

激光原位合成 Ni_3Al 金属间化合物覆层及其高温摩擦学性能*

杨连斌¹, 俞友军^{2,3}, 赵杰荣^{2,3}, 周健松², 雷自强¹, 陈建敏²

(1. 西北师范大学 化学化工学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所 兰州 730000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用激光熔覆技术在不锈钢基材表面原位合成了 Ni_3Al 金属间化合物覆层。用 XRD 和 SEM 分析了覆层的相组成和组织结构。在 CSM 栓-盘摩擦磨损试验机上对覆层的高温摩擦磨损性能进行了测试。结果表明: 覆层由单相 Ni_3Al 金属间化合物组成; 覆层与基材呈良好的冶金结合; 覆层的摩擦因数和磨损率在 500 °C 时具有最低值, 分别为 0.51 和 $1.38 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。

关键词: Ni_3Al ; 激光熔覆; 摩擦磨损

中图分类号: TG115.58; TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2011)03-0028-05

High Temperature Tribological Properties of Ni_3Al Intermetallic Compound Coating Produced by Laser Cladding

YANG Lian-bin¹, YU You-jun^{2,3}, ZHAO Jie-rong^{2,3}, ZHOU Jian-song², LEI Zi-qiang¹, CHEN Jian-min²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Ni_3Al intermetallic compound coating was successfully in-situ synthesized by laser cladding on stainless steel surface. Crystalline phase composition and microstructure of the coating were characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. It is found that the coatings are composed of Ni_3Al single-phase and exhibit good metallurgical bonding between Ni_3Al coatings and stainless steel substrates. The tribological properties of the coatings at high temperature are evaluated using pin-on-disk tester. Results show that the coatings have the lowest friction coefficient 0.51 and wear rate $1.38 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ at 500 °C.

Key words: Ni_3Al ; laser cladding; friction and wear

0 引言

Ni_3Al 金属间化合物具有高熔点、低密度、耐腐蚀、良好的抗高温氧化性、较高的高温强度及比强度等优点, 成为一种潜在的高温结构材料, 在民用和军事工业等高新技术领域具有广阔的应用前景, 近年来成为材料学界的研究热点之一, 并有进一步发展的潜力和扩大应用的需求^[1-3]。目前, 研究人员研制出了一系列 Ni_3Al 金属间化合物的合成方法, 如反应热压反应烧结、热等静压、高压烧结等^[4-6]。上述方法具有工艺简单、反应速度快和产品纯度高优点得到了广

泛应用, 但都存在反应不可控制的缺点, 如整个反应会在很短的时间内反应结束。为了克服燃烧合成反应的不可控制性, 有学者提出了, 即通过一定的技术手段, 来控制反应合成过程的可控反应合成概念。例如利用激光表面熔覆技术控制反应合成^[7]。

激光表面熔覆技术作为现代材料表面改性技术的一种重要方法, 能够方便地在金属基材表面制备出结构和性能优异的覆层材料或者原位合成金属间化合物覆层材料^[8]。利用该技术在不锈钢基材表面制备覆层材料并就其常温摩擦磨损性能的研究已有大量报道^[9-11]。然而, 利用该技术制备覆层并就覆层高温区段内的摩擦磨损性能的研究却鲜有报道。且由于工业实际应用中, 许多机械运动零部件服役于高温条件下, 这对材料

收稿日期: 2010-12-23; 修回日期: 2011-04-28

基金项目: * 国家自然科学基金(51045004); 高校博士点专项基金(20050736001)

作者简介: 杨连斌(1984—), 男(汉), 甘肃兰州人, 硕士生。

的高温机械性能和摩擦学性能提出了更高要求。则文中开展激光熔覆层高温摩擦学性能的研究,具有重要的学术理论意义和实际应用价值。

文中利用激光表面熔覆技术在不锈钢基材表面原位合成 Ni_3Al 金属间化合物覆层,系统地研究了覆层的相组成、显微组织和高温摩擦磨损性能之间的关系,以期 为 Ni_3Al 金属间化合物覆层的工程应用提供科学试验数据。

1 试 验

将镍粉(粒度 $75\text{ }\mu\text{m}$,纯度 99.0%)和铝粉(粒度 $30\sim150\text{ }\mu\text{m}$,纯度 99.5%)按原子比 $\text{Ni}:\text{Al}=3:1$ 配制于 WC 球磨罐中,加入少量无水乙醇后在 QM-3SP4J 型行星式球磨机上球磨混合 120 min,烘干备用。

将 $\text{Ni}:\text{Al}$ 混合粉末手工平铺于试样尺寸为 $\phi 45\text{ mm}\times16\text{ mm}$ 的不锈钢(1Cr18Ni9Ti)基材表面,粉末厚度约 1.5 mm。然后将整个试样放于电炉中在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下预热处理半小时。最后利用横流连续波 CO_2 激光器(沈阳大陆成套设备有限责任公司生产)对上述预热试样进行激光熔覆处理。考察激光输出功率为 $2\sim5\text{ kW}$,扫描速度为 $200\sim500\text{ mm/min}$ 的激光熔覆工艺参数,进行优化选择后得到激光原位合成 Ni_3Al 金属间化合物覆层的最佳工艺参数。具体为:激光输出功率 3.5 kW,光斑直径 3.0 mm,光束扫描速度 200 mm/min ,光斑搭接率 40%。激光熔覆后将样品放置于碳钢平盘中,用电炉加热至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 后缓慢冷却,以释放试样在熔覆过程中产生的残余应力。

利用 Philips X'Pert-MRD 型的 X 射线衍射仪分析预置粉末和覆层的相组成;利用 JSM-5600L 型扫描电子显微镜观察覆层的横截面显微组织结构特征。

覆层的摩擦磨损性能用瑞士 CSM 公司生产的 THT 摩擦磨损试验机进行测试。试验条件如下:选用 $\phi 3$ 的 Al_2O_3 陶瓷球作为摩擦对偶,温度 $25\sim700\text{ }^\circ\text{C}$,载荷 5 N,速度 0.21 m/s ,滑行距离 250 m。用美国生产的 MicroXAM 三维表面轮廓仪测量覆层的磨损体积并计算体积磨损率。

2 结果与讨论

2.1 覆层的相组成和组织结构

图 1 为 $\text{Ni}:\text{Al}$ 混合粉末的 SEM 照片。由图

可以看出球磨后混合粉末呈现不规则形貌,其中 Al 为片状颗粒,Ni 为细小球状颗粒并且细小的球状 Ni 颗粒均匀分布在片状 Al 颗粒之间,这表明球磨过程实现了 $\text{Ni}:\text{Al}$ 粉末的均匀混合。

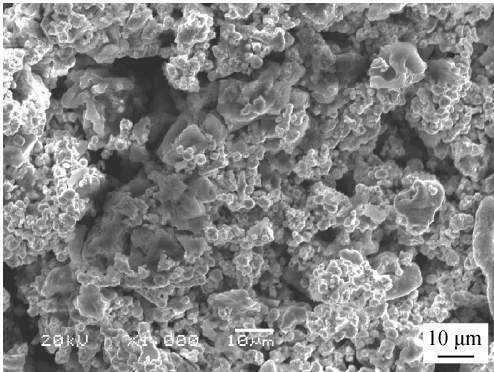


图 1 $\text{Ni}:\text{Al}$ 混合粉末的 SEM 照片

Fig. 1 SEM micrograph of the Ni and Al mixed powders

图 2 为 $\text{Ni}:\text{Al}$ 混合粉末激光熔覆前后的 XRD 谱图,其中图 2(a)为混合粉末的 XRD 谱图,图 2(b)为上述最佳熔覆工艺条件下原位合成的 Ni_3Al 覆层的 XRD 谱图。由图 2(a)可以看出, $\text{Ni}:\text{Al}$ 粉末经球磨混合后,没有新的物相衍射峰出现,表明球磨过程只实现了 $\text{Ni}:\text{Al}$ 粉末的均匀混合而没有发生机械合金化反应。由图 2(b)可以看出,在最佳熔覆工艺条件下原位合成出单相 Ni_3Al 金属间化合物覆层。

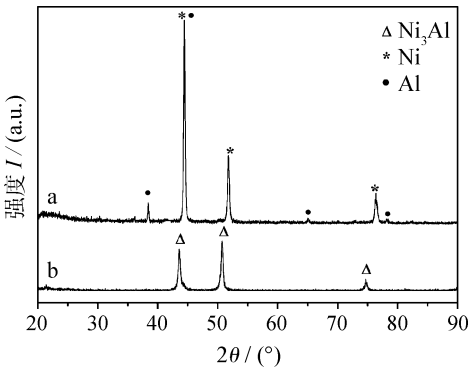


图 2 $\text{Ni}:\text{Al}$ 混合粉末(a)及 Ni_3Al 覆层(b)XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of the mixed powders (a) and the laser cladding Ni_3Al coatings(b)

图 3 为覆层截面 SEM 照片,其中图 3(a)为覆层全貌,图 3(b)为覆层底部,图 3(c)为覆层上部。由图 3(a)可以看出,覆层与基材之间存在明显界限,基材基本未发生变化,说明在激光熔覆过程中激光能量光束对基材的影响非常小;熔

覆区微观组织均匀、致密,无气孔和裂纹等缺陷,说明试验所选择的激光工艺参数能够制备出优异的 Ni_3Al 金属间化合物覆层;结合区呈现无明显组织特征的白亮带,说明覆层与基材的界面呈良好的冶金结合状态,可以认为覆层与基材之间具有很高的界面结合强度;同时可以看出覆层的厚度约为 $500\text{ }\mu\text{m}$,可以很好地满足工程加工需要。由图 3(b) 可以看出,覆层靠近基材部分呈现定向快速凝固特征,为生长取向较均匀且较粗大的不发达枝状晶,晶体生长方向垂直于基材,而且枝状晶迅速转化为结构更为精细的包状晶。由图 3(c) 可以看到,当覆层由底部的粗大枝状晶迅速转化为包状晶后,覆层组织为大小均匀、组织精细的等轴包状晶且晶粒之间紧密排列无

裂纹孔洞等缺陷存在,而这种组织结构精细的等轴包状晶将对覆层的摩擦磨损性能产生较大的影响。在激光熔覆过程中产生上述现象的主要原因是,根据金属凝固理论,在激光照射过程中,形成的熔池很小且受到不锈钢基材的强烈冷却作用,所以熔池以极快的速度冷却,说明激光熔覆是一个快速凝固的非平衡过程,随着液固界面的推移,液相温度梯度逐渐减小,晶体择优向散热反方向生长,界面处的热量主要通过基底散失,所以晶体生长方向为垂直于界面的定向生长;随着温度梯度降低,结晶速度逐渐增大,枝状晶逐渐变细,垂直于基材的晶粒生长速度最快的优势减弱,组织迅速转化为等轴晶。

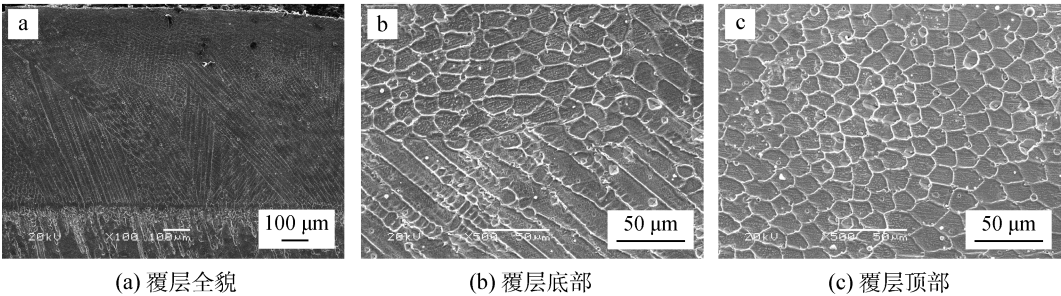


图 3 Ni_3Al 覆层横截面 SEM 照片

Fig. 3 Cross-sectional SEM micrographs of Ni_3Al coatings

2.2 覆层的摩擦磨损性能

图 4 为 Ni_3Al 金属间化合物覆层的摩擦因数与磨损率随温度变化曲线。可以看到,随着温度由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,覆层的摩擦因数随温度升高逐渐变小,至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最小值 0.51 。当温度升至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,覆层的摩擦因数略升高至 0.55 。在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间内,覆层的磨损率随温度的升高逐渐降低, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最小值 $1.38 \times 10^{-4}\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$,但是,当温度继续升高至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,覆层的磨损率略有升高。覆层的摩擦因数和磨损率随温度变化的主要原因为 Ni_3Al 金属间化合物具有反温度效应。因硬度会随着温度升高而升高^[9],可能对其摩擦因数和磨损率有一定的影响,这与图 4 所示的摩擦因数与磨损率随温度变化的曲线相吻合。但当温度达到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然覆层的硬度会随温度继续升高,但在较高温度下,覆层在摩擦过程中可能受到摩擦对偶

的挤压作用发生较严重塑性变形,使摩擦磨损机制主要以黏着磨损为主,导致摩擦因数和磨损率略有升高。

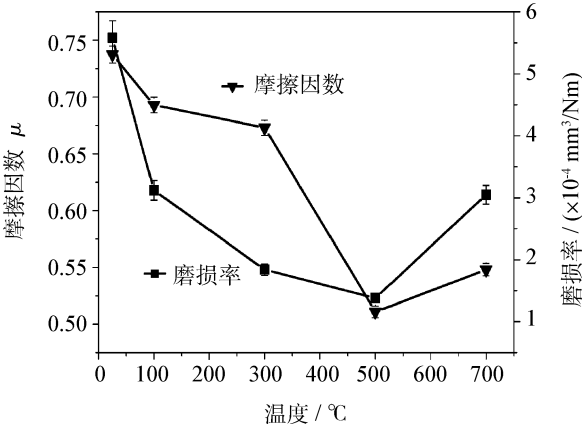


图 4 覆层的摩擦因数与磨损率随温度变化曲线

Fig. 4 Friction coefficient and wear rate of the Ni_3Al coatings as a function of the temperature

图5分别为 Ni_3Al 金属间化合物覆层在不同温度下的摩擦表面 SEM 照片。其中图5(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别对应 25℃、100℃、300℃、500℃和700℃。由图5(a)可以看出,常温下,覆层磨损表面主要表现为犁沟磨痕,呈犁沟显微切削,存在少量的剥落,磨损面总体平整,磨损机制为典型的磨粒磨损。升高温度至100℃,如图5(b)所示,覆层出现轻微的粘着和塑性形变迹象同时存在犁沟磨痕,说明此时覆层已经发生轻度的塑性形变,磨损机制主要为磨粒磨损并伴随黏着磨损。随温度的继续升高,如图

5(c)所示,覆层在300℃时发生了轻微的塑性变形同时存在犁沟磨痕,部分区域出现摩擦抛光现象而使摩擦因数有所降低,说明此时的磨损机制为黏着磨损与磨粒磨损共存。当温度达到500℃时覆层的塑性变形变得较为严重,看不到明显的犁沟磨痕,并出现大面积摩擦抛光区域致使摩擦因数进一步降低。700℃时,如图5(e)所示,可以看到覆层发生了很严重的塑性变形,覆层以块状褶皱形式存在,受到了明显的挤压作用,所以当温度超过500℃后覆层的磨损机制为典型的黏着磨损。

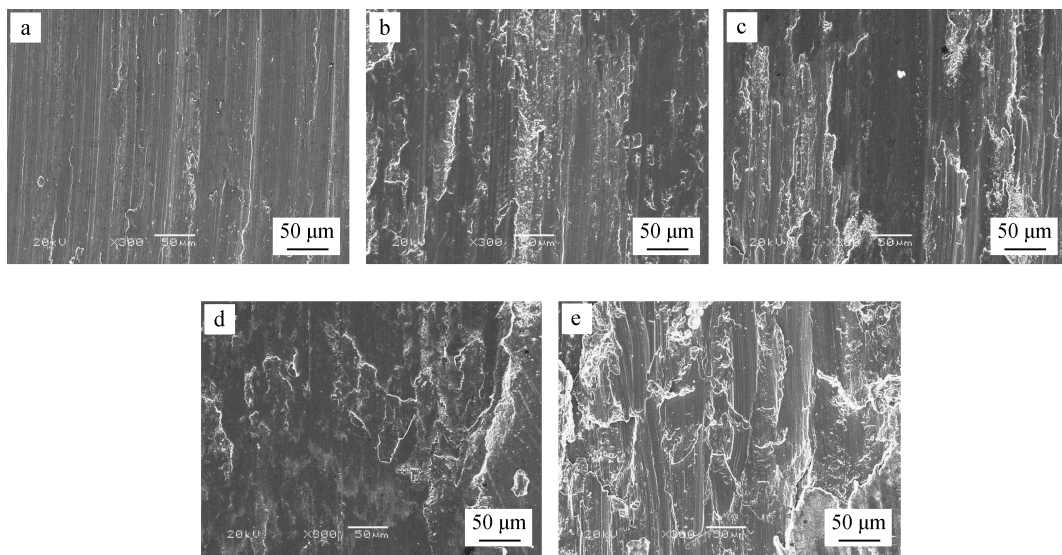


图5 Ni_3Al 覆层在不同温度下的摩擦磨损 SEM 照片

Fig. 5 SEM morphologies of the worn surface of Ni_3Al coatings at different temperatures

3 结 论

(1) 利用激光表面熔覆技术成功的在不锈钢基材表面原位合成了 Ni_3Al 金属间化合物覆层,经 XRD 分析为单相 Ni_3Al 金属间化合物。

(2) 优化激光工艺参数原位合成的 Ni_3Al 覆层厚度达到 500 μm ,具有精细致密的显微组织结构,无裂纹、孔洞等缺陷存在,与基底呈良好的冶金结合。

(3) 在 25~700℃温度范围内,随着温度的升高覆层的摩擦因数和磨损率逐渐下降,500℃时有较低的摩擦因数与磨损率。

参考文献

[1] Stoloff N S, Liu C T, Deevi S C. Emerging applications of intermetallics[J]. Intermetallics, 2000, 9-

11(8): 1313-1320.

- [2] 张志俊,王艳文,刘鹤. Al_2O_3 颗粒强化 Ni_3Al 合金的机械合金化合成及烧结[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 154-157.
- [3] 陈金护,朱定一,林登宜. Ni_3Al 基合金的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2006, 20(1): 35-38.
- [4] Moore J J, Feng H J. Combustion synthesis of advanced materials: Part I. reaction parameters [J]. Progress in Materials Science, 1995, 39: 243-273.
- [5] Leonid Farber, Irena Gotman. Solid state synlthesis of NiAlNb composites from fine elemental powders [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A244: 97-102.
- [6] Morsi K. Review: reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A299: 1-15.
- [7] 耿慧远,李言祥. Ni_3Al 金属间化合物的激光控制

- 反应合成与表面熔敷[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(5): 62-68.
- [8] Yu Youjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin et al. Preparation, microstructure and tribological properties of Ni_3Al intermetallic compound coating by laser cladding [J]. Intermetallics. 2010, 18(5): 871-876.
- [9] 尚丽娟, 朱荆璞, 谭超鑫. 激光熔覆镍基和钴基自熔合金的研究 [J]. 中国激光. 1990, 17(8): 491-496.
- [10] Ya Zuo. Latanision R M. Coppelion behavior of steel surface laser alloyed with Cr harides [J]. Materials science. 1992, 27: 3014-3020.
- [11] 陶曾毅, 陈新, 冯树强. 低合金钢表面激光熔覆层耐磨性的研究 [J]. 中国激光. 1989, (10): 629-631.
- 作者地址: 兰州市天水中路 18 号 730000
中国科学院兰州所固体润滑国家重点实验室
Tel: 138 9345 6092
E-mail: yanglianbin_2008@163.com

• 本刊讯 •

《中国表面工程》期刊第三届编委会和第四届 理事会纪要

第六届中国表面工程国际学术会议于 2011 年 5 月 10 ~ 13 日在西安举办, 借此次会议召开之机, 《中国表面工程》期刊于 5 月 11 日晚在西安交通大学学术交流中心召开了第三届编委会和第四届理事会。

会议由《中国表面工程》主编刘世参教授主持并致词, 对各位国际、国内编委和理事在百忙之中参会表示感谢并敬请大家对期刊发展提出宝贵的指导意见。

期刊常务副主编张伟教授汇报了编辑部近两年工作进展, 重点介绍了期刊在影响力和网络建设等方面的进步, 指出期刊目前存在的高质量稿源不足等瓶颈, 提出了依靠编办刊、刊登英文原版文章等具体措施。随后, 各位编委和理事踊跃发言, 在肯定期刊载文质量及排版印刷质量有很大提高的同时, 分析了期刊存在的问题, 探讨了进一步提高期刊英文摘要质量和国际重要数据库收录等事项解决的措施, 同时也表示今后将在撰稿、审稿、荐稿等方面多做努力, 给予期刊更多支持。

编委会副主任、常务副理事长马世宁教授代表编委会主任徐滨士院士向各位编委和理事颁发聘书。马教授对会议做了总结讲话, 衷心感谢各位编委、理事长期以来对《中国表面工程》期刊不遗余力的关爱与支持! 希望各位编委和理事把自己分会的会刊《中国表面工程》继续当成自己的孩子来对待, 编委们要不断供稿, 理事们要继续给力! 使《中国表面工程》在稿源和经费上获得更大的支持。

主编刘世参教授发言, 感谢各位编委和理事对期刊进步的肯定和对未来发展提出的宝贵意见, 表示期刊将在高质量稿源方面更加努力, 在解放思想、锐意改革, 在服务中国的基础上, 期刊考虑向 EI 进军。

为落实编委和理事们的指导意见, 《中国表面工程》编辑部紧接着于 5 月 12 日召开了主编办公会, 就期刊在联系实际与应用、改进摘要和图表内容、请国际编委负责审改英文摘要、加强约稿力度、及时跟踪国内与国际表面工程会议等方面做了详细的安排和分工。

主编办公会决心在编委和理事的指导、支持下, 把《中国表面工程》办得更好, 不辜负大家的希望, 拟在 2012 年第九届全国表面工程学术会议和 2013 年第 7 届中国表面工程国际会议上分别以新的期刊面貌展现给各位编委及理事。

出席此次会议的国内编委有: 马世宁、陈建敏、徐可为、顾卡丽、雷明凯、刘宣勇、朱旻昊、徐久军、张帆、杜三明。国际编委有: 董汉山、廖汉林、魏荣华、巨束英。理事有: 张慧、黄卫东、涂明武、关栋云等共计 25 人。

《中国表面工程》编辑部