

原位自生(Ti,V)C堆焊层的耐磨性能

魏来¹, 李丹², 董振²

(1. 沈阳工业大学 后勤处, 沈阳 110870; 2. 辽宁中科力勒检测技术服务有限公司, 沈阳 110170)

摘要: 为了研究大型往复压缩机的曲轴修复方法,采用激光堆焊技术对合金基体表面进行处理获得原位自生(Ti,V)C堆焊层.对获得的堆焊层进行金相组织观察和硬度试验,分析不同成分下堆焊层硬度和耐磨性能的变化规律.结果表明:随着合金层钒铁含量的增加,(Ti,V)C复合硬质相含量增加且分布均匀,堆焊层表面硬度逐渐增强,耐磨性能提高;当被测堆焊层试件中的钒铁含量为32.6%时,堆焊层硬度值为54.6 HRC,磨损量为0.4367 g,此时堆焊层的力学性能最佳且耐磨性最好.

关键词: 激光堆焊; 堆焊层; (Ti,V)C复合硬质相; 耐磨性; 曲轴; 修复; 金相试验; 硬度试验
中图分类号: TG 421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1646(2023)01-0043-05

Wear resistance of in-situ (Ti, V) C surfacing layer

WEI Lai¹, LI Dan², DONG Zhen²

(1. Logistics Department, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Liaoning Zhongkelile Testing Technology Service Co. Ltd., Shenyang 110170, China)

Abstract: In order to study the crankshaft repair method for large reciprocating compressor, a laser surfacing technology was used to treat the substrate surface and obtain the in-situ (Ti, V)C surfacing layer. Metallographic and hardness tests were carried out to analyze the hardness and wear resistance of the surfacing layer under different compositions. The results show that the amounts of (Ti, V)C composite hard phase with uniform distribution increases with the V-Fe content in alloy layer. The surface hardness is gradually strengthened, and the wear resistance is improved. When the V-Fe content in the surfacing layer is 32.6%, the surfacing layer hardness is 54.6 HRC, the wear amount is 0.4367 g, and the surfacing layer has the best mechanical properties and wear resistance.

Key words: laser surfacing; surfacing layer; (Ti, V) C composite hard phase; wear resistance; crankshaft; repair; metallographic test; hardness test

曲轴是大型往复压缩机的关键部件,在高速运转过程中受到的载荷非常复杂,曲轴静动特性对压缩机的整体性能具有重要影响.扭曲、裂纹和磨损是曲轴的常见故障,需要寻找有效方法对曲轴进行修复.激光堆焊是一种利用高能密度激光束作为热源将覆于表面的合金粉末熔化使得熔敷材料与基体形成冶金结合从而获得高性能合金层的表面熔敷技术^[1-2].由于TiC具有高硬度、高弹性模量、高熔点、良好耐热稳定性等优点以及在组织中呈弥散分布的特点,在耐磨损和耐高温领域

得到广泛应用^[3-4].钛铁在世界上的储量非常丰富,价格又很低廉,可以使生产成本大大降低^[5].有些情况下仅靠TiC来提高熔敷层的耐磨性和硬度不够理想,熔敷过程中Ti对O具有很强的亲和力,Ti-Fe中大量Ti被烧损^[6-8].

随着现代化工业和高科技的发展,机械设备的磨损问题日趋严重,造成了能源和经济损失^[9-11].学者们探讨选用耐磨材料来有效解决机械设备磨损问题.张辉等^[12]研究了不同石墨添加量对Fe-Ti-V-C涂层组织及耐磨性的影响并发现,随

收稿日期: 2021-06-17.

基金项目: 辽宁省科技重大专项计划项目(2019JH1/10100024); 辽宁省自然科学基金指导项目(2019-ZD-0201).

作者简介: 魏来(1980-),男,辽宁营口人,工程师,硕士,主要从事焊接技术等方面的研究.

着涂层中石墨的增加,熔覆层硬度和耐磨性呈先增大后减小的趋势,当石墨添加量过多时,涂层出现残余奥氏体.王晓荣等^[13]研究了硼对激光熔 Fe-Ti-V-C 合金组织及性能的影响并发现,硼的加入细化了涂层中陶瓷相颗粒,当硼加入量增加时,涂层硬度显著增加,当涂层加入量达到 25% 时,涂层会产生裂纹.张蕾涛等^[14]利用 CO₂ 激光器对 45# 钢表面进行激光熔覆和重熔处理,观察熔覆层的微观组织结构,利用显微硬度计及湿砂磨损试验机测试熔覆层的硬度和耐磨性,以愈合 Ni60/50% WC 熔覆层裂纹并消除孔洞等缺陷.朱继祥等^[15]研究了 WC 含量对铁基复合涂层组织及磨损性能的影响,对不同含量 WC 熔覆层的晶相组织与耐磨性等进行了分析,结果表明随着熔覆层 W 含量的增加,磨损量呈先减小后变大的趋势.张坚等^[16]研究了稀土 Ce 对高硼贝氏体涂层微观组织及性能的影响并发现,随着涂层中 Ce 含量的增加,涂层韧性先增大后减小,而涂层的摩擦因数呈先减小后增大趋势.张煜等^[17]利用超高速激光熔覆技术制备了镍基 WC 涂层,观察表面微观组织并发现,与低速激光熔覆相比涂层表面质量变好,涂层与基体具有更好的冶金结合,残余应力显著降低,避免了裂纹的出现,其涂层耐磨性也得到了提升.

本文在 Fe-Ti-C 合金堆焊层中加入微量钒,通过试验分析探讨钒含量对堆焊层宏观耐磨性与硬度的影响.

1 试验测试

1.1 试验材料

以 20# 钢作为母材,在其表面制备堆焊层,母材尺寸为 120 mm × 100 mm × 12 mm,制备粉末原料由钛铁 (Ti-Fe)、钒铁 (V-Fe)、石墨和铁粉组成.为了便于比较不同含量试件之间的硬度和耐磨性,提供了 4 种不同试验配方.20# 钢、合金粉末化学成分和堆焊粉末配方分别如表 1~3 所示.

表 1 20# 钢化学成分 (w)

Tab. 1 Chemical composition of 20# steel (w) %

C	Si	Mn	S	P	Fe
<0.2	0.15 ~ 0.35	<0.65	<0.015	<0.015	余量

1.2 试验设备及方法

利用 SIM-FX-100 角向磨光机将基体材料表面附着的氧化膜去掉.称取总量为 100 g 的粉末,分为 4 种分配方式.将粉末放入薄纸上搅拌至均

表 2 合金粉末化学成分 (w)

Tab. 2 Chemical composition of alloy powders (w)

原料	Ti	Al	Si	C	P	S	Fe
Ti-Fe	20 ~ 35	≤6	≤4	≤0.15	≤0.1	≤0.06	余量
V-Fe	48 ~ 55	1.5 ~ 2	2.5	0.5	0.08	0.05	余量

表 3 堆焊粉末配方 (w)

Tab. 3 Hardfacing powder formulas (w) %

试件编号	Ti-Fe	V-Fe	石墨	Fe 粉
1	25	16.2	8	余量
2	25	24.5	8	余量
3	25	29.3	8	余量
4	25	32.6	8	余量

匀,利用经高锰酸钾钝化的水玻璃为粘接剂,压制尺寸为 80 mm × 30 mm × 2 mm 的合金粉末块并粘结在基体材料试板上.放置在阴凉处自然风干 24 h 后,采用自控远红外电焊条烘干炉烘干.将试件在 50 °C 保温 10 min,在 100 °C 保温 10 min,再升温至 200 °C 保温 1 h.利用 DL-HM-T5000 型 CO₂ 激光器对试件进行表面堆焊处理.在激光熔覆过程中为了防止涂层被氧化,采用氩气进行保护.激光堆焊试验主要参数如表 4 所示.

表 4 激光堆焊试验主要参数

Tab. 4 Main parameters of laser surfacing test

焦距	速度	功率	气体流量
mm	(mm · min ⁻¹)	W	(L · min ⁻¹)
330	100 ~ 125	1 800 ~ 1 900	25

采用金相试验观察不同含量粉末形成的堆焊层中 (Ti, V) C 增强相的数量、形态和分布特征.利用 HRD-150 洛氏硬度计测量堆焊层表面宏观硬度.利用磨损试验机测试堆焊层耐磨性,并分析硬质相的形态、分布特征对堆焊层耐磨性能的影响.磨损试验在 MLS-23 型湿砂橡胶轮式磨损试验机上进行.采用 OK7750 数控制线切割机将测试完硬度的堆焊试板加工成尺寸为 56 mm × 27 mm 的试块,利用分析天平精确测量其磨损前质量.磨损试验主要参数如表 5 所示.磨损试验完成后,立即清洗砂浆并吹干,防止试块腐蚀氧化.然后将试块放在分析天平上测量其质量,获得试块磨损后的质量,并计算出试块的磨损量.

2 结果与分析

2.1 硬度试验数据分析

硬度测量中在堆焊层表面选取三个不同位置

表 5 磨料磨损试验主要参数
Tab. 5 Main parameters of abrasive wear test

磨料	胶轮转速/(r·min ⁻¹)	胶轮直径/mm	胶轮表面压力/(N·cm ⁻²)	砂水比	磨损时间/min
石英砂	240	150	150	3	3

分别进行测量,取其平均值来衡量堆焊层表面硬度. 硬度试验数据如表 6 所示,硬度值变化曲线如图 1 所示. 由图 1 可见,随着钒铁含量的增加,硬度值逐渐增大,钒铁含量达到 32.6% 时硬度值最大. 这是由于堆焊层粉末中的钛铁和钒铁在激光堆焊条件的高温作用下熔化分解,Ti 和 V 熔化在液相铁中,而 Ti 和 V 都属于强碳化物形成元素,而石墨的作用就是为此反应提供 C 原子,因而存在以下反应:Ti + C → TiC, V + C → VC. 因为 Ti:C = 1:1, V:C = 1:1,其摩尔比相同,在熔池凝固过程中很容易依附成长,从而形成 TiC 和 VC 的互溶体碳化物结构,因此,堆焊层中的硬质相为 (Ti, V)C 复合颗粒.

表 6 硬度试验数据
Tab. 6 Hardness test data (HRC)

试件编号	1 点硬度值	2 点硬度值	3 点硬度值	平均硬度值
1	28.5	28.2	29.8	28.8
2	48.3	53.2	46.2	49.2
3	48.0	49.8	53.2	50.3
4	53.9	53.2	56.8	54.6

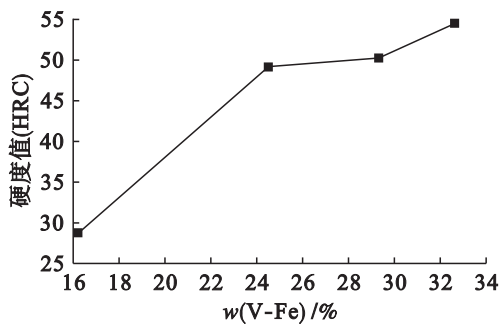


图 1 堆焊层硬度分布

Fig. 1 Hardness distribution of surfacing layer

随着堆焊层中钒铁含量的增加,(Ti, V)C 硬质相数量增多. 这是因为 1 号试件基体组织晶粒数量较少、分布不均匀且晶粒较为细小;2 号试件晶粒数目增加且分布较均匀;3 号试件晶粒数目更多,硬度也较大;4 号试件晶粒大小适中且分布均匀,因而硬度最大.

2.2 磨损试验数据分析

磨损试验结果如表 7 所示,堆焊层磨损量分布情况如图 2 所示.

表 7 磨损试验数据

Tab. 7 Wear test data g

试件编号	磨损前质量	磨损后质量	磨损量
1	143.457 7	142.744 7	0.713 0
2	121.063 3	120.495 2	0.568 1
3	152.157 6	151.665 1	0.492 5
4	130.095 3	129.658 6	0.436 7

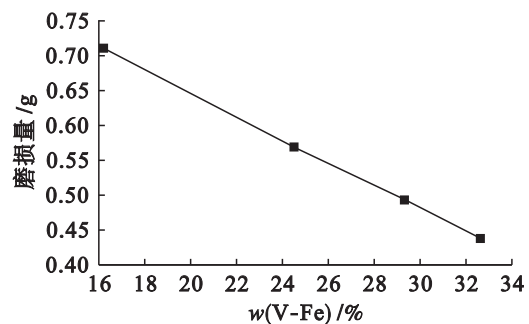


图 2 堆焊层磨损量分布

Fig. 2 Wear amount distribution of surfacing layer

由图 2 可见,随着钒铁含量的增多,磨损量逐渐减少,这是因为在堆焊过程中 TiC 和 VC 分布在板条马氏体基体中的数量增加,使得 (Ti, V)C 硬质相含量增加,即复合增强相数量增加,颗粒尺寸变大,对磨粒切削运动起到了明显阻碍作用,因而磨损量减小. 当钒铁含量为 32.6% 时,磨损量仅为 0.436 7 g.

2.3 SEM 显微组织分析

4 种不同试件堆焊层金相显微组织如图 3 所示. 堆焊层显微组织由铁素体 + 奥氏体 + 马氏体 + (Ti, V)C 硬质相组成. 由图 3 可见,随着钒铁含量的增加,形成了更多的 VC,从而使得 (Ti, V)C 硬质复合相逐渐增多. 图 3a 中白色小颗粒为 (Ti, V)C 硬质相,其数量较少且分布不均匀,因而堆焊层硬度小且耐磨损性差;图 3b 中 (Ti, V)C 硬质相增多且分布均匀了许多,堆焊层硬度增大且耐磨损性升高;图 3c 中 (Ti, V)C 硬质相均匀、密集分布在基体中,说明随着钒铁含量的增加,(Ti, V)C 硬质相含量增多,堆焊层硬度增大,磨损量逐渐减少;图 3d 中 (Ti, V)C 硬质相晶粒大小适中,数量较多且分布很均匀. 因为在磨损过程中磨料硬度很高,如果晶粒过于细小容易被磨损掉,所以晶粒适中时耐磨性较好.

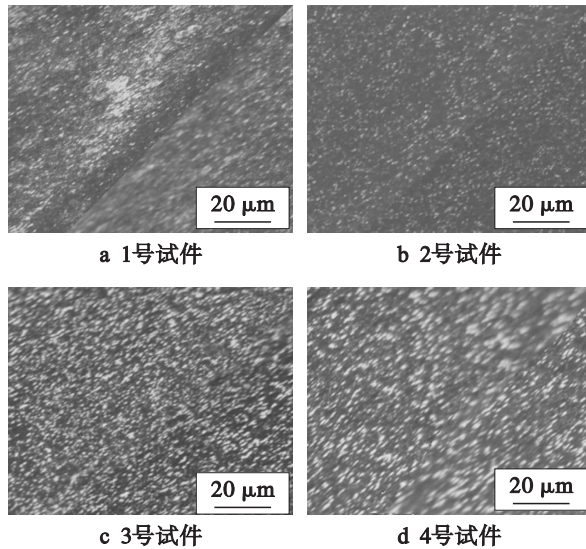


图3 堆焊层 SEM 图片

Fig. 3 SEM images of surfacing layers

综上所述,当钒铁含量为 32.6% 时,试件硬度值为 54.6 HRC,磨损量为 0.4367 g,试件硬度最高,磨损量最小,耐磨性最好。

3 结 论

利用激光堆焊技术将钛铁、钒铁和石墨按一定比例配制试件,对所获试件进行表面强化处理,获得(Ti,V)C 复合硬质相,使得铁基合金得到多元强化.通过对多元复合强化铁基耐磨堆焊合金进行试验分析,得出如下结论:

1) 堆焊层显微组织由铁素体 + 奥氏体 + 马氏体 + (Ti,V)C 硬质相组成.随着钒铁含量的增加,堆焊层中的(Ti,V)C 复合硬质相逐渐增多且分布逐渐变得均匀。

2) 随着钒铁含量的增加,堆焊层硬度升高且磨损量减少,堆焊层耐磨性增加.当钒铁含量为 32.6% 时,堆焊层硬度值为 54.6 HRC,磨损量为 0.4367 g,此时堆焊层的力学性能最佳且耐磨性最好。

参考文献 (References):

- [1] 樊帅奇,张蕾涛,李海涛,等. WC 初始状态对激光熔覆 Ni60/WC 涂层组织及性能的影响 [J]. 材料热处理学报,2021,42(6):157-162.
(FAN Shuai-qi, ZHANG Lei-tao, LI Hai-tao, et al. Effect of initial state of WC on microstructure and properties of laser cladding Ni60/WC coatings [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6):157-162.)
- [2] 宋鹏芳,姜芙林,王玉玲,等. 激光熔覆制备高熵合金涂层研究进展:强化机理与性能 [J]. 青岛理工大学学报,2020,41(4):106-114.

(SONG Peng-fang, JIANG Fu-lin, WANG Yu-ling, et al. Research progress in high entropy alloy coating prepared by laser cladding: strengthening of mechanism and performance [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(4):106-114.)

- [3] 宗琳,李荣广,张小玲. 激光熔覆 Fe-Ti-V-C 合金微观组织与磨损性能 [J]. 机械工程学报,2017,53(2):67-73.
(ZONG Lin, LI Rong-guang, ZHANG Xiao-ling. Microstructure and wear resistance of Fe-Ti-V-C hardfacing alloys by laser cladding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2):67-73.)
- [4] 赵龙志,邓楚祥,王震,等. Ti 含量对 Fe-Ni-Ti 激光熔覆层摩擦性能的影响 [J]. 表面技术,2020,49(10):39-44.
(ZHAO Long-zhi, DENG Chu-xiang, WANG Zhen, et al. Effect of Ti content on tribology properties of Fe-Ni-Ti laser cladding [J]. Surface Technology, 2020, 49(10):39-44.)
- [5] Bai Q F, Ouyang C Y, Zhao C J, et al. Microstructure and wear resistance of laser cladding of Fe-based alloy coatings in different areas of cladding layer [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(11):2839-2843.
- [6] 马宁,赵迪,张柯柯,等. TiG 熔覆原位自生 TiC-TiB₂/Fe 复合涂层 [J]. 焊接学报,2018,39(10):124-128.
(MA Ning, ZHAO Di, ZHANG Ke-ke, et al. Microstructure and properties of in situ synthesized TiC-TiB₂/Fe composite coatings by TiG cladding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10):124-128.)
- [7] Jiang J X, Pang X M, Zhou J X, et al. Optical performance and corrosion resistance of TiN/Ni multiphase cermet by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143:107-112.
- [8] 杨广峰,翟巍,路梦柯,等. TC4 激光熔覆 Ti/7YSZ 复合热障涂层实验研究 [J]. 激光与红外,2021,51(8):971-979.
(YANG Guang-feng, ZHAI Wei, LU Meng-ke, et al. Experimental study on the characteristics of Ti/7YSZ composite thermal barrier coating by TC4 laser cladding on surface [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(8):971-979.)
- [9] Zhang F Y, Qiu Y, Hu T T, et al. Microstructures and mechanical behavior of beta-type Ti-25V-15Cr-0.2Si titanium alloy coating by laser cladding [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 796:63-71.
- [10] 张松,李丹,崔文东,等. 高能脉冲类激光熔覆镍基金层的组织及性能 [J]. 沈阳工业大学学报,2017,39(2):132-136.
(ZHANG Song, LI Dan, CUI Wen-dong, et al. Microstructures and properties of Ni-based alloy cladding coating by high-energy pulsed like-laser [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(2):132-136.)
- [11] 毛萍莉,付钰. Gd 与 Zr 对 WE43 镁合金组织、力学及腐蚀性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报,2021,43(2):144-149.
(MAO Ping-li, FU Yu. Influence of Gd and Zr on microstructures, mechanical and corrosion properties of WE43 magnesium alloy [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(2):144-149.)
- [12] 张辉,邹勇,邹增大,等. 石墨添加量对 Fe-Ti-V-C 熔

- 覆层组织及耐磨性的影响 [J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3): 319 - 324.
(ZHANG Hui, ZOU Yong, ZOU Zeng-da, et al. Effect of graphite addition on microstructure and wear resistance of Fe-Ti-V-C cladding layers [J]. Tribology, 2014, 34(3): 319 - 324.)
- [13] 王晓荣, 王新洪, 侍国文, 等. 硼对激光熔覆 Fe-Ti-V-C 合金系组织和性能的影响 [J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1903 - 1907.
(WANG Xiao-rong, WANG Xin-hong, SHI Guo-wen, et al. Effect of boron element on the microstructure and property of laser cladding Fe-Ti-V-C alloy system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1903 - 1907.)
- [14] 张蕾涛, 李海涛, 贾润楠, 等. 激光重熔 Ni60/50% WC 复合涂层的制备及性能 [J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 229 - 234.
(ZHANG Lei-tao, LI Hai-tao, JIA Run-nan, et al. Preparation and properties of laser remelted Ni60/50% WC composite coating [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(5): 229 - 234.)
- [15] 朱继祥, 雷声, 李帅, 等. WC 含量对铁基复合涂层组织与磨损性能的研究 [J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2021, 44(1): 28 - 34.
(ZHU Ji-xiang, LEI Sheng, LI Shuai, et al. Research on the microstructure and wear properties of iron-based composite coating with WC [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2021, 44(1): 28 - 34.)
- [16] 张坚, 黄道思, 赵龙志, 等. 稀土 Ce 对激光熔覆高硼贝氏体涂层性能的影响 [J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 133 - 137.
(ZHANG Jian, HUANG Dao-si, ZHAO Long-zhi, et al. Effect of rare earth Ce on properties of high-boron bainite coating prepared by laser cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(1): 133 - 137.)
- [17] 张煜, 娄丽艳, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能 [J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1530 - 1540.
(ZHANG Yu, LOU Li-yan, XU Qing-long, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-based WC coating by ultra-high speed laser cladding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(11): 1530 - 1540.)

(责任编辑:尹淑英 英文审校:尹淑英)