

新华社贵阳12月20日电 二氧化碳也能用来发电了？12月20日，全球首台商用超临界二氧化碳发电机组在贵州六盘水成功商运，这也是超临界二氧化碳余热发电技术“超碳一号”的全球示范工程，成为发电技术的进步例证。

此次投运的“超碳一号”示范工程，是中核集团中国核动力研究设计院与济钢集团国际工程技术有限公司、首钢水城钢铁(集团)有限责任公司共同推进的15兆瓦超临界二氧化碳燃烧余热发电工程。

人类对发电技术的研究从未停止，但不论是传统的火力发电还是先进的核电技术，以及各类余热蒸汽发电，原理都类似于“烧开水”，就是用热量将水变为水蒸气，推动汽轮机转动来发电。但超临界二氧化碳发电技术则是告别“烧开水”的一种革新型热电转换技术。

“超碳一号”总设计师黄彦平介绍，这一技术是把温度超过31摄氏度、压力升高至73个大气压以上环境中的超临界二氧化碳作为循环工质，将其送进发电系统里，再通过压缩机和换热器提高超临界二氧化碳的压力和温度，让高温高压的二氧化碳推动透平旋转，进而产生电能。

“超临界状态下的二氧化碳，既像液体一样密度大，又像气体一样粘度低，循环发电过程中不发生相变，发电效率也就更高。”黄彦平解释，相比之前的烧结余热蒸汽发电技术，“超碳一号”发电效率提升85%以上，净发电量提升50%以上。

对企业而言，发电效率的提升就意味着实实在在的收益。在原烧结工艺不变的情况下，此次投运的项目每年可多发7000余万度电，发电收入增加近3000万元。

当前，钢铁、水泥等传统产业是能源消耗和碳排放的重点领域，也是推进“双碳”工作的主战场。大量的工业余热以废水废液、高温烟气、高温产品以及炉渣等形式直接排放到环境中。把工业余热高效利用，是节能降碳的一个实招、硬招。

专家表示，“超碳一号”不仅效率高，而且有系统紧凑、辅助系统少和响应速度快的优势，连场地需求也可以“瘦身”50%。初步测算，如果将这项技术应用于全国的烧结余热改造，不仅为钢铁行业，也将为水泥、玻璃等其他行业的余热利用带来技术变革。

中核集团已经于2024年启动了“熔盐储能+超临界二氧化碳发电”示范项目，已入选国家能源领域第五批首台(套)重大技术装备，预计2028年完成示范应用。

在不远的将来，超临界二氧化碳技术还可以与各种热源组合成发电系统，在光热发电、余热发电、储能发电等领域具有良好的应用前景，为实现“双碳”目标加油助力。



12月20日拍摄的“超碳一号”的热源换热器。  
新华社发

# 二氧化碳能用来发电了

## 超碳一号成功商运



黄彦平 受访者供图

## 专家解读 专访『超碳一号』总设计师黄彦平 如何用二氧化碳烧出电来？

华西都市报·封面新闻  
记者 边雪 贵州六盘水报道

个位数的气温夹杂微雨，12月的贵州六盘水，让人顿感冬日寒意，但在首钢水钢集团厂区内，气氛却十分火热。12月20日，全球首台商用超临界二氧化碳发电机组成功商运，这也是超临界二氧化碳余热发电技术“超碳一号”的全球示范工程。

看着屏幕前机组运行平稳的数据，中核集团首席科学家、“超碳一号”总设计师黄彦平脸上露出了笑容。这一刻，他等了15年。

传统电厂烧煤、烧气，本质都是把水烧成蒸汽去推动汽轮机。“我们干的这件事，简单地说，就是不用‘烧开水’了。”黄彦平带着科研工作者特有的直白解释道，经过十余年的攻关，超临界二氧化碳发电技术产学研体系已建立，全国产业化链条已成型，具备全面工程应用条件。

## 封锁，从零开始攻关

时间回到2009年。黄彦平，这位核反应堆工程专家，在探索新的动力循环技术途中，盯上了超临界二氧化碳。

彼时，这项技术在国外已是前沿热点。2007年，它被写入美国奥巴马政府的国情咨询报告，称为将替代全球近九成蒸汽动力的“颠覆性技术”。一年后，它更是入选《麻省理工科技评论》“全球十大突破性技术”。

而在国内，一切需从零开始。黄彦平回忆说，“听说该技术后，当时大家的第一反应是：二氧化碳？那不是温室气体吗？还能发电？”

更大的困难来自技术封锁。研发的核心装备之一

——微通道扩散焊换热器是系统的“心脏”。其制造母机，全球只有两家外国公司能提供。“我们去谈购买，对方先是答应，后来连谈都不谈了。”黄彦平说，被逼到墙角，反而能激发出斗志。“既然买不来，那就自己造。”

随后，黄彦平联合高校团队，从零开始攻关微通道换热器的全链条技术：从特殊钢材的原材料，到微通道板片的蚀刻成型，再到最关键的——制造那台“工业母机”。

“大家现在看到的那台2.5米长的扩散焊机，全球只有3台。”黄彦平的语气里带着自豪，“另外两台是外国公司的，这一台是我们自己的。”

## 突围，领先全新赛道

硬件封锁只是第一关。超临界二氧化碳作为动力工质，其物性数据、循环设计、控制逻辑，在国内都是空白。

“我们连二氧化碳在超临界状态下是什么‘脾气’都不知道。”黄彦平坦言。没有现成的设计软件，团队就从编写第一行代码开始，搭建自己的仿真平台。

“我们要实现从热源到发电全链条的统一建模，不能让各个专业模块‘各自为政’。”黄彦平说，这支跨学科的团队，硬是啃下了这块骨头。如今，这套软件已成为国内十余所高校相关专业的教学工具，被国际期刊列为该领域代表性仿真软件之一。

关键设备随之接连突破。2018年，首台兆瓦级压缩机出厂；2019年10月15日，全球首次实现兆瓦级超临界二氧化碳简单循环发电系统满功率稳定运行。

“那天晚上，看着仪表盘上所有参数稳稳达到设计值，很多人眼圈都红了。”黄彦平回忆道。2021年4月，性能更优的再压缩循环系统宣告成功，效率较第一代提升约30%。

“目前我们在兆瓦级系统的工程化上，比美国略微领先一点。”黄彦平说，“这是全新的赛道，大家都在摸着石头过河，但我们先摸到了几块关键的石头。”

## 落地，产学研用深度融合

技术走出实验室，需要找到应用场景。2022年夏天，济钢集团国际工程技术有限公司负责人找到黄彦平。

“当时我们就谈了三个问题：有没有兴趣？有没有钱？有没有合适的厂子？”黄彦平回忆说。

答案都是肯定的。双方一拍即合：2023年5月签署框架协议，8月确定在首钢水钢集团以EMC(合同能源管理)模式落地，12月项目正式动工。推进速度之快，超乎想象。“我们负责核心的动力岛，他们负责工程总包和余热接

口。”黄彦平说，这是真正的产学研用结合，各展所长。

为什么选择钢铁行业？数据给出了残酷的答案：中国钢铁行业碳排放量约占全国总排放量的15%，其中大量能量以400℃至600℃的烧结烟气形式浪费。

“超碳一号”的切入，精准命中痛点。根据测算，在首钢水钢集团的项目中，在烧结矿产量不变的前提下，余热利用效率提升42%，净发电量提升85%以上。同时，系统设备减少，占地节约一半，运维更简单。

## 未来，技术边界不断拓展

“超碳一号”技术的落地，不是终点，而是起点。

在黄彦平的蓝图里，下一个战场是新疆。那里风电、光伏资源丰富，但“弃电”问题严重。2024年，中核集团启动了50兆瓦“熔盐储能+超临界二氧化碳发电”示范项目，已入选国家能源领域首台(套)重大技术装备。

“我们的技术启动快、调峰能力强，正好匹配新能源的间歇性特点。”黄彦平解释说，早上太阳出来，系统几分钟就能满负荷运行；云来了，又能快速降下来。这是传统蒸汽机组难以做到的。

更大的功率等级也在规划中。“现在最大单机是16.7兆瓦，要做到50兆瓦、100兆瓦，对材料、轴承、密封都是极限挑战。”但黄彦平信心十足，“我们评估过，现有技术路线支撑100兆瓦等级没有问题。”

采访尾声，黄彦平望向窗外。“能源转型是一场长征，我们只是走完了突破核心技术、实现工程示范的第一段路。”他说，这条路很难，但当看到自己亲手设计的机器，真的把那些原本排到空中的废热变成电输送给千家万户时，会觉得一切都值得。