

磁记录实用摩擦学

Ci Ji Lu Shi Yong Mo Ca Xue

施文康 黄晓鸿 赵哲明 编著

上海交通大学出版社

磁记录实用摩擦学

施文康 黄晓鸿 赵哲明编著

上海交通大学出版社

(沪)新登字205号

内 容 提 要

磁记录技术现已渗透到社会生活的各方面。摩擦学作为磁记录技术中的一个重要分支对磁记录的发展起着至关重要的作用。本书结合作者近年来教学与科研工作的实践,对磁记录技术中的摩擦学原理作了系统的叙述。全书共分11章,内容包括基本概念、摩擦和磨损、流体润滑理论、磁头空气轴承的设计计算及测试,静压轴承等内容。

本书可作为高等院校计算机外部设备、磁记录设备专业的教材或教学参考书,也可供从事这方面工作的有关科技人员参考。

磁记录实用摩擦学

出 版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:江苏太仓印刷厂

开 本:850×1168(毫米)1/32

印 张:7.625

字 数:195000

版 次:1992年7月 第1版

印 次:1992年8月 第1次

印 数:1—1480

科 目:274—321

ISBN 7-313-01056-7/TN·388

定 价:2.45元

目 录

绪 论	(1)
第 一 章 基本概念	(5)
§ 1—1 流体的粘性	(5)
§ 1—2 流体的导热性	(7)
§ 1—3 气体的性质	(9)
第 二 章 摩擦表面形态与表面接触	(13)
§ 2—1 固体表面形貌参数	(13)
§ 2—2 固体表面结构与表面性质	(15)
§ 2—3 固体表面的接触	(18)
第 三 章 摩擦原理	(24)
§ 3—1 摩擦的概念与分类	(24)
§ 3—2 摩擦理论概述	(25)
§ 3—3 滑动摩擦的影响因素	(32)
第 四 章 磨损原理	(35)
§ 4—1 磨损的概念与分类	(36)
§ 4—2 磨损原理	(37)
§ 4—3 影响磨损的因素	(42)
§ 4—4 减少磨损的途径	(46)
参考文献 (1~4 章)	(48)
第 五 章 磁记录设备中的摩擦磨损问题	(49)
§ 5—1 摩擦	(49)
§ 5—2 磨损	(51)
§ 5—3 粘结	(52)
§ 5—4 摩擦聚合生成物	(53)

参考文献·····	(54)
第 六 章 流体流动导论 ·····	(55)
§ 6—1 流体运动的表示方法·····	(55)
§ 6—2 运动加速度·····	(57)
§ 6—3 流线与轨迹线·····	(59)
§ 6—4 流体速度的分析·····	(60)
§ 6—5 有旋运动和无旋运动及速度势·····	(66)
第 七 章 流体润滑基本方程 ·····	(68)
§ 7—1 作用于流体的力及应力张量·····	(68)
§ 7—2 变形速度与应力的关系·····	(75)
§ 7—3 连续方程·····	(77)
§ 7—4 纳维-斯托克斯方程·····	(79)
§ 7—5 雷诺方程·····	(84)
§ 7—6 能量方程·····	(89)
§ 7—7 初始条件和边界条件·····	(94)
参考文献 (6~7 章) ·····	(97)
第 八 章 无限宽平面和径向气体轴承 ·····	(98)
§ 8—1 无量纲化的雷诺方程·····	(98)
§ 8—2 无限宽平面气体轴承的静态特性·····	(101)
§ 8—3 阶梯形轴承·····	(112)
§ 8—4 斜面-平面组合轴承·····	(114)
§ 8—5 无限宽径向气体轴承的静态性能·····	(116)
§ 8—6 分子平均自由程对动压气体轴承 性能的影响·····	(121)
参考文献·····	(123)
第 九 章 用于空气轴承分析的数值方法 ·····	(124)
§ 9—1 微分与积分有限差分法·····	(124)
§ 9—2 用于静态分析的摄动法·····	(127)
§ 9—3 用于动态分析的摄动法·····	(132)

§ 9-4	模式有限差分法	(185)
§ 9-5	有限元法	(141)
§ 9-6	配置法	(149)
§ 9-7	温彻斯特型磁头空气轴承的 静态特性分析	(154)
§ 9-8	温彻斯特型磁头空气轴承的 动态特性分析	(159)
§ 9-9	磁盘表面缺陷对温彻斯特型 磁头空气轴承的影响	(167)
参考文献		(170)
第十章	对空气动压支承性能的测试	(172)
§ 10-1	电容法	(172)
§ 10-2	电感法	(174)
§ 10-3	光学干涉法	(174)
§ 10-4	激光多普勒法	(179)
§ 10-5	用磁头本身的读出信号来测定磁头 空气支承的动态性能	(182)
§ 10-6	用声发射检测头与盘的接触	(184)
参考文献		(186)
第十一章	静压轴承	(187)
§ 11-1	概述	(187)
§ 11-2	液体静压润滑	(190)
§ 11-3	气体静压润滑基本原理	(216)
§ 11-4	气体静压轴承的计算	(225)
参考文献		(234)

绪 论

摩擦学是摩擦、磨损和润滑学科的总称。它是一门对国民经济具有重要意义的综合性学科，近30年来得到特别迅速的发展。摩擦、磨损所造成的损失已大到惊人的程度，因此受到人们普遍的重视。据估计，全世界大约有 $1/3$ 的能源以各种形式消耗在摩擦上。而摩擦导致的磨损是机械设备失效的主要原因，在所损坏的机器零件中，大约有80%是由磨损造成的。在磁记录系统中，摩擦、磨损问题亦是一个关键技术问题，直接关系到磁记录设备的可靠性和使用寿命。

摩擦、磨损和润滑三者是密切相关的。摩擦引起能量的转换，磨损引起表面损坏和材料损耗，而润滑是降低摩擦和减少磨损的最有效的措施。流体润滑是国内外科科技工作者所取得的一大成果，它已广泛应用于各个领域。本书叙述流体润滑的一般理论，但偏重于叙述气体润滑和气体轴承。

对于机械工程师和研究人员来说，气体轴承已不是什么陌生的技术了。气体轴承本质上是一对由一层具有一定承载能力和润滑能力的气膜隔开的精加工表面。这种轴承已经广泛应用于机械、仪表、计算机等行业，其性能亦在不断地完善、提高和发展。设计工作者之所以乐于使用它，研究工作者之所以对有关的课题抱极大的兴趣，是由于气体轴承具有独特的优点，以及它的需要量正在日益增长。气体轴承的优点大致有如下几点：

①到处有空气可供使用。一般情况下轴承都处于空气中，虽然对于静压空气轴承，空气在进入轴承前先得压缩和净化，然而空气仍不失为一种廉价的润滑剂。对于整体结构也不必考虑空气的回收。

②不产生环境污染。对于要求具有清洁工作条件的场合，诸如测试仪器、化学和食品机械等，它具有特别大的意义。

③特别小的滑动摩擦力。在一些由于较大的摩擦力会影响甚至阻碍其作用的场合，如测量仪器、陀螺仪等，气体润滑支承常常是理想的支承元件。

④气体在高温条件下也可应用于润滑。气体动力粘度很少受温度的影响，而且随着温度的升高而增大。相反，液体的动力粘度将随着温度的升高而显著降低。

⑤噪音、振动小。

⑥维修简单。

与上述优点相反，它的不足之处在于：

①由于气体的动力粘度很小，因而气体轴承的承载能力很小，而且在速度提高时，由于气体的压缩性，其承载能力也不能明显地提高。

②要求滑动表面具有特别高的宏观和微观几何精度。由于气体的微小粘度而必须要求保持很小的轴承间隙。滑动表面的变形和粗糙度允差只许分配到本已相当小的间隙的一部分。

③由于气体的微小粘度而使气体轴承具有很小的阻尼，因此气体轴承中自激振动的趋势是经常存在的。

④一个纯动压气体轴承在启动和停车时所碰到的困难大于液体润滑轴承。由于启动和停车时失去了产生动压的速度条件，轴承滑动面间不存在气体润滑而呈现“干摩擦”现象。在停车时，轴承因丧失了承载能力而导致滑动面间的相互碰击，这将可能直接引起或加速轴承滑动表面的磨损，以致破坏。

根据轴承面间压力形成的方式不同，气体轴承可分为静压型和动压型两类。静压轴承是由外界向轴承表面间输入一定压力的压缩气体而具有支承能力的（见图1(c)）；动压轴承内的压力则是由轴承的两个表面的相对高速运动所产生的，图1(a)为最一般的气体动压型。当其中一表面相对于另一表面滑动时，两滑动表

面间的气楔产生压力。图1(b)也是一种气体动压型。其压力也是在两表面作相对运动的过程中形成的,然而这种相对运动不是两表面的相对滑动,而是垂直于滑动表面的振动。静压轴承适用于低速场合,如在大规模集成电路制造设备中,在诸如三坐标测量机等精密仪器中都广泛采用。而动压轴承则可省去静压轴承所必需的那种附加的供气装置。现今在计算机外部设备——磁盘驱动器中的磁头/磁盘组件是空气动压轴承成功而巧妙应用的一个实例。

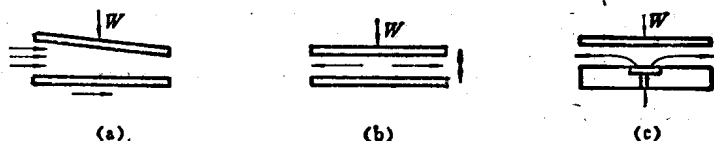


图 1 气体轴承的分类

(a) 气体动压型, (b) 挤压膜型, (c) 气体静压型。

磁盘驱动器是最重要的计算机外部设备之一。它的发展历史是与气体动压轴承的应用及其性能的提高紧密地联系在一起的。

在磁盘驱动器中,数据读写是由磁头和磁盘来完成的。磁头的浮动是应用滑动气体轴承原理使磁头浮动块通过微小的气体动压膜稳定地浮动在高速旋转的磁盘上。根据磁记录原理,为提高记录密度,增加存储容量,就必须尽可能地降低记录介质与磁头的距离,即减少气体轴承的间隙。图 2 表

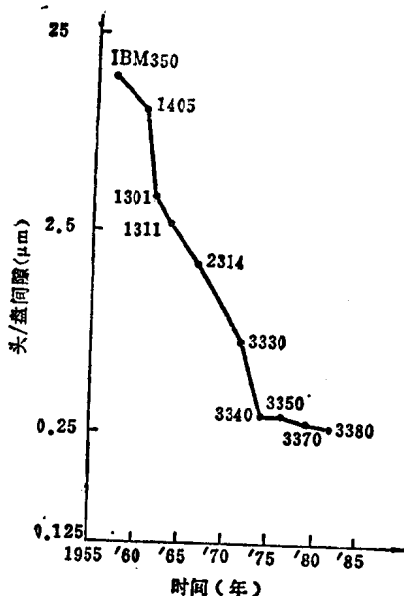


图 2 磁盘驱动器的发展与头/盘间隙的关系

示了代表世界磁盘驱动器发展水平的美国 IBM 公司磁盘驱动器的发展与空气轴承间隙（头/盘间隙）之间的关系。可以看出，每推出一种新产品，都设法使头/盘间隙设计得更小。当今，有些磁盘驱动器的这种间隙已经小到 $0.05\mu\text{m}$ 。

在磁记录这门技术密集的高科技领域中，无论是磁记录设备本身，还是在磁记录设备的制造设备和测试仪器中，都可见到各种气体轴承（静压的和动压的）。为便于从事磁记录专业的同志学习和参考，本书除分章叙述气体动压轴承的工作原理、基本方程、计算方法和性能测试等外，还就静压轴承的原理与计算作简要的叙述。本书所论述的气体轴承虽有一定的针对性，但亦适用于一般应用领域。

第一章 基本概念

§ 1-1 流体的粘性

流体流动时, 流体与固体壁面的附着力以及流体本身之间的分子运动和内聚力, 使流体质点之间可以传递微小的切向力, 流体的这种特性称为粘性。粘性是流体的一种重要特性, 液体和气体动压轴承的性能存在巨大差别主要是由二者的粘性有很大差异造成的。流体力学的理论也往往从流体的粘性开始叙述。

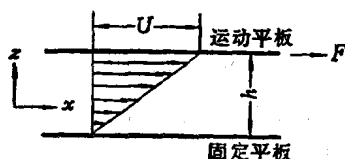


图 1-1 两平行平板间的流体

图 1-1 表示两块互相平行且靠得很近的平板, 两板间充满流体, 下板固定, 上板以速度 U 滑动。实验证明, 流体层对上板或下板的切向摩擦阻力 F 与接触处

的正压力无关, 仅与板的面积 S 以及速度梯度 U/h 成正比, 即

$$F \propto \frac{SU}{h} \quad (1-1)$$

以 τ 表示不同的流体层之间或流体与界壁之间所传递的单位面积上的切向力——切应力, 则

$$\tau \propto \frac{U}{h},$$

或表示为微分形式, $\tau = \mu \frac{dU}{dz}$, 称为流体粘性的牛顿公式, 这是流体力学的基本公式之一。凡是符合此规律的流体称为牛顿型流体。其中 μ 是表征流体粘性的比例系数, 称为动力粘度。 $\frac{dU}{dz}$ 是速度梯度, 实质上就是粘性流体运动时的剪切变形角速度。粘性

表征了流体抵抗剪切变形的能力。

引入与粘度有关的无量纲参数——雷诺数 Re ,

$$Re = \frac{h}{\nu},$$

其中 $\nu = \mu/\rho$ 为运动粘度。

雷诺数的大小决定了流体的流动性质。当 Re 较小时,流层中的流体质点都有秩序地在平行层中流动,称为层流。当 Re 大于某一临界值时,流体质点的运动出现紊乱,称为紊流。

对于有限宽度(宽度为 B)的两平行平板而言,可写出修正的雷诺数 $Re = \frac{\rho U B}{\mu} \left(\frac{h}{B} \right)^2$ 。

当 $Re \ll 1$ 时,则两平板间的流体为稳态层流。

动力粘度 μ 直接表示出流体粘性内摩擦力的大小,单位是 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ (帕·秒)。 μ 的量纲是力·时间/面积。

运动粘度 ν 是流体在同一温度下的动力粘度与密度的比例。单位是 (m^2/s) (平方米/秒)。 ν 的量纲是面积/时间。

除了动力粘度与运动粘度两种衡量流体粘度大小外,工程上常常也用相对粘度。相对粘度也称为条件粘度,它是使用特定的粘度计在规定条件下直接测量的粘度。根据测定条件不同,各国采用的相对粘度单位亦不同。我国、苏联和联邦德国用恩氏粘度,美国用赛氏粘度,英国用雷氏粘度。

恩氏粘度 $^\circ\text{E}$ 是指一定温度下200ml流体从恩氏粘度计中流出所需时间(s),与200ml、20℃的蒸馏水从该恩氏粘度计中流出时间(s)之比值。

恩氏粘度与运动粘度的换算关系为

$$\nu = 0.0731^\circ\text{E} - \frac{0.0631}{^\circ\text{E}} \quad (\text{cm}^2/\text{s}),$$

恩氏粘度与动力粘度的换算关系为

$$\mu = 0.00637^\circ\text{E} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}).$$

温度对流体的粘度都有影响。液体的粘度随温度的升高而降

低，这是由于温度升高后使液体的内聚力减小，而液体运动时的切应力则主要取决于这种内聚力。相反，气体的粘度却随温度的升高而增大，这是因为气体的粘性主要取决于气体分子的运动，温度升高正是加剧了气体分子的运动。在 $-20 \sim +500^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，气体的粘度与温度之间有如下关系：

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (1-2)$$

其中 $T_0 = 273\text{K}$ 。

对于空气来说，上式中 $n = 0.76$ 。

另外，气体的粘性也随压强的变化有微小的变化。

气体的粘度与温度的关系还可以用苏萨兰公式表示，该式较幂次公式准确：

$$\mu \approx \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s},$$

式中 $T_0 = 273.16\text{K}$ ， μ_0 为一个大气压下温度为 T_0 时的气体动力粘性系数， T_s 为苏萨兰常数，与气体的种类有关。表 1-1 列出一些常用气体在 1 个大气压下的动力粘性系数 μ_0 ，分子量以及苏萨兰常数 T_s 。

表 1-1 常用气体的动力粘性系数 μ_0 、分子量及苏萨兰常数 T_s

气 体	动力粘性系数 $\mu_0 \times 10^6 (\text{Pa} \cdot \text{s})$	分 子 量 (mg)	苏萨兰常数 $T_s (\text{K})$
空 气	17.161	28.96	124
氮	16.602	28.013	104
氧	19.200	31.999	125
氢	8.404	2.016	71

§ 1-2 流体的导热性

当流场中存在温度梯度时，将发生热量的传递。流体中的导热是一种分子间的相互作用，处于高能级的分子（通过其温度表征）

把能量传递给邻近的处于较低能级的分子。流场中温度梯度、流体的导热性和传热量三者之间的关系，遵照傅立叶定律

$$q = -\lambda \nabla T,$$

式中 q 为单位时间通过单位面积的热量，指向温度降低的方向； ∇T 为温度梯度； λ 为导热系数，它表征了流体的导热性能。对于各向同性流体， λ 无方向性，只是给定物质的一种属性， λ 随温度和压降而变。 λ 的单位为 $W/m \cdot K$ 。

对于低压（ $\leq 9.8 \times 10^5 Pa$ ）的气体，导热系数主要和温度有关，它随温度升高而增大。

若已知 $10^\circ C$ （ $273.16 K$ ）的导热系数 λ_0 ，则可用以下经验公式计算另一温度 T 时的导热系数：

$$\lambda \approx \lambda_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n,$$

或用苏萨兰公式计算：

$$\lambda \approx \lambda_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s},$$

式中 λ_0 、 T_0 、 n 及 T_s 值见表1-2。注意，这里的 T_s 与计算粘性系数时的 T_s 值不同。

表 1-2 几种常用气体的 λ_0 、 T_0 、 n 及 T_s 值

气 体	$T_0(K)$	$\lambda_0(W/m \cdot K)$	n	$T_s(K)$
空 气		0.02415	0.81	194
氮	273.16	0.02424	0.76	167
氧		0.02457	0.86	222
氢		0.16275	0.85	167

液体的导热系数基本上与压强无关，它随温度的变化也较气体弱得多。大部分液体的导热系数随温度升高而减小（水例外）。

§ 1-3 气体的性质

气体是流体的一类，流体力学的理论当然亦适用于气体。由于气体和液体某些基本性质的差别，而具有其自身所固有的某些独有的特性，还需要一些独特的方程描述。

气体有如下一些基本特性：

①气体的粘度小。例如在温度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的条件下，空气的动力粘度大约是机油粘度的 $1/4000$ ，水和煤油粘度的 $1/60\sim 1/100$ 。这就是气体轴承的承载能力不能作得很大的原因。然而，正是由于它的低粘度，可使这种气体轴承的摩擦损耗很小。如前所述，随着温度的升高，气体的粘度有所上升。例如在大气压强下，当温度从 20°C 升高到 80°C 时，机油的动力粘度减小到 $1/14$ ，而在同样的条件下，空气的动力粘度增大 16% 。另外，气体的粘度也随压强的变化有微小的变化。表1-3和图1-2分别给出空气粘度在大气压强下随温度变化的数值和几种气体的粘度与压强的变化曲线。

表 1-3 空气粘度随温度变化的数值（大气压下）

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	运动粘度系数 ν (m^2/s)	动力粘度系数 μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
-17.8	1.382	1.171×10^{-5}	1.57×10^{-5}
-6.7	1.326	1.233×10^{-5}	1.68×10^{-5}
+4.4	1.274	1.356×10^{-5}	1.73×10^{-5}
15.6	1.222	1.458×10^{-5}	1.79×10^{-5}
20.0	1.202	1.436×10^{-5}	1.80×10^{-5}
26.7	1.176	1.570×10^{-5}	1.84×10^{-5}
37.8	1.135	1.672×10^{-5}	1.90×10^{-5}
48.9	1.109	1.756×10^{-5}	1.95×10^{-5}

②在很宽的温度范围内，气体的化学性能比液体稳定。

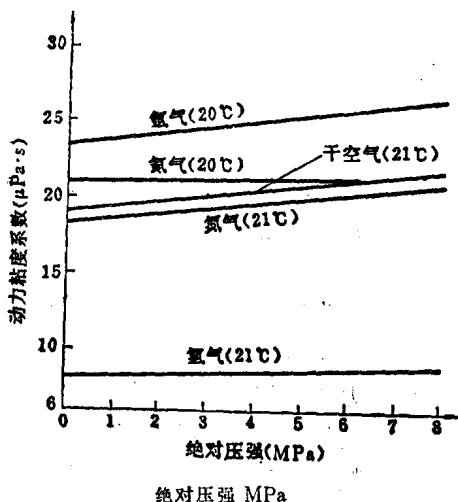


图 1-2 几种气体的动力粘度系数与绝对压力的变化曲线

③气体是可压缩性介质。因此它在轴承的间隙中流动时，其密度与压强、流速、流通截面积的变化有很大关系。这就给计算带来一定的复杂性。

④气体是无空穴现象的介质。与液体不同，在气体润滑时，润滑膜没有中断现象。

⑤气体是一种清洁的润滑剂。在必须防止常用润滑剂的挥发生成

物或润滑剂本身污染轴承周围介质的情况下，气体轴承具有重要的意义。

假设有一种气体，它的分子本身没有容积，分子间也没有内聚力，是一群彼此互不干扰的完全自由运动着的弹性质点集合体，这样抽象化了的气体称作理想气体。

理想气体的密度 ρ ，绝对温度 T ($T = 273 + t$) 及绝对压强 p 之间的关系，可用如下状态方程表示：

$$\frac{p}{\rho} = RT. \quad (1-3)$$

理想气体实际上当然是不存在的。但有许多气体，诸如空气、氮气、氦气、氢气、二氧化碳等，当压力不太高，温度不太低的情况下（例如压强不超过 200 大气压、温度不低于 -20°C 的状态时），其性质非常接近于理想气体，基本上遵循上述状态方程。方程中 R 为气体常数，不同的气体具有不同的 R 值，但气体常数与气体分子量 M_w 的乘积则为一恒定值，称为普适气体常数，用

R_m 表示:

$$R_m = 8.3143 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 8.3143 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}。$$

表1-4列出了一些气体的物理性质参数。

表 1-4 气体的物质性质

气体名称	分子量	R kJ/(kg·K)	$R \times 10^8$ Pa·m ³ /(kg·m)	0°C时的等压比热 C_p KJ/(kg·K)	绝热指数 $K = C_p/C_v$
空气	28.98	0.2868	2.868	1.004	1.40
氦	4.003	2.007	20.77	5.236	1.66
氢	39.95	0.2081	2.081	0.523	1.67
氫	2.016	4.124	41.24	14.24	1.41
氧	32.00	0.2508	2.598	0.914	1.40
氮	28.01	0.2968	2.968	1.04	1.40
一氧化碳	28.01	0.2968	2.968	1.041	1.40
二氧化碳	44.00	0.1889	1.889	0.819	1.301

气体的实际的热力学过程可抽象概括为几种典型的可逆过程: 定容、定压、定温、绝热及多变过程。

定容过程是气体在容积或比容不变时进行加热或放热的过程, 由于 V 为常数, 则状态方程式 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ 成为

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}。$$

定压过程是气体在压力不变时进行加热或放热的过程, 此时状态方程式成为

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}。$$

定温过程中, $T_1 = T_2$, 气体初、终两状态之间的关系为 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ 。

绝热过程就是工质(气体)和外界没有热交换时所进行的膨胀或压缩过程。描述绝热过程的状态方程式 $pV^k C_v$ 为常数, 其中