

宽温域连续润滑材料的研究进展^{*}

刘二勇^{1,2,3}, 贾均红³, 高义民², 曾志翔¹, 乌学东¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 2. 西安交通大学 金属强度国家重点实验室, 西安 710049; 3. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 航空、航天及核电等高新技术产业中苛刻工况下相关运动部件的润滑和耐磨问题是影响整个系统可靠性和寿命的主要因素, 因此对具有宽温域连续润滑功能的新型润滑材料提出了越来越迫切的需求。文中综述了自润滑复合材料、“发汗”润滑材料、PS/PM 自润滑涂层及温度“自适应”润滑涂层的研究成果, 包括润滑剂及复配的选择依据、新型润滑剂对宽温域连续润滑材料组织结构、摩擦学行为、摩擦化学反应、润滑机理等的影响, 并对不同润滑剂材料体系的宽温域连续润滑材料进行了系统的总结, 在此基础上展望了宽温域连续润滑材料的发展趋势。

关键词: 宽温域; 连续润滑材料; 固体润滑; 润滑剂

中图分类号: TH117.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0001-13

Progress of Continuous Lubricating Materials over a Wide Temperature Range

LIU Er-yong^{1,2,3}, JIA Jun-hong³, GAO Yi-min², ZENG Zhi-xiang¹, WU Xue-dong¹

(1a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 1b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049; 3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: The lubrication and wear performance of moving parts under extreme harsh conditions in the area of modern aviation, aerospace, nuclear power and other high-tech industries closely affect the reliability and lifetime of the entire system, thus the need for the new solid lubricant materials with excellent continuous lubricating behaviors over a wide temperature range becomes more increasingly urgent. Self-lubricating composites, “sweating” lubricating material, PS/PM self-lubricating coating and temperature “adaptive” lubricating materials were revised in this paper, including the basis of the selection of lubricants and their mixture. Furthermore, the effects of new lubricant on the microstructure, tribological action, tribo-reaction and lubricating mechanism of continuous lubricating material over a wide temperature range were researched. Additionally, the continuous lubricating materials containing different lubricant systems are also summarized and the development trends of the materials over a wide temperature range are proposed.

Keywords: over a wide temperature range; continuous lubricating materials; solid lubrications; lubricants

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2015-06-04; 基金项目: * 国家自然科学基金(51175490); 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50006); 金属强度国家重点实验室开放课题(20141605); 中国博士后科学基金(2014M551784)

通讯作者: 贾均红(1974—), 男(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 苛刻工况摩擦学及表面工程; Tel: (0931) 4968 611; E-mail: jhjia@licp.cas.cn

网络出版日期: 2015-06-23 16:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1655.002.html>

引文格式: 刘二勇, 贾均红, 高义民, 等. 宽温域连续润滑材料的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 1-13. Liu E Y, Jia J H, Gao Y M, et al. Progress of continuous lubricating materials over a wide temperature range [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 1-13.

0 引言

现代航空、航天、核技术及电力等高新技术产业中普遍存在高/低温(宽温域)、特殊介质和高速等极端苛刻工况,相关滑动部件的润滑和耐磨问题成为影响整个系统可靠性和寿命的关键技术,因此对具有宽温域连续润滑功能的新型润滑材料提出了越来越迫切的需求^[1-3]。要实现宽温域连续润滑就离不开适宜的润滑剂体系,因为润滑剂可以将相对运动部件分开,从而避免摩擦表面直接接触,起到显著的降低摩擦阻力及减缓磨损的作用^[4]。

根据润滑剂的差异可将润滑方式分为流体润滑和固体润滑:流体润滑指以润滑油、润滑脂等液体作为润滑剂的润滑方式;固体润滑指利用固体微粉、薄膜或复合材料等代替流体润滑材料来隔离两个承载表面的直接接触以达到润滑、耐磨作用的润滑方式。但是,常规流体润滑材料对温度非常“敏感”,如油脂类润滑材料的最高使用温度通常不超过 200 ℃,聚合物类润滑材料的极限使用温度为 400 ℃。过高的温度将导致润滑剂因氧化变质而失效,从而引起运动副表面的直接接触,造成运动工件的严重擦伤、甚至咬死等问题。因此,超过 400 ℃的运动部件的润滑只能采用固体润滑的方式,尤其是当其处于宽温域、特殊介质和高速等流体润滑不能奏效的极端苛刻环境下时,固体润滑就显得尤为重要。因此,如何运用固体润滑技术发展具有宽温域连续润滑功能的固体润滑材料以解决苛刻工况下相关运动部件的摩擦、磨损与润滑问题日益受到国内外学者的重视,并成为当今摩擦学领域的前沿方向之一。

文中对近年来国内外宽温域连续润滑材料的研究现状进行了详细综述,主要从自润滑复合材料、仿生“发汗”润滑材料、PS/PM 自润滑复合材料涂层及温度“自适应”润滑涂层等多体系宽温域连续润滑材料的研究进展等方面展开。并对多种润滑材料的润滑剂及其复配进行了详细介绍,具体内容包括:适宜的宽温域固体润滑剂的选择及其对润滑材料组织结构、摩擦学行为、摩擦化学反应和润滑机理等的影响。此外,还对课题组近年来在该领域的研究成果进行了描述,在此基础上提出了宽温域连续润滑材料的发展趋势,以期对苛刻工况摩擦学研究的发展有所

裨益。

1 自润滑复合材料

自润滑复合材料一般是由陶瓷或金属基体和润滑组元等按照一定的组配混合,采用相应的加工工艺制备而成^[5]。通常根据基体组元将自润滑复合材料分为陶瓷基自润滑复合材料和金属基自润滑复合材料。一般来说,陶瓷或金属基体提供较好的抗磨损能力、一定的承载能力、优异的高温化学稳定性和抗氧化性等,而适宜的润滑剂及其复配则提供优异的宽温域连续润滑功能^[6]。

1.1 陶瓷基自润滑复合材料

陶瓷材料由于具有高熔点、高硬度、高耐磨性、抗氧化及优异的高温力学性能等优点而在摩擦学领域获得广泛的应用,但是陶瓷材料在干摩擦条件下的摩擦因数一般都比较高(0.4~1.0),很难实现自润滑。因此,通过加入适宜的固体润滑剂来实现陶瓷材料自润滑已成为解决其润滑、耐磨问题的有效途径^[7]。文中对高温工况下常用陶瓷基自润滑复合材料(Al_2O_3 、 ZrO_2 等)的组分及宽温域润滑性能进行整理,分析了陶瓷相及润滑组元对复合材料宽温域摩擦磨损性能的影响,结果如表 1^[8-14]所示。

由表 1 可知:单一固体润滑剂如金属 Mo 可以改善 Al_2O_3 基复合材料的高温润滑性能,金属 Ag 与 BaSO_4 / PbSO_4 复配润滑剂则改善了 Al_2O_3 基复合材料的高温/低温润滑性能,实现了宽温域连续润滑;与 Al_2O_3 基复合材料相似,单一 BaCrO_4 润滑剂及 CaF_2 与 Ag/Au 复配润滑剂则分别改善了 ZrO_2 基复合材料的高温及高温/低温润滑性能。

肖汉宁等人进一步对 Al_2O_3 陶瓷材料进行研究,结果表明: Al_2O_3 陶瓷材料的高温摩擦学特性的改善可归因于摩擦亚表层在 1 000 ℃的摩擦过程中发生了动态再结晶,形成了具有细晶组织结构的玻璃态物质^[12-13]。随后,通过对含 h-BN 润滑剂的 Al_2O_3 基自润滑复合材料的润滑机理分析发现 h-BN 润滑剂在摩擦过程中可逐步转移磨损面形成具有持续润滑作用的润滑膜,从而改善复合材料的摩擦磨损性能^[15]。综上,含固体润滑剂陶瓷基自润滑材料可以满足高温润滑、耐磨的需求,可有效的解决宽温域连续润滑问题。

为了阐明陶瓷基复合材料中固体润滑剂的润滑机理,陈威等深入研究了含 h-BN 润滑剂 Si_3N_4 ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{h-BN}$) 陶瓷材料在摩擦过程中摩擦化学反应膜的形成机理^[16],见图 1。该研究表明:陶瓷基复合材料的固体润滑剂区域易于发生破裂而形成磨屑,随后含润滑剂的磨屑容易在来回碾压下形成摩擦反应润滑膜,隔离相对运动表面的直接接触,从而改善了复合材料的摩擦磨损

性能。该研究为陶瓷基自润滑复合材料中固体润滑剂的选择提供了有益的支撑,并为解决陶瓷在工程应用中存在干摩擦因数和磨损率较高的问题有显著的理论指导及应用意义^[16]。但是,陶瓷材料室温摩擦因数太高与添加固体润滑剂造成陶瓷材料的力学性能恶化的矛盾是陶瓷基自润滑材料研究中所存在的主要问题,需要众多研究人员对其进行深入、细致的研究。

表 1 常用陶瓷基自润滑材料的摩擦学性能^[8-14]

Table 1 Tribological properties of the ceramic-based self-lubricating materials ^[8-14]		
Materials	Lubricants	Friction coefficient
Al ₂ O ₃ -based lubricating composites	Mo	0.9(25 ℃)
		0.34(800 ℃)
	BaSO ₄ /PbSO ₄ , Ag	0.38(25 ℃)
		0.28(200 ℃)
		0.2(600-1 100 ℃)
	BaCrO ₄	0.55 (25 ℃)
0.45 (200 ℃)		
0.4 (400-800 ℃)		
ZrO ₂ -based lubricating composites	CaF ₂ , Ag/Au	0.46(25 ℃)
		0.44(200 ℃)
		0.45(400 ℃)
		0.42(600 ℃)
		0.33(800 ℃)

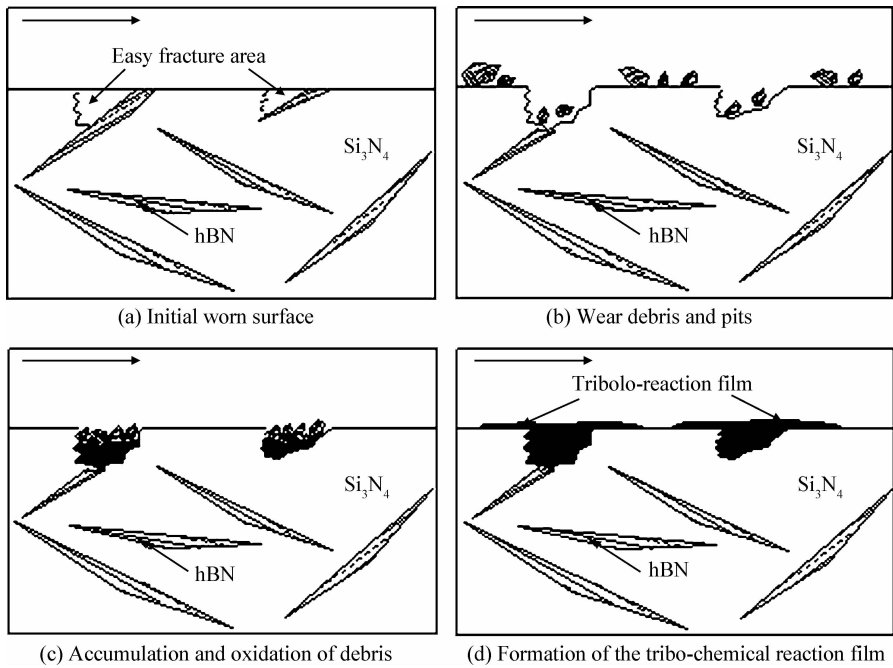


图 1 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{h-BN}$ 陶瓷基复合材料磨损过程中摩擦化学反应膜形成过程的示意图^[16]

Fig.1 Schematic diagrams for the formation process of the chemical reaction films on the $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{h-BN}$ ceramic matrix composites^[16]

1.2 金属基自润滑复合材料

金属基自润滑复合材料指将固体润滑剂作为第二组元加入到金属基体中形成的复合材料,因此该材料具有金属的优点兼有固体润滑剂的特性。金属基自润滑复合材料的摩擦学特性主要取决于金属基体材料的性能、摩擦过程中固体润滑剂结构与性能及其在磨损表面间转移所形成的润滑膜,该润滑膜覆盖在磨损表面,可有效地降低摩擦因数和延长耐磨寿命。这种材料可在高温、高强度或高真空等苛刻工况下起到有效地润滑作用,实现无油或少油条件的润滑。

目前应用于苛刻工况摩擦学领域的金属基自润滑复合材料主要为镍基自润滑复合材料,并且已有商品化的零件,如轴承保持架、密封环、干摩擦轴承、高温轴瓦、滑块等,这是由于镍基合金具有优异的耐高温、良好的抗氧化性及耐磨损等特性。因此,众多的研究者对镍基自润滑复合材料的摩擦学性能进行了深入、系统地研究。

Peterson 和李诗卓等研究了 Ni-Cu-Re 自润滑合金,其高温下的摩擦因数为 0.2~0.3,结果表明:摩擦学性能的改善与磨损表面形成的氧化膜的润滑作用有关^[17-18];吕晋军等在对含 S 元素的镍铬合金的摩擦性能研究时发现:S 元素的加入使镍铬合金 600 ℃时的摩擦因数从 0.7 左右降至 0.43,其中磨损表面富集的 Cr_xS_y 型化合物起到了显著的润滑、减磨作用^[19];熊党生等系统研究了含稀土元素、石墨、二硫化钼、银等镍基复合材料的宽温域摩擦磨损性能,研究发现含两种及两种以上润滑剂(如石墨/二硫化钼、石墨/银)的镍基复合材料具有优异的高温、低温润滑性能,并对复合材料不同温度的润滑机理进行分析。例如,室温状态下镍基复合材料磨损表面主要由金属银相所组成,而高温状态下磨损表面则主要由氧化钼等氧化物润滑相所组成^[20]。这一系列复配润滑剂的摩擦学性能的研究工作为解决宽温域连续润滑问题提供了重要的理论和技术支持。

作者所在的课题组在金属基自润滑复合材料领域开展了大量的研究工作,主要为多组元复配润滑剂的宽温域润滑行为研究。王爱芳等研究了石墨、 MoS_2 及共晶 $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ 润滑剂对 NiCr 基复合材料宽温域摩擦磨损性能的影响,结果表明:石墨在室温起到润滑作用,而 MoS_2 与

Cr_2O_3 反应生成的 Cr_xS_y 起到了高温润滑作用,共晶 $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ 润滑剂则在温度高于 400 ℃后起到优异润滑作用^[21]。该研究工作中复配润滑剂的构建为课题组后续研究工作提供了一条实现宽温域连续润滑的有效途径。随后,刘峰等制备了含 SrSO_4 、Ag、 MoS_2 、石墨等复配润滑剂的 NiCr-Al₂O₃ 镍基复合材料,结果表明: SrSO_4 显著地改善了复合材料在 200~600 ℃范围内的高温摩擦磨损性能,其润滑作用是由于磨损表面形成的 SrAl_4O_7 与 NiCr_2O_4 协同润滑相;石墨、 MoS_2 与 SrSO_4 复配润滑剂则造成了 NiCr-Al₂O₃ 金属基复合材料中、低温度摩擦磨损性能的恶化,其主要原因是石墨及 MoS_2 的添加导致复合材料力学性能的下降;金属 Ag 与 SrSO_4 复配润滑剂在室温至 800 ℃范围内起到了良好的润滑作用,这与摩擦表面上形成了 SrAl_4O_7 、 NiCr_2O_4 和金属 Ag 组成的协同润滑膜有关^[22-23]。这些研究扩展了复配润滑剂体系的选择范围,并基于磨损表面润滑组元表征阐明了复配润滑剂的协同润滑机理,为新型宽温域连续润滑材料的开发提供了依据。

1.3 仿生“发汗”润滑材料

传统的自润滑复合材料中润滑相弥散分布于基体相,但存在因两相的物理性能的差异而造成了材料的力学性能显著恶化等问题,大大缩短了润滑材料的使用寿命。“发汗”润滑材料是通过模拟生物对所处环境(温度)进行自身调节的手段,以“出汗”的方式释放润滑剂,达到不同温度润滑的目的^[24]。“发汗”润滑材料的制备过程如下:首先利用真空液相烧结技术合成出具有贯通微孔结构的金属陶瓷硬基体,随后采用熔渗工艺向基体微孔中渗入润滑剂,从而在基体表层形成一定深度的润滑层,获得具有高强度、优异耐磨性的新型自润滑复合材料(见图 2)。与普通混合法所制备的金属基自润滑材料相比,“发汗”润滑材料的润滑剂是在硬基体制备后熔渗加入,排除了润滑相对基体相连续性的破坏作用,因此在实现材料高强度、高耐磨特性的同时保持了优良的自润滑特性^[25]。

王砚军等利用粉末冶金技术制备了室温 TiC-FeCrWMoV 系多孔金属陶瓷材料,随后通过真空压浸工艺熔渗 Pb-Sn-Ag-RE 系复合固体润滑剂而制备出“发汗”自润滑复合材料。试验结果表明:

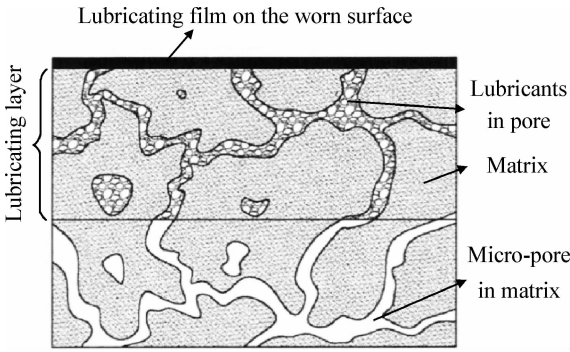


图 2 “发汗”润滑材料结构示意图^[25]

Fig. 2 Schematic diagram of the gland-lubricating material^[25]

所制备的金属陶瓷自润滑材料的硬质相与润滑相互相贯穿成网络状,既保证了复合材料具有优异的压溃强度和耐磨性,又保证了复合材料具有良好的润滑性能(如 600 ℃时平均摩擦因数 0.26~0.29)。EDXA 和 XRD 分析表明,在摩擦磨损过程中“发汗”润滑材料中润滑组元可通过微孔通道扩散至磨损表面,从而在磨损表面形成一层含有 Pb、Sn、Ag、Cu 等元素的复合润滑膜^[27]。燕松山等基于有限元 APDL 模拟建立了具有随机孔隙分布和填充特征的润滑层等效导热系数计算模型来研究润滑层等效导热系数及其影响因素,并据此研究了高温发汗自润滑材料的动态摩擦过程,探讨了摩擦因数、表面形貌、接触应力及摩擦温度场的演变规律。模拟及试验结果表明“发汗”润滑材料在熔渗 47Pb28Sn19Ag6Cu 的润滑层后具有更低的摩擦因数,这是因为润滑剂易于在“发汗”自润滑材料及配副的磨损表面形成完整的润滑膜^[25-26]。

因此,基于仿生原理对现有自润滑复合材料的再设计可以极大地改善现有材料中外来添加润滑剂对基体相力学性能的影响,从而获得摩擦学性能与力学性能平衡的自润滑复合材料。

1.4 润滑剂及其选择依据

宽温域润滑材料的研究工作表明:适宜的润滑剂体系是实现复合材料宽温域连续润滑功能的关键,具体有如下要求:①良好的附着力;②低的剪切强度;③良好的稳定性;④良好的承载能力。因此,该部分对自润滑复合材料中所用的部分润滑剂进行详细介绍,以便为新型润滑材料的开发提供润滑剂复配的设计依据。

1.4.1 室温润滑剂

常用的室温润滑剂为石墨、二硫化钼等层片

状化合物及金属银等低剪切力金属材料,其结构及性能如下所述:

(1)石墨、二硫化钼层片状润滑剂

石墨与二硫化钼均为层状六方晶体结构,其中,网层间的原子距离远大于同一网层中碳原子的间距,见图 3^[27-28]。层片状润滑剂的同一网层中的原子以强共价键结合,而层与层之间以弱范德华力结合,其结合强度仅是共价键的 1/110。这种结构特征决定了层片状润滑剂其层与层之间的众多滑移面具有良好的滑移性,且滑移面的存在使原来相对滑动的两金属表面的直接摩擦转化为分子层的相对滑移,从而降低了摩擦因数,减少了磨损。具体表现为:石墨、二硫化钼在室温及中低温段具有良好的润滑效果,但在温度高于 425 ℃石墨由于氧化而无法继续发挥润滑作用^[8],二硫化钼则在 340 ℃时开始发生氧化和分解反应而生成氧化钼,从而破坏其层状结构,造成摩擦因数升高。因此,单一的层片状润滑剂仅满足于较低温度的润滑需求,要获得宽温域连续润滑材料就需要选择层片状润滑剂与其它润滑剂复配使用。

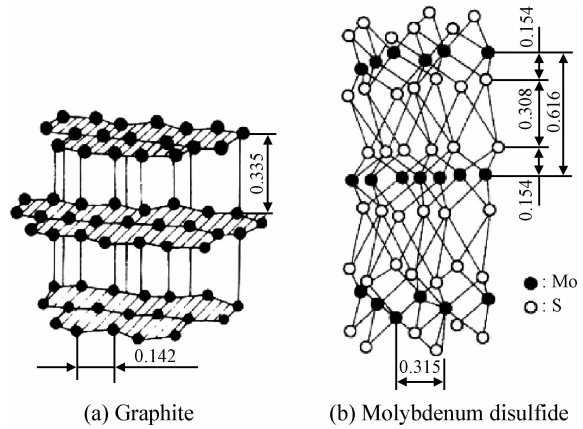


图 3 石墨和二硫化钼的晶体结构^[27-28]
Fig. 3 Crystal structure of the graphite and molybdenum disulfide^[27-28]
(Unit: nm)

(2)软金属润滑剂

软金属如铅、金、银、锡、锌等具有较低的剪切强度,同时晶体结构为各向异性,因此易于发生晶间滑移而起到润滑作用。此外,软金属一旦粘着于基材表面,便能牢固地结合在一起,从而持续地发挥润滑作用。

常用的软金属材料如金和银的物理性质和摩擦学性能如表 2 所示。研究结果表明:软金属

的润滑性能受环境的影响较大,如金属 Pb、Sn、Zn 等软金属的熔点低,仅适用于室温及中温度段润滑;而金属 Ag 在氧化性气氛中于 145 ℃生成

AgO,于 300 ℃氧化生成 Ag₂O;而金属 Pb 则在升温过程中经历了 PbO 到 Pb₃O₄ 再到 PbO 的转变过程^[29]。

表 2 常见金属材料的物理性质和摩擦学性能^[8]

Table 2 Physical properties and tribological properties of the metallic materials^[8]

Metal	Crystal structure	Density/(g · cm ⁻³)	Melting point /℃	Mohs' hardness	Friction coefficient
Au	Face-centered cubic	19.32	1 063	2.5-3.0	0.57(788 ℃)
Ag	Face-centered cubic	10.49	963	2.5	0.40(788 ℃)
Pb	Face-centered cubic	18.17	327	1.5	0.08-0.20(20 ℃)
Sn	Tetragonal system	7.28	232	2.0	0.15-0.30(20 ℃)
Zn	Hexagonal close packed	7.14	419	2.5	0.20(20 ℃)

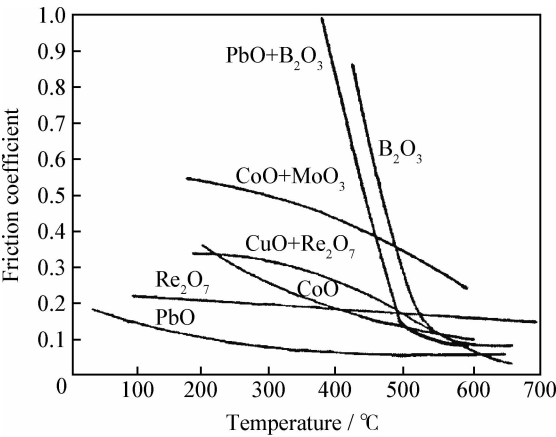
1.4.2 中高温润滑剂

中高温润滑剂的使用可确保室温润滑剂失效后复合材料仍具有优异的高温摩擦磨损性能。因此,适宜的润滑剂体系的选择是确保润滑材料具有宽温域连续润滑功能的关键。该部分叙述了常用的中高温润滑剂的结构及性能,具体如下:

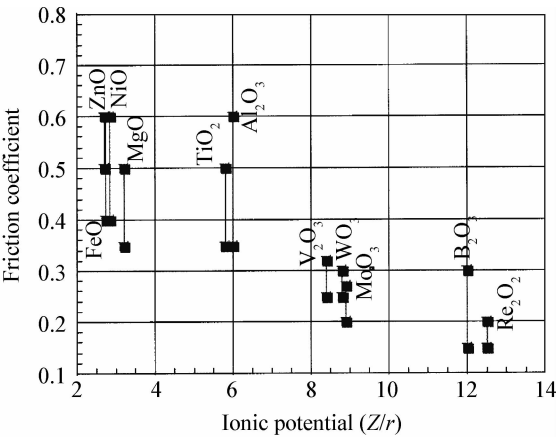
(1) 氧化物润滑剂

氧化物润滑剂是较早使用的中高温润滑剂,这是由于工作在高温大气环境中的机械设备,其相对运动的接触面会氧化而生成氧化物,所形成的氧化物将参与相对运动过程,从而影响运动部件的摩擦和磨损行为。一些金属或非金属的氧化物(如 Re、Ti、Mo、Zn、V、W、B 氧化物等)在摩擦过程中易发生变形或剪切而具有低摩擦因数(0.1~0.3)和磨损率^[30],如图 4 所示。Peterson

的研究进一步表明:除 PbO 等少数氧化物润滑剂在较宽温度范围内具有低摩擦因数外(0.1~0.2),大多数氧化物作为润滑剂的使用温度都很窄,且高温下摩擦因数仍然很高(0.2~0.4)^[17]。但是,铅具有环境污染性,已经逐渐被淘汰^[2]。针对不同氧化物物理性质与高温润滑作用的对应关系,Erdemir 引入了离子势来解释不同氧化物的润滑特性,其中离子势指离子电荷数(Z)和离子半径(r , pm)的比值(用 Φ 表示),即 $\Phi = Z/r$,该参数的大小影响化合物的热稳定性等。结合试验验证发现:氧化物的润滑特性与本身的离子势具有关联(图 4(b)),如 Re₂O₇ 的离子势为 12.5,对应的摩擦因数为 0.2~0.15 (0~327 ℃);FeO 的离子势为 2.7,对应的摩擦因数为 0.6 (300~800 ℃),该晶体模型为新型氧化物体系润滑剂的开发提供了理论依据^[31]。



(a) Friction coefficient of different oxides



(b) Diagram of ion potential and friction coefficient

图 4 氧化物的摩擦因数随温度的变化^[30]

Fig. 4 Variation of the friction coefficient of oxide with the temperatures^[30]

(2) 氟化物固体润滑剂

目前,氟化物润滑剂已经在航空航天及金属加工等高温工况下的运动部件中得到了应用,尤其是 62%BaF₂-38%CaF₂ 共晶碱土金属氟化物,由于其在航天飞机及氢介质斯特林发动机中得到成功的应用而引起了研究者的广泛关注^[32]。表 3 为氟化物润滑剂的物理性质和摩擦学性能,由表可知:氟化物润滑剂以 CaF₂、BaF₂、LiF、NaF、CeF₃、LaF₃ 等碱土金属和稀土金属的氟化物为主,均具有较高的熔点和良好的化学稳定性,同时在高温下软化而显示出良好的润滑性能^[33]。

对于碱土金属氟化物来说,如 CaF₂ 和 BaF₂ 均属于立方晶系,在 500 ℃左右由脆性材料向塑性材料转变而具有润滑性,可以使用到 900 ℃而不会发生氧化失效。与 CaF₂ 和 BaF₂ 相比,62% BaF₂-38%CaF₂ 共晶具有更低的熔点,可在更低的温度时起润滑作用;对于稀土金属氟化物来说,如 LaF₃ 和 CeF₃ 润滑剂在 500 ℃以上可有效润滑镍基合金^[34],吕晋军等研究结果表明:CeF₃ 优异的

高温润滑性能与其摩擦过程中发生的物理和化学变化有紧密联系,如(002)面的择优取向、结晶度的变化以及氧化等都对其性能有影响^[35]。但氟化物润滑剂也存在一定的不足,如室温时摩擦学性能较差,氟化物的添加造成基体材料力学性能下降等。同时,氟化物的转移润滑机理还有待研究。

综上所述,不同的润滑剂可适用于不同温度下摩擦磨损工况的润滑,没有任何一种润滑剂可以单独用于宽温域连续润滑,因此解决宽温域连续润滑问题的关键在于如下几个方面:①如何通过现有润滑剂的组配实现宽温域连续润滑;②新型宽温域固体润滑剂的开发与研究;③如何对宽温域润滑剂体系的润滑机理进行表征分析。

因此,深入研究材料在不同温度摩擦过程中伴随的润滑剂的组分及结构的变化,如摩擦化学反应诱导润滑剂发生的氧化和晶面取向改变等等,对于开发新型润滑材料,揭示其宽温域连续润滑机理具有重要的指导作用。

表 3 氟化物润滑剂物理性质和摩擦学性能^[33]
Table 3 Physical properties and tribological properties of the fluoride lubricants^[33]

Fluoride	Density/(g · cm ⁻³)	Melting point /℃	Mohs' hardness	Friction coefficient
CaF ₂	3.18	1 418	4.0	0.20-0.40(25-900 ℃)
BaF ₂	4.78	1 353	3.0	0.20-0.40(25-900 ℃)
62%BaF ₂ -38%CaF ₂	4.01	1 022		0.15-0.20
CeF ₃	4.50	1 437	4.5	0.20-0.50(25-1 000 ℃)
LaF ₃	4.50	1 490	4.5	0.40-0.70(25-1 000 ℃)

2 典型宽温域自润滑复合材料体系

根据自润滑复合材料的研究工作,可发现两种或两种以上的固体润滑剂组合或者开发新型润滑剂是实现宽温域范围连续润滑的有效途径^[36-37]。该部分将对几种典型的宽温域自润滑复合涂层的研究工作历程及研究进展进行描述,为新型润滑材料的设计提供技术支持。

2.1 PS/PM 系列自润滑涂层

NASA 的 Sliney 和 Dellacorte 等研制的 PS/PM 系列固体润滑材料在航空航天、斯特林发动机和箔片空气轴承等领域获得了广泛应用。该系列润滑材料以金属银/共晶氟化物为复合润滑剂体系,银保证了中低温的润滑作用,氟化物则提供了

良好的高温润滑作用。表 4 中 PS/PM 系列涂层的摩擦学性能证实该润滑体系可保证 PS/PM 材料在宽的温度范围具有优异摩擦学特性^[38-41]。

其中,PS100 系列涂层在宽温域范围具有低而稳定的摩擦因数,但由于缺乏硬质相,涂层的耐磨损能力较差;PS200 系列涂层由于加入了 Cr₂C₃ 硬质相,抗磨损性能大大提高,但是 Cr₂C₃ 存在高温氧化及加工困难等问题;PS300 系列固体润滑涂层采用 Cr₂O₃ 作为增强相,涂层的可加工性提高,但仍存在氧化或腐蚀磨损很快从基体上剥落而造成失效的问题;PS400 涂层通过降低润滑相的含量和改变粘结相的组分改善了涂层的高温抗氧化行为,但存在较高的室温摩擦因数和较高的磨损率导致涂层产生严重磨损而过早失效的问题^[41]。

表 4 PS/PM 系列固体润滑材料的组分和摩擦学性能^[38-41]

Table 4 Composition and tribological properties of the PS/PM coating^[38-41]

Materials	Matrix, $\omega/\%$	Hard phase, $\omega/\%$	Lubricants, $\omega/\%$	Friction coefficient
PS100	67Ni		16.5CaF ₂	0.24(25 ℃)
			16.5glass*	0.19(540 ℃)
				0.23(870 ℃)
PS/PM200	60NiAl	20Cr ₂ C ₃	10Ag	0.37(25 ℃)
			10BaF ₂ /CaF ₂ **	0.40(500 ℃)
				0.30(650 ℃)
PS/PM300	60NiCr	20Cr ₂ O ₃	10Ag	0.23(25 ℃)
			10BaF ₂ /CaF ₂	0.29(500 ℃)
				0.31(650 ℃)
PS400	70NiMoAl	20Cr ₂ O ₃	5Ag	0.80 (25 ℃)
			5BaF ₂ /CaF ₂	0.16(500 ℃)
				0.21(650 ℃)

Note: * composition of glass($\omega/\%$): 58%SiO₂, 21%BaO, 8%CaO, 13%K₂O

** composition of BaF₂/CaF₂ ($\omega/\%$): 62%BaF₂-38%CaF₂

2.2 温度“自适应”润滑涂层

环境“自适应”固体润滑材料的发展为具有宽温域连续润滑功能的固体润滑材料的设计提供了新的构想,其设计依据是变色龙根据环境来改变其身体颜色以躲避天敌的原理,即磨损表面的化学组分、结构和力学性能可根据磨损工况的改变(如气氛、载荷和温度等)来调整以保持低的摩擦因数和磨损率。如应用于干燥/潮湿环境的“自适应”WC/DLC/WS₂ 涂层在潮湿空气与干氮气/真空气氛下的摩擦过程中时,其磨损表面的化学组分可随着气氛的改变而主动调整。具体调整过程为:在潮湿空气中,磨损表面主要由 sp³ 的 DLC→sp² 的石墨所构成;在干氮气/真空气氛中,磨损表面则主要由层片状的二硫化钨组成。因此, WC/DLC/WS₂ 环境“自适应”涂层的研究为宽温域连续润滑材料的设计提供了新的构想,即可通过设计制备不同温度时磨损表面具有不同润滑组分的新型固体润滑材料来实现宽温域连续润滑功能^[42-43]。

根据环境“自适应”涂层的设计原理,可通过调整不同温度时磨损表面的润滑组分来保证固体润滑材料在宽温度范围内具有低的摩擦因数和磨损率。Aouadi 等利用磁控溅射技术制备了 Mo₂N/MoS₂/Ag、NbN/MoS₂/Ag、VN/Ag 等温

度“自适应”涂层,表 5 为自适应涂层不同温度摩擦学性能和磨损表面组分的对应关系^[44-47]。研究发现:Mo₂N/MoS₂/Ag、NbN/MoS₂/Ag、VN/Ag 涂层分别在室温至 600 ℃和室温至 1 000 ℃温度范围内实现了宽温域连续润滑功能,同时磨损表面相组成也随温度而改变。进一步对其宽温域连续润滑机理分析发现该系列涂层的磨损表面润滑相组分随着摩擦测试温度的升高而改变,改善了“自适应”涂层的宽温域摩擦学性能。

相对于宽温域连续润滑,温度可逆条件下的宽温域连续润滑是研究人员所面临的更加苛刻的润滑工况,这就需要依据现有的润滑材料进行再研发与设计。C. Muratore 利用磁控溅射技术制备了含 TiN 阻挡层的 YSZ-Ag-Mo 涂层,如图 5 所示。测试结果显示:金属 Ag 起到室温润滑作用,而金属 Mo 与金属 Ag 反应所生成的高温润滑相解决了高温润滑问题,TiN/YSZ 阻挡层则解决了金属 Ag 在单次宽温域润滑过程中的过度消耗,实现了温度可逆条件下的连续润滑^[48]。

该研究为 Me_xN_y 基温度可逆条件下连续润滑涂层的开发提供了有益的探索。因此,通过结构、组织调控实现温度可逆条件下的“自适应”润滑是新型润滑材料的发展方向,大大拓展了宽温域连续润滑材料的适用工况。

表 5 温度“自适应”涂层的组分与宽温域摩擦磨损性能^[44-47]

Table 5 Composition and tribological properties of temperature “adaptive” coating^[44-47]

“Adaptive” coating	Composition, a/ %	Friction coefficient	Composition of worn surface
Mo ₂ N/MoS ₂ /Ag	45Mo	0.42 (25 ℃)	MoS ₂ , Ag (25 ℃)
	34N	0.37(350 ℃)	MoO ₃ , Ag ₂ Mo ₄ O ₁₃ (350 ℃)
	5S	0.10(600 ℃)	MoO ₃ , Ag ₂ Mo ₄ O ₁₃ (600 ℃)
	16Ag		
VN/Ag		0.37 (25 ℃)	Ag(25 ℃)
	58VN	0.30(350 ℃)	V ₂ O ₅ (375 ℃)
	42Ag	0.12(700 ℃)	AgVO ₃ , Ag ₃ VO ₄ (700 ℃)
		0.20(1 000 ℃)	Ag, AgVO ₃ , Ag ₃ VO ₄ (1000 ℃)
NbN/MoS ₂ /Ag	200Nb*	0.27 (25 ℃)	MoS ₂ (25 ℃)
	35Ag*	0.29(350 ℃)	Ag ₂ Mo ₂ O ₇ , AgNbO ₃ (500 ℃)
	30MoS ₂ *	0.06(700 ℃)	AgNbO ₃ , Ag ₂ Mo ₂ O ₇ (750 ℃)
		0.40(1 000 ℃)	

Note: * target power

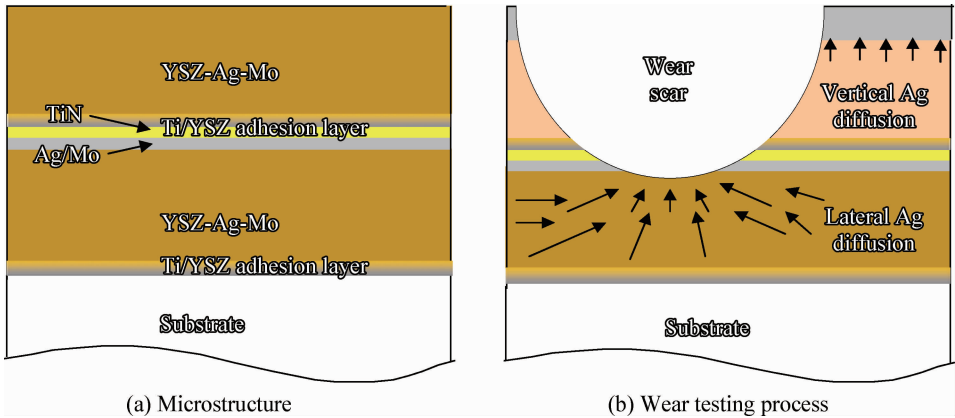


图 5 YSZ-Ag-Mo/TiN 多层复合涂层的示意图^[48]

Fig. 5 Schematic diagrams of the multilayered YSZ-Ag-Mo/TiN nanocomposite coating^[48]

2.3 新型“自适应”润滑剂体系

温度“自适应”润滑涂层的测试结果表明钼酸盐、钨酸盐、铈酸盐、钒酸盐和铌酸盐等双金属氧化物是优异的高温润滑剂^[31, 49],且该系列润滑剂可在摩擦过程中通过摩擦诱导的化学反应生成。因此,双金属氧化物润滑剂的润滑行为及其摩擦反应机理受到众多研究人员的关注。

Peterson 在对氧化物及双金属氧化物研究时发现,某些钼酸盐和铈酸盐润滑剂在高温时具有更低的摩擦因数^[31]。Murray 等研究了钼酸盐和钨酸盐对钴合金的高温润滑作用,结果表明钼酸盐和钨酸盐是潜在的高温固体润滑剂^[50]。王

静波等对钨酸铅粉末的高温摩擦学特性研究发现其润滑作用取决于粉末的软化^[51]。Aouadi 和 Gulbiński 等对钼酸银的研究发现其摩擦因数在 600 ℃时可低至 0.1 左右。随后,进一步对钼酸银的物理性能分析结果表明钼酸银的晶体结构类似于石墨等层片状固体润滑剂,如图 6 所示。因此,钼酸银等双金属氧化物的润滑机理可归结为摩擦过程中弱 Ag—O(220 kJ/mol)键较 Mo—O 键(560 kJ/mol)更易断裂从而形成富银的润滑膜^[45]。但是,无机含氧酸盐固体润滑剂同样存在不足,如室温摩擦学性能较差等,该问题与氟化物固体润滑剂类似^[31, 52-53]。

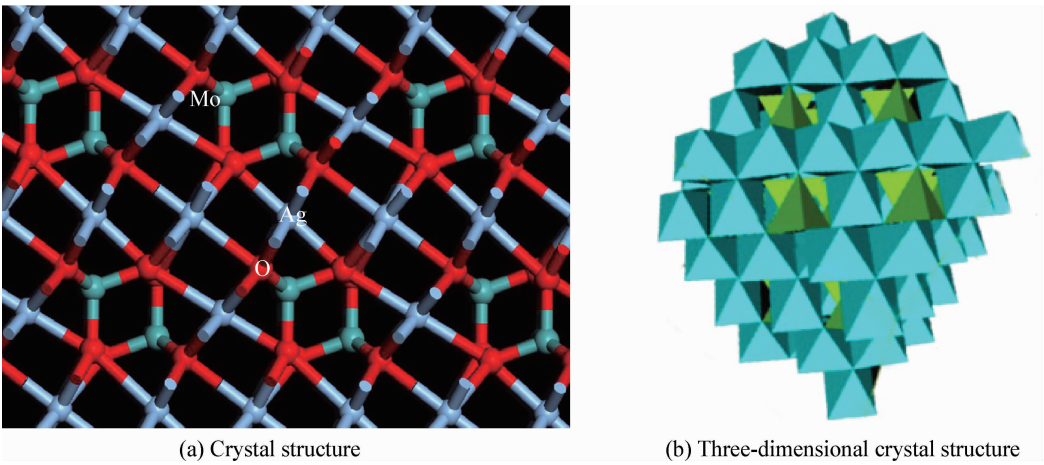


图 6 钼酸银(Ag_2MoO_4)的晶体结构示意图^[45]

Fig. 6 Schematic diagrams of the crystal structure of Ag_2MoO_4 ^[45]

作者在新型“自适应”润滑剂的研究基础上，开展了新型自润滑材料的研究工作。刘二勇等基于摩擦化学反应的原理设计了具有宽温域“自适应”润滑功能的润滑剂体系，并利用高能球磨结合粉末冶金技术制备了镍基自润滑复合材料，研究新型润滑剂体系对复合材料的摩擦磨损性能的影响，结果如表 6 所示^[37, 52-55]。

首先，制备研究了石墨、二硫化钼、金属银润滑相复配对镍基复合材料宽温域摩擦磨损行为的影响，结果表明：石墨改善了镍基复合材料的室温摩擦磨损性能，但石墨在温度高于 400 ℃ 的氧化造成了复合材料中/高温摩擦磨损性能的恶

化，同时，高温摩擦过程中石墨因氧化而消耗，则在温度可逆条件下材料的宽温域润滑性能因润滑相的缺失而受影响；二硫化钼、金属银则可明显降低复合材料的中/高温摩擦因数与磨损率，其中由二硫化钼、金属银在摩擦过程中反应生成的富钼酸银的润滑膜起到了良好的高温润滑、减磨作用。

因此，石墨、二硫化钼、金属银的复配则改善了镍基复合材料的宽温域摩擦磨损性能，其中不同温度时磨损表面的不同润滑相起到了协同润滑作用，实现了镍基复合材料的宽温域连续润滑功能^[37, 53]。

表 6 温度“自适应”镍基复合材料的组分与摩擦学性能^[37, 52-55]

Table 6 Components and tribological properties of the temperature “adaptive” Ni-based composites ^[37, 52-55]			
Temperature “adaptive” composites	Composition	Friction coefficient	Composition of worn surface
Mixed lubricants of graphite, molybdenum disulfide and metallic silver	Ni-based matrix	0.68 (25 ℃)	Graphite, MoS ₂ , Ag (25 ℃)
	Graphite	0.41(300 ℃)	MoS ₂ , Ag (300 ℃)
	MoS ₂	0.49(500 ℃)	MoO ₃ (500 ℃)
	Ag	0.22(700 ℃)	MoO ₃ , Ag ₂ MoO ₄ (700 ℃)
		0.94 (25 ℃)	Ag(25 ℃)
Silver molybdate	Ni-based matrix	0.61(300 ℃)	Ag, MoO ₃ (300 ℃)
	Silver molybdate	0.42(500 ℃)	MoO ₃ (500 ℃)
		0.23(700 ℃)	MoO ₃ , Ag ₂ MoO ₄ (700 ℃)
Silver vanadate		0.29 (25 ℃)	Ag (25 ℃)
	Ni-based matrix	0.24 (300 ℃)	Ag, V _x O _y (300 ℃)
	Silver vanadate	0.13 (700 ℃)	Ag ₃ VO ₄ (700 ℃)
		0.10 (900 ℃)	AgVO ₃ (900 ℃)

随后,制备并研究了石墨、钼酸银润滑相复配对镍基复合材料宽温域摩擦磨损行的影响,结果表明:以石墨、钼酸银为润滑相所制备的镍基自润滑复合材料实现了 $20\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续润滑功能,其中石墨与钼酸银烧结过程中分解而得到的金属银改善了复合材料的室温摩擦磨损性能,尤其是室温摩擦因数可由 0.94 降至 0.78,磨损率由 $48.12\text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 降至 $4.88\times 10^{-5}\text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,而氧化钼与金属银所生成的钼酸银润滑剂则明显改善改善了镍基复合材料的中、高温摩擦学性能。

其次,为了实现更高温度下的宽温域连续润滑功能,依据钼酸银润滑材料设计制备了含钼酸银镍基复合材料,结果表明:以钼酸银为润滑相所制备的高性能的 NiAl 基自润滑复合材料实现了 $20\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续润滑功能。具体实现方式为:钼酸银在烧结过程中分解为氧化钼与单质银,其中复合材料中的单质银在室温和中温为主要润滑相; $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Ag_3VO_4 及氧化铁起到主要润滑作用;而具有协同润滑作用的 AgVO_3 及氧化铁润滑相则明显降低了复合材料的 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的摩擦因数和磨损率^[52, 54]。

“自适应”润滑剂体系的研究为新型宽温域连续润滑材料的开发提供了理论与技术支持。因此,进一步研究润滑剂的摩擦化学反应润滑机理,开发新型的“自适应”润滑剂体系以进一步改善宽温域连续润滑材料的摩擦磨损性能是苛刻工况摩擦领域的一个研究方向。

3 总结与展望

目前国内外关于宽温域连续润滑材料的研究工作体系较为分散且不连续,并且对不同的润滑剂在摩擦过程中润滑膜的形成机理及其对摩擦特性的影响尚无系统研究。因此,基于仿生“自适应”润滑原理来设计制备新型的固体润滑材料,深入研究自润滑复合材料的宽温域摩擦学性能及其温度“自适应”润滑机理等相关研究工作已经引起了较多学者的关注。目前,已对不同的润滑剂体系、不同的基体相、复合材料及涂层材料等多种体系材料进行了研究,解决了如航空、航天等相关领域对苛刻工况润滑材料的需求。但是,随着相关产业的发展,如涡轮发动机的工作温度由 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐增高到 $1\ 200\sim 1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等,需要进一步研究具有更宽温度范围内连续润滑的新型润

滑材料。

此外,如何实现材料在力学性能与润滑性能的统一是今后研究的重要方向。对于新型的宽温域连续润滑材料,如何通过基体相的组织与结构调控获得优异的承载能力与抗磨损性能是研究的重点;如何通过润滑相的组配及润滑相的摩擦化学反应设计具有宽温域润滑功能的复合润滑剂体系是实现宽温域连续润滑的有效途径;对基体相/润滑相与之间的界面行为、化学反应等而言,如何优化基体相/润滑相的组配以获得适宜的含量与性能的关系是重要的研究内容。此外,随着制备技术的发展,具有层状结构、织构组织的纳米化润滑材料在苛刻工况摩擦学领域的研究中日益受到重视。

参考文献

- [1] 薛群基,吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 91-96.
Xue Q J, Lv J J. Research status and developing trend of solid lubrication at high temperatures [J]. Tribology, 1999, 19(1): 91-96 (in Chinese).
- [2] Sliney H E. Solid lubricant materials for high temperatures—a review [J]. Tribology International, 1982, 15(5): 303-315.
- [3] 薛群基,党鸿辛. 摩擦学研究的发展概况与趋势[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(1): 73-81.
Xue Q J, Dang H X. Developing situation and tendency of the tribological research [J]. Tribology, 1993, 13(1): 73-81 (in Chinese).
- [4] 温诗铸. 润滑理论研究的进展与思考[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6): 497-503.
Wen S Z. Study on lubrication theory—progress and thinking—over [J]. Tribology, 2007, 27(6): 497-503 (in Chinese).
- [5] 李玉峰,欧阳家虎,周玉. 高温固体润滑材料研究的发展现状[J]. 热处理技术与装备, 2007, 28(6): 2-5.
Li Y F, Ouyang J H, Zhou Y. Research and development status of high temperature solid lubricant materials [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2007, 28(6): 2-5 (in Chinese).
- [6] Jiang X, Liu W, Dong S, et al. High temperature tribology behaviors of brush plated Ni-W-Co/SiC composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 194(1): 10-15.
- [7] 薛群基,魏建军. 陶瓷润滑研究的发展概况[J]. 摩擦学报, 1995, 15(1): 90-96.
Xue Q J, Wei J J. The current research state of the lubrication of the ceramics [J]. Tribology, 1995, 15(1): 90-96 (in Chinese).

- [8] Peterson M, Murray S, Florek J. Consideration of lubricants for temperatures above 1000 F [J]. ASLE Transactions, 1959, 2(2): 225-234.
- [9] Ouyang J H, Sasaki S, Murakami T, et al. Spark-plasma-sintered $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ - BaCrO_4 self-lubricating composites for high temperature tribological applications [J]. Ceramics International, 2005, 31(4): 543-553.
- [10] Qi Y, Zhang Y, Hu L. High temperature self-lubricated properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$ laminated composites [J]. Wear, 2012, 280(3): 1-4.
- [11] Ouyang J H, Sasaki S, Murakami T, et al. Tribological properties of spark-plasma-sintered $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ - CaF_2 -Ag composites at elevated temperatures [J]. Wear, 2005, 258(9): 1444-54.
- [12] Murakami T, Ouyang J H, Sasaki S, et al. High-temperature tribological properties of spark-plasma-sintered Al_2O_3 composites containing barite-type structure sulfates [J]. Tribology International, 2007, 40(2): 246-253.
- [13] 肖汉宁, 千田哲也. 氧化铝陶瓷在高温磨损过程中的塑性变形与再结晶 [J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3): 193-198. Xiao H N, Senda T. Plastic deformation and recrystallization of alumina during sliding wear at elevated temperature [J]. Tribology, 1997, 17(3): 193-198 (in Chinese).
- [14] 赵志强, 王永兰, 金志浩. Al_2O_3 - CaF_2 -Glass 自润滑复合材料摩擦磨损的研究 [J]. 硅酸盐通报, 1998, 17(2): 14-17. Zhao Z Q, Wang Y L, Jin Z B. Investigation of self-lubricating composite Al_2O_3 - CaF_2 -glass [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1998, 17(2): 14-17 (in Chinese).
- [15] Chen W, Gao Y, Ju F, et al. Tribochemical behavior of Si_3N_4 -hBN ceramic materials with water lubrication [J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 229-238.
- [16] Chen W, Gao Y, Chen C, et al. Tribological characteristics of Si_3N_4 -hBN ceramic materials sliding against stainless steel without lubrication [J]. Wear, 2010, 269(3): 241-248.
- [17] Peterson M, Li S, Murray S. Wear-resisting oxide films for 900 °C [J]. Journal of Materials Science & Technology, 1997, 13(1): 99-106.
- [18] 李诗卓, 姜晓霞, 尹付成. Ni-Cu-Re 高温自润滑合金的研究 [J]. 材料研究学报, 1989, 3(6): 481-482. Li S Z, Jiang X X, Yi F C. On self-lubricating behavior of Ni-Cu-Re alloy at elevated temperature [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1989, 3(6): 481-482 (in Chinese).
- [19] 孟军虎, 吕晋军, 王静波, 等. 两种镍基合金的高温摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(3): 184-188. Meng J H, Lv J J, Wang J B, et al. Study on friction and wear properties of several Ni-based alloys in sliding against Co-WC at elevated temperature [J]. Tribology, 2002, 22(3): 184-188 (in Chinese).
- [20] Li J, Xiong D, Wu H, et al. Tribological properties of molybdenized silver-containing nickel base alloy at elevated temperatures [J]. Tribology International, 2009, 42(11): 1722-9.
- [21] 王爱芳, 张定军, 吴有智, 等. MoS_2 和石墨对 Ni-Cr 基复合材料摩擦学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2010, 24(5): 464-470. Wang Y F, Zhang D J, Wu Y Z, et al. Effects of adding MoS_2 and graphite on tribological properties of Ni-Cr based self-lubricating composites [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5): 464-470 (in Chinese).
- [22] Liu F, Jia J. Tribological properties and wear mechanisms of NiCr- Al_2O_3 - SrSO_4 -Ag self-lubricating composites at elevated temperatures [J]. Tribology Letters, 2013, 49(1): 281-290.
- [23] Liu F, Yi G W, Wang W Z, et al. The influence of SrSO_4 on the tribological properties of NiCr- Al_2O_3 cermet at elevated temperatures [J]. Ceramics International, 2014, 40(2): 2799-2807.
- [24] Liu Z. Elevated temperature diffusion self-lubricating mechanisms of a novel cermet sinter with orderly micropores [J]. Wear, 2007, 262(5): 600-606.
- [25] 燕松山. 高温发汗润滑层制备及其功能控制机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. Yan S S. Study on the fabrication of high temperature gland-lubricating layer and its function control mechanism [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [26] 王砚军. 高温发汗自润滑金属陶瓷的制备, 表征及摩擦学特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008. Wang Y J. Study on fabrication, characterization and tribological properties of high temperature self-lubrication metal ceramics with sweat gland structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [27] 鳞片石墨 [J/OL]. <http://www.chinabaike.com/z/yj/598675.html>, 2011-03-24.
- [28] 润滑基础知识 [J/OL]. <http://www.youboy.com/pics62956164.html>.
- [29] Hampson N, Lee J, Morley J. The electrochemistry of oxides of silver—a short review [J]. Electrochimica Acta, 1971, 16(5): 637-642.
- [30] Petterson M, Calabrese S, Stupp B. Lubrication with naturally occurring double oxide films [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 1982.
- [31] Erdemir A. A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides [J]. Tribology Letters, 2000, 8(2): 97-102.
- [32] Sliney H E, Strom T N, Allen G P. Fluoride solid lubricants for extreme temperatures and corrosive environments [J]. ASLE Transactions, 1965, 8(4): 307-322.
- [33] Deadmore D L, Sliney H E. Hardness of CaF_2 and BaF_2 solid lubricants at 25 to 670 °C [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research

Center, 1987.

- [34] Sliney H E. Self-lubricating composites of porous nickel and nickel-chromium alloy impregnated with barium fluoride-calcium fluoride eutectic [J]. ASLE Transactions, 1966, 9(4): 336-347.
- [35] 吕晋军,王静波,欧阳锦林,等. 三氟化铈的高温热稳定性及其分解产物对摩擦磨损性能的影响和作用机理 [J]. 摩擦学学报, 1996, 16(4): 330-336.
- Lv J, Wang B, Ouyang J L. The thermal stability of CeF_3 and the effect of decomposed friction-wear properties and its mechanism [J]. Tribology, 1996, 16(4): 330-336 (in Chinese).
- [36] 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.
- [37] Liu E, Gao Y, Wang W, et al. Effect of the synergetic action on tribological characteristics of Ni-based composites containing multiple-lubricants [J]. Tribology Letters, 2012, 47(3): 399-408.
- [38] DellaCorte C, Thomas F, Edmonds B J. The effect of composition on the surface finish of PS400; A new high temperature solid lubricant coating [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2010.
- [39] Sliney H E. Wide temperature spectrum self-lubricating coatings prepared by plasma spraying [J]. Thin Solid Films, 1979, 64(2): 211-217.
- [40] DellaCorte C, Edmonds B. Preliminary evaluation of PS 300; A new self-lubricating high temperature composite coating for use to 800 °C [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 1995.
- [41] DellaCorte C, Edmonds B. NASA PS400; a new high temperature solid lubricant coating for high temperature wear applications [R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2009.
- [42] Voevodin A, Zabinski J. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(5): 741-748.
- [43] Voevodin A, Fitz T, Hu J, et al. Nanocomposite tribological coatings with "chameleon" surface adaptation [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2002, 20(4): 1434-44.
- [44] Aouadi S M, Paudel Y, Luster B, et al. Adaptive $\text{Mo}_2\text{N}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$ tribological nanocomposite coatings for aerospace applications [J]. Tribology Letters, 2008, 29(2): 95-103.
- [45] Aouadi S, Paudel Y, Simonson W, et al. Tribological investigation of adaptive $\text{Mo}_2\text{N}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$ coatings with high sulfur content [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(10): 1304-9.
- [46] Stone D, Migas J, Martini A, et al. Adaptive NbN/Ag coatings for high temperature tribological applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(5): 4316-21.
- [47] Aouadi S, Singh D, Stone D, et al. Adaptive VN/Ag nanocomposite coatings with lubricious behavior from 25 to 1000 °C [J]. Acta Materialia, 2010, 58(16): 5326-31.
- [48] Muratore C, Voevodin A A, Hu J J, et al. Multilayered YSZ-Ag-Mo/TiN adaptive tribological nanocomposite coatings [J]. Tribology Letters, 2006, 24(3): 201-206.
- [49] 刘林林,李曙,刘阳. 几种合成高铈酸盐的减摩行为 [J]. 金属学报, 2010, 46(2): 233-238.
- Liu L L, Li S, Liu Y. Anti-friction behaviors of several synthesized perhenates [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 233-238 (in Chinese).
- [50] Murray S F, Calabrese S J. Effect of solid lubricants on low speed sliding behavior of silicon nitride at temperatures to 800 °C [J]. Lubrication Engineering, 1993, 49(12): 955-964.
- [51] 王静波,吕晋军,欧阳锦林,等. SiC-Ni-Co-Mo-PbO 系高温自润滑金属基陶瓷材料摩擦学性能的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 25-31.
- Wang J B, Lv J J, Ouyang J L. Study on the tribological properties of SiC-Ni-Co-Mo-PbO high-temperature self-lubricating cermet material [J]. Tribology, 1997, 17(1): 25-31 (in Chinese).
- [52] Liu E, Wang W, Gao Y, et al. Tribological properties of adaptive Ni-Based composites with addition of lubricious Ag_2MoO_4 at elevated temperatures [J]. Tribology Letters, 2012, 47(1): 21-30.
- [53] Liu E, Wang W, Gao Y, et al. Tribological properties of Ni-based self-lubricating composites with addition of silver and molybdenum disulfide [J]. Tribology International, 2013, 57(1): 235-241.
- [54] Liu E, Bai Y, Gao Y, et al. Tribological properties of NiAl-based composites containing Ag_3VO_4 nanoparticles at elevated temperatures [J]. Tribology International, 2014, 80(12): 25-33.
- [55] Liu E, Gao Y, Bai Y, et al. Tribological properties of self-lubricating NiAl/Mo-based composites containing AgVO_3 nanowires [J]. Materials Characterization, 2014, 97(11): 116-124.