

光伏多晶硅电耗降低技术路径探索

郑海洪

新疆大全新能源股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘要: 光伏多晶硅作为关键半导体材料,其生产电耗是影响行业成本与竞争力的核心因素。当前主流工艺中,改良西门子法因成熟占据主导但能耗较高,硅烷法能耗较低却受安全性制约。生产电耗分布于合成、电解制氢、精馏、还原、尾气回收等环节,受原材料纯度、设备性能、工艺参数等影响显著。通过优化工艺参数、改进设备、开发新工艺及加强能源管理与回收,可有效降低电耗,提升能源利用效率,推动行业绿色低碳发展。

关键词: 光伏多晶硅;电耗降低技术;路径探索

引言

随着光伏产业快速发展,多晶硅需求激增,其生产过程的高电耗问题日益凸显,成为制约行业可持续发展的关键。改良西门子法与硅烷法作为主流工艺,在电耗控制上各有挑战。生产中,各环节电耗相互关联,受多种因素影响,降低电耗对提升企业效益、践行双碳目标意义重大。本文围绕光伏多晶硅电耗降低技术路径展开探索,分析电耗构成与影响因素,从工艺优化、设备改进等方面提出策略,为行业节能降耗提供参考。

1 光伏多晶硅生产工艺概述

多晶硅,作为单质硅的一种重要形态,由众多结晶学方向各异的硅单晶体组合而成。其在常温环境下,化学性质颇为稳定,但一旦处于高温状态,便会与氧、氮、硫等物质发生化学反应;在高温熔融状态时,化学活性显著增强,几乎能够与任何材料相互作用。多晶硅具备半导体特性,是极为关键的优良半导体材料,作为生产单晶硅的直接原料,堪称当代人工智能、自动控制、信息处理、光电转换等半导体器件的电子信息基础材料,被誉为“微电子大厦的基石”。当下,多晶硅的生产技术主要包含改良西门子法与硅烷法。改良西门子法,是在传统西门子法气相沉积生产柱状多晶硅的基础上,采用闭环式生产工艺发展而来。该工艺首先让工业硅粉与HCl发生反应,生成SiHCl₃。将SiHCl₃置于H₂气氛的还原炉中,进行还原沉积,进而得到多晶硅。还原炉所排出的尾气,诸如H₂、SiHCl₃、SiCl₄、SiH₂Cl₂和HCl等,经过一系列分离操作后,可实现循环利用。此方法工艺成熟,沉积速率较高,原料相对安全,能够兼容太阳能级与电子级多晶硅的工业化生产,目前在市场中占据较大份额。不过,其存在产率低、能耗高、成本高、资金投入大以及资金回收慢等固有缺点。硅烷法,是把硅烷通入以多晶硅晶种作为流化颗粒的流化床里,促使

硅烷裂解,并在晶种上沉积,最终获得颗粒状多晶硅。硅烷的制备方法多样,常见的有歧化法等。该方法所生成的多晶硅含硅量较高,分解速度快,分解率高,且分解温度较低,生成的多晶硅能耗较低,产品纯度也较高。硅烷不但制造成本高昂,而且具有易燃、易爆的特性,安全性较差,在一定程度上限制了其在工业生产中的广泛应用。

2 光伏多晶硅生产电耗构成及影响因素

2.1 电耗构成分析

在光伏多晶硅生产流程中,电耗分布于多个关键环节。从起始的原料处理阶段,到核心的反应生成过程,再到后续的产品提纯与精制,电力的消耗贯穿始终。在合成环节,工业硅粉与HCl反应生成SiHCl₃时,需要电能来维持反应所需的特定温度与压力环境,确保反应高效、稳定地进行。电解制氢过程同样高度依赖电力,水电解为氢气,而氢气在后续的还原沉积步骤中是不可或缺的反应物,其制备过程的电耗在整体电耗中占据相当比例。精馏环节,为实现物质的精准分离,获取高纯度的反应原料,需要借助电力驱动各类精馏设备,实现不同组分的有效分离。在还原炉内, SiHCl₃在H₂气氛下还原沉积生成多晶硅,这一过程不仅需要持续的电能来维持高温环境,以促使化学反应发生,还需要电力来保障还原炉内的压力控制、气体流量调节等操作的精准性。尾气回收阶段,通过一系列复杂的分离操作,将尾气中的H₂、SiHCl₃、SiCl₄等物质进行回收再利用,此过程中的压缩、冷凝、吸附等设备均需消耗大量电能。氢化环节,对反应过程中产生的副产物进行处理,使其转化为可循环利用的原料,这同样离不开电能的支持。这些环节的电耗相互关联,共同构成了光伏多晶硅生产的综合电耗体系,任何一个环节电耗的变化,都可能对整体电耗产生显著影响^[1]。

2.2 影响电耗的因素

2.2.1 原材料纯度

原材料纯度对光伏多晶硅生产电耗有着至关重要的影响。以工业硅粉为例，其纯度若较低，杂质含量相对较高，在与HCl反应生成SiHCl₃的过程中，杂质可能会参与副反应，消耗额外的能量，同时导致反应速率降低，为了达到预期的反应进度与产量，就不得不延长反应时间或提高反应条件的严苛程度，这无疑会增加电耗。在精馏环节，若原料中杂质过多，会增加精馏的难度与复杂性，需要更多的塔板数和更大的回流比，才能实现高纯度的分离效果，而这将大幅提升精馏过程的电耗。不纯的原料在后续的还原沉积过程中，可能会影响多晶硅的生长质量与速率，使得还原炉需要消耗更多的电能来维持合适的反应环境，以保障多晶硅的正常生成。高纯度的原材料能够减少副反应的发生，降低反应过程中的能量损耗，优化精馏与还原等环节的运行效率，从而有效降低整体生产过程中的电耗。确保原材料具备较高的纯度，是降低光伏多晶硅生产电耗的关键基础。

2.2.2 生产设备性能

生产设备性能在很大程度上决定了光伏多晶硅生产的电耗水平。先进的合成设备，能够通过优化内部结构与反应路径，增强对反应条件的精准控制能力，使得工业硅粉与HCl的反应在更高效的条件下进行，减少不必要的能量浪费，从而降低合成环节的电耗。在还原炉方面，采用新型材料与设计的高效还原炉，具有更好的热传导与隔热性能，能够在维持反应所需高温的同时，减少热量散失，降低电能的无效消耗。高效还原炉还可能具备更合理的气体分布与流量调节系统，有助于提高SiHCl₃的还原效率，降低还原电耗。对于精馏设备而言，高性能的精馏塔与先进的分离技术相结合，能够在更低的能耗下实现更精准的物质分离，减少因分离不彻底导致的重复操作所带来的电耗增加。尾气回收设备若具备更高的回收效率，能够在消耗较少电能的情况下，实现对尾气中各类有用物质的高效回收，进一步降低整体电耗。先进的生产设备通过提升反应效率、优化能量利用、减少能量损失等多方面途径，对降低光伏多晶硅生产电耗发挥着极为重要的作用。

2.2.3 生产工艺参数

生产工艺参数的合理设置是影响光伏多晶硅生产电耗的关键因素。在反应温度方面，不同的反应阶段存在着最适宜的温度区间。例如，SiHCl₃的合成反应，温度过高可能引发副反应，导致能耗上升，而温度过低则反应速率缓慢，为达到产量要求同样会增加整体能耗。精确

控制反应温度在最佳范围内，能够实现能耗与生产效率的平衡。反应压力也是如此，合适的压力条件有助于促进反应向生成目标产物的方向进行，提高反应转化率，减少能量的无效消耗。气体流量的控制同样重要，在还原沉积过程中，H₂与SiHCl₃的流量比例会直接影响多晶硅的沉积速率与质量。若流量比例不合理，可能导致沉积不均匀、质量下降，进而需要额外的能量来进行后续处理或重新调整工艺，增加电耗。反应时间的控制也不容忽视，过长的反应时间会增加能耗，而过短则影响产品质量与产量，同样会间接导致能耗上升。通过不断优化和精准调控这些生产工艺参数，能够有效降低光伏多晶硅生产过程中的电耗，提升生产的经济性与能源利用效率^[2]。

3 光伏多晶硅电耗降低技术路径

3.1 优化生产工艺参数

(1) 针对反应温度，运用先进的温度监测与调控系统，对不同反应阶段的温度进行精准把控。在SiHCl₃合成反应中，通过实时收集反应数据，利用智能算法动态调整加热或冷却设备的运行功率，确保反应温度稳定处于最佳区间，避免因温度波动引发的副反应与能耗增加，实现能耗与生产效率的最优平衡。(2) 在反应压力方面，安装高精度压力传感器，精确测量反应体系内的压力变化。依据反应动力学原理，结合实际生产数据，优化压力调节策略。在保证反应向生成目标产物方向高效进行的同时，避免过高压力导致的设备损耗与能源浪费，提高反应转化率，降低能量的无效消耗。(3) 对于气体流量，采用质量流量计和流量调节阀，实现对H₂与SiHCl₃等气体流量的精确控制。在还原沉积时，借助大数据分析模拟技术，构建气体流量比例与多晶硅沉积速率、质量的精准模型，依据模型反馈实时调整流量比例，保证多晶硅沉积均匀、质量佳，降低后续处理能耗。严格控制反应时间，通过自动化控制系统设定合理时长，避免能耗上升，提升能源利用效率。

3.2 改进生产设备

(1) 在合成设备的改进上，深入研究工业硅粉与HCl反应的机理，优化设备内部的反应腔体结构，设计更合理的物料混合与反应路径。采用新型耐腐蚀、耐高温材料制造设备内壁，减少物料在反应过程中的附着与损耗，提高反应效率。引入智能控制系统，实现对反应温度、压力、流量等参数的精准调节，降低合成环节的电耗。(2) 对于还原炉，研发并采用新型高效热传导与隔热材料，优化炉体的热传递性能，减少热量散失到周围环境。改进还原炉的气体分布装置，使H₂与SiHCl₃在炉内更均匀地分布，提高反应的均匀性与SiHCl₃的还原效率。

通过对还原炉的结构与控制算法进行优化,实现对炉内温度场、压力场的精确控制,降低还原电耗,提升多晶硅的生长质量与速率。(3)精馏设备的改进,选用高性能的精馏塔内件,如高效填料与塔板,结合先进的分离技术,如变压精馏、热泵精馏等,能在更低能耗下实现更精准分离,提高分离效率,减少重复操作增加的电耗。对控制系统升级,实现自动化与优化控制以降低能耗。对于尾气回收设备,研发新型高效的吸附剂与分离膜,在消耗较少电能的情况下,实现尾气中有效物质的高效回收,降低整体电耗。

3.3 开发新型生产工艺

(1)探索新型的多晶硅合成工艺,研究采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)等先进技术,降低反应温度与压力条件,减少能源消耗。通过对等离子体参数的精确控制,促进反应的高效进行,提高多晶硅的合成速率与质量,同时降低合成过程中的电耗。(2)研发新的氢化工艺,改进对反应副产物的处理方式。例如,采用催化氢化技术,在更温和的条件下将副产物转化为可循环利用的原料,提高原料的利用率,减少因副产物处理不当导致的能源浪费,降低氢化环节的电耗。(3)结合绿色化学理念,开发环境友好型的多晶硅生产工艺。探索使用无毒、无害的原料与溶剂,减少生产过程中的污染排放,同时优化工艺路线,降低整体能耗。例如,研究以水为溶剂的多晶硅生产工艺,替代传统的有机溶剂,不仅降低了成本,还减少了能源消耗与环境污染。积极开展产学研合作,与科研机构、高校共同研发新型生产工艺,充分利用各方的技术优势与创新资源,加速新型工艺的开发与应用,提升公司在多晶硅生产技术领域的竞争力^[3]。

3.4 加强能源管理和回收利用

(1)建立完善的能源管理系统,安装智能电表、水表、气表等能源计量设备,对生产过程中的能源消耗进行实时监测与数据采集。通过能源管理软件对采集到的

数据进行分析,挖掘能源消耗的规律与潜在问题,为制定节能措施提供数据支持。(2)在能源回收利用方面,对还原炉等设备产生的余热进行回收再利用。采用余热锅炉、热管换热器等设备,将余热转化为蒸汽或热水,用于预热原料、加热工艺水等,提高能源的综合利用率。对尾气回收过程中产生的压力能进行回收,通过膨胀机等设备将压力能转化为电能或机械能,供其他生产环节使用,降低整体电耗。(3)优化生产调度,根据能源价格的波动与生产任务的需求,合理安排生产设备的运行时间与负荷。在能源价格低谷时段,适当增加生产负荷,提高设备的运行效率,降低单位产品的能源消耗成本。加强对员工的能源管理培训,提高员工的节能意识,鼓励员工在日常操作中积极采取节能措施,形成全员参与的能源管理氛围,持续降低光伏多晶硅生产的电耗,提升企业的经济效益与环境效益。

结语

综上所述,降低光伏多晶硅生产电耗是一项系统工程,需从工艺、设备、能源管理等多维度协同发力。通过优化生产参数提升反应效率,改进设备减少能量损耗,开发新型工艺突破传统瓶颈,加强能源回收利用提高综合效益,可显著降低电耗。未来,需持续推动技术创新与产学研融合,强化全流程节能意识,在保障产品质量的同时,实现能耗持续下降,助力产业向高效、绿色方向升级,增强市场竞争力与可持续发展能力。

参考文献

- [1]朱徐立,谢连发,黄丹辉,等.光伏多晶硅定向凝固不平衡散热的数值研究与实验[J].宇航材料工艺,2024,54(4):30-36.
- [2]陈敏,陈辉,常欣,等.基于成本和区域优势视角的光伏多晶硅产业发展格局[J].绿色矿冶,2023,39(1):53-64.
- [3]何岩,吴彬林,王敏,等.光伏多晶硅原料国际价格的形成机制[J].百科知识,2023(36):11-13.