

2024年11月20日

多晶硅、硅片及其生产工艺

——多晶硅系列专题（一）

分析师：

贾利军

从业资格证号：F0256916

投资咨询证号：Z0000671

电话：021-68757181

邮箱：jialj@qh168.com.cn

联系人

杜扬

从业资格证号：F03108550

电话：021-68757223

邮箱：duy@qh168.com.cn

戴纪煌

从业资格证号：F03137672

电话：021-68758820

邮箱：daijh@qh168.com.cn

顾兆祥

从业资格证号：F3070142

电话：021-68758820

邮箱：guzx@qh168.com.cn

专题要点：

- **多晶硅性质和分类。**多晶硅是一种光伏产业链中重要的非金属材料；根据四类不同的分类标准，可以分为致密料、菜花料、珊瑚料和复投料等诸多类型。
- **多晶硅的生产工艺及成本构成。**多晶硅的生产包括两大主流工艺：改良西门子法和硅烷流化床法，二者在工艺成熟度、产品质量、生产连续性、能耗大小等方面各有优劣，从而其成本构成中存在显著差异。
- **硅片的分类及生产工艺。**多晶硅在经过一系列的加工工序后，便生产出了硅片；硅片根据用途、掺入杂质、原料及工艺等维度，可以分为光伏硅片、半导体硅片等诸多种类。其中，单晶硅片由单晶硅棒加工而成，单晶硅棒的生产工艺主要包括直拉法、区熔法；多晶硅片由多晶硅锭加工而成，多晶硅锭的生产工艺主要包括定向凝固法、浇筑法等。

正文目录

1. 多晶硅简介	4
1.1. 基本性质	4
1.2. 分类	4
1.2.1. 以表面质量、物理特性分类	4
1.2.2. 以纯度及应用领域分类	5
1.2.3. 以生产工艺分类	5
1.2.4. 以掺入杂质分类	5
1.3. 生产工艺	6
1.3.1. 改良西门子法	6
1.3.2. 硅烷流化床法	6
1.3.3. 工艺及成本对比	7
2. 硅片简介	8
2.1. 硅片分类	8
2.1.1. 光伏硅片、半导体硅片	8
2.1.2. N型硅片、P型硅片	9
2.1.3. 单晶硅片、多晶硅片	9
2.2. 生产工艺	9
2.2.1. 单晶硅棒、硅片生产工艺	9
2.2.2. 多晶硅锭、硅片生产工艺	10

图表目录

图 1 改良西门子法生产工艺流程图	6
图 2 硅烷流化床生产工艺流程图	7
图 3 棒状硅生产成本结构	8
图 4 颗粒硅生产成本结构	8
图 5 单晶硅片生产工艺	10
图 6 多晶硅片生产工艺	11
表 1 致密料、菜花料、珊瑚料、复投料	4
表 2 冶金级、太阳能级、电子级	5
表 3 棒状硅、颗粒硅	5
表 4 P 型料、N 型料	5
表 5 改良西门子法 vs 硅烷流化床法优劣势	7
表 6 成本：改良西门子法 vs 硅烷流化床法	8
表 7 光伏硅片、半导体硅片	8
表 8 N 型硅片、P 型硅片	9
表 9 单晶硅片、多晶硅片	9

1. 多晶硅简介

1.1. 基本性质

多晶硅是一种光伏产业链中重要的非金属材料。在由工业硅提纯生产多晶硅的过程中，硅原子以金刚石晶格形态排列形成晶核、晶核进而形成晶粒，而每个晶粒存在随机的晶体取向、不同的晶粒之间则为晶界，多个单晶晶粒在过冷条件下凝固结合生成多晶硅。多晶硅也因此而得名。

多晶硅为单质硅形态，具有银灰色的晶体外观，密度 2.32~2.34g/cm³，熔点 1410℃，沸点 2355℃。常温下质脆，切割或碰撞时易破碎；但在 800℃ 以上的高温中具有一定的延展性，在 1300℃ 时将出现变形；常温下化学性质相对稳定，不易与其他物质发生反应。

1.2. 分类

多晶硅主要存在以下四个分类标准：表面质量和物理特性、纯度及应用领域、生产工艺、掺入杂质类型。

1.2.1. 以表面质量、物理特性分类

根据硅材料的表面质量、物理特性等因素，多晶硅可以分为致密料、菜花料、珊瑚料和复投料四类。

表1 致密料、菜花料、珊瑚料、复投料

分类	表面质量	物理特性	应用	图片
致密料	表面颗粒凹陷程度 <5mm	纯度、均匀性、稳定性均较高，强度高、蠕变率低、气孔率低，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、质量不如致密料，电学和光吸收性能较好。	主要用于制作低品质硅片	
珊瑚料	表面颗粒凹陷深度 >20mm	断面适中、表面粗糙、凹陷深度大，物理性能和纯度低于致密料和菜花料。	应用领域相对有限	
复投料	表面颗粒凹陷深度 5-50mm	为拉晶产生的头尾或边皮料，由多个单晶晶粒复合而成、晶粒之间存在间隙，机械强度和耐磨性较高。	经过处理后可作为填充硅料二次使用。	

资料来源：百度百科，百度图片，东海期货研究所

1.2.2. 以纯度及应用领域分类

多晶硅的纯度通常用“N 个 9”来表示。根据纯度和应用领域的不同，多晶硅可以分为三个类型：冶金级多晶硅、太阳能级多晶硅、电子级多晶硅。

表2 冶金级、太阳能级、电子级

分类	纯度范围	应用
冶金级多晶硅	5N-6N, 即 99.999%-99.9999%	可用于航空、军事技术类的特种材料, 汽车、机械等领域也有涉及。
太阳能级多晶硅	6N-9N, 即 99.9999%-99.999999%	用于生产太阳能光伏晶体硅电池, 如 TOPCon、HJT 等 N 型电池。
电子级多晶硅	9N 以上, 部分可达 11N	用于生产半导体硅片, 是集成电路、电子器件的关键材料。

资料来源:《多晶硅与硅片生产技术》, 百度百科, 东海期货研究所

1.2.3. 以生产工艺分类

按生产工艺的不同, 多晶硅可分为棒状硅和颗粒硅。多晶硅的生产工艺主要由两种: 主流技术为改良西门子法, 生产出来的主要是棒状硅; 其次为硅烷流化床工艺, 用来生产颗粒硅。棒状硅与颗粒硅在形状结构、物理性质等多个方面存在差异。

表3 棒状硅、颗粒硅

分类	棒状硅	颗粒硅
生产技术	改良西门子法, 工艺成熟、产品纯度高。	硅烷流化床法, 生产成本较低、能耗和碳排放较少, 生产过程可以实现连续化和自动化。
形态结构	长而细棒状结构, 表面光洁度高, 比表面积相对较小。	微小不规则状, 如颗粒、颗粒状片等; 孔隙度较高、比表面积较大。
物理性质	导热率较高, 机械性能、可塑性较好。	导热率较低, 吸附气体、溶液的性能好。
应用领域	光电转换材料、热界面材料等。	催化剂载体、吸附剂等。

资料来源:《多晶硅与硅片生产技术》, 百度百科, 东海期货研究所

1.2.4. 以掺入杂质分类

按多晶硅生产中掺入杂质类型的不同, 可以将多晶硅料分为 P 型料和 N 型料。

表4 P 型料、N 型料

分类	P 型料	N 型料
掺杂元素	掺入 III 族元素 (硼、铝、镓、铟、铊)。	掺入 V 族元素 (氮、磷、砷、锑、铋)。
载流子和导电类型	在硅晶体的晶格中引入缺电子的空位, 空穴成为 P 型硅的主要载流子, 从而以空穴导电为主。	在硅晶体的晶格中引入额外的自由电子, 电子是 N 型硅的主要载流子, 从而以电子导电为主。
电阻率、导电性能	空穴迁移速度较慢, 电阻率高, 导电性较差。	自由电子迁移速度较快, 电阻率低, 导电性较好。
温度系数	抗温度系数较高, 高温下的电阻值更稳定	抗温度系数较低, 温度变化对电阻值影响较大
应用	高压电器、开关电源、太阳能电池等。	电压调节器、电子整流器等。

资料来源: 百度百科, 东海期货研究所

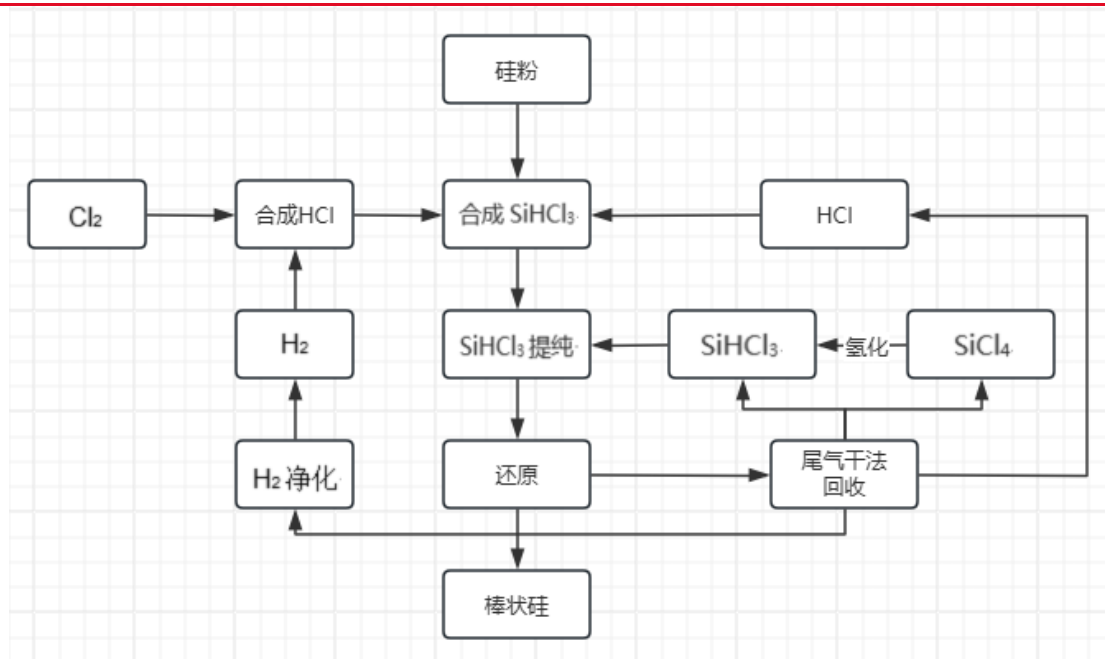
1.3. 生产工艺

多晶硅最早在二战时期便已被制备出来，其生产工艺也经历了诸多的探索和改进，包括：西门子法、改良西门子法、硅烷法、物理提纯法、流化床法、气-液沉积法等，以不断提高多晶硅的质量，并降低能耗和生产成本。目前多晶硅的生产工艺主要有两个：改良西门子法和硅烷流化床法。

1.3.1. 改良西门子法

改良西门子法的工艺流程如下：首先，用氯气和氢气合成氯化氢，并将合成的氯化氢与工业硅粉在一定温度下的合成炉中生成三氯氢硅、以及四氯化硅等产物的混合气体；第二，对合成气体进行除尘、洗涤以及分馏提纯，得到高纯度的三氯氢硅，并将四氯化硅等杂质分离出去；第三，对高纯度的三氯氢硅送入还原炉，还原为相应尺寸的棒状硅；第四，将回收的尾气进行冷却、分离、干法回收，得到氢气和四氯化硅，并将四氯化硅进行氯化反应生成三氯氢硅，实现循环使用。

图1 改良西门子法生产工艺流程图

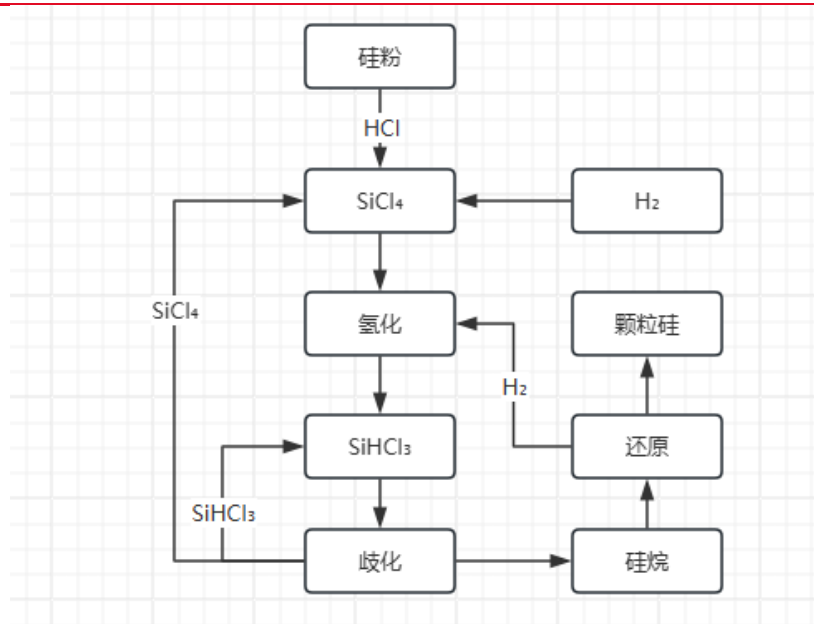


资料来源：《多晶硅与硅片生产技术》，SMM，东海期货研究所

1.3.2. 硅烷流化床法

硅烷流化床法的工艺流程如下：首先，将硅粉、氯化氢、四氯化硅、氢气在高温中反应生成三氯氢硅；第二，将三氯氢硅送入歧化反应釜中再度反应，生产硅烷、四氯化硅、三氯氢硅等气体；第三，硅烷气体进入流化床反应器中，在高温和催化剂的共同作用下裂解，沉积后得到固态固态的多晶硅颗粒；第四，四氯化硅、三氯氢硅被分离后再度循环使用。

图2 硅烷流化床生产工艺流程图



资料来源：SMM，东海期货研究所

1.3.3. 工艺及成本对比

改良西门子法和硅烷流化床法的工艺各有优劣：改良西门子法在产品质量、工艺成熟度、安全性等各方面要明显优于硅烷流化床法，但在能耗、成本、生产连续性等方面却存在着一定的劣势。

表5 改良西门子法 vs 硅烷流化床法的优劣势

	改良西门子法	硅烷流化床法
优势	(1) 生产多晶硅的主流技术，工艺成熟、稳定性和可靠性高，安全性高； (2) 产品质量高且稳定，纯度可满足太阳能级和电子级的要求； (3) 原料可循环使用，降低原料成本。	(1) 反应温度低，能耗明显降低； (2) 能够连续生产，较改良西门子法的批量生产效率更高； (3) 硅籽晶的反应面积大、反应效率高。
劣势	(1) 电力消耗高； (2) 原料反应转化率偏低； (3) 不连续的情况，只能批量生产。	(1) 受生产过程中的气流进入、反应器硅粉沉积等因素影响，产品纯度不高、性能易受影响； (2) 硅烷易燃易爆，生产过程危险性高； (3) 流化床内壁易受冲击和腐蚀，设备寿命短，需定期更换。

资料来源：《多晶硅与硅片生产技术》，SMM，东海期货研究所

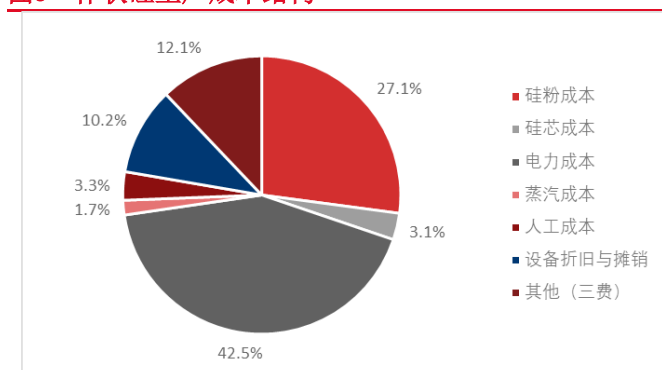
在具体的成本构成当中，硅烷流化床法因其低能耗、反应效率高、连续生产等优势而在总成本上较改良西门子法更加低廉，二者在成本构成中的硅粉、电力成本的比重存在着较大的差异。

表6 成本：改良西门子法 vs 硅烷流化床法

	改良西门子法	硅烷流化床法
反应温度	1100℃	800℃+
生产耗材	硅芯	反应内衬（石墨烯）
耗材成本	1500 元/吨	2000 元/吨
硅粉消耗	1.05-1.06kg	1.25-1.27kg
硅粉成本	13913 元/吨	16695 元/吨
电力消耗	55kwh/kg	18kwh/kg
电力成本	20800 元/吨	8980 元/吨
蒸汽成本	810 元/吨	810 元/吨
人工成本	1600 元/吨	1300 元/吨
设备折旧与摊销	5000 元/吨	5000 元/吨
其他（三费）	6000 元/吨	6000 元/吨

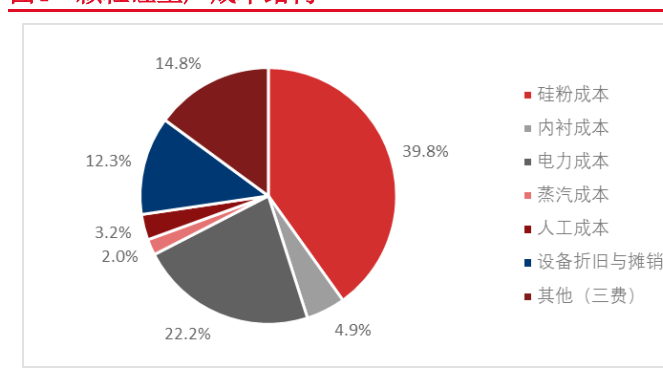
资料来源：SMM，东海期货研究所

图3 棒状硅生产成本结构



资料来源：SMM，东海期货研究所

图4 颗粒硅生产成本结构



资料来源：SMM，东海期货研究所

2. 硅片简介

2.1. 硅片分类

在将多晶硅经过切割、酸洗、抛光等一系列加工工序后，即可得到纯度和平整度更高、且具有一定厚度的硅片。

2.1.1. 光伏硅片、半导体硅片

按照最终的用途划分，可以将硅片划分为光伏硅片和半导体硅片，其在纯度、形状尺寸、制造技术、性能特点等方面存在一定差异。

表7 光伏硅片、半导体硅片

	光伏硅片	半导体硅片
应用领域	太阳能电池板制造	生产各类电子元器件，如集成电路、微处理器等
纯度	要求偏低，6N-9N 之间。	要求极高，9N-11N 之间。
形状尺寸	通常为方形，尺寸包括 125mm、150mm、156mm 等	通常为圆形，尺寸包括 150mm、200mm、300mm 等
制造技术	直拉法、铸锭法，成本效益更高	悬浮区熔法、高度优化的直拉法，更为精密昂贵，但材料的纯净度和均匀性更高。
性能特点	将光能转换为电能的转化率高、稳定性好	结构均匀、损耗较低、分辨率高等

资料来源：《多晶硅与硅片生产技术》，百度百科，东海期货研究所

2.1.2. N 型硅片、P 型硅片

按照使用硅料掺入杂质的不同，使用 N 型硅料、P 型硅料生产出的硅片分别被称为 N 型硅片、P 型硅片。

表8 N 型硅片、P 型硅片

	N 型硅片	P 型硅片
导电方式	依赖电子进行导电	依赖空穴进行导电
性能差异	少子寿命较高、光致衰减情况有所改善	少子寿命较低、易发生光致衰减情况
应用领域	成本较高、工艺复杂，更适合制造效率和可靠性更高的光伏产品。	成本较低、工艺简单，可用于对成本要求较高的光伏电池和组件。

资料来源：SMM，百度百科，东海期货研究所

2.1.3. 单晶硅片、多晶硅片

根据使用的硅原料和生产工艺的差别，硅片也可以划分为单晶硅片、多晶硅片，二者在制备成本、电子和光学性能方面存在显著差异。

表9 单晶硅片、多晶硅片

	单晶硅片	多晶硅片
制备成本	其生长条件需精确控制，对温度等条件要求严格，制备成本较高。	生长速度快、温度等条件要求较低，成本低，适合大规模生产。
电子性能	结晶质量更高、无晶界，使其载流子迁移率较高、电阻较低，性能更优越。	因存在晶界而造成载流子的散射，电子性能不及单晶硅。
光学特性	因晶格结构完整、无晶界散射问题，具有较高的透明性和较低的散射率。	透明性较低、散射率较高

资料来源：SMM，百度百科，东海期货研究所

2.2. 生产工艺

单晶硅片、多晶硅片的生产工艺存在明显差异。单晶硅片是利用单晶生长工艺从多晶硅中生长出单晶硅、随后对单晶硅进行一系列加工后获得的，生产单晶硅的工艺主要包括直拉法（CZ 法）和区熔法（FZ 法）；多晶硅片是将多晶硅锭进行切割、并进行一系列的后续加工而得到的，而生产多晶硅锭的工艺主要包括定向凝固法和浇筑法。

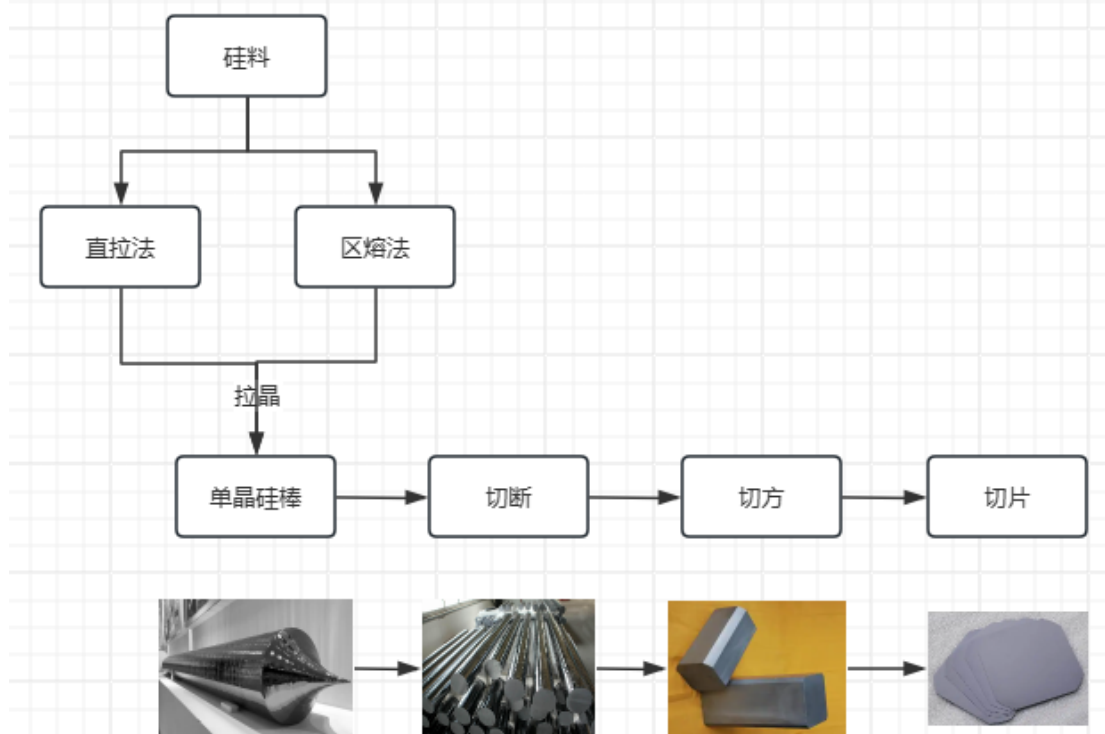
2.2.1. 单晶硅棒、硅片生产工艺

直拉法是生产单晶硅的最常用的工艺。拉单晶的过程在单晶炉内完成，其工艺主要分为装料、熔化、确定结晶温度、引晶、缩径、放肩、转肩、等径生长、收尾等环节。直拉法的拉晶过程要求较高的清洁度，需要定期对热场、炉内壁等进行清理，并要定期对设备进行维护。

区熔法在生产单晶硅的过程中，因熔硅的表面张力和加热线圈的磁托浮力而使熔区悬浮于多晶硅棒和生长出的单晶硅之间，任何时刻都只有一部分原料被熔融，因其呈悬浮状态而不与其他物体接触，具有低氧含量、低污染的性质。

在通过直拉法或区熔法拉晶得到单晶硅棒后，需要对其在进行切断、滚圆、切片、倒角、磨片、化学腐蚀和抛光等工艺，且不同工艺间需配合不同程度的清洗，最终得到符合质量要求的单晶硅片。

图5 单晶硅片生产工艺



资料来源：《多晶硅与硅片生产技术》，百度图片，东海期货研究所

2.2.2. 多晶硅锭、硅片生产工艺

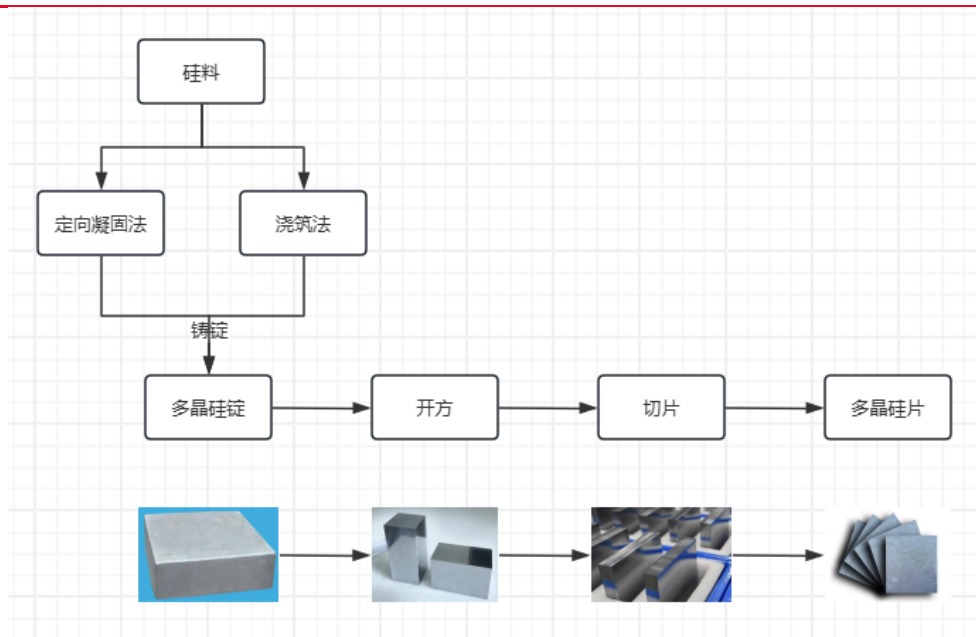
多晶硅铸锭的工艺流程包括：准备硅料和掺杂剂、加热、熔化、定向生长、退火、冷却、取出等环节，具体的工艺方法包括定向凝固法和浇筑法。

定向凝固法是将坩埚中的硅料进行加热熔化，并通过冷源等方式让坩埚的由底到顶地形成一定的温度梯度，从而自下而上地使熔融的硅料凝固成硅锭。

浇筑法将一个坩埚中的硅液倒入另一模具中进行凝固，该模具通常为放置在升降台上的石墨模型、周围用电阻加热，并以一定的速率下降以使模具形成温度梯度，从而使得硅锭逐渐凝固。

在生产出多晶硅锭后，需要将多晶硅锭进行开方、切片、清洗等操作，使获得的多晶硅片符合质量要求。

图6 多晶硅片生产工艺



资料来源：《多晶硅与硅片生产技术》，百度图片，东海期货研究所

重要声明

本报告由东海期货有限责任公司研究所团队完成，报告中信息均源于公开可获得资料。东海期货力求报告内容的客观、公正，但对这些信息的准确性及完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的观点、结论和建议等全部内容只提供给客户做参考之用，并不构成对客户投资建议，也未考虑个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要，客户不应单纯依靠本报告而取代个人的独立判断。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，交易者需自行承担风险。本报告版权仅为东海期货有限责任公司研究所所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制发布，如引用、转载、刊发，须注明出处为东海期货有限责任公司。

东海期货有限责任公司研究所

地址：上海浦东新区峨山路505号东方纯一大厦10楼

联系人：贾利军

电话：021-68757181

网址：www.qh168.com.cn

E-MAIL: Jialj@qh168.com.cn