

# 激光熔覆 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料耐磨性能研究

陈翠欣<sup>1</sup>, 赵向东<sup>1,2</sup>, 方前<sup>1,2</sup>, 赵琳<sup>2</sup>, 韩伟<sup>2</sup>, 彭云<sup>2</sup>, 殷福星<sup>1</sup>, 田志凌<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300310)

(2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘要:** 采用激光熔覆技术在 304 不锈钢基板上制备了 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (25%, 质量分数) 复合材料耐磨涂层, 分析了 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层的显微组织、硬度和耐磨性能。结果表明, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层显微组织由基体  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相和原位自生 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (M=Cr, Fe) 型碳化物组成, 且细小 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 弥散分布于  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 基体。与 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层相比较, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层显微硬度提高了约 4000 MPa。650 °C 时, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层磨损量仅为对比材料蠕墨铸铁的 28% 左右, 表明 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层具有良好的耐磨性能。

**关键词:** 激光熔覆; Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料; 显微组织; M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>; 耐磨性能

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)04-1388-07

船用柴油发动机的性能及稳定性将直接影响船舶的正常运行, 其服役环境日趋严苛。柴油发动机中关键零部件 (活塞环、气阀等) 主要的失效形式为摩擦磨损<sup>[1,2]</sup>, 所以开发新型耐磨材料代替传统材料具有重要意义。

Ni<sub>3</sub>Al 金属间化合物的 Ni、Al 原子在晶体结构中占据特定的位置, 形成了 L1<sub>2</sub> 型长程有序超点阵结构, 长程有序结构赋予了它“温度-强度”反常的特殊性能, 即在一定的温度范围内强度随温度的升高而增高<sup>[3-5]</sup>。另一方面, Ni<sub>3</sub>Al 金属间化合物具备高熔点、低密度、耐高温氧化等优异的物理性能, 同时 Ni<sub>3</sub>Al 金属间化合物具有高的加工硬化率和高温强度<sup>[6]</sup>。因此, Ni<sub>3</sub>Al 基合金是一种潜在的新型耐磨结构材料。

由于 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 具有高的热硬度、良好的高温耐蚀性能和较高的高温抗氧化性, 其与 Ni<sub>3</sub>Al 基合金热膨胀系数匹配良好<sup>[7,8]</sup>, 所以 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 作为硬质增强相添加到 Ni<sub>3</sub>Al 基体中, 将会大幅提升材料的耐磨性能。

目前, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料研究方面开展了一些工作。Bullock 等<sup>[9]</sup>采用定向凝固技术制备了 Ni-Ni<sub>3</sub>Al-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料, 结果表明添加 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的复合材料与基体材料比较具备优越的抗蠕变性能。Li 等<sup>[8]</sup>采用药芯焊丝法制得 Ni-Al-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合焊丝, 利用氩弧物理热和 Ni-Al 反应热制备了 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ni<sub>3</sub>Al 复合材料, 耐磨性能是 Stellite12 合金的 2 倍左右。Gong 等<sup>[5]</sup>的研究表明

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 增强 Ni<sub>3</sub>Al 基复合材料具备良好的耐磨性能。Fu 等<sup>[10]</sup>采用热等静压 (HIP) 技术制备了 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 块体复合材料, 显微组织是由硬芯相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 和扩散相 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 及 Ni<sub>3</sub>Al 相基体组成, 该结构表现出良好的耐磨性能。袁建鹏等<sup>[11]</sup>通过 HVOF 喷涂工艺制备了原位自生 (Cr, Al)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 碳化物增强 Ni<sub>3</sub>Al 基复合材料涂层, 与 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 涂层比较, 其耐磨性能大幅提升。

激光熔覆是材料表面耐磨涂层制备的最佳方法之一<sup>[12]</sup>, 然而目前关于 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料激光熔覆研究的公开数据较少。因此, 本研究利用激光熔覆技术在 304 不锈钢基板表面制备了 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料耐磨涂层, 研究了熔覆层的组织特征和耐磨性能, 借助扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD)、透射电镜 (TEM)、分析了熔覆层显微组织和相组成, 结合显微组织分析了熔覆层的磨损机制。

## 1 实验

激光熔覆试验采用 YLS-6000 型光纤激光器, 光纤芯径 400  $\mu\text{m}$ , 激光焦点光斑尺寸 5 mm $\times$ 5 mm。Ni<sub>3</sub>Al 合金粉和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒为原材料, 粒径范围 70~110  $\mu\text{m}$ , Ni<sub>3</sub>Al 合金粉末化学成分如表 1 所示。基板为 304 不锈钢, 化学成分如表 2 所示。试验前对粉末原材料进行 100 °C 恒温烘干处理, 配制 Ni<sub>3</sub>Al 合金粉末与 25% (质量分数) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的 Ni<sub>3</sub>Al-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 混合粉末并充分混

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1103300); 国际科技合作项目 (2015DFA50970); 河北工业大学联合培养博士研究生项目 (2018GN0003)

作者简介: 陈翠欣, 女, 1975 年生, 博士, 教授, 河北工业大学材料学院, 天津 300310, 电话: 022-60204784, E-mail: karencx@126.com

表 1 Ni<sub>3</sub>Al 合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni <sub>3</sub> Al alloy powder (ω/%)					
Al	B	Fe	Mn	Ti	Ni
10.22	0.19	11.83	1.11	0.62	Bal.

表 2 304 不锈钢化学成分

Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel (ω/%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.049	0.33	1.1	0.035	0.003	8.03	17.21	Bal.

合。将 304 不锈钢板材 (100 mm×60 mm×13 mm) 表面用 300# SiC 砂纸进行打磨, 用丙酮和无水乙醇进行擦拭去除其表面的油污及水分等有害杂质。激光熔覆工艺参数: 激光功率 1.8 kW, 扫描速度 0.18 m/min, 载粉气流量 15 L/min, 保护气流量 10 L/min, 送粉速率为 1.43 kg/h, 其中载粉气和保护气为高纯氩气 (99.999%)。采用上述实验参数, 在 304 不锈钢表面上进行单层单道熔覆试验。

利用日本 HITAVHI S-4300 扫描电镜对熔覆层显微组织进行观察, 通过 Image Pro Plus 图像分析软件对熔覆层碳化物的尺寸进行了统计分析, 采用 X 射线衍射仪分析了熔覆层的物相构成, 借助 JEOL 2010F 场发射透射电子显微镜对熔覆层的物相组成进一步观察。硬度测试采用 FM300 显微硬度计, 载荷 200 g, 保载时间 10 s。摩擦磨损试验采用德国 SRV<sup>®</sup>4 高温摩擦磨损试验机进行销-盘式 (如图 1 所示) 摩擦磨损, 销和盘的表面粗糙度  $R_a$  小于 0.5 μm, 销为 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层及对比材料蠕墨铸铁, 尺寸为 3 mm×2 mm×14 mm; 对磨盘为 304 不锈钢, 尺寸为 Φ24 mm×7.88 mm。摩擦磨损实验条件为: 干摩擦磨损, 载荷 24 N, 频率 10 Hz, 冲程 2 mm, 试验温度 25, 250, 650 °C, 时间 45 min。试验前后将销和盘用丙酮和无水乙醇超声清洗并利用高精度分析天平进行称量, 记下磨损前质量  $m_1$  和磨损后质量  $m_2$ , 然

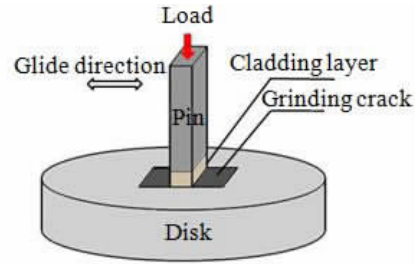


图 1 销-盘式摩擦磨损试验示意图

Fig.1 Diagram of pin-disk friction and wear test

后计算磨损量  $\Delta m = m_1 - m_2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织特征

图 2 所示为 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层宏观形貌和显微组织。摩擦磨损试验中销的磨损处位于熔覆层中上部 (如图 2a 所示), 选取此区域进行 SEM 观察。由图 2b 和 2c 可以看出, Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层组织均匀一致。图 3 所示为 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层宏观形貌和显微组织, 熔覆层组织均匀, 原位自生的细小碳化物均匀弥散分布。Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层是由基体相和碳化物两相构成, 利用 Image-Pro Plus 软件对 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层中碳化物颗粒最大粒径的统计结果如图 4 所示, 碳化物的尺寸集中在 1.5~3.5 μm 之间, 可知 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层原位自生了新碳化物, 且该碳化物细小而弥散分布在基体相中。原位自生的碳化物与基体的结合力强, 在摩擦磨损过程中不易脱落, 能够对熔覆层耐磨性能的提高起到积极的作用。图 5 为 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层 XRD 图谱。分析可知 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层为单相 γ'-Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层中基体相为 γ'-Ni<sub>3</sub>Al, 原位自生碳化物为  $M_7C_3$  ( $M=Cr, Fe$ ) 型碳化

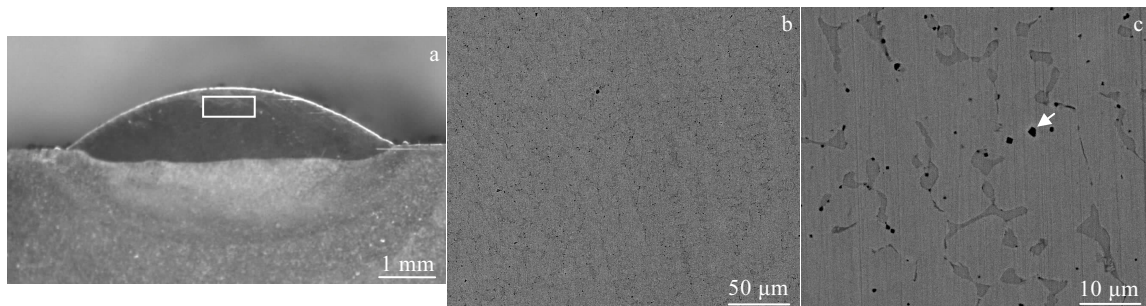


图 2 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层显微组织

Fig.2 Microstructures of Ni<sub>3</sub>Al alloy cladding layers

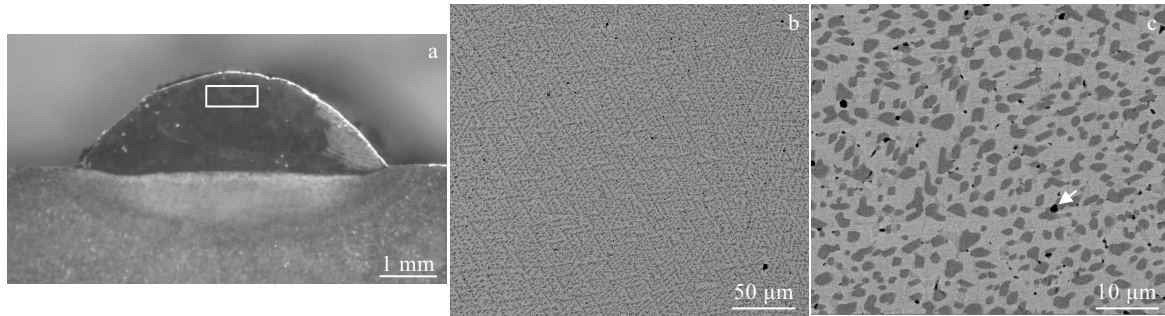


图 3 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层显微组织

Fig.3 Microstructures of Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites cladding layers

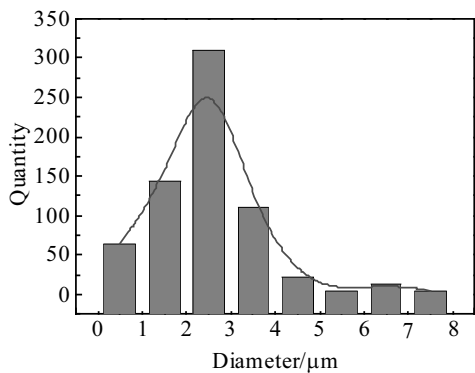


图 4 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层中碳化物晶粒尺寸分布

Fig.4 Size distribution of carbide grains in cladding layer of Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites

物。为了进一步确定 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层组织中的物相构成，利用 TEM 对 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层进行观察，图 6 是 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层 TEM 形貌及基体相和碳化物的选区电子衍射花样，对衍射谱标定分析可知：图 6a 为 γ'-Ni<sub>3</sub>Al 面心立方长程有序结构在 [001] 方向上的衍射花样，图 6b 为 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 密排六方结构在 [0001] 晶带方向上的衍射花样。Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层两相经 XRD 和 TEM 观察分析结果表明，基体相为 γ'-Ni<sub>3</sub>Al，碳化物为原位自生 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (M=Cr, Fe) 型碳化物。

以上结果表明，Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层组织为单相 γ'-Ni<sub>3</sub>Al，Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层中则是由基体相 γ'-Ni<sub>3</sub>Al 和碳化物 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 组成。激光熔覆过程中混合粉末熔化后 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 分解成游离的 Cr、C 原子，而 Ni<sub>3</sub>Al 合金中 Fe 元素含量较高，且 Fe、Cr 极易与 C 形成稳定的碳化物。Cr、Fe、C 原子的溶解和凝固，形成原位自生的 (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型碳化物，多位学者<sup>[13-15]</sup>的研究中均表明 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的溶解后在凝固的过程中生成 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型碳化物。在凝固

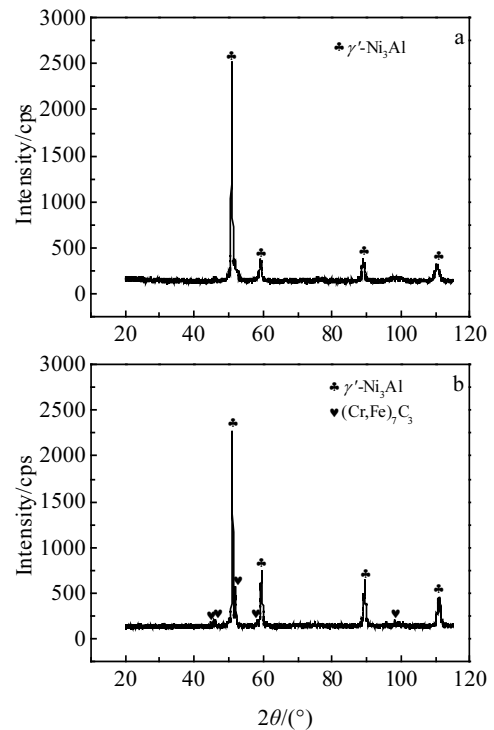


图 5 Ni<sub>3</sub>Al 和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Ni<sub>3</sub>Al alloy (a) and Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites (b) cladding layers

过程中，由于碳化物的熔点较高优先结晶，形成原位自生的 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型碳化物，且激光熔覆冷却速度极快，在高形核率的状态下易形成细小的组织。因此，Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层经历溶解和快速凝固过程，最终形成 γ'-Ni<sub>3</sub>Al 基体相和弥散分布的 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型碳化物组合结构。

### 2.2 硬度

分别对 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层进行了显微硬度测试，图 7 为熔覆层沿表面到基板方向的硬度分布，图 7a 为 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层的硬度分布，

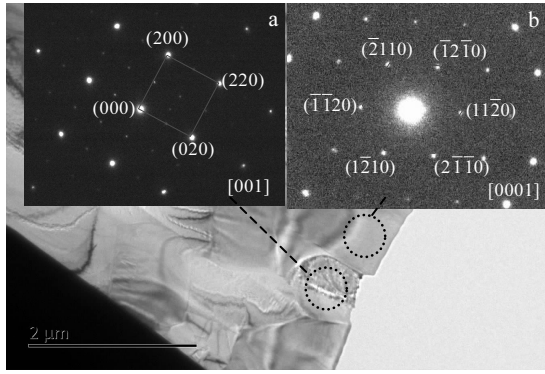


图 6 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层 TEM 形貌及对应基体相和碳化物选区电子衍射花样

Fig.6 TEM morphology of the Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites cladding layer and corresponding SAED patterns of matrix phase (a) and carbide (b)

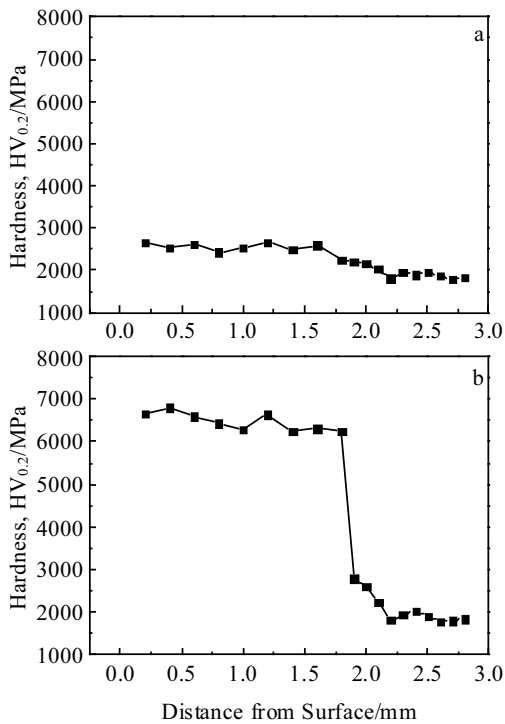


图 7 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层显微硬度分布  
Fig.7 Micro-hardness distribution of Ni<sub>3</sub>Al alloy (a) and Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites (b) cladding layers

图 7b 为 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层的硬度分布，2 种熔覆层硬度均波动较小，表明熔覆层组织较为均匀。熔覆层厚度约 1.5 mm，过渡层显微硬度平缓地过渡到基板，没有出现明显的热影响区硬化现象。Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层的平均显微硬度 (HV) 约为 2500 MPa，

Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层的平均显微硬度约为 6500 MPa，较 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层硬度提高了约 4000 MPa。

### 2.3 耐磨性能

图 8 为 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层及对比材料蠕墨铸铁在不同温度下的磨损量，其中图 8a 为不同温度下 3 种材料销的磨损量，图 8b 为不同温度下 3 种材料所对应磨盘的磨损量。因蠕墨铸铁、304 不锈钢在柴油发动机中大量应用，故选择蠕墨铸铁为对比材料，对磨盘选用 304 不锈钢。对磨盘 304 不锈钢的强度和硬度较低且耐磨性差<sup>[16]</sup>，由图 8a 可知室温下 Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层的磨损量比蠕墨铸铁和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料的磨损量高，而当温度达到 250 和 650 °C 时，Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层的磨损量远低于蠕墨铸铁，而且 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层磨损量最小。650 °C 时，Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层磨损量仅为对比材料蠕墨铸铁的 28% 左右，同时，Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层所对应的对磨盘磨损量也逐渐降低，表明 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层对应的对磨盘磨损程度较小。

与蠕墨铸铁比较，随着温度上升，Ni<sub>3</sub>Al 激光熔覆层表现出较好的耐磨性能，其原因主要有两方面：(1) Ni<sub>3</sub>Al 具备温度-强度的反常特性，Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层屈服强度升高，能够承受较大的冲击和剪切力的作

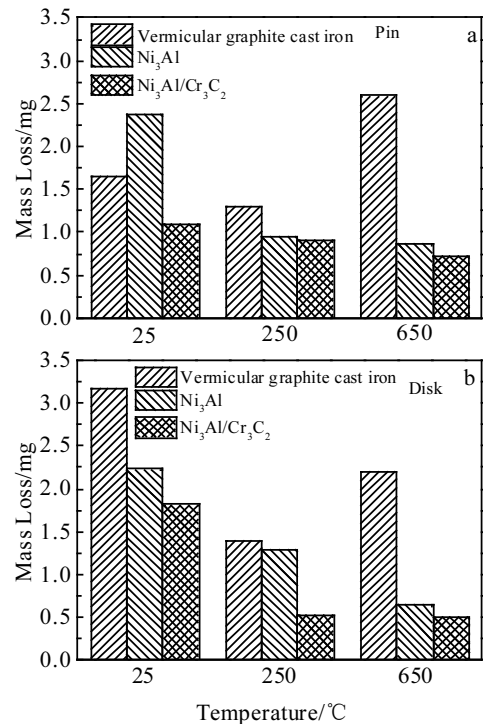


图 8 销和对磨盘磨损量

Fig.8 Mass loss of the pin (a) and disk (b)

用,从而减少了表层的脱落;(2)  $\text{Ni}_3\text{Al}$  具有较大的加工硬化能力,在摩擦磨损过程中,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  材料表面形成了一定厚度呈梯度变化的加工硬化层,提高了材料的耐磨性能<sup>[17,18]</sup>。因此,随着温度上升,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  激光熔覆层耐磨性能远优于蠕墨铸铁。与  $\text{Ni}_3\text{Al}$  激光熔覆层比较,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  激光熔覆层具有更佳的耐磨性能。一方面,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  激光熔覆层基体组织  $\text{Ni}_3\text{Al}$  具备温度-强度的反常特性和较高的加工硬化能力,保证了复合材料激光熔覆层具有较好的耐磨性能。另一方面,原位自生的细小  $\text{M}_7\text{C}_3$  型碳化物均匀弥散分布于  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  熔覆层中,与基体结合良好。原位自生的碳化物作为硬质点有效将摩擦副隔离开,降低了摩擦副之间的接触面积,而且碳化物硬质点能够阻断磨痕,减小磨粒尺寸。因此,在本研究条件下,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  激光熔覆层具有最佳的耐磨性能。

磨损过程极其复杂,往往存在多种磨损机制同时进行,且一种磨损发生可能诱发其他形式的磨损<sup>[19]</sup>。图 9 为 25 °C 下蠕墨铸铁销,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆层和  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层的磨损形貌,可以看出 25 °C 条件下,3 种材料磨损表面均出现不同程度的粘着坑,其磨损机制为典型的粘着磨损。其中  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆

层的粘着面积最大,塑流形成了塑积,表明发生了严重的粘着磨损,从而导致大量的表面脱落,同磨损量结果相符合。

图 10 所示为 250 °C 条件下 3 种材料销的磨损形貌。蠕墨铸铁磨损表面出现大量的粘着坑,发生较为严重的粘着磨损,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆层磨损表面存在少量粘着坑和犁沟划痕,其粘着磨损程度较轻,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层磨损表面呈深浅不一的犁沟划痕。表明,蠕墨铸铁主要的磨损机制为粘着磨损,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆层为粘着磨损和磨粒磨损的复合,而  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层主要是磨粒磨损。

如图 11 所示,650 °C 条件下,蠕墨铸铁磨损表面出现较深的粘着坑,发生严重的粘着磨损,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆层磨损表面存在粘着坑和犁沟划痕,其粘着磨损程度较轻,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层磨损表面光滑平整,呈轻微的犁沟划痕。表明,蠕墨铸铁主要的磨损机制为粘着磨损,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金熔覆层为粘着磨损和磨粒磨损的复合,而  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层主要是磨粒磨损。

由以上内容可知,  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  复合材料熔覆层中原位自生的  $\text{M}_7\text{C}_3$  作为硬质支撑,且与基体的结合力

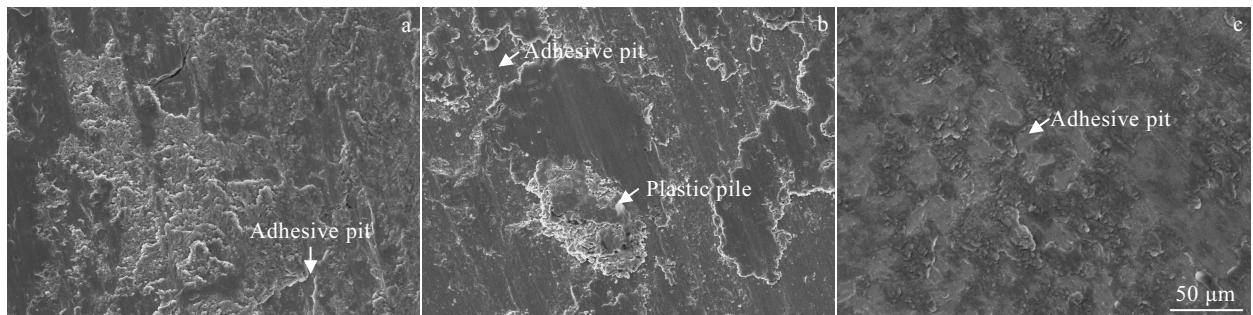


图 9 25 °C 下 3 种材料销的磨损形貌

Fig.9 Wear morphologies of vermicular graphite cast iron (a),  $\text{Ni}_3\text{Al}$  alloy (b), and  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  composites (c) pins at 25 °C

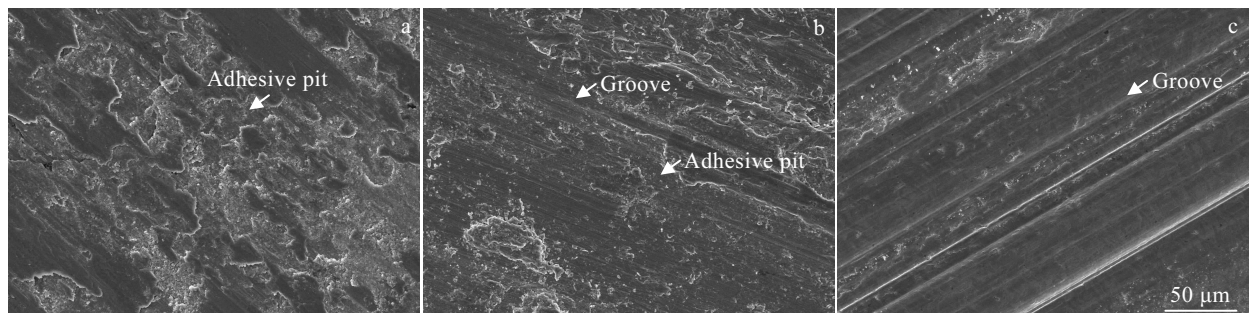


图 10 250 °C 下 3 种材料销的磨损形貌

Fig.10 Wear morphologies of vermicular graphite cast iron (a),  $\text{Ni}_3\text{Al}$  alloy (b), and  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Cr}_3\text{C}_2$  composites (c) pins at 250 °C

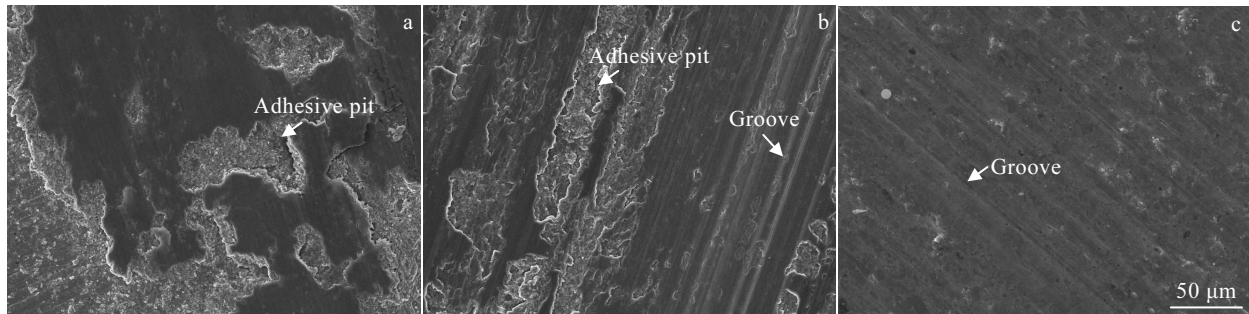


图 11 650 °C 下 3 种材料销的磨损形貌

Fig.11 Wear morphologies of vermicular graphite cast iron (a), Ni<sub>3</sub>Al alloy (b), and Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites (c) pins at 650 °C

强, 有效地将摩擦副隔离开, 不仅减少了自身磨损量, 而且对其对磨盘磨损程度也较小。因此, 在  $M_7C_3$  和 Ni<sub>3</sub>Al 基体的共同作用下, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料具备更为优异的室温和高温耐磨性能。

### 3 结 论

1) 激光熔覆制备 Ni<sub>3</sub>Al+25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层, 熔覆层组织形成了细小弥散分布的原位自生  $M_7C_3$  ( $M=Cr, Fe$ ) 型碳化物, 基体为长程有序结构的  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相。

2) Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层组织均匀, Ni<sub>3</sub>Al 合金熔覆层的平均显微硬度约为 2500 MPa, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 熔覆层的平均显微硬度约为 6500 MPa, 硬度提高了约 4000 MPa。

3) 研究了 25、250、650 °C 条件下耐磨性能, 随着温度的升高 Ni<sub>3</sub>Al 合金和 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层耐磨性能随之提高, 且其对应的对磨盘磨损程度均较小。650 °C 时, Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层的磨损量仅为蠕墨铸铁的 28% 左右。随着温度的升高, Ni<sub>3</sub>Al 合金主要磨损机制由粘着磨损转变到粘着磨损与磨粒磨损复合, 而 Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层主要磨损机制为磨粒磨损。Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料熔覆层优异的耐磨性能取决于熔覆层原位自生  $M_7C_3$  和基体  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 的强韧组合结构。

#### 参考文献 References

[1] Yan Xinping(严新平), Yuan Chengqing(袁成清), Bai Xiuqin(白秀琴) et al. *Chinese Journal of Nature(自然杂志)*[J], 2015, 37(3): 157

[2] Zhang Jinju(张金菊), Wu Jinyuan(吴金源). *Foreign Ship Technology, Internal Combustion Engines(国外舰船技术, 内燃机)*[J], 1985(7): 21

[3] Jozwik P, Polkowski W, Bojar Z. *Materials*[J], 2015, 8(5): 2537

[4] Gong K, Luo H L, Feng D et al. *Wear*[J], 2008, 265(11-12): 1751

[5] Gong K, Zhou Z F, Shum P W et al. *Wear*[J], 2011, 270(3-4): 195

[6] La P Q, Xue Q J, Liu W M. *Wear*[J], 2001, 249(1-2): 93

[7] Liu C T, White C L, Horton J A. *Acta Metallurgica*[J], 1985, 33(2): 213

[8] Li S P, Luo H L, Feng D et al. *Journal of Iron and Steel Research, International*[J], 2009, 16(5): 87

[9] Bullock E, McLean M, Miles D E. *Acta Metallurgica*[J], 1977, 25(3): 333

[10] Fu L H, Han W, Gong K et al. *Materials & Design*[J], 2017, 115: 203

[11] Yuan Jianpeng(袁建鹏), Yu Yueguang(于月光), Wang Yu(王玉). *Thermal Spray Technology(热喷涂技术)*[J], 2017(4): 13

[12] Santo L. *International Journal of Surface Science & Engineering*[J], 2008, 2(5): 327

[13] Ding Yongjun(丁永军), Lei Qiang(雷强), Luo Heli(骆合力) et al. *Journal of Iron and Steel Research(钢铁研究学报)*[J], 2011, 23(8): 44

[14] An Tongbang(安同邦), Gong Karin, Luo Heli(骆合力) et al. *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2012, 33(2): 101

[15] Li Shangpin(李尚平), Luo Heli(骆合力), Feng Di(冯涤) et al. *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2004(11): 53

[16] Lo K H, Shek C H, Lai J K L. *Materials Science & Engineering R*[J], 2009, 65(4-6): 39

[17] Gong K. *International Conference on Innovative Technologies*[C]. Rijeka: IN-TECH 2012, 2012: 361

- [18] Wen Shizhu(温诗铸), Huang Pingzhu(黄平著). *Principles of Tribology*(摩擦学原理)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012
- [19] Wen Shizhu(温诗铸). *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2008, 28(1): 1

## Wear Resistance of Laser Cladding Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Composites

Chen Cuixin<sup>1</sup>, Zhao Xiangdong<sup>1,2</sup>, Fang Qian<sup>1,2</sup>, Zhao Lin<sup>2</sup>, Han Wei<sup>2</sup>, Peng Yun<sup>2</sup>, Yin Fuxing<sup>1</sup>, Tian Zhiling<sup>2</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300310, China)

(2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The wear resistant coatings of Ni<sub>3</sub>Al alloy and Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites were prepared on 304 stainless steel substrates by laser cladding. The microstructure, hardness and wear resistance of Ni<sub>3</sub>Al alloy and Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composites were investigated. The results indicate that the microstructure of the Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> cladding layer consists of matrix  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al phase and in-situ self-generated  $M_7C_3$  ( $M=Cr, Fe$ ) type carbides, and the fine  $M_7C_3$  carbides distribute homogeneously in  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al matrix. Compared with that of the Ni<sub>3</sub>Al alloy cladding material, the micro-hardness of the Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> cladding material is increased by about 4000 MPa, and its mass loss is only 28% of that of the vermicular graphite cast iron at 650 °C. Therefore, the Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> laser cladding composite shows excellent wear resistance.

**Key words:** laser cladding; Ni<sub>3</sub>Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; microstructure;  $M_7C_3$ ; wear resistance

---

Corresponding author: Zhao Lin, Ph. D., Professor, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-62182946, E-mail: hhnds@aliyun.com