

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2018.05.013

欢迎按以下格式引用:鲁正,夏子祺.中外土木工程专业爆炸动力学课程比较研究[J].高等建筑教育,2018,27(5):72-77.

# 中外土木工程专业爆炸 动力学课程比较研究

鲁正,夏子祺

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**爆炸动力学课程是高校土木、力学等专业课程的重要组成部分,内容涉及爆炸的发生和发展规律,爆炸波在介质中的传播及引起介质和结构的变形、破坏、抛掷和振动等力学效应,以及如何防护爆炸,等等。文章主要介绍了爆炸动力学课程的发展情况,以同济大学、广州大学、北京理工大学、中国科学技术大学等国内高校,以及加州大学伯克利分校、伊利诺伊大学香槟分校等国外高校为例,通过对课程设置、课程要求和课程内容讨论和研究发现,不同学校的课程设置与其人才培养模式和对爆炸动力学的重视程度有关,最后根据研究结果,提出适合中国国情的教学改革方案。

**关键词:**爆炸动力学;课程设置;教学改革;高等教育;高等工程教育

**中图分类号:**G642 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2018)05-0072-06

爆炸,是大量能量在短时间内释放或者急骤转化的现象,爆炸力学则是一门主要研究爆炸的发生和发展规律,爆炸波在介质中的传播及引起介质和结构的变形、破坏、抛掷和振动等力学效应,以及如何防护爆炸的学科,是流体力学、固体力学与物理学、化学相互交叉学科,在国防领域、民用领域有着重要作用,例如武器研制、交通运输、水利建设、矿藏开发、机械加工,等等。

系统总结国内外的教学经验,对于建筑学教育的改革和发展具有重要的现实意义<sup>[1]</sup>。目前,国内在爆炸力学方面清华大学、北京理工大学、中国科学技术大学、天津大学、西北工业大学、浙江大学、中国矿业大学、广州大学等高校走在了研究前列,但各高校研究重点有所不同,因此爆炸力学所属学科和院系会有区别。而在国外基本没有高校单独开设爆炸动力学课程,多涵盖在结构动力学课程中。文章立足于土木工程学科,通过对比分析同济大学、广州大学、北京理工大学、中国科学技术大学等国内高校,和以加州大学伯克利分校、伊利诺伊大学香槟分校为代表的国外高校,提出相应的教学改革建议。

修回日期:2017-06-22

基金项目:同济大学教学改革研究与建设项目资助

作者简介:鲁正(1982—),男,同济大学土木工程学院副教授,博士,主要从事课程体系对比研究,(E-mail) luzheng111@tongji.edu.cn。

## 一、课程概况

### (一) 爆炸力学发展概述

对爆炸的研究从 8 世纪中唐火药开始,到第二次世界大战,实现了炸药的收缩爆炸,形成了塑性动力学和聚能射流的理论基础。此后,美国和前苏联,大力发展核武器、洲际导弹等,同时不断改革各种常规武器,多种新型抗爆技术和爆炸加工技术层出不穷,使得爆炸力学有了长足的发展<sup>[2]</sup>。学科也相应地发展为包含爆轰学、应力波和冲击波理论、材料动力学、爆炸工艺力学、爆炸结构动力学等多门学科在内的研究体系。

中国于 1956 年曾进行近万吨的矿山大爆破<sup>[3]</sup>,又在大跃进期间实现了定向爆破和爆炸成形的研究工作。20 世纪 60 年代,郑哲敏等院士在中国科技大学力学系创建工程爆破专业,后改名为爆炸力学专业。目前,除了武器工程、工程力学专业外,在材料、防灾、计算机科学,甚至宇宙探索等方向都设有相关课程。

在爆炸条件下,普通的连续介质力学理论不再适用,必须深入结构的微观层面。此外,在考虑爆炸对结构的作用时,既要从力学的角度,还要从化学、电磁学等多方面去考虑,需要物理、数学、力学等多方协作完成<sup>[4]</sup>,爆炸力学也因此成为一门复杂的交叉边缘学科,具有强大的生命力。

### (二) 课程设置概况

同济大学土木工程学院防灾减灾工程及防护工程将爆炸动力学设置为硕士研究生的专业学位课,共计 2 学分,36 课时,要求预修弹性力学、土力学等课程。课程主要采用课堂教学、课后作业和期末考试的方法,使学生掌握爆炸动力学的基本原理以及爆炸能应用中的有关动力学问题,其内容包括爆炸波的形成与传播、爆炸效应估计、抗爆结构分析等。

广州大学土木工程设有岩土工程、结构工程、防灾减灾工程与防护工程、桥梁与隧道工程四个二级学科。其中,防灾减灾工程包含 8 个方向,涉及抗震减震、抗风、地质灾害,等等,工程抗爆为其中一个方向,要求学生掌握扎实的数学和力学知识,系统掌握钢筋混凝土结构、钢结构、高层结构、岩土工程、桥梁工程等各种结构工程知识,并具有一定的生产实践和必要的试验设计能力,对土木工程学科领域的国内外研究现状、发展趋势和前沿领域的发展动态有较深入了解,具有初步从事科学研究,或独立解决本学科相关工程技术问题的能力。

此外,在广州大学的工程力学硕士点中也开展了隔震与减振技术及理论、爆轰理论、爆炸与冲击防护、结构冲击响应、危爆物检测等领域的研究,其中冲击动力学课程要求学生掌握冲击动力学的理论及其应用技术,具有从事本方向科研能力,熟悉本方向国内研究动态和国际最新发展趋势。

中国科学技术大学为力学专业研究生开设了结构冲击动力学课程,共计 4 学分,80 学时,以期让学生熟悉结构冲击动力学的一般概念、原理、分析方法,以及在工程特别是在国防工程中的应用。同时在工程力学专业开设了 3 学分、60 学时的炸药理论和爆炸技术课程。

北京理工大学开设有爆炸力学相应课程,适用于工程力学、固体力学、一般力学与力学基础、弹药工程、烟火能源等专业,主要学习爆炸作用的能量转换、爆炸对目标的作用、爆炸焊接、爆炸加工,以及爆炸力学在工业中的实际应用。

加州大学伯克利分校以及伊利诺伊香槟分校均未在土木工程专业单独开设爆炸动力学课程,但均开设了结构动力学课程,这其中涵盖有爆炸动力学的相关课程。伯克利分校开设了结构动

力学课程和随机结构动力学课程,分别为3学分,而伊利诺伊香槟分校则设置两门结构力学课程,分别为3学分和4学分。此外,伊利诺伊香槟分校的航空专业开设有航空动力学课程,其中涉及抗爆相关知识,4学分。由此可以看出,这两所学校认为爆炸动力学属于结构动力学范畴,故合并教学。

## 二、课程设置要求

以同济大学、广州大学、大连理工大学、中国科学技术大学、加州大学伯克利分校以及伊利诺伊香槟分校为例,对其课程要求列表对比如下。

学校名称	课程名称	课程性质	学时
同济大学	爆炸动力学 (Dynamics of Explosions)	防灾减灾工程及防护工程专业学位课	2学分,36学时
	建筑抗爆原理 (Elements of Blast Resistant)	指定方向选修	2学分,32学时
广州大学	冲击动力学 (Dynamics of Explosion)	任选课	2学分,32学时
	土动力学与岩土地震工程 (Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering)	岩土工程专业必修	2学分,32学时
大连理工大学	爆炸焊接原理 Principle of Explosive Welding	实验力学专业必修	2学分,32学时
	爆炸实验力学 Exploration experimental mechanics	实验力学专业必修	2学分,32学时
中国科学技术大学	结构冲击动力学 (Structural Impact Dynamics)	力学专业必修	4学分,80学时
	炸药理论和爆炸技术 (Explosive Theories and Explosion Technology)	力学专业必修	3学分 60学时
加州大学伯克利分校	结构动力学 (Dynamics of Structures)	结构工程专业必修	3学分 45学时
	随机结构动力学 (Stochastic Structural Dynamics)	结构工程专业必修	3学分 45学时
伊利诺伊香槟分校	结构动力学 I (Structural Dynamics I)	土木工程专业选修	36学时
	结构动力学 II (Structural Dynamics II)	土木工程专业选修	36学时
	航空动力学 (Astrophysical Dynamics)	航空工程专业选修	36学时

课时要求,同济大学、广州大学、大连理工大学每门课程均为2学分,同济大学的课时要求稍多,为36学时,而其余学校均为32学时。伊利诺伊香槟分校课时为36学时,加州大学伯克利分校课时为45学时,但均为选修。中国科学技术大学的课时要求明显较高,为80学时和60学时,可见中国科学技术大学在抗爆方面的重视程度。

开课数量,同济大学仅为一门必修课,而其余学校均开设有2~3门课程,课程内容更加丰富,涉及的内容也更为全面。选修与必修并行,给学生提供了更多选择的机会,有助于学生挖掘自身的兴趣点,开展更为深入的学习研究。

### 三、课程内容对比

六所学校爆炸动力学课程内容对比分析如下。

表1 中国科学技术大学爆炸动力学内容

课程名称	课程内容
结构冲击动力学 (Structural Impact Dynamics)	主要研究结构在强动(如冲击或爆炸)载荷作用下的响应和破坏。课程包括:梁、板和壳的静塑性行为;梁、板和壳的动塑性行为;横向剪切和转动惯性效应;有限变形效应;应变率效应;结构的动态渐进屈曲;结构的动态塑性屈曲;尺度率等
炸药理论和爆炸技术 (Explosive Theories and Explosion Technology)	主要讲授炸药的物理、化学和爆炸性质,炸药的热化学,爆炸反应方程式,炸药的热分解,热爆炸理论,炸药的燃烧,炸药的爆红,炸药的感度计适用范围,炸药的爆炸做功能力,测试技术和安全技术;讲授炸药在空中、水中、岩土中爆炸作用的一般规律和工程应用技术。在此基础上讲授军用民用炸药的合成与设计原理、战斗部结构、武器效应、工程爆破技术和安全防护及防爆技术。

表2 广州大学爆炸动力学内容

课程名称	课程内容
建筑抗爆原理 (Elements of Blast Resistant)	主要研究土木工程抗爆性能、工程抗爆安全监测和危险等级评估、材料和结构动态力学性能,包括工程材料与结构在爆炸荷载下的动态响应、炸药检测、装甲防护与掩体设计、人体冲击损伤与防护、材料本构关系和损伤断裂性能等。要求学生掌握工程抗爆与抗冲击的基础理论、实验技术与土木工程防护设计方法,熟悉本方向国际前沿领域最新发展动态与趋势
冲击动力学 (Dynamics of Explosion)	主要研究材料和结构在冲击和爆炸载荷作用下的动力学过程和效应,(1)材料的动态力学性能,包括材料本构关系、高温和高压条件的状态方程、动态断裂、冲击相变等;(2)冲击结构动力学,包括结构的冲击屈曲、结构塑性稳定性、结构的冲击吸收原理、材料响应与结构响应的耦合关系等;(3)冲击波与爆轰波,包括应力波理论、冲击波在各种介质中的传播规律、含能材料起爆机理、爆轰波作用原理等;(4)冲击动力学实验,包括冲击动力学实验原理、空气炮和 SHPB 实验系统、动态力学测量方法、数值模拟实验方法等;(5)冲击动力学的应用,包括防护与安全设计、冲击合成、爆炸加工、爆破工程等
土动力学与岩土地震工程 (Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering)	在动荷载(如地震、海洋波浪、爆炸等)作用下岩土体的力学性能以及地基、土工结构物和边坡等动力反应分析方法及其在工程设计中的应用

表3 同济大学爆炸动力学内容

课程名称	课程内容
爆炸动力学 (Dynamics of Explosions)	(1)应力波理论。热力学的基本概念、应力波的分类、液体和气体中的应力波、固体中的应力波。(2)爆炸及其在介质中的效应。爆炸问题的表述、炸药的爆轰、气态爆轰产生的喷流、接触爆炸产生的荷载、邻近爆炸产生的荷载、介质中的爆炸效应、结构的扰动、聚能装药爆炸、核爆炸。(3)空中爆炸理论及其应用。爆炸波的形成、无限大气中的爆炸波参数、地面接触爆炸的冲击波参数、冲击波阵面上的热力学量之间的关系、冲击波的反射、冲击波对物体的作用,以及冲击波在通道、管道、坑道和竖井中的入流和传播。(4)土中爆炸理论及其应用。土的组成和物理性质、土中爆炸的特性、爆炸波参数、土石方工程、矿床开采。(5)结构材料的动力性能。概述、冲击波引起的相变和化学变化、高应变率下的塑性变形、冲击波作用下的塑性变形、动态断裂。(6)基本构件抗爆动力分析。单自由度体系的弹塑性动力分析、梁的弹塑性动力分析、柱的动力分析、考虑整体位移时动力反应分析、结构抗爆动力计算的有限元方法。(7)爆炸的地震效应。空气冲击波诱发的地运动、直接传入的地运动、地运动的经验公式。(8)爆炸条件下地下结构物的振动分析。计算弹性介质中地下抗爆结构的振动问题、冲击反应谱及按冲击反应谱计算防护结构内人员和设备的振动参数、块体式隔震结构的动力计算

表4 北京理工大学爆炸动力学内容

课程名称	课程内容
爆炸力学 (Mechanics of Explosion)	爆炸与爆轰,材料与结构的冲击动力学,材料与物质的物态方程、本构关系和动态力学性能,动态损伤、断裂和碎裂,炸药起爆机理及感度,以及在工程技术中的重要应用

表5 加州大学伯克利分校动力学内容

课程名称	课程内容
结构动力学 (Dynamics of Structures)	结构变形和受力计算、实验演示
随机结构动力学 (Stochastic Structural Dynamics)	概率论与随机过程理论简介,功率谱,密度函数,固定和非平稳随机激励下单自由度和多自由度结构的随机动力分析,时频域分析,多点激励响应,包络过程和峰值分布,非线性随机动力分析导论、在地震、风和海洋工程中的应用

表6 伊利诺伊香槟分校动力学内容

课程名称	课程内容
结构动力学 I (Structural Dynamics I)	结构和结构构件在瞬态荷载和基础激励下的动力响应分析;简单非弹性结构系统;分布质量和弹性系统
结构动力学 II (Structural Dynamics II)	结构动力学和实验结构动力学基础概念,主要包含现代系统理论、数据采集与分析、数字信号处理、试验模态分析、系统辨识、结构健康监测和损伤检测、拟动力试验和模型模拟、智能结构技术
航空动力学 (Astrophysical Dynamics)	恒星动力学与流体动力学导论。两体碰撞,两体放松,恒星系统的势理论,绝热不变性,恒星系统模型,维里定理。流体力学、磁流体力学波的不稳定性,冲击、爆炸、密度波。

中国科学技术大学对结构在爆炸下的响应从破坏和炸药性质两方面展开教学。这两门课均开设在力学专业下。就培养目的而言,中国科学技术大学旨在让学生熟悉一般概念、原理、分析方法以及在国防工程中的应用<sup>[5]</sup>。作为课时安排最多的学校,中国科学技术大学的教学深度最深,细化到各种动塑性行为的计算,同时也是唯一一个在力学相关专业讲授炸药的物理化学作用的高校。

广州大学主要侧重在土木工程专业教学,无论是建筑抗爆原理还是土动力学与岩土地震工程,都体现了抗爆在具体工程中的应用,因此,其课程设置相比其他学校更为全面具体。但是广州大学也是选修开设最多的高校,虽然开设的科目较多,但是并不要求学生全部学习。这样更有利于学生按照自己的兴趣点有针对性地开展学习,也有利于学习深度和精度的提高。

相比之下,北京理工大学和同济大学的学时和课程数都较少。同济大学注重概念的理解,掌握基本的原理和方法,以便在灾害来临之时学生可以进行初步判断,展开进一步深入研究。而北京理工大学则主要侧重计算,对于爆炸时的物态方程、损伤机理等要求较高。

加州大学伯克利分校在结构工程方面开设的课程十分全面,虽然未单独开设爆炸动力学课程,但是仍然在结构动力学方面涵盖了相关内容。由于该课程注重结构整体的动力响应,因此爆炸动力学并不是重点。

伊利诺伊香槟分校在土木工程方面与加州大学类似,并未单独开设爆炸动力学课程,但是在航空航天专业开设的航空动力学课程中对此进行了深入教学。此外,在高阶的结构动力学课程中学习的计算理论知识也会对爆炸动力学的研究提供帮助。

因此,从开课专业而言,有的学校开设在结构工程专业,有的学校开设在力学专业,有的学校开设在航空航天专业。对比学校要求的预修课程,就同济大学和伊利诺伊香槟分校而言,同济大学的爆炸动力学课程要求先修弹性力学和结构力学,伊利诺伊香槟分校则要求先修静力学和理论力学,

可见不同学校由于所属专业归类不同导致学习的侧重点也有所不同。

## 四、课程改革发展建议

### (一) 交叉学科培养

从各高校学科培养要求先修课程的设置可以发现,爆炸力学的研究,通常不仅考虑力学因素,由于其模式的复杂性,需要融会贯通多门学科,包括物理、化学、计算机、力学、数学,等等<sup>[6]</sup>,因此在培养学生时,可以在开设爆炸动力学的同时,适当开展相关课程,以增强上述知识,从而形成一个完整的培养体系。

### (二) 加强在防灾专业的教学

目前,多数高校将爆炸动力学设置在化学、工程力学、应用力学等专业,在土木防灾专业的设置较为少见,对比国外高校也是如此。但是,防灾不应局限于地震、风灾、火灾等方面,爆炸时的冲击对结构的影响也是不可忽视的,因此需要加强防灾方向爆炸动力学相关教学。

### (三) 注重前人理论的学习

由于对于爆炸动力学的研究需要较多的经费支持,设计实验需要昂贵的设备支持,很容易出现严重的浪费现象。因此,在理论上,应当多从其他学科中汲取有用知识,同时,在试验方面,应该多学习前人的实验结论,避免重复研究。在教学上,应关注前沿信息,并及时引入课程教学中,增强学生对灾害工程的认识,还可以结合授课教师最新的研究内容和成果,以开阔学生的视野<sup>[7]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 钟波涛,饶小军. 国内建筑学高等教育之国际交流探索[J]. 高等建筑教育,2009(6):1-4.
- [2] 鲍力. 浅谈爆炸力学研究些什么问题[J]. 力学学报,1976(2):128-129.
- [3] 曾新枝. 矿山爆破效果综合评价的现状[C]//中国金属学会、中国有色金属学会、中国冶金矿山企业协会、中钢集团马鞍山矿山研究院、中矿传媒. 中国采选技术十年回顾与展望——第三届中国矿业科技大会论文集,北京:冶金工业出版社,2012:4.
- [4] 钱七虎. 岩体中爆炸与冲击作用研究进展[C]//面向21世纪的岩石力学与工程:中国岩石力学与工程学会第四次学术大会论文集,北京:中国科学技术出版社,1996:13.
- [5] 万洪英,万明,裴晓敏. 研究生个性化培养的思考与探索——以中国科学技术大学研究生个性化培养实践为例[J]. 学位与研究生教育,2013(1):31-35.
- [6] 张玉令,罗兴柏,王国栋. 爆炸力学课程建设思考与研究[J]. 教育教学论坛,2015(12):206-207.
- [7] 李永池,周光泉. 冲击动力学课程体系建设和教学内容改革[J]. 教育与现代化,1990(2):63-65.

## A comparative study on the dynamics of explosions course in civil engineering specialty between China and foreign countries

LU Zheng, XIA Ziqi

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Dynamics of explosions is an important research project in civil engineering and mechanics professional courses in universities. It contents the occurrence and development of explosion, the propagation of explosion wave and the deformation, destruction, casting and vibration mechanics effect. The paper studies the development of dynamics of explosions course of domestic universities such as Tongji University, Guangzhou University, Beijing Institute of Technology, University of Science and Technology of China, foreign universities such as UC Berkeley and University of Illinois at Urbana-Champaign. After discussing and researching the curriculum design, curriculum requirements and curriculum content, it is found that the curriculum design of different universities is related to their training mode of talents and their emphasis on dynamics of explosions. According to the research results, teaching reform schemes suitable for China's national conditions are offered.

**Key words:** dynamics of explosions; curriculum provision; teaching reform; higher education; higher engineering education