

燃煤 SO_2 、 NO_x 防治与生态优化的策略及研究计划

Prevention and Treatment of SO_2 and NO_x by Burning the Coal and Strategies of Ecologic Optimization

徐旭常

(清华大学热能工程系、清洁煤燃烧国家重点实验室,中国工程院院士 北京 100084)

陈昌和

(清华大学热能工程系、清洁煤燃烧国家重点实验室,教授 北京 100084)

一、我国的燃煤污染防治方针

我国是世界上唯一以煤为主要能源的大国,这样的能源构成在今后相当长的时期内难以改变。预计到2020年煤在我国一次能源消费中的比例可能从现在的76%下降到67%。但就消费总量而言,将从现在的12亿吨增长到31亿吨。

在现有火电机组中,燃煤机组约占93%,而且在今后很长时间内将保持这一状况。

煤的燃烧和能量转换过程需要解决两方面的问题,整体的能量转换效率和燃烧污染物的生成与排放控制。如果在常规大型燃煤蒸汽发电站采用超临界参数,可使发电的热效率提高4~6%,达到42~44%。这一项成熟技术,投资增加不多,经济效益好,是二三十年内我国常规燃煤能源发展和提高热效率的主要的,也是最现实的途径。本文则集中讨论后一问题,即常规燃煤能源系统的污染防治问题。燃煤机组产生的污染物的排放控制必须作为一个主要问题加以研究。

作为一次能源,煤的利用方式在我国主要是燃烧,而燃煤是我国生态环境破坏的最大污染源。我国的能源消费占世界的8~9%,但 SO_2 的排放占到世界的15.1%,排放总量在1997年已达2346万吨,占世界第一位; NO_x 占世界的10.1%, CO_2 占9.6%。其中我国煤燃烧所释放的 SO_2 占全国总排放的87%, CO_2 占71%, NO_x 占67%,粉尘占60%。大量燃煤排放的 SO_2 和 NO_x 已经在我国形成了极大的危害。PH值小于5.6的区域迅速扩大,形成的酸雨和 SO_2 污染区,已超过国土面积的40%,而且都在我国的经济发达地区,造成了难以估量的经济和社会损失。此外,燃煤所排放的温室气体 CO_2 总量也居世界第二位。

烧煤所造成的污染已成为制约我国国民经济

和社会持续发展的一个重要影响因素,业已成为国际上,特别是周边国家和地区对中国关注的热点。如不采取有力的治理措施,这种局面将会加速恶化,直接影响我国12亿人口健康和保护16亿亩耕地的国家大计。

煤的燃烧和利用引发的资源和环境问题,是全世界共同面临的难题,引起国际社会的广泛重视。美国、欧洲共同体和日本都投入大量人力物力和财力,对能源和环境问题进行相关的基础研究和技术开发。随着科技的进步,一些新的能源和新的燃煤发电技术将会在我国得到发展,例如在863计划中的能源技术领域发展战略中所提到的燃煤联合循环和燃料电池等,可以提高能源转换效率和降低燃煤污染物的生成和排放。但是这类技术过于复杂和昂贵,我国在二三十年之内不可能大量推广应用,即使这类发电设备在我国的总装机容量发展到20000MWe(相当于近70套300MWe发电机组),按目前的规划到2010年我国的发电总装机容量将达50000MWe,则此类设备也不会超过我国发电总装机容量的54%。大量原有的和新建的燃煤发电站、蒸汽超临界参数机组和大中型燃煤工业锅炉还是主要采用烟气脱硫等技术及其革新方法来解决燃煤污染防治问题。问题在于,前述能源技术领域发展战略没有涉及三四十年内我国的常规燃煤能源系统的污染防治问题,而在常规燃煤电站还在大力发展的我国,其污染防治问题是不能回避的。因此,燃煤发电的高新技术和常规的先进燃煤发电设备以及与之配套的低费用烟气脱硫新技术都要大力发展。

目前,国外虽已有一些成熟的燃煤污染防治技术可以利用,但国内的工作还刚刚开始。重要的是,国内外目前均无更先进的低费用污染防治新技术可立即推广应用。如已成熟的湿法烟气脱硫技术虽可以消除95%以上的 SO_2 ,但燃煤用户要付出很高

的环境治理投资(湿法脱硫装置约为整个发电厂投资的15%)和日常运行费用,自身又不能从治理环境中获得直接的回报,因而难以推动该技术在我国的普遍推广应用。如果到2010年建成500 000MWe(5亿千瓦)发电机组,且只对火电机组(约3.5亿千瓦)中的1亿千瓦机组装设湿法烟气脱硫装置,则大致的总投资为1 000亿元。这些设备的每年运行费用(石灰石和耗电等)大致又要100亿元,运行10年要耗费1 000亿元。投资和运行费用两者相加需2 000亿元。如果采用其它已有的烟气脱硫技术,如半干法喷雾脱硫、炉内喷钙加增湿活化技术等,投资费用虽比湿法低,但是脱硫剂原料(石灰等)的利用率和烟气脱硫率尚待提高。此外,湿法脱硫虽然是循环利用了水,但是水的消耗量仍很大,在北方和西北的干旱地区会遇到很大的困难。半干法耗水虽较湿法少,但也大致要耗用湿法消耗水的70%,负担仍然沉重。

因此解决燃煤所引起的环境和生态问题,必须与我国的国民经济发展相适应,与国家发展的根本目标相结合。依据我国国力有限的状况和能源构成的特点,所发展的相关理论和以此为基础的污染治理技术必须符合国情、具有自身特色(低价格和少用水)、有利于大规模使用,从而能推动国民经济和环境保护的协调发展,并可形成这方面新的环保产业。我国的燃煤污染防治方针,必须是发展低费用的烟气污染防治新技术,例如发展低费用少耗水的烟气脱硫技术和低费用、低 NO_x 燃烧技术,还必须同时开展燃煤污染治理和生态环境的优化,走燃煤污染防治和促进农业发展相结合的道路,以实现国民经济的可持续发展。

二、基础研究和技术开发

如上所述,国外已有一些成熟的燃煤污染防治技术可以利用,如湿法烟气脱硫,但投资和日常运行费用过于昂贵,难以在我国普遍推广应用。国外其它已发展的技术,我们要学习,并组织攻关和开发。目前各种已有的技术中,无论是完全成熟的或比较成熟的,都存在一定程度的这样那样的不足,例如喷雾半干法脱硫、电子束脱硫技术等。因而发展具有我国特色的、适合我国国情的燃煤污染防治技术,是十分必要的。开发低费用、低耗水的新的脱硫技术,以及将燃煤污染防治与生态优化结合起来,应是我们研究燃煤污染防治理论和开发相应技术的最大特点。

现代的燃煤污染防治和烟气脱硫技术,涉及化学反应和多组分多相复杂流动。要在燃煤污染防治和生态优化方面探讨新的道路,就应该对下列三项研究有所突破:(1)燃煤烟气脱硫的化学原理和技

术;(2)燃煤污染防治中的多组分多相流动、反应和传热传质过程及其耦合的研究;(3)燃煤能源系统的生态优化。

1. 燃煤烟气脱硫的化学原理

目前通用和成熟的烟气脱硫技术都很昂贵并要消耗大量的水。由于我国特别是北方水资源极度匮乏,发展少水/无水脱硫的新理论和工艺流程势在必行。关键在于研究清楚水在烟气脱硫中的确切作用,以及在少水/无水条件下提高烟气脱硫率的理论和在此条件下使 SO_2 转化为亚硫酸盐的比例如何尽量少,从而提高正盐的生成比例,以利于烟气脱硫副产物的进一步应用。又由于烟气中所含的 SO_2 比例很少并且携带粉煤灰等杂质,使看来很有发展前景的烟气脱硫技术中各种化学吸收剂再生和 SO_2 回收制硫酸的方法难以经济实用,故应继续探讨将单一的吸收脱硫改变为创新的吸收—催化转化脱硫的实用方法,包括以下方面:

(1)有水条件下烟气脱硫的气—液—固体体系化学反应机理 传统的湿法或半干法脱硫技术,需喷入一定量的水,以加速脱硫反应和提高脱硫效率,同时生成的亚硫酸盐量多且不稳定,使其进一步利用受到限制。为此应研究:烟气脱硫体系中界面与非界面交换与反应动力学;脱硫过程的水的原位追踪、水促脱硫机制和热力学与动力学模拟;sol—gel理论的验证。通过上述研究,实现最佳的脱硫反应,在此基础上进行新的脱硫方法的试验验证。

(2)少水/无水条件下烟气脱硫的气—固反应机理 在少水/无水条件下进行烟气脱硫,最大障碍是脱硫反应速率很低,因而脱硫效率也很低,为改变这一状况,需研究该过程中钙基脱硫剂的改性和制备方法;烟气脱硫过程中的 SO_3 无水生成机理及化学模拟;脱硫剂颗粒的活化和微观结构的变化规律;少水/无水条件下烟气脱硫过程的实验验证等。以期能在少水/无水条件下提高脱硫效率,甚至达到和半干法、湿法烟气脱硫的效率相仿。

(3)催化脱硫机理 实现烟气催化脱硫的最大障碍是催化剂的再生和回收困难,以致脱硫工艺复杂成本极高,用户难以接受。所以有必要研究:价廉易得可弃置的催化剂、添加剂的筛选与作用机制;燃煤排放的炉渣和飞灰中含有的少量和微量的过渡态金属协同催化作用机理;不同温度下 SO_2 高效转化活性中心的生成与控制条件; O_2/CO_2 气氛下的脱硫机理等。

(4)建立有关设计、化学制备与资源数据库 包括我国脱硫剂的反应动力学参数;钙基和非钙基脱硫剂的筛选和资源储备;我国典型动力用煤的成分、组成结构、燃烧和成灰特性及其对污染排放的影响;煤灰中痕量和微量元素的分布与富集规律;燃烧对重金属污染排放的影响;可用作 SO_2 吸收剂

的我国资源的特性;煤和脱硫剂的样品库等。

2. 多组分多相流动、反应和传热传质过程及其耦合

燃煤污染防治和脱硫的化学原理的研究应着重解决脱硫剂和催化剂的选择和化学工艺路线问题,但是目前实际上我国各种燃煤装置中污染物生成率很高,而脱除率又很低。要解决这些问题只研究化学原理是不够的,因为实际上的燃煤污染物的生成与脱除发生在燃料和脱硫剂颗粒表面及内部。因此污染物生成速率和脱除效率不仅取决于化学反应的种类和化学反应动力学,还在很大程度上取决于下述物理的和力学的过程:颗粒表面和颗粒内孔中气体的扩散;含有颗粒群的多组分气流流动和颗粒与颗粒间的碰撞;颗粒群和气体之间和气体各组分之间的混合和传热传质;影响流动和传热传质的湍流脉动。如果不弄清楚不同条件下上述这些过程的机理、相互作用及其中何者是最慢的并起重要作用的因素,则无法大幅度地降低污染物生成率和提高其脱除率。为此要研究:

(1) 颗粒孔隙的分形生成及孔隙中气体的扩散

脱硫剂颗粒内部存在大量微孔隙,在与 SO_2 反应时,脱硫反应产物常堵塞颗粒孔隙,阻碍 SO_2 气体扩散进入孔隙内部,使脱硫剂仅在颗粒外表面与 SO_2 进行反应,造成脱硫效率不高, CaO 的利用率也很低。这是脱硫技术研究中的一大难题。因此,必须改变脱硫剂颗粒孔隙结构,使气体能顺利扩散进入这些微孔,在微孔内部进行反应。若要采取合理的活化措施去改变颗粒孔隙结构,就需要了解气体扩散进入微孔的物理过程,就应研究脱硫剂颗粒孔隙的分形特性、生成模型及气体在孔隙中的扩散模型。

(2) 悬浮颗粒运动的研究 脱硫效率除了与脱硫剂本身的性质有关外,还与颗粒和气体的相互作用、混合密切相关。目前工程应用中主要依赖于经验,但其结果不准确。设计一个好的脱硫反应器,应对脱硫剂颗粒在其中的运动有基本了解。如果能近似地预测出颗粒在反应器中的运动,就能合理组织颗粒运动,使脱硫剂与 SO_2 在最短的时间里充分混合,提高脱硫反应效率。对于有流化床作为反应器的系统,目前描述悬浮颗粒运动的非线性现象很不准确。应通过理论分析和实验研究,近似预测颗粒的运动和行为,为设计高效低成本燃煤污染防治装置提供依据。

颗粒在反应器中的运动有时极其复杂,用细观的方法有时难以准确描述颗粒运动。因此用统计和其它统观方法描述烟气脱硫过程的宏观现象,为提高脱硫效率提供指导意见十分重要。即应研究烟气脱硫过程中的多组分多相离散系统的统计模型,以及求解这些模型的计算智能方法、神经网络方法和

演化算法等。由于现象的复杂性,很难用常规手段对系统各处进行测量,故应研究采用压力、声、光、热图像的智能诊断。

(3) 多相流动与化学反应相互作用的研究 污染物生成和脱除过程中气相和颗粒的湍流脉动不仅影响煤粉和脱硫剂颗粒的混合,而且直接影响湍流条件下的化学反应速率。如何更好地组织脱硫反应装置内部的气—固流动,从而提高反应速率,是需要迫切解决的问题。为此必须研究煤燃烧多相流动过程中硫化物、氮氧化物等污染物的生成和脱除过程和反应机理,设法增强湍流、促进脱硫剂循环和强化混合,以提高烟气脱硫率;在燃煤流场局部区域中则应设法削弱湍流,以降低氮氧化物的生成。

(4) 颗粒的碰撞和聚团、流动、传热传质和反应

颗粒和颗粒常常因发生碰撞而产生聚团现象,对其中的传热传质和反应速率有很大影响。当聚团现象发生时,其内部的脱硫剂的传热传质和化学反应必然受到阻碍。如能使聚团消散,则将显著地提高脱硫率。因此必须研究:循环流化床中的稀疏和稠密颗粒—气体两相流的运动规律,颗粒的碰撞、聚团及其消散;强化稠密颗粒—气体两相流的传热、传质和反应的规律及其整体、精细的数学模型和放大原理。

3. 燃煤能源系统的生态优化

用钙基脱硫剂的烟气脱硫副产物是含粉煤灰的 CaSO_4 和 CaSO_3 , 它们在多数情况下不能被利用而被抛弃,造成二次污染。根据已作的初步实验,可将脱硫副产物与粉煤灰一起混入盐碱土来改良盐碱土壤,也可用来改造干旱土壤甚至沙漠。这为我国大面积盐碱土的改良和更大面积的干旱土壤(沙漠)的改造提供了可能的新途径。为此必须研究:

(1) 燃煤脱硫副产物及粉煤灰改善土壤质量的机制 包括以下研究内容:燃煤脱硫副产物及粉煤灰在改善土壤理化性质、减轻碱性土壤的生物毒害作用、活化土壤养分及提高其生物有效性、调节土壤中微量元素的供需平衡等方面的作用与机制;利用脱硫副产物改造沙漠土壤的可行性;燃煤脱硫副产物及粉煤灰改造盐碱土、酸性土壤、粘闭性土壤等不同类型的机理,并在研究其用量和利用方式基础上,提出典型的优化利用模式;燃煤脱硫副产物及粉煤灰中的重金属、稀土元素等对土壤、植物并通过食物链对人体的影响,及其进入环境后无害化的生物学、化学、物理学、物理化学等处置机制。

(2) 利用燃煤烟气中的 CO_2 和太阳能的光合作用养殖藻类及其它植物 除了 SO_2 以外,燃煤过程中还产生大量的 CO_2 。 CO_2 引起的温室效应已举世

(下转第 38 页)

含有大量的模拟电路、敏感元件、高速 A/D 和 D/A, 以及大量的数字信号处理电路。由于这些部件的设计、加工工艺、测试均有很大的差异,因而增加了单芯片系统的复杂度。

当代信息技术的发展的特点是更新快,一个单芯片系统研制出来,可能仅有几个月寿命,很快被更好性能的芯片代替,因此采用模块组装来缩短设计周期。这些模块越是标准化,则它的使用范围就越宽,重复使用率也就越高,单芯片系统设计周期也就越短,从而获得高的效益。为此,世界上 36 家著名的大公司组成了“单芯片系统联盟”,其中包括有芯片生产厂、系统生产厂,还有电子设计软件公司。这个单芯片系统联盟将为下一代系统级集成电路制定国际标准,它标志着系统级集成电路已正式启动。

单芯片系统包括了系统技术、数字信号处理技术、微电子技术、电子设计自动化技术、软核模块化技术等各种先进技术的集成,是 21 世纪高技术竞争的热点。单芯片系统将是下世纪实现 DSP 的基本技术,它是专用 DSP 芯片发展的必然结果。我国应当对这一新兴领域给予足够的重视。

四、我国 DSP 发展前景

当前高速信息处理技术发展的另一个特点,是计算机、通讯和消费电子汇聚到一起,这场数字化的革命是以 DSP 技术为基础。我国 DSP 技术起步早,基本上与国外同步发展。我国已有上百所大学从事 DSP 算法的教学和科研,除了 DSP 处理器依赖国外,在信号处理理论和算法上与国外处于同一水平;在 VLSI 信号处理和系统集成上,我们已迈出

了可喜的一步,取得了经验,作出了先进国家同样水平的工作,在单个芯片上实现了 15 个乘加运算器。

当前正是 DSP 技术进入普通消费者家庭的大好时机。我国应抓住机会,投入力量,组织好队伍,打破部门所有制,尽快形成 DSP 高技术产业,占领巨大的消费电子和通讯市场,为此应作好国家的规划,组织好国家攻关队伍,分阶段开发具有自主知识产权的 DSP 产品并形成产业。我国 DSP 技术有着广阔美好的发展前景。

今后高速 DSP 技术必然是以单芯片系统为核心,信息处理的速度需要达到每秒完成数十亿次乘加运算,而只有单芯片系统才能达到运算速度的要求和降低成本。因此,我国除了重点投资 909 微电子加工线以外,亦应投入相应力量跟踪单芯片系统的技术发展。

为了推动我国 DSP 技术在声频和视频领域的应用,应首先在算法和结构上对 DSP 芯片优化,当前尤应重点抓好两个 DSP 芯片:一个是 100MOPS 的通用 DSP 处理器,它可满足我国在多媒体、数字移动电话、Internet 硬件、DVD-ROM 控制器等方面的需要;另一个是 MPEG2 图像解压缩芯片,它可以推动我国数字电视、DVD 播放机、多媒体技术及信息高速公路等相关产业的发展。这两个 DSP 芯片的解决,有利于我国形成自主知识产权,提高产品的国际竞争力,推动我国形成巨大的相关产业。

为了使我国 DSP 技术发展有后劲,应加强对信号处理新理论和新方法研究的投入,应在大学和中科院建立一支稳定的队伍,创造条件让他们走在国际前列,这对我国 DSP 技术的持续稳定发展十分重要。

(责任编辑 王宏章)

(上接第 5 页)

关注,必须认真加以解决。目前各国采取的方法能耗高、费用昂贵,非我国的国力所能承受。为贯彻可持续发展战略,应研究植物(尤其藻类)利用太阳能的光合作用吸收 CO_2 的特性,以减少 CO_2 的温室效应的危害;并研究生物质和原来会造成水环境污染的藻类转化成可再生生物能源的可行性。为形成我国生态优化、可持续发展的新能源系统,还应具体研究下列问题:利用太阳能的光合作用和烟气中的 CO_2 大规模养殖可利用藻类及其它植物的原理和方法;养殖颗石藻获得大量可再生生物能源的方法;沿海超微浮游植物(主要是能大量吸收 CO_2 的颗石藻)的生态分布、发生规律及对环境中 CO_2 循环的影响;藻类及生物质的热转化成烃机理和基本条件;各类生物质的热转化成烃特征和效率;利用催化剂降低热转化的活化能及温度;工程上实现藻类及生物质热转化成烃的可行性。

三、结 论

1. 我国应在燃煤污染防治理论上重大进展,并应研究能形成新脱硫技术的新理论。

2. 在上述理论研究成果的基础上,推动燃煤污染防治技术的发展,开发出适合我国国情的新的烟气脱硫技术,形成自己的知识产权。其脱硫效率应与现在国外成熟的脱硫技术接近,但投资将大大减少,运行费用和耗水量也可大幅度降低,从而能在我国广泛应用,大大改善我国的环境状况。

3. 寻找燃煤系统的生态优化新途径。为此应建立改良我国大面积盐碱土壤、酸性土壤和干旱土壤的新方法,完成脱硫副产物和粉煤灰改良土壤的农田试验,为农业的可持续发展服务,并探索减少 CO_2 排放的新途径。

(责任编辑 王宏章)