DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4056

熔覆电流对高钼高钒铁基硬质涂层组织结构与性能的影响

张　顶[1,2],宋庆雷[3],张　平[1],郭喜平[2],柳学强[3],沈承金[1]

(1. 中国矿业大学 材料与物理学院,江苏 徐州 221116; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 3. 徐州巴特工程机械股份有限公司,江苏 徐州 221005)

摘　要:刃板的磨损失效往往导致整个挖斗报废,为了提高其耐磨性能,采用等离子熔覆技术在刃板材料 Q345B 表面制备高钼高钒铁基耐磨涂层,研究熔覆电流(120、140、160 A)对涂层组织结构的影响,考察涂层的显微硬度、摩擦磨损与耐冲击性能。结果表明,电流大小对涂层的组织结构与界面状态影响较大,涂层组织主要由马氏体基体、弥散分布的细小球形碳化钒(VC)、多边形块状硼化钼(Mo_2B)和层片状复合硼碳化物($M_2(B, C)$)组成。120 A 下制备的涂层与基材界面处存在局部未熔合区,增大电流导致涂层中 VC 的尺寸和分布间距变大,Mo_2B 消失,$M_2(B, C)$增多且尺寸增大。涂层的平均显微硬度约为 920 $HV_{0.1}$,是耐磨钢 NM400 的 2 倍多,同等条件下的磨损失重仅为 NM400 的 1/20,表现出优异的耐磨性能。带基材的涂层具有良好的耐冲击性能,且平行熔覆纹路的耐冲击性能优于垂直熔覆纹路的。

关键词:等离子熔覆;高钼高钒铁基硬质涂层;组织结构;耐磨性能;熔覆纹路

中图分类号:TG174.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)06-0557-08

Effect of Cladding Current on the Microstructure and Properties of Fe–based Hard Coatings with High Mo and V Contents

ZHANG Ding[1,2], SONG Qinglei[3], ZHANG Ping[1], GUO Xiping[2], LIU Xueqiang[3], SHEN Chengjin[1]

(1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China: 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Xuzhou BUT Construction Machinery Joint-Stock Co., Ltd., Xuzhou 221005, China)

Abstract: To improve the wear resistance of cutting edge plates on digging buckets, Fe-based hard coatings with high Mo and V contents were prepared on Q345B steel by plasma cladding technology. The effects of cladding current (120, 140, 160 A) on the structure of the coatings were analysed, and the hardness, wear resistance and impact resistance of the coatings were investigated. The results show that the cladding current has a significant influence on the microstructure and interface quality of the coatings. The coatings mainly consist of a martensitic matrix with distributed fine spherical VC particles, polygonal Mo_2B and lamellar composite $M_2(B, C)$. Localized unfused zones are observed at the interface between the substrate and the coating prepared at 120 A. As the current increases, the size of the VC particles in the coatings increases, their distribution density decreases, and the size of Mo_2B decreases or even disappears in the coating prepared at 160 A, while the size of $M_2(B, C)$ increases and the number increases. The average hardness of the coatings is approximately 920 $HV_{0.1}$, which is more than twice that of NM400 steel, and the weight loss is only 1/20 of that of NM400 under the same abrasion conditions, showing better wear resistance. The coating specimens exhibit good impact resistance, and the coatings with parallel cladding patterns are superior to those with vertical cladding patterns.

Key words: plasma cladding; high Mo-V Fe-based hard coating; microstructure; wear resistance; cladding pattern

挖斗是挖掘机的作业工具,是挖掘机上的关键易损部件。将碎石、土壤等物料挖起并装载,与物料直接接触、频繁摩擦,极易受到强烈的冲击、大的弯曲载荷和严重的磨料磨损,其中尤以斗齿和刃板的

收稿日期:2024-03-21

基金项目:国家自然科学基金(52271081);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202307)

作者简介:张　顶,2000 年生,硕士研究生.研究方向为金属材料表面耐磨蚀涂层技术.Email: ts23180125p31@cumt.edu.cn

通讯作者:张　平,1984 年生,博士,副教授.研究方向为金属材料表面强化技术.Email: zhangping0095@cumt.edu.cn

引用格式:张顶,宋庆雷,张平,郭喜平,柳学强,沈承金.熔覆电流对高钼高钒铁基硬质涂层组织结构与性能的影响[J].铸造技术,2024,45(6):557-564.

ZHANG D, SONG Q L, ZHANG P, GUO X P, LIU X Q, SHEN C J. Effect of cladding current on the microstructure and properties of Fe-based hard coatings with high Mo and V contents[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 557-564.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

磨损最为严重[1-2]。斗齿是可装配式的易耗品,便于更换,且作用相对单一,目前已发展出多种高耐磨斗齿材料[3]。刃板与其他组成部分以焊接形式组装成一体,刃板的磨损失效往往导致整个挖斗的报废,因此提高刃板的耐磨性能尤为重要。目前刃板材料普遍选用耐磨钢板,如 NM400 或 NM450,耐磨钢的高合金化提高材料强度和耐磨性能的同时也提高了焊接工艺要求,尤其是与其他材质钢板(如侧板)的焊接拼装,从而增加了焊缝开裂的风险[4-5]。基于两种材料制造一个零件的设计思想,在满足挖斗设计结构强度的前提下,刃板可选用焊接性能良好的普通合金钢,而耐磨性能则通过表面熔覆耐磨涂层来改善。

高能束熔覆技术在关键装备零部件的表面强化、修复及再制造等领域,相对于其他表面技术而言优势明显,已广泛应用于航海、核工业、石油化工、矿山等领域[6-14]。与激光熔覆相比,等离子熔覆技术虽然使产品的尺寸精度和成形质量略低,但其工艺简单、设备成本低,对工作环境的要求低,基材表面不需要特殊处理,生产效率、粉材利用率高,适用于工业应用。此外,对于工程机械装备来说,降本增效的压力较大,开发高性能、低成本的耐磨涂层材料是熔覆层技术在其领域得以应用的根本保障。

铁基合金涂层材料是目前耐磨涂层材料体系中综合性价比最高的,被广泛应用。刘均波等[15]在低碳钢表面等离子熔覆制备了 Fe-Cr-C 涂层,涂层组织特征为大量六方初生 MC_3 碳化物,均匀分布在共晶组织(γ+M_7C_3)中,涂层具有较高的硬度和耐磨性。宗琳等[16]以 Fe-Cr-Ti-C 混合粉末为原料,采用等离子熔覆在低碳钢表面制备耐磨涂层,发现随着 Cr 含量的增加,涂层中的增强相 TiC 和 M_7C_3 含量增加,基体组织由铁素体+奥氏体向马氏体转变,涂层耐磨性也随之增加。研究结果表明,合金化元素 B、Mo、V 等的添加会进一步提高铁基合金的硬度和耐磨性能[17-18]。刘仲礼等[19]发现在高硼铁基耐磨合金中,硼元素主要以较高硬度和稳定性的 Fe_2B 硼化物形式存在,其显微硬度可达到 1 400~1 600 HV,合金硬度在 60 HRC 以上。Mo 的添加能够形成硬质的钼碳化物颗粒,高钼高速钢中的碳化物为 M_2C 型碳化物,经过热处理后,其基体组织为马氏体和奥氏体[20]。钒的添加能够与碳结合形成硬质的碳化钒颗粒,李百奇等[21]通过等离子堆焊在 Q235 上熔覆高钒铁基耐磨合金涂层,并测试了涂层在铸造石英砂磨料下的冲击磨料磨损性能。结果表明,涂层组织为原位生成的团球状碳化钒,弥散分布于强韧的板条状马氏体基体和网状共晶$(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物之间,碳化钒硬质质点对基体割裂小,涂层具有良好的强韧性匹配。

近年来,多元合金化越来越受到研究者的关注,相比单一合金元素的添加,多元合金化的强化效果更为显著。此外,考虑到熔覆含铬合金材料时所产生的高致癌性六价铬烟雾的不利影响,降低或消除 Cr 的添加更有利于保护从业人员的健康和环境安全。因此,本文采用经 Mo、V、B 多元合金化且无 Cr 的新型铁基合金涂层材料,通过等离子熔覆技术在挖斗刃板表面制备硬质涂层,研究了熔覆工艺参数(电流)对涂层组织结构的影响,对比考察涂层与耐磨钢 NM400 的硬度及耐磨性能。

1 实验材料与方法

挖斗刃板材料为 Q345B 钢,涂层粉料选用高钼高钒新型铁基合金粉末,化学成分如表 1 所示。采用型号为 PTA-400E4-ST 的等离子熔覆设备开展熔覆试验,熔覆工艺参数为:电流 120、140、160 A,离子气流量 250 mL/min,保护气流量 800 mL/min,熔覆速度 50 mm/min,摆动宽度 20 mm。采用线切割方法切取所需样品,进行后续组织分析与性能表征。

表1 高钼高钒铁基合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of Fe-based alloys with high Mo and V contents

(mass fraction/%)

Element	Fe	C	Si	Mn	B	Mo	Ni	V
Content	68.0	2.3	0.6	1.1	1.7	15.3	1.7	9.7

利用 Bruker-D8 型 X 射线衍射分析仪(XRD)对原始合金粉末、熔覆涂层进行物相分析,扫描角度为 20°~90°,扫描速率设置 2 (°)/min。利用 Quanta-250 型扫描电子显微镜(SEM)分析合金粉末及熔覆涂层的微观组织结构,利用能谱仪(EDS)检测涂层各物相的成分组成;使用 EPMA- 8050G 型电子探针对涂层的微区组织结构及元素分布进行精细分析。利用WILSON VH1102 型显微硬度计对涂层和商用耐磨钢 NM400 进行维氏硬度测试,硬度计加载载荷为100 N,加载时间 15 s。使用 M-2000 型摩擦磨损试验机对涂层和 NM400 钢进行耐磨性能测试,磨损方式为环–块摩擦,对磨环材料为淬火态GCr15,直径 40 mm,硬度 60 HRC 左右,法向载荷 120 N,转速 200 r/min,时间 30 min。使用 JB-300B 型摆锤式冲击试验机考察带基材熔覆涂层的综合耐冲击性能,分析熔覆纹路对涂层冲击性能的影响,夏比 V 型缺口冲击试样尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,如图 1 所示,熔覆涂层为冲击面,根据 GB/T 229-2020 要求进行冲击试

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验,每组试验 3 次,取平均值。

2　实验结果与讨论

2.1　合金粉末的组织结构

图 2 所示为高钼高钒铁基合金粉末的表面、截面形貌及微区组织结构。粉末采用雾化制粉,颗粒尺寸较规则,球形度良好,但在局部颗粒周围发现了卫星颗粒。合金粉末颗粒的截面组织较均匀,冶金状态良好,未发现宏观缺陷,对其微区组织进行进一步放大分析,如图 2d 所示。合金粉末内部呈现多相组织结构,表现为灰色基体上(标记 P3)弥散分布有大量的细小黑色(标记 P2)和亮白色(标记 P1)颗粒相。对不同的衬度相进行 EDS 点分析,结果见表 2。可以看出亮白色颗粒 P1 中 Mo 和 B 的含量较高,推测为硼化物相;在黑色颗粒 P2 中检测到了较高的 V 和 C 含量,可能为碳化钒相;灰色的基体相P3 为马氏体。结合图 2b 合金粉末 XRD 分析结果可知,合金粉末主要由马氏体基体、碳化钒和硼化钼组成。

表2 合金粉末中各标示点的化学成分

Tab.2 Chemical composition of the sites in the alloy powders

(atomic fraction/%)

	Fe	Mo	V	C	B
P1	39.9	29.7	5.0	16.7	11.2
P2	1.6	26.8	46.9	24.8	-
P3	68.5	12.8	3.5	14.3	-

2.2　熔覆涂层的组织结构

图 3 为不同熔覆电流下(120、140、160 A)制备的涂层横截面组织结构。120 A 时制备的涂层由外到内整体组织较均匀,主要由灰色基体相,弥散分布的黑色细小球形颗粒相及亮色多边形块体相组成,且球形颗粒越靠近内部,尺寸越小、分布越密集,这是由靠近基材的熔池冷却速度高、凝固速率快,涂层与基材的界面处局部位置存在未熔合区。当电流提高到 140 A 时,制备的涂层呈现出与 120 A 时相似的组织结构,但涂层与基材的界面熔合状态明显改善。当电流继续提高到 160 A 时,涂层组织结构发生明

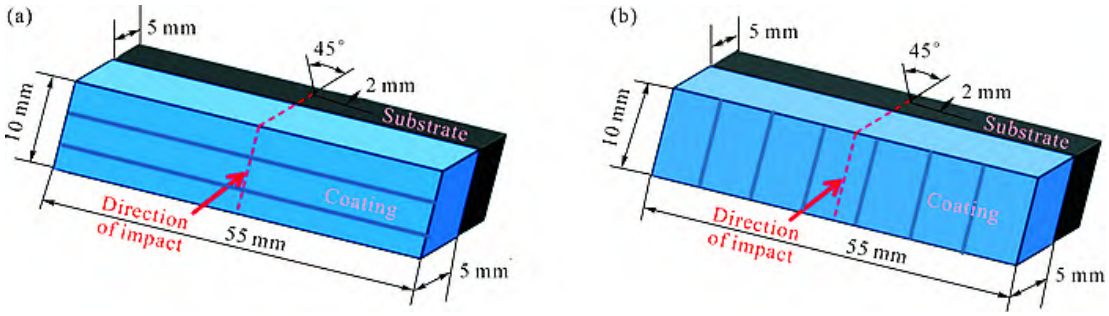

图 1　不同熔覆纹路涂层基材冲击试样:(a) 平行纹路;(b) 垂直纹路

Fig.1　Impact specimens of the coating with different cladding patterns: (a) parallel pattern; (b) vertical pattern

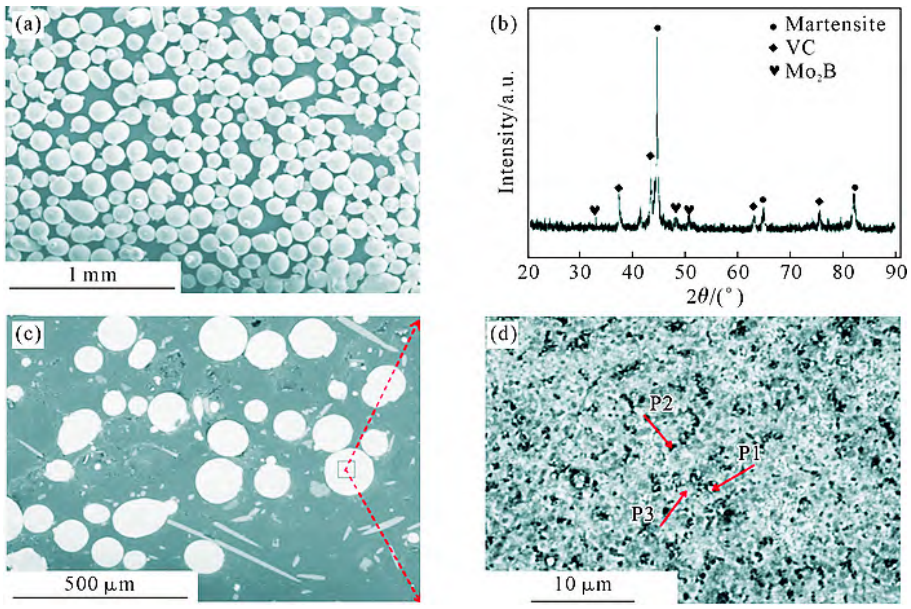

图 2　高钼高钒铁基合金粉末:(a) 表面形貌;(b) XRD 图谱;(c) 截面形貌;(d) 显微组织

Fig.2　Powders of the Fe-based alloys with high Mo and V contents: (a) surface morphology; (b) XRD pattern; (c) cross-sectional morphology; (d) microstructure

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

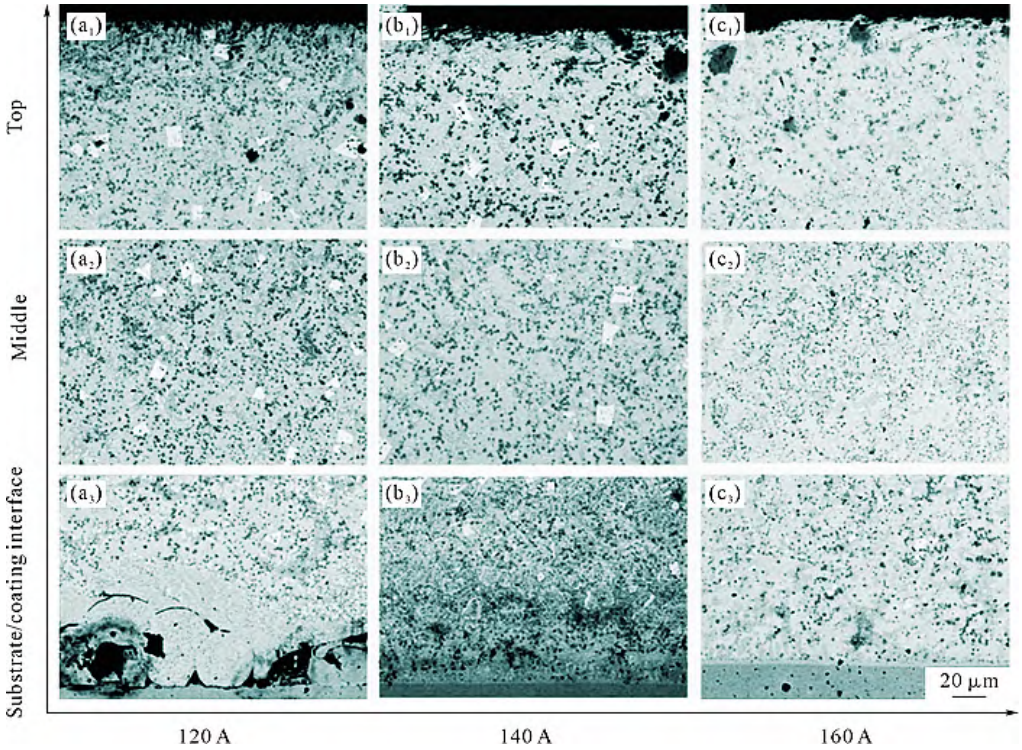

图 3 不同熔覆电流下制备的涂层横截面 BSE 像：(a_1~a_3) 120 A; (b_1~b_3) 140 A; (c_1~c_3) 160 A

Fig.3 Cross-sectional BSE images of the coatings prepared at different cladding currents: (a_1~a_3) 120 A; (b_1~b_3) 140 A; (c_1~c_3) 160 A

显变化，主要表现为涂层中的多边形块体相消失。可见，熔覆电流的改变意味着等离子束、粉末、熔池及基材之间的作用关系发生改变，影响着熔覆涂层的熔池大小、深度、能量高低（温度）及凝固路径，进而导致涂层组织结构发生变化。

对不同电流下制备的涂层微观组织结构进行放大分析，如图 4 所示。从图中可以看出，随着电流增大，涂层中黑色球形颗粒尺寸增大，且颗粒团聚减少，分布更加弥散；亮色多边形块体相的尺寸随电流的增大而减小，当电流为 160 A 时，涂层中该相消失。此外，涂层中还分布有一些亮色细小条纹状或层片状组织，且随着电流的增大，该组织的数量和尺寸均增加。对涂层各标记点处的组织进行 EDS 成分分析，结果见表 3。结合图 5 所示涂层微区组织 EPMA 元素面分布及图 6 给出的涂层 XRD 分析结果可知，涂层中的黑色球形颗粒为富 V 和 C 的碳化钒(VC)；多边形块体中 Mo 和 B 的含量较高，为Mo_2B相；亮色条纹状或层片状组织为富 Mo 的复合硼碳化物 $M_2(B, C)$；灰色基体相为马氏体。

表3 图4中不同标记点处EDS成分分析

Tab.3 EDS analysis results of the points marked in Fig. 4 (mass fraction/%)

Marked points	Fe	C	Mo	V	B
A	25.5	0.4	11.6	20.9	3.9
B	65.2	0.8	7.8	3.0	5.8
C	3.4	10.2	18.2	67.3	-
D	67.5	5.2	21.9	4.2	-

结合涂层的微观组织结构及主要相组成，对高钼高钒铁基合金涂层的熔覆凝固过程进行分析。结果表明，钒促进碳化物形成能力比铬强。在初始凝固阶段，碳化钒首先直接从液相熔池中析出。因此在共晶转变前，熔池内部已存在大量细小碳化钒颗粒，起到增加异质形核核心、细化晶粒的作用[22]。此外，由于合金中较高的 B 含量和 Mo 含量，加之 B 在铁合金中特殊的冶金学特点，二者结合成 Mo_2B 相从液

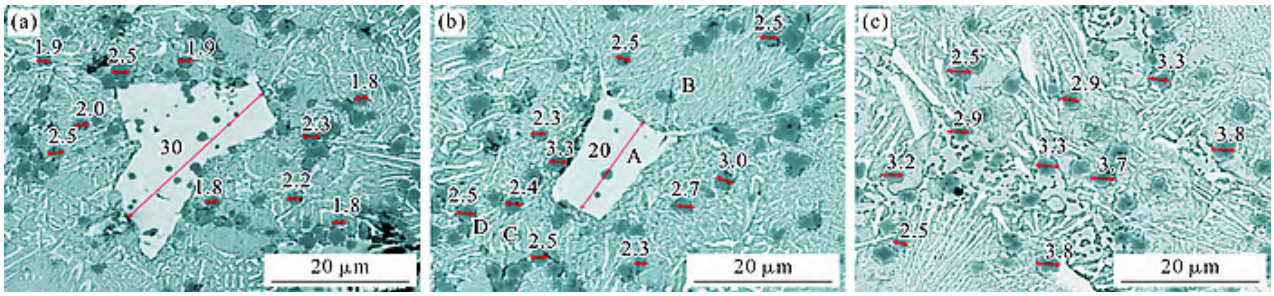

图 4 涂层微区组织：(a) 120 A; (b) 140 A; (c) 160 A

Fig.4 Microstructure of the coatings: (a) 120 A; (b) 140 A; (c) 160 A

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

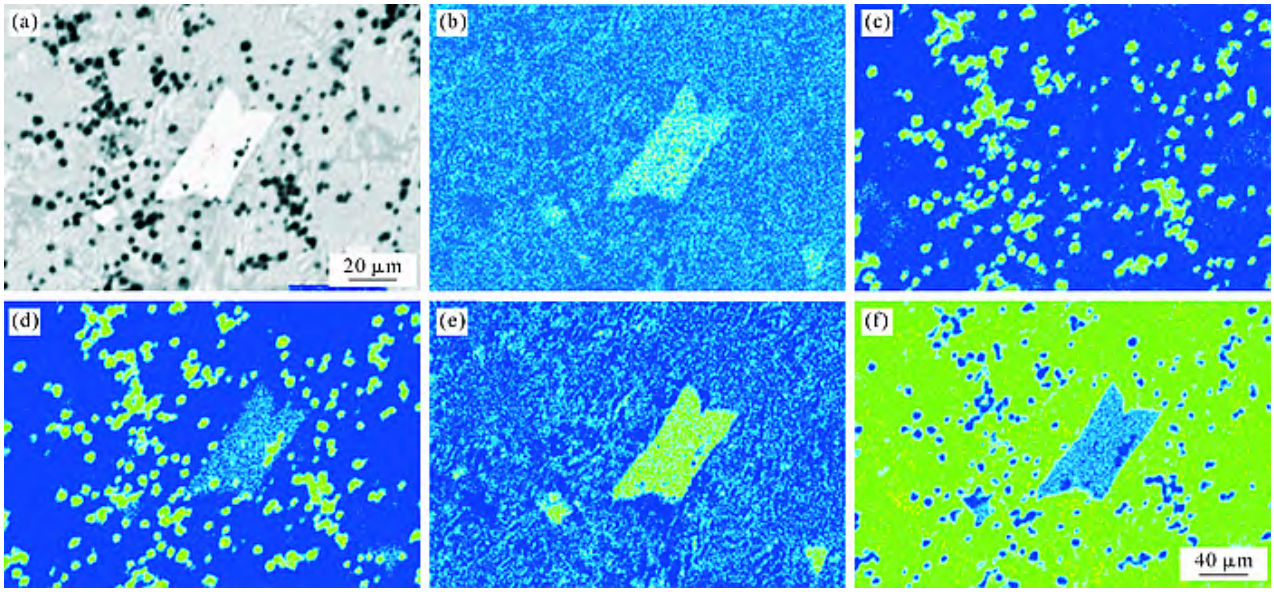

图 5 熔覆电流为 140 A 时制备的涂层微区 EPMA 元素面分布：(a) BSE 像；(b) B；(c) C；(d) V；(e) Mo；(f) Fe

Fig.5 EPMA elemental mapping of the microstructure of the coatings prepared at 140 A: (a) BSE image; (b) B; (c) C; (d) V; (e) Mo; (f) Fe

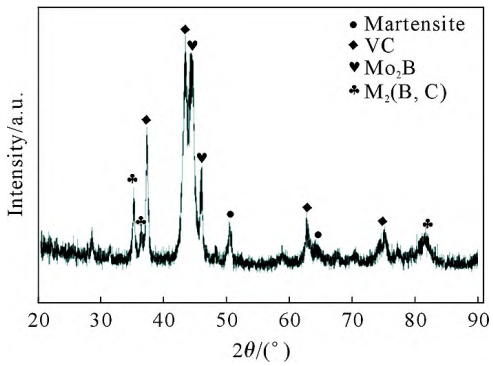

图 6 熔覆电流为 140 A 时制备的涂层表面 XRD 图谱

Fig.6 XRD pattern of the coating surface prepared at a cladding current of 140 A

相中析出，并急剧长大呈多边形。这种多边形大块状的 Mo_2B 一方面作为硬质颗粒相提高了涂层的硬度和耐磨性能，但另一方面又对涂层基体造成了割裂，影响其耐冲击性能。随着凝固进行，大量碳以碳化钒形式被析出，造成液相中碳含量降低，导致共晶反应析出 γ+$M_2(B, C)$复合硼碳化物，其中复合硼碳化物呈细小层片状分布[23]。温度继续降低，剩余液相发生三元共晶转变，析出二次碳化物和硼化物，凝固结束。最后，基体相由奥氏体转变为马氏体。

硬质涂层的硬度和耐磨性能除了与涂层中基体相的自身强度有关外，还取决于硬质颗粒相的形态、尺寸及分布。传统的镍基合金/碳化钨耐磨涂层中，镍基合金为黏结相，外加碳化钨颗粒为硬质相，在熔覆制备过程中碳化钨颗粒不可避免地发生沉降和溶解现象，造成涂层整体耐磨性能不均[24]。而高钼高钒铁基合金涂层中的黏结相为高强马氏体基体，硬质相为涂层熔覆冷凝过程中自生的碳化物和硼化物颗粒，其在热力驱动下在整个熔覆层厚度中均匀生成，使得涂层具有良好的整体耐磨性能。此外，与大尺寸、树枝状自生碳化物的高铬铁基合金涂层不同[7]，这种马氏体基体中分布着高密度弥散分布的球形碳化钒颗粒及细小层片状的复合硼碳化物，使得高钼高钒铁基合金涂层兼具良好的耐磨性能和耐冲击性能。

2.3 熔覆涂层的显微硬度与耐磨性能

图 7 所示为不同熔覆电流下制备的涂层沿截面方向的硬度分布。根据硬度分布，可分为涂层区、热影响区及基体区 3 部分。涂层区的平均硬度在 800~980 $HV_{0.1}$，且由外到内整体保持较小的波动，进一步说明了涂层组织结构的均匀性。电流大小对涂层外部区域的硬度影响较小，但涂层内部区域的硬度随着电流增大而略有降低，这与不同电流下涂层内部的碳化钒颗粒尺度及分布密度有关。由弥散强化机制可知，第二相强化粒子的尺寸越小、分布密

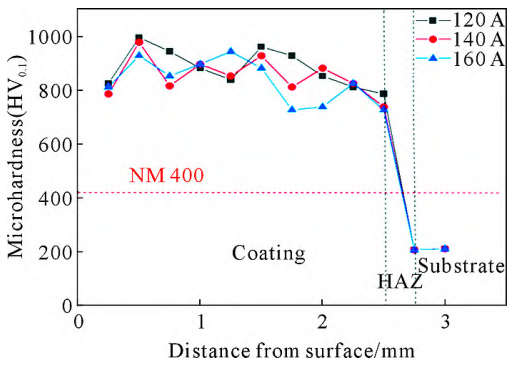

图 7 不同熔覆电流制备的涂层截面显微硬度分布

Fig.7 Cross-sectional microhardness distributions of the coatings prepared at different cladding currents

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度越高，其对基体的强化效果越好，即硬度和强度越高。热影响区处硬度发生陡降，且区域宽度较窄，说明基材对涂层的稀释程度较小。耐磨钢 NM400 的平均硬度大约为 420 $HV_{0.1}$，本试验制备的高钼高钒铁基合金涂层的硬度约为 NM400 的 2 倍多。

图 8 给出了在相同磨损试验条件下，不同熔覆电流所制备的涂层与 NM400 钢的摩擦系数变化曲线及磨损量。由图可知，3 种不同电流制备的涂层的摩擦曲线均经历了磨合阶段和稳定磨损阶段，其中在稳定磨损阶段，熔覆电流为 140 和 160 A 时制备的涂层摩擦系数相近，约为 0.42 左右，而熔覆电流为 120 A 时的涂层摩擦系数约为 0.38 左右。与之对比的 NM400 钢，其磨擦曲线一开始即进入稳定磨损阶段，摩擦系数约为 0.83 左右，但在试验过程中有 2 次明显地下降，可能是基材的磨损表面在压头作用下出现犁沟、剥落所致。从样品磨损后的宏观形貌也可以看出，涂层试样的磨损区域无论在宽度还是深度上均远小于 NM400 钢。测量样品磨损前后的失重情况，结果如图 8b 所示。相同磨损条件下，NM400 钢样品的磨损失重约为 78.9 mg，而 3 个涂层样品的磨损失重分别为 2.8、3.4 和 3.5 mg。可见，涂层样品的磨损失重仅为 NM400 钢的 1/20，表现出较优的耐磨性能。

2.4 带基材熔覆涂层的冲击韧性

材料强度和硬度的提高往往带来塑性和韧性的下降，而对于挖斗刃板来说，除了耐磨性能外，耐冲击性能也是评价其服役性能的关键因素。基于上述研究结果，采用 140 A 的熔覆电流在挖斗刃板表面制备高钼高钒铁基合金涂层(图 9)，考察不同熔覆纹路对带基材熔覆涂层耐冲击性能的影响。由图可知，两种不同熔覆纹路的涂层样件经冲击试验后，样件断口形貌均呈现出韧性断裂特征，其平均冲击韧性值分别为 144 J/cm²(平行纹路)和 115 J/cm²(垂直纹路)，二者均表现出较高的耐冲击性能，其中平行熔覆纹路的要优于垂直熔覆纹路。高钼高钒铁基合金涂层优异的耐冲击性能归因于基体中复合硼碳化物的极细层状结构和弥散分布的碳化钒的细小球形形态，而平行熔覆纹路避免了熔池搭接区的组织特征对冲击裂纹敏感性的影响。

3 结论

(1)高钼高钒铁基硬质涂层主要由马氏体基体、弥散分布的细小球形碳化钒(VC)、多边形块状硼化钼(Mo_2B)和层片状复合硼碳化物($M_2(B, C)$)组成。涂层中硬质颗粒的存在形态受熔覆电流影响较大，电流过小造成涂层与基材界面处出现局部未熔合区，而增大电流导致涂层中 VC 的尺寸和分布间距变大。Mo_2B 消失，$M_2(B, C)$增多和尺寸增大，强化效果减弱。

(2)通过与 NM400 钢显微硬度和摩擦磨损测试

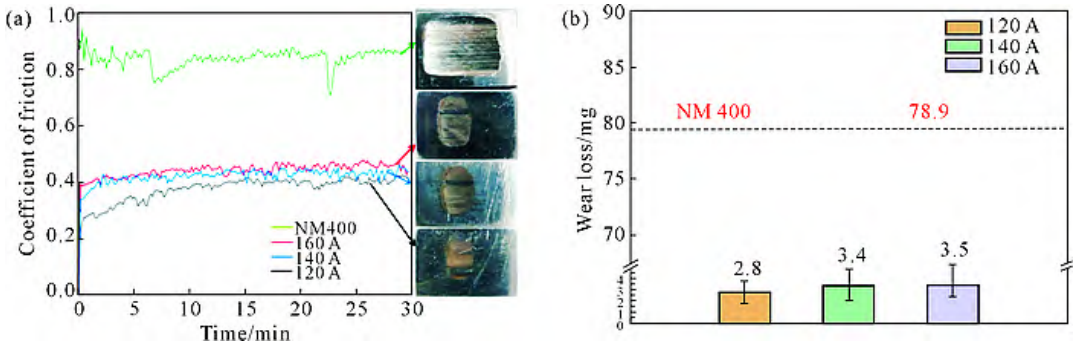

图 8 不同熔覆电流制备涂层及 NM400 钢的耐磨性能：(a) 摩擦系数；(b) 磨损量

Fig.8 Wear resistance of NM400 steel and the coatings prepared at different cladding currents: (a) coefficient of friction; (b) wear loss

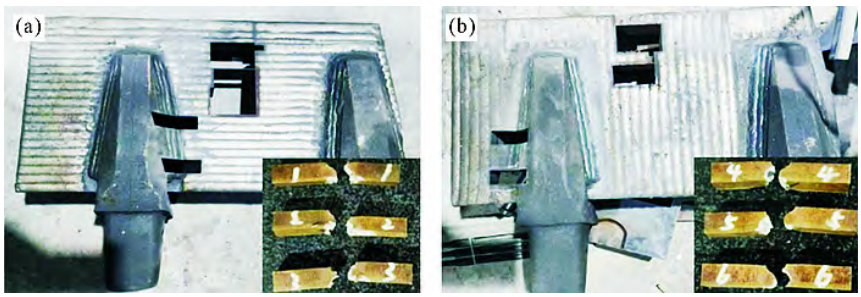

图 9 带熔覆涂层的挖斗刃板样件及冲击试样形貌：(a) 平行纹路；(b) 垂直纹路

Fig.9 Morphologies of the coated cutting edge plates of the digging bucket and impact specimens: (a) parallel pattern; (b) vertical pattern

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结果对比发现，发现3种涂层均表现出较高的硬度与耐磨性能，同等磨损条件下，其磨损失重仅为NM400钢的1/20。

(3)对带基材的熔覆涂层进行冲击试验发现，涂层中复合硼碳化物的极细层状结构和弥散分布的碳化钒的细小球形形态为其提供了较优的耐冲击性能，其中平行熔覆纹路的涂层试样冲击韧性高于垂直熔覆纹路。

参考文献：

[1] 郭红，刘英，李卫. 挖掘机斗齿的磨损机制与选材研究[J]. 材料导报，2014, 28(7): 99-103.
GUO H, LIU Y, LI W. The investigation of wear mechanism and material selection of bucket teeth on excavator[J]. Materials Reports, 2014, 28(7): 99-103.

[2] 胡元哲. 大型矿山挖掘机斗齿磨损失效分析与抗磨措施[J]. 润滑与密封，2006(5): 165-167.
HU Y Z. Analysis on wear failure of bucket teeth of mine excavators and the anti-wear measures[J]. Lubrication Engineering, 2006 (5): 165-167.

[3] 李炎粉，崔华丽. 锻压工艺对挖掘机斗齿性能的影响研究[J]. 热加工工艺，2017, 46(1): 140-142.
LI Y F, CUI H L. Effect of forging process on performance of excavator bucket teeth[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(1): 140-142.

[4] 陶勇. 挖掘机铲齿材料选择及磨损研究[J]. 铸造技术，2017, 38(4): 802-804.
TAO Y. Research on excavator tooth material selection and wear mechanism[J]. Foundry Technology, 2017, 38(4): 802-804.

[5] 张津超，石世宏，龚燕琪，余司琪，石拓，傅戈雁. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术，2020, 49(10): 1-11.
ZHANG J C, SHI H J, GONG Y Q, YU S Q, SHI T, FU G Y. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.

[6] 杜学芸，许金宝，宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J]. 金属加工(热加工)，2020(3): 15-19.
DU X Y, XU J B, SONG J. Research status and development trend of laser cladding remanufacturing technology[J]. MW Metal Forming, 2020(3): 15-19.

[7] 刘建阳. 等离子熔覆Fe-Cr-C系熔覆层改性研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2017.
LIU J Y. Study on the modification of Fe-Cr-C cladding layer by plasma cladding[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[8] 宋贵宏，杜昊，贺春林. 硬质与超硬涂层–结构、性能、制备与表征[M]. 北京：化学工业出版社，2007.
SONG G H, DU H, HE C L. Hard and superhard coatings-structure, properties, preparation and characterization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

[9] 江吉彬，练国富，许明三. 激光熔覆技术研究现状及趋势[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2015, 29(1): 27-36.
JIANG J B, LIAN G F, XU M S. Research on status and trend of laser cladding[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(1): 27-36.

[10] 来佑彬，杨波，王冬阳，孙铭含，吴海龙，李响. 钴基合金等离子熔覆工艺研究与优化[J]. 表面技术，2020, 49(6): 185-193.
LAI Y B, YANG B, WANG D Y, SUN M H, WU H L, LI X. Plasma cladding process for Co-based alloy and its optimization[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 185-193.

[11] 高万东，胡孔友，张学军，时运，王赛龙，杜晓东. 等离子熔覆WC颗粒增强Fe313涂层组织和性能研究[J]. 热加工工艺，2022(14): 78-82.
GAO W D, HU K Y, ZHANG X J, SHI Y, WANG S L, DU X D. Study on the microstructure and properties of plasma cladding WC particles to enhance Fe313 coating[J]. Hot Working Technology, 2022(14): 78-82.

[12] TEIXEIRA M F, PACHECO J, DA SILVA L, RABELO A, PEREIRA M, NIÑO C E . Wear resistance of a Metco 1030A hard coating deposited on hadfield steel by laser cladding for ore comminution application[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 1873-1884.

[13] 王伟，王成，丁士杰，宫鹏辉，高原. 激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究[J]. 中国激光，2022, 49(22): 137-147.
WANG W, WANG C, DING S J, GONG P H, GAO Y. Preparation and tribological properties of laser cladding iron-based wear-resistant coatings[J]. Chinese Lasers, 2022, 49(22): 137-147.

[14] 彭竹琴，商全义，卢金斌，吴玉萍. 铸铁等离子熔覆铁基合金耐磨涂层[J]. 焊接学报，2008, 29(4): 61-64.
PENG Z Q, SHANG Q Y, LU J B, WU Y P. Cast iron plasma cladding iron-based alloy wear-resistant coating[J]. Journal of Welding Science, 2008, 29(4): 61-64.

[15] 刘均波，王立梅，黄继华. 等离子熔覆Cr_7C_3/γ-Fe金属陶瓷复合材料涂层的耐磨性[J]. 机械工程材料，2006, 30(2): 50-54.
LIU J B, WANG L M, HUANG J H. Abrasion resistance of plasma cladding Cr_7C_3/γ-Fe cermet composite coatings[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(2): 50-54.

[16] 宗琳，刘政军，李乐成. 含钛铁基耐磨复合材料的研制[J]. 焊接学报，2012, 33(4): 53-56.
ZONG L, LIU Z J, LI L C. Development of wear-resistant composite materials containing iron titanium[J]. Journal of Welding Science, 2012, 33(4): 53-56.

[17] 张磊，陈小明，苏建灏，张凯，谌宽，赵坚. 激光熔覆Fe-Mo-V-C合金涂层组织及摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2020, 25(1): 65-71.
ZHANG L, CHEN X M, SU J H, ZHANG K, CHEN K, ZHAO J. Microstructure and friction and wear properties of laser cladding Fe-Mo-V-C alloy coating[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2020, 25(1): 65-71.

[18] 王晓荣，王新宏，杜宝帅，王承伟. 激光熔覆Fe-Ti-V-Cr-C合金涂层的微观组织和性能[J]. 材料工程，2011(3): 50-54.
WANG X R, WANG X H, DU B S, WANG C W. Microstructure and properties of laser cladding Fe-Ti-V-Cr-C alloy coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(3): 50-54.

[19] 刘仲礼，李言祥，陈祥，胡开华. 硼、碳含量对高硼铁基合金组织和性能的影响[J]. 钢铁，2007, 42(6): 78-82.
LIU Z L, LI Y X, CHEN X, HU K H. Effect of boron and carbon

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

content on microstructure and properties of high boron-iron-based alloys[J]. Iron & Steel, 2007, 42(6): 78-82.

[20] 徐流杰,李洲,周鹤,魏世忠. 高钼高速钢的显微组织与磨粒磨损性能[J]. 铸造技术,2016, 37(7): 1315-1318.
XU L J, LI Z, ZHOU H, WEI S Z. Microstructure and abrasive wear properties of high-molybdenum high-speed steel[J]. Foundry Technology, 2016, 37(7): 1315-1318.

[21] 李百奇,汤文博,王笑生. 等离子熔覆高钒铁基合金涂层耐冲击磨料磨损的研究[J]. 铸造,2022, 71(4): 409-414.
LI B Q, TANG W B, WANG X S. Study on impact abrasive wear resistance of plasma cladding high vanadium iron-based alloy coatings[J]. Foundry, 2022, 71(4): 409-414.

[22] WEI S Z, ZHUA J H, XU L J. Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel [J]. Tribology International, 2006, 39: 641-648.

[23] 苑振涛. 高硼高速钢相平衡热力学设计及硼碳化物硬质相形成机制研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
YUAN Z T. Phase equilibrium thermodynamic design of high-boron high-speed steel and mechanism of boron carbide hard phase formation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.

[24] 王俊杰,杨军,邹德宁,李新涛,米小雨. 堆焊工艺参数与碳化钨含量对镍基碳化钨涂层性能的影响研究[J]. 矿冶工程,2020, 40(4): 130-134.
WANG J J, YANG J, ZOU D N, LI X T, MI X Y. Influence of surfacing process parameters and tungsten carbide content on properties of nickel-based tungsten carbide coatings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 130-134.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net