

三维SPH算法在 冲击动力学中的应用

初文华 明付仁 张健 著



科学出版社

国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (11402143)

三维 SPH 算法在冲击动力学中的应用

初文华 明付仁 张 健 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了三维 SPH 数值模型在处理典型冲击动力学问题中取得的研究成果。首先, SPH 方法虽然在处理结构大变形与动力物质交界面方面具有很大优势,但对冲击动力学问题进行三维数值模拟时,仍存在缺陷,对此,本书开发了处理非连续问题的三维 SPH 数值模型,针对结构入水冲击、穿甲弹侵彻冲击、聚能射流冲击、爆炸冲击等具体问题,进行了机理性研究。其次,为实现该方法的有效工程应用,本书介绍了三维 SPH-FEM 耦合算法,即 SPH 方法处理结构大变形的优势与 FEM 方法高效成熟的结构动力学分析技术相结合的耦合算法。最后,本书给出了复杂结构在爆炸冲击作用下的动力响应特性研究中对该方法的应用。

本书适合从事冲击动力学问题的研究人员、从事动力学问题数值模拟的研究人员作为专业参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

三维 SPH 算法在冲击动力学中的应用 / 初文华, 明付仁, 张健著. —北京: 科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-056110-7

I. ①三… II. ①初… ②明… III. ①粒子-流体动力学-应用-冲击动力学 IV. ①O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 316196 号

责任编辑: 李 慧 马 丹 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计

联系电话: 010-64867488

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 200 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

| 前 言

长期以来,冲击动力学在军事及工程各领域有着广泛的应用,然而,对于冲击过程的数值模拟,始终存在若干技术问题,难以攻克。

研究表明,光滑粒子流体力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法可以有效解决冲击过程的数值模拟问题。本书采用 SPH 方法,系统、深入地研究了船舶与海洋工程中存在的入水冲击、结构碰撞冲击、爆炸冲击等冲击动力学热点问题,并进行了数值模拟和结果验证分析。本书所述研究过程较为科学,研究问题及方法较为前沿,研究成果较为有效,在工程领域具有可观的应用前景。

本书重点介绍了三维 SPH 数值模型在处理典型冲击动力学问题中取得的研究成果。首先,SPH 方法虽然在处理结构大变形与运动物质交界面方面具有很大优势,但对冲击动力学问题进行三维数值模拟时,仍存在缺陷,对此,本书开发了处理非连续问题的三维 SPH 数值模型,针对结构入水冲击、穿甲弹侵彻冲击、聚能射流冲击、爆炸冲击等具体问题,进行了机理性研究。其次,为实现该方法的有效工程应用,本书介绍了三维 SPH-FEM 耦合算法,即 SPH 方法处理结构大变形的优势与 FEM 高效成熟的结构动力学分析技术相结合的耦合算法。最后,本书运用该方法研究了复杂结构在爆炸冲击作用下的动力响应特性。

本书的出版得到了上海海洋大学水产高峰学科项目的资助,在撰写过程中参考了较多学者的相关著作,并得到张阿漫教授的悉心指点,在此表示诚挚的感谢!

同时本书在国家自然科学基金青年科学基金(11402143)项目的资助下完成,特此

表示深深的谢意!

冲击动力学问题十分复杂, 并涉及多个学科领域, 而作者的学术水平又有一定的局限性, 因此在撰写本书的过程中难免存在不妥之处, 最终呈现给读者的成果也有一定的不完整性, 迫切恳请读者对本书以及我们的工作予以批评和指正。

作 者

2016 年 8 月

| 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 冲击问题数值算法研究进展	2
1.2.1 结构入水冲击问题数值算法研究进展	2
1.2.2 结构高速碰撞冲击问题数值算法研究进展	5
1.2.3 爆炸冲击问题数值算法研究进展	7
1.3 处理非连续问题的三维 SPH 方法研究进展	9
1.3.1 非连续问题的提出	9
1.3.2 处理非连续问题的 SPH 方法	10
1.3.3 三维 SPH 数值模型	11
1.4 SPH-FEM 耦合算法研究进展	12
第 2 章 处理非连续问题的三维 SPH 数值模型	13
2.1 引言	13
2.2 经典 SPH 方法三维数值模型	14
2.2.1 描述冲击问题的控制方程	14
2.2.2 控制方程的 SPH 粒子近似	16
2.2.3 状态方程	17
2.3 非连续 SPH 方法三维数值模型	18
2.3.1 光滑长度对 SPH 近似过程的影响	19

2.3.2	SPH 粒子近似的对称性	20
2.3.3	非连续界面的处理	21
2.3.4	流固耦合交界面处理	25
2.3.5	固体材料交界面处理	26
2.4	非连续界面存在的客观性	27
第 3 章	圆筒结构入水冲击问题研究	31
3.1	引言	31
3.2	圆筒结构入水冲击过程模拟	31
3.2.1	圆筒结构入水冲击过程数值模型	31
3.2.2	圆筒结构入水冲击过程计算模型	32
3.2.3	计算结果与讨论	33
3.2.4	圆筒结构入水过程影响参数分析	36
3.3	圆筒结构入水冲击过程实验研究	41
3.3.1	圆筒结构入水冲击过程实验原理	41
3.3.2	实验结果及分析	42
3.4	数值模拟与实验结果对比分析	54
第 4 章	穿甲弹对靶板结构的毁伤研究	57
4.1	引言	57
4.2	穿甲弹对靶板结构毁伤过程模拟	58
4.2.1	穿甲弹侵彻靶板的数值模型	58
4.2.2	穿甲弹侵彻靶板的计算模型	59
4.2.3	计算结果分析	59
4.2.4	数值模型验证分析	63
4.3	穿甲弹毁伤效果影响参数分析	65
4.3.1	弹体着靶速度对毁伤效果的影响	66
4.3.2	弹体着靶角度对毁伤效果的影响	69

4.3.3	弹体质量分布（长径比）对毁伤效果的影响	72
4.3.4	弹体头部形状对毁伤效果的影响	75
第 5 章	聚能射流作用下结构动响应特性研究	78
5.1	引言	78
5.2	聚能装药对结构的毁伤效应模拟	79
5.2.1	聚能装药对靶板毁伤效应数值模型	79
5.2.2	聚能装药对靶板毁伤效应计算模型	80
5.2.3	聚能效应对靶板结构毁伤过程	80
5.3	聚能装药聚能效应影响参数分析	86
5.3.1	装药长度对聚能效应的影响	86
5.3.2	金属罩锥角对聚能效应的影响	88
5.3.3	炸高对聚能效应的影响	89
5.4	不同装药形式的炸药对船体甲板毁伤效应对比	90
5.5	反应式装甲防护特性研究	91
5.5.1	反应式装甲计算模型	91
5.5.2	计算结果	92
5.5.3	反应式装甲防护效果影响参数分析	95
第 6 章	爆炸螺栓分离冲击特性研究	99
6.1	引言	99
6.2	爆炸螺栓解锁分离过程模拟	100
6.2.1	爆炸螺栓解锁分离过程数值模型	100
6.2.2	爆炸螺栓基本结构及计算模型简化	101
6.3	计算结果分析	102
6.3.1	爆炸螺栓解锁分离过程工作原理	102
6.3.2	爆炸螺栓解锁分离过程载荷特性分析	105
6.4	数值模型验证	108

第 7 章 三维复杂结构在爆炸冲击作用下的响应特性研究	110
7.1 引言	110
7.2 三维 SPH-FEM 耦合算法	111
7.3 复合链表搜索方式	114
7.4 复杂结构爆炸冲击计算模型	116
7.4.1 爆炸螺栓三维 SPH 模型	116
7.4.2 复杂连接结构有限元模型	116
7.5 计算结果分析	117
7.5.1 爆炸螺栓爆炸冲击特性分析	117
7.5.2 三维复杂结构在爆炸螺栓冲击激励作用下的响应分析	119
参考文献	127

第1章 绪 论

1.1 引 言

冲击,简言之即抛射体以一定的速度向靶体进行撞击,同时在较短时间内能量发生迅速转化的过程^[1]。其特点是作用时间短、载荷强度高。无论对于抛射体还是对于靶体来说,其形态既可以是固体,亦可以是液体或气体。在极短的作用时间内(毫秒、微秒或纳秒数量级),抛射体向靶体施加高强度载荷,进而引起靶体结构的运动甚至材料的破坏。

冲击问题研究不仅有着重要的理论学术价值,更有着十分广阔的工程与军事应用背景,迄今已在船舶与海洋工程、航空航天、工程结构设计等领域得到了广泛的应用与发展^[2]。

结构入水冲击、固体间的高速碰撞冲击、高能炸药的爆炸冲击等典型的冲击动力学问题的研究对于军事与工程领域都有着十分重要的意义。然而对于结构高速碰撞冲击及高能炸药的爆炸冲击这一系列高频高强度问题,相关的试验研究危险性高、难度大,且属于耗费性试验^[3-4],无论从经济性还是安全性考虑,试验研究都无法成为这类问题的主要研究手段,因此关于冲击问题的有效数值模拟手段的开发一直是国内外学者的研究热点^[5]。对于传统的有限元方法和有限差分方法来说,高速碰撞冲击与爆炸冲击等问题的计算模拟,在结构大变形处必然出现网格畸变与滑移面处理等难以解决的关键问题,虽然有些学者为解决网格畸变提出在大变形处进行网格重新划分的思想,但这无疑在很大程度上降低了计算效率,且会导致计算过程中某些历史记录丢失^[6];而对于欧拉法,网格畸变问题虽然无需考虑,但运动物质交界面、变形边界等界面位置追踪问题却始终没有得到有效解决^[7]。关于本书所要研究的另一个典型的冲击动力学问题——结构入水冲击过程,自由液面形状的有效模拟对于现有通用软件而言存在困难。因此,关于上述冲击动力学问题,传统的数值仿真方法由于存在不同程度的缺陷,始终无法给出较为准确有效的数值解。

1.2 冲击问题数值算法研究进展

1.2.1 结构入水冲击问题数值算法研究进展

在众多的冲击问题中，有一类具有十分典型的工程背景与重要的实际意义——结构入水冲击问题。它广泛地存在于船舶工业与海洋工程中，船体砰击、海上救生艇抛落、水上飞机降落着水、空投鱼雷入水、海洋平台遭受波浪冲击等均属于该问题的研究范畴^[8-16]。结构入水过程中，较大的冲击力容易导致结构损坏、器件失灵等严重后果，因此研究结构入水问题对于结构的安全性设计具有重要的意义。

研究表明^[17-21]，结构入水冲击过程中，作用在结构上的载荷呈现显著的非线性，而在冲击载荷作用下的结构响应也同样具有非线性特性，因此对于结构入水冲击问题，目前采用理论模型进行数值计算^[22-47]尚不能十分有效地进行求解，且应用范围十分有限，更多的研究倾向于数值模拟技术^[48-81]及相关的试验验证分析^[82-95]。

1.2.1.1 结构入水冲击问题理论模型研究

关于结构入水冲击问题的理论模型研究最早始于 1929 年，Von Karman^[22]首次针对水上飞机降落时浮筒受到的砰击压力，引入附加质量概念，根据动量守恒定律与几何关系推导出结构入水冲击过程中的砰击压力理论计算公式；此后，Wagner^[23]在 Von Karman 理论的基础上引入结构入水冲击过程中的水面抬升作用，提出小斜升角模型的近似平板理论，给出了多种情况下结构入水砰击压力的计算公式，为以后的结构入水冲击理论研究奠定了重要的基础；其后，Mayo^[24]引入波浪对附加质量的影响，同时考虑沾湿面上的压力分布及其对最大冲击载荷的影响，对 Wagner 理论进行了修正；Milwitzhy^[25]采用无量纲分析方法对理论模型进行了简化；Garabedian^[26]和 Borg^[27]分别采用不同的数值方法对 Wagner 理论模型中的边界值问题进行了求解；Cumberbatch^[28]发展了 Wagner 提出的相似理论，并将其应用到楔形水柱冲击平板问题；Mackie^[29]对自由面、湿表面及伯努利方程进行了线性化处理，计算了底升角极大的楔形体入水冲击问题；此后他又采用相似流理论^[30]对二维刚性楔形体入水问题进行了研究；Dobrovolskaya^[31]基于势流理论对二维楔形体入水问题进行分析，得到入水问题的第一个完整解；Greenhow^[32]

和 Zhao 等^[33]先后采用边界元理论对任意形状的二维结构入水问题进行求解,结果与 Dobrovolskaya^[31]理论吻合较好; Pukhnachov^[34]采用椭圆函数对流固接触线进行描述,进而给出三维钝体结构入水问题的渐近解; Gavrilenko^[35]和 Kubenko^[36]对椭球体、轴对称结构、弹性薄壳、平底刚性体等不同形状的结构入水冲击问题进行了深入研究; Conite^[37-38]、Wilson^[39]和 Howison^[40]发展了匹配渐近法在结构入水冲击问题中的应用;顾懋祥等^[41]采用迭代算法研究分析了平头旋转壳体结构垂直入水过程中的水弹性效应;金伏生^[42]利用变分原理分析了三维结构入水过程中的液体流场运动方程解的可靠性;Fraenkel 等^[43]对楔形体以恒速垂直入水过程中的流场变化进行了理论研究;Korobkin 等^[44]考虑结构入水冲击的弹性问题,提出一种典型的简化方法;Xu 等^[45]利用二维对称冲击理论研究了冲击作用下的舰船结构响应;Mei 等^[15]将结构边界条件引入 Wagner^[23]理论公式,使其具有更好的普适性;Scolan 等^[46]采用能量分布法分析得到三维钝体结构入水冲击过程中的压力分布;Carcattera 等^[47]忽略了弹性力对水动力载荷的影响,提出一种求解楔形体入水冲击过程冲击载荷的新方法。

历经几十年的发展与不断修正,关于结构入水冲击问题的理论模型研究已经有了一套较为完整的体系,基于理论分析方法得到的冲击载荷计算公式,可以初步作为工程应用中的经验公式进行参考。然而,由于入水结构入水冲击过程涉及较为复杂的瞬态物理现象与非线性特性,同时考虑到结构外形、边界条件等复杂性,因此理论模型应用起来仍有一定的局限性。

1.2.1.2 结构入水冲击问题数值模拟技术研究

考虑到理论模型在工程应用领域的局限性,随着计算机技术的迅速发展,20 世纪末开始,越来越多的学者将研究重点放到入水冲击问题的数值模拟方法研究。有限元法、边界元法、有限差分法、无网格法等越来越多的数值模拟技术被开发应用到结构入水冲击的数值模拟过程中。

Marcail^[48]基于有限元法,采用引入一假设的间隙元的方法处理流固耦合作用问题,计算分析了无限长刚性圆柱体的入水冲击过程;Anghileri 等^[49]采用有限元法对刚性球体的垂直入水过程进行计算分析;刘理等^[50]基于有限元法与非线性边界条件的处理,分析研究了船底结构在入水砰击过程中的动态响应;陈震等^[51-54]利用有限元软件 MSC.Dytran 先后对平底结构、二维楔形体结构的入水冲击过程进行了仿真计算,并在此基础上讨论分析了结构尺寸、入水速度、空气层内物理参数、重力作用等因素对结构入

水冲击过程的影响。

Geers^[55] 是较早采用边界元法对二维结构入水冲击问题进行计算分析的学者；国内学者叶取源^[56] 也在早期研究了欧拉-拉格朗日混合边界元与时间步进法，并将其应用到锥头物体垂直入水过程的计算分析；陈学农等^[57] 基于边界元法对平头结构的垂直与倾斜入水过程进行了计算分析；王冰等^[58] 提出边界元耦合非线性自由液面步进法对圆柱与楔形刚体结构的入水冲击过程进行了较为有效的数值模拟；卢炽华等^[59-60] 通过将流体边界元方程与结构有限元方程进行耦合，对二维楔形体等速入水过程进行了数值计算；倪樵等^[61] 基于边界元法并引入拉普拉斯变换与数值逆变换技术，对二维刚性平底结构入水冲击问题进行了计算分析；Battistin^[62] 采用非线性边界元法对任意形状的二维对称结构等速入水过程进行了数值模拟；Wu 等^[63-64] 采用边界元法先后对楔形体自由落体入水与双楔形体等速入水过程进行了系统的分析研究。

Koehler^[65] 等较早采用矩形网格的有限差分格式分别计算分析了带小斜升角和无斜升角的刚性平板入水过程；陈九锡等^[66] 采用 MAC 法 (marker and cell technique) 计算了平头结构物垂直等速入水过程中空泡发生至闭合的完整过程；宣建明等^[67] 采用相同算法研究了锥形与球形头部结构垂直入水过程；李森虎等^[68] 采用质点网格法对平头结构入水冲击过程中的气垫效应与空泡现象进行了二维数值模拟；Kleefsman 等^[69] 尝试改进有限体积法并将其应用到结构入水冲击与上浪问题的计算分析；Oger 等^[70] 及 Gong 等^[71] 将光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法应用到二维结构入水问题的研究。钱勤等^[72-74] 先后提出任意拉格朗日欧拉边界元-有限元混合法、时域边界元法和拉普拉斯变换-边界元耦合法等多种算法对入水冲击过程中的结构响应问题进行求解。

除此之外，郑际嘉等^[75]、陈铁云等^[76]、Carcattera 等^[77]、Donguy 等^[78]、Hu 等^[79]、夏斌等^[80]、Zhu 等^[81] 也都采用了不同的数值计算方法对结构的入水冲击问题进行了不同程度与不同方面的分析研究。

数值模拟技术可以解决许多理论和试验方法无法解决和观察到的现象，随着数值算法的不断修正与扩展，对于结构入水冲击问题特别是三维结构入水冲击问题，采用数值模拟技术进行计算分析对于工程应用领域具有十分重要的意义。

1.2.1.3 结构入水冲击问题数值算法的试验验证

为对结构入水冲击问题的一系列数值算法进行验证，大量针对典型结构入水冲击过

程的试验研究逐渐开展起来。对于结构入水冲击过程的试验研究,较早可以追溯到 Worthington^[82] 和 White^[83] 的研究。由于早期试验设施及技术手段的限制,研究仅采用高速闪光及照相技术对结构入水过程中的典型现象进行了观察与记录。此后一段时间,随着试验技术的发展,大量系统详细的结构入水冲击试验研究成果不断涌现: Carcaterra 等^[77] 采用试验手段测得了楔形体入水过程中的水动力载荷曲线; Chuang^[84] 通过对倾角为 $1^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的楔形体入水过程进行试验研究,分析总结了不同倾角下楔形体结构入水冲击过程中的压力峰值回归公式; Takagi^[85] 研究了楔形体底板倾角与厚度对入水冲击过程结构响应的规律; 孙辉等^[86] 采用 V 形剖面板模拟二维楔形体结构进行入水冲击过程试验研究,分析流固耦合作用下的结构动态响应。

Chuang^[87] 是较早采用高速摄影机记录平板结构入水过程的学者,同时总结了空气垫在平板结构入水冲击中的作用; Watabana^[88] 采用试验方法,对结构入水过程中空气垫的产生及发展过程进行了观测研究; Takagi^[89] 也对束缚空气对结构入水过程的影响进行了试验研究; Verhagen^[90] 基于试验方法研究探讨了空气、水的压缩性及结构弹性对小尺度刚性平板入水过程中最大砰击压力的影响; Lewison 等^[91] 开展了二维平底结构以较高速度入水冲击过程的试验研究; 李国钧等^[92] 提出平底结构入水底部砰击压力计算公式,并设计一系列试验对计算结果进行验证; 李世其^[93]、陈震等^[94] 分别对有盖空气格栅、平底圆柱结构的入水冲击过程进行了试验研究; 何春涛等对单个及多个圆柱体垂直及沿垂向倾斜入水两种情况进行试验研究,探索了入水空泡的生成与发展机理^[95]。

在船体砰击、海上救生艇抛落等实际应用中,圆筒结构的平落入水及沿水平方向倾斜入水更接近实际情况,然而迄今为止,国内外对于这一问题的相关试验研究还很系统与充分,对于圆筒结构入水过程中的典型现象及关键参数的影响规律等尚需开展进一步的深入研究。

1.2.2 结构高速碰撞冲击问题数值算法研究进展

高速碰撞冲击问题广泛存在于装甲侵彻、聚能射流、空间碎片撞击等军事与工程领域,该过程涉及材料大变形、高温、高压下的物态方程及高应变率等极端情况,因此难以建立适当的理论模型对其进行理论分析,即使在大量的假设与简化基础上进行理论求解,得到的结构形式仍十分复杂,难以达到工程应用的要求;而该问题的相关试验研究^[96] 周期长、耗资大,且对实验条件要求较为苛刻,同时通过试验结构总结得到的经验公式均

建立在各自的试验条件基础上,因此适用范围十分有限,且存在较大误差;相较之下,采用数值仿真手段对结构高速碰撞冲击过程进行计算分析,不仅具有经济性和高效性,同时还可以十分方便地根据实际情况改变初始条件、边界条件及材料属性等参数甚至是某些试验技术难以达到的复杂条件^[97]。因此,各种数值仿真技术日益成为高速碰撞冲击问题的重要研究手段。

在多种数值计算方法中,有限元法与有限差分法起步较早且发展较为成熟,因此早期的结构高速碰撞问题的数值模拟主要基于这两种方法^[98]。

Johnson^[99]和 Anderson^[100]总结介绍了结构高速碰撞冲击的多种数值计算方法;Folson^[101]基于有限差分法对穿地弹的侵彻冲击过程开展了二维与三维的相关数值计算;Hallquist^[102]基于有限元软件 DYNA 对结构高速碰撞冲击过程进行了系统的计算分析;Schwer 等^[103]基于有限元方法,同时引入滑移面处理、本构嵌入等技术,对穿地弹与穿甲弹的斜侵彻过程进行了数值模拟;Beissel 等^[104]在弹体上设置磨损面,更加细致完整地模拟再现了弹体高速侵彻冲击的过程;在国内,胡秀章等^[105]、Song 等^[106]、许沐华等^[107]先后采用有限元方法针对结构高速碰撞冲击的不同方面建立二维数值模型进行计算分析;此后,随着有限元与有限差分技术的日渐成熟,对于结构高速碰撞冲击问题的数值模拟逐渐向三维扩展;何长江等^[108]基于欧拉有限差分方法建立较为有效的数值模型,对三维斜侵彻冲击问题进行计算分析。

冲击载荷作用下结构的动响应问题,由于其具有高频特性,且可能产生结构大变形等问题,给数值模拟带来很大的挑战。对于有限元法和有限差分法,网格畸变和滑移面处理等始终是计算过程中的障碍,而这也是其长期以来难以实现在该方面的工程中有效应用的重要原因之一;而对于欧拉算法,运动物质交界面的准确描述始终成为对该问题进行有效模拟的制约。因此建立一种有效的冲击问题计算方法一直是国内外学者的努力方向。

近年来,基于无网格的 SPH 方法逐渐被证明在处理高频、大变形问题时具有较大的优越性。随着对 SPH 方法的不断研究,其应用范围也在不断地扩大,纯流体模型下流体动力学问题的数值模拟已较为广泛。目前,SPH 方法在关于高速碎片对空间设备高速撞击、动能侵彻的数值模拟方面获得了较大成功。Hiermaier 等^[109]、许庆新^[110]采用 SPH 方法研究了冲击碰撞时固体材料的断裂破坏机理,验证了 SPH 方法在冲击等问题上的有效性;姚熊亮等^[111]通过将黎曼解引入传统 SPH 方法,对核近似过程进行修正,同时对一维冲击管问题及一维爆轰波问题进行了分析研究,大大提高了传统 SPH 方法捕获间断

信息的精度；张忠等^[112]采用 Autodyn 软件中的有限元与光滑粒子耦合模块，对高速射弹撞击屏蔽炸药的冲击起爆问题进行了数值模拟，并将数值计算结果与实验结果进行对比，验证数值算法的有效性，同时将该算法与任意拉格朗日-欧拉（arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE）算法、欧拉算法及拉格朗日算法的计算结果进行了对比分析，结果表明有限元与 SPH 耦合算法更为接近实验值；张伟等^[113]采用 SPH 方法，同时引入 Johnson-Cook 及 Johnson-Holmquist II 本构模型描述金属及陶瓷材料的非线性变形及损伤特性，对弹体侵彻陶瓷/金属复合装甲的过程进行了数值建模，模拟再现了弹体侵蚀、陶瓷锥形成、飞溅及背板隆起撕裂等侵彻过程中的典型物理现象，计算得到的结构典型位移时历曲线与实验结果吻合较好；张志春等^[2]通过在有限元节点处设置背景粒子并引入接触力的方法，将 SPH 方法与有限元方法耦合起来，进而对平头弹正冲击钢板与球头弹斜冲击钢板的问题进行了数值模拟，同时将计算结果与 LS-Dyna 的计算结果及实验结果进行了对比，验证了数值算法的有效性；王安文等^[114]采用 SPH 方法对液滴高速冲击有机玻璃（PMMA）过程中的液滴变形、固体结构的损伤情况等进行了较为有效的数值模拟，同时通过数值计算结果与相关试验结果的对比分析，验证了数值模拟方法的有效性与准确性。

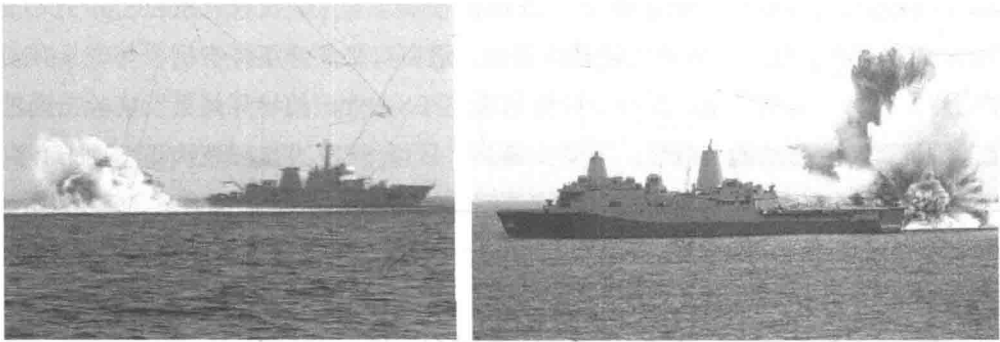
然而，在上述基于 SPH 方法的结构高速碰撞问题的数值模拟过程中，几乎都没有考虑一个十分重要的问题——非连续界面的处理。在冲击波的传递过程中，不同材料的介质在交界面处应满足力平衡与位移相等的间断面守恒条件，此时力与运动才能有效地从一种介质传递到另一种介质。上述研究在计算过程中采用传统 SPH 理论且忽略了材料交界面的处理，因此在非连续界面处计算结果存在一定的误差，且误差随着时间积分逐渐扩展到整个计算域，从而导致对整个结构高速碰撞过程的数值模拟结果并不十分精确。

1.2.3 爆炸冲击问题数值算法研究进展

爆炸冲击是比结构高速碰撞冲击更为极端的一种非线性瞬态冲击载荷，在舰船海上作战、航天领域的火工装置、工程爆破等军事和工程领域都有着极为广泛的应用。为了研究爆炸冲击对结构的冲击响应，国内外均已展开了大量实船水下爆炸试验（见图 1.1），获得了一系列相关的可靠试验数据。爆炸冲击环境的特点是：高幅值的振荡波形持续时间很短，一般在 20ms 内衰减到零。这种高频高强度的冲击对于被作用物体的

破坏作用无疑是更为巨大的。因此，对于同样涉及到高压、高应变率及材料大变形等问题的爆炸冲击过程的研究，在方法上存在着与结构高速碰撞冲击问题研究相同的弊端。

对于爆炸冲击问题，早期的理论模型主要以简单结构为研究对象，基于解析能量理论对结构在爆炸载荷作用下的永久变形进行分析计算^[115]。Cole^[116]、Cox 等^[117]、Huang^[118]、Geers^[119]、Jones^[120]先后对固支圆板、简支方板、球壳、无限长圆柱壳及梁结构等不同典型结构形式在爆炸冲击作用下的动响应进行了理论分析，国内学者周南等^[121]、张振宇等^[122]、吴有生^[123]、赵颜辉等^[124]也在相关方面做了较为系统的理论研究。



(a) 我国某舰船水下爆炸试验

(b) 国外某运输舰水下爆炸试验

图 1.1 国内外实船水下爆炸试验

Fig.1.1 Domestic and foreign warship underwater explosion test

杨桂通^[96]为求解结构在冲击载荷作用下的大变形响应开展了一系列试验研究，为寻找相关规律、建立数值模型提供了实证材料；张朋祥等^[125]采用试验手段对四个球形装药在浅层水中水底裸爆时的冲击波载荷进行了测试；凌贤长等^[126]设计一套模爆试验对爆炸冲击载荷作用下的结构防护性能与破坏机理进行研究；申祖武等^[127]通过结构模型爆炸试验对爆炸冲击波作用下的结构动力特性进行测试分析；朱锡等^[128]对水面舰艇舷侧防雷舱结构模型开展了一系列水下抗爆能力测试试验，系统地研究了水下爆炸载荷对防雷舱结构的破坏机理；计晨等^[129]通过实船爆炸试验研究测试舰船动力设备的抗冲击性能；此外，钱胜国等^[130]、顾文彬等^[131]、金辉等^[132]均先后开展一系列水下爆炸试验对结构在爆炸冲击载荷作用下的动响应特性进行分析研究。

上述试验技术在操作简易度、模拟精确度等方面各有千秋，但是总体来说，目前仍缺乏一种可以较为真实地模拟再现爆炸冲击环境的简单易行的、研制成本和试验成本低