

# 板和壳同连续介质的非定常相互作用

А. Г. Горшков

本文评述了薄壁结构及其各部分构件（板和壳）同周围介质（空气、水、土）的非定常相互作用问题<sup>1)</sup>。由于这个问题涉及较大范围的课题而又不可能全面予以阐述，因此只能把主要注意力放在其中的一些课题上：冲击波对可变形薄壁结构的作用；壳体结构对各种障碍物的冲击和侵彻；地震、风、波浪和水流等对工程和民用结构物的一定形式的非定常作用。

## 1. 冲击波

根据上述的一些方向，大量的研究工作是旨在解决有关各种强度的冲击波对板和壳作用的课题。近几年来发表了一些科学专著 [16, 18, 19, 44, 62] 和综述文章 [27, 28, 43]，这些工作足以反映这一方面研究工作的全貌。因此本文仅限于讨论近几年来（1977—1980）所获得的结果和指出今后研究的方向。

1.1. 气体中的波 利用数值法特别是网格法研究冲击波与薄壁结构的相互作用获得了很大的成就。目前这方面研究工作中应当指出的是文献 [9—12]，其中深入研究了弹塑性薄壁结构构件在可变形接触面边界条件提法下与理想介质中的冲击波非定常（平面的和轴对称的）相互作用问题的数值解法。我们在薄壳理论（考虑横向剪切和转动惯量）和塑性增量理论（考虑线性运动强化）的范围内描述了壳体的物理非线性和几何非线性动态行为。

为了对气体动力学方程进行积分，建议采用 С. К. Годунов 的穿越计算的显式有限差分格式，它的依据是计算任意间断量，从而有可能按拉格朗日和欧拉移动网格法进行计算。看来，这样的差分格式是最适宜用来解决这一类课题的。

根据显式“交叉”形式的格式，采用变分-差分法可得到弹塑性壳体动态变形方程的数值解。按照逐步改变壳体几何形状的方法来考虑几何非线性。由迭代法来确定变形张量的塑性分量。

按上述方法计算了液体和气体介质中的板和壳。研究了理想气体情况下无限长时间的平面冲击波对无限长薄圆柱壳的作用的著名课题。结果表明，在许多情况下，甚至在结构构件发生相当大位移的情况下，如同无约束的课题一样，这一课题是能够解决的。

研究人员今后应该扩大课题的范围，注意那些研究得较少的课题（例如，圆锥壳以及内部有构件和有加强的组合壳）。

文献[31]发展了用来计算弱空气爆炸波作用下的球罐的数值方法，球罐由立柱支承，其中贮存液化气。把一种半解析法的变体的有限元法作为算法的基础。用拟静力法来分析球罐结构构件的应力-应变状态。

文献 [105, 106] 研究了超声速飞机中产生的声爆对地面建筑物及其构件（墙板、窗）的

1) 本文曾在第 12 届全苏板壳理论会议上宣读并已列入会议文集，Ереван, 1980 年 6 月。

作用。在这种场合通常用移动的 $N$ 形波来近似表示外载荷。

其次要讨论那些最近具有日益重要意义的内部问题。文献[1]简要评述了有关计算爆炸洞(平底、椭圆底或球形底)壳体的理论和实验工作。对于这类课题在确定载荷下通常将壳体视为绝对刚体。这样,问题在于研究给定的动态载荷作用下爆炸洞的壳体上和其它结构构件上的应力-应变状态。采用各种理想化的提法来求解爆炸洞计算问题。要注意法兰盘附近存在着局部效应。也用实验方法找出这些效应<sup>[60]</sup>。

文献[13]用实验方法研究了脉冲内压作用下单层和多层圆柱形容器(爆炸洞)的强度问题。

紧接上述工作的是研究给定的表面脉冲移动载荷(压力波形式)作用下有关板和壳的非定常变形,此时不考虑介质的影响,这里必须指出的是专著[60,81],其中研究了很宽动态载荷谱作用下梁、板、球壳、圆柱壳和锥壳中的应力-应变状态。研究了加强的弹性构件和其它因素对响应特性的影响。

1.2.液体中的波 这方面的大部分研究工作涉及薄壁构件(板、壳),它们与理想可压缩液体相接触,而液体的运动可用声学上近似的一个波动方程来描述。这里成功地用解析法和数值法解决了这些课题。

在冲击波与薄壁结构非线性相互作用的情况下,那些参与相互作用的介质(一起或单独)呈现非线性特性(几何非线性或物理非线性),这时只有靠数值法才能有效地解决问题(参见上面提到的工作[10,11],其中提出了解类似课题的差分格式)。

文献[7]详细研究了数值计算格式,它用来分析平面压力波作用下用肋加强的弹性厚圆柱壳的应力-应变状态,以便了解相互作用起始阶段的情况(按照平面反射的假设来确定作用在圆柱体表面上的液体的压力)。对于圆柱壳和肋的弹性理论动力方程的求积分是采用有限差分法(把未知函数按角度变量展开为福利哀三角级数)。分析了各种不同的近似格式对角点位移的影响。该文作者们也用类似的方法研究了在水下冲击波作用下由各种材料制成的空心厚圆柱壳的行为<sup>[6,8]</sup>(圆柱壳置放于刚性无限长圆柱形屏壁内)。以后在计算中必须利用更精确的格式来考虑流体弹性的相互作用<sup>[27,108]</sup>。

应该指出,与液体接触的板和壳的动力学方面的数值结果大部分是依据有限差分法得到的(包括结构构件和介质两方面的数值结果)。

目前,有限元法还没有广泛地普遍用来解流体弹性方面的非定常课题,但是已借助于它找到了很多特殊问题的解。例如,文献[92,93]将通常的有限元程序方法SAPIV加以修改后,可以用很简单的方法来解弹性体与液体相互作用的问题以及压力波在容器中传播的问题。作为例子考察下列问题:压力波在具有刚性壁的贮液罐中的传播;球壳与液体相互作用的内部和外部问题;贮液罐中液体的一维和二维自由振动;贮液罐中以给定速度运动的液体的行为。在这种情形下,认为液体是剪切弹性模量为零的弹性介质(拟弹性介质)。这样,只要对弹性矩阵进行修正,就可以利用现有的程序来解一些新的问题。

文献[103]应用有限元法结合有限差分法来研究结构与液体的非定常相互作用(在求介质的运动方程的积分时利用有限差分法)。

文献[101]介绍了“单纯”利用有限元法(在欧拉坐标系和拉格朗日坐标系中)来解液体与结构(核反应堆装置)的相互作用问题。按照杆、板、壳的几何非线性理论来建立结构

的单元。考虑结构材料的弹塑性行为。认为液体是理想可压缩的。按照修正的 Бубнов 方法获得与问题有关的定解方程（用有限差分法和显式格式来求方程对时间变量的积分）。对有隔板的圆柱形管进行了数值计算。

文献[104]研究了水下平面冲击波与薄壁结构的相互作用，该结构由两个同轴的圆柱壳构成，两个圆柱壳之间充满理想可压缩及具有其它特性的液体（平面问题）。根据对时间变量的拉普拉斯积分变换，采用分离变量法来解这个问题。当趋向原点时，既可利用渐近法也可利用精确法估计围道积分。对于后者，为求每一个振型，必须用数值法来解第二类沃泰拉积分方程。对沉没在水中的钢制壳体进行了计算（在展开式中振型保留到  $n=7$ ）。

文献[11]利用上述非定常空气流体弹性二维问题的数值解法研究了类似的问题。其中还研究了更复杂的情况：壳体之间再用纵梁加以连接。进行了参数分析，用以确定壳体之间各个部分中的介质（空气和水）对响应特性的影响。结果表明，最大变形发生在加强区的外壳上。

文献[70]利用流体动压力所遵循的近似关系和 Бубнов 方法估价了周期排列的（弹性或绝对刚性）横肋对无限薄圆柱壳应力状态的影响。声压波波阵面平行于壳体轴。

文献[15]和[61]研究了无限长光滑圆柱壳当冲击波在其上绕射时的行为（文献[15]是线性提法，采用积分变换法，柱壳腔内充满可压缩液体；文献[61]考虑弹塑性壳体与冲击波的非线性相互作用，采用有限差分法）。

文献[108]对计算圆柱壳与内部构件及液体间的流体相互作用的各种格式作了估价（从平面放射假设到二重渐近近似算法）。

文献[17]采用关于时间变量的福利衰积分变换法解决了弱冲击波对弹性圆柱体作用的二维问题，该圆柱体内含弹性填充物（冶炼硅石）。获得了无穷级数形式的精确解。论述了求福利衰逆变换的数值法。

文献[5]利用关于时间变量的拉普拉斯积分变换研究了平面声压波作用下多层球壳的非定常变形。确定了壳体挠度，其中在相应的展开式中振型保留到  $n=7$ 。

文献[30,35]获得了作用在弹性厚壁球体上的平面压力波和球面压力波绕射问题的精确解析解。把未知函数按勒让德多项式展开为级数后建立了问题的解，解的形式为基本的弹性波的有限和式（按时间变量进行拉普拉斯积分变换）。对于径向对称振动和一些特殊情况的球体运动进行了数值计算。

文献[99]研究了各向异性厚壁球体的行为，该球体沉没在理想可压缩液体中，受到均匀的内压作用（中心对称和均质的各向异性）。利用算子方法求得球体和声学介质运动方程的积分（这里要指出，在各向异性参数取某些值时，可以根据文献[30,35]发展的方法建立问题的解）。对于下列两种加载情况已得到解：瞬时突加而后保持为常数的压力载荷；对球体内表面施加的脉冲压力载荷。用类似的方式找到了粘弹性球壳问题的解<sup>[98]</sup>，并且壳体周围的液体可以是无粘性的，也可以是粘性的。

文献[49]研究了声学介质中粘弹性薄壁球壳的振动（开尔文-福格梯模型），该球壳受到沿其内表面均匀分布的  $\delta$  形压力脉冲的作用。获得了壳体位移的简单解析关系。

文献[39]利用关于时间变量的福利衰积分变换研究了封闭球壳上有限作用时间的球形声波的绕射问题。壳体的运动用铁木辛柯型理论的线性方程来描述。

文献[4]研究了薄壁球壳在其内部有刚性核情况下的内部非定常问题。

文献[23]作了圆板变形的数值研究,该圆板盖住盛有水的刚性圆柱形空腔,冲击波作用在液体上(内部问题)。该问题与设置在冲床和火炮之类喷射器械中的板有关,板按流体力学处理。由于平活塞(炮弹)对圆柱体内的液体表面进行冲击而形成冲击波。用有限差分法来求流体运动方程(波动方程)和板运动方程的积分。在计算中考虑了板上存在着塑性变形和液体中存在着气蚀区域(按最简单的格式考虑液体中的气蚀)。在许多情况中由于考虑气蚀导致响应特性发生重大变化。

文献[95]研究了薄圆板的非定常振动问题,该薄板是半无限刚性圆柱形容器的底板,容器中充满了声学介质。薄板外侧承受突加均布压力(外部问题)。研究了薄板的支承方式对其行为的影响,也确定了该特殊加载情况下平面辐射假设的适用界限。

文献[2,51]提供了层板和弹性层在它们与声波(脉冲)相互作用时的各种优化问题的解。

粘性流体的流体弹性问题也十分令人感兴趣<sup>[41,42]</sup>,但这类问题仍然研究得不够。文献[40]提供了粘性流体中球壳和圆柱壳非定常变形在一些特殊情况下的某些结果。

文献[20,47,48,65,96,100,110,111]也研究了板、圆柱壳和球壳(包体)与液体相接触时在各种不同作用下的非定常行为。

文献[27,28]指出了目前在冲击波与沉没在液体中的障碍物相互作用方面的主要成果。也指明了有待今后研究的某些主要方向。而且,在薄壁结构空气流体弹性方面所发展的途径和方法可以适当地推广用来解决其它交叉力学领域如民用建筑物的空气流体弹性、生物力学、探伤等问题。

1.3. 回波信号 在最近的出版物中,专著[67]及论文[71,72,80]都对来自薄壳和球形、圆柱形及任意形状连续体的声学回波信号进行了研究。文献[71]以二层声学球体作为研究对象。文献[37,38,69]利用关于时间变量的福利衰积分变换和分离法研究了持续时间为有限的集中力脉冲作用下空心(连续)弹性球(有填充物和无填充物)的声波辐射的非定常问题。把填充物视为理想可压缩液体(气体)。用龙贝数值积分法进行逆变换。按确定远场的特性进行数值计算。

在这方面最重要和最困难的问题是建立有效的算法来求解数学物理的反问题,其中弹性对象的参数可以根据反射回波信号的参数来确定。

目前,经过深入研究得到的算法适用于形状简单的理想对象,从而在许多情况下都有可能根据反射回波信号来确定障碍物的某些参数。例如,Метсавээр<sup>[67]</sup>提出了根据回波信号来确定弹性薄壳参数的下列近似方法。假定对象的描述精确到应当予以确定的下列几个常数(参数): $L, R, \delta = h/R, \beta = c_1/c, \gamma = \rho_1/\rho, \nu, \beta_0 = c_0/c, \gamma_0 = \rho_0/\rho$ ,其中 $L$ 为观测点(所探测的脉冲源的中心)到圆柱壳的轴(或球壳的中心)之间的距离; $R$ 为壳体半径; $h$ 为壳体厚度; $\rho, c$ 分别为壳体周围的介质密度和介质中的声速; $\rho_0, c_0$ 分别为填充物的密度和声速; $\rho_1, \nu, c_1$ 分别为壳体材料的密度,泊松系数,纵波在壳体材料中的传播速度。

其次求解了与平面(球面)压力脉冲在弹性壳体上绕射有关的一系列正问题。阐明了回波信号的机构及其某些组成部分(回波脉冲)的资料。根据获得的数值结果建立了对象参数和某些回波脉冲之间的近似(经验)关系式。选择下列诸量作为回波信号的基本参数:反射脉冲到达的时间和振幅;描述无矩振型第一次辐射脉冲传递函数的模数行为的一些常数;与弯曲振型第一次辐射脉冲和第一次折射的回波脉冲的传递函数最大模数相应的频率;其它某些参数。

可利用已建立的关系式作为确定壳体和填充物的参数的方程组。有了来自未知对象的回波信号就可以识别信号，从而可确定回波脉冲的参数。然后把这些参数列入方程组，就可以求出未知对象的参数。

所得的方程组使我们有可能求得上述球壳和圆柱壳（有填充物）的全部参数，但不包括壳体材料的泊松系数，这是因为回波信号参数几乎与泊松系数无关。在实用上可将所提供的回波信号的多方面特征用来研制确定复杂对象的参数的各种仪器设备。

1.4. 弹性介质和土中的波 对弹性波在可变形板和壳上绕射的非定常问题的研究要比对液体介质情形的研究少。对圆柱形和球形的空腔和刚性包体的研究（包括解析法和数值法）获得了大量结果<sup>[44, 58, 62]</sup>。

文献[30]利用基本波的叠加获得了非定常弹性波在空心厚壁弹性球体上绕射问题的精确解。壳体的内部空腔可用声学介质或弹性介质来充填（作为一个特例，可从解答中得到相应的声波的结果<sup>[35]</sup>）。

在计算采用平板和壳体作为其构件的各种地下结构的强度时就遇到这类问题。实际上重要的是计算地下管道的问题。

文献[86, 87, 90]研究了轴对称压力波（波形剖面不变，移动载荷）对无限长圆柱壳的作用。波以恒定的速度在壳体内部传播。这个问题与水击作用下地下石油管道的计算有某些关系（不考虑液体本身的影响）。确定了壳体内的位移和应力。在轴对称移动载荷作用下无矩解对壳体位移作出主要贡献。

文献[68]用实验方法研究了爆炸波对管子的影响，该管子埋设在土中，管内充满水。获得了有关内压值的资料（研究结果证实了人们所预料的特点）。

文献[84, 85, 88]研究了塑性爆炸波（具有平面或球面波波阵面）对处于连续介质中的圆柱形扁壳和球形壳片的作用。入射波参数认为是已知的；假定波立刻作用到整个壳片上。

用近似方程来确定作用在壳片上的压力<sup>1)</sup>，它由两部分组成：第一部分相应于来自不动的刚性平面障碍物的反射所产生的压力；第二部分考虑弹性壳片运动所引起的压力（这部分可以理解为某些附加质量和阻力）。

根据 Бубнов 方法（对于圆柱形壳片的情况）和汗克尔积分变换方法（对于球形壳片的情况）来确定壳片内的行为和应力-应变状态。对与非饱和沙土相接触的壳片进行了计算。

用类似的提法也获得了下述问题的近似解：球形爆炸波对圆板的作用<sup>[80]</sup>；平面波对圆柱-环的作用<sup>[82]</sup>；平面波对刚性屏壁内矩形板的作用<sup>[83]</sup>（介质为砂土）。

## 2. 冲击和侵彻

薄壁结构对可变形障碍物的冲击和侵彻提出非常复杂的数学问题，它们具有很大的实际意义<sup>[33, 34, 74]</sup>。求解这类问题牵涉到对描述结构和障碍物共同运动的高阶方程组进行积分，而由于存在着需要在求解过程中予以确定的通常是未知的接触面和自由面，因此解这类问题是复杂的。

在工程实际中可以根据用来描述介质（结构固定在介质内）（或障碍物）运动的初始冲

1) 其基础是平面塑性冲击波与反射平面相互作用的已知解（Зволинский Н. В., Рыков Г. В. Отражение плоской ударной волны от преграды. ПИММ, 1963. №. 1, С. 91).

击速度和物理上的考虑而采用各种简化模型。下面将简要评述针对某些简单障碍物模型进行的研究工作,假定初始冲击速度远小于声音在障碍物中的传播速度。

文献[74]论述了固体对液体和土的侵彻问题,文献[33]则论述了弹性壳体对液体的侵彻问题。

2.1.对液体的侵彻 综述文献[34]反映了这方面所获得的主要结果。从最近的一些工作中我们指出关于下列物体侵入液体的初始阶段的研究工作:弹性楔<sup>[20]</sup>,二层圆柱壳<sup>[26]</sup>和三层圆柱壳<sup>[32]</sup>(平面情况)侵入理想不可压缩液体的半空间内;圆柱壳<sup>[2,45,76]</sup>和球壳<sup>[75]</sup>侵入理想可压缩液体内(文献[21]研究了固体的侵彻问题)。在这些著作中所得到的解全都是近似解,因为它们都是建立在各种假设的基础上的。

在可变形板和壳对液体的侵彻问题中,由于要建立解析解是很复杂的(这主要是因为存在着运动的自由边界和可能出现气蚀),因此,应该认为解这类问题最有前途的方法是数值法,尤其是有限差分法。预先对已有的解析解的问题进行数值计算,所得结果与解析解相吻合。

文献[11]提供了无限长圆柱壳(支承在刚体上的)垂直冲击理想可压缩液体(水)自由面的问题(平面问题)的数值解结果。初始冲击速度 $v_0 = 500$ 米/秒。采用前面文献[9,10]中提出的方法作为计算依据,求解了弹塑性结构构件与液体中的冲击波相互作用的二维问题(在对壳体运动方程求积分时采用显式有限差分格式的变分-差分法,而在解流体动力学方程时采用 Годунов 的显式穿越计算格式)。

作者们指出,在上述特殊情况下,气蚀对壳体的应力-应变状态的影响很小(与不考虑气蚀现象时所得计算结果的差别不超过5%)。按最简单的模型考虑气蚀:在压力达到临界值 $p = p_k$ 的区域,压力和密度突然改变并变为零。

文献[45,75]提出了类似的数值计算格式来求解弹性薄壁封闭球壳和圆柱壳垂直冲击和侵入理想可压缩液体的问题。壳体的侵入速度认为是常数,而壳体的运动用双曲型薄壳理论的线性方程来描述。壳体上的计算网格借助于特征线来建立。研究侵入的开始阶段,这时可以把具有被扰动液体表面的边界条件挪到其初始平面上。

对圆柱壳和球壳应力-应变状态的数值研究表明,当速度接近 $v_0 = 50$ 米/秒时,按可压缩液体和不可压缩液体计算给出的结果相近<sup>1)</sup>(对 $v_0 > 50$ 米/秒时没有作过比较)。

2.2.对各种形式基础的冲击 刚性平面障碍物是形式最简单的基础。对这种情况已经获得足够多的结果(基本上采用数值方法,例如参见文献[107]),因此本文将不再加以论述。这里仅指出一些具有代表性的工作。文献[54-57]研究了半无限弹性薄圆柱壳和理想可压缩液体这一系统中在刚性墙壁受冲击情况下的过渡过程。研究表明,在一定的条件下液体中会出现气蚀区。文献[25]利用有限差分法分析了充满气体的柔韧球壳在对刚性平面冲击后的动态行为。

用解析法求解薄壁结构在对可变形障碍物形式的冰、土冲击情况下的响应特性,这类文章目前在出版物中为数不多。下列问题可以作为类似形式的最简单的问题:头部形状为刚性

1) 关于刚性圆柱体和刚性球体的侵入情况, Дробышевский Н. И. 根据液体和侵入液体中的物体的运动方程的数值解作了这样的比较。(参见 Информация о IV семинаре «Динамика упругих и твердых тел, взаимодействующих с жидкостью», Изв. АН СССР, МТТ, 1981, №. 1, С. 202.)

半球的有限长弹性圆柱杆对半空间的冲击问题,对于这类问题,响应  $F(\tau)$  是固定刚体的几何形状以及它的位移  $x(\tau)$  和速度  $\dot{x}(\tau)$  ( $\tau = c_0 t/l$ , 其中  $c_0$  为弹性波在杆材料中的传播速度,  $t$  为时间,  $l$  为杆长; 刚体位移与杆长有关, 而响应与  $Mc_0^2/l$  有关,  $M$  为刚体质量) 所给定的函数。

根据算子法可以得到下列模型的精确解<sup>1)</sup>: 理想弹性障碍物(赫茨理论)  $F(\tau) = kx^{3/2}(\tau)$ , 其中  $k$  为取决于障碍物的弹性特性和侵入物几何形状的系数; 文克尔弹性基础  $F(\tau) = kx(\tau)$ , 其中  $k$  为弹性基础的系数; 冰的流体动力学模型  $F(\tau) = kx^{5/4}(\tau)x^{1/4}(\tau)$ , 其中  $k$  为取决于侵入球的半径和冰的特性的系数(文献[63]提出这个模型, 它与实验结果非常吻合); 土的一维模型  $F(\tau) = \sigma(\tau)S(\tau)$ , 其中  $\sigma(\tau)$  为球体下面的平均压力,  $S(\tau)$  为接触面积在水平面上的投影(文献[66]提出了这个模型)。

对于同一个初始冲击速度来说, 响应特性(特别是头部加速度)无论在量的方面或是在质的方面都是不同的。

文献[77]研究了带有平切口的刚性圆柱体对充满土的半空间的侵彻问题。在圆柱体的另一端有一个圆柱壳, 它是圆柱体的延伸部分。假定土是塑性可压缩介质, 它仅仅在冲击波(平面波)波面上改变自己的密度, 冲击波过了以后仍然为不可压缩介质。初始时刻壳体上的位移和变形已确定。

从上面的评述可知, 薄壁结构与可变形障碍物的相互作用问题研究得不充分。必须继续开展研究工作, 包括发展求解问题的有效方法和深入研究能够充分精确地描述相互作用过程的简单的介质模型。

### 3. 对工程结构的非正常作用

最近, 在非正常空气流体弹性方面已开始极大地注意涉及风载、地震载荷、海浪、潮汐和海流作用下各种民用和工程结构的计算问题<sup>[5, 2, 9, 4, 10, 2, 11, 3, 114]</sup>。因为这些结构(房屋、原子能发电站、塔架、桥梁、管道、水上平台、水库、水坝、水闸等等)都包含薄壁构件, 所以关于它们的计算都可以成功地运用那些在板壳的空气流体弹性方面所采用过的方法和途径。

特别令人感兴趣的是有关计算各种形式(浮动的和固定的)水上平台的问题。这些结构物会受到很宽的载荷谱外部作用, 如风, 海浪, 潮流, 浮冰, 地震等<sup>[94]</sup>。

文献[91]给出了求解地震作用下薄壁结构计算问题的一种可能途径。研究了沿着支承边缘盖住无限深的刚性平面基础的半球形结构。壳体位于理想可压缩液体层(声学介质)之下。壳体的运动可用抛物型线性弹性薄壳理论的方程来描述。基础以给定的加速度(地震作用)发生平移运动。不考虑表面波对壳体运动的影响(液体层具有无限厚度)。

可用有限差分法来求壳体和液体运动方程的积分。对基础作各种不同运动规律的情况进行了数值计算。画出了壳体上有代表性的那些点处最终的流体动力和径向挠度随时间的变化曲线。

文献[52]给出了国内外对风载作用下地面管道和悬空管道的稳定性进行空气动力学计算的问题现况所作的分析。

1) 见 Бобров А. В. Взаимодействие упругих стержней и оболочек с переградами: Аннот. докл. Моск. автомех. ин-т. Семинары. —Изв. АН СССР, МТТ, 1979, №, 2, С, 183.

#### 4. 实验研究

最复杂的力学问题之一是研究薄壁结构及其构件与周围介质非定常相互作用的过程。过程参数随时间迅速变化,波阵面随时间而移动,气蚀现象,在障碍物的材料中出现塑性区,出现反射波和辐射波,所有这一切都大大增加了研究工作的困难,从而不得不采取一系列简化和假设,但是这些简化和假设应由实验来验证。

同样应当指出,一般地说,对这些课题迄今尚未得到解析解。因此就提高了实验研究的作用,根据实验研究能够获得有关结构行为的可靠资料。

文献[53,79]阐述了对薄壁结构动态行为组织实验-理论研究时的若干原则以及一系列综合试验装置。

可以用不同的方式来实现板和壳的动态侵入行为<sup>[27]</sup>。照例在激波管中或由炸药药包产生的波来进行空气冲击波实验<sup>[2,79,105]</sup>。

文献[50,79]用实验方法研究了冲击波多次(循环)加载下与壳体累积损伤有关的一些重要问题。

文献[59]提出了在球形底圆柱形爆炸洞进行试验所获得的变形测量结果。用标准球形炸药药包进行试验,药包位于爆炸洞中心。文献[14]对圆柱壳和球壳进行了类似的研究。指出了弯曲变形对爆炸洞的变形状态有重大的影响(又见文献[13])。

通常用下列方式对位于液体中的壳体或充满着液体的壳体施行脉冲加载:在液体中用炸药包<sup>[73]</sup>;在液体中用高压放电爆炸丝<sup>[24,46,112]</sup>;利用放电室<sup>[64]</sup>;用压力炮<sup>[23]</sup>(用活塞冲击液面,从而在液体中产生冲击波)等等<sup>1)</sup>。

文献[73]对由玻璃环氧树脂制成的,并充满着水的圆柱壳在内部脉冲加载下的行为进行了实验研究,加载方式是靠置放在壳体内部(对称轴上)的炸药药包爆炸。运用高速电影摄影法和应变测量法记录了壳体外半径的流动值和壳体的环向变形(在一系列试验中记录了压力脉冲)。把壳体上出现穿透裂纹取作壳体的断裂判据。作用在壳体壁上的压力脉冲为三角形形式。

文献[24]对钢壳进行了类似的研究。用壳体轴线上的一根铜丝的爆炸来对壳体加载。在计算中考虑了气蚀,数值计算(有限差分法)结果与实验数据满意地符合(关于挠度和压力)。

文献[68,78]用实验方法研究了土中地下管道在爆炸波作用下的行为,爆炸波由炸药药包爆炸产生。

文献[36]提供了部分或全部充满液体的球形底光滑圆柱壳对不动的障碍物进行轴向冲击(例如铁路油槽车的冲击)时的试验结果。研究了槽中所充填液体的液面高度对槽的应力-应变状态的影响。

文献[97]描述了地震对装有液体的圆柱槽作用所进行的模拟。试验在专门的振动台上进行。

---

1) 一套别出心裁的装置用来对壳体结构在其对液体冲击和侵入下进行实验研究,它在哈尔科夫综合技术研究所中使用过。获得的第一批试验结果由 Смялянский В. А. 在第IV届“Динамика упругих и твердых тел, взаимодействующих с жидкостью”研讨班上报告。Изв. АН СССР, МТТ, 1981, № 1. С. 202.



今后为了顺利地解决新问题,必须经常改进记录和量测设备,建立新的装置和实验综合系统,以提高实验研究的水平。

### 参 考 文 献(略)

曾德顺译自: *Механика твёрдого тела*, 4 (1981): 177--189. (洪善桃校)

## 国外原子能发电装置流体力学和 传热传质学的系统研究

Г. А. Салтанов

国际核能发电装置过渡工况和事故工况的核反应堆安全及流体力学、传热传质学问题研讨会,于1980年8月25日至9月5日在南斯拉夫Дубровник市举行。参加会议的有苏联、南斯拉夫、美国、法国、西德、英国、加拿大、瑞典、芬兰、日本及其他国家的主要研究中心、实验室及公司的代表。

本述评将分析会上讨论的主要问题之一——原子能发电系统过渡工况和事故工况中流体力学和传热传质学的系统研究的问题现状和主要任务。

大家知道,对于也应当包括原子能发电装置在内的相当大的系统来说,只了解该装置的个别元件及在系统外的工作情况已经很不够。甚至在对设备元件的各个过程、效果及性能已十分详细地研究过的情况下,它们在系统中实际工作的特性还不仅可能有量的变化,而且也可能有质的变化。正因为如此,最近越来越注意系统地研究原子能发电装置的流体力学和传热传质学,这不仅对于事故工况完全必要,而且对于研制原子能发电系统中协调工作的设备也完全必要,以便提高其运转可靠性,缩短起调调整工作时间。

为了在较短期间和投资不太大的情况下确保原子能发电装置工作可靠和安全(在国外则是为了获得建造原子能发电装置的许可证),必须把物理实验同数值实验合理地结合起来,其最终目的是研究出原子能发电装置事故工况的可靠的流体力学和传热传质学预报方法,也就是建立称为“最佳计算估价”的实用计算程序包。这是战略问题。战术问题则是系统的实验装置同计算程序(程序包)之间的反复相互作用。

### 系统实验装置

对实验装置的分类有不同的看法。例如, F. Mayinger (西德)在《分析压水堆(PWR)载热介质损失事故的大尺度实验和模拟问题》的报告中谈到,在研究载热介质损失事故时,按研究的用途,实验装置分为以下几种: 1) 研究流体力学和传热传质学各个单独效应(过程)的实验装置; 2) 研究这些效应的各种综合效应的实验装置; 3) 研究上述各效应的总效应的实验装置(下面将称为系统实验装置); 4) 研究大体积中三维效应的实验装置。