

WC含量对WC/Ni60A激光熔覆层微观组织的影响

李福泉 冯鑫友 陈彦宾

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 激光熔覆镍基复合涂层在改善H13模具钢表面性能方面具有显著优势。在H13钢表面激光熔覆WC质量分数分别为20%、33%、50%的WC/Ni60A复合粉末,在优化工艺参数的基础上研究熔覆层的微观组织。研究发现,激光熔覆WC/Ni60A复合涂层的相组成复杂。WC的含量会显著影响熔覆层组织的生成及其形态。WC质量分数为20%时,熔覆层由大量 γ -(Fe, Ni)树枝晶和晶间富W碳化物组成;WC质量分数为33%时,熔覆层由大量的团絮状共晶组织组成,其中心为块状 $M_{23}C_6$,周围为 $M_{23}C_6$ 和 γ -(Fe, Ni)组成的共晶组织,形态非常特殊;WC质量分数为50%时,熔覆层中生成了大量块状 M_6C 、雪花状 $M_{23}C_6$ 和针状 $Cr_7Ni_{15}W$ 组织。WC质量分数分别为20%、33%、50%时,熔覆层的硬度相对于基体显著提高,分别达到了730、760、810 HV。

关键词 激光技术; 激光熔覆; WC含量; 微观组织

中图分类号 TG174.44 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0403009

Influence of WC Content on Microstructure of WC/Ni60A Laser Cladding Layer

Li Fuquan Feng Xinyou Chen Yanbin

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Laser cladding of nickel-based composite layer is much helpful to improve surface properties of H13 steel. WC/Ni60A composite powder with WC mass fractions of 20%, 33% and 50% is respectively cladded on the H13 steel surface. Based on optimized parameters of laser cladding process, the microstructure of the cladding layer is studied. The results show that the phase composition of the laser cladded WC/Ni60A composite layer is complex. WC content has a significant effect on the formation and morphology of the cladding layer structure. When the mass fraction of WC is 20%, the cladding layer is composed of much γ -(Fe, Ni) branch crystal and a small amount of W-rich carbide; when the mass fraction of WC is 33%, the cladding layer, with a special structure, is composed of a large amount of flocculent eutectic structures which are concentrated by $M_{23}C_6$ blocks and surrounded by eutectic structure composed of $M_{23}C_6$ and γ -(Fe, Ni); when the mass fraction of WC is 50%, much block-shaped M_6C , snowflake-shaped $M_{23}C_6$ and needle-like $Cr_7Ni_{15}W$ structure is generated in the cladding layer. The hardness of the laser cladding layer increase remarkably compared with that of the substrate and is up to 730, 760, 810 HV, when the mass fraction of WC is 20%, 33% and 50%, respectively.

Key words laser technique; laser cladding; WC content; microstructure

OCIS codes 140.3390; 310.1515; 310.1860

1 引 言

H13钢(4Cr5MoSiV1)具有较好的热强性、红硬性和韧性,被广泛用于铝、镁合金的热挤压模具成型^[1]。但是H13钢工作温度高,表面常受到较大的周期性冲击载荷作用^[2],并且H13钢硬度较低,耐磨性较差,钢材表面

收稿日期: 2015-10-16; 收到修改稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(51175114)、黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q13065)

作者简介: 李福泉(1972—),男,博士,副教授,主要从事激光表面工程及激光增材制造等方面的研究。

E-mail: lifuquan@hit.edu.cn

容易发生热磨损和热疲劳。这些缺陷易导致 H13 钢材料破损,使模具使用寿命降低,由此可能造成经济损失^[3-4]。因此,提高 H13 钢表面性能,具有重要的现实意义。激光熔覆作为改善金属表面性能的新技术,具有变形小、冶金结合好、稀释率低和组织致密等优点,受到广泛关注^[5]。

Ni60A(NiCrBSi)是一种常用的模具钢表面熔覆粉末,可以在相对较低的温度下熔化。WC 硬度高、耐磨性好,可以和 Ni 基材料良好地润湿。在 Ni 基熔覆材料中加入 WC 后,形成 WC/Ni60A 复合熔覆层,复合熔覆层的耐磨性能和硬度明显好于单纯的 Ni 基熔覆层^[6-8],所以 WC/Ni60A 复合粉末常被用作激光熔覆材料。戎磊等^[9]采用 CO₂激光器在 CCS-B 钢板上熔覆了 WC/Ni60A 复合粉末,使熔覆层平均硬度提高了 3 倍;Ma 等^[10]采用宽带光纤激光器在 Q550 钢表面熔覆 WC/Ni60A 复合粉末,熔覆层上有很多硬质碳化物,熔覆层的耐磨性被极大提高;Zhang 等^[11]研究发现,WC/Ni60A 熔覆层的耐磨性与熔覆层中的 WC 分布有关,WC 颗粒在上部聚集度越高,耐磨性就越好。Wu 等^[12]发现,不合理的激光功率、送粉量和扫面速度等参数会使 WC 颗粒下沉,导致熔覆层性能下降。同样,如何减小熔覆层裂纹敏感性,也成为重要的研究内容,如利用感应线圈预热基体,研制特殊的合金粉末,或改变加工参数等^[13-14]。吴新伟等^[15]发现 WC 含量低于 45%(质量分数)时,随着 WC 含量增加,熔覆层裂纹数目也增加,但当 WC 含量继续增加时,涂层裂纹率将减小。上述研究主要侧重于研究熔覆层的性能,对熔覆层组织与 WC 含量的关系研究较少。

不难发现,WC 的含量对熔覆层的性能有很大影响。通过调整 WC 含量,可以控制熔覆层的组织形态、生成相的种类,减少缺陷,因而调整 WC 含量对熔覆层微观组织及相结构具有重要的意义。本文采用同轴送粉光纤激光熔覆 WC/Ni60A 复合粉末对 H13 模具钢进行表面强化。通过试验优化激光熔覆工艺,分析不同 WC 质量分数激光熔覆层的微观组织及相结构,进而研究 WC 含量对熔覆层组织变化的影响规律。

2 试验材料及方法

激光熔覆试验所用基体材料为 H13 热作模具钢,试件尺寸为 270 mm×270 mm×10 mm,其成分组成如表 1 所示。激光熔覆材料为 WC/Ni60A 复合粉末,其中 WC 的质量分数分别为 50%,33%和 20%。试验采用的 Ni60A 粉末颗粒直径为 45~105 μm,其微观形貌如图 1 所示。WC 粉末颗粒直径为 60~100 μm,其微观形貌如图 2 所示。复合粉末采用 MF-PF2/2 双筒四路送粉器(GTV 公司,德国)以同轴送粉方式送入。

表 1 H13 钢基体成分组成

Table 1 Chemical composition of H13 steel substrate

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P	Fe
Mass fraction /%	0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	≤0.30	≤0.30	Bal.

试验采用的激光器为德国 IPG 公司的光纤激光器,功率为 5000 W,波长为 1.07 μm,光纤直径为 400 μm,光斑直径为 2 mm;采用德国 KUKA 公司六轴联动机器人调整激光熔覆头位置,其定位精度为 0.1 mm;熔覆头为德国 PRECTIEC 公司的 YC52 同轴送粉熔覆头。金相试件抛光后用腐蚀液(HCl 与 H₂O 的体积比为 5:95,5 g/L FeCl₃)腐蚀 21 s;采用场发射扫描电子显微镜(SEM)Quanta 200FEG、S-4700 和 Helios Nanolab600i 分析熔覆层组织形貌;采用 D/MAX-RB 12KW 型 X-射线衍射仪(XRD)分析熔覆层物相;采用 HVS-1000Z 型显微硬度计分析显微硬度,载荷为 200 g,加载时间为 10 s。

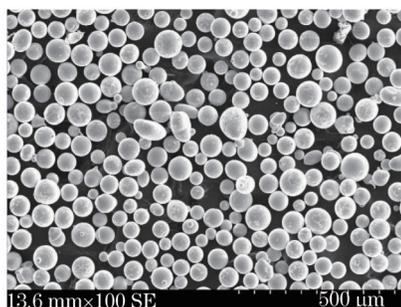


图 1 Ni60A 粉末微观形貌

Fig.1 Morphology of Ni60A powder

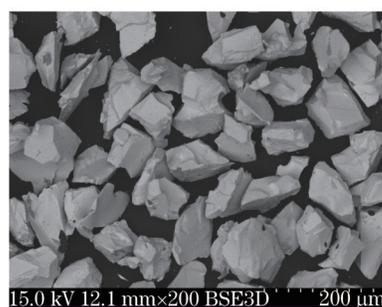


图 2 WC 粉末微观形貌

Fig.2 Morphology of WC powder

试验过程中,载气流量、保护气流量和送粉器流量均为经验值,分别为 15, 10, 5 L/min;激光功率为 700~2100 W,送粉量为 12~32 g/s,扫描速度为 $3 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$ m/s,通过试验获得优化的工艺参数,如表 2 所示。在优化的激光熔覆工艺参数条件下,调整 WC 的质量分数,研究 WC 质量分数对熔覆层组织的影响。为叙述方便,定义粉末成分为 50% WC/50% Ni60A、33% WC/67% Ni60A 和 20% WC/80% Ni60A(质量分数)的激光熔敷试件分别为试件 1、试件 2 和试件 3。

表 2 激光熔覆优化参数

Table 2 Optimized parameters for laser cladding

Process parameter	Value
Laser power /W	1300
Laser scanning speed /(m/s)	0.003
Powder feed rate /(g/min)	24
Spot diameter /mm	2
Carrier gas flow /(L/min)	15
Shielding gas flow /(L/min)	10

3 试验结果与分析

3.1 熔覆层物相

图 3 所示分别为试件 1、试件 2 和试件 3 的熔覆层横截面。试件 1 中 WC 的质量分数最大,且均匀分布,试件 2 和试件 3 中分布的 WC 颗粒逐渐减少。随着进入熔覆层的 WC 质量分数增加,液态熔覆金属的黏度也增大,粉末熔化后流动性变差,在试件 3 焊趾部位,熔覆层与基体的润湿角非常大。

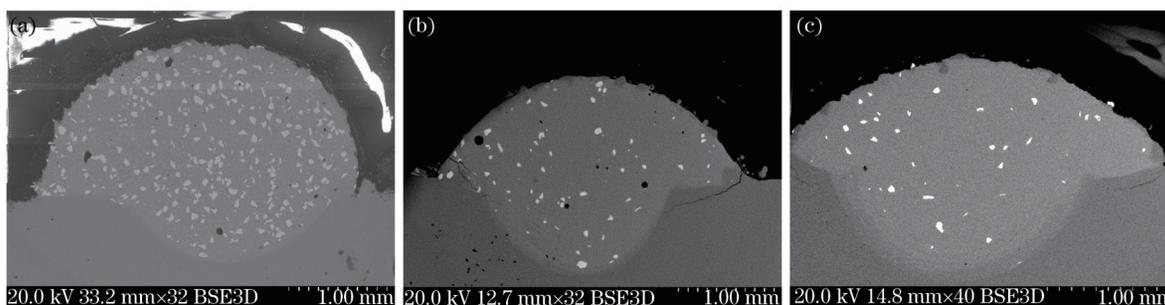
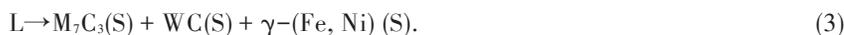


图 3 不同 WC 质量分数下熔覆层的截面形貌。(a) 试件 1; (b) 试件 2; (c) 试件 3

Fig.3 Cross-section morphologies of cladding layers with different WC mass fractions. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

图 4 所示分别为试件 1、试件 2 和试件 3 熔覆层的 XRD 物相分析结果。当 WC 质量分数为 50% 时, XRD 图谱的波峰较多,熔覆层中物相包括 WC、 W_2C 、 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、 M_6C 、 Ni_4B_3 、 $\gamma-(Fe, Ni)$ 和 $Cr_4Ni_{15}W$ 等;当 WC 质量分数为 33% 时,熔覆层由 WC、 $Ni-Cr-Fe-C$ 、 Ni_4B_3 、 $M_{23}C_6$ 、 $Ni_{17}W_3$ 、 $Cr_4Ni_{15}W$ 组成;当 WC 质量分数为 20% 时,熔覆层由 WC、 FeW_2B_2 、 $\gamma-(Fe, Ni)$ 、 $M_{23}C_6$ 和 $FeNi_3B$ 组成。试验结果分析可知,随着熔覆层中 WC 质量分数增高,熔覆层中生成的含 W 碳化物种类也不断增加。这是由于 WC 含量增加,WC 颗粒与液态金属反应界面增多,WC 不断熔解,导致 Ni 基熔覆层中 W、C 的成分起伏明显;与此同时,液态金属中的 Ni 原子、Cr 原子不断侵蚀 WC,取代 W 原子位置,产生多余的 W 原子与 C 原子。WC 含量越高, Ni 基熔覆层中 W 与 C 原子的浓度起伏越明显。基于以往研究,可以认为在 Fe-W-Cr-C 四元凝固条件下可能发生复杂的相变过程^[16],即(S:固态)



3.2 熔覆层微观组织

图 5 所示为试件 1 熔覆层的 SEM 图像,表 3 所示为图 5 中不同位置相应的能量色散 X 射线分析(EDX)结果。由图 5 可知,熔覆层中部与下部组织相同,但是雪花状组织 F 的大小却不同,熔覆层上部组织分布更为致密。这是由于熔覆层上部温度高,熔池中 W 的质量分数较大,根据凝固理论可知,上层成分更接近雪花状

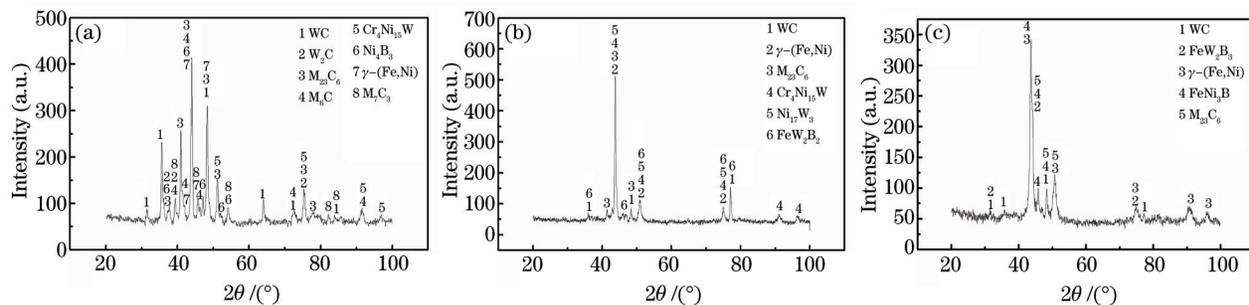


图4 不同WC质量分数下熔覆层的XRD图谱。(a) 试件1; (b) 试件2; (c) 试件3

Fig.4 X-ray diffraction patterns of cladding layers for different WC mass fractions. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

组织结晶的成分起伏,这导致上层的形核率高,雪花状组织更加致密^[17]。

图5中白色颗粒为未熔的WC颗粒,由于WC边界成为非均匀形核的质点,WC边界有很多呈放射状分布的棒状组织或小颗粒状组织A,组织A主要由W和Cr元素组成,是 M_6C 化合物,即 $(Cr, Ni)_3W_3C$ ^[18]。由于液态金属中残留的WC颗粒温度低,未熔WC附近的熔体凝固时,热量流向残留WC,形成微区定向冷却^[19],因此大部分组织A呈现为棒状,并垂直于WC颗粒边界生长。WC周围环绕的灰色块状组织B与基体上分布的块状组织E为同一组织,这种块状组织中W的质量分数为40%~50%,低于放射状组织A中W的质量分数。该块状组织受液态Ni基材料侵蚀后形成,形态上保留了原来WC颗粒的棱角。高温下WC熔解为W和C原子,因为W原子与C原子的亲和力低于Cr原子,液态金属中的Cr原子替换掉部分W原子,并与C原子结合,B点含有大量的Cr原子就是对此最好的证明。如图5(e)所示,原来WC颗粒内部存在裂纹,经过Cr原子替代,形成组织A与组织B。基体C中Fe与Ni的质量分数分别为21.26%和49.30%,所以基体由 $\gamma-(Fe, Ni)$ 固溶体和 Ni_4B_3 组成,从能谱分析中可知,基体中固溶有W、Cr、C等元素,起到固溶强化的作用。能谱结果显示,基体上分布的针状组织D中Cr原子与Ni原子的原子数比接近1:4,从二次电子成像角度考虑,组织D亮度高于基体C,说明组织D含有原子序数非常大的W原子,W含量高于基体,根据以往的研究^[20-21],可推测组织D为 $Cr_4Ni_{15}W$ 。在凝固后期,含W量高的组织已经析出,液态金属中W含量下降,但在某些位置,W仍是饱和的,所以在800℃左右会形成金属间化合物 $Cr_4Ni_{15}W$ 。雪花状组织F含有大量的W、Cr原子和少量的Fe、Ni元素,故雪花状组织为具有立方体结构的 $M_{23}C_6$ (M为Cr, Ni, Fe, W)^[22]。

图6所示为试件2熔覆层的SEM图像,表4所示为图6不同位置相应的EDX能谱结果。相比于试件1,

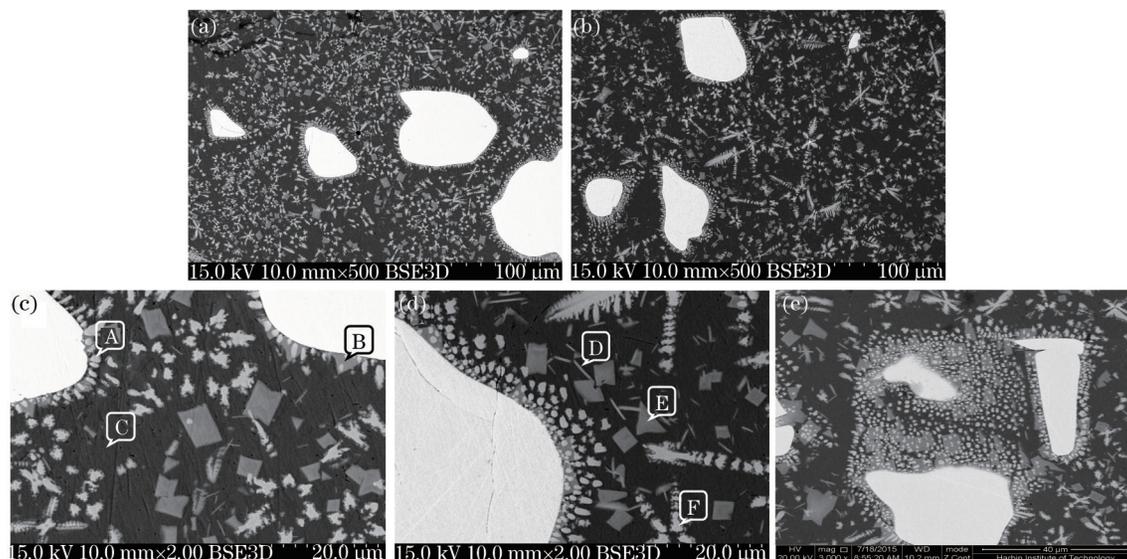


图5 试件1熔覆层各部位微观组织。(a) 上部(低倍放大率); (b) 中部(低倍放大率); (c) 上部(高倍放大率); (d) 中部(高倍放大率); (e) WC熔解图

Fig.5 Cladding layer microstructure of sample 1 at different positions. (a) Upper part (low magnification); (b) middle part (low magnification); (c) upper part (high magnification); (d) middle part (high magnification); (e) melting of WC

试件2熔覆层中的放射状组织减少,块状组织消失,这是因为高温下,Ni基液态金属增多而WC颗粒减少,Wc的溶解更充分。熔覆层基体分布大量的絮状共晶组织和富W碳化物,这种絮状共晶组织G类似于共晶核心的组织^[10],组织G的中心部分由W和Cr含量很高的块状M₂₃C₆(M为Cr,Ni,Fe,W)组成,块状组织周围的共晶组织中W和Cr含量下降,Fe与Ni含量上升。形成这种组织,主要是因为激光束作用下,液态金属中W和Cr分布不均匀,金属冷却时,W和Cr含量高的地方先形核,并长大为M₂₃C₆;随着温度下降和凝固的进行,W和Cr扩散能力下降,同时液态金属中W和Cr原子数量减少,M₂₃C₆不能继续长大,只能与溶液中的Fe和Ni等元素形成共晶组织。组织H中心没有块状M₂₃C₆,与熔覆层横截面所切的位置有关。

表3 试件1熔覆层不同点的组织成分(原子数分数,%)

Table 3 Chemical composition of the cladding layer of sample 1 at different positions (atom fraction, %)

Position	B	C	Si	W	Cr	Fe	Ni
A	4.19	30.48	5.51	21.41	22.07	5.54	8.52
B	7.46	17.66	4.19	17.99	26.76	14.74	9.27
C	—	17.02	7.34	2.73	9.88	19.33	42.66
D	—	15.63	9.04	6.20	11.32	15.64	40.73
E	7.36	17.36	2.84	14.42	31.51	15.84	9.38
F	—	23.65	—	29.12	39.91	5.40	6.59

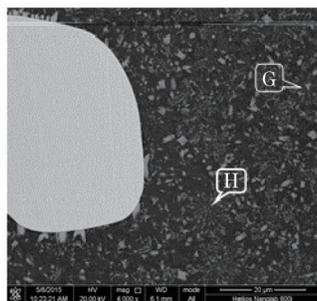


图6 试件2的熔覆层微观组织

Fig.6 Cladding layer microstructure of sample 2

表4 试件2熔覆层不同点的组织成分(原子数分数,%)

Table 4 Chemical composition of the cladding layer of sample 2 at different positions (atom fraction, %)

Position	B	C	Si	W	Cr	Fe	Ni
G	—	25.81	—	23.53	34.18	10.15	5.14
H	—	9.34	—	6.27	11.11	36.18	36.72

图7所示为试件3熔覆层的SEM图像,由于进入熔覆层的WC相对最少,熔覆层中含W碳化物生成量减少。熔覆层上部与中部分布有树枝状组织I和点状或网状组织J;熔覆层上部WC颗粒小于下部,基体中分布的富W组织J主要分布于熔覆层上部。从J点的能谱分析结果可知各元素的质量分数分别为W 32.59%、Fe 49.27%、Ni 17.29%,点状或网状组织J中W含量较高,在熔覆层冷却时应优先析出,但是从组织的分布情况来看,点状或网状组织J主要分布在树枝晶I的周围,这说明树枝状组织为初生相。树枝状组织I主要成分为

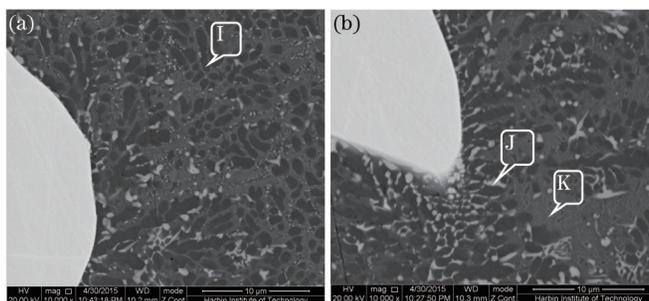


图7 试件3熔覆层各部位微观组织。(a)上部;(b)中部

Fig.7 Cladding layer microstructure of sample 3 at different positions. (a) Upper part; (b) middle part

Fe与Ni,为 γ -(Fe, Ni)相,在凝固过程中,因为Fe与Ni属于面心结构,W与Cr属于体心结构,所以在树枝晶结晶过程中,会向外排出W原子与Cr原子,造成W原子与Cr原子聚集。从宏观上看,网状或点状组织J主要分布在WC附近,其中的W和Cr含量高于于I点和K点,Fe与Ni含量也很高,这是因为点状或网状组织J过小,能谱的电子光斑直径大于组织大小,导致电子打到基体上,使Fe与Ni含量高于实际值,所以点状或网状组织J是分布在树枝晶I周围的WC、 $M_{23}C_6$ (M为Cr, Ni, Fe, W)等相。

3.3 熔覆层硬度

图8所示三条曲线分别为试件1、试件2和试件3的熔覆层硬度变化曲线。加入WC后,熔覆层的硬度得到显著提高,熔覆层中析出的高硬度碳化物的分布决定熔覆层硬度。WC质量分数为50%时,熔覆层平均硬度最高,熔覆层中析出的碳化物种类多且非常致密;WC质量分数为33%时,熔覆层中析出的碳化物强化相减少,碳化物体积小,数量多,起到弥散强化的作用,导致熔覆层平均硬度减小;WC质量分数为20%时,进入熔覆层的WC数量最少,熔覆层中主要是 γ -(Fe, Ni)枝晶,晶间有很多富W碳化物析出,析出碳化物数量上远远少于其他参数,且 γ -(Fe, Ni)枝晶本身硬度低,因此试件3与其他试件相比熔覆层硬度最低。

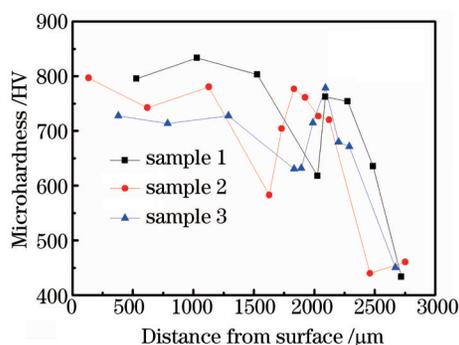


图8 不同WC质量分数下熔覆层的硬度变化曲线

Fig.8 Variation of cladding layer microhardness for different WC mass fractions

4 结 论

WC质量分数相同时,由于熔覆层上下温度不同,导致熔覆层上部WC溶解较多,液态金属中W原子数与C原子数多于中部,熔覆层上部分布的富W碳化物更加致密。

WC质量分数为20%时,熔覆层主要为 γ -(Fe, Ni)树枝晶与晶间 $M_{23}C_6$;WC质量分数为33%时,熔覆层为核心共晶组织,其中心为块状的 $M_{23}C_6$,周围为絮状组织;WC质量分数为50%时,熔覆层中存在沿WC边界生长的放射状 M_6C 、雪花状 $M_{23}C_6$ 、针状 $Cr_4Ni_{15}W$ 组织和部分W原子被Cr原子替代的碳化物。随着WC质量分数的增大,熔覆层中的碳化物不断增大,从沿晶间分布,到共晶组织,最后到独立的大块状。

WC的质量分数分别为20%、33%、50%时,熔覆层的硬度分别为730、760、810 HV。与基体相比,硬度提高一倍。

参 考 文 献

- 1 Zeng Xiaoqing, He Haiyan, Zhou Shanshan, *et al.*. Microstructure and property analysis of laser clad Ni60 alloy on H13 steel surface [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2007, 41(4): 361-363.
曾晓卿, 贺海燕, 周珊珊, 等. H13钢表面激光熔敷Ni60A合金组织及性能分析[J]. 太原理工大学学报, 2007, 41(4): 361-363.
- 2 Tang Shujun, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.*. Microstructure and property of selective laser cladding Ni-Al intermetallic compound coating on H13 steel surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1622-1624.
唐淑君, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13钢表面激光选区熔覆Ni-Al金属间化合物涂层的组织与性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1622-1624.
- 3 Yan Zhonglin, Ye Hong. The technique of laser cladding and its application on dies[J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 73-74.
闫忠琳, 叶宏. 激光熔覆技术及其在模具中的应用[J]. 激光杂志, 2006, 27(2): 73-74.
- 4 Yao Shuang, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.*. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coating on H13 steel surface by laser *in-situ* synthesis[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003004.

- 姚 爽, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13 钢表面激光原位自生 TiC 颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003004.
- 5 Qiao Y F, Fischer T E, Dent A. The effects of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coatings with very fine structures[J]. Surface and Coating Technology, 2003, 172(1): 24-41.
- 6 Si S H, Yuan X M, Liu Y L, *et al.*. Effect of laser power on microstructure and wear resistance of WC_p/Ni cermet coating[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2006, 13(3): 74-78.
- 7 Yang Lijing, Li Zhihong, Li Bo, *et al.*. Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306005.
杨理京, 李祉宏, 李 波, 等. 超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306005.
- 8 Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.*. Effects of different pressures on laser cladding special powder prepared by gas atomization [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603001.
郭士锐, 陈智君, 张群莉, 等. 不同压力对气雾化激光熔覆专用合金粉末的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603001.
- 9 Rong Lei, Huang Jian, Li Zhuguo, *et al.*. Microstructure and property of laser cladding Ni-based alloy coating reinforced by WC particles [J]. Chinese Surface Engineering, 2010, 23(6): 41-50.
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): 41-50.
- 10 Ma Q S, Li Y, Wang J, *et al.*. Investigation on cored-eutectic structure in Ni60/WC composite coatings fabricated by wide-band laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 645: 151-157.
- 11 Zhang Y M, Hida M, Sakakibara A, *et al.*. Effect of WC addition on microstructures of laser melted Ni-based alloy powder[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(6): 667-674.
- 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(1-2): 142-147.
- 13 Li S, Hu Q W, Zeng X Y, *et al.*. Effect of carbon content on the microstructure and the cracking susceptibility of Fe-based laser-clad layer[J]. Applied Surface Science, 2005, 240(1): 63-70.
- 14 Xu G J, Kutsuna M, Liu Z J, *et al.*. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 417(1-2): 63-72.
- 15 Wu Xinwei, Zeng Xiaoyan, Zhu Beidi, *et al.*. Cracking tendency of laser cladding Ni-based WC composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(6): 570-576.
吴新伟, 曾晓雁, 朱蓓蒂, 等. 镍基碳化钨金属陶瓷激光熔覆层开裂性的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(6): 570-576.
- 16 Gustafson P. A thermodynamical evaluation of the C-Cr-Fe-W system[J]. Metallurgical Transactions A, 1998, 19(10): 2547-2554.
- 17 Cui Zhongqi, Liu Beixing. Metallurgy and heat treatment theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 2.
崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 2.
- 18 Farahmand P, Liu S, Zhang Z, *et al.*. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃ [J]. Ceramics International, 2014, 40(10): 15421-15438.
- 19 Liu Ximing. Mechanism and control of the nick based alloy +WC laser clad layer microstructure[J]. Applied Laser, 2006, 26(5): 299-302.
刘喜明. 镍基合金+WC 激光熔覆层的显微组织形成机理及控制[J]. 应用激光, 2006, 26(5): 299-302.
- 20 Chen Zhikun, Liu Min, Zeng Dechang, *et al.*. Microstructure and wear resistance of laser cladding NiCrWB alloy coating Cu substructure [J]. Tribology, 2010, 30(4): 344-349.
陈志坤, 刘 敏, 曾德长, 等. 铜表面激光熔覆 NiCrWB 合金的组织结构与耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 344-349.
- 21 Jin Y, Fan J, Mou K, *et al.*. Structural and phase transformation behavior of electroless Ni-W-Cr-P alloy coatings on stainless steel[J]. Inorganic Materials, 2010, 46(6): 631-638.
- 22 Yuan Xiaozhou, Dai Xiaoguang. Investigation on dissolution characteristics of cast WC particles in Ni-based WC coating by laser cladding [J]. Journal of Ningbo Polytechnic, 2013, 17(6): 106-108.
袁晓洲, 戴晓光. 激光熔覆 Ni 基 WC 涂层内铸造 WC 颗粒溶解特征的研究[J]. 宁波职业技术学院学报, 2013, 17(6): 106-108.

栏目编辑: 宋梅梅