

硅片生产流程及主要设备

作为一种取之不尽的清洁能源，太阳能的开发利用正引起人类从未有过的极大关注。商业化太阳能电池采用的是无毒性的晶硅，单晶和多晶硅电池的特点是光电转换效率高、寿命长且稳定性好。硅片是晶体硅光伏电池加工成本中最昂贵的部分，随着半导体制造技术的不断成熟完善，硅片制造成本不断降低。硅片切割是太阳能光伏电池制造工艺中的关键部分，太阳能电池所用硅片的切割成本一直居高不下，要占到太阳能电池总制造成本的30%以上。所以降低这部分的制造成本对于提高太阳能对传统能源的竞争力至关重要。目前硅片的切割方法都是围绕如何减小切缝损失、降低切割厚度、增大切片尺寸及提高切割效率方面进行的。

1. 工艺流程：硅锭（硅棒）—切块（切方）—倒角抛光—粘胶—切片—脱胶清洗—分选检验、包装

2. 工艺简介

切块 / 切方：将硅锭或者硅棒切成适合切片的尺寸，一般硅锭切成25块（主流）。

倒角抛光：将晶柱的圆面棱角研磨成符合要求的尺寸，对表面进行抛光处理，从而获得高度平坦的晶片。

粘胶：用粘附剂把晶柱固定在由铝板和玻璃板组成的夹具上，自然硬化或用恒温炉使其硬化。

切片：把晶柱切割成硅片，切割的深度要达到夹具上的玻璃板，

以便在之后 的程序中把硅片和玻璃板分开。

脱胶清洗：用清水清洗切成的硅片，再用热水浸泡，使硅片与玻璃板分开。

分选检验包装：抽样检查厚度、尺寸、抗阻值等指标，全部检查破损、裂痕、边缘缺口，挑选出符合要求的硅片进行包装。

3. 太阳能硅片切割方法

太阳能硅片切割方法主要有：外圆切割、内圆切割和磨料线切割和电火花切割(WEDM)等。80年代中期之前的硅片切割都是由外圆切割机床或者内圆切割机床完成的，这两种切割方法在那时的研究已经达到了鼎盛时期，相当多功能的全自动切片机相继商品化，生产主要分布在瑞士、德国、日本、美国等地方。90年中后期以来，多线切割技术逐渐走向成熟，其切缝损失小、切割直径大、成片效率高、适合大批量硅片加工，在国内外太阳能电池的硅片切割上，得到广泛的应用。WEDM 经过近半个世纪的发展，技术已经十分成熟，达到了相当高的工艺水平，是一种非接触、宏观加工力很小的加工方式，理论上采用 WEDM 切割，硅片的厚度可以达到很薄。

3. 1 外圆切割

外圆切割机主要有卧式和立式两种，由主轴系统、冷却循环系统、工业机控制系统、电磁旋转工作台等组成，其中主轴系统是它的核心系统，刀片安装在主轴上面，一般是在钢质圆片基体外圆部分电镀一层金刚石磨粒，可以单刀切割或者多刀切割。

切割时由于刀片太薄容易产生变形和侧向摆动，导致硅片的切缝较大(1 mm 左右)，晶面不平整，且切割硅片的直径也不能太大(100 mm 以内)。

3. 2 内圆切割

内圆切割机与外圆切割机相类似, 内圆切割时, 圆盘型刀片外圆张紧, 利用内圆刃口边切割硅锭。但它的刀片是在基体的内圆部分电镀一层金刚石磨粒, 外圆部分有多个小孔, 安装固定在刀盘上面, 通过刀盘上的专用机构张紧, 刃部刚性得到增强, 切割阻力及外力引起的对刃口的振动减小。其刀片稳定性好、晶向可以调节、机床技术成熟、切割的硅片表面粗糙度小、切缝可以缩小到 $300\mu\text{m}$ 左右, 切割硅料直径主要为 $\Phi 150\text{mm}-200\text{mm}$, 最大达到了 $\Phi 300\text{mm}$ 。但由于刀片高速旋转会产生轴向振动, 刀片与硅片的摩擦力增加, 切割时会产生较大的残留切痕和微裂纹, 损伤层深度可达 $20\mu\text{m}-30\mu\text{m}$, 切割结束时易出现硅片崩片边的现象。

3. 3 多线切割

多线切割也称为线锯, 通常是利用一根表面镀铜的不锈钢丝 (直径 $80\mu\text{m}-200\mu\text{m}$, 长 $600\text{km}-800\text{km}$) 来回绕过导轮(有两轴、三轴或四轴几种), 保持 $20\text{N}-30\text{N}$ 的张紧力, 形成一排成百的锯带, 在导轮带动下以 $5\text{m/s}-15\text{m/s}$ 的速度高速运转。将含有粒度约 $10\mu\text{m}-25\mu\text{m}$ 的 SiC 或者金刚石磨料的粘性浆料带入硅棒切割区域, 磨料滚压嵌入硅晶体形成三体磨料磨损从而产生切割作用。它加工出硅片弯曲度(BOW)、翘曲度(WARP)、总厚度公差

(TTV)、切缝损失都很小，而且平行度(TAPER)好、表面损伤层浅。其研究主要集中在切割机理、振动切割、切割方向、线张力、温度控制等方面，并已取得很好的成果，已成为直径大于 200 mm 硅片切割的主流技术，切缝损失在 $150\mu\text{m}$ — $210\mu\text{m}$ ，硅片厚度可以达到 $100\mu\text{m}$ — $200\mu\text{m}$ ，损伤层深度 $15\mu\text{m}$ — $25\mu\text{m}$ ，但在表面会留下明显的线痕，同时金刚砂研磨硅材料时产生的切削力会对脆性硅材料表面产生冲击，同样使得大尺寸超薄硅片切割非常困难。

3.4 电火花线切割

电火花线切割加工原理是利用工件和电极丝之间的脉冲性电火花放电，产生瞬间高温使工件材料局部熔化或气化，从而达到加工目的。太阳能级硅晶体由于其掺杂浓度比较高，电阻率在 $0.1\ \Omega\cdot\text{cm}$ — $10\ \Omega\cdot\text{cm}$ 范围内，利用 WEDM 切割是比较适合的。比利时鲁文大学采用低速走丝电火花线切割(WEDM-LS)技术进行了硅片切割研究，日本冈山大学采用 WEDM 进行了单晶硅棒切割加工研究，并研制了电火花线切割原理样机。目前试验条件下电火花线切割硅片的厚度可以控制在 $120\mu\text{m}$ 以内，这是传统加工方法根本无法达到的切割厚度，弯曲程度与多线切割结果相近；切割的钼丝直径 $250\mu\text{m}$ ，切缝造成的硅材料损失大约 $280\mu\text{m}$ ，与多线切割法得到的数值相当。

3.5 几种切割方式的比较

内圆切割相对于外圆切割由于其刀片韧性较大，可以用来切割较

大直径的硅片；与多线切割比较优点是不需要供给砂浆、废弃物处理小、切片成本是它的 1/3-1/4、每片可以进行晶向调整 和厚度调整、小批量多规格加工，缺点是表面损伤较大、切缝损失大、生产效率低，是中小尺寸硅片小批量生产的主要方法。从目前 WEDM 的切割试验来看，所获得的硅片总厚度变化和弯曲程度与多线切割结果几乎一样，而且其成本比多线切割低许多，将成为一种非常有竞争力的加工手段。下表是这几种切割方法的比较。

几种切割方式的比较

	外圆切割	内圆切割	多线切割	电火花线切割
切割原理	刀片外圆沉积 金刚石	刀片内周沉积 金刚石	磨料研磨	火花放电
表面织构	剥落、破碎	剥落、破碎	切痕	放电凹坑
损伤层厚度 (μm)	-	35-40	25-35	15-25
切割效率 (cm^2/h)	-	20-40	110-220	45-65
硅片最小厚度	-	300	200	250
适合硅片尺寸 (mm)	100以下	150-200	300	200
硅片翘曲	严重	严重	轻微	轻微
切割损耗 (μm)	1000	300-500	1500-210	280-290

4 主要设备介绍

4.1 切方机

切方机是用来对硅棒、硅锭进行切割的设备。该设备目前在国内

已实现规模化生产，上海日进、上海汉虹、大连连城、北京京仪世纪等公司已有成熟的产品投入市场。一条 50MW 的硅片生产线需要配 1 台切方机即可，国产设备价格为 280 万元左右。

4. 2 多线切割机

多线切割机是目前市场上用于切片最主流，也是最先进的设备。它的基本原理是通过一根高速运动的钢线带动附着在钢丝上的切割刃料对硅棒进行摩擦，从而将硅棒等硬脆材料一次同时切割为数千片薄片的一种切割加工方法。多线切割由于其更高效、更小切割损失以及更高精度的优势，适用于切割贵重、超硬材料。近十年来已取代传统的内圆切割成为硅片切割加工的主要方式。在光伏行业切片领域，到 2011 年底国内市场基本被瑞士的 HCT、MeyerBurger（梅耶博格）和日本的 NTC 所统治。近年来国内设备厂家上海日进、电子集团 45 所、兰州瑞德、无锡开源、大连连城、北京京联发、湖南宇晶等也陆续推出了多线切割机样机。从样机来看，技术原理和设计主要都是借鉴了日本的 NTCMWM442D 机型的很多理念，样机基本属于小型机。国内开发的多线切割机样机都面临着类似的问题，成品率低、断线率高、控制精度差等。加上硅料价格高昂，客户尝试新机器的成本非常高，每次的损失可能动辄几万甚至几十万，这也是制约设备制造企业获得更多的生产性实验数据来改进设备的原因之一。硅片的厚度对硅片成本的影响很大，如今市场上的硅片 180um 和 200um 为主导，同时各企业正在不停地探索更薄硅片的切割工

艺。目前国内小部分企业硅片的硅耗量已经达到 5.8g/w。一条 50MW 的硅片生产线需要配置 5~7 台（单晶生产线所需切割机比多晶少）多线切割机，每台价格为 200~400 万元，国外同类产品的价格为 500~600 万元。据估算，一条 50MW 的硅片生产线，设备总成本大概为 2000~3000 万元。

