

研究综述

激光熔覆加工头聚焦性能及成形工艺研究进展

曹嘉兆¹, 陈永雄¹, 陈珂玮^{1,2}, 梁秀兵¹, 夏铭^{1,3}, 罗政刚^{1,3}

(1. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071;

2. 北京工业大学, 北京 100124; 3. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

摘要: 激光熔覆作为一种十分有前途的制造技术, 已在工业中广泛用于部件修复、表面改性以及增材制造等领域。在激光熔覆系统中, 激光熔覆加工头是其关键核心部件, 可以在基材表面实现激光束、熔覆材料和熔池之间的精准耦合并形成连续熔覆层。激光熔覆加工头内置有光学镜组, 主要用于激光束的传输、变换和聚焦, 可以根据不同的加工需求对光束进行处理。主要从分析激光熔覆加工头聚焦性能对熔覆成形工艺影响的角度出发, 综述了加工头的设计及其成形工艺的发展, 具体包括光斑尺寸、光斑形状、光斑能量分布、激光功率、光源特性等材料沉积速度、材料利用效率、熔覆层质量等的影响。首先按照激光熔覆的材料类型和材料与激光束的耦合形式, 对激光熔覆光料耦合方式及加工头进行了简要概述, 并对成形工艺造成的影响进行了总结。其次分别讨论了连续高斯光束和平顶光束以及脉冲激光的聚焦性能对熔覆层的影响, 同时概述了 3 种不同形状光斑 (圆形、矩形、环形) 的能量分布特性和光斑尺寸对成形工艺的影响; 接着研究了激光能量密度对熔覆层质量的影响; 基于超高速激光熔覆技术分析提出透镜长焦深聚焦特性能够大幅提升激光熔覆的加工效率。最后展望了激光熔覆加工头聚焦性能在成形工艺上的发展趋势和应用前景。

关键词: 激光熔覆; 聚焦性能; 熔覆成形工艺; 激光加工头

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0076-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.008

Research Progress on Focusing Performance of Laser Cladding
Machining Head and Forming TechnologyCAO Jia-zhao¹, CHEN Yong-xiong¹, CHEN Ke-wei^{1,2}, LIANG Xiu-bing¹,
XIA Ming^{1,3}, LUO Zheng-gang^{1,3}

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, PLA Academy of Military Science,

Beijing 100071, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: As a promising manufacturing technology, laser cladding has been widely used in industry for component repair, surface modification, and additive manufacturing. In a laser cladding system, the laser cladding machining head is its key

收稿日期: 2021-09-13; 修订日期: 2022-02-12

Received: 2021-09-13; Revised: 2022-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1902400); 国家自然科学基金项目 (51975582)

Fund: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1902400); National Natural Science Foundation of China (51975582)

作者简介: 曹嘉兆 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光增材制造。

Biography: CAO Jia-zhao (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: laser additive manufacturing.

通讯作者: 陈永雄 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为激光增材制造。

Corresponding author: CHEN Yong-xiong (1978-), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: laser additive manufacturing.

引文格式: 曹嘉兆, 陈永雄, 陈珂玮, 等. 激光熔覆加工头聚焦性能及成形工艺研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 76-88.

CAO Jia-zhao, CHEN Yong-xiong, CHEN Ke-wei, et al. Research Progress on Focusing Performance of Laser Cladding Machining Head and Forming Technology[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 76-88.

component, which can realize the precise coupling between the laser beam, the cladding material and the molten pool on the surface of the substrate and continuously form the cladding layer. The laser cladding machining head has a built-in optical lens group, which is mainly used for transmission, transformation, and focusing of the laser beam, and the beam can be processed according to different processing requirements. The processed beam develops specific focusing properties such as spot size, spot shape, energy distribution and depth-of-focus characteristics. In general, the focusing characteristics of different light sources vary greatly, and the focusing characteristics directly affect the quality of the cladding layer and the formed part through optical material coupling. This requires matching process parameters, including laser power, scanning speed, feed rate and overlap rate. This article mainly analyzes the influence of the laser cladding machining head's focusing performance on the cladding forming process, and reviews the design of the machining head and the development of its forming process. Specifically, it includes the influence of spot shape, spot size, spot energy distribution, laser power, light source characteristics, etc. on material deposition speed, cladding material utilization efficiency, and cladding layer quality.

Firstly, according to the type of laser cladding material and the coupling form of the material and the laser beam, a brief overview of the laser cladding optical material coupling method and machining head is given, and the influence of the forming technology is summarized. Coaxial feed cladding heads offer significant advantages over side axis feed cladding heads and are widely used. Secondly, the effects of the focusing properties of continuous Gaussian and flat-top beams and pulsed lasers on the cladding layer are discussed separately, while the energy distribution characteristics and the influence of the spot size on the cladding process for three different spot shapes (circular, rectangular and toroidal) are outlined. In addition to the properties of the cladding material and the substrate, the properties of the cladding layer also depend on the microscopic particle activity under temperature control during the cladding process. The pulsed laser has higher peak power, faster instantaneous heating speed, and the stirring effect on the melt pool can increase the convection circulation of the melt pool, enhance the cooling rate, reduce the temperature gradient, and greatly improve the mechanical properties and microstructure of the cladding layer. Thirdly, the effect of laser energy density on the quality of cladding layer is studied. Laser energy density is a reliable way to describe quantitative heat input. For different materials, there is an optimal combination of parameters for the energy density of laser cladding. Based on the analysis of ultra-high-speed laser cladding technology, it is proposed that the long focal depth focusing characteristics of the lens can greatly improve the processing efficiency of laser cladding, reduce the heat accumulation and improve the material utilization. Finally, the development trend and application prospect of focusing performance of laser cladding machining head are outlooked.

KEY WORDS: laser cladding; focusing performance; cladding forming technology; laser machining head

激光熔覆是一种先进的表面加工技术,其技术方法是通过送料装置在基板表面加入粉末或丝材,利用高能量密度激光束将其与基板表面熔合形成冶金结合^[1-2]。与传统表面处理技术相比,激光熔覆技术具有热影响区小、稀释率低、结合强度高等优点。在工件变形小、热输入小的情况下,易制得致密、耐磨、耐腐蚀的优质涂层^[3]。由于激光熔覆技术经济效益高,发展迅速,可以在一种合金的表面增加另一种或几种合金的性能,从而降低加工成本和能源消耗,提高金属零件的使用性能,延长使用寿命^[4-5]。因此,激光熔覆技术被广泛应用于零件的表面改性和破损零件的修复以及增材制造,在冶金、石化、电力、航空航天等关键领域发挥着越来越重要的作用。然而,激光熔覆是一个极其复杂的动态过程,熔覆过程中有很多工艺参数会直接影响熔覆层的质量,如光斑尺寸、扫描速度、激光功率、送料速率、搭接率和气体流量等会直接影响熔覆层的宏观形貌(宽度、高度、表面光滑度等)和组织性能(力学性能、气孔杂质、组织形态等)^[6]。

尽管近些年大功率激光器发展迅速,输出光束质量较好^[7],但激光器输出的光束仍不适合直接用于材料加工,必须通过一定的光学系统对光束进行处理。用于激光熔覆加工头中的光路结构一般包括准直镜、整形镜和聚焦镜。准直镜对输入的发散光束进行准直,然后整形镜对准直光束进行整形产生所需要的光束,最后通过聚焦镜将光束聚焦至加工平面,以满足特定加工的聚焦性能^[8]。聚焦性能是指激光源输出光束经过加工头内光路后所形成的光斑尺寸、光斑形状、能量分布和焦深特性等。一般而言,不同光源的聚焦特性差异较大,而聚焦特性通过光耦合作用直接影响熔覆层和成形件的质量。这就要求与之相匹配的工艺参数,具体包括激光功率、扫描速度、送料速度和搭接率等。本文主要围绕激光熔覆聚焦性能对熔覆成形工艺造成的影响展开讨论,总结了基于不同耦合方式下各种加工头的特点,分析了不同光源特性所形成的光斑形状、光斑大小、激光能量密度、长焦深特性等对熔覆成形工艺的影响,并对其发展前景进行展望。

1 激光熔覆光粉耦合方式及加工头

激光熔覆技术的快速进步得益于大功率激光器的发展,目前已衍生出多种不同的熔覆加工头。按照熔覆的光粉耦合方式可将熔覆加工头分为旁轴送料熔覆加工头和同轴送料熔覆加工头。

对于旁轴送料熔覆加工头,其送料方向相对于中心聚焦光束有一定的倾斜角度,通过激光束的热作用将熔覆材料与基体冶金结合形成紧密涂层。这种加工头设计简单,送料喷嘴调节灵活,可快速进行单道熔覆。当熔覆材料为粉末时,经过送粉喷嘴送出的粉末稳定性较好,可以实现异形零件的熔覆。旁轴送粉矩形大光斑的熔覆方式适合形状简单的零件表面大面积快速加工,极大提高了熔覆效率,但是由于侧向送粉方式下的粉末束容易发散,粉末不能全部进入熔池导致粉末利用率低,未进入熔池的粉末又影响熔覆层的表面质量。此外,当扫描方向发生变化时,光粉耦合会出现明显的方向性,熔覆层质量受到极大的影响,故该加工头通常应用于液压油缸、轧辊等面积较大、形状简单的加工,且逐渐被其他熔覆方式所取代。当熔覆材料为丝材时,上述粉末发散、飞溅、利用率低等问题便迎刃而解,且丝材为刚性输送易于实现精确控制,材料利用率几乎为100%,节能环保^[9]。然而,侧向送丝依旧不能解决熔覆的方向性问题,在进行二维和三维扫描时熔道形貌与质量呈现各向异性。对此一些学者进行了研究,李凯斌^[10]探究侧向送丝熔覆工艺时发现:送丝方向与加工头扫描方向一致时得到的熔覆层表面相对光滑,但当两者方向相反时熔覆层形貌为瘤块状。这是因为丝材侧向输送只能受到激光束的单边照射,受热不均匀,在熔覆过程中容易卷折,而且送丝方向与加工头扫描方向不一致导致金属液滴滴落时的方向也具有随机性,进而导致熔覆层形貌

不连续^[11]。此外,侧向丝材的光滑表面对激光的反射率较高,造成了激光功率的浪费,所以一般情况下,送丝角(丝轴与扫描方向的夹角)不超过 45° ^[12]。基于上述特点,侧向送丝加工头通常用于焊接,应用前景较好。

不管是送粉还是送丝,旁轴送料激光熔覆加工头始终面临的一个大问题是加工方向受限,而同轴送料激光熔覆加工头的出现巧妙地解决了这个问题,同时加工头的其他性能也得到不同程度的优化。同轴送料熔覆加工头将熔覆材料和激光束同轴耦合输出,保证了任意方向上熔覆层质量的均匀性,但其缺点是光路复杂,且造价昂贵。当熔覆材料为粉末时,按照激光束与粉束的相对位置不同,同轴送粉加工头可分为光外和光内同轴送粉加工头2种类型^[13]。光外同轴送粉熔覆加工头的光粉耦合方式为以激光束为中心斜对称分布着多个送粉嘴或环状送粉^[14],如图1a所示。这种类型的加工头相当于是旁轴送粉熔覆加工头在送粉嘴上的叠加,由于粉末束发散角较大,飞溅较严重,各个送粉喷嘴的沉积斑点并不能完全重合,易导致粉斑尺寸较大,粉末利用率低,熔覆层质量不高等问题。光内同轴送粉的光粉耦合方式为送粉管居中,如图1b所示。由于在保护气体的作用下,粉末垂直喷射到加工面,粉末发散角和直径均较小,极大程度地减少了熔覆过程中的粉末飞溅和熔覆层表面沾粉,从而提高了粉末的利用率和熔覆层表面的光洁度。由以上可以看出,光内同轴送粉加工头相比光外同轴送粉加工头更容易实现小的汇聚粉斑,更适合精密熔覆加工。当熔覆材料换成丝材时,目前采用的主要是环形光内同轴送丝熔覆加工头,其光路结构与光内同轴送粉熔覆加工头类似,只是将送粉管换成送丝管,却很好地解决了旁轴送丝扫描方向性、受热不均匀和耦合精度差等问题^[15],光内同轴送丝和旁轴送丝熔覆加工头的实物图如图2所示。考虑到环形光束的产生过

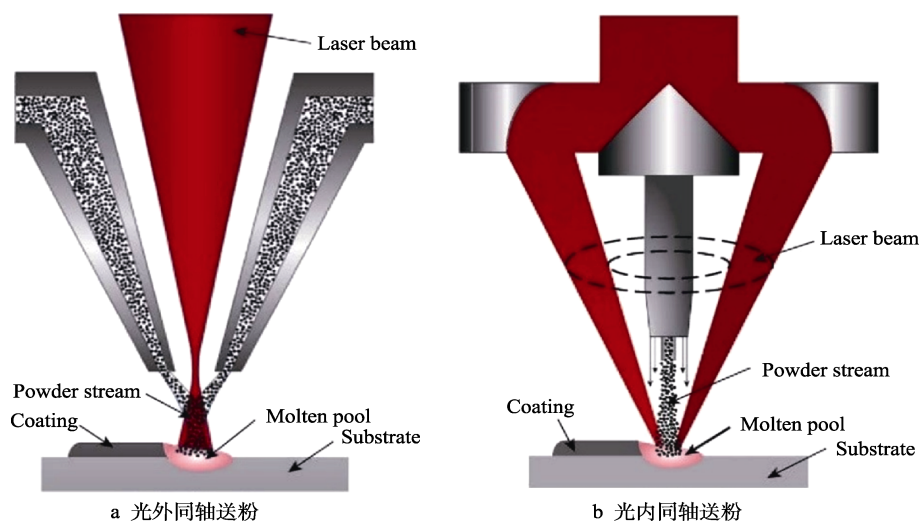


图1 同轴送粉熔覆加工头光粉耦合原理示意图^[6]

Fig.1 Schematic diagram of light powder coupling principle of coaxial powder feeding cladding processing head^[6]: a) optical external coaxial powder feeding; b) optical internal coaxial powder feeding

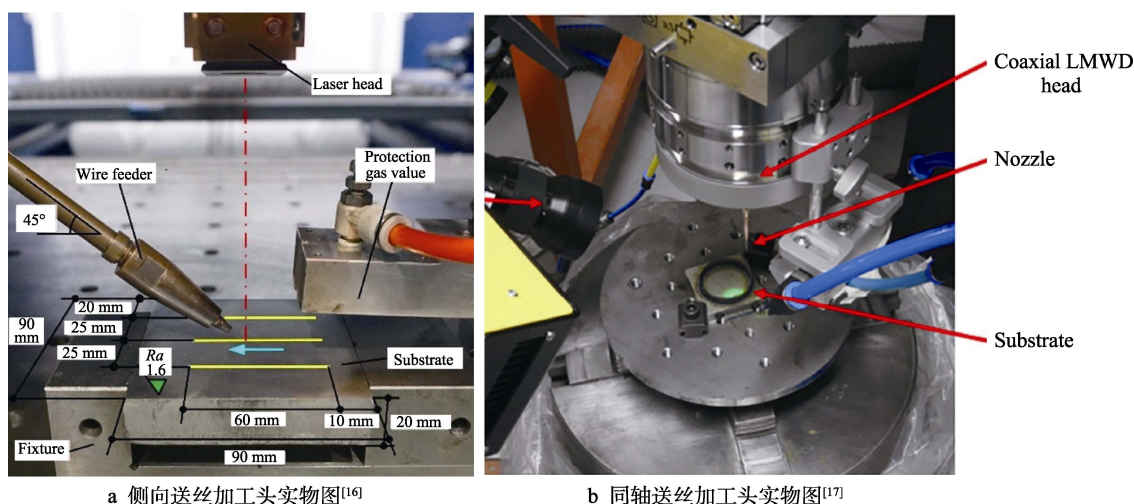


图 2 送丝激光熔覆加工头实物图

Fig.2 Physical drawing of wire feeding laser cladding processing head: a) physical drawing of lateral wire feeding cladding processing head^[16]; b) physical drawing of coaxial wire feeding cladding processing head^[17]

程增加了加工头的复杂性, 及光束在传输过程中的能量损失和光丝干涉, 吉绍山等^[15]设计出一种三光束光内同轴送丝激光熔覆加工头, 通过试验得到了较好的单向和多向单道熔覆效果。

综合来看, 不管是丝材还是粉料, 同轴送料熔覆加工头的性能均优于旁轴送料熔覆加工头。首先, 加工方向性问题的解决使得同轴送料熔覆加工头可以通过逐层沉积的方式制备结构复杂的大型构件及梯度材料^[18]; 其次, 光内同轴送粉和送丝熔覆加工头精度更高, 通常应用于主轴、齿轮等高精度零件的表面改性和增材制造。目前, 激光熔覆加工头多采用同轴送料熔覆加工头。

2 不同光源特性及光斑对熔覆成形工艺的影响

激光已经成为科学研究和工业应用中不可缺少的材料加工手段。激光能够提供一个高度定向和局部的能量来源, 这有利于材料加工的精确定位^[19]。现代激光系统也很灵活, 通过调整参数可以满足特定的要求, 控制材料加工的典型激光参数包括能量、通量、光斑大小、波长, 对于脉冲激光还包括脉冲持续时间和频率^[20]。对于激光熔覆系统, 最后通过镜组的激光束是以一定半径的光斑形式聚焦, 光斑内的能量分布特性对熔池大小、粉末利用率和熔覆层质量的影响十分显著。

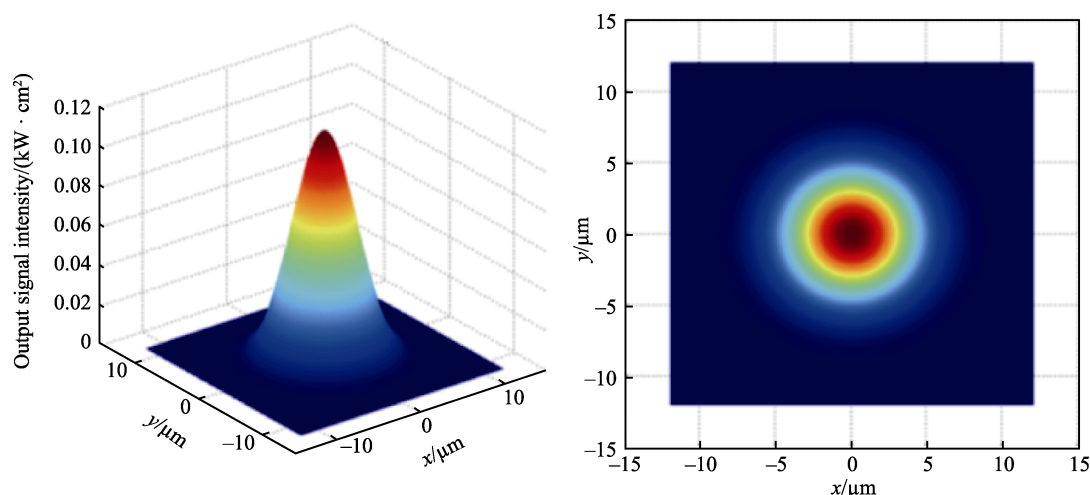
2.1 高斯光束及光斑对熔覆成形工艺的影响

高斯光束的横截面振幅服从高斯分布函数, 其振幅下降到最大值的 $1/e$ 时, 离光轴的距离为该光束的光斑半径。高斯光束通过简单光学透镜组后仍能保持其形状, 且高斯光束在聚焦光斑很小时能够维持低发散度和相对较大的景深, 因此高斯光束是材料加工中

最常用的光束^[21]。Qi 等^[22]研究磁场对钴基合金激光熔覆裂纹控制的影响时, 采用 FL020 光纤激光系统 (ROFIN, 德国)。Li 等^[23]研究激光熔覆层状态识别和裂纹缺陷诊断时, 采用 LDF4000-100 半导体激光器。Singh 等^[24]利用激光熔覆研究 colmono6+50%WC 对 SS410 钢加速冲蚀性能的影响时, 采用的二极管激光器输出的光束均为高斯光。此外, 二氧化碳激光器、氦氖激光器、Nd:YAG (掺钕钇铝石榴石, 最常用的固体激光器) 的输出光束也是高斯光。高文焱等^[25]研究了高斯光束传播对激光熔覆质量的影响, 利用 Zemax 对高斯光束聚焦性能进行模拟, 并通过实验验证在正离焦时, 光斑能量密度呈现中心高、边缘低的分布特性, 这使得基体熔化较多, 熔池大, 稀释率高, 熔覆层的硬度降低, 边缘结合处的质量差, 出现空洞; 而在负离焦时, 光斑内的能量密度分布比较均匀, 中心与边缘的能量密度差别较小, 使得在一定送粉率下, 粉末受热均匀, 基体热影响区域较小, 稀释率较低, 边缘结合处的质量较好。尽管负离焦的光斑能量分布相对于正离焦更均匀, 但是仍然不可避免地呈现出山峰状, 如图 3a 所示。在激光熔覆过程中, 当粉末落在图 3b 所示的光斑上时, 中心处的粉末容易加热过度, 边缘加热不足。此外, 熔覆层边缘较高的粉末密度和冷却速率以及激光功率衰减较快, 使得熔覆层的边缘与基体结合较弱。由此看来, 高斯光束的能量分布是影响熔覆层质量的重要因素, 且高斯光束在熔覆过程中多采用圆形和环形光斑。

2.1.1 圆形光斑对熔覆成形工艺的影响

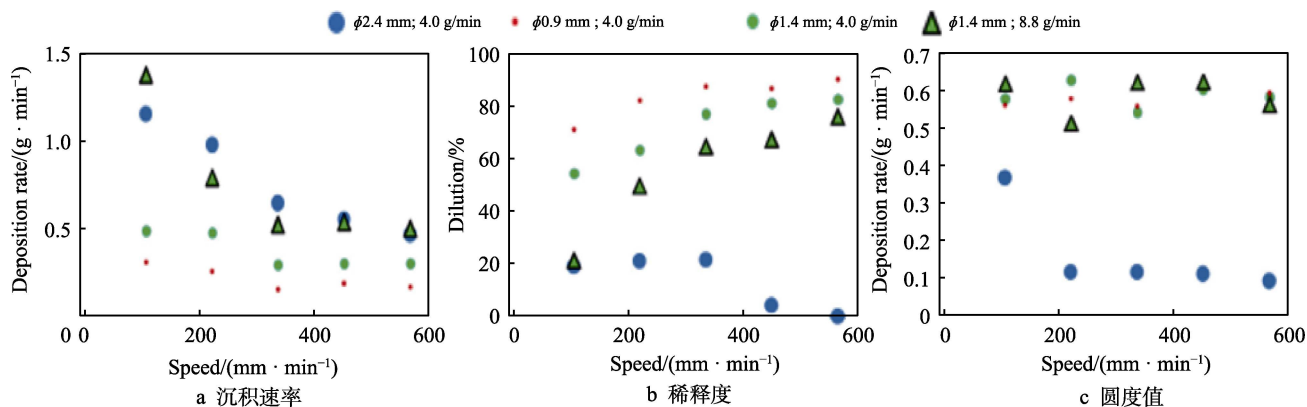
激光熔覆过程中, 通过聚焦透镜得到的圆形光斑能量分布一般为高斯分布, 这种不均匀的能量输入容易导致熔覆层的稀释率变高, 搭接性能变差, 如图 4 所示, 熔池呈现 U 形分布, 涂层形状近似为半弧形。一般而言, 不同的熔覆工艺只改变熔覆层的高度和宽度, 而熔覆层横截面形状并没有明显变化。王慧琳等^[26]

图3 高斯光束的能量分布特性^[21]Fig.3 Energy distribution characteristics of Gaussian beam^[21]图4 圆形光斑形成的熔池^[27]Fig.4 Molten pool formed by circular spot^[27]

用圆形光斑成功制备了 MoFeCrTiWAlNb 高熔点高熵合金涂层, 研究涂层组织性能时发现采用圆形光斑制备的涂层相分离严重, 大量网状析出相在晶界偏聚, 且硬度低、耐磨性较差。这主要是因为圆形光斑集中的能量分布使得基体被重熔部分较多, 较厚的涂层又使得冷却速度较慢, 基体中碳化物形核长大, 胞状晶和晶界生成大量沉淀, 涂层组织分布不均匀, 从而发生严重的相分离。

在传统激光熔覆中, 光斑直径一般为 2~4 mm, 而高速激光熔覆中, 光斑直径一般在 1 mm 以下。光

斑直径的大小直接影响加工的精密程度, 在相同激光输入功率的情况下, 光斑直径越小, 获得的能量密度越高, 扫描速度可以得到很大的提高, 而且可以保持熔覆层的精密性。Harooni 等^[28]通过在铝合金基体上熔覆工业纯铝来研究激光光斑尺寸和送粉速率对熔覆层质量的影响。图 5 显示了光斑直径与送粉速率对沉积速率、稀释度和圆度度的影响 (圆度度是一个组合参数, 用于定量比较熔覆层的几何形状, 当圆度度值接近 1 时, 熔覆层呈近似半圆形^[29])。用于比较的 3 个光斑直径分别为 0.9、1.4、2.4 mm, 在送粉速率和激光功率不变的条件下, 光斑越大, 熔池越大, 粉末沉积越分散, 能量密度越低, 熔池越浅, 从而使得沉积速率有所增大, 稀释率和圆度度有所下降, 但是熔覆层的几何形状容易变形, 而较小的光斑与之相反。同时, 送粉速率对沉积速率、稀释度和圆度度也有直接的影响。此外, 赵陈敏等^[30]通过分析光斑模拟图, 并通过激光熔覆实验进一步验证, 当粉末流焦点直径接近激光光斑直径时, 粉末利用率得到显著提高, 并且熔覆形貌较好。

图5 激光光斑尺寸与送粉速率对沉积速率、稀释度和圆度值的影响^[28]Fig.5 Effects of laser spot size and powder feeding rate on deposition rate (a), dilution (b) and roundness (c)^[28]

圆形光斑的大小对激光熔覆的影响显著, 而激光增材制造普遍采用固定光斑的激光熔覆加工头, 这是因为固定的光斑大小能够保持熔覆层质量的一致性。对于一套确定的光路系统, 光束聚焦的焦点是固定的, 要改变光斑大小只能通过正负离焦的方式, 这种方式缺少灵活性且不易控制光斑的实际大小, 特别是加工变壁厚复杂零件时 (如航空发动机涡轮片、桶形件等), 精度误差很大, 材料浪费严重, 零件质量下降。因此, 开发变斑激光熔覆技术实现不等壁厚复杂零件激光增材制造是一个重要的研究方向。秦应雄等^[31]设计开发了一套基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统, 该系统主要由反射式自适应镜、反射式抛物准直镜和反射式抛物聚焦镜等组成, 如图 6a 所示, 其中关键部件自适应镜为空腔结构, 表层为凹面薄铜片, 通过改变镜腔体内的气压使薄铜片反射面的曲率变化, 从而改变自适应镜的焦距。图 6b 为可

变光斑光学系统等效光路图, 在不改变系统焦距的情况下, 通过自适应镜表面曲率的变化从而改变聚焦光斑的大小, 最后基于该系统实现了壁厚由 3 mm 渐变到 8 mm 的椭圆形工件的制造。

2.1.2 环形光斑对熔覆成形工艺的影响

环形光斑其特点是环形区域能量分布高且呈现高斯分布特性, 环形中央能量低或者无能量输入。环形光斑的内径和外径之比称为中空比, 对于空心激光束, 中空比随离焦距离而变化, 从而影响熔池中的热场^[32]。在激光扫描过程中的热传导和热对流作用下, 熔池两侧的温度略高于中心, 边缘足够的能量有利于熔化粉末颗粒, 减少侧壁粉末黏附^[33]。环形光束一般可以通过锥镜反射聚焦^[34]、锥透镜^[35-36]等对光束转换得到。图 7a 是环形激光加工头的一种光路结构^[37]。准直的激光光束输入, 首先经过轴锥镜变换为环形

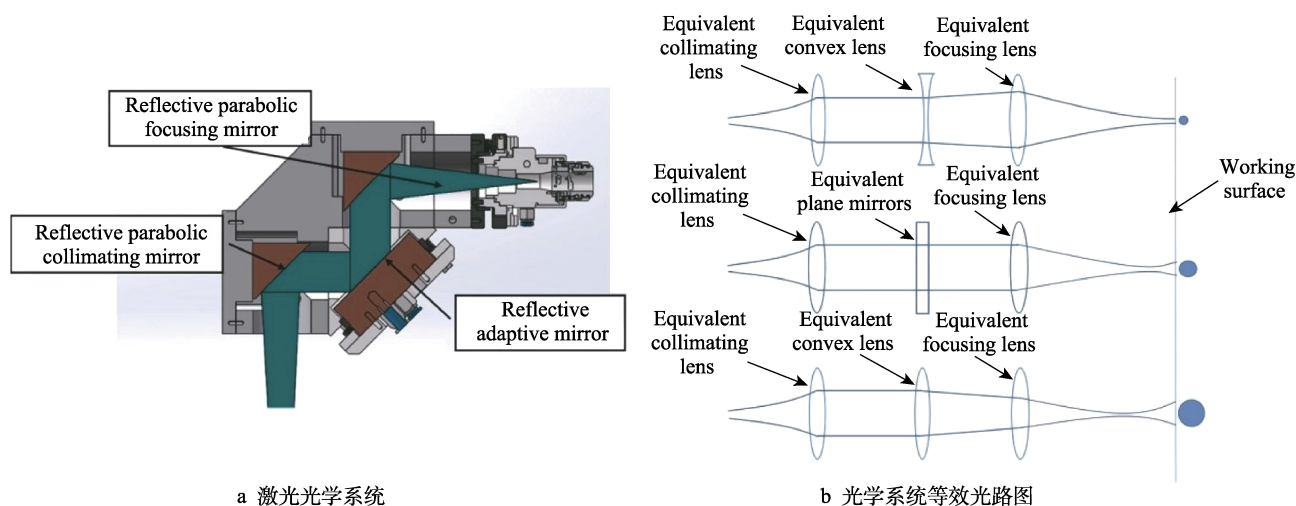


图 6 反射式可变光斑激光光学系统及等效光路图^[31]
Fig.6 Reflective variable spot laser optical system and equivalent optical path diagram^[31]:
a) laser optical system; b) equivalent optical path diagram

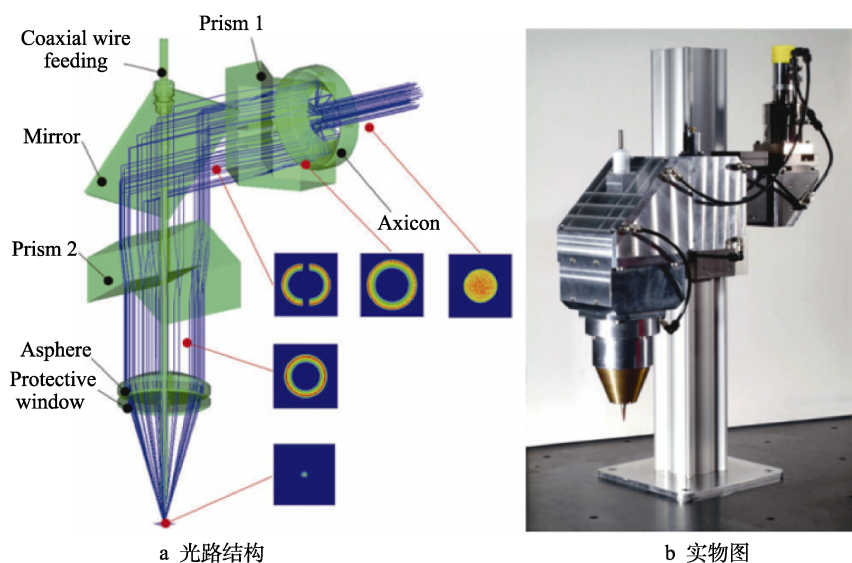


图 7 环形激光加工头光路结构及其实物图^[37]
Fig.7 Optical path structure of ring laser processing head (a) and physical diagram (b)^[37]

光, 该环形光被第一对折射棱镜分成两束半环形光, 两束半环形光之间的间隙主要是为了方便无遮挡送丝, 随后半环形光被一个平面镜偏转 90° , 再经过第二对折射棱镜将两束半环形光重新组合成一束环形光, 最后经过非球面透镜聚焦光束。该光路结构是一种比较典型的结构, 也是目前已经商业化的一种结构。

当中空比较小时, 熔池中心会过热, 而中空比较大时, 熔池无法生成。通过与具有高斯特性的圆形光斑相比, 发现环形光斑可以有效地缓解熔覆层中心的过热现象。这是因为边缘处的冷却速率比中心处高, 熔覆路径宽度上的热量输入应该是均匀的或在边缘处增加。对于环形光斑, 静止的光斑能量主要呈环形分布, 而扫描能量强度呈马鞍形分布, 其中边缘处的能量被有效地增强, 而中心处的能量被稍微削弱。在边缘产生比中心更高的温度, 这有利于抑制黏附粉末, 因为粉末可以通过环形光束的两次激光照射而重新熔化, 送入熔池中心的粉末颗粒可以完全熔化。因此, 环形光束更有利于减少表面的团聚颗粒, 从整体上改善表面光洁度^[33](用于表示熔覆层表面特征的微观粗糙度和宏观波纹的参数)。此外, 相对于圆形光斑, 环形光斑的稀释率更低, 熔覆层边界附近的冶金结合得到明显改善。

2.2 平顶光束及矩形光斑对熔覆成形工艺的影响

平顶光束是指激光束的横截面上很大区域内的能量分布是相对均匀的, 它具有中心平坦且边缘陡峭的光束强度轮廓。平顶光束广泛应用于不同领域, 如角膜治疗^[38]、高效质子加速^[39]和激光微加工^[40]等。相对于高斯光束, 平顶光束光斑内的能量密度分布比较均匀, 但传输时的光斑能量密度不稳定, 因此平顶光束往往局限在一个平面上。吴东江等^[41]提出双激光熔覆技术以降低熔覆过程中熔覆层的温度梯度, 即在传统激光熔覆技术的基础上使用一束与加工光束同轴的平顶光束对熔覆过程进行预热缓冷, 有效降低了熔覆陶瓷材料过程中的温度梯度和残余热应力, 减少裂纹缺陷的产生。张健等^[42]采用高功率的平顶光束进行熔覆试验, 研究了宽带光束与同轴粉末流的耦合规律, 同时构建了光粉耦合特性与熔覆成形之间真正的联系。此外, 平顶光束所产生的熔池底部平缓, 熔池底部的曲率比典型的高斯光束产生的熔池曲率小得多, 这可以有效地调节熔池形貌, 实现平面液固边界, 有效促进晶体的定向凝固, 为多层加工中柱状晶的定向外延提供了有利条件^[43-44]。

平顶光束激光熔覆基本采用宽带矩形和带状的大光斑, 所需要的激光功率较高, 具有激光热加载均匀、熔覆效率高等优点, 成为近年激光熔覆技术的研究热点。矩形光斑激光熔覆层的横截面形貌近似为矩形, 熔覆层与基体结合面是一条平直线的白亮带如图

8所示, 熔覆层与基体结合紧密, 稀释率比较小, 粉末利用率高。在一定的工艺参数下, 熔覆层的高度随送粉速率和激光功率的增加而变高, 随扫描速度的减小而增宽; 熔覆层的宽度随送粉速率和扫描速度的减小而增宽, 随激光功率的增大而变宽。此外光斑内的粉末能接收到均匀的能量输入, 具有相同的熔化程度, 可极大地减少熔覆层的凹陷和孔隙。王慧琳等^[26]研究光斑类型对高熔点高熵合金涂层组织性能的影响时, 通过与圆形光斑激光熔覆对比发现: 矩形光斑的熔覆层熔池浅, 稀释率小, 平均硬度高, 熔覆层表面光滑, 磨损量小, 表现出更优良的耐磨性, 更适用于制备高熵合金耐磨涂层。



图8 矩形光斑熔覆层的横截面形貌^[27]

Fig.8 Cross sectional morphology of cladding layer with rectangular light spot^[27]

2.3 连续激光与脉冲激光对熔覆成形工艺的影响

现有激光熔覆中主要采用连续激光源, 连续激光可在较长时间内持续稳定大功率输出, 在零件加工及修复领域应用广泛^[45]。本文2.1节和2.2节中所提到的激光试验均是采用连续激光作为激光源。可以注意到, 在合适的工艺参数下, 采用连续激光进行激光熔覆能够获得组织均匀致密、表面平滑的熔覆层, 但从微观角度出发, 即使采用最优工艺参数, 熔覆层依然存在不少的树枝状和柱状晶粒, 这限制了熔覆层耐磨性、耐腐蚀性和耐冲击等性能的进一步提升^[46-47]。此外, 由于连续激光作用于基体的时间比较长, 熔池较大, 熔化深度较深, 热影响区大, 造成加工件温升较快和表面粗糙度较大, 限制了激光熔覆技术在精密零件加工领域的应用^[48], 而脉冲激光的应用很好地解决了这个问题。脉冲激光是在连续激光的基础上利用一种开关速度极快的电子光闸对其进行波斩而形成的激光模式, 可调节的脉冲频率和占空比能够控制激光熔覆过程中的加热时间。而且脉冲激光具有更高的峰值功率, 瞬时加热速度快, 对熔池的搅拌效果能够增加熔池的对流循环, 提升冷却速率, 降低温度梯度, 从而改善熔覆层的力学性能和微观组织^[49]。

近些年, 脉冲激光熔覆技术多应用于“K系列”铸造高温合金和钛基上高熵合金的熔覆^[50-51], 特别是航空航天发动机叶片、燃气轮机叶片等部件的裂纹修复再制造^[52]。任维彬等^[53]采用功率1200 W、宽度5 ms、占空比1:1、光斑直径3 mm的脉冲激光实现了K418高温合金叶轮叶片的再制造, 其形变精度小于0.03 mm, 成形尺寸精度小于1 mm。这样高精度的取得很大一部

分归功于极短的脉冲宽度, 采用 5 ms 的脉宽, 使得熔池热量输入减少, 散热时间延长, 温度梯度变小, 从而使热积累效应得到缓解。赖境等^[54]研究 K452 高温合金的开裂特性机理, 采用低热输入脉冲激光熔覆成功解决液化裂纹等问题。钟如涛等^[49]分别采用连续和脉冲 CO₂ 激光在 K403 基体上熔覆 Stellite X-40 合金粉末, 结果显示, 与连续激光相比, 脉冲激光熔覆层与基体结合更好, 外表平滑整洁, 稀释率低 20%, 热影响区小 50%, 硬度高 5%, 成功解决了连续激光熔覆时开裂的难题。随后张毅斌等^[55]单独采用脉冲激光做进一步研究时发现随着脉冲宽度、脉冲频率和激光峰值功率的增加, 熔覆层的宽度和深度显著增加, 熔覆层高度变小, 基体稀释率变高。然而, 上述所列研究虽然取得了较明显的试验效果, 但却未深入研究脉冲激光对涂层组织的微观作用机理。李云峰等^[56]专门研究了脉冲频率对涂层组织性能的影响机制。他们采

用 CO₂ 脉冲激光在 ZG42CrMoA 合金钢基体上熔覆 Ni45 粉末, 并使用高速摄像机对不同时间段下熔池图像进行采集。图 9 为脉冲频率为 20 Hz 的熔池高速摄像形貌, 随着脉冲在波峰和波谷之间的周期性变化, 熔池的亮度也呈现周期性变化。脉冲频率的增大意味着脉冲周期变短, 熔池完成单个加热和降温的周期变短。当脉冲频率为 200 Hz 时, 熔池形貌与连续激光熔池差别不大。图 10 为不同频率下熔池的热循环曲线, 可以看出, 脉冲频率越低, 波峰和波谷之间的温差越大。随着脉冲频率的增大, 脉冲波峰和波谷的温差基本接近且与连续激光作用的情况类似。脉冲频率直接影响熔池温度梯度, 当频率较低时, 熔覆层受到的热影响作用明显, 其内部析出大量颗粒相, 加上熔池过快的冷却速率, 颗粒相的临界形核尺寸降低, 最终出现细小的颗粒相^[57], 这有利于涂层硬度的提升。此外, 密集细小的晶粒不容易发生塑性变形, 提高了涂层的磨损性。

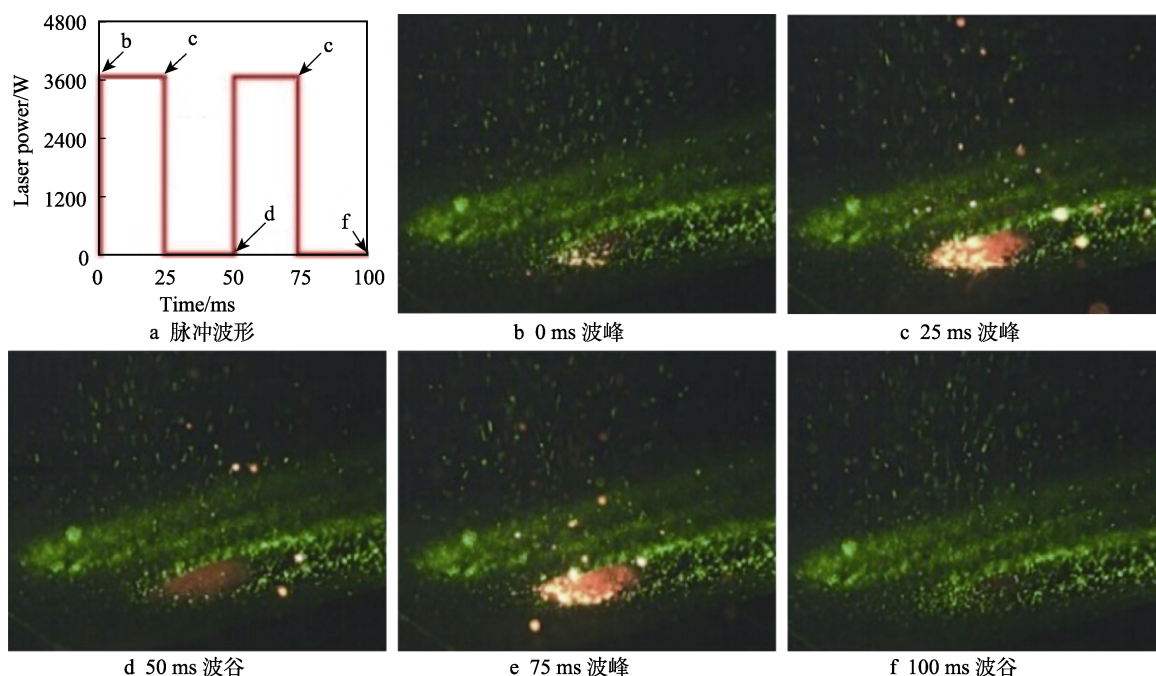


图 9 20 Hz 脉冲激光熔池高速摄像形貌^[56]

Fig.9 High speed image of 20 Hz pulsed laser molten pool^[56]: a) pulse waveform; b) 0 ms wave crest; c) 25 ms wave crest; d) 50 ms wave trough; e) 75 ms wave crest; f) 100 ms wave trough

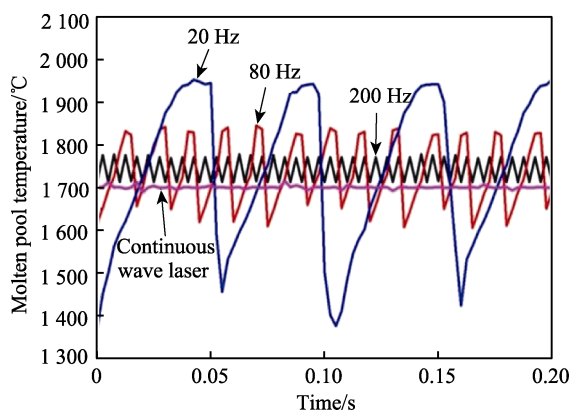


图 10 不同频率下熔池热循环曲线^[56]

Fig.10 Thermal cycle curve of molten pool under different frequencies^[56]

此外, 对于高频脉冲激光, 特别是皮秒或者飞秒激光, 熔池深度为微米量级, 拥有大的瞬时功率和较小的平均功率, 热影响区极小, 它能够实现硼掺杂的硅熔覆以及采用磁控溅射 Nb、Mo 等薄膜的熔覆^[48], 这是采用连续激光无法实现的。

综合分析, 激光光束特性和光路设计直接影响聚焦光斑的能量分布、形状和熔池加热方式等。一般而言, 现有的激光器输出的光束大部分是高斯光束, 这也是激光熔覆大多采用高斯光束作为加热源的主要原因, 而平顶光束和脉冲激光均可以通过连续高斯光束转换得到。熔覆层的表面形貌主要与光斑大小、形状、送料速率、扫描深度、激光功率密切相关; 而熔覆层的组织性能除了与熔覆材料和基体的本身特性

有关之外,还取决于熔覆过程中温度控制下微观粒子的活动。

2.4 激光能量密度对熔覆成形工艺的影响

Gu 等^[58]研究发现,用不同激光能量密度制备的熔覆成形件性能存在差异。对于激光能量密度的概念 (Laser Energy Density, LED),一般将影响激光熔覆的一些参数,如激光功率、扫描速度等统一为能量密度,在不同的研究中采用的计算方式也不尽相同。在选区激光熔覆中,为了便于不同参数的比较,简化计算,能量密度 E 的表达式如式 (1) 所示。若考虑光斑面积,以圆形光斑为例,则能量密度的表达式如式 (2) 所示^[59]。

$$E = P / v \quad (1)$$

$$E = \frac{P \cdot 2r}{\pi r^2 v} \quad (2)$$

式中: P 为激光功率; v 为扫描速率; r 为圆形光斑的半径。朱云天等^[59]研究了激光能量密度对选取激光熔覆产生的影响,结果显示,对于同种粉末,在一定参数范围内,激光能量密度越大,熔覆层的硬度及密度相对更高。对于不同参数,激光能量密度相近的熔覆层具有更加相似的性质。同时参数之间(激光功率和扫描速率)存在优先级,在实际熔覆过程中应该先确定激光功率值,再根据不同粉末确定扫描速率。王一丹等^[60]研究激光能量密度对 NiCrCoTiV 高熵合金涂层的影响,在 4 种不同能量密度的参数 (127、90、69、53 J/mm²) 下制备涂层,对比发现能量密度越小,涂层的稀释率越低,耐腐蚀性能越好。

对于不同材料,激光熔覆的能量密度存在一个最优的参数组合。激光能量密度过低,粉末不能完全熔

化,合金液相铺展效果差,球化趋势明显,熔覆层内部易出现孔隙,且与基体结合不稳定;随着激光能量密度增大,粉末充分熔化,熔覆层内部结构致密,球化趋势减弱。需要指出的是,并不是激光能量密度越高越好,如果激光能量密度过高,粉末在熔化凝固的过程中容易形成较厚的氧化层,阻碍液相铺展,导致孔隙的产生。此外,能量输入过高,组织中会残留过多的热应力导致熔覆层开裂变形,以及熔池变深导致稀释率过高。

3 长焦深聚焦特性对熔覆成形工艺的影响

超高速激光熔覆技术由德国弗劳恩霍夫激光技术研究所和亚琛大学共同提出并研制^[61-63]。该技术极大地提高了沉积速率,大幅提高生产效率,且其新型加工头配有相应的测控系统,保证了熔覆层的精度和质量^[61]。与常规激光熔覆技术相比(以粉末为例),超高速激光熔覆技术调整了光束、粉末束和熔池的汇聚位置,使得粉末汇聚于熔池上方。其中,激光能量的 90% 用于熔化粉末,足够的能量使粉末在进入熔池前就已经基本熔化,缩短了粉末在熔池中的持续时间。由于照射到基体上的激光能量较小,基体的热影响区和热损伤也较小。同时,超高速激光熔覆独特的激光-粉体耦合方式使得粉体的利用率高达 90% 以上。表 1 是常规激光熔覆与超高速激光熔覆性能参数的对比^[64],由表中数据可以看出,超高速激光熔覆技术在精度、能量密度、熔覆速度、涂层厚度、稀释率等方面均优于常规激光熔覆技术。

表 1 常规激光熔覆与超高速激光熔覆的对比^[64]

Tab.1 Comparison between conventional laser cladding and ultra-high speed laser cladding^[64]

Cladding type	Spot diameter/mm	Energy density/(J·cm ⁻²)	Cladding rate/(m·min ⁻¹)	Single coating thickness/mm	Dilution rate/%
Conventional laser cladding	2-4	70-150	0.5-2	0.5-2	10-20
Ultra-high speed laser cladding	<1	3 000	20-200	0.02-0.3	< 5

基于超高速激光熔覆的显著优势,受到其中光粉耦合方式的启发,提出将长焦深透镜应用于激光熔覆。焦深指的是特定光学系统允许的焦面或像面位置的变化范围,在该范围内,每个截面的光斑尺寸波动很小,能量分布具有一致性。如图 11 所示,图中绿色区域即为焦深,焦深越长,粉末粒子在经过该区域时受热更加充分和均匀,能够减少粉末飞溅,提高粉末利用率;同时粉末在飞行过程中就已经完全熔化,这可以大大提高扫描速度,减少基体的热量积累,实现快速熔覆。

长焦深的设计方法主要采用无衍射光束和二元光学技术进行设计,如圆锥镜法^[65]、共轭梯度法^[66]、

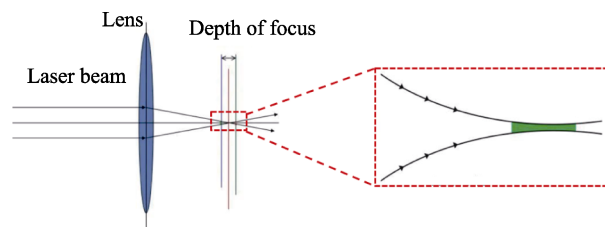


图 11 长焦深示意图

Fig.11 Schematic diagram of long depth of focus

串行迭代法^[67]、折射-衍射混合元件^[68]、计算机全息图和衍射光学^[69-70]等。目前关于设计长焦深透镜的一个难点是焦深和焦斑尺寸之间存在矛盾,即焦深的延长必然导致焦斑尺寸增大。虽然有关激光熔覆长焦深

透镜设计的文献并不多,但是可以从其他领域长焦深透镜的应用与设计上得到借鉴和启发。中国工程物理研究院的研究人员基于能量守恒方程和等光程原理设计了一种均匀长焦深的非球面反射镜,该反射镜可用于聚焦脉冲宽度为皮秒或飞秒的高功率超短脉冲激光,与参数相似的抛物面镜相比,表面轮廓的最大差异仅在微米级,焦深长度拉伸约100倍^[71]。

4 展望

1) 在激光熔覆加工头方面。改进光路结构,可使用双光束甚至多光束聚焦,实现粉末熔化和基体上熔池的分离,加大光束能量的输入,提高熔覆效率;优化加工头光路传输、整形和聚焦结构,简化光路结构,尽量减少镜片数量以降低激光能量损失和镜片的热膨胀效应,提高光束聚焦质量;优化送粉方式,实现光束与粉末的精准耦合,提高粉末的利用率;超高速激光熔覆加工头可在单位时间内实现大面积熔覆,极大提高制造效率。目前针对特殊情况下的熔覆加工头(如腔体、圆筒形等内壁形熔覆的深孔激光熔覆加工头,水下修复能够排水的激光熔覆加工头和全方位激光熔覆加工头等)的设计较少,但未来的实用性会很强,因此值得深入探究。加工头送料大多为丝材和粉末等固相材料,可考虑输送浆料等液相材料或丝材和粉末组合的混合材料。此外,通过安装实时监控系统反馈熔池温度、形貌等信息并及时调整熔覆工艺,促进激光熔覆加工头朝着智能化方向发展,这也是未来的重点研究方向。

2) 在用于激光熔覆的光束方面。目前多采用连续高斯光束和平顶光束,单模激光多呈现高斯分布特性,多模激光能量分布较为均匀,适合用于产生平顶光束,这2种光束有各自明显的优缺点和适用范围。在上述2种光束的基础上,通过折射轴锥镜和衍射轴锥镜或其他组合镜片产生贝塞尔光束,贝塞尔光束聚焦点附近易形成一段长焦深的圆柱形区域,长焦深聚焦特性有利于加工有一定起伏的表面而不需要调整加工头与加工平面的距离。目前来看,激光熔覆加工平面由规则平面向非规则平面发展,成形轨迹由二维直线向空间曲线发展。另外,脉冲激光特别是高频率的皮秒和飞秒激光引领着激光熔覆朝着更加精密化的微观领域加工方向发展。

3) 在光斑形状和大小方面。为实现小型加工件的精密加工,圆形和环形光斑半径朝着1 mm以下发展,光斑尺寸的减小与激光功率的增大能够提高光斑的能量密度,这有利于高熔点材料的成形制造。此外,对于一套固定的光路系统,其聚焦得到的光斑形状和大小是固定的,这种系统缺乏可调节性,所以发展自适应智能应变光斑光学系统将成为一种趋势。

参考文献:

- [1] SALONITIS K, D'ALVISE L, SCHINOCHORITIS B, et al. Additive Manufacturing and Post-Processing Simulation: Laser Cladding Followed by High Speed Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9): 2401-2411.
- [2] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser Cladding Assisted with an Induction Heater (LCAIH) of Ni-60%WC Coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 244-258.
- [3] DESCHUYTENEER D, PETIT F, GONON M, et al. Processing and Characterization of Laser Clad NiCrBSi/WC Composite Coatings—Influence of Microstructure on Hardness and Wear[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 162-171.
- [4] FARAYIBI P K, ABIOYE T E, MURRAY J W, et al. Surface Improvement of Laser Clad Ti-6Al-4V Using Plain Waterjet and Pulsed Electron Beam Irradiation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 218: 1-11.
- [5] PAYDAS H, MERTENS A, CARRUS R, et al. Laser Cladding as Repair Technology for Ti-6Al-4V Alloy: Influence of Building Strategy on Microstructure and Hardness[J]. Materials & Design, 2015, 85: 497-510.
- [6] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.
ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [7] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LI Jia-ning. Laser Cladding Technology and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [8] GOVEKAR E, JEROMEN A, KUZNETSOV A, et al. Study of an Annular Laser Beam Based Axially-Fed Powder Cladding Process[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 241-244.
- [9] 朱刚贤, 石拓, 傅戈雁, 等. 中空光光内送丝熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 381-384.
ZHU Gang-xian, SHI Tuo, FU Ge-yan, et al. Effect of Process Parameters on the Quality of the Cladding Layer by the Inside-Laser Wire Feeding[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 381-384.
- [10] 李凯斌. 不锈钢侧向送丝激光熔覆修复研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2015.
LI Kai-bin. Research on Laser Cladding Repair of Stainless Steel with Wire Feeding by Side[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2015.
- [11] SHI Jian-jun, ZHU Ping, FU Ge-yan, et al. Geometry Characteristics Modeling and Process Optimization in Coaxial Laser Inside Wire Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 341-348.

- [12] SYED W U H, PINKERTON A J, LI Lin. Combining Wire and Coaxial Powder Feeding in Laser Direct Metal Deposition for Rapid Prototyping[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(13): 4803-4808.
- [13] 王明娣, 左敦稳, 王珉, 等. 光内送粉激光熔覆工艺参数对单层熔覆质量的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(3): 354-357.
WANG Ming-di, ZUO Dun-wen, WANG Min, et al. Process in Single-Layer Laser Cladding Using Coaxial Inside-Beam Powder Feeding[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(3): 354-357.
- [14] KUZNETSOV A, JEROMEN A, LEVY G, et al. Annular Laser Beam Cladding Process Feasibility Study[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 647-656.
- [15] 吉绍山, 刘凡, 傅戈雁, 等. 三光束光内同轴送丝激光熔覆成形新方法研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(4): 285-293.
JI Shao-shan, LIU Fan, FU Ge-yan, et al. New Forming Method of Coaxial Wire Feeding Inside Three Beams Laser Cladding[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(4): 285-293.
- [16] LI Jin-yi, LI Hao nan, LIAO Zhi-rong, et al. Analytical Modelling of Full Single-Track Profile in Wire-Fed Laser Cladding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 290: 116978.
- [17] MOTTA M, DEMIR A G, PREVITALI B. High-Speed Imaging and Process Characterization of Coaxial Laser Metal Wire Deposition[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 497-507.
- [18] 孙莹. 激光熔覆技术在金属 3D 打印中的应用[J]. *机电产品开发与创新*, 2015, 28(6): 26-28.
SUN Ying. Application of Laser Cladding Technology in Metal 3D Printing[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2015, 28(6): 26-28.
- [19] VARACI S. Sensor Network for an Enhanced Solar Cyclone Tower[D]. London: Imperial College London, 2019.
- [20] DAHOTRE N B, HARIMKAR S. Laser Fabrication and Machining of Materials[M]. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [21] DUOCASTELLA M, ARNOLD C B. Bessel and Annular Beams for Materials Processing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 607-621.
- [22] QI Kang, YANG Yong, SUN Rui, et al. Effect of Magnetic Field on Crack Control of Co-Based Alloy Laser Cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107129.
- [23] LI Kai-qiang, LI Tao, MA Min, et al. Laser Cladding State Recognition and Crack Defect Diagnosis by Acoustic Emission Signal and Neural Network[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107161.
- [24] SINGH S, KUMAR P, GOYAL D K, et al. Erosion Behavior of Laser Cladded Colmonoy-6 + 50%WC on SS410 Steel under Accelerated Slurry Erosion Testing[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 98: 105573.
- [25] 高文焱, 赵树森, 林学春. 高斯光束传播对激光熔覆覆层的影响[J]. *电加工与模具*, 2013(4): 43-45, 55.
GAO Wen-yan, ZHAO Shu-sen, LIN Xue-chun. Influence of Gauss Beam Propagation on Laser Cladding Coating[J]. *Electromachining & Mould*, 2013(4): 43-45, 55.
- [26] 王慧琳, 郭亚雄, 蓝宏伟, 等. 光斑类型对激光熔覆 MoFeCrTiWAlNb 高熔点高熵合金涂层组织和性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 130-137.
WANG Hui-lin, GUO Ya-xiong, LAN Hong-wei, et al. Effect of Spot Type on Microstructure and Properties of MoFeCrTiWAlNb Refractory High-Entropy Alloy Coating Fabricated by Laser Cladding[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 130-137.
- [27] 刘军. 基于不同光斑激光熔覆的数值模拟及试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
LIU Jun. Numerical Simulation and Experimental Study of Laser Cladding with Different Laser Spot[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [28] HAROONI A, NASIRI A M, GERLICH A P, et al. Processing Window Development for Laser Cladding of Zirconium on Zirconium Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 263-271.
- [29] 曹丽英, 王永刚, 李强. 基于 Matlab GUI 图像处理的物料粒度与圆弧度测试[J]. *中国农机化学报*, 2015, 36(2): 95-98.
CAO Li-ying, WANG Yong-gang, LI Qiang. Particle Size and Roundness Testing Based on Matlab GUI Image Processing[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36(2): 95-98.
- [30] 赵陈敏, 练国富, 冯美艳, 等. 基于激光光斑直径的激光熔覆粉末汇聚特性数值模拟[J]. *激光与红外*, 2021, 51(6): 727-733.
ZHAO Chen-min, LIAN Guo-fu, FENG Mei-yan, et al. Numerical Simulation of Convergence Characteristics of Laser Cladding Powder Based on Laser Spot Diameters[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6): 727-733.
- [31] 秦应雄, 张怀智, 昌思怡, 等. 基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302007.
QIN Ying-xiong, ZHANG Huai-zhi, CHANG Si-yi, et al. Laser Cladding Optical System with Variable Circular Light Spot Based on Adaptive Mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302007.
- [32] LIU Shuang, KONG Fan-rong, SHI Shi-hong, et al. Study of a Hollow Laser Beam for Cladding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1): 147-159.
- [33] ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, FU Ge-yan, et al. Analysis on Surface Finish of Thin-Wall Parts by Laser Metal Deposition with Annular Beam[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105605.
- [34] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760A[P]. 2008-03-26.

- SHI Shi-hong, FU Ge-yan, WANG An-jun, et al. Technique for Manufacturing Inner-Light Powder-Supplying by Laser Machining Forming and Inner-Light Powder-Supplying Spray Head: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- [35] BLUM R, MOLIAN P. CO₂ Laser Coating of Nanodiamond on Aluminum Using an Annular Beam[J]. Applied Surface Science, 2014, 288: 1-8.
- [36] GOVEKAR E, KUZNETSOV A, JERIČ A. Drop on Demand Generation from a Metal Wire by Means of an Annular Laser Beam[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 59-70.
- [37] SCHNITZLER, RAUB M, DIETRICH J. Optisches System für Einen Laser Material Bear Beitungskopf: Germany, DE102007018400[P]. 2009-04-02.
- [38] BURATTO L, BÖHM E. The Use of the Femtosecond Laser in Penetrating Keratoplasty[J]. American Journal of Ophthalmology, 2007, 143(5): 737-742.
- [39] BULANOV S S, BRANTOV A, BYCHENKOV V Y, et al. Accelerating Monoenergetic Protons from Ultrathin Foils by Flat-Top Laser Pulses in the Directed-Coulomb-Explosion Regime[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2008, 78(2 Pt 2): 026412.
- [40] KARNAKIS D, FIERET J, RUMSBY P T, et al. Micro-hole Drilling Using Reshaped Pulsed Gaussian Laser Beams[J]. International Symposium on Optical Science and Technology. 2001, 4443: 150-158.
- [41] 吴东江, 褚洋, 牛方勇, 等. 双激光束熔覆过程平顶辅助光束对陶瓷涂层温度场的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703012.
- WU Dong-jiang, CHU Yang, NIU Fang-yong, et al. Influence of Temperature Distribution of Ceramic Coating Using Top-Hat Assistant Laser Beam in Dual-Beam Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0703012.
- [42] 张健, 张津超, 潘晓铭, 等. 宽带光束与同轴粉末流耦合规律及熔覆层成形特征[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 141-149.
- ZHANG Jian, ZHANG Jin-chao, PAN Xiao-ming, et al. Coupling Rules between Broadband Beam and Coaxial Powder Flow and Forming Characteristics of Cladding[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 141-149.
- [43] LIU Yang, WANG Ya-chao, SAVINOV R, et al. Epitaxial Growth of a Single-Crystal Nickel-Based Superalloy during Laser Melting with High-Power Flat-Top Laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107444.
- [44] YUAN Wei-hao, CHEN Hui, LI Shuai, et al. Understanding of Adopting Flat-Top Laser in Laser Powder Bed Fusion Processed Inconel 718 Alloy: Simulation of Single-Track Scanning and Experiment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1388-1401.
- [45] 翟建华, 刘志杰, 张勇, 等. 内缸活塞杆的激光熔覆修复[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111411.
- ZHAI Jian-hua, LIU Zhi-jie, ZHANG Yong, et al. Laser Cladding Repairation of Inner Cylinder Piston Rods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111411.
- [46] 李英男, 李铸国, 王晓翔, 等. 道岔尖轨表面的激光熔覆铁基耐磨涂层及其性能[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402009.
- LI Ying-nan, LI Zhu-guo, WANG Xiao-xiang, et al. Fe-Based Wear-Resistant Coating on Railroad Switch Prepared Using Laser Cladding Technology and Its Properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402009.
- [47] GUO Huo-ming, WANG Qian, WANG Wen-jian, et al. Investigation on Wear and Damage Performance of Laser Cladding Co-Based Alloy on Single Wheel or Rail Material[J]. Wear, 2015, 328-329: 329-337.
- [48] 张永彬, 宾韧, 郎定木. 纳秒脉冲激光熔覆温度场计算及薄膜飞溅机制分析[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 464-468.
- ZHANG Yong-bin, BIN Ren, LANG Ding-mu. Calculation for Nano-Second Pulsed Laser Cladding Temperature Field and Analysis of Thin Film Removal Mechanism[J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 464-468.
- [49] 钟如涛, 熊征. 连续/脉冲 CO₂ 激光熔覆高温合金 K403[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 852-857.
- ZHONG Ru-tao, XIONG Zheng. Research on Continuous/Pulse Laser Cladding Superalloy K403[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 852-857.
- [50] XIANG Kang, CHEN Liang-yu, CHAI Lin-jiang, et al. Microstructural Characteristics and Properties of CoCrFe-NiNb_x High-Entropy Alloy Coatings on Pure Titanium Substrate by Pulsed Laser Cladding[J]. Applied Surface Science, 2020, 517: 146214.
- [51] CHAI Lin-jiang, WANG Chao, XIANG Kang, et al. Phase Constitution, Microstructure and Properties of Pulsed Laser-Clad Ternary CrNiTi Medium-Entropy Alloy Coating on Pure Titanium[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 402: 126503.
- [52] 卢朋辉, 刘建睿, 薛蕾, 等. 激光成形修复 K418 高温合金的显微组织与开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 315-319.
- LU Peng-hui, LIU Jian-rui, XUE Lei, et al. Microstructure and Cracking Behavior of K418 Superalloy by Laser Forming Repairing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 315-319.
- [53] 任维彬, 周金宇, 张锁荣, 等. K418 高温合金叶轮脉冲激光再制造形状与性能控制[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3315-3319.
- REN Wei-bin, ZHOU Jin-yu, ZHANG Suo-rong, et al. Forming and Performance Control of Pulsed Laser Remanufacturing for K418 Alloy Impeller[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3315-3319.
- [54] 赖境, 路媛媛, 张航, 等. 低热输入脉冲激光修复高温合金液化裂纹研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402011.
- LAI Jing, LU Yuan-yuan, ZHANG Hang, et al. Liquation Cracks in Superalloys Repaired by Low-Heat Input Pulsed Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402011.
- [55] 张毅斌, 熊征, 童法松. 脉冲 CO₂ 激光熔覆 K403 合金层工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(5): 38-43.

- ZHANG Yi-bin, XIONG Zheng, TONG Fa-song. The Technological Researches on Laser Cladding of K403 Supralloy by Pulse CO₂ Laser[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(5): 38-43.
- [56] 李云峰, 石岩. 脉冲频率对激光熔覆层组织与性能的影响机制[J]. 中国机械工程, 2021(3): 1-10.
- LI Yun-feng, SHI Yan. Influence of Pulse Frequency on Microstructure and Properties of Laser Cladding Layer[J]. China Mechanical Engineering, 2021(3): 1-10.
- [57] KUMAR K S. Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Work Piece Welded by Laser Welding Process[J]. Procedia Materials Science, 2014, 6: 821-834.
- [58] GU Dong-dong, HAGEDORN Y C, MEINERS W, et al. Densification Behavior, Microstructure Evolution, and Wear Performance of Selective Laser Melting Processed Commercially Pure Titanium[J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [59] 朱云天, 杜开平, 沈婕, 等. 激光能量密度对选区激光熔化(SLM)制品性能的影响及其机理研究[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(2): 35-41.
- ZHU Yun-tian, DU Kai-ping, SHEN Jie, et al. The Study of the Influences of Laser Energy Density to the Properties of SLM Products and Its Mechanism[J]. Thermal Spray Technology, 2017, 9(2): 35-41.
- [60] 王一丹, 张学润, 崔秀芳, 等. 激光能量密度对NiCrCoTiV 高熵合金涂层组织结构及耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 118-124.
- WANG Yi-dan, ZHANG Xue-run, CUI Xiu-fang, et al. Effects of Laser Energy Density on Microstructure and Corrosion Resistance of NiCrCoTiV High Entropy Alloy Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 118-124.
- [61] KELBASSA I, GASSER A, MEINERS W, et al. High Speed LAM[C]//International Photonics and Optoelectronics Meetings. Wuhan: OSA, 2012: 254.
- [62] RAYKIS O. Alternative with a Future: High-Speed Laser Metal Deposition Replaces Hard Chrome Plating[J]. Laser Technik Journal, 2017, 14(1): 28-30.
- [63] SCHOPPHOVEN T, GASSER A, BACKES G, EHLLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition[J]. Laser Technik Journal, 2017, 14(4): 26-29.
- [64] 吴影, 刘艳, 陈文静, 等. 超高速激光熔覆技术研究现状及其发展方向[J]. 电焊机, 2020, 50(3): 1-10, 140.
- WU Ying, LIU Yan, CHEN Wen-jing, et al. Research Status and Development Direction of Extreme High-Speed Laser Material Deposition[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3): 1-10, 140.
- [65] BURVALL A, GONCHAROV A, DAINTY C. Telephoto axicon[C]//Optical Systems Design 2005. Jena: Optical Design and Engineering, 2005: 324-331.
- [66] LIU Rong, DONG Bi-zhen, YANG Guo-zhen, et al. Generation of Pseudo-Nondiffracting Beams with Use of Diffractive Phase Elements Designed by the Conjugate-Gradient Method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(1): 144.
- [67] BAO Nai-keng, CHEN Zhong-yu, CHEN Yan-song. Adjacent Sequence Iteration Method for Designing a Diffractive Element with Function of Long Focal Depth[J]. Acta Photonica Sinica, 2004(3): 2348-2352.
- [68] FLORES A, WANG M R, YANG J J. Achromatic Hybrid Refractive-Diffractive Lens with Extended Depth of Focus[J]. Applied Optics, 2004, 43(30): 5618-5630.
- [69] OUADGHIRI-IDRISSI I, GIUST R, FROEHLI L, et al. Arbitrary Shaping of On-Axis Amplitude of Femtosecond Bessel Beams with a Single Phase-only Spatial Light Modulator[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 11495-11504.
- [70] FAN Quan-ping, WANG Shao-yi, YANG Zu-hua, et al. The Realization of Long Focal Depth with a Linear Varied-Area Zone Plate[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(3): 244-250.
- [71] FAN Quan-ping, WANG Shao-yi, WEI Lai, et al. Uniform Long Focal Depth with Centimeter-Scale Range Produced by an Aspherical Mirror[J]. Optics Communications, 2019, 453: 124342.

责任编辑: 万长清