

引文格式: 易鸿, 郭文荣, 郭亮, 等. NbC 含量对激光熔覆不锈钢涂层组织和性能影响[J]. 航空制造技术, 2023, 66(18): 91-97.

YI Hong, GUO Wenrong, GUO Liang, et al. Effect of NbC content on microstructure and properties of laser clad stainless steel coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(18): 91-97.

NbC 含量对激光熔覆不锈钢涂层组织和性能影响*

易 鸿¹, 郭文荣², 郭 亮², 霍锋锋², 辉小斌², 李晓峰^{1,3}

- (1. 中北大学, 太原 030051;
2. 智奇铁路设备有限公司, 太原 030032;
3. 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 本文采用激光熔覆技术在 EA1T 车轴钢表面制备了添加不同碳化铌(NbC)含量的不锈钢涂层。利用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)和能量色散光谱(EDS)分析了复合涂层的相结构和显微组织演变,并测定了涂层的硬度和摩擦学性能。结果表明, NbC 的加入起到了细化晶粒的作用,同时在晶间析出 Fe(Nb, C)类硬质相。但 NbC 的加入会导致涂层中树枝晶的方向性被破坏,但涂层性能增强,且随着 NbC 质量分数的增加而提高。特别是当 NbC 质量分数为 20% 时,添加的 NbC 全部溶解,然后在晶间析出岛状硬质相。由于 NbC 的添加引起细晶强化和弥散强化,显著提高了涂层的硬度和耐磨性。与未加 NbC 涂层相比,加入质量分数 20% NbC,硬度提高了 15%,最高硬度为 60HRC。磨损系数显著降低,强化效果最好。20% NbC 的复合涂层磨损表面犁沟较浅,磨损机制为磨粒磨损。

关键词: 激光熔覆; NbC; 不锈钢粉末; 微观组织; 摩擦磨损

Effect of NbC Content on Microstructure and Properties of Laser Clad Stainless Steel Coatings

YI Hong¹, GUO Wenrong², GUO Liang², HUO Fengfeng², HUI Xiaobin², LI Xiaofeng^{1,3}

- (1. North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Zhiqi Railway Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030032, China;
3. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

[ABSTRACT] In this paper, stainless steel coatings with different NbC contents were prepared on the surface of EA1T axle steel using laser cladding technology. The phase structure and microstructure evolution of the composite coatings were analysed using X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), and the hardness and tribological properties of the coatings were determined. The results show that the addition of NbC plays a role in grain refinement, while Fe(Nb, C) type hard phases are precipitated between the grains. However, the addition of NbC resulted in the disruption of the directionality of the dendrites in the coating, but the coating properties were enhanced and increased with the addition of NbC. In particular, when the mass fraction of NbC is 20%, all of the added NbC melts and then precipitates islands of hard phase between the grains. The hardness and wear resistance of the coating is significantly improved by the fine grain strengthening and diffusion strengthening caused by the NbC addition. The addition of 20% NbC increased the hardness by 15% compared to the uncoated NbC, reaching a maximum hardness of 60HRC; The wear coefficient was significantly reduced to 0.75, with the best reinforcement effect. The wear surface plough furrows of the composite coating with 20% NbC were shallow, and the wear mechanism was abrasive wear.

Keywords: Laser cladding; NbC; Stainless steel powder; Microstructure; Frictional wear

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.18.091

* 基金项目: 国家自然科学基金(52071299, 51804280); 山西省科技成果转化引导专项(202204021301048); 山西省科技重大专项(20181101009, 20201102009); 山西省重点研发计划项目(202102050201009, 202202150401020)。

EA1T 钢主要用于列车车轴,在列车高速行驶过程中,零件易发生磨损导致失效、疲劳和氧化,严重的会产生裂纹,降低工作效率和使用寿命,甚至会直接影响列车行驶安全^[1]。为了提高列车的安全性能,通过表面改性技术可以提高 EA1T 车轴钢零部件表面的硬度与耐磨性,从而减少资源浪费、降低成本。激光熔覆是一种新兴的零件表面改性技术^[2],可以使涂层与基体实现良好的冶金结合,显著改善基材的耐磨性、耐腐蚀性、抗氧化性等特性,与传统表面改性技术(堆焊、喷涂、电镀等)相比,激光熔覆具有稀释度低、组织结构紧密、涂层和基材的基体可实现良好结合等优势,在金属材料表面强化方面呈现出广阔的应用前景^[3-5]。

王行涛等^[6]采用激光熔覆技术成功地在 35CrMoA 车轴钢上制备了低合金钢涂层,调控激光熔覆工艺参数,包括激光功率、送粉率、扫描速度和搭接率,研究熔覆后的组织和性能的影响,从而得到最佳工艺。此外,在最佳工艺参数下成形的熔覆层力学性能均达到标准要求。Feng 等^[7]研究了激光熔覆 LZ50 车轴钢上 Fe 基涂层的热影响区组织和力学性能的变化,在送粉速率 7.8 g/min、扫描速率 420 mm/min 等最佳工艺参数下,涂层的微观结构相对均匀,在热影响区和基体的中间区域观察到硬化行为,熔覆层的硬度基体高约 12%。

目前,在钢铁表面激光熔覆的粉末主要为 Ni 基^[8]、Co 基^[9]和 Fe 基^[10]等合金粉末,其涂层具有良好的耐磨性、导热性及化学稳定性,被广泛应用于激光熔覆表面强化^[11-12]。Fe 基粉末中往往加入一定量的 Cr、Ni 等元素提高其硬度与耐蚀性,由于成本低,应用最为广泛。目前众多学者在钢铁表面制备 Fe 基涂层中,加入陶瓷颗粒可显著提高涂层表面硬度和耐摩擦磨损性^[13-14]。Wang 等^[15]通过激光熔覆在 Q235 钢上成功沉积了由碳化物增强 Fe 基复合涂层,发现添加 Nb 和 B₄C 在涂层中原位合成 NbC 相,增强颗粒弥散分布在整个涂层中,Fe 基复合层的显微硬度最高达 1067.3HV_{0.5},两种 Fe 基复合材料层的磨损机制均为磨粒磨损和粘着磨损。Feng 等^[16]在 Fe 基粉末中加入微量的 B,通过第一性原理计算,阐明了涂层的微观结构演变和强化机理,随着 B 的添加,增强体由 NbC 型碳化物转变为 Cr₂₃C₆ 型碳化物,最终转变为 Fe₃C 型碳化物。此外, B 会降低 Fe₃C 的形成能,形成的 Fe₃C 型碳化物和 γ-Fe 共晶组织可同时提高涂层的抗压强度与塑性。Xiao 等^[17]将 WC 颗粒添加到 Fe 基合金中,发现 WC、W₂C、M₂₃C₆、M₇C₃ 相的析出使 WC-Fe 复合涂层的平均显微硬度提高到 1029.2HV_{0.2},提高幅度超过 50%,其耐磨性是未加 WC 颗粒涂层的 1.3 倍。Wang 等^[18]通过混合不同含量 Cr₃C₂ 和 FeV₅₀ 的 Fe 基粉末,使用激光熔覆技术原位

合成 V₈C₇。结果表明,引入 Cr₃C₂ 和 FeV₅₀ 材料使 C、V 和 Cr 的浓度在枝晶区达到饱和,晶粒尺寸减小,由于晶界强化和固溶体强化的作用,明显提高了 Fe 基合金涂层的摩擦学性能。

其中, NbC 颗粒的密度与 Fe 基涂层的密度相近^[19],有利于 Fe 基涂层中碳化物颗粒的分布均匀性^[20-22]。此外, NbC 主要分布在合金的晶界处,起到钉扎作用,会抑制晶粒生长,使晶粒细化,改善合金的微观组织结构^[23]。因此,本研究在不锈钢粉末中加入 NbC 粉末,对车轴钢表面进行激光熔覆涂层制备,优化工艺参数,研究其组织演变及力学/摩擦磨损性能,研究结果可为激光熔覆改善不锈钢涂层性能提供技术参考。

1 试验材料和方法

试验材料使用奥氏体不锈钢(不锈钢粉末牌号 20Cr17NiMo),化学成分如表 1 所示。因其具有良好的强度、塑性和韧性等综合性能,且与基体材料成分相近,润湿性好,在激光熔覆不锈钢耐磨耐蚀涂层中被广泛使用,其粒径 D₅₀=128 μm,粒径分布如图 1 所示。NbC 颗粒粒度在 1 μm 以下。根据 Fe-xNbC (x 为质量分数,0、5%、10% 和 20%)合金成分设计,粉末混合后进行球磨以获得均匀的成分,球磨参数为球粉重量比 8:1,转速为 100 r/min,球磨时间为 2 h。将球磨后的粉末用作覆层材料。基体为退火态的 EA1T 车轴钢,成分如表 2 所示,对尺寸为 20 mm × 20 mm × 10 mm 的基体进行打磨,去除表面的氧化物并让其表面保持平整,用无水乙醇清洗以去除表面的污垢和油。使用 Laserline 4.4 kW 大功

表 1 20Cr17NiMo 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 20Cr17NiMo (mass fraction) %

C	Cr	Ni	Mo	Fe
0.2	17.0	2.5	1.8	余量

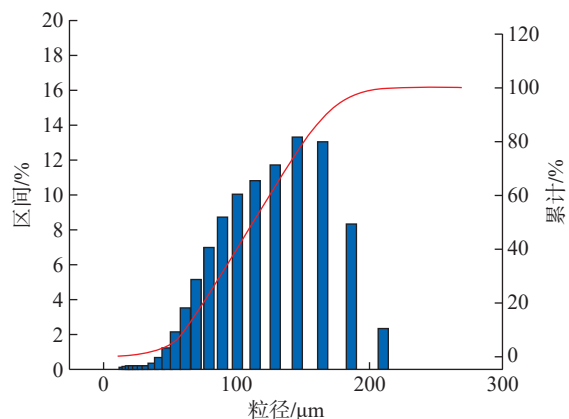


图 1 不锈钢粉末粒径分布图

Fig.1 Stainless steel powder particle size distribution

率半导体光纤耦合激光器,采用同轴激光熔覆送粉法进行激光熔覆,熔覆参数为激光功率 1.6 kW、光斑尺寸 4 mm、扫描速度 7 mm/s、送粉速度 300 mg/s。将熔化的粉末沉积在 EA1T 车轴钢基体上,以氩气为保护气体,防止熔池氧化,成形后的宏观形貌如图 2 所示。

将制备的复合涂层沿横截面切割,将 Fe-xNbC 涂层样品进行机械抛光和表面蚀刻(体积比为 HCl:HNO₃:H₂O=3:1:2),使用光学显微镜(ZEISS-Imager)进行金相观察分析,通过扫描电子显微镜(SEM, JSM-7900F)观察试样的微观组织结构和磨损表面。用 Cu-K α 辐射 X 射线衍射(XRD, SmartLab-3 kW)分析了合金的相组成。利用 HR-150A 型洛氏显微硬度计进行不同成分的熔覆涂层的硬度测试。根据 GB/T 230.1—2018《金属材料洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》进行硬度测试。测试时分别在涂层纵截面的顶部、中部和底部各打 10 个水平相距 100 mm 的点测得取值,再得出其平均值。在摩擦磨损试验机(HSR-2M)上,使用直径为 4 mm 的 Si₃N₄ 球,在载荷 40 N、摩擦速度 300 mm/min、持续时间 20 min 的试验条件下,在室温下完成样品的耐磨性测试。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 3 为添加不同质量分数 NbC 的不锈钢涂层 XRD 物相分析,可以看出,在未添加 NbC 的涂层中检测到 α -Fe、Fe-Cr 和少量的碳化物 M₇C₃ (M=Cr、Fe)。随着 NbC 的加入, α -Fe 的衍射峰急剧减小,并伴随 NbC 峰出现,这些峰随着 NbC 加入量的增加而增加。当 NbC 加入量增加到 20% 时,有关于 Nb、C 元素的峰值明显增大主要是具有了 BCC 相固溶体的几种结构,包括 α -

Fe、Fe₂Nb、Fe₃C 和 NbC 等。 α -Fe 的衍射峰峰值随着 NbC 加入量的增加而逐渐减弱,Fe₂Nb、Fe₃C 的衍射峰均在增强,说明有一部分 α -Fe 与 Nb、C 反应生成了 Fe₂Nb、Fe₃C 等化合物。当 NbC 加入量越多,Fe-NbC 涂层中析出的 NbC 含量越多,其分解出来的 Nb 和 C 元素越多,激光熔覆的过程中,由于 Nb 属于强碳化物形成元素,大部分重新结合为 NbC,另一些与 Fe 元素反应生成 Fe₂Nb 硬质相,C 进入基体中^[24]。含 Nb 的衍射峰有轻微的左移,是由于在激光熔覆过程中,NbC 颗粒的分解有助于 Nb、C 元素固溶到枝晶之间,含 NbC 的固溶体扩展了晶格结构,从而扩展了晶面间距^[25]。

2.2 显微组织分析

图 4 为未添加 NbC 颗粒不锈钢涂层横截面的金相图。图 4(a)为低倍金相图,激光熔覆成形表面平整,涂层出现少量空洞,未发现有裂纹缺陷。图 4(b)为涂层顶部组织,凝固速度较快,形成的是细小等轴枝晶。图 4(c)是中部组织,冷却速度比上部组织慢,使得晶粒组织比较粗大,包含有胞状晶和树枝晶。图 4(d)为底部连接处组织。因为熔覆的金属液体与基体材料为直接接触,温度梯度很大,所以晶粒组织主要是以平面晶的形式外延生长,平面晶会使涂层和基体有良好的冶金结合。所以,激光熔覆组织从下到上主要是从平面晶到胞状树枝晶再到等轴树枝晶的方向生长的。

图 5 为添加不同 NbC 含量的不锈钢涂层显微组织图。从图 5(a)中可以看出,未添加 NbC 的涂层显微组织呈有明显方向性的树枝晶,主要由 α -Fe 相构成。从图 5(b)中可以看到有基体以及白色颗粒,基体为 α -Fe 相,白色颗粒是少量加入的 NbC 颗粒熔化后,重新在晶界析出的碳化物相。加入质量分数为 5% 的 NbC 颗粒,晶粒明显细化,这是因为加入了陶瓷相颗

表 2 EA1T 化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of EA1T (mass fraction) %

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Ni	Fe
0.4	1.2	0.5	0.3	0.3	0.02	0.08	0.06	余量



图 2 激光熔覆单道成形整体形貌

Fig.2 Overall shape of laser cladding single pass forming

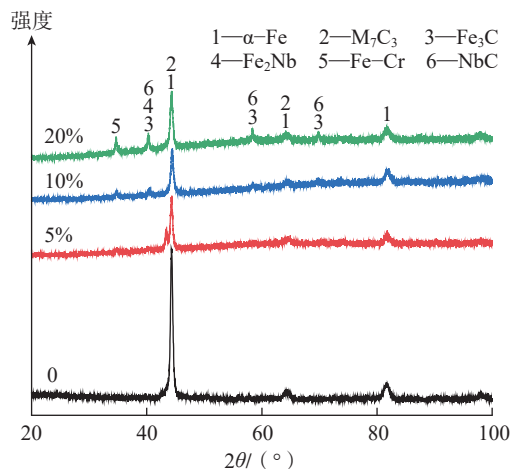


图 3 添加不同 NbC 含量的不锈钢涂层 XRD 物相分析

Fig.3 XRD physical phase analysis of stainless steel coatings with different NbC contents

粒后,陶瓷相弥散分布在组织中,形成异质形核的核心,在形核过程中提高形核速率,从而使晶粒得到细化。在激光熔覆过程中,由于涂层组织形态由熔池中合金温度梯度 G 和凝固速度 R 的比值 G/R 来决定^[26-27],当加入 NbC 颗粒后,扰乱了熔池流动的方向性,破坏了组织的原本凝固过程,使得涂层中树枝晶被破坏。

当 NbC 质量分数为 10% 或 20% 时,熔覆过程的 NbC 颗粒全部熔解,未看到大块白色的 NbC 颗粒析出,而且涂层均无明显的缺陷。如图 5 (c) 所示,加入质量分数为 10% 的 NbC 颗粒,晶粒进一步细化,生长的方向性变得更紊乱,且在树枝晶间析出岛状组织,熔解的 NbC 过多,会导致更多的 Nb 类的硬质相沿晶界析出聚集成岛状。随着 NbC 颗粒的添加量增加,有大量的 Fe₃C 相生成和过饱和的 NbC 相析出等,聚集于晶间,岛

状组织变得更大(图 5 (d));而晶间析出的组织会占据原本晶粒生长的空间,使黑色的基体组织减少,因此过饱和的 NbC 颗粒也细化了晶粒。

图 6 为添加质量分数 20% NbC 合金涂层的元素的分布结果。可以看出涂层中分布的白色网状和岛状组织富集了 Mo、Nb 元素,这是冷却过程中形成了 Nb、Mo 的碳化物固溶于晶间。Fe 元素和 Cr 元素主要分布在黑色基体组织中,其余 NbC、Fe₂Nb、Fe₃C 等这些新生的硬质相则在涂层中均匀分布,起到了弥散强化的能力。此外,在晶间区域观察到 NbC 相,这是由于 NbC 颗粒的完全熔解造成的^[28]。NbC 颗粒熔解稀释后的 Nb 与 C 原子结合性强,部分重新结合在晶间。

基于 XRD 结果和微观组织,在激光熔覆时可能会发生下列反应。



吉布斯自由能函数可以通过式(5)^[29-30]计算:

$$\Delta G_T^\theta = \Delta H_{298\text{K}}^\theta - T\Delta S_{298\text{K}}^\theta \quad (5)$$

$$\Delta H_{298\text{K}}^\theta = \Delta H_{f,298\text{K},\text{生}}^\theta - \Delta H_{f,298\text{K},\text{反}}^\theta \quad (6)$$

$$\Delta S_{298\text{K}}^\theta = \Delta S_{f,298\text{K},\text{生}}^\theta - \Delta S_{f,298\text{K},\text{反}}^\theta \quad (7)$$

式中, ΔG_T^θ 为标准反应吉布斯自由能; $\Delta H_{298\text{K}}^\theta$ 为常温下

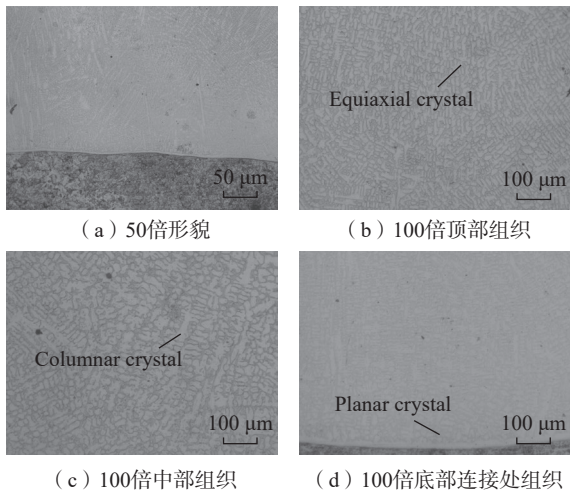


图 4 未添加 NbC 颗粒不锈钢涂层横截面的金相图

Fig.4 Metallographic diagram of cross section of stainless steel coating without addition of NbC granules

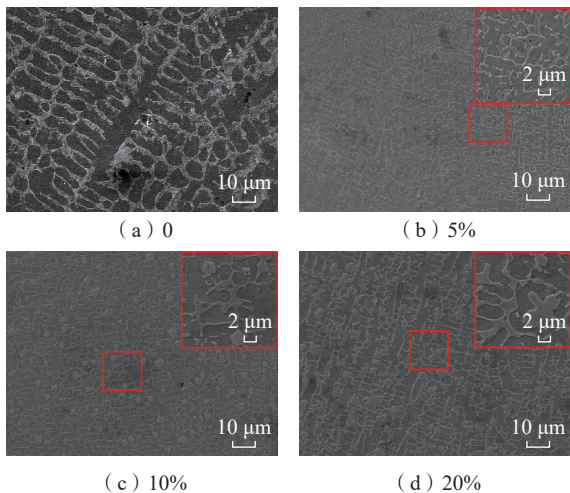


图 5 添加不同质量分数的 NbC 不锈钢涂层显微组织图

Fig.5 Microstructure of stainless steel coating with different NbC mass fractions

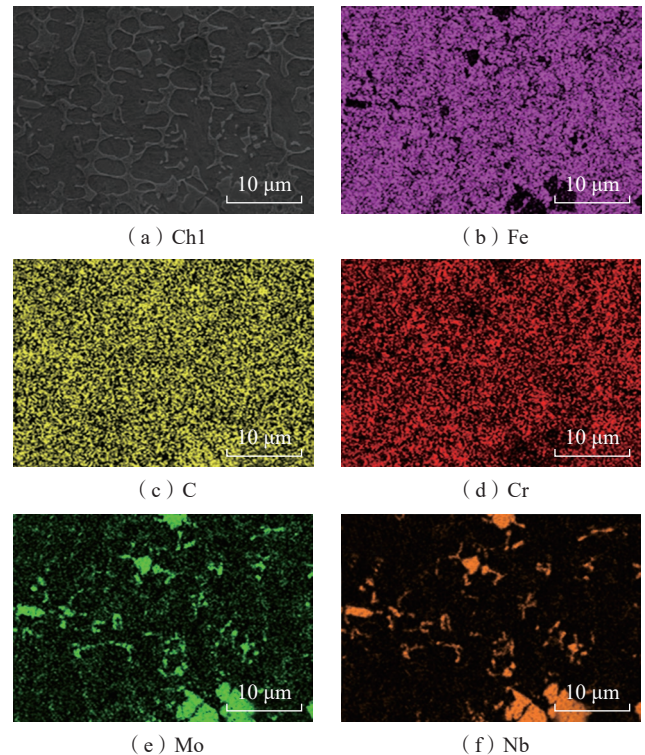


图 6 添加质量分数 20% NbC 不锈钢涂层的 EDS 面扫图

Fig.6 EDS surface scanning of stainless steel coating with mass fraction 20% NbC

标准反应热效应; ΔS_{298K}^{θ} 为常温下标准反应熵差; T 为开尔文温度; $\Delta H_{f,298K,生}^{\theta}$ 、 $\Delta H_{f,298K,反}^{\theta}$ 分别为生成物和反应物常温下标准摩尔生成热; $\Delta S_{f,298K,生}^{\theta}$ 、 $\Delta S_{f,298K,反}^{\theta}$ 分别为生成物和反应物常温下标准摩尔熵,得到的结果如图 7 所示。在 298~3000 K 范围内,上述反应的吉布斯自由能为负值时,反应可能发生且 Cr_7C_3 的吉布斯自由能值是所有反应中负值最大的。理论上讲, Cr_7C_3 应该最先从熔融池中分离。但是,形成的 NbC 相的自由能平稳,温度变化的影响很小,会由于激光的快热和冷引起的非平衡凝固促成 NbC 相的形成^[31]。此外, NbC 相具有较高的熔点,将在其他相固化之前合成。Wang 等^[8] 的研究也有相似的结果。

2.3 硬度分析

图 8 为不同 NbC 含量的涂层硬度图。可以看出,未添加 NbC 的涂层的硬度为 52.1HRC; 添加质量分数为 5% 和 10% NbC 的涂层硬度逐步增加; 添加质量分数为 20% NbC 的涂层表面硬度最高,达到 60.0HRC。由图 5 可得, NbC 颗粒的加入,使得涂层中的晶粒尺寸减小,起到了晶粒细化的效果。Nb 元素饱和带来的晶格畸变,抑制了位错运动,阻碍晶界滑移,使得涂层合金固溶体的硬度增加^[25]。此外,涂层中熔解的 NbC 颗粒,使得涂层中马氏体中含碳量增加,马氏体硬度升高,同时 C 含量的增加使析出的碳化物数量增多,涂层硬度增大。

2.4 摩擦磨损分析

图 9 为添加不同质量分数 NbC 的不锈钢涂层摩擦磨损系数。可以看出,涂层的磨损过程可分为磨合期和稳定磨损阶段两个阶段,未添加 NbC 颗粒的不锈钢涂层摩擦系数在前期迅速增加到约 1.70,然后稳定磨损阶段平均摩擦系数下降到 1.35,缓慢上升最后剧烈波动,随着摩擦的进行,涂层表面的温度升高,摩擦力逐渐增加,涂层表被粘连,摩擦系数增加。摩擦磨损系数最小的是添加质量分数为 20% NbC 的不锈钢涂层,平均摩擦系数为 0.75。根据 Archard 定律^[32],材料的耐磨性与

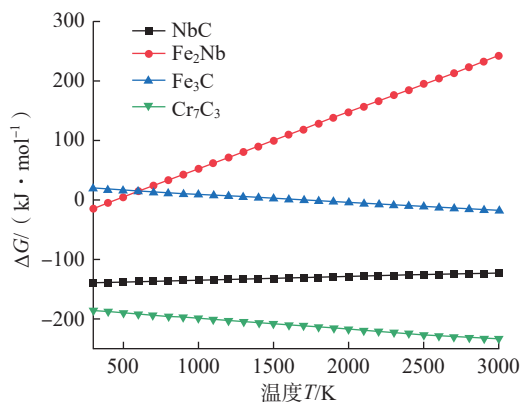


图 7 吉布斯自由能随温度变化图

Fig.7 Graph of Gibbs free energy as function of temperature

其硬度呈正相关,即耐磨性随着硬度的增加而提高。这是因为过饱和的 NbC 颗粒熔解在合金涂层中,生成了新生硬化相,如 Fe_3Nb_3C 、NbC、碳化物等和富铬化合物 Fe-Cr-C,增加了表面抵抗变形的能力,提高了涂层的耐摩擦磨损性能。涂层在摩擦稳定阶段有颗粒脱落,改变了磨损方式,因此,摩擦系数曲线和整体的波动都很小。Yang 等^[33] 对脱落颗粒进行线扫,小颗粒中富含 Nb 元素,并结合其 XRD 分析可得出脱落颗粒为 NbC。

为进一步分析涂层的摩擦磨损机制,对磨损后的平面进行扫描。图 10 (a) 是未添加 NbC 颗粒的不锈钢涂层摩擦磨损形貌。可观察到较深的犁沟,且数量较多,部分较软的相 (α -Fe、Fe-Cr 等) 与摩擦机高速往复运动中产生摩擦热,在磨损过程中被剥落和黏附,此时磨损方式以黏着磨损和磨粒磨损为主; 图 10 (b) 是添加质量分数 20% 的 NbC 的不锈钢涂层摩擦磨损形貌,可以看到摩擦磨损试验后较浅且较少的犁沟,还有散落在上面的少量金属屑,表明摩擦磨损方式主要是磨粒磨损。

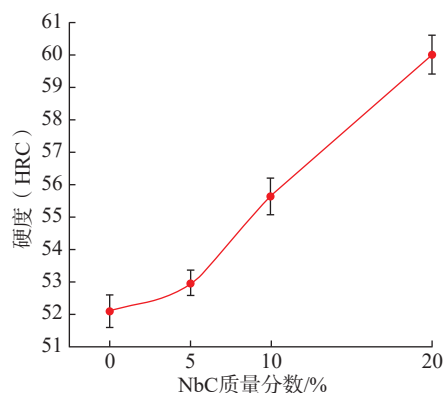


图 8 添加不同 NbC 含量的不锈钢涂层硬度图

Fig.8 Graph of hardness of stainless steel coatings with different NbC contents

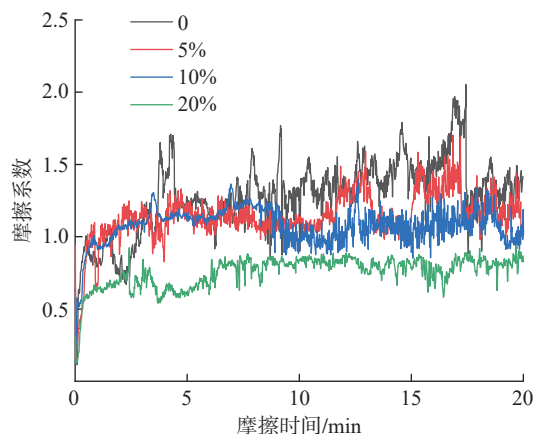
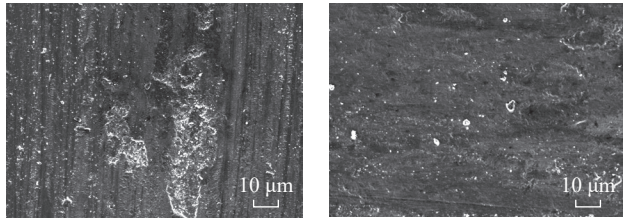


图 9 添加不同质量分数 NbC 的不锈钢涂层摩擦磨损图

Fig.9 Friction and wear diagram of stainless steel coating with different NbC mass fractions



(a) 未添加NbC (b) 添加质量分数20% NbC

图 10 涂层摩擦磨损形貌

Fig.10 Frictional wear appearance of coating

结合图 6 可以分析出,通过在不锈钢粉末中添加 NbC 颗粒,能够有效改善基体材料表面的耐摩擦磨损性能。这是因为在激光熔覆试验时,加入的 NbC 颗粒熔解,从而与 Fe 元素、Cr 元素和 Mo 元素等形成了高强度的化合物,增强了表面强度,同时改变了摩擦磨损方式,此时的磨损方式为磨粒磨损。此外,硬质相略微突出,高于 α -Fe 等较软相可以承受摩擦施加的载荷,抵抗塑性变形,防止摩擦球压入涂层,从而减小涂层与摩擦副之间的接触面积,降低摩擦力^[25]。

3 结论

在本研究中,激光熔覆制备了添加不同质量分数 NbC 增强的不锈钢涂层,研究了涂层的相变化、显微组织、硬度及耐磨性,并深入探讨了磨损机制,得出以下结论。

(1) 通过在 EA1T 车轴钢表面激光熔覆制备不同质量分数 NbC 的不锈钢涂层,涂层组织几乎没有明显的缺陷,枝晶生长完整;添加的 NbC 全部溶解并且在晶间全部析出,晶粒得到了细化。

(2) 未添加 NbC 的涂层主要由 α -Fe 和少量的 M_7C_3 组成;随着 NbC 添加,出现 Fe-Nb-C 类化合物增强相,网状分布在晶间;当添加质量分数 10% NbC 时,过饱和的 NbC 会以岛状弥散分布。

(3) 涂层的硬度随着添加 NbC 增加而提高。当在不锈钢粉末中添加质量分数 20% 的 NbC 时,平均硬度最大为 60HRC,此时摩擦磨损系数最小,为 0.7,磨损机制为磨粒磨损,耐磨性能最好。

参考文献

[1] ZHANG J W, LI H, YANG B, et al. Fatigue properties and fatigue strength evaluation of railway axle steel: Effect of micro-shot peening and artificial defect[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105379.
 [2] 冯凯, 郭彦兵, 冯育磊, 等. 激光熔覆高强度铁基涂层精细组织调控与性能研究[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 513-528.
 FENG Kai, GUO Yanbing, FENG Yulei, et al. Microstructure controlling and properties of laser clad high strength and high toughness Fe-based coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 513-528.
 [3] ZHANG H, ZOU Y, ZOU Z D, et al. Microstructure and properties of Fe-based composite coating by laser cladding Fe-Ti-V-Cr-

C-CeO₂ powder[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 119-125.
 [4] LIU Y, WANG H M. Microstructure and wear property of laser-clad Co₃Mo₂Si/Coss wear resistant coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(2): 377-382.
 [5] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106619.
 [6] 王行涛, 祝弘滨, 魏涛, 等. 激光熔覆参数对列车车轴修复组织形貌的影响[J]. 轨道交通装备与技术, 2022(4): 6-9, 30.
 WANG Xingtao, ZHU Hongbin, WEI Tao, et al. Effect of laser cladding parameters on microstructure and morphology of train axle repair[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2022(4): 6-9, 30.
 [7] FENG X Y, DONG S Y, FANG J X, et al. Heat-affected zone microstructure and mechanical properties evolution for laser remanufacturing LZ50 axle steel[C]//AOPC 2017: Laser Components, Systems, and Applications, Beijing: SPIE, 2017: 10457.
 [8] WANG C, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and wear resistance of in situ synthesized V₈C₇ particles reinforced Fe-based coating by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 58-65.
 [9] MA Q S, LI Y J, WANG J, 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.
 [10] 朱继祥, 雷声, 李帅, 等. WC 含量对铁基复合涂层组织与磨损性能的研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1): 28-34.
 ZHU Jixiang, LEI Sheng, LI Shuai, et al. Research on the microstructure and wear properties of iron-based composite coating with WC[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2021, 44(1): 28-34.
 [11] SKARVELIS P, PAPADIMITRIOU G D. Microstructural and tribological evaluation of potential self-lubricating coatings with additions produced by the plasma transferred arc technique[J]. Tribology International, 2009, 42(11-12): 1765-1770.
 [12] CHO W S, CHO M W, LEE J H, et al. Effects of h-BN additive on the microstructure and mechanical properties of AlN-based machinable ceramics[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 418(1-2): 61-67.
 [13] SHU D, LI Z G, ZHANG K, et al. In situ synthesized high volume fraction WC reinforced Ni-based coating by laser cladding[J]. Materials Letters, 2017, 195: 178-181.
 [14] LI Q T, LEI Y P, FU H G. Growth mechanism, distribution characteristics and reinforcing behavior of (Ti, Nb) C particle in laser clad Fe-based composite coating[J]. Applied Surface Science, 2014, 316: 610-616.
 [15] WANG K M, DU D, LIU G, et al. Microstructure and property of laser clad Fe-based composite layer containing Nb and B₄C powders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 802: 373-384.
 [16] FENG Y L, PANG X T, FENG K, et al. Study on microstructure and compressive properties of Fe-C-W-Cr-V-Nb coating with boron addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 904: 163986.
 [17] XIAO Q, SUN W L, YANG K X, et al. Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 420: 127341.
 [18] WANG H Y, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Effects of V and Cr on laser clad Fe-based coatings[J]. Coatings, 2018, 8(3): 107.
 [19] CAO Y B, REN H T, HU C S, et al. In-situ formation behavior of NbC-reinforced Fe-based laser cladding coatings[J]. Materials Letters, 2015, 147: 61-63.

- [20] MA X P, WANG L J, LIU C M, et al. Role of Nb in low interstitial 13Cr super martensitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(22–23): 6812–6818.
- [21] NATH S D, CLINNING E, GUPTA G, et al. Effects of Nb and Mo on the microstructure and properties of 420 stainless steel processed by laser-powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 682–691.
- [22] LI B C, ZHU H M, QIU C J, et al. Development of high strength and ductile martensitic stainless steel coatings with Nb addition fabricated by laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154985.
- [23] LI X F, FENG Y H, LIU B, et al. Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788: 485–494.
- [24] 吴绮雯, 马明星, 朱天辉, 等. 铌、铬对激光熔覆原位合成颗粒增强铁基复合涂层的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 107–112.
- WU Qiwen, MA Mingxing, ZHU Tianhui, et al. Influences of Nb and Cr on in situ particle reinforced Fe-matrix composite coating by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 107–112.
- [25] XIAO Y, LIU Z D. Characteristics study on in-situ NbC particles reinforced Ni-based alloy composite coating by laser cladding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1635(1): 012076.
- [26] WANG Q Y, XI Y C, ZHAO Y H, et al. Effects of laser remelting and annealing on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Fe-based amorphous/crystalline composite coating[J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 239–247.
- [27] TIAN W P, YANG H W, ZHANG S D. Synergistic effect of Mo, W, Mn and Cr on the passivation behavior of a Fe-based amorphous alloy coating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 31(3): 308–320.
- [28] CAO Y B, ZHI S X, QI H B, et al. Evolution behavior of ex-situ NbC and properties of Fe-based laser clad coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105999.
- [29] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- YE Dalun, HU Jianhua. *Handbook of practical inorganic thermodynamic data*[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [30] YANG L, YU T B, LI M, et al. Microstructure and wear resistance of in-situ synthesized Ti(C, N) ceramic reinforced Fe-based coating by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(18): 22538–22548.
- [31] CAO Y B, ZHI S X, GAO Q, et al. Formation behavior of in situ NbC in Fe-based laser cladding coatings[J]. *Materials Characterization*, 2016, 119: 159–165.
- [32] GUO Y J, LI C G, ZENG M, et al. In-situ TiC reinforced CoCrCuFeNiSi_{0.2} high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122522.
- [33] YANG J A, HUANG J H, FAN D Y, et al. Microstructure and wear properties of Fe–6wt% Cr–0.55wt% C–X wt% Nb laser cladding coating and the mechanism analysis[J]. *Materials & Design*, 2015, 225: 108–123.
- (上接第 90 页)
- [10] TANG Y L, ZHOU Z G, PAN S D, et al. Mechanical property and failure mechanism of 3D carbon–carbon braided composites bolted joints under unidirectional tensile loading[J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 243–253.
- [11] NISHIDA T, SUEYOSHI H. Effects of carbon fiber orientation and graphitization on solid state bonding of C/C composite to nickel[J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(1): 148–154.
- [12] JIN C K, WANG Y, YANG Z W, et al. C/C composite surface modified by electrophoretic depositing SiC nanowires and its brazing to Nb[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(1): 204–211.
- [13] 冯贞伟, 高腾飞, 邵天威, 等. C/C 复合材料与镍基高温合金 GH3128 钎焊 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(12): 105–108, 118.
- FENG Zhenwei, GAO Tengfei, SHAO Tianwei, et al. Brazing of C/C composites with Ni-based superalloy GH3128[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(12): 105–108, 118.
- [14] GUO X J, SI X Q, LI C, et al. Brazing C/C composites to DD3 alloy with a novel Ag–Cr active braze[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(11): 15090–15097.
- [15] WANG Y L, WANG W L, HUANG J H, et al. Reactive composite brazing of C/C composite and GH3044 with Ag–Ti mixed powder filler material[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759: 303–312.
- [16] SHI X H, JIN X X, LIN H J, et al. Joining of SiC nanowires-toughened SiC coated C/C composites and nickel based superalloy (GH3044) using Ni₇₁CrSi interlayer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 693: 837–842.
- [17] LIU D, SONG Y Y, SHI B, et al. Vacuum brazing of GH99 superalloy using graphene reinforced BNi-2 composite filler[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1843–1850.
- [18] 田晓羽, 亓钧雷, 张丽霞, 等. BNi²⁺TiH₂ 复合钎料钎焊 C/C 复合材料与GH99 镍基高温合金 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(5): 35–38, 114.
- TIAN Xiaoyu, QI Junlei, ZHANG Lixia, et al. Brazing C/C composites and GH99 nickel-based superalloy with BNi²⁺TiH₂ composite filler metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(5): 35–38, 114.
- [19] QING H W, WU Z Y, LI H Z, et al. Preparation of chromium carbide coatings on graphite via powder immersion reaction assisted coating[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(23): 33725–33730.
- [20] 朱嵘. C/C 复合材料钎焊接头界面及连接性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- ZHU Rong. *Research on interface and connection performance of C/C composite brazed joint*[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [21] WANG S Y, XU Y X, ZHANG X G, et al. Design and fabrication of aluminum honeycomb sandwich structures by atmosphere protect brazing: Microstructural evolution and mechanical behavior[J]. *Materialia*, 2022, 22: 101423.
- [22] HE Y M, ZHU X S, CHEN W J, et al. An ultra-high bond strength of the C_f/C composite-TC4 alloy joint brazed using pure Ni and revealing of synergetic action of multiple stress-relief mechanisms[J]. *Materials Letters*, 2022, 308: 131245.

通讯作者: 李晓峰, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为激光加工过程中材料的组织及性能演化。

(责编 晓月)

通讯作者: 续润洲, 工程师, 硕士, 主要从事金属蜂窝壁板钎焊技术研究和产品研发。

(责编 七七)