

# 电力工业大气污染治理技术开发的反思与模式创新

孙克勤<sup>1,2</sup>, 徐海涛<sup>1,2</sup>, 沈凯<sup>1,2</sup>, 周长城<sup>1,2</sup>, 徐延忠<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省电厂废气污染治理工程技术研究中心, 南京 211102;

2. 江苏苏源环保工程股份有限公司, 南京 211102)

[摘要] 通过回顾我国大气污染治理技术的发展历程以及对我国现有大气污染治理技术的现状分析, 针对我国在大气污染治理技术开发模式中存在的瓶颈, 提出了一种以全方位多尺度系统级数值仿真模拟技术为核心, 以要点试验和工程回归为辅助手段的新型技术开发模式, 并实际应用该模式实现了大型火电机组烟气脱硫脱硝技术的开发和大规模工程应用, 实现了技术的短周期开发和快速成熟。

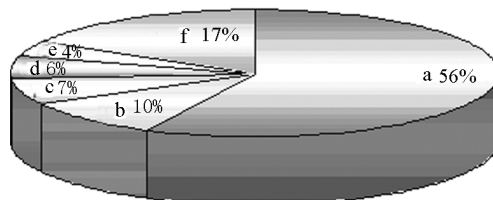
[关键词] 大气污染; 电力工业; 开发; 开发模式

[中图分类号] TM628 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)06-0091-06

## 1 前言

近年来, 随着我国经济的快速发展和工业化水平的显著提高, 大气污染状况日益严重, 我国  $\text{SO}_2$  的排放量已经位居世界第二位,  $\text{NO}_x$  排放量也在持续增长。大气污染治理已成为我国的一项重要任务, “十一五”规划将“节能减排”列为重要的约束性指标, 要求确保在 2010 年将我国的  $\text{SO}_2$  排放量降低 10%, 工作任重而道远。依据国家环保总局历年的环境公报, 在  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放源中火力发电厂一直占据主导地位, 其排放量超过了我国相关污染物总排放量的 50%, 火力发电厂占大气污染物排放份额如图 1 所示。火力发电厂的脱硫脱硝成为我国  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放治理的关键。

火力发电厂本身是一个大型工业系统, 设备众多、流程复杂, 在系统运行过程中产生的烟气量巨大, 以一台 600 MW 机组为例, 其产生的烟气量超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ , 与其配套的烟气脱硫脱硝装置也具有大型化、复杂性的特点。烟气脱硫脱硝装置本身就是一个涉及多相流动, 包含较复杂化学反应的过



a. 电力行业  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率; b. 非金属矿物制品业  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率; c. 黑色金属冶炼业  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率; d. 化工制造业  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率; e. 有色金属冶炼业  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率; f. 其他  $\text{SO}_2, \text{NO}_x$  污染贡献率

图 1 电力行业  $\text{SO}_2/\text{NO}_x$  排放份额

Fig. 1  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions of electric power industry

程工业系统。

因此电力工业大气污染治理技术开发也就成为一个多层次、涉及多学科的复杂过程工业系统开发过程, 其技术开发过程具有周期长、技术难度大、投入大等特点, 按照常规的技术开发模式, 难以满足社会发展的要求。而依靠引进国外技术、照搬国外经

[作者简介] 孙克勤(1961-), 男, 江苏南京市人, 江苏苏源环保工程股份有限公司总工程师, 研究员

验在实际应用的过程中又出现了国情适应性差、技术费用高、存在授权地与授权时间限制,容易陷入知识产权陷阱等一系列问题,不利于我国环保事业的长期健康发展,也难以满足国内日趋增长的需求。

为了满足国家社会发展的需要,如何在2~3年内开发出成熟的能够大规模应用的烟气脱硫、脱硝关键技术,成为电力工业大气污染治理技术开发的核心目标所在。

## 2 我国电力工业大气污染治理技术开发的现状

国际上烟气脱硫脱硝技术的开发始于20世纪60年代,经过10~20年的开发、工业试验和示范实现了技术的成熟应用。我国的烟气脱硫技术的研究开发始于20世纪70年代,对燃煤电厂、燃煤工业锅炉和冶金废气开展了烟气脱硫工艺研究、设备研制,取得了实验室小试和中试结果。国内曾经开发的烟气脱硫技术(见表1)大部分尚停留在小试或中试阶段,有的技术虽已有工业性试验,但都局限于容量较小的锅炉上,在50 MW以上的电厂锅炉上很少应用<sup>[1]</sup>。技术未能取得进一步的发展,技术开发与大型化努力基本限于停顿,未能真正实现工业化和产业化。而脱硝技术的自主开发则停留在实验室阶段,距离工业应用仍很遥远。

表1 我国曾经开发的烟气脱硫技术列表

Table 1 The flue gas desulfurization (FGD) technologies in China in the past

| 时间        | 地点               | 技术名称             | 技术状态 |
|-----------|------------------|------------------|------|
| 1974—1976 | 上海闸北电厂           | 石灰石 / 石膏法        | 中间试验 |
| 1974—1976 | 上海南市电厂           | 铁离子液相催化<br>脱硫回收法 | 中间试验 |
| 1972—1980 | 湖南电厂及上海<br>杨树浦电厂 | 亚钠循环法            | 中间试验 |
| 1976—1981 | 湖北松木坪电厂          | 活性炭-硫酸法          | 中试装置 |
| 80年代末     | 四川豆坝电厂           | 磷铵肥法             | 中试装置 |
| 1984年起    | 四川白马电厂           | 旋转喷雾干燥法          | 中试装置 |
| “八五”期间    | 贵州轮胎厂            | 炉内喷钙尾部<br>增湿活化   | 中试装置 |

## 3 大气污染治理技术的全新开发模式

### 3.1 传统开发模式

近年来,虽然烟气脱硫脱硝技术社会需求巨大,但国内可用的成熟的自主技术却不多,这主要是由于烟气脱硫脱硝装置这类大型工业装置工艺流程复

杂、多相介质并存、影响因素众多,技术开发难度较大。按照国际上通行的技术开发模式,大气污染治理新技术的开发需要经过机理研究→小试→中试→工业示范→逐级放大→投入应用整个开发流程,综合应用相似理论和因次分析实现系统和核心设备的放大。基本的开发流程如图2所示。

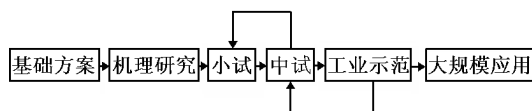


图2 传统技术开发模式基本流程

Fig. 2 The traditional technology research and development (R&D) pattern

在技术开发过程中,首先通过基础研究阶段,对技术的基础性问题从理论上和反应机理上加以明确,再通过小试来验证技术的可行性,通过小试的验证打通工艺路线后,采用该工艺在模拟工业化条件下所进行的工艺研究,结合相似理论和因次分析建立中试装置,通过中试以验证放大生产后原工艺的可行性,保证研发和应用时工艺的一致性。由小试到中试,是由实验室到大生产的中间过程,在中试过程,不但可以对小试加以验证,还为未来的大生产积累数据,因此,在传统的技术开发过程中,从小试到中试是一个必须经过的核心技术环节。也往往是这两个环节需要进行反复的验证,使得整个技术的开发周期拉长、资金投入巨大,一般的企业和研究机构根本无力承担巨大的风险。使得我国大气污染治理技术的自主开发往往在达到中试阶段后,就陷入停滞,缺乏资金和时间进行反复验证和技术优化工作,使得技术开发难以继续,最终无法获得成熟技术走向大规模工业应用。

同时在国外大气污染治理的成熟技术大举进入国内,自主技术开发受到严重挤压下的现实情况下,需要有能够快速成熟的自主技术才能与国外技术进行竞争,而依靠传统的开发模式是无法实现这一目标的。

目前,国内烟气脱硫脱硝技术开发只能主要集中在依托引进的国外技术,以环保公司等企业为主体结合高校科研院所等研究机构在对国外技术进行消化吸收的基础上,进行部分技术改良,由于核心技术部分均属于国外公司的技术秘密,因此这种改良很难在实质上提升整个系统的技术水平和应用水平。使得我国技术仍然难以摆脱对国外技术的依赖。

### 3.2 技术开发模式的反思

大气污染治理技术的发展已经历经数十年,在技术发展的初期阶段,由于技术手段的限制,实验成为验证技术的基本手段,以试验为核心结合相似理论和因次分析实验装置放大的唯一路径,同时技术的优化也依赖于反复的试验验证,因此在国外烟气脱硫脱硝的技术开发过程中,无一例外的均遵从了以试验为核心的从小试→中试→工业示范的技术开发模式,并且历经了 10 余年的开发才实现了技术的成熟和大规模的工业应用。

我国在 20 世纪 60—80 年代进行烟气脱硫脱硝技术开发的过程中,也采用了相同的技术开发模式,但由于我国当时客观条件的限制,无力承担与国外相同的开发成本,包括人力、财力和时间。进入 21 世纪,随着我国经济的迅猛发展,环境压力日益凸显,特别是大气污染物的排放已经成为影响人民生命健康的主要因素之一,突发环境事件日益增多,对经济发展的负面影响也逐渐显现,环境治理的要求十分迫切,国家制定的减排目标要求在短期内实现较大总量大气污染物的减排和治理,社会的迫切需求、环境污染的现实使得我国的大气污染治理呈现突发性、压缩性的特点,急需能够短期内成熟的大气污染治理技术,如果仍按照传统的技术开发模式,历经 10 年左右的时间,进行技术开发,即使最终开发出了成熟技术,国外技术也已在我国取得技术制高点,我国的技术也将难以适应快速的技术发展和瞬息万变的社会要求。

在烟气脱硫脱硝技术开发中,其工艺过程的核心在于过程化学,而过程化学的实现是在过程设备中完成的。烟气脱硫和脱硝过程的化学机理尽管不同,其反应器的形式亦各有特点,但都存在着设备尺度大、负荷范围宽、要求的适应性比较强、设计精度要求比较高等特点。这对过程设备的放大设计而言,是个全新的挑战。

在造船、筑坝等很多领域上相似理论和因次分析为基准的相似放大法是非常有效的,但仔细分析相似放大法在化学反应器放大方面其实际效果却往往难以达到预期,主要原因是无法在保持物理相似的同时保持化学相似。目前,反应器的多相反应过程的描述仅使用拟均相模型以及含有诸如有效因子、失活因子等人为调节参数的宏观表达式,即使用粗糙的宏观表达式来描述,导致过程放大过程必须通过多阶段的逐级放大,以保持每段放大的操作条

件逐步改变,而每次放大均是关联前一次的循序渐进。这种基于单一尺度的平均化方法由于无法反映过程的内在机制而必须引入诸多可调参数,致使预测性能差,无法解决定量放大和调控问题。

烟气脱硫脱硝技术在国外的大量应用证明虽然国内尚未掌握核心工艺,但其技术实际已相对成熟,具备跨越传统开发模式的前提。本研究采用全方位多尺度系统级数值模拟和仿真为核心,以实验研究为校正的开发模式对烟气脱硫脱硝反应器及其关联的关键设备进行了分析,对系统工艺进行开发,突破了“设计→小试→中试→工程应用”的传统及因次分析、相似理论等的限制,成功解决了脱硫脱硝多相反应器的设计放大问题,避免旷日持久和费用高昂的逐级开发过程。

### 3.3 OI<sup>2</sup> 系列技术开发模式

OI<sup>2</sup> 是精准优化 (optimization)、个性化 (individualization)、集成化 (integration) 等三个英文字母的缩写,其支撑是过程工艺、关键设备、系统集成及优化、工程设计及项目实施等四大关键技术的开发和研发、设计、工程管理三大平台的构筑,在大气污染治理技术领域,以 OI<sup>2</sup> 系列技术开发模式为基础,成功开发了 OI<sup>2</sup>-WFGD 烟气脱硫技术和 OI<sup>2</sup>-SCR 烟气脱硝技术,并实现了大规模的工业应用,技术成熟可靠,创造了可观的经济效益。OI<sup>2</sup> 系列技术的发展历程也是精准优化、个性化、集成化这三个设计思想不断完善和升华的过程。

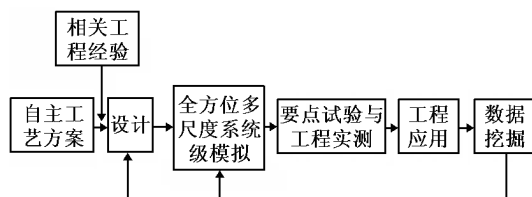


图 3 OI<sup>2</sup> 技术开发模式

Fig. 3 The OI<sup>2</sup> technology research and development (R&D) pattern

OI<sup>2</sup> 系列技术开发模式如图 3 所示,首先对文献资料、参考工程及先前投产工程的经验和运行数据进行分析,确定基本的设计方案;然后,根据确定的基本设计方案进行设计,对设计中不确定的因素进行大量的跨尺度的数值计算和模拟,其间不确定的参数(如热力学性质、传递性质等)进行少量的实验室试验获取,以此确定基本的运行参数,并返回至

跨尺度的数值计算和模拟过程,形成内封闭循环,验证数值计算结果,提高其计算精度;并投入工程设计和应用,工程投运后对大量的运行数据进行测试和分析,并以此来修正设计和运行参数,形成外封闭循环,完成技术的自我升级和更新,提高其成熟度。

以  $OI^2$  - WFGD 烟气脱硫技术为例,其技术推进路线如图 4 所示。采用上述的实验研究—设计—数值模拟—要点试验和工程实测为校正的基本研究方法。在冷态实验平台上开展过程工艺、石灰石活性强化途径等原理性研究,获取指导工程设计的关键工艺参数,通过全方位、多尺度、系统级的数值模拟突破吸收塔大比例放大的难题,同时通过热态试验平台和在烟气脱硫装置建设过程中预留分步验证的条件,适时开展系统要点试验和工程实测校正,逐步验证并完善数值计算模型,优化反应器及塔内件的结构和运行参数,实现塔型的不断改进和创新<sup>[2,3]</sup>。在此过程中,以全方位多尺度的数值模

拟为核心,简化试验过程,冷、热态试验台均为局部要点试验装置,作为全方位模拟的辅助与补充<sup>[4]</sup>。在高精度数值仿真模拟的支撑下,可有效降低开发成本,大大缩短开发周期,开发周期由 10 年缩短为 2~3 年,而在短周期开发的过程中,技术成熟度仍能够得到有效的保证。

在此基础上,对上述技术路线中涉及的各次内容进行抽象和提高,将其中共性技术归纳成研发、设计、工程管理三大通用的技术开发平台。这种平台化开发模式具有很强的移植性,图 5 为  $OI^2$  - SCR 烟气脱硝技术推进路线示意图,同样可归纳成研发、设计、工程管理三大平台,同图 4 相比,其差别仅在于研发平台中的具体内容不同。将其研发内容归纳可得出图 6 所示共性化的开发内容,即从分子尺度、单元尺度、设备尺度至系统尺度的多尺度数值计算和模拟,其支撑学科分别是计算量子化学、计算反应动力学、计算传质学/流体力学和过程系统工程等。

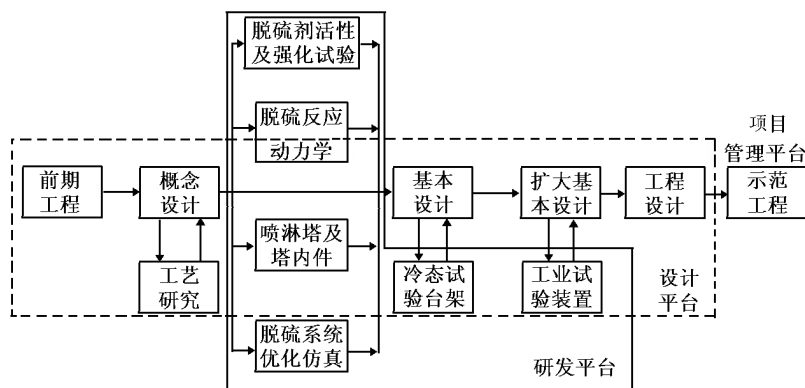


图 4  $OI^2$  - WFGD 烟气脱硫技术推进路线

Fig. 4 The technology roadmap of  $OI^2$  - WFGD

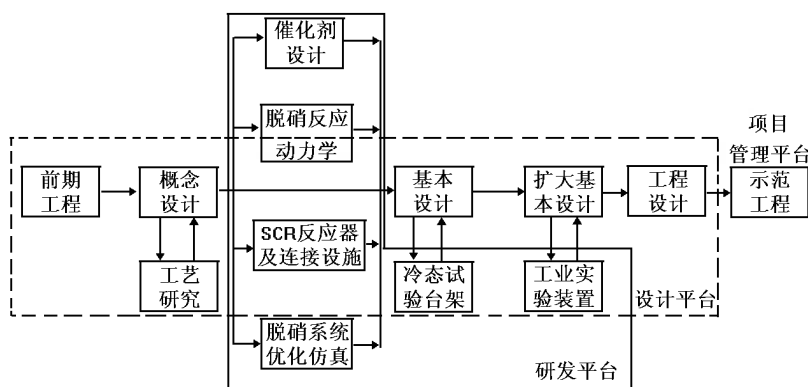


图 5  $OI^2$  - SCR 烟气脱硝技术推进路线

Fig. 5 The technology roadmap of  $OI^2$  - SCR

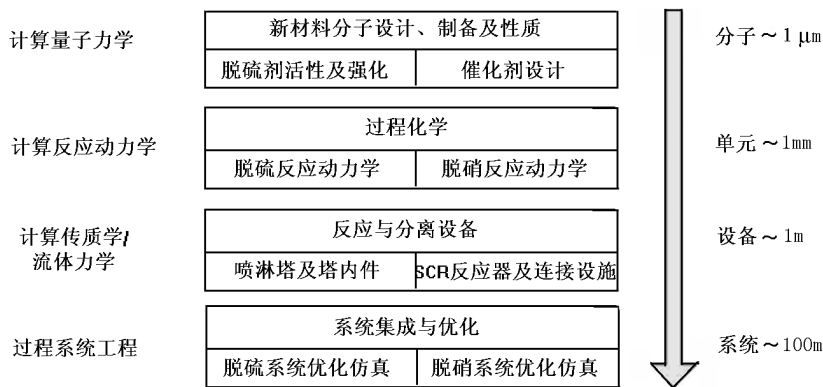


图 6 OI<sup>2</sup>系列技术共性技术研发平台

Fig. 6 The common R&D platform of OI<sup>2</sup> technologies

由此可见 OI<sup>2</sup>技术开发模式的实质是利用现有文献和数据实施逆向工程,采用大量的全方位多尺度数值计算对各种边界情况进行探索,并辅以少量的试验数据来支撑或验证数值结果,并将工程投运后的数据采集和挖掘结果作为逆向工程实施的新起点,从而实现技术的完善、成熟和更新。

### 3.4 OI<sup>2</sup> 技术开发模式的有益效果

采用 OI<sup>2</sup> 技术开发模式开发的 OI<sup>2</sup> - WFGD 烟气脱硫技术和 OI<sup>2</sup> - SCR 烟气脱硝技术投产成套装置一次投运成功率 100%, 脱硫效率大于 95%, Ca/S 小于 1.03, 石膏纯度大于 90%, 脱硝效率大于等于 90%, 残氨逃逸率小于  $5 \times 10^{-6}$ , SO<sub>2</sub> 氧化率小于 1%, 各项指标均达到国际先进水平, 大幅降低了投资和运行费用, 缩短建设周期。

本项目技术开发模式的成功应用和相关技术的成功开发及应用, 突破了国外公司的技术壁垒, 大幅度压低了国外技术的要价, 实现了关键技术的可升级性, 提高对国情的适应能力, 并促进了国内相关环保技术研究水平的提高和设备制造产业的发展。

利用本项目技术共实施了 23 个电厂 13 755 MW 的脱硫/脱硝工程建设, 合同额超过 30 亿元, 新增利润超过 3 亿元, 利税超 5 000 万元, 总处理废气能力达  $4\ 360 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , 减少排污费近 3 亿元, 减少国家经济损失 92 亿元(考虑酸雨带来的损失)。

## 4 结语

本项目通过对我国大气污染治理技术发展

历程的回顾以及我国在大气污染治理技术开发模式和技术发展现状的分析, 针对我国大气污染治理技术开发过程中遭遇的难以突破的瓶颈, 提出了在突发的社会需求、国外技术抢占市场的条件下, 一种在较少资金投入、较短时间内开发出技术成熟度高、满足市场要求的大气污染治理技术的技术开发模式, 并实现了在短周期内大型复杂工业系统技术开发模式的创新和新技术开发的有益尝试, 开发了具有自主知识产权的 OI<sup>2</sup> - WFGD/SCR 系列技术, 实现了大规模的工业应用, 取得了巨大的经济效益和环境效益。希望本项目在技术开发模式领域的探索能够为我国工业技术开发模式的发展提供参考, 同时希望我国继续积极支持工业技术开发模式的创新, 为我国工程技术的发展提供可靠保证。

### 参考文献

- [1] 周屈兰, 徐通模, 惠世恩. 我国自主开发的湿法脱硫技术及其应用[J]. 动力工程, 2006, 26(2): 262 - 266
- [2] 孙克勤, 张东平. OI<sup>2</sup> - WFGD 烟气脱硫技术介绍[J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 12 - 14
- [3] 孙克勤. 扬州电厂烟气脱硫系统特点及设计优化探讨[J]. 电力勘测设计, 2003, (1): 43 - 47
- [4] 孙克勤, 周山明, 仲兆平, 等. 大型烟气脱硫塔的流体动力学模拟及优化设计[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 270 - 274

# Reflection and innovation pattern of research and development of air pollution treatment technologies in power industry

Sun Keqin<sup>1,2</sup>, Xu Haitao<sup>1,2</sup>, Shen Kai<sup>1,2</sup>,  
Zhou Changcheng<sup>1,2</sup>, Xu Yanzhong<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Power Plant Emission Control Engineering Research Center, Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Suyuan Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

[**Abstract**] According to the discussion of the development course and the current situation of the air pollution treatment technologies in China, the choke point of the research and development (R&D) pattern for air pollution treatment technologies is analyzed and a new technology development pattern is founded. The core of the pattern is multi-scales and system class simulation. The key point experiments and engineering regression are used as assistant instruments. This new pattern is successfully used to develop the flue gas desulfurization and denitrification technology for high capacity power plants. And the technology has already realized the large-scale application. Using this pattern, a new technology can be finally developed and made it maturity in a short period.

[**Key words**] air pollution; power industry; research and development (R&D); R&D pattern