

# 富氧燃烧技术与新型干法水泥生产技术的耦合性研究

段永华<sup>1</sup>, 李辉<sup>1,2\*</sup>, 范潇<sup>1</sup>, 徐德龙<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 陕西循环经济工程技术院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**通过数学建模和理论分析,对富氧燃烧技术与新型干法水泥生产技术进行耦合性研究,结果表明,当煤粉燃烧气氛中 O<sub>2</sub> 体积分数为 21% ~ 30%, 系统漏风系数为 1% ~ 10% 时,烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数可提高到 50% ~ 83.29%; 烟气排放量降低 43.70% ~ 59.72%; 当 O<sub>2</sub> 体积分数为 30% 时,系统风量降低了 28.47% ~ 32.65%; 煤粉消耗量降低 13.94% ~ 17.04%; 富氧燃烧技术在水泥生产过程中的应用可以有效降低水泥熟料的单位能耗,提高设备的生产能力,降低水泥工业烟气中 CO<sub>2</sub> 的捕集成本,具有很高的市场推广前景。

**关键词:**水泥工业;富氧燃烧;新型干法水泥;CO<sub>2</sub> 捕集;耦合性研究

**中图分类号:**TQ172.6+2

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2014)04-0130-04

## Feasibility of oxy-fuel technology for NSP cement production process

DUAN Yong-hua<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1,2\*</sup>, FAN Xiao<sup>1</sup>, XU De-long<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Techno-Institute of Recycling Economy, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Mathematic model and theoretical study are both used for analysis on the feasibility of oxy-fuel technology for new suspended preheating cement production process. The result shows that the concentration of CO<sub>2</sub> in the exhaust gas can reach 50% - 83.29%, while the concentration of offered O<sub>2</sub> is 21% - 30% and leakage coefficient is 1% - 10%. The total amount of exhaust gas is decreased by 43.70% - 59.72%. When the concentration of offered O<sub>2</sub> is 30%, the amount of air is decreased by 28.47% - 32.65% in the system. The coal consumption is decreased by 13.94% - 17.04%. It indicates that oxy-fuel technology for cement production can tremendously reduce energy consumption, improve equipment productivity and decrease the cost of CO<sub>2</sub> capture. It is proved that the oxy-fuel technology has a high marketing prospect in the cement production.

**Key words:** cement industry; oxygen-enriched combustion; the NSP cement; CO<sub>2</sub> capture; study

水泥工业作为主要的 CO<sub>2</sub> 排放行业,其 CO<sub>2</sub> 排放量占全球温室气体排放总量的 5%,2010 年仅中国水泥工业的碳排放量就高达 13.9 亿 t。因此,中国作为 CO<sub>2</sub> 排放大国,治理和控制 CO<sub>2</sub>,尤其对水泥工业 CO<sub>2</sub> 的排放控制已刻不容缓<sup>[1-4]</sup>。

富氧燃烧技术作为一项新型的高效节能的燃烧技术,能够降低燃料的燃点,加快燃烧速度,促进燃烧完全,提高火焰温度,减少燃烧后的烟气量,提高热量利用率和降低过量空气系数,被发达国家称之为“资源创造性技术”。目前,富氧燃烧技术是工业窑炉最为看好的节能环保燃烧技术之一,已在冶金工业、玻璃工业和热能工程等领域得到了成功应用,尚没有在水泥工业采用富氧燃烧的成功案例。本文中以新型干法水泥生产工艺为基础,结合富氧燃烧技术的技术特点,在水泥生产过程中采用富

氧燃烧技术和烟气循环及配风技术组织煤粉的燃烧,采用非线性收缩模型对新型干法水泥生产技术与富氧燃烧技术进行耦合性研究,探索富氧燃烧技术对水泥工业生产过程及烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响关系<sup>[5-7]</sup>。

## 1 研究模型

由于富氧燃烧技术需要 O<sub>2</sub> 体积分数高于 21% 的气氛来组织煤粉燃烧,所以要来自于空气分离设备的高纯度 O<sub>2</sub> 与部分烟气进行复配,因此要实现富氧燃烧技术应用于新型干法水泥生产过程,需要在原有系统上增设烟气循环和配风系统,如图 1 所示。

收稿日期:2013-11-24

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116120110013);国家自然科学基金资助项目(51274159);陕西省重大科技创新项目(2012zk06-2)

作者简介:段永华(1978-),男,博士生,材料科学与工程专业,029-82005280,dyh9321@126.com;李辉(1971-),博士,教授,主要从事材料科学与工程及固体废弃物资源化利用等方面的研究,通讯联系人,029-82202022,sunshineli@vip.sina.com。

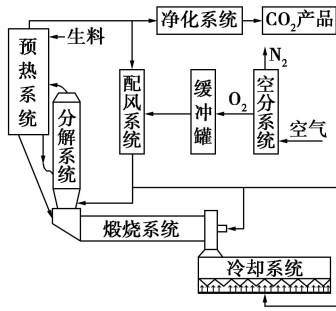


图1 水泥工业富氧燃烧生产工艺示意图

### 1.1 系统平衡模型的建立

在确定窑炉的类型之后,需要进行全面的热量平衡和质量平衡计算。

水泥窑炉物料收支平衡:

$$m_r + m_s + m_y + m_x = m_{sh} + m_f + m_{fh} \quad (1)$$

式中,  $m_r$  为燃料消耗量;  $m_s$  为生料消耗量;  $m_y$  为系统风量;  $m_x$  为漏风总量;  $m_{sh}$  为熟料量;  $m_f$  为烟气量;  $m_{fh}$  为飞灰量。

水泥窑炉热量收支平衡:

$$Q_{rr} + Q_r + Q_s + Q_y + Q_x =$$

$$Q_{shR} + Q_{sh} + Q_f + Q_{fh} + Q_{sw} + Q_s + Q_{fhr} + Q_{rw} \quad (2)$$

式中,  $Q_{rr}$  为燃料燃烧热;  $Q_r$  为煤粉显热;  $Q_s$  为生料显热;  $Q_y$  为系统风显热;  $Q_x$  为系统漏风显热;  $Q_{shR}$  为熟料形成热;  $Q_{sh}$  为熟料显热;  $Q_f$  为烟气显热;  $Q_{fh}$  为飞灰显热;  $Q_{sw}$  为生料水分蒸发热;  $Q_s$  为系统表面散热;  $Q_{fhr}$  为飞灰脱水/分解耗热;  $Q_{rw}$  为煤粉水分蒸发热。

### 1.2 配风系统模型的建立

在进行系统配风模型的建立过程中,将部分烟气混入体积分数为 93% 的  $O_2$  中,复配出煤粉助燃气氛中所需的  $O_2$  体积分数  $x_{O_2}$  和流量  $V_v^{i+1}$ ,应用式(3)和式(4)与系统平衡模型进行耦合计算,确定系统需要的  $O_2$  量和循环烟气量。

$$V_v^{i+1} \cdot x_{O_2} = V_{rR}^i \cdot x_{O_2}^i + 0.93V_{O_2}^i \quad (3)$$

$$V_v^{i+1} = V_{rR}^i + V_{O_2}^i \quad (4)$$

式中,  $V_v^{i+1}$  为第  $i+1$  次系统供风量;  $V_{rR}^i$  为第  $i$  次循环风量;  $V_{O_2}^i$  为第  $i$  次需  $O_2$  量;  $x_{O_2}^i$  为富氧燃烧气氛中  $O_2$  体积分数;  $x_{O_2}^i$  为第  $i$  次烟气中  $O_2$  体积分数。

联立系统平衡计算模型和配风系统模型,即可获得富氧燃烧条件下新型干法水泥生产过程中煤粉燃烧气氛中  $O_2$  体积分数、系统漏风系数对烟气量、烟气中  $CO_2$  体积分数、单位水泥熟料耗煤量的影响关系及系统所需循环烟气量和  $O_2$  量的变化关系。

以生产 1 kg 水泥熟料为计算基准进行计算。

为了便于与新型干法水泥工业窑炉进行比较,本文中同时对新型干法水泥工业窑炉在采用空气和不同体积分数  $O_2$  的富氧气氛作为煤粉燃烧气氛进行研究,并对由于系统规制不同所引起的不同系统漏风系数进行了研究和分析。

## 2 计算实例

计算条件:①窑型:  $\phi 3.5 \text{ m} \times 45 \text{ m}$  RSP 预分解窑;②熟料出冷却机温度:  $210^\circ\text{C}$ ;③入窑生料、煤粉温度:  $25^\circ\text{C}$ ;④环境温度:  $30^\circ\text{C}$ ;⑤入窑预热风温度:  $850^\circ\text{C}$ ;⑥空气过剩系数: 1.05;⑦生料和煤粉的水分质量分数均为 1%;⑧物料、熟料和煤粉的化学组成及物性数据如表 1 ~ 表 3 所示。

表1 物料化学成分质量分数 %

项目	烧失量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	其他	总和
干生料	35.58	13.67	3.55	2.59	42.5	1.56	—	0.55	100.00
熟料	—	20.60	5.85	5.00	63.91	2.10	—	2.54	100.00
飞灰	33.40	14.59	4.09	2.07	41.85	1.87	—	2.13	100.00
煤灰	—	40.50	16.72	10.85	15.97	5.42	5.51	5.03	100.00

表2 熟料矿物组成数据表

组分	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
质量分数/%	57.09	16.08	7.05	15.20

表3 煤粉各组分质量分数及发热量

项目	C <sup>f</sup> /%	H <sup>f</sup> /%	S <sup>f</sup> /%	N <sup>f</sup> /%	O <sup>f</sup> /%	V <sup>f</sup> /%
数值	66.48	4.08	0.35	1.17	11.84	30.40
项目	FC <sup>f</sup> /%	A <sup>f</sup> /%	W <sup>f</sup> /%	Q <sub>DW</sub> <sup>f</sup> /(kJ·kg <sup>-1</sup> )		
数值	53.52	11.28	4.80	25376		

以  $O_2$  体积分数为 25%, 漏风系数为 1% 为例,由式(1)、式(2)及相关假设进行水泥工业富氧燃烧工艺计算,所得物料衡算和热量衡算结果如表 4 和表 5 所示,烟气成分及烟气量如表 6 所示。

表4 物料收支平衡表

项目	单位熟料收/(g·g <sup>-1</sup> )	所占比例/%
燃料消耗	0.1077	3.65
生料消耗	1.6962	57.51
系统风量	1.1069	37.53
漏风量	0.0388	1.31
物料总收入	2.9495	100.00
项目	单位熟料支/(g·g <sup>-1</sup> )	所占比例/%
熟料量	1.0000	33.96
烟气量	1.8040	61.16
飞灰量	0.1455	4.93
物料总支出	2.9495	100.00

表 5 热量收支平衡表

项目	单位熟料收/(J·g <sup>-1</sup> )	所占比例/%
燃料燃烧热	2732.6949	97.38
燃料显热	3.1714	0.11
生料显热	36.6377	1.31
系统风显热	32.4737	1.16
系统漏风显热	1.1773	0.04
热量总收入	2806.1551	100.00

项目	单位熟料支/(J·g <sup>-1</sup> )	所占比例/%
熟料形成热	1750.6748	62.39
熟料显热	173.2220	6.17
烟气显热	478.8310	17.06
飞灰显热	32.8925	1.17
生料水分蒸发热	0.4236	0.02
系统表面散热	350.0000	12.47
飞灰脱水/分解耗热	20.0843	0.72
煤粉水分蒸发热	0.0269	0.00
热量总支出	2806.1551	100.00

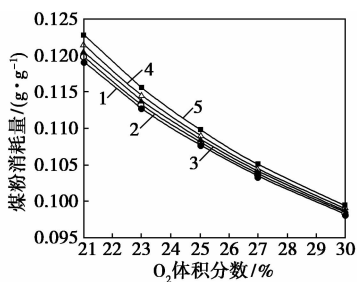
表 6 单位风量及烟气中各组分的体积分数

项目	风量/ (m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> / %	O <sub>2</sub> / %	CO <sub>2</sub> / %	SO <sub>2</sub> / %	H <sub>2</sub> O/ %
烟气	0.9963	7.41	1.23	83.14	0.05	8.21
循环烟气	0.4624	8.08	1.34	90.57	0.06	0.00
O <sub>2</sub>	0.1609	7.00	93.00	—	—	—

### 3 结果与分析

#### 3.1 富氧燃烧技术对单位水泥熟料煤粉消耗量的影响

图 2 表示了富氧燃烧条件下,新型干法水泥熟料煅烧过程中,单位水泥熟料煤粉消耗量随 O<sub>2</sub> 体积分数的变化关系。由图 2 可以看出,随着富氧燃



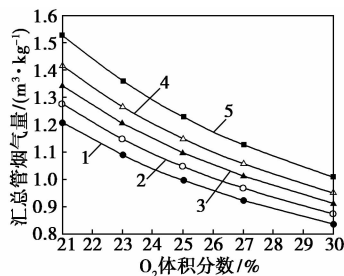
煤粉消耗量随 O<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线:  
1—1% ; 2—3% ; 3—5% ; 4—7% ; 5—10%

图 2 O<sub>2</sub> 体积分数对煤粉消耗量的影响关系

烧气氛中 O<sub>2</sub> 体积分数的增加,单位水泥熟料煤粉消耗量逐渐降低;并且随着系统漏风系数的增加,单位水泥熟料的煤粉消耗量逐渐增加。当 O<sub>2</sub> 体积分数达到 30% 时,单位水泥熟料的煤粉消耗量可降低 13.94% ~ 17.04%,所以水泥工业采用富氧燃烧技术可有效降低单位水泥熟料的煤粉消耗量。

#### 3.2 富氧燃烧技术对系统风量的影响

由于富氧燃烧技术采用 O<sub>2</sub> 体积分数大于 21% 的气氛来组织煤粉的燃烧,所以水泥工业采用富氧燃烧技术会引起系统风量和烟气的 CO<sub>2</sub> 体积分数发生明显变化。图 3 表示富氧燃烧技术对水泥熟料生产过程中系统风量的影响。



汇总管烟气量随 O<sub>2</sub> 体积分数的变化曲线:  
1—1% ; 2—3% ; 3—5% ; 4—7% ; 5—10%

图 3 O<sub>2</sub> 体积分数对系统风量的影响

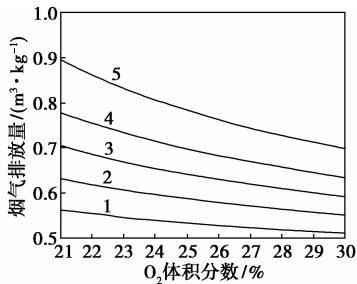
从图 3 可以看出,随着 O<sub>2</sub> 体积分数的增加和系统漏风系数的降低,系统汇总管处的风量逐渐降低,当 O<sub>2</sub> 体积分数达到 30% 时,系统风量可降低 28.47% ~ 32.65%。根据新型干法水泥生产技术的技术要求,为了使水泥生料在旋风预热器和分解炉中稳定地实现物料的换热和分解,系统需维持一定的风量,以保证其过程的稳定进行,所以采用富氧燃烧技术后,需加大生料和煤粉的投料量,以保持系统风量与原工况一致,可提高原有生产设备产能。

#### 3.3 富氧燃烧技术对烟气排放量的影响

由于煤粉在高纯度 O<sub>2</sub> 中燃烧温度过高,需将部分烟气循环稀释燃烧气氛中的 O<sub>2</sub> 体积分数,所以富氧燃烧技术也会引起水泥熟料生产过程中烟气排放量的变化。

图 4 表示水泥工业采用富氧燃烧技术的条件下,单位水泥熟料生产过程中烟气排放量随燃烧气氛中 O<sub>2</sub> 体积分数的变化关系。由图 3 可以发现,随着 O<sub>2</sub> 体积分数的增加,单位水泥熟料生产过程中烟气排放量逐渐降低,且随系统漏风系数的增加也逐渐增加。采用富氧燃烧技术的水泥熟料煅烧过程,烟气排放量为采用传统空气助燃方式燃煤技术的

43.70% ~ 59.72%。所以提高燃烧气氛的  $O_2$  体积分数、降低系统的漏风系数可大幅度降低单位水泥熟料生产过程中的烟气排放量。

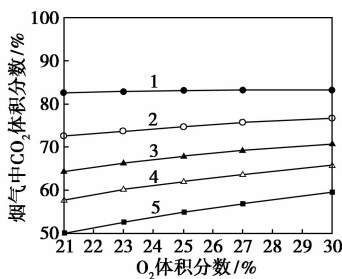


烟气排放量随  $O_2$  体积分数的变化曲线:  
1—1%; 2—3%; 3—5%; 4—7%; 5—10%

图4  $O_2$  体积分数对烟气排放量的影响

### 3.4 富氧燃烧技术对烟气中 $CO_2$ 体积分数的影响

图5表示了水泥工业采用富氧燃烧技术的条件下,系统漏风系数和  $O_2$  体积分数对烟气中  $CO_2$  体积分数的影响。由图5可以发现,随着系统漏风系数的降低,烟气中  $CO_2$  体积分数逐渐增加,  $O_2$  体积分数的增加也可以提高烟气中  $CO_2$  体积分数,但是在气密性较差的系统中,  $O_2$  体积分数对烟气中  $CO_2$  体积分数的影响比较明显。所以水泥熟料煅烧过程中采用富氧燃烧技术可以有效将烟气中  $CO_2$  体积分数提高到50%以上,  $CO_2$  体积分数的提高为后续实现  $CO_2$  分离与捕集创造了有利条件,对水泥工业实现低碳经济起到了积极的推动作用。



烟气中  $CO_2$  体积分数随  $O_2$  体积分数的变化曲线:  
1—1%; 2—3%; 3—5%; 4—7%; 5—10%

图5  $O_2$  体积分数对烟气中  $CO_2$  体积分数的影响

## 4 结论

以新型干法水泥生产技术为基础,将富氧燃烧技术应用于水泥熟料煅烧过程,确立了计算模型,进行了系统理论计算及分析,在  $O_2$  体积分数为21% ~ 30%,系统漏风系数为1% ~ 10%技术条件

下,对富氧燃烧技术与新型干法水泥生产技术的耦合性进行了研究,结论如下:

(1)富氧燃烧技术可有效降低水泥熟料煅烧过程中单位水泥熟料的煤粉消耗量。当  $O_2$  体积分数达到30%时,单位水泥熟料的煤粉消耗量可降低13.94% ~ 17.04%。

(2)富氧燃烧技术可大幅度降低水泥熟料生产过程的系统风量,当  $O_2$  体积分数达到30%时,系统风量降低了28.47% ~ 32.65%,可有效提高生产设备单位有效容积的生产能力。

(3)富氧燃烧技术可将水泥熟料生产过程的烟气排放量降低到传统工艺烟气排放量的43.70% ~ 59.72%。

(4)富氧燃烧技术可将水泥熟料生产过程烟气中  $CO_2$  体积分数提高到50.03% ~ 83.29%。

综上所述,将富氧燃烧技术应用于水泥熟料煅烧过程具有很大的技术优势,可有效降低单位水泥熟料的生产能耗;提高现有设备的生产能力;提高烟气中  $CO_2$  的体积分数,降低  $CO_2$  捕集成本,对水泥工业的节能减排具有积极的作用。对于现有的水泥生产企业而言,将富氧燃烧技术应用于水泥工业窑炉不仅可以节省能源,降低成本,也符合环境保护的要求,可提高企业的市场竞争力,具有很好的市场推广前景。

## 参考文献

- [1] 曹阳,林鹏云,罗永浩,等. 燃煤电站锅炉富氧燃烧技术的研究进展综述[J]. 锅炉技术,2012,43(1):45-48.
- [2] 毛玉如,方梦祥,马国维. 水泥工业的废弃物利用与  $CO_2$  排放控制探讨[J]. 再生资源研究,2004,(4):32-37.
- [3] 王汇,温治,罗申,等. 富氧燃烧技术在石灰回转窑中的应用研究及经济性预测[J]. 现代化工,2006,26(s2):342-346.
- [4] Vince White, Air products, UK. Oxygen production and  $CO_2$  compression [C]. Beijing:2nd Oxy-fuel Capacity Building Course,2010.
- [5] Klas Andersson, Henfik Birkestad, Peter Maksinen, et al. An 865 MW lignite fired  $CO_2$  free Power plant-a technical feasibility study [C]. Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference,2003:1051-1056.
- [6] Klas Andersson, Filip Johnsson. Process evaluation of an 865 MW lignite fired  $O_2/CO_2$  power plant [J]. Energy Conversion and Management,2006,47(18/19):3487-3498.
- [7] Arthur Darde, Rajeev Prabhakar, Jean-Pierre Tranier, et al. Air separation and flue gas compression and purification unit for oxy-coal combustion systems [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 527-534. ■