

## 金属基固体自润滑复合材料的研究进展

王常川, 王日初, 彭超群, 冯艳, 韦小凤

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 介绍固体润滑技术和固体润滑材料的应用背景和优势, 总结难熔金属基、铜基、铝基、铁基和镍基等金属基固体自润滑复合材料各自的特点, 讨论金属基固体自润滑复合材料的自润滑机理, 指出金属基固体自润滑复合材料在研究与开发中出现的问题, 介绍近年来金属基固体自润滑复合材料制备方法和研究内容方面的进展。

**关键词:** 金属基复合材料; 固体润滑剂; 自润滑; 润滑机理

**中图分类号:** TF125.9

**文献标志码:** A

## Research progress of metallic solid self-lubricating composites

WANG Chang-chuan, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, FENG Yan, WEI Xiao-feng

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The backgrounds and advantages of solid lubricating technology and materials were introduced. The characteristics of refractory metal-based, copper-based, aluminum-based, iron-based and nickel-based solid self-lubricating composites were summarized. The lubrication mechanism of metallic solid self-lubricating composite was discussed. The problems in the research and development of metallic solid self-lubricating composite were pointed out. The progresses in the preparation and research of metallic solid self-lubricating composite were introduced.

**Key words:** metallic composite; solid lubricant; self-lubricating; lubrication mechanism

全世界每年消耗的各类燃油总计约 15 亿 t, 但能源有效利用率只有 30% 左右。据估计, 摩擦和磨损消耗了全世界消费能源的 30%~40%<sup>[1]</sup>。摩擦作为物体运动中的自然现象, 是人类认识自然改造自然的过程中所面临的老问题。人类科学技术和生产方式进步的历史, 也是润滑技术发展的历史。通过改进润滑技术, 能有效地减少摩擦磨损所带来的资源浪费, 为全人类带来巨大的经济效益, 尤其是在地球能源日益枯竭、全球气候变化引起人们广泛的忧虑的今天, 节省资源更是有利于社会的稳定以及人类的可持续发展。

润滑油与润滑脂作为古老而有效的润滑材质, 应用于工程机械和车辆工具等各个领域。然而, 随着现代化工业的不断发展, 以及航空航天、科学研究和新能源开发等诸多领域的发展, 工程机械需要在真空、高温和辐射等多种苛刻条件下正常运转, 人们迫切需

要改进润滑技术和润滑材料以代替润滑油和润滑脂<sup>[2-3]</sup>, 以满足工程机械在苛刻条件下的润滑减摩需求, 固体润滑剂因此应运而生。固体润滑剂是具有润滑作用, 能降低摩擦带来的能量损耗并对相对运动的部件起保护作用的薄膜或粉末状固体物质<sup>[4]</sup>。与传统的流体润滑介质不同, 固体润滑剂在中通常为固体, 因此能较好地满足现代工业对润滑材料的使用要求。

固体自润滑复合材料是将固体润滑剂和附加组元添加到基体中, 通过一定的制备工艺而制备出同时具有一定强度和润滑性能的复合材料<sup>[5]</sup>。其中, 基体赋予材料一定的强度、硬度、抗氧化和腐蚀等性能, 固体润滑剂赋予材料润滑性能, 并且一般不需要添加润滑油脂。因此, 此类材料渐渐进入人们的视野, 并于 20 世纪 30 年代开始了粉末冶金青铜基自润滑复合材料的生产<sup>[6]</sup>, 30 年后出现了陶瓷黏结 MoS<sub>2</sub> 和相应的

金属基复合材料,在超音速飞机的问世过程中起到了十分重要的作用。随着信息时代的来临,出现了聚合物基、陶瓷基和金属基等多种门类的固体自润滑复合材料<sup>[7]</sup>,且其性能也不断改善。其中,金属基固体自润滑复合材料具有优良的综合性能、广泛的应用前景,逐渐成为材料科学研究和开发的新重点。目前,在生产机械、家用电器、办公设备、精密仪器、交通运输设备和军事装备等领域,金属基固体润滑材料都起着十分重要的作用<sup>[1]</sup>。

高性能金属基自润滑材料的研究与开发需要紧密围绕实际生产生活需要,不仅必须具备良好的工作性能,还必须做到在生产、使用和回收再利用过程中的资源节约和环境保护。开展金属基自润滑复合材料的研究,能改进其性能,拓展其应用范围,对工业生产、科学研究、军事国防和交通运输等领域具有十分重大的意义。

## 1 金属基固体润滑复合材料概况

相对于聚合物基和陶瓷基固体自润滑复合材料,金属基固体自润滑复合材料在制备和应用等方面都具有较大的优势:聚合物具有较低的密度和较高的抗腐蚀能力,但是强度较低,并且易在摩擦热的作用下失效;陶瓷材料具有较高的强度,但是制备和后期加工的难度较大。金属基固体自润滑复合材料具有金属的韧性和塑性,具有一定的加工性能和变形性能,其强度、硬度可以满足润滑膜的承载性和耐磨性要求,并且能够适应各种不同的大气环境、化学环境、高温和高真空等特殊环境<sup>[7]</sup>。此外,部分金属在摩擦过程中还可以形成多种具有润滑性的化合物,提高材料的润滑性能<sup>[8-9]</sup>。金属基固体自润滑复合材料按基体材质可分为难熔金属基自润滑复合材料、以铁铜为代表的低温自润滑复合材料、以银为代表的软金属基自润滑复合材料和以镍为代表的高温自润滑复合材料等。

在20世纪70年代,人们在钨、钼、铬、铌等难熔金属中添加固体润滑剂制备相应的自润滑复合材料,这些金属具有较好的耐磨性,并且在摩擦过程中不易发生卡滞。为了提高材料的力学性能,还可以添加WC、NbC、VC、TiC、ZrC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等硬质相。在高温高速以及摩擦发热量大的场合下具有十分广泛的应用<sup>[6]</sup>。研究表明<sup>[10]</sup>,在40%~80%W中添加20%~60%MoS<sub>2</sub>作为固体润滑剂时具有较高的强度和较好润滑减摩效果。然而,难熔金属的缺点也十分明显,它们价格昂贵,成型复杂,烧结困难,因此逐步被铜

基和铁基等材料替代。

铜具有良好的电导率和热导率,以及较好的耐腐蚀性,广泛用于电触头材料和电子封装材料以及电工机械中摩擦部件中。由于石墨性质稳定,通常不与铜基体发生反应,也不与铜基复合材料中常见的锡和铅等元素反应,并且具有良好的导电性,因此石墨在铜基自润滑复合材料中的应用最广泛<sup>[11-12]</sup>。低石墨含量的材料适合在高载荷条件下工作,而高石墨含量的材料适合在低载荷高速率条件下工作。此外,在基体中添加9%~12%锡可最大化提高基体的力学性能<sup>[6]</sup>,而添加铅可降低材料的摩擦因数,起到更好的润滑作用,铝也被证实添加至铜基体中可具有较好的润滑性能<sup>[13]</sup>。

铁基材料价格低廉、来源广泛,具有较高的强度和耐磨性,此外,铁可以依靠合金化和添加添加剂改变其力学、化学和摩擦学性能,以适应不同的工作环境。铜在铁中的溶解度非常小,但是在F/C复合材料中,铜能改变材料中渗碳体的形态和分布,进而改善材料的结构和力学性能<sup>[14]</sup>,因此,铜被用作铁基自润滑复合材料中十分重要的合金元素。常用的铁基自润滑复合材料有Fe/C、Fe-Cu/C、Fe-Mo/C等<sup>[14-16]</sup>。然而,铁基自润滑复合材料通常具有较高的硬度,在使用过程中铁与石墨反应产生弥散硬质点,容易对配偶部件造成损伤。

铝具有较小的密度、较高的强度和硬度、较好的抗腐蚀性能以及低廉的价格,因此非常适合作为室温至中高温段中的基体材质使用。杨慧敏和李溪滨<sup>[17]</sup>指出,在相同的条件下,铝基自润滑复合材料比青铜基复合材料具有更高的寿命和许用 $pv$ 值(润滑材料工作时的载荷( $p$ )与摩擦副之间相对运动速率( $v$ )的乘积),可以用于替代有油及无油条件下的青铜基复合材料。铅作为润滑相添加至铝基体中,可与石墨等润滑组分相互协同,起到良好的润滑减摩作用,将铅添加至Al/C复合材料中,可大幅度改善摩擦磨损性能<sup>[18]</sup>。用粉末冶金法制备铝基自润滑复合材料时,添加一定量的铜粉和铅粉可改促进其烧结过程,减小孔隙。

金属银具有超高真空中的稳定性、良好的电导率和热导率以及抗辐射、高温、腐蚀等优良特性,银还是良好的固体润滑剂,银基自润滑复合材料在电子领域中具有较大的优势<sup>[19]</sup>。目前常用的银基自润滑复合材料有Ag/MoS<sub>2</sub>、Ag/MoS<sub>2</sub>-C、Ag/WS<sub>2</sub>和Ag/NbSe<sub>2</sub>等。研究表明,这些银基复合材料在能在300℃以下保持0.2以下的摩擦因数,并且在电流作用下依旧保持良好的润滑减摩效果,还能适应在空间技术中常见的多倍重力加速度、辐射和真空等环境,成功运用于

我国航空航天领域<sup>[20]</sup>。

随着科学技术的发展, 人类正在挑战更苛刻的环境, 极端高温已成为人类在科学探索过程中最常遇到的困难, 因此, 在航空航天、航海远洋和石油化工等领域, 工程机械对高温固体润滑材料提出了更高的要求。镍在高温合金领域具有十分广泛的应用, 镍合金在 1 000 °C 以上的高温环境中仍具有良好的强度、抗氧化和抗腐蚀的能力, 因此, 镍基高温自润滑复合材料开始进入人们的视野并被广泛研究<sup>[21-22]</sup>。镍基高温合金具有比纯镍更优秀的抗高温氧化能力, 目前, 镍基高温合金的常用添加元素有铝、铬、钛等<sup>[23]</sup>。

在镍中加入铝后, 铝会对合金产生多种强化效果, 铝在镍中具有固溶度, 产生固溶强化作用, 其  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相也可以大幅度提高基体硬度, 并增强耐磨性能、抗高温和耐腐蚀性能<sup>[24]</sup>。当  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相的体积分数由 12% 增加至 60% 时, 合金的抗高温性能能提高约 200 °C<sup>[25-26]</sup>。镍铝基自润滑复合材料比镍基自润滑复合材料具有更好的润滑减摩性能, 进一步的研究表明, 镍铝基自润滑复合材料在自有固体润滑剂的基础上, 在润滑膜中还会出现玻璃陶瓷相, 这样的玻璃陶瓷相在 700~900 °C 下具有较好的润滑性能, 提高镍基复合材料在高温下的摩擦磨损性能<sup>[27]</sup>。ZHANG 等<sup>[28]</sup>用反应烧结法制备了 Ni<sub>3</sub>Al-hBN-Ag 复合涂层, 不仅具有优良的力学和摩擦磨损性能, 还有效避免了金属间化合物所带来的脆性。

铬是另一种镍基高温合金中常用的合金元素, 常温下铬在镍中具有较高的固溶度, 当铬的质量分数在 21% 以下时, 铬全部以固溶体形式存在于镍基体中, 因此具有较好的固溶强化效果。而当铬作为合金元素添加时, 在高温下能形成连续致密的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜, 阻隔空气与金属离子的扩散, 减缓金属的氧化速率, 提高合金的抗氧化性能<sup>[29-30]</sup>。镍铬合金的高温抗氧化性能优于纯镍和纯铬, 这是由于镍铬合金在高温下产生的尖晶石型化合物 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 能更好地阻隔金属与氧的接触, 表现出更好的高温抗氧化性能<sup>[31]</sup>。铬还能与硫反应生成多种硫化物, 在高温下具有较小的剪切强度, 易形成具有转移性的润滑膜<sup>[9]</sup>。此外, 铬能提高镍合金的抗腐蚀性能, Ni-Cr-Mo 合金具有良好的抗腐蚀性, 在氧化性介质和还原性介质中腐蚀率极低, 在海洋环境中具有较广泛的运用<sup>[32-33]</sup>。刘如铁等<sup>[34]</sup>通过在热压 Ni-Cr-Mo 合金合金中添加硫, 成功研制了可在海水环境中具有高抗腐蚀能力的自润滑复合材料。通过加入添加剂, 可改善镍基自润滑复合材料的摩擦磨损性能和力学性能。熊党生<sup>[35]</sup>在镍基自润滑复合材料中添加 4% 的 LaF<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 发现材料在分别

添加稀土化合物后, 力学性能有所降低, 但是摩擦磨损性能大幅度提高, 其中对摩擦磨损性能提升最大的稀土化合物是 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 其宽温带范围内摩擦因数和磨损率均只有合金基体的 50%。分析表明, 稀土化合物能增加镍基固溶体的晶面间距, 降低剪切强度。

## 2 金属基自润滑复合材料的润滑机理

当硬度相差较大的摩擦副发生相对运动并滑移时, 如图 1(a)所示, 硬金属通常会压入软金属中, 进而增加接触面积, 摩擦力也随之增大。而当硬金属之间发生滑移时, 如图 1(b)所示, 尽管接触面积不变, 但两者屈服强度较大, 克服塑性变形所需要的能量也较大, 因此摩擦力增大。而如果硬金属之间有一层剪切强度很小的薄膜如图 1(c)所示, 则可在不增加摩擦副间的接触面积的情况下降低剪切强度。此时摩擦所引起的塑性变形主要发生在薄膜之内, 摩擦力和摩擦因数都能降低, 从而保护基体不受摩擦的损伤。金属基自润滑复合材料的润滑作用主要体现在, 其含有的固体润滑剂能在摩擦副之间形成低剪切强度的润滑膜, 从而降低摩擦因数和磨损率<sup>[1]</sup>。

根据 BLAU 和 YUST<sup>[36]</sup>的观点, 在摩擦副中存在固体润滑时, 摩擦副之间的摩擦力由两部分组成, 一部分是对偶与金属基体之间的摩擦力, 另一部分是对偶与润滑膜之间的摩擦力, 即

$$F = \sigma_m F_m + \sigma_1 F_1 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_m$  为金属基体与对偶接触的面积,  $\sigma_1$  为润滑膜与对偶接触的面积,  $F_m$  和  $F_1$  分别为金属基体和润滑膜上的分力。而摩擦副之间的摩擦因数可表示为

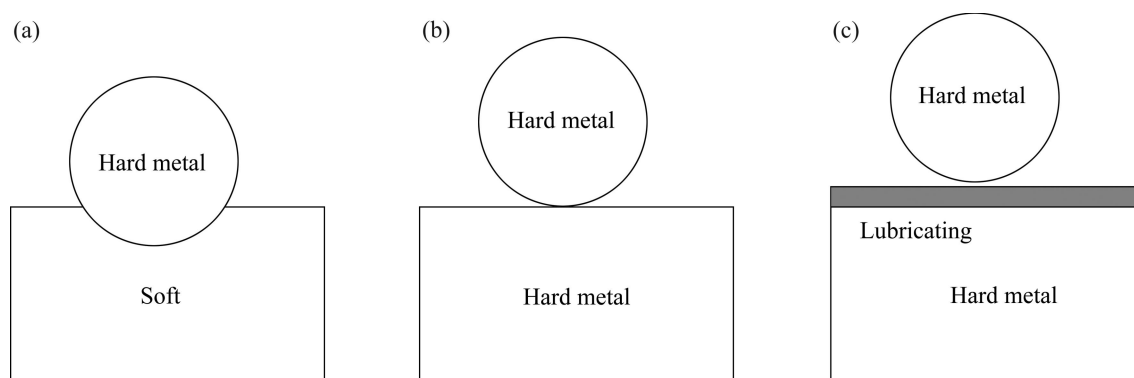
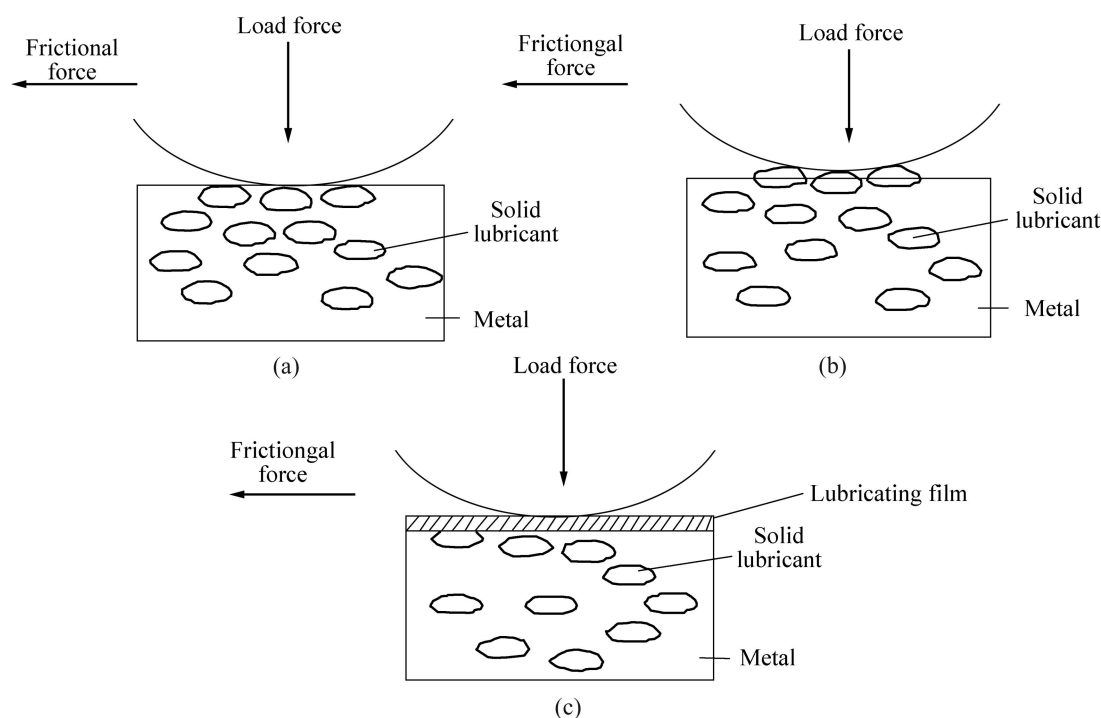
$$\mu = \chi_m \mu_m + \chi_1 \mu_1 \quad (2)$$

或

$$\mu = (1 - \chi_1) \mu_m + \chi_1 \mu_1 \quad (3)$$

式中:  $\chi_m$  和  $\chi_1$  分别为裸露的金属基体面积和固体润滑膜面积占总表面积的比例,  $\mu_m$  和  $\mu_1$  分别为金属基体和固体润滑膜与对偶材料的摩擦因数。从式(2)和(3)可看出, 有润滑膜覆盖的面积越大, 润滑膜越完整, 总的摩擦因数越低, 润滑效果越好。

金属基自润滑复合材料在滑移时产生润滑膜的原理如图 2 所示<sup>[37]</sup>。首先, 在摩擦开始前, 金属基自润滑复合材料由金属基体和固体润滑剂组成, 固体润滑剂均匀分布于金属基体中, 材料的表面与内部基本无区别(见图 2(a))。此后, 摩擦副开始相对运动, 此时摩

图 1 润滑膜作用原理图<sup>[1]</sup>Fig. 1 Diagram of lubricant film<sup>[1]</sup>图 2 固体润滑膜产生原理<sup>[37]</sup>Fig. 2 Formation mechanism of solid lubricant film<sup>[37]</sup>

摩擦副之间的作用与图 1(b)中所示的情况类似,摩擦副之间基本以金属基体和对偶材料之间的接触为主,摩擦比较剧烈,复合材料表面开始挤压变形,并伴随有大量摩擦热,此时均匀分布于金属基体内部的固体润滑剂受到挤压变形的作用逐渐向外表挤出,材料表面固体润滑剂的含量增多,固体润滑剂裸露在材料表面(见图 2(b)).最后,由于固体润滑剂通常具有较小的剪切强度,或者固体润滑剂能在压力和摩擦热作用下生成剪切强度较小的物质(见图 2(c)),这些低剪切强度的物质逐步向与对偶接触的一侧聚集,在摩擦力的作用下被剪切摊开在外表面。起初挤出的固体润滑剂并不充分,形成的润滑膜不足以覆盖整个金属表面,因

此还具有较高的摩擦因数和磨损率。但是随着时间延长,向表面挤出的固体润滑剂不断增多,在摩擦力和正压力的反复作用下固体润滑膜层不断得到完善与补充,最终形成完整连续的润滑膜。

固体润滑剂可在摩擦的过程中在剪切力的作用下成膜,固体润滑膜能否充分摊开尽可能地覆盖摩擦表面不仅取决于固体润滑剂的性质,还取决于固体润滑膜与金属基体的相互作用,以及固体润滑剂在金属基体上的转移。多年来,人们对润滑膜的转移进行了多方面的研究,但目前还没有准确统一的定论,对金属与润滑膜的相互作用中机械作用、自由能效应、静电吸附、化学作用、极性作用等<sup>[1]</sup>。

材料良好的润滑性能不仅取决于固体润滑剂能否形成完整润滑膜,而且取决于寿命润滑膜寿命的长短,而润滑膜的寿命主要取决于 3 个因素:

1) 润滑膜的耐磨性。润滑膜的耐磨性受润滑材料和基体间的匹配、基体表面状况和固体润滑膜组成及厚度等多因素的影响。润滑膜与基体间的结合受吸附作用和物理作用等多方面影响,不同的润滑介质与基体材料之间具有不同的化学亲和力和吸附作用,它们对润滑膜与基体间的结合强度影响较大,固体润滑剂与基体不匹配,不易结合,或者基体表面不适宜润滑膜的稳定存在,都会促使润滑膜剥落而影响润滑效果。

2) 基体强度。当材料具有较大塑性时,剪切力有可能深入材料内部,使基体发生撕裂与剥落,此时润滑膜会失去润滑作用。

3) 基体中固体润滑膜的修复能力。固体润滑膜发生剥落后,基体内部的固体润滑剂会继续向外挤出,若固体润滑剂含量足够,则可以形成新润滑膜填补空缺。

### 3 金属基自润滑复合材料研究目前存在的主要问题

金属基自润滑复合材料诞生的几十年来,人们通过不断研究,已开发出多系列多种类适合不同摩擦条件与苛刻环境的金属基自润滑复合材料,部分材料已运用到电子、航空、能源、水利和船舶等领域。然而,目前金属基自润滑复合材料的研究中还存在以下问题。

#### 3.1 材料的润滑性能与力学性能难以统一

粉末冶金金属基自润滑复合材料通常由两种以上具有不同性质的粉末制成。根据皮涅斯<sup>[38]</sup>的理论,两种不同种类的粉末的烧结需要满足以下关系:

$$\gamma_{AB} < \gamma_A + \gamma_B \quad (4)$$

式中:  $\gamma_{AB}$  为两相的比界面能,  $\gamma_A$  和  $\gamma_B$  分别为 A、B 两相单独存在的比界面能。当两相的比界面能小于两相单独存在的比界面能之和时,体系才能烧结。而固体润滑剂与金属之间化学性质相差较大,属于互不溶烧结体系,固体自润滑复合材料中金属基体与固体润滑剂之间的结合程度很低,材料的烧结主要依靠金属粉末之间的结合,因此,固体润滑剂的加入使得材料的烧结程度降低,力学性能变差。浩宏奇等<sup>[39]</sup>研究了石墨含量对铜基材料性能的影响,结果表明,虽然石墨的添加能改善摩擦磨损性能,但是随着石墨含量的

降低,材料的密度、硬度和抗弯强度均降低。蒋冰玉等<sup>[40]</sup>研究了 hBN 含量对 Ni-Cr 基自润滑复合材料力学性能和摩擦磨损性能的影响,结果表明,随着 hBN 含量的增加,材料的孔隙率、硬度和抗弯强度都下降,当 hBN 含量高于 11% 时甚至由于基体材料的强度过低而提高了材料的平均磨损率。

#### 3.2 固体润滑剂的使用范围有限

固体润滑剂通常具有一定的适用范围,超出使用范围则会导致固体润滑剂失效甚至导致严重事故,而目前固体润滑剂技术所面临的环境日益复杂,对固体润滑剂的要求越来越高,而固体润滑剂的适用范围有时候难以满足当前技术对复杂环境的要求。例如,MoS<sub>2</sub> 和石墨在 350 °C 以上的温度下润滑作用会减弱甚至失效<sup>[41]</sup>; CaF<sub>2</sub> 和 BaF<sub>2</sub> 在高温下具有较好的润滑性能,但是在 500 °C 以下时不具备润滑效果<sup>[42]</sup>; 软金属银和铅在真空中的稳定性和润滑性较好,但是抗氧化和腐蚀能力较差<sup>[43]</sup>。

#### 3.3 难以满足新时期对固体润滑的要求

人们的环保意识不断提高,各部门都对材料提出环保要求。随着食品、医药、水利等行业的兴起,人们开始重视低毒、低污染、低排放、安全系数高的固体润滑材料的研究与开发。目前,MoS<sub>2</sub>、PbO、Ag 等多种常用固体润滑剂中均含有对环境有害的元素,石墨等固体润滑剂具有易燃性,在使用过程中易导致安全事故。因此人们迫切需要更环保、更安全的固体润滑剂。

### 4 金属基自润滑复合材料在制备领域的进展

为解决金属基自润滑复合材料在制备中所遇到的问题,改善金属基自润滑复合材料的性能,开发新型复合材料,在金属基自润滑复合材料的制备领域人们开始采用新工艺和新手段,并取得了一定进展。

#### 4.1 粉末表面改性技术的应用

对于互不溶体系假合金,不同组分间的结合界面对材料的烧结性能影响很大,若在固相烧结时颗粒表面上有其他物质生成的液相,或者添加能加速粉末表面原子扩散的活化元素以及能与异类粉末反应的表面改性剂,都能提高粉末的活性并加速烧结过程<sup>[38]</sup>。目前,针对固体润滑剂与金属基体界面结合能力弱而导致的烧结程度较低,影响力学和摩擦磨损性能等问题,

人们采用对固体润滑剂表面改性,改善固体润滑剂与基体材料之间界面结构和润湿性,进而增强基体材料与固体润滑剂之间的界面结合,起到改善材料力学性能和摩擦磨损性能的目的<sup>[44-46]</sup>。目前在金属基自润滑复合材料中改性技术运用最广泛的是化学镀法。化学镀是在无外加电场的条件下,添加还原剂对溶液中的金属离子进行还原,并通过条件控制使金属有选择地析出成为金属镀层的工艺。尹延国等<sup>[47-48]</sup>研究了石墨表面化学镀镍对铜基自润滑复合材料力学性能和摩擦磨损性能的影响,结果表明,采用镀镍石墨粉能改善铜基体和石墨的结合状态,材料强度显著提高,并且摩擦磨损性能也有较大改善,磨损率降低约50%。此外,目前还出现了一些工艺较为简单的粉末表面改性方法对固体润滑剂进行处理。王常川等<sup>[49]</sup>用沉淀法制备了镀镍 hBN 粉末,结果表明,镀镍 hBN 粉末能改善 Ni-20Cr/hBN 复合材料的力学性能和综合摩擦磨损性能。李溪滨等<sup>[50]</sup>用硝酸镍分解-氢还原法对 MoS<sub>2</sub> 粉末进行包覆镍处理,结果表面,采用镍包覆 MoS<sub>2</sub> 粉末制备的自润滑复合材料具有较好的宽温带摩擦磨损性能。

#### 4.2 多种固体润滑剂的同时运用

针对单一固体润滑剂无法适应复杂环境的问题,人们开始采用多种固体润滑剂添加至同一基体中,利用不同固体润滑剂之间的互补,以达到对复杂环境的要求。同时添加多种固体润滑剂时,应考虑以下原则:

- 1) 多种固体润滑剂之间在润滑效果上应起到协同作用,而不是相互抵消;
- 2) 选用的不同种类固体润滑剂需在适用范围上有所区别,以提升材料对环境的适应性;
- 3) 基体和不同种类的固体润滑剂都应保持相应的匹配;
- 4) 选择的制备方法应同时满足不同固体润滑剂的要求。

ZHU 等<sup>[51]</sup>研究了同时添加银和金属氟化物 BaF<sub>2</sub> 和 CaF<sub>2</sub> 的 Ni-Al 基自润滑复合材料的摩擦磨损性能,结果表明,金属氟化物能够在高温下提高材料的强度,而 Ag 能够与金属氟化物起到较好的协同作用,有效提高摩擦磨损性能。TYAGI 等<sup>[52]</sup>研究了同时添加纳米银和 hBN 的 Ni 基复合材料的摩擦磨损性能,结果表明,同时添加银和 hBN 的复合材料的磨损性能比金属基体和单纯添加 hBN 的复合材料都好,并且当 hBN 含量为 8% 时,添加 12% 银能获得最低摩擦因数(0.35~0.55),并且银的添加能较好地降低材料在低温范围(200~400 °C)的磨损率,这说明两种固体润滑剂的

添加能改善材料的宽温带摩擦磨损性能。LI 等<sup>[53]</sup>研究了同时添加 Ag、MoS<sub>2</sub> 和 CeO<sub>2</sub> 的镍基自润滑复合材料的高温摩擦磨损性能,结果表明,添加银和 MoS<sub>2</sub> 的材料在 600 °C 以下的摩擦磨损性能比单纯添加 MoS<sub>2</sub> 的材料好,而在此基础上再添加 CeO<sub>2</sub> 能进一步提高摩擦磨损性能,CeO<sub>2</sub> 能在润滑膜表面形成陶瓷相,其摩擦磨损性能提高的幅度最大,添加 3 种固体润滑剂的材料比单纯添加 MoS<sub>2</sub> 的材料摩擦因数降低约 80%,磨损率降低约 90%。

#### 4.3 新制备工艺的应用

目前,制备金属基自润滑复合材料最常采用的是粉末冶金法<sup>[54]</sup>,包括粉末成型烧结、热压、粉末热挤压和粉末等静压烧结等。粉末冶金法不仅可以直接获得需要的形状,切削量极少,而且能够最大限度地提高生产效率,降低成本,减少能源消耗。在目前常用的固体润滑剂中,非金属固体润滑剂占有相当大的比例,粉末冶金技术可以较容易地实现金属与非金属的组合,在金属基自润滑复合材料的具有较大的优势。而对于互不溶烧结体系的复合材料,如果对材料密度要求较高,通常采用热压、复压和烧结锻造等工艺以提高其致密化程度,也可以采用熔浸、热等静压、热挤压等制备工艺<sup>[38]</sup>。此外,还有铸造法制备金属基自润滑复合材料的先例<sup>[55]</sup>。过去金属基自润滑复合材料的制备以传统冷压烧结法为主,而近年来,人们开始尝试采用新方法和新工艺制备金属基自润滑复合材料,取得较好效果。DAOUD<sup>[56]</sup>用气压熔渗法制备了 Al/C 自润滑复合材料,结果表明,在熔渗法制备的复合材料中,铝对材料起到了较好的支持作用,碳纤维分布均匀且材料孔隙率较低,在摩擦过程中,碳纤维使材料具有优良的自润滑性能并且不易发生严重磨损。付传起等<sup>[57]</sup>用感应烧结法制备了 Cu-Fe/MoS<sub>2</sub> 高温自润滑复合材料,并研究其高温摩擦磨损性能,结果表明,35Hz 的感应频率能使复合材料的综合性能达到最佳,在室温 800 °C 范围内摩擦因数在 0.33~0.44 之间。随着表面技术的发展,在工件表面制备金属基复合涂层的方法也开始大量应用。章小峰等<sup>[58]</sup>用激光熔覆法制备了 Ni45-CaF<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 复合涂层,结果表明,激光熔覆过程中部分 WS<sub>2</sub> 发生分解,复合涂层中产生 Cr<sub>x</sub>S<sub>y</sub> 和 CaWO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> 能明显改善熔池的流动性,复合涂层的摩擦因数稳定在 0.5 左右并且受温度的影响很小。WU 等<sup>[59]</sup>用化学镀法制备了 Ni-P-C-SiC 复合涂层,结果表明,用化学镀法可使石墨与 SiC 与镍基体有较好的结合,Ni-P-C 复合镀层具有较低的磨损系数,

Ni-P-SiC 复合镀则具有较好的耐磨性, Ni-P-C-SiC 能兼顾两者的优点, 具有较好的综合摩擦磨损性能。

## 5 金属基自润滑复合材料在理论研究方面的进展

随着科学技术的发展和检测手段的提升, 人们对金属基自润滑复合材料的研究和理解正在不断的深入, 提出了新理论以解释在研究过程中出现的新现象和新问题。由于技术手段的发展, 对金属基自润滑复合材料的研究更加系统更加深入。

### 5.1 提出新的润滑与摩擦磨损机理

为解释金属基复合材料中的新现象, 人们提出了多种相关理论并加以研究, 形成了独特的学科体系。研究较多的新理论有耗散结构论、类比法和协同理论等。耗散结构论<sup>[60]</sup>是指固体润滑剂在高温和摩擦的作用下通过自耗的方式提供润滑相, 并以此形成和修复润滑膜。耗散结构关注的是存在外界物质交换和能量交换的系统中, 材料热力学状态与宏观结构形成的关系, 可以用以解释固体润滑剂形成于修复过程中的一系列热力学与动力学问题, 在相变润滑和摩擦釉化等方面具有较好的契合度。类比法<sup>[61]</sup>是利用同类结构性质相似的原则, 通过计算与比较氧化物离子势的方法, 以预测一种或多种氧化物的剪切特性和润滑性能。当体系中由于化学反应、相变等方式转变为复杂混合体系时, 可以通过类比法研究不同氧化物对整体摩擦磨损性能和润滑的作用, 并解释添加氧化物固体润滑剂的金属基自润滑材料摩擦磨损行为。协同理论<sup>[60]</sup>是系统中多个子系统间相互协同而达到稳定结构。协同理论主要研究多个不同子系统之间的相互作用以及这种相互作用对总系统的影响, 可用于解释多种固体润滑剂同时使用时的摩擦磨损现象并作出解释。

### 5.2 关注材料的高温行为

在摩擦过程中, 摩擦副之间的机械能转化为热能, 摩擦过程中的温度上升对材料的影响, 以及材料在高温中的一系列现象逐渐被人们所重视。在高温下, 金属基自润滑复合材料发生氧化并出现氧化层。氧化物的出现有的可以提高材料的力学和摩擦磨损等性能, 有的则会导致材料性能下降甚至失效。徐娜等<sup>[62]</sup>研究了高温对 Ni-Cr 基复合自润滑涂层带来的影响, 结果表明, 涂层经 500 和 650 °C 处理后, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 NiO 等氧化物能使材料组织细化和均匀化, 结合强度较处理前更高, 而在 800 °C 下处理后, 材料内固体润滑相 BaF<sub>2</sub>

发生氧化, 材料致密度变差, 结合强度降低。王振生等<sup>[63]</sup>研究了 Ni-Al 基复合材料的自润滑性能, 结果表明, 在 700~900 °C 下, 材料在高温下于表面形成极细的氧化物保护膜, 这种氧化膜消除了材料与对偶之间的直接磨损, 并使之具有自润滑性能。高温下复合材料中的组元之间化学反应与相变也会对材料的摩擦磨损性能产生影响。董丽荣等<sup>[64]</sup>研究了添加 LaF<sub>3</sub> 和 MoS<sub>2</sub> 的 Ni-Cr 基自润滑复合材料在高温下的化学反应对材料摩擦磨损性能的影响, 结果表明, 在 400~700 °C, MoS<sub>2</sub> 发生分解, S 与基体生成硫化物, 与 LaF<sub>3</sub> 产生协同作用, 使材料的摩擦因数降低。韩杰胜等<sup>[65]</sup>研究了添加 CaF<sub>2</sub> 的 Fe 基自润滑复合材料的高温摩擦特性, 结果表明, 在 500 °C 以上磨损时, CaF<sub>2</sub> 与合金中的 Fe 和 Mo 元素反应形成 CaMoO<sub>4</sub>、FeMoO<sub>4</sub>F<sub>6</sub>、CaF<sub>2</sub> 以及多种氧化物共同组成的润滑膜, 具有良好的润滑性能。

### 5.3 研究特定环境下的摩擦磨损行为

以往对于自润滑复合材料的研究通常局限于一般性的摩擦磨损研究, 而目前自润滑复合材料运用的范围不断扩大, 面对的环境更加复杂, 为了验证其对环境的适应性, 通常还需要研究其在不同环境中的性能, 相关的研究还在不断深入和细化。WATANABE<sup>[66]</sup>研究了添加石墨和 WS<sub>2</sub> 的铜基自润滑复合材料在电流作用下的摩擦磨损行为, 发现在电流作用下材料的电阻增加, 摩擦因数降低, 并且当电流在 0.1~10A 范围内增大时, 材料的摩擦因数下降。这是由于表面电流能改变材料与对偶之间的接触状态, 使固体润滑剂更好更平稳地发挥作用。JIA 等<sup>[67]</sup>研究了添加石墨的铜基自润滑复合材料在水中的摩擦磨损性能, 结果表明, Cu/C 复合材料在水中的摩擦因数较干摩擦时有所提高, 这是由于水抑制了摩擦生热效应使得石墨的滑移能力降低, 水对摩擦副的润滑作用不能弥补石墨损失的润滑性能。但是摩擦生热效应的降低能有效提高基体的强度, 因此该复合材料在水中的磨损率较干摩擦时有大幅度降低。

## 6 前景展望

润滑技术的改进不仅能取得巨大的经济效益, 还有利于环境保护和资源合理利用, 金属基固体自润滑复合材料作为固体润滑材料的一种, 可以在高温、辐射和真空等苛刻环境中取代润滑油脂, 并且相对于聚合物基和陶瓷基固体自润滑复合材料, 金属基固体自

润滑复合材料具有应用范围广和制备工艺相对简单等优势,因而发展十分迅速。目前相关研究主要遇到 3 个方面的挑战:

1) 固体润滑剂的局限性。固体润滑剂的润滑性能比润滑油脂稍差,并且对金属烧结的阻碍作用,限制其大量添加,虽然采用粉末改性技术和多种新的材料制备技术在此方面得到一定成果,但是固体润滑剂对材料力学性能的不利影响依旧十分明显;

2) 工作环境对润滑材料提出更高的要求。目前工程机械等使用的自润滑部件不仅要面对高温、真空、辐射等环境,还被要求有广泛的适用性,如更宽的使用温度和载荷范围、更长的使用寿命和抗疲劳抗热振性能等,这需要根据基体和固体润滑剂的性质,合理设计体系和成分,并开发新型固体润滑剂以满足需求;

3) 目前还未针对金属基固体自润滑复合材料有提出完整系统的摩擦磨损理论。在此类材料的摩擦系统中,存在金属基体、润滑相、润滑膜、摩擦副和气氛环境等多种因素,目前的理论研究主要以现象解释为主,相关的理论研究不够深入,难以对材料的设计和研制起到参考和指引作用。

因此,金属基固体自润滑复合材料未来的研究也应该针对以上问题,包括开展粉末冶金技术和复合材料相关的研究、开发新自润滑体系和新固体润滑剂和针对自润滑材料的摩擦学特性系统研究相关的摩擦磨损理论的等。相信在未来,金属基固体自润滑复合材料能具有更高的性能和更广泛的应用空间,更好地服务于各行各业。

## REFERENCES

- [1] 王海斗, 徐滨士, 刘家浚. 固体润滑摩擦技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 6-74, 273-275.  
WANG Hai-dou, XU Bin-shi, LIU Jia-jun. The solid lubrication technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 6-74, 273-275.
- [2] GAO Yu-xia, DU Ling-zhong, HUANG Chuan-bing, LIU Wei, ZHANG Wei-gang. Wear behavior of sintered hexagonal boron nitride under atmosphere and water vapor ambiances [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(23): 10195-10200.
- [3] ZHU Sheng-yu, BI Qing-ling, YANG Jun, LIU Wei-min. Influence of Cr content on tribological properties of Ni<sub>3</sub>Al matrix high temperature self-lubricating composites [J]. Tribology International, 2011, 44(10): 1182-1187.
- [4] 王毓民, 王恒. 润滑材料与润滑技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 420-425.  
WANG Yu-min, WANG Heng. Lubricating material and technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 420-425.
- [5] 冯小明, 张崇才. 复合材料[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 1-3.  
FENG Xiao-ming, ZHANG Chong-cai. Composites [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007: 1-3.
- [6] 费多尔钦科 И. М. 粉末冶金复合减摩材料[M]. 李孔兴, 译. 北京: 北京市粉末冶金研究所, 1985: 168-215, 190-193.  
FEDORCHENKO И. М. Friction composite of powder metallurgy [M]. LI Kong-xing, transl. Beijing: Powder Metallurgy Institute of Beijing, 1985: 168-215, 190-193.
- [7] 石淼森. 固体润滑材料[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 14.  
SHI Miao-sen. Solid lubricating materials [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 14.
- [8] 李诗卓, 姜晓霞, 尹付成, PETERSON M B, CALABRESE S J. Ni-Cu-Re 高温自润滑合金的研究[J]. 材料科学进展, 1989, 3(6): 481-486.  
LI Shi-zhuo, JIANG Xiao-xia, YIN Fu-cheng, PETERSON M B, CALABRESE S J. On self-lubricating behavior of Ni-Cu-Re alloy at elevated temperature [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1989, 3(6): 481-486.
- [9] XIONG Dang-sheng. Lubrication behavior of Ni-Cr based alloys containing MoS<sub>2</sub> at high temperature [J]. Wear, 2001, 251(1/12): 1094-1099.
- [10] 牛淑琴, 张绪寿, 阮虎生. 含难熔金属自润滑复合材料之研究—W-MoS<sub>2</sub> 体系复合材料[J]. 固体润滑, 1982(3): 158-164.  
NIU Shu-qin, ZHANG Xu-shou, RUAN Hu-sheng, FANG Jia-bao, OUYANG Jin-lin. The research of self lubricating composites with refractory metal: W-MoS<sub>2</sub> composite [J]. Journal of Solid Lubrication, 1982(3): 158-164.
- [11] LIU Ru-tie, XIONG J Xiang, CHEN Fu-sheng, LU Jin-zhong, HONG Li-ling, ZHANG Yi-qing. Tribological performance of graphite containing tin lead bronze-steel bimetal under reciprocal sliding test [J]. Tribology International, 2011, 44(2): 101-105.
- [12] RAJKUMAR K, KUNDU K, ARAVINDAN S, KULKARNI M S. Accelerated wear testing for evaluating the life characteristics of copper-graphite tribological composite [J]. Materials and Design, 2011, 32(5): 3029-3035.
- [13] 丁莉, 姚萍屏, 樊坤阳, 余直昌, 贡太敏, 肖叶龙, 赵林. 铝代铅新型铜基自润滑复合材料的摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(4): 487-491.  
DING Li, YAO Ping-ping, FAN Kun-yang, SHE Zhi-chang, GONG Tai-min, XIAO Ye-long, ZHAO Lin. Friction and wear properties of copper matrix self-lubrication composites without Pb [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(4): 487-491.
- [14] 彭元东, 易健宏, 郭颖利, 罗述东, 李丽娅. 不同温度下微博烧结 Fe-Cu-C 的性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(4): 723-728.  
PENG Yuan-dong, YI Jian-hong, GUO Ying-li, LUO Shu-dong,



- LI Li-ya. Properties of Fe-Cu-C alloys microwave sintered at different temperatures [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(4): 723-728.
- [15] SKARVELIS P, PAPADIMITRIOU G D. Plasma transferred arc composite coatings with self lubricating properties, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behavior [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(10/11): 1384-1394.
- [16] WANG Wen-feng. Effect of alloying elements and processing factors on the microstructure and hardness of sintered and induction-hardened Fe-C-Cu alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1/2): 92-97.
- [17] 杨慧敏, 李溪滨. 粉末冶金固体自润滑材料的研究现状[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2001, 6(2): 123-127.
- YANG Hui-min, LI Xi-bin. General situation of P/M aluminum-matrix solid self-lubricating materials [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2001, 6(2): 123-127.
- [18] 李溪滨, 刘如铁, 杨慧敏. 铝铅石墨固体自润滑复合材料的性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 465-468.
- LI Xi-bin, LIU Ru-tie, YANG Hui-min. Properties of solid self-lubricating Al-Pb-graphite composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 465-468.
- [19] SIERRAS K A, BEJITUAL T S, CRONIN S, KESSMAN A J, KUKUREKA S N, CAIRNS D R. Tribo-corrosion of Ag and Ag-alloy ITO multilayers used in solar energy applications [J]. Wear, 2011, 271(9/10): 1438-1444.
- [20] 朱家佩, 郑 冀, 欧阳锦林. 银及其合金基自润滑复合材料的研究与应用[J]. 稀有金属材料与工程, 1987, 16(3): 63-69.
- ZHU Jia-pei. ZHENG Ji, OUYANG Jin-lin. Silver and silver-based self-lubricating composite materials research and application [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1987, 16(3): 63-69.
- [21] LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection [J]. Wear, 2008, 265(3/4): 533-539.
- [22] SUWARDIE J H, ARTIAGA R, MIER J L. Thermal characterization of a Ni-based superalloy [J]. Thermochemica Acta, 2002, 392/393: 295-298.
- [23] 金谨秀. 高温合金中微量元素的作用与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 272.
- JIN Jin-xiu. The effect and control of trace elements in high temperature alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 272.
- [24] DOMNET A, ERDEMIR A. Solid lubricant coatings: Recent developments and future trends [J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 389-397.
- [25] RO Y, KOIZUMI Y, HARADA H. High temperature tensile properties of a series of nickel-base superalloys on a  $\gamma/\gamma'$  tie line [J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 223(1/2): 59-63.
- [26] JACKSON J J, DONACHIE M J, HENRICKS R J, GELL M. The effect of volume percent of fine  $\gamma'$  on creep in DS mar-M20+HF [J]. Metallurgical Transactions A, 1997, 8(10): 1615-1620.
- [27] 王振生, 周兰章, 郭建亭, 张光业, 李会强, 胡壮麒. NiAl-Cr(Mo)-Cr<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 自润滑复合材料的摩擦磨损特征[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 589-595.
- WANG Zhen-sheng, ZHOU Lan-zhang, GUO Jian-ting, ZHANG Guang-ye, LI Hui-qiang, HU Zhuang-qi. Friction and wear behavior of NiAl-Cr(Mo)-Cr<sub>3</sub>S<sub>2</sub> self-lubricating composite [J]. Tribology, 2010, 30(6): 589-595.
- [28] ZHANG Shi-tang, ZHOU Jian-song, GUO Bao-gang, ZHOU Hui-di, PU Yu-ping, CHEN Jian-min. Preparation and characterization of reactively sintered Ni<sub>3</sub>Al-hBN-Ag composite coating on Ni-based superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1/2): 462-466.
- [29] HUANG Can, ZHANG Yong-zhong, VILAR R. Microstructure and anti-oxidation behavior of laser clad Ni-20Cr coating on molybdenum surface [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(3): 835-840.
- [30] MA Jun, JIANG Su-men, GONG Jun, SUN Chao. Composite coatings with and without an in situ forming Cr-based interlayer: Preparation and oxidation behavior [J]. Corrosion Science, 2011, 53(9): 2894-2901.
- [31] 刘秀晨, 安成强, 崔作兴, 吴 伟. 金属腐蚀学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 257-294.
- LIU Xiu-chen, AN Cheng-qiang, CUI Zuo-xing, WU Wei. Corrosion of metals [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 257-294.
- [32] LATHE G, RAJESWARI S. Suitability of high Ni-Cr-Mo alloys as construction materials in seawater [J]. Corrosion Prevention and Control, 1997, 44(1): 22-28.
- [33] HIBNER E L, SHOEMAKER L E. High-strength corrosion-resistant alloy for seawater fastener service [J]. Materials Performance, 2001, 40(10): 60-63.
- [34] 刘如铁, 李溪滨, 赵福安, 熊拥军. 石墨添加量对热压镍铬钼-石墨复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2005, 23(5): 359-362.
- LIU Ru-tie, LI Xi-bin, ZHAO Fu-an, XIONG Yong-jun. Effects of the graphite addition on the performance of the Ni-Cr-Mo-graphite composites made by P/M hot pressing [J]. Powder Metallurgy Technology, 2005, 23(5): 359-362.
- [35] 熊党生. 添加稀土化合物对镍基自润滑合金机械及高温摩擦特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(2): 144-147.
- XIONG Dang-sheng. The effect of rare earth compounds on the mechanical and high-temperature tribological properties of Ni-based self-lubricating alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(2): 144-147.

- [36] BLAU F P, YUST C S. Microfriction studies of model self-lubricating surfaces [J]. *Surface and Technology*, 1993, 62(1/3): 380–387.
- [37] WU Yun-xin, WANG Fu-xing, CHENG Yin-qian, CHEN Nan-ping. A study of the optimization mechanism of solid lubricant concentration in Ni/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite [J]. *Wear*, 1997, 205(1/2): 64–70.
- [38] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 268, 304–306.
- HUANG Pei-yun. Principles of powder metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 268, 304–306.
- [39] 浩宏奇, 丁华东, 李雅文, 金志浩. 石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(3): 120–123.
- HAO Hong-qi, DING Hua-dong, LI Ya-wen, JIN Zhi-hao. Effect of graphite content on friction and wear properties of copper base material [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(3): 120–123.
- [40] 蒋冰玉, 刘世民, 王日初, 罗丰华. BN 含量对 BN/Ni(Cr)自润滑材料力学及磨损性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(1): 57–62.
- JIANG Bing-yu, LIU Shi-min, WANG Ri-chu, LUO Feng-hua. Effect of BN on mechanical and tribological properties of BN/Ni(Cr) self-lubricating composites [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2009, 14(1): 57–62.
- [41] SLINEY H. Metals handbook: Solid lubricants [M]. Detroit: ASM International, 1993: 112–113.
- [42] SLINEY H E, STORM T N, ALLEN G P. Fluoride solid lubricants for extreme temperature and corrosive environments [J]. *ASLE Transactions*, 1965, 8(4): 307–322.
- [43] 于德洋, 翁立军, 欧阳锦林. 空间机械润滑研究的发展现状[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(1): 89–96.
- YU De-yang, WENG Li-jun, OUYANG Jin-lin. Recent progress of the space mechanism lubrication [J]. *Tribology*, 1996, 16(1): 89–96.
- [44] MOUSTAFA S F, ELBADRY S A, SANAND A M, KIEBACK B. Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders [J]. *Wear*, 2002, 253(7/8): 699–710.
- [45] HIROTAKA K, MASAHIRO T, YOSHIRO I, WASHIDA K, SASAKI Y. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide [J]. *Wear*, 2003, 255(1/6): 573–578.
- [46] SANAD A M. Effect of copper coating on consolidation and sintering of copper-graphite composites [J]. *Powder Metallurgy*, 1997, 40(3): 201–206.
- [47] 尹延国, 杜春宽, 郑治祥, 解挺, 刘焜, 吴玉程. 镀镍石墨粉对铜基石墨复合材料力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1895–1901.
- YIN Yan-guo, DU Chun-kuan, ZHENG Zhi-xiang, XIE Ting, LIU Kun, WU Yu-cheng. Effect of graphite coated with nickel on mechanical properties of copper-matrix/graphite composite materials [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(11): 1895–1901.
- [48] 焦明华, 尹延国, 俞建卫, 解挺, 杜春宽, 刘焜, 吴玉程. 石墨表面金属化对铜基复合材料摩擦学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1637–1643.
- JIAO Ming-hua, YIN Yan-guo, YU Jian-wei, XIE ting, DU Chun-kuan, LIU Kun, WU Yu-cheng. Influence of surface metallization of graphite on tribological properties of Cu-matrix/graphite composite materials [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(10): 1637–1643.
- [49] 王常川, 王日初, 彭超群, 冯艳, 韦小凤. hBN 表面镀 Ni 对 Ni-20Cr/hBN 自润滑材料性能的影响[J]. 材料研究学报, 2010, 25(5): 509–516.
- WANG Chang-chuan, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, FENG Yan, WEI Xiao-feng. Effects of hBN surface plated nickel on properties of Ni-20Cr/hBN self-lubricating composites [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2010, 25(5): 509–516.
- [50] 李溪滨, 刘如铁, 龚雪冰. 添加 Ni 包覆 MoS<sub>2</sub> 的 Ni-Cr 高温固体自润滑材料的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(10): 783–786.
- LI Xi-bin, LIU Ru-tie, GONG Xue-bing. Study of Ni-Cr high temperature solid self-lubricating materials added with Ni coated MoS<sub>2</sub> powders [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, 32(10): 784–786.
- [51] ZHU Sheng-yu, BI Qing-ling, YANG Jun, LIU Wei-min, XUE Qun-ji. Ni<sub>3</sub>Al matrix high temperature self-lubricating composites [J]. *Wear*, 2011, 44(4): 445–453.
- [52] TYAGI R, XIONG Dang-sheng, LI Jian-liang, DAI Ji-huai. Elevated temperature tribological behavior of Ni based composites containing nano-silver and hBN [J]. *Wear*, 2010, 269(11/12): 884–890.
- [53] LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng, HUANG Zhong-jia, KONG Jian, DAI Ji-huai. Effect of Ag and CeO<sub>2</sub> on friction and wear properties of Ni-base composite at high temperature [J]. *Wear*, 2009, 267(1/4): 567–584.
- [54] AKHLAGHI F, ZARE-BIDAKI A. Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method [J]. *Wear*, 2009, 266(1/2): 37–45.
- [55] COURANT B, HANTZPERGUE J J, AVRIL L, BENAYOUN S. Structure and hardness of titanium surfaces carburized by pulsed laser melting with graphite addition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 160(3): 374–381.
- [56] DAOUD A. Wear performance of 2014 Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufacture by gas pressure infiltration [J]. *Materials Letters*, 2004, 58(25): 3206–3213.
- [57] 付传起, 孙俊才, 王周. 感应烧结 MoS<sub>2</sub>/Cu-Fe 基高温自润滑复合材料的摩擦学特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 185–179.

- FU Chuan-qi, SUN Jun-cai, WANG Zhou. Study of tribological properties of MoS<sub>2</sub>/Cu-Fe matrix self-lubricating composites prepared by induction sintering at elevated temperature [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(S2): 175–179.
- [58] 章小峰, 王爱华, 张祥林, 乔晓勇, 黄早文. 激光熔覆 Ni45-CaF<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 自润滑涂层组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 17(2): 215–220.
- ZHANG Xiao-feng, WANG Ai-hua, ZHANG Xiao-lin, QIAO Xiao-yong, HUANG Zao-wen. Microstructure and tribological properties of laser cladding Ni45-CaF<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> self-lubrication coating [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 17(2): 216–220.
- [59] WU Ya-ting, SHEN Bin, HU Wen-bin. The tribological behavior of electroless Ni-P-Gr-SiC composite [J]. *Wear*, 2006, 261(2): 201–207.
- [60] 戴振东, 王珉, 薛群基. 摩擦体系热力学引论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 15–19.
- DAI Zhen-dong, WANG Min, XUE Qun-ji. The friction thermodynamic introduction [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 15–19.
- [61] ERDEMIR A.A. crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides [J]. *Tribology Letters*, 2000, 8: 97–102.
- [62] 徐娜, 张甲, 侯万良, 全明秀, 李荣德, 常新春. 热处理对高温固体自润滑涂层组织结构及结合强度的影响[J]. *金属学报*, 2009, 45(8): 943–948.
- XU Na, ZHANG Jia, HOU Wan-liang, QUAN Ming-xiu, LI Rong-de, CHANG Xin-chun. Influence of heat treatment on microstructures and adhesive strength of high temperature solid self-lubricant coating [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(8): 943–948.
- [63] 王振生, 周兰章, 郭建亭, 胡壮麒. 原位内生 NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 的高温磨损特性[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(6): 497–502.
- WANG Zhen-sheng, ZHOU Lan-zhang, GUO Jian-ting, HU Zhuang-qi. Wear behavior of in situ composite NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC at high temperature [J]. *Tribology*, 2008, 28(6): 497–502.
- [64] 董丽荣, 李长生, 丁巧党, 姜春华, 王旻璐, 彭义. LaF<sub>3</sub> 与 MoS<sub>2</sub> 对镍铬基复合材料摩擦学性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(10): 55–58.
- DONG Li-rong, LI Chang-sheng, DING Qiao-dang, JIANG Chun-hua, WANG Min-lu, PENG Yi. Effect of LaF<sub>3</sub> and MoS<sub>2</sub> on tribological properties of Ni-Cr based composite [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(10): 55–58.
- [65] 韩杰胜, 王静波, 张树伟, 孟军虎, 吕晋军. Fe-Mo-CaF<sub>2</sub> 高温自润滑材料的摩擦学特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(4): 306–310.
- HAN Jie-sheng, WANG Jing-bo, ZHANG Shu-wei, MENG Jun-hu, LÜ Jin-jun. Study on the tribological properties of Fe-Mo-CaF<sub>2</sub> high temperature self lubricating material [J]. *Tribology*, 2003, 23(4): 306–310.
- [66] WATANABE Y. High-speed sliding characteristics of Cu-Sn-based composite materials containing lamellar solid lubricants by contact resistance studier [J]. *Wear*, 2008, 264(7/8): 624–631.
- [67] JIA Jun-hong, CHEN Jian-min, ZHOU Hui-di, WANG Jing-bo, ZHOU Hua. Friction and wear properties of bronze-graphite composite under water lubrication [J]. *Tribology International*, 2004, 37(5): 423–429.

(编辑 何学锋)