

# 过渡层结构对类石墨镀层结合强度的影响

施文彦, 蒋百灵, 李洪涛

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 南京 210009)

**摘要:**目的 探究过渡层沉积时间和结构对类石墨镀层结合强度的影响规律。方法 采用微弧离子镀技术,改变梯度层沉积时间,制备不同的类石墨镀层。利用扫描电子显微镜(SEM)分析镀层的微观形貌,利用截面能谱扫描分析镀层中梯度层结构变化。采用压痕法和划痕法对镀层与基体的结合强度进行评价。采用维氏硬度计测试镀层的显微硬度,并利用针盘式摩擦磨损试验机测定镀层的摩擦系数。结果 随着梯度层沉积时间的延长,镀层与基体的结合强度呈先上升、后下降的变化趋势,在过渡层沉积时间为20 min时,结合强度最高,约为46 N。此外,随着过渡层沉积时间的延长,镀层摩擦系数逐渐下降,但显微硬度下降,承载能力减弱,摩擦磨损寿命下降。结论 合理调控过渡层沉积时间有助于类石墨镀层结合强度的提升,镀层的摩擦磨损寿命随着过渡层时间的延长而呈现先上升、后下降的趋势,高结合强度使得膜基界面的结合寿命延长。

**关键词:**磁控溅射; GLC 镀层; 结合强度; 过渡层结构; 划痕法; 压痕法

中图分类号: TG174.444 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)01-0041-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.007

## Effects of Transition Layer Structure on Bonding Strength of GLC Films

SHI Wen-yan, JIANG Bai-ling, LI Hong-tao

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

**ABSTRACT:** Objective To explore the influencing law of transition layer deposition time and structure on the bonding strength of the GLC films. Methods Different GLC (Graphite-Like Carbon) films were synthesized by the micro-arc ion plating technology with varied gradient layer deposition time. The microstructure of the coating was characterized by scanning electron microscopy (SEM). The scanning of cross-sectional energy spectrum was used to analyze the variation of gradient layer structure. The bonding strength between the film and the substrate was determined by the scratch and indentation methods. The micro-hardness of the film was tested using Vickers hardness tester, and the friction coefficient of the films was measured by pin-on-disc friction and wear tester. Results When the deposition time of transition layer was 20 min, the bond strength reached 46 N. With the increasing transi-

收稿日期: 2015-10-21; 修订日期: 2015-11-28

Received: 2015-10-21; Revised: 2015-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(51401106); 江苏高校自然科学研究项目(12KJB430008); 江苏省自然科学基金(BK2013095)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51401106), Jiangsu Higher Education Institutions Natural Science Research Project(12KJB430008), and Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(BK2013095)

作者简介: 施文彦(1991—),男,江苏人,硕士研究生,主要研究金属表面处理。

Biography: SHI Wen-yan(1991—), Male, from Jiangsu, Master graduate student, Research focus: metal surface treatment.

通讯作者: 蒋百灵(1960—),男,陕西人,教授,主要研究方向为微弧离子镀、镁铝合金表面处理等。

Corresponding author: JIANG Bai-ling(1960—), Male, from Shaanxi, Professor, Research focus: metal surface treatment of magnesium alloy and aluminum, micro-arc ion plating technology.

tion layer deposition time, the bond strength of the films first increased and then decreased. The content of chromium increased with the increasing transition layer deposition time, while the hardness of GLC films decreased with the slowing down of gradient layer structure. The friction coefficient and the lifetime of the films decreased with the increasing transaction layer deposition time.

**Conclusion** Reasonable transition deposition period was helpful to improve the bonding strength of the GLC coating. The friction and wear life of the coating first increased and then decreased with the increasing transaction layer deposition time. High bonding strength was helpful to increase the adhesive life between the film and substrate.

**KEY WORDS:** magnetron sputtering; GLC films; bonding strength; transition layer structure; scratch test; Rockwell indentation

以  $sp^2$  键为主的类石墨碳膜(Graphite Like Carbon, 简称 GLC)是一种具有高硬度、低摩擦系数、低磨损率等优异性能的材料<sup>[1-2]</sup>,集良好的耐磨性与优异的减摩性于一体,在固体润滑和机加工等领域的应用前景广阔<sup>[3-5]</sup>。镀层与基片良好的结合强度是保证镀层发挥作用的基本条件<sup>[6]</sup>,但是目前对 GLC 镀层与基体结合强度的研究未见深入报道,且针对过渡层结构对结合强度的影响研究较少<sup>[7]</sup>。有研究表明,采用成分和结构渐变的梯度过渡层有利于逐级释放镀层的内应力,提高镀层与基体的结合强度<sup>[8-10]</sup>,梯度层的渐变结构也能显著改变镀层应力的分布。对于承受摩擦磨损的 GLC 镀层,镀层与基体结合强度越好,镀层的使用寿命也就越长。

镀层结合强度的评价方法主要有划痕法和压痕法。划痕法是用一根具有光滑圆锥状顶端的划针在硬质镀层表面以一定的速度划过,同时逐步增大压头的垂直压力,镀层出现开裂并与基体剥落处的最小载荷称为临界载荷,以此表征镀层的结合强度<sup>[11-14]</sup>。压痕法是一种间接评价镀层与基体结合强度的方法,通过压痕形貌评价膜基结合强度<sup>[15-16]</sup>。

文中采用划痕法和压痕法研究梯度层结构对 GLC 镀层结合强度的影响,揭示影响规律。

## 1 实验

### 1.1 GLC 镀层沉积

基体材料为 W6Mo5Cr4V2 高速钢及 P 型(100)硅片。利用自制 MSIP-019 型微弧离子镀设备沉积镀层。沉积前,真空腔的背底真空度为  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa。沉积镀层时,Ar 流量为 30 mL/min(标况下),真空室压力为 0.12 Pa。操作步骤为:1)启动一个石墨靶和一个铬靶,对靶放置,然后加载电流,并在基片上加载一定的负偏压,通入氩气进行等离子清洗 30 min;2)改变铬靶电流,沉积铬打底层,此时将石墨靶电流关闭,沉积时间 3 min;3)再次启动石墨靶,逐渐增加石

墨靶电流,逐渐减小铬靶电流,并调整基体偏压,沉积 C-Cr 梯度过渡层,四组实验的沉积时间分别为 5, 15, 20, 30 min;4)维持石墨靶电流不变,保持铬靶电流为恒定数值,沉积表面工作层,时间为 180 min。

### 1.2 镀层测试

利用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜观察镀层截面形貌和表面形貌,设备的分辨率为 1 nm,最大可放大 650 000 倍。

采用 WS-2005 型涂层附着力自动划痕仪对镀层临界载荷进行检测,金刚石压头加载压力为 60 N,加载速度为 60 N/min,测试长度为 4 mm,并采用日本 OLYMPUS 公司生产的 GX71 倒置金相显微镜对划痕部分拍照。采用 HX-1000 显微硬度计测定原始硅片基体和镀层硬度,载荷 50 g,保压加载时间为 10 s。

采用 MC010-HR-150A 洛氏硬度计加载洛氏压痕,加载载荷为 150 kg,保压时间为 40 s。

采用 XLGT200 针盘式摩擦磨损仪测试薄膜的摩擦磨损性能。以 GCr15 小球作为摩擦副,转速为 200 r/min,载荷为 5 N,测试时间为 1 h。如果镀层摩擦系数上升至 0.5 以上,认为镀层失效,提前终止。

## 2 结果与讨论

### 2.1 镀层微观形貌及厚度

图 1 为过渡层沉积时间不同的四种样品工作层的截面形貌。可以看出,打底层纯铬为典型的柱状结构,生长方向垂直于单晶硅基体。随着铬靶电流逐渐减小及碳靶电流逐渐增大,过渡层柱状结构逐渐减弱;随着沉积时间的延长,过渡层逐渐变厚,柱状结构越来越明显。

图 2 为过渡层沉积时间不同的四种样品工作层的表面形貌。如图 2a 所示,当过渡层沉积时间较短(5 min)时,镀层表面疏松,有很多微裂纹和缺陷,形成的团簇颗粒不均匀,大小不一。如图 2b 所示,随着

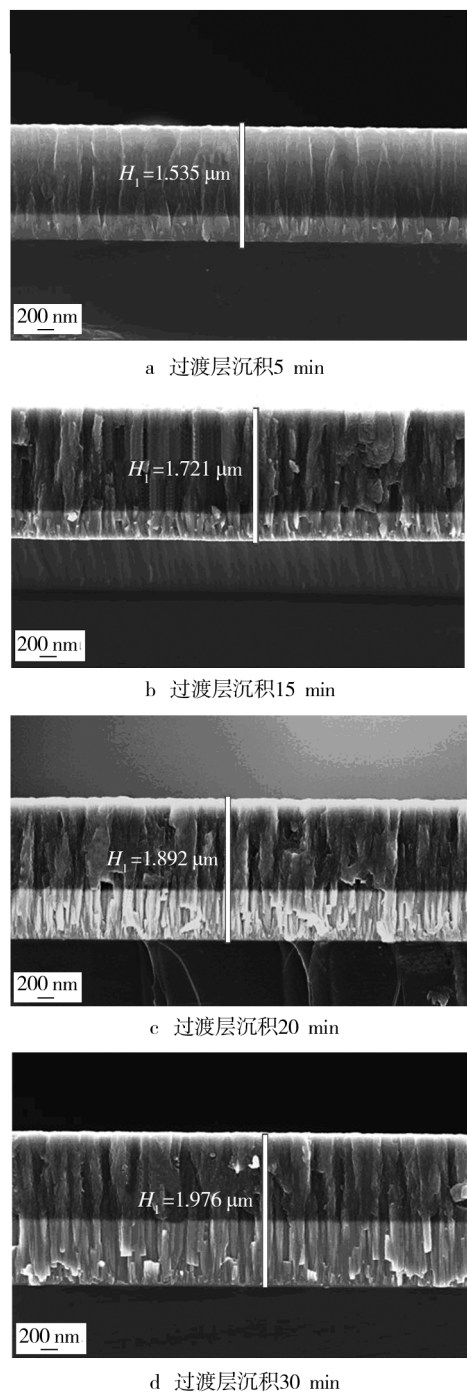


图1 GLC 镀层的扫描截面形貌(20 000×)

Fig. 1 The cross-section morphology of GLC film ( 20 000×)

过渡层沉积时间延长至 15 min,镀层表面微裂纹减小,但存在较多的缺陷和孔隙。当过渡层沉积时间为 20 min 时,如图 2c 所示,镀层变得均匀致密,微裂纹和孔隙明显减小,形成的团簇粒子紧密结合在一起,并且镀层表面连续紧凑,颗粒细小均匀,团簇颗粒致密。随着过渡层沉积时间达到 30 min,如图 2d 所示,镀层表面出现了少量裂纹,团簇颗粒直径增加。

由上述分析可知,随着过渡层沉积时间的延长,

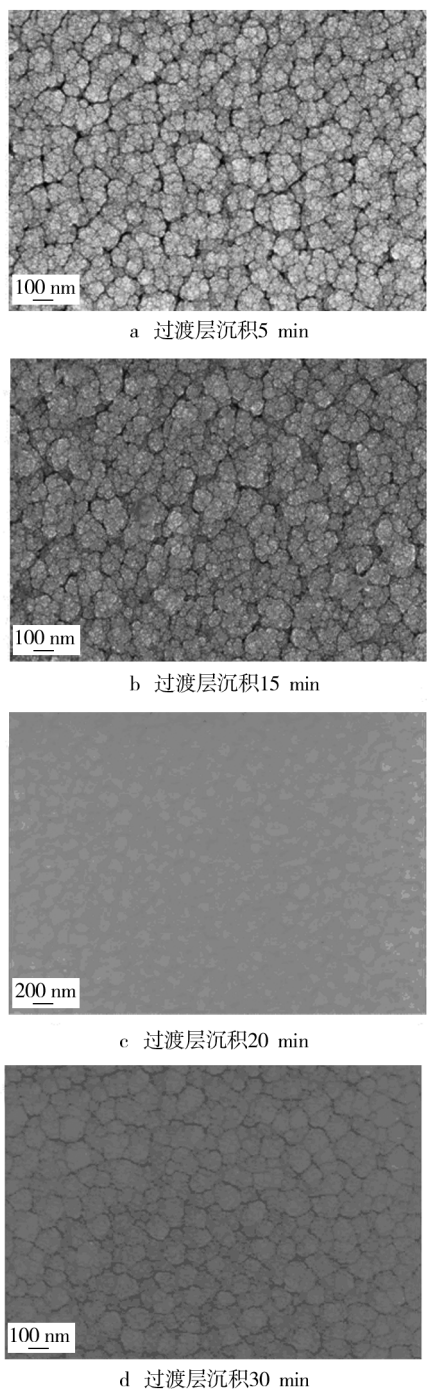


图2 GLC 镀层的扫描表面形貌(50 000×)

Fig. 2 The scanned surface morphology of GLC film ( 50 000×)

镀层表面孔隙尺寸及颗粒直径均先减小,后增大。由于基体与镀层之间热膨胀系数及晶格的差异较大,因此镀层在制备和冷却过程中存在较大的热应力以及原子在扩散过程中由于晶格常数不匹配产生的内应力。加入梯度过渡层使基体到工作层的结构缓慢过渡,当过渡层沉积时间较短时,过渡层较薄,梯度变化的幅度过大,碳与铬的成分变化过大,内应力得不到充分缓解释放,在镀层制备过程中,随着温度升高,内



应力只能通过工作层中的孔隙与裂纹释放出来,因此工作层表面形成了微裂纹和孔隙,镀料粒子在表面无法充分扩散,形成了较粗大的团簇颗粒。随着过渡层沉积时间的延长,梯度层结构变化变缓,碳和铬成分变化趋势减慢,过渡层增厚,内应力在梯度层逐渐变化的过程中得到释放,并且由于梯度层变化趋势的减缓,镀层表面致密性也增加。随着过渡层沉积时间的继续延长,过渡层继续增厚,梯度层变化继续变缓,碳与铬的层数增加,接触界面也逐渐增加,界面应力增大,后期过渡层自身产生的界面应力成为主要影响,

镀层表面致密性开始下降,并产生裂纹和孔隙。

## 2.2 镀层截面元素分布

图3为过渡层沉积时间不同的四种样品工作层的截面线性能谱扫描结果,实验中对Cr, C, Si三种元素进行了能谱扫描测试。由于铬靶和碳靶为对靶,溅射形式为碳铬间隔式,因此元素变化具有微小的起伏。随着过渡层沉积时间的延长,结构和成分梯度的变化逐渐变缓。由图3c, d可知,随着过渡层沉积时间的延长,镀层中元素成分和结构的变化逐渐减小。

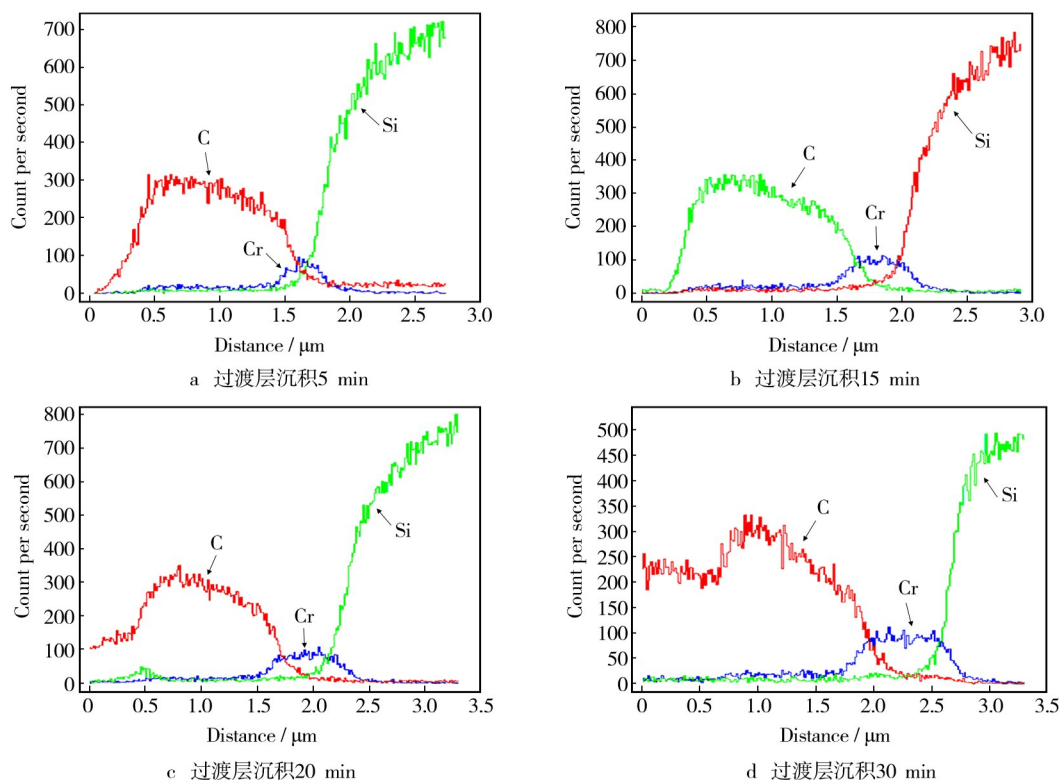


图3 GLC镀层的截面线性能谱扫描分析结果

Fig. 3 The cross-section EDS of GLC film

## 2.3 镀层划痕形貌及结合强度

图4为梯度层结构不同的镀层表面划痕形貌。可以看出,镀层表面划痕形貌差异较大,随着梯度层结构变化逐渐变缓,镀层剥落面积先减小后增大,结合强度呈现先增大、后减小的趋势。图4a中,镀层在划痕六分之一处开始产生塌陷,在划痕四分之一处开始剥落而露出基体,随着加载力增大,镀层开始大面积剥落,划痕周围出现隆起和剥落,破损处周围可以看到大量剥落的镀层碎片。从镀层开始破裂处的局部放大图可以看出,开始破裂处露出了大量基体。

图4b中,划痕内部塌陷情况减弱,但划痕上仍然

露出了少量基体。从划痕破损处放大图可以看到,破损部分的镀层已经剥落,镀层不同成分之间存在裂纹和褶皱。

由图4c可以看出,随着过渡层沉积时间的延长,镀层的结合力增加,随着划痕压力的增大,划痕内部出现塌陷,但周围并未出现大面积剥落,划痕周边没有发现镀层剥落的碎片,划痕内部未出现连续的剥落。由破损处局部放大图可以看出,破损处的镀层出现断裂,呈褶皱形貌,有裂纹存在,未出现大面积连续剥落。由于镀层与基体的弹性模量不一样,导致二者的变形量不一样,因此随着加载力的增大,镀层与基体之间出现褶皱。此外,由于梯度层结构变化变缓,



内应力得到释放,因此镀层与基体间结合良好。

由图 4d 可以看出,随着过渡层沉积时间的进一步延长,结合力下降,在划痕内部先期出现塌陷,划痕五分之三处,周边出现连续剥落,露出基体,划痕内部也出现不连续的剥落,露出少量的基体。随着加载力增大,划痕内部出现裂纹并延展至划痕外围,使周边出现剥落。由破损处局部放大图可以看出,破损处出

现了明显的断裂,镀层出现破碎崩落现象。由镀层出现连续崩落现象可知,镀层应力增大。随着加载力的增大,镀层出现脆性断裂,最终以崩落形式失效。

2.4 镀层压痕形貌及结合强度分析

图 5 为梯度层结构不同的镀层洛氏压痕形貌。在洛氏硬度压痕实验中,由于压痕尺寸和深度较大,如

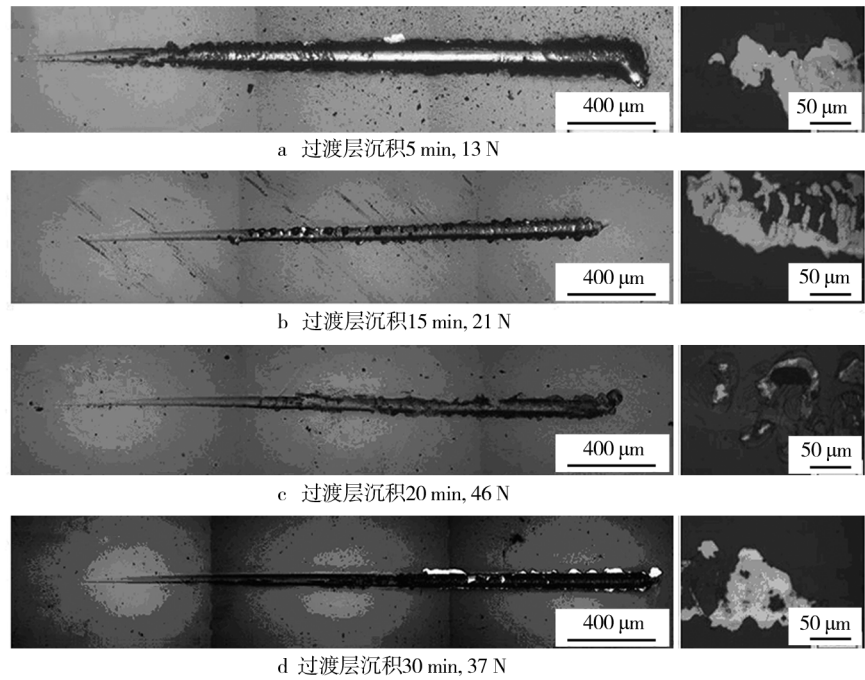


图 4 梯度层不同的镀层划痕形貌及镀层破损处局部放大形貌

Fig. 4 Surface scratching micrographs of GLC coatings on M2 steel under different gradient layer and the enlarged micrographs of coating breakage

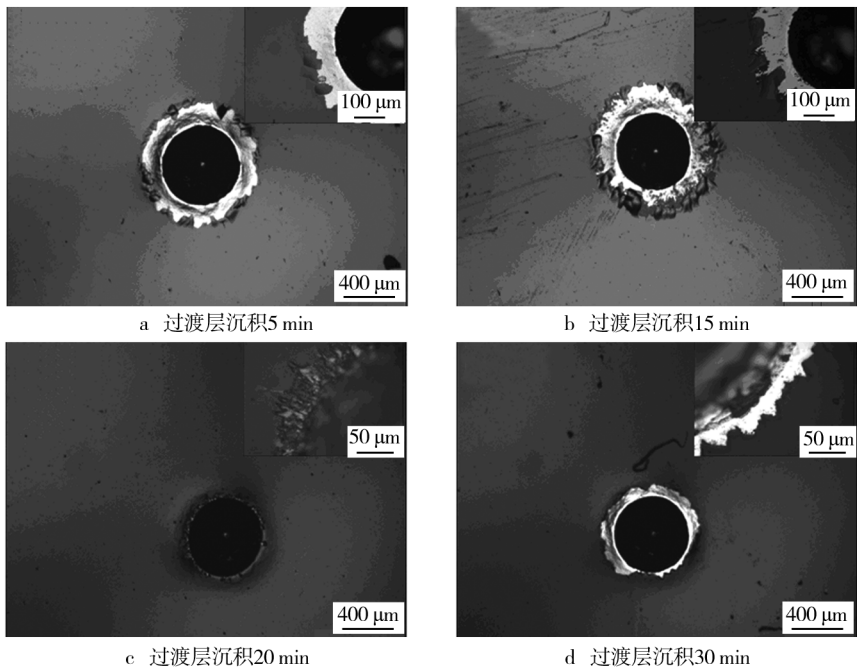


图 5 梯度层不同的镀层洛氏压痕形貌

Fig. 5 Rockwell indentations of GLC film on M2 steel under different gradient layer

图5a所示,镀层周围出现了大面积剥落。镀层应力较大,在压痕加载过程中,压应力加载在镀层上面,由于镀层不致密,存在孔隙,且表面团簇颗粒大,因此承受不住载荷,断裂后发生连续剥落,露出大面积基体。

图5b中,压痕周围出现大面积剥落,但是仍有断裂部分附着在基体上。

图5c中,整体洛氏硬度压痕形貌较好,未出现大面积剥落,压痕周边虽出现隆起、凸出,但镀层并未剥落。从图5c的放大图可以看出,镀层存在少量裂纹,仅有少量的基体露出,镀层与基体结合强度较高。

图5d中,压痕周围出现隆起及少量不连续剥落,有少量基体露出。由图5d的放大图可以看出,出现了较多的裂纹和不连续的断裂,导致基体露出,表明镀层结合强度下降。

## 2.5 镀层摩擦磨损性能及硬度

图6为过渡层沉积时间不同的镀层显微硬度测试结果。可以看出,随着过渡层沉积时间的延长,镀层显微硬度逐渐下降。过渡层沉积时间延长时,铬靶在大电流的时间随之延长,铬靶的溅射产额在同等条件下远远大于碳靶的溅射产额,使得镀层中铬含量增加。铬为纯金属,在镀层中不属于硬质相,因此镀层的硬度逐渐下降。

图7为过渡层不同的类石墨镀层的摩擦系数曲

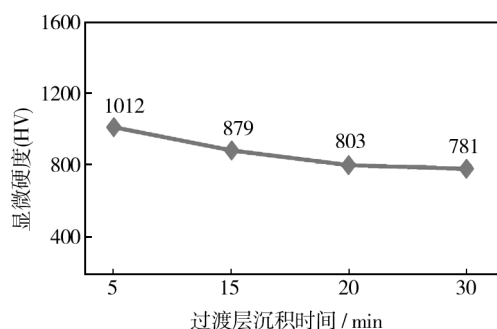


图6 GLC镀层的显微硬度

Fig.6 Micro-hardness of GLC coatings

线,磨痕半径为10 mm。可以看出,a图和b图的摩擦系数曲线起伏比较大。由于镀层表面粗糙,颗粒半径比较大,因此在磨损过程中,摩擦系数波动比较大且偏高。c图中,摩擦系数刚开始平稳,在后期上升。这是因为镀层硬度较低,承载力下降,在摩擦磨损中出现了塌陷等情况,无法支撑大载荷长期磨损。d图中,摩擦系数变化平稳,但磨损寿命较短。

图8a中有基体裸露,并且有黑色的氧化产物。图8b中,磨痕中间也露出基体,且磨痕较深。图8c中,镀层边缘出现了剥落和氧化。图8d中,由于镀层本身承载力较低,镀层支撑时间较短,摩擦磨损寿命缩短,并且摩擦副与镀层之间大面积接触,因此镀层剥落较严重。

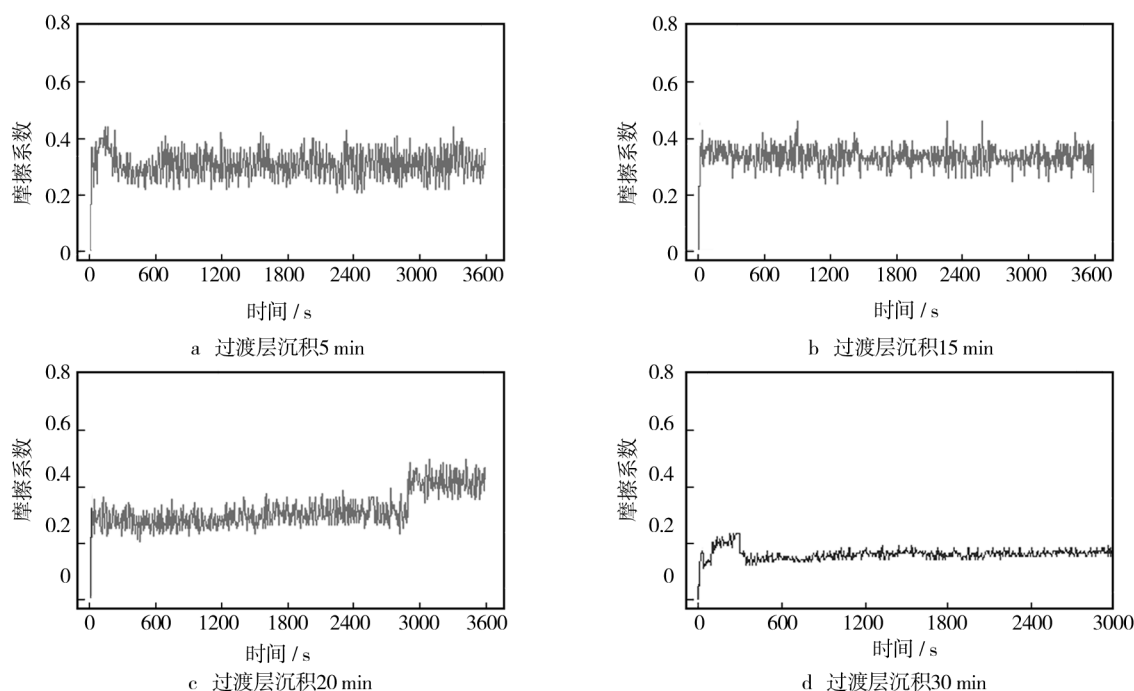


图7 梯度层不同的镀层摩擦磨损曲线

Fig.7 The friction curve of GLC coatings on M2 steel under different gradient layer

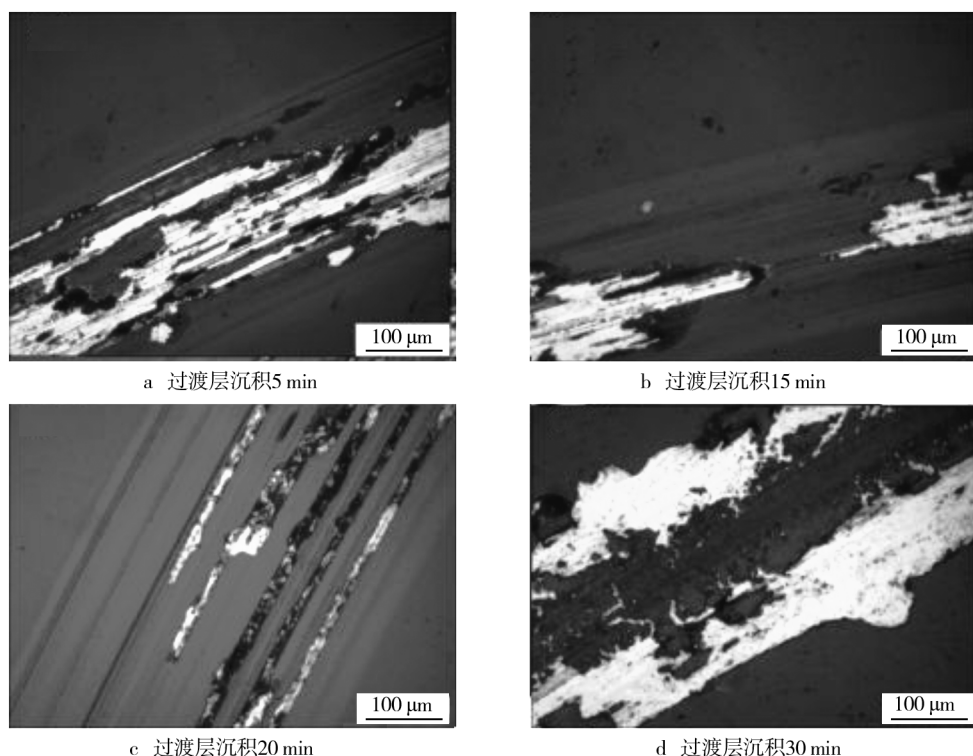


图8 梯度层不同的镀层磨损形貌

Fig.8 Wear morphology on M2 steel under different gradient layer

### 3 结论

1) 随着过渡层沉积时间的延长,梯度层结构和成分变化逐渐变缓,镀层表面团簇结构颗粒尺寸呈先减小、后增大的趋势。

2) 随着过渡层沉积时间的延长,镀层的摩擦系数逐渐减小,但镀层硬度降低,磨损寿命也逐渐下降。

3) 通过划痕法和压痕法分析,过渡层沉积时间为20 min时,镀层结合强度达到最高,约为46 N。

### 参考文献

- [1] 杜军,何家文.类石墨碳膜的制备及其与类金刚石碳膜的区分[J].中国表面工程,2005,18(4):6—8.  
DU Jun, HE Jia-wen. The Preparation of Graphite-like-carbon Film (GLC) and Difference from Diamond-like-carbon (DLC) Film[J]. China Surface Engineering, 2005, 18(4): 6—8.
- [2] 严富学,白力静,殷鹏.偏压对GLC镀层的结构及应力的影响研究[J].表面技术,2010,39(2):28—30.  
YAN Fu-xue, BAI Li-jing, YIN Peng. Effects of Bias Voltage on Microstructure and Stress of GLC Films [J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 28—30.
- [3] KULIKOVSKY V, METLOV K, KURDYUMOV A, et al. Study of the Structure of Hard Graphite-like Amorphous Carbon Films by Electron Diffraction [J]. Diamond and Related Materials, 2002(11): 1467—1471.
- [4] YANG S, TEER D G. Investigation of Sputtered Carbon and Carbon/Chromium Multi-layered Coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 131(1/2/3): 412—416.
- [5] WIKLUND U, LARSSON M. Low Friction PVD Titanium-Carbon Coatings [J]. Wear, 2000, 241(2): 234—238.
- [6] 黄鹤,何家文.刀具的抗磨和减摩镀层[J].机械工程学报,2013,8(4):155—158.  
HUANG He, HE Jia-wen. Hard with Low-friction Coating Layers for Cutting Tools [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 8(4): 155—158.
- [7] 崔雨潇,赵天奇,孙方宏,等.基于中间过渡层技术提高金刚石薄膜与硬质合金基体间附着力的研究进展[J].中国科技论文,2015,10(6):673—676.  
CUI Yu-xiao, ZHAO Tian-qi, SUN Fang-hong, et al. Advances in the Investigation on Adhesion Improvement of Diamond Films on Carbide Substrates by Interlayer Technology [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(6): 673—676.
- [8] 江功武,于翔,王成彪.类金刚石碳膜的研究进展[J].金属热处理,2003,28(11):1—6.  
JIANG Gong-wu, YU Xiang, WANG Cheng-biao. Research Technology, 2010, 39(2): 28—30.



- Progress of Diamond-like Carbon Films[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(11): 1—6.
- [9] TEER D G. New Solid Lubricant Coatings[J]. Wear, 2001, 251(1—12): 1068—1074.
- [10] 汪渊, 宋忠孝, 徐可为. 体心立方金属 W 薄膜晶体取向的膜厚尺寸效应及其表面映射[J]. 物理学报, 2007, 56(12): 7248—7254.
- WANG Yuan, SONG Zhong-xiao, XU Ke-wei. The Surface Mapping and Crystal Orientation of Body-centered Cubic Thin Metal Tungsten Films of Different Thickness[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7248—7254.
- [11] 胡奈赛, 徐可为, 何家文. 涂、镀层的结合强度评定[J]. 中国表面工程, 1998, 11(1): 31—35.
- HU Nai-sai, XU Ke-wei, HE Jia-wen. Evaluation of Bonding Strength on Coating Layers[J]. China Surface Engineering, 1998, 11(1): 31—35.
- [12] 郑森林, 何家文, 张平余. 涂层膜基结合强度测定方法研究进展[J]. 薄膜科学与技术, 1993, 6(2): 85—91.
- ZHENG Sen-lin, HE Jia-wen, ZHANG Ping-yu. Progress Determination of Strength of the Coating Film and Substrate Binding[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 6(2): 85—91.
- [13] BURNETT D J, RICKERBY D S. The Relationship between Hardness and Scratch Adhesion[J]. Thin Solid Films, 1987, 154: 403—416.
- [14] WANG C T, ANA E, TOMAS P, et al. Indentation and Scratch Testing of DLC-Zr Coatings on Ultrafine-grained Titanium Processed by High-pressure Torsion[J]. Wear, 2013, 306: 304—310.
- [15] HEINKE W, LEYLAND A, MATTHEWS A. Evaluation of PVD Nitride Coatings, Using Impact, Scratch and Rockwell-adhesion Test[J]. Thin Solid Films, 1995, 270: 431—438.
- [16] 易茂中, 胡奈赛, 何家文. 用涂层压入仪测定薄膜与基体结合强度的探讨[J]. 真空科学与技术, 1999(2): 89—96.
- YI Mao-zhong, HU Nai-sai, HE Jia-wen. Evaluation of Bonding Strength between Thin Film and Substrate by a New Indentation Tester[J]. Vacuum Science and Technology, 1999(2): 89—96.

(上接第 6 页)

- [39] ZHANG Y, LU X, ZHENG Z Y, et al. Transmitted Laser Propulsion in Confined Geometry Using Liquid Propellant[J]. Appl Phys A, 2008, 91(2): 357—360.
- [40] 程建中, 蔡建, 胡云, 等. 掺杂金属颗粒的高分子工质激光推进实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1190—1194.
- CHENG Jian-zhong, CAI Jian, HU Yun, et al. Experimental Study of Laser Propulsion by Using Polymer Propellant Doped with Metal Powders[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1190—1194.
- [41] MATAR S F, ETOURNEAU J. Investigation of the Electronic Structure of Carbon-containing TiAl[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1996, 233: 112—120.
- [42] ROULEAU B, PEYRE P, BREUILS J, et al. Characterization at a Local of a Laser-shock Peened Aluminum Alloy Surface[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 7195—7203.
- [43] GILL A, TELANG A, MANNAVA S R, et al. Comparison of Mechanisms of Advanced Mechanical Surface Treatments in Nickel-based Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 576: 346—355.
- [44] GAO Y K. Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528: 3823—3828.
- [45] ZHANG S Z, KONG F T, CHEN Y Y, et al. Phase Transformation and Microstructure Evolution of Differently Processed Ti-45Al-9Nb-Y Alloy[J]. Intermetallics, 2012, 31: 208—216.
- [46] KURUML T, OBRTLIK K. Microstructure Degradation in High Temperature Fatigue of TiAl Alloy[J]. Fatigue of Metallic Materials—Mechanisms and Life Estimation, 2010, 65: 28—32.
- [47] TETSUI T. Development of a TiAl Turbocharger for Passenger Vehicles[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 329: 582—588.
- [48] APPEL F, WAGNER R. Microstructure and Deformation of Two-phase  $\gamma$ -Titanium Aluminides[J]. Materials Science and Engineering R, 1998, 22: 187—268.
- [49] MARKETZ W T, MARKETZ F D, FISCHER H C. Deformation Mechanisms in TiAl Intermetallics—experiments and Modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19: 281—321.
- [50] KIM S, NA Y, YECOM S E, et al. An in-situ Transmission Electron Microscopy Study on Room Temperature Ductility of TiAl Alloys with Fully Lamellar Microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 589: 140—145.
- [51] FALLAHI A, ATAEE A. Effects of Crystal Orientation on Stress Distribution Near the Triple Junction in a Tricrystal  $\gamma$ -TiAl[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 4576—4581.
- [52] MALOY S A, GRAY G T. High Strain Rate Deformation of Ti-48Al-2Nb-2Cr[J]. Acta Materialia, 1996, 44: 1741—1756.