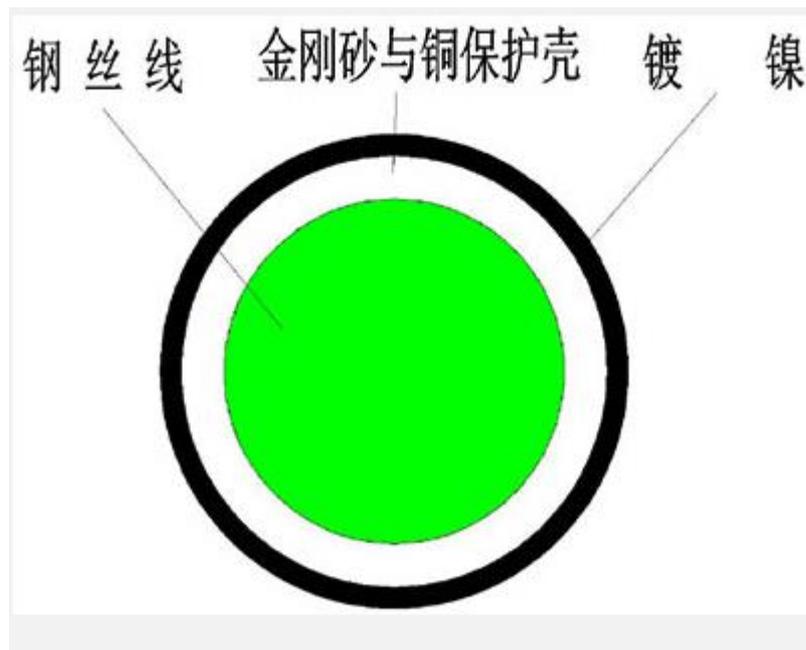


## 金刚石线切割技术简析

以生产工艺划分，**金刚石线**可以分为**电镀金刚石线**和**树脂金刚石线**。金刚石切割线是通过一定的方法，将金刚石镀覆在钢线上制成，通过金刚石切割机，金刚石切割线可以与物件间形成相对的磨削运动，从而实现切割的目的。

金刚石线是用复合电镀的方法将高硬，高耐磨性的金刚石**微粉**固结在钢丝基体上，而制成固结**磨料**金刚石锯线。在切割过程中 90%的抗拉强度来自钢丝线，因此钢丝线对金刚石线至关重要。

在自由磨料线锯切割过程中，研磨液由喷嘴直接喷到钢丝线与硅晶体上，由线网的钢丝线带动游离磨料对硅晶体进行切割。与游离磨料不同，金刚石线将金刚石微分固结到钢丝线上，钢丝线往复移动对硅晶体进行切割。



图：金刚石线构成轴剖面图

### 技术优势

传统砂浆的利用钢丝的快速运动将含磨料的液体带入到工件切缝中，产生切削作用。在切割过程中，碳化硅被冲刷下来，唯有持续进行滚动磨削，而减少切割效率。碳化硅的硬度 9.5(莫氏)，而金刚石硬度在 10(莫氏)。金钢线切割线速度基本在 15m/s，正常切割的砂浆线速度

基本在 9-11.5m/s。而若金钢线再做突破的话，就应该是要更硬，同时兼有更好的自锐性（多晶金刚石），更稳定的固结方式，更快的线速度。

金刚石切割线相比传统工艺有三大优势：

- 1) 金刚石线切割漏损少，寿命长，切割速度快，切割效率高，提升产能；
- 2) 品质受控，单片成本低，金刚石线切割造成的损伤层小于砂浆线切割，有利于切割更薄的硅片；
- 3) 环保，金刚石线使用水基磨削液（主要是水），有利于改善作业环境，同时简化洗净等后道加工程序。

### 添加剂原理

随着金刚石线切割技术的发展及单多晶竞争的日益激烈，**多晶硅片**将全部由砂浆线切割转变为金刚石线切割。不过由于金刚石线切割多晶硅片的损伤层浅、线痕明显等问题，常规砂浆线的酸制绒难以在其表面刻蚀出有效的减反射绒面。

目前，针对金刚石线多晶硅片制绒的难题，主要解决办法包括：金刚石线直接添加剂法、干法黑硅(RIE)及湿法黑硅(MCCE)等，由于 RIE 和 MCCE 成本及工艺等原因，目前大多数企业以金刚石线直接添加剂法制备金刚石线切割多晶硅片的减反射绒面，当然由于添加剂法制备的电池转换效率低等因素，决定其只是金刚石线切割多晶硅片全面推广的一个过渡阶段。

#### — 金刚石线添加剂制绒原理 —

金刚石线切割多晶硅片利用二维切割方法，通过电镀或树脂固定的方法将金刚石颗粒镶嵌在不锈钢丝上，直接利用其高速运转对硅片进行磨削切割，具有切割效率高、环保、适合于薄片切割及硅料利用率高等优点，但表面损伤层浅且有较多粗线痕；砂浆线切割多晶硅片利用三维切割方法，采用不锈钢丝将 SiC 微粉及聚乙二醇等带入切割区进行磨削切割的方法，具有表面损伤层较深且基本无线痕优势，但产量低、硅料损耗大、环境污染大等。由于金刚石线多晶硅片与砂浆线硅片损伤层等差异较大，因此利用砂浆线酸制绒的方法对金刚线多晶硅片进行制绒时反射率达到 28%左右，平均 Eta 比常规砂浆线低 0.2%左右，主要是由于其制绒后反射率过高，从而导致 Isc 下降。

目前，许多添加剂厂家都开发出金刚石线切割多晶硅片用添加剂，可以直接用砂浆线多晶硅片的酸制绒机台，制绒后反射率比砂浆线高 2%左右，转换效率约比砂浆线低 0.05%，成本低且与产线 100%兼容。一般来说，按照金刚石线添加剂厂家建议的 HF/HNO<sub>3</sub>/DI 初配，没有加入添加剂时减重较高，反应较剧烈，气泡较大较少，反射率高，绒面会较大较浅；加入添加剂后减

重会明显降低，反应变慢，但气泡较小较多，反射率变低，表面整体变暗，绒面普遍较小较深，这是因为：金刚石线添加剂会降低制绒药液的表面张力，有利于气泡、反应的含硅络合物等形成的“掩膜”脱离硅片表面，尤其是对硅片底部的作用效果较为显著，因此在金刚石线添加剂作用下促进绒面纵向发展，这样制绒时纵向反应速度与横向反应速度差异比无金刚石线添加剂时小很多，从而有利于硅片的绒面变小变深，达到降低反射率的目的。由此表明：金刚石线添加剂首先是抑制制绒反应的进行，使得整体反应速度变慢，同时通过控制绒面宽度和深度降低反射率，达到陷光效果。下图即为有无金刚石线添加剂条件下 3D 绒面照片，对比可发现：有金刚石线添加剂时绒面明显更小，出绒率更多，这是由于添加剂相对促进硅片纵向反应的结果。

### — 金刚石线直接添加剂法所需 HF/HNO<sub>3</sub> 理想配比的实现方法 —

目前各厂家金刚石线添加剂直接制绒法的初配比例差异较大，一方面是由于市场上金刚石添加剂的种类繁多，添加剂配方差异较大；另一方面是因为多数添加剂及电池厂家都仅在常规砂浆线多晶硅片初配的基础上进行适当调整，并没有调试出一个很好的初配比例，这样会造成制绒后的反射率难以达到添加剂所能达到的最低值，不利于提高电池的转换效率，同时会造成大量 HF 和 HNO<sub>3</sub> 的浪费。

根据金刚石线添加剂特性及原理，我认为任何一款金刚石线添加剂都只是相对的降低制绒反射率，因此都有其所能达到的最低反射率。如果金刚石线添加剂的用量偏少而 HF/HNO<sub>3</sub> 用量过多，不仅会造成化学品的浪费，而且很难达到降低金刚石线多晶硅片制绒反射率的目的。尤其是 HNO<sub>3</sub> 对反射率较为敏感，HNO<sub>3</sub> 稍多就会造成表面发白，反射率迅速增加，HF 过多会造成黑绒及整体反应加速等现象。如果添加剂用量偏多，不仅造成其浪费，还不利于提高电池转换效率(金刚石线添加剂含有有机物等)，同时也难以界定 HF/HNO<sub>3</sub> 用量是否达到合适配比，不利于获得更低的制绒反射率。因此，我认为金刚石线添加剂制绒初配时首先需要考虑合适的金刚石线添加剂的用量，然后通过工艺调整得到最佳的 HF/HNO<sub>3</sub>/DI 配比，这样才能得到最低的反射率，提高金刚石线多晶电池的 Isc 和 Eta。

那么，怎么通过调试获得最佳的工艺配比呢？通过金刚石线添加剂实验发现：在适当的初配比例下，可通过逐步的工艺调整得到理想药液配比(包括添加剂量，HF、HNO<sub>3</sub> 及 DI 用量，甚至带速、温度等、循环流量等)。工艺调试过程中遵循单一变量的原则，并重点监控绒面、反射率(表面敏感程度)、减重及外观黑丝状况等参数，通过每次工艺调整后各监控参数的变化分析药液中各化学品量状态(过量还是少量)，尤其注意一些突变性的变化，这有助于快速帮助我们把握某些化学品的量是否适宜。配合对金刚石线添加剂原理的理解及各种化学品的作用，可建立一个金刚石线多晶硅片制绒反应的模型，通过对工艺调试过程中各监控参数变化进行逻辑推理，可得到理想的金刚石线添加剂药液配比。针对不同用量的金刚石线添加剂，可调试出不同的相适宜的

HF/HNO<sub>3</sub>/DI 配比，同时此方法亦可调试出最佳的 HF/HNO<sub>3</sub> 自动补加比例。

## 为什么能提升效率

金刚石线的切割效率能够较游离碳化硅切割提高分为以下几个方面，

固结方式，也就是带来金刚石参与磨削的切割更多，同时也减少了磨料之间的相互磨损现象。

金刚石硬度高，金刚石的耐磨损强，都将大大延长金刚线的使用寿命。

切割线速度高，金刚石与硅片接触面积增大，金刚石线又将能承受高线速度带来的其他不良，从而发挥高切割速度的优势。

传统砂浆的利用钢丝的快速运动将含磨料的液体带入到工件切缝中，产生切削作用。在切割过程中，碳化硅被冲刷下来，唯有持续进行滚动磨削，而减少切割效率。碳化硅的硬度 9.5（莫氏），而金刚石硬度在 10（莫氏）。金刚线切割线速度基本在 15m/s，我们正常切割的砂浆线速度基本在 9-11.5m/s。而若金刚石线再做突破的话，就应该是要更硬，同时兼有更好的自锐性（多晶金刚石），更稳定的固结方式，更快的线速度。

## 增效的地方

切割效率高：首先第一个切割效率高降低了设备厂房及一切折旧、单片人工加工成本。

单片成本低：金刚石线替代了传统砂浆的切割的碳化硅、悬浮液、钢线，对比三项来说，根据砂浆使用结构线加线回收砂浆系统的单片控制在 0.65 元算比较前沿的，但不是每一家都可以达到这个程度，金刚石线的电镀线切割基本持平，树脂金刚石线还可以下潜 1 毛钱。

### 品质受控：

1、从品质管控来说，砂线液是必须分三家供应商，如果在加上二级三级供应商的话，三项辅材需要设置要达到 6-12 家，相对金刚线将砂、线、综合了，供应商的减少也减少辅料波动性，只需管控一家即可。

2、切割过程中的断线，是影响良品率的一大杀手。金刚石线的母线采购单价是高于普通直拉刚线几倍的价格，对于直拉刚线的品质要求也要更高，需要经过多次上砂和清洗和修磨工艺。

3、金刚石线的制造过程，需要经过多道金刚石线拉力机的测试，并设立三道品质检验，分别从母线检测、一次成品检测、二次成品检测、需对每卷线都会有一份相应可追溯性检测报告，对表面镀层上砂颗粒数量、破断拉力、突出量等一系列数据进行检测。



ADD: HI-TECH ZONE, XIAN CITY, SHAANXI, CHINA  
WEBSITE: HTTP://WWW.COMAXTOOL.COM  
TEL: +86-29-87552162 FAX: +86-29-88899744  
E-MAIL: SALES@COMAXTOOL.COM

**CO-MAX MACHINERY TOOLS LIMITED**

4、金刚石线品质的性能，另外还需要是大量建立实际切割数据基础上，在提供给客户应用之前，现具有规模的金刚石线厂家都会添加 1 台或者多台金刚石线多线切割。建议一个具有示范性、可复制的前沿技术推广应用的生产测试部门，对每批次刚线进行切割和前沿技术的摸索，经过了品质检验和实际生产的测试双向检测。

5、金刚石线的生产是完全建立数据跟踪系统，对于每卷线数据做到具有可追溯性，这也将品质把控更提高了一步。

**环保：**

环保处理费用在现中国的时代，工厂对于环保的认知还是太低了，砂浆的 cod 达到几十万，而金刚石线切割液经过纯水稀释加切割液 cod 在 200-1000，对于污水的处理也将大大提升。

**硅耗降低：**

潜在利于硅粉的回收再利用，回炉再利用，现在还在探索阶段。

---

**CO-MAX MACHINERY TOOLS LIMITED**

10 Anson Road #26-04 International Plaza, Singapore (079903). Tel: +65 90255373 Fax: +65 64461885