

真空技术的科学基础

陈 丕 瑾 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十章。第一章至第九章是真空技术的理论基础部分,包括气体的基本特性、气体分子运动论、扩散、非理想气体的状态方程与分子力、气-固-液界面和气体的流动等。第七至第九章(气体的流动)详细介绍了计算分子流流导的经典处理法、传输几率法、几何因子法、蒙特卡洛法等。第十章是真空技术部分,除了介绍作者的成果之外,也介绍了近十年发展起来的新真空规和真空泵。

本书可供从事真空技术研究、生产、应用的工程技术人员及大专院校有关专业的师生参考。

真空技术的科学基础

陈丕瑾 编著

责任编辑 马征宇

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 22 $1/2$ 591千字

1987年3月第一版 1987年3月第一次印刷 印数: 0,001—2,000册

统一书号: 15034·3068 定价: 6.00元

序

真空技术对于科学技术、工业等多方面的重要性是不待强调而知的。近年来，真空度、抽速及其产生方法等都有空前的提高和进展，应用也日益扩大。这是实践与理论互相促进的结果。技术虽然日新月异，但基础理论则永葆其正确与普适性。所以凡从事真空技术者欲窥探真空的真谛，必须坚实地掌握真空技术的科学基础。

陈丕瑾同志所著《真空技术的科学基础》一书从经典的分子运动论开始，着重阐明了在不同压强的气体分子的性能，输运规律和气体分子（包括带电的粒子和光子）与物质在界面上的相互作用的基本规律，介绍了各种较新的计算和实验方法。这是他从事真空技术多年的实践和教学经验中总结出来的知识结晶，一定会给真空工作者以系统的科学知识而俾益于其学业与技术上的进展。

孟昭英

1985年于北京

前 言

真空技术的任务是提供比大气稀薄的环境。最早的真空获得可以追溯到遥远的古代，中医用的拔火罐就是一个杰出的例子。但是，历史上有确切记载的是托里卸利（Torricelli, 1643年）或维伐尼（Viviani, 1644年）利用充满水银的毛细管倒置获取所谓托里卸利真空；随后由德斯卡特斯（Descartes, 1647年）发明了水银柱压力计，并用它首次测量了真空和大气压；与此相应，波以耳（Boyle, 1661年）和伯努利（Bernoulli, 1738年）分别提出了波以耳定律和气体分子运动论，奠定了真空物理的基础。

从1643年（或1644年）获得托里卸利真空开始，到爱迪生（Edison, 1879年）发明电灯泡为止的二百多年间，真空技术经历了一个漫长的发展过程，这个过程孕育着电子学的诞生和发展，而电子学的发展又推动着真空物理和技术的进步，并奠定了真空技术的基础。本世纪初，盖德（Gaede）相继发明了机械泵、分子泵和扩散泵，使真空技术从低真空发展到高真空，而盖德、郎缪尔（Langmuir）、何增禄等则对真空物理基础的奠定起着重要作用。

近二十年来，真空技术是与尖端科学技术一起发展的，特别是在超大规模集成（ULSI）、等离子体核聚变装置、带电粒子加速器等方面。目前还在不断开拓真空技术新的应用领域，某些新材料（如超低温、超导材料）、新工艺（超微粉末制造和固体元件制造工艺、分子束外延）、新器件（如表面薄膜器件和约瑟夫器件）、新技术（如表面分析、催化、激光、超导、太阳能利用）对真空技术提出越来越高的要求。真空技术促进了计算机事业的发展，而计算机和微处理机引入真空技术，则改善了真空系统的设

计计算和控制技术。今天的真空技术已能获得和量测从大气压到 10^{-15}Pa ($\approx 10^{-17}\text{Torr}$) 的宽达 20 个数量级的压强范围, 并随着某些新应用的开拓而要求一步步接近“什么也不存在”的理想真空状态。

正如本书第一章绪论所指出的, 在覆盖如此宽广的压强范围内, 物理特征是有显著差别的, 因此, 物理基础也不尽相同。本书的理论部分(从第一章到第九章)由三部分组成, 即气体分子运动论, 真空技术中的界面现象和真空中的气体流动。在气体分子运动论中, 从基本假设和麦氏分布函数的运用入手, 着重于获得入射频率(即碰壁数)和余弦定律这两个公认为真空技术的基本表达式。输运现象是一种非平衡态过程, 在真空技术中, 三种输运现象(扩散、热传导和内摩擦)十分重要, 我们以真空管吸热器和磁悬浮转子规为例分别阐明热传导和内摩擦现象的应用。在界面现象中着重讨论气-固界面现象, 包括气体从固体表面的吸附、脱附, 带电粒子和光子与固体表面的彼此作用等等, 在这里特别强调了真放气率和净放气率概念的差别, 并指出已发表的许多材料放气的数据多半是净出气率。本书还用了相当的篇幅探讨了气-液-固界面现象, 这往往被有关专著所忽略。在讨论气体通过壁面有吸附作用的导管的扩散和气体通过固体的扩散时, 强调指出存在延迟时间和稳定时间两个完全不同的概念, 许多专著把它们混为一谈, 实际上, 延迟时间约等于稳定时间的 $1/3$, 对此可用无规行走的概念进行解释。在气体流动中, 着重分析了分子流现象, 系统地整理了传输几率法, 这种方法的奠基者是我国物理学家何增录先生, 他于 1932 年提出何氏系数, 实际上这是传输几率最早的定义。今天传输几率法已成为真空系统分子流流导计算的一个重要分支, 在书中我们从传输几率的定义出发, 系统地整理了奥特莱(Oatley)、贝伦斯(Ballance)、宾逊(Pinson)、圣特勒(Santerner)、黑菲尔(Heifer)等人的工作, 把散于各处的文献汇编成章, 并详细列举它的应用及其限制。这里要提一下的是贝伦斯例题中的一个错误, 由此不得不修改应用贝伦斯第

二定律时的一个原则。此外，本书简单而扼要地介绍了蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 法在真空技术中的应用以及计算分子流流导的角系数法和克劳辛 (Clausing) 方程。对于计算流导的经典处理方法——与电路类比法也作了介绍，近年来发展的电阻网络法就是在经典处理法的基础上发展起来的。本书的最后一章是真空技术部分，主要介绍作者的观点、经验和某些试验。

本书的部分内容曾作为教材于1981~1984年度在清华大学无线电电子学系的电子物理、电子材料、激光、真空和表面科学专业，以及工程物理系加速器专业的本科生和部分研究生中试用。其中习题及题解限于篇幅，只好分册另行出版。

本书在撰写过程始终得到吾师孟昭英先生的关怀和指导，在这里表示深切的谢意。

谨向全面和详细校阅了本书，并提出大量宝贵意见的马丽平、吴金生、李昌全和王大文同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中一定存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

陈丕瑾于清华园

1984年12月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 气体的特性	2
1.1.1 气体的简单经验定律	2
1.1.2 气体的可逆等温膨胀	5
1.1.3 气体向真空室的快速绝热膨胀	5
1.1.4 一摩尔理想气体的比热容	6
1.1.5 可逆绝热膨胀	12
1.1.6 气体在绝热膨胀过程中做的功	13
1.1.7 绝热膨胀过程对温度的影响	13
1.1.8 膨胀时熵的变化	13
§ 1.2 真空区域的划分	14
第二章 气体分子运动论	18
§ 2.1 气体分子运动论的基本假设	18
§ 2.2 气体分子运动论积分	19
§ 2.3 球坐标与立体角	21
2.3.1 球坐标	21
2.3.2 立体角	22
§ 2.4 气体的压强与密度	23
§ 2.5 气体分子的速度分布——麦克斯韦速度分布函数	29
§ 2.6 麦克斯韦速度分布的某些特性	32
§ 2.7 碰撞对分布函数 f 的影响	39
2.7.1 弹性碰撞引起的速度变化	39
2.7.2 碰撞对分布函数 f 的影响	41
2.7.3 分布函数 f 随时间 t 的变化率	44
§ 2.8 气体分子的碰撞频率	46
2.8.1 计算碰撞频率的简单模型	46
2.8.2 计算碰撞频率 ^①	47
2.8.3 计算以同一速度运动的分子束之间的碰撞频率	51
§ 2.9 自由程长度	53
2.9.1 单一气体的平均自由程	53
2.9.2 混合气体的平均自由程	54

2.9.3	平均自由程与速度的关系	55
§ 2.10	自由程长度的分布律	58
§ 2.11	稀薄气体中的分子间作用力	60
§ 2.12	分子散射现象	68
2.12.1	两分子之间的碰撞散射	68
2.12.2	广义的碰撞截面或散射截面	80
§ 2.13	入射频率与余弦定律	85
§ 2.14	入射频率 (碰壁数) 的某些应用	91
2.14.1	理想抽速的概念	91
2.14.2	蒸发率与饱和蒸气压	92
2.14.3	气体通过小孔的流动	93
2.14.4	热流逸现象	95
2.14.5	单分子形成时间	97
§ 2.15	输运现象 I ($K_n \ll 1$) —— 非平衡态过程	98
2.15.1	自扩散	98
2.15.2	互扩散	101
2.15.3	输运方程的统一形式	107
2.15.4	内摩擦现象	108
2.15.5	热传导现象	114
2.15.6	关于 $K_n \ll 1$ 时输运现象的一般讨论	117
§ 2.16	输运现象 II ($K_n > 1$) —— 非平衡态过程	118
2.16.1	自由分子粘滞性	118
2.16.2	自由分子热传导	122
2.16.3	自由分子扩散现象 —— 气体通过导管的流动	131
§ 2.17	输运现象 III ($K_n \approx 1$) —— 非平衡态过程	137
2.17.1	压强下降对粘滞性的影响	137
2.17.2	气体压强对热传导的影响	138

第三章 扩散

§ 3.1	扩散过程的基本定律	144
3.1.1	扩散方程	144
3.1.2	稳态扩散	147
3.1.3	非稳态扩散	149
3.1.4	瞬时源头的扩散问题	158
3.1.5	无规行走问题	160
3.1.6	无规行走与扩散的关系	165
3.1.7	气体通过薄膜的扩散	167
3.1.8	气体通过壁面有吸附作用的导管的扩散	170
§ 3.2	表面扩散	175

第四章 非理想气体的状态方程与分子力	179
§ 4.1 真实气体的状态方程	179
4.1.1 气体的临界点	181
4.1.2 半经验状态方程	185
4.1.3 对应状态定律	187
§ 4.2 真实气体偏离理想气体定律的分子解释——范德瓦方程的推导	192
§ 4.3 分子力的性质 第二维里系数的统计力学理论	193
4.3.1 分子间作用力的位函数	193
4.3.2 第二维里系数的统计力学理论	197
第五章 真空技术中的界面现象 I	210
§ 5.1 固体的基本概念	213
5.1.1 固体的结构及价键	213
5.1.2 固体内原子间作用力的影响	216
5.1.3 固体结合能与升华热的关系	220
§ 5.2 液体的基本概念	226
5.2.1 表面张力	226
5.2.2 接触角与接触平衡	229
§ 5.3 液-气界面现象	229
5.3.1 毛细管现象	229
5.3.2 液体的蒸气压	233
第六章 真空技术中的界面现象 II ——气固界面现象	240
§ 6.1 分子-表面的相互作用	240
6.1.1 物理吸附	240
6.1.2 化学吸附	248
6.1.3 吸附-脱附动力学	266
6.1.4 材料的热放气	315
6.1.5 材料的热吸气	356
6.1.6 气体通过真空室器壁的渗透	356
§ 6.2 带电粒子与光致诱导脱附	370
6.2.1 电子轰击脱附 (EID) 或电子诱导脱附 (ESD)	370
6.2.2 光致脱附	395
6.2.3 离子诱导脱附 (ISD)	405
第七章 气体的流动 I ——经典处理	410
§ 7.1 与电路的类比	410
§ 7.2 关于导管内气流的一般讨论	411
§ 7.3 各种流动状态的辨别式	412

§ 7.4	气体通过小孔的流动	414
§ 7.5	气体通过圆截面导管的流动	416
§ 7.6	短管公式	418
§ 7.7	广压强适用的圆截面导管的流导公式	422
§ 7.8	任意形状截面直长管的流导	424
§ 7.9	大孔修正	438
§ 7.10	泵与导管连接后的抽速	439
§ 7.11	真空系统内的压强分布	440
§ 7.12	与电路进一步类比——电阻网络模拟法	445
第八章	气体的流动 II ——传输几率法和蒙特卡罗法	455
§ 8.1	奥特莱传输几率计算法	455
8.1.1	传输几率与流导的关系	456
8.1.2	奥特莱第一定律	457
8.1.3	圣特勒公式	460
8.1.4	奥特莱第二定律	465
8.1.5	奥特莱定律的应用举例	465
8.1.6	贝伦斯第一定律	467
8.1.7	贝伦斯第二定律	471
8.1.8	宾逊公式	472
8.1.9	黑菲尔公式	473
§ 8.2	蒙特卡罗法的应用	486
8.2.1	戴维法	486
8.2.2	自由分子流和准自由分子流通过轴对称导管的行为	501
第九章	气体的流动 III ——克劳辛方程和角系数（几何因子）法	507
§ 9.1	克劳辛方程	507
9.1.1	圆截面直管	507
9.1.2	矩形截面小孔	515
§ 9.2	角系数（几何因子）法——纳温法的扩展形式	519
§ 9.3	关于气流问题的处理方法小结	527
第十章	真空量测和获得	528
§ 10.1	真空中的无磁放电	528
10.1.1	真空中的火花放电	528
10.1.2	次级电子倍增放电	530
10.1.3	静电马鞍场电子振荡器	533
10.1.4	高频马鞍场电子振荡器	539

§ 10.2	真空量测	540
10.2.1	高真空和超高真空量测的发展概况	540
10.2.2	静电马鞍场电离规	546
10.2.3	测量压强下限的开拓	553
10.2.4	超高真空规性能的比较与选择标准	560
10.2.5	中真空(高压强)量测的发展概况	562
10.2.6	高压强电离规	562
10.2.7	关于电离规的灵敏度	571
§ 10.3	真空获得	576
10.3.1	概论	576
10.3.2	真空泵的分类	579
10.3.3	前级泵问题	580
10.3.4	辅助泵(升华泵、体效应泵)	591
10.3.5	主泵(封闭型泵、开放型泵)	608
10.3.6	泵间配合	676
习题		678
参考资料		694

第一章 绪 论

真空技术的应用非常广泛，几乎遍及全部科学技术领域，而且，许多正在开拓的研究领域也都涉及真空技术。

我们所说的真空指的是低于大气压的特定空间状态。我们在谈到真空空间时，是指真空泵对真空容器排气之后所产生的压强低于大气压的特定空间，而不包括我们生活的周围空间。

在上述关于真空的定义中涉及到两个概念：一个是大气压，一个是特定空间。

(1) 大气压指的是我们生活的环境气压，而不是物理学中规定的标准大气压。

(2) 特定空间系指容器包围的一定空间。按照这个定义，大气空间的低压状态（例如同温层）仍然是大气压，而不是真空。

此外，还必须指出，不要把真空设想成为绝对真空，因为，绝对真空是表示什么也没有的一种状态，这个概念只有哲学上的意义。绝对真空是不存在的，因为它既不可能获得，也无法测量。因此，我们所谈到的真空应当理解为多少存在着一些气体的特定空间状态。

在我们生活的地球上，真空是通过真空泵对容器排气而获得的。容器内的真空度是随着容器内的压强不断降低而提高的，传统说法的低真空、中真空、高真空、超高真空和极高真空正是与越来越低的压强相对应的。初看起来，上述真空范围的划分是人为规定的，其实并不尽然，真空区域的划分既与特定的量测和获得手段有关，又与真空所对应的物理状态和特征有关，而且后者更为重要。此外，上述划分也有一定的历史原因。例如，在四十年代，根据种种实验事实看来，已获得的真空度似应高于 10^{-6} Pa了，但是在当时始终未能得到量测的证明。直到1950年，贝阿德

(Bayard) 和阿尔珀特 (Alpert) 发明了新型电离规 (即 B-A 规), 使得真空度量测范围一下子开拓了三个量级。大家公认, 从此进入了超高真空时代, 超高真空范围是以真空度进入 10^{-6} Pa 来标志的。

今天, 由于真空技术的发展, 人们已能获得从大气压到 10^{-15} Pa 即宽达 20 个数量级的压强范围。无疑, 在不同的压强范围, 它所涉及的理论基础也是有所区别的: 在低真空, 主要的理论基础是空气动力学; 到了极高真空则出现了统计涨落现象。凡此种表明: 真空技术所涉及的基本理论范畴十分广泛。本书将侧重讨论压强低于 0.1 Pa 的领域。

在正式讲解真空技术的科学基础之前, 作为绪论, 本章将首先简要地介绍一下气体的一般特性, 其次概略地谈一下真空区域的划分问题。

§ 1.1 气体的特性

我们常把气体看作是直径为 d 、质量为 m 的弹性球粒子 (包括原子和分子) 的总和, 它们可以充满任何容器并在其空间内迅速而随机地运动。气体粒子大小与它们之间的距离相比是很小的; 粒子之间的相互碰撞与粒子对容器器壁的碰撞都是弹性碰撞; 除了碰撞瞬时, 粒子之间没有作用力, 这实际上是理想气体状态。真实气体与理想气体的区别在于前者分子之间有相互作用力。在真空技术中一般认为, 真实气体例如氮、氧、氩、氟、氢、氦、氖等在室温、大气压下很接近理想气体。而在室温、低压强下, 有更多的气体接近理想气体。以下讨论气体的整体性质。

1.1.1 气体的简单经验定律

一、阿伏加德罗定律

在压强和温度相同的情况下, 相同体积的任何气体其分子数是相同的。

二、摩尔体积

在压强和温度相同的情况下, 1mol 的任何气体 具有相同的体积。

在标准状态下 (即压强为 101325Pa, 温度为 0°C), 1mol 气体体积 V_m 等于 22.4L。

三、阿伏加德罗常数 N_0

阿伏加德罗数系指 1mol 物质含有的分子个数 (或 1mol 物质含有的原子个数)。对任一物质, 阿伏加德罗数都是相同的, 即 N_0 等于 6.0228×10^{23} 个。由此可以得到摩尔量 μ 与分子质量 m 之间的关系:

$$\mu = N_0 m = 6.0228 \times 10^{23} m \text{ (g/mol)} \quad (1.1)$$

或

$$m = 1.66 \times 10^{-24} \mu \text{ (g)} \quad (1.2)$$

四、洛喜米脱数 N_L

洛喜米脱数 N_L 等于在标准状态下, 单位体积 (1cm^3) 内的气体分子数, 即

$$N_L = \frac{N_0}{V} = 2.69 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (1.3)$$

五、气体的基本定律

1662年波义耳实验总结了一定质量的理想气体在恒定温度条件下体积 V 和压强 P 的关系, 这便是波义耳定律:

$$PV = \text{const} \quad (1.4)$$

随后, 1802年, 盖·吕萨克得到了恒定压强下, 一定质量的理想气体的体积 V 和温度 T 的关系为

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (1.5)$$

同年, 查理得到了恒定体积下, 一定质量的理想气体的压强 P 和温度 T 的关系为

$$\frac{P}{T} = \text{const} \quad (1.6)$$

理想气体状态方程式表征一定质量的理想气体, 它的状态可

由 P 、 V 、 T 三个参量中的任意二个来描绘，而这三个参量之间的关系由状态方程联系着，即

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1.7)$$

式中， M 表示气体质量 (g)， R 称为普适常数，与气体种类无关。

实际上，理想气体状态方程包含了波义耳、盖·吕萨克、查理和阿伏加德罗等四个定律。不过，理想气体状态方程不适用于压强过高或温度太低的实际气体。

当 $M = \mu$ ，即讨论 1mol 气体的情形时，则理想气体状态方程可简化成

$$PV = RT \quad (1.8)$$

式 (1.8) 常称为克拉贝龙方程。

关于 R 的单位，在国际单位制 (P 用 Pa, V 用 m^3) 中为

$$R = \frac{1.01 \times 10^5 \times 22.415 \cdot 10^{-3}}{273.16} = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

如果能量用卡[●]表示，则

$$R = 1.987 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

在 C. G. S. 制中为

$$\begin{aligned} R &= \frac{1.01325 \times 10^6 \times 22.415 \times 10^3}{273.16} \\ &= 8.3146 \times 10^7 \text{ erg}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

在实用真空单位 (P 用 Torr, V 用 L) 制中为

$$R = \frac{760 \times 22.415}{273.16} = 62.364 \text{ Torr} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

六、道尔顿 (Dalton) 定律

一定温度下，混合气体的总压强等于各成分气体的分压强之和，即

● $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$, $1 \text{ kcal} = 4.1868 \times 10^3 \text{ J}$.

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.9)$$

1.1.2 气体的可逆等温膨胀

在一定温度下，令气体在无摩擦的圆筒内可逆膨胀，它做的功为

$$dW = P \cdot dV \quad (1.10)$$

由式 (1.8) 可得

$$P = \frac{RT}{V}$$

代入式 (1.10)，得到

$$dW = \frac{RT}{V} dV$$

如果气体由状态 1 (P_1, V_1) 可逆膨胀到状态 2 (P_2, V_2)，所做的功为

$$W = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (1.11)$$

这功是由恒温源为了维持一定温度而以吸放热量的形式所提供的。

1.1.3 气体向真空室的快速绝热膨胀

如图 1.1 所示的一膨胀法校准系统，容器 1 充满气体，它的状态参量为 P, V, T ，容器 2 抽成真空。假设整个系统与外界热绝缘。一旦阀门开启，容器 1 的气体将迅速膨胀并充满容器 2，尽管开始时二容器内的温度并不相等，但热平衡会迅速建立起来。

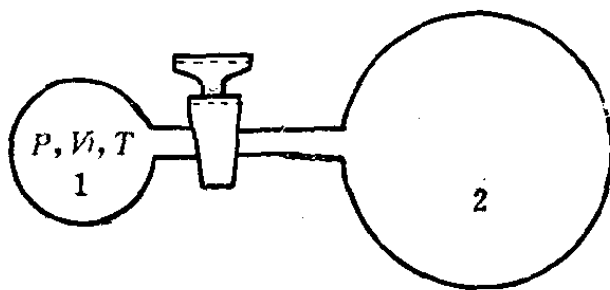


图1.1 膨胀法校准系统示意图

一般情况下，系统总的内能变化 dU 等于外界做的功 ΔW 和添入的热能 ΔQ ，即

$$dU = \Delta W + \Delta Q \quad (1.12)$$

这里，因为是绝热过程，没有热量交换，所以 $\Delta Q = 0$ 。虽然气体由容器 1 向容器 2 膨胀要做功，但与外界无关，因此 ΔW 也等于零，即

$$dU = 0 \quad (1.13)$$

内能由两部分组成，即与温度有关的热能以及由于分子间的作用力产生的位能。对于干燥空气的膨胀过程来说，由于终态温度与始态温度相同，因此热能的变化 ΔQ 为零。此外，根据式 (1.13) $dU = 0$ ，所以位能的变化也应等于零。这意味着分子间的作用力可以忽略。

另一方面，我们可以写出

$$U = f(V, T)$$

或

$$U = f(P, T)$$

所以

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \cdot dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \cdot dT$$

因为 $dT = 0$ ，由式 (1.13) 知道 $dU = 0$ ，因此 $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$ ，或类似地有

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T = 0 \quad (1.14)$$

由此可以得到结论：理想气体的内能 U 只是温度 T 的函数，它既与压强 P 无关，也与体积 V 无关。

1.1.4 一摩尔理想气体的比热容

在图 1.1 所示的系统里，如气体的温度增加 dT ，当考虑它的体积有微小的变化时，其基本方程式为