

阀门结构与改进

张光函 曾品其 龚王军/编著



科学出版社

阀门结构与改进

张光函 曾品其 龚王军 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是对阀门设计和制造的技术经验总结,主要介绍了阀门设计中常见的共性问题,是对现有阀门设计基础知识的补充。本书主要内容包括阀的流量系数、阀内流体流动、新型球阀结构设计、旋塞阀的改进、调节阀结构设计、异形阀件结构验算、耐腐蚀材料选用和液气压驱动装置。

本书可供阀门设计人员培训使用,也可以供相关企业工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

阀门结构与改进 / 张光函, 曾品其, 龚王军编著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-058985-9

I. ①阀… II. ①张… ②曾… ③龚… III. ①阀门-结构设计
IV. ①TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 226407 号

责任编辑: 郭勇斌 周 爽 欧晓娟 / 责任校对: 樊雅琼
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 10 月第一次印刷 印张: 28 3/4

字数: 575 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

四川大学制造科学与工程学院与成都乘风阀门有限责任公司（以下简称乘风阀门）于 2002 年实施校厂技术合作，学校教师参与公司重大工程项目的技术咨询和顾问工作，近 16 年来校厂合作成绩显著，本书由张光函教授和曾品其、龚王军高级工程师合作编写，由高级工程师史利民审阅。

乘风阀门主要生产工业用阀门：闸阀、蝶阀、球阀、旋塞阀、调节阀及其他多种阀门；主要用于天然气、石油管路输送及存储系统，石油天然气生产和化工产品生产系统，水电、火电生产及国防军工领域生产系统中。乘风阀门自行创新设计和开发各种特殊要求的工业阀门，适应和满足不同的市场需求。乘风阀门生产的 40/48" 大口径高压全焊接球阀 2016 年获得中国机械工业科学技术奖一等奖。

2014 年，乘风阀门从成都市区迁往成都市大邑县工业园区，众多高校毕业生到公司工作。为了尽快让这些年轻人适应公司的技术工作要求，在收集和总结公司 50 多年生产工业阀门的技术和经验基础上，编写相关技术资料，供入职的年轻人在职技术培训学习之用。在 2015 年技术培训使用后，将相关资料整理修改成本书。

本书主要介绍阀门设计中相关流体力学知识，重点介绍几种典型阀门的新结构和改进结构的设计要点，可供其他类型阀门创新和改进参考。简要介绍异形薄壁阀件的强度和变形计算，阀件的接触应力计算及阀件的耐蚀材料选用，专项介绍近年发展较快的阀门用的气、液压驱动装置。

全书共八章：

第一章主要介绍阀的流量系数，阀口结构尺寸的确定及阀的流量系数的测定。

第二章主要介绍流体流经阀门时出现各种现象，列举在实际生产中遇到的相关问题。

第三章主要介绍偏心球阀和轨道式球阀的结构工作原理及其设计参数确定，并重点介绍轨道式球阀的系列设计及其结构异变——轨道式蝶阀。

第四章主要介绍旋塞阀为了减小回转摩擦力矩，提高阀的使用压力和延长使用寿命，增加阀的流量系数的多种改进方案的结构工作原理及其设计参数确定。

第五章主要介绍流量型调节阀和压力型调节阀结构设计与参数选择，重点叙述流量型调节阀阀口结构简化，以及适应现代计算机控制的调节阀结构变化和设计中应注意事项。

第六章重点介绍异形阀件结构强度和变形计算，特别是阀体薄壁件的结构验算。简要介绍接触应力选择和确定方法及许用应力确定原则。

第七章主要介绍耐腐蚀材料选用和确定方法。偏重于耐应力腐蚀材料选用及其他耐腐蚀材料选用。

第八章专项介绍阀门的气压和液压驱动装置的选用及其应用实例，并简介电液数值伺服传动及其在阀门驱动装置中的应用。

本书在乘风阀门总裁丁骐先生的关怀下，在乘风阀门研究所直接组织下进行编写，曾和友、胥丹红、漆正云、杨浩林等在文字录入及编辑排版方面做了大量工作，在此特表示感谢！限于编者水平和时间限制，书中难免有疏漏与不妥之处，望读者批评指正。

张光函 曾品其 龚王军

2018年3月

目 录

前言

第一章 阀的流量系数	1
第一节 流体的物理性能	1
一、密度与比热容	1
二、气体状态方程和热力过程	5
三、压缩性、声速、热膨胀性和黏性	13
四、流体的流动状态	16
第二节 流体的孔口出流	18
一、孔口出流的流量	18
二、气体阀口出流	22
三、蒸汽流动与两相流动	30
第三节 流量系数	33
一、流量系数 K_v	33
二、阻塞流判据的修正	36
三、流量公式中的系数计算	41
四、计算举例	46
第四节 流量系数的测试	53
一、试验设备	53
二、流量系数测试	56
三、压力恢复系数 F_p 的测试	57
四、流量系数测试实例	58
第二章 阀内流体流动	63
第一节 节流气穴	63
一、闪蒸、空化及其影响	63
二、节流气穴的防止	65
三、两相流的冲蚀	66
第二节 流动噪声	67
一、阀门噪声	67
二、声波及其计量	68

三、噪声预估	70
四、噪声治理	78
第三节 流动中能量转换	82
一、温度变化	82
二、冲击压力	86
三、气体作为不可压缩流体的条件	89
第四节 流体的动量变化	90
一、流体流动动量原理	90
二、阀口的动量变化	91
三、流体动量变化对蝶阀操控力矩的影响	93
第五节 不平衡力(矩)与阀门压降	100
一、流动引起的不平衡力(矩)	101
二、阀门允许压降	105
第三章 新型球阀结构设计	109
第一节 偏心球阀	109
一、传统球阀密封结构特点	109
二、偏心球阀类型	111
三、三偏心球阀几何结构	114
四、结构参数选择	117
第二节 轨道式球阀	120
一、结构工作原理	120
二、球阀密封结构	124
三、结构强度设计	128
四、导向机构	135
五、10"轨道式球阀校核	138
六、工作能力的评估	144
第三节 球阀的异形结构——轨道式蝶阀	145
一、结构工作原理	145
二、主要结构参数	147
三、结构设计与强度校核	148
第四节 轨道式球阀和蝶阀的系列型谱及其主要结构参数	148
一、系列型谱及特性参数	148
二、导向机构主要结构参数	150
第四章 旋塞阀的改进	152
第一节 低启闭力矩旋塞阀	152

一、旋塞阀结构工作特点	152
二、低启闭力矩旋塞阀	154
三、单偏心旋塞阀	156
第二节 压力平衡式倒锥形旋塞阀	162
一、结构工作原理	163
二、密封面结构与密封压力	165
三、操控力矩	171
四、注脂	174
五、结构工艺	174
第三节 轨道式旋塞阀	177
一、主要结构类型	177
二、“三片”旋塞轨道式旋塞阀主阀结构	184
三、双杆凸轮机构	187
四、超压泄压装置	189
第五章 调节阀结构设计	194
第一节 调节阀的结构工作原理	194
一、调节阀组成	194
二、控制调节方式	195
三、调节阀主要功能	198
第二节 调节阀的流量特性	200
一、典型流量特性	200
二、工作流量特性	203
三、流量特性的选用	207
四、低压降比阀的固有流量特性	209
五、线性流量特性扩大应用	211
第三节 调节阀设计的主要参数	218
一、额定流量系数	218
二、压降的确定	223
三、可调比与阀门开度验算	224
四、主要性能要求	225
五、改进和发展方向	232
第四节 高压调节阀	233
一、高压调节阀类型	233
二、使用寿命短的主因	234
三、抗气蚀结构方案	235

四、抗蚀材料选用及阀件表面处理	237
第五节 设计实例	239
一、流量调节阀	239
二、压力调节阀	243
第六章 异形阀件结构验算	251
第一节 薄板结构计算及其应用	251
一、薄板弯曲	251
二、矩形阀件强度验算	267
三、弧形板强度验算	273
四、异形板件近似验算	274
第二节 异形薄壳阀件验算	281
一、非圆形截面薄壳阀体	281
二、加强肋(圈)结构设计	285
三、外加强非圆形截面壳体	289
四、阀体验算实例	292
第三节 接触应力	299
一、接触应力	299
二、疲劳强度与许用接触应力	306
三、强度校核用许用接触应力	309
第四节 许用应力	311
一、许用应力的确定	311
二、焊接系数	313
第七章 耐腐蚀材料选用	315
第一节 金属材料腐蚀与选用原则	315
一、金属材料腐蚀的失效类型	315
二、金属腐蚀评价指标	319
三、耐腐蚀材料的选用	321
第二节 耐腐蚀金属材料及其应用	324
一、常用金属材料的耐蚀情况	324
二、抗硫化物应力开裂用钢	330
三、耐热钢和低温钢	341
第三节 不锈钢耐蚀性及其选用	346
一、铁素体不锈钢	347
二、马氏体不锈钢	348
三、奥氏体不锈钢	349

四、双相不锈钢·····	353
五、超级不锈钢·····	355
第八章 液气压驱动装置·····	357
第一节 常用液气压元件·····	357
一、液压泵和马达·····	357
二、方向控制阀·····	361
三、压力控制阀·····	368
四、流量控制阀·····	370
五、辅件·····	372
第二节 气压驱动装置·····	374
一、执行机构·····	374
二、气源设备·····	390
三、气动基本回路·····	397
四、典型气压驱动装置·····	401
第三节 液压驱动装置·····	405
一、液压执行元件·····	405
二、控制回路（系统）·····	412
三、油源装置·····	427
四、典型液压驱动装置·····	438
参考文献·····	447

第一章 阀的流量系数

第一节 流体的物理性能

一、密度与比热容

1. 标准状态和基准状态

流体的物理性能与流体所处的状态有关，压力和温度是流体重要的物理参数。

(1) 压力

压力可用绝对压力、表压力和真空度等来度量，其关系如图 1-1 所示。

绝对压力：以绝对真空作为起点的压力值，一般需在表示绝对压力符号的右下角标注“ABS”。即 p_{ABS} 。

表压力：高出当地大气压力值，并由压力表测得的压力值，一般在压力符号下不作标注。

真空度：低于当地大气压力的压力值。

真空压力：绝对压力与大气压力之差，真空压力值在数值上与真空度相同，但应在其数值前加“-”号。

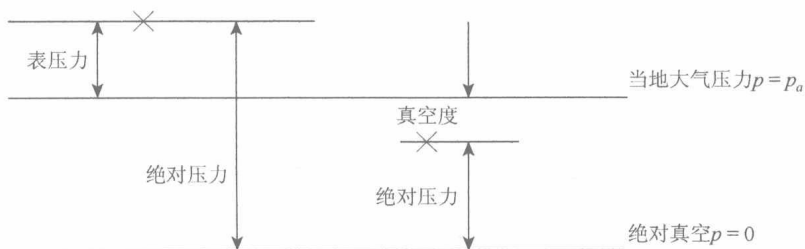


图 1-1 绝对压力、表压力和真空度关系

在工程计算中，常将当地大气压力用标准大气压力代替，即 $p_a = 101325\text{Pa}$ 。

压力单位是 Pa 即 N/m^2 ，较大单位用 kPa ($1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$) 或用 MPa ($1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$)，有时用 bar ($1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ 或 $1\text{bar} = 0.981\text{kgf/cm}^2$)，在气体状态参数计算中常用绝对压力。压力单位换算见表 1-1。

表 1-1 各种压力单位换算

	Pa	bar	kgf/cm ²	lbf/in ²	mmHg	mmH ₂ O
Pa (N/m ²), 帕	1	10 ⁻⁵	1.02 × 10 ⁻⁵	1.45 × 10 ⁻⁴	7.5 × 10 ⁻³	0.102
bar, 巴	10 ⁵	1	1.02	14.5	750	1.02 × 10 ⁴
kgf/cm ² , 千克力每平方米	0.981 × 10 ⁵	0.981	1	14.22	735.6	10 ⁴
lbf/in ² , 磅力每平方英寸	6.9 × 10 ³	0.069	0.07	1	51.71	703
mmHg, 毫米汞柱	133.3	1.33 × 10 ⁻³	1.36 × 10 ⁻³	19.34 × 10 ⁻³	1	13.6
mmH ₂ O, 毫米水柱	9.81	9.81 × 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	1.42 × 10 ⁻³	7.36 × 10 ⁻²	1

注: 1mmHg = 1Torr (托), 1kgf/cm² 称为一个工程大气压, 760mmHg 称为一个物理大气压。

(2) 温度

温度是状态参数中另一个重要的物理量参数。在工程上经常使用的温度有摄氏温度和热力学温度; 热力学温度又称绝对温度。它们关系是

$$T = 273.15 + t \text{ (K)} \quad (1-1)$$

式中, T ——热力学温度, K;

t ——摄氏温度, °C。

由式 (1-1) 可知, 绝对零度即 $0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$ 。

在研究流体物理性能时, 要注意该物理性能是处于标准状态或基准状态, 还是特定某一状态。

标准状态: 是指温度 20°C , 压力 0.1MPa 时的状态, 在该状态下的参数可在单位后面标注“ANR”。例如, 标准状态下流量是 $30\text{m}^3/\text{h}$, 可写成 $30\text{m}^3/\text{h}$ (ANR), 或在参数代号 (符号) 下加脚标“N”, 例如, 标准状态压力 $p_N = 0.1\text{MPa}$, 流量 $Q_N = 30\text{m}^3/\text{h}$ 等。

基准状态: 指温度 0°C , 压力 101.3kPa 时的状态, 在气体参数计算中, 要注意区别基准状态和标准状态。

2. 密度与比容

流体是物质, 它具有质量。单位体积流体含的质量称为密度, 用 ρ 表示, 密度的倒数称比容 (或比体积), 用 v 表示, 即表示单位质量流体所占有的体积。可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ v &= \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \text{ (m}^3\text{/kg)} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

或

式中, m ——流体质量, kg;

V ——流体体积, m³。

液体的密度随温度和压力的变化很小，一般情况下可以忽略不计。因此在液压技术中常把液压油的密度看作常数，即 $\rho = C$ 。

气体的密度与其所处状态有关，例如，空气在标准状态下，相对湿度为 65% 时，其密度 $\rho = 1.185 \text{kg/m}^3$ 。在基准状态下，干空气的密度 $\rho = 1.293 \text{kg/m}^3$ 。或用以下公式计算：

$$\begin{aligned} \text{对于干空气} \quad \rho &= 3.482 \times 10^{-3} p_{\text{ABS}} / T \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ \text{对于湿空气} \quad \rho &= 3.482 \times 10^{-3} (p - 0.378 \varphi p_v) / T \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中， p_{ABS} ——空气绝对压力，Pa；

T ——空气的热力学温度，K；

φ ——相对湿度，%；

p_v ——温度为 273K 时饱和水蒸气分压力（又称饱和蒸汽压），Pa。可查表 1-2。

表 1-2 饱和湿空气表（在 101.23kPa 下）

温度/°C	饱和水蒸气密度 ρ_v (g/m ³)	饱和水蒸气分压力 p_v /kPa	温度/°C	饱和水蒸气密度 ρ_v (g/m ³)	饱和水蒸气分压力 p_v /kPa	温度/°C	饱和水蒸气密度 ρ_v (g/m ³)	饱和水蒸气分压力 p_v /kPa	温度/°C	饱和水蒸气密度 ρ_v (g/m ³)	饱和水蒸气分压力 p_v /kPa
-60	0.019	0.0011	-20	1.02	0.102	11	10.00	1.310	32	33.77	4.751
-58	0.024	0.0014	-18	1.26	0.125	12	10.65	1.400	33	35.60	5.025
-56	0.030	0.0018	-16	1.48	0.151	13	11.33	1.495	34	37.54	5.314
-54	0.038	0.0024	-14	1.73	0.181	14	12.06	1.595	35	39.55	5.617
-52	0.049	0.0031	-12	2.02	0.218	15	12.81	1.702	36	41.65	5.936
-50	0.060	0.0039	-10	2.25	0.260	16	13.61	1.813	37	43.87	6.270
-48	0.075	0.0050	-8	2.73	0.310	17	14.46	1.936	38	46.15	6.619
-46	0.093	0.0064	-6	3.16	0.369	18	15.36	2.060	39	48.54	6.985
-44	0.114	0.0081	-4	3.66	0.437	19	16.29	2.193	40	51.05	7.371
-42	0.141	0.0102	-2	4.22	0.517	20	17.28	2.334	45	65.28	9.576
-40	0.172	0.0129	0	4.845	0.610	21	18.31	2.484	50	82.77	12.33
-38	0.210	0.0161	1	5.190	0.656	22	19.41	2.640	55	103.9	15.73
-36	0.255	0.0201	2	5.555	0.705	23	20.55	2.806	60	129.6	19.91
-34	0.309	0.0249	3	5.944	0.757	24	21.76	2.980	65	160.3	24.98
-32	0.373	0.0309	4	6.356	0.812	25	23.02	3.163	70	196.8	31.13
-30	0.448	0.0381	5	6.793	0.871	26	24.34	3.357	75	239.9	38.51
-28	0.536	0.0468	6	7.255	0.934	27	25.73	3.561	80	290.6	47.32
-26	0.640	0.0573	7	7.745	1.001	28	27.19	3.776	85	349.8	57.75
-24	0.761	0.0701	8	8.263	1.071	29	28.73	4.000	90	418.3	70.04
-22	0.903	0.0853	9	8.811	1.147	30	30.32	4.239	95	497.5	84.44
—	—	—	10	9.390	1.226	31	32.01	4.488	100	588.7	101.23

3. 比热容

(1) 比热容

物体温度升高 1K (或 1°C) 所需要的热量称为该物体的热容量; 单位质量物质的热容量称为该物质的比热容 (质量热容), 用 c 表示, 单位为 J/(kg·K) 或 kJ/(kg·K), (热量法定单位是焦耳, 即 J, 1J = 1N·m)。如果物质吸收热量 δQ , 温度升高 δT , 则该物质的比热容:

$$c = \frac{\delta q}{\delta T} \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-4)$$

因热量是个过程量, 故比热容也是个过程量, 不同的加热过程其热容的数值也不同。常用的有比定容热容和比定压热容。

比定容热容 c_v 是指单位质量物体在等容加热过程中温度升高 1K 所需热量; 比定压热容 c_p 是指单位质量物体在等压加热过程中温度升高 1K 所需热量, 因而式 (1-4) 可写为

$$c_v = \frac{\delta q_v}{\delta T} \text{ 及 } c_p = \frac{\delta q_p}{\delta T} \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-4)'$$

(2) 比热容比

由理想气体的热力学原理知道 c_p 与 c_v 关系是

$$c_p - c_v = R \quad (1-5)$$

式中, R ——气体常数, J/(kg·K)。

由式 (1-5) 可知, 气体的 c_p 大于 c_v , 这是因为定容时气体不对外膨胀做功, 所加入热量全部用于增加气体本身的热力学能, 使温度升高; 而在定压过程中, 气体在受热温度升高的同时, 还要克服外力对外膨胀做功, 因而在定压过程中温度同样升高 1K 所需热量比定容过程多。对于不可压缩流体及固体, 其 $c_p = c_v$ 。

c_p 与 c_v 的比值称为比热容比又称为绝热指数, 用符号 k 表示, 即

$$k = c_p / c_v \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 和式 (1-6) 可得

$$c_p = \frac{k}{k-1} R \text{ 及 } c_v = \frac{1}{k-1} R \quad (1-7)$$

表 1-3 中给出了常用气体比热容比的值。

表 1-3 常用气体的分子质量、气体常数、低压下的比热容和摩尔热容

气体名称	M	c_p	c_v	R	k
	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	C_p/C_v
氩 (Ar)	39.94	0.523	0.315	0.208	1.67
氦 (He)	4.003	5.200	3.123	2.077	1.67
氢 (H ₂)	2.016	14.32	10.19	4.124	1.40
氮 (N ₂)	28.02	1.038	0.742	0.297	1.40
氧 (O ₂)	32.00	0.917	0.657	0.260	1.39
一氧化碳 (CO)	28.01	1.042	0.745	0.297	1.40
空气	28.97	1.004	0.717	0.287	1.40
水蒸气 (H ₂ O)	18.016	1.867	1.406	0.461	1.33
二氧化碳 (CO ₂)	44.01	0.845	0.656	0.189	1.29
二氧化硫 (SO ₂)	64.07	0.644	0.514	0.130	1.25
甲烷 (CH ₄)	16.04	2.227	1.709	0.519	1.30
丙烷 (C ₃ H ₈)	44.09	1.691	1.502	0.189	1.13

注: $R = R_0/M$, $R_0 = 8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, $c_v = c_p - R$ 。

二、气体状态方程和热力过程

1. 理想气体状态方程

绝对压力 p , 质量体积 (比容) v 和热力学温度 T 之间关系, 称为气体的状态方程。理想气体状态方程是

$$pv = RT \quad (1-8)$$

$$\text{或 } p = \rho RT = \rho \frac{R_0}{M} T \quad (1-9)$$

式中, R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $R = R_0/M$, 可参阅表 1-3;

v ——比容, m^3/kg , $v = 1/\rho$;

T ——热力学温度, K ;

p ——压力 (绝对压力), Pa ;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

R_0 ——通用气体常数, 对任何气体都是同一值, $R_0 = 8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M ——气体分子质量, kg/kmol ; 可参阅表 1-3。

对一定质量的气体，气体状态方程可写成

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (1-10)$$

对封闭容器中的气体和流动中的气体，上述方程都可使用，对流动中的气体， p 、 ρ 、 T 是同一流体质点处于不同位置时的三个基本状态参数。

利用气体状态方程，可将有压状态下的气体体积折算成标准状态下的气体体积，已知有压状态下 p 、 T 、 V 转为标准状态， p_N 、 T_N 的体积 V_N ：

$$V_N = V \frac{p T_a}{p_N T} \quad (1-11)$$

在常温下，只要压力不超过 5MPa，工程上 O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 等气体，以及主要由这些气体组成气体混合物，都可以作为理想气体处理。在气动技术所使用的压力范围 $\leq 2\text{MPa}$ 内，实际气体压缩率几乎等于 1，因此可将气动计算中压缩空气看成理想气体。

2. 绝热过程

工程实际的热力过程是多种多样的，为了突出实际过程中状态参数变化的主要特征，将实际过程近似为具有简单规律的典型过程。如定容、定压、定温、定熵过程等。这些过程在理论上可以用比较简单的方法进行分析计算，且所得结果一般与实际过程相近，常用来定性分析和评价热力过程。

流体（或气体）流经阀门的状态，因某一质点气体流经阀门时间很短，气体与外界没有热量交换的状态变化过程，近似于绝热过程，又称定熵过程。其特征是气体的所需比热量 $\delta q = 0$ ， $q = 0$ 根据热力学第一定律：

$$q = U + \omega \quad (1-12)$$

式中， q ——从外界吸取单位介质热量，J/kg，称比热量；

ω ——对外所作单位介质膨胀功， $\omega = pv$ ，J/kg；

U ——单位介质本身热能的变化量，J/kg，称比内能，在理想气体中 $dU = c_v dT$ ；

v ——比容， m^3/kg ；

p ——绝对压力，Pa。

比焓 h ，主要是表明所具有作功的内能量，与 q 的物理意义不同，但计量单位一样。

$$h = U + pv \quad (1-13)$$

式中， h ——比焓，J/kg，在理想气体中 $dh = c_p dT$ ；

比熵 S ：气体温度对热交换起着“推动力”作用，其状态变化标志着热交换是否进行，这个状态变化参数就是比熵 S 。在实际应用中，关心的不是比熵绝对值，而是比熵变化 δS ，即

$$\delta S = \delta q/T \quad (1-14)$$

式中, S ——比熵, $J/kg \cdot K$;

q ——比热量, J/kg ;

T ——温度, K 。

绝热过程是气体在和外界没有热交换情况下所进行的膨胀或压缩过程。即由式 (1-14) 得 $\delta S = \delta q/T = 0$, S 为常数, 对于理想气体绝热过程: 热力学第一定律表示为 (推导从略)

$$dS = c_v \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v} \quad (1-15)$$

将式 (1-15) 积分得到 $\frac{c_p}{c_v} \ln v + \ln p = \ln p v^{c_p/c_v} = p v^k = \text{常数}$, 因而

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k, \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}, \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-16)$$

根据热力学第一定律流体介质绝热过程所作技术功, 等于焓的减少, 即技术功 $\omega_t = -\Delta h = h_1 - h_2$ 。该式可以进一步表示为

$$\omega_t = c_p(T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = k \omega \quad (1-17)$$

式中 $\omega = \frac{R T_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$, 称膨胀功。在定温过程中技术功与膨胀功数值上相等,

在定熵过程的技术功是膨胀功的 k 倍。

各种热力过程的计算公式列于表 1-4 中。

表 1-4 各种热力过程的计算公式

过程	过程方程式	初、终状态参数间的关系	交换的功量		交换的热量 $q/(J/kg)^{\text{②}}$
			$\omega/(J/kg)$	$\omega_t/(J/kg)^{\text{①}}$	
定容	$v = \text{定数}$	$v_2 = v_1; \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	0	$v(p_2 - p_1)$	$c_v(T_2 - T_1)$
定压	$p = \text{定数}$	$p_2 = p_1; \frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	或 $\frac{p(v_2 - v_1)}{R(T_2 - T_1)}$	0	$c_p(T_2 - T_1)$
定温	$p v = \text{定数}$	$T_2 = T_1; \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	ω	ω