

文章编号:1001-5078(2006)增刊-0755-04

激光加工技术的发展

宋威廉

(中国电子科技集团公司第十一研究所,北京 100015)

摘要:文章介绍了全球和国内激光加工设备市场的概况以及制造业对激光加工设备的基本要求。从新工业激光器的研究和激光加工的应用两方面阐述了激光加工技术的发展。最后指出激光加工技术显现出传统加工工艺无法比拟的优势,应该向制造业提供成套的激光加工技术,为中国成为制造强国作出贡献。

关键词:激光加工;市场;制造;激光器

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

The Development of Laser Processing Technology

SONG Wei-lian

(11th Research Institute, CETC, Beijing 100015, China)

Abstract:In the paper the global and domestic market of laser material processing system are introduced, as well as the main requirements for manufacture. The progress of research on new industrial lasers and applications of laser processing are described. Compared with traditional technique, the laser processing emerge indisputable advantages. Sets of laser processing technology are provided for manufacture to make China become a powerful manufacturing nation.

Key words:laser processing; market; manufacture; laser

1 激光加工技术的市场

激光加工技术在上世纪激光问世不久就受到人们的重视,经过40多年的发展,至今已成为先进制造技术的重要组成部分。

为了推测出对激光加工技术需求的前景,对1995年至2004年全球激光加工设备的销售额和我国国产激光加工设备的销售情况进行了统计(见表1和表2):

从表中所列数据可以看出,全球激光加工设备市场持续增长,2000年起受经济萧条的影响,增长速度减缓,随着世界经济复苏,2004年起激光加工设备市场迅速回升,说明技术发达国家对发展激光加工技术的重视。我国国产激光加工设备的销售额随国民经济的发展增长更快,尤其是从2000年开始

进入高速发展时期,到2004年已超过了15亿元人民币;但只占全球销售额的5%,对一个制造大国来说是不相称的,必须大力发展先进的激光加工技术,改造传统的制造工艺,提升我国的制造水平,成为全球制造强国。

表1 1995~2004年全球激光加工设备的销售额(亿美元)

年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
销售额	11.62	16.36	20.63	23.42	25.68	27.76	28.75	29.90	31.11	37.25

作者简介:宋威廉(1939-),男,研究员级高工,1962年毕业于上海交通大学,现任中国光学学会激光加工专业委员会副主任、华北莱茵光电技术有限公司顾问。

收稿日期:2006-06-15

表 2 1995~2004 年我国国产激光加工设备的销售额(亿人民币)

年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
销售额	0.73	1.23	1.31	1.59	1.61	3.40	6.32	10.35	12.53	15.01

制造业要发展,就必须提高制造技术,先进的制造技术和设备是提高制造水平的有效手段,采用激光加工技术可以提高生产效率、降低成本、提高产品质量,所以制造业竞相采用激光加工技术,例如在美国、欧洲、日本高功率激光切割机的装机量都超过了一万台,德国大众汽车厂用于车身制造的激光机械手多达 475 台,我国长江实业公司的 IC 封装生产线上也装备了近百台激光标记机。制造业的需求使得激光加工技术的市场始终保持着强劲的上升势头。目前激光加工的主要应用如图 1 所示。

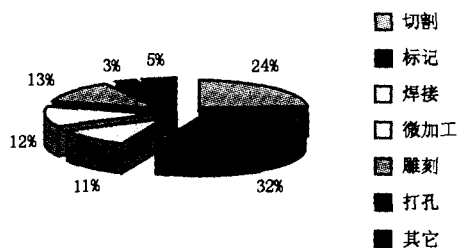


图 1 2005 年全球激光加工应用情况

2 制造业对激光加工设备的基本要求

制造业为了采用激光加工技术,要求激光加工设备能达到以下几点要求:

- (1) 能满足使用要求:能够提升产品质量或制造新产品,提高企业的竞争能力;
- (2) 可靠:能在工业环境下运行,24 小时连续工作,一般熟练工作人员就能操作;
- (3) 安全:设备安全性好,使用中不会发生人身伤害或其它给企业造成损失的事故;
- (4) 回收投资周期短:要求设备性能好、价格合理、能耗少、占地面积小,使企业能够以较少的投资、较低的运行成本、取得较高的经济效益。

通过研究人员和生产厂家的不懈努力,激光加工设备质量有了大幅度的提高,目前已达到在生产线上稳定运行的要求。例如 SYNRAD 公司生产的扩散冷却密封 CO₂ 激光器寿命达到 20,000 小时(投入市场较早的型号已超过 45,000 小时)。为了提高工业激光器的质量,在制造中采用了许多新设计、新工艺,如 Coherent 公司的 Avia-30 声光调 Q 绿光激

光器,输出功率 30W, $M^2 < 1.3$,脉宽 45ns,适用于精细加工;用无铝高功率半导体激光器泵浦,使稳定性和可靠性显著提高;在谐振腔光路安装时采用了 PermAlign 专利技术,是一种钎焊键合工艺,保证内部光学件永久定位,最大程度地保证谐振腔的准直性不受时间和震动的影响,达到了免维护。现在,激光加工设备的功能、可靠性、安全性、性价比都能达到制造业在生产线上运行的要求,而且可以完美解决加工的难题,因此受到制造业的青睐。

3 激光加工技术的发展

3.1 新工业激光器的研究

(1) 光纤激光器

近年来光纤激光器在技术上取得了巨大的进展,与传统的固体激光器相比较,整体化的结构从根本上解决了由于内腔光学件污染、位置变化引起的故障,大大提高了可靠性;同时,光纤激光器输出激光的模式由光纤波导参数决定,而这些参数取决于光纤的折射率分布,因此输出的激光不仅光束质量好,而且稳定;加上体积小、转换效率高、光纤柔软可弯曲,便于激光传输,使得它在工业应用中对用户来说更具吸引力。据 ILS 统计,2005 年光纤激光系统的销售额比 2004 年增长了 170%,目前主要用于标记和高功率焊接,此外在薄金属构件的精密切割领域也开始应用。输出功率可达千瓦,增大输出功率的主要技术途径为合束,输出非相干激光,但光束质量下降(M^2 与合束数的平方根成正比),因此高功率光纤激光的切割质量还不如 CO₂ 激光。然而,随着研究的深入,高功率光纤激光器的性能也在不断提高,最近 IPG 公司出售给德国国家材料研究所的 YLR-20000 型光纤激光器,输出功率 20kW,芯径 200 μ m, BPP < 11mm·mrad,是当前同类固体激光器中性能最好的。

表 3 列出了光纤激光器与其它激光器的比较,显然,光纤激光器以其优异的性能,在制造业将会得到更加广泛的应用。

(2) 紫外波段激光器

在材料加工中应用比较多的是准分子激光器和全固态 UV 激光器,波长有 157、193、248、266、355nm 等。加工机理为高能量的光子直接切断材料的化学键,实质上属于光化学反应。例如当高分子材料吸收 UV 激光后,分子键迅速断裂,使局部区域

的体积迅速膨胀而将碎片“爆炸”式地抛离表面,整个过程时间极短(约 20ns),因此热扩散造成的损伤极其微小。与可见光或红外激光利用聚焦到加工部位的热量来熔化、汽化材料相比较,它避免了热传导对周围材料的影响,是“冷加工”方式。另外,由于 UV 激光波长短,可以聚焦成更小的光斑,因此能够进行更精密的加工。采用 UV 激光切割硅、砷化镓等晶圆,切口宽度小于 $3\mu\text{m}$,切口平直、光滑、无边缘碎片、几乎没有再铸层。

表 3 光纤激光器与其它激光器的比较

激光器	光纤	半导体	Nd:YAG	CO ₂	
最大输出功率(W)	20000	6000	6000	30000	
插头(wall plug)效率(%)	20	30	3	10	
光束质量(mm·mrad)	100W	<1	25	3	
	5000W	10	300	25	
价格(\$)	100W	70,000	30,000	54,000	35,000
	1000W	360,000	160,000	145,000	90,000
运行费用(\$/h)	100W	0.1~0.2	0.2~0.4	1.0	0.4~1.0
	1000W	1~2	2~4	5~9	4~7

准分子激光器在“冷加工”领域曾经占主导地位,但是它的体积大、运行费用高、工作物质有毒,尤其是光束截面大,因此影响了推广应用。自从全固态 UV 激光器的输出功率增加,可以满足加工的需要后,由于它结构紧凑、稳定可靠、光束质量好、能够在高重复频率下运行,使得 UV 激光加工得到迅速发展,在基片分割、划片、电路微调、打微孔、医疗器械标记、3-D 微结构制造、直接微通道成型等方面的应用增长很快。

(3) 飞秒激光器

采用飞秒激光进行材料加工时,由于激光脉冲持续时间为飞秒量级,远小于材料中受激电子的能量释放时间,激光在极短的时间间隔、极小的区域内与物质相互作用,几乎没有能量扩散的影响;另一方面,由于飞秒激光脉冲峰值功率非常高,例如脉宽 50fs、能量 0.2mJ 的激光聚焦成 $20\mu\text{m}$ 的光斑,可以达到 $10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ 的功率密度,此时,电子受激的动力学过程已不能用传统的线性共振吸收解释,强场使电子通过隧道效应而发生电离或直接摆脱原子的束缚,与材料相互作用时,可能诱发多光子吸收、自聚焦等非线性效应。因此,加工具有非热熔性、高

3D 空间分辨率、能耗低、加工材料广泛等特征,能完成比 UV 激光更精密的加工。

飞秒激光加工技术特别适合于微细加工,不仅能获得长脉冲无法比拟的高精度和低损伤,而且不断发现新的应用,例如日本大版大学基于双光子吸收效应,用高分子材料制造出一个长 $10\mu\text{m}$ 、高 $7\mu\text{m}$ 的公牛模型,大小与一个红血球相当;再如在透明介质内加工波导、刻制光栅等等。可以预料,随着研究的不断深入,飞秒激光将在精密打孔如喷嘴打孔、高清晰度喷墨头打孔,精密切割如心血管支架切割,高熔点、高硬度、脆性材料精细加工,集成电路、MO-EMS 制造中大显身手。

(4) 半导体激光器

主要优点是体积小、电光转换效率高、可靠性高,主要缺点是光束质量不好。在材料加工领域目前主要作为全固态激光器的泵浦源,但已开始把它直接用来焊接、热处理、标记,并且显示出不可比拟的优越性。德国意识到半导体激光器将引起激光加工技术的重大变革,于 1997 年就开展了“模块化半导体激光束工具”的研究计划,研究内容包括管芯技术、器件与系统技术、工艺及应用,目标是改进高功率半导体激光单元,把半导体激光器集成为高功率系统,满足制造业应用。目前采用锥形腔技术,瓦级的半导体激光器可获得 $M^2 < 2$ 的光束,集成的模块在 3kW 下 $BPP < 100\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。美国 2003 年启动了“超高效率半导体激光源”的研究计划,目标是把半导体激光器电光转换效率提高到 80%,目前 nLight 公司已将总效率从 50% 提高到了 70%。毫无疑问,这些成果无论是把半导体激光器作为泵浦源或直接用来加工都是十分振奋人心的。

现在多家公司能生产激光加工用的高功率半导体激光系统,如 Rofin 公司的 3kW 的半导体激光器体积只有一只鞋盒大小,很容易安装在机械手上。焊接汽车车身用的 2~4kW 半导体激光器与 Nd:YAG 激光器相比,其转换效率高 10 倍,占地面积仅为 1/5,维护间隔时间长 20 倍。研究所和企业都十分重视半导体激光器在加工中的应用,例如在 2002 年时,Laser Line 公司已具备了 200 台半导体激光加工系统,用于焊接和硬化。可以预言:半导体激光器将在本世纪内成为激光加工市场的主力。

3.2 激光加工的应用

任何一种新的制造技术都是在与传统制造技术

竞争中发展起来的。激光加工技术与传统工艺的竞争中在许多方面显示出独特的优越性,不仅提高了效率,节省了材料,提高了质量,而且导致设计思想更新,工艺流程改进,从而赋给产品更高的附加值。

轿车车身制造中以激光焊接取代电阻焊,每辆车节省钢材约 25kg,焊速快 10 倍,强度提高 20%。采用激光拼焊技术,可以在冲压成型前将多块厚度、材质相同或不同的金属板材焊接在一起再冲压成型,简化了设计、减少了模具、减轻了车身重量、提高了车体结构精度、改善了抗腐蚀性、增强了抗碰撞性能。因此,德国、美国、日本的各大汽车公司都在生产线上采用了激光加工技术,惟恐在制造技术的竞争中落伍而导致汽车市场的丢失。

随着集成电路集成度不断提高,印刷电路板上的元器件数以几何指数增加,印刷电路的线间距离已小到 0.15mm 以下,为了提高电路板布线密度,要使用多层电路板。因此,互连多层板的微通道技术显露出越来越高的重要性。然而通道的直径一般为 25 ~ 250 μm ,用传统的机械钻孔工艺不仅难以大批量加工 250 μm 以下的通孔,更不可能加工盲孔;用激光不但能快速加工出高质量的小孔,而且可以加工盲孔和任意形状的孔,还能完成电路板外形轮廓切割。因此激光微孔加工技术目前已成为多层电路板加工的主流,美国在 1996 年印刷电路板激光打孔占 43%,到 2000 年已超过 93%。

4R (Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture) 原则是当今制造技术绿色化所追求的准则,目的是满足节能、节材、环保的要求。激光加工技术在产品的绿色制造过程中发挥着重要作用,能够达到减量小、无污染的目的。例如,采用激光直接制造的零件外形与实际尺寸极为接近,不但提高了材料的利用率,而且简化了加工过程,采用激光切割降低了材料消耗,采用激光冗余修正减少 DRAM 的废品,采用激光清洗避免了对环境的污染等等。再制造是指以产品全寿命周期理论为指导,采用先进技术来修复、改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。美国十分重视再制造,估计 2005 年,再制造的产品年销售额约 1000 亿美元;到 2010 年,要求 100% 的再制造产品性能达到或超过原产品。美国军方从再制造中受益不浅,如 B-52 轰炸机于 1961 ~ 1962 年生产,经 1980、1996 年两次再制造改造后,性能得到提高,预计服役年限可延长到 2030 年。激光加工技

术是再制造的有效手段,例如用激光相变硬化、激光熔凝、激光合金化等激光表面处理工艺技术,能对报废的涡轮发动机叶片、转子轴、注塑模具、冶金轧辊、汽配件等进行激光修复,性能不但能达到原制造标准,而且耐磨性能、抗疲劳性能、强度、耐腐蚀性能会得到不同程度的提高。

当前社会要求产品的性能不断提高,供货的周期不断缩短,促使生产方式向高精度、小批量(甚至是定制)、多品种、快速响应的方向发展,对生产技术提出了敏捷制造的要求,越来越多的情况下采用激光加工技术可以满足这方面的要求。例如传统方法开发一代新车需要 5 ~ 7 年周期,而采用 CAD/CAM 技术和激光加工技术,新车型开发周期只需要 7 个月。激光快速原型制造是上世纪 80 年代后期发展起来的一项新的激光制造技术,它改变了传统的模型和模具的制造方法,实现了从计算机造型设计到激光制造 3 维实体原型的一步到位,为工程设计和产品开发提供了高效的手段。在此基础上又发展出“激光直接制造”的全新概念,它是从 3D 计算机辅助设计(CAD)出发的仿型制造技术,首先从工件的数据库生成一组工件 2D 截面的数据文件,再通过计算机辅助制造(CAM)转换成控制激光的平面扫描加工,然后逐层堆集而制造出工件。激光直接制造技术意味着制造技术向数字化、信息化、柔性、高效、低成本发展,是一种符合现代社会发展潮流的敏捷制造技术,也是目前美、德、英等发达国家重点发展的前沿技术。在化工、生物、电子、微机械等领域中有广阔的应用前景。可以制造常规工艺难以制造的零部件,如涡轮发动机叶片、模具热流道、人体关节等;还能实现多种材料梯度分布零件的制造。采用激光快速直接制造技术不需要专用设备,缩短了设计制造周期,降低了人为因素造成的一致性,从而制造出高性能的产品。

4 结束语

激光加工技术将在本世纪凸显出传统加工工艺无法比拟的优势,在制造业改造生产技术、提升产品质量中大放异彩。我们应该在全球激光加工技术高速发展的形势下,以研究新一代工业激光器为龙头,在提高单元技术的基础上实现激光加工设备的系统技术集成创新,探索新的激光加工应用领域,向制造业提供成套的激光加工技术,为我国成为制造强国作出贡献。