

文章编号: 1001-3806(2006)01-0067-03

工艺参数对 TiAl 合金激光熔覆复合涂层的影响

刘秀波¹, 王华明²

(1. 中原工学院 材料与化学工程系, 郑州 450007; 2 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用预涂 NiCr-C₃C₂ 复合粉末对 γ -TiAl 合金 (简称 TiAl 合金) 进行激光熔覆处理, 制得了以 C₃C₂, TiC 硬质耐磨相为增强相, 以 γ -NiCrAl 镍基固溶体为基体的复合涂层; 较系统地研究了光束扫描速度对 TiAl 合金激光熔覆复合涂层组织与耐磨性能的影响。结果表明, 随着激光束扫描速度的提高, 涂层显微组织有细化的趋势, 显微硬度有所提高, 而涂层厚度则有所降低。在中等扫描速度下 (2.00mm/s) 获得的涂层具有最好的滑动磨损耐磨性。

关键词: 激光熔覆; TiAl 合金; 工艺参数; 显微组织; 耐磨性

中图分类号: TG166.7; TG665 **文献标识码:** A

The influence of processing parameters on laser cladding composite coatings on TiAl intermetallic alloy

LIU Xiubo¹, WANG Huaming²

(1. Department of Materials & Chemical Engineering, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of processing parameters on the microstructure and wear property of laser cladding γ /C₃C₂/TiC composite coatings on TiAl intermetallic alloy substrates with NiCr-50% C₃C₂ precursor mixed powder is investigated. The results show that the microstructure of the laser cladding composite coatings is refined and the microhardness increases with the increasing of the laser beam scan-rate, but the thickness of the clad coating decreases. The laser cladding coating with the moderate (2.00mm/s) scan-rate exhibits the best wear-resistance under the full dry sliding wear test condition.

Key words: laser cladding; TiAl intermetallic alloy; processing parameter; microstructure; wear-resistance

引 言

TiAl 金属间化合物合金具有低密度、良好的高温性能等性能优点, 在未来航空航天、汽车发动机等领域极具应用潜力^[1-4]。当 TiAl 合金作为运动副零部件时 (如直升机发动机叶片和压气机叶片, 汽车、机车发动机排气阀等), 耐磨性能成为其作为实际应用结构材料的最关键因素之一。为有效提高其在高温状态下的耐磨性, 最近, 作者分别采用激光表面合金化^[5]和激光熔覆^[6]等技术, 以 NiCr-C₃C₂ 复合粉末为原料, 成功地制得了以初生块状 C₃C₂, 树枝状或粒状 TiC 为耐磨增强相, 以 γ -NiCrAl 镍基固溶体为基体的复合材料涂层, 研究结果表明, 复合涂层的耐磨性能大大提高。同时, 由于其在高温环境下能够生成连续、致密的氧化膜, 还具有良好的耐高温氧化性能, 显示出很好的研究和应用前景。激光熔覆技术是一种先进的材料表面改性技术^[7,8], 激光熔覆工艺参数, 特别是激光束扫

描速度, 对所形成涂层的显微组织和性能具有显著的影响, 是科研试验和实际应用中应该重点考虑的问题。本文中系统地考察光束扫描速度对熔覆涂层组织和性能的影响, 以期对涂层组织和性能的机理研究和正确制定工艺参数有所帮助。

1 试验方法

材料选用具有全片层组织的铸造 TiAl 合金 Ti-48Al-2Cr-2Nb (摩尔分数, %), 试样尺寸为 8mm × 10mm × 40mm, 将 NiCr-50% C₃C₂ (体积分数) 混合粉末预涂于试样表面, 粉末粒度为 40 μ m ~ 140 μ m, 预涂层厚度为 1.5mm ~ 2.0mm。激光处理采用 5kW 横流激光器, 激光输出功率 2.8kW, 光斑大小 1mm × 18mm, 光束扫描速度分别为 1.50mm/s, 2.00mm/s 和 2.67mm/s。沿激光扫描的垂直方向切取试样, 在 Rigaku Rotaflex D/max α B X 射线衍射仪上进行 XRD 分析, 利用 SEM (型号为 JEOLJSM-5800 和 S-530, 装有 Oxford Link ISIS EDS 系统) 分析熔覆涂层的组织和物相成分, 显微硬度测试采用 HMP-3 型显微硬度计, 载荷为 200g, 加载时间为 10s。干滑动磨损试验在 MM-200 环块式磨损试验机上进行, 试样尺寸为 8mm ×

作者简介: 刘秀波 (1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事新材料工程和激光表面技术领域的科研与教学工作。

E-mail: liuxiubo@zzti.edu.cn

收稿日期: 2004-10-25; 收到修改稿日期: 2005-05-25

10mm ×10mm,对磨环为淬火低温回火的45#钢,硬度为HRC(53 ±3)。试验条件为法向载荷98N,对磨环旋转速度为400r/min,滑动行程为2.21 ×10³m。采用称重法,用感量为10⁻⁴g的分析天平称取试样磨损失重(所有结果均为3个试样的平均值),用相对耐磨性作为评定试样耐磨性高低的标准,相对耐磨性为原始试样磨损失重和熔覆涂层磨损失重的比值。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

利用NiCr-50%Cr₃C₂混合合金粉末对TiAl合金进行激光熔覆所获复合材料涂层的组织,实际上是在高能激光束的照射下,预涂NiCr, Cr₃C₂原料合金粉末溶解,基体TiAl合金表面熔化,形成Ni-Cr-C-TiAl-Nb合金化熔池,合金化熔池在随后激光束前移之后主要依靠外界空气的辐射传热和基体材料的热传导作用快速凝固而最终形成γ-Cr₃C₂-TiC高温耐磨抗氧化复合材料激光熔覆涂层。其中基体γ为具有优良强韧性及抗氧化性能的NiCrAl过饱和镍基固溶体。该涂层物相组成和形成机理,文献[5]和文献[6]中已经做过详细讨论。

图1为TiAl合金预涂NiCr-50%Cr₃C₂粉末在不

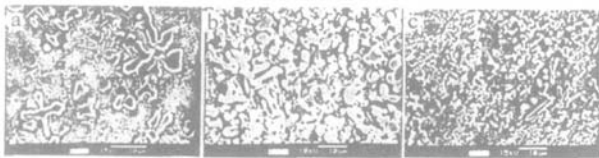


Fig 1 SEM microstructure comparison of laser cladding composite coatings on TiAl alloy as function of laser beam scan-rate
a-1.50mm/s b-2.00mm/s c-2.67mm/s

同的激光束扫描速度下所形成的复合涂层中部的典型组织。观察发现,不同扫描速度下,激光熔覆涂层的显微组织虽基本相同,主要都是由初生较规则块状Cr₃C₂和Cr₃C₂之间的层片状或菊花状γ/Cr₃C₂共晶以及少量粒状或树枝状TiC所组成,但由于不同的扫描速度意味着试样表面所吸收的热量和随后的凝固冷却速度不同,因而其显微组织也有其自身的特点。图1a为扫描速度为1.50mm/s时熔覆涂层的典型显微组织,其初生Cr₃C₂较粗大,且初生Cr₃C₂之间的层片状或菊花状γ/Cr₃C₂共晶组织特征明显,TiC亦呈较发达树枝状;图1c为扫描速度为2.67mm/s时熔覆涂层的典型显微组织,可见,初生Cr₃C₂相细化,初生Cr₃C₂之间的γ/Cr₃C₂共晶含量减少,TiC呈细小颗粒状。从凝固与晶粒形核生长的机制来分析,当激光束扫描速度较慢时,激光束在试样表面停留的时间长,表面吸收热量多,同时基材被熔化得也较多,因而合金化熔池中具有更高的Ti,Al含量,在相同的传热条件下,冷却

速度较慢,晶粒生长时间长,因而初生相Cr₃C₂较粗大,初生相之间的γ/Cr₃C₂共晶组织含量较多,共晶特征也较明显,因化合生成的TiC亦呈较发达树枝状;随着扫描速度的增大,激光束与材料的交互作用时间缩短,试样表面单位面积接收的能量少,凝固时的温度梯度大,凝固冷却速度高,形核率高及生长速度快,同时基材被熔化得较少,合金化熔池中的Ti,Al含量相对较低,因而凝固时初生相Cr₃C₂细小,TiC呈细小颗粒状,整个涂层的组织相对细小均匀。

2.2 硬度

在不同的扫描速度条件下,激光熔覆涂层的显微硬度提高情况有所差别。在3种不同的扫描速度下,TiAl合金预涂NiCr-50%Cr₃C₂合金粉末激光熔覆涂层显微硬度的分布趋势基本上是类似的,只是显微硬度提高的幅度有所不同而已。从3条曲线对比可知,其变化的总体趋势是当扫描速度较慢时,熔覆涂层的硬度较低,而靠近涂层-基材结合区附近时变化趋势较平缓,当扫描速度较快时,熔覆涂层的硬度较高,而至涂层-基材结合区附近硬度急剧下降。尤其是当扫描速度为最高的2.67mm/s时,这种现象表现得十分明显,如图2所示,这种现象符合激光熔覆处理基体传热和

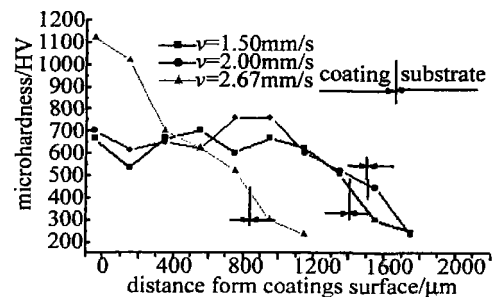


Fig 2 Microhardness profiles of the laser cladding composite coatings as function of the laser scan-rate with the NiCr-50%Cr₃C₂ precursor mixed powder

熔化后冷却结晶的普遍规律。当激光束扫描速度分别为1.50mm/s,2.00mm/s和2.67mm/s时,熔覆涂层的平均显微硬度分别为HV603,HV666和HV780,可见,随着激光束扫描速度的提高,熔覆涂层的显微硬度有一直提高的趋势,其可能的原因是:在预涂NiCr-50%Cr₃C₂合金粉末厚度相同的条件下,快的扫描速度缩短了激光束与材料的相互作用时间,在随后的凝固过程中,冷速相应较快,所形成的Cr₃C₂,TiC的生长时间短,最终得到的组织比较细小均匀,细小均匀的组织有利于其硬度和韧性的提高,也就是说快的扫描速度可能造成熔覆涂层显微硬度的相应提高,因而使得激光熔覆涂层具有如图2所示的显微硬度分布情形。从图2也可清楚地看出,快的激光束扫描速度由于光束与试样表面相互作用的时间较短而导致熔覆涂层的厚度明显下降。

2.3 耐磨性

TiAl合金预涂 NiCr-50% C_FC₂合金在不同扫描速度下激光熔覆涂层的室温干滑动磨损相对耐磨性分别为 1.15, 1.90, 1.52 (对应的激光束扫描速度分别为 1.50mm/s, 2.00mm/s, 2.67mm/s)。可见, 预涂 NiCr-50% C_FC₂合金粉末激光熔覆涂层的耐磨性, 在扫描速度为 2.00mm/s 时为最好。一般地, 材料的硬度在很大程度上体现了该材料的耐磨性能, 随着扫描速度的增加, 熔覆涂层内的组织逐渐变得细小, 同时熔覆层内固溶体的过饱和度明显增加, 起到了固溶强化的作用, 这些都不同程度地提高了熔覆涂层的硬度; 这也使得在相对较低的扫描速度范围, 随着扫描速度的提高, 涂层的耐磨性也随之提高。继续增大扫描速度, 在本文中的扫描速度范围内, 整个熔覆涂层内的增强相 C_FC₃, TiC 呈更加均匀细小的分布状态, 这无疑会进一步增加该熔覆涂层的硬度值; 但有资料表明^[9], 在以轻微显微切削为主导机制的磨损条件下, 初生碳化物的过分细化, 尽管涂层的硬度提高, 但过细的碳化物导致其在磨损过程中抵抗显微切削的能力降低, 使得其优异的抗磨作用不能得到应有的发挥, 因而表现为在 $v=2.67\text{mm/s}$ 的扫描速度下得到的熔覆涂层的耐磨性反而比 $v=2.00\text{mm/s}$ 的扫描速度下得到的熔覆涂层有所下降。

3 结论

激光束扫描速度对 γ -TiAl合金预涂 NiCr-50% C_FC₂混合粉末激光熔覆复合材料涂层组织与耐磨性能有明显影响。随着激光束扫描速度的提高, 涂层显

微组织有逐渐细化的趋势, 显微硬度有所提高, 而涂层厚度则有所降低。在中等扫描速度下 (2.00mm/s) 获得的涂层具有最好的滑动磨损耐磨性。

参考文献

- [1] YE H Q. Recent developments in Ti₃Al and TiAl intermetallics research in China [J]. Material Science Engineering, 1999, A263: 289~295.
- [2] YANG R, CUI Y Y, DONG L M *et al* Alloy development and shell mould casting of gamma TiAl [J]. Journal of Material Processing Technology, 2003, 135: 179~188.
- [3] YOSHIMURA M, SUZUKI T, TANAKA R. Improvement of oxidation resistance for TiAl by surface treatment under a low partial pressure oxygen atmosphere and Al diffusion coatings [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 1991, 31: 1201~1206.
- [4] XU D, ZHANG Z, LIU X *et al* Improvement of oxidation resistance of TiAl by ion-beam-enhanced deposition coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 66: 486~494.
- [5] LIU X B, YU L G, WANG H M. Microstructure and properties of laser surface alloyed γ -NiCrAl/TiC/C_FC₃ composite coatings on γ -TiAl intermetallic alloy [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2001, 30 (3): 224~227 (in Chinese).
- [6] LIU X B. Laser cladding for high-temperature wear-resistant composite coatings on γ -TiAl alloy [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2001. 17 (in Chinese).
- [7] ZHANG W P, MA Y T, LU S H. Microstructural characterization of in situ formed composite coating produced by laser cladding [J]. Laser Technology, 2005, 29 (1): 38~39, 55 (in Chinese).
- [8] TIAN Y S, CHEN C Z, WANG D Y *et al* Analysis of the growth mechanism of TiC crystal and the mechanical properties of the laser alloyed layer on the surface of pure titanium [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 113~115, 137 (in Chinese).
- [9] WU X W, ZENG X Y, ZHU P D. Research on laser clad metal ceramics technology [J]. Metal Heat Treatment, 1992, 4: 40~43 (in Chinese).
- [10] MAKI A. Assignment of some DCN and HCN laser lines [J]. A P L, 1968, 12 (4): 122~124.
- [11] BRUNEAU J L, BELLAND P, VERON D. A CW DCN waveguide laser of high volumetric efficiency [J]. Opt Commun, 1978, 24: 259~264.
- [12] KOGELNIK H, LIT. Laser beams and resonators [J]. Proc IEEE, 1966, 54 (10): 1312~1329.
- [13] REBUFFIL, GREEN J P. Radiation patterns the H E₁₁ mode and Gaussian approximations [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10 (4): 291~311.
- [14] LIU H Q, GAO X, JIE Y X *et al* Optimization and maximum output power of CW DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25 (4): 649~655.
- [15] ASIF M, GAO X, JIE Y X *et al* Experimental study with LaB₆ cathode on DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25 (5): 809~813.
- [16] GAO L, GAO X, HU X W *et al* The beam property of DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25 (6): 891~895.

(上接第 66 页)

以得到稳定连续的高功率放电。光束传输远场满足高斯分布, 对各种参数进行优化后, 190 μm 和 195 μm 窗口处输出 EH₁₁ 模功率分别为 0.15W 和 0.16W。可以满足超导托卡马克连续运行的干涉测量的需要。

参考文献

- [1] RAN Y, LITQ, QN J Y. Realm and foreground of application of millimeter waves laser [J]. Laser Technology, 2000, 24 (6): 392~395 (in Chinese).
- [2] GAO X, LIU H J, GUO Q L *et al* Infrared laser diagnostics on the HT-6M tokamak [J]. Rev Scient Instrum, 1995, 66 (1): 139~142.
- [3] JIE Y X, GAO X, LIU H Q *et al* Design of CW high-power discharge-pumped DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 24 (12): 2079~2083.
- [4] VERON D. Infrared and millimeter waves [M]. New York: J L Brunau, 1979. 67~135.
- [5] VERON D, BELLAND P, BELLAND M J. Continuous 250mW gas discharge DCN laser at 195 μm [J]. Infrared Physics, 1978, 18 (5): 465