

中等粮食学校试用教材

通风除尘与气力输送



TONG FENG CHU CHEN YU QI LI SHU SONG

中等粮食学校试用教材

通风除尘与气力输送

通风除尘与气力输送编写组 编

中国财政经济出版社

中等粮食学校试用教材
通风除尘与气力输送
通风除尘与气力输送编写组 编

•
中国轻工业出版社 出版

(北京东城大佛寺东街8号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

北京枫叶印刷厂印刷

•
787×1092毫米 16开 15.875印张 2插页 380000字

1988年9月第1版 1988年9月北京第1次印刷

印数：1—13600 定价：3.30元

ISBN 7-5005-0238-9/TS·0013(课)

编 审 说 明

本书是根据中等粮食学校粮食加工专业《通风除尘与气力输送》教学大纲的要求，在原《粮食加工厂通风与气力输送》教材的基础上编写而成的，同时也作为饲料加工专业、油脂制取专业开设本课程的相应教材，还可供粮食加工厂的工人、技术人员学习参考。

参加本书编写的有：上海市粮食学校董秀华（第一章）；北京市粮食学校矫林（第二章）；安徽省合肥粮食学校林聚英（第三、四、五章）；辽宁省粮食学校严滇（第六、七、八章及绪论）、张新华（第九章）。由严滇主编，南京粮食经济学院周诚主审。

本书经我们审定，可以作为中等粮食学校试用教材。

中华人民共和国商业部教材编审委员会

一九八七年七月

目 录

绪 论	(1)
第一章 空气在管道中流动的基本规律	(4)
第一节 空气的基本特性和状态变化	(4)
第二节 空气流动的基本方程	(12)
第三节 空气在管道中流动时的阻力	(22)
第四节 管路中的压力、速度和流量的测定	(37)
第二章 风 机	(45)
第一节 风机的分类	(45)
第二节 离心通风机的构造和工作原理	(46)
第三节 离心通风机的性能参数和性能曲线	(49)
第四节 离心风机比例定律	(60)
第五节 离心风机主要结构对其性能的影响	(63)
第六节 常用离心风机及其选择	(64)
第七节 通风机的联合工作	(69)
第八节 通风机噪声的产生及其控制	(71)
第九节 罗茨鼓风机	(73)
第十节 空气压缩机	(76)
第三章 粉尘及其控制	(80)
第一节 粉尘的分类、形成及基本特性	(80)
第二节 含尘浓度及其测定	(82)
第三节 粉尘爆炸及预防	(85)
第四节 吸尘罩	(86)
第四章 空气的净化和除尘器	(92)
第一节 空气的净化	(92)
第二节 降尘室与吸风分离器	(93)
第三节 离心集尘器	(94)
第四节 布筒过滤器	(100)

第五节	静电除尘器	(109)
第六节	除尘器性能评定	(110)
第五章	通风除尘网路的设计与计算	(113)
第一节	通风除尘网路的设计原则	(113)
第二节	机器设备的吸风量和阻力	(114)
第三节	通风除尘网路的计算	(114)
第六章	气力输送装置	(122)
第一节	气力输送的基本原理	(122)
第二节	气力输送装置的形式和特点	(127)
第三节	接料器和供料器	(132)
第四节	输料管	(141)
第五节	卸料器	(143)
第六节	闭风器	(150)
第七节	风量调节器	(158)
第七章	气力输送网路的设计与计算	(160)
第一节	概 述	(160)
第二节	稀相气力输送主要参数的确定	(161)
第三节	压力损失的计算	(164)
第四节	计算举例	(171)
第八章	其它形式气力输送装置简介	(181)
第一节	空气槽气力输送	(181)
第二节	栓流气力输送	(183)
第九章	通风除尘和气力输送装置的调整和操作	(186)
第一节	试车前的准备工作	(186)
第二节	试车和调整	(187)
第三节	风网的测试和分析	(189)
第四节	操作管理和故障分析	(195)
附 录	(200)
附录1-1	在标准大气压力下空气的密度 ρ 值	(200)
附录1-4	管件局部阻力系数表	(201)
附录2-1	通风机性能表	(212)

附录2—2	离心通风机性能选择曲线	(215)
附录2—3	通风机空气动力学略图和无因次特性曲线	(218)
附录2—4	通风机性能试验	(221)
附录4—1	除尘器的规格、处理风量和阻力表	(227)
附录5—1	机器设备的吸风量和阻力参考值	(232)
附录5—2	$(H_1/H_0)^{0.225}$ 值	(235)
附录7—1	垂直输料管计算用表	(236)
附录7—2	弯头后水平输料管的K值	(244)

绪 论

通风与气力输送工程在内容上，大致可分为通风除尘与气力输送两大部分。通风的目的，就是有效地组织空气流动，控制生产过程中产生的粉尘、有害气体等，创造良好的生活环境和生产环境，保护大气环境。对于粮油及饲料加工工业，通风的目的还在于要保证空气条件符合生产工艺的需要，以利于生产的正常进行和效率的提高。

粮油、饲料加工厂中粉尘伴随整个生产过程产生。这些粉尘有的是夹杂在原粮中的泥土，有的是粮粒的表皮和外壳，有的是粮粒自身的粉末颗粒。一个粮油加工厂每天散布的这种灰尘，如果不加控制任其飞扬，其数量可达几公斤至几百公斤。这不仅污染车间和周围环境，甚至会造成严重的粉尘爆炸事故；而且在经济上也是很大的损失，因为这些粉尘其中大都是有价值的，有的本身就是成品，有的是良好的饲料。

另外，在粮食加工生产过程中，往往产生大量的热量，使物料温度升高而影响成品质量。同时由于物料温度升高造成水汽蒸发，使机器设备内部发生水汽凝结而影响正常生产。

所以，在粮食加工厂中，利用通风来进行除尘、除湿、冷却是生产中必不可少的重要措施。此外，利用空气的力学特性，对粮粒进行风选分级，清除其中的砂石和轻杂更是粮食、饲料等加工生产过程中必不可少的一环。由此可见，对于粮食、饲料等加工厂，通风的作用不仅在于改善车间环境，而且在生产工艺上也占有极为重要的地位。

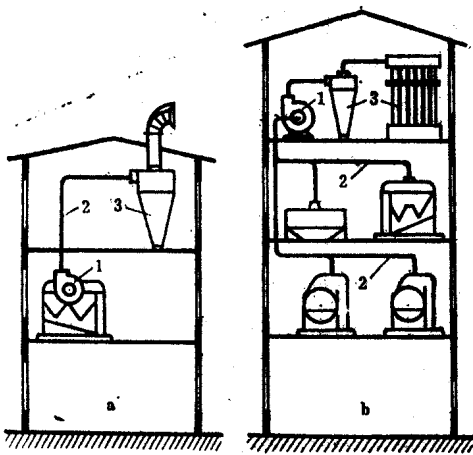
归纳起来，通风在粮食、饲料等加工厂中的作用，主要有以下几方面：

1. 控制和吸除生产中的粉尘，改善劳动条件。
2. 冷却碾磨物料，保证产品（面粉、大米、饲料、食品等）的品质。
3. 吸除水汽，防止水汽凝结，提高筛理设备的效率。
4. 对粮粒进行风选分级，分离轻重杂质，提高成品的纯度。
5. 减少粮食在加工过程中的飞散损耗，提高经济效益。
6. 改善机器设备的清洁状况，减少磨损，延长设备使用寿命。
7. 防止微生物和害虫滋生。
8. 防止粉尘爆炸和火灾事故。

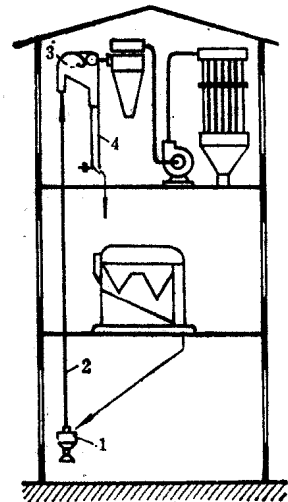
气力输送就是利用空气输送物料，在粮食加工厂中，常简称为“风运”。气力输送的发展和运用，使工厂的面貌发生了深刻的变化。一系列笨重复杂的机械输送设备（斗式提升机、螺旋输送机），被体积小、结构简单的风管、通风机等所代替，从而节约了厂房面积，利于设备布置，节省了设备投资。另外，气力输送实际上就是通风作用的进一步转化应用，因此它同样具有除尘、冷却、风选等作用。由于气力输送把输送和通风结合了起来，上述这些作用，有时发挥得更好，更彻底。物料采用机械输送时，这些设备本身，往往就是产生灰尘飞扬的地方，需要专门的通风设备为它服务，采用气力输送后，输料管通常处于负压状态下工作，粉尘不但不会外扬，相反地，还能对其它设备发挥通风的作用。

气力输送的主要缺点是，它的动力消耗要比机械输送高。输送颗粒状物料如果处理不当，容易引起破碎，并对设备有较大的磨损。但是，随着气力输送与通风更好地结合，设备结构的不断改进，以及设计、操作水平的提高，这些缺点是可以逐步克服的。这也是当今对气力输送进一步研究的重要课题。

粮食、饲料等加工厂的通风装置，通常是以局部吸风形式来进行工作的。通风装置主要由通风机、风管、除尘器以及吸尘罩等四部分组成。如图绪-1所示，当通风机1工作时，通过风管2从作业机的罩壳或风道中吸出空气，使作业机内部形成负压，阻止灰尘外逸，并根据需要把其中的灰尘、轻杂、热量、水汽等带走。带有灰尘的空气，必须经过除尘器3净化，然后排入大气。图绪-1中a为一台作业机由一台通风机进行吸风，这台通风机直接装在作业机上；b为多台作业机由一台通风机进行吸风。



图绪-1 通风装置示意图



图绪#2 气力输送装置示意图

粮食、饲料等加工厂气力输送装置的基本形式，同通风装置大致相似。它也是以负压吸风的方式把物料带走。它的组成除了有风管、除尘器、通风机以外，还有一些专门设备，如接料器、输料管、卸料器和关风器等。如图绪-2所示，当物料从作业机流出后，先经接料器1与空气混合，然后在输料管2中提升，再经卸料器3和闭风装置4（图中所示为料封压力门闭风装置）排出。卸掉物料以后的空气则送除尘器净化排空。

粮食工业是我国发展较早的民族工业之一。解放前，粮食加工厂的厂房简陋狭小、机器破旧，根本谈不上有什么通风设备，工人在灰尘弥漫的环境中劳动，健康受到严重损害。新中国成立以后，劳动人民成了国家的主人，他们的健康和安全受到党和政府的极大重视和关怀。1956年，国家建委和卫生部联合颁发了《工业企业设计卫生标准》，1979年对该标准又进行了修订，1973年颁发了《工业“三废”排放试行标准》，这些标准的制定，有力推动了通风技术的发展。

粮食部门，每年都要投放相当的财力和物力用来改进粮食、饲料等加工厂的通风和风运设备，粮食部门的广大职工，在多年的实践中也创造了一系列经济有效的通风除尘方法。在“密闭为主，通风为辅，结合清扫”的除尘方针的指导下，粮食工业的生产面貌发生了根本的变化。

在气力输送技术的应用方面，自从1958年在浙江金华建成我国第一座气力输送面粉厂

后，改建和新建的气力输送粉厂如雨后春笋般一个接一个投入生产，目前全国绝大多数面粉厂的制粉车间都采用了气力输送。近20年来，气力输送的应用范围越来越广泛，由面粉厂的制粉车间发展到仓库、码头、饲料加工厂、油厂等等。随着气力输送的广泛应用，这门技术正在不断发展和完善。近年来研制成功了一些高效率的通风机以及各种型式的卸料器、接料器；“一风多用”的措施有了进一步的发展和应用；测试技术和管理水平也有了很大提高；通过实践，培养了一大批操作人员和设计人员。所有这些，使气力输送的经济效果有了显著提高。尽管在气力输送的应用方面，我们已经取得了巨大的成就，但是发展是不平衡的。有些工厂应用这门技术，只讲形式，不求实效，存在电耗偏高，产品质量下降等问题。当前的紧迫任务是要大力改进操作技术，提高管理水平；进一步研究和开发“一风多用”的措施，充分发挥气力输送的效能，千方百计降低气力输送的能耗；发展密相输送、栓流输送技术，进一步拓宽气力输送的应用范围，实现大容量、长距离输送。同时要进一步加强气力输送的理论研究，形成较完整的理论体系。总之，要进一步提高通风和气力输送的水平，为实现粮食工业现代化作出贡献。

第一章 空气在管道中流动的基本规律

第一节 空气的基本特性和状态变化

一、空气的特征和连续介质模型

自然界的物质通常有三种形态，即固体、液体和气体。固体可以保持一定的形状，液体和气体都不能保持一定的形状，只要产生任何微小的剪切力就可使液体和气体发生任意大的变形，以至在自身重力作用下就会作连续变形运动。与固体相比，气体和液体容易流动，这个特性称为流动性。因此，液体和气体统称为流体。气体的分子距离比液体的分子距离大，分子间吸引力小，因而气体更容易变形，具有更大的流动性。

任何流体都是由大量进行着热运动的分子所组成的，分子之间有一定的空隙。因而从微观上看，流体的质量在空间并不是连续分布的。如果要从个别分子的运动出发掌握流体的运动规律，显然是十分困难而复杂的。许多情况下，尤其对工程技术领域所涉及的装置，设备的尺度与分子运动的平均自由程相比，通常是非常大的。因此，在工程上研究流体运动规律时，就没有必要去探讨复杂的微观分子运动，而只要从流体的宏观机械运动着手。例如，对于密闭小室中的空气，从分子运动观点看，空气分子始终不停地在运动着，空气不是静止的。但从宏观上看，则可以认为小室里的空气是静止的，并没有作宏观运动。显然，在多数工程技术领域内，从宏观角度观察流体，才是具有实用意义的。1753年，欧拉首先提出以连续介质作为宏观流体模型来代替流体的真实结构，称为连续介质模型。这个模型认为，流体是由无间隙而连续一片的流体质点所组成的，这种质点与设备尺度相比是充分小，但与分子尺寸相比又足够大。由于质点比分子大得多，质点中包含着足够多数量的分子，这样就能够用统计平均的方法得到描述流体的宏观物理量，如温度、密度、速度等。由于流体是由质点组成的连续体，宏观物理量在空间的分布是连续的。因此，就可用连续函数来进行描述和分析。大量事实表明，在连续介质模型基础上所推导出的数学方程式以及计算的结果，与工程实际和实验结果是十分吻合的，这就证实了该模型的合理性。因此，连续介质模型成了我们研究流体宏观运动规律的基本立足点之一，也是本书讨论空气流动规律的出发点。

二、空气的主要物理性质

(一) 密度

空气占有一定的空间且具有一定的质量，质量越大，惯性力愈大，流体运动的状态愈难改变。因此，在讨论流体运动状态时，密度通常是一个重要的物理量。

单位体积空气所具有的质量，反映出质量的密集程度，称为空气的密度，以 ρ 表示。

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1-1)$$

式中：m——空气的质量，
v——空气的体积。

在工程单位制中，质量的单位是公斤·秒²/米，体积的单位是立方米，故密度的单位是公斤·秒²/米³。

(二) 比重

空气在地心引力的作用下具有重量。单位体积空气所具有的重量即为空气的比重，以 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中：G——空气的重量，
V——空气的体积。

在工程单位制中，重量的单位是公斤，故比重的工程单位是公斤/立方米。由牛顿第二定律可得，空气的重量等于空气质量与重力加速度的乘积，即

$$G = mg \quad (1-3)$$

式中：G——空气的重量，
m——空气的质量，
g——重力加速度。

由式(1-1)、(1-2)、(1-3)可得密度和比重的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

(三) 温度

空气是由不同成分分子所组成的混合气体，空气中的无数分子不停地进行着无规则的热运动。温度高，空气分子运动速度大，分子平均动能大。因此，空气温度的高低表明了空气分子热运动速度的大小。

工程技术上，通常采用摄氏温标。它所表示的温度为摄氏温度，以符号t表示，单位为度(°C)。摄氏温标以冰融化为水时的温度作为零度，这是一种人为的定义，事实上，温度可以低于零度，即出现负的摄氏温度，因此摄氏温标只是一种相对的温标。

在理论研究中，还通常采用另一种温标即绝对温标。它所表示的温度称绝对温度，以符号T表示，单位为开(°K)，这种温标的零度称为绝对零度，它没有摄氏温标的那种相对性，也就是说不可能出现比绝对零度更低的温度。摄氏温度与绝对温度之间的差值为273.16，即，

$$T = t + 273.16 \quad (1-5)$$

当绝对温度为0°K时，摄氏温度为-273°C。

(四) 压强

空气的压强是指空气垂直作用于容器单位面积上的力，以符号P表示。根据分子运动学说，空气的压强是由于大量分子撞击容器内壁的结果。显然，单位时间内气体分子对器壁的碰撞次数愈多，或每碰撞一次的作用愈强，空气的压强则愈大，压强的单位可根据下式确定：

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中：F——垂直作用于器壁的力，牛；
A——力所作用的面积，平方米。

地球的表面都是由空气所包围的，大气是有重量的，因此地面上的一切物体都沉浸在大气中，都要受到由于大气重量所引起的压强即大气压强的作用，以符号 P_a 表示。

这种由于重量而引起的压强，显然将随着高度的不同而变化。海拔愈高处，空气愈稀薄，大气压强愈小。反之，离地面愈近，大气压强愈大。大气压强不仅决定于海拔高度，还与温度和纬度有关。应用托利拆里实验可以测量大气压强值。为了能有一个度量大气压强的统一标准，国际上规定在纬度为45度的海平面上，温度为 0°C 时测得的大气压强值（760毫米汞柱）作为标准大气压，如果转换为水柱表示，则因汞的比重是水的13.6倍，所以

$$\begin{aligned} 1 \text{标准大气压} &= 760 \times 13.6 = 10336 \text{毫米水柱} \\ &= 1.0133 \times 10^5 \text{牛/平方米 (即帕)} \end{aligned}$$

在工程技术上为了计算方便，规定了另一种压强单位——工程大气压，

$$1 \text{工程大气压} = 10000 \text{毫米水柱} = 9.81 \times 10^4 \text{牛/平方米}$$

在通风和气流输送中，由于空气的压强一般不很大，因此压强单位通常采用〔毫米水柱〕表示。

$$1 \text{毫米水柱} = 1 \text{公斤/平方米} = 9.81 \text{牛/平方米}$$

在物理学上压强和压力是两个不同的物理概念，但由于习惯上的原因，工程上通常把压强又称为压力，本书以后不再强调区分。

空气的压力可采用各种仪表来进行测量，最简单的压力计是弯曲成“U”形的玻璃管，称U形压力计。图1-1所示为测量示意图。U形玻璃管内装有指示液体（如水或汞），它的一端用橡皮管与风管壁上的小孔接通，另一端则敞开与大气相通。当风管内部压力与大气压相等时，U形管两侧玻璃管中的指示液处于同一高度。当管道中的压力与大气压不相等时，玻璃管中的指示液就会在U形管的一侧上升，另一侧下降，由两侧液柱高度的差值 h ，即可得知风管中的压力。显然由U形管压力计上直接读得的读数乃是风管中空气压力与大气压力的差值，因而测得的是相对压力。如液柱沿着与风管相通一侧的玻璃管升高，则表示风管中的压力小于大气压，称为负压力或真空度，例如吸风管内的压力就是负压。反之，液柱若沿着与大气相通一侧玻璃管上升，则表示风管中的压力大于大气压，称为正压力或剩余压力，例如排风管中的压力就是正压力。

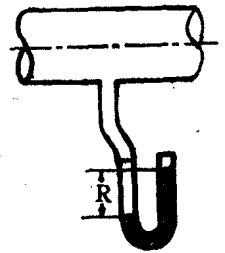


图1-1 管道内压力的测量

以上例子中的正、负压力是以大气压作为零点进行讨论的，这就说明表达压力大小时需考虑一个基准问题。空气的压力按其度量基准的不同，有绝对压力和相对压力两种。

绝对压力：以绝对真空作为基准而计量的压力值，以 $P_{绝}$ 表示。某一点的绝对压力只能是正值，不可能出现负值。

相对压力：以当时当地大气压力 P_a 为基准而计量的压力值，用符号 $P_{相}$ 表示。数学表达式为：

$$P_{相} = P_{绝} - P_a \quad (1-7)$$

在工程装置中，由于到处存在着大气压力而自相平衡，通常并不显示出大气压的影响。因此，绝大多数的测压仪表都是以当时、当地的大气压作为零点，压力表上的读数为零，但实际上测压点处已具有一个大气压的压力。这就表明，测压仪表所测出的是相对压力，又称为表压，以 $P_{表}$ 表示。它和大气压相比可以大于大气压也可以小于大气压，因此相对压力可为正值亦可为负值，通常将相对压力为正值时的压力称为正压力，负值称为负压力。

负压力的绝对值又称为真空度。用符号 $P_{真}$ 表示。它表明该测压点处绝对压力小于大气压产生真空的程度。

$$P_{真} = |P_{绝} - P_a| \quad (1-8)$$

以上几种压力之间的关系可以用图1-2表示。

下列两点需要注意：

第一，绝对压力大于大气压力线时，表压（即相对压力）为正值，绝对压力低于大气压力线时表压为负值（即真空度）。

第二，物理学中一般应用绝对压力计量。如气态方程中的压力都需要应用绝对压力，而在工程技术中为了方便多数用相对压力计量。

(五) 粘 性

凡是流体都具有流动性，但各种流体抵抗流动变形的能力有很大差别，流体受到剪切力作用时抵抗变形的特性称为粘滞性，简称粘性。在日常生活中，当人们将水和糖蜜打翻时可以看到水和糖蜜的流动速度是不同的，糖蜜比水流动得慢，这就是说糖蜜的粘性大，所以流体的粘性是影响流动的一个重要因素。

实际流体都是有粘性的，它可以通过下列实验，清楚地看出。如图1-3所示，用细线C悬挂一圆筒B，筒内置一个圆筒A，使A、B两筒的轴线相重合。然后使圆筒A迅速旋转，此时可以看到，圆筒B也会朝着同一方向转动。这一现象，可以作如下解释：在圆筒A的表面粘附着一层空气，这层空气随着圆筒一起转动，而在这层空气周围的另一层空气，开始时并没有转动，但因空气有粘性，所以在紧贴圆筒表面那层空气的带动下也跟着转动起来。这样一层一层地带动下，终于使圆筒B也开始转动。

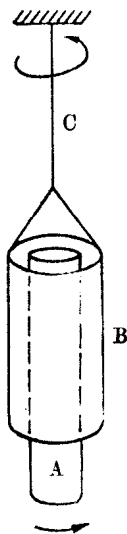


图1-3 空气粘性的试验

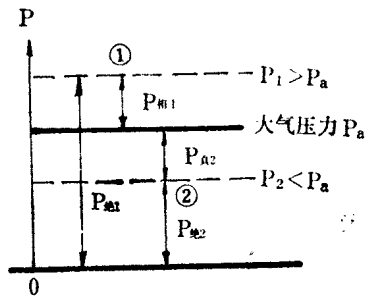


图1-2 绝对压力、相对压力和真空度的关系

为了进一步理解流体的粘性以及由此引起的内摩擦力，再观察和分析图1-4所示的实验现象。

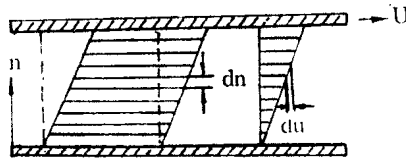


图1-4 粘性流体内摩擦实验示意

在两块平行平板间充满静止的流体，当上板以速度U运动时，由于流体与固体壁面间分子附着力的作用，紧贴于此板的流体质点层必将以速度U跟随上板一起运动。下板若固定不动，附着于下板的流体质点层的速度则为零。它们中间的流体均作平行于平板的运动，两板之间各流体层的速度都是不相等的，上层流体流动较快，下层流体流动较慢，两流体层之间发生了相对滑动，快层对于慢层的作用力与运动方向相同，带动慢层加速，称为拖力。而慢层对于快层的作用力与运动方向相反，阻滞快层运动称为阻力。拖力和阻力大小相等、方向相反，且与流层相切。由于这是作用于流体内部由粘性而产生的一对剪切力，故称为内摩擦力。工程上为了维持流体的运动必须利用泵或风机供给一定的动力来克服由于粘性而产生的阻力，因此粘性是空气运动时产生能量消耗的根本原因。

1686年，牛顿首先提出并由大量实验证明，对于大多数流体，流体层之间的内摩擦力具有下列规律：

1. 与两层流体的接触面积A成正比；
2. 与两层流体之间的速度梯度 $\frac{du}{dn}$ 成正比，速度梯度 $\frac{du}{dn}$ 表示在垂直于流速方向上单位长度的速度增量，即流速在其法线方向上的变化率；
3. 与流体的物理性质有关；
4. 与流体所受的压力大小无关。

牛顿所提出的上述规律即流体内摩擦定律可以用下列数学形式表达：

$$F = \mu \cdot A \frac{du}{dn} \quad (1-9)$$

若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力，称剪切应力，则：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dn} \quad (1-10)$$

式中：F——剪切力或内摩擦力，牛；

A——二流体层间的接触面积，平方米；

$\frac{du}{dn}$ ——与流体流动方向相垂直的法线方向上的速度梯度，1/秒；

μ ——动力粘滞系数，又称动力粘度，通常简称粘度。

从公式可知，在平衡流体中即没有相对运动的情况下， $\frac{du}{dn} = 0$ ，故 $\tau = 0$ 。表明流体的

粘性只有当流层间发生相对运动即 $\frac{du}{dn} \neq 0$ 时才表现出来。服从这一规律的流体称为牛顿流

体。如常见的水、空气、甘油等。此外，从公式(1-10)可知， $\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dn}}$ ，其单位为牛·秒/

平方米或帕·秒。当 $\frac{du}{dn} = 1$ 时， μ 的数值就等于流体在单位接触面积上的粘滞阻力，流体的粘度愈大，内摩擦力作用则愈强，因此 μ 是衡量流体粘性大小的物理量。不同的流体具有不同的粘度值，通常由实验测定，应用时可由专门图表查得。

由于在研究流体流动规律和流体力学的计算中 μ 和 ρ 往往以比值 $\frac{\mu}{\rho}$ 同时出现，该比

值具有运动学的因次，通常称为运动粘滞系数又称运动粘度，以符号 ν 表示，即 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，其单位为平方米/秒。

需要指出的是由于运动粘度是两个具有独立含义的物理量 μ 和 ρ 的比值。 ν 本身并不具有独立的物理含义。例如当温度为零度时，水的粘度 μ 值约为空气的100倍，但 ρ 值却是空气的1000倍，因此水的 ν 值比空气的小得多，但这决不表明水的粘度比空气低。

粘度可以用来衡量流体粘性的大小，而粘度的大小不仅因流体的种类而异，而且随流体的压力和温度而发生变化，压力的改变对粘度的影响很小，一般可以忽略，而温度对于粘度的影响却较大。但需注意，液体与气体二者的粘度随温度变化的规律是不同的，液体的粘度随温度的升高而减小，气体的粘度随温度的升高而增大，这是因为粘性是由于分子间的吸引力和分子不规则热运动产生动量交换所产生的结果。对液体来讲，其粘性主要由分子间吸引力所造成的。当温度增高时，液体分子间的距离加大，吸引力减小，致使内摩擦力减弱，流体抵抗变形的能力降低，因而粘度随温度的升高而减小。对于气体，由于其分子间吸引力很小，粘性主要是由分子运动引起的分子掺混作用而产生的。温度升高，分子热运动加剧，分子间碰撞机会增多，加剧了不同速度流体层之间的质量与动量交换，致使内摩擦力增加，粘度增大。

表1-1列出了空气在1个大气压下不同温度时的 μ 值和 ν 值

表1-1

1大气压下的空气粘度

t °C	μ 10 ⁻³ 帕·秒	ν 10 ⁻⁶ 平方米/秒	t °C	μ 10 ⁻³ 帕·秒	ν 10 ⁻⁶ 平方米/秒
0	0.0172	13.7	60	0.0201	19.6
10	0.0178	14.7	70	0.0204	20.5
20	0.0183	15.1	80	0.0210	21.7
30	0.0187	16.6	90	0.0216	22.9
40	0.0192	17.6	100	0.0218	23.6
50	0.0196	18.6	120	0.0228	26.2

综上所述，正是由于流体具有粘性，才使得飞机在空中飞翔，船舶在海洋中航行，气体在管道中流动时都将消耗掉一定能量来克服粘滞阻力。也正是由于空气具有粘性，才能够利用流动的空气携带物料达到通风除尘和气力输送的目的。

三、空气的状态变化

所谓状态，就是指一个物系所有性质的总和。也就是说，只要物系处于某一确定状态，它所有的性质或变量也就完全确定，而且相互之间还存在着一定的依赖关系。体积(V)、压力(P)、温度(T)是表征气体状态的三个物理量，表达三者间依赖关系的就是状态方程。

根据波义耳—马略特定理，在温度保持一定时（即等温过程），对于一定质量的气体，其体积与压力成反比，即：

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots \quad (1-11)$$

$$PV = \text{常数}$$

又由盖·吕萨克定律，当压力保持不变时（即等压过程），对于一定质量的气体，其体

积与绝对温度成正比，即：

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots \quad (1-12)$$

$$\frac{V}{T} = \text{常数}$$

综合以上两个定律，可以得到P、V、T三者之间的关系。假设气体先经等温过程再经等压过程，分二步由初始状态 P_1 、 V_1 、 T_1 变化为终态 P_2 、 V_2 、 T_2 。

第一步： T_1 不变，当压力由 P_1 变为 P_2 时，体积则由 V_1 变为中间状态 V_0 。由式(1-11)得

$$V_0 = V_1 \frac{P_1}{P_2} \quad (1-13)$$

第二步： P_2 不变，当温度由 T_1 变为 T_2 时，体积则由 V_0 变为 V_2 ，由式(1-12)得：

$$V_0 = V_2 \frac{T_1}{T_2} \quad (1-14)$$

由式(1-13)、(1-14)则可得到：

$$V_1 \frac{P_1}{P_2} = V_2 \frac{T_1}{T_2}$$

$$\text{即：} \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

上式表明，对于一定质量的气体，状态变化时，压力、体积二者的乘积和绝对温度的比值始终保持为常数，即：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n} = R = \text{常数} \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad PV = RT \quad (1-16)$$

必须指出，任何一个物理定律都有它的适用范围，上述表征气体P、V、T之间关系的状态方程，也有一定的运用范围。对于一般气体来说，当压力不太大（相对于大气压力而言），温度不太低（相对于室温而言）时，其状态变化符合上述规律。可以设想，有这样一种气体，它在任何情况下都遵守上述规律。这种气体叫理想气体，表征其状态变化规律的方程又称为理想气体状态方程。理想气体是人们认识的一种近似的假设。在通风和气流输送工程中，我们所研究的空气，通常压力不是很高，温度也不是很低，因此可以看成是理想气体。

在理想气体状态方程中，对于1摩尔的任何气体，式中的常数R均相等称为通用气体常数，它与气体的状态无关，可通过实验测定。R的单位取决于P与V的单位，常用的单位为：牛·米/公斤·开。对于一定质量的不同气体，由于分子量不同，就有不同的R值。空气的R值还与湿度有关。对于干燥空气， $R=287.33$ 牛·米/公斤·开；对于中等湿度（ $\phi=50\%$ ）的空气， $R=288.4$ 牛·米/公斤·开。

由于 $V = \frac{m}{\rho}$ ，则式(1-16)可以写成

$$Pm = \rho RT \quad (1-17)$$

对于单位质量的气体，则

$$\rho = P/RT \quad (1-18)$$