

中等專業學校教學用書

活塞式航空发动机原理

王振时 著



國防工業出版社

中等专业学校教学用书

活塞式航空发动机原理

王振时 著



国防工业出版社

編写“活塞式航空发动机原理”的說明

本書是按航空发动机制造专业的中等技术学校学生的需要知識而編写的。內容是重点地介紹了活塞式发动机工作过程的一般概念。参考了 М. М. Маслеников 和 М. С. Рапиорт 合著“航空活塞式发动机”，并根据目前我国中技学校学生的水平，确定了編写的內容。

本書的主要內容是輕油四行程发动机的工作原理，为了使本書的內容比較完整，还增加了一部分重油二行程发动机的工作原理，但所占篇幅很少。

整个內容分成四章，第一章是介紹活塞式发动机的工作过程，而重点介紹輕油四行程发动机气缸內所进行的过程。第二章是发动机的功率和經濟性，除介紹功率及燃料消耗量的計算原理以外，还介紹了汽化器（包括薄膜式汽化器）及直接噴油法等簡單工作原理。第三章是活塞式航空发动机的性能，对各种性能曲綫都作了一般的介紹。关于外部性能及节流性能的計算，采用了最簡單最近似的方法，能說明变化的基本关系。最后一章是重油发动机，主要是簡單介紹压燃式及二行程发动机的基本原理及其与四行程輕油发动机的区别。

序 言

§ 1. 航空发动机

飞机在天空中飞行要受到空气阻力，因此需要装上一种发动机以产生推进力量，此发动机称为航空发动机。航空发动机的基本要求有下列几点：

1. 重量馬力比（即公斤/馬力）要愈小愈好；馬力要大，重量要輕。

2. 燃料消耗愈省愈好。

3. 迎风面积愈小愈好，减少空气阻力。

4. 高空性；即要求在很高的高度上还能保持相当大的功率。

5. 坚固而可靠，飞行安全。

比較能适合上述条件的发动机是內燃机，常称为活塞式航空发动机。为了提高飞行速度，近代又采用了噴气式航空发动机。

§ 2. 航空发动机发展簡史

我国因多年来的封建統治，人民智慧的創造未能得到充分发挥；但有些发明是航空事业的濫觴，至今流傳称道，如风筝，竹蜻蜓，火箭及走馬灯等。

航空事业的发展，应归功于帝俄及苏联的科学家們。人类第一次駕駛着飞机征服天空的是帝俄的海軍軍官莫查依斯基（1882年在彼得堡試飞成功）。这一架飞机所用的发动机是蒸汽机，功率是30馬力，重量为140.5公斤，所以重量馬力比为4.7公斤/馬力。当时的內燃机剛剛发明，非常笨重，这是莫查依斯基当时所以不用內燃机的原因。

到十九世紀末叶才制造了不少比較輕便的內燃航空发动机，

其中最著名的是考士托維奇的发动机。它有八个液冷式气缸，水平放成二排，是世界上第一个使用液体燃料及电火花点火的发动机，其最大功率为80馬力，重量馬力比約为3公斤/馬力。

此后烏灰姆采夫制出双旋轉式星形发动机，在1200轉/分时功率为90馬力，重量亦輕；尼司基洛夫曾制出了很完善的液冷式七缸星形发动机，其功率为120馬力；而設計家卡里潑則制成了七缸气冷轉缸式发动机，气缸直徑为140公厘，活塞用鋁制成的，功率为80馬力，重量約80公斤。

偉大的十月革命以后，帝俄时有限的发动机制造厂，几乎全被破坏，技术人員缺乏。列宁斯大林特別重視航空事业，大力建厂，積極培养干部，使苏联的航空事业得到了惊人的发展。在发展过程中，出現了不少发动机的构造家，最著名的有下列三位：

1. 許維卓夫

許維卓夫所領導的設計小組，在1924年設計并制成了气冷式五缸星形发动机M-11。其功率为110馬力，重量为150公斤，大部分用在教練机上，一直到現在还在使用。此后他們更研究了大馬力气冷式发动机，制成了九缸星形气冷式发动机M-25，重量435公斤而功率为635馬力。1939年斯大林曾邀請許維卓夫面談，決定制造十四缸双排星形发动机。这就是今日著名的AM-82发动机，其功率为1700馬力，重量为850公斤。它可以装在轟炸机上，亦可装在驅逐机上。在苏联偉大衛国战争，苏联英雄闊日杜布駕駛着装有此种发动机的Лa-5驅逐机消灭了敌机62架。

2. 米古林

1930年米古林設計小組設計了一“V”型12缸液冷式发动机AM-34，其功率为800馬力。此后經米古林小組不断地研究改进，而設計成了一系列的大馬力的AM型发动机。功率自800馬力增加到1600馬力，重量-馬力比自0.90降低到0.50公斤/馬力，而高度达到了6000公尺。苏联衛国战争，使敌人丧胆的攻击机ИЛ-2就装着AM-38发动机（与現在的AM-42发动机相似）。装有AM-型发动机的飞机曾經完成了經過北极的飞行，創造了十余次的国际記錄。

3. 克里莫夫

克里莫夫設計小組在1935年創造了12缸V型液冷式發動機M-100,功率為860馬力,重量為445公斤。此後不斷改進,又設計成了一系列的BK-型優良的航空發動機。BK-105就是其中之一。由於它們具有優良性能、體積及重量都小,大部分都裝在驅逐機及快速轟炸機上。

蘇聯航空工業在十月革命以後的突飛猛進,說明了社會主義制度的優越性,亦說明了革命後蘇聯航空專家、工程師、工人的積極勞動所獲得的輝煌成就。

我國的航空工業與蘇聯革命剛成功時的情況相似,一切都需迎頭趕上世界的先進水平。我們有很好的客觀條件,首先是蘇聯以先進航空技術的無私幫助。我們深信在中國共產黨和毛主席的領導下,努力學習蘇聯,發揮一切力量來發展自己的人民航空事業,不久的將來,會有我們自己的發動機裝在自己的飛機上飛翔於祖國天空,保衛着祖國的國防。

目 录

序 言

§ 1. 航空发动机	6
§ 2. 航空发动机发展简史	6
第一章 活塞式发动机的工作过程	1
一、燃料及其燃烧	1
§ 1-1 航空燃料及其理化性质	1
§ 1-2 燃料的热值	1
§ 1-3 每公斤燃料燃烧时理论上所需要的空气量	2
§ 1-4 余气系数及废气的组成	2
§ 1-5 新鲜混合气和工作混合气的分子变化系数	3
二、活塞式航空发动机的工作原理及构造	5
§ 1-6 四行程发动机及二行程发动机	5
§ 1-7 有传动离心式增压器的发动机及有涡轮增压器的发动机	9
§ 1-8 活塞式航空发动机的分类	11
三、轻油四行程发动机气缸内进行的过程	11
§ 1-9 进气过程	11
§ 1-10 进气系数	12
§ 1-11 进气系数与各种因素的关系	13
§ 1-12 残余系数及进气终了时的温度	14
§ 1-13 压缩过程	16
§ 1-14 气缸内的混合气燃烧过程	17
§ 1-15 正常燃烧过程的三个时期	18
§ 1-16 膨胀开始(或燃烧终点)时的温度及压力	18
§ 1-17 爆燃——不正常的燃烧	20
§ 1-18 膨胀过程	21
§ 1-19 排气过程	22
§ 1-20 气门定时图	22
§ 1-21 理论示功图及实际示功图	23

§ 1-22	平均指示压力	25
§ 1-23	指示效率及其与各种因素的关系	26
第二章 发动机的功率和經濟性		28
一、指示功率及有效功率		28
§ 2-1	指示功率	28
§ 2-2	指示功率与各种因素的关系	30
§ 2-3	发动机的机械損失功率	31
§ 2-4	損失功率与各种因素的关系	31
§ 2-5	有效功率及平均有效压力	33
§ 2-6	机械效率及有效效率	33
二、发动机的燃料消耗量及热量平衡		35
§ 2-7	指示耗油率与实际耗油率	35
§ 2-8	发动机的热量平衡	37
三、活塞式发动机的燃料供給机构		38
§ 2-9	汽化器的用途及对它的要求	38
§ 2-10	简单汽化器的工作原理	38
§ 2-11	简单汽化器的性能	39
§ 2-12	汽化器的主要配油方法	40
§ 2-13	现代汽化器中的輔助装置	42
§ 2-14	无浮子式汽化器的工作原理	44
§ 2-15	燃料的直接喷射法	45
§ 2-16	高压油泵的工作原理	47
§ 2-17	噴油嘴的工作原理	48
第三章 活塞式航空发动机的性能		49
一、外部性能及节流性能		49
§ 3-1	发动机性能的一般概念	49
§ 3-2	发动机的外部性能曲綫及其計算	49
§ 3-3	发动机的节流性能曲綫及其計算	53
§ 3-4	发动机功率按标准大气条件的換算	57
二、高度性能		57
§ 3-5	概論	57
§ 3-6	低空发动机的高度性能曲綫	58

§ 3-7	航空发动机高空性的概念及保证方法	59
§ 3-8	用于活塞式航空发动机的增压器的类型	60
§ 3-9	有传动离心式增压器发动机的高度性能曲线	61
§ 3-10	有复合式增压器发动机的高度性能曲线	66
	第四章 重油发动机	68
	一、压燃式发动机的一般概念	68
§ 4-1	压燃式发动机的工作过程	68
§ 4-2	重油发动机燃烧过程的分析	69
§ 4-3	重油发动机的优缺点	71
	二、二行程发动机	72
§ 4-4	二行程发动机的示功图	72
§ 4-5	二行程发动机的吹除方法	73
§ 4-6	二行程发动机与四行程发动机的比较	75

第一章 活塞式发动机的工作过程

一、燃料及其燃烧

§ 1-1 航空燃料及其理化性质

航空发动机上，一般都采用液体燃料，例如汽油，煤油，柴油，酒精等。在活塞式发动机上常用汽油，喷气式发动机上常用煤油；它们都是碳氢化合物，从石油中提炼出来的。

对航空燃料的理化性质有以下几点要求：

1. 热值要高，即每公斤燃料完全燃烧时所放出的热量要高。普通汽油的热值为10200~10700千卡/公斤燃料。

2. 挥发性要好；在一定温度及气压条件下，燃料变为蒸汽的多少表示挥发性的好坏。挥发性好，则可以得到良好的燃烧；但不能要求挥发性太大，以防导管中的气泡阻塞油路。

3. 抗爆性要高；爆炸性的燃烧，会严重影响发动机的性能，甚至损坏发动机。因此要求燃料有很好的抵抗爆燃的性质。

4. 成分要纯不含杂质；汽油中不能含有许多硫黄，砂粒等杂质，亦不能有酸性。其目的是防止燃料对零件的腐蚀，同时亦便于保存使其性质不变。

5. 凝固点要低；在寒冷气候中，燃料不会冻结，因此防止了油路中有障碍出现。

§ 1-2 燃料的热值

燃料的燃烧是燃料与空气中氧激烈化合的过程，热量随着发生。每公斤燃料完全燃烧时所能发出的热量称为热值。在燃气中的水汽所具有的汽化热，在发动机中无法利用，因此常常减去不算，这样就成为燃料的低热值，以 H_u 表示，单位为千卡/公斤燃料。

燃料热值的计算可以用帝俄化学家蒙得里业夫所提出的公式，称为蒙得里业夫公式，即

$$H_u = 8140C + 24600\left(H - \frac{O_T}{8}\right) \text{ 千卡/公斤燃料,}$$

式中C、H、 O_T 代表每公斤燃料中含有炭素、氢素及氧素的重量。因为普通汽油中无氧素，所以 $O_T = 0$ 。

§ 1-3 每公斤燃料燃烧时理论上所需要的空气量

根据化学方程式按重量计算，每公斤燃料完全燃烧时所需要的理论空气量 l_0 为

$$l_0 = \frac{\frac{8}{3}C + 8H - O_T}{0.232} \text{ 公斤空气/公斤燃料。}$$

理论空气需要量有时也用莫尔单位来计算，用 l_0' 表示：

$$l_0' = \frac{l_0}{\mu_B} = \frac{l_0}{28.9} \text{ 莫尔空气/公斤燃料,}$$

式中 μ_B 为空气的相当分子量， $\mu_B = 28.9$ 。

§ 1-4 余气系数及废气的组成

实际于发动机中，对每公斤燃料所供给的空气量 l_{π} 不一定等于理论空气需要量 l_0 ； l_{π} 可能小于 l_0 ，也可能大于 l_0 或等于 l_0 。

空气实际供给量 l_{π} 与空气理论需要量 l_0 之比值称为余气系数，以 α 表示，即

$$\alpha = \frac{l_{\pi}}{l_0} \text{ 或 } l_{\pi} = \alpha l_0 \text{ 公斤空气/公斤燃料。}$$

用莫尔单位计算时则

$$l_{\pi}' = \frac{l_{\pi}}{28.9} = \alpha l_0' \text{ 莫尔空气/公斤燃料,}$$

式中 l_n' 为用莫尔单位計算时的空气实际供給量。

混合气体中余气系数 α 的大小决定燃气或廢气的組成。廢气的組成可以从发动机中取出廢气样品作化学分析来决定，或用一种廢气分析器直接測出，也可以近似地用公式来計算。

当 $\alpha = 1$ 时，混合气体称为理論混合气。这种混合气在理論上应得到完全燃燒。廢气成分應該是 CO_2 及 H_2O 以及剩下的 N_2 。但实际上由于燃料与空气的混合不能达到理想的均匀，往往不可能得到完全燃燒，廢气中就含有一氧化碳 CO 及未及作用的氧 O_2 。

当 $\alpha > 1$ 时，供給的空气量多于完全燃燒所需要的空气量，也就是空气多油少，因此称为貧油混合气。由于过量空气的存在就可以得到完全燃燒。廢气成分中，除含有 CO_2 、 H_2O 以外，还有剩余的 O_2 及空气中带来的 N_2 。

当 $\alpha < 1$ 时，供給的空气量少于完全燃燒所需要的空气量，也就是空气少油量多，因此称为富油混合气。由于空气不足就不可能得到完全燃燒。此时在廢气中，除 CO_2 、 H_2O 以外，还含有 CO 、 H_2 及 CH_4 等气体成分以及空气中带来的 N_2 。

經驗指出，在重油发动机中，要 $\alpha > 1$ ，在正常情况下， $\alpha \approx 1.3 \sim 1.7$ 。在輕油发动机中，要 $\alpha < 1$ ，在以最大功率工作情况下， $\alpha \approx 0.80 \sim 0.90$ ；在最高經濟情况下， $\alpha \approx 0.95 \sim 1.1$ 。

§ 1-5 新鮮混合气和工作混合气的分子变化系数

发动机的廢气除大部分被排出以外，尚有一小部分殘存在燃燒室中，称为殘余廢气。殘余廢气和新鮮混合气混合以后，就形成发动机实际工作循环的工質，称为工作混合气。混合气在气缸內燃燒后的重量應該等于燃燒前的原来重量，但莫尔数并不相等，因为燃燒前后混合气的相当分子量有了改变。燃燒后的莫尔数常常大于燃燒前的莫尔数。它們之間的比值称为分子变化系数，由于混合气成分的不同，分子变化系数也并不相同。

新鮮混合气燃燒后的莫尔数与燃燒前的莫尔数之比称为新鮮

混合气的分子变化系数。用 β_0 表示，公式是

$$\beta_0 = \frac{M_2}{M_1},$$

式中 M_1 ——新鲜混合气燃烧前的莫尔数；

M_2 ——新鲜混合气燃烧后的莫尔数。

根据理论分析， β_0 可用下列公式来计算，即

$$\beta_0 = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O_T}{32} + 0.21l_0'(1-\alpha)}{\alpha l_0'}。$$

在一般情况下， $\beta_0 \approx 1 \sim 1.2$ 。

工作混合气燃烧后的莫尔数与燃烧前的莫尔数之比称为工作混合气的分子变化系数。用 β 表示。

设 M_r = 残余废气的莫尔数，

$$\text{则 } \beta = \frac{M_2 + M_r}{M_1 + M_r} = \frac{\frac{M_2}{M_1} + \frac{M_r}{M_1}}{1 + \frac{M_r}{M_1}},$$

式中 $\frac{M_2}{M_1} = \beta_0$ ；

$$\frac{M_r}{M_1} = r_{\text{OCT}}。$$

r_{OCT} 是残余废气的莫尔数与新鲜混合气燃烧前的莫尔数之比，常称为残余系数。在一般情况下

$$r_{\text{OCT}} \approx 0.01 \sim 0.07,$$

因此

$$\beta = \frac{\beta_0 + r_{\text{OCT}}}{1 + r_{\text{OCT}}}$$

根据各种计算， β 略小于 β_0 。

二、活塞式航空发动机的的工作原理及構造

§ 1-6 四行程发动机及二行程发动机

1. 活塞式发动机的曲柄连杆机构及几个技术名词。

活塞式发动机之所以能够发出能力完成工作，是由于气缸内混合气体的燃烧，升高压力，推动活塞作功。为了能周期不断地作功，就必须使气体的状态一次接一次地恢复到原来状态，形成发动机的工作循环。但是气体膨胀所作的功，只能使活塞进行直线运动。要使这个运动变成发动机的旋转运动，同时使活塞不断地进行往复运动，则必须用连杆把活塞及曲轴连接起来。这样便形成一个曲柄连杆机构，如图所示。活塞随着连杆在极限位置 I 与 II 之间作往复运动。位置 I 离曲轴中心最远，称为上死点；

位置 II 离曲轴中心最近，称为下死点。活塞在 I 与 II 两极限位置间所经过的路程称为活塞行程（或冲程），以 S 表示，它等于

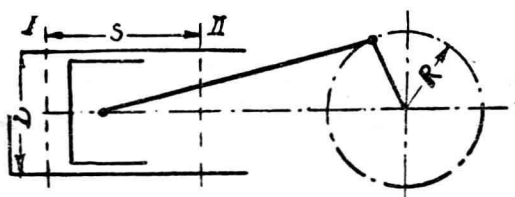


图1-1 曲柄连杆机构

曲柄半径 R 的两倍，即 $S = 2R$ 。

活塞在其行程中所排除的容积称为工作容积（或活塞排量），以 V_h 表示。如果以 D 表示气缸的直径，则

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S。$$

当活塞到达上死点位置时，剩下的气缸容积称为燃烧室容积，以 V_c 表示。工作容积和燃烧室容积之和称为气缸的总容积，以 V_a 表示，因此

$$V_a = V_c + V_h。$$

发动机的压缩比是指气缸的总容积（即压缩开始时的气缸容积）与燃烧室容积（即压缩終了时的气缸容积）之比。压缩比常用 ϵ 来表示，因此

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_h}{V_c} + 1。$$

由此得

$$V_c = \frac{V_h}{\epsilon - 1}。$$

2. 四行程发动机的工作原理

絕大多数的航空发动机，其工作循环是由四个行程所組成的，称为四行程发动机。四个行程分別說明如下：

a) 进气行程——活塞从上死点到下死点；此行程中进气門开放，但是排气門則关着。新鮮混合气进入气缸，与殘余廢气混合成为工作混合气。 $p-v$ 图上用 $r-a$ 表示。气缸內的压力应该小

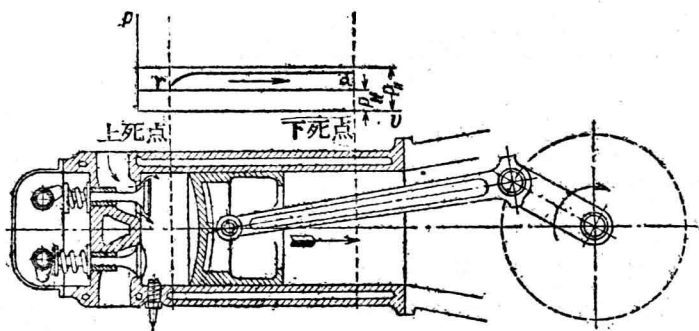


图1-2 进气行程

于增压器出口的压力 p_k ，因此进气綫是在 p_k -綫的下面。 p_H 代表外界大气压力。

b) 压缩行程——活塞从下死点到上死点；此时进、排气門都关闭着，因此工作混合气受到压缩。图中以 $a-c$ 綫表示。

в) 膨胀行程——活塞从上死点到下死点；在压缩行程末尾，

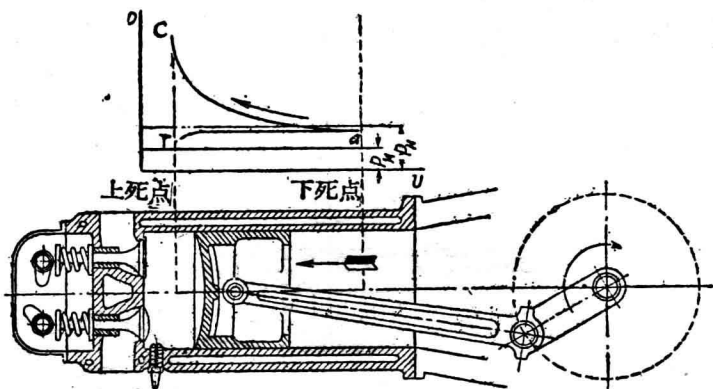


图1-3 压缩行程

混合气被电火花点燃，使混合气温度及压力大为增高，就将活塞推动作功。它包括燃烧过程 $c-z$ 及膨胀过程 $z-b$ 。

r) 排气行程——活塞从下死点到上死点；排气门开放，废气被排出。气体压力应高于外界大气压力，因此排气线在 p_H -线的

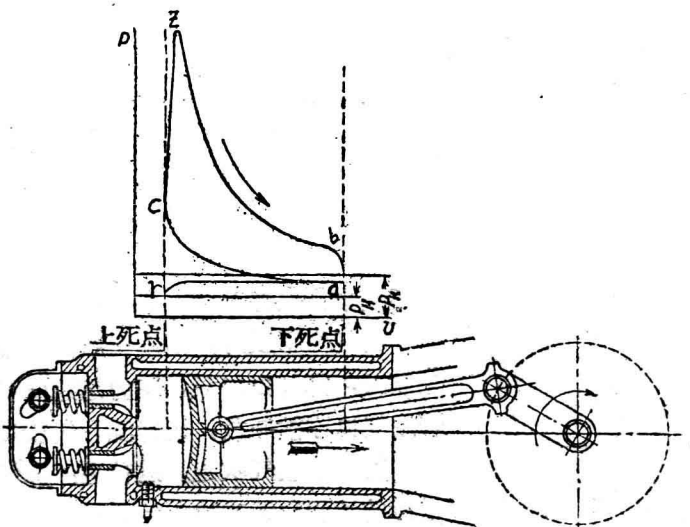


图1-4 膨胀行程

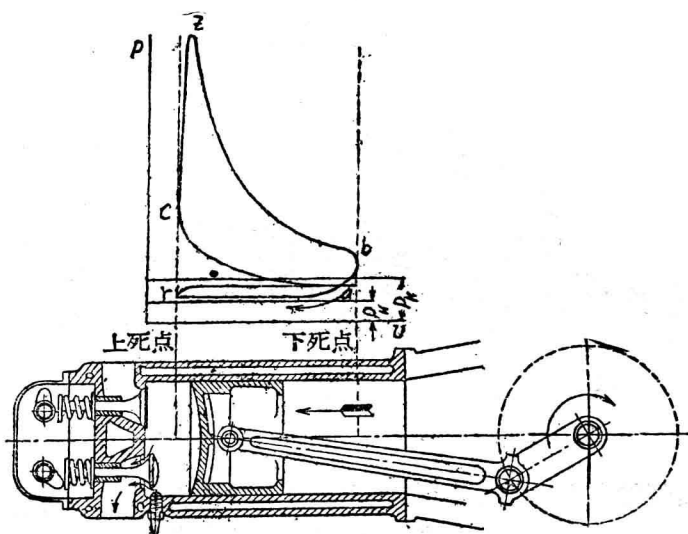


图1-5 排气行程

上面，如图中 $b-r$ 所示。

3. 二行程发动机的工作原理

二行程发动机的工作循环，只需要活塞往返一次即可完成。

图 1-6 表示二行程发动机的简单原理图。

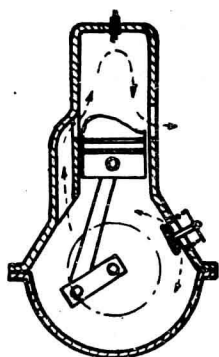


图1-6 二行程发动机原理图

气缸内活塞从下死点走向上死点是压缩行程；从上死点到下死点是膨胀行程。进气及排气的过程都是在接近下死点的地方完成的。进、排气口都开在气缸壁上，由活塞本身来开关。

当气体膨胀时，活塞下行。当接近下死点时，排气口开放，压力迅速降低，接着进气口亦被开放，新鲜混合气就进入气缸，将残余废气吹走。这种进、排气同时进行的过程称为吹除。为了进行吹除，新鲜气体应具有较高的压力。因此混合气在