



METHANE  
GUIDING  
PRINCIPLES  
甲烷减排指导原则

# 甲烷减排：最佳实践指南

## 火炬燃烧

二零一九年十一月

翻译：北京市燃气集团有限责任公司  
Beijing Gas Group Company Limited

校译：美国环保协会  
Environmental Defense Fund

## 免责声明

本文件由甲烷减排指导原则伙伴关系编写。每篇指南总结了截至发布之日已知的减排措施、成本和现有技术，上述内容可能随时间改变或改进。文中包含信息为作者已知最准确的信息，但不代表甲烷减排指导原则签字方或支持机构的观点或立场，读者需自行对所提供的信息进行评估。SLR国际公司及其承包商、甲烷减排指导原则或其签字方或支持机构对本指南中包含信息的完整性或准确性不提供任何保障。

每篇指南描述了甲烷排放管理的相关措施。指南不包含任何强制性的行动或措施建议，只提供甲烷排放管理的有效办法。在特定的条件或情况下，其他方法可能同样/甚至更加有效。读者的选择通常取决于具体情况、需要管控的特定风险以及适用法律。

译校团队尽量忠实原文并提供准确信息，如有不清楚之处，请参考英文原文。译校团队对本指南中文版中包含信息的完整性或准确性不提供任何保障。

# 目录

摘要.....	2
简介.....	3
量化排放.....	4
减排策略.....	5
检查清单.....	14
附录.....	15
参考文献.....	16

# 摘要



火炬是可燃气体在排放到大气之前，将其燃烧的排放控制装置。据估计，世界各地的石油和天然气行业供应链中，每年露天火炬燃烧大约1450亿立方米天然气。此过程排放的甲烷约为200万公吨，约占全球石油和天然气生产环节甲烷排放的2%<sup>1</sup>。

减少火炬燃烧甲烷排放的方法有多种。最理想的情况是避免产生废气。如果无法做到的话，则回收废气用于销售；又或者将气体存储(回注)到油气藏中。如果两种方法都不可行，也可以考虑废气发电。如果火炬燃烧无法避免，那么应该提高燃烧效率实现减排。

## 减少火炬燃烧甲烷排放的最佳实践策略:

- ✓ 准确记录火炬燃烧作业活动。
- ✓ 设计无天然气排放的系统避免火炬燃烧。
- ✓ 回收计划用于火炬燃烧的气体，作为天然气或天然气凝液出售。
- ✓ 将回收后无法立即出售的气体回注到油气藏中。
- ✓ 如不能作为天然气或天然气凝液出售，废气可做发电等其他用途。
- ✓ 如必需火炬燃烧，确保其燃烧效率。
- ✓ 利用年度清单跟踪火炬燃烧和放空作业活动。

# 简介

当天然气产量过剩，或由于常规控排需要，出于安全考虑，会进行火炬燃烧。

- **出于安全考虑，可能需要进行火炬燃烧**

在诸如完井（准备生产）、例行和非例行检修以及紧急关闭等工作期间。

- **天然气生产过剩时可能需要进行火炬燃烧**

原因有多种，包括缺乏集输设施、供过于求、压力失衡、设备临时关闭，以及天然气凝液集聚。如果伴生气在集输管道开通之前出现，则可能需要火炬燃烧。即便有集输管道基础设施，新井的初始高压高流量可能超过系统负荷，这时多余的气体可能会被燃烧。集输管中形成的冷凝液也会导致火炬燃烧。

- **火炬燃烧可能用作常规控排手段**

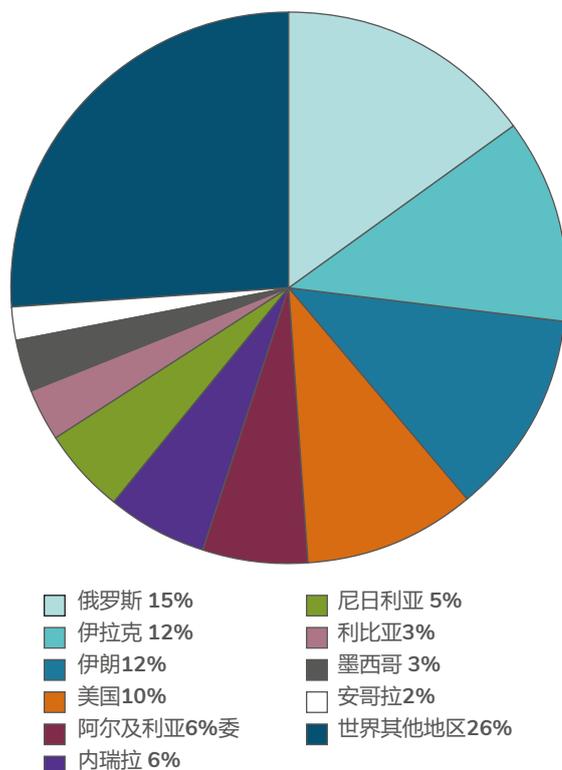
防止某些气体被排放到大气中。

火炬燃烧规模通常可以根据卫星对光强度的测量进行量化。虽然这不覆盖封闭式火炬燃烧，但仍然可以显示某一时点的火炬燃烧规模和分布。

2018年，世界银行旗下全球天然气减排合作协会(GGFR)（世界银行，2019)的报告称，全球天然气露天火炬燃烧的天然气量约为每年1450亿立方米<sup>1</sup>，几乎占2018年全球天然气总产量38,700亿立方米的4%。火炬燃烧按国家占比分布见图1。如果这1450亿立方米的天然气用于销售，将产生每年150亿至200亿美元的收益。

(基于每千标准立方英尺3至4美元，每标准立方米0.11至0.14美元的天然气价值)。

**图 1: 基于量化的天然气火炬燃烧国家占比 (排名前10位的国家和世界其他地区)**



来源：参考文献<sup>1</sup>

# 量化排放

天然气火炬燃烧会导致大量甲烷排放，一般假设火炬燃烧的效率为98%，这意味着2%的废气未燃烧，即每年大约有200万公吨的甲烷直接排放到大气中。

在大多数开展大规模火炬燃烧的国家 (如俄罗斯、伊拉克、伊朗)，火炬燃烧与常规石油和天然气生产相关。然而，美国的火炬燃烧主要关系到非常规油气生产<sup>2</sup>。

火炬燃烧气体的流量因地区而异。来自美国和加拿大的分析表明，一小部分设施占据了大部分的火炬燃烧<sup>3,4</sup>。在阿尔伯塔省，约10%的设施处理了火炬燃烧气体总量的一半<sup>3</sup>，而在美国，2万个火炬燃烧塔中，不到5%的设施处理了火炬燃烧气体总量的一半<sup>4</sup>。这意味着减排策略可能只对一小部分高流量的火炬燃烧有经济效益，而这些场所处理了一大部分火炬燃烧气体。

火炬燃烧气体的流量也随时间发生变化，特别是针对非常规石油生产 (产量迅速下降)或用气基础设施在建的地区。火炬燃烧的持续时间也可能会影响某些减排策略的经济可行性。

# 减排策略

减少火炬燃烧的最佳方法包括避免废气产生、回收废气再利用，以及将废气注入油气藏。

如果废气无法回收再利用或无法注入油气藏，可以考虑用来发电。如无法避免火炬燃烧—最后选择，则应提高燃烧效率，以减少甲烷排放。

**表 1: 减少火炬燃烧的方法**

减排策略	描述
1. 消除火炬燃烧需求	设计油井时添加另外一个分离器。
2. 回收废气，作为天然气或天然气凝液销售	2a 储罐上增加闪蒸气回收装置。
	2b 减少试井和完井期间的火炬燃烧。
	2c 生产压缩天然气并通过公路运输。
	2d 回收天然气凝液。
3. 储存废气	将废气注入油气藏存储。
4. 开发废气的其他用途	利用废气发电。
5. 提高火炬燃烧效率	5a 提高有人值守的蒸气或空气辅助火炬的燃烧效率。
	5b 改善无人值守场所小型火炬的燃烧效率。

表1总结了火炬燃烧和减排策略，其他避免放空排放方法 (例如，防止天然气冷凝物在加工厂管道中聚集)也可以减少火炬燃烧。更多减排策略参见其他最佳实践指南。

本文的余下部分详细介绍了表1中列出的减排策略，附录中提供了更多相关信息的链接。

## 减排策略1: 设计油井时另增一个分离器<sup>5</sup>

上游生产端将冷凝液或原油烃类液体从高压分离器输送至常压冷凝罐。罐中液体产生的甲烷闪蒸气需要火炬燃烧。在现场另增一个分离器，可以大大减少闪蒸气的燃烧。

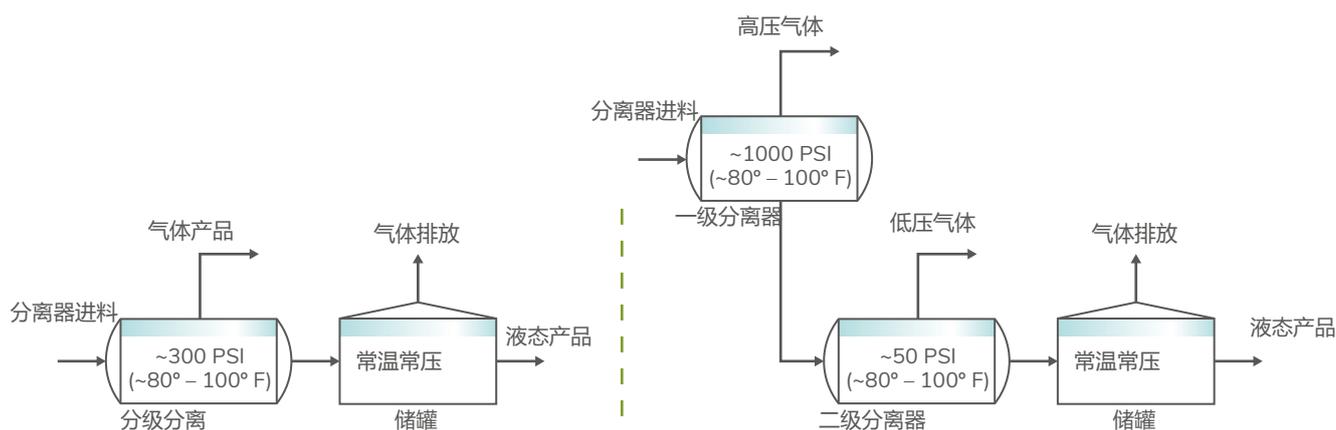
液体被输送到分离器中实现油、水和气分离。分离器的工作压力介于井口压力与冷凝液储罐的大气压之间。采用两级分离法，如下图2所示，可以增加烃类液体的产量，并减少甲烷排放。

两级分离只适用于高压井，并且第二级分离产生的低压气体可能需要再加压。与单级分离相比，两级分离中冷凝物或原油的雷德蒸汽压 (RVP)值会增加，但在许多辖区内仍会低于规定值。

### 减排与成本回收

得克萨斯州中南部的Eagle Ford产区对两级分离法做了评估<sup>5</sup>。通过安装二级分离器碳氢化合物气体的总产量增加了15%至20%，烃类液体的产量增加了1%至4%，放空量减少了65%至75%。安装两级分离器的成本约为单级分离器的3倍。

图 2: 安装二级分离器增加碳氢化合物和烃类液体的产量，同时减少火炬燃烧排放



虽然没有报告具体的投资回收期 (收回额外成本需要的时间)，二级分离增加的产量意味着几个月就可以收回投资<sup>5</sup>。

## 减排策略2a：在储罐上增加蒸气回收装置<sup>6</sup>

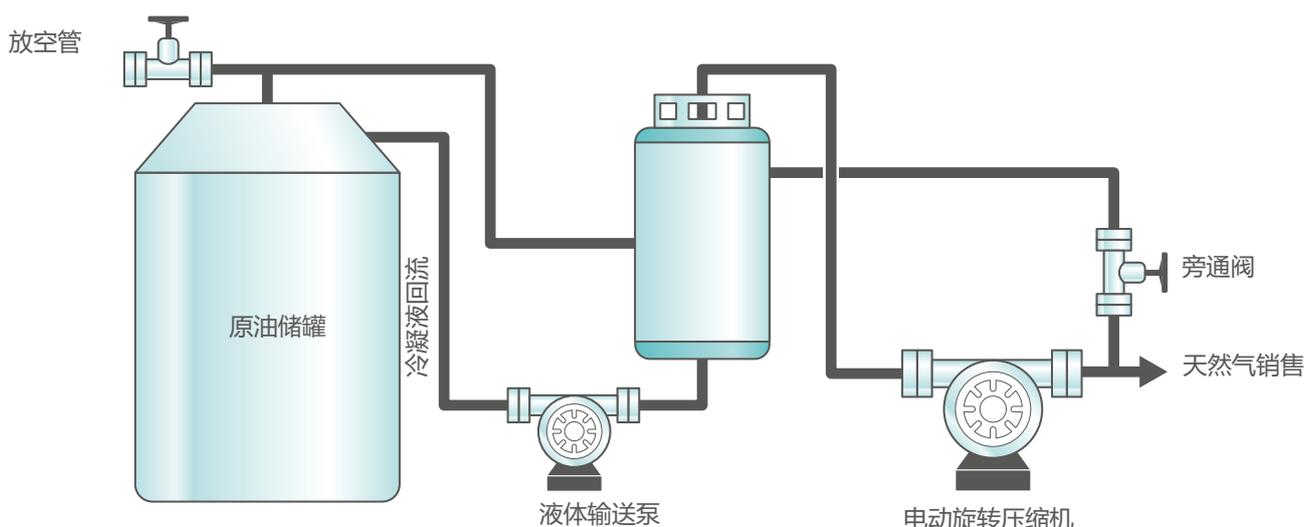
上游生产端将冷凝液或原油烃类液体从高压分离器输送至常压冷凝罐。罐中液体产生的甲烷闪蒸气可能被火炬燃烧。储水罐也可能发生甲烷闪蒸 (尽管程度要低得多，因为甲烷易溶于液态烃，但不易溶于水)。

蒸气回收系统可以捕获闪蒸气，压缩后通过管道输送供销售，而非直接排放或被火炬燃烧。蒸气回收系统简单的设置可以是个小型压缩机，当储罐压力达到一定水平时启动运行；也可以是一个上游闪蒸气回收塔 (VRT)，作为闪蒸气分离器的同时保证回收装置的压缩机更稳定运行。

如果闪蒸气回收系统容量小于现场潜在的最大回收量时，则需要设置火炬燃烧塔，燃烧无法回收的那部分储罐闪蒸气，避免排放。

任何油气生产端都可以通过安装闪蒸气回收系统减排。有些地区 (例如美国和加拿大)的法规

图3: 闪蒸气回收装置可以回收废气销售



## 减排策略

明确规定了排放量超过一定数值的储罐必须设置闪蒸气回收装置。也有些地区在回收的气体价值大于设备投入成本时，出于经济效益考虑，会选择安装回收系统。有时公司也会自愿采取该措施。

### 减排和成本回收

通过设计蒸气回收系统，可以回收超过90%的被排放或燃烧的废气<sup>6</sup>。但是，由于回收闪蒸气需要增加压缩机等设备，考虑经营成本时必须比较回收气体的销售价值与系统投资及后续维护的成本。

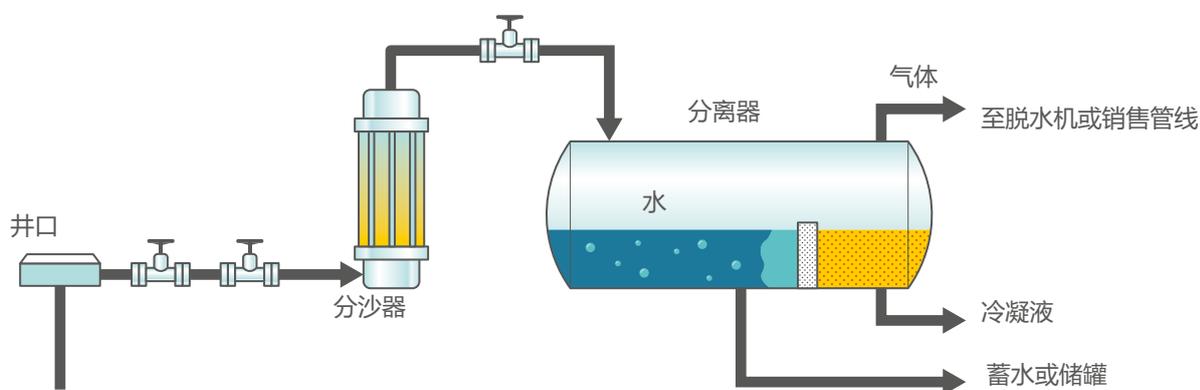
## 减排策略 2b：减少试井和完井的排放<sup>7</sup>

钻井完工后将新井投入生产的过程叫做完井。在完井过程中，需要先回收钻屑、泥浆和压

裂液(水力压裂返排液)，然后才能将生产井与管道连接。返排期间可能会有天然气排放或火炬燃烧。减少返排气体可以削减放空或火炬燃烧。现在，美国和加拿大等很多地区要求实行“绿色完井”或“减排完井”，即完井过程中使用分离器捕获原本会排放的废气。出售回收的气体可以减少排放和火炬燃烧。即使回收的气体被火炬燃烧，由此产生的排放也少于放空(更多信息参见放空减排指南)。

试井期间会排放气体测试流速，可能导致放空或火炬燃烧。可以安装临时设备回收废气。试井阶段所用的气体分离器通常比永久分离器大得多，因此只能在试井期间带到现场。

图4:减排完井可以减少放空，如果捕获的气体可销售，还可以减少火炬燃烧。



来源：参考文献7

## 减排和回收成本

完井减排的经济效益包括减少放空。美国环境保护署 (EPA) 的天然气之星计划相关内容<sup>7</sup>显示, 出售回收的气体用能带来可观的经济收益。如只能火炬燃烧不能回收, 仍可达到一定的减排效果。

## 减排策略2c: 生产压缩天然气并通过公路运输<sup>8</sup>

对原计划火炬燃烧的气体进行脱水、脱硫和脱碳处理, 在现场生产压缩天然气 (CNG)。因为CNG需做进一步处理才能适合管道输送, 所以可先将其通过公路运到天然气加工厂。

如果陆上单井距离天然气加工厂30至40公里, 将CNG通过公路运送到加工厂通常在经济上是可行的。即使距离超过该范围, 对于具有多口井的井场来说通过公路运输CNG到加工厂也可能盈利。

### 减排与成本回收

有分析<sup>8</sup>认为, 以上策略适用的最佳天然气量为: 单井场每天约200,000标准立方英尺 (每天5,700标准立方米), 多井场每天约600,000至700,000标准立方英尺 (每天17,000至20,000标准立方米)。考虑到典型的生产负荷下降的情况, 最具成本效益的解决方案可将火炬燃烧减少90%。如果牺牲一些利润, 可以实现更高的减少火炬燃烧比例。

## 减排策略2d: 回收天然气凝液<sup>8</sup>

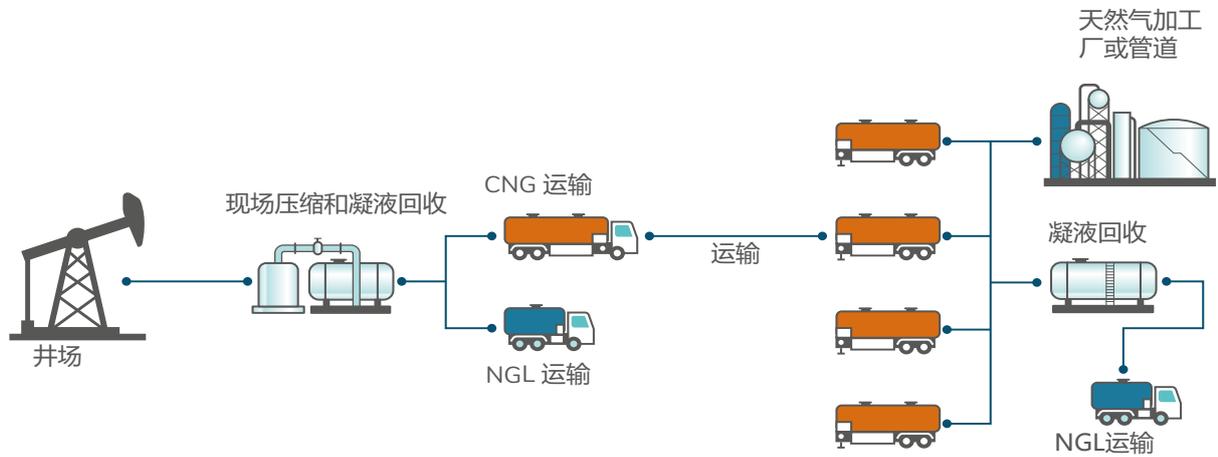
从原本计划火炬燃烧的废气中回收达到管道气标准的天然气通常也会同时涉及天然气凝液 (NGL) 回收。NGL回收系统可以是只过滤最重的NGL (戊烷和重烃类) 的简单膨胀阀; 也可以是复杂的零度以下低温冷凝技术。系统选择取决于天然气的NGL含量和NGL的最终用途。

可通过加压膜技术和吸附/吸收技术将戊烷和重烃凝液与废气分离。这些系统通常适用于大规模用途。而制冷和膨胀阀分离技术通常适用于小规模作业且相当便宜。针对丙烷等NGL轻烃凝液回收, 热交换和机械制冷则是较为经济的方法。高压系统可以使用“焦耳-汤姆逊”装置, 尽管其初始成本通常高于机械制冷。低温涡轮膨胀回收系统最昂贵, 但回收气量也更大<sup>8</sup>。

### 减排与成本回收

据报告, 基于10,000标准立方米的天然气日流量以及80公里内的陆上井场与天然气加工设施的距离, 该减排策略的成本可低于0.07美元/标准立方米 (2.00美元/千标准立方英尺)<sup>8</sup>。

图 5：通过公路运输将CNG与NGL送至天然气加工设施



来源：参考文献<sup>7</sup>

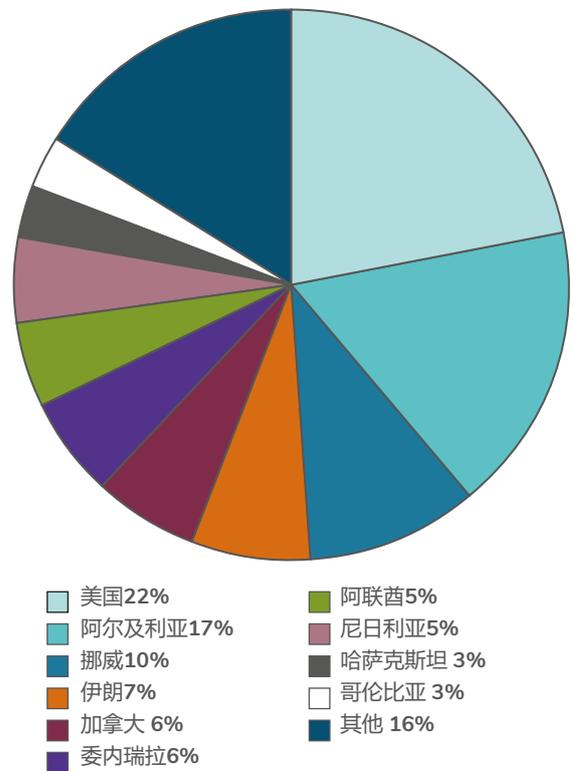
### 减排策略 3：将废气注入油气藏

#### 储存<sup>9,10</sup>

通过将废气回注到原油气藏或其他储层，增加石油产量。2015年，全球回注了17.5万亿立方英尺的废气，远超全球火炬燃烧的天然气总量 (5万亿立方英尺/1450亿立方米)。天然气回注作业在世界各地分布不均 (参见下图6)，大部分发生在阿尔及利亚、加拿大、伊朗、哈萨克斯坦、挪威、美国、阿联酋和委内瑞拉<sup>9</sup>。

废气回注的效果取决于储层特点。

图6：回注天然气的全球分布



来源：参考文献<sup>9</sup>

## 减排与成本回收

根据美国Bakken和Eagle Ford 产油区的废气回注经验表明，废气回注可以提高石油产量，带来经济回报<sup>10</sup>。

## 减排策略4：利用原本计划火炬燃烧的废气发电<sup>8</sup>

燃气轮机和“往复式发动机”可用天然气发电。尽管有30至250千瓦的微型涡轮机，但典型的运行规模为0.2至10兆瓦。产生的电力可在现场为其他设备（包括控制器、泵和空气压缩机）供电或出售给电网。

涡轮机要求其使用的天然气不含或只含极少的烃类凝液，并且低硫。对于其他气体，可能需要将涡轮与NGL回收结合使用（请参阅减排策略2d）。将未经处理的原料气与柴油燃料混合用于往复式发动机，可以不需要NGL回收。选择设备类型和规模是一件复杂的工作。钻探和完井设备的所需功率为0.5到15兆瓦以上。常规生产通常所需的电量在0.1至0.15兆瓦（单井）和0.25至0.4兆瓦（多井）。由于生产要求电源稳定，而废气流量经常变化，因此通常需要备用电源。

设备选择很复杂，由于气流量发生变化，产量也长期下降，造成有的设计适用于生产早期，而有的适用于后期。

如果油井有电网接入，通常将产生的电力出售给电网是最佳选择。

## 减排与成本回收

将废气用于涡轮机发电以替代火炬燃烧可能不会减少甲烷排放。但是，由此产生的电力可以减少现场或场外的排放活动。有报告显示，该方案的初始成本为0.5兆瓦的涡轮机60万美元，2兆瓦机组120万美元。满负荷运行的2兆瓦机组产生的电力价值在35万美元至100万美元之间（电价为每0.06千瓦时0.02美元），投资回收期通常超过一年，而较大机组的投资回收期通常更短。用原计划火炬燃烧的天然气代替柴油可能更节约成本，但取决于发动机类型<sup>8</sup>。

## 减排策略5a：提高有人值守空气或蒸气辅助火炬的燃烧效率<sup>11-14</sup>

如果火炬燃烧不能避免，则应尽可能提升燃烧效率，将甲烷排放降至最低。火炬设计主要取决于流量及其变化。大型火炬通常设计有空气或蒸气辅助装置，在燃烧区提供额外的氧气（请参见下图7）。增加进入火炬燃烧区的空气或蒸气流量可以减少烟雾形成，但过量的空气或蒸气补充会导致火炬燃烧效率下降。近期关于大型火炬设计的选型研究<sup>11,12</sup>表明，要实现接近完全燃烧（> 98%）并同时降低烟雾形成，需要非常严格地控制空气和蒸气的辅助率。

图7a: 蒸汽辅助火炬 (前端的燃烧火焰)与空气辅助火炬 (后部)大流量燃烧废气

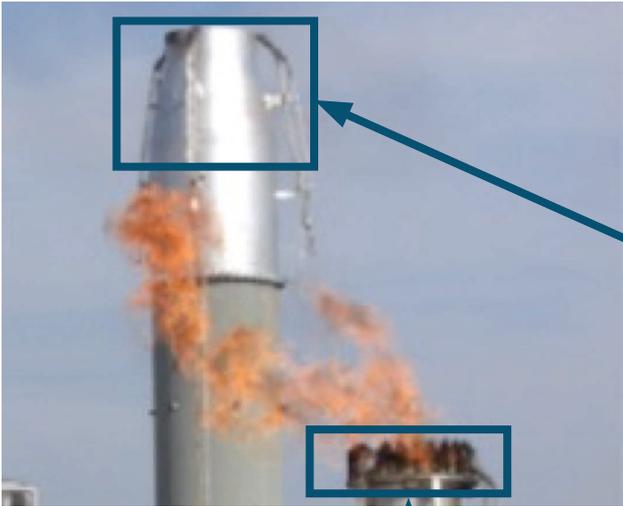


图 7c: 蒸汽喷嘴环绕着蒸汽辅助火炬的尖端



资料来源: 德克萨斯大学

图7b: 具有多个楔形流动截面的空气辅助废气火炬, 在空气流和废气流之间交替



最近的研究<sup>11,12</sup>发现很难将烟雾最小化并保持燃烧效率, 特别是在废气的热值相对较低且火炬低负荷运行的情况下。通常可以通过熟练的操作来维持辅助率, 实现烟雾最小化和燃烧效率最大化。可以进行火炬运行方面的培训<sup>13</sup>, 但是对于固定辅助率的火炬, 例如在空气辅助火炬中使用定速鼓风机时, 要达到理想的火炬燃烧条件可能很困难<sup>14</sup>。

### 减排及回收成本

熟练的操作可以有效提高燃烧效率<sup>13</sup>。但是, 某些情况下, 可能需要升级火炬。

## 减排策略 5b: 改善无人值守场

### 所小型火炬的效率

大多数小型火炬位于无人值守的上游井场<sup>4</sup>，旨在应对小流量废气和异常工况，例如当闪蒸回收装置 (VRU) 超压或停运、或在完井期间。火焰一旦熄灭 (火焰熄灭且没有燃烧发生)，火炬就成了一个放空塔，谈不上任何燃烧效率。

尽管许多小型火炬安装长明火或带有火焰监测器的火花点火器来防止火焰熄灭，但长明火通常需要单独的稳定气流，例如管道供气，而火花点火器则需要电源或电池供电。

某些地区 (例如加拿大和美国) 要求对部分或全部油井和生产场所使用长明火或火花点火器。

#### 减排和成本回收

许多现有火炬可以加装或内置长明火或火花点火器。通过提高燃烧效率减排，收回投资成本。

# 检查清单

下面的检查清单可以评估通过火炬燃烧或提高燃烧效率的减排进展。

活动	是否完成	占所有场站的百分比
✓ 准确记录气体放空源。		
✓ 准确记录火炬燃烧气体来源，详细说明火炬燃烧气体的量和燃烧持续的时间。		
<b>针对每种减排策略，评估火炬燃烧量和持续时间是否提高减排效果。如果策略可行，跟进策略实施情况。</b>		
✓ 避免火炬燃烧 (通过井场内多级分离)。		
✓ 回收计划火炬燃烧的气体作为天然气或天然气凝液销售。		
a. 储罐上添加闪蒸气回收装置；		
b. 试井和完井期间减少火炬燃烧；		
c. 生产压缩天然气并通过公路运输；		
d. 回收天然气凝液。		
✓ 将气体回注油气藏存储。		
✓ 为不可回收的火炬燃烧气体寻找新的用途。		
✓ 提高火炬燃烧效率 (如果火炬燃烧无法避免)。		
e. 提高有人值守空气或蒸气辅助的火炬燃烧效率。		
f. 提高无人值守场所小型火炬的燃烧效率。		

# 附录

更多减排策略的信息链接

减排策略	描述	参考文献
1. 消除火炬燃烧需求	设计油井时添加一个分离器。	(5)
2. 回收用于火炬燃烧气体，作为天然气或天然气凝液销售	2a 储罐上添加闪蒸气回收装置。	(6)
	2b 试井和完井期间减少火炬燃烧。	(7)
	2c 生产压缩天然气并通过公路运输。	(8)
	2d 回收天然气凝液。	(8)
3. 储存原本要被火炬燃烧的气体	将气体注入油气藏存储。	(9,10)
4. 寻找火炬燃烧气体的替代用途	利用废气发电。	(8)
5. 提高火炬燃烧效率	5a 提高有人值守空气或蒸气辅助的火炬燃烧效率。	(11-14)
	5b 改善无人值守场所小型火炬燃烧效率。	(13)

关于火炬燃烧的更多信息，请参见世界银行旗下全球天然气减排合作协会(GGFR)<sup>1</sup>，Johnson和Coderre<sup>3</sup>，Allen等<sup>4</sup>，美国环境保护署<sup>15</sup>，美国国家科学、工程和医学研究院<sup>16</sup>，以及Porter等<sup>17</sup>。

# 参考文献

- 1 World Bank, Global Gas Flaring Reduction Partnership; Estimates of Flaring using Satellite Data, available at <http://pubdocs.worldbank.org/en/603281560185748682/pdf/Gas-flaring-volumes-Top-30-countries-2014-2018.pdf> (2019)
- 2 International Energy Agency, 2019, Methane tracker: Reducing methane emissions from oil and gas operations, available at: [www.iea.org/weo/methane](http://www.iea.org/weo/methane).
- 3 MR Johnson and AR Coderre, 'Compositions and greenhouse gas emission factors of flared and vented gas in the Western Canadian Sedimentary Basin', Journal of the Air & Waste Management Association, 62:9, 992-1002, doi: 10.1080/10962247.2012.676954 (2012).
- 4 DT Allen, D Smith, VM Torres, and F Cardoso Saldaña, 'Carbon dioxide, methane and black carbon emissions from upstream oil and gas flaring in the United States', Current Opinion in Chemical Engineering, 13, 119-123 (2016).
- 5 Richard Roehner, Panja Palash and Deo Milind, 'Reducing gas flaring in oil production from shales', Energy & Fuels 30.9 (2016): 7524-7531
- 6 US Environmental Protection Agency (US EPA) [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/II\\_final\\_vap.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/II_final_vap.pdf) (2019).
- 7 US Environmental Protection Agency (US EPA) [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/reduced\\_emissions\\_completions.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/reduced_emissions_completions.pdf), (2019)
- 8 Carbon Limits/Clean Air Task Force, 'Improving utilization of associated gas in US tight oil fields', Report and appendices available at [www.catf.us/wp-content/uploads/2015/04/CATF\\_Pub\\_PuttingOuttheFire.pdf](http://www.catf.us/wp-content/uploads/2015/04/CATF_Pub_PuttingOuttheFire.pdf) and [www.catf.us/wp-content/uploads/2018/10/CATF\\_Pub\\_PuttingOuttheFire\\_Appendix.pdf](http://www.catf.us/wp-content/uploads/2018/10/CATF_Pub_PuttingOuttheFire_Appendix.pdf) (2015)
- 9 US Energy Information Administration (2017), Reinjected Gas, available at: [www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=002&c=rurvfvvtvnnv1urvfvfvvvvfvvovu20evvvvvvvvvvvvuo&ct=0&tl\\_id=3002-A&vs=INTL.48-1-AFG-BCF.A&cy=2015&vo=0&v=H&end=2017](http://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?pa=002&c=rurvfvvtvnnv1urvfvfvvvvfvvovu20evvvvvvvvvvvvuo&ct=0&tl_id=3002-A&vs=INTL.48-1-AFG-BCF.A&cy=2015&vo=0&v=H&end=2017)
- 10 B. Todd Hoffman, Steve Sonnenberg, Hossein Kazemi and Qi Cui, 'The benefits of reinjecting instead of flaring produced gas in unconventional oil reservoirs, Available at [www.onepetro.org/conference-paper/URTEC-1922257-MS](http://www.onepetro.org/conference-paper/URTEC-1922257-MS) (2014)
- 11 VM Torres, S Herndon, Z Kodesh, R Nettles and DT Allen, 'Industrial flare performance at low flow conditions: Part 1. Study Overview' Industrial & Engineering Chemistry Research, 51, 12559-12568, DOI: 10.1021/ie202674t (2012)
- 12 VM Torres, S Herndon and DT Allen, 'Industrial flare performance at low flow conditions: Part 2. Air and Steam assisted flares' Industrial & Engineering Chemistry Research, 51, 12569-12576, DOI: 10.1021/ie202675f (2012)
- 13 University of Texas, 'Supplemental Flare Operations Training' available at <https://sfot.ceer.utexas.edu/> (2019)

- 14 FM Al-Fadhli, VM Torres and DT Allen, 'Impacts of air assist flare blower configurations on flaring emissions' *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 12606-12610, DOI: 10.1021/ie3012209 (2012)
- 15 US Environmental Protection Agency (US EPA), *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2017* April 2019.
- 16 National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) 'Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States' National Academy Press, Washington, DC (2018)
- 17 MD Porter, R Natili and A Strathman, 'Marcellus Shale Production Facility Emissions: Overcoming Challenges in the Liquids-Rich Area' Society of Petroleum Engineers, Eastern Regional Meeting (2016).







METHANE  
GUIDING  
PRINCIPLES