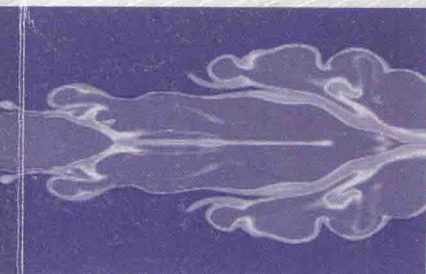


可压缩性和 高速多相流动



Compressible and
High-Speed
Multiphase Flows

施红辉 罗喜胜 著

中国科学技术大学出版社

可压缩性和 高速多相流动

Compressible and
High-Speed
Multiphase Flows

施红辉 罗喜胜 著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书系统地归纳总结了作者二十多年来从事可压缩性和高速多相流动研究的成果,涉及实验技术、实验方法、数值计算和理论分析。内容包括:超声速液体射流、水下超声速气体射流、高速物体出入水及超空泡流动、超声速凝结气体流动、激波与固体颗粒的相互作用、激波对气/液界面的冲击以及高速液体对固体表面的冲击等。研究范围从基本概念到工程应用。书中介绍的许多力学机理和现象,都是作者的首次发现,这些对于理解可压缩性及瞬态多相流物理过程十分重要。

本书可供流体力学、空气动力学、航空航天、船舶与海洋工程、动力工程与工程热物理、兵器设计、应用物理等专业的研究生、科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

可压缩性和高速多相流动/施红辉,罗喜胜著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014.2

ISBN 978-7-312-03374-2

I. 可… II. ①施… ②罗… III. 流体力学 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 001081 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥市宏基印刷有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 28.75

字数 486 千

版次 2014 年 2 月第 1 版

印次 2014 年 2 月第 1 次印刷

定价 68.00 元

前 言

作者在中国科学技术大学、浙江大学和浙江理工大学的研究生教学实践中,发现相关专业的研究生教材比较匮乏,而研究生又对当前国际上本专业前沿研究领域的发展了解得不够全面,这种状况显然不符合国家对培养大批高素质人才的要求。这也促使我们写成此专著。作者 2009 年开始构思本书的框架,从 2012 年起开始正式写作并在年内完成了第 1 章到第 4 章和第 6 章的文稿;在 2013 年,除了完成第 5 章的写作外,对其他各章的内容及参考文献进行了少量的拾遗补缺。

本书概括总结了作者自 1987 年以来到现在,在海内外进行过的、在可压缩性和高速多相流动方面的研究活动以及所取得的成果,内容包括:超声速液体射流、水下超声速气体射流、水中高速运动物体诱导的超空泡流动、超声速凝结气体流动、激波与固体颗粒的相互作用、激波对气/液界面的冲击以及高速液体对固体表面的冲击等。由施红辉撰写第 1 章到第 3 章,第 5 章和第 6 章,由罗喜胜撰写第 4 章。

在本书出版之际,作者感谢对完成本书研究工作有帮助的中外导师、同事和学生,特别感谢英国剑桥大学卡文迪什实验室 John Field 教授(英国皇家学会会士,FRS)、日本东北大学流体科学研究所高山和喜教授、日本名古屋工业大学机械工程系伊藤基之教授、中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室王柏懿研究员、中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室俞鸿儒院士、西安交通大学能源与动力工程学院俞茂铮教授、荷兰埃因霍芬理工大学 Marinus E. H. van Dongen 教授。在完成本书研究工作的过程中,施红辉得到了西安交通大学唐照千留学奖学金、日本政府

国费留学生奖学金、日本文部科技省科学研究辅助金奖励研究 A (09750188) 及一般研究 C (12650162)、中国科学院“百人计划”基金、国家自然科学基金 (10672144)、浙江省自然科学基金重点项目 (Z1110123) 及面上项目 (Y1090869)、浙江省提升地方高校办学水平专项资金项目 (XK1203-001-S)、浙江理工大学科研启动基金等课题经费的资助; 罗喜胜得到了中国科学院“百人计划”基金和国家自然科学基金等课题经费的资助。在此一并感谢。

全书 6 章中的内容, 每一章都是一个独立的专题, 但每章之间也存在有机的联系。这种写法也是一种新尝试。在个别小节里, 为了保证章节的系统性和完整性, 也引述了其他研究者的结果。作者希望抛砖引玉, 听取广大读者的批评意见。

作 者

2013 年中秋节于杭州

目 录

前言	i
第 1 章 超声速液体射流	1
1.1 引言	1
1.2 高速液体射流的发生技术	2
1.3 测量技术和方法	5
1.4 射流速度与喷嘴压力	10
1.5 射流速度的测量结果	14
1.6 超声速液体射流的气动特性:单喷口及多喷口喷射	20
1.7 高超声速液体射流	35
1.8 累积加速方法与其他方法的比较	54
1.9 从矩形喷嘴中产生的高速液体射流	68
参考文献	81
第 2 章 水下超声速气体射流	89
2.1 引言	89
2.2 问题的描述	90
2.3 实验装置与实验方法	91
2.4 水下超声速气体射流的流动特性	100

2.5	水下超声速气体射流诱导的水下声场测量	102
2.6	关于流场的讨论	108
2.7	水平喷射二维水下超声速气体射流	110
2.8	垂直向上喷射二维水下超声速气体射流	119
2.9	三维水下超声速气体射流喷射初期的流动特性	136
2.10	垂直向下喷射的超声速气体射流	144
2.11	小结	150
	参考文献	150
第 3 章	高速物体出入水及超空泡流动	156
3.1	引言	156
3.2	超空泡问题的研究范围	163
3.3	实验装置与方法	164
3.4	高速钝体入水初期的瞬态流动	176
3.5	高速钝体入水后诱导的超空泡流动	180
3.6	细长体入水超空泡流动	204
3.7	超空泡出水过程	214
3.8	水平超空泡运动及其与自由面的相互作用	223
3.9	平面尾迹空化研究	231
3.10	关于超声速超空泡流动的讨论	237
3.11	出水超空泡溃灭的理论模型	238
	参考文献	239
第 4 章	伴随相变的高速气体流动	248
4.1	引言	248
4.2	气液相变现象的物理模型	250
4.3	气液两相流动的物理描述	257
4.4	数值方法	266

4.5 气液相变与流动相互作用的典型例子	278
4.6 总结	306
参考文献	307
第 5 章 激波与固体颗粒的相互作用	312
5.1 引言	312
5.2 实验装置与实验方法	313
5.3 激波在空气中的衰减	325
5.4 激波在海绵泡沫中的运动	327
5.5 激波与静止颗粒群的相互作用	337
5.6 颗粒群在激波作用下的输运	349
参考文献	363
第 6 章 激波驱动的气/液两相流动	369
6.1 高速液体对固体表面的冲击	369
6.2 高速液体对深水自由面的冲击	400
6.3 激波和压缩气体驱动的液柱流动及雾化	404
6.4 激波冲击下的气/液界面上的不稳定性	413
6.5 激波与液滴、液柱和液幕(水帘)的相互作用	430
参考文献	443

第 1 章 超声速液体射流

1.1 引言

高速液体射流在工业界有着广泛的应用,最直观的例子就是水射流切割技术^[1-5]。从 20 世纪 90 年代开始,人们开始关注控制汽车尾气中的 NO_x 和碳颗粒的排放量。在柴油发动机中采用高压喷射燃料,可以达到使燃料充分燃烧的目的,然而在高压的驱动下,燃料射流达到了超声速($\sim 345 \text{ m/s}$)^[6-7]。高速液体射流还有一个传统的应用,就是用于模拟航空飞行器的雨滴冲击^[8-10]。当液体射流速度达到高超声速时,它不但可用来进行宇宙碎片(space debris)对航天器的冲击损伤实验^[11-13],对比聚能装药射流(shaped charged)^[14],而且可用于模拟超燃发动机中燃料与高超声速气流的相互作用^[15-17]。

对高速液体射流的研究,不仅涉及空气动力学领域,而且涵盖液体雾化的基本原理。Rayleigh 勋爵^[18]和 G. I. Taylor^[19]建立了液体雾化的理论基础。脉冲高速液体射流的发生技术,源于 Bowden 和 Brunton^[20,21]的先驱性的工作。随后,Ryhming^[22]对该技术进行了理论分析,Edney^[23]则进行了该技术工程设计。本章主要介绍的是,我们在前人的基础上,对高速液体射流发生技术比较系统的研究与开发,以及通过各种测量手段观察到的各种有趣的现象。

1.2 高速液体射流的发生技术

图 1.1 示出了高速液体射流的产生方法。图 1.1(a)中,液体被隔膜密封在一喷嘴中,首先被加速了的抛射体冲击和加速活塞,接着活塞继续通过隔膜压缩液体,并在液体中产生高压。然后,高压驱动液体流出喷嘴前端的小孔,从而形成高速液体射流。这种方法常被称为动量交换方法^[24]。喷嘴材料可以是不锈钢或钛合金,隔膜通常使用橡皮;活塞材料应该比喷嘴的软,以保证喷嘴有足够的使用寿命。抛射体通常由轻气炮加速,材料一般用聚乙烯,当然根据需要也可使用金属。图 1.1(b)所示的方法被称为直接冲击方法,即抛射体直接冲击被密封在喷嘴中的液体。在相同条件下,用这样的方法可以获得更高速度的射流,但是产生的射流的连接性不一定好,因为这与抛射体冲击喷嘴时的接触状况有关^[25]。

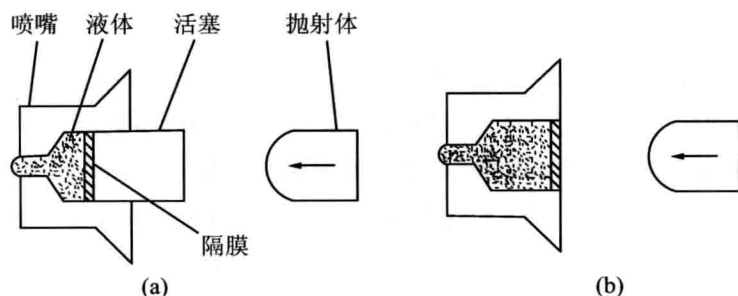


图 1.1 高速液体射流的产生方法

图 1.2(a)示出了高速液体射流发生装置,它主要由一个喷嘴装置和一个用于加速抛射体的轻气炮装置组成,其中轻气炮由高压气室、隔膜连接部和发射管(加速管)组成。图 1.2(b)给出了装置的照片。隔膜通常使用聚乙烯膜片或铝膜片,抛射体置于发射管中靠近隔膜连接部的那一端。当高压气体的压力超过破膜压力之后,隔膜破裂,高压气体进入加速管加速抛射体。加速管的管径和长度根据抛射体的质量和所要求的膛口速度用内弹道学理论可进行计算与预估^[26]。抛射体在喷嘴装置里的运动过程已经由图 1.1 解释清楚了,而由

此产生的高速液体射流可以轻易地达到超声速。

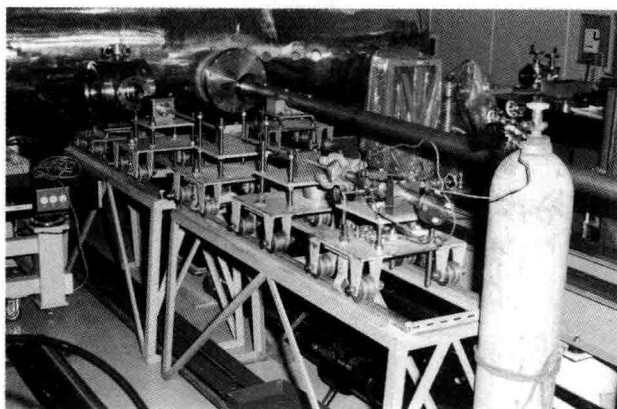
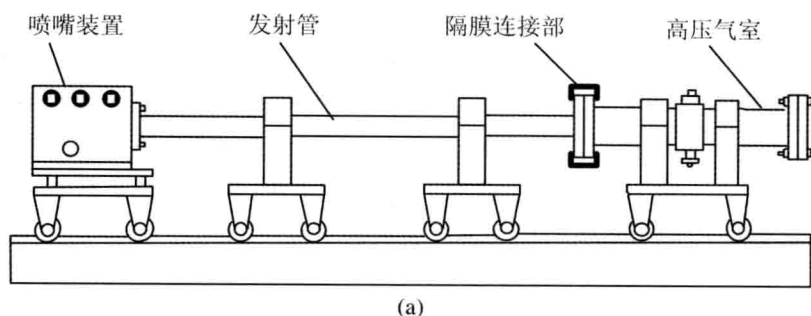
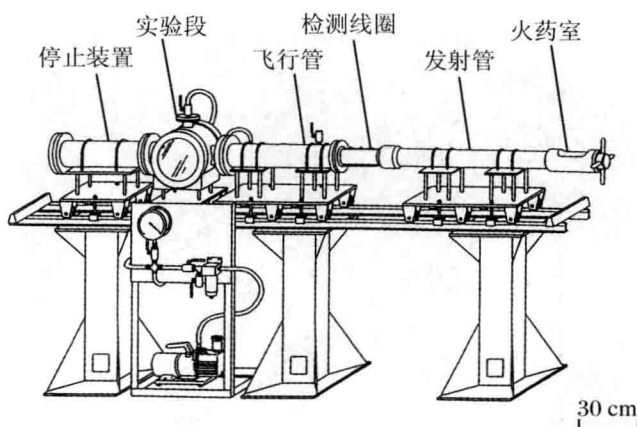


图 1.2 高速液体射流发生装置示意图及照片

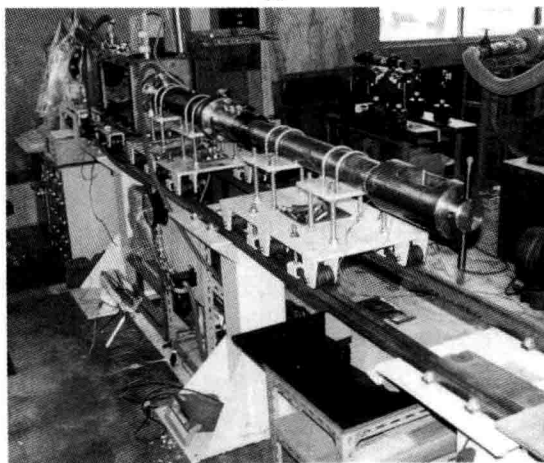
要获得高超声速液体射流,就要增加抛射体的速度,而火药炮能轻易地将抛射体加速到 1 km/s 以上^[27]。图 1.3(a) 示出了产生高超声速液体的火药炮装置,它主要由火药室、发射管、检测线圈、飞行管、实验段和停止装置组成。实验段中可以抽真空或者填充其他气体。真空泵被置于炮架导轨的下面,从真空表读出真空度。喷嘴被悬挂设置在实验段和飞行管之间一特制的隔板上。图 1.3(b) 示出了装置的照片。

为了保证高超声速液体射流的获得和射流品质,不但需要提高抛射体速度,而且要精心设计喷嘴装置。如图 1.4(a) 所示,液体被前后两片薄的聚乙烯膜片密封在内圆柱体内,内圆柱体被套在外圆柱体里面;外圆柱体通过螺纹结构,前端与渐缩喷嘴相连接,后端与支撑体相连接。支撑体被固定在法兰上。来自火药炮的抛射体冲击液体,强冲击波使得聚乙烯膜片瞬间粉碎,因此它们不会对液体射流产生影响。在压力驱动下,液体先在具有渐缩通道的内圆柱体

里被加速,当液体进入喷嘴后又再次被加速^[28]。因为有多次加速,因此这种方法常被称为累积加速方法(cumulation method)。图 1.4(a)的设计,具有操作方便、结构清晰等优点;它的缺点是,内圆柱体在超高压作用下向前伸展时,容易造成喷嘴螺纹的损坏。图 1.4(b)示出了改进后的设计^[27,29]。它的设计原理仍然吸收了上述的内外圆柱体套接的优点,不同的是,前后两个外圆柱体通过 8 个长螺栓连在一起并将喷嘴固定牢。这样,冲击能量被较多地传回了悬挂隔板,喷嘴装置的使用寿命得到了提高。



(a)



(b)

图 1.3 产生高超声速液体射流的火药炮装置及照片

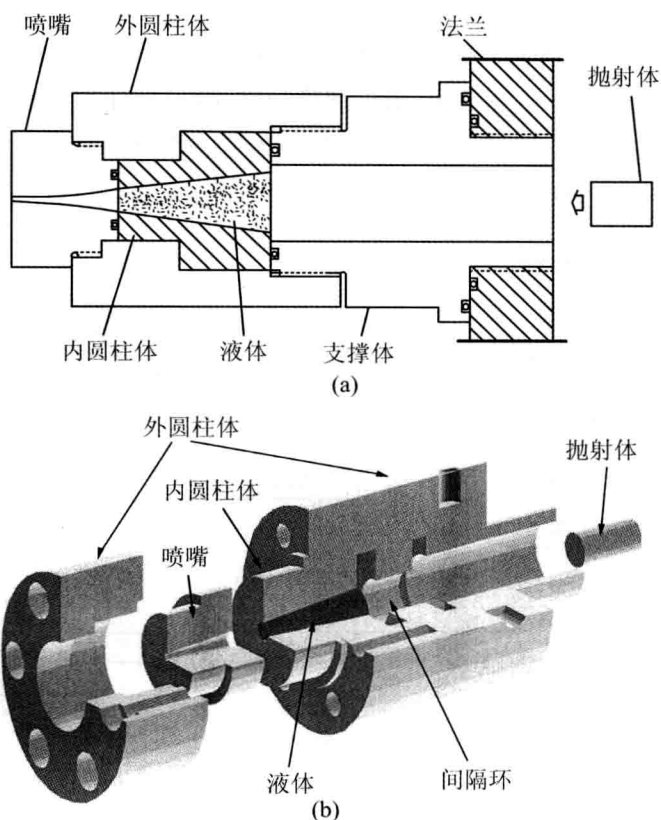


图 1.4 高超声速液体射流的喷嘴装置设计

1.3 测量技术和方法

图 1.5 示出了产生射流前后轻气炮动作的时间顺序,由此可知需要进行测量的各物理量。在 $t = 0$ 时刻,轻气炮还未动作,此时向高压室注入 $1.3 \sim 1.5$ MPa 压力的氦气,加速管内的气体为空气。在 $t = t_1$ 时刻,隔膜破裂,高压气体驱动抛射体在发射管内运动;抛射体压缩前面的空气,形成膛内激波。在 $t = t_2$ 时刻,抛射体离开发射管,冲击喷嘴后产生射流(图 1.1 中已有详细解释)。因此,在装置的 B、C、D、E 处,分别钻开直径为 1.5 mm 的小孔。当两束激光分

别通过 D 和 E 时,可测出腔内激波的速度;当两束激光移至 B 、 C 时,可测出抛射体冲击喷嘴前的速度;当两束激光移至喷嘴外的 A 处时,可以测出射流的速度;如果将两束激光移至 A 和 B ,根据测得的时间,可以计算出从抛射体冲击喷嘴后部到射流从前端流出所需的时间,我们称这个时间为液体射流产生时间。我们将在后面陆续介绍这些结果。

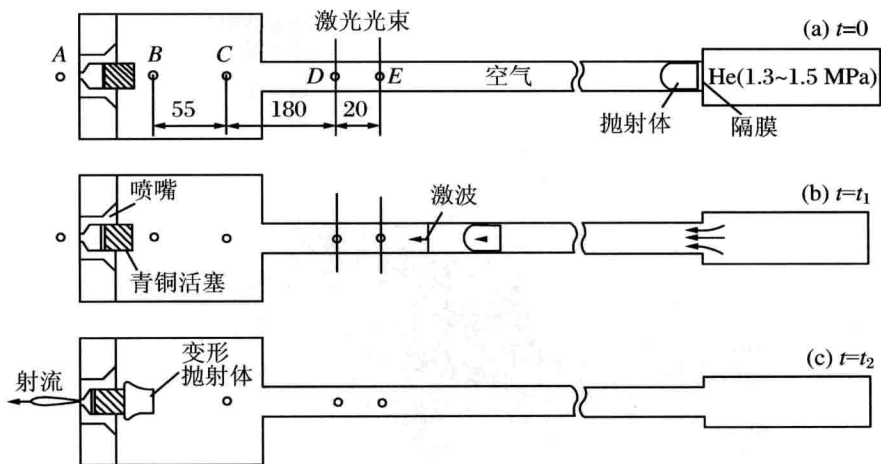


图 1.5 液体射流产生的时间顺序和各测量要素
(测点 B 、 C 、 D 、 E 处的孔径均为 1.5 mm)

图 1.6 给出了激光测速装置的示意图。由一台激光器,例如 12 mW 功率的氦氖激光器,发出一束激光,经过一个半透明反光镜和几个全反射镜 M 之后,形成一定间距的两束平行激光(光束 1 和 2)。当射流经过这两束激光时,光束分别被瞬时遮断。此时接收激光的光电二极管给出光电电压下降的信号,由示波器和计数器记录下电压信号。根据测出的时间间隔以及已知的激光束之间的距离,就可计算出速度。图 1.7 给出了一个腔内激波速度的测量实例。两束激光的位置分别位于图 1.5 中所示装置的 D 和 E 点,因此两束激光之间的距离为 20 mm。由图可知激波经过两束激光的时间为 $27\text{ }\mu\text{s}$,所以算出激波速度为 741 m/s;而根据激波管理论^[30],预测出的激波速度为 749 m/s。

为了保证瞬态流场的光学可视化的成功,例如全息摄影、高速连续摄影、单张拍摄(single shot)等,必须涉及可靠的触发方法。图 1.8 和 1.9 分别给出了激光束触发装置和导线触发装置,即激光布置在离喷嘴不远处,自上而下与射流运动轴线相垂直。当射流产生后,遮断激光,随之产生光电信号。光电信号

经由延时装置,通往光源或相关光学仪器。而导线触发装置是在发射管的适当位置,穿过管的中心线,布置一根绷紧的细导线(例如直径为 0.3 mm 的铜线^[31])。当抛射体通过这个位置时,导线被切断,导线的回路就会发出一触发信号。用这种方法可以得到稳定可靠的触发信号,但是给导线绝缘具有一定难度,特别是对薄壁的发射管。

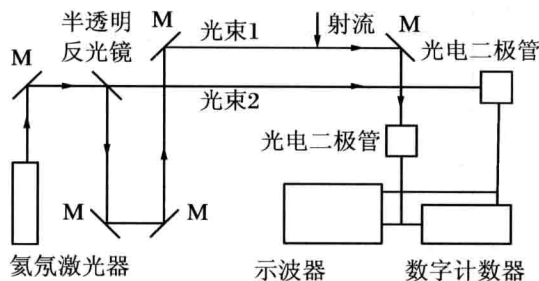


图 1.6 激光测速装置

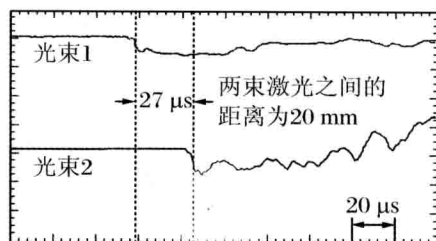


图 1.7 膛内激波速度的测量实例

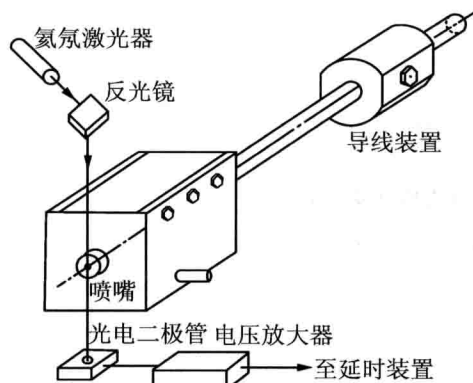


图 1.8 激光束触发装置

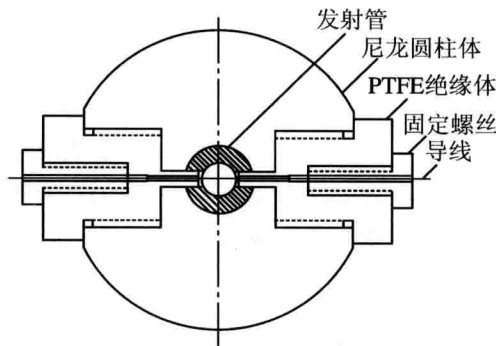


图 1.9 导线触发装置

图 1.10 示出了双曝光激光全息流场可视化系统,以及高超声速液体射流的实验装置。一台每脉冲能量为 10 J 的红宝石激光器 1 发出一定时间间隔的两个脉冲,每个脉冲的持续时间为 25 ns ,激光经过反光镜 M、分光镜 BS、透镜 L 和抛物镜 2 后,形成平行主光路。主光路穿过流场后,经过对面的抛物镜 2、反光镜 M 和透镜 L 后,将影像投在全息干板 3 上。同时,经过分光镜 BS 的另一束激光成为参考光,经过别的路径也投射在全息干板 3 上,与主光相干后形成干涉条纹。然后,全息干板要被放置到再现(reconstruction)光路中进行影像的重建^[32]。图 1.10 中所示的火药炮装置已在图 1.3 中作了介绍。需要指出的

是,抛射体 5 中预埋有一个小磁铁,当抛射体及磁铁经过两个检测线圈 7 时,在线圈中诱导出电流;电流信号经放大器 10 后,送入计数器 11,再经过延时装置 12,触发激光器 1。从计数器中可以读出抛射体经过线圈的时间,由此可算出抛射体的速度。

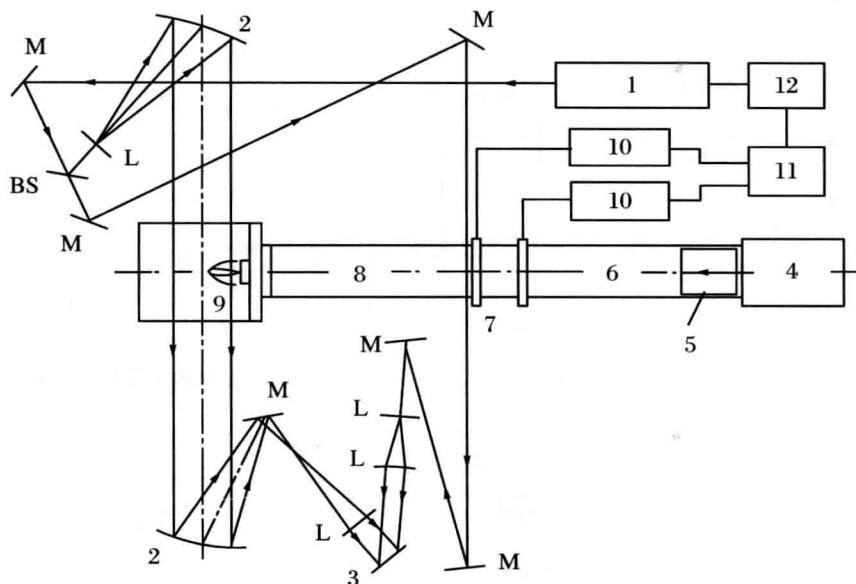


图 1.10 双曝光全息干涉流场可视化系统

1. 红宝石激光器(10 J/脉冲);2. 抛物镜;3. 全息干板;4. 火药室;5. 抛射体;
6. 发射管;7. 检测线圈;8. 飞行管;9. 射流;10. 放大器;11. 计数器;12. 延时装置;
M. 反光镜;BS. 分光镜;L. 透镜

为了观察高速液体射流在飞行中的连续演化过程,需要采用高速摄影机。图 1.11 给出的高速摄影系统中,摄影机的触发方法和图 1.8 中介绍的相同,即当射流遮断激光束后,光电二极管给出触发信号,再经延时装置送到高速摄影机。Imacon 468 型高速相机的最大拍摄速率超过 10^6 张/秒,足以满足高超声速液体射流的应用。图 1.12 示出了进行单张拍照的实验装置。氙气闪光灯或频闪仪和一台打开了快门的相机被一起布置在一个喷嘴出口段的暗室中,闪光灯与相机成 90° 。在暗室中不适合采用激光束触发方法,因此将直径为 0.5 mm 的铅笔芯安装在喷嘴出口,将铅笔芯接入触发回路。射流生成后,立即切断脆性的导电铅笔芯,从而触发闪光灯发光,将射流记录在相机的胶片上。Sugahara NP-1A 型氙灯的发光时间仅为 180 ns,基本上可以实现将影像“冻结”在胶片上。

的目的。

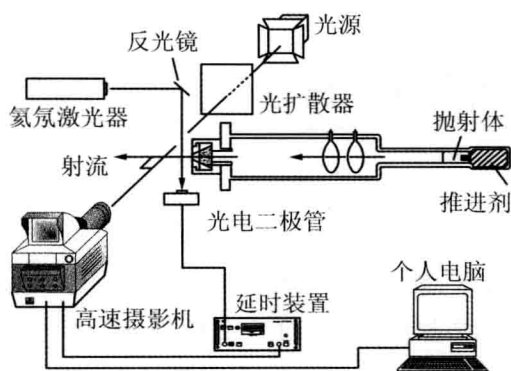


图 1.11 高速摄影及触发装置

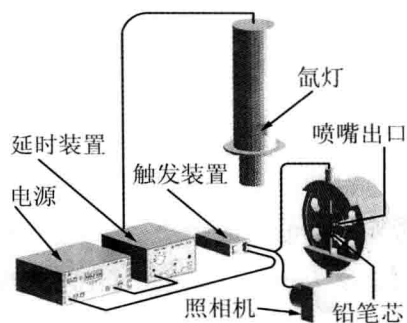


图 1.12 氩气闪光灯照明方法

获得喷嘴压力的实验数据,对于了解射流的生成机理十分重要。如图1.13所示,液体被装入一个特制的测压室,压力传感器与被测液体直接接触,液体的左侧被一橡皮隔膜密封。图中所示的加压方式是前面已介绍过的动量交换方法,如果去掉青铜活塞,就可以测量用直接冲击方法得到的压力(图 1.1)。图 1.13 中画的是瑞士 Kistler 6227 型压力传感器。测压室经过改造,也可以与其他型号的压力传感器相匹配,例如灵敏度更高的聚乙二烯二氟化物(PVDF)压电薄膜压力传感器^[26,33]。

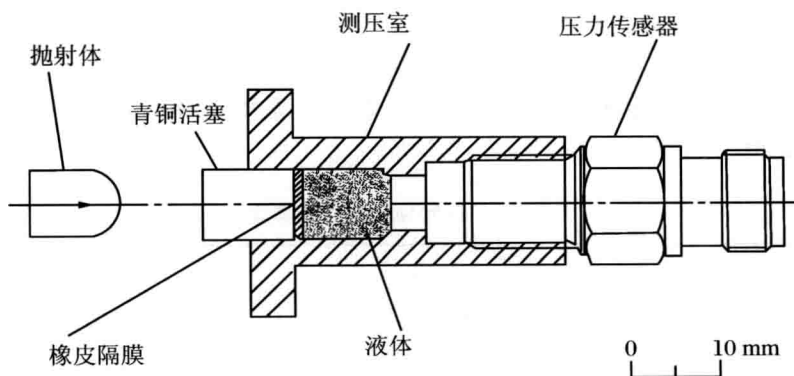


图 1.13 喷嘴压力的测量方法