

2035“美丽中国”目标下的 我国核能和氢能发展前景



研究单位：清华大学

要实现“美丽中国”和“碳达峰和碳中和”目标（简称双碳目标），我国能源系统低碳转型起着关键作用。实际上，在能源低碳转型过程中，各种低碳能源技术的发展规模和发展潜力，以及市场占比存在较大的不确定性，其中核能和氢能的未来发展前景的不确定性尤为突

出。本研究从能源供应和能源需求两个方面，结合我国双碳目标，重点研究“美丽中国”目标下的我国能源低碳转型路径，特别是“2035美丽中国”目标下的核能和氢能发展情景和发展路径。

一、“美丽中国”目标和双碳目标对我国能源系统低碳转型的影响

2035年既是“美丽中国”基本实现的目标年，也是由碳达峰迈向碳中和的关键节点，有着承前启后的战略意义。“美丽中国”强调把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程。而双碳目标的提出及其行动落实，为我国应对

气候变化、能源系统大幅度低碳转型、生态环境改善、核能和氢能大规模发展提供了新的战略机遇，也是建设“美丽中国”的强大助力和重要抓手。因此，核能和氢能的发展前景和发展路径，对我国有序实现能源系统低碳转型，具有重要的研究价值和现实意义。

二、核能现状和未来发展趋势

从全球来看,尽管核电发展当前面临诸多挑战,但未来仍将呈现增长趋势。从区域分布来看,世界核电发展中心正从欧洲、北美向亚洲转移。从国内来看,我国核电在运装机规模全球第三,在建装机规模全球第一,核电占全国发电量比例为5.0%,远低于全球平均核电比例。

核能是一种可大规模利用的零排放清洁能源,是实现双碳目标,建设“美丽中国”的重要技术选择。核能不排放CO₂、SO₂和NO_x,是当今世界仅次于水电(占比16%)的第二大低碳电力来源,在电力系统低碳转型中发挥重要作用。1971—2021年期间,全球核电累计减少CO₂排放700亿吨,如果没有核电,全球发电相关CO₂排放量会高出近20%。

核电技术成熟、具有功率密度高、高效稳定可靠的

技术优势,年运行时间长、受自然条件约束小、可以提供稳定的电力基荷,有利于兼容当前的电网体系并确保其安全稳定运行,可在不改变当前电网架构前提下大规模替代化石能源发电,促进我国电力系统安全低碳转型。

除了核电外,核能非电利用包括核能供热和核能制氢,有助于实现工业、交通和建筑等难减排部门以较低成本实现碳中和。其中核能低温供热技术和核能热电联产技术比较成熟,在国内外已经投入运行。核能高温工艺供热处于研发示范阶段,可广泛用于石油、化工、稠油开采、甲醇生产等需要大量高温工艺热的工业领域。核能制氢可以大规模提供零碳工业原料,特别是核能制氢炼钢技术,有望大幅度替代焦炭炼钢和减排钢铁行业CO₂排放,目前处于研发阶段。

三、氢能现状和未来发展趋势

氢能是一种清洁、高效的零碳二次能源,是实现能源系统清洁低碳转型的重要载体,可转化为电力或者燃料,拥有较强的跨时间空间储能能力,是我国能源系统大幅度低碳转型和实现2060年碳中和目标的重要技术选择之一。2022年3月,我国氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)发布,明确氢能的战略定位:氢能是未来国家能源体系的重要组成部分、用能终端实现绿色低碳转型的重要载体、氢能产业是战略性新兴产业和未来产业重点发展方向。随着氢能技术进步和成本降低,未来氢能将在工业、交通部门得到较大的发展和应用,建筑和电力部门也将得到一定的应用。氢能可以使钢铁化工等难以电气化的行业实现大规模脱碳生产,减少交通领域石油消耗,在合成氨和甲醇生产中氢气作为原料,石油精炼过程进行加氢生产轻质油品,用氢气代替焦炭还原铁矿石进行钢铁生产,可以大幅减少钢铁生产中的碳排放。

目前,绝大多数氢来源于化石能源制备,主要用途为化工原料,只有少量作为能源被使用。制氢技术包括化石燃料制氢、工业副产气提取制氢、电解水制氢、核能热制氢、生物质制氢等。其中化石燃料制氢包括煤气化制氢、天然气催化(SMR)制氢。电解水制氢包括网电制氢,可再生能源电解水制氢(水电、风电、光伏制氢)、核电制氢等。总体来说,传统化石燃料制氢技术相对成熟,而新型制氢技术还处于研发和示范阶段。

不同制氢方式的平准化制氢成本差异较大,主要分布在10-50元/千克之间。其中,化石能源制氢与焦炉煤气提氢是目前成本最低的制氢技术,制氢成本在20元/千克以下。新型制氢技术成本偏高,原因在于初始投资和运营维护成本较高,或者年运行小时数较低。其中电解水制氢的成本在25元/千克以上,风电光伏制氢成本高于40元/千克,如图1所示。



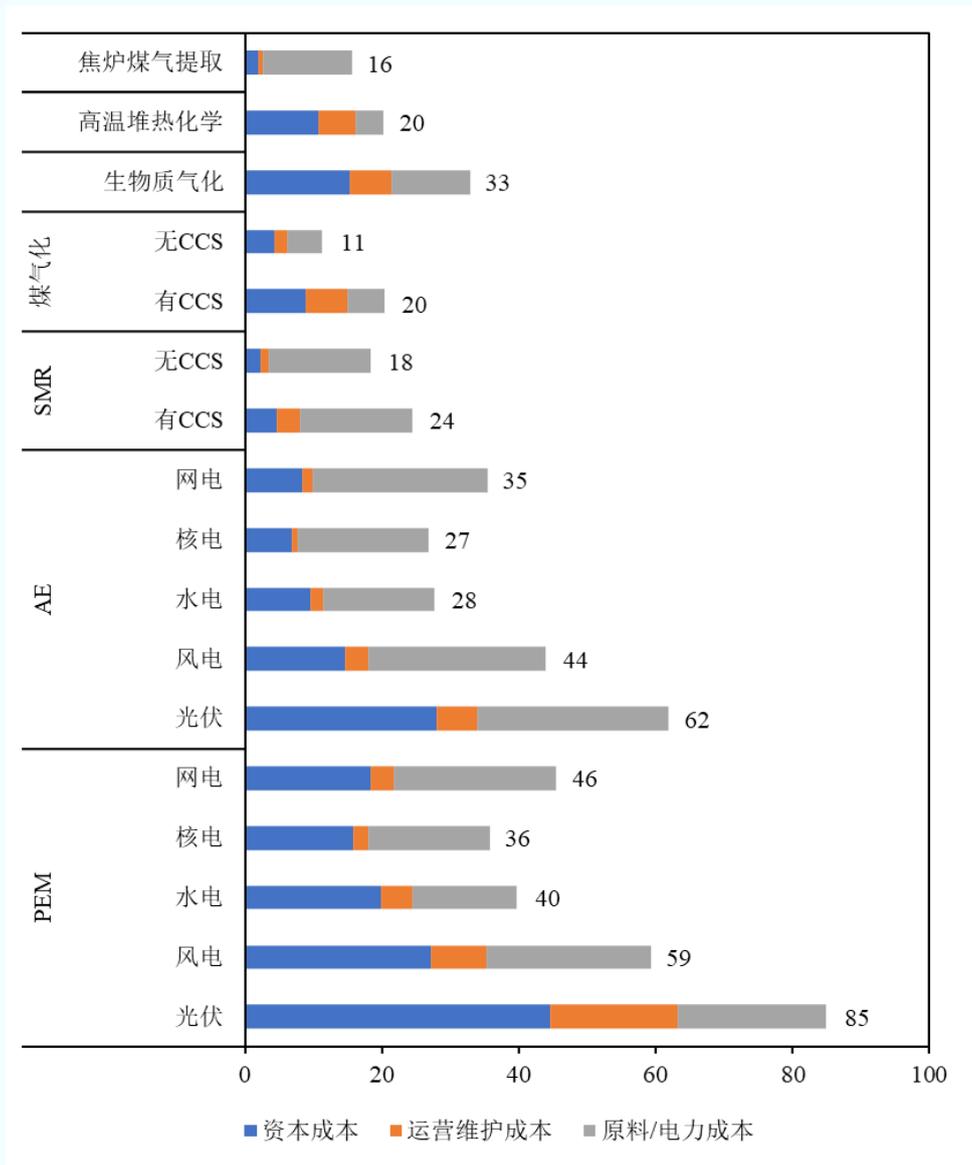


图 1. 不同制氢方式平准化制氢成本 (单位:元 / 千克)

考虑技术进步、学习曲线、碳排放成本等因素，氢能平准化成本未来将大幅度下降。到2040年前后，绿氢

逐渐具有市场竞争力。2050年之后，当碳价高于700元/tCO₂时，届时绿氢逐渐成为成本最低的制氢方式。

四、“美丽中国”目标下我国核能和氢能发展路径

综合考虑“美丽中国”目标和双碳目标，为全面反映我国核能和氢能对“美丽中国”目标实现的贡献和未来发展路径的不确定性。本研究设置三个情景，即基准情景、积极情景、激进情景。主要参数包括宏观经济参数（人口、GDP和产业结构）和能源系统相关参数（能源总量、能源结构、能源效率）的现状和未来发展趋势，其他参数主要来自GCAM 6.0 (release version) 默认值，研究

结果如下。

CO₂排放路径：与能源相关的CO₂排放，2020年为10.63GtCO₂ (10亿吨CO₂)。在双碳目标下，三种情景下未来CO₂排放路径基本类似，2025年前后达到峰值，然后逐渐下降。到2035年，减少20%左右。到2060年，减少85%左右。因此，要实现碳中和目标，CO₂大幅度减排将对我国能源系统低碳转型带来巨大挑战。

一次能源消费总量:随着我国经济增速放缓,一次能源消费将进入长期低速增长然后缓慢下降阶段。从绝对量来看,我国一次能源消费2020年为4.98Gtce(10亿吨标煤,发电煤耗计算),到2035年缓慢增加15%左右,并达到峰值,然后缓慢下降,2060年基本与2020年持平。从能源消费结构来看,2035年前,仍将以燃煤消耗为主,但燃煤比例逐渐降低,非化石能源比例逐渐增加。到2060年,燃煤比例下降到15%左右(含燃煤CCS利用),非化石能源比例大幅度增加到的60%-70%之间。

核电供应路径:核电规模和核电占比逐渐增加。2020年,核电装机规模5000万千瓦,发电规模3662亿千瓦时,核电占比5%。到2035年,装机规模增加到1.0-1.5亿千瓦,发电规模8000-10000亿千瓦时,核电占比7.5%-10%。到2060年,装机规模2.0-5.0亿千瓦,发电

规模1.0-3.0万亿千瓦时(pWh),核电占比10%-20%,如图2所示。

氢能供应路径:我国氢能需求逐渐增加,氢能生产,逐渐低碳化。氢能需求规模2020年为3300万吨左右,到2060年将逐渐增加到9000万吨到1.2亿吨之间,占终端能源比例为5%-10%。2020年,以煤制氢和天然气制氢为主。到2035年,当碳价超过50美元/tCO₂(2015年价),低碳制氢逐渐增加。到2060年,碳价为200美元/tCO₂左右,主要来自于可再生能源发电制氢、网电制氢、核能制氢、CCS等低碳/零碳制氢技术。绿氢(可再生能源制氢和核能制氢)比例到2035年增加到7%-10%,到2060年的50%-70%。随着气候政策力度的增加,蓝氢也将逐渐发挥重要作用。如图3所示。

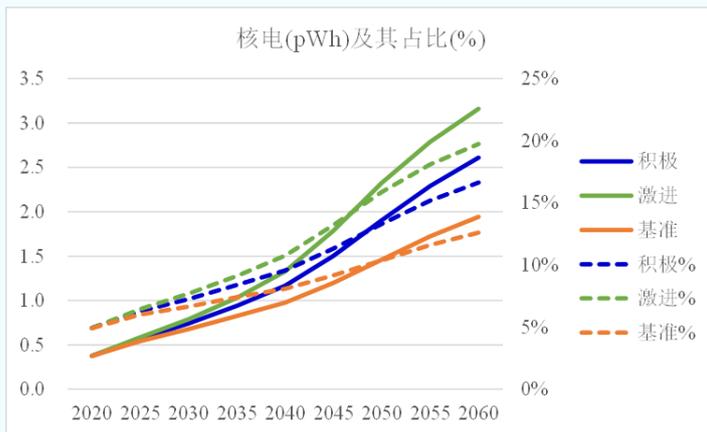


图 2. 核电供应及其占比

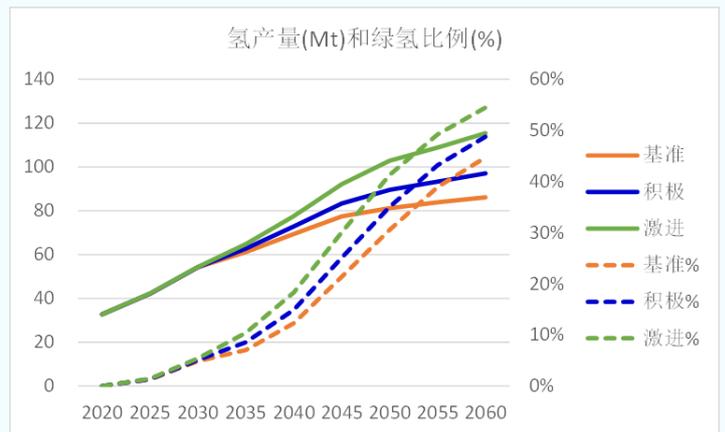


图 3. 氢能生产和绿氢比例

五、研究结论

研究表明,要实现“美丽中国”目标,并考虑到2060年碳中和目标,我国核能和氢能具有较大的发展前景和市场竞争能力,可大规模提供零碳电力、热力和零碳工业原料。到2060年,核电装机规模将达到2-5亿千瓦,发电规模1.0-3.0万亿千瓦时,核电占比10%-20%,核能非电利用(区域供热、工艺热、核能制氢)也具有较大前景。氢能需求规模将增加到9000万吨到1.2亿吨之间,是目前氢能规模的3-4倍,占终端能源比例为5%-10%。氢能生产50%-70%来自于绿氢。氢能尽管目前生产成本

较高,考虑技术进步、规模扩大、技术学习曲线、碳排放成本,到2040年前后,绿氢生产成本有望低于化石能源制氢,具有较大的市场竞争力。

为实现美丽中国目标,核能和氢能将发挥重要作用。到2035年,氢能规模将从目前的3300万吨,增加到6000-6500万吨,占终端能源比例7%左右,其中绿氢比例7%-10%。核电装机规模1.0-1.5亿千瓦,发电规模8000-10000亿千瓦时,核电比例为7.5%-10%等。

