

文章编号: 1671-8097(2021)01-0001-13

DOI:10.13738/j.issn.1671-8097.019232

工业炉窑燃烧过程中节能减排问题的 研究进展与发展方向

魏小林¹, 黄俊钦¹, 李 森¹, 潘利生¹, 陈立新², 谭厚章³, 杨富鑫³

(1. 中国科学院 力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 北京汉能清源科技有限公司, 北京 100070;

3. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 工业炉窑是建材、冶金、化工等流程工业中至关重要的用能装备,也是化石能源消耗和环境污染的主要源头之一。工业炉窑燃料中煤炭占 70%,存在着能耗高排放大的问题,需要研发高效低排放的新技术。对于典型的工业炉窑,其生产过程具有多工艺目标、多品种交叉生产,以及大负荷调节比、宽幅度负荷变化的复杂工艺特点。通过综述在节能管控、富氧燃烧与氧燃料燃烧、分级燃烧和颗粒物脱除等方面的研究进展,提炼出工业炉窑物质流与能量流匹配节能、富氧燃烧及燃烧优化调控、分级燃烧与 SNCR 脱硝以及微细颗粒物排放与资源化利用等四项共性关键技术。在此基础上,给出了需要进一步研究的技术内容,为我国工业炉窑高效低排放技术研发与应用提供发展方向与途径的建议。

关键词: 工业炉窑;高效洁净燃烧;关键技术;现状与发展

中图分类号: TK175;X70 **文献标识码:** A

0 引 言

能源是人类社会和经济不断发展的原动力,环境是人类赖以生存的前提条件。工业炉窑在人类生存和发展中起到至关重要的作用,工业炉窑耗能巨大,污染排放严重,已经成为我国继火力电站之后,污染控制的重点对象。工业炉窑是指在工业生产中用燃料或电能转化产生的热量,将物料或工件进行冶炼、焙烧、烧结、熔化、加热等工序的热工设备。根据《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996),工业炉窑分 10 类 19 种^[1]。

工业炉窑是我国的能耗大户,消耗全国 1/4 以上的能源,其中 90% 以上为煤、油和气等燃料消耗(其他主要为电力消耗),而燃料中煤炭占 70%^[1],比如,我国钢铁行业、建材行业和化工行业用煤大约占我国煤炭消耗总量的 17%、14% 和 7%。由于炉窑在燃料燃烧排放污染物时,还伴随着原料分解产生的污染物质,因此工业炉窑也是我国污染物排放的一大来源。例如,仅钢铁行业

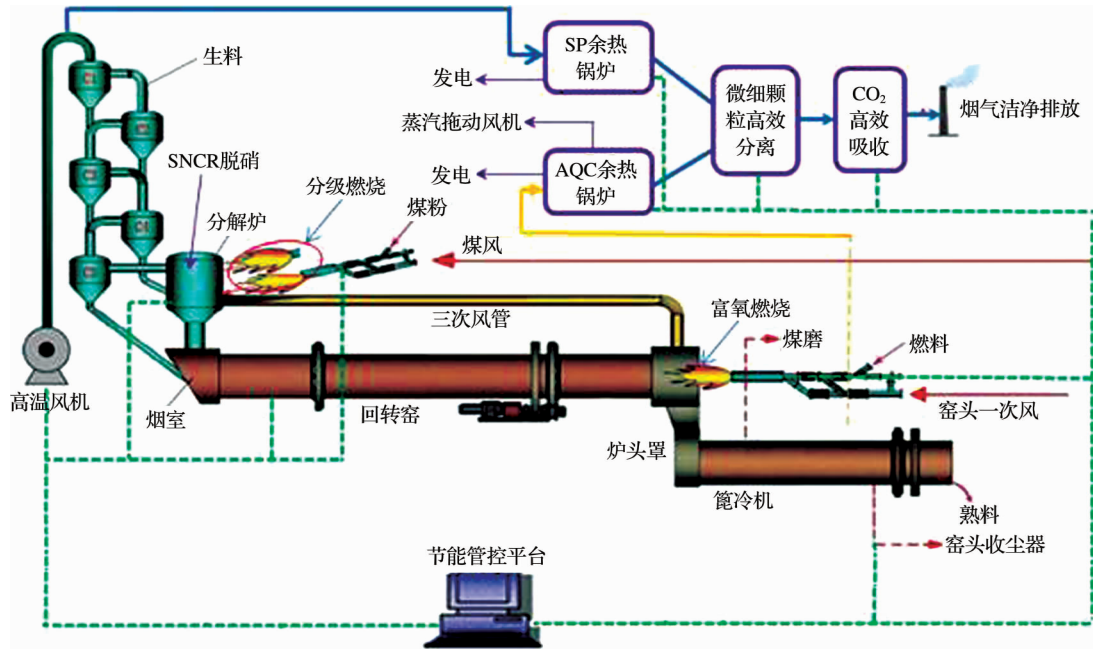
的大气污染物 NO_x、SO₂ 和粉尘排放量就分别占全国排放总量的 10%、7% 和 20%^[2]。燃煤电厂实施超低排放以来,火电行业污染物排放量大幅度下降。2017 年钢铁行业主要污染物排放量已超过电力行业,成为工业部门最大的污染物排放来源。可见,工业炉窑的节能减排潜力巨大。

我国大部分工业炉窑在炉型结构、燃烧系统、热能利用、绝热材料、热工监控和环境保护等方面技术比较落后,由此造成产品综合能耗高、环境污染较严重、产品质量不高等问题。同时工业炉窑生产过程一般具有多工艺目标、多品种交叉生产,以及大负荷调节比、宽幅度负荷变化的复杂工艺特点。对于典型的工业炉窑,以水泥炉窑为例(如图 1 所示)^[3],可以看出其生产过程具有复杂的工艺特点。虽然不同工业炉窑的热量损失途径和污染排放源也各不相同,但是诸如排烟热损失、不完全热损失等热量损失途径及 NO_x、SO_x 及颗粒物排放是各种炉窑所共有的,因此,在工业炉窑行业大力开展节能减排共性问题研究及关键技术研发

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2020-03-20.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601501).

作者简介: 魏小林,男,1967 年生,研究员,主要从事清洁燃烧及节能减排等方面的研究与开发工作. E-mail: xlwei@imech. ac. cn

图 1 典型工业炉窑的工艺流程^[3]Fig. 1 Process flow of typical industrial furnace^[3]

具有重大意义。

国内外工业炉窑的技术进步发展迅速,在节能管控、富氧煅烧、分级燃烧和颗粒物脱除技术等方面取得了长足进步。这些新技术对于工业炉窑在燃烧过程中提高能效、降低排放具有重要意义,其理论成果,如节能减排方法与数学建模理论等,将丰富、完善相关学科理论技术体系,对学科发展起到积极促进作用,有望成为本领域技术发展的新方向;其高效低排放共性关键技术对于工业炉窑具有普适性,可以显著提升工业炉窑能源利用效率,大幅降低能耗和污染物排放,推动工业炉窑的科技进步并提升企业核心竞争力。

由于工业炉窑种类繁多,因此本文在详细分析建材与冶金行业工业炉窑节能减排技术基础上,兼顾分析其他工业炉窑,从而提炼出工业炉窑核心共性关键技术,综述其发展动态,给出了需要进一步开展研究的技术内容,为我国工业炉窑高效低排放技术研发与应用提供了参考的发展方向与途径。

1 国内外研究现状

1.1 工业炉窑物质流与能量流匹配的节能管控平台

在流程工业中,“流”有三种载体来体现,即以

物质形式为载体的物质流,以能源形式为载体的能量流和以信息形式为载体的信息流^[4](也有人将“价值流”和“污染物流”等看作新的“流”)。在工业炉窑实际生产中不同物料沿着生产流程运动,形成物质流;各种形式能源沿着转换、使用和排放的途径流动,形成能量流;伴随物质流、能量流的不同特征参数在生产过程中的有序动态变化,形成信息流。物质流和能量流既各自独立又相互联系、彼此制约,信息流与物质流、能量流密切相关。物质流是炉窑生产的主体,包含各种原燃材料,能量流推动物质流进行流动和转变。能量流除提供目标产品的生产能耗外,余热余能产生源多、分散、差别大,同时能源需求点多而分散,要求不同,有时会出现此处能源放散,而别处却不够用的现象^[5]。随着工业炉窑普遍采用DCS等控制系统,可以获取生产过程中物质流、能量流的大量信息,但这些数据没有得到有效利用来表征和调控工业炉窑的运行。如果采用人工智能和专家系统等信息技术手段改善能量流和物质流的信息调控,就能够达到节能减排的目标。

工业炉窑的能源系统组成复杂。从能源种类上分,有固体燃料如煤、焦炭等,液体燃料如柴油、液化石油气等,气体燃料如天然气、煤气等以及电力能源、余热蒸汽等;另外,还包括耗能介质如水、

压缩空气、氧气、氮气等^[6]。炉窑耗能的指标可以由单位质量产品的综合能耗(燃料与电耗等)来评价,需要考虑产品与物料类型、能源种类、能源流转与使用方式等因素。这样一个复杂的系统必须依靠信息自动化技术,通过信息流保证能源的准确调配以及炉窑的高效用能,即利用能源管控平台实现炉窑运行中物质流与能源流的匹配。

钢铁制造流程是由不同工序的冶金炉窑等设备组成的复杂系统,最早开展了能源管理中心的建设。20世纪90年代,日本新日铁开始建设能源指挥中心。20世纪90年代末,国内第1套建成于宝钢,随后,在武钢、首钢等大型钢企中应用较多,同时在煤炭、电力、重机、化工、水泥、建筑等行业也开始了推广。自2000年开始,国际上一些国家陆续发布了能源管理系统标准规范,我国也在2009年月正式发布了《能源管理体系要求》标准。这种能源管理方式已经开始向机械加工行业、建材行业、轻工业和建筑行业等生产过程推广应用。但是这些能源中心还只是进行各类能源的集中监测和宏观调度(如煤气的优化调度),对于炉窑实际运行的节能作用还十分有限。

另一方面,国内外的工业炉窑已经实现了生产过程中某些与物质流/能量流信息(流量、压力、温度等)相关的采集与监控,同时也开始注重生产工艺中各主要生产环节优化控制软件的开发与应用^[7-9]。刘超明^[7]介绍了工业窑炉优化燃烧控制系统的设计过程、控制流程、控制系统的工作原理以及在DCS中的实现方法。吉利宏^[8]报道了宣钢转炉智能炼钢控制系统的智能化改造,提高了产品质量,降低了成本。对于大型水泥熟料生产线,齐灵水^[9]较早采用水泥炉窑的仿真软件,用来分析炉窑的操作与运行。Sogut等^[10]建立模型,研究了水泥炉窑的能量流,表明51%的热量被放散。Atmaca和Yumrutas^[11]通过模型分析了水泥炉窑的能量流和有用能,给出了炉窑能量输入与输出的比例(如图2所示)。周元^[12]采用PLC和组态技术设计了一套水泥窑炉节能优化集控系统,可实现对窑炉主要生产参数的实时监测和控制。李福通^[13]进行了预分解窑系统能效分析、物料平衡、热平衡的测试,分析了水泥窑系统的能耗分布情况,评价了节能改造获得的效果。

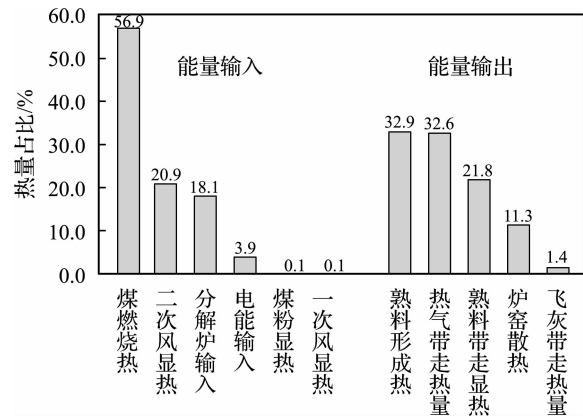


图2 炉窑的能量流分布^[11]

Fig. 2 Energy flow distribution in the furnaces^[11]

从生产工艺上,工业炉窑的节能潜力仍然很大。例如:冶金行业可利用的余热有:焦炉荒煤气显热、烧结线的高温烧结块显热(只利用了400℃以上余热)、转炉煤气(800℃以下)显热以及轧钢工艺的高温钢坯或产品显热等。同时,水泥炉窑的回转窑筒体、窑头罩、蓖冷机、三次风管等设备散失的余热尚未有效回收^[14-15]。

从节能管控技术发展来看,国外工业生产过程已经实现能源系统的实时监控和优化管理,而我国现阶段正从单纯设备监控转向生产过程和系统综合监控^[16],并向管控一体化方向发展,节能降耗优势在钢铁等行业得到了体现,然而工业炉窑能量流优化重组与节能管控紧密结合的节能技术还较少见。

1.2 富氧燃烧与氧燃料燃烧技术

富氧燃烧(oxygen enriched combustion)是一种利用含氧体积分数超过21%的空气进行燃烧的高效节能技术,具有火焰温度和黑度高、燃烧速度快、燃点温度低等特点,提高了炉内辐射传热能力和热利用率;富氧燃烧形成的高温环境可以改善工艺条件,提高生产效率、改善产品质量;同时助燃空气中氮含量的降低减少了烟量(也减少了烟气余热损失)和NO_x、CO等污染物。

富氧燃烧技术较早应用于冶金、建材等行业的工业炉窑上,国内外已经将富氧燃烧技术应用到钢铁行业烧结线、热风炉、钢包烘烤器、轧钢加热炉和热处理炉^[17],有色冶金行业铜、铅锌冶炼炉,建材行业水泥、陶瓷和玻璃炉窑等^[18]。雷杰^[19]在加热炉中研究了天然气富氧燃烧,当助燃剂中含氧量为30%时,燃料消耗量降低近30%。

钢坯的加热时间明显缩短。徐亮等^[20]探讨了富氧空气与退火窑热风结合在玻璃熔窑上的应用,结果表明,采用富氧热风燃烧,火焰辐射玻璃液温度可提高 100 °C 左右,配合料熔融速度加快,提高熔化率 10% 以上。我国也已在工业炉窑上进行了富氧燃烧技术的应用,张利军^[21]报道了富氧燃烧技术在高炉热风炉上的成功应用,取得了良好的节能降耗效果。杨志芳等^[22]研究了富氧燃烧在水泥炉窑上的应用,通过现场试验表明,吨熟料综合能耗可降低 3% 以上。

国内外在工业炉窑的氧燃料燃烧(oxy-fuel combustion,此时氧化剂中含 N₂ 量一般小于 5%)方面发展迅速。Smeichele^[23]记录了林德公司采用氧燃料燃烧技术逐步改造加热炉、热处理炉和转底炉的能量消耗过程。如图 3 所示,2001~2004 年采用空气燃烧,13 个炉子的平均能耗较高,2005 年起逐步进行改造,2007 年已有 9 个炉子完成改造,从图 3 可以看出采用氧燃料燃烧所有炉子每吨燃料消耗大为降低,考虑到烟气余热损失减少以及燃料节省(25%~50%),节能率可以达到 20%~50%,同时可以提高产量 15%~50%,NO_x 排放最大可以减少 50%,CO₂ 排放减少 25%~50%。强孙燕等^[24]也报道了林德公司的氧燃料燃烧技术在我国热轧加热炉上的成功应用。

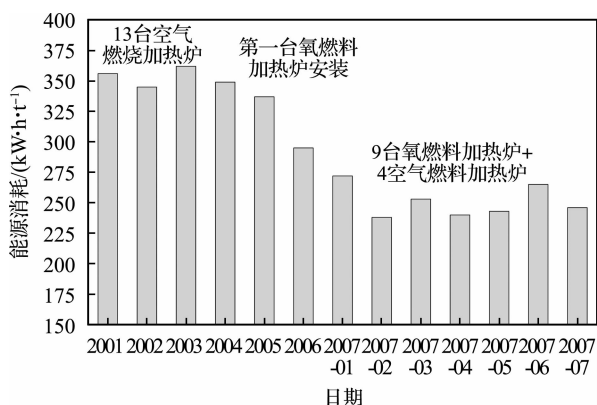


图 3 加热炉(13 台)采用氧燃料燃烧后的节能效果^[23]

Fig. 3 Energy saving effect of 13 heating furnaces burning oxygen fuel^[23]

Filho 等^[25]采用实验研究和数值模拟的方法,对比研究了 MW 级陶瓷熔炉的氧燃料燃烧与

空气燃料燃烧技术,采用氧燃烧时热效率更高,单位 kg 产品的耗热量仅为空气燃烧时的一半。Han 等^[26]采用数值模拟研究了钢铁加热炉中的氧燃料燃烧,也表明氧燃料燃烧比空气燃烧的热效率提高 50% 以上。Ghadamgahi 等^[27]研究钢铁均热炉中的氧燃料无焰燃烧过程,精确给出了温度分布,但与空气燃烧相比,由于烟气量减少影响对流,会导致气流和温度的不均匀分布。Schluckner 等^[28]采用部分混合稳态扩散的火焰面湍流燃烧模型对加热炉的氧燃料燃烧进行了数值模拟,得到了比较准确的 NO_x 排放预测结果。

氧燃料燃烧在我国玻璃炉窑上也得到了较多的应用,国内称为全氧燃烧技术。潘再勇等^[29]采用数值模拟研究了玻璃熔窑火焰空间的温度场与流场分布,火焰最高温度有 2 062 °C,其中燃烧空间非火焰区平均温度为 1 290 °C,辐射效率大大增加;玻璃熔化质量显著提高,节能减排效果也随之提升。姜宏^[30]详细综述了全氧玻璃熔窑设计、全氧燃烧对玻璃性能的影响,以及实际生产过程中玻璃液表面泡沫多、澄清困难等关键问题,进行了浮法玻璃全氧燃烧技术在炉窑系统、节能减排和运行成本等方面的研究分析。

可见,工业炉窑富氧燃烧技术在国外应用较早,在国内也已经开始应用,但存在制氧方法的适用性以及运行投资高的问题。采用变压吸附制氧的富氧燃烧方法可能具有节能效果良好、运行可靠性高、投资回收期短等优势,因此在研发与应用中值得重视。另外,在研发中需要关注富氧与燃料的匹配问题,优化燃烧器的设计,从而充分发挥富氧助燃低热值燃料的优势,解决好与工业炉窑运行的优化控制问题,使企业真正实现节能减排、增产增效的目的。同时,全氧燃烧技术已经在玻璃炉窑和加热炉等上取得成功,今后在其他工业炉窑也有可能获得应用^[31]。

1.3 分级燃烧和 SNCR 优化脱硝技术

燃烧中的分级燃烧技术、燃烧后的选择性非还原(SNCR)技术,以及分级燃烧与 SNCR 相结合脱硝技术(包括先进再燃脱硝)首先在燃煤电站取得应用,在脱除 NO_x 方面取得可观的成效^[32-33]。SNCR 技术对温度较为敏感,存在一个最适温度区间,称之为“温度窗口”,大约为 800~1 100 °C。如水泥分解炉中温度恰在此区间,适

合采用该技术^[34],同时停留时间可以达到 5 s,十分有利于 NO_x 的还原。

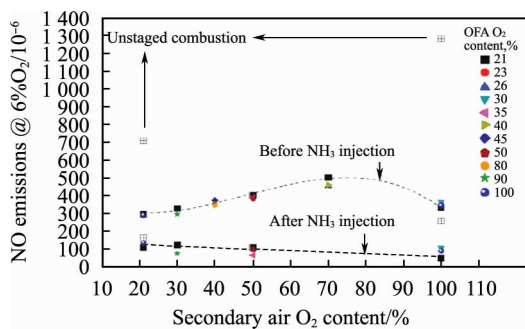
Daood 等^[35]进行了煤(与生物质)富氧条件下的分级燃烧与 SNCR 实验研究,图 4 给出了分级燃烧前后的 NO_x 排放量。结果表明:采用分级燃烧(RC2 煤,二次风 21% O₂),NO_x 从体积分数 709×10^{-6} 下降到 163×10^{-6} ,NO_x 还原率为 77%;当 O₂ 量增加时(二次风 100% O₂),分级燃烧前,NO_x 大幅增加到约体积分数 $1\,275 \times 10^{-6}$,但分级燃烧后 NO_x 还原率可达 80%;当共同采用分级燃烧与 SNCR,对于较高的分级率(SR1=0.80,31%分级),从图 4(b)可见,NO_x 还原率可达 45%左右,即 NO_x 可以进一步减少约 50%。Tree 和 Clark^[36]研究了先进再燃脱硝技术(即采用天然气再燃与 SNCR 相结合),研究表明,烟气中 O₂ 体积分数在 0.7%~3.0%、温度为 1 274~1 343 K 时,脱硝效率最高,并且这与 SNCR 脱硝的最佳条件极为接近。Han 等^[37]采用详细反应机理对于先进再燃脱硝技术进行了数值模拟,结果表明,当再燃区 SR2=0.95,氨氮比 NSR=1.5

时,NO_x 还原率可达 70%~80%。

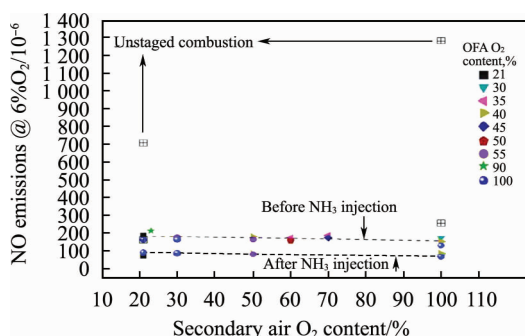
王智化等^[38]在小型沉淀炉上做了以氨为还原剂的 SNCR 实验研究,实验结果表明喷氨最佳温度在 850~1 100 °C 时,NO_x 还原率高达 82% 并且氨逃逸率较低。李超等^[39]做了空气分级与 SNCR 相结合的脱硝实验,在富燃料区喷入还原剂,实验得出,当主燃区温度为 1 300 °C、过量空气系数为 0.75 和 0.85 时,喷氨后脱硝效率都会有所提高。Guo 等^[40]研究了 K/Na 添加剂对于 SNCR 过程的影响,结果表明碱金属可以扩展 SNCR 的温度窗口约 50~100 K。刘平安等^[41]则针对陶瓷炉窑中 NO_x 生成问题进行测试分析,结果表明,当温度高于 950 °C 以后,烧成进入还原阶段,NO_x 的生成速率将会大大减少。Iliuta 等^[42]耦合焦炭燃烧、石灰石分解和 NO 生成机理等,建立了水泥分解炉的非均相反应模型,研究表明,还原区出口的三次风混合速率和焦炭反应性等是重要的分解炉影响参数,CO 在 CaO 表面引起的 NO 还原反应十分重要。Fan 等^[43]研究了水泥分解炉中的 SNCR 脱硝机理。结果表明:增加 O₂ 浓度,脱硝的效率降低,最佳的脱硝温度减小,温度窗口向低温侧移动;水分会促进 NO_x 脱除,拓宽脱硝的温度窗口;当温度低于 900 °C 时,H₂O、O₂、SO₂ 和 CO 浓度的增加有利于减少氨逃逸。

分级燃烧与 SNCR 脱硝技术除在燃煤锅炉上应用外,还在垃圾焚烧炉、水泥炉窑与陶瓷炉窑等方面取得较多的应用^[34,44-47]。Neuffer 和 Laney^[34]综述了欧美在水泥炉窑控制 NO_x 技术方面的研究进展。结果表明:通过分级燃烧 NO_x 脱除率可达 17%~43%,通过 SNCR 脱除率可达 10%~50%;采用分级燃烧与 SNCR 相结合的技术,NO_x 排放体积分数有望降低到标准状态下 100~200 mg/m³。李双喜^[48]系统分析了 SNCR 与炉窑分级燃烧两种技术在水泥窑中降氮的原理、技术工艺参数以及具体的经济效益,并通过生产实践证明,优化后的脱硝技术可使分解炉中 NO_x 排放量减少 50% 以上。

国内外大量研究已证明,分级燃烧与 SNCR 相结合的脱硝技术脱除燃煤锅炉中氮氧化物颇有成效,并且分级燃烧和选择性催化还原技术组合是一种经济有效的方式,但获得准确的工艺参数仍然需要针对具体的炉内参数情况继续进行技术



(a) SR1=0.9



(b) SR1=0.8

图 4 煤在富氧条件下的分级燃烧与 SNCR 实验^[35]

Fig. 4 Experimental study on staged combustion and SNCR of coal under oxygen enriched condition^[35]

优化。国内虽然开展了工业炉窑分级燃烧和 SNCR 脱硝技术的相关研究,但还需要解决在工业炉窑的工程实际应用问题。随着我国 NO_x 排放的环保标准越来越严格,当前还亟需研发包括 SCR 等的工业炉窑 NO_x 超低排放新技术。

1.4 工业炉窑气固排放物质的高效分离与洁净利用技术

气体和粉尘是工业炉窑最常见的排放物质。水泥炉窑作为典型的高耗能高排放燃煤工业炉窑,所排放的气固物质主要包括 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、氟化物、氨等气态物质以及颗粒物、重金属等固态物质,其中 CO_2 以及粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的微细颗粒物,已经引起全世界的高度重视,且仍缺乏较为成熟且可推广的分离与利用技术,迫切需要研发以减排 CO_2 和微细颗粒物为目标的工业炉窑气固排放物质高效分离与洁净利用技术。

工业炉窑 CO_2 减排可通过 CO_2 捕获与封存技术(carbon capture and storage, CCS)实现,主要有物理吸附法、化学吸附法、膜分离法和低温冷凝法等,但各方法均具有一定局限性,如投资费用高、 CO_2 回收率低、造成环境污染及化学试剂腐蚀工业设备等问题。与此同时,将 CCS 技术应用于水泥行业仍面临技术经济方面的巨大挑战,国内外相关应用研究仍处于可行性论证和理论分析阶段^[49-51]。

离子液体作为 CO_2 吸附剂,具有溶解能力强、热稳定性好、结构和性质可调节以及可循环使用等优点,成为国内外研究及应用所广泛关注的热点。Bates 等^[52]首次合成氨基修饰的离子液体,使其对 CO_2 的吸收量提高至质量分数 7.4%。Zhao 等^[53]报道了一系列在阴阳离子上同时引入氨基的功能化离子液体具有较高的 CO_2 吸附性能。付格红等^[54]研究发现,以 Al_2O_3 为载体的负载型离子液体比以 SiO_2 和活性炭为载体的负载型离子液体对 CO_2 具有更优异的吸附性能。崔国凯等^[55]在研究功能化离子液体吸收二氧化碳时发现,聚合离子液体不仅克服粒子液体体积分数大的问题,还能高校吸收低浓度的 CO_2 ,在常温下,含丁二酰亚胺阴离子的离子液体对 CO_2 的吸收量可以达到质量分数 22%。冯建鹏^[56]研究了基于离子液体为电解质,直接将 CO_2 进行电化学还原,研究表明,在一定条件下, CO_2 可以被还原

成 CO 或是其他醇烃类物质。

工业炉窑燃烧排放的微细颗粒物具有数量庞大、质量分数低、难以被传统除尘设备捕获,及更易进入人体而严重危害人体健康等特点。颗粒凝并技术因具有良好的技术可行性和广阔的应用前景而受到国际社会的广泛关注,主要包括电凝并、湍流凝并、相变凝并、声凝并、磁凝并、光凝并及化学凝并等。其中,湿式相变凝并(如图 5 所示)技术^[57]适用于高温高湿的烟气环境,配合热利用装置可实现烟气余热回收,有助于烟气中水的回收利用,具有较好的技术经济优势。基于湿式相变凝并技术进行工业炉窑颗粒排放物的高效分离及洁净利用技术研究具有重要意义。

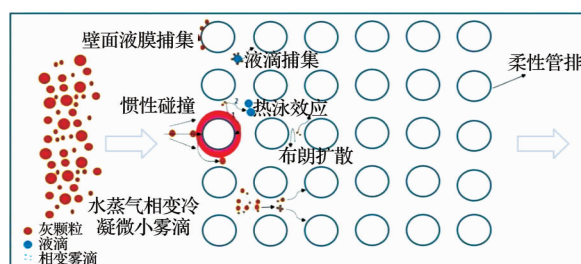


图 5 湿式相变凝并技术原理^[57]

Fig. 5 Principle of wet phase change coagulation technology^[57]

国外在蒸汽湿式相变凝并脱除颗粒物方面具有较早的理论研究。Schauer^[58]最初于 1951 年研究发现使蒸汽在颗粒物表面凝结可以有效促使微细颗粒物在流动烟气中团聚,有利于微细颗粒物在除尘设备中的捕获与脱除。Sun^[59]应用蒸汽相变原理设计了脱除污泥焚烧亚微米颗粒的工艺方案,该方案中烟气中颗粒分别经过碰撞团聚、烟温调节和相变凝结三个过程,最终进入常规除尘设备脱除含尘液滴。Heidenreich 等^[60]将蒸汽相变与旋风除尘技术相结合,试验研究该系统混合不同温度饱和气流所得到饱和水汽环境条件下亚微米颗粒的脱除效果。可以看出,蒸汽相变凝并技术可通过预处理设备与传统除尘设备相结合,进而实现工业炉窑固体排放物的分离与利用。

国内在蒸汽相变凝并方面的研究与应用主要表现为结合脱硫洗涤塔,协同水雾喷淋及重力沉降等效应实现微细颗粒物的团聚与脱除。刘锦辉等^[61]、鲍静静等^[62]以湿法烟气脱硫系统为研究对

象,发现在低温高湿烟气中添加适量蒸汽建立过饱和环境,可促使水蒸汽在微细颗粒物表面凝结,最终经过除雾器可脱除除尘液滴。凡凤仙等^[63-64]经过数值研究发现颗粒的物化性质和溶液的润湿性能对蒸汽在颗粒表面的异质核化特性具有决定性作用,同时理论分析发现相变凝结后颗粒物粒径趋于一致。熊英莹和谭厚章等^[65-66]发现将湿式相变装置布置于烟道中,利用饱和烟气中的水蒸气凝结相变、微细颗粒物凝并、颗粒惯性作用以及重力沉降等多因素除尘过程,可以有效脱除燃煤污染物中的微米级微细颗粒物。

离子液体吸附 CO_2 技术主要依靠经验进行设计调节,缺乏以功能特性为基础的设计理论以及直接应用于工程实践的试验结果。国内外在工业炉窑中微细颗粒减排方面还主要以基础研究为主。针对具体的工业炉窑,由于其 CO_2 浓度和微细颗粒物的粒径分布特性等各有不同,因此需要深入研究高效捕集与脱除的机理与方法,同时在工业炉窑上开展工业示范。

2 关键技术发展方向

2.1 工业炉窑多工艺目标物质流与能量流匹配节能关键技术

基于工业炉窑物质流与能量流的匹配关系,针对水泥等工业炉窑原料和工况的波动性,需要研发工业炉窑原料物流、燃烧能流与余热利用精准匹配的节能方法及管控技术,进行节能管控平台的设计,开发满足多品种工艺目标要求的工业炉窑能量流优化重组节能新技术。

1) 研究多原料、宽负荷和多产品工业工艺过程的物质流监测与优化控制法,研究工业炉窑多工艺目标能量流焓分析以及物质流与能量流匹配的节能原理;开展工业炉窑不同部位的能量品位、热能与电能需求以及能量散发与损失分析,研发工业炉窑能量流优化重组节能新技术。

2) 研发工业炉窑能源数据采集与交换关键硬件及软件技术,研究能源系统执行单元的控制流程,开发工业炉窑生产过程实时监测和远程控制软件;研究工业炉窑经济指标自动分析方法,建立能耗能效分析评估体系及能源运行状态分级预警和协作处理体系。

3) 研究先进涂料的热传导与涂层强度性能,

研发炉窑筒体及热风管道先进隔热保温技术,同时研发高温窑筒体、高温物料、热风管等的余热高效取热与利用方式;研发燃烧能流与余热利用精准控制的节能方法及技术,建立工业炉窑物质流、能量流、信息流高效匹配的节能管控平台。

2.2 富氧燃烧及燃烧优化调控关键技术

针对目标产品的多变性及其工艺燃煤的特殊性,需要采用低能变压吸附制氧技术与富氧燃烧有机结合的新工艺,研发满足产品种类及产量质量宽度变化生产的工业炉窑富氧燃烧技术,解决煤种变动性制约工业炉窑节能减排的共性难题。

1) 研发低能耗真空变压吸附(VPSA)制氧技术和工艺,研究高浓度氧源的制备特性,研发生成 25%~35% 体积分数富氧空气的混氧技术;研究富氧对提高整个炉窑系统燃烧效率及综合节能的影响,研究富氧煅烧对废气排放量及 CO 、 NO_x 等有害气体排放的影响。

2) 研究工业炉窑富氧煅烧对产品煅烧质量、产量及能耗影响的规律,研发满足原燃材料、产品种类及产量质量宽度变化生产的工业炉窑富氧煅烧技术;研究富氧煅烧时工业炉窑废气中氧浓度对熟料液相成分和黏度的影响,同时研究原料和工况的波动性、目标产品的多变性及燃煤品种的适应性,研发富氧煅烧的优化控制技术。

3) 研究制氧与混氧新技术、多通道煤粉燃烧器以及富氧优化控制技术的集成方法。

2.3 分级燃烧与 SNCR 优化控制关键技术

针对 NO_x 和 SO_x 等高排放的问题,需要综合优化分解炉分级燃烧与再燃、SNCR 脱硝、炉窑自脱硫技术,实现 NO_x 及 SO_x 的低排放,研发分级燃烧与新型 SNCR 等污染物控制技术。

1) 研究工业炉窑分级燃烧还原区过量系数和燃尽风送入位置对 NO_x 排放和燃烧效率的影响,研究替代燃料(如煤矸石、垃圾、生物质等)等对于碳酸盐生料分解的影响;优化设计工业炉窑分级燃烧时各股风的位置,确定分级燃烧接入点的位置、角度以及进入分解炉的速度等因素,研究低 NO_x 燃烧过程中分解炉的局部高温结皮特性。

2) 开展工业炉窑内部燃烧过程和 SNCR 脱硝技术的数值模拟研究,优化 SNCR 喷嘴在炉膛中的数量分布、速度和位置;研究烟气初始 NO_x

和 O_2 浓度、氨氮喷注摩尔比、喷注位置及混合对 SNCR 脱硝反应的影响规律,分析不同气体(CO 、 CH_4 和 H_2 及其构成的复合可燃气体)对于 SNCR 的影响,研发新型 SNCR 脱硝技术;优化喷煤风、三次风、窑尾风的速度流场,研究物料流、气流的混合特性和脱硝还原区的稳定性。

3) 研究还原区温度、过量空气系数、燃烧停留时间等对 CaO 、 MgO 自身脱硫的影响,研究替代燃料硫含量与灰分组分特性对于分解炉脱硫的影响;综合优化分级燃烧、SNCR 脱硝、SCR 脱硝、炉窑自脱硫等技术。

2.4 微细颗粒物排放与资源化利用关键技术

针对排放物减排与资源化利用,需要研发烟气深度降温除尘颗粒排放物的净化分离与再利用以及新技术,实现颗粒物洁净排放及资源化利用。

1) 研究烟气低温换热器的冷却性能,研究烟气温度、流动等特性对于颗粒物分离的影响,研发工业炉窑烟气深度降温及高效除尘技术;研究烟气中粉尘的相变凝聚机理,建立颗粒物凝聚模型,分析微细颗粒物的微观凝聚机制;研究喷淋水雾对烟道流场、温度场以及颗粒物浓度分布的影响,分析烟道内颗粒物的流动及凝聚特性;优化喷嘴的类型、布置方式以及烟道阻力特性,研究粉尘颗粒高效凝聚与捕集的机制,同时研究有/无扰流钝体时烟气中颗粒物的湍流凝聚特性。

2) 建立吸收 CO_2 速率快、选择性好、溶解度大的离子液体设计与制备方法,研究 CO_2 吸收前后离子液体的物化性质变化规律,总结离子液体高效吸收与分离 CO_2 的机理;研究窑尾烟气条件下离子液体吸收 CO_2 的规律,考察温度、压力、烟气组分、液气比、吸收塔结构等工况参数对离子液体的吸收容量以及抗氧化能力的影响特性。

3) 集成烟气深度降温及高效除尘技术,研究技术在应用于工业炉窑时的适用性,研发排放物资源化利用技术。

3 结论与展望

随着国家经济、社会与环境的发展,工业炉窑燃烧过程的节能减排问题愈显重要。因此本文综述了节能减排的核心关键技术,包括有节能管控、富氧燃烧、分级燃烧与 SNCR 脱硝以及微细颗粒物排放与资源化利用等技术。得到主要结论与展

望。

1) 工业炉窑燃烧是一个复杂的过程,其生产过程伴随各种物质流与能量流的交换与转移。随着计算机技术的发展,生产过程的信息流数据不仅得到监控还被采集分析,节能管控平台虽然是最近几年才在工业炉窑上运行,但其智能化管理控制,工业炉窑的节能效果得到较大改善,因此,该项技术值得关注。

2) 富氧燃烧技术在工业炉窑领域很早就有运用,正因为其具有火焰温度和黑度高、燃烧速度快、燃点温度低等特点,所以一直在炉窑燃烧方面成为研究热点。近年来,在富氧燃烧基础上有学者提出氧燃料燃烧技术,该项技术不仅综合了富氧燃烧的优势,更因为在燃烧前排除氮气,而大大减少 NO_x 气体,不仅节能,还减少污染,因此,氧燃料燃烧逐渐受到重视。

3) 分级燃烧技术与 SNCR 技术在减少 NO_x 排放领域已经在应用,并且脱硝效果良好。随着研究的深入,有的学者将两者结合起来,并对该项技术进行了深入分析,大量实验证明两种技术的结合不仅提高了减排效果还降低了成本,但这种技术被用于实践生产仍存在一定问题。

4) 随着环保要求的日益苛刻,工业炉窑所排放的 CO_2 以及粒径小于 $2.5 \mu m$ 的微细颗粒物引起了学者的兴趣。离子液体作为 CO_2 的吸收剂被广为研究,与其他吸收剂不同之处在于,在外加电场的作用下,吸收剂作为电解质可以定向将 CO_2 转化为有用的化合物。微细颗粒物特别是 $PM_{2.5}$ 的颗粒物因其体积小而难以捕捉,有的学者巧妙地将湿式相变装置布置于烟道中,其捕集效果十分高效。

工业炉窑节能减排技术日新月异、发展迅速,本文对其核心技术的起源及发展现状进行了比较详细的总结,并探讨了存在的问题和日后的发展趋势,为我国工业炉窑高能效低排放技术研发与应用提供发展方向与途径的建议。面对我国工业炉窑超低排放的紧迫需求,亟需开展院校与企业的大力协作,发挥各自优势,高水平地完成工业炉窑的节能减排技术研发与应用。

参考文献(References):

[1] 王 冠,安登飞,庄剑恒,等. 工业炉窑节能减排

- 技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- WANG Guan, AN Dengfei, ZHUANG Jianheng, et al. *Energy Saving and Emission Reduction Technology of Industrial Kiln* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 新华社. 我国推进实施钢铁行业超低排放 [R/OL]. (2019-05-05) [2019-09-17]. http://www.gov.cn/guowuyuan/2019-05/05/content_5388872.htm.
- Xinhua News Agency. *China Promotes the Implementation of Ultra-low Emission of Iron and Steel Industry* [R/OL]. (2019-05-05) [2019-09-17]. http://www.gov.cn/guowuyuan/2019-05/05/content_5388872.htm. (in Chinese)
- [3] 陈立新, 付艳辉, 王光, 等. 变压吸附分子筛制氧助燃技术在水泥煅烧中的应用 [J]. *中国水泥*, 2016(6): 95-97.
- CHEN Lixin, FU Yanhui, WANG Guang, et al. Application of PSA molecular sieve oxygen production and combustion supporting technology in cement calcination [J]. *China Cement*, 2016(6): 95-97. (in Chinese)
- [4] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- YIN Ruiyu. *Theory and Method of Metallurgical Process Integration* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 蔡九菊, 王建军, 陆钟武, 等. 钢铁企业能量流与物质流及其相互关系 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(9): 979-982
- CAI Jiuju, WANG Jianjun, LU Zhongwu, et al. Material flow and energy flow in & steel industry and correlation between them [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006, 27(9): 979-982. (in Chinese)
- [6] 宋小磊. 工业企业能源管理信息系统研发与应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- SONG Xiaolei. *Research, Design and Application of Enterprise Energy Management Information System* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] 刘超明. 工业窑炉优化燃烧控制系统的设计及其在DCS中的实现方法 [J]. *石油化工自动化*, 2008(2): 22-25.
- LIU Chaoming. The design of an industry stove & furnace optimum combustion control system and the realization meth [J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2008(2): 22-25. (in Chinese)
- [8] 吉利宏. 宣钢 150 t 转炉智能炼钢关键控制技术优化 [J]. *河北冶金*, 2018(6): 39-43.
- JI Lihong. Optimization of key control technology for intelligent steelmaking in 150 t converter of xuansteel [J]. *Hebei Metallurgy*, 2018(6): 39-43. (in Chinese)
- [9] 齐灵水. 仿真技术在新型干法水泥窑系统中的应用 [D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- QI Lingshui. *The Application of The Simulation Technology to NSP Kiln System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [10] SOGUT Z, OKTAY Z, KARAKOC H. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(8-9): 817-825.
- [11] ATMACA A, YUMRUTAS R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66: 435-444.
- [12] 周元. 大型水泥生产线窑炉节能优化与控制研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2010.
- ZHOU Yuan. *Research for Kiln and Furnace Energy-saving and Control in Large-scale Cement Production Line* [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology. (in Chinese)
- [13] 李福通. 水泥窑系统综合节能改造效果研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- LI Futong. *The Comprehensive Energy-saving Effect Research of Cement Kiln System* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] YIN Q, CHEN Q, DU W J, et al. Design requirements and performance optimization of waste heat recovery systems for rotary kilns [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 1-8.
- [15] SHAHIN H, HASSANPOUR S, SABOONCHI A. Thermal energy analysis of a lime production process: rotary kiln, preheater and cooler [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 114: 110-121
- [16] 杨昕梅, 杨承, 李绍荣. 一种网络化能耗采集和耗能设备运行精细化节能管控系统的设计 [J]. 现

- 代建筑电气, 2014(增刊): 60-64.
- YANG Xinmei, YANG Cheng, LI Shaorong. Design of a network energy consumption collection and precision operation energy saving management and control system of energy consuming equipment [J]. *Modern Architecture Electricity*, 2014 (Suppl. 1): 60-64. (in Chinese)
- [17] 毛艳丽, 曲余玲, 王 涿. 富氧燃烧技术及其在钢铁生产中的应用 [J]. *上海金属*, 2012, **34**(6): 52-55.
- MAO Yanli, QU Yuling, WANG Zhuo. Oxygen enriched combustion technology and its application in steel production [J]. *Shanghai Metals*, 2012, **34**(6): 52-55. (in Chinese)
- [18] BAUKAL C. E. *Oxygen-enhanced Combustion. Industrial Combustion* [M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- [19] 雷 杰. 富氧燃烧时加热炉中钢坯的加热及氧化特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LEI Jie. *Study on Thermal Properties and Oxidation Characteristics of Billet Heated in Oxygen-fuel Combustion Heating Furnace* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [20] 徐 亮, 周金毅, 罗文斌. 浮法玻璃熔窑富氧热风助燃系统的探讨 [J]. *建材世界*, 2018, **39**(5): 31-34.
- XUN Liang, ZHOU Jinyi, LUO Wenbin. Discussion on oxygen-enrich hot air combustion-supporting system for float glass furnace [J]. *The World of Building Materials*, 2018, **39**(5): 31-34. (in Chinese)
- [21] 张利军. 富氧燃烧技术在钢铁企业中的应用 [J]. *冶金动力*, 2019(7): 21-24.
- ZHANG Lijun. Application of enriched oxygen combustion technology in steel enterprises [J]. *Metallurgical Power*, 2019 (7): 21-24. (in Chinese)
- [22] 杨志芳, 卿 山, 王 华, 等. 富氧燃烧在水泥生产中的应用 [J]. *工业加热*, 2013, **42**(4): 7-10.
- YANG Zhifang, QING Shan, WANG Hua, et al. The application of oxygen-enriched combustion to the cement production [J]. *Industrial Heating*, 2013, **42**(4): 7-10. (in Chinese)
- [23] SCHEELE J. Results from 120 oxyfuel installations in reheating and annealing [J]. *Heat Processing*, 2009, **7**(4): 339-342.
- [24] 强孙燕, 黄 敏, 张 停. 富氧燃烧技术在马钢热轧加热炉中的应用 [J]. *工业炉*, 2019, **41**(1): 19-21.
- QIANG Sunyan, HUANG Min, ZHANG Ting. Application of oxygen-enriched combustion technology in heating furnace of master [J]. *Industrial Furnace*, 2019, **41**(1): 19-21. (in Chinese)
- [25] FILHO E, POSSAMAI T, NICOLAU V, et al. Experimental investigation of the thermal behavior for oxy-fired and air-fired high temperature furnaces for the vitreous ceramic industry [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, **16**: 100455.
- [26] HAN S H, LEE S Y, CHO J, et al. Efficiency analysis of air-fuel and oxy-fuel combustion in a reheating furnace [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **121**: 1364-1370.
- [27] GHADAMGAHI M, ÖLUND P, EKMAN T, et al. Numerical and experimental study on flameless oxy-fuel combustion in a pilot-scale and a real-size industrial furnace [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **141**: 788-797.
- [28] SCHLUCKNER C, GABERA C, LANDFAHRER M, et al. Fast and accurate CFD-model for NO_x emission prediction during oxy-fuel combustion of natural gas using detailed chemical kinetics [J]. *Fuel*, 2020, **264**: 116841(1-12).
- [29] 潘再勇, 陈筱丽, 祝思忠, 等. 全氧燃烧玻璃熔窑火焰空间的数值模拟 [J]. *玻璃*, 2016, **43**(11): 3-7.
- PAN Zaiyong, CHEN Xiaoli, ZHU Sizhong, et al. Numerical simulation of all-oxygen combustion space in glass melting furnace [J]. *Glass*, 2016, **43**(11): 3-7. (in Chinese)
- [30] 姜 宏. 浮法玻璃全氧燃烧技术发展 [J]. *玻璃与搪瓷*, 2018, **46**(2): 20-35.
- JIANG Hong. The development of the oxy-fuel combustion technique in float glass melting furnace [J]. *Glass & Enamel*, 2018, **46**(2): 20-35. (in Chinese)
- [31] 张乐宇, 魏小林, 李 森, 等. 大型水泥分解炉 O₂/CO₂ 燃烧的数值模拟研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, **49**(9): 1080-1088.
- ZHANG Leyu, WEI Xiaolin, LI Sen, et al. Numerical simulation of O₂/CO₂ combustion in large cement precalciner [J]. *Scientia Sinica Tech-*

- nologica, 2019, **49**(9): 1080-1088. (in Chinese)
- [32] HAMPARTSOUMIAN E, FOLAYAN O O, NIMMO W, *et al.* Optimisation of NO_x reduction in advanced coal reburning systems and the effect of coal type [J]. *Fuel*, 2003, **82**: 373-384.
- [33] 姚 强. 洁净煤技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
YAO Qiang. *Clean Coal Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [34] NEUFFER B, LANEY B. *Alternative Control Techniques Document Update - NO_x Emissions from New Cement Kilns; EPA-453/R-07-006* [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2007.
- [35] DAOOD S S, JAVED M T, GIBBS B M, *et al.* NO_x control in coal combustion by combining biomass co-firing, oxygen enrichment and SNCR [J]. *Fuel*, 2013, **105**: 283-292.
- [36] TREE D R, CLARK A W. Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame [J]. *Fuel*, 2000, **79**(13): 1687-1695.
- [37] HAN X H, WEI X L, SCHNELL U, *et al.* Detailed modeling of hybrid reburn/SNCR processes for NO_x reduction in coal-fired furnaces [J]. *Combustion and Flame*, 2003, **132**(3): 374-386.
- [38] 王智化, 周 昊, 周俊虎, 等. 不同温度下炉内喷射氨水脱除 NO_x 的模拟与试验研究 [J]. *燃料化学学报*, 2004, **32**(1): 48-53.
WANG Zhihua, ZHOU Hao, ZHOU Junhu, *et al.* Modeling and experimental study on NO_x reduction in furnace with ammonia injection [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, **32**(1): 48-53. (in Chinese)
- [39] 李 超, 吕学敏, 罗永浩, 等. 高级空气分级脱硝特性的实验研究 [J]. *锅炉技术*, 2009, **40**(2): 63-67.
LI Chao, LÜ Xuemin, LUO Yonghao, *et al.* Experimental study on NO_x reduction by advanced air-staging [J]. *Boiler Technology*, 2009, **40**(2): 63-67. (in Chinese)
- [40] GUO X F, WEI X L, LI S. Detailed modeling of the effects of K/Na additives on the thermal DeNO_x process [J]. *Energy & Fuels*, 2013, **27**: 421-429.
- [41] 刘平安, 王 慧, 税安泽, 等. 陶瓷烧成中 NO_x 生成及控制对策 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, **6**(8): 23-25, 49.
LIU Pingan, WANG Hui, SHUI Anzhe, *et al.* Analysis of NO_x formation during ceramics sintering [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, **6**(8): 23-25, 49. (in Chinese)
- [42] ILIUTA I, DAM-JOHANSEN K, JENSEN A, *et al.* Modeling of in-line low-NO_x calciners — a parametric study [J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57**(5): 789-803.
- [43] FAN W, ZHU T, SUN Y, *et al.* Effects of gas compositions on NO_x reduction by selective non-catalytic reduction with ammonia in a simulated cement recalcined atmosphere [J]. *Chemosphere*, 2014, **113**: 182-187.
- [44] JACOB M, BJARNE M, KIM C, *et al.* Life cycle assessment of selective non-catalytic reduction (SNCR) of nitrous oxides in a full-scale municipal solid waste incinerator [J]. *Waste Management*, 2011, **31**: 1184-1193.
- [45] HU Z F, JIANG E C, MA X G. Numerical simulation on operating parameters of SNCR process in a municipal solid waste incinerator [J]. *Fuel*, 2019, **245**: 160-173.
- [46] FU S, SONG Q, YAO Q. Study on the catalysis of CaCO₃ in the SNCR NO_x process for cement kilns [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **262**: 9-17.
- [47] 吕宏俊, 张泽玉, 连长康, 等. SNCR 脱硝技术在陶瓷行业的应用 [J]. *中国环保产业*, 2015(1): 30-34.
LÜ Hongjun, ZHANG Zeyu, LIAN Changkang, *et al.* Application of SNCR De-NO_x technology in pottery industry [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2015(1): 30-34. (in Chinese)
- [48] 李双喜. 水泥窑选择性非催化还原(SNCR)与分级燃烧研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
LI Shuangxi. *Cement Kiln Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) Research and Staged Combustion* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [49] BA-SHAMMAKH M, CARUSO H, ELKAMEL A, *et al.* Analysis and optimization of carbon dioxide emission mitigation options in the cement industry [J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, **4**(5): 482-490

- [50] NARANJO M, BROWNLOW D T, GARZA A. CO₂ capture and sequestration in the cement industry [J]. *Energy Procedia*, 2011, **4**(1): 2716-2723.
- [51] 韩娟, 赵晨, 汪牡丹, 等. 我国水泥工业二氧化碳排放现状与减排分析 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2010, **28**(03): 252-256.
HAN Juan, ZHAO Chen, WANG Mudan, *et al.* CO₂ emission status and emission reduction analysis of China's cement industry [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2010, **28**(3): 252-256. (in Chinese)
- [52] BATES E D, MAYTON R D, NTAI I, *et al.* CO₂ capture by a task-specific ionic liquid [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, **124**(6): 926-927.
- [53] ZHAO Y, ZHANG X, ZHEN Y, *et al.* Novel ionic liquids based solvents: preparation, characterization and applications in carbon dioxide capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, **5**(2): 367-373.
- [54] 付格红, 吕功煊, 马建泰, 等. 负载型氨基功能化离子液体吸附 CO₂ 性能差异研究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2013, **19**(1): 41-53.
FU Gehong, LÜ Gongxuan, MA Jiantai, *et al.* CO₂ adsorption studies in supported amino functionalized ionic liquids [J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2013, **19**(1): 41-53. (in Chinese)
- [55] 崔国凯, 吕书贞, 王键吉. 功能化离子液体在二氧化碳吸收分离中的应用 [J]. 化工学报, 2020, **71**(1): 16-25, 429.
CUI Guokai, LÜ Shuzhen, WANG Jianji. Functional ionic liquids for carbon dioxide capture and separation [J]. *CIESC Journal*, 2020, **71**(1): 16-25, 429. (in Chinese)
- [56] 冯建朋. 基于离子液体介质的 CO₂ 电化学还原过程研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
FENG Jianpeng. *Electrochemical Reduction Process of Carbon Dioxide Based Ionic Liquids* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [57] 谭厚章, 熊英莹, 王毅斌, 等. 湿式相变凝聚技术协同湿式电除尘器脱除微细颗粒物研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, **37**(12): 2710-2714.
TAN Houzhang, XIONG Yingying, WANG Yibin, *et al.* Investigation on fine particulate matters removal by using wet phase transition agglomeration technology cooperated with wet electro static precipitator [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, **37**(12): 2710-2714. (in Chinese)
- [58] SCHAUER P J. Removal of submicron aerosol particles from moving gas stream [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1951, **43**(7): 1532-1538
- [59] SUN J. *Particulate Emission and Control Research on a Sewage Sludge Incinerator* [D]. Twin Cities: University of Minnesota, 1992.
- [60] HEIDENREICH S, SCHABEL S, SACHWEH B, *et al.* Submicron particle separation in cyclones based on droplet growth by heterogeneous condensation [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, **26**(Suppl. 1): S873-S874.
- [61] 刘锦辉, 杨林军, 熊桂龙, 等. LIFAC 烟气脱硫中应用蒸汽相变促进细颗粒物脱除的实验研究 [J]. 燃料化学学报, 2011, **39**(1): 1-7.
LIU Jinhui, YANG Linjun, XIONG Guilong, *et al.* Experimental investigation on the improving removal of fine particles in LIFAC flue gas desulfurization by heterogeneous condensation [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2011, **39**(1): 1-7. (in Chinese)
- [62] 鲍静静, 杨林军, 颜金培. 应用蒸汽相变协同脱除细颗粒和湿法脱硫的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, **29**(2): 13-18
BAO Jingjing, YANG Linjun, YAN Jinpei. Experimental study on combined wet flue gas desulfurization and removal of fine particles by heterogeneous condensation enlargement [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(2): 13-18. (in Chinese)
- [63] 凡凤仙, 杨林军, 袁竹林, 等. 蒸汽在细微颗粒表面异质核化研究进展 [J]. 化工进展, 2009, **28**(9): 1496-1500.
FAN Fengxian, YANG Linjun, YUAN Zhulin, *et al.* Progress and prospect in the study of heterogeneous nucleation of vapor on fine particles [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, **28**(9): 1496-1500. (in Chinese)
- [64] 凡凤仙, 张明俊. 蒸汽相变凝结对 PM_{2.5} 粒径分布的影响 [J]. 煤炭学报, 2013, **38**(4): 694-699.
FAN Fengxian, ZHANG Mingjun. Influence of vapor heterogeneous condensation on the PM_{2.5} particle size distribution [J]. *Journal of China*

- Coal Society*, 2013, **38**(4): 694-699. (in Chinese)
- [65] 熊英莹, 谭厚章. 湿式毛细相变凝聚技术对微细颗粒物的脱除机理研究 [C]. 2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都: 四川大学, 2014: 1-7.
XIONG Yingying, TAN Houzhang. Study on theremoval mechanism of fine particles to wet capillary phase transition condensation technique [C]. *Academic Annual Meeting of the China Environmental Science Society*. Chengdu; Sichuan University, 2014; 1-7. (in Chinese)
- [66] 熊英莹, 谭厚章, 许伟刚, 等. 火电厂烟气潜热和凝结水回收的试验研究 [J]. 热力发电, 2015, **44**(6): 77-81.
XIONG Yingying, TAN Houzhang, XU Weigang, *et al.* Experimental study on latent heat and condensate recovery from flue gas in coal-fired power plants [J]. *Thermal Power Generation*, 2015, **44**(6): 77-81. (in Chinese)

Research progress and prospect of high efficiency and low emission technology of industrial furnaces combustion

WEI Xiaolin¹, HUANG Junqin¹, LI Sen¹, PAN Lisheng¹,
CHEN Lixin², TAN Houzhang³, YANG Fuxin³

(1. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Beijing Hanneng Qingyuan Technology Limited Company, Beijing 100070, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Industrial furnaces are the important energy-consuming equipments and the main sources of fossil energy consumption and environmental pollution in the process industry, e. g. building materials, metallurgy and chemical industry. Coal shares for 70% in the fuel of industrial furnace, with problems of high energy consumption and emission. It is urgent to develop the key technology for high energy efficiency and low emission. Typical industrial furnace has complex characteristics of mufti-objective, multi products cross-making, large load adjustment ratio and wide threshold load variation. In recent years, the technology of cement kiln has been developed rapidly and the significant progress has been made on the aspects of energy conservation controls, oxygen-enriched combustion and oxy-fuel combustion, staged combustion and particulate matter removal. This article summarized four key technologies in industrial furnaces, e. g. matching energy saving of material flow and energy flow, oxygen-enriched combustion and combustion optimization control, staged combustion and SNCR for denitration, and fine particulate matter emission and utilization. Based on this, the further technologies needed to research are proposed, which suggest the directions and approaches to develop high energy efficiency and low emission industrial furnaces.

Key words: industrial furnaces; high efficiency and low emission's combustion; key technology; status and development

[责任编辑: 郭万慧]