

# 变频器解决方案在多晶硅项目的应用研究及发展趋势

马 玲 (重庆横河川仪有限公司, 重庆 400707)

**摘要:** 是单质硅的一种形态。在过冷条件下, 熔融的单质硅原子以金刚石晶格形态排列成多个晶核, 这些晶核长成具有不同晶面取向的晶粒, 并最终结合形成多晶硅。多晶硅因其具有高稳定性、高电导率和低电阻率等特点, 因此被广泛应用于多个领域, 主要包括: 太阳能产业、半导体行业、化学工业、电力行业等。本文通过对多晶硅项目具体的发展趋势和生产工艺进行研究, 结合变频器在多晶硅生产工艺过程中的难点, 在实际应用中给出具体解决方案。

**关键词:** 多晶硅; 西门子改良法; 应用研究; 发展趋势

## 1 多晶硅的概念

多晶硅是制造太阳能电池的核心材料, 用于制造硅片、电池组件和太阳能发电系统。随着清洁能源的需求日益增长多晶硅在太阳能领域的应用也持续扩大。太阳能级多晶硅主要用于光伏电池的生产制造, 而电子级多晶硅作为芯片等生产的原材料, 广泛应用于集成电路产业。根据硅料掺入杂质及导电类型的不同, 可分为P型、N型。当硅中掺杂以受主杂质元素, 如硼、铝、镓等为主时, 以空穴导电为主, 为P型。当硅中掺杂以施主杂质元素, 如磷、砷、锑等为主时, 以电子导电为主, 为N型。多晶硅根据纯度要求的不同, 可划分为金属级、太阳能级和电子级。其中, 太阳能级多晶硅约45%, 电子级多晶硅占比大概在55%左右。太阳能级多晶硅一般纯度在6N~9N之间(即99.9999%~99.9999999%, 几个9即是几N); 应用于芯片的硅(电子级)要求纯度达到11N(99.999999999%)、12N(99.999999999%)。其次, 多晶硅是半导体制造中最重要的原材料之一, 可用于制造集成电路、晶体管、二极管等半导体器件。在化学工业方面, 多晶硅可以用作化学品生产过程中的催化剂, 促进化学反应的进行, 并提高反应速率和效率。此外, 它还可以用于制造高温陶瓷、硅胶、硅橡胶和硅藻土等产品。在电力行业方面, 多晶硅可用于制造高效能的太阳能电池板和风力发电系统等可再生能源发电设备, 满足能源转型和清洁能源需求。

## 2 多晶硅的发展现状及发展趋势

多晶硅是光伏产业的核心原材料, 对于支持全球能源转型和实现“双碳”目标扮演着至关重要的角色。多晶硅的发展趋势不仅关系到光伏行业的健康进展, 也是新能源领域广泛关注的重点。自2022年起, 中国多晶硅产能呈现快速增长趋势。中商产业研究院的

报告显示, 2022年底中国多晶硅产能达到120.3万吨, 到2023年末, 名义产能进一步提升至275.1万吨。根据国际能源署(IEA)预测2024年全球光伏新增装机量402.3GW, 集邦咨询预测2024年全球光伏新增装机量为474GW, 彭博新能源财经预测2024年全球光伏新增装机达到574GW。

中国光伏行业协会数据显示, 2023年我国多晶硅产量超过143万吨, 同比增长66.9%。此外, 东南亚、印度、中东、中亚、非洲等“一带一路”沿线国家或地区的光伏电站装机容量骤增。中国光伏产业可以抓住出海拓商机的新机遇点, 向外开辟更广阔的市场。

然而当前多晶硅行业遇到的主要问题便是多晶硅产能过剩, 尤其是在中国市场。过剩产能导致多晶硅价格下跌, 企业利润率降低。颗粒硅龙头协鑫科技发布2023年年报, 报告期内实现营收337.01亿元, 同比下滑6.2%; 净利润25.1亿元, 下滑84.7%。大全能源发布了2023年年报, 2023年大全能源实现营收163.29亿元, 同比减少47.22%; 实现归属于上市公司股东的净利润57.63亿元, 同比减少69.86%。硅料价格从2023年初的20万元/吨, 已经跌破5万元/吨, 毛利率随之大幅下降。根据硅业分会数据显示, 硅料价格依旧呈持续下跌。当前, 光伏面临全产业链过剩局面, 预计2024年全球多晶硅产能将超过300万吨。面临过剩, 优质产能是做到“剩”者为王的关键。因此, 通过优化多晶硅技术创新, 投入, 提高产品质量和降低生产成本, 是多晶硅生产企业强有力竞争的关键。

## 3 多晶硅的主要流程工艺

目前, 多晶硅的主流生产工艺大概分为四种, 包括西门子改良法、硅烷流化床法、冶金法、硅碳热还原法, 其中西门子改良法是目前行业中应用较多的生产工艺, 其他几种方法均由于生产过程中的特点, 在

不断的进行研究和完善。

### 3.1 西门子改良法

原始西门子改良法工艺源自德国西门子公司在1955年开发的高温硅芯积累技术。第一代西门子工艺含有大量的副产物，如四氯化硅( $\text{SiCl}_4$ )、氢气( $\text{H}_2$ )、氯化氢( $\text{HCl}$ )。经过多年发展，第三代西门子多晶硅生产工艺实现了四氯化硅的闭路循环生产，即“西门子改良工艺”。改良西门子法成熟，是目前多晶硅生产的主导工艺。

西门子改良法以 $\text{SiO}_2$ 为原料，第一步是将 $\text{SiO}_2$ 还原成煤冶炼金硅。使用 $\text{Si}$ 和 $\text{HCl}$ 两种物质，在一定条件下在还原炉中反应生成产物三氯氢硅( $\text{SiHCl}_3$ )。其次，需要通过蒸馏提纯 $\text{SiHCl}_3$ ，提纯过程中需要注意两点：一是需要达到 $\text{SiHCl}_3$ 的沸点；其次，要防止水分和空气混合，从而有效保证 $\text{SiHCl}_3$ 的纯度。最后，对 $\text{SiHCl}_3$ 进行还原，通常通过气相沉积工艺，在密封环境中进行，最终获得高纯度多晶硅。

### 3.2 硅烷流化床法(颗粒硅)

硅烷流化床法：第二大多晶硅制备工艺，使用硅烷进行还原；硅烷流化床法与改良西门子法的前半段工艺相同，都是通过工业硅氢化得到三氯氢硅并分离尾气，但硅烷流化床法在后半段将三氯氢硅加氢制成硅烷，并将其通入流化床反应炉内进行连续热分解，然后在流化床反应器内对预制的硅晶种进行气相沉积反应，以产生粒状多晶硅产物。硅烷易与其他氯硅烷分离，分解温度低，分解率高，副反应少，因此硅烷流化床法具有以下优点：精馏，废气处理工艺简单，能耗和单体投资大幅降低，反应转化率接近100%，流化床电耗仅为西门子改良法的10%~20%。主要优点是可以不间断地连续生产，从而实现极高的生产率。能量转化率高，比西门子改良法大大降低能耗。反应物处于流动状态，有效保证了反应物之间的充分接触，既可提升反应效率，又可缩短反应时间。

### 3.3 冶金法

冶金法也称为物理冶金法，是指利用冶金技术方法提纯冶金级硅的过程，主要是利用工业硅为原材料，采用湿法冶金、真空熔炼、氧化精炼、定向凝固、特种场熔炼等技术组合而制备多晶硅的方法。

冶金法的特点在于硅在提纯过程中不参与任何化学反应，根据硅与杂质的物理特性差异，可以通过金属熔炼的方法除去杂质，从而获得满足太阳能电池性能要求的多晶硅。冶金法是制备多晶硅的新技术，以

低成本、低能耗、保护环境著称。

## 4 变送器解决方案

### 4.1 变送器简介

变送器是一种输出为标准信号的传感器，它能够将传感器输出的模拟信号转变为标准信号。这些标准信号的形式和数量范围都符合国际标准，例如电流信号 $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$ (DC)和电压信号 $1\text{V}\sim 5\text{V}$ (DC)等。变送器主要由测量部分、放大器和反馈部分组成，用于检测被测变量并将其转换成可被放大器接受的输入信号，再通过反馈部分将输出信号转换成反馈信号，与调零信号进行比较并放大，最终转换成标准输出信号。

变送器在工业中应用广泛，主要作用是将各种物理量，如温度、压力、流量、液位等，转换成可接收的直流模拟量电信号，以便于传输到远处的控制室或显示设备上。它们被广泛应用于石油、石化、化工、电力、造纸、钢铁等多个行业。

此外，变送器还分为多种类型，如电压输出型和电流输出型，以及气动变送器和电动变送器等以适应不同的工作环境和能源需求。在应用中变送器需要满足高稳定性、高精度等要求，以确保测量和控制的准确性。

### 4.2 变送器在多晶硅项目的监测内容

变送器在工业自动化、仪表与控制系统中发挥着关键作用，是连接传感器与控制系统的重要桥梁。在这个过程中，变送器作为一种关键的自动化控制设备，为多晶硅生产过程提供了精确的温度、压力、流量等参数的实时监测和控制，变送器在多晶硅行业的主要检测点如下：

#### 4.2.1 温度监测与控制

多晶硅生产过程中，温度对晶体生长具有重要影响。过高或过低的温度都可能导致晶体质量下降，甚至影响生产过程的正常进行。因此，实时监测和控制多晶硅炉内的温度至关重要。变送器可以将温度传感器的信号转换为标准信号，通过通信接口传输给控制系统，实现对温度的实时监测和调节。

#### 4.2.2 压力监测与控制

多晶硅生产过程中，压力对气体输送、液体流动等环节具有重要作用，压力是否匹配操作工况可以保证生产过程的稳定性和效率。变送器可以实时监测和控制多晶硅生产过程中的压力，确保压力在设定范围内波动，提高生产效率和产品质量。

#### 4.2.3 流量监测与控制

在实际生产过程中，准确的流量监测和控制可以

保证生产过程的稳定性和效率。变送器可以实时监测和控制多晶硅生产过程中的流量,确保流量在设定范围内波动,提高生产效率和产品质量。

#### 4.2.4 液位监测与控制

多晶硅生产过程中,液位对于反应釜、储罐等设备的运行具有重要影响,液位监测和控制可以保证生产过程的安全性和稳定性。变送器可通过对多晶硅生产过程中的液位的实时监测和控制,确保液位在设定范围内波动,以提高生产效率和产品质量。

#### 4.3 主要监测点

##### 4.3.1 三氯氢硅合成工段

变送器被用于监控反应炉的温度、压力以及三氯氢硅合成过程中的各种参数。多晶硅的生产需要在高温、低温、高磨损等特殊工况下进行,因此对变送器的耐高温、耐低温、防磨损等性能有较高要求。同时,变送器还需要能够快速准确地响应温度和压力的变化,以保证反应的稳定性和产品的质量。

##### 4.3.2 冷氢化工位点

在冷氢化工段,变送器主要用于监控多晶硅的冷却速率和固化状态。变送器需要具备较高的灵敏度和准确性,能够实时反映冷却和固化过程中的变化,以便及时调整工艺参数。

##### 4.3.3 还原装置工位点

在多晶硅生产过程中,需要对整个还原装置的总管压力测量、物料压力测量、回水压力测量、反应罐内的各项压力测量等。变送器主要用来监测和控制各种过程反应的参数,以确保反应过程的压力满足反应过程需求。

##### 4.3.4 尾气回收与废气处理工位点

变送器主要被用于监控反应过程中的各种工艺介质及产品的生产。变送器需要具有高精度和快速的响应能力,整个反应过程中液位及压力的稳定性和可靠性。

#### 4.4 变送器解决方案的技术难点

在整个生产过程中,设备反应过程中主要的介质包括硅粉、氯气、氢气、三氯氢硅(氯硅烷)、四氯化硅、氟利昂、氮气、水、蒸汽、碱液、酸、树脂、制冷剂、催化剂等。对于变送器而言,其工艺难点主要集中在高温高压工况、高磨损(硅渣渣浆、硅粉磨损等)介质、介质具有腐蚀性(强酸碱)等难点。在整个生产过程中,由于有机硅、多晶硅生产过程中原料硅粉属于可燃性粉尘,因此整个生产过程中要符合防爆要求。因硅粉

材质较硬,对于含有硅粉的工况的检测点一般膜片需要耐磨加厚处理,因介质中含有高纯氢气,因此在设计阶段膜片需要镀金处理。由于整个反应过程中是否含有油脂对于多晶硅的产量影响很大,为提升产品质量,完善工艺流程,反应过程中尽量要采用脱脂禁油处理。对于工艺介质为氯气工况需要用氟油填充,同时注意脱脂禁水。对于硅烷气工段、尾气回收工段等超低温工况,对于变送器的选型需要考虑低温硅油。

#### 5 结语

随着近年来中国工业的迅猛发展,自动化仪表作为推动工业生产自动化进程的工具,在其领域同步得到发展。通过持续研究多晶硅具体的生产工艺,变送器在整个多晶硅生产过程中具体检测的工位点,以及项目具体实施过程中遇到的问题,给出了变送器的解决方案,可在今后的不断实际项目实施过程中加以验证并不断改善,致力提升整个生产工艺的生产水平和效率,为企业的发展带来更大的效益,为做好碳达峰、碳中和的中国高质量发展目标提供研究基础。

#### 参考文献:

- [1] 王阳,侯乐乐,王俊华,等.国内外电子级多晶硅技术发展现状及未来展望[J].中国集成电路,2024,33(04):11-15+51
- [2] 龙桂花,吴彬,韩松,等.太阳能级多晶硅生产技术发展现状及展望[J].中国有色金属学报,2008,18(E01):7.
- [3] 温雅,胡仰栋,单廷亮.改良西门子法多晶硅生产中分离工艺的改进[J].化学工业与工程,2008,25(2):6.
- [4] 周舟,吴锋,吕磊.硅烷流化床法高纯多晶硅材料制备技术分析[J].化工管理,2016(27):2.
- [5] 伍继君,马文会,谢克强,等.冶金法制备太阳能级硅研究进展[J].昆明理工大学学报:自然科学版,2012,37(5):6.
- [6] 宋玲玲,李世鹏,刘金生,等.多晶硅生产工艺的现状与发展[J].化工管理,2021,000(003):167-168.
- [7] 徐波.自动化仪器仪表行业的现状及发展趋势[J].科技创新与应用,2014,(013):99.
- [8] 高天云.智能压力变送器[J].自动化仪表,1997,018(005):1-4.

#### 作者简介:

马玲(1989-),女,汉族,籍贯辽宁省沈阳市,重庆横河川仪有限公司 职称:中级工程师/科长,学历:重庆大学工程管理硕士,研究方向:项目管理。