

高等学校教材

透平膨胀机

(修订本)

西安交通大学 计光华 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校教材

透平膨胀机

(修订本)

西安交通大学 计光华 编



机械工业出版社

本书为1982年出版的《透平膨胀机》一书的修订本。该书的重点为系统分析空分装置透平膨胀机的基本原理，列举了大量设计计算例题以及各类透平膨胀机的结构等。本书除保留其特点外还根据近十来年的技术发展，补充了多组分工质透平膨胀机、增压透平膨胀机、能量回收透平膨胀机的设计和性能分析。此外还补充了强度计算一章，使内容更加完善。

本书为高等学校《制冷与低温》专业的基本教材之一，也可作从事制冷与低温技术及废余能利用的科技人员的参考书。

透 平 膨 胀 机

(修 订 本)

西安交通大学 计光华 编

责任编辑：王存新 责任校对：张 佳

责任印制：尹德伦 版式设计：霍永明

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登记证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 415 千字

1982年2月北京第一版

1989年11月重庆第二版·1989年11月重庆第三次印刷

印数：6,601—8,100 定价：3.45元

ISBN 7-111-01777-3/Tk·75 (课)

前 言

本书是在1982年出版的高等学校试用教材《透平膨胀机》的基础上,根据1984年5月全国高等工业学校流体动力机械专业教材分编审委员会第二次委员(扩大)会议制订的教学计划和教学大纲以及审定的修改大纲修订的。本书是《制冷设备与低温技术》专业教材,总学时为65h。

近十多年来,透平膨胀机的应用范围有了很大的扩展,有的国家能量回收用透平膨胀机的总功率已超过低温制冷用透平膨胀机。因此,本书除继续以空分装置透平膨胀机为主安排教材的主要内容外,对多组分工质热力性质及其计算,能量回收透平膨胀机的设计计算及结构特点作了较多的补充,以适应我国今后发展的需要。

考虑到学生在学习《透平膨胀机》课程后,需要进行课程设计和毕业设计,修订本增加了“透平膨胀机零部件的强度计算”这一章,适当补充了强度计算方面的知识。此外,还增加了相似模化法、增压透平膨胀机等内容。

对于三元流动和两相流动这部分内容,考虑到一般院校只作为选修课讲授,而且这部分内容比较深,又已独立编为《透平膨胀机中的三元流动与两相流动》一书,由西安交通大学出版社于1989年正式出版,因此修订本中不再收入。

本版仍保持了第一版时所列举的大量例题和大型综合性例题,使学生在学习了本课程后基本上掌握了一台透平膨胀机设计计算的主要内容。此外,对油田气透平膨胀机、氟里昂透平膨胀机的计算也作了详细介绍。

书末附录中列出了国内外一部分透平膨胀机的主要参数和比较详细的参考文献目录,可供读者进一步查阅参考。

本书除供《制冷与低温》专业学生作教材外,还可供从事制冷与低温技术及废余能利用的科技人员参考。

本书由华中理工大学低温技术教研室高原审阅,对书稿提出了很好的建议,兄弟院校及有关企事业单位对本书的修改提供了很有用的意见和资料,编者在此向这些同志致以谢意,并欢迎广大读者提出批评与建议。

编 者

1988年7月

目 录

第一章 绪论.....	1	§ 6-2 空气透平膨胀机热力计算方法与 例题.....	114
§ 1-1 透平膨胀机的应用.....	1	§ 6-3 油田气透平膨胀机热力计算 举例.....	129
§ 1-2 透平膨胀机的分类及其 典型结构.....	9	§ 6-4 氟里昂透平膨胀机热力计算 简介.....	138
§ 1-3 国内外透平膨胀机的发展概 况.....	12	第七章 透平膨胀机制动器的工作 原理.....	141
第二章 透平膨胀机工质的热物理 性质.....	15	§ 7-1 制动器的作用及类型.....	141
§ 2-1 膨胀工质的组成及分类.....	15	§ 7-2 制动风机及增压器的工作原理 及其特性.....	141
§ 2-2 膨胀工质的状态方程式.....	16	§ 7-3 制动发电机的特性.....	154
§ 2-3 膨胀工质的热力学函数.....	25	§ 7-4 油制动器.....	160
§ 2-4 实际气体热力学函数电算 举例.....	27	第八章 透平膨胀机的特性曲线及 调节.....	161
第三章 透平膨胀机的基础理论.....	34	§ 8-1 透平膨胀机的特性曲线与变 工况.....	161
§ 3-1 实际气体的过程方程式.....	34	§ 8-2 调节方法.....	163
§ 3-2 控制容积与随体微商.....	37	§ 8-3 调节方法与制动方式的配合.....	170
§ 3-3 流量连续方程式.....	39	第九章 透平膨胀机零部件的强度 计算.....	171
§ 3-4 动量方程式.....	41	§ 9-1 透平膨胀机零部件上的作用 力.....	171
§ 3-5 能量方程式.....	44	§ 9-2 轮盘的强度计算.....	172
第四章 一元稳定流动单相透平膨胀 机原理.....	47	§ 9-3 叶片和轮盘的振动.....	175
§ 4-1 气体在蜗壳中的流动.....	47	§ 9-4 轴的强度计算和转子的临界 转速.....	180
§ 4-2 气体在喷嘴中的流动.....	52	§ 9-5 高速轻载油轴承.....	190
§ 4-3 气体在工作轮中的流动.....	66	§ 9-6 气体轴承.....	199
§ 4-4 气体在扩压器中的流动.....	72	§ 9-7 透平膨胀机中应用的材料.....	201
第五章 透平膨胀机的基本损失与 效率.....	75	第十章 透平膨胀机的结构.....	204
§ 5-1 损失与效率的分类.....	75	§ 10-1 透平膨胀机结构的特点.....	204
§ 5-2 损失与效率的计算.....	77	§ 10-2 透平膨胀机机组的组成.....	205
§ 5-3 在比焓-比焓图上的膨胀过程、 制冷量与机械功.....	83	§ 10-3 透平膨胀机典型结构的分析.....	209
§ 5-4 透平膨胀机的基本参数.....	85	§ 10-4 其他型式的空分用透平膨 胀机.....	227
§ 5-5 最佳参数选择法.....	87		
§ 5-6 相似模化法.....	96		
第六章 透平膨胀机的热力计算.....	113		
§ 6-1 透平膨胀机设计计算的内容.....	113		

§ 10-5 氧、氮透平膨胀机.....	235	数	255
§ 10-6 空气制冷机用的透平膨胀机.....	239	附表8 国产天然气、油田气透平膨	
§ 10-7 化工尾气及油田气透平膨胀		胀机的主要参数.....	256
机.....	242	附表9 美国部分天然气、油田气透	
附录1 单位换算表	247	平膨胀机的主要参数.....	257
附录2 常用符号及其单位.....	248	附表10 部分飞机空调用透平膨胀机	
附表1 国产全低压空分装置用透平		的主要参数.....	258
膨胀机的主要参数.....	251	附表11 苏联TC-P型径向叶栅相对	
附表2 增压流程空分装置用透平膨		坐标.....	258
胀机的主要参数.....	252	附图1 空气的 $Z-p$ 图.....	259
附表3 国外全低压空分装置用部分		附图2 氮的 $Z-p$ 图.....	259
透平膨胀机的主要参数.....	253	附图3 标准氢的 $Z-p$ 图.....	260
附表4 国内外部分空分用中压透平膨胀机		附图4 氦的 $Z-p$ 图	260
的主要参数.....	253	附图5 气体的动力粘度	
附表5 国内外部分空分用高压透平膨胀		($p=0.1\text{MPa}$)	260
机的主要参数.....	254	附图6 TC-P叶型的气流角.....	261
附表6 国内外部分氢透平膨胀机的		附图7 TC-P叶型的损失	262
主要参数	255	参考文献.....	263
附表7 部分氮透平膨胀机的主要参			

第一章 绪 论

§ 1-1 透平膨胀机的应用

大家知道,绝热等熵膨胀是获得低温的重要效应之一,也是对外作功的一个重要热力过程,而透平膨胀机则是实现接近绝热等熵膨胀过程的一种有效机械。目前,从空调设备、低温环境模拟到空气与多组分气体的液化分离以及极低温氢、氮的液化制冷,都有透平膨胀机的实际应用。

在能源的综合利用方面,透平膨胀机作为回收能量的机械也得到了广泛的应用。例如高炉气透平膨胀机、石油催化裂解再生气透平膨胀机、化工尾气透平膨胀机、烟气透平膨胀机、天然气透平膨胀机、液化天然气冷热发电透平膨胀机、排热回收用的朗肯循环透平膨胀机等。

表1-1给出了从1970~1987年日本生产的各种用途膨胀机的统计资料,其中除了个别的场合采用螺杆膨胀机以及在极低温中采用部分活塞膨胀机之外,绝大多数都是径流式或轴流式透平膨胀机。从表中可以看出,从生产的台数来看,用于空气分离、极低温、轻烃回收等低温领域的约占65%,用于能量回收的约占35%。但从回收的功率来看,用于低温制冷与液化的膨胀机只占总功率的7.63%,其余90%以上的功率都属于能量回收膨胀机,而其中高炉气发电透平膨胀机一项竟高达65%以上。由此可见,日本对能量回收是十分重视的。当然,这是一个比较突出的例子,其他国家不完全相同。我国还没有确切的统计资料,据不完全估计,到目前为止,透平膨胀机生产的台数已达1000台,而用于空气分离的占90%左右,用于能量回收的还不到5%。从回收的功率看,用于空气分离的占50%左右,用于能量回收的约占40%。总回收功率约10万kW,单机平均功率约100kW。因此,除继续发展在低温制冷领域中的应用之外,在我国,进一步扩大透平膨胀机在能量回收装置中的应用将有广阔的前景。

表1-1 日本膨胀机应用的概况(1970~1987)^[1]

序号	用 途	台 数		功 率		单机平均功率 kW
		台 数	百分比	kW	百分比	
1	空气分离	256	56.02	55445	5.47	217
2	高炉气发电	57	12.47	662805	65.42	11628
3	石油催化裂解再生气	12	2.63	80845	7.98	6737
4	液化天然气冷热发电	20	4.38	57733	5.70	2887
5	化工尾气	33	7.22	95856	9.46	2905
6	轻烃回收	16	3.50	21711	2.14	1357
7	新能源开发	6	1.31	2152	0.21	359
8	排热回收	8	1.75	31590	3.12	3948
9	极低温	27	5.91	203	0.02	7.5
10	其他	22	4.81	4853	0.48	221
合 计		457	100	1013184	100	2217

图1-1给出了飞机座舱空气调节用的带透平膨胀机的空气制冷系统。右端透平膨胀机的工作气体来自飞机涡轮喷气发动机的增压空气1，该气体经过外来冲压空气2的冷却。膨胀后的低温空气3被送到座舱去供空气调节使用。膨胀机发出的功率带动另一端的轴流风机，用它来抽吸冲压的冷空气。

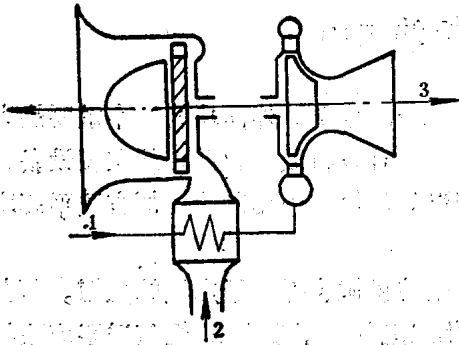


图1-1 飞机座舱空调用透平式空气制冷系统

1—来自涡轮喷气发动机的增压空气 2—迎面冲压空气 3—低温空气（去座舱空调室）

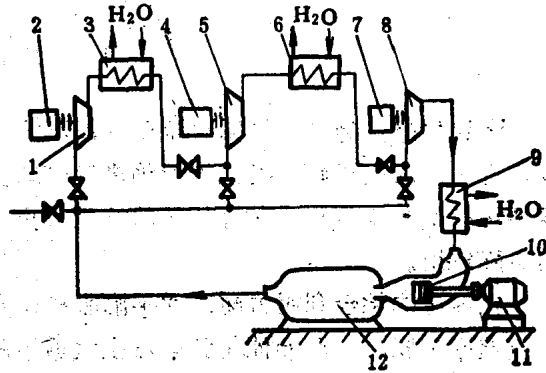


图1-2 大型低温环境模拟设备流程

1、5、8—透平压缩机 2、4、7—电动机 3、6、9—水冷器 10—轴流式透平膨胀机 11—发电机 12—试验腔

在大型低温环境模拟装置中，常常采用带透平膨胀机的空气制冷循环。图1-2给出了实现这种循环的一种流程。通过对三台透平压缩机1、5、8的不同组合，可以获得透平膨胀机10的从3.5~30的不同膨胀比。相应地，膨胀后的空气温度可以在 $+20^{\circ}\text{C}$ 到 -60°C ~ -70°C 范围内变化。透平膨胀机的气体流量可达 $50000\sim 200000\text{kg/h}$ 。由于流量大，该流程中选用了轴流式透平膨胀机。每台透平压缩机的后面都装有水冷却器3、6、9。透平膨胀机发出的功率在这里利用发电机作为制动器来吸收，并转换为电能输出。有时也可以把作为制动器的发电机11与作为透平压缩机动力的电动机2同轴相连，以减少总功率消耗。通过试验腔后的空气仍可被压缩机吸入，进行循环。此外也可从大气中吸入进行补充。后者必须进行干燥处理，以防止大气中的水蒸气在膨胀过程中冷凝。

对于需要很低温度的宇宙环境模拟设备，则可以采用氮制冷循环。

采用透平膨胀机的气体液化和低温分离装置就更普遍了。图1-3提供了一台氮液化装置的原理流程。其中液化回路的氮气由中压氮压缩机组2压缩到 2.5MPa ，依次经过第一级预冷器4、液氮预冷器5及第三、四、五、六、七级换热器6、7、8、9、10的冷却，然后经焦-汤阀11节流到约 0.1MPa 产生液氮。液氮可以从排放阀放出，而气氮逆向依次通过换热器10、9、8、7、6、4复热到常温，再送入压缩机组2。液化部分所需要的氮气由气柜3补充。制冷回路的氮气由低压氮压缩机组1压缩到 0.8MPa ，经过第一预冷器4、液氮预冷器5及第三换热器6的冷却后，一部分氮气进入第一级透平膨胀机14中膨胀，另一部分继续被第四、五级换热器7、8冷却，然后进入第二级透平膨胀机13中膨胀。膨胀后的低温氮气分别并入液化回路的返回气中。

图1-4则为用于全低压空气分离装置中的一种典型增压流程。空气由大气吸入，经由透平压缩机1压缩，经过分子筛吸附器3清除水分与二氧化碳。为了增强吸附能力，可在吸附器前增设氟里昂预冷器2。吸附后的空气大部分经板式换热器4冷却后送入精馏塔8的下部，分离后的氮气和氧气返回板式换热器，经复热后送出装置。另一部分空气首先进入增压器6增

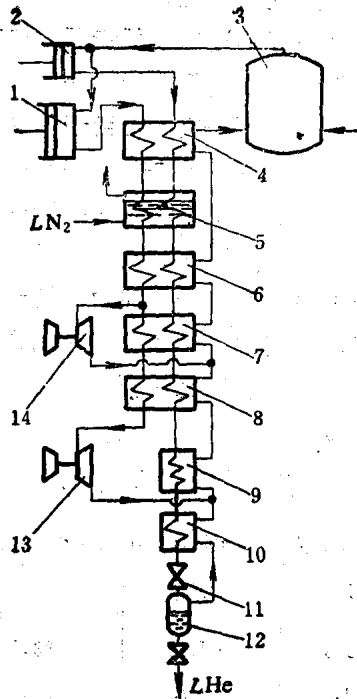


图1-3 氮液化装置的原理流程

1—低压氮压缩机 2—中压氮压缩机 3—气柜 4—第一级预冷器 5—液氮预冷器 6、7、8、9、10—第三、四、五、六、七级换热器 11—焦-汤阀 12—液氮槽 13、14—透平膨胀机

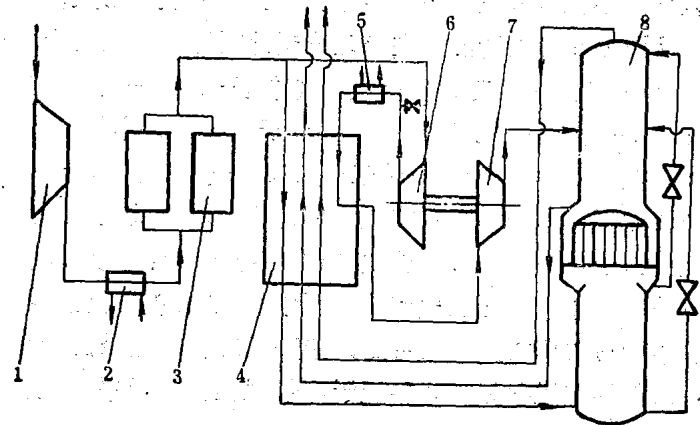


图1-4 全低压空气分离装置的增压原理流程

1—透平压缩机 2—氟里昂预冷器 3—吸附器 4—换热器 5—水冷却器 6—增压器 7—透平膨胀机 8—精馏塔

压，经水冷却器 5 后进入板式换热器，根据设计，冷却后的空气从板式换热器中部出来，送入透平膨胀机 7 膨胀制冷，然后进入上塔中部参加精馏。

上述应用透平膨胀机的所有流程中，基本上都包含有相似的理论热力循环。它由两个等压换热过程 2—3 及 4—1，一个等温压缩过程 1—2 和一个等熵膨胀过程 3—4 组成，如图 1-5 所示。这一循环是在气相区完成的，因此它是气体制冷循环的一种类型。

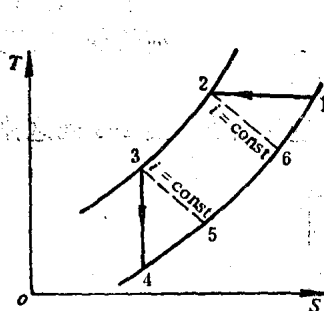


图1-5 气体制冷循环

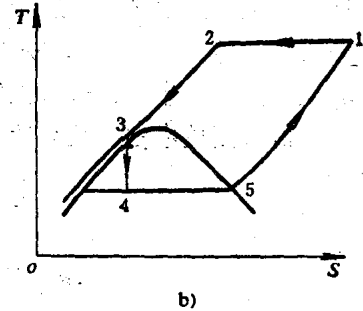
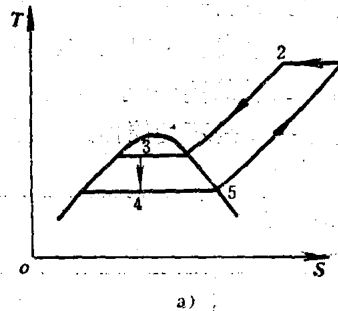


图1-6 等熵两相膨胀的制冷循环

a) 两相区内的膨胀 b) 超临界状态膨胀

此外，由于膨胀机结构性能和热力性能的不断改进，给实现两相区内的等熵膨胀创造了条件，因而有可能实现如图 1-6 所示的两相膨胀制冷循环。它们综合了蒸汽制冷循环和气体制冷循环的优点，不仅在应用单一组分工质时可以获得更高的循环效率，而且还可以实现含有不同沸点的多组分工质的等熵膨胀。图 1-6a 中所示的等熵两相膨胀中，进口状态可以是气相或气液两相。这种循环已经在天然气和油田气的液化分离装置中得到应用。图 1-6b 中，等熵膨胀的进口状态为超临界状态，膨胀后可以是液相或气液两相。这种循环特别适合于氮的液

化装置，不仅可以提高循环效率，而且可以改善膨胀前换热器的热交换过程。

从图 1-5 可以看出，在该理论制冷循环中，温度为 T_4 的工质在复热过程中所能吸收的热量为 $(i_1 - i_4)$ 。它由三部分组成：其中 $i_5 - i_4 = i_3 - i_4$ ，相当于在膨胀机中进行等熵膨胀时的比焓降； $i_5 - i_5 = i_2 - i_3$ ，在数值上相当于在换热器中的复热量；而 $i_1 - i_6 = i_1 - i_2$ ，相当于等温节流效应值。其中 $(i_5 - i_5)$ 是用来冷却膨胀气体的，属于循环内部的热交换。 $(i_1 - i_6) + (i_5 - i_4)$ 则是该循环对外能够吸收的最大热量，习惯上就把 $(i_1 - i_6) + (i_5 - i_4)$ 称为该循环的制冷量，而把相当于 $(i_5 - i_4)$ 的膨胀机中的比焓降 $(i_3 - i_4)$ 称为膨胀机的制冷量。表 1-2 给出了带有膨胀机的高、中、低压空气制冷循环中膨胀机的制冷量（相当于等熵焓降部分）在整个循环制冷量中所占的比重。可以看出，膨胀机的制冷量是占绝对优势的。因此，提高膨胀机的效率，使其膨胀过程尽可能接近于等熵过程，是透平膨胀机的重要研究课题之一。

表 1-2 膨胀机的制冷量在空气循环制冷量中的比重

循环的制冷量	低压循环		中压循环		高压循环	
	在 0.6MPa, 130K/0.14MPa 下		在 2.5MPa, 170K/0.6MPa 下		在 20MPa, 300K/0.6MPa 下	
	kJ/kg	%	kJ/kg	%	kJ/kg	%
等熵比焓降部分	41.86	89.2	51.23	79.8	169.65	83.8
等温节流效应部分	5.06	10.8	12.93	20.2	32.75	16.2
总 和	46.92	100	64.16	100	202.40	100

随着高炉的大型化、高压化，炉顶排出气体的能量越来越大，利用这些气体在透平膨胀机中膨胀，可以回收很大的电能，图 1-7 给出了高炉容积与高炉气透平膨胀机回收功率的关系。这种膨胀机回收的功率是很可观的。图 1-8 为高炉气发电的一种方案，一座容积为 4000 m^3 的高炉，可产生压力达 0.25MPa 的高炉气约 70 万 m^3/h ，回收电功率达 15000kW。空气由高炉鼓风机吸入，经过热风炉后送入高炉。炉顶气经除尘器、文氏洗涤器后被送入透平膨胀机，膨胀后的气体经电气集尘器后排出。功率由发电机回收。为了减少由于高炉负荷的变化对透平膨胀机负荷的影响，一般把 20%~40% 的高炉气通过旁通减压阀排走。

在能量回收中占有很大比重的另一类是石油催化裂解再生气能量的回收。图 1-9 是这种

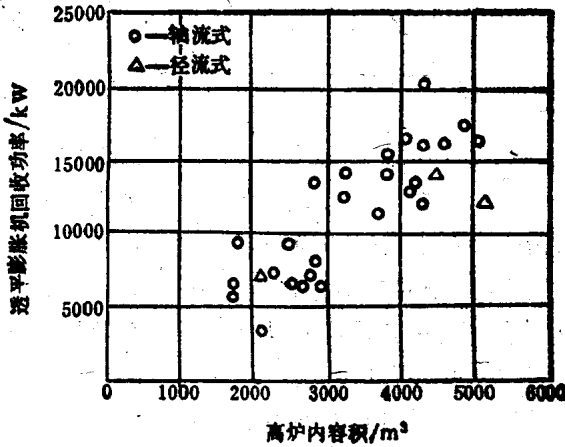


图 1-7 高炉容积与可回收功率的关系

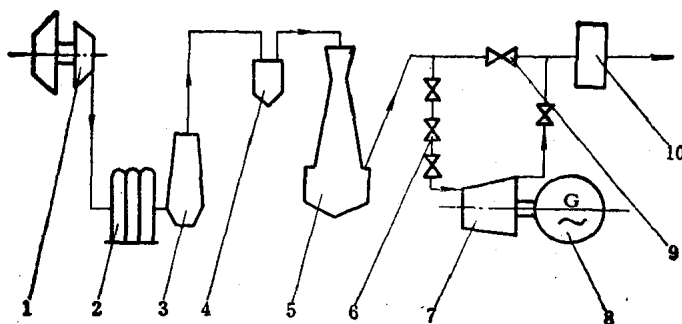


图1-8 高炉气发电原理流程

1—高炉鼓风机 2—热风炉 3—高炉 4—除尘器 5—文氏洗涤器 6—紧急关闭阀
7—高炉气透平膨胀机 8—发电机 9—减压阀 10—电气集尘器

能量回收装置的流程图。原油从反应塔的底部进入，反应后的流体由塔顶送到精馏塔进行精馏，反应后催化剂送入再生塔，由空气压缩机来的空气燃烧后经分离器，送到透平膨胀机做功。膨胀机发出的功率通过发电机、减速器和空气压缩机相连，以减少动力透平的功率消耗。由于催化剂燃烧再生后产生的燃烧气体具有 $600\sim 760^{\circ}\text{C}$ 的高温 and $0.1\sim 0.3\text{MPa}$ 的压力，而且气量很大，因此可以回收很大一部分功率，几乎达空气压缩机消耗功率的 $50\%\sim 80\%$ 。膨胀后的气体仍有 500°C 左右的余温，因此，可以在余热锅炉中再加以回收，然后经电气集尘器回收催化剂后排入大气。

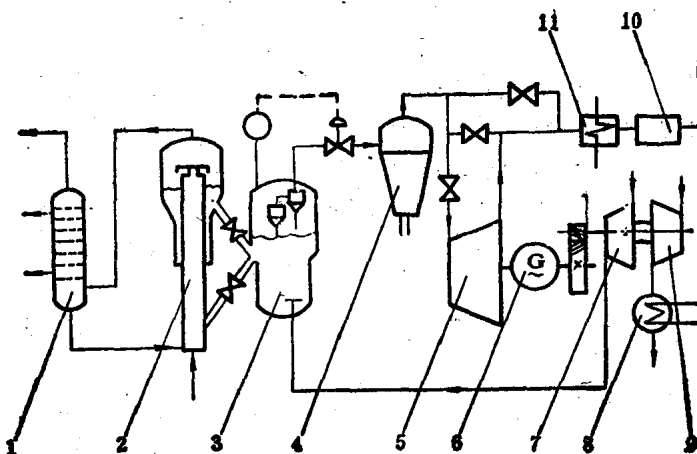


图1-9 石油催化裂解再生气发电原理流程

1—精馏塔 2—反应塔 3—再生塔 4—分离器 5—透平膨胀机 6—发电机
7—空气压缩机 8—冷凝器 9—蒸汽动力透平 10—电气集尘器 11—余热锅炉

各种化学工业中的尾气也是能量回收透平膨胀机的重要工质。图1-10提供了一种回收硝酸生产过程中产生的尾气能量的流程图。液氨在蒸发器中蒸发为氨气后，在燃烧室与来自空气压缩机的空气混合，导入排热锅炉用来加热水，水蒸气用作蒸汽动力透平的工质。冷却后的反应混合气经反应气压缩机送入吸收塔，再导入脱气塔后由底部排出成品硝酸。吸收塔产生的尾气经与催化剂分离后，送入尾气透平膨胀机回收能量，然后排入大气。这种膨胀气体具有 $300\sim 650^{\circ}\text{C}$ 的温度和 $0.6\sim 1.0\text{MPa}$ 左右的压力，因此膨胀机的回收功率也很大，可达到压缩机总耗功的 $60\%\sim 70\%$ 。

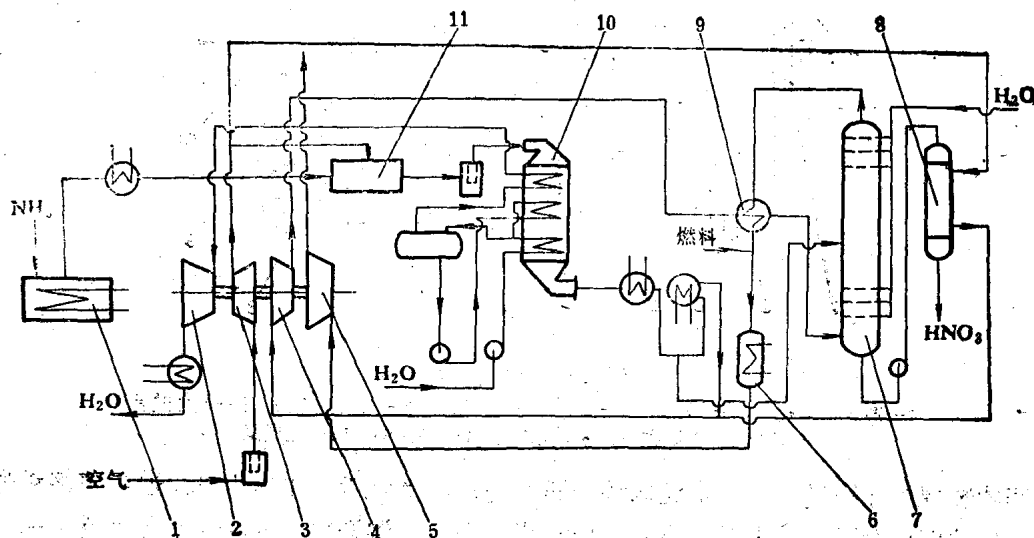


图1-10 硝酸尾气能量回收系统

1—氨蒸发器 2—蒸汽动力透平 3—空气压缩机 4—反应气压缩机 5—尾气透平膨胀机 6—催化剂分离器
7—吸收塔 8—脱气塔 9—排气冷却器 10—排热锅炉 11—燃烧室

对于应用液化天然气作为燃料的国家，利用液化天然气的冷量是很重要的，可以利用冷热进行发电。按利用的方法有直接膨胀、直接膨胀加朗肯循环以及混合工质等三种。不管哪一种方法，都要采用透平膨胀机回收功率。图1-11提供了直接膨胀加朗肯循环的液化天然气冷热电联产简图。由贮罐来的液化天然气由泵送到朗肯循环的冷凝器中作为冷却剂，同时液化天然气被气化，再经海水加热后送入透平膨胀机直接膨胀做功，然后送到管系中作为用户的天然气。朗肯循环中的二次工质在冷凝器中被液化天然气冷凝后由泵送到气化器，可用海水加热，气化后的二次工质送到朗肯循环透平膨胀机中膨胀做功。二次工质根据使用的温度、压力可以采用氟里昂R-13、R-22、R-23或丙烷等。单机功率也可高达上万千瓦。

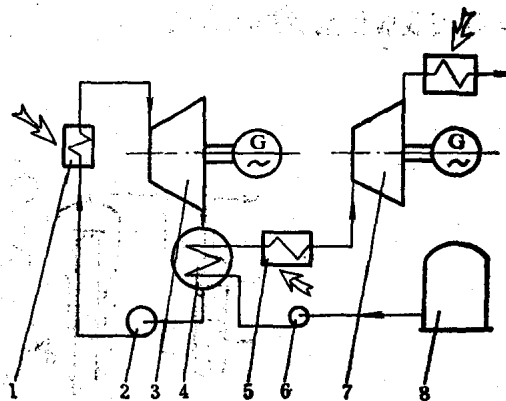


图1-11 液化天然气冷热电联产原理流程

1—二次工质气化器 2—泵 3—朗肯循环透平膨胀机
4—冷凝器 5—加热器 6—泵 7—天然气透平膨胀机
8—液化天然气贮罐

在自然界、工农业生产中甚至在日常生活中，常常存在着大量低势位能量，以往不被重视。70年代以来已逐步被人们所注意。这些能量除少部分有条件可以直接用作膨胀工质在膨胀机中回收外，绝大部分都要利用中间介质来实现。这种中间介质常常采用低沸点的有机介质，因此，由此完成的热力循环，称为有机介质朗肯循环。显然，在这里透平膨胀机实现的热力循环是和前面所述的制冷循环不同，这里是正向的动力循环，制冷则是逆循环。但是透平膨胀机都具有膨胀做功的功能。图1-12给出了三种不同动力循环的温度-比焓图。图中a)为工作于亚临界状态的朗肯循环，这时热源温度变化线MN必须高于膨胀工质在加热过程中的各点温度。显然，这时热源排走时仍有较高温度。如果采用图中b)所示的超临界朗肯循环，

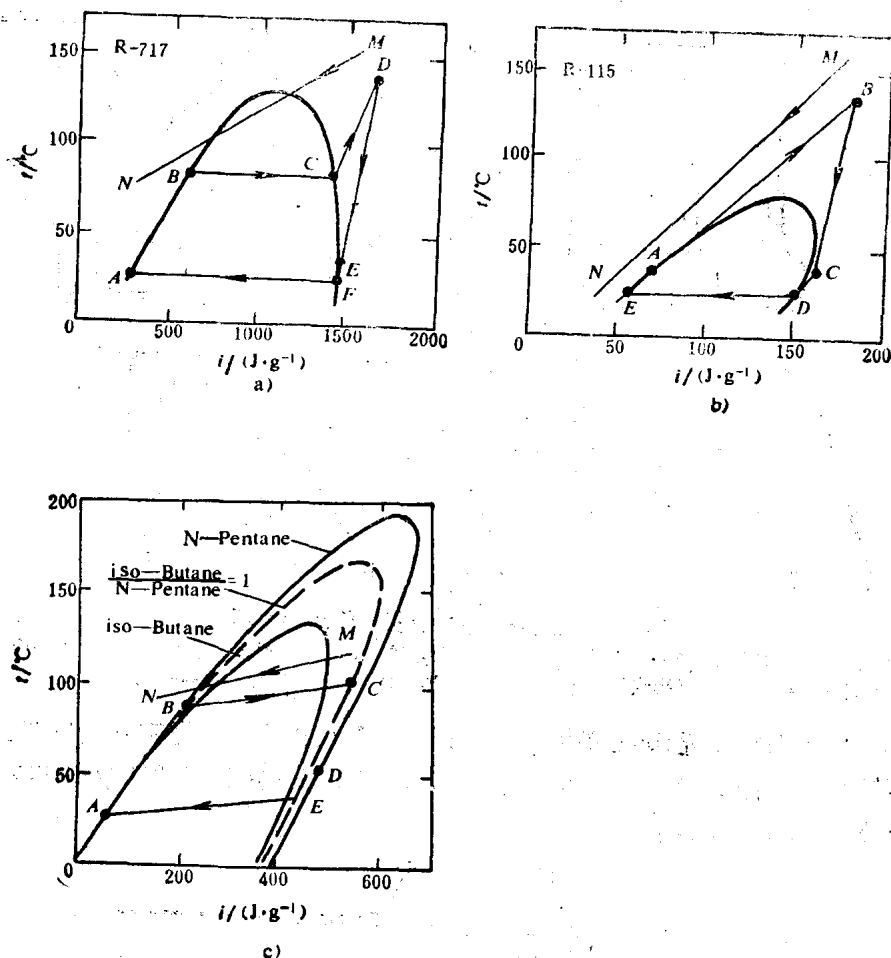


图1-12 各种动力循环的温度-比焓图
a)亚临界朗肯循环 b)超临界朗肯循环 c)混合工质循环

那么热源温度变化与膨胀工质的升温具有相似的趋势，传热温差比较均匀。因此，热源排出时可以降到较低的温度，热量得到了充分的利用。但是它的工作压力过高。如果采用如图c所示的混合工质循环，那么不仅可以降低工作压力，而且可以利用温位更低的低势位能量。图中采用的是异丁烷与正戊烷各半的混合工质。

利用低势位能量的装置很多，图1-13给出了在工业酿酒中利用发酵过程产生的废蒸汽回收功率的一种方案，可回收500kW功率。从酿酒桶出来的水蒸气在R-114蒸发器和R-114预热器中冷凝成水，余热还可在热水锅炉中回收。R-114在经过预热器和蒸发器后蒸发，经分离器后R-114蒸汽再由废蒸汽过热，然后导入透平膨胀机做功。膨胀机的功率用来带动一台螺杆式制冷压缩机，用于满足工艺中的冷量需要。膨胀后的R-114在冷凝器中冷凝成液体，经过贮液筒及升压泵依次流入预热器及分离器，分离后的蒸汽再去过热器，而液体则由R-114循环泵送回蒸发器加热蒸发。

大部分低势位能量可采用与上述相类似的方法来回收功率。但在温度较高的排热利用时，要注意有机介质在蒸发器和过热器中可能产生的分解，因此有时在排热与有机介质之间还需采用中间介质，如水或油。图1-14就是一种采用水作为中间介质的转炉废热利用。循环

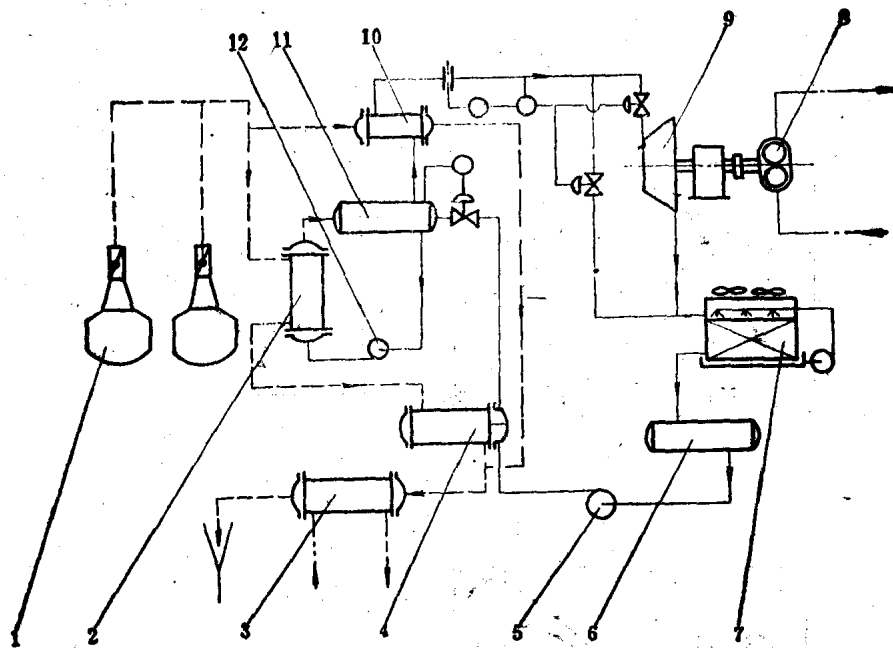


图1-13 工业酿酒中的有机介质朗肯循环系统

1—酿酒桶 2—R-114蒸发器 3—热水锅炉 4—R-114预热器 5—R-114升压泵 6—贮液筒 7—冷凝器 8—螺杆制冷压缩机 9—透平膨胀机 10—R-114过热器 11—汽液分离器 12—R-114循环泵

水在冷却转炉后可获得接近 100°C 的温度，经过贮水箱后由热水泵送到氟里昂蒸发器加热氟里昂，降温后的水又经过水箱和循环泵送到转炉。氟里昂在其封闭循环中完成有机介质朗肯循环，由透平膨胀机回收功率。

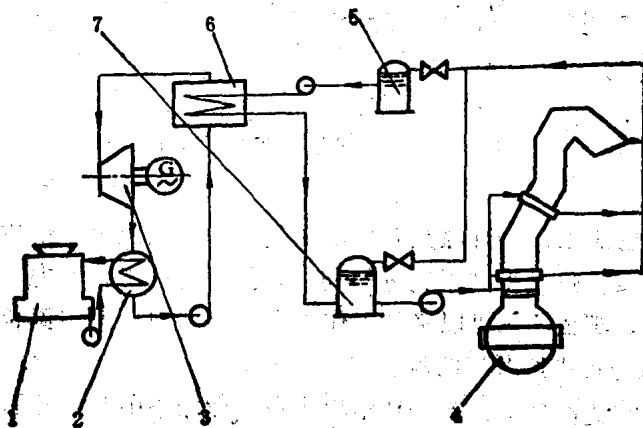


图1-14 利用转炉热量的能量回收系统

1—冷却塔 2—冷凝器 3—透平膨胀机 4—转炉 5—热水箱 6—氟里昂蒸发器 7—水箱

上述方法原则上也适用于太阳能、地热等低势能的利用。图1-15是一种采用有机介质的地热利用方案。其工作过程与前面的类似，不再重复。地热利用的另一种方案是直接膨胀，图1-16是一种新型的地热利用直接膨胀式方案。地热水在分离器中分离为气相和液相两部分。其中气相部分送入气液两相透平膨胀机膨胀做功，液相部分则送入液相透平膨胀机中膨胀做功。后者膨胀后产生的气液两相工质被引入两相透平膨胀机的中部再次膨胀做功。由于既利用了蒸汽的能量，又利用了液体的能量，因此这种方案的经济性是比较好的。它比闪蒸

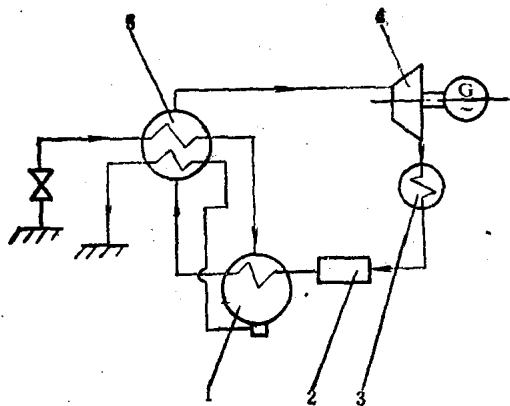


图1-15 采用有机介质的地热利用
1—预热器 2—贮液筒 3—冷凝器 4—透平膨胀机 5—蒸发器

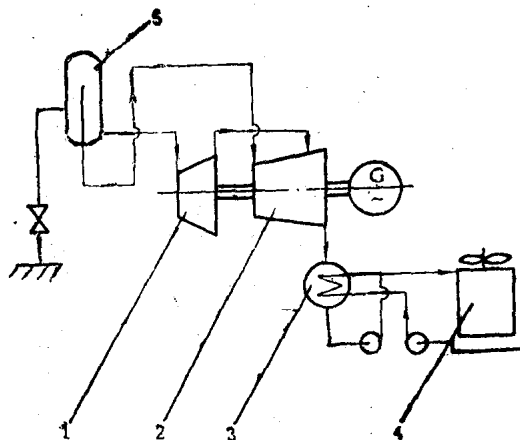


图1-16 采用两相透平膨胀机的地热利用
1—全液透平膨胀机 2—气液两相透平膨胀机 3—冷凝器 4—冷却塔 5—气液分离器

法（或扩容法）可提高30%~40%的出力。

综上所述，透平膨胀机的应用范围是十分广泛的，因此带来的特殊问题也是多方面的。本书重点分析透平膨胀机的基本工作原理及其计算方法，至于一些特殊问题可参阅有关文献。

§ 1-2 透平膨胀机的分类及其典型结构

透平膨胀机是利用工质流动时速度的变化来进行能量转换的，因此也称为速度型膨胀机。工质在透平膨胀机的通流部分中膨胀获得动能，并由工作轮轴输出外功，因而降低了膨胀机出口工质的内能和温度。工质在工作轮中膨胀的程度称为反动度。具有一定反动度的透平膨胀机就称为反动式透平膨胀机。如果反动度很小以至接近于零，则工作轮基本上由喷嘴出口的气流推动而对外作功，因此称为冲动式透平膨胀机。

此外，根据工质在工作轮中流动的方向可以有径流式、径-轴流式和轴流式之分，如图1-17所示。按照工质从外周向中心或从中心向外周的流动方向，径流式和径-轴流式又有向心式和离心式的区别。事实上，由于离心式工作轮的流动损失大，因此只有向心式才有价值。

如果工作轮叶片的两侧具有轮背和轮盖，则称为闭式工作轮，如图1-18b。轮盖没有，只有轮背的则称为半开式工作轮，见图1-18a。轮盖和轮背都没有的，或轮背只有中心部分而外缘被切除的，则称为开式工作轮，图1-18c就是其中的一种型式。只有在应力很大的场合，才采用开式工作轮，利用外缘的切除来降低离心力。在低温装置中开式工作轮的应用并不普遍。

根据一台膨胀机中包含的级数多少又可以分为单级透平膨胀机和多级透平膨胀机。为了简化结构、减少流动损失，径流透平膨胀机一般都采用单级或由几台单级组成的多级膨胀。

按照工质的膨胀过程所处的状态，又有气相膨胀机和两相膨胀机之分。而两相膨胀机又有气液两相、全液膨胀及超临界状态膨胀的区别。

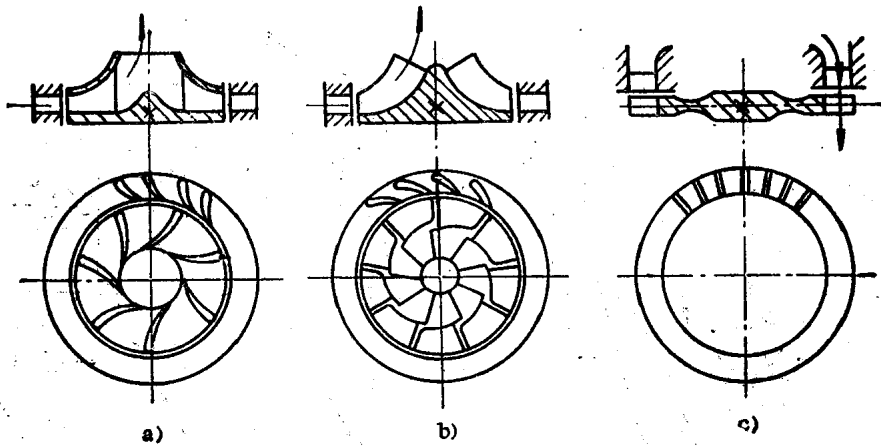


图1-17 透平膨胀机通流部分的基本型式

a) 径流式 b) 径-轴流式 c) 轴流式

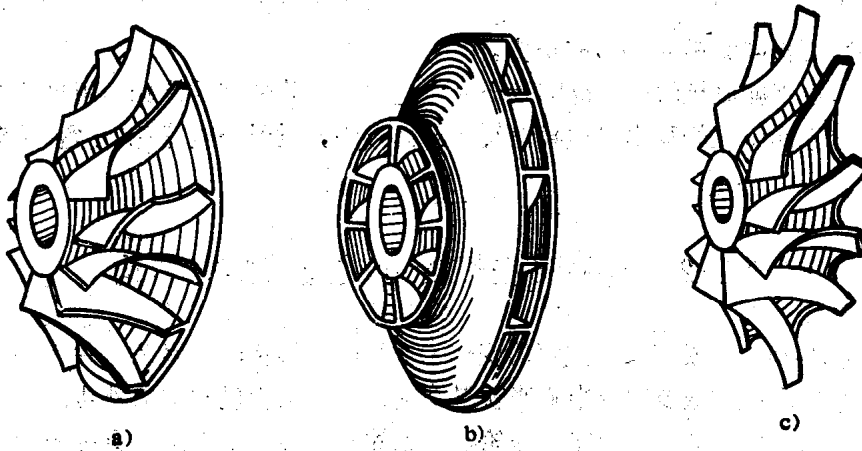


图1-18 径-轴流工作轮的型式

a) 半开式 b) 闭式 c) 开式

最后，还可以按照工质的性质、工作参数、用途以及制动方式来区分不同类型的透平膨胀机。这里不再赘述。

目前，在低温技术中应用最为广泛的是带有半开式工作轮的单级向心径-轴反动式透平膨胀机。它的级比焓降大，允许转速高，结构简单，热效率较高。图1-19提供了这种类型透平膨胀机典型结构的局部剖面图。它是由膨胀机通流部分、制动器及机体三部分所组成。膨胀机通流部分是获得低温的主要部件。工质从管道进入膨胀机的蜗壳1，把气流均匀地分配给喷嘴2。气流在喷嘴中第一次膨胀，把一部分比焓降转换成气流的动能，因而推动工作轮3输出外功。同时，剩余的一部分比焓降也因气流在工作轮中继续膨胀而转换成外功输出。膨胀后的低温工质经过扩压器4排出到低温管道中。在这台透平膨胀机中采用风机作为制动器。制动空气通过风机端盖8上的进口管吸入，经风机轮6压缩后，再经无叶扩压器及风机蜗壳7扩压，最后排入出口管道中。在风机端盖中还设有电感式的测速器9，用以测量透平膨胀机的转速。机体在这里起着传递、支承和隔热的作用。通过主轴5把膨胀机工作轮的功率传递给右端的制动器，主轴又支承在机体11中的轴承座10上。为了防止不同温区的热量

传递和冷气体的泄漏，机体中还设有中间体 12 和密封设备 13。由膨胀机工作轮、制动风机轮和主轴等旋转零件组成的部件称为转子。在这里膨胀机工作轮和风机轮是悬挂在主轴两端的，称为双悬臂式转子。在采用风机制动的透平膨胀机中，几乎毫无例外地采用这种型式的转子。

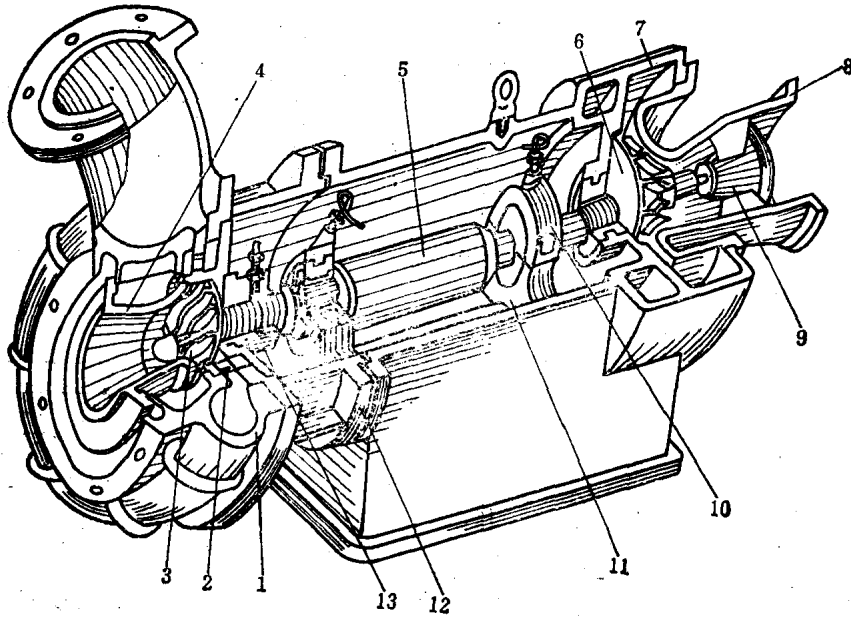


图 1-19 离心-轴流反动式透平膨胀机的典型结构

1—蜗壳 2—喷嘴 3—工作轮 4—扩压器 5—主轴 6—风机轮 7—风机蜗壳
8—风机端盖 9—测速器 10—轴承座 11—机体 12—中间体 13—密封设备

在透平膨胀机通流部分中工质参数的变化大致如图 1-20 所示。在蜗壳中气流参数基本上不变。进入喷嘴后，气流压力下降，速度增加，温度降低。在工作轮内，由于气流继续膨胀，因而压力和温度继续下降。但是气流的速度则由于工作轮输出外功反而减少。图 a 就是这种反动式透平膨胀机通流部分的参数变化。对于冲动式透平膨胀机，工作轮内气流基本上不再继续膨胀，因而在在工作轮中气流的压力和温度基本上没有变化，而气流的速度同样由于对外作功而减少，如图 b 所示。进入扩压器后，由于截面扩大而使排出气流速度有所减少，同时，压力和温度相应地稍有回升。

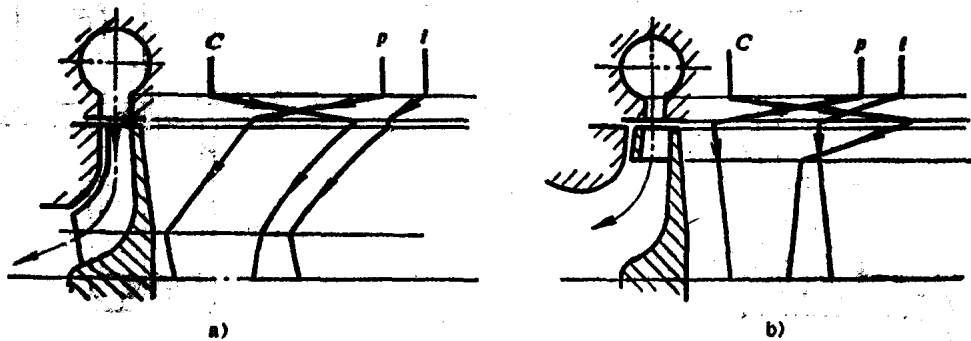


图 1-20 透平膨胀机通流部分气流参数的变化
a) 反动式 b) 冲动式