

高等学校试用教材



活塞膨胀机

华中工学院 丑一鸣 合编
段茂金



机械工业出版社

高等学校试用教材

活 塞 膨 胀 机

华中工学院 丑一鸣 合编
段茂金



机械工业出版社

DV83 / 10

活 塞 膨 胀 机

华中工学院 丑一鸣 合编
段茂金

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 14 · 字数 334 千字

1982 年 1 月北京第一版 · 1982 年 1 月北京第一次印刷

印数 0,001—25,500 · 定价 1.45 元

*

统一书号: 15033 · 5101

前 言

《活塞膨胀机》是根据一九七八年高等学校一机部对口专业座谈会的精神和同年在庐山召开的“制冷及低温技术专业教材编审会”审定的《活塞膨胀机》编写大纲编写的全国试用教材。它既是高等学校低温技术专业的教学用书，也可供有关工程技术人员和科研人员参考。

根据学科发展的趋势和编写大纲的要求，本书加强了活塞膨胀机的理论基础和设计计算内容，期望通过本课程的学习使读者对活塞膨胀机的工作原理从理论上有更深入的理解，并培养从事活塞膨胀机的设计计算和测试工作的能力。为了适应低温技术发展的需要，对于氢、氦等工质的低温特性和以氢、氦为工质的低温活塞膨胀机也作了较多的介绍。

本书共十章，主要包括：活塞膨胀机的工作原理、热动力计算、结构及工艺、试验研究等四个方面。其中第一章对活塞膨胀机的作用、分类及其发展过程作了简明扼要的介绍。第二章是本书的基础理论部分，本章加强了活塞膨胀机工作过程热力学分析的理论基础，介绍了确定示功图各特性点气体温度的分析计算方法，以及在低温下氢气等工质的特性。第三章详细分析了各种因素引起的冷量损失，指明了提高活塞膨胀机效率的途径，介绍了冷量损失的计算方法，并综合描述了活塞膨胀机的多变膨胀过程和多变压缩过程。第四章全面地介绍了活塞膨胀机的热力计算方法，并列举了计算例题以便学习使用。第五章为活塞膨胀机的动力学，本章除详细阐述了一般活塞膨胀机动力学及计算方法外，还介绍了自由活塞膨胀机动力计算的特点。配气机构和活塞密封是影响活塞膨胀机性能的重要部件，在第六章和第七章中分别作了详细的阐述，并提供了设计所需的必要数据和计算方法。第八章为活塞膨胀机总体结构，除一般介绍活塞膨胀机主要零件外，还介绍了国内外各类活塞膨胀机的典型结构。第九章介绍活塞膨胀机设计所必需的结构工艺知识。第十章着重介绍活塞膨胀机的试验研究方法和测试设备。

本书是在原来编写的《活塞式膨胀机》的基础上参考了兄弟院校教材和国内外有关资料编写的。西安交通大学陈纯正同志还提供了他所收集的有关资料。在编写过程中，还得到本教研室和兄弟单位同志们的支持和帮助，谨此一并表示感谢！

本书由华中工学院低温理论和技术教研室丑一鸣、段茂金合编，由西安交通大学低温技术教研室陈纯正审稿。

本书责任编辑——郝育生。

1980. 7

符 号 表

a_0 —相对余隙容积系数	封气量
$a_{0,m}$ —迷宫密封环槽所形成的相对余隙容积系数	$\overline{G}$ —导出气量；相对气量
a —凸轮加速度；自由活塞膨胀机—压缩机活塞加速度	$\overline{G'}$ —考虑进排气阀阻力时的相对气量
a_r —向心加速度	G^* —超临界状态时通过环槽密封气量
a_s —活塞往复运动加速度	$G_{x,h}$ —每小时流经膨胀机气量
B —波尔兹曼常数	G_{min}^* —临界状态时通过环槽密封气量
B_1 —系数	H_l —连杆高度
b —气缸壁厚	h —活塞密封（皮碗、活塞环）全高度；凸轮升高度；气阀升高度；气体焓值
b_f —活塞环厚度	h'_1 —皮碗工作高度
B_l —连杆大头宽度	h_f —活塞环高度
b_l —连杆小头宽度	h_0 —气阀圆柱形密封凸缘高度
b_p —皮碗厚度	h_{k_s} —等熵过程出口焓值
b_s —十字头壁厚	h_L —从系统中泄漏出的气体的焓值
b_x —曲轴的曲臂厚度	h'_L —从工作容积中泄漏出的气体的焓值
b_m —环槽密封沿周向分区宽度	h_p —管道中气体混合后焓值
c —多变过程比热	h_w —气缸排出气体的焓值
c_p —等压过程比热	I —飞轮惯性矩
c_v —等容过程比热	I_r —膨胀机全部旋转质量的惯性矩
c_0 —迷宫密封的径向间隙	i —气缸数；顺序号
c_φ —对应 φ 角处的径向间隙	i_c —杠杆比
D —活塞直径	K —传热系数
d —十字头销直径	K_0 —考虑迷宫密封环槽几何形状特征的系数
D_s —十字头直径	K_D —系数
d_m —连杆杆身中间截面当量直径	K_d —系数
d_x —曲轴主轴颈直径	K_m —系数
e —偏心率	K_l —系数
$\overline{e}$ —相对偏心率	k —绝热指数
F —最大换热面积	k_0 —一定温度时的绝热指数
F_0 —取决于密封环槽特性参数的函数	$(k_0)_{pH_2}$ —一定温度时仲氢的绝热指数
F_1 —膨胀机工作容积的表面积	$(k_0)_{nH_2}$ —一定温度时氢的绝热指数
F_2 —膨胀机气缸的横截面积	L_1 —一个环槽迷宫密封长度
F_p —管道截面积	L_z — z 个环槽迷宫密封长度
F_f —气阀通道截面积	l_m —工作容积中工作区中部到热区中部的长度；迷宫密封两环槽的间隔
F_h —活塞截面积	l —连杆长度
f —一切向力图面积	M —马赫数
f_{fcp} —沿密封线平均直径的阀杆面积	M^* —临界马赫数
$f_{x,j}$ —求最优化的目标函数	M_H —力偶
G —气量；流经膨胀机气体流量；流经环槽密封	

- M_i —主动力矩
 M_m —摩擦力矩
 M_T —制动力矩
 M_{z0} — z 环槽中气流马赫数
 m —平衡状态膨胀过程多变指数
 m' —平衡状态压缩过程多变指数
 m_j —非平衡状态膨胀过程多变指数
 m'_j —非平衡状态压缩过程多变指数
 m_A —连杆质量
 m_f —飞轮质量
 m_h —活塞部件和十字头质量
 m_s —转移质量
 m_n —总平衡配重质量
 m_s —往复运动质量
 m'_s, m''_s —平衡配重质量
 N_e —轴功率, 有效功率
 N_i —指示功率
 N_m —摩擦功率
 N_T —制动功率
 n —膨胀机转速
 $\overline{n}$ —膨胀机单位时间循环数
 P —总活塞力
 P_A —侧向力
 P_f —法向力
 P_q —切向力
 $P_{q, cp}$ —按轴功率计算的平均切向力
 $P_{I, s}$ —往复运动惯性力
 $P_{I, r}$ —回转运动惯性力
 P_l —连杆力
 P_m —摩擦力
 P_i —气体力
 $P_{m, s}$ —往复运动摩擦力
 $P_{m, r}$ —回转运动摩擦力
 p —压力
 p_f —活塞环作用在气缸壁上的平均比压
 p_i —气缸中气体的指示压力
 p_A —活塞环作用在气缸壁上的法向压力
 p_{1r}, p_{2r} —压缩机气缸中气体的开始压力和终了压力
 p_0 —压缩机进气管道中的气体压力
 p_{z0} — z 环槽出口处气体压力
 Q —总热量, 气体体积流量
 Q_g —气缸传给气体的最大热流量
 Q_m —摩擦热
 Q_w —外热
 q —热流
 q_m —活塞密封产生的摩擦热
 q_{mz} —传给周围介质的活塞密封摩擦热
 q_w —周围介质传给工质的热量
 R_0 —凸轮基圆半径
 R_p —每个环槽的承载能力
 R_z —迷宫密封的总承载能力
 Re —雷诺数
 r —曲柄回转半径
 r_g —滚轮半径
 S —活塞行程; 活塞离开上止点距离
 S_0 —对应余隙容积的活塞行程长度
 S_1 —对应于进气阀开启的行程长度
 S_2 —排气窗口高度
 S_y —无轴膨胀机—压缩机活塞的全行程
 T —温度
 T_j —进气温度
 T_A —气缸壁中座标为 x 处的平均温度增量波幅
 T_b —振动转化温度
 T_l —沿气缸壁厚度方向的温度梯度
 T_g —气缸内气体温度, 气缸工作区平均温度
 T_w —气缸内壁处温度
 T'_w —气缸外壁处温度
 T_r —转动转化温度
 T'_A —气体温度波动的幅度
 u —气体的内能
 V —容积
 v —比容
 V_i —对应于 i 点压力 p_i 的容积
 $V_{y, g}$ —压缩机工作容积
 $V_{y, s}$ —压力为 p_0 时压缩机的容积生产率
 $V_{y, m}$ —压缩机的排气量
 $V_{g, h}$ —每小时气缸工作容积
 V_0 —余隙容积
 W_i —指示功
 W_e —有效功; 轴功
 W_T —制动功
 W' —活塞反行程时气体功
 W'_m —活塞反行程时运动件的摩擦功
 W'_s —活塞反行程时随动机构所需的功
 $W_{p, m}$ —有活塞密封摩擦热时气体的膨胀功

- $W_{p,s}$ —绝热时气体的膨胀功
 W'_m —气体压力使活塞环产生的摩擦功
 W''_m —活塞环弹力产生的摩擦功
 w —活塞运动速度; 配气机构运动速度
 w_s —活塞往复运动速度
 w_r —曲柄销圆周速度
 w_0 —活塞在上止点时的速度
 w_x —活塞在 x 点处的速度
 w_p —管道中气流速度
 w_f —阀门中气流平均速度
 $w_{f,H}$ —进气阀中气流平均速度
 $w_{f,K}$ —排气阀中气流平均速度
 x —往复运动行程
 x_0 —上止点
 x'_0 —下止点
 z —气体压缩性系数; 皮碗数
 z_x —吸气时气体压缩性系数
 z_p —排气时气体压缩性系数
 Δh —气阀与顶杆之间的间隙
 ΔH_K —一个循环中的总制冷量
 $\Delta H_{s,e}$ —外热引起的总冷损
 Δh_K —实际焓降
 Δh_s —绝热焓降
 $\Delta h_{s,b}$ —不完全膨胀引起的冷损
 $\Delta h'_{s,b}$ —有余隙容积不完全膨胀引起的冷损
 $\Delta h_{s,y}$ —余隙容积充气引起的冷损
 $\Delta h_{s,m}$ —摩擦热引起的单位冷损
 $\Delta h_{s,n}$ —内部热交换引起的冷损
 Δp —压力测量误差
 Δp_i —压力测量各环节误差
 ΔT —气缸中瞬变温度综合误差
 ΔT_g —温度传感器误差
 ΔT_I —二次仪表误差
 ΔT_h —温度传感器标定误差
 α —给热系数; 曲轴转角; 凸轮转角
 α_2 —进气关闭角
 α'_2 —凸轮密封锥面与气阀平面夹角
 α_b —气体在管道中流动的换热系数
 α_k —微分节流效应系数
 $\alpha_{A,k}$ —凸轮空行程角
 α_K —微分祛气过程效应系数
 α_m —微分多变过程效应系数
 α_s —微分等熵效应系数
 $\alpha_{s,f}$ —平衡状态微分等熵效应系数
 β —连杆摆角
 $\bar{\beta}_0$ —迷宫密封环槽结构参数的函数
 $\bar{\beta}_{x,0}$ —临界状态下迷宫密封环槽结构参数的函数
 γ —气体重度
 δ —充气度 $\delta = \alpha_0 + \varepsilon_2$
 δ_2 —充气度 $\delta_2 = \frac{\alpha_0 + \varepsilon_2}{1 + \alpha_0}$
 ε —压缩度
 ε_2 —相对进气系数
 ε_b —相对压缩系数
 $\varepsilon_{0,v}$ —无阀(单阀)膨胀机的容积比
 ε_v —无阀(单阀)膨胀机的实际容积比
 ε_y —压缩机的压缩比
 ξ —系数
 η —传动效率
 $\eta_{3,4}$ —祛气过程效率
 η_s —绝热效率
 η'_s —考虑进排气阀阻力后的绝热效率
 η_m —机械效率
 η_l —迷宫密封总环槽长度损失系数
 η_μ —气体动力粘度系数
 θ —气体温度波动与气缸壁温度波动的相位差; 凸轮计算用夹角
 λ —导热系数
 $\lambda_{r,l}$ —曲柄回转半径与连杆长度之比值
 $\lambda_{s,b}$ —活塞行程与气缸直径之比值
 $\lambda_{v,y}$ —压缩机容积系数
 $\lambda_{T,y}$ —压缩机温度系数
 $\lambda_{p,y}$ —压缩机压力系数
 $\lambda_{q,y}$ —压缩机气密系数
 μ —摩擦系数
 μ_i —第 i 个皮碗的摩擦系数
 μ_d —顶杆加速度系数
 μ_r —加速度系数
 μ_l —切向力图长度比例尺
 μ_p —切向力图力的比例尺; 示功图压力比例尺
 μ_v —示功图容积比例尺
 ξ —气阀阻力系数
 σ_e —环槽承载能力系数
 σ_1 —环槽第一区承载能力系数
 σ_2 —环槽第二区承载能力系数
 σ_s —迷宫密封总承载能力系数

τ —时间	δd —连杆小头衬套与十字头销的配合间隙
τ_x —由 o 点运动到 x 处的时间	δg —系统中泄漏出的气量
ϕ —等熵过程实际温差与计算温差之比	δq_m —传给泄漏气体的活塞密封摩擦热
φ —过程膨胀比	$\delta T_{cb}(\Delta T_{cb})$ —进排气阀阻力引起的温度增量
φ' —过程实际膨胀比	δT_f —不平衡因素冷损引起的温度增量
φ_i —凸轮作用角	$\delta T_{f,z}$ —进排气阀阻力引起的温度增量
φ'_i —气阀滞留角	下脚标符号
φ''_i —气阀在全开时的滞留角	H —开始
Φ_m —迷宫密封环槽压力降	K —结束
$\Phi_{m,i}$ —迷宫密封第 i 个环槽压力降	cp —平均
φ_f —示功图丰满系数	zj —最佳
ψ —系数	$\max$ —最大
ψ_0 —进气过程开始时进气阀相对压力损失系数	$\min$ —最小
ψ_1 —进气阀相对压力损失系数	g —气缸
ψ_2 —排气阀相对压力损失系数	h —缓冲器
ω —角速度; 波动过程的圆频率	p —膨胀机
δb —飞轮旋转不均匀度	y —压缩机
δD —十字头滑板与滑道间隙	

目 录

前言	
符号表	
第一章 绪论	1
§ 1-1 活塞膨胀机在深冷装置中的作用	1
§ 1-2 活塞膨胀机的特点和分类	2
§ 1-3 活塞膨胀机发展概况	8
第二章 活塞膨胀机的工作原理	11
§ 2-1 活塞膨胀机的工作过程	11
§ 2-2 活塞膨胀机工作过程的理论基础	13
§ 2-3 示功图及其特性参数	30
§ 2-4 工作示功图上各特性点温度的确定	40
第三章 活塞膨胀机的冷量损失	44
§ 3-1 活塞膨胀机冷量损失的分析和计算	44
§ 3-2 活塞膨胀机的绝热效率、气体流量和制冷量	57
§ 3-3 一些参数对活塞膨胀机性能指标的影响	59
§ 3-4 活塞膨胀机多变膨胀过程和多变压缩过程的综合描述	64
第四章 活塞膨胀机的热力计算	67
§ 4-1 概述	67
§ 4-2 活塞膨胀机的热力计算方法	67
§ 4-3 几种活塞膨胀机热力计算的特点	89
第五章 活塞膨胀机动力学	94
§ 5-1 曲柄连杆机构活塞膨胀机的动力学	94
§ 5-2 无轴膨胀机—压缩机动力计算的特点	113
第六章 活塞膨胀机的配气机构	116
§ 6-1 概述	116
§ 6-2 气阀机构	116
§ 6-3 其它型式的配气机构	126
§ 6-4 气阀传动机构	130
§ 6-5 配气机构设计计算	135
第七章 活塞膨胀机的活塞密封	152
§ 7-1 概述	152
§ 7-2 皮碗密封	152
§ 7-3 活塞环密封	154
§ 7-4 迷宫密封	156
§ 7-5 O形弹力环活塞密封	161
第八章 活塞膨胀机结构	162
§ 8-1 活塞膨胀机结构特点	162
§ 8-2 活塞膨胀机的主要零部件	165
§ 8-3 活塞膨胀机的冷量调节机构	172
§ 8-4 活塞膨胀机的安全机构	176
§ 8-5 各类活塞膨胀机的结构特点	180
第九章 活塞膨胀机的材料和结构工艺	193
§ 9-1 活塞膨胀机零部件材料选择	193
§ 9-2 活塞膨胀机零件的精度	195
§ 9-3 活塞膨胀机零件的表面质量	198
§ 9-4 活塞膨胀机的结构工艺性	200
第十章 活塞膨胀机的试验研究	201
§ 10-1 概述	201
§ 10-2 活塞膨胀机的试验设备	201
§ 10-3 活塞膨胀机的试验研究	207
§ 10-4 试验资料的整理	210
主要参考资料	213

第一章 绪 论

§ 1-1 活塞膨胀机在深冷装置中的作用

在深冷装置中,要使装置正常运转,就要不断地供给冷量,以建立装置正常工作的必要条件,并补偿装置在运转过程中的各种冷量损失(如跑冷和复热不足等损失)。活塞膨胀机就是制取冷量的一种低温机械。

在生产实践中,人们发现,压缩气体在气缸中绝热膨胀,并对外做功,可以使气体本身强烈地冷却。为此,首先要压缩气体,这实际上就是对系统加入能量。在深冷装置中,能量的加入通常都是采用加机械功给压缩机以压缩气体,增加气体的内能,再使系统内的压缩气体在膨胀机中膨胀,并对外做功,而气体的温度降低,同时制取冷量。

如图 1-1 所示,设气体进入膨胀机的状态为点 $H(p_H, T_H, h_H)$,膨胀到压力 p_K 时排出膨胀机。这时,若为等熵绝热膨胀,则膨胀终了的状态为点 $K_s(p_K, T_{K_s}, h_{K_s})$ 。但在生产实践中,由于在膨胀机中存在许多冷量损失,所以工质膨胀的实际过程常偏离等熵绝热过程,膨胀终了的状态为点 $K(p_K, T_K, h_K)$ 。

由图 1-1 可见,等熵绝热过程温降和焓降最大,而实际过程的温降和焓降都较少。因此,实际过程与等熵绝热过程接近的程度反映出活塞膨胀机性能的好坏,即膨胀机的效率问题。

在深冷装置中,膨胀机得到了广泛的应用。因为它与利用节流阀等温节流(焦耳-汤姆逊效应)循环相比,虽然节流阀结构简单,但膨胀机制冷既有效又经济得多。

表 1-1 列出了节流阀与膨胀机制冷循环指标的比较。

表 1-1 节流阀与膨胀机制冷循环指标比较

指 标	$p_H = 200(\text{atm})$	
	节流阀	膨胀机
制冷量(kJ/N)	3.43	10.025
所得液态空气与通过膨胀阀门的压缩空气总量之比(%)	5.37	21
获得 1(N)液态空气的能耗(kJ)	14.7×10^2	3.6×10^2

可见,活塞膨胀机的制冷量远比节流阀循环的大,而膨胀机的动力消耗又比节流阀循环

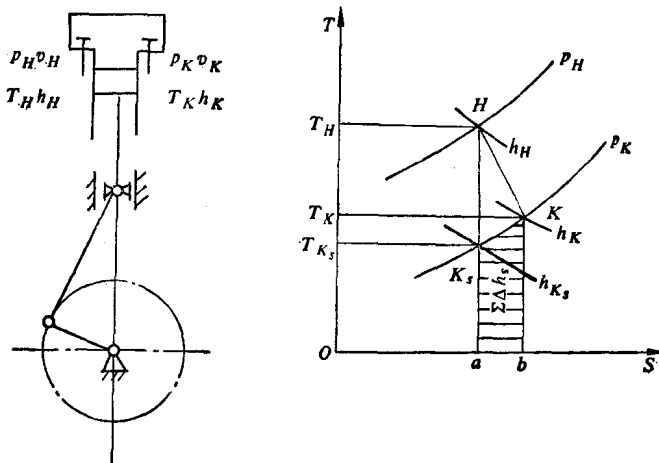


图 1-1 绝热膨胀过程

的少。因此，活塞膨胀机是深冷装置中提供冷量的主要配套机器之一。

在膨胀机气缸中若生成液体，则将产生“水击”现象，对膨胀机不利。因此，在深冷装置中，一般不单独采用膨胀机，常与节流阀配合使用。

表 1-2 给出了带膨胀机的高、中、低压空气制冷循环中膨胀机的制冷量在整个循环制冷量中所占的比重。可以看出，膨胀机的制冷量在整个循环中占绝对优势。因此，提高膨胀机的绝热效率，以获得最大的绝热焓降，具有重要的意义。

表 1-2 膨胀机的制冷量在整个循环制冷量中的比重

制 冷 部 分	循 环		低 压		中 压		高 压	
	进 排 气 压 力		0.6/0.14(MN/m ²)		2.5/0.6(MN/m ²)		20/0.6(MN/m ²)	
	进 气 温 度		130(K)		170(K)		300(K)	
	制 冷 量 , 百 分 比		(kJ/N)	%	(kJ/N)	%	(kJ/N)	%
等 熵 焓 降			4.2	89.2	5.15	80	17	84.6
等 温 节 流			0.51	10.8	1.29	20	3.28	16.4
总 和			4.71	100	6.44	100	20.28	100

§ 1-2 活塞膨胀机的特点和分类

膨胀机既然是将压缩气体的内能转变为机械功的一种机械，那么，究其作用原理来说，实质上是一种气体发动机。但是，与发动机相比，膨胀机不仅工作温度不同，而且所要解决的主要矛盾也不同。发动机在高温下工作，其目的在于获得尽可能大的机械功，而膨胀机在低温下工作，主要是制取冷量。所以，膨胀机的主要矛盾是在进、排气压力和进气温度一定的情况下如何最大限度地制取冷量和膨胀终了得到最低的温度，也就是在相同的压降范围和相同的进气温度下如何使膨胀机具有最高的绝热效率。至于机械功的获得则是附带的。

根据膨胀机能量转换的方式不同，可将膨胀机分为两类：容积式膨胀机和透平式膨胀机。

容积式膨胀机是利用容积的变化而使气体膨胀输出外功以制取冷量的。改变气体的容积有很多方法，因此，容积式膨胀机的型式也有许多种。它既包括一般的利用活塞在气缸中作往复运动以改变容积的活塞膨胀机，也包括一些作回转运动的容积式膨胀机。但目前，最常见、应用最广的还是活塞膨胀机。因此，通常都习惯于把膨胀机分成活塞膨胀机和透平膨胀机。

透平膨胀机是利用气体膨胀时，其能量（全部或部分）首先变成高速气流的动能，然后使动能转化为转子的输出功以制取冷量的。在这类膨胀机中，既包括膨胀气体作向心运动的径流式透平膨胀机，也包括膨胀气体作轴向运动的轴流式透平膨胀机。根据膨胀气体的膨胀过程不同，又可分为冲动式和反击式两种。在冲动式透平膨胀机中，气体的膨胀过程完全在静止的喷嘴中进行，叶轮依靠气流的冲击而运动。而在反击式透平膨胀机中，气体的膨胀过程不仅在喷嘴中进行，而且还在叶轮的流道中继续进行。但不管哪种透平膨胀机都是以工质流动时速度能的变化来传递能量的。因此，也称为速度型膨胀机。

图 1-2 为各种膨胀机的分类示意图。

不同种类的膨胀机，其应用范围也不同。这主要取决于深冷装置的工作条件，即降温的高低、冷量的大小以及循环型式。活塞膨胀机适用于高、中及低压的中小型装置，也就是适用于压比大、流量小的场合。一般压力比为 $4\sim 40$ ，气体的重量流量为 $500\sim 100000\text{ N/h}$ 。而透平膨胀机主要用于大型装置，即压比小、流量大的场合。一般压力比小于 5 。目前，在一些中压装置和少数低压装置中也采用透平膨胀机。

随着空分装置大型化，透平膨胀机有取代活塞膨胀机的趋势。但透平膨胀机在高压和小流量的情况下，其效率还不能超过活塞膨胀机。按现有工艺水平，透平膨胀机的气量下限不能太小，一般约为 $100\sim 200\text{ Nm}^3/\text{h}$ ，而活塞膨胀机没有气量下限的限制，它的最大气量也远远超过透平膨胀机的气量下限。因此，虽然透平膨胀机正在向中小型发展(目前已用在 $12\sim 15\text{ t/h}$ 氮液化器及 $10\text{ Nm}^3/\text{h}$ 氮制冷机上)，但在中小型氮液化器及制冷机中，活塞膨胀机仍然占有重要的地位。

图 1-3 列出了活塞膨胀机和透平膨胀机的适用范围。

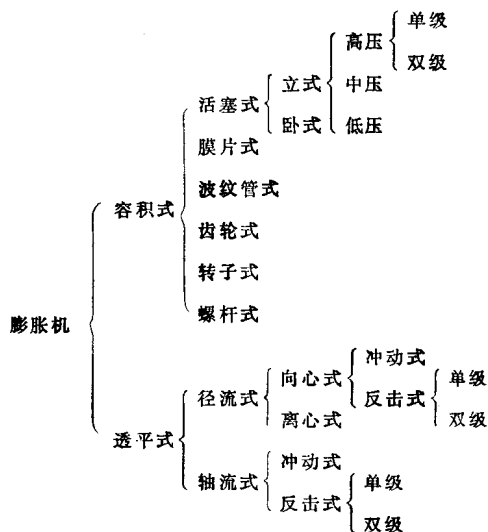


图 1-2 膨胀机分类示意图

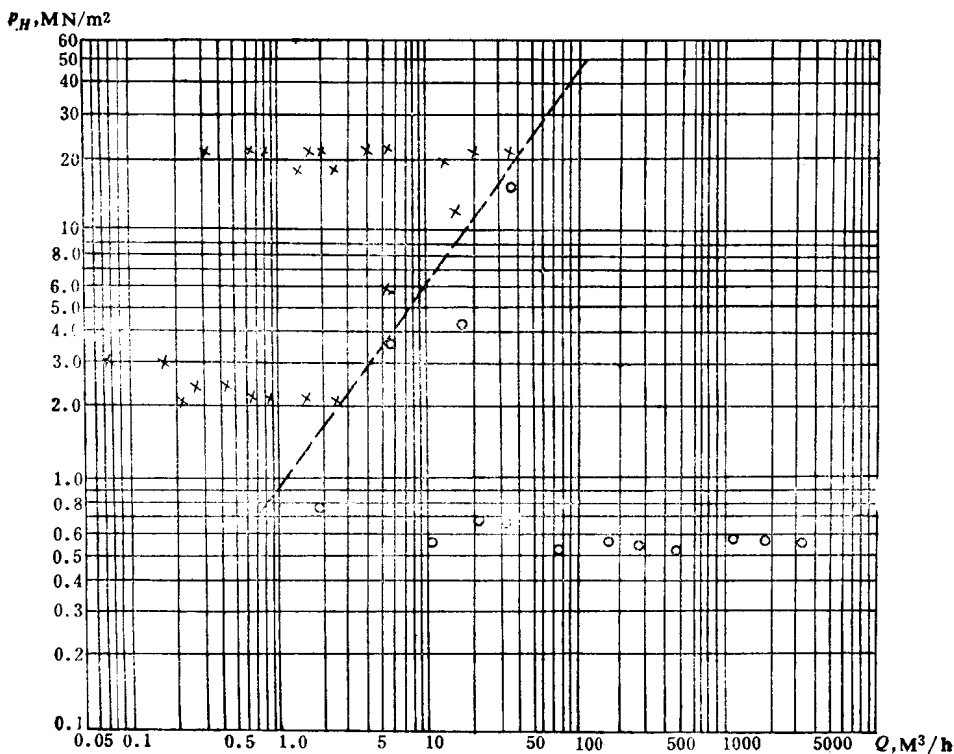


图 1-3 活塞膨胀机和透平膨胀机的适用范围

×—活塞膨胀机 ○—透平膨胀机

表1-3 国内某些活塞

型 号	配 套 装 置	工质	气 量 Q (Nm ³ /h)	进气压力 p_H (atm)	排气压力 p_K (atm)	进气温度 T_H (K)	排气温度 T_K (K)
55-210	50(Nm ³ /h) 制氧机	空气	210	启动55 正常20~25	6 5	173 183	113 153
200-70/11	11-800 液氧装置	空气	340	200	6	318	
1LP-10/50-6		空气	600	50	6		
1LP-4.16/64-6		空气	250	64	6		
1LP-16.6/50-6	150(Nm ³ /h) 制氧机	空气	1000	50	6	193	163
1LP-3.4/200-6	KFS-330 型制氧设备	空气	206	200	6		
1LP-26-6/200-18.5	空分氮洗联合装置	氮气	850	200	18.5	178	
PZK-5/40-6	50(Nm ³ /h) 制氧机	空气	启动300 正常100~150	40 20	6	193 173	
PZK-14.3/40-6	150(Nm ³ /h) 制氧机	空气	启动860 正常280~450	40 20	6	173	
2LP-20/199-28	空分氮洗联合装置	氮气	900~1200	200	29	218	
1WT21/200-6		氮气	1250	200	6	228	
50/200-6		氮气	3000	200	6		
50-710/12	150(Nm ³ /h) 制氧强化装置	空气	1000	50	6		
200-50	12 l 移动式制氧车	空气	50~60	180~200	13~16	303	193
PZK-2.8/55-6		空气	启动168 正常70	55 25	6 6	>178 ~178	
HY-10	10 l 氮液化器	氮气	60	30	1.2	25~30	
HY-50	50 l 氮液化器	氮气	500~740	25~30	0.2~0.3	27	14

膨胀机特性参数一览表

绝热效率 η_s (%)	缸径 D (mm)	行程 S (mm)	转速 n (rpm)	活塞平均速度 w_{cp} (m/s)	制动功率 N_T (kW)	机器重量 G (kg)	结 构 特 点
45 30~40	85	160	120~130	0.692	10	1475	立式单缸单列, 皮碗密封, 油压控制进排气阀
70	70	180	200	1.2	14	1320	金属活塞环油润滑
	95	160	500	2.665	14	1330	
	95	160	200	1.068	14	1700	
	110	200	170	1.132	14	1800	立式双缸双列, 金属活塞环注油润滑
70	50	160	320	1.735	13	830	金属活塞环, 气缸注油润滑
80	60	180	270	1.62	28		金属活塞环, 凸轮装在曲轴上
60	78	120	300	1.2	7.5		聚四氟乙烯塑料活塞环, 无油润滑, 凸轮在曲轴上
>60	120	180	300	1.8	14	1575	立式单缸单列长活塞, 绝热缸套, 四氟塑料活塞环, 凸轮装在曲轴上
	60	180	360	2.16	28		四氟塑料活塞环, 气缸无油润滑, 凸轮装在曲轴上
	155	290	120	1.16	130	7180	卧式单列, 金属活塞环, 气缸注油润滑
	155	290	190	1.84		9480	卧式单列, 金属活塞环, 气缸注油润滑
	$\frac{110}{110}$	200	170	1.132		1800	
	28	130	350~400	1.54~1.76		430	压缩机制动, 气缸用油润滑
	50	100	340		3		四氟塑料活塞环, 无油润滑, 连杆采用滚动轴承
65~67	32	40	600~1300	0.8~1.73			立式单缸单列, 单阀内传动, 转速连续可调
65	52	76	950	2.4			立式双缸双列, 单阀内传动, 短活塞, 流量可调

表1-4 国外某些活塞

型 号	国家	配 套 装 置	工 质	气 量 Q (Nm ³ /h)	进气压力 p_H (atm)	排气压力 p_K (atm)
林德型	西 德	3 l 氮液化器	氮 气	3.6~4.5	30~35	1.2~1.3
试验用无阀膨胀机	西 德	氮液化器	氮 气	9	30	1.5
He-EM50-2	西 德	氮液化器	氮 气	≤250	32	1.2~1.8
Clark膨胀机	美	30Nm ³ /h制氧车	空 气	90	6~8	1.2
FXA-1	美	制氧装置	空 气	5000	211	
JX-1	美	制氧装置	空 气	8500	211	
无轴自由活塞式	美	8 l 氮液化器	氮气	20	26	
氮液化器用活塞膨胀机	美	大型氮液化器	氮气	656	137	7
氮液化器用活塞膨胀机	日	氮液化器	氮气	300	15	
气阀内传动膨胀机	法	氮制冷机	氮气		9	1.6
无阀膨胀机	印度	气体制冷机	空气		10	1.033
ДЕД-6	苏	КЖ1000型 制氧装置	空气	3000	170	6
ДВД-10	苏	制氧装置	空气	78	200	6
ДЕД-13	苏	АКДС-70М型 制氧装置	空气	340	200	6
试验用直流式膨胀机	苏		空气	450	180	6
试验用自由活塞 膨胀机-压缩机	苏		空气	195	200	6
氮液化活塞膨胀机	苏	350 l 氮液化器	氮气	100	100~150	6~40
ГДСД-1	苏	Г-2型 8 l 氮液化器	氮气	5~8	22	1.3
ГДСД-11(一级)	苏	氮制冷机	氮气	0.75	18	0.92
ГДСД-11(二级)	苏	氮制冷机	氮气	15	17	0.96
ГДСД-5	苏	制冷量4kW 氮制冷机	氮气	400	25	2.0
ГД80/80	苏	氮制冷机	氮气	80~100	26	1.6
ГДСД-2М	苏	Г-45 40 l 氮液化器	氮气	48~77	20~40	1.2~1.4

膨胀机特性参数一览表

进气温度 T_H (K)	排气温度 T_K (K)	绝热效率 η_s (%)	缸 径 D (mm)	行 程 S (mm)	转 速 n (rpm)	机器重量 G (kg)	活塞密封形式
25~27	14~15	60~70	37.5	80	450~700	10	迷 宫
26.2	12.6	76	28.5	32	1200		迷 宫
15~140		60	32	42	600~1200(无级调速)		氟塑料活塞环
114	85	80~85	100	89	150~300		迷 宫
290			127	267	327		金属活塞环
290			162	355	257		金属活塞环
24		70	32	32	1800~2700		迷 宫
75~72	35~30	80	125	260	125~300		氟塑料活塞环
20		80	60	50	200		氟塑料活塞环
50~80		60	30	42	300		塑料活塞环
303	133		30	36	120		
238		80	155	290	145	10000	金属活塞环
293	163	65~70	28	130	320	480	金属活塞环
293		70	50	160	370	865	金属活塞环
293		70~75	40	60	1200	130	金属活塞环
270		70	54	40~50	1500	250	氟塑料活塞环
48~42		70~80	40	100	400		皮 碗
28	12	80	35	35	400	45	迷 宫
80		60	28	40	230		迷 宫
20		70	20	34	230		迷 宫
27~25	14~11	75~80	110	140	340		无油润滑活塞环
25.5	12.4	80	80	80	370		皮 碗
28~24	13.6~11.5	75	60	75	310~400	115	迷 宫

根据深冷装置制冷参数的不同, 活塞膨胀机分为高压、中压及低压三种膨胀机。通常, 工业上用的高压活塞膨胀机, 气量为 $50 \sim 3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 进气压力为 $160 \sim 200 \text{ atm}$, 排气压力为 $6 \sim 15 \text{ atm}$, 进气温度为 $240 \sim 300 \text{ K}$; 中压活塞膨胀机, 进气压力为 $20 \sim 60 \text{ atm}$, 排气压力为 6 atm , 进气温度为 $120 \sim 220 \text{ K}$; 低压活塞膨胀机, 进气压力为 $5 \sim 15 \text{ atm}$, 排气压力为 $1.2 \sim 1.4 \text{ atm}$, 进气温度为 $20 \sim 130 \text{ K}$ 。

在深冷装置中, 高压活塞膨胀机多用于液化装置, 中压活塞膨胀机一般用于中小型制氧装置, 低压膨胀机应用较少, 国外在某些小型深冷装置有所采用, 如 $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 运输式低压制氧机。

表 1-3 列出了国内一些活塞膨胀机的特性参数。表 1-4 列出了国外一些活塞膨胀机的特性参数。

§ 1-3 活塞膨胀机发展概况

活塞膨胀机作为一种制取冷量的低温机械, 其发展是与整个深冷技术的发展紧密相连的。随着工业对冷量和温度等级要求的不同, 活塞膨胀机也在不断革新、发展。

活塞膨胀机是利用容积变化使气体膨胀对外做功以制取冷量和获得一定温度级的低温流体。因此, 怎样使有限的容积产生的冷量最多和得到所需温度级的低温流体, 这是它的主要问题。为此, 就要研究制冷循环、绝热措施和减少冷损的方法, 以得到膨胀机良好的绝热效率, 从而探讨活塞膨胀机的新型结构。活塞膨胀机的发展就是围绕这些问题进行的。

早在十九世纪, 人们就开始设想制造利用气体在气缸中膨胀制冷的机器。1840~1850 年, 美国人哥里制成了世界上第一台气体膨胀机。1857 年, 英国人西蒙斯企图在带有再生热交换器和膨胀机的装置上液化空气, 1885~1887 年索尔非重新进行了这一工作, 但未取得预期效果。直到 1902 年 5 月 12 日法国工程师克劳德首先在空气液化装置中采用了中压活塞膨胀机, 这是一个蒸汽发动机型的机器, 活塞密封采用皮碗密封。1907 年德国工程师海兰德建立了世界上第一台高压活塞膨胀机, 用在制取液氧的装置中。1920 年克劳德又设计制造了一台氢活塞膨胀机。1934 年苏联科学院院士卡皮查设计制造了用来液化氮的活塞膨胀机。

现代的活塞膨胀机, 虽然已有许多变化, 但其基本构思还是这些机器的继承和发展。

在活塞膨胀机的发展过程中, 同时也出现了一些其它型式的容积式膨胀机。1938 年美国麻省理工学院的柯林斯设计了一种膜片式膨胀机。这是一种用柔软膜片的变形来代替活塞运动以改变气腔容积的膨胀机。它应用于氮液化器上。1940 年柯林斯又设计了一种柔杆式活塞膨胀机, 该机的特点是活塞杆为细而长的柔杆, 在工作过程中活塞杆处于受拉状态, 从而保证了活塞与气缸的同心, 减少了泄漏。这种活塞膨胀机主要用于小型制氧装置和氮液化器。

早在 1928 年, 英国人西蒙提出以弹性金属波纹管代替一般常用的气缸、活塞的容积式膨胀机。1953 年柏林大学的埃德尔、1954 年牛津大学的朗和西蒙分别将波纹管膨胀机用于氮液化器 (产量均为 0.4 t/h 液氮)。前者采用了钢波纹管, 后者采用了青铜波纹管。这种膨胀机的主要优点是完全消除了气体沿活塞的泄漏以及避免了气缸中出现润滑油。但由于波纹管的疲劳损坏和波纹管各卷内余隙容积的充填困难等原因而限制了它的发展。

从带有进、排气阀门的回流式活塞膨胀机发展成只有单一进气阀的单流式活塞膨胀机大约在 1956~1957 年左右。这种机器只有一个进气阀, 排气是通过气缸壁上的圆形小窗口进