

高等学校适用

活塞膨胀机

华中理工大学 丑一鸣 编

GAODENG XUEXIAO
SHIYONG

机械工业出版社

243516

高等学校适用

活塞膨胀机

(修订本)

华中理工大学 丑一鸣 编



机械工业出版社

DV 83 / 12

前 言

本书是在1982年1月出版的高等学校试用教材《活塞膨胀机》的基础上,根据1985年5月高等学校流体动力机械专业教材分编审委员会制订的新教学计划和教学大纲以及审定的修改大纲,总结、分析了本门课程的教学实践及读者反馈的意见修订的。

《活塞膨胀机(修订本)》是高等学校制冷及低温技术专业的重要专业课。活塞膨胀机是中、小型空分设备、氮液化设备、能量回收和合成氨尾气提氢等低温装置中获得低温冷量的一种主要低温机械。由于在我国这些设备比较多,因此,本书既是高等学校制冷及低温技术专业的教材,也可供有关工程技术人员和科研人员参考。

1982年1月版《活塞膨胀机》是根据1978年“高等学校一机部对口专业座谈会”的精神和同年“制冷及低温技术专业教材编审会”审定的编写大纲,由原华中工学院丑一鸣、段茂金编写的。它是在原编的校内教材《活塞式膨胀机》的基础上,参考了西安交通大学陈纯正编写的《活塞式膨胀机》(空分设备讲座)和国内外有关资料编写的。其中第三章的§ 3-1和§ 3-3主要引用了陈纯正编写的《活塞式膨胀机》一书的部分内容。

本书根据教学要求和学时限制,对内容进行了选择,对全书进行了改编,并新编了部分内容,压缩了篇幅,突出了重点,着重讲清工作原理、理论基础、热力、动力计算和结构。对重要的公式增加了关键的推导步骤,并注意阐明物理概念,以便于自学。删去了其它课程已有的和不常用的内容。为满足读者进一步深入了解的需要,列出了有关的参考文献。

本书由华中理工大学低温技术教研室丑一鸣编写,由西安交通大学低温技术教研室陈纯正审稿。

在本书的编写出版过程中,陈纯正提出了很多宝贵的意见,编者所在的教研室给予了有力支持,特别是在编者丑一鸣书稿尚未整理完毕而突然不幸逝世的情况下,邬田华和高原对书稿的整理和贯彻有关的有关标准方面作了大量工作,付出了辛勤劳动。谨在此一并表示衷心的感谢。

欢迎读者对本书提出宝贵意见。

华中理工大学低温技术教研室

1988年11月

目 录

第一章 绪论.....	1
§ 1-1 活塞膨胀机在低温装置中的作用	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	6
第二章 活塞膨胀机的工作原理	9
§ 2-1 活塞膨胀机的工作过程	9
§ 2-2 活塞膨胀机工作过程的理论基础	11
§ 2-3 示功图及其特性参数	29
§ 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	45
§ 3-1 活塞膨胀机冷量损失的分析和计算	45
§ 3-2 活塞膨胀机的绝热效率、气体流量和制冷量	56
§ 3-3 一些参数对活塞膨胀机性能指标的影响	58
§ 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	65
第四章 活塞膨胀机的热力计算	66
§ 4-1 概述	66
§ 4-2 活塞膨胀机的热力计算方法	66
§ 4-3 几种活塞膨胀机热力计算的特点	85
第五章 活塞膨胀机动力学	87
§ 5-1 曲柄连杆机构活塞膨胀机运动学	87
§ 5-2 曲柄连杆机构活塞膨胀机动力学	92
§ 5-3 无轴膨胀机-压缩机动力计算的特点	106
第六章 活塞膨胀机的配气机构	107
§ 6-1 概述	107
§ 6-2 配气机构的结构	108
§ 6-3 气阀传动机构	123
§ 6-4 配气机构动力计算和材料选择	142
第七章 活塞膨胀机的活塞密封	145
§ 7-1 概述	145
§ 7-2 皮碗密封	145
§ 7-3 活塞环密封	147
§ 7-4 迷宫密封	149
§ 7-5 O形弹力环活塞密封	155
第八章 活塞膨胀机结构.....	156
§ 8-1 活塞膨胀机结构特点	156
§ 8-2 活塞膨胀机的主要零部件	159

§ 8-3	活塞膨胀机的冷量调节机构	164
§ 8-4	活塞膨胀机的安全机构	167
§ 8-5	各类活塞膨胀机的结构特点	171
§ 8-6	活塞膨胀机零部件材料选择	185
第九章	活塞膨胀机的试验研究	187
§ 9-1	概述	187
§ 9-2	活塞膨胀机的试验设备	187
§ 9-3	活塞膨胀机的试验研究	193
参考文献		198

第一章 绪 论

§1-1 活塞膨胀机在低温装置中的作用

在低温装置中，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所必需的条件，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）。活塞膨胀机就是用来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，并对外作功，可以使气体本身受到强烈的冷却。为此，首先要压缩气体，这实际上就是对系统加入能量。在低温装置中，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，并对外作功，使气体的温度降低，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 b (p_b 、 T_b 、 h_b)，膨胀到压力 p_e 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 e_s (p_e 、 T_{e_s} 、 h_{e_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偏离等熵绝热过程，膨胀终了的状态为点 e (p_e 、 T_e 、 h_e)。

由图1-1可见，等熵绝热过程温降和比焓降最大，而实际过程的温降和比焓降都比较小。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。

在低温装置中，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列出了膨胀机与节流阀制冷循环指标的比较。

表1-1 膨胀机与节流阀制冷循环指标比较

指 标	$p_b=20\text{MPa}$	
	膨胀机	节流阀
制冷量/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	102.5	34.3
所得液态空气与通过膨胀阀门的压缩空气总量之比 $\times 100$	21	1.37
获得1kg液态空气能耗/kJ	3.6×10^3	14.7×10^3

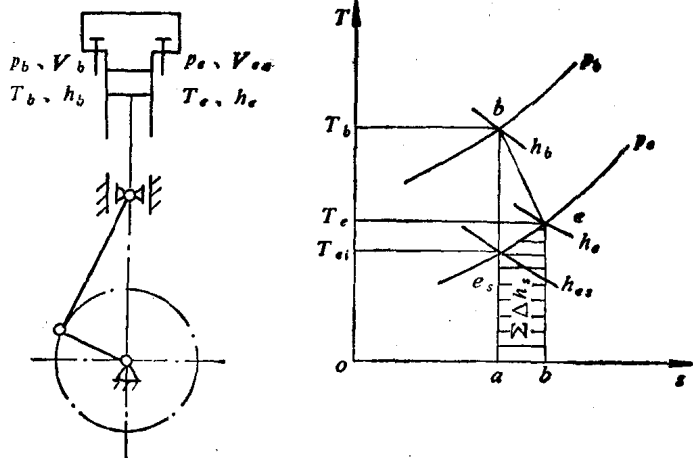


图1-1 绝热膨胀过程

可见, 活塞膨胀机的制冷量远比节流阀循环为大, 而膨胀机的动力消耗又比节流阀循环的少。因此, 活塞膨胀机是低温装置中提供冷量的主要配套机器之一。

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, 以获得最大的绝热比焓降, 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, 0.14MPa		2.5, 0.6MPa		20, 0.6MPa	
	进气温度		130K		170K		300K	
	制冷量		/(kJ·kg ⁻¹)	× 100	/(kJ·kg ⁻¹)	× 100	/(kJ·kg ⁻¹)	× 100
等熵比焓降			42	89.2	51.5	80	170	84.6
等温节流			5.1	10.8	12.9	20	32.8	16.4
总 和			47.1	100	64.4	100	202.8	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时得到最低的温度, 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方式的不同, 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, 最常见而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。

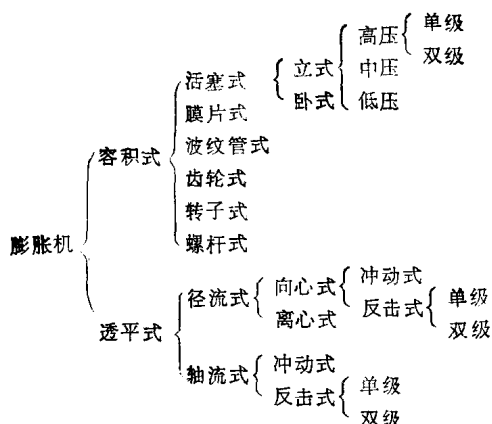


图1-2 膨胀机的分类

不同种类的膨胀机，其应用范围也不同。这主要取决于低温装置的工作条件，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4~40，气体的质量流量 q_m 为50~10000kg/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，在绝大多数低压装置和少数中压装置中采用透平膨胀机。

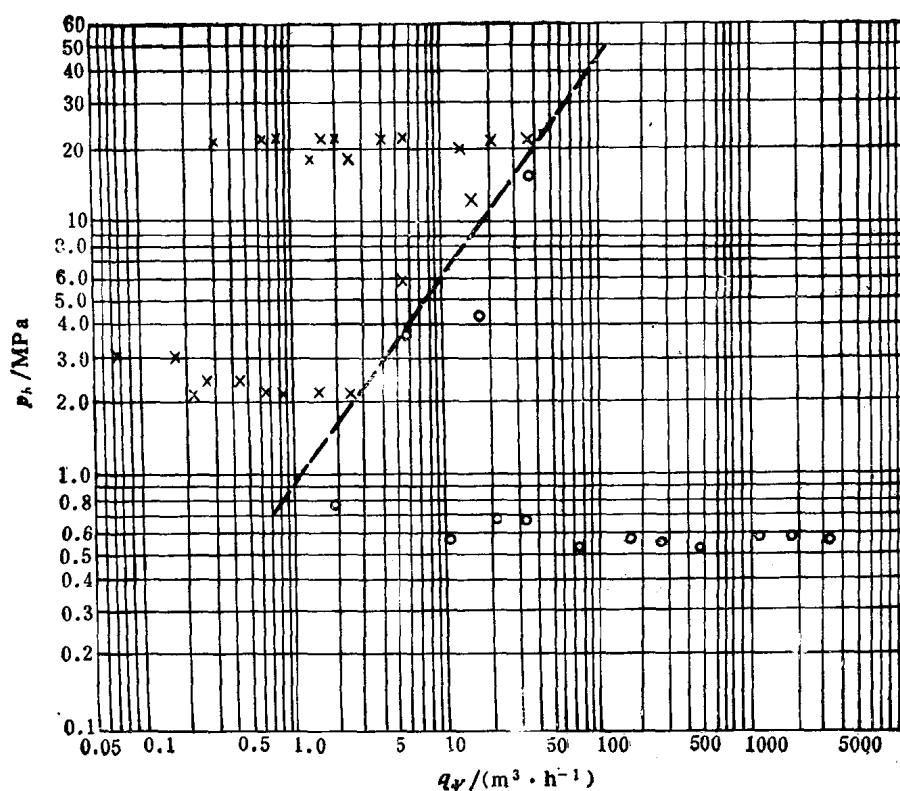


图1-3 活塞膨胀机和透平膨胀机的适用范围

×—活塞膨胀机 ○—透平膨胀机

表1-3 国内某些活塞泵机特性参数一览表

型 号	配套装置	工质	气体流量 $q_v / (m^3 \cdot h^{-1})$	进气压力 p_s / MPa	排气压力 p_e / MPa	进气温度 T_s / K	排气温度 T_e / K	绝热效率 $\eta_a \times 100$	缸径行程 $D / s / mm$	转速 $n / (r \cdot min^{-1})$	活塞平均速度 $w_{av} / (m \cdot s^{-1})$	制动功率 P_T / kW	机器重量 m / kg	结构特点
55-210	50(m^3/h) 制氧机	空气	210	启动5.5 正常2.0~2.5	0.6	173	113	45	85	160	120~130	10	1475	立式单缸单列, 皮碗密封, 油压控制进排气阀
200-70/11	11-800 液氧装置	空气	340	20	0.5	183	153	30~40	70	180	200	14	1320	金属活塞环油润滑
1LP-10/50-6	空气	600	5	0.6					95	160	500	14	1330	
1LP-4.16/64-6	空气	250	6.4	0.6					95	160	200	14	1700	
1LP-16.6/50-6	150(m^3/h) 制氧机	空气	1000	5	0.6	183	163		110	200	170	14	1800	立式双缸双列, 金属活塞环注油润滑
1LP-3.4/200-6	KFS-330 型制氧设备	空气	206	20	0.6			70	50	160	320	13	830	金属活塞环, 气缸注油润滑
1LP-26-6/200-18.5	空分氮洗联合装置	氮气	850	20	1.85	178		80	60	180	270	28		金属活塞环, 凸轮装在曲轴上
PZK-5/40-6	50(m^3/h) 制氧机	空气	启动300 正常100~150	4	0.6	133		60	78	120	300	7.5		聚四氟乙烯塑料活塞环, 无油润滑, 凸轮在曲轴上
PZK-14.3/40-6	150(m^3/h) 制氧机	空气	启动860 正常280~450	4	0.6	173		>60	120	180	300	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
2LP-20/199-28	空分氮洗联合装置	氮气	300~1200	4	2.8	218			60	180	360	28		四氟塑料活塞环, 气缸无油润滑, 凸轮装在曲轴上
1WT21/200-6	150(m^3/h) 制氧强化装置	氮气	1250	20	0.6	228			155	290	120	130	7180	卧式单列, 金属活塞环, 气缸注油润滑
50/200-6	空气	3000	20	0.6					155	290	190	9480		卧式单列, 金属活塞环, 气缸注油润滑
50-710/12	空气	1000	5	0.6					110	200	170	1800		
200-50	12L 移动式制氧车	空气	50~60	18~20	1.3~1.6	303	193		28	130	350~400		430	压缩机驱动, 气缸用油润滑
PZK-2.8/55-6	空气	启动168 正常70	5.5 2.5	0.6 0.6	>178 ~178				50	100	340	3		四氟塑料活塞环, 无油润滑, 连杆采用滚动轴承
HY-10	10L 氮液化器	氮气	60	3	0.12	25~30		65~67	32	40	600~1300			立式单缸单列, 单阀内传动, 转速连续可调
HY-50	50L 氮液化器	氮气	500~740	2.5~3	0.12~0.13	27	14	65	52	76	950			立式双缸双列, 单阀内传动, 短活塞, 流量可调

表1-4 国外某些活塞膨胀机特性参数一览表

型 号	国 家	配 套 装 置	工 质	气 体 流 量 $q_v / (m^3 \cdot h^{-1})$	进 气 压 力 p_s / MPa	排 气 压 力 p_e / MPa	进 气 温 度 T_s / K	排 气 温 度 T_e / K	绝 热 效 率 $\eta_a \times 100$	缸 径 行 程 $D / s / mm$	转 速 $n / (r \cdot min^{-1})$	机 器 重 量 m / kg	活 塞 密 封 形 式
林德型	联邦德国	3L 氮液化器	氮气	3.6~4.5	3.0~3.5	0.12~0.13	25~27	14~15	60~70	7.5 80	450~700	10	迷 官
试验用无阀膨胀机	联邦德国	氮液化器	氮气	9	3	0.15	26.2	12.8	76	28.5 32	1200		迷 官
He-EM50-2	联邦德国	氮液化器	氮气	≤ 250	3.2	0.12~0.18	15~140		60	32 42	800~1200(无级调速)		氟塑料活塞环
Clark膨胀机	美	30m ³ /h 制氧车	空气	80	0.6~0.8	0.12	114	85	80~85	100 89	150~300		迷 官
FXA-1	美	制氧装置	空气	5000	21.1		290			127 267	327		金属活塞环
JX-1	美	制氧装置	空气	8600	21.1		290			162 355	257		金属活塞环
无轴自由活塞式	美	8L 氮液化器	氮气	20	2.6		24		70	32 32	1800~2700		迷 官
氢液化器用活塞膨胀机	美	大型氢液化器	氢气	656	13.7	0.7	75~72	35~30	80	125 260	125~300		氟塑料活塞环
氮液化器用活塞膨胀机	日	氮液化器	氮气	300	1.5		20		80	60 50	200		氟塑料活塞环
气阀内传动膨胀机	法	氢制冷机	氮气		0.9	0.16	50~80		60	30 42	300		塑料活塞环
无阀膨胀机	印度	气体制冷机	空气		1	0.103	303	133		30 36	120		
ДВД-6	苏	КЖ1000型 制氧装置	空气	3000	17	0.6	238		80	155 290	145	10000	金属活塞环
ДВД-10	苏	制氧装置	空气	78	20	0.6	293	163	65~70	28 130	320	480	金属活塞环
ДВД-13	苏	AKTC-70M型 制氧装置	空气	340	20	0.6	293		70	50 160	370	865	金属活塞环
试验用直流式膨胀机	苏		空气	450	18	0.6	293		70~75	40 60	1200	130	金属活塞环
试验用自由活塞膨胀机—压缩机	苏		空气	195	20	0.6	270		70	54 40~50	1500	250	氟塑料活塞环
氢液化活塞膨胀机	苏	350L氮液化器	氢气	800	10~15	0.6~4	48~42		70~80	40 100	400	45	皮 碗
ГДСД-1	苏	Г-2型 8L氮液化器	氮气	5~8	2.2	0.13	28	12	80	35 35	400		迷 官
ГДСД-11(一级)	苏	氮制冷机	氮气	75	1.8	0.092	80	40	60	28 40	230		迷 官
ГДСД-11(二级)	苏	氮制冷机	氮气	15	1.7	0.086	20	10	70	20 34	230		迷 官
ГДСД-5	苏	制冷量4kW 氮制冷机	氮气	400	2.5	0.2	27~25	14~11	75~80	110 140	340		无油滑活活塞环
ГД80/80	苏	氮制冷机	氮气	80~100	2.6	0.16	25.5	12.4	80	80 80	370		皮 碗
ГДСД-2M	苏	Г-45 40L氮液化器	氮气	48~77	2~4	0.12~0.14	28~24	13.6~11.5	75	80 75	310~400	115	迷 官

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,透平膨胀机的气体流量下限不能太小,一般约为标态 $100\sim 200\text{ m}^3/\text{h}$,而活塞膨胀机则没有气体流量下限的限制,它的最大气体流量也远远超过了透平膨胀机的气体流量下限。因此,虽然透平膨胀机正在向中小型发展(目前已用在 $12\sim 15\text{ L/h}$ 氮液化器及标态 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 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地位。

图1-3列出了活塞膨胀机和透平膨胀机的适用范围。

根据低温装置制冷参数的不同,活塞膨胀机分为高压、中压、低压三种膨胀机。通常,工业上用的高压活塞膨胀机,其气体流量为标态 $50\sim 3000\text{ m}^3/\text{h}$,进气压力为 $16.2\sim 20.3\text{ MPa}$,进气温度为 $240\sim 300\text{ K}$,排气压力为 $0.6\sim 1.5\text{ MPa}$;中压活塞膨胀机,进气压力为 $2.0\sim 6.0\text{ MPa}$,进气温度为 $120\sim 220\text{ K}$,排气压力为 0.6 MPa ;低压活塞膨胀机的进气压力为 $0.5\sim 1.5\text{ MPa}$,进气温度为 $20\sim 130\text{ K}$,排气压力为 $0.12\sim 0.14\text{ MPa}$ 。

在低温装置中,高压活塞膨胀机多用于液化装置;中压活塞膨胀机用于中、小型空分装置;低压活塞膨胀机应用较少,国外某些小型低温装置有所采用,如标态 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 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

社会需要是推动科学技术发展的动力。活塞膨胀机作为一种制取低温冷量的低温机械,其发展与整个低温技术的发展紧密相连。随着工业部门和科学研究对低温技术提出不同要求,活塞膨胀机也在不断发展。目前已出现了各种类型的活塞膨胀机,如空分装置用的空气膨胀机,氮气膨胀机,氮液化器用的氮气膨胀机,合成氨尾气中提氢用的氢气膨胀机,两相膨胀机等。

凡是活塞膨胀机都是利用容积变化使气体膨胀对外做功而制取冷量并获得一定温度级的低温流体机械。因此活塞膨胀机的主要问题是使有限的容积产生最多的冷量和得到所需温度级的低温流体。为此要研究各种工质的制冷循环、机器的绝热措施和减少冷损的方法,以提高活塞膨胀机的性能。对不同的活塞膨胀机除了上述共性的问题外,还有自己的特殊问题,如氢活塞膨胀机中氢气的密封防爆、两相膨胀机中液体的排出收集等。活塞膨胀机的发展就是围绕这些问题进行的。

早在19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回热器和膨胀机的装置上液化空气,1885~1887年索耳非重新进行了这一工作,但未取得预期的效果。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成功地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。它应用于氨液化器上。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氨液化器。

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氨液化器(产量均为0.4 L/h液氨)。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圈内余隙容积的充填困难等原因,限制了它的发展。

约在1956~1957年,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。这种机器只有一个进气阀,排气阀是通过气缸壁上的圆形小窗口进行的。由于降温后的低温气体不必回流通过气缸头部的排气阀流出,因此,其绝热效率得到改善,机器的转速也可提高,试验表明,这种单流式活塞膨胀机的性能是比较理想的。

1962年联邦德国工程师多尔和埃德尔研制了无阀活塞膨胀机。这种膨胀机的进、排气阀完全利用气缸上的进、排气窗口进行。其启闭由活塞在气缸中的位置来确定。其结构简单,由工质本身进行气体润滑,转速可达1000~1700 r/min,但制造精度要求高。其他国家也相继进行了这方面的研究,近年来已出现两级无阀活塞膨胀机。

60年代中期,一些国家开始研制一种自由活塞膨胀机—压缩机。这种膨胀机取消了传统的曲柄连杆机构,整个机器有一个膨胀气缸、一个压缩气缸,两缸的活塞通过活塞杆和传动机构相连。它的正行程是依靠进入膨胀机气缸的气体膨胀来实现的,而反行程则是靠压缩机余隙容积中残留的气体膨胀来完成的。这种膨胀机有较好的动力平衡。

70年代末期以来,还出现了一种螺杆式膨胀机。这种膨胀机是利用互相啮合的转子(螺杆)在机体内作回转运动使容积变化而实现膨胀过程的。

与此同时,许多国家进行了气、液两相活塞膨胀机的研究。美国的柯林斯已在1969年研制成了氨两相活塞膨胀机。这种膨胀机使用氨气作为工质,因为进入气缸的高压氨气热容量与液氨潜热的比值要比空气的大得多,不会出现空气活塞膨胀机中那种情况:因为气缸中出现液体,液体至气缸壁放热系数增加,导致内部热交换冷损加大;而且因有少量液体存在,使进气温度显著降低,气体流量增加而制冷量不变。这样,单位气体流量所作的功显著降低,这些都使膨胀机的绝热效率降低。

苏联和其他国家也进行过两相膨胀机的研究。据称,用两相活塞膨胀机代替节流阀的制冷循环,其总效率可以提高20%~30%。

在研究、改进活塞膨胀机整体结构的同时,对活塞膨胀机的配气机构也进行了研究和改进,如把气阀外传动改为气阀内传动。这样,与传统的凸轮轴外传动的活塞膨胀机相比,它结构简单,工作可靠。进、排气阀分开配置,可以增加通流面积、减少节流损失;气流单向流动,可以降低流动损失、减少热交换,而且可以提高膨胀机的转速。目前,一些国家都在氨、氮制冷机和液化器的活塞膨胀机上采用这种结构。

此外,还出现了在活塞膨胀机的余隙容积中安装回热器的结构方案。这种机器虽然保留了传统的进、排气机构,但是在给定的压力条件下,可以减小机器尺寸,改善工作性能。

在发展活塞膨胀机的同时,也开展活塞膨胀机的理论研究。在活塞膨胀机发展的早期,主要是借用活塞蒸汽机的理论研究和实验资料,来弥补活塞膨胀机研究的不足。当时,设计活塞膨胀机大都利用这些原始资料。随后,在此基础上才出现了活塞膨胀机的工程计算方法。与此同时,也分别研究了活塞膨胀机的各项冷损。在这些计算和分析中,工质的焓同样被作为基本特性参数。50年代初逐渐完善了活塞膨胀机工作过程的理论研究。这种研究大致沿两个基本方向进行:利用工质的焓作为基本特性参数来分析膨胀机的理论循环;从分析各种冷损入手,导出计算膨胀机理论循环焓的变化关系,从而建立了活塞膨胀机的计算方法。60年代,开始建立研究活塞膨胀机工作性能的数学模型,并在数字计算机上模拟其工作过程,将其结果与样机上的结果进行比较分析。

近年来,对活塞膨胀机的研究,是在工质的变质量系统的热力学基础上研究膨胀机的工作过程。此外,对极低温条件下工作的氦活塞膨胀机进行了大量的研究,确定了工质与气缸壁内部再生热交换形成的冷损及其对效率的影响,并作出了氦活塞膨胀机的温度指示图,而且根据它模拟了活塞在气缸工作容积中的工作过程。对气、液两相氢、氦活塞膨胀机也进行了理论研究,现已提出了气、液两相低温活塞膨胀机工作过程的数学模型。

目前,活塞膨胀机的研究发展工作主要是:完善设计计算方法,模化不同示功图的机器进行优化设计;研制各种新型活塞膨胀机,特别是两相低温活塞膨胀机;研究测量活塞膨胀机性能的低温传感器;用电子计算机模拟和分析活塞膨胀机的实际工作过程,用微型电子计算机控制活塞膨胀机等。

我国的低温技术部门是新中国成立后才建立和发展起来的。从1953年开始到现在,我国的制造低温设备的气体分离和液化部门已先后生产了10多种各种类型的活塞膨胀机。其中包括氧、氮、氢、氦等工质的活塞膨胀机。1953年我国自行设计制造了为标态 $30\text{m}^3/\text{h}$ 制氧机配套的活塞膨胀机。1957年以来又相继生产了与标态 $50\text{m}^3/\text{h}$ 、标态 $150\text{m}^3/\text{h}$ 制氧机配套的活塞膨胀机。1958年研制了带活塞膨胀机的氮液化器。1961年研制了斯特林型气体制冷机。1963年试制成 $100\text{L}/\text{h}$ 氢液化设备。1966年先后生产过各种使用活塞膨胀机的移动式空气分离设备。1976年成功地设计制造了用于氮液化器的单阀活塞膨胀机。1981年研制了双级回热式氮液化设备。1983年研制了合成氨尾气低温分离提氢设备。此外,从事低温科研的部门也研究了许多低温设备,如各种类型的气体制冷机,快中子冷却装置等。目前,我国的制冷和低温技术正在朝现代化方向发展。

第二章 活塞膨胀机的工作原理

§2-1 活塞膨胀机的工作过程

活塞膨胀机的工作原理与过程, 是使被压缩气体经过膨胀机, 在气缸内膨胀, 推动活塞对外做功, 并使气体温度降低, 同时制取冷量。

图2-1为活塞膨胀机的基本结构及其热力过程的示意图。

压缩气体通过配气机构进入气缸中进行膨胀, 并推动活塞运动, 通过曲柄连杆机构将活塞的往复运动变成曲轴的旋转运动而对外做功。与此同时, 气体本身产生强烈的冷却效应, 使气体的温度下降, 比焓降低。

膨胀机气缸内的工作过程, 是由充气、进气、膨胀、驱气、排气及压缩等过程所组成。膨胀机曲轴每转一转, 这些过程便重复一次, 也就是完成了一个循环。在每次循环中, 重复这些工作过程。过程的这种持续性用示功图表示。示功图的特性点是由配气机构决定的。配气机构已定后, 在相同工况下, 示功图上各特性点的参数在工作过程中是不变的。示功图是用专门的示功器将气体在气缸内压力和体积的变化关系描绘在图上。

图2-2是某中压活塞膨胀机在试验时实际测出的示功图。在示功图上, 可以清楚地反映出气体在气缸内的工作情况。但这种实际工作过程, 影

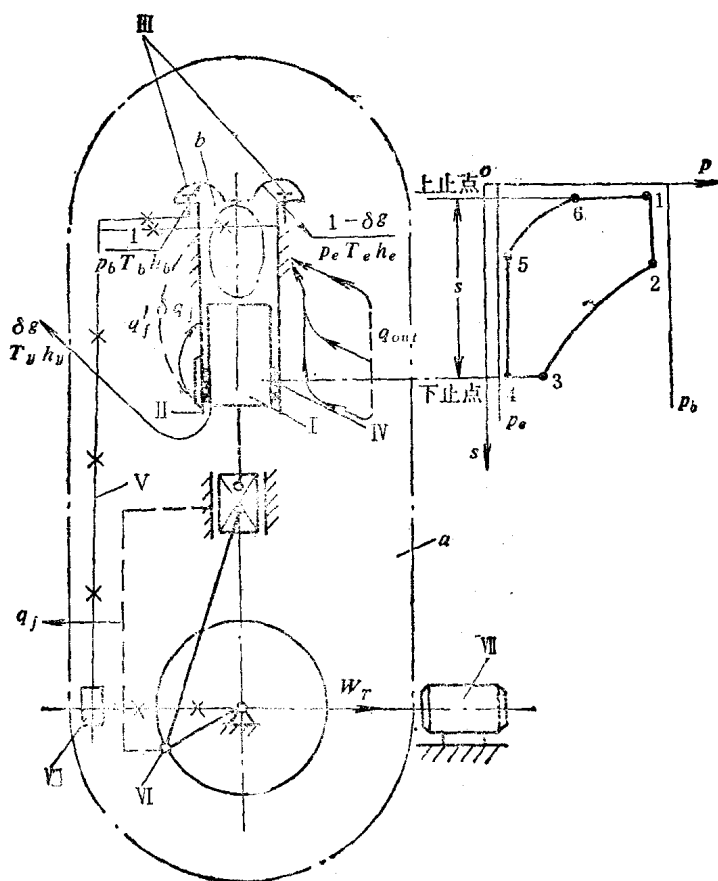


图2-1 活塞膨胀机基本结构和热力过程

I—活塞 II—气缸 III—配气机构 IV—活塞密封 V—配气机构传动链 VI—运动机构 VII—制动机构 VIII—调节机构 1—2为进气过程 2—3为膨胀过程 3—4为驱气过程 4—5为排气过程 5—6为压缩过程 6—1为充气过程 热力系统, a—活塞膨胀机的绝热部分 b—活塞的工作容积 q_{out} —外界传入热流密度 q_f —摩擦热流密度 T_g, h_g —进膨胀机气体的温度和比焓 δg —泄漏气体量 W_r —制动功 p_b, T_b, h_b —进膨胀机气体的压力、温度和比焓 p_e, T_e, h_e —出膨胀机气体的压力、温度和比焓

响因素较多。因此，直接由示功图进行分析计算比较困难。

为了分析活塞膨胀机的工作循环，现对于一些标志活塞膨胀机工作过程的性能指标加以说明。

在下面的说明和公式中，量的符号的意义为： p ——压力； V ——体积； v ——比容； T ——温度； s ——比熵； H ——焓； h ——比焓； c_v ——定容比热容； c_p ——定压比热容； λ ——导热系数； R ——气体常数； z ——气体压缩系数； k ——定熵指数； m ——循环气体质量。

一、绝热比焓降 Δh_s

绝热比焓降是气体在等熵绝热膨胀开始及终了时的最大比焓差。它仅决定于膨胀过程的气体参数 p_b 、 T_b 和 p_e 。这些参数一旦给定，就可根据 $T-s$ 图（如图1-1所示）来确定：

$$\Delta h_s = h_b - h_{e_s} \quad (2-1)$$

它也是理想膨胀机的最大单位制冷量。用它作为评定膨胀机性能好坏的标准。

二、实际比焓降

实际比焓降是实际单位制冷量。它是膨胀机实际循环中进口气体和排出气体的比焓差，即

$$\Delta h_e = h_b - h_e \quad (2-2)$$

进口气体的比焓 h_b 和排出气体的比焓 h_e 可根据进膨胀机前气体的压力 p_b 、温度 T_b 和排出膨胀机后气体的压力 p_e 、温度 T_e ，在 $T-s$ 图（如图1-1）上确定。由图1-1可以看出，在一定的条件下，实际比焓降 Δh_e 越大，则 e 点越接近 e_s 点。这表明膨胀机的效率也越高。

三、单位冷量损失 $\Delta h_{l,t}$ 和相对冷量损失 $\frac{\Delta h_{l,t}}{\Delta h_s}$

图1-1表示，在理想情况下，膨胀终了气体的比焓可达到 h_{e_s} 。实际上，由于膨胀和压缩不完全、余隙容积充气、进排气阻力、摩擦热、外界传热和内部热交换等各种因素的影响，实际排出气体的比焓只能达到 h_e 。两者之间的差值称为膨胀机的单位冷量损失，即：

$$\Delta h_{l,t} = h_e - h_{e_s} \quad (2-3)$$

它相当于图1-1中的面积 $ae_s eb$ 。它是各种因素引起冷量损失的总的反映。在一定条件下，冷量损失越大，表明膨胀机排气温度也越高。

冷量损失有时用相对冷量损失 $\frac{\Delta h_{l,t}}{\Delta h_s}$ 表示。它是单位冷量损失与理想单位制冷量的比值。

四、绝热效率 η_s

膨胀机的绝热效率是膨胀机实际比焓降与绝热比焓降之比值。

$$\eta_s = \frac{\Delta h_e}{\Delta h_s} = 1 - \frac{\Delta h_{l,t}}{\Delta h_s} \quad (2-4)$$

膨胀机的进气压力 p_b 、进气温度 T_b 和排气压力 p_e ，一般都是由低温装置的工艺流程决定的。在 p_b 、 T_b 和 p_e 已定时，绝热比焓降 Δh_s 也就确定了。所以，绝热效率较高，则表明冷量

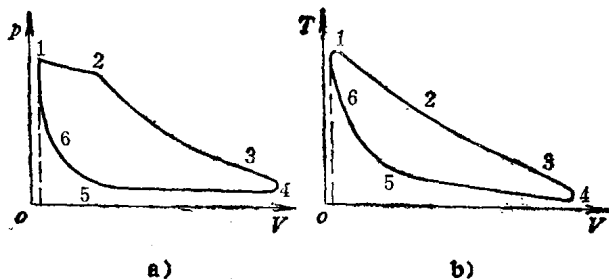


图2-2 某活塞膨胀机实测示功图

a) 压力示功图 b) 温度示功图

损失 Δh_e 较小, 膨胀终了气体温度较低, 膨胀机的工作过程比较完善。因此, 效率 η_e 是衡量膨胀机工作好坏的一个重要指标。

五、膨胀机循环气体量 m 及总制冷量 Q_e 。

在膨胀机的一个工作循环中, 流经膨胀机的气体质量 m 称为循环气体量。它由低温装置流程设计计算确定。

在设计活塞膨胀机时, 根据给定的循环气体量确定气缸尺寸。循环气体量的大小直接影响膨胀机总制冷量的大小。

在运转过程中, 通过膨胀机的气体流量, 可按不同工况进行调节。

膨胀机的一个循环的总制冷量, 按下式计算

$$\begin{aligned} Q_e &= m \Delta h_e \\ &= m \Delta h_e \eta_e \\ &= \Delta H_e \eta_e \end{aligned} \quad (2-5)$$

六、指示功率 P_i 、制动功率 P_b 。

活塞膨胀机在一个循环中, 发出的功称为指示功, 按一个循环的时间平均, 则叫指示功率 P_i 。根据热力学第一定律, 如果膨胀气体与外界没有热交换, 那么, 循环制冷量就等于循环的指示功, 即示功图的面积。但是, 在实际工作过程中, 由于有摩擦热及外界传热的影响, 使得膨胀机的指示功增加, 膨胀终了气体的比焓也增大, 循环制冷量则随之减少, 这时, 循环指示功大于循环制冷量。

以膨胀机作为一个孤立系统, 列出能量平衡方程式

$$Q_e = W_e - Q_{out}$$

$$W_e = W_i - Q_f$$

经变换整理得:

$$Q_e = W_i - Q_f - Q_{out} \quad (2-6)$$

式中 W_e ——轴功;

W_i ——指示功;

Q_f ——摩擦热;

Q_{out} ——外界传热。

因此, 在实际工作过程中, 膨胀机的指示功并不等于制冷量。只是在一定条件下, 指示功的大小可以反映制冷量的大小。

近代活塞膨胀机的摩擦热和外界传热的数值, 通常不超过指示功的10%。因而, 可以根据示功图的变化, 来近似地判断一些因素对膨胀机制冷量的影响。

膨胀机发出的功率, 通过曲柄连杆机构传给外界制动设备, 例如发电机、压缩机及泵等。这些制动设备的制动功率, 一般可按下式近似估算

$$P_b = (0.7 \sim 0.8) Q_e n \quad (2-7)$$

§2-2 活塞膨胀机工作过程的理论基础

一、等熵膨胀过程的制冷效应

活塞膨胀机的理想工作过程是气体在气缸中绝热膨胀、对外做功, 而其熵不变, 膨胀后

气体的压力和温度均降低，并同时制取冷量。

在绝热膨胀时，因压力的微小改变而引起的温度变化，称为微分等熵效应。用微分等熵效应系数 α_s 来表示

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \quad (2-8)$$

根据公式

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

因为是等熵过程，故 $ds = 0$ 。

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp = 0$$

经整理后得：

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{c_p} \quad (2-9)$$

对于任何气体，因为 $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ 恒大于零，所以 α_s 总是大于零的正值。因此，绝热膨胀过程总是产生冷效应，膨胀后气体的温度永远是降低的。

那么，为什么压缩气体在膨胀机中绝热膨胀对外做功时，其总的能量会减少，而温度又下降呢？这是因为：

(1) 设单位质量气体在膨胀前其状态为 p_s 、 T_s 、 v_s 、 h_s ，经绝热膨胀后其状态为 p_e 、 T_e 、 v_e 、 h_e ，并输出外功 W_t 。

根据热力学第一定律列出系统在状态变化过程前后的能量平衡方程式

$$h_s = h_e + W_t$$

则

$$\Delta h_s = h_s - h_e = W_t \quad (2-10)$$

从式 (2-10) 可以看出：气体绝热膨胀所作的功等于气体的比焓降。

由于压缩气体在绝热（即没有外界热量交换）的条件下膨胀，并带动制动装置，而消耗了压缩气体的能量。这样，使气体的内能大幅度下降。因此，相对于外界而言，若气体温度要回复到膨胀前的温度，气体具有从外界吸取相当于输出功 W_t 的能量的能力。这就是制冷量。

(2) 压缩气体在绝热过程中膨胀时，压力降低，体积增大，气体分子之间的平均距离增大。由于分子具有吸引力，当它们之间的距离增大时，为了克服吸引力，则必须做功，因而分子间的位能增加。但绝热过程时外界无能量供给。因此，根据能量守恒原理，它的分子的位能的增加，就只能来自分子动能的减少，即部分动能转变为位能。而由气体分子的运动理论可知，气体分子的平均动能是温度的函数。分子动能的减少，其宏观表现就是气体温度的降低。

综上所述，可见气体绝热膨胀输出外功使气体内能大大减少；膨胀过程中为克服分子引力所需的功又使分子平均动能减少。这些均使气体温度显著下降。所以，绝热膨胀总是使气体降温并制取冷量。