



央国企碳中和行动： 绿色电力助力工业脱碳进程





关于落基山研究所(RMI)

落基山研究所(RMI), 是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与政府部门、企业、科研机构及创业者协作, 推动全球能源变革, 以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所致力于借助经济可行的市场化手段, 加速能效提升, 推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

作者与鸣谢

作者

郝一涵、路舒童、江漪、李伟婷

除非另有说明，所有作者均来自落基山研究所。

联系方式

路舒童, llu@rmi.org

版权与引用

郝一涵, 路舒童, 江漪, 李伟婷, 央国企碳中和行动: 绿色电力助力工业脱碳进程, 落基山研究所, 2022

鸣谢

RMI感谢ClimateWorks Foundation等机构对本报告的支持。

目录

引言	5
1. 电气化的普及和绿电的应用将重塑工业部门能源消费结构	6
2. 绿电在工业部门的应用场景	8
2.1 绿电在绿氢生产中的应用潜力	8
2.2 绿电在电解铝行业的应用	9
2.3 绿电在钢铁行业的应用	10
3. 绿电在工业部门的规模化应用的挑战与发展趋势	12
4. 央国企将作为推动工业部门大规模使用绿电的关键领导者	15
5. 央国企碳中和行动建议	18
参考文献	20

引言

作为制造大国，我国的第二大碳排放源来自工业部门，其碳排放量占全国总排放量的28%，占全球工业部门排放量的44%。¹因此，中国工业部门顺利实现低碳转型，不仅有助于国家双碳目标的推进，更将对在全球范围内实现《巴黎协定》的气候目标作出重大贡献。

在过去的二十年里，中国工业部门通过节能及能效提升等手段，在脱碳方面取得积极进展。自2005年到2019年，中国工业部门已实现碳排放强度下降57.8%。²根据国际能源署预测，在承诺目标情景下，到2050年，中国工业部门二氧化碳排放量预计会比2020年减少近75%。³但目前，随着见效快的节能及能效提升项目在工业部门的普及率进一步提升，工业脱碳进程已进入深水区。想要突破这一脱碳瓶颈期，加快实现2050的减排目标，工业部门需积极探索新的脱碳路径。

使用绿电是降低碳足迹、实现碳中和最直接且重要的途径之一，工业部门中的各类企业也逐渐开始结合自身的生产运营情况布局绿电。部分工业部门央国企在绿色电力的使用上进行了初步探索，直面工业企业用电量大、对生产成本敏感度高等阻碍绿电使用和推广的挑战，为推动实现国家碳中和战略、探索工业部门脱碳路径起到了引领和表率作用。央国企的行动必将进一步推动绿电交易机制的完善，为规模化使用绿电创造更优条件，加速推动工业部门的脱碳进程。

本报告立足于重工业部门央国企，以绿氢、电解铝、钢铁产业为例，对绿色电力在重工业部门脱碳减排过程中的重要应用场景进行阐释，总结了绿电在未来重工业部门应用的三大挑战和三大趋势，并对央国企未来的绿电采购行动提出了建议。

1. 电气化的普及和绿电的应用将重塑工业部门能源消费结构

绿电在工业部门的规模化应用离不开匹配的应用场景作为基础，电气化的普及将加快重塑工业部门能源消费的方式，降低工业生产对化石能源的依赖，为绿电的使用提供更多场景。

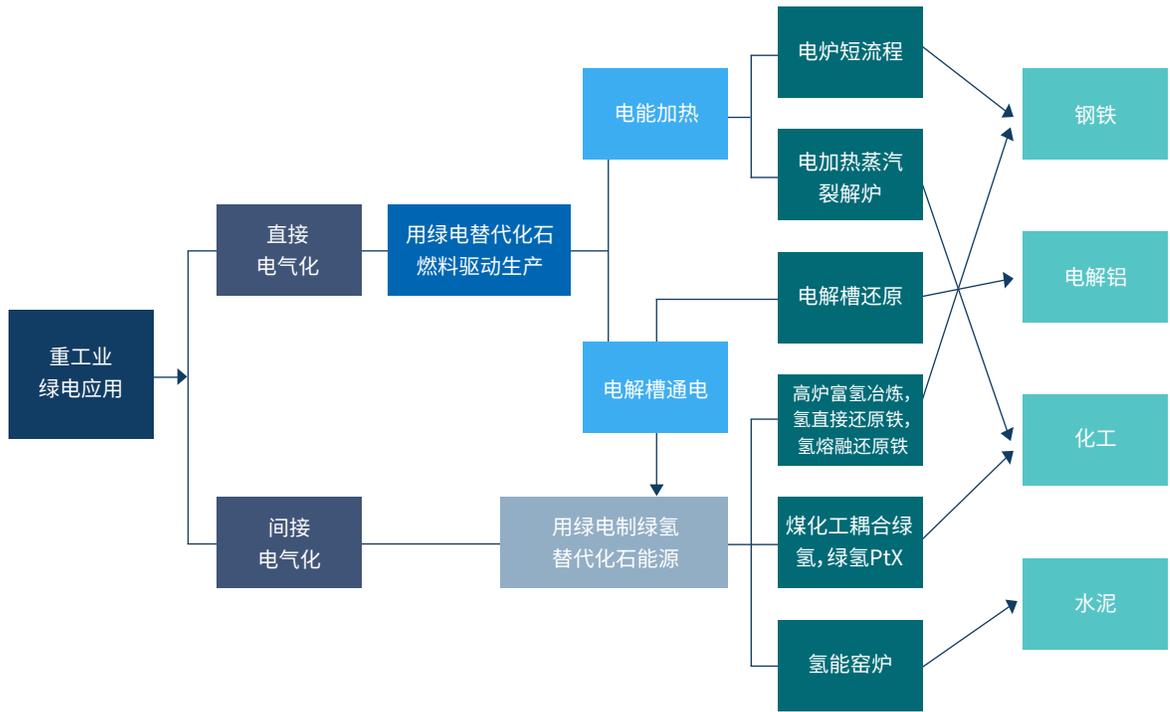
目前，在中国工业部门能源消费中，煤炭比例持续缩低，电气化水平显著提升。据统计，2020年工业部门电气化率已经达到了26.5%。⁴未来，中国将更快迈入更高电气化水平的阶段，工业部门电气化率有望在2050年进一步上升至51%。⁵随着工业电气化率的不断提高，绿色电力在工业领域规模化应用的基石也随之愈发稳固，对加速工业脱碳起到了至关重要的作用。

工业电气化可分为直接电气化和间接电气化。直接电气化是指在工业生产过程中以电力替代煤炭、石油等化石能源的消费，该方法适用于中低温度要求的工业领域。间接电气化，指的是当难以直接运用电能代替工业生产中使用的化石能源时，譬如在由化石燃料支撑的高温要求的工业生产过程中，间接电气化得以在电能的基础上制造出更为清洁的工业燃料或原料，再将其应用在工业生产中。电气化使得电能工业能源总消费中的占比显著提高，叠加电力系统脱碳和清洁燃料或原料的使用，将大幅减少工业部门对化石燃料的依赖，加速减排脱碳。

如图表1所示，在直接电气化中，绿电可以通过两种方式来替代化石燃料驱动生产过程。首先，工业生产流程及化学反应所需要的温度可以通过绿电加热来提供，这包括在钢铁短流程工艺中所使用的电炉技术，及化工行业中所使用的电加热蒸汽裂解炉。其次，在工业领域运用电解技术生产时可通过绿电来驱动电解槽，常见的电解槽还原氧化铝的制铝工艺就是其中一种做法。而在间接电气化中，绿电可作为最基础的生产资料用于驱动电解槽生产零排放的绿氢，再将绿氢用于工业生产中，由此来替代化石能源。目前，绿氢已经可以作为替代运用于包括钢铁、化工、水泥等多个生产场景中，这其中包括在水泥生产中以绿氢为燃料的氢能窑炉。未来，随着绿氢产业链的完善以及工业技术的进步，绿氢在工业领域将迎来更大的发挥空间。

随着电气化率进一步提高，工业部门对绿色电力的需求也将迎来显著提升。根据落基山研究所的预测，在2050年的零碳情境下，终端电力消费将达15万亿度，其中工业直接电气化和制氢和合成氨用电占比将达70%，⁶若想实现零碳，则这部分用电需依靠绿电，届时对绿电的需求将达到10.5万亿度。

图表 1 工业电气化场景及绿电应用潜力



2. 绿电在工业部门的应用场景

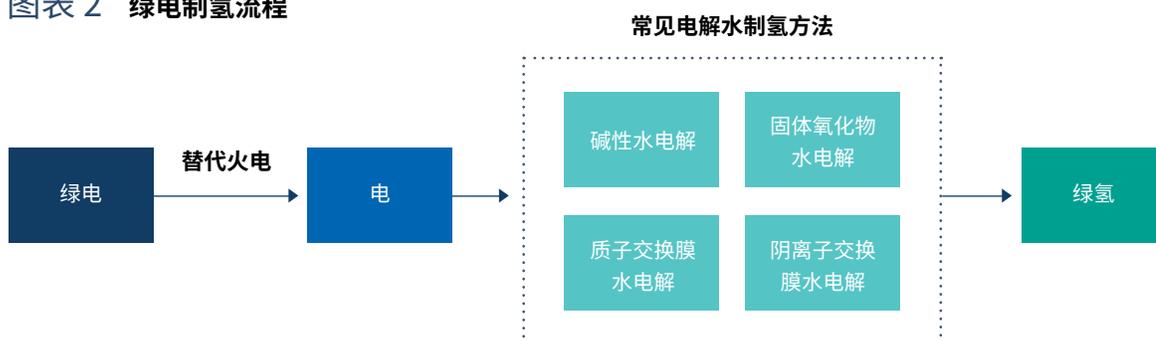
在电气化的基础性加持下，绿电在各个重工业行业的应用场景中都有能力扮演起重要角色。本报告将聚焦绿氢、电解铝、以及钢铁这三个行业，详细说明绿电在其中的应用潜力、挑战及政策引导方向。氢能在工业领域应用广泛，而绿氢的生产离不开绿电，因此工业部门未来对于绿氢的需求增长将会带动大量绿电消费。而电解铝作为有色行业中的重要一环，其生产中的碳排放主要来自于电力使用，因此它在通过绿电脱碳方面展现出最大的潜力。与此同时，考虑到钢铁行业碳排放量在工业中占比最大，且终端消费侧对于绿色钢铁的需求已实现快速增长，因此，绿电在钢铁行业中的应用对于整个工业部门脱碳和钢铁行业的未来发展都具有极高的价值。

2.1 绿电在绿氢生产中的应用潜力

以绿电为原料制作的绿氢是新兴的低碳工业原料。氢是重工业部门的重要生产资料之一，由于它具备强还原性，因此在钢铁和化工行业中都拥有广泛的应用潜力。当前，中国氢气绝大部分由化石燃料制取，并根据制氢装置是否配备碳捕获与储存技术（CCS）将其区分为灰氢或蓝氢。由于灰氢和蓝氢都取自化石燃料，它们的生产过程中都将产生不同程度的碳排放。而相较于灰氢和蓝氢，绿氢是由绿电供能电解槽制得（见图表2），因此可以实现零碳排放。但在2021年，电解水制氢仅占中国氢气产量的1.42%，⁷其中通过绿电供能电解槽生产的绿氢占比更是微乎其微。

随着重工业部门脱碳压力逐步提升，绿氢的使用逐渐被重视。根据国际能源署的预测，到2050年，全球实现二氧化碳净零排放将需要大约5.2亿吨的低碳氢，其中60%将来自电解制氢。⁸根据落基山研究所预测，2060年中国绿氢将占氢能需求的75%-80%，即达到0.75-1亿吨/年。⁹由此可见，我国绿氢的市场潜力还有待进一步解锁。

图表 2 绿电制氢流程



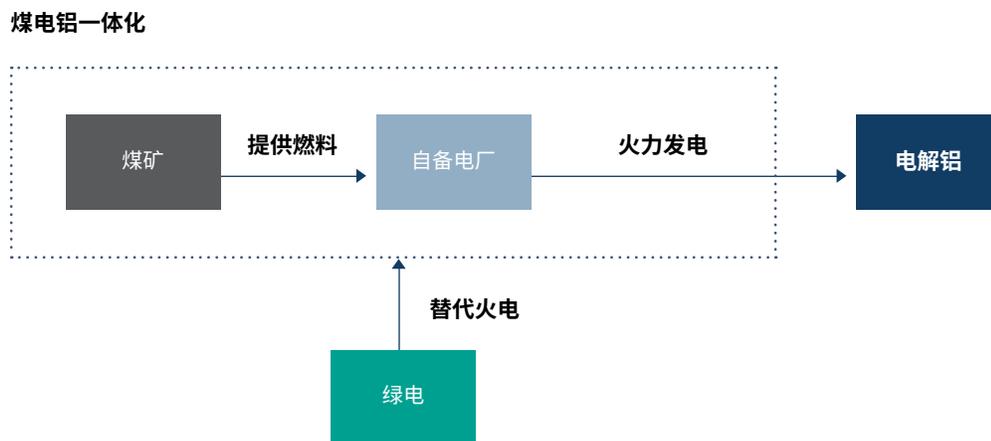
虽然在政策支持下，绿电制氢发展迅速，但高昂的生产成本是阻碍绿氢在重工业行业实现规模化应用的主要挑战之一。相比起成本在30元/千克以上的绿氢，灰氢和蓝氢的成本区间在11~20元/千克之间，更具有经济性优势。¹⁰由于工业企业普遍对成本十分敏感，目前大多数企业还是偏向于选择低成本的灰氢。由于在绿氢的成本结构中，电力部分占到了生产成本的60%~70%，¹¹未来绿色电力价格的发展趋势是决定绿氢使用成本且推动绿氢发展的重要条件。根据落基山研究所的分析，当氢能的终端使用成本低于12.5元/千克时，才能与以化石燃料为基础的冶炼路线成本持平。¹²但目前中国绿氢成本约为16.0元/千克，高昂的使用成本对工业低碳转型造成了一定经济上的阻力。¹³

在政策引导作用下，已经有多个央企在绿氢的发展方面进行布局，并成为推动绿电制氢在工业化生产运用的主要领导者。发展绿氢已成为国家能源转型中的重要战略之一，并在政策层面获得了大力支持。为加快绿色低碳氢能的发展，国家制定了《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》，明确了可再生能源制氢的战略地位，推动可再生能源制氢技术的发展和广泛应用，并设立了到2030年形成较为完备的清洁能源制氢及供应体系的目标。为保证大量的绿电供应，多个“绿电+绿氢”一体化基地已完成落地。以正在建设的中国石化首个万吨级绿氢示范项目为例，预计在2023年建成投产后，其光伏电站年均发电量可达6.18亿千瓦时，生产的绿氢将部分替代现有的天然气制氢，每年预估可减少二氧化碳排放48.5万吨。¹⁴

2.2 绿电在电解铝行业的应用

电力消费的碳排放占到了电解铝生产的60%以上。¹⁵中国在全球铝行业中占有重要地位，2020年中国原铝产量占全球产量57%。¹⁶但极高的产量也推高了我国电解铝行业的碳排放——全球铝业生产的碳排放大约70%都来自中国。¹⁷这一现象与中国电解铝行业使用的电力主要源自于火电息息相关。首先，由于中国火力发电量占比超70%，电解铝企业通过外购网电制铝将产生大量碳排放。再者，考虑到电力是该行业最重要的能量来源，铝业企业为追求经济性，常以自办自备煤电厂或参股电厂的煤电铝一体化模式为发展战略（见图表3），通过压低电力成本来提升企业竞争力。据统计，2020年中国原铝生产中超过一半的二氧化碳排放来自自备煤电厂。¹⁸

图表 3 绿电制电解铝流程



电解铝行业的脱碳转型将面临打破固有生态圈和产能增长带来的双重挑战。尽管使用绿电来替代火电能让电解铝生产过程中的二氧化碳排放量实现快速下降，但若想推行绿电，则要求拥有电厂的电解铝企业打破现有煤电铝的一体化，提前退役自备煤电厂，并要求外购网电的电解铝企业采购绿电。对于已为煤电铝一体化模式进行固定资产投资的企业来说，这将会带来运营和成本上的挑战；对于依赖网电的企业来说，绿电的溢价则可能会给企业带来额外的压力。此外，全球对电解铝的需求也呈现出日益增长的趋势。据预测，到2030年，全球对铝的需求将增长近40%，其中，工业部门的需求将从2020年的86.2吨增加到2030年的119.5吨。¹⁹未来发展对铝材需求的增加同时也意味着碳排放总量的增长。如要消除持续增长的产能所带来的碳排放，必须将其电力消费都转为零碳的绿电。

为充分释放绿电的减排潜力，政策和产业端都正在鼓励越来越多的电解铝企业推广绿电在行业生产的应用。

为了大幅提升绿电在未来电解铝生产中的使用比例，中国不仅从绿电政策上给予电解铝行业企业要求和优惠，也对行业的产业布局进行了优化调整。在政策方面，国家发改委出台了《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》，提出对使用绿色电力的电解铝企业给予相应的电价优惠。据文件规定，“电解铝企业消耗的非水可再生能源电量在全部用电量中的占比超过15%，且不小于所在省（自治区、直辖市）上年度非水电消纳责任权重激励值的，占比每增加1个百分点，阶梯电价加价标准相应降低1%。”同时，《工业领域碳达峰实施方案》也要求“到2030年，电解铝使用可再生能源比例提至30%以上。”在产业布局上，我国电解铝产业布局正在经历“北铝南移、东铝西移”的过程——自2017年以来，电解铝产能正逐渐从新疆、山东为主的火电区域向云南为主的水电区域转移，目前云南已吸引众多国企和央企布局水电铝项目。神火股份、魏桥铝电、中国宏桥等龙头企业纷纷向西南地区转移产能。云南依托其得天独厚的水电资源，致力于打造绿色铝谷，已对包括云南绿色铝创新产业园的203万吨绿色水电铝项目在内的水电铝加工一体化项目进行布局。²⁰随着电解铝产业逐步向清洁能源资源丰富区域转移，未来涵盖风、光伏发电技术的清洁能源大基地也将进一步加速产业脱碳。

2.3 绿电在钢铁行业的应用

钢铁行业减排对于中国实现双碳目标意义重大。钢铁行业能源消费量大、碳排放量大，是实现国家双碳目标的重点行业。我国是全球最大的钢铁生产国，2021年粗钢产量约为1,033百万吨，约占全球一半，²¹其巨大的产量也拉高了能源消费和碳排放量的基数。2019年，中国钢铁行业二氧化碳排放量15.74亿吨，²²占全国二氧化碳排放总量的17%，²³是重工业行业中排放量占比最大的行业，因此，钢铁行业也成为首批需进行温室气体排放核查和报告的八大重点行业之一。²⁴

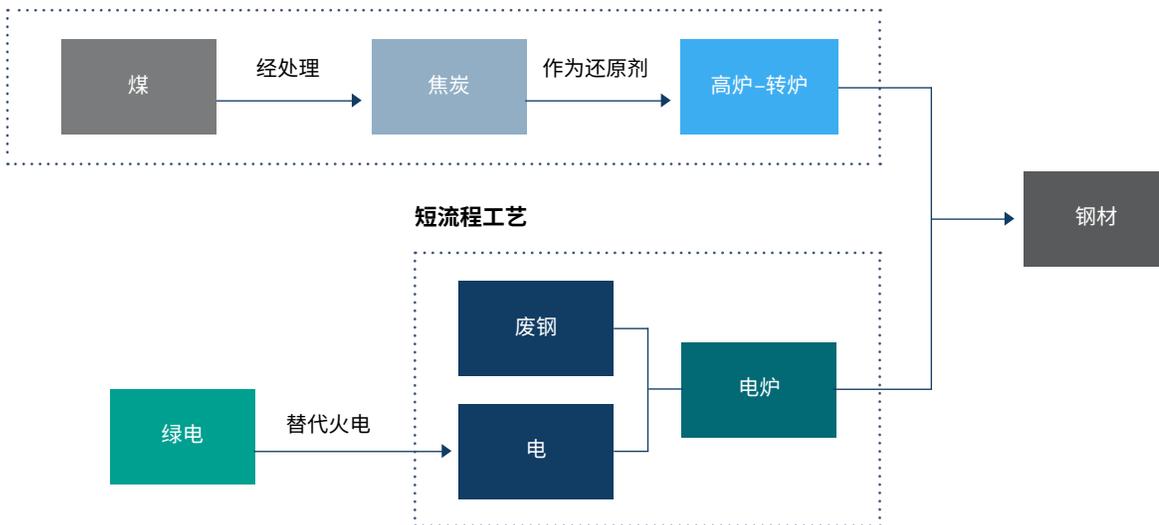
绿电在钢铁行业绿色转型中的潜力主要体现在钢铁企业向短流程转型的过程中（图表4）。在短流程炼钢工艺中，电力是主要的能源来源，因此短流程工艺的碳排放将取决于电力的清洁程度。短流程吨钢碳排放约为0.6吨二氧化碳，长流程则为2.0吨二氧化碳，因此短流程工艺可比长流程工艺降低70%左右（按照0.9吨CO₂/MWh计算）的吨钢碳排放量。²⁵短流程制钢在美国和欧洲已分别占比70%和41%左右，²⁶是已被验证的极具可行性的钢铁行业电气化途径。尽管在我国的钢铁行业中，目前短流程仅占国内生产总量的10%左右，²⁷但若这部分全部使用绿电，这10%的短流程产能仍可避免3000万吨二氧化碳排放量的产生。ⁱ

根据落基山研究所的零碳图景，未来，当中国钢铁企业在中远期转向短流程工艺时，短流程钢预计将在2050年上升至60%，即达到3.7亿吨，²⁸届时，绿电减排作用将更加显著。

ⁱ 使用2021年粗钢产量1,033百万吨、短流程占比10%、短流程吨钢耗电500千瓦时、当前电网排放因子0.5810tCO₂/MWh（参考生态环境部印发《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》）计算

图表 4 钢铁生产工艺对比

长流程工艺



在政策端推动和消费端强劲需求的双重推动下，钢铁行业应用绿电进行转型的速度正在逐渐加快。正因钢铁行业减排对于中国至关重要，在进入“十四五”后，多部政策点名要求推动钢铁行业进行产业结构优化和清洁能源替代。在国家层面上，《2030年前碳达峰行动方案》和《“十四五”工业绿色发展规划》均明确要求提升清洁能源在钢铁行业中的应用，并提升供应终端用能电气化水平。此外，《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》明确指出发展电炉炼钢为主要任务，而《工业领域碳达峰实施方案》则提出到2025年短流程炼钢占比达15%以上，到2030年短流程炼钢占比达20%以上。作为蝉联前两名的粗钢产量大省，河北及江苏的“十四五”工业绿色发展规划也同步提出将电炉短流程工艺作为钢铁行业低碳转型工程之一。除政策的加持外，消费端对绿钢的需求也持续刺激钢铁行业进行转型。宝马公司计划从2025年开始，采购二氧化碳排放量比传统钢铁少95%、并且无需化石燃料的绿色钢铁，²⁹并于2022年8月与河钢集团签署《打造绿色低碳钢铁供应链合作备忘录》，逐步采用基于绿电和电炉工艺生产的绿钢。³⁰瑞典的H2绿色钢铁公司(H2 green steel)于近期宣布其已签署跨度超5-7年、年超150万吨的合同，侧面反映了消费端对于绿色钢铁需求的增长。³¹另外，作为中国绿色钢铁的先行者，宝武集团早在2021年1月就率先发布双碳目标时间表，并提出将在新疆建设世界首条钢铁短流程“零碳工厂”示范项目。³²

3. 绿电在工业部门的规模化应用的挑战与发展趋势

通过以上三个工业行业的应用场景不难看出，虽然绿电在工业领域的运用已经具备了一定的基础和实践，且拥有巨大潜力，但工业部门的企业还缺乏大量使用绿电的动机，实现其规模化应用仍面临着挑战。

挑战一, 在现行机制下, 以经济可行的方式大规模且持续获取绿电仍存在挑战。因为能源消耗量大, 且下游消费对于重工业产品的价格敏感度较高, 工业企业对于电费等基础生产成本的控制十分严格。而为了补偿可再生能源开发企业、体现环境价值, 在当前的绿电交易机制下, 绿电的交易通常伴随着“绿色环境溢价”, 价格普遍比火电更高。这样一来, 大规模使用绿电将会抬高企业的生产成本, 很多企业因此选择继续依赖火电来进行生产。另外, 绿电与工业产能的空间错配进一步增加了难度。当前绿电资源集中在西北地区, 而工业产能主要集中在东部沿海地区, 由于空间的不匹配, 跨省跨区的绿电交易十分困难, 使得企业的绿电需求难以得到满足, 或需付出高昂的成本。图表5总结了中国企业购买绿电的五种方式及各方式在重工业行业的适用性:

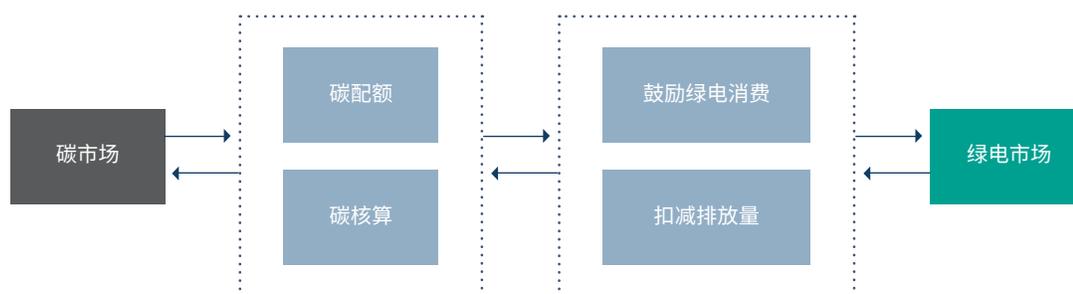
图表 5 企业购买绿电的五种机制

	描述	经济性	可持续性	采购规模	重工业行业适用性
场内分布式	企业在场内直接投资安装分布式光伏或分散式风电发电设备, 进行自发自用、余量上网; 或与可再生能源开发商以合同能源管理模式(EMC)开展分布式项目合作。	企业自持: 需要支付一定的前期设备投资和后期运营费用。 EMC模式下: 企业无需投资; 开发商租赁企业场地, 并以长期折扣电价的形式补偿企业, 通常为电网代购价格的15%。	高, 企业通常可持续获得20-25年的优惠绿电; EMC模式下需注意环境权益的所属权。	小	中, 尽管工业工厂占地面积大, 但通常由于厂房结构特殊, 可以进行分布式发电设备安装的场地有限。
隔墙售电	用户通过市场化交易从处于同一配网的分布式项目购买绿电。	企业可在输配电费上大幅节省开支。	低, 当前仅有一例试点展开。	不确定, 取决于所处配网	不确定
直接投资	企业直接投资可再生能源发电集中式项目, 并拥有部分项目所有权及相应环境权益。	企业需要承担前期投资及相应运营成本; 项目运营情况存在不确定性。	高, 企业可在项目运行期间获得绿电及相应环境权益。	大	高, 企业可更好地结合自身用电需求, 支撑如绿电就地制氢等一体化项目的发展。

绿电交易 (直购电)	用户与可再生能源发电企业（或由售电公司、电网企业代理）之间直接签订购电合同。	企业能够锁定一段时间内的绿电价格，帮助企业对冲电价波动风险。但需支付额外的环境溢价。	中，当前绿电交易并未于全国范围常态化开展。	大	高，重工业企业的用电特性使其能够在绿电交易中拥有更大话语权，从而达成更合适的交易。
绿证	由国家可再生能源信息管理中心针对每兆瓦时集中式风电、光伏上网电量颁发的证书，用以证明其所带有的绿色环境属性。	单纯为环境权益支付额外费用。小额交易价格较高，平价绿证约为30-50元/张，大宗交易可能为企业获取更大优惠。	高，绿证购买不分时间、地点，灵活度高。	大	较低，重工业企业需求量大，因此若通过购买绿证方式满足绿电需求会增加额外支出。

挑战二，绿电消费所产生的减碳价值未能被充分体现。全国碳排放权交易市场于2021年7月正式启动，目前，除发电行业已被纳入全国碳排放权市场的履约周期外，我国还要求石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、民航行业的重点排放企业进行温室气体排放的核查和报送。然而，当前国家针对这八大行业已实施的核算指南中，并未对企业绿电的使用如何扣减碳排放进行明确的规定，所以企业通过消费绿电所产生的减排量目前还不能在温室气体排放的核算中得到体现。因此，由于绿电市场和碳市场缺乏直接联系、绿电消费不能清晰地体现企业在碳减排中作出的努力，消费绿电难以成为企业优先考虑的减排方式。此外，除对绿电的直接消费外，企业减排还可以通过购买绿证来实现。但由于绿证与存量核证自愿减排量（CCER）的环境权益存在重复计算的问题，因此通过购买绿证所带来的减排效益在国际上的认可度有限，进一步打击了重工业企业消费绿电的积极性。未来，伴随着碳市场的逐步扩大，预计将有更多重点排放行业被纳入其中。而要发挥绿电作为重要减排手段之一的关键作用，则需要尽快实现绿电市场与碳市场之间的进一步衔接（图表6）。

图表 6 绿电市场与碳排放权市场衔接



挑战三，在工业工艺电气化过程中还存在资产搁浅的风险。虽然以绿电为基础的电气化进程是工业部门脱碳的必经之路，但电气化的提升也意味着工业生产中工艺流程的转换。如此一来，原工艺流程下的资产面临着加速贬值的风险。以钢铁为行业例，中国高炉设施投产后平均时间约为13年，还未达到正常使用年限的三分之一。³³因此，在从以高炉技术为主的长流程向短流程生产转换的过程中，这些资产的搁浅风险给重工业企业资产管理和转型融资带来了挑战。以电解铝行业为例，据统计，中国65%的铝业企业都拥有自备电厂，然而自备电厂100%

为燃煤发电厂。³⁴在不断提升绿电使用比例、打破煤电铝一体化生态圈的过程中，铝业企业的自备电厂将被闲置，造成固定资产浪费。

尽管面临着种种挑战，但在意识到挑战存在的前提下，市场各方正在积极开展行动，努力克服现有的困境。接下来，本节将总结工业企业在应对这些挑战时市场上出现的三大趋势。

趋势一：绿电应用与产业布局结合发展。在绿电消费上，空间错配和成本控制的问题给工业企业带来了经济方面的压力，这意味着推动绿电在工业领域实现大规模的应用，需要将工业产能集中地区与新能源资源丰富的地区重新匹配。目前，工业产能向新能源丰富地区的迁移以及发展分布式新能源项目是两种具备高可行性的解决方案。就产能迁移而言，如前文所述，通过将电解铝的产能从北边移至水电更为丰富的西南边，既能保证绿电在生产中的大量供应，也为企业节约了电力成本。就发展分布式新能源项目而言，相比起主要分布在西部和北部地区的集中式新能源项目，分布式项目可以突破地理的限制，在靠电力消费端更近的工业园区就地开发。在国家最新发布《“十四五”可再生能源发展规划》中就提出了“在中东南部地区重点推动风电和光伏发电就地就近开发。”鼓励通过发展分布式新能源，使绿电更贴近工业产能集中地。

趋势二：绿电消费与碳市场将会进一步结合，帮助工业企业减排。碳市场作为激励企业减排的有效市场调节机制，与绿电市场实现进一步融合才能为工业企业提高绿电消费带来更多的动力。企业可通过配额清缴或使用核证自愿减排量（CCER）抵消来完成碳市场的履约。

目前，电解铝行业的《企业温室气体排放核算方法与报告指南铝电解工序（征求意见稿）》，和水泥行业的《企业温室气体排放核算方法与报告指南水泥熟料生产（征求意见稿）》已经将绿电使用纳入碳核查过程中外购电的排放量扣减计算，这意味着未来绿电使用将能够帮助企业减少其实际为完成碳市场履约所需要使用的碳配额。

此外，CCER作为补充机制也可被用于碳市场的履约。自全国碳市场启动以来，国家及省级层面都在致力于进一步完善CCER机制。北京绿色交易所于2021年开始推进全国温室气体自愿减排注册登记系统和交易系统建设，系统的建设也是CCER“重启”工作的支撑性的基础设施建设工作之一，目前已接近尾声。³⁵除国家层面外，以浙江为代表的部分省份已对绿电交易和CCER的环境权益归属作出规定：“参与此次绿色电力交易，结算完成的绿色电力交易电量不重复认购绿证、核证自愿减排量（CCER）或参与其他减排指标相关的交易”。³⁶

未来，政策将在更多重点行业中明确绿电对排放量的扣减，并结合当前可再生能源发展趋势，待CCER备案签发的再次重启时更进一步明晰环境权益归属，使得绿电的减碳价值在碳市场中得到更好的体现，从而进一步激励工业企业对绿电的使用。

趋势三：绿电应用与转型金融应共同发力。绿电在重工业不同场景的应用能助力高碳行业的转型，但比起绿色资产，其转型往往面临着更大的风险，而转型金融正是为支持高碳资产的转型应运而生的。绿电在重工业行业的运用除了需要大量绿色投资来支持电气化和绿氢的基础设施建设，与此同时，也将迫使许多尚在有效期内的高碳资产被提前淘汰，成为搁浅资产。而转型过程中带来的大量搁浅资产，同样需要资金支持其退出。以钢铁行业为例，长流程转短流程会导致高炉提前淘汰，造成煤炭资产的加速贬值。为了解决工业企业在转型中对搁浅资产的担忧，转型金融这一概念开始崛起，市场上开始出现了越来越多的适合高碳行业的金融产品。目前可持续挂钩债券是市场上支持重工业转型的主流金融产品。不同于一般的绿色债券，可持续挂钩债券更符合重工业企业的需要，因为其募集资金通常不投向特定项目、资产或活动，而是用于一般用途，只是更看发行人的承诺是否低碳绿色，且需设有关键绩效指标（KPI）。³⁷据报道，柳钢集团在去年成功发行了国内钢铁行业中第一笔可持续发展挂钩债券。³⁸未来，随着多样化需求的上涨，市场会开发出越来越多样的转型金融产品，比如转型基金、转型保险，来支持绿电在工业转型中的应用。

4. 央国企将作为推动工业部门大规模使用绿电的关键领导者

中国作为世界工厂，工业生产是推动中国经济发展的主要动力。2021年，工业部门贡献了中国GDP的32.6%，³⁹是占比最高的部门。自中国工业发展之初，央国企就承担了建立起完整工业体系的责任，对中国经济和国家战略有着重要意义。尽管随着改革开放的深入，非国有经济有序进入，在重工业行业的头部企业中仍以央国企居多（图表7）。在中国工业部门亟需转向绿色低碳发展的今天，央国企依旧应该发挥更强的领导力来应对转型过程中面临的挑战，成为重工业行业低碳转型的推动者和领导者。

图表 7 2020中国主要重工业行业头部央国企产量占比

行业	企业	排名标准	产量	合计占当年全国产量 ⁴⁰
钢铁	宝武集团	粗钢(万吨)	11,529 ⁴¹	20%
	河钢集团		4,376 ⁴²	
	鞍钢集团		3,819 ⁴³	
水泥	中国建材集团有限公司	水泥熟料产能(万吨)	40,071 ⁴⁴	37%
	安徽海螺水泥股份有限公司		20,906 ⁴⁵	
	华润水泥控股有限公司		6,495 ⁴⁶	
化工*	中国石油化工集团有限公司	乙烯(万吨)	1,206 ⁴⁷	85%
	中国石油天然气集团有限公司		635 ⁴⁸	
电解铝	中国铝业(含云铝)	电解铝(万吨)	610 ⁴⁹	28%
	国家电力投资集团		250 ⁵⁰	
	酒泉钢铁(集团)有限责任公司		165.4 ⁵¹	

*化工行业产品种类繁多，此处以乙烯为排名依据

推动重工业央企加速转型，积极开展绿电尝试的驱动力主要来自于以下两个方面：

I. 国际市场的驱动

由于国际消费市场对产品全生命碳足迹所提出的要求逐渐提升，工业企业需加速减排以保证其产品在全球市场的竞争力。例如，欧盟于2022年6月底通过的碳边境调节机制（CBAM, Carbon Border Adjustment Mechanism）要求进口或出口的高碳产品缴纳或退换相应的税费或碳配额，主要的重工业产品：钢铁、铝、水泥、化肥、有机化学品、氨等产品皆被纳入考核范围，给这些产品的生产企业施加了合规压力。

II. 国内市场的预期

央国企是支撑中国重工业行业发展的主体，也是中国实现气候目标过程中最具影响力、起到表率作用的实体，社会各方对于央国企在重工业行业践行其领导力给予了较高预期。2021年，国资委发布了《关于推进中央企业高质量发展做好碳达峰碳中和工作的指导意见》，强调了央企在推进工业绿色升级、建立低碳化的绿色工厂、提高工业电气化水平，以及加强绿色低碳技术的革新和布局中的关键作用，并对央企制定实施碳达峰方案作出了部署。2022年，国资委发布了《中央企业节约能源与生态环境保护监督管理办法》，要求将中央企业节约能源与生态环境保护考核评价结果纳入中央企业负责人的业绩考核。

为尽快适应国际市场的新要求及响应国家低碳转型的号召，许多工业部门央国企开始分步骤地进行规模使用绿电的尝试。首先是逐步提升电气化率。比如，在2018-2020年间，国家电网在钢铁、铸造、玻璃、陶瓷等重点工业行业积极推广工业电锅炉、电窑炉等技术，实施电能替代项目2.5万个，完成替代电量1145亿千瓦时。⁵²国家电投黄河公司也与青海油田签署战略合作协议，推动青海油田在用能替代上加速向电气化、无碳化转型。⁵³在电气化的基础之上，工业部门央国企也作出了绿电应用的引领性的尝试，以实现进一步的减排（图表8）。

图表 8 工业部门央国企绿电使用案例⁵⁴

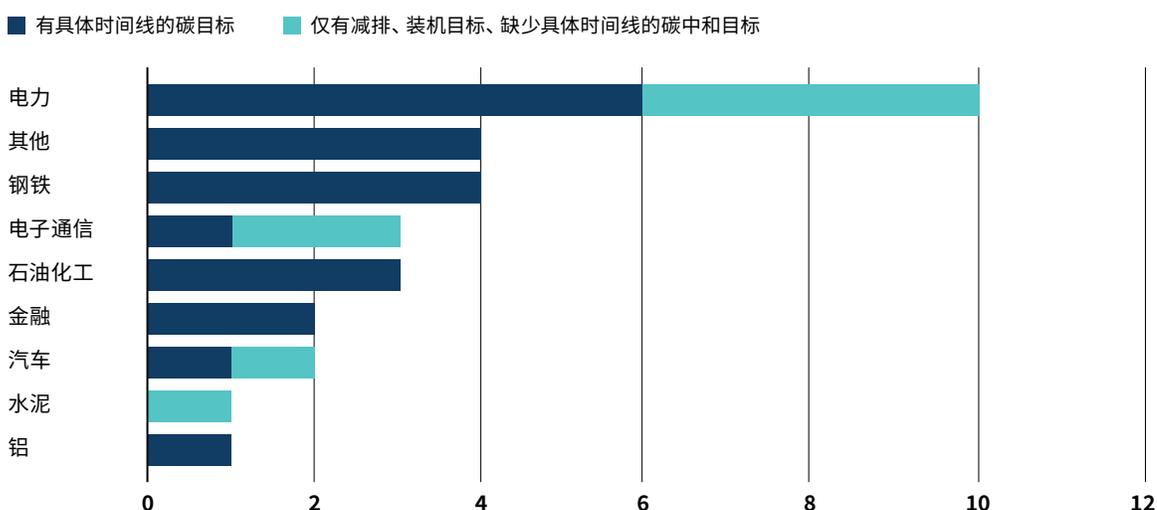
行业	绿电使用案例
宝武集团	宝武“自发绿电应上尽上”项目群： <ul style="list-style-type: none">2021年6月，97.2兆瓦的宝钢股份运行中心屋顶分布式光伏项目并网发电2021年12月，30.6兆瓦湛江钢铁厂房屋顶分布式光伏并网发电2021年12月，宝武铝业光伏项目投运，预计年提供1000万千瓦时电能
太原钢铁集团	2022年，太钢集团分别于同煤电力晋控新能源、华能山西华能新能源签订2022年绿电直接交易协议，年度绿电采购不少于11亿千瓦时，占外购总电量18%
内蒙古包钢钢联股份有限公司	2022年7月，包钢首个6兆瓦屋顶光伏发电项目投运，项目位于包钢薄板硅钢厂房屋顶，年平均发电量预计达400万千瓦时，全年可节约电费420万元
河钢集团有限公司	2022年，河钢集团完成首次绿电交易，成交量2.7亿千瓦时

<p>国家电投集团铝电投资有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 国电投铝电(宁夏)氢能应用有限公司依托宁东地区丰富的新能源资源和现代煤化工、石油化工产业基础,建设高效的可再生能源制备绿氢示范项目,生产出的氢气纯度可达99.999%,可供宁东及周边地区精细化工企业、电子产品加工企业等使用 • 2022年3月17日,国家电投铝电公司组织青铜峡分公司、宁东分公司两家电解铝单位,与福建公司、五凌电力在宁新能源单位和中卫新能源公司完成宁夏电解铝行业首笔绿电交易,成交电量900万千瓦时
<p>中国铁塔股份有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2022年8月,山东铁塔16个市分公司都获得了国家可再生能源信息管理中心颁发的绿色电力交易证书。全省共购得绿色电力160万千瓦时。此外山东铁塔还参与了2021年第四季度绿色电力交易,并在当次交易中成为山东成交量最大的绿电用户
<p>中国铝业股份有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2022年7月,中铝青海与省内23家新能源电站签订中长期框架协议,交易总电量31.7亿千瓦时,占全省总量的50.05%。并与7家新能源企业成功达成省内首次绿色电力交易,成交电量4750万千瓦时,占全省成交总额的79.1%
<p>中国海洋石油集团有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2022年,中海油惠州石化有限公司与中海油电力投资有限公司达成2022年度1亿千瓦时绿电交易,包括年度长协3800万千瓦时(占广东2022全年长协绿电交易量14.7%)、月度竞价合同6200万千瓦时 • 2021年12月,中海壳牌石油化工有限公司(合资)与中国海油电力投资有限公司签署100万千瓦时绿电交易合同,成为惠州首笔绿电交易,约占2021年12月当月广东绿电市场交易量17% • 2022年1月,海油发展珠海冷能利用分公司下属中海油工业气体(宁波)有限公司与华能(浙江)能源开发有限公司达成1500万度绿电采购交易 • 截至2022年第一季度末,渤海油田秦皇岛32-6油田和曹妃甸11-1油田群的29个海上生产平台全部接通绿色电力供应,使用绿电量近2000万度。这是中海油天津分公司首次完成绿电市场化交易,也是中国海油目前完成的单次最大绿电交易量,交易总额达1.86亿度,可减排二氧化碳16.4万吨 • 2022年2月,中海石油舟山石化有限公司日前与国能浙江能源销售有限公司签署2700万千瓦时绿色电力交易合同,这是中海石油舟山石化完成的首单绿色电力交易
<p>中国石油化工集团有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2022年4月,荆门石化与国电长源电力公司蕲春赤东光伏电站完成1000万千瓦时绿电交易,并获得湖北省绿电消费认证 • 2021年,中石化投资近30亿在新疆库车打造全球最大光伏绿氢生产项目,包括300兆瓦、年均发电量6.18亿千瓦时的光伏电站 • 4月20日,江汉油田向湖北电力交易中心线上提报2022年绿色电力交易双边协议,经过平台审核,核准成交电量近6000万千瓦时,完成首次绿电市场化交易 • 2021年9月7日,燕山石化作为北京市首批绿色电力交易试点企业之一,通过跨省交易的方式,与山西新能源企业签署绿色电力交易合同,认购2021年9月至12月绿色电力4000万千瓦时,占北京市场总交易量42%,成为北京市最大绿色电力交易购买方 • 2021年9月7日,扬子石化作为江苏省首批试点企业之一,扬子石化-巴斯夫有限责任公司与中国广核新能源江苏分公司签署绿色电力交易合同,认购1.07亿千瓦时,交易有效期至2022年底,成为江苏省绿色电力交易中最大购买方
<p>中国石油天然气集团有限公司</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2022年初,中石油玉门东200兆瓦光伏发电项目投运,年发电量约4亿千瓦时;同时玉门油田160兆瓦光伏制氢示范项目落地,打造甘肃省氢能产业链链主企业重点示范工程

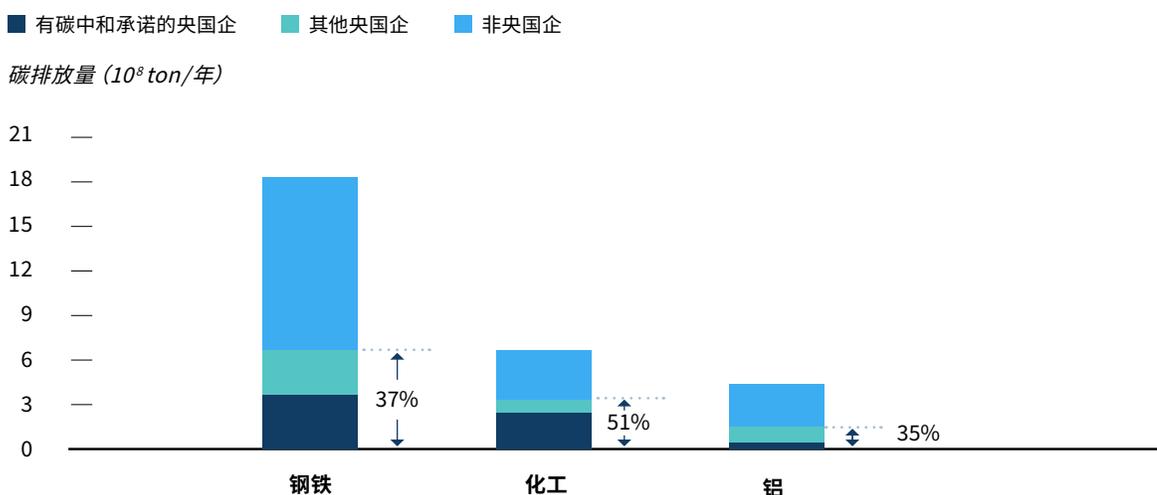
5. 央国企碳中和行动建议

当前，“双碳”目标已上升到国家战略目标，并被纳入“十四五”规划中。企业作为社会减碳的基础单元，已经纷纷开始制定减碳策略和行动计划。根据落基山研究所统计，目前已有超过33家央国企发布自身碳中和目标，其中有20家已制定详细行动计划及时间线（图表9）。另外，以钢铁、化工、铝为例，央国企可在其所在行业分别贡献37%，51%和35%（图表10）的减排量，比例相当可观。但从图中不难看出，并不是所有央国企均已作出承诺且提出明确碳减排目标，更多央国企的领导力和带动效果还有待进一步解锁。

图表9 央国企碳中和目标情况



图表10 央国企碳减排贡献潜力

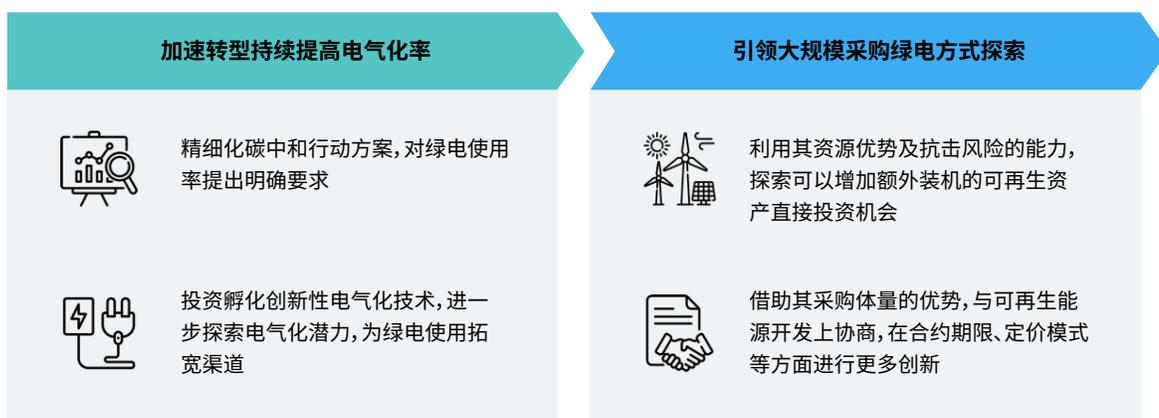


*图表9和10数据来自于落基山研究所统计

因此，央国企仍需持续发力，作出示范引领作用，积极探索重工业行业提高绿电使用的路径，以帮助加快推动整个行业的碳减排进程。重工业央国企普遍拥有包括财务和人力资源在内的丰富资源，并拥有较高的风险包容度，企业可以借助这些优势，大胆开展创新试点。我们建议央国企未来可以在提高电气化率和绿电采购模式创新两个方面同时发力：

- 在提高电气化率方面，央国企首先应保证自身有清晰的目标及行动计划，再凭借其资源调动的能力，开展相关技术的孵化及投资。央国企的碳中和行动在给同行业其他企业起到示范作用的同时，也将带动全产业链的减排转型。
- 在绿电采购模式创新方面，我们认为央国企可以首先关注参与门槛较高，但可带来更多绿色环境价值的直接投资模式，以增加全系统的绿色装机占比，帮助中国加速实现零碳电力系统的建设。另外，由于重工业的央国企自身用电需求高，在与可再生能源开发商的沟通过程中具有谈判优势，央国企可以借助此优势，与其他利益相关方一起，在购电协议上尝试更多创新，推动完善绿电交易机制，为更多企业参与绿电交易奠定基础。

图表 11 央国企行动计划方向建议



参考文献

- 1 IEA CO2 Emissions Data 2019
- 2 张春生, 积极推进工业领域碳减排, 2021, <https://cdo.developpress.com/?p=12310>
- 3 IEA, 中国能源体系碳中和路线图, 图3.11, 2021
- 4 中国电力企业联合会, 中国电气化年度发展报告2021
- 5 国家可再生能源中心 (CNREC), 中国可再生能源发展报告, 2019
- 6 能源转型委员会, 落基山研究所, RMI 2050 中国零碳图景报告, 2019
- 7 李婷, 刘玮等, 开启绿色氢能新时代之匙: 中国2030年“可再生氢100”发展路线图, 落基山研究所, 中国氢能联盟研究院, 2022
- 8 IEA, Roadmap to Net Zero, 2021
- 9 李婷, 刘玮等, 开启绿色氢能新时代之匙: 中国2030年“可再生氢100”发展路线图, 落基山研究所, 中国氢能联盟研究院, 2022
- 10 王彦哲, 中国不同制氢方式的成本分析, 2021, <http://www.zhgny.org.cn/Detail.aspx?newsId=8187&TId=345>
- 11 WEF report
- 12 陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 落基山研究所, 2021
- 13 李抒苒, 薛雨军, 王珮珊, 碳中和目标下的中国化工零碳之路, 落基山研究所, 2022
- 14 隆基氢能, 绿电+绿氢加速能源转型 隆基氢能入围中石化绿氢示范项目, 2022, <https://news.bjx.com.cn/html/20220511/1224329.shtml>
- 15 World Economic Forum, Aluminium for Climate: Exploring pathways to decarbonize the aluminium industry, 2020, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Aluminium_for_Climate_2020.pdf
- 16 杨木易, 武毅秀, 铝: 中国绿色复苏“晴雨表”, 2021, <https://chinadialogue.net/zh/1/71172/>
- 17 Julian Kettle, Decarbonisation: is aluminium a solution or a problem?, 2021, <https://www.woodmac.com/news/opinion/decarbonisation-is-aluminium-a-solution-or-a-problem/>
- 18 杨木易, 武毅秀, 铝: 中国绿色复苏“晴雨表”, 2021, <https://chinadialogue.net/zh/1/71172/>
- 19 CRU International Ltd, Opportunities For Aluminium In A Post-Covid Economy, 2022, <https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/>
- 20 探访云南千亿级绿色低碳水电铝材一体化基地, http://yn.news.cn/reporter/2022-03/31/c_1310537239.htm
- 21 2021年12月及全年全球粗钢产量, 2022, <https://worldsteel.org/zh-hans/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>
- 22 上官方钦等, 气候变化与钢铁工业脱碳化发展, 钢铁Vol. 56, No.5 (2021): P1-6.
- 23 全球能源互联网发展合作组织, 中国2030年前碳达峰研究报告, 2021
- 24 生态环境部办公厅, 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知, 2022, https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html

- 25 陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 落基山研究所, 2021
- 26 陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 落基山研究所, 2021
- 27 冶金工业规划院
- 28 陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 落基山研究所, 2021
- 29 Green Car Congress, BMW Group plans to source steel produced with green power and hydrogen from H2GS in Sweden, 2021, <https://www.greencarcongress.com/2021/10/20211026-bmwhsgs.html>
- 30 河北日报, 河钢与宝马携手打造绿色低碳钢铁供应链 河钢“绿钢”首个客户花落宝马, 2022, <http://hebei.com.cn/system/2022/08/05/101002382.shtml>
- 31 驻瑞典王国大使馆经济商务处, 瑞典绿色钢铁公司H2 Green Steel拿下多个巨额订单, 2022, <http://se.mofcom.gov.cn/article/jmxw/202205/20220503312227.shtml>
- 32 宝武将建世界首条钢铁短流程“零碳工厂”示范产线, 明年投产, 2022, https://www.sohu.com/a/524693619_260616
- 33 国际能源署, 钢铁技术路线图: 迈向可持续发展的钢铁技术, 2020
- 34 国铝工业与煤电, <https://reurl.cc/0XKkV9>
- 35 李德尚玉, 专访北京绿色交易所董事长王乃祥: 自愿减排注册登记和交易系统建设接近尾声, CCER重启利好多个行业, 2022, <https://m.21jingji.com/article/20220720/herald/f29ed18dda963e1989e4d522b43f164e.html>
- 36 《参与2022年浙江省绿色电力交易承诺书》
- 37 高白羽, “转型金融”: 高碳行业转型如何获得金融支持? 2022, <https://chinadialogue.net/zh/3/77623/>
- 38 柳钢集团成功发行可持续挂钩发展债券, 2021, <https://finance.sina.com.cn/money/future/indu/2021-05-10/doc-ikmyaawc4415974.shtml>
- 39 Distribution of the gross domestic product (GDP) in China in 2021, by industry, <https://www.statista.com/statistics/1124008/china-composition-of-gdp-by-industry/>
- 40 国家发改委、统计局
- 41 2021年主要钢铁公司产量排名, <https://worldsteel.org/zh-hans/steel-topics/statistics/top-producers/>
- 42 2021年主要钢铁公司产量排名, <https://worldsteel.org/zh-hans/steel-topics/statistics/top-producers/>
- 43 2021年主要钢铁公司产量排名, <https://worldsteel.org/zh-hans/steel-topics/statistics/top-producers/>
- 44 关于公布2020年全国水泥熟料产能前50家企业排名的通知, <https://www.dcement.com/article/202003/167242.html>
- 45 关于公布2020年全国水泥熟料产能前50家企业排名的通知, <https://www.dcement.com/article/202003/167242.html>
- 46 关于公布2020年全国水泥熟料产能前50家企业排名的通知, <https://www.dcement.com/article/202003/167242.html>
- 47 中国石油化工股份有限公司2020年年度报告, 2021, <http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2021-03-29/1209468064.PDF>
- 48 中国石油天然气集团有限公司2020年度报告, <https://www.cnpc.com.cn/cnpc/ndbg/202104/4733d8af74c24a938b50607f75862ee6/files/d1f45e2e6aa4d9aa479bf9c4c8f346a.pdf>

- 49 中诚信国际, 行业展望, 2022, https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202202071545491553_1.pdf?1644252715000.pdf; Mysteel: 2021年全球电解铝企业产量排行榜TOP15, 2022, <https://youse.mysteel.com/22/0406/18/A37AF67489185F64.html>
- 50 Mysteel: 2021年全球电解铝企业产量排行榜TOP15, 2022, <https://youse.mysteel.com/22/0406/18/A37AF67489185F64.html>
- 51 酒泉钢铁(集团)有限责任公司 2020年度重大信息公告, 2021, <https://www.jiugang.com/article/message/2834.html>
- 52 电能替代大步提速 需求资源加速激活, 2021, <http://www.gdshe.org/Item/14700.aspx>
- 53 https://www.sohu.com/a/478070464_703050
- 54 资料来源于: 北极星、中国宝武钢铁集团、河钢集团有限公司、中国石油化工集团有限公司、国际能源网、高工氢电、搜狐网

郝一涵, 路舒童, 江漪, 李伟婷, 央国企碳中和行动: 绿色电力助力工业脱碳进程, 落基山研究所, 2022

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2022年9月, 落基山研究所版权所有。Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。