

充路径长、局部升温显著，更容易形成敏化区。在散热器基材中，齿根部位因受力不均成为腐蚀优先萌生处；幕墙型材的转角因应力叠加易出现晶界沟槽。由此可见，几何结构强化了应力耦合作用，使晶间腐蚀呈“结构依赖”特征，是工程设计与挤压成形过程中必须重点控制的因素。

4.3 后续时效处理与残余应力释放对应的腐蚀行为变化

挤压后的冷却方式决定残余应力的初始分布，而人工时效可调节应力释放及强化相演化，从而影响晶间腐蚀敏感性。当 T6 或 T5 时效制度与挤压组织匹配良好时，晶内强化相弥散析出，可减轻晶界连续析出趋势，实现晶界强化与晶内强化的协调，提高耐蚀稳定性。若时效温度过高或时间过长，会造成晶界析出相粗化与 PFZ 扩展，导致敏化增强；时效不足则残余应力释放不充分，局部高应力区仍促使腐蚀沿晶界扩展。此外，水冷、雾化冷却或风冷等冷却方式会影响应力消散速率，冷却过强可能引入新的表层应力^[2]。工程实践表明，优化时效温度—时间曲线并辅以适度预拉伸，可改善应力分布，使晶界析出更均匀，从而显著提升 6061 铝合金的抗晶间腐蚀性能。

5 工业应用场景中挤压工艺与晶间腐蚀控制策略

5.1 建筑型材生产中的挤压工艺优化策略

建筑幕墙型材长期暴露于湿热、雨水及盐雾环境，对 6061 铝合金的晶间腐蚀稳定性要求更高。挤压温度的分区调控是改善组织均匀性的关键：适度降低前段加热温度可避免金属过度软化，使应变速率更稳定；中后段温度保持一致能抑制局部再结晶，减少粗晶带形成。同时，通过优化流道结构、采用模具等温设计，提高金属流动同步性，可有效减弱速度梯度引起的带状组织。此外，快速均匀的空气冷却或风冷有助于抑制晶界连续析出并缩小 PFZ 宽度，从而减少贯通式腐蚀路径。实践表明，低温—中速挤压结合在线冷却控制，可显著改善型材晶界析出相分布，提高幕墙产品的耐候可靠性和服役寿命，且在大规模生产中具备良好稳定性。

5.2 交通装备型材中晶间腐蚀的区域化控制

交通装备用 6061 铝合金型材截面复杂、流动路径不均，挤压过程中易形成应变集中与速度差异区域，成为晶间腐蚀优先发生部位。为减弱区域化腐蚀风险，需对模具流道进行优化，如调整厚薄差异较大的部位的流动阻力、改善死区金属补充，从而提升截面各区域流速一致性，避免薄壁区因高

应变形成位错密集带。在挤压比方面，应在组织细化与应力集中之间取得平衡，避免过大挤压比导致敏化加剧。同时，保持出口温度稳定可减少晶界连续析出。部分企业采用分段挤压和在线均匀化技术，有效降低大截面型材温升波动，使晶界析出更离散。多项实践表明，通过金属流动调控、温升控制和组织均匀化，可显著减小不同区域晶间腐蚀差异，提高车体结构的服役可靠性。

5.3 电子散热器基材对挤压工艺的特殊要求

电子散热器基材对导热性和长期耐蚀性具有严格要求，因此其挤压过程需更加注重组织均匀性与晶界析出控制。过高挤压温度或过快挤压速度易导致晶界 Mg₂Si 相沿晶界连续析出，不仅降低耐蚀性，还破坏热传导路径。降低挤压速度可改善金属变形可控性，使纤维化组织更加均匀，同时避免位错在晶界集中。模具深冷预处理技术的应用可降低金属进入模腔时的温度场波动，减少局部升温引起的敏化趋势。针对散热器薄片、多齿结构，挤压出口需采用精准风冷或雾化冷却以限制 PFZ 过度扩展，保持晶界电化学均匀性^[3]。综合来看，通过控制挤压速度、优化温度场以及采用深冷模具与有效冷却方式，可获得更均匀的晶界分布，为散热器在高热载条件下的稳定服役提供可靠保障。

6 结语

挤压工艺对 6061 铝合金晶间腐蚀行为具有多维度影响，其核心机制包括温度与速度调控组织形貌、挤压比影响晶界析出相分布、位错密度驱动析出动力学、残余应力耦合腐蚀扩展路径等。工业实践显示，通过精确控制挤压温度曲线、改善金属流动均匀性、优化挤压比及实施可控冷却制度，可明显降低晶间连续析出的概率，改善 PFZ 宽度与晶界电化学均匀性，显著提升 6061 铝合金在建筑型材、交通装备用型材及散热器基材等领域的耐蚀稳定性。未来，随着智能挤压装备、数据驱动工艺控制和在线组织监测技术的发展，6061 铝合金挤压工艺将实现更加精准的组织调控，进一步降低晶间腐蚀风险，为高性能铝合金型材产业的可靠性提升提供更强技术支撑。

参考文献

- [1] 刘瀚璋. 用于 6061 铝合金切屑固态回收的热挤压工艺及其材料的组织与性能研究[D]. 华南理工大学, 2024.
- [2] 王文辉. 时效处理对 6061 铝合金力学性能及腐蚀行为的影响[D]. 宁夏大学, 2023.
- [3] 何祯, 拜斌, 张小明, 等. 航空用 6061 铝合金恒载荷应力腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(02): 64-69.

Research on Optimal Configuration Methods for Energy Storage Capacity in New Energy Power Stations

Jingwen Shi

State Power Investment Corporation Xiong'an Energy Co., Ltd. Beijing Branch, Tianjin, 300131, China

Abstract

Under the promotion of the dual carbon target, the output volatility and uncertainty caused by the large-scale development of new energy power plants have become key factors restricting the safe and stable operation of the power system. As a core means of stabilizing fluctuations and enhancing the capacity of new energy consumption, the capacity optimization configuration of energy storage systems directly affects the system's economy and reliability. The research results indicate that the proposed optimization configuration method can achieve a balance between energy storage investment costs and new energy consumption benefits while meeting the requirements of grid access, providing a scientific basis for the planning of energy storage systems in new energy power plants.

Keywords

new energy power station; Energy storage capacity; Optimize configuration; solving algorithm

新能源电站配套储能容量优化配置方法研究

石静雯

国家电投集团雄安能源有限公司北京分公司, 中国 · 天津 300131

摘要

双碳目标推动下, 新能源电站规模化发展引发的出力波动性与不确定性问题, 已成为制约电力系统安全稳定运行的关键因素。储能系统作为平抑波动、提升新能源消纳能力的核心手段, 其容量优化配置直接影响系统经济性与可靠性。研究结果表明, 所提优化配置方法能够在满足电网接入要求的前提下, 实现储能投资成本与新能源消纳效益的平衡, 为新能源电站储能系统规划提供科学依据。

关键词

新能源电站; 储能容量; 优化配置; 求解算法

1 引言

双碳目标推动下, 我国新能源电站装机规模持续扩张, 风能、太阳能等清洁能源在电力结构中占比显著提升。然而, 受自然条件制约, 新能源出力呈现强波动性、随机性与间歇性, 大量并网后不仅加剧电力系统供需失衡, 增加传统火电调峰压力, 还导致新能源弃电风险上升, 成为制约能源转型进程的关键瓶颈。储能系统作为平抑新能源波动、提升消纳能力的核心手段, 其容量配置直接关系系统经济性与可靠性, 但现有研究多聚焦单一目标优化, 对源荷不确定性与系统灵活性的协同考量不足, 配置方案实用性与经济性难以兼顾。基于此, 本文围绕新能源电站配套储能容量优化展开研究, 先阐述新能源电站与储能系统基础理论、梳理容量配置核心影响因素, 再构建多目标优化模型并选取粒子群算法求

解, 最后通过实际算例验证模型有效性, 旨在为储能系统科学规划提供技术支撑, 助力新型电力系统安全高效运行。

2 新能源电站与储能系统相关基础理论

2.1 新能源电站出力特性分析

新能源电站出力由资源禀赋与发电技术决定, 风能、太阳能为代表的新能源出力呈显著波动性、随机性与间歇性。风电受风速、风向影响, 日内功率起伏大, 冬春季出力高、夏秋季低; 光伏依赖太阳辐射与日照, 日内呈单峰特性, 云层、阴雨会引发随机波动, 季节变化也导致出力差异。此外, 新能源出力存在地域差异, 如我国西北地区资源丰富但出力波动更明显, 难以提供稳定电力, 给电力系统供需平衡与安全运行带来挑战^[1]。

2.2 储能系统工作原理与技术类型

储能系统核心是实现电能时空转移, 工作原理为充电时将电能转化为化学能、机械能等存储, 用电高峰或新能源出力不足时反向转化为电能并网。按存储形式可分多类: 电

【作者简介】石静雯 (1996-), 女, 中国山西阳泉人, 硕士, 助理工程师, 从事风电场管理研究。

化学储能响应快、配置灵活，其中锂电充放电效率高、寿命长，适用于分布式与集中式场景，液流电池容量与功率可独立调节，适合大规模长时储能；抽水蓄能技术成熟但依赖地理条件、建设周期长；压缩空气储能适用于长时大规模场景，飞轮储能响应极快，多用于短时调频。不同类型储能 在效率、成本等方面有差异，为优化配置提供选择。

2.3 储能容量优化配置核心目标

核心目标是平衡系统经济性、可靠性与环保性。经济性目标为最小化全生命周期成本，含储能投资、运维及新能源弃电损失成本，以提升项目效益；可靠性目标是通过储能调节平抑波动，保障电网电压、频率稳定，降低供电中断风险；环保性目标契合双碳要求，通过提高新能源消纳率减少化石能源发电与碳排放^[2]。三者相互约束，需寻求最优平衡以制定科学配置方案。

3 新能源电站配套储能容量影响因素分析

3.1 新能源出力波动性与不确定性影响

新能源出力的波动性与不确定性是储能容量配置的核心影响因素，直接决定储能调节需求。波动性表现为出力在不同时间尺度的持续变化：日内短时快速波动需储能具备快速响应能力，季节性波动则要求长时存储能力，波动幅度越大，所需储能容量越高。不确定性源于出力预测误差，气象条件的复杂性使预测值与实际值存在偏差，可能引发供需失衡，需储能预留备用容量应对；预测误差随预测时长增加而扩大，配置时需充分考虑以规避系统风险。此外，新能源电站装机规模会放大上述影响，大规模集群的出力波动叠加后，对储能调节能力需求更迫切，需配置更大容量保障系统稳定^[3]。

3.2 负荷需求特性与电网接入要求

负荷需求特性与电网接入要求从外部约束影响储能配置。负荷时序分布决定供需平衡状态：若新能源出力高峰与负荷高峰重叠，储能需求较小；若负荷高峰与新能源出力低谷并存，则需更大容量实现电能转移。负荷波动幅度也会增加需求，波动剧烈区域需储能同时应对新能源与负荷波动。电网接入要求提出明确约束：部分地区规定电源侧储能按配套新能源装机 15%、2 小时配置，负荷侧按用电负荷 5%、2 小时配置；电网接纳能力有限时，需储能转移富余电量，接纳能力越弱，所需容量越大；同时，储能需具备足够容量与功率参与调频、调压，保障电网运行安全^[4]。

3.3 储能系统技术参数与经济性约束

储能系统的技术参数与经济性指标从可行性与经济性角度制约配置。技术参数方面：充放电效率越低，能量损耗越大，需更大容量达预期调节效果；循环寿命越短，更换成本越高，配置时需兼顾短期需求与长期寿命；充放电功率上限越高，应对突发波动能力越强，可适度降低容量需求。经济性约束聚焦成本与收益平衡：单位容量、功率投资成本直

接影响总投资，成本越高，相同预算下可配置容量越小；运维成本含设备检修、电池更换及能耗等，长期过高会降低经济性。此外，新能源上网电价、峰谷价差影响收益，价差越大，储能削峰填谷收益越高，可支撑更大容量配置；项目全生命周期越长，越能分摊初始投资，利于配置较大容量。

4 储能容量优化配置方法构建

4.1 优化目标函数建立

储能容量优化需综合经济性、可靠性与环保性构建多目标模型。经济性目标以全生命周期总成本最小为核心，成本涵盖储能投资成本（单位容量 / 功率成本、固定投资）、运行维护成本（检修、能耗）及新能源弃电损失成本（与弃电率、上网电价相关）；可靠性目标以系统供电缺电率最低为指标，降低负荷需求无法满足的风险；环保性目标以碳排放量最小为导向，通过提升新能源消纳率减少化石能源使用。采用加权求和法将多目标转化为单目标函数，结合项目需求与政策导向赋予目标权重，最终目标函数表现为经济性成本、可靠性惩罚成本（与缺电率正相关）、环保成本（与碳排放量正相关）的加权和最小^[5]。

4.2 约束条件设定

储能配置需满足技术、电网与经济性三类约束。技术约束包括：储能系统充放电功率不超额定值，荷电状态维持在允许范围且每日循环后恢复初始值，同一时刻不兼具充放电状态；新能源电站出力与储能充放电功率叠加值不超额定装机容量。电网约束包括：功率平衡（新能源出力 + 储能放电 = 负荷需求 + 储能充电），接入节点电压维持在额定电压允许波动范围。经济性约束包括：储能全生命周期成本不超预算上限，新能源弃电率不超政策规定上限。

4.3 求解算法选择与实现

选取粒子群算法求解，该算法收敛快、鲁棒性强，适用于多目标优化，核心是模拟鸟群觅食，通过粒子位置与速度调整寻找最优解。实现步骤为：确定算法参数（粒子数量、迭代次数等）与解空间范围（结合储能参数、预算、电网约束）；初始化粒子群位置与速度，每个粒子代表一组储能配置方案；计算粒子适应度（基于目标函数，值越小方案越优）；更新个体与群体最优位置，调整粒子速度与位置；引入交叉变异机制增加种群多样性，避免局部最优；采用罚函数法处理约束违反情况，若达到迭代次数或收敛精度，输出最优储能容量与功率方案，否则继续迭代。

5 算例分析与验证

5.1 算例数据选取与参数设置

选取我国西北地区某风电场作为算例，该风电场装机容量为 100 兆瓦，全年风能资源丰富但波动明显，年平均风速为 6.5 米 / 秒，年有效发电小时数约 2200 小时。选取该风电场连续一年的实测出力数据，时间分辨率为 1 小时，数据显示日内最大出力波动幅度达 30 兆瓦，冬季出力明显高