

文章编号: 1004 - 0609(2006)09 - 1595 - 08

等离子熔覆 Mo/Ni 基合金涂层的组织结构及耐磨性能^①

侯清宇, 何宜柱, 高甲生

(安徽工业大学 材料科学与工程学院, 马鞍山 243002)

摘要: 应用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、透射电镜(TEM)以及滑动磨损实验, 研究不同 Mo 加入量对等离子熔覆镍基合金涂层组织结构和性能的影响。结果表明, 熔覆层主要是由面心立方结构的 γ (Ni, Fe) 固溶体、六方结构的 $M_7(C, B)_3$ 和四方结构的 Cr_2B 等物相构成, 在镍基固溶体中存在明显的成分偏析。Mo 的加入没有改变熔覆层的相结构, 但硼碳化物的相对含量却有所提高, 成分偏析逐渐减弱, 直至消失, 并且促进了等轴晶的形成。Mo 的加入可以提高熔覆层的耐磨性能, 当其加入量在 6% 以内时, 随着 Mo 加入量的提高, 熔覆层的耐磨性逐渐提高。但是, 当加入量达到 8% 时, 耐磨性能开始降低。

关键词: 等离子熔覆; 镍基合金; 钼; 组织结构; 耐磨性

中图分类号: TG 113.12; TG 456.2

文献标识码: A

Microstructure and wear resistance of Mo/Ni-based alloy coating produced by plasma cladding

HOU Qing-yu, HE Yi-zhu, GAO Jia-sheng

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology,
Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The effect of different Mo additions on the microstructure and wear resistance of the nickel-based alloy coating produced by plasma cladding was investigated using optical microscope, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscope (TEM), and sliding wear test. The results show that the γ (Ni, Fe) solid solution with a face-centered cubic crystal structure is presented accompanied by the $M_7(C, B)_3$ with a hexagonal crystal structure and Cr_2B with a tetragonal crystal structure in the nickel-based alloy coating. The obvious component segregation exists in the nickel-based solid solution. The addition of Mo does not change the phase composition, though the relative content of boride and carbide increases. Meanwhile, the component segregation decreases gradually then disappears finally with the increasing Mo content. The equiaxed crystals come into being in the Mo-modified coating. The addition of Mo increases the wear resistance. The wear resistance increases with the increasing Mo content when its content is lower than or equals to 6%. On the contrary, the wear resistance decreases again when the Mo content equals to 8%. The addition of Mo can homogenize the component, promote the formation of equiaxed crystals, and increase the relative quantity of boride and carbide. All these results are beneficial to increasing the wear resistance of the cladding coating.

Key words: plasma cladding; nickel-based alloy; Mo; microstructure; wear resistance

近年来, 随着对材料表面性能要求的提高, 人们采用诸如电弧和激光等表面改性技术来提高构件

的表面耐磨、耐蚀性能^[1-5]。在这些表面改性技术中, 等离子熔覆作为材料表面强化手段之一, 同传

① 基金项目: 安徽省高校青年教师科研资助项目(2006jq1082)

收稿日期: 2006-03-13; 修订日期: 2006-06-28

通讯作者: 侯清宇, 讲师; 电话: 0555-2312056; 传真: 0555-2311570; E-mail: hou_qingyu@yahoo.com.cn

统的堆焊方法以及激光熔敷相比，具有熔覆率高、成型性好、粉末适用范围广等突出优点。而镍基合金熔覆层由于具有良好的中、高温性能和耐磨、耐腐蚀性能，受到了人们的广泛关注^[6-11]。

众所周知，材料的表面性能取决于表面的化学成分、组织结构以及加工处理方式。一般来说，粗大的组织，其耐磨性较低^[6-9]。最近，Shin等^[12]在钴基斯太利合金中添加不同质量分数的Mo，并采用等离子熔覆的方式获得复合结构涂层，大大提高了熔覆构件的表面耐磨性能。该研究发现，添加Mo元素的钴基斯太利合金熔覆层中位于枝晶间的富Cr硼、碳化物相的尺寸减小，含量略有增加，并且细化了富Co固溶体的枝晶组织，所有这些改变都有利于熔覆层表面耐磨性能的提高。但到目前为止，还未见Mo元素在等离子熔覆镍基合金中应用的相关报道。可以预见的是，在镍基合金中添加Mo元素，采用等离子熔覆的方式制备复合结构涂层，将对涂层的组织结构及性能产生影响。本文作者研究了不同Mo加入量对镍基合金等离子熔覆层的组织结构和耐磨性能的影响，为Mo元素在等离子熔覆镍基合金中的应用提供了实验依据。

1 实验

将镍基自熔性合金粉末(Ni60，粒度为75~180 μm，熔化温度约为1373 K)与钼粉(纯度为99.5%，粒度约为80 μm)按一定的质量分数(4%~8% Mo)进行配置，把配置好的粉末放入玛瑙研钵中，充分搅拌，待均匀后放入120℃的烘干箱中烘烤2 h，取出待用。将烘干的合金粉末用等离子熔覆的方式熔覆在Q235A钢的表面(熔覆母材尺寸为200 mm×35 mm×20 mm)，形成等离子熔覆层。镍基合金粉末的化学成分如表1所列。

表1 镍基合金粉末的化学成分

Table 1 Composition of nickel-based alloy powder (mass fraction, %)

C	Si	B	Cr	Fe	Ni
0.8	4.5	4.5	15	20	Bal.

等离子熔覆实验是在L4-400PC型等离子熔覆机上进行的。工艺参数为：转移弧电流180~195 A，转移弧电压37~39 V，主气压力0.3 MPa，离子气流量0.5 m³/h，送粉气流量0.2 m³/h，送粉电压23~25 V，摆动电压18~22 V，行走电压18~20 V，冷却水压力3 MPa，喷距7 mm，焊枪摆幅

20 mm。

采用OLYMPUS-PME3型金相显微镜和PHILIPS扫描电镜对熔覆层显微组织进行观察分析，利用Rigaku D/max-IIIc型X射线衍射仪对熔覆层进行物相分析，加速电压为45 kV，管流为150 mA，采用Cu K_α靶。用H-800透射电镜对熔覆层的微结构进行观察分析。磨损实验是在MM-200滑动磨损试验机上进行的，载荷为49 N，转速为400 r/min，每1200 s测量一次摩损失重。采用失重法评定耐磨性的高低，称量是在感量为0.1 mg的FN2004电子天平上进行的，每种材料取3块试样的磨损平均值作为该材料的磨损值。

2 结果与讨论

2.1 X射线衍射

图1所示为熔覆层的X射线衍射谱。由图可知，熔覆层主要是由面心立方的γ(Ni, Fe)，六方

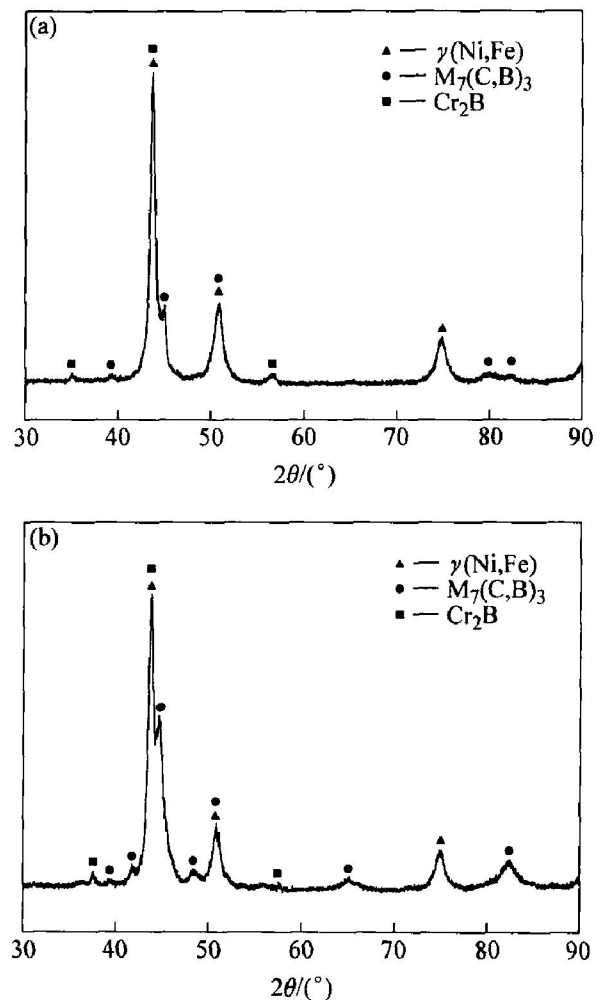


图1 等离子熔覆镍基合金涂层的X射线衍射谱
Fig. 1 XRD patterns of nickel-based alloy coatings produced by plasma cladding
(a) —Ni60; (b) —Ni60/6% Mo

结构的 $M_7(C, B)_3$ 和四方结构的 Cr_2B 等物相构成 ($M = Ni, Cr, Fe, Si, Mo$)。由 X 射线衍射谱还可以看出, 固溶体所对应的衍射峰的相对强度较高, 而硼、碳化物所对应的衍射峰的相对强度则较低。根据文献[13]可知, 由于等离子熔覆是一个快速加热和快速凝固过程, 在熔覆层中很容易出现择优取向, 从而使得先析出相固溶体的衍射峰明显, 而后析出的硼、碳化物所对应的衍射峰的相对强度就相应降低了。比较图 1(a) 和图 1(b) 可以看出, Mo 的加入并没有改变熔覆层的相组成, 只是 $M_7(C, B)_3$ 型硼、碳化物所对应的衍射峰的相对强度有所增强。这说明由于 Mo 的加入, 熔覆层中硼、碳化物的相对含量有所增加, 而固溶体相的相对含量则有所降低, 并且其择优取向性减弱^[12]。

根据文献[12]可知, Mo 的加入可以增加硼、碳化物的含量, 而且可以使枝晶变细, 从而使硼、碳化物所对应的衍射峰强度升高, 组织的择优取向性减弱。由于 Mo 是高熔点金属(2890 K), 在熔覆层凝固结晶过程中, 部分 Mo 首先从熔池中析出, 作为非自发形核的核心, 因此可以细化组织, 使组织的取向性减弱, 所以衍射谱的择优取向减弱。

2.2 熔覆合金层的组织特征

图 2 所示为镍基合金熔覆层的剖面显微组织。由图可见, 在熔覆层和基材之间有一条明显的白亮带, 有部分白亮带呈齿牙状伸入基材, 说明熔覆层和基材形成了良好的冶金结合^[11, 13]。比较图 2(a) 和(b) 可以看出, 添加 6% Mo 以后, 熔覆层与基材之间的结合情况没有发生明显变化, 但熔覆层组织却发生了变化。

为了更好地观察 Mo 的加入量对熔覆层组织的影响, 对熔覆层的中部组织进行了观察分析, 如图 3 所示。由图 3 可以清楚地看出, 没有添加 Mo 的熔覆层组织呈短杆状, 并且在上面分布有许多黑色块状组织, 由 SEM 和 TEM 高倍观察以及能谱分析结果可知, 这些黑色块状组织与基体组织成分相近, 说明在熔覆层中存在成分偏析。这是由于在本实验条件下, 熔覆合金粉末的熔化温度约为 1373 K, 尽管等离子弧温度很高, 但是熔覆冷却速度很快, 合金元素在熔池中来不及充分扩散, 导致熔覆层在随后的快速冷却过程中存在成分偏析。加入不同含量的 Mo 以后, 由于 Mo 的熔点远高于镍基合金粉末的熔化温度, Mo 的加入必将提高熔覆合金粉末的熔化温度, 因此熔覆层开始凝固结晶的温度也高于没有添加 Mo 的熔覆层, 从而使得合金元

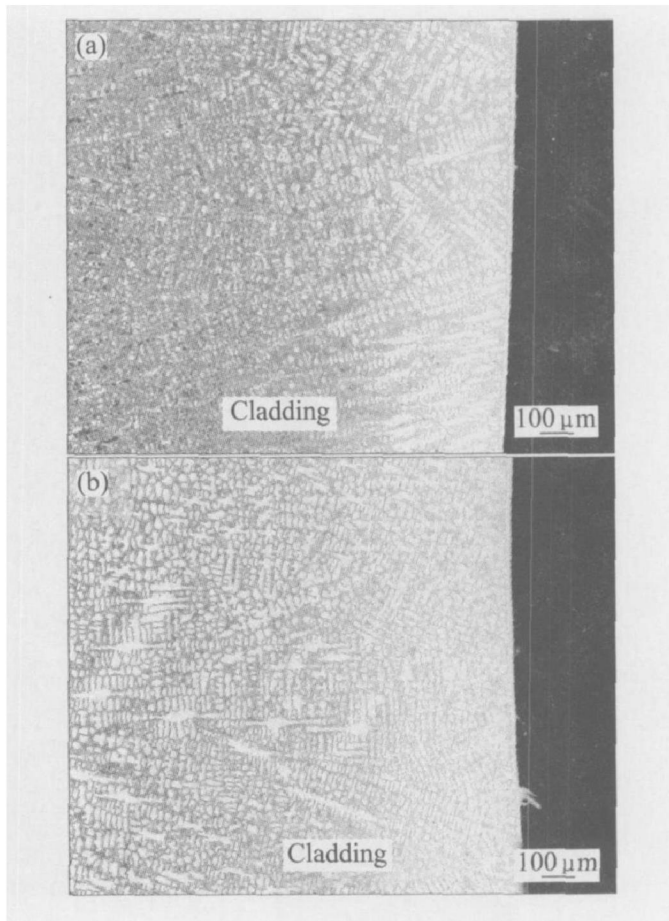


图 2 等离子熔覆层熔合区特征

Fig. 2 Characteristics of fusion zone for cladding coatings

(a) —Ni60; (b) —Ni60/6% Mo

素在更高的温度进行扩散重新分配。由于合金元素在高温时的扩散速度高于较低温度下的扩散速度, 所以添加 Mo 元素以后, 合金元素的扩散速度高于没有添加 Mo 元素的熔覆层, 从而使合金元素的分布更加均匀。随着 Mo 加入量的增加, 熔覆层的开始凝固温度也提高, 合金元素的扩散就越充分, 因此, 成分偏析逐渐减弱, 直至消失。

此外, 比较加入 Mo 元素前后的熔覆层组织还可以发现, Mo 元素的加入, 改变了熔覆层的组织形态, 并且 Mo 加入量越多, 熔覆层显微组织变化越明显, 其形态由原来的杆状逐渐向树枝状转变, 而且当 Mo 的加入量达到 6% 的时候, 在组织中出现了大量均匀分布的等轴晶; 加入量达到 8% 时, 熔覆层组织与 6% 加入量时相比没有发生明显变化。熔覆层在凝固过程中形成等轴晶是由于: 一方面, 因为熔池表面过冷度大, 最表面的过冷液体中首先析出的细小晶核, 在本身重力作用下下沉, 造成近表面的过冷液体中存在很多核心; 因熔池过冷, 液体的粘度较大, 对下沉的核心阻力较大, 下



图3 等离子熔覆层显微组织

Fig. 3 Microstructures of cladding coatings

(a) -Ni60; (b) -Ni60/4% Mo; (c) -Ni60/6% Mo; (d) -Ni60/8% Mo

沉的晶核遇到由熔池底部向上生长的树枝晶前沿，停止下沉，这些晶核附着在树枝晶的前沿继续生长并阻碍树枝晶的进一步长大，从而形成等轴晶；另一方面，过冷液体中析出的一些高熔点相质点 ($M_7(C, B)_3$ 和 Cr_2B) 可以作为非自发形核核心，提高形核率，也有助于等轴晶的形成。此外，由于 Mo 是高熔点金属，在熔覆层凝固结晶过程中，首先从熔池中析出，提供非自发形核核心，从而也有助于形核率的提高，促进等轴晶的形成。在以上几个因素的共同作用下，使得在熔覆层中形成了等轴晶。比较以上各因素对等轴晶形成的作用可以发现，高熔点 Mo 作为非自发形核核心是熔覆层形成等轴晶的主要因素。但是当 Mo 的加入量达到 8% 时，同加入 6% Mo 相比，熔覆层组织并没有发生明显变化，而且由后面的性能测试结果可知，这时熔覆层的耐磨性能与加入 6% Mo 相比不再提高，而是略有降低，说明 Mo 的加入量不是越多越好，而且加入量过多，可能造成熔覆合金粉末熔化温度提高过多，合金粉末的可熔覆性降低，冲淡率升高，并引起熔覆层质量下降，进而影响熔覆层的耐磨

性能。

图 4 所示为熔覆层的 SEM 二次电子形貌。由图可知，熔覆层主要由呈深色分布的 $\gamma(Ni, Fe)$ 基体 A，呈杆状或者网状分布的硼、碳化物 B，以及呈灰白色的岛状 C 所构成。比较图 4(a) 和图 4(b)~(d) 可以看出，随着 Mo 加入量的增加，熔覆层的组织变得越来越均匀，成分偏析逐渐减少，直至消失，而且共晶体的形态由杆状逐渐向网状转变。当 Mo 的加入量在 6% 以下时，随着 Mo 加入量的增加，硼、碳化物的量也增多，加入量达到 8% 时，硼、碳化物的量不再增加。

熔覆层的 EDS 分析结果如表 2 所示。可以看出，Mo 元素主要分布在网状硼、碳化物中，而在基体固溶体中则分布较少，这与文献[12]所报道的结果相同。此外，由表 2 还可以看出，无论是基体区还是硼、碳化物区的 Fe 元素相对含量都随着 Mo 加入量的增加而提高。这是由于随着 Mo 加入量的增加，熔覆层开始凝固的温度升高，合金元素更加容易扩散，从而有更多的 Fe 元素由熔覆母材扩散到熔覆层，引起熔覆层 Fe 元素含量的提高。

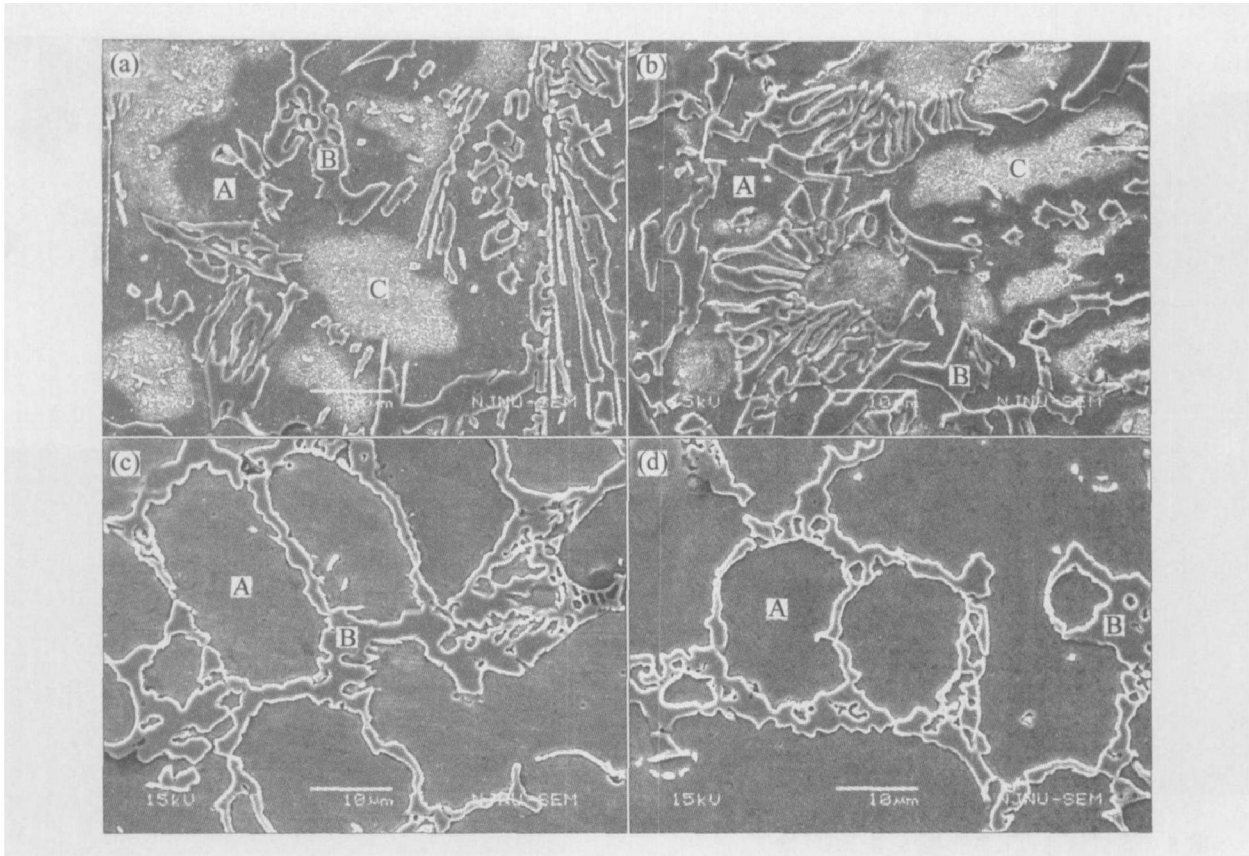


图 4 等离子熔覆层的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM images of cladding coatings

(a) -Ni60; (b) -Ni60/4% Mo; (c) -Ni60/6% Mo; (d) -Ni60/8% Mo

表 2 等离子熔覆镍基合金涂层的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis of nickel-based alloy coatings produced by plasma cladding (mass fraction, %)

Element	Solid solution zone A				Boride and carbide zone B				Segregation C	
	Ni00	Ni04	Ni06	Ni08	Ni00	Ni04	Ni06	Ni08	Ni00	Ni04
Ni	51.87	49.42	46.29	37.17	15.11	13.07	12.47	12.17	49.80	44.22
Fe	36.40	39.66	42.37	52.74	46.37	47.12	48.27	50.47	35.68	41.12
Cr	4.50	3.78	4.41	3.87	30.27	29.40	28.10	25.64	8.42	6.88
B	3.61	3.22	4.01	4.05	7.99	6.99	6.90	5.94	3.61	4.96
Si	3.62	3.41	2.35	1.50	0.26	0.15	0.15	0.24	2.49	2.23
Mo	0.00	0.51	0.57	0.67	0.00	3.27	4.11	5.54	0.00	0.59

2.3 熔覆层的 TEM 研究

如前所述, 当没有添加 Mo 元素或者 Mo 元素的加入量较少时, 在熔覆层中存在成分偏析, 这可以由 TEM 分析得到进一步确证, 图 5 所示为图 4 成分偏析区(C 区)的 TEM 形态及其多晶衍射花样。由图 5(a)可以看出, 偏析区呈茶状, 并且分布在基体固溶体的晶界处。由相应的多晶衍射标定结果可以看出, 偏析区仍然是呈面心立方结构的 $\gamma(\text{Ni, Fe})$, 如图 5(b)所示。

由 XRD 衍射结果可知, 熔覆层中存在六方结

构的 $\text{M}_7(\text{C, B})_3$ 和四方结构的 Cr_2B 。但由于在熔覆层中存在择优取向, 因此在 X 射线衍射谱中这 2 个物相所对应衍射峰的相对强度较弱, 为了更加明确地确定熔覆层中硼、碳化物的种类和结构, 对熔覆层进行了 TEM 观察, 如图 6 和图 7 所示, 相应的选区电子衍射花样(SAD)如图 6(b)和图 7(b)所示。由标定结果可以看出, 熔覆层的硼、碳化物相为呈六方结构的 $\text{M}_7(\text{C, B})_3$ 和四方结构的 Cr_2B 所构成。文献[13, 14]的研究结果表明, 在不同处理方式下, $\text{M}_7(\text{C, B})_3$ 具有正交和六方 2 种结构, 在本实验条件下, $\text{M}_7(\text{C, B})_3$ 呈六方结构。

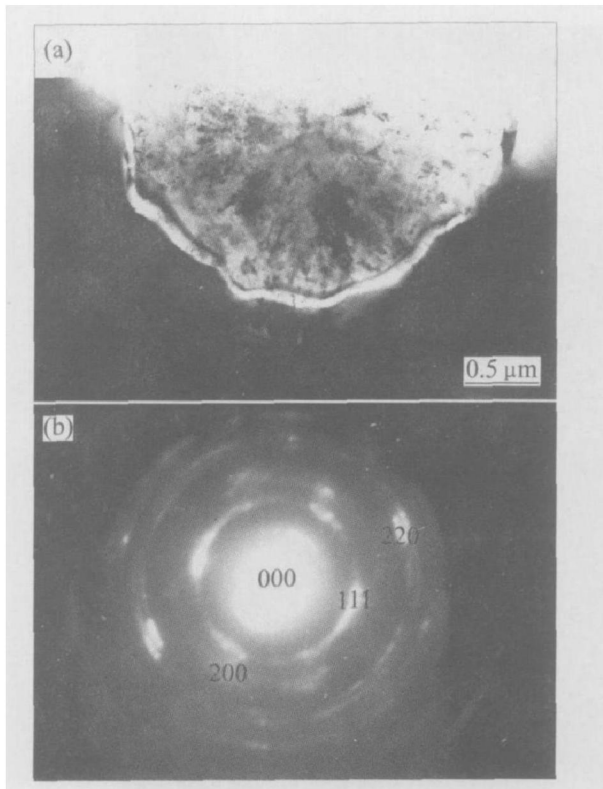


图5 偏析区的TEM形貌及其SAD谱

Fig. 5 TEM morphology showing segregation in cladding coating (a) and its polycrystal diffraction pattern (b)

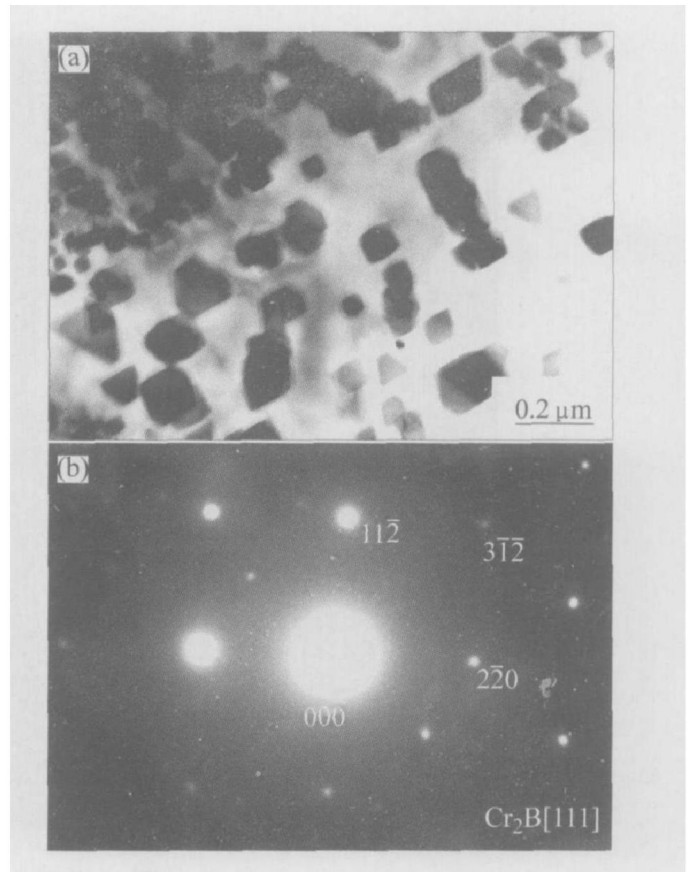


图7 Cr₂B型化合物的TEM形貌(a)及其SAD谱(b)

Fig. 7 TEM morphology of Cr₂B(a) and its SAD pattern (b)

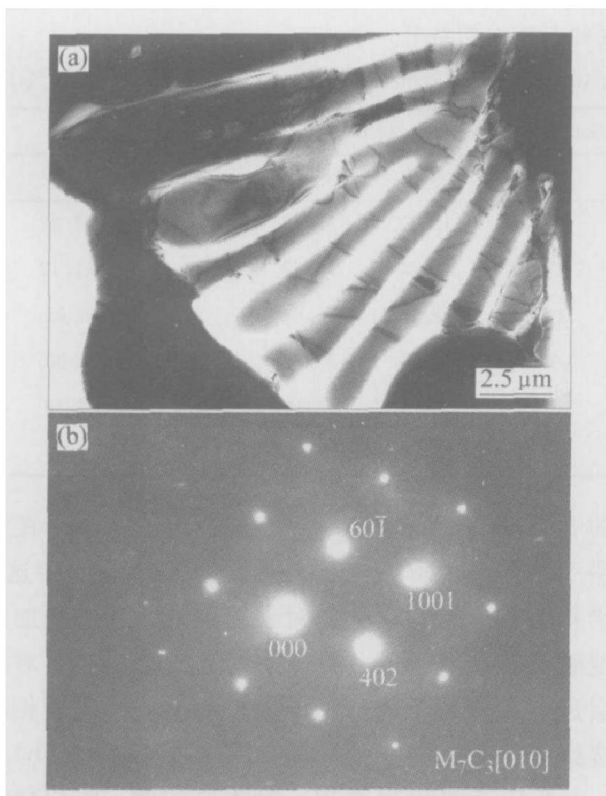


图6 M₇(C, B)₃型化合物的TEM形貌(a)及其SAD谱(b)

Fig. 6 TEM morphology of M₇(C, B)₃(a) and its SAD pattern(b)

2.4 熔覆层表面耐磨性能

图8所示为熔覆层的表面滑动磨损实验结果。由图可以看出, Mo的加入提高了熔覆层的表面耐磨性能, 并且随着Mo加入量的提高, 熔覆层的耐磨性能逐渐提高。当Mo的加入量达到6%时, 熔覆层的耐磨性能最好。Mo的加入量达到8%时, 熔覆层的耐磨性能略有降低。

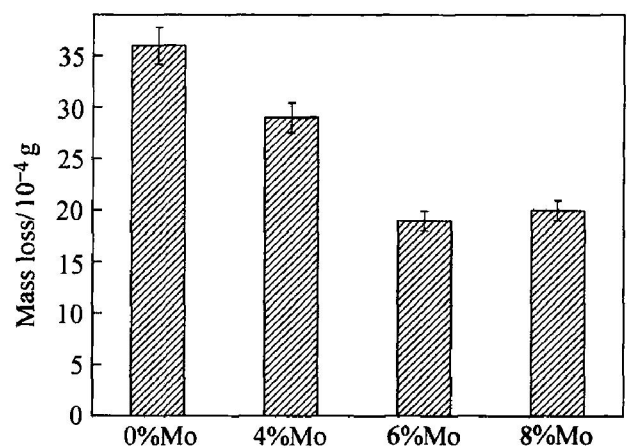


图8 熔覆层的耐磨性能

Fig. 8 Wear resistance of cladding coatings

由前面的分析可知, Mo 元素的加入, 不但可以降低成分偏析, 均匀化组织, 促进等轴晶的形成, 而且还可以增加硼、碳化物的含量, 所有这些都利于耐磨性的提高。但是, 当 Mo 的加入量达到 8% 时, 如上所述, 熔覆层的组织不再进一步变化, 而且还可能由于其加入量过高而引起熔覆合金粉末熔点过高, 冲淡率升高, 粉末可熔覆性降低, 从而影响熔覆层的质量, 进而影响熔覆层的耐磨性能。此外, 由于 Mo 元素的加入使熔覆层中硼、碳化物的含量增加, 熔覆层抵抗变形和切削的能力增强, 同偶件摩擦表面发生粘着的倾向减弱, 提高了熔覆层的耐磨性能, 从而使熔覆层的摩擦因数降低^[12, 15]。

3 结论

1) 等离子熔覆镍基熔覆层是由呈面心立方结构的 $\gamma(\text{Ni}, \text{Fe})$ 、六方结构的 $\text{M}_7(\text{C}, \text{B})_3$ 和四方结构的 Cr_2B 构成。Mo 元素的加入, 没有改变熔覆合金层的相结构, 但硼、碳化物的相对含量却有所提高。

2) 等离子熔覆镍基熔覆层中存在明显的成分偏析。随着 Mo 加入量的提高, 成分偏析逐渐减弱, 直至消失。此外, Mo 元素的加入还可以均匀化组织, 促进等轴晶的形成, 而且 Mo 元素主要存在于硼、碳化物中。

3) Mo 元素的加入, 可以提高熔覆层的表面耐磨性能。当其加入量达到 6% 时, 耐磨性最好。但当其加入量达到 8% 时, 耐磨性同加入 6% Mo 相比略有降低。

REFERENCES

- [1] Lian Y F, Yu L G, Xue Q J. The effect of cerium dioxide on the friction and wear properties of flame spraying nickel-based alloy coating[J]. *Wear*, 1995, 181-183: 436-441.
- [2] Wu P, Zhou C Z, Tang X N. Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 166: 84-88.
- [3] Yang S, Chen N, Liu W J, et al. Fabrication of nickel composite coatings reinforced with TiC particles by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 183: 254-260.
- [4] 菅丽娜, 张凌云, 于荣莉, 等. 钛合金表面激光熔敷 $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2$ 基金属硅化物涂层组织与耐磨性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(6): 936-939.
- JIAN Lina, ZHANG Lingyun, YU Rongli, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2$ -based metal silicide coating on titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(6): 936-939.
- [5] 杨尚磊, 吕学勤, 邹增大, 等. 含内生硬质碳化物颗粒的金属堆焊层的抗磨性能及磨损机理[J]. *摩擦学报*, 2004, 24(6): 508-511.
- YANG Shanglei, LÜ Xueqin, ZOU Zengda, et al. Wear resistance and wear mechanism of welded surfacing layers containing internally produced carbide particulates[J]. *Tribology*, 2004, 24(6): 508-511.
- [6] 王宏宇, 张雪峰, 许晓静, 等. 喷焊工艺对钛基体镍基涂层显微组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(5): 799-805.
- WANG Hongyu, ZHANG Xuefeng, XU Xiaojing, et al. Influence of spray-welding technology on microstructures and properties of Ni-based coating on titanium substrate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(5): 799-805.
- [7] 花国然, 黄因慧, 赵剑峰, 等. 激光熔覆纳米 Al_2O_3 等离子喷涂陶瓷涂层[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(2): 199-203.
- HUA Guoran, HUANG Yin-hui, ZHAO Jian-feng, et al. Plasma-sprayed ceramic coating by laser cladding of Al_2O_3 nanoparticles[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(2): 199-203.
- [8] Gatto A, Bassoli E, Fornari M. Plasma transferred arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimization as a function of alloy and geometrical configuration[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 187: 265-271.
- [9] 吴玉萍, 林萍华, 王泽华. 等离子熔覆原位合成 TiC 陶瓷颗粒增强复合涂层的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(8): 1335-1339.
- WU Yuping, LIN Pinghua, WANG Zehua. Microstructure and properties of in-situ synthesis of TiC particle reinforced composite coating by plasma cladding[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(8): 1335-1339.
- [10] 董丽虹, 徐滨士, 朱 胜, 等. 等离子弧堆焊镍基复合粉末涂层材料[J]. *焊接学报*, 2005, 6(1): 37-40.
- DONG Lihong, XU Binshi, ZHU Sheng, et al. Study on nickel-based composite powders by plasma arc surfacing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 6(1): 37-40.

- [11] 侯清宇, 高甲生. 镍基合金等离子弧堆焊组织结构和显微硬度[J]. 有色金属, 2004, 6(1): 13 - 16.
HOU Qing-yu, GAO Jia-sheng. Structure and hardness of nickel-based alloy plasma arc surfacing[J]. Nonferrous Metals, 2004, 6(1): 13 - 16.
- [12] Shin J C, Doh J M, Yoon J K, et al. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166: 117 - 126.
- [13] Hou Q Y, Gao J S, Zhou F. Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 194: 238 - 243.
- [14] 武晓雷, 陈光南. 激光熔敷 Fe-Cr-W-Ni-C 合金的微观组织及其演化[J]. 金属学报, 1998, 34(10): 1033 - 1038.
WU Xiao-lei, CHEN Guang-nan. Microstructure characterization and evolution of laser clad Fe-based alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(10): 1033 - 1038.
- [15] 吕旭东, 王华明. 激光熔敷 $M_{0.2}Ni_{1.5}Si/NiSi$ 金属硅化物耐磨复合材料涂层组织与抗磨性能[J]. 摩擦学报, 2003, 23(3): 184 - 187.
LÜ Xu-dong, WANG Hua-ming. Microstructure and dry sliding wear resistance of laser clad $M_{0.2}Ni_{1.5}Si/NiSi$ metal silicide composite coatings[J]. Tribology, 2003, 23(3): 184 - 187.

(编辑 李向群)