

Co800 基激光熔覆/重熔增强多物相 复合层组织及耐磨性能

李嘉宁^{1,2,3,4}, 徐连勇^{1,2}

(1.天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350; 2.天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350; 3.山东建筑大学 材料科学与工程学院, 济南 250101; 4.济南森峰激光科技股份有限公司, 济南 250107)

摘要: **目的** 增强钛合金表面耐磨损性能。**方法** 采用激光熔覆与激光重熔技术在 TC4 钛合金表面制备 Co800-Si₃N₄-YPSZ (Y₂O₃ 部分稳定 ZrO₂) 与 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs (单层氧化石墨烯薄片) 复合层, 并对熔覆层及重熔层微观组织结构、元素分布及耐磨损性能进行分析。**结果** 细晶强化作用改善了 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 熔覆层的耐磨性。激光重熔后, 在熔池快速冷却过程中产生了非晶-纳米晶相, 促进了多物相重熔层形成。MGOSs 受热分解释放了 C, 在熔池中原位生成了 Ti(CN)。 **结论** 含有 Ti₅Si₃、TiN 及 TiC 等多种硬质增强相的 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 熔覆层的摩擦因数较 TC4 的摩擦因数降低, 其磨损体积约为 TC4 磨损体积的 1/7。

关键词: 激光; 钛合金; 显微组织; 磨损性能; 表面改性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.022

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0186-07

Microstructure and Wear Resistance of Co800 Based Clad/Re-melt Multi-phase Composite Layer

LI Jia-ning^{1,2,3,4}, XU Lian-yong^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 4. Jinan Senfeng Laser Technology Co., Ltd., Jinan 250107, China)

ABSTRACT: The work aims to strengthen the wear resistance of titanium alloy surface. Co800-Si₃N₄-YPSZ (yttria partially stabilized zirconia) and Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs (monolayer graphene oxide sheet) composite layers were prepared on the TC4 titanium alloy by laser cladding/re-melting technology and the microstructure, element distribution and wear resistance of the clad/re-melt layers were analyzed. The wear resistance of Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs clad layer was enhanced by the fine

收稿日期: 2022-09-09

Received: 2022-09-09

作者简介: 李嘉宁 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进轻质材料焊接及激光精密加工。

Biography: LI Jia-ning(1982-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: welding and laser precision process of the advanced light materials.

通讯作者: 徐连勇 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为焊接接头腐蚀、焊接结构强度与断裂及高温蠕变等。

Corresponding author: XU Lian-yong (1975-), Male, Doctor, Professor, Research focus: the research on corrosion behaviors, strength and fracture of welded structures and the high temperature creep of the welded joints.

引文格式: 李嘉宁, 徐连勇. Co800 基激光熔覆/重熔增强多物相复合层组织及耐磨性能[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 186-192.
LI Jia-ning, XU Lian-yong. Microstructure and Wear Resistance of Co800 Based Clad/Re-melt Multi-phase Composite Layer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 186-192.

grain strengthening. The amorphous and nanocrystalline phases were produced under an action of the rapid cooling rate of a laser induced pool after laser re-melting process, promoting the formation of multi-phase re-melt layer. MGOSs released C due to thermal decomposition in the laser induced pool, forming Ti(CN) by in-situ reaction. The friction coefficient of Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs clad layer is lower than that of TC4 due to the formation of the reinforcement phases such as Ti₃Si₃, TiN, TiC, etc., so the wear volume loss is about 1/7 of that of TC4.

KEY WORDS: laser; titanium alloy; microstructure; wear resistance; surface modification

激光熔覆是一种被广泛研究并应用的表面改性技术, 涉及化学、材料科学、光电等众多科学领域, 近年来得到国内外诸多学者的认可与关注^[1-2]。激光束具有高能密度, 可使陶瓷、合金粉末与基体之间产生冶金结合进而形成良好的熔覆层, 实现金属表面性能的提升。高能激光束、基体和粉末三者之间的相互作用可有效降低稀释率且获得缺陷较少、组织均匀致密的激光熔覆层。激光熔覆技术具有十分广阔的发展前景及工业应用价值^[3]。TC4 属 (α+β) 型钛合金, 具有良好的耐腐蚀及热稳定性, 诸多涉及焊接结构、形状复杂的钛合金制造零件在航空航天领域被广泛使用, 工业领域对这类钛合金各项性能有着极高要求, 如 TC4 耐磨损性能仍有待进一步提高^[4-6]。

Co800 粉末的合金元素主要有 Co、Mo、Cr、Si、Fe、Si 的加入可增加合金粉末的润湿性, Fe 和 Cr 等元素的存在可有效提高激光熔覆层的硬度及耐磨性^[7]。Co800 粉末具有良好的热稳定性, 在熔覆过程中无明显变化, 这有利于形成组织结构致密的熔覆层。YPSZ 陶瓷具备高强度和优良韧性, 可有效增强熔覆层的组织性能^[8]。MGOSs 中含有大量—C—O 及—COOH 等含氧官能团, 在高能激光束作用下会在高温熔池中分解产生大量 O 及 C 元素, C、O 元素与 Ti 元素通过激光熔池中的原位反应生成 TiC、Ti—O 等硬质相, 有利于改善激光熔覆层的耐磨损性^[9]。文中采用预置涂层法将 Co 基混合粉末熔覆于 TC4 钛合金表面, 研究高温熔池中多物相的产生对 Co800-Si₃N₄-YPSZ 与 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 复合层组织及摩擦磨损性能的影响。

1 试验

以 TC4 钛合金为试验基材。试验材料如下: 合金粉末 Co800 (纯度 ≥ 99.5%, 粒度为 50 μm)、Si₃N₄ (纯度 ≥ 99.5%, 粒度 50 μm)、YPSZ (纯度 ≥ 99.5%, 粒度 50 μm) 以及 MGOSs 去离子水溶液 (纯度 ≥ 99.5%, MGOSs 尺寸为 0.4~2.0 μm, 厚度为 0.8~1.2 nm)。其中 Co800 的化学成分如表 1 所示。合金粉末成分配比为 88Co800-10Si₃N₄-2YPSZ (质量分数, 记为试样 1) 和 88Co800-10Si₃N₄-2YPSZ-MGOSs (质量分数, 记为试样 2)。对尺寸为 10 mm×10 mm×

10 mm 的 TC4 钛合金试样表面进行机械清理, 去除表面氧化膜及杂质, 将 Co800-Si₃N₄-YPSZ 与水玻璃黏着剂 (Na₂O·nSiO₂) 混合涂覆于试样表面, 厚度为 0.8 mm, 自然风干 (试样 1); 将 MGOSs 去离子水溶液与水玻璃溶液按体积比 1:3 混合, 再经超声处理混合均匀后滴到打磨后的 TC4 表面, 风干后循环涂覆至 MGOSs 层, 厚度约 0.5 mm, 后将 Co800-Si₃N₄-YPSZ 与水玻璃黏着剂混合均匀涂覆于 MGOSs 层表面, 厚度为 0.5 mm, 形成 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 预置层 (试样 2)。用高功率光纤激光加工系统 (YLS-10000, IPG Photonics) 进行多道激光熔覆, 工艺参数如下: 激光功率为 1 000 W, 激光直径为 4 mm, 扫描速度为一恒定值, 采用氩气保护, 气流速率为 24 L/min。熔覆后对试样进行研磨抛光处理, 激光重熔参数与熔覆参数保持一致, 采用质量分数为 5% 的氢氟酸对试样进行腐蚀。采用扫描电子显微镜 (JSM-6700F) 和高分辨率透射电子显微镜 (Titan 80-300) 对熔覆层及重熔层显微结构进行分析, 采用 MM-200 磨损设备在室温下测试熔覆层在干摩擦条件下的磨损体积损失量, 所用摩擦副为 20%Co-WC 合金 (质量分数, 硬度 ≥ 80HRA), 转速为 400 r/min; 隔 10 min 记录熔覆层及 TC4 基材的磨损体积损失量, 测试时间为 50 min。

表 1 Co800 化学成分

Tab.1 Chemical composition of Co800

						wt. %
C	Cr	Si	Fe	Mo	Ni	Co
0.08	18.00	3.40	1.50	28.50	1.50	Bal.

2 结果与分析

2.1 组织结构

试样 1 和试样 2 的熔覆层组织形貌如图 1 所示。由图 1a 可知, 熔覆层与基材表面产生了良好的冶金结合, TC4 钛合金呈明显外延生长模式, 多种熔质作用产生了成分过冷, 形成了垂直于熔合线生长的树枝晶; 择优生长和散热方向决定着晶粒长大方向, 由于散热方式不同, 熔覆层中部树枝晶无固定的生长方向, 生长呈多方向性^[10]。Co800 具有良好的热稳定性,

可促进 Mo 元素扩散,有效提高了原子间结合力,起细化晶粒、增强熔覆层的作用^[11]。有大量块状析出物于熔覆层中部产生,如图 1b 所示。

Si_3N_4 在高温熔池中分解并与 Ti 发生反应,易形成 Ti_5Si_3 及 TiN ;块状 Ti_5Si_3 与树枝状 TiN 附于熔覆层基底上,相互抑制彼此生长,这利于组织细化^[12]。在激光熔覆过程中,YPSZ 在激光熔池中发生高温分解,形成细小球状物并在熔池凝固后弥散分布于熔池中,有效细化了熔覆组织。 Y_2O_3 具有钉扎效应,可使系统吉布斯自由能和晶粒生长驱动力降低, Y_2O_3 易在晶界和位错处偏析,这利于形成组织结构致密的激光熔覆层^[13]。混合粉末不均匀的收缩及膨胀可导致熔覆层产生大量热应力,较为混乱的合金体系使晶界处产生位错、空位及偏析等缺陷,且 TiN 内部产生的微裂纹可有效分散主裂纹能量,在一定程度上抑制裂纹扩展^[14]。由图 1c 可知,MGOSs 的加入使熔覆层底部产生六边形网状组织,并与熔覆层上部的树枝状组织呈明显分层现象。MGOSs 具有较高熔点,在激光熔覆过程中并未完全熔化,仍保持六边形结构,在熔池凝固后形成六边形网状组织。MGOSs 比碳纳米管具有更好的分散性,与 $\text{Co800-Si}_3\text{N}_4\text{-YPSZ}$ 中部分元素发生化学反应从而增强了熔覆层的耐磨

损性。Ti 在熔覆层中上部与 Si_3N_4 反应生成树枝状 TiN ,可进一步提升熔覆层硬度。如图 1d 所示,由于热量不均匀,在熔覆层中部产生了树枝晶和细小块状晶,两者相互抑制生长从而细化了组织结构^[15]。图 2 为试样 1 激光熔覆层的 XRD 衍射图谱,该熔覆层相组成包括 Ti_5Si_3 、 TiN 等,且在 $40^\circ\sim 47^\circ$ 附近出现了宽化漫散射峰,可判定熔覆层由非晶相与晶化相组成^[16]。

图 3 为试样 2 熔覆层中部 SEM 像与对应 EDS 图。可以看到,诸多树枝状及块状组织在该区域形成,MGOSs 的存在抑制了缺陷产生,改善了 TC4 的表面性能。由于激光熔覆热量较集中,MGOSs 受热分解与 Ti 反应生成 Ti-C 硬质相。激光熔池的急冷特性使物相在熔池凝固前无法充分结晶而形成大量非晶相^[17]。过量硬质相和非晶相的存在导致熔覆层产生应力集中,在一定程度上增大了裂纹产生倾向。熔覆层中部元素分布图表明,Ti 和 N 在枝晶处含量明显增多,说明在此处生成了 Ti-N 陶瓷相,C 均匀分布于熔覆层中,凭借原子扩散作用与 N、Ti 反应生成了 $\text{Ti}(\text{CN})$,提升了激光熔覆层硬度,大量 Si 在激光熔覆层中利于非晶-纳米晶相等多物相生成^[18]。

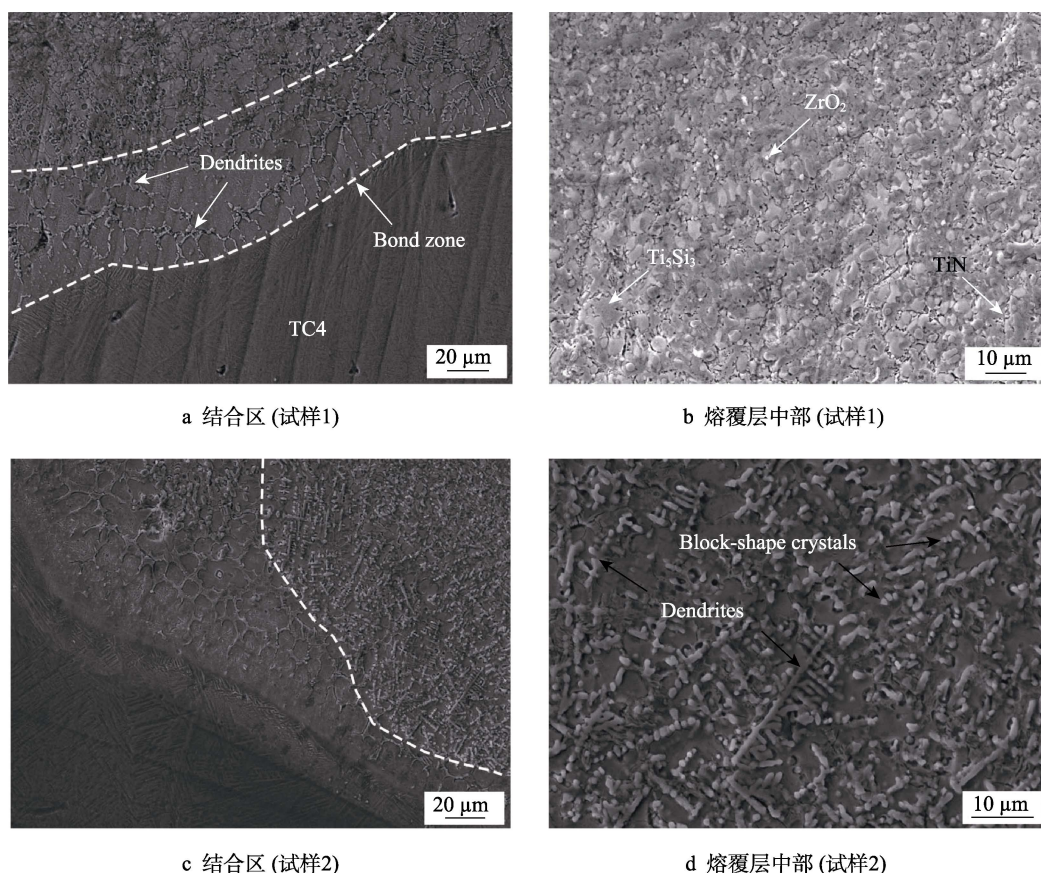


图 1 试样 1 和试样 2 的熔覆层组织形貌

Fig.1 Microstructure and morphology of the clad layer of sample 1 and sample 2: a) bond zone (specimen 1); b) middle of clad layer (specimen 1); c) bond zone (specimen 2); d) middle of clad layer (specimen 2)

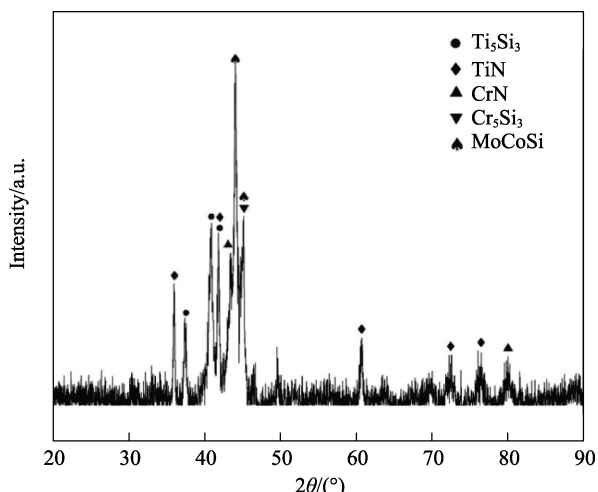


图 2 试样 1 激光熔覆层 XRD 衍射图谱
Fig.2 XRD pattern of the clad layer of specimen 1

2.2 激光重熔复合层组织结构

图 4 为试样 2 激光重熔层结合区 SEM 像与对应 EDS 图。可知, TC4 与重熔层冶金结合良好, 与图 1c 相比, 重熔层下部组织更为均匀致密, 枝晶组织得到进一步细化并形成弥散分布的细小晶粒, 且无明显气孔及裂纹等缺陷生成。未熔化粗大颗粒在激光重熔的高温作用下熔化并在熔池中充分流动, 形成组织细小、表面平整的重熔层。接近 TC4 基材的热影响

区受热充分生长, 形成了粗大枝状晶。由于 TC4 基材对熔池的稀释作用, Ti 进入熔池并通过原位反应增强了重熔层性能。由于激光重熔冷却速度较快, N 的扩散能力强于 Si 的, 易产生富 N 区, 大部分 Si 分布在重熔层中, 增加了原子堆积密度, 进一步增强了过冷液相的稳定性。由于 Si 与 MGOSs 中 C 原子半径相似, 两者相互扩散, 可有效促进 Si-C 非晶相生成。

试样 2 激光重熔复合层 HRTEM 图如图 5 所示。从图 5a 可观察到层错及位错核的作用, 原子在高温熔池中获得大量能量, 增大了体系混乱度与自由能, 非晶-纳米晶界面处较高的结合能导致应力产生, 利于晶格畸变形成, 在一定程度上阻碍了位错的滑移变形, 增强了激光熔覆复合层的耐磨性能^[19-20]。从图 5b 可观察到纳米晶组织, 由于熔池急冷过程中存在亚稳相, 阻碍了晶粒形核及生长, 导致纳米晶生成, 在其作用下点缺陷密度和晶界自由能增加, 高表面自由能促进了晶格畸变产生^[21]。由于组分间原子混乱程度增加, 降低了系统吉布斯自由能, 利于纳米晶生成, 非晶相的形成是由于固液界面能提高和形核驱动力降低, 在不同原子偏析作用下阻碍了晶体形核, Y_2O_3 分布在熔池中也可有效抑制晶化相生长, 且激光熔池中 Co 基合金的加入利于非晶相生成^[22]。非晶无位错的紧密堆积结构阻碍了原子间的相对运动, 对重熔层起显著增强作用。

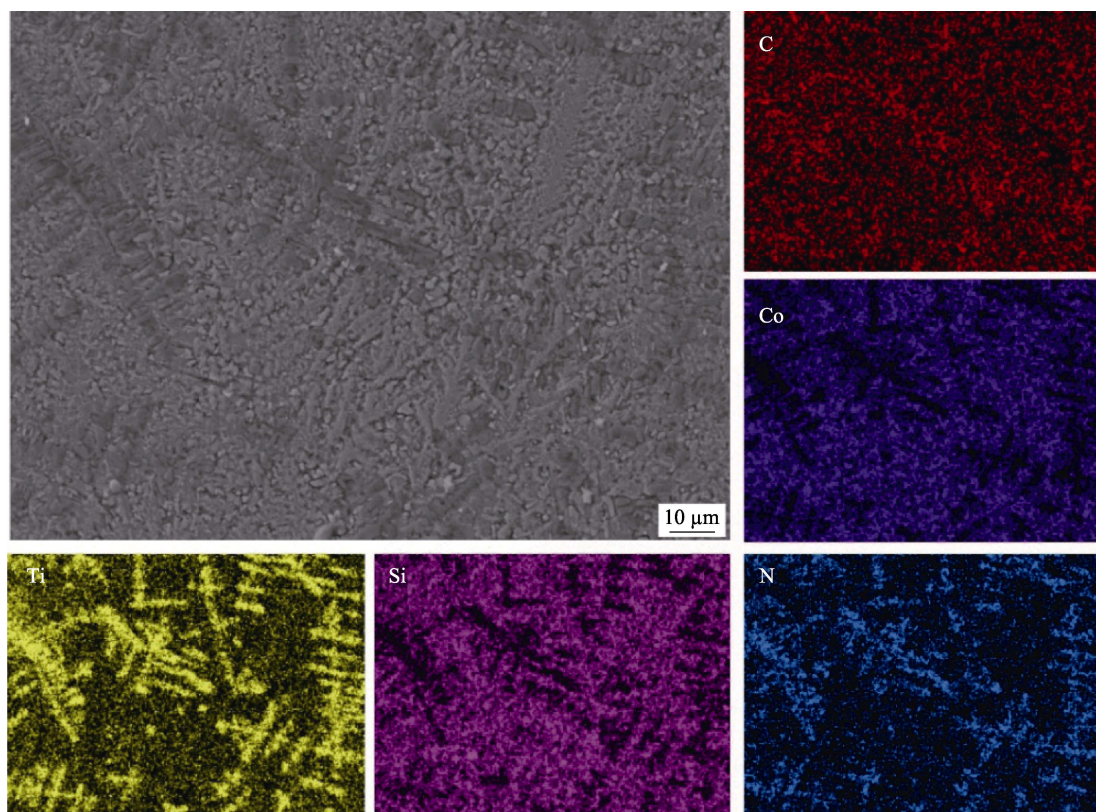


图 3 试样 2 熔覆层中部 SEM 像与 EDS 图
Fig.3 SEM image and EDS diagram of the middle of the clad layer of specimen 2

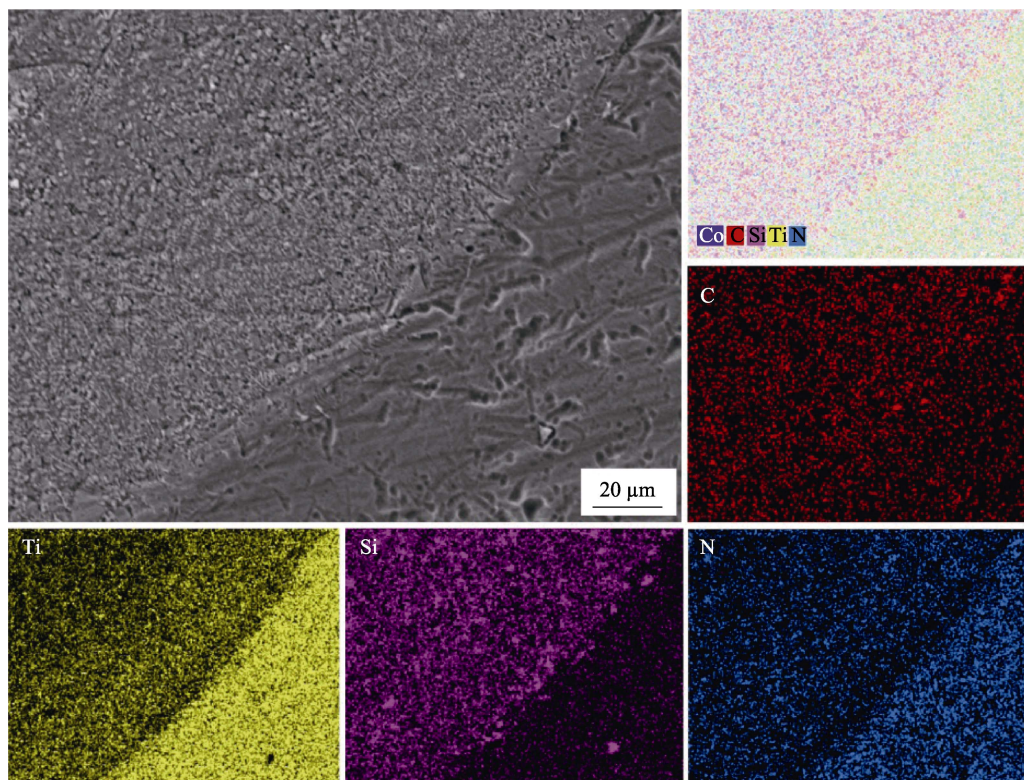
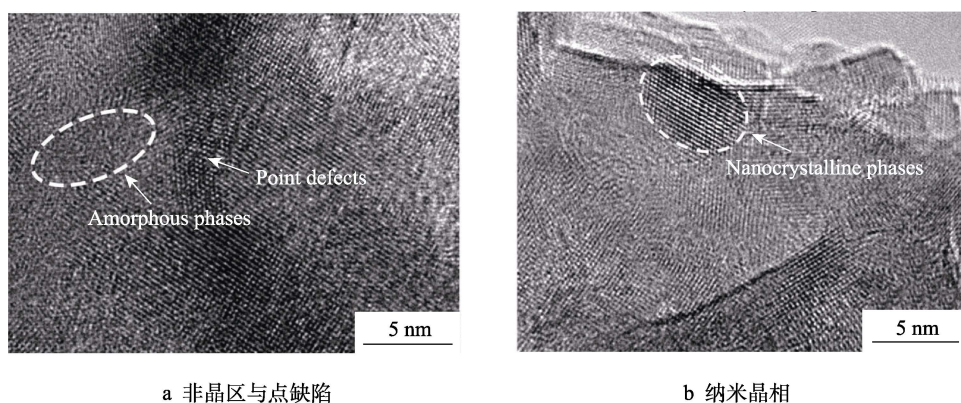


图 4 试样 2 激光重熔层结合区 SEM 像与 EDS 图

Fig.4 SEM image and EDS diagram of the bond zone of the remelt clad layer of specimen 2



a 非晶区与点缺陷

b 纳米晶相

图 5 试样 2 激光重熔层 HRTEM 图

Fig.5 HRTEM diagram of the remelt clad layer of specimen 2: a) amorphous zone and point defects; b) nanocrystalline phase

2.3 激光熔覆复合层耐磨损性能

当载荷为 98 N、干滑动摩擦 50 min 时,各试样(基材、试样 1 和 2 中的激光熔覆层)在相同条件下体积损失量随磨损时间的变化如图 6a 所示。由于 TC4 钛合金硬度低、摩擦因数大,摩擦副在摩擦磨损过程中易切入基材,10 min 后的磨损体积损失量达 13.61 mm^3 ,随着磨损时间增加,磨损体积持续增大,摩擦性能变差。50 min 时,试样 1 磨损体积约为 TC4 基材的 1/5,原位反应生成的具有高硬度及高弹性模量的块状 Ti_5Si_3 和树枝状 TiN 增强相可抵抗施加载荷的剪切应力,通过 TC4 钛合金传递载荷并分散应力,从而减小熔覆层磨损体积^[23]。在摩擦磨损试验过程中

生成了 Co 的氧化物,其分布在 Co-WC 摩擦副与熔覆层之间,减少了摩擦副对激光熔覆层的犁削作用,并通过自身的低剪切强度降低了摩擦因数,表现出良好的自润滑特性^[24]。YPSZ 的加入促进了晶粒细化,细晶强化作用增强了熔覆层的耐磨性能。

Ti 与 C 有很强的亲和力,Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 熔覆层中 Ti 与 MGOSs 的结合形成了分散均匀的高硬度细小 TiC,显著阻碍了 C 扩散,TiC 第二相强化作用使熔覆层无法发生大尺度变形,从而减少了剥落的发生,使摩擦表面平整,降低了磨粒磨损情况,增强了熔覆层的耐磨性能。温度梯度和表面张力梯度引起 Marangoni 对流,促进了激光熔池中 Ti、N 和 C 原子的重新排列,根据 TiC-TiN 相图推测形

成了高度稳定的 $\text{Ti}(\text{CN})$, 在摩擦副磨损过程中在一定程度上阻碍了塑性变形并减少了剪切应力^[25]。部分碳化物由于熔池急冷现象转变为比表面积较大且沿晶界分布的球状组织, 显著降低了激光熔覆层的界面能进而减少了磨损体积^[26]。非晶-纳米晶相的产生获得了表面平整的熔覆层, 对塑性变形起阻碍作用, 通过提高熔覆层显微硬度及降低摩擦因数可有效减少磨损体积, 50 min 后试样 2 熔覆层磨损体积约为 TC4 基材的 1/7。

图 6b 表明, TC4 钛合金与 Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 熔覆层的摩擦因数 (μ) 随接触载荷的增加而减小, 如式 (1) 所示。

$$\mu = AS/P \quad (1)$$

式中: A 为接触面积; S 为剪切应力; P 为接触载荷。随着接触载荷 P 增大, 材料表面摩擦因数减小, 与试验所得结论相符。随着干摩擦试验的进行, 具有密排六方及体心立方结构 TC4 的表面温度升高, 发生氧化反应生成 TiO_2 等润滑相, 接触载荷的增大使位错密度增加, 降低了 TC4 的摩擦因数。试样 2 中 Ti-Si-C 化合物及非晶-纳米晶等硬质相生成了细化熔覆层组织结构。表面微凸体颗粒发生了塑性变形, 增大了摩擦副与激光熔覆复合层表面间实际

接触面积, 减少了磨粒磨损的发生从而进一步降低了激光熔覆层的摩擦因数。

3 结论

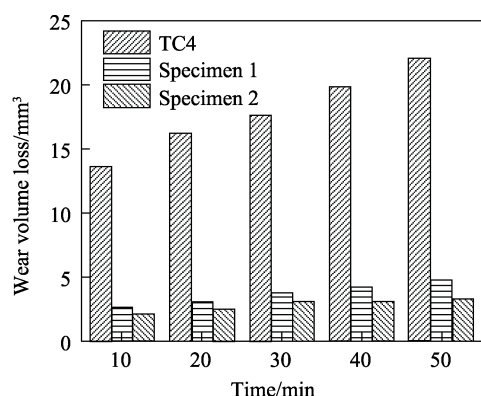
1) 在 Co800-Si₃N₄-YPSZ 激光熔覆复合层中生成了块状 Ti_5Si_3 及树枝状 TiN , 组织结构得到了细化, 获得了均匀致密的复合层; MGOSs 的加入通过原位反应生成了 Ti-C 硬质相, 在激光熔池中, C、N 通过原子扩散与 Ti 反应生成 $\text{Ti}(\text{CN})$, 进一步增强了复合层的耐磨性能。

2) Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 熔覆层经激光重熔后组织进一步细化, 在激光熔池急速冷却作用及较高原子混乱度下促进了晶格畸变的产生; Y_2O_3 抑制了熔池中晶粒的生长, 表现出多物相性, 激光重熔复合层为非晶、纳米晶及其他晶化相共存。

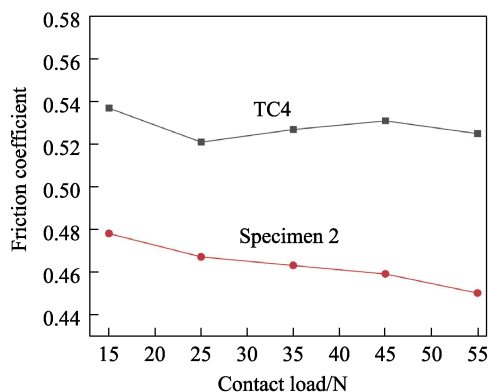
3) 在 TiC、TiN 等陶瓷增强相及非晶-纳米晶等相的综合作用下, Co800-Si₃N₄-YPSZ-MGOSs 激光熔覆复合层耐磨性能增强, 熔覆层摩擦因数降低; 经载荷 98 N、50 min 干滑动摩擦试验后, 熔覆层摩擦因数降低, 磨损体积约为 TC4 的 1/7。

参考文献:

- [1] ZHAO Y, FENG K, YAO C W, et al. Effect of MoO_3 on the Microstructure and Tribological Properties of Laser-Clad Ni60/NanoCu/h-BN/ MoO_3 Composite Coatings over Wide Temperature Range[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 387: 125477.
- [2] 曾嘉怡, 练国富, 褚梦雅, 等. 激光熔覆原位合成 TiC 成形工艺参数优化方法[J]. 精密成形工程, 2022, 14(6): 101-110.
ZENG Jia-yi, LIAN Guo-fu, CHU Meng-ya, et al. Laser Cladding In-Situ Synthesis of TiC Forming Control Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(6): 101-110.
- [3] REN W B, ZHUANG B L, LEI W N, et al. Microstructure and Performance Evolution of Ti-6Al-4V Alloy Coating by Laser Cladding and Laser Shocking Composite Remanufacture[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107342.
- [4] YANG W L, HE X J, LI H P, et al. A Tribological Investigation of SLM Fabricated TC4 Titanium Alloy with Carburization Pre-Treatment[J]. Ceramics International, 2020, 46: 3043-3050.
- [5] QI C Q, ZHAN X H, GAO Q Y, et al. The Influence of the Pre-Placed Powder Layers on the Morphology, Microscopic Characteristics and Microhardness of Ti-6Al-4V/WC MMC Coatings during Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105572.
- [6] JIAO J K, ZOU Q, YE Y Y, et al. Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and TC4 Alloy Laser



a 体积损失量随磨损时间变化



b 摩擦因数随载荷变化曲线

图 6 试样 1、2 激光熔覆层与 TC4 磨损性能

Fig.6 Wear resistance of the clad layers of specimens 1, 2 and TC4: a) function of relationship between wear volume loss and time; b) function of relationship between friction coefficient and contact load

- Assisted Joining with the Metal Surface Laser Plastic-Covered Method[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 213: 108738.
- [7] ZHANG J Q, LEI J B, GU Z J, et al. Effect of WC-12Co Content on Wear and Electrochemical Corrosion Properties of Ni-Cu/WC-12Co Composite Coatings Deposited by Laser Cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 393: 125807.
- [8] 白杨, 王振华, 左娟娟, 等. 激光熔覆制备铁基复合涂层及其耐热耐蚀性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 38-44.
- BAI Yang, WANG Zhen-hua, ZUO Juan-juan, et al. Fe-Based Composites Prepared by Laser Cladding and Its Heat/Corrosion Resistance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 38-44.
- [9] YAN Q, CHEN B, LI J S. Super-High-Strength Graphene/Titanium Composites Fabricated by Selective Laser Melting[J]. *Carbon*, 2021, 174: 451-462.
- [10] YE Z Y, LI J N, LIU L Q, et al. Microstructure and Wear Performance Enhancement of Carbon Nanotubes Reinforced Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding on Titanium Alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106957.
- [11] LIU C C, LIU Z D, GAO Y, et al. Investigation on the Corrosion Behavior of Ni-Cr-Mo-W-xSi Laser Cladding Coating in H₂S Corrosion Environment[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 578: 152061.
- [12] AKILAN A A, GOKCE A, NATH S D, et al. Laser Powder Bed Fusion of In-Situ Composites Using Dry-Mixed Ti6Al4V and Si₃N₄ Powder[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 43-50.
- [13] XI L X, DING K, GU D D, et al. Interfacial Structure and Wear Properties of Selective Laser Melted Ti/(TiC+TiN) Composites with High Content of Reinforcements[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 870: 159436.
- [14] YAN G H, ZHENG M Y, YE Z H, et al. In-Situ Ti(C,N) Reinforced AlCoCrFeNiSi-Based High Entropy Alloy Coating with Functional Gradient Double-Layer Structure Fabricated by Laser Cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 886: 161252.
- [15] 徐连勇, 高雅琳, 赵雷, 等. Hastelloy X 激光熔覆工艺及组织性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(S1): 357-361.
- XU Lian-yong, GAO Ya-lin, ZHAO Lei, et al. Laser Cladding Technology and Microstructure Properties of Hastelloy X[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S1): 357-361.
- [16] 黄海博, 孙文磊, 黄勇. 超高速激光熔覆 Fe 基非晶合金单道工艺分析[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 410-419.
- HUANG Hai-bo, SUN Wen-lei, HUANG Yong. Analysis on the Process of Single Track Fe Based Amorphous Alloy during Ultra High Speed Laser Cladding[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 410-419.
- [17] XIAO M Y, JIANG F C. Microstructural Evolution of Fe-Based Amorphous Alloy Coatings via Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding[J]. *Materials Letters*, 2022, 322: 132520.
- [18] 董文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的影响[J]. *金属学报*, 2020, 56(9): 1265-1274.
- TONG Wen-hui, ZHANG Xin-yuan, LI Wei-xuan, et al. Effect of Laser Process Parameters on Microstructure and Properties of TiC Reinforced Co-Based Laser Cladding Layer[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(9): 1265-1274.
- [19] ZHANG L W, SU M L, QI X, et al. Laser Cladding of Ceramics Reinforced Ni-Base Amorphous/Nanocrystalline Composites[J]. *Lasers in Engineering*, 2020, 45(1/2/3): 167-175.
- [20] LI J N, CRAEGHS W, JING C N, et al. Microstructure and Physical Performance of Laser-Induction Nanocrystals Modified High-Entropy Alloy Composites on Titanium Alloy[J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 363-370.
- [21] SU M L, LI J N, WANG X G, et al. Amorphous/Nanocrystallization of TiN-TiB₂ Reinforced Laser Clad Composites[J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26: 1950057.
- [22] LIU X B, BI J Z, MENG Z Y, et al. Tribological Behaviors of High-Hardness Co-Based Amorphous Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. *Tribology International*, 2021, 162: 107142.
- [23] LI B Y, HAN C J, VIVEGANANTHAN P, et al. Refined Microstructure and Ultrahigh Mechanical Strength of (TiN+TiB)/Ti Composites In-Situ Synthesized via Laser Powder Bed Fusion[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2022, 3: 100082.
- [24] 王振生, 张孟恩, 杨双双, 等. NiAl-7.5Cr-2.5Ta-5Co 合金的室温摩擦磨损性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(8): 1909-1914.
- WANG Zhen-sheng, ZHANG Meng-en, YANG Shuang-shuang, et al. Friction and Wear Properties of NiAl-7.5Cr-2.5Ta-5Co Alloy at Room Temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(8): 1909-1914.
- [25] ZHAO Y, ZHANG T Q, CHEN L Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-C-TiN-Reinforced Ni204-Based Laser-Cladding Composite Coating[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(5): 5918-5928.
- [26] 刘政军, 李东芮, 王文欣, 等. TiN 对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织及耐磨性影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 15-19.
- LIU Zheng-jun, LI Dong-rui, WANG Wen-xin, et al. Effect of TiN on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 15-19.