4月

2025 年

## 水泥工业氧-燃料燃烧碳捕集技术研究进展

周月桂,王玉亭,黄冠硕,陈 涛

(上海交通大学机械与动力工程学院热能工程研究所,上海 200240)

摘 要:水泥工业作为高能耗高排放的主要工业领域之一,其二氧化碳 (CO2) 排放控制已成为学术界 和工业界关注的热点。氧-燃料燃烧技术是水泥工业高效低成本二氧化碳捕集利用与封存(CCUS) 的重要技术之一, 对减少 CO2 排放和提升水泥熟料产量具有重要意义。本文系统综述了水泥工业增氧 燃烧、部分氧-燃料燃烧以及全氧-燃料燃烧技术在试验研究、数值模拟、流程优化和工业应用方面的 研究进展。增氧燃烧技术通过提高燃烧空气中氧气体积分数来提高燃烧温度、热效率和增加熟料产 量,其最佳氧气体积分数一般在27%~30%,该技术已在国内外多个水泥生产线上应用,取得了较好的 节省燃料和增产效果。部分氧-燃料燃烧是在分解炉中采用氧-燃料燃烧的碳捕集技术,该技术能够 提高 CO,体积分数并减少 NO,排放,但需要适当提高分解炉温度以维持相同的石灰石分解率,燃料消 耗量也会有所增加。全氧-燃料燃烧技术是在分解炉和回转窑中均采用氧-燃料燃烧的碳捕集技术, 可获得高 CO。体积分数的烟气,是水泥工业碳捕集技术的未来方向。为了实现与空气气氛相同的炉内 温度和产品质量,全氧-燃料燃烧的总体氧气体积分数一般在27%~29%,需要进一步优化以确定分 解炉和回转窑氧-燃料燃烧器一二三次风氧气体积分数的合理分配。通过对水泥工业氧-燃料燃烧 改造方案的技术经济性分析,其 CO2 捕集成本一般在 200~250 元/t,低于燃烧后化学吸收碳捕集技术 的成本,表明水泥工业氧-燃料燃烧碳捕集技术具有较好的经济性。未来水泥工业氧-燃料燃烧碳捕 集技术将进一步向高效率低成本低能耗方向发展,聚焦全氧-燃料燃烧关键技术研究开发、低成本制 氧技术以及与可再生能源电转气和可再生合成燃料等技术的深度融合,最终实现水泥工业 CCUS 和净 零CO,排放。

关键词:水泥工业;二氧化碳捕集利用与封存;氧-燃料燃烧;增氧燃烧;部分氧-燃料燃烧;全氧-燃料燃烧 中图分类号:TK-17 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2025)04-0163-18

# Research progresses on oxy-fuel combustion carbon dioxide capture technologies in cement industry

#### ZHOU Yuegui, WANG Yuting, HUANG Guanshuo, CHEN Tao

(Institute of Thermal Energy Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China) **Abstract:** Cement industry is one of the major industries with high energy consumption and high pollutants emissions, and its carbon dioxide ( $CO_2$ ) emission control has become a hotspot in the academia and industry. Oxy-fuel combustion technology is one of the most important technologies for high-efficiency and low-cost carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) in cement industry, which is of great significance for reducing  $CO_2$  emission and enhancing cement clinker production. This paper systematically reviews the research progresses of oxygen-enriched combustion, partial oxy-fuel combustion and full oxy-fuel combustion in terms of experimental studies, numerical simulations, process optimization and industrial application. Oxygen-enriched combustion air, and the optimal oxygen volume fraction is 27%-30%. It has been industrially applied in many cement production lines and has realized the fuel saving and yield enhancement. Partial oxy-fuel combustion is a  $CO_2$  capture technology with utilizing oxy-fuel combustion in the calciner, which can enhance  $CO_2$  volume fraction and reduce  $NO_x$  emissions, but the calciner temperature needs to be raised appropriately in order to

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52376120, 51976120, 51761125011, 51576128)

作者简介:周月桂(1972—),男,湖北京山人,教授,博士。 E-mail: ygzhou@sjtu.edu.cn

引用格式:周月桂,王玉亭,黄冠硕,等.水泥工业氧-燃料燃烧碳捕集技术研究进展 [J].洁净煤技术,2025,31(4):163-180.

ZHOU Yuegui, WANG Yuting, HUANG Guanshuo, et al. Research progresses on oxy-fuel combustion carbon dioxide capture technologies in cement industry [J].Clean Coal Technology, 2025, 31(4): 163–180.



maintain the same calcination degree of limestone, and the fuel consumption will be increased. Full oxy-fuel combustion is used in both the calciner and rotary kiln, which can obtain a high  $CO_2$  volume fraction in flue gas, and it is the future direction of  $CO_2$  capture technology in cement industry. In order to achieve the same furnace temperature and product quality as those in air atmosphere, the overall oxygen volume fraction of full oxy-fuel combustion needs to be increased to 27%-29%, and it is also necessary to optimize the partitions of the oxygen volume fractions of primary/secondary/tertiary oxidizer streams both in the rotary kiln and the calciner oxy-fuel combustors. The techno-economic analysis of partial and full oxy-fuel combustion in cement industry shows that the  $CO_2$  capture cost is 200-250 yuan/ton, which is lower than that for post-combustion carbon capture technology, indicating that oxy-fuel combustion technology is better in the economic performance. In the future, the  $CO_2$  capture technology of oxy-fuel combustion in cement industry will be further developed in the direction of high efficiency, low cost and low energy consumption, focusing on research and development of the key technologies of full oxy-fuel combustion, low-cost oxygen generation technologies and deep integration with renewable energy power to gas and renewable synthetic fuels, in order to finally realize CCUS and net-zero  $CO_2$  emission in cement industry. **Key words:** cement industry; carbon dioxide capture utilization and storage; oxy-fuel combustion; oxygen-enriched combustion; partial

oxy-fuel combustion; full oxy-fuel combustion

#### 0 引 言

水泥工业是全球基础设施建设的重要支柱产 业,也是高能耗高排放的工业领域,对全球气候变 化和环境保护构成重大挑战。据国际能源署 (IEA)统计,水泥工业是第三大工业能源消费 体,占全球工业能源使用量的7%,其产生的二氧 化碳(CO<sub>2</sub>)占全球碳排放总量约5%<sup>[1]</sup>。中国是全 球最大的水泥生产国,水泥产量约占全球的52%, 每生产1t熟料排放的CO<sub>2</sub>为813~942 kg<sup>[2]</sup>。2022 年中国水泥工业排放的CO<sub>2</sub>约为11.89亿t,占全国 碳排放总量的11.7%,位居第3,仅次于电力工业和 钢铁工业<sup>[3]</sup>。随着我国提出"2030年前碳达峰、 2060年前碳中和"目标,水泥工业面临的碳减排压 力日益严峻,在应对全球气候变化和实现碳中和目 标中扮演着重要角色<sup>[4]</sup>。

与火力发电行业排放的 CO<sub>2</sub> 主要来源于化石燃 料燃烧不同,水泥生产过程中 60% 的 CO<sub>2</sub> 排放来 源于分解炉石灰石转化为生石灰的煅烧过程, 35% 来源于提供必要热量的化石燃料燃烧过程, 5% 来自于由电力消耗导致的间接排放。而燃料燃 烧主要发生于分解炉和回转窑这两个热工设备。这 些不同造成了水泥工业的高 CO<sub>2</sub> 排放量,也使得水 泥工业的碳减排技术路径与火力发电行业明显 不同。

近十年来国内外众多学者和研究机构在水泥工 业碳减排方面开展了大量研究。2018年 IEA 提出了 水泥工业低碳转型技术路线<sup>[1]</sup>,分析了包括提升能 源利用效率、采用替代燃料、降低水泥中熟料比例 和碳捕集 4 种创新技术措施对水泥工业碳减排的贡 献率,能源利用效率提升和燃料替代的贡献率比较 低,降低水泥中熟料比例和包括碳捕集的创新技术 将分别贡献 37% 和 48% 的碳减排潜力。目前水泥 工业二氧化碳捕集与封存技术有燃烧后碳捕集技术 (包括化学吸收、膜分离法、钙循环法等)和燃烧 中碳捕集技术(即氧-燃料燃烧技术)<sup>[5-7]</sup>。IEA 给 出了为了实现全球平均气温上升幅度不超过 2 ℃ 目 标的二氧化碳捕集与封存(CCS)部署趋势,其中 燃烧后 CO<sub>2</sub> 化学吸收技术、氧-燃料燃烧技术(包 括全氧-燃料燃烧和部分氧-燃料燃烧)是 2 种最 主要的水泥工业二氧化碳捕集与封存技术。国内外 学者对各种碳捕集技术经济性分析结果表明氧-燃 料燃烧碳捕集技术所需能耗相对较低,而燃烧后化 学吸收碳捕集技术最容易应用到目前水泥生产中<sup>[8-10]</sup>。

燃烧后化学吸收碳捕集技术适用范围广,但其 能耗主要取决于所需捕集的 CO<sub>2</sub> 的量,水泥工业生 产排放的 CO<sub>2</sub>不仅来自燃料燃烧,还来自于石灰石 分解,其流量较大,导致燃烧后化学吸收碳捕集系 统庞大,CO<sub>2</sub>捕集的总能耗较高。而氧-燃料燃烧 技术的能耗主要取决于化石燃料燃烧所需的氧气流 量,CO<sub>2</sub>捕集的总能耗受石灰石分解的影响较小, 因此氧-燃料燃烧技术因在现有水泥厂具备的高可 行性和低成本优势受到广泛关注<sup>[11-14]</sup>。笔者主要对 水泥工业氧-燃料燃烧碳捕集技术的发展现状和未 来趋势进行评述,为水泥工业高效低成本碳捕集技 术的研究、开发、示范与部署提供重要参考。

#### 1 水泥工业氧-燃料燃烧技术概述

在水泥工业氧-燃料燃烧碳减排技术的研究和 工程应用中,先后发展了2种技术,一种是增氧燃 烧(Oxygen-Enriched Combustion, OEC)技术,另 一种是氧 – 燃料燃烧(Oxy-Fuel Combustion, OFC)技术,两者不同于常规空气燃烧,需要空气 增氧或者采用纯氧作为燃料燃烧的氧化剂,如图1 所示。

增氧燃烧技术是通过采用比普通空气含氧量



图 1 水泥工业氧 - 燃料燃烧技术发展 Fig. 1 Classification of oxy-fuel combustion technology

21% 更高的富氧空气作为助燃剂,以增强燃料燃烧效率和热利用率的技术<sup>[15-16]</sup>。该技术通过减少助燃空气中氮气的比例来降低烟气量和热损失<sup>[16-18]</sup>,提高火焰温度和烟气辐射能力,进而提高热效率和节约燃料,也减少了一部分 CO<sub>2</sub> 排放。而氧一燃料燃烧技术是采用空气分离装置制备的高浓度 O<sub>2</sub> 与 60% ~ 70% 的再循环烟气混合形成 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛来替代空气作为化石燃料燃烧的氧化剂,燃烧产生的烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数较高,经压缩纯化后可以直接利用或封存<sup>[19-20]</sup>。

欧洲水泥研究院 (European Cement Research Academy, ECRA) 于 2007—2016 年牵头对水泥工业 的二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS)技术进行了 评估,发现胺溶液化学吸收法和氧-燃料燃烧技术 较为合适,其中胺溶液的降解对 CO<sub>2</sub> 捕集性能有一 定的影响,而氧-燃料燃烧技术对水泥生产过程的 负面影响很小<sup>[11]</sup>。ECRA 对水泥工业氧-燃料燃烧 技术改造可行性进行了研究,确立了部分氧-燃料 燃烧 (Partial Oxy-Fuel Combustion)和全氧-燃料 燃烧 (Full Oxy-Fuel Combustion)和全氧-燃料 燃烧 (Full Oxy-Fuel Combustion)并行的研究方 向<sup>[11,21-23]</sup>。部分氧-燃料燃烧技术是在分解炉内采用 纯氧燃烧技术,如图 2 所示<sup>[11]</sup>。而全氧-燃料燃烧 技术是在水泥生成全过程 (包括分解炉和回转窑) 中都采用纯氧燃烧技术<sup>[11,24-26]</sup>,如图 3 所示。

欧盟"Horizon 2020" 计划在 2015—2018 年资助的 CEMCAP(CO<sub>2</sub> capture from cement production) 项目开发了适用于水泥生产的先进碳捕集技术。该项目特别关注氧-燃料燃烧技术在水泥工业中的应用,通过改变氧气和 CO<sub>2</sub> 的比例来实现燃烧优化,研究内容涵盖回转窑设计、燃烧器性能测试、炉膛和煅烧技术的优化等方面。项目在德国斯图加特大学的 58 kW 携带流分解炉试验台(图 5)上分别对分解炉和回转窑进行了氧-燃料燃烧试验,并对采用蒂森克虏伯



图 2 部分氧-燃料燃烧技术流程示意[11]





Fig. 3 Full oxy-fuel combustion technology process<sup>[11]</sup>

公司的 POLFLAME 燃烧器的大型水泥回转窑进行 了全氧-燃料燃烧工况的数值仿真,验证了燃烧不 同类型燃料(如预干燥褐煤、石油焦等)时氧-燃 料燃烧技术在水泥工业碳捕集中的应用潜力,为水 泥生产过程全尺寸氧-燃料燃烧改造提供了依据<sup>[27-29]</sup>。

欧盟 2019—2022 年期间实施的 AC<sup>2</sup>OCem (Accelerating Carbon Capture using Oxyfuel technology in Cement production)项目开始探索水 泥窑炉氧-燃料燃烧的工业改造,并计划在海德堡 水泥公司和拉法基豪西蒙公司进行工业改造示范, 为现有水泥厂的全氧-燃料燃烧改造提供指南。该 项目将探索生物质替代燃料在第1代全氧-燃料燃 烧技术中的应用,同时蒂森克虏伯公司提出了水泥 窑无烟气再循环的第2代全氧-燃料燃烧技术<sup>[30]</sup>。 中国水泥工业氧-燃料燃烧技术研究和工程示范起 步较晚,但目前发展较快。2022年中国建材集团天 津水泥工业设计研究院建立了我国首套水泥窑炉全 氧-燃料燃烧中试试验台,如图6所示。该中试试 验台主要包括燃料输送系统、配气系统、生料输送 系统、预分解系统、熟料煅烧和冷却系统、烟气再 循环系统和仪表控制系统等<sup>[31]</sup>,具备分解炉燃烧/窑



图 4 58 k W 携带流分解炉试验台<sup>[28]</sup>







炉联合煅烧2种运行模式。该平台的研究成果应用 于青州中联水泥20万t/a水泥工业氧一燃料燃烧碳 捕集工程示范项目<sup>[32]</sup>。

#### 2 水泥工业增氧燃烧技术研究进展

增氧燃烧技术是一种通过提高助燃空气中氧气 166





体积分数以强化燃料燃烧的技术,在节能减排方面 具有一定优势。随着水泥工业降低能耗和碳减排的 要求,增氧燃烧技术一直受到关注,尤其在降低燃 料消耗和减少污染物排放方面的潜力备受期待<sup>[33,34]</sup>。 常规燃料燃烧空气中的氧气体积分数通常为 21%, 增氧燃烧技术通过采用富氧空气(氧气体积分数大 于 21%),能够提高燃烧温度和热效率,同时减少 过量空气需求以及排烟热损失,进而通过降低煤耗 来降低碳排放。

#### 2.1 增氧燃烧技术的试验研究与工业应用

国外对于水泥工业增氧燃烧技术的研究和工业 应用较早,在20世纪70年代WRAMPE等<sup>[35]</sup>从热 力学角度上建立了水泥窑产量与氧气量的关系,验 证了增氧燃烧能够提高水泥窑的熟料产量。2001年 美国 California Portland水泥厂在水泥窑中完成的增 氧燃烧测试表明,增氧燃烧提高了熟料产量约 8.85%<sup>[36]</sup>。美国 Hercules水泥厂的增氧燃烧测试发 现增氧燃烧降低了煤耗量 3%~5%,实现了每吨氧 气增产 4~5t 熟料的效果,产品质量几乎不发生变 化<sup>[37]</sup>。

近年来国内水泥企业广泛采用增氧燃烧技术, 取得了显著的节能减排效果。2009年北京新北水泥 厂与普莱克斯公司开发了利用增氧燃烧处理工业废 弃物的技术<sup>[38]</sup>。2011年烟台海洋水泥有限公司投运 了国内首台增氧燃烧节能装置,在不增加燃料的情 况下火焰温度提高了180℃,节能效果显著<sup>[39-40]</sup>。 云南、辽宁、山东等地的水泥生产线增氧燃烧技术 改造表明,当氧气体积分数控制在27%~30%时, 煤耗下降7%~10%,吨熟料节煤7~10 kg,显著提 升能源利用效率<sup>[39,41-43]</sup>。2020年安徽池州海螺水泥 5000 t/d 生产线完成了增氧燃烧技术改造,煤耗降低了约7 kg标准煤/吨熟料,并论证了烟气再循环氧-燃料燃烧的可行性<sup>[44,45]</sup>。2022 年北京汉能清源科技有限公司等单位开发了适用于增氧燃烧的燃烧器,实现了低热值煤的稳定燃烧,使 3 200 t/d 生产线产量提高 4.6 t/h,并优化了熟料质量<sup>[46]</sup>。

#### 2.2 增氧燃烧的数值模拟研究

计算流体动力学(CFD)数值模拟是研究水泥 窑炉增氧燃烧和氧-燃料燃烧技术的重要手段,常 被用于模拟煤粉燃烧过程中的速度场、温度场和化 学反应过程。

WANG 等<sup>[47]</sup> 对分解炉增氧条件下煤矸石掺烧 的工况进行了数值模拟,发现随着氧气体积分数的 增加,出口平均温度和石灰石分解率都出现了一定 程度的上升。潘赓等<sup>[48]</sup> 对 30% 氧气体积分数下的 分解炉进行了数值模拟,发现增氧条件下煤粉燃烧 速率快,炉底燃料燃烧温度明显提升,碳酸钙的分 解率在 95% 以上。陈立新等<sup>[49]</sup> 模拟了分解炉采用 增氧燃烧的效果,认为增氧燃烧工艺改造后不会对 水泥生产造成影响,为后续白山水泥厂等生产线的 增氧燃烧技术改造奠定了基础。

MARIN 等<sup>[50]</sup> 对回转窑增氧燃烧工况进行了数 值模拟。研究表明,在23% 增氧工况下熟料产量提 高了 6.4%。增氧燃烧能够改善窑内燃料燃烧状况和 粉尘导致的燃烧不稳定现象,通过调整氧气注入角 度,能够有效控制 NO, 排放。ZHOU 等<sup>[51]</sup> 研究了 回转窑一次风氧气体积分数在 21%~40% 情况下燃 烧火焰形状、温度分布、煤粉燃尽率和 NO, 排放。 随着氧气体积分数的增加,火焰温度最高增加了 150 K, 且温度分布更为集中, 可以有效提高煤粉燃 尽率和熟料产量。WANG 等<sup>[52]</sup> 研究了 5 种不同的 氧气体积分数下增氧燃烧的燃烧效率、温度和 NO<sub>x</sub> 排放。当氧气体积分数超过 27% 后, NO<sub>x</sub> 体积 分数快速增加,如图7所示。而李全亮<sup>[53]</sup>的研究则 表明当氧气体积分数超过 30% 时,煤粉燃烧速率和 温度提升效果逐渐减小。因此增氧燃烧氧气体积分 数应控制在 27%~30% 以下。

在经济性分析方面,朱思彤等<sup>[54]</sup>分析了4000 t/d 水泥熟料生产线采用增氧燃烧的经济效益,发现当 氧气体积分数达到30%时,年总收益为551.4万 元,年减排CO<sub>2</sub>达到19024 t,表明增氧燃烧对水 泥工业的经济和环境效益均有明显提升,如图8所 示。这些研究结果均表明增氧燃烧技术不仅不会对 熟料质量产生不良影响,还通过提高能源利用效 率、降低煤耗来减少碳排放。



Fig. 7 NO<sub>x</sub> concentration profiles along the kiln center-line at different oxygen volume fractions<sup>[52]</sup>





#### 3 水泥工业部分氧-燃料燃烧技术研究进展

水泥工业氧-燃料燃烧技术主要包括部分 氧-燃料燃烧技术和全氧-燃料燃烧技术<sup>[55]</sup>。分解 炉中碳排放量在水泥生产中占据主要地位,其原因 是约 60% 的石灰石分解过程发生在分解炉中,在分 解炉中使用氧-燃料燃烧技术可以使循环烟气的 CO<sub>2</sub>体积分数达到 80% 以上<sup>[56]</sup>。因此,仅在分解炉 中采用氧-燃料燃烧的部分氧-燃料燃烧技术可以 首先得到应用。

国际能源署评估了规模为 91 万 t/a 的水泥厂采 用燃烧后碳捕集技术和部分氧-燃料燃烧技术 2 种 CCS 工艺的可行性、性能、成本和环境影响<sup>[57-59]</sup>, 指出部分氧-燃料燃烧技术是水泥厂实现碳减排改 造最可能的方案。该改造方案如图 9 所示,将原单 台预热器分为 2 台,分别与分解炉和回转窑相连 接。来自分解炉的富含 CO<sub>2</sub> 的烟气通过预热器 2 排 出,一部分烟气再循环与空气分离装置(ASU)制 取的高纯度 O<sub>2</sub> 混合后用作分解炉的氧化剂。另一 部分烟气送入 CO<sub>2</sub> 压缩与纯化装置(CPU),进行 压缩提纯后得到高浓度 CO<sub>2</sub>用于后续其他用途。该 改造系统剩余部分仍按传统模式运行。



图 9 水泥工业部分氧 - 燃料燃烧改造工艺<sup>[59]</sup>

Fig. 9 Production process of partial oxy-fuel combustion retrofitting for cement industry<sup>[59]</sup>

欧洲水泥研究院 (ECRA) 提出了另一种部分 氧-燃料燃烧改造方案<sup>[11]</sup>,如图 10 所示。该方案只 使用一台预热器,来自 ASU 的氧化剂回收富含 CO<sub>2</sub> 的烟气的余热后与再循环烟气混合,混合气先经 气-气热交换器预热,再进入分解炉参与煅烧,而 生料由分解炉产生的富含 CO<sub>2</sub> 的烟气进行预热后进 入分解炉煅烧。该改造方案简单,改造成本较低, 但由于气--气换热器效率较低,需要大量烟气来预 热生料,烟气再循环率较高,可能需要补充额外燃 料提供热量。



图 10 ECRA 提出的水泥工业部分氧 - 燃料燃烧生产工艺<sup>[11]</sup> Fig. 10 Partial oxy-fuel combustion production process for cement industry proposed by ECRA<sup>[11]</sup>

MALDONADO 等<sup>[55]</sup> 介绍了水泥厂部分氧-燃 料燃烧和全氧-燃料燃烧 2 种工艺配置的概念与区 别,指出了采用氧-燃料燃烧技术需要对水泥工厂 布局、关键部件以及操作方式进行修改或调整,并 研究了分解炉温度对部分氧-燃料燃烧工艺的影 响,以及烟气再循环比率对全氧-燃料燃烧工艺的 影响。陈昌华等<sup>[60]</sup> 提出了一种采用水泥生产主系统 和氧-燃料燃烧子系统并联运行的改造方案,进行 空气燃烧和部分氧-燃料燃烧生产水泥熟料并联产 液态 CO<sub>2</sub> 的系统,可实现水泥生产过程中碳减排和 低成本制备 CO<sub>2</sub> 产品。

#### 3.1 部分氧-燃料燃烧的试验研究与工业应用

ECRA 的 ALCAZER 等<sup>[22]</sup> 研究了适用于氧-燃 料燃烧的分解炉不同工况下的炉内温度,认为虽然 氧-燃料燃烧工况会导致炉内温度明显上升,但最 高温度不会超过现有设备的设计温度极限,验证了 对现有设备进行部分氧-燃料燃烧改造的可行性。 BECKER 等<sup>[24]</sup> 研究了 5 种不同种类现代分解炉的 氧-燃料燃烧改造,通过对比加热效率,得出内联 式分解炉最适合进行部分氧-燃料燃烧改造的结 论。KORING<sup>[61]</sup>在管式反应器中测试了 CO<sub>2</sub>分压高 于 0.09 MPa 时的水泥生料分解率, 认为需要将反应 温度提高 80 ℃。F.L.Smidth 公司在中试氧-燃料燃 烧分解炉的研究结果表明,当分解炉温度升高 60~ 70 ℃ 时生料分解率可达 92%<sup>[62]</sup>。CEMCAP 项目在 德国斯图加特大学 58 kW 携带流分解炉试验台上研 究了空气和 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下石灰石煅烧过程<sup>[63]</sup>,如 图 11 所示。研究结果发现,在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下仅增 加石灰石在分解炉中的停留时间无法实现与空气气 氛下相同的石灰石分解率,炉内 CO。体积分数的升 高会显著提高达到 90% 石灰石分解率所需的炉内温 度。在体积分数 80% 的 CO<sub>2</sub> 条件下该温度提高 60 ℃ 左右,达到 940~960 ℃。



图 11 不同温度条件下空气燃烧 (AF) 和氧-燃料燃烧 (OF) 石灰石的煅烧<sup>[63]</sup>



段永华实验研究了在体积分数 30% ~ 100%CO<sub>2</sub> 条件下石灰石热分解特性,测得了其反应级数为 2/5 ~ 2/3,并获得了表观活化能和指前因子等反应 动力学参数与 CO<sub>2</sub>体积分数的关系式。研究发现随 着 CO<sub>2</sub>体积分数的升高,石灰石热分解反应的起始 温度和终止温度都升高<sup>[64]</sup>。天津水泥工业设计研究 院在全氧 – 燃料燃烧中试试验台上研究了分解炉 氧 – 燃料燃烧,发现出口温度为 900 ~ 950 ℃时生 料分解率能够达到 90%,通过合理控制分解炉内的 温度场,可以优化生料分解率<sup>[31]</sup>。

西班牙 ENDESA 公司 2010 年建成了 1.7 MW<sub>th</sub> 分解炉中试装置,该装置可用于燃烧后碳捕集和 氧-燃料燃烧的研究。氧-燃料燃烧工况的研究结 果表明,在 950 °C 时可实现 90% 的石灰石分解率, 分解炉出口的 CO<sub>2</sub> 体积分数可达到 85%<sup>[65]</sup>。丹麦 F.L.Smidth 公司 2012 年建成了 1 MW<sub>th</sub> 氧-燃料燃 烧中试分解炉并进行了试验<sup>[62]</sup>,如图 12 所示,为部 分氧-燃料燃烧技术用于水泥生产环节提供示范, 并对全尺寸分解炉的氧-燃料燃烧改造进行了技术 经济性分析。中试试验结果表明该分解炉能够实现 92% 的石灰石分解率,而技术经济性分析的结果表 明,CO<sub>2</sub> 捕集成本为 62 欧元/t,且可以优化至 50 欧元/t,低于胺溶液化学吸收法的 90 欧元/t<sup>[62]</sup>。



图 12 F.L.Smidth 公司 1 MW<sub>th</sub> 氧 - 燃料燃烧中试分解炉<sup>[62]</sup> Fig. 12 F.L. Smidth's 1 MW<sub>th</sub> oxygen-fuel combustion pilot calciner<sup>[62]</sup>

国内青州中联水泥氧-燃料燃烧耦合碳捕集工 程示范项目是目前全球已建成最大的水泥工业部分 氧-燃料燃烧碳捕集项目,如图 13 所示。该项目由 天津水泥工业设计研究院总承包并承担部分氧-燃 料燃烧的工程建设,上海凯盛节能工程技术有限公 司负责二氧化碳捕集提纯的工程建设,华中科技大 学基于 300 kW 中试燃烧炉试验提出的高效低成本 水泥窑无焰全氧燃烧碳捕集技术方案为该项目提供 了技术支撑,新天山水泥、中联水泥、青州中联及 地方政府等单位也提供了资金及政策支持<sup>[66-68]</sup>。该 项目于 2024 年 1 月 9 日点火运行,能够将分解炉出 口烟气中的 CO<sub>2</sub> 体积分数提升至 80%,并采用变压吸 附和低温精馏方法将 CO<sub>2</sub> 纯度提升至 99% 以上<sup>[32]</sup>。



图 13 青州中联水泥部分氧-燃料燃烧示范项目<sup>[32]</sup> Fig. 13 China United Cement Qingzhou partial oxy-fuel combustion demonstration project<sup>[32]</sup>

3.2 部分氧-燃料燃烧的数值模拟与流程优化研究

在氧一燃料燃烧条件下 CO,体积分数远高于空 气气氛,由于石灰石分解为吸热反应并释放出 CO<sub>2</sub>,因此CO<sub>2</sub>体积分数增加会导致分解反应平衡 移动,石灰石分解反应平衡温度增加。碳酸钙在空 气气氛下理论分解温度为 795 ℃, 而在体积分数 80% CO<sub>2</sub> 的氧-燃料燃烧条件下达到了 884 ℃<sup>[28]</sup>。 GRANADOS 等<sup>[69]</sup> 使用非稳态一维欧拉-拉格朗日 数学模型分析了回转窑氧-燃料燃烧条件下烟气再 循环率(FGR)对石灰石煅烧过程的影响。结果表 明在给定的温度下,氧-燃料燃烧情况下 CO2 分压 的增加导致分解率的降低。在同样的煤粉输运速率 下,低于28%氧气体积分数的氧-燃料燃烧工况会 导致石灰石分解率低于空气气氛。MIKULCIC 等<sup>[70]</sup> 对碳酸钙煅烧机理进行了研究,结果表明高温低 CO2 气氛会加快反应速率,同时碳酸钙颗粒大小会 显著影响煅烧反应的速率。

ZHANG 等<sup>[71]</sup>使用 Realizable k-ε 湍流模型对全 尺寸分解炉进行了数值模拟,模拟分析了 5 种不同 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>体积分数(21%/79%、25%/75%、29%/71%、 33%/67%和 37%/63%)氧-燃料燃烧工况下的煤粉 燃尽率、原料分解率和 NO<sub>x</sub> 排放。发现随着氧气体 积分数的增加,预分解炉中的温度逐渐升高,有助 于碳酸钙的分解,但也对预分解炉的耐热材料提出 了更高要求。同时炉内富集的  $CO_2$  避免了氮气参与 反应,从而减少了  $NO_x$ 的生成,出口处的  $NO_x$ 体 积分数为 116~181×10<sup>-6</sup>,远低于传统空气燃烧的  $NO_x$ 体积分数,如图 14 所示。同时,更高的  $CO_2$ 体积 分数可以有效提高  $CO_2$  回收率。

F.L.Smidth 公司对全尺寸氧-燃料燃烧分解炉的经济性分析的结果表明,氧-燃料燃烧分解炉的CO<sub>2</sub> 捕集成本为 62 欧元/t,明显低于燃烧后碳捕集的 90 欧元/t<sup>[62]</sup>。笔者采用 Aspen Plus 软件对 3 000 t/d 水泥生产线部分氧-燃料燃烧改造工艺进行了详细的流程建模和仿真分析,建立了部分氧-煤粉燃烧



图 14 不同氧气体积分数下氧-燃料燃烧预分解炉 NO<sub>x</sub> 体积分数分布<sup>[71]</sup>

Fig. 14 Average cross-sectional  $NO_x$  concentrations along the oxy-fuel precalciner at different oxygen volume fractions<sup>[71]</sup>



Fig. 15 Production process of partial oxy-coal combustion retrofitting for cement industry<sup>[72]</sup>

流程模型,计算了水泥工业部分氧-煤粉燃烧改造 系统所需采用的参数,如图 15 所示<sup>[72]</sup>。模拟结果表 明,水泥生产线部分氧-煤粉燃烧改造需要比传统 工艺增加约 8%的燃料量。当烟气再循环率为 38%时该系统的沿程温度分布最接近于空气燃烧, 此时分解炉三次风氧气体积分数为 35.1%,76%的 生料由分解炉产生的烟气进行预热。 笔者对性能优化后的水泥生产线部分氧-煤粉 燃烧改造系统进行了热力性能和经济性分析,为改 造方案对比分析提供了数据,如图 16 所示<sup>[72]</sup>。计算 结果发现,该系统的综合能量效率为 41.93%, 佣效 率为 51.1%, 热损失是造成能量损失和佣损失的主 要原因。该部分氧-煤粉燃烧改造系统的 CO<sub>2</sub> 捕集 成本为 240.6 元/t, 碳捕集效率为 79.5%。





### 4 水泥工业全氧-燃料燃烧技术研究进展

全氧-燃料燃烧技术是水泥工业碳捕集技术的 研究重点和未来发展趋势。该技术将预热器排放的 一部分烟气进行再循环处理,并与空气分离装置制 取的高纯度 O<sub>2</sub>混合,形成 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>混合气体。这一 混合气体随后被输送到熟料冷却机,在冷却熟料的 同时对 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>混合气体进行预热,之后再将预热 后的 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气体输送至分解炉和回转窑,作为燃 料燃烧过程中的氧化剂。另一部分烟气经过压缩纯 化处理后获得高浓度 CO<sub>2</sub>进行利用,如图 17 所 示。全氧-燃料燃烧技术改造方案不仅整合了空气 分离装置(ASU)和二氧化碳压缩纯化装置 (CPU),而且在主要的水泥生产环节保持了与传 统工艺的一致性。全氧-燃料燃烧技术能够有效地 捕集分解炉和回转窑生产过程中产生的 CO<sub>2</sub>,为水 泥工业的低碳转型提供了有力的技术支撑。

#### 4.1 全氧-燃料燃烧的试验研究

CARRASCO 等<sup>[73-74]</sup> 在德国斯图加特大学 500 kW<sub>th</sub> 中试燃烧试验炉上研究了空气气氛和氧-燃料燃烧 气氛下石油焦、褐煤以及褐煤与固体废弃物混烧的 燃烧特性。结果表明氧-燃料燃烧气氛下火焰长度 明显比空气气氛下长,且具有更强的辐射换热能 力。总体氧气体积分数对火焰温度有明显影响,提 高总体氧气体积分数可以提高炉膛内部烟气温度。 当总体氧气体积分数增加到 27% 时,可以获得与空 气气氛下相同的炉内温度分布和热通量。一次风氧 气体积分数对燃烧稳定性和 CO 生成有显著影响, 通过增加高速一次风中的 O<sub>2</sub> 体积分数,可以有效 地减少回转窑内 CO 体积分数,提高燃烧稳定性, 当一次风 O,体积分数达到 60% 时与空气气氛类 似。旋流角度可以改变火焰在回转窑内的位置,增 加旋流角度可以使火焰长度变短,从而有效控制火 焰形状。ANDERSSON等<sup>[75]</sup>研究了空气气氛和氧



Fig. 17 Process flowsheet of full oxy-fuel combustion retrofitting for cement industry<sup>[59]</sup>

-燃料燃烧气氛下水泥回转窑内煤粉燃烧的热辐射 特性,发现 25% 氧气体积分数工况与空气气氛回转 窑内烟气温度沿程分布相似。此时气体辐射量增 加,但由于颗粒辐射占主导作用,因此回转窑内总 体的热辐射传热特征没有明显差异。ECRA 的研究 结果表明,高 CO<sub>2</sub>体积分数下生产的熟料样品与标 准水泥的关键性能仅存在轻微差异,说明全氧-燃 料燃烧对熟料质量的影响很小<sup>[11]</sup>。

CEMCAP 项目设计了如图 18 所示的回转窑氧-燃料燃烧器,并在德国斯图加特大学 500 kW<sub>th</sub> 中试 燃烧试验炉上研究了总体氧气体积分数、一次风氧 气体积分数对回转窑全氧-燃料燃烧的烟气温度分 布、热通量和烟气组分的影响<sup>[29]</sup>。试验研究结果发 现,总体氧气体积分数为27%时烟气温度场与空气 气氛接近,更高的总体氧气体积分数会使火焰峰值 温度位置更接近于燃烧器,如图 19 所示。在总体氧 气体积分数略低于 25% 时辐射热通量与空气气氛相 匹配。由于更高的温度和更高的氧气体积分数引起 的烟气量减少,在氧-燃料燃烧条件下 NO<sub>r</sub>的浓度 比空气燃烧条件下更高,但单位燃料热值的 NO<sub>x</sub> 排 放量明显降低,如图 20 和 21 所示。增加一次风氧 气体积分数可以有效降低燃烧器附近区域 CO 的生 成量,如图 22 所示。全氧-燃料燃烧器可以在较小 改动下实现回转窑和分解炉内氧-燃料燃烧,总体 氧气体积分数、一二三次风氧气体积分数分配以及 燃烧器旋流角度是影响燃烧器性能的关键因素。





Fig. 18 Burners for rotary kilns with full oxy-fuel combustion<sup>[29]</sup>



图 19 炉膛中心线气体温度分布<sup>[29]</sup>

Fig. 19 Gas temperature profiles along the furnace centerline<sup>[29]</sup>



基于 AC<sup>2</sup>OCem 项目,蒂森克虏伯公司提出了 第 2 代全氧 – 燃料燃烧技术,即 Polysius pure oxyfuel technology,如图 23 所示。该技术不再采用 烟气再循环,在回转窑中送入大量过量氧气而非再 循环烟气与氧气的混合气,以控制回转窑内的燃烧 火焰温度,多余的氧气在分解炉中进一步消耗。水 泥工业第二代全氧-燃料燃烧技术整个过程中气体 量减小,从而降低热损失,减少设备和场地成本, 且能够提供更高的 CO<sub>2</sub>体积分数(>90%)。蒂森克 虏伯公司在德国 Mergelstetten 水泥厂建立了一个





variation of the oxygen volume fractions in the primary oxidizer stream<sup>[29]</sup>







450 t/d 的半工业规模试验厂,以验证技术可行性。 该项目 2022 年开始运营,并计划于 2025 年进入全 面运行阶段。此外,该技术将在 Lafarge Holcim 公 司的 GO4ZERO 项目、Titan 水泥公司的 IFESTOS 项目和 Heidelberg 水泥公司的 GeZero 项目中应用, 并计划分别实现 110、190、70 万 t/a的 CO<sub>2</sub> 捕集目 标<sup>[76]</sup>。

#### 4.2 全氧-燃料燃烧的数值模拟与流程优化研究

许多学者对全氧-燃料煤粉燃烧开展了大量的研究,发现在相同氧气体积分数时 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下的燃烧火焰温度低于 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 气氛。最主要的原因是传统空气气氛下的 N<sub>2</sub> 被 CO<sub>2</sub> 代替,CO<sub>2</sub> 摩尔比热容是 N<sub>2</sub> 摩尔比热容的 1.6 倍,从而导致相同的热通量情况下回转窑内气体温升更低。因此需要提高氧气体积分数来达到与空气气氛下相同的炉内温度水平<sup>[73]</sup>。

GRANADOS 等<sup>[77-78]</sup>使用 CFD 数值模拟方法研究了水泥回转窑 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下不同烟气再循环率对炉内温度的影响,发现烟气再循环率低于 77% 时(即氧气体积分数高于 31%)炉内峰值温度比空气气氛煤粉燃烧更高。在氧-燃料燃烧条件下,由于烟气中 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 体积分数增加,三原子气体辐射能力明显增强,对于所有氧气体积分数超过 23% 的氧-燃料燃烧工况,其气体辐射热通量可以增加 2.5~4.3 倍。

ECRA 对 3 000 t/d 水泥回转窑全氧-燃料燃烧 进行了模拟,证明了全氧-燃料燃烧在回转窑中的 可行性[11]。研究发现在全氧-燃料燃烧工况下高 CO2体积分数和更高的温度导致距离燃烧器出口 20~25 m 处 CO 体积分数明显高于空气气氛,进而 导致火焰长度增加,高于1400℃的区域延伸至距 离燃烧器出口 25 m 处。建议提高一次风氧气体积 分数,同时采用与环境温度相同的一次风以避免在 燃烧器内提前着火,并指出可通过燃烧器设计(如 增大旋流角等)来减小温度分布和熟料生成方面的 变化<sup>[11]</sup>。在 CEMCAP 项目中, CARRASCO 等<sup>[59,79]</sup> 对德国斯图加特大学 500 kWth 中试燃烧试验炉全 氧-燃料煤粉燃烧进行了详细的数值模拟,对比了 空气气氛和 27% 氧气体积分数的氧 - 燃料燃烧气 氛,模拟结果与试验结果符合较好,验证了模型的 准确性。模型预测的炉内火焰长度和形状在氧-燃 料燃烧和空气燃烧下保持相似,并且受到燃烧器旋流 角度的重要影响。基于该研究建立的模型、CEMCAP 项目对 3 200 t/d 全尺寸水泥回转窑采用氧-燃料燃 烧技术的工况进行了模拟,并对运行参数进行了优 化<sup>[27, 28]</sup>。结果表明在 OXY-2 (总体氧气体积分数 26%、一次风氧气体积分数 60%、煤粉携带风氧气 体积分数 18% 和二次风氧气体积分数 20.8%) 工况 下可以实现与空气燃烧条件下最为接近的炉内传热 传质特性,如图 24 所示。

在水泥工业全氧-燃料燃烧改造中,为了实现





Fig. 24 Surface incident heat radiation profiles at the rotary kiln boundary<sup>[27]</sup>

与空气气氛相同的炉内温度、传热和产品质量,一 方面要确定全氧-燃料燃烧的总体氧气体积分数, 更为重要的是要进一步确定回转窑和分解炉全氧燃 烧器-二三次风氧气体积分数的分配。

笔者研究了总体氧气体积分数(25%~ 35%)、一二次风氧气分配方法和二次风温度对水 泥回转窑全氧-燃料煤粉燃烧传热特性和火焰长度 的影响<sup>[13]</sup>,如图25所示。数值模拟结果表明,当总 体氧气体积分数为29%时,归一化参数(氧-燃料 燃烧的热通量与空气燃烧的热通量之比)最接近 1,氧-燃料燃烧气氛下炉膛壁面总热通量与空气气 氛下相匹配,60%一次风氧气体积分数可以更好地 满足炉内传热匹配的要求,而且二次风温度增加对 炉内热通量具有重要影响。在全氧-燃料煤粉燃烧 器开发方面,笔者研究发现,将煤粉入口设置于一 次风内侧可以显著减少动量损失,同时相较于将煤 粉入口设置于一次风外侧的方案增加了约50%烟气 再循环量<sup>[80]</sup>。

ERIKSSON 和 HÖKFORS 等<sup>[81]</sup> 基于多组分化学 平衡计算研究了氧-燃料燃烧对 CaO 生产的影响, 发现全氧-燃料燃烧的干烟气中 CO2体积分数为 89%~94%,水泥生产能耗降低10%,为6.3 GJ/t熟 料,因此CO,生成量由传统工艺的每吨熟料生成 1.34 t 降低至新工艺的每吨熟料生成 1.23 t。全氧 - 燃料燃烧的实施会对水泥生产线全流程的技术经 济性产生影响,同时 ASU 和 CPU 装置的能耗也会 对其技术经济性造成影响。因此,一些学者建立 了全氧-燃料燃烧水泥生产线的过程模型。 SKINNEMOEN<sup>[82]</sup>在Aspen Hysys 中建立了水泥生产 过程模型,研究了2%~10%空气泄漏对水泥生产 过程和 CO<sub>2</sub>捕集的影响。研究结果发现空气渗漏比 例每增加1%, CPU的能耗增加约2.6%, CO, 捕集 率下降约 0.5%。同时指出当采用全氧-燃料燃烧进 行改造时,需要对水泥厂窑头进行工艺改进以及重



图 25 不同氧气体积分数对归一化参数的影响<sup>[13]</sup> Fig. 25 Effect of different oxygen volume fractions on the normalized parameters<sup>[13]</sup>

新设计熟料冷却机。ZEMAN<sup>[83]</sup>提出可将熟料冷却 机分为2个部分,第1部分采用再循环烟气进行冷 却,从而回收热量用于燃烧,第2部分采用空气进 行冷却以保证熟料冷却完全。

MEUNIER 等<sup>[84]</sup> 采用 Aspen Plus 软件对水泥厂 所需的二氧化碳压缩与纯化装置进行了建模,并对 全氧-燃料燃烧水泥生产过程进行碳捕集,获得整 个过程的 CO<sub>2</sub> 捕集率为 75.8%~93.8%, CO<sub>2</sub>体积 分数为 94.8%~98.4%,并指出获得的 98% 以上体 积分数的 CO<sub>2</sub> 产品可用于催化转化为甲烷、甲醇或 其他有价值的化学品。FARIA 等<sup>[85]</sup>分析了水泥厂 氧-燃料燃烧和电转气(Power-to-Gas, PtG)技术 的集成,发现尽管集成系统对电力的需求很高,但 可通过全氧-燃料燃烧工艺捕集水泥工业中的 CO<sub>2</sub>,将可再生能源电力转化为合成天然气,而集 成系统中全氧-燃料燃烧水泥生产线的最佳烟气再 循环比率为 55%。

根据 ECRA 的研究, 3000 t/d 水泥厂每小时需 要 50~55 t 氧气, 对制氧系统提出了较高的要求, 目前深冷空分制氧设备的能耗为 0.2~0.35 MWh/t O<sub>2</sub><sup>[86]</sup>。笔者采用 Aspen Plus 软件对图 26 所示的水



图 26 水泥工业全氧-燃料燃烧改造工艺流程<sup>[12]</sup> Fig. 26 Production process of full oxy-coal combustion retrofitting for cement industry<sup>[12]</sup>

泥工业全氧-燃料燃烧改造工艺进行了详细的流程 建模与仿真,研究了水泥工业全氧-燃料燃烧改造 工艺的热力性能和技术经济性<sup>[12]</sup>。研究结果表明, 当全氧-燃料燃烧水泥生产系统的烟气再循环比率 为51%时系统各部分温度与空气气氛下相匹配,此 时系统总体氧气体积分数为26.4%,如图27所示。 考虑 ASU和 CPU 的电耗后,全氧-燃料燃烧气氛 下系统能量效率为43.3%,低于空气气氛下的 53.4%。改造后系统的 CO<sub>2</sub> 减排率为 94.5%, CO<sub>2</sub> 捕集成本为 227.3 元/t, 明显低于燃烧后 MEA 碳捕 集的 395 元/t<sup>[87]</sup>。

为了探究全氧-燃料燃烧对水泥熟料生成过程的影响,HÖKFORS等<sup>[88]</sup>将Aspen Plus工艺流程软件与 ChemApp 程序和 FactSage 数据库相结合,开发了一种用于评估水泥和石灰生产过程的模型。结果表明,在保证熟料质量的同时,采用全氧-燃料



Fig. 27 Energy flow of production process of full oxy-fuel combustion retrofitting for cement industry<sup>[12]</sup>

燃烧生产水泥, 熟料产量提高 17.5%, 同时能耗降 低 11.8%。而 CEMCAP 项目则将过程仿真模拟与数 值模拟相结合,过程仿真为数值模拟提供入口边界 条件, 而数值模拟为过程仿真提供辐射热通量和温 度分布<sup>[14]</sup>。通过过程仿真模拟与数值模拟之间的 迭代优化,可以获得整体性能最佳的水泥生产线全 氧-燃料燃烧技术改造方案。

#### 结论与展望 5

#### 5.1 结论

本文系统总结了国内外水泥工业氧-燃料燃烧 碳捕集技术的研究进展,包括早期的增氧燃烧技术 到最新的部分氧-燃料燃烧和全氧-燃料燃烧技术 的试验研究、数值模拟、流程优化和工业应用进 展,将为水泥工业氧-燃料燃烧碳捕集技术开发和 工程应用提供重要参考。主要结论如下:

1)水泥工业增氧燃烧技术通过提高燃烧空气中 氧气体积分数来提高燃烧温度、热效率和增加熟料 产量。优化增氧燃烧的氧气体积分数能有效控制 NO<sub>x</sub> 排放,最佳氧气体积分数一般在 27%~30%。 增氧燃烧技术已在国内外多个水泥生产线得到应 用,取得了较好的节能效果,能够提高熟料产量、 每吨熟料标准煤耗降低 5~10 kg, 但制氧等配套设 施导致系统电耗有所增加。

2) 水泥工业部分氧 - 燃料燃烧技术有助于提 高 CO<sub>2</sub>体积分数并减少 NO<sub>x</sub> 排放。研究结果表明 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下需要将分解炉炉内温度提高 60 ℃ 左 右以维持相同的石灰石分解率。因此需要将氧气体 积分数保持在 28% 以上, 但系统燃料消耗量将有所 增加。

3)全氧-燃料燃烧技术是水泥工业碳捕集技术 的未来方向,通过纯氧替代空气并结合烟气再循 环,获得高 CO<sub>2</sub>体积分数的烟气,便于水泥工业二 氧化碳捕集利用与封存。在水泥回转窑氧-燃料燃 烧改造中,为了实现与空气气氛相同的炉内温度和 产品质量,氧-燃料燃烧的总体氧气体积分数一般 在 27%~29%,且需要进一步优化确定回转窑和分 解炉氧-燃料燃烧器-二三次风氧气体积分数的 分配。

4) 通过对水泥工业部分氧 – 燃料燃烧和全 氧-燃料燃烧改造方案的技术经济性分析,其 CO<sub>2</sub> 捕集成本一般在 200~250 元/t, 低于燃烧后化 学吸收碳捕集成本,表明水泥工业氧-燃料燃烧碳 捕集技术具有较好的经济性。

#### 5.2 展 望

未来水泥工业的氧燃料燃烧碳捕集技术将朝着 高效率、低成本、低能耗的方向发展,以实现水泥 工业深度脱碳和碳中和目标。该技术的发展方向主 要包括以下3个方面。

1)全氧-燃料燃烧碳捕集技术的工程示范与应 用:目前全氧-燃料燃烧碳捕集技术已在少数水泥 企业进行了示范,但要实现水泥工业规模化推广应 用,需要开展全尺度、全流程的工程示范,包括研 发适用于水泥分解炉和回转窑氧-燃料燃烧技术的

176

2025 年第4期

全氧燃烧器以提高燃烧稳定性和热效率,在实际生 产条件下验证氧-燃料燃烧对熟料矿物组成、产品 性能及设备运行稳定性的长期影响。

2)低成本、低能耗制氧技术的突破:水泥工业 氧-燃料燃烧技术推广应用的主要限制因素是空气 分离制氧装置(ASU)带来的高能耗和高成本。未 来需要发展更加经济高效的制氧技术,包括采用选 择性气体分离膜的膜分离制氧技术和利用金属氧化 物循环释放氧气的化学链制氧技术。

3)氧-燃料燃烧与可再生能源结合实现碳循 环:随着可再生能源的发展,水泥工业可通过探索 与电转气(PtG)等技术的深度融合实现净零 CO<sub>2</sub> 排放目标。该技术包括电解水制氢制氧技术和 CO<sub>2</sub>合成可再生燃料技术,利用可再生能源(如风 能、光伏)进行电解水制氢,同时副产高纯度氧 气,直接用于水泥窑炉的氧-燃料燃烧,提高系统 经济性。同时利用水泥窑炉氧-燃料燃烧捕集的 CO<sub>2</sub>,与可再生能源制取的绿氢合成甲醇、天然气 等低碳燃料,实现 CO<sub>2</sub>的循环利用和净零排放。

#### 参考文献 (References):

- IEA. Technology roadmap-low carbon transition in the cement industry[R]. Paris: International Energy Agency, 2018: 5-39.
- [2] 何捷,崔敬轩,聂卿,等.中国水泥行业碳中和路径研究 [R].北 京:中国建筑材料科学研究总院有限公司,2023:4-7.
- [3] 李婷,李抒苡,李威,等.加速工业深度脱碳:中国水泥行业碳中 和之路[R].北京:落基山研究所,中国水泥协会,2022:5-6.
- [4] 新华社.中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做 好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2025-03-19]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\_5644613. htm.
- [5] JORDAL K, VOLDSUND M, STØRSET S, et al. CEMCAPmaking CO<sub>2</sub> capture retrofittable to cement plants[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 6175–6180.
- [6] JORDAL K, ABANADES C, BERSTAD D, et al. D2.11 CEMCAP strategic conclusions-progressing CO<sub>2</sub> capture from cement towards demonstration[R]. Norway: SINTEF, 2019: 8-17.
- PLAZA M G, MARTÍNEZ S, RUBIERA F. CO<sub>2</sub> capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations[J].
   Energies, 2020, 13(21): 5692.
- [8] RODRÍGUEZ N, MURILLO R, CARLOS ABANADES J. CO<sub>2</sub> capture from cement plants using oxyfired precalcination and/or calcium looping[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(4): 2460–2466.
- [9] GERBELOVÁ H, VAN DER SPEK M, SCHAKEL W. Feasibility assessment of CO<sub>2</sub> capture retrofitted to an existing cement plant: Post-combustion vs. oxy-fuel combustion technology[J]. Energy Procedia, 2017, 114; 6141–6149.
- [10] 王新频. 水泥工业几种 CO2 捕获技术的评估 [J]. 水泥, 2019(8):

1 - 5.

WANG Xinpin. Assessment of several CO<sub>2</sub> capture technologies in cement industry[J]. Cement, 2019(8): 1–5.

- [11] ALCAZER G, BANNON C, FERREIRA J M B, et al. ECRA CCS project-report on phase III[R]. Germany: European Cement Research Academy GmbH, 2012: 18-84.
- [12] 陈涛,王玉亭,周月桂.水泥生产系统富氧燃烧改造的性能模拟 优化[J].洁净煤技术,2025,31(2):181-189.
   CHEN Tao, WANG Yuting, ZHOU Yuegui. Simulation optimization of oxygen-fuel combustion retrofitting of cement production system[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(2):181-189.
- [13] 黄冠硕, 周月桂. 水泥回转窑富氧煤粉燃烧数值模拟的优化 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4938–4945.
   HUANG Guanshuo, ZHOU Yuegui. Numerical optimization on the retrofitting of oxy-coal combustion in cement rotary kiln[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4938–4945.
- [14] ARMIN J, KRISTINA F, JOHANNES R, et al. D6.1 Optimized operation of an oxyfuel cement plant [R]. Norway: SINTEF, 2018: 1–51.
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 燃烧方式 术 语和定义: GB/T 37650—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [16] 经慧祥.纤维素、半纤维素、木质素和生物质在增氧燃烧中燃 烧行为的实验研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2020: 1-11.
- [17] ENGIN B, KAYAHAN U, ATAKÜL H. A comparative study on the air, the oxygen-enriched air and the oxy-fuel combustion of lignites in CFB[J]. Energy, 2020, 196: 117021.
- [18] HOKE B C Jr, INSKIP J L. A comparison of oxygen-enhanced combustion technologies[C]//KIEFFER J. 62nd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2002, 23(1): 135-151.
- [19] 郭军军,张泰,李鹏飞,等.中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1197-1208,1526.
   GUO Junjun, ZHANG Tai, LI Pengfei, et al. Industrial demonstration progress and trend in pulverized coal oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(4):1197-1208,1526.
- [20] 张恬, 闫凯, 乌晓江, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下烟气物性参数对燃煤锅 炉对流传热影响的模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 123-130.

ZHANG Tian, YAN Kai, WU Xiaojiang, et al. Effect of flue gas physical properties on convective heat transfer of coal-fired boiler in  $O_2/CO_2$  atmosphere[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1); 123–130.

- BANNON C, DAMTOFT J, GERAGHTY E, et al. Carbon capture technology-options and potentials for the cement industry[R].
   Duesseldorf: European Cement Research Academy, 2007: 15-58.
- [22] ALCAZER G, BANNON C, CINTI G, et al. ECRA CCS project report about phase II[R]. Duesseldorf: European Cement Research Academy, 2009: 31-43.
- [23] ALCAZER G, FERREIRA J, BUZZI L, et al. ECRA CCS project report on phase IV[R]. Duesseldorf: European Cement Research Academy, 2016: 4-44.
- [24] BECKER S, MATHAI R, FLEIGER K, et al. D8.1 Status report on calciner technology[R]. Norway: SINTEF, 2018; 1-19.

- [25] ANANTHARAMAN R, BERSTAD D, CINTI G, et al. D3.2 CEMCAP framework for comparative techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture from cement plants[R]. Norway: SINTEF, 2018: 3-70.
- [26] DITARANTO M, BAKKEN J. Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 83; 166–175.
- [27] DITARANTO M, BAKKEN J, BUGGE M, et al. D7.3 Oxyfuel CFD burner and large kiln simulations[R]. Norway: SINTEF, 2018: 1-27.
- [28] CINTI G, PANERU M, MACK A, et al. D8.3 Assessment of calciner test results[R]. Norway: SINTEF, 2018; 15-58; 1-14.
- [29] CARRASCO F, GRATHWOHL S, MAIER J, et al. D7.2 Oxyfuel burner prototype performance tests[R]. Norway: SINTEF, 2018: 1-30.
- [30] CYNTHIA K, JÖRG M, MARI V, et al. Second-generation oxyfuel technology: Accelerating CCS in the cement industry [EB/OL]. (2021-12-16) [2025-03-19]. https://blog.sintef.com/energy/ second-generation-oxyfuel-technology-accelerating-ccs-in-thecement-industry/.
- [31] 彭学平,陈昌华,代中元,等.水泥行业双碳体系下全氧燃烧碳 减排技术装备研发及示范应用 [J].水泥技术,2024,1(5):11-18.
  PENG Xueping, CHEN Changhua, DAI Zhongyuan, et al. Research and demonstration application of oxy-fuel combustion carbon reduction technology and equipment under the dual carbon system in the cement industry[J]. Cement Technology, 2024,1(5):11-18.
- [32] 中联水泥. 青州中联年产 20 万吨二氧化碳全氧燃烧富集提纯 示范项目顺利点火 [EB/OL]. (2024-01-15) [2025-03-19]. https:// www.dcement.com/article/202401/220261.html.
- [33] 王志增, 路宁, 张旭. 工业炉窑富氧燃烧技术的应用实践 [J]. 节 能, 2013, 32(11): 37-39.
  WANG Zhizeng, LU Ning, ZHANG Xu. Application practice of oxygen-enriched combustion technology in industrial furnace kilns[J]. Energy Conservation, 2013, 32(11): 37-39.
- [34] 王俊杰,颜碧兰,朱文尚,等.水泥窑用富氧燃烧技术理论分析
  [J].节能技术,2015,33(3):195-198,202.
  WANG Junjie, YAN Bilan, ZHU Wenshang, et al. Theoretical analysis of oxygen combustion technology in cement kilns[J].
  Energy Conservation Technology, 2015, 33(3):195-198, 202.
- [35] WRAMPE P, ROLSETH H C. The effect of oxygen upon the rotary kiln's production and fuel efficiency: Theory and practice[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1976, IA-12(6): 568–573.
- [36] SHAFER B. Oxygen enrichment at California Portland cement company's mojave plant[C]//IEEE-IAS/PCA 2001 Cement Industry Technical Conference. Conference Record. Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 293-298.
- [37] FRIDAY J G. Oxygen enrichment for cement kiln firing[C]//IEEE-IAS/PCA 2001 Cement Industry Technical Conference. Conference Record. Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 271-277.
- [38] 李铁冰,任晓雪.富氧燃烧在水泥窑协同处理工业废弃物中的应用[J].中国水泥,2010(4):49-51.

LI Tiebing, REN Xiaoxue. Application of oxygen-enriched combustion in cement kiln co-processing of industrial waste[J]. China Cement, 2010(4): 49–51.

- [39] 杨志芳. 富氧燃烧在水泥回转窑中的应用研究 [D]. 昆明: 昆明 理工大学, 2013: 8-15.
- [40] 黄伟. 富氧技术在新型干法水泥窑上的试验 [J]. 新世纪水泥导报, 2013, 19(5): 21-23, 6.
  HUANG Wei. Experiment of rich-oxygen technology used in PC cement kilns[J]. Cement Guide for New Epoch, 2013, 19(5): 21-23, 6.
- [41] 贾华平.水泥窑富氧燃烧需要辩证思维 [EB/OL]. (2023-07-13).[2025-03-19]. https://www.ccement.com/news/content/3923 1989709015001.html.
- [42] 蔡晖.水泥新突破!我国首套回转窑富氧燃烧工艺技改项目成功运行 [EB/OL]. (2018-04-13) [2025-03-19]. https://www.163.com/dy/article/DF9OIBG205149DCL.html.
- [43] 齐砚勇, 柯盛强, 谢鸿源. 预分解窑热平衡计算及传热效率评估
   兼论水泥窑富氧燃烧特征 [J]. 新世纪水泥导报, 2018, 24(6):
   22-30.

QI Yanyong, KE Shengqiang, XIE Hongyuan. Thermal balance calculation and heat transfer efficiency evaluation of pre-decomposition kiln and oxygen-enriched combustion characteristics of cement kiln[J]. Cement Guide for New Epoch, 2018, 24(6): 22–30.

- [44] 李乐意,轩红钟,刘守信.水泥窑富氧燃烧技术的应用及分析
  [J].新世纪水泥导报, 2021, 27(2): 34–35.
  LI Lehui, XUAN Hongzhong, LIU Shouxin. Application and analysis of oxygen-enriched combustion technology in cement kiln[J].
  Cement Guide for New Epoch, 2021, 27(2): 34–35.
- [45] 吴铁军, 孔取和, 马明, 等. 水泥窑富氧燃烧废气循环碳捕集技术
  [J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(4): 30-32.
  WU Tiejun, KONG Quhe, MA Ming, et al. Carbon capture technology for oxygen-enriched combustion and exhaust gas circulating of cement kiln[J]. Cement Guide for New Epoch, 2021, 27(4): 30-32.
- [46] 陈立新,陈虹旭. 水泥炉窑富氧煅烧新工艺及优化控制技术研发与工业示范[J]. 科技成果管理与研究, 2023, 18(11): 65-67.
   CHEN Lixin, CHEN Hongxu. Development and industrial demonstration of new process and optimized control technology for oxygen-enriched calcination in cement kilns[J]. Management and Research of Scientific and Technological Achievements, 2023, 18(11): 65-67.
- [47] WANG J, CHEN L, KAO H T. Numerical simulation of oxygenenriched combustion in a precalciner using coal gangue-blended pulverized fuel[J]. Thermal Science, 2024, 28(5 Part A): 3711–3724.
- [48] 潘赓, 刘府, 叶骏, 等. 富氧条件下分解炉三维流场数值模拟 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3561–3565.
   PAN Geng, LIU Fu, YE Jun, et al. Numerical simulation of flow in precalciner under the condition of oxygen-enriched combustion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(10): 3561–3565.
- [49] 陈立新, 付艳辉, 张乐宇. 富氧燃烧技术在水泥分解炉上应用的

178

可行性分析 [J]. 中国建材, 2019(9): 132-134.

CHEN Lixin, FU Yanhui, ZHANG Leyu. Feasibility analysis of oxygen-enriched combustion technology applied on cement decomposition furnace[J]. China Building Materials, 2019(9): 132–134.

- [50] MARIN O, CHARON O, DUGUE J, et al. Simulating the impact of oxygen enrichment in a cement rotary kiln using advanced computational methods[J]. Combustion Science and Technology, 2001, 164(1): 193–207.
- [51] ZHOU Y, CHEN L X, LUO Q, et al. Simulating the process of oxyfuel combustion in the sintering zone of a rotary kiln to predict temperature, burnout, flame parameters and the yield of nitrogen oxides[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2018, 54(5): 650–660.
- [52] WANG M Y, LIAO B, LIU Y Q, et al. Numerical simulation of oxy-coal combustion in a rotary cement kiln[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103; 491–500.
- [53] 李全亮. 水泥回转窑富氧燃烧的数值模拟与优化设计 [D]. 武 汉: 武汉理工大学, 2022: 40-83.
- [54] 朱思彤,李志涛,刘强强.水泥熟料烧制系统富氧燃烧技术分析
  [J]. 能源研究与管理, 2024, 16(3): 160-165.
  ZHU Sitong, LI Zhitao, LIU Qiangqiang. Analysis of oxygen enriched combustion technology in cement clinker firing system[J]. Energy Research and Management, 2024, 16(3): 160-165.
- [55] CARRASCO-MALDONADO F, SPÖRL R, FLEIGER K, et al. Oxy-fuel combustion technology for cement production-State of the art research and technology development[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 45: 189–199.
- [56] 彭学平,范道荣,李惠,等.天津水泥工业设计研究院有限公司 研发绿色低碳技术加快水泥行业减污降碳协同增效[J].中国建 材,2024(5):51-53.

PENG Xueping. Research and development of green and lowcarbon technologies to accelerate the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in the cement industry[J]. China Building Materials, 2024(5): 51–53.

- [57] IEA. CO<sub>2</sub> capture in the cement industry[R]. Paris: International Energy Agency, 2008; 33–51.
- [58] BARKER D J, TURNER S A, NAPIER-MOORE P A, et al. CO<sub>2</sub> capture in the cement industry[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 87–94.
- [59] CARRASCO F. Pilot testing, simulation, and scaling of an oxyfuel burner for cement kilns[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2021: 12-17.
- [60] 陈昌华,代中元,林敏燕,等.一种全氧燃烧生产水泥熟料联产 液态 CO<sub>2</sub> 的系统及方法: CN114907033A[P]. 2022-08-16.
- [61] KORING K. CO<sub>2</sub>-emissionsminderungspotential und technologische auswirkungen der oxyfuel-technologie im zementklinkerbrennprozess [D]. Düsseldorf: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2013: 1-147.
- [62] GIMENEZ M, PAXTON C, WASSARD H, et al. The oxy combustion option[J]. International Cement Review, 2014(5): 37–43.
- [63] PANERU M, MACK A, MAIER J, et al. D8.2 Oxyfuel suspension

calciner test results[R]. Norway: SINTEF, 2018: 1-37.

- [64] 段永华.水泥工业富氧燃烧 CO<sub>2</sub> 捕集技术的理论和实验研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2015: 15-78.
- [65] SÁNCHEZ-BIEZMA A, PANIAGUA J, DIAZ L, et al. Testing postcombustion CO<sub>2</sub> capture with CaO in a 1.7 MWt pilot facility[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1–8.
- [66] 天津市对外经济合作协会.天津水泥院:承建的青州中联年产 20万吨二氧化碳全氧燃烧富集提纯示范项目开工 [EB/OL]. (2023-07-12).[2025-03-19]. https://mp.weixin.qq.com/s/h7yR0N mRCr7NvL4WKPswgg.
- [67] 煤燃烧与低碳利用全国重点实验室. 2023 年研究进展 [EB/OL].
   (2024-07-18).[2025-03-19]. https://sklcc.hust.edu.cn/info/1020/ 2891.htm.
- [68] 天津水泥工业设计研究院. 创新引领|全球水泥行业全氧燃烧 耦合碳捕集技术规模最大项目烟气二氧化碳浓度成功点火 [EB/OL]. (2024-04-11).[2025-03-19]. https://www.163.com/dy/ article/IVHA22ID05565EU3.html.
- [69] GRANADOS D A, CHEJNE F, MEJÍA J M. Oxy-fuel combustion as an alternative for increasing lime production in rotary kilns[J]. Applied Energy, 2015, 158: 107–117.
- [70] MIKULČIĆ H, VUJANOVIĆ M, DUIĆ N. Reducing the CO<sub>2</sub> emissions in Croatian cement industry[J]. Applied Energy, 2013, 101: 41–48.
- [71] ZHANG L Y, WEI X L, ZHAO J, et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion with different O<sub>2</sub>/CO2 fractions in a large cement precalciner[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(4): 4949–4957.
- [72] 陈涛. 水泥工业富氧煤粉燃烧改造的流程模拟与性能优化 [D]. 上海: 上海交通大学, 2024: 32-67.
- [73] CARRASCO-MALDONADO F, HORNBERGER M, MAIER J, et al. Oxyfuel kiln burner tests for a CO<sub>2</sub>-free cement plant[C]//14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference. Melbourne: SSRN Electronic Journal, 2018: 1–5.
- [74] CARRASCO F, GRATHWOHL S, MAIER J, et al. Experimental investigations of oxyfuel burner for cement production application[J]. Fuel, 2019, 236; 608–614.
- [75] ANDERSSON K, JOHANSSON R, HJÄRTSTAM S, et al. Radiation intensity of lignite-fired oxy-fuel flames[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 67–76.
- SCHOENECK L. ThyssenKrupp polysius: next generation oxyfuel technology and SCMs [EB/OL]. (2024-06-03) [2025-03-19]. https://worldcementassociation.glueup.com/resources/protected/ organization/5670/event/100426/1c2d2573-5595-4c2f-9070-352d499a30bb.pdf.
- [77] GRANADOS D, MEJÍA J, CHEJNE F, et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion in a cement kiln[C]//2nd International Conference on Energy Process Engineering Efficient Carbon Capture for Coal Power Plants. Germany, 2011: 184–187.
- [78] GRANADOS D A, CHEJNE F, MEJÍA J M, et al. Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln[J]. Energy, 2014, 64: 615–625.
- [79] CARRASCO-MALDONADO F, BAKKEN J, DITARANTO M, et al. Oxy-fuel burner investigations for CO<sub>2</sub> capture in cement plants[J]. Energy Procedia, 2017, 120: 120–125.

- [80] 黄冠硕.水泥回转窑富氧煤粉燃烧数值模拟与性能优化 [D].上海:上海交通大学, 2024: 15-57.
- [81] ERIKSSON M, HÖKFORS B, BACKMAN R. Oxyfuel combustion in rotary kiln lime production[J]. Energy Science & Engineering, 2014, 2(4): 204–215.
- [82] SKINNEMOEN M. Process simulation of oxy-combustion CO<sub>2</sub> capture in cement plant[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2014: 13–67.
- [83] ZEMAN F. Oxygen combustion in cement production[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 187–194.
- [84] MEUNIER N, LARIBI S, DUBOIS L, et al. CO<sub>2</sub> capture in cement production and re-use: First step for the optimization of the overall process[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 6492–6503.
- [85] FARIA D G, CARVALHO M M O, NETO M R V, et al. Integrating oxy-fuel combustion and power-to-gas in the cement indus-

try: A process modeling and simulation study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103602.

- [86] ALCAZER G, BANNON C, CINTI G, et al. ECRA CCS project report about phase I [R]. Duesseldorf: European Cement Research Academy, 2007: 15–59.
- [87] 刘罗茜, 雷涯邻, 支树洁, 等. 中国水泥行业点源层面 CCUS 技术减排潜力与优化部署 [J]. 北京理工大学学报, 2024, 26(4): 56-67.

LIU Luoxi, LEI Yaoyi, ZHI Shujie, et al. Potential and optimization deployment of CCUS technology emission reduction at point source level in China's cement industry[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2024, 26(4): 56–67.

[88] HÖKFORS B, ERIKSSON M, VIGGH E. Modelling the cement process and cement clinker quality[J]. Advances in Cement Research, 2014, 26(6): 311–318.