

激光熔覆 Ni-Cr-Mo 合金钢涂层的 组织与热稳定性

丁 洁, 吕 游, 张子扬, 段明伟, 王树奇, 崔向红

(江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 用 Nd^{3+} : YAG 激光器在 H13 钢基体表面上激光熔覆两种 Ni-Mo-Cr 系涂层, 化学成分(质量分数 $\mu/\%$) 分别为 $\text{Ni}_9\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.15}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{78.4}$ 和 $\text{Ni}_2\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.1}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{85.4}$, 分别用 X 射线衍射(XRD)、金相显微镜、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)及高温管式电炉对涂层的表面形貌、物相成分、微观组织、成分分布及热稳定性能进行研究。结果表明: 两种 Ni-Mo-Cr 系粉末与基体皆可发生冶金结合, 表面呈均匀的鱼鳞状, 组织均匀致密, 涂层主要物相为 γ -(Fe, Ni) 固溶体、FeCr、 α -Fe 和 NiCrFe 相等化合物, 并且熔覆区组织为等轴晶, 结合区组织为垂直于结合面且较为粗大的柱状枝晶。Ni 添加量为 9% 和 2% 时的 Ni-Mo-Cr 系涂层平均显微硬度($\text{HV}_{0.2}$) 分别为 650 和 740, 约为基体硬度(230) 的 2.8~3.2 倍; 两种 Ni-Mo-Cr 涂层的热稳定性能相对于 H13 钢都有很大提高, 其中 Ni 添加量为 2% 时的涂层较佳。

关键词: H13 钢; Ni-Mo-Cr 系涂层; 激光熔覆; 显微组织; 硬度; 热稳定性

中图分类号: TF76, TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2019)01-0153-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Microstructure and Thermal Properties of Laser Cladding Ni-Cr-Mo Alloy Steel Coating

Ding Jie, Lü You, Zhang Ziyang, Duan Mingwei, Wang Shuqi, Cui Xianghong

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: in this paper, two kinds of Ni-Mo-Cr coatings were laser-clad on the surface of H13 steel substrate by Nd^{3+} : YAG laser. The chemical compositions of applied coatings were $\text{Ni}_9\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.15}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{78.4}$ and $\text{Ni}_2\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.1}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{85.4}$ (mass fraction $\mu/\%$) respectively. Surface morphology, microstructure, phase composition, composition and thermal stability of the coating had been investigated by X-ray diffraction (XRD), metallographic microscope, scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and microhardness tester. The results show that the coatings of two Ni-Mo-Cr powders are metallurgically bonded to the matrix. The surface morphology presents uniform and dense fish scale. The main phases of the coating are γ -(Fe, Ni) solid solution, FeCr, α -Fe and NiCrFe equivalent compounds. The coating region is composed of equiaxed grain, and the bonding region is composed of relatively coarse columnar dendrites perpendicular to the bonding surface. The average microhardness of Ni-Mo-Cr coatings with 9% and 2% Ni addition are 650 $\text{HV}_{0.2}$ and 740 $\text{HV}_{0.2}$, respectively, which is about 2.8 to 3.2 times that of the matrix (230 $\text{HV}_{0.2}$). The thermal stability of the Ni-Mo-Cr coating is greatly improved compared to the H13 steel, and the coating is better when the Ni addition is 2%.

Key words: H13, Ni-Mo-Cr coating, laser cladding, microstructure, hardness, thermal stability

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(51874116, 51774108) 资助。

作者简介: 丁 洁(1990—), 女, 汉, 研究生, 主要从事材料表面涂层及耐磨性研究。E-mail: 1003806464@qq.com; 通讯作者: 崔向红, 女, 汉, 副教授, 主要从事材料表面涂层及耐磨性研究。E-mail: 715714561@qq.com。

0 引言

国际上广泛使用 H13 钢(4Cr 5Mo Si V1) 作为热作模具钢,其具有较高的热强度、硬度、耐磨性、韧性以及较好的耐热疲劳性能,可用于制造各种热挤压模、锻模等^[1]。但是高温金属的加热导致受热温度很高,H13 钢模具长时间处在高温工作环境下,会使表面的性能(强度、硬度等)显著降低,热作模具钢的热塑变抗力逐渐失效;模具材料在使用过程中会不断受热与冷却,导致模具表面材料因热疲劳或磨损失效^[2]。因此,利用激光熔覆技术来改善 H13 钢表面性能已逐渐成为近年来的研究热点^[3-7]。

激光熔覆技术已成为新材料制备、金属零部件制造、失效金属零部件修复的重要方法而广泛应用,特别适用于材料表面强化。激光熔覆技术通过较高的能量输出,使熔敷材料和基体同时熔化,在凝固过程中形成良好的冶金结合,对特定部位进行强化,提高零部件的表面性能^[8-9]。因而通过在工件表面激光熔覆一层合金粉末,实现对材料的表面改性、对产品的表面修复、快速原型制造等,延长其使用寿命,更好的满足服役条件,提高经济效益,有一定的工程价值与现实意义。

近年来,采用激光熔覆强化,多以 Fe、Ni 元素为基,并加入类金属元素 B、Si 等在低碳钢表面制备非晶-纳米晶涂层的研究已经见相关报道^[10-12]。但

是因为激光急冷急热的特点,当涂层粉末与基体之间存在较大的成分差异时,会使熔覆过程中出现裂纹、孔洞等缺陷。因此在铁-镍基的基础上增加了 Mo、Cr 等元素,使之与基体成分相近,有望获得结合牢固、无缺陷的涂层。

笔者通过利用 Nd³⁺:YAG 激光器在 H13 钢表面上激光熔覆 Ni-Mo-Cr 系粉末制备出合金涂层,初步研究了激光熔覆后涂层的物相组成、微观组织、显微硬度及热稳定性。

1 试验材料及方法

激光熔覆试验采用的基体材料为 H13 钢,化学成分如表 1 所示。钢板试件尺寸为 30 mm×30 mm×15 mm,接着依次用不同型号的砂纸对试样进行打磨,去除其表面的杂质、油污和氧化皮,并用丙酮进行清洗。涂层材料为两种 Ni-Mo-Cr 系合金粉末,粉末粒度均为 10~30 μm,粉末配比如表 2 所示。根据要求的配置比例,将各种粉末用电子分析天平 E180(精度为 10⁻⁵ mg)称量出相应的量,然后放入球磨机进行混合,时间为 24 h,确保粉末混合均匀。然后取出后放入密封袋中,再置于干燥皿中待用。本试验采用粉末预置法,利用 XR-MW400 型 YAG 固体激光加工系统来进行激光熔覆,预置粉末厚度为 0.5 mm。激光熔覆工艺参数如表 3 所示。

表 1 H13 钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of H13 steel

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P	S
%	0.463	0.874	0.320	5.308	0.144	1.379	0.851	0.015	0.002

表 2 涂层材料成分
Table 2 Coating composition of coating powders

	Ni	Mo	Cr	Al	Ti	B	Si	Fe
%	9	2	2.5	0.15	1	4	3	78.4
	2	2	2.5	0.10	1	4	3	85.4

表 3 激光熔覆工艺参数
Table 3 Laser cladding process parameters

	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	脉宽/ms	激光频率/Hz	搭接率/%	氩气流量/(L·min ⁻¹)
%	400	2.5	2.5	20	50	15

将激光熔覆后的试样进行线切割,切割成 10 mm×10 mm×15 mm 的小试样,并对试样进行打磨、抛光,腐蚀,采用王水对其截面进行腐蚀 10 s,王水

由盐酸和硝酸配制而成,体积配比为 3:1。然后采用型号为 LEICA DM-2500M 金相显微镜对试样截面组织形貌进行观察;采用型号为 D/Max2500pc 的

X 射线衍射仪分析涂层的物相,采用 Cu 靶的 Ka 射线,测试参数为: 电流 150 mA、电压 30 kV、衍射速度 6°/min、衍射角范围 20°~100°;应用 HV0.2-1000 型数字显微硬度计来对涂层和基体的硬度进行测量,载荷为 200 N,加载时间 15 s;采用 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜及 Inca energy 350 型能谱仪分

析涂层的形貌及元素。
采用 GSL-1300X 高温管式电炉进行热稳定性试验。表 4 是对涂层 1($\text{Ni}_9\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.1}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{78.4}$)、涂层 2($\text{Ni}_2\text{Mo}_2\text{Cr}_{2.5}\text{Al}_{0.1}\text{Ti}_1\text{B}_4\text{Si}_3\text{Fe}_{85.4}$) 以及 H13 钢基体的加热条件,通过测量 Ni-Mo-Cr 系涂层和 H13 钢基体的硬度,并分析比较涂层和基体的热稳定性^[13]。

表 4 涂层 1、涂层 2 和 H13 钢的热处理条件
Table 4 Heat treatment conditions for coating 1, coating 2 and H13 steel

试样	固溶处理		时效处理		热稳定性试验	
	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h
涂层 1	1 020	30	600	4	650	2、4、6、8、10
涂层 2	1 040	30	620	4	650	2、4、6、8、10
H13 钢	1 020	20	620	2	650	2、4、6、8、10

2 试验结果与分析

2.1 Ni-Mo-Cr 系涂层宏观形貌分析

图 1 分别为激光熔覆后的涂层 1 和涂层 2 的宏观形貌,可以看出涂层表面呈整齐规则的鱼鳞状,涂层表面光亮、平整,粉末飞溅少,仅产生少量的脱落颗粒,无明显裂纹,可见涂层与基体发生良好的冶金结合。

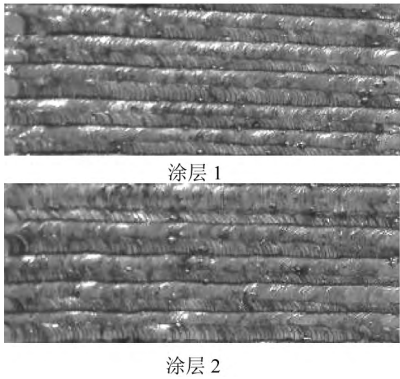


图 1 Ni-Mo-Cr 系涂层表面形貌
Fig.1 Surface morphology of Ni-Mo-Cr coating

2.2 Ni-Mo-Cr 系涂层物相分析

图 2 为激光熔覆后涂层 1 和涂层 2 的 XRD 图谱。从图 2 可以看出,两种涂层所产生的物相是相同的,主要为 γ -(Fe,Ni) 固溶体、FeCr、 α -Fe 和 NiCrFe 相等化合物^[14-16]。

由于激光熔覆的快速凝固特性,使涂层中物相的过饱和度增加,晶格畸变,且涂层中 Fe 和 Ni 原子

都是面心立方晶格结构,可以相互固溶,因而优先形成 γ -(Fe,Ni) 固溶体,同时也形成了 FeCr 和 NiCrFe 等硬质相,这些硬质相相对提高涂层硬度和热稳定性起到很重要的作用。

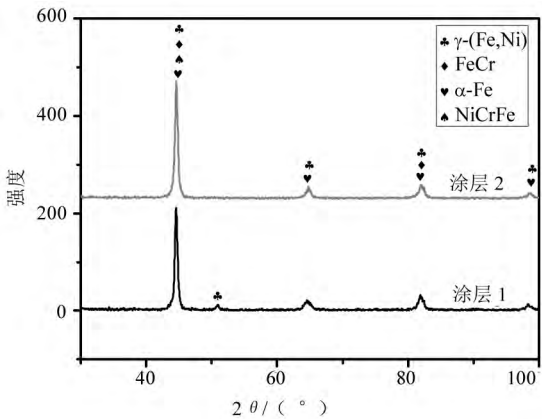
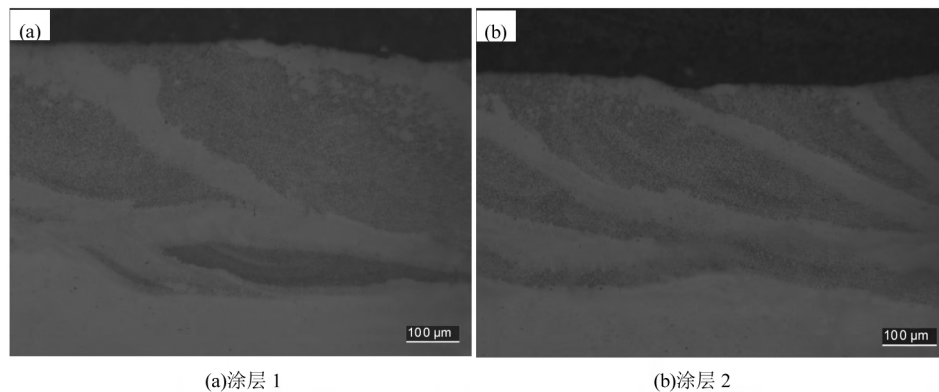


图 2 Ni-Mo-Cr 系涂层 XRD 衍射图谱
Fig.2 XRD pattern of Ni-Mo-Cr coating

2.3 涂层微观组织

图 3 中(a)和(b)分别为激光熔覆后的涂层 1 和涂层 2 的截面显微组织。

由图 3 可看出两种涂层的厚度在 250~350 μm,并在基体交界处都可以看到一条白亮带,这是因为基体温度较低,溶池底部的液相的温度梯度很大,凝固速度非常小,故成分过冷趋近于零,此时凝固所释放的热量全部向界面后方的基体散去,使结晶界面缓慢的向较热的液体金属中推移,结晶呈平面形态,从而在界面区形成一条由平面晶构成的白亮带。说明了激光熔覆后的熔敷层与基体金属之间发生了相互溶解与扩散,并进行了冶金结合。



(a)涂层 1

(b)涂层 2

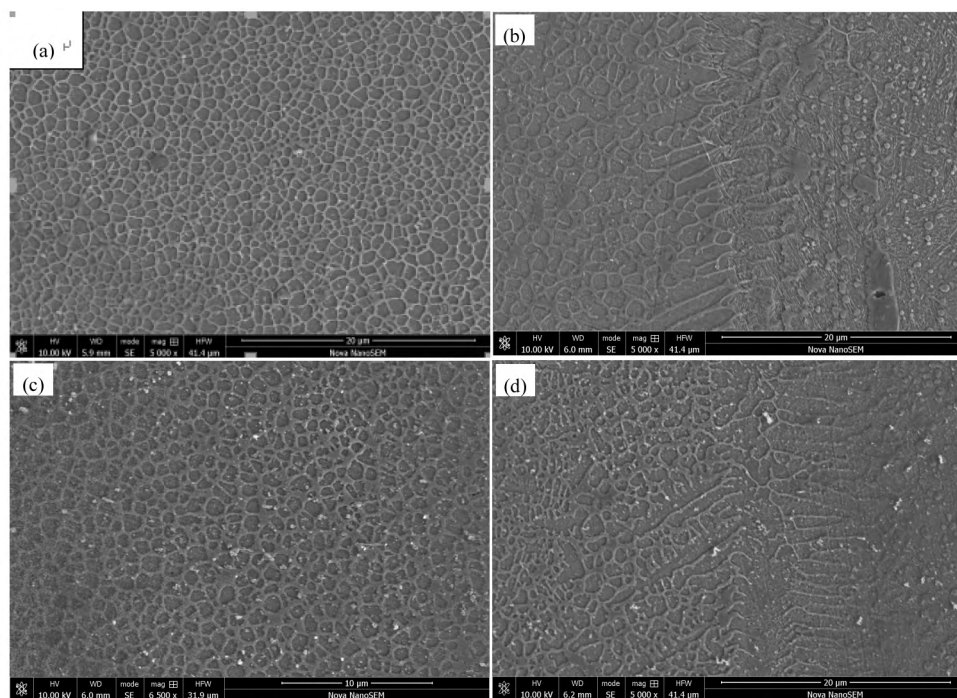
图 3 Ni-Cr-Mo 涂层 1 (a) 和涂层 2 (b) 的截面金相图

Fig.3 Metallographic diagram of Ni-Cr-Mo coating 1 (a) and coating 2 (b)

本试验制备出的涂层几乎无裂纹,主要原因是:本试验使用的是脉冲 Nd^{3+} :YAG 激光器,脉冲激光在基体上的热量集中程度要小于连续激光器,且作用时间短,粉末与基体交界处在冷却过程中会产生更少热应力,成功减少开裂性;添加自熔性粉末 B、Si,自熔性粉末可以形成熔点比较低

的硼硅酸盐,形成的硼硅酸盐将以熔渣的形式浮出液态金属表面,减少涂层的含氧量和夹渣,提高基体与涂层的润湿性和工艺成型性,减少裂纹的出现。

图 4 为激光熔覆两种 Ni-Mo-Cr 系粉末后涂层 1 和涂层 2 的截面显微组织形态。



(a)涂层 1 熔覆区; (b)涂层 1 结合区; (c)涂层 2 熔覆区; (d)涂层 2 结合区

图 4 Ni-Cr-Mo 涂层 1 (a) 和涂层 2 (b) 的显微组织形态图

Fig.4 Microstructure of Ni-Cr-Mo coating 1 (a) and coating 2 (b)

激光熔覆涂层截面从上到下依次分为熔覆区、结合区、热影响区。(a)和(c)分别为涂层 1 和涂层 2 的熔覆区组织,可以看出晶粒以等轴晶形态生长,(b)和(d)分别为涂层 1 和涂层 2 的结合区组织形

态,可以看出晶粒以柱状枝晶形态生长^[17-20]。由于激光束的瞬间能量很高,使预置粉末迅速熔化,粉末和基体之间发生冶金结合后并凝固,属于快热快冷动态过程。根据合金凝固理论^[21],开始凝固时基体

表面的温度较低,而涂层的温度很高,因而温度梯度很大,结晶速度较慢,过冷度小,沿垂直于结合面的方向散热最快,对流速度较大,有利于一次晶轴生长,并且生长方向也是垂直于结合区。因此其他取向的晶粒受到附近晶粒的限制很难继续生长,而有利取向的晶粒不断生长,形成有方向性生长的柱状枝晶,并垂直于结合面向涂层内部发展;随着液-固界面继续向前推移,由于结晶导致溶质元素的增加,温度梯度减小,结晶速度加快,过冷度增大,形成树枝晶,同时主晶轴侧面产生分枝,形成二次轴,同时由于试件体积小,散热慢且没有方向性,在

熔化的粉末中形成大量的晶核,导致晶核自由生长,从而在涂层表面形成无方向性的等轴晶。

图 5 中(a)和(b)分别是对涂层 1 和涂层 2 结合区元素的能谱分析结果。从图 5(a)和(b)中都可以看出涂层与基体之间发生了元素互相稀释的现象。由于激光熔覆过程中产生较高的热量,使得部分基体发生熔融,产生熔池,增大了稀释率。因此,基体中少许 Fe、Cr 元素在熔覆过程中扩散到涂层中,使涂层中 Fe、Cr 元素比原来有所增加,而 B、Al、Ti 等元素在激光熔覆中也发生了一些烧损,所以元素含量有所减少。

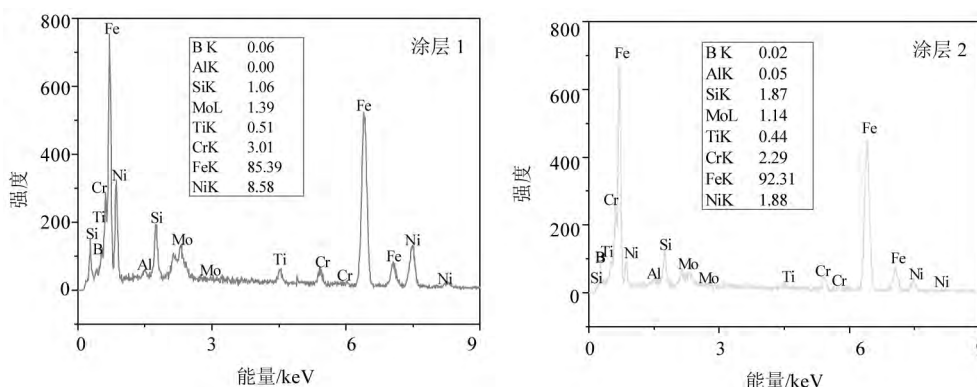


图 5 Ni-Mo-Cr 涂层 EDS 分析

Fig.5 EDS analysis of Ni-Mo-Cr coating

2.4 Ni-Mo-Cr 系涂层显微硬度及热稳定性分析

图 6 为激光熔覆后涂层 1 和涂层 2 的硬度分布曲线,硬度曲线是由涂层表面,沿着熔覆区—热影响区—基体的硬度进行绘制的,可看出涂层表面到基体内部的硬度曲线呈下降式的梯度分布。涂层 1 的涂层部分的平均硬度($HV_{0.2}$,下同)为 650,涂层 2 的涂层部分的硬度稍高于涂层 1,平均硬度在 740 左右,过渡到热影响区时,硬度开始下降,此时两种试样的硬度很接近,平均在 520,但也是远高于基体的硬度 230,涂层的硬度相比于基体的硬度提高了 2.8~3.2 倍。涂层硬度值的提高,也有利于增强涂层的耐磨性。

分析认为,涂层硬度提高的主要是因为,快速凝固时过冷度大且凝固时间短,晶粒不易长大,从而形成快速凝固特征的细小晶粒,产生了细晶强化的效果; $\gamma-(Fe, Ni)$ 固溶体的存在,涂层中的 Cr、B、Si 等元素起到固溶强化作用^[22];涂层中弥散分布着高熔点、高硬度的硬质相 $FeNi_3$,以及 Cr、Ni、Al 等合金化元素,在激光熔覆过程中分散到涂层各个部分,起到

了弥散强化的效果^[23-24]。涂层在经过激光熔覆后会存在大的热应力,使冷却时发生 $\gamma-\epsilon$ 马氏体相变,马氏体使涂层的硬度得到提高。热影响区硬度高于基体硬度,一方面由于高温下快速冷却,出现淬火现象,使得此处硬度提高,另一方面由于稀释作用,多道搭接熔覆造成该处熔深加大,稀释率加大。基体中大量的 Fe 元素扩散到热影响区,使得此处涂层的合金元素含量少于涂层而多余基体,因而硬度低于熔覆区,而高于基体。

图 7 为热处理后的涂层 1、涂层 2 以及 H13 钢试样分别在 650 °C 下保温 2、4、6、8 h 及 10 h 后的硬度变化曲线。三种涂层 1、涂层 2 涂层和 H13 钢的初始硬度是近乎一致的,由图可知三种试样随着保温时间的延长,硬度都呈下降的趋势。在保温过程中时,涂层 1 和涂层 2 涂层硬度下降的趋势很缓慢,10 h 后的涂层 1 涂层硬度由 458 降到了 385,下降了 70 左右;10 h 后的涂层 2 涂层硬度由 456 下降至 431,仅降低了 25,而且在 6 h 后的硬度很平稳,几乎没有降低。两种涂层硬度下降缓慢,至少有降低,

原因主要是保温过程中,涂层中原有的内应力得到缓解,并且一些硬质颗粒溶于 γ -(Fe,Ni)固溶体,使硬度变化范围小。

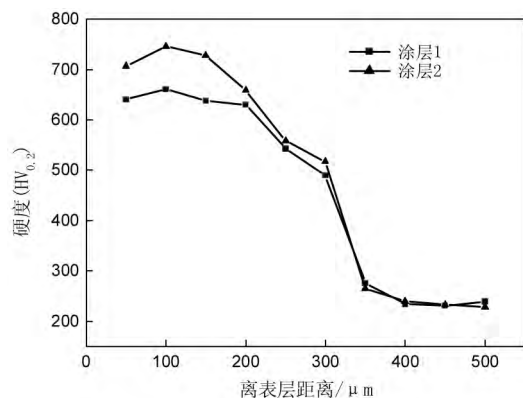


图6 Ni-Mo-Cr 涂层沿层深方向的硬度分布曲线
Fig.6 Hardness distribution curve of Ni-Mo-Cr coating along of the layer depth

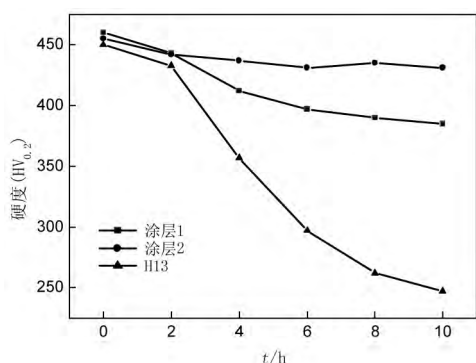


图7 Ni-Mo-Cr 涂层和 H13 钢的硬度变化曲线
Fig.7 Hardness curve of Ni-Mo-Cr coating and H13 steel

但是 H13 钢的硬度下降速度要远高于涂层,保温 4 h 后的硬度已经明显低于涂层硬度。在保温 10 h 后, H13 钢硬度已由初始的 451 下降至为 247。H13 钢硬度不断下降,主要是由于碳化物脱溶沉淀,合金元素(碳、铬等)的固溶度越来越小,强化效果逐渐消失,使硬度不断下降。由此可见,激光熔覆 Ni-Mo-Cr 涂层后,涂层的热稳定性确实有很大提高,并且涂层 2 涂层热稳定性较佳。

3 结论

1) H13 钢基体表面上激光熔覆不同 Ni 添加量的 Ni-Mo-Cr 系粉末与基体发生良好的冶金结合,组织均匀、致密。

2) 不同 Ni 添加量的 Ni-Mo-Cr 系涂层的主要物相都是 γ -(Fe,Ni) 固溶体、FeCr、 α -Fe 和 NiCrFe 等。

3) Ni-Mo-Cr 系粉末与基体发生之间有一条白亮带,并且在结合区发生了元素扩散,形成了良好冶金结合的涂层。涂层由熔覆区、结合区、基体热影响区组成,熔覆区组织为等轴晶,结合区组织为垂直于结合面且较为粗大的柱状枝晶。

4) Ni 添加量为 9% 和 2% 时的 Ni-Mo-Cr 系涂层平均显微硬度(HV_{0.2}) 分别为 650 和 740,约为基体(230HV_{0.2}) 的 2.8~3.2 倍;随着保温时间的延长,Ni-Mo-Cr 系涂层中原有的内应力得到缓解,并且一些硬质颗粒溶于 γ -(Fe,Ni) 固溶体,使涂层硬度下降缓慢,热稳定性能远高于 H13 钢,并且 Ni 添加量为 2% 时的涂层的热稳定性较佳。

参考文献

- [1] He Haiyan, Cao Xiaoqing. Experimental study on laser cladding Ni-based and Co-based alloy powder on H13 steel surface [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology 2010: 1-3.
(贺海燕,曹晓卿.H13 钢表面激光熔覆 Ni 基、Co 基合金粉末的试验研究[D].太原:太原理工大学,2010: 1-3.)
- [2] Pham Thi Hong Nga, Zhang Xiaowei, Wang Chuanqi. Transactions of the China welding institution [J]. Transactions of the China Welding Institution 2013, 34(11): 27-32.
(Pham Thi Hong Nga, 张晓伟,王传奇.H13 钢表面 TiC/Co 基激光修复层的显微组织与力学性能[J].焊接学报,2013,34(11): 27-32.)
- [3] Wu Xiaolei, Hong Youshi. Microstructure and mechanical properties at Ti/Cp/Ni-alloy interfaces in laser-synthesized coatings [J]. Materials Science and Engineering 2001, 318(1/2): 15-21.
- [4] Tang Shujun, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei. Microstructure and property of selective laser cladding Ni-Al intermetallic compound coating on H13 steel surface [J]. Infrared and Laser Engineering 2014, 43(5): 1621-1626.
(唐淑君,刘洪喜,张晓伟.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): 1621-1626.)
- [5] Li Zhigang. Investigation on surface modification of die-casting mould steel H13 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008: 1-15.

- (李志刚. 热作模具钢 H13 表面改性的研究[D]. 太原: 太原理工大学 2008: 1-15.)
- [6] Chen Jie. The study of H13 steel and its heat treatment [J]. Heat Treatment Technology and Equipment 2008 29(4): 44-46.
(陈杰. H13 钢及其热处理 [J]. 热处理技术与装备 2008 29(4): 44-46.)
- [7] Zhang Milan, Xing Shuming, Xin Qiao. Abnormal failure analysis of H13 punches in steel squeeze casting process [J]. Journal of Iron and Steel Research 2008 15(3): 47-51.
- [8] Zhu Qingjin, Wang Xinhong, Qu Shiyao *et al.* Amorphization of Fe₃₈Ni₃₀Si₁₆B₁₄V₂ surface layers by laser cladding [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China 2008 18: 270-273.
- [9] Huang Yongjun, Zeng Xiaoyan. Microstructure and interface interaction in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating [J]. Applied Surface Science 2009 255: 3940-3945.
- [10] Zhu Qingjun, Zou Zengda, Wang Xinhong *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Fe-based amorphous/nanocrystalline composite coatings [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science) 2008 38(2): 1
(朱庆军, 邹增大, 王新洪 等. 激光熔覆 Fe 基非晶/纳米晶复合涂层的组织与性能 [J]. 山东大学学报 (工学版) 2008, 38(2): 1-5.)
- [11] Zhu Qingjun, Qu Shiyao, Wang Xinhong *et al.* Synthesis of Fe-based amorphous composite coatings with low purity materials by laser cladding [J]. Applied Surface Science 2007 253: 7060-7064.
- [12] Wu Xiaolei, Hong Youshi. Fe-based thick amorphous-alloy coating by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2001 141: 141-144.
- [13] Chen Xueju, Wang Zehua, Lin Pinghua. Study on thermal stability of Cr-Mo alloy spherical cast steel [J]. Modern Metallurgy, 2006 34(6): 7-10.
(陈雪菊, 王泽华, 林萍华. Cr-Mo 合金球墨铸钢的热稳定性研究 [J]. 现代冶金 2006 34(6): 7-10.)
- [14] Li R, Li Z, Huang J *et al.* Dilution effect on the formation of amorphous phase in the laser clad Ni-Fe-B-Si-Nb coatings after laser remelting process [J]. Applied Surface Science 2012 258(20): 7956-7961.
- [15] Tao X P, Zhang S, Zhang C H *et al.* Effect of Fe and Ni contents on microstructure and wear resistance of aluminum bronze coatings on 316 stainless steel by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology 2018 337: 342.
- [16] Zhao Dongmei, Lei Jianbo, Wang Zhi *et al.* Microstructure and properties of laser cladding FeCr-based Ni-B₄C composite coatings [J]. Journal of Materials Heat Treatment 2015 36(12): 204-209.
(赵冬梅, 雷剑波, 王植 等. 激光熔覆 FeCr 基 Ni 包 B₄C 复合涂层的组织性能 [J]. 材料热处理学报 2015 36(12): 204-209.)
- [17] Yi Xinpeng. Preparation of Fe-Mn-Si memory alloy coating by laser cladding and its wear resistance [D]. Dalian: Dalian Maritime University 2014: 33-34.
(易鑫鹏. 激光熔覆制备 Fe-Mn-Si 记忆合金涂层工艺及耐磨性研究 [D]. 大连: 大连海事大学 2014: 33-34.)
- [18] Li X Z, Liu Z D, Li H C *et al.* Investigations on the behavior of laser cladding Ni-Cr-Mo alloy coating on TP347H stainless steel tube in HCl rich environment [J]. Surface & Coatings Technology 2013 232(10): 627-639.
- [19] Yue T M, Li T, Lin X. Microstructure and phase evolution in laser cladding of Ni/Cu/Al multilayer on magnesium substrates [J]. Metallurgical & Materials Transactions A 2010 41(1): 212-223.
- [20] Xu A Q, Fu G Y, Wang C *et al.* Study on behavior of Ni-based and Fe-based hardfacing alloys in plant valves with laser cladding [J]. Advanced Materials Research 2011 287-290: 2267-2270.
- [21] Zhang Jian, Wang Zhen, Zhao Longzhi *et al.* Study on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe-36Ni invar alloy coating [J]. Hot Working Technology 2017(14): 173-176.
(张坚, 王震, 赵龙志 等. 激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层的组织与耐磨性研究 [J]. 热加工工艺 2017(14): 173-176.)
- [22] Liu Hongxi, Zeng Weihua, Zhang Xiaowei *et al.* Microstructure and properties of multi-channel laser cladding Ni-based coating on stainless steel surface [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineer 2011 19(7): 1515-1523.
(刘洪喜, 曾维华, 张晓伟 等. 不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能 [J]. 光学精密工程 2011 19(7): 1515-1523.)
- [23] Zhang Jing, Liu Jichang, Zhang Fuquan *et al.* Laser cladding Fe-Cr-Si-B coating on nodular cast iron surface [J]. Journal of Materials Heat Treatment 2010 31(5): 133-137.
(张静, 刘继常, 张福全 等. 球墨铸铁表面激光熔覆 Fe-Cr-Si-B 涂层 [J]. 材料热处理学报 2010 31(5): 133-137.)
- [24] Wang Yixiang, Li Baozeng, Gong Yaohua *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Fe-based alloy coating on 45 steel surface [J]. Thermal Engineering 2008 37(21): 131-133.
(王义厢, 李宝增, 宫耀华 等. 45 钢表面激光熔覆铁基合金涂层显微组织与性能 [J]. 热加工工艺 2008 37(21): 131-133.)