

基材属性对 Ni60A-WC 激光熔覆涂层性能的影响

刘发兰, 赵树森, 高文焱, 周春阳, 王奕博, 林学春

(中国科学院 半导体研究所 全固态光源实验室, 北京 100083)

摘要: 在 304 不锈钢(304SS)和 Q235 碳钢上分别熔覆 Ni60A 及 Ni60A-WC 金属粉末, 以及添加 Cr 和 Cr₃C₂ 的涂层, 利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)分析涂层的宏观形貌、微观组织和元素分布, 用显微硬度计对涂层的硬度进行测试分析。结果表明: 基材中元素成分的不同会导致涂层气孔和裂纹的差异, Ni、Cr 元素含量高的 304SS 上的涂层气孔和裂纹数明显比 Q235 碳钢上的少; 基材的导热性能对涂层的稀释率与性能具有明显影响, 导热性能差的 304SS 稀释率大, WC 颗粒分解多, 涂层组织粗大; 由于 Q235 导热性能好, 冷却速率高, 导致涂层硬度高, Ni60A+40%WC 涂层平均硬度高达 1000HV_{0.2}。此外, Cr 和 Cr₃C₂ 的加入能有效防止涂层气孔的产生。

关键词: WC 涂层; 激光熔覆; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

Effect of substrate on Ni60A-WC laser cladding coatings

LIU Fa-lan, ZHAO Shu-sen, GAO Wen-yan, ZHOU Chun-yang, WANG Yi-bo, LIN Xue-chun

(Laboratory of All-Solid-State Laser Sources, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Ni60A and Ni60A-WC laser cladding coatings were prepared on 304 stainless steel and Q235 carbon steel, respectively, as well as adding Cr and Cr₃C₂ coatings. The macroscopic morphology, microstructure and elemental distribution of the coatings were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The microhardness of the coatings were tested with microhardness tester. The results show that the element composition on the substrate can cause the differences of pores and cracks. The pores and cracks of the coatings on 304 stainless steel (with high contents of Ni and Cr elements) are significantly less than those of the coatings on Q235 carbon steel. The thermal conductivity of the substrates have a significant impact on the dilution rate and performance of the coatings. Because of poor thermal conductivity, the coatings on 304 stainless steel have high dilution rate, more WC particles decompose and then coarsen the microstructure. The average hardness of Ni60A+40%WC coating on Q235 substrate up to 1000HV_{0.2} attributes to its good thermal conductivity and high cooling rate. Furthermore, pore free coatings adding with Cr and Cr₃C₂ are obtained.

Key words: WC coating; laser cladding; microstructure; microhardness

WC 粉末具有极高的硬度, 适用于工业领域易磨损部件耐磨涂层的制备^[1], 其中以 Ni 基合金-WC 颗粒复合涂层应用最为广泛^[2-5]。激光熔覆作为一种新兴

的表面改性技术, 具有高效、高质量、无污染等优点。采用激光熔覆方式制备 Ni 基合金-WC 颗粒复合涂层是近年来激光熔覆修复领域的研究热点。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51205380)

收稿日期: 2013-04-20; 修订日期: 2013-11-20

通信作者: 林学春, 研究员, 博士; 电话: 010-82304165; E-mail: xclin@semi.ac.cn

HUANG 等^[6-7]采用激光熔覆方法在 H13 工具钢上获得了 WC 含量为 70%(质量分数)、硬度高达 800HV 的涂层。WU 等^[8]用 2 kW 连续 CO₂ 激光器在低碳钢基材上熔覆 Ni35+50%(体积分数)WC-Ni (15%Ni, 余量 WC, 质量分数)包 WC, 获得了无气孔和裂纹的涂层。徐国建等^[9]利用侧向送粉激光熔覆的方法得到了 Ni 基合金粉末和 50%WC 无裂纹涂层, 硬度达到 45 钢基材的 5 倍以上。ZHOU 等^[10]利用激光-感应复合熔覆的方法在 A3 钢基材上得到了 35%WC 含量无气孔、无裂纹的涂层, 熔覆效率是普通激光熔覆方法的 5 倍。杨胶溪等^[11-12]利用宽带熔覆及梯度熔覆的方法在 45 钢基材上得到了 WC 含量为 60%无气孔和裂纹的涂层。ZHONG 等^[13]利用双侧送粉的方式, 在低碳钢基体上研究了 Stellite6 掺入不同含量 WC(0~100%, 体积分数)的微观组织结构。CHEN 等^[14]研究了 45 钢基材上激光熔覆不同粒度 WC+Ni60B 的涂层性能。

综上所述, 已有的研究主要是针对在同种基材上熔覆不同 WC 含量的工艺探索。然而, Ni 基合金-WC 复合涂层激光熔覆工艺参数选择及涂层性能与所采用基材密切相关。在不同基材上, 工艺相差甚远。因此, 有必要针对基体材料对 WC 涂层熔覆工艺及性能影响机制开展研究。基材属性包括基材的材料属性、几何形态和热处理状态等, 这些属性对激光熔覆工艺均具有重要的影响, 然而大部分因素可以通过人为方式控制, 如基材的表面形貌、粗糙度、热处理状态以及热处理程度; 但是基材的物理属性, 如化学成分、热传导性能等是材料的固有属性, 在实际应用中无法人为干预。本文作者基于上述工艺需求, 选取 304SS 和 Q235 碳钢两种典型 Fe 基基体, 进行 Ni 基合金-WC 复合粉末激光熔覆工艺研究, 重点考察基材成分、导

热性能等基材的固有属性对同种涂层在熔覆工艺、涂层性能等方面的影响规律, 为 Ni 基合金-WC 复合涂层在不同基材上的工艺移植提供理论指导。

1 实验

1.1 实验材料和方案

基体材料分别为 304SS 和 Q235 碳钢, 其尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm, 待熔覆表面粗糙度均为 $R_a=3.2$, 预热至 200 °C。熔覆材料为 Ni60A(粒度为 45~109 μm)和 Co 基 WC(粒度为 15~45 μm), 其中 Ni60A 的成分如表 1 所列。实验中 WC 含量分别为 0 和 40%(质量分数), 具体工艺参数如表 2 所列。

表 1 Ni60A 粉末成分

Table 1 Composition of Ni60A powder (mass fraction, %)

C	Cr	Fe	B	Si	Ni
0.8	17.0	≤8.0	3.5	4.0	Bal.

1.2 实验方法和设备

采用 3KW 固体激光器进行激光熔覆实验, 光束通过光纤传导与六轴联动的机器人相连, 采用焦距为 120 mm 的聚焦镜聚焦, 离焦 15 mm, 得到直径为 5 mm 的圆形光斑。粉末以同步送粉的方式送入熔池中, 采用氮气送粉, 流量为 3 L/min, 四道搭接熔覆, 搭接率为 30%。在激光熔覆样件上截取金相试样, 经打磨抛光后用王水腐蚀。采用 QUANT FEG-450 型扫描电镜和 9XB-PC 型金相显微镜对熔覆层横截面的组织成分进行分析, 采用 HXD-1000TMS/LCD 型显微硬度计进行硬度测试, 沿垂直于熔覆层的方向每隔 100 μm

表 2 激光熔覆实验方案

Table 2 Experimental technology parameters of laser cladding

Sample No.	Powder	Substrate	Scanning velocity/ (mm·s ⁻¹)	Powder feed rate/ (g·min ⁻¹)	Laser power/W
1	Ni60A	304SS	6	10	1000
2	Ni60A	Q235	6	10	1000
3	Ni60A+40%WC	304SS	2	6	1000
4	Ni60A+40%WC	Q235	2	6	1000
5	Ni60A+40%WC+10%Cr	304SS	3	6	1000
6	Ni60A+40%WC+10%Cr ₃ C ₂	304SS	2	6	700

进行测试, 载荷为 1.96 N, 加载时间 15 s。

2 结果与分析

2.1 涂层宏观形貌分析

图 1 所示为样品 1~4 的宏观截面形貌图。从图 1(a) 可见, 304SS 上熔覆的 Ni60A 涂层表面无裂纹和气孔, 界面平整光滑; 从图 1(b) 可见, Q235 碳钢上熔覆的 Ni60A 涂层表面有一道大裂纹和少量的气孔, 界面有少量的凹坑; 从图 1(c) 可见, 304SS 上熔覆的 Ni60A+40%WC 涂层表面没有气孔和裂纹, 表面只有少量的 WC 颗粒, 涂层稀释率大(稀释率约为 60%); 从图 1(d) 可见, Q235 碳钢上熔覆的 Ni60A+40%WC 涂层表面有大量的气孔, 均匀分布了大量的 WC 颗粒

(图中灰白色小颗粒), 涂层稀释率约为 30%, 虽然图中所示的截面没有裂纹, 但是从显微镜下观察到激光熔覆后的表面存在裂纹。总之, 304SS 上的涂层表面没有裂纹和气孔, Q235 碳钢板上的涂层表面存在大量的气孔和裂纹; WC 含量为 40% 时, 304SS 板上的熔覆层稀释率大。

2.2 基材属性对涂层稀释率、气孔和裂纹的影响

表 3 所列为 304SS 和 Q235 碳钢的物理性能。从表 3 可以看出, 304SS 的导热系数为 17 W/(m·K), Q235 碳钢的导热系数为 60.5 W/(m·K), 304SS 的导热能力较差, 在相同的工艺参数条件下导致 304SS 上熔覆 Ni60A+40%WC 涂层稀释率大, 基材与涂层相互扩散, 基材中的元素扩散至涂层, 从而影响涂层的性能。

激光熔覆镍基 WC 涂层气孔的主要来源是 C 与 O

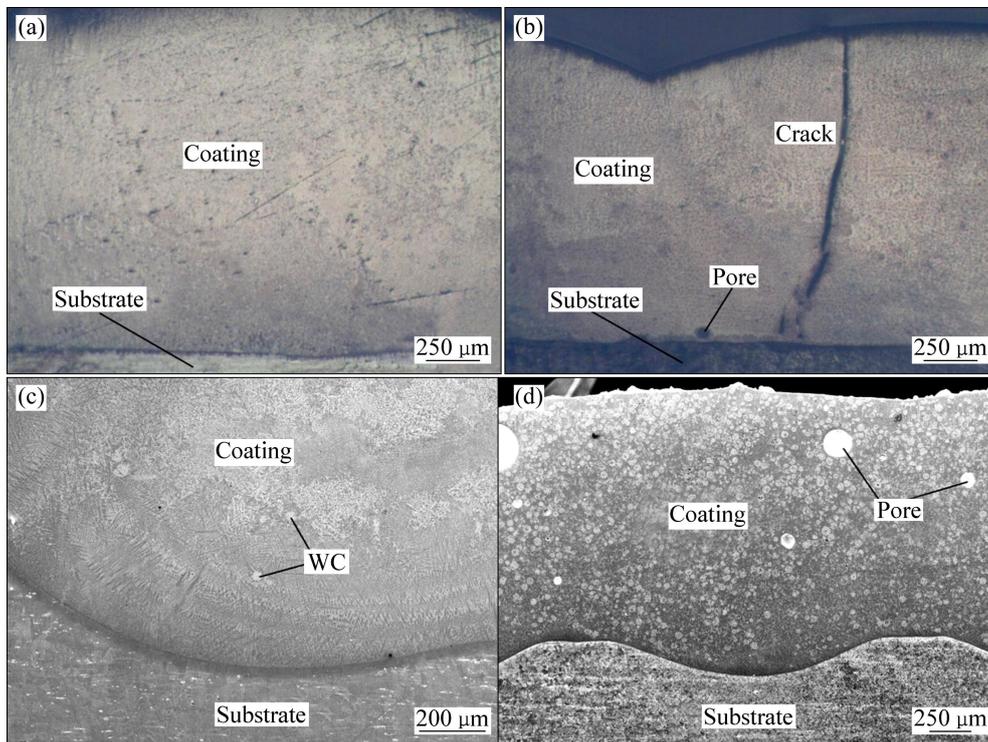


图 1 熔覆涂层截面的 SEM 像

Fig. 1 SEM images of cross-sections of laser cladding coatings: (a) Sample 1, Ni60A coating prepared on 304 stainless steel; (b) Sample 2, Ni60A coating prepared on Q235 carbon steel; (c) Sample 3, Ni60A+40%WC coating prepared on 304 stainless steel; (d) Sample 4, Ni60A+40%WC coating prepared on Q235 carbon steel

表 3 304SS 和 Q235 碳钢的物理性能

Table 3 Physical properties of 304 stainless steel and carbon steel Q235

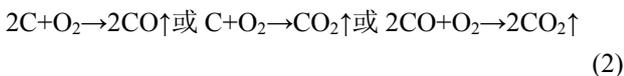
Material	Thermal conductivity/ (W·m·K ⁻¹)	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Melting point/°C
304SS	17	≥520	≥205	≥40	1440
Q235	60.5	375-460	235	≥26	1545

反应生成的 CO 和 CO₂ 气体, 其中 O 的来源可能是熔覆粉末从空气中吸取的水分, 也可能是熔池发生剧烈的物理化学变化, 周围气流剧烈扰动, 保护气体没有始终笼罩熔池周围, 使少量空气卷入并接触熔池, O 就进入熔池; 而 C 主要来源于 Ni 基合金中添加的 WC 在激光高温作用下热分解生成的游离 C; 游离的 C 会与 O 结合生成 CO 和 CO₂ 气体, 气体在熔池极快的冷却速度下, 来不及逸出便形成了气孔。

涂层中气孔的产生与 WC 颗粒的熔解密切相关, WC 颗粒虽然是一种优良的硬质相, 但在高温下容易氧化脱碳, 许多文献证实^[15-16]WC 的脱碳过程如下:



生成气体的过程如下^[17]:



因此, 通过减少熔池中 C 和 O 含量可以抑制涂层中气孔的产生。

表 4 所列为 304SS 和 Q235 碳钢的成分。从表 4 可以看到, 304SS 和 Q235 碳钢在成分上的最大区别是 304SS 中含有大量的 Cr 和 Ni 元素, 由前面的分析可知, 304SS 上熔覆 Ni60A+40%WC 涂层稀释率大, 基材中的 Cr 元素扩散至涂层能与涂层中的 C 结合形成碳化物, 降低涂层中的 C 含量, 避免 CO 和 CO₂ 气体的产生, 从而减少涂层中的气孔。因此, 304SS 板上的涂层表面没有气孔, 而 Q235 碳钢板上的涂层存在大量的气孔。

表 4 304SS 和 Q235 碳钢的成分

Table 4 Composition of 304 stainless steel and carbon steel Q235 (mass fraction, %)

Material	C	Cr	Ni	Si
304SS	≤0.08	17-19	8-12	≤0.1
Q235	0.14-0.22	0	0	≤0.3
Material	Mn	P	S	Fe
304SS	≤2	≤0.05	≤0.03	Bal.
Q235	0.3-0.65	≤0.045	≤0.05	Bal.

激光熔覆涂层裂纹的产生主要与应力有关, 激光熔覆是一个快速加热和冷却的过程, 冷凝时温度梯度导致激光熔覆涂层内产生拉应力, 当拉应力大于该温度下材料强度极限时, 熔覆层出现裂纹^[18]。涂层气孔处应力容易集中, 减少和控制气孔数量可以明显减少裂纹的出现。从表 4 可以看到, 304SS 中含有大量的 Ni 元素, 一方面, Ni 元素扩散至涂层能提高熔覆合金

对基体的润湿性、降低熔覆层的热膨胀系数、减少合金的熔化温度区间, 从而降低熔覆层的裂纹敏感性; 另一方面, 304SS 上的涂层表面没有气孔进一步降低了涂层的裂纹敏感性, 因此, 304SS 上的涂层表面没有裂纹, 而 Q235 碳钢板上的涂层存在大量的裂纹。

2.3 基材属性对涂层组织和成分的影响

图 2 所示为样品 1 和 2 中局部区域的 SEM 像。从图 2(a)可见, 304SS 表面 Ni 基合金的组织是在共晶的基底上分布着黑色块条状颗粒和灰色网状相, 组织粗大, 其中黑色块条状颗粒较多, 尺寸在 5~10 μm 之间, 其体积分数在 15%左右。从图 2(b)可见, Q235 碳钢表面 Ni 基合金的组织是在共晶的基底上分布着黑色圆形颗粒和灰白色块状相, 组织细小。Q235 碳钢表面激光熔覆涂层组织较细, 原因是激光熔覆涂层的组织主要受成分、加热和冷却速度的影响。304SS 与 Q235 碳钢相比, 304SS 的导热能力较差, 造成熔池内的冷却速度较慢, 从而使熔池内的晶核有足够的时间

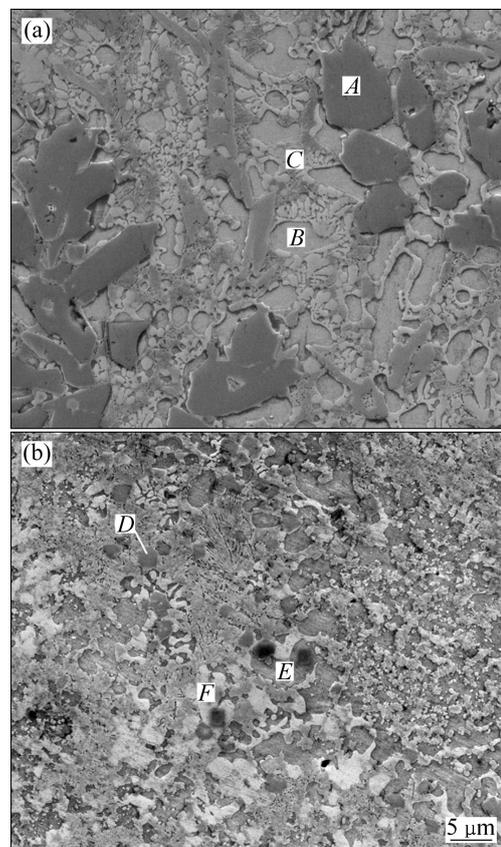


图 2 熔覆涂层截面的 SEM 像

Fig. 2 SEM images of cross-sections of laser cladding coatings: (a) Sample 1, Ni60A coating prepared on 304 stainless steel; (b) Sample 2, Ni60A coating prepared on Q235 carbon steel

长大, 故熔覆层内的组织粗大。而 Q235 碳钢基体由于导热快, 对熔池的冷却速度快, 使熔池内的晶核由于快速冷却而来不及长大, 因此, 获得的涂层组织细小。

表 5 所列为图 2 中 304SS 和 Q235 碳钢表面涂层各组织组成物的 SEM 能谱分析结果, 从表 5 可见, 黑色颗粒 A、D 区域主要元素含量是 Cr 和 B, 以及少量的 Fe、Ni 和 C 等, 说明黑色颗粒是硼铬化合物, 样品 1 中从基材扩散的 Cr 元素多, 因此, 涂层中生成的硼铬化合物较样品 2 的多; 图中 B、C、E、F 区域的主要元素含量是 Ni, 是 γ -Ni 的共晶组织, 其中固溶了少量的 Fe 和 Cr。

表 5 图 2 中样品 1 和 2 不同区域主要元素的含量

Table 5 Chemical compositions of main elements in different areas of samples 1 and 2 shown in Fig. 2

Sample No.	Area	Mass fraction/%						
		Fe	Ni	Cr	B	Si	C	Mn
1	A	3.11	1.40	82.20	9.87	-	0.73	2.69
	B	4.22	85.62	8.37	-	1.78	-	-
	C	9.07	74.74	9.83	-	4.71	-	1.65
2	D	2.11	9.26	78.13	8.03	0.4	0.7	1.37
	E	-	85.10	8.92	-	5.99	-	-
	F	-	90.09	9.91	-	-	-	-

图 3 所示为样品 3 和 4 局部区域的 SEM 像, 从图 3(a)可见, 在 304SS 上熔覆的 Ni60A+40%WC 合金的组织是在褐色 H 区基底上分布着部分熔解的 WC 颗粒和大量规则白色树枝晶, 这些白色树枝晶占涂层体积分数的 50%左右。从表 6 的元素分析结果可见, 褐色 H 区的主要元素含量是 36.90%Fe 和 56.43%Ni, 白色 G 区域含有大量的 W 元素, 说明 WC 分解的 W 元素与 Fe、Ni、Cr 形成的碳化物均匀分布在涂层中的 γ -(Fe、Ni)固溶体上, 且从其所占的体积分数可见, 该涂层中 WC 颗粒分解多。从图 3(b)可见, 在 Q235 碳钢上熔覆的 Ni60A+40%WC 合金的组织是褐色的 J 基底上分布着部分熔解的 WC 颗粒和大量花朵状和条状的白色相, 其中白色相占整个涂层体积分数的 30%左右, 明显低于样品 3 中白色树枝晶所占的体积。从表 6 的能谱分析结果可见, 花朵状和条状白色相中 W 元素含量高达 62.27%(质量分数), Fe、Ni 和 Cr 元素含量明显低于样品 3 白色区的, 说明样品 4 中 WC 颗粒的分解较样品 3 中的少, 样品 3 涂层中由于 Cr 元素含量高, 促进了 WC 颗粒的分解。样品 4 涂层中由于 Cr 含量少, WC 颗粒分解产生的 C 元素得不到有效结合而与空气中的氧气反应产生气体, 来不及溢出而形成

气孔(见图 1(d))。

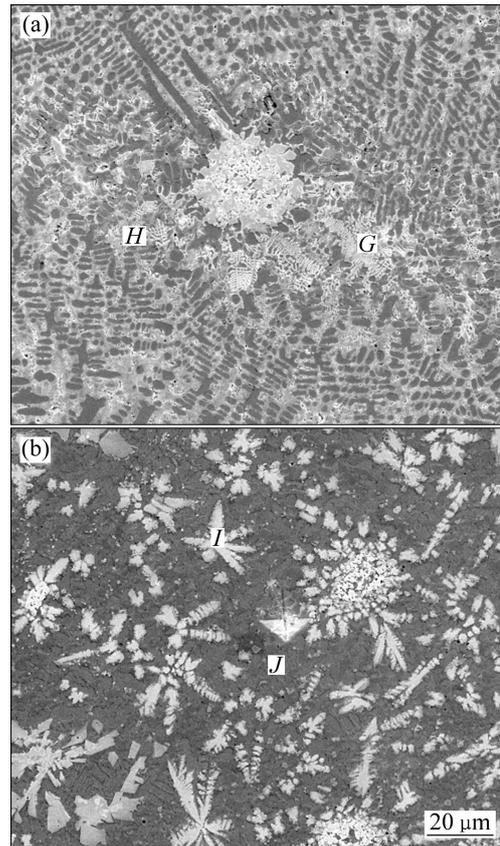


图 3 熔覆涂层截面 SEM 像

Fig. 3 SEM images of cross-sections of laser cladding coatings: (a) Samples 3, Ni60A+40%WC coating prepared on 304 stainless steel; (b) Samples 4, Ni60A+40%WC coating prepared on Q235 carbon steel

表 6 图 3 中样品 3 和 4 不同区域的主要元素含量

Table 6 Chemical compositions of main elements in different areas of samples 3 and 4 shown in Fig. 3

Sample No.	Area	Mass fraction/%					
		Fe	Ni	Cr	W	Si	C
3	G	29.08	21.98	15.41	32.18	-	1.34
	H	36.94	56.43	-	-	4.62	1.91
4	I	7.82	18.09	10.43	62.27	-	1.38
	J	29.53	62.26	-	-	3.9	1.31

2.4 Cr 和 Cr₃C₂ 的加入对涂层组织的影响

综上所述发现, 基材中 Cr 元素渗入涂层能有效抑制涂层的气孔, 在此, 又进一步研究 Ni60A+40%WC 中分别加入 10%的 Cr 和 Cr₃C₂(见表 2 中样品 5 和 6), 其显微形貌分别如图 4 和 5 所示。从图 4(a)可见, 添加 10%Cr 的涂层平整光滑无气孔, 但涂层表面几乎没

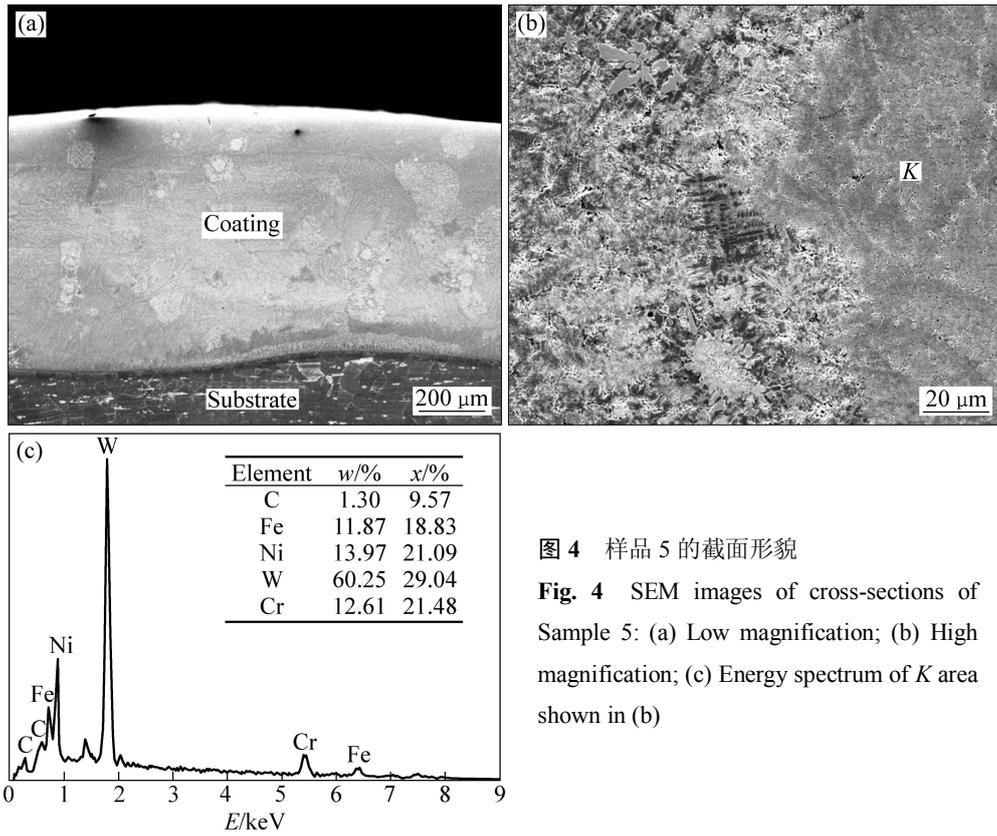


图4 样品5的截面形貌

Fig. 4 SEM images of cross-sections of Sample 5: (a) Low magnification; (b) High magnification; (c) Energy spectrum of K area shown in (b)

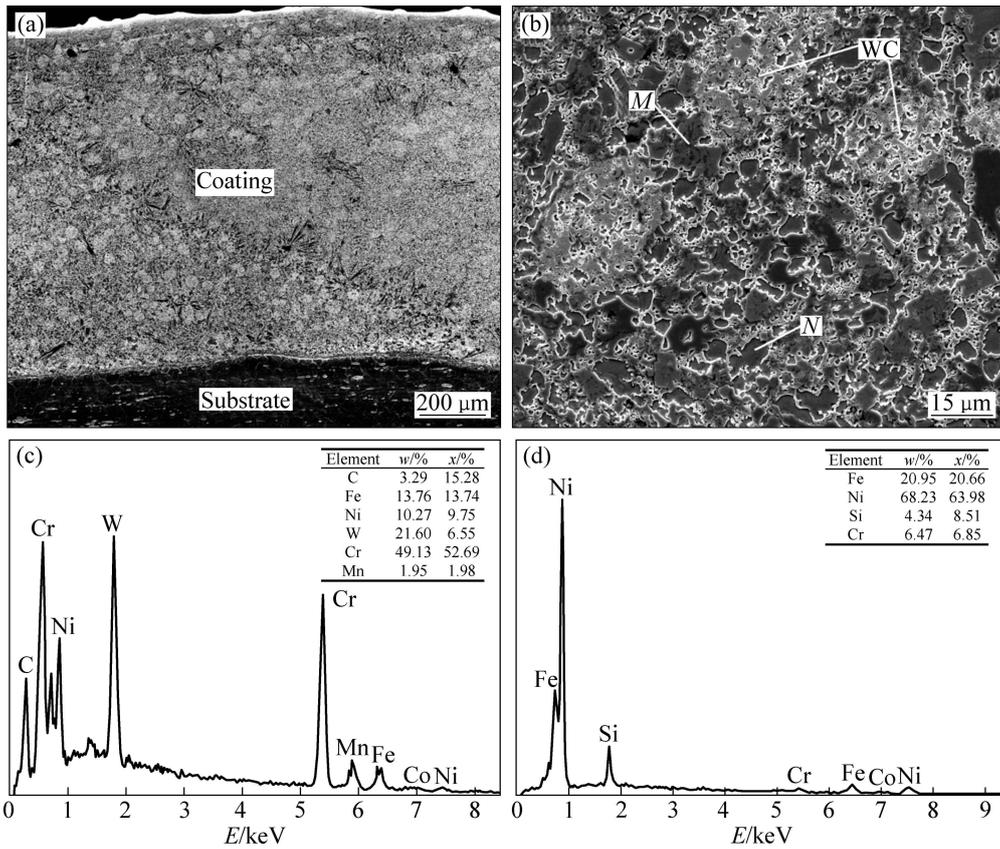


图5 样品6截面形貌

Fig. 5 SEM images of cross-sections of Sample 6: (a) Low magnification; (b) High magnification; (c) Energy spectrum of M area shown in (b); (d) Energy spectrum of N area shown in (b)

有完整的 WC 颗粒, 说明 Cr 的加入能促进 WC 的分解、有效地抑制涂层中气孔的产生。图 4(b)所示为图 4(a)中局部区域放大图, 从图中可以看到, 涂层中生成了一些灰色团状物 K, 经能谱分析发现 K 区的元素含量如图 4(c)所示, 该区域含有大量的 W(60.25%, 质量分数), 说明 Cr 的加入促进了 WC 的分解, 分解后产生的 W、C 元素与 Fe、Ni 和 Cr 等聚集形成团状物, 从而抑制气孔的生成。从图 5(a)可见, Ni60A+40%WC+10%Cr₃C₂(质量分数)涂层中分布了大量的 WC 颗粒, 表面没有气孔, 组织细密均匀, 从图 5(b)的局部放大图可以看到, WC 颗粒周围分布大量的深黑色块状物和灰色组织, 图 5(c)和(d)所示分别为这两个区域的能谱分析图。从图 5(c)可见, 深黑色块状物所含元素含量为 49.13%Cr、21.60%W、13.76Fe、10.27Ni、3.29C 和 1.95Mn(质量分数), 其中含有大量的 Cr, 推测是铬的化合物。从图 6(d)可见, 灰色 N 区的主要元素是 Ni, 说明是 Ni 的固溶体, 其中固溶了大量的 Fe 和少量的 Cr、Si。Cr₃C₂ 的加入不但可以抑制涂层中气孔的产生, 由于其本身就含有 C 原子因此还可以抑制 WC 颗粒的分解。

2.5 基材属性对涂层性能影响

图 6 所示为 WC 含量为 40%时不同基材上涂层截面显微硬度对比曲线。从图 6 可以看到, 基材的平均硬度为 200 HV_{0.2}, 在 Q235 基材上涂层的平均硬度高达 1000HV_{0.2}, 是基材的 5 倍; 304SS 基材上涂层的平均硬度为 600HV_{0.2}, 是基材的 3 倍, 两者硬度相差较大。两者硬度差别大的主要原因是 304SS 的导热能力较 Q235 碳钢的差, 导致涂层稀释率大, 基材中的元素渗入涂层影响涂层的性能, WC 颗粒分解多, 这从图 1(c)和(d)可以明显看到, 图 1(d)中的 WC 颗粒明显多于图 1(c)中的, 而 WC 是提升熔覆层硬度的主要硬

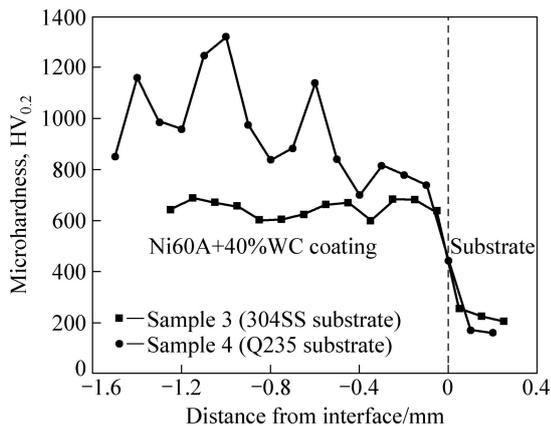


图 6 样品 3 和 4 的截面显微硬度曲线

Fig. 6 Microhardness comparison of samples 3 and 4

质颗粒, 该颗粒的减少会显著降低熔覆层的硬度。

图 7 所示分别加入 10%的 Cr 和 Cr₃C₂ 的样品 5 和 6 显微硬度对比曲线。从图 7 可见, 添加 10% Cr₃C₂ 的样品 6 的平均硬度高达 900HV_{0.2}, 与样品 4 相当。添加 10%Cr 的样品 5 的平均硬度为 600HV_{0.2}且存在个别硬度较低的点, 明显低于样品 6 的, 这主要是由于 Cr 的加入使涂层中的 WC 颗粒大部分溶解, 因此, 加 Cr 的样品的硬度较低。

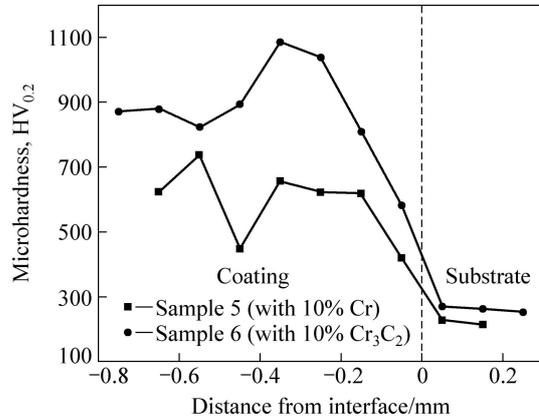


图 7 样品 5 和 6 的截面显微硬度对比

Fig. 7 Microhardness comparison of samples 5 and 6

3 结论

1) 304SS 和 Q235 碳钢元素成分不同导致涂层气孔、裂纹方面存在很大差异。由于 Cr 元素能够捕捉涂层中的 C 而形成碳化物, 减少了涂层中的气孔; Ni 元素能提高熔覆合金对基体的润湿性、降低熔覆层的热膨胀系数、减少合金的熔化温度区间, 从而降低熔覆层的裂纹敏感性, 因此, Ni 和 Cr 元素含量高的 304SS 上的涂层气孔和裂纹明显比 Q235 碳钢上的少; 基材的导热性能对涂层的稀释率与性能具有明显影响, 导热性能差的 304SS 的稀释率大, WC 颗粒分解较多, 涂层组织粗大; 由于 Q235 导热性能较好, 使涂层冷却速率高, 导致涂层硬度更高, Ni60A+40%WC 涂层平均硬度高达 1000HV_{0.2}。

2) Cr 和 Cr₃C₂ 的加入能有效防止涂层气孔的产生, Cr 元素促使 WC 分解, 涂层硬度较低(平均硬度仅有 600HV_{0.2}); 添加 Cr₃C₂ 的涂层中 WC 颗粒未观察到明显分解, 其平均硬度高达 900HV_{0.2}。

REFERENCES

[1] 刘建弟, 张述泉, 王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层

- 的组织及耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2600-2607.
- LIU Jian-di, ZHANG Shu-quan, WANG Hua-ming. Microstructure and wear resistance of laser cladding WC particles reinforced composite coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2600-2607.
- [2] ST-GEORGES L. Development and characterization of composite Ni-Cr+WC laser cladding[J]. Wear, 2007, 263(1): 562-566.
- [3] GUO Chun, ZHOU Jian-song, CHEN Jian-min, ZHAO Jie-rong, YU You-jun, ZHAO Hui-di. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings[J]. Wear, 2011, 270(7): 492-498.
- [4] XU J S, ZHANG X C, XUAN F Z, WANG Z D, TU S T. Microstructure and sliding wear resistance of laser clad WC/Ni composite coatings with different contents of WC particle[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(9): 1904-1911.
- [5] NURMINEN J, NÄKKI J, VUORISTO P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding[J]. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2009, 27(2): 472-478.
- [6] HUANG S W, NOLAN D, BRANDT M. Pre-placed WC/Ni clad layers produced with a pulsed Nd:YAG laser via optical fibres[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 165(1): 26-34.
- [7] HUANG S W, SAMANDI M, BRANDT M. Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers[J]. Wear, 2004, 256(11): 1095-1105.
- [8] 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(1): 84-88.
- [9] 徐国建, 黄雪, 傅新皓, 杭争翔, 于恩洪, 李永波. Ni基合金与WC混合粉末的激光熔覆层组织[J]. 硬质合金, 2012, 29(5): 297-308.
- XU Guo-jian, HUANG Xue, FU Xin-hao, HANG Zheng-xiang, YU En-hong, LI Yong-bo. Microstructure of laser cladding layer prepared by mixed powder of Ni-based alloys and WC[J]. Cemented Carbide, 2012, 29(5): 297-308.
- [10] ZHOU Sheng-feng, DAI Xiao-qin. Laser induction hybrid rapid cladding of WC particles reinforced NiCrBSi composite coatings[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(14): 4708-4714.
- [11] 杨胶溪, 闫婷, 刘华东, 左铁钊. 激光熔覆WC-Ni基超硬梯度复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 5-9.
- YANG Jiao-xi, YAN Ting, LIU Hua-dong, ZUO Tie-chuan. Microstructure and properties of laser clad WC-Ni base superhard gradient composite coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(11): 5-9.
- [12] 杨胶溪, 闫婷, 王喜兵, 郭江, 左铁钊, 徐文清. 激光宽带熔覆碳化钨/钴基合金的组织与性能[J]. 表面改性技术, 2007(11): 26-29.
- YANG Jiao-xi, YAN Ting, WANG Xi-bing, GUO Jiang, ZUO Tie-chuan, XU Wen-qing. Microstructure and properties of laser wide-strip clad WC/Co-base alloy[J]. Surface Modification Technology, 2007, (11): 26-29.
- [13] ZHONG Min-lin, LIU Wen-jin, YAO Ke-fu, GOUSSAINB J C, MAYER C, AHIM B. Microstructural evolution in high power laser cladding of stellite 6+WC layers[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157(2): 128-137.
- [14] CHEN Hua-hui, XU Cai-yun, CHEN Jun, ZHAO Hui-you, ZHANG Lei, WANG Zhen-ting. Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear[J]. Wear, 2008, 264(7): 487-493.
- [15] 高南, 孙大千, 曹书云. 镍基碳化钨高温磨损特性的研究[J]. 华中理工大学学报, 1991, 19(6): 83-88.
- GAO Nan, SUN Da-qian, CAO Shu-yun. A study of high temperature wearing characteristics of nickel-based self-fluxing alloy with different tungsten carbide contents[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1991, 19(6): 83-88.
- [16] 吴新伟, 曾晓雁, 朱蓓蒂, 陶曾毅, 崔崑. 镍基WC金属陶瓷激光熔覆涂层的熔化烧损规律[J]. 金属学报, 1997, 33(12): 1282-1288.
- WU Xin-wei, ZENG Xiao-yan, ZHU Bei-di, TAO Zeng-yi, CUI Kun. Heat damage of laser clad Ni-based WC coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(12): 1282-1288.
- [17] 钟文华, 刘贵仲, 葛大梁, 高原. Cr₃C₂对镍基碳化钨激光熔覆层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2012(7): 45-48.
- ZHONG Wen-hua, LIU Gui-zhong, GE Da-liang, GAO Yuan. Effect of adding Cr₃C₂ on microstructure and properties of Ni/WC cladding layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2012(7): 45-48.
- [18] KADOLKAR P B, WATKINS T R, DE HOSSON J Th M, KOOI B J, DAHOTRE N B. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1203-1214.

(编辑 龙怀中)