

引用格式:刘畅,饶嘉威,蒋凤琦,等.等离子弧熔覆 Fe-C-B-V 系耐磨堆焊层的组织及性能研究[J].热加工工艺,2024,53(2):145-148.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20193556
http://www.rjgy.net rjgy@vip.163.com

等离子弧熔覆 Fe-C-B-V 系耐磨堆焊层的组织及性能研究

刘畅,饶嘉威,蒋凤琦,沈毅锋,吴磊,浦娟

(江苏科技大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212000)

摘要:以硼铁、高碳铬铁、钒铁为原料,采用等离子弧熔覆技术在 Q345 钢表面堆焊 Fe-C-B-V 系铁基合金。使用金相显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射仪等研究了堆焊层的显微组织;分别使用维氏硬度计和冲击试验机测量堆焊层的显微硬度和冲击韧性。结果表明,堆焊层显微组织主要由马氏体、网格状 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B 、弥散分布的碳化物及硼化物等(如 VB_2 、 VC 、 Cr_2B)硬质相构成;堆焊层的平均硬度高达 904.58 HV10、冲击功为 68.5 J。堆焊过程中形成的硼化物、碳化物作为硬质相提高了堆焊层的硬度和耐磨性,形成的碳化钒使组织从鱼骨状变成网格状,细化了晶粒,提高了堆焊层的冲击韧性。

关键词:等离子熔覆;Fe-C-B-V 堆焊层;显微组织;显微硬度;冲击韧性

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)02-0145-04

Study on Microstructure and Performance of Fe-C-B-V Wear Resistant Surfacing Layer by Plasma Arc Cladding

LIU Chang, RAO Jiawei, JIANG Fengqi, SHEN Yifeng, WU Lei, PU Juan

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Fe-C-B-V iron-based alloy was cladded on the surface of Q345 steel by plasma arc surfacing technology, using ferroboration, high carbon chromium iron and ferrovanadium as raw materials. The microhardness and impact toughness of the surfacing layer were measured by using the Vickers hardness and impact test machine, respectively. The results show that the microstructure of the surfacing layer is mainly composed of martensite, grid shaped $Fe_3(C,B)$ and Fe_2B , the dispersal distribution of carbides and borides (e.g VB_2 , VC and Cr_2B). The average hardness of the surfacing layer is up to 904.58 HV10, its impact energy is 68.5 J. The carbides and borides formed during surfacing welding ascribe to improve the hardness and wear resistance of the surfacing layer, meanwhile, the formed vanadium carbide makes the microstructure change from fishbone to grid, refining the grain, then, the impact toughness of the surfacing layer improves.

Key words: plasma arc cladding; Fe-C-B-V surfacing layer; microstructure; microhardness; impact toughness

堆焊是提高机械零部件表面性能的重要途径之一,堆焊不仅可修复旧的金属零件,而且可在金属工件表面形成复合层,使其具有特殊的性能,从而起到改善工件表面质量、延长使用寿命和降低成本的作用。目前,堆焊技术主要有气体保护电弧堆焊、带极电弧堆焊、电子束堆焊、激光堆焊、等离子弧堆焊等方法^[1-7]。气体保护电弧堆焊具有操作简便效率高,成本低的特点^[8];带极电弧堆焊的焊道宽广而平滑,熔敷效率高^[9];电子束堆焊具有易获得细小晶粒、焊接

过程稳定、生产效率高、改善焊缝成形和消除焊接缺陷等特点^[10];激光熔覆具有加热冷却速度快,可较好保留熔覆材料的原始化学成分以保证熔覆层材料性能的良好继承性的特点^[11];等离子弧堆焊技术因具有等离子弧能量集中、温度高、燃烧稳定、能堆焊难熔材料,稀释率小、表面控形容易,可实现自动化生产等优点而逐渐得到堆焊工作者的重视。

铁基堆焊合金通常选择 Cr、Mo、W、Ti、V 等贵重金属元素作为堆焊层的合金元素,Cr 元素的加入旨在形成较多种类的硼化物和碳化物起到强化作用^[12],Mo 元素可提高合金材料在强冲击条件下的耐磨性能^[13],W 元素形成的化合物能够与基体组织相互配合显著提高堆焊合金的硬度和耐磨损性能^[14],适量

收稿日期:2019-12-16

基金项目:江苏省 2019 年本科生创新计划项目(201910289063Y)

作者简介:刘畅(1996-),男,江苏宿迁人,研究方向:堆焊工艺及材料的研究;E-mail:1578305281@qq.com

的 Ti 和 V 不仅能提高堆焊层的硬度和耐磨性,而且会提高其强度与韧性^[15],但这些粉末价格昂贵,不利于推广使用。高硼铁基合金成本相对较低、耐磨性能优异,已在磨料磨损领域显示出明显的优越性^[16]。这是由于硼元素价格低、经济适用性好,在高温下,它能与多种金属以及金属氧化物发生反应,形成硬度极高、耐磨性极好的硼化物^[17],代替或部分代替碳化物作为铁基堆焊层的耐磨骨架,在保证堆焊层的硬度和耐磨性的同时减少钨、钼、铬、钒等贵重与稀有合金元素的使用。本文考虑用添加一定含量的 B 元素,减少 Cr、Mo、W 等元素的使用,同时添加 V 元素来提高堆焊层的抗裂性和韧性。

1 实验材料与方 法

配制等离子熔覆用混合粉末,粉末粒径为 80 μm, 1# 混合粉末成分(质量分数,%)为:硼铁 6~10、高碳铬铁 6~10、钛铁 1~2、锰铁 1~3、硅铁 0.1~1、碳化钨 0.5~2,余量为铁粉。2# 混合粉末是在 1# 混合粉末中添加钒铁 2~4。采用粉末等离子弧熔覆技术在 Q345 钢上进行堆焊 Fe-C-B-V 硬面合金,堆焊高度达 12 mm,等离子弧熔覆技术参数见表 1。

表 1 粉末等离子弧熔覆设备工艺参数选择

Tab.1 Selection of technological parameters of powder plasma arc cladding equipment

电流 /A	喷嘴距基板距离 /mm	保护气氛	等离子气流量 /(L·min ⁻¹)	保护气流量 /(L·min ⁻¹)	送粉气流量 /(L·min ⁻¹)	熔覆速度 /(mm·min ⁻¹)
70~80	8~10	Ar	2~3	7~8	3~4	360

采用线切割法从 1#、2# 堆焊层上分别截取 1 个尺寸为 10 mm×15 mm×3 mm 化学成分分析试样,1 个尺寸为 15 mm×10 mm×10 mm 金相试样和 3 个尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm 的冲击试样,其中冲击试样开 V 型缺口,堆焊层厚度为 6 mm。

采用 MAXXLMM05 直读光谱仪测量堆焊层的化学成分。金相试样经砂纸打磨、抛光和腐蚀后,用蔡司金相显微镜和 JSM-6480 扫描电镜观察微观组织形貌,腐蚀液为 4%硝酸酒精,腐蚀时间 5 s,采用 XRD-6000X 射线衍射仪检测堆焊层物相构成。使用 KB30s 全自动维氏硬度仪测量堆焊层的硬度。冲击试验根据 GB/T 229-2007 通过 ZBC2302-D 冲击试验机完成,测试温度条件为室温,同种试样测试 3 个,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 等离子弧熔覆 Fe-C-B(-V)硬面合金化学成分分析

表 2 是等离子弧熔覆 Fe-C-B 硬面合金化学成分分析结果。可看出,合金粉中元素能有效过渡到堆焊层中,在等离子弧熔覆技术下,合金粉末损失较少。

表 2 等离子弧熔覆 Fe-C-B(-V)硬面合金的化学成分(质量分数,%)

Tab.2 Chemical composition of Fe-C-B(-V) hard surface alloy by plasma arc cladding (wt%)

合金	C	Cr	V	Si	B	Ti	Mn	Fe
1#	2.6	4.8	—	0.8	1.8	1.3	1.3	余量
2#	2.4	5.0	3.0	0.6	1.5	1.4	1.2	余量

2.2 等离子弧熔覆堆焊层微观组织分析

图 1 是等离子弧熔覆 Fe-C-B 硬面合金不含 V 和含 V 的微观组织形貌。由图 1(a)可看出,不含 V 的堆焊层组织是由大量白色鱼骨状物质、马氏体基体和黑色颗粒状物质构成。一旦向 Fe-C-B 硬面合金中添加 V 元素,可将白色鱼骨状物质变成连续网格状物质,黑色颗粒状物质呈弥散状分布在网格中,如图 1(b)所示。

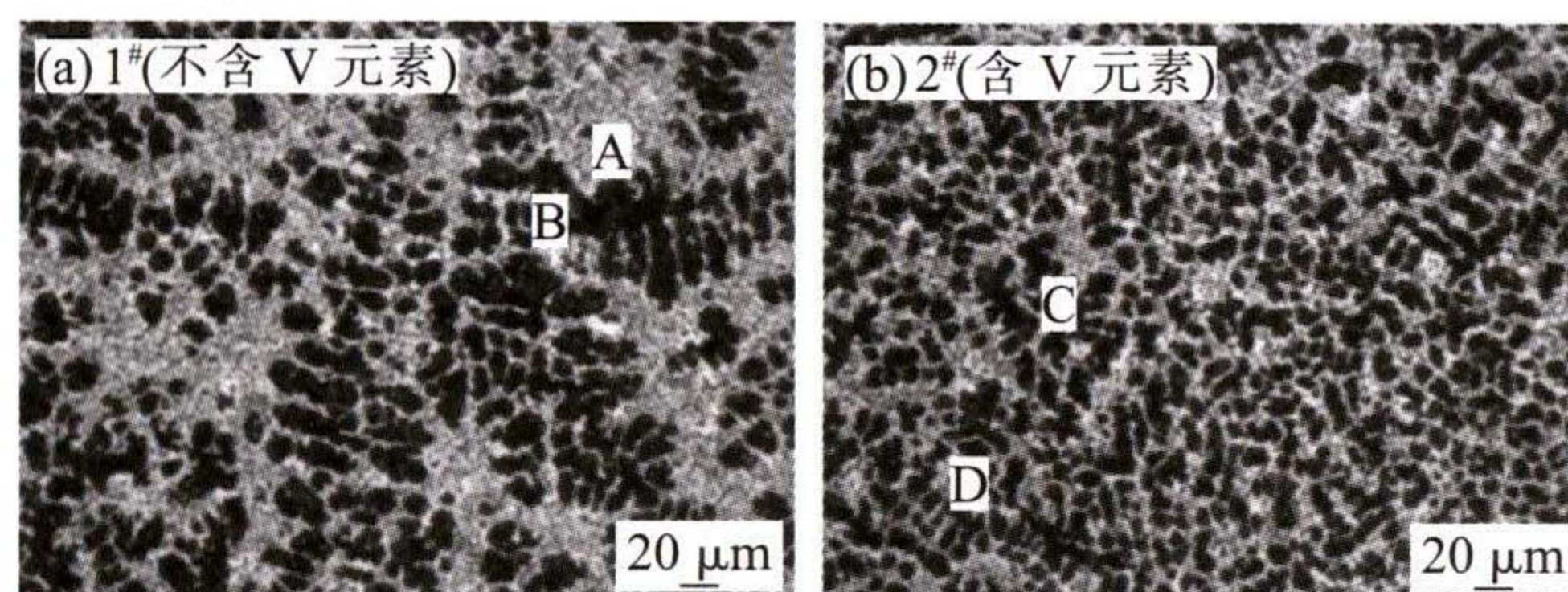


图 1 等离子弧熔覆 Fe-C-B(-V)硬面合金的微观组织
Fig.1 Microstructure of Fe-C-B(-V) hardfacing alloy by plasma arc cladding

为了弄清楚白色鱼骨状物质和黑色颗粒状物质的化学成分构成,用扫描电镜能谱点分析对图 1(a)上的 A 区域、B 区域和图 1(b)上的 C 区域和 D 区域进行分析,点分析结果见表 3。根据 Fe-C-B/V 三元合金相图及结合表 3 结果可知,鱼骨状物质 A

表 3 能谱点分析结果(质量分数,%)

Tab.3 Result of energy spectrum point analysis (wt%)

区域	B	C	Ti	Cr	V	Mn	Fe
A	25.2	2.41	1.64	1.35	0	0.94	68.46
B	1.23	4.14	1.02	1.14	0	1.38	91.09
C	14.5	2.82	1.23	1.51	2.31	1.12	76.51
D	2.11	3.02	1.09	1.43	1.85	1.36	89.14

区主要是硼化物和碳硼化物。B区主要为Fe、C、Cr、Ti元素组成的碳化物颗粒。网格状物质C区是含有硼化钒的硼化物和碳硼化物,D区域是Fe、C、Cr、V、Ti组成的碳化物颗粒。

为了确定Fe-C-B硬面层所存在的物相,对堆焊层进行X射线衍射分析,结果见图2。可知,不含V元素的堆焊层合金中有 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B 产生,含V元素的堆焊层合金中有 VB_2 与 VC 生成。由此可得出,不含V的堆焊层组织主要由马氏体、鱼骨状 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B 、弥散分布的碳化物构成。一旦组织中加入V,堆焊层中有 VB_2 与 VC 生成,这将取代部分 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B ,破坏了组织中鱼骨状形状,变成网格状,细化晶粒,减小了组织脆性。

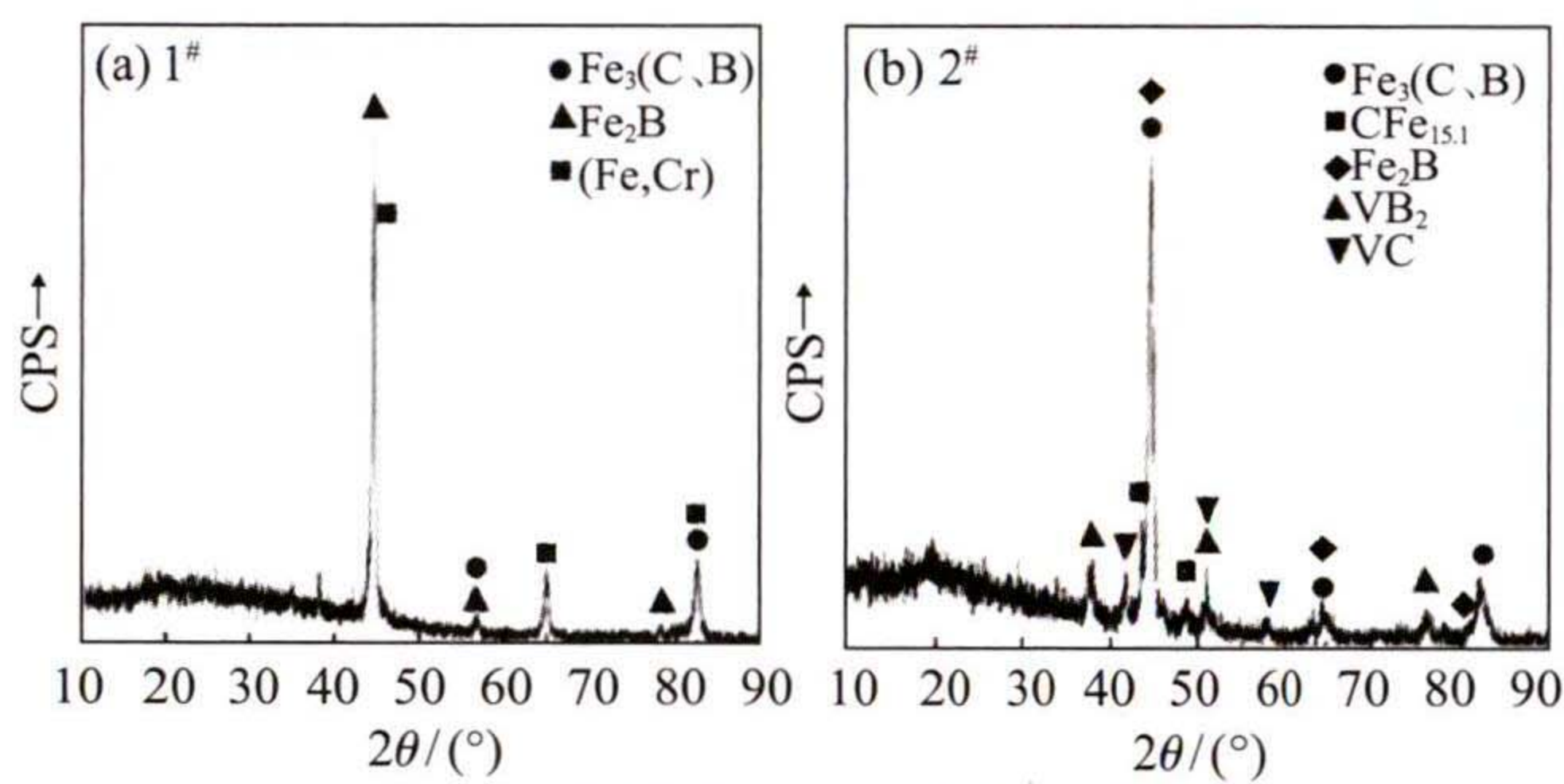


图2 堆焊层 XRD 的分析结果
Fig.2 XRD analysis results of hardfacing layer

2.3 等离子弧熔覆堆焊层硬度分析

表4是1#和2#堆焊层的维氏硬度测量结果。可知,不含V堆焊层的平均硬度值为891.63HV10,含V堆焊层的平均硬度值为904.58HV10,焊层的硬度均比较高且彼此相差不大。这是由于不论堆焊层中是否含V,堆焊过程中形成的硼化物、碳化物均作为硬质相,起到第二相强化的作用,且堆焊层金属中存在的合金元素会溶入到马氏体基体中,引起一定的晶格畸变,起到固溶强化的作用,从而提高了堆焊层的硬度。

表4 1#和2#堆焊层的显微硬度(HV10)
Tab.4 Microhardness of 1# and 2# hardfacing layers (HV10)

合金	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
1#	928.50	922.72	890.46	876.27	885.91	862.51	867.63	899.06	891.63
2#	905.23	897.04	910.28	897.08	911.79	914.69	897.09	903.46	904.58

2.4 等离子弧熔覆堆焊层冲击韧性分析

表5是1#和2#堆焊层的冲击实验结果。可知,不含V的堆焊层冲击韧性较差,断口形貌属于典型的脆性断裂;堆焊层中一旦加入V元素,其冲击功由

表5 1#和2#堆焊层的冲击吸收能量(J)
Tab.5 Impact absorption energy of 1# and 2# hardfacing layers (J)

合金	1	2	3	平均值
1#	28.37	29.43	32.65	30.15
2#	65.75	72.33	67.42	68.50

30.15J变为68.50J。这主要是因为堆焊过程中不含V的堆焊层组织形成了晶粒较大的白色鱼骨状物质 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B ,这些物质硬度高、脆性大,使组织分布不均匀,降低了堆焊层的韧性。当加入适量的V之后,V与B优先形成 VC 和 VB_2 ,代替组织中的部分 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B ,将组织中的鱼骨状结构变成网格状,使组织分布均匀。同时,优先形成的高熔点 VC 和 VB_2 会阻碍奥氏体晶粒长大与析出二次碳化物,使组织晶粒细化,提高堆焊层的韧性和抗裂性。

图3是1#和2#堆焊层冲击断口形貌。未加入V的Fe-C-B堆焊金属内析出的硬质相颗粒较大,组织呈鱼骨状,冲击断裂时,硬质相晶界成为裂纹萌生点,裂纹沿硬质相晶界扩展,因此堆焊层断口内出现大量小平面,此时主要为脆性断裂,如图3(a)所示。Fe-C-B堆焊合金中加入V元素,可使组织结构由鱼骨状变成相互交织的网状,能有效提高材料的抗裂纹扩展能力,此时冲击吸收能量较高,断口为韧-脆混合断裂方式。

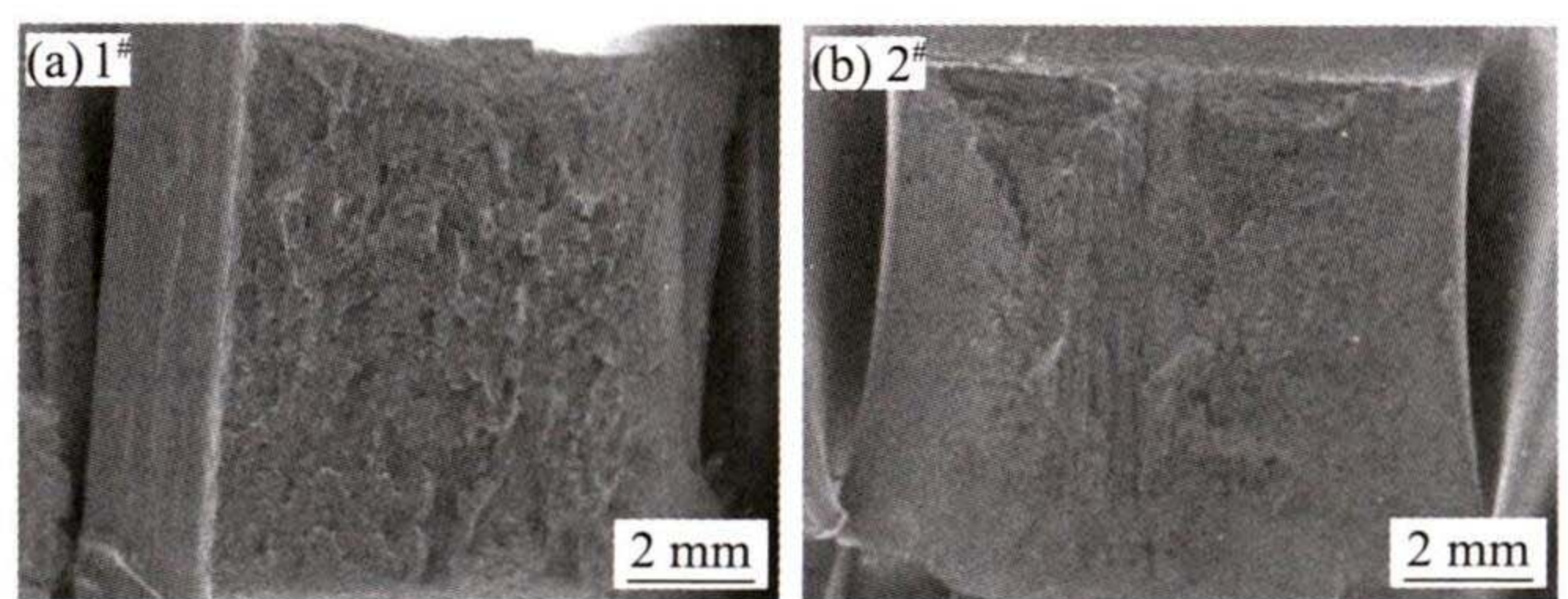


图3 1#和2#堆焊层的断口形貌
Fig.3 Fracture morphologies of 1# and 2# hardfacing layers


3 结论

(1) Fe-C-B系合金堆焊层显微组织主要由马氏体、鱼骨状 $Fe_3(C,B)$ 和 Fe_2B 、弥散分布的碳化物构成。向Fe-C-B系合金中加入V元素,堆焊层中有 VB_2 与 VC 生成,其破坏了组织中鱼骨状形状,变成网格状,细化晶粒。

(2) 不论Fe-C-B系合金中是否加入V元素,等离子熔覆堆焊层均具有较高的硬度,不含V的堆焊层硬度为891.63HV10,含V堆焊层的硬度为904.58HV10。

(3) 向 Fe-C-B 系合金中加入 V 元素, 提高了等离子熔覆堆焊层的冲击韧性, 冲击功从 30.15 J 增加至 68.50 J。

参考文献:

- [1] 赵立亭. 双丝高效气体保护堆焊研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2012.
- [2] 卢静, 李勇, 欧阳航, 等. 我国堆焊复合技术的应用与发展[J]. 世界有色金属, 2018(10):195-197.
- [3] 杨元修, 康福仪. CO₂+N₂ 混合气体保护电弧堆焊金属性能研究[J]. 阀门, 1999(1):10-12.
- [4] 王金满. 带极电弧堆焊的卷边法[J]. 电焊机, 1974(3):53-58.
- [5] 赵健, 张秉刚, 李晓鹏, 等. 电子束填丝工艺对堆焊焊缝形成的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(5):31-34.
- [6] 董会, 韩燕, 付安庆, 等. 快速激光熔覆 Ni/ 不锈钢堆焊层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5):21-27.
- [7] 邹家生. 材料连接原理与工艺[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [8] Tang Yingying, Zhu Zhiming, Yang Zhongyu, et al. High-efficiency gas shielded multi-arc welding technology [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(11):9-20.
- [9] Chigarev V V, Belik A G. Flux-cored strips for surfacing[J]. Welding International, 2012, 26(12):975-979.
- [10] Shinonaga Togo, Masashi Takata, Akira Okada, et al. Study on metal film formation by large-area electron beam irradiation [J]. International Journal of Electrical Machining, 2016, (21): 7-12.
- [11] Qian Jiuhong, Li Xikun, Qiu Guanming, et al. Development on laser cladding ceramic coating [Z]. Beijing: Journal of Rare Earths, 2005.
- [12] 刘政军, 李乐成, 苏允海, 等. 硼对等离子熔覆高硼铁基合金组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(1):45-48.
- [13] 张艳红, 蔡顺虎, 崔磊. 添加微量元素对多元复合强化高锰钢堆焊合金焊丝性能的影响分析[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(5):73-75.
- [14] 刘玲玲. N、Nb、W 对 Fe-Cr-N-Nb-W 系堆焊层组织性能的影响[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2018.
- [15] 杨柳青. 钛、钒对 2Cr13 药芯焊丝耐磨性能的影响研究[D]. 太原:太原科技大学, 2015.
- [16] 庄明辉. 高硼铁基堆焊合金组织结构形成机理及耐磨性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [17] 李煌. Fe-C-Cr-V-Ti 系高硼堆焊合金显微组织及耐磨性研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2010. 

(上接第 144 页)

- [7] Yu L, Ma B, Chen M, et al. Thermodynamic differences of different friction pairs in a multidisc clutch caused by spline friction: numerical simulation and experimental verification [J]. Tribology Transactions, 2019, 62:724-736.
- [8] Yu L, Ma B, Chen M, et al. Numerical and experimental studies on the characteristics of friction torque based on wet paper based clutches [J]. Tribology International, 2019, 131: 541-553.
- [9] 刘利萍, 魏敬丹, 陈华. 石墨含量对风电机组用铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(6):696-700.
- [10] 于亮, 马彪, 郑长松, 等. 沟槽面积对不同润滑油温下离合器摩擦磨损特性的影响[J]. 汽车工程, 2021, 43(10):1536-1542
- [11] Bäk M, Patrosz P, Sliwiński P. Torque transmitted by multi-plate wet clutches in relation to number of friction plates and their dimensions. In: Stryczek J., Warzyńska U. (eds) Advances in hydraulic and pneumatic drives and control 2020. NSHP 2020 [C]//Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer: Cham, 2020.
- [12] 张恒, 李和言, 昌和, 等. 湿式多片离合器摩擦转矩衰减特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7):94-102.
- [13] 陈爱华, 闫晨, 孟志立. 铜基复合材料制备及研究新进展[J]. 中国冶金, 2019, 29(2):7-11.
- [14] Goodarzi D M, Pekkarinen J, Salminen A. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27:S29201.
- [15] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe-TiC composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7):2007-2015. 