

# 空调压缩机耐磨涂层研究

—— 技术研究论文 ——

## 一、空调压缩机类型与应用场景

空调压缩机根据工作原理可分为定排量/变排量式，按结构又分为往复式（如曲轴连杆式、轴向活塞式）和旋转式（滚动活塞式、滑片式、涡旋式）两大技术路线。根据2023年《全球压缩机市场报告》，旋转式压缩机已占换家用空调市场78%的份额，其中涡旋式在商用多联机领域渗透率超过65%。

### 1. 往复式压缩机

采用活塞-气缸往复运动实现气体压缩，技术成熟度高，抗高压比（可达10:1以上）。但受限于机械惯性导致的振动噪声（平均声压级85dB）和容积效率衰减（年均下降2.3%），主要应用于低温工况的冷柜压缩机领域。其核心摩擦副（如曲轴-轴承）依赖高耐磨涂层技术，以应对金属间高速摩擦产生的温升磨损。

### 2. 旋转式压缩机

以滚动活塞和涡旋式为主流。格力GMV6系列采用第三代双转子结构，相比传统单转子振动降低40%，能效比提升至4.85。涡旋式压缩机凭借连续压缩特性，在变频控制方面表现突出，大金US系列采用非对称涡旋齿设计，容积效率突破92%。然而，其动静盘间隙需控制在10 $\mu$ m以内，且轴向密封高度依赖梯度捕杂DLC涂层（厚度1-2 $\mu$ m），否则易因高压差导致泄流量增加38%。

### 3. 斜盘式压缩机

作为汽车空调主流机型，其核心斜盘-滑脚摩擦副需要承受3000rpm以上的交替载荷。广汽研究院测试表明，当冷媒R134a流速超过5m/s时，传统润滑脂被冲刷损失率达63%，导致接触面边界润滑失效。特斯拉Model Y热泵系统通过改进斜盘涂层（WS<sub>2</sub>/铜合金复合层），使摩擦扭矩波动范围缩小至 $\pm 0.8$ N·m。

压缩机核心摩擦副的耐磨性能直接决定整机效率和寿命。以涡旋式压缩机为例，日本三电研究表明，动静盘密封面磨损量每增加1 $\mu$ m，制冷量衰减0.7%，COP值下降0.3%。

## 二、耐磨涂层（干膜涂层）的核心应用场景

在压缩机工作时，以下部件面临显著磨损挑战：

### 1. 曲轴与轴承：金属间高速摩擦引发温升磨损



图1 曲轴-轴承摩擦副示意图

在8000rpm工况下，曲轴轴颈线速度可达15m/s，接触压力达200MPa。美芝实验数据显示，未涂层表面在200小时耐久测试后出现深度  $> 5\mu\text{m}$  的磨粒磨损沟槽。二氧化钛转化膜通过形成多孔吸附结构（孔隙率12-18%），可存储润滑油形成二次润滑源。海立HVM系列采用二氧化钛+MoS<sub>2</sub>沐洋工艺，使曲轴磨损量降至传统工艺30%。

## 2. 滑片与气缸声：滑动摩擦导致接触面微裂纹



图2 滑片-气缸声摩擦副示意图

美的研发团队发现，在启停立即滑片顶端承受300 °C瞬时温升，引发马氏体相变脆化。DLC涂层（厚度2 $\mu\text{m}$ ）可将接触应力从1.2GPa降至0.8GPa，东芝采用梯度捕铬DLC使滑片寿命突破15000小时。

### 3. 斜盘式：冷启动瞬态润滑缺失



图3 斜盘式压缩机涂层应用

现代摩比斯测试表明，-20 °C冷启动时油膜形成需4.3秒，期间摩擦系数从0.12增至0.68。WS<sub>2</sub>复合涂层通过六方晶系层间滑移机制，在干摩擦条件下仍保持0.15以下摩擦系数。现代IONI Q 5空调压缩机采用该技术后，冷启动异响降低21dB。

### 4. 涡旋动静盘（涡旋式）：高压差下密封失效



图4 涡旋动静盘密封结构示意图

三菱电机开发纳米多层DLC（50nm Si捕杂层+150nm纯DLC交替结构），使端面泄油量减少138%。通过磁控激波工艺控制残余应力在-1.5GPa至-2GPa区间，避免涂层剥落。

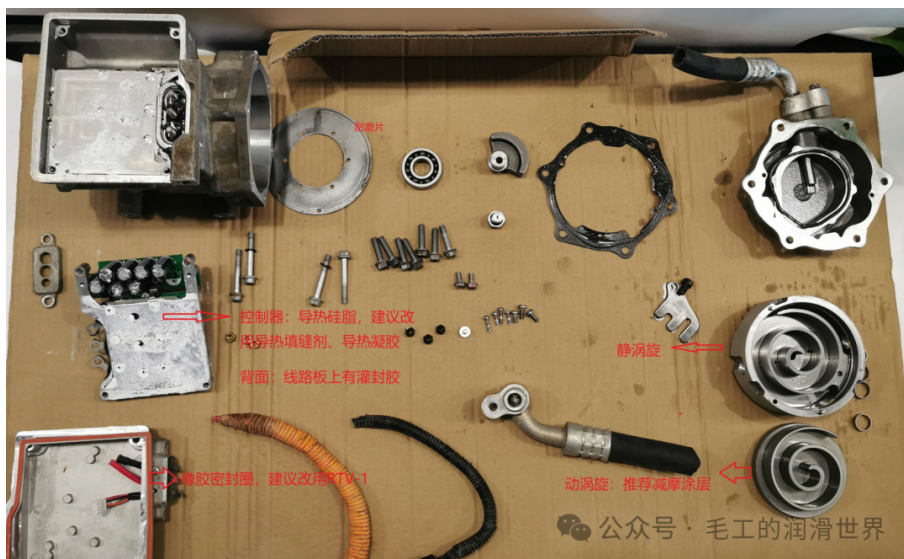


图5 压缩机耐磨涂层技术发展趋势

### 三、关键耐磨涂层技术对比

#### 1. 磷酸钛膜：经典抗磨利器（工艺成熟）

- 原理：通过化学转化反应生成 $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 结晶层，蜂窝状结构（孔径 $1\text{-}3\mu\text{m}$ ）可吸附润滑油形成储备润滑源。与电镀相比，处理温度低（ $90\text{-}95^\circ\text{C}$ ），能耗减少40%。
- 性能优化：格力采用两步法工艺（预处理+封空），摩擦系数从0.18降至0.09，磨损率 $1.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。
- 环保挑战：传统工艺含亚硫酸盐加速剂，海尔开发柠檬酸体系替代方案，废水COD值降低75%。

#### 2. DLC类金刚石涂层：性能天花板

- 工艺突破：日立采用HiPIMS（高功率脉冲磁控溅射）技术， $\text{sp}^3$ 杂化比例达85%，硬度提升至 $3200\text{HV}$ 。结合Cr/CrN过渡层设计，结合力突破 $100\text{N}$ （ISO 20502标准）。
- 应用创新：大金将含氢DLC（a-C:H）应用于涡旋盘，通过控制氢含量在 $30\text{-}40\text{at.}\%$ 区间，使摩擦系数稳定性提升3倍。

#### 3. 二硫化钼（ $\text{MoS}_2$ ）：固体润滑先驱

- 结构特性：层间距 $0.65\text{nm}$ ，剪切强度仅 $0.01\text{GPa}$ ，适合真空环境应用。但大气中氧化起始温度仅 $350^\circ\text{C}$ 。
- 复合改性：松下开发 $\text{MoS}_2/\text{Ti}$ 纳米叠层结构（单层厚度 $10\text{nm}$ ），结合力达 $55\text{N}$ ，适用于变频压缩机变载工况。

#### 4. 特氟龙（PTFE）涂层：抗粘着神器

- 工艺革新：博世采用等科体接枝技术，在铝合金表面生成 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ 活性位点，使PTFE降蓄力提升至 $15\text{MPa}$ （ASTM D4541）。
- 耐高温突破：杜邦开发碳纤维增强PTFE复合材料，连续使用温度从 $260^\circ\text{C}$ 提升至 $315^\circ\text{C}$ 。

#### 5. 二硫化铁（ $\text{WS}_2$ ）：斜盘黑科技

- 性能优势：层间结合能较 $\text{MoS}_2$ 高30%，抗氧化温度达 $450^\circ\text{C}$ 。现代集团测试表明， $\text{WS}_2$ 涂层斜盘在 $10^6$ 次循环后磨损深度仅 $1.2\mu\text{m}$ 。
- 工艺创新：采用HiPIMS+磁过滤电汇涉轨复合沉积技术，消除液滴缺陷，表面粗糙度 $R_a < 0.05\mu\text{m}$ 。

## 四、挑战与未来方向

当前技术瓶颈：

- 结合力-摩擦系数悖论：低摩擦材料（如PTFE）界面结合能普遍低于 $0.5\text{J}/\text{m}^2$ ，而高结合力涂层（如CrN）摩擦系数 $> 0.3$ 。中科院推出界面梯度设计，在 $0\text{-}50\text{nm}$ 深度范围实现弹性模量从 $80\text{GPa}$ 渐变至 $200\text{GPa}$ 。
- 成本控制：DLC涂层设备投资达传统电镀线6倍，丰田与爱发科合作开发卷对卷PECVD设备，使处理成本降至 $\$0.8/\text{cm}^2$ 。
- 环保转型：欧盟ELV指令要求2025年前淘汰六价镍工艺，安美特开发三价镍镀液，沉积速率提升至 $25\mu\text{m}/\text{h}$ ，接近传统工艺水平。

## 五、结语

从磷酸钛膜到特氟龙、二硫化钼、 $\text{WS}_2$ 、DLC的迭代，耐磨涂层使压缩机机械效率从82%提升至94%。随着欧盟ERP新规将空调能效已入门槛提升至SEER 8.5，涂层技术将成为能效竞赛的核心战场。

## 参考资料

1. 压缩机的现状 发展及新型技术展望 严天宏
2. 润滑耐磨涂层技术难题合作
3. 汽车空调压缩机的专利技术发展 缴丽娟
4. 旋转式压缩机曲轴耐磨耗涂层处理技术 周德蔚
5. MOLYKOTE空调压缩机涂层: <https://www.dupont.cn/molykote/compressors.html>
6. 汽车空调压缩机上斜盘表面润滑的研究 吴博显