

舰艇内燃机原理

JIANTING NEIRANJI YUANLI

下 册

曹 渝 白 编

一九六三年五月

272.1421

5532

下 册 目 录

第六章 二冲程发动机的排气和扫气过程

6-1 引言	1
6-2 二冲程发动机的排气与扫气系统	2
6-3 排气与扫气过程的进行情况	5
6-4 换气过程的计算	7
6-5 换气过程计算参数的估计	19
6-6 配气器官的实际时-面值	21
6-7 计算进行步骤及例题	29
6-8 扫气质量的估计, 扫气与排气过程的实验研究	38

第七章 混合气形成与燃烧室

7-1 引言	42
7-2 燃料的喷雾	42
7-3 油雾的蒸发	58
7-4 燃烧室	62
7-5 燃烧室气动过程的近似计算	83
7-6 舰艇内燃机燃烧室的发展趋向	95

第八章 燃料的发火与燃烧

8-1 引言	97
8-2 燃料自燃与燃烧的物理化学过程原理	97
8-3 燃料发火及燃烧的物理化学机构	111
8-4 发动机气缸中发火与燃烧过程的实验研究	115

第九章 舰艇内燃机的特性

9-1 舰艇内燃机的基本工况	118
9-2 外特性	123
9-3 螺旋桨特性	128
9-4 变距螺旋桨装置	131
9-5 负荷特性	132
9-6 万能特性或多参数特性	136
9-7 特种特性	138

第十章 发动机单位功率的提高

参考文献

第六章 二衝程發動機的排氣和掃氣過程

6-1 引 言

二衝程發動機的功率和經濟性在很大程度上取決於掃氣和充填的質量。

研究二衝程發動機的換氣過程是創造和發展二衝程發動機的主要問題之一。

在沒有討論二衝程發動機的排氣——掃氣過程之前有必要首先對二衝程與四衝程發動機工作循環的特點提供比較的概念。

需要指出的一些特點為：

1) 氣缸尺寸與轉速相同時，理論上二衝程發動機可以得到比四衝程發動機加倍的功率。實際上，二衝程發動機功率不是成倍的增加，因為實現掃氣與排氣時要損失一部份活塞衝程，所以只有四衝程的1.7—1.8倍；此外，驅動掃氣設備還要消耗發動機指示功率的5—10%。

2) 由於整個工作循環只需兩個（而非四個）活塞衝程就可完成，故二衝程發動機轉矩的均勻性要強得多。

3) 在採用沒有氣閥的氣口式掃氣系統時，二衝程發動機的结构比四衝程簡單，不過要实现二衝程循環還必須有掃氣設備。

4) 廢氣的清除過程和新氣的充填過程，在四衝程發動機中進行的比較完善，因為在四衝程中，這兩個過程占有多於兩個活塞衝程的時間。

下面給出氣缸清除和充氣過程的配氣相角（按曲軸轉角計）大致的比較概念。

配氣相角	發 動 機	
	四 衝 程	氣口掃氣式二衝程
排氣器官總開啟角	215—305	120—130
進氣或掃氣器官總開啟角	215—286	70—80

從表中可以看出，二衝程發動機不論是廢氣排出氣缸，還是新氣充入其中，顯然，實現起來都要困難得多。

5) 燃燒——膨脹過程所占有的曲軸轉角角度 φ ，在四衝程發動機中比二衝程者要大。實際上，在四衝程中 $\varphi \approx 140^\circ$ ，而在二衝程中只有 $\varphi \approx 100 \sim 120^\circ$ ，亦即少了20—40°。

6) 四衝程發動機比較容易確定最佳的配氣定時，因為調整凸輪機構即可改變提前或延遲的角度。而在二衝程彎流式系統中，不更換氣缸套就無法改變這些角度。單流一氣閥掃氣形式中只可能改變排氣定時。

7) 四衝程發動機以增壓提高功率比較便利，因為其氣缸負荷較小而且使用的增壓形式可以最簡單。

6-2 二冲程发动机的排气与扫气系统

如上所述，二冲程发动机中废气清除和新气充入工作气缸的过程，即排气和扫气过程所使用的时间是有限的，所以，工作气缸的清除和充气过程的效果好坏主要取决于扫气系统的完善程度。

现有的扫气系统，根据扫气气流的运动性质，可以分为两种主要形式——弯流式和直流式。

弯流式的特征是扫气气流先向下向上沿气缸轮廓升起，到达气缸盖处转180°弯，然后再依反向从上往下的运动。

直流式的扫气系统，与此相反，空气气流的运动方向仅朝一个方向。因此，这种形式中扫气空气的路程比弯流式中大约要短一半。

扫气系统还可按扫气口及排气口的结构形式分类，即按：*a)* 气口在气缸上的相对位置；*b)* 气口的相对高度；*c)* 气口在平面上的布置和方向。

弯流式系统按照气缸上气口的相对位置（图6-1, *a-g*）可分为：

- 1) 横流式——排气口位于进气口的对面（I *a, b*）；
- 2) 回流式——排气口与扫气口位于气缸的同侧（I *c*）；
- 3) 环流式——扫气口与排气口各皆分布在整个圆周上（I *d*）。

- 4) 混合式——是1), 2), 3)三种形式的修改形式。

直流式系统中，进排气器官（气口或气阀）总是各位于气缸的两端（IV *h, i*）。

弯流式系统按照排气口与扫气口的相对高度不一样可分为：

- 1) 扫气口上边缘低于排气口上边缘，这时进行的是气口式（无气阀）扫气（I *a, b*）。为了过后充气或增压，排气口有时按装旋转滑阀或回转活门；

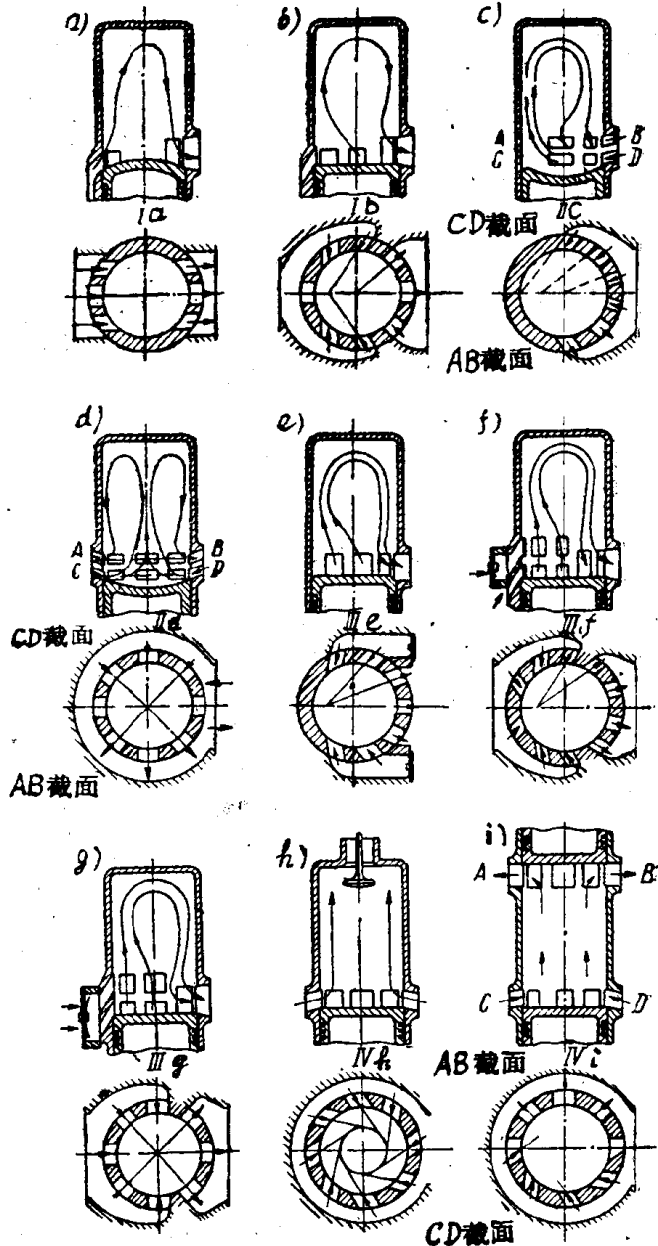


图 6-1 排气和扫气系统的各种形式

2) 排气口和扫气口上边缘的高度一样, 在这种结构中, 扫气口应装备自动阀;

3) 扫气口上边缘高于排气口上边缘, 在单排扫气口时, 扫气口应按装控制阀; 在双排扫气口时, 则上排气口应安装控制阀(Ⅱf)或两排都装(Ⅱg)。

至于直流一气口式扫气系统, 则在上述三种情况下都无需在扫气口有任何形式的阀, 但必须有相应的正时, 为此, 使排气活塞领先一个角度。

气口在平面内的布置和方向适合与否, 对扫气和排气过程的影响很大, 其有下列结构形式:

1) 平行式(a)——扫气口与排气口布置的相互平行(用于小功率发动机)。

2) 辐射式(d, g)——扫气口与排气口的方向均自气缸中心向外辐射。

3) 切线式(h)——扫气口与排气口的方向与一直径小于气缸直径 D 的圆周相切。

4) 偏心式(b, f, e)——扫气口的中心线指向一点或数点, 这些点皆位于靠近扫气口的那半气缸中。

5) 光线式(c)——扫气口与排气口的中心线如光线一样, 从一点或数点射出, 这些点是偏心的或位于气缸之外。

除了上述气口在平面上布置的主要形式外, 在现有发动机中还会遇到一些其它形式, 不过都是这些主要形式的修改而已。

弯流式扫气系统主要是在低、中速船用发动机中采用。如果用提高转速的办法加强发动机, 则由于充量损失的增加(无控制阀的形式中), 空气气流行径复杂(环形)以及燃烧产物同新气混合的增加, 都会使弯流式发动机工作气缸的清除效果恶化。因此, 为了便于保证高转速时的扫气质量, 应该采用直流式扫气系统。但是, 在合理的弯流式扫气系统中, 在高速情况下也能有效地实现优良的气缸扫气, 例如, 图 6-2 所示的史纽莱(Schnurle)系统。航空型诺马德(Nomad)柴油机即采用史纽莱扫气系统(图 6-3); 该发动机在 $n = 2950$ 转/分时, $N_e = 3135$ 有效马力, 增压压力 $p_k = 6.28$ 公斤/厘米², $p_c = 17$ 公斤/厘米², $g_c = 158$ 克/有效马力小时。

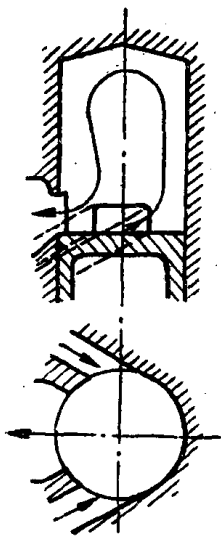


图 6-2 史纽莱弯流式扫气系统简图

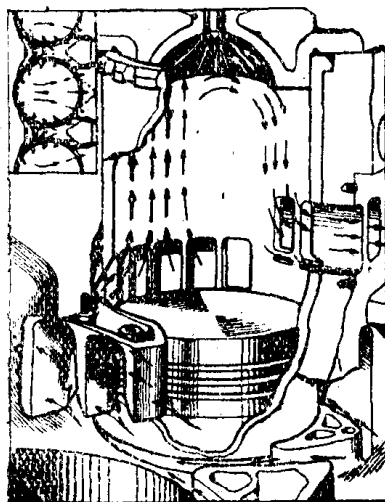


图 6-3 史纽莱弯流系统的实例

直流式扫气系统目前优先在中、高速舰艇发动机中采用，下面我们较为详细的叙述一下。

1) 直流气阀—气口式系统(IVh)，其扫气口分布在气缸全圆周上，而气缸盖上有1~4个排气阀。

采用直流式时，扫气空气几乎不与排出的废气渗合，废气是逐渐被新气所置换。因此，气缸的清除效果良好 ($\gamma_r = 0.06 \sim 0.08$)，而平均有效压力也高（非增压时， $p_e = 5.5 \sim 6.0$ 公斤/厘米²）。

采用气阀排气，有可能很方便的选定最合适的配气定时，以及在有必要时实现气缸的延长充气。扫气口在平面内经常采用切向布置 ($\alpha = 15 \sim 25^\circ$)，以便创造扫气空气的涡动和改善混合气的形成过程。扫气口分布在气缸的全圆周上，有可能得到较大的通流截面，保证气缸内空气均匀的供应，同时也冷却了活塞顶。

中、高速发动机采用直流气阀—气口式扫气者甚为广泛，如37Д, 40Д, 45Д及GMC诸系列等。当前这类发动机已广泛采用复合增压；采用增压以后，提高了平均有效压力 p_e 和经济性。例如，中速GM16—498发动机，在 $p_e = 9.06$ 公斤/厘米²时， $g_e = 170$ 克/有效马力小时。高速三菱24-WZ增压发动机，在 $n = 1600$ 转/分时， $N_e = 3000$ 有效马力， $p_e = 9.95$ 公斤/厘米²， $g_e = 188$ 克/有效马力小时。

2) 直流—气口式扫气系统(IVi)用于对置活塞式发动机中，它是目前最好的扫气系统。双曲轴，上下活塞的曲柄(位置相差 180°)错开 $10 \sim 15^\circ$ ，用以实现扫气口与排气口同时关闭，甚至在必要情况下还可以延长充气。曲柄错开使活塞上的功率分配有所改变，例如错角为 10° 时，落后活塞将传递 $\sim 40\%$ 功率，而领先活塞则传递 $\sim 60\%$ 功率。

扫气口在平面内为切向布置，以造成空气的涡动；而排气口则为辐射式(IVi)。

直流—气口式扫气系统在各国获得普遍采用，诸如 Д100, FM38E, FM38D, Napier Deltic, Fiat1516MX, Götaverken TOP, Jumo等中、高速发动机。

这一形式的主要缺点，是发动机的结构复杂和控制排气口启闭的活塞的工作条件严重。直流—无气阀形式之气缸的清除不亚于四冲程发动机的清除质量 ($r_r = 0.03 \sim 0.06$)。当单位耗油量为 $170 \sim 175$ 克/有效马力小时，平均有效压力 p_e 值达到 $6 \sim 7$ 公斤/厘米²（非增压）。

英国纳皮尔三角形十八缸快艇对置活塞式发动机，在机械增压时， $n = 2000$ 转/分， $N_e = 2500$ 有效马力， $p_e = 6.47$ 公斤/厘米²， $g_e = 181$ 克/有效马力小时；而进一步实行涡轮增压后(T18—37K)， $n = 2100$ 转/分， $N_e = 3100$ 有效马力， $p_e = 7.62$ 公斤/厘米²， $g_e = 190$ 克/有效马力小时；前者 $p_K = 1.548$ 公斤/厘米²，后者 $p_K = 2.336$ 公斤/厘米²（当环境条件为750毫米水银柱高， 29.4°C ，50%湿度时）。

对置活塞式发动机已能实现使用多种燃料的燃烧系统，例如英国L60等发动机，L60发动机为六缸在 $n = 2400$ 转/分时为700有效马力。

总之，直流式优于弯流式扫气系统，这是因为：

- 1) 可以保证气缸更好的清除；
- 2) 气口高度减小，压缩开始较早，能更充分地利用气缸工作容积；
- 3) 将混合物压向热的区域（活塞或排气阀）使充气温度提高，发火延迟期缩短。

但是直流式结构比较复杂，弯流式则比较简单；后者无需气阀及其传动机构，而且容易实现直接反转。在高速高增压的情况下，弯流式结构有时也不亚于直流式系统。

6-3 排气与扫气过程的进行情况

排气和充气过程进行中所发生的现象的机理，在各类型的发动机中都不相同，直到目前为止，还没有完全搞清楚。

如果根据可以代表大多数二冲程发动机排气与扫气过程期间压力随曲轴转角变化的实际情况，适于把这里发生的过程分成下列三个主要阶段（图6-4），即：

- I 自由排气阶段；
- II 强制排气和扫气阶段；
- III 过后充气或充量损失阶段。

阶段 I——燃烧产物的“自由排气”阶段，相当于由于工作气缸与排气总管之间存在的压力差以及排气系统内气体动力过程所产生的气体流动过程。自由排气是从排气器官打开时刻开始（点B），并通常终止于扫气口已经开启一定时间（点r）之后；自由排气期中的流动过程本身尚可分成超临界和亚临界二个时期。从排气器官开启时刻就发生和进行着在超临界区域的气体流动过程，一直到到达临界压力比 β_{kp} 的时刻为止（在发动机中，如果废气排入大气，则 β_{kp} 约为2绝对气压）；这一时期的气体流速等于临界速度（音速，当气体温度在 $1000^\circ K$ 左右时，约等于500~600米/秒）。

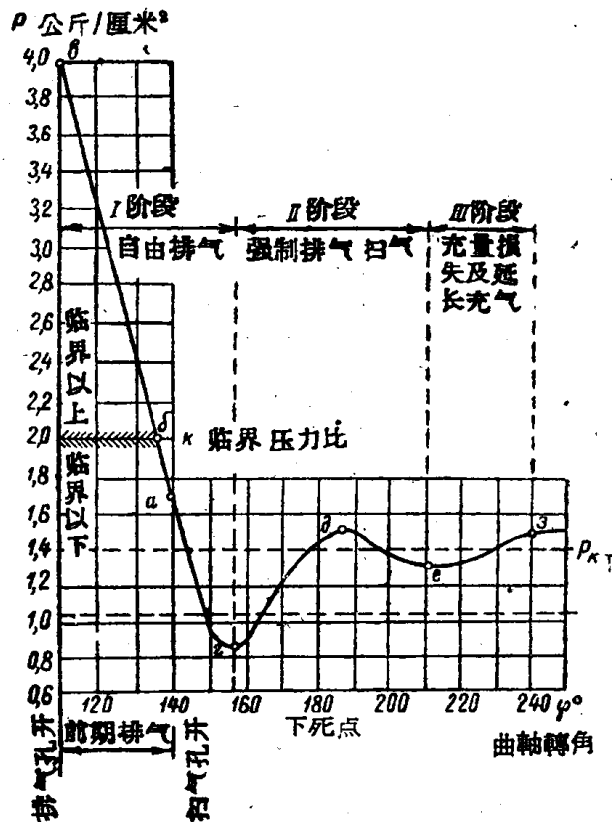


图 6-4 排气和扫气过程各阶段

阶段 I 的第二时期，相当于气体在压力低于临界压力（低于2绝对气压）和速度大大降低的情况下的自由流动时期。

阶段 I 大约在下死点附近结束。在这一阶段终点，压力降至大气压力；而在高速发动机中，将降至低于大气压力的数值（点r），这是由于以巨大速度冲进排气总管的气柱的动力影响所致。

如取排气开始时气缸压力 $p_b = 5$ 公斤/厘米² 及 $T_b = 1200^\circ K$ ；而自由排气终了气缸压力 $p_n = 1.1$ 公斤/厘米²，温度 $T_n = 800^\circ K$ ，则在自由排气阶段燃烧产物排出的份数为

$$\frac{\frac{P_b V_b}{RT_b} - \frac{P_n V_n}{RT_n}}{\frac{P_b V_b}{RT_b}} = \frac{P_b - P_n \frac{V_n}{V_b} \frac{T_b}{T_n}}{P_b} = \frac{5 - 1.1 \cdot 1.1 \cdot \frac{1200}{800}}{5} = 0.64,$$

式中, V_b —排气开始时的气缸容积;

V_n —自由排气终了时的气缸容积, 取其等于 $1.1V_b$.

上述近似计算指出, 在自由排气之后, 仍有25~30%的燃烧产物要继续流出气缸, 如果考虑有5~10%的残余废气的话。

阶段 I——同时进行工作气缸的排气和充气过程, 或所谓“强制排气”过程(γ—δ—e)。扫气口才打开的时候, 空气并不立刻进入气缸, 因为通常这时气缸内压力 ($p_a = 1.5 \sim 3.0$ 公斤/厘米²) 比扫气箱内压力 ($p_k = 1.2 \sim 1.4$ 公斤/厘米²) 要高。若考虑到在扫气口刚打开时排气器官开启面积已经很大, 气缸内压力的急剧下降以及排气流注的喷出作用, 就无需担心在压力到达平衡前会有大量的气体进入扫气箱内。

阶段 II 可以再分为二个时期。在第一个时期中, 当扫气口已经打开相当大的时候, 由于空气的进入, 压力有很大的升高(区域γ—δ); 在第二个时期中, 压力变化的幅度减小, 过程特性近乎稳定流动(区域δ—e—з)。

扫气过程之初, 主要是进行燃烧产物的排出和空气的置换。在弯流式扫气系统中, 随着过程的发展, 空气与燃烧产物的渗混有所增加。在直流式扫气系统中, 燃烧产物排出和扫气空气的进入是层层置换的。

阶段 III 随扫气系统而异, 可以是过后充气, 如果扫气器官在排气器官之后关的话; 反之, 如果排气器官在扫气器官之后关, 也可成为“充量损失”阶段。在中速和高速发动机中, 採用不对称扫气系统, 既可以实现过后充气, 如果有必要的话, 也可以实现发动机增压。

图 6-5 所示为各类扫气系统配气器官开启面积曲线。

工质置换期间, 与气缸内压力变化过程的同时, 由于排气脉冲的影响, 在排气总管和支管内, 产生了来回反射于排气总管或支管的自由端与排气器官之间的压力波。

这种以音速来回传播的压力波, 对气缸内过程进行的特性以及涡轮增压时排气能量的利用效果都有很大的影响。

在扫气箱中也有类似徘徊的压力波, 不过波幅小得多。

目前二冲程发动机的清除和充气过程计算, 只限于进气和排气器官截面的计算。清除和充气过程质量只依靠分析计算是不行的, 需要通过各种实验研究途径来解决。

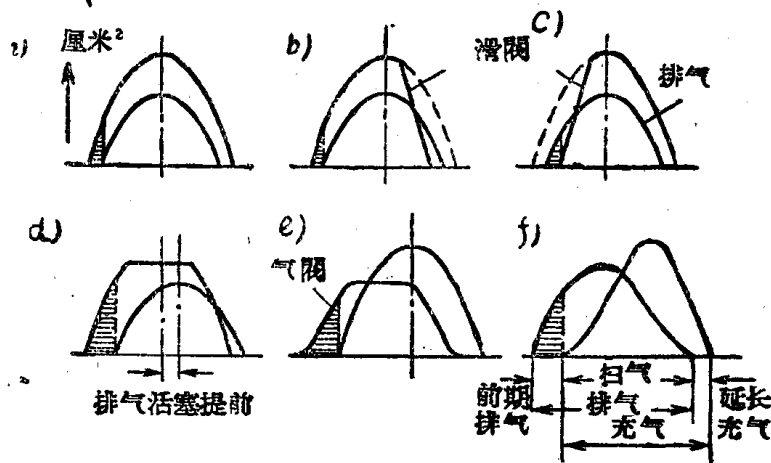


图 6-5 扫气与排气器官开启面积 f 曲线; 扫气形式各为: a—对称一气口式; b—具有排气滑阀; c—具有进气滑阀; d—对置活塞式; e—气阀—气口式; f—气阀式。

6-4 换气过程的计算

1. 排气过程的基本公式:

排气过程是一个气缸容积和进、排气管通流截面都在变化的情况下从气缸向外的流动过程;在过程进行中,气缸和排气管内的压力也在变化着。

用概括的形式研究这种复杂的问题是非常困难的,因此,为了解决这个问题,我们假定气流是单向流动的,排气管内的压力为定值并等于 p_p ,这样才可能使我们对排气过程进行近似的研究。

忽略摩擦力及体积力,单向流动的气体运动方程式可写成:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

式中, p 及 ρ — 压力及密度;

x — 运动中的气体质点的位置的座标;

w 及 t — 速度及时间。

在单向流动条件下,连续方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

绝热过程的状态方程式

$$p = c \rho^k. \quad (3)$$

在稳定流动情况下,速度、压力及密度与时间无关,即 $\frac{\partial w}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ 和 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 故

$$w \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

两边乘以 dx , 延流线积分, 并利用式(3), 则得

$$\frac{w^2}{2} = -\int_1^2 \frac{\partial p}{\rho} = -\int_{p_1}^{p_2} c^{1/k} \frac{dp}{p^{1/k}} = \frac{k}{k-1} c^{1/k} p_1^{\frac{k-1}{k}} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (4)$$

考虑到

$$c^{1/k} = \frac{p_2^{1/k}}{\rho_2} = \frac{p_1^{1/k}}{\rho_1},$$

可有

$$\frac{p_1^{\frac{k-1}{k}} p_1^{1/k}}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1}.$$

因此,公式(4)可写成下列形式

$$\frac{w^2}{2} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (5)$$

或写成燃烧产物的流速

$$w = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

式中, p_2 和 p_1 —排气器官之后及工作气缸内的压力瞬时值;

$\rho_1 = \frac{\gamma_1}{g} = \frac{1}{v_1 g}$ —气缸内气体的密度。

每秒气体流出的重量

$$G = V \gamma = \mu f w \gamma, \quad (6)$$

式中, $\gamma = \frac{1}{v_2}$ —在压力 p_2 下的气体比重。

流出气体的绝热膨胀过程方程式为

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k. \quad (7)$$

根据式(5), (6)和(7)可得气体每秒流量为:

$$G_{\text{сек}} = \mu f \psi \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ 公斤/秒}, \quad (8)$$

$$\text{式中 } \psi = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \quad (9)$$

p_1 及 v_1 —气缸内气体的压力及比容;

μ —排气器官的流量系数;

f —配气器官的通流截面。

从热力学课程中, 我们知道流动过程分为两个时期 (图6—4):

- 1) 超临界时期 (压力比 $\frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}}$), 流速等于当地音速;
- 2) 亚临界时期 (压力比 $\frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}}$), 在压力 p_1 下降时, 气体的流量因流速下降而减小;

直到 $\frac{p_2}{p_1} = 1$ 时, 流速等于零。

临界压力比

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (10)$$

它与流出气体的性质有关, 而后者通过与温度有关的绝热指数 k 表征之。例如, 取双原子气体的平均值 $k=1.4$, 则

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = 0.528 \text{ 或 } \left(\frac{p_1}{p_2} \right)_{\text{кр}} = 1.89.$$

对于排气, 在 $k \approx 1.34$ 时, 则

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = 0.535 \text{ 或 } \left(\frac{p_1}{p_2} \right)_{\text{кр}} = 1.87.$$

在排气总管内的平均压力 $p_p = 1.03$ 公斤/厘米²时, 气缸内临界压力将为:

$$(p_1)_{\text{кр}} = 1.87 \cdot p_p = 1.87 \cdot 1.03 = 1.93 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

因为排气器官开启时压力 $p_v \approx 3 \sim 6$ 公斤/厘米², 很显然, 排气过程总是包括超临界和亚临界两个时期。

在超临界排气时期, $\psi = \psi_{\max}$, 即

$$\psi_{\max} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2gk}{k+1}}, \quad (11)$$

而与 $\frac{p_2}{p_1}$ 比值大小无关。

例如, $k=1.3$ 时, $\psi_{\max}=2.09$ 。

超临界时期 气体最大流量

$$G_{\max} = \mu f \psi_{\max} \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} = \mu f \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{2g \frac{k}{k+1}} \frac{p_1}{v_1}. \quad (12)$$

排气在亚临界时期, 公式(8)维持不变。

在 dt 单元时间内气体的流量为:

$$dG = \mu f \psi \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} dt. \quad (13)$$

令 p_0 及 v_0 表示气缸内气体的初始参数, 并假定排气期间气缸内的状态变化是按多变指数 $m < k$ 的规律变化的, 即

$$p_1 v_1^m = p_0 v_0^m. \quad (14)$$

经演算后得

$$dG = \mu f \psi \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2m}} \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} dt. \quad (15)$$

此外, 流出的气体还可以气缸内初、终气体重量 (G_0 及 G_1) 之差表示:

$$G = G_0 - G_1 = \frac{V_0}{v_0} - \frac{V_1}{v_1},$$

式中 V 及 v 一气缸容积和气体比容。

因此
$$dG = -d\left(\frac{V_1}{v_1}\right). \quad (16)$$

将(15)及(16)两式右端相等, 从式(14)代入 v_1 的值, 再将所得方程式两端除以 $\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2m}} V_1$, 结果得到研究稳定流动过程用的基本公式:

$$\frac{1}{m} \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{-1} d\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = -\frac{\mu f \psi}{V_1} \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}} dt - \frac{dV_1}{V_1}. \quad (17)$$

从公式(17)中解出 $\frac{f dt}{V_1}$, 即得

$$\frac{f dt}{V_1} = -\frac{1}{\psi m \mu \sqrt{p_0 v_0}} \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}} d\left(\frac{p_1}{p_0}\right) - \frac{1}{\mu \sqrt{p_0 v_0}} \cdot \frac{1}{\psi \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}}} \frac{dV_1}{V_1}, \quad (18)$$

式中的变量是: $\frac{p_1}{p_0}$, f , V_1 及函数 ψ 。

积分式(18), 得总公式为:

$$\int \frac{f dt}{V_1} = \frac{1}{m \mu \sqrt{p_0 v_0}} \int \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}} \frac{d(p_1)}{\psi} - \frac{1}{\mu \sqrt{p_0 v_0}} \int \frac{1}{\psi \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}}} \frac{dV_1}{V_1}, \quad (19)$$

利用这一公式可决定扫气与排气过程各阶段的理论时-面值。

2. 自由排气过程的计算:

自由排气期中气缸容积的变化比较小,故可将式(19)左端气缸在该时期内的变容积 V_1 以其平均值代替之。

$$\text{对于前期排气} \quad V_{cP} = \frac{V_b + V_d}{2}$$

$$\text{对于自由排气} \quad V_{cP} = \frac{V_b + V_{\pi}}{2}$$

式中的註角 d 与 π 各相当于扫气口开启时刻 (d) 和扫气空气实际开始进入气缸的时刻 (π)。

让我们引用(19)式来研究前期排气和自由排气两个流动过程。

在前期排气中, $p_0 = p_b$, 则

$$\begin{aligned} \frac{1}{V_{cP}} \int_{t_b}^{t_d} f dt &= \frac{1}{\mu m \sqrt{p_b v_b}} \int_{p_b}^{p_d} \frac{p_1^{\frac{1}{2m} - \frac{3}{2}}}{\psi} d(p_1) - \frac{1}{\mu \sqrt{p_b v_b}} \int_{V_b}^{V_d} \frac{1}{\psi \left(\frac{p_1}{p_b} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}}} \frac{dV}{V} \\ &= A_1 + A_2. \end{aligned} \quad (20)$$

前已指出, 发动机扫气口开启前的气体流动常常只是在超临界区域内进行的。因此, 式(20)中积分第二项内的函数 ψ 以 $\psi = \psi_{\max} = \text{常数}$ ① 代入,

$$A_2 \approx - \frac{1}{\mu \sqrt{p_b v_b} \psi_{\max}} \int_{V_b}^{V_d} \frac{1}{\left(\frac{p_1}{p_b} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}}} \frac{dV}{V}.$$

当 $1 \leq m \leq 1.5$; $0 < \frac{m-1}{2m} < 0.166$ 和 $1 \leq \frac{p_b}{p_1} \leq 5$ 的时候, $\frac{1}{\left(\frac{p_1}{p_b} \right)^{\frac{m-1}{2m}}}$ 的值在 1.0 至

1.3 的范围内变化; 取平均值为 1.15 时, 则可算出积分

$$A_2 \approx - \frac{1.15}{\psi_{\max} \mu \sqrt{p_b v_b}} \ln \frac{V_d}{V_b}. \quad (21)$$

将积分 A_1 分成超临界 (A'_1) 和亚临界 (A''_1) 两个排气时期:

$$\begin{aligned} A_1 &= - \frac{1}{m \mu \sqrt{p_b v_b}} \int_{p_b}^{p_d} f \left(\frac{p_1}{p_b} \right) d \left(\frac{p_1}{p_b} \right) \\ &= - \frac{1}{m \mu \sqrt{p_b v_b}} \int_{\frac{p_{KP}}{p_b}}^{\frac{p_d}{p_b}} f \left(\frac{p_1}{p_b} \right) d \left(\frac{p_1}{p_b} \right) - \frac{1}{m \mu \sqrt{p_{KP} v_{KP}}} \int_{\frac{p_{KP}}{p_b}}^{\frac{p_d}{p_{KP}}} f \left(\frac{p_1}{p_{KP}} \right) d \left(\frac{p_1}{p_{KP}} \right) \\ &= A'_1 + A''_1. \end{aligned} \quad (22)$$

① 以 ψ_{\max} 代替 ψ 对于最终结果并无重大影响。

超临界区域中, $\psi_{\max} = \text{常数}$, 故

$$A'_1 = -\frac{1}{m\mu\sqrt{p_b v_b} \psi_{\max}} \int_1^{\frac{p_{\text{KP}}}{p_b}} \left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{3}{2}} d\left(\frac{p_1}{p_b}\right).$$

积分后, 得

$$A'_1 = \frac{2}{\varphi_{\max} \mu \sqrt{p_b v_b} (m-1)} \left[\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \left(\frac{1}{2m-\frac{1}{2}}\right) \left(\frac{p_b}{p_p}\right)^{\frac{m-1}{2m}} - 1 \right], \quad (23)$$

式中 p_b —排气总管内的背压。

再看表示亚临界排气时期的式(22)的第二项:

$$A''_1 = -\frac{1}{m\mu\sqrt{p_{\text{KP}} v_{\text{KP}}}} \int_1^{\frac{p_d}{p_{\text{KP}}}} \frac{\left(\frac{p_1}{p_{\text{KP}}}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{3}{2}}}{\psi} d\left(\frac{p_1}{p_{\text{KP}}}\right). \quad (24)$$

将积分号内换成变数 $\left(\frac{p_p}{p_1}\right)$ 的函数:

$$\frac{p_1}{p_{\text{KP}}} = \frac{p_1}{p_p} \frac{p_p}{p_{\text{KP}}},$$

$$d\left(\frac{p_1}{p_{\text{KP}}}\right) = d\left[\left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{-1} \left(\frac{p_p}{p_{\text{KP}}}\right)\right] = -\left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{-2} \frac{p_p}{p_{\text{KP}}} d\left(\frac{p_p}{p_1}\right), \quad \text{则}$$

$$\frac{1}{\psi} \left(\frac{p_1}{p_{\text{KP}}}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{3}{2}} d\left(\frac{p_1}{p_{\text{KP}}}\right) = -\frac{1}{\psi} \left(\frac{p_p}{p_{\text{KP}}}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{1}{2}} \left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{-\frac{1}{2m}-\frac{1}{2}} d\left(\frac{p_p}{p_1}\right),$$

转换后, 则得:

$$\begin{aligned} A''_1 &= -\frac{1}{m\mu\sqrt{p_{\text{KP}} v_{\text{KP}}}} \left(\frac{p_p}{p_{\text{KP}}}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{1}{2}} \int \frac{\frac{p_p}{p_d} d\left(\frac{p_p}{p_1}\right)}{\frac{p_p}{p_{\text{KP}}} \psi \left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{\frac{1}{2m}+\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{1}{m\mu\sqrt{p_{\text{KP}} v_{\text{KP}}}} \left(\frac{p_p}{p_{\text{KP}}}\right)^{\frac{1}{2m}-\frac{1}{2}} z, \end{aligned} \quad (25)$$

式中积分

$$\int \frac{\frac{p_p}{p_d} d\left(\frac{p_p}{p_1}\right)}{\frac{p_p}{p_{\text{KP}}} \psi \left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{\frac{1}{2m}+\frac{1}{2}}}$$

以 z 表之。这一积分, 在任一 m 值下无法用定积分形式解之。图6-6所示为最简单的图解积分, 积分极限从 $\left(\frac{p_p}{p_1}\right)_{\text{KP}}$ 到 $\left(\frac{p_p}{p_1}\right) = 1$ 。先绘函数 $\psi\left(\frac{p_p}{p_1}\right)$ —曲线1,

再绘 $\left(\frac{p_p}{p_1}\right)^{\frac{1}{2m}+\frac{1}{2}}$ —曲线2, 最后绘其乘积—曲线3
和此乘积的倒数—曲线4。最后一条曲线的下方

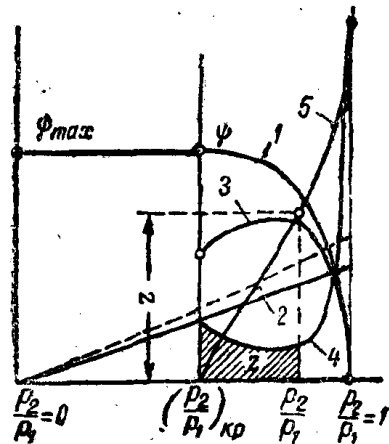


图 6-6 积分图解法

所含面积也就是在一定的 $\left(\frac{p_p}{p_1}\right)$ 范围内所求积分的数值。函数 $z = f\left(\frac{p_p}{p_1}\right)$ 近似于一条直线，并可用曲线5决定，或者也可以足够准确的（当 $\frac{p_p}{p_1} < 0.9$ 时）根据奥尔林（А. С. Орлин）所提出的公式计算之：

$$z = \frac{p_p}{1.4p_1} - 0.387 = 0.715 \frac{p_p}{p_1} - 0.387. \quad (26)$$

$A'_1 + A''_1 + A_2$ 的总和展开式为

$$\int_{V_{cp}} \frac{f dt}{V_{cp}} = A'_1 + A''_1 + A_2 = \frac{2}{\psi_{\max} \mu (m-1) \sqrt{RT_b}} \left[\left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1} \left(\frac{1}{2m} - \frac{1}{2} \right)} \left(\frac{p_b}{p_p} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}} - 1 \right] + \frac{1}{m \mu \sqrt{RT_{KP}}} \left(\frac{p_p}{p_{KP}} \right)^{\frac{1}{2m} - \frac{1}{2}} z - \frac{1.15}{\mu \psi_{\max} \sqrt{RT_b}} \ln \frac{V_d}{V_b}. \quad (27)$$

因为气缸内气体膨胀过程是指数为 m 的多变过程，故得 T_{KP} 与 T_b 的关系式如下：

$$T_{KP} = T_b \left(\frac{p_{KP}}{p_b} \right)^{\frac{m-1}{m}} = T_b \left(\frac{p_{KP}}{p_p} \frac{p_p}{p_b} \right)^{\frac{m-1}{m}};$$

$$\frac{1}{\sqrt{T_{KP}}} = \frac{1}{\sqrt{T_b}} \left(\frac{p_p}{p_{KP}} \right)^{\frac{m-1}{2m}} \left(\frac{p_b}{p_p} \right)^{\frac{m-1}{2m}}.$$

将所得公式代入式(27)，经过化简，得超临界与亚临界排气过程公式的一般形式：

$$\int_{t_b}^{t_d} f dt = \frac{2V_{cp}}{\mu \sqrt{RT_b}} \left\{ \left[\left(\frac{p_b}{p_p} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2m}} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\left(\frac{1}{2m} - \frac{1}{2} \right) \frac{k}{k-1}} - 1 \right] \times \frac{1}{\psi_{\max} (m-1)} + \frac{0.5}{m} \left(\frac{p_b}{p_p} \right)^{\frac{m-1}{2m}} z - \frac{0.57}{\psi_{\max}} \ln \frac{V_d}{V_b} \right\}, \quad (28)$$

式中註脚： b —排气开始； d —扫气口开启始点； p_b —排气总管的背压。

化简式(28)，代入 $R=29.2$ ； $m=k=1.3$ ， $z=0.715 \frac{p_p}{p_1} - 0.387$ ， $\psi_{\max}=2.09$ （当 $k=1.3$ 时），则得前期排气必需的时-面值

$$\int_{t_b}^{t_d} f dt = \frac{V_{cp}}{\mu \sqrt{T_b}} \left\{ \left[0.496 + 0.102 \left(\frac{p_p}{p_d} \right) \right] \cdot \left(\frac{p_b}{p_p} \right)^{0.115} - 0.59 - 0.1 \ln \frac{V_d}{V_b} \right\}. \quad (29)$$

上面得到的公式(28)及(29)是前期排气时期（扫气口开始打开为止）用的，并且认为在该时期内既具有超临界也具有亚临界排气。

如果前期排气只在超临界区域内（发生在高速发动机中），则 $z=0$ ，利用上式选用的 R ， ψ_{\max} 和 $k=m=1.3$ 各值，式(28)将变成下列形式：

$$\int_{t_b}^{t_d} f dt = \frac{0.59V_{cp}}{\mu \sqrt{T_b}} \left[\left(\frac{p_b}{p_d} \right)^{0.115} - 1 - 0.17 \ln \frac{V_d}{V_b} \right]. \quad (30)$$

要解方程式(29)及(30)，必需根据实验资料给出前期排气终点压力 p_d ；在将这些公式用于全部自由排气过程的情况下，应将方程式(29)中之 p_d 代之以 p_u ， V_d 代之以 V_u 。

如果有现成发动机的实际拥有的时一面值, 则可以根据方程式 (29) 决定流量系数 μ , 并将其与实验数据相比较。

为了绘制气缸压力与曲轴转角的函数关系曲线, 可以从公式(29)中解出 p_d :

$$p_d = \frac{0.102 p_p}{\left[\frac{\mu \sqrt{T_b}}{V_{cD}} \int_{t_b}^{t_d} f dt + 0.59 + 0.1 \ln \frac{V_d}{V_b} \right] \left(\frac{p_p}{p_b} \right)^{0.115} - 0.496}; \quad (31)$$

亦可从式(30)解出 p_d :

$$p_d = \frac{p_b}{\left[\frac{\mu \sqrt{T_b}}{0.59 V_{cD}} \int_{t_b}^{t_d} f dt + 0.17 \ln \frac{V_d}{V_b} + 1 \right]^{0.115}}. \quad (32)$$

把相当于前期排气的全部过程分成一系列超临界和亚临界区域内的小段落, 用 1 和 2 作为其起迄点, 则

$$p_2 = \frac{0.102 p_p}{\left[\frac{2 \mu \sqrt{T_1}}{V_1 + V_2} \int_1^2 f dt + 0.59 + 0.1 \ln \frac{V_2}{V_1} \right] \left(\frac{p_p}{p_1} \right)^{0.115} - 0.496}. \quad (33)$$

将分子分母同乘以 3, 并考虑到 $6ndt = d\alpha$, 则得:

$$p_2 = \frac{0.306 p_p}{\left[\frac{\mu \sqrt{T_1}}{n(V_1 + V_2)} \int_1^2 f d\alpha + 1.77 + 0.3 \ln \frac{V_2}{V_1} \right] \left(\frac{p_p}{p_1} \right)^{0.115} - 1.49}. \quad (34)$$

同理, 对于超临界排气; 利用式(32)可得:

$$p_2 = \frac{p_b}{\left(\frac{\mu \sqrt{T_1}}{0.295(V_1 + V_2)} \int_1^2 f dt + 0.17 \ln \frac{V_2}{V_1} + 1 \right)^{0.115}}. \quad (35)$$

每一小段的温度可根据气缸内气体为多变膨胀的假定求得:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}. \quad (36)$$

当 $m = 1.3$,

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.231}.$$

有了气缸内压力与温度随曲轴转角变化的函数关系, 即可算出过程中每一小段的排气重量^①:

$$\Delta G_i = \frac{p_1 V_1}{RT_1} - \frac{p_2 V_2}{RT_2}. \quad (37)$$

总排气重量:

$$G_B = \sum_{i=1}^n \Delta G_i, \quad (38)$$

式中, n —过程中小段的数目。

排气过程诸参数的估计在下面给出。

① 为了简便, 此后我们忽略压力 p 与 P 之区别。

流量系数 μ_B 的选择以实验数据为基础(见表 6-1), 或根据实际和必须的时-面值的对比来选定。

3. 扫气和强制排气过程的计算

扫气过程开始于自由排气终了, 气缸内压力 p_1 等于或小于贮气箱内压力 p_K 的时候(所小的数值为扫气口处压力降 Δp_K)。空气进入气缸的过程是亚临界情况, 压力比大于临界压力比($\frac{p_1}{p_K} > \beta_{KP}$)。

假定: 第一, 从扫气箱向气缸内流动是绝热过程; 第二, 气缸内压力 $p_1 = p_u$, 扫气箱内压力 p_K 和排气系统内压力 p_p 不随时间变化, 则可写出单元时间 dt 内进入气缸的空气流量公式

$$dG_n = \mu_n \psi_n f_n \sqrt{\frac{p_K}{v_K}} dt, \quad (39)$$

或从这公式解出扫气时期的时-面值, 得

$$\int f_n dt = \frac{G_n}{\mu_n \psi_n \sqrt{\frac{p_K}{v_K}}}, \quad (40)$$

式中 μ_n —扫气器官的流量系数;

f_n —在所考虑的时刻内扫气口的通流截面;

$\psi_n = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_u}{p_K} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_u}{p_K} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$ — ψ_n 与压力比 $\frac{p_u}{p_K}$ 的函数关系(图 6-7);

当 $p_u = \text{常数}$ 和 $p_K = \text{常数}$, 显然, 函数 ψ_n 也等于常数。

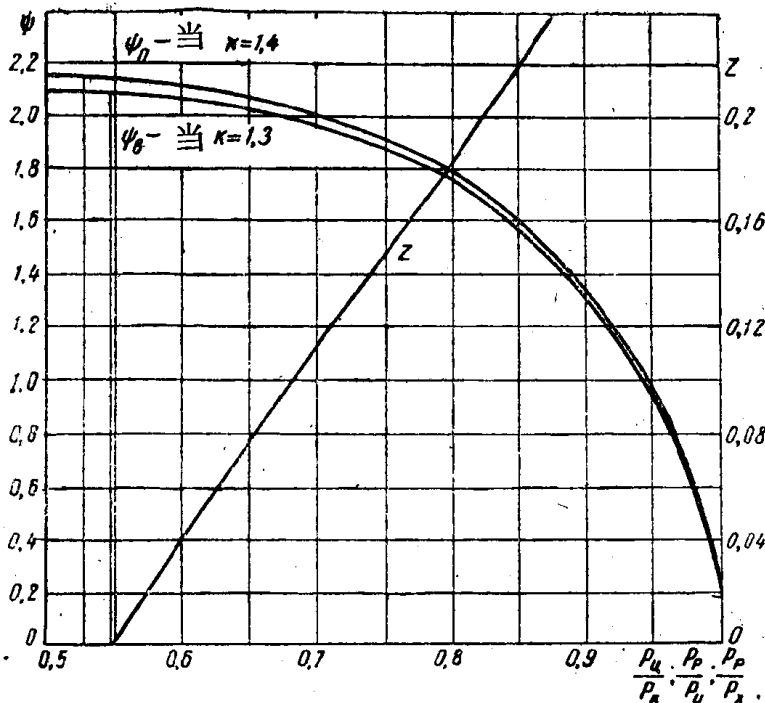


图 6-7 $z = f_1(p_p/p_K)$, ψ_B 和 ψ_n 与 p_u/p_K 和 p_p/p_u 的函数关系

必须的扫气空气重量 G_n 与发动机的结构和扫气系统有关, 等于

$$G_n = i \frac{V_s}{v_0} \varphi_0, \quad (41)$$

式中 V_s —气缸工作容积;
 v_0 —环境条件下的空气比容;
 φ_0 —扫气过量空气系数;
 i —气缸数。

将所得的 G_n 之公式代入(40), 并从特性方程式

$$p_0 v_0 = RT_0 \text{ 及 } p_K v_K = RT_K$$

中消去 v_0 , 并代之以扫气空气的比容 v_K , 即

$$v_0 = v_K \frac{T_0}{T_K} \frac{p_K}{p_0}, \text{ 则得:}$$

$$\int f_n dt = \frac{\varphi_0 V_s}{\mu_n \psi_n v_K \frac{T_0}{T_K} \frac{p_K}{p_0} \sqrt{\frac{p_K}{v_K}}} = \frac{\varphi_0 V_s p_0 T_K}{\mu_n \psi_n p_K T_0 \sqrt{p_K v_K}} = \frac{\varphi_0 V_s p_0 T_K}{\mu_n \psi_n p_K T_0 \sqrt{RT_K}}, \quad (42)$$

或取 $R=29.2$, 得扫气必需的时-面值为:

$$A_n = \int f_n dt = \frac{\varphi_0 V_s p_0 \sqrt{T_K}}{\mu_n \psi_n p_K T_0 \sqrt{R}} \approx 0.185 \frac{\varphi_0 V_s p_0 \sqrt{T_K}}{\mu_n \psi_n p_K T_0}. \quad (43)$$

如果把 p , T 和 φ 都化归为扫气空气箱内的条件 (p_K, T_K 及 φ_K), 则

$$A_n = \int f_n dt = \frac{\varphi_K V_s}{\mu_n \psi_n \sqrt{RT_K}} \approx 0.185 \frac{\varphi_K V_s}{\mu_n \psi_n \sqrt{T_K}}. \quad (44)$$

从公式(43)中, 除了可求得 $\int f_n dt$ 之外, 还可求得:

1) 扫气期间的气缸压力 p_n , 如果已知 φ_0, μ_n 和 $\int f_n dt$ (以及 p_K, T_K 和 T_0), 利用曲线 $\psi_n = f\left(\frac{p_n}{p_K}\right)$ (图6-7) 即可求得;

2) 流量系数 μ_n , 如果已知压力 p_n 和 $\int f_n dt$.

$\varphi_0, \varphi_K, p_K, T_K$ 见第五章。 p_K 及 μ_n 以及扫气实际拥有的时-面值的图解法在下面还要叙述。

强制排气过程 开始于气缸内最小压力届临之际, 是在扫气口和排气口都开得相当大的时候, 在扫气空气作用下进行的。

也和研究扫气过程一样, 设在强制排气过程中气缸压力 p_n 和排气管压力 p_p 皆为常量, 从而函数 $\psi_B = f\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$ 也是常量。

如假定流动过程中无热交换, 而且是在大于临界压力比的条件下进行的, 则强制排气的必需时-面值为:

$$\int f_B dt = \frac{G_B}{\mu_B \psi_B \sqrt{\frac{p_p}{v_n}}}, \quad (45)$$