

ICS XXXXXX  
CCS X XXX

# 团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

## 水泥窑炉富氧（全氧）燃烧技术规范

Technical specification for oxygen-enriched (Oxy) combustion  
energy saving of cement kiln

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布



# 目 录

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理与流程 .....	3
4.1 原理 .....	3
4.2 流程 .....	3
5 应用分类与适用条件 .....	4
5.1 应用分类 .....	5
5.2 适用条件 .....	6
6 技术要求 .....	6
6.1 一般要求 .....	6
6.2 燃烧器、富氧喷管要求 .....	6
6.3 管道要求 .....	6
6.4 控制要求 .....	6
6.5 环保要求 .....	6
7 评价指标 .....	7
7.1 富氧提升百分数 .....	7
7.2 富氧节能率 .....	7
7.3 提升熟料质量 .....	7
7.4 提升熟料产量 .....	7
7.5 降低煤耗 .....	7
7.6 烟气量 .....	7
7.7 烟气中 CO <sub>2</sub> 浓度 .....	8
7.8 节能效果评价方法 .....	8
7.9 考核方法 .....	8
附录 A .....	8

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由北京汉能清源科技有限公司提出。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会归口。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件主要起草单位：北京汉能清源科技有限公司、.....。

本文件主要起草人：陈立新 张永谋 .....

# 水泥窑炉富氧（全氧）燃烧技术规范

## 1 范围

本文件规定了富氧（全氧）燃烧节能技术的术语和定义、原理与流程、应用分类与适用条件、技术要求 and 评价指标。

本文件适用于各种水泥窑炉，其他行业也可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本文件。

- GB4915-2013 《水泥工业大气污染物排放标准》
- T/CCAS022-2022 《水泥工业大气污染物超低排放标准》
- GB/T 17159 《工业炉名词术语》
- GB/T 20001.3 标准编写规则 第3部分：分类标准
- GB 50295-2008 《水泥工厂设计规范》
- GB50443-2016 《水泥工厂节能设计规范》
- GB50030-2013 《氧气站设计规范》
- GB/T3863-2008 《工业氧》
- JB/T6427-2015 《变压吸附制氧制氮设备》
- HG20519-2009 《化工工艺设计施工图内容和深度统一规定》
- HG20546-2009 《化工装置设备布置设计规定》
- HG/T20688-2000 《化工工厂初步设计文件内容深度规定》
- HG/T20570-1995 《工艺系统工程设计技术规定》
- JB/T5902-2015 《空气分离设备用氧气管道技术条件》
- JC/T 2634-2021 《水泥行业绿色工厂评价要求》

## 3 术语和定义

GB/T17195 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

富氧燃烧 oxygen-enriched combustion

以大于正常大气氧浓度（含氧体积百分比，20.95%）作为氧化剂来源的燃烧组织。

3.2

全氧燃烧 oxy combustion

以接近纯氧组分作为氧化剂来源的燃烧组织。

3.3

富氧率 oxygen-enriched rate

助燃空气富氧后对比正常大气（含氧体积百分比，20.95%）增加的氧含量百分比。

3.4

低浓度富氧法 low oxygen-enriched concentration method

氧气浓度不高于 30%的富氧方法。

3.5

高浓度富氧法 high oxygen-enriched concentration method

氧气浓度大于 30%且小于 90%的富氧方法。

3.6

全氧法 overall Oxygen method

氧气浓度为 90%且以小于 99%的富氧方法。

3.7 纯氧法 pure oxygen method

氧气浓度为 99%以上的富氧方法

3.8

常规富氧法 conventional oxygen enrichment method

采用燃烧器作为富氧空气通道而不外加富氧空气输送装置入窑炉的富氧助燃方法。

3.9

直接富氧法 direct oxygen enrichment method

采用不经燃烧器、额外设置富氧空气输送通道，给燃料提供富氧空气的方法。

3.10

局部富氧法 local oxygenation for combustion

部分燃烧点位助燃空气用富氧空气替代的方法，亦称局部增氧助燃法。

3.11

全富氧法 overall oxygenation for combustion

全部燃烧点位助燃空气用富氧空气替代的方法

3.12

烟气 flue gas

水泥熟料煅烧过程中因为原料排放、燃料燃烧和空气漏入后的气体量，一般以顶部旋风预热器（C1）出口来衡量，成分主要为  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $CO$  等。

### 3.13

烟气再循环 flue gas recirculation

烟气再循环是指，水泥熟料煅烧过程中产生的部分烟气又与助燃气体混合后再次进入水泥熟料煅烧过程。

## 4 原理与流程

### 4.1 原理

采用含氧体积百分比  $\geq 20.95\%$  ( $v/v$ ) 的富氧空气作为氧化剂来源的燃烧组织。

### 4.2 流程

采用常规富氧法。典型的富氧燃烧工艺流程如图 1，全氧燃烧的工艺流程见图 2 和图 3。

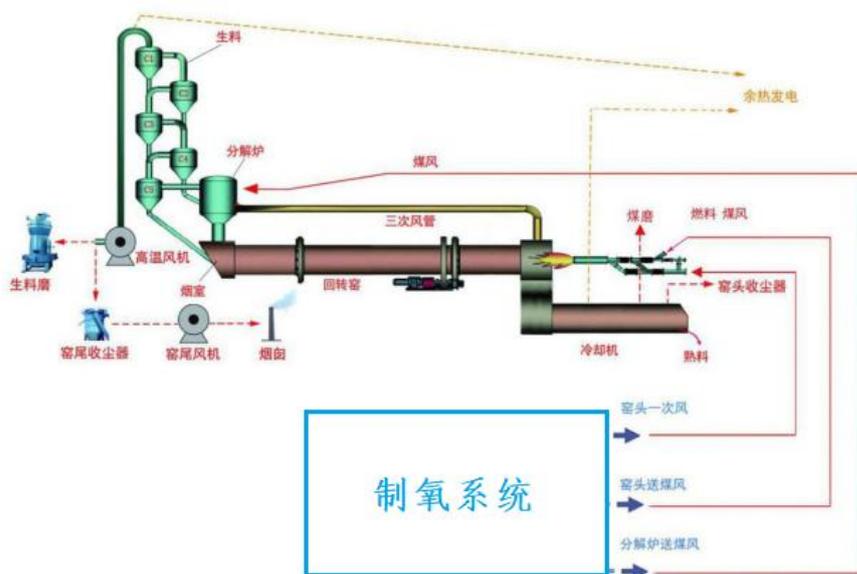


图 1 富氧燃烧的工艺流程

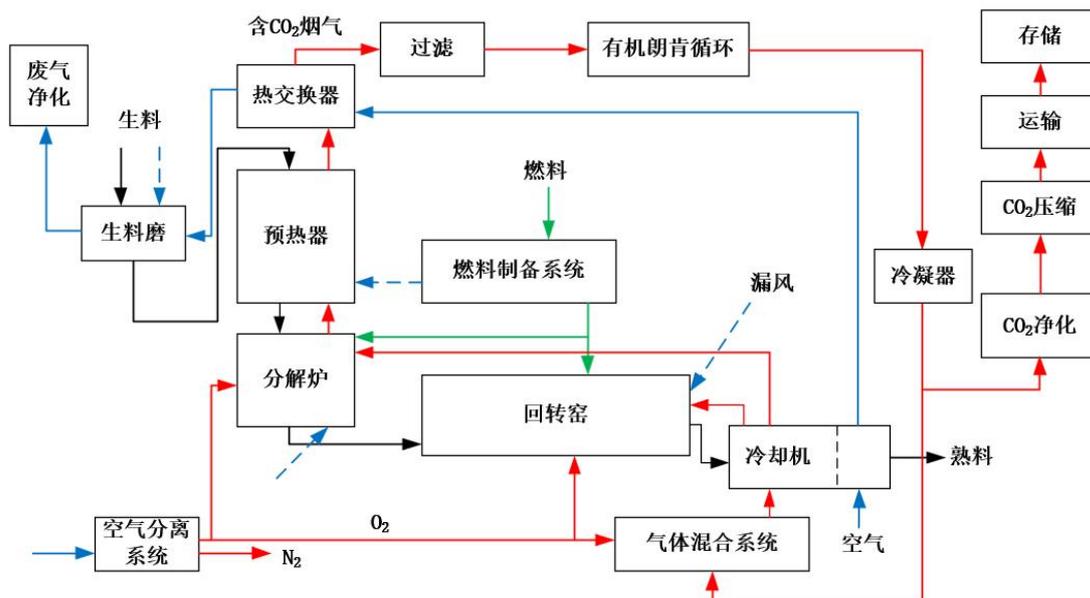


图 2 全氧燃烧的烟气再循环工艺流程

图 2 的工艺流程为：为窑炉提供燃料燃烧需要的  $O_2$ ，并实现烟气的再循环，即产生的烟气再循环进入窑炉中，从而不至于影响生料悬浮、原料烘干等，两级熟料冷却机（第一级工作在富氧燃烧模式，第二级为空气模式）。在这种情况下，烟气中的组分将会以  $O_2/CO_2$  为主，即从目前的  $O_2/N_2/CO_2$  气氛变为  $O_2/CO_2$  气氛。

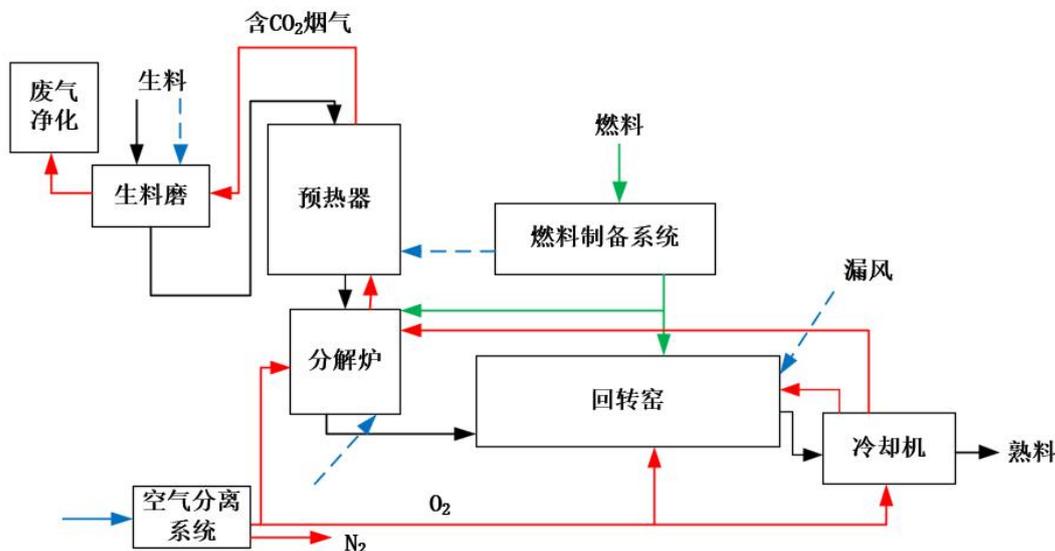


图 3 全氧燃烧的工艺流程

图 3 的工艺流程为：只为窑炉提供燃料燃烧需要的  $O_2$ ，那么这部分  $O_2$  的体积较现有空气助燃情况将会大幅度减少，根据空气中  $O_2$  浓度含量计算约为现有体积约 1/5，再加上碳酸盐分解产生的烟气量，总烟气量约为现有烟气量的 40% 以下。仅从生料悬浮、原料烘干等角度来看，现有窑炉尺寸等无法满足全氧燃烧改造后的要求，需要重新设计窑炉尺寸结构参数。

## 5 应用分类与适用条件

## 5.1 应用分类

5.1.1 依照富氧率的不同，富氧燃烧方法可分为低浓度富氧法、高浓度富氧法和纯氧法。

5.1.2 按氧气接入点的不同，富氧燃烧方法可分为常规富氧法和直接富氧法（直接火焰氧气法）见图 4 和图 5。

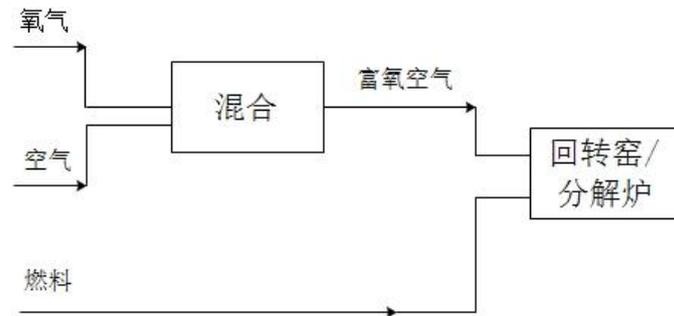


图 4 常规富氧法

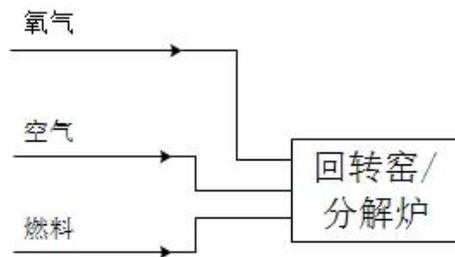


图 5 直接富氧法（直接火焰富氧法）

5.1.3 按与燃料混合方式不同，富氧燃烧方法可分为预混富氧法和非预混富氧法见图 6 和图 7。

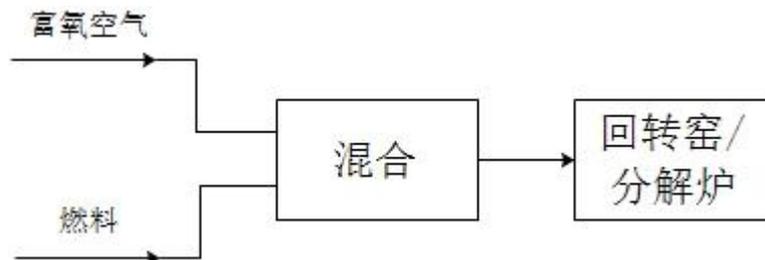


图 6 预混富氧法

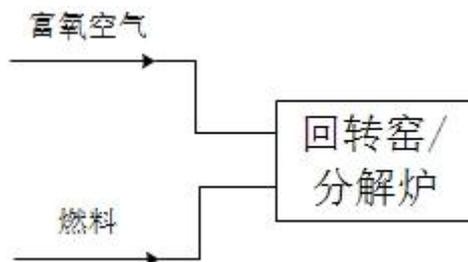


图 7 非预混富氧法

5.1.4 按照制氧方法不同，可分为深冷空分法、变压/温吸附法和膜分离法。

深冷空分法是利用液化后各组分沸点差异来精馏分离的，主要特点是单套装置产生氧气量大，适用于单产纯氧 10000Nm<sup>3</sup>/h 以上的工况，主要优点产生氧气浓度高，还能产生副产高纯度氮气和其它稀有气体，寿命在 20 年以上，不足之处是设备投资大、能耗较大、检修复杂、操作难等问题。

变压/温吸附法是利用吸附剂对特定气体的吸附和脱附能力不同来分离的,主要特点是产生氧气量较大,适用于单产纯氧 500-7500Nm<sup>3</sup>/h 的工况,随着近年来锂基分子筛技术的成功研发与应用,寿命在 10 年以上,主要优点是投资较少,设备占地面积小,工艺流程简单、自动化水平高、能耗较低。

膜分离法是利用膜对特定气体的选择透过性能不同来分离的,主要特点是产生氧气量较小,适用于 500Nm<sup>3</sup>/h 以下的工况,主要优点是投资小,运行维护简单,不足之处是对环境较敏感、产品氧气需要脱湿、膜组件寿命较短等问题。

5.1.5 依据工艺要求选择不同富氧燃烧方法。

## 5.2 适用条件

5.2.1 富氧燃烧技术适用于不同燃料的水泥炉窑,特别适用于空气中氧含量较低或使用低质煤或水泥窑协同处理固废的生产工艺情况。

## 6 技术要求

### 6.1 一般要求

6.1.1 无论采用何种技术制取富氧、全氧、纯氧,与正常大气或烟气混合为富氧之前的富氧、全氧、纯氧状态,均应为气态为宜。

### 6.2 燃烧器、富氧喷管要求

6.2.1 入窑氧浓度(体积百分比、富氧率)应满足富氧、全氧、纯氧燃烧节能改造的工艺设计要求。

6.2.2 以富氧、全氧、纯氧作为氧化剂来源的燃烧组织过程中,传统燃烧器、富氧燃烧器或富氧、全氧、纯氧喷管,应能满足富氧、全氧、纯氧燃烧的要求。

6.2.3 富氧、全氧、纯氧与燃料(燃煤、燃气)预混输送时,应满足输送的安全性要求,并应设有必要的安全装置,以确保防制灾害扩大的要求。

### 6.3 管道要求

氧气输送管道应符合 GB50030 和 GB50316 规定,管道及附件的脱脂应符合现行标准《脱脂工程施工及验收规范》HG20202 的规定。

燃料(燃煤、燃气)应遵循相应国标的规定。

### 6.4 控制要求

6.4.1 富氧燃烧技改后,氧气的供给应具有自动、手动切断回路,并能与原空气助燃系统自由切入、切出,满足无损工艺切换的要求。

6.4.2 氧气供应系统富氧、全氧、纯氧出口以及富氧、全氧、纯氧掺混空气、烟气之后,均应具有流量、压力、温度监测设施。

### 6.5 环保要求

6.5.1 富氧燃烧的水泥窑炉的烟气污染物排放应符合 GB4915-2013 《水泥工业大气污染物排放标准》或 T/CCAS022-2022 《水泥工业大气污染物超低排放标准》。

6.5.2 噪音应符合《GB 12348-2008 工业企业厂界噪声排放标准》。

## 7 评价指标

可采用富氧率、富氧节能率、提升熟料质量、提升熟料产量。对应用富氧燃烧技术的窑炉进行节能效果评价，定期完成热平衡测定，测定与评价方法应符合 GB/T26282-2021 规定。

### 7.1 富氧提升百分数

富氧提升百分数按式（1）计算。

$$n = (\varphi_1 - \varphi_2) \times 100\%$$

式中： $n$ —富氧提升百分数，以%表示；

$\varphi_1$ —使用富氧后氧气含量，以%表示；

$\varphi_2$ —使用富氧前氧气含量，以%表示，一般为空气（其体积百分比为 20.95%）；

### 7.2 富氧节能率

富氧节能率按式（2）计算。

$$\eta_f = \frac{B_q - B_h}{B_q} \times 100\%$$

式中： $\eta_f$ —富氧节能率，以%表示；

$B_q$ —富氧前窑炉的标准煤耗；

$B_h$ —富氧后窑炉的标准煤耗；

### 7.3 提升熟料质量

使用富氧后，调整配料方案，熟料 KH 控制值能够提高，并相应调整 N 和 P，能够提高熟料 28 天强（参考值为 1-3MPa）。

提升熟料质量不仅受富氧影响，还受调整配料方案的影响，因此该参数不做为评价富氧燃烧技术的量化指标。

### 7.4 提升熟料产量

使用富氧后，窑系统工况会出现新的变化，通过调整优化工艺参数，可使回转窑工况得到改善并更加稳定，能够提高平均台时产量，（参考值为 3%-10%）。

提升熟料产量不仅受富氧影响，还受调整优化工艺参数的影响，因此该参数不做为评价富氧燃烧技术的量化指标。

### 7.5 降低煤耗

使用富氧后，提高煤的燃尽率、降低煤的着火点、提高火焰温度，通过调整优化工艺参数，可使回转窑工况得到改善并更加稳定，降低煤耗（参考值为 3%-10%）。

降低煤耗不仅受富氧影响，还受调整优化工艺参数的影响，因此该参数不做为评价富氧燃烧技术的量化指标。

### 7.6 烟气量

使用富氧燃烧或全氧燃烧后，助燃气体量会相应减少，产生的烟气量也会相应减少，在进一步优化

工艺参数的情况下，可望降低烟气量 3%以上，为降低煤耗奠定基础。

### 7.7 烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度

使用富氧燃烧或全氧燃烧后，尤其使用全氧燃烧技术后，产生的烟气量中 CO<sub>2</sub> 浓度会增加，在进一步优化工艺参数的情况下，可望增加烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度 3%以上，为后续的碳捕集技术奠定基础。

### 7.8 节能效果评价方法

可采用富氧节能率对应用富氧燃烧技术的炉窑进行节能效果评价，定期开展热平衡测定，测定与评价方法应符合 GB 16780 规定。

### 7.9 考核方法

可采用富氧流量、氧气浓度、运行电耗、水耗、出口压力及运行寿命等指标进行考核。

## 附录 A

(规范性附录)

### 富氧燃烧参数计算

#### A.1 富氧空气氧含量

富氧空气氧含量按式 (A.1) 计算。

$$\gamma_{O_2} = \frac{\varphi_1 V_{O_2} + \varphi_2 V_k}{V_{O_2} + V_k} \times 100\%$$

式中： $\gamma_{O_2}$ —富氧空气的氧含量，以%表示；

$\varphi_1$ —使用富氧后氧气纯度，以%表示；

$\varphi_2$ —使用富氧前氧气纯度，以%表示

$V_{O_2}$ —接入的氧气流量，单位为立方米每秒 (Bm<sup>3</sup>/s)；

$V_k$ —富氧前空气流量，单位为立方米每秒 (Bm<sup>3</sup>/s)；