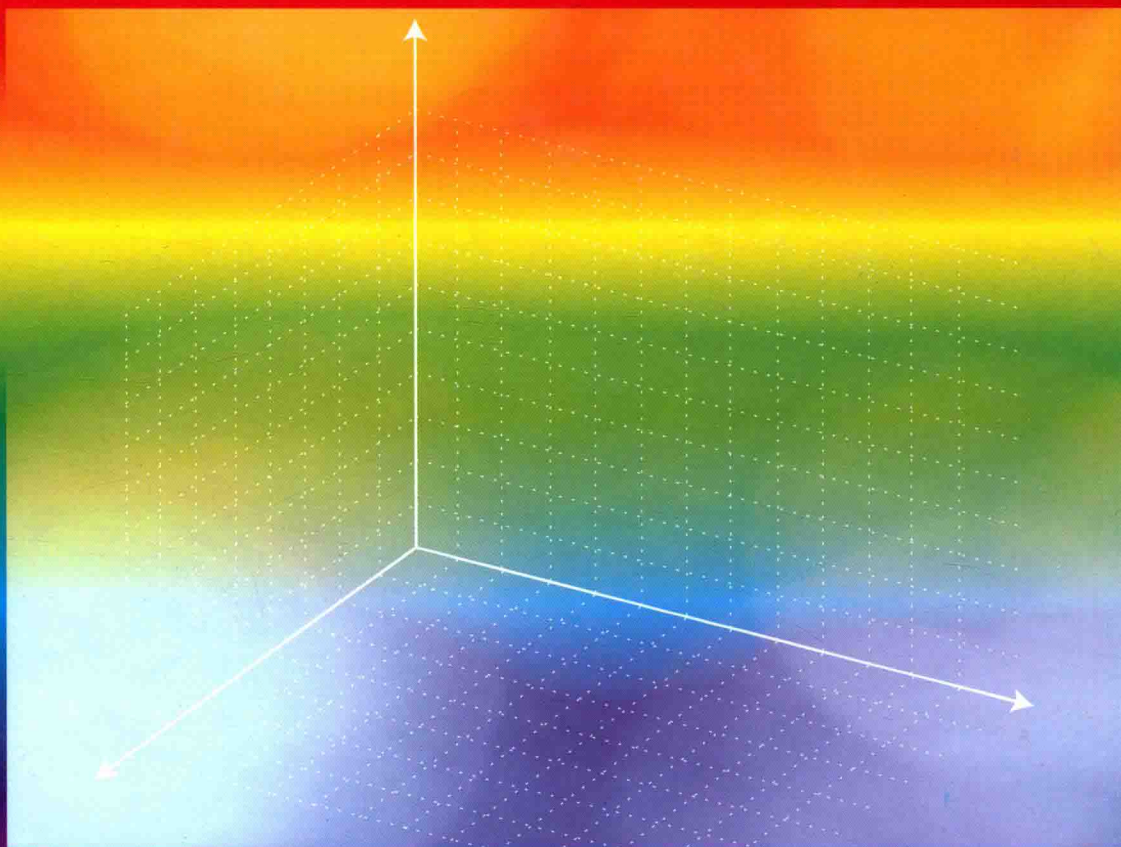


白少先 温诗铸 著



气体热动力润滑与密封

清华大学出版社

气体热动力润滑与密封

白少先 温诗铸 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书以高速气体轴承和高压气体密封的润滑设计为应用背景,系统阐述了多物理场耦合条件下的气体润滑理论和设计分析方法。全书共9章:第1章主要介绍气体的基本性质,第2章主要介绍气体润滑理论基本方程的建立和推导,包括雷诺方程、能量方程、固体热传导方程与界面方程;第3、4章重点介绍典型气体润滑轴承和密封的等温润滑特性及刚性表面气体润滑规律;第5~7章重点介绍气体端面密封的气体热弹流润滑、动载特性和冷凝析水润滑规律;在此基础上,第8、9章介绍气体端面密封的实验方法和设计方法。

本书可以作为从事气体润滑和密封工作者的参考用书,也可作为相关专业研究生的教学用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

气体热动力润滑与密封/白少先,温诗铸著. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-45453-3

I. ①气… II. ①白… ②温… III. ①气体润滑—研究 ②气体密封—研究 IV. ①TH117.2
②TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274719 号

责任编辑:赵 斌 刘远星

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:10

字 数:241千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:65.00元

产品编号:067234-01

序

PREFACE



润滑与密封是两个不同的实践性很强的技术学科,同时它们又有十分紧密的联系。它们的发展与社会生产力的发展和科学技术的进步密切相关。白少先教授撰写的本书以高速气体轴承和高压气体密封的润滑设计为应用背景,系统阐述了多物理场耦合条件下的气体润滑理论和设计分析方法。

润滑作为摩擦学的主要研究内容之一,它通过改变摩擦副间的摩擦状态来减少摩擦、降低或避免磨损。此外,润滑剂还有降温、防锈、密封等功能。1886年雷诺推导出著名的雷诺方程,从而奠定了润滑理论的基础。随着润滑理论、机理与实践得到了人们深入的研究,特别是随着计算机的应用与普及,对液体润滑已经建立了较完善的理论体系。随着机械装备的高速化、微型化和机电一体化等,气体润滑技术的应用越来越多。本书在介绍气体润滑基本理论的基础上,突出了对磁头-磁盘、螺旋槽止推轴承等气体润滑方面应用技术的阐述。此外,本书在气体润滑方面的另一特色是对气体润滑与温度场的耦合分析,从而使得理论分析更接近实际情况。

密封的主要目的是防止润滑剂泄漏,以及防止外界杂质如灰尘与水分等侵入,它与工程技术的关系十分密切。虽然接触式密封更加可靠,但是它会带来显著的摩擦、磨损和能量损耗。因此,在高速或精密机械中会更多采用非接触密封。非接触密封装置更加节能,使用寿命更长。在本书中,不仅介绍了气体密封基本理论,更是深入讨论了热弹流润滑在高压气体端面密封中的应用。此外,本书在气体动载端面密封、冷凝析水端面密封和型槽技术等方面都做了详细的讨论。

白少先教授长期从事润滑与密封技术的研究,在清华大学摩擦学国家重点实验室研读博士后期间和本书成书过程中,多次得到温诗铸院士的指点,为本书添色不少。白少先教授在润滑与密封研究中取得的丰硕成果,以及他的创新精神给人留下了深刻印象。本书是从事这方面研究和应用的科学工作者和工程技术人员的一本不可多得的参考书。希望读者在阅读本书之后能够获得所需的信息和期望的收获。

黄 平

2016年6月于广州

前言

FOREWORD

气体润滑是流体润滑的一种形式,采用空气或工质气体作为润滑剂将两相对运动的摩擦副隔开,具有摩擦阻力小、工作精度高、适用温度范围广等优点,广泛应用于极高温和极低温、超高速和超低速、超精密等极端条件下的气体静压轴承、高速止推轴承、箔片轴承、机械密封等机械零部件和装备设计。

1854年,Hirm提出用气体做润滑剂的设想。1886年,雷诺推导出了描述流体润滑膜压力分布的雷诺方程,使人们对流体润滑原理的认识上升到理论高度。20世纪50年代,基于轴承设计需求的气体润滑理论研究得到快速发展。1959年,Elrod和Burgdorfer从理论上说明了一般工况下润滑气膜内部的温升效应可以忽略,等温假设在气体润滑分析中被普遍接受。20世纪80年代以后,磁存储技术的发展推动气体轴承膜厚从微米降低到纳米量级,气体稀薄效应、表面粗糙度等微观效应受到广泛关注,促进了气体薄膜润滑理论的发展。

随着机械装备转速的提高以及轴承部件新型结构的不断出现,气体热动力润滑问题日益突出。例如,对于 $20\mu\text{m}$ 间隙、 0.7MPa 压力、 20000r/min 转速工况下的静压气体润滑轴承,剪切热可以使润滑气膜温度升高 30°C 以上。轴承转子温升和气体黏度的增加可提高轴承刚度和阻尼系数,但是缺少充分冷却时轴承容易发生热失稳,在高速轴承设计中尤为突出。

相对于剪切流为主的轴承气体润滑而言,气体密封润滑区中还存在密封压力引起的压力流,密封气体从高压侧向低压侧泄漏流动过程中,由于体积迅速膨胀引起气膜温度降低,产生热变形等气体热动力润滑问题。1968年,John Crane公司首先研制出圆弧面螺旋槽气体润滑密封,并推出平面螺旋槽气体润滑密封产品。随着气体密封技术不断向高温、高压、高速等高参数方向发展,密封介质的多样化以及应用领域的不断拓展,表面热变形、超声速流、介质相变等气体热动力润滑问题日益增多。

本书以温诗铸院士的弹流润滑理论研究成果为基础,总结作者近年来的研究成果,以高速气体轴承和高压气体密封的润滑设计为应用背景,系统阐述了气体热动力润滑理论和设计分析方法。以典型结构的轴承和密封为对象,讨论了气体润滑分析的理论模型和润滑特性规律,并给出了具体算例数据以便读者进行对比研究。

全书共分9章,具体内容如下。

第1章 气体性质,重点研究气体一般热力过程状态分析问题,基于能量均分原理,提出了将理想气体状态方程分解为两个独立的气体方程。

第2章 气体润滑方程,主要介绍雷诺方程、能量方程、固体热传导方程与界面方程等基本润滑方程的推导,并讨论了润滑分析中的力平衡和流量守恒问题,给出了解决方法。

第3章 等温气体润滑,主要介绍滑块轴承、径向轴承、止推轴承和端面密封等典型结构的等温气体润滑建模方法和基本润滑特征。

第4章 刚性表面气体热动力润滑,主要介绍滑块轴承、径向轴承、止推轴承和端面密封等典型结构的气体热动力润滑建模方法、气膜温度分布特征和润滑特征。

第5章 端面密封气体热弹流润滑,针对高压气体端面密封,介绍考虑阻塞流效应的热弹流润滑建模方法、端面变形特征以及气体润滑规律。

第6章 端面密封气体动载热润滑,针对气体端面密封,介绍外界扰动条件下气膜刚度、阻尼等动态参数的分析方法,讨论了气膜温度对端面气体密封气膜的刚度、阻尼频域响应特性和气膜压力动态分布特征的影响规律。

第7章 端面密封冷凝析水润滑,针对高压气体端面密封,介绍高压水汽冷凝析水问题的分析建模方法和润滑规律,并讨论了液滴在气体润滑表面的运动问题。

第8章 气体端面密封型槽技术与实验,主要介绍典型密封型槽及其润滑特点、型槽加工和密封实验方法,并结合微孔端面密封实验讨论了气体密封开启方式、气膜厚度变化、泄漏率控制等润滑特性。

第9章 气体端面密封设计,主要介绍气体端面密封摩擦副的润滑设计方法和计算流程。

由于气体润滑和密封涉及的范围广泛,本书的篇幅有限,对于取材和论述方面存在的不妥和不足之处,敬请广大读者批评指正。

在本书的编写过程中,黄平教授给予了大力支持和帮助,在此致以诚挚的谢意。同时,对为本书编写给予热情支持与帮助的同事和研究生们,表示衷心的感谢。

白少先

2016年6月于杭州

目 录

CONTENTS



第 1 章 气体性质	1
1.1 气体方程	1
1.1.1 理想气体方程	2
1.1.2 指数方程	3
1.1.3 实际气体方程	4
1.1.4 气体分子自由度	4
1.1.5 比热容	5
1.2 气体黏度	5
1.3 含湿气体性质	10
1.3.1 压力	10
1.3.2 湿度	11
1.3.3 露点温度	11
参考文献	12
第 2 章 气体润滑方程	13
2.1 雷诺方程	13
2.1.1 雷诺方程推导	14
2.1.2 极坐标雷诺方程	16
2.1.3 柱坐标雷诺方程	17
2.1.4 润滑参数	17
2.2 能量方程	18
2.2.1 流体内能变化	19
2.2.2 外界对气体做机械功及能量损失	20
2.3 固体热传导方程和界面方程	22
2.4 数值分析方法	22
2.4.1 有限差分方法	23
2.4.2 流量守恒	23

2.4.3 摩擦力平衡	27
参考文献	28
第3章 等温气体润滑	29
3.1 滑块	29
3.1.1 润滑方程	30
3.1.2 边界条件	31
3.1.3 润滑性能参数	31
3.1.4 滑块动压润滑特性	32
3.1.5 发散斜滑块动压润滑特性	34
3.1.6 磁头滑块润滑特性	35
3.2 径向轴承与密封	38
3.2.1 润滑方程	39
3.2.2 边界条件	40
3.2.3 润滑特性参数	40
3.2.4 润滑特性	42
3.3 螺旋槽止推轴承	44
3.3.1 气体润滑方程	45
3.3.2 边界条件	45
3.3.3 润滑特性参数	45
3.3.4 润滑特性	46
3.4 螺旋槽端面密封	47
3.4.1 润滑方程	48
3.4.2 边界条件	48
3.4.3 密封润滑性能参数	49
3.4.4 润滑规律	49
参考文献	52
第4章 刚性表面气体热动力润滑	53
4.1 滑块	53
4.1.1 气体润滑方程	53
4.1.2 边界条件	54
4.1.3 热润滑特性	55
4.2 径向静压轴承	57
4.2.1 润滑方程组	57
4.2.2 热边界条件	58
4.2.3 热润滑特性	58
4.3 螺旋槽止推轴承	59
4.3.1 润滑方程组	60

4.3.2	边界条件	61
4.3.3	热润滑特性	62
4.4	螺旋槽端面密封	63
4.4.1	气膜温度特征	64
4.4.2	热润滑特性	68
	参考文献	69
第5章	端面密封气体热弹流润滑	71
5.1	基本方程	71
5.1.1	润滑方程组	71
5.1.2	边界条件	73
5.2	阻塞流效应	77
5.2.1	模型检验	77
5.2.2	压力分布特征	78
5.3	端面热弹变形特征	78
5.4	热弹润滑规律	79
5.4.1	端面弹性变形	80
5.4.2	端面热变形	81
5.4.3	端面热弹变形	83
	参考文献	85
第6章	端面密封气体动载热润滑	86
6.1	基本方程	86
6.1.1	动力学方程组	87
6.1.2	润滑方程组	87
6.1.3	边界条件	88
6.1.4	动态特性参数	88
6.2	等温动载润滑特性	88
6.2.1	轴向刚度和阻尼	89
6.2.2	角向刚度和阻尼	90
6.2.3	气膜幅频特性	92
6.3	刚性表面热动载特性	92
6.3.1	轴向刚度和阻尼	93
6.3.2	角向刚度和阻尼	94
6.3.3	气膜幅频特性	95
6.4	热弹流气膜动载特性	96
6.4.1	轴向刚度和阻尼	96
6.4.2	角向刚度和阻尼	97
6.4.3	气膜幅频特性	97

参考文献	98
第 7 章 端面密封冷凝析水润滑	99
7.1 基本方程	99
7.1.1 含湿气体方程	99
7.1.2 析水参数	100
7.2 气膜冷凝析水特征	101
7.3 冷凝析水规律	101
7.3.1 湿度的影响	102
7.3.2 气膜厚度的影响	102
7.3.3 密封压力的影响	102
7.3.4 转速的影响	103
7.4 润滑表面液滴运动	104
7.4.1 表面润湿模型	104
7.4.2 表面织构几何参数与润湿性	105
7.4.3 液滴运动形态	110
7.4.4 密封端面液滴吸附	113
参考文献	114
第 8 章 气体端面密封型槽技术与实验	115
8.1 端面密封型槽	115
8.2 气体密封测试	119
8.2.1 实验装置	119
8.2.2 端面型槽加工	120
8.2.3 端面形貌测试	121
8.3 密封特性实验	123
8.3.1 密封开启特性	123
8.3.2 动压特性	124
8.3.3 表面磨损	125
参考文献	126
第 9 章 气体端面密封设计	128
9.1 密封受力分析	128
9.1.1 开启力	129
9.1.2 闭合力	129
9.1.3 O 形圈摩擦力	129
9.2 密封几何参数	129
9.2.1 密封膜厚	129
9.2.2 密封端面宽度	130

9.2.3	平衡直径	130
9.2.4	密封端面与轴(轴套)间隙	130
9.3	密封性能参数	131
9.3.1	泄漏率	131
9.3.2	气膜刚度	131
9.4	密封副材料	131
9.5	密封环尺寸设计	132
9.5.1	动环尺寸设计	132
9.5.2	静环尺寸设计	133
9.5.3	端面型槽设计	134
9.6	辅助密封设计	134
9.7	密封设计流程	134
9.7.1	设计流程	134
9.7.2	设计条件	135
9.7.3	设计步骤	135
	参考文献	144

CONTENTS



Chapter 1 Properties of Gases	1
1.1 Gas State Equations	1
1.2 Gas Viscosity	5
1.3 Humidity Gas	10
References	12
Chapter 2 Gas Lubrication Equations	13
2.1 Reynolds Equation	13
2.2 Energy Equation	18
2.3 Heat Conduction Equation and Interface Equation	22
2.4 Numerical Method for Lubrication Analysis	22
References	28
Chapter 3 Isothermal Gas Lubrication	29
3.1 Sliders	29
3.2 Journal Bearing and Radial Seals	38
3.3 Spiral Groove Thrust Bearing	44
3.4 Spiral Groove Face Seals	47
References	52
Chapter 4 Gas Thermo-Hydrodynamic Lubrication of Rigid Surfaces	53
4.1 Sliders	53
4.2 Journal Bearing and Radial Seals	57
4.3 Spiral Groove Thrust Bearing	59
4.4 Spiral Groove Face Seals	63
References	69

Chapter 5	Gas Thermo-Elastic Hydrodynamic Lubrication of Face Seals	71
5.1	Fundamental Equations	71
5.2	Choked Fluid Effect	77
5.3	Characteristics of Thermo-Elastic Distortions of Seal Faces	78
5.4	Characteristics of Gas TEHL	79
	References	85
Chapter 6	Transient Thermo-Elastic Hydrodynamic Gas Lubrication of Face Seals	86
6.1	Fundamental Equations	86
6.2	Dynamic Characteristics of Isothermal Gas Lubrication	88
6.3	Dynamic Characteristics of Thermal Gas Lubrication of Rigid Surfaces	92
6.4	Dynamic Characteristics of Gas TEHL	96
	References	98
Chapter 7	Vapor-Condensed Gas Lubrication of Face Seals	99
7.1	Fundamental Equations	99
7.2	Characteristics of Vapor Condensation in Gas Lubrication Film	101
7.3	Laws of Vapor Condensation in Gas Lubrication Film	101
7.4	Movement of Liquid Drops on Gas Lubrication Surfaces	104
	References	114
Chapter 8	Surface Grooves of Gas Face Seals and Testing Technology	115
8.1	Surface Grooves of Gas Face Seals	115
8.2	Testing Technology of Gas Face Seals	119
8.3	Experimental Characteristics of Gas Face Seals	123
	References	126
Chapter 9	Design of Gas Face Seals	128
9.1	Force Analysis of Gas Face Seals	128
9.2	Geometric Parameters of Gas Face Seals	129
9.3	Performance Parameters of Gas Face Seals	131
9.4	Materials of Seal Couple	131
9.5	Dimension Design of Seal Rings	132
9.6	Design of Secondary Seals	134
9.7	Process of Seal Design and Illustration	134
	References	144



第1章

气体性质

黏度等流体特性是形成流体润滑的物质前提,由于气体的可压缩性以及密度、温度和压力存在强耦合关系,润滑气体表现出不同于液体的黏压、黏温关系。此外,气体的含水特性容易出现高压气体密封润滑中的冷凝相变问题,也使得气体润滑表现出不同于液体润滑的规律特征,但本质上取决于气体的物理性质。

本章主要介绍与润滑计算有关的气体基础知识,包括气体状态方程、黏度与压力和温度的关系、湿度与压力和温度的关系等。

1.1 气体方程

在气体润滑中,气体的流动过程也是气体状态不断发生变化的过程。一般地,气体润滑雷诺(Reynolds)方程描述了在速度剪切、挤压等外力作用下气体的宏观运动,能量方程则描述了气体与外界热量交换以及宏观机械能与气体内能的转换关系。但是,气体微观热运动状态的描述由压力 p 、密度 ρ 和温度 T 这 3 个参数描述,对于理想气体,压力、密度和温度之间的关系满足如下气体状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = R_u T \quad (1-1)$$

式中:理想气体常数 $R_u = 8.314472 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

由于理想气体状态方程中存在 3 个变量,对于一般的热力过程,即压力、密度和温度同时发生变化时,单一利用式(1-1)不能给出气体的压力、密度和温度变化数值。因此,需要建立另外一个气体方程。

布朗运动是气体或液体中的微观粒子不停进行无规则曲线运动的一种状态,于 1827 年

由英国植物学家布朗发现。1907年,爱因斯坦提出了能量均分定理。这一统计力学的基本理论认为,一个微观粒子的动能只取决于其温度,而与其大小和质量无关。但是,由于布朗运动中粒子间的高速碰撞会导致其运动方向和速度不断发生变化,使得布朗运动中单个粒子的瞬时速度测定困难,因此一直无法直接证明能量均分定理适用于布朗粒子。

2010年,得克萨斯大学的Li等人^[1]找到了一种在空气中测定布朗粒子瞬时速度的方法,直接证实了布朗粒子服从能量均分定理。

我们从能量均分原理出发,讨论和分析了气体的压力和温度表征,对于理想气体建立了独立的压力和温度方程^[2],实现了一般热力过程的气体润滑膜温度场分布求解计算。下面对基于能量均分原理的气体方程进行简要介绍。

1.1.1 理想气体方程

一般情况下,可把理想气体分子看做刚球分子。如图1-1所示,刚球分子具有 x 、 y 、 z 三个方向上的平动自由度和转动自由度。假设大量分子组成的气体系统达到平衡状态,分子每个自由度对应的能量 \bar{E}_e 相同,则单个气体分子的能量 E_{sum} 表达式为

$$E_{\text{sum}} = i_d \bar{E}_e \quad (1-2)$$

式中: i_d 是气体分子运动自由度。

假设气体温度仅是气体分子转动能量水平的宏观表征量,则有

$$T = c_T i_d \bar{E}_e \quad (1-3)$$

式中: T 为热力学温度; c_T 是温度常量系数, c_T^{-1} 表示单位温升内能的增量,即定容比热容倒数,即

$$c_T = \frac{1}{c_v} \quad (1-4)$$

根据以上假设,可进一步假设气体压力与气体的分子动能和密度有关,即

$$p = c_p \rho i_d \bar{E}_e \quad (1-5)$$

式中: c_p 是压力常量系数。

由式(1-3)和式(1-5),可得到理想气体状态方程

$$\frac{p}{T\rho} = \frac{c_p}{c_T} \quad (1-6)$$

对比状态方程(1-1),得到

$$c_p = c_T R_u \quad (1-7)$$

即

$$c_p = \frac{R_u}{c_v} \quad (1-8)$$

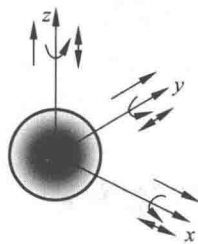


图1-1 气体分子热运动自由度示意图

式(1-3)和式(1-5)是两个独立的气体方程,分别表征了气体压力和温度与气体动能之间的关系。相对于理想气体状态方程(1-1)而言,增加了一个气体方程,实现了多变量气体润滑方程组的封闭,从而可直接定量分析一般热力过程中气体的压力、温度和密度变化规律。

1.1.2 指数方程

指数方程常用于对气体热力过程的表征和描述,下面从能量均分的原理出发对其进行推导,以检验所提出的气体温度方程和压力方程的正确性。

如图1-2所示的绝热压缩过程,取初始状态为 T_0 、 p_0 、 ρ_0 的 1mol 气体,其中截面积为 1。外力对气体做功为

$$\Delta W = -p dx = -p d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (1-9)$$

根据式(1-2),气体内能增量为

$$\Delta W' = i_d d\bar{E}_e \quad (1-10)$$

将式(1-5)代入式(1-10),得

$$\Delta W' = \frac{1}{c_p} d\left(\frac{p}{\rho}\right) \quad (1-11)$$

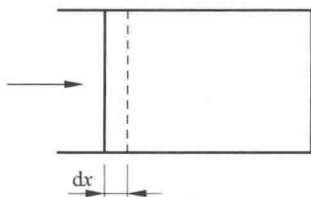


图 1-2 气体绝热压缩过程示意图

对于绝热压缩过程,有

$$\Delta W = \Delta W' \quad (1-12)$$

所以,有

$$-p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{1}{c_p} d\left(\frac{p}{\rho}\right) \quad (1-13)$$

对式(1-13)积分,得

$$-(\ln \rho^{-1} - \ln \rho_0^{-1}) = \frac{1}{c_p} (\ln(p\rho^{-1}) - \ln(p_0\rho_0^{-1})) \quad (1-14)$$

可得

$$p\rho^{-\gamma} = p_0\rho_0^{-\gamma} \quad (1-15)$$

其中, $\gamma = 1 + c_p = 1 + \frac{R}{c_v}$ 。

从式(1-15)可以看出,绝热压缩过程中气体状态呈现指数变化,与现有的理论相一致,对于空气,定容比热容 $c_v = 2.5R_0$, 所以有 $\gamma = 1.4$ 。对于一般的气体热力过程,其压力、密度和温度变化满足式(1-3)和式(1-5)。已知气体的初始状态 (T_0 、 p_0 、 ρ_0) 和最终状态 (T_1 、 p_1 、 ρ_1), 可以求得指数 γ 为

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)} \quad (1-16)$$

需要指出的是,对于一般的热力过程中的过程指数 γ 主要通过实验测量获得,因而指数方程不适合于未知规律的气体热润滑分析。

1.1.3 实际气体方程

对于实际气体,压力、密度和温度之间的关系满足如下实际气体状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = \epsilon R_u T \quad (1-17)$$

式中: ϵ 是气体压缩系数。由于气体压缩系数主要表征了气体的可压缩性对状态参数的影响,因而,需对气体压力方程进行修正,即

$$p = \epsilon c_p \rho_i \bar{E}_c \quad (1-18)$$

表 1-1 给出了氮气在不同温度、压力下的气体压缩系数。可以看出,在 10MPa 压力以下的标准室温环境下,气体压力系数变化范围小于 1%,因而在一的一般的气体润滑计算中理想气体假设是合理的。

表 1-1 不同温度、压力下氮气的气体压缩系数

压力/MPa	温度/K								
	126.9	143.2	173.2	203.2	223.2	248.2	273.2	293.2	323.2
0.101	—	0.9939	0.9968	0.9985	0.9991	0.9991	1.0000	0.9999	1.0001
1.013	—	0.9298	0.9637	0.9805	0.9866	0.9918	0.9962	0.9975	1.0005
2.027	0.7620	0.8520	0.9266	0.9587	0.9732	0.9841	0.9925	0.9961	1.0010
3.040	0.5749	0.7642	0.8892	0.9425	0.9610	0.9781	0.9894	0.9948	1.0017
4.053	—	0.6654	0.8525	0.9210	0.9495	0.9720	0.9870	0.9940	1.0030
5.066	—	0.5616	0.8172	0.9030	0.9391	0.9676	0.9848	0.9941	1.0045
6.080	—	0.4738	0.7840	0.8901	0.9298	0.9647	0.9840	0.9942	1.0065
8.106	—	0.5698	0.7307	0.8648	0.9151	0.9576	0.9835	0.9958	1.0064
10.133	—	—	0.7053	0.8554	0.9087	0.9550	0.9848	1.0016	1.0182
20.265	—	—	—	0.9174	0.9614	1.0073	1.0355	1.0537	1.0770
30.398	—	—	—	1.0828	1.0999	1.1204	1.1335	1.1454	1.1590

1.1.4 气体分子自由度

对于常温下的气体分子,可以看成是刚体,不考虑振动自由度。对于非刚性分子,如同加一个类似弹簧的振动,故而自由度需加 1。

单原子分子,如氦、氖、氩等,只有一个原子,可以看成是自由质点,所以为 3 个平动自由度。

刚性双原子分子,如氢、氧、一氧化碳分子等,两个原子之间连线距离保持不变,确定质心的位置,需要 3 个独立坐标;确定质点连线的位置,需要 2 个独立坐标;两质点绕连线的