

中国矿业大学新世纪教材建设工程资助教材

化工原理辅导

Huagong Yuanli Fudao

丁曙光 丁 玉 刘建周 秦志宏 冯光明 编写

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国石化集团公司职业技能鉴定教材

化工原理辅导

Learning Guide

中国石化集团公司职业技能鉴定教材

中国石化集团公司职业技能鉴定教材

中国石化集团公司职业技能鉴定教材

化工原理辅导

丁曙光 丁 玉 刘建周 秦志宏 冯光明 编写

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

化工原理是一门实践性很强的课程,涉及化工过程众多单元操作的基本理论、典型设备操作性能和结构原理、主要设备的选型或设计计算。全书共分八章,内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸馏、吸收、液体萃取和干燥。本书侧重介绍运用所学理论知识解决实际问题的思路和方法。为了便于理解,书中运用了较多的示意图帮助解释。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理辅导/丁曙光等编写. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.12

ISBN 978 - 7 - 81107 - 829 - 9

I. 化… II. 丁… III. 化工原理 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 201483 号

书 名 化工原理辅导

编 写 丁曙光 丁 玉 刘建周 秦志宏 冯光明

责任编辑 褚建萍 周 红

责任校对 徐 玮

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮政编码 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印 张 12 字 数 228 千字

版次印次 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

定 价 15.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

化工原理是一门实践性很强的课程,涉及化工过程众多单元操作的基本理论、典型设备操作性能和结构原理、主要设备的选型或设计计算。对上述内容全面深刻的理解以及充分掌握和灵活运用主要的运算方法与技能是学好化工原理的根本要求。

《化工原理辅导》正是为实现上述目的而编纂的。本书是在总结各位作者多年教学经验的基础上,借鉴国内多家教材精华而成书的。全书力争通过对单元操作基本原理的介绍、典型设备的选型及计算,充分阐述课程所涉及的基本概念与理论。行文力求按照认知规律,由浅入深,便于学生自学及课后复习。

全书共分八章,主要内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸馏、吸收、液体萃取和干燥。教材按章编排,每章分为两个部分:① 基本内容,把概念与相关公式以有机结合的形式展现给读者,尽可能以分析、介绍概念的方法向读者讲述所涉及概念的定义以及如何使用它们来分析解决实际问题。② 典型题详解,将同一章主要的、重点的内容中具有关联性的知识点恰当地整合成一道题目,各题所涉及的理论和问题尽量不重复,使每章的题目数减至最少;每道题目的解答一般分成三或四部分:解题思路、解题方法(包括两种以上的方法)、解题过程,必要时给出小结。

本书侧重介绍运用所学理论知识解决实际问题的思路和方法。为了便于理解,书中运用了较多的示意图帮助解释。

各章的编纂分工如下:第一、第二章由刘建周和丁玉编写;第三、第四章由丁玉和冯光明编写;第五、第八章由丁曙光编写;第六、第七章由秦志宏和丁曙光编写。

由于成书仓促、作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者指正。

编 者

2007.04.05

目 录

第一章 流体流动	1
本章符号说明	1
基本内容	2
典型题详解	13
第二章 流体输送机械	20
本章符号说明	20
基本内容	21
典型题详解	27
第三章 非均相物系的分离	37
本章符号说明	37
基本内容	39
典型题详解	46
第四章 传热	61
本章符号说明	61
基本内容	62
典型题详解	75
第五章 蒸馏	94
本章符号说明	94
基本内容	95
典型题详解	109
第六章 吸收	131
本章符号说明	131
基本内容	133

典型题详解·····	139
第七章 液体萃取 ·····	154
本章符号说明·····	154
基本内容·····	155
典型题详解·····	159
第八章 干燥 ·····	169
本章符号说明·····	169
基本内容·····	170
典型题详解·····	177
参考书目 ·····	185

第一章 流体流动

本章符号说明

英文字母

A ——截面积, m^2 ;
 A_0 ——孔板小孔面积或文丘里喉口面积, m^2 ;
 C ——流量系数;
 C_0 ——流量系数;
 d ——管径, m ;
 E ——1 kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;
 g ——重力加速度, 其值取 9.81 m/s^2 ;
 G_A ——累积物料的量;
 G_i ——输入物料的量;
 G_o ——输出物料的量;
 h_f ——直管能量损失, J/kg ;
 h_f' ——局部能量损失, J/kg ;
 l_e ——当量长度, m ;
 M ——摩尔质量, kg ;
 p ——气体的绝对压强, Pa ;
 p_0 ——标准状态下绝对压强, 其值为 $101\,330 \text{ Pa}$;
 Δp_f ——1 m^3 流体流动时损失的压强降, Pa ;
 Q_i ——随物料进入系统的热量, kJ 或 kW ;
 Q_o ——随物料离开系统的热量, kJ 或 kW ;

Q_L ——向系统外散失的热量, kJ 或 kW ;
 R ——气体常数, 其值为 $8.315 \times 10^3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$;
 T ——热力学温度, K ;
 T_0 ——标准状态下热力学温度, 其值为 273.15 K ;
 u ——流速, m/s ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e ——输送设备对 1 kg 流体所做的有效功, J/kg ;
 x_i ——液相中 i 组分的摩尔分数;
 x_{wi} ——液体混合物中 i 组分的质量分数;
 x_{vi} ——气体混合物中 i 组分的体积分数;
 y_i ——气相中 i 组分的摩尔分数;
 Z ——测压点高度, m 。

希腊字母

ϵ ——绝对粗糙度, mm ;
 η ——效率;
 λ ——摩擦因数;
 μ ——粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 ν ——运动粘度, m^2/s 或 cSt ;
 ξ ——阻力系数;
 ρ ——密度。



本章的基本要求

掌握物料衡算和能量衡算的方法,单位制及单位换算。

掌握流体静力学基本方程及其应用。

了解牛顿粘性定律及流体的粘度,流体的流动现象、流动类型和流动边界层的概念,应用流体的流动现象分析流动阻力等问题。

掌握流体在管内流动阻力的量纲分析及流动阻力的计算。

掌握稳态流动与非稳态流动过程的计算方法。应用连续性方程和柏努利方程对流体流动过程进行计算。

掌握简单管路、并联管路和分支管路的计算方法。

掌握应用皮托管、孔板流量计、文丘里流量计和转子流量计测量流量的原理



本章的重点与难点

重点:一是流体流动现象及其对流动阻力、传热和传质过程的影响。如流体的粘性与粘度,流体流动的边界层定义及影响因素,流动类型及其描述。二是对流体流动过程的计算。一般情况下,对单元操作过程的计算依据四个方面的基本关系,即物料衡算、能量衡算、相平衡关系和速率方程;对流体流动过程的具体计算主要依据物料衡算和能量衡算,应用连续性方程和柏努利方程,结合静力学方程和阻力计算解决所求问题。

难点:对管路的设计或计算。一方面管路复杂的布置涉及到管径、管材、输送设备、输送任务等方面的若干参数,导致管路计算的复杂性,往往采用试差法来解决问题;另一方面本章的流体流动计算应与流体输送设备相结合。在以上诸方面的设计计算中应体现过程的优化和强化。结合优化设计方法和经济核算共同来解决所求问题。

基本内容

化学工程的研究对象可用“三传一反”来概括,无论是化工原理所研究的单元操作,还是化学反应工程所涉及到的反应器设计及过程优化等内容,流体的流动现象及其遵循的基本原理是基础。化工生产过程中所处理的原料或产品多为流体,生产工艺的设计,输送设备尺寸的计算,输送过程中压强、流速、流量等参数的设计和核算,流体流动过程优化和强化等,都会应用到流体流动的基本原理。

本章所涉及到的流体包括液体和气体,一般情况下指牛顿型流体。在工程

技术领域,设计所面对的是流体所表现出来的宏观性能,即大量的单个分子或微粒微观运动的统计平均特性。

一、物料衡算和能量衡算

(一) 单位制及单位换算

由于历史、地区和各学科的不同要求,对基本的物理量及其单位有不同的选择和表达,因而产生了多种不同的单位制度。目前,国际上统一采用国际单位制(SI)。

任何物理量都是用数字和单位统一表达的。在任何一个单位制中,一般是以几个独立的物理量,如长度、时间和质量等,并以使用方便为原则规定出它们的单位,这些物理量称为基本量。其他物理量,如密度、压强等的单位则根据自身的物理意义,由基本单位组合而成,称为导出单位。SI单位制的基本量见表1-1。

表 1-1 SI 单位制的基本量

项目		单位符号	项目		单位符号
基本物理量	长度	m	物理量	面积	m ²
	时间	s		容积	m ³
	质量	kg		密度	kg/m ³
	温度	K		速度	m/s
	物质的量	mol		加速度	m/s ²
辅助物理量	平面角	rad		力	N
				压强	Pa
				粘度	Pa·s
				热、功、能	J
				功率	W
				导热系数	W/(m·K)

(二) 物料衡算和能量衡算

衡算的一般步骤:

(1) 确定衡算范围。应包括所衡算的所有物料流,可以是某段管路或某个反应器等。

(2) 确定衡算基准。若为间歇操作,可以一批物料为基准;若为连续操作,可以单位时间为基准。非稳态过程,可以 dt 时间为基准。能量衡算还要选择温度基准。

(3) 进行物料衡算和能量衡算。

① 物料衡算式:

$$\sum G_i = \sum G_o + G_A \quad (1-1)$$

物料衡算关系可适用于各物料的总量衡算,也可适用于某个组分量的衡算。过程中有化学反应时,可对某元素的量进行衡算。物料衡算的适用对象见表 1-2。

表 1-2 物料衡算的适用对象

衡算形式	衡算式	无反应时	有反应时
总量衡算	总质量衡算式	是	是
	总物质的量衡算式	是	否
组分衡算	某组分质量衡算式	是	否
	某组分物质的量衡算式	是	否
元素衡算	原子质量衡算式	是	是
	原子物质的量衡算式	是	是

② 能量衡算式:

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_L \quad (1-2)$$

(三) 流体的物理性质

1. 密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度。

液体的密度:基本上不随压强变化,但随温度略有变化。一般情况下,可从手册或有关资料中查得,也可用密度计测量出来。由于不同的单位制,从资料中得到的密度的单位和数值不同,应用时可首先将其换算成 SI 单位制。

气体的密度:由于气体的可压缩性,气体的密度随压强和温度而变化。一般当压强不太高和温度不太低时,可按理想气体处理。应用理想气体状态方程计算气体的密度或对密度进行温度和压力的校正。

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

$$\rho = \frac{MT_0 p}{22.4 T p_0} \quad (1-3a)$$

$$\rho = \rho' \frac{T' p}{T p'} \quad (1-3b)$$

液体混合物的密度:化工生产过程中遇到的多数是混合物,而在手册中列出的往往是纯物质的密度。液体混合物的密度可用密度计测出,也可以通过计算求出平均密度。采用质量衡算的方法,以 1 kg 混合液体为基准,混合液中各组分的组成以质量分数表示,各组分混合后总体积等于各组分单独存在时体积之和。则有:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-4)$$

气体混合物的密度: 气体混合物中各组分以体积分数表示, 混合前后质量守恒。以 1 m^3 混合气体为基准, 有:

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \cdots + \rho_n x_{Vn} \quad (1-5)$$

气体混合物的密度也可以用理想气体状态方程求出。此时, 气体混合物的摩尔质量用平均摩尔质量代替。各组分的组成以摩尔分数表示时, 平均摩尔质量计算式为:

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \cdots + M_n y_n \quad (1-6)$$

2. 粘度

流体流动时存在一种抗拒向前运动的特性称为粘性, 粘性是流体固有的特性之一。粘度是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力, 其 SI 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, cP, P。CGS 单位制中单位是 cP。换算关系为: $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$, $1 \text{ P} = 100 \text{ cP}$ 。

牛顿粘性定律:

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-7)$$

物质粘度数据来源于实验, 是流体重要的物性之一。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。压强增加时, 液体的粘度基本不变, 气体的粘度随压强的增加而增加得很少, 工程计算中可以忽略。只有在极高或极低的压强下, 才需要考虑压强对气体粘度的影响。

3. 运动粘度

流体的粘度 μ 与密度 ρ 的比值称为运动粘度。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

运动粘度的单位在 SI 单位制中为 m^2/s ; 在 CGS 单位制中为 cm^2/s , 称为斯托克斯, 以 St 表示。换算关系为: $1 \text{ St} = 100 \text{ cSt} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

混合物的粘度在缺少实验数据时, 可通过经验公式估算。

常压气体混合物的粘度:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-9)$$

非缔合液体混合物的粘度:

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-10)$$

(四) 流体流动的稳态过程与非稳态过程

流体的流动过程分为稳态过程与非稳态过程。在流动过程中, 若过程参数只随位置变化, 不随时间变化, 则此过程为稳态过程; 若过程参数既随位置变化, 又随时间变化, 则此过程为非稳态过程。

从宏观上看,多数连续的过程视为稳态过程。生产中的开车或停车及出现故障后的恢复阶段多为非稳态过程。一个宏观的稳态过程,从微观上看可能是一个非稳态过程。

二、流体静力学方程

流体静力学研究流体在外力作用下达到平衡时各物理量的变化规律。流体静止或流动过程中的压强等相关参数可以通过流体静力学方程求得。

(一) 流体的压强

标准大气压是指海平面处测出的压强,其值为 760 mmHg 或 101 325 Pa。大气压强随大气的温度、湿度和所在地的海拔高度而变化。温度越高,大气压强越小;湿度越大,大气压强越大;海拔高度越高,大气压强越小。在工程设计中,应考虑这些因素对大气压强的影响。

绝对压强:是指以绝对的零压强为起点的大气压强。

表压强:是指压强中高出大气压强的部分。

真空度:是指压强中低于大气压强的部分。

各压强表示法之间的关系为:

$$\text{表压强} = \text{绝对压强} - \text{大气压强}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强}$$

$$\text{表压强} = - \text{真空度}$$

(二) 流体静力学方程

当流体在重力和压力作用下达到平衡时,静止流体内部压强的变化遵循流体静力学规律。

对于不可压缩流体有:

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 \quad (1-11)$$

$$p_2 - p_1 = \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-11a)$$

即重力场下,静止的、连续的和连通的流体内部任意两点间压强差与两点间的高度差及流体的密度有关。

若将 p_1 点以液面处压强 p_a 表示,液体内任一点处的压强为:

$$p = p_a + \rho gh \quad (1-11b)$$

利用流体静力学方程可设计出各种液柱压差计、液位计,可进行液封高度的计算等。

三、连续性方程

稳态流动系统中,根据质量守恒定律,对在不同直径的管内流动的流体进行物料衡算,有:

$$w_{s1} = w_{s2} = \cdots = \text{const} \quad (1-12)$$

$$w_s = u_1 \rho_1 A_1 = u_2 \rho_2 A_2 = \cdots = u \rho A = \text{const} \quad (1-12a)$$

当流体为不可压缩流体时, $\rho_1 = \rho_2 = \cdots = \text{const}$

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{const} \quad (1-12b)$$

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 \quad (1-12c)$$

四、柏努利方程

(一) 柏努利方程的形式

柏努利方程又称机械能守恒方程,即理想不可压缩流体在重力场中做稳态流动时,单位质量流体在任一截面上所具有的总机械能 E (动能、位能、静压能之和) 是一常数,各种形式的机械能之间可以相互转换。

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-13)$$

由于实际流体均具有一定的粘性,在流动中不可避免地存在能量损失。为克服阻力,在流体输送过程中要有外功的加入。因此,实际常用的是柏努利方程的引申形式,习惯上亦称柏努利方程:

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-14)$$

$$W_e = g\Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho} + \Delta \frac{u^2}{2} + \sum h_f \quad (1-14a)$$

(二) 有关使用柏努利方程的讨论

(1) 柏努利方程应用于连续的流体。

(2) 柏努利方程为机械能守恒方程,其意义是理想的不可压缩的流体在重力场中做稳态流动时本身所具有的机械能之和保持不变。其引申形式中,除机械能项之外, $\sum h_f$ 是流经系统的能量消耗, W_e 则是流体在系统中获得的有效功。 W_e 是决定流体输送机械的重要参数之一。

输送机械的有效功率为:

$$N_e = W_e w_s \quad (1-15)$$

(3) 对于可压缩流体,若绝对压强 $(p_1 - p_2)/p_1 < 20\%$ 时,用两截面间流体的平均密度 ρ_m 代入公式,柏努利方程仍然适用。

(4) 柏努利方程中的 p_1 与 p_2 , 计算时既可以采用表压强,也可以采用绝对压强,只要前后意义和单位一致。

(5) 对于非稳态流动,某一个瞬间柏努利方程仍然成立。

(6) 流体静力学方程只是柏努利方程的一个特例。当系统中流体处于静止时, $u=0$, 所以 $\sum h_f=0, W_e=0$ 。则式(1-14)转化为静力学方程式, $gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} =$

$$gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}.$$

(7) 不同基准的柏努利方程。

以单位质量流体为衡算基准：

$$H_e = \Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta \frac{u^2}{2g} + H_f \quad (1-16)$$

其中, $H_e = \frac{W_e}{g}$, $H_f = \frac{\sum h_f}{g}$ 。此式多用于液体输送设备, 如泵的计算。

以单位体积流体为衡算基准：

$$Z_1 \rho g + \frac{u_1^2}{2} \rho + p_1 + W_e \rho = Z_2 \rho g + \frac{u_2^2}{2} \rho + p_2 + \rho \sum h_f \quad (1-17)$$

此式多用于气体输送设备, 如风机的计算。

(8) 应用柏努利方程解题时, 恰当选取上、下游截面与基准面时, 可简化计算。

(三) 柏努利方程的应用

柏努利方程是解决流体流动各种问题应用最广泛的计算方程。柏努利方程与连续性方程结合, 可解决诸如以下各种问题：

- (1) 确定管道中流体的流量；
- (2) 确定设备间的相对位置；
- (3) 确定输送机械的有效功率或功率；
- (4) 确定管路中流体的压强。

(四) 流体的流动现象分析

1. 流动类型与雷诺数

流体在圆管中流动, 当处于层流或滞流流动时, 流体微团(或质点)沿轴向做规则运动, 无碰撞或混合; 当处于湍流流动时, 流体微粒或质点沿轴向和径向做无规则脉动, 产生碰撞或混合。

流体的流动类型用雷诺数表示, 即

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (1-18)$$

当 $Re \leq 2000$ 时, 流体表现为层流状态; 当 $Re \geq 4000$ 时, 流体表现为湍流状态; 介于两者之间, $Re = 2000 \sim 4000$ 时, 为过渡流。

2. 流体流动边界层的概念

当流体流经固体壁面时, 由于流体具有粘性, 在垂直于流体流动方向上便产生了速度梯度。在壁面附近存在着较大速度梯度的流体层, 称为流动边界层, 简称边界层。边界层外, 速度梯度可视为零, 流体的粘性不起作用, 称为主流区或

外流区。边界层内,由于存在着显著的速度梯度,即使流体的粘度很小,其摩擦应力($\tau = \mu \frac{du}{dy}$)也会很大。主流区内,速度梯度接近零,故摩擦应力可以忽略。

工程上一般规定,边界层外缘的流速为主流区流速的 99%,即 $u = 0.99u_\infty$ 。

边界层内的减速作用是逐渐消失的。所以,对于平板上流动的流体,边界层可以发展到无穷远处;对于圆管内流动的流体,边界层汇集于管中心线。边界层的发展过程中,边界层内流体的流型可以是层流,也可以由层流发展为湍流。边界层可区分为层流边界层和湍流边界层。湍流边界层内,靠近壁面处极薄的一层流体仍维持层流流动的状态,称为层流内层或层流底层。层流内层与湍流层之间还存在着过渡层或缓冲层,其流型不稳定,可能是层流,也可能是湍流。

流体流动过程中,层流边界层或层流底层内,流体以层流型流动。在传热过程中以热传导方式进行,在传质过程中以分子扩散的方式进行,层流边界层或层流底层是传热和传质的主要阻力区。强化传热和传质时,提高流体的湍动程度,减小层流层厚度是有效途径之一。

流体流过直圆管和平板时,边界层是紧贴壁面的。当流体流经曲面物体时,如球面和柱面等,边界层内无论是层流或湍流,受流动过程中动能和静压能转换的作用,产生边界层与壁面分离的现象,称为边界层的分离。在边界层与壁面分离处产生大量的旋涡和质点间的碰撞,会造成能量的损失。

(五) 流体在管内的流动阻力

实际流体的流动阻力来源于两个方面:流体由于具有粘性,流动时产生内摩擦而形成流动阻力;流体流经具有一定形状的固体表面时,产生形体阻力。

流动阻力的计算分为直管沿程阻力与局部阻力两种。直管沿程阻力主要因内摩擦而引起;管路中的管件、阀门及管截面的突然扩大与缩小等,则主要表现为形体阻力。

管内流体流动的总阻力计算式为:

$$\sum h_f = h_f + h_f' \quad (1-19)$$

1. 流体在直管中的沿程阻力

当流体以速度 u 在管内径为 d 、管长为 L 的直管内做稳态流动时,直管内沿程阻力为:

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \frac{L}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-20)$$

其中, λ 为摩擦因数,与流体的流动类型和管材管径有关。 λ 、 Re 、 ϵ/d 之间的关系见图 1-1。

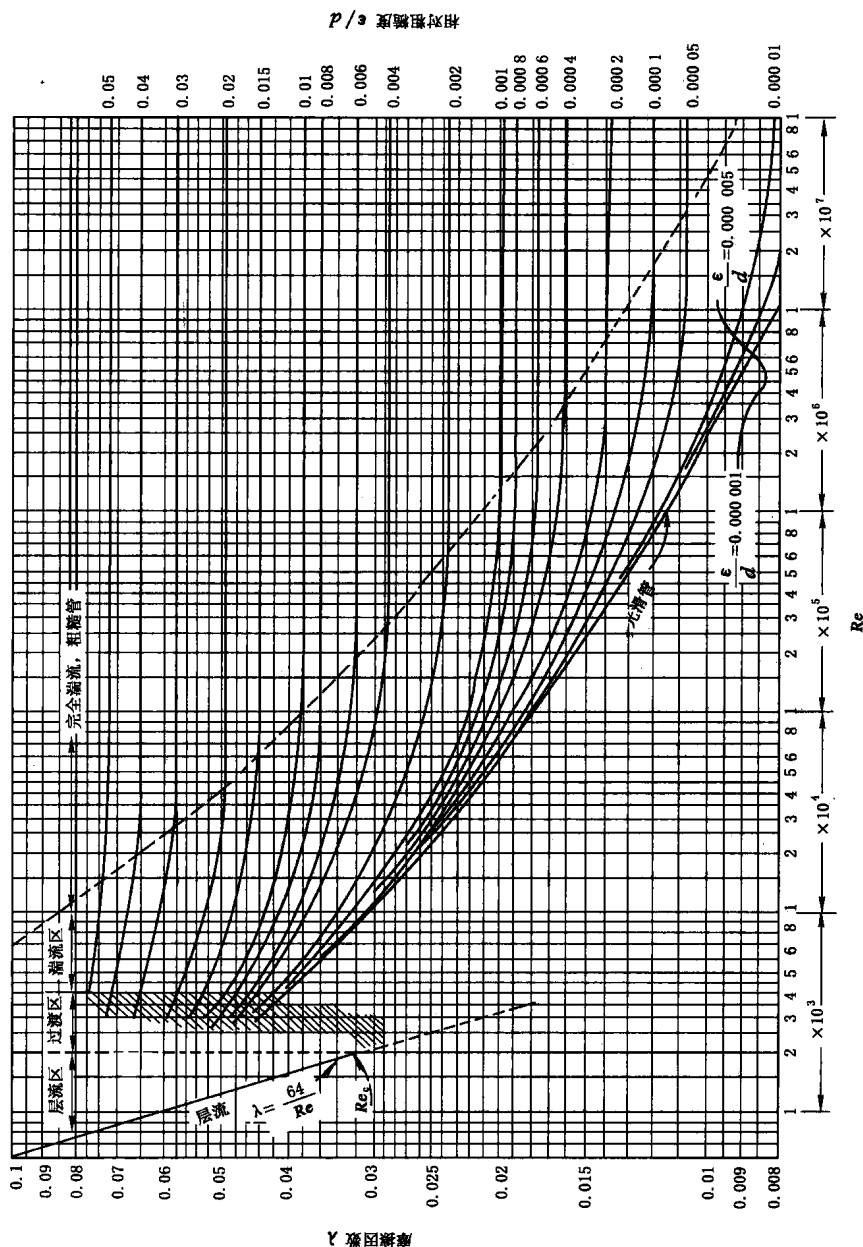


图 1-1 摩擦系数与雷诺数及相对粗糙度的关系