

## 加热炉燃烧控制技术分析

蒋利军, 姜建国, 付 涛, 杨玉晶

(莱芜钢铁股份有限公司 原料部, 山东 莱芜 271104)

**摘要:** 加热炉燃烧控制技术, 就是在各种燃烧工况条件下, 找到合理的最佳空燃比, 以提高炉温控制精度和加热速度。常用的燃烧控制方法包括氧化锆残氧分析、热值分析仪、多目标专家寻优、模糊控制等, 这些控制方法各有优缺点。同时指出, 人工智能技术、专家系统及模糊控制技术等是加热炉燃烧控制技术的发展方向。

**关键词:** 加热炉; 燃烧控制技术; 空燃比寻优; 人工智能理论

中图分类号: TF068 文献标识码: B 文章编号: 1004-4620 (2006) 02-0024-02

### Analysis on Combustion Control Techniques for Reheating Furnace

JIANG Li-jun, JIANG Jian-guo, FU Tao, YANG Yu-jing

(The Raw Material Department of Laiwu Iron and Steel Co., Ltd., Laiwu 271104, China)

**Abstract:** The combustion control techniques for reheating furnace are in order to search the optimal air fuel ratio, to improve the control precision of the temperature and the velocity. Combustion control methods in common use includes zirconium oxide oxygen measuring analysis, heat value analyzer, multiple-object expert optimizing, and fuzzy control and so on, each of which has some excellences and disadvantages. At the same time, it is pointed that AI technique, expert system and fuzzy control etc are the development aspect of combustion control techniques.

**Key words:** reheating furnace; combustion control technique; optimal air/fuel ratio; artificial intelligence theory

## 1 国内外燃烧控制发展情况

加热炉是轧钢生产企业中的主要耗能设备, 尽量提高燃料利用率, 是节能降耗需解决的主要问题。国内冶金行业的燃料主要为焦炉、高炉混合煤气及各单一煤气, 部分使用天然气, 个别小型轧钢厂使用重油。计算机控制燃烧过程, 就是在各种燃烧工况条件下, 找到合理的最佳空燃比, 使燃烧处于较佳状态, 从而提高炉温控制精度, 保证钢锭以较快的速度达到出钢温度, 节约能源, 减少氧化烧损。

轧钢加热炉通常配备的是以模拟调节仪表为核心的控制系统。当燃料的热值与压力稳定时, 这种控制系统的控制效果还比较好, 而对于燃料的热值与压力频繁波动的情况, 常规模拟仪表系统就难以达到预期目标, 操作者必须经常通过“看火孔”去观察火焰, 调节空燃比以改善燃烧效果。这不仅给操作者带来许多不便, 而且靠人工随时调节空燃比, 很难跟踪热值变化的速度, 加之加热炉都需要按照加热工艺曲线进行周期性的加热, 而炉子的特性是变化的, 要使加热炉实现最有效的节能运行还应该考虑到进料状况(冷锭或热锭)以及轧机故障待轧的运行状态。对这些要求, 模拟控制系统是难以实现的。

国外从20世纪70年代, 我国从80年代开始对加热炉生产过程进行计算机控制技术的研究。随着检测设备、仪表、计算机水平的提高, 90年代我国轧钢企业配置计算机控制的连续加热炉逐渐增多, 并进行了不同程度的控制, 由于各自的控制内容和使用情况不同, 所得到的效果也不尽相同。目前国内在控制理论和关键技术方面的开发与国外先进国家相比差距不是很大, 但在真正的应用上与欧美、日本、前苏联等冶金技术较先进国家相比差距较大。从20世纪90年代末国内许多老企业, 都对加热炉进行了计算机燃烧控制方面的改

造，计算机几乎全是选用进口的，检测设备、仪表部分采用国产的，新上项目大部分是整套设备进口。

## 2 主要燃烧控制方法及应用

### 2.1 串级并联双交叉限幅控制燃烧

双交叉限幅经历了燃料先行的比值或空气先行的比值调节系统、串级串联燃烧控制系统、串级并联燃烧控制系统、串级并联单交叉限幅燃烧控制系统四个发展阶段。它是以炉温调节回路为主环，燃料流量和空气流量调节为副环，构成串级并联双交叉限幅控制系统。双交叉限幅控制系统在负荷变化时，系统各参数变化，根据实测空气流量对燃料流量进行上、下限幅，而且还根据实测燃料流量对空气流量进行上、下限幅。在负荷增加或减小时，燃料流量和空气流量相互限制交替增加或减小，即使在动态情况下，系统也能保持良好的空燃比。

串级并联双交叉限幅控制燃烧是仪表控制调节回路的基本方式，以前计算机水平较低、应用较少，比值调节、交叉限幅燃烧控制系统都是作为独立的控制单元。现在大多是计算机参与控制，与氧化锆残氧分析仪、热值分析仪、专家寻优、模糊控制等一起使用，控制效果比过去单独使用要理想。

### 2.2 氧化锆残氧分析法

采用电化学法，利用氧化锆固体电解质做成的检测器通过氧化锆测量烟气中氧含量的办法，判断炉内煤气燃烧是否充分，它可以避免煤气热值和压力波动或管道漏气而影响配比控制。残氧检测数据被送到计算机用来参与闭环控制，反馈速度快。计算机算出空燃比实现串级并联燃烧自动控制。但目前存在的主要问题是氧化锆探头价格昂贵，且使用寿命短。

1999年，中日合作济南钢铁集团总公司（简称济钢）绿援项目加热炉高效燃烧控制系统，即采用日本横河Z021D型氧化锆残氧分析仪在济钢中厚板厂两座推钢式加热炉上使用，起到了节能降耗，减少有害气体排放量，保护环境的目的。

### 2.3 用热值分析仪测煤气的热值

热值分析仪实际是一个小型燃烧炉，将经过预处理后的干净煤气引入，通过减压阀减压，进入陶瓷过滤器进行过滤，并经恒压调节，至燃烧室与机柜内的小型助燃风机经恒压调节后的空气混合燃烧。微机利用热电偶检测的燃烧装置温度场的废气温度，结合标定的系数和煤气、空气压差计算出热值及空燃比，将该信号输出至参与燃烧控制的计算机或其它显示仪。

热值分析仪测得的数据较准确，但是热值分析仪一次性投资费用大，煤气清洁麻烦，维修量大。但随着热值分析仪技术水平的提高和价格的降低，热值分析仪在国内外大型加热炉上将进一步广泛运用，成为空燃比的主流检测设备。

### 2.4 利用高焦混合煤气成分理论推测空燃比

高焦比值即高炉煤气流量与焦炉煤气流量之比。假设现测高焦比为7:3（计算时忽略空气中的水分），根据煤气成分（主要含CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>）可计算出理论空燃比<sup>[1]</sup>：

$$L_{\text{理论空气需要量}}: L_{\text{混合煤气量}} = 1.77 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$$

取空气过剩系数为1.05，则：

$$L_{\text{实际空气需要量}}: L_{\text{混合煤气量}} = 1.77 \times 1.05 = 1.86 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$$

当混合煤气高焦比为7:3时，空燃比为1.86。

理论计算空燃比采用的是高炉、焦炉煤气混合前的数值，再考虑煤气压力变化、含水分、杂质等因素，所以理论计算的只是一个近似值。

实践证明通过高焦比计算空燃比与其它几种方法结合使用，反应快，省去了大量的寻优时间。莱芜钢铁股份有限公司轧钢厂将高焦比混合煤气成分理论推测空燃比与多目标专家寻优算法两种办法相结合，应用在

初轧均热炉上，取得良好的控制效果。

理论计算空燃比不需添置设备，计算简单，作为参考值来用经济合算。高炉煤气、焦炉煤气流量可根据混合前的流量计实测。

## 2.5 多目标专家寻优算法

控制思想是：在煤气热值、压力等炉况不稳定的状态下，把影响燃烧的多个因素考虑进来，炉温升温速度合理（可能快或一般），烟气升温速度合理（满足一定范围），炉压合理（满足一定范围），热风升温速度合理（满足一定的范围），满足所有这些条件的才是“最佳空燃比”。

当计算机燃烧控制系统开始运行时，选用当前控制加热炉的平均空燃比值作为基值，“专家寻优系统”根据炉温、烟气上下部温度、炉压、热风等条件的变化寻找合适的空燃比。空燃比合适时，升温、保温曲线良好，“专家寻优系统”不运行，保持这个状态，煤气流量、热风流量、炉压不变；当煤气热值、压力变化时，专家寻优系统推理机根据数据库内专家经验，判断煤气加减方向及推算加减量，寻找到“最佳空燃比”。多目标专家寻优算法的优点是避免了使用氧化锆、热值分析仪，缺点是不如氧化锆、热值分析仪反馈时间快、数据准确。但寻优算法的思路在燃烧控制方面已得到广泛承认，并越来越多地应用于实践。

## 2.6 模糊控制技术的应用

随着模糊控制技术的不断发展完善，越来越多的模糊控制技术应用到加热炉的燃烧控制中。常用的是二维模糊控制器，即选用误差、误差变化率为输入，一个输出量。多维模糊控制器（三维及以上）除了误差外，还增加了误差变化率及误差变化的变化率，从理论上讲，控制会更加精细。但是，由于模糊控制器输入维数增多，控制规则的选取越来越困难，相应的控制算法也越来越复杂。

济钢中板厂采用二输入一输出的模糊控制器求空燃比。以炉膛温度的增量 $\Delta T$  ( $\Delta T = T_j - T_{j-1}$ ) 和上一周期的寻优步长 $u_{j-1}$ 为输入，输出是本次寻优步长 $u_j$ 。代入公式：

$$\text{合适煤气量} = \text{当前煤气量} + \text{煤气加减方向} \times \text{系数} \times \text{步长}$$

采用变步长的寻优方法，可以提高搜索速度、减少搜索损失。如果步长固定不变，步长小，则收敛速度慢，对于一些不可控扰动的响应就难以适应；步长大，则搜索损失增大，有时还会引起振荡，无法收敛，这是应当避免的。当在离极值点较远处，反映在温差上是变化率较小时，可采用小步长搜索。

日本住友鹿岛制铁所初轧均热炉采用模糊控制器在线调整PID调节器的参数，即随系统状态的变化，对比例、积分、微分系数 $f_p$ 、 $f_i$ 、 $f_d$ 进行调整。该方法与常规模糊调节器和常规PID调节器相比，具有较强的适应性和鲁棒性。

采用PID调节器的参数 $f_p$ 、 $f_i$ 、 $f_d$ 在线构成模糊控制器，输出 $u_p(e)$ 、 $u_i(e)$ 、 $u_d(e)$ ，实现在线修正PID调节器的三个主要系数。

$$\begin{aligned} f_p(n) &= f_{p0} + r_p u_p[e(n)] \\ f_i(n) &= f_{i0} + r_i u_i[e(n)] \\ f_d(n) &= f_{d0} + r_d u_d[e(n)] \\ y(n) &= f_p(n)e(n) + \sum f_i(j)e(j) + f_d(n)[e(n) - e(n-1)] \end{aligned}$$

$f_p(n)$ 、 $f_i(n)$ 、 $f_d(n)$ 分别为比例、积分、微分系数； $f_{p0}$ 、 $f_{i0}$ 、 $f_{d0}$ 分别为比例、积分、微分系数的初值； $r_p$ 、 $r_i$ 、 $r_d$ 分别是 $u_p(e)$ 、 $u_i(e)$ 、 $u_d(e)$ 的权数； $e(n)$ 、 $j$ 、 $e$ 为不同时间的误差向量； $y(n)$ 为PID调节器的输出<sup>[2]</sup>。

## 3 加热炉控制技术发展趋势

燃烧控制的另一条最为理想的途径是人工智能化直接监测火焰性能控制燃烧的方法，类似人工烧钢通过观察火焰颜色判断燃烧情况。但由于加热炉炉膛很大，长30、40m以上，宽5m以上，是一个时变、分布参数

非线性、大惯性延迟的控制系统，炉气、钢锭、墙壁之间的传热过程复杂且是非线性的，还有影响燃烧控制的许多不确定因素，目前没有实用仪器来实现。近年来，随着人工智能理论的发展和实用化，以及计算机技术的进步和检测设备、仪表性能的提高，专家系统、模糊控制等技术正在加热炉燃烧控制上得到越来越广泛的应用。蒙特卡洛随机思想以及量子物理浮点思想在自动控制方面也引起研究者们的高度重视，随着现代科学技术的发展，随机系统滤波与控制理论也将被应用于加热炉计算机控制中<sup>[3]</sup>。

参考文献：

[1] 韩昭沧. 燃料及燃烧[M]. 北京：冶金工业出版社, 1984.

[2] 段丽. 日本住友鹿岛制铁所初轧均热炉燃烧过程模糊控制[J]. 冶金自动化, 2002, (2) :63~64.

[3] 温治. 连续加热炉计算机控制技术综述[J]. 金属世界, 2004, (1) :45~48.

---

[返回上页](#)