

激光熔覆 TiC 增强镍基熔覆层的 微观组织与耐磨性研究^①

王志东¹, 张佳豪², 王明静², 刘二勇²

(1.中国石化长庆油田分公司 物资供应处(物资管理部),陕西 西安 710016; 2.西安科技大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要: 选择微纳尺度 TiC 为增强相、镍粉为基体粉,利用激光熔覆技术制备 TiC 增强镍基熔覆层,考察了 TiC 对熔覆层微观结构和耐磨性的影响。结果表明,镍基熔覆层组织以 γ -Ni 和 TiC 为主;高 TiC 含量时易引起熔覆层顶部 TiC 偏聚;随着 TiC 含量增加,熔覆层的硬度逐渐增大且表层硬度升高更为明显;三体磨损实验结果表明,复合熔覆层的耐磨性随着 TiC 含量升高而降低,表明冲击载荷下脆性增强相不利于提升熔覆层的耐磨性。

关键词: 激光熔覆; 镍基熔覆层; TiC; 微观组织; 耐磨性能

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.030

文章编号: 0253-6099(2023)01-0137-04

Microstructure and Wear Resistance of TiC Reinforced Ni-Based Coating by Laser Cladding

WANG Zhidong¹, ZHANG Jiahao², WANG Mingjing², LIU Eryong²

(1. Material Supply Department (Material Management Department) of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: With micro-nano TiC as reinforcing phase and nickel powder as matrix powder, a TiC reinforced Ni-based coating was fabricated by laser cladding technology, and the effect of TiC on microstructure and wear resistance of the coating was investigated. The results show that Ni-based coating has its microstructure predominately composed of γ -Ni and TiC, and a high content of TiC is prone to cause TiC segregation at the top of coating. With the increase of TiC content, coating will have its hardness increase gradually, especially have an obvious improvement in the surface hardness. A three-body wear test shows that the wear resistance of this composite coating decreases as TiC content increases, indicating that the brittle reinforcement phase is not conducive to improving wear resistance of the coating under impact load.

Key words: laser cladding; Ni-based coating by laser cladding; TiC; microstructure; wear resistance

激光熔覆是随着大功率激光器的发展而兴起的新型表面改性技术,该技术采用激光束把选定的材料熔覆到基体表面,使零件具有高硬度、良好的耐热、耐磨损、耐腐蚀和抗氧化等性能^[1-4]。自该技术问世以来,熔覆粉末一直是激光熔覆技术的研究热点,目前已从自熔性合金粉末发展到陶瓷粉末和复合粉末等^[5]。相较于自熔性合金熔覆层,金属陶瓷熔覆层一般具有

优异的硬度、耐蚀等性能,这与陶瓷相的种类、含量等密切相关^[6]。因此,研发新型熔覆粉末体系是促进激光熔覆技术快速发展的有效途径之一^[7-9]。

在 WC、Cr₂C₃、TiC 等众多陶瓷增强相中,TiC 不仅具有极高硬度和优异热稳定性,还与铁、镍等金属具有良好的相容性,成为金属-陶瓷熔覆层的重要增强相^[10-13]。文献[14-15]制备了 TiC 增强复合熔覆层,发

① 收稿日期: 2022-08-12

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021SF-469);国家自然科学基金(51705415)

作者简介: 王志东(1968—),男,陕西西安人,主要从事矿产多元化利用研究。

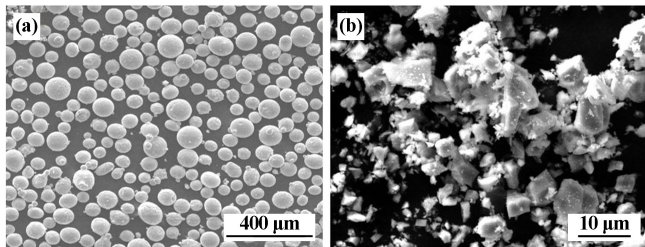
通信作者: 刘二勇(1982—),男,陕西西安人,博士,副教授,主要从事金属表面工程、腐蚀与摩擦学研究。

现熔覆层中 TiC 具有细化晶粒、提高显微硬度和耐磨性的特性。文献[16]表明低能量脉冲下可以直接熔覆制备出含大量 TiC 颗粒的熔覆层,显著提高熔覆层的显微硬度和耐磨性;但低脉冲能量只能促进钛粉和石墨中形成少量 TiC,熔覆层性能没有明显提高。虽然 TiC 增强熔覆层的组织演变、力学性能和耐磨性能等研究取得了一定成果,但仍需深化 TiC 增强复合熔覆层的研究。本文选择 TiC 粉末和 Ni 粉末为原材料,利用激光熔覆技术制备了不同 TiC 含量的镍基熔覆层,研究 TiC 增强相对熔覆层微观组织和耐磨性的影响,以期阐明 TiC 对复合熔覆微观组织的影响,研发出具有优异耐磨性能的 TiC 增强镍基熔覆层,促进激光熔覆技术的快速发展。

1 实验

1.1 实验材料

选用 Ni 粉(北矿新材料科技有限公司,99.90%)和 TiC 粉(广州金属冶金有限公司,99.99%)为熔覆粉末,其微观结构见图 1。Ni 粉为规则的球状颗粒,粒径范围 50~100 μm ;TiC 粉为不规则形态的微纳尺度颗粒,粒径范围 0.5~20 μm 。利用行星式球磨机配制 Ni/TiC 复合粉末,TiC 的质量分数分别为 0、5%、10%和 15% (分别命名为 Ni、Ni-5TiC、Ni-10TiC 和 Ni-15TiC)。



(a) Ni 粉; (b) TiC 粉

图 1 粉末的微观形貌

1.2 熔覆层的制备

选用调质态 45 钢为基材,首先利用线切割将 45 钢加工成 160 mm×100 mm×20 mm 试样;随后对试样表面进行磨削加工和清洗,备用。利用激光熔覆技术制备 TiC 增强镍基复合熔覆层,熔覆工艺为:输出功率 2 300 W、扫描速度 4 mm/s、搭接率 40%、送粉方式为铺粉。熔覆结束后,利用线切割制备不同尺寸的测试样品,进行打磨、抛光处理后,再用超声波清洗、冷风机吹干,备用。

1.3 熔覆层的表征

利用 XRD-7000X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的相组成;利用 JSM-6390A 型扫描电镜(SEM)观察熔

覆层纵截面微观组织形貌;利用 HVS-1000A 显微维氏硬度仪测试熔覆层显微硬度,测量 3 次取平均值;利用 MMH-5 环块三体摩擦磨损试验机测试熔覆层耐磨性,每隔 10 min 测量样品质量变化,通过质量变化评价熔覆层耐磨性,测试 3 次取平均值。磨损测试后,利用扫描电镜观察磨损表面和截面形貌,分析磨损机理。

2 实验结果与讨论

2.1 镍基熔覆层微观组织

图 2 为不同 TiC 加入量镍基熔覆层的 XRD 图。镍基熔覆层以 γ -Ni 为主,且 TiC 衍射强度随着 TiC 加入量增多而增强,说明 TiC 增强镍基熔覆层的物相仍以 γ -Ni 和 TiC 为主。说明激光熔覆过程中 TiC 未与 Ni 基体发生反应,而保持了稳定的物相组成,这有助于提高复合熔覆层的力学性能。

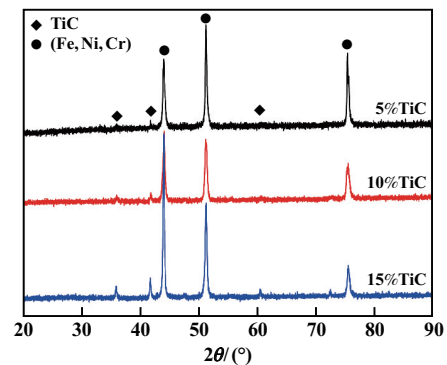
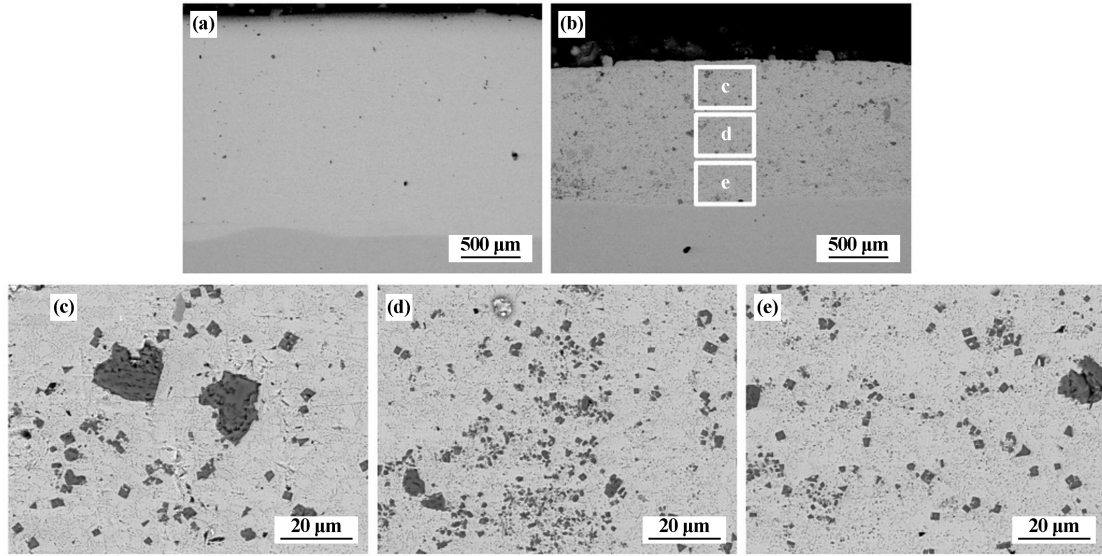


图 2 熔覆层的 XRD 图谱

图 3 为不同含量 TiC 增强镍基熔覆层的截面组织形貌。可以看到,TiC 增强熔覆层出现了黑色弥散点状区域;熔覆层较为致密,且在熔覆层与热影响区结合处有一条清晰的结合线,表明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合。进一步分析镍基熔覆层中 TiC 增强相的演变行为,以 15%TiC 增强镍基熔覆层作为研究对象,分别对熔覆层上、中、下部进行放大观察,结果如图 3(c)~(e)所示。TiC 增强镍基熔覆层存在深度方向的组织不均匀性。熔覆层上部分布着大尺寸的不规则块状黑色 TiC 颗粒,熔覆层中下部的 TiC 颗粒尺寸和数量减少,且呈弥散分布在 Ni 基体中。究其原因,熔覆过程中熔池的冷却主要依赖于基体传导热,进而导致熔覆层上部处于高温的时间长,为 TiC 颗粒及共晶的生长提供了充足的时间;另外在凝固冷却过程中由于 TiC 的低密度、高熔点等特点,在熔池顶部可以依靠自身特性(低密度)和异质颗粒(未溶解的 TiC)快速形核与长大,随后熔池中剩余液相依靠晶核表面的过冷度形核长大^[17]。



(a) Ni-5TiC; (b) Ni-15TiC; (c) Ni-15TiC 上部; (d) Ni-15TiC 中部; (e) Ni-15TiC 底部

图 3 TiC 增强镍基熔覆层截面形貌

2.2 熔覆层显微硬度

图 4 为不同 TiC 含量镍基激光熔覆层截面显微硬度变化曲线。随着 TiC 含量从 5% 增加到 15%, 熔覆层的显微硬度呈上升趋势。TiC 质量分数为 5%、10% 和 15% 时熔覆层的最高硬度分别为 311.2、431.6 和 572.3 (HV_{0.3})。常规瓦特镀镍涂层的硬度约为 160 ~ 180HV。可见 TiC 增强相的加入对提高镍涂层的硬度作用显著。一般来说, 材料的硬度越高, 耐磨性越好, 间接反映 TiC 有望改善镍基熔覆层的耐磨性。基体热影响区显微硬度出现明显升高, 原因在于激光熔覆的热输入使基材温度显著升高, 并通过随后的快速冷却形成了淬硬现象, 导致热影响区硬度明显上升。

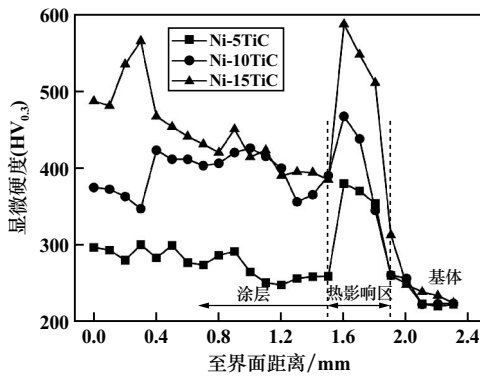


图 4 不同 TiC 含量镍基熔覆层截面显微硬度变化曲线

2.3 熔覆层三体磨损实验

图 5 为不同 TiC 含量镍基熔覆层的三体磨损实验结果。随着磨损时间增加, 所有样品的磨损失重都增加; 随着 TiC 含量增多, 镍基复合熔覆层的磨损率呈现

先增大后降低的变化规律, 尤其是 Ni-10TiC 的磨损失重高达 600 mg; Ni-5TiC 熔覆层的磨损失重随着时间延长显著增高, 磨损时间 30 min 时的 Ni-5TiC 熔覆层磨损失重明显升高, 也间接反映 TiC 的分布存在纵向不均匀现象。因此, TiC 增强镍基熔覆层的耐磨性不仅与 TiC 的含量密切相关, 还取决于 TiC 的分布。

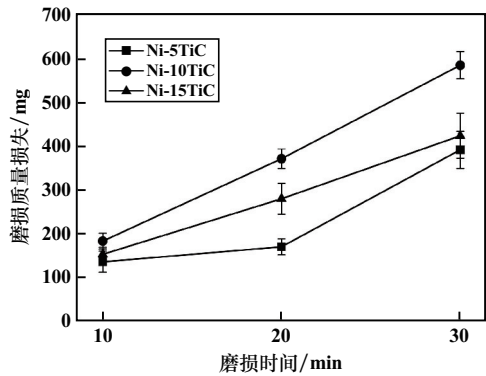
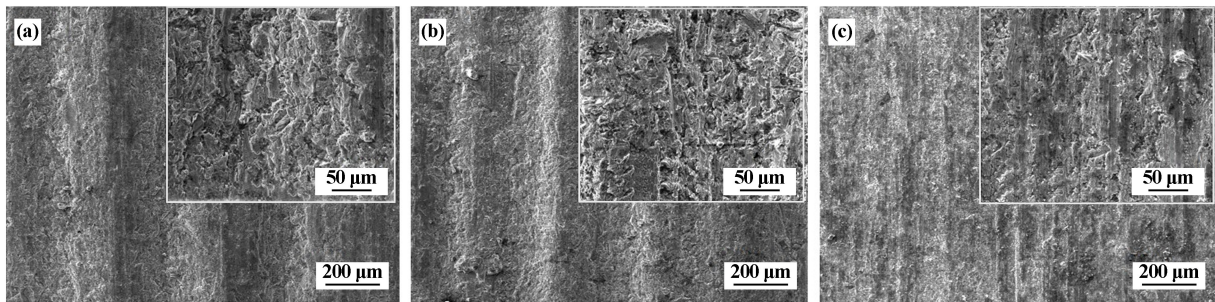


图 5 不同 TiC 含量镍基熔覆层的三体磨损质量损失

图 6 为 TiC 增强镍基熔覆层的三体磨损形貌图。随着 TiC 含量增加, 镍基复合熔覆层表面的犁沟变得更细小。Ni-5TiC 和 Ni-10TiC 的犁沟明显; 而 Ni-15TiC 的熔覆层磨损面较光滑, 仅出现轻微切削, 剥落和犁沟痕迹较浅, 其耐磨性较好, 磨损机制为磨粒磨损。从图 6(a) ~ (c) 右上角的高倍 SEM 照片看到, 在磨粒作用下, 含量较少的 TiC 不足以支撑起基体抵抗高硬度磨料的侵入, 在熔覆层表面犁出一条条沟壑, 切削后的磨屑堆积在沟壑两旁, 形成犁皱。在磨损中后期, 磨料继续作用于熔覆层表面, 将堆积起的磨屑

重新压平,磨料也会在犁沟隆起的脊梁处再次遭到犁沟变形,如此反复,材料表面发生反复塑性变形,出现疲劳磨损面,使材料表面局部发生撕裂和脱落,

此时的磨损机制为疲劳磨损和磨粒磨损。Ni-10TiC 磨损表面犁沟较深,耐磨性较差,对熔覆层耐磨性提升不强。



(a) Ni-5TiC; (b) Ni-10TiC; (c) Ni-15TiC

图6 不同TiC含量镍基熔覆层三体磨损表面形貌

2.4 小结

综上所述,利用激光熔覆技术可制备出TiC弥散分布的镍基熔覆层,且熔覆层中TiC出现明显的顶部偏聚分布现象;镍基复合熔覆层的三体耐磨性与TiC含量及分布密切相关,因此,适宜的TiC含量与TiC均匀分布能有效改善镍基熔覆层的耐磨性。

3 结论

1) TiC增强镍基熔覆层主要由 γ -Ni和TiC组成,且TiC增强存在深度方向的组织不均匀性,高含量TiC易引起镍基复合熔覆层顶部TiC偏聚现象。

2) 随着TiC含量增加,镍基熔覆层的显微硬度呈上升趋势,并且热影响区因快速升温、降温出现了淬硬性。

3) 在三体磨损工况下,TiC增强镍基熔覆层的磨损失重随TiC含量增加呈先升高后降低的变化规律,磨损机理以磨粒磨损和疲劳磨损为主,表明适量的TiC可有效改善镍基熔覆层的耐磨性。

参考文献:

- [1] 袁庆龙,冯旭东,曹晶晶,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 材料导报, 2010(3):112-116.
- [2] Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S F. Laser cladding[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [3] ZHU L, XUE P, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021,138:106915.
- [4] 谭米雪,王臻,赵风君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):202-206.
- [5] 董世运,马运哲,徐滨士,等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006,20(6):5-9.
- [6] Muvvala G, Karmakar D P, Nath A K. Online assessment of TiC decomposition in laser cladding of metal matrix composite coating[J].

Materials & Design, 2017,121:310-320.

- [7] Yakovlev A, Bertrand P, Smurov I. Laser cladding of wear resistant metal matrix composite coatings[J]. Thin Solid Films, 2004,453:133-138.
- [8] Candel J, Amigó V, Ramos J, et al. Sliding wear resistance of TiCp reinforced titanium composite coating produced by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2010,204(20):3161-3166.
- [9] 李聪玮,刘泽,王明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):149-152.
- [10] GUO C, CHEN J, ZHOU J, et al. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2012,206(8-9):2064-2071.
- [11] Barbosa M, Bischoff R, Strauß W, et al. Less CO₂ and Fine Dust Emissions in Automotive: High-power laser cladding as a cost-effective rotor coating solution[J]. Photonics Views, 2020,17(4):46-49.
- [12] 王东生,田宗军,沈理达,等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2013,32(6):538-544.
- [13] 吕品回,王小锋,董翠鸽,等. 增强体表面镀钛对SiCP/Al2014复合材料组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):156-160.
- [14] Ertugrul O, Enrici T M, Paydas H, et al. Laser cladding of TiC reinforced 316L stainless steel composites: Feedstock powder preparation and microstructural evaluation[J]. Powder Technology, 2020,375:384-396.
- [15] ZHU H, OUYANG M, HU J, et al. Design and development of TiC-reinforced 410 martensitic stainless steel coatings fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2021,47(9):12505-12513.
- [16] ZHANG Z, WANG X, ZHANG Q, et al. Fabrication of Fe-based composite coatings reinforced by TiC particles and its microstructure and wear resistance of 40Cr gear steel by low energy pulsed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2019,119:105622.
- [17] 陈刚,黎向锋,左敦稳,等. 基于有限元的激光熔覆凝固过程分析[J]. 中国机械工程, 2012,23(4):468-473.

引用本文:王志东,张佳豪,王明静,等. 激光熔覆TiC增强镍基熔覆层的微观组织与耐磨性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):137-140.