

中图分类号: TG661
学科分类号: 080201

论文编号: 1028705 18-SZ002

硕士学位论文

往复走丝电火花线切割绞合电极丝 装置研制及切割工艺试验

研究生姓名	方来久
专业类别	工程硕士
专业领域	机械工程
指导教师	赵剑峰 教授（校内导师） 张旭东 工程师（企业导师）

南京航空航天大学

研究生院 机电学院

二〇一八年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Mechanical and Electrical Engineering

The Device Development And Cutting Process Test Of Stranded-electrode Wire Of High-speed WEDM

A Thesis in
Mechanical Engineering

by

Fang Lai-jiu

Advised by

Prof. Zhao Jian-feng

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

Mar, 2018

摘 要

针对往复走丝电火花线切割在大能量和大厚度切割过程中由于极间工作液供给不足以及蚀除产物难以及时排出导致加工效率难以得到提升的问题,本文提出了一种新型电极丝——绞合电极丝。本文研制的绞合电极丝制作装置是基于单根电极丝来绞制双绞合电极丝,将绞合电极丝应用于电火花线切割大能量和大厚度加工中,解决了常规电极丝的带液和排屑困难等问题,对于提高往复走丝电火花线切割在大能量和大厚度条件下的切割效率具有重要的应用价值。所做的具体工作如下:

(1)提出了绞合电极丝装置采取的方案,并将整个装置模块化,解决了单根电极丝的退扭、恒张力控制以及匀速收丝等关键问题;解决了绞合电极丝不同丝径不同绞距绞合电极丝的规整紧凑收丝等问题。

(2)对绞合电极丝装置的绞丝模块、收排丝模块、机架的各个零部件进行了具体设计;介绍了控制系统中用到的变频器、光电开关等器件,并给出整个了控制系统的工作原理;设计了新的同步带轮与同步带以增大机床排丝距从而避免丝径较粗的绞合电极丝出现叠丝现象。

(3)对绞合电极丝的切割工艺试验规律进行了研究,在不同放电能量条件下,绞合电极丝与圆截面电极丝做了对比试验,研究发现,与圆截面电极丝相比,绞合电极丝的带液和排屑能力更好,使极间得到充分冷却和消电离,所以绞合丝的切割效率更高,切割得到的工件表面质量更好,而且随着能量的增大,绞合电极丝的优势体现得越明显。对包络直径相同但绞距不同的电极丝做了工艺对比试验,研究发现绞合电极丝绞距越小,切割效率就越高,因为相同长度的绞合电极丝的螺旋形凹槽的体积与绞距成反比,长度一定的绞合电极丝,其螺旋形凹槽的体积越大,则带液和排屑能力越强,加工性能也就越好。

(4)研究了绞合电极丝与圆截面电极丝对不同厚度工件的加工对比试验,研究发现,随着工件厚度的增加,绞合电极丝的带液和排屑能力逐渐体现出来,因此绞合电极丝的切割速度逐渐超过圆截面电极丝。

关键词: 电火花线切割, 绞合电极丝装置, 机床改进, 工艺试验

ABSTRACT

In the process of large energy and large thickness cutting of high-speed WEDM, the efficiency of machining is difficult to be improved due to the shortage of working fluid and the timely removal of corrosion products, a new type of electrode wire, twisted wire, is proposed in this paper. The fabrication device of the twisted electrode wire is based on the single electrode wire to twist the double twisted electrode wire. The stranded electrode wire is applied to the machining of large energy and large thickness of high-speed WEDM, which solves the problems of the difficulty of the liquid and chip removal of the conventional electrode wire, it has important application value for improving the cutting efficiency of the WEDM under the condition of large energy and large thickness. The major research works are as follows:

(1) The scheme of the twisted electrode wire device was proposed and the whole device was modularized. It can solve the key problems, such as back twisting of single electrode wire, constant tension control and uniform wire receiving. And also solves the problem of the regular compact wire winding of different wire diameters of stranded electrode wires.

(2) The twisted-wire module, the wire-collecting module, the parts of the frame were designed concretely. The devices including inverter and photoelectric switch used in the control system were introduced, and the working principle of the whole control system was given. The twisted electrode wire device is fabricated and the stranded electrode wire was successfully twisted. A new synchronous belt pulley and synchronous belt were designed to increase the wire spacing of the machine tool which can avoid the stacking phenomenon of the stranded electrode wire with coarse wire diameter.

(3) The experimental law of the cutting process of the twisted wire was studied. Under the conditions of different discharge energy, the comparison experiment between the twisted electrode wire and the circular cross section electrode wire is made, it is found that twisted electrode wire has better ability to take in working fluid to the inter-electrode and remove corrosion products out of the inter-electrode than the circular cross section electrode wire, so that the inter-electrode can be fully cooled and deionization. Therefore, the cutting efficiency of the twisted electrode wire is higher, the workpiece has better surface quality, and the advantage of the wire electrode is more obvious with the increase of energy. Because the volume of helical grooves of the same length of twisted wire is inversely proportional to the distance of the twist. The larger the volume of the spiral grooves is, the stronger the ability of liquid and chip removal is, the better the processability is.

(4) Study on the comparison test on the machining of workpiece with different thickness with twisted electrode wire and circular section electrode wire, it is found that with the increase of the thickness of the workpiece, the ability of the liquid and chip removal of the twisted electrode wire is gradually manifested. Therefore, the cutting speed of the twisted electrode wire is more than that of the circular section electrode wire.

Keywords: WEDM, twisted electrode wire device, machine improvement, process test

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电火花线切割加工技术简介	1
1.1.1 电火花加工概念	1
1.1.2 电火花线切割的原理及特点	1
1.1.3 电火花线切割机床分类	2
1.2 电极丝的发展以及分类	3
1.2.1 电极丝的发展历程	3
1.2.2 电极丝分类	4
1.3 绞合线锯	5
1.4 论文研究的意义和主要内容	5
1.4.1 论文研究的意义	5
1.4.2 论文研究的主要内容	6
第二章 绞合电极丝装置方案设计	8
2.1 绞线技术概述	8
2.1.1 绞线机	8
2.1.2 恒张力控制	9
2.1.3 绞线退扭	10
2.1.4 匀速收线控制技术	11
2.1.5 收排丝机构	11
2.2 绞合电极丝装置总方案设计	12
2.3 单根电极丝退扭及恒张力方案设计	14
2.3.1 单根电极丝退扭方案	14
2.3.2 电极丝恒张力方案	15
2.4 绞合电极丝收排丝及变绞距方案设计	15
2.4.1 绞合电极丝收排丝方案设计	15
2.4.2 变绞距方案设计	16
2.5 本章小结	17
第三章 绞合电极丝装置结构设计及控制模块设计	18
3.1 绞丝模块设计	18

3.1.1 旋绞主轴结构设计.....	18
3.1.2 齿轮设计.....	19
3.1.3 退扭放丝机构.....	19
3.1.4 导丝架设计.....	22
3.2 排收丝模块设计.....	24
3.2.1 排丝模块设计.....	24
3.2.2 收丝模块设计.....	26
3.3 机架及电极丝消抖模块设计.....	27
3.3.1 机架设计.....	27
3.3.2 消抖束丝模块设计.....	29
3.4 绞合电极丝装置控制系统设计.....	29
3.4.1 变频器.....	29
3.4.2 步进电机.....	30
3.4.3 光电开关.....	30
3.4.4 控制模块原理图.....	31
3.5 本章小结	32
第四章 绞合电极丝高效切割研究.....	34
4.1 电火花线切割机床及电控柜的改进.....	34
4.1.1 排丝距的改变.....	34
4.1.2 绞合电极丝专用电控柜结构的设计	35
4.2 绞合电极丝工艺试验.....	37
4.2.1 试验设备.....	37
4.2.2 大能量加工情况对比.....	38
4.2.3 绞合电极丝与圆截面电极丝带液分析.....	43
4.2.4 绞合电极丝与圆截面电极丝不同丝速下的加工对比实验	43
4.3 绞距对绞合电极丝加工性能的影响.....	45
4.4 不同厚度工件绞合电极丝与圆截面电极丝加工对比试验	46
4.5 本章小结	48
第五章 总结与展望	49
5.1 本文完成的工作.....	49
5.2 后续研究工作展望.....	50
参考文献	51

致谢	54
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	55

图清单

图 1.1 线切割加工原理.....	2
图 1.2 新型电极丝截面图.....	4
图 1.3 电极丝分类.....	4
图 1.4 双绞合电极丝示意图.....	6
图 2.1 常见的绞线机.....	8
图 2.2 磁粉制动器.....	9
图 2.3 摩擦带张力控制.....	10
图 2.4 绞合形式对比图.....	10
图 2.5 恒定收丝线速度控制原理.....	11
图 2.6 收排线原理图.....	12
图 2.7 光杆排线器.....	12
图 2.8 绞合电极丝装置原理图.....	13
图 2.9 同步带轮退扭机构简图.....	14
图 2.10 恒张力收丝机构.....	15
图 2.11 收排丝方案.....	16
图 3.1 主轴装配示意图.....	18
图 3.2 中心带轮固定连接板.....	20
图 3.3 退扭轴零件装配示意图.....	20
图 3.4 压紧轮结构示意图.....	21
图 3.5 放丝机构	21
图 3.6 放丝机构安装方式.....	22
图 3.7 无导丝架的绞丝原理图.....	22
图 3.8 安装导丝架的绞合原理图.....	23
图 3.9 导丝架装配图.....	23
图 3.10 排丝模块.....	24
图 3.11 排丝丝杠零件图.....	25
图 3.12 螺母结构示意图.....	25
图 3.13 直线轴承.....	26
图 3.14 收丝模块.....	26

图 3.15 收丝轴示意图.....	27
图 3.16 机台实物图.....	28
图 3.17 防护罩	28
图 3.18 钣金安装方案.....	29
图 3.19 消抖束丝装置.....	29
图 3.20 变频器	30
图 3.21 步进电机.....	30
图 3.22 光电开关.....	31
图 3.23 绞合电极丝装置控制原理.....	32
图 4.1 同步带传动示意图.....	34
图 4.2 电控柜外观.....	36
图 4.3 腔体	36
图 4.4 实验用电火花线切割机床.....	37
图 4.5 绞合电极丝与圆截面电极丝对比.....	39
图 4.6 切割效率与平均电流的关系.....	40
图 4.7 蚀除率与平均电流的关系.....	41
图 4.8 放电波形对比图.....	42
图 4.9 绞合电极丝与 0.36mm 圆截面电极丝加工工件对比.....	42
图 4.10 不同电极丝极间工作液占比示意图.....	43
图 4.11 切割效率与丝速关系	44
图 4.12 丝速为 6m/s 的工件表面对比图.....	45
图 4.13 不同绞距下切割速度与平均电流关系.....	45
图 4.14 绞合电极丝示意图.....	46
图 4.15 波形对比图.....	47

表清单

表 4.1 HF320 机床各项指标38

表 4.2 试验用其他辅助设备.....38

表 4.3 大能量加工参数.....39

表 4.4 不同丝速加工用参数.....43

表 4.5 实验参数及结果.....46

第一章 绪论

1.1 电火花线切割加工技术简介

1.1.1 电火花加工概念

电火花加工^[1] (Electric Discharge Machine, 简称 EDM) 始于 20 世纪 50 年代末的前苏联, 它主要利用周期性脉冲电压施加于工具电极和被加工的工件之间, 通过火花放电对金属材料进行蚀除, 在航空航天、汽车、模具等行业发挥着其独特的作用, 是一种不可或缺的加工方法^[2]。

1.1.2 电火花线切割的原理及特点

电火花线切割是由电火花放电加工的其中一种形式, 电火花线切割的工具电极采用的是运动的电极丝, 电火花线切割加工是依靠极间脉冲放电时产生的瞬间能量来进行加工进给, 也就是当电极丝和被加工工件在充满工作液的极间逐渐靠近时, 由于电极丝与工件的微观表面都是凹凸不平的, 导致电极丝与工件之间的电场分布很不均匀, 而电极丝到工件最近两点由于电场强度最大, 所以这两点之间的极间介质将首先被击穿从而形成放电通道^[3]。由于放电通道非常窄, 同时放电脉冲持续时间特别短, 这样将导致能量集聚, 在电极丝表面和工件表面放电, 放电产生的热量将达到一万摄氏度以上, 在这样的能量下将导致放电范围内的材料熔化甚至蒸发, 而放电区域附近的工作介质将会汽化, 由此产生的热膨胀会把被蚀除的金属材料从工件表面抛出, 从而进入极间介质中^[4]。直到单个脉冲结束后, 工作介质对极间进行消电离, 另外电极丝的运动也将含有蚀除产物的工作液带出极间。在周期性的脉冲放电作用下, 工件的材料得以去除。

图 1.1 为电火花线切割加工原理图, 工件通过夹具固定在工作台上, 电源的正极与工件相连, 负极与电极丝连在一起, 而水泵不间断地将过滤后的工作液送到工件的上下两侧, 工作液随着电极丝的运动被带入极间, 使极间能有充足的工作介质来进行冷却, 同时及时把蚀除产物排出极间^[5]。另外, 根据需求来设置电源的相关参数, 通过控制电极丝的运行轨迹来加工所需形状的工件, 能够加工难加工材料以及形状复杂的零件, 特别是传统加工难以加工的异形孔、异形槽^[6]。

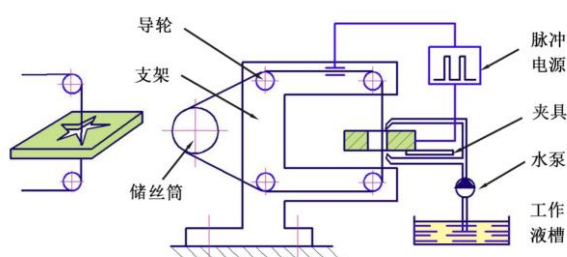


图 1.1 线切割加工原理

电火花线切割加工的特点主要有以下几点：

（1）能加工难加工材料。由于是依靠放电产生的瞬间高温来进行金属材料的蚀除，因此只需考虑被加工材料的导电性能和热学特性（如熔点、热导率等），使得金属材料的硬度，韧性，塑性等不再重要^[7]。因此这种加工方法可以很容易地加工超硬材料，可以加工硬质合金、钛合金和陶瓷等难加工材料^[8]，只要材料能导电即可。

（2）能够加工复杂型面和微细零件。在加工过程中，电极丝和工件并没有直接接触的，所以电极丝和工件之间不存在切削力，那么这种加工方法就适用于微细加工。对于复杂型面的加工，可以利用数控技术来控制电极丝的运动轨迹进行放电加工来实现材料的去除，将不必要的那部分材料一起切除，大大提升加工效率，减少了材料的浪费^[9]。

（3）能够实现自动化加工。由于电火花放电加工是利用脉冲放电产生的瞬间高温来实现材料的去除，而脉冲等相关电参数很容易通过数字控制、智能化控制等来实现，因此电火花线切割比传统加工更容易实现自动化控制。

（4）对加工材料的热影响范围小。因为电火花线切割通过高频脉冲电源产生脉冲来进行放电，一个脉冲的持续时间非常短，所以脉冲放电时在极间所产生的热量持续时间也特别的短、另外还有工作液的及时冷却作用，使热量扩散速度很慢，材料受到的热影响区域非常小^[10]。

1.1.3 电火花线切割机床分类

对电极丝的运行方式和走丝速度完成分类，可以将线切割机床大概分为低速单向走丝电火花线切割机床和高速往复走丝电火花线切割机床这两类^[11]。

（1）高速往复走丝电火花线切割机床

我国在 20 世纪 60 年代末研制成功高速往复走丝电火花线切割机床（简称 HSWEDM），其一般采用钼丝做电极丝来进行高速往复运动，它的速度最高能够达到 12m/s。基于其性价比较高，结构简单特性，高速往复走丝电火花线切割机床在我国得到了飞速的发展，并且将其出口到世界各个地方， 目前我国的年产量能够维持在 3.5~5 万台左右，它在国内市场的保有量已经达到了 50 多万台^[12]。它的优势在于其能进行长期稳定、高效的加工，因此如何提高 HSWEDM 的持久性和切割效率就成为了研究的重点。在实际生产中，使用新型智能脉冲电源搭配复合工

作液,可以实现 100mm η min 的平均切割效率。然而,当前的 HSWEDM 在实验室能够达到的极限加工效率超过了 250mm η min,它的加工性能已经可以和中档慢走丝机床相提并论,但是,由于慢走丝的成本远远高于高速走丝电火花线切割,HSWEDM 仍然具备了很大的竞争优势。然而,由于电极丝在加工过程中运用的是高速往复运行的方式,电极丝的恒张力控制难以实现,所以容易使电极丝的张力不均匀,从而导致了其在加工过程中发生短路、空载等一系列不正常的放电行为^[13-14]。与此同时,如果平均电流超过了 6A,将会工件表面将会紧密附着大量黑色物质。由于难以去除这些相间的黑色条纹,工件的表面加工质量将会造成严重影响。同时,如果将使用的加工能量增大一定程度之后,加工过程中短路等加工不稳定现象会频繁出现,无法进行加工。因此,尽管可以进一步加大脉冲电源输出能量,钼丝也可以承受更大高速往复走丝电火花线切割,但是烧伤现象的出现让加工工件没有实际的使用价值,加工不稳定现象令其效率不能更进一步,这两点使 HSWEDM 的发展成为一个瓶颈。

(2) 低速单向走丝电火花线切割机床

低速单向走丝电火花线切割机床(简称 LSWEDM)电极丝的运动速度大部分在 0.25m/s 以下,电极丝一般采用细铜丝,它的加工精度已经能够达到微米级,表面加工质量与表面磨削质量相接近,并且切割时均匀平稳,它的最大切割效率可以基本可以达到 350mm η min 以上^[13]。一般采用去离子水作为工作介质,在特殊情况下会使用煤油。比较容易控制电极丝的张力,所以加工精度一般较高,可以达到 $\pm 0.005\text{mm}$,最高的时候能够达到 $\pm 0.001\text{mm}$ 。但是低速单向走丝结构排屑效果比较差,必须在高压喷液的环境下才能加工,而且加工厚度较大的工件时仍然比较困难,能够切割的最大工件厚度目前一般在 400mm 以内。而且由于单向走丝,电极丝损耗很大,其成本一般是高速往复走丝电火花线切割机床的数十倍甚至近百倍,所以低速单向走丝电火花线切割机床一般用在精密零件和模具的加工。

1.2 电极丝的发展以及分类

电极丝作为电火花线切割的工具电极,电极丝的质量对线切割加工效率和切割质量具有非常重要的作用。因此对于电极丝技术的研究从未停止过,而电极丝技术的突破也经常导致线切割机床的革新。

1.2.1 电极丝的发展历程

1967 年前苏联生产了目前基本公认的第一台商业化的低速单向走丝电火花线切割机床,采用的是紫铜电极丝,虽然紫铜具有良好的导电性及导热性,但紫铜丝抗拉强度很低,在放电加工时,伴随着一定的张紧力及煤油条件下的放电,很容易出现断丝,使得切割效率不能得到有效地提高。1977 年,黄铜丝因为有更好的抗拉强度,同时能够承受更高的放电能量,另外黄铜

丝的切割效率是紫铜丝的两倍^[15]，因此黄铜丝被广泛运用于低速单向走丝电火花线切割机床中。研究人员通过实验发现低熔点的锌对于改善极间的放电特性有明显的促进作用，但是黄铜中锌的比例又受到限制，于是人们想到了在黄铜丝外面再加一层锌，做成包芯丝，所以就产生了镀锌电极丝。包芯丝制造工艺的出现使电极丝得到了空前的发展，从而出现了更多的新型镀层电极丝。镀层电极丝目前的生产工艺主要有浸渍、电镀和扩散退火这三种方法。

而国内的高速往复走丝电火花线切割常用的有钨丝和钼丝，虽然钨丝的抗拉强度特别好，但钨丝在放电过后容易变脆而导致频繁断丝，所以现在普遍采用钼丝进行切割。针对大厚度切割过程中极间工作液供给不足的问题，广东工业大学的万自尧等人提出了一种新型的电极丝^[16]，并且用加工出的新型电极丝进行了相关的工艺试验，发现新型电极丝加工的稳定性以及在大厚度加工时的排屑能力明显要优于圆截面电极丝。新型电极丝截面如图 1.2 所示。

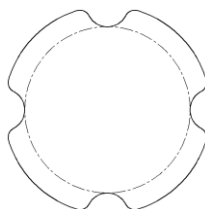


图 1.2 新型电极丝截面图

1.2.2 电极丝分类

如图 1.3 所示,电极丝主要可以分为无镀层电极丝、镀层电极丝以及复合电极丝这三大类。

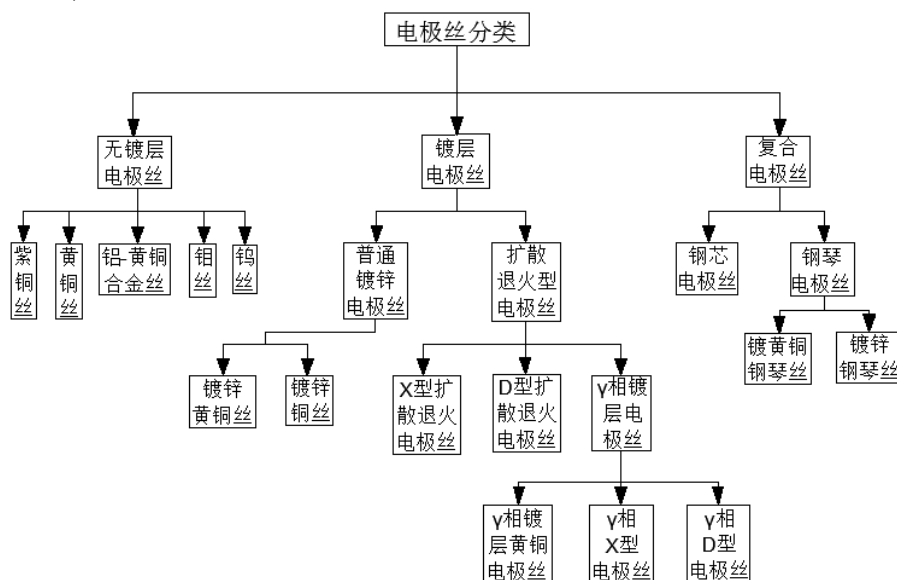


图 1.3 电极丝分类

无镀层电极丝中常用的有黄铜丝和钼丝。黄铜丝常按 65%的紫铜和 35%的锌进行制造，锌由于熔点较低（锌为 420℃，紫铜为 1080℃），能够改善冲洗性，理论上锌的比例越高越好，不过在黄铜丝的制造过程中，当锌的比例超过 40%后，电极丝将由单相 α 结晶结构变成了 α 和 β

双相结晶结构。这种材料太脆而不适合把它拉成细丝。另外紫铜中加入少量锌会大大降低其导电性，硬黄铜丝的导电性只有紫铜丝的 20%，这样必然会影响切割效率，且黄铜丝在切割后会有黄铜积存在工件上，很难去除，影响切割精度。所以普通黄铜电极丝切割精度、速度要求较高的场合并不适用。钼丝按拉伸方式可分为冷拉伸钼丝和热拉伸钼丝，另外钼丝还需进行退火、矫直等工艺。

镀层电极丝可分为普通镀锌电极丝和扩散退火型电极丝。普通镀锌电极丝的芯材为普通黄铜或铜，再在外面镀上一层锌^[17]。主要采用浸渍工艺进行生产，但镀锌后再拉丝，很难控制镀层的均匀性，同时电镀层容易脱落，导致切割效果不佳。扩散退火型电极丝用铜或黄铜作为芯材，采用扩散退火在外层包一层铜锌合金，铜和锌的比例通常为 1:1。由于芯材为铜或黄铜，表层是采用扩散退火形成的多孔结构，故这种电极丝的冲洗效果比常规的电极丝要好。这种电极丝的切割速度比较快。但是表层扩散退火的铜和锌由于导电率的限制使得这种电极丝只适合于特殊场合的加工。

复合电极丝主要有钢芯电极丝和钢琴电极丝这两类。钢芯电极丝由钢制的芯加上中间的铜镀层和外面的黄铜镀层组成。钢芯在常温下的拉伸强度与黄铜丝差不多，但是随着温度的升高黄铜丝的拉伸强度迅速降低，而钢的拉伸强度则高于黄铜丝。钢琴电极丝所用的芯材为制造钢琴用的高碳钢，因此又被称作钢琴丝，芯材为高碳钢，表层镀黄铜或者锌。高碳钢丝经多次的加工及热处理，强度同样可以达到钨或钼丝的强度。

1.3 绞合线锯

日本研究人员采用两根细的圆柱芯钢丝进行绞合并经过电镀，成功研制出了金刚石双绞合线锯，通过实验发现金刚石双绞合线锯的加工效率比传统线锯的提高了很多，同时金刚石双绞合线锯的使用寿命更长。因为绞合线锯的容屑槽能够把工作液带入加工区，同时容屑槽能够及时排屑，因此绞合线锯的效率更高。另外实验还发现合适的绞距能使双绞合线锯的最大加工效率比传统线锯的高 2 倍多^[18]。之后有学者还研究了多线绞合的绞合线锯^[19]。

而电火花线切割为了提高切割效率，在脉冲电源、电极丝材料等方面做了相当多的研究，基于金刚石电沉积绞合线锯能有效地提升切割效率，本课题引入绞合电极丝来进一步提升切割效率。

1.4 论文研究的意义和主要内容

1.4.1 论文研究的意义

随着制造业的迅猛发展，高速往复走丝电火花线切割机床已无法满足对加工效率的迫切需求，需要进一步提高我国的模具、航空航天等领域的零件加工效率，因此高效切割成为

HSWEDM 最主要的研究方向^[20]。目前高速往复走丝电火花线切割的切割效率大概在 100-120mm³/min 之间，切割效率会随着平均电流的增长而继续升高，但是当加工效率大于 150mm³/min 之后，工件表面会有大量的烧伤条纹，工件表面质量变差，电极丝损耗更加严重，很容易出现断丝^[21]。另外，对于大厚度工件，极间很难有充足的工作液，导致加工效率特别的低。

工作液主要通过吸附在电极丝上并随电极丝的高速运动被带入极间，极间的冷却、消电离以及蚀除产物的排出都需要充足的工作液，而目前市场上用的工作液基本上都是水基工作液(含有大量的水)，在用较大的平均电流进行切割时，由于火花放电而产生的热量使极间中有限的工作液消耗严重，导致极间，尤其是工件出口区域基本没有工作液，这样蚀除产物无法及时排出并在工件出口处大量堆积，发生微短路和电弧放电，加工非常不稳定，工件表面出现严重烧伤条纹^[22-23]。而大厚度工件通过普通电极丝带入极间的工作液很有限，同时蚀除产物也很难及时从极间排出，导致加工效率无法提升。因此极间时刻保持充足的工作液与大量的蚀除产物能否及时从极间排出成为提高加工速度与稳定性的首要前提。

由于常用的电极丝都是圆形截面的电极丝，为了解决圆截面电极丝的带液和排屑能力有限这一问题，提出了如图 1.4 所示的绞合电极丝。由于绞合电极丝螺旋形凹槽的存在，能够提高带液和排屑能力，从而提高加工效率和稳定性。

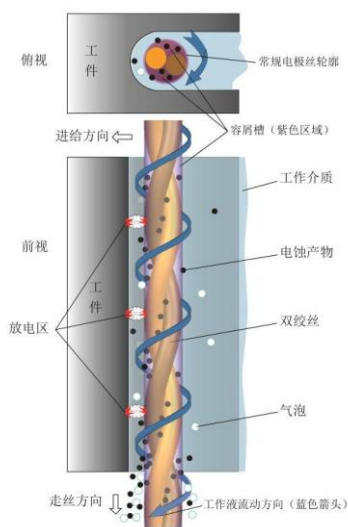


图 1.4 双绞合电极丝示意图

1.4.2 论文研究的主要内容

(1) 绞合电极丝装置的设计与制造

确定绞合丝装置的总体方案，并将整个装置模块化，解决了绞合电极丝装置的退扭、恒张力控制以及匀速收丝等关键问题，完成了绞合电极丝装置各个零部件的设计，设计过程中充分考虑加工和装配工艺，最终成功完成了绞合电极丝装置的制作。

（2）绞合丝装置控制系统设计

选取合理的步进电机，变频器以及限位开关。通过编程控制实现绞合电极丝的匀速收丝，使绞合电极丝装置能绞合不同丝径不同绞距的绞合电极丝。

（3）机床的改进及绞合丝工艺试验

改变丝筒的排丝距以适应绞合电极丝加工，避免出现叠丝现象。改装电控柜的内部结构，通过温差散热来减少进入电控柜内部的油污；在不同放电能量条件下，对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝、截面积相同的绞合电极丝与圆截面电极丝进行了实验研究，同时对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝在不同丝速下也进行了实验研究；研究了相同包络直径但绞距不同的绞合电极丝的加工性能；研究了绞合电极丝切割不同厚度工件的规律。

第二章 绞合电极丝装置方案设计

本章主要确定绞合电极丝装置的总体方案。绞合电极丝的绞合质量对加工的精度影响特别大，而现有的绞线设备主要用于绞合电缆线等直径较粗的线，对于绞合电极丝并不完全适用。因此需要根据现有绞线机的工作原理对绞合电极丝装置进行总体方案的设计。设计过程中有三个子方案的设计，包括单根电极丝退扭及恒张力方案设计、绞合电极丝排丝及收丝方案设计、调速方案设计，解决了单根电极丝的退扭、恒张力以及匀速收丝等问题，将电极丝匀速且规整紧凑地收到收丝盘上，且能绞合不同丝径的电极丝，另外能够绞合出不同绞距的绞合电极丝。

2.1 绞线技术概述

绞线一般指若干根单线以一定顺序和节距缠绕成一整体的导线绞线^[24]。被绞合线体沿绞合轴向每旋转 360 度后其前行的垂直距离即为绞线的节距（简称绞距）。要使单线以一定的绞距进行绞合，设备必须满足以下两个要求：一是使所有单线围绕设备的中心轴作旋转运动；另一是使绞合线在动力牵引下作直线前进运动。改变这两种运动的配合，可调整绞距的大小，使生产出的绞线或束线符合结构要求。绞合线在弯曲性能上会比相同包络直径的单根线好很多。

2.1.1 绞线机

绞线机主要由旋绞模块、牵引装置、排收线模块、控制系统等组成。又常见的绞线机如图 2.1 所示。

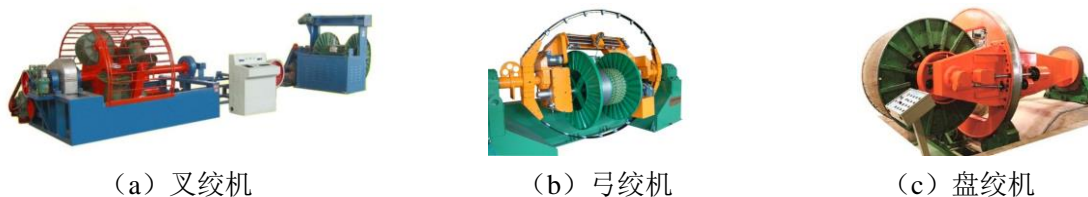


图 2.1 常见的绞线机

作为绞线机的主体，旋绞模块上安置各放线盘并进行旋绞运动^[25]。旋绞模块主要包括放线机构和制动机构，制动机构保证旋绞模块在控制或者出故障时能安全停车。作为安放线盘的线盘架，可以根据需要在旋绞模块上进行设计使其能绞合多股芯线。而且每个线盘架都装有张力控制装置来保持张力恒定。

牵引装置在绞线过程中输出牵引力，通过调整牵引轮的转速来控制绞合线的绞距，通过牵引轮给线芯提供直线运动。

收线装置将绞合后的线在排线器的作用下紧凑规整地收到收线盘上，以备使用。

2.1.2 恒张力控制

在绞线过程中，为了能够绞制得到绞距均匀且紧凑地绞合线，则需要对单根绞线的张力进行控制，使其张力保持恒定^[26]。按照控制系统的控制对象进行分类，可分为三类：一是利用磁粉制动器来控制张力，电线电缆和印刷等行业通常采用这种方式^[27-28]；二是通过变频电机来控制张力，该方式主要运用在钢铁等工业领域；三是利用摩擦装置，在此装置作用生成的固定转矩会对放线盘一端发生作用，从而可以维持张力的恒定。

（1）磁粉制动器张力控制

利用电磁原理和磁粉传递转矩，因为励磁电流与传递转矩基本上是线性关系，所以对参与绞合的单根线实时张力进行检测，并将检测值与设定的张力值进行对比，同时将反馈励磁电流传输给磁粉制动器，控制输出转矩，从而可以确保实时张力与设定值相等，最终实现动态控制。磁粉制动器实物如图 2.2 所示。



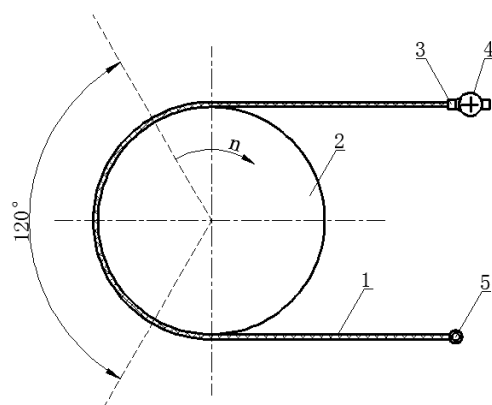
图 2.2 磁粉制动器

（2）变频电机张力控制

该方法与磁粉制动器不同，其保证张力的恒定是通过控制两个电机的转速差值恒定来实现的，而电机的转速由变频器来调节。

（3）摩擦张力控制

现有线缆绞制设备的放线装置大多采用薄钢带与石棉刹车带铆合而成，包在与放线盘同步转动的平面摩擦轮上，将组合的摩擦带一端固定在设备上，包角 180 度后，把另一端装在可调张力的定位点上，如图 2.3 所示，通过改变包角的大小改变摩擦力。本文采用改进的摩擦带-摩擦轮张力控制方式实现张紧力控制。

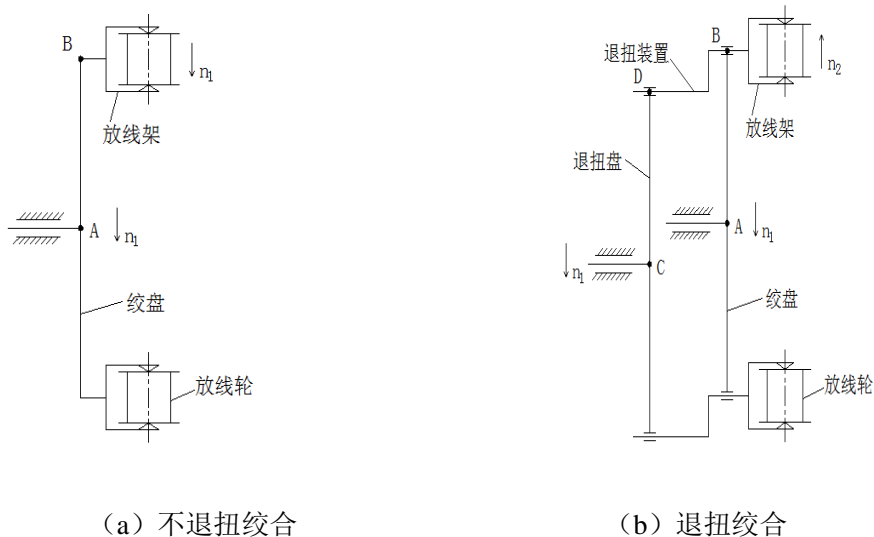


1.摩擦带 2.摩擦轮 3.摩擦带定位点 4.张力调节螺钉 5.摩擦带固定点

图 2.3 摩擦带张力控制

2.1.3 绞线退扭

退扭绞合是指在绞线机上装备退扭机构去除单根丝线在绞合过程中的自身扭转，使绞合线不产生扭转内应力的绞合。不安装退扭装置时，如图 2.4（a）所示，当绞盘旋转时，放线架相对于绞盘是不动的，安装在放线架上的放线盘也保持不动，单线相对于自身便产生扭转；安装退扭装置的话，当绞盘旋转时，放线轮相对绞盘有旋转，如图 2.4（b）所示，因此绞合单线相对于自身基本没有扭转^[29]。



(a) 不退扭绞合

(b) 退扭绞合

图 2.4 绞合形式对比图

不进行退扭的话，单线会因绕自身扭转而产生变形，电极丝极易产生鼓包，使得绞合线绞距不均匀，结构不紧凑，绞合线会存在间隙，而且扭转变形会随着单线线径越大，韧性越强而越严重。但如果绞合过程中进行退扭的话，由于单线不绕自身轴线做相对的旋转，所以基本没有扭转应力，那么绞合线的质量就会很好，可是生产效率却降低了。

四连杆机构退扭、齿轮退扭、同步带退扭为常见的退扭方式，而同步带轮退扭机构具有结构较简单，重量轻，保养方便以及传动距离大等特点。但是和四连杆机构退扭以及齿轮退扭一样，同步带退扭机构结构复杂、生产效率低。

单根电极丝不进行退扭的话会存在扭转内应力，这会使两根电极丝之间不能紧密地缠绕在一起，导致绞合电极丝无法用于试验加工，所以本文设计的绞合电极丝装置中采用了退扭机构。

2.1.4 匀速收线控制技术

为了保证绞距始终保持一致，在保持绞盘转速恒定时，则需要保持收线速度也是恒定的。在匀速收线控制方式中，采用控制器配合变频器的控制方式使用的最多。在绞合过程中，设收线盘转速为 $n(t)$ ，收线半径为 $r(t)$ ，则收丝线速度 $v(t)$ 可以用下式表示：

$$v(t) = 2\pi \cdot r(t) \cdot n(t) / 60 \quad (2-1)$$

从式(2-1)可以看出，随着收线半径增大，假设收线盘转速保持不变，则收线速度将增大，要使收线速度为定值，需要检测实时的收线速度，再将实时收线速度与设定的收线速度相比较，经过控制器处理后，控制器重新发信号给变频器以调整收线盘的转速来使收线速度保持不变^[30-32]。图 2.5 为恒定收丝线速度控制原理示意图。

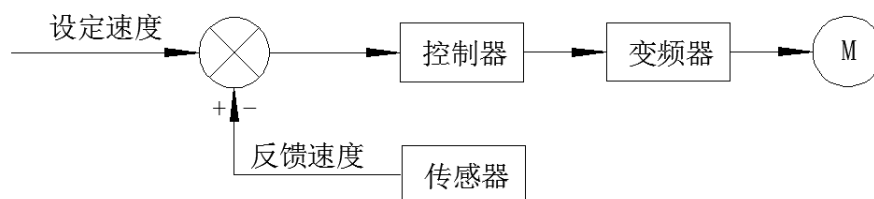


图 2.5 恒定收丝线速度控制原理

2.1.5 收排丝机构

在把丝线收到丝盘之前，还需要进行排线，使收到线盘上的丝线均匀并且相互之间没有游动间隙。绞线机常用的收排线原理如图 2.6 所示，收线盘在牵引收线的同时，通过皮带带动光杆旋转，从而使排线器在光杆上移动，而导线轮与排线器固装在一起，导线轮将丝线按设定的排线距螺旋状地排到收丝盘上，当丝线收到收丝盘端部时，排线器上的限位开关触碰到限位块使排线器立刻换向，使丝线在原来的基础上继续往上叠加，排线器就这样在两个限位块间来回排线，直至收线盘收满丝线，针对不同的尺寸的收线盘，只需调整限位块的位置使丝线能刚好收到丝盘上^[33]。当线径不一样时，通过调整排线距即可，保证丝线能规整紧凑地收到收线盘上。

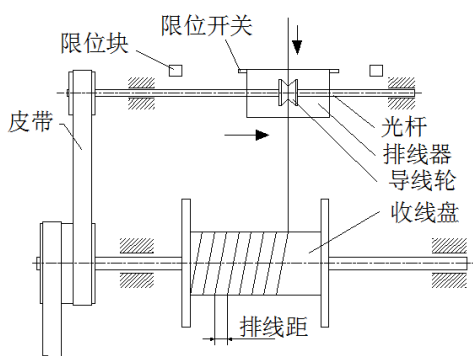


图 2.6 收排线原理图

光杆排线器的实物如图 2.7 所示，光杆排线器本身带有调整排线距的档位，因此通过调节档位即可调整排丝距。



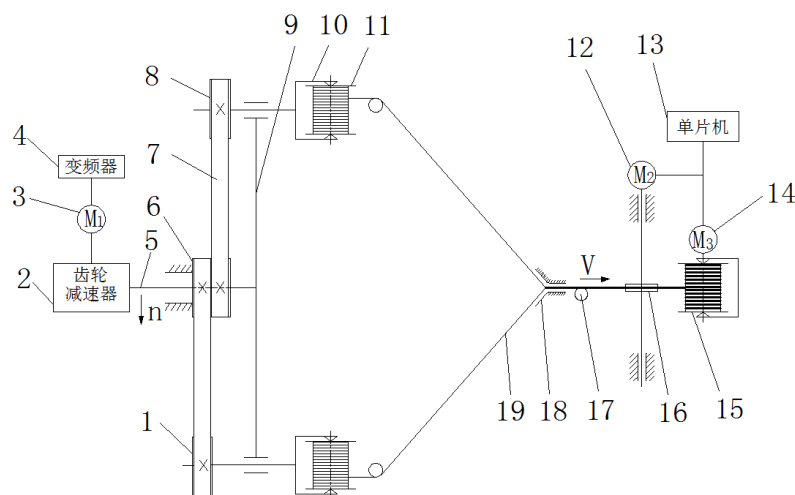
图 2.7 光杆排线器

2.2 绞合电极丝装置总方案设计

绞合电机丝装置的总方案需满足以下要求：

- (1) 单根电极丝能够在绞丝模块的作用下实现完全退扭；
- (2) 能够保证电极丝张力的实时稳定；
- (3) 能够绞合出不同绞距的电极丝；
- (4) 能够实现不同丝径电极丝的规整收丝，使绞合电极丝能有序的收到丝盘上。

由绞线机的工作原理，我们提出了绞合电极丝装置的整体方案，绞合电极丝装置的整体方案如图 3.8 所示，由图可知，通过变频器来控制三相电机的转速恒定，同时保证收丝速度也为恒速，那么就能绞合得到绞距均匀的绞合电极丝。该装置通过控制一台三相电机和两台步进电机来实现两根电极丝的绞合与收丝，利用变频器来调整三相电机的转速从而控制绞盘的绞合速度，另外通过单片机控制两个步进电机来实现排丝与收丝，从而得到绞合电极丝。



1-同步带轮 1, 2-齿轮减速器, 3-三相电机, 4-变频器, 5-主轴, 6-中心同步带轮, 7-同步带
8-同步带轮 2, 9-绞盘, 10-放丝架, 11-放丝盘, 12-排丝电机, 13-单片机, 14-收丝电机,
15-收丝盘, 16-排丝器, 17-过渡导轮, 18-消抖束丝装置, 19-电极丝

图 2.8 绞合电极丝装置原理图

由图可以看出，绞合电极丝装置的具体工作过程如下：

(1) 三相电机通过齿轮传动来把动力传递到主轴，三相电机的转速可通过变频器来调节，主轴再带动绞盘进行电极丝的绞合，而电极丝的完全退扭是通过三个完全一样的同步带来实现的，当绞盘开始转动时，与工作台固定的中心同步带通过同步带带动另外两个同步带同步运动，从而实现电极丝的完全退扭，因此从放丝架放出的电极丝基本不产生扭转内应力。

(2) 绞合好的电极丝穿过消抖束丝装置经过消抖束丝之后再通过过渡导轮将绞合电极丝导向排线器。

(3) 针对不同丝径的电极丝，调整排丝距来实现把绞合丝紧凑地收到丝盘上，而排丝距的调整只要通过改变单片机在相同时间内发送给收丝电机与排丝电机的脉冲个数，即改变收丝电机与排丝电机的传动比从而使排丝距改变。绞合好的电极丝要规整地收到丝盘上，则需要排丝器进行排丝，把绞合丝规整地排到丝盘上。另外，绞合丝的不同绞距是由收丝速度和绞丝速度共同决定的，当保持绞丝速度不变时，通过控制收丝电机的转速来控制收丝的速度即可实现变绞距。由于要把绞合丝收到丝盘上，随着绞合电极在收丝盘上越叠越多，如果收丝电机的转速不变的话，那么收丝的速度就会变大，为了保持收丝速度保持基本不变，通过对收丝速度进行检测，然后再与初始设定的收丝速度进行比较，进而调整收丝电机的转速来实现近乎匀速收丝。最终实现绞合绞盘转速在 0~300r/min 可调，绞距在 2~12mm 可调，从而绞合出所需的绞合电极丝。

2.3 单根电极丝退扭及恒张力方案设计

2.3.1 单根电极丝退扭方案

本装置采用同步带轮退扭机构，同步带轮的传动效率高，工作时噪音小，且保养方便，运转费用低，传动平稳，不产生滑动，有固定传动比，另外与齿轮相比，不需要润滑，同步带轮比齿轮的质量小，从而减小整个绞丝模块的重量，且同步带能够实现长距离的动力传输，图 2.9 所示为同步带轮退扭机构简图，中心同步带轮 Z_1 固定在机台上，绞盘通过主轴连接在机台上，同步带轮 Z_2 与 Z_3 连接在绞盘上，另外中心同步带轮的齿数与绞盘上的两个同步带轮的齿数是相等的，即 $Z_1 = Z_2 = Z_3$ ；当绞盘按 n_H 方向转动时，由于中心同步带轮是固定于机台的，因此绞盘上的两个同步带轮在同步带的带动下会随着绞盘一起转动，同时同步带轮 Z_2 、 Z_3 绕自身轴线的转动方向与绞盘的转动方向是相反的。由于三个同步带轮的齿数是一样的，那么同步带轮 Z_2 、 Z_3 与绞盘是反向同步的，也就是绞盘转一圈，同步带轮也是刚好转一圈的，固定丝盘的放线架与同步带轮是固装在一起的，这样就能够实现单根电极丝的完全退扭。

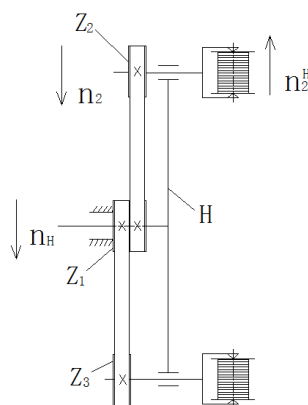


图 2.9 同步带轮退扭机构简图

由轮系的相关理论可得，先将整个机构简化成一个定轴轮系，由此可得：

$$i_{12}^H = (n_1 - n_H) / (n_2 - n_H) = Z_2 / Z_1 \quad (2-2)$$

由于中心同步带轮固定在机架上，那么 $n_1 = 0$ ，则：

$$n_2 = (1 - Z_1 / Z_2) n_H \quad (2-3)$$

又 $n_2^H = n_2 - n_H$ ，可以得到：

$$n_2^H = -(Z_1 / Z_2) n_H \quad (2-4)$$

以上各表达式中， Z_1 为中心同步带轮的齿数， Z_2 为同步带轮 2 的齿数； n_1 为中心同步带轮的绝对转速， n_2 为同步带轮 2 的绝对转速； n_H 为绞盘的绝对转速； i_{12}^H 为中心同步带轮到同步带轮 2 的传动比； n 为固装于同步带轮 2 上的放丝盘相对于绞盘的转速。

绞盘转动一圈, 则 $n_H=1$, 代入以上式中可以得到 $n_2^H=-1$, 即放丝盘相对于绞盘反向转动了一圈, 实现了单根电极丝的完全退扭。

2.3.2 电极丝恒张力方案

该装置的恒张力方案采用摩擦带的方案, 相较于其他方案, 该方案成本比较低, 而且操作起来也很方便。利用摩擦带产生的摩擦力来为单根电极丝提供张紧力, 只要保证该张紧力在一定范围内就好了。而张力大小的调整, 可以通过调整摩擦带的伸长量来进行调整, 摩擦带的一侧有三个孔用于调整摩擦带的张紧力。而与摩擦带配合的摩擦轮将阻力传递到放丝轴, 从而实现恒张力的控制。

整个张力装置的结构如图 2.10 所示, 放丝盘和摩擦轮安装在放丝轴的两端。

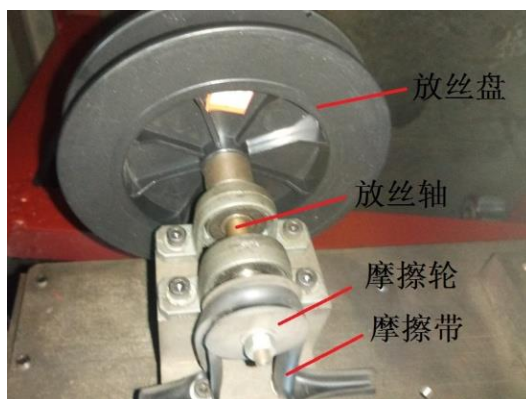


图 2.10 恒张力收丝机构

2.4 绞合电极丝收排丝及变绞距方案设计

2.4.1 绞合电极丝收排丝方案设计

由于排线器一般用于线径较粗的丝线, 且价格也比较高, 为此该装置中的收排线模块进行自行设计, 同时把排线器称为排丝器。收排丝模块原理图如图 2.11 所示, 图中 M_1 为排丝电机, M_2 为排丝电机, M_1 、 M_2 均为步进电机。参照线切割机床丝筒排丝的原理, 将排丝器设计成丝杠螺母结构, 收丝盘在收丝电机带动下转动将绞合电极丝收到丝盘上, 但收丝盘不做轴向运动, 于此同时排丝电机带动丝杠使螺母块做轴向移动, 所以绞合电极丝在与螺母块固装在一起的导轮的作用下规整地排到丝盘上, 当丝线收到收丝盘端部时, 排丝器上的限位开关触碰到限位块使排丝器立刻换向, 则绞合电极丝将在原来的基础上继续往上叠加, 排线器就这样在两个限位块间来回排线, 直至收线盘收满丝线, 针对不同的尺寸的收线盘, 只需调整限位块的位置使丝线能刚好收到丝盘上。

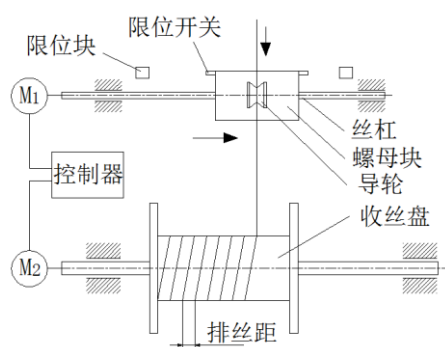


图 2.11 收排丝方案

对不同丝径的电极丝的绞合主要问题在于绞合好的电极丝是否能规整紧凑地收到收丝盘上去，因此就要求能够调整排丝距，使收丝盘上相邻电极丝间基本没有间隙，即排丝距要能多级可调，所以在该装置中排丝轴与收丝轴并没有采用齿轮传动或者塔轮来改变传动比，而是通过调整控制器在相同时间内发送给收丝电机与排丝电机的脉冲数来改变丝杠与收丝盘的传动比，排丝距也就得到了改变^[34-35]。

2.4.2 变绞距方案设计

绞合电极丝装置为了能够绞合出不同绞距且绞距均匀的绞合电极丝，那么就得控制好绞盘的旋绞转速和收丝电机的转速，在这两个运动的共同作用下就能够制造出绞合电极丝。当旋绞速度保持不变时，要改变绞合电极丝的绞距，只需改变收丝速度就能够改变绞距。因此该装置需要调节速度的是绞盘的旋绞速度和收丝速度。

(1) 旋绞速度的调节

绞盘是通过键由主轴带动旋转的，而主轴是通过三相电机带动旋转的，因此要调节旋绞的速度，只需调整三相电机的速度。在该装置中为了实现更精确的调速，我们采用变频器来对三相电机进行调速，而不采用塔轮来调速，因为塔轮调速是有级调速，并不适用我们这个装置。

(2) 收丝速度的调节

收丝速度的调节是通过控制收丝电机的转速来实现的，由于绞合电极丝需要完整地收到收丝盘上，根据收排丝模块的工作原理，绞合电极丝一层一层地往上叠，直至整个丝盘排满电极丝，如果收丝电机转速不变的话，随着丝在丝盘上越叠越多，则收丝速度也就越来越大，因此需要对收丝电机的转速进行调整以保证收丝速度基本保持不变。在该装置中我们通过对收丝速度进行检测，并与初始设定好的收丝速度进行对比，然后重新调整收丝电机的转速，使收丝速度与设定的收丝速度相等，从而实现近乎匀速收丝；对于收丝速度的检测，采用光电开关检测过渡导轮转动一圈的时间，因为过渡导轮的外径尺寸可以通过测量得到，由此可以算出收丝速度，因为过渡导轮的尺寸比收丝盘小很多，所以计算得到的收丝速度可以看作是实时收丝速度。

2.5 本章小结

本章主要通过参考绞线机的工作原理，确定了绞合电极丝装置的总体方案。针对设计过程中的难点提出了相应的解决方案，达到电极丝能够实现完全退扭，并且能均匀规整地绞合出不同丝径不同绞距的绞合电极丝。总结如下：

（1）利用同步带轮机构实现单根电极丝的完全退扭，抵消绞合电极丝的扭转应力；

（2）恒张力装置采用摩擦带这一方案，将单根电极丝的张力保持恒定，使电极丝时刻保持张紧，另外可以通过改变摩擦带的长度来改变应力。

（3）利用步进电机带动丝杠使安装有单边导轮的螺母块做往复运动，从而实现规整排丝。另外通过调整在同一时间段内单片机发给收丝电机与排丝电机的脉冲信号来改变传动比从而调整排丝距，针对不同丝径的电极丝其排丝距也需要做相应的调整，这样收到丝盘上的绞合电极丝才能够紧凑。

（5）通过调整旋绞速度与收丝速度来实现变绞距绞合。

（4）匀速收丝是通过将采集到的收丝速度信号与设定的收丝速度进行比较，进而调整收丝电机的转速来实现匀速收丝。

第三章 绞合电极丝装置结构设计及控制模块设计

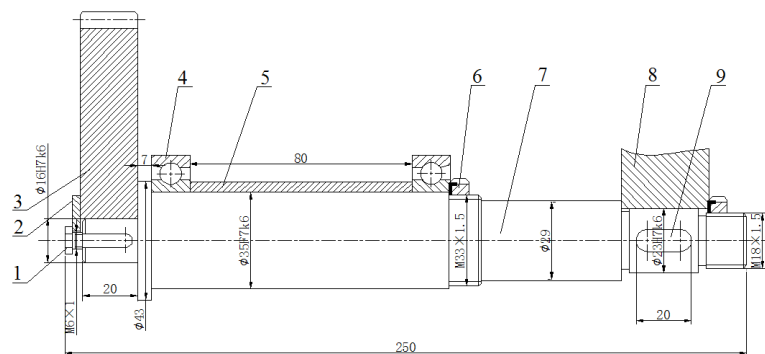
本章主要进行之前设计的绞合电极丝装置各个方案的具体结构设计及控制模块设计。设计过程中充分利用模块化的设计思想,把总体方案分为四个模块进行设计,分别是绞丝模块设计,排丝及收丝模块设计,机台及消抖束丝模块设计,以及控制模块设计。

3.1 绞丝模块设计

3.1.1 旋绞主轴结构设计

旋绞主轴^[36-37]作为绞丝模块的核心部件,它起到了动力传递的作用,三相电机传递过来的动力通过主轴带动绞盘旋转。安装在主轴上的零件有齿轮、轴承、绞盘以及对顶锁紧螺母。旋绞主轴需要有足够的强度,同时需要对强度进行校核使其满足要求,防止轴的断裂。由于绞盘的旋转需要足够的空间,同时两个放丝盘放出的丝在绞合点处汇聚,所以绞合主轴只能采用悬臂安装的方式,这就对主轴的支撑强度提出了更高的要求。另外还考虑了齿轮、轴承、绞盘等零件的安装及定位的要求。还有就是中心同步带轮的中心轴线要与主轴的轴线重合。

旋绞主轴为阶梯轴,图 3.1 为主轴的装配示意图,主轴上安装定位各个零件的方式如下:齿轮采用垫圈和主轴的轴肩通过拧紧螺钉进行轴向定位,而齿轮的周向定位采用平键进行定位;左轴承左侧利用绞盘主轴轴肩定位,右侧采用套筒定位,而右轴承左侧利用套筒定位,右侧采用圆螺母进行锁紧限位,圆螺母定位可靠;带座轴承自带锁紧螺母,也可进行轴向和周向定位。绞盘的左侧采用主轴的轴肩定位,右侧则靠锁紧螺母进行定位,而绞盘的周向定位采用平键定位。



1—锁紧螺钉, 2—垫圈, 3—大齿轮, 4—角接触球轴承, 5—套筒, 6—锁紧螺母,
7—主轴, 8—绞盘, 9—平键

图 3.1 主轴装配示意图

为满足轴的力学性能，主轴采用调质 45 钢。旋绞主轴承受扭转应力，而旋绞主轴悬空部分不长，则最小轴径通过许用剪切应力来进行确定，最小轴径可以通过下式计算得到：

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{9.55 \times 10^6 P}{0.2 [\tau_T] n}} \quad (3-1)$$

式中：P 为旋绞主轴传递的功率，本装置主轴的功率为 0.83kW；

n 为旋绞主轴的转速，本装置旋绞主轴的转速为 375r/min；

$[\tau_T]$ 是材料许用的剪切应力，查表得 $[\tau_T]=40\text{MPa}$ 。

通过计算可以求出旋绞主轴的最小轴径为 16mm。图 3.1 中，最左端就是旋绞主轴的最小轴径，此处安装大齿轮，大齿轮的齿宽为 21mm，故该轴段长度设计成 20mm，使左侧的螺钉能保证大齿轮的轴向定位；支承旋绞主轴的轴承选用普通角接触球轴承，其中 80mm 的套筒保证了两轴承的轴向距离，右侧轴承的圆螺母与左侧轴承的轴肩使这两个轴承的轴向定位得到了保证，选用 M33×1.5 的圆螺母，有效螺纹长度为 15mm；旋绞主轴中安装绞盘处的轴径设为 26mm，定位轴肩的高度设为 3mm，选用 M24×1.5 的圆螺母保证绞盘的轴向定位，另外退刀槽的宽度为 1.5mm。

对轴的两端进行 45° 倒角以便大齿轮和绞盘的安装；为了提高生产效率，将键槽设计到轴的同一母线上，同时退刀槽采用相同的宽度。

3.1.2 齿轮设计

在本装置中需要通过减速再把三相电机的动力传递到主轴上，在这里选择减速比为 1:4。因为齿轮传动效率高，能够保证恒定的瞬时传动比，工作可靠，寿命长，三相电机到主轴的动力传动采用齿轮传动的方案^[38]。选用模数为 2，小齿轮选择调质 40Cr 来进行加工，硬度为 260HB，大齿轮选用 45 钢，硬度为 240HB，考虑到整个装置的空间位置等诸多因素，小齿轮的齿数设计为 22，大齿轮的齿数设计为 88，齿形角为 20°，齿轮的精度等级为八级。

3.1.3 退扭放丝机构

3.1.3.1 退扭机构的设计

同步带轮、同步带、压紧机构及退扭轴共同构成了退扭机构。为了实现退扭的作用，中心同步带轮需要与机台固定在一起，在绞盘旋转时由于中心同步带轮相对机台不动，因此同步带会带动安装在绞盘上的两个同步带轮一起转动，而三个同步带轮的齿数又相同，所以绞盘的旋转与退扭轴的旋转时反向同步的，从而实现了电极丝的退扭。根据前文所述的退扭原理，可以看出两根退扭轴的转动方向是一致的。

依据丝盘的尺寸及整个装置的空间位置确定同步带的尺寸，在这个装置中我们选用圆弧形齿的同步带轮，同步带轮的节距为 5mm，齿数是 74Z，为了减轻重量，同步带的材料选用铝合金，并且采用腹板式结构的同步带。所以选用的同步带型号为 HTD595-5M。

依据同步带轮的结构再进行固定中心同步带轮所用的固定连接板的设计，固定连接板一端与机台连接，另一端与中心同步带轮连接，由此实现对中心同步带轮的固定。其结构如图 3.2 所示。

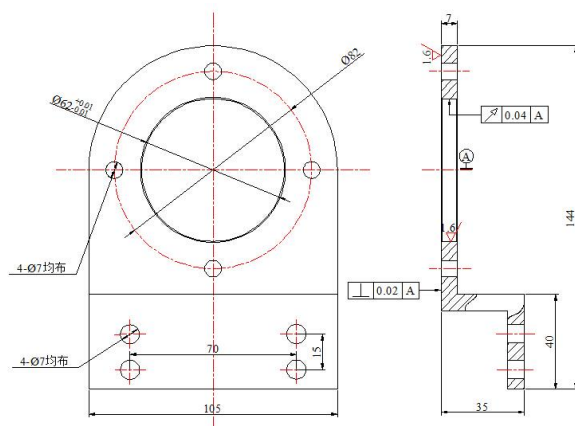
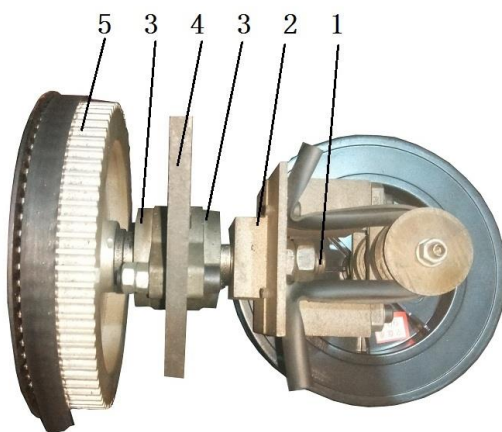


图 3.2 中心带轮固定连接板

退扭轴上各个零件的装配如图 3.3 所示，各个轴段上分别安装着同步带轮，带座轴承座，放丝架等。同步带轮的定位是通过退扭轴的轴肩以及对顶锁紧螺母来实现轴向定位的，而同步带的周向定位是通过平键来定位的。退扭轴与绞盘的连接采用安装在退扭轴上的一对带座轴承座通过螺栓来实现连接，而带座轴承座自带锁紧螺母能够实现轴承的轴向及周向定位。放丝架靠退扭轴的轴肩和对顶锁紧螺母进行轴向定位。另外放丝架的周向定位也是采用平键来定位的。



1—退扭轴，2—放丝架，3—带座轴承，4—绞盘，5—同步带轮

图 3.3 退扭轴零件装配示意图

为了避免同步带的松动，设计了压紧轮装置，压紧轮采用尼龙材质，并且两端各加装一个轴承来是压紧轮平稳转动。压紧轮的结构如图 3.4 所示。

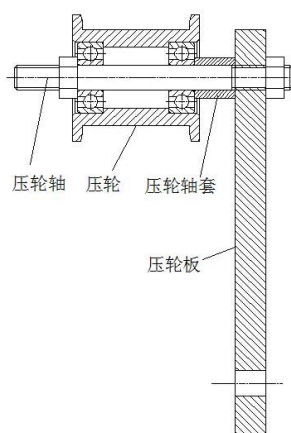
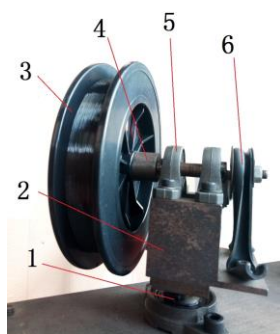


图 3.4 压紧轮结构示意图

3.1.3.2 放丝机构的设计

放丝结构^[39-40]由放丝架、放丝轴、放丝盘、带座轴承等零部件组成。其中放丝架是放丝机构最重要的一个零件。由于放丝架需要与退扭轴相连来实现单根电极丝的完全退扭，另外放丝轴和单根电极丝的恒张力所用的摩擦带也需要安装在放丝架上，所以放丝架的结构相对会比较复杂。考虑到放丝架是安装在绞盘上的，需要长期在较高转速下工作，所以放丝架的设计应该使放丝盘和摩擦轮的安装更加紧凑。

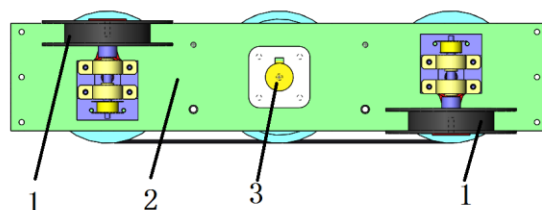
而整个放丝机构如图 3.5 所示，放丝轴通过带座轴承安装在放丝架上，保持恒张力的摩擦带利用螺钉固定在放丝架上。放丝轴上安装着摩擦轮，带座轴承以及放丝盘，放丝盘相对于退扭轴偏心安装，这样使放丝架的整体尺寸大大减小，使结构更紧凑。由于放丝轴承受的负载并不大，而带座轴承自带锁紧螺母，所以采用锁紧螺母来实现轴承的轴向和周向定位。



1—退扭轴，2—放丝架，3—放丝盘，4—放丝轴，5—带座轴承座，6—摩擦带摩擦轮

图 3.5 放丝机构

因为放丝机构中丝盘是偏心安装的，而绞盘需要在较高转速下转动，所以两个放丝机构在绞盘上的安装一定要相对于主轴始终是中心对称的，这样在绞盘转动过程中才能始终保持动平衡。所以我们采用了如图 3.6 所示的放丝机构安装方式，可以看出两个放丝机构相对于主轴是中心对称安装的，当绞盘开始转动时，两个放丝机构也跟着绞盘同步转动，因为这两个放丝机构的转向和转速是一样的，可以分析得到放丝机构的实时位置也是始终相对于主轴对称的，这样放丝机构就能时刻保持动平衡，可实现稳定绞丝。



1—放丝盘，2—绞盘，3—主轴

图 3.6 放丝机构安装方式

3.1.4 导丝架设计

绞盘在转动的过程中，起退扭作用的退扭轴会相对于绞盘反向同步转动，而放丝盘是固装在退扭轴上，且相对于退扭轴是偏心的，如图 3.7 所示，当绞盘处于 a 位置时两个放丝盘的放丝点的相对距离是最近的，所以两根电极丝的绞合汇聚点刚好位于并线模处；而当绞盘处于 b 位置时，两个放丝盘的放丝点的相对距离是最远的，此时两根电极丝的绞合汇聚点却离并线模最远。在绞丝过程中，放丝点的位置一直在动态变化，这样也导致绞合汇聚点也在时刻变化着，所以便会出现丝的松紧现象，最终导致无法得到绞合电极丝。

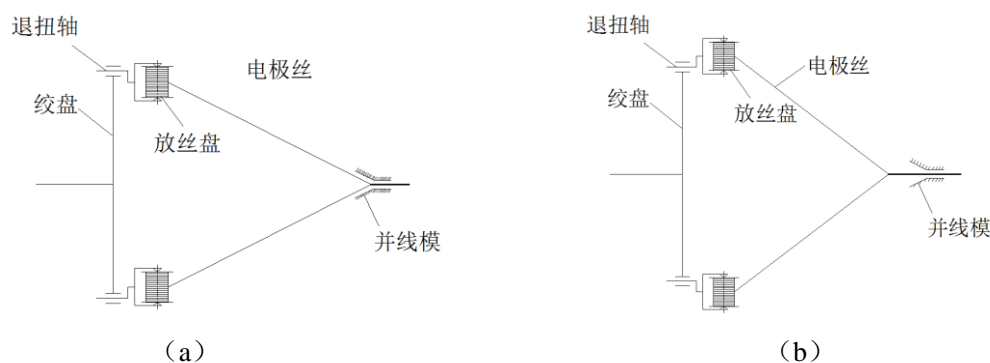


图 3.7 无导丝架的绞丝原理图

为了解决上面问题，首先根据以上所出现的现象分析了原因，由于两个放丝盘是偏心运动，两个放丝盘放丝点的位置一直在相对变化，这样导致了绞合汇聚点也跟到一起变化，从而出现松紧，所以需要将放丝盘偏心运动通过一个特殊的机构进行抵消，由此提出了在两个放丝盘前端各加一个导丝架的方案，通过将放丝盘放出的电极丝穿过安放在放丝盘前端的导丝架的小孔

再进行汇聚绞合,同时该小孔的中心轴线必须与退扭轴的轴线是重合的,导丝架与绞盘固装在一起。如图 3.8 所示,安装了导丝架之后,之前出现的绞合电极丝的松紧问题得到了解决,因为导丝架上的导丝孔的中心轴线与退扭轴的是重合的,在绞合过程中,放丝盘的放丝点到导丝孔的距离始终保持不变,所以放丝盘旋转一周时,放丝盘到导丝这段距离的电极丝的运动轨迹将是一个圆锥,而导丝孔到并线模的距离是固定不变的,则电极丝的绞合汇聚点也将保持不变,这样就解决了绞丝过程中丝的一松一紧现象,从而能够绞合出所需的绞合电极丝。

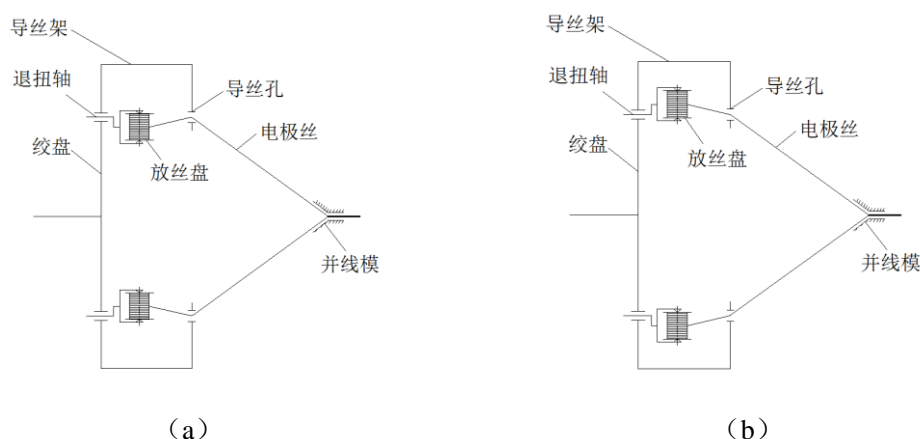
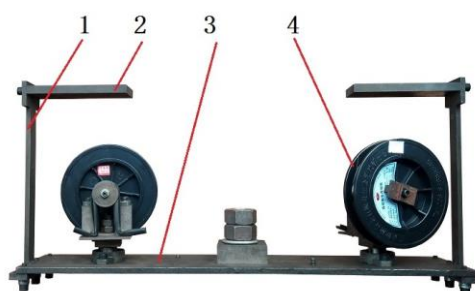


图 3.8 安装导丝架的绞合原理图

导丝架的装配如图 3.9 所示,导丝架通过螺钉固定在绞盘上,导丝架由于其结构比较特殊,考虑到加工工艺,将导丝架分解为两部分进行加工,分别为导丝架支架和导丝板着两部分,然后通过螺钉将导丝架与导丝支架固定为一个整体。整个导丝架需要满足一定的刚度和强度,须保证在绞盘的旋转下不变形,也就是保证小孔的位置始终与退扭轴保持在同一轴线上。另外考虑到电极丝穿过小孔时的磨损,小孔的两端需要倒个圆角,这样就能避免对电极丝的磨损。



1—导丝支架, 2—导丝板, 3—绞盘, 4—放丝盘

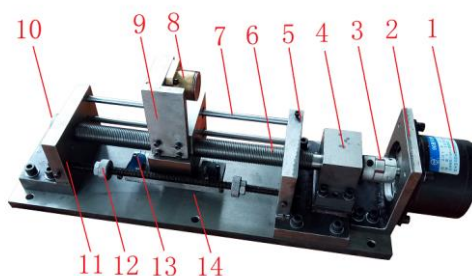
图 3.9 导丝架装配图

导丝架支架由于结构比较复杂,因此选用线切割加工的方法来进行加工,然后再进行打孔。而导丝架也是先采用线切割进行加工,然后再打孔攻丝,对于导丝架上面的导丝孔的加工,在这里选用小孔机进行打孔,并对该小孔进行倒圆角。

3.2 排收丝模块设计

3.2.1 排丝模块设计

排丝模块在对于能否得到绞距均匀且规整收丝至关重要，排丝模块由排丝丝杠、排丝螺母块、轴承座、排丝丝杠支撑座、排丝电机座等零件组成。排丝模块的装配图如图 3.10 所示，排丝电机安装在电机座上，通过梅花联轴器将电机的动力传递到丝杠上从而带动丝杠螺母块的来回移动。丝杠由轴承座内的一对角接触轴承与外球面球轴承共同支承。丝杠螺母块安装在左右支撑座之间以方便来回排丝。为了将导轮和行程开关安装在丝杠螺母块上，同时利用直线轴承来进一步保证排丝精度，所以螺母的结构较复杂；在左右支撑座上安装光轴导轨的孔需要较高精度，因此这些孔位采用镗刀加工，光轴导轨与安装在螺母上直线轴承相配合从而进一步保证了排丝精度。另外，左右支撑座之间还安装了螺杆，螺杆上安装了一对限位螺母和一对普通的六角螺母，通过调整限位螺母便可以调整丝杠螺母块的运动行程，针对收丝盘的不同来进行调整该行程，而普通的六角螺母是利用对顶螺母的原理来进行限位螺母的定位，防止限位螺母出现松动。排丝导轮安装在排丝导轮连接板上，连接板利用螺钉固装在丝杠螺母块上，所以排丝导轮会跟着丝杠螺母块一起来回移动从而进行排丝。丝杠螺母块的来回移动利用行程开关触碰限位螺母来实现换向的，行程开关安装在行程开关固定板上，行程开关固定板也是通过螺钉固定在螺母上。



1—排丝电机，2—电机座，3—梅花联轴器，4—轴承座，5—右支撑座，6—丝杠，
7—光轴，8—导轮，9—导轮连接板，10—外球面球轴承，11—左支撑座，12—限位螺母，
13—行程开关，14—底板

图 3.10 排丝模块

4.2.1.1 排丝丝杠的设计

排丝丝杠作为排丝器中的重要部件，它决定了排丝器的排丝精度，因此排丝丝杠的精度需要非常高。因为排丝模块整体受力较复杂，而且排丝螺母块承受的负载不大，为方便设计，将排丝丝杠的最小轴径设计成与电机轴径相同。排丝丝杠的材料选用常用的 45#钢，为保证力学性能需进行调质处理。由于排丝距比较小，因此丝杠的螺距应尽量的小。而滚珠丝杠的话由

于造价比较高，与之相反，螺纹丝杠的能够实现较小螺距，且成本较低，故排丝丝杠选用螺纹丝杠的形式，排丝丝杠的零件图如图 3.11 所示。

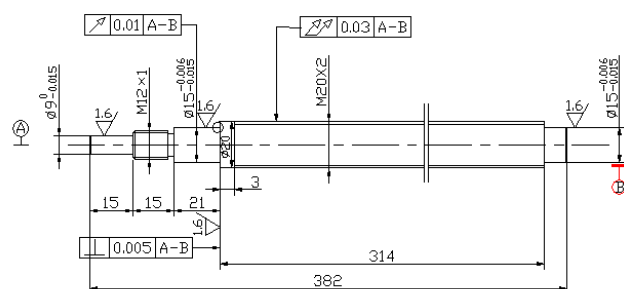


图 3.11 排丝丝杠零件图

4.2.1.2 排丝螺母块设计

丝杠和螺母的材质最好选用一硬一软，前面的排丝丝杠已经选用调质处理的 45#钢了，因此排丝丝杠强度高并且耐磨，排丝螺母块选用材质较软的球墨铸铁。为了使排丝模块更加紧凑可靠，所以将排丝螺母块设计为一个整体。螺母块的结构示意图如图 3.12 所示，排丝螺母块的 M20×2 的螺纹孔是与丝杠相配合的。

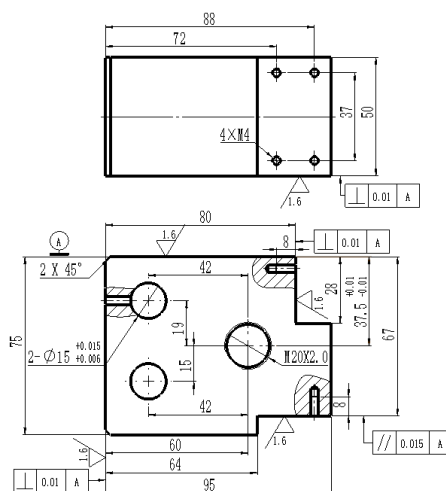


图 3.12 螺母结构示意图

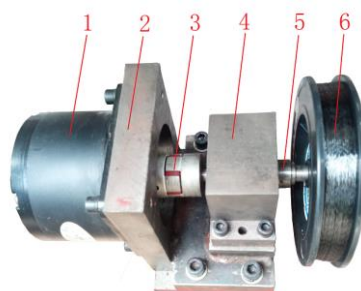
排丝螺母上两个 $\phi 15$ 的孔用于安装直线轴承，直线轴承选用日本恩斯克公司的 LM8UU 这一型号的轴承，实物如图 3.13 所示，这两个孔的精度要求较高，需要用镗刀进行加工，同时在这两个孔的侧面打四个螺纹孔，采用螺钉来限制直线轴承的轴向运动。



图 3.13 直线轴承

3.2.2 收丝模块设计

收丝模块将绞合电极丝在排线模块的辅助下规整地收到收丝盘上，收丝模块由收丝盘、收丝轴、轴承座、收丝电机座、收丝电机等零件组成^[41]。收丝模块如图 3.14，收丝电机通过梅花联轴器将动力传递到收丝轴上，收丝轴由安装于轴承座内部的一对角接触球轴承支承，收丝盘安装在收丝轴的端部，收丝电机与轴承座通过螺钉固定在收丝电机座上。为了标准化，收丝盘采用收纳电极丝用的空丝盘。



1—收丝电机，2—收丝电机座，3—梅花联轴器，
4—轴承座，5—收丝轴，6—收丝盘

图 3.14 收丝模块

收丝轴示意图如图 3.15 所示，由于收丝轴承受的负载非常小，故为方便设计，将收丝轴的最小轴径设计成与收丝电机的输出轴径相等，所以最左端的轴径为 9mm，最右端的轴径通过梅花联轴器将收丝电机的动力传力到收丝轴上，收丝轴右端安装 M12×1 的圆螺母用于右轴承的定位，而左轴承利用轴肩进行定位，由于与轴承配合处的轴径为 $\phi 15\text{mm}$ ，故左轴承定位轴肩的轴径选取 $\phi 19\text{mm}$ ，最左端的轴段用于安装收丝盘。

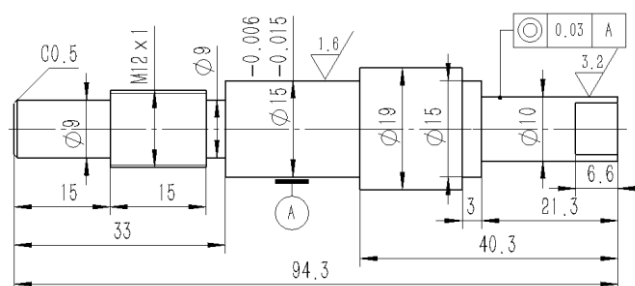


图 3.15 收丝轴示意图

收丝电机座上安装了收丝电机和轴承座，收丝电机座的精度决定了整个收丝模块的精度，同样地，出于成本和生产周期的考虑，收丝电机座也采用钢板焊接，然后再送到多面体机床进行加工。

为了保证排丝和收丝模块的精度，将排丝模块和收丝模块一起固定到一块大的钢板底座上，使其模块化，方便之后的装配与拆卸。

3.3 机架及电极丝消抖模块设计

3.3.1 机架设计

机架作为绞合电极丝装置的基础，主要分为机台和防护罩这两个部分，之前设计的各个模块都要安装在机台上，所以机台几乎承载整个绞合电极丝装置的重量，而且绞盘的旋转将产生翻转等力矩的作用，因此这对机台的各项性能提出了很高的要求。由于绞盘在较高转速下工作，因此需要考虑安装防护装置，所以设计了防护罩将绞丝模块与外界隔开，防止绞丝模块在工作过程中因为人的疏忽或者机器的故障对人造成伤害。防护罩与机台通过铰链进行连接。机架在设计工程中需要满足以下几点要求^[42-44]：

(1) 可靠性：在使用期内必须安全可靠，其结构应与所承受的外力相协调，满足强度、刚度、振动稳定性等方面的要求；

(2) 工艺性：机架方便铸造或焊接，尽量避免铸造或焊接不当而产生的缺陷，易于通过常规加工来实现，同时装配和调试方便；

(3) 经济性：尽量减轻结构质量降低材料成本，减少加工工时和制造成本。另外尽量使造型美观并且合理。

参考机械手册，同时进行综合考虑，该装置选用框架式机架这种形式。而框架式机架选用角铁进行焊接，角铁的型号为 $40 \times 40 \times 5\text{mm}$ ，焊接过程中需要在大的工作平台上进行焊接，并且利用夹具对角铁进行固定，然后再进行焊接从而减小机架的变形。机台如图 3.16，机台主要分为三个空间，分别为绞丝模块安装空间、旋绞空间、收排丝模块安装空间。防护罩如图 3.17 所示，防护罩防护的是旋绞空间，防护罩通过铰链与机台连接，翻转防护罩能够打开和闭合旋

绞空间。当绞丝装置在工作时，防护罩闭合旋绞空间，防止意外发生；当需要更换放丝盘或者绞丝完毕时，打开防护罩即可。

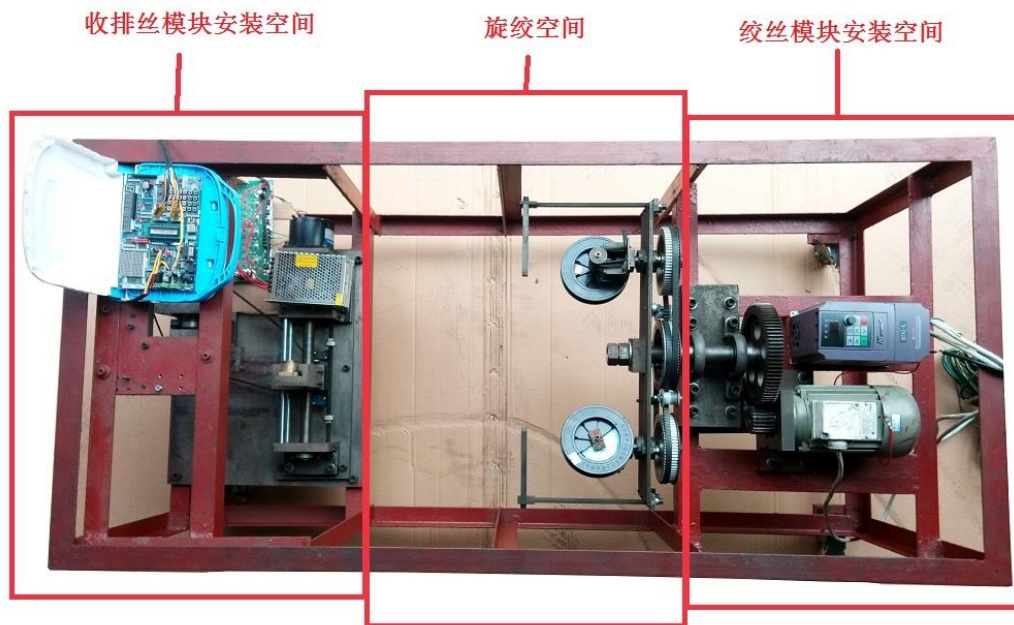


图 3.16 机台实物图

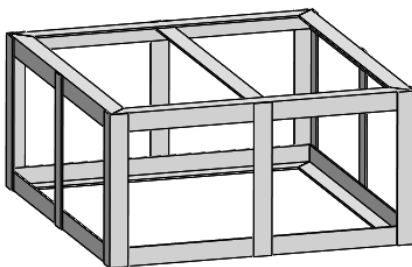


图 3.17 防护罩

由于机架采用角铁焊接而成，故存在镂空部分，如图 3.18 所示，对旋绞空间的镂空部分全部加装适当尺寸的 1mm 厚的钣金。采用角铁搭建机架的方案可大大缩短生产周期，同时制造简单，成本也比较低。另外，由于该装置比较重，为方便移动，在机台的四个底角上安装了可锁紧的万向轮，当需要移动该装置时将万向轮解锁，当装置处于工作状态时，锁紧万向轮即可。

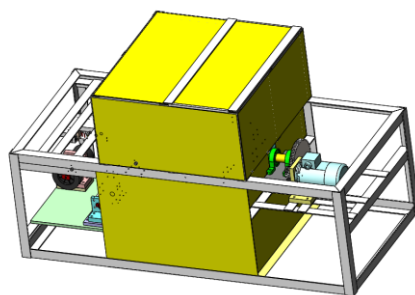
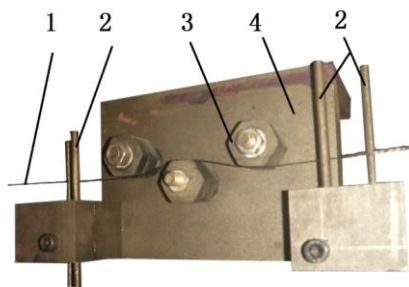


图 3.18 钣金安装方案

3.3.2 消抖束丝模块设计

绞丝过程中由于绞盘一直在旋转，导致刚绞合完毕的丝会存在着振动，这样不好直接将绞合电极丝导向排丝导轮，所以在将绞合电极丝导向排丝导轮之前需将绞合电极丝的抖动消除，为此设计了丝过渡模块。丝过渡模块由两部分组成，分别是消抖装置和过渡导轮。参照线切割机床上所用的挡丝棒和进电块，由于这两种零件获取方便且耐磨，故采用这两种零件来进行绞合电极丝的消抖。消抖束丝装置的整体装配图如图 3.19，绞合好的电极丝先穿过左边的两根挡丝棒先消除电极丝的水平抖动，然后再穿过三个进电块来消除竖直方向的抖动，接着绞合电极丝穿过右边的挡丝棒再进行一次水平消抖使绞合电极丝平稳的导向过渡导轮。



1—绞合电极丝，2—挡丝棒，3—进电块，4—进电块安装座

图 3.19 消抖束丝装置

3.4 绞合电极丝装置控制系统设计

绞合电极丝装置的匀速收丝、变绞距以及变排丝距收丝都需要通过控制来实现。绞合电极丝装置控制系统用 C 语言编程通过单片机控制步进电机、光电开关、行程开关等组成的一个系统。

3.4.1 变频器

为了调整绞盘的转速，在该装置中选用变频器来调整三相电机的转速。变频器主要是用来改变电机工作电源频率方式来控制交流电动机的电力控制设备。其主要是由整流、滤波、逆变

器、制动单元、驱动单元、检测单元微处理单元等组成。变频器靠内部 IGBT 的开断来调整输出电源的电压和频率，根据电机的实际需要来提供其所需要的电源电压，进而达到节能、调速的目的，另外，变频器还有很多的保护功能，如过流、过压、过载保护等等，在这里我们选用的变频器的型号为易驱牌变频器，实物如图 3.20 所示，这种变频器采用先进的控制方式实现了高转矩、高精度、宽调速范围，具备体积小、操作简单、功能齐全等优点。



图 3.20 变频器

3.4.2 步进电机

由于绞合电极丝装置中的收丝电机与排丝电机需要比较高的精度，而步进电机具有快速停、精确步进和定位等特点。在该装置中选用宝马牌的型号为 90BF006 的步进电机，通过计算，这个型号的电机的力矩满足收排丝模块中收丝电机与排丝电机的要求。步进电机实物如图 3.21 所示。



图 3.21 步进电机

3.4.3 光电开关

光电开关利用被检测物对光束的遮挡或反射，由同步回路接通电路，从而检测物体的有无。物体不限于金属，所有能反射光线（或者对光线有遮挡作用）的物体均可以被检测。光电开关将输入电流在发射器上转换为光信号射出，接收器再根据接收到的光线的强弱或有无对目标物

体进行探测。光电开关如图 3.22 所示，在绞合电极丝装置中，利用光电开关检测过渡导轮转动一圈的时间，然后发送给单片机进行处理，以计算出收丝速度。



图 3.22 光电开关

3.4.4 控制模块原理图

控制模块的原理图如图 3.23 所示，电机 1 为三相电机，电机 2 和电机 3 分别为排丝电机与收丝电机，根据需要的绞距和电极丝的丝径先设定好相关的参数，包括变频器的工作频率、单片发送到收丝电机与排丝电机的脉冲数以及收丝速度，收丝速度通过大盘轮转动一圈的时间来间接计算获得，对于不同丝径的电极丝绞合只要通过改变单片机在相同时间内发送给收丝电机与排丝电机的脉冲个数，即改变传动比使排丝距改变；对于不同绞合不同绞距的电极丝，是在绞丝电机与收排丝电机共同配合下实现的，绞丝电机的转速保持不变，收丝电机提供收丝牵引力将绞合好的电极丝收到收丝盘上，而排丝电机与收丝电机同步工作，这样绞合电极丝就螺旋状紧密的收到收丝盘上，而光电开关通过检测几组过渡导轮的转动时间的数据，并将该数据发送到单片机从而得到实时的收丝速度，并将这几组速度取平均值，在行程开关触碰螺母块时调整发送到收丝电机与排丝电机的脉冲个数以保持匀速收丝，丝一层一层地叠，因此每当行程开关触碰限位螺母就要调整一次速度，这样就能保证绞距均匀，当需要改变绞距时只需改变收丝速度即可。不同材质的丝的绞合只需保证两根电极丝的拉伸强度相近即可。

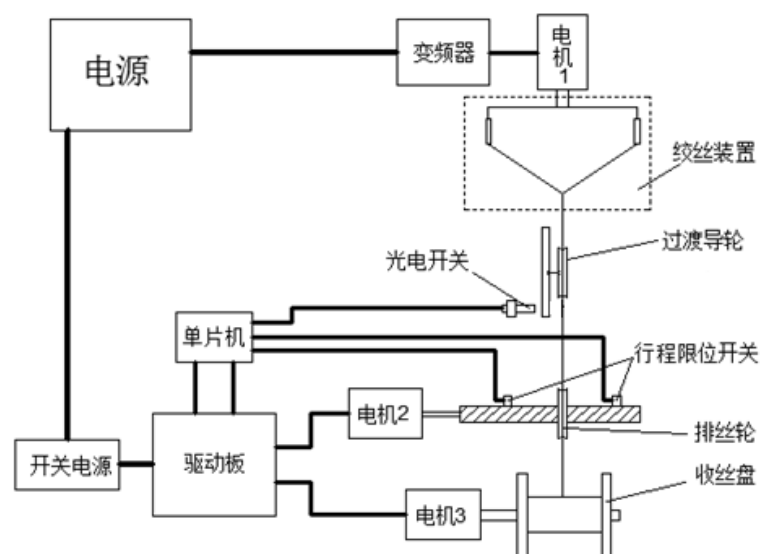


图 3.23 绞合电极丝装置控制原理

3.5 本章小结

本章根据前一章给出的方案，设计了绞合电极丝装置的绞丝模块、收排丝模块、机台以及绞合电极丝的电控系统，给出了装置中重要零件的结构示意图和各模块的装配示意图，可以得到：

（1）主轴采用调质的 45 号钢进行设计制造，强度满足要求，主轴采用带座轴承与机架进行固定；采用齿轮副将三相电机的动力传递到主轴；绞盘的设计成轻巧结构以减轻重量，而退扭用的同步带轮采用材质为铝合金的腹板式结构，另外为了减小放丝架的尺寸，放丝盘采用偏心安装，同时通过导丝架来解决放丝盘偏心安装时出现的丝的周期性松紧现象。

（2）排丝模块采用安装有导轮的螺母块在丝杠上来回移动的形式进行绞合电极丝的排丝，丝杠的材料是调质 45 号钢，丝杠为螺纹丝杠，丝杠通过角接触轴承和外球面轴承共同支承，丝杠与电机通过联轴器连接来实现动力传递；而螺母块的材料为球墨铸铁，螺母块上安装了排丝用的单边导轮和限位用的行程开关，另外螺母块上还安装了直线轴承，直线轴承与光轴导轨配合；为缩短生产周期，左右支撑座采用钢板焊接而成再进行加工。

（3）收丝模块的收丝电机座采用钢板焊接并加工而成，收丝电机座上安装了收丝电机和轴承座，收丝轴与收丝电机也是利用梅花联轴器连接，收丝盘安装在收丝轴的另一端，并且通过特殊设计的卡块进行定位。

(4) 机台选用角铁焊接而成，机台分为三个空间，分别是绞丝模块安装空间、绞丝空间以及收排丝空间；另外为了抵消绞合电极丝的振动，设计了丝的过渡模块，将绞合电极丝平稳的导向收排丝模块。

(5) 电控部分的设计介绍了变频器、光电开关以及限位开关，同时设计了整个系统的控制电路图。

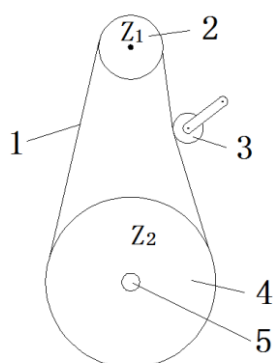
第四章 绞合电极丝高效切割研究

通过对机床进行相应的改进以适应绞合电极丝的加工，同时设计工艺试验研究绞合电极丝的各方面性能。

4.1 电火花线切割机床及电控柜的改进

4.1.1 排丝距的改变

由于普通电极丝的丝径为 0.18mm，而机床上的排丝距一般都是 0.25mm，而绞合电极丝时将两根电极丝绞合而成的，则绞合电极丝的包络直径会是单根电极丝的两倍，采用 0.18mm 的电极丝进行绞合时，得到的绞合电极丝的直径将达到 0.36mm，所以为了避免出现叠丝现象需改变机床的排丝距。丝筒每转动一圈，丝筒在运丝丝杠的作用下将往自身轴向方向上移动一定的距离 a ， a 要大于所用电极丝的直径，而 a 的大小则由丝筒到运丝丝杠的传动比决定，所以机床排丝距可以通过改变丝筒到运丝丝杠的传动比来改变的，也就是改变同步带轮的传动比。同步带传动示意图如图 4.1 所示^[45]。



1-同步带，2-小同步带轮，3-压紧轮，4-大同步带轮，5-运丝丝杠

Z_1 -小同步带轮的齿数 Z_2 -大同步带轮的齿数

图 4.1 同步带传动示意图

丝筒的传动比为：

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4-1)$$

而未做改动前， $Z_1=19$ ， $Z_2=74$ ，带入得：

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{19}{74} \approx 0.26$$

由于运丝丝杠的螺距为 1mm，所以排丝距为 0.26mm，而我们的绞合电极丝的是普通 0.18mm 电极丝的两倍，即为 0.36mm，则要把总传动比调整为 $i' > 0.36$ ，重新调整后 $Z_1' = 20$ ， $Z_2' = 50$ ，故

$$i' = \frac{Z_1'}{Z_2'} = \frac{20}{50} = 0.4 > 0.36$$

所以最终确定了大带轮和小带轮的齿数分别为 50 和 20，同时同步带轮的型号为 HTD-5M，这样就能够满足绞合电极丝的排丝距。

另外，由于同步带轮的尺寸发生了变化，所以与同步带轮相配合的同步带的长度也要改变，同步带长度计算公式如下：

$$L' = 2C + 1.57(D_p + d_p) + \frac{D_p + d_p}{4C} \quad (4-2)$$

式中， L' 表示皮带节线长； C 表示两轴的中心距； D_p 表示大带轮的节径； d_p 表示小带轮的节径。

已知 $C = 172\text{mm}$ ， $D_p = 79.58\text{mm}$ ， $d_p = 31.83\text{mm}$ ，入公式得 $L' = 519.08\text{mm}$ ，而标准的同步带有 520mm 的，故选用 HTD520-5M 的同步带，多余的长度采用压紧轮来进行压紧。

4.1.2 绞合电极丝专用电控柜结构的设计

绞合电极丝主要用于大能量切割，因此电控柜的发热器件能产生大量的热量，导致电控柜内部的温度急剧上升^[46-47]。而之前的大部分电控柜都是采用机械散热，也就是利用风扇进行散热，这种散热方式有很多弊端，不管机器是否处于加工状态，柜体内部的空气流动量都保持恒定的流速，由于电控柜所在工作环境的空气中存在大量的灰尘、工作液雾气及油污，长期下来影响电子、电器元件的寿命，进风口容易堵塞，而风扇本身也会受影响而导致故障率高，从而降低电器的稳定性。

针对风扇排热的这些问题，提出了一种新型的排热方式以适应绞合电极丝加工，就是通过合理排布电子元器件使柜体内部产生温度差从而进行自动散热，将这种散热方式定义为热泵散热。电控柜的外观如图 4.2 所示，柜体正面为显示面板，采用隔板将电控柜的内部分割成腔体 1 和腔体 2，打开侧面门能看到腔体 2，柜体的背面还有一扇门，打开这扇门能看到腔体 1，另外柜体的底部有进气口，进气口通向腔体 1 与腔体 2，而出气口设在柜体的顶部，也与腔体 1、腔体 2 相通。



图 4.2 电控柜外观

如图 4.3(a)所示，腔体 1 的上部安装高发热器件，下部安装低发热器件；而腔体 2 上侧安装 PC 机，下侧安装低发热器件，腔体 2 如图 4.3 (b) 所示。

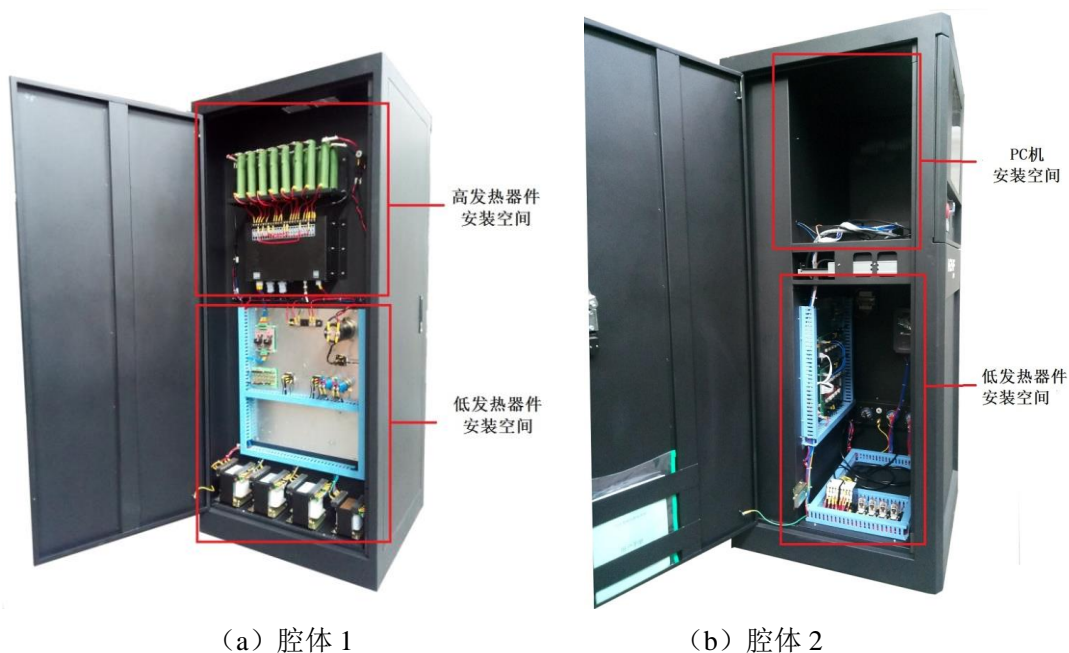


图 4.3 腔体

电控柜中的腔体 1 的高发热器件主要为大功率电阻和脉冲电源，腔体 1 低发热器件包括变压器、电容等元器件，当机床处于工作状态时，腔体 1 内部的高发热器件产生大量的热量，而低发热器件基本不发热，由此便产生温差，根据物理学相关知识，高温气流往上流动，因此高

温的气流通过出气口从腔体 1 中排出，而出此时底部进气口会有外界温度较低的气体补充到腔体 1 中，由此便形成了气流，该气流受到高频电流的影响，高频电流处于小电流工作时，腔体 1 内部的温差较小，进风口与出风口的气流也就小，而高频电流处于大电流工作时，腔体 1 内部的温差较大，进风口与出风口的空气流速也将增大以及时将热量排出，将温度控制在一定范围内，起到了散热的效果；当机床处于非工作状态时，腔体 1 内部的高发热器件不产生热量，由此腔体 1 内部基本没有气流，所以与风扇散热相比，大大减少了相同时间内外界空气的进入量，也就减少了进入柜体内部的油污、灰尘等，这样便保护了重要电子元器件，使其使用寿命大大延长，另外没有安装机风扇使电控柜更节能，也避免了因为风扇问题而出现的故障。腔体 2 的上部安装的是 PC 机，下部安装的是控制板和变频器等器件，只要 PC 机处于工作状态，那么 PC 机就会产生热量，而底部的控制卡和变频器等器件基本不产生热量，由此也形成了温度差，所以也能自动散热，而且 PC 机内部的散热风扇能产生气流，加速热量的排出。因此柜体内部的温度根据机床的工作状态自动调节，这样安装在腔体 1 内部的各个元器件能起到很好的保护效果。

4.2 绞合电极丝工艺试验

进行了绞合电极丝在不同能量和不同厚度下与圆截面电极丝的工艺对比试验，来研究绞合电极丝的带液与排屑能力，从而发现绞合电极丝的加工规律^[48-50]。

4.2.1 试验设备

实验所用的设备是高速往复走丝线切割机床，该机床是由杭州华方数控机床有限公司生产的，机床型号为 HF320，其外观图如图 4.4 所示。



图 4.4 实验用电火花线切割机床

机床的具体参数图表 4.1 所示。

表 4.1 HF320 机床各项指标

项目	参数	项目	参数
工作台尺寸 (mm)	320×450	最大切割速度 (mm ² /min)	180
工作台行程 (mm)	350×450	输入电源	3N—50Hz—380V (单向—50Hz—22CV)
切割锥度 (°)	±6°	机床功率 (kw)	0.8
切割精度 (mm)	<0.015	线切割系统	HL 数控系统
最大加工厚度 (mm)	300	步进电机	反应式, 步距角 0.36/0.72

试验用到的其他辅助设备如表 4.2 所示。

表 4.2 试验用其他辅助设备

设备名称	型号	用途
粗糙度仪	LANDTEK	测量工件表面粗糙度
示波器	DS1102D	采集放电波形
超声波清洗仪	KQ-50E	清洗工件

4.2.2 大能量加工情况对比

线切割加工的工作液是随着电极丝的运动被带入极间, 当极间放电间隙工作液充足时, 极间能够得到及时冷却, 蚀除产物能随着工作液一起从极间排出, 那么加工工件表面基本不会产生烧伤条纹, 并且表面质量好, 但是随着放电能量的增大, 极间状态严重恶化^[51-52], 被电极丝带入极间的工作液在极间汽化严重, 导致在电极丝运行方向的工件出口处基本没有工作液, 因此便产生了烧伤条纹。由于绞合丝的初衷就是为了提高电极丝的带液和排屑能力, 所以通过对比绞合电极丝与圆截面电极丝的在相同加工参数下的加工对比实验来研究绞合电极丝的加工性能。

为了更综合地反映绞合电极丝的加工性能, 分别从绞合电极丝的有效截面积与有效包络直径这两方面与圆截面电极丝进行对比, 实验用的绞合电极丝通过两根 $\varnothing 0.18\text{mm}$ 电极丝绞合而成, 通过计算得到 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 的圆截面电极丝与绞合电极丝的有效截面积相等, $\varnothing 0.36\text{mm}$ 的圆截面电极丝与绞合电极丝的包络直径相等, 所以对绞合电极丝、 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝以及 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝进行加工对比实验。绞合电极丝与圆截面电极丝对比如图 4.5 所示。

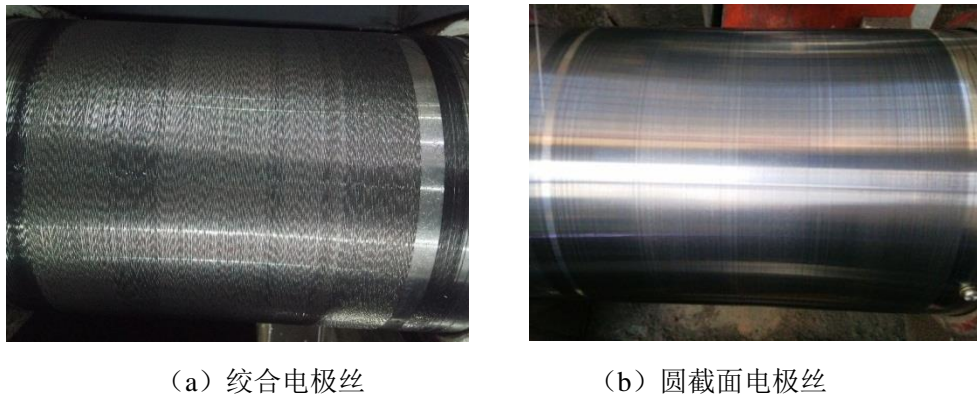


图 4.5 绞合电极丝与圆截面电极丝对比

大能量加工参数如表 4.3 所示，采用杭州华方数控机床有限公司最新的大电流控制柜进行加工，该控制柜的功率管个数最多为 15 个，最大电流能达到 30A，加工的样件的尺寸为 $10 \times 10\text{mm}$ ，加工工件的材料为 Cr12，加工用的工作液为佳润 JR1A 复合工作液，按工作液与自来水比例为 1: 15 进行配比。

表 4.3 大能量加工参数

序号	工件厚度 (mm)	脉宽 (μs)	占空比	功率管数 (个)	丝速 (m/s)
1	60	60	1:3	3	10
2	60	60	1:3	4	10
3	60	60	1:3	5	10
4	60	60	1:3	6	10
5	60	60	1:3	7	10
6	60	60	1:3	8	10
7	60	60	1:3	9	10
8	60	60	1:3	10	10
9	60	60	1:3	11	10
10	60	60	1:3	12	10
11	60	60	1:3	13	10

为了更全面地研究绞合电极丝的加工性能，在比较了这三种电极丝在相同条件下的切割速度的同时，还比较了这三种电极丝的蚀除体积效率，这里的蚀除体积效率等于电极丝切割速度与电极丝直径加上两侧放电间隙的乘积，而单侧放电间隙为 0.01mm。

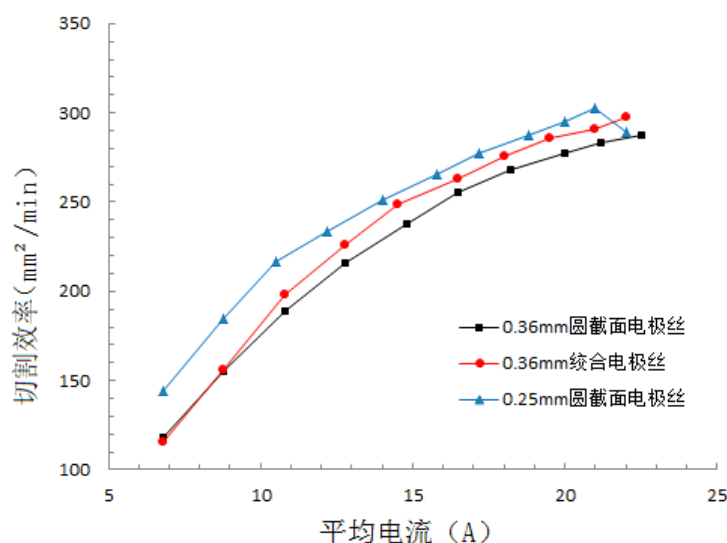


图 4.6 切割效率与平均电流的关系

图 4.6 为三种电极丝的切割效率与平均电流的关系，由图可知，在保证脉冲宽度、占空比等其他条件不变的情况下，增大脉冲峰值电流（通过增加功率管的个数），当然平均电流也会随之增大，最终切割效率也得到很大的提升，但是随着平均电流的增大，切割效率上升的斜率却逐渐变小，特别是 0.25mm 的电极丝的加工效率反而出现了降低。根据分析可以得到，随着平均电流的增大，放电能量也随之增大，相同时间内的蚀除量增多，电极丝的进给速度增大，因此切割速度也就随之增大，但是在高能量加工下，工作液汽化越来越严重，极间得不到充分的冷却，因此放电能量增大，加工效率增长的幅度不大。

在电极丝包络直径相同的情况下，绞合电极丝与 0.36mm 的圆截面电极丝相比，当平均电流比较小的时候，绞合电极丝的切割效率比圆截面电极丝的会低一些，而电流增大的一定值时，圆截面电极丝的效率将被绞合电极丝的反超，并且绞合丝的效率随平均电流的增长的幅度会比圆截面电极丝的更大。分析可得，在平均电流较小时，因为放电能量不大，极间有充足的工作液来进行冷却消电离，蚀除产物不多，能及时从极间排出，因此工作液在此时并不是主导因素，相反地，为了能够将更多的工作液带进极间并且有更大的容屑空间，绞合电极丝自带螺旋形凹槽，但这也使绞合电极丝的放电范围变少了，并且绞合电极丝的有效截面积也比圆截面电极丝的更小，因此绞合电极丝电阻会比圆截面电极丝的更大，则在相同电参数下，绞合电极丝的平均电流会比圆截面电极丝的平均电流更小，这样也造成了部分能量的损耗，另外一定量金属离子存在于极间对于击穿延时，充分利用脉冲，使切割效率得到提升，而绞合电极丝由于其异形截面的存在会放缓放电通道的建立，所以绞合电极丝的切割效率会比圆截面电极丝的切割效率更低。随着平均电流的增大，随之增大的放电能量使蚀除产物也大量增多，同时放出大量的热，工作液汽化严重使极间得不到充分的冷却，极间没有充足的工作液将使蚀除产物大

量在极间堆积,从而影响正常的消电离,极间加工状况严重恶化,这时候电极丝的带液能力与排屑能力将成为影响切割效率的主要因素,绞合电极丝由于其螺旋形凹槽的存在,具有比圆截面电极丝更强的带液和排屑能力,能够将更多的工作液带入极间来维持极间加工状态,同时绞合电极丝的螺旋形凹槽还能容纳更多的蚀除产物,另外电极丝的运动能把存储在螺旋形凹槽的蚀除产物及时从极间排出,这是圆截面电极丝所不能做到的,所以在较大电流下绞合电极丝的切割效率会比圆截面电极丝的切割效率更高。

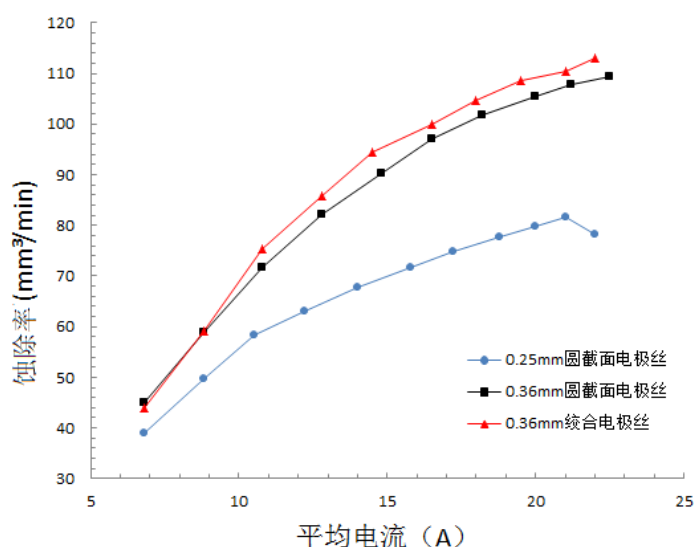


图 4.7 蚀除率与平均电流的关系

如图 4.7 所示,因为本实验所用的绞合电极丝的包络直径与 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝的相等,所以切割速度与体积效率的变化趋势是一致的,故不做蚀除率对比。在电极丝截面积相等的情况下,绞合电极丝与 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝的平均电流基本一致,因此它们的极间放电能量相差不多。由于 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝的丝径要比绞合电极丝的细很多,由图 4.6 可知 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝的切割速度会比较绞合丝的更高,因此选择对比绞合电极丝与 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝的体积蚀除效率。由图可知,绞合电极丝的体积蚀除效率始终大于圆截面电极丝的效率,并且随着平均电流的增大,绞合电极丝体积蚀除效率的增长幅度大于圆截面电极丝的增长幅度。分析认为,在极间放电能量基本一致的情况下,由于绞合电极丝的包络直径比 $\varnothing 0.25\text{mm}$ 圆截面电极丝的大,使得绞合电极丝的放电范围与圆截面电极丝的相差不多,而绞合电极丝极间的工作液比圆截面电极丝的更充足,排屑能力更强,所以绞合电极丝的体积蚀除效率比圆截面电极丝的更大,而且随着放电能量的增大,绞合电极丝的带液与排屑优势能得到充分体现。

图 4.8 为在相同电参数下用绞合电极丝与 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝进行切割得到的放电波形,由图可知绞合电极丝在进行切割时正常放电波形的占绝大多数,不正常放电波形几乎没有,由此可以看出采用绞合电极丝加工时,极间工作液较充足,极间的蚀除产物浓度较低,极间放电

状态良好，而 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝切割过程中的击穿延时放电波形非常少，且存在微短路放电波形，由此可以得出圆截面电极丝在加工中有蚀除产物堆积，消电离不充分，影响正常加工。

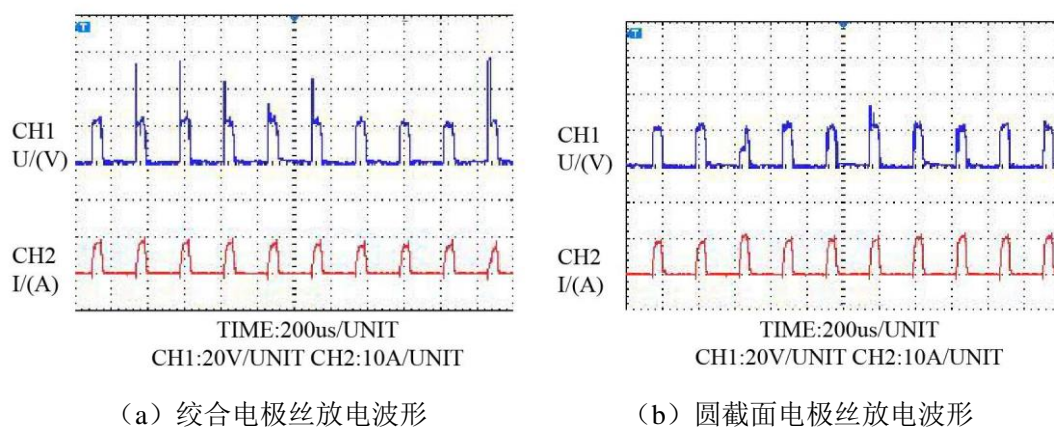


图 4.8 放电波形对比图

如图 4.9 所示，图中的两个工件是在相同电参数下分别用绞合电极丝与 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝切割得到的，可以看出用绞合电极丝切割的工件表面光亮，表面颗粒较细，基本没有烧伤条纹，而用圆截面电极丝切割的工件表面较暗，颗粒较粗，烧伤较严重。分析认为，在大能量切割过程中，绞合电极丝的极间状态一直能保持得比较好，绞合电极丝的凹槽能更快地将干净的工作液带入极间，同时及时将极间的蚀除产物排出，使放电更正常，不正常放电的几率大大减少，使加工表面更均匀平整；而圆截面电极丝的带液和排屑能力有限，在大能量切割时，其极间的工作液逐渐损耗，导致在工件出口处基本没有工作液，这样严重影响了消电离和冷却，蚀除产物不能及时排出，极间状态恶化，因此导致加工表面较暗，出现烧伤条纹，并且由于放电不稳定，有可能出现单点放电，表面的均匀性与一致性很差，所以看起来颗粒较大^[53]。

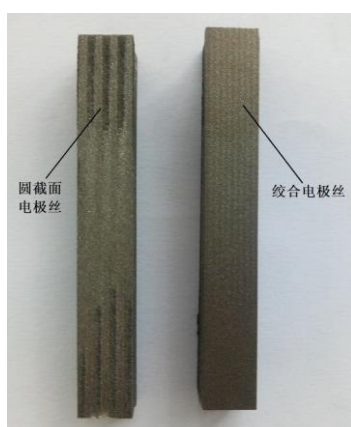
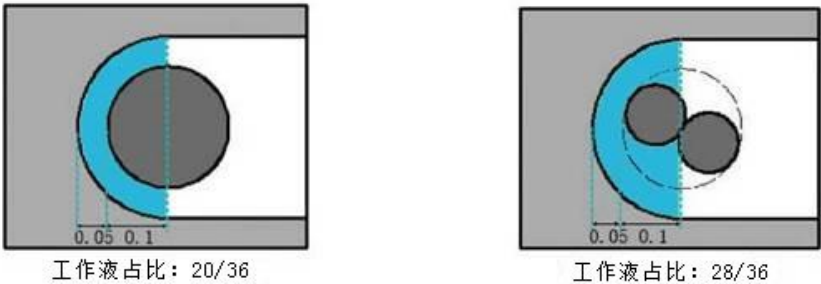


图 4.9 绞合电极丝与 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝加工工件对比

4.2.3 绞合电极丝与圆截面电极丝带液分析

在包络直径相同的情况下，如图 4.10 所示，与圆形截面电极丝相比，绞合电极丝由于螺旋形凹槽的存在，在极间内工作液的容积会更大，即极间有更充足的工作液，另外绞合电极丝的螺旋形凹槽能够存储工作液，能将更多的工作液带入极间，快速补充极间工作液的消耗，同时螺旋形凹槽使极间的容纳空间变大，能够容纳更多的蚀除产物，而且位于螺旋形凹槽内的蚀除产物能随着电极丝的高速运动被从极间排出，因此绞合电极丝的极间的冷却、消电离非常充分，尤其在大能量切割时，绞合电极丝的带液和排屑能力能够得到充分体现，所以绞合电极丝使切割效率得到显著提升。



(a) 圆截面电极丝极间工作液占比 (b) 绞合电极丝极间工作液占比

图 4.10 不同电极丝极间工作液占比示意图

4.2.4 绞合电极丝与圆截面电极丝不同丝速下的加工对比实验

所用的加工参数如表 4.4 所示，实验使用的电极丝为 $\varnothing 0.36\text{mm}$ 圆截面电极丝与两根 $\varnothing 0.18\text{mm}$ 圆截面绞合而成的绞距为 6mm 的绞合电极丝，切割工件的厚度为 60mm，工件材料为 Cr12，切割尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，实验用的工作液为佳润 JR1A 复合工作液，工作液与自来水按 1:15 进行配比。

表 4.4 不同丝速加工用参数

序号	脉宽 (μs)	占空比	功放管个数	平均电流 (A)	丝速 (m/s)
1	50	1:3	3	6.2	2
2	50	1:3	3	6.2	4
3	50	1:3	3	6.2	6
4	50	1:3	3	6.2	8
5	50	1:3	3	6.2	10

实验所用的两种不同电极丝的丝速与切割效率关系如图 4.11 所示, 由图可知, 在丝速较慢时, 切割速度很慢, 随着丝速的提高, 切割速度能得到很大的提升, 但是上升的趋势越来越平缓, 当丝速不低于 6m/s 时, 丝速对切割速度的影响不大, 当丝速小于 6m/s 时, 绞合电极丝和圆截面电极丝切割速度受丝速的影响特别大, 丝速为 2m/s 时, 圆截面电极丝出现频繁短路现象导致加工无法正常进行, 而绞合电极丝却能正常切割。分析认为, 在走丝速度不低于 6m/s 时, 绞合电极丝与圆截面电极丝带入极间的工作液基本能保证极间的冷却消电离, 所以丝速越高, 虽然被电极丝带入极间的工作液增多了, 但切割速度的提升并不显著, 另外随着丝速的提高, 圆截面电极丝的切割速度逐渐追赶上绞合电极丝的切割速度。当丝速低于 6m/s 时, 由于丝速较慢, 通过电极丝带入极间的工作液较少, 使极间的冷却消电离不能及时完成, 蚀除产物也不能及时排出, 极间放电状态恶化导致异常放电的频繁出现, 降低了切割速度, 当丝速为 2m/s 时, 绞合电极丝由于螺旋形凹槽的存在, 有较强的带液和排屑能力, 所以仍然能够保持使加工持续进行下去, 只是切割速度较慢, 而圆截面电极丝的极间工作液严重不足, 并且蚀除产物堆积严重, 导致极间状态严重恶化, 因而出现频繁短路现象, 导致加工无法进行。

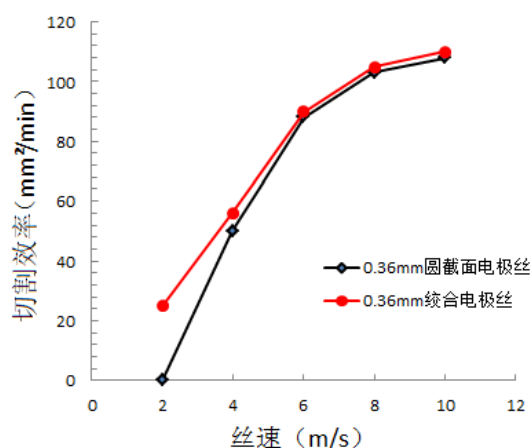


图 4.11 切割效率与丝速关系

如图 4.12 所示, 在丝速为 6m/s 时用绞合电极丝和圆截面电极丝切割得到的工件进行比较, 能够发现圆截面电极丝切割的工件表面有比较多的黑色烧伤条纹, 同时表面更暗一些, 但是用绞合电极丝切割的工件烧伤条纹非常少, 表面更光亮, 由此可以得出绞合电极丝的带液和排屑能力比圆截面电极丝的要更强。

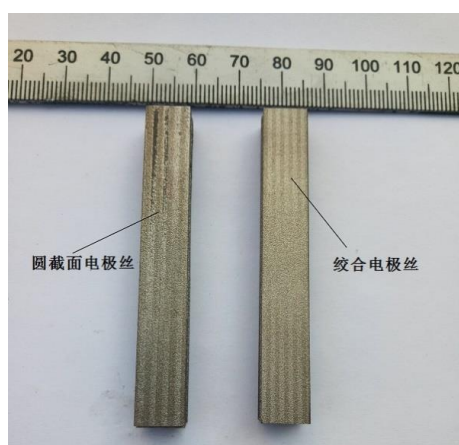


图 4.12 丝速为 6m/s 的工件表面对比图

4.3 绞距对绞合电极丝加工性能的影响

实验采用两根丝径为 0.18mm 的钼丝绞合而成的绞距分别为 3mm, 6mm 和 9mm 的三种绞合电极丝进行对比, 实验电参数采用表 5.1 所示的电参数, 切割工件的厚度为 60mm, 工件材料为 Cr12, 切割尺寸为 10mm×10mm, 实验用的工作液为佳润 JR1A 复合工作液, 工作液与自来水按 1:15 进行配比。得到绞合电极丝切割速度与平均电流关系如图 4.13 所示。从图中可以看出, 切割速度随着绞合电极丝绞距的增大而增大, 并且表面质量也更好。这与绞合电极丝的螺旋形凹槽的大小有关。

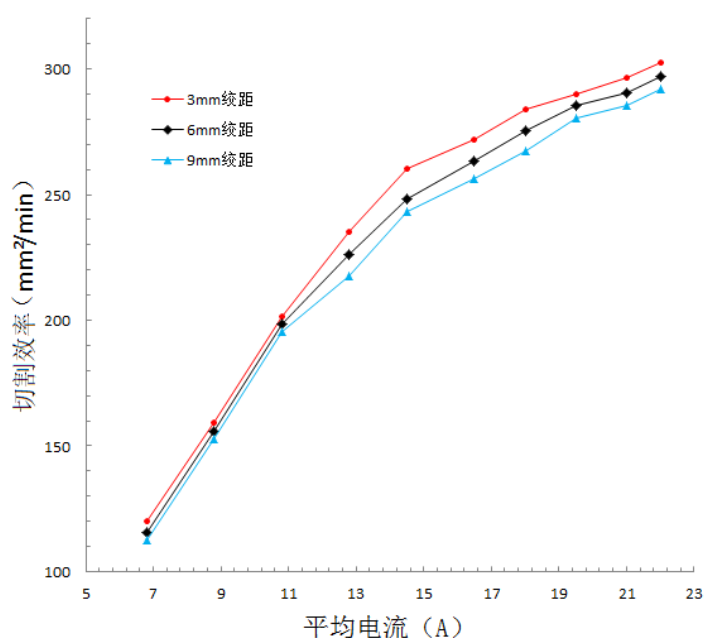


图 4.13 不同绞距下切割速度与平均电流关系

如图 4.14 所示, h 表示绞合电极丝的绞距, d 表示单个电极丝丝径, 单个绞距内的绞合电极丝的螺旋形凹槽的容积 V_1 可以用下式表示:

$$V_1 = \frac{\pi d^2}{2} \sqrt{h^2 + (\pi d)^2} \quad (5-3)$$

当用绞合电极丝切割厚度为 L 的工件时, 则设位于极间的绞合电极丝的螺旋形凹槽的容积为 $V_{\text{总}}$, $V_{\text{总}}$ 可用下式表示:

$$V_{\text{总}} = \frac{\pi L d^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{h}\right)^2} \quad (5-4)$$

由上式可以看出, 长度和丝径相同的绞合电极丝, 绞距越小, 单位长度的绞合电极丝的螺旋形凹槽的容积就越大, 带入极间的工作液的量就越大, 极间能够得到充分冷却, 更多的蚀除产物能通过螺旋形凹槽排出极间, 极间状态稳定, 对于极间工作液汽化严重的大能量切割来说, 更充足的工作液能很好地保证加工持续稳定进行。

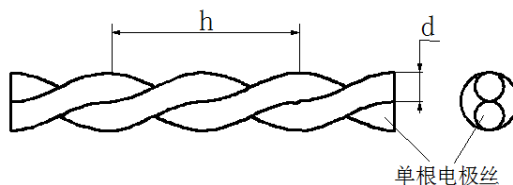


图 4.14 绞合电极丝示意图

4.4 不同厚度工件绞合电极丝与圆截面电极丝加工对比试验

本小节主要采用绞合电极丝和圆截面电极丝对不同厚度的工件进行工艺对比试验, 实验中圆截面电极丝与绞合电极丝的直径均为 0.36mm, 工件材料为 45 号钢, 并进行淬火处理, 工件厚度分别为 50mm、150mm、400mm 以及 800mm, 切割尺寸为 10×10mm 的正方, 工作液为 JR1A (1: 20 配比), 实验前, 根据不同的工件厚度分别设定了不同的电源参数以获得较好的加工状态, 具体实验参数及结果如表 4.5 所示。

表 4.5 实验参数及结果

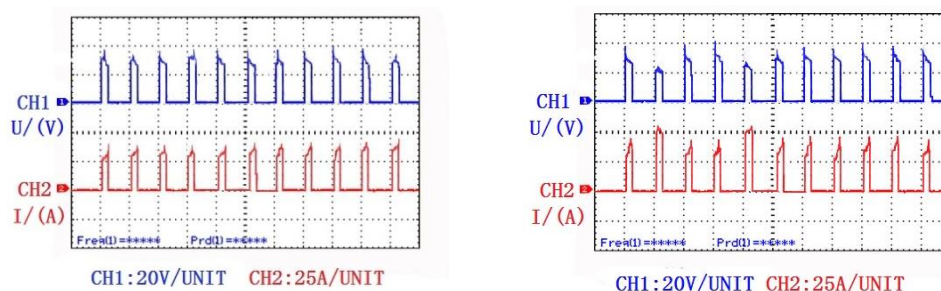
工件厚度 (mm)	电源参数	电极丝类型	切割效率 (mm ³ /min)	短路情况
50	脉宽: 32μs 占空比: 1:5 功放管数: 3 平均电流: 4.3A	圆截面电极丝	52	无短路
		绞合电极丝	50	无短路

表 4.5 (续)

工件厚度 (mm)	电源参数	电极丝类型	切割效率 (mm ³ /min)	短路情况
150	脉宽: 48 μ s 占空比: 1:6 功放管数: 5 平均电流: 6.3A	圆截面电极丝	75	无短路
		绞合电极丝	74	无短路
400	脉宽: 64 μ s 占空比: 1:7 功放管数: 7 平均电流: 6.5A	圆截面电极丝	47	偶尔短路
		绞合电极丝	50	无短路
800	脉宽: 80 μ s 占空比: 1:10 功放管数: 8 平均电流: 6.0A	圆截面电极丝	40	频繁短路
		绞合电极丝	51	无短路

由表 4.5 可看出, 当工件为 50mm 时, 宏观加工状态均无短路情况出现, 圆截面电极丝的加工效率要高于绞合电极丝的加工效率。在电火花线切割加工过程中, 由于工件厚度为常规厚度, 同时平均电流不大, 绞合电极丝相对于圆截面电极丝的带液效果并没有太大的优势, 而绞合电极丝由于存在螺旋形凹槽, 因此其表面有效放电面积要比圆截面电极丝的小, 因此在极间状态都较好的情况下, 绞合电极丝的加工效率要比圆截面丝的加工效率低。

对于 150mm 厚度的工件加工, 宏观都没有出现短路现象, 若极间状态都比较好的话, 此时按前面的分析可知, 绞合电极丝要小于圆截面电极丝的加工效率, 但由表 5.3 的实验结果来看, 两种电极丝在相同实验条件下的加工效率相当, 为进一步探究具体原因, 我们需要从极间放电状态进行分析, 图 4.15 为加工 150mm 厚度工件所采集的波形图。



(a) 绞合电极丝加工波形

(b) 圆截面电极丝加工波形

图 4.15 波形对比图

由图 4.15 (a) 可看出, 在加工 150mm 厚工件时, 绞合电极丝的加工波形均为正常波形, 可知因绞合电极丝带液效果较好, 极间工作液较充足, 极间蚀除产物可及时排出, 因此其加工

状态较好,加工过程几乎无短路波形。对于圆截面来说,由图 4.15 (b) 可看出,圆截面电极丝在进行 150mm 厚度工件加工时,波形中出现了短路波形,这是因为在进行较高厚度工件切割时,圆截面电极丝的带液效果比绞合电极丝差,其极间工作液也就相对较少(甚至不能充满整个极间),极间的蚀除产物不能及时排出,极间状态较差,因此在加工时会出现短路现象,影响加工效率。这就是圆截面电极丝的有效加工面积比绞合电极丝的大但两者综合加工效率相当的具体原因。基于此分析并结合表 4.5 可看出,在相同的实验条件下,绞合电极丝切割时均没有出现宏观的短路现象,而圆截面电极丝在进行 400mm 厚度工件切割时偶尔出现短路,尤其圆截面电极丝在切割 800mm 厚度工件时,短路较频繁,此外,在切割效率方面,在进行 400mm 厚度工件切割时,绞合电极丝的切割效率已大于圆截面电极丝的切割效率,尤其在切割 800mm 厚工件时,切割效率的差异已十分明显。通过此次的对比试验可看出,与圆截面电极丝相比,在相同的实验条件下,绞合电极丝更适合高厚度工件的切割,且随着工件厚度的增加,绞合电极丝在切割效率以及稳定性方面的优势有着越来越明显的趋势。

4.5 本章小结

(1) 设计了新的同步带轮与同步带来使丝筒与运丝丝杠的传动比增大,从而增大排丝距以避免丝径较粗的绞合电极丝出现叠丝现象;提出了一种新的散热方式,通过对发热器件与非发热器件进行分开布置,利用发热器件与非发热器件形成的温差进行自动散热,避免了采用机械散热因风扇问题而出现的故障,同时这种散热方式大大减少了外界空气进入柜体内部的量,也就减少了进入柜体内部粉尘与油污,延长了电子元器件其使用寿命。

(2) 在不同放电能量条件下,对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝、截面积相同的绞合电极丝与圆截面电极丝进行了实验研究,同时对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝在不同丝速下也进行了实验研究,研究发现,与圆截面电极丝相比,绞合电极丝的带液和排屑能力更好,能够使极间得到充分冷却和消电离,极间状态更好,因此在大能量切割或丝速较慢时,绞合丝的切割效率更高,切割得到的工件表面质量更好。

(3) 对相同包络直径的绞合电极丝在绞距不同的情况下进行了加工性能研究,随着绞距的减小,绞合电极丝的切割效率能得到一定的提升,分析认为相同长度的绞合电极丝的螺旋形凹槽的体积与绞距成反比,长度一定时,其螺旋形凹槽的体积越大,则带液和排屑能力越强,加工性能也就越好。

(4) 对不同厚度的工件分别用绞合电极丝与圆截面电极丝做了对比实验,发现在相同电参数下,随着工件厚度的增加,由于绞合电极丝的带液和排屑能力更强,绞合电极丝的切割速度逐渐超过圆截面电极丝。

第五章 总结与展望

5.1 本文完成的工作

电火花线切割在大能量和大厚度切割时采用常规圆形截面的电极丝进行切割时因极间供液不足,无法保障正常放电以及蚀除产物无法及时通过工作液从极间排出从而导致加工不稳定,同时工件表面烧伤严重;工作液主要通过电极丝的运动被带入极间,为了提高电极丝的带液和排屑能力,本文利用两根相同丝径的电极丝通过退扭绞合制作出一种新的电极丝—绞合电极丝。

本文研制的绞合电极丝装置基于单根电极丝绞制双绞合电极丝,成功绞制出绞合电极丝,并将其应用于线切割大电流和大厚度加工中,解决了圆截面电极丝的带液和排屑困难等问题,对于提高大能量和大厚度切割下的切割效率具有重要的应用价值。所做的具体工作如下:

(1) 提出了绞合电极丝装置采取的方案,并将整个装置模块化,针对关键问题提出对应解决措施:采用行星同步轮退扭机构实现单根电极丝的完全退扭,保证单根电极丝基本不产生扭转应力;采用摩擦带形式对张力进行控制,改变摩擦带的伸长量就能够实现张力的改变,以满足不同的张力需求;匀速收丝的实现是通过光电开关测量安装在过渡导轮另一侧的外径尺寸已知的大轮盘转动一圈所用的时间来求出收丝速度,并与设定的收丝速度相比较,根据比较结果单片机对收丝电机的转速进行调整,使收丝速度与设定的收丝速度相等。不同绞距的绞合电极丝的制作是在保证旋绞速度一定的情况下,通过改变收丝速度完成的。排丝器采用丝杠螺母结构,安装有排丝导轮的螺母在行程开关的作用下做往复运动,将绞合电极丝规整紧凑地排到丝盘内。针对不同丝径的电极丝,通过调整单位时间内收丝电机与排丝电机的转速比来该变排丝距,使不同丝径的绞合电极丝都能够紧凑地收到丝盘上。

(2) 对绞合电极丝装置的绞丝模块、收排丝模块、机架的各个零部件进行了具体设计,给出了主轴、齿轮等重要零部件的尺寸、材料及加工与装配工艺。介绍了控制系统中用到的变频器、光电开关等器件,并给出整个了控制系统的工作原理。根据设计制造了绞合电极丝装置,并用该装置成功绞合出了满足要求的绞合电极丝。

(3) 为了适应绞合电极丝加工,设计了新的同步带轮与同步带来使丝筒与运丝丝杠的传动比增大,从而增大排丝距以避免丝径较粗的绞合电极丝出现叠丝现象;提出了一种新的绞合电极丝专用的散热方式,通过对发热器件与非发热器件进行分开布置,利用发热器件与非发热器件形成的温差进行自动散热,避免了采用机械散热因风扇问题而出现的故障,同时这种散热方式大大减少了外界空气进入柜体内部的量,也就减少了进入柜体内部粉尘与油污,延长了电子元器件其使用寿命。

(4) 在不同放电能量条件下,对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝、截面积相同的绞合电极丝与圆截面电极丝进行了实验研究,同时对相同包络直径的绞合电极丝与圆截面电极丝在不同丝速下也进行了实验研究,研究发现,与圆截面电极丝相比,绞合电极丝的带液和排屑能力更好,能够使极间得到充分冷却和消电离,极间状态更好,因此在大能量切割或丝速较慢时,绞合丝的切割效率更高,切割得到的工件表面质量更好;对相同包络直径的绞合电极丝在绞距不同的情况下进行了加工性能研究,随着绞距的减小,绞合电极丝的切割效率能得到一定的提升,分析认为相同长度的绞合电极丝的螺旋形凹槽的体积与绞距成反比,长度一定的绞合电极丝,其螺旋形凹槽的体积越大,则带液和排屑能力越强,加工性能也就越好。

(5) 对不同厚度的工件分别用绞合电极丝与圆截面电极丝做了对比实验,发现在相同电参数下,随着工件厚度的增加,由于绞合电极丝的带液和排屑能力更强,绞合电极丝的切割速度逐渐超过圆截面电极丝。

5.2 后续研究工作展望

本文对绞合电极丝装置的设计与制造,绞合电极丝加工用的机床和控制柜以及绞合电极丝大电流加工的切割实验等进行了研究,但是因为时间紧迫以及个人能力有很多不足,有些问题不能研究的很透彻。之后的研究可以这样展开:

(1) 本文设计的绞合电极丝装置的绞丝效率不高,后期可以通过改进绞丝模块以及选用铸铁床身来代替机架,提高整个装置的刚度,然后再提高绞盘的转速来提高绞丝的效率;

(2) 本文采用的两根钼丝进行绞合而得到的绞合电极丝,后期可以考虑不同材质的电极丝进行绞合,如黄铜丝与黄铜丝进行绞合,或者相同直径的钼丝与黄铜丝进行绞合;

(3) 本文设计制造的绞合电极丝装置的控制部分并不完善,后期可以增加故障检测模块,另外对匀速收丝的检测还可以进一步改进。

参考文献

- [1] 白基成, 刘晋春, 郭永丰,等. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 2015: 67-68.
- [2] 李明辉. 电火花线切割技术的研究现状及发展趋势. 模具技术, 2002, (06): 49-52.
- [3] 倪杨. 放电通道振荡特性分析及其蚀除机理的研究, [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 刘志东, 高长水. 电火花加工工艺及应用. 北京: 国防工业出版社, 2011.4: 49-51.
- [5] 李明辉. 电火花加工理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1989: 26-27.
- [6] 程国柱. 高低双速走丝电火花线切割多次切割及表面完整性研究, [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [7] 宣仲义. 高速快走丝电火花线切割机床数控系统设计与开发, [硕士学位论文]. 浙江: 浙江工业大学, 2009.
- [8] 伍俊, 李明辉. 浅谈高速走丝电火花线切割加工技术的发展趋势. 电加工与模具, 2000, (2): 1~4.
- [9] 周光永. 基于高速走丝电火花线切割中工件表面质量的分析. 电气制造. 2006, (08): 40-42.
- [10] 刘志东. 高速往复走丝电火花线切割的现状与发展. 机械制造与自动化. 2013, 42: 1-6.
- [11] Luo Y F. An energy-distribution strategy in fast-cutting wire EDM. Journal of materials processing technology, 1995, 55(3-4): 380-390.
- [12] 张月芹, 刘志东, 夏丽霞, 王威. 往复走丝电火花线切割极间放电机理研究. 第16届全国特种加工学术会议论文集, 2015: 11.
- [13] Yan M, Lai Y. surface quality improvement of wire-edm using a fine-finish power supply. international journal of machine tools and manufacture. 2007, 47: 1686-1694.
- [14] 朱宁, 叶军, 韩福柱, 等. 电火花线切割加工技术及其发展动态. 电加工与模具, 2010(增刊): 53-63.
- [15] CIMA2007 特种加工机床评述专家组. 第十届中国国际机床展览会特种加工机床展品评述. 电加工与模具, 2007, (3): 1-10.
- [16] NBVPrasad^[1], Ch.V.S.ParameswaraRao^[2], S. Sivanaga MalleswaraRao^[3]. Studies on Wire Selection for Machining With WEDM [J]. International Journal of Computer Science Trends and Technology, 2015.
- [17] Ho K H, Newman S T. State of the art electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003, 43(13): 1287-1300.

- [18] 石川宪一等. 金刚石电沉积绞合线锯开发[J]. 超硬材料与宝石, 2004, 16(54): 34-38.
- [19] 刘志东. 复合工作液提高高速走丝电火花线切割效率研究. 南京航空航天大学学报, 2008, 01:100-103.
- [20] Kazuaki SUGIMURA*, Katsutoshi IWAMOTO and Hiromu IZUMIDA. New High-Speed Precision Steel Core EDM Wire with New Alloy Coating (SUMISPARK Gamma) [J]. SEI TECHNICAL REVIEW, 2015.
- [21] 刘志东, 王振兴, 张艳, 等. 高速走丝电火花线切割高效切割技术研究. 中国机械工程, 2011, 04: 385-389.
- [22] 刘志东. 高速往复走丝电火花线切割的现状与发展. 机械制造与自动化, 2013, 02: 1-6.
- [23] Wen-Pei Sung, Kuen-Suan Chen. Evaluation model for multi-process capabilities of stranded wire, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(5-6): 425-432.
- [24] 余云龙, 吴银荣, 朱建, 等. 铜、铝绞线工艺装备. 2003 年导体与装备技术研讨会论文集, 上海, 2003: 215-229
- [25] 张云康, 卜天民, 等. 电线电缆机械设备. 北京: 机械工业出版社, 1993: 34-35.
- [26] 刘根荣, 等. 框式绞线机综述. 中国电工技术学会电线电缆专业委员会 2008 年学术年会论文集, 安徽合肥, 2008: 90-95.
- [27] 盛广权. 成缆机电气退扭传动机构设计. 光纤与电缆及其应用技术, 2008, (06): 31-33.
- [28] 段国权, 等. 新型的预扭装置的设计与应用. 电线电缆, 2002, (04): 34-37.
- [29] 孙健. 笼式绞线机摇篮架的退扭机构的优化设计. 电线电缆, 2010, (02): 42-44.
- [30] 武学艺. 基于交流电机调速的恒张力控制系统的研究. 武汉: 武汉理工大学, 2010:1-3.
- [31] 康家玉, 米林安, 等. 复卷机退卷张力控制的研究与应用. 中国造纸, 2004, 23(6): 35-38.
- [32] 刘东升, 王守芳. 基于 PLC 与变频器的恒张力卷绕控制系统. 制造业自动化, 2011, 33(8): 131-133.
- [33] 孙大阳, 田丽霞. 压延卷曲张力的几种控制方式明. 橡塑技术与装备, 2008, 34(3):44-46.
- [34] 崔海英. 浅谈放线张力装置的改进设计. 电线电缆, 2003, (6): 45-46.
- [35] 孙大阳, 田丽霞. 压延卷曲张力的几种控制方式明. 橡塑技术与装备, 2008, 34(3): 44-46.
- [36] 马帅, 伞红军, 吴智恒, 等. 高速电主轴技术综述. 机械制造, 2014, 52(5): 16-19.
- [37] Creighton E, Honegger A, Tulsian A, et al. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 386-393.
- [38] 黄海, 厉海祥, 罗齐汉. 点线啮合齿轮接触强度计算的研究. 机械制造, 2010, 48(11): 10-12.

- [39] 孙健. 笼式绞线机摇篮架的退扭机构的优化设计. 电线电缆, 2010 (2): 42-44.
- [40] 朱小平. 笼式绞线机放线架支撑机构的改进设计[J]. 电线电缆, 2001 (6): 42-43.
- [41] 徐江, 刘峰, 李宏伟, 等. 张力控制系统与卷径计算. 重型机械, 2011 (4): 117-119.
- [42] 《机械设计手册》编委会编著. 单行本. 机架、箱体及导轨[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.7: 9-3~9-21.
- [43] Scamberti G S. Twisting machine for stranded wire: U.S. Patent 3,198,220 A[P]. 1965-8-3.
- [44] Apparatus for making stranded wire structures: U.S. Patent 2,724,944[P]. 1955-11-29.
- [45] 韩奎亮. 同步带失效形式的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(5): 84-86.
- [46] 范圣耀. 高速走丝多次线切割电极丝动态特性及形位稳定技术研究, [博士学位论文]. 镇江: 江南大学, 2013.
- [47] 步丰林, 李明辉. 超大厚度电火花线切割工艺研究. 上海交通大学学报, 1996, (09):124-128.
- [48] 刘志东. 复合工作液提高高速走丝电火花线切割效率研究. 南京航空航天大学学报, 2008, (01): 100-103.
- [49] Okada A, Uno Y, Nakazawa M, et al. Evaluations of spark distribution and wire vibration in wire EDM by high-speed observation[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 231-234.
- [50] 魏为. 提高高速往复走丝电火花线切割加工精度及稳定性试验研究, [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [51] 史会, 赵婷. 工作液在线切割加工中的应用. 中国教育技术装备. 2006(9): 49-54.
- [52] 疏达, 赵雪松, 孙际超, 等. 基于正交试验法优化电火花线切割加工参数的研究[J]. 安徽工程科技学院学报 (自然科学版), 2010, 25(3): 38-41.
- [53] F•bio N L, I.R.P. A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. Materials Processing Technology, 2004, 149: 341-346.

致谢

将近三年的研究生生活即将结束，在这三年里，导师赵剑峰教授和刘志东教授为我提供了良好的科研条件，对撰写本论文提供了很多专业性的指导。导师亲切和蔼的处事风格、勤俭节约的生活习惯、正直高尚的人格品质、大度包容的宽广胸怀使我终生受益。导师的淳淳教诲将成为我取之不尽、用之不竭的宝贵精神财富。导师不仅在学术科研方面给予了精心指导，而且在生活中，给了我无微不至的关怀和帮助。论文的字字句句都倾注了导师的心血，在论文即将脱稿之际，特向赵剑峰教授和刘志东教授致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

感谢杭州华方数控机床有限公司张旭东总经理，桂峰工程师，安继忠工程师，技术人员刘继源师傅，在我一年的工程实习中，他们在生活上对我关怀备至，在平常的工作上细心指导，这些不仅让我学到了很多技术上的知识，为后续论文的撰写提供了帮助，而且让我学会了很多为人处事的道理。

在研究的过程中，感谢田宗军老师，沈理达老师，邱明波老师给予我的指导和关怀，另外还得到了实验室硕士研究生李成让、潘红伟、邓聪、季益超以及教研室其他各位师兄的帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

特别感谢一直支持我、激励我的父母和家人，他们在精神和物资上给我不断地鼓励和支持，是我不断前进的动力。

最后，谨向审阅论文和参加答辩的各位老师致以由衷的谢意！

方来久

机电学院

二零一七年十二月

在学期间的研究成果及发表的学术论文

- [1] Chengrang Li, Zhidong Liu, **Laijiu Fang**, Hongwei Pan, Mingbo Qiu. Super-high-thickness high-speed wire electrical discharge machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017: 1-14.(SCI 原刊)