



高等教育“十一五”规划教材

高职高专专业基础课教材系列

# 化工单元操作

郑孝英 韩文爱 主编



科学出版社  
www.sciencepress.com

高等教育“十一五”规划教材

高职高专专业基础课教材系列

# 化工单元操作

郑孝英 韩文爱 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要以化工产品生产过程为背景,以培养学生从事化工生产职业能力为主线,依据岗位能力培养需要和国家职业技能鉴定标准构建教材内容。全书共三篇,第一篇流体输送,主要包括流体流动、流体输送设备;第二篇传热;第三篇混合物的分离,主要包括非均相混合物的分离、蒸发、吸收、蒸馏、干燥、其他分离技术。每个学习单元通过案例引入,知识目标、能力目标使学习者明确每个单元操作在生产中的作用,学习该单元操作能解决生产中的哪些实际问题,解决实际问题应具备的能力,需掌握的知识。章后配有本章小结、同步测试题,方便学习者自我检测和总结提高。相关链接了相应工种的国家职业技能鉴定标准,使学习者明确各工种鉴定内容和要求,以便获取相应的职业资格证书。

本书可以作为化工技术类、应用化工类专业及相关专业的教材,也可作为化工职业资格培训教材及各类化工应用性人才和教师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作/郑孝英,韩文爱主编. —北京:科学出版社,2010  
(高等教育“十一五”规划教材·高职高专专业基础课教材系列)  
ISBN 978-7-03-028928-5

I. ①化… II. ①郑… ②韩… III. ①化工单元操作-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第174918号

责任编辑:周 恢 / 责任校对:王万红  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年10月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年10月第一次印刷 印张:24 1/4

印数:1—3 000 字数:575 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (VP04)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

教材建设是教育教学改革的重要环节，并且是体现高职高专教育特色的知识载体和教学的基本工具，直接关系到高职高专教育是否能为一线岗位培养出符合要求的高技术应用型人才。

本书是按照当前职业教育对于人才培养的基本要求，以化工产品生产过程为背景，以培养学生从事化工生产职业能力为主线，依据岗位能力培养需要，融合国家职业技能鉴定标准来组织编写的。在教材编写过程中，到云南铜业硫酸分厂、云天化集团富瑞化工、昆明化肥厂等企业进行了调研，得到了企业专家的指导和帮助，增强了教材的实用性。

本书共分三篇九章内容。第一篇流体输送，主要包括流体流动、流体输送设备；第二篇传热；第三篇混合物的分离，主要包括非均相混合物的分离、蒸发、吸收、蒸馏、干燥、其他分离技术。通过每章生产案例的引入，使学习者了解各种化工产品的生产过程，明确单元操作在化工产品生产中的作用，懂得各化工单元操作在化工产品生产中需完成的工作任务，完成任务需具备的基本能力，培养能力必需的训练项目及相应的理论知识这条主线来构建基于工作过程的教材体系和教材内容。每章的技能训练使学习者在完成工作任务的过程中培养能力和掌握相关知识；每章后面附有同步测试题，便于学习者复习并系统掌握本章内容；相关链接了国家职业技能鉴定标准，便于学习者明确各工种鉴定内容和要求。通过相关知识的学习和技能训练，学习者可以参加压缩机工、蒸发工、蒸馏工、吸收工、干燥工等工种的技能鉴定，获取相应等级的职业资格证书，充分体现了“工学结合”、“双证融通”的教学模式。

本书由昆明冶金高等专科学校郑孝英、石家庄职业技术学院韩文爱任主编，茂名职业技术学院董利任副主编。郑孝英编写绪论、第一章、技能训练、附录，并负责全书统稿；武汉软件工程职业学院吴雨龙编写第二章；董利编写第三章并负责第三、五、六章统稿；昆明冶金高等专科学校李然编写第四章、茂名职业技术学院王丹菊编写第五章；茂名职业技术学院张燕编写第六章；韩文爱编写第七章并负责第七、八、九章统稿；石家庄职业技术学院陈玉峰编写第八章；漯河职业技术学院陈思顺编写第九章。

本书在编写过程中得到了许多企业专家的大力指导，得到了浙江中控科教仪器设备有限公司的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和疏漏，请读者批评指正。

# 目 录

绪论	1
同步测试题	5

## 第一篇 流体输送

第一章 流体流动	9
第一节 案例引入	9
第二节 流体静力学	10
第三节 流体动力学	17
第四节 流体阻力	24
第五节 化工管路	36
第六节 流量的测量	44
第七节 技能训练——流体输送管路拆装训练	48
同步测试题	49
第二章 流体输送设备	55
第一节 案例引入	55
第二节 离心泵	56
第三节 其他类型泵	76
第四节 气体输送设备	82
第五节 技能训练——流体输送训练	91
同步测试题	96

## 第二篇 传 热

第三章 传热	101
第一节 案例引入	101
第二节 热传导	106
第三节 对流传热	112
第四节 传热过程计算	118
第五节 换热器	129

第六节 技能训练——传热操作训练·····	141
同步测试题·····	143

### 第三篇 混合物的分离

<b>第四章 非均相混合物的分离</b> ·····	149
第一节 案例引入·····	149
第二节 沉降·····	150
第三节 过滤·····	164
第四节 非均相混合物分离方法的选择·····	171
第五节 技能训练——板框压滤机操作·····	171
同步测试题·····	173
<b>第五章 蒸发</b> ·····	176
第一节 案例引入·····	176
第二节 单效蒸发·····	178
第三节 多效蒸发·····	181
第四节 蒸发设备·····	184
第五节 技能训练——蒸发操作实训·····	191
同步测试题·····	196
<b>第六章 吸收</b> ·····	198
第一节 案例引入·····	198
第二节 气液相平衡·····	201
第三节 传质机理与吸收速率·····	208
第四节 吸收塔的计算·····	214
第五节 填料塔·····	220
第六节 解吸和吸收流程·····	232
第七节 技能训练——吸收解吸操作实训·····	234
同步测试题·····	238
<b>第七章 蒸馏</b> ·····	241
第一节 案例引入·····	241
第二节 双组分溶液的气液相平衡关系·····	242
第三节 蒸馏与精馏原理·····	246
第四节 两组分精馏的计算·····	249
第五节 特殊精馏·····	264
第六节 板式塔·····	266

---

第七节 技能训练——精馏操作实训·····	282
同步测试题·····	287
<b>第八章 干燥</b> ·····	<b>291</b>
第一节 案例引入·····	291
第二节 湿空气的性质及湿度图·····	294
第三节 干燥过程的物料衡算与热量衡算·····	304
第四节 干燥速率和干燥时间·····	309
第五节 干燥设备·····	315
第六节 技能训练——干燥操作实训·····	324
同步测试题·····	328
<b>第九章 其他分离技术</b> ·····	<b>332</b>
第一节 萃取分离技术·····	332
第二节 膜分离技术·····	339
同步测试题·····	345
附录·····	347
主要参考文献·····	379

# 绪 论

## 一、案例引入

乙炔加氯化氢制氯乙烯工艺流程，如图 0.1 所示。经净制处理的干燥精乙炔通过沙封 1 与干燥的氯化氢气体在混合器 2 中混合均匀，进入反应器 3，在催化剂氯化汞的作用下进行加成反应，反应后的气体先经过水洗塔 4 除去氯化氢。再经过碱洗塔 5 除去残余的氯化氢和二氧化碳，然后在预冷器 6 中用水间接降温。可将水冷凝分离出来。其余气体在全凝器 7 中用盐水间接降温使氯乙烯和二氯乙烷等全部冷凝，冷凝液送入低沸塔（精馏塔）8 使乙醛等低沸物及乙炔等气体从塔顶蒸出，釜液送入氯乙烯塔（精馏塔）9，塔顶馏出液为精氯乙烯单体，釜液是二氯乙烷等高沸物，可另再回收。

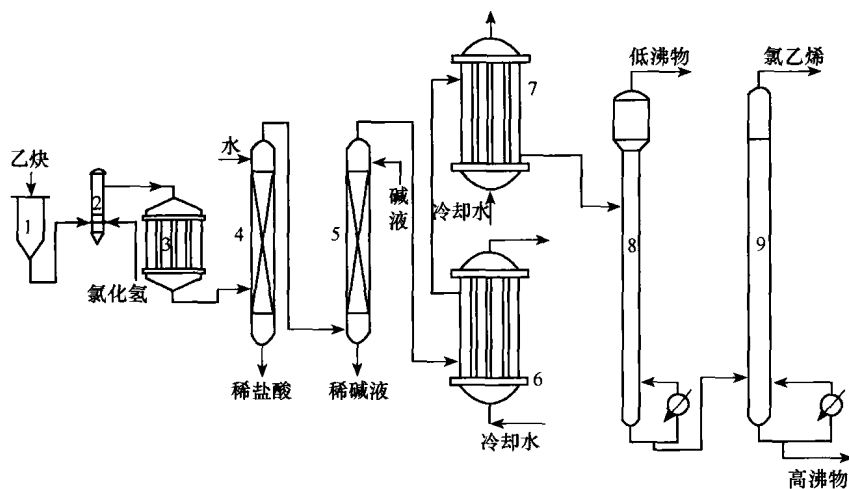


图 0.1 乙炔加氯化氢制氯乙烯工艺流程图

1. 沙封；
2. 混合器；
3. 反应器；
4. 水洗塔；
5. 碱洗塔；
6. 预冷器；
7. 全凝器；
8. 低沸塔；
9. 氯乙烯塔

## 二、化工生产过程与单元操作

### （一）化工生产过程

化学工业是指对原料进行加工处理，使其发生化学和物理变化而获得产品的工业（如氯乙烯产品生产）。化工产品不仅是工业、农业和国防部门的重要生产资料（如乙烯、化肥、燃料油等），同时也是人们日常生活中的重要生活资料（如医药、化妆品等）。我国化学工业已形成煤化工、盐化工、石油化工、生物化工等 20 多个行业，4 万多个品种和规格的化工产品，化学工业及其产品在国民经济中占有重要地位。



化工生产过程是指化学工业的一个个具体生产过程，简单地说，就是化工产品的加工过程（如氯乙烯的生产过程）。化工生产过程可以分为两类：一类是以化学反应为核心的化学反应过程，通常在反应器中进行，如氯乙烯的生产过程中，氯化氢与乙炔，在催化剂作用下化学反应过程；另一类是只改变物料的物理性质，而不改变其化学性质的物理过程，如氯乙烯的生产过程中，反应后产物里，除主产物氯乙烯外，还含有未反应的氯化氢、乙炔及副产物二氯乙烷等，氯化氢经水洗塔的吸收过程，二氯乙烷与氯乙烯经精馏塔的分馏过程均属物理过程。任何一种化工产品的生产过程都是由若干个物理过程与若干个化学反应过程组合而成。

## （二）单元操作

尽管化工产品千差万别，生产工艺多种多样，但这些产品的生产过程所包含的物理过程并不是很多，而且是相似的。如流体输送，不论用来输送何种流体，其目的都是把流体从一个设备输送到另一个设备；加热与冷却的目的都是得到需要的操作温度；分离提纯的目的都是得到指定浓度的混合物。这些在各种化工产品的生产过程中，普遍采用、遵循共同的物理学规律、所用设备相似、具有相同作用的基本物理操作，称为单元操作。如合成氨、硝酸和硫酸的生产过程中，都采用吸收操作分离气体混合物，而且都遵循亨利定律及相平衡原理，都是在吸收塔内进行，所以吸收是一个单元操作。又如尿素、聚氯乙烯的生产过程中都采用干燥除去固体中的水分，所以干燥是一个单元操作。

按照单元操作所遵循的基本规律，可将十几种单元操作归纳为几个基本过程：

（1）动量传递过程（流体动力过程）——包括遵循流体力学基本规律的单元操作，如流体流动、流体输送、沉降、过滤等。

（2）热量传递过程（传热过程）——包括遵循传热学基本规律的单元操作，如传热、蒸发等。

（3）质量传递过程（传质过程）——包括遵循传质基本规律的单元操作，如吸收、精馏、干燥和萃取等。

由氯乙烯的生产过程可见，单元操作在化工生产过程中的重要地位。

## 三、课程的性质、任务和内容

### （一）本课程的性质

“化工单元操作”是一门技术性、工程性、实用性很强的技术基础课程，是培养学生工程技术观点与化工核心实践技能的重要课程。

### （二）本课程的内容

“化工单元操作”主要介绍单元操作的基本原理，所用典型设备的结构、计算和选用。本书内容分三部分，第一部分流体输送，包括流体流动和流体输送设备；第二部分传热；第三部分混合物的分离，包括非均相混合物的分离、蒸发、蒸馏、吸收、干燥及其他分离技术。

### (三) 本课程的任务

本课程的任务是掌握各个单元操作的基本原理、典型设备的构造、性能及工作原理,具备根据生产工艺要求,物料特性和技术、经济特点,合理选择单元操作及设备的能力;掌握这些过程的基本计算和设备设计,具备根据选定的单元操作,进行工艺计算和设备选型的能力;学会单元操作过程的具体操作和调节,具备分析和解决操作中发生故障的能力;有选择适宜操作条件、探索强化过程途径和提高设备效能的能力。

## 四、化工单元操作中常用的基本规律

在计算和分析各单元操作的问题时,经常会用到下列四个基本规律,即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、过程速率四个基本规律。下面扼要介绍这几个基本规律。

### (一) 物料衡算

根据质量守恒定律,输入该系统的物料质量必等于从系统中输出的物料质量与积累在系统中的物料质量之和。即

$$\text{输入系统的物料质量} = \text{输出系统的物料质量} + \text{积累在系统中的物料质量} \quad (0.1)$$

对于稳定连续操作过程,过程中没有物料积累,则物料衡算关系为

$$\text{输入系统的物料质量} = \text{输出系统的物料质量} \quad (0.2)$$

物料衡算的步骤:

- (1) 根据过程要求画出流程示意图,物料的流向用箭头表示,并标出已知数据和待求量。
- (2) 用虚线划定衡算范围,并确定衡算对象及衡算基准(一般选没有变化的量作为基准)。
- (3) 列出衡算式并求解未知量。衡算时方程两边计量单位应统一。

### (二) 能量衡算

根据能量守恒定律,在稳定的化工生产系统中,输入该系统的能量必等于从该系统输出的能量与其在系统中损失的能量之和。即

$$\text{输入系统的能量} = \text{输出系统的能量} + \text{系统中损失的能量} \quad (0.3)$$

能量包括物料自身的能量(内能、动能、位能)、系统与环境交换的能量(功、热)等,能量衡算的步骤与物料衡算类似。本书中所用到的能量衡算主要有机械能和热能衡算。机械能衡算将在第一章流体流动中介绍,热量衡算将在传热、蒸馏、干燥等章节中介绍。通过热量衡算,可以了解化工生产过程中热量利用和损失情况,为生产和设计提供依据。

### (三) 平衡关系

若组成不同的两相互相接触,则各组分将在两相间进行传递,直到每一组分在两相间相互传递的速率相等,两相的组成才不再发生变化,此时称为平衡。平衡时各参数之间的关系称为平衡关系。平衡是动态的,当条件发生变化时,旧的平衡将被打破,新的

平衡将建立，但平衡关系不发生变化。

物系平衡关系表示了各种自发过程可能进行到的极限程度。如在一定温度、压力下，用水吸收合成氨原料气中的二氧化碳，二氧化碳在气相和液相间不平衡时，原料气中的二氧化碳将进入水中，当水中的二氧化碳含量增到一定值时，二氧化碳在两相间达到平衡，即不再有质量的净传递。对于化工生产过程，可以从物系平衡关系来判断过程能否进行以及进行的方向和能达到的极限程度。

#### (四) 过程速率

单位时间内过程进行的变化量称为过程速率，如传热速率用单位时间内传递的热量表示。平衡关系只表明了过程进行的极限程度，而过程速率表明过程进行的快慢，对化工过程来说，过程进行的速率往往比过程的极限显得更重要。如果一个过程可以进行，但速率很慢，该过程在生产中无使用价值。过程速率越大，设备生产能力越大，或在完成相同生产任务时所需设备的尺寸越小。理论和科学实验证明过程速率与过程推动力成正比，与过程阻力成反比，即

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}} \quad (0.4)$$

推动力的性质取决于过程的内容，过程的内容不同，推动力的性质也不同。如传热过程的推动力是温度差，对传质来说推动力就是浓度差，但在物系达到平衡时其推动力等于零。过程的阻力则取决于过程机理。显然改变过程推动力或过程阻力均可改变过程速率，在学习各单元操作时，注意分析影响过程速率的因素，探求改进生产的措施。

## 五、单位的正确使用

### (一) 单位制

由于对基本量选择的不同，或对基本单位规定的不同，便形成了不同的单位制，长期以来工程上采用工程单位制、科学研究采用物理单位制（CGS制），使计算和交流极为不方便。从1960年10月起国际上普遍采用国际单位制（SI制）。常用单位制的基本量和基本单位见表0.1。我国于1984年颁发了以国际单位制为基础的法定计量单位。

表 0.1 常用单位制的基本单位

国际单位制 (SI制)							
基本量	长度	质量	时间	电流强度	热力学温度	发光强度	物质的量
基本单位	米 (m)	千克 (kg)	秒 (s)	安培 (A)	开尔文 (K)	坎德拉 (cd)	摩尔 (mol)
物理单位制 (CGS制)							
基本量	长度	质量	时间				
基本单位	厘米 (cm)	克 (g)	秒 (s)				
工程单位制							
基本量	长度	力	时间				
基本单位	米 (m)	千克力 (kgf)	秒 (s)				

中华人民共和国的法定计量单位包括：

- (1) 国际单位制的基本单位（见附录中的附表 1）。
- (2) 国际单位制的辅助单位（见附录中的附表 2）。
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位（见附录中的附表 3）。
- (4) 国家选定的非国际单位制单位（见附录中的附表 4）。
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位。
- (6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位（见附录中的附表 5）。

## （二）单位换算

本书采用法定计量单位，但在实际应用中，现存文献、手册中尚有许多采用非法定计量单位的数据、图表，而在进行化工计算之前必须把采用不同单位制表示的有关数据（物理量）换算成法定计量单位的数据，因此，熟悉各种不同单位制度，并能熟练地相互换算是学好本课程及将来正确进行化学工程计算的技能之一。

我们知道，物理量由一种单位制的单位转换成另一种单位制的单位时，量本身并无变化，只是在数值上有所改变。在进行单位换算时要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数，就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量的比值，即

$$\text{新单位数值} = \text{原单位数值} \times \text{换算因数} \quad (0.5)$$

化工中常用单位间的换算因数可从附录中查得。

## （三）单位的正确使用

化工计算中所用公式有两类，一类是根据物理规律建立的理论公式，这类公式中，各物理量的单位要求采用同一种单位制的单位，解出结果的单位也属于这一种单位制的单位。另一类是由实验数据整理出来的经验公式，这类公式中，各物理量的单位都是指定单位，解出结果的单位也是指定的单位。

所谓正确使用单位，就是在工程计算中注意这两类公式的不同要求，并在计算前，将各物理量换上适合公式要求的单位。

## 同步测试题

### 一、填空题

1. 化学工业是指对原料进行加工处理，使其发生\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_变化而获得产品的工业。
2. 《化工单元操作》是一门技术性、工程性、实用性很强的\_\_\_\_\_课程。

### 二、问答题

什么是单元操作？

### 三、计算题

1000kg 的电解液中含 NaOH 质量分数 10%、NaCl 的质量分数 10%、H<sub>2</sub>O 的质量分数 80%，用真空蒸发器浓缩，食盐结晶分离后的浓缩液中含 NaOH 50%、NaCl 2%、H<sub>2</sub>O 48%，均为质量分数。试求：(1) 水分蒸发量。(2) 分离的食盐量。(3) 食盐分离后的浓缩液量。在全过程中，溶液中的 NaOH 量保持一定。

# 第一篇

# 流体输送



# 第一章 流体流动



## 知识目标

- (1) 了解化工管路的组成及管路布置原则。
- (2) 了解转子流量计、孔板流量计、文丘里流量计的工作原理。
- (3) 理解稳定流动、流量、流速、黏度、流体流动状态等基本概念。
- (4) 掌握静力学基本方程式、连续性方程式、伯努利方程式的应用。



## 能力目标

- (1) 能正确选择管子的规格。
- (2) 能拆装化工管路。
- (3) 能正确使用流量计测定流量。
- (4) 能应用静力学基本方程式、伯努利方程式解决生产实际问题。

## 第一节 案例引入

### 一、生产案例

盐酸生产流程，如图 1.1 所示。氢气和氯气在合成炉内进行化学反应，生成的氯化氢气体经空气冷却器冷却、降温之后，在吸收塔内用水吸收，形成了浓度为 31% 左右的盐酸。从塔底送入产品贮槽内，然后用泵送到高位槽，通过槽下阀门的控制，作为成品运出。在盐酸生产过程中，原料、中间产品和最终的产品全都是流体，整个生产过程就是一个流体的流动与输送过程。在盐酸的生产过程中，有许多需要用流体流动知识解决的问题，如管路的布置、管子规格的确定、流量的控制、流体输送设备的选用、高位槽位置的确定等。

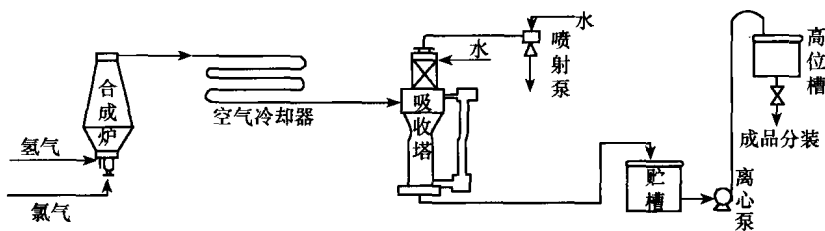


图 1.1 盐酸生产流程图



## 二、流体的特性

气体和液体都具有流动性，统称为流体。在化工生产中除要解决流体输送问题外，生产中的传热、传质以及化学反应大都在流体流动下进行，流体流动状态对这些单元操作有着很大的影响。

流体具有流动性、无固定形状、能向各个方向传递压强的特性。如果流体的体积随压强的变化而发生变化，则该流体称为可压缩性流体；如果流体的体积随压强的变化而不发生变化，则该流体称为不可压缩性流体；实际流体都是可压缩的，但由于液体的体积随压强变化很小，所以一般将液体视为不可压缩性流体；气体的体积随压强变化很大，所以一般将气体视为可压缩性流体。但是如果压强或温度变化很小时，气体也可以当作不可压缩性流体处理。

## 三、流体的输送方式

在化工生产中，为了满足工艺条件的要求，常需将流体从一个地方输送至另一个地方，从某一个设备转移至另一个设备，流体输送可根据生产实际采取不同的输送方式。常见的输送方式有高位槽送料、压缩空气送料、输送设备送料和真空抽料等。

## 第二节 流体静力学

流体的静止是运动的一种特殊形式，流体静力学是研究流体处于静止时各种物理量的变化规律。在生产实际中，可用静力学基本规律解决容器液位测定、流体压强差测定、安全液封等问题。

### 一、流体的主要物理量

#### (一) 流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度。表达式是

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

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

$m$ ——流体的质量， $\text{kg}$ ；

$V$ ——流体的体积， $\text{m}^3$ 。

#### 1. 液体的密度

##### 1) 液体的密度

影响流体密度的因素主要是温度和压力，液体为不可压缩性流体，当压强变化时液体密度变化甚小，可忽略。当温度变化时液体密度会发生变化。液体密度一般由实验测定，不同温度下液体的密度不同。