

# 无油润滑压缩机活塞环 的结构设计

赵 玉 和  
(四川深冷设备研究所)

## 摘 要

作者在分析无油润滑压缩机活塞环运动规律和受力情况的基础上,提出了用作活塞环材料的选择方法。文中着重论述了无油润滑活塞环的结构设计及其各结构参数的确定。

## 前 言

自六十年代初国产第一台无油润滑空气压缩机研制成功以来,压缩机的无油润滑技术发展很快。不少用户将原来有油润滑的压缩机改造成无油润滑,压缩气体由原来的空气发展为氧、氮、氮氢气、氦气以及天然气等多种气体。由此既可节省大量的润滑油,简化工艺流程、减少设备投资,又提高了生产效率。

为了进一步提高无油润滑压缩机的效率,本文将对活塞环的结构设计作一论述。活塞环的运动状况、材料性质与结构设计有密切关系,有必要对此先作一介绍。

## 一、活塞环的运动规律与受力分析

### 1. 活塞环的运动规律

曲柄连杆运动机构示意图见图 1-a, 对应的气缸压力和容积变化见图 1-b。由图 1 可知, 当活塞环随活塞一起作往复运动时, 活塞运动线速度 $C^{(1)}$ 为:

$$C = r\omega \left( \sin\alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right)$$

$$\text{当 } \alpha = 0^\circ (360^\circ), C = 0;$$

$$\alpha = 90^\circ, C = \gamma \cdot \omega;$$

$$\alpha = 180^\circ, C = 0;$$

$$\alpha = 270^\circ, C = \omega \cdot \gamma$$

活塞在死点位置时速度为零, 由于惯性力的作用迅速转过死点。在一周中速度 $C$ 随 $\alpha$ 而变化。由此可见, 活塞环的运动速度是周期性变化的。

为了使活塞环不因温度变化而被卡死，在环槽中环与环槽间需具有必要的间隙，在活塞环改变方向的瞬间，环将会悬浮在槽中间，活塞环切口处的不均匀受力促使环径向转动。据全苏压缩机研究所用放射性同位素测量，活塞环的径向转动速度可达2~6转/秒<sup>[2]</sup>。

## 2. 活塞环的受力分析

活塞环在压缩及排气过程中的受力情况见图2 a；活塞环在膨胀及吸气过程中的受力情况见图2 b。

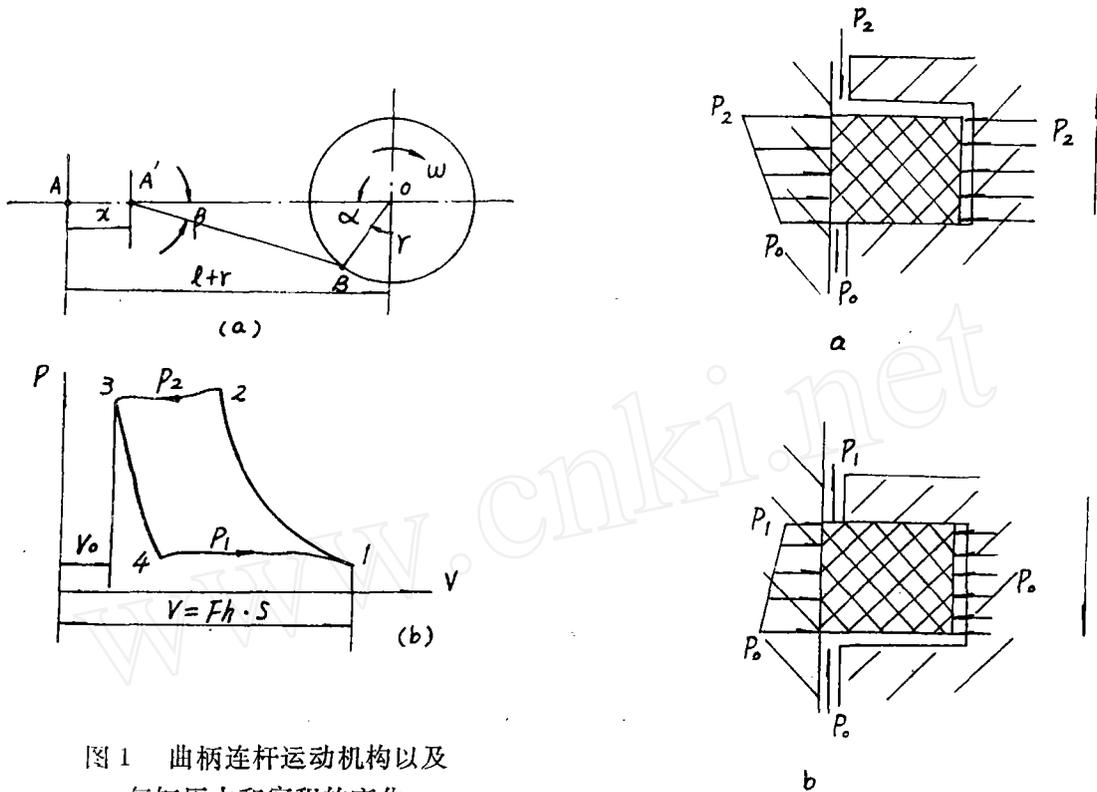


图1 曲柄连杆运动机构以及气缸压力和容积的变化

图2 活塞环受力图

压缩过程中，由于背压作用使活塞环贴紧在气缸壁上，在背压力和惯性力作用下，环的下侧紧贴环槽。此时，气缸壁压向活塞环的力，其轴向线性分布为：

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_0}{2}$$

当缸内压力逐渐升高至略大于 $P_2$ 时，排气阀打开，排气结束后，气缸内压力仍为 $P_2$ 。

膨胀过程中气缸内残存气体膨胀，活塞环承受的背压 $(\Delta P = \frac{P_1 - P_0}{2})$ 逐渐下降，当缸内气体下降到略低于吸气压力 $P_1$ 时，进气阀打开，此时的 $\Delta P = \frac{P_0 - P_1}{2}$ 。由于密封背压的变化和运动惯性力的作用，使活塞环出现瞬时悬浮。

活塞环在运动中的摩擦阻力是周期性变化的，并且还受密封气体背压的影响。

## 二、活塞环的材料选择

由活塞环的运动规律和受力状态表明，活塞环的工作条件是比较苛刻的，它将会引起粘着、疲劳、变形和磨蚀等多种形式的磨损。其磨损寿命除取决于工作介质、压力、速度、温度和环的结构等因素外，很大程度上还取决于材料的性质。所以，在设计时，必须根据这些因素选取相应性质的材料。例如，含不同填充剂的聚四氟乙烯材料，在不同介质中，其磨损性能有着很大的差别（图3~6）〔8〕。这就需要根据压缩机工作介质来选取合适的材料。图3~6中各曲线所代表的材料组成列于表1。

表1 各种填充剂的材料

标号	填充剂	填充量* (%)
C	特殊碳	25
E, F	碳-石墨	25
G, H	玻璃纤维	25
J	玻纤及石墨	15%玻纤 + 5%石墨
K	玻纤 + 碳-石墨	20%玻纤 + 5%碳-石墨
L	青铜	<25
M	金属氧化物	<25

\*其余为聚四氟乙烯

目前，国内用作无油润滑活塞环的主要材料有填充聚四氟乙烯、填充聚酰亚胺、铸型尼龙和金属塑料等材料。对于它们的机械性质和摩擦磨损特性因其基材、填料的不同和运转参数（介质、压力、速度、温度）的变化有很大的差异。所以，设计时，需针对特定的工作条件进行选材。

有人对材料的PV值较感兴趣，他们试图根据PV值来选取材料。其实，手册中的PV值不能表示材料的实际性能，尤其是磨损性能，因为它没有指明温度和外力作用特性。只有在确定温度或外力作用性能的条件下，

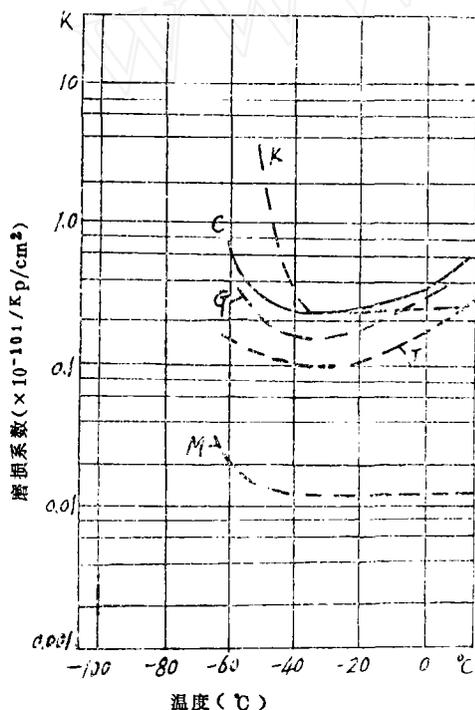


图3 空气中的磨损系数

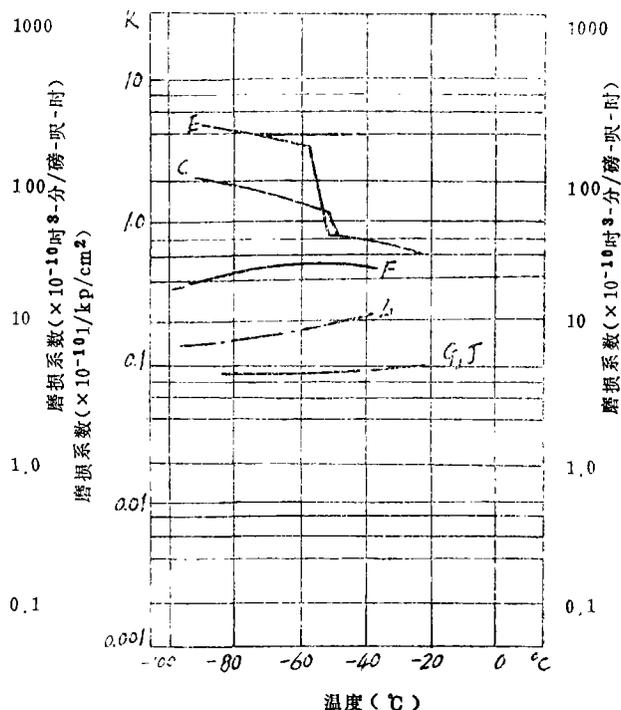


图4 氧气中的磨损系数

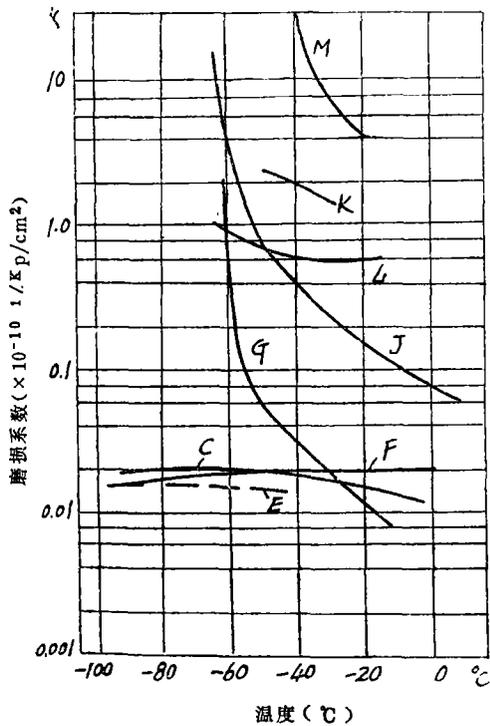


图5 氮气中的磨损系数

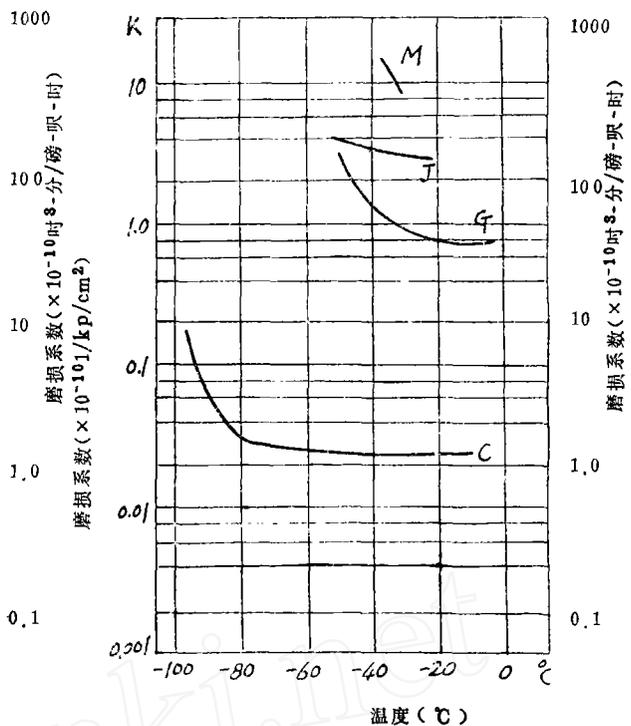


图6 甲烷中的磨损系数

其PV值才有实用意义。所以，较为有效的方法是 根据模拟或台架试验结果进行选材。

### 三、活塞环的结构设计

正确的设计、合理的选材是延长活塞环使用寿命的关键手段。活塞环设计包括结构设计，环数、尺寸和间隙的确定，导向环比压计算等，现分述如下：

#### 1. 环数确定：

无油润滑压缩机的活塞环数通过计算PV值来初步确定。P为有效平均背压，V为活塞线速度。有效平均背压用 $P_m$ 表示，计算公式：

$$P_m = \frac{K}{K-1} P_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

式中，K为被压缩介质绝热指数，空气、氧气和氮气的 $K=1.4$ ， $P_1$ 为吸入压力（公斤/厘米<sup>2</sup>）， $P_2$ 为排出压力（公斤/厘米<sup>2</sup>）；

$$V = \frac{SN}{30} \text{ (厘米/秒)}$$

式中，S为行程（厘米），N为转速（转/分）。

据文献介绍，填充聚四氟乙烯临界PV值为1000~1200公斤/厘米<sup>2</sup>·厘米/秒，取其 $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{6}$ 作为允许PV值，即200公斤/厘米<sup>2</sup>·厘米/秒，则，环数  $n = \frac{P_m V}{200}$ 。由于摩擦温度对活

塞环的磨损影响很大, PV值并没有反映出温度的因素, 即使环数设计在PV值的范围内, 因温度变化使其磨损变化而影响寿命, 所以, 单纯由PV值确定环数是不充分的, 还须考虑其它因素的影响。

表2 活塞环内、外径与轴向高度

活塞环外径(毫米)	活塞环内径(毫米)	轴向高度(毫米)
30~40	20~30	5
45~75	33~63	6
80~155	64~139	8
160~275	156~255	10
280~390	256~366	12
400~600	371~570	15
610~860	580~770	18

## 2. 尺寸的确定

高聚物活塞环的轴向高度和径向厚度比金属环要大, 轴向高度增大是为了防止环的变形, 径向厚度加大是为了延长寿命。环的径向磨损量一般规定为环厚度的 $\frac{1}{3}$ , 而美国规定允许磨损量为环径向厚度的50%。环的轴向高度和活塞环的内、外径关系见表2。

导向环是承受侧压力的, 确定导向环的

尺寸, 首先要计算其比压 $q$ 。

$$q = M/F \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}$$

$M$ 为 $\frac{1}{2}$ 活塞杆重量+活塞重量(公斤),  $F$ 为导向环投影面积(厘米 $^2$ )

$$F = \frac{1}{2} \pi DB$$

$D$ 为导向环外径(厘米),  $B$ 为导向环支承长度(厘米)。

西德HVT公司导向环比压 $q$ 值取0.07~0.15公斤/厘米 $^2$ , 日本取0.25~0.5公斤/厘米 $^2$ , 国内取 $\leq 0.3$ 公斤/厘米 $^2$ 。

## 3. 活塞环的开口间隙

间隙计算很重要, 间隙大泄漏多, 压缩机容积效率低, 间隙太小, 则容易卡死并加速磨损。其计算公式:

$$\Delta l = \alpha \cdot \pi \cdot D_{c_p} (t_2 - t_1) + a$$

式中,  $\Delta l$ 为间隙(毫米),  $\alpha$ 为材料的线胀系数(1/℃),  $D_{c_p}$ 为活塞环中径(毫米),  $t_2$ 为被压缩介质最高工作温度(℃),  $t_1$ 为被压缩介质最低工作温度(℃),  $a$ 为工作预留间隙, 一般取 $a = 0.10$ 毫米。

## 4. 环的结构。

无油润滑压缩机初期的导向环是开口型的, 即与普通的金属活塞环一样, 只是轴向宽度大些, 这种结构的导向环性能较差。近期设计的大多数为整体套胀导向环, 选用的材料需具有一定的延伸率, 以防止热胀时被拉断。装配时, 导向环与热胀工具一起加热, 温度为100℃左右时间为1小时。切勿直接用火加热, 可采用蒸汽加热。加热以后, 迅速套胀, 一次套胀时间为2~3分钟, 有时需重复加热预胀、复胀才能完成。套胀后的活塞及导向环再一起加热, 消除其应力。套胀前导向环内径的设计过盈量为活塞导向环槽底名义尺寸的2~3%为宜。若有松动, 则可适当增大过盈量。

整体导向环不受背压作用, 使用寿命长。开口型导向环和整体型导向环磨损情况见图7。活塞环的结构见图8。从密封性能来看, c最好, a最差, b次之; 从机加工难易性来看, a最易, c最难, b次之。目前, 国内这三种结构均较常见。

为了减轻活塞环的背压, 林德公司采用T型活塞环(图9)[8]。在背压作用下, 当T型环被磨损到间隙消失时, 该活塞与气缸壁间形成迷宫密封。T型环使用在密封压力为200公斤/厘米 $^2$ 的立式无油润滑压缩机中, 其寿命可达8000小时以上。

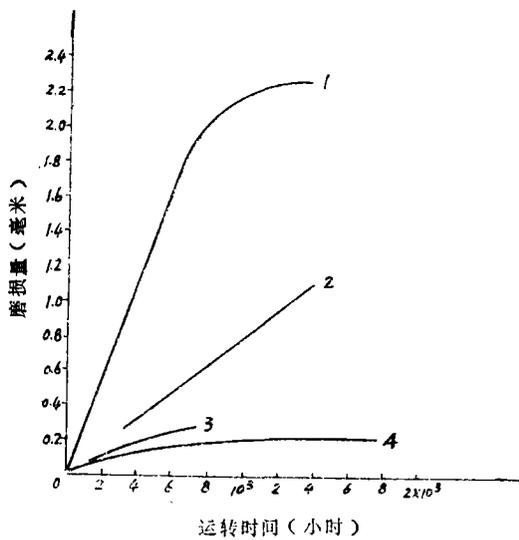


图7 2 D3.5~11.5/200型氮氢气  
压缩机五、六级导向环的磨损  
1—六级导向环(开口); 2—五级导向环  
(开口); 3—六级导向环(整体); 4—五  
级导向环(整体)

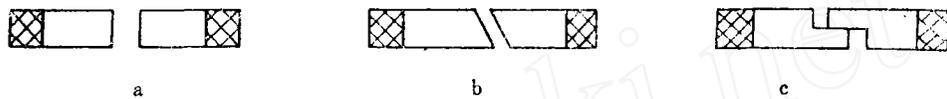


图8 活塞环的切口型式  
a—直切口; b—斜切口; c—搭切口

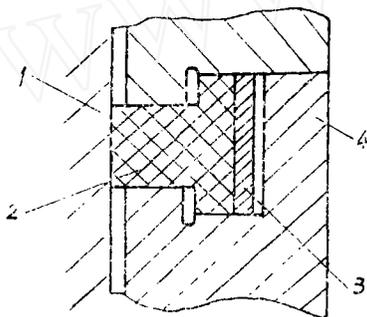


图9 T型环剖面  
1—气缸; 2—T型活塞环; 3—弹力环; 4—活塞

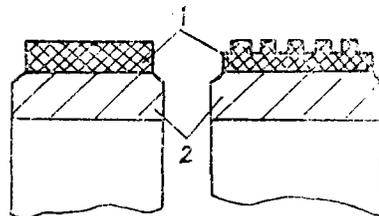


图10 新型无背压环剖面  
1—填充聚四氟乙烯; 2—金属

日本三国重工业株式会社设计的新型环为无背压活塞环(见图10)。该环由两种材料复合而成,即填充聚四氟乙烯材料复合在金属环上而成。使用这种结构的活塞环,其运转寿命长达18000小时。该环无切口,装拆不太方便,所以,它仅能用于组合活塞。

美国海军工程材料所设计的高压无油润滑空气压缩机活塞环为套筒型,选用材料为25%玻纤填充聚四氟乙烯和聚酰亚胺复合材料,在4500磅/吋<sup>2</sup>的压力下(相当于316.2公斤/厘米<sup>2</sup>的高压)可运转1500小时。而一般的填充聚四氟乙烯环仅能用200~300小时。活塞结构见图11<sup>[4]</sup>。国内小型高压无油润滑氧气压缩机已采用这种结构,运转效果较好。

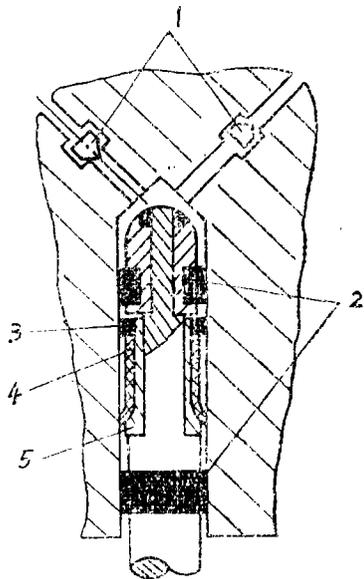


图11 套筒型活塞密封  
1—阀门；2—导向环；3—活塞环；4—外  
套；5—内套

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 西安交通大学动力机械系压缩机教研组，“活塞式压缩机”，西安交通大学印刷厂，1972年8月，p60。
- [ 2 ] БЕЖАНИЦВИЛИ, Э.М., “化工与通用机械”，1979, 1 : 60.
- [ 3 ] Rudolf Schubert, Sürth Bei Köln, Linde Reports on Science and Technology, 1971, 17 : 13~15.
- [ 4 ] 杭州制氧机厂设计科机器组，杭州制氧机研究所技术情报组合编，“国外无润滑压缩机概况”，杭州制氧机研究所出版，1973年。

## The Material Selection and Structure Design for Piston Rings in a Oilless Compressor

Zhao Yuhe

(Si Chuan Institute of Cryogenic Equipment)

#### Abstract

Based on the analysis of motion and stress, a selecting method for piston ring material in oilless compressor is presented. The paper is focused on the structure design and the principle to determine structure parameters for oilless-lubricated piston rings.