doi:10.11887/j.cn.202005010 http://journal.nudt.edu.cn

激光制备高附着性能的铜基类金刚石膜*

陆益敏[1],黄国俊[1],米朝伟[1],奚 琳[2],王 赛[1],曹海源[1],程 勇[1]
(1. 陆军工程大学 军械士官学校,湖北 武汉 430075;2. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院,安徽 芜湖 241000)

摘 要:提升类金刚石(Diamond-Like Carbon, DLC)膜在被保护基底上的附着能力具有明显的实际应用价值。从微观机理上分析了前期设计的Cu基多层DLC膜有效性的原因。在此基础上,研究了DLC/SiC循环层中两者厚度比例对膜层的附着性能、纳米硬度和耐磨性的影响,以优化结构、进一步提升实际应用所需的膜层性能。纳米划痕和压痕测试结果表明:随着DLC层与SiC层厚度比例的增大,多层DLC膜在Cu基上附着性能逐渐降低,但当厚度比小于2.3时,仍接近厚度400 nm的单层DLC膜在Si基上的附着性能;Cu基多层DLC膜的纳米硬度逐渐提高,同时,耐磨性接近纯DLC膜。

关键词:铜基类金刚石膜;脉冲激光沉积;临界载荷;纳米硬度;耐磨性
中图分类号:TH145.1 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1001-2486(2020)05-068-06

听语音 聊科研 与作者互动

Cu-based diamond-like carbon film with high adhesion prepared by pulsed laser deposition

LU Yimin[1], *HUANG Guojun*[1], *MI Chaowei*[1], *XI Lin*[2], *WANG Sai*[1], *CAO Haiyuan*[1], *CHENG Yong*[1]
(1. Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Army Engineering University, Wuhan 430075, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Improvement for the adhesive property of the DLC (diamond-like carbon) film on the protected substrate has obvious value in the actual application, and the reason for the validity of the Cu-based multi-layer DLC film designed in our former research was analyzed in the view of the micro-theory. Then, in order to optimize the structure of the multi-layer film and improve its performance in the practical application, the influences of the thickness ratio between the DLC layer and SiC layer in the periodic layer on the adhesion property, nano-hardness and wear property were studied. The results of the nano-scratch and nano-indentation tests show that the adhesive property and nano-hardness of the Cu-based multi-layer DLC film decreased and its nano-hardness increased, respectively, while the thickness ratio was maintained in the increasing state. Critical load of the multi-layer DLC film on the Cu substrate could approach that of the single-layer DLC film with the thickness of 400 nm on the Si substrate, when the thickness ratio was below 2.3. Meanwhile, the wear property of the Cu-based multi-layer DLC film was approximately close to that of the pure DLC film.

Keywords: Cu-based diamond-like carbon film; pulsed laser deposition; critical load; nano-hardness; wear property

由于类金刚石(Diamond-Like Carbon, DLC)膜具有高硬度和低摩擦的显著优势,在力学和摩擦学领域受到广泛关注。但是,它不能直接镀制在很多材料上,主要有两个原因:一是其内应力极高[1-2],尤其是脉冲激光沉积法(Pulsed Laser Deposition, PLD)更是大于2 GPa[3-4],导致膜层本身不能镀厚;二是与基底材料的理化特性差异大,导致附着性能低[5],这一点对于金属材料尤为突出。另外,很多金属材料与类金刚石膜的硬度差异极大(1个数量级以上),因此降低了类金刚石膜的高硬度保护作用,在外力作用下也容易破裂。

膜层附着牢固是其工程应用的基本要求。临界载荷是附着性能高低的表征参数之一,可由纳米划痕(nano-scratch)或微米划痕(micro-scratch)测试获得;两者主要区别在于使用金刚石针尖的尺度差异大,与样品的接触面积差异巨大,导致测试结果差异巨大。所以,划痕测试结果只能在同等测试条件下比较不同样品的附着性能,而不能将不同测试条件下的测试结果相互比较。Constantinou等[6]采用准分子激光(248 nm)在Si基底上制备出Ag掺杂DLC膜,临界载荷(纳米划

* **收稿日期:**2019-03-07
基金项目:国家部委基金资助项目(012016017000B12503)
作者简介:陆益敏(1981—),男,安徽芜湖人,讲师,博士,E-mail:luyimin_zy@163.com

痕)由纯 DLC 膜的 145.4 mN 提升到 253.4 mN。Jelinek 等[7]采用准分子激光(248 nm)在 Ti_6Al_4V 合金基底上制备出 Ti 掺杂 DLC 膜,临界载荷(微米划痕)由纯 DLC 膜的 4 N 提高至 10 N。其他类似的研究还有 Cr 掺杂[8-9]、Fe/O/N 掺杂[10]、Fe/Si 掺杂[11]。姜秀英[12]采用射频磁控溅射技术在 316L 不锈钢表面制备 Ti/TiO_2、Ti/DLC 双层膜和 $Ti/DLC/TiO_2$多层膜,在提高耐磨性和耐蚀性的同时,提高了 DLC 膜在不锈钢上的附着性能。姜齐立等[13]采用磁过滤阴极真空弧沉积技术制备多层 Ti 掺杂 DLC 膜,实现了低应力、高附着,膜层厚度高达 42.3 μm。类似的研究还有利用 CrN 层[14]、Cr 层[15]以及 Ge 层[16]等作为键合层或缓冲层,均提高了 DLC 膜在基底上的附着性能。

铜及铜合金广泛应用于轴承传输、驱动媒介等机械、电子、军工领域。课题组前期已验证了铜基多层 DLC 膜的低摩擦性,目前主要目标是提高 DLC 膜在铜基上的附着性和耐磨性。设计并制备多种铜基 DLC 膜样品,通过比较临界载荷、表面硬度等机械指标,来优化结构,进一步提升附着性能。

1 实验

1.1 样品制备

基底为直径 25.0 mm、厚 1.8 mm 的抛光金属铜和厚 0.3 mm 的抛光硅,靶材到基底的距离为 11 cm,激光等离子体中轴线偏离基底自转中心 10 mm,以保证膜厚的均匀[17]。其中,铜基样品用于机械性能测试,而硅基样品用于观察膜层结构。基本真空度为 2×10^{-4} Pa;沉积膜层前,利用 400 V、30 mA 能量的 Ar^+ 轰击,去除样品表面的自然氧化层,并用酒精擦拭未能清洗的表面污染,以提高膜基结合力。

沉积源为 KrF 准分子紫外激光(波长 248 nm、脉宽 25 ns、重频 50 Hz),采用脉冲能量 500 mJ、能量密度 8.3 J/cm^2 的激光参数进行实验,对靶材的入射角度为 45°。

按“Cu 基底 | Ti | SiC | $(DLC | SiC)^n$ | DLC | 空气”的膜层结构(如图 1 所示)逐层沉积。在 5 个样品的制备过程中,Ti 层和独立 SiC 层的厚度均为 300 nm,最外层 DLC 保护层厚度为 400 nm;循环层中 DLC 层与 SiC 层的厚度比例不同,厚度及循环次数设计如表 1 所示。所有样品的膜层设计总厚度相同(均为 4 μm),以保证测试结果的可比较性。

根据前期实验和计算,在与本次实验同等条件下,DLC 层的沉积速率约为 56.3 nm/万脉冲,SiC 层的沉积速率约为 58.1 nm/万脉冲;因此,可估算出镀制设计膜厚所需要的脉冲数。

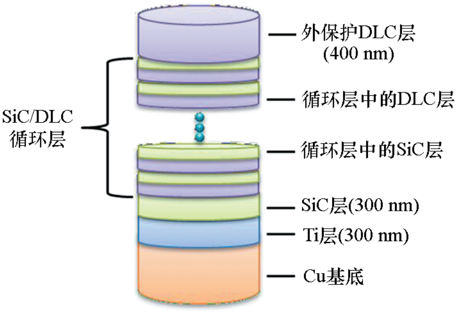


图 1 铜基 DLC 膜结构示意图

Fig. 1 Sketch of the Cu-based DLC film

表 1 循环层设计

Tab. 1 Design of the periodic layer

样品	DLC 层厚/nm	SiC 层厚/nm	循环次数	厚度比例
S1	30	30	50	1 : 1
S2	70	30	30	2.3 : 1
S3	120	30	20	4 : 1
S4	270	30	10	9 : 1
S5	470	30	6	15.7 : 1

实验后样品 S5 的膜层直接脱落,可能是因为 DLC 层内应力积累过大导致 SiC 层缓冲作用不够造成的。因此,仅对其他 4 个样品进行测试分析。

1.2 结构表征及机械性能测试

利用 FEI 公司的 SIRION 扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察铜基 DLC 膜结构,采用参数为电压 20 kV、放大倍率 5000 倍和 20 000倍。利用 Micro Materials 公司的 NanoTest TM Vantage 纳米划痕仪测试样品的临界载荷,形貌扫描载荷 0.1 mN、最大载荷 300 mN、划痕距离 320 μm。利用 Agilent Nano Indenter G200 型纳米压痕仪的经典模块测试样品的纳米机械性能,通过测试“载荷 - 压入深度”曲线,计算样品的纳米硬度和硬度 - 杨氏模量比;每个样品测试 5 个点,每个点之间距离不小于最大压入深度的 30 倍,最大压入深度为 1500 nm。

2 测试结果与讨论

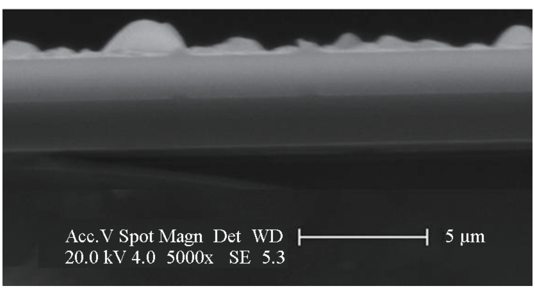
2.1 微观结构

借助 SEM 测量样品断面,有助于判读多层结

构的具体情况。图 2(a)所示为 SEM 观察的样品 S3 断面,即多层 DLC 膜的结构;图 2(b)所示为起黏附作用的 Ti 层和独立 SiC 层的局部结构。

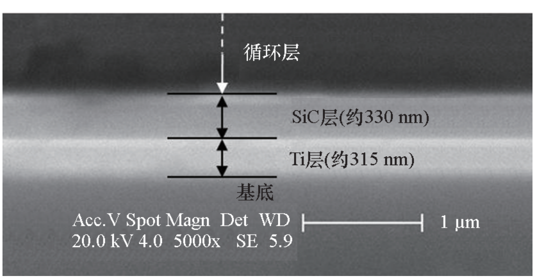
从图 2(b)中可以看出,独立 SiC 层、Ti 层及基底(Si)之间的对比非常明显;但仔细分辨可以发现,Ti 层与基底之间的分界面比较模糊,而 Ti 层与 SiC 层之间的分界面相对要清晰得多,这与金属 Ti 的性质有很大关系。激光等离子体中的粒子携带了高动能,撞击基底(或下接膜层)并扩散,逐渐耗散能量后冷凝成膜。制备 Ti 层初期,Ti 动能粒子向基底内部扩散,形成了模糊的界面;而金属 Ti 却具有阻止外界粒子向其内部扩散的性能[18],因此 Ti 层在成为黏附层的同时,也是一种障碍层,从而使得 Ti 层与上膜层间的分界面相对清晰。

图 2(b)中循环层中 DLC 层与 SiC 层之间没有明显的区分,其局部经数字图像处理后显示在图 2(c)中,可以大致看出两者间的差别,但分界面仍难辨别。



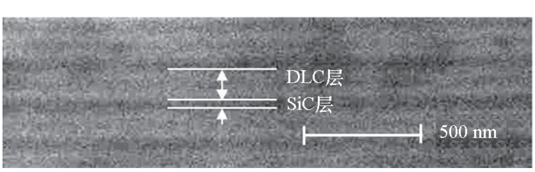
(a) 多层 DLC 膜结构

(a) Structure of the multi-layer DLC film



(b) 黏附层结构

(b) Structure of the adhesive layers



(c) 循环层结构

(c) Structure of the periodic layers

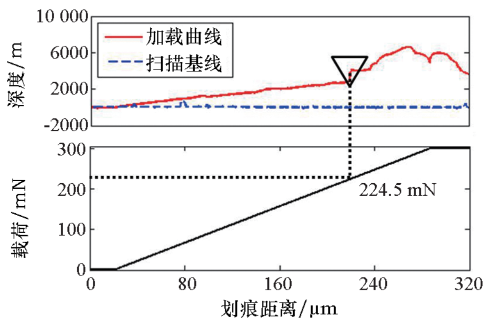
图 2　多层 DLC 膜的 SEM 图像

Fig. 2　SEM imaging of the multi-layer DLC film

2.2　附着性能

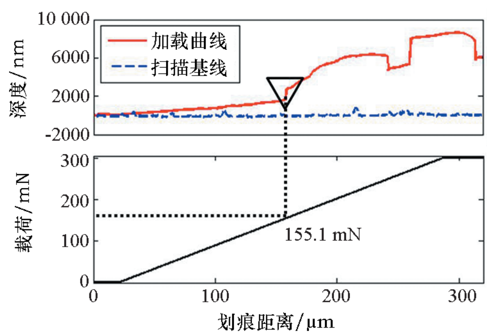
胶粘和重摩擦等测试(依据标准有 GJB2485—1995 和 MIL - 48497A 等)只能定性地判断膜层样品的附着性能是否达到某一标准;为了定量测试样品的附着性能,进行纳米划痕测试并比较不同工艺条件下的 Cu 基多层 DLC 膜的临界载荷。

研究中样品的纳米划痕典型测试曲线如图 3 所示。图中,形貌基线已去除倾斜。



(a) 样品 S1

(a) Sample S1



(b) 样品 S4

(b) Sample S4

图 3　铜基 DLC 膜的划痕测试

Fig. 3　Scratch testes of the Cu-based DLC film

图 3 表明,随着载荷的增大,加载曲线的纵坐标“深度”逐渐上升,表示针尖不断深入样品内部,膜层初期发生弹性形变(该段加载曲线近似线性变化);但随着载荷的不断增大,加载曲线在某一位置出现突变(图中倒三角所示),暗示膜层破裂,此后膜层发生了不可逆的塑性形变。膜层破裂的位置对应载荷值,即临界载荷,可以表征膜层的附着性能。加载曲线出现了多次突变,表明内部膜层逐渐断裂,但按“木桶原则”,第一层的断裂即认为整个膜层的失效。根据纳米划痕测试,各样品的临界载荷对比如图 4 所示,其中 X 表示在 Si 基上直接镀制 400 nm 厚 DLC 膜样品,测试条件同其他样品。

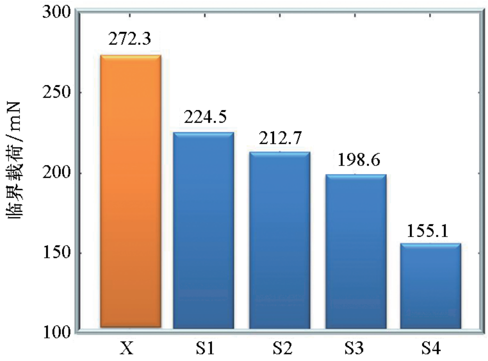


图 4　样品的临界载荷对比

Fig. 4　Contrast among the critical loads of the samples

从图 4 中可以看出,随着 DLC 层与 SiC 层厚度比例的提高,Cu 基 DLC 膜的临界载荷逐渐降低。当厚度比小于 2.3 时,其值接近或超过 Si 基 DLC 膜(厚度为 400 nm)临界载荷的 80%,具备了较高的实用价值。该厚度比例过高(如 9∶1)时,DLC 层厚度过大,其内应力积累严重,这会直接导致膜层在外力作用下的破裂,从而在总体上影响膜层的附着性能。

将 Si 基 DLC 膜的临界载荷作为参照,是因为理论上 DLC 膜与 Si 的结合最为牢固,这源于 C 原子与 Si 原子同族且最为接近,两者之间具有极低的失配界面(mismatch interface),可以形成较强的 Si—C 原子键。反观 C 原子与 Cu 原子,两者之间存在极高的失配界面,因此形成了大量易断裂的弱键;当 C 原子累积至一定程度时,会引起某一方向上的剪切力过大,导致键的断裂[5],即膜层脱落。Cu 基多层 DLC 膜的设计就是在 Cu 基与外层 DLC 保护层之间添加黏附作用的膜层,并有意识地使两者之间巨大的硬度差异得到过渡,从而增强 DLC 膜的附着性和保护性。

金属 Ti 是一种典型的金属与类金属黏结材料,Ti 原子在 Cu 基浅表扩散并以 $CuTi_2$、CuTi、Cu_2Ti 等多种较强的金属键存在[18-21],使 Ti 层牢固地附着在 Cu 基上。而 SiC 被选择作为另一个黏附材料,是因为 Ti 原子可以取代 Si—C 中的 Si 原子,并与其最近的 4 个 C 原子产生杂化;该过程填补了 Si 空位的悬空键,同时对能带结构的影响很小[22]。因此,SiC 层能够与 Ti 层牢固结合。再次,在 DLC 层与 SiC 层的界面中,原子扩散使得 DLC 层中的 C 原子与 SiC 形成稳定的能带结构,增强两者之间的结合[23-24];同时,一定厚度的 SiC 层引入也避免了 DLC 层内应力的不断积累。因此,DLC/SiC 循环层在研究中得到利用。

2.3　机械硬度

纳米硬度是反映膜层抵抗外力作用的机械性能的参数之一,能够表现其抗划伤能力。同等条件下,膜层硬度越高,抗划伤的能力越强。纳米压痕测试是测试薄膜硬度、杨氏模量等机械参数的方法之一。测试中采用经典模块,而非当前流行的动态接触模块(Dynamic Contact Module, DCM)。这是由于金属 Cu 基底的抛光效果较差(材质太软不易抛光)、表面不是很平坦,厚度为数微米的膜层也不能使样品表面达到适于 DCM 模块使用的要求。与 DCM 相比,经典模块具有最大载荷更大、压入深度更深的特点,对厚膜的测试更有优势;虽然精度上略差于前者,但对于研究中的这几个样品的比较已经足够了,在 10% 膜厚(约400 nm)以内的测试数据仍能保证基本的精度。

典型的纳米压痕测试结果"载荷-压入深度"曲线如图 5 所示。测试针头压到最大压入深度时使用的加载力越大,说明膜层对外力的承受能力越大,也就表明硬度越高;反之,硬度越低。由图 5 可知,在压入深度为 1500 nm 的条件下,对样品 S1 使用的载荷最小,说明其纳米硬度最低。样品 S4 的硬度最高,这主要是因为样品 S4 中 DLC 层的厚度最大,DLC 的纳米硬度比 SiC 的要高得多。因此,随着 DLC 层与 SiC 层厚度比例的增大,整个膜层的纳米硬度必然提高。

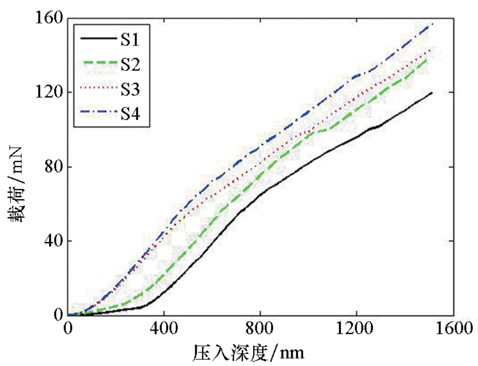


图 5　载荷-压入深度曲线

Fig. 5　Curves of load-depth

对样品的"载荷-压入深度"曲线计算后,获得样品的纳米硬度、杨氏模量等参数。对每个样品的纳米硬度取平均,绘于图 6 中。由图 6 可知,随着 DLC 层与 SiC 层厚度比例的增大,Cu 基多层 DLC 膜的纳米硬度逐渐提高。金属 Cu 的纳米硬度不足 2 GPa,可见设计膜系使其机械性能得到了极大提升。

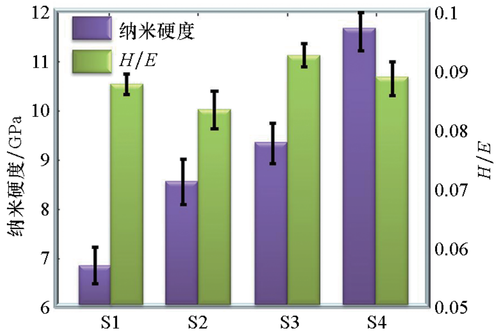


图 6　样品表面磨痕

Fig. 6　Wear trail of the surfaces

除了磨损量参数，膜层的耐磨性还可以由硬度－杨氏模量比（H/E）来表征[25－26]，4 个样品的 H/E 也绘于图 6 中。耐磨性好的 DLC 膜的 H/E 一般在 0.1 左右[25－27]，Cu 基多层 DLC 膜的 H/E 在 0.085～0.095 之间，略低于上述文献的报道值，毕竟与这些报道研究中的 Si 基或不锈钢基 DLC 膜相比，Cu 基多层 DLC 膜的 H/E 受到了很多不利因素的影响，如较软的金属基底、较软的 SiC 层以及较软的金属 Ti 层。

3　结论

针对金属 Cu 基底硬度低、硬质 DLC 保护膜附着性能差的问题，设计制备出 Cu 基多层 DLC 膜，使 DLC 膜层获得了优良的附着性能、机械硬度和耐磨性能。

随着循环层中 DLC 层与 SiC 层厚度比例的提高，Cu 基多层 DLC 膜的临界载荷逐渐降低，当厚度比小于 2.3 时，其值接近或超过厚度为 400 nm的 Si 基 DLC 膜。

随着 DLC 层与 SiC 层厚度比例的增大，Cu 基多层 DLC 膜的纳米硬度逐渐提高；同时，表征耐磨性的参数 H/E 接近最佳值 0.1。

参考文献（References）

[1] 薛群基，王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京：科学出版社，2012.
XUE Qunji, WANG Liping. Thin film materials of carbon-based DLC [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

[2] Liu L, Wang T, Huang J L, et al. Diamond-like carbon thin films with high density and low internal stress deposited by coupling DC/RF magnetron sputtering [J]. Diamond and Related Materials, 2016, 70(1): 151－158.

[3] 程勇. 脉冲激光沉积类金刚石膜技术[M]. 北京：科学出版社，2017.
CHENG Yong. Technology of diamond-like carbon film prepared by pulsed laser deposition [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

[4] de Bonis A, Rau J V, Santagata A, et al. Diamond-like carbon thin films produced by femtosecond pulsed laser deposition of fullerite[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(12): 3747－3753.

[5] Neuville S, Matthews A. A perspective on the optimization of hard carbon and related coatings for engineering applications[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(17): 6619－6653.

[6] Constantinou M, Pervolaraki M, Nikolaou P, et al. Microstructure and nanomechanical properties of pulsed excimer laser deposited DLC: Ag films: enhanced nanotribological response [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309(15): 320－330.

[7] Jelinek M, Zemek J, Kocourek T, et al. Dual laser deposition of Ti: DLC composite for implants [J]. Laser Physics, 2016, 26 (10): 105605.

[8] Písařík P, Jelínek M, Kocourek T, et al. Chromium-doped diamond-like carbon films deposited by dual-pulsed laser deposition[J]. Applied Physics A, 2014 (117): 83－88.

[9] Gayathri S, Kumar N, Krishnan R, et al. Tribological properties of pulsed laser deposited DLC/TM (TM = Cr, Ag, Ti and Ni) multilayers [J]. Tribology International, 2012, 53: 87－97.

[10] de Melo Silva W, Carneiro J R G, Trava-Airoldi V. XPS, XRD and laser raman analysis of surface modified of 6150 steel substrates for the deposition of thick and adherent diamond-like carbon coating[J]. Materials Research, 2013, 16(3): 603－608.

[11] 吴伟，朱志鹏，张剑东，等. 射频输入功率对 DLC：F：Si 薄膜结构和附着特性的调制机理[J]. 材料科学与工程学报，2017，35(3)：363－368.
WU Wei, ZHU Zhipeng, ZHANG Jiandong, et al. Modulation mechanism of RF input power on structure and adhesion characteristics of DLC : F : Si thin film[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(3): 363－368. (in Chinese)

[12] 姜秀英. 316L 不锈钢表面多层薄膜的制备及性能研究[D]. 镇江：江苏大学，2014.
JIANG Xiuying. Preparation and property research of multilayers on the surface of 316L stainless steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)

[13] 姜其立，王浩琦，周晗，等. 双弯管磁过滤阴极真空弧技术沉积超厚多层钛掺杂类金刚石膜[J]. 中国表面工程，2018，31(3)：53－60.
JIANG Qili, WANG Haoqi, ZHOU Han, et al. Ultra-thick multilayer ti-doped DLC films deposited by double bend-tube magnetic filter cathode vacuum arc technology [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 53－60. (in Chinese)

[14] 李福球，林松盛，林凯生，等. CrN/DLC 复合薄膜的制备及其摩擦学性能研究[J]. 电镀与涂饰，2017，36(1)：25－30.
LI Fuqiu, LIN Songsheng, LIN Kaisheng, et al. Preparation of CrN/DLC composite thin film and study on its tribological property[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36 (1): 25－30. (in Chinese)

[15] 于大洋，马胜歌，张以忱，等. 非平衡磁控溅射结合电弧离子镀制备掺杂 DLC 硬质膜性能研究[J]. 中国表面工程，2006，19(6)：43－46.
YU Dayang, MA Shengge, ZHANG Yichen, et al. The properties of DLC Hard film prepared by combining unbalanced magnetron sputtering with arc plating[J]. China

Surface Engineering, 2006, 19(6): 43 -46. (in Chinese)
[16] 陆益敏, 郭延龙, 黄国俊, 等. 脉冲激光沉积低内应力多层类金刚石膜[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 275 -280.
LU Yimin, GUO Yanlong, HUANG Guojun, et al. Multilayer-DLC film with low inner-stress prepared by pulsed laser deposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 275 -280. (in Chinese)
[17] 陆益敏, 黄国俊, 郭延龙, 等. 激光沉积大面积均匀类金刚石膜的设计改进及实验[J]. 兵工学报, 2017, 38(3): 555 -560.
LU Yimin, HUANG Guojun, GUO Yanlong, et al. Improved design and experiment for preparing uniform optical DLC film by large area PLD[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(3): 555 -560. (in Chinese)
[18] Hsu S Y, Chen H Y, Chen K N. Cosputtered Cu/Ti bonded interconnects with a self-formed adhesion layer for three-dimensional integration applications[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33 (7): 1048 -1050.
[19] Lin Q J, Yang S M, Wang C Y, et al. Multifractal analysis for Cu/Ti bilayer thin films[J]. Surface and Interface Analysis, 2013, 45(8): 1223 -1227.
[20] Maawad E, Brokmeier H G, Wagner L, et al. Investigation on the surface and near-surface characteristics of Ti -2.5Cu after various mechanical surface treatments[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(12): 3644 -3650.
[21] Hosseini M, Manesh H D. Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding[J]. Materials & Design, 2015, 81: 122 -132.
[22] Assali L V C, Machadoy W V M, Justo J F. Titanium impurities in silicon, diamond, and silicon carbide[J]. Brazilian Journal of Physics, 2004, 34(2b): 602 -604.
[23] Wang J, Liu G C, Wang L D, et al. Studies of diamond-like carbon (DLC) films deposited on stainless steel substrate with Si/SiC intermediate layers[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(8): 3108 -3114.
[24] Srisanga C, Asanithi P, Siangchaew K, et al. Characterization of SiC in DLC/a-Si films prepared by pulsed filtered cathodic arc using Raman spectroscopy and XPS[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(15): 5605 -5609.
[25] Modabber A A, Kameli P, Ranjbar M, et al. Correlations between microstructure and hydrophobicity properties of pulsed laser deposited diamond-like carbon films[J]. Superlattices and Microstructures, 2015, 81: 64 -79.
[26] Amanov A, Cho I S, Sasaki S. The influence of DLC coating on the mechanical and frictional properties of unpeened and peened Cu-based bimetal under dry sliding conditions[J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 143(2): 814 -824.
[27] Dwivedi N, Kumar S, Malik H. Superhard behaviour, low residual stress, and unique structure in diamond-like carbon films by simple bilayer approach[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(2): 023518.

(上接第 59 页)

[13] Kwon H S, Niu Y Y, Kim Y J. Planar nearfield acoustical holography in moving fluid medium at subsonic and uniform velocity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(4): 1823 -1832.
[14] 周鹤峰, 曾新吾. 双面声场反向神经网络声压外推分离[J]. 声学学报, 2018, 43(6): 873 -882.
ZHOU Hefeng, ZENG Xinwu. Double-plane sound field separation after sound pressure extrapolation using back propagation neural networks[J]. Acta Acustica, 2018, 43(6): 873 -882. (in Chinese)
[15] Amiet R K. Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction[C]// Proceedings of 2nd Aeroacoustics Conference. AIAA, 1975: 24 -26.
[16] Candel S, Guedel A, Julienne A. Radiation, refraction and scattering of acoustic waves in a free shear flow[C]// Proceedings of 3rd AIAA Aero-Acoustics Conference, 1976.
[17] 高印寒, 周晓华, 杨开宇, 等. 基于小波分析的声全息识别运动声源的方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(5): 1197 -1202.
GAO Yinhan, ZHOU Xiaohua, YANG Kaiyu, et al. Wavelet based acoustic holography method for moving sound source identification[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(5): 1197 -1202. (in Chinese)
[18] 杨殿阁, 罗禹贡, 李兵, 等. 基于时域多普勒修正的运动声全息识别方法[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 4738 -4747.
YANG Diange, LUO Yugong, LI Bing, et al. Acoustic holography method for measuring moving sound source with correction for Doppler effect in time-domain[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4738 -4747. (in Chinese)
[19] Dobrzynski W. Amiet shear layer correction with an additional temperature gradient considered: nomograms for the correction of noise signatures from open jet wind tunnel tests: DFVLR-Mitt -84 -11[R]. DFVLR, 1984.