

WC 颗粒对激光熔覆 FeCoCrNiCu 高熵合金 涂层组织与硬度的影响 *

黄祖凤¹, 张 冲¹, 唐群华¹, 戴品强^{1,2}, 吴 波¹

(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)

摘 要: 采用 CO₂ 横流激光器制备添加 WC 颗粒的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层, 研究 WC 含量对涂层的组织结构及硬度的影响。结果表明: 不同 WC 含量的高熵合金涂层均由简单的面心立方结构(FCC)和体心立方结构(BCC)两相组成。随着 WC 含量的提高, 涂层中 FCC 相含量不断减少, BCC 相含量不断增加。WC 颗粒在激光熔覆过程中发生溶解并完全溶入 FCC 相和 BCC 相中, 并未引起复杂碳化物相的生成。不同 WC 含量的涂层均为树枝晶组织。激光熔覆过程中的快速凝固条件有利于抑制枝晶和枝晶间的成分偏聚。WC 含量的提高使枝晶细化, 硬度提高。

关键词: 高熵合金; 涂层; 激光熔覆; WC 颗粒

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)01-0013-07

Effects of WC Particles on the Microstructure and Hardness of FeCoCrNiCu High-entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding

HUANG Zu-feng¹, ZHANG Chong¹, TANG Qun-hua¹, DAI Pin-qiang^{1,2}, WU Bo¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108; 2. Department of Materials Science and Engineering, College of Fujian University of Technology, Fuzhou 350108)

Abstract: FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating with WC particles was prepared by the continuous wave CO₂ laser. The effects of WC particles on the microstructure and hardness were investigated. Results show that the high entropy alloy coatings with different WC content are all composed of face-centered cubic (FCC) and body-centered cubic (BCC) solid solution phases. With the increase of WC content, BCC phase content increases and FCC phase content decreases. During the process of laser cladding, WC particles dissolved into the FCC and BCC phases, however, the addition of WC does not cause the formation of complex carbide phases. The microstructure of coatings with different WC content is typical dendrite. Element segregation between the dendrite and interdendrite can be effectively inhibited by laser cladding with rapid solidification. The increase of WC content lead to grain refinement and microhardness increasing.

Key words: high-entropy alloy; coating; laser cladding; WC particles

0 引 言

传统合金以一种元素为主要元素(称为主元), 通过添加适量其它元素来提高合金的性

能^[1]。高熵合金又称多主元合金, 是由 5~13 种元素构成, 每种元素的摩尔比介于 5% 到 35% 间, 合金的性能由多种主元共同作用来决定^[2-3]。通过适当的成分设计可以获得高强度、高硬度、耐

收稿日期: 2012-09-29; **修回日期:** 2013-01-08; **基金项目:** * 福建省自然科学基金(2012J01202); 国家自然科学基金(51171046, 50971043); 福建省高校产学研合作重大项目(2010H60001)

作者简介: 黄祖凤(1988—), 男(汉), 福建霞浦人, 硕士生; **研究方向:** 新型金属材料

网络出版日期: 2013-01-14 11:44; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130114.1144.003.html>

引文格式: 黄祖凤, 张冲, 唐群华, 等. WC 颗粒对激光熔覆 FeCoCrNiCu 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.

高温软化和高耐腐蚀性的高熵合金^[4-6]。目前对高熵合金的研究主要集中在采用电弧熔铸的块体材料上。制备高熵合金采用的金属元素大都比较昂贵,如镍、铬和钴。因而,在低价的钢基体上制备高熵合金涂层对于拓展高熵合金的实际应用具有很大的意义。目前,已经有报道通过采用电沉积^[7]和磁控溅射^[8-9]的方法制备出高熵合金涂层,但是通过这些方法得到的涂层太薄,不能满足重载应用场合。激光熔覆具有高的加热和冷却速率,涂层与基体为冶金结合,结合强度高,涂层厚度最高可达到几毫米等优点。

目前,激光熔覆技术主要用于制备镍基、钴基和铁基合金涂层^[10-11],以及添加陶瓷颗粒增强的合金涂层^[12]。对于激光熔覆高熵合金涂层的研究还较少,处于起步阶段,文献^[13-15]报道了在 Q235 钢基体上制备高熵合金涂层,具有简单固溶体结构和优异的耐高温软化性能。但对于添加陶瓷颗粒增强激光熔覆高熵合金涂层的研究还未见文献报道。文中通过制备 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层,研究添加 WC 颗粒对高熵合金涂层组织结构及硬度的影响,为进一步研究添加陶瓷颗粒增强高熵合金涂层提供参考。

1 试验方法

激光熔覆设备为 GFT-IVB 型 CO₂ 横流激光器。基材为 Q235 钢板,将其加工为 40 mm×20 mm×10 mm 的试样块,表面使用砂纸打磨,并分别用酒精和丙酮洗净。熔覆材料采用纯度高于 99% 的 Fe、Co、Cr、Ni 和 Cu 粉按 FeCoCrNiCu 等摩尔配比混合而成,粉末粒度为 48~74 μm。为提高熔覆材料的铺展能力和造渣能力,添加摩尔分数为 4% 的 B, B 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,

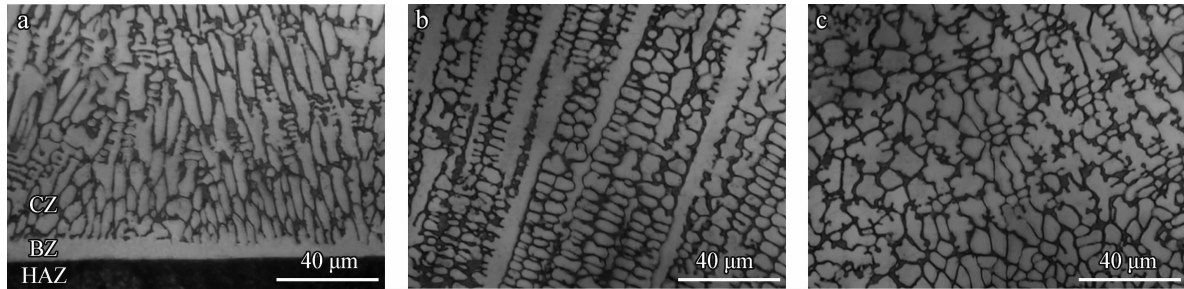
0.5% Al, 余量 Fe), 粒度为 180 μm。

WC 以质量分数为 10% 和 20% 的比例掺入含 B 的 FeCoCrNiCu 合金粉末中,将粉末机械研磨均匀后涂覆在基材表面,粘结剂使用溶于丙酮的醋酸纤维素溶液,厚度约为 1 mm。另以不加 WC 含 B 的 FeCoCrNiCu 合金作为对照组。将涂覆好的试样放入干燥箱中在 150 ℃ 烘干 2 h。激光多道熔覆参数为:激光功率 1.6 kW,光斑直径 4 mm,扫描速度 150 mm/min,搭接率为 50%。熔覆过程用 Ar 气作为保护气体。采用 XJZ-6A 型金相显微镜和日立 S3400 扫描电镜分析试样横截面的微观组织,并利用 SEM 附带的能谱仪进行微区 EDS 分析。采用日本理学 D/Max Ultima III XRD 进行相组成分析。用 DHV-1000 型显微维氏硬度计测定涂层横截面的硬度,载荷 200 g,加载时间 15 s,从基体开始沿横截面方向测试熔覆层显微硬度,间距为 0.1 mm。

2 试验结果与讨论

2.1 高熵合金熔覆层的显微组织形貌

图 1 为激光熔覆 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的横截面显微组织。图 1(a)~(c) 分别为 FeCoCrNiCu 熔覆层底部、中部和顶部的金相显微组织。从图 1(a) 可以看出,熔覆试样横截面由表及里依次为熔覆层区(CZ),结合区(BZ)和基体热影响区(HAZ)。熔覆层与基材间有一条白亮条带,构成结合区;熔覆层底部为定向凝固的柱状树枝晶组织,中部组织和底部类似,为柱状树枝晶组织,二次枝晶臂较底部组织发达;熔覆层顶部的枝晶生长方向与扫描方向的夹角较小,因而试样横截面上所反映出来的熔覆层顶部微观组织呈等轴晶形态^[16]。



(a) Bottom of laser layer (b) Middle of laser layer (c) Top of laser layer

图 1 激光熔覆 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的横截面显微组织

Fig. 1 Cross-section microstructure of laser cladding FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating

熔覆层与基体间有约 10 μm 厚的白亮条带, 即结合区, 此区域的 EDS 分析结果显示, 该区域成分为 51.61% Fe, 10.01% Cr, 11.72% Co, 13.18% Ni, 13.58% Cu(原子数分数)。说明结合区是熔覆层和基体材料元素相互扩散产生的, 由于元素的相互扩散使得熔覆层与基体形成良好的冶金结合。合金凝固时, 固-液界面处液相内的温度梯度 G_L 、凝固速度 R 和合金的原始成分 C_0 是决定合金晶体形貌的主要因素。在激光快速熔凝过程中, 由于是通过基材散热, 基体表面一薄区会发生熔化, 这一区域与熔覆层区域会发生元素的相互扩散, 而此时液固界面处的液相内实际温度梯度 G_L 极大, 大于液相线温度梯度 G_m , G_L/R 很大, 晶体形核速度远大于生长速度, 该处液体以界面作为形核核心, 按平面晶的形态生长。随着液固界面的推移, 结晶前沿液相内实际温度梯度下降, 凝固速度相对增大, 即此时 G_L/R 值减小, 平面晶向柱状晶转变, 由于熔池中部较熔池底部的冷却速度小, 晶粒有足够的时间沿热流方向生长, 因而熔池中部有足够的时间形成较发达二次枝晶臂。随着液固界面的继续推移, G_L 不断下降, R 不断增大, 此时 G_L/R 不断减小, 此时垂直向基体方向的散热作用被削弱, 热量更多传向熔池尾部, 导致熔池顶部的枝晶生长方向与扫描方向夹角变小, 因而横截面上体现出来的顶部微观组织为等轴晶形态^[16], 即如图 1(c)所示的组织。综上所述, 熔覆层为树枝晶组织, 熔覆层与基体间达到良好的冶金结合。

2.2 WC 含量对高熵合金涂层相组成的影响

图 2 为不同 WC 含量 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 XRD 图谱及其标定结果。可以看出, 不同 WC 含量的涂层均由面心立方结构(FCC)和体心立方结构(BCC)两相组成。WC 颗粒的加入并未引起复杂碳化物相的生成, 高熵合金涂层中相的数目未发生改变。随着涂层中 WC 含量的增加, FCC 相所对应的衍射峰强度逐渐减弱, 而 BCC 相所对应的衍射峰强度不断增强, 这说明 WC 含量的增加使涂层中 FCC 相含量不断减少, BCC 相含量不断增加。

2.3 WC 含量对高熵合金涂层显微组织的影响

图 3 为不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层中部的典型显微组织, 可以看出, 不同 WC 含量的涂层均为树枝晶组织, 由枝晶和枝晶

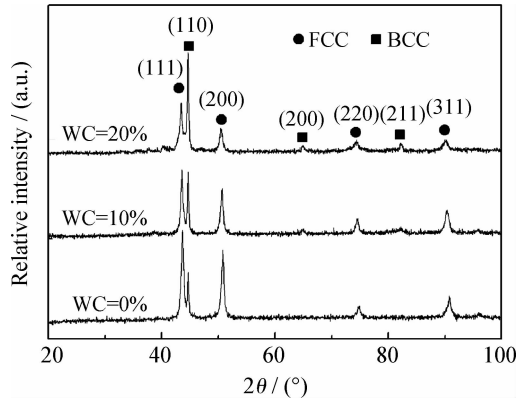
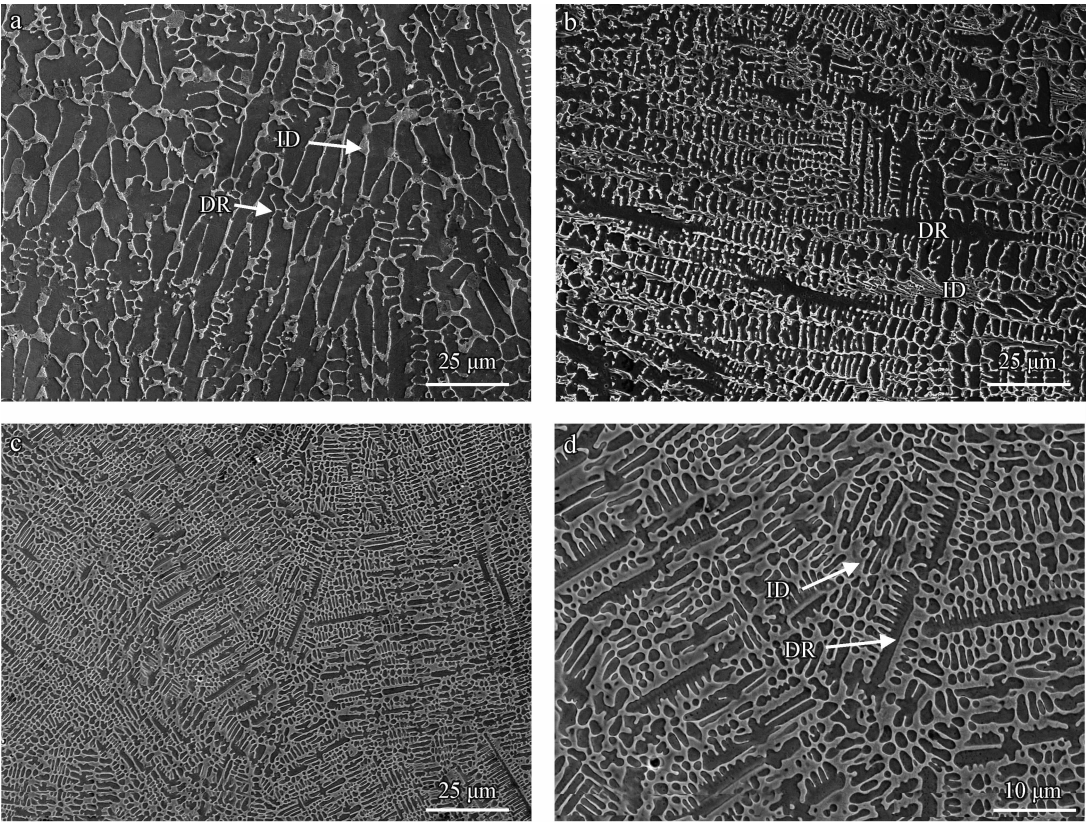


图 2 不同 WC 含量 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 XRD 图
Fig. 2 XRD patterns of laser cladding FeCoCrNiCu high-entropy alloys coatings with different content of WC

间构成, 随着 WC 含量的增加, 枝晶不断被细化, 枝晶间组织逐渐增多。结合涂层的 XRD 分析结果, 随着 WC 含量的增加, 涂层中 FCC 相含量降低, BCC 相含量增加。可以判断, 枝晶对应 FCC 相, 枝晶间对应 BCC 相。不同涂层组织中均未发现 WC 颗粒, 在激光熔覆过程中, WC 颗粒完全溶入 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层中, 但并未与其它合金元素形成复杂的碳化物相, 而是完全溶入固溶体相中。这种涂层相比 WC 颗粒未溶解的涂层来说具有更好的韧性和耐冲击性能, 较适合应用于熔覆层要求有一定韧性, 耐高温磨损性和高耐蚀性的场合。WC 颗粒未溶解的涂层耐磨性更佳, 但韧性较差, 适合应用于不受冲击, 要求更高耐磨的场合。

表 1 为不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 涂层的稀释率计算结果。通过公式 $\eta = h / (H + h)$ 来计算熔覆层稀释率, 其中 η 为熔覆层稀释率, H 为熔覆层高度, h 为基体熔深。从表 1 可以看出, 随着 WC 含量的增加, 涂层的稀释率不断增加。

表 2 为不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层 EDS 分析结果(由于 B 和 C 为轻元素, 且 B 名义的摩尔分数仅 4%, 测试不准确, 所以未标出, 表中的 Actual 代表激光熔覆后所测得元素的实际含量, ID 和 DR 分别代表枝晶和枝晶间)。表 2 可得, Fe 的实际含量高于名义成分, 这是基体稀释的结果, 而 Cu 和 Ni 的实际含量略低于 Co 和 Cr, 这是因为 Cu 和 Ni 在激光熔覆过程中发生少部分的烧损。可以看出随着 WC 含量的增加, Fe 实际含量逐渐增大, 这是因为 WC 对 CO_2



(a) 0% (b) 10% (c) 20% (low power) (d) 20% (high power)

图 3 不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 SEM 图

Fig. 3 SEM images of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coatings with different content of WC (ID: interdendrite DR: dendrite)

激光(波长为 10.6 μm)的吸收系数较金属粉末高得多^[17],随 WC 含量的增加,熔覆相同厚度涂层所需最小比能量减小,导致了相同工艺条件下整个熔覆层温度升高,基体中更多的 Fe 进入到涂层中,涂层的稀释率增加。

表 1 不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 涂层的稀释率
Table 1 Dilution of FeCoCrNiCu coatings with different content of WC

Alloy	H/mm	h/mm	$\eta=h/(H+h)$
WC=0%	0.69	0.09	11.5%
WC=10%	0.57	0.15	20.8%
WC=20%	0.45	0.26	36.6%

从图 3(a)可以看出,未加 WC 时,涂层组织由枝晶和枝晶间组成,从上面分析可知,枝晶为 FCC 相,枝晶间为 BCC 相,结合表 2 可知,枝晶富集 Fe、Co、Ni 和 Cu,而枝晶间富含 Cr。当 WC

含量为 10%和 20%时,Fe、Co、Ni 和 Cu 仍偏聚于枝晶,而 Cr 和 W 则在枝晶间富集。

表 3 为各元素间的混合焓^[18]。可以看出,B 与 Cr 的混合焓最小(较负),与 Fe、Co 和 Ni 间的混合焓也均较小,但相差不大,而 B 与 Cu 的混合焓相对较大,元素间的混合焓大小很大程度决定元素的偏聚,所以在未加 WC 时,Cr、B 与部分的 Fe、Co、Ni 在枝晶间形成富 Cr 的 BCC 相,B 的含量很少,固溶在 BCC 结构固溶体中,Fe、Co、Ni 和 Cu 富集于枝晶形成 FCC 结构固溶体,即 FCC 相,虽然 Fe、Co 和 Ni 在枝晶富集,但在枝晶和枝晶间的含量相差较小;当涂层中添加 10%或 20% WC 颗粒时,因为 C 和 Cr 的混合焓最小,容易溶入富 Cr 的 BCC 相中,而在枝晶间富集,由于 W 与 C 的混合焓较小(较负),与 Fe、Co、Ni 和 Cu 混合焓较大,因而 W 亦在枝晶间富集。Fe、Co、Ni 和 Cu 仍偏聚于枝晶而形成 FCC 相。

WC 含量的增加使枝晶细化,枝晶间组织增

表 2 不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的 EDS 分析结果(a/%)

Table 2 EDS analysis results of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coatings with different content of WC (a/%)							
Alloy	Zone	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	W
WC=0%	Actual	19.52	28.52	19.82	16.77	15.37	0
	DR	15.36	30.11	21.13	17.05	16.35	0
	ID	36.55	25.68	17.57	12.18	8.02	0
WC=10%	Actual	17.55	32.33	17.74	14.92	14.25	3.21
	DR	13.14	34.44	18.88	16.87	15.02	1.65
	ID	32.95	28.97	14.20	11.13	6.14	5.61
WC=20%	Actual	16.43	36.06	15.52	13.43	12.30	6.26
	DR	12.76	37.68	16.09	16.00	13.66	3.91
	ID	27.52	31.35	12.75	9.60	5.48	13.30

表 3 各元素间的混合焓^[18] (kJ/mol)

Table 3 Mixing enthalpy of different atom-pair ^[18] (kJ/mol)								
Element	Fe	Co	Cr	Ni	Cu	W	C	B
Fe	0							
Co	-1	0						
Cr	-1	-4	0					
Ni	-2	0	-7	0				
Cu	13	6	12	4	0			
W	4	-5	5	-9	1	0		
C	-50	-42	-61	-39	0	-32	0	
B	-26	-24	-31	-24	0	4	-10	0

多。这是由于 WC 颗粒几乎全部溶解,大部分溶入 BCC 相中,少部分溶入 FCC 相中,由于枝晶间对应 BCC 相,因而 WC 含量的增加使涂层中枝晶间组织增多。BCC 固溶体相固溶了较多半径差别较大的原子,晶格畸变较大,为硬质相,BCC 相含量的增多会阻碍枝晶的长大,因而使枝晶细化。

不同于激光熔覆镍基合金涂层在添加 WC 颗粒时易生成各种复杂的碳化物相。FeCoCrNiCu 高熵合金涂层在添加 WC 颗粒时未形成复杂的碳化相,涂层仍由简单的固溶体相组成。这是由高熵合金的高混合熵效应所引起的,高的混合熵会增加各主元的相容性,抑制化合物相的生成,促进各主元互溶而形成简单的固溶体结构^[2]。

表 4 为电弧熔炼 FeCoCrNiCu 高熵合金的微

区成分分析结果^[6]。对比表 2 中激光熔覆 FeCoCrNiCu高熵合金涂层 EDS 分析结果,可以发现,虽然不同 WC 含量涂层组织中枝晶和枝晶间依然存在成分偏析,但成分偏析的程度比电弧熔炼的高熵合金下降了很多。这主要原因是激光熔覆过程中冷却速度极快,可以达到 $10^4 \sim 10^6$ K/s^[15],快速冷却降低了成分在枝晶和枝晶间的偏析,其次,微量 B 元素的加入可能也会对降低成分偏析也起到一定的作用。

表 4 电弧熔炼 FeCoCrNiCu 高熵合金枝晶和枝晶间 EDS 分析结果^[6]

Table 4 EDS analysis of the dendrite and interdendrite of FeCoCrNiCu high-entropy alloy prepared by arc melting technique ^[6]					
Area	Cr	Fe	Co	Ni	Cu
DR	21.08	23.58	24.67	21.34	9.56
ID	1.78	3.46	2.67	5.41	86.68

2.4 高熵合金涂层显微硬度

表 5 为不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的平均显微硬度。图 4 为不同 WC 含量的高熵合金涂层的显微硬度分布。FeCoCrNiCu 合金涂层横截面的平均显微硬度为 275 HV,而采用电弧熔炼方法制得的块体 FeCoCrNiCu 合金硬度仅为 133 HV^[2],这主要是因为激光熔覆过程中冷却速度极快,可以达到 $10^4 \sim 10^6$ K/s,快速凝固一方面使晶粒细化,另一方面也进一步增加了涂层中固溶体的固溶度极限,提高了固溶强化效

果;另外,微量 B 元素的加入,增加了晶格畸变,在一定程度上也促进了硬度的提高。从表 5 可以看出,随着 WC 含量的增加,涂层平均硬度逐渐增大,当 WC 含量为 20% 时,涂层硬度达到 634 HV,比未加 WC 时提高了 1.3 倍。这主要是由以下 3 个方面原因引起的:首先,随着 WC 含量的增加,BCC 相含量提高,而 BCC 相为硬质相,使硬度提高;其次,Wc 含量的增加使枝晶细化,即起到了细晶强化的效果;最后,随着 WC 含量的提高,更多的 W 和 C 原子固溶在 BCC 固溶体相和 FCC 固溶体相中,晶体点阵畸变增大,固溶强化作用增强,使涂层硬度提高。

从图 4 可以看出,不添加 WC 时,整个涂层的硬度变化不大。当 WC 含量为 10% 和 20% 时,涂层靠近热影响区部分的硬度相比涂层其它部分发生一定程度的下降。当 WC 含量增加到 20% 时,下降程度最大,这是由 WC 含量增加时涂层稀释率增大所导致的结果。

表 5 不同 WC 含量的高熵合金涂层的平均显微硬度
Table 5 Average microhardness of laser cladding Fe-CoCrNiCu high-entropy alloy coatings with different content of WC

WC	0%	10%	20%
HV	275	501	634

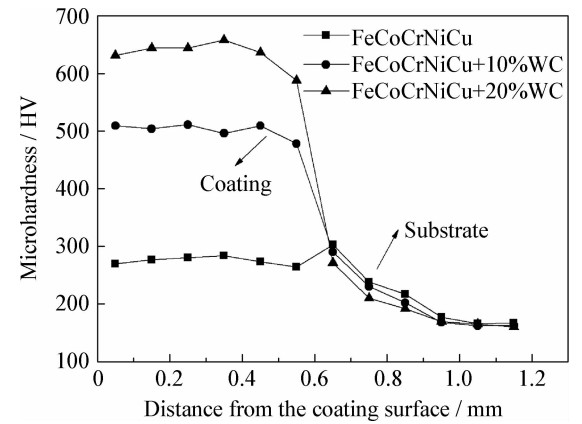


图 4 不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的显微硬度分布
Fig. 4 Microhardness distribution of FeCoCrNiCu high entropy alloy coatings with different content of WC

3 结 论

(1) 不同 WC 含量的 FeCoCrNiCu 高熵合金

涂层均由简单的 FCC 结构固溶体相和 BCC 结构固溶体相组成,Wc 颗粒的加入并未引起复杂碳化物相的生成,Wc 溶解后大部分溶入 BCC 相中,少部分溶入 FCC 相中。随着 WC 含量提高,涂层中 BCC 相含量不断增加,FCC 相含量不断减少。

(2) 随着 WC 的含量的提高,枝晶不断细化,涂层的稀释率逐渐增大。相比电弧熔炼的块体合金,激光熔覆 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层具有较小成分偏聚。

(3) 激光快速凝固有利于提高合金的硬度,激光熔覆 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的平均硬度为 275 HV,而电弧熔炼的块体 FeCoCrNiCu 合金硬度仅为 133 HV;随着 WC 含量的提高,涂层平均硬度增加,当 WC 含量为 20% 时,涂层硬度达到 634 HV,比未加 WC 时提高了 1.3 倍。

参考文献

[1] Greer A L. Confusion by design [J]. Nature, 1993, 366 (25): 303-304.

[2] Yeh J W, Chen S K, Lin S J. Nano-structured high entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes [J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.

[3] Yeh J W, Chen S K. Formation of simple crystal structures in solid solution alloys with multi-principal metallic elements [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2004, 35(8): 2533-6.

[4] Tong C J, Chen M R, Chen S K, et al. Mechanical performance of the $Al_xCoCrCuFeNi$ high-entropy alloy system with multiprincipal elements [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2005, 36(4): 1263-71.

[5] Senkov O N, Wilks G B, Miracle D B. Refractory high-entropy alloys [J]. Intermetallics, 2010, 18(9): 1758-65.

[6] Hsu Y J, Chang W C, Wu J K. Corrosion behavior of Fe-CoNiCrCu_x high-entropy alloys in 3.5% sodium chloride solution [J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 92 (1): 112-117.

[7] Yao C Z, Zhang P, Liu M, et al. Electrochemical preparation and magnetic study of Bi-Fe-Co-Ni-Mn high entropy alloy [J]. Electrochim Acta, 2008, 53(28): 8359-65.

[8] Chen T K, Wong M S. Structure and properties of reactively-sputtered $Al_xCoCrCuFeNi$ oxide films [J]. Thin Solid Films, 2007, 516(2): 141-146.

[9] Chang H W, Huang P K, Yeh J W. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal component ($AlCrMoSiTi$)N coatings [J]. Surface and Coatings

Technology, 2008, 202(14): 3360-6.

[10] Wong T T, Liang G Y, He B L. Wear resistance of laser-clad Ni-Cr-B-Si alloy on aluminium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology. 2000, 100(1): 142-146.

[11] Li M X, He Y Z, Sun G X. Laser cladding Co-based alloy/SiC_p composite coatings on IF steel [J]. Materials and Design, 2004, 25(4): 355-358.

[12] Wu P, Du H M, Chen X L, et al. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings [J]. Wear, 2004, 257(2): 142-147.

[13] Zhang H, Pan Y, He Y Z. Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding [J]. Materials and Design, 2010, 32(4): 1910-15.

[14] Ye X Y, Ma M X, Liu W J, et al. Synthesis and characterization of high-entropy alloy Al_xFeCoNiCuCr by laser cladding [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2011: 1079-86.

[15] 张晖, 潘冶, 何宜柱. 激光熔覆 FeCoNiCrAl₂Si 高熵合金涂层 [J]. 金属学报, 2011, 47 (8): 1075-9.

[16] 单际国, 李辉, 任家烈. 聚焦光束粉末堆焊熔池的凝固特征及微观组织形成机理 [J]. 金属学报, 2002, 38(5): 555-560.

[17] 戎磊, 黄坚, 李铸国, 等. 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 40-44.

[18] Takeuchi A, Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element [J]. Materials Transactions, 2005, 46 (12): 2817-29.

作者地址: 福建省福州市闽侯县上街大学城 350108
福州大学学生公寓生活三区 36 号楼
Tel: (0591) 8373 4022
E-mail: huangzufeng@sina.cn

• 学术动态 •

2013 年全国青年摩擦学学术会议将在青岛举行

由中国机械工程学会摩擦学分会主办的 2013 年全国青年摩擦学学术会议将于 2013 年 5 月在山东青岛召开。会议设大会报告、分会场报告以及展览交流三种形式。会议目的在于为国内及海外华人青年摩擦学工作者提供一个自由和气氛友好的学术交流平台,就摩擦学领域内大家关注的问题,特别是生态、环境、能源等热点问题展开讨论,交流新现象与新方法的研究。大会组织委员会热诚欢迎全国各高等院校、研究机构、企事业单位从事摩擦学研究和工业应用的人员参加大会,展示研究成果或提交论文。会议届时将邀请院士、专家以及公司、企业技术负责人出席。

会议主题(但不限于)包括:① 摩擦与磨损的基础研究;② 润滑的基础研究;③ 表面工程;④ 摩擦化学与界面;⑤ 环境与生态;⑥ 生物与仿生;⑦ 工业摩擦学(轴承、齿轮、密封、液压、风电等新技术及工程应用);⑧ 微纳摩擦学与应用;⑨ 摩擦学创新研究——新理论、新现象、新方法 & 新应用。

会议征集论文,会议组委会会前将印制非正式出版的论文/论文详细摘要文集,供会议交流使用,论文不收取版面费。论文全文截止日期为 2013 年 3 月 31 日。请将论文摘要/论文全文的电子版通过 E-mail 或会议网站(即将开通)提交至大会秘书处,请注明会议论文。

联系人: 王静(18669723895); 马咏娣(13646482627); 杨萍(13573888173); 李霞(13361209997)
联系地址:山东省青岛市抚顺路 11 号青岛理工大学机械工程学院(266033)
联系电话:(0532) 8507 1980, (0532) 8507 1283; QQ: 346366512
电子邮件:tribo2013qd@163.com;tribo2013qd@126.com

(摘自中国机械工程学会 网)