

金属基复合材料涂层摩擦学的研究进展*

马红玉, 张嗣伟

(石油大学(北京) 机电工程学院, 北京 102200)

摘要: 对金属基复合材料涂层的减摩抗磨性能和制动摩擦性能、涂层的摩擦磨损机理和影响涂层摩擦磨损性能若干因素的研究现状进行了综述, 并指出有关涂层材料与基体的匹配规律、不同基材上涂层制备工艺的优化、多组元涂层及多层涂层的设计和制备工艺、纳米尺度涂层技术、涂层内应力的控制、涂层减摩抗磨机理以及制动摩擦机理等方面是今后在金属基复合材料涂层摩擦学方面值得进一步研究的问题。

关键词: 金属基复合材料涂层; 减摩抗磨; 制动摩擦; 涂层摩擦学

中图分类号: TG174.44; TH117

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)01-0008-08

Progress in Studies on Tribology of Metal-based Composite Coatings

MA Hong-yu, ZHANG Si-wei

(School of Mechanical and Electronic Engineering, University of Petroleum, Beijing 102200 China)

Abstract: The progress in studies on the tribological properties and the braking friction behaviors, as well as the friction and wear mechanisms of metal-based composite coatings is reviewed. Some factors influencing the friction and wear behaviors of the coatings are described. Moreover some problems needed to be investigated further in the field of tribology of metal-based composite coatings, such as the matching law of substrates and coatings, the optimization of coating preparation techniques, the design and preparation technique of multilayer and multicomponent coatings, the nano coating technology, the control of coating's internal stress, the coating's braking friction mechanism and friction-reduction and wear-resistance mechanisms, are pointed out.

Key word: metal-based composite coatings; friction-reduction and wear-resistance; braking friction; tribology of coatings

0 引言

金属基复合材料涂层具有耐高温、耐磨损、导电导热性好、不吸湿、不放气、尺寸稳定、不老化的优良特性, 而其优异的摩擦学性能更使它在摩擦学领域倍受青睐, 有关金属基复合材料涂层的摩擦磨损性能的研究方兴未艾。Subramanian等根据涂层的发展历程把涂层技术分为3代: 第1代涂层指传统的单组分涂层, 如TiN涂层, 已广泛应用于刀具、模具、量具及轴承; 第2代指二元复合涂层, 如Ti-C-N、Ti-B-N、Ti-Al-N, 已初步应用于某些耐磨部件上; 第3代指新近出现的多层涂层及多组元复合涂层, 即运用一种或多种表面工程技术将具有不同性能的材料组合到同一体系中以得到单一材

料无法具备的新的性能, 因而成为目前涂层中极具应用潜力的研究对象^[1,2]。文中仅就金属基复合材料涂层摩擦学的研究进展作一综述。

1 金属基复合材料涂层减摩抗磨性能的研究现状

1.1 单一涂层

单一涂层是指传统的单组分单层涂层, 主要包括金属涂层、金属化合物涂层、陶瓷涂层等。金属涂层中, 采用的各种金属离子注入的方法, 可提高注入金属表面的硬度, 降低表面的摩擦因数, 提高表面抗磨性能, 如H13钢表面注入Ti离子^[3]。另外, 如镀铬层, 它具有耐磨、减摩、耐热、耐腐蚀、摩擦因数低、防咬合等特点, 能改善模具表面性能, 提高模具寿命^[4]。陶瓷涂层中最典型的代表是TiN涂层, 研究表明^[5~7], TiN涂层与基材结合良好, 与基体相比, 其力学性能优异, 摩擦因数小, 耐磨性

收稿日期: 2004-12-01; 修回日期: 2005-01-06

基金项目: *高等学校博士学科点专项科研基金(20020425005)

作者简介: 马红玉(1977-), 女(回), 新疆米泉人, 博士生。

好,已广泛应用于各领域,特别是工模具方面。其它陶瓷涂层如 Al_2O_3 涂层、 Cr_2O_3 涂层等也都具有良好的减摩抗磨性能^[8]。金属化合物减摩抗磨涂层主要是一些具有自润滑性能的硫化物涂层、氧化物涂层和氟化物涂层,如 MoS_2 涂层^[9]、 FeS 涂层^[10]、 PbO 涂层^[8]、 CaF_2 涂层^[8]等。

1.2 复合涂层

用单一的或复合的表面工程技术将金属与一种或多种非金属微粒共同沉积于材料表面所获得的涂层称为复合涂层^[4]。上面提到的第2代二元复合涂层以及第3代多层涂层和多组元复合涂层均在复合涂层的范畴内。

Ti-C-N 、 Ti-Al-N 、 Ti-Si-N 及 Ti-B-N 涂层都是典型的二元复合涂层^[1,2],在切削刀具及工模具领域倍受关注。这类涂层大多采用气相沉积方法制备,微观组织呈现多相结构,例如 Ti-B-N 涂层^[11]中存在 TiN 相、 TiB 相、 BN 相及 TiBN 相。业已发现, Ti-C-N 、 Ti-B-N 、 Ti-Al-N 涂层的减摩抗磨性能均优于 TiN 涂层^[11~13]。

多组元复合涂层技术试图对涂层组成进行设计,期望各组分协同作用,从而获得性能更为优异的涂层。这类涂层主要包括:合金涂层、金属基耐磨复合涂层、自润滑复合涂层和金属-高分子材料复合涂层等。

金属合金以其良好的耐高温、耐磨损及与金属底材的粘结性而常用作涂层材料。目前广为关注的合金涂层主要是一些自熔剂合金,如Ni基合金、Co基合金、Fe基合金、Zr基合金等。研究证实,在不同的基体表面激光熔覆镍基合金 NiCrBSiC 涂层^[14]、Zr基非晶合金 Zr-Al-Ni-Cu 涂层^[15],以及电弧喷涂铁基合金 $7\text{Cr}13$ 涂层^[16],其硬度及减摩抗磨性能与基体相比均有明显改善。

在金属合金涂层中添加适当的材料(如纳米微粒、稀土)将会进一步提高涂层的减摩抗磨性能。例如将钼粉、自熔剂合金粉及 Al_2O_3 陶瓷粉进行混合,可以获得耐磨、减摩钼基伪合金等离子弧喷涂涂层^[17];在真空熔结镍基合金涂层中加入0.8%~1.0%的纳米金刚石粉,可显著提高涂层的硬度和耐磨性,摩擦因数可减小60%^[18]。在激光熔覆镍基合金 NiCrBSi 和 NiCrBSi-WC 复合合金中添加稀土氧化物 CeO_2 (氧化铈)^[19],以及在Fe基合金涂层中引入稀土氧化物 La_2O_3 ^[20],均可促进晶粒细化,提高

涂层组织均匀性及表面硬度,从而改善涂层的摩擦磨损性能。另外如 Ni-SiC 、 Ni-P-SiC 、 $\text{Ni-B-B}_4\text{C}$ 等复合电镀层都是良好的Ni基耐磨减摩涂层^[3]。

在合金涂层中添加润滑材料可获得自润滑复合涂层。研究表明,在镍基自熔粉末中添加润滑成分 $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ 可得到镍基高温润滑涂层,当 $w(\text{CaF}_2/\text{BaF}_2)$ 含量为0.25时,涂层摩擦学性能最佳,并且其磨损率随温度升高而降低^[21]。Ni基/ MoS_2 涂层也具有很好的自润滑性能^[22]。其它的金属基自润滑复合涂层还有Ni-石墨、Ni-氟化石墨、 Cu-In 等,这些涂层已得到实际应用^[3]。此外,黄锦滨等^[23]还研究了 Ni-Cu-P/MoS_2 固体润滑镀层的优化。

目前有关金属基-高分子复合涂层研究的报道很少,并且高分子添加成分仅限于PTFE,如采用非电复合镀法可获得Ni基-PTFE复合涂层,该涂层具有较低的摩擦因数,抗磨效果明显,经热处理后,耐磨性能有较大提高^[24]。化学镀 Ni(Cu)P-PTFE 复合涂层具有较低的表面粗糙度和孔隙率,经时效处理后,涂层硬度和耐磨性能提高,减摩性能良好^[25]。

近年来,多层涂层倍受关注,这是因为其具有如下优点^[1]: 可获得各个不同材料单层特性的综合特性; 与底材更牢固地粘结; 多层涂层中多个平行于底材表面的界面可有效地抑制裂纹的产生和扩展,从而提高涂层的硬度和韧性,并获得适当的硬度/韧性比和残余应力; 可获得高致密度的厚涂层($>10\text{ }\mu\text{m}$),满足切削刀具、磨粒磨损和冲蚀磨损等工况下的使用要求; 多层膜具有“应力阻挡”作用,可降低表面与次表面的最大应力,从而具有较高的承载能力。

目前,多层涂层的研究仍处于实验室阶段。关于软-硬、硬-硬交替及不同重叠周期(单层厚度及周期)的多层涂层都有报导^[26~30],张绪寿等认为^[1],一般多层膜均具有比单层膜更好的物理、力学和摩擦学性能。如 WCp/Ni 基合金梯度复合涂层^[31],随着层数增多,涂层硬度提高,摩擦因数和磨损率则减小,如表1所示。他还认为^[1],在多层强化涂层中,对硬质耐磨涂层而言,较少层数的均质和非均质结构单层组成的多层涂层比层数很多的超晶格多层涂层具有更优异的摩擦学特性,后者是利用具有等同结构的单层材料,即各单层材料具有相似的化学键合、原子半径、晶格参数及在晶格尺寸之内的厚度,进行周期性排列而得到的一种涂层^[2],换

表 1 WCp/Ni基金属梯度复合涂层的性能随层数的变化^[31]

Table 1 Variation of properties of WCp/Ni based gradient composite coating with the number of layers

试样编号	第一梯度层	第二梯度层	第三梯度层	硬度 HRC	摩擦 因数	磨 损 体 积/mm ³
基体				27	0.125	3.665
16-2	Ni60B90 %+铸造WCp10%			47	0.098	0.052
16-3	Ni60B90 %+铸造WCp10%	Ni60B70%+铸造WCp30%		55	0.093	0.042
19-4	Ni60B90 %+铸造WCp10%	Ni60B70%+铸造WCp30%	Ni60B50%+铸造WCp50%	56.5	0.063	0.018

言之，在性能、组分和结构上具有梯度特征的多层体系具有更优异的摩擦学特性；最外层、涂层总厚度及层数主要取决于工况条件。

2 金属基复合材料涂层的制动摩擦性能研究现状

为了改善汽车、火车和石油钻机绞车等重载制动系统的制动特性，以往的研究大多着眼于改良刹车材质，对刹车材料的研究^[32~36]主要集中于石棉有机摩擦材料、非石棉有机摩擦材料、半金属摩擦材料和粉末冶金金属陶瓷摩擦材料等，而忽视了表面工程技术的应用，因此有关金属基复合材料涂层的制动摩擦性能的研究报道还不多见。就现有文献资料来看，一些陶瓷涂层、高级合金涂层及二者的复合涂层表现出良好的制动摩擦性能。

陶瓷涂层能承受很高的表面温度，它们的低导热率产生的热障效应，减少了传递给基体的热量，从而使其温度降低，这也同样降低了在高能制动过程中，因局部瞬时高温而导致的塑性变形和金属咬合，其结果是，陶瓷涂层制动盘具有更为稳定的摩擦性能并且在使用中磨损更小^[37]。国外LAMIH实验室^[38]采用等离子喷涂获得的金属陶瓷涂层NiCr-Cr₃C₂的硬度高达800 HV，在和钛酸铝闸片匹配时，与传统的280 CDV5钢制动盘匹配Fe-Cu 烧结闸片相比，它具有稳定的摩擦因数、优良的耐磨性和不易受潮湿影响的性能，如图1所示(图中，μ_m和ω分别表示摩擦因数和转速)。另外研究表明^[39]，WC等离子喷涂涂层与GCr15钢配副，涂层的耐磨性能比基体材料(HT250)提高了两个数量级，其摩擦因数也高于灰铸铁，而对配副材料造成的磨损率基本相当。

高级合金具有优良的热机械性能和较好的抗

磨抗裂(剥落)性能，它们一般适用于苛刻的磨损工况。LAMIH实验室^[38]在缩小的XC38#钢制动盘上，分别涂覆了以钴基为主的钴铬钨钼高级合金(牌号为Corec6)涂层，以及两种以镍基为主的钴铬钨钼高级合金(牌号为Nirec6和Nirec1)涂层。试验表明，Corec6和Nirec6合金制动盘的性能和金属陶瓷材料制动盘的性能相似，与Nirec1合金制动盘相反，后者的摩擦因数虽高，但不够稳定，如图2所示。此外，某些学者考察Ni基金属涂层和Cu基金属涂层的摩擦学特性时发现，这两种涂层在给定试验条件下均具有较高的摩擦因数(0.4以上)^[40~41]。

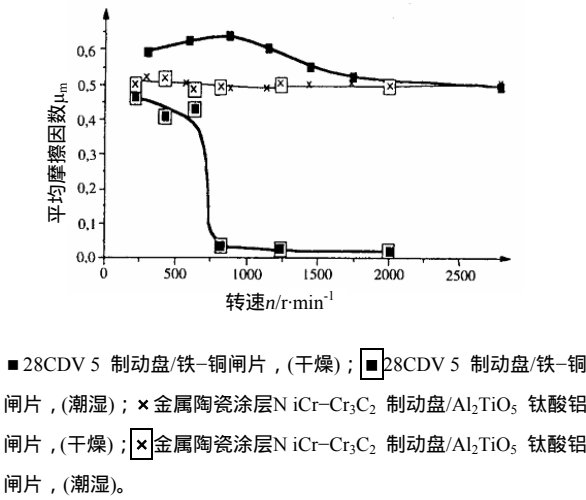


图1 28CDV5制动盘匹配铁-铜闸片和涂有金属陶瓷涂层NiCr-Cr₃C₂制动盘匹配Al₂TiO₃闸片；在潮湿情况下和干燥情况下平均摩擦因数随转速(接触压力：0.3 MPa)的变化^[38]

Fig.1 28CDV5 brake disc/Fe-Cu brake shoe and brake disc coated with NiCr-Cr₃C₂/Al₂TiO₃ brake shoe ;variation of average friction coefficient with rotate speed under dry and wet conditions (contact pressure: 0.3 MPa) ^[38]

另外,在合金涂层中添加合适的硬质相陶瓷微粒亦可获得具有较高摩擦因数的复合涂层。易茂中等^[42]对等离子喷涂Fe-Ni-Co-WC涂层的重载制动摩擦特性进行了试验研究,结果表明,在相同的试验条件下,等离子喷涂涂层分别与石棉摩擦材料和半金属摩擦材料对摩时的摩擦因数均比与基体35CrMo钢对摩时的高,制动时间短,制动效率和耐磨性能都明显提高,制动力矩峰小,刹车平稳,制动特性好。其它如激光熔覆NiCrBSi-TiC复合涂层^[43]、等离子喷涂镍基WC陶瓷涂层^[44]、激光熔覆Cu基-WCp复合涂层^[45]、高速电弧喷涂Fe-Al+WC复合涂层^[46]、等离子喷涂铁-镍-钴-碳化钨涂层^[47],由于陶瓷材料的加入,不但摩擦因数高,耐磨性也得到明显改善。

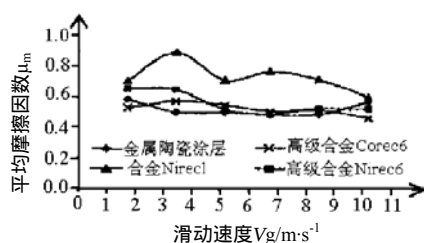


图 2 有涂层的制动盘在干、湿状态下保压(120 s)制动: 平均摩擦因数 μ_m 与滑动速度 V_g 成函数关系变化(Al_2TiO_5 闸片, 制动压力0.3 MPa)^[38]

Fig.2 Braking of brake discs with different coatings at constant pressure under dry and wet conditions: variation of average friction coefficient with sliding speed(Al_2TiO_5 brake shoe, brake pressure: 0.3 MPa)^[38]

3 涂层的摩擦磨损机理的研究进展

3.1 宏观力学机理

宏观力学机理描述摩擦磨损现象时着重考虑接触表面的应力及应变分布和由此引起的弹塑性变形、磨屑的形成过程及其动力学。接触表面的摩擦学性能主要取决于以下4个因素: 涂层和基体的硬度关系, 涂层厚度, 接触表面的粗糙度, 接触表面上任何碎屑的尺寸和硬度^[48]。

涂层硬度及其与基体硬度的关系是个重要参数。软涂层能减小摩擦。软基体上的硬涂层, 则能防止微观犁削和宏观犁削的发生, 因此不但能减小摩擦还能减小磨损。这种涂层存在残余压应力, 能够防止拉应力的产生。减小摩擦和磨损的进一步措

施是改善承载能力, 也就是增加基体硬度, 从而抑制由对偶件引起的变形和犁削作用^[49]。

就软涂层而言, 涂层厚度影响摩擦过程中的犁削作用, 而对粗糙表面来说, 涂层厚度影响粗糙表面微凸体穿透涂层进入基体的程度。厚且硬的涂层有助于改善软基体的承载能力, 这样可以减小接触面积和摩擦。软基体上涂覆薄而硬的涂层, 则涂层会因基体变形产生应力而发生破裂。尽管微凸体容易导致磨粒磨损和疲劳磨损, 但粗糙表面确实能减小实际接触面积^[49]。

滑动接触面上游离颗粒或碎屑是十分常见的, 它们可能来自周围环境, 也可能由磨损产生。在某些接触情况下, 它们对摩擦磨损的影响是相当大的, 这主要取决于颗粒直径、涂层厚度与表面粗糙度的关系以及颗粒、涂层和基体三者的硬度关系^[49]。

3.2 微观力学机理

微观力学机理着重考虑应力和应变的形成、微裂纹的产生和扩展、材料的运移及颗粒的形成。在典型的工程实例中, 这些现象都发生在微米级水平甚至纳米级水平。剪切和破裂是微裂纹成核、扩展并最终导致材料的运移及磨痕与磨屑的形成的两个基本机制, 但这方面的理论还不完善。研究微观力学机理的另一条途径是采用Berthier等建立的速度调节模式概念进行分析^[50]。

3.3 摩擦化学机理

摩擦化学机理主要考虑涂层工作的环境、介质的化学特性及可能发生的摩擦化学反应。滑动过程中接触表面上发生的化学反应将改变最外层的化学组成及其力学性能, 这对摩擦磨损性能有很大影响, 因为摩擦磨损性能在很大程度上决定于表面性能, 而在接触表面上, 剪切、微裂纹及微凸体犁削这些现象时有发生。影响摩擦化学反应的主要因素是微凸体碰撞点上很高的局部压力和超过1 000 的闪温^[49]。

试验表明, 硬质TiN涂层之间的滑动摩擦因数最低可达0.1, 类金刚石涂层与不同对偶材料的摩擦因数甚至小至0.05。摩擦因数如此小可以用硬质涂层上形成的低剪切微观薄膜进行解释, 如果从微观水平考察接触表面, 则微观薄膜实际上是硬质基体上的软质涂层, 只不过充当硬质基体的是先前的硬质涂层。如果先前的基体足够硬, 以致能够防止脆

性涂层破裂、提高承载能力并减小实际接触面积,这显然对摩擦磨损性能是十分有益的^[49]。

另外,在空气中,大多数金属表面容易形成氧化膜。有些氧化膜比金属易剪切,如氧化铜薄膜,有些氧化膜则非常坚硬,如氧化铝薄膜。研究发现,铅涂层和二硫化钼涂层表面的氧化膜能改善涂层的润滑性能^[49]。

3.4 毫微物理学机理

采用毫微物理学方法旨在揭示原子水平的摩擦磨损机理。毫微物理学机理重点考察摩擦磨损的来源,载荷、结晶滑动方向和原子水平的表面粗糙度对摩擦因数的影响,以及常用的宏观摩擦学定律与纳米水平的分子摩擦学特性之间的关系。研究表明,两表面相对滑动时,其中一表面上近表面原子在对偶面原子的带动下进入运动状态,原子晶格发生振动,从而产生摩擦,滑动所需的机械能一部分转化为声能并最终转化为热能。目前,有关毫微物理学机理的研究刚刚起步^[50]。

3.5 材料转移机理

当磨屑剥离表面后,它对接触表面摩擦学特性的影响分两种情况,自由磨屑对摩擦磨损性能的影响已在上文提到,另外,磨屑也可能粘附在对偶面上形成转移膜,也就是说形成了新的对偶面,产生了新的材料配副,这将显著改变对偶面的摩擦学特性^[50]。

4 影响涂层摩擦学特性的若干因素

4.1 涂层的化学组分

化学组分对涂层力学性能及摩擦学特性的影响十分明显,这主要表现在两个方面,即组分种类和组分含量。例如在多弧离子镀TiN涂层中添加Al、C等元素形成TiCN、TiAlN涂层,与TiN涂层相比,这两种涂层均具有较高的硬度和良好的耐磨性,与钢对摩时其摩擦因数也有所降低^[51]。在镍基等离子喷涂涂层添加MoS₂,随着MoS₂含量的增加,涂层的磨损率和摩擦因数先降低后增加,其中含MoS₂20%的涂层的摩擦磨损性能最佳^[22]。

4.2 涂层的结构

结构往往对性能具有决定性作用。涂层结构可以分为微观结构和宏观结构。微观结构涉及以下内容:晶粒、尺寸和晶界结构,一般小的晶粒尺

寸会引起金属和合金膜的硬化,而对于单相难熔化合物,硬度值并不强烈地取决于晶粒尺寸,晶界处的孔洞及微裂纹可能大大降低涂层的强度;晶体的结构,包括晶形的变化,如类金刚石中立方结构与非晶结构的比值决定了其硬度及润滑性能;晶体生长时的择优取向,如MoS₂涂层以(002)基面平行于基体表面择优取向的涂层比棱面择优取向的涂层具有低的摩擦因数和高耐磨性;以(111)面取向的TiN有高的硬度及耐磨性。此外,由于外来元素掺入原化合物的间隙位置而形成的亚稳态结构也可从整体上改变涂层的力学性能^[2]。宏观方面考虑涂层是单层涂层还是多层复合涂层,多层复合涂层又包括梯度复合涂层和超晶格或超点阵涂层,涂层的宏观结构不同,其性能也有很大差异,这已在前面提到。

4.3 涂层与基体间的结合状况^[52]

涂层与基体之间的良好结合是涂层得以发挥其作用的基本条件,也是保证涂层经久耐用的重要因素。涂层与基体间结合类型有冶金结合、扩散结合、外延生长、化学键结合、分子键结合及机械结合;影响涂层界面结合强度的因素主要是材料的润湿性能、界面元素的扩散情况、基体表面的状态和涂层的应力状态等;通常,改善膜层与基体间的界面结合力主要从以下几个方面入手:直接提高膜层与基体间的结合强度;减少膜层与基体在结合面上的应力集中;减少膜层自身的内应力。具体可采取如下措施:合理匹配覆层材料与基体材料的类型,以使涂层在基体上有良好的润湿性,易于成膜,以及尽量减少涂层与基体间的应力集中;应用中间涂层(过渡层);合理使用涂复工艺、适当控制工艺参数;进行表面预处理,如超声波清洗、等离子体处理等;利用一些促进物质间相互扩散的方法,如加热涂层和基体材料、提高涂层形成时的温度以及在膜层形成后进行适当热处理等等。

4.4 涂层厚度

涂层厚度也是影响涂层摩擦学特性的一个重要参数。为了使涂层在一定的磨损速率下能够有更长的使用寿命,希望涂层厚度比较大,但涂层厚度过大也有很多不利之处。首先,摩擦因数一般与涂层厚度成正比,当涂层厚度比较大时,其摩擦因数随之变大,导致摩擦工况恶劣。其次,涂层厚度比

较大时,在涂层内部积聚的热量很难散发出去,从而在涂层内部引起很大的热应力,直接影响涂层的寿命。最后,涂层厚度与涂层内应力密切相关,当涂层厚度较大时,涂层与基体的界面在外载作用下会产生很大的界面应力,从而导致涂层裂纹萌生或涂层剥落^[53]。可用的涂层厚度和材料种类有密切关系。一般可采用延展性好的结构合金,其厚度要比硬而延展性低材料厚得多。延展性好的材料随着涂层厚度增加而产生的应力更容易释放。热膨胀系数较小的材料在相同涂层厚度下一般产生的应力较小^[54]。通常抗磨涂层厚度推荐值在1 mm左右。

4.5 基材特性

涂层的摩擦学特性除与其本身的物理化学性能、机械性能和组织结构有关外,还受基体的物理化学性能、机械性能、组织结构、基体与涂层的相容性等因素的影响,其中基体的硬度、表面粗糙度等对涂层的持久性、减摩性及耐磨性的影响十分明显。研究发现,在高硬度基底上沉积MoS₂涂层减摩涂层,可以有效提高减摩效果、持久性、耐磨性和抗微动损伤能力^[55];表面粗糙度的改善有利于TiN层/基体的界面结合力的提高,同时可改善TiN层的摩擦学性能^[56]。

5 结 论

金属基复合材料涂层由于具有优良的综合性能,无论是在减摩抗磨方面,还是在制动摩擦方面,都显示出良好的应用前景。但有关金属基复合材料涂层的摩擦学研究仍处于初级阶段,尚未形成系统的理论和设计指南,而且,大多研究致力于开发新型的减摩耐磨涂层,对制动摩擦涂层的关注相对较少。应当指出,在涂层摩擦学领域,以下研究亟待进一步深入和完善: 系统研究涂层材料与基体材料的匹配规律,包括材质匹配、性能匹配,探寻涂层与基体的最佳组合方案,为设计性能优良的涂层提供规范和理论指导; 进一步研究不同基材上涂层制备工艺地优化以及涂层内应力的控制和优化,以便更好地控制涂层的组织结构和成膜质量,并力求适应工业化生产; 在继续研究涂层减摩抗磨机理的同时,还应深入研究涂层的制动摩擦特性与机理,使涂层技术可广泛应用于石油、矿山、汽车、航空和铁路等工业部门的制动器,这样就可采用价廉的基材,既能提高制动性能和使用寿

命,又可大大降低其生产成本,并有利于材料的再利用和减少能耗。 不断挖掘多组元及多层涂层技术、纳米涂层技术以及复合表面工程技术的应用潜力,以满足高性能表面的新要求。

参考文献:

- [1] 张绪寿,余来贵,陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 156-160.
- [2] 韩修训, 阎逢元, 阎鹏勋, 等. 多层涂层的摩擦学研究进展 [J]. 机械工程材料, 2002, 26(5): 1-5.
- [3] 曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 463.
- [4] 黄瑶, 王雷刚, 聂爱琴. 摩擦学涂层技术在模具减摩抗磨中的应用 [J]. 机械工程师, 2004, 1: 55-58.
- [5] 胡树兵, 葛顺兰, 陈湘一, 等. 3Cr2W8V 钢模具离子镀 TiN [J]. 金属热处理, 1997, 10: 14-16.
- [6] 陈赤国, 苏梅. TC9 激光熔覆 TiN 涂层的组织与耐磨性的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 24(3): 253-255.
- [7] 彭志坚, 苗赫濯, 齐龙浩, 等. 高能量密度脉冲等离子体制备的氮化钛刀具涂层的微观结构与力学性能 [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 900-904.
- [8] 陈爱智, 张永振, 肖宏滨, 等. 耐磨涂层材料摩擦磨损特性的研究进展 [J]. 洛阳工学院学报, 2001, 22(2): 12-16.
- [9] 盛选禹, 雒建斌, 温诗铸. MoS₂超细粉制备耐磨涂层及其性能分析 [J]. 润滑与密封, 2000, 6: 33-34.
- [10] 王海斗, 庄大明, 王昆林, 等. FeS 固体润滑涂层的结构分析及磨损行为比较 [J]. 金属学报, 2003, 39(10): 1031-1036.
- [11] Q Q Yang, L H Zhao, L S Wen. A study of the composition and properties of EB-ion plating Ti-B-N coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 1996, 78: 27-30.
- [12] J Takadoum, H Houmid Bennani, M Allouard. Friction and wear characteristics of TiN, TiCN and diamond-like carbon films [J]. Surface & Coatings Technology, 1996, 88: 232-238.
- [13] 张德元, 彭文屹, 许兰萍, 等. TiAlN 与 TiCN 系涂层磨损机理的比较 [J]. 金属热处理, 1997, 2: 30-32.
- [14] 李强, 王富耻, 雷廷权, 等. 激光熔覆 Ni-Cr-B-Si-C 合金的组织及其摩擦磨损特性 [J]. 中国有色金属

- 学报, 1998, 8(2): 201-205.
- [15] 李刚, 夏延秋, 王彦芳, 等. 激光熔覆Zr-Al-Ni-Cu复合涂层组织及其摩擦磨损性能 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(5): 343-346.
- [16] 乔玉林, 徐滨士, 马世宁, 等. 电弧喷涂7Cr13涂层的组织结构及摩擦学机理 [J]. 中国机械工程, 2002, 13 (19): 1649-1651.
- [17] 姚冠新, 吴德宣. 等离子弧喷涂钼基伪合金涂层的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 5.
- [18] 朱少峰, 张华堂, 佟晓辉. 纳米金刚石增强镍基金熔覆涂层的摩擦学性能 [J]. 金属热处理, 2000, 12: 3-5.
- [19] 田保红, 黄金亮, 吴磊, 等. 稀土氧化物和激光熔敷对复合合金喷涂层耐磨性的影响 [J]. 焊接学报, 1996, 17(2): 88-93.
- [20] 赵高敏, 王昆林, 李传刚. 稀土对 Fe 基金熔覆涂层抗磨性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 318-321.
- [21] 冯大鹏, 刘近朱, 毛绍兰, 等. 热喷涂镍基高温润滑涂层的研究 [J]. 机械工程材料, 1999, 23(6): 15-17.
- [22] 陈爱志, 张永振, 肖宏滨, 等. 镍基MoS₂复合粉末等离子喷涂涂层的干滑动摩擦磨损性能 [J]. 材料开发与应用, 2002, 17(1): 1-3.
- [23] 黄锦滨, 朱宝亮, 刘家浚, 等. 新型Ni-Cu-P/MoS₂固体润滑镀层优化试验研究 [J]. 表面工程, 1995, (3): 18-22.
- [24] 王汉功, 辜健, 戚红雨. 一种Ni-PTFE非电复合镀层的制备工艺及抗磨损性能研究 [J]. 中国表面工程, 1999, 3: 28-32.
- [25] 吴玉程, 叶敏, 王文芳, 等. 化学镀镍(铜)磷聚四氟乙烯复合涂层的沉积特性 [J]. 电镀与环保, 2000, 20(2): 16-20.
- [26] Wei Zhang, Qunji Xue, Xushou Zhang. Microstructure and tribological characteristic of Ni-Mo multilayer film deposited by ion beam mixing [J]. Surface & Coatings Technology, 1997, 91: 50-56.
- [27] Mikhailov S, Savan A, Pfluger E, et al. Morphology and tribological properties of metal(oxide)-MoS₂ nanostructured multilayer coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 105: 175-183.
- [28] Wei Zhang, Qunji Xue. Tribological properties of nickel-copper multilayer film on beryllium bronze substrate [J]. Thin solid films, 1997, 305: 292-296.
- [29] Ziegele H, Rebholz C, Scheibe H-J, et al. Mechanical and tribological properties of hard aluminum-carbon multilayer films prepared by the Laser-Arc technique [J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 107: 159-167.
- [30] Hovsepian P Eh, Kok Y N, Ehiasarian A P, et al. Structure and tribological behaviour of nanoscale multilayer C-Cr coatings deposited by the combined steered cathodic arcunbalanced magnetron sputtering technique [J]. Thin solid films, 2004, 447-448: 7-13.
- [31] 刘其斌, 朱维东, 邹龙江, 等. 宽带激光熔覆 WC P-Ni 基金梯度复合涂层组织与摩擦磨损特性 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 52-56.
- [32] 盛钢, 马保吉. 制动摩擦材料研究的现状与发展 [J]. 西安工业学院学报, 2000, 20(1): 127-133.
- [33] 戴雅康. 高速列车摩擦制动材料的现状与发展 [J]. 机车车辆工艺, 1994, 2: 1-8.
- [34] 李绍忠, 贺奉嘉. 汽车制动摩擦材料的现状与发展趋势 [J]. 汽车研究与开发, 1995, 2: 28-31.
- [35] Zhang Siwei, Wang Xinhua, Fan Qiyun, Lin Li. Investigation of the tribological performance of friction pair for disc brake of drilling rig [J]. Science in China(Series A), 2001, 44(Supplement): 253-258.
- [36] 王新华, 张嗣伟, 樊启蕴. 石油钻机盘式刹车副材料选配的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(3): 197-201.
- [37] 云济. 陶瓷涂层制动盘的潜力 [J]. 国外机车车辆工艺, 2003, 1: 36-37.
- [38] 郭晓燕. 制动用材料 [J]. 国外机车车辆工艺, 2004, 1: 25-31.
- [39] 上官宝, 陈跃, 铁喜顺, 等. WC 等离子喷涂涂层摩擦磨损特性研究 [J]. 表面技术, 2004, 33(1): 21-22.
- [40] 陈传忠, 李士同, 耿浩然, 等. Ni60A 等离子喷涂层的组织结构及其摩擦磨损特性 [J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(5): 56-59.
- [41] 董世运, 韩杰才, 杜善义. 铝合金表面激光熔覆 Cu 基复合涂层的组织及摩擦磨损性能 [J]. 材料工程, 2001, 2: 26-29.
- [42] 易茂中, 韩志海, 陈华, 等. 等离子喷涂铁-镍-钨-碳化钨涂层制动摩擦特性的研究 [J]. 摩擦学学报, 1996, 16(2): 150-155.

