

# 先进线锯切割技术

在太阳能光伏电池制造中的应用



# 先进线锯切割技术

## 在太阳能光伏电池制造中的应用

### 简介

为了使太阳能电池能够最终在取决于每瓦成本的能源供应市场上具有竞争力，光伏价值链中每个生产步骤的总体拥有成本（图 1）都至关重要。晶体硅片的生产也不例外：处理一片硅片的总体拥有成本是降低其总体成本的主要动力。



图 1: 晶体硅太阳能光伏硅片切割价值链



图 2: Applied HCT 切方机

硅片切割工艺始于由单晶硅或多晶硅材料制成的实心硅锭。线锯将硅锭裁成方块（图 2），然后再切割成很薄的硅片。这些晶体硅片就被用作制造光伏电池的衬底。如今的线锯切割大多数是通过多线切割技术（MWS）实现的。

本文简要介绍线锯切割工艺及生产过程中面临的各种挑战，并且展示了能同时降低硅锭切方与硅片切割成本的下一代线锯切割技术。

### 线锯的历史

第一台可实际使用的光伏硅片切割机是以瑞士 HCT 成型系统公司（HCT Shaping Systems）的创始人 Charles Hauser 博士的开创性研究为基础研制而成，于上个世纪八十年代投入使用。（如今是应用材料公司的精密硅片切割系统部门。）这类设备使用携带研磨浆料的切割线，通过切割线运动来切割硅片。即使到现在为止，大多数用来将硅锭开方和切片的线锯仍然保留了与 Hauser 博士的原型机器相同的基本结构，但是载荷与切割速度都得到了大幅提升。

### 线锯切割工艺

现代线锯的核心部分是缠绕在导轮上、直径为  $110\mu\text{m}$ – $140\mu\text{m}$  的单根切割钢线。这种导轮开槽精细且槽距均匀，形成平行切割线的水平网状结构或网（图 3）。强大的驱动力使整张网在相对高速（每秒 10 米到 20 米）下运行。浆料，一种由耐磨粒子加冷却液制成的悬浮液，通过喷嘴输送到运动中的切割线上。切割线将浆料传送到切割区。将要切割的硅锭被固定在切割台上并且与切割头逆向垂直运动。这一动作将硅锭推

过切割线网，同时产生大量的硅块或硅片。在使用浆料的多线锯切割系统中，切割运动基本上是一种快速的三体磨损过程，其特点在于使用了一种基于滚动及压入的切割机制[1]。

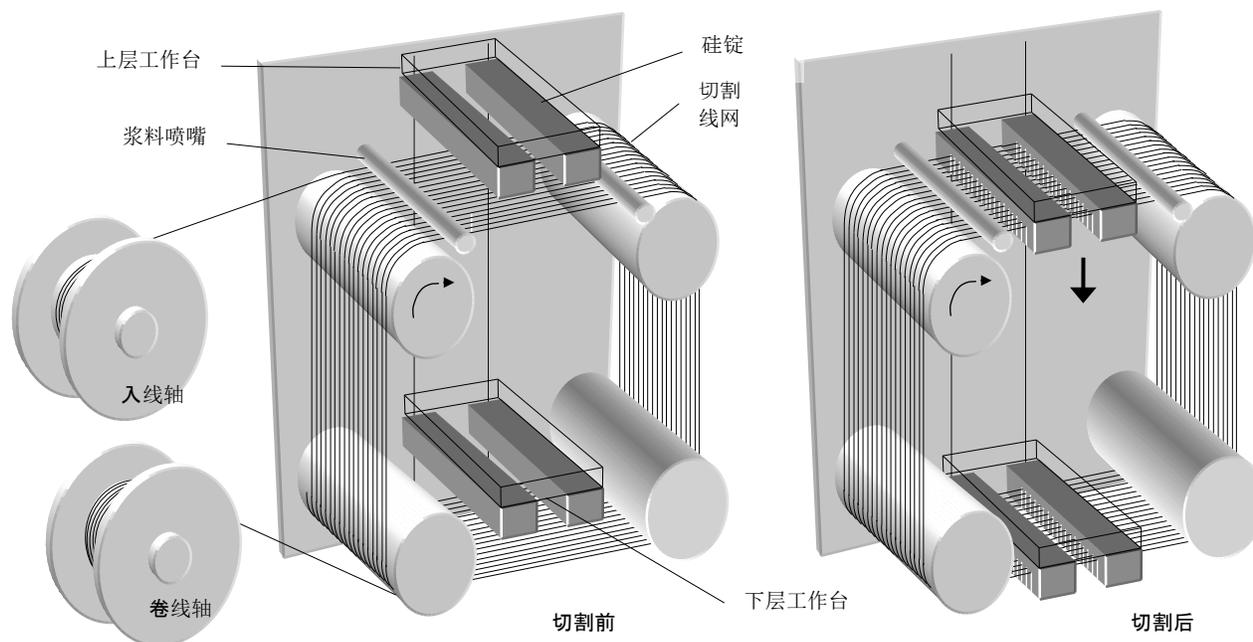


图3：多线锯系统示意图。硅锭被推过切割线网。

线锯切割的原理浅显易懂，但是真正的挑战来自于实际操作。线锯必须准确地平衡切割线的直径、切割速度以及切割总面积，这样才能既不造成切割线断裂又能保证精确的形状控制和高成品率。

## 降低成本

多线切割系统在进行硅片切割时的总体拥有成本取决于4个关键因素（按照重要性递减顺序）：多晶硅的市场价格、硅片成品率、切割耗材的成本以及生产率。

提高成品率可以在降低硅片切割成本方面带来极大的改进，而对于原材料成本来说，能做的事情并不多或者根本没有办法。硅片成品率，即每单位原材料所制成硅片的可用面积，受两大因素的影响：切割过程中原材料的损耗（“锯末”或锯缝损失）以及切割过程中产生的未达标硅片。硅原料的利用率可通过减少锯缝损失或在保证切割质量的同时降低硅片厚度来加以提高。硅片的厚度由导轮的槽距决定，而锯缝损失取决于钢线直径与磨料颗粒的大小。在过去十年中，光伏硅片的厚度已经从330 $\mu\text{m}$ 减少到如今常见的180 $\mu\text{m}$ ，而且未来这一趋势还会继续。线锯切割系统的切割线直径最初在180 $\mu\text{m}$ 至160 $\mu\text{m}$ 之间，如今已经缩小到常见的130 $\mu\text{m}$ 至100 $\mu\text{m}$ 之间。

晶体硅太阳能光伏电池生产商对硅片质量要求极高，要求硅片没有任何表面损伤或只有极少的表面损伤（微小裂痕和锯痕），极少的外貌缺陷（扭曲、弯曲以及厚度不均）并且基本无需额外的下游处理。如下所述，钢线直径和磨料颗粒的大小是保证硅片表面质量的重要因素。

最后，耗材成本及生产率改进为降低成本提供了更多的渠道。浆料消耗、切割线磨损、浆料回收以及切割线更换耗时等方面的改进都能发挥一定的作用。在硅片切割工厂中，提高回收是一种十分强大、有效的

降低成本的手段。从这种技术最初于二十一世纪初期进入市场直至今今天，以机械和化学分离原理为基础的回收技术稳定而显著地降低了浆料成本，同时也带来了一定的环保效益。如今，大多数终端用户在切割硅片时所使用的浆料由 70%到 80%的回收成分（例如，液态冷却剂和研磨碳化硅颗粒）和全新的材料组成。

## 主要工艺变量

硅片切割工艺的目标在于提高产量同时保证一流的成品率。产量即指定时间内所生产出的硅片数量，主要取决于以下几个因素：

- 1) **切割台速度** (或进料速度) 指固定待切割硅锭的切割台通过运动中的切割线网的速度。硅锭通过切割线网开始接受切割时，切割线和硅原料之间的压力会逐渐增加。两者之间的研磨浆料通过一种被称为“滚动与压入”的研磨机制开始切开硅原料。在压力增加与原料开始移除之间的延迟会导致切割线网出现弯曲。一旦原料移除速度和切割台下移速度匹配，切割就达到了运动平衡。在指定的切割台速度和载荷下，这种平衡很大程度上取决于切割线速度、浆料切割能力以及切割线张力。
- 2) **载荷**——指每次运行的总切割面积，即硅片面积乘以硅块数量然后再乘以每个硅块能生产的硅片数量。每个硅块可生产的硅片数量由硅块/硅锭的长度除以导轮的槽距所得数值决定。
- 3) **钢线直径**——较小的钢线直径意味着更低的锯缝损失。然而，钢线直径较小的切割线容易断裂，而且在切割过程中会受到更多的磨损。这种钢线直径的变化会增加切割线断裂的风险并影响硅片质量。优化切割线损耗的方法包括在切割线磨损和断裂风险之间找到最佳平衡点：一种能承受更多切割线磨损的系统虽然可以减少切割线的用量，但是却面临着更为频繁的切割线断裂风险。在特定应用中（载荷、硅片厚度等），切割台速度（进料速度）与切割线速度之比越高 ( $v_r/v_w$ )，则切割线磨损就越快。
- 4) **可维护性或切换时间**——在两次切割运行过程中，线锯被服务的速度越快，包括更换切割线和浆料，则整体生产率越高。

在理想状态下，生产商希望载荷尺寸能够最大化。同时切割更多的硅料可在规定时间内生产出更多的硅片，从而实现生产率的最大化。Applied HCT B5 (图 4) 是市场上唯一具备处理较大载荷 (2 米) 能力的系统，为生产商提供了优化载荷的灵活性，在不牺牲成品率的前提下实现生产率的最大化。



图 4: Applied HCT B5 型线锯

图 5、图 6 及图 7 显示了 0.85 米载荷和 1.73 米载荷的测量数据，证实了提高载荷能极大地提高生产率并确保硅片的成品率。在 1.73 米载荷及每分钟 210 $\mu$ m 的切割台速度下，98%的硅片可达到总厚度变化 (TTV) 30 $\mu$ m、厚度变化 (TV) 20 $\mu$ m 以及 20 $\mu$ m 锯痕的规格要求。

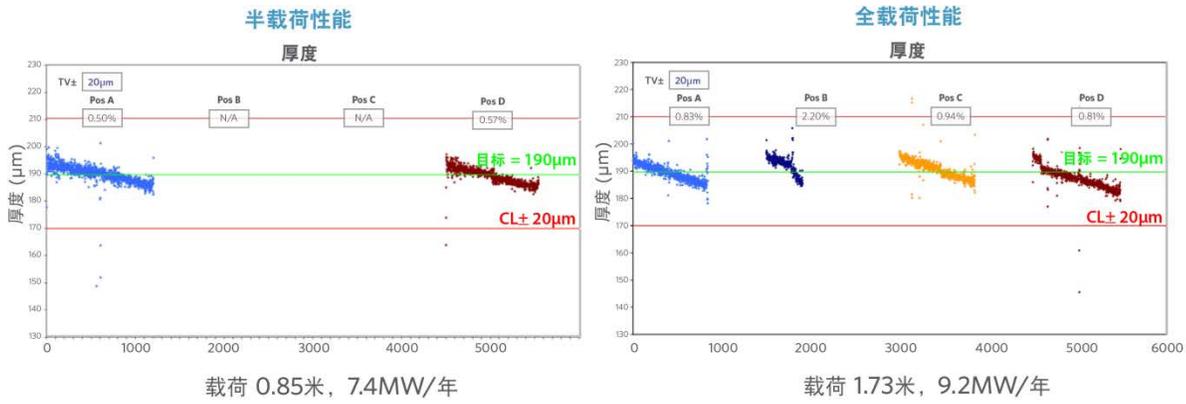


图 5: 厚度变化对比图表

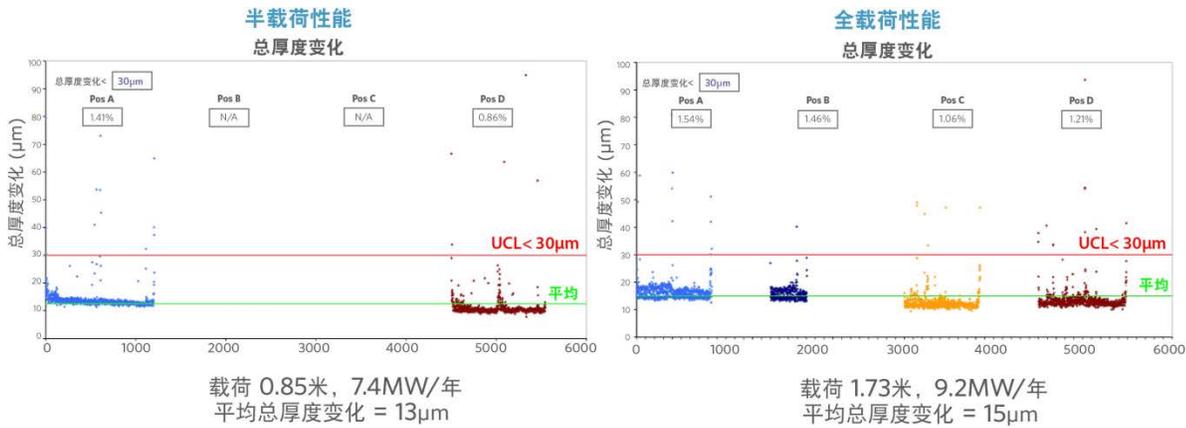


图 6: 总厚度变化对比图表

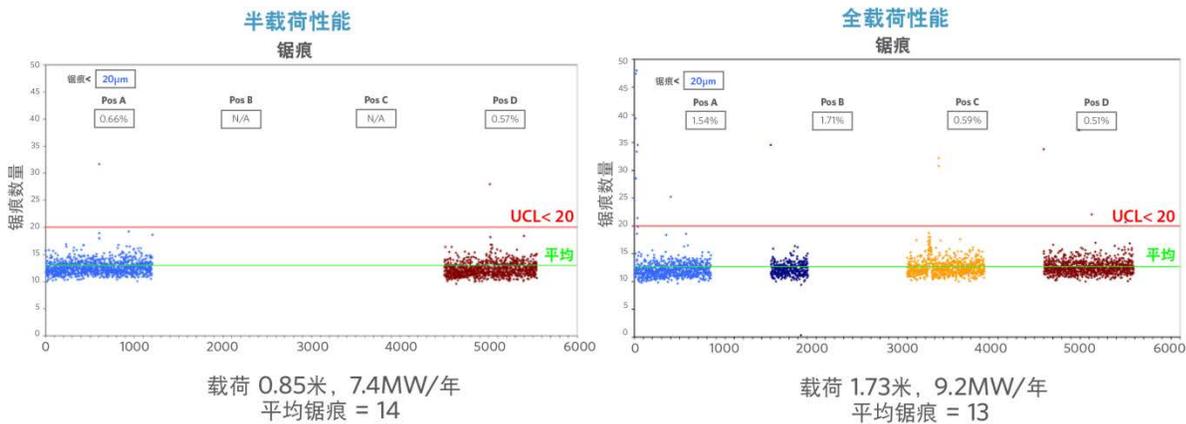


图 7: 锯痕对比图表

## 先进的线锯切割技术

为了满足市场对更低成本的要求，线锯平台架构必须不仅可以进行载荷优化，而且还要能够适应线锯技术的进步。B5 系统是经过实践证明可进行大规模生产的硅片切割系统，不仅能够使用细钢线，而且还可以方便地升级到其它先进的技术，例如结构线和金刚线。



图 8: 结构线

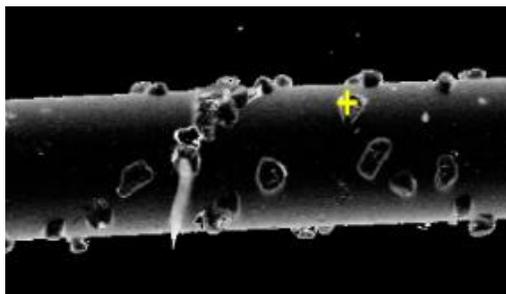


图 10: 金刚线

结构线（图 8）是一种革命性的切割线技术。由于这种技术能够更有效地传输浆料并实现更快的切割速度，因而能大幅提高生产率。Applied HCT 在硅片切割和开方方面首先应用结构线技术。实践证明，在 Applied HCT 开方机上，具有专利保护的粗结构线可将生产率提高 70%、将拥有成本降低 25%（图 9）。Applied HCT 正致力于开发结构线在硅片切割中的应用。结构线面临的挑战在于由于降低切割线断裂载荷而导致的切割线网管理难度。然而，我们预期最终可以在不影响硅片质量的前提下实现更快的切割速度。

BKM 比较	标准结构线 250 $\mu$ m	粗结构线 300 $\mu$ m
每个硅锭的锯缝损失 (GEN 5 x 250 mm)	每块 2.05 公斤	每块 2.34 公斤
生产率	100%	170%
拥有成本	100%	75%
硅块规格	$\pm 0.25$ mm @ 95%	$\pm 0.25$ mm @ 95%

图 9: 结构线在多切割线切方中的应用

新一代金刚线（图 10）专门用于在通过减少浆料损耗降低成本的同时进一步提高切割速度。金刚线是线锯切割工艺的一项关键变革。金刚线实际上是一种表面嵌有钻石颗粒的切割线。金刚线的磨料颗粒大小和集中度随应用而变化，例如，是切割多晶硅还是单晶硅材料。钻石颗粒起到了研磨剂的作用，这样无需使用碳化硅磨料，使整个工艺更加清洁、更加环保。和结构线一样，金刚线技术也同时适合于硅片切割和硅锭开方应用。

Applied HCT 开方机和 B5 平台通过硬件升级可扩展到使用金刚线，这使客户能以更低的成本费用切换到金刚线技术，因为客户不用投资购买新的系统。

最近，Applied HCT 金刚线开方机项目已经在实验室中成功实现了在 4000 $\mu\text{m}$ /分钟的速度下有 100%硅块符合规格。同时，Applied HCT 正在积极地研发使用金刚线进行硅片切割的解决方案。初期结果显示，使用 PEG 冷却剂能容易地实现单晶硅切割。而下一个挑战就是优化多晶硅材料载荷的长度以及使用水性冷却剂，这样一方面能完全消除 PEG 回收成本，而另一方面仍然可以实现高切割速度。

## 结论

目前原材料费用占晶体硅太阳能电池总体成本相当大的一部分，因此线锯技术对于降低每瓦成本并让太阳能光伏价格与传统电力能源持平来说至关重要。线锯切割技术取得的三大进步已经大幅减少了产生太阳能电力所要消耗的硅材料（每瓦所需的硅材料克数）。

首先，实现切割**更薄硅片**的能力。历史趋势显示，每 5 年硅片厚度就会减少 50 微米。从 1995 年至今，硅片厚度已经从 330 $\mu\text{m}$  降低到了 180 $\mu\text{m}$ 。而这一趋势已经不可能再持续这一速度：随着厚度的降低，硅片会变得越来越脆弱，这需要能够在最小压力下处理超薄硅片的先进自动化技术。这在将硅片从切割后的堆叠结构中取出（这一过程也被称为“分检”）以及在太阳能电池生产线加工时都是如此。同时，也需要提高切割工艺来减少硅片的厚度变化并使其与厚度成比例。

其次，使用**颗粒更小的磨料**。磨料颗粒大小不仅在通过减少锯缝损失来实现原料节约方面，而且还在通过切割线的单向运动来降低“楔”效应方面起到了重要的作用：硅片在切割线切入硅块的一端比切割线切离硅块的一端要厚。（这种厚度变化含糊地被称为“总厚度变化”，缩写为 TTV。）与粗糙的磨料相比，颗粒更小的磨料在切割时还能让表面损伤更浅，因此在下游太阳能电池生产线上所需的锯痕消除工作也就更少。减少损伤还能提高硅片的机械强度，减少处理中发生的损耗。

最后，多年来**钢线直径**的减少有助于节省硅料。钢线直径已经从上个世纪九十年代中期的 180 $\mu\text{m}$  降低到今天常见的 120 $\mu\text{m}$ （有些生产中使用钢线直径规格为 110 $\mu\text{m}$  甚至 100 $\mu\text{m}$  的切割线，而在研发领域，钢线直径已经降低到了 80 $\mu\text{m}$ ）。

随着线锯行业通过直切割线技术继续降低硅片切割工艺的成本，结构线和金刚线等新兴线锯切割技术将在保持甚至提高硅片质量的同时进一步降低成本、提高生产率并减少耗材成本。

Applied Materials, Inc.  
3050 Bowers Avenue  
P.O. Box 58039  
Santa Clara, CA 95054-3299  
U.S.A.  
Tel: 408-727-5555

应用材料公司  
中国上海张江高科技园区  
张东路1388号22幢  
邮编：201203  
电话：(86.21) 3861.6000

[solar\\_sales@amat.com](mailto:solar_sales@amat.com)

<http://www.appliedmaterials.com/zh-hans/technologies/solar>

© 应用材料公司2011年。应用材料公司、应用材料公司徽标和其它指定或指示作为产品名称或服务的商标是应用材料公司在美国和其他国家的商标。保留所有权利。2011 年 4 月。