



装备科技译著出版基金



高新科技译丛

CAMBRIDGE

The Detonation Phenomenon

爆震现象

【美】 John H.S.Lee 著 林志勇 吴海燕 林伟 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

爆震现象

The Detonation Phenomenon

John H. S. Lee 著

林志勇 吴海燕 林伟 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-001号

图书在版编目(CIP)数据

爆震现象/(美)李(Lee, J. H. S.)著;林志勇,吴海燕,
林伟译. —北京:国防工业出版社, 2013. 9
(高新科技译丛)
书名原文: The Detonation Phenomenon
ISBN 978-7-118-08917-2

I. ①爆... II. ①李... ②林... ③吴... ④林...
III. ①爆震-研究 IV. ①0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 220710 号

This is a Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

THE DETONATION PHENOMENON ISBN 978-0-521-89723-5

© John H. S. Lee 2008

This Chinese edition for the people's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and National Defense Industry Press 2013

This Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a data-base or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and National Defense Industry Press.

本书简体中文版由 Cambridge University Press 授权独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 19¼ 字数 387 千字
2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776
发行业务: (010)88540717

译者序

燃烧学是一门既古老又年轻的学科。从远古的钻木取火,到现今的航空航天,都与燃烧过程和现象密不可分。而对于燃烧的研究与认识可以说仍然相对肤浅。正如尼科来也维奇·谢苗诺夫在所著的《燃烧与爆炸》所述那样:我们对古老的火的认识远不如对年轻的电的了解更清楚,在关于火的科学方面,我们常在最简单的现象面前束手无策,直到今天我们更多的还是利用原始经验和感觉。

爆震燃烧作为燃烧领域中一个特殊的燃烧模式,早在 100 多年前因为煤矿瓦斯爆炸而受到关注,后来由于其在民用、军用领域都具有广泛的应用背景,而吸引了全世界诸多著名科学家从事探索。到目前为止,对于爆震燃烧的研究和认识正由爆震宏观及唯像认识逐步深入到内在物理机理,爆震燃烧在基础研究中取得的进展也推动了其在工程应用中的发展。

加拿大籍华裔科学家 J. H. S. Lee 教授是爆震研究的先驱者之一,从 20 世纪 60 年代至今持续活跃在该研究领域最前沿,并做出了巨大的贡献。Lee 教授总结了他自己长达半个世纪的成果及同事的部分工作,并于 2008 年撰写出版了《The Detonation Phenomenon》。书中对复杂的爆震物理现象和理论模型进行了生动的描述与准确的分析,并试图从多方面解释这些现象的内在脉络,揭示它们的发展转换规律。该书在剑桥大学出版社出版后一直深受读者好评,绝对是一本燃烧学界的经典著作。它不仅适合作为涉及燃烧理论专业的高校老师和研究生学习的教科书,也适合作为从事爆震燃烧基础研究及工程应用的科研人员的参考书。

译者自 2004 年开始一直从事爆震燃烧基础和应用研究。于 2009 年初次接触该书,就被作者对爆震物理本质的认识和对这些问题深入浅出的阐述所折服,并带领课题组持续对该书进行研读。但考虑到我们学识浅薄,水平有限,一直难以下决心去翻译出版。直到 2012 年邀请 Lee 教授来国防科学技术大学讲学之际,才下决心翻译出版该译著:一则希望借此机会更深入学习该书;二则希望能以微薄之力为国内的同行提供一点方便。但由于译者水平实在有限,对书中知识的理解和作者原意把握不够,虽然一直与作者保持交流沟通,但难免还会出现偏差,敬请读者不吝批评赐教。

本译著是国防科学技术大学爆震研究小组集体智慧的结晶,这里特别感谢孙健、刘彧、张宇杰、蔡晓东、韩旭、覃慧、刘世杰、周朱林、苗世坤、陈伟强等在初稿翻译或修订阶段付出的艰辛努力。

非常感谢 Lee 教授在本译著修订阶段给予的讲解和指导!更要感谢 Lee 教授在爆震燃烧领域及研究人员培养上所做出的巨大贡献!更要对 Lee 教授那种淡泊名利,几十年如一日从事爆震基础研究的追求真理的科学奉献精神,表示由衷的敬意!

这里还要由衷地感谢庄逢辰院士。我们能坚持完成本译著,离不开庄逢辰老师的关心和鼓励!

译者

2013 年 8 月 长沙

爆震现象

本书介绍了爆炸物中的爆震现象,适合于具有热力学和流体力学知识背景的工程师和研究生阅读。书中所给的材料大多是定性的,目的是说明这些现象的物理特性。本书首先给出了爆震波理想情况下的经典理论,通过这些理论可以得出爆震波速度、爆震波前后的气体属性以及爆震波内部的流体属性分布。接下来的章节详细描述了爆震波真实的不稳定结构。书中给出了一维、二维和三维的计算模拟结果,同时包含采用不同的实验技术得到的实验结果。书中同样讨论了受限空间和边界条件的重要作用,以及它们对爆震传播的影响。书中最后一章涵盖了生成爆震的不同方法,并回顾了爆震研究领域的突出问题,展望了未来的发展方向。

John H. S. Lee 博士是 McGill 大学机械工程教授。他的研究领域涵盖燃烧、爆震和激波物理以及爆炸动力学。他在这些领域已经开展了 40 年的基础研究及应用研究。他从 20 世纪 60 年代后期开始,在爆炸危害和安全方面,作为咨询委员服务于多个政府和工业咨询委员会机构。由于在爆炸和爆震现象的基础和应用研究方面的突出贡献,1980 年获得了国际燃烧协会的银质奖章,1988 年获得波兰科学研究会 Dionizy Smolenski 奖章,1991 年获得 Nuna Manson 金质奖章。他先后于 1989 年和 1995 年两次获得院系杰出教学奖,2003 年被聘为中国科学院力学所荣誉教授,并获得了香港理工大学的 Alumni Award 奖(2003)。他还是加拿大皇家学会成员。

序 言

爆炸物是具有快速反应速率的高能物质,并能以气态、液态或固态的形式存在。化学反应能以高超声速爆震波的形式穿过爆炸物,爆震波是一道热力学状态突然跃升的压缩激波,并诱导了化学反应,把反应物转变成燃烧产物。本书致力于描述爆震现象,介绍了造成爆震波自持传播的物理和化学过程、确定爆震状态的流体动力学理论、边界层对爆震传播的影响以及如何在爆炸物中起爆爆震。

本书仅考虑气相爆炸物中的爆震波,因为它们比凝聚相介质中的爆震更好理解。气相爆炸物中的爆震和凝聚相爆炸物中的爆震有很多相似之处,这是由于凝聚爆炸物的爆震压力比凝聚相爆炸物的材料强度高得多,并且气相爆震流体力学理论同样适用于凝聚相爆震。然而对于凝聚相爆炸物,材料的属性如各相异性、多孔性和晶体结构在爆震起爆(以及敏感性)中可起到重要作用。

在写书中要想做到完全客观是不可能的,即使是科学书籍也是如此。在专题的选择,表述顺序和每一个专题的重点以及对理论和实验观察的解释,必然都反映了作者的观点。为了努力把这本书写得让初学者易读,忽略了那些数学上很复杂的专题(如稳定性理论)或者仅对它们给出了定性讨论。

我想把这本书写得适合于具有流体力学和热力学大学知识背景的人阅读。因此,这本书并未涉及爆震科学的全部内容,并且忽略了很多重要的专题或者仅仅进行了简单介绍。我同样避免给出一个完整的参考文献目录,因为我感觉在互联网时代,读者能够很容易地找到希望深入的任何专题的相关参考文献。

考虑到主题的平衡,我没有回顾这一领域的大量文献,也没有讨论我的很多同事所作的贡献。而且,我已经从这一领域的所有过去和现在的研究者中学到了很多;对他们所有人我都心存感激。我想要特别说明一件非常有幸的事情是,两次世界大战期间有世界上最好的物理学家和化学家对爆震现象开展了研究(Richard Becker, Werner Döring, G. I. Taylor, John von Neumann, George Kistiakowsky, John Kirkhood, Yakov Zeldovich, K. I. Schelkhin 等人)。从他们战

时和战后出版物中我首先接触了这一学科。我同样感谢在 20 世纪 60 年代早期在我的性格形成时期,国际上爆震研究学者对我的强烈的影响(如 Don White, Russell Duff, Gary Schott, Tony Oppenheim, Roger Strehlow, Numa Manson, Hugh Edwards, Rem Soloukhin 和 Heinz Wagner)。他们将我视为年轻的同行,并且指导了我的发展。T. Y. Toong 是最初引导我接触科学研究的人。尽管他对我的指导时间不是很长,但他给我树立了一个持久的学者典范,而那正是在我职业生涯中一直所追求的方向。

在本书手稿完成并即将出版之际,我最感谢的人是 Jenny Chao。她在该书的校对和修订中付出了大量的心血。没有她的贡献,我怀疑该书也许永远无法出版。Eddie Ng 也为该书做出了巨大的贡献。该书的爆震结构、不稳定性和爆震起爆那些章节大量参考了他的博士学位论文。一声“谢谢”不足以表达我对 Jenny 和 Eddie 的感谢,因为他们的付出最后使我的手稿得以出版成书。Steven Murray 和 Paul Thibault 通读了该书原稿的全文,指出了其中的错误并提出有价值的建议。Paul 还花费了很多时间对该书终稿进行校对。Andrew Higgins 和 Matei Radulescu 选读了部分章节并给出了有用的意见。Jeff Berghorson 对本书的校对稿进行了仔细的校对,使得本书质量有了明显的提高。虽然顾全到每个人的建议是不切实际的,但我保证没有特意忽略他们的意见,毕竟对书稿的修订次数和时间有限。

我还要感谢 Christian Caron,是他鼓励我开始撰写此书,让我确信我个人对爆震的研究能够达到出版的水平。我深深地感激在该书最后的校对出版阶段, Peter Gordon 所给予的热心支持与鼓励。我发现写书是一次令人惭愧的经历。

最后,我要感谢 Julie、Julian、Leyenda、Heybye 和 Pogo,他们在科学研究之外为我的生活带来了无尽的爱与欢乐,这是对本书间接的贡献。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 爆燃和爆震	1
1.2 爆震现象的发现	3
1.3 Chapman - Jouguet 理论	4
1.4 爆震结构	6
1.5 爆震产物动力学	8
1.6 爆震面稳定性	8
1.7 边界条件影响	10
1.8 爆燃向爆震转变(DDT)	11
1.9 直接起爆	13
1.10 突出问题	14
参考文献	16
第2章 爆震与爆燃的气体动力学理论	20
2.1 引言	20
2.2 基本方程	20
2.3 Rayleigh 线和 Hugoniot 曲线	22
2.4 相切(CJ)解	25
2.5 沿着 Hugoniot 曲线熵的变化	27
2.6 下游流动状态	29
2.7 CJ 准则	30
2.8 Hugoniot 关系	33
2.9 爆燃	37
2.10 小结	41
参考文献	42

第3章 爆震产物动力学	43
3.1 引言	43
3.2 基本方程	43
3.3 发散的圆柱 CJ 爆震和球 CJ 爆震	46
3.4 扩张爆震后的活塞运动	48
3.5 非均匀介质中的扩张爆震	53
3.6 小结	58
参考文献	59
第4章 爆震的层流结构	60
4.1 引言	60
4.2 理想气体的 ZND 结构	62
4.3 病态爆震	68
4.4 非理想爆震	73
4.5 小结	78
参考文献	79
第5章 不稳定爆震:数值描述	80
5.1 引言	80
5.2 线性稳定性分析	81
5.3 简正模式线性分析	81
5.4 不稳定爆震渐近模型	82
5.5 高活化能和牛顿极限	83
5.6 多维不稳定渐近分析和胞格尺寸预测	84
5.7 大过驱度渐近极限	85
5.8 弱热量释放的渐近极限	85
5.9 不稳定爆震的直接数值模拟	86
5.10 一维不稳定性(单步反应速率模型)	88
5.11 化学对稳定性的影响	95
5.12 二维胞格不稳定性	103
5.13 小结	113
参考文献	113

第6章 不稳定爆震:实验观测	119
6.1 引言	119
6.2 螺旋爆震现象	120
6.3 螺旋爆震的 Manson - Taylor - Fay - Chu 声学理论	123
6.4 螺旋爆震面的结构	126
6.5 多头爆震	137
6.6 其他形状管子中的胞格爆震	143
6.7 胞格尺寸与化学	155
6.8 小结	159
参考文献	160
第7章 边界条件影响	162
7.1 引言	162
7.2 速度亏损	163
7.3 粗糙壁面管中的爆震	170
7.4 声学吸收壁	180
7.5 爆震极限	186
7.6 小结	195
参考文献	195
第8章 爆燃向爆震转变(DDT)	198
8.1 引言	198
8.2 爆燃波的气体动力学	199
8.3 转变现象的特征	205
8.4 火焰加速机制	208
8.5 爆震波的开始	219
8.6 爆燃向爆震转变的判据	226
8.7 小结	232
参考文献	233
第9章 爆震直接起爆	235
9.1 引言	235

9.2 冲击波起爆(实验观测)	236
9.3 冲击波起爆的数值模拟	248
9.4 临界管径	258
9.5 直接起爆的其它途径	267
9.6 冲击波起爆理论	275
9.7 SWACER 机制	285
9.8 小结	290
参考文献	291
结束语	294

第1章 绪 论

先定义爆燃和爆震的概念并给出区别这两类燃烧波的特征,这非常重要。既然本书是对爆震现象的描述,所以在详细描述爆震之前,先介绍一下与爆震相关的各个专题是很有意义的。这样,读者对全书就会有总的认识,并且那些已经熟悉本领域的人还可进行选择性地阅读。

在讲述一个故事时,自然会从它的来历讲起。这里,将基本沿着爆震的历史进展讲述各个专题。然而,这里没有特意讨论太多早期的文献。Manson 和他的合作者(Bauer 等,1991;Manson 和 Dabora,1993)已经综述了从 19 世纪后期最早发现爆震到 20 世纪 50 年代中期这段时间里,爆震研究的历史脉络,并给出了大量早期研究工作的参考文献,想要进一步追溯爆震历史可以参考。本章只对本书包含的内容进行定性概述。

1.1 爆燃和爆震

点火后,燃烧波将从点火源开始往外传播,将反应物转化成产物,同时释放出存储在反应物分子化学键中的势能,并转化成燃烧产物的内能(热能)和动能。由于放热,跨过燃烧波后热力学和气体动力学状态发生了显著变化。燃烧波中梯度场诱导了物理和化学过程,从而导致了燃烧波的自持传播。

通常而言,有两种自持传播的燃烧波:爆燃和爆震。爆燃波相对于它前方的反应物,以相对较低的亚声速传播,其下游的扰动能向上游传播并影响反应物的初始状态。因此,爆燃波的传播速度不仅依赖于可爆混合物的属性和初始状态,还依赖于爆燃波后的后边界条件(如来自一根闭口管或一根敞口管)。爆燃波是一道膨胀波,跨过反应面压力下降,并且燃烧产物以相反方向加速远离波面。依赖于后边界条件的不同情况(如对于一根闭口管,产物气流速度为零),燃烧产物的膨胀导致了反应面前反应物的迁移。这样,反应面传入了沿传播方向运动的反应物中。那么,爆燃速度(相对于实验室固定坐标系)即是反应物的迁移流动速度和相对于反应物的反应面速度(即燃烧速度)的总和。反应物迁移流动的结果是在反应面前也形成了压缩波(或激波)。所以,一道传播中的爆燃波通常由一道前导激波与紧随其后的反应面组成。前导激波的强度依赖于反应物的迁移流动速度,因此也依赖于后边界条件。

爆燃波传入其前方反应物的机制是通过热扩散和质量扩散。跨过反应面急剧变化的温度梯度和化学组分浓度的梯度,导致了热量和自由基组分从反应区向其

前方的反应物的输运,从而实现点火。因此,爆燃波本质上是一道扩散波,其速度正比于扩散率的平方根和反应速率的平方根(反应速率控制着温度和组分浓度梯度)。假如爆燃面是湍流,可以在一维框架下定义湍流扩散率来描述输运过程。火焰通常定义为一道稳定在燃烧器上的静止爆燃波(相对于实验室坐标系),反应物朝波面流动。然而,即使是传播中的爆燃波,通常也用火焰这词来指代反应面。

爆震波是一道跨过它后热力学状态(如压力和温度)急剧增加的超声速燃烧波。爆震波可看作是一道带反应的激波,它使反应物转变成燃烧产物的同时伴随着能量的释放。因为这道波是超声速的,所以其前方的反应物在它到达之前不受干扰,因此保持初始状态不变。因为爆震波是一道压缩波,跨过爆震的密度增加并且产物的气流速度与波运动同一方向。根据质量守恒条件,爆震波后必须跟有活塞或膨胀波。对于活塞支持的爆震波(通常所说的强爆震或过驱爆震),由于其后没有跟随着膨胀波,爆震波后的流动可以为亚声速。然而,对于自由传播的爆震波(其后没有支持它的运动活塞),爆震面后的膨胀波将通过降低压力并增加气流速度来匹配后边界条件。因为强爆震后的流动为亚声速,任何膨胀波都能穿过反应区并减弱爆震强度。因此,自由发展的爆震波,波后必须是声速或超声速条件。波后为声速的爆震波称为 CJ 爆震,波后为超声速的称为弱爆震。弱爆震要求 Hugoniot 曲线(即代表不同爆震速度下爆震产物平衡状态的轨迹的曲线)具有特殊性质,并且一般难以实现。因此,自由发展的爆震波通常为 CJ 爆震,其波后为声速。

反应物的点火是通过爆震波反应区前方的前导激波面的绝热压缩造成的。前导激波后紧跟着诱导区,通常反应物在该区域离解并产生自由基,诱导区内的热力学状态变化通常很小。经过诱导区后发生快速复合反应,反应放热并导致温度上升。通过反应区,压力和密度都下降。可见,爆震中的反应区与爆燃波相似,并且通常认为爆震波是激波和爆燃的紧密耦合的联合体,不同的是爆震波的点火是通过前导激波的绝热加热而产生的。反应区中的压力快速下降,同时自由传播爆震后的膨胀波导致压力进一步下降,两者共同作用推动了前导激波面向前运动。这样,无外力支持的爆震波传播的典型机理为:通过前导激波压缩导致自燃,而其后燃烧产物的膨胀反过来又推动着激波前进。

自主传播爆燃波本质上是不稳定的,其中存在着很多不稳定机制使得反应面变成湍流,从而增加爆燃波传播速度。因此,自持传播的爆燃会不断加速,只要边界条件允许,它们将向爆震突然转变。在向爆震转变之前,湍流爆燃速度能达到较高的超声速(相对于固定坐标系)。通常把这种加速爆燃称为转变过程中的高速爆燃。当爆震在壁面非常粗糙的管中传播时,其传播速度能够远小于正 CJ 爆震速度。这些低速爆震称为“准爆震”。高速爆燃和准爆震的速度范围存在重叠。这些波的复杂湍流结构是非常相似的,意味着它们的传播机理也可能相似,因此,难

以在它们之间划分出明显的界限。

在不同的初始和边界条件下会出现本节所描述的不同类型的燃烧波。本书的主题就是讨论这些燃烧波。

1.2 爆震现象的发现

从 15 世纪起就已经知道,特定化学成分的混合物(如雷酸汞混合物)在受到了机械冲击或激波作用时会发生剧烈的化学分解。然而,直到发展了诊断方法,观察到了快速燃烧现象并测量了燃烧波的传播速度后,才能说发现了爆震现象。Abel(1869)可能最先测量了强棉药炸药包中的爆震速度。然而,Berthelot 和 Vieille(Berthelot, 1881; Berthelot 和 Vieille, 1883)(图 1.1)^①针对不同的气体燃料(如 H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_2)和不同氧化剂(如 O_2 、 NO 和 N_2O_4)的混合物,并针对惰性氮气的不同稀释度,系统测量了爆震速度,由此确定了气相爆炸混合物中存在爆震。



图 1.1 Marcelin Berthelot (1827—1907) 和 Paul Vieille (1854—1934)

Mallard 和 Le Chatelier(1883)(图 1.2)采用滚筒相机观察了爆燃向爆震的转变,证明了同一种气体混合物中可能存在两种燃烧模态。他们还提出爆震波中的化学反应是由爆震面的绝热压缩诱导的。因此,在 19 世纪后期,最终证明了气相爆炸混合物中的超声速爆震波明显不同于相对慢速传播的爆燃波。爆震研究的先驱者(Berthelot 和 Vieille; Dixon, 1893, 1903)都认为,爆震波中化学反应是通过绝热激波压缩诱导的。

^① 本章中图,原文未编图号。

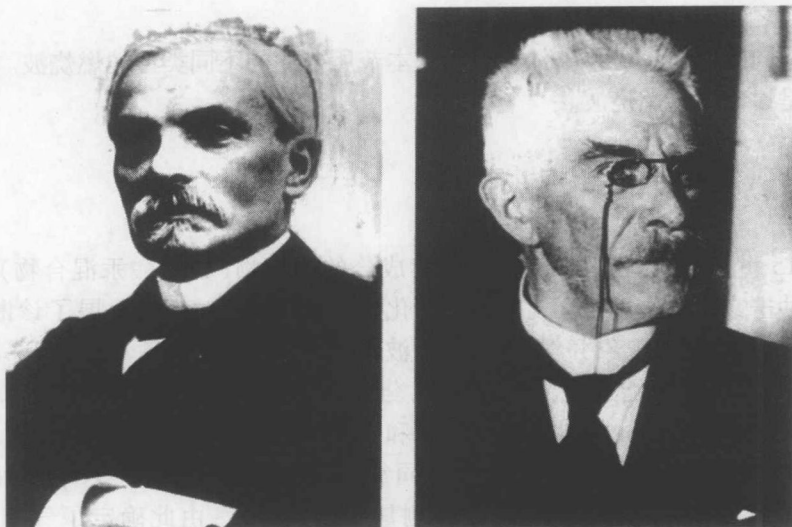


图 1.2 Ernest Mallard(1833—1899)和 Henry Le Chatelier (1850—1936)

1.3 Chapman – Jouguet 理论

发现爆震现象后不久,Chapman(1889)和 Jouguet(1904,1905)(图 1.3)就建立了定量理论来预测爆炸混合物中爆震速度。

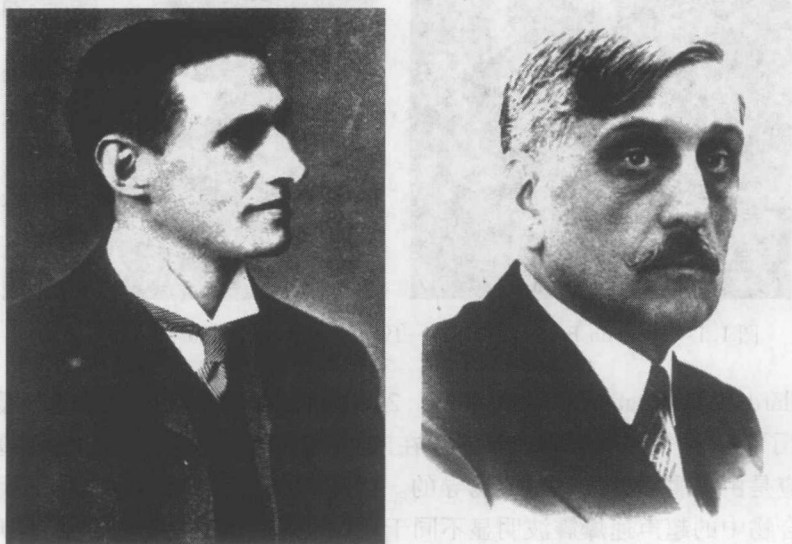


图 1.3 Donald Leonard Chapman (1869—1958) 和 Ehrile Jouguet (1871—1943)

Chapman 和 Jouguet 基于 Rankine(1870)与 Hugoniot(1887,1889)的工作建立了他们各自的理论来分析跨过激波的守恒方程。对于爆震波,反应物向产物的转

变释放了化学能。假设波的下游达到了平衡,就可以根据热力状态确定产物的化学组分,由此可得出跨过激波所释放的化学能。与无反应的激波不同,对于给定的爆震传播速度存在着两个可能解:强爆震解和弱爆震解。强爆震波后的压力和密度比弱爆震的要大。强爆震下游的流动是亚声速(相对于波面而言),而弱爆震下游流动则是超声速的。当爆震速度达到最小值时,这两个解汇聚到一点。当给定的爆震速度小于这个值时,解不存在。对于给定可爆混合物,可能得到大于上述最小值的连续分布的爆震速度,因此爆震理论的任务便是,在给定初始条件下对于一种可爆混合物,给出一个准则来确定合适的爆震速度。

Chapman 的准则本质上是选择最小速度解。他的证据非常简单:对于给定的可爆混合物,实验中只能观测到唯一的爆震速度。这样,最小的速度解必定是正确的。另一方面,Jouguet 研究了不同爆震速度对应的热力学状态轨迹(即 Hugoniot 曲线)。他确定了沿着 Hugoniot 曲线的熵变,并发现了一个最小值。他进一步指出熵最小的解对应于爆震下游满足声速条件。随后 Jouguet 提出熵最小的解(声速解)正是所求的解。他的同事 Crussard(1907)后来指出速度最小的解对应于熵最小的解,并且也给出了波下游的声速流动。这样,Chapman 和 Jouguet 都给出了各自准则(即最小速度或者最小熵)来确定给定可爆混合物的爆震速度,也就是现在所说的 CJ 理论。但 Chapman 和 Jouguet 都没有对他们的假设提供物理或数学上的判据。

值得指出的是,俄罗斯的 Mikelson(1890)在更早的时候便发展了类似的爆震理论。他同样分析了跨过爆震的守恒方程,并发现了存在两个可能的稳态解,当爆震速度最小时收敛成唯一解。遗憾的是,发表他分析结果的博士论文并未被俄国以外的人所知道。尽管三位研究者几乎在同一时间独立建立了爆震的气体动力学理论,但是只有 Chapman 和 Jouguet 的名字与该理论联系起来。

需要指出,只有通过更严格的物理或数学论据来证明这种确定爆震速度解的准则,CJ 理论才算是完整的。后来的一些研究者都是把他们的论据建立在熵基础上(Becker,1917;1922a,1922b;Scorah,1935),但是 Zeldovich(1940/1950)反驳了所有这些热力学论据,他指出仅凭着跨过激波发生的熵增,并不代表此处一定有激波存在。要生成激波还需要有相应的机理(如波后有活塞运动)。早期的研究者基于跨过爆震面的 Rankine-Hugoniot 方程解的特性(如最小速度、最小熵或声速条件),对 CJ 准则进行证明。G. I. Taylor(1950)研究了锋面后爆震产物的动力学问题。他最先指出,爆震面的边界条件必须满足一定要求,使得导出的爆震波后燃烧产物的非稳态膨胀流动的解有物理意义。对于平面爆震,Riemann 解与 CJ 爆震声速条件是相容的。然而,对于球爆震,当加入 CJ 条件时将出现膨胀梯度无限大的奇异解,这与稳态 CJ 球爆震(如 Courant 和 Friedrichs,1948;Jouguet,1917;Zeldovich 和 Kompaneets,1960)相矛盾。自由传播的爆震则可以排除强爆震解,因为质量守恒条件要求必须有一道膨胀波来降低爆震波后的密度。由于在强爆震后的流动是亚声速的,此时膨胀波肯定会穿透反应区并且减弱爆震,所以可以排除。而