

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0060-06

# ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 对镍基合金激光熔覆层的影响

王文丽, 周笑薇, 晁明举, 王 征, 阮宜斌

(郑州大学物理工程学院 材料物理教育部重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要** 采用激光熔覆技术, 在 A3 钢表面进行了 Ni60 合金粉末添加 ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 的熔覆实验。使用金相显微镜、扫描电镜、电子能谱和 X 射线衍射仪对熔覆层进行了显微组织和物相分析, 讨论了 ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 加入量对熔覆层组织、裂纹敏感性的影响, 并测试了涂层硬度及摩擦性能。结果表明, 通过对工艺参数及 ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 含量的优选, 可以获得无裂纹、无气孔且与基底呈冶金结合、质量良好的熔覆层, 其组织为  $\text{BMo}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  的共晶体分布在  $\gamma$ -Ni 固溶体基体中。与纯 Ni60 熔覆层相比, 虽然其硬度稍有降低, 但耐磨性却有较大提高, 因而适量 ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 的加入能抑制涂层中块状 CrB 脆性相的产生, 形成细小的网状共晶体, 使得涂层组织均匀细化, 且韧性成分提高, 从而涂层的韧性提高、裂纹敏感性降低。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 显微组织; 裂纹敏感性; 耐磨性

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A

## Effect of ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) on the Microstructure and Properties of Nickel-Based Composite Coatings

WANG Wen-li, ZHOU Xiao-wei, CHAO Ming-ju, WANG Zheng, RUAN Yi-bin

(Department of Physics and Key Lab. of Material Physics of Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract** The experiments of laser-clad nickel-based alloy powder doped with ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) were carried out on steel A3 substrate. The microstructural and metallographic analyses were performed by a scanning electron microscopy, energy-dispersive spectrometer and X-ray diffractometer. Effect of content of ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ )-doping on the cracking susceptibility and the microstructure of Ni-based composite coatings has been analysed. The hardness and wear-resistance of the coatings were also studied. It is shown that good finish and crack- and porosity-free coatings can be achieved under a proper amount of ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ )-doping and a suitable processing technique, and that a strong metallurgical bonding is presented between the coating and the substrate. Both the cracking sensitivity and the wear resistance are considerably improved at the little expense of a decrease in hardness. This can be attributed to the refinement of the microstructure both in grain sizes and their homogeneous distribution in the coatings. The microstructural and metallographic analyses suggest the composite coating consists of the eutectic composed of  $\text{BMo}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  and  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  dispersed in the  $\gamma(\text{Cr-Ni-Fe-C})$  matrix. Thus, it can be concluded that the refinement in microstructure is due to both an increase in number of nucleation sites by the formation of  $\text{BMo}_2\text{C}$  in the melting pool and an impediment to the growth of larger brittleness phase CrB by the ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ )-doping.

**Key words** laser technique; laser cladding; microstructure; wear resistance; cracking susceptibility

## 1 引 言

改善熔覆层的组织, 提高熔覆层的性能, 一直是材料工作者努力的目标<sup>[1]</sup>。激光熔覆可在普通金属

材料表面获得热影响区小、稀释率低、组织细密、界面为冶金结合的合金涂层<sup>[2]</sup>。在众多的熔覆材料中, 镍基自熔性合金粉末以其良好的耐磨性、润湿

**基金项目:** 河南省高校青年骨干教师资助计划项目基金(2002-218)和河南省教育厅自然科学研究计划(2006140009)基金资助课题。

**作者简介:** 王文丽(1980—), 女, 河南柘城人, 硕士研究生, 主要从事激光表面改性技术的研究。E-mail: wwli966@tom.com

**导师简介:** 晁明举(1964—), 男, 河南泌阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用和激光加工技术的研究。

E-mail: chaomingju@zzu.edu.cn

性、高温自润滑性以及适中的价格在激光熔覆中有着广泛的应用<sup>[2,3]</sup>。由于该合金与基体材料的热物理性能差异及熔覆过程中快速凝固形成的较高应力,在其熔覆层容易形成裂纹<sup>[4]</sup>。虽然基体的适度预热及控制冷却速度等手段可减小熔覆层应力,防止熔覆层开裂,但增加了激光熔覆工艺的工序,提高了加工成本,降低了生产效率。不少研究表明,在合金粉末中加入适量的稀土元素或氧化物可以改善熔覆层组织和性能,降低裂纹敏感性<sup>[5]</sup>。本文选择(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)作为抑制剂,研究抑制剂加入量对镍基硬质合金熔覆层裂纹敏感性、组织、晶粒和性能的影响。在无预热和后处理条件下,采用预涂法在A3钢表面进行单道熔覆和多道搭接熔覆,可有效避免裂纹的产生,改善涂层性能。

## 2 材料及方法

### 2.1 材料

实验用基材为A3钢,其化学成分(质量百分数)为:C(0.14~0.22),Si(0.12~0.30),Mn(0.40~0.65),P(≤0.04),S(≤0.055),其余为Fe,试样尺寸为100 mm×35 mm×20 mm。实验前将待涂敷面用砂纸打磨并用丙酮清洗干净,熔覆粉末为Ni60+(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)混合粉末。Ni60合金粉末成分(质量百分数):C(0.8~1.0),Si(3.5~5.5),B(3~4.5),Cr(16),Fe(<10),粒度-150~+320目,MoO<sub>3</sub>为分析纯,纯度质量百分比为99.5%,B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为高纯试剂,纯度质量百分比为99.99%。Ni60+(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)中MoO<sub>3</sub>和B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末固定摩尔比4:1,二者的总加入量的质量百分数分别为5%,10%,15%和20%,将配制好的合金粉末在QM-ISPO4行星磨中研磨均匀,用特制的粘结剂将混合粉末预涂在清洗干净的试样表面上,预涂厚度约1 mm,在室温下自然晾干。

### 2.2 方法

采用的激光器为TJ-HL-5000横流连续CO<sub>2</sub>激光器,工作模式为多模。使用焦长300 mm的GaAs透镜变换光束。以聚焦光束垂直入射样品表面,对预涂层进行单道和多道搭接激光熔覆。工艺参数:固定扫描速率2 mm/s和离焦量50 mm(光斑直径约5 mm),激光功率分别为1.2 kW,1.4 kW,1.6 kW和1.8 kW,对应比能线密度分别为 $1.2 \times 10^8$  J/m<sup>2</sup>, $1.4 \times 10^8$  J/m<sup>2</sup>, $1.6 \times 10^8$  J/m<sup>2</sup>和 $1.8 \times 10^8$  J/m<sup>2</sup>。

采用渗透法对熔覆后的试样进行裂纹检测,用

DPT-5着色渗透探伤剂显示裂纹的分布。将试样沿垂直于扫描方向线切割,横断面用砂纸打磨并抛光,用HF+HNO<sub>3</sub>溶液腐蚀。在4XB-TV金相显微镜和JSM-6700F扫描电镜下观察显微组织,利用扫描电镜附件Inca Energy能谱仪拍摄能量散射光谱(EDS)图谱,进行成分分析。在HXD-1000显微硬度仪上测试硬度,利用D/MAX-3B型转靶X射线衍射仪分析涂层的相构成。在MRH-3高速环块磨损试验机上进行摩擦试验。上试样12 mm×12 mm×19 mm,摩擦面(熔覆面)尺寸12 mm×19 mm,下试样为标准环(GCr15),硬度HRC60.5。滑动速度322 rev/min,法向载荷为200 N和300 N,持续时间分别为300 s,600 s和900 s,大气室温无润滑滑动摩擦。使用电子分析天平(精度0.1 mg)称量试块摩擦前后质量,计算摩擦磨损失重。

## 3 结果与分析

### 3.1 熔覆层形貌

对(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)加入量的质量百分比分别为0%,5%,10%,15%和20%,激光功率分别为1.2 kW,1.4 kW,1.6 kW和1.8 kW的各熔覆试样,采用着色法检测熔覆道表面裂纹,用显微镜观察其横断面和熔覆层内部微观裂纹。实验发现,纯Ni60熔覆道表面光滑,但表面均有宏观裂纹出现,且横断面内出现不少微观裂纹,熔覆层与基材界面处有气孔。而加入(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的熔覆道均连续光滑成形,与纯Ni60熔覆道相比,其表面宏观裂纹较少,随(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)含量的增加,其表面宏观裂纹逐渐减少,且当(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)加入量的质量百分比为15%时,表面宏观裂纹完全消除,如图1所示,从左向右,各熔覆道对应的激光功率分别为1.2 kW,1.4 kW,1.6 kW和1.8 kW,最右边为1.6 kW下多道搭接情形。无论是单道还是多道搭

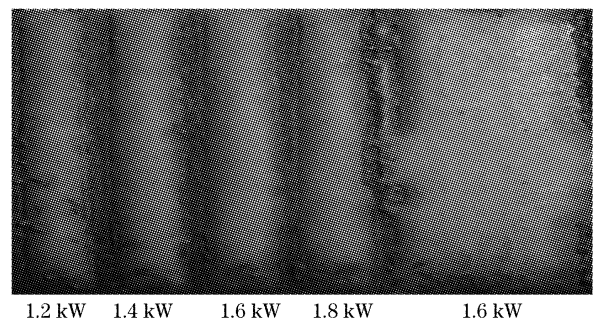


图1 Ni60+15%(质量百分比)(MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)熔覆层形貌  
Fig. 1 Morphology of Ni60+15wt.-% (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) coatings

接,均无裂纹出现,且表面成形良好光滑。在显微镜下观察其横断面,微观裂纹很少甚至消失,界面处仅有个别地方出现很少的小气孔。

由图 1 可知,当激光功率为 1.6 kW 时,熔覆层表面形貌最好,显微镜下观察相应熔覆道横断面的微观裂纹情况,其结果与表面形貌一致。这说明加入适量( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ )和采用合适的工艺参数,可以有效降低激光熔覆层的裂纹敏感性,抑制裂纹的产生。

### 3.2 显微组织

图 2 为在激光功率 1.6 kW,扫描速率 2 mm/s 时, $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$  (质量百分数为 15%) 激光熔覆层的 X 射线衍射(XRD)图谱,熔覆层组织主要由  $\gamma$  奥氏体,  $\text{BMo}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  等相构成。结果说明在激光熔覆  $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$  过程中, ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 的加入产生了新的  $\text{BMo}_2\text{C}$  相。

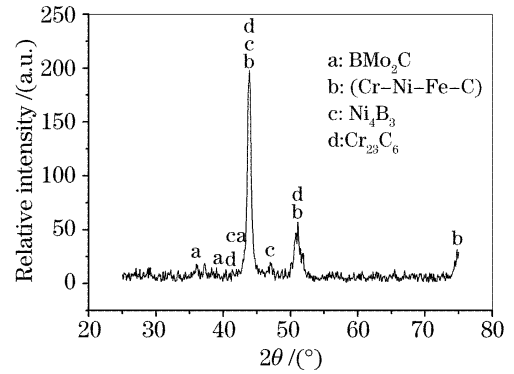


图 2  $\text{Ni60} + 15\%$  (质量百分比) ( $\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) 熔覆层的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction spectra of the clad layer of  $\text{Ni60} + 15\text{wt.}\% (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$

图 3 为该试样涂层底部、中部和上部的扫描电镜(SEM)图像。在试样的横断面上,由表及里可分为:熔覆层(CL)、界面(BZ)和基体热影响区(HAZ)。

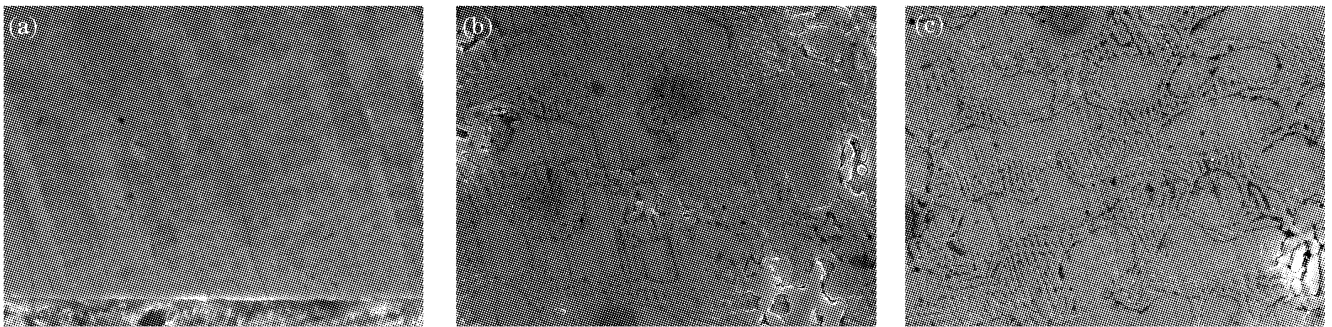


图 3  $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$  熔覆层的扫描电镜图像。(a) 底部, (b) 中部, (c) 上部

Fig. 3 SEM micrograph of zone in the clad layer of  $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$ . (a) Lower, (b) middle, (c) upper

由图 3 可以看出,熔覆层的显微组织在中上部为细小的树枝晶,呈现树枝晶结构特征;在靠近冶金结合带的地方为较大的柱状或胞状晶垂直界面生长,呈现快速凝固的定向生长组织特征;在熔覆层与基体连接的地方,呈现出平面晶,这是由于基体元素的渗入,覆层材料和基体材料形成了一条牢固的熔化冶金结合层,在图 3(a)中呈现为一条狭窄的白亮带<sup>[5~8]</sup>;同时,靠近熔覆层的基体由于受到快速加热和冷却作用,形成了一定范围的热影响区,其温度达到甚至超过 A3 钢的相变温度,发生相变硬化,其组织为淬火态和回火态组织<sup>[7,8]</sup>。

图 4 为涂层中上部放大 3000× 的扫描电镜图像。其组织为细小的树枝晶,主要由两部分组成:网状相和卵状相。表 1 为对应图 4 中两种相的能量散射光谱成分分析。由表 1 中的光谱 1, 4, 图 4 中网状相主要含有 Mo, Fe, Ni 和 Cr, 结合 X 射线衍射分析可知,网状相应为  $\text{BMo}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  的共

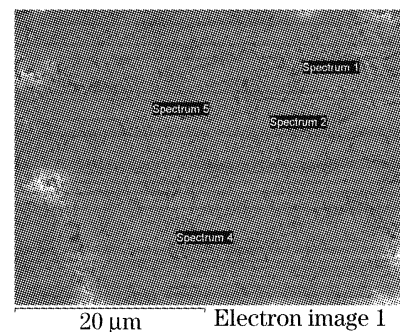


图 4  $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$  熔覆层中部和上部扫描电镜图像

Fig. 4 Typical SEM micrograph of  $\text{Ni60} + (\text{MoO}_3 + \text{B}_2\text{O}_3)$  coatings

晶体,是涂层的主要强化相。由表 1 中的光谱 2, 5, 图 4 中卵状相富含 Fe, Ni 和 X 射线衍射分析可知,卵状相应为  $\gamma(\text{Cr-Ni-Fe-C})$  固溶体,是涂层的基体。由于能量散射光谱对元素 B 的探测不敏感,因此在表 1 中没有显示 B 的含量。

因此, Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (质量百分数 15%) 激光熔覆层中上部组织为 BMo<sub>2</sub>C, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> 的网状共晶体分布在  $\gamma$ (Cr-Ni-Fe-C) 基体中, 组织均匀、细小。而靠近界面的底部组织主要为定向生长的树枝晶结构。

表 1 能量散射光谱成分分析(单位:质量百分比)

Table 1 Composition by EDS investigation (wt.-%)

	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 4	Spectrum 5
C	3.97	2.24	5.17	2.96
Si	1.81	2.14	1.27	2.05
Cr	11.97	9.05	14.56	8.48
Fe	34.14	39.13	32.37	38.51
Ni	35.93	44.76	31.76	44.57
Mo	12.19	2.69	14.86	3.42
total	100.00	100.00	100.00	100.00

由凝固理论可知, 温度梯度与凝固速率的比值  $G/R$  决定了凝固组织的形貌, 冷却速度  $dT/dt$  则决定显微组织的尺度; 在熔池底部, 由于温度梯度  $G$  最大, 凝固速率  $R$  最小, 凝固首先以无晶核的方式, 直接在基底上通过晶体外延附生的方式生长出一层平面晶, 它是熔池凝固时的固/液界面<sup>[8~10]</sup>, 随着固/液界面的推进, 液相温度梯度  $G$  逐渐减小, 结晶区前沿液相溶质原子再分配造成的成分过冷逐渐增大, 凝固速率  $R$  明显加快,  $G/R$  减小, 由于冷却速度快, 溶质原子来不及充分扩散, 凝固组织进而变为胞状晶、柱状晶和树枝晶。相对于一般熔凝组织, 激光熔覆过程的冷却速度显然较快, 所以组织较细。

在激光熔覆过程中, 熔池中的 MoO<sub>3</sub> 和 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会发生熔融分解, 溶解后的 Mo 和 B 元素固溶于合金熔体中, 一方面 Mo 有较强的阻止奥氏体晶粒长大的作用<sup>[9]</sup>, 使得熔覆层组织细化; 另一方面, Mo 固溶于熔覆层中, 能增加熔覆层的高温强度。溶解的 Mo 和 B 与合金中的元素结合, 熔体冷却时首先析出大量的初生 BMo<sub>2</sub>C, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> 的碳、硼化合物, 在熔液凝固时弥散析出, 大大提高了形核率, 起到均匀和细化晶粒的作用。由于 (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的加入, Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 熔覆层中不再出现粗大的枝状相和 CrB 块状相 (纯 Ni60 激光熔覆层普遍出现<sup>[11,12]</sup>), 其组织为细小的网状共晶体分布在  $\gamma$ (Cr-Ni-Fe-C) 固溶体基体中, 且韧性的  $\gamma$ (Cr-Ni-Fe-C) 固溶体的体积百分数有所增加。其原因在于, 熔体凝固时, B 与 Mo 优先形成 BMo<sub>2</sub>C, 使得熔体中的 B 含量降低, 从而抑制了块状 CrB 脆性相的大量形成; BMo<sub>2</sub>C, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> 的弥散

析出, 形成细小的网状共晶体, 因而熔覆层的组织均匀而致密, 韧性增加, 塑性提高, 裂纹敏感性降低。

### 3.3 显微硬度

图 5 是在激光功率为 1.6 kW 条件下, 纯 Ni60 和 Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (质量百分数 15%) 熔覆层横截面内沿层深方向的显微硬度分布曲线, 其硬度曲线均呈阶梯分布, 分别对应于 CL, BZ, HAZ 和基材。根据显微组织分析, 由于 (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的加入, 使得 Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 熔覆层中粗大块状相消失, 韧性相增加, 所以熔覆层的显微硬度比纯 Ni60 熔覆层的稍有降低。从接近界面的熔覆层底部到界面的区域为过渡区, 其成分主要为  $\gamma$ (Cr-Ni-Fe-C) 固溶体, 且由于基材对涂层的稀释作用, 过渡区中 Fe 成分较多, 因此从熔覆层底部到界面之间过渡区的硬度逐渐降低。在 HAZ, 从界面到基材内部区域, 温度呈梯度分布, 达到相变温度的区域发生相变硬化, 其硬度分布具备激光淬火的分布特征。随着距界面距离的增加, 硬度逐渐从淬火硬度降低到 A3 钢的原始硬度。

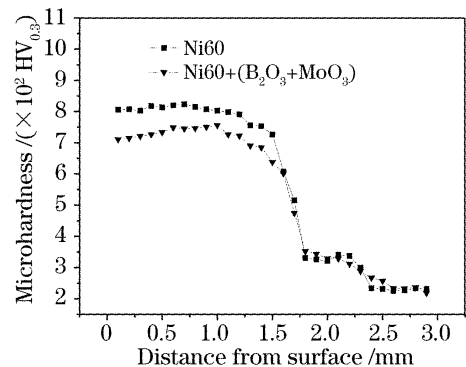


图 5 Ni60 + Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 和纯 Ni60 熔覆层显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution in the cross-section of Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and pure Ni60 coatings

### 3.4 摩擦试验

图 6 是在载荷 200 N, 300 N, 持续时间分别为 300 s, 600 s 和 900 s, 大气环境、干摩擦条件下, 纯 Ni60 熔覆层和 Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (质量百分数 15%) 熔覆层的摩擦磨损失重对比图。可以看出, 与纯 Ni60 熔覆层相比, Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 熔覆层的耐磨性均有较大提高。图 7 为纯 Ni60 覆层与 Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (质量百分数 15%) 熔覆层摩擦磨损表面形貌照片。可以看出: 纯 Ni60 覆层的磨损表面存在剥落坑和裂纹, 且有犁沟出现, 而 Ni60 + (MoO<sub>3</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 熔覆层无剥落坑和裂纹产生, 仅有极微小的犁沟和磨屑。这是因为纯 Ni60 覆

层组织在摩擦过程中,由于摩擦对偶环的连续切削及纯 Ni60 涂层中粗大的硬质脆性相在剪切应力的作用下,容易破碎而剥落,成为磨屑黏着在表面上,发生犁削和磨粒磨损<sup>[10,13]</sup>。Ni60+(MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)熔覆层由于主要以凝固时形成的钼和硼的碳化物及

其间细密的共晶组织组成,且碳化物均匀分布在细小的枝晶和共晶组织中,增强涂层组织间的结合力,从而有效地提高了熔覆层的耐磨性能。因此,磨损失重比纯 Ni60 熔覆层小得多,表现为良好的抗干滑动摩擦磨损能力。

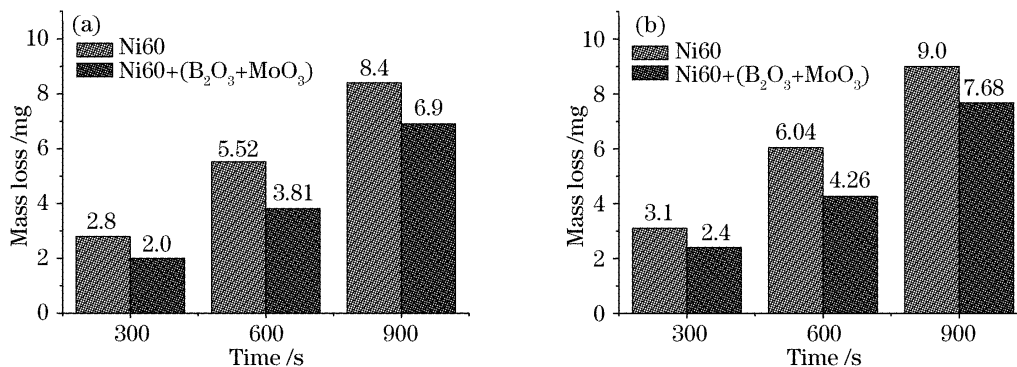


图 6 摩擦磨损失重。(a) 200 N; (b) 300 N

Fig. 6 Wear and tear mass loss of the specimens. (a) 200 N; (b) 300 N

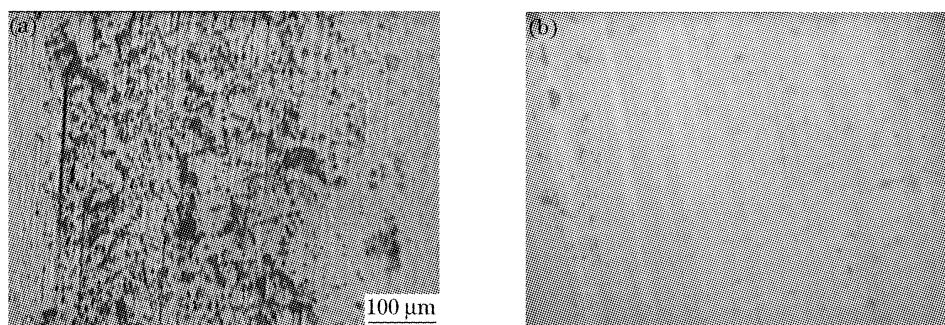


图 7 磨损表面形貌。(a) Ni60; (b) Ni60+15wt.-%(MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Fig. 7 Wear pattern of the specimens. (a) Ni60; (b) Ni60+15wt.-%(MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## 4 结 论

1) 在 Ni60 自熔性合金粉末中加入适当比例 MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在合适工艺条件下,可以得到无裂纹的光滑的激光熔覆层。

2) (MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的加入能够降低 Ni60 激光熔覆层裂纹敏感性的原因在于加入适当的 (MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)能够抑制粗大块状硬质相的生长,细化组织,提高涂层韧性。

3) 与纯 Ni60 熔覆层相比,加入适当比例 (MoO<sub>3</sub>+B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的镍基复合熔覆层,虽然硬度稍有降低,但其耐磨性明显提高。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yulin, Shen Dejiu, Liao Bo. Effect of rare earth on Ni-based spontaneous melting by laser cladding [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(3): 139~140,146  
王玉林,沈德久,廖波. 稀土在激光熔覆镍基自熔合金中的作用 [J]. *应用激光*, 2003, **23**(3): 139~140, 146
- 2 Ma Yunzhe, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Effect of CeO<sub>2</sub> on

- microstructure and performance of laser cladding Ni-based alloy coatings [J]. *China Surface Engineering*, 2006, **A19**(10): 7~11  
马运哲,董世运,徐滨士等. CeO<sub>2</sub>对激光熔覆 Ni 基金属涂层组织与性能的影响 [J]. *中国表面工程*, 2006, **A19**(10): 7~11
- 3 Chen Chuazhong, Bian Jie, Wang Diangang *et al.*. Effect cladding technology on microstructure of laser clad Ni60A coating [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(6): 381~384  
陈传忠,边洁,王佃刚等. 熔覆工艺对 Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响 [J]. *应用激光*, 2001, **21**(6): 381~384
- 4 Chao Mingju, Liang Erjun, Zhao Dong. Effect of TiO<sub>2</sub> on the laser cladding layers of Ni-based alloy on 45# steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **A30**(10): 947~952  
晁明举,梁二军,赵栋. TiO<sub>2</sub>对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的影响 [J]. *中国激光*, 2003, **A30**(10): 947~952
- 5 Qingmao Zhang, Jin Jiang, Liu He *et al.*. Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **162**: 140~146
- 6 Sen Yang, Na Chen, Wenjin Liu *et al.*. Fabrication of nickel composite coatings reinforced with TiC particles by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, **183**: 254~260
- 7 Si Songhua, Yuan Xiaomin, He Yizhu. Microstructure and properties of laser clad Ni-based metal-ceramics layers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 759~762  
斯松华,袁晓敏,何宜柱. 激光熔覆镍基金属陶瓷涂层的组织性能研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 759~762

- 8 Wei Lun, Chen Qinghua, Long Jinming *et al.*. Laser cladding in situ formed polyphase ceramic particle reinforced coating [J]. *Laser Technology*, 2002, **A26**(4): 246~249  
魏 仑,陈庆华,龙晋明等. 激光熔覆制备原位自生复相陶瓷颗粒增强涂层 [J]. *激光技术*, 2002, **A26**(4): 246~249
- 9 Zhao Pin. Basis of Materials Science [M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1999. 231  
赵 品. 材料科学基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 231
- 10 Liu Xiubo, Wang Huaming. Study on wear and high-temperature oxidation properties of laser clad metallic silicide composite coatings on TiAl inter metallic alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1143~1149  
刘秀波,王华明. TiAl合金激光熔覆金属硅化物复合材料涂层耐磨性和高温抗氧化性能研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1143~1149
- 11 Wang Dongsheng, Chao Mingju, Liang Erjun *et al.*. Investigation on cracking susceptibility of laser-clad V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/NiCrBSi coating [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 331~334  
王东升,晁明举,梁二军等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/NiCrBSi激光熔覆层开裂敏感性研究 [J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 331~334
- 12 Chao Mingju, Yang Kun, Yuan Bin *et al.*. Effect of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the properties of laser-clad nickel-based coatings [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **A26**(8): 27~30  
晁明举,杨 坤,袁 斌等. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对Ni60激光熔覆层的影响 [J]. *焊接学报*, 2005, **A26**(8): 27~30
- 13 Niu Xin, Chao Mingju, Zhou Xiaowei *et al.*. Research on in-situ synthesis of B<sub>4</sub>C particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1583~1588  
牛 薪,晁明举,周笑薇等. 激光熔覆原位生成B<sub>4</sub>C颗粒增强镍基复合涂层的研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1583~1588