

# HT250 铸铁表面等离子合金化 $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$ 高熵合金复合涂层

卢金斌<sup>1</sup>, 彭竹琴<sup>2</sup>, 马明星<sup>2</sup>, 李俊魁<sup>2</sup>, 齐振东<sup>2</sup>, 贺亚勋<sup>2</sup>

(1. 苏州科技学院, 江苏 苏州 215009; 2. 中原工学院, 郑州 450007)

**摘要:** 目的 通过等离子合金化高熵合金涂层, 提高铸铁表面耐磨性。方法 采用等离子合金化法, 以等摩尔比的 Al, Co, Cr, Cu, Mn, Ni 单质金属粉在 HT250 铸铁表面制备高熵合金复合涂层。通过 SEM, EDS, XRD 等分析涂层的组织, 测试涂层的显微硬度分布。结果 由于铸铁基体少量熔化, 基体中的 Fe 和 C 元素进入涂层, 形成了厚度约为 0.2 mm 的  $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$  高熵合金涂层。从涂层表面到基体, 体系的混合熵呈高熵-中熵-低熵的梯度变化。涂层主要由高熵合金的枝晶和枝晶间渗碳体、 $\sigma$  相等组织构成, 主要有 FCC, BCC,  $\text{Fe}_3\text{C}$  及  $\sigma$  相。涂层的显微硬度大约为 350~600HV0.2, 明显高于铸铁基体的硬度(200~230HV0.2)。结论 通过等离子合金化可以在铸铁表面形成高熵合金+碳化物的复合涂层, 提高了铸铁的显微硬度, 有利于铸铁表面耐磨性的提高。

**关键词:** 等离子合金化; 高熵合金; 显微硬度; 复合涂层;  $\sigma$  相; 铸铁

中图分类号: TG174.442; TG135

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)09-0013-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.003

## Composite Coating Prepared by Plasma Alloying $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$ High-entropy Alloy on the Surface of HT250 Cast Iron

LU Jin-bin<sup>1</sup>, PENG Zhu-qin<sup>2</sup>, MA Ming-xing<sup>2</sup>, LI Jun-kui<sup>2</sup>, QI Zhen-dong<sup>2</sup>, HE YA-xun<sup>2</sup>

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the abrasion resistance of the surface on cast iron by plasma alloying high entropy alloy coating process. **Methods** High entropy alloy coating was prepared on the surface of HT250 cast iron by plasma alloying Al, Co, Cr, Cu, Mn and Ni powders in equal molar ratio. The microstructure of the coating was studied by SEM, EDS, XRD, and its microhardness distribution was tested by the microhardness tester. **Results** Due to melting of a small amount of iron, the atoms such as Fe and C dissolved into the coating to get  $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$ , the thickness of which was about 0.2 mm. The mixing entropy of both the composition and the microstructure of the coating distributed in a high-medium-low gradient. The microstructure of the coating was mainly composed of high-entropy alloy dendrite and interdendrite cementite and  $\sigma$  phase etc, and the coating contained

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-06-21

Received: 2015-05-14; Revised: 2015-06-21

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(072300440020)

Fund: Supported by Foundation and Advanced Technology of Henan Province (072300440020)

作者简介: 卢金斌(1970—), 男, 山西人, 博士, 副教授, 主要从事金属材料表面处理及钎焊方面的教学与研究。

Biography: LU Jin-bin(1970—), Male, from Shanxi, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface treatment of metal materials and brazing.

mainly FCC, BCC,  $\text{Fe}_3\text{C}$  and  $\sigma$  phase. The microhardness of the coating was about 350 ~ 600HV0.2, which was significantly higher than that of the matrix (200 ~ 230HV0.2). **Conclusion** The composite coating including high entropy alloy and carbide could be formed on the surface of cast iron by plasma alloying, which improved the microhardness of the cast iron, and thus helped to improve the abrasion resistance of the surface on cast iron.

**KEY WORDS:** plasma surface alloying; high-entropy alloys; microhardness; composite coating;  $\sigma$  phase; cast iron

高熵合金由等原子比或接近等原子比的多种主元组成,具有硬度高、耐高温、耐腐蚀及抗氧化等优点,综合性能受到关注<sup>[1-3]</sup>。由于高熵的原因,其原子扩散速度较慢,甚至在铸态下趋于形成简单的体心立方或面心立方结构,可能伴有晶间细小化合物、纳米晶、非晶等<sup>[3-4]</sup>。等离子合金化是通过在金属材料表面熔化一定的金属涂层材料,从而使金属材料表面形成具有冶金结合的涂层,能够提高工件的耐磨性、耐蚀性<sup>[5]</sup>。高熵合金块体通常成本较高,因此在金属材料表面制备高熵合金涂层成为热点之一。采用激光熔覆技术制备高熵合金涂层的较多<sup>[6]</sup>。黄祖凤等通过激光熔覆制备添加 WC 的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层,发现随着 WC 含量的提高,枝晶得到细化,涂层硬度得到提高<sup>[7]</sup>;他们还对激光熔覆 FeCoCrNiB 涂层进行了 900 °C 退火处理,发现析出了颗粒状和短棒状的  $\text{M}_3\text{B}$ ,经 1000 °C 退火处理,转变为块状  $\text{M}_3\text{B}$ <sup>[8]</sup>。刘俊东研究了 TiC 增强高熵合金,发现了 TiC 的原位自生机制,提出采用高能球磨有助于优化高熵合金基复合材料<sup>[9]</sup>。Liu W H 等采用熔铸法制备了单一 FCC 结构的 FeCrNiCoMn 高熵合金,经退火处理获得晶粒尺寸不同的高熵合金,发现其屈服强度与晶粒度的关系符合 Hall-Petch 公式<sup>[10]</sup>。张保森采用等离子弧在 Q235 钢基体上熔覆了 (CuCoCrFeNi)95B5 高熵合金涂层,提高了材料的耐磨性<sup>[11]</sup>。张松等采用激光合金化技术,在钢基体表面制备了高熵合金涂层,涂层的混合熵呈高熵-中熵-低熵梯度变化,具有 BCC 结构<sup>[12]</sup>。Sheng guo 采用熔铸法制备了  $\text{Al}_x\text{CrCuFeNi}_2$  高熵合金,发现该合金的凝固行为较特殊,形成了类似向日葵形状的过共晶微观组织<sup>[13]</sup>。

许多零部件是采用铸铁制造,为提高铸铁零件的耐磨性,可以在铸铁表面制备高熵合金耐磨涂层,但在铸铁表面合金化制备高熵合金涂层未见报道。铸铁的熔点通常较单质金属低,考虑到铸铁中含有较多的 C 和 Fe 元素,而等离子弧因等离子射流作用较大,会对钢基体产生挖掘作用<sup>[14-15]</sup>,使钢基体中的 Fe 和 C 进入涂层,因此制备的是含一定量 Fe 和 C 元素的高熵合金涂层。

## 1 试验

### 1.1 合金化

选用纯度 99.9% 的 Al, Co, Cr, Cu, Mn, Ni 单质金属粉末,粉末粒度均小于 50  $\mu\text{m}$ 。基体材料为 HT250 铸铁,合金化前先对其表面进行清洗、除油除锈。

用球磨机将等摩尔比的金属粉末混合均匀,预涂在经过处理的 HT250 铸铁表面,涂层宽度大约为 7 ~ 9 mm,涂层厚度为 1.2 mm,加热到 200 °C 烘干。

对预置金属粉的试样进行等离子表面合金化处理。工作电流为 150 A,工作电压为 27.4 V,用 Ar 气作为保护及电离气体,保护气体流量为 18  $\text{m}^3/\text{h}$ ,电离气体流量为 2.5  $\text{m}^3/\text{h}$ ,喷嘴距工件表面距离为 7 ~ 8 mm,扫描速度为 160 mm/min。

### 1.2 测试方法

垂直于合金化涂层截取试样,制成金相试样,对涂层进行机械打磨、抛光后,用 4% (体积分数) 硝酸酒精溶液腐蚀。在 JSM-5610LV 扫描电镜上观察试样的组织,采用 18 kW 转靶 D/max 2500VL/PC 型 X 射线衍射仪分析涂层的相组成。涂层显微硬度测试采用 HXD-1000TC 型显微硬度计,加载载荷 200 g,测试间距 0.1 mm,保持时间 10 s。

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层的组织

采用试验中的等离子弧表面合金化工艺参数,在 HT250 铸铁基体上获得了表面较光滑、连续性好、无宏观气孔和裂纹的  $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$  合金涂层。图 1 为高熵合金涂层的扫描电镜照片。

图 1a 为等离子合金化涂层与铸铁基体的界面处微观组织,可以看出明显有三个区域:最下面为铸铁基体,有片状石墨;中间为过渡区;上面为涂层。基体 A 处的成分见表 1,主要为 Fe 和 Si。C 元素原子序数

较小,未能测出。

图 1b 为过渡区和涂层部分的放大图。可以看出,过渡区中主要是树枝晶和枝晶间组织。根据涂层 B 点的成分测试结果(表 1)可知,采用 Boltzmann 假设<sup>[16]</sup>,体系的混合熵  $\Delta S_{\text{mix}}$  为  $1.8141R$ ,符合高熵合金。

图 1c 为熔化与未熔化的过渡区域,C 处成分见表 1。C 处为未熔化的珠光体,由于铸铁基体成分不均匀,因此局部存在成分近共晶点的区域,其熔点较低。在等离子弧作用下,局部熔化的 D 处为铸铁基体在高温作用下,石墨溶入后快速冷却转变成的变态莱氏体。而在距等离子更近的 C1 处没有熔化,这主要与该点成分远离共晶点有关。

图 1d 为过渡区的组织形貌,呈明显的树枝晶组织,基本以固溶少量 Ni,Mn 等的 Fe 基奥氏体与枝晶间莱氏体为主。

图 1e 为涂层上部与过渡区的组织,可以看出,枝晶间化合物逐渐增多。根据树枝晶 E 点的成分测试结果(表 1)可知,其混合熵为  $1.8593R$ ,完全符合高熵合金成分。枝晶间 F 点的成分测试结果(表 1)表明,其主要为 Cr,Fe 的化合物。涂层上部主要为高熵合金和针状化合物,对针状化合物(图 1f 的 G 点)进行成分测试可知其可能为  $\sigma$  相,分析认为是冷却过程中析出的。同时,涂层上部形成了较多的化合物,主要有 Fe 和 Cr 的碳化物、 $\sigma$  相等。这可能是因为大量铸铁中的元素进入涂层,形成了高碳的梯度高熵合金。

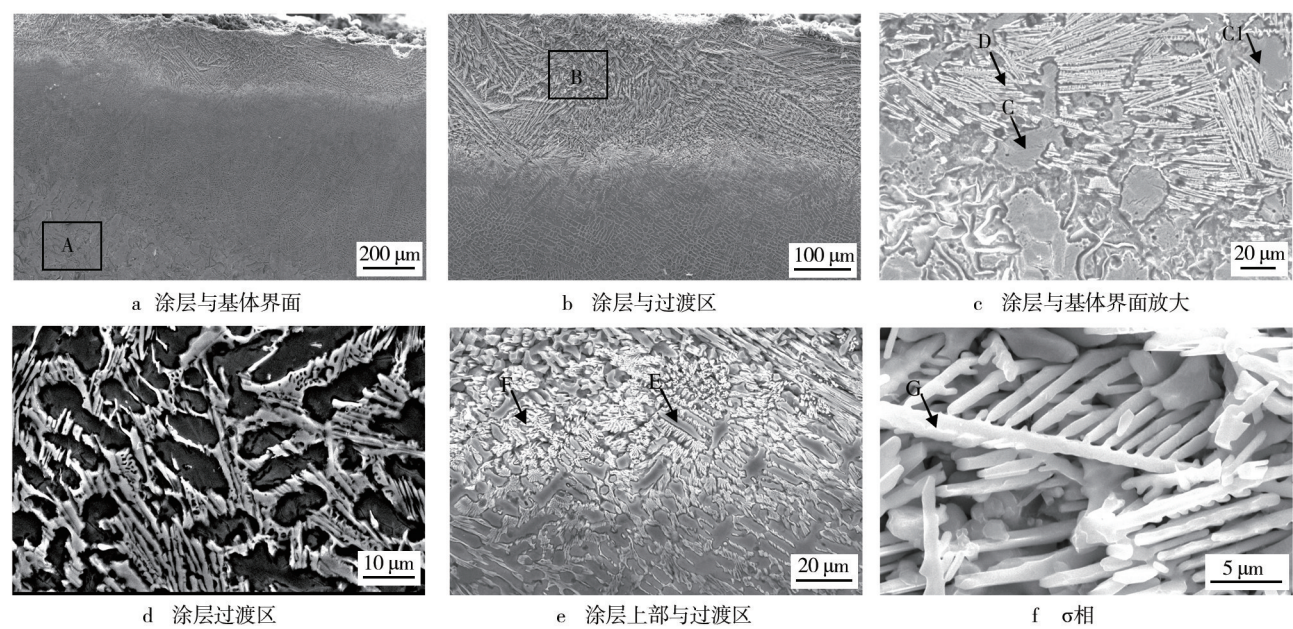


图 1 涂层微观组织

Fig. 1 Microstructure of the coating: a) the interface between the coating and matrix; b) coating and the transition zone; c) The magnified image of the interface between the coating and matrix; d) transition zone on coating; e) top and the transition zone; f)  $\sigma$  phase

表 1 涂层的 EDS 分析结果  
Tab.1 EDS chemical analysis results of the coating

Zone	Atom percent/%							
	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Si
A	—	—	—	94.56	—	—	—	5.44
B	5.34	12.92	11.21	32.15	15.06	13.57	9.75	—
C	—	—	—	93.36	—	—	—	6.64
D	—	—	—	94.01	—	—	—	5.99
E	8.67	8.50	10.40	26.16	14.99	20.18	11.11	—
F	—	36.73	13.27	48.21	1.79	—	—	—
G	—	66.81	9.58	23.61	—	—	—	—



## 2.2 涂层的相结构

涂层的X射线衍射图谱如图2所示。已标为FCC的4个衍射峰,按顺序计算其 $\sin 2\theta$ 值,基本符合FCC的3:4:8:11;已标为BCC的3个衍射峰,按顺序计算其 $\sin 2\theta$ 值,符合BCC的1:2:3。由此确定,涂层的物相主要有BCC和FCC。此外,由于铸铁中的C含量高,且碳化物具有更低的Gibbs自由能,因此未能抑制碳化物的形成,使得涂层中有碳化物 $\text{Fe}_3\text{C}$ 形成。由于局部成分符合 $\sigma$ 相的生成条件,涂层中还有 $\sigma$ 相存在。

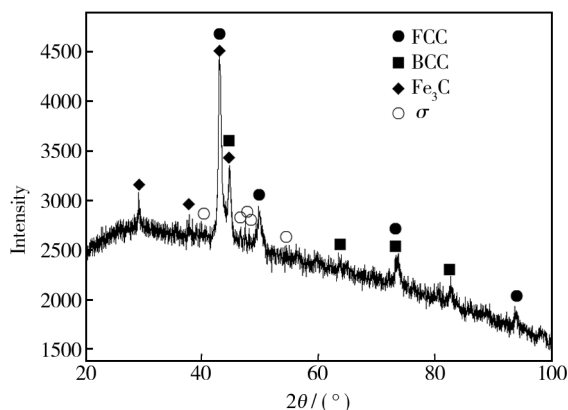


图2 涂层的X射线衍射图谱

Fig. 2 XRD pattern of the coating

由于添加了Al元素,Al原子半径为0.143 nm,大于Fe(0.124 nm),Cr(0.125 nm)等,因此使高熵合金中FCC的晶格常数(可从图2相关参数算得)有所增大。另外,涂层的快速冷却及固溶部分C原子也会导致晶格常数增大。图谱中存在一定馒头峰,这是因为高熵合金中存在多种主元,合金中的协同扩散难以进行及等离子合金化处理后快的冷却速度导致涂层中有较多的非晶相、纳米相,此外快的冷却速度还会导致涂层存在一定的残余应力。

## 2.3 $\sigma$ 相的形成机理

$\sigma$ 相是材料中最常见的拓扑密排相(TCP)之一,具有复杂的四方点阵结构,是高硬度的脆性相。当 $\sigma$ 相电子缺位数 $N_v$ 值小于2.52时,不会出现 $\sigma$ 相<sup>[17]</sup>。涂层中含有较多高 $N_v$ 值的Al, Si(来源于铸铁), Cr, Mn等元素,具备生成 $\sigma$ 相的条件。

由前述分析可知,高熵合金涂层的主要物相为FCC和BCC,非常类似于奥氏体不锈钢或双相不锈钢焊接的凝固模式。分析认为,该高熵合金涂层的凝固

模式为AF模式<sup>[18]</sup>,凝固初晶相为FCC相,因此凝固过程中不断地将铁素体(BCC)形成元素Cr排入残留液体中,达到了 $\sigma$ 相的成分要求,生成了树枝晶。图3为树枝晶形貌的 $\sigma$ 相。可以看出, $\sigma$ 相是从液相直接以非小晶面的方式生长,这与文献<sup>[19]</sup>中的 $\sigma$ 相呈针状且互相平行非常接近。由于采用的是较深的腐蚀方法,因此图3的局部区域可以看到该 $\sigma$ 相的准三维形貌。从 $\sigma$ 相准三维形貌可以看出,该树枝晶非常规整,其一次枝晶臂达到几十微米,各树枝晶的一次枝晶臂基本平行,这主要与冷却过程中的温度梯度有关,而且该树枝晶在生长过程中按某种晶体的位向关系生长。

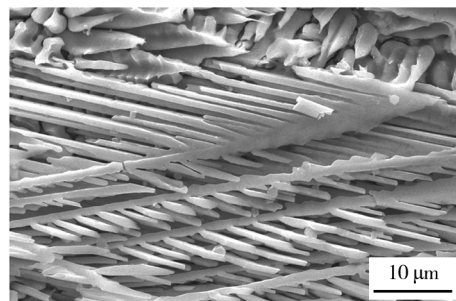


图3 树枝晶 $\sigma$ 相的形貌

Fig. 3 Morphology of dendrite  $\sigma$  phase

## 2.4 涂层的显微硬度

如图4所示,涂层的显微硬度在350~600HV0.2之间,明显高于基体的硬度(200~230HV0.2)。原因分析如下:其一,复合涂层中高熵合金的树枝晶各主元原子半径差距较大,特别是原子半径明显较大的Al元素和原子半径较小的C元素,进一步增加了固溶强化的作用;其二,等离子合金化过程的快速冷却进一步提高了涂层的固溶极限,并细化了晶粒,甚至出现纳米晶,有利于涂层的强化;其三,枝晶间的碳化物、金属

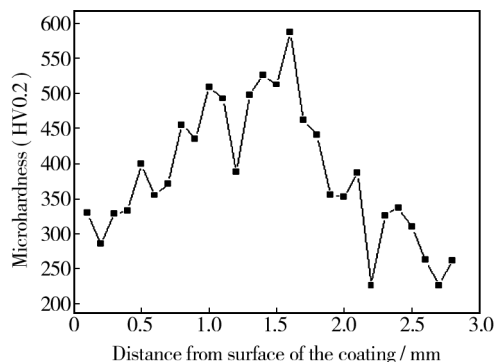


图4 涂层的显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of the coating

间化合物也有利于提高涂层的显微硬度。另外,涂层表层及涂层与基体界面处的硬度较低。这可能是由于等离子弧加热时,涂层处于高温的熔池,导致表面有烧损及有少量气孔等缺陷存在,表面硬度降低。

### 3 结论

以等摩尔比的 Al, Co, Cr, Cu, Mn, Ni 单质金属粉对 HT250 铸铁表面进行等离子合金化,获得了梯度分布的  $\text{AlCoCrCuFe}_x\text{MnNiC}_x$  高熵合金复合涂层。涂层主要由高熵合金的树枝晶和枝晶间  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\sigma$  相组成。涂层的显微硬度约为 350 ~ 600HV0.2,明显高于基体,有利于提高铸铁的表面耐磨性。

### 参考文献

- [1] ZHANG Y, ZHOU Y J, LIN J P, et al. Solid Solution Phase Formation Rules for Multicomponent Alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(6): 534—537.
- [2] YE H J W, CHEN S K, GAN J Y, et al. Formation of Simple Crystal Structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V Alloys with Multiprincipal Metallic Elements[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35A: 2533—2536.
- [3] YE H 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.
- [4] SINGH S, WANDERKA N, MURTY B S, et al. Decomposition in Multi-component  $\text{AlCoCrFeNiCu}$  High-entropy Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59: 182—190.
- [5] 张迪, 单际国, 任家烈. 高能束熔覆技术的研究现状及发展趋势[J]. *激光技术*, 2001, 25(2): 39—42.  
ZHANG Di, SHAN Ji-guo, REN Jia-lie. Status and Development of Cladding with High Power Density Beam[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(2): 39—42.
- [6] 刘宁, 朱智轩, 金云学, 等. 激光熔覆技术制备高熵合金涂层的研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(3): 133—142.  
LIU Ning, ZHU Zhi-xuan, JIN Yun-xue, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology to Prepare High-entropy Alloy Coating[J]. *Materials Review*, 2014, 28(3): 133—142.
- [7] 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 Zu-feng, ZHANG Chong, TANG Qun-hua, et al. Effects of WC Particles on the Microstructure and Hardness of FeCoCrNiCu High-entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(1): 13—19.
- [8] 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性能的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 9—13.  
HUANG Zu-feng, ZHANG Chong, TANG Qun-hua, et al. Effects of Annealing on the Microstructure and Hardness Laser Cladding FeCoCrNiB High-entropy Alloy Coating[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(1): 9—13.
- [9] 刘俊东. TiC/AlCrFeNi-M 系高熵合金基复合材料显微组织及原位自生机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
LIU Jun-dong. Microstructure and Mechanism of in-situ Synthesis of Reinforcing Phase in TiC/AlCrFeNi-M High-entropy Alloy Based Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] LIU W H, WU Y, HE J Y, et al. Grain Growth and the Hall-Petch Relationship in a High-entropy FeCrNiCoMn Alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(7): 526—529.
- [11] 张保森, 程江波, 徐滨士, 等. 等离子熔覆 (CuCoCrFeNi) 95B5 高熵合金涂层研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(5): 1128—1132.  
ZHANG Bao-sen, CHENG Jiang-bo, XU Bin-shi. (CuCoCrFeNi) 95B5 High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Plasma Transferred Arc Cladding Process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(5): 1128—1132.
- [12] 张松, 吴臣亮, 王超. 铁单元素基合金表面激光高熵合金化涂层的制备[J]. *金属学报*, 2014, 50(5): 555—560.  
ZHANG Song, WU Chen-liang, WANG Chao. Synthesis of Laser High Entropy Alloying Coating on the Surface of Single-element Fe Base Alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(5): 555—560.
- [13] SHENG Guo, NG C, LIU C T. Anomalous Solidification Microstructures in Co-free  $\text{Al}_x\text{CrCuFeNi}_2$  High-entropy Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 557: 77—81.
- [14] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
WU Chuan-song. Welding Thermal Process and Molten Pool Shape[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [15] 李德元, 赵文珍, 董晓强, 等. 等离子技术在材料加工中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
LI De-yuan, ZHAO Wen-zhen, DONG Xiao-qiang, et al. The Application of Plasma Technology in Material Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [16] SWALIN R A. Thermodynamics of Solid[M]. 2nd Ed. New York: Wiley, 1991.

- DENG Shu-hao, YI Dan-qing, LIU Yao-qiong, et al. Electrochemical Preparation and Performance of Biological Ceramic Film on Titanium Alloy [J]. Surface Technology, 2008, 37 (6): 5—9.
- [8] 韩建业, 于振涛, 周廉. 溶胶凝胶法制备 TiO<sub>2</sub>/HA 复合生物活性涂层及其体外活性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊4): 551—554.
- HAN Jian-ye, YU Zhen-tao, ZHOU Lian. Hydroxyapatite/Titania Composite Coating Processed by Sol-Gel Method and Its Bioactivity in Vitro [J]. Rare Metal and Engineering, 2008, 37( Suppl. 4): 551—554.
- [9] YU B, LEUNG K, GUO Q, et al. Synthesis of Ag-TiO<sub>2</sub> Composite Nano Thin Film for Antimicrobial Application [J]. Nanotechnology, 2011, 22(11): 115603.
- [10] FU T, SHEN Y, ALAJMI Z, et al. Sol-Gel Derived Ag-containing TiO<sub>2</sub> Films on Surface Roughened Biomedical NiTi Alloy [J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 12423—12429.
- [11] SHI X, NAKAGAWA M, KAWACHI G, et al. Surface Modification of Titanium by Hydrothermal Treatment in Mg-containing Solution and Early Osteoblast Responses [J]. Journal of Materials Science—Materials in Medicine, 2012, 23(5): 1281—1290.
- [12] AKGUN B, DURUCAN C, MELLOTT N. Effect of Silver Incorporation on Crystallization and Microstructural Properties of Sol-Gel Derived Titania Thin Films on Glass [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2011, 58(1): 277—289.
- [13] 汪宇炎, 汪洋. TiO<sub>2</sub> 薄膜在玻璃材料上的亲水性研究 [J]. 表面技术, 2009, 38(2): 52—54.
- WANG Yu-yan, WANG Yang. Study on Hydrophilic Properties of TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared on Glass [J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 52—54.
- [14] UENO T, YAMADA M, SUZUKI T, et al. Enhancement of Bone-Titanium Integration Profile with UV-photofunctionalized Titanium in a Gap Healing Model [J]. Biomaterials, 2010, 31(7): 1546—1557.
- [15] 郑志刚, 姚元元, 张延彪, 等. 银纳米粒子对大肠杆菌和金黄葡萄球菌杀灭机理研究 [J]. 分析科学学报, 2011, 27(6): 799—801.
- ZHENG Zhi-gang, YAO Yuan-yuan, ZHANG Yan-biao, et al. Bacteriostasis Mechanism of Ag Nanoparticles to Escherichia Coli and Staphylococcus Aureus [J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(6): 799—801.
- ~~~~~
- (上接第 17 页)
- [17] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- XIAO Ji-mei. The Metallography of Stainless Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [18] LIPPOLD John C, KOTECKI Damian J. 不锈钢焊接冶金学及焊接性 [M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- LIPPOLD John C, KOTECKI Damian J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels [M]. CHEN Jian-hong, Trans. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [19] 刘君, 孙志超, 唐文亭. K403 镍基铸造合金热暴露后的微观组织与性能 [J]. 铸造, 2013, 62(7): 612—615.
- LIU Jun, SUN Zhi-chao, TANG Wen-ting. Microstructure and Properties of K403 Nickel Based Alloy after Thermal Exposure [J]. Foundry, 2013, 62(7): 612—615.
- ~~~~~
- (上接第 49 页)
- ZHANG Tong-he. The Effects of Ions Sputtering in High Dose Implantation [J]. Nuclear Technology, 1987(2): 30—33.
- [18] 谭雪霏, 张新, 赵春波. 钛离子注入对 AZ31 镁合金表面力学性能及耐蚀性的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(8): 45—49.
- TAN Xue-fei, ZHANG Xin, ZHAO Chun-bo. Effect of Ti Ion Implanting on Mechanical Property and Corrosion Resistance of AZ31 Magnesium Alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(8): 45—49.
- [19] 陈秋龙, 蔡亦炜, 彭辉, 等. 奥氏体不锈钢氮离子注入层的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(3): 129—134.
- CHEN Qiu-long, CAI Yi-wei, PENG Hui, et al. Study on Austenitic Stainless Steel Nitrogen Ion Implantation Layer [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1995, 29(3): 129—134.
- [20] 张通和, 吴瑜光. 粒子束表面工程技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- ZHANG Tong-he, WU Yu-guang. Beam Surface Engineering Technology and Applications [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [21] 李朋. 铝离子注入 AZ31 镁合金的腐蚀磨损研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- LI Peng. Corrosion and Wear Resistance of Al Ion Implanted AZ31 Magnesium Alloys [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.