

# h-BN含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和磨损性能的影响

牛 伟<sup>1</sup> 孙荣禄<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津工业大学机械工程学院, 天津 300160  
<sup>2</sup> 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300160)

**摘要** 采用 CO<sub>2</sub> 激光器在 H13 钢基体上制备了 Ni+h-BN 自润滑复合涂层, 利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)和 X 射线衍射仪(XRD)等手段分析涂层组织和相组成, 利用显微硬度计和 M200 型摩擦磨损试验机测试了涂层的硬度和摩擦磨损性能。结果表明, Ni+5%h-BN(质量分数, 下同)涂层主要是  $\gamma$ -Ni 基体上分布着条状 Cr<sub>2</sub>N 相和少量不规则块状 CrB 相; Ni60+10%h-BN 组织主要是短小的杆状 CrB 相; Ni60+15%h-BN 涂层组织为类树枝晶 CrB 相。随着 h-BN 含量的增加, Ni+h-BN 涂层的显微硬度增大, 摩擦系数减小。其中最高显微硬度可达 1200 HV<sub>0.2</sub>, 约为基底的 4 倍。Ni+h-BN 涂层的摩擦系数和磨损重量较 Ni60 涂层显著降低, 最小的磨损重量仅为基体的 6%。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; h-BN; 自润滑涂层; 微观组织; 磨损性能

**中图分类号** TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0803011

## Effect of h-BN Content on Microstructures and Wear Resistance of Laser Cladding Self-lubricant Coatings

Niu Wei<sup>1</sup> Sun Ronglu<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China  
<sup>2</sup> Tianjin Area Major Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin 300160, China)

**Abstract** Ni+h-BN self-lubricating composite coatings are prepared on H13 steel substrate by CO<sub>2</sub> laser cladding with powder mixtures of Ni60 and h-BN. The chemical compositions and microstructures of the coatings are analyzed by using optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The microhardness profile of the coatings along the depth direction is measured on a microhardness tester. The friction properties are investigated by using on a pin-on-ring M200 wear tester. The results show that, the microstructure of Ni60+5% h-BN (mass fraction) coating are consisted of wattle-like phase Cr<sub>2</sub>N and a few irregular block-like phase CrB distributed in  $\gamma$ -Ni matrix, Ni60+10% h-BN coating is consisted of short-plate phase CrB and Ni60+15% h-BN coating is consisted of dendritic-plate phase CrB. With the content of h-BN increasing, the microhardness of the Ni60+h-BN coatings increases and the friction coefficient reduces. The maximal microhardness 1200 HV<sub>0.2</sub> is 4 times more than that of the substrate. The friction coefficient and wear mass loss of the Ni+h-BN coatings are lower than those of the Ni60 coating, respectively. The minimum wear mass loss of the Ni+h-BN coating is 6% of that of the substrate.

**Key words** laser technique; laser cladding; h-BN; self-lubricant coatings; microstructure; wear resistance

**OCIS codes** 140.3470; 140.3390; 350.3390; 350.3850

### 1 引 言

激光熔覆技术利用高能量密度的激光束使熔覆

材料与基材表面薄层快速熔凝获得优良的耐磨、耐蚀和抗高温等性能的涂层, 具有涂层组织致密且与

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-04-21

基金项目: 教育部博士点基金(20091201110002)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCZDJC21400)资助课题。

作者简介: 牛 伟(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: newways\_2005@126.com

导师简介: 孙荣禄(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光表面改性和材料加工等方面的研究。E-mail: rlsun@tjpu.edu.cn

基材冶金结合、基材变形小、适合的熔覆材料多等特点,在表面强化技术领域得到广泛研究和应用。目前的主要研究集中在以陶瓷颗粒作为增强相提高材料的硬度和耐磨性方面<sup>[1~6]</sup>。但是从摩擦学的角度考虑,并不是硬度越高越好,而是要求表面既有较高的耐磨性又有良好的减摩性,在金属合金中加入固体润滑剂如 MoS<sub>2</sub><sup>[7,8]</sup>, WS<sub>2</sub><sup>[9]</sup>, h-BN<sup>[10]</sup> 制备自润滑涂层,它兼有金属的优异力学性能和固体润滑剂的摩擦学特性,能满足某些相对运动的部件处于高温、低温、高真空、强辐射、化学污染等特殊工况下对润滑的要求。

h-BN为白色结晶粉末,具有六方晶体层状结构,其同一层的 B, N 原子由共价键相连,结合力很强,但层与层之间由范德华键相连,结合力弱<sup>[11]</sup>,是良好的润滑剂。此外它还有较高的热导率、良好的热稳定性和抗腐蚀性能。近年来, h-BN被广泛用于模具制造、航空、航天涡轮发动机等诸多部件不同温度区的可磨耗涂层的制备。Avril 等<sup>[12]</sup> 利用激光合金化在 X30Cr13 不锈钢表面制备 α-Fe(Cr)/h-BN 复合涂层,大大改善了基材的硬度和摩擦磨损性能。Takahiro 等<sup>[13]</sup> 利用激光熔覆技术在不锈钢表面制备石墨/h-BN固体自润滑涂层,摩擦磨损试验发现,

涂层的摩擦系数远小于基底; Shehata 等<sup>[14]</sup> 利用 YAG 激光器在 AISI M2 钢表面制备出 Ti/h-BN自润滑涂层,其涂层硬度可达680 HV,熔覆层磨损率比基底降低了 30%左右; Zhang 等<sup>[15]</sup> 利用激光熔覆技术制备出 Ni/h-BN自润滑复合涂层,发现涂层在 800 °C具有良好的减磨耐磨性能。

本文利用 5 kW CO<sub>2</sub> 激光器制备了 Ni60+h-BN自润滑复合涂层,利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)和摩擦磨损试验等手段,研究添加不同h-BN含量对涂层微观组织、硬度和摩擦磨损性能的影响。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 材料

基材为 H13 钢(4Cr5MoSiV1),激光熔覆试样尺寸为 50 mm×20 mm×20 mm。试样待熔覆表面经磨削加工,粗糙度 R<sub>a</sub>=0.2 μm,预置粉末前用金相砂纸打磨以去除表面氧化层,并用无水乙醇和丙酮清洗。熔覆材料为 Ni60 自熔性合金粉和纯度不小于 99.9%的 h-BN 粉末。Ni60 自熔性合金粉和 h-BN粉末的具体化学成分和相关参数如表 1 所示。

表 1 材料的化学成分和相关参数

Table 1 Chemical composition and parameters of original materials

Material	Chemical mass fraction /%	Size /μm	Melting point /°C	Coefficient of linear expansion / (10 <sup>-6</sup> K)
Ni60	16Cr, 3.3B, 4.5Si, 0.9C, ≤8.0Fe	140~250	1050	13.4
h-BN	purity≥99.9%	1	3000	4.92

将 Ni60 与h-BN按一定的质量配比混合均匀,其中h-BN的质量分数(下同)分别为 5%, 10% 和 15%,另选用纯 Ni60 粉末做激光熔覆原料与之比较摩擦磨损性能。熔覆材料中加入一定量的有机粘结剂制成糊状,预置于基体材料上,厚度为1.0 mm,自然干燥。

### 2.2 方法

采用 TJ-HL-T5000 型 5 kW CO<sub>2</sub> 激光器对 Ni60 粉末和Ni60+h-BN复合粉末进行单道(用于组织观察与显微硬度试验)及多道搭接熔覆(用于 XRD 分析与摩擦磨损试验)。单道激光熔覆工艺参数为激光功率 P=2.0 kW,光斑直径 D=3 mm,扫描速度 V=2~7 mm/s。多道搭接激光熔覆的工艺参数为激光功率 P=2.0 kW,光斑直径 D=3 mm,扫描速度 V=3 mm/s,搭接率为 50%。

利用 Rigaku D/max 2500 PC 型 XRD 分析涂层物相,主要参数为:加速电压为 40 kV,电流为

150 mA,采用 Cu 靶,扫描速度为 20°/min;利用 OLYMPUS OM 和 QUANTA200 型 SEM 观察涂层组织形貌,并利用能谱分析仪(EDS)对涂层定点或选区进行元素成分分析。

采用 HXD-1000T 数字式显微硬度计测量激光熔覆试样的显微硬度,使用载荷 200 g,加载时间为 15 s。将多道搭接的激光熔覆试样表面磨平,然后用线切割机切成 25 mm×7 mm×7 mm 的长方体试样。采用 M-200 型磨损试验机进行摩擦磨损试验,磨轮材料为 GCr15 钢,磨轮直径 2R=43.80 mm。具体实验条件如下:试验温度为室温,载荷为 49 N 和 98 N,磨轮转速为 200 r/min;涂层摩擦磨损性能用试样的失重量 Δm 和摩擦系数 μ 来表征,即

$$\Delta m = m_0 - m, \quad \mu = M/(FR),$$

式中 m<sub>0</sub> 为试样初始质量, m 为磨损后质量, M 为摩擦力矩, F 为载荷, R 为磨轮半径。用感量为 10<sup>-5</sup> g 的分析天平测量试样磨损前后的重量,每个试验点

取3个试样的平均值。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 熔覆层宏观形貌

图1为各组分的激光熔覆层在激光功率  $P=2.0$  kW, 光斑直径  $D=3$  mm, 不同扫描速度条件下的表面形貌。可以发现在不同工艺参数下, Ni60 熔覆层表面连续光滑, 成形良好。Ni60+5% h-BN涂

层表面出现一些球形颗粒, 可能是由于激光熔覆过程中密度小的h-BN在熔池形成过程中迅速上浮, 产生飞溅, 在大气中冷却附着于熔覆层表面形成球形颗粒。而随着h-BN含量的增加, 这些球形颗粒数量减少, Ni60+h-BN涂层表面越来越光滑, 可能因为h-BN含量的增加减弱了熔池流动性, 降低了熔覆过程中h-BN颗粒的上浮速度, 减少飞溅。同种组分的单道熔覆层的宽度随着扫描速度的增加而减小。

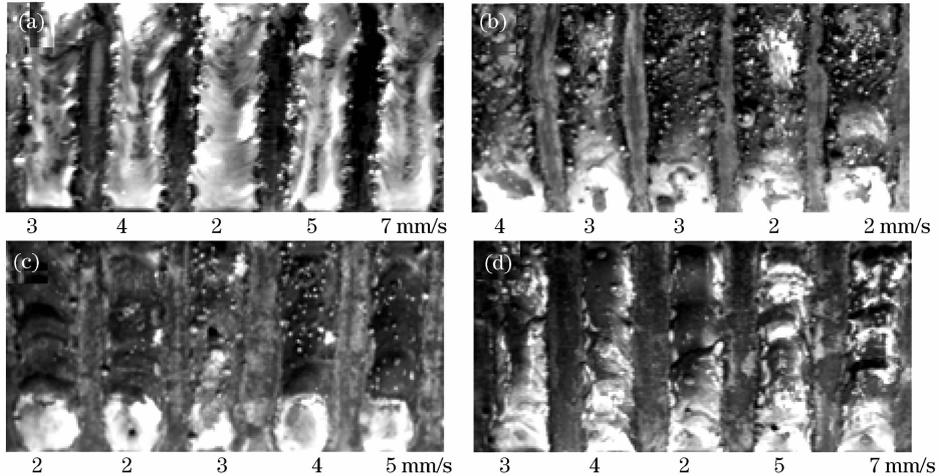


图1 激光熔覆层的表面形貌(激光功率  $P=2.0$  kW, 光斑直径  $D=3$  mm)

(a) Ni60; (b) Ni60+5% h-BN; (c) Ni60+10% h-BN; (d) Ni60+15% h-BN

Fig. 1 Surface morphologies of laser cladding coatings ( $P=2.0$  kW,  $D=3$  mm)

(a) Ni60; (b) Ni60+5% h-BN; (c) Ni60+10% h-BN; (d) Ni60+15% h-BN

#### 3.2 显微组织

Ni60 和 Ni60+h-BN 熔覆层的 XRD 图谱如图2所示。Ni60 熔覆层主要由  $\gamma$ -Ni 固溶体,  $\text{Ni}_2\text{B}$ , CrB 和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  等物相组成。Ni60+5% h-BN 熔覆层主要由  $\gamma$ -Ni, h-BN, CrB,  $\text{Cr}_2\text{N}$  和  $\text{Ni}_2\text{B}$  组成, Ni60+10% h-BN 和 Ni60+15% h-BN 熔覆层都含有  $\gamma$ -Ni, h-BN, CrB,  $\text{Cr}_2\text{N}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$  和  $\text{Ni}_2\text{B}$  相。Ni60+h-BN涂

层中硼化物 CrB 的衍射峰相对值明显大于 Ni60 熔覆层, 出现新相如  $\text{Cr}_2\text{N}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$  等, 而未发现碳化物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  的衍射峰, 这是由于在激光熔覆过程中, 部分 h-BN 溶解, B, N 有较强亲和力, 与 Cr 和 Ni 元素结合产生  $\text{Cr}_2\text{N}$ , CrB 和  $\text{Ni}_3\text{B}$  等相, 同时抑制了  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  的析出。

图3给出激光熔覆工艺参数为激光功率  $P=2$  kW, 光斑直径  $D=3$  mm 时, Ni60 涂层和 Ni+h-BN 熔覆层上部与下部的 OM 照片。激光扫描速度  $V=3$  mm/s 时, Ni60 激光熔覆层中发现树枝晶相和块状相均匀分布在  $\gamma$ -Ni 的固溶体上, 涂层的结合区的底部为一平面晶区, 厚度为  $3\sim 4$   $\mu\text{m}$ 。结合区的结晶形态与激光熔池中成分过冷的分布密切相关, 在激光熔池的底部, 基底的温度较低, 因此温度梯度较大, 同时此处的结晶速度又小, 故成分过冷接近于零, 所以平面晶得到发展。Ni60+5% h-BN 熔覆层的组织均匀(扫描速度  $V=2$  mm/s), 主要是条状相和少量块状相分布在  $\gamma$ -Ni 基体上, 上部[图3(c)]条状相方向杂乱, 下部[图3(d)]条状相呈快速定向凝固特征, 逆热流方向生长。在涂层与基底界面处有

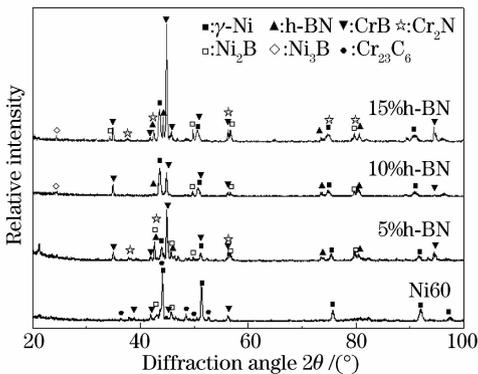


图2 Ni60 和 Ni60+h-BN 熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD analysis results of the laser cladding Ni60 and Ni+h-BN coatings

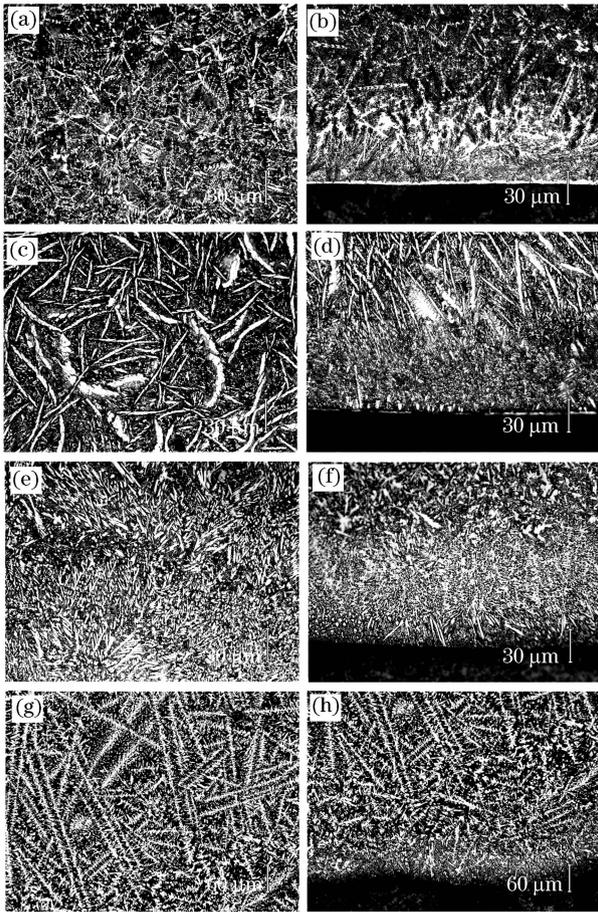


图3 Ni60和Ni60+h-BN涂层的上部和下部形貌( $P=2\text{ kW}$ ,  $D=3\text{ mm}$ )。 (a), (b) Ni60 ( $V=3\text{ mm/s}$ ); (c), (d) Ni60+5% h-BN ( $V=2\text{ mm/s}$ ); (e), (f) Ni60+10% h-BN ( $V=5\text{ mm/s}$ ); (g), (h) Ni60+15% h-BN ( $V=3\text{ mm/s}$ )

Fig. 3 Microstructure of the laser cladding Ni60 and Ni60+h-BN coatings on the top and bottom ( $P=2\text{ kW}$ ,  $D=3\text{ mm}$ ). (a), (b) Ni60 ( $V=3\text{ mm/s}$ ); (c), (d) Ni60+5% h-BN ( $V=2\text{ mm/s}$ ); (e), (f) Ni60+10% h-BN ( $V=5\text{ mm/s}$ ); (g), (h) Ni60+15% h-BN ( $V=3\text{ mm/s}$ )

一狭窄的白亮带,其组织为由基体外延生长的平面晶,在平面晶区上方为柱状晶区[如图3(d)所示]。从图3(e)可以看出Ni60+10%h-BN熔覆层的组织主要是细小的杆状相分布在基体上(扫描速度 $V=5\text{ mm/s}$ )。而Ni60+15%h-BN(扫描速度 $V=3\text{ mm/s}$ )涂层主要是细小的板条状相交织形成类树枝晶,如图3(g)所示。随着h-BN含量的增加,涂层组织形态和尺寸发生变化,分析认为主要原因为:1) h-BN的熔点比Ni60合金粉末的熔点高很多,在激光熔覆过程中Ni60合金粉末首先熔化,h-BN颗粒向周围合金溶液溶解吸收热量,致使h-BN颗粒周围

产生一个相对低温区,这就为结晶提供了成分起伏和温度起伏条件,增加了异质形核率,有利于组织细化;2) 随着h-BN含量的增加,在熔池中未熔化的h-BN数量增加,导致熔池流动性减弱,熔池中各元素不能充分混合再分布,而只能进行短距离的结合,一些亲和力强的元素形成化合物相互交错堆积形成类树枝晶;3) 在激光功率和光斑直径一定的条件下,冷却速度与扫描速度成正比。当扫描速度 $V=2\text{ mm/s}$ 时,Ni60+5%h-BN熔覆层辐照时间长,冷却速度小,晶粒有时间长大,形成粗大的条状和块状相;而扫描速度 $V=5\text{ mm/s}$ 时,冷却速度大,Ni60+10%h-BN熔覆层中颗粒来不及充分长大,形成短小的杆状相。从图3(d), (f)和(h)可以看出Ni+h-BN涂层与基底之间结合良好,没有裂纹和孔洞存在。由于Ni60+10%h-BN和Ni60+15%h-BN涂层的结合区腐蚀过大,无法观察熔覆层与基底在激光束作用下交互扩散面形成平面晶区。

图4是Ni60和Ni60+h-BN涂层的高倍SEM照片。从图4(a)可以看到Ni60涂层中存在树枝晶相和块状相,对其进行EDS分析发现树枝晶相主要成分是Cr和C,块状相主要成分是Cr和B,结合XRD结果可以判定针状相和树枝晶相是 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 相,块状相为CrB相。Ni60+5%h-BN涂层[见图4

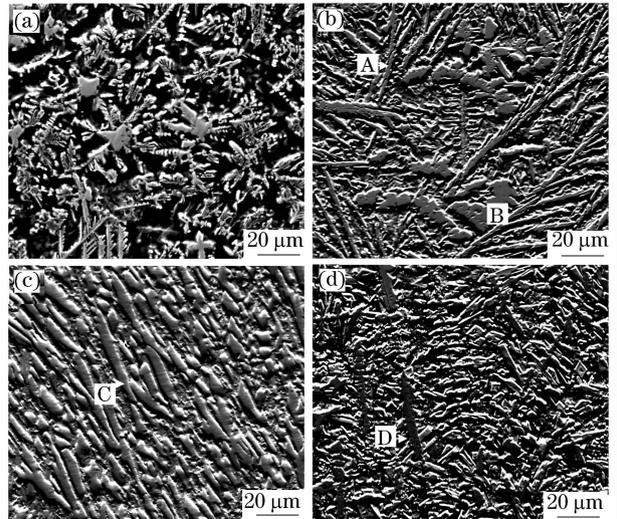


图4 Ni60和Ni60+h-BN涂层的SEM照片( $P=2\text{ kW}$ ,  $D=3\text{ mm}$ )。 (a) Ni60 ( $V=3\text{ mm/s}$ ); (b) Ni60+5% h-BN ( $V=2\text{ mm/s}$ ); (c) Ni60+10% h-BN ( $V=5\text{ mm/s}$ ); (d) Ni60+15% h-BN ( $V=3\text{ mm/s}$ )

Fig. 4 SEM micrograph of four kinds of Ni60 and Ni60+h-BN coatings ( $P=2\text{ kW}$ ,  $D=3\text{ mm}$ ). (a) Ni60 ( $V=3\text{ mm/s}$ ); (b) Ni60+5% h-BN ( $V=2\text{ mm/s}$ ); (c) Ni60+10% h-BN ( $V=5\text{ mm/s}$ ); (d) Ni60+15% h-BN ( $V=3\text{ mm/s}$ )

(b)]中条状相 A 富含 Cr, Ni, B 和 N 元素, 推测为 Cr<sub>2</sub>N 和 CrB 包含未熔的 h-BN, 不规则块状相 B 富含 Cr 和 B 元素, 为 CrB 相。Ni60+10%h-BN[见图 4(c)]涂层中组织较为简单, 为短小的杆状相 C, 富

含 Cr 和 B 元素, 推测为 CrB。Ni60+15%h-BN涂层[见图 4(d)]板条状相独立或相互交错生成类树枝晶, 板条状相主要含有 Cr 和 B, 推测为 CrB。各物相 EDS 分析结果如表 2 所示。

表 2 Ni60+h-BN 涂层的 EDS 化学成分结果

Table 2 Element content of the components of Ni60+h-BN coating by EDS

Phases	Element mass fraction / %						
	C	B	N	Cr	Fe	Ni	Si
A	—	18.00	20.34	34.49	16.25	5.87	0.76
B	—	60.72	12.14	1.03	22.54	1.58	0.28
C	13.57	37.81	—	15.98	27.99	4.30	0.31
D	9.59	53.40	16.69	9.32	8.02	2.64	0.33

综上所述, 随着涂层中 h-BN 含量的增加, 增强相 CrB 的形态发生了由块状→短杆→类树枝晶的转变。CrB 形态发生变化主要与 h-BN 含量和冷却速度有关。初步分析认为: 在 h-BN 含量少(质量分数为 5%)、冷却速度小时, 增强相 CrB 晶粒充分长大, 成为块状; 当 h-BN 质量分数增加到 10%, 扫描速度  $V=5$  mm/s 时, 熔覆层的冷却速度快, CrB 晶粒来不及长大, 呈短杆状; 而熔池流动性弱的 Ni60+15%h-BN 涂层中板条状相交错堆积形成类树枝晶形态。

### 3.3 显微硬度

图 5 是 Ni60 和 Ni60+h-BN 涂层的显微硬度分布曲线。从图中可以看出, 纯 Ni60 涂层硬度要比加入 h-BN 的低, 并且涂层由表及里呈下降趋势。Ni60 涂层硬度基本分布在 500~680 HV<sub>0.2</sub> 之间。Ni+5%h-BN, Ni+10%h-BN, Ni+15%h-BN 涂层的显微硬度分别为 700~800 HV<sub>0.2</sub>, 800~1000 HV<sub>0.2</sub>, 800~1200 HV<sub>0.2</sub>, 依次增加, 最高约为基体硬度 280 HV<sub>0.2</sub> 的 4 倍。加入软质固体润滑相 h-BN 之后硬度反而增加, 这是由于熔覆层中部分 h-BN 与 Ni60 合金中的 Cr 元素发生反应, 生成 CrB, Cr<sub>2</sub>N, 这些

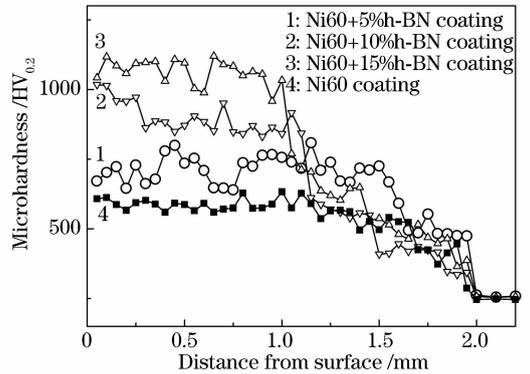


图 5 Ni60 和 Ni+h-BN 涂层的显微硬度曲线

Fig. 5 Microhardness profile of the laser cladding Ni60 and Ni+h-BN coatings

硬质相“横亘”或者交错分布在涂层中, 起到骨架的作用, 提高了涂层的硬度。而包覆在骨架中的 h-BN 起到润滑的作用。

### 3.4 摩擦磨损性能

图 6 显示了 Ni60 和 Ni60+h-BN 涂层不同载荷下摩擦系数与摩擦时间的关系曲线。在载荷  $F=49$  N, 磨轮转速  $n=200$  r/min 时, Ni+5%h-BN, Ni+10%h-BN, Ni+15%h-BN 涂层的摩擦系数分别在 0.36~0.43, 0.39~0.47, 0.39~0.43 之间波

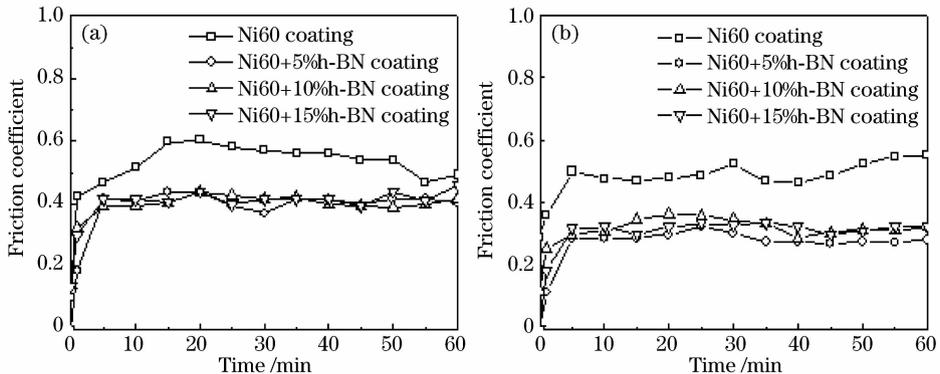


图 6 Ni60 和 Ni+h-BN 涂层的摩擦系数与摩擦时间的关系曲线。(a)  $F=49$  N; (b)  $F=98$  N

Fig. 6 Friction coefficient of the laser cladding Ni60 and Ni+h-BN coatings. (a)  $F=49$  N; (b)  $F=98$  N

动,如图 6(a)所示;而在载荷  $F=98\text{ N}$ ,磨轮转速  $n=200\text{ r/min}$ 时,  $\text{Ni}+5\%\text{ h-BN}$ ,  $\text{Ni}+10\%\text{ h-BN}$ ,  $\text{Ni}+15\%\text{ h-BN}$  涂层摩擦系数分别为  $0.27\sim 0.32$ ,  $0.25\sim 0.34$ ,  $0.30\sim 0.33$ ,如图 6(b)所示。可见  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 涂层的摩擦系数均小于  $\text{Ni60}$  涂层的摩擦系数,且在相同摩擦磨损实验条件下 3 种  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 涂层的摩擦系数相差不大,受  $\text{h-BN}$ 含量的影响甚微。转速一定时,随着载荷的增加,摩擦系数均有减小的趋势。这可能是由于载荷增加后,涂层与摩擦副之间的接触面更加贴合,涂层内具有润滑性能的  $\text{h-BN}$ 颗粒被挤压出,并转移到对偶面上,在摩擦表面形成固体转移膜,从而减低了涂层的摩擦系数。磨损测试结果表明在载荷  $F=49\text{ N}$ ,磨轮转速  $n=200\text{ r/min}$ 摩擦磨损条件下,  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 涂层的磨损失重量均小于  $\text{Ni60}$  涂层,其中  $\text{Ni60}+10\%\text{ h-BN}$ 涂层的磨损失重量最小,约为基体磨损失重量的  $6\%$ ,如图 7 所示。这是由于涂层中的  $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{N}$  等强化相在磨损过程中承担了主要的载荷,强化了基体,降低了磨损。

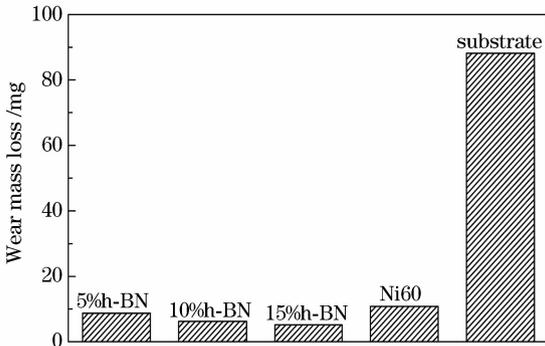


图 7  $\text{Ni60}$  和  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 涂层的磨损失重量

Fig. 7 Wear mass loss of the laser cladding  $\text{Ni60}$  and  $\text{Ni}+\text{h-BN}$  coatings

## 4 结 论

在  $\text{H13}$  钢表面激光熔覆  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 体系粉末,制备了硬度高摩擦磨损性能良好的自润滑复合涂层。 $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 复合涂层的组织与  $\text{h-BN}$ 含量密切相关,  $\text{Ni}+5\%\text{ h-BN}$ 涂层组织由条状  $\text{Cr}_2\text{N}$ 相、不规则块状  $\text{CrB}$ 相组成,  $\text{Ni60}+10\%\text{ h-BN}$ 涂层组织为短小的杆状  $\text{CrB}$ 相,  $\text{Ni60}+15\%\text{ h-BN}$ 涂层中  $\text{CrB}$ 相呈板条状独立或相互交错生成类树枝晶。随着涂层中  $\text{h-BN}$ 含量的增加,  $\text{h-BN}$ 与合金元素发生反应生成的增强相  $\text{CrB}$ 形态发生块状 $\rightarrow$ 短杆 $\rightarrow$ 类树枝晶的转变。起到骨架作用的增强相提高了  $\text{Ni}+\text{h-BN}$ 复合涂层的硬度(最高硬度为  $1200\text{ HV}_{0.2}$ ),使涂层具

有良好的耐磨性。包覆在骨架中的  $\text{h-BN}$ 起到润滑的作用,减小了涂层的摩擦系数,其最小摩擦系数为  $0.27\sim 0.32$ ,最小磨损失重量约为基体的  $6\%$ 。

## 参 考 文 献

- Jyotsna DuttaMajumdar, Lin Li. Development of titanium boride (TiB) dispersed titanium (Ti) matrix composite by direct laser cladding [J]. *Mater. Lett.*, 2010, **64**(9):1010~1012
- Yuling Yang, Duo Zhang, Wei Yan *et al.*. Microstructure and wear properties of TiCN/Ti coatings on titanium alloy by laser cladding [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2010, **48**(1):119~124
- J. J. Candel, V. Amigó, J. A. Ramos *et al.*. Sliding wear resistance of TiCp reinforced titanium composite coating produced by laser cladding [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, **204**(20):3161~3166
- Ma Xingwei, Jin Zhuji, Gao Yuzhou. Effect of rare earth  $\text{La}_2\text{O}_3$  on microstructure and tribological property of laser cladding FeAl based alloys and TiC reinforced composites coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):271~276  
马兴伟,金洙吉,高玉周. 稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  对激光熔覆铁铝基合金及 TiC 增强复合材料涂层组织及摩擦磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(1):271~276
- Peng Chengzhang. Influence of  $\text{La}_2\text{O}_3$  on microstructure and performance of laser cladding Ni-based nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite coatings [J]. *Laser Journal*, 2010, **31**(4):43~45  
彭成章.  $\text{La}_2\text{O}_3$  对激光熔覆镍基纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层组织和性能的影响[J]. 激光杂志, 2010, **31**(4):43~45
- Zhang Xianhu, Chao Mingju, Liang Erjun *et al.*. In-situ synthesis of TiC-ZrC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):998~1004  
张现虎,晁明举,梁二军等. 激光熔覆原位生成 TiC-ZrC 颗粒增强镍基复合涂层[J]. 中国激光, 2009, **36**(4):998~1004
- Yang Jiaoxi, Liu Huadong, Ding Xiao *et al.*. Microstructure and dry sliding wear behavior of  $\text{MoS}_2/\text{Ni}$ -based solid self-lubrication coatings prepared by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2010, **35**(8):22~26  
杨胶溪,刘华东,丁 啸等. 激光熔覆制备  $\text{MoS}_2/\text{Ni}$  基自润滑复合涂层组织及磨损性能[J]. 金属热处理, 2010, **35**(8):22~26
- Chen Zheyuan, Xu Jiang, Liu Wenjin *et al.*. Study on microstructure and wear behaviors of  $\text{MoS}_2/\text{TiC}/\text{Ni}$  composite wear-resistant coating by laser cladding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, **28**(Suppl.):253~258  
陈哲源,徐 江,刘文今等. 激光熔覆  $\text{MoS}_2/\text{TiC}/\text{Ni}$  减摩耐磨复合涂层组织及磨损性能的研究[J]. 材料热处理学报, 2007, **28**(增刊):253~258
- Zhang Xiaofeng, Wang Aihua, Zhang Xianglin *et al.*. Microstructure and tribological properties of laser cladding  $\text{Ni45-CaF}_2\text{-WS}_2$  self-lubrication coating [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, **18**(2):215~220  
章小峰,王爱华,张祥林等. 激光熔覆  $\text{Ni45-CaF}_2\text{-WS}_2$  自润滑涂层组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, **18**(2):215~220
- Zhang Xiaofeng, Wang Aihua, Zhang Xianglin *et al.*. Microstructure and properties of laser clad nano-Ni-encapsulated  $\text{h-BN}/\text{CaF}_2$  composite coating [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2009, **37**(1):9~13  
章小峰,王爱华,张祥林等. 激光熔覆 Ni 基纳米 Ni 包  $\text{h-BN}/\text{CaF}_2$  涂层组织性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(1):9~13
- Feng Yan, Wang Richu, Yu Kun. Analyses of frictional wear mechanics of Ni-Cr/BN self-lubricating composites [J]. *Rare*

- Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(10):1820~1823
- 冯 艳,王日初,余 琨. Ni-Cr/BN自润滑材料摩擦磨损机理分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, **36**(10):1820~1823
- 12 L. Avril, B. Courant, J. J. Hantzpergue. Tribological performance of  $\alpha$ -Fe (Cr)-Fe<sub>2</sub>B-FeB and  $\alpha$ -Fe (Cr)-h-BN coatings obtained by laser melting [J]. *Wear*, 2006, **260**(4-5):351~360
- 13 Katoh Takahiro, Sakamoto Tohru, Kakunai Satoshi *et al.*. Effect of laser processing conditions on wear life of laser clad graphite/boron nitride layers [J]. *J. Jpn. Soc. Tribologists*, 2002, **47**(3):215~223
- 14 G. H. Shehata, A. M. A. Moussa, P. A. Molian. Nd:YAG laser alloying of high-speed steel tools with BN and Ti/BN and the effects on turning performance [J]. *Wear*, 1993, **170**(2): 199~210
- 15 Zhang Shitang, Zhou Jiansong, Guo Baogang. Friction and wear behavior of laser cladding Ni/hBN self-lubricating composite coating [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2008, **491**(1-2):47~54