



Building and Industrial Applications  
Building Technology and Urban Systems Division  
Lawrence Berkeley National Laboratory

LBNL-2001584

# 清洁的中国工业： 加热电气化的技术经济分析、实施障碍及政策选项

Nik Sawe<sup>1</sup>, Hongyou Lu<sup>2</sup>, Jeffrey Rissman<sup>1</sup>, Zhiyu Tian<sup>3</sup>, and Nan Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Energy Innovation: Policy and Technology LLC

<sup>2</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory

<sup>3</sup> Energy Research Institute of China

2024 年 5 月

<https://doi.org/10.20357/B70894>



## 执行摘要

中国制造业的二氧化碳排放占全国 61%，其中近四分之三与工业加热工艺相关。为实现中国的气候目标以及达成工业零碳化，工业加热工艺的脱碳至关重要。如果中国的电力系统也实现脱碳，直接电气化是能在大范围内高效满足所需热能的最实际的方法。

除了减少温室气体排放以外，工业电气化还将有助减少污染和提高能源安全。传统空气污染物排在 2019 年造成中国 185 万人过早死亡，同时中国 2021 年 85% 的石油产品和原油以及 46% 的天然气依赖进口。直接电气化也将有助于降低化石燃料价格和未来碳价波动对中国企业的影响，并确保企业在向注重环保的客户和政府销售产品时保持竞争力，因为这些客户和政府可能会使用碳边境调整机制或类似措施来鼓励采购更洁净的材料。

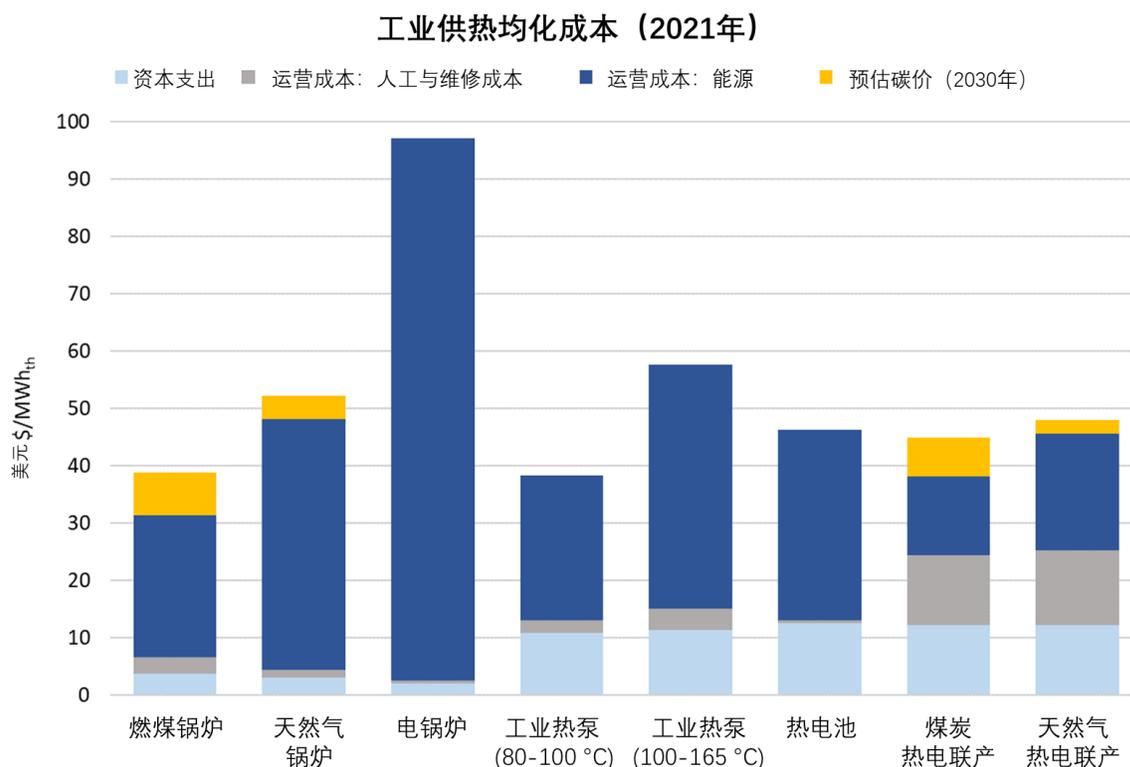
两项电气化技术对于中国工业加热工艺脱碳尤其重要：工业热泵和热电池。工业热泵是供应清洁、低温工艺热最高效和最具成本效益的方法。其能源效率可比其他电气技术高几倍，因为它不将输入的电力直接转化为热，而是从低温区域向高温区域移动热量，其运作原理类似于冰箱或空调。工业热泵可以从热源（如大气、地热或其他工业过程的废热）中提取热量，并输出高达 165°C 的热量。把温度提高 40 至 60°C 的热泵通常具有 300-400% 的效率。值得注意的是，没有其他加热技术的能源效益可以超过 100%，这使热泵成为一条特别具有成本效益的电气化路径。

至于高温工艺，热电池可以提供高达 1700°C 的热力，使其足以满足中国制造业超过三分之二的加热需求。热电池含有高比热容的储热材料，该材料能在高温下抵抗化学分解。储热材料被封装在高度隔热的外层中以减低热损失，某些热电池系统每天的热损失低至 1%。热电池内的电阻加热器将电力转化为热力，热力被储存材料吸收，然后可以在工业工艺需要用热时提取。

热电池的储存能力意味它们可以在与电网相连时或者在离网状态下提供稳定的热力。离网的热电池可以从专用可再生能源项目以批发价购电，以平衡因日夜循环或天气条件导致的波动。同样，对于连网的热电池，其可以在一天内最便宜的时候购电并储存以供其他时间使用。虽然中国的制造业都位于东部省份，那里未必有足够的土地建设新的离网可再生能源项目，但连网的热电池仍可为企业和公共事业公司提供最佳价格。此外，在电力紧缺时减少工业电力需求，配有热电池的直接电气化方式也能帮助调节电网、帮助电网融纳更多可变的可再生能源，削减高峰需求，降低实现洁净工业所需的与电网相关的资本成本。

在对电气化技术以及提供工业热力的其他技术进行技术经济比较后，我们发现在 100°C 以下，工业热泵是第二便宜的加热选项，其供热均化成本为 \$38 美元/MWh<sub>th</sub> (¥260 人民币/MWh<sub>th</sub>)，足以跟热电联产技术竞争，并显著低于天然气锅炉或电锅炉（如图 ES-

1 所示)。尽管燃煤锅炉目前的供热均化成本最低，但当考虑了 2030 年的预估碳价后，工业热泵成为低温供热的最低成本选项。对在在 100 至 165 °C 之间的供热需求，工业热泵的均化成本为约\$58 美元/MWh<sub>th</sub> (¥391 人民币/MWh<sub>th</sub>)，而且成本可能随进一步的研究和开发而更低。工业热电池的成本则处于两种热泵之间，为\$58 美元/MWh<sub>th</sub> (¥314 人民币/MWh<sub>th</sub>)，并能提供更高的温度。



**图 ES-1. 不同工业供热技术的供热均化成本 (包括资本支出、能源以及非能源的运营成本，以及预估的 2030 年碳价)**

注: 1) 为了更准确地比较设备运行期间的成本，本图表对煤炭和天然气技术加入了 2030 年的预估碳价，假设中国碳排放交易体系 (ETS) 将从电力部门扩展到包含工业部门。2030 年的碳成本是基于《2022 年中国碳定价调查》的估计，该调查涉及中国约 500 个行业代表 (Slater, Wang, and Li 2023)。本分析中使用的成本是 ¥130 人民币/吨 CO<sub>2</sub> (\$19.50 美元/吨 CO<sub>2</sub>)。2) 电气化技术 (包括电锅炉、工业热泵和热电池) 不含额外的碳成本，因为它们的能源来源是电力，已包含中在全国碳排放交易体系 (ETS) 内，碳价已反映在如今的电价中 (X. Yang and Lin 2023)。虽然 2030 年供电公司支付的碳价将高于目前的碳价，但中国电网的碳强度将会降低，洁净电力的成本也可能会降低，因此没有理由假设 2030 年的最终电价在纳入更高碳价后会更高。基于此原因，我们在本图表中没有加入电气化技术的潜在碳成本。

对比起燃煤技术，在考虑所需电力所产生的污染物排放下，工业热泵能显著减少五种污染物 (CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>) 排放，而热电池则能减少三种污染物 (SO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>) 排放。随着中国的电力系统越来越趋近零排放，电气化技术的污染物排放将逐步下降，并最终随中国电力系统的完全脱碳实现零污染。

制定良好的政策对于克服中国工业在实现电气化中遇到的经济、技术和基建挑战至关重要。对于工业能源购买者来说，中国的化石燃料的价格远低于电力成本。同时，电气化设备的供应有限也是一大障碍，特别是在高温工业热泵和工业热电池方面。此外，对现有工业设备的升级和电气化改造会有技术挑战，而且在设备自然更换周期之外进行改造亦可能带来额外的成本。

政策制定者可以考虑利用设备退税、设备更换补助和低息贷款来鼓励电气化，以降低采用这些技术所需的投资成本。加强既有的能源效率标准、排放标准和绿色公共采购计划亦可促进向直接电气化的转型。研究机构，如中国科学院运营的实验室，可以与私营企业合作推行研发项目，以推动早期技术的发展。同时，研发资金也可以不仅限于支持实验室规模的研究，还可以资助试点或示范工厂以对技术进行验证。创造煤炭和电力之间的竞争环境也很重要，这可以通过制定碳价或补贴洁净电力和支持电气化升级来实现。此外，跨省电力交易和改善中国的绿色电力证书系统也可帮助普及清洁电力。

中国工业加热工艺直接电气化有潜力大幅减少温室气体排放，为全国和全球带来环境效益。现有电气化技术提供了一条可行的路径，因此建立有效及友善的政策环境，鼓励采用电气化技术对中国的工业部门实现清洁化非常关键。靠着自身强大的工业能力，中国有潜力在实现其气候目标的同时引领清洁工业技术的发展和采用。