

# 星弧DLC-T涂层

## ——汽车“心脏”耐磨与密封问题的钥匙

□ 星弧涂层新材料科技（苏州）股份有限公司 / 卢小伟

DLC薄膜由于具有高硬度和高弹性模量、低摩擦因子和耐磨损等特性，很适合作为发动机滑动摩擦副表面减摩耐磨涂层。

提高燃油效率是实现汽车节能减排最有效的途径之一。而提高燃油效率则主要通过增大油气喷射压力，提高发动机输出功率来实现。油气喷射压力的增大则必然会导致发动机零部件承受的摩擦力越来越大，磨损越来越严重，而传统的材料和表面处理手段已经很难满足发动机正常工作需求。DLC薄膜由于具有高硬度和高弹性模量、低摩擦因子和耐磨损等特性，很适合作为发动机滑动摩擦副表面减摩耐磨涂层。欧美等发达国家及地区已经将DLC薄膜材料作为21世纪的战略材料之一。

### 1. DLC薄膜概述

DLC (Diamond like carbon) 薄膜又叫类金刚石薄膜，它是一种新型的硬质润滑功能薄膜材料，具有SP2和SP3电子轨道杂化的碳原子空间网络结构，通常为非晶态或非晶-纳米晶复合结构。DLC薄膜具有较高的硬度、优异的减摩耐磨性能、高热导率、低介电常数、宽带隙、良好的光学透过性以及优异的

化学惰性和生物兼容性等，在航空航天、机械、电子、光学、装饰外观保护、生物医学等领域有着广阔的应用前景。

DLC薄膜的制备方法有多种，目前常用的主要有物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）以及液相等。气相沉积技术已相对成熟，而液相电化学沉积作为一种新的方法，其沉积工艺还不成熟，还未能解决薄膜质量差、膜基结合弱、石墨含量高等瓶颈问题。

DLC薄膜虽然具有众多优良的性能，但其未能在世界范围内得到广泛应用，主要技术瓶颈体现在以下几方面：首先，DLC薄膜在沉积过程中产生较高的内应力，使其与基体结合力差，膜层易起皮、脱落；其次，DLC薄膜的热稳定性差，当温度高于200℃发生石墨化转变，高于450℃则发生明显的氧化；再次，DLC薄膜材料存在脆性强、韧性低及摩擦学行为具强环境敏感性等问题；最后则是大面积的均匀沉积、极端尺寸工件镀膜等问

题的解决。

### 2. DLC涂层在汽车零部件的应用

摩擦磨损是汽车能量损耗的主要原因之一，汽车消耗的燃油只有15%左右的能量用于驱动车辆正常行驶，大部分能量被发动机和动力传动系统等浪费，可见降低摩擦损失对汽车节能减排具有重要意义。PVD涂层自1995年引进到汽车行业并获得成功应用以来，便打开了汽车零部件行业对PVD涂层的需求，从此PVD涂层在汽车行业就成了降低磨损和减少摩擦做功的代名词。早期发挥巨大作用的主要是以CrN为代表的金属氮化物陶瓷涂层，但随着汽车行业的发展和节能减排要求的提高，陶瓷涂层由于其较高的摩擦系数已不能满足供应商的需求。DLC则因其高硬度、高弹性模量、低摩擦因子、耐磨损等特性，迅速应用于汽车零部件表面减摩耐磨处理（CrN与DLC性能对比见表1）。与CrN相比，DLC最大的优点在于大大降低了活塞环摩擦功

耗，实验表明：排量1.8L的L4发动机活塞环采用DLC涂层后，在整个工作转速区域摩擦损失下降10%~15%。

表1 CrN和DLC涂层主要性能和参数对比

|                               | CrN         | DLC       |
|-------------------------------|-------------|-----------|
| 硬度 (Hv0.05)                   | 2 000~2 200 | 800~7 000 |
| 摩擦系数                          | 0.4         | 0.02~0.2  |
| 内应力 / (GPa·μm <sup>-1</sup> ) | 0.1~2.6     | 0.1~1     |
| 厚度/μm                         | 1~40        | 1~10      |

DLC涂层由于其高硬度和低摩擦因子使得部件磨损大大降低，同时也减小了由摩擦引起的噪声和由磨损造成的密封性下降等问题，提高了燃油效率。例如DLC在气门机构零件上的应用，可以减少40%的摩擦功耗，结果是更好的燃油经济性和1%~2%的CO<sub>2</sub>减排。DLC薄膜在汽车发动机零部件上的应用降低了各部件原有功耗的近一半左右（见图1），提高了输出功率。

3. 星弧DLC-T涂层在燃油喷射系统供油控制阀上的应用

随着排放标准的提高，发动机燃油喷射压力尤其是柴油发动机的燃油喷射压力大大增加（从90MPa提升到135MPa左右），作为燃油喷射系统的核心——供油控制阀的耐磨与密封处理必须要首先考虑，而传统的热处理等方法已不能满足其性能要求。此外，控制阀每分钟还将承受200次左右的强力冲击（135MPa），普通DLC薄膜不能满足其性能要求。鉴于此，星弧涂层在普通DLC基础上开发了DLC-T涂层，其采用多种金属过渡，减小

了内应力，大大提高了膜基结合强度，使薄膜能够做的更厚（8 μm），从而延长其耐磨寿命。此外薄膜的韧性增加，抗冲击性大大改善，这些都使得DLC-T能够适用于发动机中高冲击性部件和高磨损部件的表面处理，如柱塞、活塞环、挺杆、挺柱、控制阀等零部件。

星弧DLC-T薄膜由于具有优异的耐磨性能和较好的抗冲击性能，极大地满足了控制阀的耐磨和抗冲击需求，同时也解决了由于磨损而引起的密封性能下降问题。星弧DLC-T薄膜在台架试验中大大延长了控制阀的使用寿命（寿命延长600%以上），也保证了燃油喷射系统的封闭性（见图2），提高了其燃油喷射压力，从而提高了燃油燃烧率。

星弧DLC-T涂层的开发，成功地满足了发动机内部高冲击和高磨损零

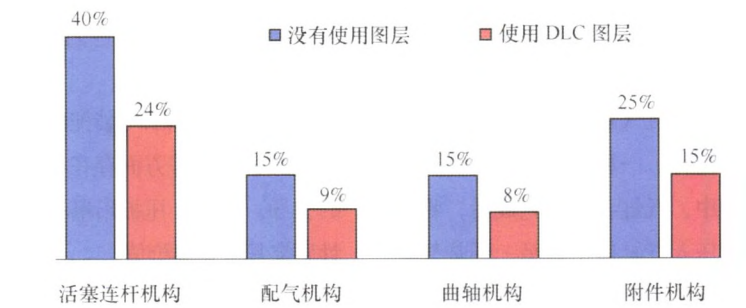


图1 各机构涂层前后占发动机摩擦功耗

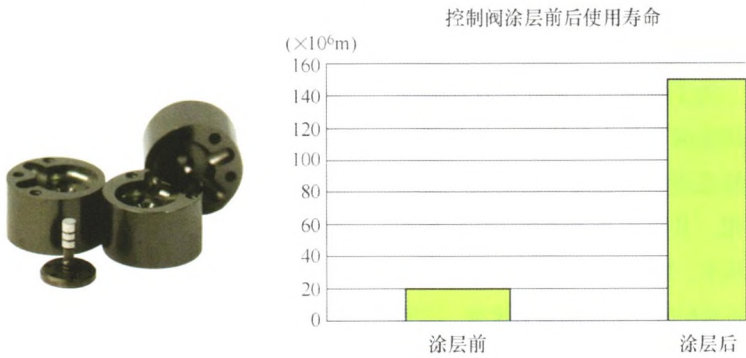
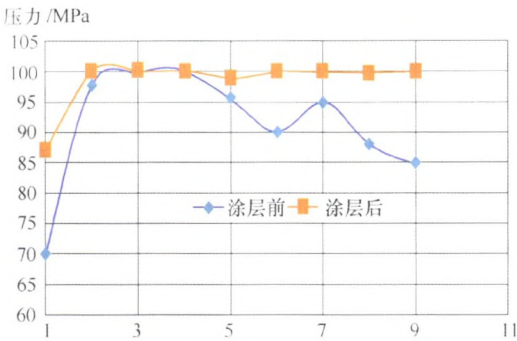


图2 镀DLC-T涂层前后控制阀使用寿命和喷油压力变化对比

部件的耐磨及密封要求，提高了燃油效率，有望推动柴油发动机燃油喷射系统性能的进一步提高。 **AME**