

激光熔化沉积 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料的组织及高温摩擦磨损性能

刘志宏¹, 刘元富^{1,2*}, 张乐乐¹, 陈德强², 石晨晓¹, 陆富刚¹, 冯志成¹, 金杰¹

¹北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

²河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室, 河南 洛阳 471023

摘要 采用激光熔化沉积技术制备了 TiC/CaF₂/Inconel 718 高温合金基高温耐磨自润滑复合材料, 对其显微组织、显微硬度及高温干滑动摩擦磨损性能进行了研究, 探讨了其高温磨损机理。结果表明: 复合材料的显微组织由 TiC、CaF₂、Cr₇C₃、 γ' -Ni₃Nb 和 γ -(Ni, Fe) 构成, 原位自生 TiC 初生相和细小 CaF₂/TiC 共晶弥散分布在被 Cr₇C₃ 和 γ' -Ni₃Nb 等超细高温相强化的 γ -(Ni, Fe) 固溶体基体上; 复合材料的平均显微硬度为 820 HV; 与激光熔化沉积 Inconel 718 对比样相比, 复合材料具有良好的高温耐磨性及低且稳定的摩擦因数, 复合材料优异的高温摩擦磨损性能源自于其合理的显微组织结构。

关键词 激光技术; 激光熔化沉积; Inconel 718; 显微组织; 自润滑; 摩擦磨损

中图分类号 TN249; TG146.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0102008

Microstructure and High-Temperature Friction and Wear Properties of TiC/CaF₂/Inconel 718 Composite Fabricated Using Laser Melting Deposition Technique

Liu Zhihong¹, Liu Yuanfu^{1,2*}, Zhang Lele¹, Chen Deqiang²,

Shi Chenxiao¹, Lu Fugang¹, Feng Zhicheng¹, Jin Jie¹

¹School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²National and Local Joint Engineering Laboratory for High-End Bearing Tribology Technology and Application, Henan University of Science and Technology, Henan, Luoyang 471023, China

Abstract A high-temperature wear-resistant self-lubricating composite based on TiC/CaF₂/Inconel 718 superalloy is fabricated using the laser melting deposition technique. The composite's microstructure, microhardness, and high-temperature dry-sliding friction and wear properties are investigated. Furthermore, its high-temperature wear mechanism is studied. The results demonstrate that the composite's microstructure comprises TiC, CaF₂, Cr₇C₃, γ' -Ni₃Nb, and γ -(Ni, Fe). *In-situ* synthesized TiC primary phases and fine CaF₂/TiC eutectics are uniformly scattered on a matrix of γ -(Ni, Fe) solid solution, which is strengthened by super-fine Cr₇C₃ and γ' -Ni₃Nb high-temperature strengthening phases. The composite's average microhardness is approximate 820 HV. Compared with the Inconel 718 reference specimen fabricated by laser melting deposition technique, the composite has good high-temperature wear-resistance and a low and stable friction coefficient. The composite's excellent high-temperature friction and wear properties are derived from its reasonable microstructure.

Key words laser technique; laser melting deposition; Inconel 718; microstructure; self-lubricating; friction and wear

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 160.3900

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-09-13; 录用日期: 2019-10-09

基金项目: 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金(SKLTkf17B06)、高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金(201904)、中央高校基本科研费专项资金(2019ZBJ106)

* E-mail: yfliu@bjtu.edu.cn

1 引 言

沉淀强化型变形镍基高温合金 Inconel 718 具有优异的高温力学性能,且性价比较高,是航空制造业中应用最广泛的高温结构材料之一,已被广泛用于制造涡轮叶片、轴、支架、紧固件等关键零部件^[1-3]。由于 Inconel 718 中的主强化相 γ'' -(Ni₃Nb) 和辅助强化相 γ' -(Ni₃Al) 的含量有限,且其自身硬度不高,加之其主要组成相 γ (Ni, Fe) 固溶体无法利用相变来提高硬度,因此 Inconel 718 的硬度偏低,高温耐磨性不足,不能应用于高接触应力和高温强磨损的恶劣工况下^[4-5]。如果以 Inconel 718 为基体,同时引入高温耐磨强化相和高温固体自润滑相构成 Inconel 718 基高温耐磨自润滑复合材料,则有望在保持 Inconel 718 优异高温力学性能的基础上显著提高其高温摩擦磨损性能。

过渡族金属碳化物 TiC 具有熔点高(3147 °C)、硬度高(30 GPa)、弹性模量高、摩擦磨损性能优异、密度小(4.95 g/cm³)、导电导热性好、高温稳定性好等优点,但 TiC 的致密化温度超过了 1700 °C,且其室温脆性大、韧性差,使得 TiC 不能作为整体结构材料使用^[6-9]。TiC 目前主要用作复合材料或复合涂层的颗粒增强相,用以提高复合材料或复合涂层的常温及高温耐磨性能^[10-11]。Muvvala 等^[12]利用激光熔化沉积(LMD)技术在 AISI 304 基材上制备了 TiC/Inconel 718 复合涂层,发现原位自生 TiC 初生相与奥氏体基体界面结合良好,复合涂层表现出了良好的高温耐磨性能。Hong 等^[13]利用 LMD 技术制备了 TiC 颗粒增强 Inconel 718 基复合材料,对其进行研究后发现,TiC 增强相的形成以及复合材料显微组织的细化有效提高了复合材料的显微硬度和高温耐磨性。

CaF₂ 是最常用的复合涂层或复合材料的高温固体润滑相之一,其熔点为 1360 °C,在 500 °C 左右时会出现脆-韧转变,在 500~1000 °C 范围内能起到良好的固体润滑作用^[14-16]。CaF₂ 的化学稳定性良好,只有在富含 O₂ 或 H₂O 的高温环境下才会发生氧化或水解^[17],而在制备含 CaF₂ 固体润滑相的复合材料或复合涂层时,大部分制备工艺都不能满足 CaF₂ 发生氧化或水解的条件,因此,可以认为 CaF₂ 在大部分情况下是稳定的。

本文以 Ti、镍包石墨、镍包 CaF₂ 和 Inconel 718 混合粉末为原料,采用同轴送粉激光熔化沉积技术制备了 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料,研究了复合材料

的显微组织,测试了复合材料的显微硬度及高温干滑动摩擦磨损性能,探讨了复合材料的高温磨损机理。目前,利用 LMD 技术制备 TiC/CaF₂/Inconel 718 高温耐磨自润滑复合材料的相关研究鲜见报道。

2 实验部分

选用 Inconel 718 粉(粒径为 53 μm,化学成分见表 1)、Ti 粉(粒径为 75 μm)、镍包 CaF₂(镍的质量分数为 50%,粒径为 45 μm)以及镍包石墨(镍的质量分数为 75%,粒径为 45 μm)作为原材料。前期实验发现,当混合粉末中镍包 CaF₂ 的质量分数高于 15% 时, CaF₂ 在复合材料中的分布均匀性开始变差,局部出现 CaF₂ 的团聚,复合材料的耐磨性开始降低,优化后的混合粉末成分(质量分数)为 63% Inconel 718-12% Ti-10% 镍包石墨-15% 镍包 CaF₂。将混合粉末放入 YXQM-2L 立式行星磨中球磨 4 h 后,将混合粉末取出置于干燥箱中,烘干后备用。同轴送粉激光熔化沉积实验在专用激光熔化沉积系统上进行,该系统配备了 GS-TFL-8000 型 CO₂ 激光器、HNC-21M 四轴联动数控工作台和 BSF-2 型送粉器。采用高纯氩气作为保护气及送粉气。激光熔化沉积工艺参数对 CaF₂ 的溶解再析出过程具有显著影响。前期实验发现,在激光功率和送粉速率确定的情况下,若扫描速度过高或搭接率过低,混合粉末中的 CaF₂ 就没有充足的时间溶解再析出,从而影响 CaF₂ 分布的均匀性及 CaF₂ 的界面结合强度。前期实验优选出的激光熔化沉积工艺参数如下:激光功率为 4.5 kW,光斑直径为 5 mm,扫描速率为 200 mm/min,送粉速率为 9 g/min,搭接率为 50%。沉积试样的尺寸为 30 mm×20 mm×10 mm。

表 1 Inconel 718 粉的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Inconel 718 powder

Element	Mass fraction / %
Al	0.2-0.8
Ti	0.65-1.15
Mo	2.8-3.3
Nb	4.75-5.50
Cr	17-21
Ni	50-55
Mn	0.35
Si	0.35
Cu	0.30
Co	1.00
C	0.08
Fe	Bal.

采用线切割切取金相试样,对试样上垂直于激光扫描方向的面进行打磨和抛光,使用 HF、HNO₃、H₂O 体积比为 1:6:7 的腐蚀液对试样表面进行腐蚀处理。利用 XD-3 型 X 射线衍射仪(XRD)分析复合材料的相组成,利用 FEI Quanta 200 FEG 和 ZEISS EVO18 型扫描电镜观察复合材料的显微组织,采用能谱仪(EDS)分析复合材料中各相的含量。

利用 MH-5L 型显微硬度计测试复合材料的显微硬度,加载载荷为 1.96 N,载荷保持时间为 15 s,每个试样取 10 个点进行测量,将 10 个点的算术平均值作为试样的显微硬度值。高温磨损实验在 SRV-4 型球-盘式磨损试验机上进行,对磨件为 Si₃N₄ 陶瓷球。高温磨损实验条件如下:磨损时间为 30 min,实验温度为 600 °C,载荷分别为 10, 20, 30 N,总滑动行程为 556.8 m,相对滑动线速率为 32.97 m/min。以激光熔化沉积 Inconel 718 作为对比样,用磨损率和相对耐磨性作为考察复合材料高温耐磨性的指标,磨损率越小,相对耐磨性越大,表明试样的耐磨性越好。利用 zygo NexView 3D 型光学表面轮廓仪观察分析磨痕的三维形貌,利用精度为 0.1 mg 的电子天平称量磨损前后试样的质量。

$$W = m / (NS), \quad (1)$$

$$\epsilon_w = \Delta m_0 / \Delta m, \quad (2)$$

式中:W 为磨损率;m 为磨损质量;N 为测试载荷;S 为总滑动行程; ϵ_w 为相对耐磨性; Δm_0 为对比样的磨损质量; Δm 为复合材料试样的磨损质量。采用(1)~(2)式计算磨损率^[18]和相对耐磨性。

3 结果与讨论

3.1 XRD 物相分析

图 1 为复合材料的 X 射线衍射图谱。复合材料的主要组成相为 TiC、CaF₂、Cr₇C₃、 γ'' -(Ni₃Nb)以及 γ -(Ni, Fe)。XRD 分析结果表明,以 Inconel 718、Ti 粉、镍包石墨、镍包 CaF₂ 质量比为 63:12:10:15 的混合粉末作为原料,采用激光熔化沉积技术制备出了相组成为 TiC、CaF₂、 γ'' -(Ni₃Nb)、Cr₇C₃ 和 γ -(Ni, Fe) 固溶体的复合材料。XRD 图谱中未出现单质钛和石墨的衍射峰,表明混合粉末中各组分在激光熔化沉积过程中进行了充分的冶金反应,没有单质粉末过剩。

3.2 显微组织分析

复合材料的典型显微组织如图 2 所示,图 2(c) 为图 2(b)中部区域典型显微组织的局部放大照片。由图 2(b)、(c)可以看出,复合材料的典型显微组织

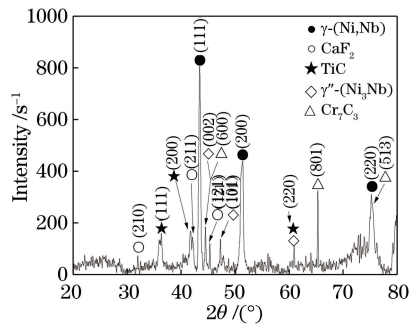


图 1 激光熔化沉积复合材料的 X 射线衍射图谱
Fig. 1 X-ray diffraction pattern of laser-melting-deposited composite

为灰色基体上弥散分布着黑灰色的初生树枝晶、不规则的块状初生相和白色长条状共晶组织。表 2 为图 2(c)中不同区域的 EDS 分析结果。

在激光熔化沉积过程中,熔池中上部的过冷度较小,合金熔体无法均匀形核,熔池底部具有最大的过冷度及最小的形核功,熔池底部的合金熔体率先凝固。对于由 Ni、Ti、C 以及高温作用下会发生熔解的 CaF₂ 构成的多组元合金熔体,TiC 具有最高的熔点及负的吉布斯生成自由能(熔点为 3433 K,温度为 3400 K 时吉布斯生成自由能 $\Delta G_f = -130.348$ kJ/mol)^[19],初生 TiC 在熔池底部首先形核,受成分过冷的影响,自由生长为发达的树枝晶组织,从初生树枝晶主干上脱落的二次或三次枝晶,随熔体流动到达过冷度较小的熔池中上部,其中未被完全熔化的二次或三次小枝晶作为形核核心在熔池中上部形核并自由生长,形成黑灰色的 TiC 等轴树枝晶或不规则的块状初生 TiC。随着 TiC 初生相的析出及熔池温度的降低,遇高温发生熔解的 CaF₂ 依靠其负的吉布斯生成自由能及相对较高的熔点(熔点为 1633 K,温度为 1700 K 时的 $\Delta G_f = -947.393$ kJ/mol)^[19],依附在熔池中弥散分布的细小 TiC 颗粒上重新形核并交替生长,形成细小的 TiC/CaF₂ 共晶组织。共晶组织中的白色长条状组织为 CaF₂,黑色细长颗粒为共晶 TiC。随着熔池温度进一步降低,残余熔液以 γ -(Ni, Fe) 固溶体的形式最后凝固析出,从而形成了如图 2 所示的典型组织形貌。

由图 2(a)可见,TiC/CaF₂ 共晶组织在复合材料中的分布比较均匀,这得益于镍包 CaF₂ 中镍的包覆作用。镍包 CaF₂ 虽然未能避免 CaF₂ 在高温合金熔池中发生熔解(因为合金熔池温度远高于 Ni 和 CaF₂ 的熔点^[20]),但改善了 CaF₂ 的流动性,使本来流动性极差的 CaF₂ 能够顺利地通过同轴送粉进入

激光熔化沉积合金熔池中;同时,镍的包覆也增大了CaF₂的密度,使CaF₂在熔池中分布得相对均匀,避免了CaF₂在熔池中上浮而导致的复合材料中CaF₂

分布不均匀的现象发生。CaF₂作为固体润滑相在复合材料中均匀分布,对改善复合材料的摩擦磨损性能十分有益。

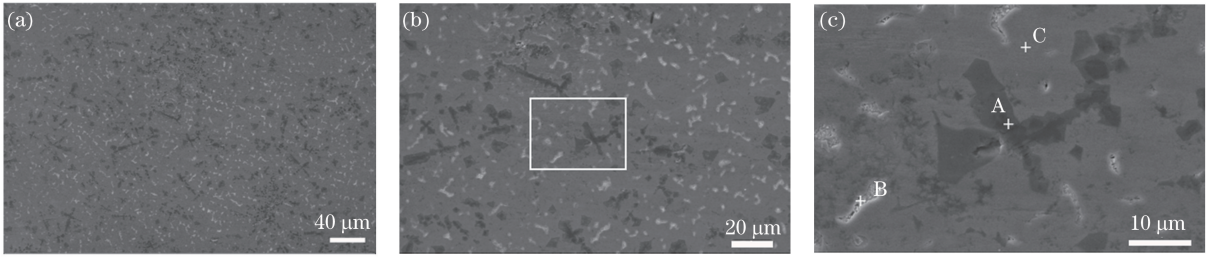


图 2 激光熔化沉积复合材料典型显微组织的 SEM 照片。(a)低倍照片;(b)高倍照片;(c)局部放大
Fig. 2 SEM images of typical microstructure of laser-melting-deposited composite. (a) SEM image with low magnification; (b) SEM image with high magnification; (c) local-magnified SEM image

表 2 对应图 2(c)中不同区域的 EDS 分析结果

Table 2 Results of EDS analysis corresponding to different regions in Fig. 2(c)

Zone	Mass fraction /%										Possible phase
	Ti	C	Ca	F	Ni	Fe	Nb	Cr	Mo	Total	
A	47.1	46.8	—	—	0.6	0.2	4.2	0.8	0.3	100	TiC
B	11.6	11.7	21.4	51.5	0.7	0.2	2.0	0.3	0.6	100	CaF ₂ and TiC
C	2.4	13.1	—	—	50.5	21.7	—	11.9	0.5	100	γ-(Ni, Fe)

3.3 显微硬度分析

图 3 为激光熔化沉积复合材料及 Inconel 718 对比样的平均显微硬度,可见:复合材料的平均显微硬度高达 820 HV,约为激光熔化沉积 Inconel 718 试样(390 HV)的 2.1 倍。在激光熔化沉积 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料中,含量较高的 TiC 初生相以及在 γ-(Ni, Fe)固溶体基体中弥散分布的 TiC、Cr₇C₃、γ'-(Ni₃Nb)等高温强化相与位错之间存在强烈的相互作用,通过钉扎和拖曳来阻碍位错运动,进而有效地提高了复合材料的强度和硬度^[21-22]。

3.4 高温摩擦磨损性能分析

图 4 所示为激光熔化沉积复合材料及对比样在

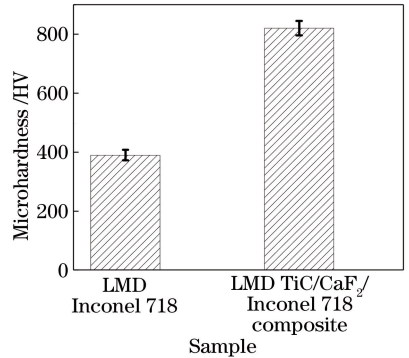


图 3 激光熔化沉积复合材料及对比样的平均显微硬度
Fig. 3 Average microhardnesses of laser-melting-deposited composite and reference specimen

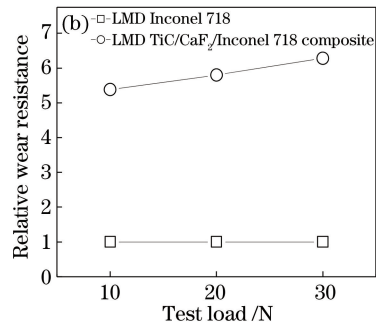
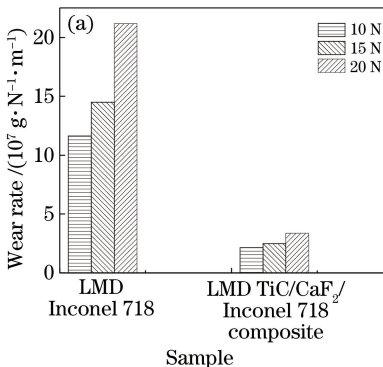


图 4 激光熔化沉积复合材料及对比样的磨损率、相对耐磨性随载荷的变化

Fig. 4 Wear rate and relative wear-resistance as functions of test load for laser-melting-deposited composite and reference specimen

高温干滑动磨损实验中的磨损率及相对耐磨性随载荷的变化,可见:在相同的载荷作用下,复合材料的磨损率远低于对比样;随载荷增大,复合材料和对比样的磨损率均有所增加,但复合材料磨损率增大的幅度远低于对比样,从而导致复合材料的相对耐磨性随载荷增大而呈现出逐渐增大的趋势,表明复合材料对载荷的增加不敏感,复合材料在较高的接触载荷下仍保持了良好的高温耐磨性。

图 5 为激光熔化沉积复合材料及对比样在温度为 600 ℃、载荷为 30 N 实验条件下的摩擦因数曲线,可见:激光熔化沉积 Inconel 718 对比样的平均摩擦因数约为 1.2,摩擦因数波动幅度较大;复合材料的平均摩擦因数约为 0.35,摩擦因数相对较平稳。在高接触应力的高温干滑动磨损实验条件下,相比于激光熔化沉积 Inconel 718 对比样,激光熔化沉积 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料在减摩性能上的优势十分明显。

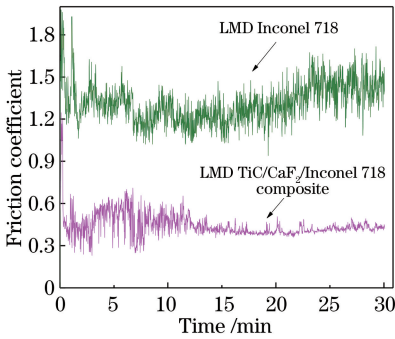


图 5 激光熔化沉积复合材料及对比样的摩擦因数曲线
Fig. 5 Friction-coefficient curves of laser-melting-deposited composite and reference specimen

图 6 为激光熔化沉积复合材料及对比样在温度为 600 ℃、载荷为 30 N 实验条件下的磨痕横截面轮廓曲线,可以看出:复合材料的磨痕宽度和深度分别为 1526.2 μm 和 69.7 μm,对比样的磨痕宽度和深度分别为 2093.4 μm 和 111.3 μm,复合材料磨痕宽度及深度均显著低于对比样。这说明相对于激光熔化沉积 Inconel 718 对比样,激光熔化沉积 TiC/CaF₂/Inconel 718 复合材料的高温耐磨性显著提高。

图 7 为激光熔化沉积复合材料及对比样在温度为 600 ℃、载荷为 30 N 实验条件下的磨损表面形貌。由图 7(a)可见:对比样的磨损表面布满了黏着转移后留下的黏着坑,同时磨损表面发生了严重的塑性变形;除此之外,磨损表面上也存在少量沿摩擦方向分布的面积较小的相对平滑的黑色长条状区

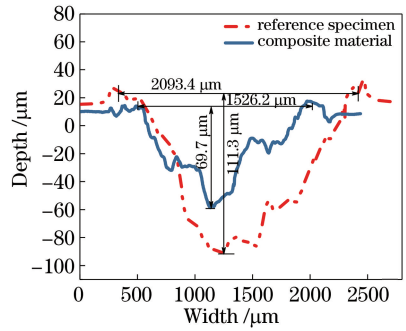


图 6 激光熔化沉积复合材料及对比样磨痕的横截面轮廓曲线

域。EDS 分析结果表明,黑色长条状区域的化学成分(原子数分数,%)为 43.1O-17.7Ni-12.9Fe-9.7Cr-6.6Ti-6.2Si-1.3Al-1.2Nb-0.2V,氧元素的含量较高,表明该局部区域发生了氧化磨损。

氧化磨损过程中所生成的低剪切强度氧化膜可以有效避免氧化膜之下的组织发生严重的黏着磨损和塑性变形,但由于氧化膜的总体面积较少,复合材料在提高高温耐磨性方面的作用有限。激光熔化沉积 Inconel 718 对比样的高温干滑动磨损机制可归结为严重的黏着磨损、塑性变形及局部氧化磨损。由图 7(b)可以看出,复合材料磨损表面整体上比较光滑,磨损表面大部分区域被含 CaF₂ 的润滑膜覆盖,局部区域存在少量黏着坑及浅而窄的犁沟。复合材料的高温干滑动磨损机制可归结为程度较轻的磨粒磨损和黏着磨损。

复合材料优异的高温摩擦磨损性能源自其合理的显微组织结构。首先,复合材料中的耐磨增强相 TiC 保证了复合材料在高温环境下仍保持着较高的硬度。王焕荣等^[23]通过对 TiC 价电子结构的分析计算证实,TiC 中的最强键为 Ti—C 键,温度对 Ti—C 键能有较大影响,随着温度升高,共价电子对数增多,键能增大,原子之间的结合力增强,即 TiC 的热稳定性及硬度随着温度的升高而增大。体积分数较高的初生相及共晶 TiC 的存在,赋予了复合材料良好的高温硬度及强度,使得复合材料具备了良好的抗黏着磨损和磨粒磨损的能力。其次,原位自生 TiC 增强相与 γ-(Ni,Fe)固溶体之间良好的界面相容性,保证了二者之间的结合强度;同时,γ-(Ni,Fe)固溶体被弥散分布其中的 Cr₇C₃、γ''-(Ni₃Nb)等高温强化相所强化,保证了 γ-(Ni,Fe)固溶体在高温环境下具有较高的强韧性,从而使得 γ-(Ni,Fe)

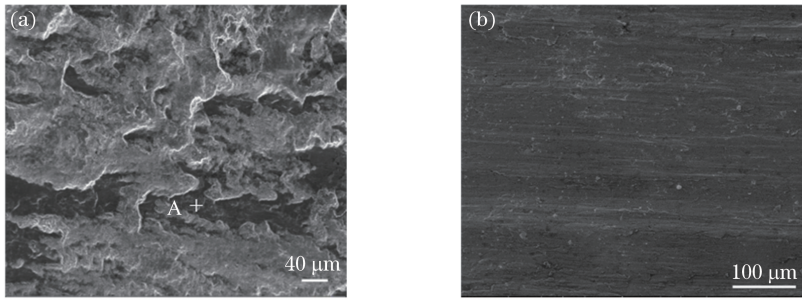


图 7 激光熔化沉积复合材料和对比样的磨损表面形貌。(a)对比样;(b)激光熔化沉积复合材料
Fig. 7 Worn-surface morphologies of laser-melting-deposited composite and reference specimen.

(a) Reference specimen; (b) laser-melting-deposited composite

固溶体能对 TiC 增强相起到可靠的黏结及支撑作用,有效地避免了复合材料在高温磨损过程中发生严重的塑性变形。第三,含高温固体润滑相 CaF_2 的低剪切强度固体润滑膜的存在,避免了摩擦副之间微凸体的直接接触,从而有效地降低了 Si_3N_4 陶瓷球对复合材料的磨损。

图 8 为复合材料磨损亚表层的 SEM 照片,可见:初生 TiC 增强相与 γ -(Ni, Fe) 固溶体基体结合良好,未观察到 TiC 颗粒拔出或破碎的现象;复合材料亚表层也未出现塑性变形或开裂现象。这表明 TiC 起到了最主要的抗磨作用,避免了硬度较低的 γ -(Ni, Fe) 固溶体基体发生选择性过度磨损,同时也表明 γ -(Ni, Fe) 固溶体对 TiC 起到了可靠的黏结及支撑作用。

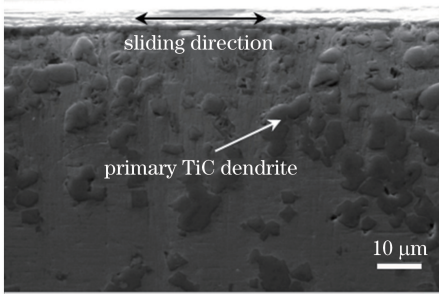


图 8 激光熔化沉积复合材料磨损亚表层的 SEM 照片
Fig. 8 SEM image of worn subsurface of laser-melting-deposited composite

4 结 论

利用激光熔化沉积技术制备了 $\text{TiC}/\text{CaF}_2/\text{Inconel 718}$ 高温合金基高温耐磨自润滑多相复合材料,该材料的典型显微组织为 TiC 初生相及 TiC/CaF_2 共晶均匀弥散分布在 γ -(Ni, Fe) 固溶体基体上, γ -(Ni, Fe) 固溶体中含有组织极细的 Cr_7C_3 、 γ'' -(Ni_3Nb) 高温强化相。与激光熔化沉积 Inconel 718 对比样相比,激光熔化沉积 $\text{TiC}/\text{CaF}_2/\text{Inconel}$

718 复合材料的硬度更高,高温耐磨性更好,摩擦因数更低且更稳定,复合材料良好的高温干滑动摩擦磨损性能得益于其合理的显微组织结构。

参 考 文 献

- [1] Liu Y C, Guo Q Y, Li C, et al. Recent progress on evolution of precipitates in Inconel 718 superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(10): 1259-1266. 刘永长, 郭倩颖, 李冲, 等. Inconel 718 高温合金中析出相演变研究进展[J]. *金属学报*, 2016, 52(10): 1259-1266.
- [2] Sun H F, Tian S G, Jin Y. First-principle investigation on Nb doping promoting $\gamma' \rightarrow \gamma''$ phase transformation in Ni-based superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(2): 449-455. 孙昊昉, 田素贵, 金莹. Nb 掺杂对 Ni 基合金中 $\gamma' \rightarrow \gamma''$ 相转变影响的第一原理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(2): 449-455.
- [3] Xiao W H, Lu S Q, Wang Y C, et al. Mechanical and tribological behaviors of graphene/Inconel 718 composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(10): 1958-1969.
- [4] Liu Y C, Zhang H J, Guo Q Y, et al. Microstructure evolution of Inconel 718 superalloy during hot working and its recent development tendency[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1653-1664. 刘永长, 张宏军, 郭倩颖, 等. Inconel 718 变形高温合金热加工组织演变与发展趋势[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1653-1664.
- [5] Ma W H, Xie Y C, Chen C Y, et al. Microstructural and mechanical properties of high-performance Inconel 718 alloy by cold spraying[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 456-467.
- [6] Lee J, Lee D, Song M H, et al. *In-situ* synthesis of TiC/Fe alloy composites with high strength and hardness by reactive sintering[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(8): 1397-1404.

- [7] Zhou Y, Duan L C, Wen S F, et al. Enhanced microhardness and wear resistance of Al-15Si/TiC fabricated by selective laser melting[J]. Composites Communications, 2018, 10: 64-67.
- [8] Wang S, Cheng X, Tian X J, et al. Effect of TiC addition on microstructures and properties of MC carbide reinforced Inconel 625 composites by laser additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0602002.
王舒, 程序, 田象军, 等. TiC添加量对激光增材制造 MC 碳化物增强 Inconel 625 复合材料组织及性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602002.
- [9] Jin M, He D Y, Wang Z J, et al. Microstructure and properties of laser clad 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111403.
靳鸣, 贺定勇, 王曾洁, 等. 激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111403.
- [10] Liu L X, Wang B, Li X H, et al. Liquid phase assisted high pressure sintering of dense TiC nanoceramics[J]. Ceramics International, 2018, 44(15): 17972-17977.
- [11] Gorji M R, Edtmaier C, Sanjabi S. Synthesis of Ni/TiC composite coating by infiltration sintering of electrophoretic deposited layers [J]. Materials & Design, 2017, 125: 167-179.
- [12] Muvvala G, Karmakar D P, Nath A K. In-process detection of microstructural changes in laser cladding of *in situ* Inconel 718/TiC metal matrix composite coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 545-558.
- [13] Hong C, Gu D D, Dai D H, et al. Laser metal deposition of TiC/Inconel 718 composites with tailored interfacial microstructures [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 98-109.
- [14] Yang X F, Wang Z R, Song P L, et al. Laminated structure optimization and drawing performance of Al₂O₃-TiC/Al₂O₃-TiC-CaF₂ self-lubricating laminated ceramic conical die [J]. Ceramics International, 2015, 41(9): 12480-12489.
- [15] Wang H M, Yu Y L, Li S Q. Microstructure and tribological properties of laser clad CaF₂/Al₂O₃ self-lubrication wear-resistant ceramic matrix composite coatings[J]. Scripta Materialia, 2002, 47(1): 57-61.
- [16] Yan H, Zhang J, Zhang P L, et al. Laser cladding of Co-based alloy/TiC/CaF₂ self-lubricating composite coatings on copper for continuous casting mold [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 232: 362-369.
- [17] Wu G Y, Xu C H, Xiao G C, et al. Structure design of Al₂O₃/TiC/CaF₂ multicomponent gradient self-lubricating ceramic composite and its tribological behaviors[J]. Ceramics International, 2018, 44(5): 5550-5563.
- [18] Shi H F, Ren X. Mechanical properties of materials [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2015: 249.
时海芳, 任鑫. 材料力学性能[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2015: 249.
- [19] Barin I. Thermochemical data of pure substance[M]. Cheng N L, Niu S T, Xu G Y, et al., Transl. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2003: 427-1674.
伊赫桑·巴伦. 纯物质热化学数据手册[M]. 程乃良, 牛四通, 徐桂英, 等, 译. 3版. 北京: 科学出版社, 2003: 427-1674.
- [20] Tan S J, Li D S, Ye Y, et al. Temperature field and morphology simulation of laser melting deposited Inconel 718 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(11): 2296-2304.
谭树杰, 李多生, 叶寅, 等. 激光熔化沉积 Inconel 718 合金温度场及形貌的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(11): 2296-2304.
- [21] Song K, Yu K, Lin X, et al. Microstructure and mechanical properties of heat treatment laser solid forming superalloy Inconel 718[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(8): 935-942.
宋衍, 喻凯, 林鑫, 等. 热处理态激光立体成形 Inconel 718 高温合金的组织及力学性能[J]. 金属学报, 2015, 51(8): 935-942.
- [22] Fu L M, Shan A D, Wang W. Effect of Nb solute drag and NbC precipitate pinning on the recrystallization grain growth in low carbon Nb-microalloyed steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(7): 832-837.
付立铭, 单爱党, 王巍. 低碳 Nb 微合金钢中 Nb 溶质拖曳和析出相 NbC 钉扎对再结晶晶粒长大的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(7): 832-837.
- [23] Wang H R, Ye Y F, Min G H, et al. Analysis of TiC valence electron structure and its properties[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(3): 215-218.
王焕荣, 叶以富, 闵光辉, 等. TiC 价电子结构及其性质分析[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 215-218.