

# 中国垃圾焚烧发电实现从“跟跑”到“领跑”跨越

深圳罗湖一场大型城市疤痕修复工程刷屏网络。这处名为玉龙填埋场的地方,正在进行迄今为止全国体量最大、全量开挖的垃圾搬迁治理工程。这座已经封场20年的垃圾山,正在开启新的使命。

传统的卫生填埋方式会产生占用大量土地资源、易产生二次污染(如渗滤液、甲烷气体排放)等问题,“垃圾围城”在上世纪90年代一度成为许多大中城市的严峻挑战。

但谁也没有想到,一场技术革命悄然启动。我国逐步攻克垃圾焚烧发电的关键技术,垃圾摇身一变成资源。

如今垃圾焚烧已取代传统填埋,成为我国城市生活垃圾处理的主流方式。困扰大城市数十年的垃圾填埋问题也应声而解。

我国的垃圾焚烧发电技术在全球已处于领先地位。中国环保协会官网去年7月发布的文章指出,我国科研机构、企业通过自主创新实现了垃圾焚烧发电技术从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”的跨越,在焚烧装备、炉温控制、废气处置等领域达到世界领先水平。



中国垃圾焚烧发电技术演进围绕“高效燃烧、严控污染、提升能效”三大核心展开

## 从“垃圾围城”到“无废城市”

从“十一五”规划开始,国家明确将垃圾焚烧发电作为固废处理的重要方向。进入“十四五”时期,伴随“双碳”目标和“无废城市”建设理念的提出,垃圾焚烧发电的战略地位进一步凸显。

过去十年,在电价补贴等政策支持下,我国垃圾焚烧发电高速发展,已形成完整的产业链和成熟的商业模式,涵盖上游的环卫清运服务、设备制造和工程建设;中游为垃圾焚烧发电项目的投资和运营;下游主要包括电网公司(购买电力)和地方政府(支付垃圾处理费)。此外,炉渣、飞灰的资源化利用企业也构成了下游的重要组成部分。

生态环境部数据显示,2024年,全国城市生活垃圾无害化处理量为26198.58万吨,接近99%,其中焚烧处理贡献巨大。

去年9月,生态环境部副部长李高表示,“十四五”以来,我国固体废物污染防治工作取得明显成效。历史性地全面禁止洋垃圾入境;全国危险废物集中利用处置能力达到2.23亿吨/年,生活垃圾焚烧处置能力达到114.1万吨/天,比“十三五”末分别增长58.8%和72.4%。

垃圾焚烧发电不仅是解决环境问题的关键基础设施,更因其能替代化石能源发电、避免填埋产生的甲烷排放,被视为典型的负碳或低碳行业。

据华经产业研究院数据,2024年中国垃圾焚烧发电行业市场规模约为730亿元,较2020年近

千亿元的峰值有所回落。一个重要原因就是,库存的垃圾已“消化”得差不多了。

## 技术全面实现国产化

我国垃圾焚烧发电技术在引进、消化、吸收的基础上已实现全面的自主创新和产业化,并在部分领域达到国际领先水平。技术演进始终围绕“高效燃烧、严控污染、提升能效”三大核心展开。

其中,机械炉排炉是当前的主流技术,市场占有率超过80%。其优点在于技术成熟、运行稳定、对垃圾预处理要求低,能适应我国生活垃圾水分高、热值不稳定的特点。三峰环境、深圳能源等企业已掌握核心技术并实现大规模生产,打破了国外垄断。

“焚烧炉的炉排像波浪一样运动,垃圾就在里面燃烧。里面有1100摄氏度,烧两个小时之后就变为炉渣。”深圳能源旗下子公司深圳市深能环保东部有限公司总经理刘汉俊表示。

近年来,过去采用的大量流化床项目正在通过技改升级为炉排炉。

二次污染控制是垃圾焚烧发电技术的生命线,其中,剧毒物质的控制尤为关键。解决这一问题需要从源头和过程加以控制,包括保证炉膛温度稳定在850摄氏度以上,烟气停留时间不小于2秒,并保持充分的氧气和湍流,从根本上抑制剧毒物质的生成。

刘汉俊表示,深能环保采用7级烟气处理系统,可以把所有的烟气处理到极低的情况下排

放,都是自主研发的,已经实现百分百国产化。

末端烟气净化环节是控制排放的最后一道防线,采用活性炭用于吸附剧毒物质和重金属,布袋除尘器则捕集含有污染物的飞灰。

国家对垃圾焚烧还有严格的监管要求,所有焚烧厂必须安装自动监测设备,与生态环境主管部门的监控设备联网,实时上传各项排放数据,确保处理过程全程可控、可追溯。

值得一提的是,我国的自主创新垃圾焚烧发电技术正在赋能部分“一带一路”共建国家。据中华环保联合会统计,截至2025年5月,中国企业参与海外垃圾焚烧项目(含已签约)达79座。在东南亚、中亚等地,采用中国技术和标准建设的垃圾焚烧发电厂不仅解决了垃圾处理难题,还为当地提供了清洁电力,推动了经济结构的绿色转型。

## 垃圾开始不够烧了

垃圾处理产业链的核心环节是中游垃圾焚烧发电项目的投资和运营,参与者主要是大型环保企业。截至2025年初,全国已建成并运行的垃圾焚烧发电厂数量超过1000座。

与产能的飞速扩张相伴而生的,是局部地区“垃圾不够烧”的问题。根据E20研究院的监测数据,近两年国内垃圾焚烧发电项目的平均产能利用率仅为60%左右。部分新建成项目,尤其是在县域地区的项目面临“吃不饱”的问题。

从监测平台中不难看出,国内垃圾焚烧厂的

# 抗量子密码:构筑未来数字安全“护城河”

今年第一天,在德国达姆施塔特工业大学发起的格挑战赛之“最短向量问题(SVP)挑战赛”中,一个新纪录诞生:西交利物浦大学后量子迁移交叉实验室主任丁津泰教授领衔的团队,成功求解210维SVP难题。

“团队以攻击者的身份解密新密码算法,寻找构成这套密码的最短向量。维度越高,计算越复杂,维度每增加10维,计算难度便会增加10倍。”丁津泰在日前举办的成果发布会上说,这场竞赛类似于在全球密码学家共同建造的“数学迷宫”里,找到一条最短最有效的“破局”路径。

这不是一个简单的数字游戏。这项发源于2010年的全球知名抗量子密码学长期挑战赛,试图以学术界小规模实验性的攻击竞赛,探索全球应对量子计算攻击的安全边界。

量子计算技术的快速推进,让其在处理大规模数据和复杂运算时显现出极大优势,但它也让传统密码体系面临崩塌风险。一旦现代密码体系崩塌,全球金融体系与互联网安全将不复存在。

抗量子密码,便成为抵御量子计算攻击的“护城河”。在这场关乎未来数字时代话语权的科技竞赛中,世界多国已经开始布局“突围”。

## 经典密码学面临挑战

“互联网和计算机安全依赖于密码学标准。超文本传输安全协议、电子银行和文档签名、电子邮件等的核心都是公钥密码学。”丁津泰介绍。

公钥密码学是现代互联网与数字经济的安全基石。它高效满足了大型通信网络中的两个最核心需求:安全和信任。公钥加密确保信息在网络传输过程中不被窃听,公钥签名确保了网络上身份与信息的真实性。

从手机支付、云服务到关键基础设施运行,现有的数字世界,其安全信任根基完全建立在非对称加密算法(RSA)和椭圆曲线密码(ECC)等传统公钥密码算法之上。

但量子信息技术的发展,打破了公钥密码体系的稳定。1994年,美国应用数学家彼得·肖尔提出著名的“肖尔算法”,指出量子计算机可以高效破解整数分解的问题。

“这意味着,现有的公钥密码体制,例如迪菲-赫尔曼加密、RSA和ECC等加密算法,都可

以被量子计算机完全破解。”西交利物浦大学后量子迁移交叉实验室副主任刘锐说,更紧迫的是,如果黑客持续拦截并大量储存当前使用传统公钥算法加密的敏感数据,那么当量子计算机问世后,便可轻易解密这些信息。这些信息有可能包括国家安全机密、企业核心知识产权、金融交易记录、个人生物基因档案等。

“肖尔算法”向经典密码学的“宣战”,促使研究者们开始“突围”这一困境,抗量子密码学应运而生。

## 形成五大新技术路线

“抗量子密码学是一种全新的密码算法体系,它的目标是研发出全新的公钥密码算法,使其能同时抵御传统计算机和量子计算机的攻击。它基于量子计算机也难以解决的复杂数学难题建立。”刘锐介绍。

经过多年探索,抗量子密码学已形成5条主要的技术路线,即基于格的密码学、基于多变量的密码学、基于哈希的密码学、基于编码的密码学,以及基于同源的密码学。

“基于格的密码学的安全性依赖于格的最短向量问题的难度。”丁津泰解释,在所有的技术路线中,格密码学因其高效性和安全性,被美国国家标准与技术研究院(NIST)选定为公钥加密和数字签名的唯一主标准。NIST自2016年面向全球征集抗量子密码算法,2022年首批入选的4个算法中有3个基于格理论。

此次丁津泰带领团队刷新纪录使用的算法,也属于格密码学领域。2025年3月,丁津泰团队攻克了200维SVP问题,团队此次又成功破解了210维SVP难题。

“从200维到210维,计算量增加了10倍,如果沿用此前的算法,需要耗时5年。在此次攻击中,我们改进了算法,在算力和带宽不变的情况下,提高了算法的计算效率,仅约9个月便实现了突破。”丁津泰解释,挑战赛中被攻击的“靶子”,是从抗量子密码算法中提取出来的。挑战者们需要找到办法攻击该靶子,来检测抗量子密码的防御能力,以验证和改进密码算法参数。

“掌握了‘攻克’的技巧,才能更好地‘防护’。”丁津泰说,“当针对SVP问题的攻击能力达到约400维时,目前全球主流的抗量子密码方案就可能面临被破解的风险。接连攻克200维、210维,

证明这套算法在格密码分析能力上有了巨大突破,这将为抗量子密码算法参数的动态调整与自主设计提供重要参考。”

## 多国布局抗量子密码迁移

量子计算虽然还处于工程化和产业化初期,但量子计算专用领域的价值探索已拓展到金融、航空航天、生物医药、通信等领域。有数据显示,2024年,全球量子科技产业整体规模达80亿美元,预计到2035年,这一数字将突破9000亿美元。

面对量子计算的机遇与挑战,多国已开始布局抗量子密码体系。美国于2024年推出首批抗量子加密标准。我国商用密码标准技术研究院于2025年2月面向全球开展新一代商用密码算法征集活动,旨在推动全球抗量子安全的发展。

“虽然目前中国还没有建立抗量子密码标准,但已经开始为抗量子密码迁移做准备。”刘锐解释,抗量子密码迁移,即有计划地将传统密码系统,升级替换为能抵御量子计算攻击的抗量子密码系统。目前欧美日韩等国家和地区普遍计划在2035年左右完成各自信息系统的抗量子密码迁移工作,部分关键信息基础设施的迁移甚至会提前。

抗量子密码迁移不是简单的替换算法,还涉及密码识别认定、安全防护、监测预警、事件响应等领域。

在我国,多家银行已经开始积极布局抗量子密码迁移。其中,中国工商银行已完成国际抗量子密码算法的技术验证,并在网络层传输加密、应用层传输加密及数字签名场景完成了抗量子密码算法的试点;中国建设银行、中信银行、江苏银行等已试点完成抗量子迁移仿真验证。

“抗量子密码迁移的最终目的,是保障数字信息的长期安全,为数字经济发展赋能。”刘锐举例,对于金融业,抗量子密码迁移可以保障数字人民币的交易数据安全与完整性;在通信领域,可以为5G、6G提供加密数据传输;对云与物联网来说,可以保护大数据的隐私安全。

“量子科技与金融安全的深度融合,是一场涉及技术迭代、标准重构、产业升级和生态重塑的系统性工程,任重道远。”江苏省金融学会会长周诚君表示。 据《科技日报》作者:金凤

分布基本以胡焕庸线为界,胡焕庸线东南区域圆点密布,其中多数在过去十余年间建设、投产。

有媒体梳理了焚烧发电厂监测平台上2138座垃圾焚烧炉2024年的运转情况,其中有1267座正常运转时间超过了全年的90%。也有107座焚烧炉停炉时间超50%。

据不完全统计,国内主营业务中含垃圾焚烧发电的上市公司约25家。行业前五的上市公司依次为光大环境、瀚蓝环境、三峰环境、节能环境、绿色动力,整体行业呈现“一超多强”的竞争格局。

“垃圾不够烧现象在局部地区比较突出,主要出现在县级行政单位规划建设垃圾焚烧发电厂。”中国城市建设研究院有限公司总工程师、教授级高级工程师徐海云表示。

头部公司的焚烧发电项目,多位于经济发达地区,产能利用率位居高位。2025年上半年,瀚蓝环境生活垃圾焚烧发电产能利用率约为115%;绿色动力在2025年曾披露,按入厂垃圾量计算的平均产能利用率约为96%。

在国内大多数垃圾焚烧项目中,最常见的商业模式是BOT(建设-运营-移交)。在该模式下,政府授予企业特许经营权(通常在20年以上),由企业负责项目的投资、建设和运营。

运营期内,企业通过收取垃圾处理费和售电收入来收回投资并获取利润。特许经营期满后,项目资产无偿移交给政府。在补贴逐渐退坡的当下,BOT模式对企业的融资能力、建设效率和长期运营能力提出了很高要求,同时政府也不用承担前期的项目投资费用。

此外,PPP(政府与社会资本合作)、BOO(建设-拥有-运营)等模式也有应用。

但也有部分项目在规划阶段对垃圾增长量过于乐观,区域总产能远超实际需求。另外,在一些农村和偏远地区,垃圾“应收尽收”尚未完全实现,未能进入正规处理体系。

针对垃圾不够烧的情况,行业内公司纷纷寻求新的垃圾来源(一般工业固废、污泥等),并通过拓展供热、降本增效、科技创新、人工智能等手段,来提升项目运营质量与效率。

将封存了20年的罗湖玉龙填埋场重新开挖,正是由于垃圾焚烧等相关技术的发展,城市有了根治这一“顽疾”的能力。

广州的兴丰应急填埋场项目也在差不多时间启动搬迁治理,垃圾总开挖量336万立方米,预算12.5亿元。

“玉龙工程的核心突破在于,它首先彻底革新了环境治理的逻辑。面对历史遗留的庞大填埋场,项目没有选择传统的原地封盖与长期监控的打补丁式方式,而是以连根拔起的决心进行全量开挖,从物理根源上实现污染的清零。”浙江大学中国新型城镇化研究院院长张蔚文表示。

供稿:《21世纪经济报道》作者:林典驰

## ► 科技前沿

# 国产光学领域大模型发布 可用于高端仪器算力设施

随着人工智能的不断发展,科研和产业界对垂直领域的大模型提出更高需求。

近日,上海交通大学发布光学领域垂直大语言模型——Optics GPT,标志着我国在人工智能与硬科技交叉融合领域取得重要突破。

该模型如同一位“虚拟光学专家”,能够深度理解光学原理,为科研、设计与教学提供智能化支持。

当前,通用人工智能模型虽功能强大,却难以深入理解如光学等需要深厚专业知识与精密计算的硬科技领域。上海交通大学“光生未来”项目组打造的这款“光学原生”的专业模型,并非简单改造通用模型,而是从光学专业数据中“成长”而来,系统学习了光通信、光学设计等领域的核心知识与设计逻辑。

如果说ChatGPT这样的通用大模型是“博学的通才”,那么Optics GPT则是“资深的专才”。它集中精力深度学习一个特定领域的全部知识,从而在该领域内回答更专业、解决更具体的问题,可靠性也更强。这就像培养一位光学专业的博士生,使其成为该领域的AI专家。

作为完全自研的国产模型,Optics GPT具备鲜明的“四大特点”:轻部署、高认知、强应用、全可控。

该模型应用前景包括赋能教学、科研、产业。在教学方面,模型能够将抽象的光学理论与复杂公式转化为直观的可视化演示与互动问答,并可自动生成丰富的教学案例与虚拟实验,从而变革传统教学模式,显著提升教学效率与学习体验。

在基础研究与前沿探索中,该模型可作为全天候的智能研究助手,帮助科研人员快速梳理文献、启发创新构想、完成复杂模拟计算,并辅助设计实验方案,从而加速从理论到验证的科研进程。最后在工业设计方面,该模型也可以运用于光学产业链的关键环节。

在国产高端仪器领域,该模型可提升仪器使用体验,增加高端仪器的智能化水平;在算力基础设施领域,为数据中心光互连系统的故障智能诊断与运维提供决策支持,并对光模块进行快速、精准的出厂标定;在激光制造领域,推动激光器核心器件向参数自主优化、状态智能预测、故障自动运维的智能化方向升级。 据《第一财经日报》作者:金叶子