

# 压缩机反向角理论及在压缩机设计中的应用

赫贵志 马宁

(沈阳鼓风机集团往复机设计部 110142)

摘要：本文阐述了往复压缩机设计过程中的反向角理论，介绍了反向角的定义及其在实际压缩机设计中的应用原则，分析了对称平衡型往复压缩机的结构特点并对往复压缩机的各种受力进行了分析，总结了影响反向角的各种因素。阐述了往复压缩机设计中反向角的基本原则和注意事项，并提出了解决反向角过小或无反向角的各种方法。

关键词：石油化工装置、对称平衡型往复压缩机、反向角、应用、设计原则，连杆小头衬套事故。

## 一：前言

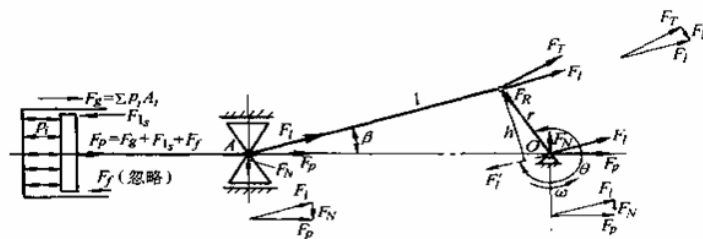
随着世界经济全球化的快速发展，石油化工工艺流程新技术的不断应用，大型往复式压缩机也得到迅速的发展。由于压缩机是石油化工行业的心脏设备，它为整个工艺流程的气体输送提供必需的动力和工作压力，对化工装置的安全正常运转有着举足轻重的地位。如果运行中的压缩机出现非计划性停车，将影响工艺流程、造成巨大的生产损失、影响环境及设备安全。因此，提高压缩机的设计水平及对压缩机进行综合监测及提供在线监测可以在早期确认设备故障根源、延长压缩机的运行周期、避免非计划性停机、提高压缩机的可靠性、降低运行成本、提高产量、增加人员及设备的安全性。

反向角是往复压缩机设计中的重要参数，有无反向角或反向角的大小直接影响到十字头销与连杆小头衬套间的润滑是造成烧连杆小头衬套事故的重要原因。据分析这直接和连杆小头衬套的润滑不良，润滑油油膜未能有效建立，十字头销--连杆小头瓦处的润滑油供油量不足有关。

导致连杆小头衬套润滑不良的原因很多，如油道堵塞、油压低、活塞杆负荷不能反向等，连杆和十字头销的设计存在缺陷，运动机构的加工形位尺寸偏差过大安装过程中的不足等，其中活塞杆负荷反向角问题是影响连杆小头衬套润滑的最重要原因。而气阀故障使压缩机运行过程中出现反向角减小甚至为0也是导致事故的直接原因。

## 二：反向角理论分析

### 2.1 往复压缩机的受力分析



图一：压缩机的受力分析图

压缩机中的作用力有三种：压缩机工作时压缩气体产生的气体力和曲柄连杆机构运动时产生的惯性力（往复惯性力和旋转惯性力）和磨擦力（往复摩擦力和旋转摩擦力）。气体力、往复惯性力、往复磨擦力都是沿着气缸中心线方向作用，它们的代数和称为为综合活塞力，综合活塞力为确定压缩机组件级别的重要依据。以上各力可在压缩机的方案计算时根据热动力计算的结果确定。

气体力在机组内部平衡，不直接传到机组外部，惯性力主要由不平衡运动质量的运动所产生，惯性力和惯性力矩多将传到基础上，引起基础的振动。往复式压缩机存在两种惯性力分为由往复运动质量不平衡产生的往复惯性力和由旋转运动不平衡质量产生的旋转惯性力，惯性力=质量×加速度。往复惯性力平衡方法：对于对称平衡型压缩机一般采用相对二列曲柄错角 180°，两缸对称布置，运动方向相反，惯性力方向也相反，通过对二列往复运动部件（活塞、十字头等）质量的配重计可使一阶、

二阶往复惯性力、旋转惯性力完全平衡，可平衡往复惯性力。由于两缸间距为  $a$ ，将产生惯性力矩，各惯性力矩无法平衡。但由于力臂  $a$  较小，则各惯性力矩并不大。旋转惯性力只发生在曲轴上。由于旋转质量都集中在曲轴上，旋转惯性力可以用曲轴反方向配重来平衡。摩擦力又分为：往复摩擦力和旋转摩擦力。往复摩擦力主要发生在：活塞与气缸、活塞杆与填料函、十字头与滑道等。旋转摩擦力主要发生在：十字头销、连杆瓦、主轴瓦、轴承等。摩擦力方向与转向相反。

## 2.2 往复压缩机的反向角理论分析

反向角是指压缩机曲轴旋转一周时，综合反向负荷持续时间内曲柄转过的角度。综合反向负荷的持续时间（反向角）是往复式压缩机设计中必须十分重视的一个问题，反向角对于大型压缩机尤为重要，因为它直接影响连杆小头瓦、十字头销、主轴瓦的润滑和寿命。如果没有活塞杆负荷反向或足够大的反向角，十字头、十字头销及连杆小头衬套会在几分钟的运行时间里产生高温并烧损。



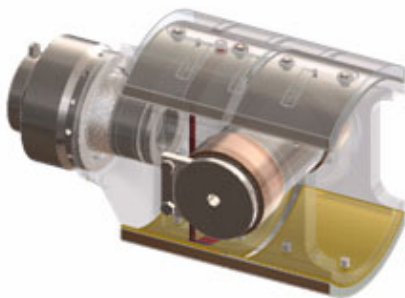
图二：活塞杆在受压状态



图三：活塞杆在拉伸状态

活塞杆及所有传动部件都受压力或拉力，而连杆小头衬套和十字头销的润滑和冷却需要润滑油的进入，这个压力或拉力使十字头销压在连杆小头衬套的一侧，而另一侧出现了间隙，使润滑油进入润滑和冷却该侧的大半个十字头销和连杆小头衬套，如果只受一个方向的力，十字头销总压在连杆小头衬套的一侧，那么受压一侧将始终没有间隙，这一侧润滑油就无法进入，也就没有润滑和冷却。使十字头销与连杆小头瓦以及曲轴与轴瓦之间不能形成正常的润滑油膜，进而造成严重磨损或烧研。因此，活塞杆所受力的方向必须改变，这样，活塞杆的受力方向必须交替改变一定时间，以便连杆小头衬套两侧轮流得到润滑和冷却。这就是“负荷反向”。负荷反向必须保持一定时间，允许润滑油充分进入润滑和冷却十字头销及连杆小头衬套。

活塞杆负荷反向的核算是往复式压缩机设计的一项重要工作；同时压缩机在工况变化时也必需进行负荷反向的计算，要保证负荷反向有足够长的时间。如果压缩机运转过程中反向角过小或为 0，则十字头销承载一个方向（通常为压向曲轴侧）的综合负荷，使十字头销与连杆小头瓦以及曲轴与轴瓦之间不能形成正常的润滑油膜，甚至出现断油情况，摩擦温度积聚并持续升高，进而造成严重磨损或烧研。尤其是在压缩机的高压级盖侧气阀失效或者轴侧吸气阀不工作造成盖侧单作用的情况，最容易出现反向角为 0 的现象。因此，在设计往复式压缩机时必须充分认识到反向角的重要性，应尽量使正、反向负荷持续时间均匀，以保证轴承处的良好润滑。



图四：压缩机十字头部件



图五：连杆小头衬套



图六：连杆瓦因供油不足烧损

图四和图五为压缩机十字头部件及连杆小头衬套常用的结构其中轴瓦的油孔和油槽的作用是把润滑油导入轴颈和轴承所构成的运动副表面。图六为连杆瓦因供油不足而产生的烧损现象。

## 三：反向角理论在往复压缩机的方案设计中的基本应用

综上所述压缩机方案的设计过程中和变工况状态下必须对反向角引起足够的重视：活塞杆负荷

反向必须要持续一定的时间，以允许润滑油充分进入并发挥作用。这个时间以曲轴转角来表示称为“反向角”。2007年版的API 618标准第5版，《石油、化学和气体工业设施用往复压缩机》中对活塞杆反向定义为：“在每转中活塞杆负荷受力方向的改变（拉伸到压缩或相反）导致十字头销上负荷反向。”同时在压缩机使用过程中任何部件所受到的无论哪个力都不超过最大许用连续综合活塞杆负荷，还规定“对所有规定的运行负荷档次和完全卸荷条件，在曲轴转一整周期间，平行于活塞杆的综合活塞杆负荷的分量应在十字头销和衬套之间完全反向。为了维持适当的润滑，该反向的持续时间和幅度应当与十字头衬套的油分配设计一致。注：有些衬套的设计（如有槽衬套）具有经证实的可靠性，在3%幅度活塞杆反向只有15度。简单的衬套设计（无槽）可能要求最小45度的活塞杆反向和20%的幅度。制造方宜在投标阶段向采购方提供实际要求”。

我公司规定压缩机设计要考虑活塞杆反向负荷原则；活塞力均衡性原则等的同时，反向角应不小于40°。活塞杆反向负荷综合峰值应不小于其相反方向负荷综合峰值的11%。当反向角过小时，可采取调整气缸直径，改变活塞部件质量，采用贯穿杆结构，顶开盖侧吸气阀等措施。

## 四：影响往复压缩机反向角的主要因素和反向角改善的主要措施

### 4.1 影响往复压缩机反向角的主要因素

(1) 压缩机气阀工作状态的变化也会导致反向角的变化，因为它决定着活塞杆所受气体力的大小。这些情况会引起反向角不符合设计要求，很可能造成连杆小头衬套烧损。

(2) 惯性力是个反向变化的力，它的增大使连杆负荷值和反向角都增大。往复运动重量的大小对反向角有直接的影响。

(3) 气缸直径与活塞杆的匹配会对反向角产生影响，特别是在小缸径大压比的工况下，活塞将会产生较大的气体力，引起无反向角或反向角过小。

(4) 余隙的大小也会引起综合活塞力的分布，在压比一定的情况下，余隙的大小决定了气体膨胀过程的长短，因此其也会对反向角造成一定的影响。

(5) 单作用气缸很容易产生无反向角，盖端单作用比轴端单作用更易造成无反向角。对单作用气缸来说，增加负荷将降低反向角，在非工作端增加负荷提高反向角。

### 4.2 往复压缩机改善反向角的主要措施

(1) 在压缩机方案设计时应严格按照标准规定进行，分析气缸的布置是否合理，是否能适应较大范围的工况变化，图纸设计完进行余隙容积的复算。

(2) 对于高压比、小缸径的活塞，一般采用活塞尾杆（贯穿杆）结构，利用活塞尾杆使活塞两端面受压面积相等或接近来减小压力。当选用单作用结构时，最好用轴端单作用，尽量避免采用盖端单作用而产生无反向角的情况。

(3) 压缩机在工艺流程发生变化时必须进行热、动力的复算。分析其受力情况的变化，计算反向角是否符合规定，使其满足反向角的要求。同时压缩机运行中应避免工况出现大的波动。

(4) 压缩机运转过程中随时观测进、排气阀是否正常工作，对压缩机的压力和温度进行监测控制，从而保证压缩机的安全。采用气量无级调节系统，避免机组长时间在部分负荷下运行。

同时为减少连杆小头衬套事故的发生，在设计方面要采取合理的结构，把好连杆小头瓦质量关；使用方面要保证压缩机的油路清洁和油品质量达标，润滑油的黏度不宜过大，同时要控制好供油温度，不宜过低，否则将导致油膜难以建立。机组启动前的盘车也十分重要，是为油膜的建立创造条件。

#### 参考文献

【1】API 618 石油、化工和气体工业用往复压缩机[S]. 美国石油学会，2007.

【2】郁永章. 容积式压缩机技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，2000.

【3】黄梓友 润滑与密封 加氢裂化新氢压缩机连杆小头衬套与十字头销烧损原因分析

作者简介：赫贵志（1962-）高级工程师，男，现在沈阳鼓风机集团往复机事业部设计部从事压缩机设计

马宁（1987-）助理工程师，男，现在沈阳鼓风机集团往复机事业部设计部从事压缩机设计