

试验研究

20[#] 钢激光熔覆-重熔 Ni 基涂层及其高温磨损行为

张小彬¹, 臧晨峰², 刘常升²

(1. 重庆理工大学, 重庆 400050; 2. 东北大学 各向异性与织构工程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

[摘 要] 应用激光熔覆法, 采用镍基 NiCrSiB 粉末, 在 20[#] 钢表面制备了熔覆涂层, 并用激光重熔涂层。观察了熔覆-重熔层的形貌, 检测了其相组成和高温耐磨性能, 结果表明: 所制得熔覆-重熔层组织均一、致密, 与基体形成了良好的冶金结合; 经重熔处理后, 熔覆层表面的裂纹显著减少; 熔覆-重熔层的硬度提高到基体的 5 倍, 高温磨损率约为基体的 1/3。熔覆-重熔层耐磨能力的增强除因其与基体形成了良好的冶金结合和硼化物、硼碳化物等析出相的强化作用外, 也是重熔减少微裂纹的结果。

[关键词] 20[#] 钢; 激光熔覆; NiCrSiB; 重熔; 高温磨损

[中图分类号] TG174.45

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)01-0001-04

Ni-based Laser Cladding-remelting Layers on 20 Steel and Its High Temperature Abrasive-wear Behavior

ZHANG Xiao-bin¹, ZANG Chen-feng², LIU Chang-sheng²

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China; 2. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110004, China)

[Abstract] Ni-based alloy laser cladding layer and laser cladding-remelting layer were made on surface of 20 steel specimens using NiCrSiB powder. Phase characteristics, high temperature abrasive-wear behavior and surface morphologies after abrasive-wearing of the layers were investigated and the results show that laser cladding-remelting layer has dense microstructure, and has metallurgical combination with 20 steel substrate. There is much less cracks in laser cladding-remelting layer after remelting process. Micro-hardness and high temperature abrasive-wearing resistance of laser cladding layer are 5 and 3 times of 20 steel specimen separately. The improvement in high temperature abrasive-wearing resistance of the layer is due to the metallurgical combination; Strengthen effects of borides and boron-carbides precipitate phases and less harmful cracks.

[Key words] 20 steel; Laser cladding; NiCrSiB; Remelting; High temperature abrasive-wear

20[#] 钢韧性好、成本低, 虽不能经受很大的应力, 但在稍作表面处理后可用于加热炉内外的辊道辊中。但现有的辊道辊表面处理技术(如热喷涂、堆焊等)均存在一系列问题, 常规的轧辊表面强化技术(如等离子喷涂、电弧堆焊等)均不能有效地提高其表面高温磨损和开裂的抗力。

激光熔覆工艺具有多种优点, 受到研究人员的重视^[1-2], 国内外很多钢铁企业采用了轧制钢材轧辊表面的激光熔覆技术^[3], 而对于激光涂层技术在辊道辊

表面的应用性研究很少。将激光表面熔覆技术综合应用于 20[#] 钢上, 可以增强辊道辊的高温耐磨、耐腐蚀能力, 提高辊道辊的使用寿命。本文采用 NiCrSiB 粉末, 在 20[#] 钢基体表面激光熔覆 Ni 基涂层, 并进行重熔处理, 以进一步增强 20[#] 钢的高温耐磨能力。

1 实 验

基体材料选择 20[#] 钢, 主要合金成分(质量分数)

[收稿日期] 2009-10-12

[基金项目] 国家自然科学基金(50274028)

[作者简介] 张小彬(1979-), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为材料表面科学技术。

为:0.17%~0.24% C,0.17%~0.37% Si,0.35%~0.65% Mn,P≤0.035%,S≤0.035%,余量为 Fe。热处理工艺为:910 ℃正火,显微组织为珠光体+铁素体。激光熔覆材料为 NiCrSiB 合金粉末,成分见表 1。

表 1 NiCrSiB 合金粉末成分

Tab.1 Chemical composition of NiCrSiB powder

合金元素	C	Cr	Si	B	Fe	Ni
质量分	0.5~	15.0~	3.5~	3.0~		
数/%	1.1	20.0	5.5	4.5	<5.0	余量

20[#] 钢用 800[#] 砂纸磨光后,经丙酮清洗、干燥并称量。将球磨后的 NiCrSiB 粉末与一定比例 504 胶水均匀混合后,涂抹在 20[#] 钢样品表面(厚度约为 0.5~0.7 mm),常温下置于干燥皿中晾干。采用 JHM-1GY-400 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,对前述晾干样品涂合金粉末层的工作面先进行激光熔覆处理,再进行激光重熔处理,2 次激光处理的优化工艺参数见表 2。

表 2 优化后的激光处理工艺参数

Tab.2 Process parameters of two laser treatments

	搭接方式	输出电 流/A	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	离焦量 /mm	频率 /Hz	脉宽 /ms	搭接 率/%
初次熔覆	多道搭接	200	4.0	+15	15	3.0	40
重熔	多道搭接	200	3.5	+15	15	3.0	10

激光熔覆-重熔处理后的样品经抛光、腐蚀(腐蚀液为王水)后,利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)分析熔覆-重熔层的微观结构。利用 X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆-重熔样品的相组成。利用维氏硬度测试仪测量熔覆-重熔样品沿截面深度方向的显微硬度,加载载荷为 100 g,加载饱和时间为 10 s。

摩擦磨损测试在 MG-2000 型高温高速摩擦磨损实验机上进行,实验各项参数为:载荷 100 N,温度 500 ℃,转速 250 r/min。分别对 20[#] 钢、熔覆样品和熔覆-重熔样品进行 2 000,4 000,8 000 r(分别对应磨损时间为 8,16,32 min)的磨损试验,摩擦副材料为热处理(淬火+低温回火)后的 60[#] 钢,其硬度为 HRC60。磨损后测量磨损失重,计算磨损率,并采用扫描电镜对磨损表面进行观察。

2 结果与讨论

2.1 金相分析及相组成和硬度

图 1 分别是激光熔覆层和熔覆-重熔层表面的微观组织图。由图 1a 可见,20[#] 钢表面的 NiCrSiB 粉末涂层经激光熔覆后,所得熔覆层与基体表面结合良好,

呈冶金结合,整体均匀、致密,基本没有夹杂物和气孔;但是存在一定量的裂纹缺陷,这是因为激光熔覆工艺很容易在工件上造成热量集中而使其开裂^[4-5]。经过重熔处理后,由于重熔工艺不仅重熔熔覆层,而且激光能量能够沿裂纹内表面进入到裂纹之中,产生热量集中效应,熔化裂纹周围的熔覆层,从而熔合绝大部分的裂纹,因此裂纹数量大大降低(见图 1b),熔覆-重熔层质量良好。

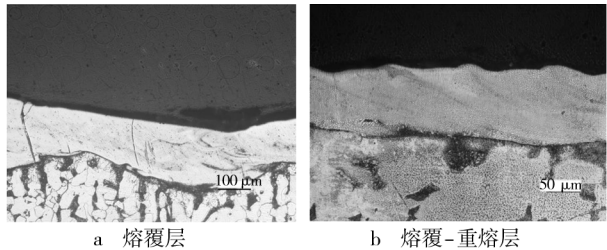


图 1 显微组织

Fig.1 Optical micrographs

图 2 为激光熔覆层和熔覆-重熔层的断面组织扫描电镜形貌,可以看到:由熔覆层表层至 20[#] 钢基体的不同区域,涂层组织致密。熔覆层表层是组织细小、致密的等轴晶(图 2a),中部逐步发展为细小树枝晶和方向紊乱的较为粗大的树枝晶(图 2c),熔覆层与基体界面处的枝晶垂直于界面(图 2e)。这些不同形貌的组织与激光熔覆时的温度梯度和凝固速度密切相关。当

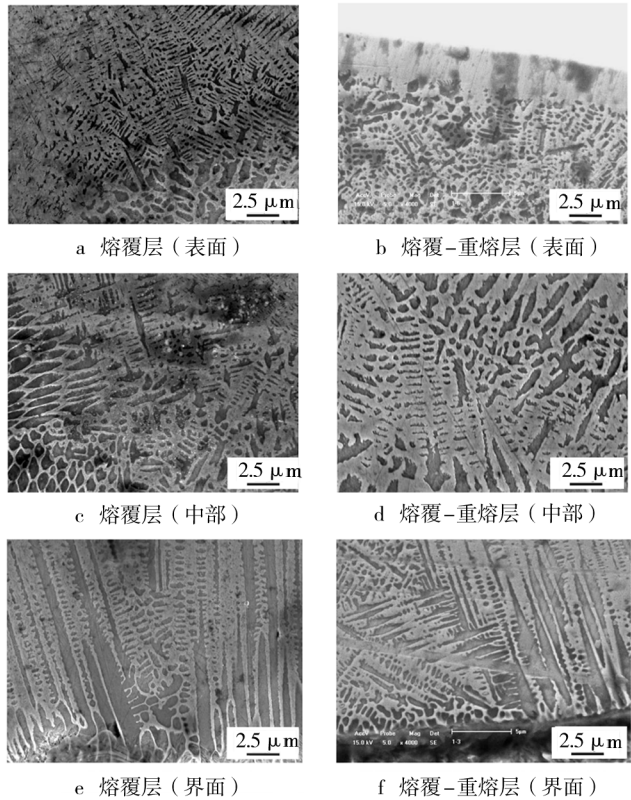


图 2 SEM 表面形貌

Fig.2 SEM morphologies

激光束辐照时,材料表面快速熔化,由于材料本身也是有效的冷却源,当激光束关闭或移开后,局部熔化区立即快速凝固。随着距熔池底部距离的增加,平界面开始不稳定,从平界面上产生许多突起,深入成分过冷区内,由于成分过冷区域较窄,这些突起不会产生分枝,从而以条状生长。随着凝固的继续,条状晶逐渐发展为树枝晶^[6-9]。相应地,熔覆-重熔层中部及其与基体结合界面处的组织结构与熔覆层类似(见图 2d、图 2f),表层则有一条重熔区与熔覆区交界的界面。

图 3 为激光熔覆层和熔覆-重熔层表面的 XRD 图谱,可见它们主要由 (Fe, Ni) 固溶体基体和 Cr_{23}C_6 , (Fe, Ni), Fe_3B , CrB 等化合物组成。在激光熔覆的快速凝固过程中, Ni 基涂层先析出 (Fe, Ni) 固溶体,而 Cr_{23}C_6 , (Fe, Ni), Fe_3B , CrB 等化合物分布在固溶体基体上。NiCrSiB 合金粉末中含有一定量的 Si 和 B,可以夺取氧化物中的 O 形成 SiO_2 和 B_2O_3 ,生成的 SiO_2 和 B_2O_3 熔点低,比重小,流动性好,能和其他夹杂物一起形成熔渣上浮,并带出气体,从而获得氧化物含量相对低、气孔率少的熔覆层,有效地保护高温熔态合金不被氧化,使熔覆过程可在大气条件下进行,大大增加了激光熔覆的实用性;此外, B 和 Si 还降低了镍基合金的熔点,增加了合金与 20# 钢基体的浸润作用,对合金的流动性及表面张力产生有利的影响。这些物质的生成,将会使得镍基涂层具有更优异的高温耐磨性能和抗热性能^[10-11]。激光熔覆工艺后的简单重熔不能改变涂层的相组成,因此,熔覆-重熔层的相组成与熔覆层是基本相同的。

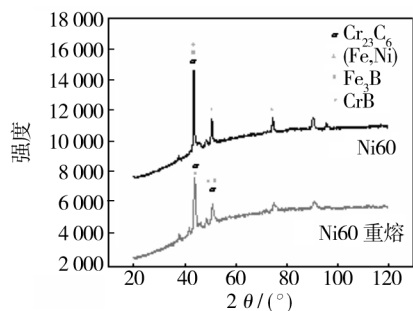


图 3 熔覆层表面的 XRD 衍射分析
Fig. 3 XRD patterns of the layers

图 4 为激光熔覆层和熔覆-重熔层的显微硬度分布曲线。从图可见,涂层的硬度较 20# 钢基体有所提高,熔覆层的硬度最高能达到 HV806,熔覆-重熔层的硬度最高能达到 HV1 076,分别约是 20# 钢基体硬度 (HV206) 的 4 倍和 5 倍。涂层硬度的显著提高主要归因于 Cr_{23}C_6 , (Fe, Ni), Fe_3B , CrB 等化合物以及 (Fe, Ni) 固溶体的形成^[12-13]。与激光熔覆层相比,熔覆-重熔层的硬度只是略有增加。二者从表面到 20# 钢基

体,显微硬度逐渐减小,没有发生突变,这就使金属涂层与基体之间的应力平稳过渡,降低了涂层失效的趋势。硬度在很大程度上与耐磨性有一定的正比关系,熔覆-重熔层高的显微硬度会使其耐磨性与 20# 钢基体相比有很大的改善和提高。

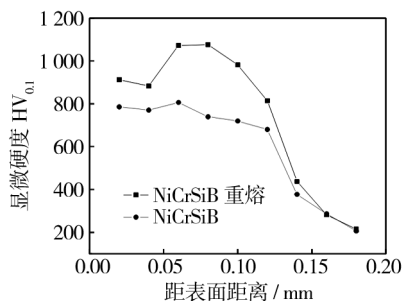


图 4 截面显微硬度

Fig. 4 Microhardness distribution along depth

2.2 磨损率与形貌分析

图 5 为 20# 钢基体、激光熔覆层和熔覆-重熔层的磨损率随磨损时间的变化曲线图。随着磨损时间的延长,3 种样品的磨损率明显增加,其中,熔覆-重熔层的磨损率的增加幅度最小。当磨损时间为 8 min 时,20# 钢的磨损率就已经高于激光熔覆层和熔覆-重熔层。随着磨损时间的延长,20# 钢的耐磨性能越来越差,磨损 32 min 时,20# 钢的磨损率已经是激光熔覆样品的 2.8 倍、激光熔覆-重熔样品的 3.5 倍。可见,激光熔覆-重熔工艺使 20# 钢的耐磨性能得到了明显改善。

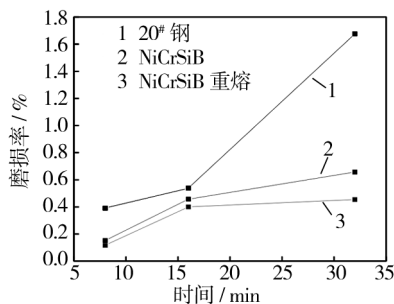


图 5 磨损率随时间的变化

Fig. 5 Wear rate of layers and 20# steel along change of time

图 6 为 3 种样品磨损 32 min 后的 SEM 表面形貌。从图中可见,磨损后,三者的宏观形貌都出现了塑性变形;但与 20# 钢相比,激光熔覆层和熔覆-重熔层样品的磨损表面要平滑得多,犁沟更轻微。这可能是因为激光熔覆层和熔覆-重熔层表面存在硬质相,且涂层与 20# 钢基体形成了冶金结合,使材料的耐磨性能大大提高^[14]。此外,激光熔覆层和熔覆-重熔层样品的磨损以粘着磨损为主,同时含有高温氧化磨损和磨粒磨损,20# 钢的磨损以磨粒磨损为主。

由于 20# 钢较软,很容易在磨损过程中产生塑性变形,从而引起磨损。在 20# 钢表面制备熔覆-重熔 Ni

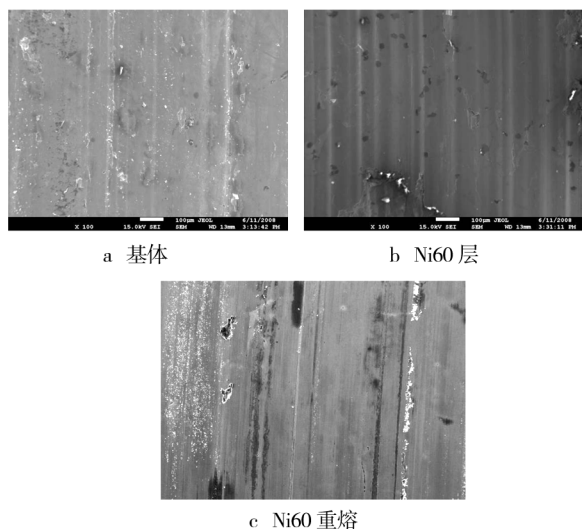


图 6 磨损表面 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphologies after abrasive-wear experiment

基涂层后,由于该涂层除了含有固溶强化效应外,还有细晶强化和硬质相强化效应,且与基体之间具有牢固的冶金结合,因此 Ni 基涂层既强又韧,磨损过程中,磨擦副与 20# 钢之间的载荷被这一强韧涂层很好地传递,大大降低了 20# 钢的塑性变形倾向。因此,激光熔覆-重熔工艺能很好地改善 20# 钢的耐磨性能。

3 结 论

1) 采用熔覆-重熔工艺在 20# 钢表面制备了良好的 Ni 基合金涂层,涂层组织致密,基本无裂纹,与基体形成了良好的冶金结合。

2) Ni 基合金熔覆-重熔层基体由 (Fe, Ni) 构成,内部含有 Cr_{23}C_6 , (Fe, Ni), Fe_3B , CrB 等析出相。硬质析出相使熔覆-重熔层的硬度提高到 HV1 076, 约为 20# 钢基体 (HV206) 的 5 倍。

3) Ni 基合金熔覆-重熔层的高温磨损率仅约为 20# 钢基体的 1/3。熔覆-重熔层与基体良好的冶金结合、硼化物和硼碳化物等析出相的强化作用及激光重熔工艺使得熔覆-重熔层表面的微裂纹大大减少是熔覆-重熔层耐磨能力提高的主要原因。

[参 考 文 献]

[1] 刘常升, 才庆魁. 激光表面改性与纳米材料制备[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.

[2] Fujii Y, Maeda K. Flaking failure in rolling contact fatigue caused by indentations on mating surface(I): reproduction of flaking failure accompanied by cracks extending bi-directionally relative to the load-movement [J]. *Wear*, 2002, 252(9,10): 787—798.

[3] Chiu K Y, Cheng F T, Man H C. Laser cladding of austenitic stainless steel using NiTi strips for resisting cavitation erosion [J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A402: 126—134.

[4] Sun S, Durandet Y, Brandt M. Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 194(2,3): 225—231.

[5] Brygo F, Dutouquet C, Guern F L, et al. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(6): 2 131—2 138.

[6] Yakimets I, Richard C, Beanger G, et al. Laser peening processing effect on mechanical and tribological properties of rolling steel 100Cr6 [J]. *Wear*, 2004, 256(3,4): 311—320.

[7] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[8] Du D, He Y F, Sui B, et al. Laser texturing of rollers by pulsed Nd: YAG laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161(3): 456—461.

[9] Zhang D W, Lei T C, Zhang J G, et al. The effects of heat treatment on microstructure and erosion properties of laser surface-clad Ni-base alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 115(2,3): 176—183.

[10] Wang B Q, Geng G Q, Levy A V. Effect of microstructure on the erosion-corrosion of steels [J]. *Wear of Materials*, 1991, (1): 129—136.

[11] 徐成伟, 姜伟, 胡芳友. 稀土元素和工艺参数对激光熔覆层微观形貌的影响 [J]. *表面技术*, 2009, 38(3): 58—60.

[12] Div M G, Cuppari, Souza R M, et al. Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe-Cr-Ni-C alloys [J]. *Wear*, 258: 596—603.

[13] 佗劲红, 陈岁元, 周利, 等. 激光表面改性对轧辊用高速钢组织与硬度的影响 [J]. *金属热处理*, 2006, 31(1): 56—59.

[14] 张林, 张彩磊. 材料凝固时晶粒生长-粗化的二维元胞自动机模型 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(2): 217—220.