

激光技术在材料加工领域的应用与发展

李苏^{1,2}, 张占辉^{1,2}, 韩善果^{1,2}, 任香会^{1,2}, 刘丹^{1,2}, 辛杨桂^{1,2}, 高世一^{1,2}

(1. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院) 广东省现代焊接技术重点实验室
广东省科学院, 广州 510650; 2. 阳江市中乌巴顿技术研究院, 广东 阳江 529533)

摘要: 激光因其具有方向性强、能量密度高、时间和空间控制性好等特点, 在航天航空、汽车制造、电子电器和生物医疗等领域获得广泛应用, 尤其在材料加工领域。简要介绍了激光加工技术的原理及优势, 主要从组织性能研究、工艺开发与优化、数值模拟等方向综述了激光技术在切割、焊接、增材制造和表面改性 4 个加工领域的研究进展和应用现状, 表明超短超快激光技术的发展进一步促进了激光技术在材料加工领域的纵深应用, 并对激光技术未来发展进行展望。

关键词: 激光技术; 材料加工; 激光焊接; 增材制造; 表面改性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.008

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0076-10

Application and Development of Laser Technology in the Field of Material Processing

LI Su^{1,2}, ZHANG Zhan-hui^{1,2}, HAN Shan-guo^{1,2}, REN Xiang-hui^{1,2}, LIU Dan^{1,2}, XIN Yang-gui^{1,2}, GAO Shi-yi^{1,2}

(1. Guangdong Key Laboratory of Modern Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;
2. Yangjiang China-Ukraine E. O. Paton Institute of Technology, Yangjiang 529533, China)

ABSTRACT: Lasers are widely used in aerospace, automobile manufacturing, electronic appliances, biomedicine, especially in material processing, because of their characteristics of strong directionality, high energy density, and good control of time and space. This article briefly introduced the principles and advantages of laser processing technology, mainly summarized the research progress and application status of laser cutting, laser welding, laser additive manufacturing and laser surface modification from the aspects of tissue performance research, process development and optimization, and numerical simulation. And the application status showed that the development of ultra-short and ultra-fast laser technology further promoted the application of laser technology in material processing. The future development of laser technology was prospected.

KEY WORDS: laser technology; material processing; laser welding; additive manufacturing; surface modification

近年来随着超快光学、光纤激光器及大功率激光器的迅速发展, 激光技术在输出功率、加工效率、精度和质量等方面都得到了完善提升, 进一步加深了激光技术在材料加工、光电检测、高速通信、生物医疗、国防工业等众多领域的发展, 促进了相关产业的技术

革新和产业升级^[1-4]。激光技术本质上是融合光学、机械学、电子学、计算机学等学科为一体的高新技术, 因其具备高单色性、相关性、平行性等独特优势, 且有着极好的空间和时间控制性能, 其应用领域范围不断扩展^[5-9]。

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金(2020GDASY-20200402006); 广东省科技计划(2018-A050506060); 广州市科技计划(201907010006, 201704030068)

作者简介: 李苏(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为焊接装备及焊接工艺开发、增材制造技术等。

通讯作者: 高世一(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为焊接智能化、自动化、电弧 3D 打印等。

激光技术在材料加工领域的应用颇为广泛,应用的工业激光器主要有 CO₂ 激光器、Nd: YAG 激光器、光纤激光器、碟片激光器和半导体激光器,目前交付使用的高功率高光束质量光纤激光和碟片激光器最大输出功率高达 100 kW,轴快流 CO₂ 激光器最大功率为 20 kW,研制的新一代二极管泵浦金固态激光器,具有极高的能量转换效率,且体积小,波长短,使用更方便^[10]。

1 激光加工技术原理及优势

通常将应用到材料加工领域的激光技术称为激光加工技术,因激光可精确聚焦至微米级,能量密度高(可达 $10^5 \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$),因此激光加工技术可对新型材料、复合材料、金属化合物以及非金属材料等进行高效、高质、高水平加工,且加工过程中对材料的损伤程度低^[11]。激光加工技术具有以下几点优势:

① 工艺集成性强,材料加工步骤繁琐,包括打磨、切割、打孔、焊接等多道工序,普通技术加工耗时长,且容易浪费资源,激光加工技术可实现在同一台设备完成多种加工工艺,从而大大提升工作效率,提升经济效益;② 材料适用范围广,激光加工技术可对不同种类材料加工,既可对硬质合金材料、耐热合金材料等高强度、高硬度、高熔点的金属材料加工,又可加工高硬度、脆性大的非金属材料,如宝石、陶瓷、玻璃等,同时激光加工技术对工作环境要求比较低,可以在大气、真空甚至个别特殊极端工作环境下工作;③ 加工精度及效率高,由于激光的能量密度高,可瞬时完成加工任务,因此热影响区小,同时加工方式为非接触式,工件变形小,能够极大保证加工质量,降低加工成本^[12]。

2 激光技术在材料加工领域的典型应用

2.1 激光切割技术

激光切割是利用高能量密度的激光束加热工件,使工件材料在极短时间内达到熔点或沸点,通过辅助气体吹走切割缝内的熔渣,达到切割的目的。激光切割通用性强,可以对新型材料、金属材料、玻璃和半导体等脆性材料进行精准切割,且加工后工件热影响和材料变形小,切割后的工件可直接使用无需二次加工。相比与传统切割技术,激光切割过程噪音较小,且能节省 15%~30% 的原材料。随着激光技术的日臻成熟,超快激光可实现微米级加工精度,表面粗糙度可达到或优于 $Ra0.4 \mu\text{m}$ 。激光切割技术与机器人、计算机软硬件相结合,向智能制造发展,能实现多坐标联动,完成复杂工件的精准高效切割^[13]。目前国内外

汽车制造企业大量引入激光切割技术,使汽车安全性能得到进一步提升^[14]。图 1 所示为激光切割在材料加工领域的应用。目前,在切割金属薄板方面,光纤激光器的应用最为广泛,其切割效率和切割质量均具有显著优势^[15]。



图 1 激光切割在材料加工领域的应用

Fig.1 Application of laser cutting in material processing

在金属材料激光切割方面,赵鑫等^[16]以高速飞行器尾翼不同厚度的 Q235 钢板为实验对象,进行激光切割工艺试验,研究表明随切割速度与辅助气压的增大,切缝表面质量整体呈先升高后降低的趋势,与钢板厚度无明显关系。顾俊等^[17]分别对 0.8 mm 和 1.6 mm 的 TC4 钛合金民用大飞机蒙皮板材进行激光切割工艺试验,研究表明,切割速度是影响切割质量的主要因素,热影响区深度受切割工艺的影响较大,热影响区深度越深,材料的拉伸性能越差,试样断口形貌属于塑性断裂。沈义平等^[18]针对 8 mm 厚 AA2219 铝合金开展了光纤激光切割工艺实验,研究表明,激光功率和辅助气压是影响切缝质量的最主要工艺参数,当激光功率增大至 5.4 kW、辅助气压取值范围增大至 1100~1500 kPa 时,切缝挂渣量最少。

在非金属材料激光切割方面,边晓微^[19]将 355 nm 的纳秒激光器和 1064 nm 的皮秒激光器用于蓝宝石的切割实验,结果表明用纳秒激光器在紫外波段对蓝宝石基片造成损伤的峰值功率密度阈值为 $0.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$,加工效率低且存在明显的热效应,而脉宽为 15 ps 的皮秒激光对蓝宝石基片造成损伤的峰值功率密度阈值为 $0.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$,加工几乎不产生热效应,切割质量优。图 2 为通过皮秒激光对 0.55 mm 的蓝宝石进行高质量的分层扫描切割^[20]。蒋翼等^[21]用红外皮秒激光加工 CFRP 碳纤维增强复合材料,将材料的热损伤降到了 5 μm ,并发现 HAZ 会随着激光平均功率的增大,先减小再增大;HAZ 随脉冲重复

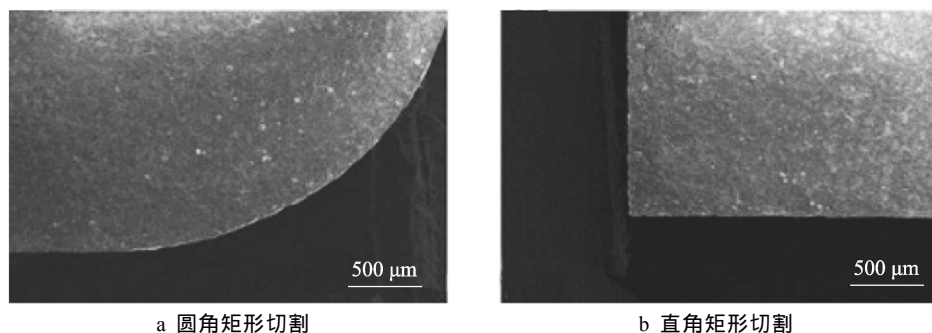


图2 皮秒激光切割蓝宝石
Fig.2 Cutting of sapphire by picosecond laser

频率的增加而增大；HAZ 随扫描速度的增大逐渐减小，最后 HAZ 会逐渐趋于一个稳定值。乔璐等^[22]针对低温共烧陶瓷 Ferro A6M LTCC 基板进行激光切割工艺研究，研究表明当激光参数设置为空占比为 30%，频率为 10 kHz，速度为 4 mm/s 时，得到的切割效果较好。

在切割工艺对切割质量的影响因素方面，许天宇等^[23]通过国志激光 YMM-12000 光纤激光器对 20 mm 厚的 Q235b 钢板进行切割工艺实验，表明影响切割质量的主要工艺参数为激光功率和辅助气压，当激光功率增大到 4 kW，辅助气压取值范围增大到 1400~1500 kPa 时，切缝挂渣量最少。侯红玲等^[24]对 1.7 mm 厚飞机钛合金蒙皮材料进行激光切割实验，当激光功率为 1000 W，辅助气压为 1.2 MPa、切割速度为 3000 mm/min 时，切割面粗糙度最小，激光切割提高了切面的硬度。何燕春等^[25]以 Kapton 复合胶膜为实验对象进行激光切割实验，得到最优工艺参数为喷嘴走速为 80 mm/s，激光功率为 70%，激光频率为 6500 kHz，伺服电机加速度为 450 mm/s²，工艺改进后激光切割 Kapton 复合胶膜孔切透率由原有的 9% 提升至 97.4%。

2.2 激光焊接技术

激光焊接技术是激光领域重要的研究方向之一，据统计，制造业中 25% 的焊接任务由激光焊接完成，激光焊接技术被誉为“21 世纪最有发展潜力的高能束流焊接技术之一”^[26]。在航空航天领域，激光焊接技术常用于武器装备和飞行器的制造、飞机蒙皮的拼接等。在船舶制造和修复领域，将激光焊接技术应用于甲板和舱壁的焊接，有效解决船板翘曲变形问题，同时用于船舶关键零部件的修复，如大型低速机活塞部件，通过修复使部件使用寿命延长 2~3 倍^[27]。在汽车制造领域，激光焊接已成为汽车焊接中的一项标准工艺，主要用于车身不等厚板的拼焊、车身的组焊和汽车零部件的焊接。与传统焊接技术比，激光焊接有如下优点：焊接材料适用性更广；焊接熔深大；焊缝热影响区窄，残余应力小；更高效；非接触式焊接，无污染；运用光纤传播，不受大气和电磁场的影响。激

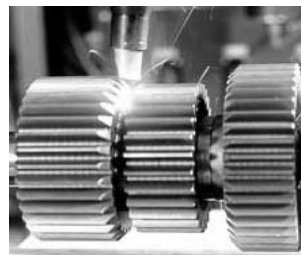
光焊接根据焊缝特点可分为深熔焊和传导焊，深熔焊一般应用于机械制造领域，传导焊一般用于熔池深度较浅、宽度要求较小的焊接领域，如电子工业^[28]。图 3 所示为激光焊接在材料加工领域的应用。



a 汽车框架



b 新能源汽车电机部件



c 齿轮

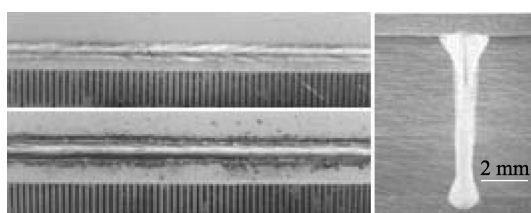


d 空调冷凝管

图3 激光焊接在材料加工领域的应用
Fig.3 Application of laser welding in material processing

国内针对激光焊接工艺开展了大量研究，图 4 为不同金属材料激光焊接焊缝及外观形貌。韩善果等^[29]针对 16 mm 厚 1561 铝合金采用不开坡口无间隙的双面激光-MIG 复合焊接工艺，结果表明焊接接头中存在着基体相 α -Al 和第二相 $\text{Fe}(\text{Mn Al})_6$ ，第二相经焊接热循环重熔后弥散分布，较大的激光功率可使双面焊道交叉面积增大，有利于减少焊道根部缺陷，提高拉伸性能。陈永城等^[30]对 5 mm 厚紫铜进行焊接，结果表明，在激光功率为 4.5~9.5 kW 范围内，焊缝熔

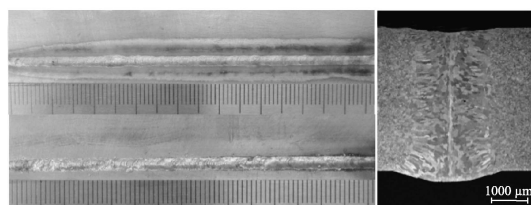
深与激光功率几乎呈线性关系,高功率可显著减少焊接过程的飞溅及表面孔洞,焊缝横截面形貌为 I 型,显微组织为柱状晶,焊接接头的拉伸强度为母材的 77.3%,伸长率为母材的 41.8%。蔺小轩等^[31]利用激光焊接汽车差速器壳与盆齿轮,省去了零件螺纹孔加工,焊接件总成疲劳及静扭试验符合设计标准,同时新产品减重效果明显,主减速器传动系统的传动效率得到了明显提升。省焊接所辛杨桂等开发了 1000 W 的手持式激光焊接设备,具备轻便、易上手的特点,可广泛用于焊接薄板材料。



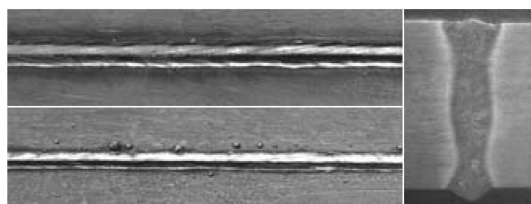
a 10 mm 不锈钢激光焊接



b 16 mm 铝合金激光-电弧复合焊接



c 5 mm 紫铜激光焊接



d 10 mm 钛合金激光焊接

图 4 不同厚度金属材料激光焊接焊缝及外观形貌

Fig.4 Laser welding seam and appearance of different thickness metal materials

在激光焊接对接头组织性能影响方面,温鹏等^[32]采用摆动光纤激光-CMT 电弧复合焊接方式对高速列车用带锁底 6A01-T5 铝合金型材进行了焊接工艺试验,得到了良好接头。研究表明,摆动激光复合焊缝外观成形优良,焊缝内工艺性气孔得到明显抑制;焊缝中心为树枝晶组织,二次枝晶明显弱化;复合焊接头极限疲劳强度为 105.0 MPa,抗拉强度平均值为 223.19 MPa,接头拉伸断口呈韧窝状,具有典型韧性断裂特征。罗兵兵等^[33]对车用 6016 铝合金

与 DC06 低碳钢进行了钢上铝下机器人激光焊接工艺试验,结果表明,在激光功率为 800 W,离焦量为 +2 mm 的条件下,均获得了良好的表面成形。焊接速度为 0.07 m/s 时,熔池内部生成大量塑性良好的珠光体组织,界面金属间化合物(IMC)数量少,应力集中系数最小,接头的平均抗拉剪力达到最大值 81.3 N。李斌等^[34]采用激光-电弧复合技术焊接 BS960E 高强钢板材,实验结果显示,采用直径为 1.2 mm 的 90G 型焊丝进行焊接,对应的接头组织主要为板条贝氏体,少量马氏体和 MA 组元,焊缝接头抗拉强度为 1117.13 MPa,伸长率为 11.82%,焊缝冲击吸收功为 23 J,冲击断口以准解理断裂为主,呈现韧窝状形貌。

在激光焊数值模拟方面,彭进等^[35]对激光焊接中不同尺寸的熔滴填充进入熔池过程的匙孔三维形貌,以及熔池金属流动特性进行了数值模拟研究,模拟结果表明,熔滴在匙孔上方下落填充进入熔池,对匙孔的形态波动影响较大,熔滴尺寸较大时,匙孔深度的波动幅度较大。冯燕柱等^[36]建立了 304 不锈钢激光焊接过程熔池和匙孔之间瞬态耦合的三维模型,开展了匙孔瞬态行为研究,仿真结果与试验结果吻合,研究表明,匙孔瞬态行为受气泡影响,纵截面上匙孔面积因气泡破裂而增大;焊件上表面匙孔开口长度与匙孔后壁倾角相关;与匙孔开口宽度相比,匙孔纵截面上面积和匙孔长度变化幅度更大。黄立进等^[37]建立了气泡三维数值模型,研究铝合金激光焊接中匙孔行为和匙孔型气孔的形成机理。实验论证表明,匙孔的形成与坍塌机理在数值模拟与实验中是相似的;匙孔坍塌的主要步骤是匙孔后壁处形成凸起,匙孔后壁上的凸起继续向匙孔前壁处流动,并与匙孔前壁接触形成液桥;气孔形成的主要因素是匙孔坍塌形成气泡和气泡被凝固界面捕获。

激光焊接技术发展迅猛,焊接工艺不断创新,已开出多种基于激光的复合焊接工艺,如激光-电弧复合焊,弥补了单一热源的不足,可以获得具有很好熔深和深宽比的焊缝;激光填丝焊,可降低工件坡口加工和装配精度要求,控制焊缝区域的组织性能;激光飞行焊,即利用高速扫描振镜头进行长距离加工的激光焊接方法,其定位精度高、效率高,可定制任意形状焊缝以优化结构强度;激光钎焊,其加热温度低,只在焊缝表面产生熔化现象,接头平整光滑,实现分光的同时可进行多点对称焊,同时易实现自动化等^[38-39]。

2.3 激光增材制造技术

激光增材制造(LAM)技术以激光为能量源,将复杂的 CAD 数字模型快速而精密地制造成三维实体零件,实现真正的“自由制造”。与其他增材制造技术相比,激光的能量密度高,激光增材制造技术不受零件材料和结构的限制,可用于难加工材料、复杂

结构及薄壁零件的加工制造,在航空航天领域的高性能复杂构件和生物制造领域的多孔复杂结构制造中优势显著^[40]。目前,激光增材制造技术已经成功制造出高致密度金属构件,包括钛合金、高温合金、铝合金、不锈钢以及非晶合金材料等,针对高性能材料如梯度合金、记忆合金以及高熵合金的研究也在进行中^[41]。激光增材制造技术按照其成形原理分类,具有代表性的有激光选区融化(SLM)技术和激光金属直接成形(LMDF)技术^[42]。

SLM成形技术在增材制造技术中得到了最广泛和最深入的研究。如通过SLM设备与工艺技术,美国GE公司制造出了发动机离心式燃油喷嘴,目前该喷嘴已成功应用于CFM国际公司开发的LAEP-X发动机中,如图5a所示;美国SPACE X航天公司则利用SLM技术制造了载人飞船的引擎,如图5b所示。西班牙Salamanca大学利用Arcam型SLM设备成功制造出钛合金胸骨和肋骨,并成功植入患者体内,如图5c所示^[42]。美国普渡大学的技术员Dahlon P Lyles利用铝合金材料AlSi₁₂打印出了能够承受408 kg的晶格结构,这个晶格结构总质量为3.9 g,质量轻、负重强度大,使得该材料拥有更多的应用领域,如图5d所示。华中科技大学Wen等^[43]深入研究了SLM成形过程中熔池边界对成形件性能的影响,研究表明熔池边界对成形件的力学性能尤其是延展性与韧性有很大影响。华南理工大学刘睿诚等^[44]对SLM成形金属零件上表面粗糙度进行研究,研究表明成形件的

上表面粗糙度主要受熔道宽度、扫描间距和铺粉层厚3个因素的共同影响,并提出通过电化学处理改善表面质量的方法。雷佳公司通过SLM技术利用不锈钢316L粉末为一汽大众制造了汽车制造辅助装备,性能优良,如图5e所示。

目前对于LMDF技术的研究主要围绕成形工艺和成形组织性能展开,如美国GE公司利用LMD技术对发动机支架结构设计进行了减重设计加工,原零件质量约为2033 g,试制的零件质量仅为327 g,减轻质量达83.9%^[45]。NASA喷气推进实验室开发出一种新的激光金属直接成形技术,可在一个部件上打印多种金属或合金,制件质量满足航空零部件不同部位不同性能的需要。英国Rolls-Royce公司利用LMDF技术生产Trent XWB-97发动机的前轴承座,该部件由钛铝合金构成,包括48片机翼叶,直径为1.5 m,长度为0.5 m,如图6a所示。北京航空航天大学王华明团队利用LMDF技术制造出世界最大的激光增材制造设备(最大成形尺寸为7 m×4 m×3.5 m)和世界最大的某大型轰炸机发动机钛合金加强框,并获得了国家技术发明一等奖,如图6b所示。在LMDF工艺研究方面,耿靖贺等^[46]以激光增材制造核动力系统凸轮轴为背景,对12CrNi2粉末激光金属直接成形技术进行“控形”、“控性”以及应力分析3方面的研究,获得了成形无缺陷并且性能良好的工艺参数,并借助有限元技术与实际测试对其成形试件的残余应力分布进行分析。马琳杰等^[47]研究了一种金字塔池化

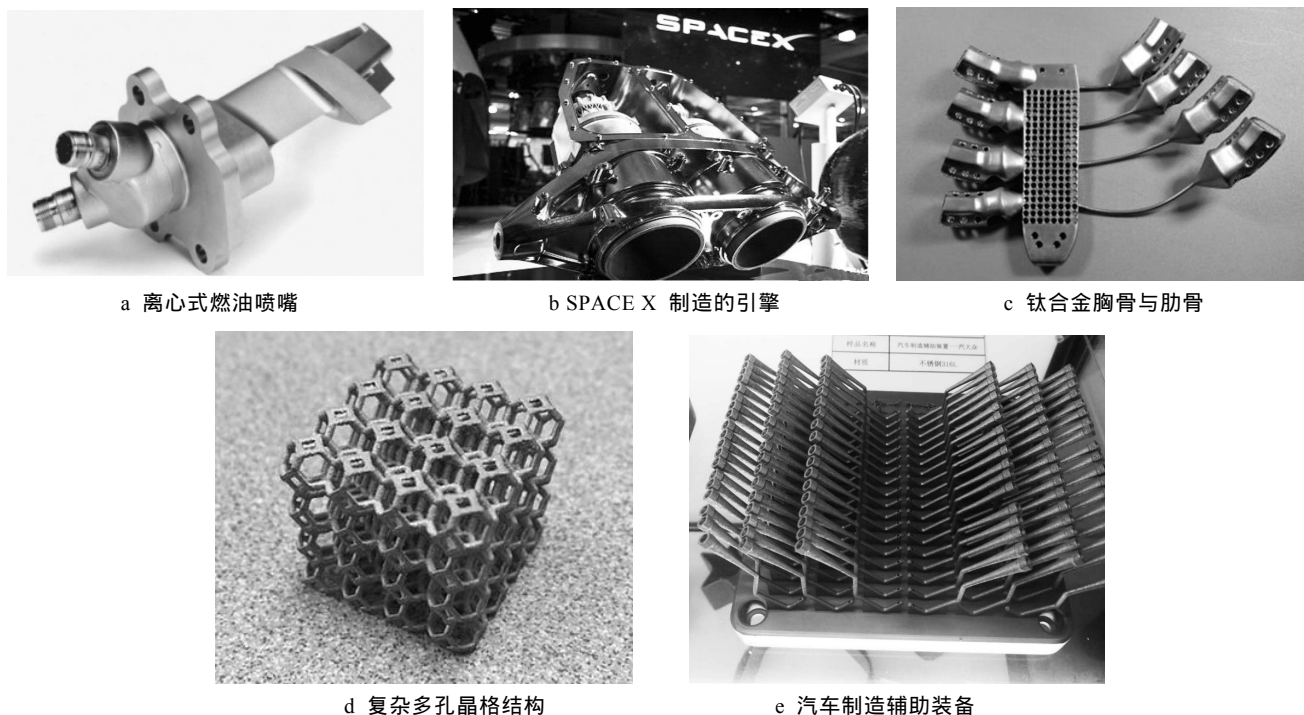
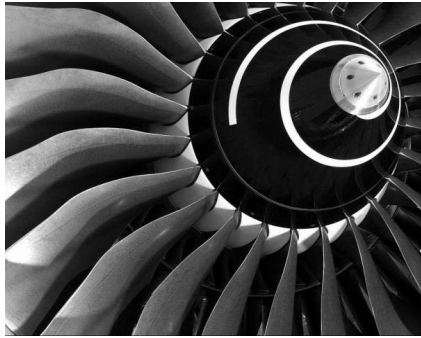
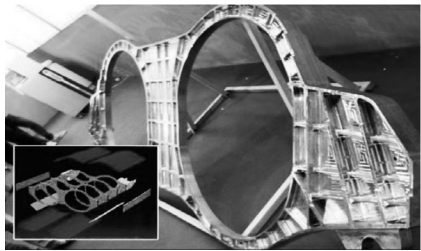


图5 SLM的技术应用实例
Fig.5 Application of SLM



a 英国飞机发动机的钛铝合金前轴承座



b 大型轰炸机发动机的钛合金加强框

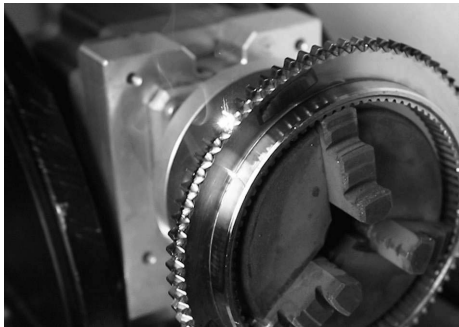
图 6 LMDF 的技术应用实例
Fig.6 Application of LMDF

卷积神经网络的金属激光熔化沉积熔池状态识别方法，构建了金字塔池化卷积神经网络，有效减少高层特征的信息丢失问题。中国兵器装备集团自动化研究所的刘广志等^[48]设计一种基于神经网络 PSD 算法的成形过程自适应成形闭环反馈控制系统，对工艺参数与熔池尺寸动态关系进行分析，实现了 LMDF 成形过程工艺参数的自适应控制。

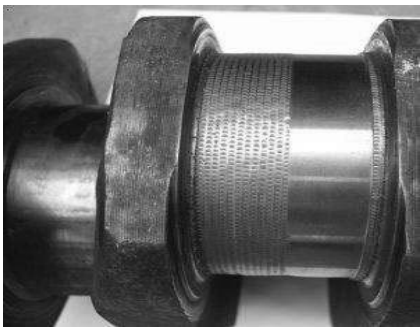
2.4 激光表面改性技术

激光表面改性技术是通过高能激光束与工件表面发生反应，从而提高零件表面性能的方法，涉及领域主要包括激光表面硬化、激光表面熔敷与合金化等。激光表面硬化是快速表面局部淬火工艺的一种高新技术，能快速提高金属材料及零件的表面硬度、耐磨性、耐蚀性以及强度和高温性能，同时使零件内部保持较好的韧性，分为激光相变硬化、激光熔化凝固硬化和激光冲击硬化 3 种工艺，该技术主要应用于汽车缸套、凸轮轴、曲轴、连杆等易磨损零件，通过表面改性延长零件使用寿命，从而提升经济效益。激光表面熔覆与合金化是利用高能激光束在基材表面产生快速熔凝的过程，形成与基层相互熔合的合金覆层，合金覆层与基层具有完全不同的成分与性能，从而提升材料的耐磨耐腐蚀性能，主要用在低熔点材料上，广泛应用于阀门、铸铁模具、气门、汽轮机齿轮的齿面等易磨损、易腐蚀零件^[49—51]，如图 7 所示为激光表面改性技术应用实例。

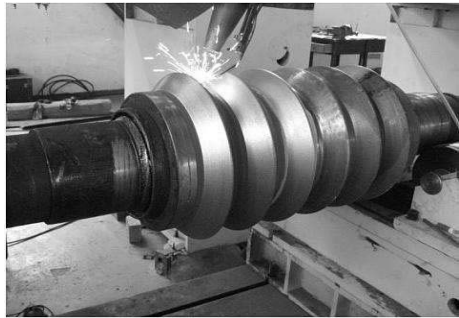
目前激光表面改性技术的研究主要集中在改性工艺的优化和涂层成分的优化配比方面。南非约翰内斯堡大学的 Fatoba 等^[52]通过在 Ti-6Al-4V 合金表面熔覆 Ti-Co 合金，发现降低扫描速率可提高金属间化合物的比例，激光熔覆后，表面硬度从 HV301 最高提升至 HV719，合金的强度和耐腐蚀性能均得到显著提高。茨瓦恩理工大学的 Sibisi 等^[53]在 Ti-6Al-4V 表面



a 齿轮表面硬化



b 曲轴激光熔敷修复



c 轧辊激光合金化



d 汽轮机叶片激光合金化

图 7 激光表面改性技术应用实例
Fig.7 Application of laser surface modification technology

激光熔覆 Ti+SiAlON 陶瓷粉末,使表面硬度相对基体提高了 2 倍以上。国内,李涛等^[54]采用时效工艺处理发动机用 FGH96 镍基高温合金,利用激光冲击强化方法对其表面进行修复,研究表明激光冲击强化实现了 FGH96 合金的沉淀强化作用,显著降低疲劳裂纹的扩展速度,使试样达到了更高的疲劳寿命。郭磊等^[55]对航空发动机涡轮叶片 Y_2O_3 部分稳定 ZrO_2 (YSZ) 热障涂层进行表面改性,研究表明,改性层的厚度与激光功率成正比,与光束长度成反比,优化的激光改性参数为:激光的功率为 75~80 W,扫描速度为 8 mm/s,光束长度为 160 mm。吴桂兰等^[56]在钛合金基体表面成功制得 Ti-Si 合金涂层,Ti-Si 合金涂层整体组织致密且分布均匀,冶金结合程度良好,硬度提高了 1.9 倍,抗氧化性能提高了 2.4 倍,平均摩擦因数降低了 0.39~0.45。

随着超短脉冲、超快激光技术的发展,通过超短激光实现表面功能特性的研究逐渐受到关注。马德里理工大学的 Jagdheesh 等^[57]采用纳秒激光在铝合金表面加工出微纳复合结构,得到超疏水表面,当液滴体积为 8 μ L 时,水滴与加工表面的接触角最大达到了 180°。Kaakkunen 等^[58]利用纳秒激光在飞机机翼表面加工出减阻结构,通过改变激光加工参数,在铝合金表面加工了不同高度和倾角的肋条,风洞实验表明,这些微结构可以明显降低飞机运行时的阻力。北京航空航天大学 Wang 等^[59]采用超快激光一站式加工得到微纳复合的超疏水结构,此结构自清洁和抗结冰能力强、热稳定性好,且承受机械磨损能力优异。

除以上几种应用范围较广的激光加工技术之外,激光加工技术不断创新,开发出了多种具有重要应用意义的新型激光加工技术,如激光打标、刻蚀、毛化、清洗等技术。

3 激光加工技术的应用展望

激光加工技术有着传统加工技术无法比拟的应用优势,同时其符合当前生态文明建设,实现绿色与可持续发展的要求,具有巨大的发展潜力和广阔的市场。随着激光加工技术应用领域的不断拓展,仍存在一些关键问题亟待解决,如激光设备的成本普遍偏高,专门针对激光增材制造的金属粉末开发不足,表面改性的激光加工工艺研究有待进一步深入等,因此针对上述问题开展技术研究,将促使激光加工技术更好应用于材料加工领域,从而助力中国制造业快速发展。

参考文献:

- [1] 李适民,黄维玲. 激光器件原理与设计(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- LI Shi-min, HUANG Wei-ling. Principles and Design of

- Laser Devices (Second Edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [2] SHI W, SCHULZGEN A, AMEZCUA R, et al. Fiber Lasers and Their Applications: Introduction[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554.
- [3] 周军,王璞,周朴,等. “高功率光纤激光技术”专题前沿[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 7—8.
- ZHOU Jun, WANG Pu, ZHOU Pu, et al. The Introduction of “High-power Fiber Laser Technology” Special Issue[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 7—8.
- [4] HARUN S W, ALAM S U, KURKOV A S, et al. Introduction to the Issue on Fiber Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron, 2014, 20: 5—7.
- [5] 王狮凌,房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 51—64.
- WANG Shi-ling, FANG Feng-zhou. High Power Laser and Its Development[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2017, 54(9): 51—64.
- [6] 楼祺洪,张海波,袁志军. 光纤和光纤激光器[J]. 科学, 2018, 70(2): 32—37.
- LOU Qi-hong, ZHANG Hai-bo, YUAN Zhi-jun. Fiber and Fiber Laser[J]. Science, 2018, 70(2): 32—37.
- [7] 杨依枫,沈辉,陈晓龙,等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 262.
- YANG Yi-feng, SHEN Hui, CHEN Xiao-long, et al. All-fiber High-efficiency, Narrow Line Width Fiber Laser Achieves 2.5 kW Near-diffraction Limit Output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 262.
- [8] 马思烨,张闻宇,邱佳欣,等. 高功率连续光纤激光器技术发展概述[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(5): 1—6.
- MA Si-ye, ZHANG Wen-yu, QIU Jia-xin, et al. Review on Technology Development of High Power CW Fiber Laser[J]. Fiber and Cable and Its Application Technology, 2019(5): 1—6.
- [9] 周朴,黄良金,冷进勇,等. 高功率双包层光纤激光器: 30 周年的发展历程[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(2): 123—135.
- ZHOU Pu, HUANG Liang-jin, LENG Jin-yong, et al. High-power Double-cladding Fiber Lasers: A 30-year Overview[J]. Science in China: Technology Science, 2020, 50(2): 123—135.
- [10] 任成高,申晓龙,张明军,等. 高功率激光器及应用于厚板焊接的技术进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1): 11—15.
- REN Cheng-gao, SHEN Xiao-long, ZHANG Ming-jun, et al. Technical Progress of High Power Lasers and Its Applications in Thick Plate Welding[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(1): 11—15.
- [11] 王霄. 激光加工技术的应用现状与未来发展分析[J]. 科学技术创新, 2017(22): 34—35.
- WANG Xiao. Analysis of the Application Status and Future Development of Laser Processing Technology[J].

- Science and Technology Innovation, 2017(22): 34—35.
- [12] 王占海. 浅析激光技术在材料加工产业中的应用[J]. 信息记录材料, 2019, 20(5): 48—49.
WANG Zhan-hai. Analysis of the Application of Laser Technology in the Material Processing Industry[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(5): 48—49.
- [13] 梁磊, 张宁. 激光技术应用综述[J]. 河南科技, 2019(35): 79—80.
LIANG Lei, ZHANG Ning. A Summary of Laser Technology Application[J]. Henan Science and Technology, 2019(35): 79—80.
- [14] 高威昊, 吴明清, 王晶, 等. 金属材料加工中的激光技术应用[J]. 中国金属通报, 2018(8): 13—14.
GAO Wei-hao, WU Ming-qing, WANG Jing, et al. Application of Laser Technology in Metal Material Processing[J]. China Metal Bulletin, 2018(8): 13—14.
- [15] 许天宇, 刘怀亮, 马修泉, 等. 光纤激光切割碳钢工艺研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(3): 174—176.
XU Tian-yu, LIU Huai-liang, MA Xiu-quan, et al. Research on Fiber Laser Cutting of Carbon Steel[J]. Electromechanical Engineering Technology, 2020, 49(3): 174—176.
- [16] 赵鑫, 李志永, 姚程, 等. 激光切割高速飞行器尾翼的基础工艺试验研究[J]. 制造技术与机床, 2020(6): 126—130.
ZHAO Xin, LI Zhi-yong, YAO Cheng, et al. Experimental Study on Basic Technology of Laser Cutting Tail Wing of High Speed Aircraft[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2020(6): 126—130.
- [17] 顾俊, 刘钊鹏, 徐友钧, 等. TC4钛合金激光切割热影响区及性能研究[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 97—102.
GU Jun, LIU Zhao-peng, XU You-jun, et al. Research on Heat-affected Zone and Performance of Laser Cutting TC4 Titanium Alloy[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 97—102.
- [18] 沈义平, 陈聪, 高明, 等. 光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 140—147.
SHEN Yi-ping, CHEN Cong, GAO Ming, et al. Technology Characteristics in Fiber Laser Cutting of Medium-Thickness Aluminum Alloy Sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 140—147.
- [19] 边晓微. 超短激光加工蓝宝石研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
BIAN Xiao-wei. Study on Machining of Sapphire by Ultrashort Laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [20] 李平雪, 辛承聪, 高健, 等. 皮秒激光加工研究进展与展望[J]. 激光与红外, 2018, 48(10): 1195—1203.
LI Ping-xue, XIN Cheng-cong, GAO Jian, et al. Research Progress and Development of Picosecond Laser Processing[J]. Laser and Infrared, 2018, 48(10): 1195—1203.
- [21] 蒋翼. 碳纤维复合材料皮秒激光切割及其与铝合金连接研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
JIANG Yi. Research on Cutting Carbon-fiber Reinforced Plastic with Picosecond Pulsed Laser and Its Connection with Aluminum Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [22] 乔璐, 李俊, 杨兴宇. LTCC基板激光外形切割研究[J]. 山西电子技术, 2020(2): 87—89.
QIAO Lu, LI Jun, YANG Xing-yu. Research on Laser Shape Cutting of LTCC Substrate[J]. Shanxi Electronic Technology, 2020(2): 87—89.
- [23] 许天宇, 刘怀亮, 马修泉, 等. 光纤激光切割碳钢工艺研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(3): 174—176.
XU Tian-yu, LIU Huai-liang, MA Xiu-quan, et al. Research on Fiber Laser Cutting of Carbon Steel[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2020, 49(3): 174—176.
- [24] 侯红玲, 吴辰, 宫经珠, 等. 激光切割钛合金飞机蒙皮及其力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 125—129.
HOU Hong-ling, WU Chen, GONG Jing-zhu, et al. Study on Laser Cutting of Titanium Alloy Aircraft Skin and Its Mechanical Properties[J]. Hot Processing Technology, 2020(16): 125—129.
- [25] 何燕春, 刘鑫, 袁莓婷. 激光切割 Kapon 复合胶膜工艺改进研究[J]. 科技视界, 2020(15): 61—62.
HE Yan-chun, LIU Xin, YUAN Mei-ting. Research on Improvement of Laser Cutting Kapon Composite Film Technology[J]. Science and Technology, 2020(15): 61—62.
- [26] 王志, 胡芳友, 崔爱永, 等. 激光焊接技术的研究现状及发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2016(3): 42—44.
WANG Zhi, HU Fang-you, CUI Ai-yong, et al. Current Status and Prospect of Research on Laser Welding Technology[J]. New Technology and New Process, 2016(3): 42—44.
- [27] 姜雨昂. 浅谈激光焊接技术的发展[J]. 中国新技术新产品, 2020(4): 56—57.
JIANG Yu-ang. The Development of Laser Welding Technology[J]. Chinese New Technology and New Products, 2020(4): 56—57.
- [28] 王丽娟. 激光技术在金属材料加工工艺中的应用研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(4): 52—53.
WANG Li-juan. The Application Research of Laser Technology in Metal Material Processing Technology[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(4): 52—53.
- [29] 韩善果, 罗子艺, 蔡得涛, 等. 铝合金激光-MIG 双面焊接接头组织和性能研究[J]. 电焊机, 2017, 47(7): 106—109.
HAN Shan-guo, LUO Zi-yi, CAI De-tao, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser-MIG Double-sided Welded Joints of Aluminum Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(7): 106—109.
- [30] 陈永城, 罗子艺, 韩善果, 等. 激光功率对 5 mm 厚紫铜激光焊接焊缝组织及力学性能的影响[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 556—561.
CHEN Yong-cheng, LUO Zi-yi, HAN Shan-guo, et al. Effect of Laser Power on Microstructure and Mechan-

- cal Properties of 5 mm Thick Copper Laser Welding Welds[J]. Applied Laser, 2018, 38(4): 556—561.
- [31] 蔺小轩, 李惠江, 黎祥民, 等. 激光焊在差速器壳与被动盆齿轮连接上的应用[J]. 汽车零部件, 2020(5): 76—79.
- LIN Xiao-xuan, LI Hui-jiang, LI Xiang-min, et al. Application of Laser Welding in Connection of Differential Case and Gear[J]. Automobile Parts, 2020(5): 76—79.
- [32] 温鹏, 栗忠秀, 张松, 等. 摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头气孔特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020(6): 1—16.
- WEN Peng, LI Zhong-xiu, ZHANG Song, et al. Investigation on Porosity and Performances of 6A01-T5 Aluminum Alloy Joint with Oscillating Fiber Laser-CMT Hybrid Welding[J]. China Laser, 2020(6): 1—16.
- [33] 罗兵兵, 张华, 雷敏, 等. 焊接速度对铝/钢激光搭接焊接接头质量的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 151—154.
- LUO Bing-bing, ZHANG Hua, LEI Min, et al. Effect of Welding Speed on Quality of Laser Overlap Welded Joint of Aluminum and Steel[J]. Hot Processing Technology, 2020(15): 151—154.
- [34] 李斌, 朱勇辉, 邓林, 等. BS960E 高强钢激光-电弧复合高速焊接接头组织及性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 72—76.
- LI Bin, ZHU Yong-hui, DENG Lin, et al. Microstructure and Properties of Laser-arc Composite High-speed Welding Joints of BS960E High-strength Steel[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(5): 72—76.
- [35] 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 熔滴对激光焊接匙孔与熔池影响的数值模拟[J]. 中国激光, 2020(31): 1—10.
- PENG Jin, XU Hong-qiao, WANG Xing-xing, et al. Numerical Simulation of the Effect for Droplet on the Keyhole and Molten Pool in Laser Welding[J]. China Laser, 2020(31): 1—10.
- [36] 冯燕柱, 高向东, 彭聪, 等. 304 不锈钢激光焊接匙孔瞬态行为分析[J]. 机电工程, 2020, 37(5): 577—581.
- FENG Yan-zhu, GAO Xiang-dong, PENG Cong, et al. Analysis of Transient Behaviors of Keyhole during 304 Stainless Steel Laser Welding[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2020, 37(5): 577—581.
- [37] 黄立进, 刘鹏, 朱苏, 等. 铝合金激光焊气孔数值模拟[J]. 造船技术, 2020(2): 1—6.
- HUANG Li-jin, LIU Peng, ZHU Su, et al. Numerical Simulation of Aluminum Alloy Laser Welding Pores[J]. Shipbuilding Technology, 2020(2): 1—6.
- [38] 汪健坤, 李强, 黄磊, 等. 激光焊接技术最新研究进展及应用现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 4—10.
- WANG Jian-kun, LI Qiang, HUANG Lei, et al. The Latest Research Progress and Application Status of Laser Welding Technology[J]. Metal Processing (Hot Processing), 2020(3): 4—10.
- [39] 段东磊. 激光焊接技术在汽车制造中的应用现状及发展趋势[J]. 世界制造技术与装备市场, 2019(5): 38—44.
- DUAN Dong-lei. Application Status and Development Trend of Laser Welding Technology in Automobile Manufacturing[J]. World Manufacturing Technology and Equipment Market, 2019(5): 38—44.
- [40] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129—135.
- LI Di-chen, HE Jian-kang, TIAN Xiao-yong, et al. Additive Manufacturing: Integrated Fabrication of Macro/Micro Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129—135.
- [41] LI N, HUANG S, ZHANG G H, et al. Progress in Additive Manufacturing on New Materials: A Review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(2): 242—269.
- [42] 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016(12): 26—31.
- YANG Qiang, LU Zhong-liang, HUANG Fu-xiang, et al. Research Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing Technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(12): 26—31.
- [43] WEN S F, LI S, WEI Q S, et al. Effect of Molten Pool Boundaries on the Mechanical Properties of Selective Laser Melting Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2660—2667.
- [44] 刘睿诚, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型金属零件上表面粗糙度的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 425—430.
- LIU Rui-cheng, YANG Yong-qiang, WANG Di. Research of Upper Surface Roughness of Metal Parts Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 425—430.
- [45] 胡美娟, 吉玲康, 马秋荣, 等. 激光增材制造技术及现状研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(5): 1—6.
- HU Mei-juan, JI Ling-kang, MA Qiu-rong, et al. Overview of Laser Additive Manufacturing Technology and Status[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(5): 1—6.
- [46] 耿靖贺. 12CrNi2 激光金属直接成形工艺研究及残余应力分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- GENG Jing-he. Research on the Technology and Residual Stress of 12CrNi2 Metal by Laser Metal Direct Forming[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [47] 马琳杰, 刘伟巍, 唐梓珏, 等. 一种基于 PPCNN 的金属激光熔化沉积熔池状态识别方法[J]. 内燃机与配件, 2020(10): 23—26.
- MA Lin-jie, LIU Wei-wei, TANG Zi-jue, et al. A Method for Identifying Molten Pool State of Laser-based Direct Energy Deposition Based on PPCNN, 2020(10): 23—26.
- [48] 刘广志, 王敏, 贺雷, 等. 基于神经网络 PSD 算法的 LMD 自适应控制系统[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 1—4.
- LIU Guang-zhi, WANG Min, HE Lei, et al. LMD Adaptive Control System Based on Neural PSD Algorithm[J].

- Ordnance Industry Automation, 2020, 39(6): 1—4.
- [49] 丁旭, 罗海龙. 激光技术在材料加工领域的应用探究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(9): 34—37.
- DING Xu, LUO Hai-long. Exploration of the Application of Laser Technology in the Field of Material Processing[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(9): 34—37.
- [50] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- GUAN Zhen-zhong. Manual of Laser Machining Technology[M]. Beijing: China Metrology Press, 1998.
- [51] 陈旭阳. 金属材料加工工艺中激光技术的应用[J]. 中国高科技, 2019(11): 62—64.
- CHEN Xu-yang. The Application of Laser Technology in the Metal Material Processing Technology[J]. China High Technology, 2019(11): 62—64.
- [52] FATOBA O S, ADESINA O S, POPOOLA A P I. Evaluation of Microstructure, Microhardness, and Electrochemical Properties of Laser-deposited Ti-Co Coatings on Ti-6Al-4V Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018(97): 2341—2350.
- [53] SIBISI P N, POPOOLA A P I, KANYANE L R, et al. Microstructure and Microhardness Characterization of $C_pTi/SiAl$ on Composite Coatings on Ti-6Al-4V by Laser Cladding[J]. Procedia Manufacturing, 2019(35): 272—277.
- [54] 李涛, 丁文文. 激光冲击强化制备发动机用 FGH96 镍基高温合金性能分析[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(4): 342—346.
- LI Tao, DING Wen-wen. Characterization of Ni-Based FGH96 Supper Alloy Surface-Modified by Ageing and Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(4): 342—346.
- [55] 郭磊, 高远, 辛会. 热障涂层的激光表面改性参数优化和结构设计[J]. 航空学报, 2020(30): 1—11.
- GUO Lei, GAO Yuan, XIN Hui. Laser Modification Parameters Optimization and Structural Design of Thermal Barrier Coatings[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020(30): 1—11.
- [56] 吴桂兰, 许晓静, 戈晓岚, 等. TC4 钛合金表面激光合金化制 Ti-Si 涂层[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(7): 1949—1952.
- WU Gui-lan, XU Xiao-jing, GE Xiao-lan, et al. Ti-Si Coating Produced by Laser Alloying on the Surface of TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(7): 1949—1952.
- [57] JAGDHEESH R, DIAZ M, OCANA J L. Bio Inspired Self-cleaning Ultra-hydrophobic Aluminium Surface by Laser Processing[J]. RSC Advance, 2016, 6(77): 72933—72941.
- [58] KAAKKUNEN J J J, TIAINEN J, JAATINEN V, et al. Fabrication of Surfaces with Reduced Friction Using Nanosecond Laser[J]. Procedia Manufacturing, 2018(17): 14—21.
- [59] WANG H P, HE M J, LIU H, et al. One-step Fabrication of Robust Super-hydrophobic Steel Surfaces with Mechanical Durability, Thermal Stability, and Anti-icing Function[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019(11): 25586—25594.