从而导致搜索失败；模拟退火算法求最优解判断终止的通常做法主要为：①设置终止温度的阈值；②设置终止迭代次数；③算法搜索到的最优值连续若干步保持不变。

3　应用效果

2020 年包钢采用焦炭质量预测与配煤优化系统，对该系统各预测模块进行多次系统测试和应用。在配煤比优化技术方案模型应用中，根据焦炭质量要求和公司降本核算以及炼焦单种煤品种与储量平衡，优化出多组配煤技术方案，对焦炭质量管控、配合煤成本核算以及炼焦单种煤优化提供帮助和技术支撑。经过单次或批量预测焦炭质量指标，焦炭质量预测指标准确率反应性（CRI）达到 95.81%，反应后强度（CSR）达到 95.40%，灰分达到 95.66%，硫分达到 95.14%，耐磨强度 M_{10} 达到 95.32%、抗碎强度 M_{40} 达到 96.52%。今后随着数据的不断积累，系统通过不断的自学习，预测精度将进一步提高。

通过炼焦配煤比优化方法应用，2020 年包钢焦炭质量和配煤成本有了一定的改善，2020 年与 2019 年焦炭质量和配煤成本对比情况如表 1 所示。

表 1　2020 年与 2019 年 5#—10#焦炉焦炭质量和配煤成本对比情况

时间	灰分 /%	硫分 /%	M_{40} /%	M_{10} /%	反应性 /%	反应后强度 /%	焦炭合格率 /%	配合煤价格 /（元·t^{-1}）
2020 年	12.63	0.89	88.61	6.28	24.07	65.87	84.69	1 196.46
2019 年	12.84	0.89	88.34	6.41	25.31	63.94	82.83	1 362.00

4　结论

针对焦化生产过程中的配煤配比优化问题，本文提出了基于多层神经网络的焦炭质量预测智能优化方法与基于模拟退火算法的智能优化方法。基于模拟退火算法的智能优化方法依照模型构建、目标函数确定、约束条件确定和模型成型与优化方式，在炼焦配煤中得到了开拓性地应用。基于多层神经网络的焦炭质量预测智能优化方法与基于模拟退火算法的智能优化方法的研发与应用为焦化配煤技术展示了一种新颖而实用的思维方式，提供了一种全新的优化单种煤配比的手段和方法。焦炭质量预测模型与模拟退火算法优化模型实现了软件工业化应用，在稳定和提高焦炭质量的基础上，降低了优质焦煤的配比，创造了经济效益。

参　考　文　献

[1] 梁敦仕. 2018 年我国煤炭经济运行形势回顾及未来市场展望 [J]. 煤炭经济研究，2019，39（2）：4－11.

[2] 周洪，闵礼书，邹祥林. 基于神经网络的特大型焦炉焦炭质量预测研究 [J]. 系统仿真学报，2009，（6）：1543－1547.

[3] 王雪梅，王义和. 模拟退火算法与遗传算法的结合 [J]. 计算机学报，1997，20（4）：381－384.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net