

金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展

李博雅^a, 曹志强^b

(大连理工大学 a.化工学院 b.材料学院, 大连 116024)

摘要: 金属基固体自润滑复合涂层具有强度高、耐高温、耐磨损以及易加工等特性, 成为近来研究热点。首先综述了国内外金属基固体自润滑复合涂层的材料体系(即难熔金属基自润滑复合涂层、软金属基自润滑复合涂层、低温金属基自润滑复合涂层以及高温金属基自润滑复合涂层), 随后分析了金属基固体自润滑复合涂层的润滑机理, 指出润滑膜的低剪切特性是实现减磨润滑的关键。接着介绍了金属基固体自润滑复合涂层的制备技术, 比较分析了烧结、电镀、化学镀、热喷涂、物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、激光熔覆等技术, 在制备金属基自润滑复合涂层方面的优点和不足。最后总结了目前在关于金属基固体自润滑复合涂层研究中存在的问题, 进而探讨了相应的解决方案, 提出应深入研究金属基体、固体润滑剂与环境三者之间的相互作用机理, 并进一步指出研发新型固体润滑剂、改进现有制备技术、开发新工艺是未来重点发展的方向。

关键词: 固体自润滑复合涂层; 金属基; 材料体系; 润滑机理; 制备技术; 摩擦

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0032-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.006

Metal-based Solid Self-lubricating Composite Coating and Its Preparation Technology

LI Bo-ya^a, CAO Zhi-qiang^b

(a. School of Chemical Engineering, b. School of Materials Science and Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: Metal-based solid self-lubrication composite coating has recently become a research focus due to its high strength, high temperature resistance, abrasion resistant and easy processing. Material systems of metal-based solid self-lubricating composite coatings were reviewed firstly (i.e., refractory metal-based solid self-lubricating composite coating, soft metal-based solid self-lubricating composite coating, low temperature metal-based solid self-lubricating composite coating, and high temperature metal-based solid self-lubricating composite coating). Lubrication mechanisms of metal-based solid self-lubrication composite coatings were then analyzed, it was indicated that low shear property was the key of antifriction and lubrication. Then preparation technologies of the coatings were introduced. Advantages and disadvantages of such technologies as sintering, electroplating, electroless plating, thermal spraying, physical vapor deposition (PVD), chemical vapor deposition and laser cladding were compared and analyzed. Finally, problems concerning study on metal-based solid self-lubrication composite coatings were summarized, corresponding solutions were discussed, and it was recommended to further study interaction mechanism among metallic substrate, solid lubricant and environment. It was pointed out that research and development of new solid lubricant, improving existing preparation technologies and developing new process were directions to be emphasized in the

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-07-07

Received: 2017-04-24; Revised: 2017-07-07

通讯作者: 曹志强(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为金属基复合材料、激光熔覆。

Corresponding author: CAO Zhi-qiang(1965—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: metals matrix composites, laser cladding.

future.

KEY WORDS: solid self-lubricating composite coatings; metal-based; material system; lubrication mechanism; preparation technology; friction

摩擦会导致能量损耗、效率低、温度升高以及性能下降等一系列问题，磨损会造成零件表面形状和尺寸缓慢而连续损坏，使机器的工作性能与可靠性逐渐降低，甚至可能导致零件的突然破坏。有调研表明^[1-2]，2006 年我国因摩擦、磨损而导致的损失约高达 9500 亿元。润滑是降低该危害最为有效的措施^[3-4]，其中油脂润滑是最常见的传统润滑方法，可以降低摩擦，减小磨损。但是油脂润滑具有使用温度范围窄、易变质、不易储存等缺点，此外油脂润滑会污染环境，在要求清洁的环境中，如食品加工设备等，不宜采用油脂润滑。为了降低摩擦、减小磨损，有必要寻求其他的润滑方式。

固体自润滑复合材料具有较宽的使用温度范围，其化学性质稳定，能够在高真空和强辐射等特殊环境中发挥作用，能够实现永久润滑，使用方便且绿色，是解决上述问题最有效途径之一^[5-7]。固体自润滑复合材料有粉末、涂层以及块状三种形式，根据摩擦学观点^[8-9]，磨损发生在工件表面或近表面区域，因此在工件表层制备固体自润滑复合涂层是最经济、有效的方式。固体自润滑复合涂层按其基体类型分为 3 类：金属基固体自润滑复合涂层、无机非固体自润滑复合涂层以及聚合物基固体自润滑复合涂层。无机非固体自润滑复合涂层的强度高，但是不易制备，并且其后期加工的难度较大^[10-12]。聚合物基固体自润滑复合涂层的密度低和抗腐蚀能力强，但是强度较低，且在高温下易于失效^[13-14]。金属基固体自润滑复合涂层因具有优良的综合性能，成为近来研究的热点。

1 金属基固体自润滑复合涂层材料体系

金属基固体自润滑复合涂层是通过一定的工艺在基体表面制备的以金属为基体，加入固体润滑剂和附加组元，兼具基体金属性能以及自润滑性能的复合涂层。金属基固体自润滑复合涂层材料体系如表 1 所示。涂层根据金属基体的类型分为四类：以 W、Mo 为代表的难熔金属基自润滑复合涂层^[15-16]，以 Ag 为代表的软金属基自润滑复合涂层^[17-19]，以 Al、Cu 为代表的低温金属基自润滑复合涂层^[20-22]以及以 Ni、Co 为代表的高温金属基自润滑复合涂层^[23-24]。难熔金属基自润滑复合涂层广泛应用于高温和高速的场合，但由于其加工困难、价格高而逐渐被取代。Ag 基自润滑复合涂层具有良好的反射率、电导率、热导率以及延展性等特性，在电子探头和太阳能设备等方面具有独特的优势^[25-27]。低温金属基自润滑复合涂层在温度较低的情况下，具有优良的自润滑效果，当温度升高时，润滑效果降低，高温金属基自润滑复合涂层则与其相反^[28]。金属基固体自润滑复合涂层常用的固体润滑剂大致可分为三大类^[29-30]：1) 无机固体润滑剂，如 Ag、Pb 等软金属，MoS₂、WS₂ 和石墨等层状固体，CaF₂、BaF₂ 和 Al₂O₃ 等金属化合物，Ti₃SiC₂、SrSO₄ 等新型高温润滑剂^[31-33]；2) 有机固体润滑剂，如 PTFE、PE 等高聚物；3) 复合固体润滑剂，如 h-BN+MoS₂、WS₂+Ag+h-BN 以及 MoS₂+Ag 等。

表 1 金属基固体自润滑复合涂层材料体系
Tab.1 Material system of metal-based solid self-lubrication composite coatings

基体材料	固体润滑剂			附加组元
	无机固体润滑剂	有机固体润滑剂	复合固体润滑剂	
难熔金属基 W、Mo，软金属基 Ag，低温金属基 Al、Cu，高温金属基 Ni、Co	软金属：Ag、In、Au、Pb、Sn、Cr、Ni、Cu 层状固体：MoS ₂ 、WS ₂ 、石墨、h-BN、GaS、GaSe 氟化物、硫化物：CaF ₂ 、BaF ₂ 、PbS、CaSO ₄ 、BSO ₄ 氮化物：TiN、CrN、ZrN、BN 碳化物：TiC、WC、CrC 氧化物：Al ₂ O ₃ 、Cr ₂ O ₃ 、TiO ₂ 新型高温润滑剂：Ti ₃ SiC ₂ 、SrSO ₄	Polytetrafluoroethylene(PTFE)、polyethylene(PE)、Polyimide(PI)	h-BN+MoS ₂ 、WS ₂ +Ag+h-BN、MoS ₂ +Ag、h-BN+Ag、石墨+MoS ₂ 、CaF ₂ /BaF ₂ +Ag	增强体如碳纤维、碳纳米管，稀土化合物La ₂ O ₃ ，合金元素 Al、Cr

应该注意的是, 固体润滑剂在一定范围内才能发挥作用, 超出其使用范围会失效, 不能起到润滑作用。例如, Sliney H E 等^[34-35]研究表明, MoS₂ 和石墨等层状固体润滑剂在高于 350 °C 的温度下会发生氧化而失去润滑作用, 因此层状固体润滑剂制备的涂层只有在工作温度不高的环境中才能发挥作用。Chen J 等^[36]研究表明, CaF₂ 在温度大约 400 °C 时会发生韧脆转变, 低于 400 °C 时会因变脆而失去润滑作用, 因此 CaF₂ 适用于制备在高温环境下服役的涂层。软金属适用的温度范围较宽, 但具有易塑性变形、易氧化等缺点^[37-38]。因此, 应该根据具体应用选择不同的固体润滑剂。

高温金属基自润滑复合涂层的附加组元有如下几类: 碳纤维、碳纳米管等提高涂层强度、硬度以及耐磨性的增强体^[39-40]; 使涂层具有高硬度、耐高温、耐腐蚀以及抗氧化等特性的元素, 如 Al、Cr、S^[41-42]。

2 金属基固体自润滑复合涂层润滑机理

摩擦力是粘着效应和犁沟效应产生阻力的总和。两工件之间产生滑动摩擦一般有以下两种情况: 第一种情况, 如图 1a 所示, 摩擦对偶在软质合金发生相对滑动时, 会使软质合金表面产生严重的犁削和擦伤, 摩擦力也随之升高, 最终导致工件的磨损失效; 第二种情况, 如图 1b 所示, 当摩擦对偶在硬质金属表面发生相对滑动时, 根据 Bowden 和 Tabor 固体摩擦理论, 可以忽略犁沟效应而只考虑粘着效应对摩擦力的影响。如图 1c 所示, 当摩擦对偶与硬质金属之间有一层润滑膜时, Blan 和 Yust^[43]提出了用平均法计算两者之间摩擦力 F 的大小, 如公式 (1) 所示:

$$F = \alpha_m F_m + \alpha_1 F_1 \quad (1)$$

式中: α_m 为摩擦对偶与硬质金属间的接触面积; α_1 为摩擦对偶与润滑膜的接触面积; F_1 和 F_m 分别为金属和润滑膜的抗剪强度。假设载荷在接触区域均匀分布, 摩擦系数 μ 可表示为:

$$\mu = (1 - \chi_1)\mu_m + \mu_1\chi_1 \quad (2)$$

式中: χ_1 为摩擦对偶与润滑膜之间的接触面积占

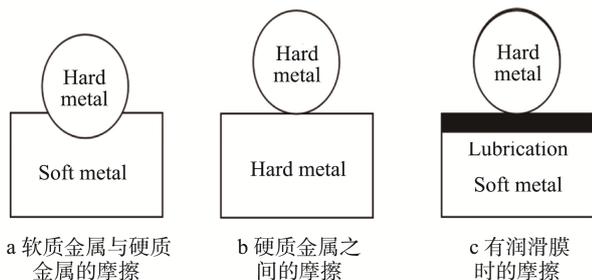


图 1 润滑膜作用原理^[43]

Fig.1 Mechanism of lubrication film^[43].

a) friction of soft and hard metal, b) friction of hard metal, c) friction under lubricated condition

总接触面积的百分比; μ_m 和 μ_1 分别为金属和润滑膜的摩擦系数。从式 (1) 和式 (2) 可以得知, 在摩擦表面, 润滑膜的面积越大、抗剪强度越小以及摩擦系数越低, 则摩擦力越小, 产生的润滑效果越好。

金属基固体自润滑复合涂层的自润滑原理如图 2 所示^[44]。当未发生摩擦时, 如图 2a 所示, 固体润滑剂分布在金属基体中, 此时, 涂层表面与涂层内部基本没有差别。当开始发生摩擦时, 如图 2b 所示, 摩擦副之间主要以对偶材料与金属基体的摩擦为主, 此时摩擦力较大, 涂层表面发生挤压变形, 导致分布在金属基体中的固体润滑剂暴露在涂层表面, 并且温度升高。最后, 如图 2c 所示, 在摩擦副之间形成一层具有低剪切特性的润滑膜, 实现润滑减磨的作用。

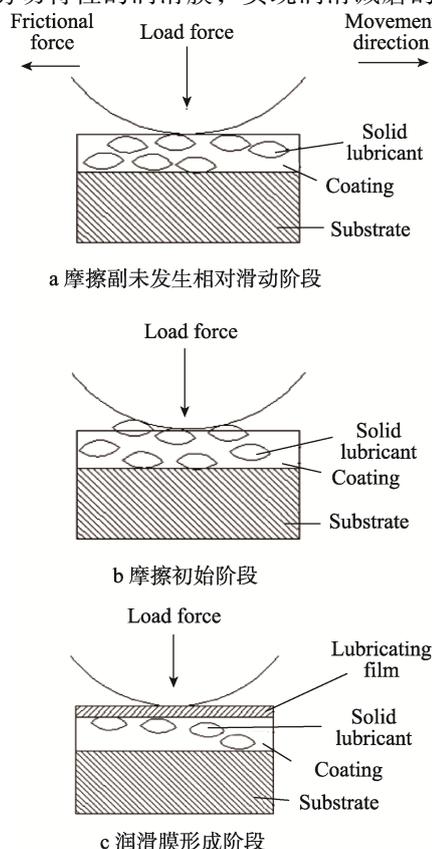


图 2 金属基固体自润滑复合涂层自润滑原理^[44]

Fig.2 Mechanism of metal-based solid self-lubrication composite coatings^[44]: a) stage of no sliding of friction pair, b) initial stage of friction, c) stage of formation of lubrication film

3 金属基固体自润滑复合涂层的制备技术

涂层的制备技术影响着涂层的组织结构, 进而决定了涂层的性能。目前制备金属基固体自润滑复合涂层技术主要有^[45]: 烧结、电镀、化学镀、热喷涂、物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积 (CVD)、激光熔覆, 其中烧结技术、热喷涂技术、激光熔覆技术应用

最为广泛。

3.1 烧结技术制备金属基固体自润滑复合涂层

烧结技术是将均匀涂覆在基体表面的料浆经高温烧结形成表面涂层的工艺方法。用烧结技术制备金属基固体自润滑复合涂层具有固体润滑剂分布均匀、工艺简单、成本低以及应用广泛等优点,但是其制备的涂层与基体为机械结合,结合强度低,表面质量差,因此不适用于制备高压、重载以及腐蚀环境中的金属基固体自润滑复合涂层。段文博等^[46-47]采用感应烧结技术制备出润滑相细小且分布均匀的 Ni 基自润滑复合涂层,研究表明,涂层组织均匀、细小、致密,其孔隙率为 5% 左右。Shi 等^[48]采用放电等离子体烧结技术制备了 Ni₃Al 基自润滑复合涂层,研究表明,涂层的摩擦学性能取决于 h-BN 润滑剂的含量,在从室温到 800 °C 范围内,当 h-BN 的质量分数为 15% 且添加质量分数为 5% 的 TiC 时,涂层具有相对较低的摩擦系数以及磨损率。

3.2 热喷涂技术制备金属基自润滑复合涂层

热喷涂是利用火焰、等离子电弧等热源将喷涂材料加热至熔融或半熔融状态,使其沉积到经过预处理的基体表面,形成具有特定功能涂层的沉积技术,是制备金属基固体自润滑复合涂层的有效方式之一。目前主要应用的热喷涂技术有等离子喷涂和火焰喷涂。该技术制备的涂层中存在气孔、微裂纹以及夹渣等缺陷,可以采用火焰重熔、激光重熔和炉内重熔等后处理方式消除或部分消除缺陷。Zhang 等^[49]用大气等离子喷涂技术制备了添加固体润滑剂 Ag 或 Ag-Mo 的 Ni 基高温固体自润滑复合涂层并研究了其润滑机理,研究表明,温度低于 600 °C 时,Ag 形成一层润滑薄膜,产生润滑作用;温度为 600 °C 时,Ag、Mo 与 O₂ 发生反应,生成具有层状结构的 Ag₂MoO₄ 薄膜,产生润滑作用;当温度在 600 °C 以上时,部分在磨损区域的 Ag₂MoO₄ 发生融化,形成摩擦系数更低的液态薄膜,产生润滑作用。徐海峰等^[50]采用等离子喷涂技术制备了 NiCrBSi-Mo 涂层,研究表明,用热喷涂技术制备的 NiCrBSi-Mo 涂层中,Mo 与 NiCrBSi 结合良好,产生了良好的润滑效果,但是含有较多的孔隙,并且孔隙率随 Mo 含量的增加而增加。Niranatlumpong 等^[51]采用大气等离子喷涂技术制备了 NiCrBSi-Mo 涂层,研究了 Mo 含量对涂层摩擦磨损性能的影响,研究表明,Mo 的存在可以起到润滑减摩效果,但当 Mo 含量超过一定量时,会导致涂层开裂与剥落。

3.3 激光熔覆技术制备金属基自润滑复合涂层

激光熔覆技术是将涂层材料以一定的方式放置

在基体表面,采用激光加热的方式使之和基体表面薄层同时熔化,并快速凝固后形成冶金结合的表面涂层的工艺方法。激光熔覆技术效率高,制备的涂层与基体为冶金结合,结合强度高,由于局部加热,因此对基体的材料要求较低,在制备金属基固体自润滑复合涂层方面优于其他技术,近年来,广泛地应用于金属基固体自润滑复合涂层的制备^[45,52]。Lu 等^[53]用激光熔覆的方法在 Ti6Al4V 合金上制备了 Ni 基固体自润滑复合涂层,研究表明,激光熔覆技术制备的 Ni60-10% h-BN 自润滑复合涂层具有良好的高温润滑效果。

应用激光熔覆技术制备金属基固体自润滑复合涂层时,会使 CaF₂、Ag 等熔点低的固体润滑剂因氧化、分解而失效。针对这一问题,Liu 等^[54]用激光熔覆技术制备固体自润滑复合涂层前,采用化学镀 Ni-P 包覆 CaF₂ 及 WS₂ 固体润滑剂,研究表明,涂层中均匀分布着 CaF₂ 颗粒,说明包覆方法能有效地降低 CaF₂ 的分解。

4 问题与展望

综上所述,金属基固体自润滑复合涂层在材料体系、润滑机理以及制备技术方面取得了相应的研究成果,并且成功地应用于机械、电子以及航空航天等诸多领域。然而,目前仍存在一些急需解决的问题:

1) 固体润滑剂的使用温度范围有限,目前还没有一种能够在很宽温度范围中使用的金属基固体自润滑复合涂层。因此,开发新型固体润滑剂,扩大涂层的使用温度范围是目前急需解决的问题。

2) 金属基固体自润滑复合涂层没有完整系统的理论体系,目前主要以现象解释为主,接下来应深入研究金属基体、固体润滑剂与环境三者之间的相互作用机理,用以指导涂层材料的设计及其制备。

3) 目前金属基固体自润滑复合涂层主要以传统的涂层制备技术为主,具有一定的局限性,为进一步提高涂层质量、开发新的涂层体系,制备技术的改进以及新工艺的开发也是一个极其重要的发展方向。

参考文献:

- [1] 谢友柏. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究——摩擦学在工业节能、降耗、减排中地位与作用的调查[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
XIE You-bo. Study on Application Status and Development Strategy of Tribology Science and Engineering—Investigation on the Status and Function of Tribology in Industrial Energy Saving, Consumption Reduction and Emission Reduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

- [2] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节约潜力巨大——谈我国摩擦学工业应用现状的调查[J]. 中国表面工程, 2008(2): 50-52.
ZHANG Si-wei. Enormous Economy Potential of Tribology Application in Industry in China: On the Survey of Present Status of Tribology Application in Industry[J]. China Surface Engineering, 2008(2): 50-52.
- [3] STACHOWIAK G, BATCHELOR A W. Engineering Tribology[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [4] MUCHAMMA D, TAUVIQIRRAHMAN M, PRATOMO A W, et al. The Beneficial Effect of Superhydrophobic Layer Addition on Lubrication Behavior in Bearing Application[J]. American Institute of Physics Conference Series, 2016, 1725(1): 611-620.
- [5] KONG Ling-qian, BI Qin-ling, ZHU Sheng-yu, et al. Self-lubricating Behavior of $ZrO_2(Y_2O_3)$ -Mo-CaF₂-Graphite Composite[J]. Advanced Materials Research, 2013, 815: 584-587.
- [6] 尹洪峰, 魏剑. 复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
YIN Hong-feng, WEI Jian. Composite Material[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [7] 徐兵, 胡志立. CNTs/NbSe₂/Cu 基自润滑复合材料的制备及其摩擦学性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(2): 189-194.
XU Bing HU Zhi-li. Fabrication of Self-lubricating Compound Coatings on Magnesium Alloy and the Research on Tribological Performance of the Coating[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(2): 189-194.
- [8] HOLMBERG K, MATHEWS A. Coatings Tribology: A Concept, Critical Aspects and Future Directions[J]. Thin Solid Films, 1994, 253(1): 173-178.
- [9] 刘启跃, 王文健, 何成刚. 摩擦学基础及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
LIU Qi-yue, WANG Wen-jiang, HE Cheng-gang. Foundation and Application of Tribology[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [10] 王培, 叶源盛. 钛合金表面激光熔覆 h-BN 固体润滑涂层[J]. 表面技术, 2015(8): 44-48.
WANG Pei, YE Yuan-sheng. Solid Self-lubricating Coatings on TC4 Titanium Alloy by Laser Cladding with h-BN[J]. Surface Technology, 2015(8): 44-48.
- [11] WU Guang-yong, XU Chong-hai, XIAO Guang-chun, et al. Self-lubricating Ceramic Cutting Tool Material with the Addition of Nickel Coated CaF₂ Solid Lubricant Powders[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 56: 51-58.
- [12] FANG Yuan, FAN Heng-zhong, SONG Jun-jie, et al. Surface Engineering Design of Al₂O₃/Mo Self-lubricating Structural Ceramics Part II: Continuous Lubrication Effects of a Three-Dimensional Lubricating Layer at Temperatures from 25 to 600 °C[J]. Wear, 2016, 360: 97-103.
- [13] WANG Zhan-hua. Self-healing Fluoropolymer Brushes as Highly Polymer-repellent Coatings[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(7): 2408-2412.
- [14] 逢艳, 汤皎宁, 谷坤明, 等. PTFE-环氧树脂复合固体润滑膜的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(6): 54-56.
PANG Yan, TANG Jiao-ning, GU Kun-ming, et al. Study on Tribological Behaviors of PTFE-epoxy Resin Composite Solid Lubricating[J]. Film Lubrication Engineering, 2008, 33(6): 54-56.
- [15] 牛淑琴, 张绪寿, 阮虎生, 等. 含难熔金属自润滑复合材料之研究——W-MoS₂ 体系复合材料[J]. 固体润滑, 1982(3): 158-164.
NIU Shu-qin, ZHANG Xu-shou, RUAN Hu-sheng, et al. Study on Refractory Metal-containing Self-lubricating Composites: W-MoS₂ Composite[J]. Solid Lubrication, 1982(3): 158-164.
- [16] FU C, SUN J, ZHOU W. Study of Tribological Properties of MoS₂/Cu-Fe Matrix Self-lubricating Composites Prepared by Induction Sintering at Elevated Temperature[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2010, 33(9): 239.
- [17] 闫淑萍, 韦尧兵, 韩杰胜, 等. Ti₃SiC₂ 的加入对 Ag-MoS₂-graphite 复合材料力学及摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 622-628.
YAN Shu-ping, WEI Yao-bing, HAN Jie-sheng, et al. Effect of the Addition of Ti₃SiC₂ on Mechanical and Friction/Wear Properties of Ag-matrix Composites[J]. Tribology, 2015, 35(5): 622-628.
- [18] AN V, ANISIMOV E, DRUZYANOVA V, et al. Study of Tribological Behavior of Cu-MoS₂, and Ag-MoS₂, Nanocomposite Lubricants[J]. Springerplus, 2016, 5(1): 1-5.
- [19] MAO F, WIKLUND U, ANDERSSON A M, et al. Graphene as a Lubricant on Ag for Electrical Contact Applications[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(19): 6518-6525.
- [20] CAO Tang-kun, LEI Shu-ting, ZHANG Meng. The Friction and Wear Behavior of Cu/Cu-MoS₂, Self-lubricating Coating Prepared by Electrospark Deposition [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270: 24-32.
- [21] 张银娣. 自润滑 Cu/Cu-MoS₂ 复合材料的制备及性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
ZHANG Yin-di. Preparation and Properties of Cu/Cu-MoS₂ Self-lubricating Composite[D]. Luoyang: Henan Technology University, 2014.
- [22] KUMAR V, GAUTAM R K, TYAGI R. Tribological Behavior of Al-based Self-lubricating Composites[J]. Composite Interfaces, 2016, 23(6): 481-492.
- [23] ARUNA S T, ARUNIMA S, LATHA S, et al. Preparation of Oil-encapsulated Microcapsules and Tribological Property of Ni Composite Coating[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2016, 31(1): 107-111.
- [24] 陆小龙, 刘秀波, 余鹏程, 等. 后热处理对 304 不锈钢激光熔覆 Ni60/h-BN 自润滑耐磨复合涂层组织和摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1):

- 48-54.
LU Xiao-long, LIU Xiu-bo, YU Peng-cheng, et al. Effects of Post Heat-treatment on Microstructure and Tribological Properties of Ni60/h-BN Self-lubricating Anti-wear Composite Coating on 304 Stainless Steel by Laser Cladding[J]. *Tribology*, 2016, 36(1): 48-54.
- [25] SIERROS K A, BEJITUAL T S, CRONIN S, et al. Tribo-corrosion of Ag and Ag-alloy ITO Multilayers Used in Solar Energy Applications[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 1438-1444.
- [26] HAROLD E S. The Use of Silver in Self-lubricating Coatings for Extreme Temperatures[J]. *Tribology Transactions*, 1986, 29(3): 370-376.
- [27] UYSAL M, AKBULUT H, TOKUR M, et al. Structural and Sliding Wear Properties of Ag/Graphene/WC Hybrid Nanocomposites Produced by Electroless Co-deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 654: 185-195.
- [28] 陈百明, 张俊喜, 郭小汝, 等. 高温金属基减摩材料的固体润滑剂的研究进展[J]. *矿山机械*, 2016, 44(1): 7-11.
CHEN Bai-ming, ZHANG Jun-xi, GUO Xiao-ru, et al. Research Progress on Solid Lubricant for Metal-matrixed Anti-friction Material at High Temperature[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2016, 44(1): 7-11.
- [29] THORSTEN B, WOLFGANG B, JÜRGEN B, et al. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [30] ZHANG Rui, FENG Ke-qin, MENG Jun-hu, et al. Tribological Behavior of Ti_3SiC_2 and Ti_3SiC_2/Pb Composites Sliding Against Ni-based Alloys at Elevated Temperatures[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 7107-7117.
- [31] 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.
- [32] 刘耀, 张建波, 李勇, 等. MAX/金属基自润滑复合材料的现状及进展[J]. *材料导报: 纳米与新材料专辑*, 2015(S2): 517-523.
LIU Yao, ZHANG Jian-bo, LI Yong, et al. The Status and Progress of MAX/Metallic Matrix Self-lubricating Composite[J]. *Materials Review: Nano and New Material Album*, 2015(S2): 517-523.
- [33] CLAUSS F J. *Solid Lubricants and Self-lubricating Solids*[M]. New York: Elsevier, 2012.
- [34] ZABINSKI J S, SANDERS J H, NAINAPARAMPIL J, et al. Lubrication Using a Microstructurally Engineered Oxide: Performance and Mechanisms[J]. *Tribology Letters*, 2000, 8(2): 103-116.
- [35] CHEN Jian-min, HOU Guo-liang, CHEN Jie, et al. Composition Versus Friction and Wear Behavior of Plasma Sprayed WC-(W,Cr) $_2$ C-Ni/Ag/BaF $_2$ -CaF $_2$ Self-lubricating Composite Coatings for Use up to 600 °C [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 261: 584-592.
- [36] SLINEY H E. The Use of Silver in Self-lubricating Coatings for Extreme Temperatures[J]. *Tribology Transactions*, 1986, 29(3): 370-376.
- [37] 陈元迪. 基于 In-Cu 单镀液和纳米 MoS $_2$ 复合镀液电刷镀层的抗粘着磨损性能研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(1): 89-95.
CHEN Yuan-di. Adhesive Wear Resistance of Brush Plated Coatings Based on In-Cu Single Coating Solution and Nano MoS $_2$ Composite Coating Solution[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(1): 89-95.
- [38] STOKES-GRIFFIN C M, COMPSTON P. Investigation of Sub-melt Temperature Bonding of Carbon-fibre/PEEK in an Automated Laser Tape Placement Process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 84: 17-25.
- [39] 王齐华, 张新瑞, 王廷梅, 等. 碳纤维增强聚合物基自润滑材料及其制备方法: 中国, CN101747626A [P]. 2011-08-31.
WANG Qi-hua, ZHANG Xin-rui, WANG Ting-mei, et al. Fiber Reinforced Polymer-matrix Self-lubricating Material and Preparation: China, CN101747626A [P]. 2011-08-31.
- [40] SLINEY H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures—A Review[J]. *Tribology International*, 1982, 15(5): 303-315.
- [41] 童照鹏, 孙桂芳, 房晓玉, 等. NiCr-MoS $_2$ -M 耐磨自润滑涂层的激光制备及表征[J]. *激光技术*, 2015, 40(2): 166-170.
TONG Zhao-peng, SUN Gui-fang, FANG Xiao-yu, et al. Laser Preparation and Characterization of NiCr-MoS $_2$ -M Self-lubricating Wear-resistant Coating[J]. *Laser Technology*, 2015, 40(2): 166-170.
- [42] LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng, QIN Yong-kun, et al. Tribological Behavior of Ni-based Self-lubricating Composites at Elevated Temperatures[J]. *Processing Techniques and Tribological Behavior of Composite Materials*, 2015: 72.
- [43] BLAU P J, YUST C S. Microfriction Studies of Model Self-lubricating Surfaces[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1993, 62(1): 380-387.
- [44] WU Yun-xin, WANG Fu-xing, CHENG Yin-qian, et al. A Study of the Optimization Mechanism of Solid Lubricant Concentration in Self-lubricating Composite[J]. *Wear*, 1997, 205(1/2): 64-70.
- [45] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A, et al. A Review to the Laser Cladding of Self-lubricating Composite Coatings[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2016, 3(2): 67-99.
- [46] 段文博, 孙岩桦, 丁春华, 等. 滑动速度对 IS304 涂层自润滑磨损机理的影响[J]. *摩擦学学报*, 2015, 32(2): 147-153.
DUAN Wen-bo, SUN Yan-ye, DING Chun-hua, et al. The Effect of Sliding Speed on the Wear Mechanisms of IS304 Self-lubricating Coating[J]. *Tribology*, 2015,

- 32(2): 147-153.
- [47] 郑晨, 何祥明, 杨茂盛, 等. 固体自润滑复合涂层制备技术的研究进展[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2011, 31(5): 19-23.
ZHANEG Chen, HE Xiang-ming, YANG Mao-sheng, et al. Research Progress on the Preparation of Solid Self-lubricate coatings[J]. Journal of Soochow University (Engineering Science Edition), 2011, 31(5): 19-23.
- [48] SHI Xiao-liang, SONG Si-yuan, ZHAI Wen-zheng, et al. Tribological Behavior of Ni₃Al Matrix Self-lubricating Composites Containing WS₂, Ag and hBN Tested from Room Temperature to 800 °C[J]. Materials & Design, 2014, 55: 75-84.
- [49] ZHANG Tian-tian, LAN Hao, HUANG Chuan-bing, et al. Preparation and Characterizations of Nickel-based Composite Coatings with Self-lubricating Property at Elevated Temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 294: 21-29.
- [50] 徐海峰, 肖金坤, 张嘎, 等. 热喷涂 NiCrBSi 基耐磨涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2016(2): 109-117.
XU Hai-feng, XIAO Jin-kun, ZHANG Ga, et al. Progress of Thermal Sprayed NiCrBSi Based Wear-resistant Coatings[J]. Surface Technology, 2016(2): 109-117.
- [51] NIRANATLUMPONG P, KOIPRASERT H. The Effect of Mo Content in Plasma-sprayed Mo-NiCrBSi Coating on the Tribological Behavior[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(2): 483-489.
- [52] 余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. 激光熔覆制备自润滑耐磨涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2016, 49(1): 48-51, 62.
YU Peng-cheng, LIU Xiu-bo, LU Xiao-long, et al. Research Progress of Self-lubricate Wear-resistant Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Materials Protection, 2016, 49(1): 48-51, 62.
- [53] LU Xiao-long, LIU Xiu-bo. Synthesis and Characterization of Ni60-hBN High Temperature Self-lubricating Anti-wear Composite Coatings on Ti6Al4V Alloy by Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 87-94.
- [54] LIU Xiu-bo, SHI Shi-hong. Microstructure and Wear Behavior of γ /Al₄C₃/TiC/CaF₂ Composite Coating on γ -TiAl Intermetallic Alloy Prepared by Nd: YAG Laser Cladding[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(11): 5662-5668.