

多晶硅期货前瞻（一）：多晶硅的性质及生产工艺

张秀睿 F03099436 Z0021022

国投安信期货研究院

导读：多晶硅期货预期今年在广州期货交易所上市。多晶硅不仅是工业硅主要的消费下游，也是光伏产业的核心原材料。为帮助投资者了解多晶硅基础知识，我们计划推出多晶硅专题系列报告，本文作为首篇，将重点阐述多晶硅的定义、性质以及其生产工艺。

一、多晶硅的定义及性质

多晶硅，又名硅料、高纯晶硅，是以纯度 99%左右的工业硅（通常称为 99 硅）为原料，经过各种物理或化学方法提纯后，使得硅纯度达到 99.9999%以上的高纯硅材料。

多晶硅有灰色金属光泽，熔点 1410℃，沸点 2355℃，加热至 800℃ 以上即有延性，1300℃ 时显出明显变形。硬度介于锗和石英之间，室温下质脆，切割时易碎裂。

图：多晶硅



资料来源：公开信息

多晶硅在光伏产业中获得了广泛的应用，得益于硅的半导体属性。硅元素因其丰富的储量、低廉的成本、晶体热稳定性以及成熟的提纯技术，在第一代半导体材料中尤为突出。

二、多晶硅的生产工艺

目前，多晶硅生产技术主要有改良西门子法和硅烷流化床法两种，产品分别为棒状硅和颗粒硅。改良西门子法历史较长，硅烷流化床技术发展迅速，据光伏行业协会（以下简称 CPIA）报告，2023 年国内颗粒硅和棒状硅的市场份额分别为 17.3%和 82.7%。

1. 改良西门子法

多晶硅的西门子生产工艺，源于西门子公司所创，其过程将高纯度的三氯氢硅（ SiHCl_3 ，简称 TCS）与氢气（ H_2 ）在高温条件下进行还原反应，以制得多晶硅棒。相较于传统西门子

法，改良后的西门子法采用了大直径对棒节能型还原炉、封闭式干法回收还原尾气技术，这些改进在节约能源、降低物料消耗及减少环境污染方面具备更优秀的经济效益。

改良西门子法生产步骤主要有三个环节，即合成、提纯和还原：

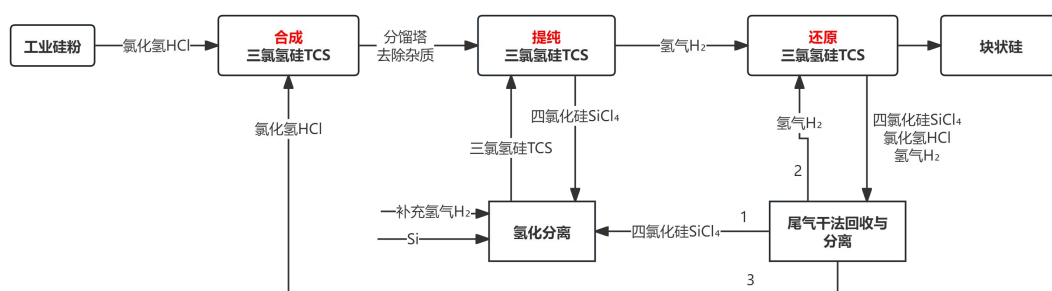
第一步：合成三氯氢硅（TCS）。电解饱和食盐水制氢气（ H_2 ）和氯气（ Cl_2 ），氢气与氯气反应生成氯化氢（HCl），氯化氢（HCl）与工业硅粉在合成流化床中反应，生成三氯氢硅（TCS）和副产物四氯化硅、二氯二氢硅、氢气（ $SiCl_4$ 、 SiH_2Cl_2 、 H_2 ）等。该步骤的主要反应式： $Si+HCl=TCS+SiCl_4+SiH_2Cl_2+H_2$ 。

第二步：提纯三氯氢硅（TCS）。采用多级分馏塔，控制温度和压力，利用沸点差异分离杂质，即四氯化硅（ $SiCl_4$ ）、硼、磷等，以提高纯度。

第三步：还原三氯氢硅（TCS）。提纯后的三氯氢硅（TCS）与高纯氢气（ H_2 ）混合后，送入多晶硅还原炉。在炉内，三氯氢硅（TCS）在硅芯表面发生氢化还原反应，生成硅沉积在硅芯上，直径逐渐变大至规定尺寸。该步骤的反应式为： $TCS+H_2=Si+SiCl_4+HCl+H_2$ 。

要注意的是，还原中产生尾气包含未反应的氢气、氯化氢、四氯化硅（ H_2 、HCl、 $SiCl_4$ ）等，改良西门子法通过尾气回收系统进行了多级冷凝分离。其中，氢气（ H_2 ）被重新输送至还原炉中；氯化氢（HCl）则被送回三氯氢硅（TCS）合成装置以实现循环利用；四氯化硅（ $SiCl_4$ ）通过氢化过程转化为三氯氢硅（TCS），随后再次进入提纯流程。由此多晶硅的生产过程实现了原料及副产品的循环再利用。

图：改良西门子法生产多晶硅流程



资料来源：点石能源、国投安信期货

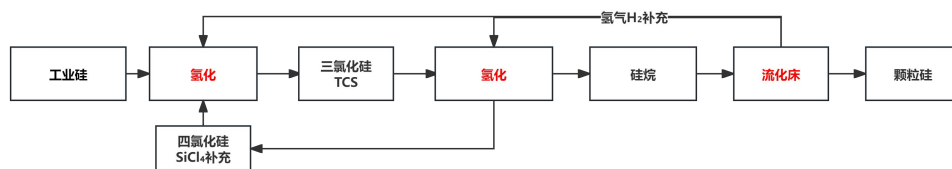
改良西门子法作为多晶硅生产的主要技术路线仍有其局限性，主要体现在以下几点：首先，该方法需要在 1150-1200℃ 的高温环境下进行还原反应，而转化率相对较低，大 10%-20%0%，导致整体电力消耗较高，每生产一吨多晶硅大约需要 5-6 万度电能，电力成本

约占总成本的 35%左右；其次，该技术的生产效率不高，缺乏连续性，更适合批量生产；最后，棒状硅在破碎过程中容易混入杂质，对材料的纯度造成影响。

2. 硅烷流化床法

硅烷流化床技术是一种高效、节能且环保的多晶硅生产方法。该技术的生产流程相对简单，与改良西门子法的前半段工艺相同，均是通过工业硅氢化得到三氯氢硅并分离尾气，但后半段将三氯氢硅加氢制成硅烷，并通入流化床反应炉内进行连续热分解，在流化床反应器内预制的硅籽晶上发生气相沉积反应，生产颗粒硅。

图：硅烷流化床法生产多晶硅流程



资料来源：正点光伏、国投安信期货

硅烷流化床法在一定程度上克服了改良西门子法的若干缺陷：首先，该技术的还原反应温度较低，即 550-700℃，远低于改良西门子法，每生产一吨多晶硅电力消耗仅为 1.8 至 2 万度，且反应转化率较高，通常超过 90%；其次，该技术实现了连续化生产，自动化投料，可根据不同的生产需求灵活调整制备条件，且不会产生有害气体，符合环保标准；再者，产品形态颗粒状，无需进一步破碎处理，从而节约了成本，并且更易充分填充单晶硅拉棒环节的石英坩埚，提高单晶硅的拉制效率。

尽管硅烷流化床技术有诸多优势，但发展仍面临技术难题和市场垄断的挑战。在国际市场上，一些发达国家的企业已经掌握该技术，并实现了产业化。在我国，协鑫科技和陕西天宏是主要的颗粒硅生产企业。

综合来看，在光伏行业降本趋势下，随着技术的不断进步和优化，硅烷流化床法有望在解决现有技术难题的基础上，逐步扩大市场份额。然而，由于改良西门子法在技术成熟度、产品纯度和安全性等方面的优势，其在未来一段时间内仍将是多晶硅生产的主流工艺。

免责声明

国投安信期货有限公司是经中国证监会批准设立的期货经营机构，已具备期货投资咨询业务资格。本报告仅供国投安信期货有限公司（以下简称“本公司”）的机构或个人客户（以下简称“客户”）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。如接收人并非国投安信期货客户，请及时退回并删除。本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及推测只提供给客户作参考之用。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的期货或期权的价格、价值可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。客户不应视本报告为其做出投资决策的唯一因素。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所导致的任何损失负任何责任。本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，本公司不对其内容的真实性、合法性、完整性和准确性负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。本报告的版权归本公司所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。