

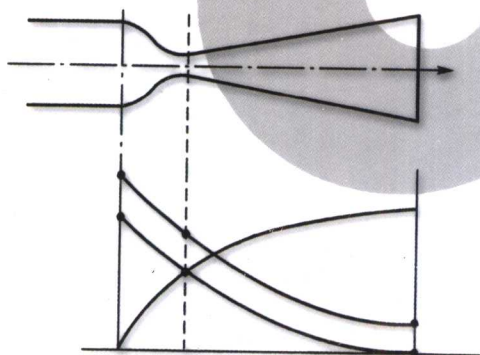
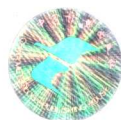
高等学校适用教材

LIUTI LIXUE JICHU

# 流体力学基础

朱爱民 主编

中国计量出版社



高等学校适用教材

# 流体力学基础

朱爱民 主编

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学基础/朱爱民主编. —北京: 中国计量出版社, 2004.12  
高等学校适用教材

ISBN 7-5026-1785-X

I. 流… II. 朱… III. 流体力学—高等学校—教材 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 102597 号

## 内 容 提 要

本书共分五章, 第一章简述流体的物理性质和概念; 第二、三章讲述流体平衡与运动的基本规律; 第四章讲述流体阻力及管路水头计算; 第五章讲述可压缩流体一元运动基本知识。

本书可作为高等学校质量技术监督和测控技术与仪器专业流量计量方向的教材; 高等职业技术学院、高等专科学校和中等职业技术学校也可选用; 并可作为从事流量计量的科技人员的参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm × 960 mm 16 开本 印张 11.75 字数 195 千字

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

\*

印数 1—3 000 定价: 19.00 元

# 质量技术监督高校教材 编 审 委 员 会

主 任 张玉宽

副主任 马纯良 孙秀媛

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 委 员 | 瞿兆宁 | 裴晓颖 | 黄 夏 | 何伟仁 | 李小亭 |
|     | 张 艺 | 宋明顺 | 杨建华 | 吴宁光 | 史菊英 |
|     | 赵玉禄 | 孙克强 | 周志明 | 张莉莉 | 王庆仁 |
|     | 许吉彬 | 刘宝荣 | 韦录强 | 张万岭 | 孙振江 |
|     | 陈小林 | 朱和平 | 李素琴 | 刘宝兰 | 刘文继 |
|     | 张桂琴 |     |     |     |     |

# 出版前言

随着我国加入世界贸易组织，社会主义市场经济和质量技术监督事业的迅速发展，迫切需要大量的质量技术监督专业人才。质量技术监督高等专业教育在质量技术监督教育事业中占有重要地位，对提高在职人员的素质、改善队伍结构、培养新生力量具有重要意义。大力发展质量技术监督高等专业教育，将对质量技术监督事业产生深远的影响。

近年来，全国各地质量技术监督院校办学条件不断改善，招生规模不断扩大，教学质量和水平不断提高。与此同时，在质量技术监督教育中，高等教育所占比重不断增大。为了适应这种形势，加快质量技术监督院校教材建设的步伐，根据质量技术监督院校对专业教材的实际需求，我们组织全国质量技术监督及相关院校和单位编写了有关标准化、计量、质量等方面的系列专业基础课和专业课教材。

这套教材主要是根据质量技术监督高等专业教育的需要编写的。在目前情况下，存在多种形式的质量技术监督高等和中等专业教育，因此，在编写过程中从内容选取、结构设计、深浅程度等方面考虑了适用的多样性。质量技术监督普通中等专业教育、职业教育和人员技术培训等，可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

原国家质量技术监督局政策法规宣传教育司进行了本套教材的前期组编工作。参加教材审定工作的院校和单位有：中国计量

学院、河北大学质量技术监督学院、四川省技术监督学校、山东省质量工程学校、广西计量学校、河南省质量工程学校、天津市渤海职业中等专业学校、吉林省技术监督职工中专学校、北京市质量技术监督培训中心等。在教材的编写、审定等工作中，中国计量出版社、河北大学质量技术监督学院等单位做了很多具体、细致的工作。

这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面的努力，但仍可能存在很多不足之处，甚至于错误，我们拟在使用过程中听取各方面意见，于适当时机组织修订。

**国家质量监督检验检疫总局人事司**

**2003年4月**

## 编者的话

《流体力学基础》是热工计量专业及相近专业的一门重要的专业基础课,本教材是根据质量技术监督高校教材审定会制定的教学大纲进行编写的。

本教材是以原河北省技术监督学校编写的《流体力学基础》为基础,考虑到培养对象的新定位,在内容及深度上作了较大的调整及扩充,增加了管路的水头计算及应用、气体动力学的有关内容。在着重讲述流体的性质、平衡规律的基础上,对热工计量专业经常遇到的管内液流及气流问题作了较为详细的叙述。在内容的安排上,既注意保持本学科的系统及全面性,又侧重于基本概念的理解和基本原理在热工计量技术中的应用,以培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。

本书共分五章,第一章主要简述流体的物理性质和概念;第二、三章讲述流体平衡与运动的基本规律;第四章讲述流动阻力及管路水头计算;第五章讲述可压缩流体一元运动基本知识。其中第二、三、五章是本课程的中心内容,第二、三章是本课程的重点。该书建议教学时数为 60 学时,其中实验 20 学时。

本书编写力求反映如下特点:

(一)体现高等技术监督学校《工程流体力学》学科体系的理论水平,加深和强化了如流体平衡与运动多元分析法和气体的全能方程等内容。

(二)注意加强流体力学理论与计量技术的结合,即应用流体力学的基本概念和原理,解释和解决计量技术中的实际问题。例如对静力学基本方程与压力测量仪器、动力学方程与流量测量仪表、高压气体经喷管的流动与临界流流量计等作了分析介绍。

(三)强化理论,注意应用。本书附有必要的图表数据,各章附有思考题和习题,借助例题启发和习题求解引导学以致用,促进理论深化,从而培养学生分析和解决问题的能力。

本教材由河北大学质监学院朱爱民、梁淑英、王芳,河北省计量科学研究院卜占成、屈宏强编写。其中第一、二章由梁淑英、王芳编写,第

三、四章由卜占成、屈宏强编写，第五章由朱爱民编写。全书由朱爱民统稿。

在教材编写过程中始终得到了中国计量科学研究院王自和、翟秀贞的指导和帮助，也得到了编者所在单位和各方面的大力支持，谨在此一并致谢。

本书编者都长期工作在计量科学研究单位和教育战线，我们希望这本教材能对我们所热爱的热工计量工作有所贡献。由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2004年6月



# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 绪 论 .....                  | (1)  |
| 第 1 章 流体的主要物理性质 .....      | (3)  |
| 第一节 流体的特性 .....            | (3)  |
| 第二节 流体的密度和重度 .....         | (4)  |
| 第三节 流体的压缩性和膨胀性 .....       | (9)  |
| 第四节 流体的粘性及内摩擦定律 .....      | (13) |
| 第五节 表面张力和毛细现象 .....        | (23) |
| 第六节 作用在流体上的力 .....         | (34) |
| 第 2 章 流体静力学 .....          | (37) |
| 第一节 流体静压力及其特性 .....        | (37) |
| 第二节 流体平衡微分方程及等压面 .....     | (40) |
| 第三节 流体静压力基本方程 .....        | (42) |
| 第四节 流体静压力的测量——液体式压力计 ..... | (47) |
| 第五节 平面上的液体总压力 .....        | (52) |
| 第六节 曲面上的液体总压力 .....        | (57) |
| 第七节 浮力原理、潜体和浮体的平衡 .....    | (59) |
| 第 3 章 流体动力学基础 .....        | (72) |
| 第一节 流体力学有关基本概念 .....       | (72) |
| 第二节 连续性方程 .....            | (79) |
| 第三节 能量方程（不可压缩流体） .....     | (83) |
| 第四节 能量方程的应用 .....          | (90) |
| 第五节 动量方程的应用 .....          | (95) |

|              |                              |              |
|--------------|------------------------------|--------------|
| 第六节          | 平面流、绕流、两相流·····              | (98)         |
| 第七节          | 相似理论 ·····                   | (104)        |
| <b>第 4 章</b> | <b>流动阻力与能量损失 ·····</b>       | <b>(111)</b> |
| 第一节          | 流动阻力与能量损失的两种形式 ·····         | (111)        |
| 第二节          | 流体流动的两种形态及雷诺实验 ·····         | (113)        |
| 第三节          | 管中层流运动规律——达西公式 ·····         | (118)        |
| 第四节          | 管中紊流概述 ·····                 | (121)        |
| 第五节          | 紊流沿程损失的计算公式 ·····            | (126)        |
| 第六节          | 尼克拉茨实验及系数 $\lambda$ 公式 ····· | (127)        |
| 第七节          | 局部能量损失 ·····                 | (131)        |
| 第八节          | 管路计算 ·····                   | (136)        |
| <b>第 5 章</b> | <b>压缩性流体一元运动基本理论 ·····</b>   | <b>(146)</b> |
| 第一节          | 绝热气流的基本方程及应用 ·····           | (146)        |
| 第二节          | 音速、气流按不可压缩处理的限度 ·····        | (151)        |
| 第三节          | 速度与断面关系、临界参数 ·····           | (157)        |
| 第四节          | 高压气体经喷嘴与拉伐尔喷管的流动 ·····       | (160)        |
| 第五节          | 气体管流的基本理论 ·····              | (168)        |

# 绪 论

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学，可分为理论流体力学和工程流体力学，本教材阐述的是工程流体力学。

工程流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法来研究流体处于平衡运动和流体与固体相互作用的力学规律，以及这些规律在实际工程中的应用，因此流体力学又是力学的一个分科。

工程流体力学研究对象是流体，而流体主要是液体和气体两部分，因而流体力学就是指液体力学和气体力学。液体力学通常以水为液体的代表，故又称为水力学。水力学在研究液体运动过程中，认为流体不可压缩（或其压缩性可忽略），而流场中各点的密度为恒值，这种等密度流动就是水力学的特点，因此水力学是在等密度流动前提下来研究其运动规律。气体力学在研究气体运动过程中，由于流体可被压缩，而密度在流场上各点为变数，且气体在改变密度的同时还伴随有扰动波的形成，这两个特性就是气体力学的特点，因此气体力学是在上述前提下来研究运动规律以及确定表征运动状态的参数值。

气体力学与水力学是有原则性区别的，其实质就在于气体的可压缩与液体的不可压缩。

古典流体力学在研究流体平衡及运动规律时，是从严密的数学推理出发，追求问题的严密性和精确性。而水力学则是从简化的工程角度出发，在理论分析的基础上，又广泛采用实验数据和经验公式来解决实际问题。

现代的工程流体力学的内容和研究方法，是古典流体力学与水力学两者的结合，也就是以理论分析与实验研究相结合的方法来研究流体的力学规律。

工程流体力学在工程技术中占有重要地位，计量技术与流体力学的关

系同样十分密切。例如液体式压力计的测压原理，皮托管测量流速的原理，差压式流量计、速度式流量计、临界流流量计等测量流量的原理以及流量标准装置的设计计算等都分别涉及到流体静力学、流体动力学等基本理论，特别是经常用到伯努利方程、连续方程和动量方程这三个流体力学的基本方程。可见流体力学在计量技术中是有重要作用的，因此流体力学是计量测试技术特别是热工计量技术专业一门重要的基础课，只有掌握流体平衡和运动的主要理论规律，才能为后继的计量技术专业课打下必要的基础。

流体的物理性质是决定流体平衡和运动规律的内部原因，因此在讨论流体的力学规律之前，应先了解流体的概念和流体的主要物理性质。

# 第 1 章

## 流体的主要物理性质

---

### 第一节 流体的特性

#### 一、流体的概念

液体和气体统称为流体。流体由大量流体分子组成。液体和气体与固体相比较，分子间引力较小，分子运动较剧烈，分子排列松散，不能像固体那样抵抗拉力和切力，只能抵抗对它的压缩力作用。只要有运动及变形的可能，流体就会发生变形或流动。自然界中的流体都具有一定的粘性，因而其流动性也要受到自身的粘性约束，不会无限制地流动。

液体和气体所具有的共同特性是流动性（这种流动性不是无限制的）。但它们也还有一些不同的特性，对气体来讲它很容易被压缩或使其膨胀，而且它没有自由表面，不能保持一定的形状。由于分子间的斥力很弱，因而容易被压缩。气体分子的自由运动使它能够充满所占容器的空间。另一特点是气体的粘性小，而随温度的升高，其粘性加大。

对液体而言，它有自由表面，有固定的体积，在一般的情况下液体被看成是不可压缩的流体。因为液体分子比固体分子间距离大，所以引力减弱，不能保持一定的形状，但都比气体分子间的距离小，分子间的引力尚能使液体保持一定的体积。在受到压缩时，由于分子的斥力较大，阻抗压缩，因而具有不可压缩性，这一点在实用上是很有意义的。

液体粘性较大，并且随温度的升高而降低。

#### 二、流体作为连续介质的概念

流体由大量的流体分子所组成，而分子是存在间隙的，由于分子力的

作用, 这些分子一直在作杂乱无章的运动。从微观上来看, 这些分子之间是不连续 (有间隙的), 如果从研究分子运动出发, 从而掌握整个流体与运动规律是很困难的, 即便在一个很小的体积内所包含的分子数目也特别多 (在标准状况下  $1 \mu\text{m}^3$  液体有液体分子  $3.35 \times 10^{10}$  个,  $1 \mu\text{m}^3$  气体中有气体分子  $2.7 \times 10^7$  个), 而每个分子的运动又很复杂, 所以要列出这些单个分子的运动方程式几乎是不可能的。因此, 在研究流体时, 可将流体加以理想化。这就是把真正的流体看成是一种有无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质, 而这种假想的连续介质仍然具有流体的一切基本力学性质。

将流体视为一种连续介质也是可能的, 因为流体力学研究的不是个别分子的微观运动, 而是由大量分子组成的宏观流体的机械运动。

把流体看作连续介质, 我们就可以抛开流体内部复杂的分子运动, 而仅研究流体的宏观机械运动。这样, 反映流体宏观运动的物理量, 像压力、温度、速度等均可看成是在空间坐标上连续分布的, 可用数学上的连续函数来描述。数学上一系列的连续函数的研究成果均可用于解决流体力学中的各类问题。

以上便是把流体看作连续介质的假说, 它是 1753 年由欧拉提出的观点。以后一直沿用把流体看作连续介质的观点, 并将这种连续介质本身看成有无数多个连续分布的微小流体团组成, 这种微小流体团称之为流体质点, 又称流体微团。

应该指出, 连续介质的假定也有一定的适用范围。当研究的区域很小, 与分子的自由程处于同一数量级时, 例如在很稀薄的空气中或高真空技术中, 连续介质的假定就不再适用, 而必须考虑不连续介质。另外当流体性质局部突变时, 连续介质的假定也不适用。例如液体中局部地区压力很低, 发生汽化现象形成气穴时, 就会破坏液体的连续流动。

## 第二节 流体的密度和重度

### 一、流体的密度

流体和自然界里其他物体一样, 具有质量。单位体积内流体所具有的质量称为密度。对于均质流体, 其密度等于流体质量与它所占体积的比值, 即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中:  $\rho$  ——均质流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$M$  ——均质流体的质量, kg;

$V$  ——均质流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

密度的单位是千克每立方米, 单位符号为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

对于非均质流体, 按上式计算的结果只能表示流体的平均密度, 而流体内某一点  $a$  处的密度  $\rho$  表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

式中:  $\rho$  ——流体内某一点  $a$  处的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\Delta M$  ——包含该点的微元流体体积所具有的质量, kg;

$\Delta V$  ——包含该点的微元流体体积,  $\text{m}^3$ 。

流体的密度随压力和温度而变化。

## 二、密度与温度的关系

假设物体在温度  $t_1$  和  $t_2$  时的密度分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 物体的质量为  $m$ , 则有

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1}$$

$$\rho_2 = \frac{m}{V_2}$$

于是有

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_1[1 + \beta(t_2 - t_1)]} = \frac{1}{1 + \beta(t_2 - t_1)} \\ \rho_2 &= \rho_1[1 - \beta(t_2 - t_1) + \beta^2(t_2 - t_1)^2 + \cdots] \end{aligned} \quad (1-3)$$

根据密度变化的性质、温度间隔值和准确度的要求, 式 (1-3) 可取到一次项、二次项或三次项。对于温度变化范围不大的间隔, 在一般准确度要求下, 可将式中的二次项小量忽略掉, 即将密度随温度的变化视为线性, 此时有

$$\rho_2 = \rho_1[1 - \beta(t_2 - t_1)] \quad (1-4)$$

式中:  $\rho_1$  ——温度为  $t_1$  时流体的密度;

$\rho_2$  ——温度为  $t_2$  时流体的密度;

$\beta$  ——温度在  $t_2 \sim t_1$  范围内流体的体胀系数。

体胀系数等于物质温度每变化  $1^\circ\text{C}$  时它的密度相对变化量的大小, 即

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

式中:  $p$  ——压力。

在实际工作中, 若已知  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\rho_1$  和  $\beta$  值, 则可根据式 (1-3) 求得

流体温度为  $t_2$  时的密度。许多液体它们的密度随温度的变化可视为线性关系, 即  $(\rho_1 - \rho_2) / (t_2 - t_1)$  是一常量, 我们用  $\alpha$  表示它, 并称为密度温度修正系数。

### 三、密度与压力的关系

由于液体分子间距很小, 所以液体内部(分子的)的压力很大。故在外部压力变化时, 液体密度变化很小, 尤其压力变化不大时, 密度变化更微小。通常在一个大气压下的液体密度测定, 压力的波动对密度的影响可以忽略不计。但在高压下的测定或在极精密的测定中, 为得到准确的结果, 压力变化的影响还须考虑。

若以  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别表示压力为  $p_1$  与  $p_2$  时的液体密度, 在恒定温度下, 则有

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \beta_p (p_2 - p_1)] \quad (1-5)$$

式中:  $\beta_p$ ——在压力为  $p_1 \sim p_2$  范围内的平均等温压缩系数, 它等于压力变化一个单位压力时相应的密度变化量。

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

气体就不同了, 它的分子间距比液体大得多, 当压力变化时, 分子间距就随之有明显的变化。当温度不变时, 压力的变化对密度的影响可用下式表示:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta p}{p} \quad (1-6)$$

可见, 压力的变化对气体密度的影响是很大的。对于气体, 如果不计气体分子之间的相互作用力和分子本身的尺寸, 把气体作为完全气体(即理想气体), 则它的密度、热力学温度及绝对压力间的关系, 可用理想气体状态方程表示:

$$pv = RT$$

$$p = \rho RT$$

式中:  $p$ ——气体的压力, Pa;

$R$ ——气体常数,  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$  或  $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ;

$T$ ——热力学温度, K;

$v$ ——气体的比容(比容为密度的倒数即  $v = \frac{1}{\rho}$ ),  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

对于空气、氮气、氩气、氧气、氮气、二氧化碳气等, 除了高压和低温状态外(例如, 压力不超过  $2 \times 10^7$  Pa, 热力学温度不低于 253 K), 基本上



都能遵循上述方程的规律，这样气体的密度就为

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1-7)$$

式(1-7)中，对于同一种气体，不论在什么状态下， $R$ 的数值恒为常数，但值随气体的种类而异，例如氧气、空气的 $R$ 值分别为 $0.2598 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 和 $0.287 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。气体常数与气体的摩尔质量 $M$ 的乘积为一恒定值，称为摩尔气体常数，用 $R_M$ 表示。 $R_M = 8.314 \ 510 \pm 0.000 \ 070 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。若气体的质量为任意千克时，则气体的密度为

$$\rho = \frac{pM}{R_M T} \quad (1-8)$$

在工程计算中常用式(1-7)。表1-1是常用气体的物理性质。

由式(1-7)可知，气体的密度并不完全取决于压力，这对气体力学分析带来了不便，但是，气体的状态变化又遵循 $\frac{p}{\rho^n} = c$  ( $c$ 为常数)的规律，而且很多工程问题可以归属于下列二种情况：

(1) 等温变化过程， $n=1$  即  $\frac{p}{\rho} = c$ ；

(2) 等熵变化过程， $n=\kappa$  即  $\frac{p}{\rho^\kappa} = c$ 。

式中： $n$ ——多变指数，取决于状态变化过程中气体吸热或放热的程度；

$\kappa$ ——等熵指数（又叫绝热指数）。

在量值上

$$\kappa = \frac{c_{p,m}}{c_{v,m}}$$

各种气体的 $\kappa$ 值见表1-1。

表1-1 常用气体的物理性质  
(在标准大气压下，温度为20℃)

| 气体名称  | 分子式             | 摩尔质量<br>$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ | 摩尔定压热容<br>$c_{p,m}/[\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 绝热指数<br>$\kappa$ | 密度<br>$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 重度<br>$\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|-------|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 空气    | —               | $29.98 \times 10^{-3}$                    | 29.10                                                                 | 1.40             | 1.205                                        | 11.82                                         |
| 氦气    | He              | $4.033 \times 10^{-3}$                    | 20.94                                                                 | 1.66             | 0.166                                        | 1.628                                         |
| 氩气    | Ar              | $39.95 \times 10^{-3}$                    | 20.89                                                                 | 1.67             | 1.662                                        | 16.29                                         |
| 氢气    | H <sub>2</sub>  | $2.016 \times 10^{-3}$                    | 28.71                                                                 | 1.41             | 0.0839                                       | 0.823                                         |
| 氧气    | O <sub>2</sub>  | $32.00 \times 10^{-3}$                    | 29.25                                                                 | 1.40             | 1.331                                        | 13.04                                         |
| 氮气    | N <sub>2</sub>  | $28.01 \times 10^{-3}$                    | 29.13                                                                 | 1.40             | 1.160                                        | 11.38                                         |
| 一氧化碳气 | CO              | $28.01 \times 10^{-3}$                    | 29.16                                                                 | 1.40             | 1.160                                        | 11.38                                         |
| 二氧化碳气 | CO <sub>2</sub> | $44.00 \times 10^{-3}$                    | 30.04                                                                 | 1.301            | 1.84                                         | 18.04                                         |