

(教学参考书)

流体力学计算

[俄] 基里洛夫 И. Л. 尤里耶夫 Ю. С. 编著

吴兴曼 译

中国原子能出版社

流体力学计算

(教学参考书)

[俄]基里洛夫 П. Л. 尤里耶夫 Ю. С. 编著
吴兴曼 译



中国原子能出版社

图字(2012)01-2012-1577

图书在版编目(CIP)数据

流体动力学计算 / (俄罗斯)基里洛夫, (俄罗斯)
尤里耶夫编著;吴兴曼译. —北京:中国原子能出版社,
2013. 1

ISBN 978-7-5022-5788-0

I. ①流… II. ①基… ②尤… ③吴… III. ①流体动
力学—计算方法 IV. ①O351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 301549 号

流体动力学计算

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 9.75 字 数 243 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5788-0 定 价 40.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

УДК 621.039.517

ББК

К43

流体动力学计算:教学参考书。基里洛夫 П. Л., 尤里耶夫 Ю. С. —, 2009. —С.

本书的内容涵盖了核动力课题中最常碰到的众多流体动力学问题。

本参考书是核反应堆、热交换器和蒸汽发生器热工水力计算方面的简明参考丛书中的第一部。这本丛书供完成课程设计和毕业设计的大学生使用。本参考资料不是标准文件,但对于完成类似计算的工程师以及攻读学位的研究生会有所裨益,因为此书汇总了工程中水力学方面最熟知、最常用的关系式。

本书专门论述各种通道和回路内单相流和两相流的流体动力学计算。它包含下列四章:

1. 单相介质流动。
2. 两相流。
3. 强烈变物性冷却剂的流动。
4. 回路流体动力学。

所援引的参考文献目录列在各章内。

本书供物理动力专业的高年级大学生和核物理装置的工程师使用。

俄罗斯原子能部批准用作高等院校《核电厂与核装置》专业培训大学生的教学参考书。

第1至第3章由基里洛夫 П. Л. 教授编写,第四章由尤里耶夫 Ю. С. 教授编写。

УДК 621.039.517

ББК

教学参考书文稿准备工作得到了俄罗斯基础研究基金和卡卢伽州政府的经费资助(项目 №06-08-96300)。

作者
2009年

约定符号

a	热扩散率, m^2/s ; 声速, m/s
C	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
D	(壳体)直径, m ;
d	(圆管)直径, m ;
E	弹性模量, Pa ;
F, f	通道横截面积, m^2 ;
f	频率, s^{-1} ;
g	重力加速度, m^2/s ;
G	质量流量, kg/s ;
h	(肋片, 通道等的)高度, m ; 比焓, J/kg ;
H	距离, m ; 以液柱高(米)为单位的静压;
L, l	长度, m ;
m	体积孔隙率; 联结质量, kg ;
M	质量, kg ;
n	圆管数、肋片数、泵转数等;
q	热流密度, W/m^2 ;
Q	体积流量, m^3/s ;
p	压力, Pa ;
P	湿润周长, m ;
r, R	半径, m ;
r	汽化热, J/kg ;
s	(圆管、燃料元件等)排列步距, m ; 滑速比; 通道截面, m^2 ;
T	温度, K ; 绕丝步距; 肋片步距, m ;
v	比容, m^3/kg ;
$V_* = \sqrt{\tau/\rho}$	动力学速度, m/s ;

V	体积流量, m^3/s ;
w	速度, m/s ;
$x = s/d$	圆管、燃料元件的相对排列步距;
x	平衡质量含汽率;
z	圆管列数;
Z	坐标;
α	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
β	体积流量含汽率;角;
δ	厚度;粗糙度凸起高度, m ;
Δ	等效粗糙度, m ;
ζ	局部阻力因数;
η	效率;
Θ	量值之比($R_1/R_2, d_1/d_2, T_w/T_0$);
λ	热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
μ	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 流量系数;
ν	运动黏度, m^2/s ;
ξ	摩擦阻力因数;
ρ	密度, kg/m^3 ;
σ	表面张力, N/m^2 ;
τ	切应力, N/m^2 ; 时间, s ;
φ	真实含汽率;角;
ψ	两相流的不均匀因子;
ω	截面面积, m^2 ; 循环频率, $(2\pi f), \text{s}^{-1}$ 。

下 标

B	内部的;	f	液体介质;
BX	与入口有关;	f _g	滑移速度(V_{fg});
Γ	水力学;	g	气体, 蒸汽;

гр	边界;	in	入口;
из	等温;	L	液体;
к	环形;	max	最大;
м	局部;	TDF	与两相流有关;
н	外部;	w	壁;
нк	沸腾起始;	—	平均值符号;
см	与混合物有关;	+	无量纲值;
ср	平均;	'	与液相有关;
р	与栅格有关;在 S_p 情况下为肋片 步距;	"	与汽相有关。

这里只列出一些主要的约定符号,其他在正文内给出。我们在每一章中维持传统的符号,因此,同一参数或特性在不同章节中标示各异。例如:

- 在水力计算中速度标示为 w ;
- 在振动计算中的速度为 V ,而位移为 w ;
- 体积流量可以用 V 或 Q 标示。

我们希望这不会带来特别的不便,因为在本参考书的不同章节内经常会遇见这样的差异(或一致)。

序 言

冷却任何核反应堆的介质流动时的流体动力学和热交换在很大程度上决定了反应堆的主要特性和尺寸。对于核动力装置的所有热交换设备也是如此。在流体动力学方面没有足够认识,就不可能确定核动力装置的反应堆和热交换设备的尺寸。正是流体动力学过程首先决定了动力装置各个部件内温度场的水平和稳定性以及材料的工作条件,从而决定了其可靠性。

为了计算和设计核电厂和核动力装置的众多组成设备,有诸多指导性技术资料可用,它们都需要查阅参考文献。

水力学中现今所用的计算关系式主要根据实验结果获得,但它们的方法说明和原始数据并不充分或者已经遗失。因此,应当信赖那些最权威专著和手册作者的论述和总结是非常认真的。任何时候,只要有可能,在本参考书内都提供相应的专著和手册的索引。

本参考书供相应专业大学生完成课程设计和毕业设计时用;也供核动力装置的工程技术人员、结构师和设计师使用。对于研究生和应考学位人员它可能有用,因为它汇总了工程中水力学方面最为人所共知的关系式。

本参考书是核反应堆、热交换器和蒸汽发生器热工流体力学计算简明参考出版物系列的第一部。

作者具有在大学内从事科研活动的经验和教学经验,在本参考书内作者力求将物理过程的简明概念与对工程计算的实用建议结合起来。这些情形反映了奥布宁斯克热物理大学学术活动的特点。该大学进行了、并一直进行着核动力重要实际任务方面的基础科学研究和应用科学研究。

已有很多书籍和众多科学和应用专题杂志的文章专门介绍流体动力学过程。选取必需的关系式是极为困难的任务,其结果可能会有争议。但是应当注意到:第一,参考书里援引的数据属于信息资料范畴,不是标准;第二,选取这些关系式只是取决于核动力装置和核电厂的部件结构设计时求解典型任务的需要。编写本参考书不仅根据已知的和认可的文献来源,而且使用了当今鲜为人知的国内外出版资料。在各章末尾列出了所用资料来源的目录。

在这一比较新的工程领域里,为了改进现有结构,会萌生一些新思想和新建议,总要产生与此相关的水力学问题。这种状况要求进行新的计算和实验研究。

近年来,很多流体动力学问题试图用计算方法解决,而无需做实验工作,在现代技术条件下,前者简单得多,又便宜得多。这里需要的是谨慎。爱因斯坦曾经诚心诚意地说过:数学是愚弄自己最好的方法。能够足够准确地进行所有计算,而它们的结果与试验结果的差别不是百分之五,百分之十,而是整整百分之百。爱因斯坦愚弄的仅仅是自己一个人,而在工程中那可是建造动力装置的成百上千个人!因此科学院院士卡丕查 И. Л. 这样表述:“实验总是必要的!”在流体动力学中确实如此。

第1至第3章由基里洛夫 И. Л. 教授编写,第四章由尤里耶夫 Ю. С. 教授编写。

教学参考书的出版得到“俄罗斯核动力”康采恩(副总经理阿斯莫洛夫 В. Г.)的支持。我们之所以感激,不仅由于经费支持,当然,这是很重要的,更主要的是,康采恩和他的同事对当今条件下创作这类出版物必要性的理解。

我们对俄罗斯联邦国家科学中心物理动力研究院的同行,技术科学博士列夫琴柯 Ю. Д., 费多托夫斯基 В. С., 威雷夏金娜 Т. Н. 参与材料讨论、所作建议、提出意见和评论表示感谢。作者对奥布宁斯克国家核动力技术大学(ОГТУАЭ)热物理教研室主任阿弗杰耶夫 Е. Ф. 就书稿所作的评论表示衷心感谢。他的意见和要求无疑使教学参考书更为完善。

在书中我们还能找到物理动力研究院同事苏波金 В. И.、乌沙科夫 П. А.、伊布拉基莫夫 М. Х-Г、卡布里阿诺维奇 Б. Н.、茹科夫 А. В.、博布科夫 В. П.、列夫琴科 Ю. Д.、叶凡诺夫 А. Д.、费达多夫斯基 В. С.、库兹涅佐夫 И. А., 以及友邻单位同事库塔杰拉杰 С. С.、波利珊斯基 В. М.、赫里斯基亚诺维奇 С. А.、罗强斯基 Л. Г.、米利恩希科夫 М. Д.、弥坚科夫 Ф. М.、巴特拉舍夫的劳动成果 А. Н.。

我们也将对教学参考书的内容向我们提出自己的意见和要求的所有读者表示感谢。我们的通信地址是 249033 卡卢伽州 奥布宁斯克市 邦达连科广场 1 号 俄罗斯联邦国家科学中心物理动力研究院(ГНЦ РФ ФЭИ, пл. Бондаренко, 1, г. Обнинск, Калужской обл, 249033)。传真:8 (48439) 98071 或 68225。电子邮件:kirillov@ippe.ru。

编 者

目 录

约定符号

序言

第 1 章 单相介质(水,气体,液态金属)流动	1
1.1 基本规则	1
1.1.1 计算压降的关系式	1
1.1.2 压降的组成	4
1.2 各种形状通道内的摩擦阻力因数,层流	6
1.3 各种形状通道内的摩擦阻力因数,湍流	7
1.3.1 圆管	7
1.3.2 环形间隙	9
1.3.3 纵向绕流棒束(或管束)	9
1.4 圆柱体和管束横向绕流时的阻力因数	15
1.4.1 流动特性	15
1.4.2 阻力因数	17
1.5 局部水力阻力	19
1.5.1 各种通道形状	19
1.5.2 定位格架和带增强器栅板的阻力因数	23
1.5.3 局部阻力的相互影响	24
1.6 球形填床的水力阻力	24
1.6.1 贮槽型填床	24
1.6.2 通道型填床	25
1.7 各种形状通道内的速度分布和切应力分布	25
1.7.1 通则	25
1.7.2 圆管,平直通道	25
1.7.3 同轴环形通道	28
1.7.4 偏心环形通道	30
1.7.5 三角形排列的光滑圆棒束	30
1.8 非定常流动	32
1.8.1 通则	32
1.8.2 水力阻力	34
1.8.3 脉动(自振荡)流动	36
第 1 章参考文献目录	37

第 2 章 两相流	41
2.1 总 则	41
2.1.1 两相流的主要特性	41
2.1.2 流动工况	42
2.2 各种通道内汽水混合物流动时的真实体积含汽率	45
2.2.1 绝热流动(不加热通道)	45
2.2.2 非绝热流动(加热通道)	46
2.2.3 沿通道截面的局部真实含汽率值分布图	48
2.3 水力阻力	49
2.3.1 通则	49
2.3.2 光滑圆管	50
2.3.3 蛇形管	57
2.3.4 带内肋片的圆管	57
2.3.5 棒束	57
2.3.6 汽水流内节流垫圈的局部阻力	58
2.3.7 带增强器和不带增强器的定位栅格的水力阻力	58
2.4 两相流动不稳定性	59
2.4.1 不稳定性的类型	59
2.4.2 多根圆管内不稳定性边界的计算	61
2.5 液体中的汽泡动力学	62
2.5.1 汽泡增长动力学	62
2.5.2 液体内汽泡浮升速度	64
2.6 汽水混合物流内液膜和液滴的流动	67
2.6.1 弥散-环状工况起始条件	67
2.6.2 液膜流体动力学基础	68
2.6.3 汽流内的液滴	70
2.7 液态金属-气体两相系统	75
2.8 水和蒸汽(气体)逆向流	77
第 2 章参考文献目录	78
第 3 章 强烈变物性冷却剂的流动	83
3.1 总 则	83
3.2 强烈变物性冷却剂流动时的摩擦水力阻力因数	84
3.2.1 温度差很大的气体	84
3.2.2 黏度强烈变化的液体	85
3.2.3 近临界参数下的冷却剂流动	85
第 3 章参考文献目录	88
第 4 章 回路流体动力学	90
4.1 一回路水力学	90
4.1.1 水力管网	90

4.1.2	增压器	95
4.1.3	气流计算的特点	97
4.1.4	流体流对壁的力作用	99
4.1.5	反应堆堆芯和热交换器中的流量分配	101
4.2	射流流动	111
4.2.1	轴对称等温射流	111
4.2.2	非等温射流	111
4.2.3	通过孔的出流	113
4.2.4	气体出流	114
4.3	动力学效应	115
4.3.1	水锤	115
4.3.2	气蚀	117
4.3.3	回路内的过渡过程	119
4.4	棒和管绕流时的振动	120
4.4.1	物理现象和技术问题	120
4.4.2	自由振动及固有频率	123
4.4.3	强迫振动及共振	124
4.4.4	分布系统的振动	125
4.4.5	单棒和单管的强迫振动	126
4.4.6	棒束和管束在单相液体内的振动	128
4.4.7	管和管束在两相冷却剂内的振动	131
4.4.8	棒和管在纵向液流内的强迫振动	133
4.4.9	棒束和管束在纵向液流内的振动	134
4.4.10	棒在介质横向流内的强迫振动	137
4.4.11	被两相流体流绕流的管束振动	138
	第4章参考文献目录	141

第 1 章

单相介质(水,气体, 液态金属)流动

1.1 基本规则

1.1.1 计算压降的关系式

核动力中大多数流体动力学计算与通道内流动有关。计算这类(优先的是不可压缩单相介质)流动时的主要任务是确定不同形状通道的水力阻力和局部阻力,计算流量分配、速度分布以及沿通道周界切应力分布。计算回路各个部件水力阻力的目的是确定通道内总压力损失和唧送冷却剂消耗的功率。

表 1.1 在 VVER 型反应堆内观测到最大压力损失(水力阻力)的位置^[51]

反应堆容器内压降分布
下腔室
堆芯和旁路
上腔室
控制棒通道

一回路(热环路)内压降分布
给水管线
蒸汽发生器管道
冷联箱
管道直管段和弯头

水力计算要用到表征通道内流体流的下列量值:通道的几何特性(截面面积、水力直径或其他定型尺寸、绝对粗糙度和等效粗糙度等),介质的速度、密度和黏度。介质的平均密度按通道给定区段介质平均温度确定。核动力中使用的所有冷却剂,包括液态金属,都是牛顿流体,因而遵循通用的规律。

表 1.2 影响压降的各种因素^[51]

几何	基本形状, 特种部件, 粗糙度	圆管, 环形通道, 棒束, 栅格, 活门, 阀门等
介质的相	单相 两相	单组分, 双组分, 多组分
流动特征	层流 过渡流 湍流	湍流强度
两相混合物流动工况	泡状流 塞状流 弥散-环状流等	气泡; 液塞和汽塞; 液膜, 液滴
流的方向	垂直向上 垂直向下 倾斜 水平	液体和蒸汽同向流动, 逆向流动
时间条件	定常的 非定常的	改变过程速率
驱动力	强迫对流(强迫运动) 自然对流(自由运动)	宏观的, 微观的

对于绕流热交换表面的场合, 截面面积(f, m^2)由下列各公式确定:

—在圆管中流动的情况, $f = n(\pi d_n^2)/4$ 。

式中, n ——并联圆管数;

d_n ——圆管内径。

—在沿着内径 D , 单位为 m 的圆柱容器内放置的 n 根管束纵向绕流的情况, $f = \pi(D^2 - nd_n^2)/4$ 。

式中, d_n ——圆管外径, m 。

—在环形通道内流动的情况, $f = \pi(d_2^2 - d_1^2)/4$ 。

式中, d_2, d_1 ——环形通道的外径和内径, m 。

—在步距 s 的 n 根棒组成的三角形栅格的燃料组件内流动的情况, $f = \frac{2\sqrt{3}B^2}{4} - \frac{n\pi d^2}{4}$ 。

式中, B ——燃料组件套管内边尺寸。

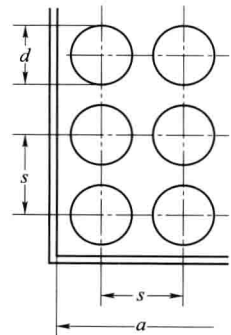
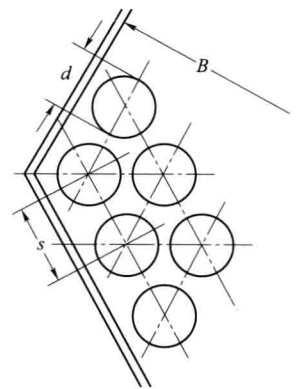
—在由 n 根棒组成的正方形栅格的燃料组件内流动的情况, $f = a^2 - n\pi d^2/4$ 。

式中, a ——燃料组件套管内边尺寸。

—在按流入流体流速度(不考虑诸管的阻塞)横向绕流管束的情况, $f = lb$ 。

式中, l ——圆管长度, m ;

b ——管束宽度, m 。



1.1 基本规则

—在横向绕流棋盘式和走廊式光滑管束的场合,按受压缩横截面处速度计算时, $f=l \times b(s_1-d)/s_1$;按棋盘式管束受压缩斜向截面处速度计算时, $f=2l \times b(s_2-d)/s_1$ 。

式中, s_1 ——管束正面的步距, m;

s_2 ——管束斜向截面的步距, m。

—在横向绕流带圆肋片和单头螺旋肋片的棋盘式和走廊式管束的场合,按受压缩横截面处速度计算时, $f=l \times b \left(\frac{s_1-d}{s_1} - \frac{2h\delta}{s_1 s_p} \right)$ 。

式中, h ——肋片高度, m;

s_p ——肋片步距, m;

δ ——肋片平均厚度, m。

按棋盘式管束受压缩斜向截面处速度计算时, $f=l \times b \left(\frac{2(s'_2-d)}{s_1} - \frac{4h\delta}{s_1 s_p} \right)$ 。

式中, s'_2 ——管束斜向截面的步距, m;

也请参见后面的图 1.8。

关于定型尺寸,如果没有特别指明,取水力直径 $d_r = \frac{4f}{P}$, m。

式中, f ——冷却剂通道截面面积, m^2 ;

P ——湿润周长, m。

—在圆管内流动的情况, $d_r = d_n$ 。

—在环形通道内流动的情况, $d_r = (d_2 - d_1)$ 。

—纵向绕流 n 根管束,并考虑到容器周界的场合, $d_r = (D^2 - nd_n^2)/(D + nd_n)$ 。

式中, D ——容器内径, m;

d_n ——圆管外径, m。

不考虑容器周界(对于无限栅格),并以三角形排列安放外径为 d 的管和棒时, $d_r = d(2\sqrt{3}x^2/\pi - 1) = d(1.103x^2 - 1)$;在正方形排列时, $d_r = d(4x^2/\pi - 1) = d(1.27x^2 - 1)$ 。

式中, $x = s/d$ ——相对步距;

s ——管或棒安放步距, m。

对于带有以步距 s 的三角形排列安放的直径为 d 的 n 根棒的燃料组件,并考虑到套管的

周界, $d_r = \frac{3\sqrt{3}B^2 - n\pi d^2}{(3/\sqrt{3}B) + n\pi d}$ 或 $d_r = \frac{6\sqrt{3}a^2 - n\pi d^2}{6a + n\pi d}$ 。

式中, B ——对边距尺寸;

a ——燃料组件边长;

对于以步距 s 正方形排列安放的直径 d 的 n 根棒的燃料组件,并考虑到边长 a 的套管周界, $d_r = \frac{4a^2 - n\pi d^2}{4a + n\pi d}$ 。

在绕流无限栅格中以步距 s 三角形排列安放的带肋片的管径 D_p (以肋片顶计算)管束的场合, $d_r = D_p \left[1.103 \left(\frac{s}{D_p} \right)^2 - 1 \right]$ 。

对于横向绕流管束的场合,定型尺寸取:

—对于光滑圆管束,取圆管外径 d_n , m。

—对于带肋片的圆管束, 取 $l_r = \frac{F_{tp}}{F_n} d + \frac{F_p}{F_n} \sqrt{\pi(D_p^2 - d^2)/4}$ 。

式中, F_{tp}, F_p, F_n 分别为圆管肋片之间区段面积、肋片面积以及带肋片圆管的总面积。

1.1.2 压降的组成

通道的总阻力由摩擦阻力(Δp_r)、局部阻力(Δp_m)、与流动加速有关的阻力(Δp_{yck})以及与克服密度差有关的阻力(位差压头)(Δp_{mmb})相加而成:

$$\Delta p = \sum \Delta p_r + \sum \Delta p_m \pm \Delta p_{yck} \pm \Delta p_{mmb} \quad (1.1)$$

对于中等升温情况下的单相液流, 方程(1.1)的最后两项具有(±)号, 并且与前两项相比通常很小。第三项的符号取决于液流是加速还是减速。液流加速要额外消耗能量, 应当为(+)号; 液流减速时应为(-)号。方程(1.1)第四项的符号取决于强迫对流与自然对流方向是否一致。它们的方向一致时应当使用(-)号。强迫对流与自然对流方向相反时取(+)号。摩擦阻力按下式计算:

$$\Delta p_r = \xi \frac{l}{d_r} (\rho \bar{w}^2 / 2) \quad (1.2)$$

式中, \bar{w} ——平均速度, m/s;

ρ ——介质密度, kg/m³;

l, d_r ——通道的长度和水力直径, m;

ξ ——摩擦阻力因数, 它取决于通道的几何(形状)、它的粗糙度和雷诺数($Re = \frac{\bar{w} d_r}{\nu}$)。

粗糙度用凸起的平均高度 δ 来估算, m; 它可以是均匀的(喷砂粗糙度)或者非均匀的。计算中使用的 Δ 为等效粗糙度, mm。对于某些表面条件取下列值:

铜, 黄铜	1×10^{-3}
不锈钢	1×10^{-2}
铝	1.5×10^{-2}
碳钢:	
新管或在水仔细净化情况下	8×10^{-2}
焊接管	5×10^{-2}
腐蚀不严重的饱和蒸汽管或水管	0.2
处于运行中的水管	1
铸铁管	0.12
混凝土管	1~10

按尼库拉泽数据^[22], $\xi(Re, \Delta)$ 关系的特征示于图 1.1。存在 4 个关系(工况)区域:

1) 层流工况;

2) 光滑表面($\Delta=0$)湍流工况, $\xi(Re)$;

3) 过渡湍流工况, 其中 $\xi(Re, \Delta/d_r)$;

4) 湍流工况, 其中 ξ 与雷诺数无关, 只与粗糙度有关, 即 $\xi(\Delta/d_r)$ ——“平方规律”(见图 1.1)。

表面“光滑度”条件通常按变异雷诺数 $Re_* = \frac{\Delta v_*}{\nu}$ 确定。

式中, $v_* = \bar{w} \sqrt{\xi/8}$ ——动力学速度, m/c。

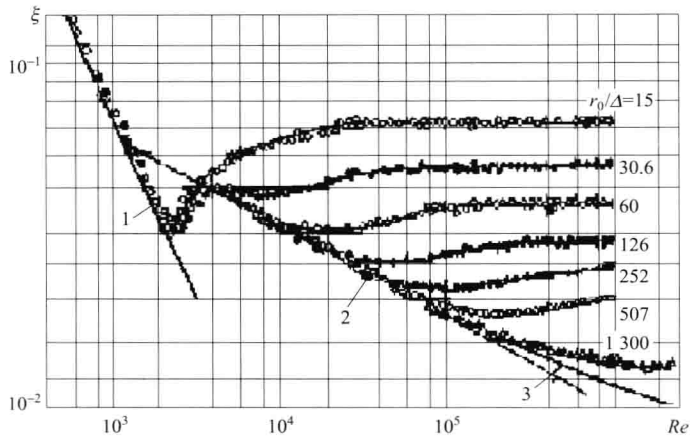


图 1.1 具有人工喷砂粗糙度的圆管内流动时阻力因数的变化
 直线 1,2,3—按普阿泽伊列公式、勃拉休斯公式和普朗特公式
 计算——见后面公式 1.7,1.9,1.11^[22]

为了计算动力学速度,量值 ξ 用逐次逼近法求得, ξ 的真实值开始选取水力光滑表面的量值。

当 $\Delta v_r / \nu < 60$ 时认为表面是光滑的。更简单的估算是把相对粗糙度与普通雷诺数相关联: $Re < 20d_r / \Delta$ 。

考虑到开始的流体动力学区段,公式(1.2)将有下列形式:

$$\Delta p_\tau = \left(\xi \frac{l}{d_r} + k \right) \frac{\rho \bar{w}^2}{2} \quad (1.3)$$

如果通道内速度分布图已经稳定,则量值 $k=0$ 。对于圆管入口处的平直速度分布图, $k=1.16$ 。对于平直间隙 $k=0.63$ 。对于矩形管,当 $h/b=0.125 \sim 1.0$ 时, $k=1.1 \sim 2.02$ 。如果 $\Delta/d_r < 15/Re$, 认为带不均匀粗糙度的圆管是水力光滑的。由此临界雷诺数等于 $Re_{\text{нред}} = 15d_r/\Delta$, 小于它认为圆管是光滑的。确定进入阻力平方规律边界的雷诺数 $Re_{\text{тп}} \cong 560d_r/\Delta$ 。

观察到在现代动力装置中使用更高冷却剂速度的趋势。这导致通道会在阻力平方规律区域工作,从而知道准确的 Δ 值十分重要。因为在参考文献中援引的只是这个量的大致值,为了准确计算,必须测量选用管道的绝对等效粗糙度。

局部阻力按下式计算:

$$\Delta p_m = \zeta_m \rho \bar{w}^2 / 2 \quad (1.4)$$

式中, ζ_m ——局部阻力因数;

\bar{w} ——阻力因数对应的流速(通常是小截面处的流速), m/c。

加速压头损失

$$\Delta p_{\text{уч}} = (\rho w)^2 (1/\rho_k - 1/\rho_H) \quad (1.5)$$

式中, ρw ——介质质量流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

ρ_k, ρ_H ——在区段末端和始端介质的密度。

位差压头量值按下式计算:

$$\Delta p_{\text{ннб}} = (\rho_1 - \rho_2) gh \quad (1.6)$$