热输入对金属基复合涂层中(Nb,Ti)C 颗粒 分布及性能的影响

潘琳琳¹, 曾邦兴^{1,2}, 易江龙¹, 邹晓东¹, 郭春富¹, 彭琳³

(1.广东省科学院中乌焊接研究所 广东省现代焊接技术重点实验室,广州 510650;2.广东工业大学 材料与能源学院,广州 510006;3.攀钢集团有限公司,四川 攀枝花 617067)

摘要:目的 热输入对复合碳化物的析出、分布及耐磨性能具有重要影响。然而,目前热输入对碳化物增强 金属基复合堆焊层组织结构与性能方面影响的研究较少。因此,需要探究焊接热输入对(Nb,Ti)C 增强金属基 复合堆焊层组织及耐磨性的影响,明确(Nb,Ti)C 复合颗粒在堆焊层的作用机制。方法 采用 Ar 保护气体进行 堆焊涂层的制备,通过调节堆焊电流和电压,研究不同热输入下堆焊层的形貌、组织及耐磨性能。结果 堆 焊层中 Ti 元素与 C 元素优先发生了原位反应,生成了以 TiC 为形核中心的(Nb,Ti)C 复合碳化物,弥散分布 在马氏体基体组织上。随着热输入的增大,析出的(Nb,Ti)C 颗粒数量逐渐减少,块状(Nb,Ti)C 尺寸也逐渐变 小。采用较低的热输入时,堆焊层硬度达到最高,为 734.88HV0.5;随着堆焊热输入的增大,堆焊层的显微 硬度呈降低趋势。具有较多(Nb,Ti)C 的低热输入试样耐磨性能最佳,磨损量为 0.80 mg;而具有较少(Nb,Ti)C 的高热输入试样产生了严重的黏着磨损,磨损量较低热输入试样增大了约 144%。结论 在摩擦磨损过程中, 高硬度的(Nb,Ti)C 颗粒会对基体起保护作用,可以提升其耐磨性能,且耐磨损性能随着堆焊热输入的增大而 降低。

关键词: Fe 基复合涂层; 堆焊; 热输入; 硬度; 耐磨性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.024

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)04-0228-09

Effects of Heat Input on Distribution and Properties of (Nb,Ti)C Particles in Metal Matrix Composite Coating

PAN Lin-lin¹, ZENG Bang-xing^{1,2}, YI Jiang-long¹, ZOU Xiao-dong¹, GUO Chun-fu¹, PENG Lin³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology,

通讯作者:郭春富(1971—),男,高级工程师,主要研究方向为先进焊接材料开发及工艺优化。

收稿日期: 2022-08-17

Received: 2022-08-17

基金项目:广东省科学院发展专项资金项目资助(2022GDASZH-2022010203);广东省自然科学基金-面上项目(2021A1515011756) Fund: GDAS' Project of Science and Technology Development (2022GDASZH-2022010203); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515011756)

作者简介:潘琳琳 (1990—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为先进焊接材料开发。

Biography: PAN Lin-lin (1990-), Female, Doctor, Engineer, Research focus: development of advanced welding material.

Corresponding author: GUO Chun-fu (1971-), Male, Senior engineer, Research focus: advanced welding material development and process optimization.

引文格式: 潘琳琳, 曾邦兴, 易江龙, 等. 热输入对金属基复合涂层中(Nb,Ti)C 颗粒分布及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 228-236.

PAN Lin-lin, ZENG Bang-xing, YI Jiang-long, et al. Effects of Heat Input on Distribution and Properties of (Nb,Ti)C Particles in Metal Matrix Composite Coating[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 228-236.

229

Guangzhou 510006, China; 3. Pangang Group Company Limited, Sichuan Panzhihua 617067, China)

ABSTRACT: The precipitation, distribution and wear resistance of complex carbides have a very close relationship with the heat input. However, the relationship between the heat input and the organizational structure and performance of carbide reinforced metal matrix composite surfacing layer has rarely been reported in the literature. Therefore, the work aims to explore the effects of welding heat input on the microstructure and wear resistance of (Nb,Ti)C reinforced metal matrix composite surfacing layer, and to clarify the action mechanism of (Nb,Ti)C composite particles in the surfacing layer. By adjusting the current and voltage of surfacing, the morphology, microstructure and wear resistance of the surfacing layer under different heat input were studied when Ar was used as protective gas. The results showed that in the surfacing layer, Ti and C elements first reacted in situ, resulting in the formation of (Nb,Ti)C composite carbides with TiC as the nucleation center, which was dispersed on the martensite matrix. With the increase of heat input, the number of precipitated (Nb,Ti)C particles gradually decreased, and the size of massive (Nb,Ti)C gradually decreased. With low heat input, the hardness of the surfacing layer reached the highest, 734.88 HV0.5. The microhardness of the surfacing layer decreased with the increase of heat input sample with less (Nb,Ti)C particles produced serious adhesive wear, increased by about 144% compared with the low heat input sample. In the process of friction and wear, the high hardness (Nb,Ti)C particles can protect the matrix and improve its wear resistance, and the wear resistance decreases with the increase of heat input in surfacing.

KEY WORDS: Fe matrix composite coating; surfacing; heat input; hardness; wear resistance

随着先进制造技术的不断发展,对关键零部件使 用寿命的要求越来越高,对其表面强化的堆焊涂层耐 磨性能也随之提出了更高的要求。研究表明,陶瓷颗 粒的加入可以有效提高金属基涂层在高温环境下的 耐磨性及力学性能,因此,其被广泛应用于模具修复、 矿山机械等领域^[1-4]。相比于其他陶瓷颗粒,NbC 颗 粒具有较低的吉布斯自由能和较高的硬度,能够在不 和 Fe 发生反应的情况下在 Fe 中保持极低的溶解度。 而且,Nb 元素属于强碳化物形成元素,与 C 具有较高 的亲和力,容易在合金中形成高硬度的弥散状 NbC, 对提高铁基材料的硬度和耐磨性具有重要作用^[5-6]。邹 芹等^[7]研究了不同的烧结温度(1 300~1 600 ℃)对 TiN_{0.3}-NbC 复合材料微观结构与性能的影响,研究表 明,随着烧结温度的升高,复合材料的韧性逐渐增大, 而硬度却先增大后减小。

金属基复合材料堆焊涂层的制备途径主要分为 两类,即原位反应合成法和外加法。其中,采用原位 合成法能够解决外加 NbC 粒子产生的增强相与基体 晶粒尺寸差异、增强相与基体结合性较差、易产生内 应力等问题。因此,通过原位反应制备碳化物增强熔 覆层的方法已成为研究热点。郗文超等^[8]利用激光熔 覆的方法在 45 号钢基体上制备出 NbC 增强 YCF102 熔覆层,并对其显微硬度及耐磨性进行了研究,结果 表明,激光功率的改变对激光熔覆过程中原位反应的 反应程度有显著影响,激光的功率大小将直接对原位反 应的发生起到抑制或促进作用。当激光功率为 525 W 时,熔覆层具有较高的显微硬度及良好的耐磨性。Li 等^[4]采用激光熔覆技术原位制备了不同 CeO₂ 加入量 的 Fe-NbC 复合涂层,并研究了稀土对涂层组织和显微硬度的影响。研究发现,CeO₂ 在减少微孔、细化 晶粒、促进 NbC 沉淀等方面具有重要作用,因此, 加入 CeO₂后,涂层从上到下的平均显微硬度和平滑 度都有所提高。

此外,通过在涂层中加入合金元素生成的复合碳 化物可以进一步提高涂层的硬度及耐磨性能^[9-10]。 Sun等^[11]利用激光熔覆技术在 Cr12MoV 钢板上制备 了不同 Nb/Ti 含量的镍基复合涂层,研究发现,当 Nb/Ti=1 1时,(Nb,Ti)C 为具有 NbC 结构的复合碳 化物,且该涂层的显微硬度和耐磨性较其他涂层有明 显提高。杨静等^[12]基于密度泛函理论(DFT)的第一 性原理方法,研究了 Si、Ni、Mn、Cr、Mo 在 NbC/fcc-Fe 界面的偏析行为,结果表明,Cr 和 Mo 可以稳定存在 于界面和 NbC 中, Mo 更倾向于在界面和 NbC 中偏 析,容易偏析到 NbC 中形成复合碳化物,Ni 和 Mn 在界面上有轻微的偏析倾向。

以上研究表明,原位生成的(Nb,M)C(M为金属 元素)复合碳化合物可以改善NbC颗粒与Fe基体之 间结合性较差的问题,进一步提高其整体耐磨性。堆 焊工艺参数是影响堆焊层成形、组织及性能的重要因 素^[13-15]。其中,热输入对复合碳化物的析出、分布及 耐磨性能具有重要影响。然而,目前关于热输入对碳 化物增强金属基复合堆焊层的组织结构与性能方面影 响的研究较少。因此,文中通过调节堆焊电流和电压, 研究不同热输入下堆焊层的形貌、组织及性能差异, 探讨热输入对堆焊层组织与性能的影响并探寻最佳热 输入范围,从而探究(Nb,Ti)C复合粒子对堆焊层形核、 长大、分布及耐磨性的影响,为实际应用提供理论依据。

1 试验方法

1.1 材料

以退火 Cr5 钢为母材 (150 mm×100 mm×15 mm), 其成分见表 1。Cr5 钢母材在堆焊前需要先去除表面 氧化层,并用酒精和丙酮进行清洗,于 120 ℃的鼓风 干燥箱中干燥 2 h 后待用。采用铬铁、钼铁、硅铁、 锰铁、铌铁等合金粉末制备填充率为 30%的含铌药芯 焊丝(直径 1.6 mm),药芯焊丝的基础合金成分见表 2。

表 1 Cr5 钢的元素含量 Tab.1 Element content of Cr5 steel

Elements	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	Р	S	Fe
Mass fraction/%	5	0.5	0.12	0.42	0.20	0.03	0.0	3 Bal.

表 2 堆焊焊丝化学成分

Tab.2 Chemical composition of surfacing wire

Elements	Cr	Nb	Si	Mn	С	Ti	Fe
Mass fraction/%	7	5.5	1	1	1.25	0.3	Bal.

1.2 堆焊涂层试样的制备

采用松下 Panasonic YD-500GS 电弧堆焊机进行 堆焊试验,保护气体为纯 Ar,对比不同热输入对堆 焊层的影响,具体堆焊工艺参数如表 3 所示。试样根 据热输入由低到高分别标记为 H₁、H₂、H₃。

	表 3	试验约	扁号及コ	1艺参	診数	
Tab.3	Test nu	imbers	and pro	cess	parameter	S

No.	Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/ (m·min ⁻¹)	Heat input/ (kJ·mm ⁻¹)
H_{1}	180	20.2	0.5	43.6
H_{2}	220	22.6	0.5	59.7
H_3	260	24.0	0.5	74.9

1.3 微观组织表征与性能测试

采用线切割将堆焊试样沿垂直堆焊方向切割出 20 mm×20 mm×8 mm 的金相试样,采用 SiC 砂纸对 试样进行打磨,并用 2.5 μ m 金刚石抛光液完成抛光。 采用 5 g FeCl₃+50 mL HCl+100 mL H₂O 的盐酸氯化 铁溶液腐蚀 2 min。采用 FEI Talos F200X 场发射扫描 电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和能谱仪 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)对 堆焊试样进行观察,对其微观形貌进行表征并对微区 进行能谱扫描以分析堆焊层中元素分布。使用 Smartlab 9 kW 高分率 X 射线衍射仪 (X-Ray Diffractometer, XRD)进行物相分析,扫描角度范围为 10°~90°, 扫描速度 4 (°)/min; 采用 WILSONVH202 维氏硬度计测试堆焊层显微硬度,从堆焊层顶部每隔 0.25 mm 取点测试硬度,一直延续到母材,所用载荷 压力为 5 N,保压时长设置为 10 s。采用 UMT-3 型 多功能摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验,磨球使用 直径为 9.5 mm 的 Si₃N₄,频率 5 Hz,振幅 8 mm,磨 损时间 60 min,滑动速度 80 mm/s,总磨损行程为 144 m,载荷选用 100 N,磨损前质量以 m_0 表示,磨 损后重量以 m_1 表示,二者差值 Δm 表征其磨损损失 量,并使用 SEM 对磨损后微观形貌进行观察分析。

2 结果与分析

2.1 堆焊热输入对堆焊层组织的影响

2.1.1 宏观形貌分析

图 1 显示了不同堆焊热输入的单道单层截面形 貌。熔宽、熔深、余高、稀释率具体数值统计结果如 图 2 所示。堆焊试样 H₁、H₂、H₃的熔深分别为 1.09、 1.48、1.57 mm;余高分别为 2.93、3.75、4.05 mm; 熔宽分别为 5.96、7.49、9.57 mm。从图 2 中可以看 出,随着堆焊热输入的增大,堆焊层的熔宽、熔深、 余高都有所增加。从统计结果可以看出,堆焊试样 H₁、H₂、H₃稀释率分别为 27.1%、28.2%、28.1%, 堆焊热输入对堆焊层的稀释率影响较小^[16]。





b H₂



图 1 堆焊层试样截面形貌 Fig.1 Cross-sectional morphology of surfacing layer samples



Fig.2 Parameters of surfacing layer morphology: a) penetration; b) weld reinforcement; c) width; d) rate of dilution

2.1.2 物相分析

图 3 为不同堆焊热输入堆焊层的 XRD 图谱。由 图 3 可知,不同热输入下的相组成相同, α -Fe(马氏 体)相与(Nb,Ti)C 相为堆焊层的主要组成相,同时还 发现少量的 γ -Fe(残余奥氏体)。其中,(Nb,Ti)C 峰 在低热输入下强度最高,表明 H₁的碳化物含量最高。 这是由于在堆焊过程中,热输入越低,熔池冷却速度 越大,有利于碳化物的析出,因此,在低热输入下生 成的碳化物数量最多。(Nb,Ti)C 相的生成有效提高了 堆焊层的显微硬度及耐磨性能^[17]。虽然随着热输入的 增大,冷却速度会下降,但是降低后的冷却速度依然 能使 γ -Fe 相向 α -Fe 相转变。



Fig.3 XRD patterns of surfacing layers with different heat input

2.1.3 显微组织分析

图 4 显示了不同热输入堆焊试样的金相显微组 织。从图 4 可以看出,不同热输入下堆焊层均析出大 量块状碳化物颗粒并弥散分布在马氏体基体组织上, 结合 XRD 图谱(图 3)可知,碳化物是原位反应析 出的(Nb,Ti)C。屈朝霞等^[18]指出,焊接过程中析出的 (Nb,Ti)C可以有效降低晶粒长大倾向,从而起到细化 晶粒的作用。随着热输入的增大,块状(Nb,Ti)C的尺 寸呈减小趋势。

图 5 为不同热输入堆焊试样的 SEM 图谱。由图 5 可以发现,堆焊层中析出的碳化物不仅包含尺寸较 大的块状碳化物,还有大量细小的白色颗粒碳化物。 另外,堆焊试样 H₁ 析出碳化物数量最多,随着热输 入的增大,碳化物析出量减少。Li 等^[19]研究表明, Ti 与 C 的结合能力强于 Nb,因此先析出的 TiC 颗粒 可成为富 Nb 碳化物异质形核的核心,并最终在熔池 中形成(Nb,Ti)C 复合析出相^[20]。

为了进一步确认碳化物及基体的具体成分,采用 EDS 面扫对堆焊层基体及析出碳化物进行成分分析。 试样 H₁中 Nb、Ti、C、Fe、Cr 元素的分布如图 6 所 示。结果表明,Fe 元素与 Cr 元素主要分布在堆焊层 基体中,Cr 元素能与 Fe 元素产生固溶强化,生成 Fe-Cr 固溶体,从而提高堆焊层基体的强度和硬度。 碳化物中主要包含 Nb、Ti、C 元素,表明原位生成 了(Nb,Ti)C,与 XRD 结果一致。从图 6b—d 可以看 出,Nb 元素主要集中在碳化物中,构成复合碳化物的



Fig.4 Metallographic structure of surfacing layers with different heat input: a) H₁, 200 times; b) H₁, 500 times; c) H₂, 200 times; d) H₂, 500 times; e) H₃, 200 times; f) H₃, 500 times



d H₂4000倍

e H₃2000倍

f H₃4000倍



主要部分,而 Ti 元素主要集中在碳化物中间,作为 形核中心促进 NbC 的析出^[21],Ti 不会全部与 C 反应, 因此,Ti 元素同时存在于基体和碳化物颗粒中。

利用 Image-J 软件对不同热输入堆焊层中的块 状(Nb,Ti)C 碳化物颗粒进行尺寸及数量统计,结果如 图 7 所示。结果显示,堆焊试样 H_1 、 H_2 、 H_3 块状碳 化物数量分别为 0.8、0.59、0.44 个/ μ m²;碳化物颗 粒平均尺寸分别为 2.38、1.92、1.53 μm。碳化物尺寸 及析出量由高到低排序为 H₁>H₂>H₃。低热输入堆焊 试样 H₁ 的块状碳化物颗粒尺寸最大,数量最多;而 高热输入堆焊试样 H₃ 的块状碳化物颗粒尺寸最小, 数量最少。由此可见,不同的热输入对碳化物析出量 及尺寸影响较大,随着热输入的增大,碳化物颗粒尺 寸及析出数量呈降低趋势。这主要是由于随着热输入



图 6 堆焊层 SEM 图和 EDS 面扫图

Fig.6 SEM image and EDS surface scan maps of surfacing layers: a) SEM image; b) Nb; c) Ti; d) C; e) Fe; f) Cr



Fig.7 Statistics of the size and quantity of carbide particles in surfacing layers

的增大,堆焊试样稀释率增大(图 2d);线能量越大, Nb 元素烧损越严重。以上两点原因都会造成堆焊层 中 Nb 含量随着热输入的增大而减少,所以碳化物的 尺寸及析出数量也会随之减小。

2.2 热输入对堆焊层硬度的影响

图 8 为不同热输入堆焊试样的显微硬度。堆焊 试样 H₁、H₂、H₃平均显微硬度分别为 734.88HV0.5、 695.30HV0.5、663.92HV0.5。从图 8 可以看出,随 着堆焊热输入的降低,堆焊层的显微硬度呈增长趋 势。这主要与原位形成(Nb,Ti)C 复合碳化物的数量有 关^[22],硬度会随着碳化物颗粒的增加呈增长趋势。因 此,堆焊试样 H₁中生成的碳化物颗粒数量最多,其 堆焊层的整体硬度最高;H₃中碳化物数量最少,其 硬度最低。



2.3 热输入对堆焊层摩损性能的影响

2.3.1 摩擦因数

图 9 为不同热输入堆焊试样的摩擦因数 (COF) 随时间变化曲线。从图 9 可以看出,所有样品的 COF 变化表现为 3 个不同的阶段:磨损初期 COF 随着时 间的增加而增大,处于不稳定状态;随后 COF 达到 最大值,并随着时间的延长缓慢下降;当滑移距离增 大时,COF 最终达到稳定状态。COF 从不稳定状态 到稳定状态的变化与摩擦副的表面接触状态有关^[23]。 这是由于在磨损刚开始阶段突然施加的载荷会造成 堆焊层试样的塑性变形,Si₃N₄ 磨球会与堆焊层试样 表面产生冲击、磨合等作用,从而显示出典型的磨合 初期特征。随着磨损试验的开展,摩擦副表面粗糙度 逐渐减小。由于表面粗糙度的减小,接触面由不均匀 状态转变为光滑状态,相应的 COF 逐渐减小,达到 稳定状态。堆焊试样 H₁、H₂、H₃平均摩擦因数分别 为 0.82、0.75、0.71。堆焊层的组织特征和显微硬度 对其摩擦因数有较大影响^[24]。随着堆焊热输入的增 大,摩擦因数逐渐降低,说明 H3 的微观组织结构对 提高堆焊层的耐磨性能有积极作用。摩擦因数的大小 与堆焊层磨损表面的自润滑度有关,堆焊试样 H1 磨 损表面分布着尺寸更大、数目更多的碳化物颗粒,碳 化物凸起程度高,使得磨损发生后磨损的表面粗糙度 增大,所以摩擦因数值较高,相较之下,堆焊试样 H₃有着更好的表面润滑性,所以其摩擦因数低于H₁、 H₂。另外,从图9可以看出,试样H₂和H₃的摩擦因 数在 2 500 s 左右突然降低, 且 H₃的下降幅度大于 H₂。这是由于随着摩擦副表面温度的升高,会导致表 面强烈氧化,基体中的 Fe、Cr 元素会与空气中的 O2 反应生成氧化物。由于氧化物形成时磨面温度较高, 摩擦氧化层较为致密且强度较高,性能明显不同于堆 焊层。当摩擦氧化物的形成占据主导地位, 磨面形成 致密的摩擦氧化层,能够降低摩擦因数,保护基体^[25]。 而且 H₃ 磨面上氧化层的覆盖率大于 H₂, 且更为光滑 致密,所以 H₃的摩擦因数下降幅度大于 H₂。





2.3.2 磨损量

图 10 为不同热输入堆焊层试样的磨损量, 磨损 量变化与摩擦因数变化高度一致。由图 10 可知, 堆焊

试样 H₁(热输入最低)有着 0.80 mg 的最低磨损量; H₂ 磨损量则为 1.74 mg; 而 H₃(热输入最大) 磨损量 最大,为1.95 mg。耐磨性由高到低排序为H₁>H₂>H₃, 热输入的增大使得堆焊层试样耐磨性有所降低。这是 因为在往复摩擦磨损过程中,高硬度的(Nb,Ti)C颗粒 会对基体起保护作用,减少磨球对基体的磨削, (Nb,Ti)C 周围的组织由于硬度较低先被磨损后,凸起 的(Nb,Ti)C 颗粒成为磨损对象,高硬度的(Nb,Ti)C 颗 粒能有效阻止磨损路径,降低对基体的磨损^[21]。而 尺寸较小的碳化物在磨损过程中容易脱落、滑动, 不能很好地起到阻碍磨损路径的作用,因此,拥有 更多更大尺寸碳化物的堆焊试样H₁表现出了更好的 耐磨性能。





2.3.3 磨损形貌

为了阐述不同热输入对磨损机理的影响,利用 SEM 分别观察不同热输入堆焊层的摩擦磨损形貌, 如图 11 所示。可知, H1 堆焊层磨损表面有轻微的氧 化层黏附,发生了轻微的黏着磨损。H2氧化层面积 明显增大,这是由于其碳化物相较于堆焊试样 H1颗 粒尺寸更小,数目更少,基体被磨损的程度更深,磨 损过程中会导致摩擦副表面温度升高,大面积的磨损 基体会与空气中的 O₂ 反应生成更大面积的氧化物。 堆焊试样 H3 的碳化物起到的阻碍磨损路径作用最 弱,在摩擦磨损过程中存在大量的磨屑脱落,往复过 程中推动磨屑朝两头堆积,如图 11c 所示,此外,碾 碎的磨粒会对磨损表面产生磨粒磨损^[26]。



a H₁

图 11 不同热输入堆焊试样磨损形貌 Fig.11 Wear morphology of surfacing samples with different heat input

3 结论

1) 在堆焊过程中,通过原位反应生成了以 TiC 为中心的(Nb,Ti)C 复合碳化物,并弥散分布在马氏体 基体组织上。热输入会对碳化物的尺寸及数量产生重 要影响。随着堆焊热输入的增大,析出的(Nb,Ti)C 颗 粒数目逐渐减少,块状(Nb,Ti)C 尺寸也逐渐变小。

2)采用较低的热输入时(H₁),堆焊层硬度达到 最高,为734.88HV0.5;随着堆焊热输入的增大,堆 焊层显微硬度呈降低趋势,试样 H₃的硬度达到最低 值 663.92HV0.5,仅为 H₁的 90.3%。

3) 在摩擦磨损过程中,高硬度的(Nb,Ti)C 颗粒 会对基体起保护作用,能有效阻止磨损路径,降低对 基体的磨损。因此,具有较多(Nb,Ti)C 的试样 H₁ 耐 磨性能最佳,磨损量为 0.80 mg;而具有较少(Nb,Ti)C 的试样 H₃产生了严重的黏着磨损,磨损量较 H₁增加 了约 144%。

参考文献:

- ZHOU Ye-fei, YANG Yu-lin, QI Xiao-wen, et al. Influence of La₂O₃ Addition on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Cladding Formed by Arc Surface Welding[J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(10): 1069-1074.
- [2] WU HAO, HUANG Si-rui, ZHAO Chen-meng, et al. Microstructures and Mechanical Properties of in-Situ FeCrNiCu High Entropy Alloy Matrix Composites Reinforced with NbC Particles[J]. Intermetallics, 2020, 127: 106983.
- [3] SHI Rong-jian, MA Yuan, WANG Zi-dong, et al. Atomic-Scale Investigation of Deep Hydrogen Trapping in NbC/α-Fe Semi-Coherent Interfaces[J]. Acta Materialia, 2020, 200: 686-698.
- [4] LI Qing-tang, LEI Yong-ping, FU Han-guang. Laser Cladding in-Situ NbC Particle Reinforced Fe-Based Composite Coatings with Rare Earth Oxide Addition[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 239: 102-107.
- [5] CHEN Liao-yuan, YU Tian-biao, XU Peng-fei, et al. In-Situ NbC Reinforced Fe-Based Coating by Laser Cladding: Simulation and Experiment[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 412: 127027.
- [6] DAI W H, YUE B B, CHANG S, et al. Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of WC-Bronze-Based Impregnated Diamond Composite Reinforced by Nano-NbC[J]. Tribology International, 2022, 174: 107777.
- [7] 邹芹,张扬,李艳国,等.NbC 含量和烧结温度对 TiN_{0.3}-NbC 复合材料微观结构与性能的影响[J].硬质 合金,2021,38(6):387-394.
 ZOU Qin, ZHANG Yang, LI Yan-guo, et al. Effects of

NbC Content and Sintering Temperature on the Microstructure and Properties of TiN_{0.3}-NbC Composites[J]. Cemented Carbide, 2021, 38(6): 387-394.

- [8] 郗文超,宋博学,梁赢东,等. 原位生成 NbC 增强 YCF102 熔覆层热力学与耐磨性研究[J]. 东北大学学 报(自然科学版), 2021, 42(4): 538-543.
 XI Wen-chao, SONG Bo-xue, LIANG Ying-dong, et al. Research on Thermodynamics and Wear Resistance of in-Situ NbC Reinforced YCF102 Cladding Layer[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(4): 538-543.
- [9] ZHANG Ming-yang, LI Min, CHI Jing, et al. Microstructure and Tribology Properties of *in-Situ* MC(M: Ti, Nb) Coatings Prepared via PTA Technology[J]. Vacuum, 2019, 160: 264-271.
- [10] ZHANG Hui, ZOU Yong, ZOU Zeng-da, et al. Microstructures and Properties of Low-Chromium High Corrosion-Resistant TiC-VC Reinforced Fe-Based Laser Cladding Layer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 622: 62-68.
- [11] SUN Shu-ting, FU Han-guang, PING Xue-long, et al. Formation Mechanism and Mechanical Properties of Titanium-Doped NbC Reinforced Ni-Based Composite Coatings[J]. Applied Surface Science, 2019, 476: 914-927.
- [12] 杨静, 张翊, 董楠, 等. 合金元素在 NbC/fcc-Fe 界面的偏析行为和硼的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2056-2062.
 YANG Jing, ZHANG Yi, DONG Nan, et al. Segregation Behavior of Alloying Elements at NbC/fcc-Fe Interface and the Effect of Boron[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(6): 2056-2062.
- [13] CHEN F F, XIANG J T, THOMAS D G, et al. Model-Based Parameter Optimization for Arc Welding Process Simulation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81: 386-400.
- [14] SHARMA S, RAJPUT B, SINGH R P. A Review Paper on Effect of Input Welding Process Parameters on Structure and Properties of Weld in Submerged Arc Welding Process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 1931-1935.
- [15] PATHAK D, SINGH R P, GAUR S, et al. Influence of Input Process Parameters on Weld Bead Width of Shielded Metal Arc Welded Joints for AISI 1010 Plates[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38: 24-28.
- [16] CHENG Zhi, YE Zheng, HUANG Ji-hua, et al. Influence of Heat Input on the Intermetallic Compound Characteristics and Fracture Mechanisms of Titanium-Stainless Steel MIG-TIG Double-Sided Arc Welding Joints[J]. Intermetallics, 2020, 127: 106973.
- [17] GOU Qing-shan, XIONG Ji, GUO Zhi-xing, et al. Influence of NbC Additions on Microstructure and Wear Resistance of Ti(C,N)-Based Cermets Bonded by

CoCrFeNi High-Entropy Alloy[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 94: 105375.

- [18] 屈朝霞,田志凌,杜则裕,等. 超细晶粒钢 HAZ 晶粒 长大的规律[J]. 焊接学报, 2000, 21(4): 9-12.
 QU Zhao-xia, TIAN Zhi-ling, DU Ze-yu, et al. Grain Growth in HAZ of Ultra-Fine Grain Steels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(4): 9-12.
- [19] LI Qing-tang, LEI Yong-ping, FU Han-guang. Growth Mechanism, Distribution Characteristics and Reinforcing Behavior of (Ti, Nb)C Particle in Laser Cladded Fe-Based Composite Coating[J]. Applied Surface Science, 2014, 316: 610-616.
- [20] ZHAO Chang-chun, ZHOU Ye-fei, XING Xiao-lei, et al. Precipitation Stability and Micro-Property of (Nb, Ti)C Carbides in MMC Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 763: 670-678.
- [21] ZHAO Yu, CHEN Liao-yuan, SUN Jia-yu, et al. Microstructure Evolution and Wear Resistance of *in Situ* Synthesized (Ti, Nb)C Ceramic Reinforced Ni204 Composite Coatings[J]. Ceramics International, 2022, 48(12): 17518-17528.
- [22] ZHANG Ming-yang, LI Min, WANG Shu-feng, et al. Enhanced Wear Resistance and New Insight into Microstructure Evolution of *in-Situ* (Ti, Nb)C Reinforced 316L Stainless Steel Matrix Prepared via Laser Clad-

ding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128: 106043.

- [23] CAI Xiao-long, WANG Huan-xi, XU Yun-hua, et al. Room-Temperature Wear Resistance of Tungsten Carbide Composite Layers Produced on Grey Cast Iron by Diffusion-Controlled in Situ Reactions[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 424: 127649.
- [24] XIAO H, LIU X Y, LU Q H, et al. Promoted Low-Temperature Plasma Nitriding for Improving Wear Performance of Arc-Deposited Ceramic Coatings on Ti₆Al₄V Alloy via Shot Peening Pretreatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2981-2990.
- [25] 何燕妮, 俞树荣, 李淑欣, 等. 摩擦氧化层对 TC4 合金磨损行为和摩擦系数的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(4): 1417-1424.
 HE Yan-ni, YU Shu-rong, LI Shu-xin, et al. Effect of Tribo-Oxide Layers on Wear Properties and Coefficient of Friction of TC4 Alloy in Fretting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(4): 1417-1424.
- [26] 曾邦兴, 胡永俊, 邹晓东, 等. 保护气体对(Nb, Ti)C 增强铁基复合堆焊层组织与性能的影响[J]. 焊接, 2022(6): 33-41.

ZENG Bang-xing, HU Yong-jun, ZOU Xiao-dong, et al. Influence of Shielding Gas on Microstructure and Properties of (Nb, Ti)C Reinforced Fe-Based Composite Surfacing Layer[J]. Welding & Joining, 2022(6): 33-41.