

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.05.08

精密测量和加工中的激光技术

乔晓旭¹, 罗怡^{1,2}, 王晓东^{1,2}

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 激光具有高方向性、高单色性、高相干性以及普通光源达不到的能量密度等优点。近年来, 由于激光技术具有高准确度、非接触、稳定性好等独特优点, 在精密加工和测量领域受到了广泛关注。本文综述了激光技术在精密测量和加工领域的应用现状, 并根据其测量原理和应用场景的不同进行分类和总结。在现有发展现状的基础上, 对激光技术在精密测量和加工领域的发展趋势进行了分析和展望, 为进一步推动激光技术在精密测量和精密加工领域的应用提供参考。

关键词: 激光技术; 精密测量; 激光测量技术; 激光加工技术

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)05-0074-10

Laser Technology in Precision Measurement and Manufacture

QIAO Xiaoxu¹, LUO Yi^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Laser has the advantages of high directivity, high monochromaticity, high coherence and energy density that cannot be achieved by ordinary light source. Laser technology has been widely used in measurement, analysis, processing, manufacture, medical and other fields. In recent years, given the unique advantages of laser technology such as high precision, non-contact and good stability, it has become a research focus in the field of precision measurement and manufacture. This paper reviews the application status of laser technology in precision measurement and machining, classifies and summarizes the measurement principles and application scenarios. Moreover, the development trend of laser technology in precision measurement and machining field is predicted on the basis of the present development status, which provides reference for the application of laser technology in the field of precision measurement and precision machining.

Key words: laser technology; precision measurement; laser measurement; laser machining technology

0 引言

1916年, 爱因斯坦提出了“受激辐射”的概念, 为激光的诞生奠定了理论基础。1958年, 美国科学家 Schawlow 和 Townes 发现了激光现象, 并提出激光原理, 获得了1964年诺贝尔物理学奖。1960年, 世界上第一台红宝石激光器正式诞生。1964年, 钱学森建议将 LASER 的中文名称定为“激光”, 完美解释了激光的产生原理“将通过辐射受激发射的光放大”。此后, 激

光技术和应用得到了迅速的发展, 与原子能、半导体、计算机并成为“二十世纪的四大大发明”。

激光技术的应用与激光的特性密不可分。激光具有方向性好的优点, 可精确测量直线度、同轴度等物理量; 具有高相干性、高单色性的优点, 可精确测量长度、角度、速度、振动以及表面粗糙度等物理量; 还具有普通光源达不到的能量密度的优点, 可利用其对金属及非金属等材料进行精密加工。通常来说, 激光的应用不是这些性质的单独应用, 而是综合利用。

收稿日期: 2021-09-17; 修回日期: 2021-10-11

基金项目: 国家部委基础预研重大项目(JCYK2016205A003)

引用格式: 乔晓旭, 罗怡, 王晓东. 精密测量和加工中的激光技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 74-83.

QIAO X X, LUO Y, WANG X D. Laser technology in precision measurement and manufacture[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 74-83.

本文对激光技术在精密测量和精密加工领域中的应用现状进行介绍,重点分析以激光干涉测量技术为主的激光精密测量技术,在此基础上总结并讨论激光技术在精密测量和加工领域仍面临的问题及未来的发展趋势,为促进激光技术在精密测量和精密加工领域获得更加广泛的应用提供参考。

1 激光技术在精密测量领域的应用现状

激光测量技术在精密测量领域的应用越来越广泛,可实现长距离、非破坏、高准确度、非接触的测量。激光测量技术可对长度、距离、位移、速度、角度、形变、振动、表面质量等参数实现精准的测量。目前在精密测量领域应用较为广泛的激光测量技术主要有激光干涉测量技术、激光衍射测量技术、激光准直测量技术、激光三角法测量技术、激光视觉三维测量技术、激光多普勒测量技术等。

1.1 激光干涉测量技术

激光干涉测量技术是以激光光波干涉原理为基础的一种测量技术。激光干涉测量技术主要包括双光束干涉测量、双频激光干涉测量、激光移相干涉测量、激光全息干涉测量、激光散斑干涉测量等多种干涉测量技术。

激光干涉测量技术是实现几何量等参数高水准精密测量的典型代表^[2],其测量准确度可达到纳米量级,具有较高的灵敏度,可实现对长度、位移、角度、介质折射率以及振动等参数的精密测量,应用范围十分广泛。

杨晔等^[3]采用基于长度可变真空腔的激光干涉测量技术对空气折射率进行了测量,并提出了测量过程中的误差检测和补偿方法。将实验结果与 Edlén 公式进行对比表明,系统测量结果具有较好的一致性和准确度。陈宇^[4]基于条纹傅里叶变换法,对激光干涉测温技术进行了研究。采用条纹傅里叶方法对激光干涉测量图片进行处理和计算,获取温度分布情况。将激光干涉测温的结果与其他测量结果进行对比,其相对误差在 7% 以内。Sun 等^[5]提出了一种基于调频连续波(FMCW)的新型接触式激光干涉测量技术,将非接触式测量转换为接触式测量,具有准确度高、量程大、抗电磁干扰等优点,可以在生产线上实现对复杂表面条件工件的直接测量,突破了光学测量的局限性,拓展了激光干涉测量的应用范围。Dang 等^[6]设计了一种

基于激光干涉法测量重力加速度的方案,并分析计算了测量过程中误差的主要来源和大小。结果表明,与传统测量重力加速度的方法相比,激光干涉方法测量准确度更高,可达到 $6 \times 10^{-4}g$ 。He 等^[7]针对长距离高速激光干涉仪测量系统,提出了一种结构设计与闭环控制相结合的方法,以减少环境参数引起的测量误差。实验结果表明,该方法的温度控制误差小于 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$,压力控制误差小于 1 Pa ,可广泛应用于远程超精密测量的微环境参数控制。Li 等^[8]研制了一种基于激光散斑干涉测量技术的表面形貌检测系统,如图 1 所示,通过改进的基于最小二乘迭代的相位分布提取方法来处理振动效应。将该系统测量的形貌结果与共聚焦显微镜测量的结果对比,相对误差在 20% 以内,表明该方法具有良好的在线实时检测前景。

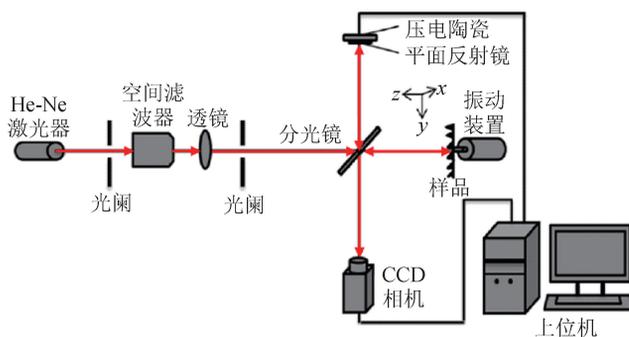


图 1 环境存在振动时激光干涉测量系统原理图^[8]

Fig. 1 Schematic of laser interferometry system in vibration environment^[8]

传统激光干涉测量技术需要被测量表面具有高反射特性,或者需要通过安装测量靶镜来获得高信噪比干涉信号,然而,在目前的许多超精密加工中无法安装测量靶镜,并且被测对象表面也不是高反射材料,限制了激光干涉测量技术的应用和发展。为解决此类问题,Xu^[9]等提出了一种基于微芯片激光反馈干涉法同时测量物体折射率和厚度的新方法。该方法将移频激光反馈与共光路结构相结合,消除了环境扰动对测量结果的影响,实现了相位测量中的环境鲁棒性。对不同玻璃的测量结果表明,该方法折射率的测量不确定度优于 0.00002 ,厚度的测量不确定度优于 $0.6 \text{ } \mu\text{m}$,具有较小的不确定度。

激光干涉测量技术在精密测量领域始终发挥着不可替代的作用。未来针对光刻机、超精密机床等领域的科学研究中,对测量准确度的需求将从微纳

米量级提升至更高级别，如何实现更高的分辨力、更小的测量误差，是激光干涉测量技术中亟需解决的问题。

1.2 激光衍射测量技术

衍射现象是指波在传播过程中遇到障碍物而发生的偏离直线传播方向的现象。由于激光的高单色性、高相干性等优点，使得激光衍射测量技术可以利用激光衍射条纹的变化来精确测量长度、振动、角度以及轮廓。激光衍射测量技术具有非接触、高准确度、稳定性好等优点，已广泛应用于工业分析及医药检测等精密测量领域。激光衍射测量方法主要有间隙测量法、反射衍射法、分离间隙法、互补测量法以及艾里斑测量法等。

潘林超^[10]在激光衍射法测量粒度分布方面进行了深入的研究，总结了球形颗粒散射光斑(艾里斑)的产生机理，提出了一种基于环形样品池的激光衍射测量方案，实现对亚微米级别颗粒的准确测量。田园等^[11]设计了一种基于激光衍射测量法的细圆柱直径测量系统，该系统基于 Fraunhofer 衍射理论和 Babinet 互补测量法，具有非接触、测量速度快、测量准确度高等优点，可用于在线检测，其测量细圆柱衍射花样图如图 2 所示。Song 等^[12]研究了温度和湿度对激光衍射法测量雾化器粒径分布的影响。实验结果表明，温度和湿度对激光衍射测量法的性能和一致性有着显著的影响，在温度为 5 ℃，相对湿度为 90% 的情况下，激光衍射法可以检测粒径小于 1 μm 的粒子分布情况。

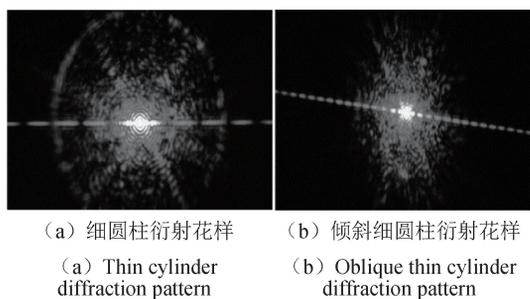


图 2 细圆柱衍射花样^[9]

Fig. 2 Thin cylinder diffraction pattern^[9]

1.3 激光准直测量技术

激光具有良好的方向性，经过准直的激光其能量分布中心可以看作是一条直线。激光准直测量技术利用激光的高方向性，将激光光束作为直线基准来测量

被测物体与激光光束之间的偏差，得到被测物理量的误差。通常利用激光测量技术对物体的直线度、同轴度等物理量进行精密测量。按照工作原理的不同，激光准直测量技术可分为干涉测量法、振幅测量法和偏振测量法。

楼志斌等^[13]提出了一种结合激光准直测量技术的二维转角动态测量方法，克服了传统方法结构复杂、成本较高的缺点，如图 3 所示。该方法采用准直激光作为直线基准，用位置探测器作为检测器件。实验结果表明，该方法可动态测量二维转角，测量重复性误差为 1 μrad，满足测量所需的高稳定性、高准确度、高重复性要求。

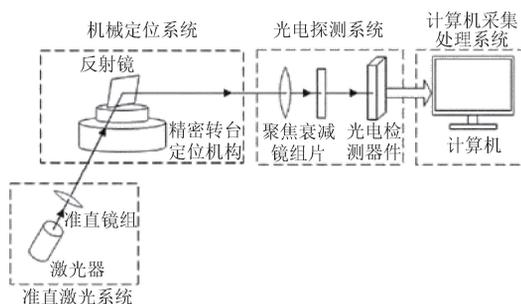


图 3 结合激光准直测量技术的二维动态转角测量系统^[13]

Fig. 3 Two dimensional dynamic angle measurement system combined with laser collimation measurement technology^[13]

张刘港等^[14]提出了一种将视觉测量技术与激光准直测量技术相结合的激光跟踪姿态角测量方法，建立了视觉测量系统坐标系与激光准直测量系统坐标系之间的转换关系。实验结果表明，在测量距离为 2.5 m，姿态角测量范围在 ±20° 之间时，该系统姿态角测量误差可控制在 ±2° 以内。Sun 等^[15]提出了一种用于同时测量五自由度运动误差的激光准直测量系统和光路补偿方法，并对直线度和角度误差进行了补偿。通过实验验证了系统的可靠性和有效性，该系统可应用于精密测量和标定领域，包括实时检测光的漂移等。Liu 等^[16]针对在较长的工作距离下，激光准直测量直线度的准确度和稳定性会受到大气湍流的严重影响这一问题，提出了一种基于激光准直测量直线度的噪声衰减方法。该方法采用湍流屏蔽设计以减小大气湍流对光束路径的影响。实验结果表明，在测量距离为 5 m 处安装湍流屏蔽后，水平直线度噪声和垂直直线度噪声的标准差分别降低了 95.6% 和 84.7%，有效提高了激光准直直线度测量的准确度和稳定性。

1.4 激光三角法测量技术

激光三角法测量技术以激光作为光源，利用其入射与反射光线、物体与成像之间的三角关系对几何量进行测量。激光技术、PSD 位置敏感探测器以及 CCD/CMOS 等光电、位置传感器技术的不断发展，有效促进了激光三角测量技术的快速发展。激光三角测量技术具有无接触、测量速度快、测量准确度高等优点，广泛应用于几何量测量领域。

王成武等^[17]针对激光三角法测量位移量过程中，被测面位移量与成像光斑在光敏面上的位移量之间的非线性关系进行了系统分析，确定了拟合过程中的误差来源，并采用了多项式拟合法，确定了可保证测量误差的拟合参数。Victor 等^[18]采用激光三角测量技术对风力涡轮机叶片的振动进行了测量，利用沿光束 Z 轴等距位移的几何对称性来获得振幅数据，测量叶片一阶自振频率的相对误差小于 1%。Bian 等^[19]采用激光三角测量技术对锻造环境中的高温锻件的缺陷、温度、位置、尺寸等参数进行在线检测，根据实时检测结果调整锻压设备和改进生产工艺路线，有效提高了锻压准确度和效率。Nan 等^[20]基于激光三角测距原理，根据不同物体上的静态和动态实际激光成像波形的特点，提出了一种快速激光调整算法，可应用于点胶机器人的位移测量，实验结果表明，该方法测量重复性误差为 2.7 μm ，动态阶跃响应延迟为 0.5 ms。

在提高激光三角法测量准确度方面，Nan 等^[21]对小型激光三角位移传感器的温度适应性进行了研究，通过极端温度实验建立了激光三角位移传感器的温度漂移误差数据库，并通过广义回归神经网络模型进行误差补偿。实验结果表明该方法测量结果的准确度和温度的线性度均达到了较高的水平。Ye 等^[22]提出了一种通过集成衍射光栅提高测量准确度的激光三角测量方法，与只有一个光斑信息的传统方法相比，衍射光能够在 CMOS 图像传感器上产生多个衍射光斑，在一个采样周期中同时获得多个采样结果，并通过平均运算获得更高的测量准确度。实验结果显示：在 0 ~ 20 mm 的测量范围内，采用衍射光栅的激光三角测量技术测量非线性和重复性分别为 0.113% FS 和 0.89 μm ，与未采用衍射光栅的激光三角测量技术相比有显著提高。

随着 CCD, CMOS 等光电检测器件的高速发展，以激光三角法测量技术为基础的激光视觉三维测量技

术在精密测量领域也得到了快速的发展和广泛的应用。激光视觉三维测量技术是以激光作为光源，通过结构光在被测物体上的精确点位数据来获取视觉测量信息的主动视觉检测技术。激光视觉三维测量技术通常使用三种结构的激光光源：点结构光^[23]、线结构光^[24]和面结构光^[25]。激光视觉三维测量技术具有非接触、快速测量、可在线检测等优点，广泛应用于各种工业产品的精密测量领域中。

洪梓铭等^[26]提出了一种基于光纤激光的超精密视觉测量方法，实现了对微型物体几何尺寸的多尺寸快速精密测量。该方法基于线结构光方法对被测物体连续发射激光线，再通过相机获取物体的被测信息，经过图像处理、坐标转换获得被测物体的测量值。实验结果表明该方法可达到微米级的测量误差，可准确、快速地测量微型物体的几何信息。Hou 等^[27]针对基于激光视觉测量技术的机器人免教焊接系统进行了研究，提出了一种快速统一的激光视觉检测标定方法，能够实时获得亚像素准确度的特征点，提高了激光视觉检测系统的测量准确度。Zheng 等^[28]针对单传感器 SLAM 系统在不同应用场景下存在的局限性问题，将激光视觉三维检测技术与传统视觉检测技术相融合，提高了激光-视觉融合 SLAM 系统的定位和映射的准确度，产生了良好的鲁棒性。

1.5 激光多普勒测量技术

激光多普勒测量技术的基本原理是基于对运动物体散射光线的多普勒效应，具有非接触、准确度高、响应快、不扰乱测量物体等优点，广泛应用于医学、流体力学、空气动力学等精密测量领域。

激光多普勒测量技术在精密测量领域的应用方面，宋耀东等^[29]基于激光多普勒测量技术，提出了一种三维扫描振动测量方法。该方法将三套激光多普勒测振仪的光束集成于一点，实现对该点三维振动的精密测量，通过控制该点的移动，可实现对整个面的三维振动信息的测量。徐大川等^[30]利用激光多普勒技术搭建了一套极低风速测量系统，并对系统的测量准确度、安装角度等影响测量结果的因素进行了分析。该系统可以获得稳定可靠的信号，其测量误差可以控制在 0.01 m/s 以内。Kozlov 等^[31]提出了一种数字激光多普勒血流测量的方法和装置，并提出了一种基于多普勒展宽频率下功率幅值分布分析的信号处理方法。

在提高激光多普勒测量准确度方面,席崇宾等^[32]为了提高多普勒信号的有效性,增加激光多普勒测量的范围和距离,提出了一种基于液体透镜的品质因子增强技术。实验结果表明:通过改变驱动液体透镜的电流大小,多普勒信号的品质因子显著增加,大幅度提高了激光多普勒测量的范围和距离。Ma等^[33]为了去除激光多普勒对速度的测量结果中包含的噪声,采用改进的小波去噪阈值算法和卡尔曼滤波算法对测速数据进行处理,提高了测量准确度。实验结果表明,经过卡尔曼滤波后的均方根值更接近额定转速值,去噪效果较好。

除了上述几种在精密测量领域应用范围较广,发展程度较为成熟的激光测量技术以外,还有多种有重要应用价值的激光测量技术,例如:激光扫描测径技术^[34]、激光相位测距技术^[35]、飞秒激光频率梳测距技术^[36]等,它们具有测量速度快、测量准确度高等优点,广泛应用于圆柱体直径、长距离测量等领域。

2 激光技术在精密加工领域的发展现状

自上世纪60年代第一台激光器问世以来,激光加工技术在精密加工领域的应用就受到科研人员的高度重视。经过多年的发展,激光加工技术已成为精密制造技术的重要组成部分,被誉为“万能的加工工具”。激光加工技术具有柔性化、高效率、高质量等综合优势,可应用于计算机芯片、微电子、航空发动机等精密加工领域,并且发挥着越来越重要的作用。目前在精密加工领域应用较为成熟的激光加工技术有:激光焊接技术、激光增材制造技术、激光微纳技术等。

2.1 激光焊接技术

激光焊接技术具有能量密度高、焊接速度较快、焊接接头的热影响区小、焊缝成型好、几乎没有焊接变形等优点,可极大提高焊接的质量。通常来说,根据激光焊接功率密度的大小,可将激光焊接技术分为激光热传导焊接和激光深熔焊接。由于金属对激光的反射率较高,当激光功率密度较小时,到达金属表面的激光一部分被反射出去,另一部分被金属表面吸收,完成光能向热能的转化,金属表面的热量以热传导的方式向金属内部传递。随着温度的升高,形成金属焊接熔池,实现各个零件的连接。当激光功率密度较高时,金属表面瞬间产生的高温会使表面金属发生气化,形成细长的孔洞,在激光的照射下,孔洞的深度逐渐

加大,当照射结束后,孔洞周边的液体回流,冷却后形成良好的焊接效果。

国内外学者针对激光焊接技术在精密加工领域的应用进行了大量的研究,其中陈勇等^[37]针对304不锈钢TIG焊与激光焊接工艺进行了对比研究,如图4所示。

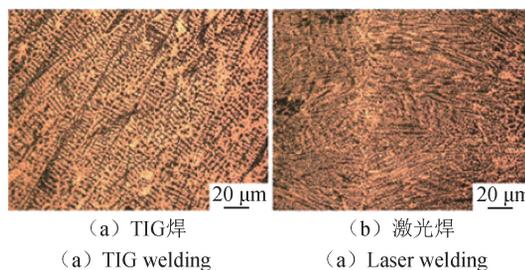
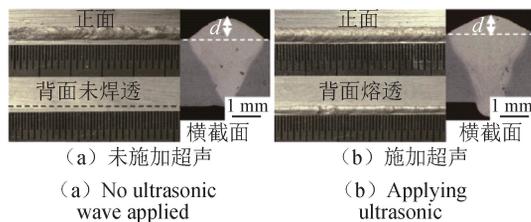


图4 TIG焊和激光焊焊缝中心微观组织^[37]
Fig. 4 Center microstructure of TIG welding and laser welding seams^[37]

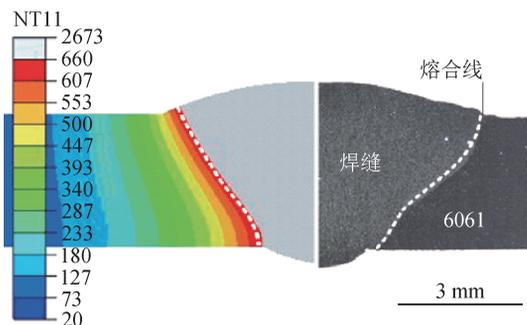
实验结果表明,相较TIG焊,激光焊接焊缝面积以及正反面焊缝宽度更小;通过扫描电镜对焊缝组织进行观察,激光焊接焊缝组织奥氏体和 δ 铁素体形成的树枝状晶体更多,且尺寸更加细小;拉伸破坏实验结果表明,激光焊接试样抗拉强度更大,塑性更好,且激光焊接接头显微硬度更高。

在激光焊接辅助技术方面,雷正龙等^[38]针对铝合金激光焊接接头性能下降的问题,开展了超声振动辅助激光焊接的研究,如图5所示。超声波的引入增加了焊接熔池成分的均匀性,起到了细化晶粒的作用,提高了焊接接头的塑性和抗拉强度。与未引入超声辅助焊接的结果相比,焊接接头的抗拉强度提高了40 MPa,接头延伸率提高了1.9%。孔凉等^[39]针对0.5 mm厚纯钛TA2薄板的激光焊接问题,开展了电弧辅助激光焊接实验研究。结果表明,相较激光焊接,电弧辅助激光焊接焊缝正面熔宽减小了13.5%,正面余高减小了7.5%。

在激光焊接数值模拟方面,王伟等^[40]采用ABAQUS有限元分析软件对钛/铝异种合金激光-电弧复合焊接接头的残余应力进行了计算,如图6所示。仿真结果表明,焊缝中心处应力值最大,焊缝两侧等效残余应力非对称分布,表现出“两端受压,中间受拉”的分布特征,且焊缝正反面余高处存在应力集中的现象。周勇等^[41]建立了12 mm厚HG785D高强度钢激

图5 5A06 铝合金激光焊接焊缝成型^[38]Fig. 5 Weld formation of 5A06 aluminum alloy laser welding^[38]

光-MIG 复合焊接的热源模型，并开展了焊接实验。采用 ANSYS 有限元分析软件对复合焊接温度场进行仿真分析，结果表明，数值模拟与实验获得的焊接接头温度场循环曲线规律吻合，获得了 12 mm 厚 HG785D 高强度钢激光-MIG 复合焊接最佳工艺参数。

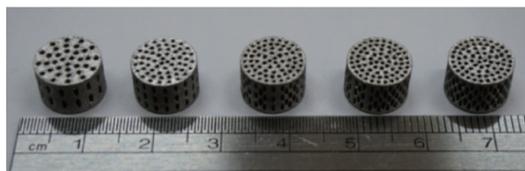
图6 钛/铝异种合金激光-电弧复合焊实际熔合线形状与仿真结果对比^[40]Fig. 6 Comparison between actual fusion line shape and simulation results of laser arc welding of titanium/aluminum dissimilar alloy^[40]

2.2 激光增材制造技术

激光增材制造技术 (Laser Additive Manufacturing, LAM) 以高能激光为能量源，以 CAD 等数字模型为基础，通过逐层堆叠的方式，将粉末状、丝状等原材快速制造成三维零件。与其他增材制造技术相比，激光的功率密度更高，不受零件材料和结构的限制，可用于复杂结构 (例如点阵结构、大型薄壁结构、复杂曲面结构、一体化结构等) 以及难加工材料 (例如陶瓷材料、复合材料、镍基材料等) 的加工制造。通常来说，按照成形原理，激光增材制造技术可以分为激光选区熔化成形技术 (Selecting Laser Melting, SLM) 和激光熔化沉积技术 (Laser Melting Depositon, LMD)。

SLM 技术在激光增材制造技术中得到了最为广泛

的应用。王文权等^[42]采用 SLM 技术制备了 TiN/Inconel 复合材料，并对其微观组织和力学性能进行了研究。实验结果表明，相比 IN718 合金，SLM 成型复合材料的显微硬度提高了 39 HV_{0.2}，抗拉强度提升了 74 MPa。此外，经过均匀化 + 固溶时效热处理后，复合材料抗拉强度提升了 410 MPa。Van 等^[43]以及 Chen 等^[44]都通过 SLM 技术制备了多孔 Ti-6Al-4V 结构，用于代替人的骨骼，如图 7 所示。Chen 等通过 CAD 设计了孔隙度为 40% ~ 80%，孔径为 600 ~ 1000 μm 的多孔结构，并通过进一步减小粉末尺寸和激光束直径获得了更精确的 SLM 多孔形貌。实验结果显示，孔隙度为 67% 的试样与人体骨骼最为匹配，其杨氏模量为 15 GPa，屈服应力为 129 MPa。PARRY 等^[45]为了探究激光扫描策略对 SLM 制备的成型结构中残余应力的影响，采用热力学模型进行了分析，发现了产生残余应力的温度梯度机制。结果表明，零件中残余应力的分布呈各向异性，残余应力最大分量与激光扫描矢量平行。

图7 采用 SLM 技术制备的 Ti-6Al-4V 多孔试样^[44]Fig. 7 Ti-6Al-4V porous sample prepared by SLM technology^[44]

目前各国学者针对 LMD 技术进行了大量的研究。张荣伟等^[46]针对封闭式薄壁空心球体等零部件的制造，提出了连续多姿态 LMD 成形方法，将原始 3D 模型分段规划，并建立相应的数学模型，如图 8 所示。实验结果表明，重熔处理后各沉积角球面粗糙度 $R_a = 1.1 \mu\text{m}$ ，提高了 LMD 成形方法对封闭构件的制造能力。陈研等^[47]为了提高沉积层的致密度，开展了超声波辅助 LMD 成形技术研究。实验结果表明，利用该技术能够获得 Al-12Si 沉积层致密度达到 99.1% 的试样，并且相较无超声波辅助 LMD，试样抗拉强度提高了 17%，延伸率提高了 53%。Shi 等^[48]采用光内送粉技术，对扭曲薄壁状零件的 LMD 技术进行了研究。实验利用六轴机器人进行空间变换，保持喷头与零件的生长方向相切，成功地沉积了花瓶状金属零件，如图 8 所示。实验结果表明，成型件壁厚均匀，显微组织细小，显微硬度较高。



(a) 沉积成形过程

(a) Depositional forming process



(b) 最后封闭沉积

(b) Final seal deposition



(c) 表面重熔

(c) Surface remelting

图8 空心球体LMD成形^[46]Fig. 8 Hollow sphere LMD forming^[46]

除了上述几种在精密加工领域应用范围较广, 发展程度较为成熟的激光加工技术以外, 随着科研人员对激光加工技术的不断研究, 还开发出了其他具有重要应用价值的激光加工技术, 包括: 激光打标技术^[49]、激光雕刻技术^[50]、激光微纳技术^[51]等。

3 结论与展望

综述了激光技术在精密测量和加工领域的应用现状, 并分别讨论了激光测量技术和激光加工技术在实际应用中的优点以及目前存在的问题。作为一种高分辨力、高准确度、非接触的测量方式, 激光测量技术在目前的精密测量领域中仍然不可替代。但是, 激光测量技术对测量环境的要求较高, 当环境噪声较高时, 会掩盖真实信号, 引起整个测量系统失调, 这已成为制约激光测量技术应用于精密测量领域的因素之一。激光加工技术具有能量密度高、加工速度快、热影响区小等优点, 但仍存在被加工物体激光反射率高导致激光能量利用率低、激光加工系统的柔性较差、各环节之间的合作融合不够等问题, 亟需科研人员开展相关研究解决。

在精密测量领域, 后续的研究将围绕以下内容展开: 1) 测量信号噪声的分析与抑制技术研究: 在激光测量系统中存在大量的由于激光反射、散射及环境光所造成的噪声信号, 会对测量结果带来误差。因此需要开展针对此类噪声的理论分析及抑制技术研究, 以减小噪声对测量结果的干扰; 2) 提高激光精密测

量系统在复杂环境下的精密测量能力: 激光精密测量技术已逐渐应用于产品的生产、加工、装配、测试等各个环节, 针对生产现场环境条件的复杂性和场地条件的局限性问题, 需要对激光测量系统的小型化、测量误差的快速标定、测量方案的自主化决定以及保证在现场复杂环境下的测量准确性等进行深入研究; 3) 激光测量技术与先进光电技术相结合: 激光测量技术的发展与光电技术的发展密不可分, 未来 CCD/CMOS 等图像传感器、PSD 位置敏感传感器、光电二极管等光电技术的不断发展, 将不断提高激光与图像检测的灵敏度和速度。将激光测量技术与先进光电技术相结合, 将大幅提高激光精密测量的准确度和效率。

在精密加工领域中, 后续的研究也将围绕以下内容展开: 针对被加工物体的材料对激光的反射率较高问题, 可将高反射率的激光光源改为低反射率的激光光源, 提高激光的输入能力, 有效提高加工效率, 节约生产资源; 将激光焊接、激光增材制造等多种激光精密加工技术相结合, 集成于一台激光加工中心上, 以提高激光加工系统的柔性; 将计算机技术、网络技术、机器人技术、精密测量技术等结合起来, 构建智能化的加工中心, 对加工过程进行全程感知、实时分析、自主决策, 不仅可以大幅提高激光精密加工的生产效率, 还能够保证产品的质量和性能。可以预见的是, 激光技术将在精密测量和加工领域中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] TROKHIMCHUCK P. Recent research and development status of relaxed optics and laser technology: a review[J]. *Optics and photonics journal*, 2021, 11(7): 210 - 263.
- [2] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 228 - 249.
TAN Y D, XU X, ZHANG S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chinese journal of lasers*, 2021, 48(15): 228 - 249. (in Chinese)
- [3] 杨晔, 严利平, 陈本永, 等. 基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(6): 48 - 55.
YANG Y, YAN L P, CHEN B Y, et al. Analysis and compensation of the measurement error of air refractive index using a laser interferometer with a variable length vacuum cavity[J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2021, 42(6): 48 - 55. (in Chinese)

- [4] 陈宇. 基于条纹傅里叶分析的激光干涉测温方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
CHEN Y. Fourier analysis of laser interferometry for probing axisymmetric spatial temperatures [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [5] SUN B, ZHENG G, ZHANG X. Application of contact laser interferometry in precise displacement measurement[J]. Measurement, 2021, 174: 108959.
- [6] DANG C, LI J, TANG J. Systematic research on measuring acceleration of gravity by laser interferometry[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1982(1): 012146.
- [7] HE Y, ZHU Y, NIE H. Study on the control of micro-environmental parameters in long distance laser interferometry[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 2002(1): 012055.
- [8] LI Y, CUI X, LI S, et al. An improved approach to eliminate the error induced by vibrations for laser speckle interferometry under tokamak vibrational environments[J]. Nuclear materials and energy, 2020, 25.
- [9] XU L, ZHANG S, TAN Y, et al. Simultaneous measurement of refractive-index and thickness for optical materials by laser feedback interferometry[J]. Review of scientific instruments, 2014, 85(8): 1693.
- [10] 潘林超. 激光衍射法粒度测量的准确性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
PAN L C. Research on measurement accuracy of particle sizing by laser diffraction method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [11] 田园, 杨晓东. 利用激光衍射法测量细圆柱直径[J]. 日用电器, 2018(10): 82-85.
TIAN Y, YANG X D. Measurement of thin cylinder diameter with laser diffraction method[J]. Electrical appliances, 2018(10): 82-85. (in Chinese)
- [12] SONG X, HU J, ZHAN S, et al. Effects of Temperature and humidity on laser diffraction measurements to jet nebulizer and comparison with NGI[J]. Aaps pharmscitech, 2016, 17(2): 380-388.
- [13] 楼志斌, 赵辉, 刘权, 等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 561-568.
LOU Z B, ZHAO H, LIU Q, et al. Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation[J]. Optics and precision engineering, 2019, 27(3): 561-568. (in Chinese)
- [14] 张刘港, 熊芝, 冯维, 等. 基于视觉与激光准直的激光跟踪姿态角测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 30-36.
ZHANG L G, XIONG Z, FENG W, et al. Laser tracking attitude angle measurement method based on vision and laser collimation[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2020, 41(8): 30-36. (in Chinese)
- [15] SUN C, CAI S, LIU Y, et al. Compact laser collimation system for simultaneous measurement of five-degree-of-freedom motion errors[J]. Applied sciences, 2020, 10(15): 50-57.
- [16] LIU W, ZHANG C, DUAN F, et al. A method for noise attenuation of straightness measurement based on laser collimation[J]. Measurement, 2021, 182.
- [17] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 1-8.
WANG C W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2021, 42(5): 1-8. (in Chinese)
- [18] OLIVA V I M, DIAZ F, HERNANDEZ E R, et al. Vibration measurement using laser triangulation for applications in wind turbine blades[J]. Symmetry, 2021, 13(6): 10-17.
- [19] BIAN S, ZHOU P, XU J, et al. Online detection device for high temperature forgings based on laser triangulation[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1885(5): 35-44.
- [20] NAN Z, TAO W, ZHAO H, et al. A fast laser adjustment based laser triangulation displacement sensor for dynamic measurement of a dispensing robot[J]. Applied sciences, 2020, 10(21): 74-84.
- [21] NAN Z, TAO W, ZHAO H. Development of a small size laser triangulation displacement sensor and temperature drift compensation method [J]. Measurement science and technology, 2021, 32(9): 095-104.
- [22] YE G, ZHANG Y, JIANG W, et al. Improving measurement accuracy of laser triangulation sensor via integrating a diffraction grating[J]. Optics and lasers in engineering, 2021, 143(2): 106-115.
- [23] 张海涛. 基于点视觉激光 3D 轮廓测量系统设计与研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
ZHANG H T. Design and research on 3D profile measurement system based on laser [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [24] 林晟杰. 基于线结构光视觉测量的逆向工程技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
LIN S J. Research on reverse engineering technology based on line structured light vision measurement [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [25] 杨瑞文. 基于面结构光三维测量技术的 SLM 成形过程平面度和轮廓在线测量[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

- YANG R W. On-line measurement of flatness and profile of SLM forming process based on surface structure light three-dimensional measurement technique[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] 洪梓铭, 艾青松, 陈昆. 基于光纤激光的高精度三维视觉测量技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 89-96.
HONG Z M, AI Q S, CHEN K. High precise 3D visual measurement based on fiber laser[J]. Infrared and laser engineering, 2018, 47(8): 89-96. (in Chinese)
- [27] HOU Z, XU Y, XIAO R, et al. A teaching-free welding method based on laser visual sensing system in robotic GMAW[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2020, 109.
- [28] ZHENG J, ZHANG H, TANG K, et al. Research on laser-visual fusion-based simultaneous localization and mapping[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1682(1): 12-19.
- [29] 宋耀东, 杨兴, 刘志方, 等. 基于激光多普勒技术的三维扫描测振研究[J]. 机械工程师, 2018(4): 150-152, 159.
SONG Y D, YANG X, LIU Z F, et al. Study on 3D scanning technology based on laser doppler vibrometer[J]. Mechanical engineer, 2018(4): 150-152, 159. (in Chinese)
- [30] 徐大川, 龙彦志, 李玉栋, 等. 基于激光多普勒原理的极低风速测量实验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6): 1228-1237.
XU D C, LONG Y Z, LI Y D, et al. Experiment of extremely low wind velocity measurement based on laser doppler[J]. Journal of aerospace power, 2020, 35(6): 1228-1237. (in Chinese)
- [31] KOZLOV I O, ZHEREBTSOV E A, PODMASTE K V, et al. Digital laser doppler flowmetry: device, signal processing technique, and clinical testing[J]. Biomedical engineering, 2021, 55(3): 1-5.
- [32] 席崇宾, 黄荣, 周健, 等. 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 98-106.
XI C B, HUANG R, ZHOU J, et al. Quality factor enhancement technology of laser doppler signal based on liquid lens[J]. Chinese journal of lasers, 2021, 48(7): 98-106. (in Chinese)
- [33] MA X, WANG H, LI M, et al. Research on speed measurement signal denoising processing of laser doppler vibrometer[J]. Integrated ferroelectrics, 2021, 217(1): 11-26.
- [34] 康志远, 龙威, 唐立军, 等. 双路扫描式激光测径仪系统设计[J]. 测控技术, 2019, 38(5): 72-76.
KANG Z Y, LONG W, TANG L J, et al. Design of double scanning laser diameter measuring system[J]. Measurement & control technology, 2019, 38(5): 72-76. (in Chinese)
- [35] BAUD C, BETEILLE H T, LESCURE M, et al. Analog and digital implementation of an accurate phasemeter for laser range finding[J]. Sensors and actuators a physical, 2006, 132(1): 258-264.
- [36] SHI H, SONG Y, LIANG F, et al. Effect of timing jitter on time-of-flight distance measurements using dual femtosecond lasers[J]. Optics express, 2015, 23(11): 57-69.
- [37] 陈勇, 徐育焱, 李勤涛, 等. 304 不锈钢 TIG 焊与激光焊工艺对比研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(2): 41-45. CHEN Y, XU Y L, LI Q T, et al. Study on comparison of TIG welding and Laser welding of 304 stainless steel[J]. Welding technology, 2021, 50(2): 41-45. (in Chinese)
- [38] 雷正龙, 郭亨通, 张登明, 等. 5A06 铝合金超声辅助激光填丝焊接熔池流动与结晶行为研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 78-86.
LEI Z L, GUO H T, ZHANG D M, et al. Study on melt flow and grain refining ultrasonic-assisted laser filler wire welding process of 5A06 aluminum alloy[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(6): 78-86. (in Chinese)
- [39] 孔谅, 周洋, 王敏, 等. TA2 薄板电弧辅助激光高速焊接的焊缝成形稳定性[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 137-147.
KONG L, ZHOU Y, WANG M, et al. Robustness of weld appearance on high-speed arc-assisted laser welding process on titanium sheet[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(10): 137-147. (in Chinese)
- [40] 王伟, 王泽明, 商乔, 等. 铝异种合金激光-电弧复合熔钎焊接头残余应力数值计算[J]. 焊接技术, 2020, 49(11): 24-28.
WANG W, WANG Z, SHANG Q, et al. Numerical simulation on residual stress of Ti/Al dissimilar joint by laser-arc hybrid welding-brazing[J]. Welding technology, 2020, 49(11): 24-28. (in Chinese)
- [41] 周勇, 张成文, 张国军, 等. 高强钢激光电弧复合焊接温度场的数值模拟与试验研究[J/OL]. 精密成形工程, 2021: 1-8 [2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1199.TB.20210820.1101.006.html>.
- ZHOU Y, ZHANG C W, ZHANG G J, et al. Numerical simulation and experimental study of temperature field of hybrid laser arc welding joint of high strength steel[J/OL]. Journal of net-shape forming engineering, 2021: 1-8 [2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1199.TB.20210820.1101.006.html>. (in Chinese)
- [42] 王文权, 王苏煜, 陈飞, 等. 选区激光熔化成形 TiN/Inconel 718 复合材料的组织和力学性能[J]. 金属学报, 2021, 57

- (8): 1017 – 1026.
WANG W Q, WANG S Y, CHEN F, et al. Microstructure and mechanical properties of TiN/Inconel 718 composites fabricated by selective laser melting[J]. Acta metallurgica sinica, 2021, 57(8): 1017 – 1026. (in Chinese)
- [43] BAEL S V, CHAI Y C, TRUSCELLO S, et al. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti-6Al-4V bone scaffolds[J]. Acta biomaterialia, 2012, 8(7): 2824 – 2834.
- [44] CHEN S, HUANG J, PAN C, et al. Microstructure and mechanical properties of open-cell porous Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 248 – 254.
- [45] PARRY L, ASHCROFT I A, WILDMAN R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. Additive manufacturing, 2016, 12(1): 1 – 15.
- [46] 张荣伟, 万乐, 石拓, 等. 薄壁空心球体的多自由度随形激光熔化沉积制备工艺与精度[J/OL]. 中国激光, 2021: 1 – 15 [2021 – 10 – 09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20210716.1636.008.html>.
- ZHANG R W, WANG L, SHI T, et al. Multi-degree of freedom conformal laser metal deposition process and precision of thin-walled hollow sphere[J/OL]. Chinese journal of lasers, 2021: 1 – 15 [2021 – 10 – 09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20210716.1636.008.html>. (in Chinese)
- [47] 陈研, 张洋, 郭玉奇, 等. 超声波辅助激光熔化沉积 Al-12Si 合金致密化工艺研究[J]. 应用激光, 2021, 41(1): 51 – 58.
CHEN Y, ZHANG Y, GUO Y Q, et al. Densification process of Al-12Si alloys prepared by ultrasonic-assisted laser metal deposition[J]. Applied laser, 2021, 41(1): 51 – 58. (in Chinese)
- [48] SHI T, LU B, SHI S, et al. Laser metal deposition with spatial variable orientation based on hollow-laser beam with internal powder feeding technology[J]. Optics & laser technology, 2017, 88(1): 234 – 241.
- [49] LIN R. A study of the innovative produce design with the laser engraving technology[J]. Advanced materials research, 2013, 711(1): 741 – 746.
- [50] AGEEV E I, ANDREEVA Y M, BRUNKOV P N, et al. Influence of light incident angle on reflectance spectra of metals processed by color laser marking technology[J]. Optical & quantum electronics, 2017, 49(2): 50.
- [51] LUO X, LIU W, CHEN C, et al. Femtosecond laser micro-nano structured Ag sers substrates with unique sensitivity, uniformity and stability for food safety evaluation[J]. Optics & laser technology, 2021, 139(7): 106969.

作者简介



乔晓旭(1994 –), 男, 河南新郑人, 博士研究生, 主要研究方向为微小零件精密装配。曾参与国家科技重大专项(04 专项)课题, 授权发明专利 2 项。



罗怡(1973 –), 女, 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微机电系统及微小零件精密装配。曾作为子课题负责人参加多项国家级科研项目, 包括国家 863 计划重点项目课题、国家 973 计划项目课题、国家自然科学基金等, 并曾主持多项企业委托课题。