

我国能源面临着利用效率偏低、能源安全形势严峻、能源供应成本提高的巨大挑战。因此，能源产业的改革势在必行，清洁、低碳、高效、安全是能源革命的主要目标。



郑楚光：华中科技大学教授

常规能源的新挑战及应对措施

文 郑楚光

化石能源是我国能源消费的主要组成部分，其中尤以煤炭为最。当前，我国能源面临着利用效率偏低、能源安全形势严峻、能源供应成本提高的巨大挑战。因此，能源产业的改革势在必行，清洁、低碳、高效、安全是能源革命的主要目标。

煤炭是我国的重要能源，在我国能源消费结构中占比约为64%，而且以煤为主的能源结构将长期不会改变。煤炭既是中国能源供应的重要支撑，也是中国能源安全的重要保障。能源消费绝对量的大幅增加和以煤炭为主的能源消费结构，导致我国环境污染日益加重。环境污染、生态破坏、气候变化已经成为压在中国头上的三座环境大山。

近年来，我国在污染排放控制方面取得了显著的成果，其中以电力行业对烟尘、二氧化硫、氮氧化物等常规污染物的控制，效果尤为显著。2014年，中国开始实施《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020年）》，实施更为严格的超低排放标准，即新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度，基本达到燃气轮机组排放限值，而这一标准已经高于国际标准。但同时，雾霾、汞和CO₂等非常规污染物的排放依然形势严峻，影响严重。我

国每年汞排放量约占全球总排放量的1/3以上，其中燃煤电站排放的燃煤汞贡献了85%以上的份额。另外，我国CO₂排放量已位居世界第一，排放总量超过美国与欧洲的总和。综上，控制燃烧气体中非常规污染物的排放是当前一项紧迫的任务。

细颗粒物脱除技术

细颗粒物（PM_{2.5}）富含大量有毒、有害物质，在大气中的停留时间长、输送距离远，因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。我国细颗粒物的排放量从2006年的1803万吨增长到了2012年的2087万吨。从对我国大气中细颗粒物源解析结果来看（图1），细颗粒物一次排放量中，燃煤排放约占25%。从我国的煤炭使用情况来看，燃煤电厂耗煤量最大，所以燃煤电厂烟气中细颗粒物治理成为大气颗粒物污染治理与研究的焦点。

针对燃煤电厂颗粒物的排放控制，国际上常采用干式静电除尘器和袋式除尘器来控制燃煤颗粒物。然而，常

规电除尘对于细颗粒物，尤其是对0.1-1μm细颗粒的脱除效率较低，因此在传统除尘器前设置预处理阶段，使细颗粒物通过物理的或化学的作用团聚成较大颗粒后加以清除，已成为除尘技术研究的一个新的热点问题。

细颗粒物团聚促进技术具有投资少、成本低等优势，在不改变现有除尘设备和参数的前提下，不增加大型设备、不需大量投资的基础上，提供了一种最佳效率/成本比的颗粒物排放和烟尘黑度控制方法。该技术通过在燃后区，利用化学团聚理论，增加颗粒之间的液桥力和固桥力，促进细颗粒物团聚，使细颗粒物团聚成较大颗粒团，以提高静电除尘器对细颗粒物的脱除效率，达到用袋式除尘器置换静电除尘器才能达到的目标，甚至超过袋式除

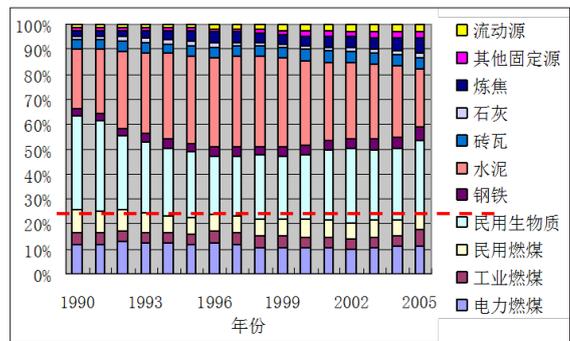


图1. 全国人为源细颗粒物排放清单

尘器的除尘效率，达到国家颁布的最新颗粒物排放环保标准。我国能源以燃煤发电为主，具有上千座燃煤发电厂，该技术在发电行业具有广阔的应用前景。2016年12月，在国电集团丰城电厂300MW机组进行的化学团聚现场示范，实现了烟尘的超低排放，并通过中国环保产业协会技术鉴定，整体达到国际先进水平。

汞及痕量有害元素的排放与控制

联合国环境规划署2013年的报告指出，2010年中国由燃煤引起的汞排放量达254吨，约占亚洲东部和东南部的75%，占全球汞释放总量的1/3。由燃煤释放的汞主要来源于电力和工业生产。其他有害微量重金属元素如砷、铅、镉、氟等的排放形势也很严峻。然而，由于人们对细颗粒物和有害微量元素的排放规律和抑制机理的探索和认识最为肤浅，对有害微量重金属元素相关的排放法规还很宽松或尚属空白。

近年来，我国的重金属排放量逐年增加。2010年的汞、砷、铅、铬、镉等重金属排放量是2000年总排放量的3倍左右。其中，煤燃烧是重金属排放的主要来源之一，约占38%~73%（图2）。我国的燃煤汞

污染控制面临严峻的挑战。目前的以脱硝、除尘及脱硫等设备的协同脱除不能满足燃煤汞控制的要求，迫切需要单项脱汞技术储备。因此，这些煤中有害元素分布富集机理的研究，不仅可以解决有害元素污染控制技术发展中亟待解决的关键科学问题，而且通过煤利用过程中有害元素迁移转化机制等关键科学问题的研究以及防控技术的研发，能使我国在煤中有害元素环境污染控制方面形成明显特色优势。这也为今后建立燃煤电站砷、镉、铍、铀、铅、氟等微量元素的排放标准奠定基础，发展微量元素的协同脱除技术。

目前，国内外汞排放控制技术的研究主要集中在三个方面：燃烧前脱汞、燃烧中脱汞和燃烧后烟气脱汞，其中以燃烧后脱汞技术的研究最为广泛。活性炭喷射技术是国际上公认最有效的燃煤烟气汞释放控制技术，但运行成本太高，而且会导致灰中碳含量增加，影响其商业化应用。

利用具有磁性的铁氧化物或者飞灰磁选分离，得到具有磁性的吸附剂并循环利用，以及利用催化剂氧化脱除烟气中的元素汞，将催化剂在特定气氛下进行再生，是目前脱汞的研究方向。针对现有汞吸附剂价格昂贵、适应性差等问题，需要研发可再生高效汞吸附剂及其活化制备技术、喷射装置与控制系统，并在此基础上，形成具有自主知识产权的、可工业应用的汞脱除技术，形成可再生吸附剂喷射脱汞及活化再生的完整工艺流程。

碳捕集封存利用

碳捕集利用与封存（简称CCUS）被广泛认为是实现化石能源利用过程中减排二氧化碳的唯一途径，也是实现能源变革的战略性支撑技术之一。政府间气候变化专门委员会（简称IPCC）认为，没有CCUS技术，将很难完成碳减排任务。从“十一五”开始，我国政府高度重视应对气候变化和二氧化碳减排工作，在CCUS领域先后部署了“973”“863”“国家科技支撑计划”等一系列重点研究任务。

燃烧前、富氧燃烧、燃烧后捕集CO₂是目前主流的三种方法。其中，富氧燃烧技术具有相对成本低、易规模化、适于存量机组改造等诸多优势，被认为是最可能大规模推广和商业化的CCUS技术之一。该技术用高纯度的氧代替助燃空气，同时采用烟气循环调节炉膛内的介质流量和传热特性，可获得高达90%~95%体积浓度的富含CO₂的烟气，从而以较小的代价冷凝压缩后实现CO₂的永久封存，是一种易于为电力工业界所接受的大规模捕集CO₂的新型燃煤发电技术。与此同时，烟气再循环使得燃烧装置的排烟量大为减少（仅为传统方式的1/4~1/5），从而大大减少排烟损失，锅炉热效率得以显著提高。此外，这种新型燃烧方式还具有高效脱硫、脱硝的效能，可望成为一种污染物综合排放低的环境友好型的燃烧方式。从经济角度看，虽然氧燃烧系统中需要增加花费较高的空分装置，但由于无需增加昂贵的烟气净化装置，节省了净化成本，加之CO₂的资源化利用，因此在经



图2. 全国人为源大气重金属排放清单

济上是可行的。

目前，华中科技大学在富氧燃烧的研发领域具有引领优势，已完成了“0.3MW-3MW-35MW-200MW”的技术放大路线图，实现了“富氧燃烧-空气燃烧兼容”的

创新性设计理念。

未来煤燃烧的基础研究和技术开发的挑战和使命，是对于燃煤释放的非常规污染物排放的控制。应开展煤燃烧排放区域大气颗粒物和重金属的健康风险评价，探索相应

的健康风险模型，建立相应的卫生标准，有针对性地制定干预措施；研究控制技术实施前后大气颗粒物和重金属人群健康风险的实际情况，论证控制技术对于生态系统和人群健康的影响。

氢能作为二次能源，可以成为连接化石能源和可再生能源的桥梁，将热力网、电力网和燃料供应网连于一体，使化石能源应用更清洁，使可再生能源应用更高效。



蒋利军：北京有色金属
研究总院教授级高工

氢能的开发与应用

文 蒋利军

氢能是洁净的二次能源，其来源广泛，可存可输，应用多样。自然界中，氢存在于水、化石燃料和生物质当中，当输入一定能源后，可从这些物质中提取出氢。近年来，全球可再生能源发展迅速，但由于其在时间和地理上的分布不均衡，产生的波动大，因此造成上网难，如何大规模消纳成为制约可再生能源规模化发展的瓶颈。2016年，我国弃风电量达497亿千瓦时，弃风、弃光、弃水总量超过800亿千瓦时，相当于整个三峡水电站一年的发电量，十分可惜。因此，发展合适的储能技术迫在眉睫。

氢能是大规模储存可再生能源的重要途径。氢适合各种规模的储能，在储存过程中无能量损失，可

跨季度储存。例如，可以在风电资源丰富的时候，将剩余风电转化为氢储存起来，等到枯风期使用，这样可以实现全年的可再生能源供电。风电转变为氢后，还有另外一个优势，就是终端利用灵活，氢既可以作为化工原料和工业气体，还可用于分布式发电和燃料电池汽车的氢源，还可直接掺入天然气管网作为居民燃气等。从这个角度说，氢能作为二次能源，可以成为连接化石能源和可再生能源的桥梁，将热力网、电力网和燃料供应网连于一体，使化石能源应用更清洁，使可再生能源应用更高效。

制氢方法

目前，比较成熟的制氢方法

有碱性电解水、水煤气和重整制氢等方法。与此同时，新型电解水制氢方法正在研发当中，如固体聚合物电解质电解水制氢技术（简称SPE）和固体氧化物电解水制氢技术（简称SOEC）。SPE技术可以实现纯水的电解，其功率波动适应范围广，能效比碱性电解水高。但电解水制氢首先需将其他能源转换为电能，然后再制氢，多了一次能量转换环节，因而其总的能量转换效率偏低。理想的方法是直接从太阳能出发，直接热分解水制氢，或直接光分解水制氢，其总效能会更高。从生物质出发，发展生物质气化制氢、微生物制氢也是比较有前途的制氢方法。

直接热分解水制氢，须达3000℃