

综 述

激光加工技术应用的发展及展望

江海河

(中科院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 全面地介绍了激光加工的优异性能及应用与发展, 同时探讨了制约我国激光加工技术发展的几个问题, 指出 21 世纪最具竞争力的先进加工技术是激光加工技术, 并展望了其发展前景。

关键词 激光加工技术, 激光加工应用, 市场分析

1 引 言

由于激光具有方向性好、高能量和单色性好等一系列优点, 自 60 年代初问世以来, 就受到科研领域的高度重视。激光技术推动了诸多领域的迅猛发展, 应用范围越来越广, 在加工领域中的应用成果尤为显著^[1]。

激光加工系指激光束作用于物体的表面而引起物体形状的改变, 或物体性能的改变的加工过程。按光与物质相互作用机理, 大体可将激光加工分为激光热加工和光化学反应加工两类。激光热加工系指激光束作用于物体所引起的快速热效应的各种加工过程; 激光光化学反应加工系指激光束作用于物体, 借助高密度高能量光子引发或控制光化学反应的各种加工过程, 也称为冷加工。热加工和冷加工均可对金属材料和非金属材料进行切割、打孔、刻槽、标记等。热加工对金属材料进行焊接、表面强化、切割均极有利; 冷加工则对光化学沉积、激光刻蚀、掺杂和氧化很合适。

按激光加工的应用类别分: 切割约占 40%, 标刻和焊接各占 20%, 表面改性、打孔和微加工各占 10%。当前用于激光加工

的激光器主要有三类: CO₂、Nd:YAG 和准分子 (KrF、ArF) 激光器, 但随着半导体激光技术的迅速发展, 使得二极管激光器、二极管泵浦全固体化激光器、光纤激光器和超短脉冲激光器必然进入材料加工业, 特别在微细加工中的应用增长更快^[2]。激光加工应用的行业包括机械制造、纺机、医疗器械、汽车、航天航空、电子电器、电站电机、量具刃具、冶金、化工、包装和工艺装饰等。全球现有激光加工站约 4000 家。按其销售量分: 美国、日本和欧洲约各占 1/3^[3]。

在发达国家的加工业中, 已逐步进入“光加”时代。日本估计在本世纪, 激光加工将占整个加工业的 10% 以上。目前, 一些国际性大公司积极采用先进的激光加工技术, 以提高产品的竞争力, 如西门子公司在它的一条流水线上就采用了 400 多台激光器。激光加工不仅技术先进, 而且经济效益显著。美国在 2000 年用于材料加工的激光器预计达到 20000 台^[4]。我国激光加工市场前景广阔, 预计平均以每年 20~30% 速率递增, 但在激光加工系统的可靠性、稳定性以及整体化、智能化、自动化水平与国外差距较大^[4], 这

收稿日期: 2001-02-22

收修改稿日期: 2001-07-15

是制约我国激光加工技术进一步发展的关键所在,国家正在积极采取措施,加速我国激光加工产业化的进程和发展。

2 激光加工技术的特点与应用

2.1 激光加工技术的优异性能

激光具有亮度高、方向性强、单色性和相干性好等性能,加上激光的空间控制性和时间控制性很好,易获得超短脉冲、尺度极小的光斑,能够产生极高的能量密度和功率密度,足以融化世界上任何金属和非金属物质,特别适用于材料自动化加工,而且对加工对象的材质、形状、尺寸和加工环境的自由度都很大。与计算机数控技术相结合,激光加工系统为优质、高效和低成本的加工生产开辟了广阔道路,激光加工技术已成为工业生产自动化加工生产的关键技术,并具有普通加工技术所不能比拟的优势。

激光加工为无接触加工,其主要特点也就是无惯性,因此其加工速度快、无噪声。由于光束的能量和光束的移动速度都是可以调节的,因而可以实现各种复杂面型的高精度的加工目的。且加工过程中无“刀具”磨损,对工件无“切削力”。

激光束不仅可聚焦,而且可以聚焦到亚微米量级,光斑内的能量密度或功率密度极高,用这样小的光斑可以进行微区加工,也可以进行选择性加工。它不仅可以进行金属加工,还可以实现对非金属的加工,特别适合于加工高硬度、高脆性及高熔点的材料,如钻石打孔、金属切割。

由于光束照射到物体表面是局部的,虽然加工部位的热量很大、温度很高,但移动速度快,对非照射的部位没有什么影响。因此,其热影响区很小。例如,在热处理、切割、焊接过程中,加工工件基本无变形,可省去或减少后继加工量。这一特点也可以成功地用于局部热处理和显像管的焊接。

激光加工不受电磁干扰。与电子束加工

相比,其优越性就在于可以在大气中进行。在大工件加工中,使用激光加工比使用电子束加工要方便得多。

激光束易于导向、聚焦和发散。根据加工要求,可以得到不同的光斑尺寸和功率密度。通过外光路系统可以使光束改变方向,因而可以和数控机床、机器人连接起来,构成各种加工系统。这是一种极灵活的柔性加工系统,对于改造传统的机床和机器人是一种极好的方法。

激光加工技术具有的优越性使其在机械、电子、冶金、汽车、石油和国防等领域得到了广泛应用,并产生了巨大的经济效益和社会效益,应用前景是十分广阔的。

2.2 激光加工技术应用现状

激光加工技术是集光学、机械学、电子学、计算机学等为一体的高技术,是激光应用最有发展前途的领域。目前已开发出20多种激光加工技术,如雨后春笋般地应用于各个新工艺领域,如激光切割、激光打标、激光打孔、激光焊接、激光表面热处理、激光快速成型、激光清洗、激光冗余修正、激光退火、激光光刻与存储等。激光加工技术的出现是对传统的加工工艺和加工方法具有重大影响的技术变革,很快被广泛应用于汽车、电子电器、航空、冶金、机械制造等国民经济重要行业,推动了工业的快速发展,并产生了巨大经济效益。

2.2.1 激光加工技术在传统制造业中的应用

(1) 激光焊接:激光焊接是把激光聚焦成很细的高能量密度光束照射到工件上,使工件受热熔化,然后冷却得到焊缝。激光焊缝熔深大,速度快,效率高;激光焊缝窄,热影响区很小,工件变形也很小,可实现精密焊接;激光焊缝结构均匀,晶粒很小,气孔少,夹杂缺陷少,在机械性能,抗蚀性能和电磁学性能上优于常规焊接方法。激光焊接技术具有溶池净化效应,能纯净焊缝金属,适

用于相同和不同金属材料间的焊接。激光焊接能量密度高,对高熔点、高导热率和物理特性相差很大的金属焊接特别有利。目前,汽车行业将不同材质的薄钢板实施激光拼接焊后冲压成型,激光拼接焊取代了电焊,使得每辆轿车可节约 100 美元。德国新型奥迪 A2 的铝车体中的激光焊缝长达 30 m。

在激光焊接技术研究与应用方面处于世界领先水平的国家有德国、日本、瑞士和美国等。激光焊接能够实现的材料厚度最大已达 80 mm,最小为 0.05 mm,正朝着低成本、高质量的方向发展^[5]。

(2) 激光切割:激光切割是利用激光束聚焦形成高功率密度的光斑,将材料快速加热至汽化温度,蒸发形成小孔洞,并使光束与材料相对移动,实现连续孔洞的窄切缝。脉冲激光适用于金属材料,连续激光适用于非金属材料,后者是激光切割技术的重要应用领域。与计算机控制的自动设备结合,激光束具有无限的仿形切割能力,切割轨迹修改方便;通过预先在计算机内设计,进行众多复杂零件整张板排料,可实现多零件同时切割,节省材料。激光切割以其优越的性能成为现代工业应用中的第一大户。在美国、德国、日本等发达国家,因其汽车工业的发达而使激光切割的使用比例达 60% 以上。

(3) 激光打孔:激光打孔技术具有精度高、通用性强、效率高、成本低和综合技术经济效益显著等优点,已成为现代制造领域的关键技术之一。目前,工业发达国家已将激光深微孔技术大规模地应用到飞机制造业、食品加工业、医药制造业等行业。进入 90 年代,激光打孔朝着多样化、高速度、孔径更微小的方向发展。例如,在飞机机翼上打上 5 万个直径为 0.064 mm 的小孔,可以大大减小气流对飞机的阻力,取得节油 40% 的效果。目前,激光可在 3 mm 厚的不锈钢板上以每秒 65 个孔的速度进行打孔,在 1

mm 厚的不锈钢板上的打孔速度可达 100 孔/s。我国在 60 年代就开始在钟表行业中使用激光加工,对宝石轴承进行激光打孔,现已累计产值已达 22 亿元。

(4) 激光标记:激光标记技术是激光加工最大的应用领域之一。激光标记是利用高能量密度的激光对工件进行局部照射,使表层材料汽化或发生颜色变化的化学反应,从而留下永久性标记的一种技术。通过计算机控制可实现各种文字、符号和图案大小从毫米量到微米量级的标记,激光标记速度快,所标记线条、字符图案清晰,且易于在生产线上更改标记符号(如每个工件一个编号),对工件表面无作用力,不产生形变,对表面不产生腐蚀,对软、硬表面都可标记。例如:激光加工几平方毫米的集成块元件和 $500 \times 160 \text{ mm}^2$ 的计算机键盘,运用光化学作用,使塑料分子结构发生变化,从而使键盘表面的外观颜色改变,呈现出我们所看到的不同字符,这可谓是治标治本,当然不会磨灭。由于光点的热效应,标记的字符呈现凸出,可以实现键盘盲打。最近,美国某集成电路制造商已开发出寿命超 15 000 小时光纤激光打标系统用于众多半导体模制化合物、引底座、晶片、陶瓷基底和包装上形成清晰耐久的标记^[6]。

(5) 激光表面热处理:激光表面热处理技术包括激光相变硬化技术、激光涂覆技术、激光合金化技术、激光冲击强化技术等,这些技术对改变材料的机械性能、耐热性和耐腐蚀性等具有重要作用。

激光相变硬化(即激光淬火)是激光热处理中研究最早、最多、进展最快、应用最广的一种新工艺,适用于大多数材料和不同形状零件的不同部位,可提高零件的耐磨性和疲劳强度,国外一些工业部门将该技术作为保证产品质量的手段。我国西安内燃机配件厂装备 24 条发动机缸体激光淬火热处理生

产线, 年处理缸套 120 万套, 缸套磨损寿命提高 2~3 倍。武汉钢铁公司、湖南涟源钢铁厂、湖北鄂城钢铁厂等装备大型轧辊激光淬火设备后, 延长了轧辊使用寿命, 年节约成本上亿元。

激光合金化和激光涂敷: 激光合金化和激光涂覆是利用高功率激光束快速扫描金属工件表面, 使一种或多种合金元素与工件材料表面一起快速熔化再凝固, 共同形成硬化层。其冷却速度在 $10^4 \sim 10^{11} \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, 硬化层的深度通常小于 1.5 mm。激光表面合金化技术是材料表面局部改性处理的新方法, 是未来应用潜力最大的表面改性技术之一, 适用于航空、航天、兵器、核工业、汽车制造业中需要改善耐磨、耐腐蚀、耐高温等性能的零件上。激光涂覆的热处理方式也采用激光合金方式, 因此与激光合金化有许多相似之处, 其主要区别在于经激光作用后, 其熔化深度仅仅涉及到工件材料表面下极薄一层, 使其成分几乎没有进入涂层内, 以保证涂层的化学成分基本上不变化, 具有较高的性能。一般激光涂覆硬化层厚度为 0.1~0.4 mm。激光涂覆技术是在工业中获得广泛应用的激光表面改性技术之一, 具有很好的经济性, 可大大提高产品的抗腐蚀性。通过激光 Cr、Mo 合金化, 可使 45 号钢表面的耐磨性提高 1~2 倍。而用 Cr-Mo 作为覆盖层, 对 45 号钢进行激光 Cr-Mo 合金化, 结果发现: 通过激光 Cr-Mo 合金化, 可使 45 号钢表面合金层的热疲劳裂纹的萌生期比其工件内部的材料高一个数量级以上, 并且它比常用的热处理模具钢还要高 5 倍左右。

激光冲击强化: 激光冲击强化使用脉冲宽度极短激光照射材料表面, 可以产生 10^6 MPa 高强度冲击波, 使得金属材料的机械性能改善, 阻止裂纹的产生和扩展, 提高钢、铝、钛等合金的强度和硬度, 改善其抗疲劳性能。通过激光强化可以消除应力、改善微观结

构, 提高工件表面的耐磨性、耐腐蚀性、耐高温性, 从而大大提高产品的质量, 成倍地延长产品使用寿命和降低成本。例如: 对钢、铸铁、钛和铝合金, 其疲劳强度增加 25%~500%。目前人们正在将该技术应用于飞机制造业, 以增强飞机发动机部件的抗疲劳强度。

2.2.2 激光加工技术在微电子行业应用

(1) 激光光刻: 掩模版上的电路图形, 在光照下或直接投影或缩小 5~10 倍后投影到硅片的感光胶 (抗蚀剂) 上, 经过显影步骤后, 未被曝光部分的感光胶被溶解 (负型感光胶), 或者被感光部分的感光胶被溶解 (正型感光胶)。感光胶被溶解部分的硅片裸露出来, 以便进行下一步的刻蚀、扩散或金属淀积处理, 获得芯片的内部的实际结构制作。因为保留下来的感光胶起保护硅片的作用, 这种特殊的感光胶通常又叫做抗蚀剂。能够把集成电路的集成度越做越高, 完全得益于微细加工技术的不断进步。越来越多的晶体管元件集成在小的硅片上, 一直是微电子工业界不懈的追求目标, 尤其是近 10 年中, 单位面积硅片上的晶体管集成度以每三年翻四番的速度增长。根据最近出席日本京都举行的第一届国际半导体技术讨论会的人员得出结论, 光刻技术的未来前景是光明的, 下一代 130 nm 芯片要用 ArF 准分子激光光刻制造, 准分子激光仍是今后一段时间内光刻的主要工具。激光光刻技术比传统的汞灯光刻技术工艺精细、可大幅度降低生产成本, 可加工 0.125~1 μm 宽的线, 非常适合于超大规模集成电路的制造。光刻技术的未来前景是光明的, 130 nm 这代芯片到 2003 年可能用 193 nm 的 ArF 准分子激光光刻制造, 这一线宽与 16Gbit 动态随机存储器 (DRAM) 的相当 (见表 1)。通过采用积极的光学近似校正和 193 nm 的曝光器具的相移技术, 或以 F_2 准分子激光技术为基础的 157 nm 曝光, 光刻技术可能推进改革到 100 nm 一代

的芯片,其最小特征可达70 nm。准分子激光光谱窄于汞弧灯高亮度输出,同时缩短了芯片的曝光时间,提高了产量。

表1 集成电路芯片光刻比较表

DRAM	特征线宽	光刻光源	波长
16Mbit	0.5 μm	g 线	436nm
64Mbit	0.365 μm	i 线	365nm
256Mbit	0.25 μm	KrF	248nm
1Gbit	0.13 μm	ArF	193nm
64Gbit	0.07~0.1 μm	F ₂	175nm

(2) 激光微调:激光微调是把激光束聚焦成很小的光点,对电阻导电膜进行切割(熔融、蒸发),改变电阻导电体的有效导电面积或有效导电长度,达到精确调整电阻单元阻值的目的。激光微调技术可对指定电阻进行自动精密微调,精度可达0.01%~0.002%,比传统加工方法的精度和效率高、成本低。激光微调已广泛用于生产,它是在大规模集成电路生产中最为成熟的工艺,是获得高精度电路和高速生产的唯一方法。激光微调包括薄膜电阻(0.01~0.6 μm 厚)与厚膜电阻(20~50 μm 厚)的微调、电容的微调和混合集成电路的微调。目前,激光调阻设备每秒可调200多个电阻。

(3) 激光退火:激光退火最初是消除半导体中离子注入引起电路基体的破坏,并使注入杂质激活。现在这项工作已伸展至很宽的范围,有些情况已不存在离子注入的破坏,如硅化物形成、非晶物生长单晶、使化学沉积多晶形成大粒多晶等。这些技术为大规模集成电路的制造提供了新方法。它能形成陡峭又浅的p-n结,获得比普通杂质激活法更高的掺杂浓度区,形成良好的连接。最有益的是为在非晶材料上生长晶状半导体提供了一种较便宜的晶体制造方法,可形成有绝缘层的多层晶状薄膜,为三维集成电路发展提供了可能性。激光退火技术是半导体加工的一种新工艺,效果比常规热退火

好得多。激光退火后,杂质的替位率可达到98%~99%,可使多晶硅的电阻率降到普通加热退火的1/2~1/3,还可大大提高集成电路的集成度,使电路元件间的间隔缩小到0.5 μm 以下。

(4) 激光存储:光盘的制作分两个阶段,第一阶段是激光刻制母盘既印模模具;第二阶段是压制生产用户盘。在母盘刻制中,信息首先用激光录制到优质盘形衬底的光致抗蚀剂上,这个过程称为主录。染料记录层改用无机材料层,无机材料层可在晶态和非晶态之间转换,并通过脉冲激光加热又可变回来,实现对原有数据信息的擦除,并可重新录制新的数据信息。激光存储技术是利用激光来记录视频、音频、文字资料及计算机信息的一种技术,是信息化时代的支撑技术之一。用聚碳酸酯衬底制作的盘片,结果使得DVD-Video和DVD-ROM盘的每张存储信息达9.4 GB,该容量特别适合存储135 min时间的电影。DVD、VCD光刻:光盘直径:120 mm,650Mbyte。数据凹坑:宽度小到0.6 μm ,深度小到0.12 μm ,长度1~2 μm ,几亿凹坑;螺距1.6 μm ,总长约5 km。光刻激光器:3 mW、波长为780 nm的半导体激光器。不久,400 nm左右的短波长激光器即将实用化,届时DVD的容量将大大提高。

(5) 激光划线:随着单晶硅衬底尺寸的不断增大和超大规模集成芯片尺寸的逐渐减小,几英寸晶片上制造的芯片数目达几千片,在封装这些芯片之前,必须将基片按芯片的布局进行切断。与过去的超薄金钢石砂轮切割相比,激光划线是非接触切断,无切削粉末和冷却液污染,切口光滑,精度高。目前激光划线技术已成为生产集成电路的关键技术,其划线细、精度高(线宽为15~25 μm ,槽深为5~200 μm),加工速度快(可达200 mm/s),成品率可达99.5%以上。目

前,英国石英公司正在试验使用激光划线技术提高太阳能电池的效率。他们在石英被涂覆之前,用激光在其上刻划出栅格,以此增大电子密度,从而将普通的太阳能电池的转换效率从12%提高到17%。

(6) 激光清洗:使用短脉冲的紫外激光照射基片,基片吸收光子的能量其表面温度发生变化而产生热膨胀,导致吸附在基片表面上的微粒和油脂克服吸附力的束缚而向前喷射,使基片实现清洗。采用 KrF 准分子激光能够将直径 $0.180\ \mu\text{m}$ 的颗粒去除,包括金属碎片、光致抗蚀剂屑、金属离子、有机薄膜等,颗粒减少达 96%。激光干式清洗工艺较目前的湿式化学清洗工艺有许多优点,该工艺不留痕迹因而不损坏芯片表面,特别适合于清洗极高分辨率光刻所需的芯片。激光清洗技术的采用可大大减少加工器件的微粒污染,提高精密器件的成品率。清洁一块 6 英寸芯片所需要时间目前约为 1 min。使用该工艺,可节省 10% 的建造新工厂的费用,如建造一个 10 亿美元的工厂则可节省 1 亿美元以上。此外,由于每年可减少上百万升清洁芯片的超纯净水,制造商可节省 20% 的运转费,部分是传统清洗法所需的有毒化学试剂的费用。目前,芯片制造商用湿式清洗一块 150 mm 芯片要花费 7.35 美元,而该项激光清洗新工艺可将此费用减少 67.85%。

2.2.3 激光加工在其他行业应用

(1) 激光快速成型:激光快速成型技术集成了激光技术、CAD/CAM 技术和材料技术的最新成果,根据计算机设计出的零件的 CAD 模型立体图形,直接制造出模型,它制造模型的办法是在一层接一层的基础上不断添加材料。与此相反,传统的制造过程是从一大块原料上开始,逐步削掉不需要的部份。激光快速成型正对机械制造的工序流程和制造技术方面进行一种彻底的变革。激光快速成型不仅能用来评估零件的形态和装

配,而且还能反应零件的功能性。最近,快速原型制造法的模型已用来制造加工模具,再用这些模具去生产功能性原型。这些加工模具还被用来进行有限的产品生产,其中许多这样的模具能进行 1000 次以上的操作。目前正朝着直接制造加工模具方向努力,许多厂商在这方面已获得成功。该技术已在航空航天、电子、汽车、家电等工业领域得到广泛应用。

(2) 激光毛化:激光毛化是用特殊调制的脉冲激光,将其聚焦照射到轧辊表面,高能量密度的光斑使得轧辊表面小区间的温度升到数千度,形成一个微小熔池,获得轧辊表面的毛化。然后在薄板轧制或平整过程中,轧辊面上的凸台在板面上再形成许多变形硬化微坑,以形成激光毛化板。激光毛化轧辊表面粗糙度均匀、可控,能明显改善毛化板深冲性能和涂镀性能,而且还可以延长轧辊使用寿命;激光毛化过程无噪声、无污染,是一种清洁文明的生产工艺。激光毛化可以使普通冷轧薄板(带)的质量大大提高。天津冷轧薄板厂由于采用了激光毛化技术,将面临倒闭的企业起死回生,仅 1995 年生产了 6 亿元的激光毛化钢板,出口创汇数千万美元。

(3) 激光制版:激光的出现引发了印刷工业中的一场革命。现代社会中,信息的作用越来越重要。谁掌握的信息越迅速、越准确、越丰富,谁也就更加掌握了主动权,也就有更多成功的机会。因此在信息传播中,加快印刷速度,缩短出版周期也就有了相当重要的意义。激光照排是将文字通过计算机分解为点阵,然后控制激光在感光底片上扫描,用曝光点的点阵组成文字和图像。在我国已广泛应用的汉字排版技术就采用了激光照排,它比古老的铅字排版工效至少提高 5 倍。目前,正在研制的激光直接制版技术,可以实现激光直接扫描到 PS 印版上,与激

光照排技术相比,可以省去软胶片的曝光、冲洗和拼版、晒版等工艺,大大地提高了印版的质量和制版效率。

(4) 激光刻蚀: 印染网激光雕刻是用高功率密度的激光作用在涂胶的镍网辊表面上,通过计算机及专业软件,控制激光按印染花样的要求扫描。生物芯片和布拉格光纤光栅的刻蚀。其中布拉格光纤光栅主要用于光纤通信,所以需求量极大。用于激光刻蚀的激光器主要有准分子激光器、铜蒸气激光器和倍频氩离子激光器。

(5) 激光雕刻: 激光雕刻就是利用高能量密度的聚焦激光束代替传统的凿子和刻刀,对工件多余的部分去除雕刻,形成一定的形貌。像传统雕刻一样,分镂空雕刻和普通刻划雕刻两类。激光可用于仿古家具的镂空雕刻,石碑碑文和原子印章雕刻。其中激光雕刻原子印章技术的出现,使印章业跨入了大规模现代化生产时期。其优点在于能大批量生产,效率大为提高。目前我国印章雕刻用的 CO₂ 激光雕刻系统已批量生产,并满足于市场需求。

(6) 激光强化电镀: 激光强化电镀技术可提高金属的沉积速度,速度比无激光照射快 1000 倍,对微型开关、精密仪器零件、微电子器件和大规模集成电路的生产和修补具有重大意义。使用该技术可使电镀层的牢固度提高 100~1000 倍。

还有激光精细加工技术如激光焊接医疗器械部件——超常规注射系统(不需要针头和无痛苦药物传递系统 BOCCascs,一次性使用,全球需求量为 200 亿次/年)、激光冗长修复加工技术、激光捕获细胞器的光镊技术等等在这里就不一一赘述了。

3 制约我国激光加工技术发展的几个关键问题

3.1 激光器的质量

作为激光加工机械核心的激光器的质量

仍是制约激光加工技术发展的关键因素之一,因为激光器的输出参数如功率、能量的稳定性、光束质量、器件的可靠性都影响着激光加工的成品率及效益。因此发展和完善检测技术,提高光束质量是激光加工应用技术首要解决的问题,也是促进激光加工业发展的一项重要措施^[7]。光束质量的实时在线监测并控制调整加工机械的工作状态可保证加工质量,国外商品化的激光加工装置几乎都配备激光监视系统和可供用户参考的工艺参数与方案。而国内尚无检测系统与整机配套的定型产品。

3.2 激光加工工艺技术

激光加工质量的保证和提高在很大程度上是取决于成熟的激光加工工艺技术,即确定加工的最佳工艺参数,它是随激光技术不断发展并经过大量的应用研究与实践而逐渐积累完善起来的^[8]。可以这么说,激光加工技术的发展,就是激光加工工艺技术的提高和完善。实时检测系统为激光加工机的研制生产提供研究加工工艺的手段,在此基础上应该进一步从单纯监测走向监控,实现对最佳加工光参量的实现控制,保证用户在使用时的效果。

3.3 导光系统

导光聚焦系统是激光加工系统的重要配套设备,因为激光的聚焦光斑直径、焦平面和焦深,在不同的位置将发生很大的变化,这会对加工质量带来严重的影响^[9]。在加工机的导光系统中国外已有 400 μm 芯径的光纤传输高光束质量的 5 kW 功率的激光束。空芯管状光纤传输技术的进步提高了激光加工导光系统的柔性化程度和光转换效率。而且使 CO₂、Er:YAG 激光系统更加实用化。

3.4 高速传动与精密定位系统

激光加工通常是光、机、电一体化系统,除激光器外,还要对加工件进行传动、装卸和定位,随着加工精度的提高和工艺化在线生

产的要求,传动速度和系统精度越来越高。例如,美国某公司生产的激光调阻器,其调阻速度高达 12000 个/min,位置精度小于 5 μm 。

在我国由于科技支撑能力不强,不仅存在以上几个制约激光加工产业发展的关键技术问题,还有研发成果的推广和激光加工市场的培育问题(科研成果转化为生产力的机制较差),众多应用企业对激光加工的优越性和重要性严重认识不足,有待于激光加工科普的宣传,早日缩短与国外的差距。

4 激光加工市场分析

4.1 全球激光产业回顾与市场分析

2000 年全球激光产业得到了迅速增长。2000 年全球激光器市场总销售额预测为 63 亿美元,其中半导体激光占 69%,约为 43 亿美元,通信激光器为 29 亿美元,占该市场总销售额的 46%。实际上,由于光通信的快速发展,半导体激光器增长速度惊人,2000 年全年市场销售额达到 51 亿美元,比 1999 年的 22 亿美元大幅增长了 132%,接近年初预测值 69% 的 2 倍。结果导致 2000 年全球激光器市场总销售额高达 88 亿美元,比 1999 年大幅增长了 79%。

由于 2000 年激光产业的快速增长和当前激光通信行业过热,使得人们对 2001 年的全球激光器市场预测有些忧郁,期望该市场总销售额达到 115 亿美元,同比去年增长 30%,其中非半导体激光器产业增长 13%,用于光通信和光存储的半导体激光器分别增长 37% 和 32%。

在全球都将注意力集中在光通信产业时,2000 年度通信以外的其他激光器产业比预期的增长了 18%,达到了 38 亿美元,同比 1999 年增长了 44%。预计,2001 年该市场将进一步增长 21%,达到 46 亿美元,其中,就非半导体激光器产业而言,2000 年的市场销售额比年初预计的增加了 14%,达

到了 22 亿美元,同比 1999 年增长了 26%。预计,2001 年该市场再增长 13%,达到 25 亿美元。除通信以外,世界半导体器件市场 2000 年比 1999 年增长了 37%,而 2001 年还要增长 27%^[10]。2000 年二极管激光器的全球销售额达到 65.9 亿美元,比 1999 年 31.7 亿美元增长了 108%,比 1999 年预期的增长多得多,总的来看,2001 年二极管激光器市场呈增长势头,预计为 36.2%。图 1 为二极管激光器及非二极管激光的 1997~2001 年的销售情况。

在工业应用方面,2000 年成为激光产业新的里程碑。激光系统设备市场销售额突破 30 亿美元,工业激光超过 10 亿美元,其中增长较快的是半导体泵浦激光系统和准分子激光系统,同比上年增长了 20% 和 23%,这主要得益于它们被广泛用于材料处理。由于半导体工业将转向 150 nm、130 nm 准分子光刻系统和 300 mm 基片、铜导电层的晶片,2001 年半导体材料加工市场预期增加 30%。预计,2001 年激光材料加工将再增加 17%,非半导体激光材料加工市场销售额将达到 16 亿美元,其中准分子光刻系统将增长 35~40%^[10]。

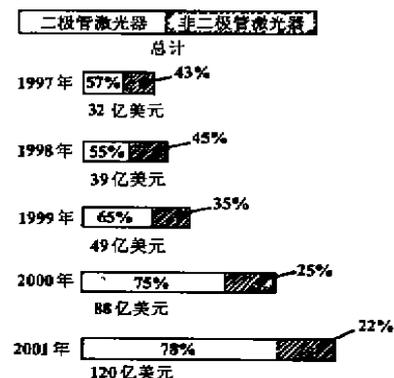


图 1 1997~2001 年世界商品化激光器销售总额 (单位:亿美元)

在金属加工市场方面,2000 年总销售比预计下降了 5%,即 2000 年比 1999 年增长了 10%,但 2001 年预计能增长 11%。

二极管激光器打入激光材料市场的迅猛势头未减, 2000 年用于材料加工的二极管激光器销售虽然较 1999 年有所减少(因统计不连续性造成的不准确), 但预计 2001 年增长 61%, 其中使用二极管激光器的大功率系统增长最大^[11]。根据 Optech 资料表明, 工业激光加工系统需求旺盛(见图 2), 尤其集中在东南亚市场。图 3 为 2000 年与 2001 年用于材料加工(含相关的通信、光存储二次加工)的二极管与非二极管销售情况对照。

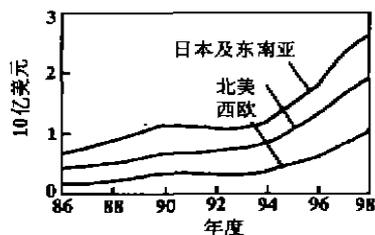


图 2 1986 年以来全球工业激光加工系统 (CO₂, Nd:YAG 和二极管激光器) 需求对照

4.2 国外激光产业现状

2000 年, 由于美国经济的高速增长, 带动了全球经济复苏。目前, 美国、日本、德国三个国家激光产业的发展代表了当今世界激光产业发展水平。1998 年全球激光产业产值达 60 亿美元, 其中三大市场分别为: 美国(包括北美)占 55%, 欧洲占 22%, 日本和太平洋地区占 23%。激光器销售额为 38 亿美元, 比 1997 年增长 19%。

在美国比较著名的激光公司有: 相干公司、光谱物理公司、联合工艺 (URTC) 公司、PRC 公司、燃烧工程公司、Lumonics 公司、Synrad 公司、Marted Lasers 公司、Electrox 公司和 ESI 公司等。相干公司和光谱物理公司是美国最大的两个激光公司, 占美国激光公司总销售额的 40% 以上。光谱物理公司的工业激光部的高功率 CO₂ 激光器股权已为德国 Rofin-Sinar 公司所收购, 主要生产 1.5 ~ 6 kW 横流 CO₂ 激光器; 联合工艺公司主要生产 5 ~ 30 kW 高功率横流 CO₂

激光器, 并且和德国一公司合资在德国制造这类设备; PRC 公司主要生产 0.5 ~ 3.5 kW 轴快流 CO₂ 激光器, 现已累计销售了 1000 台高功率 CO₂ 激光器; 燃烧工程公司生产 1 kW、5 kW 和 10 kW 的高功率横流 CO₂ 激光器(以色列 MLI 公司的专利); Synrad 公司主要生产 500 W 以下封离型射频激励 CO₂ 激光器。

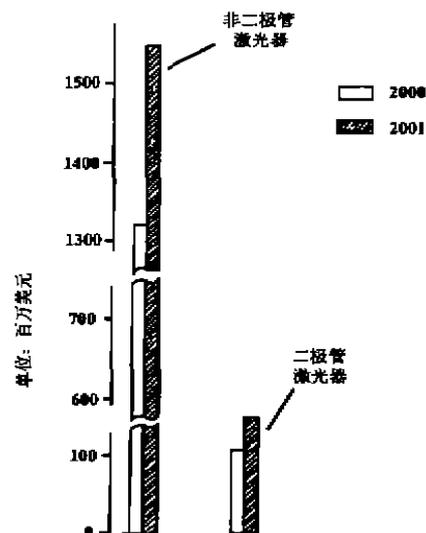


图 3 用于材料加工的商品化激光器销售情况对照

美国是世界上最早建立激光加工站的国家, 许多加工站建立于 70 年代中期, 1996 年的统计结果表明, 美国激光加工站的年收入已逾 60 ~ 80 亿美元, 在美国激光加工站已超过 1765 家, 这对于在美国推广激光加工技术起着重要的作用。1999 年美国激光加工站已增至 2700 家。

统计表明, 日本占当今世界上工业用激光设备的 30% 左右, 激光加工是日本重要的基础制造技术之一。日本生产 CO₂ 激光器的厂商有 60 家, 生产 CO₂ 激光加工机的主要制造厂商为三菱电气、松下电气、Amada 和 Mazak 等公司, 占日本激光加工市场 70% 左右。另外德国 Rofin-Sinar 激光公司和日本 Marubeni 及 Nippei Toyama 公司合资经营, 德国的 Trumpf 激光技术公司和日本石

川岛播磨重工合资经营, 这表明德国的 CO₂ 激光加工机已进入了日本激光加工市场。日本生产 YAG 激光器的有日本电气、富士电视、东芝等 30 家生产厂家。由于近几年日本经济不景气, 激光产业受到了较大冲击, 不仅没有增长反而出现了一定的倒退。

德国比较著名的研究所和中心有: 夫朗和费激光技术研究所、柏林固体激光研究所、汉诺威激光中心、斯图加特光束应用研究中心等。德国企业 (主要是 Rofin-Sinar 激光公司、Trumpf 激光技术公司、Haas 固体激光公司、Lambda Physik 公司等) 几乎占了世界市场的 40%, 处于领先地位。在激光光源方面 CO₂ 占 42%, Nd:YAG 占 35%; 在激光系统方面 CO₂ 激光加工系统占 56%, YAG 激光加工系统占 40%。CO₂ 激光加工系统 Trumpf 公司是自行配套, 而 Rofin-Sinar 公司则与格瑞斯海姆有限公司合作配套, 已形成 Lascontur 系列激光加工机。Rofin-Sinar 公司 2000 年第二季度的销售额同比增长 60%, 这主要得利于贝塞尔激光技术的应用和将半导体泵浦的数千瓦固体激光器用于欧洲的汽车行业。Trumpf 公司 2000 年激光产业销售额增长了 15%。近几年德国激光产业的出口增长表明, 在国际上德国企业有强大的竞争能力, 其激光工业目前仍处于上升阶段。

德国为了推广激光加工技术, 除了建立 9 个国家级激光中心外, 还大量建立激光加工站; 同时在大、中、小型企业积极建立激光加工生产线。为此, 在“激光 2000”计划中特别提供 500 万马克 (25 个项目) / 年, 向批准有激光加工技术项目的中小厂每个项目资助 20 万马克。

以美国、日本、德国为首的西方工业发达国家非常重视激光技术的发展与应用, 把激光技术列入国家级发展计划中, 例如美国的“激光核聚变计划”、德国的“激光

2000”、英国的“阿维尔计划”、日本的“激光研究五年计划”等, 形成了如德国的通快公司 (Trumpf), 美国的相干公司 (Coherent)、Synard 公司等世界知名激光公司。俄国对发展激光技术也奋起直追, 制定和提出“激光技术服务于俄罗斯经济”国际专项纲要, 重点支持在 1996~2005 年“国家技术库”联邦专项纲要中设立“发展光电子和激光技术”专项。

4.3 我国激光产业现状

国家“六五”至“九五”期间对激光技术基础研究的大力投入, 已在北京、上海、武汉三地形成中国激光研究、应用的三足鼎立之势。据统计, 我国激光产业的总销售额在“八五”期间达到 125.32 亿元, 平均年增长率达 2.33 倍, 其中排在第一位的是光存储, 第二位是测距、准直, 第三位是激光医疗, 第四位是激光加工设备。

中国光电子协会提出的国家激光产业发展战略是: 以世界激光产业发展趋势和国内外市场为导向, 以国内建设和人民生活急需的重要项目为龙头, 集中力量, 发挥优势, 采取重点突破, 组织和建立多种投资体制的产业集团, 逐步形成规模生产, 加速激光产品商品化、产业化和国际化进程, 争取在 2010 年国内激光产品销售额达到 400 亿元。中国激光产业应尽快进行地区性、全国性的兼并重组, 组建大激光产业集团, 才能在中国加入 WTO 后抵御国外激光企业的挑战。

我国目前从事激光器及激光应用设备生产的厂家达 500 多家, 其中有 5 个国家级的激光技术研究中心、10 多个研究机构, 全国有 21 个省、市、地区生产和销售激光产品, 主要分布在湖北、上海、江苏和北京。从事激光加工系统开发和生产的主要单位有: 大恒科技、华工科技、电子十一所、楚天、上海激光 (集团) 总公司、大族公司等。

近年来, 我国激光市场以 15% 左右的年

平均发展速度增长, 1999年的销售总额达到11.84亿元, 比1988年增长了23%、其中创汇1525.2万美元, 预计2000年比1999年增长15%, 达13亿元^[12], 表2为1999年产品的销售额应用分类与1998年比较^[12]。

5 激光加工技术的发展与展望

激光加工技术是对传统加工技术的革命, 随着我国经济的迅速发展和产业的升级以及激光技术的不断推广应用, 激光产品将有非常广阔的市场前景。

我国在光电子技术方面是与国际水平差

距较小的一个领域, 与发达国家几乎同时起步。1960年, 世界第一台红宝石激光器问世, 第二年, 我国第一台红宝石激光器就研制成功了, 此后我国激光技术迅速发展, 特别是在改革开放后, 以激光为特色的光电子信息产业作为一支产业新军迅速崛起。专家们认为, 在激光科研领域我国并不落后, 可以说, 国外已有的激光技术, 我国也都研究开发过, 但真正达到应用的还不多, 特别是在微电子、汽车、机械制造这些领域, 激光技术还没有发挥出应有的作用。

表2 1998、1999年全国激光产品销售按应用、器件分类统计

类别	1998年		1999年	
	销售额(万元)	增长率*%	销售额(万元)	增长率%
光通信	15888.08	87.3	30831.2	93.9
激光加工	15897.5	21	16082.1	1.2
激光医疗	5775.4	7.5	9902.5	71.5
测距准直	19288.5	160	19792.6	2.6
材料、元器件	17332.7	38	19649.7	13.4
CO ₂ 激光器及其应用	8666.9	-17.8	12018.9	38.7
YAG激光器及其应用	26728.1	11.3	25635.1	-4
He-Ne激光器及其应用	2865.7	-28.6	1926.3	-32.7
半导体激光器及其应用	14833.3	84.5	39249.4	164.6

*注: 与1997年的销售额相比

激光加工作为信息时代的一种新型加工工艺, 对提高产品质量、劳动生产率、自动化、无污染、减少材料消耗等起到愈来愈重要的作用, 既得到其他高新技术发展的有力支撑, 又受到社会经济迅速发展强烈要求的牵引, 正保持着强劲的发展势头。预期它将沿着以下一些方向发展:

1. 数控化和综合化

把激光器与计算机数控技术、先进的光学系统以及高精度和自动化的工件定位相结合, 形成研制和生产加工中心, 已成为激光加工发展的一个重要趋势。

2. 小型化和组合化

国外已把激光切割和模具冲压两种加工

方法组合在一台机床上, 制成激光冲床, 它兼有激光切割的多功能性和冲压加工的高速高效的特点, 可完成切割复杂外形、打孔、打标、划线等加工。

3. 高频度和高可靠性

目前, 国外脉冲YAG激光器的重复率已达2000 Hz, 连续二极管泵浦的YAG激光系统输出功率已达10 kW, 100 W的器件已商品化。二极管阵列泵浦的Nd:YAG激光器的平均维修时间已从原来的几百小时提高到1~2万小时。最近Jenoptik Laserdiode公司已研制出了2 kW的二极管激光器, 其快慢轴光束参数积 $< 200 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 可直接用于激光加工。

4. 超快和紫外激光加工

适用微电子、微机械和分子生物学发展的需要,利用波长更短的激光,包括X射线激光、其它固体激光的高次谐波、特别是准分子激光,发展亚微米和纳米加工,如打极小的孔、刻极微细的槽、进行极微细的三维雕刻、纳米机电零件的清洗与搬运等。同时,可用激光对生物细胞及其中的染色体进行切割、搬运和改造,成为生物工程和医学研究的一种精密工具。目前,全固化266 nm的紫外激光器输出功率已达20 W;193 nm准分子激光已达到10 W、4 kHz。

总之,激光加工是21世纪最具竞争力的先进加工技术,展望它的发展前景是十分广阔的。

我国科技部提出的“十五”激光项目设想是,把握激光技术发展中的新机遇,利用产业结构调整 and 科研体制改革带来的有利条件,以激光加工技术为重点,在“攻关键技术、抓示范应用、建推广体系”这三个有机结合的层次上,重点解决激光产业化的关键技术、重点制造业中急需的激光加工集成装备以及激光技术推广应用的服务体系等^[19],使我国激光加工朝高稳定、整体化、智能化、柔性化方向发展,进而促进传统产业技术升级和激光产业的发展。

参考文献

- 1 Johnson K I. Current and future developments of the plasmaare, laser and electron beam processing. Proc Int Power Beam Conf, San Diego, California, USA, 1998, 5(2-4):1~10
- 2 宋威廉. 用于激光加工的激光器及其特点. 激光与红外, 1997,27(6):323~325
- 3 汤祖亮. 试论我国的激光加工市场. 激光与红外, 1998, 28(2):77~80
- 4 苏宝蓉. 我国的激光加工现状及发展前景. 激光与红外, 1996,26(3):175~177
- 5 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望. 激光技术, 2001, 25(1):48~54
- 6 颜 严. 光纤激光器将成功用于制造业. 激光与光电子学进展, 2001,4:55~56
- 7 满春阳, 陆东, 史红民. 激光加工中光参量的测试技术及设备. 应用激光, 1999,19(5):323~326
- 8 关振中主编. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998,6
- 9 赵 侠. 在大幅面激光加工中获得稳定高质量聚焦的方法. 激光技术, 2001,25(1):67~70
- 10 Anderson S G. Review and forecast of the laser markets—Part I: Nondiode laser. Laser Focus World, 2001, 37(1): 88~110
- 11 Steele R. V. Review and forecast of the laser markets—Part II: Diode laser. Laser Focus World, 2001, 37(2): 84~99
- 12 中国光协激光专业分会秘书处. 1999年度我国市场的发展. 北京: 中国光协激光专业分会第四届会员大会. 见: 激光集锦, 2000,10(3): 16~18
- 13 孙中发. 关于“十五”激光项目及其实施要求的设想. 北京: 中国光协激光专业分会第四届会员代表大会上的讲话, 2000.11

Development and Forecast of the Laser Processing Technology Application

Jiang Haihe

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences Hefei 230031)

Abstract The outstanding performance of laser processing and its application and developments are entirely introduced. Some problems to restrict the development of laser processing technology in China are discussed. That the most competitive advanced processing technology in 21th century is the laser processing technology is indicated in this paper. Finally, its development prospect is forecasted.

Key words laser processing technology, laser processing application, market analysis