

水泥炉窑高能效低排放关键技术研发及应用进展

姚远¹ 魏小林^{1,2} 陈立新³ 李森^{1,2} 谭厚章⁴

(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.中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3.北京汉能清源科技有限公司 北京 100070; 4.西安交通大学 能源与动力工程学院 陕西 西安 710049)

摘要: 工业炉窑的高能效低排放关键技术能够有效提升炉窑能源利用效率、降低污染物排放。综述了节能管控与余热利用、富氧煅烧、分级燃烧以及颗粒物分离与资源化利用等工业炉窑节能减排共性关键技术研发及其在 2 500~5 000 t/d 水泥炉窑上的集成应用。基于工业炉窑物质流与能量流的匹配关系,开展了节能管控平台的设计,开发了满足多品种工艺目标要求的水泥炉窑能量流优化重组节能新技术,并进行了水泥炉窑物质流与能量流匹配的节能管理平台工业示范的实施;采用低能变压吸附制氧技术与水泥熟料煅烧有机结合的新工艺,研发了满足产品种类及产量质量宽度变化生产的水泥炉窑富氧煅烧技术,并进行了工业示范;针对 NO_x 和 SO_x 等高排放问题,综合优化了解析炉分级燃烧、SNCR 脱硝等技术,并进行了水泥分解炉分级燃烧和 SNCR 优化脱硝技术工业示范的实施;针对排放物减排与资源化利用,研发了烟气深度降温除尘颗粒排放物的净化分离与再利用新技术,并进行了工业炉窑气固排放物质的高效分离与洁净利用技术工业示范的实施,实现了颗粒物洁净排放及资源化利用。

关键词: 水泥炉窑; 节能管控; 富氧煅烧; 分级燃烧与 SNCR; 气固排放

中图分类号: TQ172; TK17 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2020)05-0001-10

Research and application progress of the key technologies for high efficiency and low emission of cement kilns

YAO Yuan¹, WEI Xiaolin^{1,2}, CHEN Lixin³, LI Sen^{1,2}, TAN Houzhang⁴

(1.State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Beijing Hinerger Clean Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China; 4.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The key technologies for high energy efficiency and low emission of industrial furnaces can effectively improve the energy utilization efficiency and reduce pollutant emissions. In this paper, the research of common key technologies for energy conservation and emission reduction in industrial furnaces were reviewed, such as energy-saving management and waste heat utilization, oxygen-enriched calcination, staged combustion, particle separation and resource utilization, and their integrated applications in 2 500-5 000 t/d cement kilns. Based on the matching relationship between the material and energy flow of industrial furnaces, the design of an energy-saving management platform was carried out. New energy-saving technologies for optimization and reorganization of energy flow in cement kilns were developed to meet the requirements of multiple types process goals. The industrial demonstration of the energy-saving management platform matching the material and energy flow in cement kilns has been implemented. The oxygen-enriched calcination technologies in cement kilns was developed by organically combining low-energy pressure-swing-adsorption and cement clinker calcination, which can meet the wide threshold variation in production of product category and output quality, and their industrial demonstrations was carried out. In view of the problems of high emissions such as NO_x and SO_x, the stage combustion and SNCR denitration technologies in decomposition furnace were comprehensively optimized. The industrial demonstration of the technologies for the staged combustion and SNCR optimized denitrification in cement decom-

收稿日期: 2020-08-06; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080621

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601501)

作者简介: 姚远(1993—),女,湖南益阳人,助理工程师,从事热能利用等方面工作。E-mail: yao-yuan@imech.ac.cn。通讯

作者: 魏小林,研究员,从事清洁燃烧及节能减排等方面工作。E-mail: xlwei@imech.ac.cn

引用格式: 姚远,魏小林,陈立新,等.水泥炉窑高能效低排放关键技术研发及应用进展[J].洁净煤技术,2020,26(5):1-10.

YAO Yuan, WEI Xiaolin, CHEN Lixin, et al. Research and application progress of the key technologies for high efficiency and low emission of cement kilns[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 1-10.



移动阅读

position furnace has been conducted. Aiming at emission reduction and resource utilization, the new technologies for particulate emissions purification, separation and reuse in deep cooling and dust removal of flue gas have been proposed. The industrial demonstration of efficient separation and clean utilization of gas-solid emissions in industrial furnaces has been put into effect. The clean emission and resource utilization of particulate matter have been realized.

Key words: cement kiln; energy-saving management and control; oxygen-rich calcination; staged combustion and SNCR; gas-solid emissions

0 引言

工业炉窑是冶金、建材、化工、石化等流程工业中的重要用能装备,也是化石能源消耗和环境污染的主要源头。为了打赢污染防治攻坚战和蓝天保卫战,亟需研发工业炉窑高效低排放关键技术。水泥炉窑是水泥行业核心的燃煤煅烧装备,2019年我国水泥产量达到23.5亿t,年耗煤量2亿t左右。水泥炉窑属于典型的应用广泛、高能耗高污染的工业炉窑,是工业炉窑节能减排技术革新的重要领域。研发水泥炉窑节能减排的共性关键技术并开展工业示范,可以为我国工业炉窑高效低排放技术应用提供方向、途径和技术支撑。

经过近40年发展,我国的水泥炉窑技术基本形成了具有自主知识产权的核心关键技术。但与国际先进技术相比,仍存在一定差距,不能满足水泥厂应对日益严苛的环保标准以及对整厂节能减排的综合性需求,为水泥行业的高效清洁燃烧技术和产业装备升级换代提供了巨大的机会。从水泥生产工艺的技术现状来看,新型工业炉窑正朝着与成熟的互联网技术和工业自动化技术相结合的方向发展^[1]。实施水泥炉窑物质流与能量流匹配的节能管控平台可以精准调控煤等燃料、生料以及配合料等的供应量,降低熟料综合能耗,提高余热利用率,有效降低成本。采用智能化工厂的思维模式是节能管理平台的主要技术路线,湖南大学针对回转窑提出了一种新的集成方法PSR-PCA-HMM,并在中州铝业公司2号和3号回转窑上论证了模型性能,有助于实现对烧结温度的稳定闭环控制^[2]。Wurzinger等^[3]基于100t/h水泥回转窑的测量数据,建立了一个非线性的自回归NARMAX模型,交叉验证了其良好的控制设计精度。上述研究主要针对单一回转窑,鲜见关注于整个水泥生产线,甚至水泥厂的复杂网络与节能管控紧密结合的节能技术。

鉴于化石燃料现状,在不降低生产效率的情况下使用高质煤替代燃料是工业炉窑的必然趋势,水泥炉窑富氧煅烧新工艺及优化控制技术可以提升低质煤使用比例,解决煤种变动性制约工业炉窑节能减排这一共性难题。Tsiliyannis^[4]基于质量和焓平

衡,量化验证了水泥生产中富氧能提高熟料产量,减少废气量。Puig-Arnavat等^[5]研究了富氧程度对分解炉和窑炉的能量和经济性的影响规律,证实其可以增加熟料产量、使用替代燃料。文献[6]研究了氧燃料燃烧在水泥生产中的情况。美国Cemex's Victorville水泥厂、California Portland's Mojave水泥厂、Hercules水泥厂采用富氧燃烧技术,平均提产8%~10%,燃料消耗降低3%~5%。其中,汉能清源公司变压吸附制氧与煅烧有机结合的技术是水泥炉窑富氧煅烧技术的主要技术路线^[7]。

针对典型的工业炉窑-水泥炉窑低NO_x排放技术,结合水泥分解炉工艺特点,采用分级燃烧与SNCR相结合的方法降低NO_x排放,可以实现烟气洁净排放。清华大学开展了水泥窑SNCR脱硝工艺中的表面吸附及反应机理研究,探讨了CaCO₃对脱硝过程的影响^[8-9]。Baleta等^[10]模拟了SNCR过程中相关现象的物理过程,研究了同一工况下主要运行参数对NO_x还原效率的影响。同时,美国Suwannee American Cement、Hercules Cement、Drake Cement,意大利Barbetti,丹麦Alboarg Portland,以色列Nescher水泥厂,以及多家中国水泥厂等也推广了该技术,如枣庄中联水泥有限公司2号5000t/d生产线采用ERD高效再燃脱硝技术结合SNCR脱硝技术,脱硝效率达80%以上,氨水用量小,节煤效果显著,脱硝技术运行成本低^[11]。

鉴于水泥工业颗粒物污染控制对环境保护的重要性,关于水泥厂颗粒物的特性和影响已经有一些研究。Hua等^[12]基于动态排放因子和窑炉运行参数数据,建立了1980—2012年中国水泥行业大气污染物综合排放清单。Rovira等^[13]测定并整理了2013—2016年水泥厂的PM₁₀水平及各种颗粒物信息。Yang等^[14]研究了北京具有危险废物综合处理设施的某水泥厂周围的PM₁₀特性。但鲜见关注于从烟囱排放和从窑炉产生的颗粒物的粒径分布研究。因此,准确获得PM排放因子和粒度分布规律,研发颗粒物减排新技术,对减少微细颗粒物排放,提高颗粒物资源化利用率有积极影响。

中国科学院力学研究所牵头的“水泥炉窑的高效低排放关键技术研发与工业示范”项目针对水

泥炉窑提炼出 4 项核心共性关键技术,主要集中在工业炉窑多工艺目标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 优化控制技术以及微细颗粒物排放与资源化利用等方面,目标是有效提高水泥炉窑的用能效率,并显著降低 NO_x 、颗粒物等污染物排放。

1 水泥炉窑节能管控技术

1.1 水泥分解炉的物质流与能量流分析

基于节点计算法开展了水泥熟料生产工艺过程中物质流与能量流相匹配的节能分析。以一台 3 200 t/d (实际产量达 3 800 t/d) 的水泥分解炉为例,采用 Aspen Plus 软件建立了水泥熟料生产工艺的计算模型,模拟了该分解炉中煤粉燃烧和生料分解,分解炉流程如图 1 所示。B1 为非常规物质(煤)的转化反应器;B2 为煤燃烧反应器;B3 为生料分解反应器;B4 为气固分离器;B5 为一次风、三次风和回转窑烟气的混合器。

3 800 t/d 产量水泥炉窑工业示范现场采集的分解炉分解率、出口烟气成分和温度见表 1~3。由表 1 模拟结果可知,水泥生料分解达到预期要求,总分解率为 97%,模拟结果与实测结果偏差不足 1.4%,其他各种组分与实际分解炉运行工况基本相符。

表 1 分解后生料组分结果对比

Table 1 Comparison of raw material components after decomposition

项目	质量分数/%						
	CaCO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	MgCO_3
模拟结果	3.19	21.61	3.97	3.44	3.24	64.55	0
实测结果	—	22.36	4.77	3.31	2.78	64.91	—

表 2 分解炉出口烟气成分对比

Table 2 Comparison of flue gas components at the outlet of the decomposition furnace

项目	体积分数/%					
	H_2	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O
模拟结果	0.04	2.81	62.20	0.52	28.97	5.00
实测结果	—	3.30	64.00	0	29.70	—

表 3 分解炉出口温度对比

Table 3 Comparison of outlet temperature of the decomposition furnace

现场温度/K	模拟温度	模拟温度
	(考虑热损)/K	(绝热)/K
1 172	1 175	1 191

1.2 篦冷机内气固流动及换热研究

以 3 800 t/d 水泥熟料生产线为例,针对新型干法水泥生产工艺中的关键设备——篦冷机,采用 Fluent 软件开展了篦冷机内水泥熟料和空气的流动与换热的三维数值模拟,得到了篦冷机内部熟料相

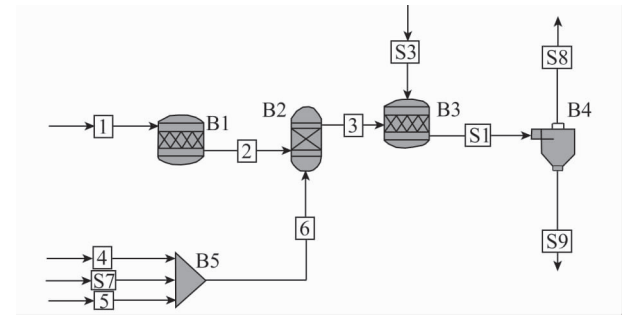


图 1 分解炉模拟流程

Fig.1 Simulation flow chart of decomposition furnace

由表 2 可知,分解炉出口烟气主要包括 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CO 、 CO_2 和 H_2O 等气体。其中,模拟结果中 CO_2 体积分数达到 28.97%,实测分解炉中 CO_2 体积分数为 29.7%,偏差不足 2.5%;模拟结果中 O_2 为 2.81%,实测烟气中 O_2 为 3.30%,可知模拟结果符合实际运行。由表 3 可知,在不考虑分解炉散热损失的条件下,模拟中分解炉出口温度为 1 191 K,在考虑分解炉炉体散热后,分解炉出口温度为 1 175 K;而分解炉现场运行时,出口温度为 1 172 K,在考虑散热时,分解炉出口模拟温度与现场温度偏差不足 0.4%,表明模拟结果可靠。该模型适用于预测水泥分解炉煤粉燃烧和生料分解情况。

和空气相的流场、温度场分布规律,研究了篦冷机内水泥熟料和空气的流动、换热特性。对比数值模拟结果与 3 800 t/d 水泥熟料生产线现场实际监测得到的温度(表 4)发现:偏差为 0.40%~13.10%,验证了模型的可靠性。该模型适用于预测篦冷机内气固流动及换热情况。

表 4 篦冷机各出口烟气温度对比

Table 4 Comparison of temperatures at each outlet of the grate cooler

项目	二次风	三次风	高温风	废气出口	出口熟料
计算值/K	1 173	1 162	697	500	544
实测值/K	1 293	1 183	675	502	481
偏差/%	9.28	1.78	3.26	0.40	13.10

给定篦冷机进料量,研究了粒径变化对熟料-空气换热的影响规律^[15],研究表明:10 mm 熟料粒径的换热效果最好,可达到 72% 热回收效率。进一步采用余风再循环技术,即将 100 °C 废气处理后通

过循环风管引入后篦冷机冷却区段风室,可提升热回收效率至74.9%。

1.3 汽电双驱技术成功应用于水泥行业

在一台5000 t/d熟料生产线上建设了3 MW汽轮机驱动窑尾高温风机节能项目,电耗下降9.32 kWh/t(以熟料计),这是国内首创在熟料生产线上实现电机/汽轮机双驱动窑尾高温风机的应用案例。该项目于2017年2月开工建设,5月投入运行,建成了一套与水泥企业余热电站富余蒸汽相匹配的3 MW凝汽式汽轮机驱动系统,替代电动机驱动窑尾高温风机(图2)。当汽轮机出现故障、大修或余热锅炉未产生足够蒸汽时,系统自动切换到电动机驱动风机;当汽轮机组故障排除后,系统自动切换到汽轮机驱动,充分保证了窑尾高温风机的安全稳定运行。



图2 汽电双驱窑尾高温风机系统

Fig.2 High-temperature fan system of steam-electric double-driven in cement kiln

1.4 水泥炉窑节能管控平台研究与开发

研究了面向企业能源计量信息的数据采集、实时控制的标准化建模方法及双向数据通讯规范。水泥炉窑节能管控系统采用“集中决策层+分布控制层+设备层”的三层架构(图3)。

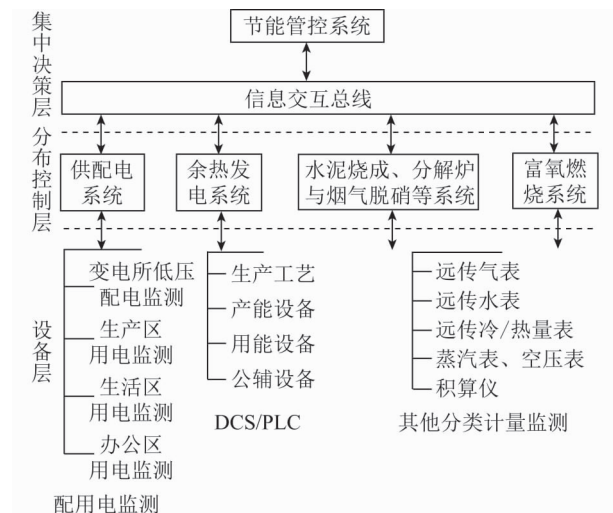


图3 节能管控系统三层架构

Fig.3 Three-tier architecture diagram of energy-saving management and control system

集中决策层包括节能管控系统平台和信息交互总线。其中节能管控系统平台是实现整个水泥工艺高效低排放统一协调控制的核心,可以完成水泥工艺模型建模、多能流信息采集建模、多能流水泥产量-能效-排放最佳匹配优化控制模型等功能。信息交互总线主要负责与处于分布式控制层的可调控资源管理系统或装置的信息互联。

分布控制层主要负责对多能流水泥产量-能效-排放最佳匹配优化控制模型中的单个可调控资源的监控管理,包括对供配电、余热利用、富氧燃烧、分解炉分级燃烧与SNCR脱硝等水泥DCS系统的协调管控,各子系统与主站系统进行信息交互,以及下发控制指令到设备层。

设备层主要负责对供配电设备、水泥多能流工艺设备的数据采集和控制。

能源管控系统软件架构采用组件化设计,包含能源综合监控、基础能源管理、高级能源管理、综合信息发布四大应用。通过全业务优化整合及全流程高效贯通,发现企业生产过程中的能耗异常点和节能潜力点,合理安排用能计划,实现企业能耗精细化管理目标,从技术和管理2条主线进行节能管控。

针对互联网+能源管控系统的跨安全区数据接入问题,提出在该能源管控系统与电力调度数据网安全一区之间,增加数据采集和转发安全区,数据采集与转发安全区内无线通信服务器与内网通信服务器通过正反向隔离相连,实现了互联网+能源管控系统的上行数据采集与下行遥控遥调下发,符合《电力监控系统安全防护规定》“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的安全规范,可适用于不同行业互联网+系统数据的跨安全区接入^[16]。

针对电表易动问题,研发了一种适用于电表易动的电量数据采集处理方法,可以消除电表原因导致的数据差异,提高电量数据分析的可靠性,进一步提出综合能源系统电表易动的处理方案。以综合能源系统为基础,在主站系统数据库中增加电表设备用于存储采集电度值,增设历史电度值作为电表更换的标识,消除电表更换后带来的数据差异,为电量数据分析统计奠定数据基础,提高电量相关业务的准确性^[17]。

2 工业炉窑富氧燃烧技术

2.1 水泥窑煤粉富氧燃烧研究

为了研究氧-煤燃烧技术在水泥回转窑中应用的可能性,采用计算流体动力学方法开展了水泥回转窑富氧煅烧的数值模拟研究^[18],探讨了烧结区一

次风的氧气/氮气比在 21%~31% 时, 回转窑的温度分布(图 4)、煤的燃尽率、火焰形状以及 NO_x 的生成情况。

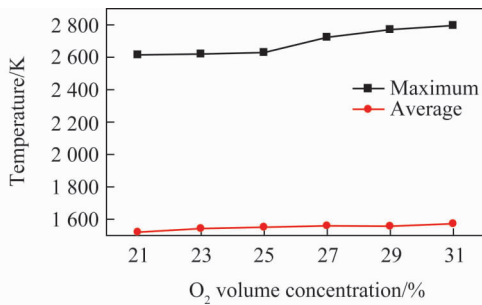


图 4 不同氧浓度下窑烧区最高温度和平均温度变化^[18]

Fig.4 Changes of the maximum and average temperature in the kiln firing zone for various oxygen concentration^[18]

工业示范现场采用 FLIR A615 热像仪通过回转窑炉头观察孔采集到的平均最高火焰温度和平均内壁温度见表 5。可知模拟结果与现场测试结果吻合良好, 证明水泥窑内煤粉富氧燃烧可以明显提高窑内火焰温度及窑内整体温度。由于火焰核心区缩短, 导致烧成段长度缩短, 因此需要适当降低直流风和旋流风调节火焰长度。富氧导致煤粉燃烧更加剧烈, 燃尽率提高, 达到节约燃料的目的。

表 5 回转窑观察孔点温数据对比

Table 5 Comparison of temperature data from looking-fire-hole in rotary kiln

O ₂ 体积 分数/%	观察孔处火焰温度/K		观察孔处内壁温度/K	
	计算值	实测值	计算值	实测值
21	1 711	1 691	1 501	1 489
31	1 767	1 758	1 556	1 551

将水泥窑煤粉富氧燃烧数值模拟结果用于指导试验过程, 建立了高温水泥煅烧试验系统, 通过试验探究烧成温度对水泥煅烧成球以及熟料质量的影响。结果表明: 煅烧温度影响熟料颗粒成球过程, 提高烧成温度有利于提高水泥熟料质量。该结论也得到了工业示范现场的验证。空气/富氧助燃下水泥窑生产指标对比见表 6, 采用富氧助燃后, 水泥窑

表 6 空气/富氧助燃下生产指标对比

Table 6 Comparison of production indicators under air and oxygen-enriched combustion

项目	称显熟料台 时产量/(t·h ⁻¹)	熟料 3 d 强度/MPa	f-CaO 合格率/%
空气助燃	148.2	28.2	83.4
富氧助燃	150.7	29.2	87.2
增减量	+2.5	+1.0	+3.8
增减幅度/%	+1.69	+3.55	+4.56

炉负荷(即称显熟料台时产量)明显增加, 熟料品质(包括熟料 3 d 的强度和 f-CaO 合格率)明显提高。

2.2 水泥炉窑富氧燃烧新技术应用

基于以上研究, 完成了一套水泥炉窑富氧煅烧新技术设备(图 5)的安装以及调试运行工作。通过分析运行记录和能效测试结果, 结合示范应用情况发现: 将富氧助燃系统应用于水泥生产线, 实现了稳定窑况、提高熟料产量和质量等多项目标。



图 5 水泥厂窑头燃烧器

Fig.5 Kiln head burner in cement plant

开展了建材行业富氧燃烧系统的推广工作, 完成了一套玻纤制氧系统及液氧后备项目(图 6)的调试, 实现了连续稳定运行。该系统采用高效分子筛变压吸附方式制备富氧, 主要运行指标达到: 连续运行时间 72 h, 氧气平均纯度为 93.66%, 氧气平均流量为 3 287 m³/h, 电耗为 0.37 kWh/m³, 氧气平均纯度和流量均超过了预期指标。



图 6 玻纤制氧系统吸附塔

Fig.6 Adsorption tower in glass fiber oxygen system

3 水泥分解炉脱硝技术优化

3.1 CO 还原 NO 及 CaO 催化还原机制

目前, 水泥分解炉脱硝主要采用分级燃烧(空气分级/燃料分级)和炉内喷氨 SNCR 两类技术。为了实现深度脱硝, 必须针对分解炉高浓度高氧化钙复杂环境, 开展分级燃烧和 SNCR 喷氨脱硝机制研究。

1) CO 还原 NO 机制

在水泥分解炉中,分级燃烧在炉内形成贫氧环境,产生大量还原性物质(主要为 CH_i 和 CO),使得 NO_x 被还原为 N_2 。 CO 对 NO_x 具有较强的还原能力。为了获得 CO 还原 NO 关键反应机制和反应路径,利用 Chemkin 软件模拟了 CO 还原 NO_x 的反应路径。采用一维柱塞流反应器(plug-flow reactor, PFR)模型和详细化学反应机理 GRI 3.0。

CO 脱硝过程中 N 转化主要反应路径如图 7 所示。结果表明: NH 和 H 对 NO 还原具有重要作用, H 来源于 H_2O ,高温下 H_2O 分解为 OH 和 H , CO 与 OH 反应生成 CO_2 和 H ,因此烟气中 H_2O 和 CO 浓度对 NO_x 脱除具有重要影响。Li 等^[19] 研究表明:当 $H_2O < 1\%$,控制因素为 H_2O 含量,提高 H_2O 可激发更多自由基 H ;当 $H_2O > 1\%$,控制因素为 CO 含量,提高 CO 浓度,可使 H 达到更高浓度平衡态; OH 促进 NO 生成, H 促进 NO 还原,可以实现 H_2O 和 CO 耦合调控深度燃烧降氮。

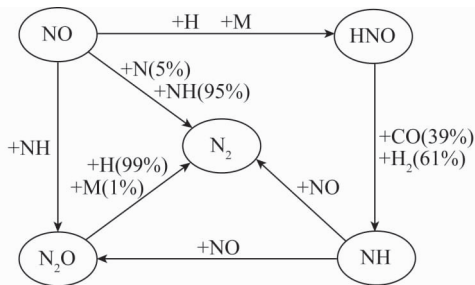
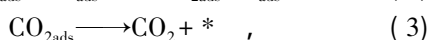
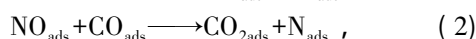


图 7 CO 脱硝过程中 N 转化主要反应路径^[20]

Fig.7 Main reaction path of N conversion during CO denitrification^[20]

2) CaO 对 CO 还原 NO_x 的催化机制

水泥分解炉处于高浓度 CaO 环境中,为了探寻 CaO 对 CO 还原 NO_x 影响机制,基于分子动力学广义梯度密度泛函理论,利用分子动力学软件 Materials Studio 针对 CaO 催化 CO 还原 NO 反应过程进行了分子动力学模拟。该模拟在 Dam-Johansen 等^[21] 基于试验现象推测出的 Langmuir-Hinshelwood 反应机理的基础上开展研究。



式中, $*$ 为 CaO 表面活性吸附位;下标 ads 为吸附态。

基于 CaO 催化 CO 还原 NO 的反应机理,发现 CaO 催化使得 CO_{ads} 还原 NO_{ads} 的反应能垒为 2.06 eV,无 CaO 催化时 CO 还原 NO 的反应能垒为 10.84

eV^[22-23]。 CO 在 CaO 表面氧化产生活性空位,高效催化 NO 还原,反应能垒降低了 80.5%。 CaO 表面催化 CO 还原 NO 反应机制,效率提高了 30%~42%^[24]。 CO 还原 NO 各步反应势能如图 8 所示。

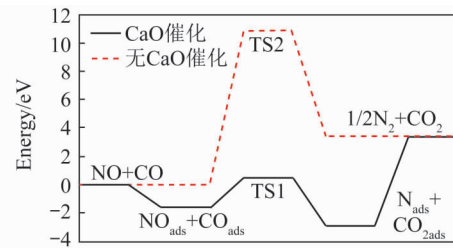


图 8 CO 还原 NO 各步反应势能^[23]

Fig.8 Potential energy diagram of each step of CO reduction to NO ^[23]

3.2 CaO 对 SNCR 脱硝的影响机制

针对水泥炉窑分解窑工艺特点,分解炉工艺要求 60% 左右的煤粉进入分解炉燃烧,炉内温度在 850~1100 °C,在燃烧区上方采用 SNCR 喷入还原剂氨,可实现水泥生产过程中的 NO_x 减排。然而,由于分解炉内含有高浓度 CaO ,对 SNCR 脱硝具有一定影响^[8,25]。为此,通过原位红外试验对 NH_3 和 NO 在 CaO 表面的反应过程进行了红外在线监测分析,结合表征检测和红外监测结果,进行了 NH_3 和 NO 在 CaO 表面反应的微观反应机理研究。

高钙环境中, NH_3 与 O_2 和 NO 反应路径如图 9 所示。在高 CaO 气氛中, NH_3 吸附于 CaO 表面发生脱氢反应, CaO 表面的 NH_3 与吸附的 O_2 反应产生 NH_2 , O_2 可以加速 NH_3 转化为 NH_2 。 NH_2 在 CaO 表面既可以与 O_2 反应生成 NO ,又可以与 NO 反应生成 N_2 ,而 NH_2 与 O_2 反应速率比 NH_2 与 NO 反应速率快。 NH_3 容易吸附在 CaO 表面氧化为 NO ,消耗大量 NH_3 ,并且抑制 NO 还原, CaO 抑制 NH_3 还原 NO ^[20]。

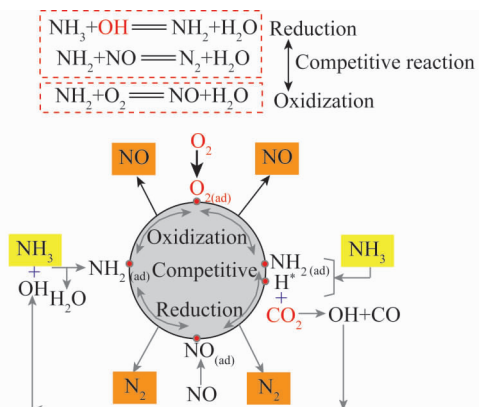


图 9 高钙环境中 NH_3 与 O_2 和 NO 反应路径

Fig.9 Reaction path of NH_3 with O_2 and NO in high calcium environment

3.3 工程应用

针对目前水泥分解炉高氧化钙浓度区间喷氨脱硝传统方式存在的问题,结合氧化钙抑制喷氨脱硝前期研究成果,考虑到分解炉预分解器 C5 出口(图 10)大量 CaO 被分离,可满足避开高浓 CaO 区对 SNCR 脱硝抑制的要求。为此,提出了水泥分解炉 C5 出口炉外喷氨脱硝方案以及分解炉下锥体喷氨脱硝方案,在某水泥厂 3 200 t/d 的新型干法水泥分解炉预分解器 C5 出口安装 2 层 SNCR 喷氨口,每层 3 支喷氨枪。炉外喷氨脱硝方案实施后,脱硝效率提高了 25%,喷氨量降低了 40%,NO_x排放由改造前 400 mg/m³降低到 295 mg/m³。

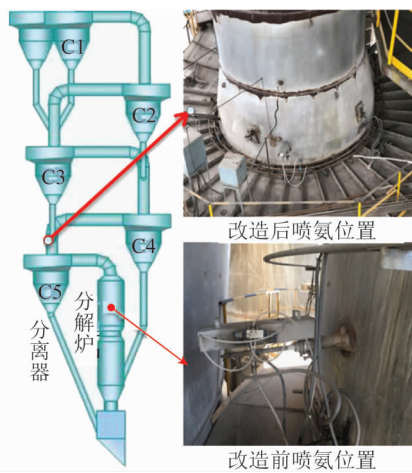


图 10 水泥分解炉预分解器 C5 出口喷氨脱硝
Fig.10 Ammonia spraydenitration at the C5 outlet of the precalciner of the cement decomposition furnace

4 水泥炉窑颗粒物减排技术

4.1 颗粒物高效分离和洁净排放研究

水泥炉窑作为典型的燃煤工业炉窑,普遍存在

高能耗高排放等问题,亟需研发烟气微细颗粒物高效分离洁净排放以及节能利用的关键技术。

在理论模型和试验研究方面,建立了考虑布朗团聚、湍流团聚以及临界碰撞速度的离散元数值模型,并针对扰流元件前后微细颗粒发生的团聚过程进行了数值模拟研究(图 11)^[26],探寻了扰流元件结构参数对微细颗粒物团聚效率的影响,主要参数包括几何尺寸、排数、纵向节距、横向节距、布置方式等。研究表明,4.8 m/s 进口流速下湍流团聚的最佳团聚效率约为 16.42%^[26-27]。

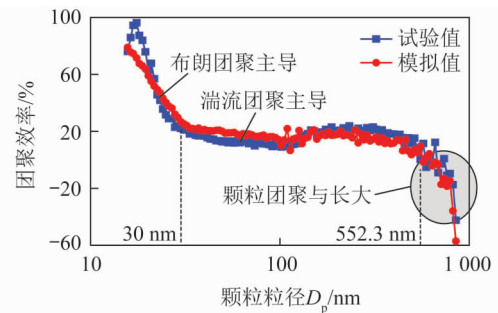


图 11 对比给定工况下团聚效率的试验和模拟结果^[26]
Fig.11 Comparison of the agglomeration efficiency of experimental and simulation results under given conditions^[26]

选取以水泥厂为代表的燃煤工业进行微细颗粒物排放测试,结果表明:传统燃煤工业除尘设备静电除尘器、布袋除尘器等在粒径 0.1~1.0 μm 具有脱除效率低的工业问题^[28-30]。

针对该工业实际问题,研发了湿式相变凝聚装置并进行中试研究(图 12)。结果表明:湿式静电除尘器结合湿式相变凝聚系统后,对高湿燃煤烟气环境下 PM₁ 及 PM_{2.5} 脱除效率可达 83.6%~95.3% 以及 87.7%~95.0%,且具有 Hg、Mn 和 As 等痕量金属元素的多污染物脱除效果^[31-33]。

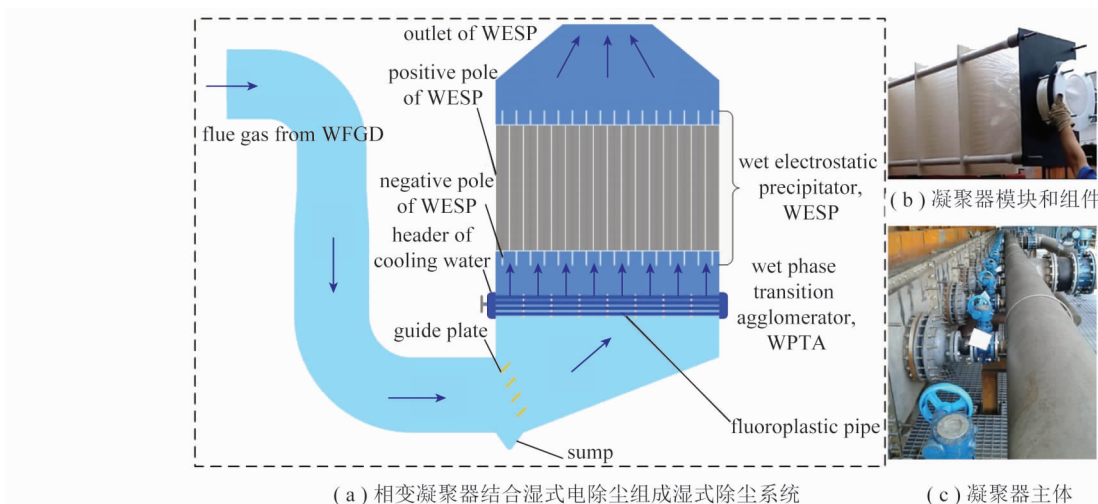


图 12 湿式除尘系统^[32]
Fig.12 Wet dust removal system^[32]

考虑到荷电雾滴对微细颗粒物脱除具有较优效果,采用电压 10~30 kV 和频率 10~15 kHz 的介质阻挡放电方式对超声波喷雾进行荷电团聚微细颗粒物的试验研究,结果表明:水雾荷质比在 mC/kg 量级,同时在 1 m/s 进口流速条件下,荷电喷雾对亚微米颗粒的团聚效率约为 39%。

4.2 颗粒物减排技术应用于水泥炉窑

基于多场耦合凝聚微细颗粒物的思路,提出超声波雾化预荷电湍流凝聚技术,该技术通过湿式相变凝聚、雾化荷电凝聚以及湍流凝聚,结合传统除尘设备实现燃煤工业炉窑烟气微细颗粒物的高效团聚与脱除。同时,提出系列凝聚效率高、简单可行且具有推广价值的颗粒物减排技术,主要包括超声波雾化荷电湍流团聚颗粒物系统及方法^[34-35]、颗粒浓淡电湍凝聚装置^[36]、低温等离子体荷电超声波雾化液滴的颗粒凝聚装置^[37-38]等。基于上述颗粒物减排技术的积累,将研发的超声波雾化预荷电湍流凝聚装置在某水泥炉窑上进行应用,并完成了示范装置的现场安装。该装置由超声波雾化荷电电极以及湍流团聚扰流元件 2 部分组成,并创新性地低温等离子体应用于雾化液滴荷电,通过雾化荷电电极与超声波喷雾流道的巧妙设计,有效解决沿面闪络、电极固定、绝缘保护以及积液引流等问题。

5 展望

水泥炉窑高效低排放关键技术的研发及应用已成为一个必然的发展趋势,而节能管控与余热利用、富氧燃烧、分级燃烧以及颗粒物分离与资源化利用是水泥炉窑节能减排关键技术发展的重要方向。基于此,针对工业炉窑节能减排技术的发展提出 5 个方面的建议:

1) 探索适用于工业炉窑节能管控的人工智能系统,如炉窑电力需求侧管理系统等。将水泥炉窑吨熟料最低电耗作为优化目标,应用神经网络理论,分析水泥烧成系统过程变量数据,获得水泥熟料烧成系统电力消耗过程的最优调节参数。

2) 研究水泥炉窑 O₂/CO₂ 煅烧等变革性技术,大幅提高炉窑产量,实现 CO₂ 近零排放。用 O₂/CO₂ 替代 O₂/N₂ 燃烧,可以避免 N₂ 参与燃烧产生 NO_x, CO₂ 分子的强辐射也有利于炉内温度分布均匀,同时,窑尾出口烟气中的高纯度 CO₂ 可以被直接捕获后进行资源化利用。

3) 研发先进的分级燃烧、SNCR 以及颗粒物分离与资源化利用等污染物减排技术。针对煤种适应性和超低排放的要求,研发适用于工业炉窑的新型

燃烧、NO_x 减排和颗粒物脱除技术,通过理论和技术的原始创新,最终实现 NO_x 浓度 ≤ 50 mg/Nm³, SO₂ 浓度 ≤ 30 mg, 氨逃逸 ≤ 8 mg/Nm³, PM 浓度 ≤ 10 mg/Nm³ 等超低排放的目标。

4) 开发工业炉窑余热余能利用升级换代技术。以 ORC 低温余热发电技术为例,利用有机工质沸点低,在低品质热源条件(80~300 °C)下也可获得较高的蒸汽压力进入透平膨胀做功的特性,将工业余热的低品位热能转换为高品位电能。

5) 加强关键技术和装备在工业炉窑的推广。全面提升整个产业链的水平,包括炉窑保温、耐火材料、工业物联网等关键技术、制造工业及设备开发等。另外,需要建立和完善质量体系和标准,助推我国工业炉窑产业绿色可持续发展。

6 结语

本文综述了节能管控与余热利用、富氧燃烧、分级燃烧以及颗粒物分离与资源化利用等工业炉窑节能减排共性关键技术的研发及其在大型水泥炉窑上的集成应用,主要结果包括:建立了一种工业炉窑物质流与能量流匹配的数学模型,获得了典型工业炉窑不同部位的能量收支情况,安装了工业炉窑节能管控平台;研究了富氧燃烧对窑内温度、水泥煅烧成球以及熟料质量的影响,制氧量可达 1 100 Nm³/h (氧气体积分数 80%),制氧设备单位电耗为 0.38 kWh/Nm³(按纯氧计),富氧燃烧氧体积分数达到 30%~35%;开展了 0.6 t/d 水泥分解炉分级燃烧和 CaCO₃ 分解试验研究,实施了水泥分解炉 C5 出口以及下锥体喷氨脱硝方案的现场改造,脱硝效率提高了 25%,喷氨量降低了 40%,NO_x 排放降低到 295 mg/m³;建立了亚微米颗粒湍流凝聚以及雾化荷电电极试验平台,确定了示范工程的扰流元件参数及流动参数,改造后窑头颗粒物排放浓度 ≤ 15 mg/m³,烟道内增加阻力 ≤ 100 Pa。

参考文献(References):

- [1] 朱俊杰. 基于模糊神经网络的工业炉窑优化燃烧控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHU Junjie. The research on optimization of industrial furnace combustion control based on fuzzy neural network[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [2] ZHANG Xiaogang, ZHANG Lei, CHEN Hua, et al. Prediction of coal feeding during sintering in a rotary kiln based on statistical learning in the phase space[J]. ISA Transactions, 2018, 83: 248-260.
- [3] WURZINGER A, LEIBINGER H, JAKUBEK S, et al. Data driv-

- en modeling and nonlinear model predictive control design for a rotary cement kiln [J]. IFAC - Papers on Line ,2019 ,52(16) : 759-764.
- [4] TSILYANNIS C A. Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment[J]. Energy 2016 ,113: 1202-1218.
- [5] PUIG-ARNAVAT M ,SOGAARD M ,HJULER K ,et al. Integration of oxygen membranes for oxygen production in cement plants [J]. Energy 2015 ,91: 852-865.
- [6] 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.
- [7] 陈立新. 实践水泥炉窑富氧煅烧加速行业节能减排步伐 [C]//2016 中国水泥技术年会论文集. 北京: 中国学术期刊电子出版社 2016: 156-164.
- CHEN Lixin. Practice the oxygen - enriched calcination of cement kilns to accelerate the energy saving and emission reduction of industry [C]//2016 Proceedings of China Cement Technology Annual Conference. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House 2016: 156-164.
- [8] FU Shilong ,SONG Qiang ,YAO Qiang. Mechanism study on the adsorption and reactions of NH_3 , NO and O_2 on the CaO surface in the SNCR de NO_x process [J]. Chemical Engineering Journal , 2016 ,285: 137-143.
- [9] FU Shilong ,SONG Qiang ,YAO Qiang. Study on the catalysis of CaCO_3 in the SNCR de NO_x process for cement kilns [J]. Chemical Engineering Journal 2015 ,262: 9-17.
- [10] BALETA J ,MIKULCIC H ,VUJANOVIC M ,et al. Numerical simulation of urea based selective non - catalytic reduction de NO_x process for industrial applications [J]. Energy Conversion and Management 2016 ,125: 59-69.
- [11] 王新频 ,赵娇 ,乔彬 等. 国内外水泥熟料生产线降氮脱硝技术及应用(中) [J]. 中国水泥 2016(8) : 93-96.
- WANG Xinpin ,ZHAO Jiao ,QIAO Bin. Nitrogen reduction and denitrification technology and application in domestic and foreign cement clinker production lines (middle) [J]. China Cement 2016(8) : 93-96.
- [12] HUA Shenbing ,TIAN Hezhong ,WANG Kun ,et al. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China 's cement plants: Temporal trends ,spatial variation characteristics and scenario projections [J]. Atmospheric Environment ,2016 ,128: 1-9.
- [13] ROVIRA J ,SIERRA J ,NADAL M ,et al. Main components of PM_{10} in an area influenced by a cement plant in Catalonia , Spain: Seasonal and daily variations [J]. Environmental Research 2018 ,165: 201-209.
- [14] YANG Zhenzhou ,TANG Siqi ,ZHANG Zuotai ,et al. Characterization of PM_{10} surrounding a cement plant with integrated facilities for co-processing of hazardous wastes [J]. Journal of Cleaner Production 2018 ,186: 831-839.
- [15] 方立军 ,杨欢 ,李森 等. 篦冷机内气固流动和换热过程的数值模拟 [J]. 电力科学与工程 2018 ,34(2) : 69-74.
- FANG Lijun ,YANG Huan ,LI Sen ,et al. Numerical simulation of gas - clinker two - phase flow and heat transfer in the grate cooler [J]. Electric Power Science and Engineering 2018 ,34(2) : 69-74.
- [16] 黄丹 ,朱法顺 ,龚广京 等. 综合能源系统电表易动的处理方法 [J]. 数字化用户 2018(42) : 104.
- HUANG Dan ,ZHU Fashun ,GONG Guangjing ,et al. Processing method of easy-to-move electric meter in comprehensive energy system [J]. The Journal of Digital User 2018(42) : 104.
- [17] 朱法顺 ,郑涛 ,黄小鉢 等. 面向互联网+能源管控系统的跨安全区数据接入方法 [J]. 数字化用户 2017(47) : 29-46.
- ZHU Fashun ,ZHEN Tao ,HUANG Xiaoshu ,et al. Data access method for cross - safety area oriented to Internet + energy management and control system [J]. The Journal of Digital User 2017(47) : 29-46.
- [18] ZHOU Ying ,CHEN Lixin ,LUO Qiao ,et al. Simulating the process of oxy-fuel 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.
- [19] LI Sen ,WEI Xiaolin ,GUO Xiaofeng. Effect of H_2O vapor on NO reduction by CO: Experimental and kinetic modeling study [J]. Energy and Fuels 2012 ,26(7) : 4277-4283.
- [20] 孙立超. 水泥分解炉 NO_x 脱除机制研究 [D]. 北京: 华北电力大学 2018.
- SUN Lichao. Study on mechanism of NO_x reduction in cement calciner [D]. Beijing: North China Electric Power University 2018.
- [21] DAM-JOHANSEN K ,HANSEN P F B ,RASMUSSEN S. Catalytic reduction of nitric oxide by carbon monoxide over calcined limestone: Reversible deactivation in the presence of carbon dioxide [J]. Applied Catalysis B Environmental ,1995 ,5(4) : 283-304.
- [22] 戎旭. 水泥分解炉 CO 脱硝实验及机理研究 [D]. 北京: 华北电力大学 2019.
- RONG Xu. Study on experiment and mechanism of denitrification by CO in cement precalciner [D]. Beijing: North China Electric Power University 2018.
- [23] 杨建蒙 ,戎旭 ,李森 等. 水泥分解炉高 CaO/CO_2 环境 CO 还原 NO 机制 [J]. 化学工程 2019 ,47(1) : 1-5.
- YANG Jianmeng ,RONG Xu ,LI Sen ,et al. Mechanism of NO reduction by CO in high CaO/CO_2 environment of cement precalciner [J]. Chemical Engineering(China) 2019 ,47(1) : 1-5.
- [24] LI Sen ,GE Yifei ,WEI Xiaolin. Experiment on NO_x reduction by advanced reburning in cement precalciner [J]. Fuel 2018 ,224: 235-240.
- [25] YANG Xinfang ,ZHAO Bo ,ZHUO Yuqun ,et al. DRIFTS study of ammonia activation over CaO and sulfated CaO for NO reduction by NH_3 [J]. Environmental Science & Technology ,2011 ,45: 1147-1151.
- [26] LIU Hexin ,YANG Fuxin ,TAN Houzhang ,et al. Experimental and numerical investigation on the structure characteristics of vortex generators affecting particle agglomeration [J]. Powder Technology 2020 ,362: 805-816.
- [27] 刘鹤欣 ,谭厚章 ,杜勇乐 等. 亚微米颗粒湍流团聚特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报 2020 ,41(3) : 763-770.

- LIU Hexin ,TAN Houzhang ,DU Yongle ,et al. Experimental study on the characteristics of turbulent agglomeration for submicron particulates[J]. Journal of Engineering Thermophysics ,2020 ,41 (3) : 763-770.
- [28] RUAN Renhui ,LIU Hexin ,TAN Houzhang ,et al. Effects of APCDs on PM emission: A case study of a 660 MW coal-fired unit with ultralow pollutants emission[J]. Energy & Fuel , 2019 , 155(5) : 418-427.
- [29] LIU Hexin ,YANG Fuxin ,DU Yongle ,et al. Field measurements on particle size distributions and emission characteristics of PM₁₀ in a cement plant of China[J]. Atmospheric Pollution Research , 2019 ,10(5) : 1464-1672.
- [30] 阮仁晖 ,谭厚章 ,段钰锋 ,等. 超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性[J]. 环境科学 ,2019 ,40(1) : 126-134.
- RUAN Renhui ,TAN Houzhang ,DUAN Yufeng ,et al. Particle removal characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Environmental Science ,2019 ,40(1) : 126-134.
- [31] XIONG Yingying ,TAN Houzhang ,WANG Yibin ,et al. Pilot-scale study on water and latent heat recovery from flue gas using fluorine plastic heat exchangers[J]. Journal of Cleaner Production ,2017 ,161: 1416-1422.
- [32] CAO Ruijie ,TAN Houzhang ,XIONG Yingying ,et al. Improving the removal of particles and trace elements from coal-fired power plants by combining a wet phase transition agglomerator with wet electrostatic precipitator [J]. Journal of Cleaner Production , 2017 ,161: 1459-1465.
- [33] 谭厚章 ,熊英莹 ,王毅斌 ,等. 湿式相变凝聚器协同多污染物脱除研究[J]. 中国电力 ,2017 ,50(2) : 128-134.
- TAN Houzhang ,XIONG Yingying ,WANG Yibin ,et al. Study on synergistic removal of multi-pollutants by WPTA [J]. Electric Power ,2017 ,50(2) : 128-134.
- [34] 谭厚章 ,杜勇乐 ,刘鹤欣 ,等. 一种利用超声波雾化荷电湍流团聚颗粒物的系统及方法: CN106823652B[P]. 2017-02-27.
- [35] 谭厚章 ,刘鹤欣 ,杜勇乐 ,等. 一种雾化湍流团聚颗粒物的装置: 201621378966.X[P]. 2017-08-01.
- [36] 谭厚章 ,刘鹤欣 ,张思聪 ,等. 一种用于PM_{2.5}脱除的颗粒浓淡电湍凝聚装置: CN108325314B[P].2018-02-05.
- [37] 谭厚章 ,刘鹤欣 ,杨富鑫 ,等. 一种低温等离子体荷电超声波雾化液滴的颗粒凝聚装置: CN109939530B[P].2019-03-19.
- [38] 谭厚章 ,刘鹤欣 ,程翔鹏 ,等. 一种低温等离子体协同吸附催化的气体净化装置: 201810112017.4[P].2018-07-27.