

Research of Variational Rule of CO₂ Emission with Coal Burning in Coal-Fired Utility Boiler

Jianxing Ren¹, Fangqin Li¹, Qunyin Gu¹, Weijun Gao², Yongwen Yang¹, Qingrong Liu¹, Jiang Wu¹

¹Energy and Environment Engineering Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090

²University of Kitakyushu, Japan, 1-1, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, Fukuoka

ren608@163.com

Abstract: CO₂ is one of the main greenhouse gases; Control of atmospheric CO₂ concentration is believed to be the key measures to solve the greenhouse effect. Electric power production is a concentration of CO₂ emission. Low oxygen burning technology can control and increased CO₂ formation concentration. According to the principle of low oxygen burning, variational rule of CO₂ emission with excess air coefficient was gotten. By controlling excess air coefficient, providing favorable conditions for the CO₂ recycling.

Keywords: coal-fired power stations; low oxygen burning; Carbon dioxide

电站锅炉煤炭燃烧与 CO₂ 排放浓度变化规律的研究

任建兴¹, 李芳芹¹, 顾群音¹, Weijun GAO², 杨涌文¹, 刘青荣¹, 吴江¹

¹上海电力学院, 上海市平凉路 2103 号, 中国, 200090

²University of Kitakyushu, Japan, 1-1, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, Fukuoka

ren608@163.com

摘要: CO₂ 是大气环境逐渐变暖最为主要的温室气体之一, 控制大气中的二氧化碳浓度是解决温室效应的关键措施。燃煤发电厂是 CO₂ 的一个集中排放源, 采用低氧燃烧技术有利于控制和提高燃煤电站锅炉 CO₂ 生成浓度, 根据低氧燃烧原理, 得出锅炉煤炭燃烧过量空气系数与 CO₂ 浓度的变化规律, 通过控制锅炉煤炭燃烧的过量空气系数, 能够有效提高燃煤烟气中 CO₂ 的排放浓度, 为 CO₂ 回收利用提供了有利条件。

关键词: 燃煤电站; 低氧燃烧; CO₂

1 引言

中国是一个一次能源相对丰富的国家, 在一次能源中煤炭占相当大的比例, 是当今世界上第一产煤大国, 煤炭产量占世界的 35% 以上。中国同时也是世界煤炭消费量最大的国家, 在一次能源生产和消费构成中煤炭始终占一半以上^[1]。如表 1 所示。

根据上述中国能源消费结构表 1 可知, 煤炭一直是中国最主要的一次能源, 不仅过去如此, 现在如此, 将来较长时期内仍然如此。煤炭工业在中国能源工业和国民经济中占有十分重要的地位。在煤炭总消耗量中,

煤炭主要用于火力发电, 截至 2007 年底, 全国发电装机容量达到 71329 万千瓦, 其中, 水电装机容量达 14526 万千瓦, 占总容量的 20.36%; 火电装机容量 55442 万千瓦, 约占总装机容量的 77.73%; 核电装机容量达 885 万千瓦, 约占总装机容量的 1.2%, 风力发电为 403 万千瓦, 占总容量的 0.57%; 生物质能等其他发电为 74 万千瓦, 占总容量的 0.10%^[2-3]。

由此可知, 中国的发电能源以煤为主, 其次是水能, 核电的比重较小。火电发电仍然是电力生产的主要形

*本文得到上海市教委重点学科 (第五期 No.G51304) 和上海市教委第三期本科教育高地建设项目资助。

Table 1. 1997-2007 total energy consumed and structure of China

表1 1997-2007 年中国能源消费总量与结构

年份	能源消费总量 (万吨标准煤)	占能源消费总量的比重(%)			
		煤炭	石油	天然气	水电、核电、风电
1997	137798	71.7	20.4	1.7	6.2
1998	132214	69.6	21.5	2.2	6.7
1999	133831	69.1	22.6	2.1	6.2
2000	138553	67.8	23.2	2.4	6.7
2001	143199	66.7	22.9	2.6	7.9
2002	151797	66.3	23.4	2.6	7.7
2003	174990	68.4	22.2	2.6	6.8
2004	203227	68.0	22.3	2.6	7.1
2005	224682	69.1	21.0	2.8	7.1
2006	246270	69.4	20.4	3.0	7.2
2007	265583	69.5	19.7	3.5	7.3

式。随着国家经济的发展对电力的需求也将随之增加,这必将消耗更多的煤炭资源,同时也将加大污染物二氧化碳的排放。基于中国以煤为主的能源结构,CO₂年排放量处于较高的水平,节能减少CO₂排放是当今社会的热点问题,因此针对煤炭消耗量大的燃煤发电机组,研究CO₂减排技术就显得尤为重要。

2 燃煤电站控制 CO₂ 排放技术

在电力生产过程中,电站锅炉煤炭燃烧时必将产生大量的二氧化碳,这些二氧化碳的排放直接影响到大气环境的品质。目前控制和减少 CO₂ 排放的方法主要有吸收分离法、吸附分离法、膜分离法、O₂/CO₂ 燃烧技术、低氧燃烧技术等。降低 CO₂ 排放技术的实施效果与燃煤烟气中 CO₂ 浓度和分压力有关,提高烟气中 CO₂ 排放浓度有助于 CO₂ 的脱除与回收。

一般情况下,常规燃煤电站锅炉烟气中 CO₂ 的浓度一般为 14%-16%,就此直接从烟气中分离、回收低浓度的 CO₂ 将影响电站锅炉效率和发电成本。因此,如何提高烟气中 CO₂ 的浓度,降低分离回收 CO₂ 成本是当今研究领域的热点问题^[4, 5]。

采用较低的过量空气系数,使燃烧后烟气中剩余氧很少的燃烧技术称低氧燃烧技术。采用此技术后,烟气中 CO₂ 浓度增加,为燃烧后烟气中 CO₂ 捕集提供了方便,

根据现阶段燃煤发电机组烟气量大、CO₂ 分压低,其中还含有 NO_x、SO₂、O₂、飞灰等的实际状况,对燃煤发电厂脱碳技术提出了更高的要求 and 条件:

(1) 在煤炭燃烧生成的烟气中,要求 CO₂ 浓度高。

(2) CO₂ 吸收过程应能在较低的温度下进行,减少能量损失。

(3) 燃煤电厂脱碳是以减少温室气体排放为目的,吸收后解析的 CO₂ 浓度高,有利于加压液化成 CO₂

产品,提高 CO₂ 气体回收率。

(4) 脱碳过程中各工艺环节的能耗要尽可能低。

2 低氧燃烧原理

低氧燃烧是提高烟气中 CO₂ 浓度的有效方法。该技术就是在煤炭燃烧过程中,采用较低的过量空气系数,使燃烧后烟气中剩余氧含量降低的燃烧技术^[6]。针对燃煤电站锅炉的实际运行状况,通过锅炉低氧燃烧技术的改造,减少燃烧后产生的烟气量,使得烟气中 CO₂ 浓度增加,为燃烧后烟气中 CO₂ 捕集提供良好的前提条件。在实际实施过程中,结合锅炉空气分级燃烧或燃料再燃技术,还可以有效降低 NO_x 的排放量,经济效益显著。

影响低氧燃烧技术实施的主要因素:电站锅炉燃用的煤炭特性、锅炉运行参数、燃烧器类型与结构配置等。煤炭特性中的成分直接影响锅炉炉膛温度及燃烧所需空气量;锅炉运行参数影响燃烧器结构布置及空气量的分配形式、空气加热温度、磨煤量等。电站锅炉常用的燃烧器是切圆燃烧方式直流燃烧器,燃烧器一、二次风喷口有两种布置方式:均等配风方式和分级配风方式如图 1(a)、(b)。

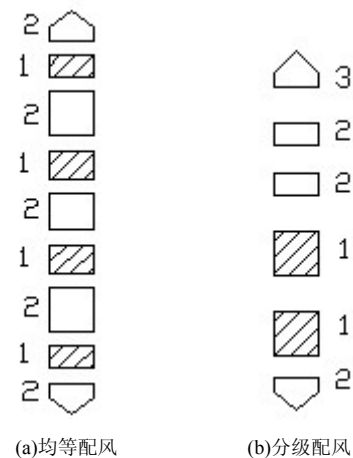


Figure 1. Installation of direct burners with tangential firing

图 1 切圆燃烧方式直流燃烧器喷口布置方式

图 1 (a) 为均等配风方式,特点是一、二次风喷口相间布置,一、二次风喷口相互紧靠,其喷口边缘的上、下间距较小,一般为 80~160mm,沿高度间隔排列的各个二次风喷口的风量分配接近均匀。这种布置方式称为烟煤、褐煤型配风方式,在国内外燃用高挥发分的烟煤和褐煤锅炉上应用较广。图 1 (b) 为分

级配风方式，特点是一次风喷口相对集中布置，并靠近燃烧器的下部，二次风喷口则分层布置，其一、二次风的喷口边缘保持较大的距离，约为 160~350mm。这种配风方式称为无烟煤、贫煤型配风方式，适合于低挥发分的无烟煤和贫煤锅炉的燃烧要求。

控制 CO₂ 生成采用低氧燃烧技术后，供给煤炭燃烧空气量的减少，煤炭燃烧稳定性和燃尽受到影响。为减小对燃烧特性的影响，一般采用分级配风的方式，以推迟一、二次风的混合，保证在混合前的一次风煤粉气流有较好的着火条件。同时二次风分层，分阶段送入燃烧器煤粉气流中，首先在一次风煤粉气流着火后送入一部分二次风，促使已着火的煤粉气流的燃烧能继续扩展，煤粉气流整体着火后，再高速送入部分二次风，使它与已着火的煤粉气流强烈混合，由此加强气流的扰动，提高扩散速度，促使煤粉的强烈燃烧和燃尽过程的迅速完成。

低氧燃烧技术对锅炉煤炭燃烧运行的具体要求是：

(1) 充分利用锅炉各二次风门挡板的调节作用，使空气在燃烧器垂直面上的分级配风满足低氧燃烧的要求，

(2) 燃烧器上二次风应与 OFA 风配合使用，考虑到锅炉负荷、炉膛出口氧量的因素，在空气量的条件下保持煤炭的燃尽率。

(3) 在实施低氧燃烧时，同时要考虑污染物 NO_x 的排放浓度，降低 NO_x 的排放量。

(4) 在不同煤种、不同负荷工况下锅炉运行调整的参数随之改变。

3 煤炭燃烧与 CO₂ 浓度的变化关系

影响煤炭燃烧过程的因素有很多，CO₂ 生成浓度与燃烧密切相关，其中影响比较大的因素是燃烧过量空气系数。锅炉炉膛内煤炭燃烧过量空气系数 α 的改变将引起锅炉效率的变化，过量空气系数增大会增加排烟损失和引风机、送风机的电能耗量，减小则煤炭燃烧不完全，化学不完全燃烧损失和机械不完全燃烧损失增大，因此，在维持一定的燃烧热损失条件下，降低过量空气系数 α 有利于降低机组能耗，提高二氧化碳的排放浓度。通常不同类型的电站锅炉燃烧 α 值也会有所不同，一般在煤粉炉中，试验时的炉膛过量空气系数在 1.15~1.45(氧量在 2.74%~6.52%)之间，正

常情况下 α 值为 1.4。以有代表性的烟煤为例，计算燃烧 1kg 烟煤所需的理论与实际空气量和烟气中二氧化碳浓度，根据计算可知，一般情况下，燃煤电站锅炉燃烧烟气中二氧化碳浓度为 12.47%。

(1) 按空气中氧的容积百分数为 21% 计算，1kg 燃料完全燃烧时所需的最少空气量即理论空气量为：

$$V^0 = 0.0889 \times (Car + 0.375Sar) + 0.265 \times Har - 0.0333 \times Oar \quad (3-1)$$

$$= 4.7117 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_y^0 = 1.866 \times Car / 100 + 0.7 \times Sar / 100 + 0.8 \times Nar / 100 + 0.79 \times V^0 + 11.1 \times Har / 100 + 1.24 \times Mar / 100 + 0.0$$

(2) 当 $\alpha = 1$ 时，1kg 燃料完全燃烧生成的理论烟气体积 V_y^0 为：

$$= 5.1747 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3-2)$$

(3) 当 $\alpha > 1$ 即 $\alpha = 1.4$ ，1kg 燃料燃烧产生的实际烟气体积 V_y 为：

$$V_y = V_y^0 + (\alpha - 1) \times V^0 + 0.0161 \times (\alpha - 1) \times V^0 \quad (3-3)$$

$$= 7.0897 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

(4) 假设煤含有的碳完全燃烧，1kg 燃料生成的 CO₂ 体积为：

$$V_{CO_2} = 1.866 \times Car / 100 \quad (3-4)$$

$$= 0.8841 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

(5) 排放的烟气中 CO₂ 气体含量为：

$$\gamma_{CO_2} = V_{CO_2} / V_y \quad (3-5)$$

$$= 12.47 \%$$

如果采用低氧燃烧技术，燃烧过量空气系数变化所对应的二氧化碳浓度的变化规律如表 2 所示。

根据表 2 中数据可以得到图 2、3。由图表可知，煤炭燃料完全燃烧生成的烟气体积及 CO₂ 浓度随 α 值增大而增大。

因此，针对燃煤电站锅炉采用低氧燃烧技术，通过控制燃烧过量空气系数 α ，能够改变烟气中 CO₂ 浓度。当过量空气系数从 1.4 降低到 1.05 时，烟气中 CO₂ 浓度从 12.47% 提高到 16.33%，这为从烟气中捕集 CO₂ 气体提供了有利的条件。

Table 2. Flue gases and CO₂ concentration with different α

表 2 不同 α 值时烟煤燃烧烟气量、CO₂ 浓度

α 值	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4
烟气量 (Nm ³ /kg)	5.1747	5.4141	5.6535	5.8928	6.1322	6.3716	6.6110	6.8503	7.0897
CO ₂ 浓度(%)	17.09	16.33	15.64	15	14.42	13.88	13.37	12.906	12.47

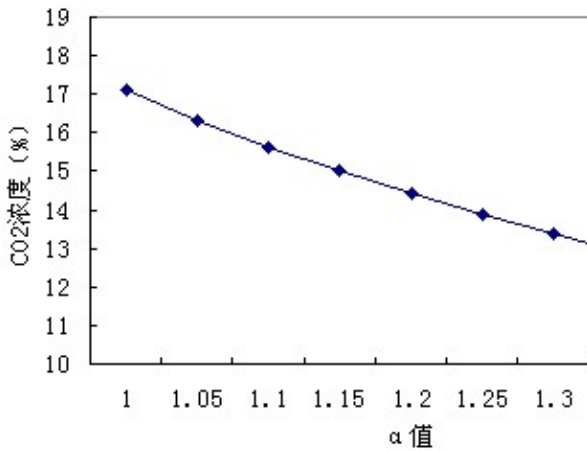
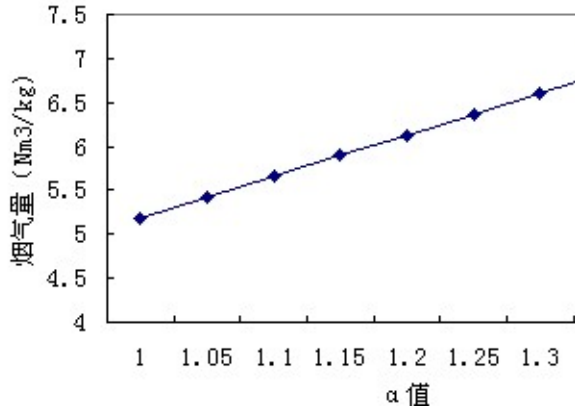


Figure 2. Change rule of flue gases with different α

图 2 煤炭燃烧烟气量随 α 值的变化规律

Figure 3. Change rule of CO₂ concentration with different α

图 3 烟气中 CO₂ 浓度随 α 值的变化规律

4 结论

控制和降低燃煤电站锅炉烟气中 CO₂ 排放量的方法有很多，化学吸收法、物理吸收法、膜分离法、

O₂/CO₂ 燃烧技术、低氧燃烧技术等。各种控制和回收 CO₂ 的方法各有利弊，针对电站燃煤锅炉燃烧的特点，比较适合电站锅炉控制 CO₂ 的方法是低氧燃烧技术。采用低氧燃烧技术能够提高电站燃煤锅炉燃烧烟气中的 CO₂ 浓度，当过量空气系数从 1.4 降低到 1.05 时，CO₂ 浓度从 12.47% 提升到 16.33%。因此，在保障煤炭燃烧稳定、燃尽的基础上，控制过量空气系数，即减少了烟气中的剩余氧，减少了烟气排放量，提高了 CO₂ 排放浓度，有利于 CO₂ 的捕集和回收，同时也能够降低锅炉排烟热损失、引风机和送风机耗电量，从而提高了锅炉热效率，具有良好的社会与经济效益。

致 谢

本文得到上海市教委重点学科（第五期 No.G51304）和上海市教委第三期本科教育高地建设项目资助。

References（参考文献）

- [1] Sun Xin. Trapping and storage technology of CO₂ in coal-fired power station[J]. China Coal, 2008, 34 (4): 96-99. 孙欣. 燃煤电厂二氧化碳捕集与储存技术[J]. 中国煤炭, 2008, 34 (4): 96-99.
- [2] Li Qingzhao, Zhao Changsui. Study on the CO₂ control technology in coal-fired power station[J]. Boiler Technology, 2007, 38 (6): 65-69. 李庆钊, 赵长遂. 燃煤电站二氧化碳控制技术[J]. 锅炉技术, 2007, 38 (6): 65-69.
- [3] Zhang Mao., Wu Shaohua, Li Zhenzhong. CO₂ tapping of coal-fired power station and resource technology[J]. Power System Engineering, 2007, 23 (5): 11-13. 张茂, 吴少华, 李振中. 火电厂 CO₂ 捕集及资源化技术[J]. 电站系统工程, 2007, 23 (5): 11-13.
- [4] Kristian J essen, Ant hony R. Kovscek, Franklin M., et al. Increasing CO₂ storage in oil recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 293 - 311.
- [5] Curt M White, Brian R Strazisar, Evan J Granite, et al. Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration in geological formations-coal beds and deep saline aquifers [J]. Air & Waste Management Association, 2003, 53(1047-3289): 645-715.
- [6] M Ishida, H Jin Hoppesteyn. CO₂ recovery in a power plant with chemical looping combustion [J]. Energy Convers. Mgmt., 1997, 38:187-192.