

FHG97/WS₂ 自润滑复合材料力学性能和摩擦学性能的研究

于成涛^{1,2}, 陈明辉¹, 王福会¹

(1. 东北大学 沈阳材料科学国家研究中心东北大学联合研究分部, 沈阳 110819;
2. 宁夏理工学院 机械工程学院, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: **目的** 探究 FHG97/WS₂ 复合材料力学和摩擦学性能。**方法** 采用放电等离子烧结技术制备不同 WS₂ 含量的复合材料, 通过硬度仪和万能试验机评估材料的力学性能。采用往复摩擦试验机和白光干涉仪测试 25~600 °C 的摩擦学性能。利用 XRD、SEM、EDS 和 Raman 分析材料的物相、显微组织和磨损表面的形貌及元素成分。**结果** 在复合材料制备烧结过程中, WS₂ 与 FHG97 发生了固相原位反应, 生成了 Cr_xS_y 和 M₆C 相。新生相提高了复合材料的微观硬度和抗压强度, 降低了抗弯强度。摩擦磨损测试结果表明, 复合材料的摩擦系数在 25~600 °C 都随温度的升高而降低, 添加 WS₂ 对摩擦系数降低有积极的作用。磨损率在 25~400 °C 先降低, 600 °C 有所上升。Cr_xS_y 和 M₆C 协同作用使复合材料在 25~200 °C 改善了摩擦磨损性能。400 °C 时, 磨损表面形成的 NiO、Cr₂O₃ 和 Ni₂CrO₄ 等氧化物, 以及 Cr_xS_y 的协同作用使得 FW1 的磨损率下降 1 个数量级。600 °C 时, Cr_xS_y 软化降低了氧化膜的粘附力, 使 FW1 的磨损率略有上升。FW2 表面未形成氧化膜, M₆C 脱落对表面形成磨粒磨损, 加剧了表面磨损。**结论** 制备的 FHG97/WS₂ 复合材料具有优异的力学性能, FW1 在 25~600 °C 内具有最优的摩擦学性能。FHG97/WS₂ 体系材料中 WS₂ 的添加量应考虑原位反应对基体中 Cr 的消耗, 避免在高温下无法形成保护性的氧化膜。

关键词: 镍基自润滑材料; 高温; 摩擦学性能; 润滑性; 磨损机理

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0143-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.011

Mechanical and Tribological Properties of FHG97/WS₂ Self-lubricating Composites

YU Cheng-tao^{1,2}, CHEN Ming-hui¹, WANG Fu-hui¹

(1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Mechanical Engineering, Ningxia Institute of Science and Technology, Ningxia Shizuishan 753000, China)

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-09-15

Received: 2022-03-15; Revised: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51871051); 宁夏自然科学基金 (2021AAC03255); 第四批宁夏青年科技人才托举工程 (TJGC2019028)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51871051); Natural Science Foundation of Ningxia Province (2021AAC03255); The Fourth Batch of Ningxia Youth Talents Supporting Program (TJGC2019028)

作者简介: 于成涛 (1985—), 男, 博士研究生, 主要研究为高温自润滑复合材料。

Biography: YU Cheng-tao (1985-), Male, Doctoral candidate, Research focus: high temperature self-lubricating composites.

通讯作者: 陈明辉 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高温防护涂层与自润滑复合材料。

Corresponding author: CHEN Ming-hui (1984-), Male, Doctor, Professor, Research focus: high temperature protective coating and self-lubricating composites.

引文格式: 于成涛, 陈明辉, 王福会. FHG97/WS₂ 自润滑复合材料力学和摩擦学性能的研究[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 143-150.

YU Cheng-tao, CHEN Ming-hui, WANG Fu-hui. Mechanical and Tribological Properties of FHG97/WS₂ Self-lubricating Composites[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 143-150.

ABSTRACT: In the research of high temperature self-lubricating composites, researchers often focus on the characterization of tribological properties, but pay little attention to the mechanical properties of composites, so it is difficult to evaluate their utility. The work aims to investigate the effects of WS_2 addition on the mechanical and tribological properties of nickel-based self-lubricating composites. Three kinds of FGH97/ WS_2 composites with different WS_2 content 0wt% (FW0), 6wt% (FW1) and 12wt% (FW2) were prepared by spark plasma sintering technology. The tribological properties of the composites in the range of 25-600 °C were tested by reciprocating friction and wear tester, and the wear rate and scratch profile were measured by white light interferometer. A hardness tester was used to test the hardness of the material at room temperature, and a universal testing machine was used to test the compressive strength and flexural strength of the material at room temperature. The phase of the materials was analyzed by X-ray diffractometer. The morphology and composition of the scratch were observed and analyzed by scanning electron microscope with energy spectrometer. The phase compositions of worn surface were characterized by Raman scattering instrument. The results showed an in-situ solid-state reaction between WS_2 and FGH97, generating the Cr_xS_y and M_6C phases during the composite sintering. With the increase of WS_2 content, the hardness and compressive yield strength of the composites increased. The flexural strength of FW1 was basically the same as that of the matrix FW0, while the flexural strength of FW2 decreased significantly. At 25-600 °C, the friction coefficients of the three materials decreased with the increase of temperature. The friction coefficient decreased more obviously with the increase of WS_2 . At 25-200 °C, due to the poor deformation ability of the material, abrasive wear and adhesive wear mainly occurred, which made FW0 and FW1 have high friction coefficient and high wear rate. At 200 °C, the FW2 exhibited good tribological properties, with a friction coefficient of 0.36 and a wear rate of $8.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. At 400 °C, FW0 and FW1 undergo tribo-induced oxidation, and NiO , Cr_2O_3 and NiCr_2O_4 were formed on the wear surface, which improved the tribological properties. FW1 had excellent tribological properties due to the synergistic effect of oxides and Cr_xS_y , with a friction coefficient of 0.33 and a wear rate of $1.9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. At 600 °C, the surface of FW0 was instantly oxidized to form a continuous smooth enamel layer rich in Cr_2O_3 , which significantly improved the tribological properties of the matrix. However, Cr_xS_y decreased the adhesion of oxide film and increased the wear rate of FW1 slightly. The falling off hard phase M_6C caused abrasive wear on FW2 surface, resulting in no oxide film on the surface and exacerbated surface wear. In summary, the prepared FGH97/ WS_2 composites have excellent mechanical properties, and FW1 has the best tribological properties at 25-600 °C. The addition of WS_2 in FGH97/ WS_2 system should consider the consumption of Cr in the matrix by in situ reaction, so as to avoid the failure to form a protective oxide film at high temperature.

KEY WORDS: nickel-based self-lubricating material; high temperature; tribological properties; lubricity; wear mechanisms

在现代电力、核能、航空航天等先进技术系统中,越来越多的摩擦学部件在极端条件下服役。为满足工程需求,迫切需要开发能够耐高温重载荷、抗磨损、耐腐蚀、长寿命等综合性能优异的润滑材料^[1-2]。传统润滑介质在高温及真空等条件下易失效,发展自润滑复合材料成为可行有效途径。自润滑复合材料常用润滑剂石墨^[3]、 MoS_2 ^[4]和 Ag ^[5]等,它们在 400 °C 会因氧化而失效,无法满足需求。 WS_2 具有更好的高温稳定性,经常被报道应用在自润滑复合薄膜中^[6-7]。Liu 等^[7]采用激光熔覆技术在奥氏体不锈钢表面制备了 $\text{NiCr/Cr}_3\text{C}_2$ -30% WS_2 涂层,涂层中增强相 Cr_7C_3 和 $(\text{Cr,W})\text{C}$ 以及润滑相 WS_2 和 CrS 协同作用,在摩擦过程中,既提高了材料的耐磨性,也降低了材料的摩擦系数。因此,以 WS_2 为润滑相的复合材料能够获得较好润滑效果。然而,制备涂层与基体之间存在热膨胀系数不匹配、结合力弱等缺陷,往往在高速、高负

载及宽温域的条件下极易失效,无法满足工程需求^[8]。

通过粉末冶金制备的组织结构致密的块体自润滑复合材料,因其质量控制相对简单,获得广泛的研究^[9-10]。润滑相通过机械混合的形式添加到基体中,难以保证润滑相的均匀分散,并且烧结后润滑相与基体之间的界面结合不良,导致复合材料出现力学性能下降的关键问题,改善摩擦学性能往往以牺牲力学性能为代价。如美国国家航空航天局(NASA)开发的以镍基合金为基体的 PM 系列块体材料在室温至 650 °C 范围内获得良好的摩擦学性能^[11],但其低强度限制其广泛应用。复合材料力学性能差的本质是基体与增强体的界面结合太弱,无法有效地将应力从基体向增强体转移。近年来广泛研究的原位合成方法制备的复合材料界面洁净,分散相均匀分布,不仅润滑性能优良,而且提高了力学性能^[12-13]。Pan 等^[12]通过预压成形烧结制备了聚碳硅烷(PSC)原位衍生 TiC 增强的钛基

复合材料, 添加 3% (质量分数) PCS 的复合材料, 硬度为 4.72 GPa, 弹性模量为 169.23 GPa, 其明显高于基体合金 (硬度为 4.45 GPa, 弹性模量为 142.47 GPa), 在特定条件下获得优于基体的磨损率 $1.84 \times 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

在粉末冶金的制备工艺中, 放电等离子烧结 (SPS) 因烧结速度快、材料致密、晶粒细化等优点, 使其在制备自润滑复合材料中获得广泛的应用^[13-14]。Shang 等^[13]采用 SPS 制备了添加 0.15% (质量分数) 石墨烯的 Ti6Al4V 复合材料, 复合材料的显微硬度和抗拉屈服强度相比于基体分别提高了 2.6%~11.7% 和 8.1%~20.4%, 并且磨损率比基体降低了 21.9%~49.5%。石墨烯以及原位生成 TiC 协同作用, 有效提升了材料的承载能力。

在高温自润滑复合材料的报道中, 研究者往往注重摩擦学性能表征, 而对复合材料力学性能的报道却很少, 因此很难评估其实用性。为获得优异的力学, 镍基高温合金因优良的高温性能而得到广泛应用^[5,15]。FGH97 是我国开发的 γ 沉淀强化镍基粉末高温合金, 具有较高的断裂强度、抗蠕变性能和较低的裂纹扩展速率, 在 650~750 °C 内仍具有优异的综合性能^[16-17]。迄今为止, 以 FGH97 为基体的自润滑复合材料的设计策略鲜见报道。因此, 本研究首次以 FGH97 作为基体, 以 WS₂ 为润滑剂, 采用 SPS 技术, 通过原位反应制备力学优良和润滑效果良好的复合材料。本工

作探索原位反应对材料组织结构、力学以及摩擦学性能的影响, 为 Ni 基高温合金自润滑复合材料的工程应用提供理论依据。

1 试验

1.1 原料和材料的制备

材料制备采用 SPS 技术。氩气雾化法制备的 FGH97 粉粒径为 25~75 μm , 其化学成分 (质量分数) 为: Co 15.9%, Cr 9.0%, W 5.9%, Mo 3.9%, Al 5.0%, Ti 1.7%, Nb 2.6%, Hf 0.2%, B 0.01%, C 0.05%, Ni 余量。添加剂 WS₂ 粒径小于 5 μm 。2 种原料的 SEM 形貌和 EDS 分析结果如图 1 所示。在 FGH97 粉中分别添加 0%、6%、12% 的 WS₂ 后, 置于不锈钢球磨罐中, 加入 3 mL 的正庚烷作为过程控制剂。球磨工艺: 球料比为 10:1, 时间为 40 h, 转速为 300 r/min。以上比例样品分别命名为 FW0、FW1 和 FW2。球磨后的粉末装入 $\phi 40 \text{ mm}$ 石墨模具中, 置入 SPS 炉 (HPD250, 德国 FCT 公司) 进行烧结。在氩气气氛下真空度抽至 0.1 Pa 后开始加热, 升温至 450 °C 时, 保温 10 min, 随后按 50 °C/min 速率升温至 1 200 °C 保温 15 min, 随炉冷却, 烧结压力为 40 MPa^[16], 工艺流程如图 2 所示。分析测试前, 将样品加工成所需形状, 用砂纸逐级打磨后抛光, 抛光表面粗糙度 (R_a) 约为 0.2 μm 。

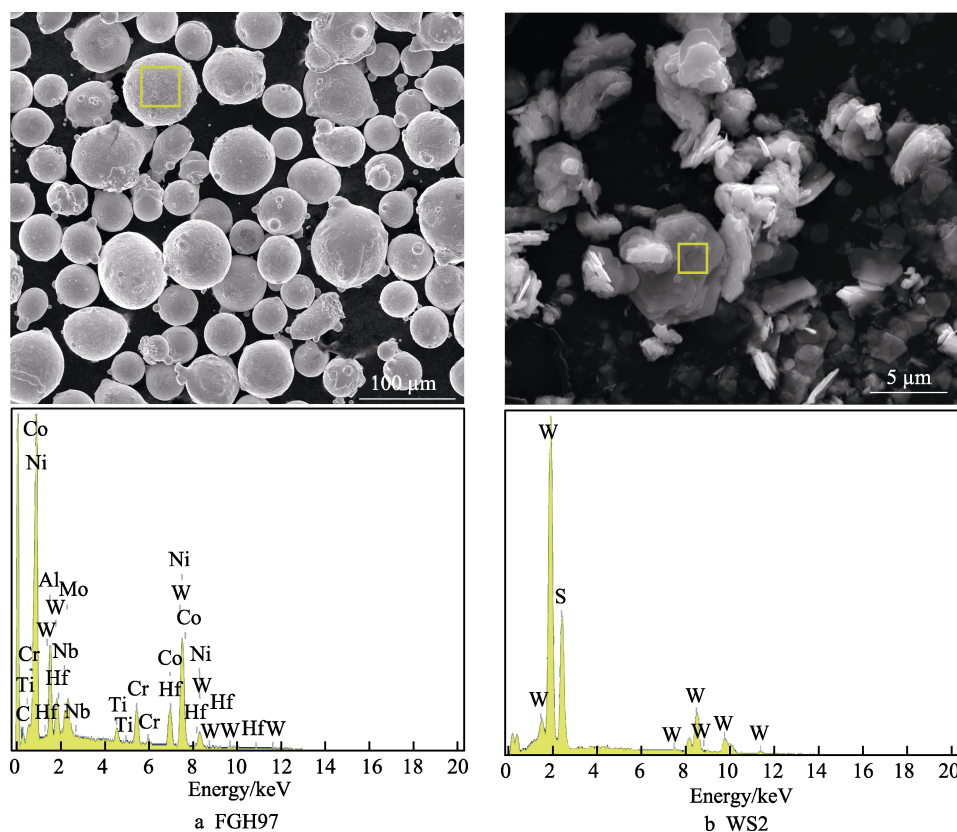


图 1 原料的 SEM 形貌以及 EDS 分析

Fig.1 SEM morphology of raw materials and corresponding EDS analysis

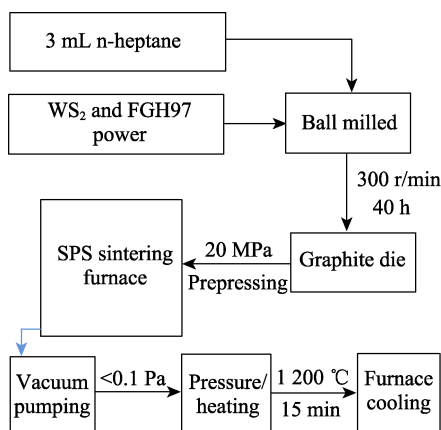


图2 工艺流程

Fig.2 Schematic diagram of process.

1.2 力学测试

采用 HVS-1000AT 维氏硬度仪测试材料的显微硬度, 载荷为 200 g, 加载 10 s, 重复测试 30 次, 计算平均值。采用万能试验机 (WDW-100, 长春试验机有限公司) 测试复合材料的室温压缩强度和抗弯强度。压缩试验试样尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 应变速率为 $1.38 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。抗弯强度测试采用三点弯曲试验, 试样尺寸为 $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$, 跨度为 30 mm, 压头下移速度为 0.1 mm/min。压缩试验和三点弯曲试验都平行测试 3 次, 并计算平均值。

1.3 摩擦学性能测试

采用往复式摩擦磨损试验机 (MFT-5000, 美国 Rtec 仪器公司) 测试样品的摩擦学性能, 直径为 9.525 mm 的 Al_2O_3 陶瓷球作为对磨副。试验前, 将球在酒精中超声清洗 10 min 后烘干。摩擦测试参数参照文献[14], 具体参数: 载荷为 10 N, 滑动长度为 6 mm, 频率为 2 Hz, 滑动时间为 30 min。使用白光干涉仪 (Zygo, NewView 8300) 测量磨损体积。根据 Archard 公式 $W=V/(SF)$ 计算磨损率 W , 其中, V 为磨损体积, S 为总滑动距离, F 为施加载荷。试样的摩擦系数和磨损率均重复测试 3 次, 取平均值。

1.4 材料的组成、微结构的表征

采用 X 射线衍射仪 (XRD, SmartLab, $\text{Cu K}\alpha$ radiation) 分析材料的相组成。采用扫描电子显微镜 (SEM, Inspect F50) 观察试样表面和磨痕形貌, 用能谱仪 (EDS, Oxford) 分析试样表面成分。使用拉曼散射仪 (Raman, JY Horiba HR800, 波长为 532 nm) 分析磨痕的物相组成。

2 结果与讨论

2.1 物相及显微组织分析

复合材料的 XRD 图谱如图 3 所示。结果显示, FGH97 合金由 γ/γ' -Ni 相组成。添加 WS_2 的 FW1 和 FW2 复合材料主要由 γ/γ' -Ni、 Cr_xS_y 和 M_6C 相组成, 未检测到 WS_2 的特征峰, 说明烧结过程中 WS_2 与基体发生反应, 生成了 Cr_xS_y 和 M_6C 。随着 WS_2 的增多, Cr_xS_y 和 M_6C 相的衍射峰增强。

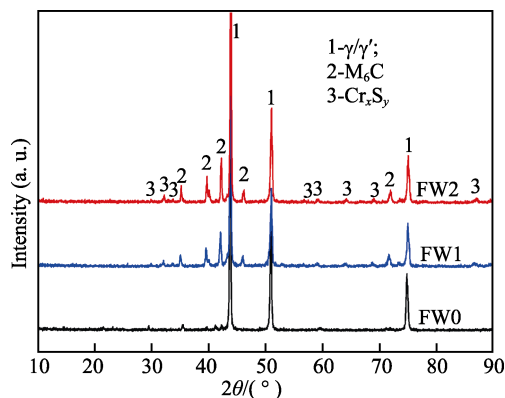


图3 复合材料的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of composites

复合材料表面 SEM 形貌如图 4 所示。图 4a 中, FW0 基体材料主要由 γ 相包裹的 γ' 相组成, 并有少量白色相均匀分散。根据表 1 中 EDS 分析结果, A 处白色相主要富含 Ni、Mo、W 和 Nb 元素, 可推断为 M_6C [16]。图 4b 中, FW1 主要由灰色基体相以及周

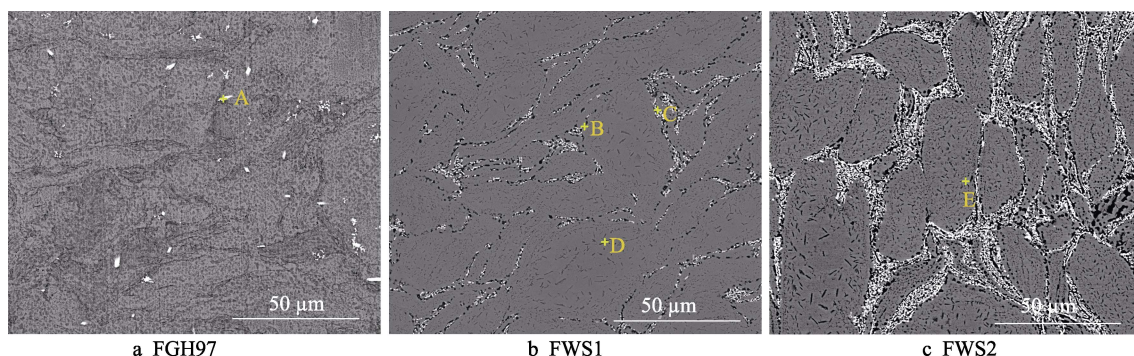


图4 复合材料表面 SEM 形貌

Fig.4 SEM micrographs of composites
表 1 图 4 中所示标记点的化学组成

Tab.1 Chemical composition in at% of the spots marked in Fig.4

Samples	at. %									
	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Nb	Hf	S
A	28.47	11.86	6.33	10.42	25.42	9.39	2.63	5.39	0.09	—
B	36.16	9.43	14.65	1.62	1.12	7.41	5.42	0.49	—	23.69
C	15.11	8.34	8.63	22.93	14.00	7.46	3.47	6.67	0.01	13.58
D	33.02	9.66	5.90	1.36	2.07	8.63	10.58	12.97	0.09	15.72
E	16.75	5.59	21.06	4.09	1.15	9.61	5.08	—	—	37.41

围的黑色和白色相组成, 在基体内部出现黑色棒状。根据 EDS 分析结果, 黑色相 B 为 Cr_xS_y^[18], 白色相 C 含 W、Mo 和 Ni 等元素, 结合原子比例以及 XRD 结果, 分析为 M₆C^[19]。基体中黑色棒状物 D 主要含有 Ti、Nb 和 S 元素, 推断为 TiS₂ 和 NbS₂^[20]。FW2 (见图 4c) 中 Cr_xS_y 和 M₆C 增多, 并在基体颗粒边缘发生偏聚, 基体内的硫化物同样增多。Cr_xS_y 具有 NiAs 型结构^[21], 而 TiS₂ 和 NbS₂ 具有层状结构^[22-23], 摩擦性能良好, 因此对材料的减摩有积极的作用。

2.2 力学性能分析

复合材料的力学性能参数见表 2。结果显示, 随着 WS₂ 的添加, 材料的硬度和抗压强度逐渐增加。FW1 的抗弯强度与基体 FW0 保持一致, 但 FW2 的抗弯强度明显下降。WS₂ 在烧结过程中分解生成单质 W, 一部分 W 扩散到基体中起到固溶强化作用^[24], 剩余 W 生成的 M₆C 阻碍了基体的位错滑移, 提高了复合材料的抗变形能力。因此, WS₂ 的添加改善了复合材料的硬度和抗压强度。Cr_xS_y 具有低剪切强度^[19], FW2 中过多的 Cr_xS_y 聚集在基体颗粒边缘, 导致抗弯强度下降。对比 NASA PM212^[11], 复合材料的力学性能具有较大优势, 表明复合材料满足作为承载摩擦学部件的要求。

表 2 复合材料的力学性能参数
Tab.2 Mechanical properties of composites

Samples	Vickers hardness (HV)	Compressive yield strength/MPa	Flexural strength/MPa
FW0	426	1 015	1 354
FW1	503	1 655	1 323
FW2	542	1 595	970

2.3 摩擦磨损性能分析

复合材料摩擦学性能随温度变化的情况如图 5 所示。从图 5a 可以看出, 3 种材料的摩擦系数都随温度的升高而降低, 且随 WS₂ 的增多, 摩擦系数下降更明显。FW2 在 25~600 °C 内都具有最低的摩擦系数, FW1 次之。图 5b 中, 在 25~200 °C 时, 磨损率随 WS₂ 添加量的增加而下降, FW2 在 200 °C 具有最低的磨损率 8.6×10⁻⁵ mm³/(N·m)。400 °C 时, FW0 和 FW1 的磨损率相较于 200 °C 都下降了 1 个数量级, FW1 的磨损率最低为 1.9×10⁻⁵ mm³/(N·m), 而 FW2 的磨损率有所增加。600 °C 时, FW0 的磨损率最低为 1.9×10⁻⁵ mm³/(N·m), 而 FW1 和 FW2 的磨损率上升。可见, 添加 WS₂ 能有效降低材料的摩擦系数, 并且改善材料在 25~400 °C 内的耐磨性, 但在 600 °C 时, 磨损率恶化。

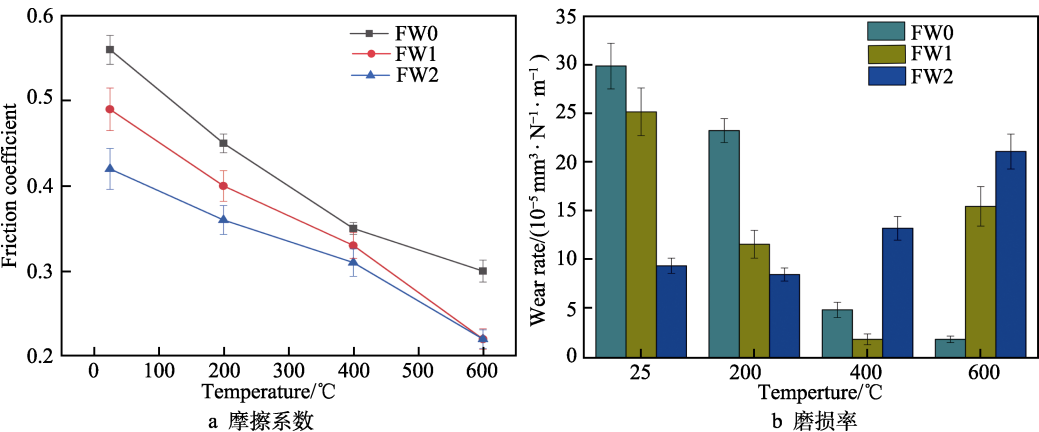


图 5 25~600 °C 复合材料的摩擦学性能

Fig.5 Tribological properties of composites at 25-600 °C:
a) variation curve of friction coefficient; b) bar chart of wear rate

不同温度下各样品的磨损表面形貌如图 6 所示。从图 6a—c 可以看出, 在 25 °C 时, FW0 的磨损表面粗糙, 存在剥落和较深的犁沟; FW1 的磨损表面犁沟细小; FW2 的磨损表面除了少量细小的磨屑外, 表面平整, 有轻微的犁沟。相比于 FW0, FW1 和 FW2 硬度和强度的提高改善了材料的变形抗力, 同时 Cr_xS_y 等硫化物良好的润滑作用, 使材料的室温摩擦磨损性能得到改善。在 200 °C 时, FW0 磨损形貌特

征为粘着磨损, 摩擦学性能改善不明显。FW1 的磨损表面仍以磨粒磨损为主, 但犁削现象减弱, 并伴随轻微的塑性变形。FW2 中磨屑与变形合金形成分层结构, 减弱了磨粒对表面的切削, 进一步降低了磨损率。因此在 200 °C, FW2 具有最优的摩擦学性能。

400 °C 时, 图 6g 中 FW0 的磨损表面出现大面积的剥落, 未剥落区形成光滑的表面。根据 A、B 两区的 EDS 分析 (见表 3) 表明, 未剥落区氧含量为

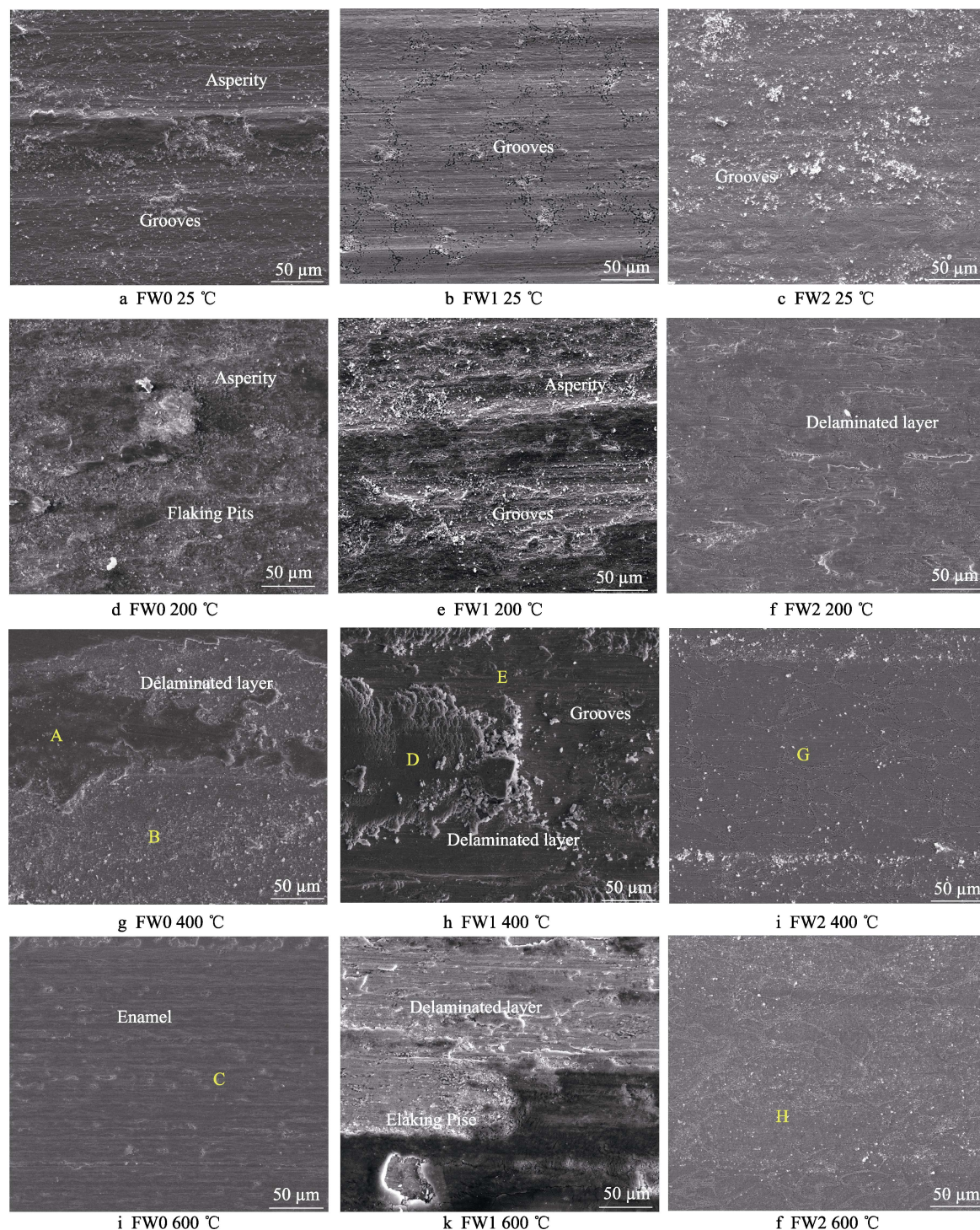


图 6 不同温度下样品磨损表面形貌

Fig.6 The worn surface morphologies of samples at different temperature

表 3 图 6 中特定区域的化学成分
Tab.3 Chemical composition in wt% of specific areas in Fig.6

Samples	wt. %									
	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Nb	S	O
A	39.30	11.05	6.23	4.49	3.23	4.30	1.25	1.94	—	28.21
B	50.35	13.41	8.20	5.17	4.55	5.33	1.57	3.02	—	9.06
C	42.82	8.69	6.82	3.50	3.00	4.29	1.48	2.49	—	27.04
D	43.02	11.83	6.16	2.74	2.13	4.16	1.26	0.38	1.10	27.22
E	34.94	12.34	8.25	12.04	8.76	6.30	3.12	2.11	5.07	7.08
F	37.68	9.05	8.60	5.44	1.89	3.76	1.73	2.23	1.29	28.57
G	58.95	14.45	5.77	2.60	2.73	4.94	1.68	3.54	1.13	3.67
H	36.92	7.34	8.06	22.19	5.63	2.83	0.85	0.55	2.56	13.07

28.21%, 明显高于剥落区的 9.06%。Raman 分析 (见图 7a) 显示, 表面含有 NiO、Cr₂O₃、NiCr₂O₄ 等氧化物, 形成的氧化膜在中高温具有良好的润滑性和保护性^[25-26]。因此, 400 °C 时, FW0 的摩擦学性能明显改善。图 6h 中, FW1 磨损表面 D 区被细小磨屑压实层覆盖, 其 EDS 分析氧含量为 27.22%, 明显高于未覆盖 E 区的 7.08%。根据 Raman 结果表明, 表面成分为 NiCr₂O₄、NiO、Cr₂O₃ 和 Cr_xS_y。FW1 表面虽未形成致密的氧化膜, 但压实层避免了摩擦副与基体的直接接触, 减弱了磨损, 且在 Cr_xS_y 的润滑作用下, 降低了摩擦系数。图 6i 中 FW2 的磨损表面光滑, 存在少量的磨屑。根据表面 EDS 和 Raman 分析结果证实, 表面未形成有效的氧化膜。在烧结过程中, 固态反应消耗基体中的大量 Cr 元素, 导致无法形成具有粘

附性 Cr₂O₃。在摩擦应力下, 偏聚的 Cr_xS_y 和 M₆C 在没有氧化膜的保护下容易剥落, M₆C 在压应力和切向力作用下切削基体, 产生了磨粒磨损, 导致磨损率上升。

在 600 °C 时, 图 6j 中 FW0 磨损表面形成连续光滑的釉质层。根据 C 区的 EDS 分析和图 7b 中 Raman 分析, 磨损表面 NiCr₂O₄ 的含量比 400 °C 明显增多。这是由于在更高温度下, 摩擦诱导了快速瞬态氧化, 形成富含 Cr₂O₃ 的釉质层^[27], 并通过釉质层的热软化特性改善摩擦性能^[28]。图 6k 中 FW1 磨损表面出现鱼鳞层状堆积, 虽然在局部区域形成氧化膜, 但存在细小的裂纹和剥落坑, 说明摩擦过程形成的氧化物的粘附性较差。结合 EDS 和 Raman 分析结果, F 区主要含有 NiCr₂O₄、NiO、Cr₂O₃ 和 Cr_xS_y。Cr_xS_y 可与基体合金形成熔点为 600 °C 的共晶体而软化, 虽然进一

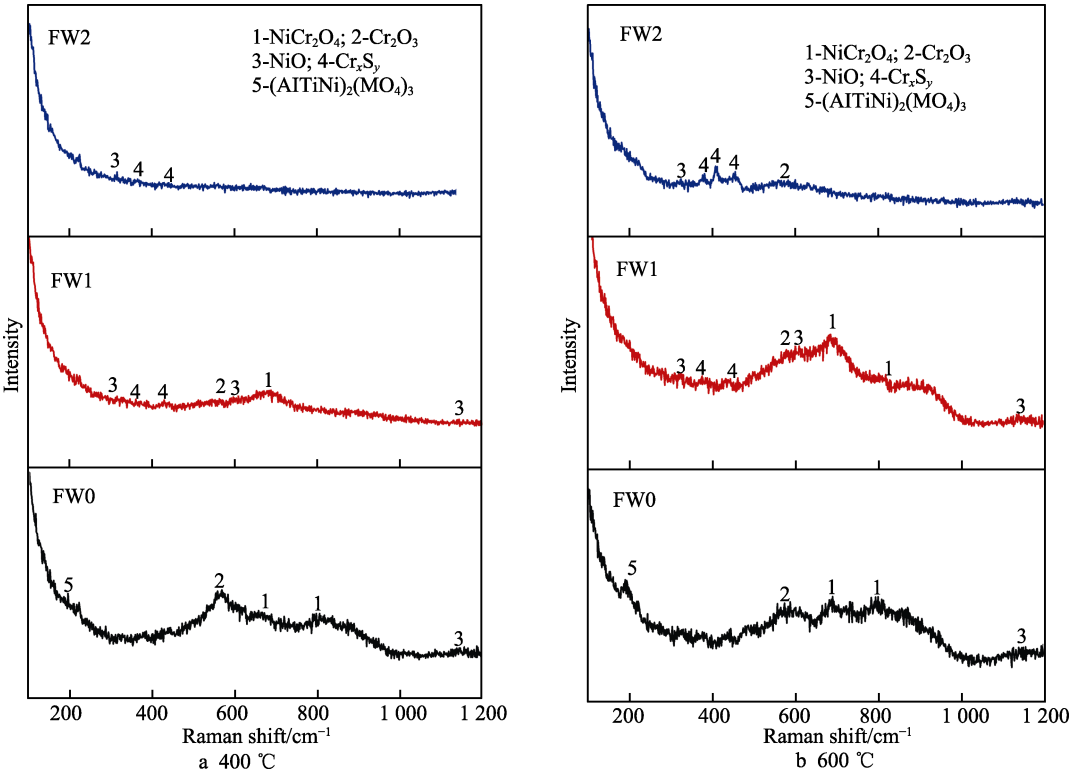


图 7 复合材料不同温度下摩擦后磨痕的拉曼图谱
Fig.7 Raman spectra of the worn surface of composites after sliding at different temperature

步降低了摩擦系数,但损害了氧化膜的粘附性,导致磨损量升高^[29]。图 61 中 FW2 磨损表面与 400 °C 时一样出现磨粒磨损,根据 H 区的 EDS 和 Raman 分析,表面未形成有效的氧化膜。其磨损率进一步升高,原因与 400 °C 时基本一致,同时 Cr_xS_y 的软化加速了 M_6C 的脱落,进而加剧了表面的磨损。

综上所述,FGH97/ WS_2 复合材料的摩擦学性能与 WS_2 的添加量以及温度有关。虽然,随着 WS_2 添加量的增加,各温度复合材料都获得了较低的摩擦系数,但是磨损率在 600 °C 时不降反增。对于这一现象,可以通过调控基体成分,增加 Cr 含量,或减少 WS_2 添加量,同时改善球磨工艺,达到细化微观结构,使硬质相 M_6C 均匀分布,改善磨粒磨损的目的。

3 结论

通过固相反应制备了 WS_2 不同含量的 FGH97/ WS_2 复合材料,研究了复合材料的力学性能以及室温至 600 °C 的摩擦学性能,得出以下主要结论:

1) 复合材料主要由 γ/γ' -Ni、 Cr_xS_y 和 M_6C 等相组成。随着 WS_2 添加量的增加,复合材料的硬度值升高,抗压强度提高,抗弯强度有所下降。优异的力学性能满足作为承载摩擦学部件的要求。

2) 复合材料的摩擦系数随着温度的升高而降低,且随 WS_2 的增多,摩擦系数下降更明显。FW1 和 FW2 的磨损率在 25~400 °C 内较低,但在 600 °C 磨损率反而上升。FW0 在 600 °C 时,表面形成了釉质层,获得了最低的磨损率。

3) 600 °C 时,FW1 和 FW2 磨损率升高归因于 Cr_xS_y 生成消耗基体中大量的 Cr 元素,使高温诱导生成保护性 Cr_2O_3 氧化膜减少,同时 Cr_xS_y 高温下的软化降低了氧化膜的粘附性,致使 M_6C 对表面产生磨削作用。

参考文献:

- [1] GONG Han-jun, YU Cheng-cheng, ZHANG Lin, et al. Intelligent Lubricating Materials: A Review[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 202: 108450.
- [2] TORRES H, RODRÍGUEZ RIPOLL M, PRAKASH B. Tribological Behaviour of Self-Lubricating Materials at High Temperatures[J]. International Materials Reviews, 2018, 63(5): 309-340.
- [3] WANG Long, GENG Yu-shan, TIEU A K, et al. In-Situ Formed Graphene Providing Lubricity for the FeCoCrNiAl Based Composite Containing Graphite Nanoplate[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 221: 109032.
- [4] FURLAN K P, DE MELLO J D B, KLEIN A N. Self-Lubricating Composites Containing MoS_2 : A Review[J]. Tribology International, 2018, 120: 280-298.
- [5] WANG Dan, TAN Hui, CHEN Wen-yuan, et al. Tribological Behavior of Ni_3Al -Ag Based Self-Lubricating Alloy with Ag_2MoO_4 Formed by High Temperature Tribo-Chemical Reaction[J]. Tribology International, 2021, 153: 106659.
- [6] 范祥娟, 李文生, 崔帅, 等. 软/硬质摩擦偶件材料对 Ni_3Al 基涂层宽温域内摩擦学行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 152-159.
- [7] FAN Xiang-juan, LI Wen-sheng, CUI Shuai, et al. Effect of Soft/Hard Friction Pairs Material on the Tribological Behavior of Ni_3Al -Based Coating in Wide Temperature Range[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 152-159.
- [8] LIU Xiu-bo, LIU Hai-qing, LIU Yuan-fu, et al. Effects of Temperature and Normal Load on Tribological Behavior of Nickel-Based High Temperature Self-Lubricating Wear-Resistant Composite Coating[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 53: 347-354.
- [9] LIU N, LIU Q, LI Z, et al. Tribological Behavior of Plasma-Sprayed Metal Based Solid Self-Lubricating Coatings under Heavy Load[J]. Wear, 2021, 486-487: 204108.
- [10] NGUYEN C, TIEU A K, DENG Guan-yu, et al. Tribological Performance of a Cost-Effective CrFeNiAl_{0.3}Ti_{0.3} High Entropy Alloy Based Self-Lubricating Composite in a Wide Temperature Range[J]. Tribology International, 2022, 174: 107743.
- [11] PARVEEZ B, WANI M F. Tribological Behaviour of Nano-Zirconia Reinforced Iron-Based Self-Lubricating Composites for Bearing Applications[J]. Tribology International, 2021, 159: 106969.
- [12] DELLACORTE C, SLINNEY H, BOGDANSKI M. Tribological and Mechanical Comparison of Sintered and HIPped PM212-High Temperature Self-Lubricating Composites[J]. Lubrication Engineering, 1992, 48: 877-885.
- [13] PAN Yu, LI Wei-bin, LU Xin, et al. Microstructure and Tribological Properties of Titanium Matrix Composites Reinforced with *in Situ* Synthesized TiC Particles[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110633.
- [14] SHANG Cai-yun, ZHANG Fa-ming, WANG Juan, et al. Interface Configuration Effect on Mechanical and Tribological Properties of Three-Dimension Network Architectural Titanium Alloy Matrix Nanocomposites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 158: 106981.
- [15] XU Jie, KONG Xuan, CHEN Ming-hui, et al. High-Entropy FeNiCoCr Alloys with Improved Mechanical and Tribological Properties by Tailoring Composition and Controlling Oxidation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 82: 207-213.
- [16] LI Bo, LIU Fei, LI Cong, et al. Effect of Cr Element on the Microstructure and Oxidation Resistance of Novel NiAl-Based High Temperature Lubricating Composites[J]. Corrosion Science, 2021, 188: 109554.
- [17] XIE Lei-peng, SUN Wen-yao, WANG Jin-long, et al. Improving Strength and Oxidation Resistance of a Ni-Based ODS Alloy via *In-Situ* Solid-State Reaction[J]. Corrosion Science, 2022, 197: 110078.
- [18] QU Zong-hong, ZHANG Ping-xiang, LAI Yun-jin, et al. Influence of Powder Particle Size on the Microstructure of a Hot Isostatically Pressed Superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1283-1292.