

激光熔覆 FeSiB 非晶涂层工艺及组织

李娟 王善林 龚玉兵

南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063

摘要 以厚度 2 mm 的低碳钢为基体材料, 采用脉冲激光将厚度约为 25 μm 的 Fe-Si-B 非晶带材熔覆在低碳钢基材表层。研究脉冲功率 P 、脉冲宽度 T 、脉冲频率 F 、光斑直径 f 等工艺参数对涂层表面成形、稀释率、组织结构和显微硬度的影响。研究表明, 当 $P=18.4\text{ W}$, $T=3.2\text{ ms}$, $F=3.0\text{ Hz}$, $f=0.3\text{ mm}$ 时, 涂层成形良好、稀释率最低、结构致密, 且与基材之间呈良好的冶金结合。随着脉冲功率增大, 涂层越容易发生晶化, 且晶化相 α -Fe、 Fe_2B 及 Fe_3Si 的含量和种类均增加。随着脉冲功率增大, 涂层厚度增大, 但涂层显微硬度下降; 涂层中部显微硬度值最高, 可达 1400 HV, 远高于低碳钢基材的 100 HV。

关键词 材料; 激光熔覆; 铁基非晶带材; 涂层; 显微组织

中图分类号 TG174.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0103006

Processing Optimization and Microstructure of FeSiB Amorphous Coating by Laser Cladding

Li Juan Wang Shanlin Gong Yubing

National Defence Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract Using the substrate of mild steel with thickness of 2 mm, Fe-Si-B amorphous ribbon with thickness of about 25 μm is cladded on substrate surface by pulse laser. The effects of pulse power P , pulse width W , pulse frequency F , beam diameter f of the pulse laser on the formation, the dilution rate, microstructure and microhardness of the coatings are investigated. The results show that the coating with well formation, the lowest dilution rate, lower pore density, and chemical bonding with substrate is obtained, when $P=18.4\text{ W}$, $T=3.2\text{ ms}$, $F=3.0\text{ Hz}$, $f=0.3\text{ mm}$. With the increase of laser power, the crystallization in coating happens easily, and the contents and categories of crystallization phase of α -Fe, Fe_2B and Fe_3Si are increased, moreover, the thickness of coating increases while the microhardness of coating decreases. The highest microhardness in central coating is about 1400 HV, exceeding extensively that of mild steel with 100 HV.

Key words materials; laser cladding; Fe-based amorphous ribbon; coating; microstructure

OCIS codes 140.3538; 160.3900; 160.2750

1 引言

铁基非晶合金因较高的强度、硬度, 优异的软磁、耐蚀及耐磨性能, 原料成本低廉等优点, 而具有潜在的广泛应用前景^[1-3]。由于相对较低的玻璃形成能力和较大的断裂脆性, 块体铁基非晶合金的工程应用受到极大限制。然而, 铁基非晶涂层可以解决脆性和尺寸问题, 突破其应用瓶颈^[4-6]。在近二十年中, 对铁基非晶涂层做了广泛的研究, 并取得了可喜的成果, 如美国已经研制出核废料储罐用高耐蚀铁基非晶涂层并且在工

收稿日期: 2015-08-12; 收到修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51461031, 51565041), 国家重点实验室开放基金(2013-Z05)、江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-S389)、江西省教育厅科技落地计划项目(KJLD14055)

作者简介: 李娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事铁基非晶的激光焊接方面的研究。E-mail: 704677529@qq.com

导师简介: 王善林(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事铁基块体非晶的制备及应用方面的研究。

E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn(通信联系人)

业上得到了实际应用^[7]。在国内,王彦芳等^[8-10]采用激光熔覆非晶粉末制备了铁基非晶涂层,涂层由非晶相组成,能改善材料表面耐磨耐蚀性能,但涂层孔隙率较高,且存在熔深波动等现象;如果增大激光功率,可以提高致密度,但容易因热输入过大、冷却速度降低而导致涂层晶化,这些都将影响涂层的耐蚀耐磨性能。研究表明,采用激光熔覆粉末预置法或送粉法^[11]均容易使涂层产生孔洞、界面开裂等缺陷,而且送粉喷涂法因粉末潮湿容易堵塞喷枪甚至引起飞溅,导致粉末利用率低;采用预置法难以保证粉末的平整度及厚度的均匀性,增大涂层孔隙率,而且制备过程中需使用粘结剂,易产生烟尘,且效率低。**Cheng**等^[12-15]采用电弧喷涂、等离子喷涂、超音速火焰喷涂及激光熔覆技术制备了铁基非晶涂层,但都以非晶粉末为原材料,很难获得结构致密的非晶涂层。然而,**Fe-Si-B**非晶带材与粉末相比,成本更低廉、结构更致密、与基材亲和力更好,能够获得质量、性能良好的熔覆层,是理想的激光熔覆材料。因此,以铁基非晶带材代替非晶粉末,采用脉冲激光熔覆技术获取高致密度非晶涂层,优化熔覆工艺参数,分析工艺参数对非晶涂层显微组织及力学性能的影响,为高致密度非晶涂层的制备及工程应用提供实验和理论依据。

2 实验材料及方法

采用2 mm厚的低碳钢为基体,以商业化的**Fe-Si-B**非晶薄带为熔覆材料(牌号:1k101),非晶薄带厚25~30 μm,宽40 mm。预实验发现,当熔覆材料太薄,容易产生未熔透或烧穿等缺陷,非常不稳定;熔覆材料太厚,易产生表层熔化、底层未熔透现象,因此,采用10层非晶薄带叠加,即熔覆材料厚250~300 μm,在自制的铜质夹具下,采用平均功率为80 W的SL-80型Nd:YAG脉冲激光设备制备铁基非晶涂层。熔覆前,对低碳钢表面打磨,之后用丙酮清洗表面和非晶薄带,吹干。设定试样移动速度为0.3 mm/s,保护气体流量为10 L/min,激光表面聚焦,采用单一变量法调整其他熔覆工艺参数:脉冲功率*P*、脉冲宽度*T*、脉冲频率*F*、光斑直径*f*及脉冲能量*E*(其中*E*表示单位时间内激光输出的能量,由*P*和*T*共同决定),制备涂层,具体工艺参数如表1所示。

涂层制备后,采用光学显微镜观察涂层表面形貌;用线切割机截取试样,沿试样厚度方向打磨、抛光;采用5%的硝酸酒精的腐蚀液腐蚀6~8 s,采用MR5000倒置显微镜观察涂层组织结构;用X射线衍射仪(XRD)对涂层进行物相分析,采用Cu靶,加速电压为40 kV,电流为40 mA,衍射范围为20°~80°,衍射速度为4°/min,步长0.02°;采用HVS-50型显微硬度仪测量沿涂层最大深度方向的显微硬度,加载载荷为100 gf,保持时间为10 s。用金相显微镜中的测量工具测量涂层的外观尺寸,包括涂层厚度*H*(即熔高)、基材被熔覆深度*h*(即熔深),如图1所示,并计算出稀释率*D*, $D=h/(h+H)/100\%$ ^[16],每次测量3次,取平均值。

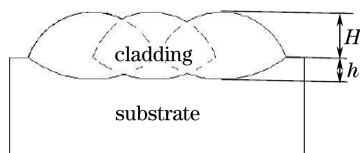


图1 涂层横截面外观尺寸示意图

Fig.1 Appearance size sketch diagram of the coating cross-section

表1 激光熔覆涂层工艺参数

Table 1 Processing parameters of laser cladding

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
<i>P</i> /W	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	21.6	21.6	21.6	21.6	23.2	23.2	23.2
<i>T</i> /ms	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	2.7	3.0	3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.6	2.7	3.0	3.2	3.4	2.5	2.7	3.0	
<i>F</i> /Hz	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0	3.0	3.0	6.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<i>f</i> /mm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>E</i> /J	4.2	4.3	4.7	4.8	4.3	4.3	4.5	4.8	5.1	5.3	4.3	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	5.0	5.2	4.0	4.8	5.1	5.3	4.6	4.8	5.5

3 实验结果与分析

3.1 工艺参数对涂层表面成形的影响

图2为不同熔覆工艺参数下涂层的表面形貌。其中图2(a)~(c)是脉冲功率分别为17.6、21.6、23.2 W(表1中

第1、21、26组参数)时涂层的表面形貌。当脉冲功率较小时,熔覆材料不容易被熔化,如图2(a)所示;当脉冲功率较大,容易导致涂层烧穿、产生气化而挥发,如图2(c)所示;当脉冲功率适中,熔覆层表面未见烧穿及熔透现象,如图2(b)所示。当脉宽为2.7 ms时,熔覆材料部分未熔透,熔覆层大部分脱落;而当脉宽为3.0 ms时,得到的涂层宏观质量较好;但当脉宽增大到3.6 ms时,熔覆层出现烧穿现象,分别如图2(d)~(f)所示(表1中第11、12、19组参数)。从图2(g)~(i)可以看出,随脉冲频率从1.0 Hz增加至6.0 Hz(表1中第13、15、17组参数),涂层表面越来越平整;当频率为3.0 Hz时,涂层表面较平整,无裂纹,但频率增大到6.0 Hz,涂层表面出现裂纹。

显然,当脉冲功率为17.6 W时,因激光功率太低,导致激光束提供的热量无法达到非晶及基材的熔点温度,即出现未熔透现象;而当脉冲功率超过23.2 W时,因激光功率过大,热量过高,引起非晶挥发而产生烧穿现象。如果脉冲功率合适,但脉宽过长,即单位焊缝的加热时间增加,也容易导致过热而产生烧穿现象;同理,如果脉宽过短,则加热时间不足,易产生未熔透现象。改变脉冲频率即改变单个脉冲的叠加率,脉冲频率越高,叠加率越高,即单位焊缝长度的热输入也越高,而且焊缝同一位置受到的焊接热循环次数越多,产生的热应力也越大,容易产生焊接裂纹;如频率过低,熔池叠加率降低,导致焊缝表层变粗糙。

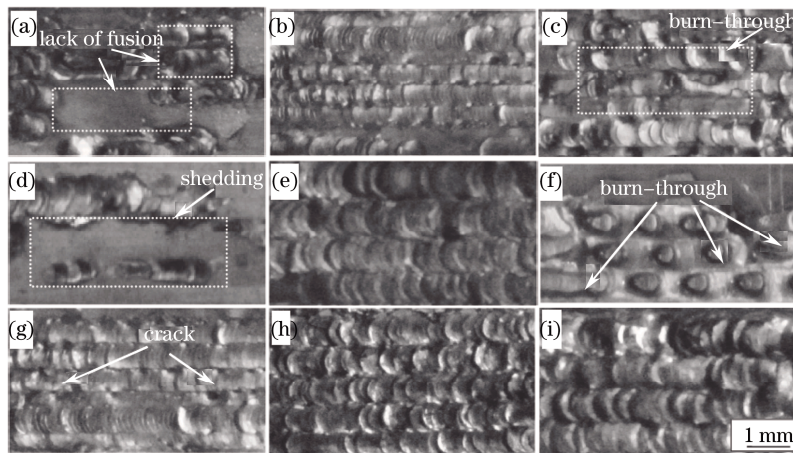


图2 不同工艺参数下的激光熔覆涂层表面形貌。(a) $P=17.6\text{ W}$; (b) $P=21.6\text{ W}$; (c) $P=23.2\text{ W}$; (d) $T=2.7\text{ ms}$; (e) $T=3.0\text{ ms}$; (f) $T=3.6\text{ ms}$; (g) $F=6.0\text{ Hz}$; (h) $F=3.0\text{ Hz}$; (i) $F=1.0\text{ Hz}$

Fig.2 Surface morphologies of laser cladding coating with different processing parameters. (a) $P=17.6\text{ W}$; (b) $P=21.6\text{ W}$; (c) $P=23.2\text{ W}$; (d) $T=2.7\text{ ms}$; (e) $T=3.0\text{ ms}$; (f) $T=3.6\text{ ms}$; (g) $F=6.0\text{ Hz}$; (h) $F=3.0\text{ Hz}$; (i) $F=1.0\text{ Hz}$

在脉冲能量 E 一定时,脉冲功率及脉宽匹配不同,也将影响涂层表面成形,如表2所示。高脉冲功率小脉宽时,熔覆过程不稳定、很难熔透,熔宽窄、热影响区小,但涂层表面成形较差;低脉冲功率大脉宽时,熔覆过程稳定,涂层成形较好;高脉冲功率大脉宽时,熔覆飞溅大、容易产生烧穿现象。实验结果发现,当功率为17.6~23.2 W,脉宽为2.7~3.8 ms,对应的脉冲能量为4.5~5.0 J时,可以获得良好的涂层表面形貌;当功率为18.4 W、脉宽为3.2 ms、脉冲频率为3.0 Hz、光斑直径为0.3 mm时,激光熔覆铁基非晶涂层表面成形及质量最佳,如图3所示。

表2 脉冲功率与脉宽对涂层表面成形的影响

Table 2 Influences of pulse power and width on coating surface shaping

T/ms	$P=17.6\text{ W}$	$P=18.4\text{ W}$	$P=20.0\text{ W}$	$P=21.6\text{ W}$	$P=23.2\text{ W}$
2.5	—	—	—	—	○
2.7	—	—	○	○	√
3.0	—	○	√	√	×
3.2	○	√	√	√	—
3.4	√	√	√	×	—
3.6	√	√	×	—	—
3.8	√	×	—	—	—

Note: '√' is good shape, '○' is lack of fusion, '×' is burn-through, '—' is not

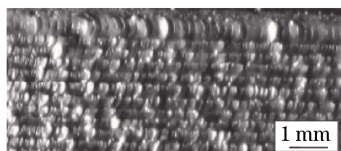


图3 激光熔覆铁基非晶涂层表面形貌

Fig.3 Surface morphology of laser cladding Fe-based amorphous coating

图4是脉冲功率为18.4 W,脉宽为3.2 ms,脉冲频率为3.0 Hz,光斑直径为0.3 mm时涂层横截面图。从图4可得,涂层结构致密,未出现孔洞、裂纹等缺陷,非晶薄带层及涂层与基体之间界面结合良好,未发现明显间隙;涂层厚度约为248 μm,熔深约为54 μm。表3为涂层表面成形良好的横截面上涂层厚度、熔深、稀释率变化规律。从表3可知,随脉冲功率的增加,熔深增加、稀释率增大,但涂层厚度没有明显规律;随脉宽的增加,涂层厚度、熔深、稀释率均呈总体增大趋势;随光斑直径的减小,涂层厚度、熔深、稀释率都增大。在低功率低脉宽下,激光脉冲能量达不到熔化非晶带材所需的能量,熔深很小,甚至没有熔化;当提高脉冲功率和脉宽时,单位面积涂层的热输入提高,涂层温度升高,有利于熔化非晶带材,使得熔深增大;减小光斑直径,提高激光能量密度,导致熔深也增大。

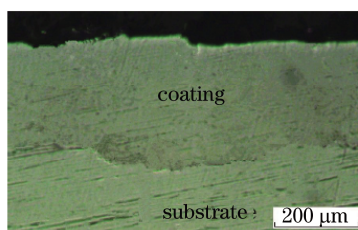


图4 涂层横截面

Fig.4 Coating cross section

表3 不同工艺参数下涂层的尺寸及稀释率

Table 3 Sizes and dilutions of coating with different processing parameters

No.	P/W	T/ms	f/mm	E/J	$H/\mu m$	$h/\mu m$	$D/\%$
3	17.6	3.4	0.3	4.7	295	—	—
4	17.6	3.6	0.3	4.8	287	69	19
7	18.4	3.2	0.3	4.6	228	41	18
8	18.4	3.4	0.3	4.8	248	54	18
9	18.4	3.6	0.3	5.1	268	88	25
14	20.0	3.2	0.4	4.8	216	151	41
15	20.0	3.2	0.3	4.8	216	157	42
16	20.0	3.2	0.2	4.8	246	216	46
21	21.6	3.0	0.3	4.8	272	260	46
22	21.6	3.2	0.3	5.1	223	200	47
25	23.2	2.7	0.3	4.6	256	260	50

3.2 涂层的组织特征

图5是脉冲功率为18.4 W、脉宽为3.2 ms、脉冲频率为3.0 Hz、光斑直径为0.3 mm条件下的涂层横截面微观组织。显然,在横截面上存在几个不同组织的区域:基材组织区A、重结晶区B、熔合区C、熔覆区D,如图5(a)所示。基材是典型的铁素体和珠光体组织,白色颗粒状为铁素体,黑色曲折线条为晶界,其黑色小点为氧化物,如图5(b)所示;重结晶区晶粒细小、尺寸约为5 μm;由于“B”区域在熔覆过程中并未熔化,但是该区域的温度达Ac3以上。在加热过程中粗大的铁素体容易发生奥氏体化,由于高温停留时间短,奥氏体来不及长大,在随后快速冷却过程中发生转变形成细小的铁素体。熔合区为细小的柱状晶组织,晶粒大小为10 μm;由于靠近界面处,晶粒容易以原始晶面为形核中心,沿其方向向外生长,形成外延生长的树枝晶组织。在快速的冷却过程中,熔覆区成分均匀、没有异质形核核心,不易异常长大;而是均匀形核,且形成晶粒后来不及

长大,形成尺寸细小的晶粒,如图5(c)所示。鲁青龙等^[15]认为熔覆区在快冷条件下,原子来不及长程扩散,形核速率趋近于零,可能形成非晶相。

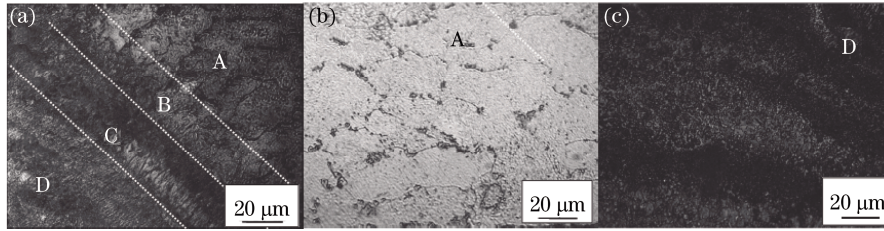


图5 涂层的显微组织形貌。(a)横截面结构;(b)基材组织区;(c)熔覆区

Fig.5 Microstructures of laser cladding coatings. (a) Cross section; (b) substrate structure zone; (c) cladding zone

图6为不同参数下激光熔覆FeSiB涂层的XRD图谱。图6(a)是脉冲功率为17.6~21.6 W(表1中第4、8、15、21组参数)时的XRD图谱。显然,在所有参数中,涂层中都出现晶化相,主要由 α -Fe、Fe₂B和Fe₃Si组成。随着脉冲功率的增大,晶化相峰值增大,且晶化峰也增多,表明晶化相含量越多,且种类也越多。当脉冲功率低于20.0 W时,晶化相主要是 α -Fe和Fe₃Si;当脉冲功率超过20.0 W时,析出相主要为 α -Fe、Fe₂B和Fe₃Si。随脉冲功率的增加,激光脉冲能量也增加,导致单位面积涂层的热输入提高,涂层温度也将升高;在随后的冷却过程中,冷却速度也可能降低,导致晶化明显。

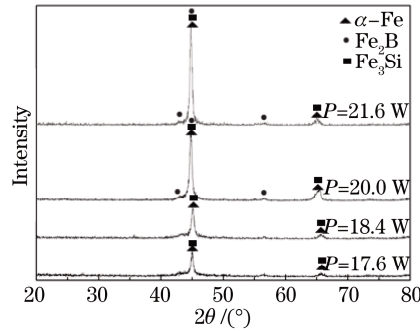


图6 不同参数下涂层XRD图谱

Fig.6 XRD patterns of coating with different parameters

3.3 涂层的显微硬度

图7为不同脉冲功率时沿涂层厚度方向的显微硬度分布(表1中第4、8、15、21、25组参数)。从图7可知,涂层的熔覆区有极高的硬度值且明显大于基材。在脉冲功率为17.6 W和18.4 W时,熔覆区厚度较小,并且由涂层熔覆区过渡到基材,其显微硬度变化表现出先升高后降低的趋势,且熔覆区中部的硬度最高,熔覆区最高硬度达1400 HV,平均显微硬度值为1200 HV,约为基材硬度100 HV的12倍。随着脉冲功率的增大,涂层熔覆区厚度增大,其硬度逐渐降低。如脉冲功率从17.6 W增大到23.2 W,涂层熔覆区最高,显微硬度从1420、1390、1380、1100 HV依次降低到875 HV。

涂层由非晶合金FeSiB熔覆而成,合金中含有过饱和的非金属元素Si和B;而且熔覆过程中,冷却速度快,涂层晶粒细小,产生了硬脆的硅化物和硼化物,因此,涂层显微硬度远高于基材显微硬度。当脉冲功率较低时,单位面积涂层的热输入较小,涂层高温停留时间较短,涂层中非金属元素扩散到基体的量降低,即涂层非金属元素含量较高;而且冷却速度快,晶粒生长时间短,尺寸细小。相反,当脉冲功率增大、单位面积涂层的热输入增大,涂层高温停留时间拉长,涂层中非金属元素扩散到基体的量提高,即涂层非金属元素含量降低,而且冷却速度相对下降,晶粒生长时间增长,尺寸相对粗大。因此,随功率的增大,涂层熔覆区硬度逐渐降低。同理,当脉冲功率较低时,非金属元素扩散时间短,扩散距离短,因此涂层厚度较小。当脉冲功率较大,非金属元素扩散时间长,扩散距离远,导致部分过渡区硬度急剧增大,则显示高硬度的涂层熔覆区厚度增大;相反,低硬度的过渡区宽度则减小。而且,低脉冲功率时,非金属元素扩散时间短、扩散不充分,导致涂层化学成分不均;因扩散速率不同,在靠近界面处易形成富Si和富B元素,且因温度较高,易晶化生成硬脆的Fe₂B和Fe₃Si,所以显微硬度逐渐增大。高脉冲功率时,非金属元素扩散时间长、扩散充分,涂层化学

成分均匀,但Si和B元素含量降低,所以整个涂层显微硬度均匀。

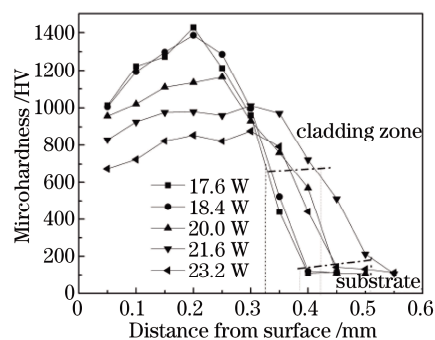


图7 不同工艺参数下激光熔覆涂层的显微硬度

Fig.7 Microhardness of the laser cladding coatings with different parameters

4 结 论

以铁基非晶薄带为原材料,用脉冲激光制备非晶涂层,研究了熔覆工艺参数对非晶涂层成形、显微组织和显微硬度的影响,得到以下结论:

1) 采用非晶薄带为原材料,当最优工艺参数为脉冲功率 **18.4 W**、脉冲宽度 **3.2 ms**、脉冲频率 **3.0 Hz**、光斑直径 **0.3 mm** 时,制备的涂层无孔洞、结构致密、界面呈冶金结合;

2) 由于冷却速度相对较低,涂层产生晶化,晶化相为 α -Fe、Fe₂B 和 Fe₃Si。随脉冲功率增大,晶化相含量和种类增多,但晶粒细小;

3) 随脉冲功率增大,显微硬度下降,涂层厚度增加;当功率为 **18.4 W** 时,所得涂层的最高显微硬度值达到 **1400 HV**,平均显微硬度 **1200 HV**,约为基材硬度的 **12** 倍,表明涂层具有很高的耐磨性能;

4) 与传统采用非晶粉末为熔覆材料制备的涂层相比,该方法制备的涂层结构更加致密,并且制备方法简单、环保。

参 考 文 献

- 1 Scully J R, Gebert A, Payer J H. Corrosion and related mechanical properties of bulk metallic glasses[J]. *J Mater Res*, 2007, 17(6): 302-313.
- 2 Wei Dandan, Chen Qingjun, Gao Jiwen, et al.. Current status of Fe- based bulk amorphous alloy research[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(1): 80- 85.
魏丹丹, 陈庆军, 高霁雯, 等. 铁基大块非晶合金的发展现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(1): 80- 85.
- 3 Zhang Guoxiang. A new Fe- based amorphous alloy with excellent soft magnetic properties[J]. *Metallic Functional Materials*, 2003, 10 (2): 13- 18.
张国祥. 新型铁基非晶合金的研究[J]. *金属功能材料*, 2003, 10(2): 13- 18.
- 4 Wang Yanfang, Xiao Lijun, Liu Mingxing, et al.. Research progress of laser cladding amorphous coatings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 070002.
王彦芳, 肖丽君, 刘明星, 等. 激光熔覆制备非晶复合涂层的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070002.
- 5 Mi Zhiming. Performance of The Research and Fe- Based Amorphous Composites Coating Prepared by Laser Cladding[D]. Xi'an Chang'an University, 2014: 40- 42.
米志明. 激光熔覆法制备 Fe 基非晶复合涂层及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 40- 42.
- 6 Y Y Zhu, Z G Li, R F Li, et al.. Microstructure and property of Fe- Co- B- Si- C- Nb amorphous composite coating fabricated by laser cladding process[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280: 50- 54.
- 7 P F Gostin, S Oswald, A Gebert. Acid corrosion process of Fe- based bulk metallic glass[J]. *Corrosion Science*, 2012, 62: 112- 121.
- 8 Wang Yanfang, Li Li, Lu Qinglong, et al.. Laser cladding Fe- based amorphous coatings on stainless substrate[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603017.
王彦芳, 栗 荔, 鲁青龙, 等. 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶涂层研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603017.
- 9 Wu Xiaolei, Hong Youshi. Thick amorphous coating of Fe- based alloy by laser clad[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*,

2001, 22(1): 51-54.

武晓雷, 洪友士. 激光熔覆铁基大厚度非晶合金表层的研究[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(1): 51-54.

10 Zhu Qingjun, Zou Zengda, Wang Xinhong, *et al.*. Forming conditions of Fe-Ni-Si-B amorphous coating by laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(9): 91-94.

朱庆军, 邹增大, 王新洪, 等. 激光熔覆 Fe-Ni-Si-B 非晶层的形成条件[J]. 焊接学报, 2007, 28(9): 91-94.

11 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Effect of powder properties on the convergence of powder stream in coaxial laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503008.

刘 昊, 虞 钢, 何秀丽, 等. 粉末性质对同轴送粉激光熔覆中粉末流场的影响规律[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503008.

12 J B Cheng, Z H Wang, B S Xu. Wear and corrosion behaviors of FeCrBSiNbW amorphous/nanocrystalline coating prepared by arc spraying process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(5): 1025-1031.

13 Z Zhou, L Wang, D Y He. Microstructure and electrochemical behavior of Fe-based amorphous metallic coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 20(5): 344-350.

14 C Zhang, L Liu, K C Chan. Wear behavior of HVOF-sprayed Fe-based amorphous coatings[J]. Intermetallics, 2012, 23(2): 80-85.

15 Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.*. Effects of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203007.

鲁青龙, 王彦芳, 栗 荔, 等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203007.

16 Zhou S F, Huang Y J, Zeng X Y. Effects of processing parameters on structure of Ni-based WC composite coatings during laser induction hybrid rapid cladding[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(20): 8494-8500.

栏目编辑: 张 雁