

策划编辑 高小红 彭 敏  
责任编辑 龙 敏  
封面设计  H.C. CULTURE  
上架编码 Jyjk-000234

# 基于新工科的 项目式工程训练

基于新工科的项目式工程训练

主编◎漆为民 朱雪明 曹 刚 王凤华

 电子科技大学出版社



ISBN 978-7-5770-2397-7



定价: 56.80元

新时代高等教育创新型教材  
“互联网+”教育改革立体化教材



# 基于新工科的 项目式工程训练

主编◎漆为民 朱雪明 曹 刚 王凤华

 电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于新工科的项目式工程训练 / 漆为民等主编.  
成都: 成都电子科大出版社, 2026. 6. -- ISBN 978-7-5770-2397-7

I. TH16

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026YK1764 号

## 内容简介

本书以“项目制的工程训练”课程为核心, 严格遵循政策导向与教学规律, 构建了兼具基础性、实践性与创新性的内容体系。本书以各类训练项目为主线, 系统阐明各个工种的基本原理与操作方法, 明确训练要求与操作要领, 突出项目导向的实践特色。内容覆盖传统机械基础、先进制造技术、电子工艺及综合创新等领域, 涵盖技能训练、安全规范及劳动教育等方面, 既包含钳工、车削等传统实训项目, 也融入了木工、掐丝珐琅、陶艺等非遗实训项目, 更增加了工业机器人、AI 机器狗、智能制造生产线等前沿内容, 兼顾机电结合, 难易搭配, 使学生具备发现复杂工程问题、系统分析问题、协同解决问题的能力, 力争提升其工程实践能力、智能技术应用能力、团队协作能力与工程伦理素养, 为后续专业课程学习、创新创业实践及未来职业发展奠定坚实基础。

本书可作为普通高等工科院校机械、材料、自动化、电子信息、计算机等专业的工程训练教材, 同时也可作为企业工程技术人员培训及相关从业人员的参考用书。

## 基于新工科的项目式工程训练

JIYU XINGONGKE DE XIANGMUSHI GONGCHENG XUNLIAN

漆为民 朱雪明 曹 刚 王凤华 主编

策划编辑 高小红 彭 敏

责任编辑 龙 敏

责任校对 陈姝芳

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 崇阳文昌印务股份有限公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 21

字 数 538 千字

版 次 2026 年 6 月第 1 版

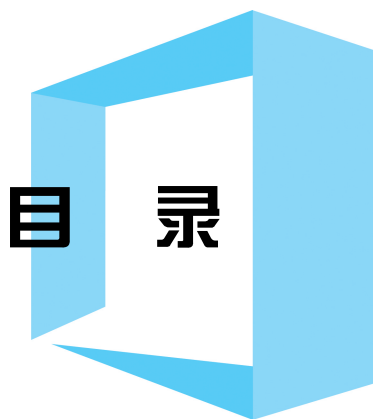
印 次 2026 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-2397-7

定 价 56.80 元

版权所有, 侵权必究





|                         |    |
|-------------------------|----|
| 绪论 .....                | 1  |
| 第 1 章 钳工 .....          | 5  |
| 1.1 钳工概述 .....          | 5  |
| 1.2 钳工常用工具与设备 .....     | 6  |
| 1.3 钳工核心操作工艺与实践规范 ..... | 8  |
| 1.4 钳工操作安全规范与职业素养 ..... | 13 |
| 1.5 钳工实训项目——鸭嘴锤制作 ..... | 13 |
| 第 2 章 车削 .....          | 17 |
| 2.1 车削概述 .....          | 17 |
| 2.2 车削设备及车削刀具 .....     | 18 |
| 2.3 车削安全操作规范 .....      | 22 |
| 2.4 车削实训项目——印章的制作 ..... | 23 |
| 第 3 章 普铣 .....          | 28 |
| 3.1 普铣概述 .....          | 28 |
| 3.2 普铣工具 .....          | 30 |
| 3.3 普铣的形式 .....         | 31 |
| 3.4 普铣安全操作规范 .....      | 35 |
| 3.5 铣削实训项目——角度面铣削 ..... | 36 |
| 第 4 章 焊接 .....          | 39 |
| 4.1 焊接概述 .....          | 39 |
| 4.2 主流焊接技术 .....        | 44 |
| 4.3 焊接安全操作规范 .....      | 48 |
| 4.4 焊接实训项目 .....        | 48 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>第 5 章 铸造技术</b>         | <b>51</b>  |
| 5.1 铸造概述                  | 51         |
| 5.2 砂型铸造                  | 52         |
| 5.3 特种铸造（熔模铸造）            | 56         |
| 5.4 铸造安全操作规范              | 57         |
| 5.5 铸造实训项目                | 58         |
| <b>第 6 章 数控车削技术</b>       | <b>67</b>  |
| 6.1 数控车削技术与数控车床概述         | 67         |
| 6.2 数控车床编程基础              | 71         |
| 6.3 数控车削加工实操              | 84         |
| 6.4 数控车削实训项目——圆弧轴类零件仿真加工  | 89         |
| <b>第 7 章 数控铣削技术</b>       | <b>91</b>  |
| 7.1 数控铣削技术与数控铣床概述         | 91         |
| 7.2 数控铣床编程基础              | 96         |
| 7.3 数控铣削加工实操              | 108        |
| 7.4 数控铣削实训项目——零件外轮廓加工     | 111        |
| <b>第 8 章 电火花线切割技术</b>     | <b>114</b> |
| 8.1 电火花线切割技术与线切割机床概述      | 114        |
| 8.2 线切割加工工艺流程和主要工艺指标及影响因素 | 119        |
| 8.3 提高加工精度的关键技术           | 121        |
| 8.4 常见加工缺陷、原因分析与对策        | 123        |
| 8.5 工件表面质量                | 124        |
| 8.6 电火花线切割实训项目            | 124        |
| <b>第 9 章 激光加工技术</b>       | <b>130</b> |
| 9.1 激光加工概述                | 130        |
| 9.2 主流激光设备的介绍与使用          | 134        |
| 9.3 知识拓展                  | 138        |
| 9.4 激光加工实训项目——非金属激光加工     | 139        |
| <b>第 10 章 电子工艺实训</b>      | <b>143</b> |
| 10.1 电子工艺概述               | 143        |
| 10.2 手工焊接技术               | 148        |
| 10.3 表面贴装技术               | 152        |

|               |                                  |            |
|---------------|----------------------------------|------------|
| 10.4          | 电子工艺实训项目——蓝牙小音响的制作 .....         | 156        |
| <b>第 11 章</b> | <b>PCB 设计实训——从入门到制作 .....</b>    | <b>159</b> |
| 11.1          | PCB 设计概述 .....                   | 159        |
| 11.2          | 常用 PCB 设计软件 .....                | 166        |
| 11.3          | PCB 实训项目——PCB 直尺设计与制作 .....      | 167        |
| <b>第 12 章</b> | <b>可编程控制器实训 .....</b>            | <b>177</b> |
| 12.1          | 可编程控制器概述 .....                   | 177        |
| 12.2          | S7-200 PLC 程序设计基础 .....          | 179        |
| 12.3          | PLC 实训项目 .....                   | 187        |
| <b>第 13 章</b> | <b>木工实践与工程创新 .....</b>           | <b>193</b> |
| 13.1          | 常用工具、设备与材料 .....                 | 193        |
| 13.2          | 榫卯工艺：传统智慧与现代应用 .....             | 198        |
| 13.3          | 安全规范与操作规程 .....                  | 199        |
| 13.4          | 木工实训项目——四腿八叉小板凳制作 .....          | 199        |
| <b>第 14 章</b> | <b>3D 打印 .....</b>               | <b>207</b> |
| 14.1          | 3D 打印概述 .....                    | 207        |
| 14.2          | 3D 打印主流成型方法 .....                | 209        |
| 14.3          | 知识拓展：3D 打印模型获取方式概述 .....         | 212        |
| 14.4          | 3D 打印实训项目——熔融沉积成型（FDM） .....     | 214        |
| <b>第 15 章</b> | <b>Arduino 智能车与 AI 机器狗 .....</b> | <b>223</b> |
| 15.1          | Arduino 基础 .....                 | 223        |
| 15.2          | 基础项目 .....                       | 225        |
| 15.3          | 传感器应用——使用 HC-SR04 测距 .....       | 228        |
| 15.4          | 电机控制 .....                       | 230        |
| 15.5          | Arduino 智能车实训项目——智能车控制 .....     | 236        |
| 15.6          | AI 智能视觉机器狗 .....                 | 244        |
| <b>第 16 章</b> | <b>掐丝珐琅 .....</b>                | <b>249</b> |
| 16.1          | 掐丝珐琅概述 .....                     | 249        |
| 16.2          | 掐丝珐琅常用工具与设备 .....                | 251        |
| 16.3          | 掐丝珐琅常用技法 .....                   | 253        |
| 16.4          | 掐丝珐琅实训项目 .....                   | 255        |

|               |                    |            |
|---------------|--------------------|------------|
| <b>第 17 章</b> | <b>陶艺制作</b>        | <b>259</b> |
| 17.1          | 陶艺概述               | 259        |
| 17.2          | 陶艺制作工具、设备和原料       | 260        |
| 17.3          | 陶艺成型工艺             | 263        |
| 17.4          | 陶艺装饰技法与烧制          | 267        |
| 17.5          | 陶艺实训项目             | 268        |
| <b>第 18 章</b> | <b>工业机器人</b>       | <b>271</b> |
| 18.1          | 工业机器人的定义及分类        | 271        |
| 18.2          | 工业机器人的应用           | 274        |
| 18.3          | 工业机器人的机械结构系统       | 275        |
| 18.4          | 工业机器人的驱动系统         | 278        |
| 18.5          | 工业机器人的基本操作规范       | 279        |
| 18.6          | 工业机器人示教器           | 280        |
| 18.7          | 工业机器人实训项目          | 285        |
| <b>第 19 章</b> | <b>智能制造生产线</b>     | <b>288</b> |
| 19.1          | 智能制造系统概述           | 288        |
| 19.2          | 智能产线构建及调试          | 290        |
| 19.3          | 智能生产线整体联调及运行调试     | 294        |
| 19.4          | 安全操作规范             | 298        |
| 19.5          | 智能制造实训项目——指尖陀螺     | 298        |
| <b>第 20 章</b> | <b>精密测量</b>        | <b>304</b> |
| 20.1          | 精密测量概述             | 304        |
| 20.2          | 三坐标测量              | 308        |
| 20.3          | 三维扫描               | 312        |
| 20.4          | 影像测量               | 314        |
| 20.5          | 安全操作要求             | 317        |
| 20.6          | 精密测量实训项目           | 317        |
| <b>第 21 章</b> | <b>AI 大模型简介及应用</b> | <b>320</b> |
| 21.1          | 大模型时代与工程训练的变革      | 320        |
| 21.2          | 大模型在数控加工中的应用案例     | 322        |
| 21.3          | 大模型在 3D 打印中的应用案例   | 323        |
| 21.4          | 大模型在工业机器人中的应用案例    | 324        |
|               | <b>参考文献</b>        | <b>326</b> |

# 电火花线切割技术

电火花线切割加工（wire cut electrical discharge machining, wire-cut EDM 或 WEDM）属于特种加工范畴，它是在电火花加工（electrical discharge machining, EDM）基础上发展起来的一种加工方法。其通过数控系统控制电极丝与工件相对运动，按预定轨迹逐层切割，无须强力切削，适合加工复杂形状、硬质精密金属零件，加工精度高、变形小。

## 8.1 电火花线切割技术与线切割机床概述

### 8.1.1 电火花线切割的基本原理

电火花线切割加工的基本原理是利用连续移动的细金属丝（称为电极丝）作为工具电极，对工件进行脉冲火花放电，产生瞬时高温使工件材料局部熔化、汽化而被蚀除，从而实现零件的切割加工，如图 8-1 所示。其具体过程如下。

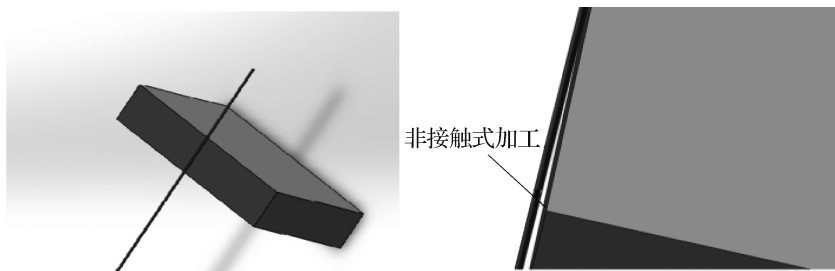


图 8-1 线切割加工原理示意图

(1) 介质击穿与通道形成：电极丝与工件之间充满具有一定绝缘性能的工作液（通常是去离子水或乳化液）。当两者在微观上接近一定距离（几微米到几十微米）时，在脉冲电源产生的电场作用下，绝缘的工作液被瞬时击穿，形成放电通道。

(2) 能量转换与蚀除：通道中瞬间产生极高的电流密度（ $10^4 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ ），电子和离子在电场作用下高速轰击工件和电极丝表面，产生大量热能，使放电点局部温度瞬间可达 $10\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上，从而使得工件表面材料迅速熔化，甚至汽化。

(3) 抛出蚀除物：单个脉冲放电结束后，经过短暂的间隔时间，放电通道崩溃。由于工作液的冷却作用，熔化了的材料在表面张力和内部爆炸力的作用下被抛出，在工作表面留下一个微小的凹坑。

(4) 持续进给与切割：伺服系统控制工件与电极丝之间始终保持一个微小的放电间隙（通常为 $0.01\text{ mm}$ 左右），不断进给。成千上万次、乃至上百万次的高频脉冲放电连续不断进行，大量的放电凹坑重叠，最终将工件材料按预定的轨迹切割开来。电极丝连续移动，以补偿自身的损耗并带入新的冷却液，确保加工持续稳定。

### 8.1.2 电火花线切割加工的特点

与传统的机械切割（如车、铣、磨等）及电火花成形加工相比，线切割具有以下显著特点。

#### 1. 优点

(1) 以柔克刚：由于采用丝状电极，无须制造形状复杂的成形电极，可以加工一般切削方法难以加工或无法加工的高硬度、高强度、高韧性、高脆性等导电材料，如淬火钢、硬质合金、人造聚晶金刚石、钛合金等（如图8-2所示）。

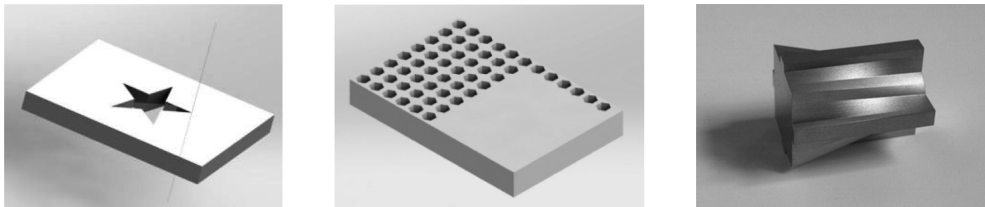


图8-2 线切割加工样件

(2) 非接触加工：电极丝与工件之间不直接接触，存在放电间隙，宏观作用力极小，有利于加工低刚度工件、微细结构，且工件装夹简单。

(3) 加工复杂形状：通过数控系统控制工作台（工件）在水平面（ $X$ 、 $Y$ 方向）的运动，可以方便地加工出各种复杂的二维直纹曲面形状，如冲模、凸轮、异形孔、微细孔槽等。

(4) 材料利用率高：电极丝直径很细（通常为 $0.03 \sim 0.3\text{ mm}$ ），切缝很窄，对贵重金属材料的切割特别有效，材料浪费极少。

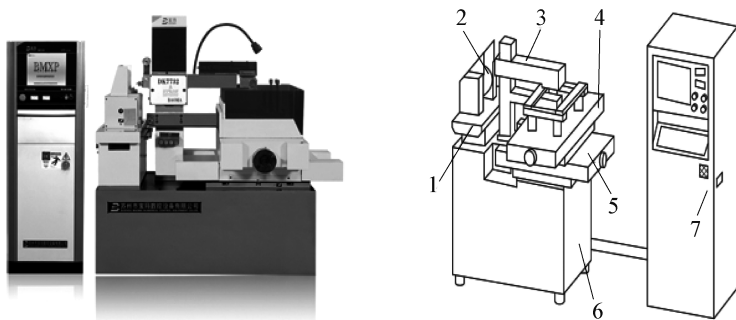
(5) 数字化控制：加工过程由数控程序控制，自动化程度高，操作方便，易于实现精密加工。加工参数的调整主要依靠电参数设置，而非机械调整。

## 2. 局限性

- (1) 只能加工导电材料。
- (2) 加工速度一般较机械加工慢。
- (3) 存在电极丝损耗（低速走丝可忽略），影响加工精度。
- (4) 加工表面由无数微坑组成，无机械加工的刀痕，但可能存在微裂纹、变质层等电火花加工固有的表面缺陷。

### 8.1.3 电火花线切割机床的组成

一台典型的数控电火花线切割机床主要由机床本体、脉冲电源、工作液循环系统和数控系统四大部分组成（如图 8-3 所示）。



1—走丝溜板；2—储丝筒；3—丝架；4—上工作台；5—下工作台；6—床身；7—脉冲电源及微机控制柜。

图 8-3 线切割机床的主要构成

#### 1. 机床本体

机床本体是加工的执行机构，主要包括以下几个部分。

(1) 床身与工作台：床身是支撑所有部件的基础，要求具有很高的刚性和稳定性。工作台通常由十字滑台组成，在  $X$ 、 $Y$  方向上进行伺服进给运动，由精密滚珠丝杠副和伺服电机驱动。

(2) 走丝系统：这是线切割机床的核心特征系统，其又分为高速走丝系统和低速走丝系统。

①高速走丝系统：电极丝整齐地排列在储丝筒上，由储丝筒电机带动，做高速往复运动（通常速度为  $8 \sim 12 \text{ m/s}$ ）。该系统包括储丝筒、导轮、张紧机构、换向装置等。

②低速走丝系统：电极丝由供丝卷筒放出，经过一系列导向轮和张力控制装置，以较低的速度（通常为  $0.2 \sim 15 \text{ m/min}$ ）单向运动，最后被收丝轮收卷。用过一次的电极丝不再重复使用。

(3) 锥度切割装置：为了实现上下异形体或锥度零件的加工，高档机床配有锥度切割装置。通常通过  $U$ 、 $V$  轴（两个附加的小行程直线轴）驱动上线臂（导丝嘴）相对于下导丝嘴移动来实现。



(4) 夹具与附件：用于装夹工件和找正。

2. 脉冲电源

脉冲电源是能量供给系统，其作用是把工频交流电转换成一定频率的单向脉冲电流，提供给电极丝和工件之间的放电间隙。脉冲电源的性能直接关系到加工速度、表面质量、电极丝损耗和加工精度。其关键参数包括脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、空载电压等。现代脉冲电源多为晶体管式、自适应控制式，能根据加工状态实时优化参数。

3. 工作液循环系统

工作液循环系统包括工作液箱、泵、过滤器、管道、流量和压力控制阀等。其具有以下重要作用。

- (1) 绝缘介质：保证击穿形成放电通道。
- (2) 冷却：冷却电极丝和工件，防止热变形。
- (3) 排屑：将电蚀产物从放电间隙中冲走，维持稳定放电。
- (4) 消电离：在脉冲间隔期内帮助放电通道消电离，恢复介质的绝缘强度。

高速走丝机床常用乳化液作为工作液；而低速走丝机床必须使用去离子水，并通过离子交换树脂使其保持很高的电阻率。

4. 数控系统

数控系统是机床的“大脑”，现代线切割机床均采用计算机数控系统。其主要功能如下。

- (1) 轨迹控制：根据用户输入的加工程序（如 ISO 代码或 3B 代码），插补计算出 X、Y、U、V 轴的协调运动轨迹，控制伺服驱动器完成加工。
- (2) 加工控制：控制脉冲电源的启停和参数切换，控制工作液泵、走丝系统等辅助功能的启停。
- (3) 自适应控制：实时监测放电状态，调整进给速度、脉冲参数等，防止断丝、短路、电弧放电，优化加工效率。
- (4) 人机交互：提供图形编程、轨迹模拟、加工状态显示、故障诊断等功能。

8.1.4 高速走丝与低速走丝线切割

高速走丝与低速走丝线切割是电火花线切割两种最主要的技术分支，它们在技术原理、设备、性能和应用上存在显著差异（见表 8-1）。

表 8-1 两种数控电火花线切割对比

| 特征对比 | 高速走丝线切割                          | 低速走丝线切割                                       |
|------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| 走丝速度 | 高速（8~12 m/s），往复运动                | 低速（0.2~15 m/min），单向运动                         |
| 电极丝  | 钼丝（ $\phi$ 0.08~0.2 mm），重复使用，损耗大 | 黄铜、镀锌铜、纯铜等（ $\phi$ 0.03~0.3 mm），一次性使用，损耗极小可忽略 |
| 工作液  | 乳化液                              | 去离子水（高电阻率）                                    |

续表

| 特征对比  | 高速走丝线切割                                          | 低速走丝线切割                                                                       |
|-------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 加工精度  | 较低 ( $\pm 0.015 \sim 0.02 \text{ mm}$ ), 表面有换向条纹 | 高 ( $\pm 0.002 \sim 0.005 \text{ mm}$ ), 表面均匀细腻                               |
| 表面粗糙度 | 较差 ( $Ra \ 1.0 \sim 3.2 \ \mu\text{m}$ )         | 优良 ( $Ra \ 0.1 \sim 0.8 \ \mu\text{m}$ , 多次切割后可能低于 $Ra \ 0.1 \ \mu\text{m}$ ) |
| 切割效率  | 较高 (初加工)                                         | 高 (尤其在精加工和多次切割时)                                                              |
| 设备成本  | 低                                                | 高                                                                             |
| 应用领域  | 中低档模具、零件加工, 下料, 新产品试制                            | 精密模具 (如级进模、精冲模)、航空航天、医疗、微细零件等高精度领域                                            |

### 1. 高速走丝线切割

高速走丝线切割是我国独创并具有特色的技术。其优点是结构简单、成本低、加工效率较高。但因其电极丝往复运动, 振动大, 导向机构精度有限, 且电极丝损耗后直接影响加工精度, 故难以实现高精度和镜面加工。近年来, 通过多次切割技术的应用 (俗称“中走丝”), 其加工质量已有显著提升。

### 2. 低速走丝线切割

低速走丝线切割代表了线切割技术的高端发展方向。电极丝单向平稳运动, 张力控制精确, 导向机构采用高精度宝石导嘴, 加之智能化的电源技术和多遍切割工艺, 使其在加工精度、表面质量和自动化程度方面达到了极高水准。

## 8.1.5 电火花线切割的应用领域

电火花线切割技术因其独特优势, 已被广泛应用于诸多工业部门。

(1) 模具制造: 是最大的应用领域。用于加工冲裁模 (凸模、凹模、固定板、卸料板等)、级进模、精冲模、挤压模、塑料模、粉末冶金模的模芯和镶件等。

(2) 新产品试制: 直接利用板料或棒料切割出零件, 而无须制造模具, 可缩短研发周期, 降低成本和风险。

(3) 难加工材料: 加工各种超硬、高脆、高韧的导电材料。

(4) 特殊复杂零件: 加工带异形孔、窄槽、微细复杂形状的零件, 如喷丝板、激光防伪标志、样板、成形刀具等。

(5) 贵重金属加工: 切割贵重金属, 节省材料。

## 8.1.6 电火花线切割加工的不足和发展方向

尽管电火花线切割加工已得到广泛的应用, 但其仍存在一些不足之处。现阶段, 电火花线切割加工在以下几个方面仍存在不足。

(1) 切割速度。电火花线切割的加工速度较慢, 影响生产效率。

(2) 电极丝损耗和二次放电。电火花加工脉冲放电时, 会有电子或离子产生并轰击金

属表面,工具电极也受到轰击而造成电极损耗。另外,加工过程中如果脉宽过小,会出现二次放电而造成拉弧,烧伤加工表面的同时也会损伤电极丝。

(3) 工作台精度的影响。加工过程中工具和工件的运动都是靠工作台的驱动来实现的。工作台对加工精度的影响主要体现在机械传动精度上,包括装配精度、配合间隙、磨损等在内的种种误差集中体现在机床的传动中,如不达标则会直接导致加工过程中加工表面粗糙度达不到要求,电极丝抖动产生表面加工条纹等。

(4) 抬刀的影响。加工时,抬刀的目的是使工作液冲洗加工间隙中的电蚀废物和更新工作液,有利于提高加工精度。抬刀不及时或过及时不仅会影响到加工速度,也会使工件产生拉弧烧伤等现象。

为解决上述不足,线切割加工技术正朝着某些方向不断发展,包括:高精度电火花线切割机床的使用;高速走丝系统的完善,同时重视低速走丝电火花线切割机的开发和发展;重视微细电火花线切割加工的发展;开发新型走丝系统,如将传统的往复走丝系统改进为旋转走丝系统或含粗、细丝的双丝系统;多轴联动电火花数控加工系统开发(目前我国仍局限在四轴以上联动的电火花加工系统的开发);改善机床抬刀运动,提高抬刀速度;利用现代技术,实现加工的数控化、智能化、绿色化。

## 8.2 线切割加工工艺流程和主要工艺指标及影响因素

### 8.2.1 线切割加工工艺流程

一个完整的线切割加工流程包括以下几个关键步骤。

#### 1. 图样分析与工艺准备

分析零件图纸,明确加工要求(材料、厚度、精度、表面质量等),确定装夹方案、穿丝孔位置、起割点、切割路径。

#### 2. 工件准备与装夹

工件材料下料、磨平上下表面、钻穿丝孔。使用压板、磁力吸盘或专用夹具将工件可靠地装夹在工作台上,并用百分表或寻边器进行找正,确保工件的基准面与机床坐标轴平行。

#### 3. 电极丝选择与穿丝

根据加工要求选择电极丝材料、直径。进行穿丝、上丝操作,并调整电极丝的垂直度(使用垂直度校正器或火花法找正)和张力。

#### 4. 编程

(1) 手工编程:对于简单图形,可直接计算交点坐标,使用G代码(如G00、G01、G02、G03)或早期的3B/4B格式代码进行编程。

(2) 自动编程:现代加工普遍采用计算机辅助设计/计算机辅助制造(computer-aided design/computer-aided manufacturing,CAD/CAM)集成式自动编程。首先利用CAD软件绘

制零件图形或直接导入二维/三维模型；其次在 CAM 软件中设置加工参数（偏置量、切割次数、电参数等），由软件自动生成刀具路径和 NC 代码；最后通过通信接口（如 RS232、USB、网络）将程序传输至机床数控系统。

### 5. 加工参数设置

在机床数控界面上设置脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、伺服参考电压、走丝速度、工作液流量等参数。通常可使用机床内置的工艺数据库，根据材料、厚度、目标粗糙度自动推荐参数。

### 6. 加工执行与监控

启动加工，机床自动执行程序。操作人员需密切监控放电状态、工作液供应是否正常，防止出现短路、断丝等异常情况。

### 7. 检验

加工完成后，取下工件，清洗，使用卡尺、投影仪、三坐标测量机（coordinate measuring machine, CMM）等工具检测零件的尺寸、形状精度和表面粗糙度是否合格。

## 8.2.2 线切割加工的主要工艺指标及影响因素

衡量线切割加工性能的主要工艺指标有切割速度、表面粗糙度、加工精度和电极丝损耗等。

(1) 切割速度 ( $v_w$ )：单位时间内切割工件的截面积 ( $\text{mm}^2/\text{min}$ )。它是衡量加工效率的核心指标。

(2) 表面粗糙度 ( $Ra$ )：加工表面微观不平度的算术平均偏差值 ( $\mu\text{m}$ )。它用于衡量加工表面质量。

(3) 加工精度：包括尺寸精度、形状精度（如直线度、圆度等）和位置精度（如孔距）。它是衡量加工结果与图纸要求符合程度的综合指标。

(4) 电极丝损耗：在高速走丝中，电极丝在切割一定面积后的直径减少量，通常用损耗量占原直径的百分比表示。它直接影响加工精度。

这些指标受到一系列复杂因素的相互影响和制约，其关系见表 8-2 所列（“↑”表示增大或增强，“↓”表示减小或减弱）。

表 8-2 影响线切割工艺指标的因素

| 影响因素                | 切割速度 $v_w$          | 表面粗糙度 $Ra$        | 电极丝损耗        | 备注（主要影响机制）                 |
|---------------------|---------------------|-------------------|--------------|----------------------------|
| 脉冲宽度 $t_i \uparrow$ | $\uparrow \uparrow$ | $\uparrow$ （变差）   | $\uparrow$   | 单脉冲能量增大，蚀除量增加，但放电凹坑变大加深    |
| 峰值电流 $I_p \uparrow$ | $\uparrow \uparrow$ | $\uparrow$ （变差）   | $\uparrow$   | 同上，影响更为显著                  |
| 脉冲间隔 $t_o \uparrow$ | $\downarrow$        | $\downarrow$ （改善） | $\downarrow$ | 利于排屑和消电离，稳定加工，但单位时间内放电次数减少 |

续表

| 影响因素    | 切割速度 $v_w$ | 表面粗糙度 $Ra$ | 电极丝损耗 | 备注（主要影响机制）                    |
|---------|------------|------------|-------|-------------------------------|
| 空载电压 ↑  | ↑          | ↑（略差）      | ↑     | 击穿间隙增大，利于排屑，但单脉冲能量略有增加        |
| 工件材料    | —          | —          | —     | 材料导热性越好、熔点越高，越难加工             |
| 工件厚度 ↑  | ↓          | ↑（略差）      | —     | 排屑条件变差，加工稳定性下降                |
| 电极丝直径 ↑ | ↑          | —          | —     | 可承受更大电流，但切缝变宽                 |
| 电极丝张力 ↑ | —          | ↓（改善）      | —     | 减少电极丝振动，提高轨迹精度，改善表面质量         |
| 走丝速度 ↑  | ↑          | ↓（改善）      | ↓（HS） | 利于冷却和排屑，稳定放电过程                |
| 工作液状况   | 极其重要       | 极其重要       | 极其重要  | 介电强度、清洁度、流量和压力直接影响排屑、冷却和消电离效果 |

根据表 8-2 总结的工艺规律如下。

- （1）追求效率：应选用较大的脉冲宽度和峰值电流，但这会牺牲表面质量和增大电极丝损耗。
- （2）追求质量：应选用较小的脉冲宽度和峰值电流，并增大脉冲间隔，但这会降低加工速度。
- （3）“鱼与熊掌不可兼得”：高速与高质量之间存在矛盾。多次切割技术是解决这一矛盾的根本途径。

8.3

提高加工精度的关键技术

加工精度是一个系统工程，涉及机床、工艺、环境、操作等多个方面。

8.3.1 机械精度与热稳定性控制

- 高精度基础件：床身、工作台、丝杠、导轨等必须具备极高的几何精度、刚性和耐磨性；采用花岗岩床身、精密滚珠丝杠、直线导轨等措施。
- 恒温环境：精密加工应在恒温车间 [ (20±1)℃ ] 进行，避免因热胀冷缩引起的精度变化；机床采用全封闭罩壳，并对工作液进行恒温冷却。
- 防止热变形：加工过程中产生的热量会使工件和机床局部变形。可采用小能量规准、充分冷却、对称切割路径、预加工释放应力等方法减少热影响。

### 8.3.2 精密的走丝系统

导向机构：采用高精度、高耐磨的宝石导嘴，并保证其与上下导丝嘴的同心度。

恒张力控制（低速走丝电火花线切割加工）：通过伺服电机或重锤机构对电极丝施加恒定且可调的张力，减少因放电爆炸力引起的电极丝偏移（“拱弯效应”）。

平稳走丝：确保电极丝无抖动、无摩擦地平稳运行。

### 8.3.3 智能化的放电控制技术

伺服控制系统：实时检测间隙平均电压，与预设的伺服参考电压进行比较，快速调整进给速度，使放电间隙保持在最佳状态，防止开路（效率低）和短路（稳定性差）。

自适应电源：实时分析每个脉冲的放电状态（空载、正常放电、电弧、短路），并动态调整下一个脉冲的参数（如增大间隔以消弧），始终将放电维持在最高效、最稳定的状态。

抗电解电源（低速走丝电火花线切割加工用水基工作液时）：采用正极性加工（工件接正极）时，水在放电作用下会电解产生氧气，对工件表面产生氧化腐蚀（“电解变质层”）。先进的电源采用无电解脉冲技术（如隔半周期加入负极性脉冲），从根本上消除电解效应，提高表面完整性和尺寸精度。

### 8.3.4 多次切割工艺

多次切割工艺是低速走丝机床实现高精度、低粗糙度加工的核心技术。它将加工分为主切（粗割），修切（精割）1次、2次……甚至多达7次来完成。

（1）主切：采用大能量规准进行高速切割，但留有一定量的加工余量（通常为0.05~0.2 mm）。此时效率高，但表面粗糙、精度差。

（2）修切：采用逐次减小的脉冲能量和逐次偏移的路径（通过数控系统自动计算偏置量），对主切留下的余量进行精细修光。

①第一次修切：去除大部分余量，修正主切造成的斜度和尺寸误差。

②后续修切：主要任务是改善表面质量，去除前次加工留下的变质层和微裂纹，最终达到极高的尺寸精度和镜面效果。

多次切割工艺完美地解决了效率与质量的矛盾。

### 8.3.5 工艺技巧与补偿技术

穿丝孔与起割点：合理安排穿丝孔位置和起割点，避免在加工中因材料内应力释放变形而卡断电极丝或影响精度。起割点通常选择预钻的穿丝孔。

切割路径优化：对于凹模类封闭图形，应在材料内部预钻穿丝孔。对于凸模类零件，应从材料外部起割，并设置暂停点和附加连接部（微连接），加工完成后人工敲断，防止加工结束时零件脱落砸伤工件或电极丝。

电极丝偏移补偿：编程时是按电极丝中心轨迹编程的。在实际加工中，放电间隙和丝半径的存在使得切出的轮廓会偏大或偏小。数控系统具有自动补偿功能（G41/G42），只

需按工件轮廓编程，系统就会自动向指定方向偏移一个量（偏移量=电极丝半径+放电间隙）。精确计算和设置偏移量是保证尺寸精度的关键。

锥度加工补偿：进行锥度切割时，上下平面的轮廓偏移量是不同的，需要进行  $U$ 、 $V$  轴联动补偿，该补偿量由数控系统自动完成计算。

8.4

常见加工缺陷、原因分析与对策

电火花线切割加工中常见的加工缺陷、原因分析与对策见表 8-3 所列。

表 8-3 常见的加工缺陷、原因分析与对策

| 缺陷现象           | 可能原因分析                                                                                              | 解决对策                                                                                                        |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 加工速度慢          | (1) 电参数选择不当（脉宽太小、间隔太大）<br>(2) 工作液浓度不合适或太脏<br>(3) 电极丝张力太小，抖动大<br>(4) 工件太厚，排屑不畅<br>(5) 进给速度调整不当（伺服太紧） | (1) 增大脉宽，减小间隔（在保证稳定的前提下）<br>(2) 调整浓度，更换工作液<br>(3) 增大张力<br>(4) 增大冲洗压力，调整参数<br>(5) 调整伺服参考电压                   |
| 表面粗糙度差         | (1) 电参数过大（脉宽、电流大）<br>(2) 电极丝抖动或张力不足<br>(3) 工作液供应不足或脏污<br>(4) 进给不稳定，有短路、开路现象                         | (1) 减小脉宽和电流<br>(2) 检查导轮、轴承，调整张力<br>(3) 检查液路，保证流量，更换工作液<br>(4) 调整伺服参考电压值，检查工件装夹是否变形                          |
| 断丝<br>(高速走丝常见) | (1) 电参数过大<br>(2) 工作液供应不足（未切入工件、堵塞）<br>(3) 电极丝老化、抖动<br>(4) 导轮磨损、跳动<br>(5) 工件变形夹断电极丝<br>(6) 编程路径错误    | (1) 减小参数<br>(2) 检查液嘴是否贴面，疏通管道<br>(3) 更换新丝<br>(4) 更换导轮、轴承<br>(5) 优化工艺，预加工释放应力<br>(6) 检查程序，特别是锥度加工时的清角处理      |
| 精度超差           | (1) 机床机械精度失准<br>(2) 电极丝偏移量设置错误<br>(3) 工件装夹变形或找正不准<br>(4) 加工热变形或内应力释放<br>(5) 环境温度变化大                 | (1) 定期进行机床精度检验与补偿<br>(2) 精确测量丝径和放电间隙，校准补偿值<br>(3) 改进装夹方式，仔细找正<br>(4) 进行多次切割，粗切后释放应力再精修；优化切割路径<br>(5) 保证恒温环境 |
| 工件接缝处有痕迹       | 多次切割时，修切路径的起点和终点与主切路径重合，由于加工条件变化，在该处产生接缝痕迹                                                          | 采用随机移位加工功能，使每次修切的起点在圆周上随机变化，避免痕迹重叠                                                                          |



## 8.5 工件表面质量

- (1) 表面有线痕，可能是电极丝抖动或材料变形以及偏移量设置不合理造成的。
- (2) 工件表面两端黑斑严重，是工作液的问题。
- (3) 切割后的工件，及时用草酸清洗，然后用清水冲去草酸残液，用干净的白布擦干水渍，最后涂上防锈油。

## 8.6 电火花线切割实训项目

### 8.6.1 电火花线切割加工的具体操作步骤

#### 1. 材料选择

金属材料均可加工；可推荐常用 Cr12 材料，规格：100 mm×100 mm×5 mm。

#### 2. 上丝

右手戴手套轻扶丝盘。绕丝前，运丝筒行程调节撞块先移到两边。将电极丝盘置于绕丝机构伸出轴上，紧固旋钮，然后将电极丝一端经排丝轮绕到卷丝筒并用螺钉压住（应将卷丝筒摇至终端位置），均匀缠绕几圈后，选择第“2”挡或第“3”挡速度，利用机床运丝面板上的运丝启动/停止按钮控制电机的旋转。根据所需绕丝量来停止运丝电机。剪断电极丝，电极丝按照正确走丝方式绕好后，回到卷丝筒上并压紧，再反向缠绕几圈。

#### 3. 穿丝

将电极丝依次穿过卷丝筒、排丝轮、宝石挡丝块、导电块、上导轮、下导轮、导电块、宝石挡丝块、断丝保护棒、卷丝筒。注意，调节行程挡块间距，保证两端留有 5~10 mm 电极丝缠绕长度的余量。绕丝时注意转向和运丝台移动方向，防止冲出行程。

#### 4. 紧丝

采用紧丝轮手动紧丝，电极丝在经过一段时间使用后，会因弹性疲劳、放电损耗及加工过程中产生拉伸而变松，可采用手动紧丝方法重新张紧，注意用力均匀。一般新绕的电极丝，应手动紧丝 1~2 遍，紧丝时应用力均匀。在表面黑色物除去后，需要匀一下电极丝。

#### 5. 电极丝找正

将找正块放在工作台上，将电极丝沿 X 方向缓缓移向找正块。电极丝与找正块之间产生火花放电，然后肉眼观察产生的火花：若火花上下均匀，则表明在该方向上电极丝垂直度良好，若下面或上面火花多，则说明电极丝左倾或右倾。调节 U、V 轴使电极丝垂直度良好；同理，在 Y 方向进行找正操作。（如图 8-4 所示）



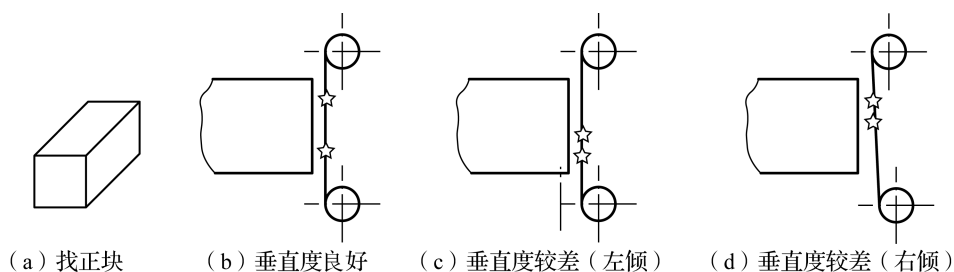


图 8-4 电极丝找正

## 6. 工件找正

采用拉表法确定工件位置，保证工件在  $X$ 、 $Y$  方向垂直度良好。

## 7. 使用 AutoCAD 完成钥匙扣的设计

灵活使用直线、圆弧、样条曲线、修剪、延伸、阵列等命令绘制钥匙扣。规定钥匙扣挂环的外圆尺寸为 3 mm，并在图形最低点处作一条 2 mm 引线（如图 8-5 所示）。

## 8. 设置间隙补偿提高精度

电极丝补偿量的计算公式为

$$\Delta R = \text{电极丝半径} + \text{电火花单边放电间隙}$$

当加工外形时，补偿量的方向与第一刀加工方向相同（如图 8-6 所示）；当加工内孔时，补偿量的方向与第一刀加工方向相反；当用作切割下料时，则无偏移方向。（切割普通件时单边放电间隙一般设置为 0.105 mm）

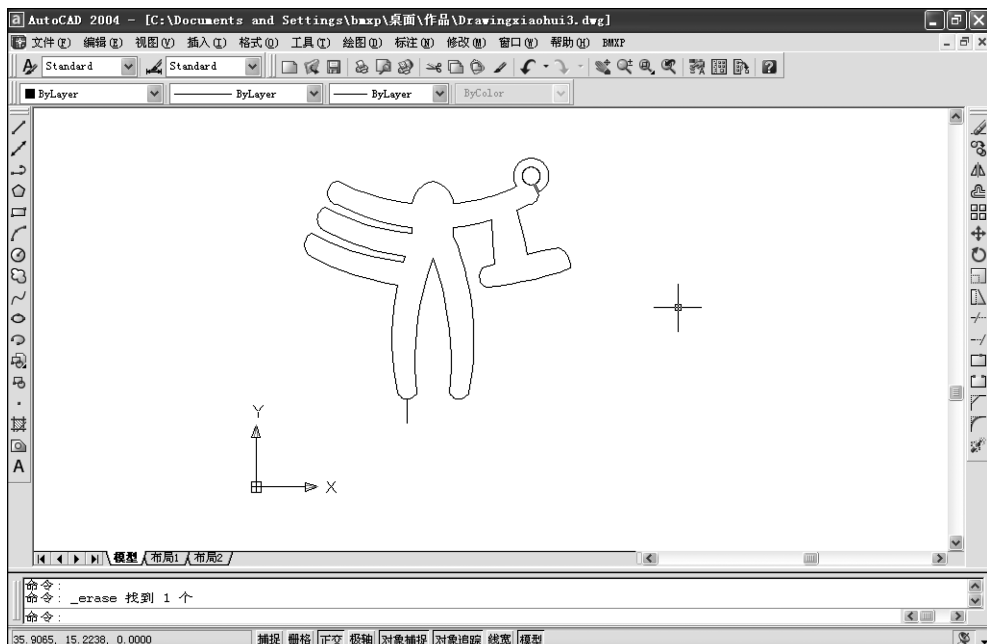


图 8-5 线切割样件的 CAD 设计

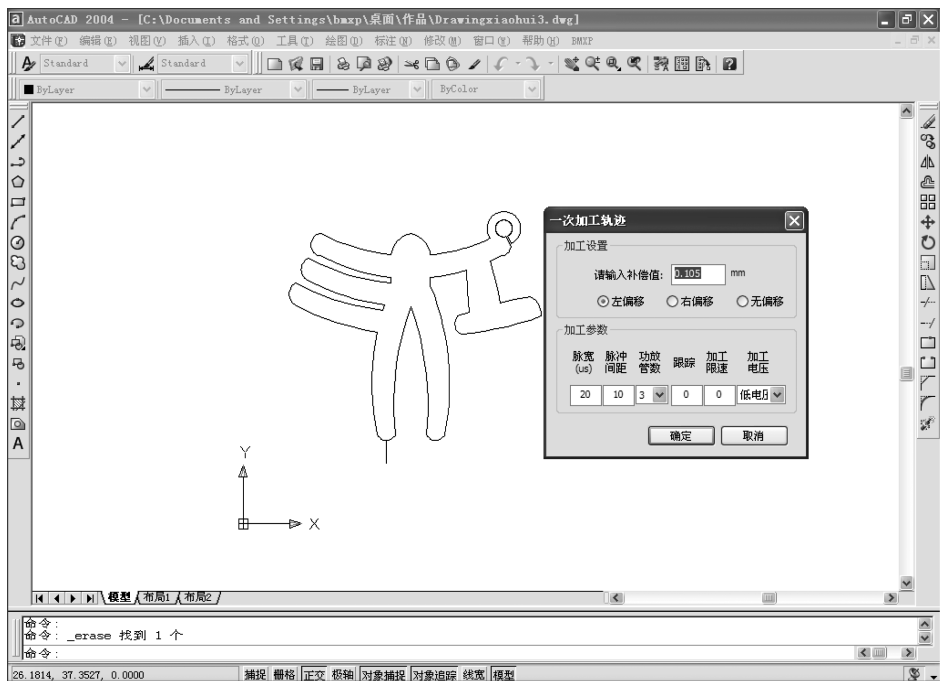


图 8-6 间隙补偿的设置

由于不同加工材料的电导率不尽相同，且电极丝在放电过程中存在不可避免的损耗，所以加工工件的实际尺寸在默认间隙补偿下加工，得到的工件最终尺寸有时不那么准确。

当加工外形轮廓时，若工件的实际尺寸大于设计尺寸，则需适当减小间隙补偿；若工件的实际尺寸小于设计尺寸，则需适当增加间隙补偿。反之，当加工内孔结构时，若内孔的实际尺寸大于设计尺寸，则需适当增加间隙补偿；若内孔的实际尺寸小于设计尺寸，则需适当减小间隙补偿。

### 9. 线切割机床的操作（以 BM400C 型号为例）

启动电源开关，让机床空载运行，观察其工作状态是否正常。观察的内容包括以下几点。

- (1) 电控柜必须先通电工作 10 min 以上，要求无异味、无异常响声。
- (2) 机床 X、Y、U、V 电机运动正常，运丝筒换向正常，水泵出水正常，高频交流接触器吸合正常。
- (3) 运丝筒换向切断高频脉冲功能正常。
- (4) 各个行程开关触点动作灵敏。
- (5) 工作液各个进出管路畅通无阻，压力正常。
- (6) 在进入加工卡菜单后，摇动手轮（如图 8-7 所示），熟悉 X、Y 方向的移动，感受不同倍率下的移动速度。



图 8-7 操作手轮

## 10. 对火花

先使用手轮×100倍率移动X、Y轴，使电极丝大致接近进刀点，再使用×10倍率继续接近工件，直至刚好产生轻微、上下均匀火花，此时将手轮拨片拨至“OFF”挡；随即在数控面板上将X、Y轴的即时坐标回零。

## 11. 生成加工轨迹，选择穿丝点

如图8-8所示，生成加工轨迹，再选择穿丝点。

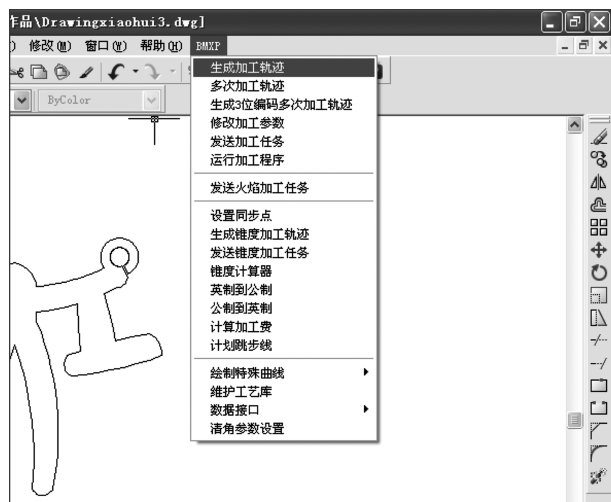


图 8-8 生成加工轨迹

## 12. 加工

注意切割外形时补偿偏移方向与加工方向一致，切割内孔时选择补偿偏移方向与加工方向相反；正确的加工轨迹是一个完整的封闭图形。（如图8-9、图8-10所示）

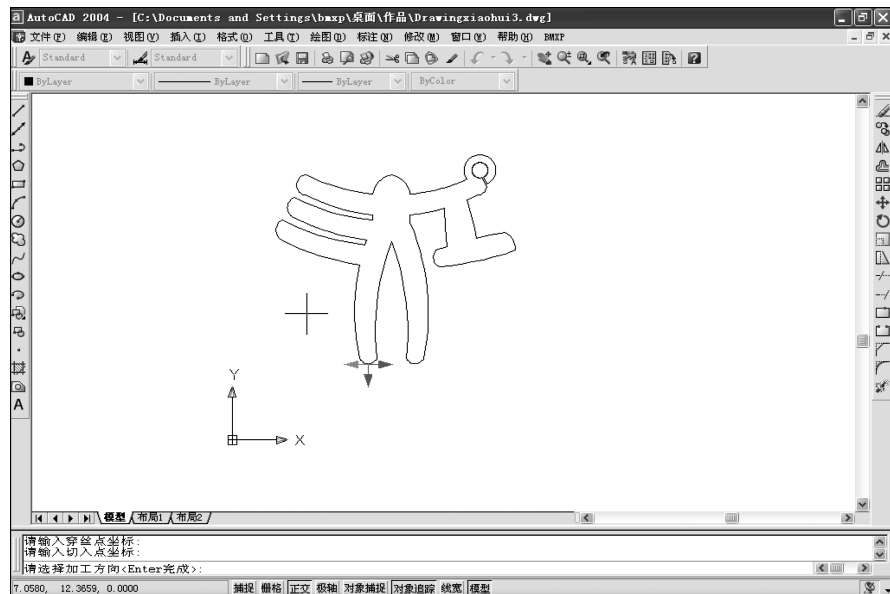


图 8-9 加工方向选择

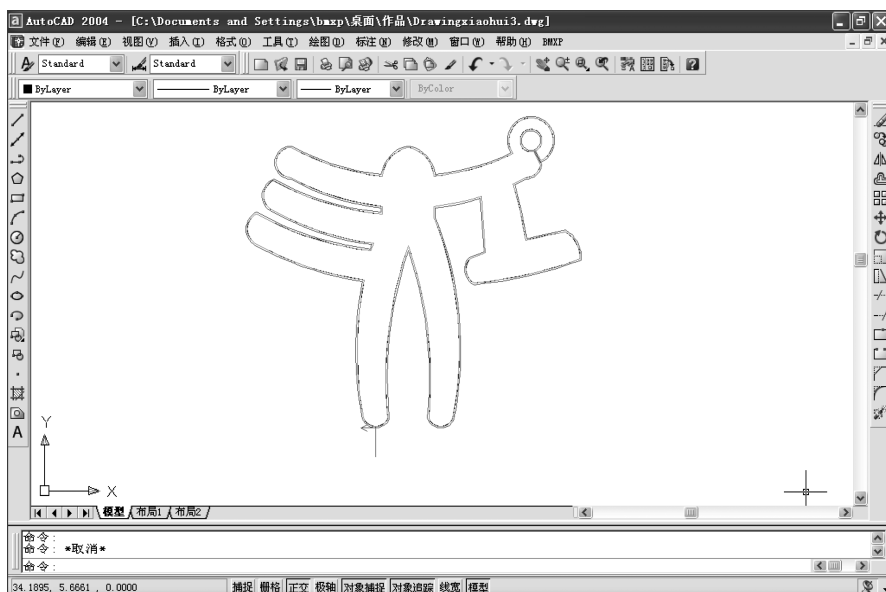


图 8-10 加工轨迹形成

- (1) 在 BMXP 选项卡中选择“发送加工任务”，选择 1 号加工卡。(如图 8-11、图 8-12 所示)
- (2) 根据工件厚度调整线架跨距。(切割工件时避免调整跨距)
- (3) 选择运丝速度最快的第“1”挡速度。开启运丝电机，换向正常。
- (4) 开启水泵电机调节喷水量。开启水泵时注意把调节阀调至关闭状态，然后逐渐开启，调节至上下喷水柱能包着电极丝，水柱射向切割区即可，水量不可太大。
- (5) 选择合适的放电参数，选择“开始加工”。
- (6) 加工完成，使用手轮移动工作台让工件远离电极丝，得到产品。



图 8-11 发送加工任务

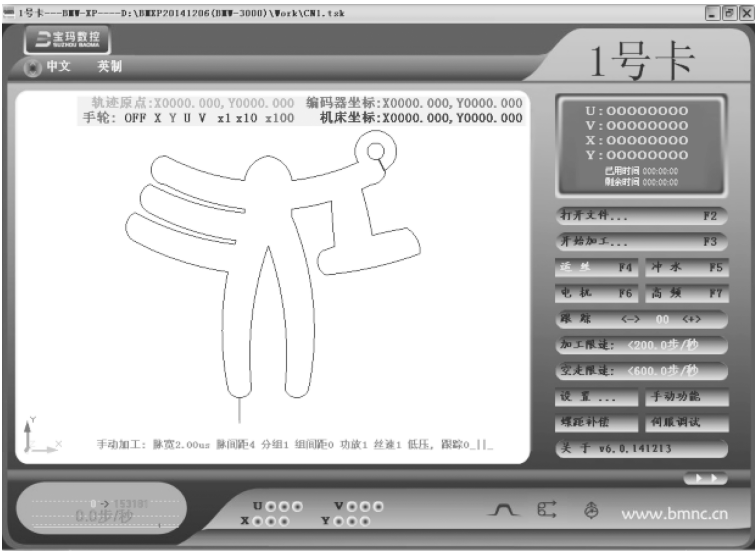


图 8-12 加工界面

### 8.6.2 实训任务——电火花线切割小饰品的制作

参考 8.6.1 小节的流程，使用 AutoCAD 软件设计零件图，正确操作机床并完成加工。

### 8.6.3 考核评价标准

电火花线切割实训项目的考核评价标准见表 8-5 所列。

表 8-5 电火花线切割实训项目的考核评价标准

| 序号 | 项目评价体系     | 考核内容                              | 分值/分 |
|----|------------|-----------------------------------|------|
| 1  | 辅助工作（30 分） | 能正确进行上丝、紧丝操作，紧丝后电极丝张力合适           | 10   |
|    |            | 能正确使用找正块调整 U、V 轴，使电极丝垂直度良好        | 10   |
|    |            | 能正确使用拉表法调整工件，使之在 X、Y 方向垂直         | 5    |
|    |            | 能按要求清理制作工具、工位现场整洁有序               | 5    |
| 2  | 步骤流程（40 分） | 正确使用 CAD 软件                       | 10   |
|    |            | 工件设计美观，尺寸准确                       | 10   |
|    |            | 机床操作手法、步骤正确                       | 20   |
| 3  | 完成质量（30 分） | 挂环外径尺寸准确（ $\pm 0.02\text{ mm}$ ）  | 15   |
|    |            | 表面粗糙度良好（ $Ra\ 3.2\ \mu\text{m}$ ） | 15   |

## 第 9 章

# 激光加工技术

激光加工技术是利用高功率密度激光束与材料相互作用，实现切割、焊接、打孔及表面处理等工艺的工科技术，主要应用于汽车、电子、电器、航空、冶金和机械制造等领域。激光是 20 世纪以来继核能、计算机、半导体之后人类的又一重大发明，被称为“最快的刀”“最准的尺”“最亮的光”。激光的原理早在 1916 年已被著名物理学家爱因斯坦发现。

### 9.1 激光加工概述

#### 9.1.1 什么是激光和激光加工

激光 (light amplification by stimulated emission of radiation)，最初的中文名叫“镭射”，是它的英文名称首字母缩写 LASER 的音译，意思是“某些物质原子中的粒子受激发射而发出的光”。激光是原子中的电子吸收能量后从低能级跃迁到高能级，再从高能级回落到低能级时，所释放的能量以光子的形式放出，被引诱（激发）出来的光子束。其中的光子光学特性高度一致。因此激光相比普通光源单色性强、方向性好，亮度更高。

激光加工则是利用高功率密度的激光束照射工件，使材料熔化、汽化而进行穿孔、切割和焊接等的特种加工。激光加工就是利用这种光能的热效应对材料进行焊接、打孔和切割等加工的。通常，用于加工的激光器主要是固体激光器和气体激光器。

## 9.1.2 激光加工的主要类型

### 1. 激光切割

如图 9-1 所示,激光切割是利用高功率密度激光束照射被切割材料,使材料很快被加热至汽化温度,蒸发形成孔洞,随着光束在材料上移动,连续孔洞形成宽度很窄(0.1 mm 左右)的切缝,完成对材料的切割。激光切割设备通常采用计算机数字化控制技术装置。采用该装置后,就可以利用传输线从计算机辅助设计工作站来接收切割数据。

### 2. 激光焊接

激光焊接是利用聚焦的高能量密度激光束作为热源,对金属局部加热,使材料熔融后结合,如图 9-2 所示。激光焊接分为热传导焊(浅层)和深熔焊(高功率穿透)。其主要应用于汽车、电子元器件、航空航天精密焊接等。

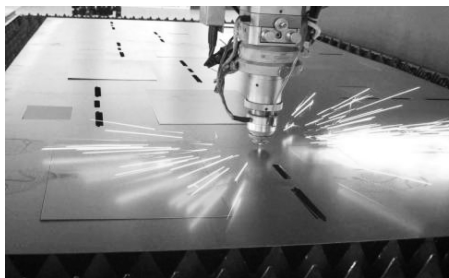


图 9-1 激光切割



图 9-2 激光焊接

### 3. 激光打标/雕刻

激光打标/雕刻是通过表面烧蚀或颜色变化形成永久标记,如图 9-3 所示。其适用于金属、玻璃、塑料等。

### 4. 激光表面处理

激光表面处理是一种非接触式处理方法,如图 9-4 所示,通过对工件表面进行激光加热和改进,改善其表面性能,如激光淬火(提高硬度和耐磨性)、激光清洗(提高抗腐蚀性)、激光抛光(提高金属表面光洁度)、激光熔覆(形成保护层,涂层修复)等。激光表面处理具有高效、精确和环保的特点,广泛应用于航空、汽车和模具等领域。

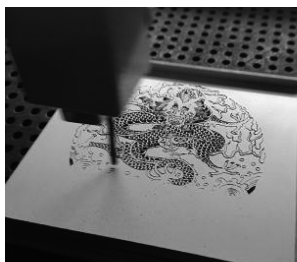


图 9-3 激光打标/雕刻

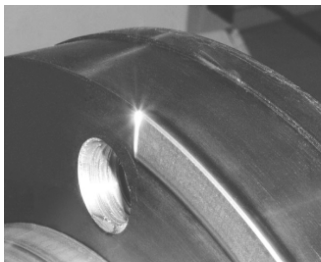


图 9-4 激光表面处理



## 5. 微加工

微加工是利用激光束作为加工工具，利用超短脉冲激光，在微米乃至纳米尺度上对材料进行精确加工的技术，如 PCB 钻孔、半导体划片等。

### 9.1.3 激光器的类型

激光器是产生激光的重要装置，一般内置于激光设备中。按激光工作物质分类，常见的激光器类型如下。

#### 1. CO<sub>2</sub> 激光器（气体激光器）

如图 9-5 所示是一种典型的 CO<sub>2</sub> 激光器结构（波长 10.6 μm）。在放电管中，通常输入几十或几百毫安的直流电流。放电时，放电管中的混合气体内的氮分子由于受到电子的撞击而被激发出来。这时受到激发的氮分子便和 CO<sub>2</sub> 分子发生碰撞，N<sub>2</sub> 分子把自己的能量传递给 CO<sub>2</sub> 分子，CO<sub>2</sub> 分子从低能级跃迁到高能级上形成粒子数反转从而产生激光。CO<sub>2</sub> 激光器适用于非金属（木材、亚克力）和部分金属的加工，功率高但效率较低。

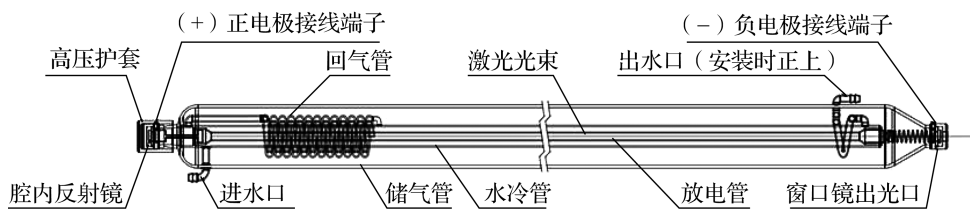


图 9-5 典型的 CO<sub>2</sub> 激光器结构

#### 2. 光纤激光器（1.06 μm）

光纤激光器是一种以掺杂稀土元素（如镱、铒、钕等）的光纤作为增益介质的激光器，其工作原理基于激光原理和光纤波导结构的特性。如图 9-6 所示，光纤激光器主要由增益介质（掺杂稀土元素的光纤）、泵浦源（通常为半导体激光二极管）和谐振腔等组成。与普通 CO<sub>2</sub> 激光器相比，光纤激光器更节省空间和气体消耗量，光电转化率高，是节能环保的新产品，也是世界上领先技术产品之一，是工业主流选择。

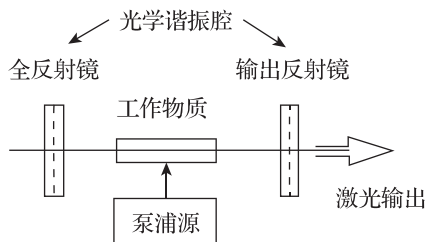


图 9-6 光纤激光器结构示意图

#### 3. Nd: YAG 激光器（1.064 μm）

Nd: YAG 激光器（掺钕钇铝石榴石激光器）是迄今使用最广泛的固体激光器。因为能够掺进去的钕浓度很高，可达  $1.3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$  以上，所以单位工作物质体积能提供比较高的激光功率。如图 9-7 所示，普通灯泵 Nd: YAG 激光器一般由工作介质（Nd: YAG 晶体）、泵浦源（氙灯或氪灯）、电源系统和冷却系统等部分组成。Nd: YAG 激光器几乎是所有固体激光器中应用最广泛的一种，可用于材料加工、全息技术、测距、目标照明和指示、外科手术等领域。

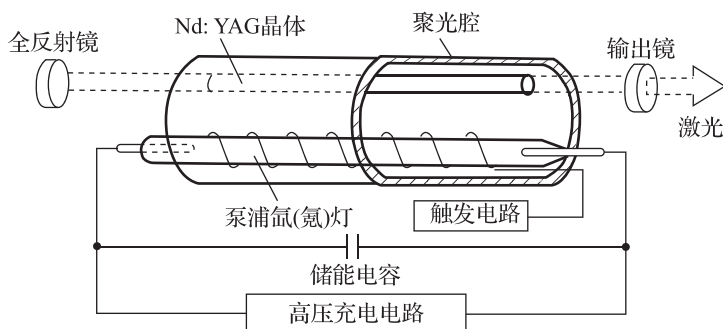


图 9-7 普通灯泵 Nd: YAG 激光器结构示意图

### 9.1.4 激光加工的特点

激光具有的宝贵特性决定了其在加工领域存在以下优势。

(1) 非接触式：由于激光加工是无接触加工，且加工过程中无刀具磨损，无切削力作用于工件，并且高能量激光束的能量及其移动速度均可调，因此可以实现多种加工目的。

(2) 材料的广泛适用性：激光加工可以对多种金属、非金属加工，特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料。

(3) 热变形小：在激光加工过程中，激光束能量密度高，加工速度快，并且是局部加工，对非激光照射部位没有影响或影响极小。因此，其热影响区小，工件热变形小，后续加工量小。

(4) 柔性化：由于激光束易于导向、聚集实现各方向变换，极易与数控系统配合，对复杂工件进行加工，因此是一种极为灵活的加工方法。

(5) 集成化：激光加工将控制、工艺和激光器相结合，实现光、机、电、材料加工一体化，提高生产效率和加工质量。

(6) 加工精度高：使用激光加工，精度可达微米级，适合复杂几何形状。

### 9.1.5 激光加工的应用领域

激光精密制造作为现代制造业的核心技术之一，正随着技术创新和市场需求的推动，展现出多元化、高端化的发展趋势，其应用领域广泛。

(1) 工业制造领域：激光切割、激光焊接、激光打孔、激光打标等，广泛应用于金属和非金属的加工，如木材行业、服装行业、汽车制造、航空航天和电子器件生产领域等。

(2) 工艺品制造：在礼品、纪念品上雕刻图案或文字，提升产品附加值。

(3) 广告业：制作各种标牌、标识和广告品。

(4) 个性化定制：提供个性化的定制服务，如手机壳、饰品等。

(5) 医疗应用：激光治疗、激光手术、激光诊断，应用于医疗器械制造和医疗美容等领域。

### 9.1.6 激光使用安全准则

激光设备在使用过程中，如果不按流程操作会存在很大危险，新手必须经过专业人员的培训才能独立操作。以下为激光设备注意事项及操作流程。

- (1) 遵守激光设备安全操作规程，严格按照激光设备的启动和关闭流程操作。
- (2) 操作者必须经过培训，熟悉设备结构、性能，掌握操作系统有关知识。
- (3) 按规定穿戴好劳动防护用品，在激光束附近必须佩戴符合规定的防护镜，严禁直接观察激光。
- (4) 在未弄清某一材料是否能用激光设备加工前，不要对其加工，以免产生烟雾和回反射等潜在危险。
- (5) 设备运行时，操作人员不得擅自离开岗位或托人代管，确实需要离开时，应停机或切断电源开关。
- (6) 操作人员不得平视激光，否则容易对眼睛造成伤害。
- (7) 开机后应对 X、Y、Z 等方向及工作台进行检查，确认有无异常情况。
- (8) 输入新的工件程序后，应先试运行，并检查其运行情况。
- (9) 在加工过程中发现异常时，应立即停机，及时排除故障或上报主管人员。
- (10) 保持激光器、床身及周围场地整洁、有序、无油污，工件、板材、废料按规定堆放。
- (11) 气瓶的使用、运输应遵守气瓶监察规程。禁止将气瓶在阳光下暴晒或靠近热源。开启瓶阀时，操作者必须站在瓶嘴侧面。
- (12) 时常检查电路电线，以免漏电等事故发生。

## 9.2 主流激光设备的介绍与使用

### 9.2.1 非金属激光雕刻机

非金属激光雕刻机适合加工木制品、纸张、皮革、布料、有机玻璃、环氧树脂、亚克力、毛料、塑料、橡胶、瓷砖、大理石、水晶、玉石、竹制品等非金属材料。如图 9-8 所示是 TY-CY-80 激光雕刻机的结构。

#### 1. 配置介绍

TY-CY-80 激光雕刻机的配置如下。

- (1) CO<sub>2</sub> 激光器：以 CO<sub>2</sub> 气体作为工作物质。放电管由玻璃制成，里面充以 CO<sub>2</sub> 气体和氮气，电极一般是镍制空心圆筒；谐振腔的一端是镀金的全反射镜，另一端是用锗或砷化镓磨制的部分反射镜。
- (2) 光路传输系统：如图 9-9 所示，在设备内有三个反射镜和一个透镜形成光路传输系统，其中 1#、2#、3#为反射镜，4#为聚焦透镜。

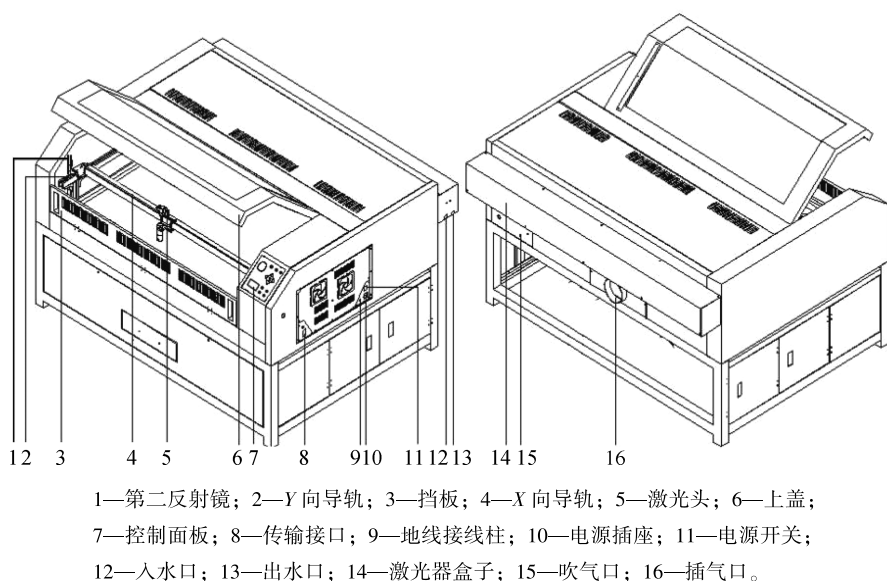


图 9-8 TY-CY-80 激光雕刻机的结构

(3) 平面运动装置 (如图 9-10 所示): 横向为  $X$  方向, 纵向为  $Y$  方向, 由步进电机驱动同步带轮带动激光头做平面运动。

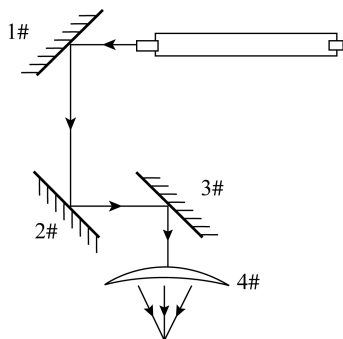


图 9-9 光路传输系统

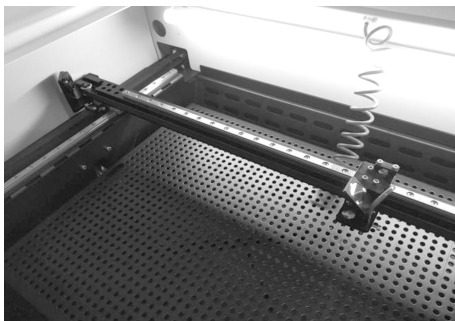


图 9-10 平面运动装置

(4) 数控系统 (如图 9-11 所示): 使用运动控制卡作为激光雕刻机的控制系统。运动控制卡是一种基于个人计算机 (personal computer, PC) 的上位控制单元, 通过与计算机连接, 利用高性能微处理器及大规模可编程器件实现多个伺服电机的多轴协调控制的一种高性能的步进/伺服电机运动控制卡。

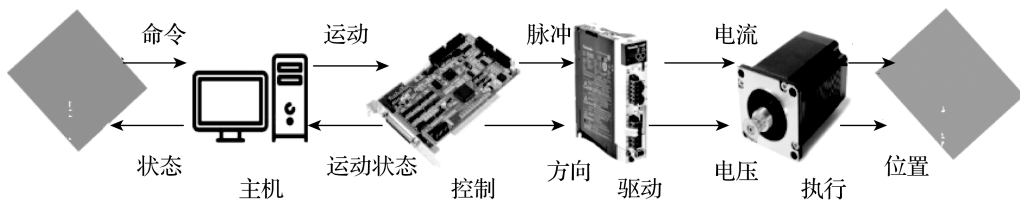


图 9-11 数控系统工作流程

(5) 可升降工作台：Z 向升降系统，通过调整工作台位置，以适应不同厚度的零件，方便加工。

(6) 除尘抽风系统：由烟尘捕集、管道输送和除尘器三部分组成。通过这些部分的相互配合，可以有效地捕集、输送和净化激光切割过程中产生的烟尘，为工作环境创造一个清洁、安全的条件。

## 2. 加工原理

如图 9-12 所示，激光雕刻机以数控技术为基础，激光加工为媒介，使加工材料在激光照射下瞬间熔化和汽化的物理变性，达到加工的目的。如图 9-12 所示，CO<sub>2</sub> 激光管产生的光束，通过光路系统传播至被加工材料。

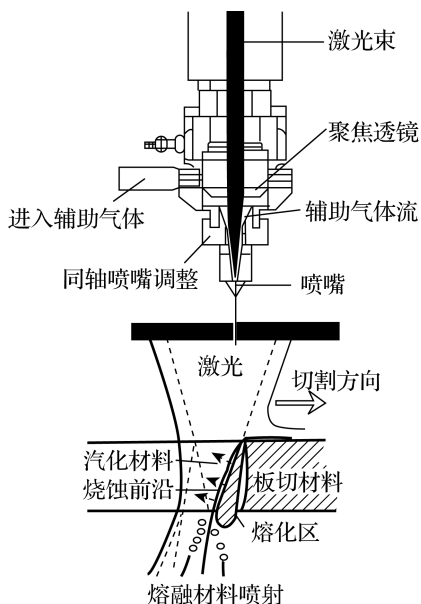


图 9-12 激光雕刻机的加工原理

## 9.2.2 激光打标

### 1. 振镜式激光打标的结构

激光打标是利用高能量的激光束照射在工件表面，光能瞬时变成热能，使工件表面迅速蒸发，从而在工件表面刻出任意所需要的文字和图形，以作为永久防伪标志。如图 9-13 所示为典型的振镜式激光打标及工作原理，其主要部件有激光器、振镜、场镜、控制卡、升降立柱，由 YAG 激光器、高速振镜系统和计算机控制系统实现高速激光打标。

### 2. 激光打标的特点

- (1) 非接触加工，可在任何异形表面标刻，工件不会变形和产生内应力，适用于金属、塑料、玻璃、陶瓷、木材、皮革等各种材料；
- (2) 标记清晰、永久、美观，并能有效防伪；
- (3) 具有标刻速度快、运行成本低、无污染等优点，可显著提高被标刻产品的档次。

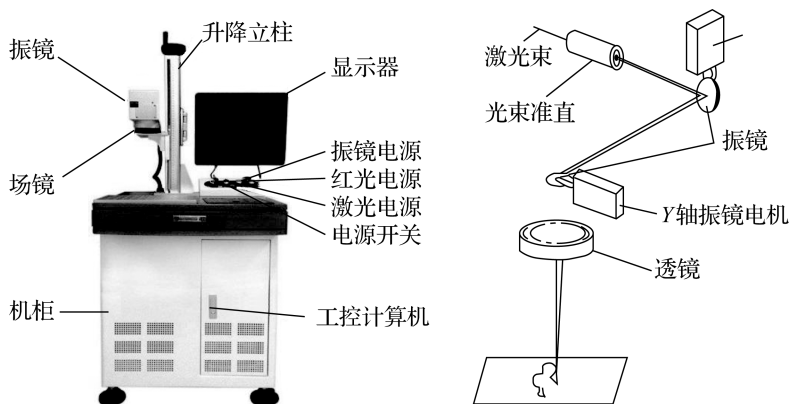


图 9-13 典型的振镜式激光打标及工作原理

### 3. 激光打标的应用

(1) 激光打标广泛应用于电子元器件、汽（摩托）车配件、医疗器械、通信器材、计算机外围设备、钟表等产品和烟酒食品防伪。

(2) 激光打标用于通信行业，可以对各种塑料或金属封装电子组件（如二极管、三极管、IC 电路芯片等）标刻商标图案。

## 9.2.3 金属光纤激光切割机

### 1. TY-CF1010 光纤金属激光切割机

光纤激光切割机是一种以光纤激光器为核心光源，通过高能量密度激光束对金属或非金属材料进行非接触式切割的高精高效加工设备。它融合了激光技术、数控技术、精密机械技术与自动化控制技术，能够实现复杂二维或三维图形的快速、精确切割，具有切缝窄、热影响区小、无机械变形、无须二次加工等优势。

光纤激光切割机属于金属切割机的范畴，一般只能用来对金属进行加工，如不锈钢、碳钢、合金钢、硅钢、弹簧钢、铝、铝合金、镀锌板、镀铝锌板、酸洗板、铜、银、金、钛等金属板材及管材切割，无法对非金属材料进行加工，如石头、布匹、皮革等材料。如图 9-14 所示，是通过光纤激光切割机加工的一些作品。



图 9-14 金属激光作品

TY-CF1010 型激光切割机的加工幅面为 1000 mm×1000 mm，具有加工迅速、产品边缘光



滑、切缝小，且热效应小等特点，尤其适合钣金加工。其可切割 6 mm 以下碳钢、不锈钢等金属材料。

### 2. 配置介绍

光纤激光切割机由以下几部分组成。

(1) 机床主机部分。机床主机部分是光纤激光切割机最主要的组成部分，其切割功能和切割精度都是由主机部分来实现的。其包括床身、工作台、横梁、Z 轴系统、气体控制系统、防护外壳、安全系统、电控系统、传动系统等。光纤激光切割机进行切割作业时，通过伺服电机驱动横梁，控制 Z 轴移动，然后在工作台面上根据程序指令，完成复杂精度的切割作业。

(2) 光纤激光器。光纤激光器是用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的激光器，它是激光切割机最核心的部件。在泵浦光的作用下，光纤内极易形成高功率密度，造成激光工作物质的激光能级“粒子数反转”，适当加入正反馈回路（构成谐振腔）便可形成激光振荡输出，因此也被称为激光切割机的“动力源”。

(3) 激光切割头。激光切割机的切割头是激光输出装置，由伺服电机和丝杠或齿轮等传动件组成，主要包括腔体、聚焦透镜座、聚焦镜、电容式传感器和辅助气体喷嘴等零件。激光切割机的切割头会根据设定的切割轨迹行走，但不同材料、不同厚度、不同切割方式情况下，激光切割头焦点位置由 CNC 自动控制。

(4) 伺服电机。伺服电机主要指在伺服系统中控制机械元件运转的发动机。伺服电机的主要功能是控制速度和切割精度，可以将控制信号转化为速度和位置以驱动切割对象。高品质的伺服电机能够有效地保证激光切割机的切割精度、定位速度和重复定位精度。

(5) 稳压器。稳压器是连接在激光器、数控机床与电力供应系统之间的装置。其主要防止外电网干扰，起到稳压的作用，从而确保机器正常运转。

(6) 冷水机。冷水机的主要作用是冷却激光器、主轴等装置。激光器是利用电能转换成光能的装置，冷却水把多余的热量带走，以保持激光发生器的正常工作。目前的冷水机大部分都已经装配输入输出控制设备开关，具有冷却水流量控制、高低温报警功能，设备性能更加趋于稳定。

(7) 供气系统。光纤激光切割机的供气系统主要包括气源、过滤装置和管路。其中，气源有瓶装气体、液化气体和压缩空气等形式。

(8) 排烟集尘系统。排烟集尘系统抽出激光切割时产生的烟尘和粉尘，并进行过滤处理，使废气排放符合环境保护标准，不会对环境造成污染，从而达到环保生产的目的。目前，国家对环保要求严格，除尘器系统也是必备的激光设备元器件。

## 9.3 知识拓展

激光加工已从传统的切割、焊接工具，演进为驱动高端制造的核心赋能技术。其核心突破在于超快激光（飞秒/皮秒）的应用，实现了近乎无热影响的“冷加工”，尤其适合



半导体、脆性材料的微纳制造。

当前发展主要体现在两大方向：一是工艺融合与智能化，如激光与电弧、3D 打印的复合，并集成 AI 与在线监控实现自适应加工；二是应用领域重大拓展，成为新能源电池、光伏芯片制造的关键工艺，并广泛应用于医疗植入体、光子芯片等前沿领域。

未来，激光加工将围绕“更极限”（更精、更快、更强）、“更智能”（深度融合数字技术）和“更跨界”（开拓生物、量子等新场景）持续深化，是创新制造的核心驱动力。

## 9.4 激光加工实训项目——非金属激光加工

### 9.4.1 项目介绍

以“创意书签”为例，本项目聚焦生成式 AI 在激光加工中的核心应用，为不同专业和层次的学生提供更方便快捷的设计途径，降低激光加工设计门槛。实训内容涵盖“AI 文生图”生成激光加工所需创意图形，借助 AI 工具完成位图到可缩放矢量图形（scalable vector graphics, SVG）等矢量图的精准转换，自动优化线条问题。同时，教学利用 RDWORKS 软件，根据木材、亚克力等不同材料适配图形参数。通过文创雕刻、零件切割等实操案例，让学习者掌握 AI 图形处理的全流程，适配激光切割与雕刻的高效生产需求。

### 9.4.2 图形设计与设备操作

（1）AI 生成设计图打开任意一个 AI 聊天或绘图工具（如文心一言、豆包等），输入下面这段话：

“请帮我设计一个书签图案，主题是‘星辰与猫’。要求是：单线图，黑白矢量风格，线条清晰，没有阴影和复杂填充，适合激光雕刻”。

生成效果如图 9-15 所示的人工智能创意生成（artificial intelligence creative generation, AICG）效果图。



图 9-15 AICG 效果图

(2) 图形处理。等待 AI 生成结果后，将其导出为 PNG 或 JPG 格式。接着访问在线矢量图转换工具（如 Vectorizer），上传位图并转为 SVG 格式，确保线条清晰、无断点，下载 SVG 格式，可直接用于激光切割，或者将 SVG 格式转换为 DXF 线稿图（这里推荐 AnyConv 文件转换器）。

(3) 参数设置及加工。在 RDWORKS 中导入文件，根据所选材料（如 3 mm 椴木板）设置功率与速度等参数，预览切割路径，确认无误后连接激光机进行加工，具体操作步骤如下。

① 点击文件→导入待加工图形。也可用左侧绘图工具栏（直线、折线、矩形、圆形等）现画，还可两者结合，生成待加工图形。

② 图中图形右上角绿点，对应设备中的红光点，可将图形放置在绘图区中央（选中图形后，点击左边绘图工具栏下部的图标），便于观察。

③ 导入图像文件（JPG、PNG、GIF 等格式）默认扫描，图形文件（dxf 等格式）默认切割。如图 9-16 所示的软件界面为“创意书签”，其中“星辰与猫”为图像文件，其余为切割图形，根据需求设置如图 9-16 所示的三个图层（只需设置三种颜色，在图形参数区域会出现三个图层），并设置不同的切割功率和切割速度。

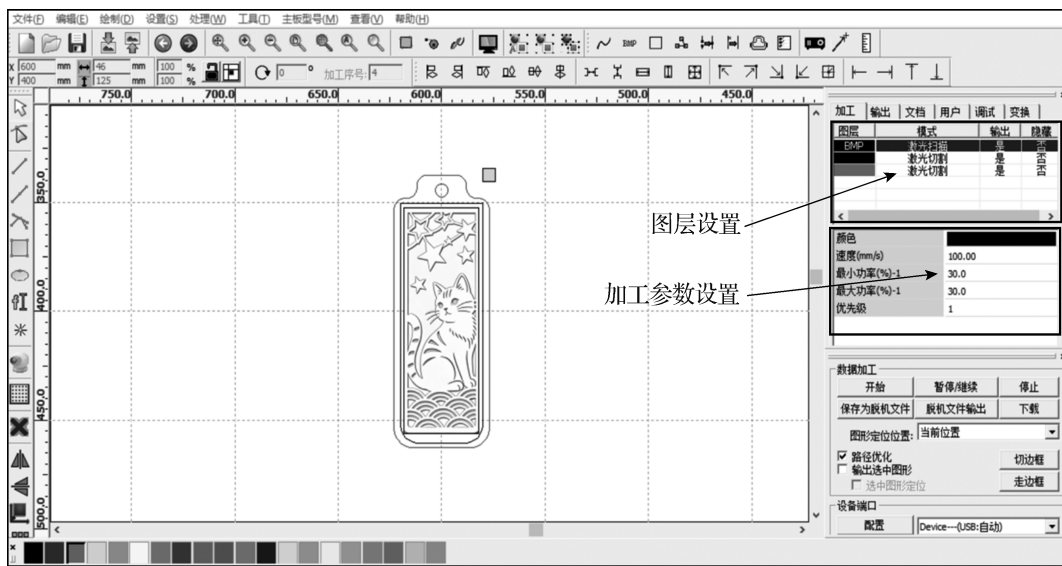


图 9-16 软件界面

④ 设置加工参数：以教学设备为例，材料为 3 mm 椴木板时，扫描速度可设为 800~100 mm/s，扫描功率为 10%~15%，切割速度为 20~30 mm/s，切割功率为 35%~40%；材料为亚克力（厚度 3 mm）时，扫描速度为 70~80 mm/s，扫描功率为 10%~15%，切割速度为 15~20 mm/s，切割功率设置为 40%~50%。需要注意的是，受诸多因素（材料、设备等）影响，参数设置要根据实际情况，没有一定之规，且每台设备可能都有一些区别，因此应先试加工。

⑤ 启动设备：检查设备工作台上是否遗留任何影响设备运行的杂物，然后依次操作设备控制面板上的急停、总电源、激光按钮，此时设备回零，红光被点亮。

⑥ 将待加工材料放置在工作台上，居中部位较好。

⑦ 如图 9-17 所示为设备操作面板，通过面板上的方向键可移动激光头，将红点置于待加工材料的相应部位。

⑧ 焦距调整：有效的雕刻需要激光光点小、功率集中，只有具备这两个条件，才能保证雕刻的精度和深度。激光束刚从激光器中射出时，直径约为 3 mm，功率密度较低，经过聚焦镜聚焦后，焦点处光束较细，直径约为 0.1 mm。因此，把待刻平面固定在聚焦镜的焦点处是成功雕刻的前提条件。通过 Z 向调整工作台的高度，点击方向键中间的按钮，切换至 Z 轴移动，此时按左右方向键，可上下调工作台。调整工作台高度时，不可将调焦棒直接置于镜头架下方，以免误操作损坏镜头。调整到如图 9-18 所示的调焦棒与透镜边框贴紧即可。

⑨ 调焦完成后，在软件界面控制面板区域按 **走边框** 按钮，观察雕刻范围，若符合要求，即可按 **开始** 按钮，完成雕刻；也可在开始前点击图形属性栏中的预览按钮 ，预览加工效果。

⑩ 加工前将盖板盖上，透过盖板观察设备运行，如发现运行错误，点击软件控制面板区域的 **暂停/继续** **停止** 按钮。遇到紧急情况时，拍下设备急停按钮。



图 9-17 操作面板



图 9-18 对焦示意图

⑪ 完成加工。完成的 AICG 激光创意书签如图 9-19 所示。

非金属激光技术为众多非金属材料带来了革新性的创作方式。它超越了传统工具的物理限制，以“光”为刃，在毫厘之间实现从精准切割到立体成型的无限可能，既催生出如图 9-20 所示的 3D 拼图般新颖的互动作品，也成为如图 9-21 所示的活化剪纸、掐丝珐琅等古老非遗技艺的现代“巧手”。



图 9-19 AICG 激光创意书签

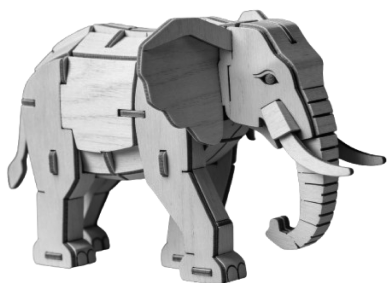


图 9-20 激光加工 3D 拼图



图 9-21 激光与非遗的融合

### 9.4.3 实训任务

要求学生独立完成立体相框的设计与制作。

### 9.4.4 考核评价标准

该项目的考核评价标准见表 9-1 所列。

表 9-1 项目的考核评价标准

| 序号 | 项目评价体系     | 考核内容                           | 分值/分 |
|----|------------|--------------------------------|------|
| 1  | 理论成绩（20 分） | 完成实训报告                         | 20   |
| 2  | 实训纪律（20 分） | 自觉遵守实训作息时间纪律要求，无迟到、早退现象        | 10   |
|    |            | 自觉遵守实训安全着装要求，不按规定着装一律不允许上岗操作实训 | 10   |
| 3  | 实训操作（60 分） | 运用 AICG 技术或绘图软件完成设计            | 20   |
|    |            | 正确操作激光设备                       | 10   |
|    |            | 独立操作完成作品                       | 30   |