

激 波 管

上 册

一般理論和實驗技術

[苏联] X. A. 拉赫馬杜林 主編
C. C. 謝苗諾夫



國防工業出版社

82
8
4121

激 波 管

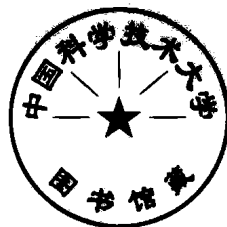
上 册

一般理論和實驗技術

X. A. 拉赫馬杜林
[苏联] 主編
C. C. 謝苗諾夫

魏 中 磊 譯

戴 昌 暉 校



國防工業出版社

內 容 摘 要

近年来,激波管已被公认为是許多現代科学技术領域中的重要的試驗研究工具。这些領域是气体物理、化学动力学、高超声速气体动力学、电磁流体动力学等等。但是迄今,还缺乏闡述这个問題的专著。

本文集汇集了西方資本主义国家1953~1959年間所发表的、有关激波管研究的主要文献52篇。中文譯本分上、中、下三册出版。上册包括两篇文章,主要闡述激波管的一般理論和实验技术。在上册中,譯者加了一个附录——激波管初等理論公式数据表。

本书的讀者对象是那些在上述蓬勃发展的新研究領域內工作的科学工作者、工程师,以及有关院校的师生。

УДАРНЫЕ ТРУБЫ

【苏联】X. A. Рахматуллин, С. С. Семенов

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 1962

激 波 管

上 册

一般理論和实验技术

魏 中 磊 譯

戴 昌 暉 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印張 $8^{9/16}$ 219千字

1965年10月第一版 1965年10月第一次印刷 印数: 0,001—1,340册

統一书号: 15034·998 定价: (科七) 1.40元

目 录

中文版序言	5
俄文版序言	7
俄文版序言参考文献	25

第一篇 激波管理論和实验技术

I. 一般問題

1. 激波管在空气动力研究中应用的某些展望 (B. D. Henshall)	45
第一章 激波管的发展历史	46
第二章 理想、一維、波的运动的理論基础	55
第三章 基本理論在激波管中的应用	64
第四章 計算普通激波管性能的快速法	75
第五章 激波管中的实际流动	88
第六章 激波管设备。总体設計	100
第七章 电子设备	112
第八章 光学设备	128
第九章 激波管设备的調整	136
第十章 激波管的运轉。实验結果	155
第十一章 边界层的生长对激波管流动影响的初步理論研究	164
第十二章 結論	179
附录	183
符号	191
参考文献	194
2. 激波管流动的理論和实验研究 (I. I. Glass, G. N. Patterson)	196

第一章 基本理論的簡述	196
第二章 實驗概述	228
結論	253
符号	256
参考文献	257
附录 激波管初等理論公式的数据表	258

激 波 管

上 册

一般理論和實驗技術

X. A. 拉赫馬杜林
【苏联】主編

C. C. 謝苗諾夫

魏 中 磊 譯

戴 昌 暉 校



國防工業出版社

內 容 摘 要

近年来,激波管已被公认为是許多現代科学技术領域中的重要的試驗研究工具。这些領域是气体物理、化学动力学、高超声速气体动力学、电磁流体动力学等等。但是迄今,还缺乏闡述这个問題的专著。

本文集汇集了西方資本主义国家1953~1959年間所发表的、有关激波管研究的主要文献52篇。中文譯本分上、中、下三册出版。上册包括两篇文章,主要闡述激波管的一般理論和实验技术。在上册中,譯者加了一个附录——激波管初等理論公式数据表。

本书的讀者对象是那些在上述蓬勃发展的新研究領域內工作的科学工作者、工程师,以及有关院校的师生。

УДАРНЫЕ ТРУБЫ

【苏联】X. A. Рахматуллин, С. С. Семенов

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 1962

激 波 管

上 册

一般理論和实验技术

魏 中 磊 譯

戴 昌 暉 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印張 $8^{9/16}$ 219千字

1965年10月第一版 1965年10月第一次印刷 印数: 0,001—1,340册

統一书号: 15034·998 定价: (科七) 1.40元

目 录

中文版序言	5
俄文版序言	7
俄文版序言参考文献	25

第一篇 激波管理論和实验技术

I. 一般問題

1. 激波管在空气动力研究中应用的某些展望 (B. D. Henshall)	45
第一章 激波管的发展历史	46
第二章 理想、一維、波的运动的理論基础	55
第三章 基本理論在激波管中的应用	64
第四章 計算普通激波管性能的快速法	75
第五章 激波管中的实际流动	88
第六章 激波管设备。总体設計	100
第七章 电子设备	112
第八章 光学设备	128
第九章 激波管设备的調整	136
第十章 激波管的运轉。实验結果	155
第十一章 边界层的生长对激波管流动影响的初步理論研究	164
第十二章 結論	179
附录	183
符号	191
参考文献	194
2. 激波管流动的理論和实验研究 (I. I. Glass, G. N. Patterson)	196

第一章 基本理論的簡述	196
第二章 實驗概述	228
結論	253
符号	256
参考文献	257
附录 激波管初等理論公式的数据表	258

中文版序言

近年来，激波管已发展成为高超声速气体动力学的主要实验研究工具之一；同时，它在气体物理、分子运动論、化学动力学、气体的輻射和吸收，以及电磁流体动力学的实验研究中，也获得了广泛的应用。激波管最突出的优点是简单、經濟。当然，由于在激波管中所能进行的試驗時間非常短暫，也就給流动参数的測量技术带来很大的困难，但这些技术上的困难，在激波管的发展过程中，已經或正在被一一加以克服和解决。目前，激波管在极高滯止溫度、极高气流速度的实验研究方面，以及在气体波动动力学的实验研究方面，都获得了丰硕的成果。

出版这本激波管文集的目的，主要是向有关科学技术人員，大专学校的教师、研究生和高年級的学生，提供一些激波管系統的参考資料。

由拉赫馬杜林 (X. A. Рахматуллин) 和謝苗諾夫 (С. С. Семёнов) 主編的这本俄文版激波管文集，材料比較全面，內容也很丰富，大体上能反映出西方資本主义国家到 1960 年为止的激波管研究状况，以及今后它的主要发展方向，因此可以认为这本文集很有使用价值。

为了尽快地使中文版能与讀者早日見面，中文版分上、中、下三册出版。

上册內容为激波管的一般理論和实验技术 (俄文版 1~189 頁)；中册为激波管流动参数的計算和測量 (俄文版 190~432 頁)；下册为应用激波管进行的研究 (俄文版 433~646 頁)。

在俄文版中，原附有 777 个有关激波管的文献目录。对一般讀者而言，它显然是冗贅了些，因此譯者根据俄文版序言中所涉

及到的那些参考文献，按先后順序重新編號（計 255 个），附于本书俄文版序言之后，以备查閱。同时，在上册中还附加了若干个激波管初等理論公式的数据表（选自 UTIA, Rep. №2）。使用这些数据表，就可免去讀者直接去計算的麻煩。

本书承蒙戴昌暉教授在百忙中予以校閱，并提出了許多宝贵意見，譯者表示衷心感謝。

譯 者

1964 年 11 月

俄文版序言(詳細摘錄)

在过去十年中，激波管研究的蓬勃发展是同人們对流体中的激波动力学、高超声速气体动力学、气体物理学、化学动力学以及电磁流体动力学等的莫大关心分不开的。根据已发表的科学资料推断，除苏联外，現在世界各地大約有一百多座激波管。这些激波管分布在美国、加拿大、英国、日本、芬兰、法国、以色列、德意志民主共和国、捷克斯洛伐克、羅馬尼亚以及其他一些国家中。它所以发展如此迅速，主要是由于在激波管中可以比較容易地在很大範圍內研究气体的状态：对于溫度，它的範圍几乎是从絕對零度到几万度、甚至几十万度；对于压力——从几个微米水銀柱到上万个大气压；对于速度——从隨便多低的速度到每秒几万米，甚至几十万米的极高速度。但是激波管中气体的状态参数并不是一下子就达到了这样广闊的範圍，而是經歷了崎嶇的发展道路，克服了許多理論上和試驗上的困难的結果。

回顾一下激波管理論和試驗的发展历史，对我们还是大有裨益的。首先要提到的是黎曼 (Riemann)、藍金 (Rankine) 和雨果尼奧 (Hugoniot) [1~3]●，他們在 1857~1889 年間所完成的經典著作，可以认为是激波管的气体动力学理論的起点。

爆炸激波管的实际研究是由柏特勒特 (Berthelot) (1878 年)、馬拉德 (Mallard) (1880 年) 和威利 (Vielle) (1881 年) 等开始的 [4~8]。他們应用激波管研究了火焰和爆震的傳播过程。在俄国，由于米赫里松 (Михельсон) 的著作 (1890 年)，激波管也就为众所周知了；在他那篇著作中給出了在他以前进行

● 本序言中，方括号內的数碼表示附于本序言后的参考文献；圆括号內的数碼表示本文集选入的文章序号。——譯者注

过的詳尽分析，甚至还在理論上考虑了爆炸波和激波的傳播的一系列問題[9]。在 1898~1946 年期間，这个方向繼續被佩門 (Paymann)、瑟弗尔德 (Schepherd) 諸人加以发展[10~14]。

其他一个方向，是与瞬时打开开关而在长管道內发生的激波系的研究相联系着的。这个方向主要是由科特維格 (Korteweg) 和茹科夫斯基 (Жуковский) 所奠定的[15, 16]，他們在 1876~1899 年間順利地进行了管道中水击的基本研究。

第三个方向似乎是在 1903~1910 年間提出来的，現在已获得了最大的发展。这个方向与科柏斯 (Kobes)、茹科夫斯基、薩尔丁 (Schardin)、庫兰特 (Courant)[17~20] 諸人的工作有关。他們研究了在管道中分隔不同压力的气体的膜片瞬时破碎后 (或瞬时打开开关后)，在其中所发生的激波系。

最后，第四个方向——电磁激波管——是不久前才提出来的。在这个方向做过研究的計有弗勒 (Fowler)[21~26]、布罗克斯姆 (Bloxsom)[27]、科布 (Kolb)[28~30]、巴特里克 (Patrick)[31~34]、齐姆 (Ziemer)[35~38] 等。

苏联学者柯青 (Кочин)[39~40] 1924 年首先研究了粘性的、带热傳导的、可压流体的間断面运动的动力相容性条件，并考虑了这种間断面的傳播速度方程。有关激波的相互干涉、火焰傳播、爆震的发生和强爆炸理論等許多問題的研究及其解答，应归功于苏联学者澤尔道維奇 (Зельдович)、拉夫林捷夫 (Лаврентьев)、朗道 (Ландау)、謝多夫 (Седов)、謝苗諾夫 (Семенов)、索科里克 (Соколик)、斯坦紐科維奇 (Станюкович) 等学者。

現在激波管已成为解决那些当前迫切的科学技术問題的、可靠的实验研究工具。关于激波管的設計和构造以及試驗方法的发展，在資本主义国家中很大程度上是依靠了康特洛維奇 (Kantrowitz)、卢卡西維奇 (Lukasiewicz)、帕特逊 (Patterson)、亨舍尔 (Henshall) 諸人的工作；而关于化学动力学、气体物理学、高超声速空气动力学和热交换的一些問題，則应归功于达

夫 (Duff)、格里費茨 (Griffith)、林紹基 (Lin S.C.)、累斯勒 (Resler) 諸人的工作。

在有些文献中，不只一次地討論了在与風洞、气体动力和气体物理試驗設備相比較下激波管所具有的优点。这里所謂气体物理試驗裝置是指激波-活塞風洞、电弧風洞和放电式風洞(又称为热冲式(Hot-shot)風洞) [41~52]。在普通的超声速風洞中由于会发生空气液化，所以用它来研究高馬赫数气流的可能性就极受限制。为了預防空气液化，而在風洞的前室中将空气加热到进行上述研究所必需的溫度，势必会对洞壁冷却或洞壁的絕热防护引起极大的困难，特别是，对噴管喉道的冷却以及保証气流的洁淨等問題，更是难以解决。

在激波管中，由于它的試驗持續時間很短，即便气体的压力和溫度都很高，也不必对風洞壁和喉道进行冷却[53、54]。同时它还具有許多优点：在激波管中获得高溫气流的方法簡單、状态稳定并有相当洁淨的熾热气流；此外，只要根据初始条件和准确地測量激波速度这一个参量，就能可靠地求出其余的流动参数 [55~59]。

但是，由于激波管的試驗持續時間很短，也有坏的一面。虽然在激波管中已进行了某些类型的探索工作（譬如，气动力和力矩的測量[60]、质量光譜的測量[61]、热融蚀的測量[62、63]），但迄今还没有得到大的发展。此外，为了記錄激波管的流动过程，要去制做特殊的、无慣性的电学和光学仪器，这是一件很困难的事，目前还没有完全成功[64~67]。对其他的各种研究方法，可以說亦是如此。

所以，目前激波管在許多方面还正处在发展阶段。即是說，現代科学技术的要求一方面提出了去創造新試驗設備的任务，以便能得到溫度和压力越发更高的气流；同时，另一方面还要在激波管中去改善和拟訂新的研究方法，而与此有关的一些困难是众所周知的，这里不再贅述。最后，應該指出，在激波管中去获得极

值溫度和壓力，其困難在很大程度上還沒有克服，雖然近來在這個方向上已得到很大的進展〔68~82〕。此外，在應用激波管上也有某些局限性，譬如，由於邊界層的存在就會對試驗研究有些妨礙；特別是在很低壓力時更是如此〔44、83~86〕。

現在已有了許多想法和建議，來提高激波管中氣體的狀態參數〔21~26、68、87~90〕，延長試驗過程的持續時間〔52、91~93〕以及擴大激波管試驗研究的可能性〔65、93~99〕。關於這些問題，目前許多學者正在世界各國的許多實驗室中進行研究。

有關激波管的文獻，近年來在資本主義國家的雜誌上出現很多，其中僅有少數已翻譯成俄文，並刊載於蘇聯外文出版社1950年開始發行的「力學」、「噴氣技術問題」、「現代物理問題」等雜誌[●]上。同時，許多非常有價值的文獻，或者很難弄到，或者印本很少；而有關激波管的某些新的研究成果的反映，僅在各種期刊上零散刊登的評述性論文和摘要中才能找到。因此，要想利用這些研究資料就很不方便。

這本文集的目的，就是要讓在各个方面工作的科學工作者、工程師、研究生和高年級的大學生等，熟悉資本主義國家中有關激波管研究的主要方向和現狀[●]。當然，文集的篇幅有限，只能搜集少數已發表的文章，其中包括激波管的基本工作原理以及它的应用，另外還選入了一些在不同研究方向上具有決定意義的論文（到1959年為止）。文集中所選用的論文題材也很廣泛，包括了在許多正進行激波管研究的實驗室中使用的，具有代表性的各種不同研究方法、特殊的測量儀器、傳感器和輔助裝置。並報導了借

● 這些雜誌的俄文原名是，「力學」——Механика；「噴氣技術問題」——Вопросы ракетной техники；「現代物理問題」——Проблемы современной физики。——譯者

● 雖然已經出版了有關激波管研究結果的第一本論文集彙編（Fundamental Data Obtained from Shock-Tube Experiments, Ed. A. Ferry, Pergamon Press, Oxford—New York—Paris, 1961），但是本文集所選入的、反映試驗方法和工藝上的特點之實際材料要完整得多。同時，文集所彙編的文獻目錄也完整得多。所以這兩本書是相輔相成的。

助于激波管得到的一系列的主要試驗結果。

在文集中还包括了許多有价值的論文摘要，它們的俄譯全文不久前已在上述的、由苏联外文出版社出版的各种刊物上刊印过了。也有若干有趣的文献的摘要，它們的全文到 1961 年为止还没有翻譯成俄文。

文集中各篇文章的排列次序，也大体上反映出激波管理論和試驗技术的研究在 1953~1959 年間的历史发展过程。文集由两大部分組成：即 1) [激波管理論和試驗研究技术]，2) [应用激波管进行的研究]。这也就是俄文版本順序地划分为上、下两篇的标题。当然，把列入文集的論文划归到那一部分在很多情形下是有一定的任意性，这一点希望讀者在閱讀本书时能够理解。在文集的俄文版之后，还給出了到 1961 年第二季度为止的、有关激波管的詳尽的文献目录(共 777 条)，并对其中的部分文献做了內容簡介。

在本书所刊登的論文中，几乎完全沒有引証苏联的文献，因此本文集的編者在俄文版序言中，适当地指出了一些苏联人的著作和他們的某些研究成果。

在文集上册的第一篇中的两篇文章，是英国学者亨舍尔和加拿大学者格拉斯 (Glass)、帕特逊写的。文中闡述了激波管的計算、构造和試驗的一般問題。因此它在方法上有启蒙意义。

亨舍尔的論文(序号 1)● 首先使讀者熟悉了激波管的初等理論，其次叙述了激波管合理的結構型式，以及选择實驗室主要設備(用于流动参数不太高的激波管上)的不同原則，而这些原則对教学的和試驗方法的研究是非常合适的。文中还給出了用于激波管中典型的电子仪器的电路图和光学仪器的詳尽示意图，同时也叙述了校准它們的方法。文中也包括了着手研究激波管所必需的一些初步知識。因为假設气体的比热是常数，所以亨舍尔的一些詳尽的計算結果有很大的局限性。并且文中也沒有考虑分子振动、离解、电离所激起的一些現象。大家知道，这些現象正是表

● 圆括号中所表示的數碼，代表选入本文集的文章目录的序号——譯者。

示高超声速飞行条件和激波管相应的試驗范围的特征。

在格拉斯和帕特逊的論文中(序号2),除去一般的引言外,还包括了計算激波、接触面和稀疏波彼此之間,以及它們同管壁的干涉的一些有用公式,也刊載了一些借助轉筒照相机所得到的、这些現象的时间展示图的暈光照片;文中还給出了有关激波衰减的一些实验和理論数据。

当激波通过变截面激波管傳播时,在其中发生的各种类型的不定常流动,理論上曾为斯坦紐科維奇[100]、澤尔道維奇[101]、別茲曼諾夫(Безменов)[102]等研究过,他們假設气体是常比热,給出了一系列的計算理想气体的、非常方便的流动图解和曲綫(还可参考[103~105])。

在亨舍尔(序号3)的文章中(也是中文版中册的第一篇文章),理論上詳尽地研究了常截面和变截面的多膜式激波管,并从有效性的观点出发对其做了比較。文章基本上是研究相似图形,它的缺点在于:当比热比为常值时,所考虑的激波馬赫数不能太高[44、106、107],通常激波馬赫数要低于 $M=11$ 才行。这也就意味着要得到高流动馬赫数,仅靠研究多膜图形可能还是不够的。

增加激波强度是提高試驗气流总焓的主要手段,也是保証有可能提高試驗气流中的 Re 、 M 、 St 和其他相似参数的条件,因而,也就是保証有可能得到由这些参数組成的最长的流动持續时间的条件。众所周知,要模拟高超声速流动和强爆炸,这些高焓的流动参数总是必不可缺少的[44、92、107~110]。在激波管中要提高入射激波的强度,就必需增加膜片两边气体的內能比和压力比。当然,这时第一个因素起决定意义,因为激波速度最終将不依赖于膜片两边压力比,因此靠提高压力比来提高激波速度总是有限制的。所以要获得极强的激波就应采用低原子量的驅动气体(氫或氦),并借助空气动力的[50、111]、化学的和电的加热方法,保証得到实际上所能达到的最高溫度和压力。这些方法将在赫茲柏(Hertzberg)和斯密司(Smith)(序号5)、布罗克斯姆