doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.043

高速激光熔覆铁基自磨刃涂层及其性能研究

赵宝辉[1,2]　马　文[1,3]　恩德拉赫-米西格多杰[4]

（1. 内蒙古自治区新材料与表面工程重点实验室，呼和浩特 010051；2. 内蒙古自治区特种设备检验研究院呼伦贝尔分院，呼伦贝尔 021008；3. 内蒙古工业大学材料与科学工程学院，呼和浩特 010051；4. 俄罗斯科学院西伯利亚分院物理材料科学研究所，乌兰乌德 670047

摘要： 为提升铁基自磨刃的耐磨性能并改善农机零部件的使用寿命，在自磨刃模具(65 Mn)表面采用光纤同轴送粉激光熔覆技术，通过调控熔覆扫描速度，对Fe901硬质合金涂层的耐磨性和硬度进行了系统分析；利用XRD、SEM-EDS、摩擦磨损试验等手段，分析熔覆涂层的截面形貌、相组成、硬度及耐磨性能。研究结果表明，Fe901铁基硬质合金涂层显微组织主要是由奥氏体柱状晶和等轴枝晶组成，周围存在针状$(Cr, Fe)_7C_3$碳化析出物。涂层主要相包括α-Fe固溶体、$(Cr, Fe)_7C_3$混合碳化物和CrFeB硬质相。在高速激光熔覆扫描速度为3.0、4.2 m/min时，涂层平均硬度为767.80、829.97 $HV_{0.3}$，是65 Mn弹簧钢基体(275.2 $HV_{0.3}$)硬度的2.79、3.02倍。同时，涂层单位面积磨损量较无涂层磨损质量分别降低27.39%、32.78%，显著提升了耐磨性。本研究有效提高了Fe901铁基硬质合金涂层的硬度和耐磨性，并在改善铁基自磨刃的使用性能方面展现出应用潜力。

关键词： 自磨刃涂层；高速激光熔覆；Fe901硬质合金粉末；硬度；耐磨性

中图分类号： S220.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2024)S2-0419-08

Iron-based Self-grinding Coating and Its Properties Prepared by High-speed Laser Cladding

ZHAO Baohui[1,2]　MA Wen[1,3]　UNDRAKH Mishigdorzhiyn[4]

(1. *Inner Mongolia Key Laboratory of New Materials and Surface Engineering*, *Hohhot* 010051, *China*

2. *Hulunbeier Branch of Inner Mongolia Autonomous Region Special Equipment Inspection and Research Institute*, *Hulunbuir* 021008, *China*

3. *School of Materials Science and Engineering*, *Inner Mongolia University of Technology*, *Hohhot* 010051, *China*

4. *The Siberian Branch of the Russian Academy of Institute of Physical Materials Sciences*, *Ulan-Ude* 670047, *Russia*)

Abstract: To enhance the wear resistance of iron-based self-sharpening blades and improve the service life of agricultural machinery components, fiber-optic coaxial powder-fed laser cladding technology was employed on the surface of self-sharpening blade molds (65 Mn). By adjusting the cladding scanning speed, a systematic analysis of the wear resistance and hardness of Fe901 hard alloy coatings was conducted. Techniques such as XRD, SEM-EDS, and friction and wear testing were used to analyze the cross-sectional morphology, phase composition, hardness, and wear resistance of the cladding coatings. The results showed that the microstructure of the Fe901 iron-based hard alloy coating consisted primarily of austenitic columnar and equiaxed dendrites, with needle-like $(Cr, Fe)_7C_3$ carbide precipitates observed around the matrix. The main phases of the coating included α-Fe solid solution, $(Cr, Fe)_7C_3$ mixed carbides, and CrFeB hard phases. At high scanning speeds of 3m/min and 4.2 m/min, the average hardness of the coating was 767.80 $HV_{0.3}$ and 829.97 $HV_{0.3}$, respectively, which were 2.79 and 3.02 times of the hardness of 65 Mn spring steel substrate (275.2 $HV_{0.3}$). Moreover, the wear volume per unit area of the coating was reduced by 27.39% and 32.78% compared with that of the uncoated substrate, significantly enhancing wear resistance. The research not only effectively improved the hardness and wear resistance of the Fe901 iron-based hard alloy coating but also demonstrated significant potential for enhancing the

收稿日期：2024-07-16　修回日期：2024-08-20

基金项目： 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220041)和内蒙古自治区青年科技人才发展项目(NMGIRT2319)

作者简介： 赵宝辉(1992—)，男，硕士生，主要从事激光熔覆研究，E-mail: 779860498@qq.com

通信作者： 马文(1973—)，男，教授，博士生导师，主要从事金属表面防护研究，E-mail: w.ma@imut.edu.cn

performance of iron-based self-sharpening blades.

Key words: self-sharpening coating; high-speed laser cladding; Fe901 tungsten carbide powder; hardness; wear and corrosion

0 引言

在现代农业制造领域,刀具性能直接影响工作效率和产品质量[1]。然而,传统刀具在高负荷工作环境中容易磨损且效率低下,不仅缩短了工具使用寿命,还增加了生产成本[2-3]。为了解决这些问题,自磨刃刀具应运而生。这种新型设计的农用刀具能够在使用过程中自动补偿刃口断面并保持刀尖圆弧半径(R≤0.2 mm),从而延长其有效使用寿命。然而,制造自磨刃刀具仍面临许多挑战,包括合金层均匀性、熔覆层与基材的结合强度,以及其在实际应用中的耐久性[4-7]。

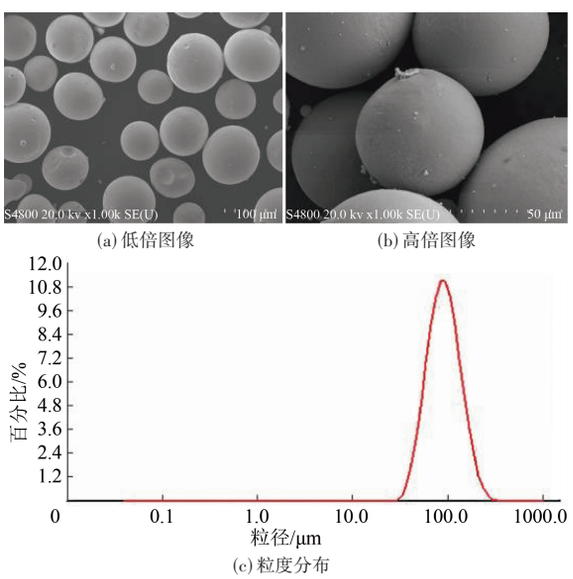
激光熔覆技术因其能精确控制焊缝位置、形状和加工尺寸,被认为是制作自磨刃刀具的理想方法之一。通过该技术可以优化微观结构,改善熔覆材料性能,提高材料的硬度和耐磨性[8-9]。此技术在制作农用自磨刃刀具上有诸多研究。WU等[10]在65 Mn试样表面采用传统激光熔覆制作梯度涂层,优化了扫描速度和送粉速率,结果显示提高了涂层的结合强度和硬度,该涂层在土壤试验中表现出优异的耐磨性和耐久性,用于旋耕机叶片时,质量损失减少81.15%。XU等[11]采用激光熔覆技术在65 Mn青贮刀刃口一侧制备了组织致密、无裂纹的Ni-WC合金耐磨层,熔覆层与基体之间形成冶金结合,硬度和韧性最佳,耐磨性显著提高,使用寿命是原始刀具的两倍。传统的激光熔覆其熔覆速度一般低于2 m/min,熔覆层厚、热输入高、组织缺陷多,极大限制了它在工程技术的发展。相较于传统激光熔覆,高速激光熔覆技术(High-speed laser cladding technology, HSLC)可以将熔覆速度提升至2 m/min以上,其可以有效避免熔覆层产生气孔缺陷,能使自磨刃具备最佳厚度,更高的硬度和更好的耐磨性[12]。然而,当前对高速激光熔覆在自磨刃方面的应用还鲜有相关研究结果。

本研究选择在65 Mn弹簧钢基体表面采用不同的熔覆速度制备Fe901硬质合金涂层,通过对熔覆涂层的微观组织、硬度、耐磨性对比,分析HSLC技术对自磨刃涂层硬度、耐磨性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

使用粒径为45~110 μm的Fe901工业级粉末(北矿新材科技有限公司),其显微形貌如图1所示,并通过场发射扫描电子显微镜(FEI Quanta FEG 650型,日本)进行EDS分析。试验前Fe901粉末需在120 ℃下干燥1 h。基体材料为直径D为50 mm、厚度δ为4 mm的65 Mn样片。Fe901粉末和基材的化学成分见表1。每个样片先用粒度320的SiC砂纸研磨,然后用去离子水和乙醇进行3次超声清洗。



(a) 低倍图像 (b) 高倍图像

(c) 粒度分布

图1 Fe901粉末显微组织和粒度分布图

Fig. 1 Microstructure and particle size distribution of Fe901 powde

表1 Fe901粉末和65 Mn钢化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Fe901 and 65 Mn steel powder %

元素	Fe	B	Cr	C	Si	Mn
Fe901	Bal.	14.14	12.51	1.43	0.93	
65 Mn	Bal.			0.62	0.19	0.94

注:Bal.为余量。

1.2 试验方法

1.2.1 涂层制备

使用RFL-C4000X型连续光纤激光器(武汉锐科光纤激光器技术有限责任公司)对65 Mn基体进行涂层的激光熔覆。激光器波长为1 080 nm,光斑直径为4 mm,最大功率为4 kW。同轴粉末进料通过氩气以一定流速同步驱动。在高功率激光束作用下,粉末在基体上方预先熔化,使熔融状态的涂层材料在局部激光束的照射下沉积到基体表面。图2为高速激光熔覆涂层示意图。试验在保护室内进行,保护气(氩气)以流速15 L/min连续供应,防止激光熔覆头和熔覆层表面被氧化。

1.2.2 试验参数确定

为了确保Fe901镀层具备优异的耐磨损特性,合理调控工艺参数至关重要。激光功率、搭接率、送粉速率和熔覆速度等参数对涂层厚度、微观结构均匀性、材料与基体稀释程度以及最终力学性能均有显著影响[13]。基于这些因素,本研究系统地调整了以往的试验数据参

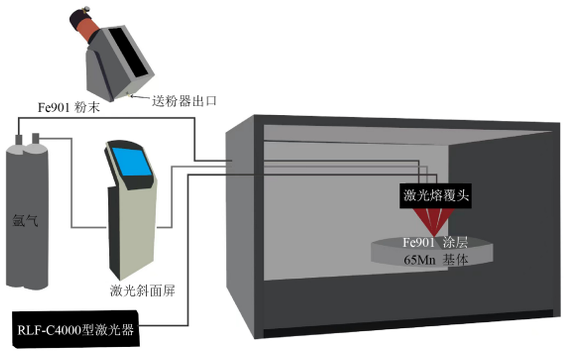


图2　高速激光熔覆涂层示意图

Fig. 2　Schematic diagram of high-speed laser cladding

数，特别是在熔覆速度为4.2 m/min、搭接率50%时，熔覆层并不连续，以此为基础确定最佳加工条件。相关数据如表2所示。

表2　激光熔覆Fe901涂层工艺参数

Tab. 2　Multiple variations in processing parameters of Fe901 coatings

试验编号	功率/W	熔覆速度/(m·min^{-1})	搭接率/%	送粉速率/(g·min^{-1})
a	2 000	1.8	50	24
b	2 000	3.0	50	24
c	2 000	4.2	65	24

为进行显微组织形貌分析，首先利用线切割机器对制备好的熔覆样品进行切割得到截面层。然后，将切割后试样依次用粒度80~1 600目SiC砂纸进行粗磨，并用抛光布和0.5 μm金刚石抛光液进行精细抛光，直至获得无划痕的镜面状表面。随后，使用王水(HCl和HNO_3按物量比3∶1组成的混合物)对试样的截面及表面进行3 s腐蚀。

1.2.3　涂层显微组织形貌观察和相组成分析

通过场发射扫描电子显微镜(FEI Quanta FEG 650型，日本)观察Fe901涂层显微形貌，并使用能谱仪(EDS)对涂层进行微区成分分析。

采用X射线衍射仪(D/MAX-2500/PC型，日本)对不同扫描速度的涂层物相进行分析。测试过程中，使用Cu-Kα靶，电压40 kV，电流30 mA，扫描速度为3 (°)/min，扫描范围为20°~90°。

1.2.4　涂层显微硬度和耐磨性测试

使用维氏显微硬度测试仪(FM-810型)测量涂层横截面的显微硬度，选定的试验载荷为0.3 kg，停留时间为15 s。测量从熔覆区到65 Mn钢基体的垂直剖面，进行5次相邻压痕，并记录平均值。

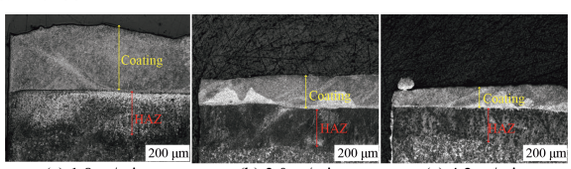
制备尺寸为15 mm×15 mm抛光试样，使用直径为5 mm的WC陶瓷球作为摩擦副，使用BRUKER UMT TRIBOLABTM系统在试验条件为对摩阻力20 N、频率5 Hz、时间15 min条件下进行测试。再通过TriboLab Viewer软件对摩擦因数进行分析。

采用砂纸摩擦磨损试验机(济南益华摩擦学测试技术有限公司，MS-003型)进行滑动摩擦磨损试验，以研究涂层耐磨性。将180目的SiC砂纸固定在钛合金圆环上作为摩擦副，试验力为20 N，摩擦副旋转一圈的有效滑动距离为23 m。记录每次摩擦磨损试验后的样品失重量，并用扫描电镜分析样品表面的摩擦形貌，以最终判断其摩擦磨损机理。

2　结果与分析

2.1　涂层显微形貌和相组成

图3为激光熔覆试样的光学显微镜(OM)图像。从图中可以看出，通过3次试验，改变激光扫描速度和搭接率形成了不同厚度的熔覆层熔覆层厚度分别为754.05、398.68、206.79 μm。而高速激光熔覆具备厚度更薄的熔覆层和更低的稀释率[13]。由于该熔覆层具有优异的深熔透性，铁基硬质涂层与65 Mn基体之间形成了良好的冶金结合[14]。



(a) 1.8 m/min　(b) 3.0 m/min　(c) 4.2 m/min

图3　不同激光熔覆速度下Fe901铁基硬质合金涂层的光学显微镜图像

Fig. 3　Optical microscope images of Fe901 Fe-based cemented carbide coatings at various laser cladding speeds

图4为涂层底部的微观结构，主要由柱状晶和等轴枝晶组成。温度梯度G和生长速率R是决定冷凝微结构形成的关键因素[15]。

$$\frac{G}{R} \leqslant \frac{\Delta T_E}{D_L}$$

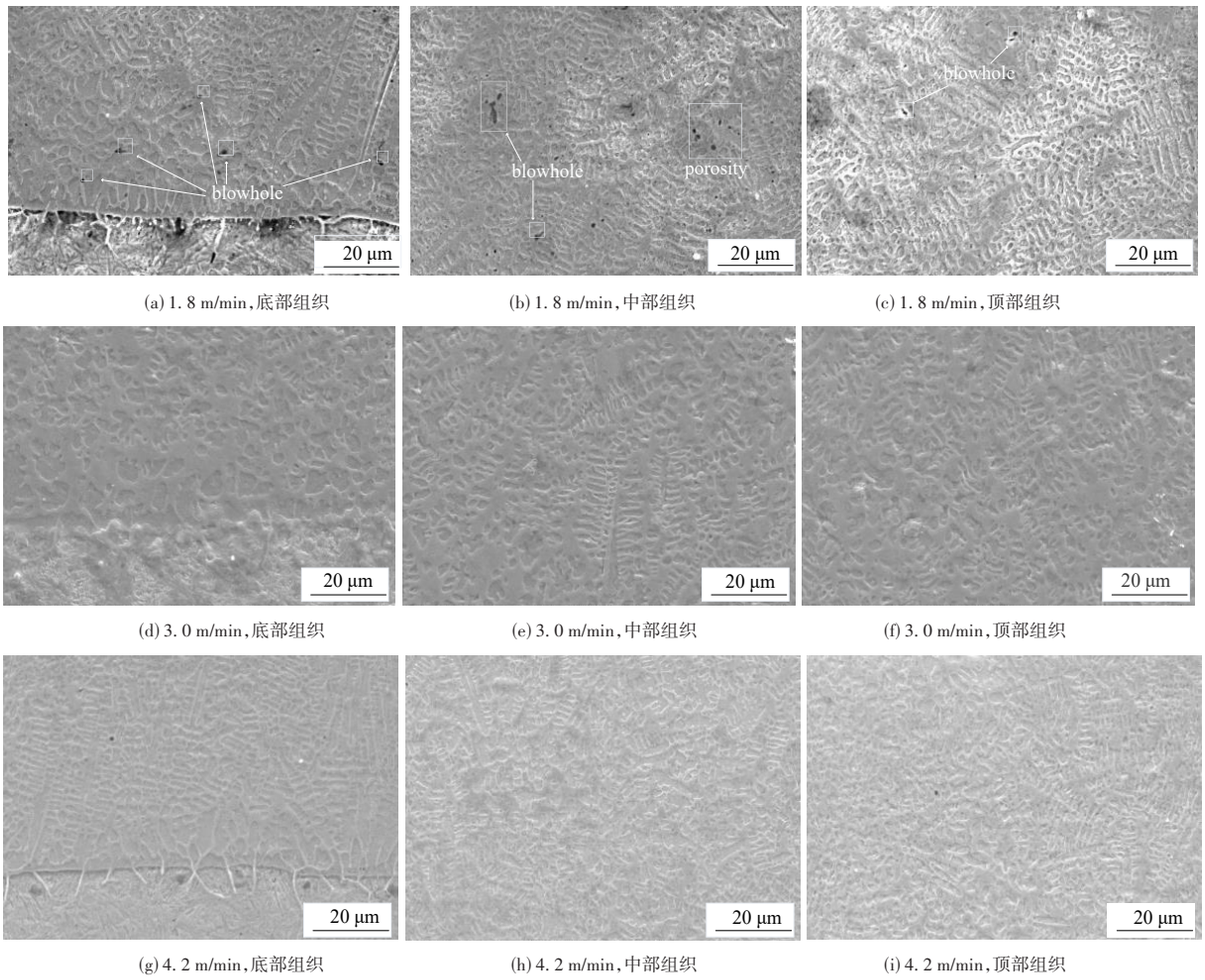
式中　ΔT_E——合金固相线与液相线之间的温差

D_L——合金中溶质扩散速率

显微组织演变主要取决于G与R之比。理论表明，较高的G/R和较低的$G\times R$会在熔池底部形成平面晶体，而较低的G/R和较高的$G\times R$会在熔池顶部形成更细的等轴晶粒，如图4h、4i所示。

图4a~4c中显示出气孔缺陷。其主要原因是在激光熔覆过程中，铁基粉末材料受到高能激光的快速加热并迅速熔化，形成的熔池内发生了一系列复杂的物理和化学反应，包括脱气、排渣和脱氧等。由于激光熔覆过程中的快速非平衡凝固，熔池寿命极短，尽管生成的气体具有低密度和快速上浮的特点，但仍可能在晶界附近聚集形成气孔缺陷。这是因为熔池固化速率超过了气泡逸出速度，导致部分气体无法在结晶前释放。这种现象与之前的研究结果一致[16]。

如图4d所示，当过渡涂层开始凝固时，金属熔池与65 Mn基体之间存在较大的G，R趋于0，导致在基体相邻的凝固界面处生长平面晶体。随着结晶的进行，G减小，



(a) 1.8 m/min,底部组织 (b) 1.8 m/min,中部组织 (c) 1.8 m/min,顶部组织

(d) 3.0 m/min,底部组织 (e) 3.0 m/min,中部组织 (f) 3.0 m/min,顶部组织

(g) 4.2 m/min,底部组织 (h) 4.2 m/min,中部组织 (i) 4.2 m/min,顶部组织

图4 不同激光熔覆速度下Fe901铁基硬质合金涂层的显微形貌

Fig. 4 Microstructure of Fe901 iron-based cemented carbide coating at different laser cladding speeds

而R逐渐增大,导致G/R逐渐减小。因此,平面晶粒界面的稳定性被破坏,在热流方向上形成枝晶和多边形晶粒混合的微观结构,如图4e、4f所示[17]。

决定凝固形貌的参数G/R从下至上逐渐减小。在凝固的最后阶段,G/R非常小,有利于新晶核的形核和生长。大量新晶核向各个方向生长,阻碍了柱状晶的生长,形成细小的等轴晶体。在凝固过程中,高含量的铁、Cr和C主导了晶粒的形核和生长。富铬枝晶首先从液相中分离出来,垂直于键合界面向外生长。较高的生长速率通常导致较低的G/R,这有助于在单层增材制造(AM)试样中形成平面或蜂窝状微观结构。快速凝固动力学限制了晶体生长方向的选择性,导致更加细小且复杂的几何形状[18]。

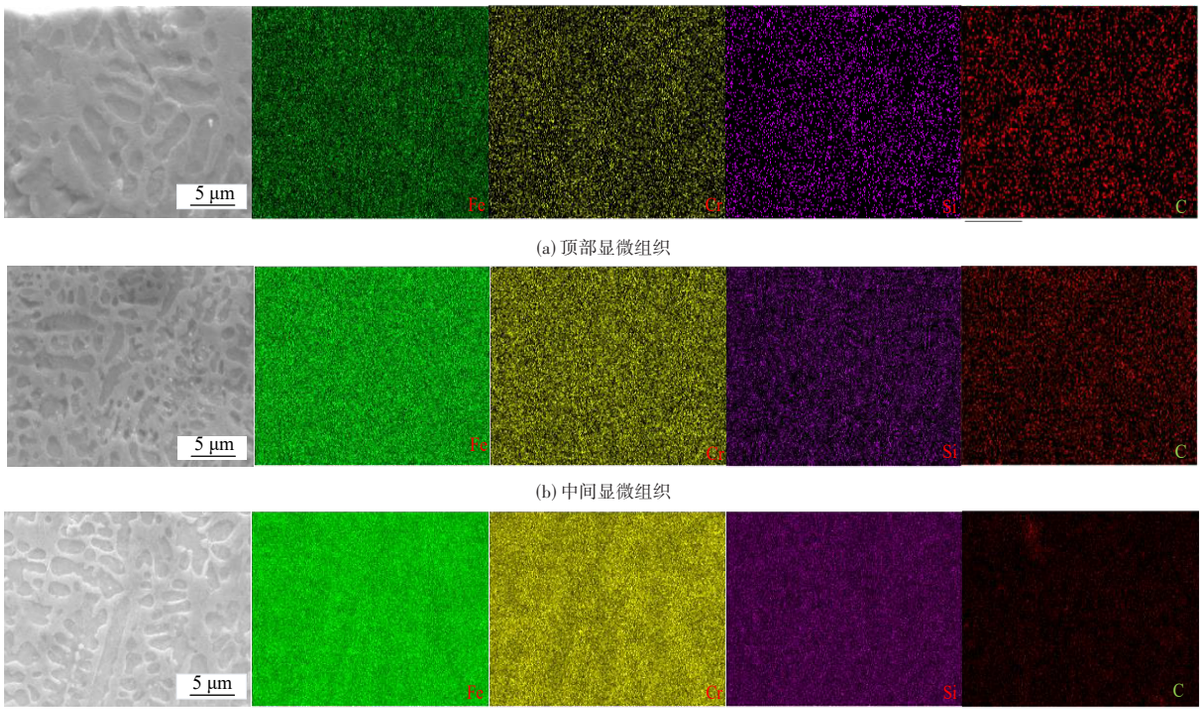
相比之下,在搭接激光熔覆过程中,由于层间的热累积效应以及后续重熔的部分会重新熔化部分先前层的材料,可以观察到柱状晶或等轴枝晶的形成。这种差异主要是由于不同层之间的接合和温度场变化导致的。在多层堆积过程中,每一层材料的加入都会改变局部的冷却条件,从而影响G/R值,进一步控制微结构的演化[18-21]。

如图4d~4i所示,将激光熔覆速度从3.0 m/min增加到4.2 m/min,显示了Fe901铁基硬质合金涂层在不同扫描速度下的二次电子图像。从图中可以发现,Fe901硬质合金涂层在速度3.0 m/min和4.2 m/min下均呈现均匀致密的结构。高生长速率导致G/R比降低至中等水平,并在涂层底部形成蜂窝状结构,如图4e、4h和图4f、4i所示。在涂层中部和顶部分别观察到柱状晶和等轴枝晶。与涂层底部相比,涂层其余部分具有更高的固化速率R和适度的温度梯度。这是由于Fe901涂层经历了重叠(65%)的重复重熔过程,导致在涂层中间区域出现柱状枝晶。

涂层顶部形成等轴晶的原因包括:①涂层顶部区域暴露于空气中,较高的冷却速率(过冷度)促进了等轴晶的形成。②局部的微观偏析降低了熔点,并增加了在枝晶前沿成核的可能性,从而抑制了柱状晶的生长。这些因素共同作用,导致了涂层顶部等轴晶的形成[13]。

图5为扫描速度为4.2 m/min的Fe901硬质合金涂层的显微组织。通过EDS和XRD分析表明,中间涂层内部的枝晶为$(Cr,Fe)_7C_3$,主要呈棒状或叶片状。叶片状树突为不规则多边形,中心中空,边缘有间隙,如图5b所示。底部涂层中致密的片状结构也含有$(Cr, Fe)_7C_3$,但C含量较低,如图5c所示。

已有研究表明,较高的C含量有利于初始$(Cr, Fe)_7C_3$碳化物的形成,同时抑制共晶生长。本试验



(a) 顶部显微组织

(b) 中间显微组织

(c) 底部显微组织

图5　4. 2 m/min时Fe901硬质合金涂层的显微组织图及其EDS扫描结果

Fig. 5　Microstructure of 4. 2 m/min Fe901 cemented carbide coating and its EDS scanning results

结果支持这一发现，表明中间涂层中较高的C含量促进了$(Cr, Fe)_7C_3$的形成，而底部涂层中较低的C含量则导致了不同的显微结构。

图6为不同扫描速度下Fe901合金粉末熔覆涂层的XRD图谱。结果表明，该区域生成α-Fe固溶体相，并伴有共晶峰。根据XRD结果，扫描速度为3.0 m/min和4.2 m/min的熔覆层具有相似的物相。涂层主要由α-Fe固溶体、$(Cr, Fe)_7C_3$混合碳化物和CrFeB硬质相组成。在XRD图谱中，还可以观察到一些谱峰紧密重叠，这可能是由于凝固过程中形成了固溶体引起的。由于Fe和Cr具有相似的原子尺寸和体心立方(BCC)晶体结构，它们能够在生长相中相互替代。因此，Fe原子可以在晶格结构中替代Cr原子，从而形成$(Cr, Fe)_7C_3$混合碳化物。这种固溶体的形成表明，在凝固过程中，Cr和Fe原子在晶体生长过程中以一种相对均匀的方式互换位置，导致了谱峰的重叠和混合碳化物的生成[22]。另外，随着扫描速度的增加，衍射线条变得弥散而宽化。X射线衍射谱带宽化程度越大，表明晶体晶粒越小，由上文涂层的显微形貌中可以证明该结论。

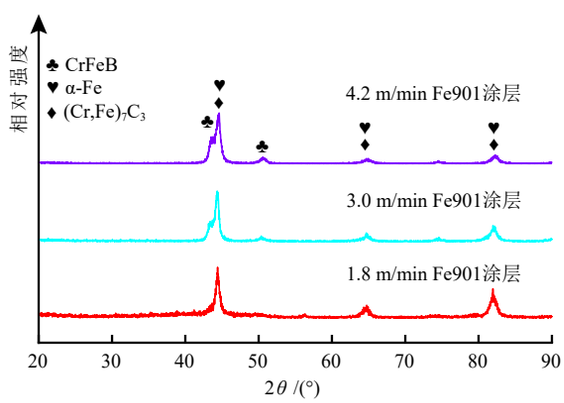


图6　不同熔覆速度Fe901硬质合金涂层XRD图谱

Fig. 6　XRD patterns of Fe901 coatings at various laser cladding speeds

2. 2　涂层显微硬度和耐磨性

由图7可知在不同激光熔覆速度下的Fe901硬质合金涂层的硬度。所有试样的显微硬度分布曲线基本一致。所有试样的显微硬度均呈现先升高后保持稳定的趋势。扫描速度为1.8、3.0、4.2 m/min的Fe901硬质合金涂层平均显微硬度分别为874.9、767.8、829.9 $HV_{0.3}$，分别是基体65 Mn弹簧钢(275.2 $HV_{0.3}$)的3.18、2.79、3.02倍。涂层硬度与基体之间形成硬度梯度，其原因是在高速激光熔覆过程中，选用能量密度极高的激光束作为热源对选定的粉末进行瞬间熔化，并将其引导至底材表面形成的熔池里。这一过程催生了熔覆层与基材之间的强冶金性结合，同时限制了向基材内部传递的热量，保护了基材不受过度热影响。刀后部较基体具有更高硬度差异的梯度分布更有益于刀具自磨，刀刃可以设计为带有特殊的结构，当边缘发生磨损时，新的边缘形状会自动生成。例如，在微观层面上的凹凸不平结构可以在磨损时露出新的锋利部分[11]。

图8为对65 Mn基体和Fe901硬质合金涂层表面进行摩擦因数试验结果。在所有摩擦因数(COF)曲线中，在初期阶段有一个急剧的上升。这一现象可以归因于初

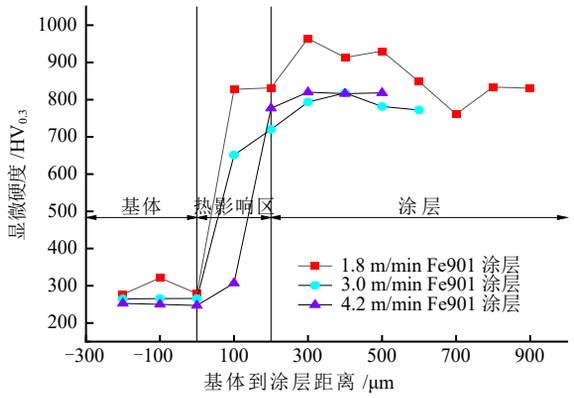


图7 不同熔覆速度Fe901涂层硬度

Fig. 7 Hardness of Fe901 coating at different laser cladding speeds

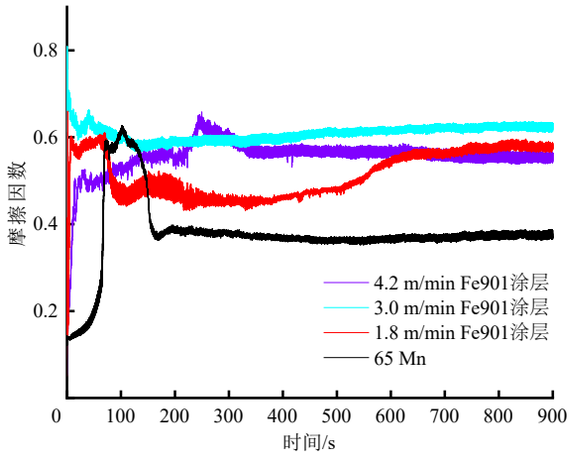


图8 65 Mn基体和不同扫描速度涂层的摩擦因数变化曲线

Fig. 8 Friction coefficient curves of 65 Mn substrate and coatings with different scanning speeds

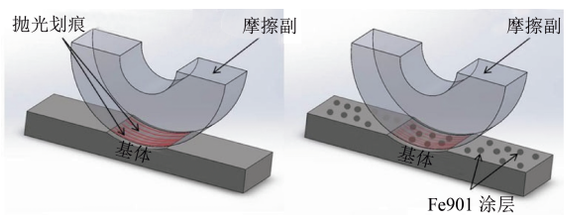


图9 摩擦试验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of friction test

始接触面积较小,从而在涂层表面引起较高的接触应力,导致涂层迅速磨损[23]。随着磨损试验的进行,摩擦副影响涂层的表面形态,相互摩擦过程中逐渐打磨涂层的表面使其变得平整。这一过程增加了接触面积并降低了磨损率,最终使系统进入一个稳态。65 Mn基体在摩擦副的作用下随时间开始变化,摩擦因数在持续增大后开始下降,直至趋于稳定到0.463。扫描速度为1.8、3.0、4.2 m/min时稳定磨损阶段时涂层的摩擦因数为0.603、0.577、0.544。

为了测试高速激光熔覆层的摩擦磨损特性,对基体和Fe901硬质合金涂层的表面进行了摩擦磨损试验。图9为摩擦试验示意图。

在加载载荷为20 N条件下,使用SiC砂纸作为摩擦副,对表面进行往复滑动摩擦,以模拟实际摩擦工况。如图10所示,不同扫描速度下基体和涂层的SEM表面磨损形貌揭示,在摩擦力20 N作用下,基体和涂层表面均出现了平行于磨削方向的犁沟,未发现裂纹,磨损机制主要为磨粒磨损。随着扫描速度的增加,激光熔覆层磨损表面的犁沟逐渐变细且变浅。基体表面有较明显的氧化和脱碳现象,但在涂层中未出现。

由图11可知,在23、46、69 m滑动摩擦后,65 Mn基体的磨损失重分别为0.082 9、0.169、0.241 g/mm^2,而4.2 m/minFe901涂层的磨损失重分别为0.048、0.109、0.162 g/mm^2。由此可见,65 Mn钢表面熔覆Fe901涂层后,材料的耐磨性能得到了显著提升。与65 Mn钢基体相比,Fe901涂层具有较大的摩擦因数和较小的磨损质量损失。

这一技术显著提升Fe901涂层耐磨性能的原因部分在于$(Cr, Fe)_7C_3$具有高硬度和优异的耐磨性,这解释了涂层具有高耐磨性的现象[24]。另外,激光熔覆合金中Cr元素含量较高(质量分数为13%)。已有研究表明[25],当钢中Cr元素质量分数超过12%时,表面会形成致密稳

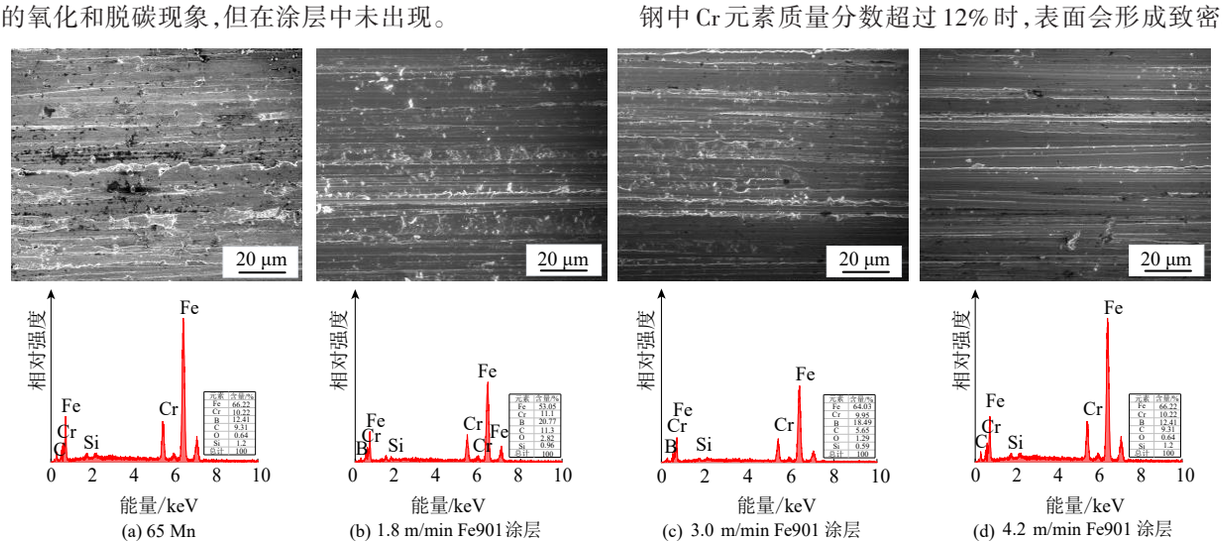


图10 65 Mn基体和不同扫描速度涂层的SEM表面磨损形貌和表面EDS

Fig. 10 SEM surface wear morphology of 65 Mn substrate and coatings at different scanning speeds and EDS

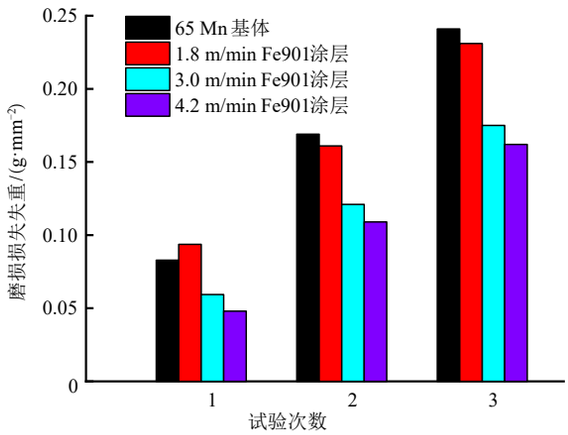


图11　65 Mn基体和不同扫描速度涂层的滑动摩擦损失失重

Fig. 16　Weight loss of sliding friction of 65 Mn substrate and coatings with different scanning speeds

定的Cr_2O_3薄膜，抑制表面与氧元素的结合，因此激光熔覆层磨损表面的氧含量较低。这一现象的原因是基材中引入了少量附加元素到熔覆层中。

3　结论

（1）XRD分析表明，涂层由α-Fe固溶体、$(Cr, Fe)_7C_3$碳化物和CrFeB硬质相组成，晶粒尺寸随扫描速度增加而减小，硬度和耐磨性显著提高。

（2）优化工艺参数（功率2 kW、扫描速度4.2 m/min、搭接率65%、送粉速度24 g/min）成功制备出206.79 μm无缺陷硬质合金涂层。该涂层硬度较65 Mn基体提高3.02倍，抗磨损性能显著提升。在69 m滑动摩擦试验中，涂层磨损较基体失重减小0.079 g/mm²，表现出优异的耐磨性。

（3）优异的硬度梯度曲线不仅提升了涂层的耐磨性，还通过逐步暴露出新的锋利刀刃，实现了自磨合效果，因此成为自磨刃刀具理想的涂层结构设计之一。

（4）高Cr含量促使表面形成Cr_2O_3薄膜，提升抗氧化能力，动态再结晶进一步改善了力学性能。

参　考　文　献

[1] REFAI M, ABDELKADER T K, SAYED H A A, et al. Wear behavior and CO_2 emissions analysis of drum mower blades during alfalfa harvest[J]. SN Applied Sciences, 2023, 5(12): 316.

[2] HUANG Jianhong. Advantages and disadvantages of carbide during wearing of sharp cutter blade for agriculture machine[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(12): 50 - 54.

[3] HUANG Yongjun, ZHANG Guozhong. Microstructure and property of 65 Mn steel preheated by laser strengthening[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 53 - 57.

[4] MEI Yiming, YU Zhonghua, YANG Zhensheng. Numerical investigation of the evolution of grit fracture and its impact on cutting performance in single grit grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 3271 - 3284.

[5] BORGES D, DIEGO J, ADRIEL M, et al. A review on the production of grinding tools through additive manufacturing processes: from current possibilities to future perspectives[J]. Machining Science and Technology, 2023, 27(5): 472 - 530.

[6] XU Lingfeng, SONG Zhanhua, LI Mingxiang, et al. Self-grinding silage knife strengthened with Ni-WC alloy prepared by laser cladding [J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 10236.

[7] WU Kun, BAI Chunhao, REN Longlong, et al. Study on low-damage cutting of alfalfa stalks by self-sharpening blades of gradient material with carbon-nitron-boronized heat-treatment[J]. Coatings, 2022, 12(9): 1319.

[8] LIU Xingfa, TIAN Zingli, ZHANG Xianfeng, et al. "Self-sharpening" tungsten high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2020, 186: 257 - 266.

[9] ROSTEK T, HOMBERG W. Locally graded steel materials for self-sharpening cutting blades[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 2185 - 2190.

[10] WU Xin, FENG Songke, ZHANG Weiguo. Microstructure, phase composition and wear properties of iron-based gradient coatings by laser cladding on 65Mn steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 477: 130290.

[11] XU Lingfeng, SONG Zhanhua, LI Mingxiang, et al. WC-high entropy alloy reinforced long life self-grinding silage knife prepared by laser cladding[J]. Nanomaterials, 2022, 12(6): 1013.

[12] FU Jiacheng, GUI Wanyuan, QIN Jingyan, et al. High-speed laser-clad 3533-00 Fe-based cemented carbide coatings on nuclear power valve sealing surface to enhanced wear and corrosion resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2024,480: 130594.

[13] GUI Wanyuan, ZHONG Cheng, GU Junyi, DING Yuhang, et al. Laser-clad Inconel 625 coatings on Q245R structure steel: microstructure, wear and corrosion resistance[J]. Materials Degradation, 2022, 6(1): 37.

[14] VOGT S, MARCO G, ELIANA F. Perspectives for conventional coating processes using high-speed laser cladding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144(4): 044501.

[15] XI Wenchao, SONG Boxue, WANG Zixuan, et al. Effect of laser re-melting on geometry and mechanical properties of YCF102 cladding layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 408: 126789.

[16] LI Qian, ZHANG Yalong, ZHANG Liang, et al. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129342.

[17] PATEL S, PRADEEP R, ARVIND K. A methodology to integrate melt pool convection with rapid solidification and undercooling kinetics in laser spot welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 164: 120575.

[18] LI Mingke, HUANG Kepeng, YI Xuemei. Crack formation mechanisms and control methods of laser cladding coatings: a review[J]. Coatings, 2023, 13(6): 1117.

[19] HEMMATI, I, OCELÍK V, DE HOSSON J T M. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46: 3405 - 3414.

[20] DU Baoshuai, ZOU Zengda, WANG Xinhong, et al. In situ synthesis of TiB_2/Fe composite coating by laser cladding[J]. Materials Letters , 2008, 62: 689 - 691.

[21] WANG Xinhong, ZHANG Min, QU Shiyao. Development and characterization of (Ti, Mo) C carbides reinforced Fe-based surface composite coating produced by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(9): 893 - 898.

[22] LI Jianfeng, ZHU Zhencai , PENG Yuxing , et al. Phase evolution and wear resistance of in-situ synthesized (Cr, W) $_{23}C_6$-WC composite ceramics reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding[J]. Vacuum, 2021, 190: 110242.

[23] OLIVEIRA J P, LALONDE A D, MA. J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108762.

[24] ZHANG Qi, HAN Bin, LI Meiyan, et al. Comparison of CoCrFeNi coatings prepared via high-speed laser cladding and normal laser cladding on microstructure and properties[J]. Intermetallics, 2023, 153: 107795.

[25] 张文华. 不锈钢及其热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,2010.

(上接第410页)

[19] DANIEL G P, OLUREMI O, JORGE Y, et al. A novel strain-based method to estimate tire conditions using fuzzy logic for intelligent tires [J]. Sensors, 2017,17(2):350.

[20] 黄小靖,张峰,张士文,等.智能轮胎的垂向载荷测量[J].汽车工程,2020,42(9):1270 - 1276,1283.
HUANG Xiaojing, ZHANG Feng, ZHANG shiwen, et al. Vertical load measurement of automotive intelligent tire [J]. Automotive Engineering, 2020,42(9):1270 - 1276,1283. (in Chinese)

[21] 王岩,梁冠群,危银涛.基于支持向量机的智能轮胎路面辨识算法[J].汽车工程,2020,42(12):1671 - 1678,1717.
WANG Yan, LIANG Guanqun, WEI Yintao. Road identification algorithm of intelligent tire based on support vector machine [J]. Automotive Engineering, 2020,42(12):1671 - 1678,1717. (in Chinese)

[22] CIRO T, SALVATORE S, MARIO T, et al. A strain-based estimation of tire-road forces through a supervised learning approach[C]// IEEE International Workshop on Metrology for Automotive,2023: 187 - 192.

[23] XU N,ZHOU J F,BARBOSA B H G, et al.A soft sensor for estimating tire cornering properties for intelligent tires[J].IEEE Transactions on Systems Man,2023,53(10):6056 - 6066.

[24] 刘卫东,韩宗志,高镇海,等.基于智能轮胎系统的实时路面辨识技术[J].汽车工程,2024,46(4):617 - 625.
LIU Weidong, HAN Zongzhi, GAO Zhenhai, et al. Real-time pavement recognition technology based on intelligent tire system [J]. Automotive Engineering,2024,46(4):617 - 625. (in Chinese)

[25] 刘志浩,刘钇汛,高钦和,等.基于解析弹性基础的重载轮胎动力学建模与分析[J].机械工程学报,2021,57(19):102 - 112.
LIU Zhihao, LIU Yixun, GAO Qinhe, et al. Kinematic modeling and analysis of the tire model with the analytical elastic foundation for the heavy-loaded radial tire[J]. Journal of Mechanical Engingeering, 2021,57(19):102 - 112. (in Chinese)

[26] ZOU D F, WANG Z D, ZHANG L M, et al. Deep field relation neural network for click-through rate prediction[J]. Information Science, 2021,577:128 - 139.

[27] 丁军,古愉川,黄霞,等.基于改进遗传算法优化人工神经网络的304不锈钢流变应力预测准确性研究[J].机械工程学报,2022, 58(10):78 - 86.
DING Jun, GU Yuchuan, HUANG Xia, et al. Research on prediction accuracy of flow stress of 304 stainless steel based on artificial neural network optimized by improved genetic algorithm[J].Journal of Mechanical Engingeering,2022,58(10):78 - 86. (in Chinese)

[28] 叶壮,余建波.基于多通道加权卷积神经网络的齿轮箱振动信号特征提取[J].机械工程学报,2021,57(1):110 - 120.
YE Zhuang, YU Jianbo. Feature extraction of gearbox vibration signals based on multi-channels weighted convolutional neural network [J]. Journal of Mechanical Engingeering, 2021,57(1):110 - 120. (in Chinese)

[29] CHU R H, CHEN Y K, KONG T, et al. ICM-3D: Instantiated category modeling for 3D instance segmentation[J].IEEE Robotics and Automation Letters,2022,7(1):57 - 64.