doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.04.013

扫描速度对激光熔覆 Ni 基 WC 合金涂层组织与 性能的影响 *

崔 岗,韩 彬,崔 娜,于梦飞

(中国石油大学(华东), 机电工程学院山东青岛 266580)

摘 要:在45钢表面激光熔覆镍基WC合金涂层,分析扫描速度对熔覆层的成型、组织和性能的影响。采用金相显微镜、扫描电镜、显微硬度仪和摩擦磨损试验机对熔覆层的显微组织、化学成分、相组成以及耐磨耐蚀性进行分析测试。结果表明,熔覆层组织致密,与基体有良好的冶金结合。扫描速度增大,熔覆层出现裂纹的倾向增大,底部柱状晶外延生长层宽度减小,组织晶粒细化,相组成种类几乎没有变化,显微硬度增大,耐磨耐蚀性提高。当扫描速度为200 mm/min时得到成型性及耐磨耐蚀性优良的熔覆层。

关键词:激光熔覆; 镍基; WC 合金; 熔覆速度

中图分类号: TG174.44 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2014)04-0082-07

Effects of Scanning Speed on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-based WC Alloy Coating

CUI Gang, HAN Bin, CUI Na, YU Meng-fei

(College of Machanical and Electrial Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong)

Abstract: Ni-based WC alloy coating was prepared on the surface of 45 steel by laser cladding. The effects of scanning speed on the variation of formability, microstructure and properties of the cladding coating were analyzed. The phase composition, morphology, and wear and corrosion resistance of the cladding layers are investigated by metallurgical microscope, scanning electron microscopy (SEM), microhardness tester and friction and wear tester. The results show that the laser cladding coating performances dense tissue and good metallurgical bonding with the matrix. With increasing scanning speed, the cladding cracks increase and the grains present finer and denser. The width of the columnar crystal at the bottom of epitaxial layer is reduced gradually, while the phase composition of the cladding coating remains unchanged. The microhardness of the cladding coating increases, while the wear and corrosion resistance of the cladding coating are also improved. When the scanning speed is 200 mm/min, the cladding coating shows the best forming and good resistance.

Key words: laser cladding; Ni-based; WC alloy; cladding speed

0 引 言

海洋油气开采过程中,海洋环境和高负荷的 工作条件使柱塞等关键零部件易发生磨损和腐 蚀。之后的检修和柱塞的更换,极大的提高了油 气开采的成本^[1-2]。所以需对关键零部件进行表 面改性。与传统的堆焊、热喷涂、等离子喷涂^[2] 等表面改性方法相比,激光熔覆技术^[3]在表面涂 层的结合强度、使用性能和基体热变形方面,具

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-07-01; 基金项目: * 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA09A203); 国家自然科学 基金(51179202); 山东省自然科学基金(ZR2009FM030); 中央高校基本科研业务费专项基金(13CX02073A)

作者简介: 崔岗(1989-), 男(汉), 山东潍坊人, 硕士生; 研究方向: 激光表面改性

网络出版日期: 2014-07-04 11:08; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140704.1108.003.html 引文格式:崔岗,韩彬,崔娜,等. 扫描速度对激光熔覆 Ni 基 WC 合金涂层组织与性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 82-88. 有很大优势。在柱塞表面制备激光熔覆合金涂 层可以大大延长柱塞在恶劣环境中的服役寿 命^[4],这已成为国内外学者的研究热点之一。丁 阳喜^[5]等对 45 钢进行 Ni 包 WC 激光熔覆,发现 当 Ni60+30%WC 时,能够得到耐磨耐蚀性能优 异的熔覆层。B. A. Obadele^[6]等在普通碳钢工件 上制备 WC-Co 熔覆层,成型效果良好。刘兴光 等^[7]在 45 钢表面熔覆了自制的 Ni55 粉末,在激光 熔覆功率 3.3 kW,扫描速度 250 mm/min 时成功 得到了成型性和耐磨耐蚀性良好的熔覆层。

激光熔覆在航空、汽车、机械等领域应用前 景广阔,人们对其研究也越来越深入。董世运[8] 等研究了激光熔覆工艺参数对铁基熔覆层成型 效率的影响,发现在一定范围内,其它参数不变, 随着激光熔覆功率增大,熔覆层成型效率增加, 但熔覆层组织性能下降。付宇明^[9]等在低合金 钢表面熔覆镍基 WC 合金粉末,研究激光功率对 熔覆层成型性以及组织性能的影响,发现随着激 光功率的增大,熔覆层成型性及组织性能由好变 坏,当激光熔覆功率为 3.0~3.3 kW 时,效果最 佳,当功率达到 3.8 kW 时,熔覆层表面氧化加 剧,明显失去金属光泽呈现暗灰色,基体对熔覆 层的稀释率增大,且晶粒比较粗大。柳吉华[9]等 研究发现,激光束能量密度越大,熔覆层稀释率 越大。在同样条件下方斑得到的熔覆层稀释率 明显低于圆斑得到的熔覆层稀释率。且方斑得 到的熔覆层组织晶粒更细,硬度更大。

文中在保证其他工艺参数不变的条件下通 过改变扫描速度来研究扫描速度对激光熔覆镍 基合金涂层组织性能的影响。

1 材料及方法

基体材料 45 钢,试样尺寸 50 mm×30 mm ×10 mm,熔覆前试样进行砂纸打磨并用丙酮清 洗,300 ℃预热1h;熔覆材料为在自制镍基粉末 中加入所占质量分数为13%的 WC 所得的粉末, 自制镍基粉末化学成分如表1所示。

试样表面铺粉厚度 1 mm。激光熔覆设备是 DL-5kW 横流二氧化碳激光器。激光熔覆功率 3.0~3.3 kW,采用 10 mm×1 mm 矩形聚焦光 斑,搭接率 30%。对熔覆粉末进行球磨、烘干,所 用的设备是 QM-3SP2 行星式球磨机和 ZYH-100 自控远红外焊条烘干炉。激光熔覆后对熔覆 层进行表面渗透探伤,检测表面的宏观缺陷。

试样采用王水腐蚀,用 MBA1000 金相显微 镜和 JSM 6380 扫描电子显微镜进行形貌观察。 MH-3 显微硬度计测定显微硬度(加载 200 g); UMT-3 型磨损机进行耐磨性能测试,摩擦方式 为干摩擦,对偶件为直径 9 mm 的 GCr15 钢球, 硬度为 62 HRC,载荷为 50 N,摩擦单行程为 50 mm,环境温度 25 度,湿度 45%。M398 腐蚀 综合测试系统对熔覆层进行耐蚀性能测试,腐蚀 液采用质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液。

表 1 SDNi55 粉末化学成分表

Table 1	Chemical	composition of	of SDNi55	(w/%)
---------	----------	----------------	-----------	------	---

Element	С	Cr	Si	В	Mn	Fe	Ni
SD-Ni55	0.5	13.4	2.3	1.7	0.1	22.5	Bal.

2 结果及分析

2.1 宏观形貌

图 1 为不同扫描速度下的熔覆层的探伤形 貌。由图可以看出,随着扫描速度增大,熔覆层 表面鱼鳞状波纹增加,脱渣性变差,且开裂倾向 增大。由于粉末和基体物理性质的差异,使熔池 凝固冷却时受到周围基体的拘束力,随着扫描速 度增加,熔池单位时间内得到的能量减少,冷却 时间变短,凝固速度加快^[10-11];熔池受到的拘束 力增大,当增大到材料的强度极限时,便会出现 裂纹。由图 1 的探伤图可知,当扫描速度达到 250 mm/min时,熔覆层表面出现粗大的裂纹。

2.2 微观组织

图 2 是熔覆层典型组织形貌。由图可知,涂 层从表面到内部可以分为熔覆层、结合区和基体 3 部分。熔池在底部与基体的温差大,凝固速度 小,界面稳定因子(G/R)很大,此区域主要通过在 基体上外延生长的方式得到柱状晶组织。熔液 和基体发生了原子的扩散,实现了冶金结合,涂 层具有很高的结合强度;随着到结合面的距离增 加,熔液与基体温差减小,上浮的碳化物作为形 核中心可加速非均匀形核,熔覆层中部凝固时主 要形成了集群生长的树枝晶;在熔覆层表面,热 量向外散失,温度梯度的方向是向四周的,而且 表面熔渣、杂质多,大大增加了形核的机会,熔覆 层上部主要是等轴晶组织^[12]。图 2(a)(c)是不同



(a) 100 mm/min

不同扫描速度下熔覆层的多道搭接探伤形貌 图 1

Fig. 1 Morphologies of the coatings after penetrant inspection at various scanning speed



图 2 不同扫描速度下熔覆层不同部位组织形貌

Fig. 2 Microstructure of the cladding coatings in different area at various scanning speed

扫描速度下熔覆层底部结合区显微组织,底部有 外延生长的柱状晶组织。随着扫描速度增大,柱 状晶组织急剧减小甚至消失。扫描速度增大,熔池

在单位时间内得到的热量减少,熔池底部凝固速度 增加,柱状晶不能充分生长。图 2 (a)(d)中的 A, B两处进行成分分析,能谱分析结果如图 3 所示,

发现B区域铁的质量分数较少。

据此推测,熔覆层组织的形成可能是界面平 衡因子和熔液成分共同作用的结果,铁元素的存 在有利于柱状晶组织的形成。据材料科学理论, 组织由柱状晶转化成树枝晶或等轴晶可实现组 织性能的改善。当扫描速度增大时,柱状晶组织 减少,树枝晶和等轴晶组织增多,此时熔覆层性 能得到改善^[13]。 图 2(d)(i)分别是不同扫描速度下熔覆层中 部和上部显微组织,随着扫描速度增大,该区域 集群状的树枝晶和等轴晶组织所占比率增大。 这是由熔池在单位时间内得到的能量减少,熔池 冷却速度增大,树枝晶和等轴晶组织更容易形 成,晶粒在高温的的生长量减小,得到的熔覆层 组织晶粒细小且更加致密^[14-15]。



图 3 熔覆层不同部位组织形貌能谱分析

Fig. 3 Microstructure and EDS analysis of the cladding coatings in different area

2.3 相结构

图 4 分别是扫描速度为 150 和 200 mm/min 时的熔覆层表面 XRD 分析。由图可得,激光熔覆 层中(Ni,Fe),Cr、Ni、Fe 的碳化物为主要相。当扫 描速度由 150 mm/min 上升到 200 mm/min 时,熔 覆层中的相组成几乎没有变化,(Ni,Fe)相有微 量减少。扫描速度较低时,熔池单位时间内得到 的能量多,熔体寿命增加,对流加强,熔体成分更 加均匀,促进了 Ni 和 Fe 的互扩散速度,有利于 (Ni,Fe)相的形成。 熔覆层中碳化物强化相(如 Ni, Cr, Fe)₇C₃ 等)的衍射峰值较高,这主要是因为粉末中 Cr₃C₂ 以及 WC 的加入提高了熔覆层中 C、Cr 的含量,在 涂层凝固过程中形成了更多的碳化物,但熔覆层中 WC 相很少,几乎没有显示,可能是由于粉末中 WC 颗粒相对于 Cr₂C₃ 等其它碳化物颗粒小,在熔 覆时烧损比较严重^[15-16]。当熔覆速度为分别为 150 和 200 mm/min 时,熔覆层中相组成种类几乎 没变,这说明此范围内扫描速度的改变对熔覆层相 的组成种类没有影响。













Fig. 5 Microhardness of the cladding coatings at various scanning speed

2.4 显微硬度

图 5 为扫描速度不同的熔覆层表面到基体 的显微硬度分布曲线。熔覆层中强化相颗粒的 存在和优异的组织结构使得熔覆层平均显微硬 度明显高于基体。随着扫描速度增加,熔覆层组 织晶粒变细^[15,17],强化相烧损程度减弱,固溶强 化和细晶强化作用增强,熔覆层显微硬度增加。 扫描速度为 150 和 200 mm/min 时的熔覆层显微 硬度已相差不大,明显大于 100 mm /min 时熔覆 层的显微硬度。当扫描速度为 200 mm/min 时, 熔覆层显微硬度出现最大值,达到 740 HV_{0.2}。

2.5 摩擦学性能

图 6 为扫描速度不同的熔覆层在 50 N 载荷, 1 cm/s条件下进行干摩擦滑动时摩擦因数随时间 的变化曲线。扫描速度为 100、150 和 200 mm/min 的熔覆层的平均摩擦因数分别约为 0.63、0.59 和 0.54;描速度增大,熔覆层摩擦因数减小。随着扫 描速度的增大,熔覆层的硬度增加,这使熔覆层 与工件之间的粘着力降低,熔覆层上更加细小的 晶粒和致密的组织使得粘着磨损和磨粒磨损作 用减弱,熔覆层摩擦因数降低^[18-19]。进行摩擦实 验之后,对试样清洁处理,进行称重。与摩擦前对 比,进行磨损实验后,试件减少重量分别为3.0、2.9 和 2.7 mg。由此可得,随着扫描速度的增加,熔 覆层实际耐磨损性能得到了增强。



图 6 不同扫描速度下熔覆层的摩擦因数

Fig. 6 Friction coefficient of the cladding coatings at various scanning speed

图 7 是扫描速度为 100、150 和 200 mm/min 时熔覆层的磨损形貌。由图可知,熔覆层主要为磨 粒磨损和粘着磨损。当扫描速度为 100 mm/min 的 熔覆层磨损最为严重,表面出现严重的磨损划痕 和变形。随着扫描速度增加,熔覆层与工件粘着 力减小,粘着磨损程度减弱;而熔覆层硬度随着 扫描速度的增加而增高,使得磨粒磨损程度减 弱;组织中晶粒细小弥散,使得熔覆层表面划痕 变浅变窄,熔覆层耐磨性提高^[19-21]。

2.5 耐腐蚀性能

图 8 为不同扫描速度下的熔覆层的动电位 极化曲线图。Tafel 曲线拟合得到表 2 所示的腐 蚀电位 E 和腐蚀电流 I。E 越大,I 越小,则熔覆 层耐腐蚀性越好。扫描速度增大细化了熔覆层 的显微组织,强化了晶界,提高了显微组织的致 密性。而且树枝晶和等轴晶增多;熔覆层组织晶 粒细化;熔覆速度增大得到的熔覆层组织中细晶 奥氏体组织所占比率增大,具有较强的耐蚀性。



(a) 100 mm/min

(b) 150 mm/min

(c) 200 mm/min



Fig. 7 Worn surface morphologies of the cladding coating at various scanning speeds





Fig. 8 Polarization curves of the cladding coatings at various scanning speed

表 2 由动电位极化曲线获得的腐蚀参数表

Table 2Corrosion parameters of the cladding coatingsat various speed

Scanning speed/ (mm • min ⁻¹)	Corrosion potential/V	Current density/ $(10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
100	-0.466	6.22
150	-0.622	7.77
200	-0.721	8.01

且在此激光熔覆功率下,熔覆层表面组织的均匀 程度相似,显微组织的致密性起主要作用。所 以,扫描速度增大,熔覆层耐蚀性增强。

3 结 论

(1)随着扫描速度增大,熔覆层鱼鳞状波纹 增多,脱渣性变差,开裂的倾向增大。 (2) 熔覆层与基体之间有着良好的冶金结合。 扫描速度增大,熔覆层中柱状晶减少,直至消失。

(3) 熔覆层的硬度和耐磨耐蚀性随扫描速度的 增加而增大。该条件下,扫描速度为 200 mm/min 时,得到成型性和耐磨耐蚀性俱佳的熔覆层。

参考文献

- [1] 吴磊,田宝红,王顺兴,等.激光熔覆镍基 WC 层的耐蚀
 性研究[J].热加工工艺,1997,18(2):8-10.
- [2] 陆萍萍,王勇,韩彬,等. 深井钻机刹车盘激光熔覆铁基
 涂层的组织与摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程,2010,23
 (1):92-96.
- [3] 陈建敏,王凌倩,周健松,等.激光熔覆 Ni 基涂层研究进 展[J].中国表面工程,2011,24(2):13-21.
- [4] 李美艳,韩彬,高宁,等.高硬度铁基熔覆层组织、成分及 耐蚀性[J].中国激光,2013,40(5):74-78.
- [5] 熊华,茄菊红,唐长斌,等.TC6合金柱塞表面改性对耐 磨性能的影响[J].金属热处理,2012,37(7):37-41.
- [6] Obadele B A, Olubambi P A, Johnson O T, et al. Effects of TiC addition on properties of laser particle deposited WC
 -Co Cr and WC-Ni coatings [J]. Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12); 3634-42.
- [7] 刘兴光,王勇,韩彬.激光熔覆 Ni 包 WC 复合涂层的组织、耐磨和耐蚀性分析及应用 [J]. 电镀与涂饰,2010,30
 (5).72-75.
- [8] 王志坚,董世运,徐滨士,等.激光熔覆工艺参数对金属 成形效率和形状的影响[J].红外与激光工程,2010,39 (2):315-319.
- [9] 付宇明,高中堂,郑丽娟. 镍基碳化钨合金粉末激光熔覆工 艺的研究 [J]. 材料热处理技术, 2011, 40(14): 102-105.
- [10] 柳吉华,王存山.激光工艺参数对 NiFeBSi 合金熔覆层组 织和性能的影响 [J].内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2012,33(5/6):241-248.
- [11] Zhou S F, Zeng X Y, Qian W H. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding

and crack - free realization [J]. Applied Surface Science 2008, 255(5): 1646-53.

- [12] Zhang F Y, Chen H, Xu Y K, et al. Influence of Mo content on microstructure and microhardness of laser solid formed Ti-6Al-Mo system alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1332-6.
- [13] 葛亚琼,王文先.不同激光功率下镁合金表面激光熔覆 Ni60合金涂层的显微组织和磨损性能[J].中国表面工 程,2012,25(1):45-50.
- [14] 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.
- [15] Hemmati I, Ocelík V, M J Th, et al. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI 431 stainless steel laser deposited coatings [J]. Surface & Coatings Technology. 2011, 205(21/22): 5235-9.
- [16] 吴新伟,曾晓雁,朱蓓蒂,等. 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): 1282-8.
- [17] Liu H X, Wang C Q, Zhang X W, et al. Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by

laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder [J]. Surface & Coatings Technology. 2013, 228: 296-300.

- [18] 于承雪,景财年,李怀学.激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法[J].航空制造技术,2012(4):75-79.
- [19] 俞友军,周健松,陈建敏,等.激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ 金属基高温自润滑耐磨覆层的组织结构及摩擦 学性能[J].中国表面工程,2010,23(3):64-69.
- [20] Wu Q L, Li W G, Zhong N, et al. Microstructure and wear behavior of laser cladding VC-Cr₇C₃ ceramic coating on steel substrate [J]. Materials and Design, 2013, 49: 10-18.
- [21] Chen J M, Guo C, Zhou J S. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate [J]. Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2171-8.

作者地址:山东青岛经济开发区长江西路 66 号 266580 中国石油大学(华东)机电工程学院

Tel: (0532) 8698 3306

E-mail: 841774282@qq. com

(责任编辑:陈茜)

•本刊副理事长单位介绍•

全军装备维修表面工程研究中心

全军装备维修表面工程研究中心(以下称"中心")成立于 1991 年,是在总部领导下为全军装备维 修服务的高科技组织,也是国内最早系统开展表面工程技术研究的单位之一,挂靠在装甲兵工程学院。 "中心"深入贯彻"主题主线"的战略思想,以科学发展观为指导,以提高我军战斗力为标准,努力研究开 发和推广表面工程新技术,加强军内外的学术交流与合作,促进表面工程学科发展,不断提高我军的装 备维修水平,为我军装备现代化服务。

"中心"下设低温离子硫化实验室、铝合金表面陶瓷化实验室、表面纳米化强化实验室、复合材料损伤修复实验室、无电焊接技术实验室等10余个专业实验室,拥有数十台(套)先进的检测分析仪器及工艺设备,具备良好的科研试验硬件条件,能有效地支撑装备维修和战场抢修技术预先研究、新技术新材料研发以及先进成果的推广应用。

"中心"拥有一支高素质的人才队伍,包括国内知名的表面工程专家,以及一批优秀的中、青年科研 骨干。先后承担了数十项国家和军队的科研项目,获得十余项国家和军队科技进步奖励。一批研究成 果在我军得到大规模推广应用,有效解决了装备维修和战场抢修的重点难点问题,产生了显著的军事 效益。"中心"还积极开展与地方企事业单位的技术合作,运用先进技术手段有效解决了工矿企业装备 维修及关键零部件表面处理的难点问题,为国民经济建设做出了贡献。