

DLC润滑薄膜在航空柱塞泵轴衬上的改进与应用

Improvement and Application of DLC Film on the Bushing of Aviation Plunger Pump

■ 强巍 杨小宁 宋娜 / 中国航发西安动力控制科技有限公司

磨损是液压泵作为飞机液压系统的核心部件所面临的主要挑战之一，采用类金刚石（DLC）等薄膜技术可以有效地应对该挑战。

液 压泵作为飞机液压系统的核心部件，承担着为整个飞机液压系统提供动力的任务，要求具有极高的可靠度和较长的无故障工作周期^[1]。磨损是影响机械零部件失效（磨损、腐蚀、断裂）的主要原因之一^[2]。据相关统计，60%~80%的零件失效与材料的磨损有关，在我国，每年因摩擦磨损造成的损失高达上千亿元，产生巨大的经济损失^[3]。在摩擦学领域，利用薄膜（涂层）技术改变材料表面的物理、化学性质从而改善摩擦副之间的界面行为是提高摩擦学性能的有效途径^[4]。DLC薄膜是一种集高硬度、低摩擦系数、耐磨损、耐腐蚀性和化学惰性等性能于一体的表面防护材料，目前在耐磨防腐涂层方面已经引起了研究者的广泛关注^[5-6]。

研究背景与思路

一型航空燃油柱塞泵轴衬在应用DLC薄膜后，进行厂内磨合试验时仍存在卡滞、磨损等问题，具体表现为发生了响应慢，且有短暂“抱死”等现象。经检验，发现轴衬接触部

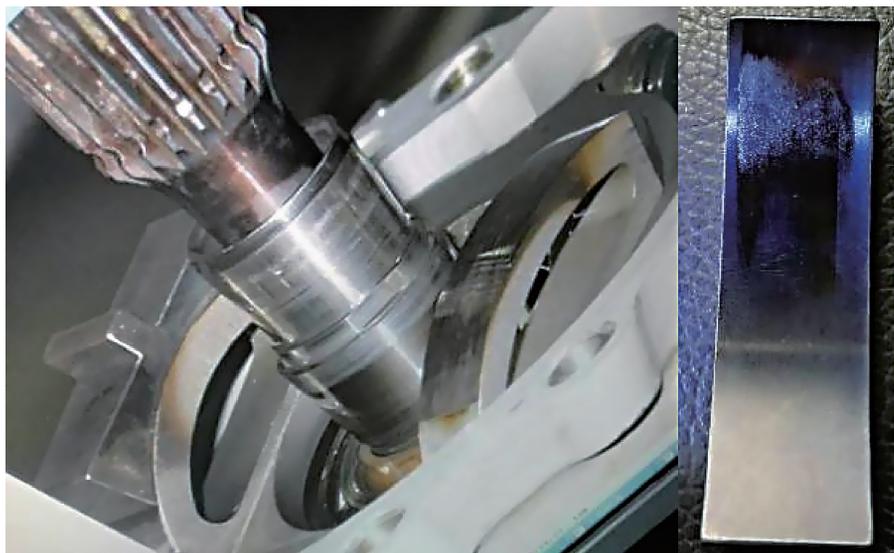


图1 柱塞泵试验后分解

位磨损严重、表面发黑、拉伤，轴衬的DLC薄膜磨损严重、偏磨严重（见图1）。上述现象可能会导致飞机机动性差，无法按照飞行员指令进行工作等情况。

基于已被国内外大多研究证实的掺杂金属元素增强DLC膜层性能的成果^[7-8]，本文从DLC薄膜的制备工艺方法及添加元素两方面入手，研制适合该型航空柱塞泵轴衬的混合润滑工况的新型DLC薄膜，开展

了两种薄膜的摩擦磨损试验，最后选取性能较佳的薄膜，开展产品磨合台架试验。

改进试验

DLC薄膜的改进制备

根据轴衬材料与摩擦接触状态，采用多靶中频磁控溅射（MF-PVD），制备含氢DLC（1）薄膜，同时改进薄膜的制备工艺及其参数，制备掺杂微量钛（Ti）元素的DLC（2）薄

膜。在制备时，溅射气体为质量分数99.99%的氩气(Ar)和甲烷(CH₄)气体，溅射靶材均采用高纯钛靶，质量分数为99.99%。薄膜制备前，将轴衬依次用石油醚和无水乙醇超声清洗20 min，干燥后置于溅射腔室的样品台上。腔室背底压力抽至 3×10^{-3} Pa以下，温度维持在250℃。钛掺杂可有效降低DLC薄膜的内应力、提高薄膜的硬度、服役稳定性和耐久性^[9]。因此，DLC(2)薄膜沉积前先在轴承工作表面沉积一层厚度为200~300 nm的钛过渡层，在钛过渡层沉积完成后，开始通入甲烷气体，沉积DLC薄膜。通过靶材电流大小和通入反应气体流量的调控，分别实现DLC(1)、DLC(2)薄膜的制备。当靶材电流为3.5A，甲烷气体流量为40标准立方厘米每分钟(sccm)时，所制备薄膜为只含氢的DLC(1)薄膜；当靶材电流为6A，甲烷气体流量为35 sccm时，所制备薄膜为掺杂有钛元素的DLC(2)薄膜，所制备薄膜的膜层厚度均为2.5~2.8 μm。

性能对比试验

首先，在高频线性振动(SRV)球盘微动摩擦试验机上开展两种薄膜的性能对比试验。试验条件：载荷8N、振幅8mm、频率6Hz、时间3h。只在开始前试样涂层表面涂一层RP-3润滑介质，通过球盘微动摩擦磨损试验，检测摩擦系数、试样磨损率、磨痕宽度、磨痕深度等数据，对比评价改进前后DLC(2)薄膜的摩擦磨损性能。

其次，基于产品实际工况和轴衬的接触形式，在MRH-3高速环块磨损试验机上，开展无膜层及两种DLC的摩擦磨损试验。试验条件：

转速3000 r/min、载荷50 N、线速度0.8 m/s、接触应力76 MPa、摩擦总距离1384.74 m。为了接近产品的实际润滑状态，试验开始前在轴衬试样表面涂一层RP-3润滑介质，过程中不增加任何润滑措施，通过检测摩擦系数、试样磨损率、磨痕宽度、磨痕深度等数据进行对比研究。

结果与分析

两种DLC薄膜的性能对比分析

球盘微动摩擦磨损试验的具体测试结果如图2、图3及表1所示。从摩擦系数图2可以看出，DLC(1)薄膜的初始摩擦系数最高接近0.2，经过初始磨合后趋于稳定，摩擦系数平均值约0.15；DLC(2)薄膜的

初始摩擦系数最高接近0.16，但很快趋于稳定，均值约0.08。DLC(1)的摩擦系数大于DLC(2)，证明经过改进的DLC(2)其减摩效果、自润滑性能均优于DLC(1)。

表1给出了两种DLC薄膜摩擦磨损性能试验的磨损率、磨痕宽度、磨痕深度的具体检测数据，DLC(2)试样的磨损率约是DLC(1)的11.6%，两者试样的磨痕宽度基本相同，DLC(2)试样的磨痕深度约是DLC(1)的17.2%。图3是三维轮廓仪检测的两种薄膜试验后的磨损形貌，可以明显看出，DLC(1)试样的磨损比较严重。试验结果证明：采取元素掺杂的方法可以改变DLC薄膜的结构，减少其内部缺陷，降

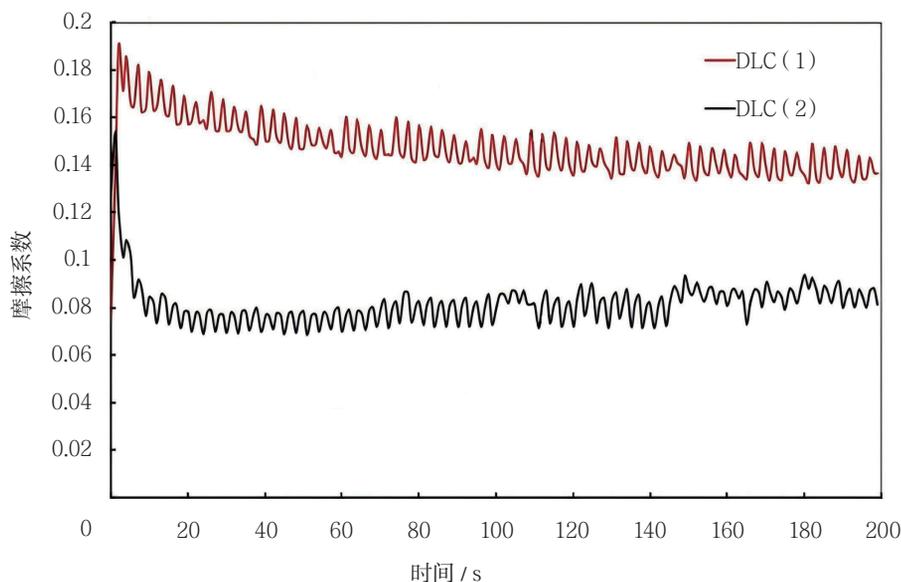


图2 两种DLC薄膜试验的摩擦系数

表1 两种DLC薄膜试验的摩擦磨损性能数据

项目	DLC(1)	DLC(2)
磨损率/(mm ³ /(N·m))	4.61×10^{-8}	5.33×10^{-9}
磨损宽度/μm	150	160
磨损深度/μm	0.58	0.10

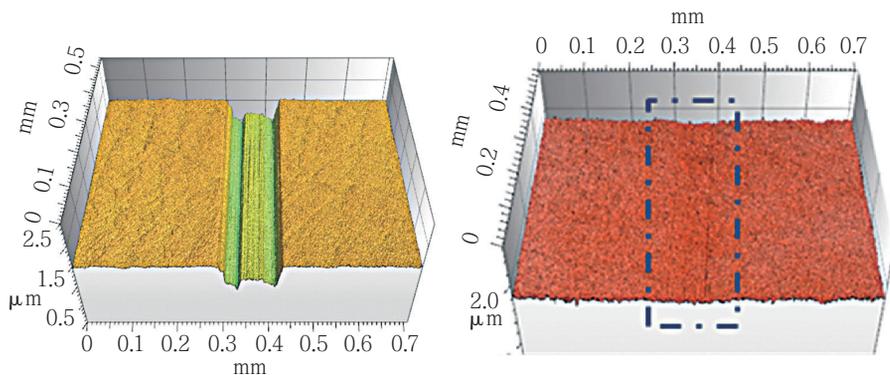


图3 试验后两种试样的磨损形貌

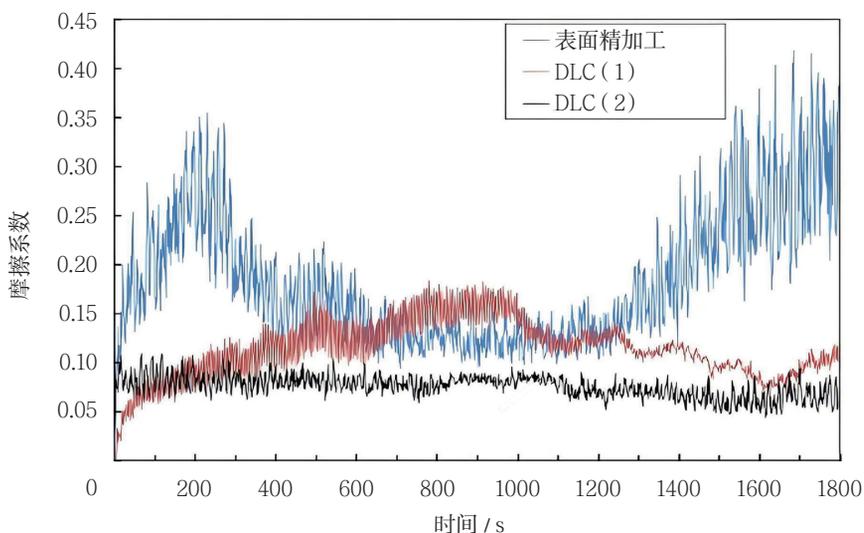


图4 模拟产品工况试验的摩擦系数

表2 模拟产品工况的试验结果

项目	表面精加工	DLC (1)	DLC (2)
磨损率 / (mm ³ / (N · m))	8.2 × 10 ⁻⁷	1.01 × 10 ⁻⁷	9.24 × 10 ⁻⁹
磨损宽度 / μm	680	650	550
磨损深度 / μm	2.3	1.9	0.25

低内应力, 提高膜层结合力, 从而有助于改善DLC薄膜的摩擦学性能。综上数据表明, 改进了制备工艺及掺杂金属元素钛的DLC (2) 薄膜, 在相同工况下表现出了良好的自润滑性与耐磨性。

基于产品工况的试验结果与分析

在高速环块摩擦磨损试验机上进行基于产品工况的对比试验, 具体结果如图4、表2及图5所示。未经过表面处理试样的摩擦系数整体波动较大, 峰值超过0.35, 均值超过0.2; DLC (1) 薄膜试样的摩擦系数呈逐渐变大的趋势, 峰值约0.185, 均值约0.12; DLC (2) 薄膜试样的摩擦系数较平稳, 峰值约0.12, 均值约0.085。摩擦系数曲线图4表明: 无薄膜润滑试样的摩擦系数值较大, 当有润滑薄膜存在时, 摩擦副的摩擦系数均有不同程度的降低; DLC (2) 试样的摩擦系数平均值低于DLC (1) 试样, 且其数值波动幅度较小, 经历磨合初期后, 趋于稳定, 由于随着摩擦升温 and 接触应力的增大, 加速DLC薄膜表面的石墨化进程以及石墨化程度, 形成了润滑转移膜, 对摩擦副起到了良好的润滑作用。相反, DLC (1) 试样的摩擦系数波动幅度较大, 稳定一段时间

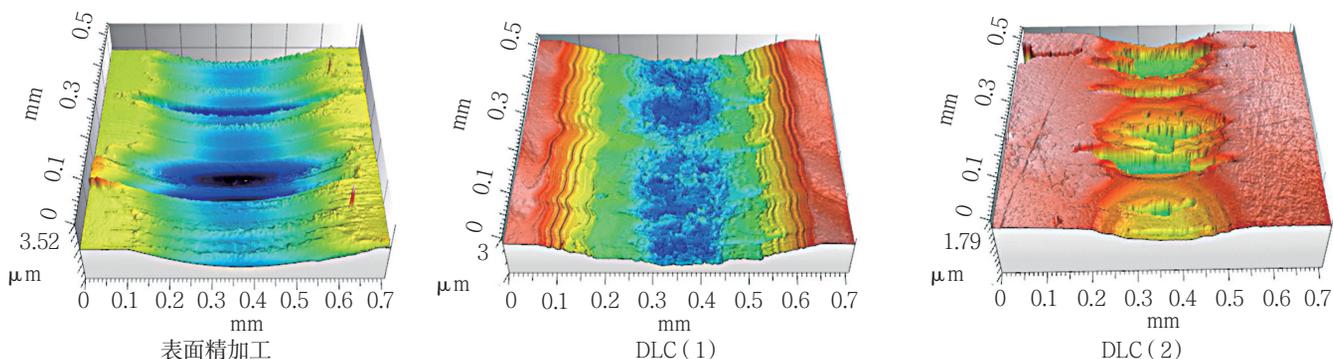


图5 模拟产品工况试验后试样的三维形貌



图6 磨合试验前后轴衬实物

后,在1400 s后摩擦系数呈上升趋势,说明在同等服役条件下,DLC(2)薄膜的自润滑性、耐磨性及可靠性均优于DLC(1)薄膜。

表2给出了模拟产品工况下3种试样试验后的磨损率、磨痕宽度、磨痕深度的具体检测结果。数据显示,无润滑薄膜试样的摩擦磨损最严重,其次是DLC(1)试样,DLC(2)试样磨损最小;与无薄膜润滑试样相比,DLC(1)试样磨损率降低了87.7%,磨痕宽度基本相同,磨痕深度降低了17.4%;与DLC(1)相比,DLC(2)试样磨损率降低了90.9%,磨痕宽度降低了15.4%,磨痕深度降低了86.8%。

三维轮廓仪显示了试验后试样的磨痕形貌,如图5所示,无薄膜润滑试样磨损最严重,DLC(1)试样次之,DLC(2)试样磨损最轻。综上所述数据表明,在模拟产品工况条件下,DLC的存在改善了摩擦副的摩擦磨损状况,改进后的DLC(2)薄膜的摩擦磨损性能明显优于DLC(1)薄膜。

根据航空燃油柱塞泵的磨合试验要求,将经过DLC(2)薄膜处理的轴衬装配于产品进行磨合试验,试验后将柱塞泵进行分解,试验前后轴衬零件实物如图6所示。从图中可以看出,在高压工况下,轴衬工作面未发生磨损,表面的DLC薄膜存在轻微磨痕,经过分析,DLC薄

膜表面的自润滑材料转移到与轴衬零件对磨零件(斜盘)的接触表面,隔绝了该摩擦副两个零件基体材料的直接接触,提升了接触面的润滑性能,摩擦系数降低;同时,改进型薄膜的硬度及承载能力有了大幅提升,因此在磨合试验中未发生严重磨损。

结束语

两种DLC薄膜的摩擦磨损试验研究证明,改善薄膜的制备工艺、增加自润滑元素以及膜层的表面硬度,可以极大地提升DLC薄膜的摩擦磨损性能。在航空燃油介质下的试验中,改进型DLC摩擦副试样的摩擦系数、磨损率、磨痕宽度、磨痕深度均不同程度减小,摩擦系数降低了33%,磨损率降低了90.9%、磨痕宽度降低了15.4%、磨痕深度降低了86.8%。最后,产品磨合试验表明,改进型DLC薄膜的膜层硬度、膜层承载能力、基体结合力均有了大幅提升,且润滑性能良好,能够满足该航空燃油柱塞泵的轴衬零件高耐磨、高可靠性等使用要求。

(强巍,中国航发西安动力控制科技有限公司,高级工程师,主要从事航空发动机燃油控制系统的材料设计与新技术应用研究)

参考文献

[1] 雍青松,王海斗,徐滨士,等.类金刚

石薄膜摩擦机理及其摩擦学性能影响因素的研究现状[J].机械工程学报,2016,52.

- [2] 马纪明,李齐林,任春宇,等.轴向柱塞泵/滑靴副润滑磨损的影响因素分析[J].北京航空航天大学学报,2015,41(3):405-410.
- [3] 杨艳峰,郑坚,狄长春.基于微观分析的火炮挡弹装置磨损失效机理研究[J].摩擦学学报,2014,34(3):304-310.
- [4] 邵天敏,耿哲.图形化固体薄膜技术及其摩擦学性能的研究进展[J].中国表面工程,2015,28(2):1-26.
- [5] BUENO A H S, SOLIS J, ZHAO H, et al. Tribocorrosion evaluation of hydrogenated and silicon DLC coatings on carbon steel for use in valves, pistons and pumps in oil and gas industry[J]. Wear, 2018, 394: 60-70.
- [6] 张书姣,吴艳霞,朱丽楠,等.不同掺杂对类金刚石薄膜的影响[J].表面技术,2018,47(9):193-198.
- [7] WANG J, MA J, HUANG W, et al. The investigation of the structures and tribological properties of F-DLC coatings deposited on Ti6Al4V alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 316: 22-29.
- [8] 刘健,曹磊,万勇,等.硼掺杂DLC薄膜在海水环境中的腐蚀磨损性能[J].表面技术,2019,48(8):247-255.
- [9] JO Y J, ZHANG T F, SON M J, et al. Synthesis and electrochemical properties of Ti-doped DLC films by a hybrid PVD/PECVD process [J]. Applied Surface Science, 2018, 433: 1184-1191.