

# 激光与光电子学进展

## 超高速激光熔覆涂层成形及关键性能研究进展

胡泽宇, 李洋, 刘进, 蔡兰蓉\*, 谭娜

天津职业技术师范大学机械工程学院 天津 300222

**摘要** 超高速激光熔覆是新兴的表面涂层技术,通过粉末和激光的最佳耦合实现熔覆效率的大幅提升,相比传统激光熔覆涂层可以获得更优质的表面质量,且对基材损伤更小。通过分析超高速激光熔覆的原理及技术优势,并与传统激光熔覆技术特点进行对比,总结了激光功率、扫描速率、送粉速度以及搭接率对熔覆层成形的影响,详细介绍了超高速激光熔覆涂层的硬度、耐磨、耐蚀等关键性能的研究现状,并且列举了国内外对超高速激光熔覆技术在工业应用现状。最后,基于目前的研究进展,指出目前对于超高速激光熔覆涂层和基体界面结合状态及涂层构件力学方面处于研究空白,并对该技术的发展提出展望。以期为超高速激光熔覆技术的广泛应用提供理论支持。

**关键词** 激光技术; 超高速激光熔覆; 工艺参数; 硬度; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号 TG113 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212752

### Research Progress of Ultra-High-Speed Laser Cladding Coating Forming and Key Properties

Hu Zeyu, Li Yang, Liu Jin, Cai Lanrong\*, Tan Na

School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

**Abstract** Ultra-high-speed laser cladding is an emerging surface coating technology. Through the optimal coupling of powder and laser, the cladding efficiency can be substantially enhanced, surface quality can be made better than that of traditional laser cladding coating, and damage to the substrate can be minimized. The principle and technical benefits of ultra-high-speed laser cladding are introduced in this study. The influence of laser power, scanning rate, powder feeding speed, and overlap rate on the cladding layer formation is summarized by comparing with the characteristics of traditional laser cladding technology. In addition, investigation status of the major properties of ultra-high-speed laser cladding coating, such as hardness, wear resistance, and corrosion resistance, is introduced in detail, and the industrial application status of ultra-high-speed laser cladding technology at home and abroad is listed. Finally, based on the current investigation progress, it is pointed out that there is a gap in the study on the interface bonding state of the ultra-high-speed laser cladding coating and the mechanics of the coating component, and prospects for the development of this technology are presented. It is predicted to offer theoretical support for the extensive application of ultra-high-speed laser cladding technology.

**Key words** laser technique; ultra-high-speed laser cladding; process parameters; hardness; wear resistance; corrosion resistance

## 1 引言

表面涂层技术一直在材料科学领域备受关注,它可以在各种零部件表面制备出高性能的涂层,可以起到耐磨、耐蚀、绝缘保护,以及装饰等作用,从而达到降低生产成本、提高产品质量、延长使用寿命的使用要求<sup>[1]</sup>。表面涂层技术包括电镀、溶胶凝胶、热喷涂、化学热处理、气相沉积、表面沾涂、热浸锌、激光熔覆等<sup>[2]</sup>。

在以上几种表面涂层技术中,激光熔覆技术的研究领域更广阔,限制因素比较少,应用前景较广泛。激光熔覆技术在国外起步较早,1974年Gnanamuthu就申请了一项利用激光熔覆法在金属基体上熔覆一层金属的专利,在此基础上美国的相关公司做了大量的研究后设计出一种新的送粉系统<sup>[3-4]</sup>,为激光熔覆系统成形奠定基础。虽然传统的激光熔覆技术已经有了技术上的革新,但在进行大面积沉积作业时效率低、成本高以及表

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-12-04; 录用日期: 2022-01-13; 网络首发日期: 2022-01-20

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2021KJ024)

通信作者: \*cailr2003@163.com

面精度低等劣势,制约了其推广应用<sup>[5]</sup>。

为解决这些问题,基于传统激光熔覆的研究,德国弗劳恩霍夫激光研究所和亚琛工业大学于 2012 年提出了超高速激光熔覆的技术设想并开展了相关的研究,于 2017 年推出了超高速激光熔覆设备<sup>[6]</sup>。因其拥有极高的沉积速率、高达 90% 的粉体利用率,一经问世就获得广泛的关注。

超高速激光熔覆技术较传统激光熔覆技术在工艺方面有很大改进,超高速激光熔覆技术本质是改变了粉末的熔化位置,使粉末在工件上方就与激光焦点交汇,在激光能量的作用下发生熔化,随之均匀涂覆在工件表面,熔覆速度比传统激光熔覆快 100~250 倍,激光能量作用于基体的时间很短,使得激光对基体的热影响达到最小<sup>[7]</sup>。显然,基于其诸多技术优势,超高速激光熔覆技术已经展现出极佳的应用前景,但是对于新兴技术的发展必然经历工艺的探索、材料的创新等技术难题,因此,关于工艺参数的探索以及熔覆层性能的提升将成为超高速激光熔覆技术研究的重点。

## 2 超高速激光熔覆技术特点及优势

超高速激光熔覆技术是基于传统激光熔覆技术发

展而来的一种高效表面涂层技术。传统激光熔覆的激光能量大约有 80% 作用于基体,使得基体过度受热,对基体材料的稀释较严重;而超高速激光熔覆从本质上改变了粉末的熔化位置,使粉末在工件上方就与激光焦点交汇,大部分激光能量在空气中被粉末吸收,随之均匀熔覆在工件表面<sup>[8]</sup>。因为粉末与激光焦点会聚位置不同,基体的热输入能量也不同,所以采用超高速激光熔覆制备涂层时基体受热明显小于传统激光熔覆。因此采用超高速激光熔覆技术拥有基体热变形小,涂层内部残余应力较小、不易开裂的特点。

超高速激光熔覆技术制备涂层的工艺流程简单易操作,首先选取合适的基体材料和熔覆材料,然后确定最佳的工艺参数进行涂层的制备,最后分析熔覆层的组织形貌及性能。如图 1(a)所示,超高速激光熔覆设备包括激光系统、机器人系统、送粉系统、水冷系统以及车床夹持系统。如图 1(b)<sup>[5]</sup>所示,超高速激光熔覆技术在制备涂层过程中,通过车床夹持基材并根据所需的扫描速度设定机床转速,随后机械臂带动熔覆头做轴向运动进行涂层熔覆。如图 1(c)<sup>[9]</sup>所示,利用超高速激光熔覆技术制备的涂层表面光滑平整。图 2 为熔覆原理示意图。

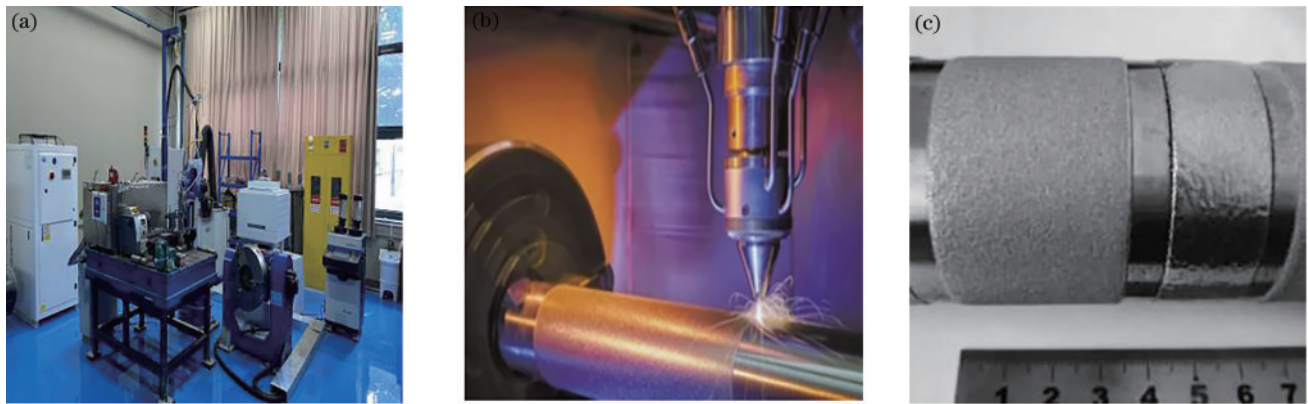


图 1 超高速激光熔覆技术工艺流程。(a)高速激光熔覆设备;(b)包层工艺<sup>[5]</sup>;(c)成品<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Ultra-high-speed laser cladding technology process flow. (a) High speed laser cladding equipment; (b) cladding process<sup>[5]</sup>; (c) finished product<sup>[9]</sup>

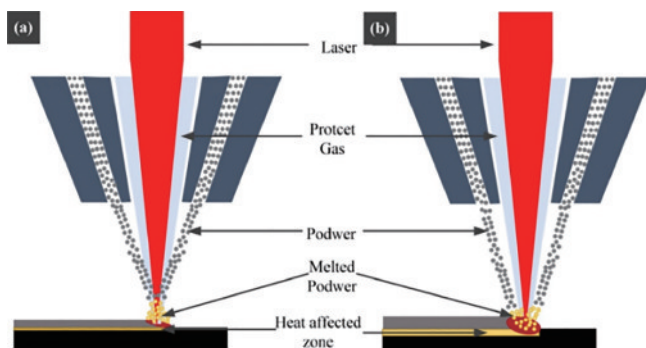


图 2 熔覆原理示意图<sup>[8]</sup>。(a)高速激光熔覆;(b)传统的激光熔覆  
Fig. 2 Schematic diagram of cladding principle<sup>[8]</sup>. (a) High speed laser cladding; (b) traditional laser cladding

因此,超高速激光熔覆技术受到国内外学者的重视,主要由于超高速激光熔覆技术的三个优势:1)高效率、低成本,以及熔覆速度快、效率高,粉末利用率高达 90% 以上,涂层厚度薄且粗糙度低,后期可直接进行精加工;2)高质量、高适应性,熔覆层的性能提升,较熔覆前耐蚀、耐磨显著提高,适用于各种金属、非金属材料;3)热输入低,对基体影响小、零件变形小,能有效地解决薄壁、热敏感材料表面熔覆的难题<sup>[4]</sup>。

## 3 工艺参数对超高速激光熔覆涂层成形质量影响

超高速激光熔覆涂层成形质量的好坏可以根据观



察涂层表面形貌是否平整光滑、有无气孔和开裂等缺陷来判断<sup>[10]</sup>。对超高速激光熔覆涂层成形的重要影响因素是工艺参数的选取,不同参数制备出的熔覆层表面质量差异明显<sup>[11]</sup>。由于工艺参数对涂层成形有至关重要的作用,近些年关于工艺参数的研究成为热点。已有学者研究了工艺参数对涂层成形的影响,如: Schopphoven 等<sup>[12]</sup>利用超高速激光熔覆制备涂层,并分析了工艺参数(激光功率、沉积速度、粉末质量流量、载气流速)对熔覆层的影响; Zhong 等<sup>[13]</sup>使用混合工艺参数方法进行高沉积率激光金属沉积,进行了粉末制备工艺、降低孔隙率、微观结构和拉伸性能等方面的研究。接下来,针对工艺参数对熔覆层涂层成形影响展开详细总结。

从目前众多研究中可以发现,涂层成形的关键影响参数包括激光功率、扫描速率、送粉速度以及搭接率<sup>[14]</sup>。因此,本文针对这四种工艺参数所引起涂层成形的变化进行详细陈述,同时对超高速激光熔覆技术与传统激光熔覆技术进行了比较。

### 3.1 激光功率

在超高速激光熔覆技术中,激光功率的作用是提供热源,功率的大小决定了输出热量的多少。基于激光理论,对照先前学者的研究成果,发现采用超高速激光熔覆技术制备 FeCr 涂层时,当功率达到 1.5 kW 时可获得表面平整无缺陷、表面粗糙度小于 10  $\mu\text{m}$  的涂层,而且可以利用激光重熔的方法继续降低表面粗糙度<sup>[15]</sup>。采用传统激光熔覆技术制备 FeCr 涂层,当功率达到 2.2 kW 时才可获得表面致密无裂纹、气孔率趋近于零的涂层<sup>[16]</sup>。对比发现,对于相同的合金粉末,两种工艺方法所用的激光功率不同,这是由于超高速激光熔覆过程中激光能量多作用于粉末、少作用于基体,激光能量利用率多,传统激光熔覆恰恰相反。而且如图 3 所示,超高速激光熔覆技术制备的涂层成形效果优于传统激光熔覆技术,超高速激光熔覆技术制备的涂层气孔率低于传统激光熔覆技术,这是因为激光熔覆技术是一种快冷快热的表面涂层工艺,而传统激光熔覆的熔池比超高速激光熔覆大,在冷却过程中产生的气体来不及逸出,所以会形成气孔。沈浩等<sup>[17]</sup>在制备 NiCoCrAlYSi 涂层中发现,通过改变激光功率所获得的涂层厚度以及表面气孔情况不同。这表明激光熔

覆技术可通过调整激光功率来获得优质涂层。

还有一些学者研究了激光功率变化对涂层成形的影响,在观察超高速激光熔覆制备的 SS431 单道涂层时发现,采用 1.2 kW 激光功率制备的涂层表面粗糙存在很多未熔颗粒,而采用 4 kW 激光功率制备的涂层表面光滑平整未观察到有未熔颗粒,这表明随着功率的增加,粉末的熔化度越大,基体表层熔化更多,与基体冶金结合得越好。同时还发现,在利用传统激光熔覆技术制备 (TiC+B4C)/Co 涂层时,采用激光功率分别为 0.8 kW、1 kW、1.2 kW 制备的涂层与基体成冶金结合,无气孔、裂纹等缺陷,且采用激光功率为 1.2 kW 制备的涂层成型质量最佳。对比发现,采用两种不同工艺制备的涂层都是在一定范围内随着功率的增加,涂层的质量也随之更佳。

无论对于超高速激光熔覆技术或传统激光熔覆技术,激光功率的大小本质上就是输出功率能量的大小,对于不同的合金粉末,熔点不同所需的激光热量也不同。当激光能量高于最优值时,可能会出现粉末成分破坏或基体损坏等问题;当激光能量低于最优值时,可能出现粉末未完全相熔、粉末利用低、与基体结合强度差等问题。同时,激光功率对涂层气孔率、平整度有一定的影响,在制备涂层时适当地调整激光功率的大小对制备优质涂层有很大的作用。

### 3.2 扫描速率

激光的扫描速度决定了激光束对粉体的熔化程度,因此扫描速度也是影响熔覆成形的主要因素。扫描速度越高,激光对粉末的加热时间越短,传输的热量越小;扫描速度越低则激光束对粉末的辐照时间越长,输出的热量越大,熔覆层致密性越好<sup>[18]</sup>。但扫描速度过低将导致金属粉末表面温度过高,会使熔覆层受热过高造成翘曲严重,影响成形质量。

一些学者研究了在制备涂层过程中扫描速率对涂层成形的影响,研究发现,利用超高速激光熔覆在 45 钢表面制备铁基合金涂层过程中,当扫描速度在 100 mm/s 时,涂层成形效果最好,表面没有缺陷且粗糙度达到最小值。在扫描速度从 10 mm/s 升至 700 mm/s 过程中,虽然涂层表面没有出现气孔、开裂等缺陷,但表面粗糙度呈现先降低后增高的趋势<sup>[19]</sup>。对比传统激光熔覆可知,在 IN718 上熔覆 NiCoCrAlY 合金粉末,当扫描速度为 16 mm/s 时,由于扫描速度太快,粉末熔化时产生的气体未能及时逸出,涂层表面产生气孔缺陷。随着扫描速度的增加,涂层与基体的结合强度变低以及表面开始出现缺陷<sup>[20]</sup>。并且利用传统激光熔覆技术在 5CrNiMo 钢上熔覆 Ni60 自熔性合金粉末,当扫描速度为 10 mm/s 时,涂层熔覆效果最好<sup>[21]</sup>。

通过前后对比发现,扫描速度对超高速激光熔覆和传统激光熔覆的影响差异不大,对熔覆层成形引起的变化趋势近乎相同。因为激光的扫描速度决定激光能量在熔覆过程中停留于粉末的时间长短以及对基体

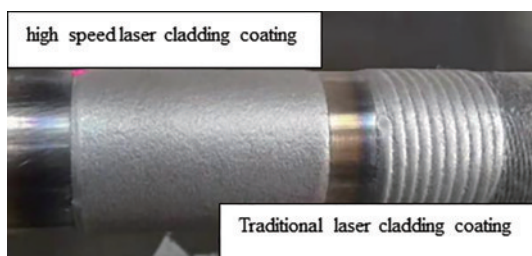


图 3 涂层成形表面形貌对比图

Fig. 3 Surface morphology contrast diagram of coating forming

热影响的大小,当扫描速率很低时,涂层的冷却时间很短,有些粉末或基体在高温热量的作用下生成的气体来不及逸出会产生气孔。并且随着扫描速率的提高,虽然涂层成形效果没有出现气孔、裂纹等缺陷,但涂层组织枝晶臂的间距先增大后减小,细枝晶无法按照最优生长方向伸展,两个不同的枝晶会发生碰撞产生微观应力,导致涂层形成开裂等缺陷<sup>[22]</sup>。

扫描速度与涂层的开裂存在一定的影响规律,激光熔覆属于一种快热快冷的表面改性技术,扫描速度过慢,会导致涂层间枝晶生长碰撞,扫描速度过快,会导致涂层间热应力差异很大。而且在设定工艺参数时:当设定的扫描速度过低时,需要降低激光功率和送粉速度;当设定的扫描速度过高时,需要增加激光功率和送粉速度,达到参数的最佳耦合,以获得最优成形质量。

### 3.3 送粉速度

送粉速度是单位时间内送入熔池的粉末质量。送粉速度的大小直接影响熔覆层的厚度,随着送粉速度的升高熔覆层的厚度显著增加,但是当送粉速度增加某一限度以上时,该涂层的组织先细小后粗大<sup>[23]</sup>,涂层的成形质量下降。

通过一些学者的研究发现,利用超高速激光熔覆在钢材上制备一种以 Fe、Cr、Ni 元素为主的合金粉末涂层,当送粉量为 50~100 g/min 时,涂层表面平整、厚度均匀,未出现气孔、裂纹<sup>[24]</sup>。同时利用超高速激光熔覆制备 Cr50Ni 合金涂层时,当送粉速度为 28 g/min 时,涂层熔覆效果很好,表面光滑平整无缺陷,并且送粉速度的大小与遮光率息息相关,送粉速度越大,遮光率越大,则激光能量在空中衰减增多,因此送粉速度增加时,为确保熔覆层的品质,激光功率也要增加<sup>[25]</sup>。对比传统激光熔覆,当送粉速度为 30 g/min 时,熔覆层成形效果达到最佳,随着扫描速度的增加,显微组织内开始出现孔洞,原因是激光能量不足,随着送粉速率的加大,粉末吸收了大量的能量,激光作用于基体的能量变少熔池温度不够,进而导致出现粉末堆积的现象,并且会将一部分能量反射出去<sup>[26]</sup>。

对比发现,利用超高速激光熔覆和传统激光熔覆制备涂层过程中,送粉速度对熔覆层成形的影响没有太大的差异性,送粉速度加大,同时要考虑粉末利用率的问题,会出现许多未熔或半熔状态的粉末,造成成本的浪费。因此在实际生产工作中要控制好送粉速度,而且随着送粉速度的增加或减小,激光功率与扫描速度也要相应地增加或减小,而且针对不同的熔覆材料需要控制不同的送粉速度。

### 3.4 搭接率

搭接率是影响熔覆层表面粗糙度的主要因素,搭接率提高,熔覆层表面粗糙度降低。但搭接部分的均匀性很难得到保证,两道熔覆层之间相互搭接区域的深度与每道熔覆层正中的深度有所不同,从而影响整

个熔覆层的粗糙度。超高速激光熔覆搭接率高达 70%~80%,而传统激光熔覆搭接率为 30%~50%。

根据先前的试验研究表明,利用超高速激光熔覆技术在 304 不锈钢材料上熔覆 FeCr 合金粉末,当搭接率设定为 86% 时,制备的涂层很薄,未出现气孔、开裂等缺陷,涂层成形达到最优。随着搭接率的提高,涂层表面越平整光滑,粗糙度降低,但是如图 4 所示,搭接率在提高到 70% 及以上时,涂层表面粗糙度就趋于稳定,没有显著的变化<sup>[27]</sup>。这是因为超高速激光熔覆激光能量多作用于粉末上,粉末充分受热之后沉积于基体,所以表面光滑,粗糙度低。对比传统激光熔覆技术,当搭接率为 50% 时,制备的涂层未出现开裂等缺陷,同时具备高强度的冶金结合,熔覆层表面光滑平整。因为搭接率直接影响到表面的平整度以及基体与涂层之间冶金结合的程度,并且随着搭接率的降低,熔覆层表面的粗糙度增加。这是因为传统激光熔覆能量多作用于基体,粉末在空中未完全受热就沉积于基体之上,易发生粉末粘连导致表面粗糙度增大。同时发现,利用传统激光熔覆技术熔覆铁基合金,当搭接率为 56% 时,涂层成形效果最佳,表面平整无多余杂质。随着搭接率的减小,表面出现明显的缺陷,气孔、裂纹以及表面粗糙,出现凹陷与变形<sup>[28]</sup>。

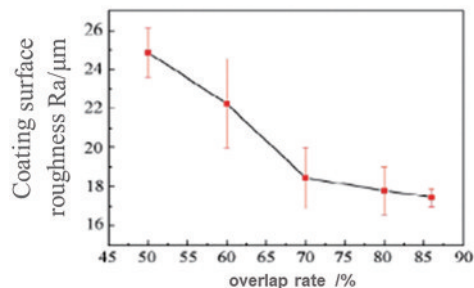


图 4 表面粗糙度随搭接率变化曲线<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Surface roughness varies with overlap rate<sup>[27]</sup>

对比两种熔覆方式可以发现,超高速激光熔覆技术的搭接率明显高于传统激光熔覆技术。如图 5 所示,超高速激光熔覆技术制备的涂层表面平整度优于传统激光熔覆技术。并且在接近或超过最佳搭接率时,熔覆层的效果变化不会太明显,在低于最佳搭接率时,熔覆层的成形效果随着搭接率的降低而下降,表面平整度也变得越来粗糙。利用激光熔覆在 TC4 钛合金表面 TiAl 合金涂层,通过单道涂层和搭接涂层对比发现,无论是从表面质量、涂层组织或者涂层硬度,搭接涂层的质量都比单道熔覆的有所提升<sup>[29]</sup>。王昕阳等<sup>[30]</sup>在采用同步送粉激光熔覆高熵合金涂层过程中发现,随着激光功率、扫描速率、送粉速度等参数的调整,涂层表面的平整度得到改善。这表明涂层表面的平整度最主要的影响因素是搭接率,但不只与搭接率有关,其余关键参数也会影响到涂层表面的平整度。



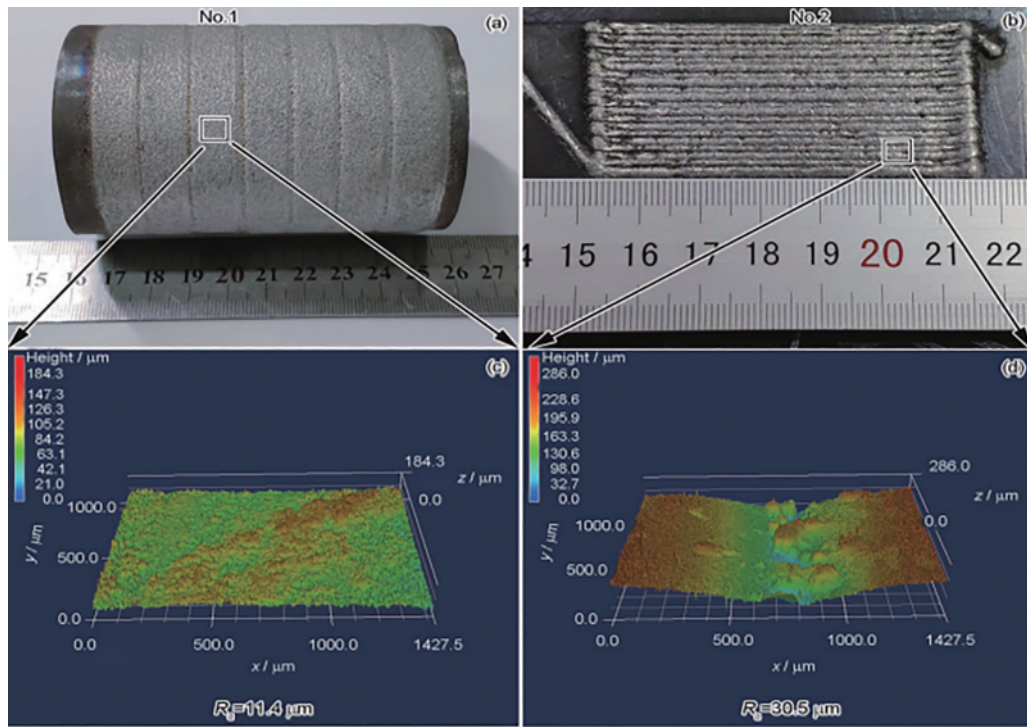


图 5 超高速激光熔覆与传统激光熔覆表面粗糙度对比图<sup>[28]</sup>

Fig. 5 Comparison of surface roughness between ultra-high-speed laser cladding and traditional laser cladding<sup>[28]</sup>

综上所述,通过工艺参数的优化可以获得成形良好的激光熔覆涂层,但对于超高速激光熔覆工艺参数的优化工作需要开展进一步的研究,可以利用模拟或数学的方法获得最佳工艺参数,如:舒林森等<sup>[31]</sup>利用激光熔覆技术在钢基体上熔覆铁基合金粉末,通过不同的工艺参数发现涂层的表面形貌差异明显,并且利用

回归方法得到了最佳工艺参数;黄海博等<sup>[32]</sup>为了研究工艺参数对裂纹和厚度的影响,设计了在 45#钢表面激光熔覆 Ni60 粉末的正交试验。结果表明:对涂层裂纹的影响顺序为扫描速度、送粉速度、激光功率;对涂层厚度的影响顺序为送粉速度、扫描速度。利用有效的参数优化方法,可以正确指导研究,提高试验效率。

表 1 工艺参数对比表

Table 1 Comparison table of process parameters

| Reference | Laser cladding | Cladding material | Optimization of process parameters | Coating forming effect |
|-----------|----------------|-------------------|------------------------------------|------------------------|
| [15]      | High speed     | FeCr              | Laser power is 1.5 kW              | Best                   |
| [16]      | Traditional    | FeCr              | Laser power is 2.2 kW              | Best                   |
| [19]      | High speed     | Fe                | Sweep speed is 100 mm/s            | Best                   |
| [20]      | Traditional    | NiCoCrAlY         | Sweep speed is 16 mm/s             | Best                   |
| [21]      | Traditional    | Ni60              | Sweep speed is 10 mm/s             | Best                   |
| [24]      | High speed     | Fe、Cr、Ni          | Powder feed rate is 50-100 g/min   | Best                   |
| [25]      | High speed     | Cr50Ni            | Powder feed rate is 28 g/min       | Best                   |
| [26]      | Traditional    | CNTs-SiC/Ni       | Powder feed rate is 30 g/min       | Best                   |
| [27]      | High speed     | FeCr              | Overlap rate is 86%                | Best                   |
| [28]      | Traditional    | Fe                | Overlap rate is 56%                | Best                   |

#### 4 超高速激光熔覆涂层的关键性能研究

在目前的工业要求以及实际应用场景中,涂层的硬度、耐磨、耐蚀决定了零部件的使用寿命以及工业生产成本,因此对这三种关键性能的改进具有重大的意义,以下对涂层的硬度、耐磨、耐蚀三个方面展开总结。

##### 4.1 超高速激光熔覆涂层的显微硬度研究

在实际工程应用领域,材料的硬度属于力学性能方面的一个综合指标,其决定了零部件的使用寿命,许多金属结构材料的合金因质软、硬度低,大大地限制了其应用范围,因此提高金属材料表面的硬度极其重要。

研究表明,超高速激光熔覆技术制备的涂层显微硬度比基体硬度大约增强了三倍(图 6),但观察发现,

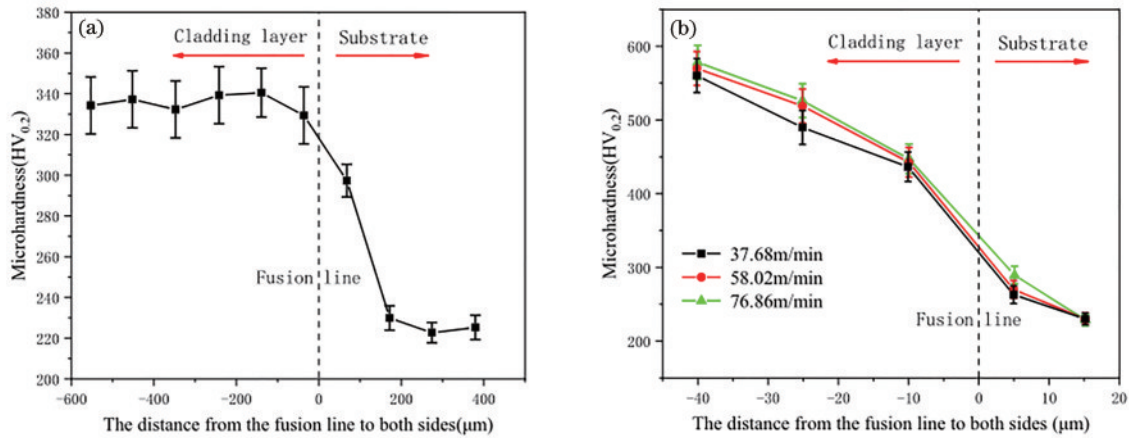


图 6 显微硬度对比图<sup>[33]</sup>。(a) 传统的激光熔覆技术；(b) 高速激光熔覆技术

Fig. 6 Microhardness comparison diagram<sup>[33]</sup>. (a) Traditional laser cladding technology; (b) high speed laser cladding technology

显微硬度从涂层表面向基体方向逐渐降低,因为在冷却过程中,底部柱状晶向顶部细小枝晶转变,组织逐渐细化,顶部显微硬度提高<sup>[33]</sup>。类似研究发现,超高速激光熔覆涂层的整体组织较为致密、细小,没有出现元素偏析现象,所形成的硬质相颗粒增多且分布均匀,使得涂层显微硬度得到提高。对比传统激光熔覆技术制备的涂层,基体的显微硬度只能达到涂层显微硬度的 1/2,但是从涂层表面到基体的显微硬度相差不大<sup>[34]</sup>。利用传统激光熔覆在 Q235 表面制备 Fe-Cr-Mo-Si 合金涂层,熔覆层组织均匀致密,内部无气孔、裂纹等缺陷,熔覆层的显微硬度从涂层到基体依然保持不变<sup>[35]</sup>。综上所述,超高速激光熔覆技术制备的涂层显微硬度明显高于传统激光熔覆,但超高速激光熔覆层的硬度分布差异明显,由涂层到基体呈下降式直线分布,传统激光熔覆层的硬度呈水平式直线分布。

同时发现,参数的改变会影响涂层的显微硬度:随着扫描速度的增加,涂层显微硬度会小幅度地降低<sup>[36]</sup>;稀释率降低会导致涂层表面产生裂纹。因此稀释率降低会造成显微硬度降低<sup>[37]</sup>,并且随着稀释率的增加,显微硬度呈现出先增大后减小的趋势<sup>[38]</sup>。

最后对比发现,超高速激光熔覆的涂层硬度显著高于传统激光熔覆,这是由于涂层的硬度与冷却速率有关,在较高的冷却速率下,细小组织的形成导致熔覆层硬度增加,并且涂层的硬度与粉末冷却过程中形成的枝晶结构有关,当枝晶结构伸展方向有序、形成细小均匀的枝晶组织、枝晶臂间距很小时,涂层硬度达到最佳。

#### 4.2 超高速激光熔覆涂层的耐磨性研究

在工业领域,机器的运转时间过长,摩擦体表面的物理、化学性能显著变化,零件表面质量下降,最终导致零部件失效,因此加强材料的耐磨性至关重要。一般情况下,材料的硬度越高,耐磨性越好,故常将硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标之一<sup>[39]</sup>,但并非所有材料硬度的高低都决定耐磨性的好坏,如最常用的耐磨材料铸铁硬度就不高。

基于涂层耐磨性的重要性,相关学者做了大量的研究,发现利用超高速激光熔覆技术制备的涂层耐磨性得到提升的原因在于,熔覆过程中的熔覆速度很快,使得晶粒尺寸变小,晶粒内部产生的第二相强化作用增强,并且在晶界和晶内形成大量的硬质相。不仅提高了涂层的硬度,而且可以确保表面原子在摩擦磨损时不会发生滑移<sup>[33]</sup>。而对于传统激光熔覆技术,其涂层的强化作用是通过固溶强化、沉淀强化和马氏体相变来实现的。

同时发现,工艺参数对涂层的耐磨性也有重要的影响,在利用超高速激光熔覆技术制备 FeCoCrNi-Mo 涂层时,当激光功率设定为 3 kW、扫描速度为 50 mm/s 时,熔覆层组织均匀,稀释率最低,耐磨性达到最佳<sup>[40]</sup>。随着激光功率由 3 kW 增加到 5.5 kW,涂层的耐磨性逐渐降低,并且随着扫描速度的降低,涂层的耐磨性显著降低。对比传统激光熔覆技术,在钢材表面熔覆 (WC+SiC)/Ni 基复合涂层试验中发现,当扫描速度从 6.8 mm/s 变化 10.3 mm/s 时,涂层的耐磨性显著提高,并且发现添加适量的稀土元素也能显著提升涂层的耐磨性。这是因为稀土元素大多偏聚于晶界处,对激光熔覆层组织有明显的细化作用,从而改善了组织的致密性<sup>[41]</sup>。

由此可见,利用超高速激光熔覆技术和传统激光熔覆技术制备的涂层都可以提高材料表面的耐磨性,但两者的作用机理不同,并且超高速激光熔覆技术制备的涂层耐磨性显著高于传统激光熔覆技术,超高速激光熔覆技术应用范围更广泛。

#### 4.3 超高速激光熔覆涂层的耐蚀性研究

材料的腐蚀问题一直是人们研究的重点,金属腐蚀会带来重大的损失,不仅造成经济上的损失还会带来安全隐患,因此通过表面改性提高金属材料的耐蚀性刻不容缓。但是耐蚀性在激光熔覆涂层领域的研究相对较少,还需要大量的试验研究来改善现状。

针对这些问题,部分学者展开了相关的研究,结果



发现,对于超高速激光熔覆技术,涂层的耐腐蚀性同样和熔覆层表面组织形成的枝晶尺寸有关,枝晶越细化,涂层耐蚀性越好,相较于传统激光熔覆技术的涂层内部枝晶就很稀疏杂乱。超高速激光熔覆技术具有独特的组织分布特点,使得涂层表面的电势分布更均匀,有助于增加耐蚀性<sup>[42]</sup>。

同时发现,涂层的耐蚀性与工艺参数有关,熔覆速度会影响枝晶的尺寸和分布,熔覆速度越高,枝晶越细化,分布越致密均匀,有利于提高涂层的耐蚀性,并且是枝晶与枝晶间易先受到腐蚀<sup>[43]</sup>,因此超高速激光熔覆技术制备的涂层耐蚀性高于传统激光熔覆。随着扫描速度由 0.4 mm/s 增加到 0.6 mm/s,涂层的耐蚀性先增强后减弱,当扫描速度为 0.5 mm/s 时涂层的耐蚀性最好<sup>[44]</sup>。另外发现,对涂层表面进行机械轧制处理是增强耐蚀性的方法,因为处理后的表面晶体发生了变化,由单一的平面晶变为平面晶、柱状晶和等轴晶,枝晶种类丰富,使得组织更加均匀致密<sup>[45]</sup>。

由于超高速激光熔覆技术是新兴的一种表面改性技术,研究尚未成熟,目前对涂层性能的研究还很欠缺,而且能够投入生产的熔覆材料种类也不是很多,所以仍然需要研究人员做大量的试验研究,以期超高速激光熔覆技术全面推广应用奠定基础。

## 5 超高速激光熔覆技术工业应用

超高速激光熔覆技术主要应用于三个领域,即对材料表面改性、对产品表面修复以及快速成型制造。该技术适用于电力、航空航天、兵器、汽车制造业等需要改善表面性能的金属部件。同时可以根据工件的工况要求,在材料表面熔覆各种能满足生产需求的金属或者非金属粉末,制备耐热、耐磨、耐腐蚀、抗氧化、抗疲劳的表面熔覆层<sup>[46]</sup>。近些年,超高速激光熔覆技术已经投放到工业生产中。

### 5.1 煤矿机械

煤矿机械指主要用于煤矿的采掘、运输、支护过程中的矿山机械,工作环境恶劣,粉尘、潮湿以及煤渣对设备造成磨损、腐蚀的危害,缩短了设备的使用寿命,同时需要提高设备的安全性,确保在开采过程中零故障率,因此对机器设备的零部件有特殊的严格要求。齿轮作为采煤机上关键零部件,不仅要求齿轮精度高还需要确保在恶劣条件下能有很高的使用寿命。而在实际工作中,小颗粒的煤屑、矿石会对齿轮造成磨损,久而久之就会失效,对于维修设备期间带来的延长工期、废旧齿轮不能二次利用的损失极大,因此利用超高速激光熔覆技术在齿轮表面制备了耐磨、耐腐蚀涂层并对失效后的齿轮进行了修复,解决了先前对齿轮无法修复或难以修复的难题,不仅降低了成本,还节约了资源<sup>[7]</sup>。

在煤矿开采的过程中,液压支架的支撑同样起到关键的作用,但受工作强度以及工况的影响,在使用过

程中液压支架中的液压立柱会出现偏磨以及局部磨损等问题,使得液压支柱常常达不到预期的耐磨效果、易损坏,导致工业成本提高,造成很多不必要的损失,因此利用超高速激光熔覆技术在液压支柱表面制备硬度高、耐磨的熔覆层是一种有效的解决办法。

### 5.2 三维打印技术

激光熔覆在三维打印技术中得到了广泛的应用,目前超高速激光熔覆三维打印技术<sup>[47]</sup>的应用极大地减少了产品的开发到投入市场的时间,能使产品制造更快速、柔性、个性化、多样化,在民用领域制造高精尖,在军工领域制造高性能特种零件,其中最典型的就是航空发动机叶片采用三维打印技术一次成型。三维打印激光熔覆技术也可以应用在高锰钢辙叉上,辙叉是由一股线路转换到另一股线路的轨线平面交叉设备,其主要承受高载、磨损,利用三维打印激光熔覆技术可以有效地提高其表面的硬度及耐磨性<sup>[48]</sup>。但目前这项技术精度、粗糙度达不到要求,质量差等问题仍待解决。

### 5.3 汽车刹车盘

我国每年汽车刹车盘年产量大约在 20 万吨,而且大部分需要一至两年更换一次,不仅造成了资源的浪费而且需要大量的人力。目前市场上的刹车盘材料基本都是铸铁为主,生产制造过程中常出现气孔等缺陷,并且目前的刹车盘耐磨性差。为了解决这些问题,德国博世公司顺利将超高速激光熔覆技术应用到刹车盘上,在刹车盘表面制备了一种耐磨涂层从而解决了刹车盘表面的精度问题,还可以利用超高速激光熔覆技术对废弃的刹车盘进行修复,不仅延长了刹车盘使用寿命,还节约了成本。

## 6 结束语

超高速激光熔覆技术属于先进制造、增材制造、绿色制造领域,熔覆速率较传统激光熔覆提高几十到上百倍,而且目前可以在零件表面制备大规模的同成分涂层。该技术不仅拥有极高的熔覆效率和粉末利用率,大幅度地降低了成本,而且在加工过程中,不会产生废气、废水等,是一种绿色、环保的新工艺。尽管超高速激光熔覆技术近几年得到了快速发展,并且在某些工业领域得到了实际应用,但该项技术目前正处于发展阶段,根据文中综述的工艺参数对涂层成形的影响,以及对关键性能的总结,并与传统激光熔覆对比发现,还存在一些问题有待解决。需要在以下几个方面进行深入研究及改进:

1) 优化工艺参数、提高成型质量。对于不同的工艺参数制备出的涂层存在差异,而且工艺参数是影响涂层成形质量的关键因素,因此要不断调整工艺参数使超高速激光熔覆技术在各种基体上对于不同的熔覆材料都能适用,可以利用数值模拟进行指导,开展系统模拟研究,揭示激光-粉末最佳耦合状态下金属熔融与

凝固特征。从而进一步提高其在工业应用中的生产效率和精度,为超高速激光熔覆的广泛应用提供理论和实践依据。

熔覆层的成形质量决定了该涂层的好坏,所以应避免出现气孔、开裂等缺陷。气孔的产生是由于在高温能量的作用下发生反应产生的气体来不及溢出,对于基体与熔覆材料是否会发生高温反应以及让产生的气体快速逸出需进一步研究。开裂是由涂层内部的残余应力所导致,在涂层成形过程中,对于内部应力的监测尚不完备,这些方面需要进一步优化。

2) 改进熔覆设备、创新熔覆材料。目前超高速激光熔覆设备只能用于加工一些小尺寸的零部件,而且加工面必须为平面或平整的曲面,这极大地限制了超高速激光熔覆技术的推广。应对设备进行革新,通过一些开发软件控制机器人使其可以按照各种路径加工各种尺寸、各种表面的零部件,在零部件修复再制造领域得到大规模的应用,减少局限性,从而提高表面精度。

对于熔覆材料方面,目前熔覆材料大多数为金属合金,只有少量的无机非金属,熔覆材料的种类过于简单,应开发更多的功能性熔覆材料,解决基体与熔覆材料之间差异性的问题,使得各种熔覆材料适应于各种基体。而且部分合金粉末的流动性很差,需要找到合适的办法提高粉末的流动性。粉末颗粒尺寸也相差很大,为减小颗粒尺寸不同所带来的熔覆效果以及性能上的差异,需要突破应用限制,因此开展熔覆设备与材料的研究具有重大的意义。

3) 增加性能试验,填补研究空白。目前超高速激光熔覆涂层和基体界面结合的研究欠缺以及涂层构建力学研究存在空白,超高速激光熔覆的成形机理造成了界面的微扩散、微冶金特征,为了该项技术的广泛应用,必须保证其稳固的界面结合强度,同时涂层自身的力学性能也是保障其服役可靠性的重要指标。

### 参 考 文 献

- [1] 余小榕. 浅谈表面涂层的制备方法[J]. 科学技术创新, 2019(36): 49-50.  
Yu X R. Preparation of surface coating[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(36): 49-50.
- [2] 王飞, 张超, 周隐玉, 等. 表面涂层技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 21-24, 29.  
Wang F, Zhang C, Zhou Y Y, et al. Research status of surface coating technology[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(10): 21-24, 29.
- [3] 张瑞珠, 李林杰, 唐明奇, 等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(3): 7-11.  
Zhang R Z, Li L J, Tang M Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2017, 38(3): 7-11.
- [4] Quazi M M, Fazal M A, Haseeb A S M A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-

mechanical performance of laser claddings: a review[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 549-564.

- [5] 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 Y, Liu Y, Chen W J, et al. Research status and development direction of extreme high-speed laser material deposition[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3): 1-10, 140.
- [6] Schopphoven T, Gasser A, Backes G. EHLA: extreme high-speed laser material deposition[J]. Laser Technik Journal, 2017, 14(4): 26-29.
- [7] 王先龙, 张维林, 侯军, 等. 超高速激光熔覆在采煤机齿轮上应用研究[J]. 金属加工, 2020(7): 22-23.  
Wang X L, Zhang W L, Hou J, et al. Application research on ultra-high speed laser cladding on shearer gear [J]. MW Metal Forming, 2020(7): 22-23.
- [8] 周远东. 45#钢表面超高速激光熔覆 X-M6V 耐磨涂层组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Zhou Y D. Research on microstructure and properties of X-M6V wear-resistant coating by extreme-high speed laser cladding on the surface of 45# steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [9] Shen B W, Du B R, Wang M H, et al. Comparison on microstructure and properties of stainless steel layer formed by extreme high-speed and conventional laser melting deposition[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 248.
- [10] 吴健. 影响激光熔覆层品质的主要因素分析[J]. 机械制造与自动化, 2004, 33(4): 52-56.  
Wu J. The analysis of main factors affecting the quality of laser cladding layer and the optimizing measures[J]. Jiangsu Machine Building & Automation, 2004, 33(4): 52-56.
- [11] 张庆茂, 王忠东, 刘喜明, 等. 工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响[J]. 焊接学报, 2000, 21(2): 2, 43-46.  
Zhang Q M, Wang Z D, Liu X M, et al. Influence of processing parameters on geometrical features of powder feeding laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(2): 2, 43-46.
- [12] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022501.
- [13] Zhong C L, Biermann T, Gasser A, et al. Experimental study of effects of main process parameters on porosity, track geometry, deposition rate, and powder efficiency for high deposition rate laser metal deposition[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(4): 042003.
- [14] 安代明. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(12): 1, 36-37, 48.  
An D M. Effect of laser cladding parameters on microstructure of cladding coating[J]. Materials Protection, 2012, 45(12): 1, 36-37, 48.
- [15] 李成新, 娄丽艳, 张煜, 等. 低功率超高速激光熔覆 FeCr 合金薄涂层微观结构与表面形貌演化[C]//国际稀土开发与应用研讨会暨中国稀土学会学术年会摘要集.



- 北京: 中国稀土学会, 2019.
- Li C X, Lou L Y, Zhang Y, et al. Microstructure and surface morphology evolution of FeCr alloy thin coatings deposited by high speed laser cladding with low laser power[C]//Abstracts of the International Symposium on rare earth development and application and the annual academic meeting of China Rare Earth Society. Beijing: The Chinese Society of Rare Earths, 2019.
- [16] 刘伟, 伏利, 陈小明, 等. 激光熔覆 FeCr 和 CoCr 合金涂层的组织与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2020, 25(3): 267-272.
- Liu W, Fu L, Chen X M, et al. Microstructure and properties of FeCr and CoCr laser cladding coatings[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2020, 25(3): 267-272.
- [17] 沈浩, 蔡杰, 吕鹏, 等. 激光工艺参数对 NiCoCrAlYSi 熔覆层微观组织及性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1524-1534.
- Shen H, Cai J, Lü P, et al. Effect of laser process parameters on microstructures and properties of NiCoCrAlYSi laser cladding coating[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1524-1534.
- [18] 刘鹏良, 孙文磊, 王恪典, 等. 扫描速率对激光熔覆镍基合金涂层性能的影响[J]. 激光技术, 2018, 42(6): 845-848.
- Liu P L, Sun W L, Wang K D, et al. Effect of scanning speed on the properties of laser cladding nickel-based alloy coating[J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 845-848.
- [19] 周丹, 沈义, 熊大辉, 等. 扫描速度和 Ni 含量对高速激光熔覆层特性的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 579-586.
- Zhou D, Shen Y, Xiong D H, et al. Effects of scanning speed and Ni content on the characteristics of high-speed laser-clad coating[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 579-586.
- [20] 王涛, 乔伟林, 王宁, 等. 扫描速度对激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211403.
- Wang T, Qiao W L, Wang N, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211403.
- [21] 姚宏凯, 吴国庆, 曹阳, 等. 激光扫描速率对 5CrNiMo 熔覆 Ni60 涂层组织与性能的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1005-1010.
- Yao H K, Wu G Q, Cao Y, et al. Effects of scanning speed on microstructure and properties of 5CrNiMo laser cladding Ni-based coating[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1005-1010.
- [22] 童文辉, 刘玉坤, 赵晨熾, 等. 工艺参数对球墨铸铁表面激光熔覆(TiC+B<sub>4</sub>C)/Co 基合金涂层组织和性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2020, 37(5): 46-54.
- Tong W H, Liu Y K, Zhao C X, et al. The effects of laser cladding parameters on the microstructure and properties of cladding layer of(TiC + B<sub>4</sub>C)/Co-based alloy on the surface of ductile iron[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2020, 37(5): 46-54.
- [23] Bourahima F, Helbert A L, Rege M, et al. Laser cladding of Ni based powder on a Cu-Ni-Al glassmold: influence of the process parameters on bonding quality and coating geometry[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1018-1028.
- [24] 澹台凡亮, 田洪芳, 陈峰, 等. 高速激光熔覆在 27SiMn 液压支架立柱上的应用探讨[J]. 新技术新工艺, 2019(3): 52-54.
- Tantai F L, Tian H F, Chen F, et al. Discussion on application of high-speed laser cladding on 27SiMn hydraulic support column[J]. New Technology & New Process, 2019(3): 52-54.
- [25] 王曙光, 石拓, 傅戈雁, 等. 激光内送粉高速熔覆 Cr<sub>50</sub>Ni 合金稀释率及单道形貌分析[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 311-318.
- Wang S G, Shi T, Fu G Y, et al. Analysis of dilution rate and single channel morphology of high-speed cladding Cr<sub>50</sub>Ni alloy by laser inside-beam powder feeding process[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 311-318.
- [26] 赵明娟, 谢池, 赵龙志, 等. 送粉速度对激光熔覆 CNTs-SiC/Ni 基复合涂层组织与性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(14): 94-96, 107.
- Zhao M J, Xie C, Zhao L Z, et al. Study on effects of powder feeding rate on microstructure and properties of laser cladding CNTs-SiC/Ni composite coating[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(14): 94-96, 107.
- [27] 娄丽艳, 李成新, 张煜, 等. 低功率超高速激光熔覆 FeCr 合金薄涂层微观结构与表面形貌演化[J]. 燕山大学学报, 2020, 44(2): 116-124.
- Lou L Y, Li C X, Zhang Y, et al. Microstructure and surface morphology evolution of FeCr alloy thin coatings deposited by ultra-high speed laser cladding with low laser power[J]. Journal of Yanshan University, 2020, 44(2): 116-124.
- [28] 张若宾, 张瑞乾. 激光熔覆铁基合金的单层多道搭接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 158-161.
- Zhang R B, Zhang R Q. Study on single-layer multi-channel overlapping process of laser cladding iron-based alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22): 158-161.
- [29] 赵欣鑫, 肖华强, 游川川, 等. TC4 表面激光熔覆 TiAl 合金涂层的工艺和组织性能[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 697-702.
- Zhao X X, Xiao H Q, You C C, et al. Process and microstructure properties of laser cladding TiAl alloy coating on TC4 surface[J]. Laser Technology, 2021, 45(6): 697-702.
- [30] 王昕阳, 黄燕滨, 刘谦, 等. 激光熔覆工艺参数对高熵合金涂层性能的影响及其优化[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(6): 414-420.
- Wang X Y, Huang Y B, Liu Q, et al. Effects of process parameters on properties of high-entropy alloy coating by laser cladding and their optimization[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(6): 414-420.
- [31] 舒林森, 林冉. 基于均匀设计的铁基合金粉末激光熔覆工艺参数优化[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(4):

- 167-174.  
Shu L S, Lin R. Optimization of laser cladding process parameters of iron-based alloy powder based on uniform design[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(4): 167-174.
- [32] 黄海博, 孙文磊. Ni60 激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响[J]. 激光技术, 2021(6): 788-793.  
Huang H B, Sun W L. Influence of laser cladding process parameters on crack and thickness of Ni60[J]. Laser Technology, 2021(6): 788-793.
- [33] Yuan W Y, Li R F, Chen Z H, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126582.
- [34] 李朝晖, 李美艳, 韩彬, 等. 高压柱塞高速激光熔覆镍基合金涂层组织和耐磨性[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 45-54.  
Li Z H, Li M Y, Han B, et al. High-pressure plunger high-speed laser cladding nickel-based alloy coating structure and wear resistance[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 45-54.
- [35] 董月, 舒林森, 林冉. 激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 合金涂层的组织与摩擦磨损性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914007.  
Dong Y, Shu L S, Lin R. Microstructure and friction and wear properties of laser clad Fe-Cr-Mo-Si alloy coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914007.
- [36] 吴刚刚, 汪选国, 曾鲜, 等. TC4 表面激光熔覆 AlCoCrFeNiTi<sub>0.5</sub> 高熵合金层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 1-5.  
Wu G G, Wang X G, Zeng X, et al. Microstructure and properties of laser clad AlCoCrFeNiTi<sub>0.5</sub> high-entropy alloy coating on TC4 surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(12): 1-5.
- [37] 申泽慧, 孙荣禄. 稀释率对钛合金表面镍基熔覆层质量的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(6): 101-105.  
Shen Z H, Sun R L. Influence of dilution rate on quality of nickel-based cladding on surface of titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(6): 101-105.
- [38] 张洋, 宋博瀚, 薛峰. 稀释率对镍基合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 259-264.  
Zhang Y, Song B H, Xue F. Influence of dilution on microstructure and properties in Ni based laser clad coating[J]. Applied Laser, 2016, 36(3): 259-264.
- [39] 娄丽艳, 张煜, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆低稀释率金属涂层微观组织及性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 149-159.  
Lou L Y, Zhang Y, Xu Q L, et al. Microstructure and properties of metallic coatings with low dilution ratio by high speed laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 149-159.
- [40] Wang H J, Zhang W, Peng Y B, et al. Microstructures and wear resistance of FeCoCrNi-Mo high entropy alloy/diamond composite coatings by high speed laser cladding[J]. Coatings, 2020, 10(3): 300.
- [41] 陈瑶, 汪金龙, 关绍康. 扫描速度和稀土元素对激光熔覆(WC+SiC)/Ni 基复合涂层显微组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 1999, 23(5): 14-17.  
Chen Y, Wang J L, Guan S K. Influence of scanning speed and RE on microstructure and properties of laser cladding (WC+SiC)/Ni based composite coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1999, 23(5): 14-17.
- [42] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002010.  
Li L Q, Shen F M, Zhou Y D, et al. Comparison of microstructure and corrosion resistance of 431 stainless steel coatings prepared by extreme high-speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002010.
- [43] Shen F M, Tao W, Li L Q, et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of coatings by extreme high speed laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2020, 517: 146085.
- [44] 李刚, 贾孟东, 况军, 等. 激光熔覆 Ni60Zr20Nb15Al5 非晶合金涂层组织及性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 9-12.  
Li G, Jia M D, Kuang J, et al. Microstructure and performance of laser clad Ni60Zr20Nb15Al5 amorphous alloy coating[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(1): 9-12.
- [45] Cui Z Q, Qin Z, Dong P, et al. Microstructure and corrosion properties of FeCoNiCrMn high entropy alloy coatings prepared by high speed laser cladding and ultrasonic surface mechanical rolling treatment[J]. Materials Letters, 2020, 259: 126769.
- [46] 王森辉, 杜博睿, 葛学元, 等. 超高速激光熔覆及材料关键技术研究与应用: GB/T 7714—2015[S]. 北京: 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 2017.  
Wang M H, Du B R, Ge X Y, et al. Research and application of high speed laser cladding and key technology of materials: GB/T 7714—2015[S]. Beijing: Beijing National Innovation Institute of Light Weight LTD, 2017.
- [47] Kim I H, Jung Y I, Kim H G, et al. Oxidation-resistant coating of FeCrAl on Zr-alloy tubes using 3D printing direct energy deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 411: 126915.
- [48] 刘恒亮. 高锰钢辙叉 3D 打印激光熔覆强化技术的应用研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 74-77.  
Liu H L. Application research of 3D printing laser cladding strengthening technology for high manganese steel frog[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 74-77.