

稀土工程丛书

XITU GONGCHENG CONGSHU

冶金化工过程与设备

■ 蔡颖 主编
■ 宋金玲 韩剑宏 副主编

YEJIN HUAGONG
GUOCHENG YU SHEBEI



化学工业出版社

本书获得2011年度内蒙古科技大学出版基金:
国家特色专业(稀土工程)经费资助

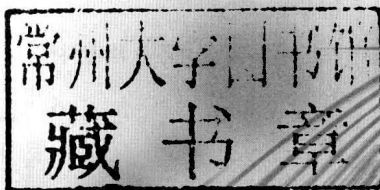
稀土工程丛书

XITU GONGCHENG CONGSHU

冶金化工过程与设备

YEJIN HUAGONG
GUOCHENG YU SHEBEI

蔡颖 主编
宋金玲 韩剑宏 副主编



化学工业出版社

本教材依据化工过程所遵循的物料衡算、热量衡算、平衡关系、过程速率、经济效益五个基本概念,叙述了在有色冶金过程及材料加工过程中涉及的化工单元操作的基本原理、计算方法及相关设备。全书包括绪论及流体力学、流体的输送机械、沉降与过滤、传热学、蒸发、传质原理、吸收、精馏、萃取、离子交换、干燥共十一章,每章编有例题和习题。

本教材可作为高等工科院校的有色冶金专业、稀土冶金专业、材料加工及材料科学与工程等相关专业教学用书,也可供相关专业的高等职业学校以及科研、设计和生产部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金化工过程与设备/蔡颖主编. —北京:化学工业出版社,
2013.6

(稀土工程丛书)

ISBN 978-7-122-17118-4

I. ①冶… II. ①蔡… III. ①冶金-化工过程②冶金-化工
设备 IV. ①TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 083431 号

责任编辑:邢 涛

文字编辑:冯国庆

责任校对:战河红

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 489 千字 2013 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00 元

版权所有 违者必究

《稀土工程丛书》序

稀土被人们誉为现代及未来工业必不可少的“工业维生素”和新材料的“宝库”，是世界上公认的战略元素和高技术元素。稀土不但在传统产业的技术进步和发展中发挥着愈来愈重要的作用，而且在信息、生物、新材料、新能源、空间、海洋六大新科技产业中有着广泛的应用。稀土作为一种不可再生的稀有资源，被广泛应用于军事、电子、环保、航天和其他尖端技术中，与高新技术和国防科技的发展息息相关。

1992年，邓小平在南巡时提出“中东有石油，中国有稀土，一定要把稀土的事情办好”；1999年，江泽民视察包头时指出，要“将稀土资源优势转化为经济优势”。为适应国家在包头建设“中国稀土谷”的重要战略和地方经济建设，2004年10月，内蒙古科技大学与包头国家稀土高新技术开发区采取联合办学、共同建设的方式，联合组建了内蒙古科技大学稀土学院，这是全国第一个以稀土命名的学院。

稀土学院成立8年来，内蒙古科技大学和包头国家稀土高新技术开发区双方以内蒙古科技大学作为教学基地，以包头稀土研究院和稀土高新技术开发区为实训基地，以包头地区的稀土企业为实习基地，通过优势互补、资源优化配置、产学研结合，目前已成为内蒙古乃至全国稀土人才培养、培训基地。

为了适应稀土产业的高速发展，总结专业建设经验，提高人才培养质量，真正把稀土工程专业建成国家特色专业，内蒙古科技大学稀土工程国家高等学校特色专业建设负责人——内蒙古科技大学稀土学院院长张胤教授与化学工业出版社合作，组织一批科研、教学经验丰富的专家教授，主持出版《稀土工程丛书》。

本丛书是为稀土工程专业精心准备的系列图书，主要面向稀土冶金及稀土材料的工程技术人员和稀土工程专业及相关专业冶金工程、材料科学与工程的本科学和研究生。

本丛书的特点是针对性强，重视基础，选材恰当。丛书体系设计针对性强，顺应了当代稀土技术发展的潮流。

本套丛书的编辑出版十分及时，是稀土界的一大喜事，对于引领我国稀土工程专业建设，规范稀土专业人才的培养，提升内蒙古科技大学稀土学院的办学水平，促进我国稀土产业深入发展有重大意义。

特别当前全世界掀起“稀土热潮”，并成为“政治说事”，本丛书的出版将有助于全国人民了解稀土，值得一读，特此推荐。

师昌绪

2012.5.7

于徐北岩大营村

前 言

稀土是化学元素周期表中镧系元素——镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu)，以及与镧系的 15 个元素密切相关的两个元素——钪 (Sc) 和钇 (Y) 共 17 种元素，有“工业维生素”之称，在电子、航空航天、国防、机械、医药卫生等诸多领域发挥着不可替代的作用。

稀土工程专业曾是国家高等教育专业目录外的专业，在国内高校中设置该专业的极少，因此，在本专业的教学过程中，长期以来始终存在着没有适宜的配套教材的问题，内蒙古科技大学稀土学院是国内首家专业稀土学院，师资力量雄厚。笔者结合多年的教学和科研经验编写了本书。

本书中对有色金属冶金过程、稀有金属冶金过程以及相关材料加工与材料科学等领域的常见化工单元过程做了着重介绍，如稀土的湿法冶炼中常用到的萃取、离子交换等单元过程。突出基础理论，注重理论联系实际，有望实现相关理论在各领域中的实践应用。全书力求保持内容的系统性和完整性。

本书可适用于高等工科院校的有色冶金专业、稀土冶金专业、材料加工及材料科学与工程等相关专业的教学使用，也可供相关专业的高等职业学校以及科研、设计和生产部门的科技人员作为参考。

参加本书编写工作的有蔡颖（绪论，第一章，第三章的第三节，第十一章），韩剑宏（第二章，第三章的第一节及第二节），宋金玲（第六章至第八章），樊文军（第四章，第五章），董忠平（第九章，第十章，附录）。全书由蔡颖定稿。

在编写过程中，得到了内蒙古科技大学稀土学院同事的大力支持和帮助，部分学生做了一些辅助工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中不足之处恳请使用者批评指正。

蔡颖

2013 年 3 月于内蒙古包头

目 录

绪 论

1

- 一、基本概念 1
- 二、国际单位制 3

第一章 流体力学基本原理

5

- 第一节 流体的基本性质 5
 - 一、流体的连续性 5
 - 二、密度 5
 - 三、流体的压强 7
 - 四、黏度 8
- 第二节 流体静力学 10
 - 一、流体静力学基本方程式 10
 - 二、流体静力学基本方程式的应用 11
- 第三节 流体动力学 13
 - 一、流量与流速 13
 - 二、稳定流动与不稳定流动 15
 - 三、连续性方程 15
 - 四、伯努利方程式 16
 - 五、实际流体的伯努利方程 17
 - 六、伯努利方程式的应用 17
- 第四节 流体阻力 20
 - 一、流体阻力概述 20
 - 二、流体流动的类型 21
 - 三、流体在圆管内的速度分布 23
 - 四、流体阻力 24
- 第五节 管路计算 30
 - 一、简单管路计算 30
 - 二、复杂管路计算 32
- 第六节 流量的测定 32
 - 一、测速管 32
 - 二、孔板流量计 34
 - 三、转子流量计 37
 - 四、湿式气体流量计 39
- 习题 39

第一节 离心泵	43
一、离心泵工作原理及结构	43
二、离心泵的主要部件	44
三、离心泵的主要性能参数	45
四、离心泵的特性曲线	46
五、离心泵的汽蚀现象及安装高度	47
六、离心泵的工作点及流量调节	49
七、离心泵的类型与选用	51
第二节 其他类型泵	52
一、往复泵	52
二、齿轮泵	54
第三节 气体输送机械	54
一、通风机	55
二、鼓风机	56
三、压缩机	57
四、真空泵	58
习题	59

第一节 流体与粒子间的相对运动	61
一、单个球形颗粒在流体中的运动	61
二、单个球形颗粒在流体中的阻力	62
第二节 沉降	62
一、重力沉降	62
二、离心沉降	66
三、过滤	68
第三节 流态化	75
一、流态化过程的基本概念	75
二、实际流化现象	76
三、流化床的流体力学	77
四、流化床的结构及特点	78
习题	79

第一节 概述	81
一、传热过程的应用	81
二、传热的基本方式	81
三、间壁式换热器的传热基本方程	82
第二节 热传导	83

一、热传导定律及热导率·····	83
二、稳定热传导·····	84
第三节 对流传热·····	87
一、对流传热的基本概念·····	87
二、对流传热的方程式·····	88
三、对流传热的特征数关系式·····	88
四、流体无相变时对流传热系数的关系式·····	88
五、流体有相变化时的对流传热·····	92
六、各种类型对流传热过程的对流传热系数值范围·····	93
第四节 辐射传热·····	94
一、辐射传热的基本概念·····	94
二、热辐射的基本定律·····	95
三、两固体间的辐射传热·····	96
四、气体辐射传热·····	97
五、设备热损失的计算·····	97
第五节 传热设备·····	98
一、换热方式及载热体·····	98
二、热交换计算·····	99
三、换热设备的结构及设计计算·····	107
习题·····	112

第五章 蒸 发

115

第一节 基本概念·····	115
第二节 蒸发器的生产能力和热力学数据·····	116
一、蒸发器的生产能力·····	116
二、传热系数·····	116
三、热力学数据·····	116
第三节 单效真空蒸发·····	118
一、单效真空蒸发流程·····	119
二、单效真空蒸发的计算·····	119
第四节 多效蒸发·····	120
一、并流法·····	120
二、逆流法·····	121
三、错流法·····	121
四、平流法·····	121
五、多效蒸发计算·····	122
第五节 降低蒸汽消耗量的方法·····	125
一、多效蒸发·····	125
二、冷凝水自蒸发的利用·····	126
三、蒸汽再压缩的蒸发器·····	126
第六节 蒸发设备·····	127

一、中央循环管式（标准式）蒸发器	128
二、外加热式蒸发器	128
三、强制循环蒸发器	128
四、液膜蒸发器	129
习题	130

第六章 传质原理 131

第一节 传质过程的基本概念	131
第二节 扩散原理	132
一、菲克定律	132
二、扩散系数 D	135
三、对流扩散	136
第三节 相际物质传递	137
一、相组成的表示方法	137
二、相际平衡	140
三、传质方程式	140
第四节 传质机理	141
第五节 传质系数的推算	142
一、理论的求算	142
二、相似法	142
习题	143

第七章 气体吸收 144

第一节 概述	144
一、气体吸收过程的应用	145
二、吸收设备	145
三、吸收剂的选用	147
四、吸收操作的分类	147
第二节 气体在液体中的平衡溶解度	148
一、平衡溶解度	148
二、亨利定律	149
第三节 吸收速率方程式	151
第四节 吸收塔的计算	154
一、物料衡算和操作线方程	154
二、吸收剂用量与最小液气比	155
三、吸收塔填料层高度的计算	158
四、吸收塔塔径的计算	164
五、吸收塔的操作计算	165
六、解吸过程	166
第五节 填料塔	169
一、填料	170

二、填料塔的流体力学性能	172
三、填料塔的附件	175
习题	177

第八章 蒸馏与精馏

180

第一节 蒸馏过程基本概念	180
一、二元理想溶液及其气液平衡图	180
二、非理想溶液及其气液平衡相图	183
三、挥发度与相对挥发度	183
第二节 蒸馏和精馏原理	185
一、简单蒸馏和平衡蒸馏	185
二、精馏	186
第三节 双组分混合液连续精馏塔的计算	188
一、全塔物料衡算	188
二、操作线方程	189
三、进料热状态参数 q	191
四、理论板数计算	194
五、塔顶液相回流比的选择	197
六、连续精馏的热量衡算	201
第四节 恒沸精馏和萃取精馏	204
一、恒沸精馏	204
二、萃取精馏	205
第五节 板式塔	206
一、泡罩塔	206
二、筛板塔	207
三、浮阀塔	208
四、板式塔的发展方向	209
习题	210

第九章 金属有机溶剂萃取

213

第一节 萃取的基本概念	213
一、萃取体系组成	213
二、溶剂萃取的基本参数	214
第二节 萃取剂的分类	216
第三节 萃取工艺流程	218
一、错流萃取	218
二、错流洗涤	219
三、逆流萃取	219
四、逆流洗涤	219
五、分流萃取 (又称双溶剂萃取)	219
六、回流萃取	220

第四节 萃取设备	220
一、箱式混合-澄清槽	220
二、塔式萃取设备	221
三、离心萃取机	223
第五节 理论级数的计算	223
一、错流萃取的理论级数计算	223
二、逆流萃取的理论级数的计算	225
第六节 萃取设备设计计算	230
一、萃取设备设计步骤	230
二、混合-澄清槽的单元设计	231
习题	235

第十章 离子交换

236

第一节 概 述	236
第二节 离子交换剂	236
一、离子交换剂的类型和结构	236
二、离子交换树脂的组成和结构	237
三、离子交换剂的特性	238
四、离子交换树脂的性能	238
第三节 离子交换理论	239
一、离子交换的基本原理	239
二、离子交换的平衡关系	240
三、离子交换容量	241
四、离子交换速率	241
第四节 离子交换设备及其计算	243
一、接触式设备	243
二、固定填充床设备	243
三、移动填充床设备	245
习题	245

第十一章 干 燥

246

第一节 概述	246
一、干燥过程的基本概念	246
二、干燥过程的分类	246
第二节 湿空气的性质及湿度图	247
一、湿空气的性质	247
二、湿空气湿度图及其应用	250
第三节 干燥过程的计算	252
一、空气干燥器的操作原理	252
二、空气干燥器的物料衡算	252
三、空气干燥器的热量衡算	254

第四节 干燥速率与干燥时间	255
一、物料中所含水分的状态	255
二、固体物料干燥机理	256
三、干燥速率与干燥时间	256
四、影响干燥速率的因素	259
第五节 干燥设备	259
一、干燥器的分类	260
二、工业上常用的干燥器	260
三、干燥器的选用	263
习题	263

附 录

265

一、单位换算	265
二、基本物理常数	265
三、饱和水的物理性质	266
四、某些液体的物理性质	266
五、某些有机液体的相对密度 (液体密度与 4℃ 水的密度之比)	268
六、饱和水蒸气表 (按温度排列)	269
七、饱和水蒸气表 (按压力排列)	270
八、某些气体的重要物理参数	271
九、干空气的热物理性质 ($p=1.01325\times 10^5\text{Pa}$)	272
十、液体饱和蒸汽压 p° 的 Antoine (安托因) 常数	273
十一、水在不同温度下的黏度	273
十二、液体黏度共线图	274
十三、气体黏度共线图 (101.325kPa)	276
十四、固体材料的热导率	277
十五、某些液体的热导率 (λ)	277
十六、气体热导率共线图	278
十七、液体比热容共线图	279
十八、气体比热容共线图 (101.325kPa)	280
十九、液体比汽化热共线图	281
二十、液体表面张力共线图	283
二十一、管子规格	284
二十二、IS 型单级单吸离心泵规格 (摘录)	285
二十三、换热器系列标准 (摘要)	287
二十四、双组分溶液的气液相平衡数据	289
二十五、常用化学元素的相对原子质量	290

参考文献

291

绪 论

有色金属共有 64 种，其中稀土金属 17 种。金属种类的繁多，使其冶金工艺流程各不相同，而同种金属的生产工艺流程也会有多种；稀土金属更因其特殊的存在形式而有着不同的生产工艺流程，但这些金属的生产过程均可采用火法、湿法或火法和湿法联合的冶金流程。这些流程的确定主要取决于矿物组成、能量来源、对产品的要求和生产的规模。有色金属的生产流程虽然复杂，但不同金属或同一金属的生产流程中都具有原理相同和所用设备类似的共同过程。因此各种金属冶炼工艺流程可以看成是由部分这种过程串、并联组合而成，这些过程称为单元过程，完成这些单元过程的操作称为单元操作。有色冶金化工过程及设备就是讲述有色金属冶金生产过程的单元操作及所用设备的基本理论知识。因此，本课程是有色冶金及相关材料类专业的一门主干课程，也是必修课程。

表 0-1 列出了各种有色金属生产工艺流程中所采用的主要单元过程，并指出了它们所遵循的基本原理。由表 0-1 可见，单元过程虽有二十余种，但其所遵循的基本原理只有四种，即流体动力学原理、传热原理、传质原理和化学反应原理。其中化学反应原理在化学、物理化学、冶金原理和有色金属冶金学中进行系统的研究，而流体动力学原理、传热原理和传质原理，简称动量传递、热量传递和质量传递，则为本课程的研究内容。

表 0-1 单元过程及其所遵循的基本原理

名称	基 本 原 理	名称	基 本 原 理
除尘	流动过程	氧化还原	流动、传热、传质、化学反应过程
固-液分离	流动过程	氯化	流动、传热、传质、化学反应过程
混合搅拌	流动过程	流态化	流动、传热、传质、化学反应过程
蒸发	流动、传热过程	焙解	流动、传热、传质、化学反应过程
浸出	流动、传热、传质过程	焙烧	流动、传热、传质、化学反应过程
增湿、减湿	流动、传热、传质过程	煅烧	流动、传热、传质、化学反应过程
精馏	流动、传热、传质过程	熔炼	流动、传热、传质、化学反应过程
吸收	流动、传质过程	溶液电解	流动、传热、传质、化学反应过程
干燥	流动、传热、传质过程	熔盐电解	流动、传热、传质、化学反应过程
萃取	流动、传质、化学反应过程	吹炼	流动、传热、传质、化学反应过程
离子交换	流动、传质、化学反应过程	精炼	流动、传热、传质、化学反应过程
膜分离	流动、传质、化学反应过程	烧结	流动、传热、传质、化学反应过程

一、基本概念

各种冶金单元操作原理及设备计算都是以物料衡算、能量衡算、平衡关系和速率关系四种基本原理为依据。另外经济效益概念也是从事生产过程的工作者应当了解的。

1. 物料衡算

物料衡算是质量守恒定律在冶金过程中的应用，它说明引入一个单元过程的物料量必等

于操作后输出的物料量与在过程中累积的物料量之和，即：

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{累积量}$$

对于连续操作的过程，若各物理量不随时间改变，即处于稳定操作状态时，过程中没有累积量，则物料衡算关系为：

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

物料衡算可按下列步骤进行：

① 根据题意画出过程示意图，在图上用箭头标出物料流股的流向，并用数字及符号标明物料的量及组成；

② 用虚线圈出衡算范围，确定衡算对象及衡算基准；

③ 将衡算范围内各物料流股逐项列出，建立衡算式。

物料衡算对于冶金过程中的设备设计和生产过程的正确进行起着重要的指导作用。在设计新的生产过程时，它可以帮助人们正确地选择过程的流程和设备的尺寸；在实际操作中，它可以揭示物料和金属的损失情况，同时可反映设备操作的正常情况及生产的完善程度，从而人们可以提出改进方案，做到既经济又合理。

2. 能量平衡

能量平衡是能量守恒定律在冶金过程中的应用，它说明引入一个单元过程的各种形式的总能量一定等于操作后得出的总能量。在操作过程中各种形式的能量可以互相转变，但总能量不变。在有色冶金过程中遇到的能量有机械能、热能和化学能。在流体动力学中，主要研究各种形式的机械能的守恒和机械能之间以及机械能与热能的互相转换。在传热学中要研究热量平衡，在有化学反应的单元过程中则要研究化学能与热能的相互转换。

能量平衡是有色冶金工程中又一个基本概念，应用它，在生产过程与设备的设计时，可以揭示热量是否需要由外界引入或向外界输出。在生产操作中可帮助人们选择操作条件和检验能量的消耗程度，制定出既经济又合理的能量消耗方案。

3. 平衡关系

研究流体力学、传热学和传质规律，实质上就是研究分子或质点的运动规律，即研究物质的运动规律。由物理学和化学知道物质的运动是十分复杂的，有物理运动和化学运动等。虽然运动是瞬息万变的，但并不是无规律可循的。例如由速度差引起的动量传递，由温度差引起的热量传递和由浓度差引起的质量传递，说明过程的进行是沿一定方向的，总是由不平衡趋向平衡，打破旧的平衡趋向新的平衡。

这种平衡关系在生产上具有一定的实际意义，它能揭示过程进行的方向和限度，能为设备尺寸的设计提供依据。

4. 过程速率

在生产实践中，过程速率较平衡关系更具有现实意义，一般总是希望过程速率快些，时间就能节省，从而提高设备的生产能力。过程速率是单位时间内过程的变化率，它是过程推动力和阻力的函数。显然，过程速率与推动力成正比，与阻力成反比，即：

$$\text{过程速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

过程速率是决定设备的重要因素，过程速率大时，设备尺寸可以小。

5. 经济效益

经济效益是各种生产方式都普遍存在的客观经济范畴，一般是指经济活动中，所取得的

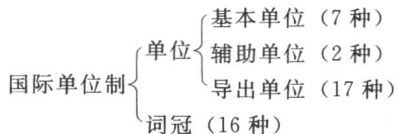
成果与消耗的劳动之比。

在解决具体的有色冶金问题时，技术经济比较是极为重要的因素，上述四个基本理论是制定技术经济比较方案的重要手段。

二、国际单位制

1. 国际单位制

国际单位制是国际计量会议制定的国际上统一使用的一种单位，其国际代号为 SI。国际单位制的单位是由基本单位、辅助单位及导出单位构成。



2. 基本单位与导出单位

用以表示基本量的大小的单位叫做基本单位，通过基本单位而导出的单位为导出单位，基本单位、辅助单位及导出单位分别列于表 0-2~表 0-5。

表 0-2 国际单位制基本单位

基本量	单位名称	单位符号	基本量	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开尔文	K
质量	千克(公斤)	kg	物质的量	摩尔	mol
时间	秒	s	光学强度	坎德拉	cd
电流	安培	A			

表 0-3 国际单位制辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 0-4 常用国际单位制的导出单位

量的名称	单位名称	符号	用国际制基本单位表示的关系式
面积	平方米	m^2	
体积	立方米	m^3	
速度	米每秒	m/s	
加速度	米每秒平方	m/s^2	
密度	千克每立方米	kg/m^3	
浓度	摩尔每立方米	mol/m^3	
比体积	立方米每千克	m^3/kg	
力	牛顿	N	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
压强、应力	帕斯卡	Pa	$\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{m})$
能、功、热量	焦耳	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^2$
功率、辐射通量	瓦特	W	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$
动力黏度	泊稷叶	Pl	$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$
热流密度	瓦特每平方米	W/m^2	kg/s^3
热容、嫡	焦耳每开尔文	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
热导率	瓦特每米开尔文	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^3/\text{K}$
能量密度	焦耳每立方米	J/m^3	$\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{m})$
摩尔能量	焦耳每摩尔	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{mol})$
摩尔热容	焦耳每摩尔开尔文	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mol})$

表 0-5 常用的国际制词冠

因数	词冠	代号	因数	词冠	代号
10^9	吉咖	G	10^{-1}	分	d
10^6	兆	M	10^{-2}	厘	c
10^3	千	k	10^{-3}	毫	m
10^2	百	h	10^{-6}	微	μ
10^1	十	da	10^{-9}	纳	n

3. 量纲与单位

用量纲表示物理量的种类，如长度用 L 表示，时间用 T 表示，质量用 m 表示等， L 、 T 和 m 分别为长度、时间和质量的量纲。比较同类量的大小，采用数量上唯一的量叫做单位，如米是长度单位，秒是时间单位，千克是质量的单位。当然长度、时间和质量还有其他一些单位，如厘米、小时和克等。因此一个物理量的单位可以有好几个，但一个物理量的量纲只有一个。



第一章 流体力学基本原理

气体和液体都具有流动性，一般统称为流体。有色冶金化工中所处理的物料大多为流体，这些流体的输送和贮存，需要研究流体的流动规律以便进行管路的设计、输送机械的选择以及功率的计算。另外，有色冶金化工生产中的传热、传质以及化学反应过程大多也在流动状态下进行。流体的流动对这些单元操作有着重要影响。因此，流体力学基本原理是解决流体输送问题的理论基础，也是本课程的重要基础知识。

第一节 流体的基本性质

一、流体的连续性

流体是由不断运动的分子所构成的，分子运动取决于流体内分子间作用力大小。当流体处于平衡状态时，例如，将液体置于一个静止的容器中时，这种运动也会发生。除内部分子力所引起的运动之外，还存在着由于外部原因而引起的流体运动，例如，由重力和压强差等的作用而引起的运动，这样流体的真正运动就包括分子运动和由外部原因而引起的运动。

流体力学仅研究由于外部原因而引起的流体运动，分子运动则不予考虑。此时其真正的流体分子结构，则用一种简化形式予以代替，即将流体看做是由无数流体微团或质点组成的连续介质。所谓流体质点或微团是指：它的大小与放置在流体中的实物或流体运动所发生的空间相比较是微不足道的，但比起分子自由程长度要大得多。它包含足够的分子，能用统计平均的方法求出其宏观的特征量（如压强、密度和宏观速度等），进而便可以考察这些宏观量的变化情况。因此，连续性的假设首先意味着流体介质在宏观上其质点是连续的，其次还意味着其质点运动过程也是连续的。

引用这一假设之后，便能利用连续函数的数学工具对流体力学问题进行数学处理，这就大大简化了流体平衡及运动的研究，由这一假设所得出的结果与实验符合，这就表明这一假设是合理的和正确的。当然连续性假定不能任意推广，如在高真空时气体稀薄，空气就不能再被当做连续介质了。

二、密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度。数学表达式为：

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

式中 m ——流体的质量，kg；