

# 多晶硅系列专题（一）：基础知识

## 摘要

多晶硅作为光伏领域的重要原材料之一，也是工业硅最主要的下游之一。本篇为多晶硅期货系列报告的第一篇，主要介绍多晶硅概念、分类、生产工艺、产业链概率等。

多晶硅是单质硅的一种形态，呈现灰色金属光泽，密度 2.32~2.34 g/cm<sup>3</sup>，熔点 1410°C，沸点 2355°C。多晶硅具有半导体的性质，是当代人工智能、自动控制、信息处理、光电转换等广泛应用的半导体产品的基础材料。

多晶硅的分类方法有多种：按纯度要求及用途可分为冶金级、太阳能级和电子级多晶硅；按照生产工艺可分为棒状硅、颗粒硅；按表面质量可分为致密料、复投料、菜花料、珊瑚料；按照掺杂元素可分为 P 型硅料、N 型硅料。

多晶硅的生产工艺主要可以划分为化学法和物理法两大类。化学法是生产多晶硅的主流工艺技术，目前以改良西门子法和硅烷流化床法为主，两种方法分别产出棒状硅和颗粒硅。改良西门子法与硅烷流化床法各有优劣。改良西门子法的主要优势在于工艺成熟和稳定，生产的多晶硅纯度较高、品质较为稳定，是目前市场的主流工艺。硅烷流化床法的优势更多体现在成本优势、连续生产、副产品少等，但是硅烷流化床法有易发生氢跳、易产生杂质等缺点，生产的颗粒硅纯度一般不如棒状硅。

从产业链来看，多晶硅产业链上游为原材料，主要为工业硅（硅粉）、氯气、氢气等。中游为多晶硅的生产，将工业硅提纯制备成多晶硅锭、单晶硅棒。下游为多晶硅的应用领域，主要为光伏领域和半导体领域。随着光伏领域的发展，光伏电池对多晶硅需求量的增长速度远高于半导体领域的需求。目前，光伏行业是多晶硅使用量最大的行业领域。

多晶硅

专题报告

2024 年 4 月 11 日

国贸期货·研究院  
有色金属研究中心

方富强

投资咨询号：Z0015300

从业资格号：F3043701

研究助理 陈宇森

从业资格号：F03123927

欢迎扫描下方二维码  
进入国贸投研小程序



期市有风险，入市需谨慎

# 1 多晶硅简介及分类

## 1.1 多晶硅是什么

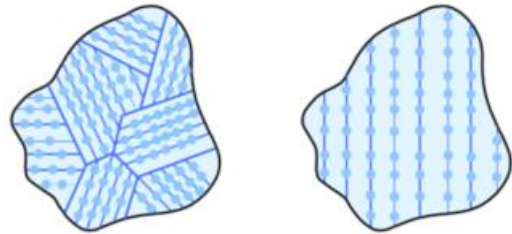
多晶硅是单质硅的一种形态，呈现灰色金属光泽，密度  $2.32\sim 2.34\text{g/cm}^3$ ，熔点  $1410^\circ\text{C}$ ，沸点  $2355^\circ\text{C}$ 。多晶硅是熔融的单质硅在过冷条件下凝固时，硅原子以金刚石晶格形态排列成许多晶面取向不同的晶粒的结合。多晶硅具有半导体的性质，是当代人工智能、自动控制、信息处理、光电转换等广泛应用的半导体产品的基础材料。

图表 1：多晶硅



数据来源：国贸期货整理

图表 2：多晶硅（左）和单晶硅（右）示意图



数据来源：国贸期货整理

## 1.2 多晶硅的分类

### 1、按纯度要求及用途分类：冶金级多晶硅、太阳能级多晶硅和电子级多晶硅

冶金级多晶硅，一般含硅量为  $99.999\%\sim 99.9999\%$ （5N-6N），主要应用包括航空、尖端技术、军事技术部门的特种材料以及建筑、纺织、汽车、机械等领域。

太阳能级多晶硅，纯度介于冶金级硅与电子级硅之间，一般在  $99.9999\%\sim 99.9999999\%$ （6N-9N）之间，主要应用在太阳能光伏晶体硅电池的生产。在《太阳能级多晶硅》（GB/T 25074-2017）中，根据技术指标的差异，可分为特级品、1级品、2级品和3级品。

图表 3：太阳能级多晶硅技术指标

项目	技术指标			
	特级品	1 级品	2 级品	3 级品
施主杂质浓度/ $10^{-9}$ (ppba)	$\leq 0.68$	$\leq 1.40$	$\leq 2.61$	$\leq 6.16$
受主杂质浓度/ $10^{-9}$ (ppba)	$\leq 0.26$	$\leq 0.54$	$\leq 0.88$	$\leq 2.66$
氧浓度/(atoms/ $\text{cm}^3$ )	$\leq 0.2 \times 10^{17}$	$\leq 0.5 \times 10^{17}$	$\leq 1.0 \times 10^{17}$	$\leq 1.0 \times 10^{17}$
碳浓度/(atoms/ $\text{cm}^3$ )	$\leq 2.0 \times 10^{16}$	$\leq 2.5 \times 10^{16}$	$\leq 3.0 \times 10^{16}$	$\leq 4.0 \times 10^{16}$
少数载流子寿命/ $\mu\text{s}$	$\geq 300$	$\geq 200$	$\geq 100$	$\geq 50$
基体金属杂质含量/(ng/g) Fe,Cr,Ni,Cu,Zn	$\leq 15$	$\leq 50$	$\leq 100$	$\leq 100$
表面金属杂质含量/(ng/g) Fe,Cr,Ni,Cu,Zn,Na	$\leq 30$	$\leq 100$	$\leq 100$	$\leq 100$

数据来源：中国国家标准化管理委员会，国贸期货整理

电子级多晶硅，一般要求含硅量达到 99.9999999%以上（9N 以上），主要应用于半导体硅片的生产。其中，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。在《电子级多晶硅》（GBT12963-2022）中，根据技术指标的差异，可分为特级品、1 级品、2 级品和 3 级品。

图表 4：电子级多晶硅技术指标

项目	技术指标要求			
	特级品	电子 1 级	电子 2 级	电子 3 级
施主杂质含量(P,As,Sb 总含量,以原子数计) $\text{cm}^{-3}$	$\leq 0.15 \times 10^{13}$	$\leq 0.25 \times 10^{13}$	$\leq 0.5 \times 10^{13}$	$\leq 1.5 \times 10^{13}$
受主杂质含量(B,Al 总含量,以原子数计) $\text{cm}^{-3}$	$\leq 0.5 \times 10^{12}$	$\leq 1.5 \times 10^{12}$	$\leq 2.5 \times 10^{12}$	$\leq 5.0 \times 10^{12}$
碳含量(以原子数计) $\text{cm}^{-3}$	$\leq 1.0 \times 10^{15}$	$\leq 2.5 \times 10^{15}$	$\leq 2.5 \times 10^{15}$	$\leq 5.0 \times 10^{15}$
基体金属杂质含量(Fe,Cr,Ni,Cu,Zn,Na 总含量) ng/g(ppbw)	$\leq 0.1$	$\leq 0.3$	$\leq 0.5$	$\leq 2.0$
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)	$\leq 0.1$	$\leq 0.5$	$\leq 1.0$	$\leq 5.0$

注：多晶硅的导电类型、电阻率、少数载流子寿命和氧含量由供需双方协商确定。

数据来源：中国国家标准化管理委员会，国贸期货整理

## 2、按照生产工艺分类：棒状硅、颗粒硅

棒状硅是目前光伏硅料供应的主流，采用目前主流的生产工艺——改良西门子法生产，工艺相对成熟，纯度可达 6-11N。颗粒硅是光伏硅料环节的新一代技术，生产工艺为硅烷流化床法（FBR）。颗粒硅形似球状，直径在 2mm 左右，大小近似绿豆，纯度可达 6N。改良西门子法生产的棒状硅，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，而颗粒硅为球状，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。

图表 5：棒状硅



数据来源：国贸期货整理

图表 6：颗粒硅



数据来源：国贸期货整理

### 3、按表面质量分类：致密料、复投料、菜花料、珊瑚料

致密料是指晶体结构紧密、表面光滑的硅料。致密料颜色明亮、外表光滑，表面颗粒凹陷程度最低，小于 5mm，无氧化夹层。它具有较高的纯度和较低的缺陷密度，主要用于拉制单晶硅、适用于制造高效率的光伏电池。致密料因为其制备过程相对复杂，通常具有较高的价格。

复投料属于致密料的一种，是拉晶产生的头尾或边皮料，品质较好，可以作为填充硅料二次循环使用。

菜花料是指晶体结构不规则、表面粗糙的硅料。菜花料颜色偏灰、表面粗糙，颗粒凹陷程度适中，为 5-20mm，断面适中。它的制备过程相对简单，成本较低，价格中档。菜花料通常用于制造低成本的光伏电池，但其效率相对较低。

珊瑚料表面凹陷较为严重，深度大于 20mm，断面疏松，价格最低。菜花料、珊瑚料主要用于制作多晶硅片，部分企业选择在致密料中掺杂不低于 30%的菜花料来生产单晶硅，从而节约原料成本；但菜花料的使用会在一定程度上降低拉晶效率，企业需在两者之间进行权衡后选择合适的掺杂比例。

图表 7：致密料



数据来源：国贸期货整理

图表 8：复投料



数据来源：国贸期货整理

图表 9：菜花料



数据来源：国贸期货整理

图表 10：珊瑚料



数据来源：国贸期货整理

#### 4、按照掺杂元素分类：P 型硅料、N 型硅料

纯净的硅是半导体，其本身导电性不强，通过添加少量的掺杂元素，可以显著提高其导电性。按照掺杂元素可分为 N 型硅料和 P 型硅料。

N 型硅料也称为电子型硅料，是在硅中添加五价元素如磷（P），砷（As）等，使得硅中存在额外的自由电子。磷与硅相溶性更差，导致制造工艺复杂，短期成本偏高；优点是 N 型硅料少数寿命要比 P 型硅料高出 1-2 个数量级，温度系数低导致高温条件下可获得加高输出功率，电池效率做得更高。

P 型硅料也称为空穴型硅料，是在硅中添加三价元素如硼（B），铝（Al）等，使得硅中存在“空穴”（缺乏电子的地方），这些空穴可以接受电子。

## 2 多晶硅生产工艺

多晶硅的生产工艺主要可以划分为化学法和物理法两大类。化学法是生产多晶硅的主流工艺技术，生产中根据沉积工艺不同可分为西门子法和流化床法。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。有部分企业出于降本考虑，使用硅烷流化床法生产颗粒硅。

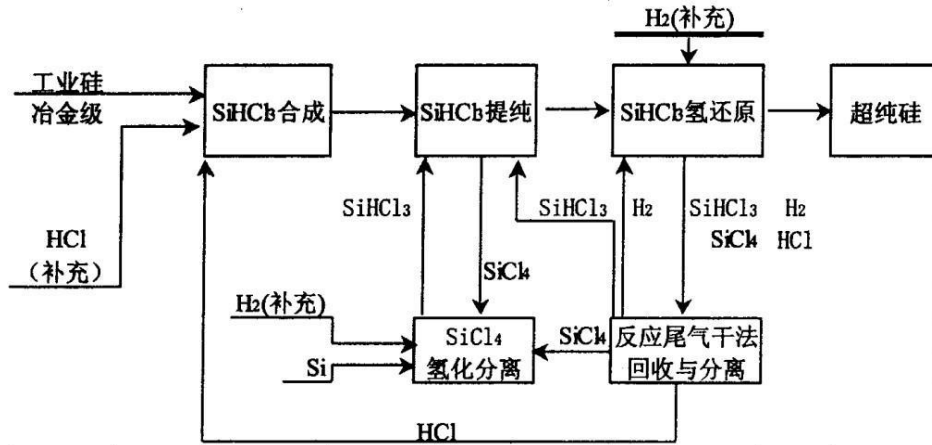
### 2.1 改良西门子法

1955 年，德国西门子公司成功开发利用氢气还原三氯硅烷，在炽热的硅芯/硅棒表面沉积出多晶硅，并于 1957 年开始了工业规模的生产，俗称西门子法。为了解决西门子法转化率低、副产品排放污染等问题，改良西门子法应运而生。

改良西门子法以工业冶金级硅粉为原料，与氯化氢（HCl）反应形成三氯氢硅气体（ $\text{SiHCl}_3$ ，简称 TCS），经进一步将 TCS 精馏提纯后进入还原炉与氢气发生化学气相沉积反应，在硅棒

表面形成高纯多晶硅。改良西门子法还引入尾气回收和四氯化硅氢化工艺，实现了生产过程的闭环循环。

图表 11：改良西门子法

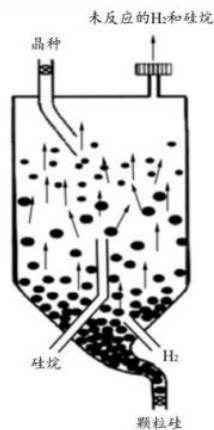


数据来源：中国光伏行业协会，国贸期货整理

## 2.2 硅烷流化床法

流化床法是上世纪 70 年代开发的新一代生产工艺，主要目的是降低多晶硅的生产能耗和成本。硅烷流化床法主要是硅烷和氢气的混合气从流化床炉的底部注入反应器。在反应器顶部加入平均粒径约为 0.2~0.6mm 的细小硅颗粒作为籽晶，堆积形成晶种颗粒硅床层。在反应器外壁加热器的作用下，同时伴随载气流速的不断增加，晶种颗粒硅床层会处于悬浮状态，即由固定床转变为流化床。悬浮的籽晶颗粒硅不断外延生长，达到足够重量时形成颗粒硅，并沉降到反应器底部排出。反应的副产物则从顶部管路排出。这种持续加入籽晶和通入硅烷气和载气的方法，可以达到不间断的连续生产。

图表 12：硅烷流化床法示意图



数据来源：《太阳能级多晶硅生产技术发展现状及展望》，国贸期货整理

## 2.3 主流生产工艺对比

改良西门子法与硅烷流化床法各有优劣。改良西门子法的主要优势在于工艺成熟和稳定，生产出的多晶硅纯度较高、品质较为稳定，是目前市场的主流工艺，市占率超 95%。但由于改良西门子法的产品是棒状硅，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，对生产效率、产能、成本都有较大影响。硅烷流化床法的优势更多体现在生产过程中的低能耗带来的成本优势，也是其得以推广的原因之一。此外，硅烷流化床法还有可连续、无间断、生产闭路循环，三废排放少，已于运输等优点。但是硅烷流化床法有易发生氢跳、易产生杂质等缺点，生产的颗粒硅纯度一般不如棒状硅。

图表 13：改良西门子法与硅烷流化床法对比

项目对比	改良西门子法	硅烷流化床法
原料	三氯氢硅、氢气	硅烷、氢气
产品质量	电子级、太阳能级	太阳能级
多晶硅纯度	高	低
反应温度	高（1080-1100℃）	低（550-700℃）
能耗	高（耗电量约 60 度/kg）	低（耗电量约 20 度/kg）
工艺成熟度	最成熟、可靠、投产速度最快	工艺不够成熟，仅有少数企业使用
生产连续性	批次生产，需进行装、拆炉	连续性不间断生产
副产物	产生大量聚氯硅烷，需经氯化处理	副产物少，污染性排放少
初始投资	约 10 亿元每万吨	约 7 亿元每万吨
制造成本	国内：40 元/kg-60 元/kg	小于 35 元/kg
优势	1、工艺成熟稳定，易复制扩大 2、多晶硅纯度高	1、能耗低，生产成本低 2、生产效率高，无需破碎
劣势	1、间断生产能耗较高 2、需人工破碎	1、容易发生氢跳 2、易产生杂质 3、存在生产安全隐患
代表企业	多数多晶硅企业	协鑫科技、陕西天宏瑞科

数据来源：协鑫包头项目环评，各企业官网，国贸期货整理

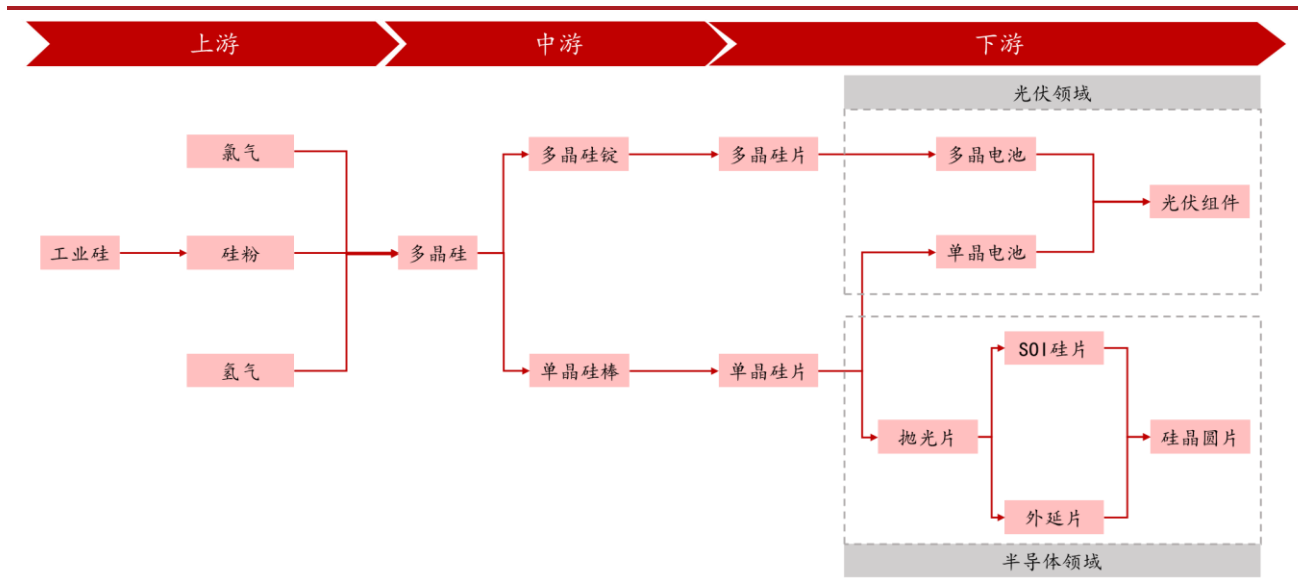
## 3 多晶硅产业链概览

多晶硅产业链上游为原材料，主要为工业硅（硅粉）、氯气、氢气等。中游为多晶硅的生产，主要以工业硅为原材料，通过物理方法或化学方法将工业硅进一步提纯，制备成多晶硅锭、单晶硅棒。

下游为多晶硅的应用领域，主要为光伏领域和半导体领域。多晶硅锭和单晶硅棒进一步切割加工为硅片、光伏电池，进而成为光伏组件的关键部分，应用于光伏领域。此外，单晶硅片还可通过反复的打磨、抛光、外延、清洗等工艺形成硅晶圆片，作为半导体电子器件的衬底材料。在光伏领域发展之前，多晶硅被认为是电子工业的基石，全球 95% 以上的半导体器件和 99% 以上的集成电路都是由硅材料(含单晶硅及多晶硅)制造的。而随着光伏领域的发展，光伏电池对多晶硅需求量的增长速度远高于半导体领域的需求，多晶硅需求经历了由“半导体领域

主导”向“光伏领域主导”的转变，目前，光伏行业是多晶硅用量最大的行业领域。

图表 14：多晶硅产业链



数据来源：国贸期货整理

本报告中的信息均源于公开可获得的资料，国贸期货力求准确可靠，但不对上述信息的准确性及完整性做任何保证。

本报告不构成个人投资建议，也未针对个别投资者特殊的投资目标、财务状况或需要，投资者需自行判断本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况，据此投资，责任自负。

本报告仅向特定客户推送，未经国贸期货授权许可，任何引用、转载以及向第三方传播的行为均构成对国贸期货的侵权，我司将视情况追究法律责任。

免责声明