

烟气分析仪在提高燃烧效率中的应用

曾汉生 刘占增 张道明 丁翠娇
武汉钢铁(集团)公司技术中心热能研究室

摘要 本文介绍了轧钢加热炉和燃煤锅炉等加热设备的燃烧产物及烟道气中氧气和一氧化碳的含量对燃烧效率的影响,以及烟气分析仪器的的工作原理及其在提高燃烧效率中的应用。
关键词 燃烧效率 烟气 空燃比

Application of Analyzer for Flue Gas on Raising Combustion Efficiency

Abstract The effect on combustion efficiency of the composition of the flue gas was introduced in this paper. The principle and applications of the analyzer for flue gas on raising combustion efficiency were described too.

Keywords combustion efficiency flue gas air/fuel ratio

1 前言

随着人们环保和节能意识的逐渐提高,众多大中型企业如钢铁冶金、石油化工、火力发电厂等,已将提高燃烧效率、降低能源消耗、降低污染物排放、保护环境等作为提高产品质量和增强产品竞争能力的重要途径。钢铁行业的轧钢加热炉、电力行业的锅炉等燃烧装置和热工设备,是各行业的能源消耗大户。因此,如何测量和提高燃烧装置的燃烧效率、确定最佳燃烧点,是十分令人关心的。

2 确定最佳燃烧效率点

供给加热炉、锅炉等加热设备的燃料燃烧热并不是全部被利用了。以轧钢加热炉或锅炉为例,有效热是为了使物料加热或熔化(以及工艺过程的进行)所必须传入的热量。根据炉子热平衡可知,

$$h = 1 - \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{Q}$$

式中, Q ——供给炉子的热量;

Q_1 ——炉子烟气(废气)中过剩空气带走的物理热;

Q_2 ——炉子烟气(废气)中燃料不完全燃烧而生成的或未燃烧的 CO 气带走的物理热;

Q_3 ——炉子设备热损失(包括炉体散热、逸气损失、冷却水带走、热辐射等);

Q_4 ——其他热损失。

由上式可以看出,炉子烟气带走的物理热是热损失中主要部分。图 1 显示了热效率和各项热损失随着空燃比 的增减的变化规律。

当鼓风量过大时(即空燃比 偏大),虽然能使燃料充分燃烧,但烟气中过剩空气量偏大,表现为烟气中 O_2 含量高,过剩空气带走的物理热 Q_1 值增大,导致热效率 偏低。与此同时,过量的氧气会与燃料中的 S 、烟气中的 N_2 反应生成 SO_2 、 NO_x 等有害物质。而对于轧钢加热炉,烟气中氧含量过高还会导致钢坯氧化铁皮增厚,增加氧化烧损。

当鼓风量偏低时(即空燃比 减小),表现为烟气中 O_2 含量低, CO 含量高,虽说排烟热损失小,但燃料没有完全燃烧,热损失 Q_2 增大,热效率 也将降低。另外,烟囱也会冒黑烟而污染环境。

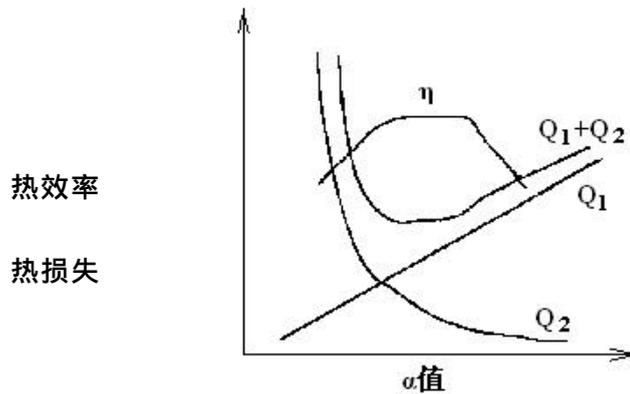


图 1 热效率与空燃比的关系

所谓提高燃烧效率，就是要适量的燃料与适量的空气组成最佳比例进行燃烧。实验研究表明，图 2 为烟气中氧含量和 CO 含量与炉子能耗的关系。

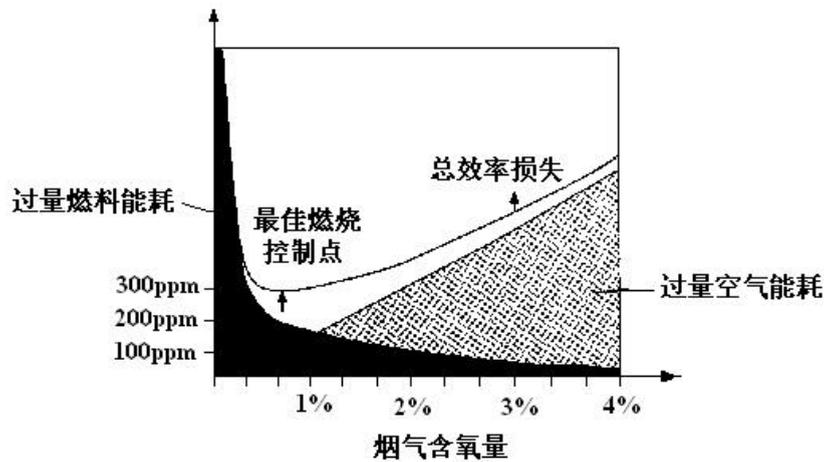


图 2 烟气中 O₂ 和 CO 含量与炉子能耗的关系

图 2 中，“过量空气能耗”阴影面积表示富余的空气形成的能耗（或热损失），表征为烟气中 O₂ 含量。“过量燃料能耗”阴影面积表示有未完全燃烧的燃料所引起的能耗，表征为烟气中 CO 含量。可以看出，若要降低这两部分能耗（同时亦可提高产品质量），必须降低烟气中 O₂ 含量和 CO 含量，但烟气中 O₂ 含量和 CO 含量是互相制约的两个因素。若将上述两个阴影区叠加成另外一条曲线，即总效率热损失曲线，其最小值即为最佳的燃烧控制点，此处热损失最小、热效率最高，即烟气中 O₂ 含量约为 1%。

由上文可知，热效率与烟气中的 CO、O₂、CO₂ 含量以及排烟温度、供热负荷、雾化条件等因素有关。因此，可通过测量并控制烟道气体中 CO、O₂、CO₂ 的含量来调节空气消耗系数，来达到最高燃烧效率。

燃烧效率控制由来已久，上世纪 60 年代，曾广泛采用 CO₂ 分析仪监测烟道气体中 CO₂ 含量来控制空气消耗系数 以达到最佳，但 CO₂ 含量受燃料品种影响较大。70 年代后，逐渐采用烟气中 O₂ 含量或 O₂ 含量和 CO 含量相结合的方法来控制燃烧效率。

提高燃烧效率最直接的方法就是使用烟气分析仪器（如烟气质分析仪、燃烧效率测定仪、氧化锆氧含量检测仪）连续监测烟道气体成分，分析烟气中 O₂ 含量和 CO 含量，调节助燃空气和燃料的流量，确定最佳的空气消耗系数。

3 正确使用烟气分析仪

无论采取何种方式控制燃烧效率，快速、准确的测量烟气中 O₂ 含量和 CO 含量都是实现最佳燃烧的前提条件。因此，这里介绍一些典型的烟气分析仪器的的工作原理及其使用方法。

3.1 烟气分析仪（或燃烧效率测定仪）

烟气分析仪是抽气采样炉窑烟道气体并自动进行成分分析的仪表，分为在线监测式和便携式。一般可以测量分析烟气中的 CO、O₂、NO_x、SO₂ 等气体含量，以及烟气温度、压力等，并通过计算获得 CO₂ 含量、过剩空气系数、烟气露点、燃烧效率、排烟热损失、烟气流量等热工参数。

烟气分析仪中一般安装多个传感器，分为电化学传感器和红外传感器。电化学传感器测量原理是将待测气体经过除尘、去湿后进入传感器室，经由渗透膜进入电解槽，使在电解液中被扩散吸收的气体在规定的氧化电位下进行电位电解，根据耗用的电解电流求出其气体的浓度。

红外传感器主要由红外光源、红外吸收池、红外接收器、气体管路、温度传感器等组成。它是利用各种元素对某个特定波长的吸收原理，当被测气体进入红外吸收池后会对红外光有不同程度的吸收，从而计算出气体含量。红外传感器具有抗中毒性好、量程范围广、反应灵敏等特点。

烟气分析仪利用测量得到的 O₂、CO 含量等数据可计算得到相应的热工参数。其计算公式如下：

$$\text{CO}_2 \text{ 含量: } CO_2 = CO_{2\max} \cdot \left(1 - \frac{O_2}{21.0}\right)$$

$$\text{空气过剩系数: } I = \frac{21.0}{21.0 - O_2}$$

$$\text{排烟热损失: } Loss = (T_{\text{gas}} - T_{\text{air}}) \cdot \left(\frac{A_1}{CO_2} + B\right)$$

$$\text{燃烧效率: } Eff = 100 - Loss$$

$$\text{这里, } A_1 = \frac{V_{\text{drymin}} \cdot C_{\text{pm}} \cdot CO_{2\max}}{H_u \cdot CO_2}, \quad B = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{pmH}_2\text{O}}}{H_u}$$

式中：O₂、CO₂——干烟气中 O₂、CO₂ 的体积百分浓度，%

CO_{2max}——燃料完全燃烧生成的 CO₂ 最大值

T_{gas}、T_{air}——燃气温度、环境温度，

A₁——燃烧效率系数

B——按 Siegert 公式计算出的校正系数

V_{drymin}——干烟气体积

C_{pm}——燃气比热

H_u——燃气净热值

V_{H₂O}——水蒸气体积

C_{pmH₂O}——水蒸气比热

3.2 氧气分析仪

测量烟气中含氧量的仪表称为氧分析仪（氧量计）。常用的氧分析仪主要有热磁式和氧化锆式两种。

（1）热磁式氧分析仪

其原理是利用烟气组分中氧气的磁化率特别高这一物理特性来测定烟气中含氧量。氧气为顺磁性气体（气体能被磁场所吸引的称为顺磁性气体），在不均匀磁场中受到吸引而流向磁

场较强处。在该处设有加热丝，使此处氧的温度升高而磁化率下降，因而磁场吸引力减小，受后面磁化率较高的未被加热的氧气分子推挤而排出磁场，由此造成“热磁对流”或“磁风”现象。在一定的气样压力、温度和流量下，通过测量磁风大小就可测得气样中氧气含量。由于热敏元件（铂丝）既作为不平衡电桥的两个桥臂电阻，又作为加热电阻丝，在磁风的作用下出现温度梯度，即进气侧桥臂的温度低于出气侧桥臂的温度。不平衡电桥将随着气样中氧气含量的不同，输出相应的电压值。

热磁式氧分析仪虽然具有结构简单、便于制造和调整等优点，但由于其反应速度慢、测量误差大、容易发生测量环室堵塞和热敏元件腐蚀严重等缺点，已逐渐被氧化锆氧分析仪所取代。

(2) 氧化锆传感器式氧分析仪

氧化锆 (ZrO_2) 是一种陶瓷，一种具有离子导电性质的固体。在常温下为单斜晶体，当温度升高到 1150 时，晶型转变为立方晶体，同时约有 7% 的体积收缩；当温度降低时，又变为单斜晶体。若反复加热与冷却， ZrO_2 就会破裂。因此，纯净的 ZrO_2 不能用作测量元件。如果在 ZrO_2 中加入一定量的氧化钙 (CaO) 或氧化钇 (Y_2O_3) 作稳定剂，再经过高温焙烧，则变为稳定的氧化锆材料，这时，四价的锆被二价的钙或三价的钇置换，同时产生氧离子空穴，所以 ZrO_2 属于阴离子固体电解质。 ZrO_2 主要通过空穴的运动而导电，当温度达到 600 以上时， ZrO_2 就变为良好的氧离子导体。

在氧化锆电解质的两面各烧结一个铂电极，当氧化锆两侧的氧分压不同时，氧分压高的一侧的氧以离子形式向氧分压低的一侧迁移，结果使氧分压高的一侧铂电极失去电子显正电，而氧分压低的一侧铂电极得到电子显负电，因而在两铂电极之间产生氧浓差电势。此电势在温度一定时只与两侧气体中氧气含量的差（氧浓差）有关。若一侧氧气含量已知（如空气中氧气含量为常数），则另一侧氧气含量（如烟气中氧气含量）就可用氧浓差电势表示，测出氧浓差电势，便可知道烟气中氧气含量。

氧化锆氧分析仪具有结构和采样预处理系统较简单、灵敏度和分辨率高、测量范围宽、响应速度较快等优点。

3.3 测试设备及应用

烟气分析仪器应用领域十分广泛，例如：

- (1) 热电厂循环流化床锅炉用于燃烧控制室的烟道气体监测；
- (2) 钢铁厂轧钢加热炉用于解决降低氧化烧损或脱碳层厚度时的炉气气氛检测；
- (3) 全氢热处理炉用于检测辐射管是否烧穿漏气
- (4) 研制新型燃烧器（蓄热式、低 NO_x 式、辐射管式）时用于燃烧器结构尺寸的设计研究；
- (5) 汽车尾气排放检测；
- (6) 其他环境保护监测项目。

国内外烟气分析仪器产品众多，性能特点也参差不齐。其中，德国汉堡名优 (MRU) 环保测量技术公司出品的烟气分析仪种类齐全、性能优良，占据了国内较大市场份额。便携式烟气分析仪主要有 MRU 95/3 型、D2000 系列、VARIO PLUS 系列等，在线式烟气监测系统有 SWG 300-1 型，以及氧化锆氧气分析仪 OMS 420 和汽车尾气分析仪 D1600 系列等。

笔者使用烟气分析仪进行炉窑热工研究和新型燃烧器开发，积累了一些经验。图 3 为使用德国名优 (MRU) 便携式 MRU 95/3 烟气分析仪进行新型辐射管燃烧器的实验研究。95/3 烟气分析仪可测量和显示 O_2 、 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 等气体成分以及烟气温度的、压力、烟气黑度和燃烧效率、过剩空气系数等，并可扩展其他气体成分的测试，是热工研究和燃烧控制的有力武器。



图 3 烟气分析仪 MRU 95/3CD 在轧钢加热炉燃烧调节和控制中的应用

4 结束语

烟气分析仪已经成为控制炉窑燃烧和运行不可缺少的重要设备，正确使用它并通过它合理调节炉窑热工操作参数，将收到以下效果：

(1) 节约能源。减少助燃空气量和排风量，节省通风机动力费用。减少烟气中过量空气带走的热量损失，达到节能的目的。或减少过量燃烧供给量，直接实现节约燃料。

(2) 减少环境污染。减少 NO_x 、 SO_2 等污染物的排放。

(3) 提高产品质量。控制烟气残氧量可减少钢坯氧化烧损，提高企业经济效益。

(4) 延长炉窑使用寿命。

我国有数十万台中小型工业锅炉和加热炉，我国的发电煤耗和吨钢能耗都与国际先进水平有一定差距，若能采用烟气分析仪器等自动控制手段，对有关燃烧参数进行在线、及时、准确的监测，以便实现人工调节或自动控制，使燃烧效率达到最高（或者较高），将给社会带来巨大的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 杨庆柏，烟气含氧量测量技术与应用，沈阳电力高等专科学校学报，Vol.3，No.4，p27，2001.10
- [2] 马新村，提高燃烧效率、降低发电成本，山东电力技术，2001.4，p67
- [3] 陆钟武，火焰炉，冶金工业出版社，北京：1995.5

作者简介

曾汉生：男，高级工程师，任职于武汉钢铁（集团）公司技术中心热能研究室，长期从事冶金行业的节能和环保课题的研究，以及热工节能监测技术的开发利用。