

专题报告：2024 年 3 月 29 日

【建投晶硅光伏】晶硅物语（一）| 多晶硅产业概览**摘要：**

“建投晶硅光伏·晶硅物语”系列中信建投期货晶硅光伏团队对于潜在上市期货品种多晶硅的系列前瞻报告，本篇为系列第一篇，主要简述多晶硅分类、产业发展历程、产业链上下游以及生产工艺等内容。

多晶硅是光伏产业链最主要的原材料之一，其价格波动往往会对其他环节的主材价格产生影响，在装机层面亦有可能对项目收益率等重要指标产生扰动，从企业生产经营角度看，是否具备多晶硅产能也会对企业的财务指标与战略规划产生影响。近年来多晶硅价格波动剧烈，产业对于多晶硅的价格发现与风险管理诉求不断提升，这些因素为多晶硅未来在期货市场上市提供了潜在的可能性。

多晶硅种类繁多，不同的分类标准可以区分出不同的多晶硅，按纯度可将多晶硅分为太阳能级多晶硅（纯度在 6N-9N）和电子级多晶硅（纯度在 9N 以上）；按表面质量可分为致密料、菜花料、珊瑚料和复投料；按生产工艺可分为棒状硅和颗粒硅，目前棒状硅仍占据着主要的市场份额，但颗粒硅也在逐渐崭露头角；按掺入杂质类型分的话，又可分为 P 型料和 N 型料。

从产业链来看，多晶硅上游为工业硅，多晶硅对工业硅的需求增速近年来快速增长，随着光伏产业不断发展，多晶硅已经超越有机硅成为工业硅最主要的消费领域；中游为多晶硅的生产制备，目前主流工艺为改良西门子法，而硅烷流化床法可用来制备颗粒硅，目前已有企业实现规模化生产；下游为硅片的生产制造，主要包括多晶铸锭与单晶拉棒两种工艺，其中单晶直拉法是主流工艺，单晶硅片也相应占据了市场上的绝大部分份额。

“建投晶硅光伏·晶硅物语”将于近期推出第二期，主要介绍多晶硅供给格局相关情况，敬请关注！

专题报告**作者姓名：王彦青**

期货交易咨询从业信息：Z0014569

电话：023-81157292

研究助理：刘佳奇

期货从业信息：F03119322

发布日期：2024 年 3 月 29 日

目 录

一、多晶硅概念与分类辨析	3
1.1、按纯度分类	3
1.2、按表面质量分类	4
1.3、按生产工艺分类	5
1.4、按掺入杂质类型分类	7
二、多晶硅产业发展历程	7
2.1、全球多晶硅产业发展历程	7
2.2、中国多晶硅产业发展历程	8
三、产业链探析	9
3.1、上游：多晶硅反超有机硅，成为工业硅第一大消费领域	9
3.2、中游：改良西门子法为主流工艺，硅烷流化床法已实现规模化生产	10
3.3、下游：主要用于直拉法生产单晶硅片	16
四、总结	18

图表目录

图表 1：太阳能级多晶硅产品标准（GB/T25074-2017）	3
图表 2：电子级多晶硅产品标准（GB/T 12963-2022）	4
图表 3：致密料	5
图表 4：复投料	5
图表 5：菜花料	5
图表 6：珊瑚料	5
图表 7：棒状硅块料	6
图表 8：颗粒硅	6
图表 9：2023-2030 年棒状硅和颗粒硅市场占比变化趋势	6
图表 10：流化床法颗粒硅产品标准（GB/T 35307-2023）	7
图表 11：改良西门子法与硅烷流化床法成本对比	7
图表 12：多晶硅产业链	9
图表 13：下游应用领域对工业硅需求量（万吨）	10
图表 14：2023 年工业硅消费占比（万吨）	10
图表 15：多晶用工业硅微量元素含量要求	10
图表 16：主要多晶硅企业生产技术路线	11
图表 17：改良西门子法生产工艺流程	12
图表 18：TCS 合成工艺流程图	13
图表 19：硅源化合物和杂质氯化物、氢化物的沸点	13
图表 20：TCS 提纯后部分杂质的含量（质量分数，%）	14
图表 21：流化床反应器结构示意图	16
图表 22：不同类型硅片市场占比	17
图表 23：CZ 法单晶炉示意图	18

一、多晶硅概念与分类辨析

硅元素有晶态和非晶态两种同素异形体，其中晶态硅又可分为多晶硅和单晶硅。在熔融的单质硅凝固时，硅原子以金刚石晶格形态排列成许多晶核，如这些晶核长成晶面取向不同的晶粒，则这些晶粒结合起来，就结晶成了多晶硅。多晶硅是光伏产业链最主要的原材料之一，其价格波动往往会对其他环节的主材价格产生影响，在装机层面亦有可能对项目收益率等重要指标产生扰动，从企业生产经营角度看，是否具备多晶硅产能也会对企业的财务指标与战略规划产生影响。近年来多晶硅价格波动剧烈，产业对于多晶硅的价格发现与风险管理诉求不断提升，这些因素为多晶硅未来在期货市场上市提供了潜在的可能性。

多晶硅种类繁多，具体来看主要包括以下分类标准：

1.1、按纯度分类

多晶硅是自然界中纯度最高的物质之一，其纯度表征以主体物质的含量多少来表示，即纯度=(总质量-杂质质量)/总质量*100%，通常用“N个9”来表示，例如6N代表99.9999%。根据纯度的不同，多晶硅通常可以分为太阳能级多晶硅和电子级多晶硅两种类型。

太阳能级多晶硅（SGS,Solar Grade Silicon），是指纯度在6N-9N的多晶硅，主要用于太阳能光伏晶体硅电池的生产，根据技术指标的差别，又可分为特级品、1级品、2级品和3级品。

图表 1：太阳能级多晶硅产品标准（GB/T25074-2017）

太阳能级多晶硅等级指标				
	特级品	1 级品	2 级品	3 级品
施主杂质浓度/ 10^{-9}	≤ 0.68	≤ 1.40	≤ 2.61	≤ 6.16
受主杂质浓度/ 10^{-9}	≤ 0.26	≤ 0.54	≤ 0.88	≤ 2.66
氧浓度/(atoms· cm^{-3})	$\leq 0.2 \times 10^{17}$	$\leq 0.5 \times 10^{17}$	$\leq 1.0 \times 10^{17}$	$\leq 1.0 \times 10^{17}$
碳浓度/(atoms· cm^{-3})	$\leq 2.0 \times 10^{16}$	$\leq 2.5 \times 10^{16}$	$\leq 3.0 \times 10^{16}$	$\leq 4.0 \times 10^{16}$
少数载流子寿命/ μs	≥ 300	≥ 200	≥ 100	≥ 50
基体金属杂质含量/(ng/g)	≤ 15	≤ 50	≤ 100	≤ 100
Fe、Cr、Ni、Cu、Zn				
表面金属杂质含量/(ng/g)	≤ 30	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Fe、Cr、Ni、Cu、Zn、Na				

数据来源：国家标准化管理委员会，中信建投期货

电子级多晶硅（EGS,Electronic Grade Silicon）一般是指纯度在9N以上的多晶硅产品，主要应用于半导体硅片的生产，应用于电子电力上的硅材料纯度要求更高，需要达到11N以上，产品标准包括特级品、电子1级、电子2级、电子3级等四种类别。

图表 2：电子级多晶硅产品标准（GB/T 12963-2022）

	电子级多晶硅等级指标			
	特级品	电子 1 级	电子 2 级	电子 3 级
施主杂质浓度/ cm^{-3}	$\leq 0.15 \times 10^{13}$	$\leq 0.25 \times 10^{13}$	$\leq 0.5 \times 10^{13}$	$\leq 1.5 \times 10^{13}$
受主杂质浓度/ cm^{-3}	$\leq 0.5 \times 10^{12}$	$\leq 1.5 \times 10^{12}$	$\leq 2.5 \times 10^{12}$	$\leq 5.0 \times 10^{12}$
碳含量/ cm^{-3}	$\leq 1.0 \times 10^{15}$	$\leq 2.5 \times 10^{15}$	$\leq 2.5 \times 10^{15}$	$\leq 5.0 \times 10^{15}$
基体金属杂质含量（Fe、Cr、 Ni、Cu、Zn、Na 总含量） /ng/g(ppbw)	≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 2.0
表面金属杂质含量（Fe、Cr、 Ni、Cu、Zn、Al、K、Na、 Ti、Mo、W、Co 总含量） /ng/g(ppbw)	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 5.0

数据来源：国家标准化管理委员会，中信建投期货

1.2、按表面质量分类

按表面质量分类，多晶硅又可分为致密料、菜花料、珊瑚料和复投料。

致密料表面颗粒凹陷程度小于 5mm，外观无颜色异常，无氧化夹层，主要用于拉制单晶硅片；

菜花料表面颗粒凹陷深度约为 5-20mm，断面适中，质量中档，主要用于制作多晶硅片，亦可作为掺杂辅料用于单晶炉第一层铺底，与致密料共同参与制备单晶硅，但如果菜花料品质较差，还需要单独进行拉晶处理；

珊瑚料表面颗粒凹陷深度大于 20mm，断面适中，质量不良，价格也较低；

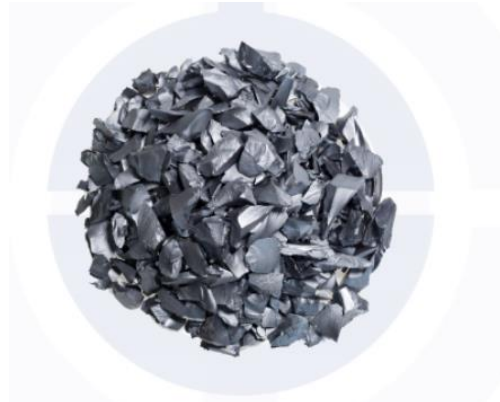
复投料是指拉晶过程中所产生的边皮料，由于品质较好，可进行二次循环参与制备单晶硅。

图表 3：致密料



数据来源：协鑫科技

图表 4：复投料



数据来源：大全能源

图表 5：菜花料



数据来源：协鑫科技

图表 6：珊瑚料



数据来源：大全能源

1.3、按生产工艺分类

按生产工艺不同，产成品多晶硅可被划分为棒状硅和颗粒硅，前者采用的是目前主流技术——改良西门子法生产，而后者则是采用硅烷流化床工艺（FBR）生产。改良西门子法生产出棒状硅后，并不能直接供下游使用，需要将其破碎成块状才可用作后续生产，而颗粒硅形状为“颗粒状”，无需进行破碎即可直接使用，一定程度上避免了硅料的损耗。目前改良西门子法依然是多晶硅生产的主要工艺，所对应的产成品棒状硅也是目前多晶硅的主要形态，据《中国光伏产业发展路线图（2023-2024 年）》，2023 年颗粒硅市场份额有所提升，达到 17.3%，而棒状硅仍是最主要的多晶硅产品形态，其市场份额为 82.7%。

图表 7：棒状硅块料



数据来源：协鑫科技

图表 8：颗粒硅



数据来源：协鑫科技

图表 9：2023-2030 年棒状硅和颗粒硅市场占比变化趋势



数据来源：《中国光伏产业发展路线图（2023-2024 年）》

2024 年 3 月 1 日，国家标准“流化床法颗粒硅（GB/T 35307-2023）”开始实施，对颗粒硅的技术指标、粒径、表面质量等方面做出了规定。相较于棒状硅，颗粒硅主要优势有几方面，一是反应原理简洁高效，硅烷流化床法的生产流程相较改良西门子法更加简单，仅需 3 步工艺流程；二是成本优势明显，据协鑫科技 2023 年报，其颗粒硅电耗成本已降至 13.8kWh/kg，而 CPIA 在《中国光伏产业发展路线图（2023-2024 年）》中的数据显示，2023 年多晶硅平均综合电耗为 57kWh/kg，相比之下颗粒硅电耗优势明显；三是碳足迹表现优秀，据协鑫科技官网，协鑫颗粒硅全生命周期内 10 万吨 FBR 颗粒硅可实现碳减排 11.17 亿吨。不过 FBR 法以及颗粒硅仍有些不足存在，例如容易发生氢跳、易产生杂质、易在空气中与氧气发生爆炸反应（ $\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）等。

图表 10：流化床法颗粒硅产品标准（GB/T 35307-2023）

	技术指标			
	特级品	1 级品	2 级品	3 级品
施主杂质浓度/ cm^{-3}	$\leq 1.5 \times 10^{13}$	$\leq 3.5 \times 10^{13}$	$\leq 5.0 \times 10^{13}$	$\leq 7.0 \times 10^{13}$
受主杂质浓度/ cm^{-3}	$\leq 9.0 \times 10^{12}$	$\leq 1.2 \times 10^{13}$	$\leq 2.5 \times 10^{13}$	$\leq 6.6 \times 10^{13}$
碳含量/ cm^{-3}	$\leq 1.5 \times 10^{16}$	$\leq 2.5 \times 10^{16}$	$\leq 4.0 \times 10^{16}$	$\leq 5.0 \times 10^{16}$
氢含量/ $\mu g/g$	≤ 25	≤ 30	≤ 30	≤ 30
总金属杂质含量/ ng/g				
Fe、Cr、Ni、Cu、Na、K、 Zn、Ti、Mo、W、Co	≤ 13	≤ 30	≤ 50	≤ 70

数据来源：国家标准化管理委员会，中信建投期货

图表 11：改良西门子法与硅烷流化床法成本对比

工艺	万吨单位投资		运营成本			
	投资费用	占地	人力	水消耗	氢消耗	电力消耗
改良西门子法	10.5 亿	200 亩	160 人	130t/t	350Nm ³ /t	63kwh/kg
硅烷流化床法	6.9 亿	60 亩	65 人	66t/t	150Nm ³ /t	13.8kwh/kg

数据来源：协鑫科技推介材料，中信建投期货

1.4、按掺入杂质类型分类

按照掺入杂质的差异，多晶硅又可分为 P 型料和 N 型料。P 型料掺杂以受主杂质为主，主要是 III 族元素，如硼、铝、镓等，P 型料导电以空穴导电为主。N 型料掺杂以施主杂质为主，主要是 V 族元素，如磷、砷、锑等，N 型料导电类型以电子导电为主。N 型多晶硅的技术标准要求更高，虽然目前暂无国标对 N 型硅料进行规范定义，但行业内普遍认为 N 型硅料需至少满足电子 2 级的标准才能够实现多根拉制。

二、多晶硅产业发展历程

2.1、全球多晶硅产业发展历程

多晶硅的起源最早可追溯至 19 世纪，但多晶硅的提纯制备技术则是于 20 世纪 50 年代才开始逐步发展。1822 年，瑞典化学家 Berzelius 首先使用钾还原四氟化硅制备出了单质硅，但直到 1951 年，杜邦公司才用类似的方法建设了全球首家多晶硅提纯工厂，供美国的电子公司生产高频二极管。之后的几年，多家公司投入到了多晶硅的提纯研发中，其中西门子公司所发明的西门子法提纯多晶硅在行业内影响较大，该方法通过使用氢气还原三氯氢硅，在硅芯发热体上沉积硅，实现了多晶硅的提纯，并于 1957 年实现建厂并进行工业规模化发展。

20 世纪 60 年代早期，西门子法制备多晶硅得到了越来越多的公司认可，日本信越、大阪

钛、室素电子等公司纷纷采用西门子法来制备多晶硅。20 世纪 60 年代后期，由于稳定性和资源稀缺等原因，半导体行业逐步将原材料由锗转向了硅，多晶硅的市场需求快速增长，摩托罗拉、德州仪器等半导体设备制造商也纷纷开始自主生产多晶硅使用。多晶硅产业进入了快速增长期，产量由 20 世纪 50 年代的百公斤量级提升到了 20 世纪 60 年代的百吨量级。

时间来到 20 世纪 70 年代，彩电、台式计算机、电子表等产品走入消费市场，集成电路市场生产规模逐步扩大，多晶硅需求快速增长，越来越多的企业开始加入到硅料生产环节。但 70 年代爆发了两次石油危机，能源价格暴涨，导致硅料企业严重亏损，行业陷入低迷，硅料生产降本成为了当时产业内最大的诉求。与此同时，也正是因为石油危机的爆发，美国开始大力扶持地面光伏产业的发展，支持低成本多晶硅生产技术的开发，多晶硅产业又重回向上发展的道路。不过，受政策影响，美国能源局和喷气推进实验室的多晶硅研究项目大多没有实现商业化生产。

20 世纪 80 年代，半导体市场加速发展，头部公司凭借技术优势拿下了越来越多的市场份额，行业集中度不断提升。到了 80 年代后期，受美国对日本的半导体反倾销政策影响，一批多晶硅企业相继退出了该领域，市场集中度进一步提高。

2000 年之后，德国 EEG 法案出台，光伏市场迎来了快速发展期。但当时太阳能级多晶硅的供应来源主要是半导体单晶厂的头尾料，无法满足光伏市场的需求，供需紧张下多晶硅价格持续上涨，越来越多的资本涌入了太阳能级多晶硅领域。

现如今，在碳中和指引及能源转型发展下，全球光伏新增装机量连年提升，光伏产业已经成为了多晶硅最重要的消费领域。

2.2、中国多晶硅产业发展历程

早在 20 世纪 50 年代，我国的一些研究机构就已经开展了多晶硅的工艺研究工作。北京有色金属研究总院于 1955 年起，在缺少技术和资料的背景下，就自行摸索了锌还原四氯化硅工艺（杜邦法）和氢还原四氯化硅工艺（贝尔法），后又于 1958 年开始研究西门子法，并在摸索过程中解决了还原炉的高压启动等工艺，成功生产出了高纯硅材料。

我国多晶硅真正实现产业化始于 1964 年，当时北京有色金属研究院 338 室内迁至四川峨边县，成立了产能 803 千克/年的多晶硅工厂，并于 1965 年 8 月实现了第一炉料产出。之后受大力发展电子工业的指示影响，冶金部号召“利用大厂一角搞半导体”，全国多个地方开始创建多晶硅项目。到了 20 世纪 70 年代，多晶硅年产量达到 8 吨/年，但行业发展逐步进入了盲目扩张时期，工厂技术水平低、生产规模小，改革开放后受市场经济冲击严重，绝大部分多晶硅企业因亏损而相继停产或转产。到了 1996 年只剩下了峨眉半导体材料和洛阳单晶硅厂两家。

为了逆转行业颓势，国家开始大力支持大型多晶硅工厂的发展。2003 年，洛阳中硅在国家发改委重点行业结构调整专项资金的支持下，建成了年产 300 吨多晶硅产业化项目，并于 2005 年 10 月投产，标志着多晶硅规模化生产技术体系形成。此后受太阳能级多晶硅市场需求爆发影响，国内资本大举进入多晶硅领域，产业规模迅速扩大，技术水平也在不断提升。

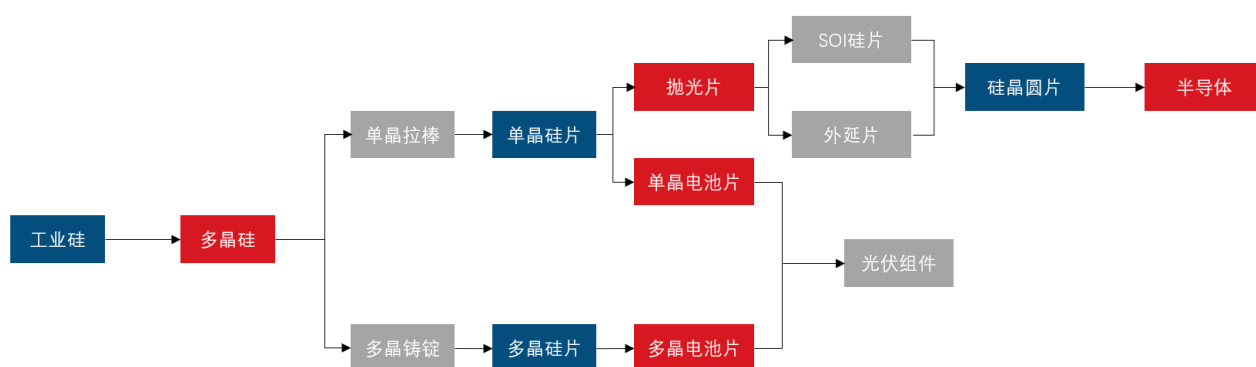
不过，资本涌入导致多晶硅产能虚增严重，2009 年时国内拟建产能达 10 万吨以上。政府部门开始将多晶硅产业认定为产能过剩行业，又受相关负面新闻影响，多晶硅被认为是“高能耗、高污染”的，银行业也对多晶硅企业收紧银根，导致多晶硅扩产、技改受到了一定抑制。到了 2013 年的时候，国务院出台《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》，国内光伏产业开始快速发展，叠加海外针对中国开展双反，产品流向转回国内，国内光伏需求迎来爆发。在之后的时间里，国内涌现出了新特能源、大全新能源、亚洲硅业等一系列优秀的多晶硅企业，技术水平不断提升优化。

随着光伏产业进入“平价上网”时代，国内新增光伏装机量不断突破新高，对应的硅料需求也在连年增加。但受产能不足、疫情扰动、突发安全事故等因素影响，2021-2022 年多晶硅呈现供不应求的局面，价格不断攀升，到了 2022 年已经出现了“拥硅为王”的现象，即价值链的大部分利润集中在多晶硅企业手中。在利润驱动下，2022-2023 年多晶硅产能快速扩张，安泰科数据显示中国多晶硅产能由 2022 年底的 116.33 万吨/年大幅增至 2023 年底的 210 万吨/年，2023 年中国多晶硅产量 147.1 万吨，同比增幅高达 81.4%。目前，中国多晶硅市场因产能快速投放，其供求对比已出现反转，行业利润大幅下降，但展望未来，随着周期轮动和光伏产业技术路线迭代，多晶硅仍将在中国制造业中扮演着重要角色。

三、产业链探析

从产业链来看，多晶硅上游为工业硅，中游为多晶硅的生产制备，下游为硅片制造中的多晶铸锭与单晶拉棒，终端应用领域包括半导体和光伏两个领域。

图表 12：多晶硅产业链

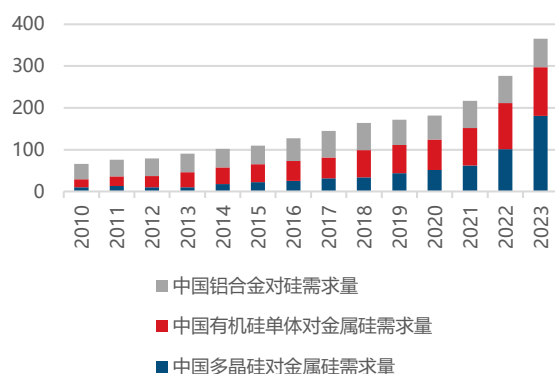


数据来源：中信建投期货

3.1、上游：多晶硅反超有机硅，成为工业硅第一大消费领域

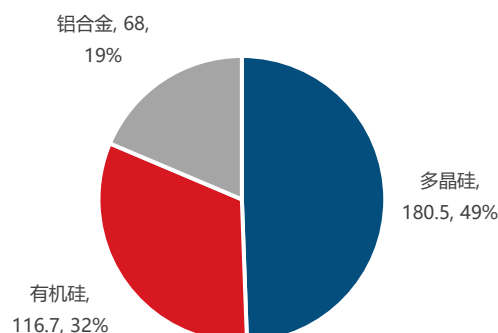
从多晶硅对上游的需求来看，2023 年国内多晶硅对工业硅的需求量为 180.5 万吨，超过有机硅成为工业硅第一大需求领域，2010 年-2023 年复合增长达到了 24.83%。随着未来光伏产业不断发展，预计工业硅的需求将更多地被多晶硅所承接，二者间的相关性或将愈发显著。

图表 13：下游应用领域对工业硅需求量（万吨）



数据来源：SMM，中信建投期货

图表 14：2023 年工业硅消费占比（万吨）



数据来源：SMM，中信建投期货

从原料标准看，多晶硅所要求的工业硅牌号以 4210# 为主，同时搭配 5210#、4410#、5530# 等牌号混合使用，通常多晶用工业硅中硅的含量在 99% 左右即可。此外，为了便于反应，工业硅也通常被磨成粉状以供多晶硅企业生产使用，即 99 硅粉。值得一提的是，在现货交易中，除了主成分含量要求以外，多晶硅企业通常还会对工业硅中的微量元素含量有要求，各个企业的要求因工艺特点存在差异，国家标准要求如下。

图表 15：多晶用工业硅微量元素含量要求

用途	类别	微量元素含量（质量分数），不大于(*10 ⁻⁶)			
		Ti	P	B	C
多晶用硅	高精级	400	50	30	400
	普精级	600	80	60	600

数据来源：国家标准 GB/T 2881-2014，中信建投期货

3.2、中游：改良西门子法为主流工艺，硅烷流化床法已实现规模化生产

产业链中游为多晶硅的生产制备。主要工艺方法可以划分为两大类：以化学提纯为基础的西门子法、流化床法，以及以冶金提纯为基础的物理法。据《当代多晶硅产业发展概论》，化学法是生产多晶硅的主流工艺技术，在化学法生产中，根据沉积工艺不同可分为西门子法和流化床法，根据反应发生原料的不同又可分为三氯氢硅法、硅烷法、四氯化硅法、二氯二氢硅法等；而根据不同的反应原料和沉积技术，可组合为三氯氢硅西门子法、硅烷西门子法、硅烷流化床法等。目前优化后的第三代三氯氢硅西门子法（简称“改良西门子法”）是多晶硅生产的主流工艺，但也有部分企业出于降本考虑，开始关注颗粒硅，从而也投建了硅烷流化床法的产能，因此下文我们将重点介绍这两种工艺。

图表 16：主要多晶硅企业生产技术路线

企业名称	国别	技术路线
四川通威	中国	改良西门子法
江苏中能	中国	硅烷流化床法
		改良西门子法
新疆大全	中国	改良西门子法
新特能源	中国	改良西门子法
Wacker	德国	改良西门子法
	美国	改良西门子法
亚洲硅业	中国	改良西门子法
东方希望	中国	改良西门子法
OCI	韩国	改良西门子法
	马来西亚	改良西门子法
Hemlock	美国	改良西门子法
天宏瑞科	中国	硅烷流化床法

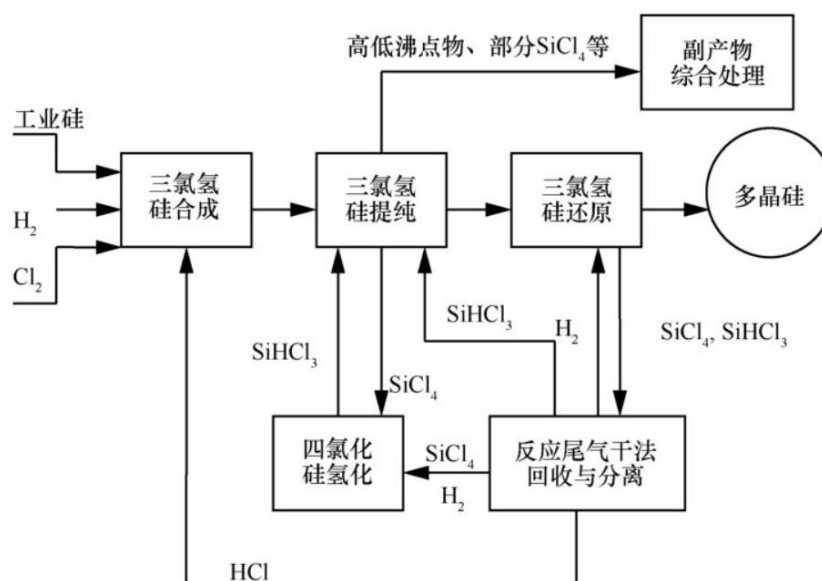
数据来源：2022-2023 年中国光伏产业年度报告，中信建投期货

（1）改良西门子法

西门子法由德国西门子公司在 1955 年率先使用，西门子公司将三氯硅烷和氢气通入钟罩式反应器中，从而在炽热的硅芯/硅棒表面沉积出多晶硅。西门子法的核心环节在于化学沉积工艺（CVD），在 CVD 炉中，首先将发热体（一般为硅芯）加热到一定温度，然后将预热后的高纯原料气体按一定配比注入到 CVD 炉中，之后产生的高纯硅会沉积在发热体上。

在过去几十年，业界对西门子法不断改进，技术工艺经历了三代演变，目前业界所使用的改良西门子法就是第三代西门子法。改良西门子法的主要流程包括三氯氢硅（简称 TCS）的合成、TCS 的提纯、TCS 的氢还原和反应尾气的回收等步骤。

图表 17：改良西门子法生产工艺流程



数据来源：当代多晶硅产业发展概论

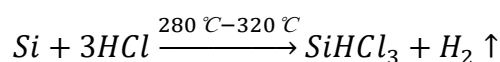
1.TCS 的合成

纯净的 SiHCl_3 常温下是无色易挥发的透明液体，带有强烈气味，密度约 1.33kg/L，沸点 31.5℃。合成 TCS 的工艺流程为：

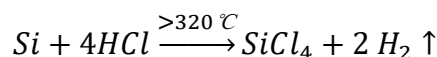
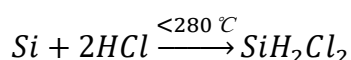
①HCl 经过深度冷冻、浓硫酸深度脱水处理后，纯度达到 99%；

②原料硅粉由压缩空气送至加料罐，自沸腾氯化炉顶部经螺旋加料器连续加入炉内，同时加入催化剂氯化亚铜，二者比例为 350：3；

③HCl 气体从沸腾炉底部中心，通过分布板进入炉内，在加热至 280℃-320℃的情况下发生反应：



④如果温度控制不当，反应生成的 SiCl_4 、 SiH_2Cl_2 等副产物会明显增加，涉及化学反应包括：



⑤生成的气体经过旋风分离器、袋式除尘器、三氯化铝除尘器后，进入冷凝器，冷凝后的 TCS 和四氯化硅（简称 STC）进入储料罐，不凝尾气在进入淋洗塔除去 HCl 气体后，会对剩余的 H_2 进行回收。

图表 18：TCS 合成工艺流程图

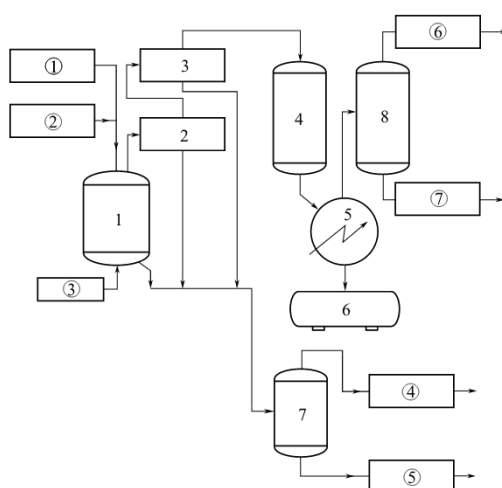


图 3.10 TCS 合成工艺流程图

1—沸腾氯化炉；2—旋风分离器；3—除尘器；4—三氯化铝去除器；5—冷凝塔；
6—冷凝液储罐；7、8—水洗塔
①—硅粉；②—氯化亚铜；③—氯化氢；④—排气；
⑤、⑦—排水；⑥—氢气回收

数据来源：多晶硅与硅片生产技术

2.TCS 的提纯

在上文所述的合成流程中，最终生成的 TCS 含量在 85%-90%，反应产物中含有一定的氯化物杂质。提纯 TCS 的方法是精馏，即利用 TCS 和其中的氯化物及氢化物杂质的蒸汽压、沸点的不同进行分离，从而提纯 TCS。

图表 19：硅源化合物和杂质氯化物、氢化物的沸点

名称	沸点/K	名称	沸点/K
SiH_4	161.3	$SiHCl_3$	305.0
HCl	188.2	$SiCl_4$	330.5
SiH_3Cl	242.8	PCl_3	347.4
SiH_2Cl_2	281.5	$AsCl_3$	404.6
BCl_3	285.9	$SbCl_3$	492.0

数据来源：多晶硅与硅片生产技术，中信建投期货

精馏过程是在精馏塔内完成的，会经历冷氢化和合成料提纯、还原回收料提纯、高沸物分离、低沸物分离等过程，精馏之后 TCS 的纯度可以提高至 9N 以上。

图表 20: TCS 提纯后部分杂质的含量 (质量分数, %)

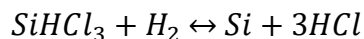
杂质	含量	杂质	含量
$SiCl_4$	<0.1	Ti	<1*10 ⁻¹⁰
B	<5*10 ⁻¹⁰	As	<5*10 ⁻¹¹
P	<1*10 ⁻⁹	Ni	<5*10 ⁻¹¹
Cu	<5*10 ⁻¹¹	Pb	<1*10 ⁻¹¹
Ca	<5*10 ⁻⁹	K	<5*10 ⁻¹⁰
Sb	<5*10 ⁻¹¹	Zn	<1*10 ⁻¹⁰
Al	<5*10 ⁻¹⁰	Mn	<5*10 ⁻¹¹
Fe	<3*10 ⁻⁸	Na	<5*10 ⁻¹⁰

数据来源: 多晶硅与硅片生产技术, 中信建投期货

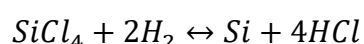
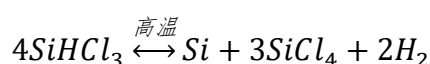
3.TCS 的氢还原

还原工序是产出高纯硅料的关键, 决定了产品质量的好坏。基本反应原理是, 以携带气 (H_2) 与提纯后的 TCS 混合形成气相, 二者按一定比例混合后送入 $SiHCl_3$ 反应系统——氢还原炉, TCS 和 H_2 摩尔比为 0.1-0.35, 在硅芯发热体 (1080°C-1100°C) 上沉积 Si。

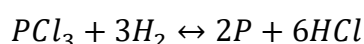
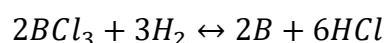
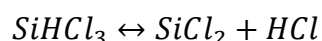
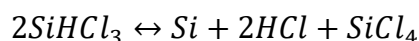
反应方程式为:



同时, 反应过程中也会发生 $SiHCl_3$ 的热分解以及 $SiCl_4$ 的还原反应, 方程式分别为:



此外, 还可能发生如下反应:



可以发现, 在 TCS 氢还原中发生的反应多为可逆反应, 所以还原炉内的反应过程十分复杂, 抑制各种逆反应和副反应成为了生产中的技术壁垒。此外, 据《当代多晶硅产业发展概论》, 西门子法制备多晶硅的电耗成本大概占多晶硅总生产成本的 1/3, 多晶硅还原电耗占总电耗的 50%-60%, 所以 TCS 氢还原是多晶硅生产中最为关键、也是成本相对更高的环节。另

据《2023-2024 年中国光伏产业发展路线图》中的数据，2023 年多晶硅还原电耗为 43kWh/kg-Si。

4. 尾气回收

在多晶硅的还原生产过程中，还原炉内的 TCS 一次转化率只有 6%-20%，大量的 TCS 随尾气一同排出，如果不加以回收，会对生产成本及效率产生不利影响。并且，尾气中还包含大量有害物质，不加回收处理便直接排放的话，也会对生态环境造成危害。因此，尾气回收也是多晶硅生产的重要环节。目前，尾气回收主要采用美国 CDI 公司的吸附分离法，运用该方法，97%以上的 HCl 和 H_2 均可得到回收。

5. $SiCl_4$ 氢化

据《当代多晶硅产业发展概论》，采用西门子法制备多晶硅时，每生产 1 吨高纯硅材料，会同时产生 15-20 吨 $SiCl_4$ 。对于富余的 $SiCl_4$ ，企业通常会对其氢化，将副产物 $SiCl_4$ 转化为多晶硅生产原料 $SiHCl_3$ ，从而实现闭环生产，以提高利用率，降低生产成本。

目前主要的氢化工艺有热氢化、氯化、冷氢化三种，分别涉及如下反应：

热氢化： $SiCl_4 + H_2 \rightarrow SiHCl_3 + HCl$ （1000-1200℃， $SiHCl_3$ 含量 15%-20%）

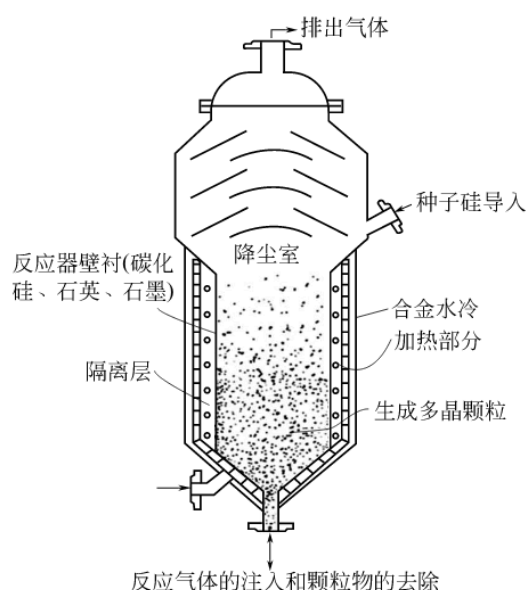
氯化： $2SiCl_4 + Si + H_2 + HCl \rightarrow 3SiHCl_3$ （550℃，36 个大气压， $SiHCl_3$ 含量 24%以上）

冷氢化： $3SiCl_4 + Si + 2H_2 \rightarrow 4SiHCl_3$ （550℃，20 个大气压， $SiHCl_3$ 含量 20%-24%）

（2）硅烷流化床法（FBR）

流化床法的基本原理是，原料气体入口在底部，气体从底部进入反应器后上升至加热区，在加热区气体原料分解为固体硅颗粒；从底部不断进入的气体流速会使颗粒硅处于悬浮状态，悬浮的颗粒会不断外延生长，当达到足够重量时，颗粒硅会沉降到底部的容器中；而反应的副产物会从顶部管路排出；最终的多晶硅产物为颗粒硅。

图表 21：流化床反应器结构示意图



数据来源：多晶硅与硅片生产技术

流化床法的主要原料是硅烷或氯硅烷，但相较于其他氯硅烷，硅烷能在更低的温度下进行反应，同时硅烷的提纯也更容易，所以在长期的工业实践中，硅烷流化床法的技术已经越来越成熟。据《当代多晶硅产业发展概述》，硅烷流化床法的沉积温度在 650°C - 800°C ，转换效率可以达到 95% 以上。但是硅烷流化床法也存在一定缺点，例如生成的产品纯度不高，内壁容易沉积硅粉等。

3.3、下游：主要用于直拉法生产单晶硅片

多晶硅下游为硅片的生产制造。硅片制造的流程是，通过铸锭技术或拉棒技术将多晶硅料加工为多晶硅铸锭或硅棒，再通过切片加工为硅片。从多晶硅产业链的角度来看，硅料直接下游为多晶铸锭与单晶拉棒，所以此处本文将主要介绍这两种技术。

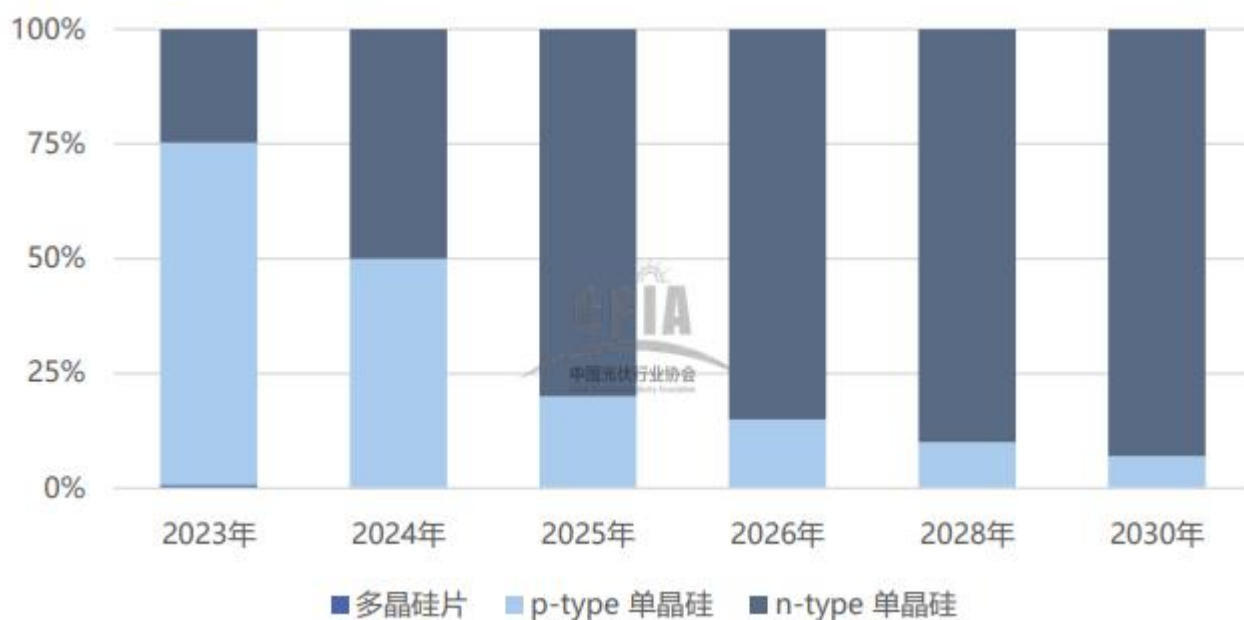
(1) 多晶铸锭

铸锭法的流程是，将多晶硅料放在石英坩埚中，利用周围的石墨加热器加热，使得硅原料在坩埚中熔化。然后在坩埚上部温度保持的同时，从坩埚底部开始逐渐降温，此时坩埚底部的熔体开始形核、结晶，之后采用定向凝固的方法使得形核晶体从底部垂直生长，最终生长出取向性较好的柱状多晶硅晶锭。但随着行业的发展，铸锭法性价比低的特点日益凸显，现阶段企业生产已经基本不再采用，导致铸锭法生产制备的多晶硅片的市场份额越来越低。在此后的技术实践中，也有公司突破了铸锭单晶技术，不过由于转换效率低、良率低等问题，铸锭单晶也在逐步退出市场。

据《中国光伏产业发展路线图（2023-2024 年）》，2022 年多晶产品市场份额由 2022 年的 2.5% 下降至 2023 年的 0.8%，未来多晶产品将仅存在于部分小众细分市场，其份额将继续

被单晶硅片所挤压。

图表 22：不同类型硅片市场占比

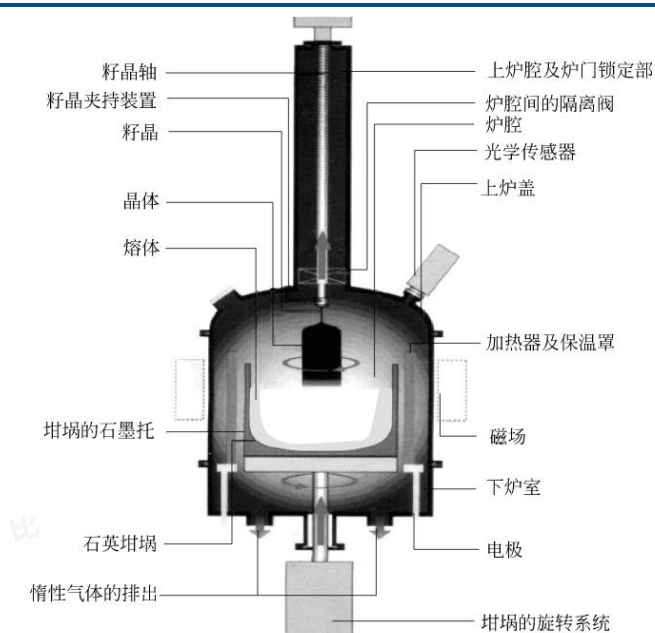


数据来源：中国光伏产业发展路线图（2023-2024 年）

（2）单晶拉棒

拉棒技术包括悬浮区熔法（FZ 法）和直拉法（CZ 法）两种，相较而言，直拉法生长单晶难度较小、成本更低，更适合单晶硅棒的生产。直拉法的原理为，将高纯度多晶硅放置在石英坩埚中加热熔化，再将单晶硅籽晶插入熔体表面，待籽晶于熔体熔合后，慢慢向上提拉籽晶，晶体便会在籽晶下端生长，形成单晶硅棒。

图表 23：CZ 法单晶炉示意图



数据来源：多晶硅与硅片生产技术

经过 CZ 法的技术发展，目前生产工艺以多次投料复拉法（RCZ 法）为主，RCZ 法节省了拆装炉换产的实践，而且石英坩埚可以重复利用，成本下降潜力大，目前正在向着更大装料量、更多晶棒数量、更高晶体拉速的方向发展。据《2022-2023 年中国光伏产业年度报告》，在 RCZ 法的赋能下，2022 年单晶炉单炉投料量已达到 3100kg，较 2021 年的 2800kg 有小幅提升。

CZ 法的另一种技术进步是连续拉晶法（CCZ 法），可以实现一边加料一边拉晶的连续生产，晶体长度更长，能够进一步节省加料时间，生产效率更高。但 CCZ 仍存在部分问题待攻克，且成本相较 RCZ 不具优势，故目前尚不具备量产应用条件。

四、总结

多晶硅是光伏产业链最主要的原材料之一，其价格波动往往会对其他环节的主材价格产生影响，在装机层面亦有可能对项目收益率等重要指标产生扰动，从企业生产经营角度看，是否具备多晶硅产能也会对企业的财务指标与战略规划产生影响。近年来多晶硅价格波动剧烈，产业对于多晶硅的价格发现与风险管理诉求不断提升，这些因素为多晶硅未来在期货市场上提供上市提供了潜在的可能性。

多晶硅种类繁多，不同的分类标准可以区分出不同的多晶硅，按纯度可将多晶硅分为太阳能级多晶硅（纯度在 6N-9N）和电子级多晶硅（纯度在 9N 以上）；按表面质量可分为致密料、菜花料、珊瑚料和复投料；按生产工艺可分为棒状硅和颗粒硅，目前棒状硅仍占据着主要的市场份额，但颗粒硅也在逐渐崭露头角；按掺入杂质类型分的话，又可分为 P 型料和 N

型料。

从产业链来看，多晶硅上游为工业硅，多晶硅对工业硅的需求增速近年来快速增长，随着光伏产业不断发展，多晶硅已经超越有机硅成为工业硅最主要的消费领域；中游为多晶硅的生产制备，目前主流工艺为改良西门子法，而硅烷流化床法可用来制备颗粒硅，目前已有企业实现规模化生产；下游为硅片的生产制造，主要包括多晶铸锭与单晶拉棒两种工艺，其中单晶直拉法是主流工艺，单晶硅片也相应占据了市场上的绝大部分份额。

“建投晶硅光伏·晶硅物语”将于近期推出第二期，主要介绍多晶硅供给格局相关情况，敬请关注！

联系我们

全国统一客服电话：400-8877-780

网址：www.cfc108.com

获取更多研报报告、专业客户经理一对一服务、
了解公司更多信息，扫描右方二维码即可获得！



重要声明

本报告观点和信息仅供符合证监会适当性管理规定的期货交易者参考，据此操作、责任自负。中信建投期货有限公司（下称“中信建投”）不因任何订阅或接收本报告的行为而将订阅人视为中信建投的客户。

本报告发布内容如涉及或属于系列解读，则交易者若使用所载资料，有可能会因缺乏对完整内容的了解而对其中假设依据、研究依据、结论等内容产生误解。提请交易者参阅中信建投已发布的完整系列报告，仔细阅读其所附各项声明、数据来源及风险提示，关注相关的分析、预测能够成立的关键假设条件，关注研究依据和研究结论的目标价格及时间周期，并准确理解研究逻辑。

中信建投对本报告所载资料的准确性、可靠性、时效性及完整性不作任何明示或暗示的保证。本报告中的资料、意见等仅代表报告发布之时的判断，相关研究观点可能依据中信建投后续发布的报告在不发布通知的情形下作出更

改。

中信建投的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见不一致的市场评论和/或观点。本报告发布内容并非交易决策服务，在任何情形下都不构成对接收本报告内容交易者的任何交易建议，交易者应充分了解各类交易风险并谨慎考虑本报告发布内容是否符合自身特定状况，自主做出交易决策并自行承担交易风险。交易者根据本报告内容做出的任何决策与中信建投或相关作者无关。

本报告发布的内容仅为中信建投所有。未经中信建投事先书面许可，任何机构和/或个人不得以任何形式对本报告进行翻版、复制和刊发，如需引用、转发等，需注明出处为“中信建投期货”，且不得对本报告进行任何增删或修改。亦不得从未经中信建投书面授权的任何机构、个人或其运营的媒体平台接收、翻版、复制或引用本报告发布的全部或部分内容。版权所有，违者必究。