

大功率半导体激光表面改性的研究进展

郭士锐^{1,2} 陈智君^{1,2} 张群莉^{1,2} 姚建华^{1,2}

(¹ 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

² 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

摘要 大功率半导体激光器在工业领域有着广泛的应用。综述了大功率半导体激光器的特性,着重介绍了其在国内外表面改性领域的研究进展,并对目前大功率半导体激光器在表面改性领域中的直接应用进行了介绍,最后展望了其发展趋势。

关键词 激光技术; 大功率半导体激光器; 激光表面改性

中图分类号 TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050004

Research Progress on Laser Surface Modification by High-Power Diode Laser

Guo Shirui^{1,2} Chen Zhijun^{1,2} Zhang Qunli^{1,2} Yao Jianhua^{1,2}

¹ Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

² Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract High-power diode laser (HPDL) is widely used in the field of industry. This paper summarizes the characteristics of HPDL, mainly introducing the research progress on laser surface modification by HPDL both at home and abroad. The application statuses of HPDL in laser surface modification are reviewed. At the end, future development and trend about this field are looked forward to.

Key words laser technique; high-power diode laser; laser surface modification

OCIS codes 140.2020; 140.3390; 350.3390

1 引言

激光表面改性技术是表面工程中的先进技术之一,它利用激光进行处理在材料表面获得符合特种需要的表面层,这项技术主要包括激光相变硬化、激光熔覆、激光合金化、激光熔凝、激光冲击硬化、激光表面非晶化和微晶化等多种工艺,其中,激光相变硬化和激光熔覆是目前国内外研究和应用最多的两种工艺。

近年来激光表面改性技术发展迅猛,但是传统的 CO₂ 激光器产生的激光波长为 10.6 μm,金属材料对此波段激光的吸收率不高,而且传统的激光器使用成本高,寿命不长的问题一直阻碍着该技术的进一步发展,虽然调整不同的激光工艺参数可以取得部分进展,但是热循环对基体金属会产生较大影响这一难题仍未解决^[1,2]。大功率半导体激光器(HPDL)可以产生非常独特的矩形光斑,由于矩形光斑更适宜于激光表面改性,并且与 YAG 和 CO₂ 等传统激光器产生的光斑相比,半导体激光焦点的光斑面积要更大,而且半导体激光熔覆层的熔宽更大,稀释度更小,热影响区(HAZ)宽度也比较窄,故半导体激光器有望突破上述难题^[3,4]。

收稿日期: 2012-12-26; **收到修改稿日期**: 2013-03-04; **网络出版日期**: 2013-04-28

基金项目: 国家国际科技合作项目(KM-JD-2012002)和浙江省公益技术应用研究国际科技合作项目(2011C24006)资助课题。

作者简介: 郭士锐(1986—),男,博士研究生,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: j10312@163.com

导师简介: 姚建华(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光表面改性方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

因此高效的大功率半导体激光表面改性技术将为激光绿色制造开辟一个全新的领域。

本文详细介绍了近年来国内外研究人员利用大功率半导体激光器在材料表面改性领域所做的研究工作,并讨论了大功率半导体激光器直接应用于工业生产中表面改性的发展及趋势。

2 半导体激光在材料加工中的特征

半导体激光器是继 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器之后,应用于材料加工领域的大功率激光器,其在材料表面改性过程中的优点与传统激光器相比主要有以下几个方面:1) 波长较短,金属材料吸收效率高,热影响区窄,加工质量好;2) 光电转换效率高,节省电能;3) 系统性能稳定性高,材料加工工艺可重复性好;4) 寿命长,维护方便并且费用较低;6) 运行成本相对较低,生产效率高,可带来较大的经济效益;7) 体积相对较小,结构更为紧凑,方便进行现场加工;8) 可根据不同的应用对加工系统进行模块化设计;9) 矩形光斑可进行大面积熔覆,并且稀释率低。

大功率半导体激光器在集成封装后的体积与电脑机箱大小相仿,可开发为手持加工设备或安装于机械手上,而 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器由于体积庞大,在许多应用领域受到限制。半导体激光器的工作性能稳定,而灯抽运 Nd:YAG 激光器会因为严重的热透镜效应而导致光束质量的不稳定^[5]。表 1 为半导体激光器与其他激光器的性能对比。

表 1 大功率半导体激光器与 CO₂ 激光器、Nd:YAG 激光器的性能对比

Table 1 Comparison of performance among high-power diode laser, CO₂ laser and Nd:YAG laser

	Diode laser	CO ₂ laser	Lamp-pumped Nd:YAG laser	Laser-diode-pumped Nd:YAG laser
Total conversion efficiency / %	35	6	1	6
Hourly cost / \$	1.5	10.0	30.0	6.0
Wavelength / μm	0.8	10.6	1.06	1.06
Absorption rate of steel / %	40	12	35	35
Absorption rate of aluminum / %	13	2	7	7
Power density / (W/cm ²)	10 ³ ~10 ⁶	10 ³ ~10 ⁸	10 ³ ~10 ⁷	10 ³ ~10 ⁷
Maintenance interval / h	8	50	100	60

大功率半导体激光器的最大特点在于其波长较短,用于材料加工的半导体激光器波长一般在 808~980 μm 之间,由于金属材料对短波长激光的吸收率明显增加,从而产生与 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器明显不同的加工效果。铝合金对该波段激光的吸收率存在一个极值,约为 Nd:YAG 激光器的 2 倍,CO₂ 激光器的 7 倍,钢对此波段激光的吸收率也要高于传统激光器,如图 1 所示^[5]。

大功率半导体激光器的缺陷在于光束质量较差,但是随着半导体激光器芯片技术的进步和外腔提高光束质量技术的进步,其光束质量也逐步得到提高,以满足激光材料加工应用对更高激光功率密度的需求。图 2 中显示了 2003 年与 2008 年大功率半导体激光器的光束质量与输出功率之间的关系。

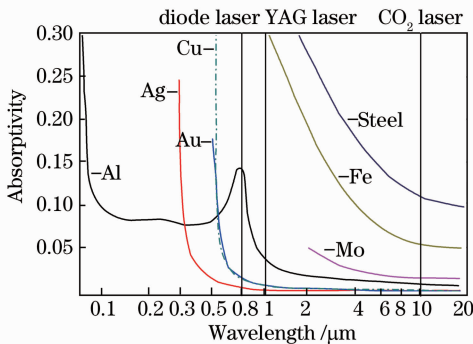


图 1 金属对不同波长激光的吸收率

Fig. 1 Absorptivity as a function of wavelength for various metal materials

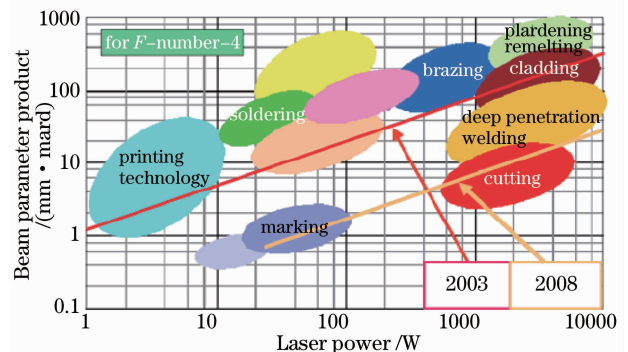


图 2 半导体激光器光束质量及其在材料加工中的应用范围

Fig. 2 Beam quality and possible applications of lasers in material processing under various operating conditions

3 大功率半导体激光在表面改性领域的研究

3.1 国外大功率半导体激光表面改性研究现状

国际上有许多知名的实验室在从事大功率半导体激光材料加工性能的研究,如英国曼彻斯特大学以 Li 教授为首的材料表面改性团队,英国剑桥大学 O'Neil 教授所在的激光微制造及激光辅助制造研究团队,德国的 Fraunhofer 激光技术研究所(ILT),芬兰的激光应用实验室(LAL)等,另外还有日本、韩国、新加坡等地的部分高等院校和研究所也在相继开展研究。

德国 Rofin-Sinar 公司的半导体激光应用研究小组的 Bachmann^[6,7]通过大功率半导体激光与传统大功率激光的对比,发现现有的 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器在材料加工方面不如大功率半导体激光有优势,并对未来的大功率半导体激光器应用于材料加工进行了展望。俄罗斯科学院物理研究所的 Bezotosnyi 等^[8]通过改变磁控溅射热金属薄膜改善半导体激光器的输出功率。

3.1.1 激光相变硬化

美国南卫理公会大学先进制造技术研究中心的 Santhanakrishnan 等^[9,10]利用大功率半导体直接激光器(HPDDL)进行实验,开发了一种基于温度监控的有限元(FE)热模型来反馈修改与预测相变工艺,最后在表面获得所需的硬度与硬化深度。

英国诺丁汉大学的 Pashby 等^[11]研究了激光功率、扫描速度对大功率半导体激光硬化 817M40 钢硬度与深度的影响。

芬兰的 Hovikorpi 等^[12]详细介绍了半导体激光应用的 4 个例子,其中大齿轮的半导体激光相变硬化说明半导体激光照射在金属表面是一个特殊形式的热传递,确保了均匀的硬化区和相变质量。

西班牙的 Lusquiños 等^[13]使用大功率半导体激光对 AISI1045 进行表面激光淬火,用 ANSYS 软件由主要工艺参数(扫描速度和功率密度)对热传导进行数值分析,预测与控制表面的温度和冷却速度的变化,以获得需要的硬度,并使淬火层具有马氏体相。

由于半导体激光的波长范围有利于金属对激光的吸收,加之半导体激光可以产生非常独特的矩形光斑,因此半导体激光相变硬化相对于传统激光器工作效率得到了大幅提高,另外与传统激光相变硬化的主要区别在于半导体激光相变硬化加工时省去了对金属表面涂抹吸光涂料的必要过程,而且半导体激光相变硬化深度较深,硬化层硬度相对均匀。通过目前对国外大功率半导体激光相变硬化研究的了解发现,现阶段国外大功率半导体激光相变硬化的主要目标是为了精准地控制硬化层的深度、宽度、硬度等,确保硬化层的质量。

3.1.2 激光熔覆

美国南卫理公会大学先进制造技术研究中心的 Santhanakrishnan 等^[14]利用矩形光斑为 12 mm × 1 mm,激光功率 2 kW 的 HPDDL(图 3)进行实验,开发了一种基于温度监控的 FE 热模型来预测熔覆工艺,最后获得冶金结合、硬度均匀的熔覆层。

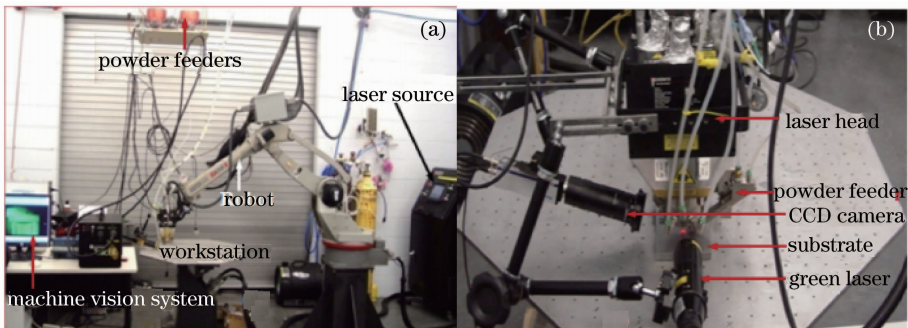


图 3 激光熔覆系统。(a) 激光熔覆实验装置;(b) 工作站

Fig. 3 Laser cladding system. (a) Overall experimental setup for laser cladding process; (b) workstation

英国曼彻斯特大学的 Pinkerton 等^[15]通过使用大功率半导体激光多层熔覆,对比熔覆层的显微结构、尺寸与表面性质,建立了输入参数和最终的材料之间的关系。

比利时的 Verwimp 等^[16]使用 3 kW 的光纤耦合半导体激光熔覆了镍基与 WC 混合粉末,制备出厚度为 1 mm 的无裂纹低孔隙率的耐磨涂层,涂层中 WC 浓度高达 50%(物质的量分数),在刀片、柱塞、压力工具等方面有多种应用。

西班牙的 Conde 等^[17]在碳钢表面使用 HPDL 熔覆 Ni-Cr-B-Si 粉末,获得两个含硼化物的镍基合金涂层,并分析了其中的组织结构与形貌。

日本名古屋大学研究人员比较了半导体激光器与 CO₂ 激光器、Nd:YAG 激光器在双相不锈钢表面熔覆钴基合金的结果,发现半导体激光器的熔覆层宽度、稀释率等优于后两者^[18]。

印度表面涂层和处理实验室的 Mann 等^[19~21]用大功率半导体激光处理 Ti6Al4V 表面合金,发现其抗气蚀性能显著增强,主要的原因是孔隙消除,因而提高了断裂韧性,降低了硬度与脆性。

印度的 Majumdar 等^[22,23]用大功率半导体激光直接熔覆 TiB 与 Ti 基复合体,发现细晶须状的 TiB 和针状 α -Ti 沉淀物,平均杨氏模量介于 159~163 GPa,优于市售的 α -Ti 和较早前报道 TiB 的 β -Ti 复合,另外其团队还在 316L 不锈钢表面用半导体激光直接熔覆 SiC,并评价了其显微硬度和耐磨损性能。

大功率半导体激光特有的优势决定了其在激光熔覆领域的巨大潜力,因此国外许多企业与研究单位都开展了这方面的研究。目前国外研究方向较广,主要方向是通过模拟来分析与预测激光与熔覆材料的相互作用,另外也研究了不同激光工艺对熔覆层性能变化的影响等,为激光熔覆技术的产业化应用奠定了基础。

3.1.3 激光合金化与激光熔凝

波兰西里西亚工业大学工程材料和生物材料研究所的 Dobrzański 等^[24,25]在 X40CrMoV5-1 与 X38CrMoV5-3 钢表面分别利用大功率半导体激光器制备 WC 合金化涂层与陶瓷颗粒涂层,发现 WC 合金化涂层中出现了未熔化的 WC 晶粒结构,相比原有材料其含量增加,说明其浓度与熔覆过程中熔融金属在熔池的波动密切相关。

印度的 Abbas 等^[26]用大功率半导体激光对镁合金表面进行激光熔凝,发现精细的显微组织,观察到的平均粒径小于 5 μm ,其耐磨性显著提高。

目前国外关于大功率半导体激光合金化与激光熔凝的研究尚少,还处于初步探索阶段。

3.1.4 激光表面非晶化和微晶化

英国曼彻斯特大学以 Lin Li 教授为首的材料表面改性团队用半导体激光器对金属、高分子材料、工程陶瓷、水泥、Al₂O₃/SiO₂ 基复合材料等进行表面处理,这些研究成果在硅酸盐水泥非晶化、中碳钢表面非晶化中得到了实际的应用^[27,28]。例如 Minami 等^[27]分别使用 2 kW 半导体激光器和 3 kW CO₂ 激光器对普通混凝土硅酸盐水泥表面进行激光处理,发现经半导体激光处理生成的釉的磨损率比 CO₂ 激光处理的低,这是由于 CO₂ 激光和 HPDL 波长有很大不同,而硅酸盐水泥对两种激光的吸收特性存在差异,这种差异会产生不同的冷却速度、凝固速度等,产生耐磨性不同的釉料。

利用半导体激光波长区别于其他激光器的特点,曼彻斯特大学对半导体激光表面非晶化和微晶化的研究较多,主要对比其他激光器研究了其在建筑工业上的应用。

3.1.5 小结

由于国外的大功率半导体激光器技术成熟,大功率半导体激光表面改性的多种工艺都有所研究,特别是激光相变硬化与激光熔覆研究较为广泛。表 2 为国外大功率半导体激光表面改性工艺的主要研究内容与应用趋势。

表 2 国外大功率半导体激光表面改性工艺

Table 2 Processing of laser surface modification with HPDL in foreign countries

Application field	Research contents	Application tendency
Laser transformation hardening	Numerical simulation of temperature; correlation of laser power, scanning speed and different substrates	Controlling the distortion of flexible deforming parts and large components

续表 2

Application field	Research contents	Application tendency
Laser cladding	Numerical simulation by the new model; relation of main factors affecting the quality of cladding layer; properties of laser cladding by high-power diode laser; to enhance the cavitation-erosion resistance of titanium alloy	Wide-band laser cladding in industrial production; large-area laser cladding with low ratio of dilution; accurately controlling the depth, width and hardness of cladding layer
Laser alloying	Relation between the properties of coating and the distribution of the molten steel in the molten pool	At the preliminary exploration stage
Laser melting	Microstructures of coating	
Laser amorphization and laser microcrystallization	Comparison with the wear resistance of different glaze by different lasers	Applied in construction industry

3.2 国内大功率半导体激光表面改性研究现状

3.2.1 激光相变硬化

北京工业大学的王智勇等^[29]使用自主研发的高光束质量 1000 W 大功率半导体激光器对 U74 钢轨进行相变硬化的试验,硬度达到 800~900 HV_{0.2},发现不同轴向扫描对硬化层有很大影响。

华中科技大学的闵大勇等^[30]进行了 7CrSiMnMoV、Cr12MoV、CrMo 等典型模具材料半导体激光淬火的工艺研究,使硬度满足模具材料的使用要求。

相较于国外,由于我国在大功率半导体激光装备系统的应用上普及率较低,现有的大功率半导体激光器多用于激光切割、激光点焊等领域,在激光相变硬化领域还主要处于基础研究阶段,但前景可观。

3.2.2 激光熔覆

目前国内大功率半导体激光在表面改性领域的研究主要集中在激光熔覆技术上。

华南理工大学的杨永强^[31]在 Fraunhofer ILT 完成的大功率半导体激光在工具钢表面熔覆高速钢粉末的实验,获得 800 HV_{0.3} 无缺陷的熔覆层,预示了国内大功率半导体激光应用的广阔前景。王志坚等^[32]使用 1 kW 半导体激光器进行熔覆试验,发现增大保护气流压力可使熔覆线高度增加,且矩形光斑的半导体激光熔覆采用矩形送粉喷嘴可获得较好的熔覆效率与结构形貌。

北京工业大学的杨胶溪等^[33]利用 3 kW 半导体激光器与同步送粉方式,在 304 不锈钢上制备出平均 1100 HV_{0.1},无缺陷且稀释率很低的絮状 WC-Ni 基超硬复合材料熔覆层。李娜^[34]研究了大功率半导体激光熔覆铁基粉末时工艺参数对成形熔覆层的外观形貌的影响规律。

上海交通大学激光制造与材料改性重点实验室的李铸国等^[35]采用 3.5 kW 半导体激光器在 42CrMo4 表面熔覆了 Stellite6 合金,在熔池的温度监控下调整激光功率获得了近似零稀释率的熔覆层。

浙江工业大学激光加工技术工程研究中心姚建华团队^[36~38]在正交试验规则的基础上设计大功率半导体激光熔覆 2Cr13 材料试验,并建立神经网络预测熔覆层的深度与宽度;利用 2 kW 半导体激光器在 40 Cr 表面熔覆铁基合金,硬度最高达到 932 HV_{0.2},耐磨性提高 2 倍左右;在热作模具钢 H13 基体上通过大功率半导体激光熔覆制备出 TiC/H13 复合涂层,研究了在 600 °C 下不同 TiC 含量复合涂层的抗回火性能。另外他们与乌克兰国立科技大学激光技术研究室合作开展了半导体激光熔覆铝合金的实验^[39],由于铝合金在半导体激光波长范围内对激光有较高的吸收率,故采用高功率半导体激光器在铝合金表面激光熔覆 Al-0.4Zn 合金,通过工艺优化显著减少了熔覆层中的气孔缺陷。

国内大功率半导体激光熔覆与国外研究的方向趋于一致,但国内大功率半导体激光熔覆的研究相对于国外尚较少。不过随着现阶段国内大功率半导体激光器的普及,关于此方面的研究逐年增多,这也凸显出大功率半导体激光在激光熔覆方面的独特优势。

4 大功率半导体激光在表面改性领域的应用

多模半导体激光条和单芯结半导体激光器件的输出功率持续增大,光电效率不断提升,半导体激光器也从科学研究领域逐步向应用领域渗透。目前国外的大功率半导体激光在材料表面改性方面的研究成果大部分已经获得应用,除了激光相变硬化和激光熔覆,还有激光合金化、激光熔凝、激光非晶化等也已经获得了工程上的应用^[40]。Fraunhofer ILT 激光技术研究所的 Stiles 和其同事利用 Rofin-Sinar 公司生产的 3 kW 半导体激光器和同轴送粉喷嘴,开发了新的激光熔覆工艺,并最早在石油工业中得到验证,目前已经过耐磨测试,大量应用于石油钻井工具上^[41]。Coherent 公司于 2007 年收购了 Nuvonyx 公司,成为大功率直接输出半导体激光器和光纤耦合输出半导体激光器系统在航空航天和国防工业等商业应用方面的先锋。在美国,半导体激光熔覆系统正取代 CO₂ 激光与 Nd:YAG 激光熔覆系统在工业的应用,不但航空航天和发电工业已经在使用庞大的激光熔覆系统,而且半导体激光器也在其他工业领域开始应用,如涡轮叶片、钻井工具、大型齿轮、铸造的容器刮除器、轧钢的传输机轧辊等。欧洲的半导体激光器在汽车零件处理方面走到前列,这主要受柴油机发动技术的推动,且欧洲的目标主要是通过激光表面处理技术使发动机在排放气体方面更清洁、燃油效率更高^[40]。

国内大功率半导体激光器应用相对国外较少,仅有的少部分还只存在于激光相变硬化与激光熔覆领域,换言之,大功率半导体激光器在我国材料表面改性领域有很大的应用潜力。目前,华工激光工程有限公司根据汽车模具行业的需求专门开发了半导体激光模具强化系统,已经进入了汽车模具表面强化中的实际工程应用;浙江工业大学激光加工技术工程研究中心也将部分技术转化到了工程应用中,比如大功率半导体激光熔覆大型轴套、叶片等。

5 结束语

半导体激光器以其体积小、重量轻、效率高、能耗小、寿命长、使用维护方便的特点,适合于现场、野外和运载使用,而且产生的光束是非常独特的矩形形状,成为新一代表面改性技术最适宜的激光光源,是激光表面改性的最重要发展趋势之一。为尽快实现大功率半导体激光表面改性技术的产业化,今后需要重点突破如下几个方面:

- 1) 开展计算机模拟、数据库和相应的数字系统研究,为半导体激光表面改性技术的产业化提供软件支持;
- 2) 集成送粉、外光束整形、聚焦、监控系统等专用设备与半导体激光器配套,开发专用装备;
- 3) 研发小型可移动半导体激光处理成套设备,研发处理面积大、形状复杂的工件的表面处理设备,满足大型复杂工件到现场服务的需求;
- 4) 提高半导体激光器的核心部件——半导体激光芯片与外延生长技术、腔面钝化技术的研究水平及器件制作工艺等。

随着相关技术的进展与突破,我国大功率半导体激光表面改性技术的研究和应用都将走进更为广阔的新天地。

参 考 文 献

- 1 Zuo Tiechuan, Chen Hong. Green manufacture in 21 century——laser manufacturing technology and application[J]. *J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(10): 106~110
左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(10): 106~110
- 2 Duan Yanli, He huan, Fu Yuechun *et al.*. Research progress in laser surface modification of alloys[J]. *Materials Review*, 2010, **24**(11): 205~212
段艳丽, 何欢, 符跃春等. 合金激光表面改性的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, **24**(11): 205~212
- 3 Zhang Guangjun, Li Jun, Li Wenge. Research progress on laser surface engineering[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(11): 1~7
张光钧, 李军, 李文戈. 激光表面改性的发展趋势[J]. *金属热处理*, 2006, **31**(11): 1~7
- 4 Lin Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing[J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2000, **34**(4-6): 231~253

- 5 Su Guoqiang. Research of Laser Surface Processing Technology by High Power Diode Laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. 2~3
苏国强. 大功率半导体激光表面加工技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007. 2~3
- 6 F. G. Bachmann. Chances and limitations of high power diode lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 95~106
- 7 Friedrich Bachmann. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, **208-209**(1): 125~136
- 8 Bezotosnyi V. V., Bondarev V. Yu, Kovalenko V. I. Modification of metal film structure by radiation from a diode-pumped solid-state laser for improving the output parameters of high-power laser diodes[J]. *Quant. Electron.*, 2007, **37**(11): 1055~1059
- 9 Soundarapandian Santhanakrishnan, Fanrong Kong, Radovan Kovacevic. An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment by using high power direct diode laser[J]. *International J. Advanced Manufacturing Technology*, 2013, **64**(1-4): 219~238
- 10 Soundarapandian Santhanakrishnan, Radovan Kovacevic. Hardness prediction in multi-pass direct diode laser heat treatment by on-line surface temperature monitoring[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2012, **212**(11): 2261~2271
- 11 I. R. Pashby, S. Barnes, B. G. Bryden. Surface hardening of steel using a high power laser[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **139**(1-3): 585~588
- 12 J. Hovikorpi, A. Jansson, A. Salminen. Case studies of industrial applications of high power diode laser in Finland[C]. *SPIE*, 2003, **4973**: 94~105
- 13 F. Lusquiños, J. C. Conde, S. Bonns *et al.*. Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **254**(4): 948~954
- 14 Soundarapandian Santhanakrishnan, Fanrong Kong, Radovan Kovacevic. An experimentally based thermo-kinetic hardening model for high power direct diode laser cladding[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, **211**(7): 1247~1259
- 15 Andrew J. Pinkerton, Lin Li. Multiple-layer cladding of stainless steel using a high-powered diode laser: an experimental investigation of the process characteristics and material properties[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **453-454**: 471~476
- 16 Jo Verwimp, Marleen Rombouts, Eric Geerinx *et al.*. Applications of laser clad WC-based wear resistant coatings[J]. *Phys. Procedia*, 2011, **12**(1): 330~337
- 17 A. Conde, F. Zubiri, J. de Damborenea. Cladding of Ni-Cr-B-Si coatings with a high power diode laser[J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2002, **334**(1-2): 233~238
- 18 Katsushige Yamada, Sou Morisita, Muneharu Kutsuna *et al.*. Direct diode laser cladding of Co based alloy to dual phase stainless steel for repairing the machinery parts[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 65~70
- 19 B. S. Mann, Vivek Arya, B. K. Pant. Cavitation erosion behavior of HPDL-treated TWAS-coated Ti6Al4V alloy and its similarity with water droplet erosion[J]. *J. Materials Engineering and Performance*, 2012, **21**(6): 849~853
- 20 B. S. Mann, Vivek Arya, B. K. Pant. High-power diode laser surface treated HVOF coating to combat high energy particle impact wear[J]. *J. Materials Engineering and Performance*, 2013, doi: 10.1007/S11665-013-0475-5
- 21 B. S. Mann, Vivek Arya, B. K. Pant. Enhanced erosion protection of TWAS coated Ti6Al4V alloy using boride bond coat and subsequent laser treatment[J]. *J. Materials Engineering and Performance*, 2011, **20**(6): 932~940
- 22 Jyotsna Dutta Majumdar, Lin Li. Development of titanium boride (TiB) dispersed titanium (Ti) matrix composite by direct laser cladding[J]. *Mater. Lett.*, 2010, **64**(9): 1010~1012
- 23 Jyotsna Dutta Majumdar, Ajeet Kumar, Lin Li. Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel[J]. *Tribology International*, 2009, **42**(5): 750~753
- 24 L. A. Dobrzański, M. Bonek, E. Hajduczek *et al.*. Alloying the X40CrMoV5-1 steel surface layer with tungsten carbide by the use of a high power diode laser[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 328~332
- 25 L. A. Dobrzański, M. Piec, A. Klimpel *et al.*. Surface modification of hot work tool steel by high-power diode laser[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**: 773~778
- 26 Ghazanfar Abbas, Lin Li, Uzma Ghazanfar *et al.*. Effect of high power diode laser surface melting on wear resistance of magnesium alloys[J]. *Wear*, 2006, **260**(1-2): 175~180
- 27 K. Minami, J. Lawrence, L. Li *et al.*. Comparison of CO₂, Nd:YAG and HPDL for the ablation of tile grout[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **186**(1-4): 256~263
- 28 J. Lawrence. A comparative analysis of the wear characteristics of glazes generated on the ordinary Portland cement surface of concrete by means of CO₂ and HPDL radiation[J]. *Wear*, 2004, **257**(12): 590~598
- 29 Wang Zhiyong, Su Guoqiang, Zhang Hui *et al.*. High power diode laser surface hardening of U74 rail steel[J]. *J. Railway Science and Engineering*, 2007, **4**(1): 63~67
王智勇, 苏国强, 张辉等. 大功率半导体激光相变硬化 U74 钢轨的实验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, **4**(1): 63~67
- 30 Min Dayong, Wang Aihua, Xiong Zhihong *et al.*. Process research of diode laser surface hardening for dies[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 364~367
闵大勇, 王爱华, 熊志红等. 模具半导体激光强韧化工艺研究[J]. 激光技术, 2012, **36**(6): 364~367

- 31 Yang Yongqiang. Cladding of high speed steel by high power diode laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(3): 251~254
杨永强. 大功率半导体激光熔覆高速钢研究[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(3): 251~254
- 32 Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Effects of powder delivering parameters on diode laser clad line shape[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, **34**(8): 82~85
王志坚, 董世运, 徐滨士 等. 送粉参数对半导体激光熔覆成形结构形貌的影响[J]. 金属热处理, 2009, **34**(8): 82~85
- 33 Yang Jiaoxi, Wang Zhiyong, Zuo Tiechuan. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-Ni based superhard composites[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3262~3266
杨胶溪, 王志勇, 左铁钊. 高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3262~3266
- 34 Li Na. Research on Fe-Based Cladding Layer by High Power Diode Laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008
李娜. 大功率半导体激光制造铁基熔覆层的工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008
- 35 Li Zhuguo, Huang Jian, Wang Yaping *et al.*. High power diode laser cladding of Co-based alloy coating under temperature field control[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 311~314
李铸国, 黄坚, 王亚平等. 温度场监控下高功率半导体激光熔敷钴基合金涂层[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(2): 311~314
- 36 Hu Xiaodong, Yao Jianhua, Kong Fanzhi *et al.*. Experiment and prediction model for 2Cr13 cladding using diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 277~280
胡晓冬, 姚建华, 孔凡志 等. 半导体激光熔覆 2Cr13 的工艺实验与预测模型[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 277~280
- 37 Lou Chenghua, Kong Fanzhi, Chen Zhijun *et al.*. Research on wear-resistant properties of high hardness Fe-based alloy by laser cladding[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(6): 470~473
楼程华, 孔凡志, 陈智君 等. 半导体激光熔覆高硬度铁基合金的耐磨性能研究[J]. 应用激光, 2010, **30**(6): 470~473
- 38 Lu Yan, Kong Fanzhi, Yao Jianhua *et al.*. Tempering resistance of semiconductor laser cladding TiC/H13 composite coating[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(6): 451~455
鲁燕, 孔凡志, 姚建华 等. 半导体激光熔覆 TiC/H13 涂层的抗回火性能[J]. 应用激光, 2010, **30**(6): 451~455
- 39 Wang Weifu, V. Kovalenko, M. Anyakin *et al.*. Study on laser clad aluminum alloy coatings based on the statistic model optimization[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(6): 460~464
王维夫, V. Kovalenko, M. Anyakin 等. 基于统计模型优化的铝合金激光熔覆研究[J]. 应用激光, 2010, **30**(6): 460~464
- 40 Guan Lihong. Application of diode laser in material processing[J]. *Laser Technology & Applications*, 2007, **24**(11): 22~24
关立红. 二极管激光器在材料加工中的应用[J]. 激光技术与应用, 2007, **24**(11): 22~24
- 41 Kincade Kathy, Anderson Stephen G. Review and forecast of the laser markets Part I: Nondiode Lasers[J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(1): 75~90