

激光与光电子学进展

Cr12 模具钢 Fe50-TiC 复合激光熔覆层的形貌、组织和力学性能

王乾廷^{1,2,3}, 曾宪斌^{1,2,3}, 陈昌荣^{4*}, 练国富⁴, 黄旭⁴, 王彦⁵

¹福建工程学院材料科学与工程学院, 福建 福州 350118;

²福建省新材料制备与成形技术重点实验室, 福建 福州 350118;

³福建省精确成型制造工程研究中心, 福建 福州 350118;

⁴福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

⁵英国布莱顿大学计算、工程与数学学院, 英国 布莱顿 BN2 4AT

摘要 针对模具表面易磨损失效的问题, 本文采用同步送粉激光熔覆技术在 Cr12 模具钢表面制备了一系列 Fe50-TiC 复合熔覆层, 并利用扫描电镜 (SEM)、显微硬度计、摩擦磨损试验机对熔覆层的微观组织、气孔率、显微硬度及耐磨性能进行分析, 探索 TiC 含量对 Fe50-TiC 熔覆层的影响规律。研究结果表明: 随着 TiC 含量的增加, 复合熔覆层的显微硬度逐渐增大, 耐磨性随之增强, 但气孔率也呈增大的趋势, 未熔 TiC 颗粒增多, 基于颗粒形核生长的组织增多; 当 TiC 的质量分数为 35% 时, 熔覆层的气孔率有所下降, TiC 以溶解形核生长的树枝晶为主, 熔覆层的平均显微硬度 (46.3 HRC) 约为基体的 2.4 倍, 磨损体积约为基体的 13%。采用 Fe50-35%TiC 复合粉末制备的 Fe50-TiC 熔覆层具有较优的综合性能。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 显微组织; 显微硬度; 耐磨性; 气孔率

中图分类号 TG174.442

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714002

Morphology, Microstructure, and Mechanical Properties of Fe50-TiC Composite Laser Cladding Layer on Cr12 Mold Steel

Wang Qianting^{1,2,3}, Zeng Xianbin^{1,2,3}, Chen Changrong^{4*}, Lian Guofu⁴, Huang Xu⁴, Wang Yan⁵

¹College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

²Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Materials Processing and Application, Fuzhou, Fujian 350118, China;

³Fujian Provincial Precision Processing Manufacturing Engineering Research Center, Fuzhou, Fujian 350118, China;

⁴School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

⁵School of Computing, Engineering & Mathematics, University of Brighton, Brighton, BN2 4AT, England

Abstract Aiming at the problem of easy wear and failure of the mold, a series of Fe50/TiC composite coatings

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2018L3001)、福建省教育厅高校领军人才项目 (2018-12)、第三批福建省特殊支持“双百计划”人才项目 (2018-5)、福建省教育厅中青年教师教育科研项目 (JAT170376)

*E-mail: changrong.chen@fjut.edu.cn

with different TiC mass fractions were prepared on the surface of Cr12 mold steel using coaxial laser cladding technology. The microstructure, porosity, microhardness, and wear resistance of the cladding layers were investigated using scanning electron microscopy (SEM), microhardness tester, and tribological tester to explore the effect of TiC content on the cladding layer. Results show that as the TiC content increases, the microhardness and the wear resistance of the composite cladding layer increase, but the porosity also exhibits an increasing trend. At the same time, the higher the TiC content, the more undissolved TiC particles in the cladding layer for nucleation, and the more the microstructure nucleating and growing based on particles. When the mass fraction of TiC was 35%, the porosity of the cladding layer decreased and grown dendrite TiC was observed owing to dissolution nucleation. The average microhardness (46.3 HRC) of the cladding layer was approximately 2.4 times that of the substrate, and the wear volume was approximately 13% of the substrate. Fe50-TiC cladding layer fabricated using Fe50-35% TiC exhibits better comprehensive properties.

Key words laser technique; laser cladding; microstructure; microhardness; wear resistance; porosity

OCIS codes 140.3390; 310.1515; 350.3850

1 引言

Cr12冷作模具钢以其高性价比、高硬度以及优良的淬透性和耐磨性,成为国内外使用最广泛的冷作模具钢之一^[1]。由于工件的变形抗力较大,Cr12钢冷作模具在工作过程中反复承受冲击与摩擦作用,因此需要具备较高的抗冲击性和耐磨性。传统的表面改性技术虽然能提高Cr12模具钢的表面性能,但是存在模具变形量大、表面易磨损及破坏等问题^[2-3]。

激光熔覆是一种重要的表面改性技术,它利用高能密度激光束快速熔凝基材表层使其与熔覆材料实现冶金结合,从而达到显著提升基材表面耐磨、耐蚀、抗氧化等性能的目的^[4-5]。利用激光熔覆技术制备金属陶瓷复合涂层,将金属的强韧性与陶瓷材料优异的耐磨、耐蚀、抗氧化等特性结合起来,是目前发展潜力巨大的一类表面改性方法^[6]。在诸多金属陶瓷复合材料中,Fe-TiC复合材料逐渐成为研究人员关注的焦点,其原因在于:1)铁基合金粉末与基体的热膨胀系数接近,界面结合牢固,成本低^[7];2)TiC陶瓷属面心立方晶型,具有密度低、熔点高、导热性好、硬度大、耐磨及耐蚀性好等优点。因此,激光熔覆铁基TiC陶瓷涂层具有广阔的应用前景^[8]。

许多学者研究了激光熔覆Fe-TiC复合涂层的力学性能,如:Khalili等^[9]采用激光熔覆技术在AISI 1024钢表面原位生成了Fe-TiC复合涂层,该涂层的显微硬度约为基体的8倍;Emamian等^[10]采用激光熔覆技术在AISI 1030碳钢表面制备了Fe-TiC复合涂层,对该涂层进行研究后发现,优化

激光熔覆工艺参数能够显著减少涂层表面的裂缝及气孔缺陷,且涂层硬度可达到基体的4倍;王植等^[11]采用激光熔覆技术在45钢表面制备了TiC质量分数不同的Fe-TiC复合涂层,对该熔覆层进行研究后发现,当TiC的质量分数为30%时,熔覆层的平均硬度为783.8HV,其磨损率为45钢基体的1/38;Zhang等^[12]采用激光熔覆技术在低碳钢表面制备了Fe-TiC-VC熔覆层,该熔覆层的硬度、耐蚀性与碳化物颗粒的尺寸成反比关系,且脉冲频率为5Hz时制备的熔覆层的硬度高、耐蚀性好;Rafiei等^[13]采用激光熔覆技术在AISI 1045钢表面制备了Fe-Ti-C-V熔覆层,对该熔覆层进行研究后发现,加入质量分数为5%的钒粉末可使熔覆层的硬度由51HRC增大到62HRC,并可使熔覆层的磨损量减少约60%;Li等^[14]采用激光熔覆技术在高碳钢表面制备了Fe-TiC-NbC涂层,结果发现,当Ti和Nb的物质的量比为1时,熔覆层的耐磨性最高。

由上述文献可知,通过激光熔覆制备Fe-TiC复合涂层确实能够大大提升基材表面的力学性能,因此利用Fe-TiC熔覆层实现表面改性及修复对于延长模具的服役寿命具有重要意义,但目前模具钢基材表面制备Fe-TiC复合涂层的研究还鲜见报道。鉴于此,本文采用激光熔覆技术在Cr12模具钢表面制备了Fe50-TiC复合涂层,以期揭示熔覆层微观组织、气孔率、硬度及耐磨性随TiC质量分数的变化规律,实现Cr12模具钢表面Fe50-TiC熔覆层形貌、组织和性能的控制与预测,有效指导Fe50-TiC复合熔覆工艺的实施。本研究成果能够有效解决模具表面磨损失效的问题,同时能为耐高温、耐磨、耐腐蚀合金熔覆层的制备提供参考。

2 试验设计

2.1 试验材料

以 Cr12 模具钢为基体材料,其规格为 $\phi 80 \text{ mm} \times$

20 mm。熔覆粉末选择成都华寅粉体科技有限公司生产的 Fe50($\rho=4.1 \text{ g/cm}^3$)、TiC($\rho=2.8 \text{ g/cm}^3$) 粉末,其形貌和化学成分分别如图 1 和表 1 所示(T. C 指的是粉末中碳的总含量,F. C 指的是游离碳含量)。

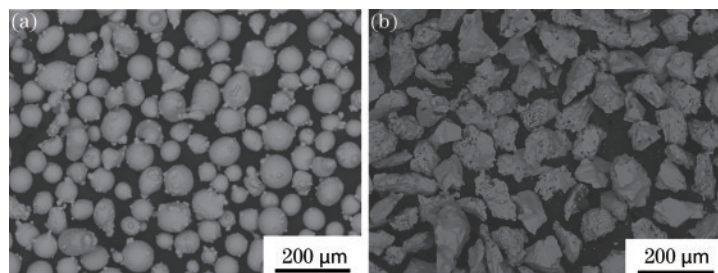


图 1 熔覆粉末的 SEM 图。(a)Fe50 粉末;(b)TiC 粉末

Fig. 1 SEM images of cladding powders. (a) Fe50 powder; (b) TiC powder

表 1 Fe50 与 TiC 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe50 and TiC powders

| Powder | Mass fraction / % | | | | | | | | | |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|------|
| | Cr | C | Mo | Si | O | Ni | Fe | N | T. C | F. C |
| Fe50 | 16.15 | 0.15 | 1.58 | 0.77 | <0.1 | 1.75 | Bal. | — | — | — |
| TiC | — | — | — | — | 0.5 | 0.08 | — | 0.5 | >18.8 | <0.5 |

2.2 试验条件

激光熔覆装置如图 2 所示,该装置由 YLS-3000 激光器、FDH0273 激光头(焦距 300 mm)、M710iC/50

工业机器人、CR-PGF-D-2 气流式送粉系统、TFLW-4000WDR-01-3385 冷水机组和 Leadshine 旋转工作台组成。

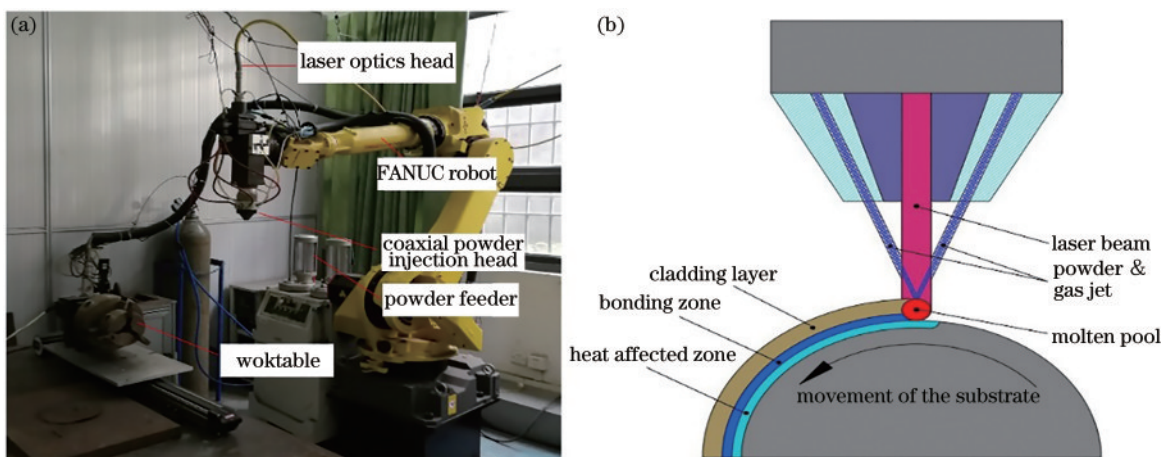


图 2 激光熔覆系统。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 2 Laser cladding system. (a) Photo; (b) schematic

熔覆前,先用丙酮将基体表面的油污清洗干净并用酒精擦拭,然后将其放入真空烘干机中烘干;熔覆粉末按一定的质量比进行配制,将配制好的粉末放入 YXQM-2L 球磨机进行混匀,时间为 2 h。混匀后,将配制好的粉末置于 120 °C 的真空烘干机中烘干 30 min。

试验所用工艺参数如下:激光功率 P 为 1500 W,

基体的旋转速度 S 为 8 mm/s,气体流量 f 为 1100 L/h。混合粉末中 TiC 的质量分数分别为 0%、5%、15%、25%、35%、45%、55%。选择压力为 0.5 MPa 的氩气作为保护气体。

熔覆后的样件经线切割、镶嵌、打磨、抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,然后采用 TM3030Plus 扫描电镜观察熔覆层横截面的显微组织;采用

MVA-402TS 显微硬度计进行硬度测试,加载载荷为 4.9 N,保荷时间为 30 s。取另一个样块,将其表面在磨床上磨平后,在 UMT-2 多功能摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验,试验参数如表 2 所示。

表 2 摩擦磨损试验参数

| Item | Content |
|---|------------------|
| Abrasive pair material | Tungsten steel |
| Diameter of abrasive pair /mm | 6 |
| Loading force /N | 35 |
| Friction speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) | 10 |
| Sliding distance /mm | 4 |
| Wear time /h | 1 |
| Friction mode | Reciprocating |
| Wear temperature | Room temperature |

试验后,熔覆层的性能分别用磨损体积(wear volume)、显微硬度(microhardness)和孔隙率(porosity,定义为熔覆层气孔面积与熔覆层面积之比)进行表征。

3 试验结果与讨论

3.1 熔覆层截面的宏观形貌

熔覆层截面的宏观形貌如图 3 所示。从图中可以明显看到,随着 TiC 质量分数的增加,熔覆层表面的未熔粉末含量逐渐增多。这是因为 TiC 的熔点(约为 3060 °C)较 Fe50(约为 1080 °C)高, TiC 粉末需要更多的能量才能熔融,而激光熔覆过程是个快冷快热的非平衡过程,随着 TiC 含量增多,部分 TiC 粉末不能及时熔融,从而导致熔覆层中的未熔粉末增多。

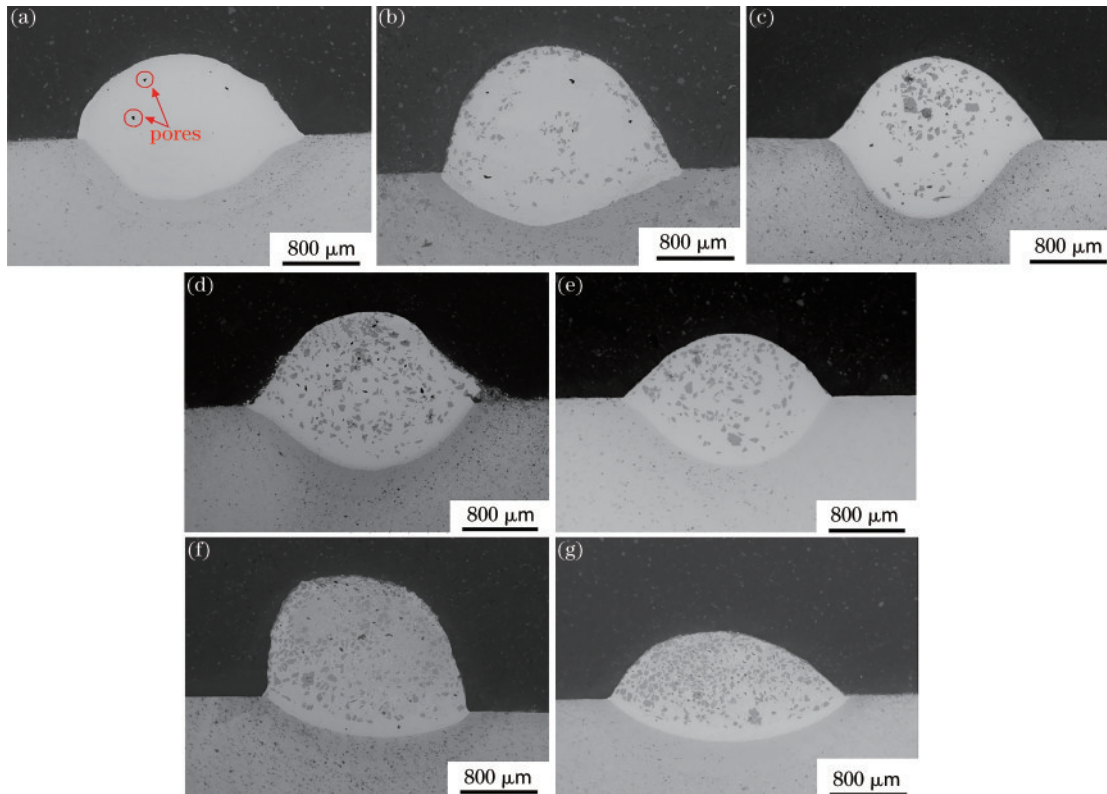


图 3 TiC 含量不同的熔覆层的截面形貌图。(a)不含 TiC;(b)TiC 质量分数为 5%;(c) TiC 质量分数为 15%;(d) TiC 质量分数为 25%;(e) TiC 质量分数为 35%;(f) TiC 质量分数为 45%;(g) TiC 质量分数为 55%

Fig. 3 Cross-sectional profile of laser layers with different TiC contents. (a) Without TiC; (b) mass fraction of TiC is 5%; (c) mass fraction of TiC is 15%; (d) mass fraction of TiC is 25%; (e) mass fraction of TiC is 35%; (f) mass fraction of TiC is 45%; (g) mass fraction of TiC is 55%

3.2 熔覆层的微观组织

图 4 为 TiC 含量不同的熔覆层截面的显微组织。TiC 粉末颗粒具有较高的耐磨性,因此,加入的 TiC 颗粒在熔覆过程中应尽量保持其原有的性能,同时应

与基体实现冶金结合。未添加 TiC(仅有 Fe50 粉末)时,熔覆层组织为较粗大的胞状晶^[15],如图 4(a)所示;当粉末中加入少量 TiC(加入 TiC 的质量分数为 5%~25%)时,熔覆层中的 TiC 颗粒分解后重新生长

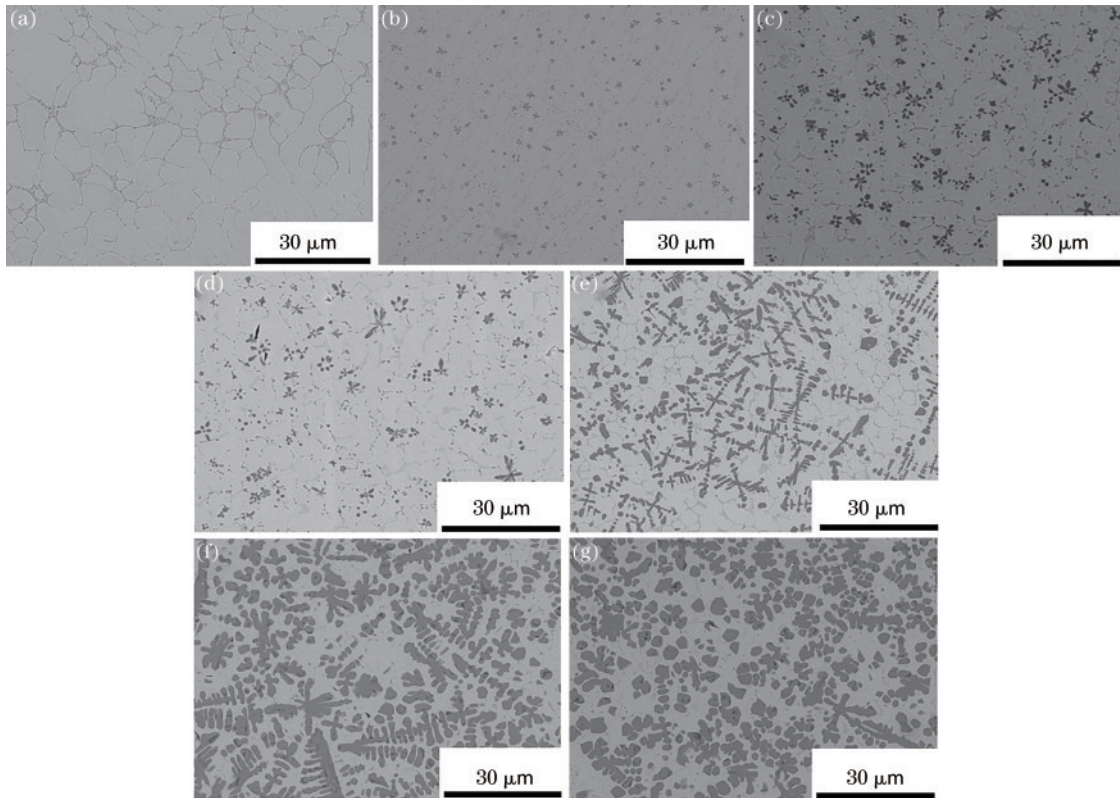


图 4 TiC 含量不同的熔覆层截面的显微组织。(a) 不含 TiC; (b) TiC 质量分数为 5%; (c) TiC 质量分数为 15%; (d) TiC 质量分数为 25%; (e) TiC 质量分数为 35%; (f) TiC 质量分数为 45%; (g) TiC 质量分数为 55%

Fig. 4 Microstructures of laser cladding layers with different TiC contents. (a) Without TiC; (b) mass fraction of TiC is 5%; (c) mass fraction of TiC is 15%; (d) mass fraction of TiC is 25%; (e) mass fraction of TiC is 35%; (f) mass fraction of TiC is 45%; (g) mass fraction of TiC is 55%

为花瓣状,且其分布较为均匀,如图 4(b)~(d)所示;随着 TiC 含量的增多,熔覆层中未熔的 TiC 颗粒增多,分解后生长的 TiC 呈树枝状或鱼骨状,如图 4(e)~(f)所示;继续增加 TiC 至其质量分数为 55% 时,熔覆层中树枝状 TiC 颗粒明显减少,未熔 TiC 颗粒明显增多且部分发生团聚现象,如图 4(g)所示。

随着 TiC 加入量的增加,熔覆层中 TiC 的显微组织发生了明显变化:当 TiC 质量分数较小时,激光能量足以熔化粉末中的 TiC 颗粒,TiC 在 Fe50 中重新形核生长,且由于过冷度较大,TiC 的形核率较高;随着粉末中 TiC 含量的增加,激光能量只能熔化 TiC 颗粒的表层,TiC 在 Fe50 中呈现为形核生长与颗粒增强并存的形态,且 TiC 基于未熔化颗粒形核生长的比例逐渐增多,形成细长的树枝晶;随着粉末中的 TiC 含量进一步增加,TiC 主要通过未熔化的颗粒形核生长,过冷度减小,多形成粗大的树枝晶以及残余的 TiC 颗粒^[16]。

3.3 熔覆层的显微硬度

图 5 为 TiC 含量不同的熔覆层的硬度在熔深方

向的分布。从图中可以看出,熔覆层横截面的显微硬度呈阶梯状分布。熔覆层的显微硬度(46.3 HRC)约为基体的 2.4 倍,且随 TiC 质量分数增加呈现增大的趋势(TiC 质量分数为 15% 和 45% 时显微硬度显著增加)。

熔覆层显微硬度的最大值在亚表层。表层的热传递快,熔池温度的最高点位于亚表层,而熔池的凝固

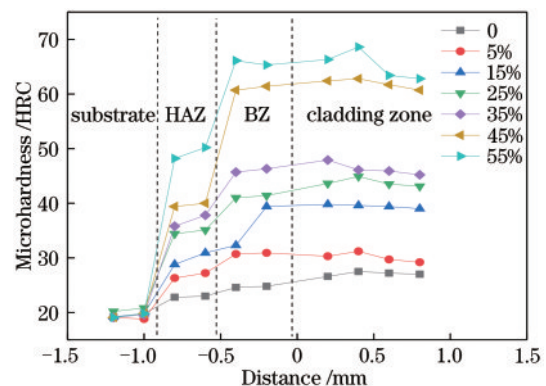


图 5 熔覆层的显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distributions of laser cladding layers

速率(R)由表至内逐渐减小,温度梯度(G)则逐渐增大, G/R 由表及里呈逐渐增大的变化趋势,晶粒尺寸逐渐变粗(亚表面的晶粒尺寸相对较细),因此显微硬度逐渐降低^[17-18](亚表面具有更高的显微硬度^[19])。

结合区(BZ)的显微硬度明显高于热影响区(HAZ),这是由熔覆粉末被基体稀释导致的。热影响区的硬度明显高于基体硬度,这是由熔池的淬火作用引起的。

3.4 熔覆层的磨损性能

图 6 为熔覆层的磨损体积对比图。可以直观地看出,在相同的磨损条件下,熔覆层的磨损体积明显小于基体的磨损体积,且随着 TiC 质量分数的增加而减小(TiC 质量分数为 0%、5%、15%、25%、35%、45%、55% 的熔覆层的磨损体积分别约为基体磨损体积的 42%、37%、33%、21%、13%、8% 和 6%),这说明增加 TiC 含量可以显著提高熔覆层的耐磨性。

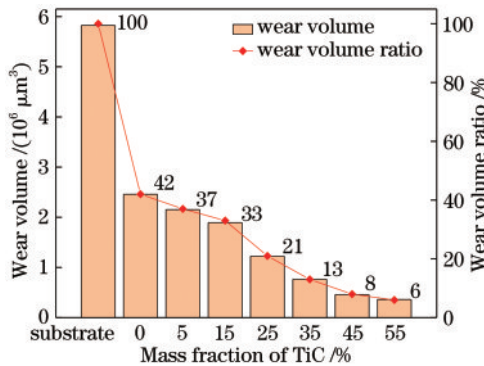


图 6 熔覆层的磨损体积

Fig. 6 Wear volume of cladding layers

由图 7 所示的摩擦因数曲线可知,在相同的磨损条件下,熔覆层的摩擦因数随着 TiC 质量分数的增大而减小,且明显低于基体的摩擦因数(基体的摩擦因数约为 0.71, TiC 质量分数为 0%、5%、15%、25%、35%、45%、55% 的熔覆层的摩擦因数分别约为 0.61、0.57、0.53、0.50、0.47、0.42、0.39),这说明增加 TiC 含量可以提升熔覆层的润滑性。

图 8 为基体与熔覆层磨损表面宏观对比图。从图中可以看出,随着 TiC 质量分数的增大,磨痕宽度逐渐减小。复合熔覆层的磨损形貌相似,主要由平行于滑动方向的细小犁沟和脆性剥落坑构成;随着 TiC 质量分数增大,熔覆层的剥落痕迹越来越明显。这是由于在磨损过程中较软的 α -Fe 受到磨球的微观切削作用形成犁沟,而 TiC 由于硬度较高,

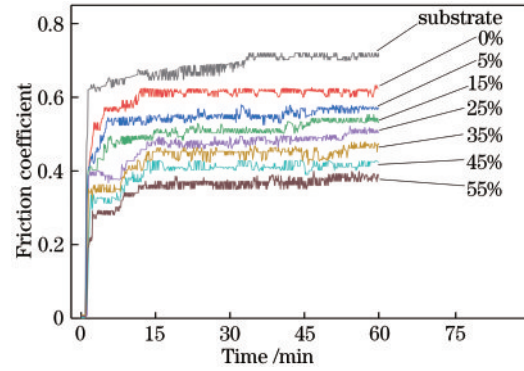


图 7 熔覆层的摩擦因数曲线

Fig. 7 Friction coefficient curves of laser cladding layers

可承受的外加载荷较大,对熔覆层起着保护作用,可以有效阻止切削作用。但是高硬度的 TiC 在高载周期性外力作用下,会产生疲劳磨损及应力集中,从而使其产生裂纹,最终从表面剥落^[20-22]。熔覆层中含量较多的 TiC 虽然可对熔覆层起到保护作用,但未熔 TiC 颗粒也会增多,而未熔 TiC 颗粒与熔覆层的结合力弱,加之摩擦过程中磨粒的作用增强,摩擦产生的热量增多,裂纹更容易产生,脆性剥落程度加剧^[23-25]。

3.5 熔覆层的气孔率

对图 3 所示的熔覆层图像进行分析,获得熔覆层的气孔率分布,如图 9 所示。从图中可以发现,随着 TiC 质量分数的增加,气孔率整体呈增大的趋势,最高气孔率为 1.3% 左右,此时 TiC 的质量分数为 55%。这是由于熔覆过程中的高能激光使 TiC 颗粒在熔融铁液中进行分解。由图 10 所示的 Fe-Ti-C 三元体系相图可知,温度为 1000 °C 时有石墨(C)相生成,在激光熔覆这一高速凝固的亚稳态下,TiC 周围会形成高 Ti、高 C 的熔池环境,进一步促进 C 相的形成,而 C 与保护气体中少量的 O₂ 发生反应就会生成 CO₂、CO 气体。熔池的快速凝固使得部分气体来不及逸出,从而滞留在熔覆层中形成气孔。随着 TiC 的含量增加,TiC 颗粒在高能激光作用下分解得到的 C 含量增多,熔覆过程中产生的气体也相应增多,因此熔覆层中的气孔率随着 TiC 添加量的增加而逐渐增大^[17]。当 TiC 的质量分数为 35% 时,气孔率有所降低,这是由于 TiC 颗粒在对流作用下的溶解速率大于分解速率,使得 C 原子含量降低,产生的含碳气体也相应减少,因此熔覆层中的气孔率相应降低^[26]。综上所述,当混合粉末中 TiC 的质量分数为 35% 时可以获得综合性能较优的熔覆层。

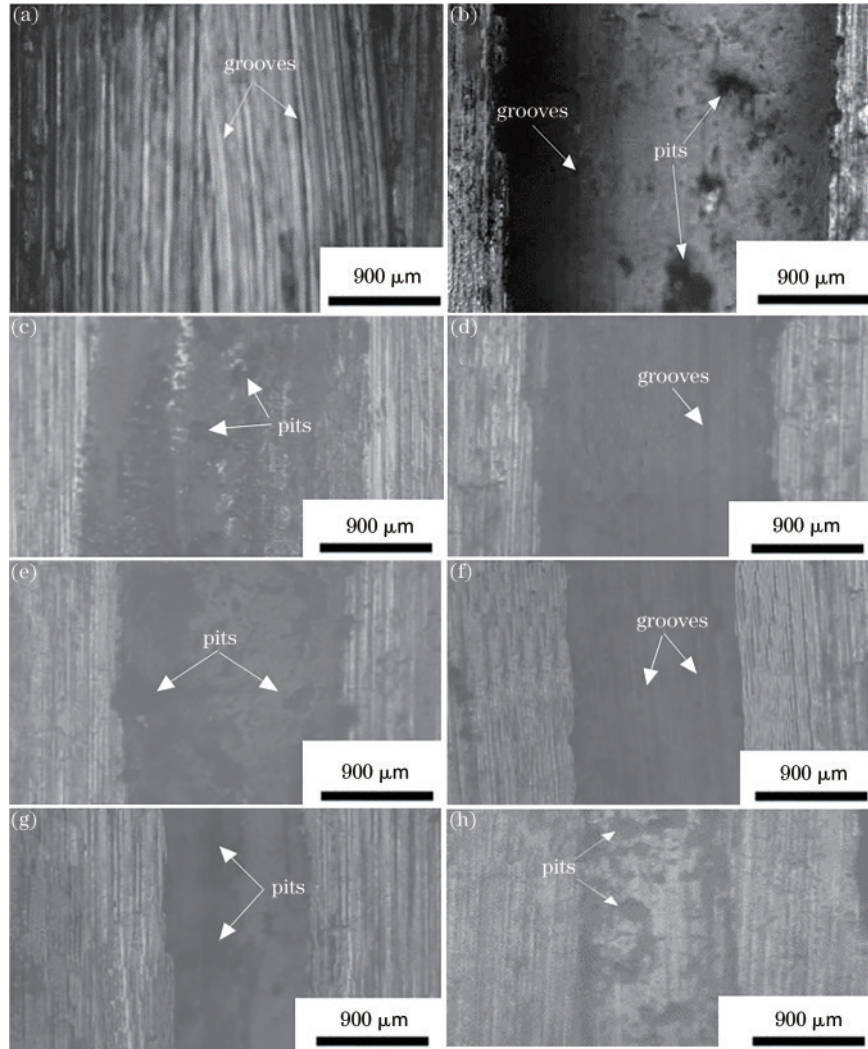


图 8 TiC 含量不同的熔覆层的磨损形貌。(a) 不含 TiC; (b) TiC 质量分数为 5%; (c) TiC 质量分数为 15%; (d) TiC 质量分数为 25%; (e) TiC 质量分数为 35%; (f) TiC 质量分数为 45%; (g) TiC 质量分数为 55%

Fig. 8 Wear profile of cladding layers with different TiC contents. (a) Without TiC; (b) mass fraction of TiC is 5%; (c) mass fraction of TiC is 15%; (d) mass fraction of TiC is 25%; (e) mass fraction of TiC is 35%; (f) mass fraction of TiC is 45%; (g) mass fraction of TiC is 55%

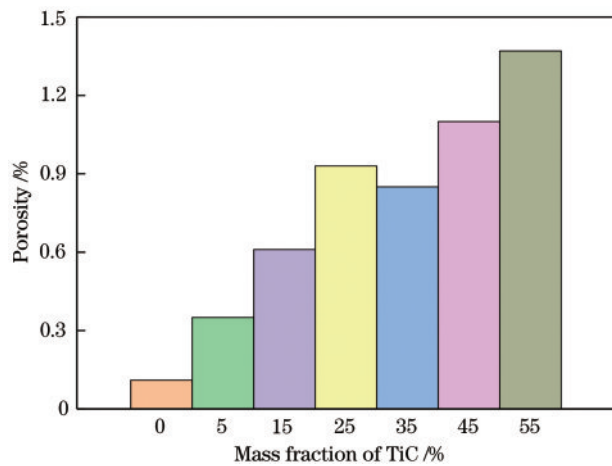


图 9 熔覆层中的气孔率分布图

Fig. 9 Porosity distribution of cladding layers

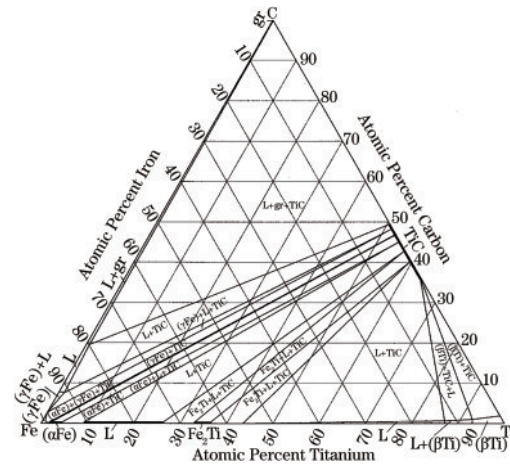


图 10 Fe-Ti-C 三元合金相图^[13,27]

Fig. 10 Phase diagram of ternary alloy Fe-Ti-C^[13,27]

4 结 论

采用激光熔覆技术在 Cr12 模具钢表面制备 Fe50-TiC 复合熔覆层,研究了 TiC 含量对复合熔覆层形貌、显微组织、显微硬度及耐磨性的影响。通过对结果进行分析可以得到以下结论:

1) Fe50-TiC 复合熔覆层中的 TiC 颗粒组成由粉末中 TiC 的含量决定,粉末中 TiC 的含量越大,复合熔覆层中残余未溶解的 TiC 颗粒越多,沿颗粒结晶生长的比例越大。

2) Fe50-TiC 复合熔覆层的显微硬度与耐磨性较基体均有明显提升,且熔覆层横截面的显微硬度沿深度方向呈阶梯状分布;熔覆层的磨损体积与摩擦因数显著低于基体,且 TiC 含量越多,熔覆层的摩擦因数及磨损体积越小。

3) Fe50-TiC 复合熔覆层的气孔率随着粉末中 TiC 的增多总体上呈增大的趋势,这是因为粉末中的 TiC 含量越多,熔覆过程中 TiC 颗粒的分解就越多,生成的气体也越多。

综上所述,本文制备的 Fe50-TiC 复合熔覆层可以明显提升 Cr12 模具钢的表面性能,当 TiC 的质量分数为 35% 时,可以得到综合性能较优的熔覆层:熔覆层的平均硬度约为基体的 2.4 倍,磨损体积约为基体的 13%,摩擦因数约为基体的 66.2%。

参 考 文 献

- [1] Ye D, Li S H, Li J, et al. Study on the crystallographic orientation relationship and formation mechanism of reversed austenite in economical Cr12 super martensitic stainless steel [J]. Materials Characterization, 2015, 109: 100-106.
- [2] Kong D J, Xie C Y. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of boronized layer on Cr12MoV steel [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 80: 391-396.
- [3] Wu B Y, Liu P, Wang X Z, et al. Effect of laser absorption on picosecond laser ablation of Cr12MoV mold steel, 9Cr18 stainless steel and H13A cemented carbide [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 11-20.
- [4] Botes A, Bolokang A S, Kortidis I, et al. Structure-property relationship of the laser clad medium carbon steel: the use of butter layer between the substrate and the top clad layer [J]. Surfaces and Interfaces, 2019, 14: 296-304.
- [5] Courbon C, Sova A, Valiorgue F, et al. Near surface transformations of stainless steel cold spray and laser cladding deposits after turning and ball-burnishing [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 371: 235-244.
- [6] Xiong L L, Zheng H Z, Chen Z, et al. Research status about materials used in laser-clad nanostructured ceramics/metal composite coatings [J]. Materials Review, 2015, 29(23): 24-29.
熊玲玲, 郑海忠, 陈郑, 等. 激光熔覆制备纳米陶瓷/金属复合涂层熔覆材料的研究现状 [J]. 材料导报, 2015, 29(23): 24-29.
- [7] Liu X, Wang W X, Cui Z Q, et al. Influence of B4C content on microstructure and properties of laser cladding Fe-based ceramic composite coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(S1): 102-106.
刘旭, 王文先, 崔泽琴, 等. B4C 含量对激光熔覆 Fe 基陶瓷复合涂层组织及性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(S1): 102-106.
- [8] Zhao L Z, Yang H C, Zhao M J, et al. *In-situ* TiC/FeAl composite coating fabricated by laser cladding [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(11): 860-866.
赵龙志, 杨海超, 赵明娟, 等. 激光熔覆 TiC/FeAl 原位复合涂层 [J]. 材料研究学报, 2017, 31(11): 860-866.
- [9] Khalili A, Goodarzi M, Mojtahedi M, et al. Solidification microstructure of *in situ* laser-synthesized Fe-TiC hard coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 747-752.
- [10] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and *in situ* formed microstructure of Fe-TiC composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2007-2015.
- [11] Wang Z, Lei J B, Jiang W, et al. Microstructure and properties of Fe-based TiC laser cladding coatings [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1): 43-49.
王植, 雷剑波, 姜伟, 等. 激光熔覆 Fe 基 TiC 涂层的组织与性能 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21(1): 43-49.
- [12] Zhang H, Chong K, Zhao W, et al. Effects of pulse parameters on *in situ* Ti-V carbides size and properties of Fe-based laser cladding layers [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 163-169.
- [13] Rafiei M, Ghayour H, Mostaan H, et al. The effect

- of V addition on microstructure and tribological properties of Fe-Ti-C claddings produced by gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 569-578.
- [14] Li Q T, Lei Y P, Fu H G. Growth mechanism, distribution characteristics and reinforcing behavior of (Ti, Nb)C particle in laser clad Fe-based composite coating [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 316: 610-616.
- [15] Cui G, Han B, Zhao J B, et al. Comparative study on tribological properties of the sulfurizing layers on Fe, Ni and Co based laser cladding coatings [J]. *Tribology International*, 2019, 134: 36-49.
- [16] Cao J, Lu H F, Lu J Z, et al. Effects of tungsten carbide particles on microstructure and wear resistance of hot-working die prepared via laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702001.
曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC对激光熔覆热作模具的组织 and 磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0702001.
- [17] Zhan X H, Qi C Q, Gao Z N, et al. The influence of heat input on microstructure and porosity during laser cladding of Invar alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 453-461.
- [18] Yao S, Liu H X, Zhang X W, et al. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coatings on H13 steel surface by laser *in situ* synthesis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003004.
姚爽, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13钢表面激光原位自生TiC颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003004.
- [19] Lu J Z, Cao J, Lu H F, et al. Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 369: 228-237.
- [20] Chi J, Li M, Wang S F, et al. Effects of TiC formation modes on microstructure and performance of Ni-based laser cladding coatings [J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(4): 134-141.
迟静, 李敏, 王淑峰, 等. TiC生成方式对激光熔覆镍基涂层组织和性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(4): 134-141.
- [21] Qu C C, Li J, Juan Y F, et al. Effects of the content of MoS₂ on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 357: 811-821.
- [22] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502001.
陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45钢表面激光熔覆Fe901合金的摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502001.
- [23] Li N, Xiong Y, Xiong H P, et al. Microstructure, formation mechanism and property characterization of Ti + SiC laser clad coatings on Ti6Al4V alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 148: 43-51.
- [24] Zeinali Moghaddam H, Sharifitabar M, Roudini G. Microstructure and wear properties of Fe-TiC composite coatings produced by submerged arc cladding process using ferroalloy powder mixtures [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 361: 91-101.
- [25] Shu D, Cui X X, Li Z G, et al. Microstructure and friction and wear property of nano-WC reinforced Ni-based coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 211401.
疏达, 崔祥祥, 李铸国, 等. 纳米WC增强Ni基涂层组织及摩擦磨损性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 211401.
- [26] Yang Z X, Wang A H, Weng Z K, et al. Porosity elimination and heat treatment of diode laser-clad homogeneous coating on cast aluminum-copper alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 321: 26-35.
- [27] Emamian A. *In-situ* TiC-Fe deposition on mild steel using a laser cladding process[J]. Ontario, Canada: University of Waterloo, 2011.
Emamian A. 低碳钢表面激光原位沉积Fe50/TiC涂层研究[D]. 安大略省: 滑铁卢大学, 2011.