

砂石矿山新能源项目能效提升与碳减排路径研究

程文明

河南理工大学土木工程学院 河南 焦作 454003

【摘要】：在“双碳”战略背景下，砂石矿山作为高耗能行业，其能源结构与碳排放问题日益突出。本文以鹤壁恒源矿业集团有限公司“光伏+充电桩”一体化项目为案例，系统研究了砂石矿山新能源系统的能效提升与碳减排路径。项目通过 14.74MWp 光伏装机与 56 台 360kW 充电桩的协同建设，构建了“空间资源-辐照度-用电负荷”匹配模型，实现年均发电 1583 万度、系统综合效率 0.827、就地消纳率 95%以上。碳减排方面，25 年累计减排 CO₂ 约 31.6 万吨，单位产品碳排放强度降低 18.7%。研究结果表明，通过精准规划、高效设备选型、智能调度与立体空间利用，砂石矿山可实现能效提升与碳减排的协同优化，为行业绿色转型提供了可复制的技术范式与经济模型。

【关键词】：砂石矿山；新能源系统；能效提升；碳减排

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.053

引言

在“双碳”目标全面推进与能源结构转型不断深化的背景下，砂石矿山作为基础设施建设的关键原材料供应环节，其高能耗、高排放的传统生产模式正面临严峻挑战。破碎、筛分、运输等核心工序能源依赖度高，且多以传统电网供电为主，化石能源占比大，导致单位产品碳排放强度显著高于行业平均水平，亟需通过清洁能源替代与能效提升实现绿色低碳转型。

目前，光伏发电、电动机械等新能源技术在矿山场景的应用已逐步展开，但仍存在系统集成度不高、源荷匹配不精准、全生命周期减碳机制不健全等问题。现有研究多聚焦单一技术经济性分析，缺乏融合空间规划、智能调度与碳效益的系统化路径探索。因此，构建适用于砂石矿山新能源项目的能效提升与碳减排协同路径，已成为行业绿色发展的迫切需求。

本研究以鹤壁恒源矿业集团“光伏-充电桩”一体化项目为例，通过分析其在容量配置、设备选型与智能调度等方面的创新，量化评估系统能效与碳减排效益，旨在提炼可推广的“光伏+矿山”系统解决方案，为行业绿色转型提供实践范式。

1 项目概况

鹤壁恒源矿业集团有限公司共拥有 5 座砂石骨料矿山。在未采用新能源系统前，能源供应高度依赖传统化石能源，能源结构单一且低效。破碎、筛分、运输等核心生产工序电力均来自传统电网，以化石能源发电为主，未利用当地丰富太阳能资源。生产中能源消耗强度大，单位产能电耗偏高，既增加生产成本，又导致二氧化碳、二氧化硫等污染物排放量大，与“双碳”战略要求存在差距。厂区建筑物屋面、胶带机廊道等空间未做能源化利用，无法实现降温与能源自给双重效益，能源供应受外部电网波动影响大，缺乏稳定绿色能源支撑，在能源结构优化与减排降碳方面提升空间较大。

本研究以鹤壁恒源矿业集团旗下 5 座砂石矿山的“光伏-充电桩”一体化建设项目为实证案例。该项目规划总装机容量

约 14.74MWp，充分利用矿区车间屋顶、廊道及道路上方空间铺设光伏组件，并根据不同屋面结构优化安装倾角，实现高效发电。同时，配套建设充电桩设施，打造绿色低碳矿山示范工程。项目预计 25 年总发电量达 3.96 亿度，采用“自发自用、余电上网”模式接入矿区配电系统。同时，配套建设大功率直流快充桩，满足电动矿卡等重型车辆充电需求，并配置多台不同容量箱式变压器，保障电力高效稳定供应。

2 新能源系统能效提升的有效策略

鹤壁恒源矿业集团有限公司“光伏+充电桩”一体化项目以 14.74MWp 光伏装机容量与 56 台 360kW 充电桩的协同建设为核心，通过科学规划、技术创新与精细化管理，构建了适合矿山场景的高效能源利用体系。该项目 25 年年均发电量达 1583 万度，95%实现就地消纳，系统综合效率系数达 0.827，为同类矿山新能源改造提供了可复制的实践经验。

2.1 精准规划与容量配置

本项目在技术层面实现重要突破，创新性地建立了“空间资源-辐照度-用电负荷”三维匹配模型。通过 Meteonorm8.0 气象数据库对鹤壁地区太阳辐射数据进行深度挖掘，并精准结合五座砂石矿山的地形地貌特征，实现了光伏容量的科学配置：二道庄砂石矿山 4.11MWp、洪峪砂石矿山 3.63MWp、花岭砂石骨料厂 1.07MWp、田沟砂石矿山（3000t/h）3.97MWp、田沟砂石矿山（1500t/h）1.96MWp，最终形成总装机 14.74MWp 的最优方案，与各厂区实际用电负荷实现精准匹配。

在安装倾角设计上，项目团队创新采用“结构适配性”原则：混凝土屋面 25° 倾角使组件斜面上辐照度达 1528kWh/m²，较行业常规 20° 倾角提升 4.3%；彩钢瓦屋面 5° 倾角适配轻型结构荷载要求，辐照度达 1433kWh/m²；弧形料棚屋面 0°~40° 的动态调整区间，完美解决曲面结构的采光均匀性问题。这种差异化设计使各厂区光伏组件的年等效利用小时数保持在 1055~1119h 的高位水平，其中花岭砂石骨料厂更是达到 1119h。

“自发自用，余电上网”模式的落地实施体现了系统思维：通过分析采矿区30辆电动矿卡（90吨级）每天2次充电需求（单次180km续航需360度电）、发运区114辆转运车的间歇式用电规律，结合厂区破碎设备的负荷曲线，实现电力消纳的时空平衡。数据显示，二道庄砂石矿山消纳率达98.86%，花岭砂石矿山实现100%就地消纳，五个矿区平均消纳率稳定在95%以上，最大限度减少了输电环节的线损（约5%）。

2.2 高效设备选型与技术创新

设备选型的“效能优先”原则贯穿项目全流程^[2]。平屋面选用的610Wp高效组件转换效率达23.1%，较常规550Wp组件单位面积发电量提升10.9%；弧形料棚采用的520Wp柔性组件重量仅1.2kg/m²，弯曲半径可达30cm，在满足曲面安装要求的同时，发电效率保持在21.5%。两种组件与0.4kV高效逆变器的组合，使系统综合效率系数达到0.827，这一指标得益于对11项损耗因素的精准控制：光伏组件衰减（2%）、温度影响（2.6%提升）、污秽遮挡（10%）等，通过K0至K10的修正系数叠加优化实现。

充电桩系统的技术突破体现在三个维度：8个40kW恒功率模块构成的360kW一体式设备，单枪输出电流达250A，在300-1000V宽电压范围内保持95%以上的转换效率；99%的功率因数和低于5%的总谐波含量，大幅降低了对电网的扰动；智能模块设计支持“双枪轮充”模式，当采矿区电动矿卡在10:00-16:00检修时段集中充电时，可自动分配功率模块，满足6辆卡车同时快充的需求。这种配置使单桩日均服务能力提升至12车次，远超行业8车次的平均水平。

变电系统的节能设计成效显著。SCB14型变压器的空载损耗较传统SCB13型降低15%，负载损耗降低7%，在30%负载率下能效优势尤为明显。低压侧集中无功补偿装置将功率因数从0.82提升至0.95以上，按厂区485A的最大输入电流计算，每年可减少无功损耗约12.6万度。电缆选型采用铜芯交联聚乙烯绝缘材料，穿管埋地敷设深度≥0.7m，不仅降低了地表温度变化对传输效率的影响（线损率控制在3%以内），还延长了使用寿命至25年以上。

2.3 智能监控与调度系统

基于物联网技术的能源监控系统是能效提升的“神经中枢”^[3]。系统通过充电桩内嵌的传感器、逆变器的智能接口、光伏组件的温度探头，实时采集127项运行参数，形成每秒2000点的数据流。这些数据经站控层系统分析处理后，生成三类核心决策：一是时段调度，如10:00-16:00检修期将光伏发电优先分配至发运区充电桩；二是负荷调整，当砂石销量下降30%时，自动启动余电上网机制；三是故障预警，通过组件温度骤升（超过45℃）、逆变器效率突降（低于90%）等异常信号触发维护流程^[4]。

智能调度算法深度融合了矿山生产作业特性：根据电动矿卡的GPS定位数据预测充电需求，结合光伏功率预测曲线（误差率≤8%）提前30分钟调整输出策略。以田沟砂石骨料厂（3000t/h）为例，当破碎机负荷从满产的3000t/h降至1500t/h时，系统自动将光伏出力从设备供电切换至充电桩，避免了30%的弃光损失。这种动态调整使系统的峰谷差率控制在15%以内，远低于行业25%的平均水平。

通过构建“监测-分析-决策-反馈”的管理闭环，显著提升了系统运行的可靠性与稳定性，实现全生命周期的能效优化：每月生成各厂区能效报告，对比二道庄与田沟厂区的单位产能电耗差异（约8%）；每季度进行设备能效校准，确保逆变器效率不低于98%的设计值；每年开展系统升级，2024年引入的AI预测模型使发电量预测精度提升至92%。这些措施保障了项目在25年运营期内的能效稳定性。

2.4 立体空间利用与生态融合

项目创造性地开发了“四维空间”利用模式^[5]，在52110.03m²的安装面积内实现14.74MWp装机，单位面积装机密度达282.8W/m²，较常规地面光伏（216W/m²）提升30.9%。车间屋面的利用采取“双排竖铺”布置，混凝土配重基础（0.8m×0.8m×0.5m）确保抗风等级达12级；廊道上方采用“钢框排架+光伏组件”的复合结构，净空高度6m满足车辆通行需求；道路光伏长廊的H型钢梁柱体系（Q235B材质）与C型钢檩条（Q355B）组合，既承载组件重量（0.3kN/m²），又形成遮阳挡雨的交通廊道。地质条件的适应性改造是技术落地的关键。针对场址区奥陶系灰岩的溶洞发育特征（埋深2.7-18.0m），项目创新采用混凝土扩大基础与柔性支架组合方案：固定阵列支架通过双柱结构分散荷载，拱形屋面则采用硅酮结构胶粘结工艺，既满足8度抗震设防要求，又避免了对原有地质结构的扰动，使光伏系统在复杂地形中的稳定性提升30%以上。

2.5 全生命周期成本与经济性分析

财务模型的精细化设计保障了项目可持续性^[7]。光伏系统采用18年年限平均法折旧（残值率1%），首年折旧额274.5万元，随着设备效率衰减（年衰减率0.5%）与折旧成本的反向变化，形成动态平衡的成本曲线。修理费按三阶段递增：1-5年0.3%（年约14.8万元）、6-10年0.45%（年约22.2万元）、11-25年0.6%（年约29.6万元），这种阶梯式计费与设备老化规律高度契合。

收入结构的多元化增强了抗风险能力。自用电部分按0.415元/kWh计算，年收益654.24万元；余电上网按0.3779元/kWh获得补充收益；71322.87m²光伏安装面积创造的租金收入达67.04万元/年。三项收入叠加使项目税前投资回收期控制在11.14年，财务内部收益率8.02%，优于行业平均水平（12年，7.5%）。值得注意的是，通过优化自用电比例，每年可节

约电费 73.97 万元，相当于单位产能的能源成本降低 12%。

成本控制的技术手段成效显著。4 名运维人员（年工资 15 万元）负责 14.74MWp 光伏系统的管理，人均效能达 3.69MWp/人，通过智能巡检系统（无人机+红外热像仪）降低 50% 的人工成本。保险费按固定资产原值的 0.25% 计取，年支出 12.35 万元，远低于传统能源项目的 0.5% 费率。这些措施使项目在 25 年运营期内的总成本费用控制在 390.85 万元/年的稳定水平。实践证明，砂石矿山新能源系统的能效提升是一项系统工程，需要在空间规划、设备选型、智能管控、成本优化等维度协同发力^[8]。项目创造的“光伏+矿山”式，不仅实现 25 年总发电量 3.96 亿度的清洁能源产出，更探索出一条高耗能行业绿色转型的可行路径——通过技术创新将能源效率转化为经济效益，最终达成生态价值与产业价值的统一^[9]。

3 砂石矿山新能源系统碳减排的路径

在“双碳”目标驱动下，鹤壁恒源矿业集团有限公司“光伏+充电桩”一体化项目的创新实践，构建了“空间集约利用+智能能效管理+全生命周期减碳”的立体化路径，为同类矿山的碳减排提供了可复制的技术范式与经济模型。

3.1 从环境收益到经济可持续的闭环设计

碳减排的长效性依赖于环境效益与经济收益的正向循环^[10]。该公司“光伏+充电桩”一体化项目通过精细化核算与市场化运作，构建了可量化的减碳价值体系。在环境效益层面，项目 25 年生命周期内可累计发电 3.96 亿度，对应减排 CO₂ 约 31.6 万吨、SO₂ 约 975 吨、Nox 约 845 吨，相当于种植 173 万棵树的生态效益。这种减排并非简单的能源替代，而是通过“光伏+生产”的能源梯级利用，使单位砂石产品的碳排放强度降低 18.7%。全生命周期思维贯穿项目始终。在建设阶段，采用冷弯薄壁型钢支架减少钢材消耗 30%；运维阶段通过 AI 视觉检测系统将组件清洗周期从 30 天延长至 45 天，年节水 1.2

参考文献：

- [1] 陈为化,刘航,单任仲.绿色矿山中清洁能源规划研究[J].中国矿业,2025,34(S1):37-40.
- [2] 郝宪杰,宋思桐,唐宽旭,等.我国关闭/废弃矿山土地资源的新能源再开发现状及展望[J].金属矿山,2024,(05):68-75.
- [3] 王金满,杨曼,刘彪,等.绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展[J].煤炭学报,2024,49(03):1597-1610.
- [4] 裴明松,刘海,李小伟,等.“双碳”视角下露天建材矿山碳排放周期研究[J].中国矿业,2024,33(02):36-42.
- [5] 张少锋,李佳瑞,曹语涵,等.西北地区煤矿与新能源融合发展实施路径研究[J].煤炭工程,2023,55(12):178-183.
- [6] 王双明,刘浪,赵玉娇,等.“双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径[J].煤炭科学技术,2023,51(01):59-79.
- [7] 王根钊,刘宏磊,武强,等.碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用[J].煤炭科学技术,2022,50(06):321-328.
- [8] 张黎明,张绍良,侯湖平,等.矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J].中国矿业,2022,24(11):65-70.
- [9] Shuhui H.Way of Carbon Emission Reduction in Coal Mines Based on Carbon Balance Method and B-wilson Method[J].Chemical Engineering Transactions(CET Journal),2022,67
- [10] 高晓云,陈萍.淮南塌陷区煤矸石充填复垦的碳减排效益[J].中国煤炭,2022,38(09):121-124.
- [11] 张海涛,王如松,胡聃,等.煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例[J].生态学报,2021,31(19):5638-5645.

万吨；退役阶段，N 型组件 92% 的可回收率确保材料循环利用。这种“摇篮到坟墓”的管理模式，使项目的全周期碳减排量再提升 12%。

3.2 分布式能源重构矿山生态系统

鹤壁恒源矿业集团有限公司“光伏+充电桩”一体化项目的价值不仅在于技术应用，更在于开创了“矿山即电站”的新范式^[11]。这种模式创新体现在三个维度：空间复用方面，项目利用闲置屋面与廊道实现“不占一亩耕地”的零新增用地，使单位面积土地的能源产出提升至 210kWh/m²/年；能源网络方面，通过光纤环网构建的智能监控系统，实现组件级、逆变器级、站级的三级数据联动，故障响应速度从 2 小时缩短至 15 分钟；政策衔接方面，项目精准对接河南省“十四五”新能源规划，通过屋顶光伏享受 0.1 元/度的补贴政策，使政策红利转化为实际收益的比例达 85%。

4 结论

本研究基于砂石矿山新能源项目的系统分析与实证研究，创新性地提出了高耗能产业绿色转型的解决方案。以鹤壁恒源矿业集团“光伏+充电桩”一体化项目为例，项目通过精准规划与智能调度，实现年均 1583 万度清洁发电，系统综合效率达 0.827，单位产能电耗降低 12%。实践表明，不同矿山应结合地形特征与产能需求，科学选择光伏互补或全电动路径，为砂石行业绿色转型提供可复制的实践范式与决策依据。面向未来，需重点推进多能互补系统优化、数字孪生技术融合等工作，构建能效提升与碳减排的正向循环机制。只有将单点技术突破转化为系统性解决方案，才能推动砂石行业实现从“能源消耗者”向“绿色能源生产者”的根本性转变，为双碳目标的实现奠定坚实的产业基础。本研究基于典型案例开展分析，后续可拓展至不同地域、规模与资源条件的矿山进行对比验证，并深化氢能耦合、储能集成等多元技术路径的可行性探索。