

大功率风冷全无油压缩机设计探讨*

彭宝成 朱玉峰 彭培英 冯贵辰

(河北科技大学机械电子工程学院 河北石家庄 050054)

摘要: 为便于对大功率风冷全无油压缩机进行设计, 对 SW-2.5/7型全无油压缩机等系列产品的设计进行了探讨。通过合理地选择参数、气缸采用合金铸铁和研磨处理和对活塞组件的合理设计等措施, 使全无油压缩机具有良好的性能和运行寿命。SW-2.5/7型全无油压缩机的主要性能指标达到了半无油润滑压缩机 A 级品水平, 并投入批量化生产。

关键词: 风冷; 全无油; 压缩机; 润滑

中图分类号: TH457 文献标识码: A 文章编号: 0254-0150(2006)7-136-3

Discussion on Large-power and Air-cooling Oilless Lubrication Compressor

Peng Baocheng Zhu Yufeng Peng Peiyang Feng Guichen

(College of Mechanical and Electronic Engineering Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050054, China)

Abstract Series production design on SW-2.5/7 oilless lubrication compressor was discussed so as to design large-power and air-cooling oilless lubrication compressor. The properties and life of oilless lubrication compressor were improved by selecting parameters reasonably, adopting alloy cast iron cylinder and treating it by grinding, designing piston structure reasonably. The main property figures of SW-2.5/7 oilless lubrication compressor get A-grade level of half-oilless lubrication compressor. The compressor has been produced by mass.

Keywords air-cooling oilless lubrication compressor lubrication

全无油压缩机自 1954 年问世以来, 发展很快。我国从 20 世纪 80 年代开始开发全无油压缩机, 该项目曾被列为国家“六五”期间重点科技攻关项目。我国已有微型全无油空气压缩机系列产品(电机功率小于或等于 7.5 kW), 但到目前为止还没有小型全无油空气压缩机(电机功率大于或小于 15 kW)系列产品问世, 更没有制定出相应的国家标准。我们开发的 1~3 m³/min 风冷全无油压缩机是我国目前最大容量的风冷全无油压缩机, 填补了我国小型风冷全无油空气压缩机系列产品的空白。本文作者通过对 SW-2.5/7 型全无油压缩机等系列产品的设计总结和性能分析, 对大功率风冷全无油压缩机设计中的结构特点、重要参数的合理选择以及技术难点的解决进行了探讨。

1 基本参数和结构特点

SW-2.5/7 型全无油空压机为 S 型 4 列(列间夹角为 55°)、风冷、单作用、移动式两级压缩机, 气

缸和曲轴箱为全无稀油润滑。

该机主要参数为:

排气量: 2.5 m³/min

排气压力(表压): 0.7 MPa

活塞行程: 100 mm

主机转速: 800 r/min

缸数×缸径: I 级 3×φ125 mm

II 级 1×φ125 mm

电机功率: 18.5 kW (现以 22 kW 电机代替)

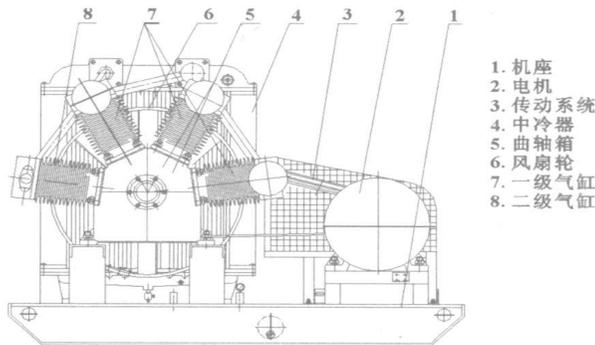


图 1 SW-2.5/7 型全无油压缩机装配图

SW-2.5/7 型全无油压缩机的主机装配图如图 1 所示。4 个连杆装在同一曲柄销上, 4 个气缸错列配置, 整机结构紧凑, 排气量大。在用足配套电机功率的原则下, 尽量提高输气系数, 提高压缩机的排气

* 基金项目: 河北省科技攻关计划项目(02212170); 河北省教育厅基金项目(2004428); 河北科技大学校立科学研究基金项目(XL2005026)。

收稿日期: 2005-08-31

作者简介: 彭宝成(1946-), 男, 教授, 主要从事流体机械的教学和研究工作。E-mail: pengbc@hebust.edu.cn

量。皮带轮（兼作风扇轮）上又改装了一级风扇轮，使冷却风量充足，冷却效果良好。优化选择了往复运行摩擦副材料和结构，不仅减少了无稀油润滑气缸的摩擦功耗，降低了机器的比功率，而且还延长了易损件活塞环和导向环的使用寿命。

连杆小头采用滚针轴承和特殊结构的润滑脂密封，较好地解决了滚针轴承在高温下漏脂的问题。连杆大头采用带双防尘盖的自润滑轴承，连杆采用球墨铸铁整体铸造而成，曲轴则为整体蛇形双支承结构，内平衡重与曲轴铸成一体，材料均为 QT600-3 以铁代钢，降低了成本。曲柄销制成了中空结构，便于导出旋转摩擦热，降低材料消耗和减少不平衡旋转惯性力。曲轴箱采用封闭式结构，呼吸孔设在曲轴箱顶端，气阀采用网状簧片阀。

该机传动方式为三角带传动。气量调节采用停转调节方式，气压调节保护实行二级压力调节及过载保护方式。

2 重要参数的选择

2.1 径长比 λ

径长比是指曲轴的曲柄半径 r 与连杆长度 l 之比，即 $\lambda = r/l$ 。 λ 的大小直接影响到活塞环的密封效果和使用寿命。由受力分析可知，综合活塞力 p_{Σ} 作用在活塞销上，在活塞销处分解为两个力：一个分力传递给连杆，沿连杆中心线方向，称为连杆力，用 p_l 表示；另一个分力通过活塞垂直作用在气缸壁上，称为侧向力或侧压力，用 p_n 来表示。侧压力 p_n 计算式如下：

$$p_n = p_{\Sigma} \frac{\lambda \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \quad (1)$$

式中： α 为曲柄转角； p_n 为侧压力； p_{Σ} 为综合活塞力，按下式计算

$$p_{\Sigma} = p + I + R_s \quad (2)$$

式中： p 为气体力，是曲柄转角 α 的函数； R_s 为往复摩擦力，因其值相对较小，可视作定值考虑； I 为往复惯性力，是曲柄转角 α 的函数。

依据式 (1)、(2) 对 SW-2.5/7 型全无油压缩机进行计算，绘制出了不同曲柄转角 α 下侧压力 p_n 与径长比 λ 的关系曲线。图 2 为 $\alpha = 300^\circ$ 时 p_n 与 λ 的关系曲线。分析可知，侧压力 p_n 随径长比 λ 的增大而增大，且基本呈直线上升趋势。 λ 越大，活塞对气缸壁的正压力越大，活塞环与气缸壁的摩擦力越大。

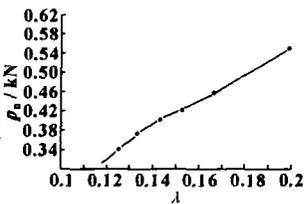


图 2 $\alpha = 300^\circ$ 时的 $p_n - \lambda$ 曲线

随着活塞环磨损的加剧，其使用寿命降低。在有油润滑压缩机中， $\lambda = 1/3.5 \sim 1/6^{[1]}$ ，由于有油润滑，且润滑油还能带走部分摩擦热，活塞环的工作环境相对较好，所以一般多取 $\lambda = 1/4$ 。在全无油润滑压缩机中，活塞环与气缸壁间属于干摩擦，工作环境要恶劣得多。为减小活塞环的磨损以提高其使用寿命，理论上 λ 值取得愈小愈好，但 λ 值取得过小，会使机器尺寸加大，给气缸等相关零部件的加工带来困难或不便。作者在开发设计全无油压缩机系列产品中，先后选择了 $\lambda = 1/6, 1/6.3, 1/6.5, 1/7$ 等多种结构型式进行了设计计算和磨损试验，经分析比较后认为全无油压缩机的径长比 λ 取 $1/6.5 \sim 1/7$ 较为适宜。

2.2 转速

转速是往复式压缩机的重要参数之一，转速选择的合理与否对压缩机运转的可靠性和经济性均有很大影响。提高转速是提高压缩机排气量的有效途径，但是随之也会带来诸多负面的影响。惯性力与转速的平方成正比，转速增加会使不平衡惯性力成倍增加，致使机器振动加剧。另外，转速提高，单位时间内活塞环与气缸壁的摩擦次数增加，会使活塞环等的使用寿命降低。转速增加也会使功率消耗增加，而且转速的变化还会以不同的规律影响到压缩机的容积系数 λ_v 、压力系数 λ_p 、温度系数 λ_T 。随着转速的提高，压缩机的排气温度随之提高，这是因为压缩机在低转速时气缸内的热量可得到较好的散发，随着转速的提高，气体来不及与外界进行热量交换，所散热量越来越少，逐渐趋于绝热过程。因此，根据微型有油润滑压缩机的研究经验^[2]和作者在小型全无油压缩机开发设计中的体会，认为小型往复式全无油压缩机的工作转速存在一个最佳工作转速范围，一般认为转速 n 在 600~800 r/min 之间选取最为适宜。

3 关键技术的解决

3.1 气缸采用合金铸铁和研磨处理

全无油压缩机气缸的对磨件是固体自润滑材料填充聚四氟乙烯导向环和活塞环，由于导热性差，热膨胀系数大，气缸内又没有润滑油及时导出部分摩擦热，因此，气缸内高温区的热量导出和冷却问题便十分突出。设计中作者吸收了已有的研究成果，合理设计了散热片的高度和密度，并优化设计飞轮（风扇轮）叶片形状和尺寸大小，保证有足够的冷却风量，以提高气缸的冷却效果。气缸内由于无稀油润滑，所以气缸等的防锈问题也是全无油空压机设计中需要解决的重要问题之一。为此，气缸材料选用了合金铸铁制造（Ni 0.23% ~ 0.4%，Cr 0.4% ~ 0.6%，Cu

0.6% ~ 1.1%)，气缸镜面加工中，经过粗磨（一般粗糙度达到 R_a 1.6 左右）后，再用与对磨件材料相同的填充聚四氟乙烯条研磨气缸镜面，使气缸壁表面形成一层理想的塑料膜，这样研磨后的气缸与导向环和活塞环形成了最佳摩擦副，不仅减少了摩擦，提高了导向环和活塞环的密封效果和使用寿命，也起到了良好的防锈效果。

3.2 活塞组件的合理设计

活塞组件示意图如图 3 所示。在气缸中作往复运动的活塞上，设有两道活塞环和两道导向环，活塞环为一槽两环，搭接口结构，内衬一个弹力环。导向环为一槽一环，C 型开口结构，设有卸载孔，以使导向环不承受气体压力，只起导向支撑作用。活塞环和导向环由机电

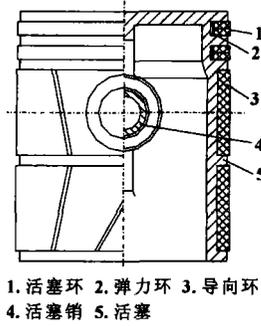


图 3 活塞组件示意图

工业部合肥所专业厂生产，配方为 38% Cu + 52% F4 + 6% 玻璃纤维 + 4% 石墨的填充聚四氟乙烯制成。

活塞环和导向环是无稀油润滑压缩机性能好坏的关键。必须对其进行正确的设计制造和装配。特别聚四氟乙烯在室温时有二次转变点，尺寸不稳定，机加工和检验测量不易控制。为了确保活塞环和导向环的

正常工作，装配时须用塞尺调整控制各装配间隙。作者把两个活塞环与环槽的端面总间隙控制在 0.28 mm 左右，导向环的端面间隙控制在 0.58 mm 左右；导向环与气缸壁的径向间隙控制在 0.08 mm 左右。作者认为端面间隙不易过大，以免往复运动时发生撞击。

经过精确的设计与装配，该机的活塞组件结构完善，密封效果理想，机器的反算输气系数高达 0.835 以上。远远好于同类型其它全无油压缩机和半无油压缩机。达到了有油润滑压缩机的活塞密封效果。样机顺利通过 500 h 运行试验，一直保持了良好性能。

3.3 冷却系统

如前所述，由于气缸内无稀油润滑，产生的摩擦热无法及时排出，所以冷却问题比有油润滑压缩机就显得更为突出，作者精心设计了气缸散热片的高度和密度（散热片高 12 mm，间距 4 mm），并在飞轮（风扇轮）上又增加了一级风扇轮，保证了足够的冷却风量，使气缸部分得到了充分冷却，获得了较好的冷却效果，中冷器设计合理，使排气温度小于 130 ℃。

4 性能试验与水平分析

在河北省产品质量监督检验所的现场监督下，对样机的排气压力、排气温度、排气量、轴功率、比功率、噪声等性能，按 GB 3853-83 《一般容积式空压性能试验方法》和 JB 2747-80 《容积式压缩机噪声测量方法》进行了监测。测试结果见表 1。

表 1 SW-2.5/7 型全无油空压机性能测试结果与对比

型号	排气压力 / MPa	排气量 / (m ³ ·min ⁻¹)	轴功率 / kW	比功率 / (kW·m ³ ·min ⁻¹)	排气温度 / ℃		输气系数	噪声 (A) / dB	备注
					一级	二级			
V-2/7-Q	0.7	1.83	13.96	7.63	145	—	0.61	—	全无油水冷
WW-2.5/7-Q	0.7	2.57	15.04	5.89	121.5	105.0	0.61	—	全无油水冷
2Z-3/8-1	0.7	2.991	17.87	5.98	102.0	109.0	0.759	82.5	某厂国优产品，半无油，水冷
SW-2.5/7	0.7	2.506	14.97	5.97	118.8	127.1	0.835	83	样机，全无油风冷

由于目前国内还没有小型风冷全无油压缩机产品问世，在国家标准 ZBJ 72 014.1-88 《全无油润滑往复式空气压缩机基本参数》和 ZBJ 72 014.2-88 《全无油润滑往复式空气压缩机技术条件》中，也找不到相应的性能参数可对照（目前我国还没有制订出 15 kW 以上小型全无油润滑空压机的国家标准）。作者应用 JB/T 53054-92 《一般用往复式空气压缩机产品质量分级》标准，并与同功率相同排气压力下的水冷半无油和水冷全无油压缩机进行水平对比。由性能分析对比表明，本样机的热力性能达到了较高水平，反算输气系数为 0.835，比功率、

噪声等性能指标达到了半无油润滑压缩机的 A 级水平。

5 结束语

研制的 SW-2.5/7 型风冷全无油润滑压缩机性能指标先进，选用摩擦副材料和结构参数合理，活塞环密封效果理想。试运行和用户使用表明，样机运转平稳，安全可靠。本机填补了我国小型风冷全无油润滑压缩机的空白，获国家专利（专利号 ZL03269988），并投入批量化生产，为今后进一步开发大功率全无油润滑压缩机的系列产品打下了良好的理论基础。

（下转第 141 页）

韧性好,使薄膜表面粗糙点内部产生的应力较低,有效降低了磨粒产生的概率。尽管 TiO_2 和 5.0% (摩尔分数) Ag/TiO_2 2类薄膜均具有良好的减摩抗磨性能,5.0% (摩尔分数) Ag/TiO_2 膜的耐磨寿命明显优于 TiO_2 ,这可能与 Ag 自身润滑特性及对 TiO_2 粒子尺寸的抑制作用有直接的关系。

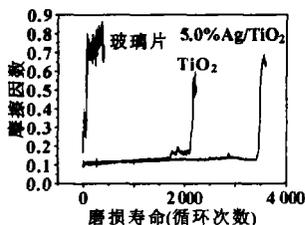


图4 薄膜摩擦性能测试曲线 (1 N)

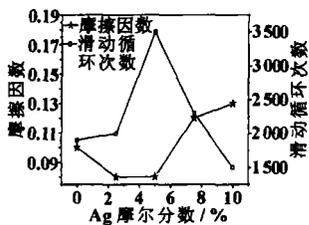


图5 掺 Ag 量对摩擦系数和寿命的影响

但是, Ag 掺杂体对 TiO_2 薄膜摩擦学性能的这种提高效率并不随 Ag 掺杂量的增加而增强。图 5 示出了 Ag/TiO_2 薄膜的摩擦系数和耐磨寿命与 Ag 掺杂量的关系,由图可见,当 Ag 掺杂量为 5% (摩尔分数) 时具有最佳耐磨寿命和最低的摩擦系数。而 10.0% (摩尔分数) Ag/TiO_2 薄膜摩擦性能明显劣于 5.0% (摩尔分数) Ag/TiO_2 ,这很可能是由于掺杂量过大时膜内逸出的 Ag 在膜表面严重富集而导致膜表面粗糙度升高的缘故。

实验过程中还发现,未经热处理的凝胶薄膜不到 2 个循环即被磨穿,在 SEM 下观察发现有严重的剥落迹象。

3 结论

采用溶胶凝胶工艺在普通载玻片上制备出了均匀、致密的 TiO_2 和 Ag/TiO_2 薄膜。通过 XRD 和 XPS 表征分析,表明 Ag 以单质的形式存在。由于不能形成稳定的固溶体,当 Ag 掺杂量大于 10% (摩尔分

数) 时将导致大量表面缺陷的产生而使薄膜摩擦学性能严重恶化。尽管如此,掺 Ag 量较低的 TiO_2 薄膜的摩擦学性能却优于纯 TiO_2 膜,这可能是由于与 Ag 恶化薄膜表面而导致的摩擦学性能下降相比, Ag 的自润滑性能对薄膜摩擦学性能的增强作用起主导作用,因而使薄膜表现为更优异的摩擦性能。高掺杂量对薄膜摩擦学行为的影响还可能与溶胶凝胶的工艺过程、薄膜的组成及微观结构有关,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 刘维民, 陈云霞, 李斌. 溶胶-凝胶法陶瓷超薄膜的制备及其摩擦学研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23: 162-167
Liu Weimin, Chen Yunxia, Li Bin. Research Progress on Preparation and Tribological Investigation of Sol-Gel-Derived Ceramic-based Ultra-Thin Films [J]. Tribology, 2003, 23: 162-167.
- [2] Xiaodong Li, Bharat Bhushan. Micro/nanomechanical characterization of ceramic films for microdevices [J]. Thin Solid Films, 1999, 340: 210-217.
- [3] Wenguang Zhang, Chengto Wang, Weimin Liu. Characterization and tribological investigation of sol-gel ceramic films on Ti-6Al-4V [J]. Wear, 2006, 260: 379-386.
- [4] M Gaudon, Ch Liberty-Robert, F Ansari, et al. Thick YSZ films prepared via a modified sol-gel route: Thickness control (8-80 μm) [J]. Journal of the European Ceramic Society, In Press, Corrected Proof Available online 19 October 2005.
- [5] Kazuhito S, Takeo H, Yasuhiro S, et al. Macroporous and nanosized ceramic films prepared by modified sol-gel method with PMMA microsphere templates [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24: 1961-1967.
- [6] Suchita Sen, SMahanty, S Roy, et al. Investigation on sol-gel synthesized Ag-doped TiO_2 cement thin films [J]. Thin Solid Films, 2005, 474: 245-249.

(上接第 138 页)

参考文献

- [1] 高慎琴. 化工机器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [2] 王迪生, 崔天生. 小型压缩机变转速的试验研究 [J]. 流体工程, 1985 (7): 13-17.
Wang Disheng, Cui Tiansheng. Test Research on Variable Speed of Small-type Compressor [J]. Fluid Engineering, 1985 (7): 13-17.
- [3] 彭宝成, 闫俊生. SW-2.5/7 型全油压缩机的设计与研究 [J]. 机械设计, 2003 (12): 14-16.
Peng Baocheng, Yan Junsheng. Design and Research on SW-2.5/7 Typed Completely Non-oil Lubricated Compressor [J].

Machine Design, 2003 (12): 14-16.

- [4] 彭宝成, 朱玉峰. SW-2.5/7 型风冷全油压缩机的密封与润滑技术 [J]. 润滑与密封, 2003 (5): 73-74.
Peng Baocheng, Zhu Yufeng. Sealing and Lubricating Technology of SW-2.5/7 Air-cooling Non-lubricated Air Compressor [J]. Lubrication Engineering, 2003 (5): 73-74.
- [5] 彭宝成, 彭培英, 朱玉峰. 全油压缩机设计中重要参数的合理选择 [J]. 润滑与密封, 2005 (1): 94-95.
Peng Baocheng, Peng Peiying, Zhu Yufeng. Reasonable Selection of Important Parameters in Design of Oilless Compressors [J]. Lubrication Engineering, 2005 (1): 94-95.