

THERMAL ENERGY TECHNOLOGY

2026年9月

# 热能情报

双月刊



主办单位：中瑞天新科技（北京）有限公司



# 卷首语：

欢迎阅读本期《热能情报》。在全球能源转型与“双碳”战略的宏大背景下，热能行业正经历着一场深刻的变革。传统能源的清洁化高效利用、可再生能源的规模化应用、前沿技术的不断突破，共同描绘着一幅绿色、低碳、智慧的热能未来图景。

作为行业的观察者与参与者，中瑞天新（北京科技有限公司）始终致力于追踪热能领域的前沿动态与核心技术。本期《热能情报》旨在为您呈现国家政策的最新导向、关键技术的发展脉络、前沿技术的深度解析以及实际应用的典型案例，希望能为您的决策与研究提供有价值的参考。

我们相信，通过这份杂志，您能清晰地感受到热能行业正在发生的深刻变革，并从中洞察到新的发展机遇。从宏观政策到微观落地，我们希望为您提供一份兼具广度与深度的参考指南。期待《热能情报》能成为您在热能领域探索前行的得力助手，与您共同见证行业的绿色转型与蓬勃发展。

主办单位：中瑞天新科技  
(北京) 有限公司



# CONTENTS

## 目录

### 国家政策的支持

工信部节能与综合利用司组织召开国家级零碳工厂建设工作座谈会..... 6

两部门：推动煤电向支撑调节性电源转型 到2030年现役机组灵活性改造应改尽改.....7

### 技术的发展

碳讨|“十五五”推动供冷系统低碳转型，集中供冷迎来新窗口.....8

百吨级乏汽引射器填补国内空白 ..... 13

AI算力迎来散热新标准！国内首部液冷数据中心国标正式获批..... 14

## 新技术简介

SkyCool面板天空辐射冷却技术介绍..... 15

西安一九零八：常温常压储氢技术，如何卡位氢能‘芯片’？ ..... 18

## 技术应用案例

吨水成本15元！污泥仅为Fenton的1/40！这项废水处理黑科技火了..... 22

装备强国 | 炉机解耦新突破！全国首个抽汽蓄能熔盐储热项目投产！ ..... 24

**保护环境  
从我身边做起！**

Protect the environment  
from my side!



## 工信部节能与综合利用司组织召开国家级零碳工厂建设工作座谈会

人民财讯8月3日电，为贯彻落实《关于开展零碳工厂建设工作的指导意见》，解读《关于组织开展国家级零碳工厂建设工作的通知》有关要求，组织各地做好国家级零碳工厂、零碳算力设施申报和建设工作的，2026年7月31日，工业和信息化部节能与综合利用司在浙江省杭州市组织召开国家级零碳工厂建设工作座谈会。会上，节能与综合利用司有关负责同志系统介绍了国家级零碳工厂、零碳算力设施建设工作有关考虑及下一步重点工作，提出将通过制定方案、年度报告、抽查核验、验收评估和持续披露等举措，形成申报、建设、验收、持续提升的全过程管理机制，引导企业科学开展建设工作。中国电子技术标准化研究院、中国信息通信研究院有关专家详细解读了国家级零碳工厂、零碳算力设施建设评估指标体系以及重点行业领域建设路径，与会同志围绕有关政策和重点问题进行交流研讨。

## 两部门：推动煤电向支撑调节性电源转型 到2030年现役机组灵活性改造应改尽改

【两部门：推动煤电向支撑调节性电源转型 到2030年现役机组灵活性改造应改尽改】财联社8月3日电，国家发展改革委、国家能源局印发《新型电力系统建设“十五五”规划》。规划提出，推动煤电向支撑调节性电源转型。落实新一代煤电升级专项行动要求，提升煤电深调、快调、高效调节能力，完善煤电容量电价机制。到2030年，现役机组灵活性改造应改尽改，热电联产机组最小发电出力达到40%以下，鼓励通过热电解耦等电热协同方式进一步提高灵活性，保障稳定供热。



## 碳讨|“十五五”推动供冷系统低碳转型，集中供冷迎来新窗口

随着“十五五”时期建筑和城市能源系统绿色低碳转型方向逐步明确，集中供冷这一相对小众的城市能源模式正再次受到关注。

从深圳前海建设覆盖大片区域的集中供冷网络，到武汉、南京探索江水供冷，再到徐州利用废弃矿井水为居民小区提供冷源，多种技术路线和示范项目陆续落地。

在政策支持、技术逐渐成熟的背景下，集中供冷正从过去“如何做”的技术探索，迈向验证商业模式、推动规模化应用的新阶段。

不过，冷站和管网带来的高额前期投入、不同场景下的经济性以及适用边界，让这项技术距离大规模商业化仍有一段距离。集中供冷能否从示范项目走向更广泛的城市应用，最终仍取决于能否算清成本账、找到适合规模化推广的商业模式。

### 多地探索差异化供冷路径

所谓区域集中供冷，是指在特定区域内设置集中的制冷站制备空调冷水，再通过市政输送管道向区域内各类建筑物提供冷量的能源供应系统。

相比传统建筑各自建设空调系统，区域集中供冷通过统一建设冷源和管网、集中管理设备，可减少制冷设备重复配置和建筑机房占用，提高能源利用效率和设备运行可靠性，并降低用户的运维成本。同时，集中供冷还可借助大型高效设备、智能控制和规模化运营实现节能降耗，减少分散冷却塔带来的噪声、局部热岛效应等问题。在用电层面，系统还

可结合蓄冷技术，在低谷时段制冷储冷、高峰时段释放冷量，从而优化电力负荷，为城市节能降碳提供新的路径。

作为国内超大型片区集中供冷的代表性项目，深圳前海三湾片区规划建设10座冷站和约90公里市政供冷管网，总制冷规模约38万RT（冷吨），可服务供冷面积约1600万平方米。目前已有6座冷站投入运营，实现片区全域集中供冷。

与传统分散式供冷不同，前海项目通过多冷站联动、冰蓄冷、智慧数字化管控以及虚拟电厂调度等方式，实现供冷系统集约化运行，并通过夜间蓄冰、日间融冰参与电网削峰填谷。经测算，相较传统分散式供冷模式，集中供冷可使楼宇空调机房建设投入降低30%，建筑全生命周期制冷综合成本下降10%以上；已投运的6座冷站在20年运营周期内预计可节约电力容量费14.85亿元，同时累计节约机房建筑面积4.77万平方米、屋面空间5.7万平方米。

随着集中供冷从单一制冷系统向城市综合能源基础设施延伸，前海模式也为新区、产业园区和中央商务区探索规模化、低碳化供冷提供了实践样本。

除了深圳前海，全国多地也在探索各具特色的集中供冷模式。济南CBD依托“余热供暖+冰蓄冷”，探索北方地区冷热同供；武汉、南京利用长江水，通过水源热泵将天然水体资源转化为区域供冷的冷热源；江苏徐州则利用废弃矿井水为居民小区提供集中供冷，实现资源枯竭型城市的能源再利用；广州金融城正在建设覆盖多个片区的综合能源系统，将集中供冷与储能、光伏、热泵等多种能源设施结合。

零碳研究院关注到，早在2023年前后，集中供冷就曾进入过公众视野，为何近期这一议题再度引起集中讨论？



一个重要背景是，集中供冷正被纳入建筑和城市能源系统绿色低碳转型的大背景中。

国务院今年7月印发的《“十五五”碳达峰行动方案》明确提出，加快供热、制冷系统绿色低碳转型，合理布局建设储热蓄冷设施；《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》提出，实施制冷能效提升行动；《新型能源体系建设“十五五”规划》则提出，合理布局建设多尺度储热储冷设施。

厦门大学管理学院讲席教授、中国能源政策研究院院长林伯强告诉新京报零碳研究院，集中供冷受到更多关注，与政策推动和技术成熟度提升密切相关。“十五五”时期，供热、供冷等城市能源系统的绿色低碳转型方向已较为明确，为相关产业发展提供了政策支撑。

在他看来，随着技术路径逐渐清晰、示范项目不断增加，行业下一步需要回答的已不再只是“集中供冷能不能做”，而是“能否把成本降下来，实现商业化和规模化推广”。

从示范走向商业化，成本账仍待算清

不过，尽管技术路线和应用场景不断丰富，但当前国内集中供冷整体规模仍然较小，成本依然是制约其商业化推广的重要因素。

林伯强认为，从技术角度来看，集中供冷已经形成多种可行路径，下一步的关键在于推动其从示范项目走向规模化商业应用，特别是在大型商业中心、产业园区等用冷需求集中、负荷密度较高的场景率先推广。

“如果仅仅停留在小规模示范阶段，意义有限。”林伯强认为，随着应用规模扩大，产业链逐步成熟，集中供冷的成本有望进一步下降，而能否形成规模效应，也将成为决定其能否实现大规模商业化的关键。

零碳研究院了解到，集中供冷的成本结构与传统空调存在明显差异。部分项目由于需要建设冷站、铺设管网等基础设施，前期投资可能比传统空调高出约20%。但对于终端用户而言，集中建设和规模化运营又可以减少单体建筑自建机房和购买制冷设备的投入。

随着供冷规模扩大，大型高效设备、集中运维以及蓄冷削峰等优势有望逐步显现，部分项目的长期运行成本可降至传统方式的50%至70%。不过，这一成本优势高度依赖具体项目的技术路线、用户密度、供冷规模和管网距离，并不意味着所有集中供冷项目都能够实现同样的经济性。

值得注意的是，集中供冷的规模化，也并不意味着所有建筑类型都适合采用这一模式。

华南理工大学建筑设计研究院有限公司副总工程师、区域能源规划与设计研究室主任王钊曾牵头起草《区域供冷系统设计标准》，主导设计广州大学城集中供冷及多个城市综合体区域能源站等项目。在他看来，集中供冷从商业和公共建筑进一步向住宅领域大规模推广，仍面临较大难度，也未必适合全面铺开。

王钊认为，住宅用户的使用需求更加个性化，且居民电价相对较低，使集中供冷在经济性方面面临挑战。与此同时，供冷系统与传统住宅建筑在设计和施工上的适配要求较高。

例如，集中供冷的部分管道和设备难以全部布置在住户室内，对住宅层高、竖井面积等提出更高要求，也会对住宅本体设计产生明显影响。



因此，在王钊看来，集中供冷在高端住宅，或拥有低成本能源、特殊天然冷源等特定条件的住宅项目中或许具备可行性，但从目前来看，更适合优先应用于大型商业中心、公共建筑、产业园区等冷负荷集中、规模效应更容易形成的场景。

从深圳前海的超大型冷站网络，到武汉、南京探索江水供冷，再到徐州利用废弃矿井水服务居民社区，集中供冷正在寻找不同的应用边界。政策方向、技术成熟和示范项目的增加，为这一行业打开了新的发展空间；但要真正从示范项目走向城市基础设施，仍需要回答成本、商业模式和适用场景等一系列现实问题。

对于集中供冷而言，技术路径或许已经逐渐清晰，但决定其能否真正走向规模化的，最终仍将是那本能否算清的“成本账”。

## 百吨级乏汽引射器填补国内空白

8月16日，记者从太原理工大学获悉，该校电气与动力工程学院马素霞教授团队取得重大科研突破，成功研发百吨级乏汽引射器，实现装备全工况自主可控，一举打破国外长期技术垄断，填补国内相关领域技术空白。

乏汽引射器是热电行业低温余热回收领域的核心关键装备。此前，百吨级乏汽引射器设计与制造技术掌握在国外企业手中。国内众多热电厂大量低温乏汽直接排空，不仅造成大量能源浪费，还增加碳排放，成为制约热电行业节能降碳、绿色转型的一大技术瓶颈。2020年，马素霞教授团队牵头承担国家重点研发计划项目，正式启动百吨级乏汽引射器技术攻关。攻关初期，国内该领域面临无成熟产品、无系统设计体系、无工程应用案例的“三无”困境，研发工作从零起步。

研究团队跳出照搬国外既有技术文献的路径依赖，深耕流体动力学底层机理，通过上万次仿真模拟精准量化设备核心卷吸性能，构建起具备完全自主知识产权的全尺寸成套设计方法。针对热电厂机组负荷波动大、运行工况复杂多变的现实痛点，团队创新设计流线型曲面可调锥体，实现全场景下蒸汽流量毫秒级精准调控；针对高压设备长期运行易泄漏的行业难题，研发石墨烯复合多重密封结构，彻底消除动静部件泄漏引发的安全隐患，系列核心创新成果已获得多项国家发明专利授权。目前，国内首台百吨级乏汽引射器已在吕梁晋能大土河热电完成全周期稳定运行。



## AI算力迎来散热新标准！国内首部液冷数据中心国标正式获批

随着大模型、智算中心快速建设，服务器算力功耗持续走高，传统风冷散热已经很难满足高密算力机柜需求，液冷技术从可选配置变成行业刚需。

国内首部冷板式液冷国家标准GB/T 48023-2026《数据中心冷板式液冷系统技术规范》正式获批发布，将于2027年2月1日实施。标准对冷板式液冷系统设计、部件要求、水力计算、测试验收全流程作出统一规定。

在此之前液冷行业缺少统一国标，各家厂商接口、规格不统一，产品质量参差不齐，项目定制成本居高不下。该国标落地，意味着液冷产业告别野蛮生长阶段，有了权威统一的建设验收依据，利于降低产业链整体成本。

行业机构预测，2026年国内AI数据中心液冷渗透率有望达到40%。液冷可以有效降低机房PUE能耗指标，节约大量电力资源，适配下一代高功率AI服务器，为算力基础设施建设筑牢底座。

## SkyCool面板天空辐射冷却技术介绍

冷却塔蒸发水以散热，应用于商业和工业冷却系统。虽然目前水资源价格较低，但用水量惊人——劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）估计，到2020年，美国数据中心将使用6600亿加仑水。如果将用于热电厂冷却塔、工业制冷系统及其他大型建筑的用水计入，年用水总量轻松超过一万亿加仑。从长远来看，这种用水量无法持续，需要开发新技术，既能实现蒸发系统的低热排热温度，又能实现闭环（干式）风冷系统的简单性。

### 解决方案

辐射自然降温是一种被动冷却技术，利用地球大气的自然特性：它对8-13微米波段的电磁辐射部分透明。该波长范围与典型地面温度（0-50°C）下物体发出的热辐射重叠。因此，面向天空的表面在这些温度下向天空释放的热辐射能量多于接收回来的能量，从而使自身降温低于空气温度。日常观察到的这种现象包括早晨汽车面向天空的表面上水凝结，以及在气温降至0°C以下之前，屋顶上形成霜冻。

这些表面已被应用于面板上，面板的形态类似于太阳能热水器。每块面板尺寸为39英寸×77英寸，干重为22磅（1.1磅/平方英尺）。这些面板以串联和并联方式连接，形成封闭系统，用于冷却流体。这些面板没有活动部件，只需电力即可驱动循环水泵。

### 其工作原理

辐射天空冷却一直存在；然而，白天用常见的建筑材料并不容易观察到。这很简单，因为任何面向天空的户外表面也都在接收来自太阳的能量和热量。因此，这种影响对建筑效率和冷却系统的影响有限。



2014年，研究显示专用纳米光子表面即使在直射阳光下也能被动冷却至比空气温度低 $5^{\circ}\text{C}$ 甚至更高（Raman等，2014;Rephaeli 等，2013）。这些专用表面采用光学和光子原理设计，具有选择性光谱发射率 $\varepsilon(\lambda)$ ，在红外波段较高，在太阳波段较低（Raman等，2014）。表面反射了97%的入射阳光，并且在8-13微米范围内强烈辐射，大气层是透明的。这些光学特性使表面能够实现观察到的冷却效果，并能将来自其他来源的热量辐射和排斥到低于空气温度的水平。结果还强调，全天候可实现超过100瓦/平方米的散热能力。近年来，利用这些专用表面的流体冷却面板被开发出来，并用于演示在24小时、不同流量下，实现比环境空气温度低达 $5^{\circ}\text{C}$  ( $9^{\circ}\text{F}$ ) 的流体冷却（Goldstein等，2017）。

SkyCool面板的核心技术是在斯坦福大学多年研究、美国能源部和国家科学基金会支持下开发的。该技术已有两项第三方研究，分别由太平洋西北国家实验室（PNNL-24904）和橡树岭国家实验室（仍在进行中）进行。

## 可应用

领域 太阳能板可以与传统空调或制冷系统配合使用，甚至可以替代建筑中更传统的制冷系统。当与传统空调或制冷系统（压缩式）结合使用时，这些面板可以用来冷却冷凝器中的制冷剂，甚至替代标准冷凝器。通过这样做，冷凝器压力可以降低，压缩机所需的工作量也更少。通过这样做，我们预计根据系统中面板的数量，节省10%到40%的电力。

这些太阳能板还可以与热储结合，用来替代一到三层办公楼的空调系统。在这种情况下，太阳能板用于夜间、清晨和傍晚为热电池降温。然后，储存的冷水可以通过建筑的冷却系统分配。以这种方式使用时，预计的节能效果相较于传统压缩机冷却系统将提升40%至60%。

这些面板也可以直接用于排斥建筑物的热量。在这种模式下，面板被用作闭合流体循环，提供了高效地从建筑物中排散热量的方法。面板的冷却能力相对于运行泵所需的电力，是冷却塔甚至风扇的10到50倍。假设这些电池板能补充典型冷却塔的散热功能，500块SkyCool电池板的阵列每年将节省数百万加仑的能源。



## 西安一九零八：常温常压储氢技术，如何卡位氢能‘芯片’？

一块350克的储氢材料，常温常压下储存的氢气，足够一辆观光车跑25公里。这不是实验室里的PPT，而是西安交大实验室走出来的企业——西安一九零八新能源科技有限公司，已经落地的成果。

当各地都在比拼氢燃料电池整车下了多少线、加氢站建了多少座时，西安选了一条更“硬核”的赛道：攻克最底层的储氢材料。这步棋究竟高明在哪？要回答这个问题，得先看清全球氢能竞争的真正牌局。

美日欧的“长板”与中国企业的“扎堆”

全球氢能赛道上，美日欧的领先优势各有侧重。

美国在液氢技术和质子交换膜燃料电池领域积累了深厚基础，拥有较为完善的储运网络体系。日本依托丰田、本田等车企在燃料电池堆和整车集成上占据高地，但储氢环节仍主要依赖高压气态或液态路线。欧洲则在绿氢制备、电解槽装备以及氢能管道网络建设上话语权较强，2021年欧洲首个大规模10兆瓦质子交换膜电解水制氢商业项目在德国投入运营，2026年2月荷兰鹿特丹港32公里氢气管网完成首次氢气充注，欧洲正加速构建系统化氢能基础设施。

再看国内，多数企业的切入点集中在燃料电池系统集成、加氢站建设、氢能商用车示范等应用端。2024年，中国新增燃料电池重卡超5000辆，占全球增量的80%以上，应用端的推进速度确实令人瞩目。但值得注意的是，底层材料——储氢材料、催化剂、膜电极等关键环节，仍不同程度依赖进口或处于实验室阶段。

全球竞争格局呈现出一个微妙特征：上游材料相对薄弱，中游应用竞争激烈。而西安的突破，恰恰瞄准了最容易被忽视、却又最关键的环节。

储氢材料：氢能产业的“芯片”级技术

为什么说储氢材料是氢能产业的“芯片”级核心技术？

答案藏在氢的物理本性里。氢气是世界上最轻的气体，标准状态下密度仅为空气的十四分之一。同等质量下，1克氢气提供的能量相当于汽油的3倍，但如何高效、安全、低成本地把氢“装”起来，一直是困扰行业的头号难题。目前主流的高压气态储氢需要70兆帕压力，安全隐患大、能耗高；液态储氢需冷却至零下253摄氏度，成本极其高昂。有专家在接受媒体采访时明确表示，固态氢才是氢能产业的未来，否则由于氢气是气体、危化品、密度低，将大大制约氢能的储、运、用。

固态储氢被业内视为终极方案，但实现起来谈何容易。吸放氢动力学性能、循环寿命、材料成本，每一个都是硬骨头。

西安一九零八新能源的突破，正是在这个“芯片”级环节撕开了口子。这项技术脱胎于西安交大实验室，依托“石墨烯界面纳米阀”原创科技成果，在微米级储氢材料颗粒表面包覆一层纳米石墨烯，储存时氢气被牢牢锁住，释放时可精准控制速度。普通储氢材料重量储氢密度仅为5.7%，一九零八做到了25%，储运效率是传统高压气态的15倍。常温常压下的金属基固态储氢，让易燃易爆的氢气变得“温顺可控”。

这项技术若实现大规模产业化，其战略价值不言而喻——谁掌握了储氢材料，谁就掌握了氢能产业链的“定价权”和“安全阀”。



## 秦创原：从实验室到产业化的“加速器”

一项实验室技术走向产业化，从来不是一条坦途。

西安一九零八的成长轨迹，折射出陕西近年来在科技成果转化机制上的深层变革。2022年起，陕西启动“三项改革”试点，聚焦职务科技成果单列管理、技术转移人才职称评定、横向科研项目结余经费出资成果转化，一步步解除束缚科技成果转化的“绳索”。截至2025年底，全省11万项职务科技成果实现资产单列管理，4.6万项科技成果实现转移转化，新成立科技成果转化企业2972家。

支撑这些数据的，是秦创原创新驱动平台的全链条服务体系。陕西省秦创原创新驱动平台建设工作领导小组于2023年11月发布的政策包，涵盖人才引进、成果转化、企业培育及创新生态优化四大领域共53项条款。秦创原创新促进中心还锻造了一支“科技经纪人”队伍，懂科技、懂产业、懂资本、懂市场，专门帮高校找项目落地渠道，帮企业匹配核心技术。

从西安交大实验室的技术验证，到秦创原孵化器落地，再到全球首个年产30吨常温常压固态储氢材料中试产线建成——一九零八新能源的每一步，都踩在了这个平台上。目前企业已完成全球最大单套系统年产3000吨的工艺包设计，正与中国电气装备集团、中国华能集团等央企合作推进光-制储氢-发电一体化示范项目。

与上海侧重氢能整车和港口应用、深圳聚焦燃料电池电堆不同，西安选择了一条“错位竞争”的路——不盲目追求终端应用的数量，而是深耕底层技术，以“硬科技”定义城市竞争力。

技术辐射：从一技之长到全链主动权

储氢材料的突破，价值远不止于材料本身。

向上游看，高效储氢材料可大幅降低氢气运输成本，使得分布式制氢的经济性显著提升。有研究机构指出，未来重要的场景是将西部的风光大基地与储能、氢能产业链绑定发展。西安的固态储氢技术若与西北地区的风光资源深度结合，有望打造“绿氢+固态储运”的闭环路径。

向下游看，氢能重卡、船舶、无人机等需要高能量密度、高安全性的储氢方案，固态储氢是理想选择。从西安昆明池景区投运的全球首款常温常压固态氢动力观光车，到上海居民夜市里为摊贩提供零排放电力保障的5千瓦电源，再到已交付国家电网的全国电力系统首台套固态储氢电源——这项技术的应用版图正在从观光出行延伸到社区保供、从商业应急覆盖到电力调度。

更深远的意义在于产业链主动权。若储氢材料实现全面国产化，中国将摆脱对进口高压气瓶、碳纤维的依赖，并在国际标准制定中拥有话语权。从“跟跑”到“领跑”的关键，不是单纯比拼整车数量，而是拼底层技术专利和材料标准。

西安选择了一条更难但更持久的路——以高校成果转化为核心，攻克氢能产业的“芯片”级材料，再向上下游辐射。这种“先硬科技、后产业化”的模式，或许能为中国新能源竞争提供一种新的解题思路。

你认为中国在新能源竞争中，更应该押注底层技术突破还是快速应用整合？



## 吨水成本15元！污泥仅为Fenton的1/40！这项废水处理黑科技火了

新能源电池材料生产——三元前驱体、锂电池回收、镍钴锰冶金——每天产生大量高浓度有机废水，COD动辄数千上万。传统Fenton法处理1吨水要花25元以上，还产生4公斤危险废物污泥。处理完了还不算完——出水放一段时间可能“反色”，COD反弹，等于白干。

科力迩科技的CDOF臭氧催化氧化气浮+活性炭组合工艺，把这三个数字全部颠覆：

- 吨水成本≤15元，仅为Fenton的1/3到1/2。一年处理10万吨废水，光药剂费就能省100万+。

- 污泥量0.1kg/t，是Fenton的1/40。危废处置费从“肉疼”变成“忽略不计”。

- 总停留时间 < 25分钟，传统工艺至少要1小时。效率提升3-6倍，同样的场地能处理3-6倍的来水。

更狠的是，CDOF把臭氧利用率干到了99.98%——几乎每一毫克臭氧都参与了反应，不是白白跑掉的。投加比仅0.5~1.2，而传统臭氧催化氧化要1.5~4。

技术原理也不复杂：四重催化氧化（均相+非均相+水力空化+加压）像给臭氧装了“涡轮增压”，氧化效率直接拉满；旋流气浮同步去悬浮物；活性炭兜底精处理。全密闭带压运行，零臭氧泄漏，全自动无人值守，催化剂寿命超过5年。

实际效果呢？2023年三个小试案例：

– COD 1215mg/L → 285mg/L，去除率76.5%，总磷完全去除

– COD 1200mg/L → 98mg/L以下，去除率超91.8%

– COD 1200mg/L → 150~300mg/L，去除率最高87.5%

脱色90%以上，出水无色无味不反色。Fenton法最头疼的“反色”问题，在CDOF这里不存在。

撬装化设计，占地面积仅为传统工艺的1/5。对于寸土寸金的新能源工厂来说，这意味着省地、省基建、省工期。

环保监管越来越严，废水处理成本却可以越来越低。CDOF正在证明这一点。



## 装备强国 | 炉机解耦新突破！全国首个抽汽蓄能熔盐储热项目投产！

全国首个抽汽蓄能熔盐储热项目投产：重塑煤电灵活性，开辟火电转型新赛道



近日，全国首个600MW火电“抽汽蓄能”熔盐储热示范项目——国能河北龙山电厂熔盐储热灵活性改造项目正式投产运营。该项目是国内首次工程化应用“多源抽汽—配汽调控”熔盐储能技术，彻底打破传统燃煤机组“锅炉、汽轮机刚性绑定”的运行桎梏，实现火电深度调峰、顶峰增发、新能源消纳、工业供汽多维度能力升级。项目整体技术经权威鉴定达到国际领先水平，入选国家能源领域首台（套）重大技术装备，为全国存量火电机组绿色低碳、灵活高效转型提供了可复制、可推广的全新国产化技术路径。

一、项目概况：行业首创的火电熔盐储能标杆工程

国能河北龙山电厂600MW抽汽蓄能熔盐储热项目，是国家能源集团重点科技创新示范工程，依托电厂600MW亚临界燃煤机组实施灵活性升级改造。项目于2024年3月开工建设，2024年12月完成系统调试、进入试运行阶段，历经百余天、十余轮系统优化与工况试验，于2025年4月11日全面完成全工况性能试验，正式投产投运。2025年7月通过中国电机工程学会技术鉴定，获评国际领先水平；同年8月入选第五批能源领域首台（套）重大技术装备名单。

| 序号 | 项目关键技术研究与应用               |
|----|---------------------------|
| 1  | 热力系统与熔盐系统耦合技术             |
| 2  | 主机设备安全性评估                 |
| 3  | 熔盐系统安全性设计                 |
| 4  | 关键设备选型（如：熔盐换热器、压力匹配器、熔盐泵） |
| 5  | 熔盐储能系统运行模式及控制策略           |
| 6  | 熔盐储能系统效率评估                |





项目总投资3.2亿元，占地面积约7900平方米，设计储热容量730MWh，是目前国内单机容量最大、技术体系最完整的抽汽式熔盐储热火电改造项目。整套系统采用完全自主可控的国产化装备与控制体系，攻克多汽源协同抽汽、精准配汽调控、高温熔盐高效换热、变工况智能耦合等一系列关键技术。

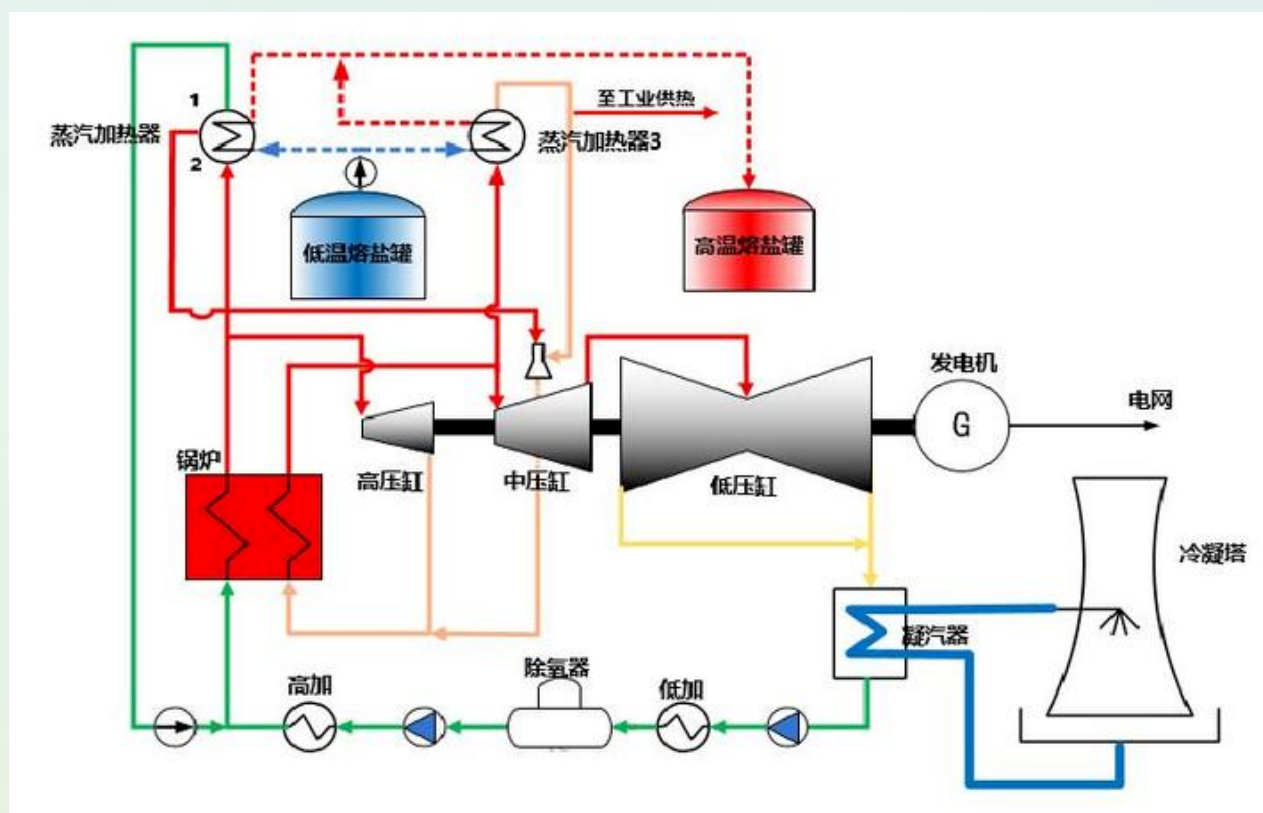
项目核心参建单位分工明确、协同攻关：业主单位为国家能源集团河北龙山电厂；核心工艺与系统解决方案由赫普能源自主研发提供；大型熔盐储罐、高效换热器等核心储能装备由西子洁能配套；高温特种阀门由武锅阀门研制配套；熔盐电加热系统由安徽华瑞电气提供，形成了完整的国产创新产业链。

## 二、核心原理：炉机解耦，重构火电运行逻辑

长期以来，传统火电机组存在先天运行短板：锅炉与汽轮机刚性耦合、深度调峰受锅炉最低稳燃负荷限制，电网低谷时段无法大幅降出力；用电高峰时段又受锅炉燃烧上限约束，顶峰增发能力不足，难以适配高比例新能源并网下的新型电力系统调节需求。

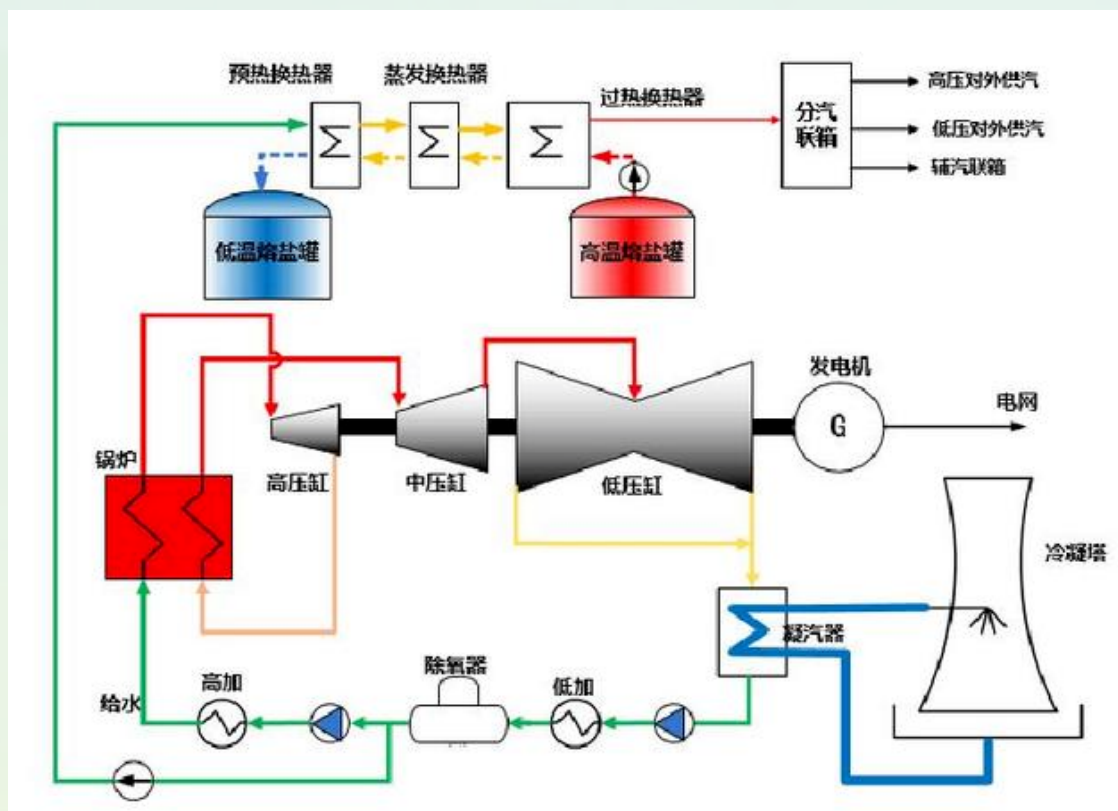
本次投运的“抽汽蓄能”熔盐储热技术，核心创新在于实现火电锅炉与汽轮发电机组柔性解耦，通过独立熔盐储热岛，赋予传统火电“可储、可放、可调节”的储能属性。

低谷储热模式：风电、光伏大发、电网电力富余时，系统从机组主蒸汽、再热蒸汽多汽源精准抽汽，通过高效换热器将热量置换至高温熔盐中储存。锅炉维持安全稳定燃烧工况，机组可进一步压低发电出力，大幅提升新能源消纳空间。



高峰释能模式：电网用电负荷紧张、新能源出力不足时，高温熔盐释放储存热量、二次产汽回补机组热力系统。在不增加锅炉燃料、不提升燃烧负荷的前提下，提升汽轮发电机组发电出力，实现高效顶峰增发。





相较于常见的电加热熔盐储能，抽汽蓄能技术跳过“电能转热能”的二次损耗，直接利用机组高品质蒸汽余热储热，换热效率更高、运行能耗更低、经济性更强，系统综合优势显著。同时项目预留工业供汽接口，可在调峰的同时稳定输出工业蒸汽，破解了传统热电联产机组“调峰保供无法兼顾”的行业痛点

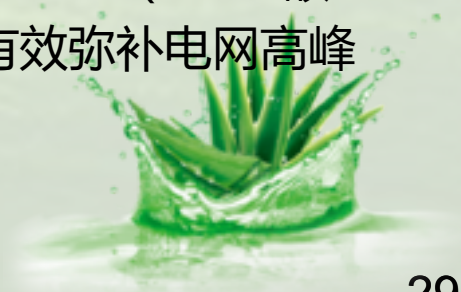
### 三、核心成效：机组调节能力实现跨越式升级

项目投运后，龙山电厂600MW机组灵活性指标实现质的飞跃，双向调节能力大幅拓宽，成为区域电网重要的调峰、调压、顶峰支撑电源。



调峰能力方面，机组新增深度调峰容量100MW，最低稳定运行负荷由传统水平大幅下探至75MW（12.5%额定负荷），可持续深度调峰4小时以上，极大提升电网低谷新能源消纳能力。

顶峰能力方面，依托熔盐释能补汽增发，机组顶峰出力提升30—60MW，最高运行出力可达650MW（108%额定负荷），顶峰持续时长可达6小时，有效弥补电网高峰电力缺口。





同时，机组升降负荷响应速度提升1.5倍，AGC调频响应精度、电网动态适配能力显著优化，机组从传统基荷电源，转变为“基荷+调峰+调频+顶峰+供热”一体化综合调节电源。

在节能环保与新能源消纳层面，项目每年可新增消纳新能源电量5.2亿千瓦时，节约标准煤15.6万吨，减少二氧化碳排放42万吨，为区域新型电力系统低碳化、稳定化运行提供强力支撑。

#### 四、项目核心参数汇总表

项目维度

核心参数与指标

项目定位

全国首个600MW机组多源抽汽熔盐储热调峰示范工程、国际领先火电储能创新技术

关键节点

2024年3月开工、2024年12月试运行、2025年4月正式投产

投资与规模

总投资3.2亿元，占地7900m<sup>2</sup>，储热容量730MWh

深度调峰能力

新增调峰100MW，最低负荷75MW，持续调峰≥4小时

顶峰增发能力

新增顶峰30—60MW，最高出力650MW，持续顶峰≥6小时

系统效率

熔盐换热效率≥95%，项目综合储能效率≥70%

环保效益

年消纳新能源5.2亿kWh，年节标煤15.6万吨，年减排CO<sub>2</sub>42万吨

核心参与单位

业主：国能河北龙山电厂；核心技术：赫普能源；储能装备：西子洁能；阀门配套：武锅阀门；电加热系统：安徽华瑞电气

权威认定

中国电机工程学会鉴定国际领先、能源领域首台（套）重大技术装备

五、行业价值与深远意义

该项目的成功投运，标志着我国火电灵活性改造跳出传统“燃烧优化、设备改造”的旧范式，开辟了抽汽熔盐储能、炉机柔性解耦的全新技术路线，对全国存量煤电转型、新型电力系统建设具有里程碑意义。

一是破解煤电调节瓶颈，激活存量电源价值。我国存量火电机组体量庞大，但普遍调峰深度不足、顶峰能力有限。抽汽蓄能熔盐储热技术无需大规模改造主机设备，通过外置储能岛即可大幅拓展机组调节区间，低成本实现存量火电灵活性升级，让传统煤电适配高比例新能源并网场景。

二是提升新能源消纳能力，助力双碳落地。依托火电储能化改造，有效平抑风光出力波动、减少弃风弃光，推动火电由传统能源主体向新能源消纳载体、电网稳定支撑主体转型，实现风光新能源与传统火电互补协同、耦合运行。

三是构建全链条国产化技术体系。从核心工艺算法、智能控制系统，到大型熔盐装备、高温特种配套设备，项





目实现100%国产化自主可控，同时形成完善的工程经验、试验数据与运维标准，具备全国大范围推广复制条件。

四是实现多功能场景融合应用。技术兼顾电网调峰、顶峰增发、调频调压、工业供汽多重场景，解决热电联产机组工况矛盾，适配工业园区、综合能源基地多元化用能需求，拓展了火电综合利用价值。

### 结语

国能河北龙山电厂全国首个抽汽蓄能熔盐储热项目的投产，是我国煤电绿色转型、储能技术创新、新型电力系统建设的重要标志性成果。它以自主创新技术重塑传统火电运行模式，让老旧存量火电焕发全新活力，为全国海量火电机组“灵活化、低碳化、多功能化”升级提供了标杆范本。未来，随着该技术规模化推广应用，将进一步夯实电力系统安全稳定运行底座，持续推动我国能源结构优化与新型电力系统高质量建设。



