

Ti 含量对 Fe-Ni-Ti 激光熔覆层摩擦性能的影响

赵龙志¹, 邓楚祥¹, 王震¹, 赵明娟¹, 刘德佳¹, 唐延川¹, 焦海涛¹, 李劲²

(1. 华东交通大学 a. 材料科学与工程学院 b. 载运工具先进材料与激光增材制造南昌市重点实验室, 南昌 330013; 2. 南昌铁路局通达工贸有限公司, 南昌 330002)

摘要: **目的** 研究 Ti 含量对因瓦合金基熔覆层原位增强的影响。**方法** 运用半导体激光器制备了 Fe-Ni-Ti 激光熔覆层, 研究了 Ti 含量对熔覆层的影响。利用金相显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪对熔覆层显微组织进行了表征, 运用硬度计和摩擦磨损实验机对熔覆层的显微硬度和耐磨性进行了分析。**结果** 在 Fe-Ni 因瓦合金粉末中加入 Ti 元素, 原位生成了 TiC/Fe-Ni 激光熔覆层, 原位 TiC 对熔覆层基体晶粒具有明显的细化作用。随着 Ti 含量的增加, 复合涂层的晶粒尺寸减小, 然后保持稳定。当 Ti 含量较低时, 熔覆层主要由 γ -[Fe,Ni] 奥氏体组成; 当 Ti 含量达到 8% 时, 熔覆层基体相结构变成了 α 相, 因瓦效应消失, 产生了微裂纹和孔洞缺陷。Ti 元素最佳添加量为 6%, 此条件下熔覆层没有裂纹, 显微硬度最高, 熔覆层耐磨性最好。**结论** 因瓦合金涂层中添加钛可以形成良好的原位强化, 钛的添加量具有最佳值, 过量添加钛将消除 Fe-Ni 合金激光熔覆层特有的因瓦效应, 熔覆层磨损机制主要为粘着磨损, 兼具磨粒磨损。

关键词: 激光熔覆; 因瓦效应; 钛含量; 原位自生; 摩擦性能

中图分类号: TG156.99; TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0039-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.004

Effect of Ti Content on Tribology Properties of Fe-Ni-Ti Laser Cladding

ZHAO Long-zhi¹, DENG Chu-xiang¹, WANG Zhen¹, ZHAO Ming-juan¹,
LIU De-jia¹, TANG Yan-chuan¹, JIAO Hai-tao¹, LI Jin²

(1. a. School of Materials Science and Engineering, b. Key Laboratory of Advanced Materials for Vehicles & Laser Additive Manufacturing of Nanchang City, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Tongda Industry and Trade Co., Ltd, Nanchang Railway Administration, Nanchang 330002, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of Ti content on in-situ reinforcement of invar alloy-based laser cladding. Fe-Ni-Ti laser cladding was fabricated by diode laser equipment, and the effect of Ti content on the laser cladding was investigated. The microstructure of the laser cladding was characterized with the optical microscopy (OP), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometer. The microhardness and wear resistance were analyzed by the microhardness tester and the M-2000 abrasion testing machine. TiC/Fe-Ni laser cladding layer was formed in situ by adding Ti element into Fe-Ni

收稿日期: 2020-08-15; 修订日期: 2020-09-27

Received: 2020-08-15; Revised: 2020-09-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51761012, 51965022); 江西省科技厅科技项目 (20192BAB206028, 20202BABL204046)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51761012, 51965022), Jiangxi Province Science and Technology Project (20192BAB206028, 20202BABL204046)

作者简介: 赵龙志 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高性能合金及其复合材料、激光表面工程和增材制造技术、非均质材料特种连接技术。邮箱: zhaolongzhi@163.com

Biography: ZHAO Long-zhi (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: advanced alloy and composites, laser surface engineering and additive manufacture and special connection technology for heterogeneous materials. E-mail: zhaolongzhi@163.com

引文格式: 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.

invar alloy powder and in-situ TiC could obviously refine the matrix grains of cladding layer. With the increase of Ti content, the grain size of the composite cladding decreased and then remained stable. When the Ti content was low, the main matrix phase in cladding was γ -[Fe,Ni]. When the content of Ti was up to 8%, the cladding matrix phase γ was changed into α phase, which indicated that the invar effect in Fe-Ni alloy disappeared and cracks and pores were observed. When the content of Ti was 6%, there was no crack in the cladding and the microhardness and wear resistance of the cladding had peak value. In-situ strengthening can be achieved by adding titanium to invar alloy cladding, and the amount of titanium added has the best value. Excessive addition of titanium will eliminate the unique invar effect of Fe-Ni alloy laser cladding, and the wear mechanism of cladding layer is mainly adhesive wear and abrasive wear.

KEY WORDS: laser cladding; invar effect; Ti content; in-situ generation; tribology properties

激光熔覆工艺快热快冷的特点以及熔覆层与基板膨胀系数的差异性,使得熔覆层容易开裂,显著降低了其综合性能^[1-6],因此激光熔覆层裂纹控制受到了研究人员的密切关注。

因瓦合金具有反常的低膨胀系数,其组织为 Ni 溶于 γ -Fe 中形成的 γ 相奥氏体组织,可以显著降低熔覆层的残余应力,有望成为控制熔覆层裂纹缺陷的一种重要手段^[7-9]。但是,单一的因瓦合金涂层强度和硬度较低、耐磨性较差,不适合应用于激光表面强化^[10-11],因此对因瓦合金涂层进行强化具有重要意义。

目前,Fe-Ni 因瓦合金的主要强化方法包括时效强化、固溶强化、形变强化、细晶强化^[12-14]。时效强化能显著提高因瓦合金的抗拉强度,但是工艺比较繁杂,适合于铸件整体热处理^[12]。在锻造过程中,通过顺磁性 W 元素细化组织晶粒,可以提高因瓦合金的强度^[13-14]。细晶强化通过引入非均匀形核提高形核率,对细化晶粒具有明显效果,但是异质材料的引入易诱发材料晶格类型转变,降低因瓦效应的低膨胀性,材料的膨胀系数明显升高^[15]。近期有研究人员向熔覆层中加入陶瓷增强相,形成复合涂层,来提高涂层性能^[16-18]。但是在激光熔覆过程中,外加陶瓷相容易与激光产生溅射效应,且激光辐照下陶瓷相容易分解,使涂层组织结构难于精确控制^[19-21]。研究发现,熔覆材料中加入易于发生原位反应的金属元素,可以形成原位陶瓷增强金属基复合涂层,克服了激光加工过程中外加陶瓷的溅射和分解缺陷,有望成为激光熔覆涂层强化的重要方法。

Ti 元素可以与因瓦合金中少量的 C 元素反应,原位生成 TiC 增强相,对熔覆层耐磨性能有明显的强化效果,但是 Ti 的加入有可能会破坏熔覆层因瓦效应。

综上,本文在 45 钢板表面制备 Fe-Ni-Ti 复合激光熔覆层,利用因瓦效应的低膨胀性,降低熔覆层残余应力,提高熔覆层服役稳定性,同时研究 Ti 含量对熔覆层组织、显微硬度和耐磨性的影响。

1 试验材料与方法

基板材料为尺寸 100 mm×100 mm×10 mm 的 45 钢,试验前采用喷砂工艺进行表面毛化和清洁处理,

并用无水乙醇清洗干净,备用。试验熔覆原材料成分如表 1 所示,材料粉末粒度为 74~104 μm 。

表 1 Fe-Ni-Ti 熔覆粉末的成分
Tab.1 Mass fraction of Fe-Ni-Ti cladding powder
wt. %

Sample	Ti	C	Ni	Fe
1	0	0.2	36	Bal.
2	2	0.2	36	Bal.
3	4	0.2	36	Bal.
4	6	0.2	36	Bal.
5	8	0.2	36	Bal.

熔覆粉末在 XQM-2L 立式行星球磨机中进行乙醇保护球磨,玛瑙磨球尺寸分别为 $\phi 6$ mm、 $\phi 10$ mm、 $\phi 20$ mm,其质量比为 2 : 5 : 3。球磨时间为 10 h,球料比为 2 : 1,转速为 250 r/min。试验用激光器为德国 Laserline 公司生产的 LDM2500-60 半导体激光器,采用氩气保护同轴送粉,气流量为 15 L/min。根据前期的实验研究^[8],激光熔覆参数为:激光功率 1400 W,扫描速度 270 mm/min,光斑直径 $\phi 3.2$ mm,送粉速率 25 g/min。

采用线切割法沿熔覆方向切割成长度为 30 mm 的试样,在光学显微镜下观察熔覆层表面宏观裂纹。另外,对熔覆层金相试样进行研磨、抛光,至镜面后,采用 4%的硝酸酒精进行腐蚀,腐蚀时间为 1 min。采用蔡司公司生产的 Vert.A1 金相显微镜和 Tesan VEGAI IMH 型扫描电子显微镜观察复合熔覆层组织,并应用能谱分析仪进行元素分析。采用 Max-2000 X 射线衍射仪分析熔覆层物相。运用 HV-1000IS 型硬度计测量熔覆层显微硬度,载荷为 200 g,加载时间 10 s。在 M-2000 型摩擦磨损试验机上进行磨损实验,载荷为 300 N,转速为 180 r/min,预磨 5 min 后清洗、称重,再磨损 20 min 后获得磨损质量。

2 结果与讨论

2.1 Ti 含量对复合熔覆层组织的影响

图 1 为不同 Ti 含量下熔覆层的截面形貌,从图

中可知,从表面到基板方向,熔覆层包括熔覆区(CL)、结合区(BZ)、热影响区(HAZ)三个特性区域。在钛含量为 2%~6% 时,熔覆层没有明显的宏观孔洞和宏观裂纹,组织均匀致密(图 1a—c)。当钛含量增加到 8% 时,熔覆层出现大量孔洞,且局部区域出现微裂纹(图 1d、e)。微裂纹垂直于激光扫描速度方向,贯穿整个熔覆层,其宽度约为 45 μm 。分析认为,由于 Ti 元素是强碳化物形成元素,加入的

Ti 原子会优先和碳原子发生原位反应,生成纳米碳化钛。剩余过量的 Ti 原子会在因瓦合金基体中固溶,同时会与 Ni 原子发生反应,生成金属间化合物。少量 Ti (低于 6%) 加入时, Ti 原子与 Ni 原子反应较少, Fe-Ni 合金主要以 γ -Fe 奥氏体因瓦合金相为主(图 2),熔覆层仍然保持良好的因瓦效应,膨胀系数较低,涂层中残余应力较小。较低的膨胀系数抑制了熔覆层裂纹的产生。

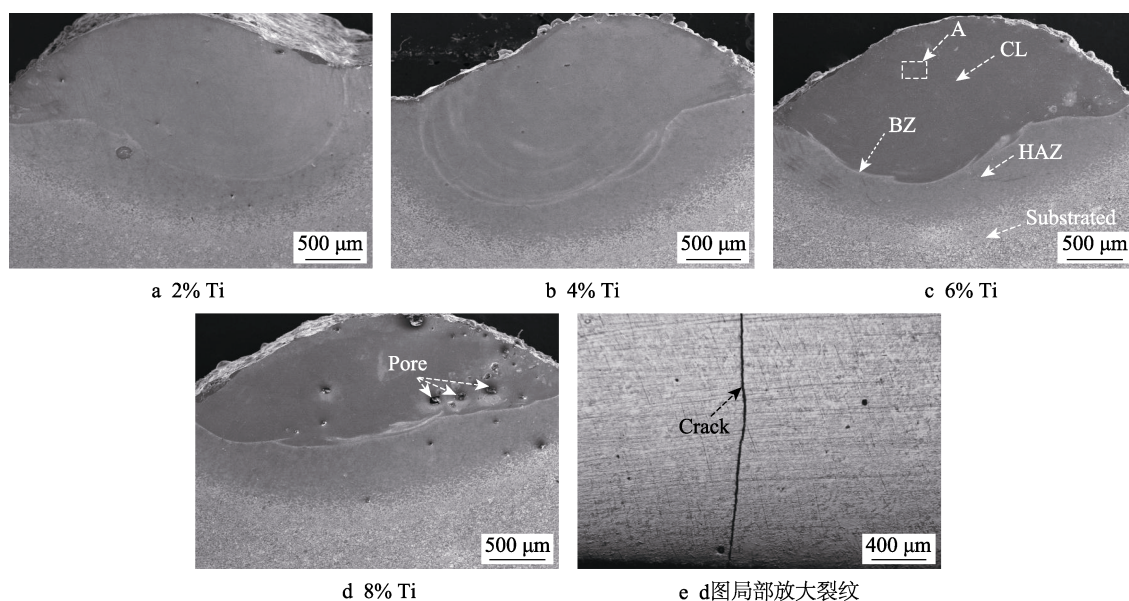


图 1 不同 Ti 含量下的熔覆层形貌

Fig.1 Morphology of the laser cladding with different Ti contents: e) magnified crack in fig.1d

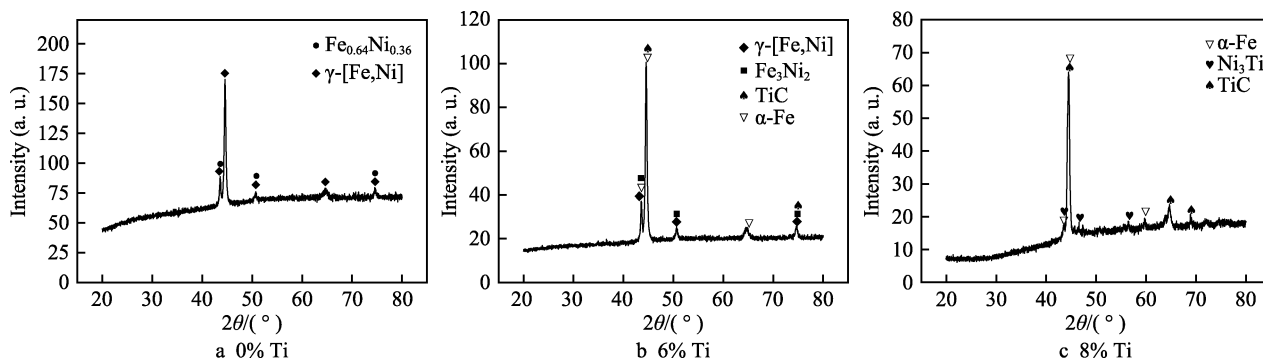


图 2 复合熔覆层 X 射线衍射图

Fig.2 X ray diffraction pattern of composite cladding

随着 Ti 含量增加, Ti 与 C 反应完成后,过量的 Ti 原子将和 Fe-Ni 因瓦合金中非碳合金元素发生反应,导致大量新的生成物出现。Ti 原子会与 Ni 原子反应生成 Ni_3Ti 金属间化合物,对 8%Ti 熔覆层组织晶界间析出相进行了能谱分析发现, Ni、Ti 原子比接近 3 : 1,如图 3 所示,结合图 2 中 XRD 分析可知,熔覆层晶界处有 Ni_3Ti 金属间化合物,金属间化合物主要分布在熔覆组织晶界间。随着 Ti 加入量逐渐增加, Ti 元素与熔覆层合金中的碳元素发生原位反应,生成原位 TiC,当 C 元素全部反应完成时, Ti 与 Ni 反应生成第二稳定相 Ni_3Ti 。原位反应消耗了合金基

体中的镍原子,改变了因瓦合金 γ -[Fe,Ni]奥氏体相的形成条件,使合金中形成了 α 相结构,熔覆层不再为因瓦合金,没有低膨胀效应,熔覆层开裂倾向增大。当 Ti 含量增加到 8% 时,熔覆层的晶格类型为 α 相(图 2),熔覆层不具有因瓦效应,因此出现了微裂纹。另外,反应产物的膨胀差异性和反应生成物固有的状态,也会诱发熔覆层中孔洞的产生。当生成产物为气态时,将会在熔覆层中形成气孔;当温度降低时,生成物体积收缩较大,周边的固态基体失去了补缩能力,熔覆层中反应产物周围将会形成缩孔。

图 4 为不同 Ti 含量 Fe-Ni-Ti 复合熔覆层的晶粒

形貌,图中晶粒均为熔覆层中部区域组织(如图1中A部区域所示)。从图中可以看出,熔覆层主要为等轴晶,随着Ti含量的不断增加,复合涂层基体的晶粒尺寸从24 μm (Ti含量为0%)逐渐细化到10 μm (Ti含量为6%),然后晶粒尺寸保持稳定,约为9 μm (Ti含量为8%),见图4f。这主要是因为随着Ti的加入,熔覆层中形成原位的TiC颗粒,这种原位相主要分布在熔覆层晶界间。图5为熔覆层能谱面扫描,

在面扫描图中,Ti与C元素都明显富集在熔覆层的晶界处,这表明原位TiC主要分布在晶界。随着Ti含量的增加,晶界处的TiC逐渐增多,TiC颗粒对晶粒的钉扎作用更加显著,因而晶粒大大细化^[22-23]。当熔覆材料中的C被添加的Ti耗尽后,生成的TiC数量保持不变,TiC颗粒对晶粒的细化作用保持稳定,因此涂层的晶粒尺寸保持稳定。

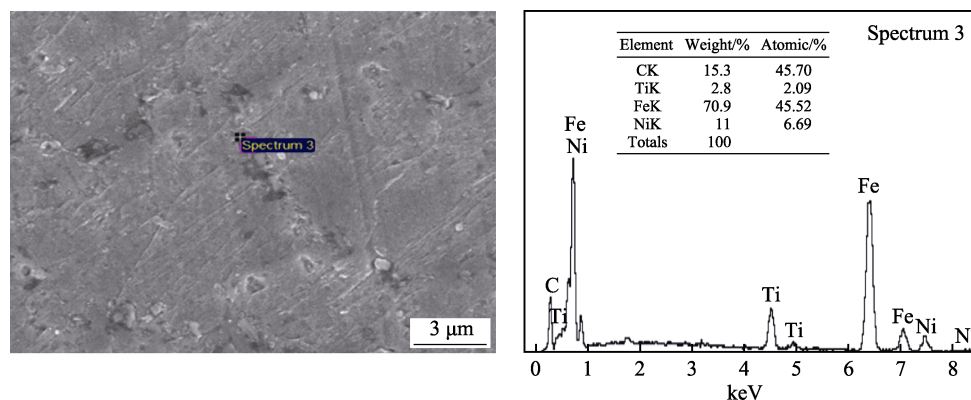


图3 熔覆层组织的EDS分析
Fig.3 EDS of laser cladding microstructure

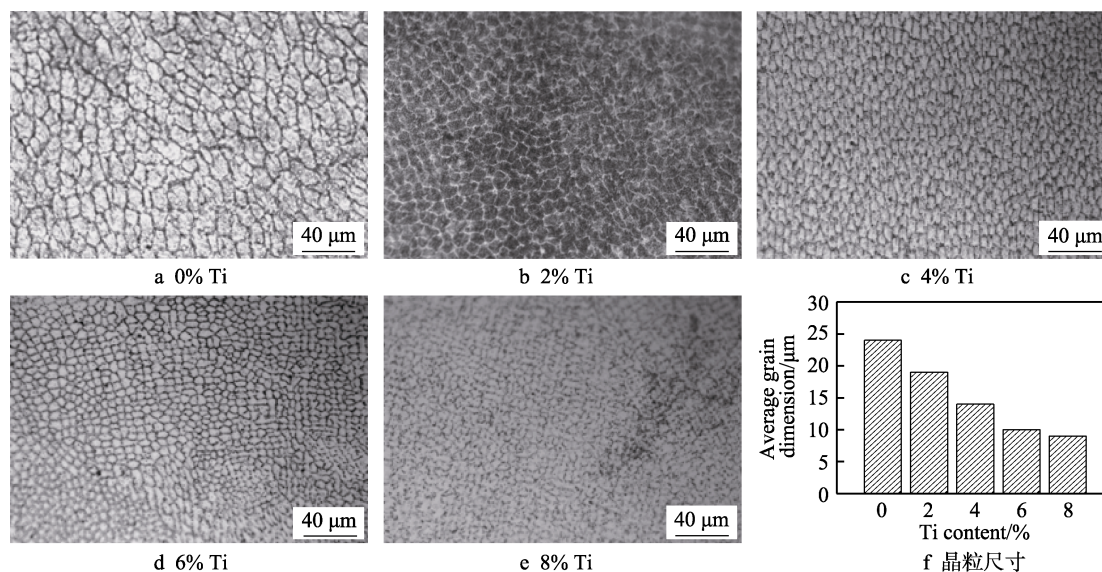


图4 熔覆层表层的微观组织特征
Fig.4 Microstructure of laser cladding: f) grain size

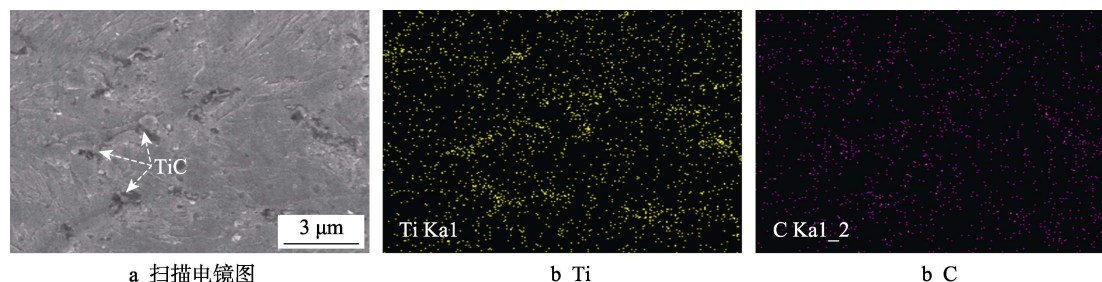


图5 熔覆层中Ti和C的分布
Fig.5 Distribution of Ti and C in cladding: a) SEM morphology

2.2 Ti 含量对复合熔覆层硬度的影响

图 6 为 Ti 含量对复合熔覆层硬度的影响,随着 Ti 含量的增加,熔覆层硬度具有最大值,当 Ti 含量为 6% 时,显微硬度最高值为 508HV,分别是单一因瓦合金涂层的 1.5 倍,基板 45 钢的 2.2 倍。随着 Ti 含量的逐渐增多,熔覆层中原位生成的 TiC 增强相增多,这些增强相大大提高了材料的硬度。另外, TiC 颗粒对基体合金晶粒的细化作用,增加了晶界比例和涂层中的位错密度。在外加载荷作用下,基体合金中的位错会产生移动,当位错移动到晶界附近时,会产生位错塞积现象,位错要继续移动必须施加更大的外力,因此合金抵抗变形的能力就会增强。所以,钛含量的增加增大了涂层中的晶界密度,有效提高了涂层位错移动阻力^[24],增强了复合涂层的变形抗力,提高了基体硬度。当涂层中 Ti 过量时,随着 Ti 含量的增加,基体合金的晶粒尺寸保持稳定,涂层中的晶界密度保持不变,细晶强化不再引起硬度增加,因此该强化机制诱发的涂层硬度保持不变。相反, Ti 的过量添加会提高涂层微裂纹和孔洞存在的倾向,当涂层表层承受载荷时,材料容易向微裂纹和孔洞处塑性流动,降低熔覆层表层抵抗塑性变形的能力,涂层的硬度降低。因此随着 Ti 含量的增加,熔覆层硬度具有最大值。

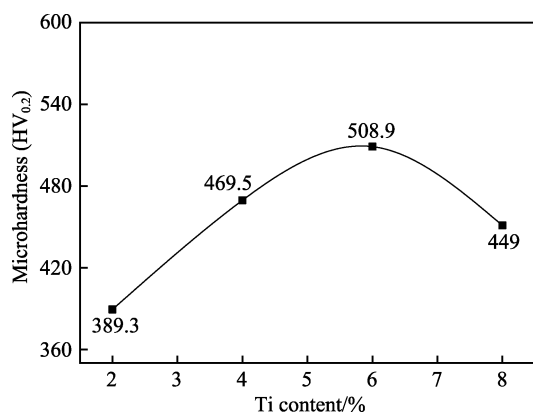
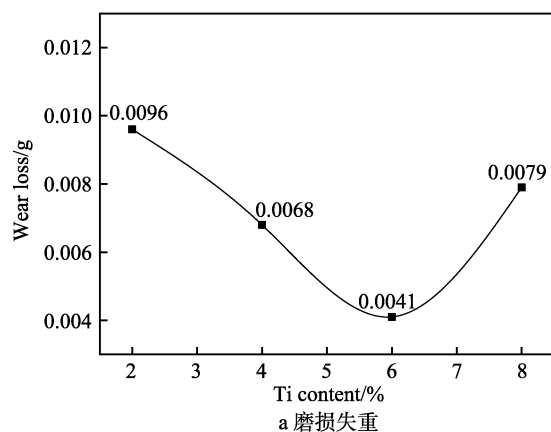


图 6 不同 Ti 含量熔覆涂层的显微硬度

Fig.6 Microhardness of the cladding with different Ti contents

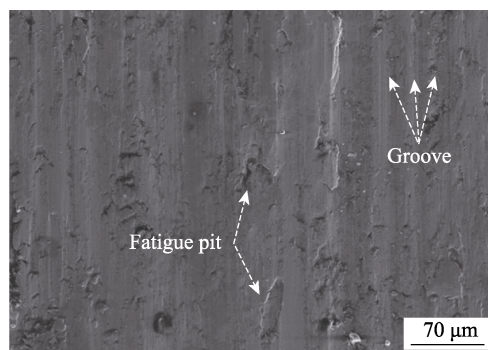


a 磨损失重

2.3 Ti 含量对熔覆层耐磨性的影响

图 7a 为 Ti 含量对 Fe-Ni-Ti 复合熔覆层耐磨性的影响,从图中可以看出,熔覆层的磨损量具有最小值,即耐磨性具有最佳值。随着 Ti 含量的增加,熔覆层中生成的 TiC 耐磨相增加,熔覆层的耐磨性提高。当 Ti 含量为 6% 时,熔覆层的耐磨性最好。当 Ti 含量超过 6% 时,涂层中 TiC 含量保持不变, TiC 对基体合金晶粒细化作用没有进一步增加,合金晶粒尺寸保持稳定,由于晶粒细化引起的耐磨性提高保持不变^[25-26]。然而, Ti 含量的继续增加会使涂层晶界中的脆性相增加,这些脆性相容易团聚,增加了涂层中的微裂纹源,使熔覆层在磨损过程中出现大颗粒剥落现象,增大了磨损量,涂层耐磨性下降。同时, Ti 的过量添加,破坏了涂层的因瓦效应,增加了熔覆层开裂倾向和涂层孔洞缺陷,进一步加速了涂层磨损。材料的磨损量与材料硬度成反比,材料硬度越高,耐磨性就越好。随着 Ti 含量的增加,涂层耐磨性的变化和微观结构、显微硬度变化保持一致。因此随着 Ti 含量的增加, Fe-Ni-Ti 复合涂层的磨损量先减少后增加,耐磨性先增加后降低。

图 7b 为熔覆层磨痕形貌,从图中可以看出,磨损表面存在磨损颗粒,熔覆层磨损主要为粘着磨损,兼有少量磨粒磨损。磨损过程中,熔覆层在垂直载荷与高速度共同作用下,摩擦表面热量累积,造成摩擦接触点温度升高。随着温度的持续升高,熔覆层表层材料局部受力,超过了材料瞬态流动应力,表面凸起点将会发生塑性流动,产生冷焊现象,形成粘着磨损。复合涂层主要包括金属合金基体和原位自生增强体,基体合金为塑性材料,在磨损过程中呈粘着磨损;原位自生陶瓷增强相与基体合金界面结合良好,在磨损过程中不易剥落,但当陶瓷颗粒大部分面积裸露在外时,陶瓷颗粒将会从涂层中剥落成磨削,进而转变为磨粒磨损的硬质颗粒,增加涂层磨损,形成了新的磨粒磨损。因此复合涂层主要为粘着磨损,兼有磨粒磨损。



b 磨痕

图 7 熔覆层的耐磨性

Fig.7 Wear resistance of laser cladding: a) wear loss; b) wear scar

3 结论

1) 在 Fe-Ni-Ti 激光熔覆复合涂层中存在原位自生 TiC 增强相, 原位 TiC 颗粒显著降低了涂层的晶粒尺寸。随着 Ti 含量的增加, 复合涂层的晶粒尺寸减小, 然后保持稳定。

2) 当 Ti 含量较低时, 熔覆层主要由 γ -[Fe,Ni] 奥氏体组成, 当 Ti 含量达到 8% 时, 熔覆层基体相结构从 γ 相转变成了 α 相, 熔覆层丧失了因瓦效应, 产生了微裂纹和孔洞缺陷。

3) Ti 元素最佳添加量为 6%, 熔覆层没有裂纹, 显微硬度最高, 耐磨性最好, 磨损机制主要为粘着磨损, 兼具磨粒磨损。

参考文献:

- [1] ZHAO L Z, ZHAO M J, LI D Y, et al. Study on Fe-Al-Si in situ composite coating fabricated by laser cladding[J]. Applied surface science, 2012, 258(8): 3368-3372.
- [2] LI S M, XIAO H, LIU K Y, et al. Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel718 during pulsed- and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study[J]. Materials & design, 2017, 119: 351-360.
- [3] SUN G F, SHEN X T, WANG Z D, et al. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and laser technology, 2019, 109: 71-83.
- [4] 赵龙志, 王怀, 赵明娟, 等. 激光沉积涂层裂纹控制的研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(5): 94-98.
ZHAO Long-zhi, WANG Huai, ZHAO Ming-juan, et al. Research progress of coating cracking control in laser deposition[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(5): 94-98.
- [5] 单晓浩, 王存山, 于群. 钛合金表面激光熔覆 Nb-Al-Ti 高温合金涂层组织与性能[J]. 中国激光, 2016(8): 184-191.
SHAN Xiao-hao, WANG Cun-shan, YU Qun. Microstructure and properties of laser cladding Nb-Al-Ti superalloy coating on titanium alloy surface[J]. Chinese journal of lasers, 2016(8): 184-191.
- [6] TANG Y C, YANG H C, HUANG D S, et al. Dual-gradient bainite steel matrix composite fabricated by direct laser deposition[J]. Materials letters, 2019, 238(3): 210-213.
- [7] ZHAO Y, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe-36%Ni alloy[J]. Materials science & engineering A, 2011, 528(s25-26): 7768-7773.
- [8] 张坚, 王震, 赵龙志, 等. 激光功率对激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 27-31.
- [9] YANG Q D, WEI K, YANG X J, et al. Microstructures and unique low thermal expansion of invar 36 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Materials characterization, 2020, 166: 110409-110417.
- [10] USTINOVSHIKOV Y, SHABANOVA I. A study of microstructures responsible for the emergence of the invar and permalloy effects in Fe-Ni alloys[J]. Journal of alloys & compounds, 2013, 578(11): 292-296.
- [11] ZHAO G, HUANG C, HE N, et al. Preparation and cutting performance of reactively hot pressed TiB₂-SiC ceramic tool when machining invar36 alloy[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 86: 2679-2688.
- [12] 石照夏, 颜晓峰, 段春华, 等. 成分与热处理对 4J36 合金力学和物理性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014(12): 31-36.
SHI Zhao-xia, YAN Xiao-feng, DUAN Chun-hua, et al. Effect of composition and heat treatment on mechanical and physical properties of 4J36 alloy[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2014(12): 31-36.
- [13] 王超, 袁守谦, 姚成功, 等. W 对 Fe-Ni 因瓦合金性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(24): 3429-3431.
WANG Chao, YUAN Shou-qian, YAO Cheng-gong, et al. Effect of W on properties of Fe-Ni invar alloy[J]. Journal of functional materials, 2012, 43(24): 3429-3431.
- [14] JIAO H T, XU Y B, ZHAO L Z, et al. Microstructural evolution and magnetic properties in strip cast non-oriented silicon steel produced by warm rolling[J]. Materials characterization, 2019, 156: 109876-109885.
- [15] LI H, CHEN B, TAN C W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of laser metal deposition of Invar 36 alloy[J]. Optics & laser technology, 2020, 125: 106037.
- [16] 赵龙志, 刘武, 刘德佳, 等. SiC 含量对激光熔覆 SiC/Ni60A 复合涂层显微组织和耐磨性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(3): 88-94.
ZHAO Long-zhi, LIU Wu, LIU De-jia, et al. Effect of SiC content on microstructure and wear resistance of laser cladding SiC/Ni60A composite coating[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(3): 88-94.
- [17] ZHANG Z, ZHANG R F, LEGUT D, et al. Pinning effect of reactive elements on adhesion energy and adhesive strength of incoherent Al₂O₃/NiAl interface[J]. Physical chemistry chemical physics, 2016, 18(33): 22864-22873.
- [18] SONG L J, ZENG G C, XIAO H, et al. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders[J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 24(1): 116-124.

(下转第 98 页)

- Wear, 2001, 251(1-12): 1009-1016.
- [12] LOTFI B, SHIPWAY P H, MCCARTNEY D G, et al. Abrasive wear behavior of Ni(Cr)-TiB₂ coatings deposited by HOVF spraying of SHS-derived ceramic powders[J]. Wear, 2003, 254(3-4): 340-349.
- [13] 陈泉, 王洪涛, 纪岗昌, 等. 超音速火焰喷涂 TiB₂-50Co 涂层及其性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1573-1580. CHEN Xiao, WANG Hong-tao, JI Gang-chang, et al. TiB₂-50Co coatings prepared by high velocity oxygen fuel and their properties[J]. Acta materiae compositae sinica, 2014, 31(6): 1573-1580.
- [14] HORLOCK A J, MCCARTNEY D G, SHIPWAY P H, et al. Thermally sprayed Ni(Cr)-TiB₂ coatings using powder produced by self-propagating high temperature synthesis: Microstructure and abrasive wear behavior[J]. Materials science and engineering A, 2002, 336(1-2): 88-98.
- [15] 刘梦茹, 程汉池. 大气等离子喷涂制备 Ni 基 TiB₂ 复合涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(6): 133-136. LIU Meng-ru, CHENG Han-chi. Study on titanium diboride-nickel composite coating by atmospheric plasma spraying[J]. Hot working technology, 2014, 43(6): 133-136.
- [16] 潘蛟亮, 王引真, 李方坡, 等. Ni 包 MoS₂ 添加剂对镍基涂层的摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(3): 225-229. PAN Jiao-liang, WANG Yin-zhen, LI Fang-po, et al. Effect of MoS₂ coated with nickel on tribological properties of Ni-based coating[J]. Tribology, 2008, 28(3): 225-229.
- [17] LEI Y, MENG Q S, ZHUANG L, et al. Friction and wear behavior of AlMgB₁₄-TiB₂ composite at elevated temperature[J]. Tribology letter 2014, 56(3): 435-442.
- [18] OUYANG J H, YANG Z L, LIU Z G, et al. Friction and wear properties of reactive hot-pressed TiB₂-TiN composites in sliding against Al₂O₃ ball at elevated temperatures[J]. Wear, 2011, 271(9): 1966-1973.

(上接第 44 页)

- [19] 路东柱, 吴敏杰. 原位 TiC 颗粒增强 Fe-36Ni 因瓦合金的组织与性能[J]. 金属功能材料, 2014(4): 9-13. LU Dong-zhu, WU Min-jie. Microstructure and properties of Fe-36Ni invar alloy reinforced by in situ TiC particle[J]. Metal functional materials, 2014(4): 9-13.
- [20] 李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016(4): 111-117. LI Fu-quan, FENG Xin-you, CHEN Yan-bin. Effect of WC content on Microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer[J]. Chinese journal of lasers, 2016(4): 111-117.
- [21] ZHAO M J, WU T, LIU D J, et al. Effect of carbon fiber on microstructure evolution and surface properties of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coatings[J]. Materials and corrosion, 2020, 71(3): 430-439.
- [22] ZHANG Z, CHEN D L. Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength[J]. Scripta materialia, 2006, 54(7): 1321-1326.
- [23] ZHAO L Z, ZHAO M J, SONG L J, et al. Ultra-fine Al-Si hypereutectic alloy fabricated by direct metal deposition[J]. Materials and design, 2014, 56: 542-548.
- [24] DONG L Y, ZHEN L S, DING S H, et al. Fine-grain strengthening mechanism of low-carbon martensite steel and its mechanical properties[J]. Journal of Northeastern University, 2014, 35(4): 499-503.
- [25] ZHOU R, TONG Z P, SUN G F, et al. Microstructure and wear behaviour of 38CrMoAl steel laser-processed with addition of MoS₂ or WS₂[J]. Lasers in engineering, 2018, 41: 1-25.
- [26] SUN G F, TONG Z P, FANG X Y, et al. Effect of scanning speeds on microstructure and wear behavior of laser processed NiCr-Cr₃C₂-MoS₂-CeO₂ on 38CrMoAl steel[J]. Optics & laser technology, 2016, 77: 80-90.

(上接第 88 页)

- [21] 李墨. 不同 Cr 含量的 Ni 基合金腐蚀行为[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009. LI Mo. Corrosion behavior of nickel-based alloys with different chromium contents[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [22] 舒勇华, 王福会, 吴维山文. NaCl 盐膜和水蒸气对纯 Cr 腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000(2): 24-32. SHU Yong-hua, WANG Fu-hui, WU Wei-shan-wen. Effects of NaCl deposit and water vapor on the corrosion behavior of pure Cr at 500~700 °C[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000(2): 24-32.
- [23] CHENG J, WU Y, CHEN L, et al. Hot corrosion behavior and mechanism of high-velocity arc-sprayed Ni-Cr Alloy coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2019, 28(6): 1263-1274.
- [24] 郭腾超, 徐国跃, 陈砚朋, 等. 硅酸盐基耐高温涂层的制备及发射率研究[J]. 红外技术, 2010, 32(12): 696-700. GUO Teng-chao, XU Guo-yue, CHEN Yan-peng, et al. Research on preparation and infrared emissivity property of silicate heat-resistant coatings[J]. Infrared technology, 2010, 32(12): 696-700.
- [25] 牛焱. 铁、镍基合金在 Na₂SO₄-NaCl 熔盐中腐蚀和稀土元素的作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1990(3): 58. NIU Yan. Corrosion of iron and nickel-based alloys in Na₂SO₄-NaCl molten salt and the role of rare earth elements[J]. Corrosion science and protection technology, 1990(3): 58.
- [26] 马元俊. GH3625 合金的高温腐蚀行为研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018. MA Yun-jun. Study on corrosion behavior of GH3625 alloy at high temperature[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.