

第一章 燃气的特性

1. 什么是燃气？有哪几类？

答：能与氧气或空气混合并可点火燃烧的气体称为可燃气体。可燃气体可以是单一气体，也可以是混合气体。城市燃气简称为燃气，它是一种由多种单一可燃气体组成的混合物。城市燃气可分为人工煤气、天然气和液化石油气三类。

2. 什么是人工煤气？有哪几种？

答：人工煤气习惯上用英文 Gas 来表示，全名为“Coal Gas”，就是用煤制取的气体。实际上广义上讲人工煤气是用煤或油通过人工炼制的煤气的总称。主要包括油煤气，炼焦煤气和煤气化煤气几种。

3. 什么是炼焦煤气？主要成分是什么？

答 炼焦煤气 也称煤干馏煤气或焦炉煤气。它是利用焦炉对煤进行干馏而得到的煤气。焦炉煤气主要成分为 H_2 占 54.4%， CH_4 占 31.5%， CO 6.3%， C_mH_n 占 3.9%， CO_2 占 1.9%， N_2 占 1.6%， O_2 占 0.4%。当然炼焦煤气由于使用煤的成分不同，炼制的气体成分也不完全一样，但是其主要成分 H_2 、 CH_4 等变化范围不大。炼焦煤气的低热值一般为 $17MJ/m^3$ 左右。

4. 什么是煤气化煤气？有哪几种？

答 通过含氧的气化剂直接与煤接触 进行化学反应而获得的煤气称为煤气化煤气。由于使用气化剂（如空气、氧气、水蒸气）种类的不同，气化途径的区别所制得的煤气的成分、热值也有区别。煤气化煤气有发生炉煤气、高炉煤气、水煤气等种类。

发生炉煤气成分为 H_2 占 8.4%， CO 占 30.4%， CH_4 占 1.8%， C_mH_n 占 0.4%， O_2 占 0.4%， N_2 占 56.4%， CO_2 占 2.2%。

高炉煤气成分为 H_2 占 4.4%， CO 占 25.6%， CH_4 占 1.9%， N_2 占 59.8%， CO_2 占 8.2%。值得指出的是当惰性气体和有害气体比例较大时，热值较低。低热值在 $9 \sim 15 MJ/m^3$ 范围。

5. 什么是油煤气？有哪几种？主要成分是什么？

答：重油通过蓄热催化裂解或者蓄热热裂解而制得的煤气称为油煤气或油制气。它包括催化裂解气和热裂解气两种。

催化裂解气的成分为 H_2 占 58.1%， CO 占 10.5%， CH_4 占 16.6%， C_2H_4 占 5.0%， O_2 占 0.7%， N_2 占 2.5%， CO_2 占 6.6%。低热值在 $14.5 MJ/m^3$ 左右。

热裂解气的成分为 H_2 占 31.5%， CO 占 2.7%， CH_4 占 28.5%， C_2H_4 占 23.8%， C_2H_6 占 2.6%， C_3H_6 占 5.7%， O_2 占 0.6%， N_2 占 2.4%， CO_2 占 2.1%。低热值在 $34.8 MJ/m^3$ 左右。

6. 什么是天然气？有哪几种？主要成分是什么？

答：中国是开发利用天然气最早的国家。距今已有 3000

多年历史。天然气就是指蕴藏在地层内天然生成的由碳氢化合物组成的可燃性气体。它有纯天然气，石油伴生气，矿井气和凝析气田气四种。

纯天然气是钻井采出来的气田气，以四川干气为代表，其主要成分为 CH_4 占 98%、 C_3H_8 占 0.3%、 C_4H_{10} 占 0.3%、 N_2 占 1.0%。低热值为 $34 \sim 3.65\text{MJ}/\text{m}^3$ 。有的纯天然气由于产地等不一样，其成分中含有少量 H_2S 、氩气等。

石油伴生气是伴随石油开采出来的石油气，它含有甲烷 80% 以上，乙烷、丙烷、丁烷总量为 15% 左右，低热值为 $42\text{MJ}/\text{m}^3$ 。

凝析气田气含有石油轻质馏分，其成分大量为甲烷，还有戊烷等碳氢化合物，低热值为 $27.5\text{MJ}/\text{m}^3$ 。矿井气是从井下煤层中抽出来的气。矿井气的成分主要是 CH_4 占 30~50%，低热值为 $12 \sim 19\text{MJ}/\text{m}^3$ 。

7. 什么是液化石油气？主要成分是什么？

答：被加压液化了的石油气叫做液化石油气。主要从油气开采或者石油加工中得来。我国液化石油气的成分差异较大，主要是碳 3 碳 4 类碳氢化合物。其热值等性能也不一样。

以北京液化石油气为例，其成分为： CH_4 占 1.5%、 C_2H_6 占 1.0%、 C_3H_6 占 9.0%、 C_3H_8 占 4.5%、 C_4H_8 占 54.0%、 C_4H_{10} 占 26.2%、 C_5^+ 占 3.8%。液化石油气的低热值在 $92 \sim 120\text{MJ}/\text{m}^3$ 。

8. 什么叫做燃气重度？

答：燃气重度是指在标准状态下，单位体积燃气的重量，单位为 kg/m^3 。

9. 什么叫做燃气的比重？

答：燃气的比重是指燃气的重度与空气的重度之比，它是一个无因次量。

10. 什么叫做燃气的热值？

答 燃气的热值是指 1 标准立方米 (1kg) 的燃气 完全燃烧后放出的热量 单位为 Mg/m^3 或 MJ/kg 。燃气的热值有高热值和低热值之分，使用时应注意。燃气的热值是燃气品质的重要参数，不同种类的燃气热值不一样。同一种类或同一气源的燃气热值也不相同，是有变化的。

11. 什么叫做燃气的理论空气量？

答：1标准立方米燃气完全燃烧所需要的最小空气量，称为该燃气的理论空气需要量。如 1m^3 氢气燃烧时需要 0.5m^3 氧气。而每立方米空气中含有 0.21m^3 氧气。所以要提供 0.5m^3 氧气需要 2.38m^3 空气。 2.38m^3 就是氢的理论空气量。

燃气的理论空气量与燃气的低热值有关。因此，可以根据燃气的低热值近似地估算理论空气量。

当低热值 H 小于 $10.5\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 时 理论空气量为

$$V_0 = \frac{0.875H}{4.187 \times 1000} \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

当低热值 H 大于 $10.5\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 时 理论空气量为：

$$(1) V_0 = \frac{H \times 1.09}{1000 \times 4.187} - 0.25\text{Nm}^3/\text{Nm}^3;$$

(2) 对于烃类燃气 (天然气、液化石油气)

$$V_0 = \frac{H \times 1.10}{1000 \times 4.187} \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

12. 什么叫做燃气的华白数？

答 华白指数也叫热负荷指数，它是指当燃烧器前压力不变时，灶具的热负荷与燃气的高热值成正比，与燃气的比重平方根成反比的值。它是判断燃气的互换性能和燃具的适应性的指标之一，用公式 $W = H_0 / \sqrt{S}$ 表示。

式中 W ——华白数；

H_0 ——燃气高热值 (MJ/m^3)；

S ——燃气的比重。

13. 什么叫做燃气的燃烧势？

答 当气源类型较多时，单用华白指数并不足以判定两种燃气是否可以互换，必须有另外的参数。法国专家德尔布经过试验研究选择了用校正华白指数 W' 和燃烧势 C_p 作为判定燃气互换性的两个参数，并以 $W' - C_p$ 坐标系互换图表示，也称德尔布互换图。校正华白指数与华白指数的关系为：

$$W' = K_1 K_2 W$$

式中 K_1 ——与 $\text{H}_2 \cdot C_m H_n \cdot \text{CO}_2$ 有关的系数；

K_2 ——与 $(\frac{\text{O}_2}{\text{H}})$ 有关的系数；

H ——燃气热值。

燃烧势即是反映内焰高度的指数。它是燃气相对比重的函数，同时也是燃烧速度的函数，即燃气组分的函数。燃烧势的计算公式如下：

$$C_p = u \frac{\text{H}_2 + 0.7\text{CO} + 0.3\text{CH}_4 + a \sum K C_m H_n}{\sqrt{S}}$$

式中 C_p ——燃烧势；
 K ——各种 C_nH_n 的特性系数；
 u ——由于燃气中含氧量及氢量不同而引人的系数；
 a ——由于燃气中含氢量不同而引人的系数；
 S ——燃气相对比重。

14. 什么叫做燃气的着火？

答 燃气与空气（氧）发生氧化反应，由稳定的氧化反应转变为不稳定的氧化反应而引起燃烧的一瞬间，称为着火。也称为自然点火。

15. 什么叫做燃气的点火？

答：由一个小的热源放入可燃的燃气与空气混合物中时，贴近热源周围的一层混合物迅速被加热，并开始燃烧产生火源，并使可燃混合物逐步着火燃烧，这种现象称为强迫点火，或称为点火。

16. 各种燃气在空气中最小点火能量和熄灭距离是多少？

答：各种可燃气体混合物的点燃特性，常用最小点火能量，即可燃混合物中能够引发火焰传播的最小能量和熄灭距离，即不能使混合物气体点火的最小电极间距离来表征，见表 1.1。其大小主要取决于可燃混合物的物理化学性质，并且与可燃混合物的压力、速度和温度也有关。

表 1.1 燃气在空气中的点火能量和熄灭距离

燃气	最小点火能量/ 10^{-5}J	最小熄灭距离/mm
氢	1.5	0.51
甲烷	29	2.03
乙烷	24	1.78
丙烷	26	1.78
正丁烷	26	2.03
正戊烷	22	1.78
苯	22.5	1.78
环丙烷	23	1.78

此表数据相应温度 20°C 气压 101325Pa 混合比最易燃爆的条件。

17. 什么叫做燃气的着火浓度极限？

答：在能引起着火的燃气与空气的混合物中，燃气所占的百分数范围，叫做该燃气的着火浓度极限，或者叫着火浓度范围，爆炸范围等等。着火浓度极限有着火上限和着火下限之分。着火上限即可燃气体占混合气中的最大百分数；着火下限即可燃气体占混合气体中的最小百分数。各种燃气的着火浓度极限见表 1.2。

表 1.2 各种燃气的着火浓度极限

燃气名称	着火浓度极限/(%)	
	上 限	下 限
氢气	4.0	75
一氧化碳	12.5	75
甲烷	5.0	75
乙炔	1.5	80
丙烷	2.1	9.5
丁烷	2.9	13
焦炉煤气	4.5	28
天然气	4.8	13.5
液化石油气	2	9.0
发生炉煤气	35	75
炼铁炉煤气	40	65
水煤气	6	70
油气	3.4	7.8

18. 什么叫做燃气的着火温度？

答：燃气的着火温度，就是使燃气与空气或氧气混合物开始燃烧的温度。燃气的着火温度与燃气成分、温度、压力等因素有关，一般常用实验方法求得。几种可燃气体的着火温度见表 1.3。

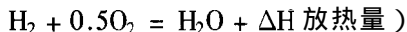
表 1.3 可燃气体的着火温度

气体名称	着火温度/℃	
	在氧气中	在空气中
氢气	450	530
一氧化碳	590	610
甲烷	645	645
乙炔		335
丙烷	490	510
丁烷	460	490
乙烷	500	530
城市煤气	450	560

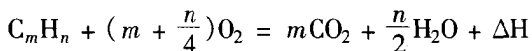
19. 什么叫做燃气的燃烧？

答：燃气的燃烧是指燃气中的可燃成分（氢气、一氧化碳、硫化氢和甲烷等烃类）在一定条件下与氧气或空气发生的一种强烈的氧化作用，同时伴随着燃烧有发热发光现象。它是一种复杂的物理化学过程。燃烧反应方程式如下：

氢气的燃烧反应方程为：



碳氢化合物的反应方程通式为：



20. 燃烧的必要条件是什么？

答：燃烧必须具备以下三个条件，也称为燃烧三要素。第一要具有可以燃烧的物质；第二要具有可以助燃的物质如氧

气、空气等 第三要具有一定的温度或能量如点火源。这三个条件缺少任何一个条件都不可能形成燃烧。

21. 什么叫做过剩空气系数？

答 燃气燃烧时实际供应的空气量 V 与燃气完全燃烧所需的理论空气量 V_0 之比值 α 叫做过剩空气系数。为了保证燃气的完全燃烧，实际供应的空气量总是略大于理论空气需要量。过剩空气系数表达式为：

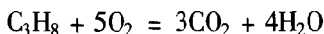
$$\alpha = \frac{V}{V_0}$$

过剩空气系数与燃烧器燃烧方式和使用的设备有关。在工业设备中一般选取 α 为 1.05 ~ 1.20 在民用设备中一般选取 α 为 1.30 ~ 1.80。

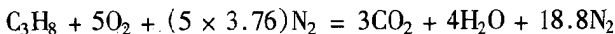
为了达到某种工艺要求和保证燃烧器稳定燃烧，供给燃烧所需的空气可以分几次供应。因此，空气系数又可分为一次空气系数 用 α_1 表示 二次空气系数 用 α_2 表示等等。

22. 燃气完全燃烧时烟气中含有哪些成分？体积是多少？

答：燃气完全燃烧产生烟气的体积可以根据燃气成分燃烧方程式计算得到。如：



若用氧气作助燃剂，则 1m^3 丙烷燃烧后生成 7m^3 烟气。
若用空气作助燃剂 则 1m^3 丙烷燃烧后生成 25.8m^3 烟气。



很显然，燃气与氧气混合完全燃烧后生成烟气成分主要有 CO_2 和 H_2O 。燃气与空气混合完全燃烧后生成的烟气成分中主要有 CO_2 、 H_2O 和 N_2 。还有少量可燃杂质的氧化物。

23. 什么叫做不完全燃烧？燃气不完全燃烧时易产生哪些有害气体？

答 当空气系数过低 或者燃气与空气混合不好时易产生不完全燃烧。不完全燃烧时剩有少量可燃气体未被充分燃烧。不完全燃烧烟气中产生 CO 、 NO_x 和未燃烧可燃气体等有害物质。

24. 什么叫做燃气的理论燃烧温度？

答 当燃气燃烧是在绝热下进行 并且其物理热和化学热都用来加热烟气时，则烟气所能达到的温度即相当于该燃气的燃烧温度，亦称燃气的理论燃烧温度。燃烧温度对工艺加热选择燃料十分重要。某些可燃气体的理论燃烧温度见表 1.4。

表 1.4 某些燃气的理论燃烧温度

燃气名称	理论燃烧温度/℃	气体名称	理论燃烧温度/℃
氢气	2210	焦炉煤气	1998
一氧化碳	2370	水煤气	2175
甲烷	2040	天然气	1970
丙烷	2155	石油伴生气	1986
正丁烷	2130	液化石油气	2050
乙炔	2620	热裂解油制气	2038

25. 什么叫做燃气的燃烧速度？

答：在单位时间内，单位火焰面上被燃烧掉的气体容积。即 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 可变成 m/s 。这就叫做燃气的燃烧速度。燃烧速度受多种因素影响，它与燃气成分、助燃剂种类、燃气与助燃剂混合比例、温度、压力、散热状况等因素有关。几种单一可燃气体与空气混合物的最大燃烧速度列于表 1.5。

表 1.5 几种单一可燃气体的最大燃烧速度

燃气种类	最大燃烧速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	燃气种类	最大燃烧速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
氢气	2.80	丙烷	0.42
一氧化碳	0.56	乙烯	0.67
甲烷	0.38	乙炔	1.52
乙烷	0.43		

几种常见燃气与空气混合最大燃烧速度列于表 1.6。

表 1.6 几种常见燃气最大燃烧速度

燃气种类	代号	最大燃烧速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	备注
炼焦煤气	RM ₁	0.857	北京
直立炉煤气	RM ₂	0.851	东北
混合煤气	RM ₃	0.842	上海
发生炉煤气	RM ₄	0.1946	天津
水煤气	RM ₅	1.418	天津
催化油煤气	RM ₆	0.978	上海
热裂油煤气	RM ₇	0.603	上海
干井天然气	TM ₁	0.380	四川
油井伴生气	TM ₂	0.380	大庆
液化石油气	YM ₁	0.435	北京
液化石油气	YM ₂	0.429	大庆

26. 什么叫做燃气的爆炸极限？

答 可燃气体和空气的混合物由着火引起的爆炸时 可燃气体所占混合物的比例范围 叫做该燃气的爆炸极限 也叫爆炸极限范围。由着火引起爆炸时，混合物中含有燃气的最大混合比例叫做爆炸上限，最小混合比例叫做爆炸下限。

爆炸极限受温度、压力、容器大小、惰性气体等因素影响。一般由实验得出，也可计算得到。各种燃气的爆炸极限数列于表 1.7。

表 1.7 各种燃气的爆炸极限

燃气种类	爆 炸 极 限/(%)	
	下 限	上 限
发生炉煤气	20.7	73.7
高炉煤气	33.2	71.8
矿井气	45.1	70.4
半水煤气	24.1	68.8
天然气	4.8	13.46
油气	3.4	7.8
焦炉煤气	5.0	28.4
油气与空气	3.4	43.2
煤气与氧气	9.9	73.7
水煤气	6.9	69.5
乙炔	1.5	80.5
乙烷	2.5	15
乙烯	3.2	34
甲烷	4.9	15.4
丙烷	2.2	9.7
丁烷	1.9	8.5
氢气	4.15	75
一氧化碳	12.5	75

27. 燃气有哪些危险性？

答 燃气有许多优点 清洁、方便、易燃、热值高。但也有缺点 存在三大危险性。第一容易燃烧。遇火极易燃烧 这给防火安全带来不利 第二容易爆炸。爆炸是一种危害，一旦发生爆炸将会造成重大的人身和财产损失；第三具有毒性。许多燃气是无色无味的，但许多燃气也是有毒的。天然气的主要危险是爆炸 液化石油气的主要危险是中毒和爆炸 而人工煤气这三种危险均存在。了解燃气的危险性，就应主动采取措施 防止事故的发生。

28. 燃气有几种燃烧方式？

答：燃气燃烧方式，一般按空气供给的方式和数量划分为三类 即扩散式燃烧 大气式燃烧和无焰式燃烧。

29. 什么是扩散式燃烧？有什么特点？

答：燃气在燃烧前不预先混入空气，就是说没有一次空气供给 ($\alpha_1 = 0$) 此种燃烧称为扩散式燃烧。扩散式燃烧的特点是，燃气与空气的混合靠燃气与空气之间的扩散作用来实现。这种燃烧，其燃烧速度低，火焰热强度低。易产生化学不完全燃烧。优点是没有回火现象，脱火速度高，燃烧较稳定。

30. 什么是大气式燃烧？有什么特点？

答 大气式燃烧也称本生式燃烧 它是 19 世纪初由德国工程师本生发明。大气式燃烧就是在燃烧前预先混入一部分空气，就是说供给一次空气 ($0 < \alpha_1 < 1$)。一次空气的供给一般靠引射吸入。大气式燃烧的火焰有内外焰两部分组成，内焰呈青蓝色 轮廓清晰 短而有力 外焰呈淡蓝色。燃烧温度

较高，减少了不完全燃烧，但易发生回火或脱火现象。本生燃烧火焰结构如图 1.1 所示。

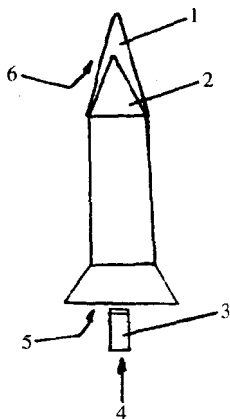


图 1.1 本生火焰结构图

1-外焰;2-内焰 3-喷嘴;4-燃气 5-一次空气;6-二次空气。

31. 什么是无焰式燃烧？有什么特点？

答：燃气燃烧前，燃气与所需空气完全混合， $\alpha_1 = 1.0 \sim 1.05$ 并有高温点火源的存在 燃烧过程在瞬间完成 火焰很短，好像没有火焰一样。故称为无焰燃烧。无焰燃烧的特点是燃烧完全 燃烧温度高 热效率高 赤热的燃烧板表面可产生红外线辐射。

32. 什么是火焰稳定特性曲线图？有什么作用？

答：用图的形式描述大气式燃烧器稳定燃烧特性的曲线称为火焰稳定特性曲线图。也称为燃烧器特性曲线。它是考察燃烧器性能的重要指标之一。稳定燃烧是一种不产生脱

火回火和黄焰的燃烧。它与燃气种类、火孔的形状、大小、排列形式有关。影响火焰稳定性的根本因素是气流速度和一次空气的大小。一般说，火孔大易产生回火，火孔小易产生脱火，一次空气系数大对人工煤气易产生回火，对天然气易产生脱火。火焰稳定特性曲线图如图 1.2 所示。

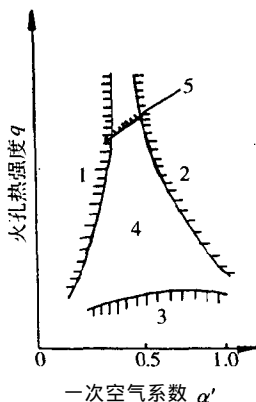


图 1.2 火焰稳定特性曲线图

1 - 黄焰区 2 - 离焰区 3 - 回火区 4 - 稳定燃烧区 5 - CO 极限。

33. 什么是黄焰？其产生的原因是什么？

答：黄焰是一种不稳定燃烧。所谓黄焰是因其颜色呈黄色而不是蓝色。一般表现为火焰长而弱、内焰模糊，严重时出现火焰冒黑烟。产生黄焰的根本原因是空气系数不足，或燃气与空气混合不均匀。造成空气系数不足或混合不好的原因可能有：

- (1) 使用燃气气质与设计气质不相符合；
- (2) 使用燃气压力大大超过额定压力；

- (3) 燃烧器与喷嘴安装不当或加工不好；
- (4) 燃烧器周围环境较差，影响二次空气的供给或空气质量污染严重；
- (5) 燃烧器设计不好，混合器效率低。

34. 什么是脱火？其产生的原因是什么？

答：脱火也是一种不稳定燃烧，脱火是火焰离开火孔出口一段距离处燃烧被吹灭的现象。对燃烧来说脱火是十分危险的，应当避免。产生脱火的根本原因是气体流速大于火焰传播速度。可能与以下因素有关：

- (1) 燃烧器入口的气流速度过大，或者压力过高；
- (2) 烟囱抽力太大；
- (3) 燃烧器内有异物或积碳等。

35. 什么是回火？其产生的原因是什么？

答：回火同样是一种不稳定燃烧。回火就是火焰缩入燃烧器内部，在喷嘴处燃烧。回火也很危险，可造成不完全燃烧，同时容易把设备烧坏。回火伴有噪声，破坏环境。回火的根本原因是气体流流速小于火焰传播速度。可能与以下因素有关：

- (1) 火孔直径偏大；
- (2) 一次空气量过大；
- (3) 燃烧器头部过热或头部阻力大；
- (4) 环境风力过大，造成干扰。

36. 燃气燃烧计算步骤和内容是什么？

答：燃气燃烧可分为以下步骤进行计算：