

# REDUCING EMISSIONS WHEN TAKING COMPRESSORS OFF-LINE

## 减少压缩机离线时的排放量

### 1 内容提要

压缩机被广泛用于整个天然气系统，将天然气从生产和处理场站输送到用户配送系统。当压缩机离线时，甲烷可能从许多源头泄漏，其泄漏量取决于系统增压情况。在一个减压系统中，甲烷泄漏的源头包括“放空”、残留在压缩机内的高压气体的排放、设备隔离阀的连续泄漏。在一个完全增压的系统中，甲烷能从关闭的放空阀和压缩机活塞杆密封处泄漏到大气中。

天然气STAR 合作伙伴发现，简单地改变操作方法可以节省资金并显著地减少甲烷排放量。当压缩机因操作原因离线时，保持压缩机处于增压状态可以立即获得经济上的回报——这种做法没有投资费用并通过避免“放空”而减少气体排放。另外两个方案可进一步减少甲烷排放。将放空管线连接到燃气系统上，这样当压缩机离线时就能将正常排放的天然气利用起来；在增压压缩机的活塞杆上安装静密封可消除停工期间活塞杆密封处的泄漏。这些做法能减少气体排放、降低泄漏速度、降低燃料成本，在多数情况下这种做法的投资回收期不超过一年。

措施 (通过措施减少压缩机排放)	净节省气体体积 (千立方英尺/年)	净节省气体的价值 (美元/年) <sup>2</sup>	实施费用 (美元)	投资回收期 <sup>3</sup>
方案1：保持增压状态	4 400	13 200	0	立即回收
方案2：保持增压状态并将天然气引入燃气系统	+1 345 <sup>1</sup>	+4 035 <sup>1</sup>	1 250	4 个月
方案3：保持增压状态并安装静密封装置	+1 200 <sup>1</sup>	+3 600 <sup>1</sup>	3 000	10 个月

<sup>1</sup> 相对于基数的增加值

<sup>2</sup> 天然气价格按3 美元/千立方英尺计算

<sup>3</sup> 贴现率为10%



# 减少压缩机离线时的排放量

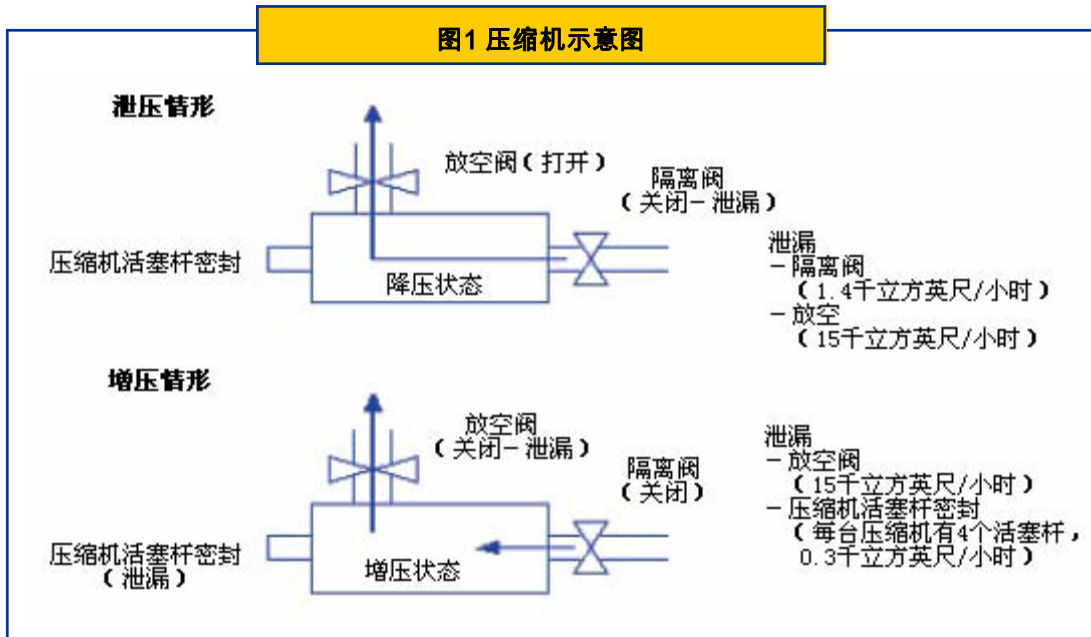
## 2 技术背景

在整个天然气系统中广泛使用的压缩机，为了满足不稳定的天然气供应需求，经常循环工作于在线和离线状态之间。设备维修和紧急情况停机是压缩机离线的其他情形。当压缩机离线时，标准的做法是“放空”或将残留在压缩机中的高压气体排放到大气中。当压缩机放空时，气体不断从设备隔离阀处泄漏出去。当压缩机完全处于增压状态时，甲烷能从关闭的泄压阀和压缩机活塞杆密封处泄漏到大气中（见图1）。

压缩机放空次数取决于其工作模式。一些压缩机运行在最低负载状态下，即它们大部分时间都处于运行状态，每年可能仅放空三次。这些压缩机的停工时间每年平均为500小时。其他一些压缩机运行在最高负载状态下，当市场需求增加并且要求较高的管线压力时，压缩机联机工作；当市场需求下降时，压缩机离线停止工作。这些压缩机离线次数每年平均为40次，大约为4 000小时。

因为经营策略、系统配置和市场需求不同，运行在最低负载和最高负载状态下的压缩机的比值在各个管道公司之间差别很大。在某些管道公司中，可能有40%的压缩机运行在最低负载状态下，而其他一些管道公司中，可能有75%的压缩机运行在最低负载状态下。

与压缩机离线有关的最大的甲烷排放源来自放空或压缩机中残留天然气的排出（即系统降压）。一般情况下，单独一次放空将向大气中释放大约15千立方英尺的天然气。



设备隔离阀是离线压缩机中的另一个甲烷排放源。这些大型阀门将压缩机和管道隔离开来，在高压管线与外界大气压作用下会泄漏大量的甲烷气体。设备隔离阀的泄漏速度一般为1 400 标准立方英尺/小时。尽管对这些设备隔离阀进行定期维护以减少泄漏，但因维护工作不及时导致前后两次定期维护期间的泄漏量逐渐增加。

# 减少压缩机离线时的排放量

离线压缩机的其他排放源有压缩机活塞杆密封和放空阀。压缩机活塞杆上的密封在正常运行过程中会发生气体泄漏，当压缩机处于闲置且完全增压状态时，即不是处于放空状态时，漏失速度大约增加4倍（每个活塞杆大约为75标准立方英尺/小时，或每台四缸压缩机为300标准立方英尺/小时）。气体通过密封圈和支承槽之间的间隙发生泄漏，这些间隙被运动的活塞杆和润滑油所封闭（见EPA经验交流材料：减少压缩机活塞杆密封系统中的甲烷排放量）。放空阀同样也从增压系统中泄漏出气体，其泄漏速度一般为150标准立方英尺/小时。

天然气STAR合作伙伴通过应用下述三种措施中的一种或多种措施，显著地减少了压缩机离线时的甲烷排放量。

（1）保持压缩机处于增压状态。将压缩机保持在完全增压状态下可避免压缩机放空时发生气体排放。这种方法可显著地将泄漏速度从1400标准立方英尺/小时（设备隔离阀处的泄漏速度）降低到大约450标准立方英尺/小时（放空阀和活塞杆密封处的泄漏速度）。因为不需要改进设施，只要有可能，那么这种方法对所有压缩机来讲都是一种最好的方法。

（2）保持压缩机处于增压状态并将天然气引入燃气系统。将放空管线连接到燃气系统上，这样当压缩机离线时就能将正常排放的天然气利用起来。一旦燃气系统和压缩机之间的压力达到平衡时，压缩机在燃气系统压力下（一般为100~150psi）“浮动”。压缩机密封和放空排气口处的泄漏速度降低到125标准立方英尺/小时左右。通过设备隔离阀泄漏进入压缩机的气体不断通过排放连接管线进入燃料气系统。

（3）保持压缩机处于增压状态并安装静密封装置。当压缩机保持增压状态时，压缩机活塞杆上的静密封在停工期间能消除活塞杆密封处的泄漏。在常规密封外侧的活塞杆轴上各安装一个静密封。当压缩机停工时激活自动控制器，在轴周围产生一个致密密封；当压缩机启动时，控制器钝化密封。当处于系统压力下时，泄漏仅发生在放空阀处，其泄漏速度大约为150标准立方英尺/小时。

## 3 经济和环境效益

尽可能通过采用简单的方法来避免对离线压缩机进行放空或者降压，这样天然气STAR合作伙伴可以获得显著的经济和环境效益：

- ★ **减少气体释放体积。**因不对离线压缩机进行降压，每次压缩机离线时作业者可以节省15千立方英尺的天然气。假设运行于最低负载状态下的压缩机每年放空3次，运行于最高负载状态下的压缩机每年放空40次，则每年节省的天然气体积在45~660千立方英尺之间。
- ★ **降低泄漏速度。**将压缩机保持在完全增压状态下可避免通过设备隔离阀泄漏大量气体。运行在最低负载状态下的设备，每年的泄漏量为475千立方英尺；运行在最高负载状态下的设备，每年的泄漏量为3800千立方英尺。
- ★ **降低燃料费用。**将压缩机内的气体引入燃气系统中作为燃料气使用，否则这部分气体会从压缩机中排放出去，这样可降低燃料费用。

# 减少压缩机离线时的排放量

## 4 决策过程

通过以下四个步骤，作业者能很容易且经济有效地减少压缩机离线时的甲烷排放量。

**第1步：确定放空替代方案。**当由于操作原因而需要压缩机离线时，有3种方案（见技术背景部分）可供选择：

- ★ **方案1：保持压缩机处于增压状态**
- ★ **方案2：保持压缩机处于增压状态并将天然气引入燃气系统**
- ★ **方案3：保持压缩机处于增压状态并安装静密封装置**

对所有压缩机来讲，最好的方案是尽可能避免采取降压作业。当与方案1结合使用时，方案2和方案3能节省更多的天然气。当维修或紧急事件需要压缩机离线时，可以使用方案2。在压缩机放空之前将压缩机内的气体排放到燃气系统中能减少排放并且省钱。

**第2步：计算甲烷排放量和价值。**压缩机离线和放空时的总的甲烷排放量，等于排放压缩机内天然气所损失的气体量与压缩机降压期间通过设备隔离阀损失的气体量之和。要计算每台压缩机每年总的损失量，输入的关键数据包括：

- ★ 每年放空次数（ $B$ ）。
- ★ 设备隔离阀之间增压压缩机的体积（ $V$ ）。每次放空排出的天然气体积取决于压缩机的空腔体积、隔离阀之间的管道系统和压力。用亨利定律（体积与压力成反比或者 $P_1V_1=P_2V_2$ ），可直接计算出天然气体积。（EPA默认值是每次放空将泄漏15千立方英尺的天然气）。
- ★ 停工期的持续时间（ $T$ ）。
- ★ 设备隔离阀处的泄漏速度（ $U$ ）。在放空排气口处用手持式测量装置能测得设备隔离阀的泄漏速度。自上次维修阀门以来，泄漏速度一般会上升。在本例分析中使用了一个缺省值，取为1400标准立方英尺/小时

总的排放量（ $TE$ ）按如下方法计算： $TE=BV+TU$ 。总价值（ $TV$ ）或这些排放量的费用等于 $TE$ 乘以天然气价格（ $P$ ）或 $TV=TE \times P$ 。

大部分信息可以很容易从操作纪录和铭牌说明中获得，或者可以估算出来。表2给出了两个计算损失量的例子，一个例子是运行于最低负载状态下的压缩机，另一个例子是运行于最高负载状态下的压缩机。

# 减少压缩机离线时的排放量

表2 计算例子

假设	最低负载状态	最高负载状态
每年放空次数	3	40
压缩气体的体积 ( 标准立方英尺 )	15 000	15 000
每年离线时间 ( 小时 )	500	4 000
设备隔离阀泄漏速度的 ( 标准立方英尺 )	1 400	1 400
<b>例1 : 运行于最低负载状态下的压缩机</b>		
总排放量	= ( 3×15 千立方英尺 ) + ( 500小时×1.4千立方英尺/小时 ) = 745 千立方英尺/年	
总价值	= 745 千立方英尺/年×3美元/千立方英尺 = 2 235美元/年	
<b>例2 : 运行于最高负载状态下的压缩机</b>		
总排放量	= ( 40×15 千立方英尺 ) + ( 4 000小时×1.4千立方英尺/小时 ) = 6 200 千立方英尺/年	
总价值	= 6 200 千立方英尺/年×3美元/千立方英尺 = 18 600美元/年	

**第3步：计算各个替代方案的费用。**各个替代方案的费用包括与方案有关的固定资产投资、增加的操作维护 ( O&M ) 费用以及压缩机离线泄漏速度。各个方案的费用总结如下：

**方案1：保持压缩机处于增压状态。**这种方案没有固定资产投资或操作维护费用。当实施这个方案时，在压缩机活塞杆密封处 ( 每个压缩机300 标准立方英尺/小时 ) 和放空阀处 ( 150 标准立方英尺/小时 ) 发生泄漏，当压缩机处于完全增压状态时，总的泄漏速度大约有450标准立方英尺/小时。

**方案2：保持压缩机处于增压状态并将天然气引入燃气系统。**这个方案涉及到要增加管道系统和阀门以将天然气从空闲压缩机中排到压缩站的燃气系统中。每台压缩机的设备更换费用为900~1 500 美元。成本费用的主要决定性因素包括压缩机尺寸、接头数量、阀门数量、管道支架数量、管道尺寸、管道长度以及是否安装自动分析器。一旦压缩机内的压力与燃气管线压力达到平衡，压缩机活塞杆密封处的泄漏速度就会降到50 标准立方英尺/小时左右，放空阀处的泄漏速度会降到75 标准立方英尺/小时左右，总的泄漏速度为125 标准立方英尺/小时。

**方案3：保持压缩机处于增压状态并安装静密封装置。**在技术可行且彼此兼容情况下，当与方案2 结合使用时，方案3 并不是经济有效的方案 ( 因为当压缩机在一个较低的燃气管线压力下“浮动”时，其泄漏速度更低 )。每个活塞杆的静密封费用大约为500 美元，加上一个用于整个压缩机系统的自动激活控制器的费用 ( 约为1 000 美元 )，则每个四缸压缩机的总费用为3 000 美元。实际上已消除了压缩机活塞杆密封处的泄漏，所以唯一剩下的泄漏来自放空阀，大约为150 标准立方英尺/小时。

## 减少压缩机离线时的排放量

表3 给出了与这三个方案相关的费用。离线泄漏量是压缩机活塞杆密封处和放空阀处泄漏量的总和，利用表2 中给出的离线时间按年来计算。

表3 替代方案的投资费用和泄漏速度			
	方案1：保持压缩机处于增压状态	方案2：保持压缩机处于增压状态并连接到燃气系统中	方案3：保持压缩机处于增压状态并安装静密封
投资	无	1 250 美元/压缩机	3 000 美元/压缩机
<b>离线泄漏</b>			
最低负载	225 千立方英尺/年 675 美元	63 千立方英尺/年 189 美元	75 千立方英尺/年 225 美元
最高负载	1 800 千立方英尺/年 5 400 美元	500 千立方英尺/年 1 500 美元	600 千立方英尺/年 1 800 美元
注意：最低负载情况下假设压缩机每年离线500 小时；最高负载情况下假设压缩机每年离线4 000 小时。天然气价格按3 美元/千立方英尺计算。			

**第4步：进行经济分析。**一旦估计出甲烷排放量和价值以及各种方案的费用，就可以进行经济分析。经济评价的一种最直接的方法就是现金流量贴现分析。在分析过程中，将各个方案的第一年费用与净节省天然气的贴现值进行比较。

对于方案1，节省量是甲烷排放量（表2 中计算的结果）与压缩机处在完全增压状态时产生的离线泄漏量之差（表3 中计算的结果）。方案2 和方案3 的节省量来自方案1 中因设备改造而进一步减少的净气体泄漏量。

表4 给出了方案1 的估计节省量以及方案2 和方案3 减去方案1 的节省量后所增加的节省量。方案1 表明在不需要投资的情况下可立即收回成本。对于方案3，在最低负载运行模式下增加的节省量在5 年时间内并不能收回设备投资。进一步讲，除连接到燃气系统以外（方案2），安装活塞杆密封所增加的节省量对于最低负载运行模式或最高负载运行模式来说在经济上都不具吸引力。



# 减少压缩机离线时的排放量

表4 方案经济对比

	方案1：保持压缩机处于增压状态		方案2：保持压缩机处于增压状态并连接到燃气系统中		方案3：保持压缩机处于增压状态并安装静密封	
	最低负载	最高负载	最低负载	最高负载	最低负载	最高负载
天然气节省量 (千立方英尺/年)	520	4 400	+207	+1 345	+150	+1 200
每年节省资金	1 560 美元	13 200 美元	621 美元	4 035 美元	450 美元	3 600 美元
设备投资	0	0	1 250 美元	1 250 美元	3 000 美元	3 000 美元
投资回收期	立即	立即	3 年	4 个月	无	10 个月
内部收益率	>100%	>100%	41%	323%	负值	118%

<sup>1</sup> 假设天然气价格为3 美元/千立方英尺

<sup>2</sup> 5 年使用寿命期，贴现率为10%

<sup>3</sup> 5 年使用寿命期（不包括每年的操作维护费用）

## 5 实施技巧

下面列出的是天然气STAR 合作伙伴用来评价方案和减少离线压缩机排放量的技巧。

- ★ 操作人员一般每12~18个月进行压缩站轮流检修，修理设备隔离阀和做较大的系统改进，如连接燃气系统。在前后两次检修之间接近一个运转周期的末期时，设备隔离阀、放空阀和压缩机活塞杆密封处的泄漏速度有可能达到最大。
- ★ 当在空闲压缩机上保持气体压力、引起活塞杆密封处泄漏速度增加时，安全会成为一个值得关注的问题。在压缩机活塞杆上安装静密封可消除这种泄漏。
- ★ 只有在有足够大的燃料需求使得天然气消耗速度达到设备隔离阀泄漏速度（估计为1.4 千立方英尺/小时）的情况下，将离线压缩机中的天然气排放到燃气系统中才是经济有效的。
- ★ 保持设备隔离阀的紧张度。密封严实的设备隔离阀每年可将因停工和放空作业造成的排放量减少90%。但是，就阀门材料和劳动力以及为维修这些阀门而全站停工和降压所带来的排放量而言，维修作业费用是非常高的。

### 案例研究：合作伙伴的经历

随着对增加节省量和减少天然气泄漏的兴趣不断增加，公司A研究了几种方法来帮助减少压缩机活塞杆密封处的泄漏。在压缩机停止使用期间，公司把压缩机连接到燃气系统上。在较低的压缩机气缸压力下，通过活塞杆密封箱和放空阀的泄漏量大大降低。公司所属的3 022个压缩机汽缸（总共577台压缩机装置），每年工作40%的时间，总的天然气节省量每年可达到15.8亿立方英尺

# 减少压缩机离线时的排放量

## 6 经验总结

合作伙伴发现，避免常规的压缩机放空作业和消除泄漏或者改变泄漏路径，会显著地减少排放量并节省大量费用。节省费用来自压缩机中滞留的产品或取代的燃气。天然气STAR合作伙伴提供的经验如下：

- ★ 尽可能避免降压作业。在不花成本的情况下将离线压缩机保持在增压状态下能获得巨大的、直接的节省费用。
- ★ 对现场人员就有关避免放空的好处进行培训。
- ★ 确定压缩机的停车计划以判定压缩机是否在最低负载或最高负载状态下运行。使用这个信息对方案2和方案3 进行经济分析。
- ★ 在经济上合理的情况下，为利用配置压缩机活塞杆静密封的燃气系统来改造现有压缩机制定一个切实可行的计划。
- ★ 记录各个压缩机上的减排量。
- ★ 甲烷减排量应包含在所提交的年度报告中（作为天然气STAR 计划的一部分）。

## 7 参考文献

Borders, Robert S. C. Lee Cook, personal contact.

Campbell, Alastair J. Bently Nevada Corporation, Houston, Texas. Optical Alignment of Reciprocating Compressors.

"Compressor Shutdown Leakage." Pipeline & Gas Journal, December 1985.

France Compressor Products. Mechanical Packing -Design and Theory of Operation, Bulletin 691.

Maholic, James. France Compressor Products, personal contact.

Minotti, Marcello. ENRON, personal contact.



# 减少压缩机离线时的排放量

1EPA

United States  
Environmental Protection Agency  
Air and Radiation (6202J)  
1200 Pennsylvania Ave., NW  
Washington, DC 20460

EPAxxx  
xxx 2006