

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

JIGUANG QIEGE JISHU

# 激光切割 技术

叶建斌 戴春祥

编著

上海科学技术出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
先进制造技术与应用前沿

# 激光切割技术

叶建斌 戴春祥 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

激光切割技术/叶建斌,戴春祥编著. —上海:上海科学技术出版社,2012.7

(先进制造技术与应用前沿)

ISBN 978-7-5478-1214-3

I. ①激... II. ①叶... ②戴... III. ①激光切割—研究 IV. ①TG485

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 036453 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.25 插页 5

字数:250 千字

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1214-3/TN·9

定价:55.00 元

---

此书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向承印厂联系调换



reface

## 前 言

---

激光加工技术是一门综合性的高科技技术,它交叉了光学、材料科学与工程、机械制造学、数控技术及电子技术等学科,属于当前国内外科技界和产业界共同关注的热点。由于激光固有的四大特性(高的单色性、方向性、相干性和亮度),它被广泛地应用于工业、农业、国防、医学、科学实验和娱乐等诸多方面,并发挥着十分重要的作用。

激光加工技术发展非常迅速,其应用范围日趋广泛,因而激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”。先进工业国家的企业由于广泛应用激光加工技术,其生产技术正发生质的变化。目前,我国企业应用激光加工技术的速度正在不断加快,但与发达国家相比还有很大差距。

目前已经出版的同类书籍中,主要是论述有关激光加工技术、工艺、装备等方面的内容,很少有详细介绍或论述激光切割原理、工艺方法及应用方面的论著,因此,非常有必要编写一本专门论述激光切割技术的基本理论、工艺及最新应用的书。本书就是在这种背景下应运而生的。

本书按照激光切割原理、工艺方法及应用的思路来编写,既顾及激光原理及技术的完整性并兼顾可读性和实用性,又充分考虑阅读上的可选性,在内容上还编入了一定量的激光切割设备的操作实例,以求更好地做到理论与实际相结合。

本书由上海文日方实业发展有限公司叶建斌高工、上海大学机电工程与自动化学院戴春祥博士合作编写,全书由叶建斌审核并定稿。参加本书文字、插图整理的还有施永康、周晓飞、伍书永、叶德诗等。

在本书编写过程中,得到在激光切割应用领域有资深经验的上海文日方实业发展有限公司副总经理刘拥葛先生、在激光加工理论与设备方面有

相当知名度的上海团结普瑞玛激光设备有限公司总经理罗敬文先生以及上海大学机电工程与自动化学院李明教授的指导和帮助,他们对本书的编写提出了一些有益的、建设性的建议和意见,在此表示衷心的感谢。还要感谢本书参考文献中所列的所有作者,他们的著作和论文为本书的编写提供了理论上以及实践上的借鉴。

由于编者水平有限,书中难免存在不当和错误,敬请广大读者批评指正。

编者

2012年1月



# 目 录

|            |                 |           |
|------------|-----------------|-----------|
| <b>第一章</b> | <b>激光加工技术绪论</b> | <b>1</b>  |
| 第一节        | 激光原理及其特性        | 1         |
| 一、         | 激光产生的背景         | 1         |
| 二、         | 激光产生原理          | 2         |
| 三、         | 激光的特性           | 3         |
| 四、         | 激光加工的特点         | 4         |
| 第二节        | 激光加工技术概述        | 5         |
| 一、         | 激光加工技术的应用       | 5         |
| 二、         | 激光加工技术的发展       | 5         |
| 第三节        | 激光切割技术概述        | 7         |
| 一、         | 激光切割技术的特点       | 7         |
| 二、         | 激光切割技术的应用及发展    | 8         |
| 第四节        | 其他常见激光加工技术简介    | 10        |
| 一、         | 激光焊接技术          | 10        |
| 二、         | 激光打标技术          | 13        |
| 三、         | 激光打孔技术          | 14        |
| 四、         | 激光雕刻技术          | 15        |
| 五、         | 激光表面加工技术        | 16        |
| 六、         | 激光快速成型          | 22        |
| 七、         | 激光弯曲            | 23        |
| <b>第二章</b> | <b>激光加工技术基础</b> | <b>24</b> |
| 第一节        | 激光加工用激光器        | 24        |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 一、激光器的基本构成 .....                | 24 |
| 二、CO <sub>2</sub> 激光器 .....     | 26 |
| 三、Nd:YAG 激光器 .....              | 29 |
| 四、准分子激光器 .....                  | 32 |
| 五、半导体激光器 .....                  | 34 |
| 六、光纤激光器 .....                   | 35 |
| 七、飞秒脉冲激光器 .....                 | 36 |
| 八、高功率 CO 激光器 .....              | 38 |
| 九、激光器的选择 .....                  | 38 |
| 第二节 激光加工成套设备系统 .....            | 40 |
| 一、激光加工机床 .....                  | 40 |
| 二、激光加工成套设备系统及国内外主要生产厂家 .....    | 45 |
| 第三节 激光加工用光学系统 .....             | 46 |
| 一、激光光学元件 .....                  | 46 |
| 二、光学聚焦系统 .....                  | 48 |
| 三、光学匀光系统 .....                  | 51 |
| 四、光学导光系统 .....                  | 54 |
| 第四节 激光束参量测量 .....               | 56 |
| 一、激光束功率、能量参数测量 .....            | 56 |
| 二、激光束模式测量 .....                 | 57 |
| 三、激光束束宽、束散角及传播因子测量 .....        | 58 |
| 四、激光束偏振态测量 .....                | 59 |
| 五、激光束的光束质量及质量因子 $M^2$ 的概念 ..... | 60 |
| 第五节 激光与材料的交互作用机理 .....          | 61 |
| 一、激光与材料相互作用的几个阶段 .....          | 61 |
| 二、影响激光与材料作用的因素 .....            | 62 |

### 第三章

### 激光切割技术原理及特点

75

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一节 激光切割分类及其与其他切割方法比较 ..... | 75 |
| 一、激光切割的概念 .....             | 75 |
| 二、激光切割的分类 .....             | 75 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 三、激光切割与其他切割方法性能比较 ..... | 78  |
| 第二节 激光切割机理 .....        | 79  |
| 一、激光切割时切口的形成 .....      | 80  |
| 二、激光切割过程中的能量分析 .....    | 82  |
| 三、激光切割过程温度场的数学模型 .....  | 85  |
| 第三节 激光切割的主要特点 .....     | 88  |
| 第四节 三维激光切割及其关键技术 .....  | 91  |
| 一、三维激光切割简介 .....        | 91  |
| 二、三维激光切割的特点 .....       | 92  |
| 三、三维激光切割关键技术 .....      | 93  |
| 第五节 激光切割设备 .....        | 95  |
| 一、激光切割设备的组成 .....       | 95  |
| 二、激光切割用激光器 .....        | 97  |
| 三、激光切割用割炬 .....         | 100 |
| 四、激光切割设备的技术参数 .....     | 104 |

## 第四章 激光切割工艺分析 110

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一节 激光切割特性分析 .....     | 110 |
| 一、激光切割的类型 .....        | 110 |
| 二、激光切割的特性 .....        | 111 |
| 第二节 激光切割控制的难点 .....    | 113 |
| 一、切缝宽度 .....           | 113 |
| 二、切割面的粗糙度 .....        | 113 |
| 三、熔渣在切口中的流动及熔渣粘附 ..... | 114 |
| 四、切割速度 .....           | 114 |
| 五、焦点位置 .....           | 115 |
| 第三节 影响激光切割的软件因素 .....  | 115 |
| 一、打孔点位置的确定 .....       | 116 |
| 二、辅助切割路径的设置 .....      | 116 |
| 三、激光束半径补偿和空行程处理 .....  | 117 |
| 四、激光切割优化排样 .....       | 118 |



|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 五、结合零件套排问题的路径选取 .....     | 118 |
| 六、考虑热效应对路径的影响 .....       | 119 |
| 第四节 激光切割钢板的若干工艺问题分析 ..... | 120 |
| 一、激光切割穿孔工艺 .....          | 120 |
| 二、切割加工小孔变形情况的分析 .....     | 120 |
| 三、激光切割钢板时穿刺点的选择 .....     | 121 |
| 第五节 常用工程材料的激光切割 .....     | 122 |
| 一、金属材料切割 .....            | 122 |
| 二、非金属材料切割 .....           | 127 |
| 三、复合材料切割 .....            | 131 |

## 第五章 激光切割质量评价及影响因素 132

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一节 激光切割的尺寸精度评价 .....   | 132 |
| 第二节 激光切割的切口质量评价 .....   | 133 |
| 一、切口宽度 .....            | 133 |
| 二、切割面粗糙度 .....          | 134 |
| 三、切割面倾斜角 .....          | 134 |
| 四、热影响区 .....            | 135 |
| 五、粘渣 .....              | 136 |
| 第三节 影响激光切割质量的因素 .....   | 137 |
| 一、激光功率对切割能力和质量的影响 ..... | 138 |
| 二、激光束的质量 .....          | 140 |
| 三、辅助气体和喷嘴的影响 .....      | 145 |
| 四、切割速度的影响 .....         | 150 |
| 五、焦点位置的影响 .....         | 151 |
| 第四节 三维激光切割质量的评定 .....   | 153 |
| 一、挂渣 .....              | 154 |
| 二、切缝宽度 .....            | 154 |
| 三、切割面粗糙度 .....          | 154 |
| 四、切割面波纹 .....           | 155 |
| 五、切口热影响层 .....          | 155 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 第五节 TRUMPF 激光切割质量评估 .....    | 155        |
| 一、毛刺 .....                   | 156        |
| 二、割缝 .....                   | 157        |
| 三、蚀损 .....                   | 158        |
| 四、标准粗糙度 .....                | 159        |
| 五、切割锋线滞后 .....               | 161        |
| 六、垂直度和倾斜度公差 .....            | 162        |
| 七、评估表 .....                  | 163        |
| 第六节 激光切割的现状、存在的问题及安全防护 ..... | 164        |
| 一、激光切割的现状 .....              | 164        |
| 二、激光切割存在的问题 .....            | 164        |
| 三、激光切割的安全防护 .....            | 165        |
| <b>第六章 激光切割的实践应用</b> .....   | <b>167</b> |
| 第一节 激光切割金属板材关键技术及应用实例 .....  | 167        |
| 一、激光切割板材的关键技术 .....          | 167        |
| 二、激光切割金属材料时板厚与切割速度的关系 .....  | 170        |
| 三、激光切割金属板材实例分析 .....         | 172        |
| 四、激光切割金属板材在实践中的应用 .....      | 176        |
| 第二节 激光切割在造船工业的应用 .....       | 188        |
| 一、造船切割方法的发展和现状 .....         | 188        |
| 二、造船工业中激光切割应用 .....          | 190        |
| 第三节 三维激光切割在汽车制造中的应用 .....    | 191        |
| 一、三维激光切割应用概况 .....           | 191        |
| 二、复杂工件的三维激光切割 .....          | 191        |
| 三、三维激光切割在汽车制造中的应用 .....      | 194        |
| 四、三维激光切割应用实例——轿车覆盖件加工 .....  | 196        |
| 五、车身覆盖件三维激光切割特殊工艺分析 .....    | 198        |
| 第四节 光纤激光器及其在激光切割中的应用 .....   | 199        |
| 一、光纤激光器简介 .....              | 199        |
| 二、光纤激光切割技术应用 .....           | 202        |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 三、光纤激光器的发展前景 ..... | 203 |
|--------------------|-----|

## **第七章 激光切割故障信息及故障排除** **207**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一节 CNC 及驱动故障处理 .....        | 207 |
| 一、CNC 及与激光切割相关的故障及处理方法 ..... | 207 |
| 二、控制及驱动系统故障信息与处理 .....       | 209 |
| 第二节 激光器故障处理 .....            | 209 |
| 第三节 水冷机故障处理 .....            | 213 |
| 一、常见故障及其处理 .....             | 213 |
| 二、疑难故障处理 .....               | 214 |
| 第四节 空压机故障处理 .....            | 215 |
| 第五节 交换工作台故障处理 .....          | 216 |
| 第六节 激光切割中常见问题分析及解决措施 .....   | 216 |
| 一、切不透 .....                  | 216 |
| 二、切割封闭线的起点和终点不重合 .....       | 217 |
| 三、激光能量不足 .....               | 217 |
| 四、切割件穿孔点位置没切透而后面切透 .....     | 218 |
| 五、切圆成椭圆、切方形成平行四边形 .....      | 218 |
| 六、切割时工作台跳动且位置大致固定 .....      | 218 |
| 七、其余问题及解决方案 .....            | 219 |
| 第七节 激光切割设备的维护 .....          | 219 |

## **附录** **221**

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 附录 1 激光切割中常用材料切割规范 .....       | 221 |
| 附录 2 常见激光器种类及其典型技术参数 .....     | 222 |
| 附录 3 500 W 固体激光器的切割参数 .....    | 223 |
| 附录 4 国内主要大功率激光加工设备制造企业名录 ..... | 225 |
| 附录 5 国外主要大功率激光设备制造企业名录 .....   | 226 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| <b>参考文献</b> ..... | 227 |
|-------------------|-----|

# 激光加工技术绪论

## 第一节 激光原理及其特性

### 一、激光产生的背景

激光的英文名 laser, 是“Light amplification by stimulated emission of radiation”的缩写, 意为“受激辐射式光频放大”。世界上第一台激光器是美国科学家梅曼(T. H. Maiman)于1960年研制成功的。

1960年7月7日, 美国 New York Times 发表了梅曼研制成功第一台激光器的消息, 随后又在英国 Nature 和 British Commum 发表, 第二年其详细论文在 Physical Review 上刊出。其实, 爱因斯坦(Einstein)在1916年便提出了一种现在称为光学感应吸收和光学感应发射的观点(又称受激吸收和发射), 这一观点后来成为激光器的主要物理基础。1952年, 马里兰大学的韦伯(Weiber)开始运用上述概念放大电磁波, 但其工作没有进展, 也没有引起广泛的注意。只有激光的发明人汤斯(C. Towes)向韦伯索要了论文, 继续这一工作, 才打开了一个新的领域。汤斯的设想是: 由4个反射镜围成一只玻璃盒, 盒内充以铷, 盒外放一盏铷灯, 使用这一装置便可以产生激光。汤斯的合作者肖洛(A. Schawlow)擅长光谱学, 对原子光谱及两平行反射镜的光学特性十分熟悉, 便对汤斯的设想提出了两条修改意见:

- (1) 铷原子不可能产生光放大, 建议改用钾(其实钾也不易产生激光)。
- (2) 建议用两面反射镜便可以形成光的振荡器, 不必沿用微波放大器的封闭盒子作为谐振器。

直到现在, 尽管激光器的种类很多, 但汤斯和肖洛的这一设想仍然是各类

激光器的基本结构。

1958年12月,Physical Review发表了汤斯和肖洛的文章后,引起了物理界的关注,许多学者参加了这一理论和实验研究,都力争自己能造出第一台激光器。汤斯和肖洛都没有取得成功,原因是汤斯遇到了无法解决的铯和钾蒸气对反射镜的污染问题,而肖洛在实验研究后却误认为红宝石不能产生激光。可是,一年多后在世界上出现的第一台激光器正是梅曼用红宝石研制成功的。尽管世界上第一台红宝石激光器不是由汤斯和肖洛研制出来的,但是他们所提出的基本概念和构想却被公认是对激光领域划时代的贡献。

以下是激光器的发展历程:

- (1) 1962年出现了半导体激光器。
- (2) 1964年由帕特尔(C. Patel)发明了第一台CO<sub>2</sub>激光器。
- (3) 1965年发明了第一台YAG(钇铝石榴石)激光器。
- (4) 1968年开始发展高功率CO<sub>2</sub>激光器。
- (5) 1971年出现了第一台商用1 kW CO<sub>2</sub>激光器。

上述一切,特别是高功率激光器的研制成功,为激光加工技术应用的兴起和迅速发展创造了必不可少的前提条件<sup>[1]</sup>。

## 二、激光产生原理

激光是通过原子受激辐射发光和共振放大形成的。原子具有一些不连续分布的能电子,这些能电子在最靠近原子核的轨道上转动时是稳定的,这时原子所处的能级为基态。当有外界能量传入,则电子运行轨道半径扩大,原子内能增加,被激发到能量更高能级,这时称之为激发态或高能态。被激发到高能级的原子是不稳定的,总是力图回到低能级去。原子从高能级到低能级的过程称为跃迁。原子在跃迁时,其能量差以光的形式辐射出来,这就是原子发光,是自发辐射的光,又称荧光。如果在原子跃迁时受到外来光子的诱发,原子就会发射一个与入射光子的频率、相位、传播方向、偏振方向完全相同的光子,这就是受激辐射的光。

原子被激发到高能级后,会很快跃迁回低能级,它停在高能级的时间称为原子在该能级的平均寿命。原子在外来能量的激发下,使处于高能级的原子数大于低能级的原子数,这种状态称为粒子数反转。这时,在外来光子的刺激

下,产生受激辐射发光,这些光子通过光学谐振腔的作用产生放大,受激辐射越来越强,光束密度不断增大,形成了激光。

由上述激光原理可知,任何类型的激光器都要包括三个基本要素<sup>[1]</sup>:可以受激发的激光工作物质;工作物质要实现粒子数反转;光学谐振腔。

### 三、 激光的特性

激光与其他光相比,具有以下的特点:高亮度、高方向性、高单色性和高相干性<sup>[2, 6]</sup>。

#### 1. 激光的高亮度

光源的亮度  $B$  定义为光源单位发光表面沿给定方向上单位立体角内发出的光功率,单位为  $W/(cm^2 \cdot sr)$ 。对于激光而言,其辐射亮度按下式计算:

$$B = P/(S \cdot \Omega) \quad (1-1)$$

式中  $S$ ——给定方向上发光表面面积( $cm^2$ );

$\Omega$ ——给定方向上的立体发散角( $sr$ );

$P$ ——给定方向上单位立体发散角发出的光功率( $W$ )。

激光辐射亮度单位中的  $sr$  为立体发散角的单位,即球面度。

太阳光的亮度约为  $2 \times 10^3 W/(cm^2 \cdot sr)$ ,气体激光的亮度为  $10^8 W/(cm^2 \cdot sr)$ ,固体激光的亮度更高达  $10^{11} W/(cm^2 \cdot sr)$ 。这是由于激光器的发光截面  $S$  和立体发散角  $\Omega$  都很小,而输出功率  $P$  都很大的缘故。激光亮度远远高于太阳光的亮度,经透射镜聚焦后,能在焦点附近产生几千度甚至上万度的高温,因而能加工几乎所有的材料。

#### 2. 高方向性

激光的高方向性主要是指其光束的发散角小。光束的立体发散角为:

$$\Omega = \theta_2 \approx (2.44\lambda/D)^2 \quad (1-2)$$

式中  $\lambda$ ——波长( $\mu m$ );

$D$ ——光束截面直径( $mm$ )。

一般工业用高功率激光器输出光束的发散角为毫拉德( $m rad$ ,  $1 rad = 10 mGy$ )量级。对于基模或高斯模,光束直径和发散角最小,其方向性也最好。激光的高方向性使激光能有效地传递较长距离,能聚焦得到极高的功率密度,这在激光切割和激光焊接中是至关重要的。

### 3. 高单色性

单色性用  $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$  来表征, 其中  $\nu$  和  $\lambda$  分别为辐射波的中心频率和波长,  $\Delta\nu$ 、 $\Delta\lambda$  是谱线的线宽。原有单色性最好的光源是  $\text{Kr}^{86}$  灯, 其  $\Delta\nu/\Delta\lambda$  值为  $10^{-6}$  量级, 而稳频器的输出单色性  $\Delta\nu/\Delta\lambda$  可达  $10^{-10} \sim 10^{-13}$  量级, 要比原有  $\text{Kr}^{86}$  灯的高几万倍至几千万倍, 几乎完全消除了聚焦透镜的色散效应, 使光束能精确地聚焦到焦点上, 得到很高的功率密度, 相应的功率密度可达  $0.10 \sim 10^3 \text{ mW/cm}^2$ , 比一般的切割热源高几个数量级。

### 4. 高相干性

相干性主要是描述光波各个部分的相位关系。其中, 空间相干性  $S$  描述垂直光束传播方向的平面上各点之间的相位关系; 时间相干性  $\Delta t$  则描述沿光束传播方向上各点的相位关系。相干性完全是由光波场本身的空间分布(发散角)特性和频率谱分布特性(单色性)所决定的。由于激光的  $\theta$ ,  $\Delta\nu$  和  $\Delta\lambda$  都很小, 故其  $S_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta}$  和相干长度  $L_{\text{相干}} = c \cdot \Delta t_{\text{相干}} = \frac{c}{\Delta\nu}$  都很大。式中,  $c$  —— 光速。因激光相干性好, 在较长时间内有恒定的相位差, 可以形成稳定的干涉条纹。

正是由于激光具有如上所述四大特点, 才使其得到了广泛的应用。激光在材料加工中的应用就是其应用的一个重要领域。

## 四、 激光加工的特点

由于激光具有上述四大特性, 因此, 就给激光加工带来了如下传统加工所不具备的可贵特点<sup>[3]</sup>:

(1) 由于是无接触加工, 并且激光束的能量及移动速度均可调, 因此可以实现多种加工。

(2) 可用来加工多种金属、非金属, 特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料。

(3) 激光加工过程中无“刀具”磨损, 无“切削力”作用于工件。

(4) 激光加工的工件热影响区小, 工件热变形小, 后续加工量小。

(5) 激光可通过透明介质对密闭容器内的工件进行各种加工。

(6) 激光束易于导向。通过聚焦可以实现各方向变换, 极易与数控系统配合, 对于复杂工件进行加工, 因此, 激光加工是一种极为灵活的加工方法。

(7) 激光加工生产效率高, 加工质量稳定可靠, 经济效益和社会效益显著。

## 第二节 激光加工技术概述

### 一、激光加工技术的应用

五十多年来,激光加工技术与应用发展迅猛,已与多个学科相结合形成多个应用技术领域,而激光的主要加工技术包括:激光切割、激光焊接、激光打标、激光打孔、激光热处理、激光快速成型、激光涂敷等。

激光加工技术是激光技术在工业中的主要应用,它加速了对传统加工业的改造,提供了现代工业加工技术的新手段,对工业发展影响很大。特别是激光切割已成为当前工业加工领域应用最多的激光加工方法,可占整个激光加工业的70%以上。

目前,激光加工技术已广泛应用于能源、交通运输、钢铁冶金、船舶与汽车制造、电子电气工业、航空航天等国民经济支柱产业。随着科学技术的不断进步与应用,激光加工技术必定还会进一步向其他领域迈进。

### 二、激光加工技术的发展

迄今为止,全球已形成了以美国、欧盟、日本等国家或地区为领头羊的激光加工市场,激光加工技术正以前所未有的速度发展,并成为21世纪先进加工及制造技术,并已经在全球形成了一个新兴的高技术产业。

以激光切割为例,目前,国际上有代表性的激光切割设备制造商有:德国 TRUMPF(通快)公司,瑞士 BYSTRONIC(百超)公司,意大利 PRIMA(普瑞玛)公司,美国 PRC 公司和日本 MAZAK 公司等。这些国际知名公司已陆续开发出了大功率、大幅面、高速、飞行光路、三维立体、自动数控的激光切割机,并且每年都在推出新的机型。如百超2002年推出加速度 $2g$ 的高速机床( $g$ ,重力加速度),2007年推出加速度 $3g$ ( $g$ ,重力加速度)的高速机床,技术发展之迅速可见一斑。

近几年来,我国在数控激光切割技术装备领域发展迅速, $\text{CO}_2$ 激光器功率达到 $4\text{ kW}$ ,加工幅面从 $3\ 015\text{ mm}$ 到 $6\ 030\text{ mm}$ 都能实现,各种光路设计都已



成熟应用,在驱动方面普遍采用直线电机伺服系统,国产数控激光切割设备已经具备较强的市场竞争能力。

随着激光切割的逐步普及,市场要求进一步提高切割效率(高速切割),降低待机时间(自动上下料系统),扩大应用面(向三维立体切割、厚板、高反射材料方向发展),降低运行成本(降低电耗)等。

激光切割加工广阔的应用市场,加上现代科学技术的迅猛发展,使得国内外激光研究学者对激光切割加工技术进行不断深入的研究,推动着激光切割技术不断地向前发展,发展包括以下几个方面:

(1) 伴随着激光器向大功率发展以及采用高性能的 CNC 及伺服系统,使用高功率的激光切割可获得高的加工速度,同时减小热影响区和热畸变,所能切割的材料板厚也将进一步地提高。高功率激光可以通过使用 Q 开关或加载脉冲波,从而使低功率激光器产生出高功率激光。

(2) 根据激光切割工艺参数的影响情况,改进加工工艺,如:增加辅助气体对切割熔渣的吹力;加入造渣剂提高熔体的流动性;增加辅助能源,并改善能量之间的耦合;改用吸收率更高的激光(YAG 激光或 CO<sub>2</sub> 激光等)切割。

(3) 激光切割将向高度自动化、智能化方向发展。将 CAD/CAPP/CAM 以及人工智能运用于激光切割,研制出高度自动化的多功能激光加工系统。

(4) 根据加工速度自适应地控制激光功率和激光模式,或建立工艺数据库和专家自适应控制系统使得激光切割整机性能普遍提高。以数据库为系统核心,面向通用化的 CAPP 开发工具,对激光切割工艺设计所涉及的各类数据进行分析,建立相适应的数据库结构。

(5) 向多功能的激光加工中心发展,将激光切割、激光焊接以及热处理等各道工序的质量反馈集成在一起,充分发挥激光加工的整体优势。

(6) 随着 Internet 和 Web 技术的发展,建立基于 Web 的网络数据库,采用模糊推理机制和人工神经网络来自动确定激光切割工艺参数,并且能够远程异地访问和控制激光切割过程,成了不可避免的趋势。

(7) 三维高精度大型数控激光切割机及其切割工艺技术。为了满足汽车和航空等工业的立体工件切割的需要,三维激光切割机正向高效率、高精度、多功能和高适应性方向发展,激光切割机器人的应用范围将会愈来愈大。激光切割正向着激光切割单元 FMC 无人化和自动化方向发展。

(8) 光纤激光切割。由于符合光纤激光器发展需要的各种光纤结构、光纤