

碳约束下火电厂低碳转型技术选型及成本效益评估

马 瑞 乔仙保 王 刚

北方联合电力有限责任公司临河热电厂 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要：本文聚焦碳约束下火电厂低碳转型，阐述碳约束内涵与形式，以及火电厂低碳转型的目标与路径。接着分析技术选型影响因素，包括政策法规、技术成熟度、经济性和电厂自身条件。对比主流低碳转型技术，从减排效果、成熟度、经济性和适用范围等方面剖析。最后构建成本效益评估体系，涵盖成本与效益构成、评估指标与方法，为火电厂低碳转型提供全面的理论支持与实践指导。

关键词：碳约束；火电厂；低碳转型；技术选型；成本效益评估

1 碳约束与火电厂低碳转型相关概念

1.1 碳约束的内涵与形式

碳约束是为应对气候变化、减少温室气体排放，对社会经济活动施加的限制与规范。其核心是借助政策、法规和市场机制等约束碳排放，推动经济社会低碳化发展。它不仅关注碳排放总量控制，还注重降低碳排放强度，以实现经济发展与碳排放脱钩。碳约束形式多样，政策法规约束是基础，各政府制定法律法规，明确碳排放限值、减排目标与责任主体。如我国出台《中华人民共和国环境保护法》等，对火电厂碳排放提出要求。市场机制约束利用经济杠杆调节，包括碳市场交易和碳税。碳市场交易设定碳排放权总量，将其作为商品交易，激励企业减排获利；碳税对含碳燃料按碳含量征税，提高高碳能源使用成本，推动能源结构调整。技术标准约束通过制定和实施相关标准，规范生产过程碳排放，如对火电厂发电效率、污染物排放等制定强制性标准，促使企业采用先进低碳技术。

1.2 火电厂低碳转型的目标与路径

火电厂低碳转型的目标是在满足电力供应需求的前提下，显著降低碳排放强度和总量，最终实现碳中和。具体而言，短期目标是在碳达峰之前，通过技术改造和管理优化，逐步降低碳排放增速，为实现碳达峰奠定基础；中期目标是在碳达峰后，持续降低碳排放总量，不断提高低碳技术的应用比例；长期目标是到2060年实现碳中和，通过深度脱碳技术的应用和能源结构的彻底转型，实现火电厂的净零排放^[1]。

火电厂低碳转型的路径主要包括以下几个方面：一是提高能源利用效率，通过采用先进的发电技术和设备，降低单位发电量的碳排放；二是优化能源结构，减少煤炭等化石能源的消耗，增加天然气、生物质能、氢能等低碳能源的占比；三是发展碳捕集利用与封存技

术，将火电厂排放的二氧化碳进行捕集、利用或封存，减少向大气中的排放；四是加强与可再生能源的协同发展，通过火电厂的调峰能力配合可再生能源的消纳，提高电力系统的整体低碳水平；五是强化管理创新，通过精细化的运营管理与数字化技术的应用，降低生产过程中的碳排放。

2 火电厂低碳转型技术选型影响因素分析

2.1 政策法规因素

政策法规是影响火电厂低碳转型技术选型的重要外部因素，对技术研发、推广和应用有直接引导与约束作用。国家和地方政府出台的碳排放目标、标准、补贴及税收优惠等政策，影响火电厂技术选择。如给予财政补贴或税收减免，可降低特定技术应用成本，提高火电厂采用积极性；若碳排放限值要求严格，火电厂会优先选减排效果好的技术，即便初期投资高。此外，政策的稳定性和连续性很关键，不稳定政策会增加投资风险，使火电厂在技术选型时更为谨慎。

2.2 技术成熟度因素

技术成熟度是火电厂选低碳转型技术的核心考量之一。成熟度高的技术运行稳定、可靠、成本相对低，能较快实现减排效果。处于研发或试点阶段的新技术，虽有减排潜力，但存在技术风险高、运行经验少、成本难控等问题。火电厂选型时会评估技术成熟度，包括研发进展、应用案例、设备可靠性与维护难度等。大型火电厂因规模大、影响广，通常选成熟度高的技术保生产稳定；有创新和风险承受能力的企业，可能尝试新兴低碳技术以抢占先机。

2.3 经济性因素

经济性是火电厂低碳转型技术选型的关键，关乎企业生存发展。选型时要综合考虑投资、运营、维护成本及收益。投资成本含技术引进、设备购置安装、工程建

设等费用，不同低碳技术差异大，如CCUS初期投资高，能效提升投资低。运营成本包括燃料、药剂、人工等，燃料替代技术会改变燃料种类和成本。收益有能源节约成本、碳市场收益或碳税减免、政府补贴等。火电厂会做成本效益分析，选全生命周期经济效益最优技术。碳市场机制完善时，碳价高低直接影响火电厂对减排技术的选择^[2]。

2.4 电厂自身条件因素

火电厂自身条件影响技术选型，涵盖规模、机组参数、地理位置、燃料供应等。不同规模火电厂对技术需求和适应力不同，大型厂适合大规模低碳技术，如IGCC，小型厂倾向投资小的能效提升技术。机组参数影响技术适用性，超临界、超超临界技术适用于高参数机组。地理位置决定燃料获取便利性和可再生能源利用性，靠近煤炭资源地区厂倾向煤电清洁利用技术，靠近生物质或天然气资源地区厂优先燃料替代技术。此外，电厂现有设备状况和技术基础也影响选型，改造现有设备或新建机组会导致不同技术选择。

3 火电厂主流低碳转型技术及对比

3.1 能效提升技术

能效提升技术是通过提高火电厂的发电效率，降低单位发电量的煤耗和碳排放，是火电厂低碳转型的基础技术。主要包括超临界、超超临界发电技术，整体煤气化联合循环（IGCC）技术等。超临界和超超临界发电技术是在传统亚临界发电技术的基础上发展而来的，通过提高蒸汽的压力和温度，提高汽轮机的发电效率。与亚临界机组相比，超临界机组的发电效率可提高3%-5%，超超临界机组的发电效率可提高5%-8%。该技术成熟度高，应用广泛，是目前火电厂提高能效的主要手段之一；IGCC技术是将煤气化技术与联合循环发电技术相结合的一种先进发电技术，通过将煤炭气化生成合成气，再利用燃气轮机和蒸汽轮机联合发电。IGCC技术不仅发电效率高，可达45%以上，而且污染物排放少，便于进行碳捕集。但该技术投资成本较高，系统复杂，维护难度较大。

3.2 燃料替代技术

燃料替代技术是通过将火电厂的燃料由高碳的煤炭替换为低碳或无碳的燃料，以减少碳排放，主要包括生物质掺烧、氢能混燃、天然气替代等技术。生物质掺烧技术是在燃煤锅炉中掺入一定比例的生物质燃料（如秸秆、木屑等）进行燃烧发电。生物质燃料在生长过程中吸收二氧化碳，燃烧时排放的二氧化碳可实现碳中和，因此能够有效降低火电厂的碳排放。该技术对现有锅炉

的改造较小，投资成本较低，但生物质燃料的供应和运输存在一定的限制；氢能混燃技术是在燃煤或燃气中掺入一定比例的氢气进行燃烧发电。氢气燃烧只产生水，不排放二氧化碳，因此可以显著降低碳排放。但氢气的生产、储存和运输成本较高，且对燃烧设备有一定的要求，目前处于试验和示范阶段。天然气燃烧产生的二氧化碳排放量比煤炭少约50%，且污染物排放也较少。该技术成熟度高，改造难度相对较小，但天然气的价格和供应稳定性会影响其应用推广。

3.3 碳捕集、利用与封存（CCUS）技术

CCUS技术是将火电厂排放的二氧化碳进行捕集、提纯，然后加以利用或封存，以减少向大气中的排放，是实现火电厂深度脱碳的关键技术。主要包括燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集等技术；燃烧前捕集技术是在燃料燃烧前将其转化为合成气，然后从中分离出二氧化碳。该技术通常与IGCC技术结合使用，碳捕集效率高，但系统复杂，投资成本高；燃烧后捕集技术是在燃料燃烧后，从烟气中分离出二氧化碳。该技术适用于现有火电厂的改造，对机组的影响较小，但碳捕集效率相对较低，能耗较高；富氧燃烧捕集技术是在富氧环境下燃烧燃料，产生的烟气中二氧化碳浓度较高，便于捕集^[3]。该技术碳捕集效率高，但需要空分设备提供氧气，投资和运营成本较高；CCUS技术的碳捕集效率可达80%-90%，但目前成本较高，且二氧化碳的利用和封存存在一定的技术和环境风险。

3.4 可再生能源替代技术

可再生能源替代技术是指火电厂逐步减少对化石能源的依赖，增加可再生能源的发电比例，或通过与可再生能源发电站的协同运行，实现整体的低碳发展。主要包括太阳能、风能、水能等可再生能源与火电厂的互补运行。火电厂可以利用其调峰能力，弥补可再生能源发电的间歇性和波动性，提高可再生能源的消纳率。同时，火电厂也可以逐步建设可再生能源发电设施，如在厂区安装太阳能光伏板、建设小型风电场等，减少对传统化石能源的消耗；可再生能源替代技术是实现火电厂零碳排放的终极途径之一，但受到地理位置、资源条件等因素的限制较大，且需要大量的投资和技术支持。

3.5 各技术对比分析

从减排效果而言，CCUS与可再生能源替代技术减排潜力大，可深度脱碳；燃料替代技术减排效果因替代燃料种类和比例而异；能效提升技术减排效果相对小，但应用范围最广。技术成熟度方面，能效提升和天然气替代技术最为成熟，已在火电厂广泛应用；生物质掺烧技

术成熟度也较高；CCUS和氢能混燃技术处于示范推广阶段；可再生能源替代技术里，太阳能、风能发电较成熟，但与火电厂协同运行尚需完善。经济性上，能效提升技术投资和运营成本低，经济效益佳；燃料替代技术经济性取决于替代燃料价格与供应；CCUS和可再生能源替代技术初期投资高，目前经济效益差，不过随技术发展和成本降低会改善。适用范围中，能效提升技术适用于所有火电厂改造新建；燃料替代技术受燃料供应限制大；CCUS技术适用于大型高碳排放机组；可再生能源替代技术适用于资源丰富地区。

4 火电厂低碳转型成本效益评估体系构建

4.1 成本构成

火电厂低碳转型成本涵盖投资、运营、维护和碳成本。投资成本是为实现转型的一次性投入，含技术引进、设备购置安装、工程建设、设计咨询等费用，不同低碳技术投资成本差异大，如CCUS技术远高于能效提升技术。运营成本是转型后日常生产运营费用，包括燃料、药剂、人工、水电消耗等成本，燃料替代技术改变燃料种类和消耗量影响燃料成本，CCUS技术因消耗大量能源和药剂运营成本高。维护成本是保证转型设备正常运行产生的检修、零部件更换等费用，技术越复杂、设备越精密，维护成本越高。碳成本是碳排放产生的费用，包括碳市场交易成本、碳税等，在碳约束趋严背景下，其在总成本中占比将增大，是影响转型经济性的重要因素^[4]。

4.2 效益构成

火电厂低碳转型效益有经济、环境和社会效益。经济效益是直接经济收益，包括能源节约成本、碳市场收益或碳税减免、政府补贴、发电量增加收入等。能效提升技术降低煤耗减少燃料成本，采用CCUS技术的火电厂可出售碳排放权获利，部分地区给予上网电价补贴。环境效益是对环境质量改善的积极影响，体现为碳排放和其他污染物排放减少，虽难直接用货币衡量，但可通过环境价值评估方法量化。社会效益是对社会发展的积极影响，包括促进就业、保障能源安全、推动相关产业发

展等，转型过程创造就业岗位，减少化石能源依赖提高能源安全性，带动相关产业发展促进产业结构升级。

4.3 评估指标与方法

火电厂低碳转型成本效益评估指标有经济、环境和社会指标。经济指标是核心，包括净现值（NPV）、内部收益率（IRR）、投资回收期（PBP）、成本效益比（BCR）等，净现值大于零、内部收益率大于基准收益率、成本效益比大于1说明方案可行，投资回收期越短方案越好。环境指标有碳减排量、单位发电量碳排放量等，衡量环境改善程度。社会指标包括就业岗位增加数量等，评估社会发展贡献。评估方法有生命周期评价法、成本效益分析法、多准则决策分析法等，分别从全生命周期、成本效益比较、多因素综合角度评估。实际评估时，要依火电厂情况和目标选合适指标方法，考虑碳市场价格等因素变化做敏感性分析，确保结果科学合理可靠。

结语

碳约束背景下，火电厂低碳转型迫在眉睫。技术选型需综合考量政策、技术、经济及电厂自身等多方面因素，合理权衡不同技术的优劣。成本效益评估体系的构建，有助于科学评估转型方案的经济性与可行性。未来，火电厂应紧跟政策导向，结合自身实际，选择适宜的低碳技术，积极推进转型，实现可持续发展，为我国碳达峰、碳中和目标的达成贡献力量。

参考文献

- [1]杨敏.火电厂锅炉烟气脱硫脱硝协同控制技术的研究[J].清洗世界,2023,39(03):69-71.
- [2]魏泽华,刘欢,孙逊,等.火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略研究[J].电站系统工程,2023,39(02):63-64+67.
- [3]李明凤.基于火电厂烟气脱硫脱硝技术的应用与节能环保研究[J].皮革制作与环保科技,2022,3(24):102-104.
- [4]王宪伟.火电厂低碳减排生产改造技术路线探讨[J].电站系统工程,2025,41(01):76-78.