超细 VC 对激光熔覆 H13 合金显微组织和耐磨性的影响

赵菲，刘子敬，张杰，吴志生

（太原科技大学 材料科学与工程学院，太原 030024）

摘　要：目的 通过添加超细 VC 颗粒改善 Q235 合金表面激光熔覆 H13 涂层的显微组织，并提高其耐磨性。**方法** 利用激光熔覆技术在 Q235 表面制备了 H13/VC 复合涂层，利用光学显微镜、扫描电镜、显微硬度仪以及摩擦磨损试验仪，研究了超细 VC 颗粒不同添加量对涂层微观结构、显微硬度和摩擦磨损性能的影响。**结果** 激光熔覆 H13/VC 复合涂层与基体呈冶金结合，无明显气孔和裂纹等缺陷。超细 VC 颗粒在激光熔覆过程中全部熔解，显著改变了涂层的微观特征。V 元素没有明显的元素偏析现象，但是随着超细 VC 含量的增加，枝晶干和枝晶间内的 V 元素含量呈现增加的趋势。超细 VC 颗粒起到了固溶强化的作用，促使熔覆层的显微硬度随着超细 VC 含量的增加而增加。H13 熔覆层的平均显微硬度为 504.21$HV_{0.3}$，随着超细 VC 含量的增加，复合涂层的显微硬度逐渐增加（608.21、658.24、680.41$HV_{0.3}$）。H13 熔覆层的磨损体积为 3.97×10^{-2} mm^3，当 VC 添加量为 2%时，复合涂层的耐磨性较 H13 合金有所提高，摩擦因数保持在较小的范围内，主要以磨粒磨损和氧化磨损为主，粘着磨损为辅。随着超细 VC 含量的增加，复合涂层的磨损体积逐渐减少，当 VC 添加量为 10%时，复合涂层的磨损体积为 2.69×10^{-2} mm^3，约为未添加超细 VC 颗粒涂层的 2/3。**结论** 超细 VC 的添加有助于改善合金的显微组织和耐磨性。

关键词：激光熔覆；复合涂层；显微组织；碳化钒；耐磨性

中图分类号：V261.8　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2022)02-0232-09

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.02.022

Effect of Ultra-fine VC on Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladded H13 Alloy

ZHAO Fei, LIU Zi-jing, ZHANG Jie, WU Zhi-sheng

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the microstructure and wear resistance of laser cladded H13 coating on Q235 alloy by adding ultrafine VC particles. H13/VC composite coating was prepared on Q235 surface by laser cladding. The effects of different amount of ultrafine VC particles on microstructure, microhardness and wear properties of the coating were studied by

收稿日期：2021-03-27；**修订日期：**2021-09-28

Received：2021-03-27；**Revised：**2021-09-28

基金项目：山西省重点研发计划项目（高新技术领域）（201903D121054）；山西省高等学校科技创新项目（2019L0621）

Fund：Key Research and Development Project of Shanxi Province (High and New Technology Field) (201903D121054); the Scientific and Technological Innovation Projects of Higher Education of Shanxi Province (2019L0621)

作者简介：赵菲（1982—），女，博士，副教授，主要研究方向为重大装备机器人连接与增材制造技术。

Biography：ZHAO Fei (1982—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: robot connection for major equipment and additive manufacturing technology.

引文格式：赵菲，刘子敬，张杰，等. 超细 VC 对激光熔覆 H13 合金显微组织和耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 232-240.

ZHAO Fei, LIU Zi-jing, ZHANG Jie, et al. Effect of Ultra-fine VC on Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladded H13 Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 232-240.

optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), microhardness tester and friction tester. The results show that the laser cladded H13/VC composite coatings were metallurgically bonded to the substrate, without obvious pores and cracks. The ultra-fine VC particles were completely dissolved in the laser cladding process, which significantly changed the micro characteristics of the coating. There was no obvious segregation of V element, but with the increase of ultra-fine VC content, the content of V element in dendrite stem and inter dendrite showed an increasing trend. The ultra-fine VC particles play the role of solution strengthening, and the microhardness of the cladding layer increased with the increase of VC content. The average microhardness of H13 cladding layer is 504.21$HV_{0.3}$, with the increase of ultra-fine VC content, the microhardness of the composite coating increases gradually (608.21, 658.24, 680.41$HV_{0.3}$). The wear volume of H13 cladding layer is 3.97×10^{-2} mm^3. When the VC content is 2%, the wear resistance of H13 alloy is higher that H13 alloy, and the friction coefficient is kept in a small range. The main wear mechanisms are abrasive wear and oxidation wear, and adhesive wear is secondary. With the increase of ultra-fine VC content, the wear volume of the composite coating decreases gradually, When the VC content is 10%, the wear volume of the composite coating is 2.69×10^{-2} m^3, which is about 2/3 of that of the coating without the addition of ultrafine VC particles. This shows that the addition of ultrafine VC particles can help to improve the microstructure and wear resistance of the composite coating.

KEY WORDS: laser cladding; composite coating; microstructure; VC; wear resistance

Q235 结构钢由于具有含碳量适中、焊接性好、强度优良以及成本低等优点，在建筑及工程结构领域具有重要应用。例如中厚 Q235 钢板作为建筑工程和大型铁路桥梁的主要钢板，对其承截能力、抗震动能力、耐冲击性能、耐磨性和耐腐蚀性要求较高[1]。在实际工况下，该类钢板常常由于受到载荷冲击、介质腐蚀和表面磨损等原因而发生失效，因此有必要对其进行表面处理，最大限度地提高其使用寿命。

激光熔覆技术是一种发展迅猛且应用广泛的表面改性方法，与传统改性技术相比，具有热输入小、与母材呈冶金结合以及组织性能可控等特点。该技术可在普通钢材表面制备出一层具有硬度高、耐磨性和耐腐蚀性良好的熔覆层，不仅大幅度提升了普通廉价钢材的表面性能，而且其产品还兼具较低制造成本和较高的经济效益[2-6]。目前针对 Q235 等普通碳素结构钢的激光表面熔覆的研究和报道有很多，大多集中在通过直接加入或者原位生成的方式，引入硬质颗粒来改善材料表面的耐磨性能和腐蚀性能。陈希章等人[7]通过原位生成的方式，在 Q235 钢表面，利用特定比例的 Fe、W、C 粉末，制备了 WC 增强铁基复合涂层。Ma 等人[8]利用激光熔覆技术在 Q550 钢表面制备了 Ni60/WC 复合涂层，并对其显微组织和摩擦磨损性能进行了研究。结果表明，残余 WC 颗粒均匀分布且在磨损过程中有效地提高其耐磨性。Yao 等人[9]比较了两种光斑类型对激光熔覆 NiCrMo-WC 涂层的组织和摩擦磨损性能。结果表明，矩形和圆形光斑均能制备出 WC 颗粒弥散分布的熔覆涂层，但是前者获得的涂层的耐磨性更好。孙宁等人[10]研究了不同 WC-12Co 含量对激光熔覆镍基复合涂层组织和摩擦磨损性能的影响。结果表明，WC 颗粒分布均匀且基本保持原有形态，并且随着 WC-12Co 含量的增加，复合涂层的耐磨性持续增加。曹俊等人[11]研究了 WC 颗粒对激光熔覆纯铁基涂层组织和磨损机制的影响。结果表明，WC 颗粒具有细化晶粒的作用，并且随着 WC 颗粒的增多，涂层的氧化磨损加剧。例如，除了常见的 WC 颗粒外，Cr_2C_3、NbC、TiC、VC 等其他碳化物硬质颗粒，均可作为增强相来提高熔覆层的力学性能[12-17]。此外，增强相的种类、含量、尺寸大小均会影响熔覆层的耐磨性以及腐蚀性能。徐国建等人[18-19]研究了 Stellite6/VC 复合涂层的组织和性能。结果显示，随着 VC 含量的增加，熔覆层组织由亚共晶组织转变为过共晶组织，VC 添加量小于 80%时，涂层的显微硬度、耐磨性、裂纹敏感性与 VC 的含量呈正相关变化。

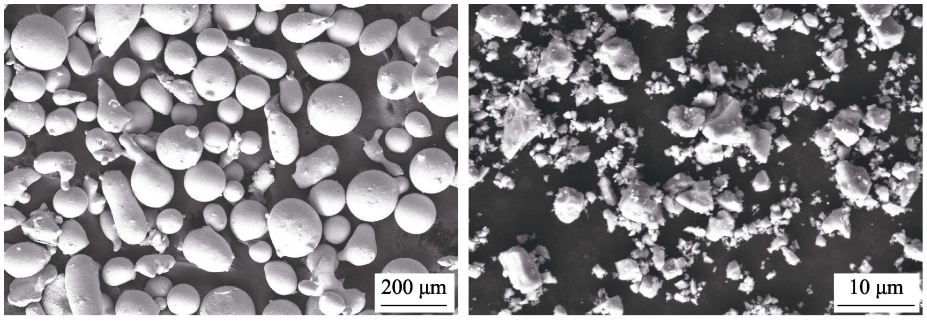
激光熔覆过程中，硬质颗粒的粒径通常为 20~200 μm[20-22]。Acker 等人[21]比较了 3 种不同尺寸（32、76、147 μm）的 WC 颗粒对激光熔覆 WC/Ni 合金涂层耐磨性的影响，发现颗粒尺寸越小，越有利于提高涂层的耐磨性。针对大粒径硬质颗粒，Deschuyteneer 等人[22]研究了大粒径（750~1200 μm）颗粒和小粒径（40~160 μm）颗粒对激光熔覆 NiCrBSi 合金耐磨性的影响。磨粒磨损实验结果表明，大粒径颗粒涂层的耐磨性比小粒径颗粒涂层的耐磨性好，而销盘磨损实验中发现较小 WC 颗粒的涂层耐磨性更好。此外，研究人员对尺寸更小的添加相也进行了对比研究。孙琳等人[23]在 TC21 合金表面上制备了 SiC 颗粒增强的 TiNi 基复合涂层，并研究了 SiC 增强相颗粒尺寸大小对熔覆层显微组织、硬度以及耐磨性的影响。结果表明，纳米 SiC（40 nm）更有助于提高熔覆层的显微硬度，而微米 SiC（<115 μm）更有助于提高熔覆层的耐磨性。张伟等人[13]将 Fe45 与 0.8 μm 粒径的 VC 颗粒复合进行激光熔覆实验，发现该粒径的 VC 颗粒能够显著提高熔覆层的耐磨性，并随着其含量的增加，显微硬度和耐磨性逐渐增强。

近年来，虽然国内外利用激光熔覆技术对不锈钢

及碳钢表面强化进行了较多的研究，但是有关铁基合金与 VC 颗粒复合强化的研究报道还比较少，尤其是粒径小于 5 μm 的微米级增强相复合强化。本研究为了提高 Q235 表面的耐磨性能，选用 H13 模具钢粉末和超细 VC（粒径< 5 μm）作为熔覆粉末，研究了不同超细 VC 含量对激光 H13 合金涂层对微观组织、显微硬度以及耐磨性的影响，为 Q235 钢板表面强化提供理论基础。

1　试验材料及方法

实验中使用的基体材料为 Q235 结构钢，熔覆粉末为图 1 所示的 H13 合金粉末（粒径 15~53 μm）和超细 VC 粉末（粒径<5 μm），其板材及 H13 合金粉末的化学成分见表 1。实验前，将 VC 粉末与 H13 合金粉末机械混合，制备出 VC 颗粒粉末质量分数为 0%、2%、5%、10%的四类粉末，烘干后备用。激光熔覆实验在专用小型同轴式激光熔覆系统上进行，该系统由 YLR-2000 型光纤激光器、CN300 三轴数控机床、环形送粉头以及负压式送粉器组成。实验过程采用高纯氩气作为保护气和送粉气体，工艺参数为：激光光斑直径 1.2 mm，激光功率 500 W，扫描速度 360 mm/min，送粉量 10 g/min，搭接率 50%。



a H13粉末　　b 超细VC粉末

图 1　熔覆材料形貌

Fig.1 Microstructure of laser cladded H13 alloy with different VC contents: (a) H13 powder; (b) ultra-fine VC powder

表 1　Q235 板材和 H13 合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Q235 substrate and H13 powder

wt.%

Materials	C	Si	Mn	Mo	V	Cr	S	P	Fe
Q235	0.14~0.22	≤0.30	0.30~0.65				≤0.05		Bal.
H13	0.4	1.0	0.4	1.5	1.0	5.2			Bal.

实验结束后，对试样依次进行切割、镶嵌、磨抛、腐蚀等工序。利用场发式 SIGMA300 型蔡司扫描电子显微镜和布鲁克 Quantax 400 型能谱仪，对其组织和成分进行分析。用日本理学 ultima4 型 X 衍射仪，对不同 VC 含量下复合涂层的相组成进行分析。用 HVS-50 型维氏显微硬度仪测试不同 VC 含量下复合涂层的显微硬度，加载载荷为 2.94 N，保持时间为 10 s，每个试样随机选区 6 个点进行测量，并将其算式平均值作为该试样的最终显微硬度值。摩擦试验在 RETCMFT-5000 型摩擦磨损试验机上进行，对磨材料为直径 4 mm 的 Si_3N_4 陶瓷球，测试条件为：载荷 50 N，往复频率 5 Hz，往复路径 6 mm，时间 1 h。利用摩擦试验机自带的光学形貌仪分析磨痕尺寸，确定其磨损体积，并利用扫描电子显微镜对其磨损机理进行进一步分析。

2　结果与讨论

2.1　显微组织与相分析

图 2 为不同 VC 含量下 H13 合金熔覆层的界面组织。由图 2 可知，熔覆层与基体 Q235 呈冶金结合，无明显气孔和裂纹等缺陷。另外，可以看出相同工艺参数条件下，除 VC 质量分数为 10%的复合涂层外，其他涂层主要由呈外延生长的柱状树枝晶及少量等轴树枝晶组成。当 VC 颗粒的质量分数提高到 10%时，复合涂层的组织形貌与其他涂层相比发生明显变化，常规枝晶形貌完全消失，出现类颗粒状析出物。值得注意的是，虽然添加了不同含量的 VC 颗粒，但是复合熔覆层基本保持激光熔覆技术的快速凝固特征，且均未发现残留的原始 VC 颗粒。这说明超细的 VC 颗粒粉末在激光熔覆加工过程中全部熔化，与 H13 合金粉末重新发生冶金反应后凝固析出[13]。

图 3 为不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的 XRD 衍射图。可以看出，H13 合金涂层主要由马氏体、残余奥氏体以及碳化物 $M_{23}C_6$ 组成，其中奥氏体和碳化物的衍射峰强度较低，说明其含量较少。添加 VC 颗粒后，熔覆层主要由马氏体、残余奥氏体、$M_{23}C_6$ 以及 VC 等组成。随着 VC 颗粒含量的增加，碳化物 VC 和 $M_{23}C_6$ 的衍射峰逐渐增强，说明其含量

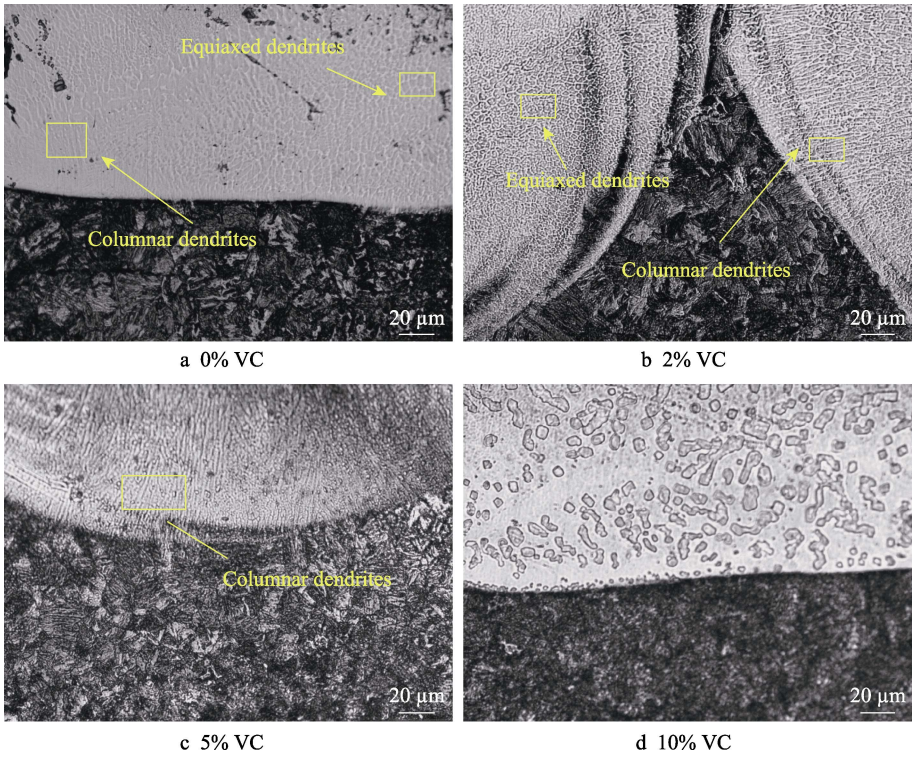


图 2　不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的显微组织形貌

Fig.2 Microstructure of laser cladded H13/VC coatings with different VC contents

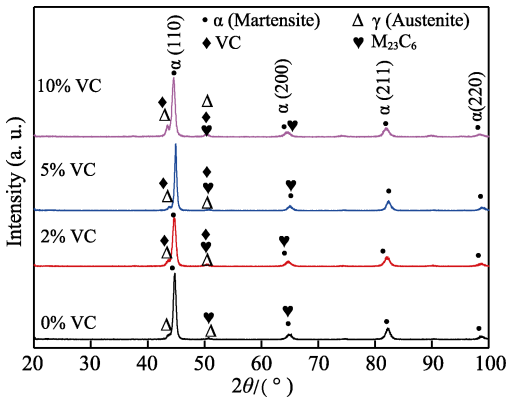


图 3　不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of laser cladded H13/VC coatings with different VC contents

逐渐增加。其原因主要是因为原始超细 VC 硬质相分解后产生了 V 和 C 元素，在后续化学冶金反应中，重新析出了 VC 颗粒以及 $M_{23}C_6$。

为了进一步分析不同含量的 VC 超细颗粒对涂层微观组织和化学成分的影响，对其熔覆层的相近部位进行 SEM 显微组织特征观察和 EDS 能谱元素分析，结果如图 4 所示。可以看出，激光熔覆 H13/VC 复合涂层的显微组织主要由马氏体、残余奥氏体和细小的碳化物组成[11]。相同条件下，VC 质量分数为 2%和 5%的复合涂层的组织形貌与 H13 合金的组织形貌相似，均属于典型的枝晶形貌，符合激光熔覆快速凝固特征。其中，VC 质量分数为 2%的复合涂层呈现等轴晶形态，VC 质量分数为 5%的复合涂层与 H13 合金涂层均呈树枝晶形态，且前者的枝晶间距大于后者。与其他涂层相比，VC 质量分数为 10%的复合涂层枝晶间的析出物明显，并呈现长链状、纤维状和颗粒状。利用 EDS 能谱仪对涂层各微区成分（图 4）进行统计，结果见表 2。图 4 中，1、3、5、7 为涂层的枝晶干区域，2、4、6、8 为涂层的枝晶间区域。可以看出，随着 VC 含量的增加，涂层中的 V 元素呈现增加的趋势。枝晶间与枝晶干处所含的元素相似且含量相差不大，无明显的元素富集现象。

VC 质量分数为 10%时，激光熔覆 H13/VC 涂层的 EDS 元素面扫描结果见图 5。可以看出，Fe 元素分布均匀，没有明显的偏析情况，而 Cr、Mo 和 C 等元素虽然也分布广泛，但是在枝晶干周围的分布更加密集。相比而言，V 元素的偏析情况最明显，主要在枝晶干附近的块状析出物内富集，推断为富 V 碳化物。结合前面 XRD 结果可知，马氏体 α 和奥氏体 γ 是熔覆层主要的基体相，其中奥氏体 γ 的适量存在有益于熔覆层的韧性，而 VC 和 $M_{23}C_6$ 等碳化物出现在枝晶干附近，微观组织上呈现较大的块状，可以提高熔覆层的显微硬度。Fe 元素是熔覆层中含量最多的元素，激光熔覆过程中可以作为 Fe 溶剂，凝固时与合金溶液中的 Cr、Mo、V 等元素发生置换固溶，最终成为含铁的固溶体，有助于各种金属间的相互强化，达到固溶强化的目的。

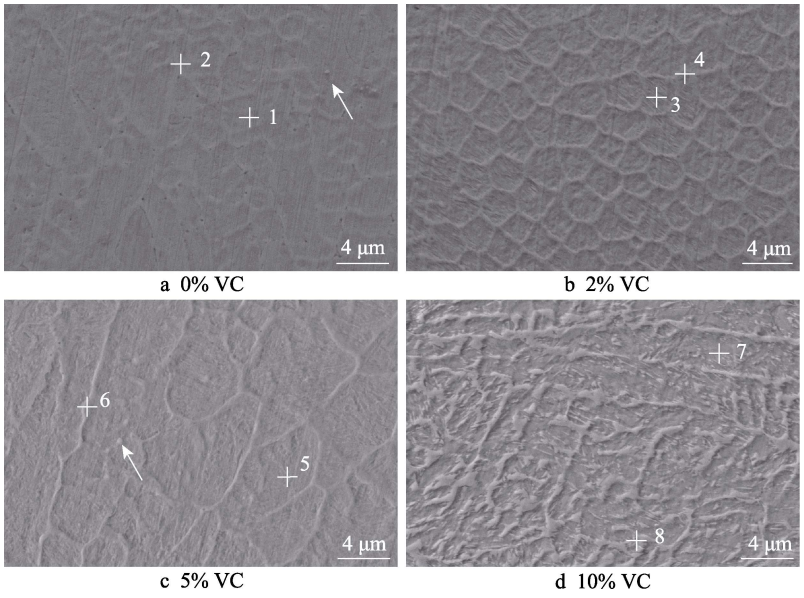


图 4　激光熔覆 H13/VC 复合涂层的 SEM 微观组织

Fig.4 SEM images of microstructure of laser cladded H13/VC composite coatings

表 2　不同 VC 含量下复合涂层枝晶干及枝晶间隙处的 EDS 元素分析

Tab.2 EDS element analysis of inter and core dendrites of composite coatings with different VC contents

wt.%

Materials		Fe	Cr	V	C	Mo	Si	Mn
0%VC	Core (1)	92.9	3.1	1.2	1.6	0.7	0.5	0.3
	Inter (2)	91.9	3.6	1.6	1.2	0.6	0.6	0.4
2%VC	Core (3)	89.2	4.1	2.6	1.6	1.0	0.8	0.7
	Inter (4)	91.3	3.6	2.1	1.1	0.8	0.6	0.5
5%VC	Core (5)	93.2	2.7	1.4	1.2	0.6	0.5	0.4
	Inter (6)	89.8	3.7	2.7	1.2	1.3	0.7	0.6
10%VC	Core (7)	89.4	4.5	2.0	1.8	0.9	0.9	0.5
	Inter (8)	85.9	5.8	3.5	1.8	1.3	1.1	0.7

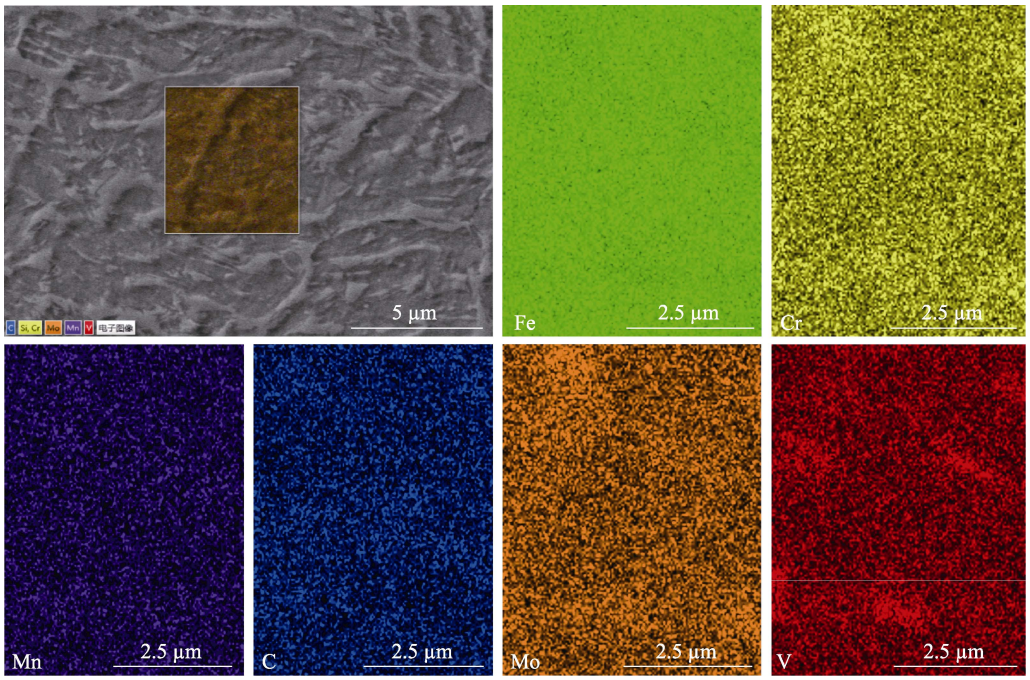


图 5　VC 质量分数为 10%时激光熔覆 H13/VC 涂层的 EDS 元素面扫描结果

Fig.5 EDS mapping profiles of of laser cladded H13/VC composite coatings with 10% VC content

2.2　显微硬度分析

图 6 为不同超细 VC 含量下复合涂层的显微硬度。可以看出，随着 VC 含量的增加，复合涂层的平均显微硬度呈增加的趋势。相同工艺条件下，添加超细 VC 前，H13 合金涂层的平均显微硬度为 504.21$HV_{0.3}$，约为 Q235 基体显微硬度的 2.3 倍；当超细 VC 质量分数为 2%、5%、10%时，复合涂层的显微硬度与未添加 VC 涂层相比明显增加，分别为 608.21、658.24、680.41$HV_{0.3}$。H13/VC 复合涂层的显微硬度随着 VC 含量的增加而明显提高的原因，主要是超细 VC 颗粒在激光加工过程中全部熔解，V 元素与 H13 合金的元素发生反应，使得 V 原子固溶到奥氏体中，起到了固溶强化的作用[18]。此外，V 含量的增加能够促使相关碳化物析出，可以通过钉扎和拖拽的方式阻碍位错运动，起到了析出强化的作用[13,19]。

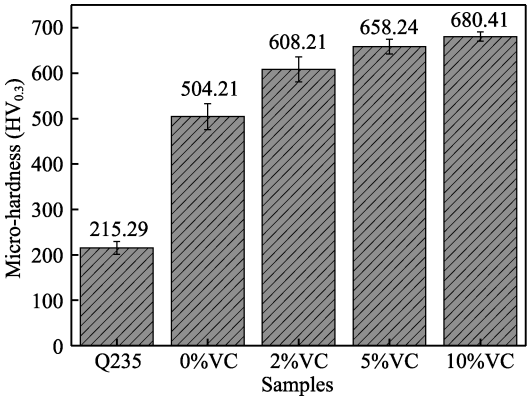


图 6　不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的平均显微硬度

Fig.6 Average micro-hardness of laser cladded H13/VC composite coatings with different VC contents

2.3　常温摩擦磨损性能分析

图 7a 为相同磨损测试条件下不同超细 VC 粉末含量制备的复合涂层的磨损体积。可以看出，随着超细 VC 粉末含量的增加，复合涂层的磨损体积逐渐减少，说明复合涂层的耐磨性能随着 VC 粉末含量的增加而逐渐提高。图 7b 为对应的摩擦因数的变化。可以看出，随着 VC 含量的增加，复合涂层的摩擦因数呈现一定的增加趋势，且摩擦因数相对稳定。VC 质量分数为 2%的复合涂层与未添加 VC 的合金涂层相比，前 20 min 内，摩擦因数基本相似，但是随着时间的推移，摩擦因数呈下降的趋势。这主要是因为 2%的 VC 起到了细化晶粒的作用，摩擦过程中涂层与摩擦球之间的剪切应力小，磨损表面相对光滑，摩擦因数呈减小的趋势。当 VC 质量分数高于 5%时，复合涂层的摩擦因数相对增大，约 5 min 后达到稳定。这主要是因为 V 元素的加入改变了熔覆层的组织成分，不仅析出含 V 碳化物，而且提高熔覆层中 V 元素的固溶程度，起到固溶强化的作用。

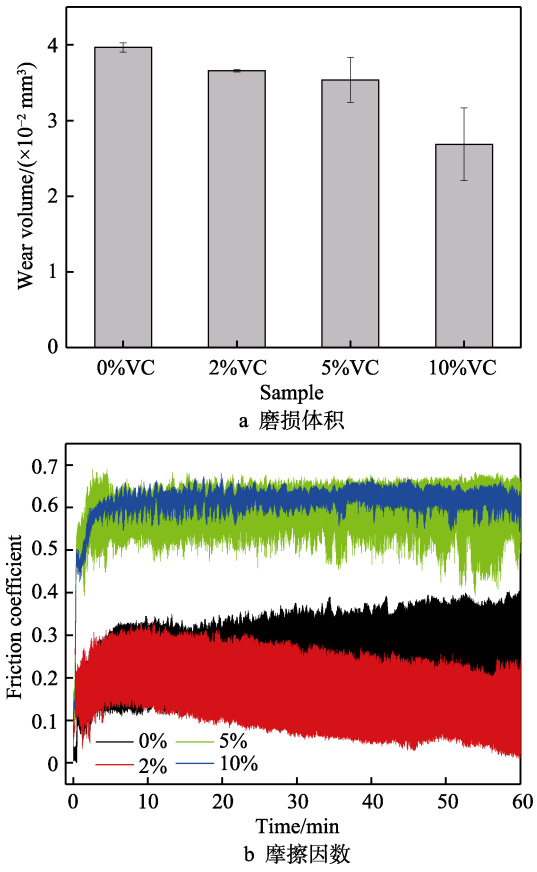


图 7　不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的磨损体积和摩擦因数

Fig.7 Wear volume and friction-coefficient curves of laser cladded H13/VC composite coatings with different VC contents: (a) wear volume; (b) friction-coefficient

图 8 为不同 VC 含量下 H13/VC 复合涂层在常温往复摩擦 1 h 后的磨损表面。从图 8a 可以看出，未添加 VC 颗粒的涂层表面存在明显的塑性变形和犁沟，同时可以观察到大量的粘着和麻点。犁沟的形成主要是由于摩擦副和涂层在相对运动过程中，较硬的表面凸起物或者脱落的硬质磨屑犁入较软的涂层表面，而发生塑性变形的产物[24-26]。这说明该涂层的主要磨损机制为磨粒磨损。VC 质量分数为 2%的复合涂层磨损表面见图 8b，可以看出犁沟较浅且呈现出明显的氧化物痕迹。对其进行 EDS 点扫描可知，O 元素的质量分数为 18.8%，说明该区域发生了氧化反应，生成了氧化物。VC 质量分数为 2%的复合涂层与未添加 VC 的涂层相比，犁沟变浅，表面更光滑，这主要是因为 VC 颗粒含量的增加促使涂层的显微硬度提高，同时在重载磨损过程中发生氧化，形成的氧化皮在周期性往复磨损过程中发生部分脱落，这些氧化皮破碎后起到了润滑的作用，一定程度上减少了较深犁沟的形成，进而提高了复合涂层的磨损性能，该条件下涂层的磨损体积和摩擦因数的变化趋势一致。这说明该涂层的主要磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损，同时伴随着粘着磨损。图 8c 为 VC 质量分数为

5%的复合涂层磨损表面，可以看到除了明显的犁沟外，部分区域的粘着特征十分明显，剥落范围大，该区域存在大量的麻点，属于典型的鳞剥形式，说明该涂层还存在疲劳磨损[27]。图 8d 为 VC 质量分数为 10%的复合涂层磨损表面，可以看出氧化皮掉落明显，重载过程中，由于塑性变形导致氧化皮随表面裂纹脱落，较细的氧化皮破碎后充当润滑剂，而较大且硬的脱落物继续充当磨屑在复合涂层表面形成新的犁沟。这说明该涂层的主要磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损，同时存在少量的粘着磨损[28-29]。

对各个涂层中对应的点进行 EDS 分析，发现未添加 VC 的合金涂层中，O 元素含量较少，而 H13/VC 复合涂层黑色区域中，O 元素含量较高，说明 3 种不同 VC 颗粒含量的复合涂层均发生了不同程度的氧化磨损，而未添加 VC 的合金涂层中氧化磨损不明显，其中 VC 质量分数为 10%时，其氧化程度最高（O 质量分数为 23.1%）。另外，随着超细 VC 颗粒含量的增加，V 元素不断固溶到富 Fe 固溶体中，达到固溶强化的效果，同时析出碳化物使得熔覆层的显微硬度提高，进而提高熔覆层的耐磨性。当 VC 质量分数为 2%时，熔覆层的显微硬度为 608.21$HV_{0.3}$，其塑性变弱，形成的氧化皮较薄，在磨粒磨损的基础上出现氧化磨损。而当 VC 质量分数提高到 5%时，熔覆层的固溶强化程度提高，显微硬度提高到 658.24$HV_{0.3}$，此时，不仅发生磨粒磨损和氧化磨损，而且出现疲劳磨损。与此同时，复合涂层局部形成氧化皮，表面出现明显的犁沟。最后，当 VC 质量分数提高到 10%时，虽然熔覆层的显微硬度进一步提高，但是在磨损过程中更容易发生氧化，其形成的氧化膜较厚、较大，疲劳磨损现象不明显，主要为氧化磨损和磨粒磨损。总之，超细 VC 的添加一定程度上提高了合金涂层的耐磨性，主要体现为氧化磨损和磨粒磨损，但随着 VC 含量的增加，其氧化磨损会逐渐加剧，粘着磨损减弱。

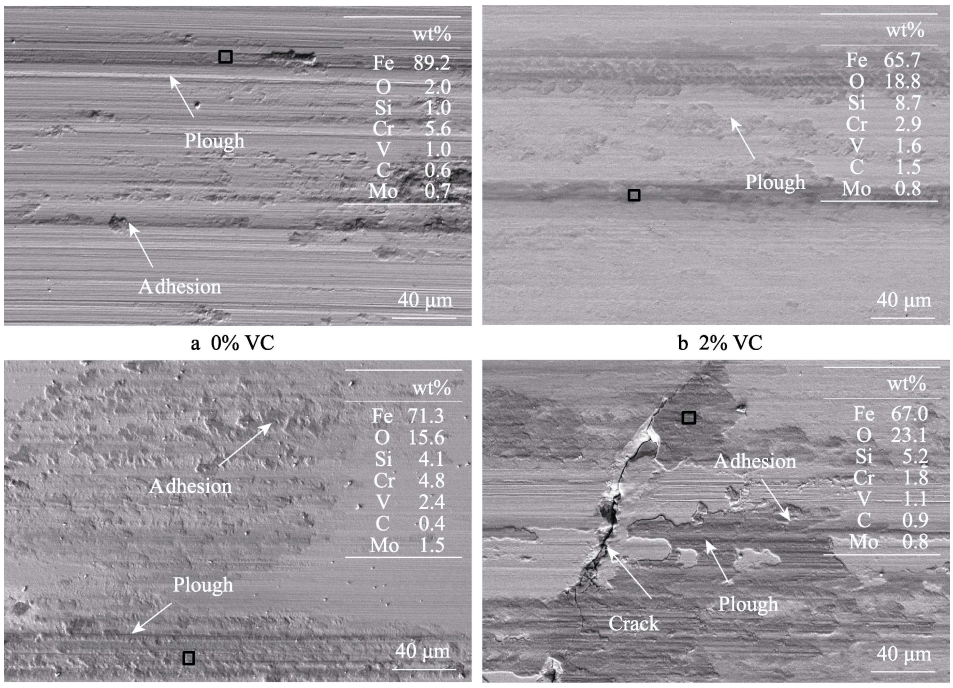


图 8　不同 VC 含量下激光熔覆 H13/VC 复合涂层的磨损表面

Fig.8 Wear morphologies of laser cladding H13/VC composite coatings with different VC contents

3　结论

1）激光熔覆 H13/VC 复合涂层与基体呈冶金结合，无明显气孔和裂纹等缺陷。超细 VC 在激光熔覆过程中完全熔解，能够显著地改变熔覆层的微观组织。复合涂层中的 V 元素随着超细 VC 颗粒含量的增加而增加，且不存在明显的 V 元素偏析。

2）超细 VC 颗粒起到了固溶强化的作用，促使熔覆层的显微硬度随着 VC 含量的增加而增加。未添加 VC 颗粒的 H13 熔覆层，其平均显微硬度为 504.21$HV_{0.3}$，随着超细 VC 含量的增加，复合涂层的显微硬度逐渐增加。VC 质量分数为 2%、5%、10%的复合涂层的显微硬度分别为 608.21、658.24、680.41$HV_{0.3}$。

3）超细 VC 颗粒有助于提高激光熔覆 H13 合金的耐磨性。当 VC 质量分数为 2%时，磨损体积比未添加 VC 颗粒试样的小，摩擦因数保持在较小的范围内，主要以磨粒磨损和氧化磨损为主，粘着磨损为辅。此后，随着 VC 含量的增加，试样的磨损体积呈下降的趋势，其磨损机制由于其成分的改变而发生变化。

参考文献：

[1] 吴志生, 云晖, 刘翠荣, 等. Q235 钢表面堆焊不锈钢的组织与性能[J]. 焊接技术, 2014, 43(3): 13-15.
WU Zhi-sheng, YUN Hui, LIU Cui-rong, et al. Microstructure and Properties of Surfacing Stainless Steel on Q235 Steel[J]. Welding Technology, 2014, 43(3): 13-15.

[2] 张群莉, 王梁, 梅雪松, 等. 激光表面改性技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 71-77.
ZHANG Qun-li, WANG Liang, MEI Xue-song, et al. Development of Laser Surface Modification Technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 71-77.

[3] 刘立君, 刘大宇, 王晓陆, 等. H13 钢激光熔覆陶瓷修复层的参数优化[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 65-70, 100.
LIU Li-jun, LIU Da-yu, WANG Xiao-lu, et al. Parameter Optimization of Laser Cladding Ceramic Repair Layer of H13 Steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 65-70, 100.

[4] 马群双, 李亚江, 王娟, 等. 宽束激光熔覆 Ni60/WC 复合层显微组织及抗剪强度[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 49-52, 131.
MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan, et al. Microstructure Characteristics and Shear Strength of Wideband Laser Clad Ni60 Composite Coatings Reinforced with WC Particle[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(12): 49-52, 131.

[5] 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 Zhao-hui, LI Mei-yan, HAN Bin, 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.

[6] 盛家锦, 王梁, 刘蓉, 等. 热处理对激光熔覆 IN939 合金涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 202-209, 252.
SHENG Jia-jin, WANG Liang, LIU Rong, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Performance of Laser Cladded IN939 Alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 202-209, 252.

[7] 陈希章, 胡科, 袁其兵. 激光熔敷原位合成 WC 增强铁基复合涂层的组织和性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 118-124.
CHEN Xi-zhang, HU Ke, YUAN Qi-bing. Microstructure and Performance of WC Reinforced Fe-Based Composite Coating Synthesized In-Situ Produced by Laser Cladding[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 118-124.

[8] MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan, et al. Microstructure Evolution and Growth Control of Ceramic Particles in Wide-Band Laser Clad Ni60/WC Composite Coatings[J]. Materials & Design, 2016, 92: 897-905.

[9] YAO Jian-hua, ZHANG Jie, WU Guo-long, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladded Composite Coatings Prepared from Pre-Alloyed WC-NiCrMo Powder with Different Laser Spots[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 520-530.

[10] 孙宁, 方艳, 张家奇, 等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602106.
SUN Ning, FANG Yan, ZHANG Jia-qi, et al. Effect of WC-12Co Addition on Microstructure and Wear Resistance of Inconel 625 Matrix Composites Prepared by Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602106.

[11] 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC 对激光熔覆热作模具的组织和磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702001.
CAO Jun, LU Hai-fei, LU Jin-zhong, et al. Effects of Tungsten Carbide Particles on Microstructure and Wear Resistance of Hot-Working Die Prepared via Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702001.

[12] VERDI D, GARRIDO M A, MÚNEZ C J, et al. Cr_3C_2 Incorporation into an Inconel 625 Laser Cladded Coating: Effects on Matrix Microstructure, Mechanical Properties and Local Scratch Resistance[J]. Materials & Design, 2015, 67: 20-27.

[13] 张伟. 激光熔覆 Fe45 与超细 VC 复合涂层的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 212-215.
ZHANG Wei. Microstructure and Properties of VC-Fe Composite Coating Prepared by Laser Cladding Technology[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(2): 212-215.

[14] 童文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1265-1274.
TONG Wen-hui, ZHANG Xin-yuan, LI Wei-xuan, et al. Effect of Laser Process Parameters on the Microstructure and Properties of TiC Reinforced Co-Based Alloy Laser Cladding Layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1265-1274.

[15] 孙文强, 张德强, 贾云杰, 等. 激光熔覆 WC/Ni 粉末对冷作模具刃口修复的实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 315-323.
SUN Wen-qiang, ZHANG De-qiang, JIA Yun-jie, et al. Experimental Study on Laser Cladding WC/Ni Powder to Repair the Cutting Edge of Cold Working Die[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 315-323.

[16] 谭金花, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ni60/h-BN 含量对激光熔覆钛基复合涂层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 107-115.
TAN Jin-hua, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Effect of Ni60/h-BN Content on Microstructures and Properties of Laser Cladding Titanium-Based Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 107-115.

[17] 张群莉, 姚中志, 周塘, 等. 前驱体对激光熔覆复合溶胶凝胶制备陶瓷涂层的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2):

1-9.
ZHANG Qun-li, YAO Zhong-zhi, ZHOU Tang, et al. Effect of Precursor on Preparation of Ceramic Coating by Laser Cladding Composite Sol-Gel[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 1-9.

[18] 徐国建, 杨文奇, 杭争翔, 等. Stellite-6+VC 混合粉末激光熔覆性能的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 165-170.
XU Guo-jian, YANG Wen-qi, HANG Zheng-xiang, et al. Performance of Clad Layer Using Mixed Powder of Stellite 6 and VC[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 165-170.

[19] 徐国建, 李春光, 郭云强, 等. 激光熔覆 Stellite-6+VC 混合粉末的熔覆层组织[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 73-78, 132.
XU Guo-jian, LI Chun-guang, GUO Yun-qiang, et al. Organization of Clad Layer Using Mixed Powder of Stellite 6 and VC[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(6): 73-78, 132.

[20] ZHU Li-da, XUE Peng-sheng, LAN Qing, et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.

[21] ACKER K V, VANHOYWEGHEN D, PERSOONS R, et al. Influence of Tungsten Carbide Particle Size and Distribution on the Wear Resistance of Laser Clad WC/Ni Coatings[J]. Wear, 2005, 258(1-4): 194-202.

[22] DESCHUYTENEER D, PETIT F, GONON M, et al. Influence of Large Particle Size up to 1.2 mm and Morphology on Wear Resistance in NiCrBSi/WC Laser Cladded Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 311: 365-373.

[23] 孙琳, 位超群, 隋欣梦, 等. SiC 颗粒尺寸对 TiNi 基熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502002.
SUN Lin, WEI Chao-qun, SUI Xin-meng, et al. Effects of SiC Particle Size on Microstructures and Properties of TiNi Based Cladding Layers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502002.

[24] 张杰, 张群莉, 陈智君, 等. 固溶温度对激光增材制造 Inconel 718 合金组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 47-53.
ZHANG Jie, ZHANG Qun-li, CHEN Zhi-jun, et al. Effects of Solution Temperature on Microstructure and Properties of Inconel 718 Alloy Fabricatedvia Laser Additive Manufacturing[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 47-53.

[25] MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan, et al. Investigation on Cored-Eutectic Structure in Ni60/WC Composite Coatings Fabricated by Wide-Band Laser Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 645: 151-157.

[26] 刘志宏, 刘元富, 张乐乐, 等. 激光熔化沉积 TiC/CaF_2/Inconel 718 复合材料的组织及高温摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102008.
LIU Zhi-hong, LIU Yuan-fu, ZHANG Le-le, et al. Microstructure and High-Temperature Friction and Wear Properties of TiC/CaF_2/Inconel 718 Composite Fabricated Using Laser Melting Deposition Technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102008.

[27] 石晨晓, 刘元富, 李勇, 等. 等离子熔化沉积 TiC 增强 Inconel 718 基原位自生复合材料显微组织及高温耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(5): 1497-1504.
SHI Chen-xiao, LIU Yuan-fu, LI Yong, et al. Microstructure and High Temperature Wear Resistance of TiC/Inconel 718 Composites In-Situ Synthesized by Plasma Melting Deposition Technique[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(5): 1497-1504.

[28] 郭士锐, 郭小锋, 易云杰, 等. 钛合金表面半导体激光气体氮化涂层的性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 201-206.
GUO Shi-rui, GUO Xiao-feng, YI Yun-jie, et al. Properties of Diode Laser Gas Nitriding Coatings on the Surface of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 201-206.

[29] YANG Li-jing, ZHANG Ping-xiang, WANG Shao-peng, et al. Microstructure and Wear Behavior of Hard Ni60 and Soft WC-12Co/Ni25 Coatings Prepared by Laser Cladding on W1813N Non-magnetic Stainless Steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(11): 3441-344.