

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2011.S0.012

# 《冲击波物理》课程教学探索

汤文辉, 冉宪文

(国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

**[摘要]** 根据多年教学实践, 就课程内容组织中的一些问题进行了探索, 重点介绍了课程教学时的指导思想。

**[关键词]** 冲击波物理; 课程教学; 指导思想

**[中图分类号]** G642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2011)S0-0037-03

## The Research on Teaching the Shock Wave Physics Course

TANG Wen-hui, RAN Xian-wen

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The shock wave physics is a typical basic course for the students who major in applied physics in National University of Defense Technology. According to our many years' teaching experience, some questions on designing the structure of the course are researched, and the guidelines to teach the course are mainly introduced.

**Key words:** shock wave physics; course lecturing; guidelines

### 一、引言

冲击波既是一种常见的自然现象, 又是一种人类改造自然界的工具。在自然力产生的冲击波中, 最常见的是雷电冲击波。此外, 大地震、火山喷发和陨星撞击等自然现象都会产生冲击波。在宇宙空间, 各种星球、星云和星系中也在不断地产生着冲击波现象。自然形成的各种冲击波现象既体现了自然界的无穷奥妙, 同时也丰富了自然界的运动图像。研究表明, 甚至地球上生命的形成过程也是与冲击波密切相关的<sup>[1]</sup>。

地球上的人造冲击波也有多种形式。牛鞭可能是最早产生弱冲击波的工具之一。在马戏团, 总能听到驯兽师手中皮鞭特有的劈啪声, 这种声音就是较弱的冲击波产生的。火药和现代化学炸药的发明, 使冲击波的应用越来越广泛。众所周知, 利用冲击波对周围介质做功并产生高压、高温效应是实现武器弹药杀伤目标的基本原理, 威力无穷的核爆炸冲击波更是人类利用智慧展示其巨大力量的一个典范。然而, 我们还要看到冲击波的另一面, 它同时也是人类改造自然环境的一种强有力工具。例如, 冲击波作用使得采矿、采石、开山、筑坝、旧

建筑物的破除等工程建设的效率大幅提高, 利用冲击波原理所形成的爆炸加工、爆炸焊接、爆炸复合等特种加工手段可完成传统加工手段所无法实现的加工作业。事实表明, 冲击波效应在很多工程建设中发挥了重要作用。在科学研究方面, 利用强冲击波压缩固体可达到百万大气压以上的压强, 从而为高压乃至极端高压下的物性研究提供条件。

由此可见, 冲击波不仅与人类日常生活密切相关, 而且与国民经济建设、科学技术以及武器装备的发展紧密相联, 因此我们需要了解它、认识它、研究它、利用它。

### 二、课程基本内容

冲击波物理是应用物理专业本科生的一门专业课, 共50学时。就课程体系而言, 目前国内外还没有对冲击波物理的体系结构形成一个统一的想法, 所以教师的选择非常重要。我校应用物理专业本科生的知识特点是, 流体力学知识明显不足, 而物理基础特别好。据此, 我们针对性地设计了如下课程内容:

首先是绪论课, 主要介绍各种冲击波现象、冲击波的基本特征及其在各领域中的作用。

**[收稿日期]** 2011-07-22

**[作者简介]** 汤文辉 (1964-), 男, 湖南沅江人, 国防科学技术大学理学院教授, 博士, 博士生导师。

第一章主要介绍流体的基本性质和基本方程,主要包括流体质点和连续介质模型、流体的热力学性质、流体运动的描述方法、流体运动方程的推导等内容。由于应用物理专业学员没有系统学习过流体力学知识,所以这一章的内容非常重要,通过学习可以建立流体力学的基本概念,同时掌握最基本的守恒定律在流体运动中的表现形式。

如果流体在保持熵不变的前提下进行可压缩流动,则产生简单波。而简单波解可根据可压缩流体运动基本方程得到,因此第二章主要介绍平面一维等熵流动,主要包括波动方程的导出、扰动的传播、特征线、简单波等概念,以及简单波区的解、简单波的相互作用、简单波波变化的机理和准则等内容。

正常流体中的压缩波一定会发展为冲击波,而冲击波却伴随熵的增加,因而不属于简单波。而流体主要又可分为气体和凝聚介质两大类,所以第三章主要介绍理想气体中的冲击波,包括冲击波基本关系式的推导、理想气体的冲击压缩线、冲击波的基本性质、冲击波的相互作用、击波管等问题。

固体材料的应用非常广泛,例如装甲、导弹壳体以及各种防护工程等大都是由多层固体材料构成的,因此,研究固体的冲击压缩具有重要意义。固体当然不属于流体,但高压下的固体具有流体属性;因而可当作流体处理。所以第四章专门讨论固体的冲击压缩。由于固体的性质与理想气体有很大差别,所以第四章主要包括固体的物态方程、固体的冲击压缩线、冲击压缩状态与卸载状态的确定、冲击波与界面的相互作用、冲击相变等内容。

### 三、开展课程教学的指导思想

#### (一) 以物理学理论为主线,注重与力学知识的交叉融合

冲击波既涉及物理学领域,也涉及力学领域。例如,前苏联著名学者 Zeldovich 的著作“激波和高温流体力学现象物理学”<sup>[2]</sup>被冠以“力学名著”称号。然而,正如该书书名所宣示的、以及作者在其序言中所指出的,该书阐述的是物理学问题。与此不同的是,另一位著名学者 Landau 的名著“流体力学”(包括冲击波、爆轰波、气体流动等内容)是以前苏联理论物理教程第6卷的形式出版的<sup>[3]</sup>,而且作者在前言中明确指出,这是理论物理的一个分支。根据冲击波物理本身的特点以及学员的知识基础,本课程是以物理学为主线来展开的。当然,在阐述各种现象的物理实质时,尽量体

现了物理学和力学的相互渗透和交叉。例如:

(1) 关于流体的基本性质,从物质的基本构成出发引出连续介质力学模型;从流体的黏性引出流体与固体在力学上的区别,并从物理上对黏性的机理进行解释。

(2) 关于流体运动基本方程,从物理学守恒定律出发引出流体运动基本方程的数学表达形式,并对数学表达式每一项的物理意义进行深入分析。

(3) 关于简单波,这个内容在传统上属于气体动力学范畴,本课程在求解简单波过程中强调了热力学量之间的相互关系;引入了扰动的物理分析和简单波波变化的物理机制;分析了完全稀疏波的特点。根据简单波理论,可得到完全稀疏波的一个重要结论,即“逃逸速度”。但我们用物理观点对“逃逸速度”进行了分析,指出“逃逸速度”实际上是实现不了的。

(4) 关于冲击波的性质,主要采用热力学理论特别是熵增原理进行分析,从而使冲击波的性质更加清晰。

(5) 关于固体中的冲击波:固体与气体存在内在的差别,本课程通过简要物理分析引出固体物态方程概念,并对其进行简要介绍;冲击卸载与冲击压缩是不可分割的一个重要过程,课程从物理上对卸载过程进行了深入分析,阐述了卸载状态的物理特征,从热力学关系出发推导出与冲击压缩线相容的等熵线,从而在等熵压缩和冲击压缩两个概念之间建立起明确的数学联系。

#### (二) 在阐述基本规律和现象时,力求建立鲜明的物理图像

冲击波物理内容广泛,现象繁多,研究成果更是硕果累累,琳琅满目。然而,作为一门课程,只能要求学生掌握基本的概念和知识,当然还应冲击波基本规律和现象的物理本质有必要的了解。为了实现这个目的,不能只要求学生去死记硬背各种定理和公式,而要充分发挥教材的作用,使学生通过鲜明的物理图像来掌握物理本质。本课程注意到了这个问题,在阐述基本规律和现象时特别注重物理图像的直观展现,一些具体的处理方法如下:

(1) 质量、动量、能量守恒定律的数学表达在物理上是非常简明的,但在欧拉描述的流体运动方程中却显得非常的“与众不同”,初学者往往难以理解。本课程利用控制体的概念进行推导和分析,使得在复杂数学表示中仍然可以较清楚地看到其所代表的物理含义。

(2) 平面波和球面波在传播过程中呈现出明

显不同的特点,但二者之间的差别并不是显而易见的。对于平面波,如果不考虑黏性和热传导效应,其形状、幅度以及能量密度均保持不变。对于一个平面压缩波,扰动区域的物质总是被压缩,而稀疏波波后的区域总是处于膨胀状态。但对于球面波,情况明显不同。在一个球面波压缩区域之后,必然跟随一个稀疏区域。各种论著所给出的点爆炸冲击波均呈现出这样一种特征,但一般都没有对这样一种特征进行解释,而本课程通过简明的数学推导揭示出了这个特征的必然性,从而使平面波和球面波呈现不同特征的物理机制和图像非常直观。

(3) 简单波波形在传播过程中必然要发生畸变,本课程采用特征线方法进行分析,使得波形变化的趋势非常清晰而自然。

(4) 对固体中的冲击波进行研究和实验测量具有重要的科学意义和军事应用价值<sup>[4]</sup>。本课程采用波系分析方法非常直观地给出了冲击波波形的形貌特征和传播过程中的变化趋势,同时还给出了冲击波与界面相互作用后的基本特征。

(三) 重视基本理论的应用,为实际问题打开窗口

冲击波理论提供了爆炸武器毁伤效应的基本原理,因此掌握冲击波理论的初步应用能力是非常重要的。本课程通过一些典型例题的设计,展现了冲击波基本理论的灵活运用,从而为科学研究和工程应用打开了一扇窗口。

(1) 根据热力学理论,严格的等熵压缩是无法实现的,但“准等熵压缩”无论对于固体高压物性研究还是核武器研究都具有重要意义,当然准等熵压缩涉及一系列复杂的技术问题<sup>[4]</sup>。本课程利用一个例题说明了基本原理的应用和计算方法<sup>[5]</sup>,定量地给出了多次冲击压缩与等熵压缩之间的相互关系,并由此推论:等熵压缩可通过多次不太强的冲击压缩来逼近,从而为准等熵压缩的研究打下了理论基础。

(2) 冲击波与冲击波或稀疏波相互作用后的量化结果是武器毁伤效应分析中经常要遇到的问题,虽然冲击波与稀疏波的基本理论在很多著作中都有介绍,但一面对实际问题,很多初学者往往束手无策。本课程通过一个例题展现了冲击波理论在冲击波相互作用定量分析中的应用<sup>[5]</sup>。只要学生消化了这个例题,就可利用计算机很容易地解决类似问题,从而为复杂实际问题的解决和结果分析打下基础。

(3) 冲击波在多层介质中的传播是一个常见的实际问题,初学者对于波与界面相互作用的定性分析很容易掌握,但要进行定量分析往往都觉得很困难,甚至无从下手。本课程利用两个例题清晰地说明了冲击波与界面相互作用的定量计算方法<sup>[5]</sup>,从而为固体中冲击波理论的实际应用奠定了基础。

(四) 以宏观规律为主要基础,恰当引入微观概念

冲击波物理的核心内容是基于宏观层次的物理规律和连续介质模型而建立起来的。以连续介质模型为基础,假定每一个质点在任意时刻都处于热力学平衡态(局部热动平衡假设),再运用基本物理原理,就可得到冲击波的传播及其与物质相互作用规律。但为了阐明一些宏观现象的内在机理,某些内容涉及到了原子分子的观点,从而突破了宏观连续介质模型。例如,关于理想气体中极强冲击波压缩比分析、冲击波熵增的机理、冲击波波阵面结构、高压气体飞向真空的逃逸速度等。当然,对于这些知识点上所引入的微观概念是容易理解的。我们希望,冲击波物理的初学者既不要被自己已有的关于原子分子的微观概念和知识所拖累,也不要被宏观的连续介质模型所限死。同时希望初学者在学习本课程后能形成开放的思维体系,从而为将来更加深入的学习和创新研究打下理论基础。

#### 四、结束语

“冲击波物理”是我校应用物理专业的一门特色专业课程,本文反映了作者在课程教学中的一些基本理念和想法。我们希望,学员在学习本课程以后,既能掌握冲击波物理的基本知识和概念,又具备一定的解决实际问题的能力。

#### [参考文献]

- [1] 格拉斯 II(加拿大)著,董务民,梁锡智,张保栋译. 激波和人[M]. 北京:科学普及出版社,1984.
- [2] 泽尔道维奇,莱依捷尔著. 激波和高温流体力学现象物理学(上、下册)[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [3] Landau LD, Lifshitz E M. Fluid Mechanics[M]. second edition, Oxford: Butterworth - Heinemann Press, 1987.
- [4] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [5] 汤文辉. 冲击波物理[M]. 北京:科学出版社,2011.

(责任编辑:胡志刚)