

# 低摩擦系数固体润滑涂层研究进展

Research Progress on Low Friction Coefficient  
Solid Lubricating Coatings

胡志彪, 李贺军, 付前刚, 陈 强, 王兰英

(西北工业大学 超高温复合材料实验室 碳/碳复合材料工程技术研究中心, 西安 710072)

HU Zhi-biao, LI He-jun, FU Qian-gang, CHEN Qiang,

WANG Lan-ying (The Research Center of C/ C Composites, Key Laboratory of

Superhigh Temperature Composites, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 低摩擦系数固体润滑涂层在许多领域得到了广泛应用,探索新型固体润滑涂层体系及其制备技术是摩擦学研究的热点。本文综述了聚四氟乙烯自润滑涂层、二硫化钼自润滑涂层以及类金刚石薄膜作为自润滑减摩涂层的原理及其研究取得的进展,介绍了新型自润滑涂层的制备技术,同时还指出了固体润滑涂层有待进一步研究的问题。

关键词: 固体润滑涂层; 摩擦系数; 四氟乙烯; 硫化钼; 金刚石

中图分类号: TH 117 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)03-0060-04

**Abstract:** Low friction coefficient solid lubricating coatings have been applied in many fields. The activity in the development of novel solid lubricated coating systems and their deposition methods have been vigorous in tribology research. The self lubricating principle and research advance of PTFE coatings, MoS<sub>2</sub> coatings and DLC film have been reviewed. New deposition methods of solid lubricating coatings have been introduced. The present problem and the future research direction have also been pointed out.

**Key words:** solid lubricating coatings; low friction coefficient; PTFE, molybdenum disulphide; diamond like carbon

润滑的目的在于降低摩擦系数和减少磨损。固体润滑的引入,突破了油膜润滑极限,在许多场合下,低摩擦系数固体润滑涂层以其自润滑功能,显示出巨大的优越性。低摩擦系数固体润滑涂层具有较高的承载能力,能在腐蚀环境中不加保护地使用。且能在超高温、超低温、超真空、超高速和强辐射等恶劣条件下工作。低摩擦系数固体润滑涂层已在电子、食品、医药以及空间机械等领域得到了广泛的应用。本文就低摩擦系数固体润滑涂层的研究现状和需进一步研究的问题作简要的阐述。

## 1 常用的固体润滑涂层

### 1.1 聚四氟乙烯(PTFE)润滑涂层

PTFE 是研究较早的耐热性聚合物,PTFE 聚合物结构是非晶形的,在基体的构造中存在着 15~90nm 厚的板状晶构成的带状结构,因而容易变形和断裂。X 射线衍射分析表明:PTFE 分子为分布相当平滑的外层电子所包围,分子呈柱状流线型结构,分子

间相互作用小,吸引力弱。这些结构从本质上决定了 PTFE 聚合物具有容易滑动的特性。作为润滑剂,它是目前所有材料中摩擦系数最小的( $\mu_{静} \approx \mu_{动} \approx 0.04$ ),且其摩擦系数在很宽的温度范围内不变,即使在真空下也能保持润滑性能,受环境影响小。当 PTFE 与其它物体对摩时,由于 PTFE 大分子容易被拉出结晶区,因而在摩擦之初就向对摩面转移,以库仑力和范德华力在对摩面上形成一层厚为 20~30nm 的薄膜,这层薄膜的大分子按滑动方向高度取向,因而具有很低的摩擦系数。另外,在摩擦过程中还会发生摩擦反应,这种反应和 PTFE 的分子结构影响了转移膜的生成及其完整性<sup>[1]</sup>。由于 PTFE 的表面能极低,其转移膜在对摩面上的附着性较差,导致做摩擦材料用 PTFE 有较严重的磨损。

为了改善 PTFE 涂层的耐磨性,许多学者进行了卓有成效的研究工作。通常向 PTFE 添加无机粉末<sup>[2~6]</sup>(如纳米金刚石、铅、钛、镍、合成蜡粉、MoS<sub>2</sub>、石墨等),能有效地提高涂层的耐磨性。从这些无机填料的晶体结构来看,可分成层状和非层状两种:层状填料

一般通过促进聚合物在摩擦过程中的转移来改善聚合物材料的减摩性能;而非层状材料主要通过提高复合材料的机械强度来改善聚合物材料的耐磨性能。但是由于层状填料(如 MoS<sub>2</sub>、石墨、六方 BN 等)与 PTFE 之间存在“固体溶剂效应”<sup>[7]</sup>,导致涂层的力学性能和耐磨性较差。为解决这一问题,一般需对层状填料的表面进行预处理。如采用金属包覆层状填料(铜包石墨<sup>[8]</sup>)等措施。

由于 PTFE 的表面能低,润湿性能差,其涂层与基体的结合强度弱。为提高 PTFE 涂层与基体的结合力,需对 PTFE 表面进行处理。可以采取离子束照射<sup>[9]</sup>、ArF 激光照射<sup>[10]</sup>、等离子体法<sup>[11]</sup>、接枝反应<sup>[12]</sup>、射线辐射处理<sup>[13]</sup>等方式对 PTFE 进行表面处理。

1.2 二硫化钼润滑涂层

MoS<sub>2</sub> 是应用最广泛的固体润滑剂,被称作润滑之王。MoS<sub>2</sub> 具有层状结构,其晶体为六方晶系。MoS<sub>2</sub> 的润滑作用取决于晶体结构,层与层间的 S 原子结合力较弱,故其易于滑动而表现出很好的减摩作用。另一方面,Mo 原子与 S 原子间的离子键赋予 MoS<sub>2</sub> 润滑膜较高的强度,可防止润滑膜在金属表面突出部位被穿透;而且 S 原子暴露在 MoS<sub>2</sub> 晶体层的表面,对金属产生很强的粘附作用。MoS<sub>2</sub> 的化学性质相当稳定,可耐大多数酸和耐辐射。在真空条件下,MoS<sub>2</sub> 在 1100℃时分解成 Mo 原子和 S 原子;在空气中,当温度超过 400℃时,产生明显的氧化,并生成 MoO<sub>3</sub>,这在一定程度上影响了 MoS<sub>2</sub> 的润滑性及对金属表面的粘附作用。然而,只有当整个润滑层全部被氧化后,MoS<sub>2</sub> 的覆盖层才失去润滑作用。与石墨相反,在有水时 MoS<sub>2</sub> 的摩擦系数与磨损都比较大;在高真空条件下,MoS<sub>2</sub> 仍然具有良好的润滑性能。

尽管 MoS<sub>2</sub> 溅射膜已成功应用于滚动轴承的真空润滑<sup>[14,15]</sup>,但在大气中尤其是在潮湿的空气中存在着润滑性能降低甚至失效的问题<sup>[16,17]</sup>。为了提高 MoS<sub>2</sub> 溅射膜的抗湿性和耐磨性,国内外不少学者都在开展利用具有协同效应的几种物质制成复合膜代替单质膜的研究<sup>[18-22]</sup>。除了用复合膜代替单质膜的方法外,还可以用表面改性的方法对膜进行处理来提高其耐磨性和抗湿性。膜的表面处理主要有:激光照射<sup>[23,24]</sup>、高能离子束轰击<sup>[25]</sup>等。采用激光照射处理单质膜并不会改变其晶体结构,但可减少单质膜中的 MoO<sub>3</sub> 的含量;而激光能提高复合膜的结晶度,二者的摩擦性能都能得到改善。高能离子束能使 MoS<sub>2</sub> 膜的结构从晶态转变为非晶态,同样可使其摩擦性能提高。

与传统的层状 2H-MoS<sub>2</sub> 相比,空心富勒烯纳米 MoS<sub>2</sub> 结构不同,化学性质亦不相同。空心富勒烯纳

米 MoS<sub>2</sub> 在湿空气中或较高温度下不被氧化或很少被氧化,其富勒烯结构不被或很少被破坏,从而显示良好的抗磨性、减摩性和稳定性。Chhowalla 等<sup>[26]</sup>比较了空心富勒烯 MoS<sub>2</sub> 膜与一般的 2H-MoS<sub>2</sub> 膜的摩擦学性能,结果显示:在 45% 相对湿度的室温下,空心富勒烯纳米 MoS<sub>2</sub> 膜的  $\mu$  和  $W$  值分别为 0.008~0.01 和  $1 \times 10^{-11} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ;而 2H-MoS<sub>2</sub> 溅射膜的  $\mu$  和  $W$  值分别为 0.1~0.3 和  $3 \times 10^{-1} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 。这表明纳米空心富勒烯 MoS<sub>2</sub> 是一种十分优异的固体润滑剂。

1.3 类金刚石薄膜

类金刚石碳(Diamond-Like Carbon, 简称 DLC)膜是一种具有高硬度、高化学稳定性、良好的生物相容性,尤其是具有良好的力学和摩擦学性能的新型薄膜材料<sup>[27-30]</sup>,其作为固体润滑膜在轴承、齿轮、航天微电子机械系统等领域具有广泛的应用前景。DLC 膜是一种非晶材料,有含氢和不含氢两种。无氢类金刚石( $\alpha$ -C)膜主要是由金刚石结构的  $\text{sp}^3$  和石墨结构的  $\text{sp}^2$  键碳原子相互混杂的三维网络构成;含氢类金刚石膜( $\alpha$ -C:H)在三维网络中同时还结合一定数量的氢。这些结构特征使 DLC 材料的摩擦学行为显著不同于金刚石。

DLC 膜的摩擦机制主要有界面的石墨化-转移膜理论<sup>[31-33]</sup>和摩擦化学反应理论<sup>[34,35]</sup>。石墨化-转移膜理论认为:DLC 膜在摩擦的过程中,亚稳态的碳克服一定的能垒,发生石墨化转变为石墨,由于石墨具有非常低的剪切强度,易形成转移膜,进而转移到对偶材料表面形成润滑膜,引起摩擦系数的降低;摩擦化学反应理论认为:真空下,无氢 DLC 膜的表面在摩擦作用下形成了悬挂键,提高了膜层的表面能,使无氢 DLC 膜在真空下具有较高的摩擦系数和磨损率,而含氢 DLC 膜在摩擦过程中产生的悬挂键因吸附氢而被氢所钝化,膜表面存在一层超薄类聚合物的碳氢化合物,在氢化碳链之间的键强只有  $8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,因而其真空摩擦系数远低于无氢 DLC 膜。在空气或潮湿的环境中含氢 DLC 膜表面吸附水和氧,并进而发生摩擦化学反应,形成  $\text{C}=\text{O}$ ,引起摩擦系数增大。

DLC 膜并不是一种单一类型的膜层,它们具有复杂的成分和结构,这主要是由沉积参数决定的。不同结构和成分的 DLC 膜具有不同摩擦学性能,因此可通过调整工艺参数来改变膜的本质特征,进而控制 DLC 膜的摩擦和磨损。Liu 和 Zhou<sup>[36]</sup>等利用 ECR-CVD 技术制备 DLC 膜,在沉积过程中,提高衬底的偏压(>140V),进而提高离子轰击能量,便可获得更交叉相连的网络,从而使 DLC 膜具有高的  $\text{sp}^3$  键含量,低摩擦

系数(0.06~0.13)和低磨损量; 衬底的偏压较低时( $\leq 100\text{V}$ ), 膜的结构呈聚束态, 网络交叉相连程度低, 因而膜的硬度低, 摩擦系数高( $\geq 0.3$ ), 磨损量也高。这一研究成果显示了 DLC 膜摩擦学特性对其结构和成分的敏感性, 不同的表面结构决定了膜层摩擦性能的差异。

同时, DLC 的摩擦学性能还受到摩擦参数和摩擦环境的影响。研究表明: DLC 膜的磨损率和摩擦系数随滑动速度和载荷的增加而降低<sup>[37-39]</sup>, 滑动速度比载荷对摩擦系数有更显著的影响<sup>[38]</sup>。与真空和惰性气氛中相比, 大多数含氢 DLC 膜在空气环境中具有较高的摩擦系数<sup>[40, 41]</sup>。

为进一步改善 DLC 膜在空气和潮湿环境的摩擦磨损性能, 可采用 DLC 复合膜<sup>[42-45]</sup>代替单一膜的方法, 来达到降低摩擦系数, 提高耐磨性的目的。采用梯度涂层<sup>[46, 47]</sup>可以提高 DLC 膜与基体的结合力, 减少涂层的内应力。

2 固体润滑膜的新制备技术

材料制备过程中, “工艺-结构-性能”三者密不可分。一定的制备工艺, 造就一定的材料结构, 赋予材料一定的性能。到目前为止, 许多涂层制备工艺都被应用到润滑涂层的制备中, 如粘接固体润滑膜具有施工简单、成本低、适用面广等优点, 得到了广泛应用<sup>[48]</sup>。为了制备性能更加优越的新型固体润滑涂层(膜), 新的制备工艺不断地被开发, 下面简单介绍最近被广泛采用的新涂层技术。

2.1 非平衡磁控溅射

非平衡磁控溅射通过采用非平衡闭合磁场, 以获得非常高的离子束电流密度, 可改善薄膜的特性, 提高其附着性。

Teer 等<sup>[49]</sup>利用闭合场非平衡磁控溅射技术制备了非晶态的  $\text{MoS}_2$  和  $\text{Ti}$  的共溅膜( $\text{MoST}$ )。MoST 膜具有优良的摩擦磨损性能, 其摩擦系数与载荷、湿度有关。在大气中高载荷下, 摩擦系数为 0.02, 而在低载荷下为 0.08; 即使在高湿度下(相对湿度 41%),  $\text{MoST}$  膜 10000 周期, 摩擦系数仍保持在 0.04, 说明 MoST 膜具有优良的抗湿性。

2.2 等离子体离子注入法(PBII 法)

等离子体离子注入法是对置于等离子体中的衬底施加负偏压, 使等离子体中的离子均匀地照射到衬底的表面来制备薄膜的方法。

Liao 和 Xia 等<sup>[46]</sup>利用 PBII 法在 2024 铝合金的表面制得梯度  $\text{AlN}/\text{Ti}/\text{TiN}/\text{DLC}$  膜, 该梯度膜表面

致密, 膜层较厚, 具有良好的摩擦学性能, 同时还能够消除涂层的内应力。

2.3 等离子体增强化学气相沉积法(PECVD 法)

等离子体增强化学气相沉积具有沉积温度低, 绕射性好, 制备的薄膜均匀致密等诸多特点而成为最常用的方法之一。

Yang 和 Sekino<sup>[45]</sup>等运用 PECVD 技术, 以  $\text{CH}_4$  和  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$  为前驱体, 在硅片上制备了  $\text{SiO}_x/\text{DLC}$  的复合膜。该复合膜与基体结合良好, 无表面起皱和分层现象, 具有低的摩擦系数、抗磨和抗湿性好等优点。

通常情况下, 单一的涂层制备技术不能满足实际的需要, 可以同时采取多种工艺来制备高性能的固体润滑涂层。

3 结束语

低摩擦系数固体润滑涂层已成功地应用于许多领域, 为进一步提高涂层的质量, 应继续运用新的涂层形成原理开发涂层制备新工艺或改进已有的涂层制备工艺。同时, 单一的涂层体系较难满足实际需要, 固体润滑的研究将由单一涂层向梯度涂层和智能涂层(如自修复功能)的方向发展。现有的低摩擦系数润滑涂层均存在一定的局限性, 应开发新型涂层, 使其能应用于不同的环境中(如大气、真空、惰性气氛)或能够在很宽的温度范围内使用。此外, 实际应用的样品一般尺寸较大, 将在小尺寸试件表面具有优异性能的润滑涂层应用于大尺寸样品表面时, 通常存在涂层不均匀问题, 从而大大影响其润滑效果, 因此, 对大尺寸试样的涂层制备工艺的开发具有重要的实际意义。

参考文献

[1] GAO J T, MAO S L, LIU J Z, et al. Tribochemical effects of some polymers/ stainless steel [J]. Wear, 1997, 212 (2): 238- 243.

[2] ZHANG Z Z, SHEN W C, LIU W M, et al. Tribological properties of polytetrafluoroethylene-based composite in different lubricant media [J]. Wear, 1996, 196: 164- 170.

[3] LEE J Y, LIM D S. Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond [J]. Surf Coat Technol, 2004, 188- 189: 534- 538.

[4] 冶银平, 陈建敏. 合成蜡粉改性聚四氟乙烯基粘接涂层摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2001, 21 (3): 201- 204.

[5] 盛选禹, 雒建斌, 温诗铸.  $\text{MoS}_2$  超细粉和石墨的粘结涂层的研究 [J]. 润滑与密封, 1997, 2: 37- 39.

[6] LIU C Z, FAIRHURST R G, REN L, et al. Co-deposition of titanium/ polytetrafluoroethylene films by unbalanced magnetron sputtering [J]. Surf Coat Technol, 2002, 149: 143- 150.

[7] YAN F Y, WANG W H, XUE Q J, et al. The correlation of

wear behaviors and microstructures of graphite-PTFE composites studies by positron annihilation [J]. *J Appl Polym Sci*, 1996, 61: 1231– 1236.

[ 8 ] LI F, YAN F Y, YU L G, et al. The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites [J]. *Wear*, 2000, 237: 33– 38.

[ 9 ] MESYATS G, KLYACHKIN Y, GAVRILOV N, et al. Adhesion of Polytetrafluoroethylene modified by an ion beam [J]. *Vacuum*, 1999, 52: 285– 289.

[ 10 ] HOPP B, KRESZ N, KOKAVECZ J, et al. Adhesive and morphological characteristics of surface chemically modified polytetrafluoroethylene films [J]. *Appl Surf Sci*, 2004, 221: 437 – 443.

[ 11 ] BAUMGARTNER K M, SCHNEIDER J, SCHULZ A, et al. Short-time plasma pre-treatment of polytetrafluoroethylene for improved adhesion [J]. *Surf Coat Technol*, 2001, 142– 144: 501– 506.

[ 12 ] ZHANG M C, KANG E T, NEOH K G, et al. Surface modification of aluminum foil and PTFE film by graft polymerization for adhesion enhancement [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 176: 139– 150.

[ 13 ] 田军, 周兆福, 薛群基. 聚氨酯/聚四氟乙烯耐磨防腐涂层表面结构的研究 [J]. *腐蚀科学与防腐技术*, 1997, 9 (3): 182– 186.

[ 14 ] WYN-ROBERT D. New frontiers for space tribology [J]. *Tribol Int*, 1990, 23 (2): 149– 155.

[ 15 ] CIZAIRE L, VACHER B, MOGNET L, et al. Mechanisms of ultra-low friction by hollow inorganic fullerene-like MoS<sub>2</sub> nanoparticles [J]. *Surf Coat Technol*, 2002, 160: 282– 287.

[ 16 ] POPE L E, PANITZ J K G. The effects of hertzian stress and test atmosphere on the friction coefficients of MoS<sub>2</sub> coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 1988, 36: 341– 350.

[ 17 ] DONNET C, MARTIN J M, MOGNET L, et al. Super-low friction of MoS<sub>2</sub> coatings in various environments [J]. *Tribol Int*, 1996, 29 (2): 123– 128.

[ 18 ] WU L L, HOLLOWAY B C, BEESABATHINA D P, et al. Analysis of diamond-like carbon and Ti/MoS<sub>2</sub> coatings on Ti-6Al-4V substrates for applicability to turbine engine applications [J]. *Surf Coat Technol*, 2000, 130: 207– 217.

[ 19 ] SIMMONDS M C, SAVAN A, PFLÜGER E, et al. Mechanical and tribological performance of MoS<sub>2</sub> co-sputtered composites [J]. *Surf Coat Technol*, 2000, 126: 15– 24.

[ 20 ] KAO W H, SU Y L. Optimum MoS<sub>2</sub>-Cr coating for sliding against copper, steel and ceramic balls [J]. *Mater Sci Eng A*, 2004, 368: 239– 248.

[ 21 ] CARRERA S, SALAS O, MOORE J J, et al. Performance of CrN/MoS<sub>2</sub>(Ti) coatings for high wear low friction applications [J]. *Surf Coat Technol*, 2003, 167: 25– 32.

[ 22 ] NAINAPARAMPIL J J, PHANI A R, KRZANOWSKI J E, et al. Pulsed laser-ablated MoS<sub>2</sub>-Al films: friction and wear in humid conditions [J]. *Surf Coat Technol*, 2004, 187: 326– 335.

[ 23 ] JERVIS T R, NASTASI M, BAUER R, et al. Laser surface processing of molybdenum disulfide thin films [J]. *Thin Solid Films*, 1989, 181: 475– 483.

[ 24 ] POPE L E, JERVIS T R, NASTASI M. Effects of laser processing and doping on the lubrication and chemical properties of thin MoS<sub>2</sub> films [J]. *Surf Coat Technol*, 1990, 42: 217– 225.

[ 25 ] HIRVONEN J P, KOSKINEN J, JERVIS J R, et al. Present progress in the development of low friction coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 80: 139– 150.

[ 26 ] CHHOWALLA M, AMARATUNGA A J. Thin film of fullerene like MoS<sub>2</sub> nanoparticle with ultra-low friction and wear [J]. *Nature*, 2000, 407: 164– 167.

[ 27 ] ERDEMIR A. Genesis of super low friction and wear in diamondlike carbon films [J]. *Tribol Int*, 2004, 37: 1005– 1012.

[ 28 ] POLIAKOV V P, SIQUEIRA C J D M, VEIGA W, et al. Physical and tribological properties of hard amorphous DLC films deposited on different substrates [J]. *Diamond Relat Mater*, 2004, 13: 1511– 1515.

[ 29 ] PLATON F, FOURNIER P, ROUXEL S. Tribological behavior of DLC coatings compared to different materials used in hip joint prostheses [J]. *Wear*, 2001, 250: 227– 236.

[ 30 ] LIFSHITZ Y. Diamond-like carbon present status [J]. *Diamond Relat Mater*, 1999, (8): 1659– 1676.

[ 31 ] ERDEMIR A, BINDAL C, FENSKE G R, et al. Characterization of transfer layers forming on surface sliding against diamondlike carbon [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 86– 87: 692– 697.

[ 32 ] LIU Y, MELETIS E I, ERDEMIR A, et al. A study of the wear mechanisms of diamond-like carbon films [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 82: 48– 56.

[ 33 ] LIU Y, MELETIS E I. Evidence of graphitization of diamond-like carbon films during sliding wear [J]. *J Mater Sci*, 1997, 32: 3491– 3495.

[ 34 ] DONNET C. Advance solid lubricant coatings for high vacuum environments [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 80: 151– 156.

[ 35 ] ERDEMIR A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films [J]. *Surf Coat Technol*, 2001, 146– 147: 292– 297.

[ 36 ] LI K Y, ZHOU Z F, BELLO I, et al. Study of tribological performance of ECR-CVD diamond-like carbon coatings on steel substrates. Part 1: the effect of processing parameters and operating conditions [J]. *Wear*, 2005, 258: 1577– 1588.

[ 37 ] RONKAINON H. Effect of tribofilm formation on the tribological performance of hydrogenated carbon coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 79: 87– 94.

[ 38 ] LIU Y, ERDEMIR A, MELETIS E I. An investigation of relationship between graphitization and frictional behavior of DLC coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 1996, 86– 87: 564– 568.

[ 39 ] VERCAMMEN K, MENEVEA J, DEKEMPENEER E, et al. Study of RF PACVD diamond-like carbon coatings for space mechanism applications [J]. *Surf Coat Technol*, 1999, 120– 121: 612– 617.

[ 40 ] KIM D S, FISCHER T E, GALLOIS B. The effects of oxygen and humidity on friction and wear of diamondlike carbon films [J]. *Surf Coat Technol*, 1991, 49: 537– 542.

[ 11 ]

NAKASHIMA K, HORITA Z, NEMOTO M, et al. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains [ J ]. Materials Science and Engineering A, 2000, 281( 1 ): 82– 87.

[ 12 ]

IWAHASHI Y, WANG J, HORITA Z, et al. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials[ J ]. Scripta Materialia, 1996, 35( 2 ): 143– 146.

[ 13 ]

WU Y, BAKER I. Experimental study of equal channel angular extrusion[ J ]. Scripta Materialia, 1997, 37( 4 ): 437– 442.

[ 14 ]

DELO D P, SEMITATIN S L. Finite-element modeling of non-isothermal equal-channel angular extrusion[ J ]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30( 5 ): 1391– 1402.

[ 15 ]

堀田善治, 王経涛, 古川稔, et al. サブミクロン粒径をもつ Al-3% Mg 合金—その製造と組織[ J ]. 日本金属学会会報, 1993, 32( 12 ): 898– 900.

[ 16 ]

SEGAL V M. Materials processing by simple shear[ J ]. Materials Science & Engineering A, 1995, 197( 2 ): 157– 164.

[ 17 ]

FURUKAWA M, IWAHASHI Y, HORITA Z, et al. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing[ J ]. Materials Science & Engineering A, 1998, 257( 2 ): 328– 332.

[ 18 ]

IWAHASHI Y, HORITA Z, NEMOTO M, et al. Process of grain refinement in equal-channel angular pressing[ J ]. Acta Materialia, 1998, 46( 9 ): 3317– 3331.

[ 19 ]

OHISHI K, HORITA Z, FURUKAWA M, et al. Optimizing the rotation conditions for grain refinement in equal-channel angular pressing[ J ]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29( 7 ): 2011– 2013.

[ 20 ]

LANGDON T G, FURUKAWA M, NEMOTO, et al. Using equal-channel angular pressing for refining grain size[ J ]. JOM, 2000, 52( 4 ): 30– 33.

[ 21 ]

GHOLINIA A, PRANGNELL P B, MARKUSHEV M V. Effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAP[ J ]. Acta Materialia, 2000, 48( 5 ): 1115– 1130.

[ 22 ]

SEGAL V M, GOFORTH R E, HARTWIG K T. Application of equal channel angular extrusion to produce extraordinary properties in advanced metallic materials[ A ]. Proceedings of the 1st International Conference on Processing Materials for Properties[ C ]. Honolulu, HI, USA: Minerals, Metals & Materials Soc, 1993. 971– 974.

[ 23 ]

VALIEV R Z, ISLAM GALIEV R K, ALEXANDROV I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation[ J ]. Progress in Materials Science, 2000, 45( 2 ): 103– 189.

[ 24 ]

FURUKAWA M, HORITA Z, HONO K. Microstructure of two-phase Al-1.7 at% Cu alloy deformed by equal-channel angular pressing[ J ]. Acta Materialia, 2001, 49( 1 ): 21– 29.

[ 25 ]

SHIN D H, KIM B C, PARK K T, et al. Microstructural changes in equal channel angular pressed low carbon steel by static annealing[ J ]. Acta Materialia, 2000, 48( 12 ): 3245– 3252.

[ 26 ]

KIM W J, KIM J K, CHOO W Y, et al. Large strain hardening in T+V carbon steel processed by equal channel angular pressing[ J ]. Materials Letters, 2001, 51( 2 ): 177– 182.

[ 27 ]

PARK K T, KIM Y S, LEE J G, et al. Thermal stability and mechanical properties of ultrafine grained low carbon steel[ J ]. Materials Science and Engineering A, 2000, 293( 1 ): 165– 172.

基金项目:

国家自然科学基金( 59974018 )和陕西省自然科学基金资助项目( 2003E121 )

收稿日期:

2005-07-26; 修订日期: 2005-09-11

作者简介:

杜忠泽( 1968– ), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 金属的变形与组织性能控制, 联系地址: 西安建筑科技大学冶金工程学院( 710055 )。

( 上接第 63 页 )

[ 41 ]

GRILL A. Tribology of diamond-like carbon and related materials: an updated review [ J ]. Surf Coat Technol, 1997, 94– 95: 507– 513.

[ 42 ]

IKEYAMA M, NAKAO S, MIYAGAWA Y, et al. Effects of Si content in DLC films on their friction and wear properties [ J ]. Surf Coat Technol, 2005, 191: 38– 42.

[ 43 ]

MIYAKE S, SAITO T, YASUDA Y, et al. Improvement of boundary lubrication properties of diamond-like carbon (DLC) films due to metal addition[ J ]. Tribol Int, 2004, 37: 751– 761.

[ 44 ]

PODGORNIK B, HREN D, VIZINTIN J. Low-friction behaviour of boundary-lubricated diamond-like carbon coatings containing tungsten [ J ]. Thin Solid Films, 2005, 476: 92– 100.

[ 45 ]

YANG W J, SEKINO T, SHIM K B, et al. Microstructure and tribological properties of SiO<sub>x</sub>/DLC films grown by PECVD [ J ]. Surf Coat Technol, 2005, 194: 128– 135.

[ 46 ]

LIAO J X, XIA L F, SUN M R, et al. The tribological properties of a gradient layer prepared by plasma-based ion implantation on 2024 aluminum alloy [ J ]. Surf Coat Technol, 2004, 183: 157– 164.

[ 47 ]

DONNET C, FONTAINE J, MOGNET L, et al. Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology [ J ]. Surf Coat Technol, 1999, 120– 121: 548– 554.

[ 48 ]

陈建敏, 冶银平, 党洪辛. 粘接固体润滑膜及其应用 [ J ]. 摩擦学学报, 1994, 14( 2 ): 180– 189.

[ 49 ]

TEER D G. New solid lubricant coatings [ J ]. Wear, 2001, 251: 1068– 1074.

基金项目:

国家杰出青年基金资助项目( 50225210 )

收稿日期:

2005-04-30; 修订日期: 2005-10-15

作者简介:

胡志彪( 1972– ), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事碳/碳复合材料表面固体润滑涂层的研究, 联系地址: 西北工业大学碳/碳复合材料工程技术研究中心( 710072 )。