

输油管道 节能技术概论

主 编 茹慧灵
副主编 闫宝东

石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

输油管道节能技术概论

主 编 茹慧灵
副主编 闫宝东

石油工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

输油管道节能技术概论/茹慧灵主编.
北京:石油工业出版社,2000.12
ISBN 7-5021-3198-1

I. 输…

II. 茹…

III. 石油运输:管道运输-节能

IV. TE89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 77808 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京国民灰色系统科学研究院计算机室排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 13 印张 347 千字 印 1-3000
2000 年 北京第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3198-1/TE.2426
定价:19.00 元

序 言

节约能源是我国发展国民经济的一项长远的战略方针,大力开展节能,提高能源利用效率,是我国经济发展的一条重要出路。江泽民总书记早就提出“要用能源翻一番来实现翻两番的工农业总产值,唯一的出路只能靠节能。”1997年我国第一部《中华人民共和国节约能源法》诞生后,以法定的形式规定了“能源节约与能源开发并重,把能源节约放在首位”的方针。这充分表明了节约能源工作已列入国家的重要议事日程。

石油企业作为产能大户,又是用能大户,对能源节约工作历来重视,从中国石油天然气总公司到中国石油天然气集团公司和中国石油天然气股份有限公司均按照“产能大户,也要做节能大户”的要求,做了大量卓有成效工作。中国石油天然气股份有限公司创建后在实施低成本发展战略中,也把节能工作列为一项重要内容。

《输油管道节能技术概论》一书,是在总结多年来运行管理经验的基础上,全面系统地阐述了输油管道有关方面的节能知识、节能方法和节能措施,为从事输油管道节能管理、设计运行的人员,提供了一本有价值的学习参考书。相信通过该书的出版,能为输油管道的节能工作起到有益的指导作用,为提高企业的经济效益作出贡献。预祝输油管道的节能工作取得更大的成绩。



2000年8月

前 言

长距离输油管道的能源消耗量与输油成本密切相关,在一定程度上可以说降低能耗就是降低输油成本,因此,搞清长距离输油管道能耗的现状、采取措施降低能耗,节约能源,实现能源的科学管理是十分必要的。

《输油管道节能技术概论》一书,就是针对长距离输油管道的实际,总结多年来的运行经验,阐述了输油过程中所涉及各环节的节能措施及方法,是一本综合性的专业技术读物。全书深入浅出地阐述了输油管道节能技术的有关知识,可作为输油管道技术干部和岗位运行管理人员的自学参考书,也可以作为从事输油管道能源管理人员的培训教材及管道职工学院热能工程及管网专业的选用教材。

全书共分三大部分:第一部分是基础知识篇,主要介绍热工及电工的有关基础知识;第二部分是输油管道节能篇,主要介绍输油管道在输油工艺、输油设备等方面的节能技术和节能方法;第三部分是测试及方法篇,主要介绍热工参数的基本测量知识、热工仪表,相关的理论分析方法及节能量的计算方法。

编写的具体分工是:主编茹慧灵,副主编闫宝东。本书第一章、第二章、第四章、第五章、第六章第一至七节、第八章、第九章、第十一章由茹慧灵执笔;第三章由王成会、张文海执笔;第四章第八节由刘福元执笔;第七章由白士武、茹慧灵执笔;第十章由邵云巧执笔;第十二章由古桢执笔。全书由俞伯炎和宋岚主审,参加审稿的还有高庭禹、张城、折恕安、李国兴、朱玉芳、王春荣、李江与姜宝良等同志。本书在编写过程中得到郑英蜚、黄非、邹呐群、容萍、耿彬、刘守龙、邹欣、冯春艳等同志的大力支持。在本书出版之际,向他们表示衷心的感谢,同时也向各位文献作者和关心支持本书编写的领导和同志们一并表示谢意!

限于编著者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者
2000年8月

目 录

第一部分 基础知识篇

第一章 工程热力学基础	(3)
第一节 基本概念	(3)
1.1 热力学系统	(3)
1.2 状态和状态参数	(3)
1.3 状态方程式及参数坐标图	(3)
1.4 过程和循环	(4)
1.5 可逆过程	(4)
1.6 功和热量的计算	(5)
第二节 热力学第一定律与热力学第二定律	(6)
2.1 热力学第一定律	(6)
2.2 热力学第二定律	(8)
2.3 卡诺循环	(9)
第三节 熵增原理和作功能力的损失	(9)
第四节 气体的热力过程	(12)
4.1 过程方程式	(12)
4.2 状态参数之间的关系式	(13)
4.3 功和热量的计算	(14)
第五节 水蒸气	(14)
5.1 水蒸气的定压发生过程	(14)
5.2 水蒸气图表	(15)
第二章 传热学及燃烧基础知识	(18)
第一节 传热的基本方式	(18)
第二节 热传导	(18)
第三节 对流换热	(21)
第四节 辐射换热	(23)
第五节 传热过程	(25)
第六节 燃烧原理与计算	(27)
第三章 电工基础知识	(33)
第一节 单相交流电路	(33)
1.1 交流电的基础知识	(33)
1.2 正弦交流电的三种表示法	(36)
1.3 单相交流电路	(37)

1.4 提高功率因数的意义和方法	(44)
第二节 三相交流电路	(45)
2.1 三相电动势的产生	(45)
2.2 三相四线制	(46)
2.3 三相负载的星形联接	(47)
2.4 三相负载的三角形联接	(49)
2.5 三相负载的电功率	(50)

第二部分 输油管道节能篇

第四章 输油泵节能技术	(55)
第一节 概述	(55)
1.1 离心泵的工作原理及分类	(55)
1.2 离心泵的结构	(56)
1.3 离心泵的技术特性	(59)
第二节 管道输油泵	(64)
2.1 梯森系(ZM 型)	(64)
2.2 宾汉姆系(HSB 型)	(65)
2.3 硅钠德系	(66)
2.4 DZS 型系列系	(67)
2.5 KD、DKS 与 KS 型系	(68)
2.6 其他类型输油泵	(68)
第三节 输油泵节能技术	(69)
3.1 合理选用泵的设计参数	(69)
3.2 对现有输油泵选用合适的调节、调速方式	(70)
3.3 采用高效泵	(77)
3.4 输油泵的节能经济运行	(77)
第五章 加热炉、锅炉节能技术	(80)
第一节 加热炉、锅炉基本知识	(80)
1.1 加热炉基本知识	(80)
1.2 锅炉基本知识	(84)
第二节 加热炉、锅炉节能技术	(86)
2.1 加热炉、锅炉热损失	(86)
2.2 加热炉节能技术	(87)
2.3 锅炉节能技术	(96)
第六章 输油工艺节能技术	(101)
第一节 概述	(101)
第二节 “先炉后泵”的加热输油工艺	(101)
第三节 “从泵到泵”的密闭输油工艺	(102)
第四节 原油热处理输送工艺	(103)

4.1 含蜡原油热处理特性	(104)
4.2 含蜡原油热处理输送工艺的应用	(105)
第五节 原油添加降凝剂输送工艺	(106)
第六节 原油添加减阻剂输送工艺	(108)
6.1 减阻剂的减阻机理	(108)
6.2 减阻剂在输油管道中的应用	(109)
6.3 减阻剂在我国输油管道上的应用前景	(110)
第七节 输油管道的优化运行	(110)
7.1 输油泵机组的优化组合	(111)
7.2 输油泵机组的优化运行	(113)
7.3 输油泵站运行方案的优化	(115)
7.4 输油管网优化运行技术	(115)
7.5 低输量管道的间歇运行	(116)
7.6 管道节能与泵站节能的关系	(118)
7.7 提高原油管输效率的方法	(118)
第八节 提高输油管道运行管理水平	(121)
第七章 电动机节能技术	(123)
第一节 概述	(123)
第二节 异步电动机的基础知识	(124)
第三节 异步电动机的节能技术	(131)
3.1 概述	(131)
3.2 异步电动机调速节能控制技术	(132)
第八章 热力管网与系统节能	(145)
第一节 供热管网的型式	(145)
1.1 蒸汽供热系统的型式	(145)
1.2 凝水回收系统	(146)
第二节 供热管网的敷设与保温	(149)
2.1 供热管网的线路敷设	(149)
2.2 热力管网的敷设方式	(150)
2.3 供热管道的保温	(151)
2.4 供热管道保温热力计算	(152)
第三节 蒸汽供热系统的节能措施	(154)
3.1 提高凝水回收率	(154)
3.2 充分利用二次蒸汽	(155)
3.3 采用先进的节能型疏水器	(155)
3.4 作好热网系统参数的匹配与平衡工作	(155)

第三部分 测试及方法篇

第九章 热工参数测量及输油管道系统效率测试方法	(159)
--------------------------------------	-------

第一节 热工参数测量及仪表	(159)
1.1 温度测量及仪表	(159)
1.2 压力测量及仪表	(164)
1.3 流量测量及仪表	(165)
第二节 输油管道系统效率测试方法	(169)
第十章 热平衡和能量的有效利用	(172)
第一节 热平衡的原则方法	(172)
第二节 热平衡计算示例	(176)
第十一章 烟及输油设备烟分析	(179)
第一节 烟的特性	(179)
第二节 烟的数学表达式	(180)
2.1 热量烟	(180)
2.2 稳流物质的烟	(181)
2.3 燃料烟	(182)
第三节 烟平衡	(183)
3.1 烟平衡分析	(183)
3.2 烟效率和烟损系数	(184)
第四节 输油设备的烟分析	(189)
第十二章 企业用热系统的评价方法	(191)
第一节 能源利用评价方法与评价指标	(191)
1.1 宏观分析法	(191)
1.2 有关的名词术语	(192)
1.3 能源利用率	(194)
第二节 企业节能量的计算	(196)

第一部分 基础知识篇

第一章 工程热力学基础

第一节 基本概念

1.1 热力学系统

作任何分析研究,都必须首先明确研究对象,热力学系统(简称热力系或系统)就是具体指定的热力学的研究对象。与热力系有关的周围物体统称为外界或环境。为了不至于把热力系和外界混淆起来,设想有界面将它们分开。这个界面称为边界。边界可以是真实的,也可以是假想的,可以是固定的,也可以是变动的。

热力系的选取,决定于所提出的研究任务,它可以是一群物体、一个物体或物体的某一部分。它可以很大,也可以很小,但是不能小到只包含少量的分子,以至不能遵守统计平均规律(热力学理论的正确性有赖于分子运动的统计平均规律,而这一规律只存在于大量现象)。

热力系和外界可以以功和热的形式进行能量交换,也可以进行物质交换。在作热力学分析时,既要考虑热力系内部的变化,也要考虑热力系通过界面和外界发生的能量和物质交换,但对外界的变化则不去追究。根据热力系与外界相互作用的情况不同,热力系又可以分为:

闭口热力系(简称闭口系):系统和外界没有物质交换,但有功和热量交换;

开口热力系(简称开口系):系统和外界有物质交换,也有功和热量交换;

绝热热力系(简称绝热系):系统和外界没有热量交换;

孤立热力系(简称孤立系):系统和外界无任何交换(既无物质交换也无功和热量交换)。

在系统中,接受、输送和转换能量的物质称为工质。由于气态物质具有膨胀性和可被压缩性,因此热力学中常用气体作为工质。

1.2 状态和状态参数

状态是指热力系全部宏观性质的综合。从各个不同的方面描写这种宏观状态的物理量即称为状态参数。在不受外界影响的条件下,如果系统的状态参数不随时间而变化,则此系统处于平衡状态。气体在平衡状态时,其内部各处的各种性质是均匀一致的,具有相同的状态参数。不平衡状态时,系统各部分的状态参数是不一样的,无法用共同的参数来描述系统所处的状态。今后,我们将只研究平衡状态以及系统由一个平衡状态向另一个平衡状态的转化。

1.3 状态方程式及参数坐标图

如上所述,对于由气体组成的热力系,当处于平衡状态时各部分具有相同的温度(T)、压力(p)和比容(v)等状态参数。经验表明,这些参数并不都是互不相关的。当一定量气体在固定容积内被加热时,压力随温度的升高而升高。反之,如保持压力不变,则容积随温度升高而增大。如果容积和压力都采取一定的数值,则温度就只能具有一个确定不变的数值,即 p 和 v 规定后, T 也就一定,而状态就确定了,其它参数也就都被决定了。用数学式表示为

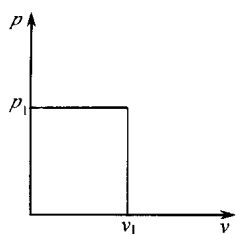


图 1-1 参数坐标图

$$T = f(p, v) \quad p = f(T, v) \quad v = f(p, T)$$

只要状态确定了,而且状态是平衡状态, p, v, T 三者之间总存在着一定的关系,这样的关系式叫做气体的状态方程式。

由于两个参数足以确定气体的状态,所以我们采用平面坐标图来描述一定的状态。尤其是 $p-v$ 坐标图,如图 1-1 所示,因它具有特别的意义,所以用得最多。例如具有压力 p_1 、比容 v_1 的气体,它的状态可用 $p-v$ 图中点 1 来表示。显然只有平衡状态才能用图上的一点来表示,不平衡状态没有一定的参数,在坐标图上无法表示。

1.4 过程和循环

系统从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和,称为热力过程,简称过程。过程的开始,也就是平衡态的破坏,因此状态的变化将经历着一系列不平衡态;当过程结束时,状态又达到平衡态。经历不平衡态的这类变化称为非准静态过程。非准静态过程的始、终两态是平衡状态,其余都是非平衡状态。

因为状态变化只有在平衡态被破坏时才发生,如果工质在平衡被破坏后能自动恢复平衡且恢复平衡所需的时间又很短,或如果过程进行得很缓慢,经历的时间和恢复的时间相比很大时,这在过程中工质有足够的时间来恢复平衡,随时都不致远离平衡态,这样的过程叫做准静态过程。这时破坏平衡的力和热的作用应为无限小(如果在过程中还有其它作用存在,实现准静态过程还必须加上其它作用存在)。只要系统的状态变化按准静态过程进行,则单相系统就是均匀的,系统中各处的状态参数就相同,并且可以用其来表征系统的状态且能得到过程的详细的数量分析,并有足够的精度。今后所涉及到的系统状态参数的变化规律及热量和功的计算式都是指在准静态过程条件下而言。

1.5 可逆过程

当系统经历了某一过程后,如能在外界不发生任何变化的情况下依原来的变化过程回复到初态,则此过程称为可逆过程;反之,称为不可逆过程。所以,过程的可逆性是指系统必须恢复到初态,同时外界在经历正、反过程后也不应发生任何变化。

由机械不平衡到机械平衡,以及由温度不平衡到温度平衡都是不可逆过程的例子。一切实际过程都是不可逆过程。在不可逆过程中除了系统和外界存在着力不平衡和温度不平衡之外,在系统内部也存在着这些不平衡,这样将使我们过程的分析计算增加困难,因此我们希望系统进行一个可逆过程。下面以气体膨胀过程为例来说明在什么条件下才能使不可逆过程成为可逆过程。如果能做到经过正过程和逆过程后,气体的膨胀功和压缩功完全相等,过程就成为可逆的了。这只有在过程的一切阶段中气体作用于活塞的力和活塞压缩于气体的力相同(也即是气体的压力和活塞的反力应该恰好是平衡的)情况下才能实现。这时,过程由一系列平衡态组成。此外,还必须保证过程的一切阶段中不存在摩擦。而要消除温度不平衡,则须确保系统的温度和外界的温度相等。

所以可逆过程是运动无压差和无摩擦、传热无温差的平衡过程。显然可逆过程是不能实现的,因为没有压差、没有摩擦也就没有机械运动,没有温差就没有传热,故而可逆过程可理解为在无限小的温差下传热、在压差和摩擦无限小的情况下作运动的过程。虽然可逆过程是理想过程,但对它的研究分析对节能是有好处的。节能的原则性措施,就是设法减小整个过程,

包括过程的任一局部区段的不可逆性,而不可逆性与不平衡性是紧密联系的。因此,在过程中出现的各种不平衡性,包括机械的不平衡、热的不平衡、化学的不平衡等,乃是节能潜力存在的标志,所以,“节能的潜力寓于不平衡之中”。

如果工质经过一系列过程后,最终它又恢复到初态,我们说工质经历了一个循环,即循环是一个封闭的过程。鉴于过程有可逆过程和不可逆过程之分,则循环也就有可逆循环和不可逆循环的区别。

准静态过程是由一系列平衡态组成,它在状态参数坐标图中表示为一条连续曲线,非准静态过程不能表示在状态参数坐标图中。同样,可逆过程和可逆循环能在状态参数坐标图中示出,不可逆过程和不可逆循环不能表示在状态参数坐标图中。

1.6 功和热量的计算

一、功的计算

设有 1kg 工质在汽缸中进行膨胀(压缩过程时,所得的结论与膨胀过程完全一样),经历了一个可逆过程 1a2,如图 1-2 所示。当活塞移动微小距离 dx 时,工质反抗外力 $p_{\text{外}}f$ 所作的微量功为

$$\delta w = p_{\text{外}} f dx$$

式中 $p_{\text{外}}$ ——外界作用在活塞的压力,MPa;

f ——活塞截面积, m^2 。

可逆过程中, $p_{\text{外}}$ 等于工质在过程中某瞬间的压力 p ,故:

$$\delta w = p_{\text{外}} f dx = p dv$$

式中 v ——1kg 工质所占的容积,称为比容, m^3/kg 。

过程 1a2 所作的功为:

$$w = \int_1^2 p dv$$

m kg 工质所作的功为:

$$w = mw = m \int_1^2 p dv$$

如果已知过程 1a2 的方程式 $p = f(v)$,就可用积分方法求得过程的功量。

上述表明,可逆过程的膨胀功可以用 $p-v$ 图中过程曲线下边的面积 1a2nm1 表示出来。如工质沿 1b2 曲线进行膨胀,从图中可以看出,曲线下的面积也就发生改变,即作的功量与前不同,因此,功的数值不仅决定于工质的初态与终态,而且还和过程经历的途径有关,即与过程的性质有关。

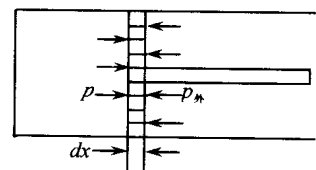
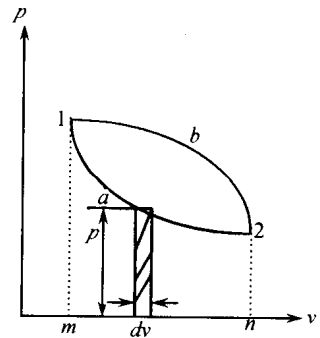
当过程 1a2 为不可逆,则工质对外所作的功 $\delta w_{\text{不}}$ 为:

$$\delta w_{\text{不}} = p_{\text{外}} dv$$

因为 $p_{\text{外}} < p$,故 $\delta w_{\text{不}} < \delta w$ 。这说明当状态由同一初态 1 变化至同一终态 2 时,不可逆过程的膨胀功恒小于可逆过程的膨胀功;压缩时则相反,不可逆过程的压缩功恒大于相同状态变化下的可逆过程的压缩功。

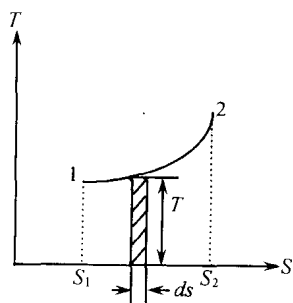
二、热量的计算

压力 p 是作功的推动力,比容 v 的变化表示功产生与否。如 $dv > 0$,意味着工质对外作膨



(1-1) 图 1-2 封闭系统的膨胀功在 $p-v$ 图上的表示

胀功; $dv < 0$, 意味着外界对工质做功, 即压缩功; $dv = 0$, 即没有膨胀功, 也没有压缩功。热量的传递也应有类似于 p 和 v 的状态参数来表示。热量是由于温差的存在而传递的, 所以在传热过程中, 温度 T 是传热的推动力。另一个状态参数的改变标志有无热量的传递, 我们对这个状态参数命名为熵, 以符号 S 表示。对应于功的表示式, 在可逆过程中的传热量为:



及

$$\delta q = Tds$$

$$q = \int_1^2 Tds \quad (1-2)$$

式中 s ——1kg 工质的熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于 m kg 工质, 其熵 $S = ms$ (kJ/K)。在以绝对温度 T 为纵坐标, 熵 S 为横坐标组成的 $T-S$ 图中, 过程曲线下的面积表示工质在此过程中与外界交换的热量(图 1-3)。不同的热力过程, 热量并不相同, 故热量也是过程的函数。

因为绝对温度 T 总是正值, 故熵 S 的变化说明工质在过程中吸热还是放热。若 $dS > 0$, 则 $\delta q > 0$, 表示外界对工质加热; $dS < 0$, 则 $\delta q < 0$, 表示工质对外界放热; 若 $dS = 0$, 表示工质与外界没有热量的交换。

第二节 热力学第一定律与热力学第二定律

2.1 热力学第一定律

热力学第一定律的基础是众所周知的能量守恒与转换定律: 各种形式的能量既不能产生, 也不能消灭; 能量可由一种形式转换到另一种形式, 在转换过程中能量保持守恒。

热力学第一定律用于封闭系统时有: 对系统加入的热量 Q 等于系统内能的变化 ΔU 和系统对外所作的膨胀功 W , 即

$$Q = \Delta U + W \quad (1-3)$$

这就是热力学第一定律数学表达式。对单位质量的工质, 上式为:

$$q = \Delta u + w \quad (1-4)$$

对微元过程有:

$$\delta q = du + \delta w \quad (1-5)$$

如工质的状态变化按可逆过程进行, 则有:

$$q = \Delta u + \int_1^2 p dV \quad (1-6)$$

或

$$\delta q = du + p dV \quad (1-7)$$

在开口系统中, 除热量和功通过系统的边界外, 还有工质进入系统。工质进入系统时将带入能量, 工质离开系统时将带出能量(见图 1-4)。

工质在状态 1(压力 p_1 、比容 v_1 、内能 u_1 、流速 V_1) 时从标高 Z_1 的进口截面 1-1 流进系统, 而在状态 2(p_2 、 v_2 、 u_2 、 V_2) 时的标高 Z_2 的出口截面 2-2 流出系统。1kg 工质流过系统时, 将接受热量 q , 并对外作出机械功(称为轴功) w_s 。

工程上常见的各种热工设备在正常运行时,流动工质在各个截面上的状态和对外交换的热及功量都不随时间而变,并且同时期内流过任何截面上的工质流量均保持相同。这样的流动工况叫做稳定流动。下面研究稳定流动条件下的能量方程式。

进入或离开系统时,1kg 工质具有的能量

形式有:机械动能 $\frac{v^2}{2}$ 、机械位能 gZ 、内能 u 、流动功 pv 。

根据能量守恒原则,得出稳定流动能量方程式:

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 + q$$

$$= u_2 + p_2 v_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + w_s \quad (1-8)$$

令焓 $h = u + pv$, h 也是一个状态参数。焓是物质进入系统时带入或带出的内能和流动功之和,是随物质转移的能量,单位为千焦每千克。对于焓,我们并不注意它的绝对值,而是关心其差值。将焓的定义式代入上式,得:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + w_s$$

整理后得:

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + w_s \quad (1-9)$$

对微元过程有:

$$\delta q = dh + \frac{dv^2}{2} + g dZ + \delta w_s \quad (1-10)$$

不论是开口系统或是闭口系统,热变功的根本途径是工质容积的膨胀。但是开口系统对外表现出来的功和闭口系统不同,它不是膨胀功,而是轴功。轴功和工质容积改变的功不但对外表现的形式不同,且在数量上也有差别。

改写式(1-8)成

$$q - \Delta u = \Delta(pv) + 1/2(\Delta v^2) + g\Delta Z + w_s$$

上式等号右边四项都是和机械能有关的能量。上面提过,不论工质是静止的还是流动的,要使热能转变为机械能,必须通过工质容积的膨胀才能实现。因此,在可逆过程中 $q = \Delta u + \int p dv$ 对开口系统也同样适用。于是上式可写成

$$q - \Delta u = \int_1^2 p dv = \Delta(pv) + 1/2(\Delta v^2) + g\Delta Z + w_s$$

令技术功

$$w_t = 1/2(\Delta v^2) + g\Delta Z + w_s$$

则

$$w_t = \int_1^2 p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \int_1^2 p dv + p_1 v_1 - p_2 v_2$$

由图 1-5 可见

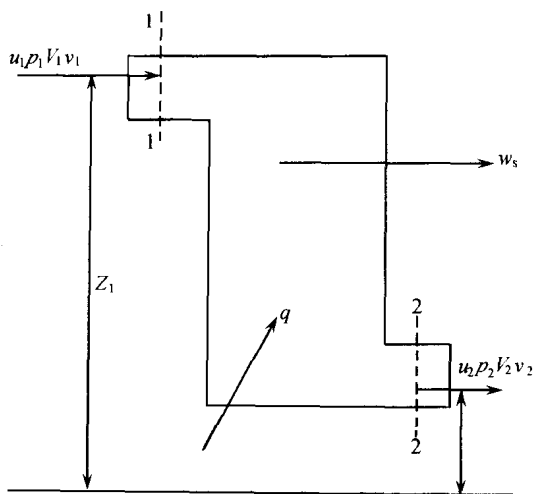


图 1-4 开口系统示意图

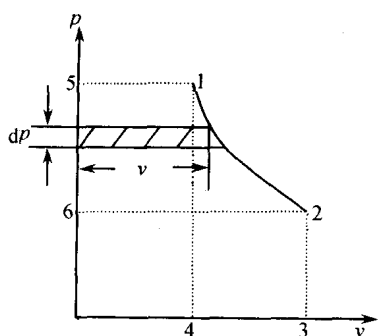


图 1-5 技术功在 $p-v$ 图上的表示

因而

$$\int_1^2 p dv + p_1 v_1 - p_2 v_2 = \int_1^2 v dp$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp \quad (1-11)$$

在忽略工质进出系统的动能和位能的变化时,则得

$$w_t = w_s = - \int_1^2 v dp$$

于是开口系统在可逆过程时的能量平衡方程式为:

$$\begin{aligned} q &= \Delta u + \Delta(pv) + w_t \\ &= (h_2 - h_1) - \int_1^2 v dp \end{aligned} \quad (1-12)$$

对微元过程有:

$$\delta q = dh - v dp \quad (1-13)$$

2.2 热力学第二定律

自然界的一切过程都是不可逆的,据此得出结论:一切自然过程只能自发地向一个方向进行。所以,“一切自发过程都是不可逆的”就是热力学第二定律的实质。随着热力学的发展,热力学第二定律的概念表述应用于某些特定的过程,而成为某些特定的表述。

“不可能制造一个机器,在循环动作中把一重物升高而同时使一热库冷却”。人们称这类机器为第二类永动机,因此热力学第二定律也可表述为“第二类永动机是不可能造成的”。热力学第二定律的另一表述为:“不可能把热量从低温物体传到高温物体,而不产生任何变化”。

热力学第二定律是以经验为基础的,它的正确性已被无数事实所证明,企图驳倒第二定律是徒劳的。

仅有热力学第一定律不能解决过程是否能够实现的问题,符合热力学第一定律的过程并不一定能够实现。解决过程中能量转换的问题,除应用已知的热力学第一定律,还要引入热力学第二定律,两者不可缺一。

在提及热力学第二定律的时候,热机循环及其热效率的概念是很重要的。

循环是一个闭合的热力过程。经过一个循环后,工质回到原状态,内能不发生变化,得到循环的净热量等于循环的净功。如果循环中工质的吸热量大于它的放热量,则 $\oint \delta q$ 是一个正值,因此 $\oint \delta w$ 也是一个正值。这样的循环称为热机循环(或称正循环)。热机循环的方向是顺时针的。

热机循环的循环净功与循环所吸收的热量之比,叫做循环的热效率,即热效率表示循环中外界向工质加入的热量有多少变为功。

令 η_t 表示热效率;

q_1 表示单位质量的工质在循环中所吸收的热量;

q_2 表示单位质量的工质在循环中所放出的热量;

则

$$\eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (1-14)$$