

固体激光在加工技术中的应用及展望

宋威廉 北京 2004年

前言



我们当前正处在以高新技术为核心的技术革新对社会发展产生广泛影响的时代，社会产业结构和市场结构都随之发生了巨大变化。当前，以制造技术为中心的科技竞争十分激烈，拥有先进的制造技术成了占领市场的关键。作为高新技术重要组成部分之一的激光技术自1960年问世后，人们就注意到它在材料加工领域会有广泛的应用前景，经过三十多年的研究开发，激光加工技术日益成熟，已成为集光、机、电、计算机和材料多个学科的技术于一体的先进制造技术。由于激光加工是一种非接触的加工方法，高效、清洁、热影响区小、不受电磁场干扰，可以解决许多传统加工方法难以完成的问题，对企业改造传统加工工艺、提高产品质量能起重要作用，因此在先进制造技术中占有重要地位，受到了制造业的极大关注。

一、激光加工市场概况

国际上激光加工技术发展很快，需求不断增长。据 Industrial Laser Solutions在2002年1月发布的对世界工业激光器及激光加工系统销售情况的统计结果，2001年激光加工系统销售额为27.6亿美元，其中固体激光加工系统占48%。对工业激光器销售台数年增长率的统计表明近几年平均有10%以上的增长率（图1），其中固体激光器的增长是最快的。主要的生产厂商分布在北美、欧洲和日本，处在三足鼎立的状态。但购买者情况有变化，主要是亚洲工业，特别是微电子工业的发展，对激光加工设备的需求增长极快，在1997年装机数量比1996年翻了一番。应用仍以切割、标记、焊接为主（图2），值得指出的是在微加工方面的应用增长极快，目前已占激光加工的10%。Photonics Spectra曾对各行各业应用激光加工的情况作了统计，电子与电器工业是最大的用户，从微调、划片、封装、标记、以至剥线，用得极广；汽车工业和加工门市部次之，主要是切割和焊接；包装业用激光进行模板切割和标记；其它用于机械工程、航天、航空、印刷、纺织等行业。

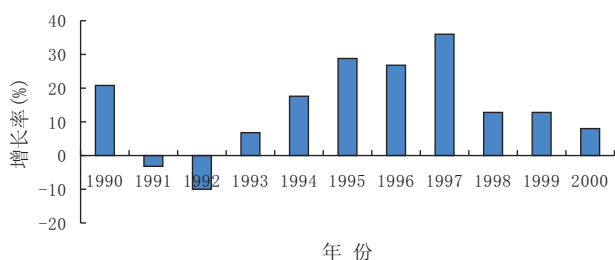


图1: 工业激光器年销售台数增长率

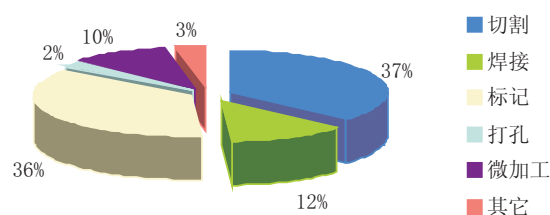


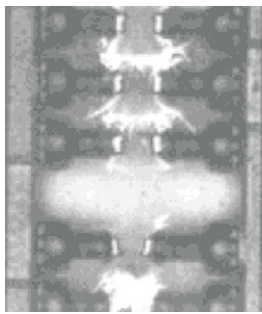
图2: 2001年激光加工应用分布

二、固体激光在加工中的应用

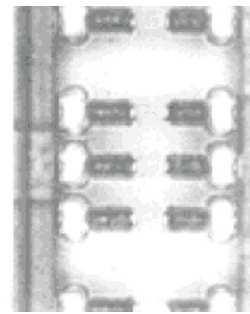
固体激光器以其结构紧凑、易维护、能用石英光纤传输激光束而在材料加工领域占有重要地位。目前加工用的固体激光器主要是Nd:YAG激光器,输出波长1.064 μm ,比二氧化碳激光波长(10.6 μm)短,与金属、半导体材料作用效率高,可以聚焦成更小的光斑,因此在精细加工、微电子工业中应用广泛。工业上使用的Nd:YAG激光器主要有连续、脉冲、声光调Q三种工作方式,目前4kW的连续激光器、2kW的脉冲激光器、100W的声光调Q激光器在加工中已得到了广泛应用。我国把国产百瓦级声光调Q激光器用于轧辊毛化,取得了良好效果。用非线性晶体频率变换技术使Nd:YAG激光器输出波长532nm的绿激光或波长355nm、266nm的紫外激光,可以完成更为精细的加工,在多晶硅太阳能电池板切割、多层线路板打孔、生物芯片制造、标记、微机械制造等应用中显示出极大的优越性。

在电子工业中,广泛采用固体激光器进行电子元件的焊接、标记、集成电路中的电阻微调、存储器修复、液晶平板显示器修补等。西门子公司在德国慕尼黑一个子公司的生产线上就有近400台各种类型的激光加工设备。日本东芝公司的激光技术研究所专门为公司生产中的需要研究开发固体激光加工设备,在显象管和集成电路生产线上的许多激光焊接机、标记机、微调机都是该公司自行制造的;由于使用了激光加工技术,使该公司的电子产品质量处于世界先进水平。我国使用脉冲Nd:YAG激光加工机封焊电池,用激光调阻机微调厚薄膜电路上的电阻等也已普及到众多生产厂。美国E.S.I.公司是世界上知名度很高的微电子用激光加工机的生产公司,年销售额达1亿美元,他们把输出波长为1.32 μm 的固体激光器用于存储器冗余修复,由于1.32 μm 的激光对硅基片的破坏阈值比1.047 μm 的YLF激光要高一倍,因此用之进行修复存储器时不会损伤硅基片,大大提高了成品率(图3)。

图3:用不同波长激光进行冗余修正



左: 用1.047 μm 波长的激光修正对硅片有烧蚀



右: 用1.32 μm 波长的激光修正对硅片无烧蚀

汽车工业市场竞争十分激烈,过去新车型从设计、模具制造到样车生产约需七年时间,采用三维激光加工技术后,缩短到七个月,大大提高了更新换代的速度,从而提高了市场竞争力,因此通用、福特、奔驰、大众、丰田等汽车制造商无一例外地采用了激光加工技术。在汽车生产中采用激光加工可为企业带来巨大的经济效益,例如汽车的车身装配中大量使用焊接工艺,从电阻点焊改为激光焊,焊速提高了10倍、强度增加20%。把不同材质和厚度的冲压件毛坯用激光焊接在一起后再进行冲压,可大大减少模具数量,同时材料利用率能提高10%以上。通用汽车公司制造工程部主管Frank A Dipietro认为,如北美的汽车制造商都采用激光加工工艺,每年可节省

10亿美元的生产费用。因为固体激光器可通过石英光纤传输激光，很容易耦合到装在机械手上的焊头，因此受到汽车制造业的欢迎。福特汽车公司用5米长的光纤将2kW的Nd:YAG激光传输到装在IR 761/125型机器人的焊头上，用于车身装配，把厚度为0.8mm车顶和侧围焊在一起，焊速达2.8m/min（图4）。我国用500W连续Nd:YAG激光器处理缸套，不但使表面硬化，又形成了小油坑，在增强耐磨性的同时又提高了润滑效果，使缸套使用寿命延长，目前在汽车修理业应用比较普遍。

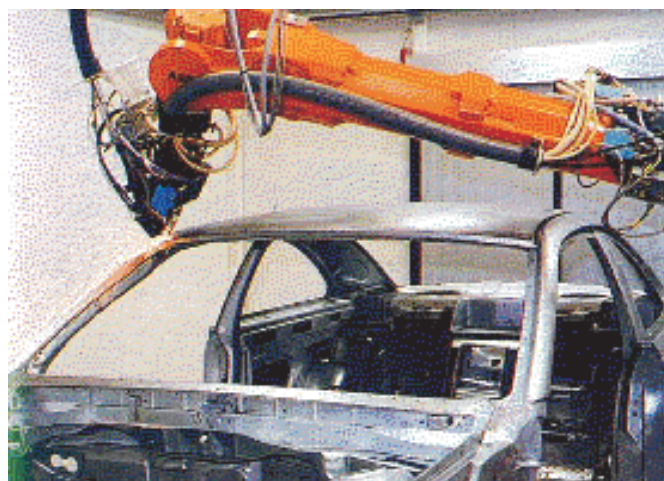


图4:固体激光用机械手进行轿车顶板焊接

目前我国已逐步形成激光加工设备的制造和开发能力。主要产品有：

激光标记机 可在金属、半导体、塑料、橡胶等材料上做标记，如在工具、刀具、量具、轴承及电子元器件、集成电路外壳上标刻规格型号；还可通过光电扫描器输入手写汉字、图像等，立刻形成刻写文件，制作工艺品。

脉冲激光焊接机 可对钢、铜、铝、钛、钽、钼、不锈钢、可伐等金属进行精密焊接，具有焊接强度高、热影响区小、密封性好等特点。通过激光分束机构可以用多路光纤输出激光，实现多点同步点焊或多工位焊接。例如光纤通讯中的光隔离器、光耦合器等无源器件要求在连接过程中有较高的同轴性，否则将影响器件的光传输效率。过去用胶粘、点焊都难以保证质量；而用多路光纤传输的激光四点同步焊接可以保证中心偏移量小于0.2mm、圆周畸变量小于1.3mm，保证了光信号衰减小于0.1db。

激光划片机 主要用于微电子工业中陶瓷基片、硅片分割，既可划直线，也可按设定曲线切划，速度快、成品率高。传统的方法是用金刚石砂轮切划，硅片表面因受机械力而产生辐射状裂纹；激光划片把激光束聚焦在硅片表面，产生高温使材料汽化而形成沟槽，硅片不会因机械力而产生裂纹。由于激光被聚焦成极小的光斑，热影响区极小，切划50μm深的沟槽时，在沟槽边25μm的地方温升不会影响有源器件的性能。

激光调阻机 用于片状电阻、厚薄膜电路中电阻网络进行精密修正，如对A/D、D/A转换器的电阻网络、铂膜温度传感器、波导器件进行微调。调阻过程全自动，每小时可微调50,000只电阻，精度0.1%，对邻近电路热影响小、无污染。

三、展望

由于固体激光加工技术已在工业应用中显露出强大的生命力，因此各国对它投入很大力量进行研究，研究的焦点集中在开发新的光源和开拓新的应用领域，尤其是对精细加工的研究。

1. 新光源的研发：

二极管泵浦固体激光器 由于量子阱二极管及其阵列发展极快，价格不断下降，为取代灯泵、使固体激光器实现全固体化创造了极为有利的条件。低功率的已用于存储器冗余修复、薄膜电阻微调、标记等，取得了良好效果。美国国防部在其《关键技术计划》中把它的优点概括为“比灯泵固体激光器效率高10倍，可靠性高100倍”。为了保持在先进制造技术方面的领先地位，美国的TRW公司等16个单位投资3,290万美元开展高光束质量、高功率二极管泵浦板条状Nd:YAG激光器研究，应用目标是汽车、造船工业中的焊接和切割，航空工业中的打孔。我国也很重视二极管泵浦固体激光器的研究，目前已研制成功激光输出达100W的样机。

超短脉冲激光器 以前用氩离子激光或灯泵的倍频Nd:YAG激光泵浦，体积大，稳定性也差，主要用于实验室。全固体化激光技术的发展使超短脉冲激光用于材料加工有了可能。超短脉冲激光在低脉冲能量下可达到很高的功率密度，如把脉宽为100fs的激光聚焦成直径20μm的光斑，脉冲能量只要0.3mJ，其功率密度便可达到1015 W/cm²，可以达到极好的加工效果。Michigan大学研究中心用脉宽为160fs的钛宝石激光在不锈钢上打出直径25μm、深0.5mm的小孔。通过精确控制能量为高斯分布的聚焦光斑，使只有靠近中心的能量密度超过被加工材料离解的阈值，还能加工出小于光斑直径的微孔。

光纤激光器 第一次演示是AT&T贝尔实验室在1973年进行的，用的是纯晶体光纤，泵浦源是气体激光器，比较笨重，效率也不高。八十年代末南安普顿大学和Polaroid公司开发了包层泵浦技术，使光纤激光器有了一个飞跃，它用高功率多模二极管激光器泵浦，效率高，输出功率大。用四个波长为915nm的二极管条通过光纤耦合到双包层掺铈石英光纤，泵浦功率55.4W，输出波长1100nm的激光达35.5W。由于光纤激光器结构紧凑、光转换效率高、预热时间短、输出与环境条件变化无关、很容易耦合到光纤或光学镜片组成的导光系统，随着输出功率的提高，已经引起工业界的兴趣，试图把它用于材料加工，如退火、焊接、切割不锈钢箔、标记等。

2. 新应用领域的开拓：

激光加工虽然已经有了较为广泛的应用，但毕竟历史不长，激光与材料相互作用的机理还没有完全弄清；新的应用还有待研究开发，特别在精细加工领域的应用是固体激光加工的重点研究方向。由于激光具有高时间及高空间分辨率，使之有可能在需要高度精密加工的场合得到进一步推广和应用，如电子、半导体、通讯、光存储、医疗仪器、微机械制造等行业。激光精细加工和普通微机械加工相比有很强的竞争力，美、日、欧洲各国政府均拨专款用于研究与精细加工有关的技术，如德国的激光技术研究计划Laser-2000中把开展激光材料加工研究列为重点，对激光诱导沉积、激光刻蚀、紫外波长激光加工技术进行深入研究，为今后建立精细加工工业打下基础。

对材料改性和制造新材料是激光加工新应用的一个热点。1995年在美国举行的“激光材料加工学术会议”上有四分之一的论文涉及脉冲激光沉积技术，应用该技术可以制造许多新材料、新器件，如超导体、宽带隙半导体、场致发光平面显示器等。

四、结 语

研究不同类型的激光对材料作用的机理是发展激光加工技术的基础，例如超快激光器能产生极高的峰值功率，由于能量高度集中，作用时间极短，加工时对材料的作用完全不同于用长脉冲或连续波激光加工的情况；对这些机理的深入研究将有助于推动固体激光技术在工业中的应用。

激光加工应用前景极好，目前尚未全面进入工业应用。工业对激光加工系统的要求一是性能价格比高，可以很快回收投资；二是可靠，不影响生产线运行；三是容易操作，便于使用；四是安全性好，不会引起事故。因此研制激光加工设备时要把可靠性、维修性、安全性放在重要地位，以向用户提供高质量的激光加工设备，这样才能使激光加工逐步成为工厂的常规工艺。激光专家资料库（通讯员：邵火）。