

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2014.06.009

# 激光熔覆 $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$ 高熵合金涂层的 组织结构与耐磨性<sup>\*</sup>

黄 标<sup>1</sup>, 张 冲<sup>1</sup>, 程 虎<sup>1,3</sup>, 唐群华<sup>1</sup>, 饶湖常<sup>1</sup>, 戴品强<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350108; 2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福州 350108;  
3. 台州学院 机械工程学院, 浙江 台州 318000)

**摘 要:** 为探究 Cr 元素对高熵合金涂层组织结构和性能的影响, 在 45 钢基体上用激光熔覆方法制备了  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  高熵合金涂层, 采用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、显微硬度和耐磨测试等方法研究了 Cr 含量对  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  激光熔覆高熵合金涂层组织结构、硬度和耐磨性能的影响。结果表明: 熔覆态高熵合金的组织均由先共晶  $\text{M}_2\text{B}$  相和共晶组织 (面心立方结构相 (FCC) +  $\text{M}_2\text{B}$  相) 组成。随着 Cr 含量的增加, 共晶组织含量增多,  $\text{M}_2\text{B}$  相减少, 先共晶硼化物形态呈现不规则颗粒状到树枝状再到条块状的变化, 共晶组织形貌由蜂窝状向片层状转变。涂层平均硬度随着 Cr 含量增加逐渐降低,  $\text{FeCoCr}_{0.5}\text{NiB}$  涂层平均硬度最高为 860  $\text{HV}_{0.2}$ 。涂层的耐磨性能与硬度呈正相关关系, 即  $\text{FeCoCr}_{0.5}\text{NiB}$  涂层耐磨性最高,  $\text{FeCoCr}_3\text{NiB}$  涂层耐磨性最低。

**关键词:** 激光熔覆; 高熵合金; 硬度; 耐磨性

**中图分类号:** TG174.44      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-9289(2014)06-0082-07

## Microstructure and Wear Resistance of $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$ High-entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding

HUANG Biao<sup>1</sup>, ZHANG Chong<sup>1</sup>, CHENG Hu<sup>1,3</sup>, TANG Qun-hua<sup>1</sup>, RAO Hu-chang<sup>1</sup>, DAI Pin-qiang<sup>1,2</sup>  
(1. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108; 2. College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108; 3. School of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang)

**Abstract:** In order to explore the effects of chromium on the microstructure and properties of high-entropy alloy coatings, the  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  high-entropy alloy coatings were prepared on 45 steel substrate by laser cladding. The effects of chromium addition on microstructure, hardness and wear resistance of the  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  high-entropy alloy coatings were investigated with X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness and wear testers. The results show that the microstructure of the as-cladding alloys is composed of proeutectic  $\text{M}_2\text{B}$  phase, and eutectic of face-centered cubic (FCC) phase and  $\text{M}_2\text{B}$  phase. With the increase of the chromium, volume fraction of eutectic increases, while that of the  $\text{M}_2\text{B}$  phase decreases, the morphology of proeutectic boride first changes from irregular granula to dendrite, which finally becomes strip shape, and the cellular pattern of eutectic develops into lamellar correspondingly. The average hardness of the coating decreases with the increasing of the Cr addition, and the  $\text{FeCoCr}_{0.5}\text{NiB}$  alloy possesses high average hardness, up to 860  $\text{HV}_{0.2}$ . The wear resistance of coatings is proportional to their hardness, suggesting that among all coatings the  $\text{FeCoCr}_{0.5}\text{NiB}$  coating exhibits excellent anti-wear capability, and the  $\text{FeCoCr}_3\text{NiB}$  coating shows the lowest wear resistance.

**Key words:** laser cladding; high-entropy alloy; hardness; wear resistance

收稿日期: 2014-07-31; 修回日期: 2014-11-09; 基金项目: \* 福建省自然科学基金 (2012J01202)

作者简介: 黄标 (1990-), 男 (汉), 福建宁德人, 硕士生; 研究方向: 新型金属材料, 表面工程

网络出版日期: 2014-11-25 10:58; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1007-9289.2014.04.001.html>

引文格式: 黄标, 张冲, 程虎, 等. 激光熔覆  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  高熵合金涂层的组织结构与耐磨性 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 82-88.

## 0 引言

高熵合金是最近几十年来合金化理论的三大突破之一<sup>[1]</sup>,中国台湾学者叶钧蔚<sup>[2]</sup>在2004年率先报道了高熵合金概念。高熵合金的组成元素种类有5~13种,其主元原子百分比含量为5%~35%。高熵合金相比传统合金最大的特点是多主元效应,主要表现为多种主元相互混合产生的高熵效应可以增加元素的相容性,使得高熵合金凝固后往往形成面心立方结构相或体心立方结构相等简单结构的固溶体。同时,多主元效应还使得高熵合金拥有高硬度、高强度、高耐磨、耐腐蚀氧化和抗回火软化能力等优异性能<sup>[3]</sup>。

目前,对高熵合金的研究主要针对熔铸的块体材料<sup>[3]</sup>。但熔铸工艺的特点限制了高熵合金块体材料的制备尺寸和凝固冷却速率,并且高熵合金成分设计中往往含有镍和钴等价格较高的元素,大大增加了高熵合金块体材料的制备成本。因此在实际应用中将高熵合金制成涂层是提高高熵合金性价比的有效手段。

激光熔覆技术是一种重要的材料表面改性技术,具有快速加热和快速冷却,对基体材料稀释小并保证基体和涂层具有冶金结合等的优点。相比于电化学沉积<sup>[4]</sup>和磁控溅射<sup>[5]</sup>制备的高熵合金薄膜,激光熔覆高熵合金涂层厚度可达毫米级,极大地发挥了高熵合金的力学性能。目前激光熔覆高熵合金成分的设计中,大多都添加了自熔性元素(硅和硼)<sup>[6-10]</sup>,硅和硼的添加一方面可以发挥自熔性作用保证涂层拥有良好的宏观质量,另一方面可以形成硅化物或硼化物硬质相来提高涂层的耐磨性。高熵合金的耐磨性能随着硼含量的增加而提高<sup>[11]</sup>,但在自熔性激光熔覆高熵合金体系中非自熔性元素含量变化对涂层的组织结构和耐磨性能的影响却较少有报道。

文中在课题组前期研究的 FeCoCrNiB<sup>[10]</sup>基础上,采用激光熔覆技术在45钢基体上制备了不同Cr含量的 FeCoCr<sub>x</sub>NiB(*x*表示Cr元素的摩尔比)高熵合金涂层。重点探讨了Cr含量对 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 涂层组织结构、硬度和耐磨性的影响。

## 1 试验方法

激光熔覆设备为 TruDisk 2002 固体激光器,基体材料为加工成 40 mm×40 mm×10 mm 的45钢试样,表面用砂纸打磨并用丙酮和乙醇依次

清洗。按 FeCoCr<sub>x</sub>NiB(*x*=0.5,1,1.5,2,3)比例,将纯度高于99%的Fe粉,Co粉,Cr粉,Ni粉及硼铁粉混合均匀作为熔覆用粉末。为了避免B元素在激光熔覆过程中烧损和宏观偏析导致涂层分层,因此B元素以硼铁粉的形式加入(硼铁粉各元素的质量分数为:20%B,0.5%C,4.0%Si,0.2%P,0.5%Al,余量Fe)。硼铁粉的粒度为177 μm,其余粉末粒度为48~74 μm。不同Cr含量的 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金以下简记为 Cr0.5, Cr1, Cr1.5, Cr2, Cr3。

激光熔覆采用预置涂层法,由于传统的预置法大多采用化学粘结剂<sup>[12]</sup>,在激光熔覆过程中未完全燃烧的粘结剂在涂层中会留下大量碳杂质,这极大地影响了原始设计成分。为了克服粘结剂预置涂层法的弊端,文中预置涂层法采用机械压粉法,即用自制的压粉装置靠机械结合力将粉末压置于基体上。如图1(a)所示,制作一个高度大于基体厚度2 mm的边框包围基体,撒上混合均匀的合金粉末,用玻璃板压紧、压平,获得预置涂层,如图1(b)所示。在激光熔覆过程中用氩气作

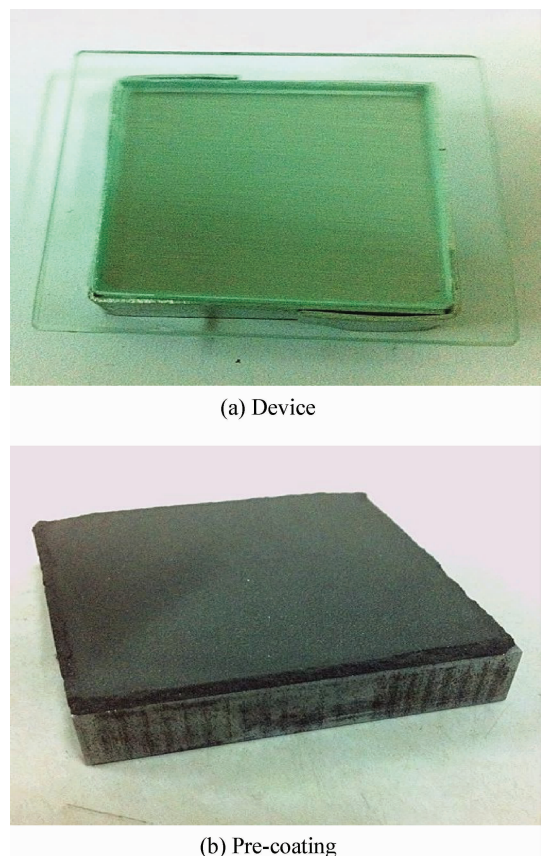


图1 预置涂层法示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the pre-coating method

保护气体,粉末预置厚度为 1.5 mm,激光熔覆参数:氩气气压 0.2 MPa,功率 1 200 W,光斑直径为 2.5 mm,扫描速度 3 mm/s,搭接率 50%。

采用日本理学 D/Max Ultima III 型 X 射线衍射仪(XRD)对涂层进行物相结构分析。采用日立 S3400-II 型扫描电镜(SEM)分析涂层截面的组织(取样方向与激光扫描方向垂直),并用 SEM 所附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。用 DHV-1000 型显微维氏硬度计,依次从基体向涂层表面,沿横截面方向等间距测试涂层的显微硬度,间距为 0.1 mm,测试载荷为 200 g,保压时间为 15 s。采用 UMT-3 型往复摩擦试验机测试

多道搭接涂层在室温干摩擦条件下的耐磨性能,摩擦方式为球盘式,磨球材料为  $\Phi$  3 mm 的 WC 小球,载荷为 10 N,频率为 5 Hz,时间为 20 min。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 涂层的物相结构和显微组织

图 2 为 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的 XRD 图谱及其标定结果。由图 2(a)分析可知:FeCo-Cr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层均由面心立方结构(FCC)相和晶体结构类似 Fe<sub>2</sub>B 的 M<sub>2</sub>B 相(合金硼化物)组成。随着 Cr 含量的增加,M<sub>2</sub>B 相的衍射峰强度逐渐减弱。

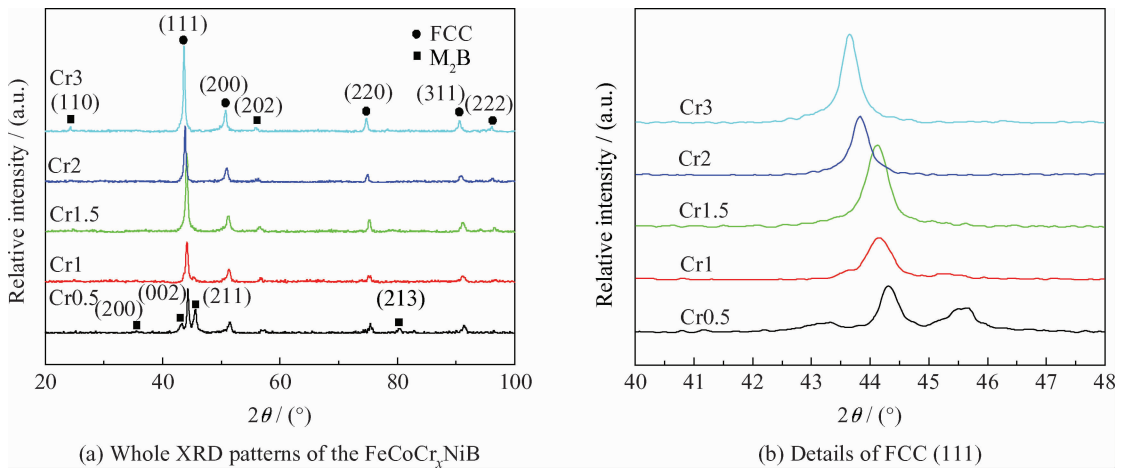


图 2 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy coatings

图 2(b)为 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层 FCC 相(111)衍射峰放大图,由图可知,随着 Cr 含量的增加,FCC 相(111)衍射峰逐渐向左偏移。这是由于随着 Cr 含量的增加,原子半径较大的 Cr 原子逐渐置换固溶于 FCC 相中,使得 FCC 相的晶格常数不断增大,根据布拉格衍射定律,FCC 相衍射峰位表现为向  $2\theta$  小角度方向偏移。

图 3 为 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的典型显微组织。FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的显微组织均由先共晶 M<sub>2</sub>B 相和共晶组织(FCC 相+M<sub>2</sub>B 相)组成,呈现典型的过共晶组织特征。随着 Cr 含量的增加,先共晶硼化物数量减少、尺寸增大,先共晶硼化物的形态逐渐呈现由不规则颗粒状(见图 3(a))到树枝状(见图 3(b)(c))再到“十字”条块状(见图 3(d)(e))的演变趋势。随着 Cr 含量的增加,共晶组织的体积分数逐渐增大,共晶组织中的 FCC 相含量逐渐增多而 M<sub>2</sub>B 相逐渐减少,伴随着

FCC 相和 M<sub>2</sub>B 相相对含量的变化,共晶组织形貌也逐渐由蜂窝状(见图 3(a)(b))变为片层状(见图 3(c)(d)(e)),而且其中片层间距随着 Cr 含量的增加逐渐减小。

对 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层中 FCC 相和 M<sub>2</sub>B 相进行了 EDS 分析,结果如表 1 所示,从等原子比的 Cr1 涂层可看出,FCC 相富集 Fe,Co 和 Ni 元素,而 Cr 元素主要偏聚于 M<sub>2</sub>B 相中,当 Cr 含量从  $x=0.5$  增加到  $x=3$  时,M<sub>2</sub>B 相中 Cr 含量较 Fe,Co 和 Ni 逐渐增加,这是因为 B-Cr, B-Fe, B-Co 和 B-Ni 的混合焓分别为 -31, -26, -24 和 -24 kJ/mol<sup>[10]</sup>,因此 Cr 与 B 最易结合形成硼化物。可以推断 Cr 含量的增加改变了 M<sub>2</sub>B 相和 FCC 相的元素组成,进而影响了 FeCo-Cr<sub>x</sub>NiB 高熵合金组织形貌的变化。

综上所述,随着 Cr 含量的增加,FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层中 M<sub>2</sub>B 相含量逐渐减少而 FCC 相

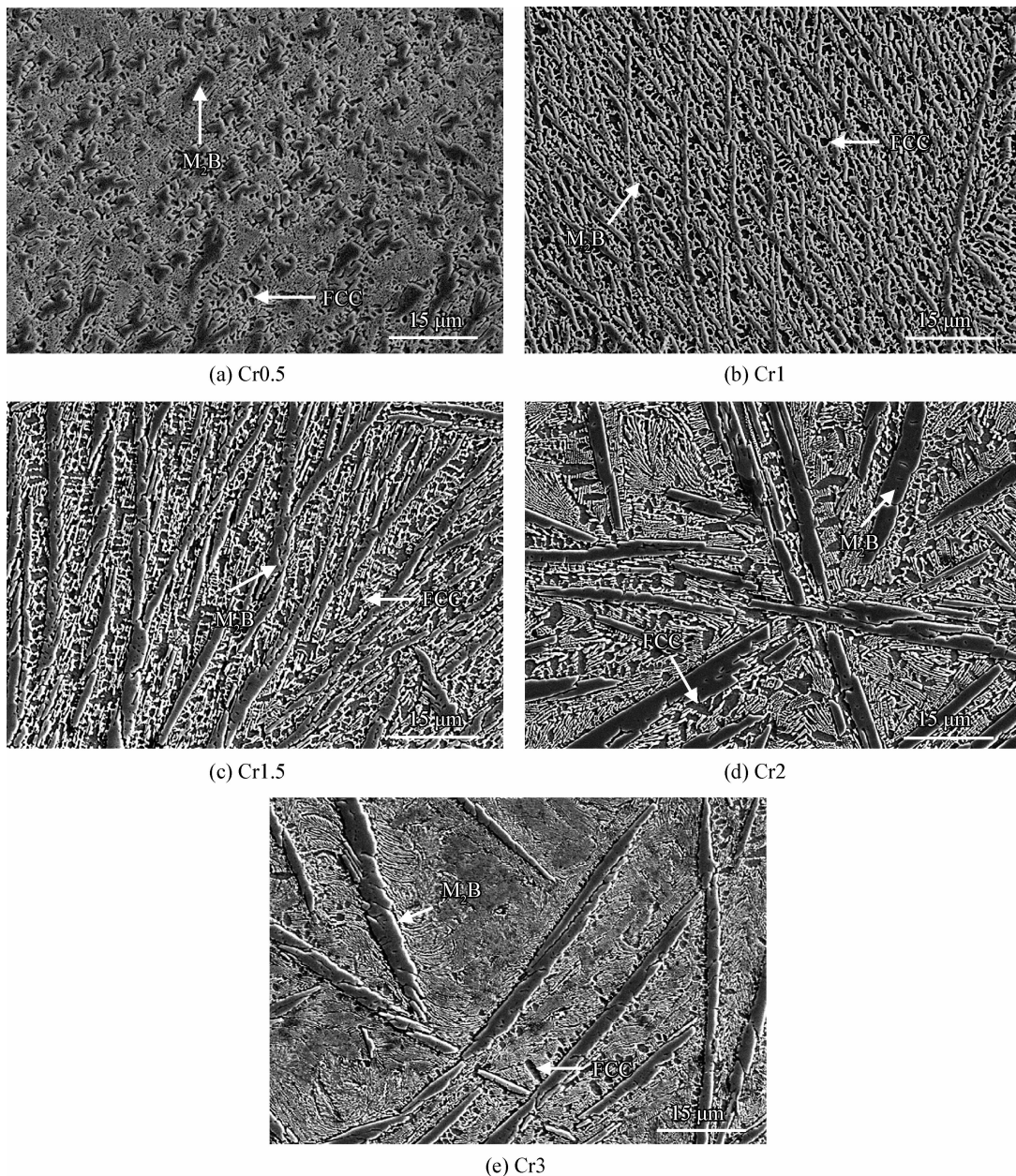


图 3 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的典型显微组织  
 Fig. 3 Typical microstructure of the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy coatings

含量逐渐增多,这与 XRD 分析结果相符。结合 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金的凝固特点,合金凝固过程可用图 4 所示的 FeCoCrNiB 高熵合金示意性共晶相图辅助说明,横坐标  $x_B$  表示 B 含量(原子数分数)的变化量。如图可知不同 Cr 含量的 Fe-CoCr<sub>x</sub>NiB 合金的成分均位于过共晶区,随着 Cr 含量的增加,图中共晶点 E 和 FCC 相最大固溶点 S 逐渐向右移动,根据相图杠杆定律可知过共晶凝固组织中共晶组织和 FCC 相比比例逐渐增大。在对与 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 成分相近的 Fe-Cr-B<sup>[13]</sup> 和

Fe-Cr-B-C<sup>[14]</sup> 等合金的研究中发现,Cr 含量的增加都使相图中共晶点位置向左移动,合金将出现更多含 Cr 合金化合物。而 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层组织中硼化物含量为什么会随 Cr 含量的增加反而减少?

热力学中用吉布斯自由能改变量  $\Delta G$  作为物相稳定性的判据,某一温度的  $\Delta G$  计算公式如下:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

式中, $\Delta H$  表示焓变, $\Delta S$  表示熵变,根据正规熔体模型, $n$  种元素形成固溶体时的  $\Delta S$  可以表示为:

表1 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的微区 EDS 结果Table 1 EDS results of the microstructure areas in the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy coatings (a/%)

| <i>x</i> | Zone             | Fe    | Co    | Cr    | Ni    | B     |
|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | Nominal          | 22.22 | 22.22 | 11.11 | 22.22 | 22.22 |
| 0.5      | FCC              | 21.25 | 19.01 | 4.97  | 20.72 | 34.05 |
|          | M <sub>2</sub> B | 19.73 | 15.25 | 15.63 | 6.95  | 42.44 |
|          | Nominal          | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| 1        | FCC              | 21.58 | 19.55 | 8.97  | 22.51 | 27.39 |
|          | M <sub>2</sub> B | 15.06 | 12.44 | 24.67 | 5.32  | 42.51 |
|          | Nominal          | 18.18 | 18.18 | 27.27 | 18.18 | 18.18 |
| 1.5      | FCC              | 20.99 | 19.19 | 11.37 | 21.69 | 26.76 |
|          | M <sub>2</sub> B | 12.06 | 8.08  | 33.26 | 2.65  | 43.95 |
|          | Nominal          | 16.67 | 16.67 | 33.33 | 16.67 | 16.67 |
| 2        | FCC              | 20.04 | 18.64 | 14.89 | 18.87 | 27.56 |
|          | M <sub>2</sub> B | 9.16  | 5.97  | 39.22 | 1.86  | 43.79 |
|          | Nominal          | 14.29 | 14.29 | 42.86 | 14.29 | 14.29 |
| 3        | FCC              | 18.36 | 16.45 | 26.31 | 17.56 | 21.32 |
|          | M <sub>2</sub> B | 7.69  | 3.57  | 44.90 | 1.15  | 42.69 |

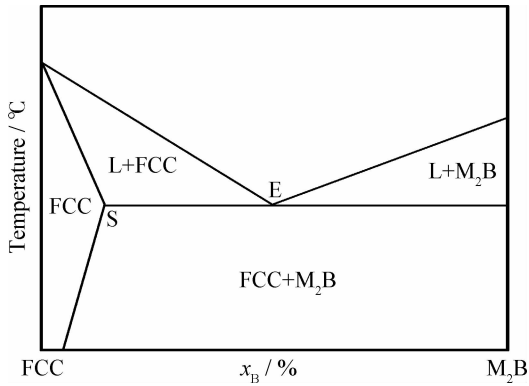


图4 FeCoCrNiB 高熵合金的共晶相图

Fig. 4 Eutectic phase diagram of the FeCoCrNiB high-entropy alloy

$$\Delta S = -R \sum_{i=1}^n C_i \ln C_i \quad (2)$$

式中,  $R$  表示理想气体常数,  $C_i$  表示各个元素的摩尔数分数。由式(1)可知固溶体相和化合物相形成时自由能改变量分别主要取决于熵变量和焓变量。高熵合金的高混合熵使得合金在凝固时往往易形成固溶体相,但 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金凝固过程中形成了硼化物,说明合金中

Cr, Fe, Co 和 Ni 与 B 结合形成硼化物的焓变值较负,抵消了部分高熵效应对元素的互溶作用<sup>[6]</sup>。因此在激光熔覆过程中熔体出现了元素的偏聚,最终导致硼化物形核长大。

表2为根据式(2)计算的 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 合金中 FCC 相混合熵值,由表2可知:随着 Cr 含量的增加, FCC 相混合熵值逐渐增大,虽然 Cr 含量的增加也提高了合金硼化物形成的负混合焓,但是 Cr 含量的增加对 FCC 相焓变值的贡献要大于 M<sub>2</sub>B 相焓变值,因此随着 Cr 含量的增加,在 M<sub>2</sub>B 相中聚集的大部分 Fe, Co, Ni 和少部分 Cr 逐渐回溶于 FCC 相中。可见 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 合金中 Cr 含量的增加改变了固溶体相和硼化物相自由能的平衡关系,逐渐增大的混合熵使合金凝固过程中更易形成 FCC 固溶体,硼化物的生成逐渐受到了抑制。对由传统合金理念设计的合金而言,由于缺少了多主元混合的高熵效应,当添加强化化合物形成元素时,合金中元素易偏聚形成化合物。综上所述在 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层中高熵效应使得 FCC 相在与 M<sub>2</sub>B 相竞争形核过程中处于优势地位,这解释了随着 Cr 含量的增加,涂层中 FCC 相含量逐渐增多而 M<sub>2</sub>B 相逐渐减少。

表2 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金 FCC 相的混合熵Table 2 Mixing entropy of the FCC phase in the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy (J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)

| Alloy          | Cr0.5 | Cr1   | Cr1.5 | Cr2   | Cr3   |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mixing entropy | 12.36 | 12.94 | 13.10 | 13.21 | 13.26 |

## 2.2 涂层的硬度和耐磨性

图5为 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的显微硬度。由图可知 Cr0.5, Cr1, Cr1.5, Cr2 和 Cr3 的平均硬度分别为 860、630、618、599 和 566 HV<sub>0.2</sub>。FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的平均硬度值明显高于基体 45 钢(205 HV<sub>0.2</sub>),当 Cr 含量从  $x=0.5$  增加到  $x=1$  时,涂层平均硬度急剧下降,随着 Cr 含量继续增加, Cr1, Cr1.5, Cr2 和 Cr3 平均硬度均匀下降,这是由于随着 Cr 含量的增加,涂层中硬质 M<sub>2</sub>B 相逐渐被质地较软的 FCC 相取代,其中 Cr0.5 涂层中析出了大量的硼化物,因此较其他涂层平均硬度显著提高。Cr1.5, Cr2 和 Cr3 涂层硬度分布的波动性明显大于 Cr0.5 和 Cr1 涂层。这是由于随着 Cr 含量的增加,硬度较低的

共晶组织含量相比硬度较高的先共晶硼化物逐渐增多,涂层中两种硬度不同的组织的分布状况导致了 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层硬度的分布有不均匀的趋势。

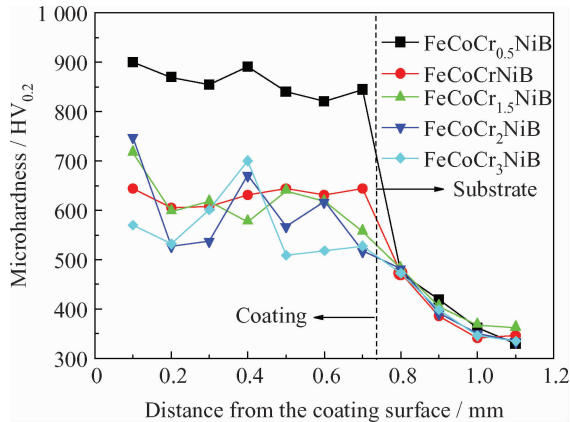


图5 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy coatings

图6所示为 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的磨损体积与平均硬度的关系,从图中可看出涂层的磨损体积随着平均硬度的降低逐渐增大,即 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的耐磨性与硬度呈现正相关的关系,Cr0.5 涂层耐磨性最高而 Cr3 涂层耐磨性最低。在本试验条件下,涂层耐磨性和硬度之间的变化规律符合经典 Archard 定律(材料耐磨性正比于硬度)<sup>[15]</sup>。

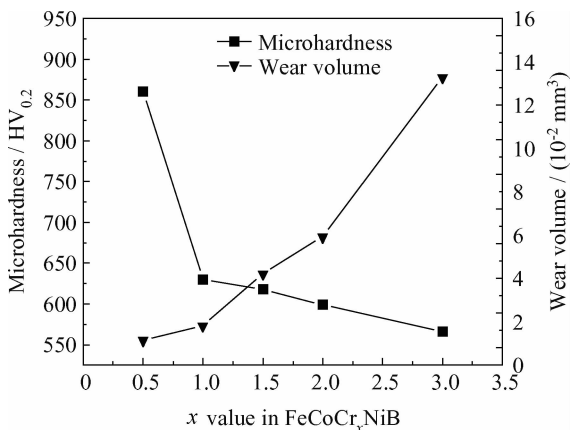


图6 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层的磨损体积与平均硬度的关系

Fig. 6 Relationships between the wear volume and average hardness of the FeCoCr<sub>x</sub>NiB high-entropy alloy coatings

### 3 结论

(1) 激光熔覆 FeCoCr<sub>x</sub>NiB 高熵合金涂层由

FCC 相和 M<sub>2</sub>B 相组成,随着 Cr 含量的增加, M<sub>2</sub>B 相逐渐减少。

(2) 合金的组织由先共晶 M<sub>2</sub>B 相和共晶组织(FCC 相+M<sub>2</sub>B 相)组成,随着 Cr 含量的增加,先共晶硼化物形态呈现不规则颗粒状到树枝状再到“十字”条块状的演变趋势,共晶组织形态由蜂窝状变为片层状,共晶组织逐渐增多。

(3) 随 Cr 含量的增加,涂层硬度逐渐下降, FeCoCr<sub>0.5</sub>NiB 涂层的平均硬度最高为 860 HV<sub>0.2</sub>。涂层的耐磨性与硬度呈现正相关关系,即 FeCoCr<sub>0.5</sub>NiB 涂层耐磨性最高, FeCoCr<sub>3</sub>NiB 涂层耐磨性最低。

### 参考文献

- [1] 梁秀兵,魏敏,程江波,等. 高熵合金新材料的研究进展[J]. 材料工程, 2009, (12): 75-79.  
Liang X B, Wei M, Cheng J B, et al. Research progress in advanced materials of high-entropy alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2009 (12): 75-79 (in Chinese).
- [2] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes [J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.
- [3] Zhang Y, Zuo T T, Tang Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys [J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 1-93.
- [4] Yao C, Zhang P, Liu M, et al. Electrochemical preparation and magnetic study of Bi-Fe-Co-Ni-Mn high entropy alloy [J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(28): 8359-65.
- [5] Liu L, Zhu J B, Hou C, et al. Dense and smooth amorphous films of multicomponent FeCoNiCuVZrAl high-entropy alloy deposited by direct current magnetron sputtering [J]. Materials & Design, 2013, 46: 675-679.
- [6] Huang C, Zhang Y, Vilar R, et al. Dry sliding wear behavior of laser clad TiVCrAlSi high entropy alloy coatings on Ti-6Al-4V substrate [J]. Materials & Design, 2012, 41: 338-343.
- [7] Zhang H, He Y, Pan Y. Enhanced hardness and fracture toughness of the laser-solidified FeCoNiCrCuTiMoAlSiB<sub>0.5</sub> high-entropy alloy by martensite strengthening [J]. Scripta Materialia, 2013, 69(4): 342-345.
- [8] Zhang H, Pan Y, He Y, et al. Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(6): 2259-63.
- [9] Zhang H, He Y, Pan Y, et al. Phase selection, microstructure and properties of laser rapidly solidified FeCoNiCrAl<sub>2</sub>Si coating [J]. Intermetallics, 2011, 19(8): 1130-5.
- [10] 黄祖凤,张冲,唐群华,等. 退火对激光熔覆 FeCoCrNiB

高熵合金涂层组织结构与硬度的影响 [J]. 表面技术, 2013, 42(1): 9-13.

Huang Z F, Zhang C, Tang Q H, et al. Effects of annealing on the microstructure and hardness of laser cladding FeCoCrNiB high-entropy alloy coating [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 9-13 (in Chinese).

[11] Hsu C, Yeh J, Chen S, et al. Wear resistance and high-temperature compression strength of FCC CuCoNiCrAl<sub>0.5</sub>F alloy with boron addition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(5): 1465-9.

[12] 黄祖凤, 张冲, 唐群华, 等. WC 颗粒对激光熔覆 Fe-CoCrNiCu 高熵合金涂层组织与硬度的影响 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 13-19.

Huang Z F, Zhang C, Tang Q H, et al. Effects of WC particles on the microstructure and hardness of Fe-CoCrNiCu high-entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 13-19 (in Chinese).

[13] Ma S, Xing J, Liu G, et al. Effect of chromium concentration on microstructure and properties of Fe-3.5B alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(26): 6800-8.

[14] 宗琳, 刘政军, 李乐成. 多元陶瓷复合相显微组织对耐磨性能的影响 [J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 61-64.  
Zong L, Liu Z J, Li L C, et al. Effect of microstructure on wear resistance for multiple ceramic phases [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2012, 33(2): 61-64 (in Chinese).

[15] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

作者地址: 福建省福州市闽侯上街大学城 350108  
福州大学学生公寓生活五区 53 号楼  
Tel: (0591) 8373 4022  
E-mail: 996822991@qq.com.cn

(责任编辑: 黄艳斐)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》朱旻昊编委入选长江学者特聘教授

根据“长江学者奖励计划”实施办法,经高校推荐、通讯评审、会议评审等程序,共产生 383 名 2013、2014 年度长江学者特聘教授、讲座教授建议人选,名单已经于 11 月 6 日由教育部人事司公示。《中国表面工程》期刊编委朱旻昊教授入选。

朱旻昊,男,1968 年生,西南交通大学教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金、教育部新世纪优秀人才、全国百篇优秀博士学位论文奖获得者,四川省有突出贡献专家。负责的“高速轮轨系统理论及技术”2011 年入选教育部创新团队。1990 年西南交大金属材料及热处理专业获学士学位,1993 年西南交大金属材料及热处理专业获硕士学位,2001 年西南交大机械设计及理论专业获博士学位。

主要从事摩擦学和表面工程,原创性地开展了径向和复合微动模式的运行和损伤机理研究,相关表面工程防护的研究成果已成功应用于铁路行业。上述研究成果,2006 年获国家自然科学基金二等奖(排名第 2)和 2003 年教育部科技进步一等奖(自然科学类,排名第 2),2005 年获全国优秀博士论文和 2003 年法国航空航天集团 SNECMA 科技奖。近年来发表论文 100 余篇,其中 SCI 检索 30 余篇,EI 检索 60 余篇;出版专著、译著和教材各 1 部;获发明专利 1 项。主持国家自然科学基金等国家级科研项目、省部级项目 10 余项,主研国家级和省部级项目 10 余项。2005 年获国家教学成果一等奖(排名第 3)。

(摘自 中华人民共和国教育部人事司和西南交通大学新闻网)