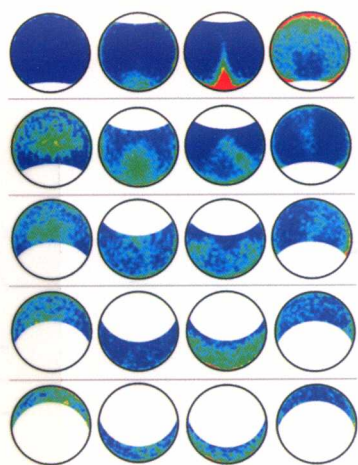


国家自然科学基金项目 (No.51876193) 资助

制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

流程阀门流体动力学

Fluid Dynamics of Process Valves



朱祖超 林哲 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

流程阀门是一种广泛使用的流程调控装备,其调控功能主要依靠改变流道通流面积来实现。阀门内部随调控过程而变化的复杂流动特征是影响其安全性和可靠性的内在因素。本书针对单相和含固两相等工况,从基础理论、数值计算和实验研究等方面对流程阀门开展研究,建立了单相工况流程阀门调控过程流体动力学特性计算方法,获得了不同结构流程阀门的调控特性与内部流动特征;建立了流程阀门含固两相流体动力学特性及流致磨损计算方法,获得了阀内两相流动特征及内部流道的磨损特性,为流程阀门的设计以及可靠运行提供了理论和技术支撑。

本书可作为流程阀门教学人员和科研人员的参考书,对从事流程阀门产品设计和实际应用的工程技术人员也具有重要的借鉴和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

流程阀门流体动力学/朱祖超,林哲著. —北京:
机械工业出版社, 2019. 6
ISBN 978-7-111-62768-5

I. ①流… II. ①朱…②林… III. ①阀门-流体
动力学 IV. ①TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 094778 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:何月秋 责任编辑:何月秋

责任校对:王明欣 樊钟英 版式设计:鞠 杨

封面设计:马精明 责任印制:张 博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 1 插页 · 223 千字

0001—1500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-62768-5

定价: 99.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

流程阀门是流程输送的主要调控装备，广泛应用于石油、化工、电力、冶金、轻工、农业、民用和国防各领域，在国民经济中占有重要的地位。流程阀门的调控功能主要依靠启闭件的升降、滑移、旋摆或回转运动改变流道面积大小来实现，其实质是调控阀门内部流体的流动规律。在阀门的节流作用下，阀门内部极易产生漩涡、回流、二次流等不稳定涡流状态，这些复杂流动状态的产生和发展是导致阀门运行失效的主要内在因素。同时，由于流程阀门使用环境的多样化，其内部流通的介质常常不是单一的流体，而是流体和固体的混合介质。阀门内部涡流与颗粒运动相互耦合，不仅会导致阀门内部流体动力学特性的复杂化，还将致使阀门内部流道表面出现不同程度的磨损，从而降低阀门的工作寿命，影响输送系统的安全性和可靠性。尽管国内外研究人员对流程阀门内部流体动力学的特性开展了一些研究，但是由于阀门种类以及使用环境的多样化，该方面的研究还需要进一步深入拓展，从而更好地为阀门的设计开发及应用控制服务。

本书以对我国经济建设和国家安全有重要现实意义的流程阀门为研究对象，针对单相及含固两相等实际工况，从基础理论、数值计算和实验研究等方面开展研究，建立了单相工况流程阀门调控过程流体动力学特性计算方法，获得了不同结构流程阀门的调控特性与内部流动特征；建立了流程阀门含固两相流体动力学特性及流致磨损计算方法，获得了阀内两相流动特征及内部流道的磨损特性，为流程阀门的设计以及可靠运行提供了理论和技术支撑。

在本书编写过程中，得到了浙江理工大学、浙江省机电设计研究院有限公司、五洲阀门股份有限公司以及浙江固特气动科技股份有限公司等高校和企业有关老师和科技人员的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

本书的出版得到了国家自然科学基金项目（No. 51876193、No. 51406184）和浙江省科技计划项目（No. 2015C31002）的资助。

对于书中存在的缺点和错误，敬请读者批评指正。

朱祖超 林 哲

本书字符含义

Symbol List

1. 英文字母含义

A	碰撞面积
A_{face}	壁面计算单元的面积
a	塑性变形压痕的体积分数
a_s	不同流动状态下的漩涡常数
B	凹槽宽度
C_D	拖曳阻力系数
C_{LR}	升力系数
C_V	国外常使用的阀门流量系数
C_μ	湍流黏度系数
D	管道直径
D_H	水力直径
D_{ij}^L	分子扩散项
D_{ij}^T	湍流扩散项
d_p	颗粒直径
d_{p0}	产生磨损的最小颗粒直径
E_1 、 E_2	第一阶段和第二阶段的碰撞磨损量
\hat{E}_1 、 \hat{E}_2	第一阶段和第二阶段的磨损最大值
E_M	壁面的损失质量
ER	磨损率 (表面材料磨损量/碰撞颗粒质量)
ER_{im}	碰撞颗粒的磨损率
ER_j	第 j 个颗粒的碰撞磨损率
ER_{lc}	局部磨损率
ER_t	总磨损率
ER_V	体积磨损率 (表面材料磨损体积/碰撞颗粒质量)
E_{total}	总磨损质量

E_V	目标材料损失的体积
e_n 、 e_t	弹性恢复系数分为法向和切向两个分量
F_{dv}	颗粒破裂程度
F_{ij}	系统旋转产生项
F_k	比热容比系数
F_B	Basset 力
F_D	拖曳阻力
F_i	作用在流体上的外力
F_M	Magnus 力
F_{normal}	垂直与壁面的作用力
F_P	压力梯度力
F_{p-p}	颗粒间作用力
F_S	Saffman 力
F_s	颗粒形状因子
F_{vm}	虚拟质量力
f	摩擦因数
\dot{G}	能量传递速率
G_b	由浮力引起的湍动能 k 的产生项
G_{ij}	浮力产生项
G_k	湍动能产生项
G_ω	耗散率产生项
H	凹槽深度
HB_w	目标材料的布氏硬度
HV_w	目标材料的维氏硬度
h	凹槽前壁面和后壁面之间的高度差
h_c	切削深度
K	弹性系数
K_V	国内常使用的阀门流量系数
K_{vm}	虚拟质量力系数
κ	湍动能
k_{eff}	流体的有效导热系数

L_e	涡长度尺度
l	行程
M_c	颗粒加速度模量
M_{im}	碰撞在壁面上颗粒的质量
M_p	颗粒总质量
M_p	颗粒总质量流率
m_p	单个颗粒质量
\dot{m}_p	碰撞颗粒的质量流率
N	壁面前一定范围内颗粒数
N_{im}	碰撞在壁面上的颗粒数量
N_{in}	进口总颗粒数量
$N_{particle}$	在单元面积上产生碰撞的颗粒数目
n_e	膨胀系数
p	压力
p_{ij}	应力产生项
P_{im}	颗粒的碰撞概率
P_n	磨损深度随时间的变化率, 磨损速率
P_{n-m}	磨损深度随来流颗粒质量的变化率
P_{n-max}	壁面磨损速率的最大值
Δp	压差
Q	流量
$R_{erosion}$	单位面积壁面的磨损速率
Re_p	颗粒的相对雷诺数
r	0 到 1 之间的均匀随机数
S	流道高度
S_d	标准差
S_h	附加体积热源
S_m	质量附加项
St	斯托克斯数
\dot{S}_D	熵产生率
$\dot{S}_{\bar{D}}$	时均运动引起的特定熵产生率



$\dot{S}_{D'}$	速度波动引起的特定熵产生率
T_L	流体的拉格朗日积分时间尺度
T	热力学温度
t_e	涡团的生存时间尺度
U_c	管道中心线处流体速度
U_{in}	进口平均速度
U_p	颗粒碰撞速度
U_r	相对速度
U_{p0}	颗粒起始碰撞速度
\bar{u}	流体平均流速
u'_{rms}	脉动速度
u_τ	壁面摩擦速度
u_{p1} 、 u_{p2}	碰撞前后颗粒速度的法向分量
v_{p1} 、 v_{p2}	碰撞前后颗粒速度的切向分量
v	流体的速度矢量
v_p	颗粒的速度矢量
v'	流体的随机脉动速度
w	显焓
X	压差比
Y_M	可压湍流中脉动扩张项
Z	压缩系数

2. 希腊字母含义

θ_a	v_{p1} 为 0 时的碰撞角度
θ_b	发生最大磨损时的碰撞角度
θ_1	颗粒的碰撞角度
σ_k	湍动能的湍流普朗特数
σ_ε	湍流耗散率的湍流普朗特数
σ_f	流动应力
σ_{pf}	塑性流动应力常量
δ	重叠部分长度
δ_c	临界应变

ζ	气体等熵指数
ζ	阻力系数
ξ_1	变形磨损因子
ξ_2	切削磨损因子
κ	固气比
φ	倾斜角度
γ	比重
Φ_{ij}	压力应变项
ρ	流体密度
ρ_p	颗粒密度
ρ_{pn}	颗粒数密度
ρ_w	目标材料的密度
λ	阻尼系数
μ_t	湍流黏度
μ	流体的运动黏度
ε	湍动能耗散率
\mathcal{G}	服从正态分布的随机数
τ	颗粒的松弛时间
τ_e	涡团生存时间尺度
τ_f	台阶处涡流的特征时间
τ_{ij}	雷诺应力张量
τ_p	颗粒的松弛时间
τ_w	壁面切应力
Ω	漩涡特征数
Ω_r	颗粒的相对旋转速度

3. 角标含义

im	碰撞
in	进口
out	出口
max	最大值
p	颗粒

前言	
本书字符含义	
第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 阀门流阻特性	3
1.2.1 阀门流量特性	3
1.2.2 阀门流量系数	5
1.2.3 阀门阻力系数	6
1.3 流程阀门研究现状	6
1.3.1 单相工况	7
1.3.2 含固两相工况	9
第2章 单相工况流程阀门数值计算方法	19
2.1 数值计算方程	19
2.1.1 流体流动控制方程	19
2.1.2 湍流模型	20
2.1.3 壁面函数	24
2.2 网格处理方法	25
2.3 数值计算策略	26
第3章 球阀流体动力学特性分析	28
3.1 球阀启闭过程动态流体动力学特性	28
3.1.1 物理模型和数值计算方案	28
3.1.2 阀门特性实验	29
3.1.3 球阀启闭过程流阻特性变化规律	30

3.1.4	球阀启闭过程内部流场变化规律	34
3.2	V型球阀流体动力学特性	37
3.2.1	数值模拟模型及计算方案	37
3.2.2	阀门特性实验	39
3.2.3	V型球阀稳态特性	40
3.2.4	V型球阀瞬态调控特性	48
第4章	截止阀流体动力学特性分析	55
4.1	普通截止阀流体动力学特性研究	55
4.1.1	数值模拟模型及计算方案	55
4.1.2	数值模拟和实验对比	58
4.1.3	截止阀内部二维瞬态流场	60
4.1.4	截止阀内部三维稳态流场	62
4.2	节流型截止阀流体动力学特性研究	66
4.2.1	数值模拟模型及计算方案	66
4.2.2	改进前后截止阀内部流场对比	66
4.2.3	改进前后阀门流阻特性对比	68
4.3	阀芯结构变化对节流型截止阀流体动力学特性的影响	73
4.3.1	阀门结构模型	73
4.3.2	数值模拟和实验对比	73
4.3.3	阀芯结构对节流型截止阀性能参数的影响	75
4.3.4	阀芯结构对节流型截止阀内部流动特性的影响	76
第5章	流程阀门含固两相流动及流致磨损数值计算方法	80
5.1	含固两相流动计算方法简介	80
5.2	基于欧拉-拉格朗日方法的数值计算模型	81
5.2.1	连续相计算模型	81
5.2.2	离散相运动方程	81
5.2.3	颗粒和壁面的碰撞反弹模型	87
5.2.4	磨损计算模型	88
5.3	数值计算策略	90



第6章 气固两相流闸阀流动及磨损分析	92
6.1 全开状态下闸阀内部稀气固两相流动特性研究	93
6.1.1 物理模型和数值模拟方案	93
6.1.2 数值模拟验证	95
6.1.3 颗粒对气体流场的影响	96
6.2 全开状态下闸阀稀气固两相流致磨损研究	99
6.2.1 物理模型及网格划分	99
6.2.2 数值模拟验证	101
6.2.3 结果与讨论	104
6.3 闸阀不同开度下两相流致磨损研究	113
6.3.1 物理模型和数值模拟方案	113
6.3.2 数值模拟验证	115
6.3.3 闸阀两相流阻特性	119
6.3.4 闸阀气固两相流动规律	119
6.3.5 闸阀磨损分析	123
第7章 基于凹槽结构的闸阀磨损改进研究	130
7.1 数值模拟方案及验证	130
7.1.1 物理模型	130
7.1.2 数值模拟方案	130
7.1.3 数值模拟验证	132
7.2 水平放置凹槽结构两相流动及磨损分析	135
7.2.1 高度差对气流场的影响	135
7.2.2 高度差对颗粒分布的影响	137
7.2.3 高度差对磨损的影响	138
7.3 倾斜放置凹槽结构两相流动及磨损分析	143
7.3.1 气相流场变化规律	144
7.3.2 颗粒分布变化规律	144
7.3.3 颗粒磨损变化规律	148
7.4 凹槽结构两相流动及磨损实验研究	152
7.4.1 实验方案	153

7.4.2	凹槽结构内部颗粒分布特性	156
7.4.3	凹槽后壁面的磨损特征	156
第8章 液固两相球阀流动及磨损分析		162
8.1	数值计算设置及验证	162
8.1.1	流体计算域的建立和参数设置	162
8.1.2	实验方案	164
8.1.3	数值模拟验证	165
8.2	球阀内部固液两相流动特性分析	168
8.2.1	球阀固液两相流量系数	168
8.2.2	固体颗粒对阀门内部流场的影响	169
8.2.3	固体颗粒分布规律	169
8.3	球阀主要壁面的磨损特性	171
8.3.1	阀芯流道磨损特性	171
8.3.2	阀芯下游管道磨损特性	175
8.3.3	球体表面及阀体表面磨损特性	182
参考文献		183

Contents

Symbol List

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Overview	1
1.2	Valve Performance	3
1.2.1	Flow Characteristics	3
1.2.2	Flow Coefficient	5
1.2.3	Resistance Coefficient	6
1.3	Current Research Situation of Process Valve	6
1.3.1	Single Phase	7
1.3.2	Fluid-Solid Multiphase	9
Chapter 2	Simulation Method of Process Valve; Single Phase Flow	19
2.1	Simulation Equations	19
2.1.1	Governing Equations	19
2.1.2	Turbulent Equations	20
2.1.3	Wall Function	24
2.2	Mesh Method	25
2.3	Simulation Strategy	26
Chapter 3	Fluid Dynamic Analysis of Ball Valves	28
3.1	Dynamic Behaviour of the Normal Ball Valve	28
3.1.1	Physical Model and Simulation Scheme	28
3.1.2	Performance test	29
3.1.3	Valve Performances in Opening and Closing Processes	30

3.1.4	Internal Flow Properties in Opening and Closing Processes	34
3.2	Fluid Dynamics of the V-Port Ball Valve	37
3.2.1	Physical Model and Simulation Scheme	37
3.2.2	Performance test	39
3.2.3	Steady-State Performance	40
3.2.4	Transient Performance	48
Chapter 4	Fluid Dynamic Analysis of Globe Valves	55
4.1	Fluid Dynamics of the Normal Globe Valve	55
4.1.1	Physical Model and Simulation Scheme	55
4.1.2	Simulation Validation	58
4.1.3	2D Transient Flow Inside the Valve	60
4.1.4	3D Steady Flow Inside the Valve	62
4.2	Fluid Dynamics of the Throttling Globe Valve	66
4.2.1	Physical Model and Simulation Scheme	66
4.2.2	Comparison of Internal Flow with the Normal Globe Valve	66
4.2.3	Comparison of Valve Performance with the Normal Globe Valve	68
4.3	Effect of Valve Core on the Fluid Dynamics of the Throttling Globe Valve	73
4.3.1	Structures of Valve Core	73
4.3.2	Simulation Validation	73
4.3.3	Effect of Valve Core on Valve Performance	75
4.3.4	Effect of Valve Core on Internal Flow Properties	76
Chapter 5	Simulation Method of Process Valve: Fluid-Solid Flow and Erosion	80
5.1	Brief Introduction of the Simulation of Fluid-Solid Flow	80
5.2	Simulation Models of Euler-Lagrangian Method	81
5.2.1	Model of the Continuous Phase	81
5.2.2	Equations of Discrete Phase Motion	81
5.2.3	Interactions between Particle and Wall	87
5.2.4	Erosion Model	88

5.3	Simulation Strategy	90
Chapter 6 Analysis of Gas-Solid Flow and Erosion in		
	the Gate Valve	92
6.1	Study of Dilute Gas-Solid Flow Properties: Fully Open	93
6.1.1	Physical Model and Simulation Scheme	93
6.1.2	Simulation Validation	95
6.1.3	Effect of Particles on Gas Flow	96
6.2	Study of Dilute Gas-Solid Flow Induced Erosion:	
	Fully Open	99
6.2.1	Physical Model and Mesh	99
6.2.2	Simulation Validation	101
6.2.3	Results and Discussion	104
6.3	Study of Dilute Gas-Solid Flow Induced Erosion:	
	Partly Open	113
6.3.1	Physical Model and Simulation Scheme	113
6.3.2	Simulation Validation	115
6.3.3	Two Phase Flow and Resistance Performance	119
6.3.4	Gas-Solid Flow Properties Inside the Valve	119
6.3.5	Erosion Analyzation	123
Chapter 7 Erosion Prevention by the Improvement of Cavity		
	Structure	130
7.1	Simulation Scheme and Validation	130
7.1.1	Physical Model	130
7.1.2	Simulation Scheme	130
7.1.3	Simulation Validation	132
7.2	Gas-Solid Flow Properties and Erosion in the Cavity:	
	Horizontal	135
7.2.1	Effect of Height Difference on Gas Flow	135
7.2.2	Effect of Height Difference on Particle Distribution	137
7.2.3	Effect of Height Difference on Erosion	138

7.3	Gas-Solid Flow Properties and Erosion in the Cavity:	
	Inclined	143
7.3.1	Variation of Gas Flow Field	144
7.3.2	Variation of Particle Distribution	144
7.3.3	Variation of Erosion	148
7.4	Experimental Study of Gas-Solid Flow and Erosion	152
7.4.1	Experimental Scheme	153
7.4.2	Distribution of Particles	156
7.4.3	Erosion on the Aft Wall of the Cavity	156
Chapter 8	Analyzation of Liquid-Solid Flow and Erosion in the Ball Valve	162
8.1	Simulation Scheme and Validation	162
8.1.1	Computational Domain and Simulation Settings	162
8.1.2	Experimental Scheme	164
8.1.3	Simulation Validation	165
8.2	Analyzation of Liquid-Solid Flow in the Ball Valve	168
8.2.1	Liquid-Solid Two-Phase Flow Coefficient	168
8.2.2	Effect of Particles on Liquid Flow Fields	169
8.2.3	Distribution of Particles	169
8.3	Erosion Characteristics on Internal Surfaces	171
8.3.1	Internal Flow Passage of Valve Core	171
8.3.2	Surface of Downstream Tube	175
8.3.3	Sphere Surfaces of Valve Core and Valve Body	182
References	183



1.1 概述

流程阀门是流体管道输送系统中用来控制流体介质流量以及流向的流体控制元件,如图 1-1 所示。它具有导流、节流、分流、溢流、截止或止回等功能,对整个系统工作的稳定性和可靠性有着很大的影响,被喻为管路的“咽喉”^[1-3]。

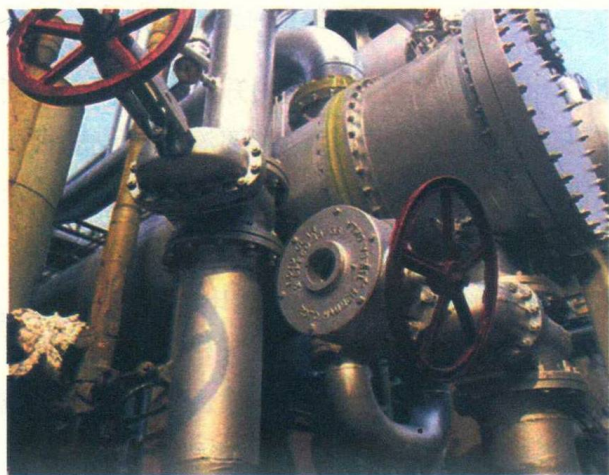


图 1-1 流程阀门在管道系统中的应用

流程阀门有着悠久的发展历史,其种类十分丰富,据不完全统计,目前国内有 3000 多个型号,40000 多个规格的阀门产品。为了对流程阀门进行区分,国内和国际上通常采用即按原理、作用又按结构的分类方法将流程阀门分成 12 大类,即闸阀、球阀、蝶阀、截止阀、旋塞阀、隔膜阀、节流阀、减压阀、止回阀、安全阀、疏水阀以及其他阀门,如图 1-2 所示。这些流程阀门产品在国