

HUO SAI SHI YA SUO JI
DE WU YOU RUN HUA

活塞式压缩机 的无油润滑

化学工业部化工机械研究院



化学工业出版社

78.7857
152

活塞式压缩机的 无油润滑

化学工业部化工机械研究院

化学工业出版社

本书共分五章，介绍活塞式压缩机应用无油润滑的技术。主要内容包括：无油润滑压缩机的应用及发展概况；无油润滑压缩机活塞的密封及各种不同结构形式和各种自润滑材料的活塞环和支承环；填充聚四氟乙烯填料函的结构、冷却、维修及设计；无油润滑压缩机的主要部件如：气缸和气缸套、活塞和活塞杆、气阀等的要求及密封不良的原因分析和处理方法；填充聚四氟乙烯密封环的成型工艺和机械加工等。

本书可供石油、化工和其他工业部门从事活塞式压缩机设计、研究、制造、运行和检修工作的工程技术人员阅读，也可供大、中专院校化工机械和压缩机专业师生参考。

活塞式压缩机的无油润滑

化学工业部化工机械研究院

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张4字数87千字印数1—54000

1982年7月北京第1版1982年7月北京第1次印刷

统一书号15063·3410定价0.45元

前 言

六十年代，我国压缩机科研、生产和使用部门便已重视无油润滑压缩机在生产上的推广和应用。随着生产形势的发展，这一要求也越来越迫切。无油润滑压缩机的质量和产量是压缩机行业生产水平的一个重要标志，也是文明生产、提高各种工艺流程产品质量的一个根本保证。

多年来，国内各有关单位对无油润滑压缩机的设计、制造及应用都做了不少工作，积累了一定的经验。这本书是在总结我国压缩机中的无油润滑应用的实践经验的基础上，参考国内外资料而编写成的。

无油润滑压缩机即被压缩的气体为不带油的压缩机。能够满足这种要求的有透平式压缩机、螺杆压缩机、膜式压缩机和活塞式压缩机。活塞式压缩机在目前使用还非常普遍，尤其是需要小流量或高压气体时，绝大多数场合还是使用活塞式压缩机。而在这种压缩机中，要得到不带油的被压缩气体，就得解决无油润滑问题。

解决无油润滑问题首先在于采用各种自润滑材料，包括从石墨、尼龙、填充聚四氟乙烯、聚酰亚胺到金属塑料，它们在不同的使用场合，分别显示出各自的特点。值得指出的是，填充聚四氟乙烯成本低廉，材料来源方便，工作参数有较宽的选择范围，可用于中、低压无油润滑压缩机，甚至用于现有大、中型合成氨厂中广泛采用的5Г-3-285/320型氮氢气循环压缩机。该机的填料函密封压力达320公斤/厘米²，

填充聚四氟乙烯使用效果稳定。此外,填充聚四氟乙烯部件的压制成型,除专业生产厂外,国内有较多的使用厂可自行加工,且已掌握其应用特性。这就给压缩机无油润滑的推广创造了必要的条件。如能进一步提高材料的性能,填充聚四氟乙烯的使用范围尚可扩大。因此,在本书中我们将重点介绍填充聚四氟乙烯在无油润滑压缩机上的应用。但也必须提及,在高速、高压差、高温的场合,填充聚四氟乙烯并非都能胜任,因而书中还介绍了其它一些材料在无油润滑压缩机上的应用。

压缩机的无油润滑一般指的是气体所接触的零部件无油,并不包括传动部件。因此,无油润滑压缩机与一般压缩机的不同点在于活塞环、支承环及填料函密封部件要作相应修改。同时,由于无油,在压缩机热力设计、气阀、防锈、防腐和除油措施等方面也带来一些变化,这些在本书内都将提及。至于机身及传动部件均与一般压缩机无异,不再赘述。

简湘云、宋宝华、杨麟亨、刘玉兰、程金志、钟银华等同志参加了本书的编写工作,最后由简湘云同志执笔写出。在编写过程中,许多单位提供了不少宝贵经验和资料,在此表示感谢。

我们对国内外先进经验的了解不够全面,实践经验也不多,加之水平较低,难免有错误和缺点,诚恳欢迎读者批评指正。

编者
一九八一年

目 录

前言

第一章 无油润滑压缩机的应用和发展	1
第一节 无油润滑压缩机在生产上使用的意义.....	1
第二节 无油润滑压缩机的发展概况.....	2
第三节 实现压缩机无油润滑的关键因素.....	5
第二章 活塞的密封	11
第一节 迷宫式密封.....	11
第二节 活塞环式密封.....	14
第三节 填充聚四氟乙烯活塞环、张力环和支承环.....	18
第四节 整体组合式活塞环和支承环.....	41
第五节 金属塑料和金属纤维减摩材料活塞环.....	53
第六节 填充聚酰亚胺活塞环.....	60
第三章 填充聚四氟乙烯填料函	63
第一节 填充聚四氟乙烯填料函的结构和维修.....	63
第二节 填料函的冷却.....	82
第三节 填料函的设计.....	85
第四章 无油润滑压缩机的其它部件	95
第一节 气缸和气缸套.....	95
第二节 活塞和活塞杆.....	99
第三节 气阀.....	105
第四节 除油措施和其他要求.....	110
第五节 密封不良的原因分析和处理方法.....	112
第五章 填充聚四氟乙烯密封环的成型工艺和机械加工	116
第一节 填充聚四氟乙烯密封环的成型工艺.....	117
第二节 填充聚四氟乙烯密封环的机械加工.....	120
参考资料.....	121

第一章 无油润滑压缩机的 应用和发展

第一节 无油润滑压缩机在生产 上使用的意义

一般压缩机所供给的含油气体，常常给生产工艺带来一系列不良后果。譬如，合成氨厂中的氮氢混合气进入合成塔如果夹带有油，便会使触媒中毒，降低使用寿命；空气分离部门的氧气压缩机为防爆而不能用油润滑；石油气压缩机中的碳氢化合物会使润滑油稀释，达不到润滑效果；供气仪表用的空气压缩机如果带油，会很容易堵塞细小的仪表管路，严重影响灵敏度；低温工程用的压缩机，润滑油会被凝固；食品工业和制药工业的产品不允许被油污染等等。无油润滑压缩机可以满足这类工艺和产品的特殊需要。此外，无油润滑压缩机还有以下优点：

1. 由于气体不带油，减少和消除了油污沉积在热交换器管壁上的可能，使换热效率提高，气体的阻力损失也可减少。

2. 可以取消注油器、油分离器等设备，并因此降低了系统阻力。在合成氨工艺流程中，合成塔入口压力可相对的提高，有利于增加合成氨产量。

3. 可以节约大量的润滑油，一台高压循环机每年可省油3600公斤。

4. 由于使用了自润滑材料的填料函密封元件,基本上可以省去对原金属填料函繁重的刮研工作量。尤其是高压填料函用的巴氏合金锥形填料函,当被具有自润滑性能的填充聚四氟乙烯的平面填料函取代后,检修工作量只有原来的六分之一,而且劳动强度也大大降低。

5. 理想的无油润滑压缩机,由于密封摩擦件摩擦系数低,因而使用寿命长。活塞环、填料函在中、低压差的条件下,寿命可达10000小时,约为原金属填料函的1.5~2倍,并减少了非生产的检修时间和开车用电。

6. 提高了气缸或气缸套、活塞杆的使用寿命。一般情况下,使用后的气缸或气缸套的镜面光洁度都有提高,而且磨损较小。

虽然无油润滑压缩机采用工程塑料或金属塑料做密封元件,成本比金属件要高些,但其经济效果却远远的高于用金属密封件的有油润滑压缩机。

由此可见,无油润滑压缩机的应用有十分重要的意义。对老机组进行无油润滑改造和生产优质的新型的无油润滑压缩机已是科研、生产等部门刻不容缓的重要任务。

第二节 无油润滑压缩机的发展概况

国外无油润滑压缩机开始于三十年代。1935年瑞士苏尔寿公司发表了迷宫式密封无油润滑压缩机的专利。五十年代初,世界市场上出现了第一批无油润滑压缩机。1957年,西德林德公司已可年产200台无油润滑压缩机,总功率达50000马力。六十年代末,日本生产的活塞式压缩机,其中无油润滑的已占50%;1967年瑞士苏尔寿公司可制造排气量达10000标准米³/时、排气压力500公斤/厘米²的迷宫式压缩机;

法国杜亚德 (Dujard) 公司生产320公斤/厘米²氮氢气对称平衡型无油润滑压缩机。

密封结构也在不断改革、创新。林德公司的T型活塞环结构在排压低于180公斤/厘米²的情况下，使用寿命8000小时以上。美国杜邦公司设计的套筒密封结构用于70～350公斤/厘米²时，具有较大的磨损补偿潜力。1969年，日本三国重工业公司提出可以使用20000小时的整体密封环无油润滑压缩机。

目前国外无油润滑压缩机最大功率达4050千瓦以上，最高排气压力500公斤/厘米²，最高活塞线速度5米/秒。填充聚四氟乙烯活塞环使用寿命在线速度为4米/秒、密封压差为100公斤/厘米²时，约为7000小时；在密封压差为200～300公斤/厘米²时，则为2000～3000小时。

国内无油润滑压缩机的研制工作首先出现于化肥工业的高压循环机和压缩机。各大、中型化肥厂所使用的5Γ-3-285/320氮氢气循环压缩机，普遍进行了无油润滑改造。该机排气压力为320公斤/厘米²；活塞线速度为1.87米/秒（转速由125转加至150转时为2.25米/秒）；气缸温度低于50℃。1967年，大连化工厂在工艺流程压力260公斤/厘米²的条件下，取消该机注油器，使用寿命达半年。目前不少单位在320公斤/厘米²压力下，使用寿命已稳定在八个月到一年。虽然该机线速度和气缸温度都较低，但对填料函无油润滑的高压差密封使用摸索了宝贵的经验。

与此同时，在大、中、小型化肥厂用的高压压缩机的高压缸上，开展了不注油的改造工作。这样，活塞环就处于高密封压差、少油润滑（因为前几级仍注油，润滑油会随气体进入高压缸内）的运行状态。1965年首先在一台1250马力的

氮气压缩机五级气缸上试用, 该机排气压力200公斤/厘米²、活塞线速度2.7米/秒、气缸温度120℃, 填充聚四氟乙烯活塞环使用寿命达10000小时, 排出气体含油量可降低40%。
2N45-130/362红旗牌氮氢气压缩机六级活塞环密封压差达314公斤/厘米², 活塞线速度4米/秒。苛刻的操作条件给不注油运转带来了困难, 衢州化工厂等单位采用金属塑料或金属纤维减磨材料活塞环, 寿命为3000~4000小时, 最高达8000小时。小化肥厂用L3.3-17/320氮氢气压缩机七级活塞环应用聚酰亚胺, 在上海吴淞化工厂等单位的使用寿命达3000小时。

在大型高压压缩机中的低压级因气缸直径大、活塞重, 使支承环比压超出允许范围, 磨损增加, 给无油润滑应用带来了困难。

目前国内能实行全部气缸无油润滑的压缩机, 排气压力一般在150公斤/厘米²以下, 线速度低于3.5米/秒, 排气温度不高于160℃。如果高于此操作条件, 就必须采取进一步措施以提高使用寿命, 否则不能维持最短检修周期。

国内从1965年开始生产中、低压无油润滑压缩机定型产品, 如沈阳气体压缩机厂生产的2Z-6/8空气压缩机; 杭州制氧机厂的2DY-100/44氧气压缩机; 常州化工机械厂的2D6.5-16.6/41石油气压缩机和无锡压缩机厂生产的进口压力70公斤/厘米²、出口压力90公斤/厘米²的D6.5-4.6/70-90氢气循环压缩机等等。

国内无油润滑压缩机的工作主要是针对气缸部分, 但在这里不能不提到, 包括传动部件在内的整机无油润滑压缩机的研制工作也已开展, 并取得了一定的成效。

沈阳气体压缩机厂生产的1Z-0.4/1.5和1Z-0.04/4全

无油空气压缩机，无十字头、主轴承和连杆大头瓦采用滚动轴承，小头瓦用滚针轴承，在低速轻载条件下，可用作医疗工具和喷气织布。

1976年上海医院设备厂等单位试制成761型微型高压无油润滑氧气压缩机，输气量为 $5\text{米}^3/\text{小时}$ 、大气吸入，排气压力为 $120\text{公斤}/\text{厘米}^2$ 、线速度为 $0.84\text{米}/\text{秒}$ 。该机由于结构简单，转移轻便，因此适用于偏僻山区及战时医疗急需加压灌氧充瓶用。该机十字头用铝合金制成，滑动表面开槽，槽内装有填充聚四氟乙烯滑块，与十字头滑道自润滑配合。连杆大头采用双列向心球面轴承，小头为改性聚甲醛压制的无油润滑轴承。

当然，传动部件无油，也仅指无稀油，滚动轴承中的润滑脂还是存在的。

第三节 实现压缩机无油润滑的关键因素

被压缩气体中所带的油来自气缸内密封部件摩擦所需的润滑油，亦即活塞环和气缸或缸套的摩擦、填料函密封元件和活塞杆间的摩擦所需的润滑油。如果这两个部位所需的润滑油可以取消，那么气缸就不需要注油器，被压缩的气体就可以不再接触润滑油。所以，目前的问题是如何实现活塞环和填料函的摩擦部位可以不用润滑油。除了迷宫式压缩机外，出路就是选择一种比较理想的自润滑材料，设计成合理的结构，来满足气缸无油润滑时密封件有较长的使用寿命。当然，由于气缸内无油所带来的一些其他问题，如气阀上金属阀片和导向表面间的干摩擦；停车期间产生缸内和管道生锈等问题都需要同时解决。

以上所述是认为气体含油的来源仅局限于气缸部分的注

油器。但实际上机身部分的润滑油在不采取隔油措施的情况下，会随着活塞杆的往复运动被带入气缸内，依然使气体带上少量的油。因此，要求绝对不含油的气体，还必须在压缩机上采取措施，使得传动部件的润滑油不进入气缸内，那些在食品工业和医药工业上用的压缩机、在空分流程上用的氧气压缩机等等都必须做到这点。

但也还有很多工艺流程所需的气体不要求绝对不含油，而少量存在的润滑油对自润滑材料的使用寿命反而有很大的好处。如合成氨生产上用的压缩机，在对老产品进行无油润滑改造时、就不需要把刮油环和填料函之间的距离加大，也不需要加装挡油环，只要将活塞环和填料函改成无油润滑的结构就可以了。这样可以使改造工作量大大减小，同时气阀的使用、气缸、管道等防锈问题也可解决。但也必须指出，如果气体很脏，则少量的润滑油有可能把杂质粘结在一起成胶状物，使密封件卡死，丧失密封能力。

设计或改造一台无油润滑压缩机，使用寿命达到4000小时以上即合乎要求，如能达到8000小时以上则属于优质。要达到这些指标，只有在了解操作条件和掌握要领的前提下，才能合理选择材料和结构设计。

填充聚四氟乙烯的使用取决于以下因素。

1. 活塞环或填料函密封件两侧的压力差 p 活塞环的密封压力不等于该级的排气压力，也不都等于该级的进排气压力差，主要取决于活塞环所分隔的二侧气腔的压力差。对于级差式活塞则由各级的配置所决定。所以，高压缸和低压缸相邻，就会给高压缸的活塞环带来很大的压差。如2N45-130/362红旗牌压缩机，六级缸的邻侧为二级缸，所以，320公斤/厘米²和7公斤/厘米²之间就造成314公斤/厘米²的高压

差。而对高压循环机，即使排气压力为320公斤/厘米²，因为是双作用活塞，活塞环的另一侧为285公斤/厘米²的吸气压力，所以，活塞环仅承受35公斤/厘米²的压力差，负荷并不大。

而填料函密封件却不同，因其密封的一侧总是大气状态，因此，它所承受的压力差仅取决于气缸内的排气压力。一般填料函都安置在低压缸上，这样就容易密封。但对循环机，则无法避免的使填料函受到150公斤/厘米²或320公斤/厘米²的高压差。

2. 活塞或活塞杆的平均线速度 v 它决定于压缩机的转速 n 和行程 s 。

$$v = \frac{2sn}{60} \text{ 米/秒}$$

无油润滑压缩机的线速度一般在4米/秒以下。

实际上，压缩机活塞的线速度不是均匀的，它随着曲轴在不同的转角而不同。但活塞在内、外止点位置时，瞬时速度最大。所以，同样的平均线速度，高转速、短行程的压缩机比低转速、长行程的压缩机更容易磨损。

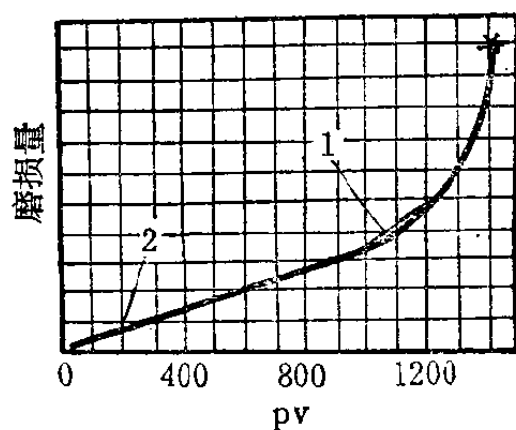


图 1-1 pv 值和磨损量

1—临界 pv 值；2—常用 pv 值

以上压力和线速度的乘积

pv 值是填充聚四氟乙烯工作条件的标志。每一种填充聚四氟乙烯都有其本身的极限 pv 值和许用 pv 值。

图 1-1 为 pv 值与磨损量关系曲线。图示说明 pv 值在一定的范围内与磨损成正比关系，超过此范围，磨损就陡然

增加，直至烧损。因此，在磨损开始剧增前的 p_v 值就叫极限 p_v 值，能保证密封环使用寿命的最大 p_v 值叫做许用 p_v 值。图1-1所示填充聚四氟乙烯的极限 p_v 值为1000~1200公斤/厘米²·厘米/秒，该值除以安全系数5~6即为许用 p_v 值。实际上，不同的材质，其极限 p_v 值和许用 p_v 值都是不同的。

还需说明，摩擦系数和耐磨性是两个不同的概念。工程塑料的摩擦系数比金属小，但并不耐磨。在摩擦系数的测定中，得知低摩擦系数仅能在高负荷和低速度下得到。即负荷增加，摩擦系数降低；速度增加，摩擦系数增加。所以，如果密封环的相对线速度高，对使用寿命肯定是一个威胁，而密封压力 P 尽管在高负荷下摩擦系数小，但如正压力增加，同样会因增加摩擦力而引起磨损。

3. 工作温度 T 它决定于气体温度，同时还决定于摩擦热。对于活塞环，因一般气缸有冷却水套、所以散热条件较好。而填料函密封即使有冷却措施，但大多数都在填料函上通冷却水，不能直接冷却摩擦面（也有少数在活塞杆内通冷却液），散热效果差。目前我们在衡量操作条件时，还是仅以气体温度来考虑。虽然，填充聚四氟乙烯的使用温度范围为-190℃~260℃，但在有压力的情况下，范围要大大缩小。一般在160℃以下，缸壁温度不超过110℃。这已基本满足大部分压缩机的使用范围。当然，级的压缩比太大的情况例外。

4. 介质纯度 被压缩介质的清洁程度是延长密封环寿命的重要保证。湿度大、杂质多的气体使填充聚四氟乙烯很快磨损。由于气体不干净，引起拉毛活塞杆表面和气缸镜面；反过来，光洁度不高的金属表面，也会使密封环磨损。有时由于污垢和少量润滑油的混合物使密封环失去张、缩的

补偿能力，如重组分多的裂解气压缩机（石油气压缩机），由于结焦，几乎把阀片都粘住。

所以，对于不干净的气体必须采取过滤措施或经脱湿器才能进入压缩机。

5. 压缩机的型式 立式压缩机实现无油润滑比卧式压缩机容易，因为立式压缩机不存在支承环承担活塞重量的问题。在卧式压缩机中，往往由于支承环磨损而使活塞下沉，因为同心度和气缸偏移而影响密封效果。立式压缩机机身的润滑油往气缸内窜的可能性也小些。

6. 金属件表面的光洁度 气缸或缸套镜面、活塞杆表面的光洁度太高并没有好处，因为填充聚四氟乙烯密封环在往复运动中，可在对磨金属件的表面形成一层填充聚四氟乙烯薄膜，这样的摩擦表面，摩擦系数很小而有利于延长使用寿命。如果金属件表面光洁度太高，填充聚四氟乙烯薄膜层固定不住；光洁度太低，则密封环的初期磨损太大，填充聚四氟乙烯也不能形成连续的薄膜层。一般活塞式压缩机活塞杆或气缸镜面可以镀铬，而在无油润滑压缩机中镀铬对摩擦件并没有好处，仅作为防腐要求才使用。无油润滑压缩机对磨金属件表面光洁度为 $\nabla 7 \sim \nabla 8$ ，比有油润滑的略低。

7. 安装和使用 和一般活塞式压缩机一样，如气缸和活塞的不同心度超出允许范围，就会引起支承环或导向环以及活塞环的偏磨现象。在卧式压缩机中，也会因为支承环的正常磨损使活塞下沉。这些都导致填料函元件和活塞杆之间不均匀的径向间隙，引起活塞杆拉毛和填充聚四氟乙烯密封环冷流破坏等现象。

这里特别要提到，填料函密封部件中的阻流环能否从设计、加工、安装、材质上合理考虑，使其能够对密封环起到

很好的保护作用，这是高压差填料函无油润滑密封使用寿命的关键问题。

8. 材料 无油润滑压缩机是建立在应用自润滑材料的基础上，所以自润滑材料的质量直接地决定了密封件是否好用的问题。

填充聚四氟乙烯以其独特的优点加入无油润滑的科学领域，是因为它的化学稳定性高、摩擦系数小、有较高的热稳定性等。

但纯聚四氟乙烯也有耐磨性差、容易冷流（负荷下变形大）、导热系数小、线膨胀系数大的缺点。这些缺点给它在应用时带来困难。因此除了在结构上采取措施外，还必须改善纯聚四氟乙烯的性能。这就是添加各种填充剂来克服它的缺点，进一步提高它的优点。这与填充剂配方的合理性以及有先进的成型工艺有密切的关系。

在实践使用中往往因为密封件在压力下产生大片冷流、磨损速度快、断裂、分层等现象，很快密封即失效。

质量好的自润滑材料，即使在长期使用后仍可以发现密封件本身以及金属摩擦表面，都光亮如镜、磨损均匀，外形整齐。

无油润滑压缩机的使用效果与很多方面有关，在实际应用拆卸时，往往发现密封环大部变形破坏，有的活塞环碎片随气流排出，在气缸内剩下无几。这样有时会产生一种偏见，单纯的认为密封件材质不好。当然并不排除材质这个重要因素，但也要熟悉压缩机的操作条件和使用过程才能找出问题所在。

有关结构设计的问题，我们下面还要专门介绍。

第二章 活塞的密封

无油润滑压缩机活塞的密封可分为有间隙密封和无间隙密封两种。

有间隙密封亦即密封零件不与气缸接触，相互间以极小的间隙对气体产生阻力而密封。密封间隙又可分为光滑间隙和迷宫式间隙。一般压缩机的柱塞活塞属于光滑间隙密封，而迷宫式间隙的迷宫槽可以有阶梯形和锯齿形两种。

无间隙密封则为密封零件（活塞环）与气缸紧密接触，与气缸镜面产生摩擦并堵塞活塞与气缸之间间隙而达到密封的目的。

本章除介绍迷宫式密封（有间隙密封）外，将重点介绍活塞环式密封以及石墨和尼龙活塞环，填充聚四氟乙烯活塞环、张力环和支承环，整体组合式活塞环和支承环，金属塑料和金属纤维减摩材料活塞环，填充聚酰亚胺活塞环。

第一节 迷宫式密封

迷宫式密封是典型的间隙密封结构。其原理是在活塞上开有螺旋形的迷宫槽，见图2-1。迷宫槽的凸缘与气缸间保持较小的间隙 δ （0.07~0.08毫米）。带压气体沿着间隙高速流动，并受到迷宫槽的阻力，使气体不断节流、膨胀、降压，直至达到活塞后的压力。迷宫式密封的泄漏量与间隙 δ 有直接的关系。曾对锯齿形迷宫做过试验当间隙值减小到0.05毫米时，泄漏量比同样直径的活塞环密封大25%。所以活塞上