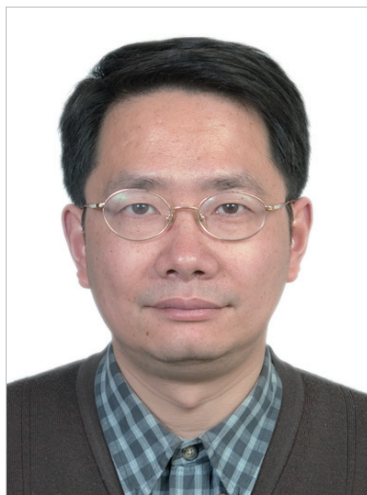


# 高速往复走丝电火花线切割 技术发展趋势

## Development Trend of High Speed Wire-Cut Electrical Discharge Machining

南京航空航天大学机电学院 刘志东



刘志东

南京航空航天大学教授、博导, 主要研究方向为特种加工新技术。近 5 年发表学术论文近百篇, SCI、EI 收录 20 余篇, 编著书籍 3 部, 获发明专利 15 项。目前担任中国机械工程学会全国特种加工分会常务理事, 全国特种加工分会电火花线切割专业委员会副主任委员, 江苏省第六届特种加工学会理事长。

HSWEDM 由于自身加工机理的不同, 在高效稳定切割, 尤其在大厚度、大锥度及细丝切割还有特种材料切割等方面具有自身的独特性, 在通用的切割技术方面近年来也有了飞速的提升, 因此 HSWEDM 必将作为一种十分有特色的电火花加工技术, 长期存在并且日趋发展。

每年的年产量已经达到 5 万台左右<sup>[1]</sup>, 已经成为机械加工领域不可替代的加工手段, 并且其应用领域在不断拓展, 技术水平也在不断提升<sup>[2]</sup>。目前 HSWEDM 也正在逐步为世界各国所接收。为进一步适应市场的需求, HSWEDM 必须进行自身的不断完善, 下面就目前 HSWEDM 所具有的工艺特点及今后的发展方向进行阐述。

### HSWEDM 主要应用及技术水平

#### 1 高效稳定切割

HSWEDM 的加工工艺指标尤其是切割效率在解决了极间冷却的指导思想, 经历了从 20 世纪 80 年代至 21 世纪初的沉寂后, 目前已经有

了质的提高。HSWEDM 由于自身往复走丝的特点, 使得其切割精度不可能与低速单向走丝电火花线切割机 (Low Speed Wire-cut Electrical Discharge Machine, LSWEDM) 进行最终的抗衡, 因此其良好的性价比的一个重要体现在于能进行高效、长期稳定的切割加工, 尤其体现在高厚度切割方面, 因此对于 HSWEDM 而言切割效率的提高及持久性是一个永恒的话题。

目前采用智能脉冲电源, 配合复合工作液 (以华方 HL-09 型智能电源配合佳润 JR1A 复合工作液为例), 可以达到的切割加工指标是: 以平均  $100\text{mm}^2/\text{min}$  的切割效率切割  $350000\text{mm}^2$  工件, 实际钼丝损耗小于  $0.01\text{mm}$ ; 切割工件厚度为  $120\text{mm}$

具有中国自主知识产权的高速往复走丝电火花线切割机 (High Speed Wire-cut Electrical Discharge Machine, HSWEDM) 自 20 世纪 70 年代步入市场后, 以其很高的性价比为广大的模具加工市场所接受, 目前

的 Cr12 模具钢,平均加工电流为 7.2~7.3A,连续切割工件 10000mm<sup>2</sup>,平均切割效率为 210mm<sup>2</sup>/min;最大切割效率目前已经超过 250mm<sup>2</sup>/min。上述指标已经接近或达到中档 LSWEDM 的一般切割效率要求,但由于 HSWEDM 的运行成本仅仅是 LSWEDM 的几分之一甚至百分之一<sup>[3]</sup>,因此在中小批量零件的切割生产中,HSWEDM 具有十分明显的优势。

效率方面,HSWEDM 今后研究的重点在于提高实用的、持续稳定的加工效率,目前持续稳定的效率已经达到 120~140mm<sup>2</sup>/min,今后努力的目标是希望能达到 160~180mm<sup>2</sup>/min,并且对于 150mm 以上厚度工件也同样适用。切割效率的提高目前的途径有:

首先,进一步提高脉冲加工利用率;目前简单的脉冲取样伺服进给放电脉冲利用率可以达到 90% 左右,而采用智能化的脉冲电源可以结合放电间隙状态的检测、等能量脉冲电源的应用以及有害脉冲的抑制等技术,进一步提高放电脉冲的利用率至 95% 以上,同时由于抑制了有害脉冲的输出(如一旦检测出现短路情况就及时切断脉冲电源),可以使得单位电流的切割效率从目前的 25~30mm<sup>2</sup>/(min·A) 上升至 30~35mm<sup>2</sup>/(min·A)。

其次,目前复合工作液如佳润 JR1A 的使用主要解决了极间放电间隙正常的洗涤、冷却及消电离问题<sup>[4]</sup>,使得极间处于正常的放电状态,而影响切割效率的提高还有一个重要的因素就是单个脉冲的放电蚀除量问题,而影响该问题与放电后能量在极间的传输、热量的扩散等因素有关,鉴于上述机理,工作液应该具有更低的电导率,以减少在放电过程中电解漏电流的能量损失,同时具有较高的动态粘度,以有利于压缩放电通道,从而能使得放电能量集中,达到高效蚀除材料

的目的。目前佳润的 JR1P(精品系列)工作液已经在 JR1A 的基础上沿用上述思想,实现了切割效率 8%~10% 的提升。

第三,是目前大家所比较忽视的张力控制问题,HSWEDM 普遍存在电极丝正反走丝张力不均的“单边松丝”的问题,而正是电极丝正反走丝张力的变化会导致切割中电极丝的振动加强,并且导致切缝宽度变宽及不均匀,因此如果能解决电极丝张力不均匀问题,将使得放电脉冲利用率进一步提升且切缝变窄并且比较均匀,由此获得因切缝材料蚀除降低而带来的切割效率的提高。

目前已有厂家设计出具有张力检测及电机张力调整的闭环张力调节系统<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。电极丝运行时,安装在定换向轮处的力传感器把电极丝张力转化成电信号,经电子电路处理放大,控制电机,再经丝杆、螺母控制动换向轮运动,调整从储丝筒上拽引出电极丝的周长,利用电极丝的弹性变形来调整其张力,从而实现电极丝张力的闭环控制。

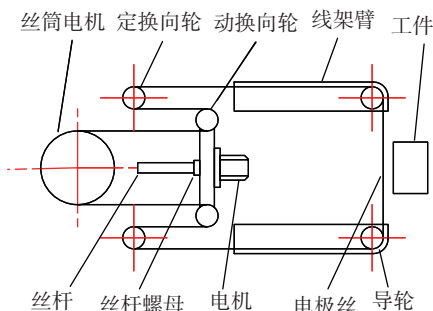


图1 闭环张力调节原理图

第四,电极丝进电问题,电极丝进电问题目前最常用的是导电块进电,导电块由硬质合金或钨钢材料制造,钼丝以 8~12m/s 的线速度贴着导电块表面滑动磨擦运动,两者接触处为一个短圆弧线段。钼丝与导电块之间的接触电阻很不稳定。放电能量传输到加工区域必然因为有接触电阻及电极丝自身的电阻产生能量损耗,如果能尽可能将进电点移动至

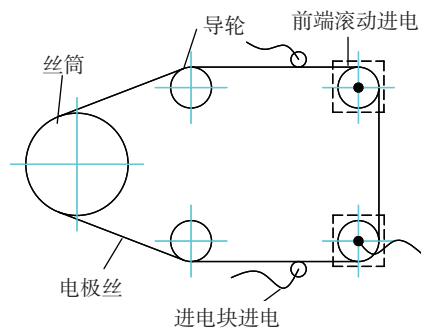


图2 进电取样方式的改进

靠近加工区域(图 2 中虚线框位置),减少能量消耗并尽可能真实获取加工区域的取样信号(通常取样点和进电点在一起),将由此获取加工效率的进一步提高,目前试验已经证明采用前端滚动进电切割效率可以提高 5% 以上。

第五,电极丝材料及表面形貌的研究,自从 HSWEDM 出现后一直在使用钼丝作为电极丝,但纯钼的电导率较铜等材料的电导率偏低,因此能否用一些其他合金或复合材质的电极丝来替代钼丝,从而提高电极丝的电导率,降低脉冲电源在电极丝上的能量损耗也是一个可以深入探讨的课题。目前在 HSWEDM 上高效切割,当最高效率超过 200mm<sup>2</sup>/min 后,工件表面将产生较严重的烧伤痕迹,并且由于放电能量的加大,使进入切缝的工作介质瞬间被汽化而导致极间冷却、洗涤及消电离状态恶化,使得断丝的几率大大增加,因此如何能将大量的工作介质尽快带入放电间隙也是进一步加大放电能量,提高切割效率的前提。

## 2 高厚度切割

HSWEDM 有别于 LSWEDM 的一个显著差异就在于能进行稳定的高厚度(厚度 > 500mm)切割<sup>[6]</sup>。对于 LSWEDM 而言,极间冷却是依靠去离子水高压喷入放电间隙,因此,当切割厚度超过 200mm 后,由于去离子水进入切缝难度增加,因此切割效率显著降低,断丝几率就会大大提高。而 HSWEDM 由于极间的工作

介质主要依靠电极丝带入,因此,采用洗涤性良好的复合工作液后,冷却、洗涤及消电离等问题已不再成为高厚度切割的阻碍<sup>[7]</sup>。目前商品化的 HSWEDM 最高切割厚度已超过 1200mm (图 3), 并且已有 1500mm 以上切割厚度的定制产品问世。

当然,能进行 500mm 以上高厚度切割并不是只解决了极间冷却后就一定能稳定进行的。由于电极丝在切缝中的长度增加,电极丝经过导轮后有一个抛离效应(图 4),而抛离后偏离上下导轮理论切线的距离  $\delta$  及跳动量均与上下线臂的跨距有关。因此,首先切缝必须有足够的间隙容纳电极丝的跳动,所以要求脉冲电源有足够的爆炸力以获得较大的放电间隙;其次,电极丝抛离后偏离上下导轮理论切线的距离与跨距及电极丝的张力( $T$ )有关,所以必须控制

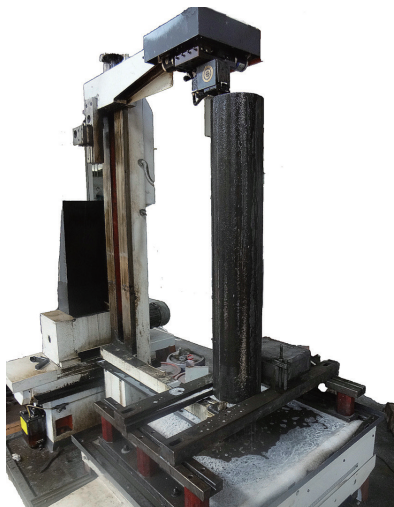


图3 1000mm高厚度切割加工现场

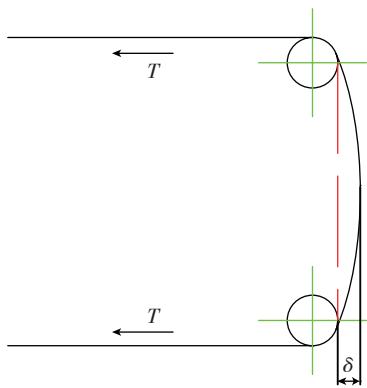


图4 电极丝导轮定位时实际空间位置图

好电极丝的张力及其稳定性;第三,由于工作液在极间作用长度的增加且工作液具有一定的导电性,必然会在极间产生较高的漏电流,并且由于极间介质的不均匀导致漏电流不稳定,从而会影响极间取样电压的稳定性<sup>[8]</sup>,因此低电导率工作介质的选择及取样方式及取样点的改进也是需要面对的问题;第四,由于电极丝在极间停留的时间增加,极间排屑距离的拉长等因素易导致极间不正常放电的几率提高,电极丝断丝几率增加,因此加工中最好能对非正常放电状态及时进行判断,一旦有异常放电应及时切断放电脉冲。在解决了上述问题后,高厚度切割的稳定性将会大大提高;第五,南航刘志东课题组的最新研究证明高速往复走丝属于非对称切割,由此造成正反向切割的不一致性,从而导致了单边松丝问题,此现象在高厚度切割中体现得尤为明显。单边松丝将使得高厚度切割持续不了太长时间,为解决此问题,通过调整正反向电极丝的走丝速度,达到基本平衡电极丝阻力的目的,从而减小或消除单边松丝问题,使得高厚度切割可以持久稳定进行,配合电导率较低的佳润 JR1P (精品系列)工作液,可以达到良好的加工指标。

好电极丝的张力及其稳定性;第三,由于工作液在极间作用长度的增加且工作液具有一定的导电性,必然会在极间产生较高的漏电流,并且由于极间介质的不均匀导致漏电流不稳定,从而会影响极间取样电压的稳定性<sup>[8]</sup>,因此低电导率工作介质的选择及取样方式及取样点的改进也是需要面对的问题;第四,由于电极丝在极间停留的时间增加,极间排屑距离的拉长等因素易导致极间不正常放电的几率提高,电极丝断丝几率增加,因此加工中最好能对非正常放电状态及时进行判断,一旦有异常放电应及时切断放电脉冲。在解决了上述问题后,高厚度切割的稳定性将会大大提高;第五,南航刘志东课题组的最新研究证明高速往复走丝属于非对称切割,由此造成正反向切割的不一致性,从而导致了单边松丝问题,此现象在高厚度切割中体现得尤为明显。单边松丝将使得高厚度切割持续不了太长时间,为解决此问题,通过调整正反向电极丝的走丝速度,达到基本平衡电极丝阻力的目的,从而减小或消除单边松丝问题,使得高厚度切割可以持久稳定进行,配合电导率较低的佳润 JR1P (精品系列)工作液,可以达到良好的加工指标。

### 3 大锥度切割

HSWEDM 能进行大厚度切割的优势同样体现在大锥度切割尤其是大厚度、大锥度的塑胶模具切割方面,对于 LSWEDM 而言,塑胶模具尤其是大厚度、大锥度的塑胶模具切割是比较困难的。

现有大锥度切割的 HSWEDM 通常由普通四连杆摆动式大锥度线架实现,如图 5 所示。导轮在四连杆带动下可以在  $U$  方向进行平移及在  $V$  方向进行偏摆。采用导轮对电极丝进行定位存在以下问题:首先,

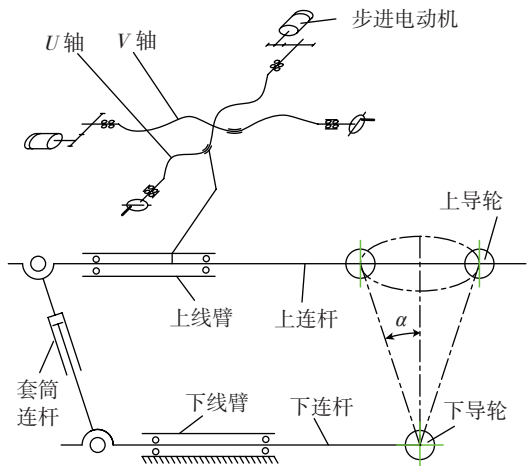


图5 普通四连杆摆动式大锥度线架

会产生锥度切割时电极丝的交切误差<sup>[9]</sup>;其次,采用导轮对电极丝进行定位时,喷水嘴为避免与电极丝在  $U$  方向平移时形成干涉,通常做成沿  $U$  方向长槽式的多出水孔喷嘴。此时对电极丝的冷却无法保证工作液从喷嘴喷出后包裹住电极丝,且对电极丝产生扰动。所以对加工区域的冷却效果很差,影响切割精度和表面质量。

针对现有的 HSWEDM 在切割大锥度工件时电极丝定位及喷水装置不能实现随动导丝及喷水的问题,南航刘志东课题组设计了一种六连杆大锥度随动导丝及喷水机构<sup>[10]</sup>,其原理如图 6 所示。

设计的六连杆大锥度随动导丝及喷水机构由于电极丝方向始终与导丝器中的 V 型槽重合,如图 7 所示,设计于导丝器上的喷水嘴喷出的工作液始终能包裹住电极丝并随电极丝进入加工区,因此能起到很好的洗涤、冷却和消电离作用。对于加工精度、切割效率和表面质量的提高,起到积极作用。其机构装置如图 8 (a) 所示,切割的现场如图 8 (b) 所示。

### 4 稳定高精度多次切割的实现

21 世纪 80 年代上海医用电子仪器厂杜炳荣高工在国内首先用 HSWEDM 进行了多次切割的研究,

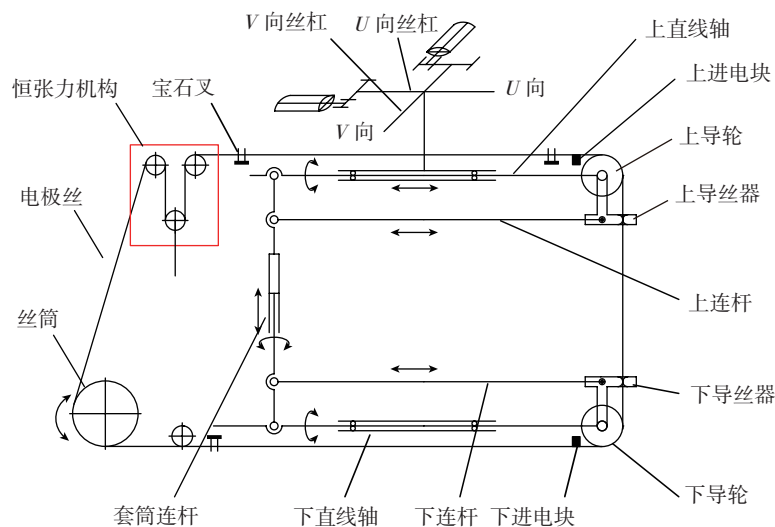


图6 六连杆大锥度随动导丝及喷水机构结构

随后南航金庆同指导的研究生对 HSWEDM 多次切割的机理及实践进行了一系列研究,证明 HSWEDM 可以进行多次切割,并且能达到较高的表面质量及切割精度<sup>[11]</sup>。但由于当时未能解决好极间冷却问题致使一次切割效率不高(稳定切割效率基本在  $80\sim 100\text{mm}^2/\text{min}$ ),从而影响了当时多次切割的实用价值。随着 21 世纪初刘志东研制的复合工作液的市场化及 HSWEDM 控制技术的发展,俗称“中走丝”的 HSWEDM 多次切割技术已成为一种实用的工艺方法<sup>[12]</sup>。但“中走丝”切割的稳定性、持久性以及拐角精度的控制又成为困扰其进一步发展的瓶颈,其最根本的问题仍然是如何保障电极丝空间位置的稳定性。随着刘志东研制的长寿命导轮<sup>[13]</sup>、开合式导丝器<sup>[14]</sup>及其他厂家设计的一系列电极丝导向及定位器件的生产并投入实际使用,使得电极丝空间位置的稳定性及持久性得到了一定程度的保障。目前 HSWEDM 对于厚度在 80mm 以内的一般形状工件多次切割已经能达到  $R_a < 0.8\mu\text{m}$ ,切割精度长期稳定在 0.01mm 以内。下一步 HSWEDM 多次切割要解决的重点问题主要有:首先是解决在较高厚度工件的多次切割并进一步改善表面完整性问题,以将 HSWEDM 多

次切割进一步应用在高厚度、大锥度塑胶模具的多次切割方面,为此在选择工作液方面,佳润 JR1P(精品系列)已经进行了一些有益的尝试,通过降低电导率改进切割工艺等一系列措施,已经可以对 150mm 以内的工件进行稳定的多次切割;其次是如何提高多次切割的拐角精度,目前已经有线切割控制系统可以根据不同的转角设定停顿时间和停顿时高频放电能量,也可以选择转角平分线过切、转角延长线过切进行加工;第三,控制系统要支持螺距补偿功能,甚至进一步采用闭环控制系统以显著提高大工件的加工精度和大行程跳步的跳步精度,并且支持伺服电机驱动,可以进行快速移动、快速空走、快速找圆心等,以显著节省加工时间并提高加工精度。

### 5 半导体及其他特种材料切割

半导体晶体因其对光、热、电、磁等外界因素变化具有十分敏感而独特的电学性质,已成为尖端科学技术中应用最为活跃的先进材料,特别是在国防工业、航空航天、通信、家电、工业制造等领域中具有十分重要的作用<sup>[15]</sup>。但到目前为止,半导体晶体的加工仍是一件十分困难的事情,它最突出的一个特性就是脆性高,断裂韧性低,材料的弹性极限和强度非

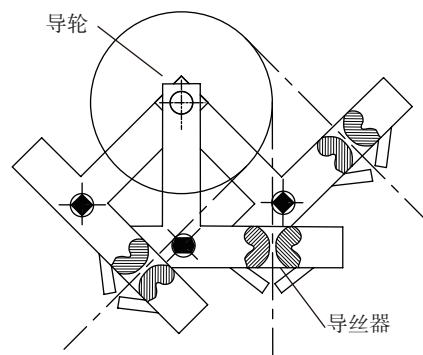
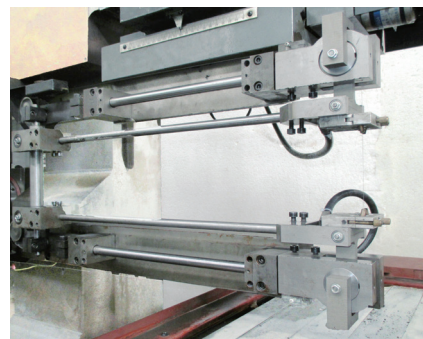
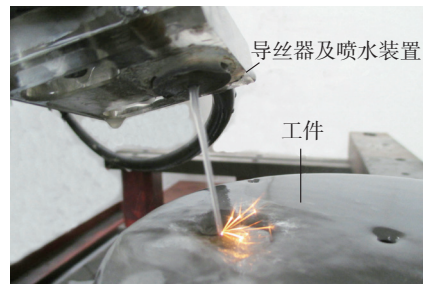


图7 锥度头U向运动时随动喷水导丝器运动图



(a) 机构



(b) 加工现场

图8 随动导丝及喷水机构及现场加工照片

常接近。当所承受的载荷超过弹性极限时,就发生断裂破坏,在已加工表面易产生裂纹,严重影响其表面质量和性能,因此半导体晶体的可加工性极差。而电加工技术不依靠机械能,而是利用电能去除材料,因此,利用电火花线切割技术加工半导体,为解决半导体晶体大尺寸、高效精密切割、窄缝切割、曲线切割等难题提供了一套可行的方案。

半导体材料的电火花线切割又是 HSWEDM 应用领域的很重要的拓展<sup>[16]</sup>,由于半导体进电时接触势垒及体电阻的存在<sup>[17]</sup>,使得采用目前传统的电火花加工伺服控制系统完

全失效,无法准确判断正常加工和短路状态,只能以恒速进给,因此无法保障切割的轨迹精度。刘志东课题组在深入研究半导体特殊的电特性的基础上,采用新型脉冲电源及改进的伺服控制系统,已实现了对电阻率 $10\Omega\cdot\text{cm}$ 以内的半导体材料的稳定切割。图9为P型单晶硅( $2.1\Omega\cdot\text{cm}$ )变厚度切割的样件,图10为该材料微小、复杂和非直线切割样件。

与此同时HSWEDM也已经被用在对聚晶金刚石及聚晶金刚石成形刀具的修整加工及其他电阻率较高的材料,如石油钻头复合片的加工方面。

## 6 细丝切割

近年来,随着对微小零件——微小齿轮、微小花键和微小连接器、传感器及贵重金属特殊复杂零件加工的需要增加,微细电火花线切割加工在许多微型机械生产领域发挥了重要的作用。但在目前的细丝电火花线切割领域,几乎均被LSWEDM所垄断,在细丝加工时,放电能量非常微弱,随着电极丝直径与放电能量的大幅度减小,放电过程及其作用机理都发生了本质的变化,对走丝系统、微精电源、加工过程控制策略等的要

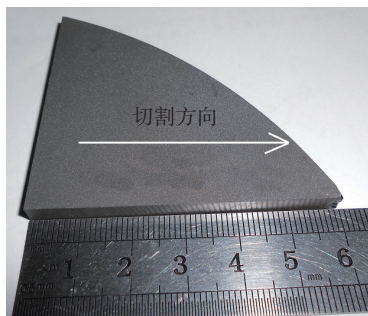


图9 P型单晶硅( $2.1\Omega\cdot\text{cm}$ )变厚度切割的样件图



图10 半导体微小、复杂和非直线切割件

求极大提高。但从基本的切割机理考虑,HSWEDM由于走丝速度快,电极丝获得的冷却将更加及时,其切割的持久性、稳定性及切割的效率指标还有性价比将大大高于LSWEDM的细丝切割,为此刘志东课题组已经对现有LSWEDM机床改进,通过调整伺服策略、脉冲能量、电极丝走丝系统、张力控制及低损耗工作液等手段,已经实现了直径 $0.05\text{mm}$ 电极丝连续稳定切割,后续将针对 $0.03\text{mm}$ 电极丝的切割开展研究。

## 7 大型或异形零件的切割

HSWEDM在大型零部件加工方面,由于结构简单,容易制成大型、多单元及回转机床,专用于加工超大型精密齿轮及齿轮轴等专用设备,图11所示为回转式多单元电火花线切割组合机床。该产品与传统的超大型齿轮加工设备(如超大型滚齿机)相比,在能耗及设备成本特别是加工刀具方面有着巨大的优势。目前,该技术已成为我国重载超大型齿轮加工的一种重要工艺方法。

图11的轮胎模线切割专机为轮胎模企业解决了轮胎模具加工的难题,还适用于环形零件或模具的分度、曲线等非标加工。



图11 回转式多单元电火花线切割组合机床

## HSWEDM存在的主要问题和 发展方向

### 1 市场规范化

对于普通的HSWEDM机床生产,由于企业进入的技术门槛比较低,因此目前国内存在大量低水平重复性生产的企业,主要集中在江浙一带。这些企业生产的重点集中在如何降低产品的制造成本方面,因此在产品品质、技术、外观方面的投

入很少,在产品的销售方面只是单纯的进行价格的拼杀,这些企业产品在市场的运行过程中造成了整个HSWEDM市场鱼龙混杂,客观上对整个HSWEDM的发展起到了阻碍作用。因此必须通过国家机床行业的强制执行标准、行业的监督及市场逐步的筛选及细分,逐步完成市场的规范运作。

### 2 技术研发方向

HSWEDM自身的特点决定了该设备是一种适合中低精度零件高效稳定切割及高厚度、大锥度及特种材料切割的设备,因此在这些领域进行深入的研究是十分有必要的。以往对HSWEDM的研究还缺乏系统性及深入性,从目前对HSWEDM的研究发现,其加工机理的复杂性不比LSWEDM差,还有很多问题不被人们所认识,还有许多技术值得认真研究。目前涉及HSWEDM的主要核心问题有:特殊的放电机理、智能高频脉冲电源控制、电极丝张力控制、工作液量化控制和工作台精度控制等。而对于HSWEDM市场进一步拓展,尤其是面向世界市场最核心的问题是加工过程的量化控制问题,以往HSWEDM的操作很大一部分需要依靠经验丰富的操作人员进行干预,这种方法对于国外用户以及目前新生代的国内操作人员都是不可接受的。因此对各个参数进行量化控制尤其是电极丝张力、工作液寿命及对应工艺指标的获取等是必然的趋势。

### 3 工作液寿命及系统

目前在使用复合工作液条件下,切割效率、工件表面质量和电极丝寿命等指标已经获得大幅度的提升,但经过一段时间加工后,复合工作液失效是必然的,而到目前为止还没有一种实用且有效的方法判别复合工作液是否失效。为此刘志东课题组在工作液寿命研究及判断方面做了大量的研究工作。

首先在研究工作液加工过程中

各种表征参数如电导率、PH 值、粘度对工艺指标影响的基础上,分析了工作液寿命与脉冲概率之间的关系<sup>[18]</sup>。从工作液性能对极间放电特性的影响角度,分析了工作液失效前后的极间状况以及放电特性,指出工作液寿命最终体现在放电脉冲概率方面,并与其呈现一定的关系,据此研制了工作液寿命的检测仪。工作液失效的实质就是有效放电脉冲概率的降低,因此可以用有效放电脉冲概率来表征工作液的寿命。工作液寿命的检测仪器测试原理如图 12 所示,先给系统设定一个有效放电电流脉冲概率的初始值,在加工过程中,实时地对电压、电流脉冲进行取样,计算出脉冲电流数占一个采样周期内的脉冲比例数。如果脉冲比例大于设定的值,则表示工作液工作正常;如果有效放电脉冲数小于设定的值,可选择调整切割参数使切割正常进行或者认为工作液寿命已到而需更换。

其次,在综合分析工作液对微观放电机理影响条件下,研制了超长寿命的佳润 JR1P (精品系列)工作液,不需要经过特殊过滤方式,通过不断补液,实现了超长使用寿命,只需经过简单过滤,其使用寿命超过 3 个月,从而大大减少了操作人员的换液次数。

#### 4 操作自动化

随着社会的发展,以人为本的思想深入人心,新一代成长起来的技术工人对工作环境和个人发展的要求越来越高。而目前 HSWEDM 机床的操作环境较差,劳动强度较高(如

穿丝、更换工作液等),培训周期较长(一般成熟的操作工要经过一年以上的培养),但操作人员的收入一般,人机环境如果不进行改进和调整,企业很难培养出安心此工作的熟练技术工人,也会导致这种工艺方法在零件生产中认可度的下降。因此注重机床的环保性能,创造一个良好的工作环境,并提高机床的自动化程度,降低工人的劳动强度将是今后 HSWEDM 一个最主要和长期发展的方向。因此类似于 LSWEDM 的自动上丝技术,遇到异常切割状况时的高频脉冲电源自动调整处理,自动寻找穿丝孔等是 HSWEDM 实现操作自动化要求发展的需要,当然其难度也是相当高的,要保持 HSWEDM 性价比高的特点,并在此条件下提高自动化的要求还有很长的路要走。

#### 5 节能环保

在日益重视节能环保的今天,开发节能环保的电火花线切割机床将会变成一种社会的必然要求。其含义主要包括:对机床进行结构的改进设计,在提高机床自身品质的同时,给操作人员创造一个洁净的工作环境。目前国内开发出的“环保型”机床主要是针对加工时工作液的飞溅和雾化进行防护,并屏蔽加工过程中的电磁波以改善操作环境,图 13 为刘志东课题组设计的丝筒顶置式环保加工机床。

而更重要的环保措施是对工作液进行净化过滤以及废液的处理,如何使失效的废液达到环保排放的要求是需要认真研究的课题。目前全年的 HSWEDM 工作原液的生产量已经超过 1 万吨,稀释成工作液后最后排放到大自然的将超过 10 万吨,而这些废液基本上是未

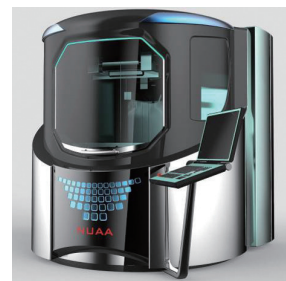


图 13 丝筒顶置式环保加工机床

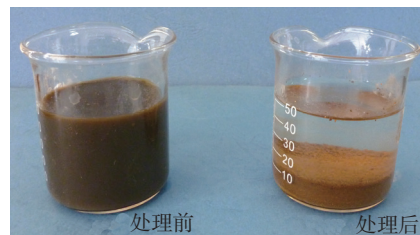


图 14 添加净化剂处理的废液

经过处理的,已经对自然环境造成了巨大的污染,现在主要是逐步淘汰油剂工作液,并且对废液进行处理。刘志东课题组通过添加化学净化剂的方法对失效的工作液进行处理,已经可以获得较好的处理效果,结果如图 14 所示,但目前对 HSWEDM 废液的处理还缺乏系统性的研究,加上采用化学处理方法会导致处理成本的增加及产生二次化学污染,因此对于类似佳润 JR1P 复合工作液而言,可以暂时采用将使用超过 3 个月以上的废液收集起来,利用自然蒸发方式去除水分,最后获得结块的蚀除产物(基本为金属粉末)做回收处理。

#### 结束语

HSWEDM 由于自身加工机理的不同,在高效稳定切割,尤其在大厚度、大锥度及细丝切割还有特种材料切割等方面具有自身的独特性,在通用的切割技术方面近年来也有了飞速的提升,因此 HSWEDM 必将作为一种十分有特色的电火花加工技术,长期存在并且日趋发展。

本文共有参考文献 18 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 小城)

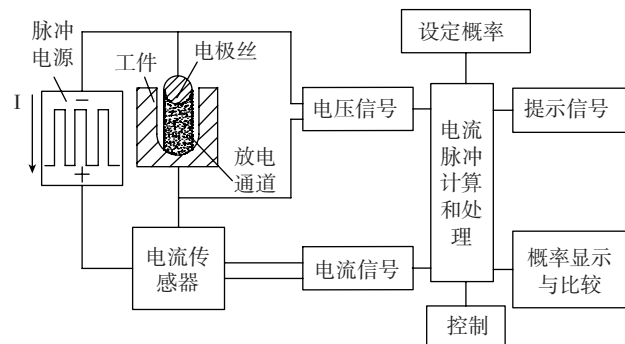


图 12 有效脉冲电流采样系统结构框图