

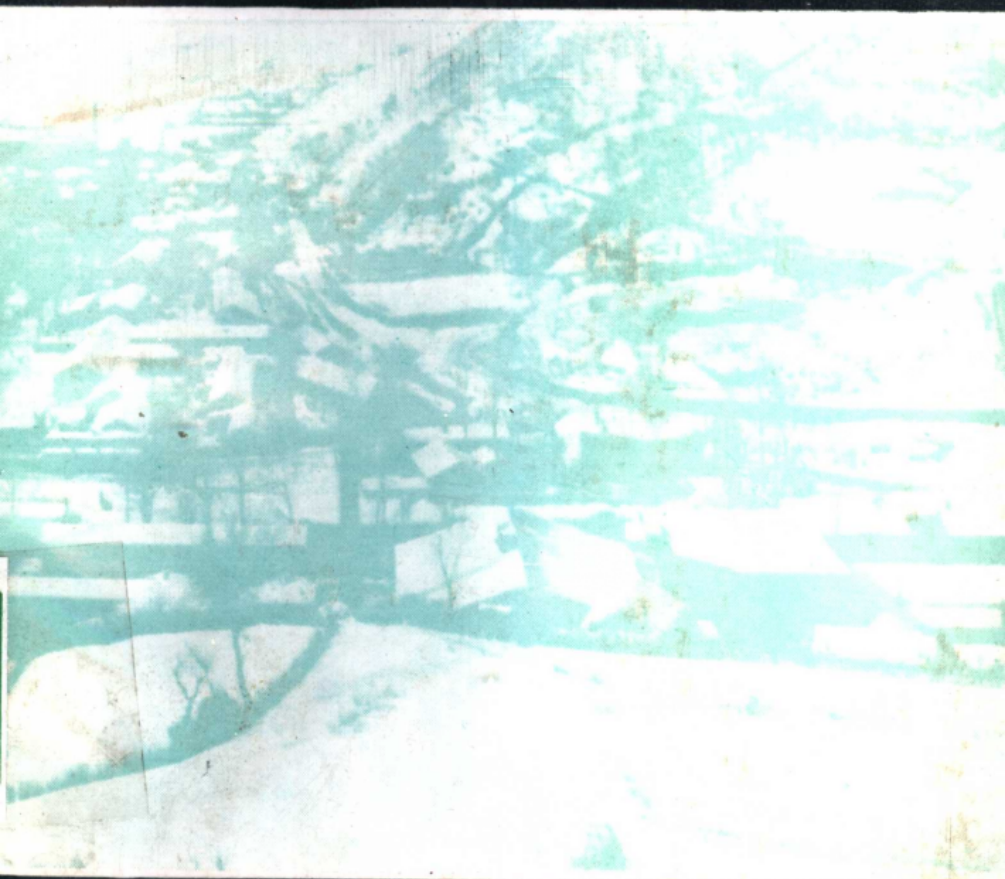


选矿流变学 及其应用

杨小生 陈 苾 著

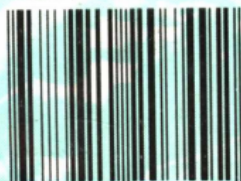
● 国家“八五”规划重点图书 ●

● 中南工业大学出版社 ●



封面设计:李星星

ISBN 7-81020-749-0



9 787810 207492 >

ISBN 7-81020-749-0/TD · 036

定价:15.00元

选矿流变学及其应用

Slurry Rheology For Mineral Processing

杨小生 陈 苙 编著

中南工业大学出版社

【湘】新登字 010 号

选矿流变学及其应用

杨小生 陈 彦 著

责任编辑：文 刀

*

中南工业大学出版社出版发行

长沙市东方印刷厂印装

湖南省新华书店经销

开本：850×1168 1/32 印张：7.75 字数：196千字

1995年5月第1版 1995年5月第1次印刷

印数：0001—1000

*

ISBN 7-81020-749-0/TD·036

定价：15.00元

本书如有印装质量问题，请直接与生产厂家联系解决

内 容 提 要

本书侧重于浆体这种分散体系的流变学特性的分析与描述,并将流变学理论与选矿实际过程相结合,是一本以实用性为主的专著。

本书共分八章。第一章简要介绍了经典牛顿流体流动的基本运动方程和几种简单流动形式;第二章介绍了非牛顿流体流变学的基本知识,包括非牛顿流体概念及几种常见非牛顿流体本构方程和流动特性等内容;第三章简述了几种常见选矿设备中矿浆的流动形式,并详细介绍了矿粒和气泡在矿浆中的运动规律;第四章介绍了流体流变测量的基本方法和原理;第五章介绍了与浆体流变性有关的基本物理特性;第六章结合实测结果综合介绍了工业浆体的常见流变特性及影响因素;第七章分别对磨矿、重介质选矿和磁流体选矿过程的流变学效应进行了分析,概述了近年来国内外在这一领域的研究成果;第八章简要介绍了牛顿和非牛顿浆体在管道中以层流和紊流输送时的流速分布和摩阻计算等基本知识。

本书可供从事选矿科研和教学的研究人员、教师和研究生阅读,也可供选矿厂工程技术人员参考。

前 言

流变学是力学的重要分支，它是研究物质在流动过程中应力与形变速率关系的科学。

浆体流变学是流变学的重要研究领域，由于近年来在许多工业中都遇到有关浆体流动的问题，如选矿过程中矿物浆体的流动，钻井充填泥浆的流动等，因而浆体流变学已日益受到重视。

鉴于目前有关浆体流变学的书籍甚少，本书着重讨论流变学，尤其是浆体流变学的基本概念和原理，并对选矿过程的流变学问题予以讨论。各种浆体和悬浮体是由固相分散于液相中形成的，比起纯流体来，其流变特性要复杂得多，在对其特性的描述和测定等方面尚有许多问题有待研究和探讨。

选矿过程是根据矿物颗粒的不同物理和化学特性进行分离的过程，这些性质包括颗粒粒度、形状、粒度分布、矿物密度及颗粒表面特性等，这些性质都影响到矿浆的流变特性，可以说浆体的流变特性是选矿过程中不可忽视的因素。目前选矿工业中一个急待解决的问题是从微细粒或矿泥中有效地回收有价矿物，这除了微细颗粒质量小，表面能高等因素外，微细颗粒对矿浆流变性显著影响是重要因素。目前国内外学者已经对细粒磨矿、重力选矿及脱水等过程流变学效应进行了研究，可以预料选矿流变学将成为一个重要研究领域。

我们希望此书的出版能对那些对浆体流变学及选矿流变学研究感兴趣的读者有所帮助。

由于作者水平有限，书中难免有错误或不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

1994年11月

目 录

第1章 牛顿流体流动	1
1.1 粘性、牛顿定律	1
1.2 粘性流体应力状态、广义牛顿定律	4
1.3 牛顿流体运动方程	7
1.4 牛顿流体的几种简单流动	9
参考文献	14
第2章 非牛顿流体及其流动	15
2.1 概 述	15
2.2 流体的分类、流变曲线	17
2.3 表观粘度、本构方程	17
2.4 幂律流体	18
2.5 粘塑性流体	21
2.6 触变性和震凝性流体	22
2.7 粘弹性流体	25
2.8 非牛顿流体流动	27
2.9 粘弹性流体流变模型	30
参考文献	36
第3章 选矿中的剪切流动	38
3.1 外部流动与内部流动	38
3.2 典型选矿设备中的流动	38
3.3 固体颗粒在流体中的运动	42

3.4	矿粒在牛顿流体中的沉降	43
3.5	矿粒在非牛顿流体中的沉降	45
3.6	气泡在流体中的运动	50
	参考文献	57
第4章 浆体一般特性		59
4.1	概 述	59
4.2	浆体中分散颗粒的一般特性	59
4.3	浆体中颗粒间的相互作用	67
	参考文献	72
第5章 浆体流变性		74
5.1	概 述	74
5.2	浆体流变性对分散颗粒浓度的依存性	75
5.3	牛顿浆体	76
5.4	浆体的假塑性和胀塑性	76
5.5	浆体的粘塑性	80
5.6	浆体的粘弹性	84
5.7	浆体粘度影响因素	86
	参考文献	96
第6章 浆体流变测量		98
6.1	毛细管粘度测量法	98
6.2	旋转粘度测量法	131
6.3	浆体屈服应力的测量	153
	参考文献	155
第7章 选矿过程流变学		158
7.1	磨矿过程流变效应	158

7.2 重介质分选过程流变效应	184
7.3 磁流体流变性与磁流体分选	202
参考文献	208
第8章 浆体管道输送原理	212
8.1 不可压缩流体在管内流动的基本关系	212
8.2 管内层流流速分布与摩阻计算	214
8.3 不可压缩流体在管道中的紊流流动	227
参考文献	234

CONTENTS

1 The Flow of Newtonian Fluids

- 1.1 Viscosity of fluids and Newtonian law
- 1.2 Stress state of viscous fluids and Newtonian law in a broad sense
- 1.3 Basic dynamic equations of Newtonian fluids
- 1.4 Typical flow types of Newtonian fluids

References

2 Non-Newtonian Fluids and Their Flow

- 2.1 Introduction
- 2.2 Classification of fluids and rheological curves
- 2.3 Apparent viscosity and rheological equations
- 2.4 Power-law fluids
- 2.5 Viscoplastic fluids
- 2.6 Thixotropic and rheopectic fluids
- 2.7 Viscoelastic fluids
- 2.8 Flow of Non-Newtonian fluids
- 2.9 Some linear viscoelastic models

References

3 Shear Flow in Mineral Processing

- 3.1 External and internal flow
- 3.2 Flow processes in some typical mineral processing

machines

- 3.3 Motion of solid particles in stationary flow
- 3.4 Settlement of ore particles in Newtonian fluids
- 3.5 Settlement of ore particles in non-Newtonian fluids
- 3.6 Motion of bubbles in stationary flow

References

4 Fundamental Characteristics of Slurry

- 4.1 Introduction
- 4.2 Fundamental characteristics of particles dispersed in slurry
- 4.3 Interparticle interactions in slurry

References

5 Rheological Behavior of slurry

- 5.1 Introduction
- 5.2 Dependence of slurry rheological behavior on solid concentration
- 5.3 Newtonian slurries
- 5.4 Pseudoplastic and dilatant slurries
- 5.5 Viscoplastic slurries
- 5.6 Viscoelastic slurries
- 5.7 Effect factors on rheological behavior of slurry

References

6 Rheological Measurement of slurry

- 6.1 Capillary viscometry
- 6.2 Rotational viscometry
- 6.3 Measurement of yield stress

2

References

7 Rheology in Mineral Processing

- 7.1 Rheological effects in grinding
- 7.2 Rheological effects in heavy medium separation
- 7.3 Rheological behavior of magnetic fluids and magnetohydrodynamic separation

References

8 Principles of Slurry Transportation through Pipe

- 8.1 Basic flow equations of fluids through pipe
- 8.2 Laminar flow of fluids through pipe
- 8.3 Turbulent flow of fluids through pipe

References

第 1 章 牛顿流体流动

1.1 粘性 牛顿定律

由材料力学知，施加于材料的应力 τ 与其形变 γ 的关系为

$$\tau = G\gamma \quad (1.1)$$

上式称为虎克定律，满足以上关系的材料称为虎克体。式中 G 称为杨氏弹性模量，是材料的物性常数，反映了材料抵抗变形的能力。

流体与固体不同，固体有保持一定形状的能力，要使固体变形必须施加一定的力。流体不能保持一定形状，处于静止状态的流体不能抵抗剪切力，任何微小的剪切力都可使流体产生任意的变形。但当变形速度较大时，流体则表现出一定的抵抗力（内摩擦力）。当运动停止，即变形速度消失时，这种抵抗力就不存在了。这种表明流体受到剪切力作用抵抗变形速度的特性叫流体的粘性。

与(1.1)式相对应，对于流体，剪切应力与变形速率符合以下关系（图 1.1）

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

式中系数 η 称为粘性系数或粘度，是流体的物性常数，反映了流体抵抗运动的能力。(1.2) 式称为牛顿定律，服从 (1.2) 式的流体称为牛顿流体。常见的牛顿流体有空气、水、甘油及低浓度浆体等。

以上，有很多流体不服从(1.2)式的线性关系，这类流体统称为非牛顿流体，非牛顿流体的流动特性在第 2 章中介绍。

(1.2)式中 η 又称为动力粘度, η 与流体密度 ρ 的比值 ν , 即

$$\nu = \eta / \rho \quad (1.3)$$

称为运动粘度, 它具有运动学因次。

(1.2)式中速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 又叫剪切变形速率, 或切变率, 以 $\dot{\gamma}$ 表示。

下面看看(1.2)式中各个量的因次和单位:

剪切应力 τ

$$\frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$$

其中 M 为质量因次, L 为长度因次, T 为时间因次。即剪切应力具有压力因次。在SI单位制中, 如力的单位为牛顿(N), 面积单位为平方米(m^2), 则剪切应力的单位为帕斯卡(Pa), 即

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

Pa与常用单位 dyn/cm^2 (达因)/ cm^2 的关系为

$$1Pa = 10dyn/cm^2$$

剪切速率 $\dot{\gamma}$

$$\frac{LT^{-1}}{L} = T^{-1}$$

在SI单位制中 $\dot{\gamma}$ 的单位为 s^{-1} (s^{-1})

粘度 η

$$\frac{MLT^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

在SI单位制中粘度的单位为 $Pa \cdot s$ 。 $Pa \cdot s$ 是比较大的单位, 其千分之一称为厘泊($mPa \cdot s$), 用cP表示。另外还有一个常用单位是泊(P), 它是 $Pa \cdot s$ 的十分之一。粘度各单位的转换在实用时

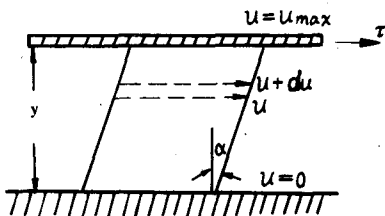


图 1.1 牛顿流体剪切流动

容易搞错,因而列于表 1.1 中。

表 1.1 粘度单位之间转换关系

Pa · s	P	cP	kgf · s/m ²
1	10	1000	0.10197
0.1	1	100	0.010197
0.001	0.01	1	0.0001097
9.807	98.07	9806.7	1

运动粘度 $\dot{\gamma}$

$$\frac{ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-3}} = L^2T^{-1}$$

若时间用 s 表示,长度用 m 表示,则运动粘度的单位为 m²/s,若长度用 cm 表示,则运动粘度的单位为 cm²/s (斯 St), St 的 1/100 称为厘斯 cSt。各单位之间的换算关系为

$$1\text{m}^2/\text{s} = 1 \times 10^4 \text{St} = 1 \times 10^6 \text{cSt}$$

从流体微观结构看,产生粘性的主要原因有两种,即分子不规则运动所产生的动量交换和相邻分子间的吸引力。

由于流体分子的不规则运动,流体在流动时速度较快的流层中的分子与速度较慢流层中的分子发生动量交换,因而在相邻流层之间产生内应力,即剪切应力。如图 1.2 所示。由分子不规则运动引起的内应力与分子不规则运动强度有关。

另外相邻流层分子间具有吸引力,为使流体流动必须克服这种吸引力,这种力也表现为剪切应力。由此产生的剪切应力与流体分子间的距离有关,分子间距离愈近其吸引力就愈大。

粘度的影响因素主要有温度和压力。温度对气体粘度和液体粘度的影响不同,气体的粘度随温度升高而增大,而流体粘度随温度升高而降低。这是因为气体的粘度主要由分子的不规则热运

动引起的，温度升高分子热运动速度增大，而液体的粘度主要取决于分子的吸引力，温度升高分子间距离增大，吸引力减小。在常压下温度对某些常见气体和液体粘度的影响如表 1.2 和表 1.3 所示。压力对流体粘度的影响远不如温度显著，

压力增加使分子间距离缩短，分子间吸引力增大，因而使粘度增大，但在压力不是很高的情况下，压力的影响可以忽略。

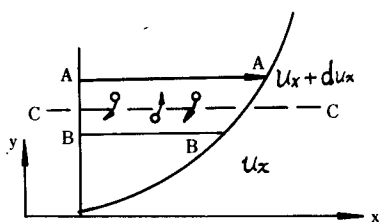


图 1.2 分子动量传递

表 1.2 水及空气在常压下的粘度

温度(°C)	水(cP)	空气(cP)
0	1.7921	0.01716
20	1.0050	0.01813
40	0.6560	0.01908
60	0.4638	0.01999
80	0.3565	0.02087
100	0.2838	0.02173

1.2 粘性流体应力状态、广义牛顿定律

通过流场中任意点 A 的微元六面体如图 1.3 所示。在微元体的每个表面上作用有一个法向应力，二个切向应力。法向应力以 σ 表示，切向应力以 τ 表示。则作用在垂直于 x 轴的表面上的应力为 $\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ ；作用在垂直于 y 轴的表面上的应力为 $\sigma_y, \tau_{yz}, \tau_{yx}$ ；作用在垂直于 z 轴表面上的应力为 $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ 。即粘性流体中任意一点的应力状态由九个分量决定。

表 1.3 某些气体及液体在常压下的粘度

物质 (气)	温度 (°C)	粘度 (cP)	物质 (液)	温度 (°C)	粘度 (cP)
1-C ₄ H ₁₀	23	0.0076	C ₃ H ₈	20	0.647
n-C ₄ H ₁₀	15	0.0084	Br ₂	26	0.946
H ₂ O	100	0.0127	C ₂ H ₅ OH	20	1.194
CO ₂	20	0.0146	Hg	20	1.547
N ₂	20	0.0175	H ₂ SO ₄	25	19.150
O ₂	20	0.0203	润滑油	20	172
Hg	380	0.0654	甘油	20	872
(C ₂ H ₅) ₂ O	20	0.2450	蓖麻油	20	972

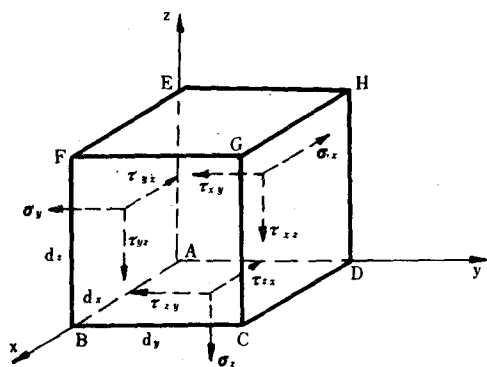


图 1.3 粘性流体应力状态

根据应力的对称性，六个切向应力中只有三个独立的，即