

电火花沉积 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的组织及性能研究

耿铭章，王文权，张新戈

(吉林大学 材料科学与工程学院，长春 130022)

摘要：目的 提高 H13 模具钢的表面耐磨性，探索金属陶瓷涂层的应用。方法 分别用 Ti(C,N)基金属陶瓷棒和纯镍棒作为电极，氩气为保护气体，在 H13 钢表面电火花沉积制备 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层。使用 X 射线衍射仪对涂层的相组成进行了分析，并用扫描电子显微镜及能谱仪观察涂层的微观结构和元素分布情况，采用显微硬度计和 CSM 球盘式摩擦计对涂层的显微硬度和不同载荷下的耐磨性进行测试。结果 涂层表面为单脉冲沉积斑点堆积而成的溅射状形貌，Fe 和 Ti 元素整体上呈现出分区富集的特征，强化层主要物相包括 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 、 $Ni_{17}W_3$ 、Ni-Cr-Co-Mo 和 Fe_3Ni_2 。涂层截面组织均匀，缺陷较少，厚度约为 $31 \mu m$ ，Fe、Ti 和 Ni 元素均在界面处发生扩散，形成了良好的冶金结合，过渡层与基体相互混合，呈现出机械式的咬合结构。涂层的显微硬度实测最高值达 $1420HV$ ，约为基体的 5.4 倍。涂层具有比基体更低的摩擦系数，且 30 min 内的磨损质量损失仅为基体的 $1/2$ ，涂层磨损机理主要为粘着磨损和轻微的磨粒磨损。**结论** 在 H13 钢表面电火花沉积制备的 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层可提高其表面的硬度、耐磨性，且具有一定减摩性，可以起到延长模具寿命的作用。

关键词：电火花沉积；H13 钢；Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层；组织形貌；耐磨性；磨损机理

中图分类号： TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：** 1001-3660(2020)04-0222-08

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.025

Microstructures and Properties of Ni/Ti(C,N) Composite Cermet Coating Prepared by Electrosparck Deposition

GENG Ming-zhang, WANG Wen-quan, ZHANG Xin-ge

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface wear resistance of H13 die steel and explore the application of cermet composite coating. The Ni/Ti(C,N) composite cermet coating was prepared on the surface of H13 steel by electrosparck deposition with Ti(C,N)-based cermet rods and pure nickel rods as electrode materials and argon gas as shielding gas. The phase

收稿日期：2019-06-30；修订日期：2020-03-10

Received: 2019-06-30; Revised: 2020-03-10

基金项目：吉林省科技厅项目 (3R1120172416)

Fund: Supported by the Project of Department of Science and Technology of Jilin Province (3R1120172416)

作者简介：耿铭章 (1995—)，男，硕士研究生，主要研究方向为电火花沉积。

Biography: GENG Ming-zhang (1995—), Male, Master, Research focus: electrosparck deposition.

通讯作者：王文权 (1971—)，男，博士，教授，主要研究方向为材料连接与材料表面改性。邮箱：wwq@jlu.edu.cn

Corresponding author: WANG Wen-quan (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material joining and material surface modification. E-mail: wwq@jlu.edu.cn

引文格式：耿铭章，王文权，张新戈. 电火花沉积 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的组织及性能研究[J]. 表面技术，2020, 49(4): 222-229.

GENG Ming-zhang, WANG Wen-quan, ZHANG Xin-ge. Microstructures and properties of Ni/Ti(C,N) composite cermet coating prepared by electrosparck deposition[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 222-229.

composition of the coating was analyzed by X-ray diffraction (XRD). Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to study the surface and cross-section morphologies and elements distribution of the coating. The microhardness and wear resistance of the coating under different loads were measured with a microhardness tester and a CSM ball-on-disk tribometer. The surface of the coating was sputtered by single-pulse deposition spots. Fe and Ti elements exhibited the characteristics of partition enrichment. The main phases of the strengthening layer included $TiC_{0.7}N_{0.3}$, $Ni_{17}W_3$, Ni-Cr-Co-Mo and Fe_3Ni_2 . The coating had a uniform cross-section structure with few defects and a thickness of about 31 μm . Fe, Ti and Ni elements were all diffused at the interface to form a good metallurgical bond. The transition layer and the substrate were mixed with each other to present a mechanical occlusion structure. The measured microhardness of the coating was up to 1420 HV, which was about 5.4 times as much as that of the steel. The average friction coefficient of the coating was lower than that of the H13 steel substrate, and the wear weight loss within 30 min was only 1/2 of that of the substrate. The main wear mechanism of the coating was slight abrasive wear and adhesive wear. The Ni/Ti(C,N) composite cermet coating deposited on the surface of H13 steel can improve the hardness and wear resistance and has certain antifriction, which can play a role in prolonging the service life of the die.

KEY WORDS: electrospark deposition; H13 steel; Ni/Ti(C,N) composite cermet coating; microstructures; wear resistance; wear mechanism

Ti(C,N)基金属陶瓷是在 TiC 基金属陶瓷基础上发展起来的新型金属陶瓷, 因其具有高硬度、高强度、优良的耐磨性以及低摩擦系数, 不但可以用于制备切削刀具、模具和发动机高温零部件, 也是一种很好的耐磨减摩涂层材料^[1-2]。如今已有多种表面技术用于制备 Ti(C,N)基金属陶瓷涂层, 包括物理气相沉积^[3-4]、化学气相沉积^[5-6]和非平衡磁控溅射^[7]等, 但上述方法需要的设备昂贵, 且对操作环境要求很高, 在复杂形状的零部件上难以实现涂覆。

电火花沉积技术 (ESD) 是利用脉冲电源存储的高能量在金属基体和电极之间产生火花放电, 从而在基体上沉积导电电极材料的微弧焊接工艺^[8]。涂覆过程中, 电极和工件接触部位在几微妙到几十微妙不等的时间内产生温度高达 8000~25 000 °C 的高温微区, 使电极材料部分熔化或气化, 并溅射沉积到基体表面, 形成特定功能的沉积层^[9]。该工艺操作灵活方便, 对基体的热输入小, 且能在涂层与基体之间形成冶金熔融界面^[10], 因此非常适用于金属陶瓷涂层的制备。Korkmaz 等人^[11]利用自制的 Ti(C,N)电极在 St37 钢表面电火花沉积制备 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 基金属陶瓷涂层, 涂层的厚度约为 20 μm , 显微硬度最高值为 870HV, 且具有比基体更低的摩擦系数。Frangini 等人^[12]利用电火花沉积技术制备了 Cr_7C_3 基金属陶瓷涂层, 涂层具有较好的耐腐蚀性能, 局部电蚀倾向小, 但涂层内存在少量应力释放微裂纹。Hong 等人^[13-15]以 Ti 和 Zr 为电极, 在 TC11 钛合金表面, 通过反应电火花沉积法制备了 TiN 金属陶瓷涂层以及 TiN/Zr 复合涂层, 通过优化工艺参数, 使得涂层显微硬度达 1221.5HV, 耐磨性能显著高于基体。但由于电火花沉积过程升温快, 导致涂层中残留较大的热应力, 上述研究中制备的金属陶瓷涂层都会存在一定数量的热应力裂纹。Radek 等人^[16-18]提出了采用激光表

面处理的方法消除这种缺陷, 但工艺较为复杂, 且会导致涂层的硬度下降, 粗糙度升高。张怡等人^[19]研究发现, 以 Ni 为基底, 通过电火花沉积制备的 Ni/ Cr_3C_2 金属陶瓷涂层裂纹减少, 热应力缓解, 且耐磨性不会降低, 该工艺是一种改善金属陶瓷涂层缺陷的有效途径。

为了进一步提高电火花沉积 Ti(C,N)金属陶瓷涂层的性能, 同时减少涂层中的裂纹, 本文采用了延展性优良的纯镍作为过渡层材料, 用电火花沉积工艺制备 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层, 研究其组织结构和耐磨性, 为电火花沉积金属陶瓷涂层的应用提供一定的理论以及试验数据支撑。

1 试验

本试验采用的基体材料是 H13 热作模具钢, 表 1 为其化学成分, 将其切割为 10 mm×10 mm×5 mm 的试样。电极材料使用的是直径 4 mm 的 Ti(C,N)基金属陶瓷棒 (55%Ti(C,N)-10%Mo₂C-10%Co-10%Ni-15%WC), 采用粉末冶金工艺制成, 其 XRD 图谱如图 1 所示。过渡层所使用的电极材料为牌号 N4 的镍棒 (纯度>99.9%), 直径为 4 mm。

表 1 H13 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of H13 steel

| | wt.% | | | | | | |
|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|------|--|
| C | Si | Mn | Cr | Mo | V | Fe | |
| 0.32~0.45 | 0.8~1.2 | 0.2~0.5 | 4.75~5.5 | 1.1~1.75 | 0.8~1.2 | Bal. | |

电火花沉积试验采用 DZS-1400 旋转电极型电火花沉积设备, 其原理如图 2 所示, 沉积过程在室温条件下进行。试验前先用 600#的碳化硅砂纸打磨基体

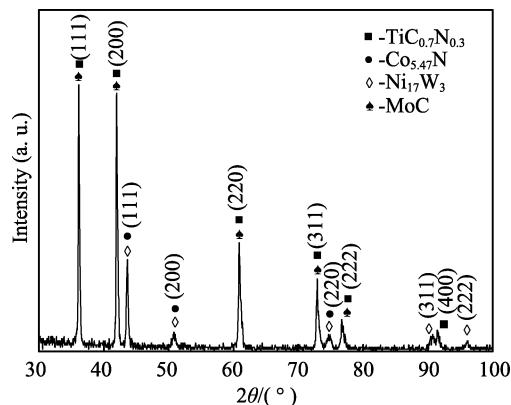


图1 Ti(C,N)基金属陶瓷的XRD图谱
Fig.1 XRD pattern of Ti(C,N)-based cermet

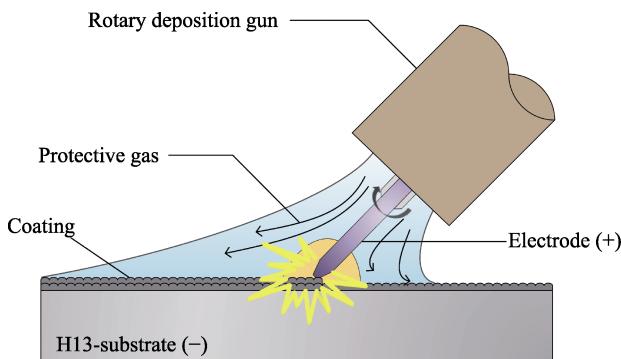


图2 电火花沉积示意图
Fig.2 Schematic diagram of electrospark deposition

表面，去除氧化皮，然后在丙酮溶液中超声波清洗25 min，去除其表面的油污。沉积过程采用手持式旋转沉积枪在氩气保护下进行，电极棒由沉积枪中的夹具固定，电极的伸出长度为10 mm，电极转速为1400 r/min，在基体表面来回移动沉积。Ti(C,N)金属陶瓷涂层和Ni过渡层采用相同的工艺参数：输出电压60 V，沉积功率1000 W，频率700 Hz，氩气流量9 L/min，比沉积时间5 min/cm²。

采用D/Max 2500pc型X射线衍射仪检测涂层的物相组成，工作电压40 kV，工作电流250 mA，Cu靶为X射线产生源，扫描范围30°~100°，扫描速度4(°)/min。采用TESCAN VEGA3型钨灯丝扫描电子显微镜对涂层的表面和截面组织以及磨损形貌进行观察，同时采用扫描电镜所附能谱仪检测涂层的元素分布情况，设备的加速电压为0.2~20 kV，分辨率为3.5 nm。采用分辨率120 nm的2EXT激光共聚焦显微镜测量涂层的表面粗糙度Ra。使用HVS-1000型显微硬度计测量维氏显微硬度，载荷设定50 g，加载时间为10 s。采用CSM球盘式摩擦计分别对涂层和基体的室温干摩擦磨损性能进行测试，对磨球为直径6 mm的氧化铝球，滑动速度保持在5 cm/s，测试距离为90 m，所加载荷为5 N和8 N，测试时间30 min，磨损前后的失重用精度为0.1 mg的BSA224S-CW型分析天平称量。

2 结果及分析

2.1 涂层的物相组成

图3所示为电极材料和Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的XRD图谱。从图中可以看出，复合涂层主要由硬质相TiC_{0.7}N_{0.3}，粘结相MoC、Ni₁₇W₃和Co_{5.47}N，合金相Ni-Cr-Co-Mo、Fe₃Ni₂等组成。与电极材料的XRD图谱相比，复合沉积层的衍射峰在衍射角2θ为70°~80°和90°处均出现了明显的宽化，这是由于在电火花沉积的快速冷却条件下，涂层晶粒发生细化，且有一定量非晶相生成所致。铁镍合金相Fe₃Ni₂的生成表明，起过渡作用的Ni沉积层与基体形成了良好的冶金结合，这在一定程度上可以提高涂层和基体的结合强度，防止涂层剥落。

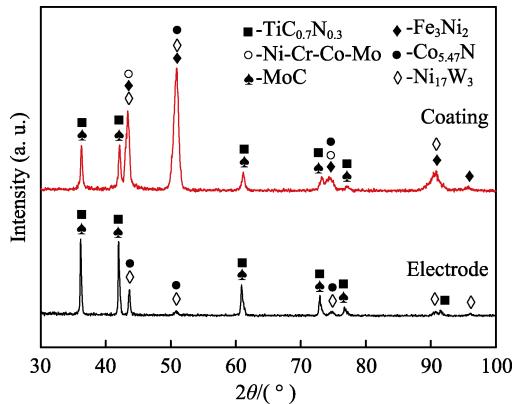


图3 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的XRD图谱
Fig.3 XRD patterns of Ni/Ti(C,N) based cermet composite coating

2.2 涂层的表面形貌和微观组织

电火花沉积Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的表面形貌和EDS元素面分布如图4所示。从图中能够看出，涂层表面宏观上呈现溅射状橘皮形貌，微观上可以看出这种形貌是由许多不规则的小熔滴斑点相互叠加而成。事实上，电火花沉积放电过程中，电极和基体表面的物理接触面积很小，在这些接触点处提供了大电流和高能量，使得电极和基体金属熔化成细小液滴。由于脉冲放电时间很短，在电场力的作用下，熔融液滴加速撞击基体并迅速冷却，形成了单脉冲沉积斑点，在持续不断的脉冲放电过程中，沉积斑点相互叠加，逐渐形成了这种溅射状形貌^[20]。涂层的表面粗糙度值Ra约为2.2 μm。

由元素的面分布图可以看出，Fe和Ti元素的整体上呈现出分区富集的特征，也有区域形成了一定范围的重叠。电火花放电过程中，基体和电极接触点处的熔池内形成混合液态金属熔滴，在旋转电极的搅动作用下，混合液态金属会粘连在电极上，并迅速

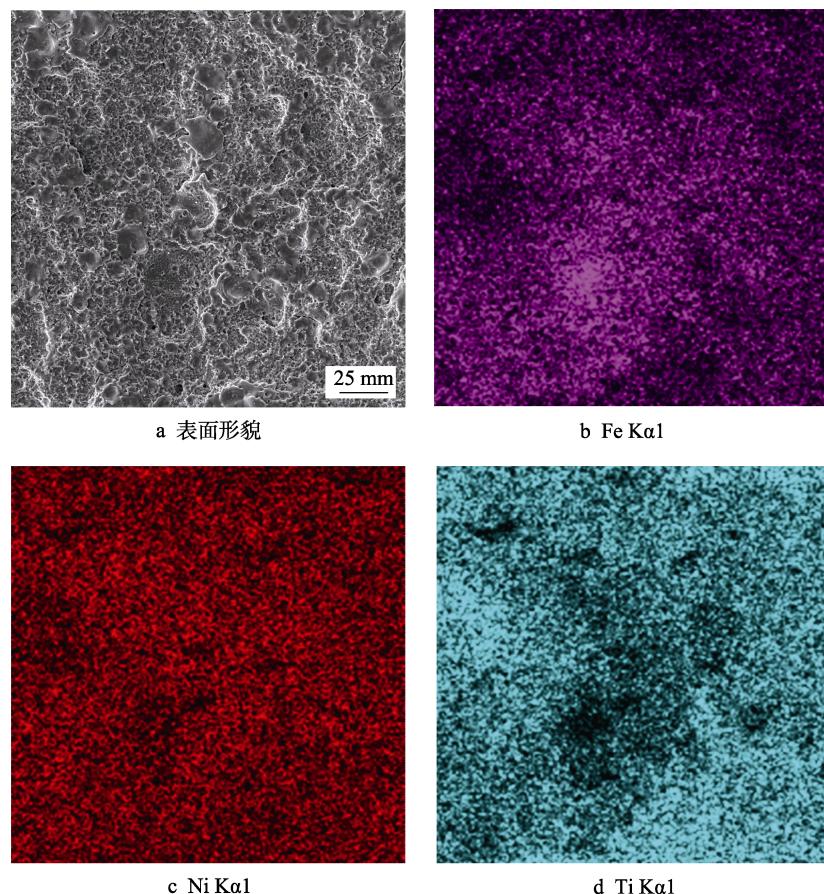


图 4 复合涂层的表面形貌及 EDS 面扫描分析
Fig.4 Surface morphologies (a) and EDS surface scanning results (b-d) of Ni/Ti(C,N)
based cermet composite coatings

凝固合金化，同时在下一次脉冲放电时进行沉积^[21]。这种电极粘连混合金属后再沉积的现象随着火花放电的进行循环产生，又由于冷却速度快，液态金属合金化不完全，于是形成了 Fe、Ti 两种元素在涂层表面分区富集分布的现象。Ni 元素的分布较为均匀，说明 Ni 与 Fe 和 Ti 的冶金相容性都非常好，发生了充分的扩散，可以起到连接基体和 Ti(C,N)基金属陶瓷涂层的作用。

Ni/Ti(C,N)基金属陶瓷复合涂层截面的微观组织如图 5 所示。可以看到截面由三个区域构成，分别是 Ti(C,N)涂层区、Ni 过渡层区和基体，涂层的平均厚度约为 31 μm。在两种涂层和基体的结合处形成了连续界面，然而 Ni 过渡层与基体界面处的组织与原始基体并不相同，呈现细小枝状晶组织。这是因为微区熔池在冷却结晶过程中，熔池边界存在较大成分过冷，加上基体对熔池的快速冷却作用，使得凝固以树枝晶形态进行^[22]。此外，在 Ti(C,N)涂层的上表面出现了少量微裂纹，倾向于沿着与涂层表面垂直的方向传播。这是因为电火花沉积的过程中，由于快速的加热和冷却作用，涂层内部会存在残余热应力，导致微

裂纹的萌生，而塑性较好的 Ni 过渡层能够起到缓解热应力的作用，从而减少裂纹的数量。

图 5b、c 所示为复合涂层截面 Ti、Fe、Ni 等元素的线扫面和面扫描分析。从图中可以看出，在 Ti(C,N)涂层和 Ni 过渡层中均存在 Fe 元素，且曲线呈现上下波动的变化趋势，在基体处趋于稳定，说明 Fe 元素在沉积过程中扩散范围较大。在过渡层内部，Fe 和 Ni 元素的含量出现此消彼长的变动趋势，这是因为电火花放电时，接触点处基体和电极同时熔化，液态基体金属中的 Fe 粘连在旋转电极上，后续放电过程中，Fe 元素就进入了涂层内部，并发生合金化。从 XRD 分析结果可知，这种冶金反应产物为 Fe₃Ni₂ 合金相。由图 5c 可以发现，中间层不是单纯的 Ni 过渡层，而是 Fe 与 Ni 元素扩散形成的一种相互咬合的涂层结构。在火花放电的过程中，电极和 H13 钢基体表面分别形成熔滴和熔池，形成的微区熔池受到了旋转电极的搅拌作用，由于熔池冷却凝固速度很快，于是形成机械混合作用下的涂层结构。这种伴随机械混合的过渡层结构有利于增强涂层与 H13 钢基体的结合强度，使其在剧烈摩擦条件下不易脱落。

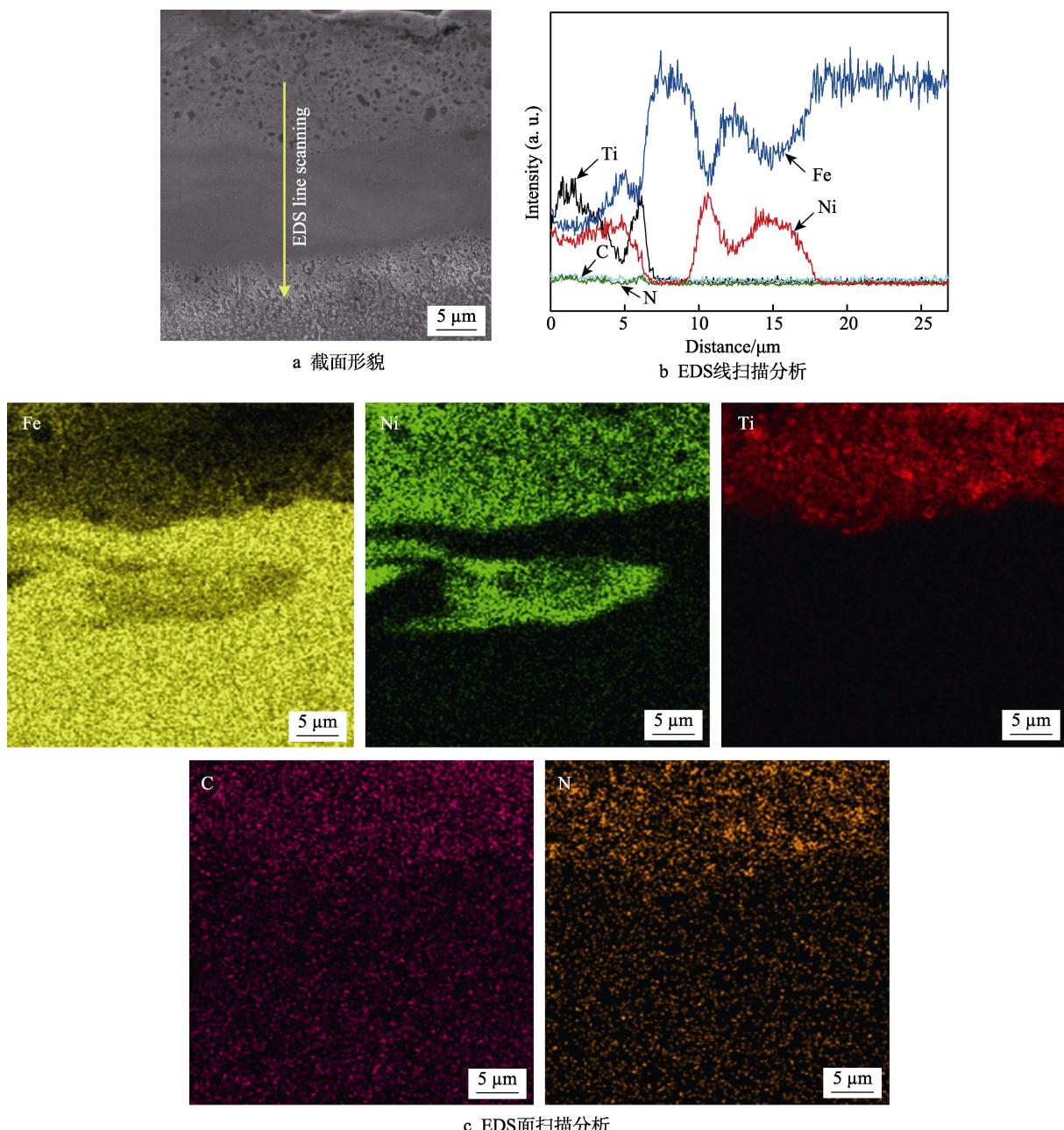


图 5 复合涂层的截面组织及 EDS 线扫描和面扫描分析

Fig.5 Cross-section microstructure (a) and EDS line scanning (b) and surface scanning (c) analysis of composite coating

2.3 涂层的显微硬度

图 6 所示为 Ni/Ti(C,N)基金属陶瓷复合涂层的显微硬度分布图, 整个硬度曲线呈现明显的梯度分布, 可以分为涂层区、过渡区和基体三部分。涂层的显微硬度最高可达 1420HV, 是 H13 钢基体 (264HV) 的 5.4 倍, 这是因为表面 Ti(C,N)涂层中含有较多的硬质相 $TiC_{0.7}N_{0.3}$, 这些硬质相呈现弥散分布, 起到了提高表面硬度的作用。距离表层 20~40 μm 的范围内, 涂层的硬度呈现均匀的下降过程, 说明涂层的组织是均匀且连续的。在距表层 40 μm 处, 涂层的硬度下降到了最低值, 约为 240HV, 是 Ni 过渡层的硬度。随着距离的继续增加, 涂层硬度又出现明显回升, 这是由

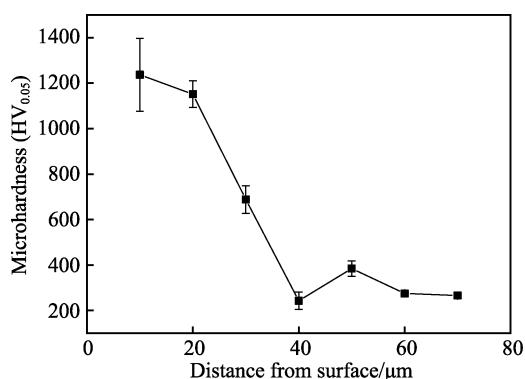


图 6 复合涂层截面的显微硬度分布图

Fig.6 Microhardness distribution diagram at the cross section of the composite coating

于 Ni 过渡层和钢表面发生冶金反应, 生成了 Fe_3Ni_2 合金相。硬度变化幅度在 H13 钢基体处趋于平缓。

2.4 涂层的摩擦磨损性能

图 7 为 H13 钢和 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层在 5 N 和 8 N 载荷下的摩擦系数曲线。从图中可以看出, 涂层和基体的摩擦系数在磨合期内均上升迅速, 然后逐渐趋于平稳, 涂层在 5 N 和 8 N 的载荷下平稳后的平均摩擦系数分别为 0.607 和 0.453, 显著低于 H13 钢基体平稳后的平均摩擦系数 (0.749(5 N) 和 0.714 (8 N)), 说明涂层相对基体来说具有一定的减摩性。这是由于基体相对于对磨 Al_2O_3 球为软材料, 在滑动摩擦的过程中, 对磨球的硬质粗糙峰嵌入软基体内, 不断推挤基体金属, 使之发生塑性变形并形成犁沟, 犁沟效应所产生的阻力成为了摩擦力的主要分量, 因此导致基体摩擦系数偏大^[23]。而表面 Ti(C,N)涂层的硬度远高于基体, 且硬质相呈现弥散状分布, 对磨球的粗糙峰不易使其发生塑性变形, 犁沟阻力小, 因此具有相对低的摩擦系数。同时由图 7 还可知, 基体和涂层的摩擦系数随载荷的增加而降低, 根据摩擦学

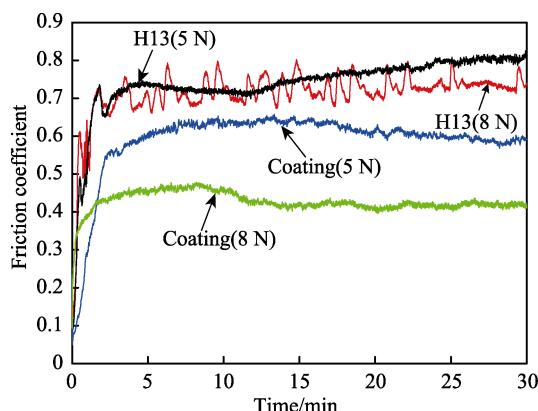


图 7 H13 钢与复合涂层的摩擦系数曲线
Fig.7 Friction coefficient curve of H13 steel and composite coating

二项式定理和粘着摩擦理论, 载荷改变时, 摩擦系数与 A/W (A 为实际接触面积, W 为所加载荷) 的比值呈正相关。滑动摩擦过程中, 摩擦面的接触属于弹塑性接触, 此时 A 近似于 $W^{2/3}$, 呈正比关系, 这种非线性关系使得载荷增加时, 摩擦系数会降低^[24-25]。

由图 8 中基体和复合涂层的磨损失重可知, 当载荷为 5 N 和 8 N 时, 复合涂层 30 min 内磨损质量损失分别为 0.6 mg 与 1.3 mg, 而基体的磨损量分别为 1 mg 和 2.5 mg, 约为复合涂层的 2 倍, 因此与 H13 钢基体相比, 电火花沉积复合涂层具有更好的耐磨性。

H13 钢基体和涂层的磨损形貌如图 9 所示。从图 9a 中可以看出, H13 钢基体的磨损表面有很深的犁沟以及层状的剥落凹坑, 这是由于 H13 钢基体的表面硬度较低, 承受变形的能力差, 在反复挤压和滑动摩擦的作用下, 会出现很深的摩擦划痕, 同时因为基体表面在交变应力的作用下产生了疲劳裂纹, 裂纹不断扩展并相互交割, 会使金属表层出现片状剥落现象。综上, H13 钢基体的磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损。图 9b 为 Ni/Ti(C,N)金属陶瓷复合涂层的磨损形貌, 其表面只存在很浅的划痕, 没有明显的片层剥落

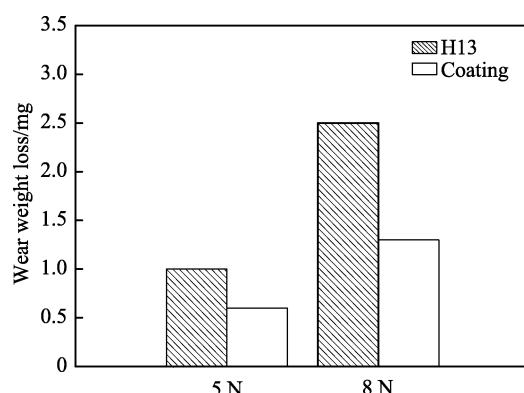


图 8 H13 钢与复合涂层的磨损失重
Fig.8 Wear weight loss of H13 steel and composite coating

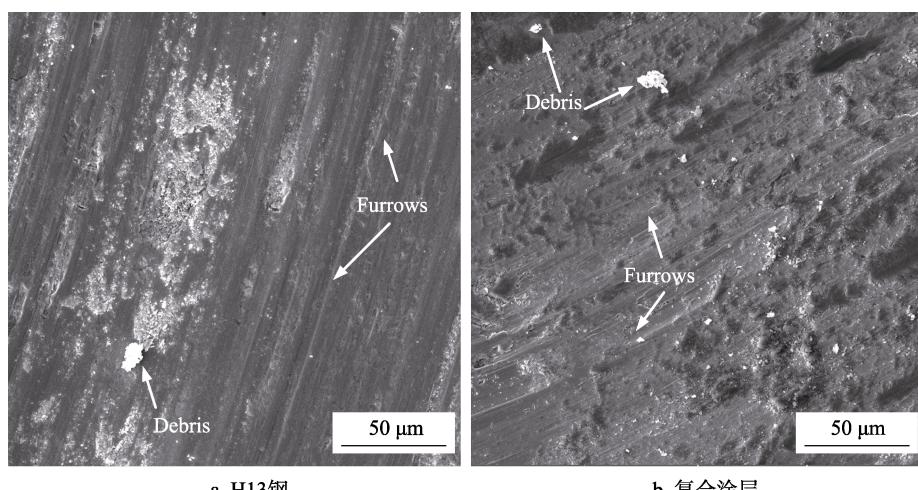


图 9 H13 钢与复合涂层的磨损形貌
Fig.9 Wear morphology of H13 steel (a) and composite coating (b)

现象。这是由于涂层中分布的硬质相 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 提高了涂层表面的硬度, 同时增强了涂层在滑动摩擦磨损过程中抵抗微切削和犁沟的能力。此外, 由于涂层与基体为致密的冶金结合, 过渡层 Ni 与钢冶金反应生成的韧性相可以抑制疲劳裂纹的扩展, 从而避免片状剥落坑的形成。涂层表面存在散落分布的磨屑, 这是由于摩擦过程中对磨表面产生粘着效应, 粘着接触点表面材料在滑动摩擦剪切力的作用下脱落, 这些脱落的硬脆相会变成研磨介质, 使涂层表面产生轻微的磨料磨损^[26]。综上, $Ni/Ti(C,N)$ 金属陶瓷复合涂层的磨损机制为轻微的磨粒磨损和粘着磨损。

3 结论

1) 采用电火花沉积技术成功地在 H13 钢表面制备了 $Ni/Ti(C,N)$ 金属陶瓷复合涂层, 涂层表面为不规则的单脉冲沉积斑点堆叠而成的溅射状形貌, 表面粗糙度值 Ra 约为 $2.2 \mu m$ 。Fe 和 Ti 元素的分布整体上呈现出分区富集的特征, 复合涂层主要物相包括 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 、 MoC 、 $Ni_{17}W_3$ 、 $Ni-Cr-Co-Mo$ 和 Fe_3Ni_2 等。

2) 涂层组织均匀且致密, 没有明显的裂纹、气孔等缺陷, 厚度约为 $31 \mu m$ 。 $Ti(C,N)$ 层、Ni 过渡层和基体的元素发生了明显的互扩散, 形成了良好的冶金结合。同时在旋转电极作用下, 过渡层与基体表面形成了一种机械咬合结构。

3) 涂层的显微硬度最大值可达 $1420HV$, 约为 H13 钢基体 ($264HV$) 的 5.4 倍。涂层的摩擦系数显著低于 H13 钢基体, 且 30 min 内的磨损量仅为基体的 $1/2$ 。H13 钢基体的磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损, $Ni/Ti(C,N)$ 金属陶瓷复合涂层的磨损机制为轻微的磨粒磨损和粘着磨损。

参考文献:

- [1] 刘宁. $Ti(C,N)$ 基金属陶瓷材料[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009: 11-12.
LIU Ning. $Ti(C,N)$ -based cermet [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2009: 11-12.
- [2] 孙东哲, 杨青青, 熊惟皓, 等. $Ti(C,N)$ 基金属陶瓷的组织结构与合金化[J]. 材料导报, 2013, 27(19): 125-129.
SUN Dong-zhe, YANG Qing-qing, XIONG Wei-hao, et al. Microstructure and alloying of $Ti(C,N)$ -based cermet [J]. Materials review, 2013, 27(19): 125-129.
- [3] LI Hai-tao, WANG Qiang, ZHUANG Ming-hui, et al. Characterization and residual stress analysis of $TiN/TiCN$ films on AZ31 magnesium alloy by PVD[J]. Vacuum, 2015, 112: 66-69.
- [4] ŹUKOWSKA L, MIKUŁA J, STASZUK M, et al. Structure and properties of PVD coatings deposited on cermet[J]. Archives of metallurgy and materials, 2015, 60(2): 727-733.
- [5] GARCIA J, PITONAK R, WEISSENBACHER R, et al. Production and characterization of wear resistant $Ti(C,N)$ coatings manufactured by modified chemical vapor deposition process[J]. Surface and coatings technology, 2010, 205(7): 2322-2327.
- [6] YOU Qian-bing, XIONG Ji, GUO Zhi-xing, et al. Microstructure and properties of CVD coated $Ti(C,N)$ -based cermet with varying WC additions[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2019, 81: 299-306.
- [7] POLCAR T, NOVÁK R, ŠIROKÝ P. The tribological characteristics of $TiCN$ coating at elevated temperatures[J]. Wear, 2006, 260(1-2): 40-49.
- [8] JOHNSON R N, SHELDON G L. Advances in the electrospark deposition coating process[J]. Journal of vacuum science & technology A: vacuum, surfaces, and films, 1986, 4(6): 2740-2746.
- [9] 张留伟, 邵俊. 电火花沉积技术研究现状及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2017(8): 76-79.
ZHANG Liu-wei, SHAO Jun. Research status and development trend of electro-spark surface deposition technology[J]. Equipment manufacturing technology, 2017(8): 76-79.
- [10] WEI Xiang, CHEN Zhi-guo, ZHONG Jue, et al. Feasibility of preparing Mo_2FeB_2 -based cermet coating by electrospark deposition on high speed steel[J]. Surface and coatings technology, 2016, 296: 58-64.
- [11] KORKMAZ K, BAKAN H. Process and properties of $TiC_{0.7}N_{0.3}$ -based cermet coating deposition on steel by electrospark deposition technique[J]. Metallic materials, 2010, 48(2): 153-163.
- [12] FRANGINI S, MASCI A, DI B A. Cr_7C_3 -based cermet coating deposited on stainless steel by electrospark process: Structural characteristics and corrosion behavior[J]. Surface and coatings technology, 2002, 149(2-3): 279-286.
- [13] HONG Xiang, TAN Ye-fa, WANG Xiao-long, et al. Microstructure and wear resistant performance of TiN/Zr -base amorphous-nanocrystalline composite coatings on titanium alloy by electrospark deposition[J]. Surface and coatings technology, 2016, 305: 67-75.
- [14] HONG Xiang, TAN Ye-fa, ZHOU Chun-hua, et al. Microstructure and tribological properties of Zr-based amorphous-nanocrystalline coatings deposited on the surface of titanium alloys by electrospark deposition[J]. Applied surface science, 2015, 356: 1244-1251.
- [15] HONG Xiang, FENG Ke, TAN Ye-fa, et al. Effects of process parameters on microstructure and wear resistance of TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(8): 1767-1776.
- [16] RADEK N, KONSTANTY J, SCENDO M. The electrospark deposited $WC-Cu$ coatings modified by laser treatment[J]. Archives of metallurgy and materials, 2015,

- 60(4): 2579-2584.
- [17] RADEK N, KONSTANTY N. Cermet ESD coatings modified by laser treatment[J]. Archives of metallurgy and materials, 2012, 57(3): 665-670.
- [18] RADEK N, WAJS E, LUCHKA M. The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment[J]. Powder metallurgy and metal ceramics, 2008, 47(3): 197-201.
- [19] 张怡, 陈志国, 魏祥, 等. 电火花沉积碳化铬基金属陶瓷涂层的微观组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 601-607.
ZHANG Yi, CHEN Zhi-guo, WEI Xiang, et al. Microstructure and properties of chromium carbide based metal-ceramic coatings prepared by electro-spark deposition[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(2): 601-607.
- [20] LIU Jun, WANG Rui-jun, QIAN Yi-yu. The formation of a single-pulse electrospark deposition spot[J]. Surface and coatings technology, 2005, 200(7): 2433-2437.
- [21] 何鹏, 吴承东, 钱乙余, 等. 钛合金表面电火花沉积 WC 电极的粘连行为分析[J]. 焊接学报, 2006(4): 25-28.
HE Peng, WU Cheng-dong, QIAN Yi-yu, et al. Adhesion behavior of WC coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of the china welding institution, 2006(4): 25-28.
- [22] XIE Y, WANG M. A feasibility study of preparing MC_xAl_y/BN composite coatings by electrospark deposition process [J]. Journal of alloys and compounds, 2009, 484(1-2): 21-24.
- [23] MA G, WANG L, GAO H, et al. The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear[J]. Applied surface science, 2015, 345: 109-115.
- [24] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 283-284.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 283-284.
- [25] MA K J, CHAO C L, LIU D S, et al. Friction and wear behaviour of TiN/Au, TiN/MoS₂ and TiN/TiCN/a-C:H coatings[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 127(2): 182-186.
- [26] JACOBS L, HYLAND M M, DE B M. Study of the influence of microstructural properties on the sliding-wear behavior of HVOF and HVAF sprayed WC-cermet coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 1999, 8(1): 125-132.

(上接第 212 页)

- [18] 翟长生. 一种感应预热熔涂集成装置的人机交互系统: 中国, CN201510995527.7[P]. 2016-05-25.
Zhai Chang-sheng. A human-computer interactive system for the integrated device of induction preheating fusion coating: China, CN201510995527.7[P]. 2016-05-25.
- [19] 翟长生. 一种感应预热熔涂集成装置的智能运控系统: 中国, CN201510995497.X[P]. 2016-05-25.
Zhai Chang-sheng. An intelligent operation and control system for integrated induction preheating fusion coating device: China, CN201510995497.X[P]. 2016-05-25.
- [20] XU M K, ZHU S G, DING H. Electrical contact strengthening of induction-clad Ni-40%WC composite coatings on 40Cr substrates[J]. Surface and coatings technology, 2015, 279: 32-38.
- [21] 杨效田, 王鹏春, 李霞, 等. 复合制备 Ni 基合金涂层的组织结构及性能演变特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 46(3): 693-698.
Yang Xiao-tian, Wang Peng-chun, Li Xia, et al. Evolution characteristics of microstructure of Ni-based alloy coatings and their properties under complex process[J]. Rare metal materials and engineering, 2015, 46(3): 693-698.
- [22] 郭建亭. 一种性能优异的低成本定向凝固镍基高温合金 DZ417G[J]. 金属学报, 2002, 38(11): 1163-1174.
Guo Jian-ting. A directionally solidified nickel-base superalloy DZ417G with excellent properties and low cost [J]. Acta metallurgica sinica, 2002, 38(11): 1163-1174.
- [23] 杨效田, 王智平, 李文生, 等. 感应熔覆制备表面涂层工艺及涂层组织特征[J]. 材料保护, 2010, 43(8): 46-50.
Yang Xiao-tian, Wang Zhi-ping, Li Wen-sheng, et al. Surface coating prepared by inducing cladding technology and its organization[J]. Materials protection, 2010, 43(8): 46-50.
- [24] 赵文明, 王俊, 翟长生, 等. 纳米复合涂层 ZrO₂/0.05w(Al₂O₃)力学性能的 Weibull 分布特性[J]. 中国表面工程, 2005, 18(4): 13-17.
Zhao Wen-ming, Wang Jun, Zhai Chang-sheng, et al. The Weibull distribution of microhardness and microstructure of ZrO₂/0.05w(Al₂O₃) plasma sprayed coatings[J]. China surface engineering, 2005, 18(4): 13-17.
- [25] 张维铭. 统计质量控制理论与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
Zhang Wei-ming. Theory and application of statistical quality control[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992.
- [26] CHEN J, DONG Y, WAN L, et al. Effect of induction remelting on the microstructure and properties of in situ TiN-reinforced NiCrBSi composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2018, 340: 159-166.