

# 结构流-固冲击屈曲研究进展\*

顾王明 唐文勇 陈铁云 郑际嘉\*\*

上海交通大学, 上海 200030

**提要** 本文回顾和综述结构在流-固冲击载荷作用下的动力屈曲问题的研究工作, 重点分析、评述流-固冲击屈曲的特征、实验资料及已取得的成果, 并展望了该领域今后的研究。

**关键词** 结构; 流-固冲击; 屈曲; 弹塑性; 动力响应

## 1 引言

已有的结构冲击屈曲研究中, 人们较多地讨论结构受到刚体(子弹、落锤等)撞击的情形, 而对结构与流体相互撞击时发生的动力屈曲问题研究甚少。实际上, 诸如水上飞机、宇航飞船在水面上的降落, 卫星在水面上的回收, 海面的高速空投, 高速舰船在波浪上的航行, 空对舰(潜水时)导弹及空投鱼雷入水攻击目标等许多场合中经常遇到流-固冲击屈曲问题。一般地, 流-固冲击载荷作用下结构的动态响应可能呈现两种形式:(1)稳定的动力响应, 属于强度问题。这类问题已有较多学者研究过<sup>[1,2]</sup>。Jones<sup>[3]</sup>的研究表明, 对该类问题, 当流-固载荷的持续时间小于结构的自振周期时, 控制方程中必须考虑惯性项; 而当持续时间大于结构自振周期时, 结构响应可理想化为准静态问题来处理。(2)不稳定的动力响应, 并通常出现结构皱褶变形, 属于动力屈曲问题。有关结构在流-固冲击载荷作用下的动力屈曲问题, 无论在理论还是实验方面, 都很少有人涉足, 公开发表的文献不多, 只是到了最近才开始初步研究。

结构在流-固冲击载荷作用下的动力屈曲问题经常发生。例如在舰船方面, 美国海军 USS Lake Champlain 号航空母舰于 1945 年由直布罗陀海峡返回美国途中遇到恶劣的海况, 致使舰首结构产生严重的表面损坏, 中剖面处的飞行甲板和双层底结构出现明显的皱曲破坏。1957 年, 其姐妹舰 USS Ticonderoga 遇上类似的海况, 也发生了类似的破坏。Heller 和 Kammerer<sup>[4]</sup>对这两次海损事故进行了分析, 按照常规的计算方法验算船体的总纵强度, 然而即使考虑最严重的海况, 中部的应力也未超过结构的屈服应力, 这表明经典的准静态方法已无法解释这种破坏现象。他们通过分析得到下列重要结论:(1) Lake

\* 国家自然科学基金资助课题

\*\* 华中理工大学, 武汉, 430074

Champlain 和 Ticonderoga 号航空母舰的飞行甲板发生了屈曲破坏；(2) 经典的准静态方法不可能正确预报此类破坏现象；(3) 甲板屈曲破坏与流-固冲击载荷（波浪砰击载荷）密切相关。Heller 和 Kammerer 研究工作的重要意义在于首次明确提出应将流-固冲击载荷作用下结构的强度问题与屈曲问题区分开来研究。之后，美国海军特地安排了另一艘姐妹舰 USS ESSEX 号在相同的航线、相似的海况下航行，并在舰上安置了应变测量仪器，结果证实了飞行甲板发生屈曲破坏。日本学者山本善之等<sup>[6]</sup>对 1935 年日本海军第四舰队的两艘特型驱逐舰“初雪”和“夕雾”号，以及 1980 年一艘大型散装货船“尾道丸”号在恶劣海况中发生首部结构折断的海损事故进行了研究。他们的分析结果表明，在严重的流-固冲击载荷作用下，船首部区域的上甲板发生屈曲破坏，包括甲板板，纵桁和纵骨，随后甲板的变形急剧增长，最终导致首部结构的折断。英国皇家海军的 Cobra 号驱逐舰在 1901 年的首次航行中亦发生了类似的灾难性事故。

流-固冲击载荷作用下结构的屈曲破坏作为一种破坏形式受到了各国的重视。但遗憾的是很少有人对此作深入的研究。文献[6,7]中将流-固载荷（砰击载荷）视为准静态的压缩载荷，忽略了砰击载荷作用下甲板屈曲破坏的动力效应，因此不可能给出舰船总体极限承载能力的正确估计，许多学者的研究表明<sup>[8,9]</sup>，即使动力载荷的持续时间与结构一阶自振周期接近，结构的屈曲中也存在着显著的动力效应。由于舰船遭遇的砰击载荷的持续时间通常接近其一阶自振周期，因此砰击载荷作用下舰船结构的动力屈曲，就外载而言，既不属于经典的理想脉冲屈曲范畴，也不属于阶跃载荷作用下的屈曲问题，而是属于另一类典型却又很少有人涉足的动力屈曲问题。本文对梁、板、刚架及圆柱壳等基本结构单元在流-固冲击载荷下的动力屈曲问题所进行的实验及理论研究作了总结回顾。这类屈曲问题的研究对舰船结构的抗砰击动态设计等领域有重要的实用意义；同时通过这些基本结构单元的流-固冲击屈曲研究，可以拓宽人们对冲击屈曲现象的理解与认识。

## 2 流-固冲击屈曲的特征

流-固冲击屈曲在理论上是不同于理想脉冲屈曲的另一类新的冲击屈曲问题。与理想脉冲屈曲问题相比较，它有以下两个主要特征：(1) 流-固冲击屈曲的加载脉冲基本上是一种具有毫秒量级持续时间的半正弦脉冲。在这种毫秒量级的加载脉冲作用下，结构不仅会呈现不同于脉冲屈曲的临界动力屈曲状态，而且由于足够长的加载时间，在动力后屈曲过程中，结构会产生另一种不同的临界状态，即动力塑性倒塌，它标志着结构最终承载能力的丧失。文献[10]中对柱的流-固冲击屈曲实验研究表明，柱呈现三种不同的临界状态：屈曲、塑性和塑性失效，针对这三种临界状态分别建立临界动力屈曲准则、临界动力塑性准则和临界动力失效准则。(2) 流-固冲击屈曲是一类典型的非保守冲击屈曲问题。在屈曲过程中，结构的屈曲变形和流体与结构之间的冲击过程相互影响，这种影响随着结构塑性变形的发展而渐渐变大。当结构达到塑性倒塌时，变形与冲击过程之间的耦合作用变得十分明显，这时冲击脉冲的形状完全畸变，不再具有早期的半正弦脉冲形状。因此，流-固冲击屈曲问题一般而言不能简单地归结为具有指定载荷规律的冲击屈曲问题。

### 3 简单结构单元的流-固冲击屈曲研究

#### 3.1 柱

张清杰等<sup>[10]</sup>对流-固冲击载荷作用下两端固支的弹塑性柱的动力屈曲问题进行了实验研究。实验在水上冲击塔上进行(图1),流-固冲击加载的基本原理是在试件上部连接一巨大的质量块,使试件垂直降落与水面产生冲击从而实现试件的轴向流-固冲击加载。为了获得流-固压力,需要在试件下端连接一个底板,流-固冲击载荷则由布置于冲击底板上的压力传感器记录(图2)。由于底板的刚度、尺寸、质量等都势必会对流-固冲击力产生影响,一般说来,底板的刚度越大,尺寸、质量越小,这种影响也会减小。实验中试件的动态行为由布置在柱

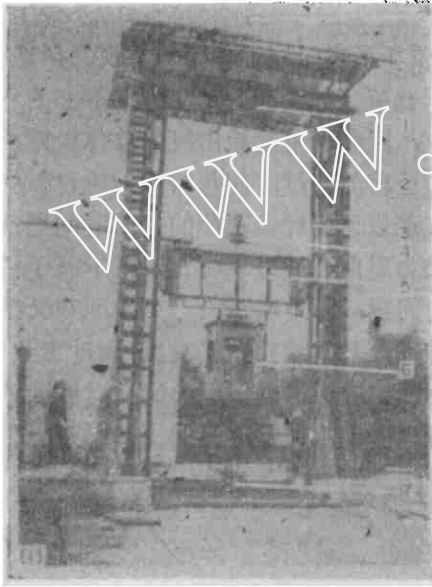


图1 装上实验装置的冲击塔外观

- 1 电机 2 冲击塔 3 导轨 4 释放装置  
5 滑动装置 6 轴向加载装置 7 水池



图2 (a) 轴向加载装置外观

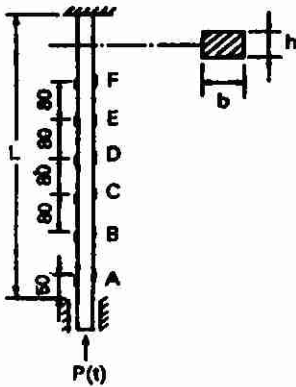


图3 应变片的布置

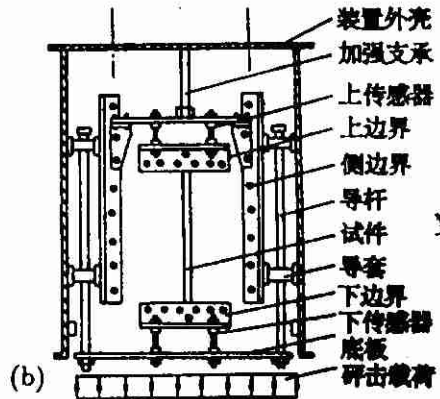


图2 (b) 轴向加载装置的构造

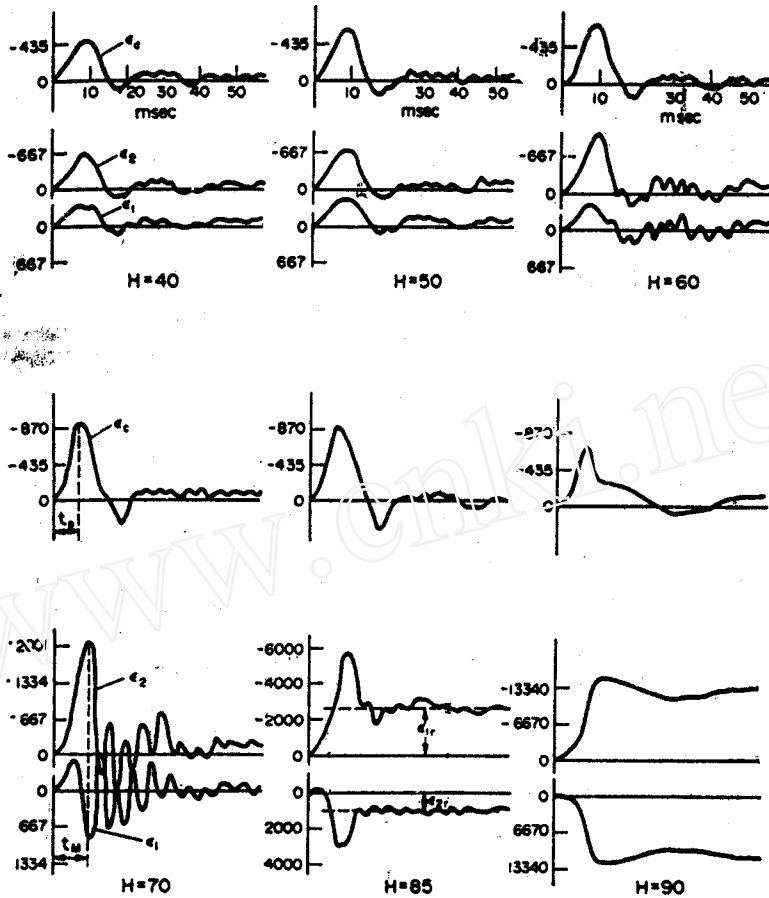


图4 典型冲击高度下两侧应变历史

$\varepsilon_c$  为冲击端附近轴向应变  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为 midpoint 处应变 ( $\mu\varepsilon$ )。当  $H < 60$  时, 基本上为压缩变形; 当  $H > 60$  时, 弯曲变形占主导地位。

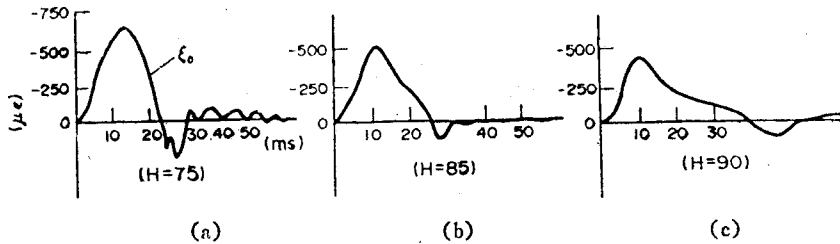


图5 流-固冲击载荷的特征

两侧的若干对应变片记录 (图 3), 当两侧应变记录发生分叉时, 则认为发生了弯曲变形 (图 4)。实验表明, 流-固冲击载荷在柱塑性倒塌之前基本上是一个半正弦波脉冲 (图 5(a)), 持续时间为 15—24 ms; 当冲击高度接近临界冲击高度时, 冲击脉冲的形状会产生畸变 (图 5(b)、(c)), 不再具有早期的半正弦波脉冲形状。因此, 流-固冲击柱问题是典型的非保守问题, 一般不能归结为指定载荷规律的冲击屈曲问题。

实验还表明, 流-固冲击柱的屈曲模态呈现一个半正弦波, 流-固冲击属于“中速”冲击

的情况,和高速冲击相比,载荷峰值不是很高而持续时间又稍长,因此这一横向弯曲振动将受横向振动基模态控制。由动态应变信号可知,当冲击高度 $H$ 较小时,柱的响应主要是纵向压缩振动,横向振动较弱;当冲击高度 $H$ 增大时,横向弯曲振动得到进一步发展;当 $H$ 达到某临界值时,柱的响应特征发生质变。张清杰等<sup>[10]</sup>定义了三个临界状态:当柱一侧的弯曲拉应变达到压缩应变时,该临界状态称为柱开始屈曲;另一临界状态是柱一侧的弯曲压应变和轴向压缩应变之和达到材料屈服应变,称为临界塑性状态;而把试件开始出现不可控制的塑性流动的临界状态称为动力塑性失效。此外,由于流-固冲击柱的载荷持续时间为毫秒量级,在载荷结束之前有足够的时间使柱的横向弯曲振动得以充分发展,因此,柱的这一动力屈曲过程发生在载荷持续时间内。由此可见,流-固冲击柱的动力屈曲既不同于低速冲击下

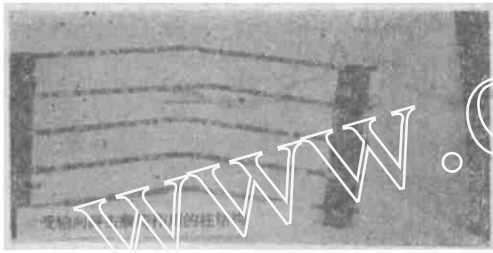


图6 流-固冲击柱的残余塑性倒塌模态

结构的“运动逸出型”动力屈曲,也不同于高速冲击下结构的“动力响应型”屈曲<sup>[37]</sup>,而是在载荷持续时间内由于横向弯曲变形得到充分发展而产生的。崔世杰等<sup>[11]</sup>在讨论铰支柱的流-固冲击屈曲时将流-固冲击柱的这类屈曲称为“动力响应发展型”屈曲,以区别于高速及低速冲击屈曲两种情形。

文献[10]还研究了冲击加载历史对塑性失效载荷的影响。实验表明,冲击失效载荷基本上取决于柱在一次冲击中的动力后屈曲弹塑性性能,而对失效前所经历的弹塑性冲击历史不敏感。流-固冲击柱的残余塑性倒塌模态如图6所示。

### 3.2 刚架

李世其等<sup>[12]</sup>对弹塑性刚架的流-固冲击屈曲和塑性失效问题进行了实验研究。刚架模型由图7、8所示的一根主梁(纵梁AB)和一根横梁CD(模型I)或一根主梁和二根横梁CD,EF(模型II)组成。研究表明:

(1)对模型I,纵梁AB的弯曲模态沿梁长为反对称的两个半波,这种反对称模态一直保持到塑性失效出现之前(图9)。而对模型II,在较低的冲击高度下,弯曲模态沿梁长基本上是一个半波且分布在前两跨(对于有多个支承的连续梁,称相邻支承的间隔为一跨)内,横梁CD,EF的变形很小;对于较大的冲击高度,随着弯曲振动的发展,弯曲模态由一

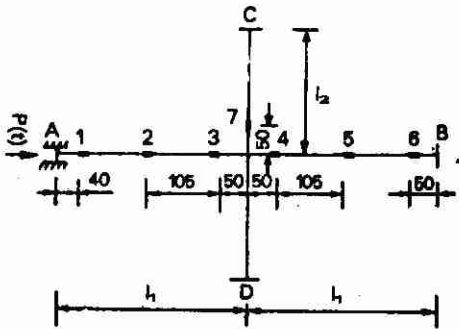


图7 模型I

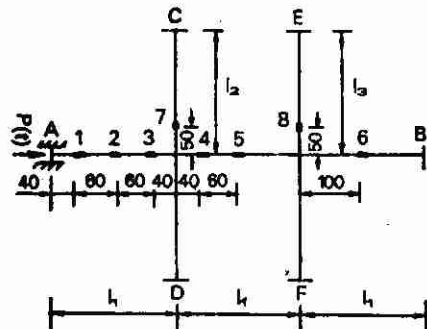


图8 模型II

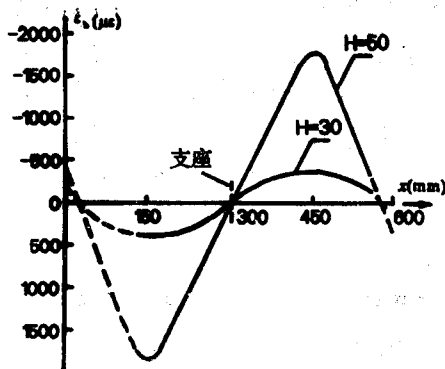


图9 模型I的屈曲模式

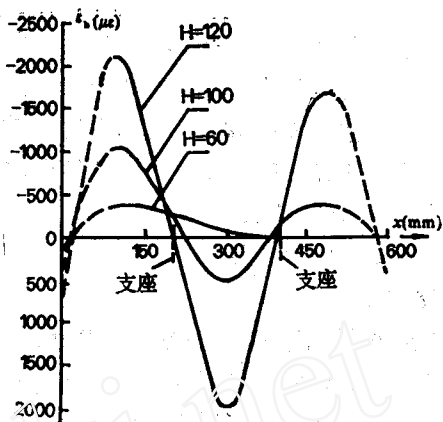


图10 模型II的屈曲模式

个半波变为三个半波；当刚架的响应变为由弯曲振动控制时，三个半波的幅值接近相等，弯曲模式也基本上是对两个支座反对称的（图10）。这说明，与模型I不同，轴向加载的非均匀性对模型II的早期弯曲振动模式有较大影响。

(2) 无论哪种模型，在破坏冲击高度下均在第一跨内出现塑性倒塌，这说明刚架的塑性失效形式对轴向加载的非均匀性是敏感的。

(3) 在失效冲击加载下，加载脉冲因结构变形不再具有脉冲早期的半正弦波形式，而产生明显的畸变。

(4) 对于文献[12]中模型所具有的尺寸，模型I发生弹性动力屈曲，即弯曲拉伸应变达到压缩应变之前，主梁一侧弯曲压缩应变与轴向压缩应变之和仍小于材料屈服应变，这种流-固冲击刚架的动力加载临界值与静力加载临界值相差甚微。相反，模型II发生塑性动力屈曲，弯曲拉伸应变达到压缩应变之前，主梁一侧弯曲压应变与压缩应变之和已大于材料屈服应变，这时，其动力加载的临界值是静力加载临界值的1.5—2.0倍。

### 3.3 板条

对图11所示两端固支的矩形板条的流-固冲击屈曲实验研究表明<sup>[13]</sup>，矩形板条与流-固冲击柱存在相似方面：(1) 所承受的流-固冲击载荷是具有毫秒量级的实际脉冲载荷；(2) 可以忽略轴向惯性，试件处于均匀的冲击加载状态；(3) 屈曲模式类似于静力屈曲的低阶模

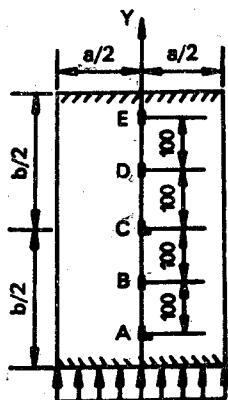


图11 流-固冲击板条

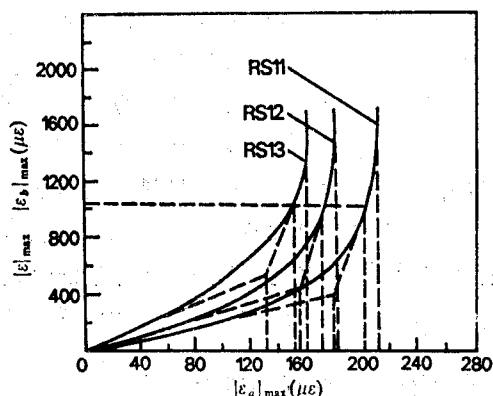


图12 弯曲应变随压缩应变变化曲线

态,沿加载方向呈一个半波,非加载方向无波形;(4)惯性力对横向弯曲运动有显著影响。但是,矩形板条也具有不同于柱的特点:(1)非加载方向对板条的动力变形有约束作用,存在一定的横向效应;(2)冲击响应过程中,矩形板条有较长的弯曲运动阶段,弯曲响应峰值一般出现在压缩响应结束时刻,而轴向冲击柱的弯曲运动相对较短;(3)针对板条的响应特征,文献[13]建议采用弯曲应变峰值激增的转折状态为临界动力屈曲状态,类似于Budiansky-Roth 准则,如图 12 所示。

### 3.4 矩形板

实验表明,流-固冲击载荷作用下,四边夹支的矩形板的动力屈曲呈现以下特点<sup>[14]</sup>:

(1)四边夹支矩形板具有显著的横向效应,非加载方向产生较大的拉伸膜应变,由此提高了板的抗弯刚度,导致较长的动力后屈曲过程和较长的后屈曲强度。

(2)四边夹支矩形板的动力屈曲模态,沿加载方向为两个半波,非加载方向为一个半波,并且最终的动力塑性失效模态完全不同于动力屈曲模态,在动力后屈曲过程中,试件的最大响应点逐渐朝冲击端移动,在极值冲击下,靠近冲击端位置发生动力塑性失效并形成近似半正弦波的塑性铰线。

(3)临界动力塑性失效冲击值与初始缺陷跟弹性冲击历史无关。

文献[14]还用等效应变概念对屈曲,塑性及塑性失效 3 种临界状态作了定义。

### 3.5 圆柱壳

顾王明等<sup>[15,16]</sup>对轴向流-固冲击载荷作用,两端夹支的弹塑性圆柱壳的动力屈曲及后屈曲行为进行了全面的实验和理论研究,圆柱壳的径厚比 $a/h=75-150$ ,其它尺寸,编号及实验结果见表 1。研究表明,圆柱壳的流-固冲击屈曲远比柱、板等结构复杂,重要的结论有:

(1)中等厚度范围的圆柱壳( $75 < a/h < 150$ )受轴向流-固冲击时,通常呈现非轴对称屈曲,不象厚圆柱壳(塑性圆柱壳  $a/h < 25$ )那样需满足一定的条件(如冲击速度大于第二临界速度)时才出现非轴对称屈曲<sup>[17]</sup>。

(2)轴向流-固冲击加载下,圆柱壳首先呈现压缩响应,随后出现弯曲变形,对给定的圆柱壳,弯曲运动出现的时间与冲击高度 $H$ 及圆柱壳上各点位置坐标有关。

(3)流-固冲击圆柱壳具有显著的轴向及横向惯性效应。

(4)流-固冲击圆柱壳的动力响应通常可划分为两个不同阶段:前屈曲运动和塑性倒塌。前者沿整个圆柱壳相对比较均匀,后者主要限于端部,端部形成的塑性区阻止屈曲运动(塑性弯曲变形)向圆柱壳的其它范围传播。塑性区究竟出现在哪一端或是否两端都出现,取决于冲击高度、圆柱壳尺寸、缺陷分布等许多因素,如图 14—15 所示。

(5)与柱、刚架及板等相比,圆柱壳流-固冲击时,流-固冲击压力持续时间较短,约为半个毫秒,而前者都有 20 多个毫秒。当冲击高度接近极值冲击高度 $H_c$ 时,结构屈曲导致流-固压力曲线畸变,圆柱壳突然丧失承载能力,不象矩形板那样具有较长的后屈曲过程。

顾王明等<sup>[18,19]</sup>用数值方法进行理论分析,分别用二参数载荷及流-固耦合载荷计算圆柱壳的动力响应,上述实验现象均能在数值模拟中得到体现。

## 4 结构流-固冲击屈曲理论研究

实际中,结构的流-固冲击屈曲现象可能出现在下列三种场合:漫潜结构受水下爆炸等冲

表 1 试件的几何尺寸、初始缺陷、临界冲击值及破坏情况

试件编号	几何尺寸 (mm)			初始缺陷 $\frac{W_{0,max}}{a} (1 \times 10^{-4})$	极值冲击高度 $H_{cr}$ (mm) 及静力失稳压力 (N)	最后一次冲击高度 (mm) 及对应的破坏情况; 静力失稳破坏情况	周向残余 半波数
	a	L	$\frac{h}{a}$				
4*	75	200	0.5	150	1.09	150 (非冲击端破坏)	9—10
5*	75	200	0.5	150	2.13	150 (大范围破坏)	10
2*	75	200	0.7	107	2.18	700 (冲击端破坏)	6—7
8*	75	200	0.7	107	2.67	700 (冲击端破坏)	6
10*	75	200	1.0	75	3.53	1700 (非冲击端破坏)	5—6
11*	75	200	1.0	75	2.82	1700 (大范围破坏)	5
静1*	75	200	1.0	75	2.03	中间	6
静2*	75	200	0.5	150	1.92	端部	10
静3*	75	200	1.0	75	/	中间	6
静4*	75	200	1.0	75	/	端部	6



击载荷作用，水面结构如舰船、海洋平台等受流体砰击等作用，高速运动结构撞水。就结构撞水屈曲而言，只要结构撞水一侧具有一定面积，则结构和水面之间通常会捕获住一层空气垫，在结构变形及水面运动的同时，空气垫中的气体一方面压缩，另一方面沿结构和水面之间的间隙外流，还可能以气泡形式溶解到水中。因此，结构撞水屈曲的物理机制，包含着结构-气体-液体三相的复杂耦合运动，这三相介质的瞬态动力学问题带有较强的非线性因素，一般要在时域内求解。



图 13 轴向流-固冲击加载圆柱壳的残余模态

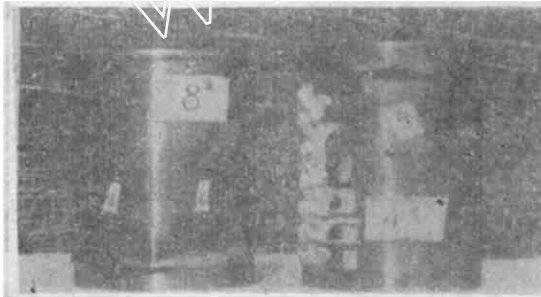


图 14 圆柱壳厚度的差异导致屈曲位置不同  
4\* 为非冲击端；8\* 为冲击端



图 15 同样尺寸的圆柱壳静力破坏与不同冲击高度的动力破坏的残余模态比较

壳厚 0.5mm、2\* 是静力破坏的情形；4\* 是  $H=150\text{mm}$  的情形；5\* 是  $H=250\text{mm}$  的情形

张清杰等<sup>[20]</sup>用摄动理论中的匹配法研究了流-固冲击柱的动力屈曲问题。李世其<sup>[21]</sup>用奇异摄动理论及基于 Banach 压缩映象原理的逐次逼近法求解了矩形板的流-固冲击屈曲问题。顾王明等<sup>[18]</sup>讨论了圆柱壳在轴向二参数流-固冲击载荷作用下的非弹性动力屈曲问题。基本控制方程由弹塑性连续介质力学中关于加速度的最小原理获得，本构关系采用增量理论，分别讨论了流-固载荷峰值、持续时间及应力波对屈曲的影响。另外还考虑了几何尺寸、材料参数、初始缺陷及径向压力的影响。郑际嘉等<sup>[22]</sup>研究了弹塑性柱撞水时的动力屈曲问题，对于结构部分采用有限元法处理，气体及液体部分则列出动力方程，然后用某种近似的解析关系描述。顾王明等<sup>[19]</sup>则类似地分析了弹塑性圆柱壳的撞水屈曲问题，但结构部分用差分方法，液体假设为不可压缩，空气层则认为等熵压缩。计算结果再现了实验中得到的不同冲击高度时压力变化规律、压力畸变现象、屈曲沿壳长分布规律及破坏模式等许多结果。程贯一等<sup>[23]</sup>研究平头壳体撞水时的瞬态力学问题，壳体采用线性有限元作离散化，对流体则用差分法，结合非线性边界条件求解拉普拉斯方程。对每一时间步算出壳体入水过程中的流场情

况、撞击力及壳体的动响应。分析中考虑了撞水初期的气垫效应，当压强达到一定值后全部溶入水中，壳体与水面通过气垫的间接耦合转变为壳体与水的直接耦合。计算结果与他们的实验值吻合较好<sup>[24]</sup>。

数值方法对分析复杂的撞水屈曲问题是适合的，问题在于计算工作量太大，因此，人们致力于寻求各种更高效的解法。主要倾向是对于流体采用 Geers<sup>[25]</sup> 的边界元法，这一方法只需在流场边界面进行离散，待求的只是边界面上物理量在节点处的值，因此自由度数目比其它数值方法少得多。最近，钱勤等<sup>[26]</sup>考虑了非线性自由液面条件，提出了一个拉格朗日、欧拉边界元-有限元混合法 (ALE-BE-FEM) 求解结构撞水问题，始终把撞水物体和水看成一个耦合系统，并作为一个动接触问题处理。但没有考虑空气层，推广到三维问题尚有一定的工作要做。

应当指出，真正考虑结构-气体-液体三相的数学模型，分析结构流-固冲击屈曲的文献非常有限，有待人们去深入研究。已有的工作大多限于实验。众多的国内外学者研究平底刚体撞水时的流-固压力<sup>[27-32]</sup>，也有一些文献<sup>[15, 28, 34]</sup>研究弹性或弹塑性结构的撞水动力响应问题（即稳定的动力响应，属强度问题）。

另一类浸潜结构如潜艇受水下冲击载荷作用时的动力响应及动力屈曲问题，在国外受到相当的重视。处理这类问题时，较成熟而又实用的方法是解析-数值法，对结构采用有限元离散，而对流体则利用某种近似的解析关系来描述。其中以 Geers<sup>[35]</sup>提出的双重渐近近似 (DAA) 最为流行。以此为基础，美国的核防护署发展了“水下冲击分析程序 (USA)”，以后又在该程序中加入了考虑空泡的模块<sup>[36]</sup>。国内的 702 所也开发了 USA 程序，但至今只能跟弹性结构程序 SAP5 等联合。加紧开发 USA 程序，并和非线性结构程序 (如 ADINA) 联合使用，还要考虑空泡等情形，显然是一项艰苦而有意义的工作。

## 5 结束语

结构在冲击载荷作用下的动力屈曲问题，根据载荷作用时间的长短，可分为高速冲击屈曲、低速冲击屈曲及中速冲击屈曲。高速冲击屈曲通常有微秒量级的加载时间，又称脉冲屈曲，结构呈现高阶屈曲模态，但由于脉冲载荷持续时间短，屈曲模态没有足够的时间发展，结构不会产生显著的屈曲变形，一般不会导致结构的严重失效。这类问题的主要特征属于“运动响应型”<sup>[37]</sup>。对于低速冲击屈曲，理论上通常将动力载荷抽象成具有无限长持续时间的阶跃载荷，结构呈现低阶屈曲模态，与静力屈曲波形相近。低速冲击屈曲问题中由于载荷具有较长的持续时间，屈曲模态有足够的时间发展，所以它通常属于一种“运动逸出型”的动力屈曲现象<sup>[37]</sup>。

流-固冲击屈曲属于典型的中速冲击屈曲问题，其载荷时间具有毫秒量级，一般既不能简化为理想脉冲载荷，也不能简化为阶跃载荷。流-固冲击屈曲模态一般较低，但又不同于低速冲击屈曲模态。在具有一定持续时间的流-固冲击载荷作用下，屈曲模态在载荷结束之前有足够的时间发展，且实验结果表明，结构的屈曲通常发生在载荷持续时间内，这同理想脉冲屈曲显然不同。对于弹塑性结构，除屈曲临界状态外，在流-固冲击载荷作用下通常还出现塑性及动力塑性失效这两个临界状态。结构的流-固冲击屈曲既不同于低速冲击下结构的“运动逸出型”屈曲，也不同于高速冲击下结构的“动力响应型”屈曲，它的特征是在有

限长的载荷持续时间内结构的横向弯曲变形得到充分发展,故可将这类流-固冲击屈曲称为“动力响应发展型”屈曲。

结构流-固冲击屈曲的特点可概括为:

(1) 流-固载荷基本上是具有毫秒量级持续时间的半正弦波脉冲。

(2) 流-固冲击屈曲是典型的非保守冲击屈曲问题。结构的屈曲变形和流-固冲击过程相互影响,当结构达到塑性倒塌时,变形和冲击之间的耦合现象非常明显,反映在压力曲线上出现“畸变”现象。

(3) 流-固冲击屈曲问题中具有显著的横向惯性效应;轴向惯性效应在前屈曲阶段不太明显,但对塑性倒塌阶段的影响十分显著。

(4) 流-固冲击屈曲中,一般呈现较低阶的屈曲模态,并且在流-固载荷持续时间内,屈曲模态通常有所变化,特别是圆柱壳结构,这种变化更为明显。

(5) 流-固冲击中,结构临界塑性失效载荷对冲击历史并不敏感。经历多次弹塑性冲击进入失效状态的临界动力塑性失效载荷,与经历一次弹塑性冲击而进入失效状态时的塑性失效载荷基本相同。但是,冲击历史对塑性失效状态下的塑性变形有较大影响。

(6) 流-固冲击中,初始缺陷对临界动力屈曲冲击值有显著影响,对临界动力弹性失效(开始进入塑性)冲击值有一定影响,对临界动力塑性失效冲击值基本上无影响。

流-固冲击屈曲研究不但具有许多重要的应用背景,而且具有重要的理论价值,它拓宽了人们对冲击屈曲现象的理解和认识,是一个值得重视的研究领域。笔者认为,至少下列几方面需要作进一步的深入研究:

(1) 加筋板、壳及组合结构的流-固冲击屈曲研究还是空白。

(2) 含缺陷(如裂纹,截面变化<sup>1)</sup>等)结构的流-固冲击屈曲问题。

(3) 考虑结构-气体-液体三相耦合的流体冲击载荷计算。目前大都将结构与水撞击的部分简化为刚性平板来计算流-固作用力,对于真实结构,如何考虑撞水部分与气体、液体的三相耦合效应及其对整个结构动力屈曲的影响也是需要解决的重要问题。

(4) 动力相似问题。用于实验研究的冲击塔一般不超过10米,其冲水速度有限,模拟导弹、空投鱼雷及其它高速撞水结构的屈曲,动力相似问题有待深入研究,即应寻找哪些相似量及满足怎样的相似准则才能将实验结果推广到真实结构上去。

(5) 实验技术的改进。包括采用高速摄影,记录流-固冲击屈曲模态的变化;合理设计冲水底板,并有效地估计其刚度、尺寸等对实验结果的影响等。

(6) 有效的、功能齐全的结构流-固冲击屈曲专用程序的开发目前仍处在理论准备阶段,尚有大量工作要做。

## 参 考 文 献

- 1 Hiraro Y. J. *Jap. Soc. Aeronaut and Space Sci.*, 21, 228 (1973): 14-31
- 2 Belytschko T, Mullen R. *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.*, 27, 2 (1981): 139-154
- 3 Jones N. *Int. Symp. on Practical Design in Shipbuilding*, Tokyo, Oct. (1977): 121-128
- 4 Heller S R, Kärmerer J T. *Dynamic Stability of Structures*, Pergamon Press, New York (1966): 129-156

1) 例如杆中由于存在孔洞、钻孔或其它原因使该处实际承力的横截面比别处小,对这类含缺陷杆有时可简化为变截面杆来研究。

- 5 Yamamoto Y, Sumi Y, Suzuki M, Suzuki T. *J. Soc. Naval Architecture of Japan*. 158 (1985) : 291—300
- 6 Akita Y. *J. Soc. Naval Architecture of Japan*. 158 (1985) : 301—309
- 7 Endo H, et al. *J. Soc. Naval Architecture of Japan*. 163 (1988) : 322—333
- 8 Karagiozova D, Jones N. *Int. J. Solids Struct.*, **29**, 10 (1992) : 1255—1272
- 9 Weller T, Abramovich H, Yaffe R. *Comput. Struct.*, **32**, 5 (1989) : 835—851
- 10 Zhang Q, Li S Q, Zhen J J. *J. Solids Struct.*, **29**, 10 (1992) : 381—397
- 11 崔世杰, 张念泉, 肖玉明, 唐家祥. 华中理工大学学报. **22**, 3 (1994) : 123—128
- 12 李世其, 张清杰, 郑际嘉, 朱科. 实验力学. **8**, 1 (1993) : 25—33
- 13 Li S Q, Zhen J J. *Acta Mech. Solida Sinica*, **6**, 3 (1993) : 349—356
- 14 李世其, 张清杰, 郑际嘉. 力学学报. **25**, 2 (1993) : 249—255
- 15 顾王明. 华中理工大学博士学位论文 (1993)
- 16 顾王明, 刘土光, 唐文勇, 郑际嘉. 工程力学 (增刊) (1994) : 1349—1353
- 17 王仁, 韩铭宝, 黄筑平, 杨青春. 力学学报. **15**, 4 (1983) : 509—515
- 18 顾王明, 刘土光, 唐文勇, 郑际嘉. 力学学报. **27**, 1 (1995) : 48—57
- 19 顾王明, 刘土光, 郑际嘉. 上海力学. **15**, 3 (1994) : 50—58
- 20 张清杰, 李世其, 郑际嘉. 中国造船. 3 (1990) : 64—74
- 21 李世其. 华中理工大学博士学位论文. (1993)
- 22 Zhen J J, Yue Y. 2nd Int. Symp. Intense Dynamic Loading and Its Effects, Chengda(成都), China. (1992) : 489—491
- 23 程贯一, 张效慈. 平头壳体入水冲击过程的水弹性响应分析. 中国船舶科学研究中心报告 (1987)
- 24 张效慈, 顾懋祥, 程贯一. 实验力学. **4**, 4 (1989) : 388—394
- 25 Geers T L. *J. of Ship Research*. **26**, 2 (1982) : 117—124
- 26 钱勤, 黄玉盈, 王石刚, 刘志宏, 赵宇征, 朱达善. 固体力学学报. **15**, 1 (1994) : 12—18
- 27 Fujita Y. *J. Zosen KiaKai*. **94** (1954) : 105—110
- 28 Tanaka N. *J. Soc. Naval Architecture of West Japan*. **72** (1952)
- 29 Chuang S L. AD-622427 (1965)
- 30 Verhagen J H Q. *J. of Ship Research*. **11**, 3 (1967) : 211—223
- 31 黄震球, 张文海. 华中工学院学报. **14**, 1 (1986) : 11—20
- 32 岳亚丁, 郑际嘉. 水动力学研究与进展. **7**, 2 (1992) : 219—226
- 33 Wilkinson J P D, Cappelli A P, Salzman R N. *AIAA J.* **6**, 5 (1968) : 792—797
- 34 Chuang S L. NSRDC Rep. 3248 (1970)
- 35 Geers T L. *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 5 (1978) : 1500—1508
- 36 Felippa C A, Derantz J A. *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.* **44**, 3 (1984) : 297—337
- 37 Simitzes G J. *Appl. Mech. Rev.* **40**, 1 (1987) : 403—409

## ADVANCES IN STUDIES ON DYNAMIC BUCKLING OF STRUCTURE SUBJECTED TO FLUID-SOLID IMPACT LOADING

Gu Wangming Tang Wenyong Chen Tiejun Zhen Jijia\*  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

**Abstract** The achievements and advances in studies on dynamic buckling of structure subjected to fluid-solid impact loading are systematically reviewed. The features of fluid-solid impact buckling and the experiment results of columns, grillages, rectangular strips, plates and cylindrical shells under fluid-solid impact loading are described. Finally, the problems which remain to be solved in experiment and theory are also suggested.

**Keywords** *structure; fluid-solid impact; buckling; elastic-plastic; dynamic response*

\* Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074