

# 燃料和燃烧

1. 简介 .....	1
2 燃料的类型 .....	1
3. 燃料的性能评估 .....	10
4. 提高能源效率的机会 .....	17
5. 方案列表 .....	19
6. 工作表 .....	23
7. 参考文件 .....	24

## 1. 简介

本节简要说明燃料的主要特性。

从太阳获得的能量通过光合作用转变成化学能。但是，我们知道，当我们燃烧干柴或木头时，产生的能量是以热切期望和光的形式存在的，我们通过光合作用释放了原本储存在干柴或木头中的太阳能。我们知道当今在世界上的大多数地方，木柴并不是主要的燃料来源。我们家里通常使用的是天然气或油，而在大型发电系统中主要靠油和煤对水加热来产生蒸汽，为涡轮机提供动力。煤、油和天然气这些燃料通常被称为化石燃料。

各种燃料（液体、固体和气体燃料）可用性取决于成本、可获得性、储存、处理、污染和锅炉、燃烧炉和其它燃烧设备等各种因素。

了解燃烧特性有助于选择适用于各种目的以及有效利用燃料的适当燃料。通常在实验室进行实验来评估燃料的性质和质量。

## 2 燃料的类型

本节说明燃料的类型：固态、液态和气态。

### 2.1 液体燃料

象炉用油和LSHS（低态重油）主要用作工业目的。下面是液体燃料的各个性质。

#### 2.1.1 密度

密度是指在参照温度为15°C时燃料质量与燃料体积的比值。密度通过液体比重计来测量。了解密度对于量化计算和评估燃烧质量很有用。密度的单位是千克/立方米（kg/m<sup>3</sup>）。

### 2.1.2 比重

比重是指在某温度下，某体积的油的重量与相同体积的的水的密度的比值。燃料相对于水的密度即称为比重。水的比重被定义为1。由于比重是一个比值，因此没有单位。比得的测量通常是用比重计来进行的。比重可用来计算相关的重量和体积。下表列出了各种燃油的比重：

表1：各种燃油的比重（摘自Thermax印度有限公司）

燃油	L.D.O (轻柴油)	炉用油	L.S.H.S (低流重油)
比重	0.85 - 0.87	0.89 - 0.95	0.88 - 0.98

### 2.1.3 粘度

液体的粘度是内部流动阻力的度量。粘度取决于温度，随着温度的上升，粘度降低。如果没有说明温度，那么粘度的数值就没有意义。粘度的单位是司托克期/厘沲。有时候粘度还用恩氏、赛氏或雷氏粘度来表示。每种油都有它自己的温度-粘度关系。粘度是用粘度计来测量的。

粘度对于燃料油的储存和使用来说是最重要的特性，对装卸、储存和满意地雾化所要求的预热程度有很大的影响。如果油太粘，很难泵抽，很难点燃燃烧器，并且也很难装卸。雾化程度低可能会在燃烧炉嘴或炉壁上产生积碳，因此要想适当地雾化有必要进行预热。

### 2.1.4 燃点

燃料的燃点是燃料可以被点燃的最低温度。炉用油的燃点是66<sup>0</sup>C。

### 2.1.5 倾点

燃料的倾点是指当在指定条件下冷却时燃料可以倾注或流动的最低温度。它是燃料油可以泵抽的最低温度的一个粗略指标。

### 2.1.6 比热

比热是指1千克的油温度升高1<sup>0</sup>C时所需要的热量（kCals）。比热的单位是千卡/千克·度（kcal/kg<sup>0</sup>C）。比热根据油比重的不同在0.22到0.28之间。比热决定了将油加热到预定温度时所需的蒸汽或电能。轻油的比热较低，重油的比热较高。

### 2.1.7 热值

热值是所产生的热或能量的量度单位，以总热值或净热值来计量。在燃烧过程中产生的水蒸汽的汽化潜热决定的总热值和净热值之间的差。总热值（GCV）即在燃烧过程中产生的所有蒸汽完全冷凝的热量，净热值（NCV）承担了水离开燃烧产品未完全冷凝时的热量。燃料应该根据净热值来进行比较。

煤的热值根据灰、水分和煤的类型而相差很大，而燃料油的热值却比较一致。下面列出了典型的常用液体燃料的GCV值：

**表2. 不同燃料油的总热值**（摘自Thermax印度有限公司）

燃料油	总热值(kCal/kg)
煤油	- 11,100
柴油	- 10,800
L.D.O	- 10,700
炉用油	- 10,500
LSHS	- 10,600

### 2.1.8 硫

燃料油中硫的数量主要取决于原油的来源，其次也受精炼过程的影响。残余燃料油（炉用油）的正常硫含量应在2%-4%之间。表3列出了不同燃料油的典型含硫量值。

**表3. 不同燃料油中含硫百分比**（摘自Thermax印度有限公司）

燃料油	含硫百分比
煤油	0.05 - 0.2
柴油1	0.05 - 0.25
L.D.O	0.5 - 1.8
炉用油	2.0 - 4.0
LSHS	< 0.5

含硫的主要缺陷在于有可能会被燃烧过程中以及之后在烟囱或烟道的冷却部分以及空气预热器和节热器中形成的硫酸腐蚀的风险。

### 2.1.9 灰分含量

灰分值是与燃料油中的无机物质或无机盐相关的。燃料中能挥发的部分的灰分水平可以忽略不计。残余燃料中的灰分含量较高。这些盐可能是钠、钒、钙、镁、硅、铁、铝、镍等的化合物。

通常，灰分值在0.03 - 0.07 %之间。液体燃料中的灰分过多可能会引起燃烧设备内积垢。灰分对燃烧器喷嘴有腐蚀作用，在高温时会损坏耐火材料，引起高温侵蚀和设备积垢。

#### 2.1.10 碳渣

碳渣的形成说明燃料内挥发成分挥发是发生在燃烧表面，例如燃烧器或喷嘴上很容易形成含碳固体积垢。碳渣含有1%或更多的碳残留。

#### 2.1.11 含水量

炉用油的含水量通常很低，因为在精炼厂的产品都经过了热处理，使得含水量小于1%。

水可能以游离或乳化形式存在，可以在燃烧过程中对燃烧炉的内表面产生损坏，特别是如果水中含有可溶性盐时。水还可能使火焰在燃烧器喷嘴喷溅，也有可能使火焰熄灭，降低火焰温度或抻长火焰。

下面的表中总结了燃料油的典型规格。

**表4. 燃料油的通常规格**（摘自Thermax印度有限公司）

性质	燃料油		
	炉用油	L.S.H.S	L.D.O
密度（在150C时约g/cc）	0.89 - 0.95	0.88 - 0.98	0.85 - 0.87
燃点（0C）	66	93	66
倾点（0C）	20	72	18
G.C.V. (kCal/kg)	10500	10600	10700
沉积物，% 重量最大值	0.25	0.25	0.1
总硫量 % 重量最大值	不超过4.0	不超过 0.5	不超过1.8
含水量% 体积最大值	1.0	1.0	0.25
灰分 % 重量最大值	0.1	0.1	0.02

### 2.1.12 燃料油的储存

在石油桶中储存燃料油存在着安全隐患。最好的作法是将油储存在圆桶中，可以在地面上也可以在地下。交货的炉用油可能含有灰尘、水和其它污染物。

储存罐设施的大小非常重要。建议储存的数量应足以提供至少10天的正常油耗。工业加热用的燃料储存罐通常是安装在地面上的垂直低碳钢罐。一定要小心，基于安全和环境原因，应在罐的周围建设围墙，来防止事故产生的泄漏。

因为时间一长在罐中就会沉淀一定量的固体和污泥，油罐应定期清洗：重油油罐应每年清洗一次，轻油油罐应每两年清洗一次。从油槽车上往储存罐中倒油是一定要小心。接口、法兰和管道上的所有泄漏一定要尽早处理。在加入到燃烧系统之间，应尽可能避免对油的任何可能污染，如灰尘、污泥和水等。

## 2.2 固体燃料（煤）

### 2.2.1 煤的分类

煤可分为三大类，即无烟煤、烟煤和褐煤。但是，各类之间并没有明显的界线。煤可以进一步分为半无烟煤、半烟煤和亚生煤。无烟煤是从地质角度上来看最古老的煤。它是一种主要由含有很少挥发成分和几乎不含水的碳组成的硬煤。褐煤从地质角度讲是年代最短的煤。它是一种主要由挥发性物质和含有固定低碳的水分组成的烟煤。固定碳是指游离状态的没有与其它元素结合的碳。挥发性物质是指当煤被加热时就蒸发的煤的可燃成分。

在印度工业中通常使用的煤都是烟煤和亚生煤。下面是根据热值区分的印度煤的等级：

等级	热值范围 (单位：kCal/kg)
A	6200以上
B	5600 – 6200
C	4940 – 5600
D	4200 – 4940
E	3360 – 4200
F	2400 – 3360
G	1300 – 2400

印度工业中通常选用的是D、E和F级煤。

煤的化学成分对它的可燃性有很大的影响。煤的性质大致分为物理性质和化学性质。

### 2.2.2 煤的物理性质和化学性质

煤的物理性质包括比热、含水量、挥发性物质和灰分。

煤的化学性质是指碳、氢、氧和硫等各种化学元素成分。

各个煤田的煤的热值也不同。下表列出了各种煤的通常 GCV。

表 5. 各种类型的煤的GCV

参数	褐煤 (干)	印度煤	印尼煤	南非煤
GCV (kCal/kg)	4,500*	4,000	5,500	6,000

\*褐煤的GCV 是指在接收状态的值 2500 –3000。

### 2.2.3 煤的分析

煤的分析有两种方法：元素分析和工业分析。元素分析将确定所有的煤成分元素、固态或气态，工业分析只确定固定的碳、挥发性物质、水分和灰分的百分比。元素分析是由熟练的化学师在装备良好的实验室中确定的，而工业分析是由简单的仪器来确定的（需要注意工业分析的工业“proximate”与近似“approximate”一词无关）。

#### 水分的测量

## 热力设备：燃料和燃烧

水含量是通过将粉末状的大小为 200-微米的生煤样品放在不盖盖儿的坩埚中，把坩埚放在  $108 \pm 2$  °C 的烤箱上。烤箱上加盖，再将样品冷却到室温，称后再称重。损失的重量即为水分。

### 挥发物质的测量

压碎的煤的新鲜样品称量，放在带盖的坩埚里，在  $900 \pm 15$  °C 的燃烧炉上加热。样本冷却，再称重，损失的重量即水分和挥发性物质。剩余物为焦炭（固定碳和灰）。关于详细方法（包括确定碳和灰分），请参照 IS1350，第一部分：1984 年，第三部分和第四部分。

### 碳和灰分的测量

掀开上一个实验中使用的坩埚盖，将坩埚在本生燃烧器上加热直到所有碳都燃烧。再将残余物称重，即为不可燃烧的灰分。与前一次称重的重量差即为固定碳。在实际操作中，用 100 减去水分值、挥发性物质和灰即得到固定碳或 FC 的值。

## 工业分析

工业分析说明了固定碳、挥发性物质、灰和水含量在碳中所占的重量百分比。固定碳和挥发性可燃物质的数量直接构成碳的热值。固定碳为燃烧过程中主要的热发生物。高度挥发性物质的含量说明了燃料的易燃性。灰分含量对于炉栅、污染控制设备以及燃烧炉的灰处理系统的设计非常重要。表6给出了各种煤的典型工业分析。

表6. 各种煤的典型工业分析（百分比）

参数	印度煤	印尼煤	南非煤
水分	5.98	9.43	8.5
灰色	38.63	13.99	17
挥发性物质	20.70	29.79	23.28
固定碳	34.69	46.79	51.22

下面对这些参数进行说明：

### 固定碳

固定碳是当挥发性物质蒸馏后留在火炉中的固体燃料，主要由碳组成，另外还含有一些未随气体流走的氢、氧、硫和氮。固定碳可用来粗略估计煤的热值。

### 挥发性物质

挥发性物质是甲烷、碳氢化合物、氢和一氧化碳以及象二氧化碳和二氧化氮等不可燃气体。因此，挥发性物质是气体燃料存在的指示。挥发性物质的一般范围在 20-35% 之间。挥发性物质：

- 对称地增加火焰的长度，并有助于煤的点燃
- 确定了燃烧炉高度和体积的最低值
- 影响二次气体要求以及分配方面
- 影响二次油的支持

### 灰分：

灰分是不能燃烧的混合物，灰分的含量一般在 5% t— 40%之间，灰分

- 降低了处理和燃烧能力
- 增加了处理成本
- 影响燃烧效率和燃烧器的效率
- 产生结垢和残渣

### 水含量

煤中的水分必须得到运输、处理和储存。因为它代替了可燃物质，降低了每千克煤中的热含量。水分一般在 0.5%~10%之间，水分：

- 增加了热损失，因为蒸汽的蒸发和过热时吸收热量
- 在某种程度上有助于精炼
- 有助于热辐射的传递

### 硫的含量

硫的含量一般在 0.5~0.8%之间，硫

- 抑制结垢和产生残渣
- 腐蚀烟道和空气加热器或节能器等设备
- 限制出口烟气的温度

### 元素分析

元素分析表明了各种化学元素的成分，如碳、氢、氧、硫等等。对于确定燃烧所需的空气以及燃烧气体的体积和百分很有帮助。在计算火焰温度和进行烟道管设计等方面需要这些信息。下表中给出了各种煤通常的元素分析。

表7. 煤的典型元素分析

参数	印度煤, %	印尼煤 %
水分	5.98	9.43
矿物质 (1.1 x 灰)	38.63	13.99
碳	41.11	58.96
氢	2.76	4.16
氮	1.22	1.02
硫	0.41	0.56
氧	9.89	11.88

表8. 元素分析与工来分析的关系

%C	=	$0.97C + 0.7(VM - 0.1A) - M(0.6 - 0.01M)$
%H	=	$0.036C + 0.086(VM - 0.1xA) - 0.0035M^2(1 - 0.02M)$
%N <sub>2</sub>	=	$2.10 - 0.020 VM$
式中		
C	=	固定碳的百分比
A	=	灰分的百分比

VM	=	挥发性物质的百分比
M	=	水分的百分比

备注：上述等式对于水分含量在 15% 以上的煤适用。

## 2.2.4 煤的储存、处理和准备

燃料可获得性和运输的不确定性使得储存和后续处理变得非常有必要。储存煤有一个缺陷在于存货增加、空间有限、质量恶化并且存在潜在的火灾隐患。与储存煤相关的另一个次要的损失是氧化、风化和磨耗层的损失。煤中1%的氧气与煤中1%的灰会有同样的作用。风化在总损失中占将近0.5 – 1.0 %。

妥善保存煤的一个主要目的是使磨耗层损失以及由于自燃所产生的损失尽可能地降低。由煤灰和土形成的不能利用的煤土混合层，会导致磨耗层的损失。另一方面，如果在煤堆内温度逐渐上升，那么氧化作用就会使储存的煤发生自燃。磨耗层损失可以通过以下措施来减少：

1. 铺设硬土地面，来储存煤
2. 搭建一个混凝土和砖筑成的标准储存池

在工业上，煤处理方法分为手动系统和传送带系统。尽量减少煤的处理次数，以便减少进一步产生煤面和煤块的情况。

在向燃烧器中填煤之前，预选大小适当的煤块装填是取得更好燃烧效果的重要步骤。大块不规则的煤会导致以下问题：

- 燃烧条件差，燃烧温度不够
- 接触空气的面积太大，导致更高的烟道损失
- 增加了灰中不燃烧物的数量
- 降低了热效率

备注：下面一节“能源效率机会”给出了煤的准备的详细说明。

## 2.3 气体燃料

气体燃料是最方便的，因为他们需要的处理量最小，并且在最简单、最小维护的燃烧器系统中使用。气体通过分配网络可随时使用，适合于人口和工业密度较高的地区。尽管如此，大用户和个人消费者有时也采用储气罐，有些自己制造生产气体燃料。

### 2.3.1 气体燃料的类型

下面是气体燃料类型一览表：

- 在自然中发现的燃料：
  - 天然气
  - 煤矿中的甲烷
- 由固体燃料生成的气体燃料
  - 从煤中获取的气体
  - 从废物和生物质中获取的气体（沼气）
  - 从其它工业流程中获取的气体（高炉煤气）

- 从石油中得到的气体
  - 液化石油气(LPG)
  - 炼厂气
  - 从油气化过程中获得的气体
- 从发酵过程中获得的气体

气体燃料的一般用途是液化石油气（LPG）、天然气、矿井气、高炉气和焦炉煤气。气体燃料的热值用常温（20 °C）常压（760 mm Hg）下每通常立方米的千卡数（kCal/Nm<sup>3</sup>）来表示。

### 2.3.2 气体燃料的性质

因为大多数气体燃烧器具不能利用水蒸汽中的热量，因此总热值没有什么意义。燃料应根据净热值来进行比较。对于天然气更是如此，因为氢含量的增加会导致在燃烧中形成更多的水分。

表 9 给出了各种气体燃料的典型物理和化学性质。

表 9. 各种气体燃料的典型物理和化学性质

燃料气体	相对密度	较高的热值 kcal/Nm <sup>3</sup>	空气/燃料比- 空气的体积m <sup>3</sup> 与燃料的体积 m <sup>3</sup>	火焰温度 °C	火焰速度 m/s
天然气	0.6	9350	10	1954	0.290
丙烷	1.52	22200	25	1967	0.460
丁烷	1.96	28500	32	1973	0.870

### 2.3.3 LPG

LPG是丙烷和丁烷混合物的主要成分，还有很少量的非饱和物质（丙烯和丁烯）以及一些轻C<sub>2</sub>和重C<sub>5</sub>。丙烷（C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>）、丙烯（C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>）、通常和异丁烷（C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>）以及丁烯（C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>）也包含在LPG中。LPG可被定义为在通常大气压下为气态，但在常温加中压的情况下呈液态的碳氢化合物。虽然它们一般在气态下使用，但是他们在储存和运输的过程中都是在加压的液态下存在的，以便于运输和易于装卸。液态的LPG蒸发后可产生体积是其250倍的气体。

LPG 蒸汽的密度比空气大：丁烷比空气重约两倍，丙烷比空气重约 1.5 倍。因此，LPG 蒸汽可以沿着地面流到周围环境最低的排水沟，并且在离泄漏源很远的地方被点燃。在静止的空气中，蒸汽扩散地很慢，即使是少量的液化气逃逸也可能会产生大体积的蒸汽/空气混合物，从而产生危险。为了检测空气泄漏，所有的 LPG 都要求添臭。在储存 LPG 的地方，地面通风要充分。正因为如此，LPG 罐不应储存在地面通风不畅的地窖或地下室中。

### 2.3.4 天然气

甲烷是天然气的主要成分，占总体积的95%左右，其它成分还有甲烷、丙烷、丁烷、戊烷、氮、二氧化碳及其它少量气体。另外还有很少量的硫化物。由于甲烷是天然气的主要成分，因此当比较天然气与其它燃料的性质时，一般可使用甲烷的性质进行对比。

天然气是不需要储存设施的高热值燃料。它与空气混合，不产生烟气或煤烟。它不含硫，比空气轻，在泄漏时很容易扩散到空气中，下表给出了油、煤和气中碳含量的比较。

表10. 各种燃料化学成分的比较

	燃料油	煤	天然气
碳	84	41.11	74
氢	12	2.76	25
硫	3	0.41	-
氧	1	9.89	Trace
氮	Trace	1.22	0.75
灰	Trace	38.63	-
水	Trace	5.98	-

## 3. 燃料的性能评估

本节说明了燃烧的原理、利用所需空气的热传导计算评估燃料性能的方式、多余气体的概念以及排放气体的排放系统。

### 3.1 燃烧原理

#### 3.1.1 燃烧过程

燃烧是指燃料迅速氧化生成热或光的过程。燃料的完全燃烧只有在氧气充分供应时才可能发生。

氧气（O<sub>2</sub>）是地球上最常见的一种元素，占空气的20.9%。燃料快速氧化产生大量的热。固体或液体燃料在燃烧前必须先转变成气体。通常将液体或固体转变成气体时都需要热。如果有充足的空气，燃料气体在通常状态下即可燃烧。

空气中含量最多的是氮气，占空气（不是氧气）的79%，另外空气里还有许多微量的其它元素。氮气被称为是燃烧中所需氧气的降温稀释剂。

氮气从燃料燃烧过程中吸收热量并冲淡了燃料气，因此降低了燃烧效率，这就减少了通过热交换表面而进行的热传递。而且，它还增加了燃烧副产品的体积，燃烧副产品必须更快的通过换热器及烟道，以便导入额外的燃料-气混合物。

氮气还能与氧气混合（特别是在高火焰温度下）生成氧化氮（NO<sub>x</sub>），氧化氮是有毒污染物。燃料中的碳、氢和硫与空气中的氧气结合，生成二氧化碳、水蒸汽和二氧化硫，释放的热量分别为8,084千卡、28,922千卡和2,224千卡。在某些条件下，碳还可以与氧气结合，生成一氧化碳，可以释放少量的热（碳的值为2,430 kcal/kg）。燃烧成CO<sub>2</sub>的碳生成的单位燃料的热量比生成CO或烟时的高。

C	+ O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	+ 8,084 kcal/kg的碳
2C	+ O <sub>2</sub>	→	2 CO	+ 2,430 kcal/kg 的碳
2H <sub>2</sub>	+ O <sub>2</sub>	→	2H <sub>2</sub> O	+ 28,922 kcal/kg的氢
S	+ O <sub>2</sub>	→	SO <sub>2</sub>	+ 2,224 kcal/kg的硫

每生成一千克 CO，就意味着损失了 5654 千卡的热量（8084 - 2430）。

### 3.1.2 燃烧的3T

好的充分燃烧的目的是为了释放燃料中全部的热量。当控制好燃烧的3T时就可以实现这个目的，即（1）温度要足够高，达到燃料的燃点并维持燃烧；（2）燃料与氧气形成湍流并充分混合；（3）有充分的时间以便充分燃烧。

象天然气和丙烷常用的燃料一般由碳和氢组成，水蒸汽是燃烧氢的副产品，带走了燃料气中的热量，否则会有更多的热产生出来。

天然气中含有的氢比燃料油中多，但每千克中的碳较少，因此产生的水蒸汽也较多。因此，当燃烧天然气时，通过排放气带走了更多的热量。

在燃烧所中燃料的含量太多或太少都可能导致未燃的燃料以及一氧化碳的生成。要想使燃烧状态最好就需一定量的O<sub>2</sub>，为确保充分燃烧就需要有过量（高于这个量）的空气，但是，空气太多也会导致热量和效率损失。

并不是所有的燃料都通过蒸发器设备转变成热并被吸收，通常燃料中的所有氢以及大部分锅炉燃料在当今空气污染标准允许的范围内都含有少量或不含有硫。所以燃烧效率的主要挑战是未燃烧的碳（在灰中以及未燃烧的气体中），生成一氧化碳而不是二氧化碳。

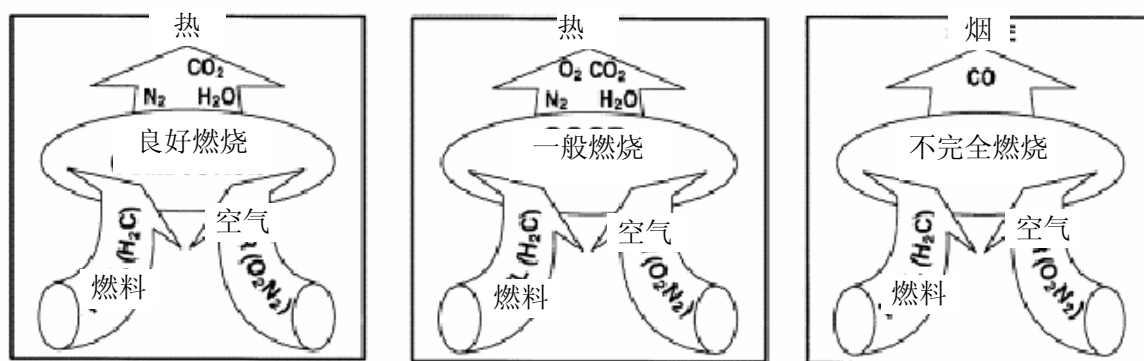


图1. 良好燃烧、一般燃烧和不完全燃烧  
(能源效率局, 2004年)

## 3.2 所需空气的热传导计算

### 3.2.1 计算炉用油燃烧所需的热传导空气

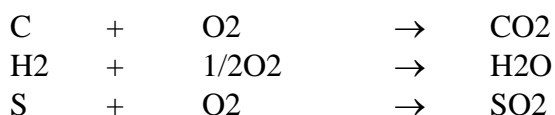
由于燃烧需要空气助燃，所需的空气量可以用以下的方法进行计算。

第一步是确定炉用油的成分。下面是实验室分析中得到的炉用油的具体规格：

成分	重量百分比%
碳	85.9
氢	12
氧	0.7
氮	0.5
硫	0.5
水	0.35
灰	0.05
燃料的GCV	10880 kcal/kg

如果我们采用这些分析数据，考虑用100千克的炉用油样品，那么就会发生以下的化学反应：

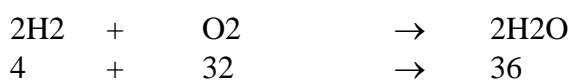
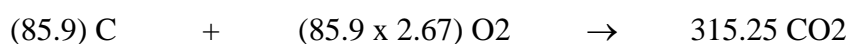
元素	分子量 (kg / kg Mol)
C	12
O <sub>2</sub>	32
H <sub>2</sub>	2
S	32
N <sub>2</sub>	28
CO <sub>2</sub>	44
SO <sub>2</sub>	64
H <sub>2</sub> O	18



燃料的成分

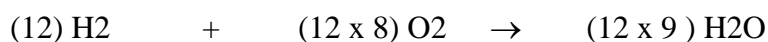


12千克的碳需要32千克的氧，生成44千克的二氧化碳，因此地无银三百两千克碳需要32/12千克，即2.67千克的氧气。

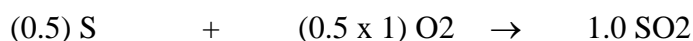


## 热力设备：燃料和燃烧

4千克氢气需要32千克的氧气，生成36千克水，因此1千克氢气需要32/4，即8千克的氧气。



32千克硫需要32千克氧气，生成64千克二氧化硫，因此1千克硫需要32/32千克，即1千克的氧气。



$$\begin{array}{rcl} \text{所需氧气的总量} & = & 325.57 \text{ kg} \\ (229.07+96+0.5) & & \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} \text{在100千克燃料中已经} & & \\ \text{具有氧气（给定）} & = & 0.7 \text{ kg} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} \text{仍需要的氧气量} & = & 325.57 - 0.7 \\ & = & 324.87 \text{ kg} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} \text{因此所需的干燥空气} & = & (324.87) / 0.23 \\ (\text{空气中含23\%的氧气，按重量}) & & \\ & = & 1412.45 \text{ kg空气} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} \text{理论上所需的空气量} & = & (1412.45) / 100 \\ & = & 14.12 \text{ kg 空气 / kg 燃料} \end{array}$$

因此，在这个例子中，每燃烧1千克的炉用油，就需要14.12千克的空气。

### 3.2.2 计算燃料气中CO<sub>2</sub>含量的理论值

另外还有必要计算燃料气中的CO<sub>2</sub>含量，然后再用来计算燃料气中的过量空气。为了让炉用油完全燃烧，还需要一定量的过量空气。但是，空气含量太多也会导致热损失，而多余气体太少又会使燃烧不充分。可利用下式来计算燃料气中的CO<sub>2</sub>：

$$\begin{array}{rcl} \text{燃料气中的氮气} & = & 1412.45 - 324.87 \\ & = & 1087.58 \text{ kg} \end{array}$$

下式计算了理论上二氧化碳在干燥燃料气中所占的百分比：

$$\begin{array}{rclcl} \text{燃料气中CO}_2\text{的摩尔数} & = & (314.97) / 44 & = & 7.16 \\ \text{燃料气中N}_2\text{的摩尔数} & = & (1087.58) / 28 & = & 38.84 \\ \text{燃料气中SO}_2\text{的摩尔数} & = & 1/64 & = & 0.016 \end{array}$$

按体积计算的CO<sub>2</sub>百分比的理论值 = (CO<sub>2</sub>的摩尔数 x 100) / 总摩尔数（干燥）

$$= (7.16 \times 100) / (7.16 + 38.84 + 0.016)$$

$$= 15.5\%$$

### 3.2.3 计算含有过量空气的燃烧气的成分

现在，我们知道了理论上的空气需量和燃料气中的CO<sub>2</sub>含量。下一步是测量方法燃料气中CO<sub>2</sub>的实际百分比。在下面的计算中，假设CO<sub>2</sub>在燃料气中所占的体积为10%。

$$\begin{aligned} \% \text{ 过量空气} &= [(\text{理论 CO}_2\% / \text{实际CO}_2) - 1] \times 100 \\ &= [(15.5/10 - 1)] \times 100 \\ &= 55\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{燃烧100千克燃料所需空气的理论值} &= 1412.45 \text{ kg} \\ \text{含55\%过量空气所需的供应空气的总量} &= 1412.45 \times 1.55 \\ &= 2189.30 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{过量空气的数量 (实际-理论过量空气)} &= 2189.30 - 1412.45 \\ &= 776.85 \\ \text{O}_2 (23\%) &= 776.85 \times 0.23 \\ &= 178.68 \text{ kg} \\ \text{N}_2 (77\%) &= 776.85 - 178.68 \\ &= 598.17 \text{ kg} \end{aligned}$$

每1千克燃料中带有55%过量空气的燃料气的最终成分如下：

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 314.97 \text{ kg} \\ \text{H}_2\text{O} &= 108.00 \text{ kg} \\ \text{SO}_2 &= 1 \text{ kg} \\ \text{O}_2 &= 178.68 \text{ kg} \\ \text{N}_2 &= 1685.75 \text{ kg} (= \text{在空气中} 1087.58 + \text{在过量空气中} 598.17) \end{aligned}$$

### 3.2.4 按体积计算干燥燃料气中CO<sub>2</sub>百分比的理论值

现在我们有各成分的重量，可以计算各成分的理论体积数了，具体如下：

$$\begin{aligned} \text{燃料气中CO}_2\text{的摩尔数} &= 314.97 / 44 = 7.16 \\ \text{燃料气中SO}_2\text{的摩尔数} &= 1/64 = 0.016 \\ \text{燃料气中O}_2\text{的摩尔数} &= 178.68 / 32 = 5.58 \\ \text{燃料气中N}_2\text{的摩尔数} &= 1685.75 / 28 = 60.20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{体积的理论百分比} &= (\text{CO}_2 \text{ 的摩尔数} \times 100) / \text{总摩尔数 (干燥)} \\ &= (7.16 \times 100) / (7.16 + 0.016 + 5.58 + 60.20) \\ &= 10\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{按体积计算的O}_2\text{的理论百分比} &= (5.58 \times 100) / 72.956 \\ &= 7.5\% \end{aligned}$$

### 3.3 过量空气的概念

为达到最佳燃烧效果，燃烧空气的实际量必须大于理论上计算所需的量。烟气中一部分是纯净的空气，即单纯加热达到烟气温度并通过烟囱离开燃烧炉的空气。气体的化学分析是有助于实现精细空气控制的客观方法。通过测量燃料气中的CO<sub>2</sub>或O<sub>2</sub>（持续记录仪表或奥萨特区报气体分析器或便宜的便携式仪器）来估算过量空气的量以及烟囱损失。需要供应的过量空气取决于燃烧的类型以及燃烧系统。

计算过量气体的一种快捷的方式是利用图2和图3，只要已测量过燃料气中CO<sub>2</sub>或O<sub>2</sub>的百分比。

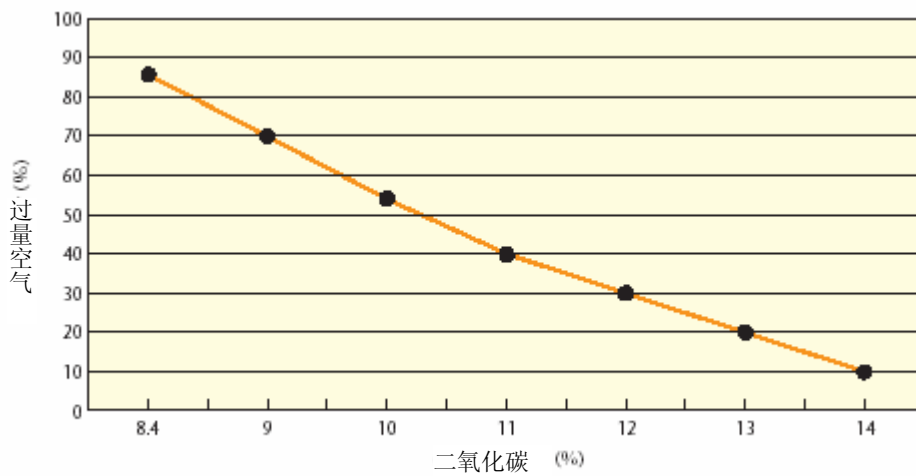


图 2. CO<sub>2</sub> 与过量气体之间的关系  
(能源效率局, 2004 年)

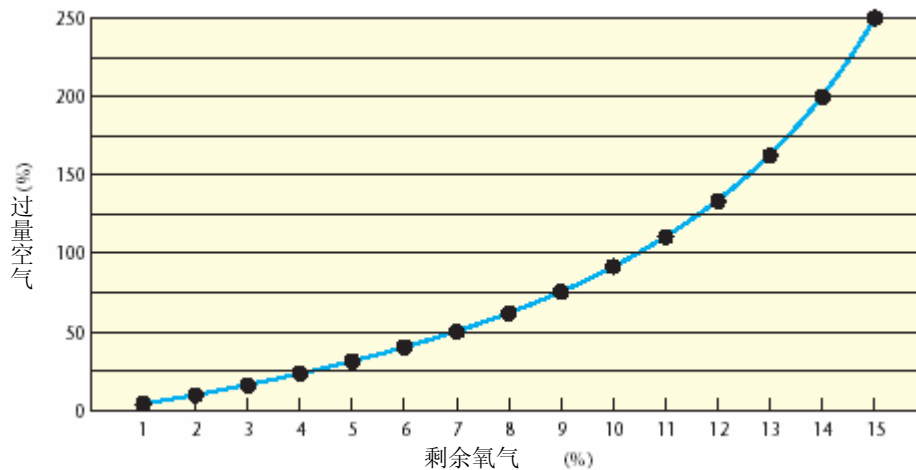


图 3. 剩余氧气与过量气体之间的关系  
(能源效率局, 2004 年)

为了优化燃料油的燃烧，燃料气中的CO<sub>2</sub>或O<sub>2</sub>应分别维持在以下水平：

CO <sub>2</sub>	=	14.5–15 %
O <sub>2</sub>	=	2–3 %

### 3.4 排放系统

燃烧系统中排放的功能是要将燃烧产物即燃烧气体排放到大气中。通风可分为两类，即自然排放和机械排放。

#### 3.4.1 自然排放

自然排放是只通过烟囱而产生的排放，是通过烟囱内的热气体柱与相同高度和横截面积的烟囱外的空气柱之间的重量差而实现的。因为烟囱内的气体比烟囱外的气体要轻得多，烟囱内的气体上升，外边较重的空气流进入了灰坑。排放通常是使用烟囱内的手动风门调节挡板和锅炉连接的烟道来控制的，在这里不使用风机或排风扇。燃烧产物在不会在造成周围社区污染的高度进行排放。

#### 3.4.2 机械排放

是通过风机进行的人工排放。适用的三种基本类型的排放有：

- **对称排放：**强制排放（F-D）风机（鼓风机）将空气推进到燃烧炉中，引风机（I-D）将空气引入到烟囱内，提供机械通风，将气体排出炉膛。在这里压力对于锅炉要保持到低于大气压0.05-0.10英寸水柱，而对于重热或热处理燃烧炉要稍微高一点。
- **引风：**引风机吸取足够的空气进入燃烧炉，使燃烧产物排放到大气中。在这里燃烧炉的压力要保持在大气压稍低，这样燃烧空气就能流入到系统中。
- **强制鼓风：**强制通风系统利用风机将空气吹进燃烧炉，迫使燃烧产物进入装置和上升到烟囱。

## 4. 提高能源效率的机会

本节包括提高燃料燃烧过程中的能源效率机会。

### 4.1 燃烧油的预热

燃烧油和LSHS（低硫重油）的粘度随着温度的降低而增加，难于对油进行泵抽。当环境温度较低时（低于 25 °C），炉用油很难泵出，为了克服这一点，需要通过以下两种方式对油进行预热：

- 将整个油罐进行预热。在这种整个预热的形式中，蒸汽螺管放在罐的底部，罐需要完全隔离；
- 当使用流出加热器对油进行加热。为了减少对蒸汽的需求量，最好将油罐隔离。

如果流速较高，使流出加热器的能力不可能实现或者当使用LSHS等燃料时，有必要进行整体加热。如果是外流加热，只对流出罐的油进行加热，直到达到泵抽温度。外流加热器是利用蒸汽或电作为加热媒质的最基本换热器。

## 4.2 燃烧油的温度控制

为防止过热有必要对温度进行恒温控制，特别是当油流量减少或停止时。这对于电加热器来说尤其重要，因为当没有流动和过热时油可能会碳化。在油随意流进吸入管的地方，应该提供自动恒温器。油可以根据泵抽的温度取决于所使用的油的等级。千万不要把油储存在高于泵抽所需的温度的地方，因为这会使能源的损耗增加。

## 4.3 固体燃料的准备

### 4.3.1 煤的大小

煤的适当尺寸是确保有效燃烧的一个关键量度。与燃烧系统直接相关的适当的煤尺寸有助于均匀燃烧，减少灰分损失以及提高燃烧效率。

压碎或磨碎煤来减少煤的尺寸。对于小装置特别是燃煤机装置来说，先把煤磨碎十分经济合算。在煤处理系统中，磨碎只限于最大 6 或 4mm 的尺寸。最常用的磨碎装置是旋转破碎机、滚动碾磨机以及碾磨机。

在磨碎前，有必要先过滤一下煤，这样只有太大的煤被送进碾磨机，有助为减少碾磨机的功率损耗，下面是一些碎煤的推荐做法：

- 安装筛子分离细小的颗粒，避免多余的细煤再次碾碎。
- 安装磁分离器来分离煤中可能会损坏碾磨机的铁片。

表 11 给出了各种燃烧系统中所需的煤的合适尺寸。

表 11. 适合各种类型的燃烧系统的煤的尺寸

序号	燃烧系统的类型	尺寸 (单位 mm)
1.	手动燃烧 (a) 自然排放 (b) 强制排放	25-75 25-40
2.	加煤机燃烧 (a) 链式炉篦 i) 自然排放 ii) 强制排放 (b) 分流加煤机	25-40 15-25 15-25
3.	煤粉燃料	75% 低于 75 微米
4	沸腾锅炉	< 10 mm

\*1 微米= 1/1000 mm

### 4.3.2 煤的调整

由于隔离效应，在燃烧中细面煤呈现出一些问题。细煤从大块煤中隔离可以通过用水对煤进行调整而降低。水有助于细颗粒由于水的表面张力粘在一起变成较大的团，这

样就防止细面通过炉栅漏下去或者被燃烧炉的通风所吹走。当把煤回火时，一定要小心，确保统一加水，并且最好以移动的或流动的煤流来进行。

如果煤中细面占了很大的比例，把煤拌湿可以减少不燃烧碳以及燃烧所需过量空气的百分比，取决于煤中细面的比例。

表 12. 拌湿的程度：煤中的细面与表面水分

细面 (%)	表面水分 (%)
10 - 15	4 - 5
15 - 20	5 - 6
20 - 25	6 - 7
25 - 30	7 - 8

### 4.3.3 煤的混合

如果煤中含有过量的细面，最好将主要是大块的煤与含有过量细面的煤混合。煤的混合有助于将要燃烧的煤中细面的量控制在25%以下。不同质量的煤进行混合有助于向锅炉中填入统一质量的煤。

## 4.4 燃烧控制

燃烧控制有助于燃烧器调整燃料供应、空气供应（燃料与空气的比率）以及燃烧气体的排出，以便实现最佳锅炉效率。向燃烧器中供应的燃料数量必须与蒸汽压力以及所需的蒸汽数量成正比。为了确保锅炉安全操作，有必要进行燃烧控制。

目前使用的燃烧控制的种类有：

- **开/关控制：**最简单的控制，开/关控制是指可以全速燃烧，或者也可以关闭。这种控制只限于小锅炉。
- **高/低/关控制：**再稍微复杂一点的是高/低/关系统，在这种系统中，燃烧器有两个燃烧档。燃烧器可以在较低一点的燃烧速度运行，在需要时也可以转换到全速燃烧的速度进行。燃烧器还可在减少贝多芬的时候切换到低速燃烧位置。这种控制适用于中型锅炉。
- **调制控制：**调制控制是通过在锅炉的整个操作范围内改变燃烧速度与所需的蒸汽压力需求相匹配。调制马达利用传统的机械连接或者电阀来调整向燃烧器供应的一级空气、二级空气和燃料。全调制是指锅炉持续燃烧，并且燃料和空气小心地与整个燃烧范围相匹配使热效率达到最高。

## 5. 方案列表

本节包括提高燃料利用以及燃烧过程中能源效率的最重要方案。

### 燃料列表

- 每日检查：燃烧器中的油温以及油/蒸汽的泄漏

## 热力设备：燃料和燃烧

- 每周任务：清洁所有的过滤器，将所有罐的水排掉
- 每年任务：清洗所有的罐

### 燃料的故障排除

1. 油不能泵抽
  - 粘度太高
  - 管道和过滤器堵塞
  - 油中有污泥
  - 吸油过程中漏油
  - 排气管堵塞
2. 粗滤器堵塞
  - 油中有污泥或蜡
  - 油中有重沉淀
  - 沉淀罐生锈或积垢
  - 由于过度加热使油碳化
3. 油中水分过量
  - 水同油一起进入
  - 泄漏孔
  - 地下罐泄漏
  - 排气管中进水
  - 加热器蒸气螺管泄漏
4. 管道堵塞
  - 油中有污泥
  - 油的粘度过高
  - 管道中存在异物，如老鼠、积垢和木片
  - 油碳化

### 燃烧列表

1. 点火
  - 检查燃烧器/喷嘴的尺寸是否合适
  - 先确定空气供应（启动吹风机），确保在点燃前没有蒸汽/气体。
  - 确保火炬或其它火源的火焰位于喷嘴之前。
  - 打开供油开关（预热）（在启动前，先排放出冷油）。
2. 操作
  - 检查燃烧炉嘴的油温是否合适（参照粘度和温度表）。
  - 检查LAP燃烧器的空气压力（通常采用的气压为63.5 cm 到76.2 cm水柱）。
  - 检查燃烧器附近是否滴油。
  - 检查火焰是否衰退/火焰是否颤动。

## 热力设备：燃料和燃烧

- 检查燃烧炉的定位（确保火焰不接触防火墙或电荷）。
- 调整火焰长度适合所需的条件（确保火焰不蔓延到燃烧炉外面）。

### 3. 荷载变化

- 同时操作空气阀和油阀（对于自调整燃烧器，操作自调节杆，不要只调整油线上的阀门）。
- 为烟囱中排出的浅褐色（烟雾状）的烟调整燃烧器和减震器，使CO<sub>2</sub>所占的比例至少为12%。

### 4. 关闭

- 先关闭油路
- 在几秒钟后关闭吹风机（确保气体清除出燃烧室）。
- 不要将燃烧器喷嘴对着燃烧炉的辐射热（当关闭油时，拆卸燃烧器/喷嘴或在喷嘴和燃烧炉之间插入一个薄的耐火材料）。

## 燃烧故障排除

下表中的内容有助于查找燃料燃烧过程中发现的典型问题的原因及解决方法。

燃烧故障排除表		
序号	问题	原因和解决方法
1.	点火困难	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 罐中没油</li> <li>2. 储罐中的污泥和水过多</li> <li>3. 由于粘度太大/温度太低，油不流动</li> <li>4. 燃烧器喷嘴堵塞</li> <li>5. 没有空气</li> <li>6. 粗滤器堵塞</li> </ol>
2.	火焰喷出或颤动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 油中有污泥或水</li> <li>2. 不稳定的油压和气压</li> <li>3. 雾化用于吹燃火焰炼制的压力太高</li> <li>4. 油管中有空气，在泵的进入线上查找泄漏</li> <li>5. 燃烧器主体损坏，或者燃烧器无主体</li> </ol>
3.	火焰回烧	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 当提前关闭空气供应后，油供仍处于“开”的位置</li> <li>2. 燃烧室中的正压太高</li> <li>3. 在开始完全燃烧时，燃烧炉的温度太低（当温度上升时，未燃烧的油颗粒又开始燃烧）</li> <li>4. 油压太低</li> </ol>
4	烟气和煤烟	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通风不足或吹风机不充分。</li> <li>2. 油流的太快</li> <li>3. 油太重，没有预热</li> <li>4. 在吹风机上的进气孔被堵塞</li> <li>5. 烟囱被煤烟/减震器堵塞</li> <li>6. 吹风机的运行速度太低</li> </ol>
5.	残渣和耐火材料	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 火焰撞击防火材料，因为燃烧室太小</li> <li>2. 未正确摆放.</li> <li>3. 喷嘴滴油</li> <li>4. 在空气供应关闭时，未关闭油的供应</li> </ol>
6.	燃烧在燃烧器的熬炼	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在关闭后喷嘴仍对着燃烧炉的辐射</li> <li>2. 填入雾化空气的燃烧器温度超过300 °C.</li> <li>3. 燃烧器主体太短或太宽</li> <li>4. 在关闭后油未从喷嘴中排出</li> </ol>
7.	过多的燃料油耗	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 油气的比例不合适</li> <li>2. 燃烧器的喷嘴太大</li> <li>3. 排风过量</li> <li>4. 燃烧器的油/气混合不合适</li> <li>5. 气压和油压不正确</li> <li>6. 油未正确预热</li> <li>7. 对于使用的燃烧器来说，油的粘度太低</li> <li>8. 在油管/预热器上漏油</li> <li>9. 维护不当（烟气的温度太高）</li> </ol>

## 6. 工作表

工作表 1：过量空气计算

No	参数	公式	单位	数值
1	碳 (C)		重量百分比%	
2	氢 (H)		重量百分比%	
3	氧 (O <sub>4</sub> )		重量百分比%	
4	氮		重量百分比%	
5	硫		重量百分比%	
6	水		重量百分比%	
7	灰		重量百分比%	
8	燃料的 GCV		kCal/kg	
9	碳燃烧所需的氧气 (O <sub>1</sub> )	$C \times (32/12)$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	
10	氢燃烧所需的氧气 (O <sub>2</sub> )	$H \times (32/4)$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	
11	硫燃烧所需的氧气(O <sub>3</sub> )	$S \times (32/32)$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	
12	所需氧气的总量 (O)	$O_1 + O_2 + O_3 - O_4$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	
13	计算所需空气的量 (S.A)	$O / 0.23$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	
14	过量空气 (EA)		%	
15	实际所需的空气量	$S.A \times (1 + EA/100)$	100 千克燃料所需的氧气，单位 kg	

## 7. 参考文件

- 能源效率局，《热设施中的能源效率》，第1章，2004年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭和水泥工业----有效利用》，1985年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭和燃烧炉操作----改进的技术》1985年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭和工业炉----有效利用》，1985年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭和纸浆工业----有效利用》，1985年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭和纺织业----有效利用》，1985年。
- 印度政府煤炭部，《煤炭燃烧----提高效率的技术》，1985年。
- 印度政府煤炭部，《流化床燃煤锅炉》，1985年。
- 石油储量研究协会，[www.pcra.org](http://www.pcra.org)
- Shaha, A.K.《燃烧工程和燃料技术》，牛津和 IBH 出版公司
- Thermax 印度有限公司，《技术备忘录》

### Copyright:

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)

*This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.*

### 版权声明:

本出版物可供任何形式的培训或非盈利活动全部或部分复制使用，无需经过版权所有者的特别许可，而只需在副本中注明出处即可。如需在其他出版物中引用本出版物中的内容，请向 UNEP 发送一份该出版物的副本。

未经联合国环境规划署的书面许可，禁止将此出版物用于转售或任何其他商业用途。

### Disclaimer:

*This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.*

### 免责声明:

该能源设备简介是“亚太地区工业温室气体排放削减计划”(GERIAP)的一部分，由印度国家生产力委员会编写。尽管 UNEP 为保证此出版物的内容的正确性做出了不懈的努力，但是 UNEP 不承担其内容的准确性和完整性的责任，对任何通过直接或间接使用或者依赖该出版物内容，包括其非英语译本，而遭受的损失或者伤害，UNEP 概不负责。本材料是英文原版的中文译本，不属于联合国的官方出版物。