

力学丛书·典藏版 —19

激波和高温流体动力学 现象物理学 (上册)

[苏] Я. Б. 泽尔道维奇 著
Ю. П. 莱依捷尔

LX



科学出版社

力学丛书·典藏版 19

激波和高温流体动力学现象

物理学

上册

藏书

[苏] Я. Б. 泽尔迪奇 著
Ю. П. 莱依捷尔

张树材 译

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是关于物理气体动力学方面的系统理论著作。书中介绍了气体动力学基础、激波理论和辐射输运理论。对于高温高压下物质的热力学和光学性质、离解和电离等一些非平衡过程的动力论、在激波中和爆炸时所出现的与光辐射和辐射热交换有关的各种现象、激波在固体中的传播等问题,都进行了很好的研究,其中有许多地方是属于作者自己的贡献。

本书可供从事应用物理和新技术的物理工作者、力学工作者、工程师及相应专业的大学生、研究生阅读。

原书共十二章。中译本分上、下两册出版。上册包括前六章。

图书在版编目(CIP)数据

激波和高温流体动力学现象物理学. 上册 / (苏)泽尔道维奇等著; 张树材译. —北京: 科学出版社, 2016.1

(力学名著译丛)

ISBN 978-7-03-046978-6

I. ①激… II. ①泽… ②张… III. ①激波 ②高温—流体动力学
IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 006920 号

责任编辑: 赵彦超 赵敬伟 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1980 年 10 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

2016 年 3 月第二次印刷 印张: 15

字数: 393,000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译 者 的 话

本书是物理气体动力学方面第一部相当完整的理论著作。作者用统一的观点、科学的方法系统地总结、归纳和整理了这一新的科学领域内的大量的理论工作和实验资料。从而对于气体动力学，激波理论，物质在高温高压下的热力学性质和光学性质、离解、电离、化学反应等一些非平衡过程的动力学(кинетика)，在激波中和强爆炸时所发生的与光辐射和辐射热交换有关的各种现象，激波在固体中的传播等许多方面的问题都进行了很好的研究。书中有许多地方是属于作者自己的贡献。

在阅读中译本时，请读者注意以下两点：

1. 本书既涉及宏观的流体“动力学”(динамика)，也涉及微观的气体“动力学”(кинетика)，而且两个“动力学”往往是同时进行的。按照我国的习惯，“динамика”和“кинетика”都应译为“动力学”。但是，为了区别这两个意义不同的名词(及其相应的形容词)，在中译本中对后一个(微观的)“动力学”(及其相应的形容词)译为“动力论”。

2. 虽然在我国统计物理学书籍中习惯于使用“配分函数”和“求配分函数”的概念，但是为了尊重原文，在中译本中仍将上述两个概念按照原文的意思分别译为“统计和”和“统计求和”，因为这从物理意义上讲乃是更为恰当的。

在翻译过程中，曾得到许多同志的支持和帮助，谨在此向他们表示衷心的感谢。他们是：刘激扬、王佩璇、高鸿元、洪凤云等。特别要感谢承担本书校阅工作的同志们：王继海、蒲洪章、关吉利、张钧、邹桃沅、孙晓云、杜书华、高飞、徐华生、李维新、贾宝琳、庄峰青、沈青。

由于本人水平有限，译文中错误、疏漏之处在所难免，欢迎读者批评指正。

张树材

原 书 第 二 版 序 言

在第二版中,书的总体结构和大部分原文仍然保持不变。但有几个部分经过了重大的修改并补充了相当数量的新材料。在第五章增加了一部分有关在聚焦的激光束作用下气体的击穿(猛烈电离)和加热过程的内容,这乃是强大光流与物质相互作用范围内的一些极有趣的现象之一。在几年以前,即在能给出高达几十兆瓦以上的巨大脉冲功率的激光器被建造出之后不久,它就在实验上被发现了,并立即引起了很多物理学家的注意(其中也包括本书的作者,我们曾发表了几篇关于该现象理论方面的文章)。

因考虑到在激光辐射作用下的气体电离的某些问题,故在第五章中增加了几节,在这几节中我们研究了由自由电子在与中性原子碰撞时所引起的光的辐射和吸收。目前对激光所表现出的浓厚兴趣,促使我们(在第二章)写了专门的一节,用来半经典地讲解诱导发射和激光效应。

第六章的第3部分有很大的变化,在那里我们研究了电离、复合和电子激发等问题。这一部分实质上是重新写过的,并因考虑到一些新近的见解而被大大地增加了。依照这些见解,在这些过程中原子的分级电离(首先是激发,然后才是电离)和三体碰撞时原子的上部能级对电子的俘获,以及随后的由电子轰击和辐射跃迁所引起的激发原子的退激,都起着重要的作用。我们比较详细地研究了空气的电离。对激波中气体电离的一些相近问题的叙述也作了改动(在第七章)。

重新写了第八章中的几节,它们涉及到电离度变化的动力学论¹⁾和当电离化气体向真空飞散时所发生的“淬火”效应。这一问

1) 本书中经常出现 *кинетика* 和 *динамика* 两个词,在翻译时我们把前者译为动力学论,后者译为动力学以示区别。——译者注

题在不久以前曾因考虑到上述见解而被重新研究过。

在第十二章中,根据第一版的材料和一些新的结果,我们专门分出了一部分,论述激波在密度为指数分布的非均匀大气中的传播。书后增加了一个附录,其中汇集了一些当按照本书的论题进行实际工作时所要经常碰到的常数、原子常数间的关系、单位间的关系和一些公式。参考文献中增加了一些近年工作的索引。

以上所提到的并不是所有的而只是一些主要的变动和补充。当然,我们也对所发现的第一版中的错误和错字进行了订正。

本书所涉及到的一些物理和力学的领域,其发展是异常迅速的,并且它们的应用有了越来越新的对象(例如,气体在激光束聚焦中的击穿和加热的现象)。

这些科学领域使人感到兴趣,其证明之一就是在本书(第一版)刚一问世之后不久,美国的出版社就开始把它译成英文。我们希望这次修订增补的第二版能够对在与本书的专业相近的科学和技术领域内进行工作的专家或开始进入这些领域的读者有所裨益。我们感谢那些指出本书第一版中不够确切和有印刷错误之处的同事们。

原 书 第 一 版 序 言

一些近代的技术问题，要求科学深入到物质状态的“高参数”的领域，即大能量密度、高温、高压和高速度的领域。在实践中，这样一些条件存在于强大的激波里，存在于爆炸和物体在大气中作高速超声运动的时候，并存在于强大的放电等一些现象之中。

在高温下，气体中要进行各种各样的物理和物理-化学的过程：分子振动的激发、离解、化学反应、电离、光辐射等等。这些过程要影响到气体的热力学性质，而当运动足够快和物质状态的变化足够快时，上述各种过程的动力论就要影响到运动。当温度很高时，与辐射的发射和吸收有关的各种过程以及辐射热交换将起着特别重要的作用。上面所列举的各种过程常常使我们感到兴趣，不仅仅是从它们对于气体运动在能量上有所影响这一角度，而且它们还会引起气体组分、气体电学性质的变化，还能导致气体的发光和许多光学效应的产生，等等。本书相当大的部分就是用于研究所有这些属于一个完全崭新的科学分支——“物理气体动力学”的问题。

对固体中强激波的研究有着很大的科学和实际的意义。利用激波压缩固体，达到几百万个大气压的这些最新成就，揭开了研究超高压下固体物质状态的新途径。在书中对于这些问题也给予了很大的注意。

在所叙述的这一领域内，科学的许多分支：气体动力学、激波理论、热力学与统计物理、分子物理、物理和化学动力论、物理化学、光谱学、辐射理论、天体物理基础、固体物理等是紧密地交织在一起的。这里所要研究的一些物理现象和过程，有很多具有不同的特点，它们之间并没有任何联系。由于材料是如此的多样性，所

以在本书内容上就缺乏一个中心。有些章有着自己的固有特点，从而分属于完全不同的物理或力学的领域，并非所有各章之间都存在着联系。因此对于那些仅对某些问题感到兴趣的读者来说，了解相应的章节也就够了。

当研究各种极不相同的问题，甚至带有数学特性的问题时，我们总是力图借助最简单的数学工具，广泛地利用估计和半定性的分析，首先来阐明现象的物理实质。同时，我们也力图帮助那些在相应的应用物理和技术的领域内工作的物理学工作者、力学工作者和工程师，给予他们以独立地分析各种复杂的物理现象的实用工具。

出于这一目的，大多数现象的研究都给出了数值结果，关于各种量的计算和估计的公式都写成了适用于实际工作的形式，引证了许多有用的实验资料和具有参考性质的知识，如此等等。

本书具有理论书籍的特点，对于实验装置和方法的叙述被压缩到最小程度。但是对于实验结果的说明，以及它们与理论计算和估计结果的比较，却给予了应有的注意。

关于“物理气体动力学”方面的期刊文献是大量的。但是，据我们所知，无论是在苏联的还是在其他国家的文献中，还没有人企图在一本书中用统一的观点来系统地总结和说明这一新的科学领域内的材料。看来，本书是这个方面的第一个尝试。

本书是在1960年—1961年期间写成的，这就决定了所应用文献的基本水平。但是，在涉及到有些问题的概念正在迅速改进的那样一些部分里，后来曾增加了一些简短的补充和征引了一些新的文献。这基本上是属于第五、第六和第七章。

现象的繁多和材料的广泛性，迫使我们限制研究的范围，而不去包括与所研究的这一领域有关的所有问题。我们没有研究流体动力学的数学方面的问题，比如象物体被超声流绕流的问题，也几乎没有提到电磁现象，更完全没有涉及到热核的聚合、等离子体在磁场中的行为以及所有那些属于磁气体和磁流体动力学以及燃烧和爆轰等问题。关于所有这些部分已经有了不少著作。

本书材料的选取，在一定程度上是比较主观的。有许多地方是用来研究作者们在自己的工作中曾经探索过的一些现象。例如，第八章和第九章就几乎完全是建立在一些原有工作的基础之上的，在很大程度上这样做的还有第七章、第十章和第十二章，部分的有第十一章。本书第一章是由其中一位作者从前写过的一本书《Теория ударных волн и введение в газодинамику》（中译本：Я. Б. 泽尔道维奇，《冲击波理论和气体动力学导论》，国防工业出版社，1962）彻底改写的结果。

（下略）

目 录

第一章 气体动力学的基础和激波的经典理论

1. 非粘性和非热传导气体的连续流..... (1)
 - § 1. 气体动力学方程 (1) § 2. 拉格朗日坐标 (4)
 - § 3. 声波 (7) § 4. 球面声波 (13) § 5. 特征线 (15)
 - § 6. 平面等熵流。黎曼不变量 (19) § 7. 有限空间中气体的平面等熵流 (24) § 8. 简单波 (27) § 9. 在有限振幅的行波中其剖面的变形。简单波的一些性质 (30)
 - § 10. 稀疏波 (33) § 11. 中心稀疏波可作为气体自模运动的一个例子 (38) § 12. 不可能存在中心压缩波 (44)
2. 激波..... (45)
 - § 13. 气体动力学中激波概念的引入 (45) § 14. 激波的绝热曲线 (50) § 15. 比热不变的理想气体中的激波 (51)
 - § 16. 激波压缩规律性的几何解释 (56) § 17. 在具有正常热力学性质的物质中不可能存在稀疏的激波 (60) § 18. 弱强度激波 (63) § 19. 具有反常热力学性质的物质中的激波 (68)
3. 气体动力学中的粘性和热传导..... (70)
 - § 20. 气体一维运动方程 (70) § 21. 关于第二粘性系数的说明 (74) § 22. 关于声音吸收的说明 (75) § 23. 弱强度激波之阵面的结构和宽度 (76)
4. 某些问题..... (86)
 - § 24. 任意间断的传播 (86) § 25. 均匀大气中的强爆炸 (94) § 26. 强爆炸的近似研究 (99) § 27. 关于考虑反压的点爆炸的说明 (101) § 28. 气体球向真空的绝热飞散 (104) § 29. 气体球向真空飞散的自模运动 (107)

第二章 介质中的热辐射和辐射热交换

§ 1. 引言和基本概念 (111) § 2. 气体中光的发射、吸收和散射的机制 (115) § 3. 平衡辐射和绝对黑体 (120) § 4. 强迫发射(123) § 4a. 经典理论和量子理论中的强迫辐射及激光效应(126) § 5. 辐射输运方程 (133) § 6. 辐射强度的积分表示式 (136) § 7. 平面层辐射 (138) § 8. 非均匀受热物体之表面的等效温度或亮度温度 (143) § 9. 考虑辐射热交换时物质的运动 (146) § 10. 扩散近似 (150) § 11. “向前-向后”近似 (156) § 12. 局部平衡和辐射热传导近似 (158) § 13. 扩散近似和辐射热传导近似之间的相互关系 (160) § 14. 星体光球中的辐射平衡 (163) § 15. 平面光球问题的解 (168) § 16. 受热物体的辐射能量损失 (171) § 17. 考虑辐射能量、辐射压力和辐射热交换的流体动力学方程 (175) § 18. 作为经典电磁场不变量的量子数 (179)

第三章 高温气体的热力学性质

1. 由无相互作用的粒子所组成的气体 (183)
 - § 1. 比热和粒子数不变的理想气体 (183) § 2. 用统计求和法计算热力学函数 (186) § 3. 双原子分子的离解(191) § 4. 化学反应 (197) § 5. 电离和电子激发(201) § 6. 原子的电子统计和及原子的激发能的作用 (208) § 7. 多次电离范围内的近似计算方法 (211) § 8. 插值公式和等效绝热指数 (218) § 9. 离解和电离条件下的激波绝热曲线 (220) § 10. 考虑平衡辐射时的激波绝热曲线 (225)
2. 由具有库仑相互作用的粒子所组成的气体 (227)
 - § 11. 稀薄的电离气体 (227) § 12. 稠密气体。电子气体的费米-狄拉克量子统计基础 (231) § 13. 托马斯-费米原子模型和冷物质的强压缩 (235) § 14. 用托马斯-费米方法计算高热稠密气体的热力学函数 (242)

第四章 激 波 管

- § 1. 激波管在物理-化学动力论研究中的应用 (246) § 2. 作用原理 (247) § 3. 激波管的基本理论 (249) § 4. 电磁激波管 (253) § 5. 各种量的测量方法 (257)

第五章 高温气体中辐射的吸收和发射

- § 1. 引言. 电子跃迁的类型 (260)
1. 连续谱 (263)
- § 2. 离子库仑场中的电子的韧致辐射 (263) § 2a. 在被中性原子散射时电子的韧致辐射 (270) § 3. 热电离气体中的自由-自由跃迁 (273) § 4. 伴随有量子发射的离子对电子俘获的有效截面 (277) § 5. 电子束缚-自由跃迁时原子和离子吸收光的有效截面 (280) § 6. 由类氢原子组成的气体中的连续吸收系数 (285) § 7. 单原子气体在第一次电离范围内对光的连续吸收 (289) § 8. 原子多次电离时气体中的辐射平均自由程 (294) § 8a. 弱电离气体中的光吸收 (300)
2. 原子的线状谱 (302)
- § 9. 谱线的经典理论 (302) § 10. 谱线的量子理论. 振子强度 (307) § 11. 类氢原子的吸收光谱. 关于谱线对罗斯兰德自由程之影响的说明 (312) § 12. 连续区的振子强度. 和数定理 (318) § 13. 谱线的辐射 (320)
3. 分子的带状谱 (324)
- § 14. 双原子分子的能级 (324) § 15. 分子光谱的结构 (329) § 16. 富朗柯-康顿定则 (333) § 17. 伴随有光发射的分子跃迁的几率 (336) § 18. 谱线内的光吸收系数 (342) § 19. 高温时的分子吸收 (344) § 20. 高温时的分子吸收系数的精确计算 (348)
4. 空气 (352)
- § 21. 热空气的光学性质 (352)
5. 在聚焦的激光束作用下气体的击穿和加热 (361)

§ 22. 击穿 (361) § 23. 在初期击穿之后气体对激光束的吸收和气体的加热 (366)

第六章 气体中弛豫过程的速度

1. 分子气体	(373)
§ 1. 热力学平衡的建立 (373) § 2. 分子转动的激发 (376)	
§ 3. 分子振动能量弛豫的动力论方程 (378) § 4. 振动激发的几率和弛豫时间 (381)	
§ 5. 双原子分子离解的动力论方程和弛豫时间 (387)	
§ 6. 原子复合的速度和双原子分子离解的速度 (389)	
§ 7. 化学反应和活化络合物法 (394)	
§ 8. 氮的氧化反应 (399) § 9. 高温下二氧化氮的生成速度 (405)	
2. 电离和复合, 电子激发和退激	(409)
§ 10. 一些基本机制 (409) § 11. 由电子轰击所引起的未激发原子的电离 (413)	
§ 12. 由电子轰击所引起的原子从基态的激发, 退激作用 (417)	
§ 13. 由电子轰击所引起的激发原子的电离 (419)	
§ 14. 原子激发态之间的轰击跃迁 (424)	
§ 15. 由重粒子轰击所引起的电离和激发 (427)	
§ 16. 光致电离和光复合 (431) § 17. 三体碰撞时的电子-离子的复合(初级理论) (436)	
§ 18. 关于三体碰撞复合的比较严格的理论 (438)	
§ 19. 空气中的电离和复合 (444)	
3. 等离子体	(447)
§ 20. 等离子体中的弛豫 (447)	
附录	(454)
参考文献	(459)

第一章 气体动力学的基础和 激波的经典理论

1. 非粘性和非热传导气体的连续流

§ 1. 气体动力学方程

为了把液体(和固体)压缩到可以觉察的程度,需要几十万个大气压以上的压力。因此在通常的条件下液体可以看成是不可压缩的介质。在密度变化很小时,液体流的速度要比声速小很多,后者是一个能表征连续介质的速度尺度。在密度变化不大和运动速度与声速相比为小量时,气体也可以被认为是不可压缩的,并借助不可压缩液体的流体动力学来描写它的运动。但是,与液体不同,在气体中显著的密度变化和可与声速相比的流速是比较容易达到的:这是发生在压差近于压力本身量级的时候;如果气体的初始压力为一个大气压,那么这即是发生在 $\Delta P \sim 1$ 大气压的时候。在这样一些条件下就必须要考虑物质的压缩性。气体动力学方程与不可压缩液体的流体动力学方程不同之处是,在其中要考虑物质密度发生很大变化的可能性。

具有已知热力学性质的运动气体的状态,取决于作为坐标和时间之函数的速度、密度和压力的确定。气体动力学的方程组就是用来求解这些函数的,这个方程组就是用微分形式所表述的普遍的物质的质量、冲量¹⁾和能量的守恒定律。

我们不加推导地写出这些方程,其推导,例如可在 Л. Л. 朗道和 Е. М. 栗弗席兹的书[1]中找到。我们略去质量力(重力)的作

1) 本书中提到的“冲量”有些应理解为“动量”。——校者注

用,以及物质的粘性和热传导¹⁾。用 $\partial/\partial t$ 来表示属于空间某一点的对时间的偏导数,即当地导数,而用 d/dt 来表示实质导数,它表明与物质的确定的运动质点²⁾相关的某一个量随着时间的变化。如果 $\mathbf{u}$ 是质点的速度矢量,而其分量为 u_x, u_y, u_z , 或 u_i , 其中 $i=1, 2, 3$, 那么

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla). \quad (1.1)$$

第一个方程——连续性方程——说明了物质的质量守恒,即某个体积元内密度 ρ 的变化是由于物质流进(或流出)这个体积元所引起的:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{u} = 0. \quad (1.2)$$

借助定义(1.1),连续性方程可以写为如下形式:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0. \quad (1.3)$$

特别是在不可压缩液体的情况下, $\rho = \text{常数}$, 连续性方程简化为:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0. \quad (1.4)$$

第二个方程反映的是牛顿定律,它与不可压缩液体的运动方程没有什么差别(p 是压力):

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p, \quad (1.5)$$

或者,用欧拉方程的形式,

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p. \quad (1.6)$$

正如通过直接计算所容易验证的那样,运动方程同连续性方程一起就等价于用类似方程(1.2)的形式所写出的冲量守恒定律:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i = -\frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k}, \quad (1.7)$$

1) 考虑粘性和热传导的气体动力学方程,将在后面 §20 中讨论。

2) 在本书所有的地方,我们都要把“质点”理解为含有足够数量的分子或原子的物质微元。——译者注

其中 Π_{ik} 是冲量流密度张量

$$\Pi_{ik} = \rho u_i u_k + p \delta_{ik}. \quad (1.8)$$

方程(1.7)反映出一个事实,即在空间某一点冲量第 i 个分量的变化,是与冲量随同物质的流出(流进)((1.8)中的第一项)和压力所作的功(第二项)有关¹⁾。

第三个方程与不可压缩液体的流体动力学方程相比实质上是个新的,它等价于热力学第一定律——能量守恒定律。可以这样来叙述它:物质某一质点的比内能²⁾ ε 的变化,是由周围介质对它所作的压缩功,及外源所放出的能量而引起的,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + p \frac{dV}{dt} = Q. \quad (1.9)$$

这里 $V=1/\rho$ 是比容,而 Q 是在 1 秒之内由外源给予 1 克物质的能量(Q 可以是负的,如果有能量的非力学损失的话,比如辐射损失)。

借助连续性方程和运动方程,能量方程也可以写成类似于(1.2),(1.7)的形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right) = - \operatorname{div} \left[\rho \mathbf{u} \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) + p \mathbf{u} \right] + \rho Q. \quad (1.10)$$

这个方程的物理意义就在于,在空间某一点单位体积内总能量的变化,是由物质运动时能量的流出(流进)、压力所作的功和外源所放出的能量而引起的。

连续性方程、运动方程和能量方程组成了一个含有五个方程的方程组(运动方程是矢量方程,它等价于三个坐标分量的方程),而这个方程组含有五个未知的坐标和时间的函数: ρ, u_x, u_y, u_z, p 。外源能量 Q 认为是给定的,而内能 ε 可由密度和压力来表示,因为假定物质的热力学性质是已知的: $\varepsilon = \varepsilon(p, \rho)$ 。

就像通常那样,如果已知的能量不是作为压力和密度的函数,

1) 公式(1.7)的右端要按出现两次的脚标 k ($k=1, 2, 3$) 求和;当 $i=k$ 时, $\delta_{ik}=1$, 当 $i \neq k$ 时, $\delta_{ik}=0$ 。

2) 在本书中凡带有“比”字的量,如比容、比热、比熵等,都是按单位质量计算的。
——译者注

而是作为温度 T 和密度, 或温度和压力的函数, 那么在方程组中还应加上物质的状态方程 $p=f(T, \rho)$ 。理想气体的状态方程具有如下形式:

$$pV=AT, \quad p=A\rho T, \quad (1.11)$$

其中 A 是按 1 克物质计算的气体常数¹⁾。

能量方程(1.9)具有普遍的意义, 甚至当物质不是处于热力学平衡的时候也是正确的。在那种特殊的而实际上又是最重要的, 即物质在热力学上达到平衡的情况下, 借助热力学第二定律

$$TdS=d\varepsilon+p dV, \quad (1.12)$$

可以将它改写为另外的形式, 这里的 S 是比熵。当没有外热源时, 气体动力学的第三个方程就等价于质点的熵为常数的方程, 即等价于运动的绝热性条件

$$\frac{dS}{dt}=0. \quad (1.13)$$

在比热不变的理想气体中, 熵可以特别简单地由压力和密度(比容)来表示:

$$S=C_V \ln p V^\gamma + \text{常数}, \quad (1.14)$$

此处 γ 是绝热指数, 它等于定压比热和定容比热的比值 $\gamma=c_p/c_v=1+A/c_v$ 。在这种情况下, 绝热性方程(1.13)(或能量方程)可以直接写为联系压力和密度(压力和体积)的微分方程的形式:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} + \gamma \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = 0. \quad (1.15)$$

还要给气体动力学微分方程组加上适当的初始条件和边界条件。

§ 2. 拉格朗日坐标

将气体动力学的量看成是空间坐标和时间的函数的方程, 叫做欧拉方程, 或欧拉坐标系中的方程。

在一维运动的情况下, 即在平面的、柱对称的和球对称的运

1) $A=R/\mu$, 其中 R 是普适气体常数, μ 是分子量。