

金属基高温自润滑复合材料研究现状及展望

陈明辉, 宋凯利, 甄宇, 王福会
(东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 传统自润滑复合材料虽通过多相协同作用展现优异摩擦学性能, 却面临力学性能不足和高温氧化失效的双重挑战。前者限制承载能力, 后者导致氧化膜增厚引发运动滞涩。基于氧化调控的新策略通过诱导摩擦过程原位生成特定氧化产物或结构, 可有效提升复合材料的综合性能。通过系统梳理高温自润滑复合材料研究现状以及面临的问题, 重点阐述3类氧化调控策略, 分别为选择性生成易烧结氧化物、原位构建表面织构、自生润滑相, 建立动态润滑机制, 为开发兼具优异力学性能、摩擦学性能与抗氧化的自润滑复合材料提供理论支持与技术参考。

关键词: 氧化; 高温; 自润滑; 磨损; 复合材料

中图分类号: TG 178 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)08-0020-12

Research Status and Prospects of Metal Matrix High-Temperature Self-lubricating Composites

CHEN Ming-hui, SONG Kai-li, ZHEN Yu, WANG Fu-hui

(School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHEN Ming-hui, E-mail: mhchen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Traditional self-lubricating composites demonstrate excellent tribological properties through multiphase synergy, yet they face dual challenges of insufficient mechanical strength and high-temperature oxidation failure. The former restricts their load-bearing capacity, while the latter induces kinematic stagnation as a result of excessive oxidation film growth. A new strategy based on oxidation regulation can effectively enhance the comprehensive performance of composites by inducing the in-situ generation of specific oxidation products or structures during the friction process. By systematically reviewing the current research status and problems faced by high-temperature self-lubricating materials, three types of oxidation regulation pathways are mainly expounded, namely selective formation of easily sintered oxides, in-situ construction of surface textures, and autonomous generation of lubricative phases, so as to establish dynamic lubrication mechanisms. These findings provide theoretical foundations and technical benchmarks for developing self-lubricating materials with excellent mechanical strength, tribological properties, and oxidation resistance.

Key words: oxidation; high-temperature; self-lubricating; wear; composites

当两个相互接触的物体沿接触面的切线方向运动或有相对运动趋势时, 便会产生一个阻碍它们相对运动的作用力, 称之为摩擦力^[1-3]。摩擦力是广泛存在于自然界和工业界中的一种普遍作用力。在某些情况下摩擦力是不可或缺的, 比如, 当人们行走时, 摩擦力提供了必要的抓地力。但是,

在机械零部件中, 摩擦力大多数情况下都是有害的, 机械的发展史就是同摩擦力的斗争史^[4]。大约一万年以前, 人类发明了轮子, 这被认为是一项重要的技术进步。因为轮子使大多数运动由高阻力的滑动摩擦转变为低阻力的滚动摩擦, 加快了人类对物资的运输。此后在轮子的使用过程中, 人们又

逐渐发明了轴承和齿轮,极大地促进了人类文明的进步和社会的发展.在轴承和齿轮的使用过程中人们又逐渐认识到润滑的重要性.由最初的水、动物脂肪、植物油这些由自然界直接获取的润滑物质,逐渐发展到矿物油、合成润滑油以及固体润滑剂等合成物质,润滑油脂的使用极大地提高了机械的使用效率.随着科技的进步,机械设备面临的使用环境愈加苛刻,对材料和润滑效果的要求也越来越高.航空、航天、核电等高新技术装备的服役工况极其恶劣,涉及高真空、高温、高压以及多工况耦合.在这些环境中,常规的润滑方式难以发挥作用,需要材料本身具有一定的润滑能力,自润滑复合材料便应运而生^[5-8].

根据使用工况,自润滑复合材料可以划分为多种类型,本文主要针对高温含氧气氛摩擦磨损工况,总结了高温自润滑复合材料的发展历史,以及目前我国研究机构在该领域的研究现状,同时指出了目前高温自润滑复合材料面临的问题.最后,综述了本团队为解决高温自润滑复合材料的应用难题在材料设计方面的研究进展.

1 高温自润滑复合材料研究简介

1.1 高温自润滑复合材料研究历史

为了解决航空航天装置的润滑问题,美国国家航空航天局(NASA)率先于20世纪70年代开展了高温自润滑复合材料的研究^[9-11].其设计理念是将本身具有低剪切强度的固体润滑剂加入到金属基体材料中,使复合材料也具备较低的摩擦系数.在研究中发现只加入润滑相时,材料的磨损率较高,为了提高材料的耐磨性,将一些较硬的陶瓷相加入其中.依据此思路分别开发了PM系列的自润滑复合材料和PS系列热喷涂自润滑涂层^[12-14].其中两种广为人知的自润滑复合材料和复合涂层分别为PM304和PS304,其成分均为质量分数为60% NiCr合金、20% Cr₂O₃以及10% Ag和10% CaF₂/BaF₂共晶体.上述自润滑复合材料成功地应用于箔片空气轴压轴承在低温和高温启停时的工况,在使用环境温度达到650℃时箔片依旧能承受10 000次循环,具有良好的摩擦磨损性能^[14-16].此后,国内外研究机构也开展了相关的自润滑复合材料和涂层方面的研究,但大多数延续了NASA的思路,即由基体相、润滑相以及耐磨相3种成分构成自润滑复合材料,所作的皆是在各类基体中尝试不同的润滑相以及耐磨

相,期望获得最佳匹配性能的组合.

1.2 高温自润滑相及其润滑机理

自润滑复合材料的润滑性主要来源于添加的润滑相.因此,润滑相的种类和含量均会极大地影响自润滑复合材料的摩擦学性能^[17-20].以下将介绍高温自润滑复合材料目前常用的几种润滑相,并对其润滑机理进行分析.

1.2.1 软金属银及银的复合氧化物

文献^[21-23],利用软金属Ag及其复合氧化物作为润滑相,通过超音速等离子热喷涂技术研制了多种宽温域自润滑复合材料以及涂层,如NiMoAl-Ag-Al₂O₃, NiAl-AgNbO₃以及NiAl-NbC-Ag,上述几种复合材料/涂层均具有较好的高温润滑性能以及耐磨性能^[21-26].如图1所示,当在NiAl基体中加入质量分数为20%的AgNbO₃后(对应图中NAB20),材料在800℃时的摩擦系数从0.4降到了0.3,磨损率从 $2.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$ 降到 $4.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$.Ag以及层状复合氧化物AgNbO₃赋予了这些复合材料优异的润滑性能.而AgNbO₃在高温下反应生成的NbC则极大地提高了材料的耐磨性^[26].

丁春华等^[27]使用真空烧结法制备了Ag₂MoO₄/Ag润滑的NiCr基自润滑复合材料,研究表明当润滑相质量分数为15%时,材料具有优异的摩擦学性能,相比于基体,复合材料的摩擦系数与磨损率下降了近50%.李建等^[28-29]采用粉末冶金工艺制备了NiCr-MoS₂-Ag-V₂O₅复合材料,并研究了该材料从室温到600℃时的摩擦学性能.研究表明在室温时材料良好的摩擦学性能主要来自银的润滑作用,而随着温度的升高银与二硫化钼以及空气中的氧气反应生成的钼酸银是材料摩擦系数降低的主要原因.

1.2.2 硫化物和氟化物润滑相

文献^[30-38]以Co基高温合金为基体,Al₂O₃, CuO, TiO₂, ZrO₂及SiC等陶瓷颗粒为增强相,对多种润滑相(Ag、各类硫化物和氟化物)进行筛选,开发了系列自润滑复合材料,如CoCrTi+WS₂+CuO, CoCrW+LaF₃+Mo+Ag, CoCrNi+MoS₂和CoCrMo+CeO₂+LaF₃.这些材料在高温下均具有良好的摩擦学性能.对于CoCrTi+WS₂+CuO而言,其优异的高温润滑性能来自于WS₂, CuO以及Co和Ti氧化生成的氧化物膜.随着CuO含量的升高,复合材料的耐磨性不断升高^[36].对于CoCrW+LaF₃+Mo+Ag复合材料而言,在滑动过程中,磨痕表面形成富银的润滑膜;高温时,银与

其他元素发生反应,形成高温润滑剂 AgF_3 和 Ag_2MoO_4 . 由于 Ag , LaCrO_3 , Ag_2MoO_4 , AgF_3 , 金属氧化物和 LaF_3 的协同作用,复合材料在高温和低温时均具有较低的摩擦系数^[37]. 对于 $\text{CoCrMo} + \text{CeO}_2 + \text{LaF}_3$ 而言,材料设计思路是采用 CeO_2 作为耐磨相, LaF_3 作为润滑相. 高温摩擦后磨痕表面

形成了 CeCrO_3 , LaCrO_3 , CeF_3 , CoO , CrMoO_3 和 La_2MoO_6 的氧化物和氟化物. 这些化合物作为高温固体润滑剂具有高温润滑作用,同时大量化合物在磨损表面形成致密连续的氧化物膜,隔离了摩擦副的直接接触,降低了接触面的剪切强度,从而使材料在高温下获得良好的摩擦磨损性能^[38].

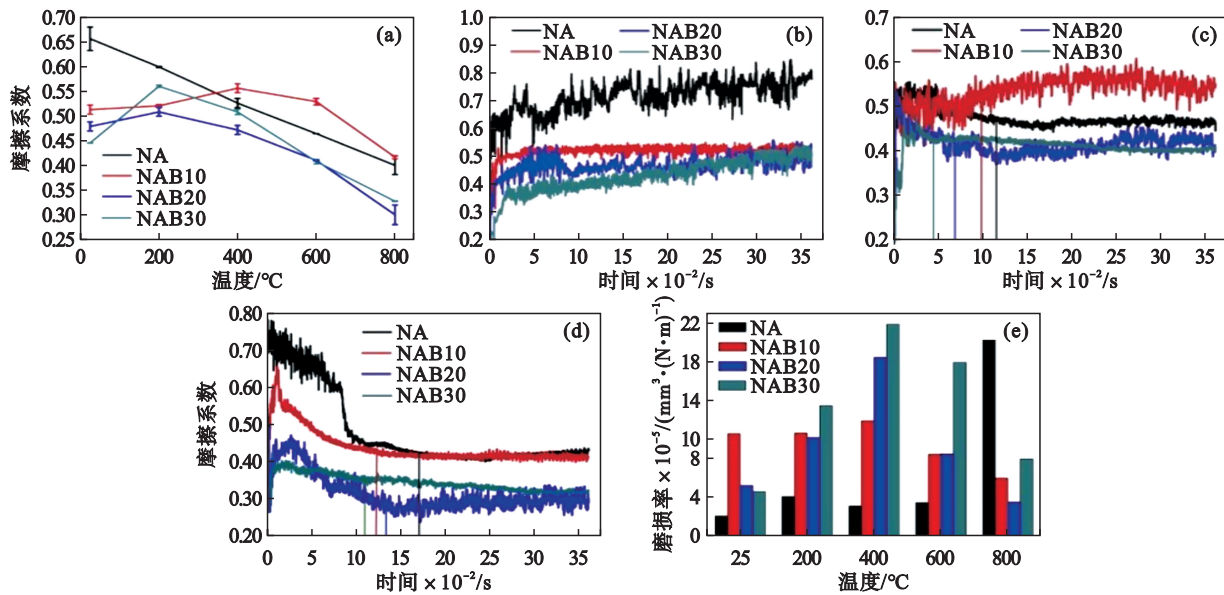


图1 NiAl和NiAl-AgNbO₃复合材料的摩擦和磨损性能^[26]

Fig. 1 Friction and wear properties of NiAl and NiAl-AgNbO₃ composites^[26]

(a)—摩擦系数与温度的关系; (b)—25 °C时摩擦系数与时间的关系; (c)—600 °C时摩擦系数与时间的关系; (d)—800 °C时摩擦系数与时间的关系; (e)—磨损率与温度的关系。

文献[39]利用放电等离子体烧结技术制备了添加 CaF_2 与 BaF_2 的 $\text{Al}_{0.3}\text{CrFeNiTi}_{0.3}$ 高熵合金 (HEA) 基自润滑复合材料,并对复合材料在不同温度下的磨损性能进行了研究,其中 HEA 为基体合金, $\text{HEA}-\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ 为复合材料. 如图 2 所示,复合材料在高温下摩擦系数稳定在 0.34~0.35,相比于基体的 0.4 以上,具有较好的润滑性能.

1.2.3 氧化物和盐类润滑相

氧化物具有高稳定性、低黏着性以及高硬度等特性,在高温摩擦学方面备受关注^[40]. 通常,氧化物在室温下均具有较高的脆性,不容易变形和剪切,难以在摩擦界面形成光滑的润滑膜^[40-41]. 此外,氧化物磨屑通常具有磨粒性质,这会导致严重的磨粒磨损和犁削. 因此,氧化物在室温摩擦时具有较差的摩擦学性能. 但是,随着温度的升高,部分金属氧化物具有了一定的韧性,结合其本身不易黏着的特性,这使得部分氧化物在高温下具有较低的摩擦系数,如表 1 所示,部分氧化物在高温下的摩擦系数甚至可以达到 0.1,润滑性非常优异^[40,42],因此可以将其作为固体润滑剂添

加到材料中,使材料具有良好的摩擦学性能^[42-45]. 此外,一些特殊种类的氧化物会在高温下反应生成复杂盐类,而这些盐类通常具有较低的熔点,可以起到减小摩擦的作用,如钼酸盐、铋酸盐、钨酸盐和硼酸盐等^[40,46-47]. Murakami 等^[48]在 Al_2O_3 和不锈钢表面制备了硫酸钡涂层并研究了其摩擦磨损性能,该涂层在高温下具有较低的摩擦系数,显示出很好的润滑性.

2 高温自润滑复合材料面临的问题

经过几十年的发展,国内一些科研机构在自润滑复合材料方面积累了丰富的研究经验,其中清华大学在润滑机理以及超滑理论方面作出了巨大贡献. 中国科学院兰州化学物理研究所、太原理工大学、中南大学以及西安交通大学等研发团队设计了很多具有优异摩擦特性的高温自润滑复合材料和涂层,推动了我国自润滑复合材料的发展. 然而,就目前所报道的自润滑复合材料而言,均存在两个最重要的限制,一是复合材料力学,二是复合材料高温耐腐蚀性能.

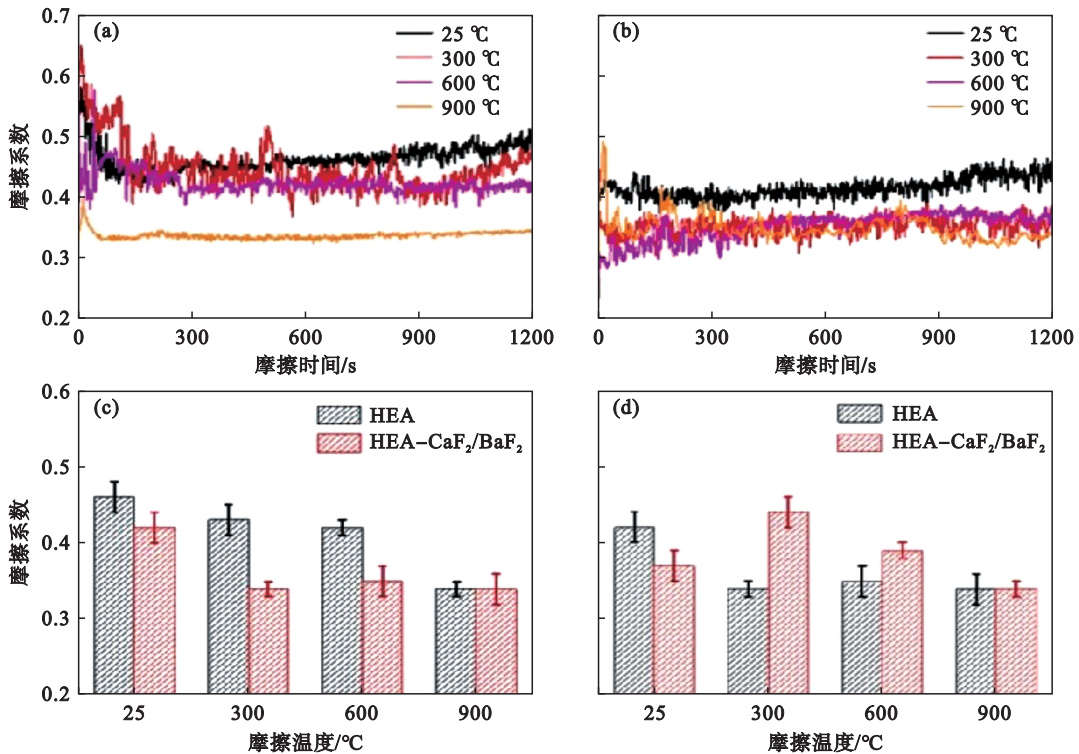


图2 HEA和HEA-CaF₂/BaF₂固体自润滑材料的摩擦和磨损性能^[39]

Fig. 2 Friction and wear properties of HEA and HEA-CaF₂/BaF₂ solid self-lubricating materials^[39]

(a)一块体HEA摩擦系数随时间变化关系;(b)一块体HEA-CaF₂/BaF₂摩擦系数随时间变化关系;

(c)—在不同温度下HEA与HEA-CaF₂/BaF₂平均摩擦系数比较;

(d)—在不同温度下HEA-CaF₂/BaF₂与HEA-Ag平均摩擦系数比较.

表 1 一些金属氧化物在 3 种温度下的摩擦系数^[40]
Table 1 Friction coefficients of some metal oxides at three temperatures^[40]

材料种类	摩擦系数		
	204 °C	316 °C	593 °C
无氧化物润滑物质	0.46~0.78	0.75	0.60~0.80
PbO	0.19	0.10	0.10
B ₂ O ₃	0.64	0.51	0.18
CrO ₃	0.14	—	—
Re ₂ O ₇	0.35	0.23	—
ReO ₂	0.64	—	0.27
Cu ₂ O	0.30	0.14	0.48
CuO	0.60	0.50	0.22
CoO	0.46	0.38	0.18
MoO ₃	0.51	0.69	0.38
WO ₃	0.41	0.60	0.56
Fe ₃ O ₄	0.60	—	0.40
Fe ₂ O ₃	0.46	—	0.42
V ₂ O ₅	0.53	0.52	0.32
TiO ₂	0.68	—	—
Al ₂ O ₃	0.77	—	—
Cr ₂ O ₃	0.41	0.64	—
NiO	0.70	—	0.69

2.1 自润滑复合材料力学性能

自 NASA 开发出第一代高温自润滑复合材

料后,绝大多数自润滑复合材料的设计便延续着相同的思路,在基体材料中引入各种润滑相以及耐磨相,利用润滑相的润滑性以及硬质陶瓷相的耐磨性赋予材料优异的摩擦学性能.然而,这种设计带来的摩擦学优势是以牺牲复合材料的力学性能而获得的.如上所述,常规的高温润滑相均为低剪切强度的陶瓷或者软金属.图 3 所示为 WS₂ 的结构示意图,可见 WS₂ 为典型的层状结构,层内原子以共价键结合,层间依靠分子间作用力吸附在一起,其剪切强度极低^[49].此外,陶瓷硬质颗粒作为增强相,在增强金属基体的同时大幅度降低了复合材料的韧性.Zhang 等^[17]在 CoCrFeNi 高熵合金中加入 Ni 包石墨和 Ni 包 MoS₂ 两种润滑相,获得了具有良好摩擦学性能的自润滑复合材料,但是材料的断裂韧性却大幅度下降,相比于基体的 24.8 MPa·m^{1/2},复合材料的断裂韧性仅有 14.3 MPa·m^{1/2},降低了 40% 以上.

2.2 自润滑复合材料高温抗氧化性能

几乎所有的金属在高温下都会与氧发生反应生成氧化物,温度越高该反应越迅速.只有在金属表面形成一层致密且稳定的氧化膜后,隔绝了金属与氧气的直接接触,才可以有效地降低该

反应速率. 当在金属中加入硬质颗粒以及润滑相时, 金属表面会有部分位置被第二相占据, 因此复合材料表面无法形成稳定且致密的氧化膜, 材料会与氧在高温下持续反应, 氧化膜持续增厚影响运动部件的稳定性. 另外, 加入的润滑相若是容易与氧反应的物质, 则这些物质在高温下与氧的反应通常不可控, 氧化速率大. 如图 4 所示, Ni20Cr 合金基体中加入质量分数为 10% 的 WS₂ 和 15% 的 Ti 制备的自润滑复合材料(对应图 4 中的 NW15T), 在 800 °C 氧化 1 h 单位面积质量增加即达到 0.2 mg/cm², 而文献[50-51]报道纯 Ni20Cr 合金在 900 °C 氧化 100 h 后单位面积增加的质量也仅为 0.3 mg/cm², 由此可知当加入润滑相以及耐磨相会显著降低材料的抗氧化性能.

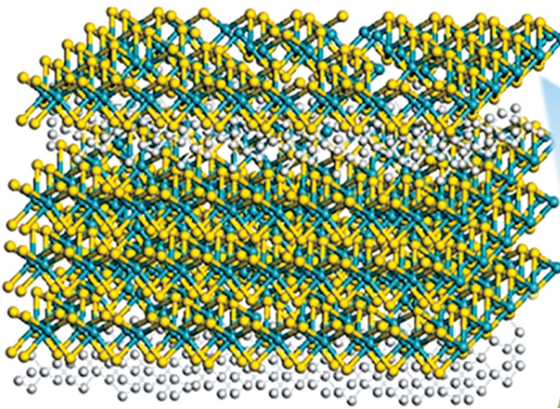


图 3 WS₂ 的结构示意图^[49]

Fig. 3 Schematic diagram of WS₂ structure^[49]

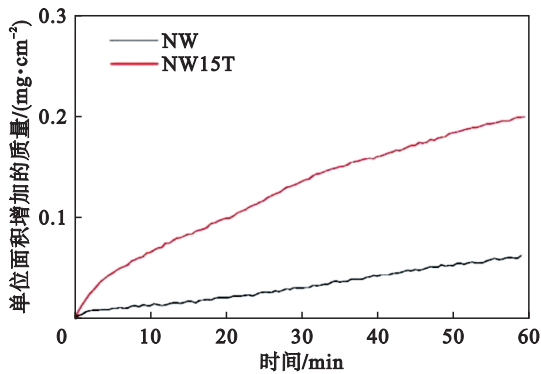


图 4 NW 和 NW15T 在 800 °C 的氧化动力学曲线^[50]

Fig. 4 Oxidation kinetics curves of NW and NW15T at 800 °C^[50]

3 基于氧化调控的高温自润滑复合材料设计

氧化反应控制得当可成为复合材料实现高温减摩降磨的有力助手. 在摩擦力的反复作用下, 部分氧化产物可在环境温度下在摩擦界面生

成一种复杂的压实的氧化物层, 或称之为釉质层^[52-54]. 釉质层的存在避开了与摩擦副的直接接触, 降低了摩擦阻力以及磨损率, 对基体具有很好的保护作用^[52,54-58]. 还有一部分氧化产物, 其本身即是一种优异的高温自润滑相, 如表 1 所示的 PbO 和 CoO 等. 这种通过表面氧化调控的方式, 可在最大限度保证复合材料力学性能、高温抗氧化性能和加工性能的基础上, 赋予复合材料高温自润滑功能. 该技术将是高温自润滑复合材料实现更大范围工业应用的关键.

3.1 选择性氧化生成易烧结的氧化产物

釉质层的生成是磨屑在高温下压实烧结的过程, 若生成的磨屑具有较为优异的烧结性, 便可在更低的摩擦温度下更快地在材料表面形成釉质层, 覆盖在合金表面可有效地隔离摩擦副之间的接触, 极大地降低了材料的摩擦系数与磨损率^[59-63].

Motallebzadeh 等^[59]研究了 Stellite 12 涂层的摩擦学性能随温度的变化关系, 研究表明随着温度的升高涂层的耐磨性呈现先升高再降低的规律. 随着温度的升高材料强度降低, 黏着磨损与磨粒磨损加剧, 材料的磨损率升高. 当温度持续上升时, 材料表面生成了一层致密的釉质层, 从而使材料磨损率下降. 同样的规律也表现在 CoFeNiVZr 合金中, 根据 Jiang 等^[60]的研究, 在 800 °C 时, 材料的磨损率会急剧降低. 值得注意的是, 对于这两种材料而言, 与低温相比, 高温下磨损生成的氧化物仅仅多了 Co₃O₄^[59-60]. 显然, Co₃O₄ 的生成是合金表面形成致密釉质层的关键. 值得注意的是, 这种氧化物仅在较高的温度下(600 °C 以上)生成, 因此如何设计在更低的温度下形成该种氧化物对扩展材料的使用温度具有重要的意义.

基于对 FeCoNiCr_{0.5} 高熵合金氧化的充分了解, 本团队通过调控合金中 Co 与 Cr 的比例, 设计了 FeCo_xCr_y 成分的系列高熵合金^[64]. 如图 5 所示, 通过 Co/Cr 成分配比的调控, 使得合金表面选择性地生成了易烧结的 Co₃O₄, 而抑制 Ni 和 Fe 的氧化. 通过不同制备工艺制备了 3 种合金粉末, AM-Co10Cr05 为通过雾化法制备的基础合金粉末, 成分为 FeNiCo1.5Cr0.5, MA-Co15Cr05 以及 MA-Co10Cr10 的合金粉末则是在 AM-Co10Cr05 基础上分别通过球磨添加原子分数为 10% 的 Cr 和 10% 的 Co 制备而成. 其中性能最优异的为 MA-Co15Cr05 合金, 该合金在 400 °C 摩擦 10 min 后, 表面便生成了较为完整致密的釉质层(图 6), 摩擦系数与磨损率分别为 0.33 与 4.0×10⁻⁵ mm³·(N·m)⁻¹.

该数据与文献[17]报道的通过在 FeNiCoCr 中加入质量分数为 5% 的石墨与 8% 的 MoS₂ 制备的复合材料的摩擦系数与磨损率相差无几。但是,该合金的强塑性极为优异,相比加入质量分数为 5% 的石墨与 8% 的 MoS₂ 的复合材料在 921 MPa 时即被压溃,该复合材料在 2 495 MPa 时依旧不会断裂。

3.2 表面织构的原位构建

材料在高温摩擦时表面会产生大量磨屑,实际上,绝大多数的磨屑在摩擦过程中离开了磨痕表面,只有少量的磨屑烧结后在摩擦表面形成了釉质层,因此,磨痕表面遗留的磨屑总量极大地影响釉质层的产生^[50, 65-68]。Kato 等^[65]为了使钢表面更快地生成釉质层,在摩擦时人为地添加一些氧化物,促进钢表面釉质层的生成,从而大幅度提高钢的摩擦学性能。事实上,若可通过磨屑捕捉,保证更多的磨屑停留在磨痕表面,亦可促使磨屑烧结并更快地形成致密釉质层^[67-68]。显然,相比于表

面平整的区域,一些凹凸不平的区域更容易遗留磨屑。表面织构便是一种表面改性的方式,通过一些物理或化学方法在材料表面设计一些特殊结构,使更多的磨屑遗留在磨痕表面,加速高温下的烧结过程,从而促进釉质层的产生。

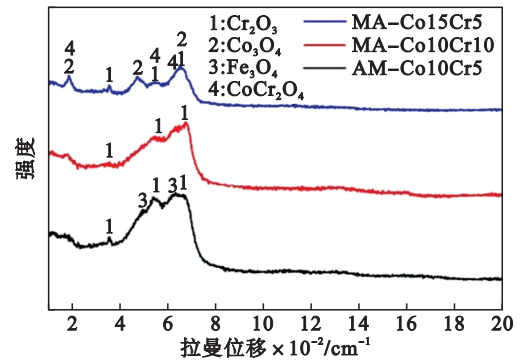


图 5 3 种高熵合金在 400 °C 下摩擦 30 min 后磨痕表面的拉曼光谱

Fig. 5 Raman spectra of worn scar on three high entropy alloys after friction at 400 °C for 30 min

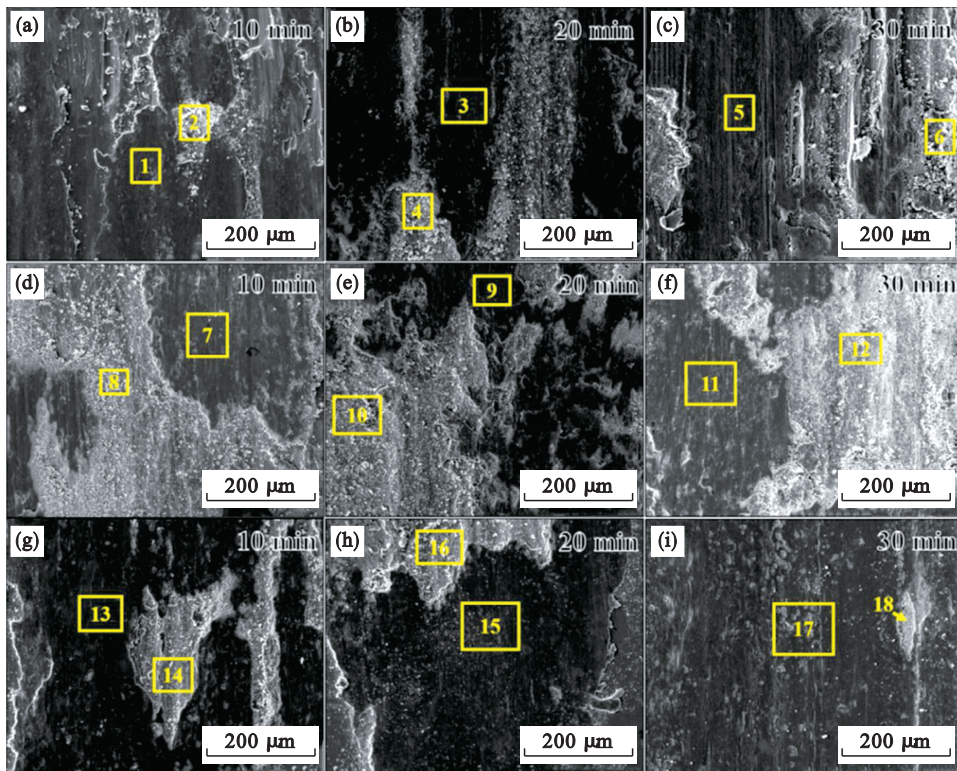


图 6 3 种高熵合金在 400 °C 下摩擦不同时间后的磨损形貌^[64]

Fig. 6 Wear morphologies of three high entropy alloys after friction at 400 °C for different durations^[64]

(a~c)—AM-Co10Cr5; (d~f)—MA-Co10Cr10; (g~i)—MA-Co15Cr5^[64]。

目前已有大量科研人员通过反应离子刻蚀、机械压刻或激光加工技术在材料表面加工出具有一定几何形貌与尺寸且排列规律的图案,改变摩擦表面的物理化学特性^[69-71]。Grabon 等^[70]研究了微凹坑与珩磨网纹相的组织对缸套-活塞环摩

擦副在低速重载下摩擦系数的影响,研究表明微凹坑与珩磨网纹相结合的织构具有优异的摩擦学性能,其具有最小的摩擦系数与磨损率。魏晓凤^[71]使用激光加工技术在人工髋关节材料表面制备了微结构,有效地降低了摩擦副的摩擦系

数.但是对于复杂的工程构件而言,该方法不仅效率低下,且使得零部件的成本急剧升高.基于此,本团队设计了一种异质结构新材料,即在NiCr合金基体中引入Ti,使其高温烧结时与Ni反应生成较硬的 Ni_3Ti 金属间化合物,包覆软相NiCr基体,形成核壳异质结构,具体结构如图7所示^[72].受力时,较硬的 Ni_3Ti 中间相承担了较高的应力,使复合材料的屈服强度得到了极大的提升,从658 MPa提升至1 645 MPa,增幅达2.5倍.此外,较软的NiCr基体相与较硬的 Ni_3Ti 相在高温下氧化速率相差较大(TiO_2 的生长速率远大于 Cr_2O_3),异质结构材料在800 °C氧化30 min后,表面即可形成原位凹凸结构(TiO_2 凸起+ Cr_2O_3 凹陷)^[73].因此,对于一些复杂工程零部件,只需要提

前将零部件在800 °C下预氧化30 min,即可在表面获得良好的织构,克服了传统方法无法加工复杂工程部件的难题.如图8所示,该结构在摩擦过程中起到了有效捕捉磨屑的作用,使该材料在高温下可以更快地形成釉质层,有效地提高了复合材料的磨损率.在800 °C时材料的摩擦系数由0.40降到0.28,而磨损率则从 $7.65 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降到 $2.10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,磨损率下降了97.3%^[50].此外,相比于其他自润滑复合材料,为获得良好摩擦学性能在材料中添加质量分数为20%的润滑相,而该材料在保证同样摩擦学性能的前提下,只需添加质量分数为10%的润滑相,极大地减少了润滑相的加入,因此,该材料具有更为优异的高温抗氧化性能.

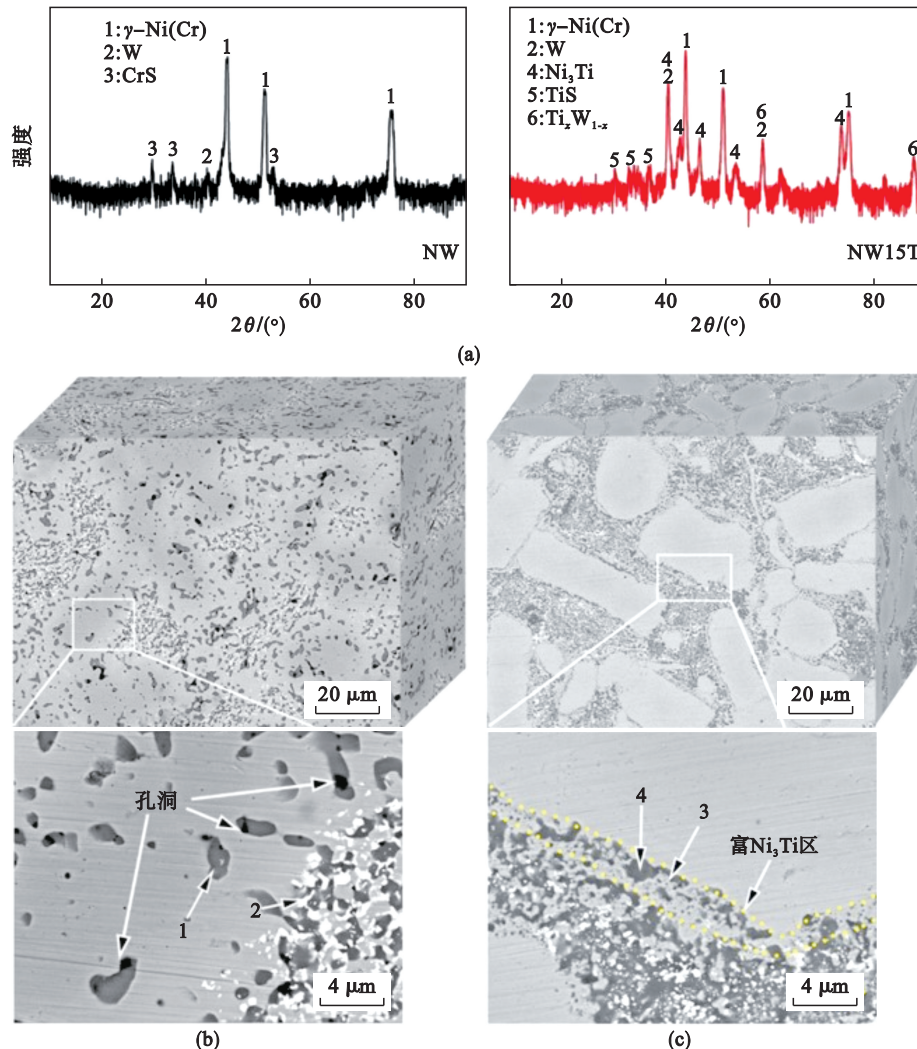


图7 NW 和 NW15T 的物相成分和微观结构^[73]

Fig. 7 Phase constituents and microstructures of NW and NW15T^[73]

(a)—XRD谱; (b)—NW的SEM微观结构; (c)—NW15T SEM微观结构.

3.3 原位自生低熔点润滑相

燕松山等^[18]研制的Pb-Sn-Ag, Pb-Sn-Ag-Cu润滑材料,以及李超^[19]制备的Pb-Sn-Ag-Re

润滑材料,都是基于润滑相的润湿性与高温低熔点特性设计出的原位自生润滑相复合材料.这种复合材料是将多元固体润滑相通过熔渗工艺加

入到多孔金属陶瓷基体的汗腺式微孔中制备而成的,是一种润滑元素梯度分布的润滑层复合材料.但是,润滑相在高温下的直接熔出会致使其

与基体的润湿性变差,进而降低复合材料的致密度,影响其力学性能.

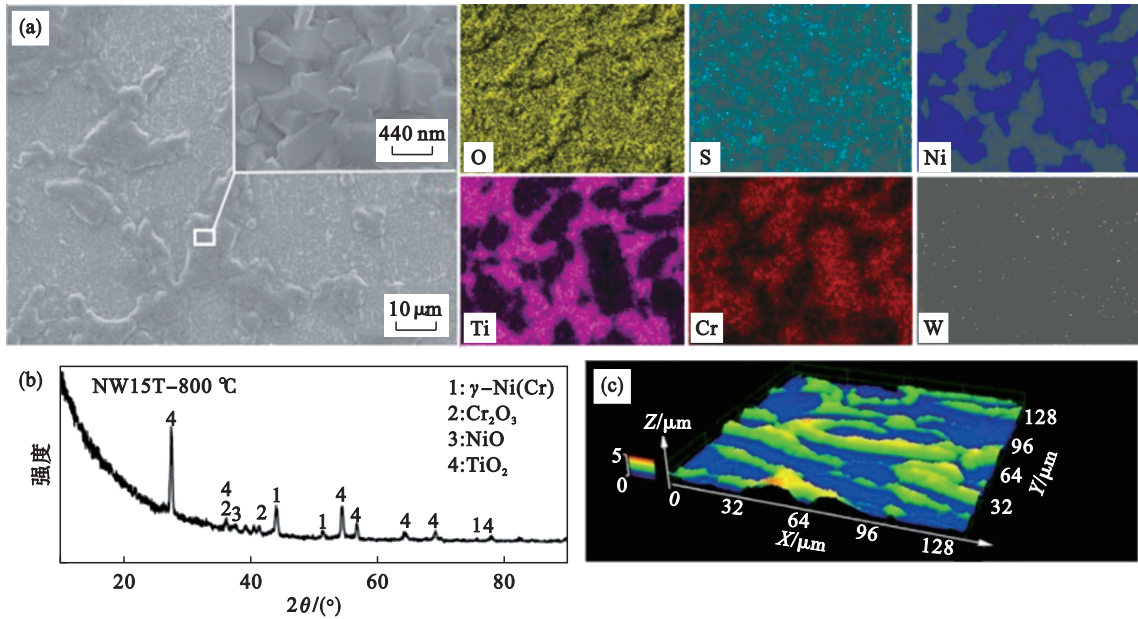


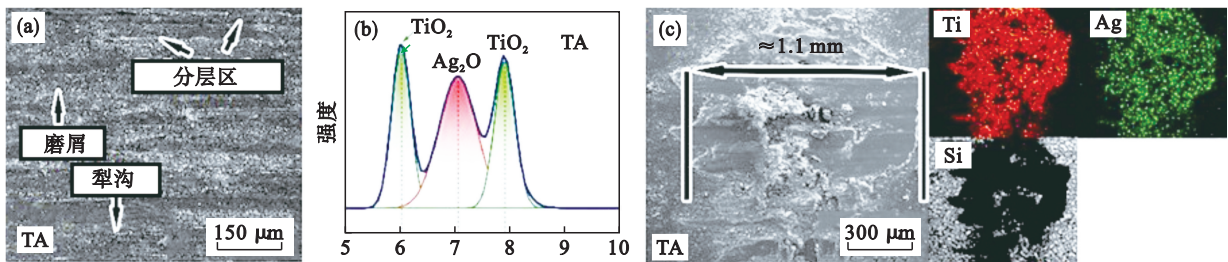
图 8 NW15T 预氧化后表面特征^[50]

Fig. 8 Surface characteristics of NW15T after pre-oxidation^[50]

(a)—表面形貌和能谱分析; (b)—XRD 谱; (c)—复合材料 NW15T 在 800 °C 下氧化 30 min 后形成氧化膜的三维图.

针对复合材料力学性能与自润滑性能无法协调的局限性,本团队提出了一种新思路,即通过添加纯金属元素且与基体能形成良好界面结合的前提下,又能在高温氧化与摩擦载荷的作用下原位自生低熔点润滑相.文献[64]通过调控 Mo 与 Ag 的含量设计并制备出一种复合材料 Ti-Mo-Ag, 该材料由等轴 β-Ti(Mo) 相组成,相中间分布一些 TiAg 与 α-Ti 组成的片层,这种特殊的组织结构,赋予了复合材料较为优异的力学性能,其抗压强度高达 1 760 MPa,且依旧具有接近 27% 的高塑性,对比其他类型的自润滑复合材料,该材料的力学性能十分优异.此外,在设计 Ti-Mo-Ag 复合材料时,直接加入银以及银的复合氧化物,在高温摩擦后,材料表面原位形成了钨酸银,如图 9 所示.该材料并非像其他自润滑复

合材料设计那样直接加入钨酸银,这也是该 Ti-Mo-Ag 复合材料具有优异的力学性能的原因之一.钨酸银是一种双金属氧化物,其晶胞由 AgO₆ 八面体团簇和 MoO₄ 四面体团簇 2 个结构单元组成,在外力作用下 Ag-O 键容易断裂,导致层间滑动,因此其具有较低的摩擦系数^[74-76].由于低熔点高温润滑相 Ag₂MoO₄ 的原位自生,复合材料 Ti-Mo-Ag 在 600 °C 表现出较低的磨损率 8 × 10⁻⁶ mm³ · (N · m)⁻¹,以及低摩擦系数 0.21,如图 10 所示,相比其他外加润滑相的复合材料,该材料的摩擦学性能同样极为优异^[77-82],且设计该自润滑复合材料时并未加入任何会严重破坏材料高温抗氧化性能的陶瓷润滑相,因此该复合材料的抗氧化性能不会严重下降.



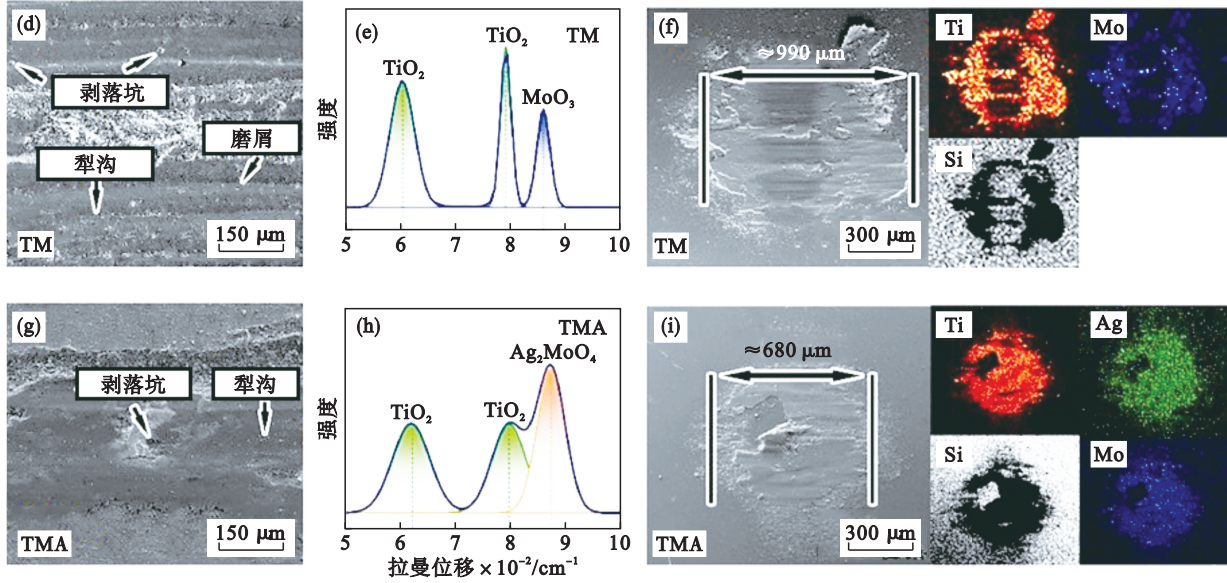


图9 复合材料TA(Ti+15%Ag), TM(Ti+10%Mo)以及 TMA(Ti+10%Mo+15%Ag)磨损表面的表征^[77]

Fig. 9 Wear scar characteristics of three composites of TA(Ti+15%Ag), TM(Ti+10%Mo) and TMA(Ti+10%Mo+15%Ag)^[77]

(a, d, g)—复合材料的表面形态; (b, e, h)—拉曼光谱; (c, f, i)—耦合球的表面形貌和元素分布.

除 Ag_2MoO_4 外, Ag_3VO_4 也具有相似的性能, Aouadi 等^[46]研究了氮化钒/银纳米复合涂层在室温到 1 000 °C 的摩擦磨损性能,发现银和钒在高温下与氧气反应,原位生成氧化钒和 2 种钒酸银相的混合物,即 $AgVO_3$ 和 Ag_3VO_4 ,并在摩擦表面

形成光滑的润滑膜,从而使得涂层摩擦系数降低,且文献[46]表明,当将 Ag_3VO_4 加热到 450 °C 时,会分离成银和液体相.因此,钒酸银作为一种高温低熔点润滑相,也能提高材料的润滑性能.

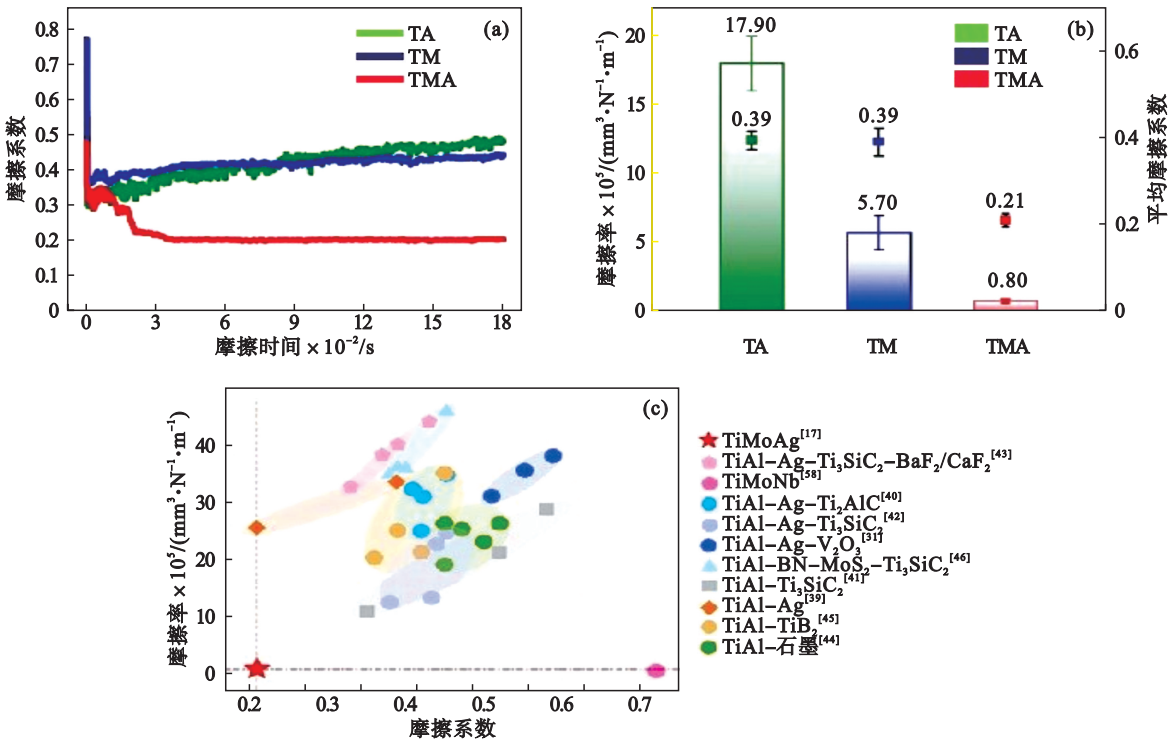


图 10 钛基复合材料在 600 °C 时的摩擦学性能^[77]

Fig. 10 Tribological properties of titanium matrix composites at 600 °C^[77]

(a)—摩擦系数曲线; (b)—磨损率和平均摩擦系数; (c)—与其他自润滑钛基复合材料对比.

4 结 语

自 20 世纪 70 年代 NASA 开发了第一代高温自润滑复合材料以来,世界各地的研究机构纷纷对此展开研究.在合金基体中通过加入固体润滑相以及耐磨相改善材料的性能,这种方式虽然提升了材料的摩擦学性能,但改善是以力学性能以及高温抗氧化性能的下降为代价,极大地阻碍了自润滑复合材料的实际应用.基于对金属在高温下氧化机理的深入理解,本文提出了氧化调控质层生成的策略并设计高温自润滑复合材料:①调控材料成分,发生选择性氧化,生成易烧结的氧化物磨屑;②设计异质结构,使材料在高温下氧化磨损形成表面织构;③原位自生低熔点润滑相.突破了传统自润滑材料摩擦磨损性能与力学性能、高温抗氧化性能难以协调优化的瓶颈,具有极好的应用前景.

参考文献:

- [1] Luo J B, Liu M, Ma L. Origin of friction and the new frictionless technology-superlubricity: advancements and future outlook [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106092.
- [2] 谭国煌, 武兴华, 肖明豪, 等. TC4 钛合金超疏水表面/超润滑表面的制备及防冷凝性防冰性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 419-427, 448.
(Tan Guo-huang, Wu Xing-hua, Xiao Ming-hao, et al. The anti-condensation, anti-icing performance of superhydrophobic and SLIPS TC4 titanium alloy surfaces [J]. *Surface Technology*, 2023, 52(12): 419-427, 448.)
- [3] 郝菊文, 党兴武, 彭斌. 动静涡旋盘齿顶摩擦副摩擦副力形预测模型[J]. 计算力学学报, 2024, 42(4): 678-684.
(Hao Ju-wen, Dang Xing-wu, Peng Bin. Fractal prediction model for friction force of tip friction pair of fixed and orbiting scroll plates [J]. *Chinese Journal of computational Mechanics*, 2024, 42(4): 678-684.)
- [4] 雒建斌. 超滑与摩擦起源的探索[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 2967-2978, 2966.
(Luo Jian-bin. Investigation on the origin of friction and superlubricity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(27): 2967-2978, 2966.)
- [5] 郝恩康, 安宇龙, 赵晓琴, 等. 热喷涂高温自润滑涂层研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 104-111.
(Hao En-kang, An Yu-long, Zhao Xiao-qin, et al. High temperature self-lubricating coatings prepared by thermal spraying[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(6): 104-111.)
- [6] Roy A, Patel P, Sharifi N, et al. Binary and ternary lubricious oxides for high temperature tribological applications: a review [J]. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2023, 11: 100117.
- [7] Liu Z M, Childs T H C. The study of wear characteristics of sintered high speed steels containing CaF_2 , MnS and TiC additives at elevated temperature [J]. *Wear*, 2004, 257(3/4): 435-440.
- [8] 徐笑笑, 梁斐, 张亚平, 等. 梯度纳米结构轴承钢的高温摩擦磨损行为[J]. 中国表面工程, 2024, 37(5): 77-87.
(Xu Xiao-xiao, Liang Fei, Zhang Ya-ping, et al. Tribological behavior of gradient nanostructured bearing steel at elevated temperatures [J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(5): 77-87.)
- [9] 甄金明, 李斐, 朱圣宇, 等. Ti 对镍基高温自润滑复合材料力学和摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 586-591.
(Zhen Jin-ming, Li Fei, Zhu Sheng-yu, et al. The influence of Ti on the mechanical and tribological properties of nickel-based high-temperature self-lubricating composites [J]. *Tribology*, 2014, 34(5): 586-591.)
- [10] Sliney H E. Wide temperature spectrum self-lubricating coatings prepared by plasma spraying[J]. *Thin Solid Films*, 1979, 64(2): 211-217.
- [11] Dellacorte C, Fellenstein J A. The effect of compositional tailoring on the thermal expansion and tribological properties of PS300: a solid lubricant composite coating [J]. *Tribology Transactions*, 1997, 40(4): 639-642.
- [12] Dellacorte C. The evaluation of a modified chrome oxide based high temperature solid lubricant coating for foil gas bearings [J]. *Tribology Transactions*, 2000, 43(2): 257-262.
- [13] Balić E E, Blanchet T A. Thrust-washer tribological evaluation of PS304 coatings against Rene 41 [J]. *Wear*, 2005, 259(7): 876-881.
- [14] Ding C H, Li P L, Ran G, et al. Tribological property of self-lubricating PM304 composite [J]. *Wear*, 2007, 262(5/6): 575-581.
- [15] Dellacorte C. The effect of counterface on the tribological performance of a high temperature solid lubricant composite from 25 to 650°C [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 86/87(2): 486-492.
- [16] Wang W C. Application of a high temperature self-lubricating composite coating on steam turbine components [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 177/178: 12-17.
- [17] Zhang A J, Han J S, Su B, et al. Microstructure, mechanical properties and tribological performance of CoCrFeNi high entropy alloy matrix self-lubricating composite [J]. *Materials & Design*, 2017, 114: 253-263.
- [18] 燕松山, 谢鹏, 解芳. Ag-Cu-Sn/金属陶瓷润滑层高温摩擦配副特性研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(5): 7-12, 18.
(Yan Song-shan, Xie Peng, Xie Fang. Wear behaviors of Ag-Cu-Sn cermet lubricating coatings with different materials at high temperature [J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(5): 7-18.)
- [19] 李超. 高温自补偿润滑的热力耦合驱动模型及成膜机理研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
(Li Chao. Research on thermo-mechanical coupled driven model and film-forming mechanisms of high temperature self-compensation lubricating composites [D]. Jinan: Jinan University, 2017.)
- [20] Liu Z X, Shen Y, Liu J, et al. Effects of double-sided textures matching on friction and wear performance in reciprocating contact interface [J]. *Wear*, 2024, 556: 205522.
- [21] Li B, Gao Y M, Jia J H, et al. Influence of heat treatments on the microstructure as well as mechanical and tribological properties of NiCrAlY-Mo-Ag coatings [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 503-510.
- [22] Wang X P, Feng X C, Lu C, et al. Mechanical and tribological properties of plasma sprayed NiAl composite coatings with addition of nanostructured $\text{TiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 157-165.

- [23] Wang J Y, Wang W Z, Jia J H. The oxidation resistance and tribological properties of Ni-based composites with in situ/ex situ Al_2O_3 and TiC ceramic phases at high temperatures [J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(20): 3262–3271.
- [24] Feng X C, Jia J H, Wang W Z, et al. Mechanical and tribological properties of NiAl–NbC–Ag composites prepared by hot-pressing sintering [J]. *Journal of Materials Research*, 2017, 32(12): 2361–2372.
- [25] Li B, Jia J H, Gao Y M, et al. Microstructural and tribological characterization of NiAl matrix self-lubricating composite coatings by atmospheric plasma spraying [J]. *Tribology International*, 2017, 109: 563–570.
- [26] Feng X C, Lu C, Jia J H, et al. High temperature tribological behaviors and wear mechanisms of NiAl–NbC–Ag composites formed by in-situ decomposition of AgNbO_3 [J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105898.
- [27] 丁春华, 丁永超, 李亚云. 采用粉末冶金法制备 $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}$ 自润滑涂层及其性能研究 [J]. *应用力学学报*, 2019, 36(5): 1082–1087, vi.
(Ding Chun-hua, Ding Yong-chao, Li Ya-yun. Preparation and properties of $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}$ self-lubricating coatings by powder metallurgy [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(5): 1082–1087, vi.)
- [28] 李建, 李长生, 段昭宇. MoS_2 –Ag– V_2O_5 对镍基材料摩擦磨损性能的影响 [J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(2): 141–146.
(Li Jian, Li Chang-sheng, Duan Zhao-yu. Effect of MoS_2 –Ag– V_2O_5 on friction and wear properties of nickel-based composites [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(2): 141–146.)
- [29] 李建. NiCrW 基高温合金自润滑复合材料的制备及摩擦学性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
(Li Jian. Preparation and tribological properties of NiCrW-based superalloy self-lubricating composites [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.)
- [30] 程书帅, 崔功军, 李方舟, 等. 纳米 SiC 增强 CoCrMo 高温抗磨复合材料及摩擦学性能 [J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(6): 1127–1137.
(Cheng Shu-shuai, Cui Gong-jun, Li Fang-zhou, et al. High-temperature wear resistant CoCrMo matrix composites reinforced by nano-SiC and tribological properties [J]. *Tribology*, 2022, 42(6): 1127–1137.)
- [31] Cui G J, Liu Y P, Li S, et al. Nano-TiO₂ reinforced CoCr matrix wear resistant composites and high-temperature tribological behaviors under unlubricated condition [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6816.
- [32] Cui G J, Qian Y, Bian C X, et al. CoCrNi matrix high-temperature wear resistant composites with micro- and nano- Al_2O_3 reinforcement [J]. *Composites Communications*, 2020, 22: 100461.
- [33] 钱钰, 李赛, 崔功军, 等. 纳米 ZrO_2 增强 CoCrW 基复合材料的制备及高温摩擦学性能研究 [J]. *润滑与密封*, 2021, 46(9): 29–31.
(Qian Yu, Li Sai, Cui Gong-jun, et al. Preparation and high-temperature tribological properties of nano-ZrO₂ reinforced CoCrW matrix composites [J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(9): 40–46.)
- [34] 程书帅. SiC(纳米)/CoCrMo 高温抗磨复合材料的设计及摩擦学性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
(Cheng Shu-shuai. Design and tribological properties of high-temperature wear resistant CoCrMo matrix composites reinforced by nano-SiC [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.)
- [35] Liu H Q, Cui G J, Shi R B, et al. $\text{MoS}_2/\text{CoCrNi}$ self-lubricating composite coating and its high-temperature tribological properties [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(12): 4280–4289.
- [36] 钱钰, 崔功军, 卞灿星, 等. WS_2 增强 CoCrTi 复合材料的制备及高温摩擦学性能 [J]. *金属热处理*, 2021, 46(12): 94–99.
(Qian Yu, Cui Gong-jun, Bian Can-xing, et al. Preparation and high-temperature tribological properties of WS_2 reinforced CoCrTi composites [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(12): 94–99.)
- [37] Cui G J, Liu H Q, Li S, et al. Design and high-temperature tribological properties of CoCrW with rare earth fluoride composites [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 2402–2411.
- [38] Ren Q C, Cui G J, Li T Y, et al. High-temperature wear behavior of cobalt matrix composites reinforced by LaF_3 and CeO_2 [J]. *Tribology Letters*, 2021, 69(4): 149.
- [39] Nguyen C, Tieu A K, Su L H, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of $\text{Al}_{0.3}\text{CrFeNi}_{0.3}$ – $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ self-lubricating composite fabricated by spark plasma sintering [J]. *Tribology International*, 2023, 188: 108855.
- [40] 熊党生, 李建亮. 高温摩擦磨损与润滑 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
(Xiong Dang-sheng, Li Jian-liang [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.)
- [41] Finkin E F. A theory for the effects of film thickness and normal load in the friction of thin films [J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1969, 91(3): 551–556.
- [42] Aouadi S M, Gao H, Martini A, Scharf T W, Muratore C. Lubricious oxide coatings for extreme temperature applications: a review [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 257: 266–277.
- [43] Stone D, Liu J, Singh D P, et al. Layered atomic structures of double oxides for low shear strength at high temperatures [J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(10): 735–738.
- [44] Erdemir A. A crystal chemical approach to the formulation of self-lubricating nanocomposite coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(5/6): 1792–1796.
- [45] Finkin E F. Theoretical analysis of factors controlling the wear of solid-film-lubricated ball-bearings [J]. *Wear*, 1984, 94(2): 211–217.
- [46] Aouadi S M, Singh D P, Stone D S, et al. Adaptive VN/Ag nanocomposite coatings with lubricious behavior from 25 to 1 000 °C [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(16): 5326–5331.
- [47] Albrecht T A, Stern C L, Poeppelmeier K R. The Ag_2O – V_2O_5 – $\text{HF}_{(\text{aq})}$ system and crystal structure of α - Ag_3VO_4 [J]. *Inorganic Chemistry*, 2007, 46(5): 1704–1708.
- [48] Murakami T, Ouyang J H, Umeda K, et al. High-temperature friction properties of BaSO_4 and SrSO_4 powder films formed on Al_2O_3 and stainless steel substrates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 432(1/2): 52–58.
- [49] Liu C, Zou J M, Yang J Z, et al. Boosting sodium-ion storage performance by tailoring intragranular porous WS_2/C nanocomposites anode [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 616: 156532.
- [50] Kong X, Sun W Y, Wang Q C, et al. Improving high-temperature wear resistance of NiCr matrix self-lubricating composites by controlling oxidation and surface texturing [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 131: 253–263.
- [51] Liu S S, Chen Y H, An Z B, et al. Microstructure and

- oxidation of NiCr alloys studied by analytical in situ environmental TEM [J]. *Corrosion Science*, 2023, 224: 111525.
- [52] 彭玉春, 陈泷, 张祥雷, 等. 高温滑动摩擦中釉质层的综述研究[J]. 材料保护, 2022, 55(6): 147-153. (Peng Yu-chun, Chen Long, Zhang Xiang-lei, et al. A review on glaze layers in high temperature sliding friction [J]. *Material Protection*, 2022, 55(6): 147-153.)
- [53] Stott F H, Wood G C. The influence of oxides on the friction and wear of alloys [J]. *Tribology International*, 1978, 11(4): 211-218.
- [54] Barnes D J, Wilson J E, Stott F H, et al. The influence of oxide films on the friction and wear of Fe-5% Cr alloy in controlled environments[J]. *Wear*, 1977, 45(2): 161-176.
- [55] Jiang J R, Stott F H, Stack M M. A generic model for dry sliding wear of metals at elevated temperatures[J]. *Wear*, 2004, 256(9/10): 973-985.
- [56] Inman I A, Datta P K, Du H L, et al. Studies of high temperature sliding wear of metallic dissimilar interfaces [J]. *Tribology International*, 2005, 38(9): 812-823.
- [57] Lepesant P, Boher C, Berthier Y, et al. A phenomenological model of the third body particles circulation in a high temperature contact[J]. *Wear*, 2013, 298: 66-79.
- [58] Zhao Z K, Shen Y, Liu Y, et al. Low and high temperature effects on friction and wear performance of Cr-plated cylinder liner[J]. *Wear*, 2024, 546: 205329.
- [59] Motallebzadeh A, Atar E, Cimenoglu H. Sliding wear characteristics of molybdenum containing Stellite 12 coating at elevated temperatures[J]. *Tribology International*, 2015, 91: 40-47.
- [60] Jiang J J, Xin B B, Zhang A J, et al. Investigation of mechanical properties and high temperature wear resistance of CoFeNi_{1.5}VZr_{0.4}Si_x high entropy alloys optimized by Si alloying[J]. *Tribology International*, 2024, 200: 110165.
- [61] Chen W, Peng Y C, Wang Y F, et al. Research on high-temperature friction and wear performances of Stellite 12 laser cladding layer against coated boron steels[J]. *Wear*, 2023, 520: 204665.
- [62] Ouyang J, Liang X S, Liu Z G, et al. Friction and wear properties of hot-pressed NiCr-BaCr₂O₄ high temperature self-lubricating composites [J]. *Wear*, 2013, 301 (1/2): 820-827.
- [63] Li J L, Xiong D S, Huang Z J, et al. Effect of Ag and CeO₂ on friction and wear properties of Ni-base composite at high temperature[J]. *Wear*, 2009, 267(1/2/3/4): 576-584.
- [64] Xu J, Kong X, Chen M H, 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.
- [65] Kato H. Severe-mild wear transition by supply of oxide particles on sliding surface[J]. *Wear*, 2003, 255: 426-429.
- [66] Dreano A, Fouvry S, Sao-Joao S, et al. The formation of a cobalt-based glaze layer at high temperature: a layered structure[J]. *Wear*, 2019, 440: 203101.
- [67] Dreano A, Baydoun S, Fouvry S, et al. Influence of a pre-existing glaze layer on the fretting-wear response of HS25 cobalt-based alloy subjected to various temperature conditions[J]. *Wear*, 2022, 488: 204144.
- [68] Viat A, Dreano A, Fouvry S, et al. Fretting wear of pure cobalt chromium and nickel to identify the distinct roles of HS25 alloying elements in high temperature glaze layer formation[J]. *Wear*, 2017, 376: 1043-1054.
- [69] 李甜甜, 孙耀宁, 张丽, 等. 表面织构化对摩擦学性能影响的研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(5): 44-48. (Li Tian-tian, Sun Yao-ning, Zhang Li, et al. Research progress on effect of surface texturing on tribological properties [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(5): 44-48.)
- [70] Grabon W, Koszela W, Pawlus P, et al. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing [J]. *Tribology International*, 2013, 61: 102-108.
- [71] 魏晓凤. 激光干涉制备人工髋关节仿生微纳结构表面技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016. (Wei Xiao-feng. Fabrication of bionic micro and nano surface structures of artificial hip joints by laser interference [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.)
- [72] 孔轩. NiCr 基核壳结构自润滑复合材料的设计与摩擦学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2023. (Kong Xuan. Design and tribological properties of the NiCr based self-lubricating composites with core-shell structure [D]. Shenyang: Northeastern University, 2023.)
- [73] Kong X, Liu Y, Chen M H, et al. Heterostructured NiCr matrix composites with high strength and wear resistance [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 105: 142-152.
- [74] Hoagland R G, Kurtz R J, Henager C H. Slip resistance of interfaces and the strength of metallic multilayer composites [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(6): 775-779.
- [75] Gouveia A F, Sczancoski J C, Ferrer M M, et al. Experimental and theoretical investigations of electronic structure and photoluminescence properties of β -Ag₂MoO₄ microcrystals [J]. *Inorganic Chemistry*, 2014, 53 (11): 5589-5599.
- [76] Hao E K, An Y L, Chen J, et al. In-situ formation of layer-like Ag₂MoO₄ induced by high-temperature oxidation and its effect on the self-lubricating properties of NiCoCrAlYTa/Ag/Mo coatings [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 75: 164-173.
- [77] Zhen Y, Chen M H, Yu C T, et al. High temperature self-lubricating Ti-Mo-Ag composites with exceptional high mechanical strength and wear resistance [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 80-90.
- [78] Shi X L, Yao J, Xu Z S, et al. Tribological performance of TiAl matrix self-lubricating composites containing Ag, Ti₃SiC₂ and BaF₂/CaF₂ tested from room temperature to 600°C[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 620-633.
- [79] Wang L, Liu Z Q, Li S F, et al. Few-layered Ti₃C₂ MXene-coated Ti-6Al-4V composite powder for high-performance Ti matrix composite [J]. *Composites Communications*, 2022, 33: 101238.
- [80] Shi X L, Xu Z S, Wang M, et al. Tribological behavior of TiAl matrix self-lubricating composites containing silver from 25 to 800 °C [J]. *Wear*, 2013, 303(1/2): 486-494.
- [81] Xu Z S, Shi X L, Wang M, et al. Effect of Ag and Ti₃SiC₂ on tribological properties of TiAl matrix self-lubricating composites at room and increased temperatures [J]. *Tribology Letters*, 2014, 53(3): 617-629.
- [82] Shen Q, Shi X L, Yang K, et al. Tribological performance of TiAl matrix composites containing silver and V₂O₅ nanowires at elevated temperatures [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(61): 56294-56302.