

# 聚氨酯橡胶表面 DLC 薄膜的制备及耐磨性能优化

踪雪梅<sup>1,2</sup>, 刘威<sup>1,2</sup>, 冯森<sup>1,2</sup>, 杨梦梦<sup>1,2</sup>, 何冰<sup>1,2</sup>

(1.江苏徐工工程机械研究院有限公司, 江苏 徐州 221004;  
2.高端工程机械智能制造国家重点实验室, 江苏 徐州 221004)

**摘要:** **目的** 增强聚氨酯橡胶的耐磨性能。**方法** 选用四氯乙烯作为溶塑剂对聚氨酯橡胶进行预处理, 再采用阴极放电等离子技术进行类金刚石(DLC)薄膜的镀制。通过扫描电子显微镜、拉曼光谱仪对制备的试样表面形貌和组成进行观察、表征。采用摩擦试验机对试样在干摩擦条件下的摩擦磨损行为进行分析, 并观察试样的磨痕形貌。**结果** 随着四氯乙烯超声处理温度和时间增加, 基体表面原有条纹的深度呈现先增大后减小的趋势, 镀制薄膜后, 试样表面平整, 且粗糙度逐渐降低; 薄膜组成从非晶态碳结构, 逐渐转变为金刚石相与石墨相混杂的典型类金刚石结构。在干摩擦过程中, 镀膜试样的摩擦系数比未镀膜试样降低了 40%以上, 随着超声处理温度和时间增加, 镀膜试样的摩擦系数和磨损量均呈现先减小后增大的趋势, 其中在 50 °C 四氯乙烯超声处理 15 min 后, 镀膜试样 4 的摩擦系数和磨损量最小。**结论** 四氯乙烯超声处理有助于改善聚氨酯表面 DLC 薄膜的摩擦性能, 合适的四氯乙烯超声处理温度为 50 °C, 合适的超声处理时间为 15 min。

**关键词:** DLC; 聚氨酯; 耐磨性; 四氯乙烯; 阴极放电等离子技术

**中图分类号:** TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0190-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.023

## Preparation and Wear Resistance of DLC Films on Polyurethane Rubber

ZONG Xue-mei<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, FENG Sen<sup>1,2</sup>, YANG Meng-meng<sup>1,2</sup>, HE Bing<sup>1,2</sup>

(1.Jiangsu Xuzhou Construction Machinery Research Institute Co., Ltd, Xuzhou 221004, China;

2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Advanced Construction Machinery, Xuzhou 221004, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the wear resistance of polyurethane (PU) rubber. Diamond-like carbon (DLC) films were deposited on the pretreated PU rubbers through cathodic discharge plasma method with tetrachloroethylene as soluble plastic agent. Scanning electron microscopy and Raman spectroscopy were taken to observe and characterize the surface morphologies and compositions of the deposited films, respectively. The tribological behavior of specimens was investigated with friction testing machine under dry sliding condition and wear morphology was observed. The depth of original stripes on the substrate surface increased firstly and then decreased with the increase of temperature and time of ultrasonic treatment of tetrachloroethylene. The surface of the coated specimen was flat and the roughness decreased gradually. With the increase of ultrasonic treatment temperature and time, the coating composition changed from amorphous carbon structure to typical diamond-like structure with diamond phase mixed with graphite phase. The coefficients of friction (CoF) of coated rubbers were

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-06-03

Received: 2019-03-06; Revised: 2019-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1105805); 江苏省国际科技合作项目(BZ2017016)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB1105805) and International Technology Cooperation Program of Jiangsu Province (BZ2017016)

作者简介: 踪雪梅(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为表面工程与强化技术。邮箱: 13776580177@139.com

Biography: ZONG Xue-mei (1975—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: surface engineering and harding technique. E-mail: 13776580177@139.com

40% lower than that of uncoated rubber under dry friction. With the increase of temperature and time of ultrasonic treatment under dry friction, the friction coefficient and wear amount of coated specimen firstly decreased and then increased. Specifically, both of the CoF and mass loss of coated specimen 4 were the smallest after treatment for 15 min with tetrachloroethylene at 50 °C. The ultrasonic treatment with tetrachloroethylene can improve the wear resistance of DLC films deposited on PU rubbers. The most suitable temperature and time of ultrasonic treatment with tetrachloroethylene are 50 °C and 15 minutes.

**KEY WORDS:** DLC; polyurethane rubber; wear resistance; tetrachloroethylene; cathodic discharge plasma method

类金刚石（Diamond-like Carbon, DLC）薄膜作为一种非晶态薄膜，具有自润滑、硬度高、耐磨性能好等特性，是一种理想的减摩耐磨涂层，其在摩擦学领域的应用已经得到了越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。DLC 薄膜被认为是一种优异的金属材料表面防护涂层，后来逐渐应用于陶瓷、玻璃表面。直至 2004 年研究人员才首次进行橡胶材料表面 DLC 镀膜技术研究<sup>[4]</sup>。橡胶材料主要由 C 和 H 组成，与碳质薄膜能够良好结合，这为橡胶表面制备 DLC 薄膜提供了研究基础。

目前，在橡胶表面沉积类金刚石薄膜主要以闭合场非平衡磁控溅射技术为主，研究对象也多集中于丁基、丁腈橡胶。Aoki 等人<sup>[5]</sup>采用闭合场非平衡磁控溅射技术，以 CH<sub>4</sub> 为碳源，研究了在丁基橡胶表面沉积类金刚石的工艺参数，并研究了膜层的摩擦性能，结果表明，在丁基橡胶表面沉积类金刚石薄膜能够显著改善其摩擦磨损行为，其摩擦系数可降至 0.1~0.2。Bui 等人<sup>[6-7]</sup>采用闭合场非平衡磁控溅射技术，以 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 为碳源，在氢化丁腈橡胶表面沉积类金刚石薄膜，将其摩擦系数降至 0.18~0.2。

聚氨酯橡胶全名聚胺基甲酸酯，具有良好的强度、弹性、耐磨、耐油、耐热老化性能，常被用在动密封件中<sup>[8]</sup>。在动态工况下，密封件自身较大的摩擦系数会引发磨损，导致其承载寿命显著降低，严重磨损时引起油液泄露，甚至造成安全事故。因此，在聚氨酯橡胶上沉积 DLC 薄膜的研究，对于保证工程应用和安全具有重要意义。然而，关于聚氨酯表面制备 DLC 的研究还鲜有报道<sup>[9]</sup>。由于聚氨酯橡胶耐热性差，在受热后易发生变形，因此在薄膜的制备过程中应尽可能降低表面温度。

脉冲碳离子源通过阴极放电产生含碳等离子体，并轰击工件表面以沉积类金刚石薄膜。脉冲离子源的优势在于以脉冲电弧放电代替常规稳定电弧放电，使得在脉冲放电的时间间隔内，将靶材产生的热量由循环冷却水回路及时传递，有效控制靶材的温度。同时，产生的碳等离子体无需经过电磁线圈二次加速，大幅降低碳等离子体所携带的能量，从而控制沉积过程中工件温升在 5 °C 以内，实现橡胶试样的常温镀膜强化。同时在摩擦过程中，橡胶中作为塑化添加剂的季戊四醇硬酯酸酯（PETS）会由于摩擦温升，而逐渐熔化渗出至表面。溢出的塑化剂导致薄膜与基底之间的压力骤增，较高的压力将薄膜撑裂并脱落<sup>[10]</sup>。

针对这一现状，本文选择四氯乙烯作为溶塑剂对聚氨酯橡胶进行超声预处理，利用脉冲碳离子源，通过阴极放电等离子技术在预处理后的聚氨酯橡胶表面沉积 DLC 薄膜，并分析不同四氯乙烯超声处理的温度和时间对 DLC 薄膜摩擦性能的影响。

1 试验

1.1 材料

本实验采用的聚氨酯橡胶块（河北隆立密封技术有限公司）尺寸为 124 mm×90 mm×2 mm。将试样在无水乙醇中超声清洗去除表面污染物，再以四氯乙烯作为溶塑剂，对橡胶试样进行超声处理，处理方法以及其编号如表 1 所示。将超声处理后的试样加热到 100 °C 热定型处理 1 h，然后通过阴极放电等离子技术在试样表面制备 DLC 薄膜。

表 1 试样预处理参数  
Tab.1 Parameters of specimen pretreatment

| No. | Solvents               | Temperature/°C | Time/min |
|-----|------------------------|----------------|----------|
| 1   | Absolute ethyl alcohol | 25             | 15       |
| 2   | Tetrachloroethylene    | 25             | 15       |
| 3   | Tetrachloroethylene    | 25             | 30       |
| 4   | Tetrachloroethylene    | 50             | 15       |
| 5   | Tetrachloroethylene    | 50             | 30       |

1.2 制备方法

采用阴极放电等离子镀膜设备 UMP-E，在聚氨酯橡胶块表面制备 DLC 薄膜。脉冲碳离子源选择石墨（纯度 99.99%），镀膜时真空室压强为 0.006 Pa，镀膜时间为 2 h。

1.3 性能测试

采用扫描电子显微镜（INSPECT S50）对四氯乙烯清洗后橡胶试样及镀膜后试样的表面形貌进行观察，并利用英国泰勒 S25 粗糙度仪对所制备的薄膜粗糙度进行测试，通过拉曼光谱仪分析沉积的 DLC 薄膜组分。采用 MTT-1M 摩擦试验机对不同处理后镀膜试样进行摩擦磨损试验。测试试样直径为 50 mm，固定于摩擦磨损试验机旋转轴的端面上，以外径 40 mm、内径 20 mm 的环形铬钢作为摩擦副，对试样施加载

荷 50 N, 旋转摩擦速度为 200 r/min, 在干摩擦条件下进行试验。试验过程中, 设备能够测得并记录下摩擦扭矩, 再计算得出试样的摩擦系数。摩擦试验前后 (清除表面污染物) 的试样采用精密电子天平 JP-200 进行称量, 测量精度为 0.0001 g。采用光学显微镜对试样磨损后的磨痕形貌进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基体及薄膜形貌

图 1 为不同超声处理后聚氨酯基材表面形貌。图 1a 为试样 1 经过无水乙醇清洗的表面形貌, 发现基

材表面较为平整, 无附着污染物, 并且能观察到压制成型时的条纹痕迹。图 1b—e 为试样 2—5 经过四氯乙烯超声处理后的表面形貌, 发现随着超声时间和超声温度的增加, 试样表面原有的条纹深度增加, 可能是由于聚氨酯表面发生了物质溶解, 部分塑化剂被溶解去除。这一方面有效增大了基体与薄膜的接触面积, 另一方面在薄膜生长过程中起到锁扣效应, 有利于提高基体与薄膜的结合强度<sup>[11]</sup>。从试样 5 的表面形貌 (图 1e) 可以发现, 当超声处理温度达到 50 ℃、时间延长至 30 min 时, 试样 5 表面的条纹完全消失, 表明此时四氯乙烯超声处理对橡胶表面的溶解效果显著, 但较为平整的表面弱化了锁扣效应。

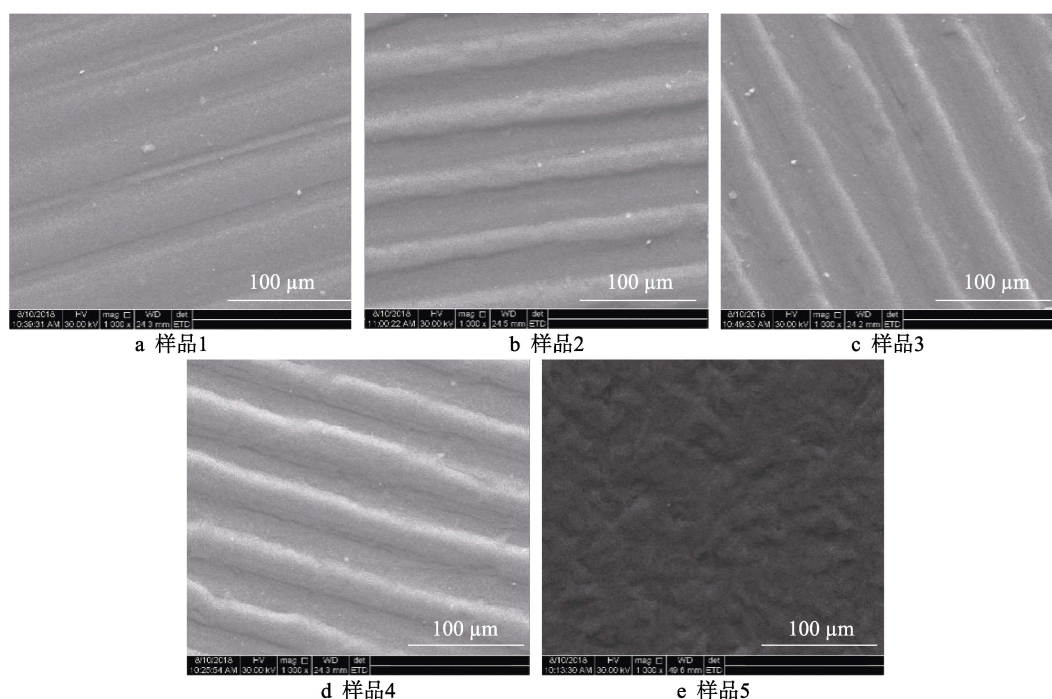


图 1 预处理后试样表面形貌

Fig.1 SEM of specimens after pretreatment: (a) specimen 1, (b) specimen 2, (c) specimen 3, (d) specimen 4, (e) specimen 5

图 2 为镀膜后聚氨酯橡胶表面形貌。从图 2a 中可以看出, 无水乙醇清洗后的试样 1 镀膜前后的表面形貌相近。图 2b—e 为四氯乙烯超声处理后进行镀膜的试样, 随着超声处理温度和时间增大, 镀膜试样表面的基体条纹逐渐被膜层覆盖, 并且表面的膜层平整致密, 未发现明显的孔洞、裂纹等缺陷。对镀膜试样的粗糙度进行了测试, 结果如表 2 所示。粗糙度结果显示, 四氯乙烯超声处理后, 镀膜试样粗糙度值存在逐渐降低的趋势, 并且与文献报道的 DLC 薄膜粗糙度值有所差异<sup>[12]</sup>, 这一现象可能与四氯乙烯处理后的基体表面形貌以及粗糙度 (1.20 μm) 有关。

### 2.2 拉曼光谱分析

拉曼光谱 (Raman) 是表征类金刚石薄膜的有效手段。类金刚石中石墨相 ( $sp^2$ ) 的散射强度是金刚石相 ( $sp^3$ ) 散射强度的 50~250 倍, 故测得的 DLC

拉曼光谱主要与其中石墨相 ( $sp^2$ ) 的构型及分布密切相关, 具体表现为 D 峰 (位于  $1340\text{ cm}^{-1}$  处) 和 G 峰 (位于  $1580\text{ cm}^{-1}$  处)。图 3 为各个试样表面 DLC 薄膜的拉曼光谱测试结果。从图 3 中可以看出, 各试样的拉曼光谱在低波数段均存在一个凸起程度不同的肩部, 证明光谱曲线都由 D 峰和 G 峰构成。其中试样 1 的拉曼光谱中的峰最不明显, 只表现为一个宽峰。通常, 宽峰的出现表明存在着大量无序混杂的碳键, 这表明直接在橡胶表面制备的 DLC 薄膜呈现非晶态结构<sup>[13]</sup>。试样 2 和试样 3 的拉曼光谱中  $1580\text{ cm}^{-1}$  附近存在一个明显的单峰, 即 G 峰, 而在  $1340\text{ cm}^{-1}$  处没有出现明显的峰, 形成这种拉曼光谱峰的原因是薄膜中金刚石相 ( $sp^3$ ) 含量较高, 薄膜主要由网状分布的  $sp^3$  碳键组成, 导致  $sp^2$  信号减弱, 从而出现

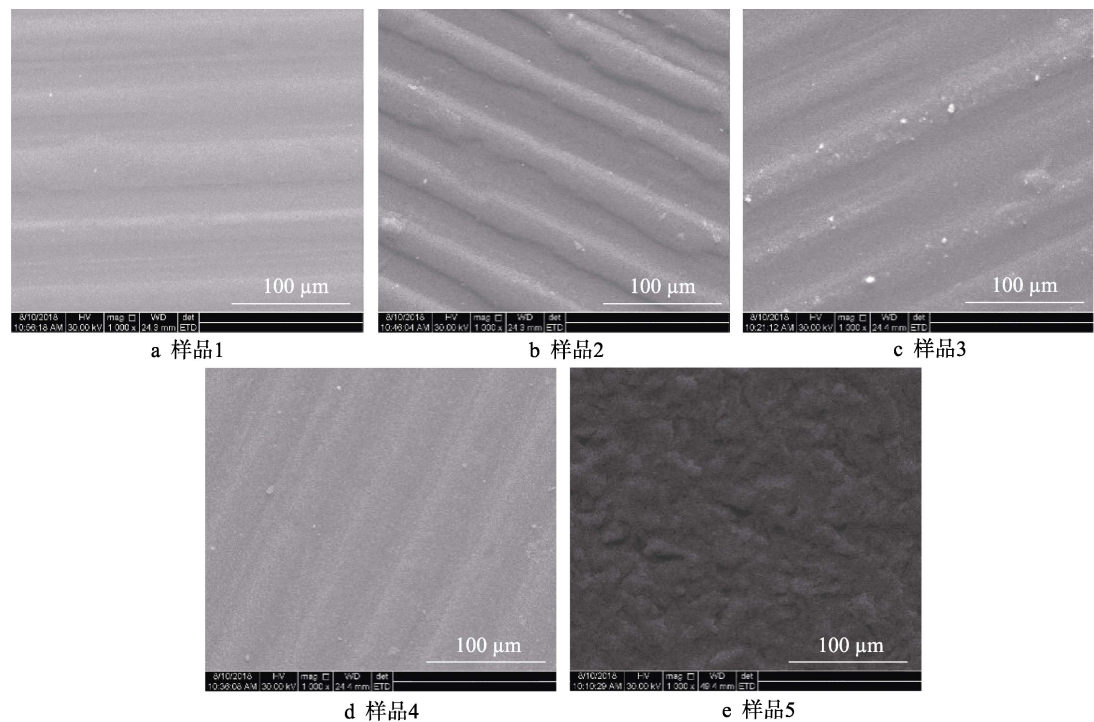


图 2 镀膜后试样表面形貌  
Fig.2 SEM of films deposited on substrates: (a) specimen 1, (b) specimen 2, (c) specimen 3, (d) specimen 4, (e) specimen 5

表 2 镀膜试样表面粗糙度  
Tab.2 Surface roughness of deposited films

| Specimen         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------------|------|------|------|------|------|
| $Ra/\mu\text{m}$ | 0.85 | 1.21 | 0.94 | 0.82 | 0.73 |

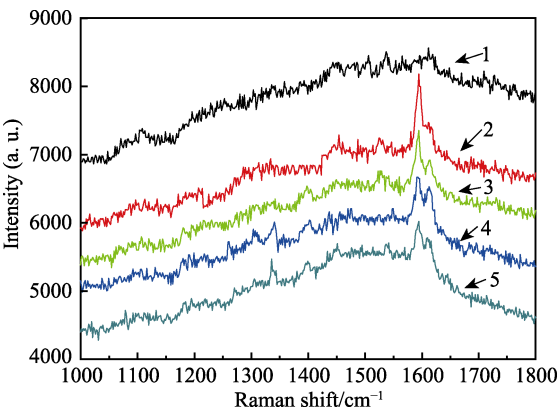


图 3 薄膜的拉曼光谱  
Fig.3 Raman spectroscopy of films

单一强峰<sup>[14]</sup>。对比发现试样 4 和试样 5 的光谱峰型更加清晰,在  $1340\text{ cm}^{-1}$  和  $1580\text{ cm}^{-1}$  处出现了明显的双峰结构,分别对应 DLC 薄膜的 D 峰和 G 峰,证明利用真空镀膜技术,在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  四氯乙烯超声处理后的聚氨酯橡胶表面成功制备了 DLC 薄膜<sup>[15]</sup>。对比发现,随着超声处理温度 and 时间的增加,试样的 G 峰强度逐渐减小,而 D 峰强度逐渐增大,表明 DLC 薄膜中石墨相 ( $\text{sp}^2$ ) 含量逐渐增加,这有助于增强 DLC 薄膜的摩擦磨损性能<sup>[16]</sup>。

2.3 摩擦磨损性能

利用摩擦磨损试验机对 5 组镀膜试样进行干摩擦测试,同时将未镀膜的聚氨酯橡胶作为对比样进行测试。图 4 为试样的摩擦系数随时间的变化曲线。从图 4 中可以发现,未经过镀膜处理的聚氨酯橡胶样在所有测试样中具有最大的摩擦系数,约为 0.5,同时其摩擦曲线在 600 s 后出现下降,随后保持稳定。这一现象是由于摩擦热引起聚氨酯表层的塑化剂 PETS 熔化渗出,对摩擦界面起到了润滑作用,从而使其摩擦系数降低。图 4 中镀膜试样的稳定摩擦系数均小于聚氨酯橡胶,说明 DLC 薄膜能够有效改善聚氨酯的耐磨性。从图 4 中还可以发现,试样 1 的摩擦系数曲线存在剧烈波动,在摩擦初期,试样的摩擦系数保持稳定,且摩擦系数与其他试样相近。经过 500 s 的摩擦后,其摩擦系数出现了突变,远超其他试样。与之相比,试样镀膜前四氯乙烯超声处理参数不同,在同样条件下的摩擦系数变化波动也不同。试样 2 和 3 的摩擦系数随摩擦时间的延长出现增大的趋势,这是由于 DLC 薄膜在摩擦过程中不断脱落造成的。与试样 1 相比,试样 2 和试样 3 的摩擦系数出现变化的时间不断延长,说明薄膜的抗摩擦磨损剥落能力增强。试样 4 和试样 5 的摩擦系数未出现明显的增大,表明在整个干摩擦过程中,表面 DLC 薄膜在摩擦剪切作用下未出现大面积剥离。对比所有试样的摩擦系数,发现随着超声处理温度 and 时间的增大,试样的摩擦系数逐渐降低随后略有增大,其中试样 4 的摩擦系数最低,小于 0.3。这一变化趋势与 DLC 薄膜发生的团簇



石墨相转变过程以及薄膜表面粗糙度的逐渐降低有关<sup>[17-18]</sup>。与试样4相比,试样5的摩擦系数出现波动且略有上升,这是由于基体表面条纹被全部溶解,导致薄膜与基体接触面积减小,在摩擦剪切作用下,薄膜出现少量脱落,从而引起摩擦系数变化。

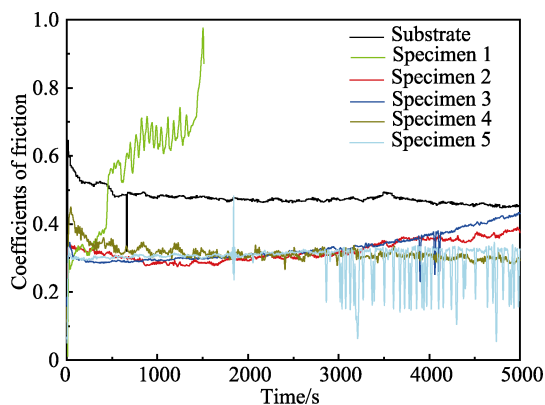


图4 试样的摩擦系数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of specimens

图5为经过干摩擦试验后各镀膜试样的磨损量。从图5中可以发现,直接镀膜的试样1具有最大的磨损量,这是由于薄膜被大块剥离,造成最严重的摩擦损失。采用四氯乙烯超声处理后,试样2—5的磨损量明显减小,对比试样1,其降低幅度超过50%。随着四氯乙烯超声处理温度和时间的增大,试样的磨损量呈先降低后增大的趋势,其中试样4的磨损量最小,与摩擦系数测试结果相符。

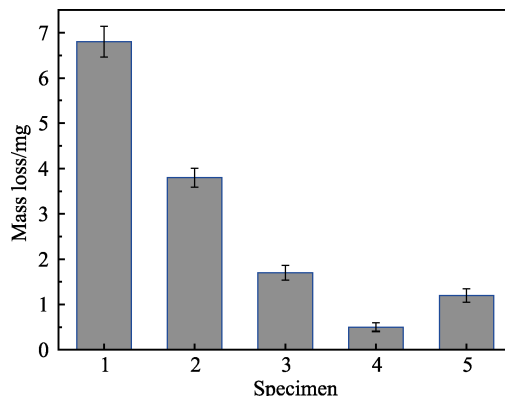


图5 干摩擦实验后试样的磨损量

Fig.5 Mass loss of specimens after dry friction

磨痕形貌能够直观反映材料的磨损性能,常用来分析材料的磨损机理。图6为试样在干摩擦实验后的表面形貌。从图6中可以明显发现,随着四氯乙烯处理强度的增强,DLC薄膜在干摩擦实验后的完整度越来越好。对于未经四氯乙烯处理直接镀膜的试样1(图6a),沉积的DLC薄膜严重脱落,表面十分粗糙,存在明显的切削痕迹,表现出磨粒磨损机制,说明DLC薄膜在剪切作用下出现剥离脱落。从图6b—e中发现,经过四氯乙烯处理后,试样的磨痕表面保持相对平整,只观察到少量犁沟。对比试样2、试样3、试样4和试样5的磨痕形貌,发现随着超声处理温度和时间的增加,DLC薄膜磨痕逐渐平整。结果证明,利用四氯乙烯对聚氨酯进行超声预处理再镀膜能够增强膜基结合力,制备的DLC薄膜能够增强聚氨酯橡胶的摩擦磨损性能。

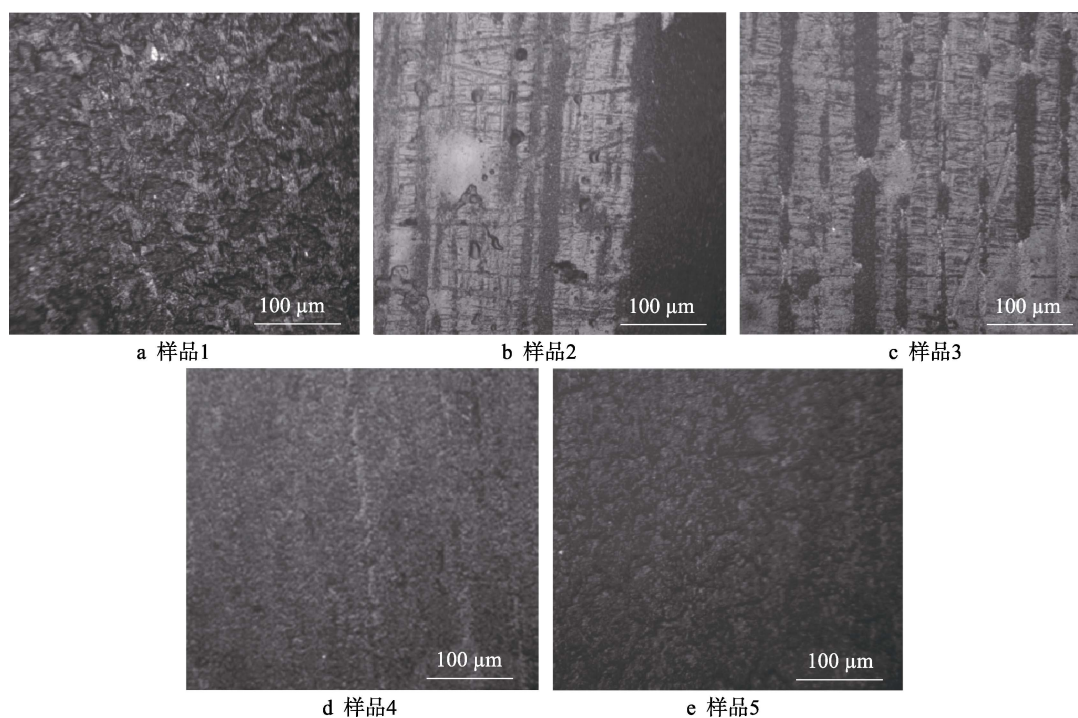


图6 干摩擦实验后试样的磨痕形貌

Fig.6 Wear morphologies of specimens after dry friction: (a) specimen 1, (b) specimen 2, (c) specimen 3, (d) specimen 4, (e) specimen 5

通过试样的摩擦系数和磨痕形貌, 分析试样的摩擦机理, 如图 7 所示。对于直接在聚氨酯表面镀膜的试样 (图 7a), 磨损形式主要表现为磨粒磨损。在摩擦力的微切削作用下, 结合力差的部位先形成裂纹。摩擦热使塑化剂 PETS 熔化渗出, 导致薄膜与基体界面处的压力骤增。在摩擦力的剪切作用下, 薄膜表面裂纹迅速扩展并相互连接, 形成大块破裂, 并脱落形成硬质磨屑, 加速了薄膜的破损, 促使试样的摩擦性能急速恶化。

对于四氯乙烯超声处理后镀膜的试样, 如图 7b 所示, DLC 薄膜与基体的结合力较强, 且 PETS 被溶解去除, 使得薄膜在剪切应力作用下不易被剥离。DLC 薄膜的表面粗糙度逐渐减小, 减弱了滑动表面间的机械咬合作用, 摩擦系数和磨损率有所降低。同时, 在与环形铬钢对磨的过程中, DLC 薄膜中的石墨相产生一层润滑性能优异的转移膜, 显著降低了薄膜的摩擦系数, 增强了膜层的耐磨性能。

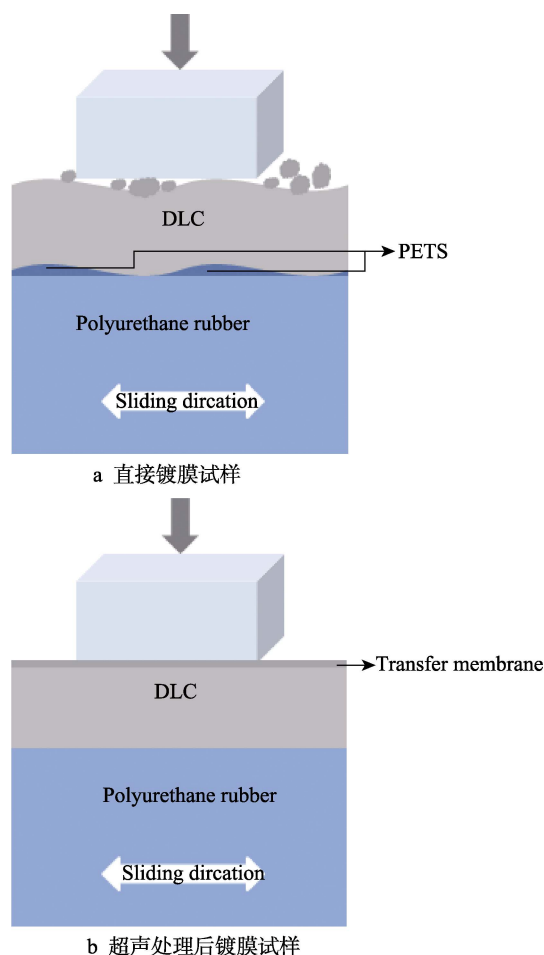


图 7 试样摩擦机理

Fig.7 Friction mechanism of specimens: (1) coated specimen; (2) coated specimen by ultrasonic treatment

### 3 结论

1) 利用四氯乙烯超声处理聚氨酯, 基体表面原

有的条纹深度随着清洗时间和温度的增加逐渐增大, 增大了试样与薄膜的接触面积; 镀膜后聚氨酯表面趋于平整, 其中经过 50 °C 的四氯乙烯超声处理 15 min 后, 镀膜试样的表面薄膜最平整。

2) 对试样表面膜层进行拉曼光谱测试, 结果表明, 所制备的薄膜为 DLC 薄膜, 并且随着四氯乙烯超声处理温度和时间的增加, 薄膜的表面粗糙度有所降低。

3) 干摩擦实验中, 镀膜试样的摩擦系数明显低于未镀膜的聚氨酯橡胶, 对比发现随着超声处理温度升高和时间的增加, 镀膜试样的摩擦系数和磨损量呈现先减小后增大的趋势, 并且在 50 °C 的四氯乙烯超声处理 15 min 后, 镀膜试样的摩擦系数最小, 稳定在 0.3 以下, 且磨损量最小。因此在聚氨酯表面镀制耐磨性能最优的 DLC 薄膜, 合适的四氯乙烯超声处理温度和超声时间分别为 50 °C、15 min。

### 参考文献:

- [1] LUBWAMA M, CORCORAN B, SAYERS K. DLC films deposited on rubber substrates: A review[J]. Surface engineering, 2014, 31(1): 1-10.
- [2] ZHAO Fei, LI Hong-yuan, JI Li, et al. Ti-DLC films with superior friction performance[J]. Diamond and related materials, 2010, 19(4): 342-349.
- [3] XIONG Li-wei, PENG Huan-yang, ZHANG Ying, et al. Tribological properties and application of diamond-like carbon film[J]. Surface technology, 2016, 89: 356.
- [4] MKAWA N, MINAMISAWA S, TAKIKAWA H, et al. Physical-chemical hybrid deposition of DLC film on rubber by T-shape filtered-arc-deposition[J]. Vacuum, 2004, 73(3/4): 611-617.
- [5] AOKI Y, OHTAKE N. Tribology properties of segment-structured diamond-like carbon films[J]. Tribology international, 2004, 37(11): 941-947.
- [6] BUI X L, PEI Y L, DEHOSSON J T M. Magnetron reactively sputtered Ti-DLC coatings on HNBR rubber: The influence of substrate bias[J]. Surface and coating technology, 2008, 202(20): 4934-4944.
- [7] BUI X L, PEI Y L, MULDER E D G, et al. Adhesion improvement of hydrogenated diamond-like carbon thin films by pre-deposition plasma treatment of rubber substrate[J]. Surface and coating technology, 2009, 203(14): 1964-1970.
- [8] 刘凉冰. 影响聚氨酯弹性体耐磨性的因素[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(2): 20-27.

LIU Liang-bing. Factors affecting abrasion resistance of polyurethane elastomer[J]. Chemical propellants and polymeric materials, 2016, 14(2): 20-27.

(下转第 229 页)

- arc spraying in seawater[J]. Surface & interface analysis, 2015, 47(9): 911-918.
- [43] LIU L M, WANG Z, SONG G. Study on corrosion resistance properties of hydrothermal sealed arc sprayed aluminium coating[J]. Surface engineering, 2010, 26(6): 399-406.
- [44] ZHU Q J, WANG K, WANG X H, et al. Electrochemical impedance spectroscopy analysis of cold sprayed and arc sprayed aluminium coatings serviced in marine environment[J]. Surface engineering, 2012, 28(4): 300-305.
- [45] LEE H S, SINGH J K, PARK J H. Pore blocking characteristics of corrosion products formed on aluminum coating produced by arc thermal metal spray process in 3.5wt.% NaCl solution[J]. Construction and building materials, 2016, 113: 905-916.
- [46] SONG D, MA A, SUN W, et al. Improved corrosion resistance in simulated concrete pore solution of surface nanocrystallized rebar fabricated by wire-brushing[J]. Corrosion science, 2014, 82: 437-441.
- [47] 周羊羊, 马国政, 王海斗, 等. 热喷涂层孔隙及对涂层性能影响的研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 90-96.
- ZHOU Yang-yang, MA Guo-zheng, WANG Hai-dou, et al. Research status of pores in thermally sprayed coatings and their effects on coating performance[J]. Materis review, 2016, 30(17): 90-96.
- [48] 宋仁国, 何望昭, 黄卫东, 等. 激光表面重熔对热喷涂铝涂层微观结构及其阻氢性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 179-184.
- SONG Ren-guo, HE Wang-zhao, HUANG Wei-dong, et al. Effect of laser surface remelting on microstructure and hydrogen resistance of thermal sprayed aluminum coatings[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2000, 10(2): 179-184.
- [49] 李相波, 许立坤, 邱善广, 等. 碳钢低压冷喷涂铝涂层的海水耐蚀性[J]. 电化学, 2013, 19(5): 425-429.
- LI Xiang-bo, XU Li-kun, QIU Shan-guang, et al. Corrosion resistance of low pressure cold sprayed Al coating on Q235 steel in seawater [J]. Journal of electrochemistry, 2013, 19(5): 425-429.
- [50] 郭永彦. 建筑用钢表面电弧喷涂铝涂层的耐蚀性[J]. 铸造技术, 2013, 34(9): 1160-1162.
- GUO Yong-yan. Corrosion resistance of arc spray Al coating on construction steel surface[J]. Foundry technology, 2013, 34(9): 1160-1162.
- [51] LI Y, LI X, HOU B. Study of corrosion behavior of sprayed zinc-aluminum (ZAZA) coatings in a marine environment[J]. Science & engineering of composite materials, 2012, 19(1): 75-80.

(上接第 195 页)

- [9] 赵菲, 孙学红, 郝立新, 等. 聚氨酯橡胶的力学性能影响因素研究[J]. 聚氨酯工业, 2001, 16(1): 9-12.
- ZHAO Fei, SUN Xue-hong, HAO Li-xing, et al. Study on the factors influencing mechanical properties of polyurethane elastomers[J]. Polyurethane industry, 2001, 16(1): 9-12.
- [10] 曹琪, 刘朋生. 季戊四醇型 HTPB-PU 弹性体的研究[J]. 功能高分子学报, 2004, 17(2): 256-260.
- CAO Qi, LIU Peng-sheng. Studies of HTPB-PU elastomers with extender pentaerythritol[J]. Journal of functional polymers, 2004, 17(2): 256-260.
- [11] LI Zhen-dong, ZHAN Hua, WANG Yi-qi, et al. Effects of plasma etching pretreatment on adhesion of carbon-based film[J]. Surface technology, 2017(1): 564.
- [12] YOSHIDA S, OKOSHI M, INOUE N. Femtosecond-pulsed laser deposition of diamond-like carbon films onto silicone rubber[J]. Journal of physics: Conference series, 2007, 59: 368-371.
- [13] 孙建华, 刘金龙, 王庆良, 等. 316L 不锈钢表面沉积类金刚石膜的拉曼光谱分析及润湿性研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 55-61.
- SUN Jian-hua, LIU Jin-long, WANG Qing-liang, et al. Raman spectra and wettability analysis of DLC films deposited on 316L stainless steel[J]. Surface technology, 2011, 40(2): 55-61.
- [14] TAKABAYASHI S, OKAMOTO K, TAKAKUWA Y, et al. Dependence of the features of diamondlike carbon films on their synthesis methods, as analyzed by Raman spectroscopy[J]. Surface and coatings technology, 2017, 330: 26-33.
- [15] 尹云飞, 车晓舟, 李国锋, 等. FCVA 制备超薄类金刚石薄膜的拉曼光谱分析[J]. 材料导报, 2010, 24(2): 75-79.
- YIN Yun-fei, CHE Xiao-zhou, LI Guo-feng, et al. Raman spectroscopy of ultra-thin DLC film deposited by FCVA[J]. Materials review, 2010, 24(2): 75-79.
- [16] 吴琮宇. 丁腈橡胶闭合场非平衡磁控溅射制备 DLC 膜及摩擦性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- WU Qiong-yu. Tribology behavior of DLC films coated nitrile rubber by closed-field unbalanced magnetron sputtering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [17] LUBWAMA M, CORCORAN B, RAJANI K V, et al. Raman analysis of DLC and Si-DLC films deposited on nitrile rubber[J]. Surface & coatings technology, 2013, 232(10): 521-527.
- [18] 祝闻, 聂朝胤, 冉春华, 等. DLC, TiN 薄膜的环境摩擦学特性研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014(1): 84-90.
- ZHU Wen, NIE Chao-yin, RAN Chun-hua, et al. Study on tribological properties of DLC and TiN films under different tribological conditions[J]. Journal of Southwest University (Natural science edition), 2014(1): 84-90.