

风机和压缩机是用于输送气体的机械，把原动机的机械能量转换成气体的能量。

§1 风机和压缩机的分类和应用

一. 分类

1. 按工作原理分类

按工作原理可分三类：(1)：容积式包括活塞式和回转式，后者又有罗茨式风机，滑片式和螺杆式等。(2) 叶片式又称透平式包括离心式，轴流式，混流式（斜流式）和横流式。(3) 喷射式。

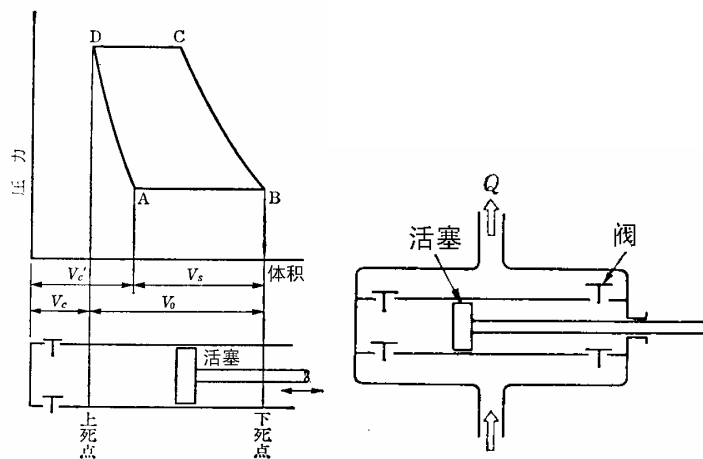


图 1-1 活塞式

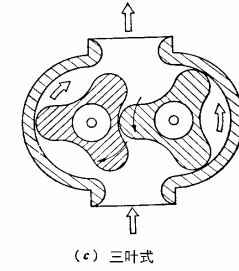
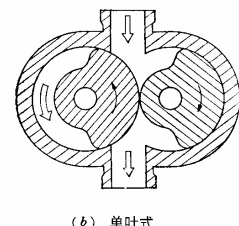
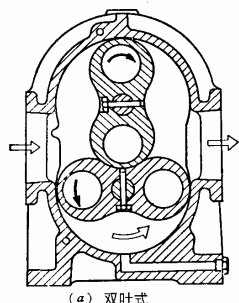


图 1-2 罗茨式

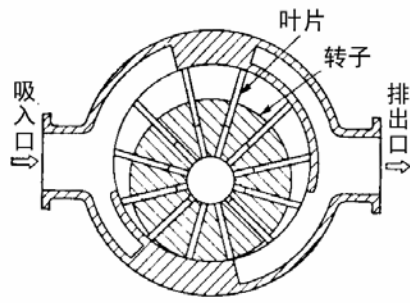


图 1-3 滑片式

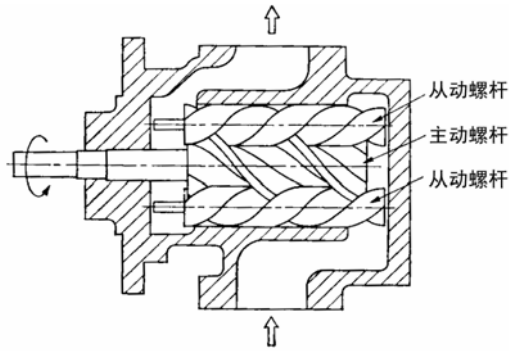


图 1-4 螺杆式

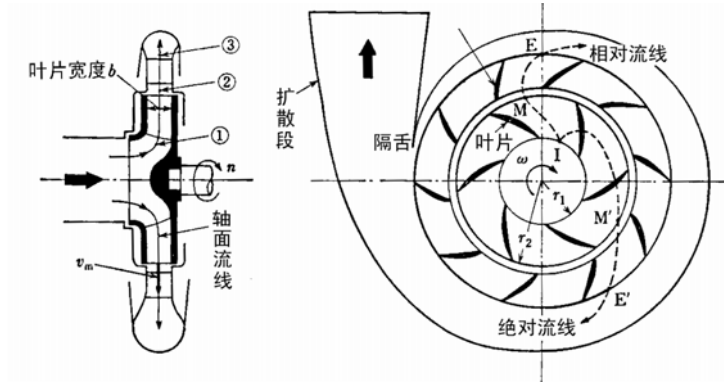


图 1-5 离心式

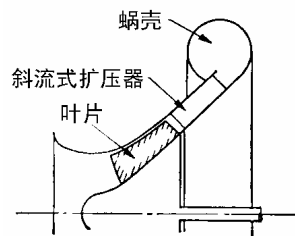


图 1-6 斜流式机

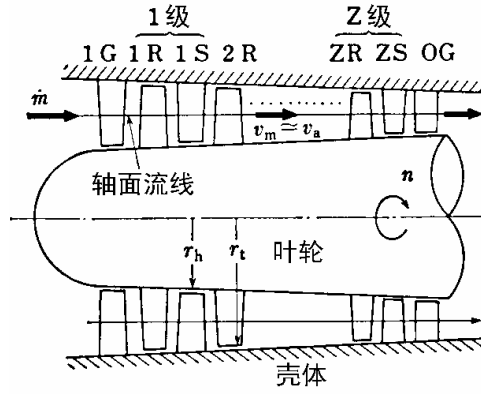


图 1-7 轴流式机械

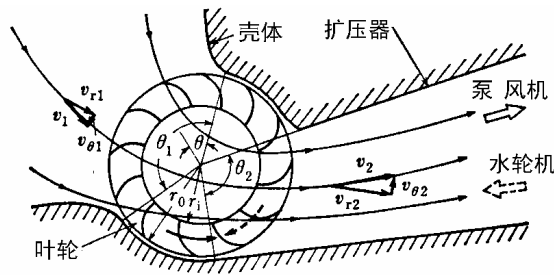


图 1-8 横流式

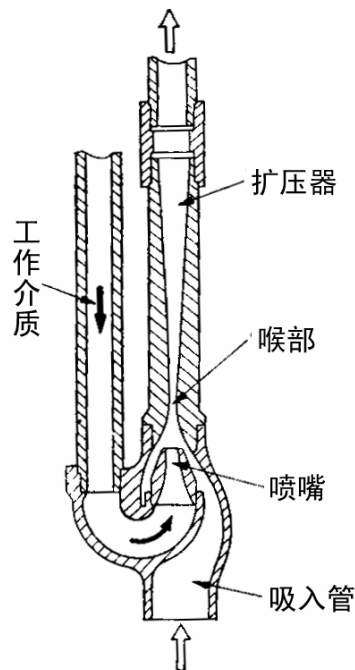


图 1-9 喷射式

2. 按产生的压力的高低分类

根据排气压力（以绝对压力计算）的高低，输送气体的机械可分为：

通风机，排气压力低于 $11.27 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 鼓风机，排气压力在 $(11.27 \sim 34.3) \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 压缩机，排气压力高于 $34.3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

(大气压 $1 \text{ kg/cm}^2 = 1.01972 \text{ kg/cm}^2 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)

二. 风机的应用

风机广泛地应用在国民经济的各个领域。

§2 风机的结构和参数

以离心式通风机为例：

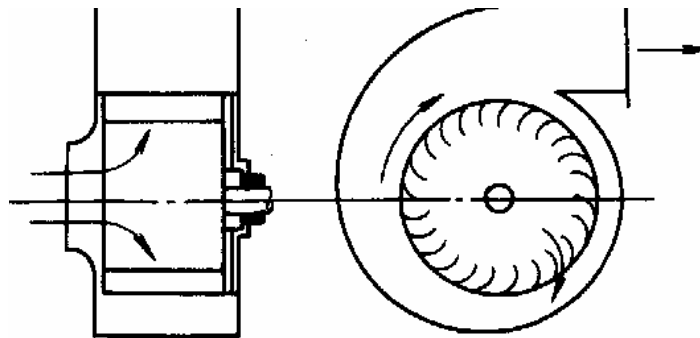


图 1—10 离心通风机简图

以离心式通风机为例可以看出风机的主要的几个部件：进气室，进气口，叶轮，蜗壳，出气口，扩散器等几个部件组成。

其主要参数与水泵相似的有：(1) 流量（体积流量式质量流量）；(2) 压力；指风机的压力升，即进出口压力之差，分全压 ΔP ，静压 ΔP_s ，及动压 ΔP_d

(3) 转速 n (r/m)；(4) 轴功率 N_s (kw=1.36ps)；(5) 效率。

§3 气体的物理性质

我们着重介绍通风机常用的空气的物理性质。

一. 标准大气状态

温度为 273K (0°C)，绝对压力为 101325 N/m^2 (760 mmHg)，

重力加速度 $g=9.807 \text{ m/s}^2$ 时干燥空气状态称为标准大气状态，或叫大气的标准状态。在标准大气状态下空气的密度为 $\rho=1.2931 \text{ Kg/m}^3$ 。随着海拔高度的增加，大气的压力，温度，密度都变化，海平面的大气压力为 101325 N/m^2 ，温度为 288K (15°C)，密度为 1.2258 Kg/m^3 。海拔高度为 H 时的大气状态可分为两种情况：

$H \leq 11 \text{ km}$ 时：(troposphere)

$$P_b = 101325(1 - 0.02257H)^{5.256}, \text{ N/m}^2 \quad (H \text{ 单位为 km})$$

$$T = 288 - 6.5H, \text{ K}$$

$$\rho = 1.2258(1 - 0.02257H)^{4.256}, \text{ Kg/m}^3$$

$H \geq 11 \text{ km}$ 时：同温层 (stratosphere)

$$P_b = 101325 \times 1.266e^{-0.1578H}, \text{ N/m}^2 \quad (H \text{ 单位为 km})$$

$$T = 216.5, \text{ K}$$

$$\rho = 1.2258 \times 1.684e^{-0.1578H}, \text{ Kg/m}^3$$

二. 风机标准进口状态

我国规定的风机进口状态是指：工质为空气，压力为 101325N/m^2 (760mmHg)，温度为 293K (20°C)，相对湿度 Φ 为 50% 的湿空气状态，其密度为 1.2Kg/m^3 。

三. 空气的其他参数

(一) 密度 单位体积气体的质量。

空气在标准状态下的密度为 1.2931Kg/m^3 ，随着压力，温度，相对湿度的变化，空气的密度亦要改变。

1. 干燥空气的密度

在任意温度 T ，压力 P 时干空气的密度用下式表示： $\rho = 1.2931 \times (273/T) \times (P/101325)$ ， Kg/m^3

($R=287$)， $\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$

2. 湿空气的密度

$\rho = 1.2931 \times (273/T) \times ((P - 0.378 \Phi P_s) / 101325)$ ， Kg/m^3

式中 Φ ——相对湿度；

P_s —— T_k 时饱和水蒸气的压力 (N/m^2)

(二). 粘度

流体具有粘性，这样在流体质点间做相对运动时，就会产生内摩擦力（阻力）。实验证明两层流体之间的内摩擦力 F （单位为 N ）与面积 A (m^2)，速度梯度 dc/dg ($\text{m/s} \cdot \text{m}$) 成正比。

$$F = \mu A dc/dg$$

比例系数 μ 称为动力粘性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)，而运动粘性系数 ν (m^2/s) 为

$$\nu = \mu / \rho。$$

粘性系数与压力和温度有关，一般压力影响很小。液体的粘性系数决定于分子间的引力，故随温度升高而下降，空气的粘性系数决定于分子运动的动量交换，温度升高，分子运动加速，粘性增大，即

$$\mu = 17.24 \times 10^{-6} \times (380/380+k) \times (273+k/273)^{3/2} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

(三) 比热

单位质量的物体温度升高一度所需的热量为比热用 C 表示，单位为 $\text{J}/\text{Kg} \cdot \text{K}$ 。

气体的比热与气体状态变化过程有关，在气体压力式比容保持不变的过程中，气体的比热分别称为定压比热 C_p ，和定容比热 C_v 。 C_p 与 C_v 的比值叫比热比。对于不考虑分子之间作用力及分子本身大小的理想气体，比热比等于绝指数 K ，即

$$K = C_p/C_v$$

对于空气 $K=1.4$ 。

(四) 气体的比重

某一气体的重度与同一温度，同一压力下干燥空气的重度之比，称为比重：

$$\begin{aligned} \text{气体比重} &= \text{气体重度 } \gamma' / \text{干空气的重度 } \gamma \\ &= \text{气体密度 } \rho' / \text{干空气密度 } \rho \\ &= \text{气体分子量} / \text{干空气的分子量}。 \end{aligned}$$

气体的比重是无量纲量。

三. 压缩系数

假设使体积为 V (m^3) 的流体压力变化为 dp (N/m^2) 时发生的体积变化为 dV ，其压缩系数表示为：

$$\beta = -(1/v) \cdot dV/dp \quad (\text{m}^2/\text{N})$$

β 的倒数叫做体积弹性系数。可以用 $-d\rho/\rho$ 代换 dV/V , 上式可改写为:

$$1/(\rho\beta) = dp/d\rho \quad (\text{m}^2/\text{s}^2).$$

$$\text{令 } 1/(\rho\beta) = \alpha^2$$

则 α 是该流体内压力波 (声波) 的传播速度 (声速):

$$\alpha = (dp/d\rho)^{1/2} \quad (\text{m/s})$$

理想气体做等熵变化时:

$$\alpha = (KRT)^{1/2} \quad (\text{m/s})$$

式中 R 是气体常数 ($\text{J/Kg} \cdot \text{K}$)。对于一种气体, 气体在等熵变化时的音速 α 与 $T^{1/2}$ 成正比。

另外在 $t^\circ\text{C}$ 的纯水和干燥空气中的声速 α_w 和 α_a 可用下式计算:

$$\alpha_w = 1404.4 + 4.8215t - 0.047562t^2 + 0.00013541t^3$$

$$\alpha_a = 331.68 \times ((273.16 + t)/273.16)^{1/2}$$

$$= 331.5 + 6.61t \quad \text{m/s}$$

§4 气体的状态变化和能量转换

在低压风机中, 流体的内能可以认为是不变的, 但是压缩机中, 由于压力和温度的变化很大而造成气体内能的变化。为了说明气体在风机中的工作过程, 先说明一下热力学中的基本概念。

一. 热力学第一定律

物体靠温度和压力等保持在内部的能量成为内能, 用 u 表示。内能是分子的动能和由于分子相互之间的吸引力所产生的位能的总合, 它与物体本身的速度和高度无关。

现考虑一个跟周围环境没有质量交换, 但有热和功交换的抽象的热力学封闭系统。对此系统中的气体加一微热量 dQ , dQ 一部分消耗在系统抵抗外部的压力 p , 使系统的气体体积变化了 dV (膨胀) 时所做的功 dW 上面, 另一部分用于增加了内能 dU ,

而贮存在气体内部, 这样热力学第一定律的表达式为

$$dQ = dU + p \cdot dV$$

如果用单位质量气体的内能 u , 单位质量气体得到的热量 dq , 和比容变化 dv 表示, 则上式为:

$$dq = du + p dv$$

二. 理想气体的状态方程

气体在变化过程满足下式的气体, 称为理想气体或空气气体。

$$Pv = RT$$

式中 V 为比容, T 为绝对温度, R 为气体常数。大多数气体可近似看成为理想气体。

若气体的分子量为 μ , 那么一摩尔 (mol) 气体的状态方程为:

$$\mu v P = \mu RT$$

由物理学可知, 当压力, 温度相同时, 一摩尔的各种理想气体的体积 μv 均等于 22.4 m^3 , 故上式为:

$$22.4P = \mu RT$$

$$\mu R = 22.4 \times 101325 / 273 = 8314.7 \quad \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

μR 称为通用气体常数, 与气体性质无关。以 μR 值代入状态方程:

$$\mu v P = 8314.7T$$

根据比容的定义: $C_v = (dq/dT)_v$ 和 $C_p = (dq/dT)_p$ 及第一定律:

$$C_v = du/dT, \quad C_p = du/dT + Pdv/dT$$

三. 气体机械中的能量转换

(一) 不可压流体的伯努利方程

低压风机中可认为气体不可压缩。如图所示的系统进口的压力和速度为 P_1, C_1 , 距离基准面的高度为 z_1 , 密度为 ρ_1 , 而出口断面以下标“2”表示。假定单位时间内外界对系统所作的功为 l_{21} , 那么在不考虑损失的情况下, 伯努利方程为:

$$P_1/\rho_1 + C_1^2/2 + gz_1 + l_{21} = P_2/\rho_2 + C_2^2/2 + gz_2$$

单位为 J/Kg, P 为流体的静压, $\rho C^2/2$ 为流体的动压, 动压和静压之和为总压 P^* : (滞止压力)

$$P^* = P + \rho C^2/2 \quad (P_t)$$

(二) 气体机械中的能量转换

对于气体机械由于内能可以变化, 而且有热量传递, 图中 q_{21} 为系统中单位质量的气体排出的热量, 根据 $v=1/\rho$, 此时能量方程可以写成为:

$$P_1 v_1 + C_1^2/2 + u_1 + l_{21}' = P_2 v_2 + C_2^2/2 + u_2 + q_{21}$$

在气体中定义单位质量气体的功能 u 和功 Pv 之和叫做气体的焓, 用 h 表示

$$h = u + Pv$$

这样能量方程可以简化为:

$$h_1 + l_{21} = h_2 + q_{21}$$

四. 封闭系统中气体的状态变化

系统中的气体以一种状态 (P, T) 过渡到另一种状态就是变化。可以用 T, P 或体积的变化来描述变化过程。对于理想气体的变化包括等容变化, 等压变化, 等温变化和绝热变化。而实际气体的变化比较复杂可用多变变化来描述。下面就封闭系统来说明上述几种变化。

1. 等温变化 (isothermal change)

气体在保持温度一定的条件下进行的状态变化, 叫做等温变化。在等温变化中, 状态方程为:

$$Pv = \text{const}$$

那么 $dv = -v(dp/p)$ 。故在等温过程中单位质量气体从 P_1, v_1 到 P_2, v_2 状态, 外部对系统所做的功 (绝对功) 为:

(注: $\int Pdv$ 为系统的膨胀功)

$$W_{is, 21} = \int_{v_1}^{v_2} Pdv = -Pv \ln(dp/p) = P_1 v_1 \cdot \ln(P_2/P_1) = P_1 v_1 \cdot \ln(v_1/v_2)$$

在等温变化中, 气体的内能保持不变。因此系统向外排除的热量就等于 W_{21} , 故

$$Q_{is, 21} = W_{is, 21}$$

2. 等容变化 (isovolumetric change)

在等容变化中, 系统的体积保持不变, 这样外部对系统所做的功为零, 即 $W_{21}=0$, 那么系统的内能变化 du 为:

$$du = C_v dT$$

故气体内能的变化为温升与定容比热的乘积, 一般情况 C_v 是常数或 T 的函数, 故内能 u 可以看成只是 T 的函数。

3. 等压变化 isobaric

在等压变化中 $dP=0$, 理想气体的状态方程可以写成

$$RdT = Pdv$$

那么 $C_p = du/dT + RdT/dT = C_v + R$

$$C_p = (K/K-1)R, \quad \text{或} \quad C_v = (1/K-1)R$$

同时可得:

$$dh = du + Pdv + vdP$$

$$dh = C_v dT + Pdv$$

$$=(C_v + R) dT = C_p dT$$

4. 绝热变化 (adabatic)

与外部没有热量交换的变化叫绝热变化。即 $dq=0$ ，由第一定律：

$$du = C_v dT, \quad Pdv = dl$$

$$C_v dT + Pdv = 0$$

代入微分形式状态方程 $C_v dv/v + R dv/v + C_v dP/P = 0$

$$C_p dv/v + C_v dP/P = 0$$

$$K dv/v + dP/P = 0 \quad (K=C_p/C_v)$$

从上式得到绝热变化中的状态方程：

$$Pv^k = \text{const} \quad (Tv^{k-1} = \text{const}, \quad T/P^{k-1/k} = \text{const})$$

这样在绝热变化中，系统从外部得到的功为：

$$\begin{aligned} W_{ad, 21} &= \int P dv = (P_2 v_2 - P_1 v_1) / (k-1) \\ &= P_1 v_1 ((P_2/P_1)^{(1-1/k)} - 1) / (k-1) = R(T_2 - T_1) / (k-1) \\ &= C_v (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

上式表明，在绝热变化中气体对外做功等于其内能之差 $C_v (T_2 - T_1)$ ，引入状态量熵 (entropy) 的概念来考虑绝热变化，熵的增量为：

$$ds = dq/T \quad (\text{J/Kg} \cdot \text{K})$$

在可逆变化中 $dq=0$ ，因此熵是常数，所以绝热变化也称为等熵变化 (isentropic change)

注： dQ 表示的热量不是状态量，而 P, v, T, h 等称为状态量。

理想气体的状态由二个量表示就行了。由第一定律：

$$dq = C_v dT + Pdv \quad \text{代入状态方程}$$

$$C_v dT + RT dv/v = dq$$

当方程两边除以 T 时，右边的 dq/T 就会成为全微分的形式：

$$C_v dT/T + R dv/v = dq/T$$

这样 dq/T 的积分就会与积分路径无关，所以 dq/T 是表示一个状态量的全微分。

5. 多变变化 (polytropic change)

在实际的压缩机械中，状态变化激烈，因此，即使从外部进行冷却也形成不了等温变化，如果不进行冷却，就总会有一定的热量交换，也不是完全的绝热变化。这样实际气体在压缩机中的变化可以通过在下面的式中选择适当的 n 值近似表示，按这种关系进行的变化为多变变化：

$$Pv^n = \text{const}, \quad Tv^{k-1} = \text{const}, \quad T/P^{k-1/k} = \text{const}$$

由上面可知：

$n=1$ 时相当于等温变化

$n=k$ 时相当于绝热变化

$n=0$ 时相当于等压变化

$n=\infty$ 时相当于等温变化

在图 1-11 为多种变化中 $P-v$ 曲线。在多变变化中

$$\begin{aligned} W_{pa1, 21} &= (P_2 v_2 - P_1 v_1) / (n-1) \\ &= P_1 v_1 ((P_2/P_1)^{(1-1/n)} - 1) / (n-1) = R(T_2 - T_1) / (n-1) \\ &= C_v (k-1) (T_2 - T_1) / (n-1) = (k-1) (u_2 - u_1) / (n-1) \end{aligned}$$

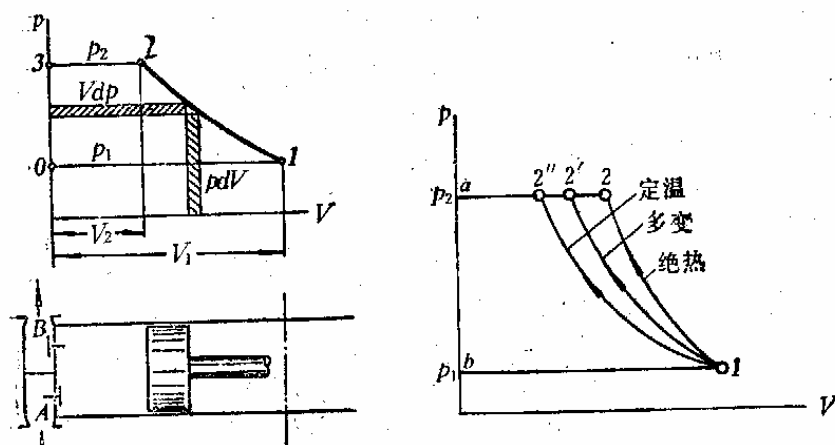


图 1-11

五. 开式系统中气体状态变化和功的计算

压缩机等风机在稳定状态下，可以看成是开式气体系统，流体从进口 1 进入，从出口 2 流出，在稳定流动中系统内的流体质量是不是不变的。单位质量的气体从进口 1 的状态到出口 2 状态外界所做的功 l_{21} 由三部分组成：

$$l_{21}' = (q_{21} + u_2 - u_1) + (P_2 v_2 - P_1 v_1) + (C_2^2/2 - C_1^2/2)$$

第一项相当于封闭系统状态变化所需的功

第二项为气体在系统进出口所做的功

第一，二项之和为 $l = \int v dp$ 压缩功。

第三项为动能变化。由图可见第一，二项的面积（在侧面）可得：

$$\begin{aligned} l_{is,21}' &= l_{ad,21} + (C_2^2/2 - C_1^2/2) \\ &= P_1 v_1 \ln(P_2/P_1) + (C_2^2/2 - C_1^2/2) \end{aligned}$$

(l_{21}' 称为工程功) W_{21} 称为绝对功， l_{21} 为系统的压缩功，在绝热变化中

$$\begin{aligned} l_{ad,21}' &= (k/(k-1)) * RT_1 ((P_2/P_1)^{k/(k-1)} - 1) + (C_2^2/2 - C_1^2/2) \\ &= K/K-1 * R(T_2 - T_1) + (C_2^2/2 - C_1^2/2) \end{aligned}$$

令总温度 T^* 为：

$$T_b^* = T + (K-1) * C^2/2K \quad Rk/k-1 = C_p$$

$$\begin{aligned} l_{ad,21}' &= (k/(k-1)) * R(T_2^* - T_1^*) \\ &= (k/(k-1)) * R T_{b1}^* ((P_{2t}/P_{1t})^{1-1/k} - 1) \end{aligned}$$

对于多变变化：

$$\begin{aligned} l_{pod,21}' &= (n/n-1) * RT_1 ((P_{2t}/P_{1t})^{1-1/n} - 1) + 1/2(C_2^2 - C_1^2) \\ &= (n/n-1)R(T_2 - T_1) + (C_2^2/2 - C_1^2/2) \end{aligned}$$

一般在往复式压缩机中，靠外部冷却，其内部变化接近于等温变化，故 $n < k$ ，在离心式和轴流式压缩机中，由于压缩很激烈，逸到外面的热量很少，再加上流体的摩擦，气体的温度要比绝热压缩时高，所以 $n > k$ 。

