

太阳能光伏产业应用的硅材料 多线切割技术

大连连城数控机器股份有限公司 (辽宁 116031) 张树礼

编者按：大连连城数控机器股份有限公司在多线切割机床方面有着相当的实力，其切方机被光伏协会鉴定为具有国际先进技术水平设备。为此，本刊特约大连连城数控机器股份有限公司的高级工程师、大连市优秀发明家张树礼撰写此文。

随着人类社会的进步和日益发展的需求，能源作为推动社会快速发展的重要作用而被全球所关注。尤其是当人们普遍认为地球上有限的资源终有终结的一天时，科学家们无不把许多精力用在了寻求新能源的领域。如水力发电、风力发电、太阳能发电等。近年来，太阳能的应用越来越广。对于这取之不尽，用之不竭的太阳能，让全人类的目光都聚焦在这里，使硅片加工业也随之兴起，从而使光伏产品得以高速发展。然而，对于硅材料的加工要求也越来越高，超薄硅片的切割技术，打破了传统锯片加工的形式，采用多线的加工方法引领当今硅片生产的潮流，硅片多线切割技术是目前世界上比较先进的硅片加工技术。

我国大多光伏行业生产厂均采用国外的多线切割机床，这缘于我国多线切割机床还处在刚刚起步阶段。2011年年初，第五届国际太阳能光伏大会在上海展览馆举行，展会上光伏产品的生产厂商众多，而硅材料多线加工机床生产厂则不足10家。大连连城数控机器股份有限公司参展的具有国际先进水平的切方机（见图1）赢得用户的青睐，进而带

着厚厚的订单而归。这让我们看到了国产多线切割机床的前景与未来，完全靠进口的局面已被打破。然而，就国产的多线切割硅片的机床而言，与瑞士和日本等先进国家的同类产品有着很大的差距，还有许多核心技术需要研究。



图1 大连连城切方机

多线加工硅片的工艺及优点

光伏产品及电子产品中的硅片是需要多种工艺而完成的。在硅锭的制造上就有所不同。单晶硅是由单晶炉拉制而成，硅锭是圆柱形，而多晶硅锭是方形体。一圆一方，要达到最终的薄片，采用多线切割机加工的工艺上也有所不同。单晶硅是先切断，即切去头尾，后切方，最终再切片。多晶硅是先切方，即将整个方形硅锭切成几十块小方，后切去顶部和底部，最终再切片。

采用多线切割硅片较传统锯切有许多优点：硅片弯曲度小，平行度好，表面粗糙度值低，厚度公差小，片间切割损耗少，切片加工出片率高，生产效率，投资回报率高。因此，应用多线切割机是发展规模化生产和提高生产效率的必然选择，特别适用于太阳能光伏电池超薄基片的批量加工。

多线切割机的加工原理

多线切割原理是使用钢丝线带动砂浆中的碳化硅微粉，对硅进行切断的一种加工方法。在加工过程中，高速旋转的导线轮带动钢线以一定的压力压在被加工的硅体上，同时，在切割部位喷淋一定量的砂浆，使其中的碳化硅微粉悬浮在钢线上，在钢线高速运动的同时，通过碳化硅颗粒对硅进行磨削，从而使硅体被切开，实现切断、切方、切片等加工工艺。多线切割机加工硅片的原理如图2所示，图中的导线轮、收、放线轮，排线轮等均由伺服电动机同步驱动。张力轮由伺服力矩电动机驱动或气缸及压力传感器驱动。图3为单晶硅的切方加工方法。

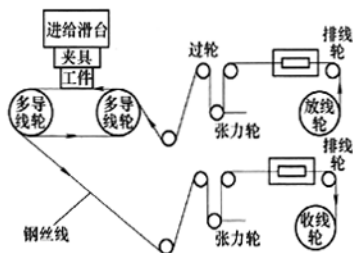


图2 原理图

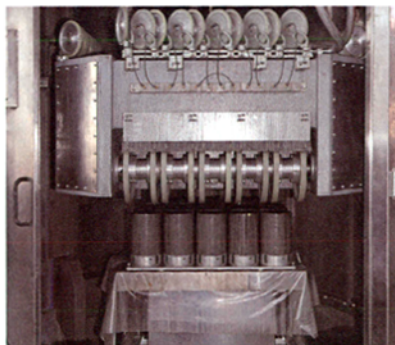


图3 切方工艺

影响硅片加工的重要因素

在硅材料的加工中，目前国内生产的多线切断和切方机床已投放市场。而多线切片机因加工难度大，要求条件苛刻，技术含量高而落后于前者。虽然个别生产厂家有了样机，但技术还不完全成熟，均处在刚刚起步阶段。硅片是光伏电池和电子产品的重要元件，因此，对硅片的质量要求很高。多线切割硅片不是一根线在切，在导线轮上平铺缠绕平行的上千条钢线同时进行切割，也就是说，一次要加工上千片硅片，且每片厚度仅在0.15~0.3mm，加之硅材料属于脆性材料，因此在切割过程中，某一个环节稍有问題，则导致硅片出现线痕、崩边、碎片而报废。硅是较昂贵的材料，是不允许有过多的报废的，这就给加工带来了难度。在硅片的加工中，影响硅片加工质量的因素很多，但主要有以下几个方面。

1. 导线轮的影响

由于导线轮上的钢线进行切割，因此对导线轮的旋转精度要求很高，不许有振动。

导线轮上开的上千个钢线槽尺寸要求一致性，且跳动要在0.02mm以内，此外，导线轮支撑轴要有温度控制装置。因为，导线轮是高速转动，如果运动不平衡，运动精度不稳定，会使被加工的硅片产生加工缺陷而出废品。因此，导线轮的运动精度，将决定机床的性能，它是判定机床好与坏的一个重要的指标。

2. 砂浆的影响

无论是切断、切方，还是切片，钢线在切割时均离不开砂浆的参与。砂浆是由聚乙二醇和碳化硅微粉按一定比例配制而成，由于在切割过程中，砂浆是悬浮在钢线上的，它不仅参与切割，而且还有冷却作用。因此，砂浆的浓度和黏度对加工性能影响很大。在切割过程中，由于钢线、碳化硅粉与硅体高速摩擦产生大量的热量，如果砂浆黏度大流动性差，会导致加工散热不好，加工硅片时会产生表面烧伤而成为次品，或钢线因过于受热而折断。如果砂浆过稀，黏度则低，使碳化硅粉在钢线上的浮着力减弱，降低了加工效率。也就是说，在砂浆中，为了使加工效果更好，碳化硅粉要占有

一定的量,这样才有能力进行加工。否则,砂浆的黏度再大,而碳化硅粉数量不足,加工效果也不会好。

另外,碳化硅粉的粒度和形状,也是影响硅片表面粗糙度值和切割能力的关键因素之一。形状规则,切出的硅片表面质量好,粒度均匀的,可提高切割能力。再者,砂浆的流量也影响加工的效果。在切割过程中,砂浆的供给量要充足,不允许有断浆或少浆等现象出现,否则会使硅片产生线痕或钢线折断。因此,砂浆流量需要用流量计进行反馈控制。

3. 钢线速度的影响

在加工过程中,钢线的速度是反映加工效率的主要指标。在保证钢线不断的情况下,钢线的速度应尽可能提高,但要与砂浆的供给能力相匹配,砂浆供给能力过大,会使硅片出现线痕或使钢线断线;砂浆供给能力过低,会出现厚薄片、线痕片,因此,钢线的速度提高,与之相关联的配套功能必须与之相适应,否则,单一提到钢线速度则无意义。

大连连城数控机器股份有限公司生产的切片机,钢线的速度可达 $10\sim 14\text{m/s}$,这个指标已经达到国际同类产品的水平。就目前而言,切片机的钢线的走向有单项和双向之分,对于单线来说控制较容易,而对于往复的双向控制就很复杂。由于导线轮换向,钢线速度要从高到低转换,直至到零,再由零到最大。由此可见,这个过程,是匀减、匀加、再匀加速运动的过程,这就给所有的导线轮、排线轮、受线轮、放线轮的同步控制带来了难度。

4. 钢线张力的影响

多线切割机之所以能够实现,与钢线的张力是有直接关系的。没有张力就无法切割,而张力过大,钢线就会断线。因此,在切割过程中,钢线的张力及其变化,需进行实时有效的控制。多线切割硅片,在导线轮上缠绕着多则上千条钢线,加工时,张力随时在不断地变化,只要有一股线断线,将使整个加工失败。断线问题是衡量机床性能的又一个重要的指标。在加工过程中,钢线的张力不同,对硅片的片痕、崩边也有很大的影响。

钢线张力过大,悬浮在钢线上的碳化硅粉就

会难以进入切割部位,且由于张力过大,钢线极易断线。因为,硅片的切割钢线一般直径为 $0.1\sim 0.18\text{mm}$,如此细的钢线,如果张力控制不稳定就会产生断线。一般情况下,张力变化控制在 $\pm 1\text{N}$ 的范围内。如果钢线张力过小,钢线弯曲度增大,钢线带砂能力同样下降,而且也容易出现跳线现象,同样也易产生线痕等残次片。可见,控制张力的变化和反馈,是多线切割的重要环节。

5. 进给速度的影响

多线切割机的切割进给即钢线切入被加工工件的速度。进给速度的快慢,决定了机床的加工效率。因此,进给速度是机床制造商和用户非常看重的技术指标。切断、切方机进给大都 1mm/min 左右,而切片机大都 $0.2\sim 0.4\text{mm/min}$ 。因为,进给速度太大,钢线与工件的压力增大,线弓也随之增大,而钢线极易断线。加工切片如图4所示。

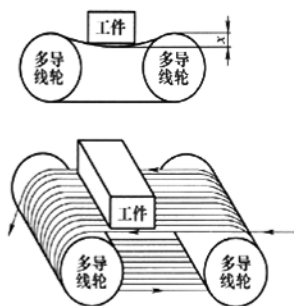


图4 切片加工

结语

影响硅片加工的因素是多方面的,一台性能优良的多线切割机除了具备上述的性能外,还应具备控制的先进性,操作维修的简易性,使用的可靠性。多线切割机的应用,为我国的太阳能光伏行业和电子行业的发展,将起到推动作用,并有着广泛的市场。目前,开发高档多线切割机床,掌握其核心技术,完全挡住进口,让国产多线切割机床占领国际市场是我国机床生产厂家的当务之急,相信,在不久的将来,多线切割机床将有一个新的飞跃,这是太阳能发展的使然,也是能源开发的结果。

MW (收稿日期:20110523)