

文章编号: 1008-8857(2011)02-0081-06

# O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术探讨

蔡灿稳, 金晶, 路遥, 何丹丹

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 分离处置化石燃料燃烧产生 CO<sub>2</sub> 的技术被认为是近期内减缓 CO<sub>2</sub> 排放的较为可行的措施。在众多 CO<sub>2</sub> 分离回收技术中, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术具有明显的优势和较强的应用前景。它不仅可以使 CO<sub>2</sub> 的回收和利用容易进行, 还可以有效减少 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放, 同时能提高锅炉效率, 是一项高效节能的燃烧方式。对 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术进行探讨, 分析了 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术节能与减排的原理及特点, 重点阐述了 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉燃烧及各种污染物的排放特性, 指出了目前研究的不足之处和存在的问题。

**关键词:** O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧; 烟气再循环; 节能; SO<sub>2</sub>; NO<sub>x</sub>

**中图分类号:** X511; TQ038.1

**文献标识码:** A

经济发展和人口增长给环境的压力越来越大, 各种环境问题层出不穷, 它们直接或间接地影响生态平衡, 影响人类的生存与发展。当今人类面临着三大环境问题: 温室效应、酸雨和臭氧层破坏。而这三大环境问题均与煤燃烧有关, 燃煤产生的大量 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 是引起上述问题的根本原因。因此, 控制和减少燃煤过程中 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放已迫在眉睫。

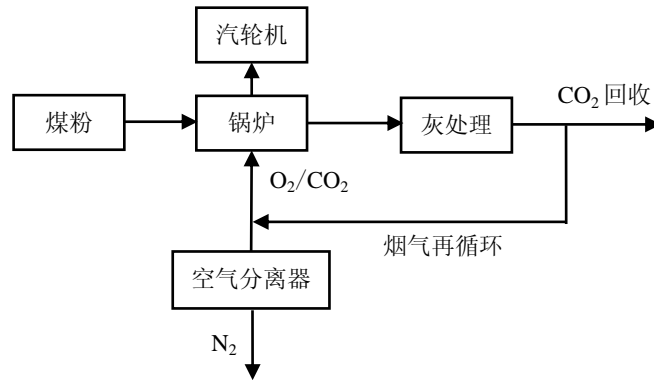
## 1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的提出

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术又称空气分离/烟气再循环技术, 用空气分离获得的纯氧和一部分锅炉排烟构成的混合气体代替空气做矿物燃料燃烧时的氧化剂, 以提高燃烧排烟中的 CO<sub>2</sub> 浓度。烟气经干燥脱水后 CO<sub>2</sub> 浓度可高达 95% 以上, 无需分离就可以实现 CO<sub>2</sub> 捕集与封存。

富氧燃烧技术由 Horne 和 Steinburg 于 1981 年提出, 经美国阿贡国家实验室 (ANL) 的研究证明只需将常规锅炉进行改造就可以采用此技术<sup>[1]</sup>。而常规化石燃料的燃烧装置中, 燃烧过程都是以空气来助燃的, 由于空气中含有大量的氮气 (接近 79%), 因此, 导致烟气中 CO<sub>2</sub> 的浓度较低 (约为 13%~16%)<sup>[2]</sup>, 直接分离 CO<sub>2</sub> 需要消耗大量的能量, 致使成本过高。如果能在燃烧过程中大幅度提高烟气中 CO<sub>2</sub> 的浓度, 使得烟气中 CO<sub>2</sub> 的浓度达到无需分离就能回收, 就能有效控制 CO<sub>2</sub> 的排放, 所以在此背景下提出空气分离/烟气再循环技术。O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的原理如图 1 所示。

收稿日期: 2010-12-06

作者简介: 蔡灿稳 (1986-), 男 (汉), 硕士研究生, caicanwen2006@163.com

图1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>混合富氧燃烧技术原理Fig. 1 Schematic diagram of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixing oxygen-enriched combustion technology

作为全球变暖的主要气体 CO<sub>2</sub> 大部分产生于矿物燃料的燃烧过程, 而电力生产中排放的 CO<sub>2</sub> 占 CO<sub>2</sub> 排放总量的 30% 以上, 是 CO<sub>2</sub> 的一个集中排放源, 控制和减缓电力生产中 CO<sub>2</sub> 的排放对于解决全球变暖和温室效应问题具有重要意义, 而 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术作为一种既能直接获得高浓度 CO<sub>2</sub>, 方便了 CO<sub>2</sub> 的捕集与封存, 又能实现综合控制燃煤污染物排放的新一代洁净煤燃烧技术, 正逐步被人们所认识和接受。

## 2 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的节能原理及特点

锅炉是以空气为燃烧介质, 如果空气成分发生变化, 对于锅炉内部燃烧、传热和其它过程的影响是根本性的, 从而影响锅炉的各项性能。O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧方式通过循环烟气调节燃烧温度, 同时循环烟气又代替空气中的 N<sub>2</sub> 携带热量以保持锅炉的传热和热效率。侯炳宇等<sup>[3]</sup>研究了用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合气体代替空气燃烧化石燃料, 并且逐步提高 O<sub>2</sub> 在混合气体中的浓度, 得到锅炉效率的变化规律。

已知锅炉效率的计算公式为

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为锅炉效率, %;  $q_2$  为排烟热损失, %;  $q_3$  为气体不完全燃烧热损失, %;  $q_4$  为固体不完全燃烧热损失, %;  $q_5$  为散热损失, %;  $q_6$  为其他热损失, %。

富氧燃烧技术的排烟热损失  $q_2$  采用下式计算

$$Q_{ar,net} = 4.18 \times [81C_{ar} + 246H_{ar} - 26(O_{ar} - S_{ar}) - 6M_{ar}] \quad (2)$$

$$I_{py} = (V_{RO_2} \times C_{RO_2} + V_{H_2O} \times C_{H_2O}) \times t_{py} \quad (3)$$

$$q_2 = I_{py} (100 - q_4) / Q_{ar,net} \quad (4)$$

式中,  $Q_{ar,net}$  为燃料低位发热值,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{ar}$  为收到基碳元素含量, %;  $H_{ar}$  为收到基氢元素含量, %;  $O_{ar}$  为收到基氧元素含量, %;  $S_{ar}$  为收到基硫元素含量, %;  $M_{ar}$  为收到基水分含量, %;  $I_{py}$  为排烟热焓,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $RO_2$  为 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 之和;  $V_{RO_2}$  为烟气中 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的体积之和,  $\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{RO_2}$  为 RO<sub>2</sub> 由 0℃ 到  $t_{py}$ ℃ 时的平均热容量,  $\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ;  $V_{H_2O}$  为烟气中水蒸气的体积,  $\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{H_2O}$  为 H<sub>2</sub>O 由 0℃ 到  $t_{py}$ ℃ 时的平均热容量,  $\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ;  $t_{py}$  为排烟温度, ℃。

在给定煤种及参数、排烟温度、过量空气系数和飞灰未燃碳不变的情况下, 通过计算得出: 随着氧气含量提高, 排烟热损失降低, 煤粉在富氧气氛下燃烧, 能够获得相对较高燃烧速度和碳燃烬率, 而且 O<sub>2</sub> 浓度的提高, 将给水加热到规定参数的过热蒸汽所需的理论空气量减少, 理论燃烧温度升高, 热容量升高。同时还发现, 当 O<sub>2</sub> 含量小于 30% 时, 随着氧浓度的增大, 锅炉效率提高较快; 当 O<sub>2</sub> 含量大于 30% 时, 锅炉效率的增大趋势变缓, 因此, 从提高锅炉效率角度考虑, 采用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧方式, O<sub>2</sub> 的体积百分数在 30% 左右较好。

采用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的节能特点:

#### (1) 减少排烟热损失

排烟热损失是由于锅炉排烟物理显热造成的热损失, 它是锅炉热损失中最主要的一项。对于大型锅炉,  $q_2$  约为 4%~8%, 影响排烟热损失的主要因素为排烟温度和烟气容积。在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧方式下, 大比例的烟气循环使得锅炉的排烟量减少 75% 左右, 使得锅炉排烟热损失  $q_2$  大大降低, 提高了锅炉的热效率  $\eta$ , 从而实现节能。

#### (2) 传热效果增强, 提高了热量利用率

由于 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧方式下高浓度 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的存在使得混合气体具有较高的比热和辐射特性, 锅炉的辐射换热与空气气氛下燃烧有较大的差异, 火焰温度的提高强化了传热, 使得相同的受热面积传热量增大, 从而可减少锅炉受热面积使锅炉结构更加紧凑, 由此带来除尘器的尺寸和管道的缩小, 降低除尘器用电消耗和管道的投资费用, 所以采用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧可以节约基建投资费用, 实现节能。

#### (3) 加快燃烧速度, 促进燃烧完全

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧气氛下, 煤粉的着火温度和燃烬温度均降低, 从而可以提高燃烧强度, 加快燃烧速度, 获得较好的热传导, 对燃烧反应有利; 而且能够减小火焰尺寸, 增加单位体积的释放热, 因此 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧气氛下可以燃用劣质煤或低挥发分煤, 有利于提高能源利用率, 从而达到节能的效果。

### 3 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的减排原理及特点

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术能够同时实现 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 等污染物的减排, 是一种污染物综合排放低的环境友好型燃烧方式。该技术主要优越性在于<sup>[4]</sup>: ① 采用烟气再循环, 以烟气中的 CO<sub>2</sub> 替代助燃空气中的氮气, 与氧气一起参与燃烧, 这样能使排烟中 CO<sub>2</sub> 体积分数大于 95%, 可直接回收 CO<sub>2</sub>; ② 与常规空气燃烧相比, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放量低; ③ 烟气再循环使得燃烧装置的排烟量仅为传统方式 1/4, 从而大大减少排烟损失, 由此锅炉热效率得以显著提高; ④ 通过调整 CO<sub>2</sub> 的循环比例有可能实现燃烧、传热的优化设计。

#### 3.1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧对二氧化硫减排原理及特点

Croiset<sup>[5]</sup>发现在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下 SO<sub>2</sub> 的转化率由空气气氛下的 91% 下降为约 64%。作者认为其主要的原可能在于 SO<sub>2</sub> 向 SO<sub>3</sub> 的转化及其在飞灰上的沉积减少, 高浓度 CO<sub>2</sub> 存在使得 SO<sub>2</sub> 析出呈现双峰结构, 在贫燃区随燃料/氧化学当量比  $\varphi$  ( $\varphi$  为理论需氧量与实际供氧量的比值) 的增大而增加, 但  $\varphi > 1.2$  后稍有下降。其原因是 SO<sub>2</sub> 被还原成 H<sub>2</sub>S、COS、CS<sub>2</sub> 等含硫物质的结果。

对煤灰的元素分析可知, 煤灰的自固硫能力强也是 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下 SO<sub>2</sub> 的排放量较少的重要原因之一。在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧中, SO<sub>2</sub> 排放特性还受 O<sub>2</sub> 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度、温度及固硫

剂等参数的影响,其规律为:在  $O_2/CO_2$  气氛中,在同等氧浓度下  $SO_2$  的析出量比空气气氛中小,随着氧浓度的提高,  $SO_2$  的排放量增大;随着  $CO_2$  浓度的升高,  $SO_2$  的排放量减少,高浓度的  $CO_2$  存在抑制了石灰石的分解,使得煅烧与脱硫同时进行,既改善了脱硫剂煅烧产物的空隙结构,又避免了脱硫产物  $CaSO_4$  对空隙的堵塞。而且石灰石加入对  $SO_2$  排放也起到抑制作用。研究发现  $O_2/CO_2$  煤粉燃烧系统炉内喷钙脱硫效果比常规方式高 3~5 倍。其脱硫机理两步反应表示为



### 3.2 $O_2/CO_2$ 混合富氧燃烧对粉尘减排原理及特点

如前所述,采用  $O_2/CO_2$  混合富氧燃烧技术后排烟的一个主要变化是烟气中的氮气含量减少。从除尘的角度分析,在总尘量不变的情况下,由于烟气体积减少,使得烟气中的粉尘浓度增大,有利于除尘收集,同时除尘设备的体积也相应地减小,但是  $O_2/CO_2$  气氛下超细颗粒物及痕量元素的行为机理可能有别于常规燃烧,其机理还有待进一步深入研究。

### 3.3 $O_2/CO_2$ 混合富氧燃烧对氮氧化物减排原理及特点

低  $NO_x$  排放特性是  $O_2/CO_2$  新型燃烧技术的一大特点。在  $O_2/CO_2$  气氛下,燃煤  $NO_x$  的排放量大大降低,约为空气气氛下燃煤  $NO_x$  排放量的 1/3~1/4。在  $O_2/CO_2$  气氛下,  $NO_x$  排放较低的主要原因在于:① 避免由于  $N_2$  存在而引起的热力型  $NO_x$  及快速型  $NO_x$  的生成;② 高浓度的  $CO_2$  气氛下生成较高含量的 CO,使得 NO 及循环  $NO_x$  在焦表面发生 NO/CO/char(炭)还原反应,即反应式(7)~(9);③ 还原性物质再燃、燃料 N 与  $NO_x$  的相互作用以及碳氢物质的还原使得  $NO_x$  的排放进一步降低;④ 由于采用烟气再循环,使得生成的  $NO_x$  参与还原反应的时间增加等。



除上述因素外,  $NO_x$  排放量的大小还受煤种、温度、燃料/氧化学当量比和烟气循环率等多种因素有关。Okazaki K 等<sup>[6]</sup>发现,当烟气循环比高达 80% 的情况下约有 50% 的循环  $NO_x$  被还原。Hu<sup>[7]</sup>研究了煤质特性对  $NO_x$  还原的影响,发现燃料 N 向挥发份物质的相对析出率以及挥发分 N 与焦炭 N 之比对  $NO_x$  的释放至关重要,而且在贫燃区随着燃料/氧化学当量比  $\phi$  的增大而增加;当  $\phi > 0.8$  后急剧下降;当  $\phi > 1.4$  后  $NO_x$  的排放浓度与  $O_2$  浓度不再相关。Hu 等<sup>[8]</sup>对煤粉在  $N_2$  气氛下和  $CO_2$  气氛下燃烧结果表明,当温度由 1 123 K 升高到 1 573 K 时,在  $N_2$  气氛下,  $NO_x$  质量分数增加 50%~70%,而在  $CO_2$  气氛下,  $NO_x$  质量分数增加 30%~50%。

## 4 $O_2/CO_2$ 混合富氧燃烧技术的应用现状

目前,国内外对富氧燃烧技术的研究主要集中在煤粉炉上。在对  $O_2/CO_2$  气氛下煤的燃烧特性、循环烟气下污染物的释放特性、 $O_2/CO_2$  混合富氧燃烧经济性和对锅炉热效率的影响等方面进行了研究。日本北海道工业研究所、荷兰 Delft 科技大学、波兰 Czestochowa 科技大学、加拿大 Ottawa 能源科技中心、芬兰 Lappeenranta 科技大学、美国 ALSTOM 以及国内的浙江大学等机构对流化床富氧燃烧技术进行了相关的研究,研究重点主要是流化床富氧燃烧的机理、

NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放特性以及氧气浓度对循环流化床(CFB)锅炉设计的影响等。

由于 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧有实验理论研究的支持, 目前它已逐步走向中试规模工业应用阶段, 而且部分独立组件已实现商业化运行。在 1990 年~1995 年, EC Joule Thermie 项目完成了第一座大型 35 MWe 富氧燃煤燃烧器改造测试。自此, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术得到了快速发展。由表 1 可以看出, 自 2007 年后, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧中试规模和具有 CCS(CO<sub>2</sub> 的捕集与封存技术)的示范电站相继启动。预计在 2014 年~2018 年前后完成 50~300 MWe 的完整规模示范电站, 并在 2020 年使 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧达到商业化运行。

表 1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧的示范电站  
Table 1 Demonstration power plants with O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixing oxygen-enriched combustion

项目名称	地点	启动年份	锅炉类型	主要燃料	CO <sub>2</sub> 处理
B&W	美国	2007	中试煤粉炉	烟煤、次烟煤、褐煤	-
Jupiter	美国	2007	工业锅炉、无烟气再循环	天然气、煤	-
Oxy-coal UK	英国	2009	中试煤粉炉	烟煤	-
Alstom (Windsor Facility)	美国	2009	中试煤粉炉	烟煤、次烟煤	-
Vattenfall	德国	2008	中试煤粉炉	褐煤	有 CCS
Toal, Lacq	法国	2009	工业锅炉	天然气	有 CCS
Callide	澳大利亚	2011	30 MWe	烟煤	有 CCS
CIUDEN-PC	西班牙	2010	中试煤粉炉	烟煤、褐煤、煤焦	有 CCS
CIUDEN-CFB	西班牙	2010	中试 CFB	烟煤、褐煤、煤焦	有 CCS
ENEL HP Oxy	意大利	2012	中试厂	煤	
HBPB-Michigan/Praxair	美国	2014	~75 MWe	烟煤	有 CCS
Vattenfall (Janschwalde)	德国	2014	~300 MWe	烟煤	有 CCS
Endesa/CIUDEN	西班牙	2015	~300 MWe	-	有 CCS
Black Hills Power/B&W/AL	美国	2015	~100 MWe	-	有 CCS
KOSEP/KEPRI Yongdong	韩国	2018	~100 MWe	-	-

## 5 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术开发存在的问题

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术的主要挑战是锅炉火焰和热传输的特征以及防止空气泄漏进入炉内等问题。况且许多现有锅炉没有设计防止漏气装置, 需要更新所有锅炉可能是困难的。用氧气代替空气燃烧, 它具有更高火焰温度, 可提高热效率, 而且在循环烟气中 CO<sub>2</sub> 的比热较空气高且水蒸气的含量也高, 使燃烧推迟, 这需要对锅炉和燃烧器进行改进研究。

目前, 电站锅炉采用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术后, 热效率随富氧量的增加而提高的幅度、锅炉内辐射换热与对流换热发生的变化以及由此带来的锅炉改造、锅炉的安全经济运行、燃烧机理、水蒸气对材料的腐蚀等问题都亟待更加深入地研究。尽管空气压缩和分离技术在当今工业发展中是很普通的方法, 但目前要研制大型空气分离设备使电站锅炉能应用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合富氧燃烧技术, 并解决由空气分离而产生的大量副产品氮气利用的合适途径等问题都有待深入研究。

## 6 结束语

综合目前研究成果可以认为, 现有火电厂采用  $O_2/CO_2$  混合富氧燃烧技术和二氧化碳捕捉技术是可行的, 而且实验研究和数值模拟都显示  $O_2/CO_2$  混合富氧燃烧技术不仅能使分离收集  $CO_2$  容易进行, 还同时具备相当低的  $NO_x$  排放和较高的脱硫效率功能。被作为一种节能并且对环境能实现零排放的清洁燃烧技术, 现已在中试规模实验中示范, 部分独立组件在所需规模下已实现商业运行, 使得  $O_2/CO_2$  混合富氧燃烧技术比其它可选择的  $CO_2$  捕获技术更具经济竞争力。但在燃烧机理、传热计算、 $NO_x$  形成机理及锅炉设计等方面还需要做进一步的工作。

### 参考文献:

- [1] 张阿玲, 方 栋. 温室气体  $CO_2$  的控制和回收利用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [2] 刘 忠.  $O_2/CO_2$  燃烧技术及其污染物生成与控制[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(1): 82-87.
- [3] 侯柄宇. 富氧燃烧技术对锅炉效率的影响[J]. 科技创新导报, 2010, 34(1): 114-115.
- [4] 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.
- [5] CROISET E, THAMBIMUTHU K V.  $NO_x$  and  $SO_2$  emissions from  $O_2/CO_2$  recycle coal combustion[J]. *Fuel*, 2001, 80(5): 2117-2121.
- [6] Okazaki K, Ando T.  $NO_x$  reduction mechanism in coal combustion with recycled  $CO_2$ [J]. *Energy*, 1997; 22(3): 207-215.
- [7] HU Y Q, KOBAYASHI N, HASATANI M. Effects of coal properties on recycled- $NO_x$  reduction in coal combustion with  $O_2$ /recycled flue gas[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(2): 2331-2340.
- [8] HU Y Q, KOBAYASHI N, HASATANI M. The reduction of recycled- $NO_x$  in coal combustion with  $O_2$ /recycled flue gas under low recycling ratio[J]. *Fuel*, 2001, 80(13): 1851-1855.

## The discussion of $O_2/CO_2$ combustion technology

CAI Can-wen, JIN Jing, LU Yao, HE Dan-dan

(College of Power and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The technology to separate and recover the  $CO_2$  from the fossil fuel burning is believed to be more feasible measures to slow down the emission of the  $CO_2$  among the separation and recovery technology of  $CO_2$  in the future.  $O_2/CO_2$  mixed oxygen-enriched combustion technology have the obvious advantages and application.  $O_2/CO_2$  mixed oxygen-enriched combustion is an energy-saving technology, which is not only beneficial to reduction and control of  $CO_2$ ,  $NO_x$  and  $SO_2$  emissions, but also can increase combustion efficiency. Research on the oxygen-enriched combustion technology is reviewed, the characteristics of energy-saving and carbon emission reduction and the development and application of oxygen-enriched combustion and the problems of it in using are all found out.

**Key Words:**  $O_2/CO_2$  combustion technology; recycled flue gas; energy-saving;  $SO_2$ ;  $NO_x$