

内燃机排放与控制

中国农业大学

车辆工程专业硕士研究生课程

第1章 概述

1. 大气污染

当大气中出现外来物质，使空气成分发生变化，可能产生有害后果，或者使人不舒服时，就可定义为出现了大气污染。

大气污染的范畴：

- ①对人体有害的化学物质；
- ②有损人们感官的气味；
- ③烟雾引起的可见度的降低等。

2. 内燃机排放的污染物及其危害性

1. 一氧化碳（CO）

CO是无色无味的气体，对人体血液中输送氧的血红蛋白(Hb)的亲合力是氧的200~250倍。损害了Hb对人体组织的供氧能力，造成不同程度的中毒症状。

1.2.2 碳氢化合物

碳氢化合物(HC)包括未燃烧和未完全燃烧的燃油、润滑油及其裂解和部分氧化产物，如烷烃、烯烃、环烷烃、芳烃、醛、酮、有机酸等数百种成分。

其中：**烯烃**略带甜味，有麻醉作用，对粘膜有刺激，经代谢转化会变成对基因有毒的环氧衍生物。烯烃是与氮氧化物一起形成有害的光化烟雾的罪魁祸首之一。**芳烃**有芳香味，却有危险的毒性。**苯**在较高的浓度下可能引起白血病，有损肝脏和中枢神经系统的作用。**多环芳烃(PAH)**有致癌作用。**醛类**是刺激性物质，来自内燃机排气的醛类主要是甲醛(HCHO)、乙醛(CH₃CHO)和丙烯醛(CH₂=CHCHO)。它们都刺激眼粘膜、喉和支气管，对血液有毒害，可能还有遗传毒性和致癌活性。

3. 氮氧化物

内燃机排放的氮氧化物绝大部分是一氧化氮(NO)，少量是二氧化氮(NO₂)，一般都用NO_x表示。NO是无色气体。高浓度的NO能引起中枢神经的障碍，会影响肺的功能。NO在空气中氧化比较缓慢，而在紫外线作用下迅速地氧化成NO₂。NO₂是褐色气体，有特殊的刺激性气味，被吸入人体后与水分结合生成硝酸，引起咳嗽、气喘，甚至肺气肿。NO₂的环境限值为 5×10^{-6} 左右。NO₂是在地面附近形成光化学烟雾的主要因素之一。

4. 臭氧和其他光化氧化剂

臭氧是刺激性很强的气体，它刺激人的眼睛和呼吸道。臭氧是刺激性很强的气体，它刺激人的眼睛和呼吸道。臭氧引起体内蛋白质的氧化和脂肪酸的过氧化，

造成长期的代谢影响。臭氧促使橡胶轮胎老化，造成破裂、损坏；臭氧也影响植物的光合作用，是导致森林病害的主要因素之一。

5. 硫化物

内燃机燃料中的硫燃烧后产生 SO_2 ，在空气中会转化为 SO_3 。 SO_3 是无色气体，是一种中等程度的刺激剂。它有很强的亲水性，与水结合形成亚硫酸，对人的口鼻粘膜有强烈的刺激性。 SO_3 氧化生成的硫酸盐微粒会深入肺内造成长期影响。

6. 微粒

内燃机排放的微粒(PM)的主要成分是碳，其粒度一般小于 $0.3\mu\text{m}$ ，可深入人体肺的深部造成机械性超负荷，损伤肺内各种通道的自净机制，从而使其他化合物容易发挥致癌作用。

3. 内燃机排放的评价指标

1. 排放物浓度和摩尔分数

物质的质量浓度：物质的质量除以混合物的体积，其单位为 kg / m^3 或 kg / L 。

质量浓度一般用于表征内燃机固态污染物的排放，如柴油机微粒排放。

物质的摩尔分数：物质的摩尔数与混合物的摩尔数之比是个无量纲量，传统上常用百分数(%)或百万分比(10^{-6})表示。

内燃机排放物的浓度或摩尔分数，表示内燃机在某工况下的排放严重程度。所以这种指标为内燃机的研究和开发工作者广泛应用。在研究对比不同因素对排放的影响时，直接用仪器测定排放物的摩尔分数或浓度是最方便的办法。

2. 质量排放量

- ①确定运转单位时间的排放量，称为排放质量流量(g / h)
- ②按某排放标准规定的办法进行一次测试的排放量，称为循环工况排放质量或工况质量排放量(g / test);
- ③装内燃机的车辆按规定的工况组合(称为测试循环)行驶后折算到单位里程的排放量，称为行程质量排放量(g / km)。

3. 比排放量

内燃机每作单位功排放的污染物质量 ($\text{g} / (\text{kW}\cdot\text{h})$) 。

比排放量可以更客观地评价不同种类、不同大小内燃机的排放性能。比排放量可以根据测得的发动机功率、排气流量、污染物浓度或摩尔分数、污染物密度等数据计算。

4. 排放指数

排放指数是指燃烧单位质量的燃料所排放的污染物质量。

第二章 污染物的生成机理和影响因素

2.1 一氧化碳

CO是碳氢化合物燃料在燃烧过程中生成的主要中间产物。

控制CO排放量的主要因素是可燃混合气的过量空气系数 ϕ_a 。当空气不足即 $\phi_a < 1$ 时，燃料燃烧时生成大量CO。

2. 1. 1 点燃式内燃机

在传统的点燃式内燃机中（化油器式），可燃混合气基本上是均匀的。在这种情况下，其CO排放量几乎完全取决于混合气的空燃比 α 。或过量空气系数 ϕ_a 。

图2-1表示11种不同H / C比的燃料在传统的点燃式内燃机中燃烧后，排气中的CO摩尔分数 x_{CO} 随 α 或 ϕ_a 的变化关系。

图2-1a表示 x_{CO} 与 α 的关系。对于不同燃料，由于H / C比不同而互不重合。但如把空燃比 α 换成过量空气系数 ϕ_a ，则不同燃料的关系相当精确地落在一条线上(图2-1b)。由此图可见，在浓混合气中($\phi_a < 1$)， x_{CO} 随 ϕ_a 的减小不断增加，这是因为缺氧引起不完全燃烧所致。作为一种粗略的估计，可以认为 ϕ_a 每减小0.1， x_{CO} 增加0.03。在稀混合气中($\phi_a > 1$)， x_{CO} 都很小，只有在 $\phi_a = 1.0 \sim 1.1$ 时， x_{CO} 才随 ϕ_a 有较复杂的变化。

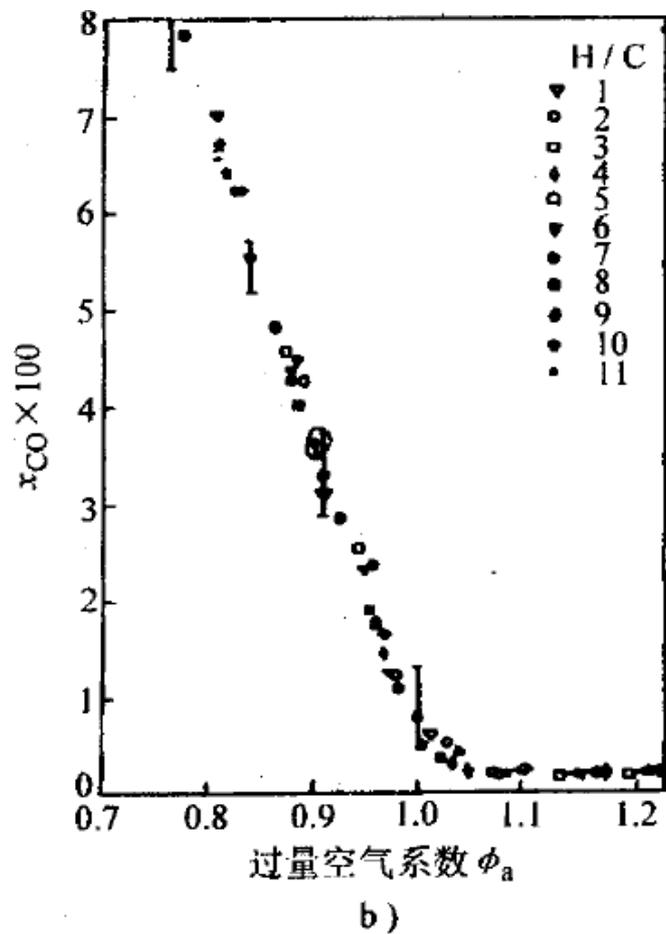
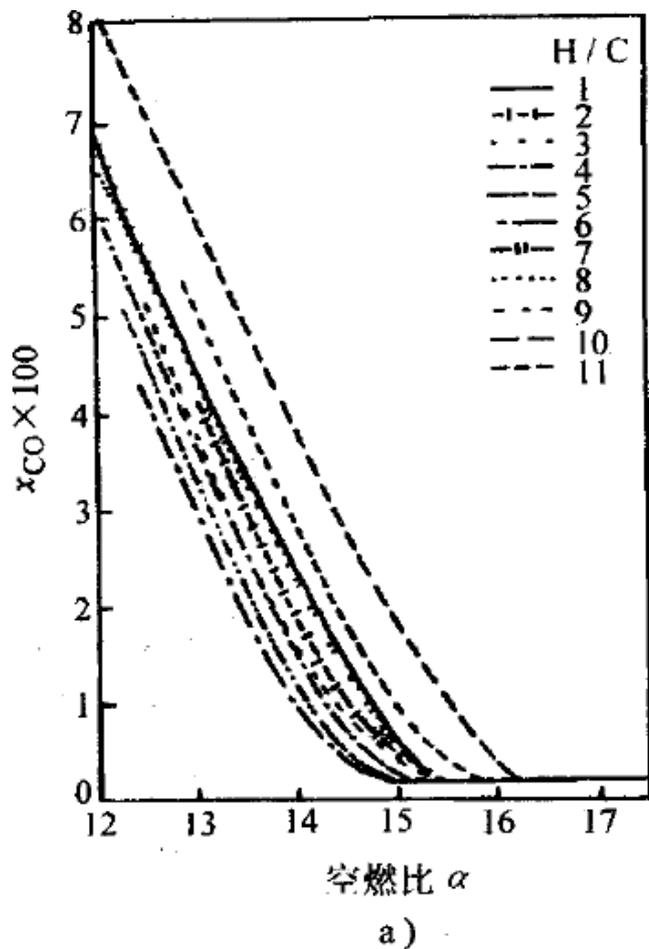


图2—1 点燃式内燃机CO排放量 x_{CO} 与空燃比 α 及过量空气系数 ϕ_a 的关系

在汽油机中，CO在燃烧室中的实际生成量总是要大于化学动力学模型的预测值。其原因可能在于在膨胀行程初期，从燃烧室沉积物和润滑油膜中解吸出来或者从燃烧室的各狭隙中流出的未燃碳氢化合物(详见2.2节)在膨胀行程中后期的不完全氧化所致。不过，汽油机排气中的CO水平总是低于在燃烧室中出现的最高值，因为一部分CO在膨胀和排气过程中发生补燃被消耗。

不带三效催化转化器的汽油机在常用工况(即部分负荷)下运转时，混合气的过量空气系数 ϕ_a 略大于1，CO排放不多。为了进一步降低CO排放，要改善可燃混合气成分的均匀性，使进入气缸的混合气可以更稀一些。尤其在多缸发动机中，各缸之间空燃比的变动是CO排放量增加的一个原因，因为即使整机平均 $\phi_a > 1$ ，可能仍会有气缸 $\phi_a < 1$ ，从而增加了CO排放量。

汽油机怠速运转时，缸内残余废气很多，混合也不充分，为了保证可燃混合气稳定燃烧，需要加浓混合气，因而排放大量CO。这是化油器式汽油机总的CO排放量大的一个主要原因，因为车用内燃机怠速运转所占时间比例很大。

为了提高汽油机全负荷运转时的功率输出，往往把可燃混合气加浓到 $\phi_a = 0.8 \sim 0.9$ ，导致CO排放量很大。全负荷不加浓或少加浓混合气，应认为是降低CO排放的实用措施之一，但要以牺牲动力性为代价。

发动机加速时，为了保证加速圆滑，也要在短时间内加浓混合气，导致出现CO排放高峰；发动机急减速时不断油，除了导致HC排放大增外，也使CO排放增加。

2. 1. 2 压燃式内燃机

柴油机总的来说是在稀混合气下运转，其平均过量空气系数 ϕ_a 大多数工况下在1.5~3之间，CO排放量要比汽油机低得多，只有在负荷很大接近冒烟界限($\phi_a=1.2\sim 1.3$)时才急剧增加(图2-2)。但是，柴油机的特征是燃料与空气混合不均匀，燃烧空间中总有局部缺氧的地方，有温度低的地方，以及反应物在燃烧区停留时间不足以彻底完成燃烧过程产生最终产物 CO_2 ，造成CO排放。这可以解释图2-2上 ϕ_a 很大(即负荷很小)时CO排放反而上升的原因，尤其是在高速运转时更明显。

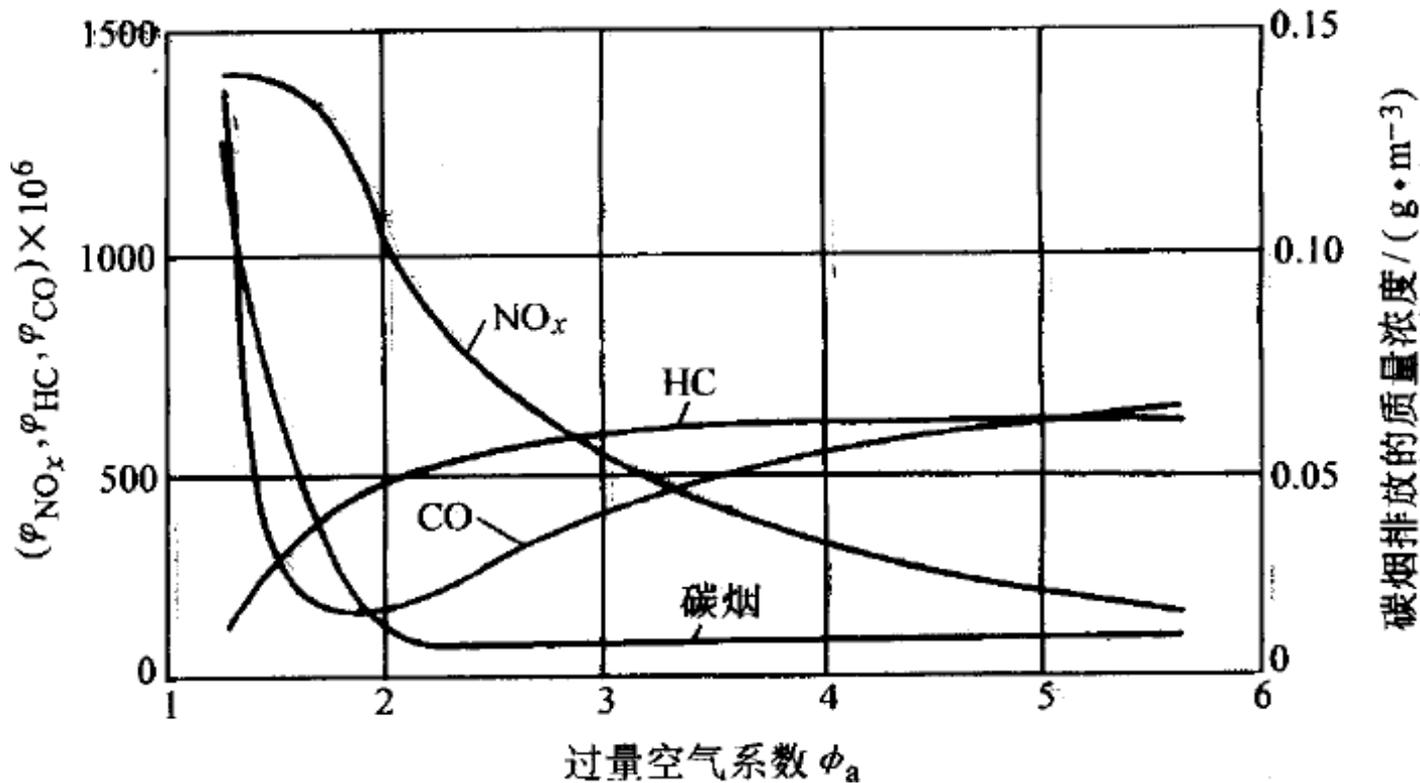


图2—2 典型的车用直喷式柴油机污染物排放量与平均过量空气系 ϕ_a 的关系

2. HC

1. 汽油机HC排放物

汽油机未燃HC都是在缸内的燃烧过程中产生，并随排气排放。其未燃HC的生成与排放有如下三个渠道。

1)在气缸内的工作过程中生成并随排气排出，称为HC的排气排放物。主要是在燃烧过程中未燃烧或不完全燃烧的HC燃料。

对于增压的四冲程汽油机，一般采用较大的气门重叠角。当进排气门重叠开启时，扫气作用虽然有助于降低发动机热负荷，但也使HC排放增加。

2)从燃烧室通过活塞组与气缸之间的间隙漏入曲轴箱的窜气，含有大量未燃烧料。曲轴箱窜气如果排入大气也构成HC排放物，称为曲轴箱排放物。

3)从汽油机和其他轻质液体燃料点燃式发动机的燃油

系统，如燃油箱、化油器等处蒸发的燃油蒸气，如果排入大气同样构成HC排放物，称为蒸发排放物。汽车汽油配售、储存和加油系统如无特殊防蒸发排放措施，会产生大量蒸发排放物。

汽油与空气的均匀混合气在过量空气系数 $\phi_a=1$ 的条件下燃烧时，似乎不应产生未燃HC，但在实际汽油机中，不管 ϕ_a 多大都排放未燃HC(图2-3)。一般在混合气略稀($\phi_a=1.1\sim 1.2$)时，未燃HC体积分数 ϕ_{HC} 最小。随着 ϕ_a 的减小，HC迅速增加。当混合气过稀($\phi_a>1.2$)时，由于燃烧恶化，HC排放不断增加。当 ϕ_a 到达某一限值，气缸内出现概率越来越大的缺火循环，由于未燃燃料原封不动地经排气管排出，HC排放急剧增加，对应燃烧稀限。

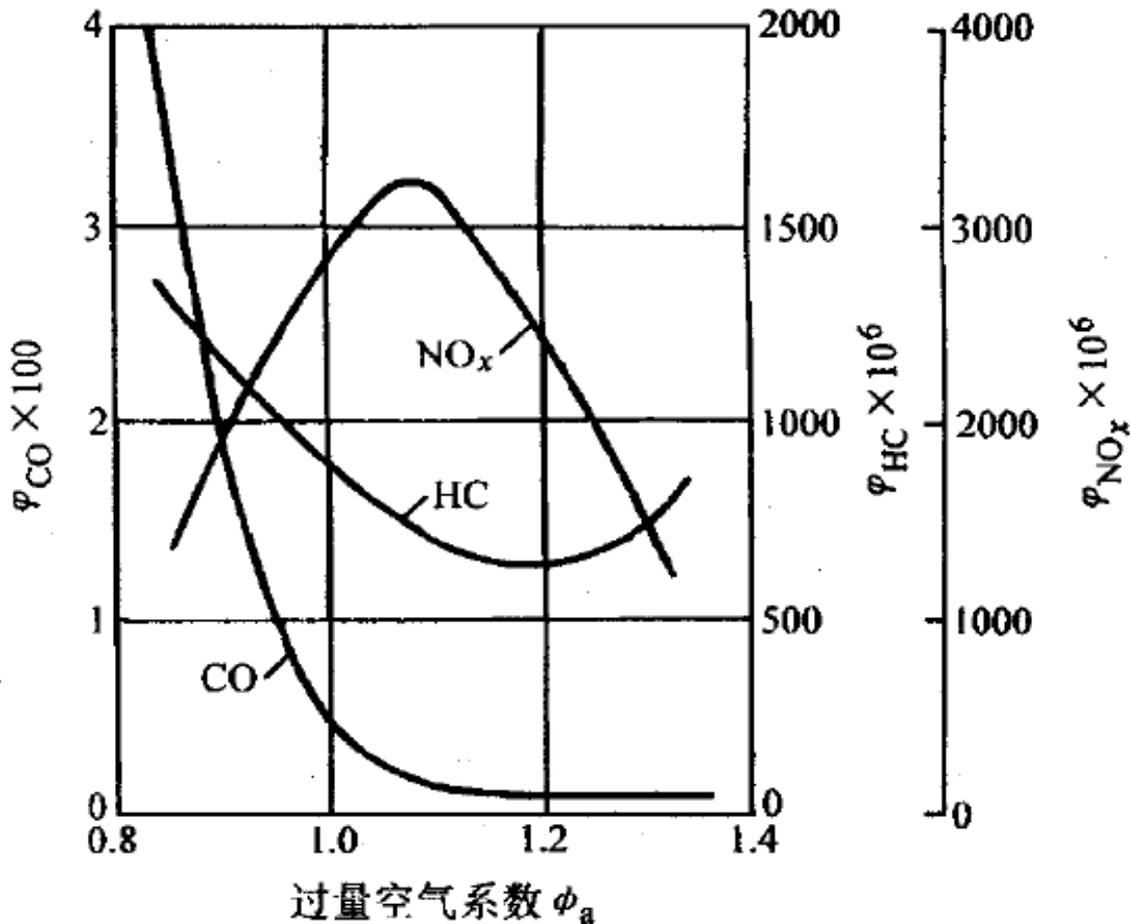


图2—3 燃烧均匀混合气的汽油机的排气污染物与过量空气系数 ϕ_a 的典型关系 (发动机排量1.6L, 压缩比9.4, 转速3000r / min, 平均有效压力0.4MPa)

汽油机生成未燃HC的机理。

1) . 壁面火焰淬熄

发动机的燃烧室表面受冷却介质的冷却，温度比火焰低得多。壁面对火焰的迅速冷却(称为冷激效应)使火焰中产生的活性自由基复合，燃烧反应链中断，使反应变缓或停止。结果，使火焰不能一直传播到燃烧室壁表面，而在表面上留下一薄层未燃烧或不完全燃烧的可燃混合气，称为淬熄层。发动机正常运转时，冷激效应造成的火焰淬熄层厚度在0.05~0.4mm间变动，在小负荷时或温度较低时淬熄层较厚。由专门的取样分析表明，淬熄层中有大量醛类存在，主要是甲醛和乙醛，表明这里是低温氧化反应的温床。不过在正常运转工况下，淬熄层中的未燃HC在火焰前锋面掠过后，大部分会扩散到已燃气体主流中，在气缸内已基本被氧化，只有极少一部分成为未燃HC排放。但在

冷起动、暖机和怠速等工况下，因燃烧室壁面温度较低，形成淬熄层较厚，同时已燃气体温度较低及较浓的混合气使后期氧化作用较弱，因此壁面火焰淬熄是此类工况下未燃HC的重要来源。

燃烧室壁面的表面粗糙度和其他微观结构特征，会影响未燃HC的含量。抛光的气缸壁面可使HC排放量比铸造壁面减小。壁面上的沉积物有与这些粗糙壁面类似的影响。

2) . 狭隙效应

点燃式发动机燃烧室中有各种很狭的缝隙，例如活塞、活塞环与气缸壁之间的间隙，火花塞中心电极绝缘子根部周围狭窄空间和火花塞螺纹之间的间隙，进排气门与气缸盖气门座面相配的密封带狭缝，以及气缸盖衬垫的气缸孔边缘内的死区等(图2-4)。

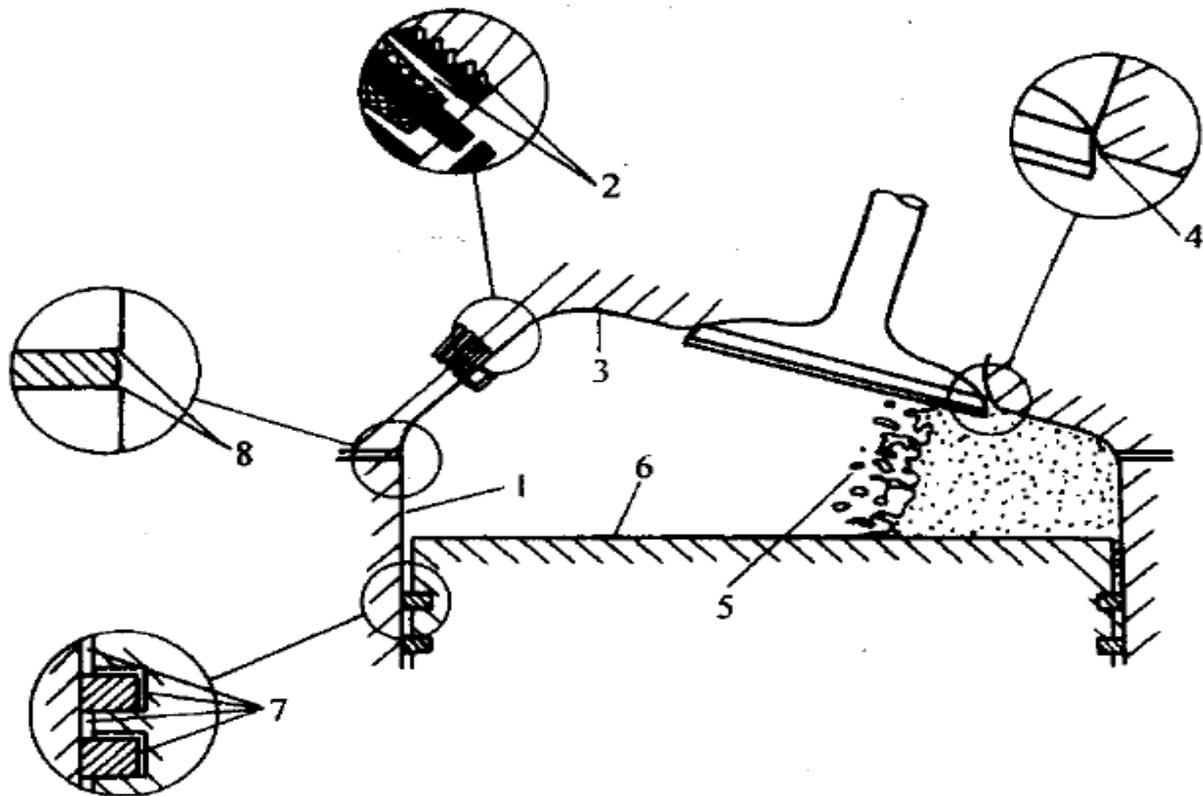


图2-4 点燃式发动机燃烧室中未燃HC的可能来源

- 1——润滑油膜的吸附及解吸； 2——火花塞附近的狭隙和死区； 3——冷激层； 4——气门座死区； 5——火焰熄灭(如混合气太稀、湍流太强)； 6——沉积物的吸附及解吸； 7——活塞环和环岸死区； 8——气缸盖衬垫缸孔死区

压缩过程期间气缸内压力升高时，可燃混合气挤入各缝隙中。因为这些小容积具有很大的**面容比**，进入其中的气体通过与温度相对较低的壁面的热交换很快被冷却。在燃烧过程期间缸内压力继续升高，又有一部分未燃的混合气进入各缝隙。当火焰前锋面到达各缝隙所在地时，火焰或者钻入缝隙把那里的混合气全部烧掉，或者烧掉一部分，或者火焰在缝隙的入口处被淬熄。淬熄的可能性取决于缝隙入口的**几何形状和尺寸**（一项试验表明，当活塞与气缸套之间的间隙小于0.2mm时，就发生淬熄）、**未燃混合气的组成及其热力状态**。在火焰到达缝隙口并被淬熄后，一部分已燃气本身也会挤入缝隙，直到缸内压力开始下降为止。当缝隙中的压力高于气缸的压力时（大约在上止点后15~20°CA），陷入缝隙中的气体逐渐流回气缸。但这时气缸内的温度已下降，氧的浓度也很低，流回缸内的可燃气体再氧化的比例不大，有一半以上原封不动地排出气缸。

在图2-4所示各縫隙中，位于活塞、活塞环与气缸壁之间的縫隙是最主要的。以几何容积计，它只占燃烧室总容积的1%~2%，但由于縫隙中藏匿的气体压力高于压缩终点的压力，且其温度低于压缩终点的温度，所以密度大；以气体质量计，可以藏匿高达5%的气缸充量。如把第一活塞环提高到与活塞顶齐平（例如用L型环），可使HC排放下降50%以上，但活塞环有粘结的危险。

试验研究结果表明，**狭隙效应造成的HC排放可占总量的50%~70%。**

3) . 润滑油膜的吸附和解吸

在进气期间，覆盖在气缸壁面和活塞顶面上的润滑油膜被在环境压力下来自燃油的碳氢化合物蒸气所饱和。这种溶解吸收过程在压缩和燃烧过程期间较高压力下继续进行。当燃烧室燃气中的HC浓度由于燃烧几乎降到零时，油膜中的HC向已燃气解吸的过程

就开始了，并继续到膨胀和排气过程。一部分解吸的燃油蒸气与高温的燃烧产物相混合，然后被氧化；其余部分与温度较低的燃气混合，因而不氧化，成为HC排放源。这种HC排放与燃油在润滑油中的溶解度成正比。对于气体燃料(CH_4)来说，实际上不存在这种影响，因为气体燃料不溶于润滑油。此外，润滑油温度提高也使燃油在其中的溶解度下降，于是降低润滑油在HC排放的分担率。这就是为什么在发动机冷起动时可观测到较多的未燃HC排放量的原因。如果把发动机冷却回路分为两个，对活塞头部进行正常冷却，而使气缸壁温度升到较高水平，可以降低HC排放。

在燃烧室壁面上出现大面积润滑油膜是HC排放的一个因素，HC排放量有随润滑油消耗量增加的趋势。合理地设计活塞环以降低润滑油消耗，也有助于降低HC排放量。

降低润滑油参与未燃HC排放的措施之一是应用合成润滑油，因为汽油在合成油中的溶解度较低。

研究表明，**润滑油膜吸附和解吸机理产生的未燃HC排放，占总量的25%左右。**

4) . 燃烧室中沉积物的影响

发动机运行一段时间后，会在燃烧室壁面、活塞顶、进排气门上形成沉积物。例如，用含铅或其他金属添加剂的汽油时形成的金属氧化物或用过浓混合气时形成的含碳沉积物。众所周知，它们会增加未燃HC的排放量。清除沉积物，立即使HC排放出现短暂的下降。

沉积物的作用机理可能相当复杂。它们可能像润滑油膜那样对可燃混合气中的HC起吸附和解吸作用，但沉积物的多孔结构和固液多相性质，可能使机理进一步复杂化。缝隙中如有沉积物应能减少可燃混合

气的挤入量，从而降低HC排放；但它们同时减小缝隙的尺寸促进淬熄，从而又可能增加HC的排放量。研究表明，这种机理占HC总排放量的10%左右。

5) . 体积淬熄

在发动机的某些运转工况下，在火焰前锋面到达燃烧室壁面前，燃烧室中的火焰就可能熄灭，这是产生未燃HC排放的一个来源。如果燃烧室中压力和温度下降太快，火焰就可能熄灭。在发动机冷起动和暖机工况下，因发动机温度较低，燃油雾化较差，蒸发缓慢，油气混合变差，导致燃烧变慢或不稳定，火焰易熄灭。发动机怠速或小负荷运转时，转速低，残余废气量大，或者排气再循环率(EGR率)过大或混合气太稀，都会使滞燃期延长，燃烧品质劣化。即使在稳态工况下发动机调整正确，在加、减速等瞬态工况下也可能发生火焰的大体积淬熄。

发动机缺火表现为因某些循环根本未点燃，而直接把

进气时吸入气缸的可燃混合气原封不动地送到排气管，造成未燃HC排放脉冲性急剧增加。所以**点火系统的可靠性对减少HC排放是至关重要的**。在燃烧室中安装两个火花塞，不仅可以加速燃烧过程，改善发动机动力性和经济性，而且有可能在燃烧困难(例如用大比例的EGR以降低NO_x排放)的情况下避免不规则地出现无燃烧的缺火循环。

6) . 碳氢化合物的后期氧化

错过发动机燃烧过程的HC，并不完全原封不动排放到大气中。当HC被“冻结”在淬熄层、缝隙区、润滑油膜和沉积物中之后，会重新扩散到高温的已燃气主流中很快被氧化，至少是部分氧化。如果有氧可用(例如在 $\phi_a > 1$ 的稀混合气下运转时)，HC的氧化很容易进行。根据碳氢化合物气相氧化总量反应动力学，为了在气相完成碳氢化合物的氧化反应，需要在600°C

(这是排气门处常见的温度)下至少停留50ms。所以，排放的HC是未燃的燃油及其部分氧化产物的混合物，而前者大约要占总量的40%。碳氢化合物也在排气管路中被氧化，占离开气缸HC的百分之几到40%。发动机产生最高排气温度($\phi_a=1$ 的混合气，高转速，迟点火，大负荷等)和最长停留时间(低转速)的运转工况，此时HC排放降低得最多。推迟点火提高排气时已燃气的温度，从而有利于HC的后期氧化。促进这种后期氧化的另一途径是降低排气系统的热损失，如增大排气管横断面积，对壁面进行绝热处理(例如用陶瓷涂层)等。

2. 2. 2 压燃式内燃机

柴油机一般把燃油高压喷入燃烧室中，直接在缸内形成可燃混合气并很快燃烧。燃油停留在燃烧室中的时间比点燃式内燃机短得多，因而受到上面已经描述过的生成未燃HC的种种机理

作用的时间也短。这种情况，可部分地解释了柴油机未燃HC排放较少的原因。

因为柴油中含有沸点较高、分子质量较大的碳氢化合物，当柴油被喷嘴雾化时已经发生了某种程度的热解作用。这使得在柴油机排气中出现的未燃烧或部分燃烧的碳氢化合物十分复杂，覆盖很宽广的分子组成谱。而且，大多数较重的碳氢化合物都被碳烟微粒吸附，构成微粒的有机可溶成分。

柴油机的燃烧是一个非常复杂的过程，其特征是燃油的蒸发、空气与燃油、已燃物和未燃物之间的混合以及燃烧本身三者同时发生。

燃油与空气形成的混合气如果太稀或太浓，则燃油不能自燃，或火焰不能传播。在这种情况下，燃油在后来的膨胀行程中与空气进一步混合之后，通过热氧化反应被部分地消耗掉。其余部分，由于混合不完全或氧化过程的淬熄而仍然未燃烧。

如果燃油在滞燃期内喷入燃烧室，所得到的混合气可能因为与燃烧室中的空气混合太快而过稀，或者因为混合太慢而过浓。主要是混合气过稀引起未燃HC的生成，因为很浓的混合气在随后与空气进一步混合期间最终会被烧掉。

如果燃油在滞燃期后喷入燃烧室，在燃油射入温度已很高的空气中时，会发生燃油或其热解产物的快速氧化。不过，混合不充分可能导致混合气过浓，或者因燃烧的淬熄而可能产生不完全燃烧产物随排气排出。

柴油机的HC排放量随运转工况变化很大，在怠速或小负荷运转时高于全负荷运转(见图2-2)。

1) . 过稀混合气的排放

燃油喷入燃烧室后，喷注附近局部过量空气系数 φ_a 的分布如图2-5所示。在这个带涡流的油气混合流场中，着火发生在 φ_a 略大于1的地区。靠近喷注外缘的混合气已经超过了可燃稀限($\varphi_{al} \approx 3$)，不可能自燃或维持一个快速的火焰前锋面，它只能是缓慢氧化反应的部位，且氧化不能完全。在这个地区出现的是未燃烧的燃油及其分解产物和部分氧化产物，如一氧化碳、醛类和其他含氧有机物，其中一部分最后会汇入排气中。

过稀区未燃HC的数量，取决于在滞燃期间喷入的燃油量、在此期间燃油与空气的混合速率以及燃烧室中

占主导的自燃条件。

如果发动机运转工况变动使滞燃期延长，HC排放量会急剧增加。

2) . 过浓混合气的排放

有两个原因：原因1：HC排放来自喷油嘴的压力室容积（在喷油嘴针阀座下游的小容积和各喷油孔道的总容积）不可控制的针阀运动引起的二次喷射也会引起HC排放。原因2：是喷入燃烧室的燃油过多。

在喷油期结束时，喷油嘴的压力室容积仍然充满燃油。在燃烧和膨胀期间，这部分被加热的燃油部分汽化，并以液态或气态低速穿过喷孔进入气缸，缓慢地与空气混合，从而错过主要燃烧期。因此，对于直喷式柴油机，当滞燃期最短时，HC排放量几乎与喷嘴压力室容积成正比。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/266220052154010124>