

小模数齿轮齿面双道激光熔覆工艺

刘千成*, 黄博

湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 采用连续光纤激光器在小模数齿轮齿面制备 1 mm 厚的 Ni60 合金涂层, 针对小模数齿顶较薄以及单道激光在齿轮中部能量过于集中易造成熔覆缺陷的原因进行分析, 提出了采用双道激光在小模数齿面制备镍基合金涂层的方法, 在保证激光总输入能量不变的条件下, 将原有单束激光的能量按一定的能量配比方案分配到两个小光斑上, 依次加工齿轮的齿顶和齿底。结果表明: 采用双道 1 mm 光斑按 4:6 能量配比方案不仅减小了齿顶的烧蚀, 还解决了齿轮中部能量过于集中的问题, 涂层的稀释率显著降低, 组织中含 Fe、Ni 的晶状奥氏体析出较少, 富含 Cr 的粒状渗碳体析出较多, 熔覆层组织整体的耐磨性和强度都优于单道激光熔覆层。双道激光熔覆工艺可显著提升小模数齿轮齿面镍基合金涂层的质量。

关键词 激光技术; 双道激光熔覆; 小模数齿轮; 稀释率; 微观组织; 工艺参数

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002009

Double-Pass Laser Cladding Process for Small-Modulus Gear-Tooth Surface

Liu Gancheng*, Huang Bo

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract Laser cladding experiments on 1-mm-thick Ni60 alloy coatings on a small-modulus gear-tooth surface are conducted using a continuous fiber laser. The analysis on the reason for causing cladding defects by the thin small-modulus tooth top and single-pass laser concentrated in the middle of the gear is performed. A double-pass laser processing method is proposed for the fabrication of nicked-based alloy coatings on the small-modulus gear-tooth surface. Under the condition of constant laser energy input, the energy of the original single-pass laser is distributed to two small spots according to a certain energy ratio scheme. The gear's tooth top and bottom are then sequentially processed. Results show that by using two 1-mm spots with an energy ratio of 4:6, the proposed method not only reduces the ablation of the gear's tooth top, but also solves the problem of excessive energy being concentrated in the middle of the gear. Additionally, the coatings' dilution rate significantly reduces. Low precipitation of crystalline austenite containing Fe and Ni is observed in the microstructure in contrast to the high precipitation of granular cementite rich in Cr. The wear resistance and strength of the cladding layer are improved compared to those of single-pass laser cladding. Overall, the double-pass laser cladding process significantly promotes the quality of the nickel-based alloy coatings prepared on the small-modulus gear-tooth surface.

Key words laser technique; double-pass laser cladding; small-modulus gear; dilution rate; microstructure; process parameters

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

小模数齿轮因功率范围广、传动效率高、传动比正确而在精密器械中应用广泛, 小模数齿轮的模数较小, 因此轮齿的宽度较窄, 齿高较低; 此外, 齿轮材料一般为 45 钢, 齿轮工作面的硬度较小, 而由于齿

轮在工作中是高副接触, 高应力接触会导致齿面产生磨损、点蚀等损伤, 而齿面磨损会影响齿轮的传动平稳性, 严重时会导致齿轮失效。对失效齿轮进行修复再制造是降低企业成本和提高产品使用寿命的有效途径。对小模数齿轮齿面采用激光修复的重要技术指标包括机械加工余量不大于 0.28 mm, 熔深

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(51405141)、湖北省自然科学基金(2014CFB596)

* E-mail: liugcmail@126.com

在 0.3~0.6 mm 之间,涂层表面均匀连续且具有金属光泽,涂层硬度达到 50 HRC^[1]。目前,对于小齿轮齿面的激光熔覆而言,主要存在的技术难题如下:1)小模数齿轮的齿顶部位很薄,在单道激光制备镍基合金熔覆涂层过程中非常容易对齿顶部位造成烧蚀,严重时将会导致齿轮表面发生形变,对齿轮后期的齿形修复造成很大影响;2)激光光源为高斯热源,光束能量分布不均且光源中间能量较高,容易造成齿面中部基材熔深较大,从而导致涂层的稀释率较高,进而影响涂层的组织和性能。

本文以在 1 模数的直齿齿轮齿面上制备出的性能优良的镍基合金熔覆涂层作为研究对象,针对单道激光熔覆过程中易出现的熔覆缺陷,提出了双道激光熔覆的实验方法,并对其进行优化研究。双道激光加工的本质是对原本不均匀的高斯光束的能量进行优化处理,将原本一个大的高斯热源的等能量到两个小高斯热源上,因此双道加工中每一道激光束的峰值能量都要低于原有的单光束峰值能量,进而缓解单道激光所造成的齿面烧蚀和热变形。通过对比优化前的单道齿面加工和优化后双道齿面加工的基材的熔深、涂层稀释率、涂层的显微组织形貌以及熔覆层横截面的显微硬度,验证光束能量分布状态对镍基合金熔覆涂层加工效果的影响,进而确定小模数齿轮齿面双道激光依次加工齿顶和齿底部位的镍基合金涂层加工工艺方法。

2 实验设备与方法

2.1 实验设备

本实验选用的加工设备为三轴联动数控激光加工操作系统,激光器为德国的 IPG 准连续光纤激光器,型号为 YLS-250,最大输出功率 $P = 250 \text{ W}$,波长为 1064 nm,如图 1 所示。所用基材为 1 模数 45 钢直齿齿轮;合金粉末为自熔性优良的 Ni60A 合金粉末,其熔化温度为 1027 °C,抗氧化温度为 760 °C,属于低熔点共晶合金,广泛应用于表面熔覆、合金喷焊等加工中,其抗氧化能力、耐磨损性和耐腐蚀性较强^[2]。图 2 为自熔性合金粉末的照片,放大倍数为 200。从图 2 中可以看出,自熔性合金粉末颗粒呈圆球状,大小不一,大部分颗粒直径小于 50 μm。

2.2 实验方法

采用冷预置涂层的方式预制备熔覆涂层,所选取的黏结剂为聚乙烯醇水溶液,将试样放到真空干燥箱中加热干燥,在 120 °C 下烘干 6 h,以彻底去除预置涂层中的水分。采用预置粉末的工艺具有方

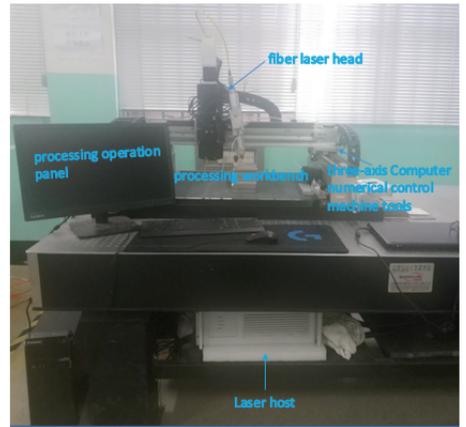


图 1 三轴联动数控激光加工操作系统
Fig. 1 Three-axis linkage numerical control laser processing system

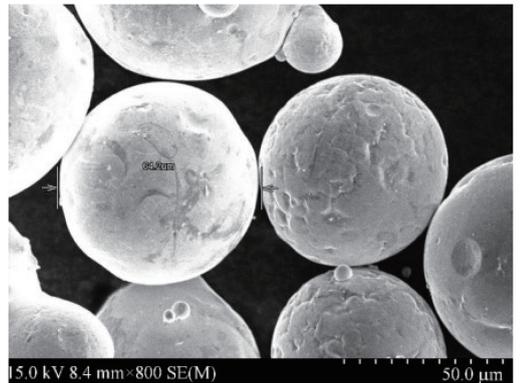


图 2 Ni60 自熔性合金粉末的扫描电子显微镜图
Fig. 2 Scanning electron microscope graph of Ni60 self-fluxing alloy powder

便、简单、操作性强、成本低、无污染、无噪声等优点,预置涂层厚度为 1 mm。

激光熔覆是一个较复杂的工艺过程,影响熔覆层质量的主要因素是材料参数和工艺参数。工艺参数主要有激光功率 P 、激光扫描速度 V_s 、激光光斑直径 D 等。由于这几个工艺参数对激光熔覆层质量的影响是相互关联的,不少研究者提出了一些与这几个工艺参数相关的综合物理量,其中广为引用的有比能量、质能量以及线能量。比能量主要反映的是熔覆过程中熔覆层单位面积所吸收能量的大小。本文使用激光比能量即激光功率密度来综合衡量激光功率、光斑直径以及扫描速度对熔覆涂层成形质量的影响^[3],其表达式为

$$P_w = Pt/S, \quad (1)$$

式中: P_w 为激光功率密度($\text{kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$); P 为激光功率(W); t 为激光束在一个光斑直径范围内的作用时间(s); S 为光斑面积(cm^2)。

由于实验过程中采用的光斑近似圆形,所以有

$$t = D/v_s, \quad (2)$$

$$S = \pi \cdot (D/2)^2, \quad (3)$$

式中： D 为光斑直径 (mm)； v_s 为激光的扫描速度 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)。进而，激光功率密度的表达式可以写为

$$P_w = 4P/(\pi \cdot D \cdot v_s)。 \quad (4)$$

通过控制功率密度这一单一变量的方法在较低功率下得到理想的镍基合金熔覆涂层，实验过程中在保持激光功率 (250 W) 和光斑直径 (1 mm) 不变的前提下，改变激光器的扫描速度，以此来调节每次单道实验过程中的激光功率密度，按照这个思路建立如表 1 所示的激光熔覆加工参数表。

表 1 单道激光熔覆齿轮齿面的加工参数

Table 1 Processing parameters of single-pass laser cladding coatings on gear-tooth surface

Number	Scanning speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Power density / ($\text{kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$)
1	0.75	21.2
2	0.70	22.7
3	0.65	24.4
4	0.60	26.5
5	0.55	28.9
6	0.50	31.8
7	0.45	35.3
8	0.40	39.7

2.3 齿面单道激光功率密度的确定

为了更加直观地观察激光功率密度对熔覆层宏观形貌以及涂层稀释率的影响，在光学显微镜下测出每组样品的截面尺寸，并计算出对应的涂层稀释率，如表 2 所示，然后绘制如图 3 所示的涂层稀释率变化曲线图。

表 2 不同功率密度下齿面镍基合金涂层的截面尺寸及稀释率

Table 2 Cross-sectional dimensions and dilution rates of nickel-based alloy coatings on tooth surface at different power densities

Number	Power density / ($\text{kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Cladding maximum height / μm	Substrate penetration depth / μm	Coating dilution rate /%
1	21.2	947.12	0	0
2	22.7	989.20	0	0
3	24.4	1109.84	257.03	23.16
4	26.5	1324.35	337.53	25.48
5	28.9	1537.51	447.65	29.12
6	31.8	1627.21	562.04	34.54
7	35.3	1725.61	648.37	37.57
8	39.7	1749.89	698.21	39.90

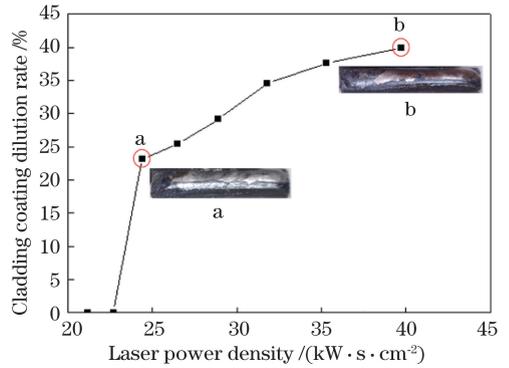


图 3 不同激光功率密度下齿面单道激光熔覆涂层的稀释率
Fig. 3 Dilution rates of single-pass laser cladding coatings on gear-tooth surface at different laser power densities

结合熔覆层的宏观形貌可以看出，当激光功率密度达到 $39.7 \text{ kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时，基材出现了明显的过度烧蚀，此时的涂层稀释率为 40%，说明了齿面镍基合金熔覆涂层的稀释率应该控制在一个合理的范围内。在保证镍基合金与基材形成良好冶金结合的前提下，同时考虑对基材的损伤尽可能的小，初步确定较为适宜的齿面加工激光功率密度范围为 $24.4 \sim 35.3 \text{ kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

为了研究不同能量密度下制得的熔覆层组织与基材的结合程度，利用扫描电子显微镜观察 4 组不同功率密度下制得的熔覆层与基材融合区域的冶金结合带附近的组织是否存在熔覆缺陷，并使用能谱仪 (EDS) 分析组织内部的元素分布情况，进一步研究功率密度对涂层内部元素含量变化的影响。不同功率密度下制备的熔覆层的扫描电镜轮廓图如图 4 所示。

从图 4(a)、(b) 中可以看出，在低激光功率密度下形成的熔覆涂层在结合部位存在一些细小的孔隙，说明熔覆层与基材之间的结合效果较差，在受到外力冲击时容易在该处产生微裂纹，进而导致涂层开裂。在图 4(c)、(d) 中可以看出：当激光功率密度大于 $31.8 \text{ kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时，熔覆层内部的温度梯度越高，熔覆层融化后再结晶的时间就越长，析出晶粒的数量及大小也就越多，并且涂层冶金结合带区域与基材之间的孔隙基本消失，熔覆层与基材之间的结合更加牢固，过渡更加自然；此外，在熔覆层底部结合区也未发现气孔、夹渣、裂纹等熔覆缺陷。总体上看，在 $31.8 \text{ kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光功率密度下，熔覆层的成形效果较好，其与基材的结合效果也较好。

3 齿面双道激光熔覆涂层的制备及分析

3.1 齿面单道激光熔覆涂层的优化思路

上文得到了小模数齿轮表面制备镍基合金涂层

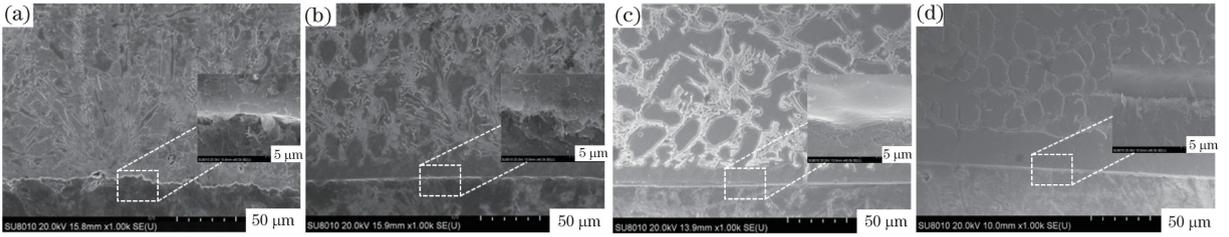


图 4 不同功率密度下制备的熔覆层底部的显微形貌。

(a) $24.4 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) $26.5 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (d) $35.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 4 Microstructures of bottom of cladding layers at different power densities. (a) $24.4 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) $26.5 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (d) $35.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$

较为适宜的激光功率密度为 $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，熔覆层的晶粒组织主要为 Ni、Fe 的化合物参与形成的奥氏体组织，而晶间组织为以 Cr、C 和 B 元素参与形成的粒状渗碳体组织。但还是可以明显地看到，由于所使用的高斯激光光源能量分布不均，能量过于集中导致齿轮齿面熔深过大，一方面导致对基材的热影响较大，如图 5(a) 所示，降低了基材的塑性和韧性；另一方面导致涂层稀释率过大，影响了合金涂层原有物理化学性能的稳定。通过观

察图 5(b) 所示的显微组织可以看出涂层中形成的奥氏体组织较为粗大，而奥氏体组织的塑性好，强度较低，这对于镍基合金涂层的硬度和耐磨性是不利的；此外，由于小模数齿轮齿顶部位较薄，而高斯光源能量不均，容易导致加工过程对齿顶部位产生过度烧蚀，如图 5(c) 所示，极大地增加了后期齿形修复的难度。因此，迫切需要一种针对小模数齿轮齿面单道激光熔覆制备镍基合金涂层的改进方法，以改善加工效果。

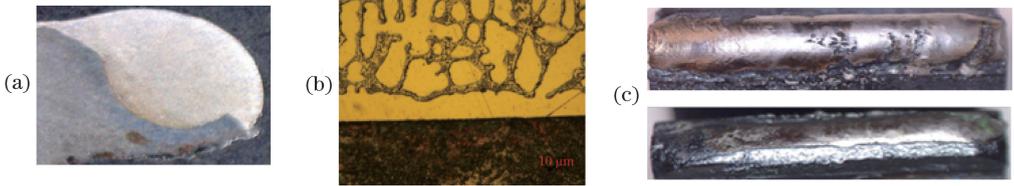


图 5 激光功率密度为 $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时制备的单道激光熔覆涂层。

(a) 熔覆层的横截面形貌；(b) 熔覆层的显微组织；(c) 熔覆层的宏观形貌

Fig. 5 Single-pass laser cladding coatings obtained with laser power density of $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$.

(a) Cross-sectional morphology of coating; (b) microstructure of coating; (c) macroscopic morphologies of coatings

针对上述问题，可以设想在保证激光总输入能量不变的条件下，将原有单束激光的能量按一定的

能量配比方案分配到两个小光斑上，依次加工齿轮的齿顶部位和齿底部位。图 6 中 $E_1 \sim E_3$ 表示每束

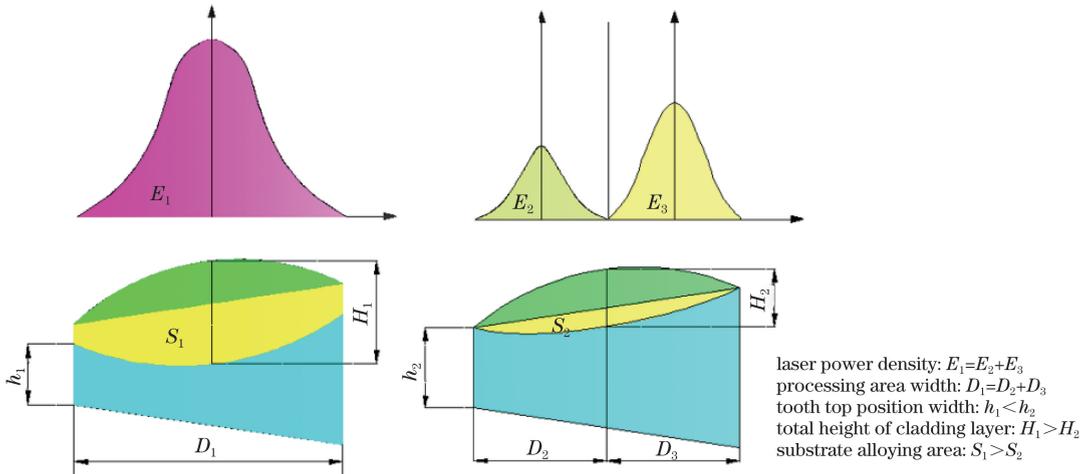


图 6 双道光束加工示意图及其预期目标改善效果

Fig. 6 Schematic of double-pass laser processing and its expected effect of target improvement

激光的功率密度, $D_1 \sim D_3$ 表示每束激光的光斑直径, h_1, h_2 表示齿顶基材的宽度, H_1, H_2 表示熔覆层的最大深度, S_1, S_2 表示齿面合金化区域的面积。上述设想在基材与合金涂层形成较好冶金结合条件下:一方面可以保证齿顶部位输入的能量不会过大,进而减小激光对齿顶部位基材的烧蚀;另一方面可使齿轮中部的激光输入能量不会过于集中,这样不仅可以有效减小基材表面的熔深、表面合金化区域的面积和合金涂层的稀释率,保障合金涂层原有物

理化学性能的稳定,还可以有效加快熔池凝固的时间,对熔覆层组织的细化有一定的促进作用。

3.2 双道 1 mm 光斑下熔覆涂层的制备及分析

由于 1 模数的直齿齿轮齿面的宽度为 2.15 mm,这里首先尝试使用两个直径为 1 mm 的光斑(以下简称“1 mm 光斑”)依次加工齿轮的齿顶部分和齿底部分,通过改善激光器输出的高斯光引起的能量分布不均的现象,提升小模数齿轮齿面熔覆镍基合金涂层的加工效果,如图 7 所示。

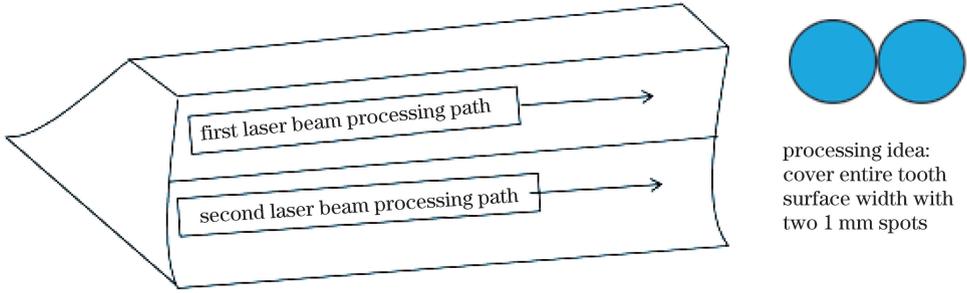


图 7 双道 1 mm 激光光斑加工示意图

Fig. 7 Schematic of laser processing by using two 1-mm spots

在齿面单道激光熔覆实验中确定了齿面镍基合金熔覆涂层最适宜的能量密度为 $31.8 \text{ kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$, 为了进一步降低单光束加工过程中齿顶部位的烧蚀情况以及基材的熔深,并保证齿底部位的涂层与基体实现较好的结合,设计出两束激光的能量配比方案以及根据功率密度表达式反求出的每道激光的扫

描速度,如表 3 所示。其中: P_1 和 P_2 分别为双道激光的功率密度; u_1 为第一道激光加工的扫描速度, u_2 为第二道激光加工的扫描速度,分别加工齿轮的齿顶部位和齿跟部位。

表 4 是在不同功率密度配比下利用两个 1 mm 光斑进行双道激光熔覆的参数表。

表 3 1 mm 光斑下双道激光熔覆的功率密度配比以及每道激光的扫描速度

Table 3 Power-density ratio of double-pass laser cladding with two 1-mm spots and scanning speed of each laser

Number	Double beam energy ratio	Power density per beam / ($\text{kW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Spot diameter /mm	Scanning speed per beam / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2:8	$P_1 = 6.36, P_2 = 25.44$	1	$u_1 = 5, u_2 = 1.25$
2	3:7	$P_1 = 9.54, P_2 = 22.26$	1	$u_1 = 3.33, u_2 = 1.43$
3	4:6	$P_1 = 12.72, P_2 = 19.08$	1	$u_1 = 2.5, u_2 = 1.67$
4	5:5	$P_1 = 15.9, P_2 = 15.9$	1	$u_1 = 2, u_2 = 2$

表 4 1 mm 光斑下双道激光熔覆实验参数表

Table 4 Experimental parameters of double-pass laser cladding with two 1-mm spots

Number	Laser power /W	Scanning speed per beam / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Powder thickness /mm	Double beam energy ratio
1	250	$u_1 = 5, u_2 = 1.25$	1	2:8
2	250	$u_1 = 3.33, u_2 = 1.43$	1	3:7
3	250	$u_1 = 2.5, u_2 = 1.67$	1	4:6
4	250	$u_1 = 2, u_2 = 2$	1	5:5

双道 1 mm 光斑在不同功率密度配比下的镍基合金熔覆涂层的表面形貌都较好,熔覆层表面均匀连续,没有明显的气孔、夹渣以及裂纹等缺陷;从截面形貌可以看出:不同功率密度配比下的

合金涂层与基材的截面形貌存在一定的差异性。为了方便统计出不同加工参数下涂层截面形貌的区别,将涂层截面形貌的参数进行对比,如表 5 所示。

表 5 双道 1 mm 光斑加工下熔覆层的截面形貌参数

Table 5 Cross-sectional morphology parameters of cladding layers under laser processing by using two 1-mm spots

Number	Double beam energy ratio	Gear tip height / μm	Cladding maximum height / μm	Dilution rate of coating /%	Bottom edge width of alloyed area / μm
1	2:8	517.37	1208.02	29.89	1564.62
2	3:7	485.64	1068.11	28.93	1779.50
3	4:6	460.61	961.72	27.28	1825.39
4	5:5	426.44	1127.61	29.32	1912.43

根据表 5 显示的不同加工工艺下镍基合金熔覆涂层的形貌参数区别可以归纳出以下几点:

1) 随着第一道光束的功率密度增大,激光对齿轮齿顶部位的烧蚀情况加重,虽然基材表面合金化区域的面积增大,但也会对后期齿轮齿形的修复精度造成一定影响。

2) 熔覆层总高度和稀释率的大小说明了在熔覆过程中有多少基材进入到了合金化区域,稀释率的大小不仅会影响合金涂层与基材的结合效果,还会对熔覆层原有的性能产生影响。在上文已经得出镍基合金熔覆涂层的涂层稀释率应大于 25.2%,这 4 组样本均满足要求。

3) 合金化区域底边边线的宽度说明了基材表面有效合金强化区域面积的大小,该值越大,说明齿

面合金化区域越大,对加工质量的提升越明显。

综上所述,双道激光加工工艺可明显改善单道齿面镍基合金熔覆涂层的表面质量以及基材的烧蚀、热影响等现象,当选择双道 1 mm 光斑进行齿面镍基合金加工时,齿顶部位和齿底部位双道激光的功率密度比选择 4:6 时较为适宜。

3.3 双道 1.5 mm 光斑下熔覆涂层的制备及分析

除了两个小光斑刚好覆盖待加工齿面的面积外,还可以考虑两个中等大小的光斑在一定搭接率下覆盖待加工齿面的面积,如图 8 所示。与两个小光斑的参数选择类似,在双道搭接时由于存在 1 到 2 次扫描区,即重熔区,因此搭接率的选择和优化也是影响搭接熔覆成形件宏观、微观质量的关键因素之一^[4]。

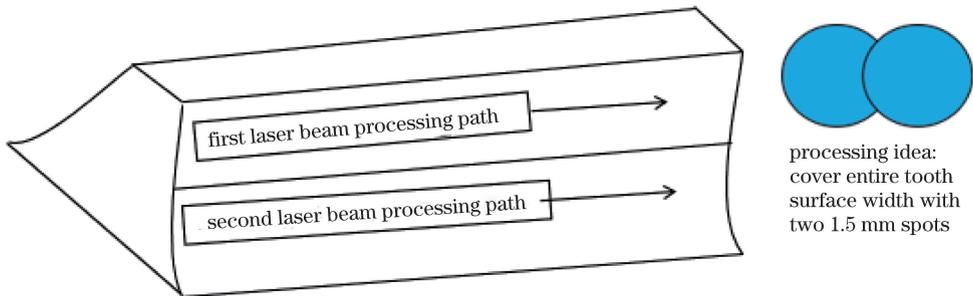


图 8 双道 1.5mm 激光光斑加工示意图

Fig. 8 Schematic of laser processing by using two 1.5-mm spots

与双道 1 mm 激光光斑加工过程类似,在保证总能量密度为 $31.8 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ 不变的情况下,为了进一步降低单光束加工过程中齿顶部位的烧蚀情况以及基材的熔深,并保证齿底部的涂层与基材有较好的结合,设计出两束激光的能量配比方案,并根据功率密度表达式反求出每道激光的扫描速度,如表 6 所示。

双道 1.5 mm 光斑加工出的镍基合金熔覆涂层的截面形貌在不同功率密度配比下有一定的变化趋势,通过观察发现熔覆层截面形貌主要呈现两种状态,如图 9 所示。

在显微镜下观察熔覆层显微组织时可以发现:当双道光束的功率密度相差较大时,齿顶部位的组

织与齿底部位的组织明显不同,由于激光功率密度较低,齿顶部位组织内部的温度梯度较小,涂层组织由针状、棒条状、块状相互交错分布,涂层组织的再结晶现象不明显,而且熔覆层与基材之间的亮白色冶金结合带较窄,使得两者之间的结合效果较差,没有起到对整个轮齿表面强化的目的;当逐渐增大齿顶部位的第一束激光,并减小齿底部位第二束激光输入时,齿顶部位输入的能量大于其传递散失的热量,使得齿顶部位的基材逐渐受热熔化进入熔池中,与镍基合金发生冶金结合,所以熔覆层截面过渡圆弧的弧长明显变长,基材表面的熔深明显变大,齿轮表面有效合金化区域的面积明显变大,有效提升了齿面激光熔覆的工艺效果,如图 10 所示。

表 6 1.5 mm 光斑下双道激光熔覆实验参数表

Table 6 Experimental parameters of double-pass laser cladding with 1.5-mm spots

Number	Laser power /W	Scanning speed per beam /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Powder thickness /mm	Double beam energy ratio	Spot overlap rate /%
1	250	$u_1=3.34, u_2=0.83$	1	2:8	30
2	250	$u_1=2.22, u_2=0.95$	1	3:7	30
3	250	$u_1=1.67, u_2=1.12$	1	3:7	30
4	250	$u_1=1.33, u_2=1.33$	1	5:5	30
5	250	$u_1=3.34, u_2=0.83$	1	2:8	40
6	250	$u_1=2.22, u_2=0.95$	1	3:7	40
7	250	$u_1=1.67, u_2=1.12$	1	3:7	40
8	250	$u_1=1.33, u_2=1.33$	1	5:5	40
9	250	$u_1=3.34, u_2=0.83$	1	2:8	50
10	250	$u_1=2.22, u_2=0.95$	1	3:7	50
11	250	$u_1=1.67, u_2=1.12$	1	3:7	50
12	250	$u_1=1.33, u_2=1.33$	1	5:5	50

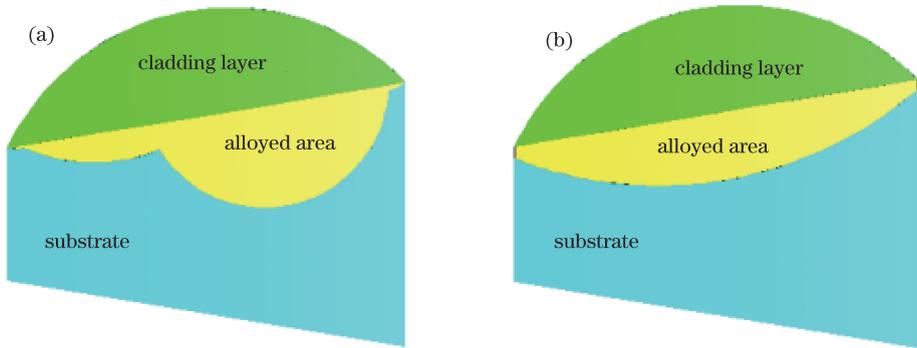


图 9 不同加工工艺下的熔覆层截面形貌。(a)双道光斑功率密度相差较大;(b)双道光斑功率密度相差较小

Fig. 9 Cross-sectional morphologies of cladding layers under different processing techniques. (a) Large difference between power densities of double-pass laser spots; (b) small difference between power densities of double-pass laser spots

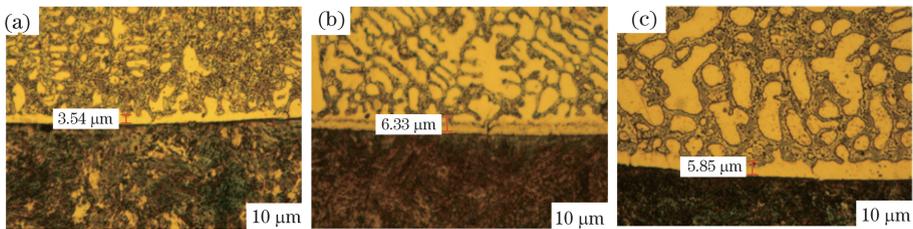


图 10 不同工艺参数下得到的合金涂层的截面组织。(a)齿顶输入的激光功率密度大于 $12.72 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b)齿底输入的激光功率密度大于 $19.08 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c)齿顶和齿底输入的激光功率密度为 $15.9 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 10 Cross-sectional microstructures of alloy coatings under different process parameters. (a) Input laser power density at tooth top of gear is greater than $12.72 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) input laser power density at tooth bottom of gear is greater than $19.08 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) input laser power densities at tooth top and bottom of gear are both $15.9 \text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$

此外双道光斑功率密度差异应该满足既不对齿顶产生过度烧蚀和对基材的热影响较小,又能保证在齿底部位形成牢固的冶金结合,控制合金涂层稀释率在合理的范围内。为了确定最适宜的激光能量分配密度以及光斑搭接率,这里将剩下的 6 组熔覆层截面形貌的参数列于表 7。

综合考虑以上因素,选择双道 1.5 mm 光斑进行齿面镍基合金加工时,齿顶部位和齿底部位双道激光的功率密度比为 4:6,且搭接率为 40%时,熔覆层的表面质量较好,比单道加工对基材的烧蚀和热影响都要低一些,宏观上看也没有出现气孔、夹渣以及裂纹等宏观缺陷。

表 7 双道 1.5 mm 光斑加工下的熔覆层截面形貌参数

Table 7 Cross-sectional morphology parameters of cladding layers under laser processing by using two 1.5-mm spots

Number	Double beam power density ratio and spot overlap ratio	Gear tip height / μm	Cladding maximum height / μm	Dilution rate of coating /%	Bottom edge width of alloyed area / μm
1	Energy ratio of 5:5, overlap of 30%	403.29	1408.31	32.77	1917.12
2	Energy ratio of 4:6, overlap of 40%	427.53	1366.44	31.48	1878.77
3	Energy ratio of 5:5, overlap of 40%	414.37	1402.73	32.45	1815.64
4	Energy ratio of 3:7, overlap of 50%	436.57	1446.28	32.51	1633.46
5	Energy ratio of 4:6, overlap of 50%	428.25	1493.69	32.87	1677.82
6	Energy ratio of 5:5, overlap of 50%	408.46	1520.81	33.59	1714.03

4 单道与双道激光工艺下熔覆层质量的对比分析

4.1 齿顶烧蚀程度和涂层稀释率的对比分析

图 11(a)为单道激光加工的涂层,其截面最大熔深为 1.6 mm;图 11(b)为双道 1.5 mm 光斑加工的涂层截面,熔覆层的最大高度为 1.3 mm;图 11(c)为双道 1 mm 光斑加工的涂层截面,熔覆层的最大高度为 0.9 mm。

由图 11 可以看出:采用双道激光加工镍基合金熔覆涂层一方面可以有效降低激光对齿轮齿顶部位

基材的烧蚀以及对基材的热影响(采用双道激光加工工艺后,基材齿顶部位的宽度由 340.84 μm 分别增加到 460.61 μm 和 427.53 μm),另一方面可以降低基材的熔化量,有效控制涂层的稀释率(采用双道激光加工工艺后,齿面镍基合金涂层的稀释率由 34.54% 分别降低到 27.28% 和 31.48%),说明双道激光加工对涂层原有性能的稳定具有一定的促进作用。

在高倍显微镜下观察单道熔覆层和不同加工工艺下的双道熔覆层的截面组织可以发现组织的形态分布具有明显的差异性,如图 12 所示。

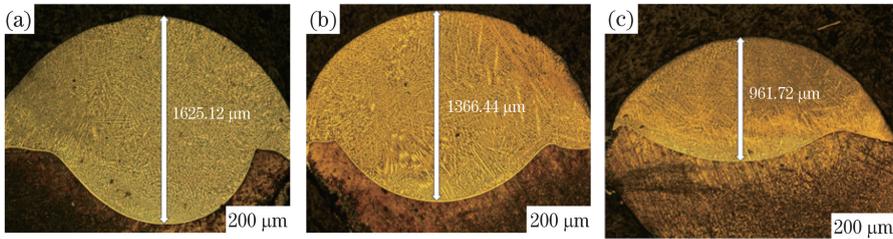


图 11 不同加工工艺下熔覆层截面的熔深的对比。(a)单道激光工艺参数: $P=250\text{ W}, u=0.5\text{ mm/s}, D=2\text{ mm}$; (b)双道 1.5 mm 激光工艺参数: $P=250\text{ W}, u_1=1.67\text{ mm/s}, u_2=1.12\text{ mm/s}, D=1.5\text{ mm}, \eta=40\%$; (c)双道 1 mm 激光工艺参数: $P=250\text{ W}, u_1=2.5\text{ mm/s}, u_2=1.67\text{ mm/s}, D=1\text{ mm}$

Fig. 11 Comparison of penetration depths of cladding layers under different processing techniques. (a) Single-pass laser process parameters: $P=250\text{ W}, u=0.5\text{ mm/s}, D=2\text{ mm}$; (b) double-pass 1.5-mm laser process parameters: $P=250\text{ W}, u_1=1.67\text{ mm/s}, u_2=1.12\text{ mm/s}, D=1.5\text{ mm}, \eta=40\%$; (c) double-pass 1 mm-laser process parameters: $P=250\text{ W}, u_1=2.5\text{ mm/s}, u_2=1.67\text{ mm/s}, D=1\text{ mm}$

根据 Hoadley 提出的以激光束为热源的热输入模型^[5](图 13)可以得出关系式:

$$R = V_s \cos \theta, \quad (5)$$

式中: R 为界面前沿界面运动的法线方向的推进速度,即凝固速度; θ 为凝固速度方向与激光束扫描速度方向的夹角。

熔覆层合金的结晶形态受熔池内液相成分和形状控制因子的影响^[6]。形状控制因子是结晶方向上的温度梯度 G 与凝固速度 R 之比,即 G/R 。在成分相对稳定的情况下, G/R 决定着凝固组织的生长形态。由图 14 可以看出,液态熔池内的组织随着凝

固条件的变化有着巨大的差别,当采用双道激光熔覆时,每道激光的扫描速度都比原有单道激光熔覆快,故熔覆层的凝固速度 R 更快,使得熔覆层内部的液态熔池持续的时间很短,熔覆层与基材之间的温度梯度 G 较小,导致得到的 G/R 的值很小,由生长曲线可以看出此时的组织生长结构为等轴的树枝晶枝、晶胞状结构,因此涂层上方的晶粒还在细小的晶枝晶胞状态下就冷却凝固;而涂层下方靠近结合线区域的组织由于内部温度梯度较大, G/R 的值较大,组织生长速度慢,有一部分柱状晶组织出现并沿垂直方向生长,由于激光的激热激冷效应,其主要热

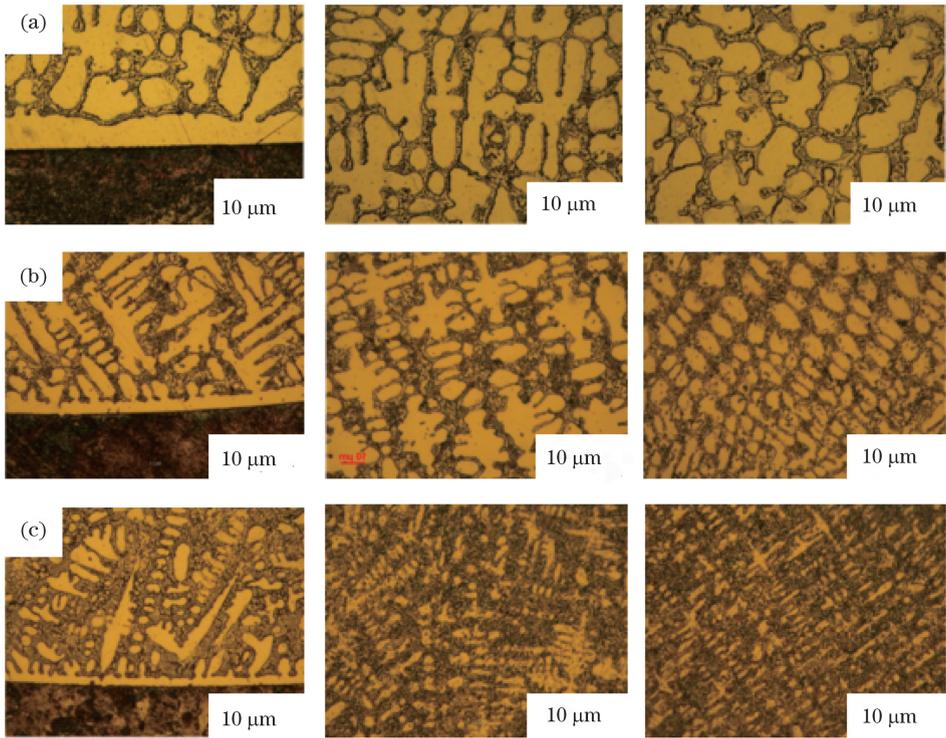


图 12 不同加工工艺下制备的镍基合金熔覆涂层的截面形貌。(a)单道激光加工;(b)双道激光搭接加工;(c)双道激光独立加工
 Fig. 12 Cross-sectional morphologies of nickel-based alloy cladding coatings under different processing techniques.
 (a) Single-pass laser processing; (b) double-pass laser lap processing; (c) double-pass laser independent processing

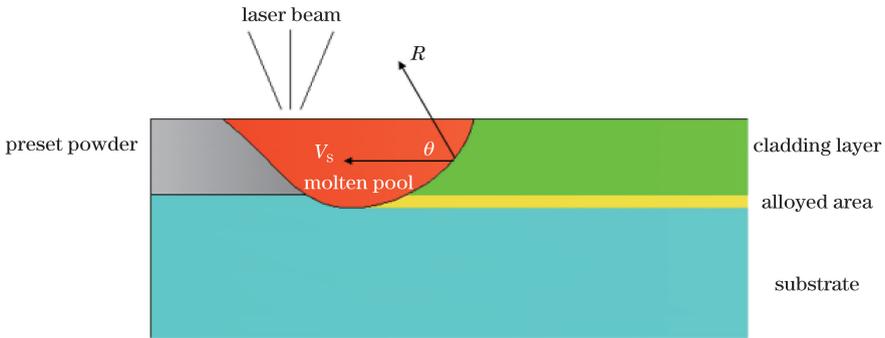


图 13 Hoadley 热输入模型^[5]
 Fig. 13 Hoadley heat input model^[5]

传递方向由熔覆层向基材内部进行,这促进了界面平面晶沿涂层方向的快速生长,以及基体元素向涂层的远距离扩散,使界面涂层一边由较宽的平面晶组织向外延伸形成柱状晶组织的特征更加明显^[7]。

将不同加工工艺下得到的 XRD 图谱进行对比分析。图 15(a)是在双道 1 mm 光斑下加工出的 Ni60 涂层截面的 XRD 图谱,可以看出 Ni60 涂层的主要物相为 γ -Ni、 γ -(Fe, Ni)、 $\text{Fe}_{3.5}\text{B}$ 、 $\text{Ni}_{4.6}\text{Si}_2\text{B}$ 、CrB 等,此时涂层的稀释率较低,涂层中少部分的 Cr 元素和 B 元素相互结合形成 CrB 等硬质化合物相并弥散在组织内部,这些相的存在对提升涂层的硬度和耐磨性起到了积极作用;图 15(b)是在双

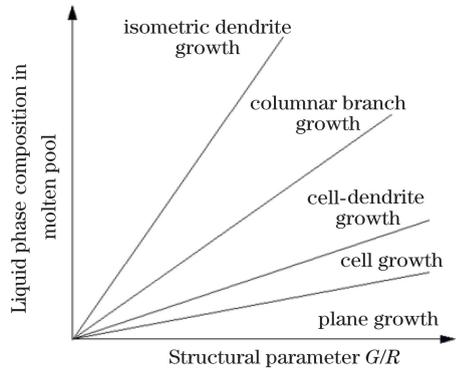


图 14 熔池内液相成分变化曲线
 Fig. 14 Variation curves of liquid phase compositions in molten pool

道 1.5 mm 光斑下加工出的 Ni60 涂层截面的 XRD 图谱,可以看出 Ni60 涂层的主要物相为 γ -Ni、 γ -(Fe, Ni)、 Fe_3B 、 $\text{Ni}_{4.6}\text{Si}_2\text{B}$ 、 $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ 等,由于此时涂层的稀释率增大,涂层内部的 Fe 元素含量

增加,因此形成的含有 Fe 元素的化合物相的比例也相应增多,表现为组织中富含 Fe 元素的柱状晶枝的体积和数量增加,导致涂层的硬度和耐磨性略有降低。

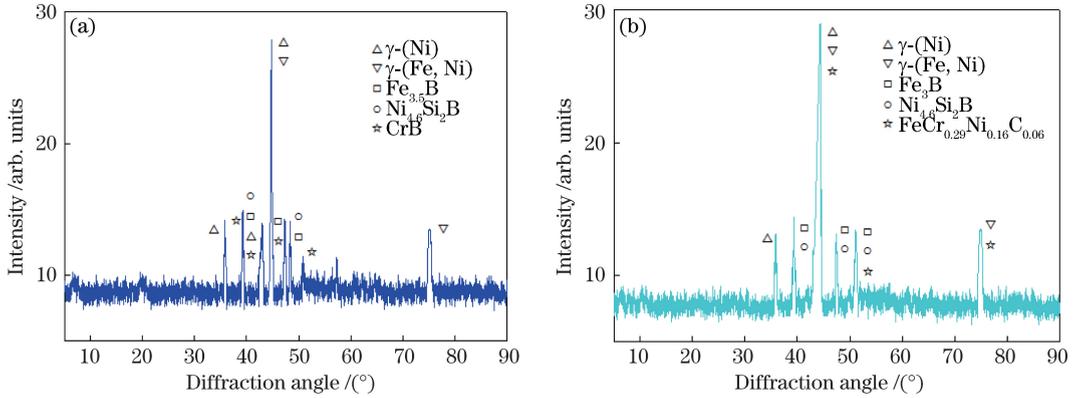


图 15 不同加工工艺下制备的镍基合金熔覆涂层的 XRD 图谱。(a)双道 1 mm 光斑;(b)双道 1.5 mm 光斑

Fig. 15 XRD spectra of nickel-based alloy cladding coatings under different processing techniques.

(a) Double-pass 1-mm laser spots; (b) double-pass 1.5-mm laser spots

4.2 熔覆层的显微硬度对比

从图 16 中可以看出,与单道激光熔覆相比,双道激光熔覆制备的熔覆层的显微硬度要高一些。由熔覆层组织在快速凝固过程中的生长机制以及熔覆层的 XRD 物相可以得出,双道激光熔覆工艺下熔覆层的组织中含 Fe、Ni 的晶状奥氏体析出相比较少,富含 Cr 的粒状渗碳体组织较多,并且弥散在组织内部,弥散强化、固溶强化及细晶强化作用使得熔覆层的显微硬度显著增大^[8-9],因此其平均显微硬度明显高于单道激光熔覆制备的熔覆层。双道 1 mm 光斑下制备的熔覆层的显微硬度更高,其主要原因是每道激光的扫描速度都很快,一方面加快了组织的凝固速度,富 Fe 颗粒粒径逐渐减小,细化了熔覆组

织,弥散分布的富 Fe 颗粒对基体起到了弥散强化的作用^[10];另一方面降低了基材熔化量以及涂层的稀释率,有效保证了镍基合金涂层原有性能的稳定。采用 1 mm 光斑进行双道激光熔覆得到的熔覆层,相比较大光斑搭接双道熔覆以及单道激光熔覆得到的熔覆层的平均显微硬度更高,对涂层原有性能的影响较小,因此熔覆层整体的强度和耐磨性也更好一些。

5 结 论

围绕小模数齿轮表面制备镍基合金涂层的微观组织和工艺参数进行了实验研究。采用双光束激光熔覆手段改善单光束熔覆过程中易出现的熔覆缺陷问题,通过双道激光熔覆工艺改善原有高斯光源的能量分布状态,使熔覆层内部的温度梯度明显降低,加快涂层的凝固速度,该过程对熔覆层组织的细化作用明显。此外,双道激光熔覆工艺下制备的熔覆层中晶状奥氏体析出较少,粒状渗碳体组织较多,平均显微硬度明显高于单道激光熔覆制备的熔覆层。实验得到了在 1 模数齿轮齿面加工 1 mm 厚镍基合金涂层的工艺参数为: $P=250\text{ W}$, $u_1=2.5\text{ mm/s}$, $u_2=1.67\text{ mm/s}$,光斑直径 $d=1\text{ mm}$,激光功率密度为 $31.8\text{ kW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。下一步工作拟通过实时分光动态整形装置对光束质量进行进一步优化,期望能获得更加优异的熔覆涂层质量。

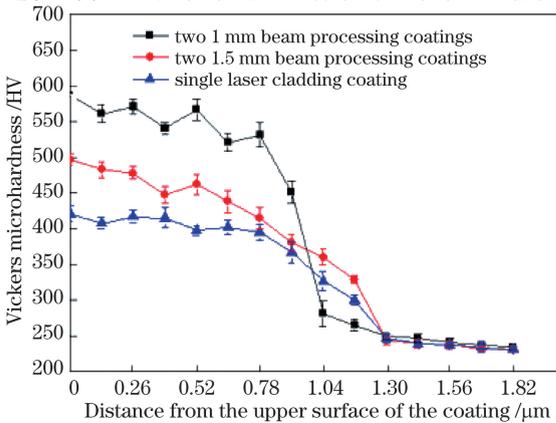


图 16 不同加工工艺下制备的熔覆层截面的显微硬度变化曲线

Fig. 16 Variation curves of cladding coatings' cross-sectional microhardness under different processing techniques

参 考 文 献

[1] Ma X Z. Practical mechanical working manual[M].

- Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2002.
- 马贤智. 实用机械加工手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [2] He L J, Zhao X J, Wang H, *et al.* Microstructure and properties of nickel-based alloy powder laser cladding on 45 steel substrate[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2015, 35(9): 909-912.
- 何力佳, 赵晓杰, 王函, 等. 45号钢基体光纤激光熔覆镍基合金的组织与性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2015, 35(9): 909-912.
- [3] Bao Z J. Experimental study on repair process of small module gear laser cladding [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2007.
- 鲍志军. 小模数齿轮激光熔覆修复工艺试验研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
- [4] Liu H X, Zeng W H, Zhang X W, *et al.* Microstructures and properties of multiple-pass laser cladding Ni-based coatings on stainless steel surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1515-1523.
- 刘洪喜, 曾维华, 张晓伟, 等. 不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1515-1523.
- [5] Hansen F, Duley W W. Attenuation of laser radiation by particles during laser materials processing[J]. *Journal of Laser Applications*, 1994, 6(3): 137-143.
- [6] Anthony T R, Cline H E. Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(9): 3888-3894.
- [7] Lu Y, Gong L, Yang X T, *et al.* Effects of surface insulation on solidification behavior of directional solidified Ni60 alloy coating [J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(4): 130-139.
- 路阳, 巩禄, 杨效田, 等. 表层绝热对定向凝固 Ni60 合金涂层凝固行为的影响[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(4): 130-139.
- [8] Zhang J, Hu Y, Tan X J, *et al.* Microstructure and high temperature tribological behavior of laser cladding Ni60A alloys coatings on 45 steel substrate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(5): 1525-1532.
- [9] Liu Y N, Sun R L, Niu W, *et al.* Microstructure and friction and wear resistance of laser cladding composite coating on Ti811 surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102010.
- 刘亚楠, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ti811 表面激光熔覆复合涂层的微观组织及摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102010.
- [10] Zhao S Z, Jin J B, Xie M, *et al.* Effects of scanning speed on microstructure and wear resistance of Cu80Fe20 immiscible coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302005.
- 赵淑珍, 金剑波, 谢敏, 等. 扫描速率对激光熔覆 Cu80Fe20 偏晶涂层组织与耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302005.