

# 激光熔覆在金属间化合物涂层材料 制备中的应用

孙耀宁<sup>1</sup>,樊丁<sup>1,2</sup>,戴景杰<sup>1</sup>

(1.兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室,甘肃 兰州 730050;2.兰州理工大学 有色金属合金重点实验室,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**在分析金属间化合物涂层材料特点的基础上,综述各种激光熔覆合成金属间化合物涂层的研究现状,分析了各种金属间化合物涂层的组织和性能。研究表明,激光熔覆合成的金属间化合物涂层均具有优异的耐磨、耐腐蚀、抗氧化等性能。

**关键词:**金属间化合物;表面涂层;激光熔覆

**中图分类号:**TG456.7 **文献标识码:**C **文章编号:**1001-2303(2007)03-0017-03

## Status of intermetallic compound coatings synthesized by laser cladding

SUN Yao-ning<sup>1</sup>, FAN Ding<sup>1,2</sup>, DAI Jing-jie<sup>1</sup>

(1.State Key Lab of Gansu New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Uni. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Education Ministry Key Lab. of Advanced Processing Tech. for Non-ferrous Metal, Lanzhou Uni. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the analysis of intermetallic coatings, the status of intermetallic compound coatings synthesized by laser cladding was described. Microstructures and properties of various coatings were analyzed. The results show that all of the coatings have excellent wear-resistance, corrosion-resistance and oxidation-resistance properties.

**Key words:** intermetallic compound; surface coating; laser cladding

## 0 前言

金属间化合物具有低密度、高比强度、高比刚度、高弹性模量、耐腐蚀和高温抗蠕变性能好的特点,成为航空、工业燃气轮机和汽车工业中最具潜力的结构材料之一,已引起世界各国科学家和有关部门的极大关注。但较差的室温韧性限制了其工业应用。尽管它作为整体结构材料使用,存在室温韧性不足的问题,但高温高强耐蚀性的优异性能,使其具备作为耐蚀涂层的使用条件。

激光表面熔覆是在激光束作用下,将合金粉末或陶瓷粉末与基体表面迅速加热并熔化,光束移开后自激冷却的一种表面强化方法。它可以完全改变材料表面性能,使之达到耐磨、抗腐蚀、耐冲蚀、耐疲劳、抗高温氧化等多种性能。涂层与基体为冶金结合,具有稀释程度小、热输入量小、热循环短暂、

对基体的热损害和热变形少、易选区熔覆、无机械接触等特点,因此,它得到了迅速发展和广泛应用<sup>[1]</sup>。而在低等级材料表面熔覆高性能异质金属基涂层是近年来国内外研究的热点,尤其是金属间化合物涂层有了很大的发展。

金属间化合物基复合材料(IMC)可获得良好的力学性能,并同时保持基体的低密度等特点,是很具竞争力的材料。

## 1 Ni-Al系金属间化合物涂层材料

Ni-Al系可形成五种合金化合物: NiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl和Ni<sub>3</sub>Al。其中NiAl和Ni<sub>3</sub>Al是较好的高温结构涂层材料, Ni<sub>3</sub>Al合金具有反常强化现象,即屈服强度随温度升高而增加的现象,使该合金在较高的温度下具备竞争力。Ni<sub>3</sub>Al合金在700℃的塑性可达25%~40%,其疲劳性能和疲劳裂纹长大性能优于镍基超合金,而蠕变性能则与之相当。NiAl密度只为Ni基高温合金的2/3,熔点高,抗氧化性优良,热

收稿日期:2006-04-24;修回日期:2007-01-28

作者简介:孙耀宁(1977—),女,陕西铜川人,在读博士,主要从事激光加工技术方面的研究工作。



导率高。激光熔覆 Ni-Al 涂层能形成极其细密的枝晶组织,并存在大量的 Ni-Al 硬质金属间化合物,极大改善熔覆层的耐磨性。

张松<sup>[2]</sup>在 6061Al 合金表面制备 Ni-Al 和 Ti-Al 金属间化合物激光表面改性层,改性层具有细密的枝晶态组织,主要由  $Ni_3Al$  和  $TiAl_3$  金属间化合物组成。改性层的硬度分布均匀,为基体硬度的 3~5 倍。与基体相比,改性层耐磨性提高两倍以上。陈瑶<sup>[3]</sup>发现,随扫描速度增加,涂层中  $Ni_3(Al, Ti, C)$  共晶体积百分比增加,晶粒不断细化,涂层硬度有所增加,但厚度减小。另外,因涂层材料与基体材料物理和化学性能差异,结合面往往较脆弱, J.H. Abboud<sup>[4]</sup>激光熔覆制备的 NiAl 多层梯度涂层,基材稀释作用可有效减小。

## 2 Ti-Al 系金属间化合物涂层材料

TiAl 系合金密度低,具有高比强度和比弹性模量,高温时仍有高强度和刚度,具有良好的抗蠕变和抗氧化能力,是航空发动机和汽车耐热结构件具备竞争力的材料。

李子夫<sup>[5]</sup>用 Ti-46.5Al 合金薄片作为激光熔覆材料,在 GH44 镍基合金表层熔覆区获得了与  $\gamma$ -TiAl 基合金激光表层熔凝区相近的细小枝晶组织,过渡区在熔覆区和基体之间形成良好的成分过渡。 $\gamma$ -TiAl 基合金涂层过渡区由  $Ni_3(Ti, Al)C$ 、 $Ti_3Al$  和 Ti 三相组成,其中  $Ni_3(Ti, Al)C$  和  $Ti_3Al$  相占多数体积分数。

在金属间化合物涂层中加入陶瓷相可提高磨损性能。刘秀波<sup>[6]</sup>在 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金表面激光熔覆制得分别以  $Cr_7C_3$ 、TiC、 $Ti_5Si_3$ 、TiSi、 $W_2C$  和  $M_{23}C_6$  等硬质相为增强相的原位激光改性层。研究表明,涂层显微硬度随着增强相体积分数的增加而增大。Keisuke Uenishi<sup>[7]</sup>研究了在铝表面形成  $Al_3Ti$  和  $Al_3Ti$ -陶瓷的激光熔覆复合涂层。结果表明:在  $Al_3Ti$  中加入陶瓷相可提高磨损性能,陶瓷颗粒尺寸和体积百分比对磨损性能都有明显影响,过细的陶瓷颗粒降低磨损性能,但可提高材料硬度和机械性能。

## 3 Fe-Al 系金属间化合物涂层材料

以  $Fe_3Al$  和 FeAl 为基的 IMC,主要用作恶劣环境下的高温结构材料。这是因为它们具有优良的抗氧化性、耐腐蚀性、相对低的密度和低成本。

程广萍<sup>[8]</sup>在低碳钢基体表面制备  $Fe_3Al$  金属间

化合物覆层。研究表明,熔覆界面处为明显平面生长的白亮组织,熔覆合金层主要由单相  $Fe_3Al$  构成,熔覆层组织为细小等轴状晶团,等轴晶团内部由大量更细小的条状  $Fe_3Al$  晶粒构成。

吴惠英等人<sup>[9]</sup>对钢基表面激光熔覆  $Fe_3Al$  试样测定硬度,熔覆合金表面的平均硬度大约为 500 HV,常规熔铸法获得铸态  $Fe_3Al$  硬度一般不超过 300 HV。激光熔覆  $Fe_3Al$  较普通铸态  $Fe_3Al$  硬度大大提高,一方面可能与激光熔覆时快速加热与快速冷却工艺造成的应力有关;另一方面,更大程度上可能与熔覆形成的  $Fe_3Al$  合金层的特殊组织结构(由大量极微细的  $Fe_3Al$  板条晶构成)有关,如图 1 所示。

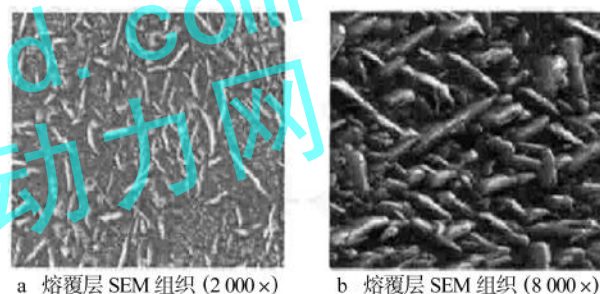


图 1 熔覆层 SEM 高倍组织

TiC 具有极高的硬度值和优异的高温稳定性,被广泛作为耐磨材料和高温结构材料中的主要强化相。陈瑶和王华明<sup>[10]</sup>利用激光熔覆技术在奥氏体不锈钢基体上制备 TiC/FeAl 复合涂层,熔覆层组织细小、致密、均匀。XRD 分析表明涂层由 TiC、FeAl 两相组成,显微组织为初生 TiC、初生 FeAl 树枝晶和枝晶间少许 TiC/FeAl 共晶组成。熔覆层组织细小、致密、均匀,涂层硬度大大提高。

张来启<sup>[11]</sup>利用激光熔覆和原位合成技术,选用 Fe-Al 二元系粉末作为熔覆材料,制备富铁 FeAl 金属间化合物涂层。得到的熔覆层无裂纹、气孔、夹杂等,且组织均匀。组织形态为胞状晶,涂层最高硬度 639 HV<sub>0.2</sub>,热影响区为 590 HV<sub>0.2</sub>,基体硬度 210 HV<sub>0.2</sub>。涂层硬度比基体高两倍。多道搭接处理对熔覆层硬度影响不大。

## 4 其他金属间化合物涂层材料

刘元富<sup>[12]</sup>以 Ti14Si6Ni80 混合粉末为原料,在高温高强 BT9 钛合金表面熔覆制得了以金属间化合物  $Ti_5Si_3$  为强化相和以金属间化合物 NiTi 为基体的复合材料涂层。涂层在 1 000 °C 恒温氧化 50 h 的试验下,具有较好的高温抗氧化性,与原始 BT9 钛合金相比,抗氧化性提高了 1.79 倍。



吕旭东<sup>[13]</sup>以 39Mo-35Ni-26Si 合金粉末为原料,在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢基材表面熔覆制得以 Mo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 金属硅化物为初生相、以 Mo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si/NiSi 共晶相为基体的金属硅化物耐磨复合涂层,Mo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 金属硅化物具有高硬度和强原子间键合力,磨损过程中难于变形和粘着,使涂层具有优异耐磨性,与 1Cr18Ni9Ti 标样相比,涂层耐磨性提高了 56 倍。

王春敏<sup>[14]</sup>以 Ni, Si, Cr 元素粉末为原料,利用激光熔覆在 A3 钢表面制得 Ni-Si 金属硅化物复合材料涂层。实验表明,复合涂层组织由 Ni<sub>2</sub>Si 初生胞状树枝晶和枝晶间少量 FeNi/Ni<sub>3</sub>Si<sub>12</sub> 共晶组成,涂层表面平整、组织细小,与基体为完全冶金结合。涂层组织显微硬度在 HV800~HV950,且沿层深分布均匀。由于涂层组成相 Ni<sub>2</sub>Si 和 Ni<sub>3</sub>Si<sub>12</sub> 等本身均具有很好的耐蚀性,并具快速凝固细小均匀显微组织,涂层在 0.5 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 3.5% NaCl 水溶液中均表现出优良的耐蚀性能。

## 5 结论

激光熔覆制备金属间化合物基复合涂层,极大地提高材料的表面性能,使用陶瓷相强化,能将金属材料较高的强度、韧性和良好的工艺性能与陶瓷材料优异的耐磨、耐蚀、耐高温和化学稳定性可有机结合起来,使一般材料表面获得超硬、超强、超耐磨、超耐蚀等特种性能,尤其适用于一些在极端条件下服役的关键部件的强化,具有良好的发展前景。

## 参考文献:

- [1] Monson P J E, Steen W M. Comparison of laser hard facing with convention processes[J]. Surface Engineering, 1990, 6(3): 185-191.
- [2] 张松, 张春华, 文效忠, 等. 原位反应合成金属间化合物激光合金化层的组织及抗磨性能[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 97-100.
- [3] Chen Y, Wang H M. Microstructure and wear resistance of a laser clad TiC reinforced nickel aluminides matrix composite coating[J]. Materials Science and Engineering A, 2004(368): 80-87.
- [4] Abboud J H, Rawlings R D, West D R F. Functionally graded nickel-aluminide and iron-aluminide coatings produced via laser cladding[J]. Journal of Materials Science, 1995(30): 5931-5938.
- [5] 李子夫, 吴国清, 黄正, 等. 镍基合金激光熔覆  $\gamma$ -TiAl 合金涂层组织研究[J]. 焊接技术, 2004, 33(4): 16-17.
- [6] 刘秀波.  $\gamma$ -TiAl 金属间化合物合金激光熔覆高温耐磨复合材料涂层组织与性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.
- [7] Keisuke U, Kojiro F K. Formation of surface layer based on Al<sub>2</sub>Ti on aluminum by laser cladding and its compatibility with ceramics[J]. Intermetallics, 1999, 7(5): 553-559.
- [8] 程广萍, 何宜柱. 钢基表面单道激光熔覆 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物的研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(8): 600-604.
- [9] 吴惠英, 程广萍, 何宜柱. 钢基表面激光熔覆 Fe<sub>3</sub>Al 的组织结构[J]. 热处理, 2004, 19(3): 31-34.
- [10] 陈瑶, 王华明. 激光熔覆 TiC/FeAl 复合材料涂层显微组织及初生 TiC 生长机制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(7): 569-572.
- [11] 张来启, 陈光南, 孙祖庆, 等. 激光熔覆原位合成  $\alpha$ -Fe(Al)/Fe<sub>3</sub>Al 涂层的研究[J]. 金属热处理, 2004, 29(6): 1-4.
- [12] 刘元富, 赵海云, 张凌云, 等. 激光熔敷 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/NiTi 金属间化合物复合材料涂层组织与高温抗氧化性能研究[J]. 应用激光, 2006, 22(3): 269-271.
- [13] 吕旭东, 王华明. 激光熔覆 Mo<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si/NiSi 金属硅化物复合材料涂层组织与耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(10): 848-851.
- [14] 王春敏, 蔡良续, 王华明. 激光熔覆 Ni-Si 金属硅化物复合材料涂层显微组织与耐蚀性[J]. 中国有色金属学, [时间不详].

## 欢迎订阅 2007 年 电焊机 杂志

《电焊机》杂志创刊于 1971 年,由国家科委批准,成都电焊机研究所主办,是以报道焊接行业发展、焊接设备、焊接新工艺、焊接材料、焊接设备使用与维修等内容,国内外公开发行的国家级技术应用刊物。主要栏目有:专题讨论、专题综述、行业论坛、研究与设计、生产与应用、使用与维修、技术与市场、焊工园地、新产品新器件、国外焊接设备、标准与质量、卫生与安全、专利介绍、技术课堂、产品导购等。《电焊机》杂志是中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、“英国《科学文摘》(INSPEC)来源期刊”、“俄罗斯《文摘杂志》收录期刊”、“美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录期刊”等。

欢迎大家踊跃订阅! 欢迎各位专家积极投稿! 各地邮局均可订阅, 邮发代号: 62-81, 订价: 10 元/月, 120 元/年。

地址: 成都市东三环路二段龙潭都市工业集中发展区航天路 24 号《电焊机》杂志社 邮编: 610052

电话: 028-84216674 联系人: 王杏英