

K. Oswatitsch
GAS DYNAMICS
(英譯者: G. Kuerti)
Academic Press 1956

內 容 簡 介

作者奧斯瓦梯許在高速流动方面做过許多工作。这是可压缩流体空气动力学方面一本概論式的书。作者根据自己的經驗对許多基础的理論作了精辟的闡述。本书的特色是将数学方法和明晰的物理意义融汇貫通。

本书闡述了一維的定常流和非定常流、一般的流动方程和定理、积分形式各方程的一些具体应用例子、定常无粘流的一般方程和一些精确特解、亚声速的和超声速的定常无粘平面流动和軸对称流动、定常无粘跨声速流动、定常和非定常的三維流动問題、粘性影响以及实验方法。

本书适于流体力学专业的学生、研究生和有关工程师作参考。

气 体 动 力 学

〔西德〕K. 奧斯瓦梯許 著

徐 华 舫 译

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

商务印书館上海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 7 月 第 一 版

开本: 850×1168 1/32

1965 年 7 月 第一次印刷

印张: 21 7/16 插頁: 6

印数: 0001—3,350

字数: 544,000

統一书号: 13031·2092

本社书号: 3198·13—2

定价: [科七] 4.20 元

序 言

气体动力学所研究的是可压缩介质的流动。它是流体动力学理论的一般形式，而把液体（不可压缩流体）的经典流体动力学作为特殊情况包括在其中。将流动介质视为不可压缩介质时，气体动力学里的诸基本定理以及定理中所包含的许多普遍命题（如相似律、伯努利方程、渦定理等）仍都是成立的。

气体动力学的初期研究（现在仍有实际意义）始于十九世纪。简单波（第 3.27 节）的研究可以追溯到泊桑（Poisson, 1808 年）。圣·维南（Saint-Venant）和万采尔（Wantzel）^{[2, 5]*} 在 1839 年发表的一篇文章里研究了气体在高压下的外射流动。1860 年黎曼（Riemann）^[3, 1] 发表了关于有限振幅波在空气中传播的重要论文。压缩冲激波的基本理论是阮金（Rankine, 1870 年）^[2, 6] 和雨果纽（Hugoniot, 1887—1889 年）^[2, 7] 提出来的。同一时期，马赫（E. Mach）^[6, 20] 发表了他关于抛射体以超声速运动时所产生的波的观察。摩侖勃吕克（Molenbroek）^[6, 9] 论气体势流的一篇文章也是在同一时期发表的；维尔（P. Vieille）^[3, 28] 关于管中压强突跃的扯平过程的分析发表在 1900 年以前。阿达玛（Hadamard）（见书末的文献表）关于波的传播的讲义问世于本世纪之初。这本著作和瑞利（Rayleigh）的“声之理论”（该书初版的问世约早三十年）里面有好多东西只到最近才成为气体动力学中的重要内容；瑞利的专著对于小扰动法说来，尤其是一本重要的奠基性的读物。恰普雷金（С. А. Чаплыгин）论气体射流的名著^[6, 11] 也发表于本世纪之初。气体动力学的系统研究是在普朗陀（Prandtl）的领导之下开始

* 这里角注[2, 5]表示见第二章参考文献[5]。序言中均如此表示，与各章中的表示法不同。——译注

于哥廷根(Göttingen). 有些早期的研究成果,在迈益(Meyer)^[8, 52]的一篇学位论文(1908年)中作了概括,这些东西现在已经成了常识了. 第一次世界大战之后,气体动力学方面的兴趣大增,目前已发表的东西数目多到几乎不可能对已有的文章做一个完全的分析报道.

在这本书里,流动介质是当作連續介质看待的;属于气体分子运动論的問題,书里不談. 即使如此,范围仍然太广,因为連續分布的介质的动力学不仅仅包括加热的和不加热的发动机中的内部流动,以及繞过各种物体的外部流动,也該包括整个的声学 and 气象学,这还没有包括天文学中所发生的气体动力学問題. 这就需要进一步加以限制,这限制仍具有一定程度的任意性,因为不可能划出气体动力学与它的相邻学科之間的绝对清晰的界限来. 我們可以不考虑重力的影响,并完全略去科里奥利力,从而把气象学除外. 声学 and 气体动力学在基本問題的說法上是有明显区别的,尽管有限振幅波的傳播和声波的傳播是密切相关的. 小振幅的顫振是处于气体动力学和声学之間的一种問題,本书对于这方面的問題只是偶尔涉及,例如在相似律中提一下. 尽管对流动气体加热已成为許多具有重大理論意义和实际意义的问题了,本书中却只談少数几个典型的简单流动. 边界层理論只讲絕热壁面的情况,因为考虑壁面有热傳导的情况已有許多專門的論著.

气体动力学的一般定理都尽可能按物理上是均匀的任意介质来推导的,然而一些特例通常却是就比热为常数的完全气体做推导的.

典型的气体动力学問題总是密度有相当大的变化的問題. 可以指出使密度发生变化的两种情况: 其一是通过大压力差以获得大的气动力作用时所不可避免的(例如热机中、枪炮中、爆震波等的流动); 另一种是这样的事实(这是不希望的),随着飞行速度的增高,空气越来越来不及避开飞来的物体了,終至造成气流截面收缩,气体受到压缩. 另一方面,当速度足够小的时候,密度簡直就保

持为常数了,不論介质是气体还是液体(这就成了不可压缩流动)。

本书重点在于把气体动力学的物理问题和工程问题作清晰的具有直观意义的论述,輔以对某些基本的实验结果的研究。虽然确有吸引人的数学问题出现,但书中只把数学当作一个立式子和表达的工具用。物理的推理和解释、物理的结果和例子,只要已经到了能引入的地方便立即引入。但这本书并不是工程手册,航空工程师会觉得,他所要解决的具体问题在本书中大多数没有做出来。他得自己去做,或是到给出的参考文献里去找解答,但他会发现本书中给出了许多不同形式的基本方程和重要公式,而且还附有数值表和图线,这些对他都是有用的。

第一章是单独气体微团的热力学,并检验了最常用的完全气体这个假设是否可用。第二章是定常气流的简单的“水力学”处理法*;第三章里,把这种准一维理论用于非定常流动过程,包括柱波和球波的传播。这一章有些题目既属于气体动力学又属于声学。

第四章里讲可压缩流体力学的一般方程组。和一维的情况一样,先建立积分定理,也就是有限大小的一块流体所遵从的方程。这里我们就可以把冲激波包括进去了;如果基本关系式都用微分形式的話,冲激波是包括不进去的。然后把适当变换之后的积分定理应用于一空间微元,即可得到微分方程组。一般的方程组里包含了許多重要的一般命题。在第五章里做了一些直接应用积分定理的例子。

第六章里推导了“定常流气体动力学”所依据的全部的定常流动关系式。这里提出的精确解在定常亚声速流(第七章)、定常超声速流(第八章)和定常跨声速流(第九章)都一样适用,这三章定常流,彼此之间的关系是很密切的,而第八章的定常平面超声速流和定常轴对称超声速流和第三章的一维非定常流却也有許多共同点。

平面非定常流和三維定常超声速流之間也存在着許多类似的密切关系。不过,特殊的錐型流是和平面亚声速流有密切关系的。

* 意指一维流处理法。——譯注

这些更复杂的情况(假定为小扰动)放在第十章里讲。

粘流問題在第十一章(边界层理論)里讲,略去了目前流行的半經驗紊流理論。这方面还缺乏滿意的理論基础,較之不可壓縮流的問題更缺乏。第十二章讲实验技术,主要讲定常流的量測技术,只需要第二章作先修知識。流动的模拟法是从理論关系上提出来的,却不失为实验技术的一个部分。风洞修正也是这样。

在本书的德文版問世以来的短短時間内,气体动力学的研究一直以日益增长的速度在进行着,要想把**全部**文章都加以总结是日益困难了。在讲分析方法和計算方法时,从未做过全书式的求全打算,书中所做的必要选择是反映了作者的喜爱的,但即使在基本理論的論述上,所期望的全面論述也沒有完全做到。

定常跨声速流(第九章)的研究,进展得很慢,令人滿意的綜合論述目前还未見到*。另一方面却已有了很丰富的从綫化流动理論推导出来的結果。所以第十章中所讲到的只是綫化方法已有結果中較小的一部分。至于紊流(第十一章),我們仍不得不滿足于不太多的結果。

在英文版的准备工作中,許多地方作了改进,許多方程的建立更为严謹了。因此,依我个人看,本书的內容在翻譯中得到了提高。这大部分得归功于奎尔蒂(Kuerti)教授胜任的辛勤的工作。我特別感謝他的卓越合作。

我还得感謝維也納斯普灵格出版社(Springer-Verlag)的奥图·兰格(Otto Lange)先生,得到他的許可才在文献表中将最近的文章包括在内;我还感謝我的几位同事,本恩特(S.B. Berndt),德劳格(G. Drougge),金采尔(Ginzel),凌来勃(F. Ringleb),范得雷(F. Vandrey),他們提出了数处有价值的建議。

K. 奧斯瓦梯許

于阿亨, 1956年3月

* J. R. Spreiter 于 1959 年写过一篇較全面的跨声速流总结文章(載于 J.A./S. S., Aug., 1959)。——譯注

英 譯 者 序

奧斯瓦梯許博士的“气体动力学”1952年出版后不久，我就熟諳这本书了。这本书是根据普朗佗的精神写的，但却处处反映了作者自己的見解和經驗，这书对我來說是一本十分感人的讀物，因为奧斯瓦梯許博士，当他要想表达某种突出的相互关系或統一的想法时，总是从不迟疑地拋却慣常用的解說方法。具有同感的朋友們和同事們都鼓励我进行本书的翻譯工作。

其間，关于高速空气动力学，写得很好的全书式的专著，已經出版不止一本了；但在英文书籍中仍給一本中等篇幅的气体动力学留有一个位置，这本书把严謹的和富于設想的基础与对高級的解析方法的評述結合在一起，后者是超出通常的航空工程教科书范围的。

在英文版的准备工作上，我得到了奎尔蒂夫人 (Mrs. R. Kuerti) 的珍貴合作。小包侖 (H. E. Boren, Jr.) 先生帮我校訂底稿，还有克拉斯諾夫 (E. L. Krasnoff) 先生帮我校对。我还要感謝凱斯工学院 (Case Institute of Technology) 的同事們关于符号和名詞的建議。最重要的是，我得感謝奧斯瓦梯許博士，他和我一起担負了长期的技术上的联系工作。

G. 奎尔蒂

克利夫兰，1956年6月

縮写字母

(参考文献中所用到的縮写字母)

- AVA 哥廷根空气动力学研究所。
Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen.
- ETH-AERO MITT 苏黎世同盟工业大学空气动力学院通报。
Mitteilungen aus dem Institut für Aerodynamik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.
- FB 航空研究科学报告中央局报告, 柏林。
Forschungsbericht der Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen für Luftfahrtforschung, Berlin.
- FFA Medd 瑞典航空研究院报告, 斯德哥尔摩。
Flygtekniska Försöksanstalten Meddelanden, Stockholm.
- KTH AERO-TN 瑞典皇家科技大学-航空学院(斯德哥尔摩)技术札记。
Kungl. Tekniska Högskolan-Institutionen för Flygteknik, Stockholm, Technical Note.
- KWI 威廉凯萨研究所。
Kaiser Wilhelm Institut.
- Lufo 航空研究(期刊), 柏林。
Luftfahrtforschung, Berlin.
- MIT (美)麻省理工学院, 剑桥。
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U. S.
- NACA TN, TM 美国航空咨询委员会的技术札记和技术备忘录。
National Advisory Committee for Aeronautics, U. S., Technical Note, Technical Memorandum.
- R. & M. 英国航空研究委员会的报告与备忘录。
Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda, England.
- R. A. E. 皇家飞机研究所, 范朋罗, 英格兰。
Royal Aircraft Establishment, Farnborough, England.
- V. D. I. 德意志工程师学会。
Verein Deutscher Ingenieure.
- ZAMM 应用数学与力学杂志, 柏林。
Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Berlin.
- ZAMP 应用数学与物理学杂志, 柏林。
Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, Berlin.

目 录

序言	iii
英譯者序	vii
縮写字母	viii
第一章 热力学	1
1.1. 引言	1
1.2. 状态方程	2
1.3. 热力学第一定律; 比热	3
1.4. 状态变化的类型(各种过程)	8
1.5. 循环的效率	11
1.6. 热力学第二定律	13
1.7. 熵	15
1.8. 热力学平衡	19
第二章 一維定常流	20
2.1. 引言	20
2.2. 基本方程	21
2.3. 冲激波和声波	27
2.4. 由能量方程推导出来的几个公式	34
2.5. 定比热的完全气体在穿越正冲激波时的状态变化	35
2.6. 比热的变化; 完全气体在冲激波內所发生的离解和 电离过程	42
2.7. 各种形式的基本方程	45
2.8. 与外界无相互作用的定常流	47
2.9. 通过管嘴的外流	56
2.10. 拉伐尔噴管	57

2.11. 具有两个喉截面的管道·····	60
2.12. 范諾綫与瑞利綫·····	63
2.13. 具有摩擦的管流·····	66
2.14. 变截面管中的摩擦作用·····	72
2.15. 有能量加入的管流·····	74
2.16. 燃燒和爆震·····	80
2.17. 在变截面管道流动中加入能量·····	82
2.18. 在定压下的燃燒·····	85
2.19. 凝結的影响·····	86
2.20. 焦耳-湯姆生效应 ·····	91
参考文献·····	92
第三章 一維非定常流 ·····	94
3.1. 引言·····	94
3.2. 欧拉及拉格朗日表达法·····	95
3.3. 欧拉表达法中的积分定理·····	96
3.4. 拉格朗日表达法中的积分定理·····	97
3.5. 欧拉形式的微分方程·····	99
3.6. 拉格朗日形式的微分方程 ·····	102
3.7. 无加速的流动 ·····	103
3.8. 內彈道学中的拉格朗日問題的近似处理法 ·····	106
3.9. 波傳播的基本方程 ·····	110
3.10. 势函数及流函数 ·····	112
3.11. 靜止介质中的小扰动 ·····	115
3.12. 小扰动的边界条件 ·····	124
3.13. 波陣面的变陡过程 ·····	126
3.14. 非定常流中的压缩冲激波 ·····	131
3.15. 等熵流的某些精确解 ·····	137
3.16. 管中压强突跃的扯平过程 ·····	138
3.17. 直管中的爆震 ·····	144

3.18. 冲激波在固壁上的反射	145
3.19. 两道压缩冲激波的顶头相撞	149
3.20. 由连续压缩波形成的冲激波; 前后追纵的冲激波	150
3.21. 冲激波在敞口端的反射	152
3.22. 非等熵问题的精确解	154
3.23. 球面冲激波和柱面冲激波在近中心处的情况	155
3.24. 远离扰动中心的冲激波	157
3.25. 影响所及区、依赖域以及情况确定区	159
3.26. 微分方程改为特征线坐标的变换	162
3.27. 简单波	165
3.28. 用特征线法计算一般的平面等熵流动过程	169
3.29. 平面等熵流的边界条件	174
3.30. 特征线法用于解气体从管子里的外向流动	176
3.31. 一般的非等熵过程的算法	180
3.32. 在中心的边界条件	184
3.33. 一般的特征线法在爆炸过程中的应用	185
3.34. 拉格朗日表达法之下的特征线法	190
参考文献	194
第四章 一般方程和定理	196
4.1. 运动的积分定理	196
4.2. 运动的微分方程	201
4.3. 压缩冲激波总论	206
4.4. 相似律	208
4.5. 涡的一般定理	215
4.6. 定常的绕障碍物的流动中的举力和环量	223
4.7. 定常流中的阻力和推力	227
参考文献	231
第五章 积分定理在一些具体问题上的应用	232
5.1. 可压缩流的卡诺突变公式, 混合过程	232

5.2. 射流收缩, 包达入口段	235
5.3. 定常射流的折转	237
5.4. 流过叶栅的流动	238
5.5. 作用在喷管上的推力	241
5.6. 机械推进; 工作气流的机械效率	242
5.7. 加热管的疑题	243
5.8. 热力推进(冲压式喷气发动机)	245
5.9. 涡轮喷气发动机和燃气涡轮	248
5.10. 火箭发动机	251
5.11. 大气流入低压贮箱的问题	255
参考文献	256
第六章 定常无粘流的一般方程和某些精确特解	257
6.1. 三维流的基本方程	257
6.2. 平面流动和轴对称流动的基本方程	259
6.3. 速度势	262
6.4. 流函数	263
6.5. 微分方程的类型	267
6.6. 坐标变换	272
6.7. 极坐标及柱坐标	275
6.8. 流线坐标	277
6.9. 点泉流和点涡流	279
6.10. 涡泉流和螺旋流	281
6.11. 普朗陀-迈登流	283
6.12. 轴对称的锥型流	285
6.13. 速度面上的微分方程	287
6.14. 势函数和流函数的勒让德变换	289
6.15. 摩侖勃吕克变换	290
6.16. 恰普雷金变换	292
6.17. 准确的边界条件和简化的边界条件	294

6.18. 冲角改变对流动状态的影响	302
6.19. 諸气动力	307
6.20. 普朗佗-葛劳渥法则	311
6.21. 无限翼的后掠效应	319
参考文献	322
第七章 定常的无粘平面亚声速流和軸对称亚声速流	324
7.1. 点泉式的奇性解	324
7.2. 点渦式的奇性解	327
7.3. 綫化理論中的薄机翼	328
7.4. 綫化理論中的細长軸对称体	337
7.5. 平面流普朗佗-葛劳渥法则的各种說法	347
7.6. 克兰法	353
7.7. 詹森和瑞利法	357
7.8. 迭弛法	363
7.9. 卡門-錢学森公式	365
7.10. 速度图法, 凌来勃公式	370
参考文献	372
第八章 定常的无粘平面超声速流和軸对称超声速流	375
8.1. 平面平行流动中的小扰动	375
8.2. 最小阻力的翼型	381
8.3. 用奇点分布法解小扰动的軸对称流	383
8.4. 斜的压縮冲激波	394
8.5. 依附在尖劈上的冲激波	398
8.6. 一道冲激波在壁面上的反射	400
8.7. 一道冲激波在自由射流边界上的反射. “心形”曲 綫	401
8.8. 在普朗佗-迈益压縮中心的冲激波	404
8.9. 同側冲激波的相交	405
8.10. 异側冲激波的相交	406

8.11. 馬赫型的波系	407
8.12. 圓錐流	408
8.13. 冲激波流动	412
8.14. 微分方程改成用馬赫綫为坐标的变换	414
8.15. 交叉导数不定的軌迹, 馬赫綫的另一种釋义	417
8.16. 流过一个机翼的精确均熵流	420
8.17. 中等馬赫数之下的均熵近似法	425
8.18. 均熵近似法的气动力	431
8.19. 繞一个机翼的简单非均熵流型	434
8.20. 前緣附近冲激波的曲率和翼型的曲率	436
8.21. 高超声速流	440
8.22. 无旋平面超声速流場的构作法(修改的普朗陀-布賽 曼法)	446
8.23. 平面无旋流的边界条件	454
8.24. 平面无旋流中的冲激波陣面	455
8.25. 产生直匀流的噴管	456
8.26. 双翼机和机翼干扰	459
8.27. 振蕩的自由射流	460
8.28. 叶栅	463
8.29. 微受扰动的軸对称流	466
8.30. 均熵的軸对称流	469
8.31. 非均熵的平面流和軸对称流	472
8.32. 边界条件通論	476
8.33. 在軸对称流里冲激波陣面的构作法, 几个例子	480
8.34. 有冲角的旋成体	486
参考文献	488
第九章 定常的无粘跨声速流	493
9.1. 引言	493
9.2. 繞障碍物的跨声速流的一般討論; 影响所及区和依	

賴域	494
9.3. 跨声速区的級数展开	500
9.4. 跨声速范围内的气体动力学方程	509
9.5. $M_\infty=1$ 的相似律	512
9.6. M_∞ 接近于 1 时的相似律	517
9.7. 噴管流动	524
9.8. 无冲激波的局部超声速区之近似表达法	531
9.9. 积分方程法	533
9.10. 用迭弛法求解	540
9.11. 用速度图法得到的跨声速解	541
9.12. 关于跨声速范围内的超声速流的几点說明	545
参考文献	546
第十章 定常的和非定常的三維流問題	551
10.1. 亚声速气流流过平薄对称物体的流动	551
10.2. 亚声速流中的举力面	554
10.3. 有冲角的超声速流动及前緣的特性	563
10.4. 流过平薄物体的超声速气流(不繞邊緣流动的情况)	565
10.5. 錐型流的方程	570
10.6. 流过超声速前緣的翼面之錐型流	580
10.7. 亚声速前緣的举力三角翼	582
10.8. 具有超声速和亚声速邊緣的翼尖区	588
10.9. 用变换法能得到的更一般的解	591
10.10. 用迭加法能得到的更一般的解	593
10.11. 关于 $M_\infty>1$ 的气流流过平薄物体一般流动問題的 某些論述	595
10.12. 非定常均熵流	599
10.13. 微受扰动的平面流之通解	601
10.14. 尖劈的减速跨声速运动	602
参考文献	605

第十一章 粘性的影响	609
11.1. 冲激波的厚度	609
11.2. 定常流中的边界层方程	611
11.3. 沿平板的层流边界层;平板温度计	613
11.4. 压强陡度不为零的边界层	618
11.5. 平面的与轴对称的边界层之间的相互关系	620
11.6. 紊流边界层. 紊流射流	622
11.7. 边界层对主流的影响	624
11.8. 边界层的稳定性	628
参考文献	629
第十二章 实验技术概述;流动的模拟	633
12.1. 压强和力的量测	633
12.2. 光学方法	635
12.3. 温度的确定	638
12.4. 风洞的类型	639
12.5. 跨声速风洞	644
12.6. 风洞修正	645
12.7. 流动泡沫	647
12.8. 浅水模拟	649
12.9. 电模拟	652
参考文献	653
积分表	656
气体动力学推荐文献	659
内容索引	661
附图綫三張	(在封三口袋內)

数 值 表

1.1. 空气的 $pm/R\rho T$ 值	6
1.2. 空气的 c_p 值	7
1.3. 空气和水蒸汽的 γ 值和 c_p 值	7

1.4. 絕热压缩中 γ 随温度的变化对 p_2/p_1 的影响	10
2.1. 越过正冲激波状态参数的变化	39
2.2. 越过正冲激波熵的增量	40
2.3. 等熵流中状态参数的变化	49
2.4. 完全气体的各种临界值	51
2.5. 流动参数之间的相互关系	54
2.6. 最大允许加热量	78
2.7. 爆震速度	82
7.1. 椭圆最大厚度点的速度	351
7.2. 沿圆柱的速度分布	352
8.1. $n-1$ 道冲激波之后的最大驻点压强	413
8.2. 特征綫网图用的数值表	448
9.1. 跨声速范围的质量流量	501
9.2. 跨声速范围的特征綫	505
9.3. 跨声速流中的折合系数	509
11.1. 空气的粘性系数和热导率	616

第一章 热 力 学

1.1. 引言

气体动力学里讨论的是气体流动所遵循的规律。这个课题需要对静止介质的基本热力学属性有一定的了解，这些基本属性在热力学教科书里都有详细的论述。下面几节将讨论到研究气体动力学所不可少的一些热力学概念和定律。

我们假定流动气体，或更概括些说，流动介质，在物理上是均质的；因而它的状态完全为压强 p ，密度 ρ ，和绝对温度 T 所决定。但这并不是说在它最小的单位中介质是完全均质的。介质也可以是若干种物质的混合物，例如空气。更一般地情况，各组分间的浓度比本身可以是状态的函数，例如高温下处于离解和电离状态中的气体就是如此。需要的只是在每一状态下介质的成分要十分确定：在状态确定时，介质成份必须不改变。在这个意义上说，我们可以把湿空气与小水珠形式的水的混合物看作是一种物理上的均匀介质，只要**总**的水量不改变，且这二相总是处于热力学平衡之下。如果在热力学平衡的建立上有严重的滞后现象(迟延的凝結)，或者 H_2O 的浓度有变化(水分凝成雨)，那我们就不能再用均质模型了。一个过程里面包含有粗粒的混合物在内的话，这个过程能否用均质模型来描述，决定于过程所占的空间的相对大小。例如在炮筒中，火药刚爆发之后，火药小棒和燃后气体的混合物，在某些条件之下是可以当作均匀介质来处理的。同理，象钢筋混凝土那样一种非均匀物质，在土木工程师的计算中也是当作均匀物质处理的。