

钛化物陶瓷颗粒增强铁基堆焊合金层组织及耐磨性的研究

朱书志¹, 贾华^{1,2}, 徐令², 于靖航²

(1.大连海洋大学 中新合作学院, 辽宁 大连 116023; 2.大连海洋大学 机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要 为了提高零件表面的耐磨性, 在Q235钢表面, 采用明弧堆焊制备Fe-Cr-C-B-N和添加钛的质量分数为4%的Fe-Cr-C-B-N-Ti这2种铁基堆焊合金层, 借助金相显微镜、扫描电子显微镜、X射线衍射仪、洛氏硬度计、磨损试验机研究原位合成钛化物陶瓷颗粒, 增强铁基堆焊合金层的组织及耐磨性。结果表明: 添加钛的质量分数为4%的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层由板条马氏体(M)、少量残余奥氏体(A)、TiC、TiB₂、TiN、M₂₃(C,B)₆、M₃(C,B)和M₂B组成。灰黑色钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)多为形状不规则的细小颗粒, 呈均匀弥散分布。初生奥氏体晶粒细化, 内部有板条马氏体生成。共晶组织呈断续网状分布, 其中的硬质相(M₂₃(C,B)₆、M₃(C,B)和M₂B)数量相对减少, 但分布更均匀。此时, 堆焊合金层硬度为66HRC, 磨损量为0.042 9 g, 与未添加钛时相比, 硬度提高了5.3%, 磨损量减少了20.8%, 具有较好的耐磨性。

关键词 钛化物陶瓷颗粒; 铁基合金; 明弧堆焊; 显微组织; 耐磨性

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2026)04-0074-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20260113.002

Study on microstructure and wear resistance of titanide ceramic particle-reinforced iron-based surfacing alloy layer

ZHU Shuzhi¹, JIA Hua^{1,2}, XU Ling², YU Jinghang²

(1.College of China-New Zealand Collaboration, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2.College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract To improve the wear resistance of component surfaces, two types of iron-based surfacing alloy layers—Fe-Cr-C-B-N and Fe-Cr-C-B-N-Ti with a titanium mass fraction of 4%—were prepared on the surface of Q235 steel using open arc surfacing. The microstructure and wear resistance of the in-situ synthesized titanide ceramic particle-reinforced iron-based surfacing alloy layer were investigated using metallographic microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, a rockwell hardness tester, and a wear testing machine. The results show that the Fe-Cr-C-B-N-Ti surfacing alloy layer with a titanium mass fraction of 4% consists of lath martensite (M), a small amount of retained austenite (A), TiC, TiB₂, TiN, M₂₃(C,B)₆, M₃(C,B), and M₂B. The gray-black titanide ceramic hard phase particles (TiC, TiB₂, TiN) are mostly irregularly shaped fine particles and are uniformly dispersed. The primary austenite grains are refined, with lath martensite formed within them. The eutectic structure exhibits a discontinuous network distribution, with a relatively reduced amount of hard phases (M₂₃(C,B)₆, M₃(C,B), and M₂B), but a more uniform distribution. At this stage, the hardness of the surfacing alloy layer reaches 66HRC, with a wear mass loss of 0.042 9 g. Compared to the alloy without titanium addition, the hardness increases by 5.3%, and the wear mass loss decreases by 20.8%, demonstrating excellent wear resistance.

Keywords titanide ceramic particles; iron-based alloy; open arc surfacing; microstructure; wear resistance

磨损是金属材料失效的主要形式之一。相关统计表明, 因磨损而造成的损失约占能源总消耗的1/3~1/2, 占材料报废总量的80%以上^[1-2]。在煤炭开采、矿山作业、石油与天然气钻探及垃圾分类装置等领域, 大量核心金属零件长期工作在苛刻的工况条件下, 相互作用面之间的接触, 使金属零件表面承受着巨大的磨损, 因此造成危险或灾难性事故^[3-5]。为了提高材料的

耐磨性, 在金属零件表面熔覆具有优异综合性能的合金层, 对提高耐磨性、可靠性、稳定性及延长使用寿命具有重要意义^[6-7]。

采用堆焊技术在金属零件表面熔覆合金层, 不仅可以提高金属零件表面的耐磨性, 还可以实现表面强化、恢复尺寸的目的^[8]。常用的堆焊合金主要有铁基合金、镍基合金及钴基合金等。其中, 铁基合金具有

收稿日期: 2025-11-19; 修回日期: 2025-12-30

基金项目: 2025年大连海洋大学省级大学生创新创业训练计划项目(S202510158006); 辽宁省科技计划联合计划项目(2025-MSLH-117);

2022年辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20221108)

第一作者: 朱书志, 男。E-mail: 2386861794@qq.com。

通信作者: 贾华, 女, 博士, 讲师。E-mail: jiahua110023@126.com。

价格低廉、来源广泛和成分容易调整等优点,是提高金属零件耐磨性的理想材料。已有研究表明,可通过优化Fe-Cr-C铁基合金成分,促使更多硬质相析出,提高其耐磨性。而在众多合金元素中,钛的化学性质活泼,并且在铁基合金中固溶量小,极易与C、B、N等反应生成TiC、TiB₂、TiN。由于TiC、TiB₂、TiN具有硬度高、熔点高、稳定性好、与铁润湿性好等优点,因此是铁基堆焊合金中最理想的增强颗粒^[9-10]。

目前,关于TiC、TiB₂、TiN陶瓷硬质相颗粒强化合金性能方面,科研工作者做了一些研究,并取得了一定进展。如马笑晗等^[11]在亚共晶高铬铸铁堆焊合金中,采用原位合成TiC和直接添加TiC这2种方法,研究堆焊合金显微组织、硬度、磨粒磨损及冲击磨损性能的变化。张宇^[12]用纳米TiC-TiB₂颗粒强化碳素钢显微组织、力学性能。结果表明,纳米TiC-TiB₂颗粒能够提高碳素钢的硬度、强度和韧性,以及承担部分载荷,减少摩擦副接触,阻碍位错运动,从而显著提高碳素钢抵抗塑性变形能力。刘政军等^[13]制备含有TiN的Fe-Cr-C-Ti-N堆焊合金,并对其耐磨性和显微组织进行研究。结果表明,液态熔池冷却过程中TiN可优先于M₇C₃析出,作为初生M₇C₃异质形核质点,促使M₇C₃晶粒细化,从而使堆焊层硬度和耐磨性提高。赵义阳等^[14]采用激光熔覆技术在Q235钢表面制备含有TiN-TiB的FeCoCr-NiMn高熵合金涂层。研究表明,高熵合金涂层中TiB和TiN呈弥散分布,粗大的树枝晶脆断为短棒状树枝晶和等轴晶,从而使组织更加均匀细小,显微硬度提高17.70%,磨损失质量降低44.23%。可见,TiC、TiB₂、TiN陶瓷硬质相颗粒可显著提高合金的性能。但通过原位合成TiC、TiB₂、TiN钛化物陶瓷硬质相颗粒,用于复合强化铁基堆焊合金层的组织及耐磨性还鲜有研究。因此,本文作者研制自保护耐磨堆焊药芯焊丝,采用明弧堆焊技术,在Q235低碳钢表面制备未添加Ti的Fe-Cr-C-B-N和添加Ti的质量分数为4%的Fe-Cr-C-B-N-Ti 2种铁基堆焊合金层,分析原位合成TiC、TiB₂、TiN钛化物陶瓷硬质相颗粒对铁基合金层组织和耐磨性的影响,为提高材料的耐磨性提供一定理论基础。

1 试验材料与方法

自制Fe-Cr-C-B-N和Fe-Cr-C-B-N-Ti 2种药芯焊丝。其用H08A钢带为外皮,尺寸为16 mm×0.3 mm,长度无限制;药芯由硼铁(19.38%B,质量分数,下同)、高碳铬铁(60.6%Cr,8.24%C)、氮化铬(61.5%Cr,9.28%N)、钛铁(27%Ti)、石墨(99.5%)和纯铁粉末混合而成,

粉末颗粒尺寸为150~180 μm。在不添加Ti时,药粉中Cr、C、B和N的质量分数分别为25%,8%,2%,3%,添加少量Al、CaO、Al₂O₃和CaF₂粉末作为渣系成分,在焊接过程中起保护作用,质量分数分别为3.0%,0.3%,0.2%,0.5%,组成Fe-Cr-C-B-N焊丝的药芯成分。由于药芯中的Cr、C、B和N以化合物形式加入,受合金配方总量限制(为100%),经计算药芯中Ti的添加量最多为5%,因此在Fe-Cr-C-B-N的基础上添加4%的钛制备Fe-Cr-C-B-N-Ti药芯焊丝。2种药芯焊丝药粉不足100%的部分,用纯铁粉补充。然后制成φ2.8 mm的药芯焊丝,使用药芯焊丝成型机通过轧制和拉拔进行制备,包粉率控制在45%±1%。

选用的堆焊母材尺寸为100 mm×80 mm×12 mm,材质为Q235低碳钢板。在堆焊前将其表面的氧化皮和油污清理干净,使用MZC-1250型埋弧焊机进行明弧堆焊,堆焊3层,每层3道焊缝。堆焊时,不断调整堆焊工艺参数,最终确定电弧电压、焊接电流、焊接速度、焊丝伸出长度分别为28 V,200 A,10 mm/s,15 mm。采用化学方法测定2种堆焊合金层各元素的含量,如表1所示。

表1 2种堆焊合金层的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of two surfacing alloy layers (mass fraction/%)

Ti添加量	Cr	C	B	N	Ti	Fe
0	12.99	1.42	0.54	0.17	—	余量
4	12.92	1.35	0.51	0.17	1.03	余量

堆焊结束后,用线切割机在堆焊合金层中间部位,垂直于堆焊合金表面切取试样。将试样的堆焊合金层磨制平整后,用布鲁克D8型X射线衍射仪分析物相组成。再将试样依次研磨、抛光、质量分数为4%的硝酸酒精溶液腐蚀、清洗和吹干后,用OLTMPUS BX-6型金相显微镜和日立S-3400N型扫描电子显微镜观察显微组织。将试样的堆焊合金层用砂纸磨制平整后,用HRC-150A型洛氏硬度计测试硬度。将试样的横截面研磨和抛光后,用HV-1000型维氏硬度计测试堆焊合金层横截面硬度。磨损试验前,将待磨损试样清洗和烘干后,使用分析天平测量试样的质量,计为磨损前的质量M₀;用MLS-23型橡胶轮式湿砂磨损试验机对试样的堆焊合金层进行磨料磨损试验,磨损参数如表2所示。磨损试验后,再将试样清洗和吹干,用分析天平测量试样的质量,计为磨损后的质量M₁。计算试样被磨损掉的质量ΔM,为ΔM=M₀-M₁。最后,用日立S-3400N型扫描电子显微镜观察2种堆焊合金层的磨损形貌。

表2 磨损试验参数

Table 2 Wear test parameters

石英砂 粒度/ μm	胶轮转速 $N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	胶轮直径 d/mm	胶轮表面压力 P/MPa	磨损时间 t/min
212~420	240	150	1.5	3

2 结果及讨论

2.1 堆焊合金层的物相分析

图1为2种堆焊合金层的XRD衍射图。分析可知,未添加钛时,堆焊合金层主要由马氏体(M)、少量残余奥氏体(A)、 $M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 、 $M_2\text{B}$ 和BN组成,如图1a所示。药芯焊丝粉芯中不含 $M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 、 $M_2\text{B}$ 和BN相,说明这些相是在焊接电弧高温作用下原位合成的。在此基础上添加4%Ti时,与未添加Ti相比,堆焊合金层的组成相在马氏体(M)、少量残余奥氏体(A)、 $M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 和 $M_2\text{B}$ 的基础上,出现了TiC、 TiB_2 、TiN的衍射峰,同时BN衍射峰消失,如图1b所示。这说明添加4%的钛后Ti与C、B、N元素原位生成了TiC、 TiB_2 、TiN硬质相颗粒,同时也说明Ti与C、B、N之间有更强大的亲和力。

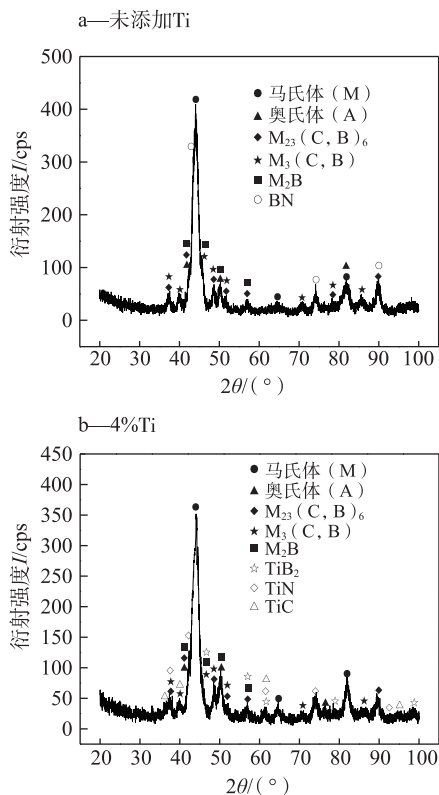


图1 2种堆焊合金层的XRD衍射图

Fig.1 XRD diffraction patterns of two surfacing alloy layers

2.2 堆焊合金层的显微组织分析

图2为2种堆焊合金层横截面熔合区的组织形貌。分析可知,左侧是堆焊合金层,右侧是母材金属,中间结合部位是熔合区金属。堆焊合金层与母材金属

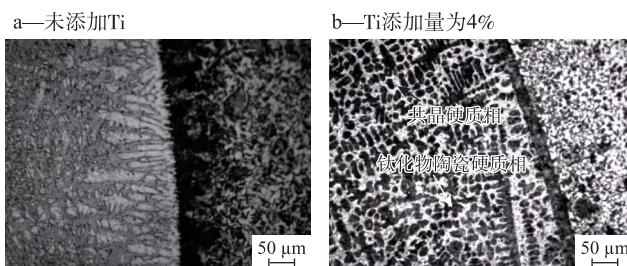


图2 2种堆焊合金层横截面熔合区的组织形貌

Fig.2 Microstructural morphology of fusion zone in cross-sections of two surfacing alloy layers

Q235低碳钢之间结合致密,未见气孔、夹杂和裂纹等缺陷,表明制备的堆焊合金层与母材金属Q235低碳钢之间是良好的冶金结合。未添加钛时,紧靠近熔合区处的初生奥氏体主要呈柱状晶分布,垂直于母材金属表面向焊缝中心生长;在逐渐远离熔合区后,有较多的初生奥氏体晶粒,晶粒尺寸变小,方向性被打乱,组织分布致密,如图2a所示。当Ti的添加量为4%时,在熔合区左侧的堆焊合金层中,初生奥氏体呈树枝状分布,晶粒细小。在初生奥氏体周围,共晶组织呈断续网状分布,其中共晶硬质相($M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 和 $M_2\text{B}$)分布在其中。另外,在组织中可见白亮色初生钛化物陶瓷硬质相(TiC、 TiB_2 、TiN)颗粒,呈细小均匀弥散分布,如图2b所示。

图3为2种堆焊合金层的显微组织。可以看到,2种成分的堆焊合金为典型的亚共晶组织,初生奥氏体和共晶组织是主要相。未添加Ti时,在堆焊合金层组织的初生奥氏体晶粒内部有针状马氏体和颗粒状BN生成。在初生奥氏体周围,有共晶组织(马氏体、残余奥氏体、 $M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 和 $M_2\text{B}$)呈断续网状分布,且数量较多,如图3a所示。当Ti的添加量为4%时,堆焊合金层中有灰黑色钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、 TiB_2 、TiN)生成,呈细小颗粒状均匀弥散分布。在初生奥氏体晶粒内部有板条马氏体生成,共晶组织(马氏体、残余奥氏体、 $M_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 、 $M_3(\text{C},\text{B})$ 和 $M_2\text{B}$)仍呈断续网状分布在初生奥氏体周围,与未添加钛时相比,初生奥氏体晶粒细化,共晶组织数量相对减少,但分布更加均匀,如图3b所示。这是由于Ti的化学性质活泼,容

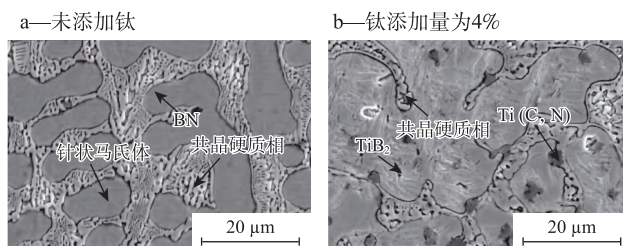


图3 2种堆焊合金层的显微组织

Fig.3 SEM microstructural morphology of two surfacing alloy layers

易与B、N和C发生化学反应,同时原位合成TiC、TiB₂、TiN硬质相颗粒的吉布斯自由能较低,因此在满足成分条件时,这些钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)可以在液态金属冷却过程中优先析出。优先析出的TiC、TiB₂、TiN一方面可以作为异质形核核心,促进堆焊合金层组织细化,起到细晶强化作用;另一方面在组织中均匀弥散分布,通过阻碍位错运动,可以大大提高材料的刚度和硬度。

灰黑色钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)主要以四边形、长条形和不规则颗粒状存在(图3b),这主要与TiC、TiB₂、TiN自身晶体结构及其形核长大过程有关。TiC和TiN属典型的NaCl型结构,是面心立方晶格,Ti原子占据面心立方的角顶和面部中心位置,C原子和N原子则位于八面体间隙位置,所以TiC和TiN在组织中呈四边形颗粒状分布^[15]。由于TiC和TiN晶体结构相同,晶格常数相近(分别为0.432 9 nm和0.424 3 nm),并且碳与N的原子半径相近(分别为77 pm和75 pm),使得TiC和TiN具有良好的相容性,在金属凝固过程中它们既可以相互依附生长,又可以形成连续固溶体,因此形成Ti(C,N)复合陶瓷硬质相颗粒,呈灰黑色四边形分布。TiB₂属六方晶系,是密排六方晶格结构,钛原子占据六棱柱的顶角和底心位置,硼原子处于钛原子构成的三棱柱中心,所以TiB₂在组织中主要以六边形、长方形和条状3种形态存在^[16-17]。其中尺寸较大的六边形和长方形颗粒多为初生颗粒,细小条状颗粒多为共晶反应生成的颗粒。但在图3b中,有灰黑色细小条状颗粒分布,几乎没有形状规则、尺寸较大的六边形和长方形颗粒,多数为形状不规则的灰黑色颗粒。这主要与C和N的原子半径与B相近(分别为77, 75 pm和82 pm),它们可以相互代替,以及优先形核的TiC、TiB₂、TiN微小颗粒可以成为后续TiC、TiB₂、TiN颗粒的形核核心有关。TiC、TiB₂、TiN(或Ti(C,N))颗粒具有高硬度、高稳定性、高弹性模量和高熔点等优点,不容易与铁合金发生界面反应,因此是铁基堆焊合金层的理想增强颗粒。

堆焊合金层初生奥氏体中析出马氏体的形态和共晶碳化物的数量与TiC、TiB₂、TiN陶瓷硬质相的原位合成密切相关。由于堆焊合金中B、N和C的含量有限,大部分C、B和N都与钛形成TiC、TiB₂、TiN陶瓷硬质相颗粒,加上初生奥氏体晶粒细化,导致初生奥氏体与共晶组织界面区域的C、B和N含量降低,因此共晶组织数量相对减少。另外,在随后的冷却过程中,初生奥氏体转变为板条状马氏体。

2.3 堆焊合金层的硬度和耐磨性分析

对2种堆焊合金层进行硬度和磨料磨损试验,结果

表明,当未添加Ti时,堆焊合金层的硬度为62.7HRC,磨损量为0.054 2 g。当Ti的添加量为4%时,堆焊合金层的硬度为66HRC,磨损量为0.042 9 g。与未添加钛时相比,添加4%Ti后,由于原位合成钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN),促使初生奥氏体晶粒细化,含共晶硬质相的共晶组织分布更加均匀,从而使堆焊合金层硬度提高5.3%,磨损量减少20.8%。这表明原位合成钛化物陶瓷硬质相颗粒对改善堆焊合金层的硬度和耐磨性十分有益。

图4为堆焊合金横截面的硬度分布曲线。其中,左侧是母材金属的硬度,右侧是堆焊合金层的硬度,“0”所指部位是熔合区。由图4分析可知,2种情况都是母材的硬度最低,约为160HV。从母材向熔合区过渡再到堆焊合金层的硬度显著升高,在距熔合区6.0 mm处至堆焊合金表层达到最高并趋于稳定。但是,当Ti的添加量为4%时,堆焊合金层的硬度明显高于未添加Ti的情况,其平均硬度可达1 200HV。这是由于堆焊合金中的合金元素较多,远离熔合区后,母材的稀释作用变弱,因此堆焊合金表层区域具有较高的硬度。对于Fe-Cr-C-B-N-Ti系堆焊合金,添加的4%Ti可以与合金中的C、B和N原位合成钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN),由于这些颗粒密度较小,容易上浮,因此添加4%钛的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层硬度更高。

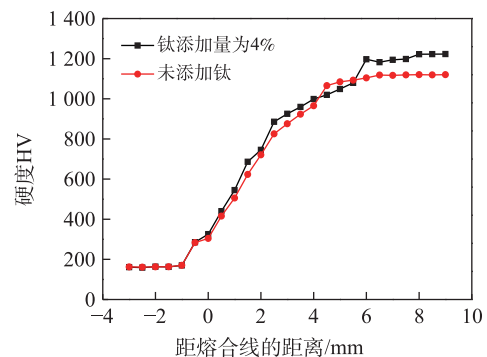


图4 2种堆焊合金层横截面的硬度分布曲线

Fig.4 Hardness distribution curves of cross-sections of two surfacing alloy layers

2.4 堆焊合金层的磨损形貌分析

图5为2种堆焊合金层的磨损形貌。分析可知,当未添加钛时,堆焊合金层有磨粒磨过留下的犁沟,但犁沟相对细密,沟槽不深,如图5a所示。当Ti的添加量为4%时,磨粒磨过堆焊合金层留下的犁沟进一步减少,沟槽浅且不明显,仅存在少量的凹坑,如图5b所示。这是由于未添加钛时,堆焊合金层只是基体组织(马氏体、残余奥氏体)和少量BN及共晶硬质相(M₂₃

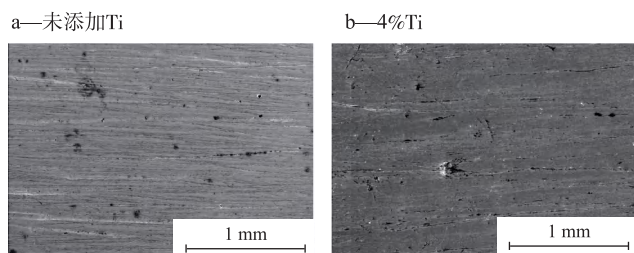


图5 2种堆焊合金层的磨损形貌

Fig.5 Worn surface morphologies of two surfacing alloy layers

(C,B)₆M₃(C,B)和M₂B)来抵抗磨料的磨削作用。当Ti的添加量为4%时,堆焊合金层中有初生钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)生成,与共晶硬质相(M₂₃(C,B)₆M₃(C,B)和M₂B)一同构成抗磨骨架,并与基体组织(马氏体、残余奥氏体)相互配合,有更强的抗磨作用,从而使堆焊合金层几乎无犁沟产生。少量的凹坑是钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)在磨料的反复冲刷与犁削作用下形成的,由于数量少,对耐磨性影响不大。因此,Ti的添加量为4%的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层具有更高的耐磨性。

3 结论

1) 未添加Ti的Fe-Cr-C-B-N堆焊合金层主要由马氏体(M)、少量残余奥氏体(A)、M₂₃(C,B)₆M₃(C,B)、M₂B和BN组成。添加4%钛的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层组成相在马氏体(M)、少量残余奥氏体(A)、M₂₃(C,B)₆M₃(C,B)和M₂B的基础上,BN相消失,出现了TiC、TiB₂、TiN相。

2) 添加4%Ti的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层与母材金属之间呈良好的冶金结合。灰黑色钛化物陶瓷硬质相颗粒(TiC、TiB₂、TiN)多为形状不规则的细小颗粒,呈均匀弥散分布。初生奥氏体晶粒细化,内部有板条状马氏体生成。共晶组织中的硬质相(M₂₃(C,B)₆M₃(C,B)和M₂B)呈断续网状分布,数量相对减少,但分布更加均匀。

3) 添加4%Ti的Fe-Cr-C-B-N-Ti堆焊合金层硬度为66HRC,磨损量为0.042 9 g。跟未添加Ti时相比,硬度提高了5.3%,磨损量减少了20.8%,堆焊合金表层硬度也最高,平均显微硬度为1 200HV。磨粒磨过后留下的犁沟少,沟槽浅,凹坑数量较少,具有较好的耐磨性。

4 参考文献

[1] 姚张富博,李振岗,郭洋,等. 316L不锈钢表面激光送丝熔覆钴基合金工艺及耐磨性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(14): 134-141.

YAOZHANG Fubo, LI Zhengang, GUO Yang, et al. Study on process and wear resistance of wire feeding laser cladding cobased alloy on 316L stainless steel surface [J]. Hot Working Technology, 2025, 54(14): 134-141. (in Chinese)

[2] 王贺千,康嘉杰,王浩东,等. 铁基非晶合金涂层的制备及其耐磨防腐性能研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(2): 1-13. WANG Heqian, KANG Jiajie, WANG Haodong, et al. Research progress in preparation and wear corrosion resistance of Fe-based amorphous alloy coatings [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(2): 1-13. (in Chinese)

[3] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions [J]. Friction, 2017, 5(3): 263-284.

[4] 张泽疆,李新梅. 激光熔覆CoCrFeNiSix高熵合金涂层的耐磨和耐蚀性能[J]. 材料研究学报, 2024, 38(10): 741-750. ZHANG Zejiang, LI Xinmei. Wear and corrosion resistance of laser cladding CoCrFeNiSix high entropy alloy coating [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2024, 38(10): 741-750. (in Chinese)

[5] MICHAŁ B, PAVLO P, THAER S, et al. Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-B-C-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding [J]. Materials, 2022, 15(14): 5074-5079.

[6] 朱厚国. C-Nb-Ni-Ti-B强化耐磨堆焊药芯焊丝研制及熔覆金属性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020. ZHU Houguo. Development of C-Nb-Ni-Ti-B reinforced hardfacing flux cored wire and metal coating properties [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

[7] LI J, KANNAN R, SHI M, et al. Solidified microstructure of wear-resistant Fe-Cr-C-B overlays [J]. Metall Mater Trans B, 2020, 51(4): 1291-1300.

[8] 雷声,李帅,马世豪,等. 两种中铬堆焊合金组织及性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 160-162. LEI Sheng, LI Shuai, MA Shihao, et al. Study on microstructure and properties of two medium chromium surfacing alloys [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21): 160-162. (in Chinese)

[9] 贾华,刘政军,李萌,等. 陶瓷硬质相对铁基复合材料组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 122-127. JIA Hua, LIU Zhengjun, LI Meng, et al. Effects of ceramic phase on microstructure and mechanical properties of ferrous matrix composite [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 122-127. (in Chinese)

[10] 高建文. TiB₂颗粒增强钢的制备与组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019. GAO Jianwen. Research on preparation and microstructure properties of TiB₂ particle reinforced steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019. (in Chinese)

[11] 马笑哈,贺定勇,秦志恒,等. TiC对亚共晶高铬铸铁堆焊合

- 金组织及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 142–150.
- MA Xiaohan, HE Dingyong, QIN Zhiheng, et al. Effects of TiC on the microstructure and wear resistance of hypoeutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 142–150. (in Chinese)
- [12] 张宇. 纳米TiC-TiB₂颗粒对碳素钢组织和性能的影响[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- ZHANG Yu. Effect of TiC-TiB₂ nanoparticles on microstructure and properties of carbon steel[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)
- [13] 刘政军, 李东芮, 王文欣. TiN对Fe-Cr-C耐磨堆焊合金组织及耐磨性影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 15–19.
- LIU Zhengjun, LI Dongrui, WANG Wenxin. Effect of TiN on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 15–19. (in Chinese)
- [14] 赵义阳, 詹凤琪, 张传舰, 等. 激光熔覆TiN-TiB增强Fe-CoCrNiMn高熵合金涂层微观结构和耐磨性能研究[J]. 铸造工程, 2025, 49(1): 20–23.
- ZHAO Yiyang, ZHAN Fengqi, ZHANG Chuanjian, et al. Microstructure and wear resistance of TiN-TiB reinforced Fe-CoCrNiMn high entropy alloy coatings by laser cladding[J]. Foundry Engineering, 2025, 49(1): 20–23. (in Chinese)
- [15] 艾慧颖, 石建稳, 陈建伟, 等. 氮掺杂TiO₂优势晶面及晶型的调控研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(8): 1580–1583.
- AI Huiying, SHI Jianwen, CHEN Jianwei, et al. Research on the regulation of N doped TiO₂ advantage facets and crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(8): 1580–1583. (in Chinese)
- [16] 朱维金. TiB₂颗粒增强铁基复合涂层组织及性能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- ZHU Weijin. Study on microstructure and properties of TiB₂ particles reinforced Fe-based composite coatings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [17] 孙荣幸, 张同俊, 戴伟, 等. 射频磁控溅射法制备TiB₂涂层及其性能分析[J]. 材料科学与工程学报, 2006(2): 249–251.
- SUN Rongxing, ZHANG Tongjun, DAI Wei, et al. Properties analyse of TiB₂ coatings deposited by radio-frequency magnetron sputtering[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006(2): 249–251. (in Chinese)
-
- (上接第47页)
- [21] 李奇涵, 马翔飞, 高嵩, 等. 高温条件下基于虚场法的钛合金弹塑性参数识别与提取[J]. 精密成形工程, 2024, 16(2): 55–61.
- LI Qihan, MA Xiangfei, GAO Song, et al. Identification and extraction of elastic-plastic parameters of titanium alloy at high temperature based on virtual field method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(2): 55–61. (in Chinese)
- [22] 王珏, 韩颖杰, 谢洪志, 等. TC4钛合金双曲面复杂航空零件热成形工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(2): 29–37.
- WANG Jue, HAN Yingjie, XIE Hongzhi, et al. Research on hot forming process of TC4 titanium alloy hyperbolic complex aviation part[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(2): 29–37. (in Chinese)