

密封装置设计基础

MIFENGZHUANGZHI
SHEJIJICHU

奚 翠

序

密封学是一门跨多种学科的边缘科学。目前，这门科学尚未形成。随着生产和科技发展的需要，世界各国关于密封的理论和工程问题的著述逐年增多，而我国出版有关密封技术的图书目前仍然很少。这不仅使密封专业人员耳目闭塞，而且影响生产和科技的发展。须知，密封虽小，作用很大。现在，密封的重要性已经开始被人们注意，人类面临着能源和环保的压力，不能不求助于密封技术以寻求出路。但是，提高密封技术不是轻而易举在短时间内可以奏效的。要使我国密封技术根本改观，需要坚持不懈的努力。

奚肇同志编写的《密封装置设计基础》一书，是该同志多年关注密封技术所积累的知识总结。本书以相当篇幅叙述了密封的基本概念与理论基础，对与密封有关的流体力学问题、弹流理论、热弹性理论等都有较好的阐述。其中关于热对密封的影响、热流体动力润滑、弹流理论以及泄漏类型与计算等资料都比较新。由于目前的密封理论尚在形成阶段，存在着许多学派，且从本质上说，不同的密封其工作机理也是不同的，不能用统一的力学模型加以描述，所以作者在摘引这些资料时，其表达形式没有做太多的加工，这便于读者参阅原著。

这本书理论与实践并重，还提供了密封设计的许多有用的数据，并提出某些新的动向，因而该书对从事密封专业的工程技术人员、工人、干部都有一定的参考价值，也可供大专院校的师生学习参考。

我希望今后有更多更好的关于密封方面的著述出版。

刘志国

一九八二年六月

目 录

第一章 密封设计的基本理论与密封装置的选择	1
第一节 概述	1
第二节 密封设计的基本理论	4
一、流体运动规律与流体机械能的转换	4
二、流体的局部能量损失	10
三、密封缝隙中的流体流动	16
四、密封结构的热影响	44
五、流体静力密封	54
六、流体动力密封	61
七、弹性流体动力润滑和密封	77
八、热液楔理论	91
第三节 密封的基本概念	94
一、密封与润滑	94
二、泄漏	95
三、密封副	103
四、密封力和密封压力的平衡	105
五、密封的追随性与卡紧	108
第四节 密封的分类和选择	109
一、密封的分类	109
二、动密封和静密封的特性	111
三、密封的选择原则	111
第二章 静密封	126
第一节 垫片(圈)密封	126

一、非金属材料垫片(圈)密封	126
二、金属垫片(圈)静密封	132
第二节 涂料密封	181
一、工作机理	181
二、密封胶的种类	181
三、选用因素	186
四、密封胶的使用	186
第三章 弹塑性体接触式动密封	188
第一节 软填料动密封装置的工作原理	188
第二节 软填料动密封装置的结构设计基础	192
一、填料函密封装置的结构及其元件	193
二、软填料密封的设计原则	199
第三节 填料函的结构设计计算	204
一、填料密封件的厚度 S	205
二、填料函的深度 H	206
三、压紧轴套螺栓的设计计算	206
四、压紧轴套的设计计算	207
第四节 软填料密封件及其使用选择	214
一、经过梳理的纤维作成的密封件	215
二、编结的填料密封件	216
三、毡和毛毡制成的密封填料	217
四、用纺织品制成的密封填料	217
五、金属软密封填料	218
六、皮革填料密封件	219
七、组合式软填料密封件	219
八、可塑性密封填料	221
九、专用的密封填料结构	222
第五节 软填料密封装置的润滑、冷却及安装	224
一、液封与润滑	224
二、冷却	227

三、软填料密封装置的安装工艺	228
第六节 O形圈密封	230
一、O形圈密封的工作原理	231
二、O形圈密封的设计计算	243
第七节 唇式密封圈的结构设计和计算	263
一、机理	264
二、受力分析	267
三、唇式密封圈的结构形式	268
四、唇式密封圈的材料	286
第八节 异形截面的唇式密封圈	299
第九节 油封	304
一、预紧式油封	305
二、弹簧的形状和制造	307
三、密封性能的形成	308
四、摩擦与摩阻	309
五、油封的材料	313
六、油封的结构	317
七、动压型油封结构	321
第四章 非弹塑性体接触动密封	324
第一节 带有硬环的轴向密封装置	325
一、结构	325
二、轴向接触力计算	328
三、硬质密封环的轴向追随性	329
四、防转	329
第二节 带有硬质密封件的径向密封装置	330
一、结构形式	330
二、径向线接触比压计算	333
三、硬质密封环的径向追随性	333
四、泄漏与许用 $q_{cr} \cdot V$	334
第三节 硬填料密封件	334

第四节 活塞环密封	339
一、概述	339
二、活塞环的结构、尺寸和材料	340
三、活塞环受力分析	345
四、无油润滑活塞环	348
第五章 流阻型与动力型非接触动密封	349
第一节 迷宫密封	349
一、机理	350
二、结构形式	351
三、迷宫密封的设计计算	359
四、用于直线往复运动的迷宫密封	359
第二节 浮环密封	360
一、概述	360
二、结构	361
三、设计和计算	364
第三节 离心密封	370
一、概述	370
二、功率消耗	373
第四节 螺旋密封	374
一、工作原理和一般结构	374
二、螺旋密封的设计要点	376
三、设计计算步骤	380
第五节 铁磁流体密封	387
一、概述	387
二、工作原理	388
三、铁磁流体密封的基本结构类型	390
四、密封特性	393
第六章 机械密封装置	398
第一节 工作原理及分类	399
一、工作原理	399

二、机械密封的分类	400
第二节 机械密封的泄漏损失	410
一、密封缝隙的变形及其对泄漏的影响	410
二、密封面上的比压和摩擦状态对泄漏的影响	428
第三节 机械密封的摩擦及磨损	445
一、端面间的摩擦和摩擦热	445
二、影响密封副磨损的因素	454
三、摩擦副的材料及其选配	464
第四节 设计与计算	473
一、摩擦副的设计	473
二、弹性元件设计	476
三、计算	479
第五节 机械密封的安装和运行	499
一、机械密封的安装	499
二、机械密封的起动、运转及停车	503
三、机械密封装置的泄漏现象及处理措施	504
第六节 特殊工况下的机械密封结构	505
一、高压机械密封结构	505
二、高速机械密封结构	509
三、高温机械密封结构	514
四、低温机械密封结构	517
五、耐腐蚀机械密封结构	521
六、真空机械密封	523
七、含有磨料介质用的机械密封结构	526
八、核电站中的机械密封典型结构	530
常用符号及其说明	543
参考文献	548

第一章 密封设计的基本理论与密封装置的选择

第一节 概 述

密封是一门涉及多学科的应用技术，它与流体力学、材料力学和弹性力学、摩擦学、材料学、化学、物理化学以及热力学等学科有密切关系。密封基础理论的研究主要是研究流体(液体、气体和蒸汽)在不同工况下，由各种材料(弹塑性或非弹塑性体)组成的不同形状壁面间隙间的流动和能量转换规律。

很久以前，冶金、酿造等手工业作坊所使用的风箱与容器，就存在着原始的动密封与静密封。最早的产业革命时期的蒸汽机，主要是用棉麻、皮革等天然材料制造密封填料和垫片。随着生产的发展，机器设备对密封的要求越来越高，因此推动了密封技术的发展。如果说六十年代以前的机械设计是以强度和刚度理论为基础，那么，由于近代工业技术的飞速发展，单纯只考虑机器设备的强度和刚度就远远不够了。六十年代以来，机械设计对密封技术及与之有关的摩擦学的考虑已提到重要地位。一种机器的密封技术的水平，往往成为该产品技术水平的重要标志。近代许多涉及危险物质或超高参数的生产过程的实现，常常是以密封技术的某种新突破为前提的。

实践证明，机器和设备性能的好坏，是与它的密封结构的设计息息相关的。在设计现代化的一切机器和装置时(如冶金、矿山、石油、化工、航空、造船、军事等机械工程和农业、轻工业机械)都存在密封问题。因为密封装置的设计不仅关系到机器和设备的

密封程度，而且还关系到它能否正常运转，影响到机器的摩擦与磨损，即影响到机器的功率消耗和寿命。因此在机械设计中，对密封类型的选择、密封装置的设计以及密封元件和材料的正确采用，都是十分重要的。

实践也证明，密封性能的不良而使工作介质或润滑液的泄漏所造成的损失是十分惊人的，这种损失在机器制造和液压或气动装置中，又是比较常见的，而且任何种类的密封装置及其所需的材料费用，都没有这种损失大。据统计，在石油化工等连续生产企业里，非计划的检修工作量用于维修密封装置的约占60~80%。因此，延长密封装置的寿命，就意味着延长一台机器甚至一套设备系统的寿命。需要指出，易燃易爆等危险物质的输送和贮存的机器设备的密封，应该是完全没有毛病的。若密封元件失效，则往往会造成事故发生。由此可见，零件虽小，关系重大，与国家财产和人民生命安全紧密相关。

然而，目前在工、农业各个领域，密封装置的设计和并未得到应有的重视。在国内许多大学生的机械课程和工程技术人员在实际设计工作中，密封这个重要问题往往触及不多，更谈不上深刻理解密封的原理和由此出发的密封设计或选择。目前机械设计仍然是按照传统规律，在总体设计完成之后才去分配密封所占的空间位置和结构，这显然不符合现代科学技术对设备运转的经济性和对人身安全以及环境保护的要求。可以想象，现代的一切机器设备，如果没有良好的密封装置，怎么能维持正常的运转?!

目前，国内外对密封技术和基础理论的研究十分活跃，并已取得不少成果。例如，超临界参数汽轮机，达3000大气压的高压聚乙烯生产设备，超音速航空发动机，大型合成氨压缩机透平化，鼯鼠犁，海底采油等等。

表1-1列出了目前密封已达到的技术水平参数。它尽管还不能反映密封技术水平的全貌，但还是能说明一定问题的。

表1-1 目前密封技术水平

项 目	动 密 封	静 密 封
压 力(真空)	10^{-10} mmHg柱~ 10^4 kgf/cm ²	10^{-11} mmHg柱~ 10^5 kgf/cm ²
温 度, ℃	-240~600	-240~900
线速度, m/s	接触型<150	
泄漏量, L/h	0.1~10	
使用寿命, 年	0.5~10	

密封技术日益进步, 主要有以下几个方面的因素:

(a) 密封的流体力学研究构成了现代密封学的理论基础。关于可压缩与不可压缩流体在缝隙或迷宫内流动的研究, 确立了非接触密封的计算原理; 关于成膜理论的研究, 确立了动压型与静压型、热流体动压和弹性流体动压密封的设计基础。

(b) 材料的进步。主要是指润滑材料(石墨等)、水润滑材料、新型橡胶、陶瓷与金属陶瓷、复合材料、表面处理与涂层技术、新型硬质合金、密封胶、磁流体等日新月异的发展。

(c) 静力学与动力学的研究促使自紧原理的广泛应用, 改善密封件的受力状况和变形状况。

(d) 密封辅机的完善化和自动控制水平的提高, 为苛刻条件下密封可靠地工作创造了条件。

(e) 密封实验技术的进步以及经验的大量积累、补充, 丰富了密封理论并纠正了理论工作的片面性。

(f) 标准化和系列化工作的成就。

但是, 目前密封技术水平还远远满足不了生产发展的要求, 某些场合泄漏问题还没有解决, 所以密封技术的研究, 是当前技术工作中的重点攻关项目之一。

根据我国密封技术的概况, 今后的发展似应从理论与应用两个方面进行。在密封理论方面, 由于密封学是一门多学科性质的

边缘科学，因此，首先必须完善密封学理论。它应当包括密封原理（流体动力密封理论、弹性流体动力密封理论、密封热流变理论等等）、密封材料学（密封材料的表面物理学和化学）和密封工程学。在密封工程学方面，要针对密封的几何形状和尺寸的控制、泄漏流体性质的控制和作用于泄漏流体上的力的控制等三个方面，进行密封的新结构、新材料、新工艺的研究和设计，以适应我国现代化建设中各个技术领域发展的需要。

第二节 密封设计的基本理论

一、流体运动规律与流体机械能的转换

1. 流体的连续性方程

流体的连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的体现。对于液体而言，则体现为体积守恒。

在流场中取一控制体积，观察流进与流出该控制体积的流体质量与控制体积内流体质量的变化，如果在某一时间间隔 Δt 内，流进控制体积的流体质量大于流出的质量，那么在控制体积内流体质量必然增加。但因为体积是已经确定不变的，所以流体的密度 ρ 就要增大，反之就要减小。如果控制体积内流体密度保持不变，则流进控制体积的流体质量必须等于流出的质量，这就是连续性方程的物理本质。由控制体积法推导出的连续性方程为（图1-1）：

$$\iint_A \rho u n dA = 1 \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度。

如果采用空间直角坐标法（图1-2），则可导出流体连续性方程为

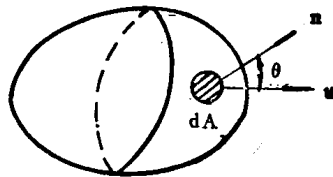


图1-1 用控制体积法推导连续性方程

$$\frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1-2)$$

在稳定流动时, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 则

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \rho u &= \nabla \cdot \rho u = 0 \\ \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

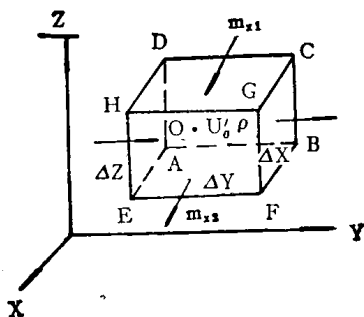


图1-2 质量守恒(直角坐标)

式中 u_x 、 u_y 、 u_z ——在时间 t 时的流速 u 对三个坐标轴的流速分量;

ρ ——流体的密度;

$\operatorname{div} \rho u$ 或 $\nabla \rho u$ ——为式(1-2)前三项之和, 称为 ρu 的散度。

对于不可压缩性流体($\rho = \text{常数}$), 则连续性方程为

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} u &= \nabla \cdot u = 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

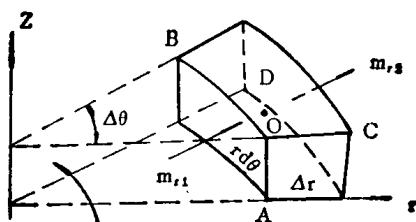


图1-3 质量守恒(圆柱坐标)

若采用圆柱坐标系(图1-3), 则可导出流体连续性方程为

$$\frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial \rho u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1-5)$$

在稳定流动时, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 则有

$$\frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial \rho u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-6)$$

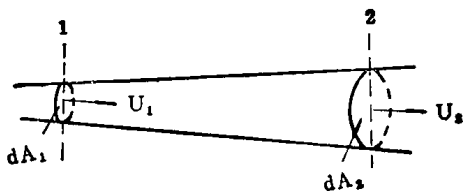
对于不可压缩性流体($\rho = \text{常数}$), 则方程为

$$\frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-7)$$

式中 u_r 、 u_θ 、 u_z ——在时间 t 时的流速 u 在圆柱坐标上的流速分量。

通常在动密封装置中, 由于主要是管状流动, 且多为液体, 故采用微小流束的概念对液体连续性方程进行推导。可以设想, 液体在空间的流动中, 其内部不产生不被液体所充满的空隙, 微小流束(或流束)可能在自己的流程中不断地改变自己的大小和形状, 但是它们总是彼此紧贴

着的。设有一微小流束(图1-4), 通过这微小流束的过水断面1、2的面积分别等于 dA_1 、 dA_2 , 通过这两个微小过水断面的流速分别为 u_1 、



u_2 。显然, 在时间 dt 内通过第一个过水断面的液体体积等于 $u_1 dA_1 dt$, 而通过第二个过水断面的液体体积等于 $u_2 dA_2 dt$ 。为研究方便计, 考虑以下几种情况:

图1-4 液体微小流束的连续性流动示意图

(a) 该段微小流束的形状不随时间而改变;

(b) 不可能有液体经过微小流束的侧面(微小流束的表面)流入或流出所研究的微小流束段;

(c) 液体是不可压缩的, 并且在液体内部不形成空隙, 也没有奇点(如液体的源点或汇点)。我们就可作出结论: 在时段 dt 内, 通过微小流束的过水断面1和2的液体体积是相等的, 即

$$u_1 dA_1 dt = u_2 dA_2 dt$$

将 dt 消去, 得单位时间通过的体积, 即

$$u_1 dA_1 = u_2 dA_2 \quad (1-8)$$

这就是微小流束连续性方程式, 其意义是指沿微小流束的各个不同的过水断面上, 流速与过水断面面积成反比, 即

$$\frac{dA_1}{dA_2} = \frac{u_2}{u_1} \quad (1-9)$$

因为流速与微小流束过水断面面积的乘积是微小流束的流量(即在 dt 等于单位时间时, 流过微小流束过水断面的液体体积),

$$\text{即} \quad u_1 dA_1 = dQ_1 \quad u_2 dA_2 = dQ_2$$

这样, 式(1-8)可写成

$$dQ_1 = dQ_2 \quad \text{或} \quad Q = \text{常数} \quad (1-10)$$

这表示沿微小流束流量不变的条件, 即在单位时间内从过水断面 1 流入这段微小流束的液体与从过水断面 2 流出的液体的量相等。

式(1-8)和式(1-10)的重要意义有三点: 第一, 由于过水断面是任意选择的, 所以上述结论适用于一切过水断面; 第二, 由于式中给出了运动参数间在运动学上的关系, 而作用于液体的力并不包括在方程之中, 所以方程无论对理想液体或对实际液体都是同样正确的; 第三, 由于我们把流体看成具有绵续性的连续介质, 它的运动参数(速度、压强等)是空间点坐标 X 、 Y 、 Z 和时间的连续函数, 因此, 流体力学问题往往可用微分方程式来表示。通过对微分方程求解, 就可以找出流体在空间坐标任意点的运动参数和由这些参数决定的其它参数(如流量、液膜厚度)的量。

2. 纳维-斯托克斯方程

纳维-斯托克斯方程(又称 N-S 方程)的重要意义是: 它概括了不可压缩性实际流体(具有粘性的流体)的运动普遍规律。这个方程再加上连续性方程, 原则上就可以求得实际流体流场的解。

在直角坐标系中, 纳维-斯托克斯方程可写成

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + \nu \nabla^2 u_x &= \frac{du_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y &= \frac{du_y}{dt} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z &= \frac{du_z}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中 Δ^2 ——拉普拉斯算子, $\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$;

ν ——粘性系数。

在圆柱坐标系中, 纳维-斯托克斯方程可写成

$$\left. \begin{aligned}
 R - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right. \\
 \left. - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right) = \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \\
 + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \\
 T - \frac{1}{r\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right. \\
 \left. + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) = \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \\
 + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \\
 Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \\
 = \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}
 \end{aligned} \right\} (1-12)$$

3. 通用能量方程

大家知道, 流体力学中的柏诺利方程说明了流体运动, 不同性质的流体机械能可以相互转换, 但总的机械能守恒, 柏诺利方程为

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 \quad (1-13)$$

式中三项依次称为压强能头 $\frac{p}{\rho g}$ 、速度能头 $\frac{u^2}{2g}$ 和位置能头 Z 。

柏诺利方程在流体力学中应用十分广泛, 但求导这个方程时,

需假设流体内不存在剪切应力，因此它只适用于理想流体或流体中速度梯度等于零的情况。实际上，并不存在理想流体，某些流体虽粘性很小，但也只是近似于理想流体。显然，不考虑流体的粘性，即不考虑流体内剪切应力的柏诺利方程，具有一定的局限性。由于它是一个机械能守恒的方程，我们可以用能量守恒的观点把它拓广。可以认为，当流体中存在剪切应力，那末流体运动时就要用一部分机械能去克服阻力而作功，这是一种无用功，只能转变成热量，一部分散逸出去（ $-dq_H$ ），另一部分使流体温度升高而改变内能 di ，并使流体膨胀而产生膨胀功 $p dv = p d\frac{1}{\rho}$ 。如

果每单位质量流体运动时克服阻力作功为 $d(gh'_i)$ ，根据能量守恒定律，则

$$\frac{dp}{\rho} + dU + u du + d(gh'_i) = 0$$

式中 U —— 一个决定流体质量力的函数。

在重力场中，

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + u du + d(gh'_i) = 0 \quad (1-14)$$

式中 $d(gh'_i) = di + p d\frac{1}{\rho} - dq_H$

$$\text{因此 } \frac{dp}{\rho} + g dz + u du + di + p d\frac{1}{\rho} - dq_H = 0 \quad (1-15)$$

如果在流体运动中，通过某一流体机械而作功 W_s ，那末，式(1-15)可修正为

$$dq_H = \frac{dp}{\rho} + g dz + u du + di + p d\frac{1}{\rho} + dW_s \quad (1-16)$$

式(1-16)称为通用能量方程。柏诺利方程只是它的一个特殊形式。

上述三个方程的物理意义表明：这三个方程分别概括了流体的质量守恒定律、流体的运动规律和流体的能量守恒规律，它们是解决流体力学问题的基本理论基础。关于它们在密封技术中的

应用，在本书的以后章节中将有较详细地述及。

二、流体的局部能量损失

在液流急剧变形的地方，由于该处流速分布的改变，必然引起惯性力，而且在一般情况下都会形成漩涡区。在漩涡区内，液体质点由于液体粘性力做功和动量交换，在该局部地方必然存在着集中的机械能损失，称局部水头损失。由于液流经过局部阻力的运动很复杂，所以只有几种局部阻力可以由理论推导出，一般多是由实验决定。

以下就流道断面收缩、断面扩大分述之。

1. 断面收缩

流道断面收缩有两种，即断面突然收缩和断面逐渐收缩。流道断面逐渐收缩时，按流体连续性原理，流速增大，由柏诺利方程可知，压强将沿流向降低，即压强梯度 $\frac{dp}{dx}$ 为负值。这样，将使由于流体粘性的作用，被壁面阻滞的近壁液体质点获得了新的前进推动力，保证流体不产生与壁面分离的倾向。但如果收缩的角度太大，而且断面有突变，则由于流线不能转折，将形成流股收缩，在突变断面后出现局部分离脱流，然后再附壁(图1-5a)，极限情况是 $\theta = 180^\circ$ ，即突然收缩。在突然收缩的情况下，流体经

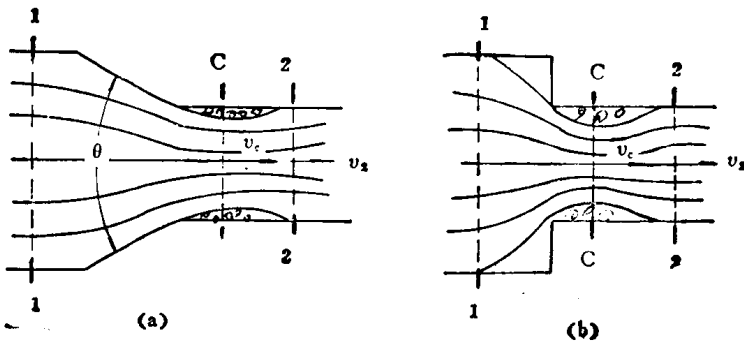


图1-5 流道收缩

(a) 流道渐缩； (b) 流道突然收缩