

文章编号: 0258-7025(2008)11-1653-07

# 国际激光材料加工研究的主导领域与热点

钟敏霖 刘文今

(清华大学机械系激光加工研究中心, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 根据六届国际激光与光电子学应用会议和三届中国全国激光加工学术会议报告论文的统计数据, 归纳总结出国际激光宏观材料加工的 15 个主导研究领域和激光微纳加工的 7 个主导研究领域。根据 1247 篇国际会议论文和 231 篇国内会议论文在 22 个主导研究领域的分布, 得出国际激光宏观加工的 5 个研究热点方向和激光微纳加工的 4 个研究热点方向。中国激光材料加工研究已覆盖国际激光材料加工研究的大部分主导研究领域, 中国在激光表面强化特别是激光熔覆方面的大量深入研究已形成优势; 中国在新型激光器和激光微纳加工领域的研究尚显薄弱, 需要加强。

**关键词** 激光材料加工; 激光微纳加工; 主导研究领域; 热点研究方向

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1653

## Leading Areas and Hot Topics on Global Laser Materials Processing Research

Zhong Minlin Liu Wenjin

*Laser Processing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing, 100084, China*

**Abstract** This paper summarizes 15 key research areas on laser materials processing and 7 key research areas on laser micro-nano fabrication based on the statistic information from 6 ICALEO-International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics and 3 CNCLMP-China National Conference on Laser Materials Processing. Five hot research topics on laser materials processing and four hot topics on laser micro-nano fabrication have been concluded from the distribution of 1247 ICALEO papers and 231 CNCLMP papers in the key research areas. The research on laser materials processing in China has covered the main and leading research areas in the world. There show strong research interests and large number of papers in laser surface modification especially in laser cladding in China. More efforts and research work are needed to strengthen the research in novel laser development and laser micro-nano processing.

**Key words** Laser materials processing; laser micro-nano fabrication; leading research areas; hot research topics

## 1 引言

自 1916~1917 年爱因斯坦提出光辐射理论和自发辐射、受激吸收、受激辐射等全新概念到 1960 年梅曼发明第一台红宝石激光器经历了 44 年, 期间出现了许多历史性的发现和发明, 并涌现出与激光的发现发明直接相关的 5 位诺贝尔奖获得者, 包括美国哥伦比亚大学教授 Charles. H. Townes, 原

苏联莫斯科列别捷夫物理研究所研究员 Alexander Prohorov 和 Nikolai G Basov (他们三位因在量子电子学领域的基础性工作及微波激射器和激光器原理的开创性工作分获 1964 年诺贝尔物理奖), 美国贝尔实验室研究员 A. L. Shawlow 和哈佛大学教授 Nicolas Bloembergen (他们两位因在激光光谱领域的开创性工作分获 1982 年诺贝尔物理奖)。从

收稿日期: 2008-09-05; 收到修改稿日期: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(50735001)资助项目。

作者简介: 钟敏霖(1961-), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与成形制造方面的研究。

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn

刘文今(1945-), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与成形制造方面的研究。

E-mail: liuwj@tsinghua.edu.cn

1960 年至今已有 48 年,这期间激光从一项物理学上的发明发展到了一种广泛应用于工业生产、通信、信息处理、医疗卫生、军事、文化教育及科学研究等各个领域的通用型技术,对促进科学技术进步与发展、形成新的产业、为提高人类健康和生活水平做出了卓越贡献,并继续发挥着越来越重要的作用。在激光应用研究领域也出现了许多开创性的工作并获得诺贝尔奖,如 1997 年, Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji 和 William D. Phillips 三人因发展了采用激光冷却和捕获的方法而获得诺贝尔物理学奖; John L. Hall 和 Theodor W. Hansch 因在基于激光的精密光谱与光频梳技术方面的贡献与 Roy J. Glauber 分享 2005 年诺贝尔奖。

激光作为一种受激辐射放大的光,它所具备的高亮度、高方向性、高单色性、高相干性以及特殊的空间分布特性、时间控制特性、偏振特性等,使其能获得高达  $10^{10} \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  的聚焦功率密度,将巨大的能量集中在非常小的范围内,迅速使材料局部温度升到上万度的高温,并能达到  $10^{12} \text{ K/s}$  的冷却速度,从而成为一种无与伦比的材料加工工具。激光加工具有高精度、高质量、高效率、非接触性、洁净无污染、参数精密控制和高度自动化等特性,这些综合特性为先进制造技术提供了前所未有的新增长点、强有力的深层次研究工具和新技术的突破点。激光加工技术综合集成了光学、激光、数控、计算机、材料科学、凝固理论、物理冶金和化学冶金学、机电及传感监测和控制等现代科学技术,其自身的开放性和适应性又使其渗透到许多学科,包含了丰富的内涵,是目前国际上极为活跃并富有成果的高新前沿研究领域,世界各国均投入大量的资金和人力开展广泛深入的研究,取得很大进展并促使激光加工得到了飞速的发展。当代激光加工已由一种特殊用途的加工技术发展成为较为通用的、具有多种用途的加工技术。激光加工作为先进技术制造中极为重要的组成部分,反映了当代科学与技术发展的趋势,是 21 世纪材料加工的主要方法之一,其在工业中所占比重已成为衡量一个国家工业加工水平高低的重要指标之一。

## 2 国际激光宏观加工的研究领域与热点

激光加工技术作为一项系统集成激光技术、新材料技术、计算机与数控技术的现代先进制造技术,一直得到世界各国重要研究机构和大学的重视和广泛研究,其最新研究成果和研究进展往往最先出现

在重要的国际会议上。激光材料加工领域的重要国际会议主要有国际光学工程学会(The International Society for Optical Engineering)主办的 SPIE 国际会议中的“激光作为制造工具”(Laser as Tools for Manufacturing)主题和美国激光学会(Laser Institute of America)主办的 ICAL EO (International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics)国际会议。ICAL EO 国际会议自 1982 年起每年举办一次,至 2008 年已是 27 届,是国际激光材料加工领域影响最大、规模最大、研究论文最集中、最能体现本领域研究发展前沿和热点的国际会议。每届参会代表约 500 多人,来自全球 30 多个国家,包含了在本领域研究的重要国家和重要研究机构。ICAL EO 国际会议包括激光材料加工会议和激光微纳加工会议,本文对 ICAL EO 02 至 ICAL EO 07 连续六届国际会议<sup>[1-6]</sup>中的 860 篇激光材料加工会议报告论文和 387 篇激光微纳加工会议报告论文进行分类统计,能够比较全面准确地反映国际激光加工的主导研究领域与研究热点。中国光学学会激光加工专业委员会(Laser Processing Committee of China Optical Society, LPC-COS)每两年主办一届“全国激光加工学术会议”(CNCLMP-China National Conference on Laser Materials Processing),已经成功举办 8 届, CNCLMP 06 有 200 多人参加,来自国内 40 所高校和 12 家研究机构,包含了在本领域主导研究的重要大学和研究机构。本文对 CNCLMP 02 至 CNCLMP 06 连续三届全国会议<sup>[7-9]</sup>的 216 篇激光加工报告论文和 15 篇微纳加工报告论文进行分类统计,能够比较全面准确地反映出中国激光加工的主导研究领域与研究热点。

国际激光材料加工研究已经涉及非常广泛的领域,每个研究领域又细分出许多子领域,因此 ICAL EO 激光宏观材料加工会议往往分多个主题,如 2007 年激光宏观材料加工会议报告论文有 147 篇,分 20 个主题,依次为:航空焊接与修复,高亮度激光加工,太阳能与能源装置制造,直接金属沉积,二极管激光技术与加工,复合焊接,激光焊接(纪念 Matrunawa 教授),铁合金激光焊接,先进加工,选择性联接过程与材料,塑料加工,打孔的航空应用,模型与模拟 I,切割与打孔,检测与控制,高亮度激光焊接,表面处理 I,模型与模拟 II,激光系统与设备,表面处理 II。每届会议的分主题不完全相同,作者对连续六届 ICAL EO 激光宏观材料

加工会议的主题进行归纳合并，总结出国际激光宏观材料加工的 15 大研究领域：

- 1) 激光与物质相互作用；2) 激光表面强化：激光热处理、激光合金化、激光熔覆；3) 激光焊接：焊接等离子体、小孔研究、轻金属焊接、钎焊、混合激光焊接、聚合物与塑料连接、焊接工业应用；4) 激光切割与打孔；5) 激光成形与制造：快速成形、激光板材成形、激光粉末烧结、激光直接制造；6) 激光引导击穿光谱；7) 激光加工新工艺新技术；8) 激光加工工

- 业应用(汽车、航空、机械制造、生物医疗、能源)；9) 激光加工过程传感、检测与控制；10) 激光加工过程模型与模拟；11) 新型激光器件及加工研究：二极管激光、光纤激光、薄片激光器；高亮度激光；12) 光束处理与诊断；13) 光学元器件研究；14) 激光加工集成制造系统；15) 激光加工环境与安全。

将 6 届 ICAL EO 激光宏观材料加工会议的 860 篇报告论文按 15 大领域分类，得到历年国际激光宏观加工研究分布如图 1 所示。

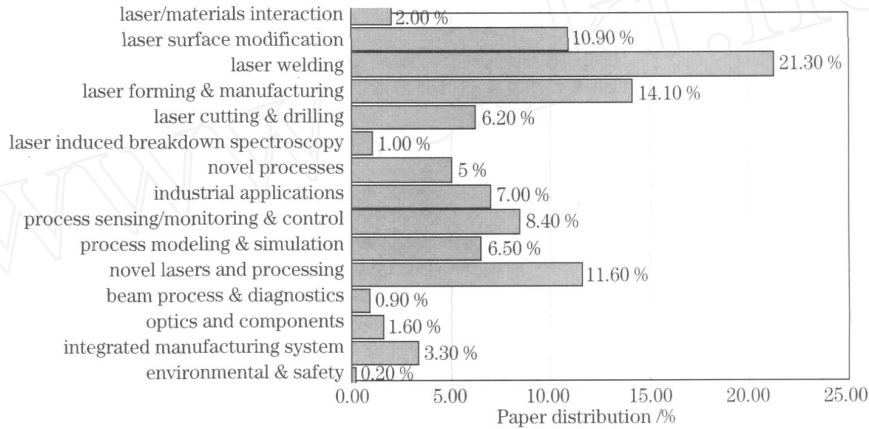


图 1 ICAL EO 2002 ~ 2007 六届国际会议激光宏观加工报告论文分布

Fig. 1 Paper distribution on laser materials processing from 6 ICAL EO conferences

国际激光宏观加工 15 大研究领域中的 5 大研究热点依次为：激光焊接(占有所有报告论文的 21.3%)，激光成形与制造(占 14.1%)，新激光器与新激光加工研究(占 11.6%)，激光表面强化(占 10.9%)以及激光加工过程的传感、检测与控制(占 8.4%)。

对前三大研究热点进行细分，激光焊接包括：复合激光焊接、焊接工艺、聚合物与塑料连接、轻金属焊接、焊接基础、钎焊、焊接等离子体、小孔研究、

焊接工业应用、高亮度激光焊接和异种金属材料焊接，其分布见图 2。热点研究方向有：复合激光焊接(占 23%)，激光焊接工艺研究(占 18%)，聚合物与塑料连接(占 16%)和轻金属焊接(占 9%)。

激光成形与制造包括：激光直接制造、激光粉末沉积、激光制造过程与系统、激光板材成形与快速成形与烧结，其分布见图 3。主导研究方向有激光直接制造(占 32%)，激光粉末沉积(占 31%)和激光制造过程与系统(占 24%)。

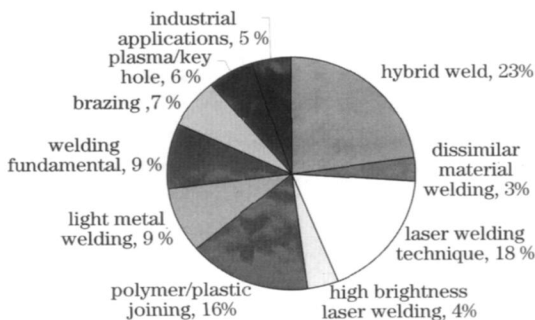


图 2 ICAL EO 2002 ~ 2007 六届国际会议激光焊接报告论文分布

Fig. 2 Paper distribution on laser welding from 6 ICAL EO conferences

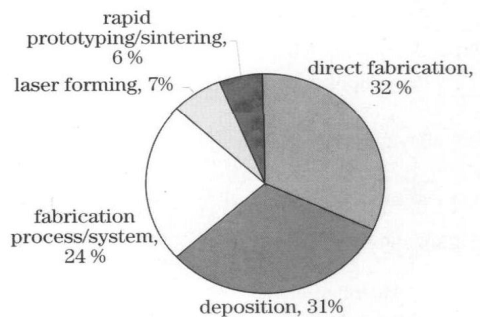


图 3 ICAL EO 2002 ~ 2007 六届国际会议激光成形与制造报告论文分布

Fig. 3 Paper distribution on laser forming & manufacturing from 6 ICAL EO conferences

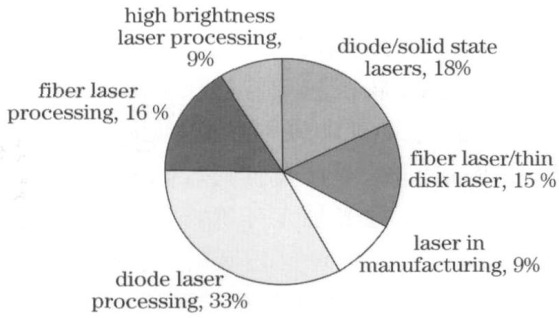


图 4 ICAL EO 2002 ~ 2007 六届国际会议新型激光器及加工研究报告论文分布

Fig. 4 Paper distribution on new lasers & process from 6 ICAL EO conferences

新型激光器件及加工研究包括：二极管与固体

激光器、光纤激光器与薄片激光器、制造中的新激光器、二极管激光加工、光纤激光加工及高亮度激光加工，其分布见图 4。主导研究方向有：二极管激光加工(占 33%)，二极管与固体激光器(占 18%)及光纤激光器与薄片激光器(占 15%)。

将三届中国全国激光加工学术会议的 216 篇报告论文同样按 15 大领域分类，得到历年中国激光宏观加工研究分布如图 5 所示。

中国激光宏观加工 15 大研究领域中的 5 大研究热点依次为：激光表面强化(占有所有报告论文的 37.5%)，激光焊接(占 18.5%)，激光成形与制造(占 14.8%)，激光切割与打孔(占 6.9%)以及激光加工过程的模型与模拟(占 5.6%)。

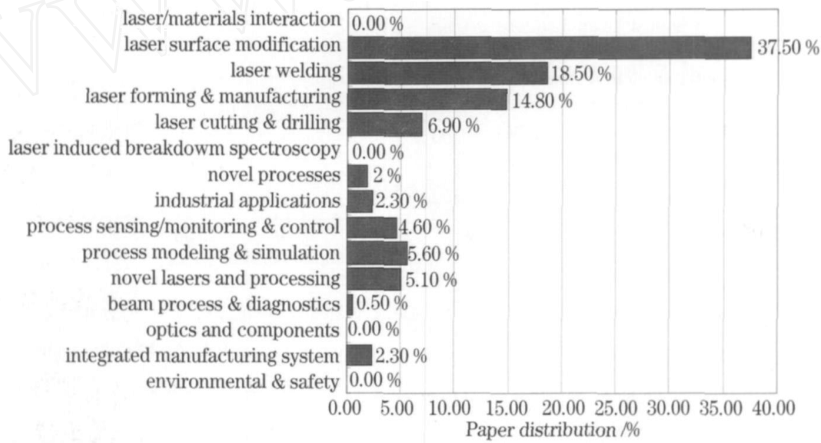


图 5 CNCLMP 2002 ~ 2006 三届全国激光加工会议报告论文分布

Fig. 5 Paper distribution on laser materials processing from 3 CNCLMP conferences

对前三大研究热点进行细分，激光表面强化包括：激光熔覆、激光合金化、激光热处理、激光烧结、激光合成、激光冲击、激光毛化、激光清洗，其分布见图 6。研究论文比较集中的方向包括：激光熔覆(占 47%)，激光热处理(占 11%)和激光烧结(占 11%)。

激光焊接仍按国际激光焊接细分方向，包括：复合激光焊接、焊接工艺、聚合物与塑料连接、轻金属焊接、焊接基础、钎焊、焊接等离子体、小孔研究、焊接工业应用、高亮度激光焊接和异种金属材料焊接，中国激光焊接报告论文分布如图 7。论文比较

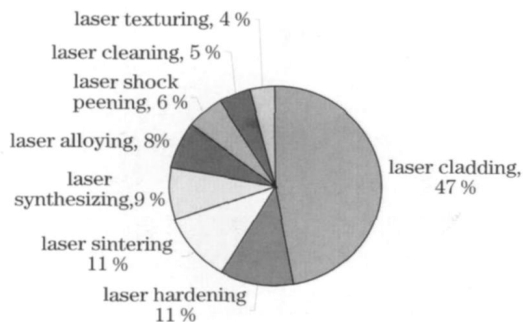


图 6 CNCLMP 2002 ~ 2006 三届全国激光加工会议激光表面强化报告论文分布

Fig. 6 Paper distribution on laser surface modification from 3 CNCLMP conferences

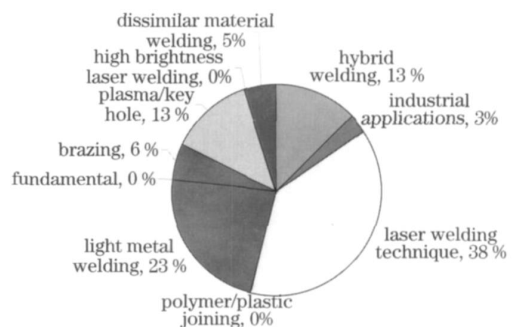


图 7 CNCLMP 2002 ~ 2006 三届全国激光加工会议激光焊接报告论文分布

Fig. 7 Paper distribution on laser welding from 3 CNCLMP conferences

集中的方向有:激光焊接工艺(占 38%)、轻金属焊接(占 23%)、复合激光焊接(占 13%)和激光焊接等离子体、小孔研究(占 13%)。聚合物与塑料连接和高亮度激光焊接研究尚未开展。

激光成形与制造研究的分布如图 9, 其中激光直接制造研究占主导。

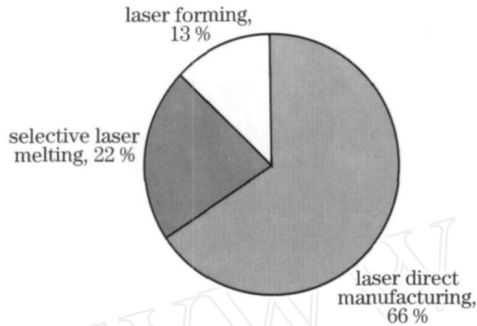


图 8 CNCLMP 2002~2006 三届全国激光加工会议激光成形与制造报告论文分布

Fig. 8 Paper distribution on laser forming & manufacturing from 3 CNCLMP conferences

分析对比中国和国际激光宏观加工研究的领域和热点分布, 可以归纳出 4 点看法:

1) 中国激光宏观材料加工研究涉及了国际激光材料加工研究的大部分主导研究领域, 研究发展势头良好;

2) 中国在激光表面强化领域集中了大量、全面、深入的研究, 其中激光熔覆的研究占绝对优势, 形成了研究特色;

3) 中国在激光焊接与激光成形制造领域的研究紧跟国际发展步伐, 形成良性发展;

4) 中国在二极管激光、光纤激光、薄片激光器新型激光器件和应用方面的研究严重不足, 在光学元器件方面的研究也很微弱, 成为我国在该领域的薄弱环节, 将会影响我国在激光加工研究领域的进一步发展, 急需加强。

### 3 国际激光微纳加工的研究领域与热点

国际激光微纳加工研究近年来受到越来越多的关注, 研究活动不断活跃, 研究机构不断增加, 研究领域不断拓宽, 被普遍认为是二十一世纪的重要发展趋势。2007 年 PICALO 会议包括激光微细加工会议和激光纳米制造会议, 激光微细加工会议有 70 篇报告论文, 分 11 个分主题: 超快激光加工 I, 光纤激光应用, 微细表面改性, 微细装置制造, 复合与其他新加工方法, 沉积、过程检测、光束整形,

超快激光加工 II, 微加工 I, 微加工 II, 微加工光源, 紫外与生物加工。ICAL EO2007 激光纳米制造会议报告论文总数为 24 篇, 分 4 个分主题: 纳米制造新出现技术, 激光辅助纳米制造, 纳米结构材料, 飞秒激光纳米结构化与纳米制造。作者对连续六届 ICAL EO 激光微纳加工会议的 387 篇报告论文的主题进行归纳合并, 总结出国际激光微纳加工的 7 大研究领域:

1) 纳米制造(激光辅助纳米制造、纳米结构材料); 2) 精密微加工(微焊、微连接、微打孔、微切割、微烧蚀、微熔覆、微成形、微表面处理、微车削); 3) 超快激光加工(飞秒加工); 4) 激光微包装; 5) 微加工应用(微电子机械系统、电子器件、生物医疗、光子学器件、玻璃微加工、诊断); 6) 激光微加工装备(激光器与系统, 光纤激光); 7) 玻璃微加工。

将 6 届 ICAL EO 激光微纳加工会议的 387 篇报告论文按 7 大研究领域分类, 得到国际激光微纳加工研究分布如图 10。热点研究领域依次为: 激光精密微加工工艺研究(占所有微纳报告论文的 37.2%), 激光微加工应用研究(占 22.2%), 超快激光加工(占 12.9%)和激光纳米制造(占 12.6%)。

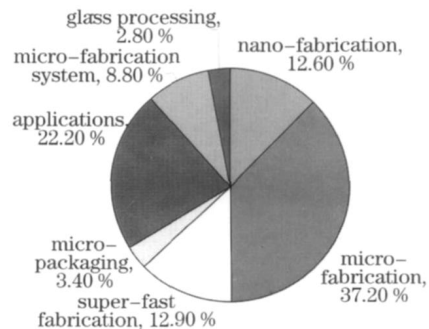


图 9 ICAL EO 2002~2007 六届国际会议激光微纳加工报告论文分布

Fig. 9 Paper distribution on laser micro-nano fabrication from 6 ICAL EO conferences

中国三届全国激光加工学术会议中涉及微纳加工的论文共 15 篇, 其中纳米制造方面 6 篇, 精密微加工方面 5 篇, 超快激光加工方面 2 篇, 微加工应用方面 2 篇, 激光微包装、激光微加工装备和玻璃微加工均没有论文。

由此可见, 我们在激光微纳加工研究方面还很薄弱, 我国激光微细加工论文占激光宏观加工论文数的 7%, 而国际激光微细加工论文占激光宏观加工论文的 45%, 而且我国激光微纳加工研究范围较窄, 急需加强。

#### 4 中国在激光加工研究领域的发展

我国的激光材料加工研究与发展从一开始就显示出不同于西方国家的特色,这样的研究格局源于我国高功率激光器的研发特点和我国科学研究发展的基本国情,其结果却形成了我国激光加工研究没有一味跟踪国外的发展,具有自己鲜明的研究应用特色和优势的局面。

自 20 世纪 70 年代末我国研制成功高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器起,高功率激光材料加工的研究迅速开展起来并在国内众多的研究机构 and 高等院校展开。鉴于横流 CO<sub>2</sub> 激光器的高阶模、大发散角光束特性,激光相变硬化研究是适应当时激光器光束质量的首选,成为研究的重点和热点。80 年代我国对激光相变硬化进行了深入细致的研究:在高能激光束与金属材料表面相互作用的基本特性、增强对远红外 CO<sub>2</sub> 激光吸收率的吸光涂料、常用工程材料(如灰铸铁、球墨铸铁、合金铸铁,各种碳刚、合金钢、工具钢、模具钢等)的激光相变硬化工艺、特性、微观组织变化、性能、激光相变硬化的基本硬化机制及典型零件的工业应用等方面均取得了很大的进展,发表了数以千计的研究论文,出现了一支人数众多的稳定研究队伍,并初步形成了我国在激光加工研究方面的特色。

90 年代开始我国在激光相变硬化技术的实用化、工业化方面已趋于成熟,在许多零件上获得成功应用并在汽车发动机缸体和缸套的强化修复方面取得重大进展,在国内大量推广应用,形成了一个高潮。到目前为止,激光相变硬化的应用状况一直良好,应用范围不断拓宽,经济效益和技术附加值显著。80 年代末和整个 90 年代,激光合金化尤其是激光熔覆成为我国激光加工研究的持续热点,研究内容包括:激光熔覆技术基础研究(熔覆特性,不同材料与基体组合的激光熔覆工艺及参数,激光熔覆层的微观组织结构和相分析,激光熔覆层的性能,熔覆层缺陷);激光熔覆基础理论和模型;激光熔覆应用研究;激光熔覆专用材料研制;激光熔覆过程裂纹形成与消除机制;激光熔覆过程关键因素的检测与控制;激光熔覆高性能送粉器和喷嘴;用激光熔覆制备新材料;基于激光熔覆的快速成形与制造技术等。全面研究了钴基合金、镍基焊接、铁基焊接、有色金属、抗高温氧化合金、耐蚀合金、金属陶瓷、金属基复合材料等大量的材料。如此全面深入的研究在国际上是绝无仅有的,我国研究人员在国内外会议和刊物上发表了大量的学术论文,成为国际上激光

熔覆研究的重要国家。

自 90 年代起我国一些研究机构和许多企业开始大量引进具有低阶模和低发散角且稳定性较好的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,用于板材的激光切割,形成了 30 多家以切割加工服务为主业的激光切割工作站,切割范围涉及自动电梯机构件、电梯面板、模切板、大型锯片、照相册板、复印机墙板、保险柜抽屉面板、粮食机械、工具、钢模板、样板、电机定子、纺织机械等,取得了良好的经济效益。但激光切割的基础研究在我国很少开展。

90 年代起我国部分高校如清华大学、华中科技大学、北京工业大学、哈尔滨工业大学也引进了国外光束质量好、稳定性高的 CO<sub>2</sub> 激光器和 Nd:YAG 激光器,并从此开展了较正规的激光焊接研究,在激光焊接等离子体研究、激光焊接过程检测与控制、激光焊接超薄材料、激光焊接超级钢及激光拼焊板技术方面取得了重要进展。90 年代后期,我国清华大学、西北工业大学、北京航空航天大学等单位开展了激光直接制造研究,在同轴送粉技术、激光制造的工艺及工艺优化、激光制造过程检测与闭环控制、激光制造过程数值模拟与模型、激光制造的材料体系研究及激光直接制造典型零件与应用研究等方面进行了深入研究,取得了快速发展。

激光微纳加工技术是激光先进制造领域的热点方向之一,近年来我国在激光微纳加工领域也有很大发展,清华大学在激光处理碳纳米管,北京大学、中国科学技术大学及江苏大学在双光子聚合微纳制造方面均取得了进展。

进入 21 世纪以来,中国的激光材料加工研究在研究水平、层次、质量和范围等方面都有明显进展。2008 年 4 月 16~18 日,中国光学学会激光加工专业委员会和清华大学联合美国激光学会在北京成功举办了“第三届太平洋国际激光与光学应用会议”(3<sup>rd</sup> Pacific International Congress on Applications of Lasers and Optics (PICALO-2008)),会议分为激光材料加工国际会议、激光微纳超快加工国际会议、国际企业家高峰论坛“全球化:中国与世界激光产业的机遇与挑战”和国际激光企业产品展示会。会议吸引了全球 19 个国家的 280 多位代表参加,来自美、德、英、法、日、澳大利亚、加拿大等 18 个国家的代表人数达到 133 人,是目前为至在我国举办的最大的激光加工国际学术会议。全球著名的 11 位激光企业总裁、CEO 参加论坛并发表演讲,30 多家国内外企业参加了产品展

示会。会议得到国家自然科学基金会等 22 个单位的资助。与会国内外代表普遍认为 PICALO 2008 取得巨大成功, 在参会人数、大会报告与邀请报告质量、到会代表层次、会议节目安排、会议论文的学术水平及会议交流的活跃程度等方面均达到国际一流水准。本次会议的成功举办大大提升了中国激光加工研究界在国际上的声誉。

## 5 结 论

国际激光材料加工研究可以归纳为 15 个激光宏观加工主导领域和 7 个激光微观加工主导研究, 按论文分布密度可以得出 5 个宏观加工热点研究方向和 4 个微纳加工热点研究方向。

中国激光材料加工研究已覆盖国际激光材料加工研究的大部分主导研究领域, 在激光表面强化特别是激光熔覆方面的大量深入研究已形成优势; 在新型激光器和激光微纳加工领域的研究尚显薄弱, 需要加强。

## 参 考 文 献

- 1 Proceedings of ICALEO 2002, LIA, Scottsdale, Arizona, USA, Oct. 14 ~ 17, 2002
- 2 Proceedings of ICALEO 2003, LIA, Jacksonville, Florida, USA, Oct. 13 ~ 16, 2003
- 3 Proceedings of ICALEO 2004, LIA, San Francisco, California, USA, Oct. 4 ~ 7, 2004
- 4 Proceedings of ICALEO 2005, LIA, Miami, Florida, USA, Oct. 31 ~ Nov. 3, 2005
- 5 Proceedings of ICALEO 2006, LIA, Scottsdale, Arizona, USA, Oct. 30 ~ Nov. 2, 2006
- 6 Proceedings of ICALEO 2007, LIA, Orlando, Florida, USA, Oct 28 ~ Nov 1, 2007
- 7 第六届全国激光加工学术会议, 北京, 2002 年 5 月 18 ~ 20 日, 应用激光, 2002, 22(2)
- 6<sup>th</sup> CNCLMP-China National Conference on Laser Materials Processing, Beijing, May 18 ~ 20, 2002, *Applied Laser Technology*, 2002, 22(2)
- 8 第七届全国激光加工学术会议, 桂林, 2004 年 11 月 6 ~ 8 日, 应用激光, 2004, 24(6)
- 7<sup>th</sup> CNCLMP-China National Conference on Laser Materials Processing, Guilin, November 6 ~ 8, 2004, *Applied Laser Technology*, 2004, 24(6)
- 9 第八届全国激光加工学术会议, 广州, 2006 年 11 月 25 ~ 26 日, 中国激光, 2007, 34(增刊)
- 8<sup>th</sup> CNCLMP-China National Conference on Laser Materials Processing, Guangzhou, November 25 ~ 26, 2006, *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(Suppl.)