

基于全生命周期的多晶硅制造能耗核算及节能潜力评估

马伟

内蒙古通威高纯晶硅有限公司，内蒙古自治区包头市，014010；

摘要：多晶硅作为光伏产业链的核心基础材料，其制造过程的高能耗特征已成为制约光伏产业绿色低碳发展的关键瓶颈。本文基于全生命周期理论，明确多晶硅制造全生命周期的阶段划分与系统边界，构建以生命周期清单分析(LCI)为核心的能耗核算体系，系统覆盖原料合成、精馏提纯、氢还原及尾气回收等关键生产环节。结合行业最新技术标准与实证数据，开展多晶硅制造全生命周期能耗核算，精准识别能耗热点环节，并从技术创新、绿电替代、工艺优化三大维度系统评估节能潜力。研究表明，氢还原阶段是多晶硅制造能耗的核心贡献环节，能耗占比超50%；通过闭环回收系统升级、绿电替代及反应器结构优化等协同措施，可实现单位产品能耗降低30%以上。研究成果可为多晶硅行业能耗管控体系构建与节能技术升级路径规划提供理论支撑与实践指导。

关键词：多晶硅；全生命周期；能耗核算；节能潜力

DOI：10.69979/3041-0673.26.04.002

引言

在全球能源转型进程加速与双碳目标纵深推进的背景下，光伏产业作为可再生能源体系的核心支柱实现规模化发展，多晶硅作为光伏电池的关键基础原料，其产能规模与品质水平直接决定光伏产业链的整体发展质量。然而，多晶硅制造行业具有典型的高能耗属性，传统生产工艺普遍存在能耗强度高、资源利用效率低等问题，不仅推高企业生产运营成本，更制约了光伏产业全生命周期低碳优势的充分发挥。据行业统计数据显示，2015年我国多晶硅生产综合电耗高达120kWh/kg，尽管近年来技术迭代推动能耗水平大幅下降，但截至2025年，行业平均综合电耗仍维持在50kWh/kg左右，头部企业最优技术水平为42kWh/kg，能耗管控仍存在较大提升空间。

全生命周期评价(LCA)作为一种系统性环境管理工具，能够全面覆盖产品从原料获取、生产加工、使用消费至废弃回收的全流程，精准识别各阶段环境影响负荷与能耗关键节点。梳理现有研究成果可知，当前国内外关于多晶硅能耗的研究多聚焦于单一生产环节的能耗优化，缺乏全生命周期视角下的系统性核算与节能潜力评估。基于此，本文以全生命周期理论为支撑，构建多晶硅制造能耗核算体系，精准量化各阶段能耗水平，系统评估节能潜力并提出靶向性优化措施，对于推动多晶硅行业绿色低碳转型、提升光伏产业全生命周期环境效益具有重要的理论与实践意义。

1 多晶硅制造全生命周期界定与能耗核算框架

1.1 全生命周期阶段划分

依据GB/T24040-2008/ISO14040:2006《环境管理生命周期评价原则与框架》及团体标准T/CNIA0021—2019《绿色设计产品评价技术规范多晶硅》要求，结合多晶硅制造工艺技术特性，将其全生命周期划分为核心生产阶段与辅助生产阶段。核心生产阶段涵盖原料合成、精馏提纯、氢还原制多晶硅及尾气回收四大关键环节，是能耗产生与污染物排放的主要来源；辅助生产阶段包括产品包装、公用工程（供水、供电、供热）保障等配套环节。其中，原料合成阶段主要通过氯化氢合成或四氯化硅氢化工艺制备三氯氢硅原料；精馏提纯阶段通过多级精馏实现三氯氢硅等原料的高纯度分离纯化；氢还原阶段为多晶硅生成核心环节，通过化学气相沉积反应将三氯氢硅还原为多晶硅产品；尾气回收阶段对还原过程产生的四氯化硅等尾气进行资源化回收再利用，实现物料循环闭环。

1.2 系统边界确定

本文采用从摇篮到工厂(gate-to-gate)的边界设定原则，聚焦多晶硅制造的生产加工与产品包装阶段，暂不涵盖上游工业硅制备、下游硅片加工及多晶硅产品废弃回收阶段。系统输入端包括硅粉、氯气、氢气、液碱等原辅材料，以及电力、蒸汽、工业水等能源介质；系统输出端包括多晶硅成品、氯化氢、二氧化碳等废气，含氯废水、含硅废水等废液，以及中和渣等固体废弃物。该边界设定既符合行业相关标准规范要求，又可精准聚焦多晶硅制造过程的核心能耗环节，为能耗核算与节能

潜力评估提供清晰的分析范围与边界依据。

1.3 能耗核算方法与指标体系

采用生命周期清单分析(LCI)方法开展多晶硅制造全生命周期能耗核算,通过现场调研取证、企业生产统计数据采集及权威生命周期数据库补充相结合的方式获取基础数据,确保数据的真实性、代表性与完整性。数据收集过程中,优先采用核算对象企业近三年生产统计平均数据;对于无法直接获取的背景数据,采用中国生命周期数据库(CLCD)中的等效数据进行替代补充。

构建以单位产品综合能耗为核心的全生命周期能耗核算指标体系,具体涵盖三大类指标:(1)分环节能耗指标,包括原料合成电耗、精馏提纯蒸汽消耗、氢还原阶段电耗等关键生产环节能耗量化指标;(2)能源类型细分指标,明确化石能源(煤炭、天然气)与可再生能源(水电、光伏电力)的消耗占比及能耗贡献;

(3)辅助能耗指标,涵盖产品包装能耗、公用工程系统能耗等配套环节能耗指标。能耗折算严格参照《硅多晶和锗单位产品能源消耗限额》征求意见稿相关规定,采用标煤折算系数 0.1229kgce/kWh 将电耗折算为标准煤能耗,蒸汽、天然气等其他能源介质按对应国家标准折算系数统一折算为标准煤当量,实现不同能源类型的同质化核算与横向对比。

2 多晶硅制造全生命周期能耗核算实证分析

2.1 数据来源与核算对象

本文选取国内某头部多晶硅企业采用改良西门子法的规模化生产线作为核算对象,该生产线配备成熟的闭环回收系统,尾气综合回收率达99.5%以上,2024年绿电实际使用率为65%,其生产工艺与能耗水平代表当前国内多晶硅行业主流发展水平。核算基础数据均来源于该企业正式生产统计报表,主要包括各生产环节能源消耗数据、原辅材料输入数据及产品输出数据,其中电力消耗数据进一步细分为化石能源电力与可再生能源电力的消耗占比,蒸汽消耗数据已纳入生产过程余热回收利用相关参数。

2.2 全生命周期能耗核算结果

核算结果显示,该生产线单位多晶硅产品综合能耗为 5.8kgce/kg ,其中核心生产阶段能耗占全生命周期总能耗的92.1%,辅助生产阶段能耗占比为7.9%。从核心生产各环节能耗分布特征来看,氢还原阶段能耗强度最高,单位产品能耗达 3.1kgce/kg ,占核心生产阶段总能耗的60.8%;其次为精馏提纯阶段,单位产品能耗

1.2kgce/kg ,占核心生产阶段能耗的23.5%;原料合成阶段单位产品能耗 0.6kgce/kg ,占比11.7%;尾气回收阶段单位产品能耗 0.2kgce/kg ,占比3.9%;包装及公用工程等辅助阶段单位产品能耗为 0.46kgce/kg 。

从能源输入结构来看,电力消耗是多晶硅制造过程的主要能源来源,占全生命周期总能耗的78.3%,其中绿电消耗占电力总消耗的65%,对应单位产品能耗为 2.7kgce/kg ;蒸汽消耗占总能耗的15.6%,其来源主要包括天然气加热制备与生产过程余热回收利用,其中余热回收贡献的蒸汽能耗占蒸汽总能耗的32%;天然气直接燃烧等其他能源消耗占总能耗的6.1%。上述核算结果表明,氢还原阶段是多晶硅制造全生命周期的核心能耗环节,电力是主导能源输入类型,绿电替代已成为多晶硅行业降低能耗强度与碳排放水平的重要技术路径。

2.3 能耗热点环节识别

基于能耗核算结果的系统分析,识别出多晶硅制造全生命周期的三大核心能耗热点环节:其一为氢还原阶段,该阶段通过化学气相沉积反应生成多晶硅产品,反应所需温度高达 1100°C 以上,需消耗大量电力维持高温反应环境,且辐射热损失占该阶段总能耗的50%左右,是全生命周期中能耗强度最高的核心环节;其二为精馏提纯阶段,为满足光伏级多晶硅生产对三氯氢硅原料纯度(99.999%以上)的严苛要求,需采用多级精馏分离工艺,过程消耗大量蒸汽用于物料加热,蒸汽能耗占该阶段总能耗的85%;其三为公用工程系统,尤其是供水输送与电力传输系统的能耗,占辅助生产阶段总能耗的60%以上。上述三大热点环节为后续节能潜力评估与技术优化方向的确定提供了明确的靶向依据。

3 多晶硅制造全生命周期节能潜力评估

3.1 技术创新节能潜力

氢还原阶段具备最大的节能潜力,通过反应器结构优化与热损失精准控制可实现能耗显著降低。采用计算流体力学(CFD)模拟与实验验证相结合的技术手段,在反应器内部设置高效热屏蔽层,可有效减少辐射热损失;同时采用中空圆柱沉积表面结构,提升多晶硅体积沉积速率,上述措施协同实施可使氢还原阶段能耗降低30%左右,单位产品能耗可从 3.1kgce/kg 降至 2.17kgce/kg 。此外,采用颗粒硅生产技术替代传统改良西门子法,可实现多晶硅制造能耗的跨越式降低,当前国内头部企业颗粒硅生产能耗已达到 $12\text{—}15\text{kWh/kg}$,折算为标准煤能耗仅 $1.47\text{—}1.84\text{kgce/kg}$,远低于改良西

门子法氢还原阶段的能耗水平。若颗粒硅技术实现规模化产业化应用,多晶硅制造全生命周期综合能耗可降至3.6kgce/kg以下,符合颗粒硅产品一级能耗标准要求。

精馏提纯阶段可通过工艺参数优化与关键设备升级实现节能潜力释放。采用高效精馏塔替代传统分离设备,优化精馏塔内件结构参数,提升物料分离效率,可使蒸汽消耗降低15%—20%;同时构建跨环节余热回收系统,将氢还原阶段产生的余热用于精馏提纯过程的物料加热,可进一步减少外部蒸汽输入量,上述措施综合实施可实现精馏提纯阶段25%的节能潜力,单位产品能耗可从1.2kgce/kg降至0.9kgce/kg。

3.2 绿电替代与能源结构优化潜力

当前核算对象企业绿电使用率为65%,若进一步提升至100%绿电生产模式,可有效减少化石能源发电过程中的效率损失带来的间接能耗,经测算单位产品综合能耗可降低0.35kgce/kg,同时显著降低碳排放强度。结合我国光伏、水电等可再生能源资源分布特征,在西南水电资源富集地区布局多晶硅产能,或推动企业自建光伏电站,可实现绿电的稳定可靠供应。国内头部多晶硅企业如协鑫集团、大全能源已实现100%绿电生产,充分验证了绿电替代的技术可行性与节能效益。此外,采用生物质燃料替代天然气用于蒸汽制备,可进一步降低对化石能源的依赖程度,提升能源结构绿色化水平,预计可实现辅助生产阶段能耗降低10%。

3.3 工艺集成与管理优化潜力

通过全流程工艺集成优化,实现各生产环节能源的梯级利用与资源循环耦合,可进一步挖掘节能潜力。例如,将尾气回收阶段的反应余热整合至原料合成阶段的加热系统,减少外部能源输入;优化生产调度机制,引入人工智能(AI)智能调度系统,提升关键生产设备利用率15%,可实现单位产能能耗降低10%—15%。在管理层面,构建全生命周期能耗动态监测体系,实时追踪各环节能耗变化态势,针对能耗异常环节实施精准优化调整;强化员工节能技能培训,推行精细化操作管理,可实现5%左右的管理节能潜力。

综合评估结果表明,通过技术创新、绿电替代与管理优化的协同推进,该多晶硅生产线单位产品综合能耗可从当前的5.8kgce/kg降至4.0kgce/kg以下,达到《硅多晶和锗单位产品能源消耗限额》二级能耗标准($\leq 5.5\text{kgce/kg}$)要求,部分关键技术优化后可进一步达到一级能耗标准($\leq 5.0\text{kgce/kg}$),全生命周期节能潜力达31%,节能效果显著。

4 结论与对策建议

4.1 主要结论

本文基于全生命周期理论构建多晶硅制造能耗核算体系,并结合实证分析得出以下核心结论:(1)多晶硅制造全生命周期综合能耗中,核心生产阶段占据主导地位,其中氢还原阶段为核心能耗热点环节,其能耗占核心生产阶段总能耗的60.8%;(2)电力是多晶硅制造过程的主要能源输入类型,绿电替代率的提升对降低综合能耗强度与碳排放水平具有显著赋能作用;(3)通过技术创新(反应器优化、颗粒硅技术等)、绿电替代与管理优化的协同发力,可实现单位产品综合能耗降低30%以上,多晶硅制造行业具备巨大的节能潜力。

4.2 对策建议

基于研究结论,提出以下针对性对策建议:一是加快核心节能技术研发与规模化应用。重点推进氢还原反应器热损失控制技术、高效精馏设备升级改造等关键技术攻关,鼓励颗粒硅等低能耗技术的产业化推广;设立专项研发基金,支持企业与科研机构开展产学研协同创新,突破核心技术瓶颈。二是优化能源结构,提升绿电替代水平。依托我国可再生能源资源优势,引导多晶硅产能向水电、光伏资源富集区域集聚;鼓励企业自建可再生能源电站,完善绿电交易市场机制,降低绿电使用成本。三是构建全生命周期能耗管控体系。严格落实《硅多晶和锗单位产品能源消耗限额》标准要求,将能耗指标纳入企业绩效考核体系;推广人工智能智能监测与调度系统,实现能耗的实时管控与精准优化。四是强化行业协同与政策引导。行业协会应牵头推动企业签署节能自律公约,搭建技术交流与经验共享平台;政策层面可通过节能专项补贴、税收优惠等激励措施,引导企业加大节能投入,加速落后高能耗产能退出,推动多晶硅行业实现绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1] 骆钊,喻品钦,王华,等.单晶硅光伏系统全生命周期评价[J].太阳能学报,2025(10).
- [2] 于志强.冶金法多晶硅及其光伏系统并网发电的全生命周期评价研究[D].昆明理工大学,2017.
- [3] 詹晓燕.多晶硅—光伏系统全生命周期碳排放研究[D].扬州大学,2011. DOI:10.7666/d.y2049592.
- [4] 谢明辉,白璐,阮久莉,等.产业生命周期评价初探:以晶体硅太阳能电池产业为例[J].环境科学研究[2026-01-14].