

爆炸容器动力学研究进展评述*

朱文辉** 薛鸿陆

国防科学技术大学应用物理系, 长沙 410073

韩钧万 刘光祚

中国工程物理研究院流体物理所, 成都 610003

提要 对爆炸容器在其内部爆炸加载下动力行为的理论和实验研究成果作了综述, 对这一方面的工作作了展望并提出了一些建议。

关键词 爆炸容器; 动力行为; 载荷特征; 动力强度

1 引言

爆炸和爆轰实验存在着破坏和污染的可能性, 因此必须尽可能限制其作用范围。以往的爆炸爆轰实验都在靶场或爆炸塔内进行, 这使我们不能方便地选择实验场地, 也不利于使用实验仪器对爆炸或爆轰过程作细致的近程观察, 而且试件回收非常困难。随着爆炸能在军事和民用工程中日益广泛的应用, 如高能武器、爆炸焊接、爆炸加工与合成等, 迫切要求我们能够在方便的工作环境中安全可靠、高频度地进行爆炸爆轰实验并回收产物。爆炸容器正是在这一背景下应运而生。

研制爆炸容器来控制爆炸作用的范围, 将可能的意外事故的损失降至最小限度, 这一思想最初由洛斯阿拉莫斯实验室的科学家们提出^[1]。

40年代初, 他们试图在研制的爆炸容器中进行世界上第一颗原子弹的爆炸试验, 以保证即使试验失败也能回收昂贵的核物质。W. E. Baker(1958)^[2]和A. F. Demchuk(1968)^[3]的工作被公认是开始爆炸容器动力学研究的标志。70至80年代爆炸容器在理论研究、实验研究和应用上都取得了巨大进展。现在苏联、美国、英国、法国和瑞典等许多大型爆炸和爆轰实验室都已装备了专为各种目的设计的爆炸容器, 其中大多数为金属容器, 容积从几立方米到几百立方米, 允许装药量从几百克到几十千克, 重量从几十吨到几百吨, 工作温度可达-50℃。图1是前苏联一个爆炸容器系列的实物照片。新近资料表明, 美国和前苏联自70年代起开始研制复合材料/金属多层复合结构的爆炸容器^[4,5]。

* 受中国工程物理研究院科学技术基金资助。

** 现在工作单位: 中国科学技术大学五系, 合肥 230026

我国在这方面起步较晚。直到1986年才由江西洪都机床设备厂章仕表主持研制了第一台1kg TNT 当量的爆炸容器；1986年中国工程物理研究院研制成5kg TNT 当量的爆炸容器并通过鉴定^[6]，新近又建成10kg TNT 当量的爆炸容器一台。可以说爆炸容器在我国还远未普及，已有的设计比较粗糙，至今还没有公开的研究论文发表。

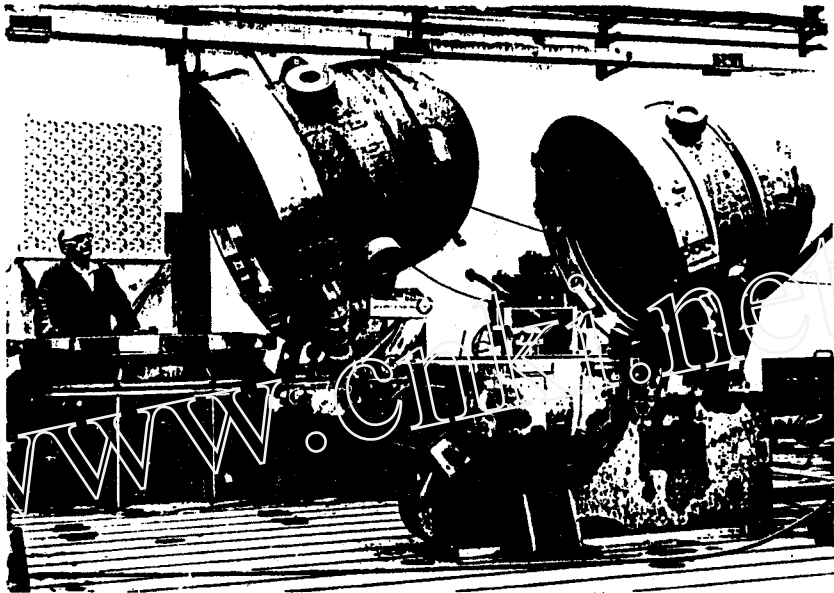


图1 苏联科学院西伯利亚分院流体力学研究装备的竖式爆炸容器系列的实物照片^[4]

这里我们着重介绍一下爆炸容器动力学研究的进展现状，包括基本方法、实验和理论工作，展示已取得的成果，对尚待解决的问题提出某些建议，以期待我们对多方面的工作有比较全面的了解。

2 基本问题

爆炸容器动力学归结为研究爆炸冲击波和产物同爆炸容器结构的相互作用以及由此引起的壳体结构的受力变形状态，并进一步确定其工作能力、安全强度、可能的破坏模式及在给定载荷下运行的破坏损伤概率（危险性），为工程设计提供有建设性的指导。考虑到容器壳体的变形对爆炸产生的容器内部的流场只有极小的影响（小于1%）^[7,8]，爆炸容器动力学研究一般可分为三个方面的问题：

- (1) 确定作用在容器各部分结构元上的爆炸载荷，此时容器壁可作刚性近似处理；
- (2) 确定在上述载荷作用下容器外壳和其他结构元素中的应力状态，提出相应的强度准则，针对具体结构找到安全系数；
- (3) 依据容器的响应行为和强度准则，对容器在指定状态或常规操作下工作的破坏概率、工作极限、操作寿命予以评估。

下面我们对上述三个问题在理论、实验和数值模拟等各方面的工作予以评介。

3 动力学载荷研究

一般爆炸流场的计算已有相当广泛的研究。但是直到1981年才由S.A.Zhdan^[9]最早直接针对球形爆炸容器数值模拟了在其内部炸药爆炸下产生的动力流场。在此之前,壁面载荷的确定一直沿用自模拟解的无量纲形式,其表达式中的系数根据对容器内部压力场的测试数据而确定^[10]。

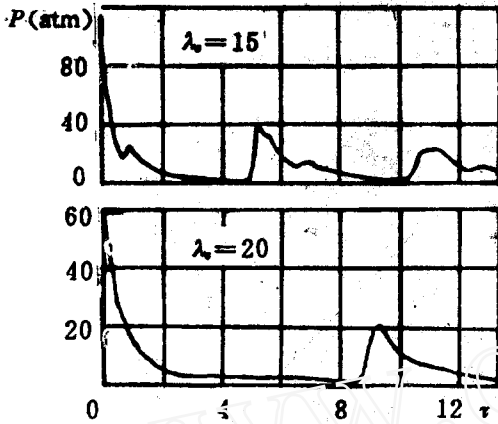


图2 典型的压力随时间变化曲线
(无量纲时间 τ 定义见[9])

S.A.Zhdan (1981)^[9]的研究假定球形爆炸容器内部动力流场由置于几何中心的球形集中装药爆炸所产生,于是问题得出的结论是,(1)作用在容器壁上的压力是非线性下降的,具有周期性宏观脉动特征,这种特征来自容器内部爆炸产物和空气冲击波复杂的运动性质;(2)当压力宏观脉动周期与壳体振动的周期满足一定的条件时,壳体有发生谐振的可能性。所得到的典型压力-时间曲线见图2。

A.E.Belov等(1984,1985)^[11,12]也对球形爆炸容器壁的动力载荷作了计算,并

考虑了炸药偏心放置的情况。研究指出,容器壁面上的载荷也显示出类似于图2的脉动特征,即存在多个逐渐降低的压力峰。动力变形的实验结果还表明,容器变形状态主要取决于第一个压力脉冲,以后的作用近似于静力学的,对壳体的动力学响应影响不明显。以装药位置离开球心的距离与壳体半径之比来衡量装药的偏心程度 e ,在 $e \leq 0.2$ 的范围内,偏心度对变形幅度和最大变形量均无明显影响。振动过程壳体变形的最大幅度不在第一个半周期到达而是在以后的某一时刻实现,这一现象称之为应变增长现象^[10],并认为这一现象不应与动力载荷的后续脉冲相关,而可能是振动过程中多个频率相近的不同振型相互作用和叠加的结果。这与Zhdan的谐振观点不同。

S.M.Bachrach (1989)^[13]对带有套管的球形容器在不同偏心度下内部球集中装药爆炸产生的流场进行了二维模拟,同时在Timoshenko壳体模型下对容器的动力响应作了计算。结果同样展示出壁面上动力载荷的脉动特征,并指出振动过程中应变增加的主要贡献来自于不同频率的弯曲振型的叠加,而并非为动力载荷的脉动特性所致。

对壁面上动力载荷的特征有不一致的观点。V.A.Maltsev (1985)^[14], A.A.Buzukov (1980)^[15]和朱文辉等人^[16,17]最近的实验结果显示出与数值结果符合的特征,但A.E.Voitenko (1970)^[18]和A.F.Demchuk (1971)^[8]却认为容器壳只承受单次冲击波的作用。

在球形爆炸容器内部偏心装药或在其他不规则、更复杂结构的容器内部集中装药情况下,确定其由爆炸所引起的、作用在容器壁上的动力载荷有一种工程应用背景很强的方法。先将装药化成等效的球形装药,求出此装药在一维球对称爆炸下在不同距离处所对应的压力,于是壳体内表面上各点的压力可以取它在等效装药的一维球对称爆炸下该点至装药中心的距离所对应的值。具体方法可见文献[19]。实验表明这种方法确定的压力有良好的可靠

性。

从上可得封闭爆炸容器中炸药爆炸产生的压力具有宏观脉动特征，后续脉冲冲量值可以与第一次压力脉冲的冲量相比拟^[19]；但这并不是导致壳体响应过程中应变（应力）增长的主要因素。

4 爆炸容器壳体的变形和动力学强度

爆炸容器壳体的动力变形和应力状态研究已从实验上作了相当多的工作，如 V.A. Maltsev (1985)^[14] 和 A.A. Buzukov (1976)^[20] 等。结合理论方面的研究，揭示出了一些重要的结论，提出了与各理论相应的计算最大变形和应力的方法。

W.E. Baker 等 (1958)^[21] 得到了弹性球壳在线性降爆炸载荷下作球对称一维振动的解析解。他在 1960 年^[21] 又得到在类似情形下球壳振动的弹塑性响应解，其中假定壳体材料为线性硬化材料。1966 年^[22] 他进一步研究了炸药偏心放置时弹性球壳的轴对称振动，给出了解析和数值结果。这些工作奠定了爆炸容器动力响应分析的基础。1973 年 R. A. Benham 等^[23] 对柱形壳体的动力行为作了理论和实验分析。V.V. Adischev 等^[7] 在 1979 年得到了有限长圆柱壳在线性下降载荷作用下动力振动过程的本征解。

A.F. Demchuk (1968)^[13] 通过简化，将爆炸容器视为一维的球对称或柱对称结构，在短暂冲击近似下以作用于壳体壁面的冲量 Φ 来表征其动力行为，通过无量纲分析得到

$$\Phi = \frac{a}{\nu} \eta^{\nu-1} \left(\frac{2}{k} \right)^{1/2}$$

其中， ν 与壳体形状相对应，对球壳 $\nu=2$ ，对柱壳 $\nu=1$ ； a 为能量反射系数， $1 \leq a \leq 2$ ； $\eta = R/r_0$ ， R 为容器半径， r_0 为装药半径； k 为常数。

分析得出壳体中应力的最大值为

$$\sigma_d = \begin{cases} \rho r_0 E \sqrt{2Q_0} / (R \rho \delta a_0) & (\text{圆柱壳}) \\ 2\rho_0 r_0^3 E \sqrt{Q_0} / (3\rho R^2 \delta a_0 \sqrt{1-\mu}) & (\text{球壳}) \end{cases}$$

这里， ρ, E, μ 分别为壳体材料的密度、杨氏模量和泊松比， r_0 为装药半径， R, δ 分别为容器半径和壁厚， a_0 为壳体材料的声速， Q_0 是炸药的比能量。

由此，依据选用的强度准则可确定出给定容器（主体结构）的允许装药量。

A.G. Ivanov (1968)^[24] 在对钢制爆炸容器动力行为的研究中考虑了 Baushinger 效应，并提出计算壳体中第一个周期的最大应力公式为

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_1}{1 - \mu} \cdot E & (\text{球形壳体}) \\ \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_1}{1 - 0.5\mu} \cdot E & (\text{圆柱壳体}) \end{cases}$$

式中 ε_{\max} 为第一个周期壳体的最大应变， ε_1 为相应的残余变形。这样得到的动力学屈服强度比静态值高约 40%。

将上述结果通过实验数据对两种具体结构建立最大应力和拉伸应变 σ, ε^+ 同无量纲装药量 $W^* = W/\rho \delta R^2$ 的关系如图 3 和图 4 所示，其中 W 为装药量。可以看出，高度 H 等于 $2R$ 的柱壳中应力比高度 $H = R$ 的柱壳和球壳中的应力都高（对相同的 W^* ），即 $H = 2R$ 的柱

壳有相对低的承载能力。

σ (kg/mm²)

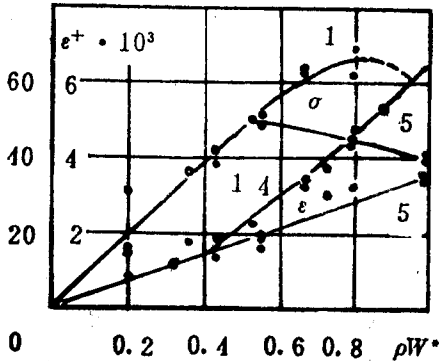


图3 σ 和 ϵ^+ 与比装药量的关系^[24].
 σ, ϵ^+ 为球壳内最大应力和应变, 1, 4, 5 为对应于 3 种不同的球壳

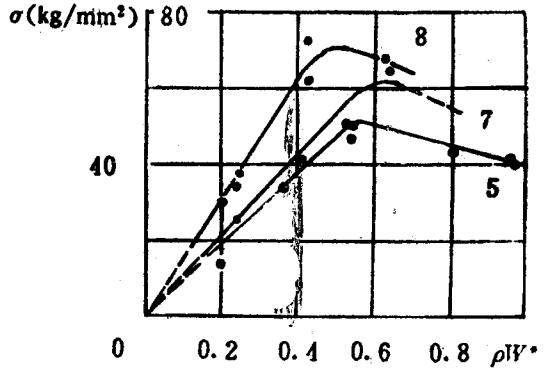


图4 3种壳体 σ 和比装药量的关系曲线^[24].
8 为对应高度 $H=2R$ 的柱壳; 7 为对应高度 $H=R$ 的柱壳; 5 为对应同样半径 R 的球壳

最早在实验中观察到爆炸容器壳体中应变(应力)增长现象的是 A. A. Buzukov



图5 圆柱壳几个不同位置的典型应变^[20].
编号 1—5 代表测量点, 箭头对应应变跳变发生

(1976)^[20]. 这种现象的特征是, 当爆炸载荷停止作用后壳体中的应变将继续增长到某一最大值后才逐渐减小. 随后 V. M. Kornev (1979)^[25] 以及许多研究者证实了这一现象的存在. 典型的应变增长过程如图 5 (引自 [20]).

在简单模型下 V. V. Bolotin (1960)^[26] 曾在理论上预言应变增长的存在. J. N. Goodier 等 (1964)^[27] 及 H. E. Lindberg (1964, 1974)^[28, 29] 研究了在初始突加的弱非均匀性载荷作用下圆柱壳中应力增长及屈

曲发生的可能性, 并明确提出这种现象是弯曲振动和膜振动相互作用和能量转换的结果. 这些理论分析虽然不是严格针对实际爆炸容器结构所作, 但其结论在某些情形下恰好与实验一致. 而 A. F. Zhdan (1981)^[9] 关于压力脉动可能引起谐振的预言虽从能量观点来看隐含着某种合理性, 但迄今还没有得到理论的直接检验.

V. V. Adishev (1979)^[7] 认为球形壳体和柱形壳体振动的本征频率十分密集是爆炸容器实验容易观察到应变增长的本质原因. 对于实际结构而言, 本征频率的密集分布特征使得瞬时振动频率容易产生跳动, 从而造成振幅的不断消涨.

A. E. Abakumov 等 (1984)^[30] 采用 Timoshenko 型壳体方程描述球形容器轴对称响应行为, 将应变随时间变化的计算结果与实验测量的结果相比较, 发现无论在赤道附近还是在极点附近两者都有良好的符合, 见图 6, 7. 这实际上间接证明了振型叠加是应变增长的主要原因, 因为从壳体方程直接计算所得的结果必须是多种振型的集体贡献. 极点附近的应变值较大表明在那里弯曲十分显著. 另外这个工作实际上还说明了研究壳体动力行为时考虑壳体

厚度（或者说横向剪切与旋转惯性）可能是必要的。P.Z.Lugovoi (1991)^[31] 在其评论文章中把 Timoshenko 型方程能较好描述壳体动力行为归结为它的双曲性质，这种双曲性质保证了它对波动过程的合理描述。

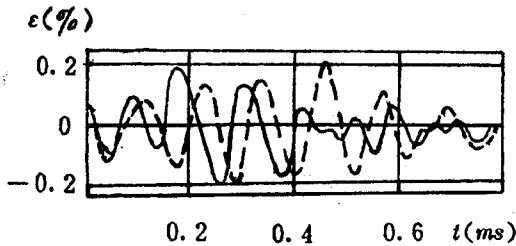


图6 极点附近应变随时间的变化^[30]
实线为实验曲线；虚线为模拟结果

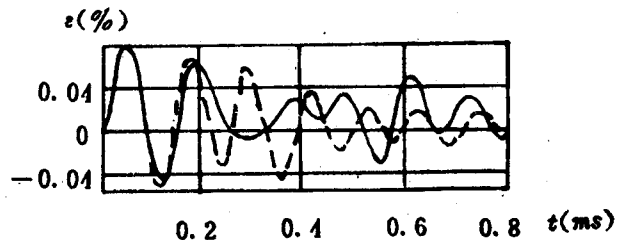


图7 赤道附近应变随时间的变化^[30]
实线为实验曲线；虚线为模拟结果

大量实验证明爆炸容器壳体振动的最大变形通常出现在载荷作用停止以后某个时刻 t_m ， t_m 的大小从几十到几百微秒不等，与具体结构有关。因此在爆炸容器的设计上必须充分考虑这个因素，并努力寻求如何控制应变增长。A.E.Belov 等 (1990)^[32] 揭示了改变圆柱壳的长径比可控制应变增长效应的原则可能性。

正如 A.F.Demchuk (1988)^[33] 在总结性论文中所提出的，从理论上探讨这种应变增长的机制还未有人深入过，对实际结构的非对称性以及由附属工作件的引入带来的应变状态的局部化和复杂化也还没有进行过估计。在几乎所有的论文中都只考虑光滑壳体，但 P.Z.Lugovoi 等 (1988)^[34] 对加筋球壳的数值研究表明加筋对爆炸容器的动载行为有严重的影响。

为考察弯曲应力的贡献，V.A.Maltsev 等 (1984)^[35] 研究了图 8 所示容器的动力学响应（图中1—4为应变片位置），并分别测量了各位置壳体内外表面的变形。结果指出，振动中弯曲振型对薄球壳的应力应变状态有重要贡献，其最大应力值可与膜应力相比拟；初始时刻壳体可以认为是无矩的，弯曲应力只在窗口边缘附近最主要，按等效应力准则可以估计出壳体中最大等效应力（可认为等于最大作用应力）高出 Baker-Demchuk 理想估计值的2—3倍；有几种不同的弯曲振型参与了振动，并观察到模态之间的能量转换。

基于实验结果的上述结论，V.A.Maltsev 等 (1985)^[36] 假定球壳初始时刻无矩，确定出初始最大应力 σ_H 和壳体的总变形能，然后考虑用弯曲和膜振动间的能量转换来确定振动过程中的最大应力 σ_{max} 。令 Ψ 表示弯曲发展后膜应变能占初始总变形能的比例，对两个方向互相垂直应力相等的情形则得到

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} = K_{\psi 1} = \sqrt{1-\Psi} + \sqrt{3\Psi}$$

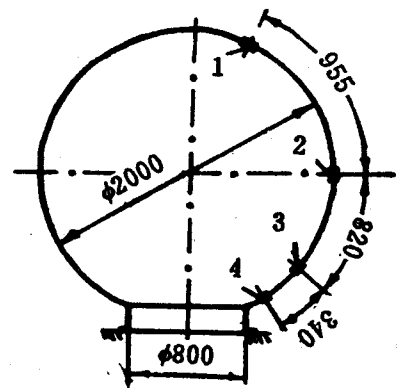


图8 爆炸容器结构简图^[35]

对相互垂直两个方向上其中一个应变等于零的情形有

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{11}} = K_{y_2} = \sqrt{\frac{2(1-\Psi)}{1+\mu}} + \sqrt{\frac{6\Psi}{1+\mu}}$$

对上述表达式取极值，得出应力放大系数的可能极大值为 2.5，这与 [35] 中的结果不矛盾。

爆炸容器结构的动载行为和强度研究中另一个重要问题是尺度效应，即不同结构尺寸的壳体具有不同的破坏强度。V.E.Tsipkin 等 (1976) [37] 的实验表明，以无量纲装药量 ζ (为允许最大装药量与容器重量的比值) 为特征量描述爆炸容器壳体的承载能力时，壳体尺寸相似放大 4 倍可以导致 ζ 减小一半。A.G.Ivanov 和 V.E.Tsipkin 等人对尺度效应有许多重要论述 [38-42]，并从能量观点提出了爆炸容器的承载能力 (以无量纲装药量表征) 对特征尺寸的依赖关系

$$\zeta < \frac{27}{16D} \left(\frac{2\pi\lambda}{n\rho R} \right)^{1/2} \quad (\text{对圆柱壳})$$

或

$$\zeta < \frac{27}{16D} \left(\frac{\sqrt{2\pi} \cdot \lambda}{n\rho R} \right)^{1/2} \quad (\text{对球壳})$$

式中 D 为炸药爆轰冲击波波速， λ 为单位面积的破坏功， n 为波数。在弹性范围内对同种形状特征尺寸为 L_1 和 L_2 的结构，允许应力 σ_1 和 σ_2 之间有

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

这种基于能量观点的尺度效应可以理解为大尺寸结构应变能的增长比破坏功的增长更迅速。薛鸿陆等 (1990) [43] 在研究超高速碰撞产生的粒子云对铝球壳的破坏时其尺度效应的结论支持了上述观点。

关于尺度效应有不同的结果报道。V.A.Maltsev 等 (1988) [44] 对直径为 2.0m 和 10.5m 的两种球壳所作的实验却表明尺寸对容器结构的强度并无显著的影响。这一有争议的结论提出了十分重要的问题，即如何将实验条件下的模拟结果有效地应用于实际结构，并对结构的工作能力作出准确的估计和预报。

为了提高爆炸容器的工作能力，减小冲击波到达壁面的强度，可以采用疏松介质吸收冲击波能量或附设屏蔽层对容器壳体加以保护。目前填充介质一般为泡沫、蛭石、砂、多孔铜甚至刨木花等材料。实验证明 [10]，与填充大气情形相比，加入泡沫介质可以使变形幅度减小到原来的 1/5—1/7。P.D.Anderson (1972) [45] 针对球形容器所作的理论分析表明泡沫体的加入可以吸收大部分爆炸能，降低作用载荷，从而大大减小爆炸容器主体的设计重量。所得到的减轻容器重量的泡沫最佳疏松度约为 100—140，此时约可减少 1/3 的重量。这些结论与他们的实验有良好符合。S.I.Afanosenko 等 (1988) [46] 的研究得到了球形爆炸容器填充多孔介质后壁面压力、冲量等对介质孔隙率的依赖曲线。这方面的其他工作可见文献 [1]。

爆炸容器动力强度的预测，其困难在于求解实际容器结构的振动过程。已得到的壳体振动的准确解在应用上都受到了限制，因为大多都是一维情形的结果。如何在一般情形下详

尽分析爆炸容器的实际响应过程,考虑具体结构的复杂形式,计及壳体元素的横向剪切与旋转惯性等,在理论上比较真实地研究爆炸容器的动力行为,以简单明了的表达形式描述响应与各变化参量的依赖关系是值得我们去深入研究的工作。

近年来爆炸容器研究的新方向之一是金属/复合材料多层结构的动力学,以前苏联的 A.G.Ivanov, V.E.Tsipkin, A.G.Fedorenko 等人^[47-52]为主要代表。金属/复合材料壳体结构的优点是重量轻,对缺陷和裂缝不敏感且有高的比承载能力。主要原因是在这类结构中加入了复合材料,从而保证壳体既有高的拉伸强度,又具有良好的阻尼性能^[6],同时消除了尺寸效应的影响^[42]。他们的研究展示了复合材料应用于爆炸容器及承受冲击载荷的壳体结构设计具有广阔的前景。

V.E.Tsipkin 等(1976)^[37]还考虑了容器中填充水的影响。实验证明在同样装药下容器充水将导致强度的降低。对于容器所作的大量破坏实验证明在内部爆炸加载下容器表面产生的裂缝数目可以由动力屈曲理论较好地预测^[37,42,52]。

在已经报道的大量理论和实验工作中,对爆炸容器的变形和动力强度的分析得出如下主要结果:

- (1) 载荷分布的不均匀性引起壳体中应力(应变)显著的不均匀性;
- (2) 实际爆炸容器壳体结构在爆炸载荷作用下的动力响应过程伴随着应变的跳变和周期性增长,这个复杂的变形特征可能源于在加载下激发了包括弯曲振型在内的多种振型的相互作用和能量转换。由于应变增长的影响,最大应力值期望高出 Baker-Demchuk 估计值的(2—3)倍;
- (3) 与应变增长相对应,容器壳体振动初期主要表现为膜应力状态;
- (4) 载荷幅度和后续脉动只对壳体初期振动幅度有影响,而对最大应力(应变)无显著影响;但载荷作用时间对不同模态的幅度分布和相位均有严重影响;
- (5) 壳体结构尺寸的合理选择可能消除应变增长现象;
- (6) 阻尼介质的加入可以有效地吸收冲击波能量,降低壳体中的最大应力(应变)。

5 可靠性评估

爆炸容器在爆炸载荷作用下的可靠性估计所见文献甚寥,只有 O. S. Vorontsova (1992)^[53]的论文提出一种方法用于评估玻璃丝增强塑料/钢双层壳体结构在给定实验范围内的破坏概率。评估的容器最大允许化爆释放能为 1.25 GJ,以最大应变准则作为强度判据,并计及圆柱壳中心截面最大环向拉伸破坏、容器窗口附近应力集中引起的拉伸破坏和由爆炸产物准静压力决定的阻尼压缩破坏 3 种主要的破坏机制,在正态分布假定下当化爆能为 0.42 GJ 时估计出容器的破坏概率为 10^{-5} 。所建议的方法可以获得容器在一次使用时,危险性控制函数(强度条件)遭到破坏的最高概率估计或可靠性因子的最低估计。

6 展望和建议

爆炸容器作为一种控制潜在危险的限域装置,在核反应堆防护、炸药工业、核武器及部件试验、爆炸加工与合成及有害物质的安全输运等方面得到了广泛的应用。爆炸容器的动力学变形和强度研究对爆炸容器、航天结构燃料舱、武器弹头等的设计都将具有重要的指导意

义。已有的工作虽然揭示出爆炸容器动力学行为的许多重要特征和规律，但下述工作尚待开展或需进一步深入开展：

(1) 在数值模拟实验的基础上，弄清作用于实际爆炸容器壳体结构上的动力载荷的规律与特征，并应用于实际复杂的动力学响应计算；

(2) 作用载荷的特征对容器动力响应的影响；

(3) 在一般意义下对实际爆炸容器结构提出精确可靠的数学模型，对其在爆炸载荷作用下的响应特征，如应变增长等进行可能的解析描述和数值求解，确定影响因素，弄清物理本质，给出其形成与发展条件；

(4) 在实验和数值模拟的基础上，找出容器结构最可能的破坏、失效机制，提出普遍意义下的合乎实际的强度准则，并利用这些结果对容器操作运行的危险性概率作出评估。

(5) 定量考察尺度效应的影响，提出判据；

(6) 在变形和强度分析中计及材料性质的动力影响。

参 考 文 献

- 1 杨秀会. 资料 J1-80A01, 西南流体物理研究所 (1980)
- 2 Baker W E, et al. Proc. 3rd US Natl. Cong. Appl. Mech., New York (1958) : 79
- 3 Demchuk A F. Appl. Mech. & Tech. Phys. (in Russian), 5 (1968) : 47
- 4 Gerstle F P. Sci. LA-73-1093
- 5 Tsipkin V E, et al. Mech. Composite Materi. (in Russian), 5 (1987) : 833
- 6 周复方等. 爆炸容器鉴定会资料汇编 (1986), 西南流体物理研究所
- 7 Adischev V V, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 15, 6 (1979) : 108
- 8 Demchuk A F. Candidate Dissertation (1971), Soviet Acad. Sci.
- 9 Zhdan S A. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 17, 2 (1981) : 142
- 10 Carlson R W. LA-390 (1945)
- 11 Belov A E, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 20, 3 (1984) : 71
- 12 Belov A E, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 21, 6 (1985) : 132
- 13 Bachrach S M, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 25, 6 (1989) : 117
- 14 Maltsev V A, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 21, 4 (1985) : 133
- 15 Buzukov A A. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 16, 5 (1980) : 87
- 16 朱文辉, 薛鸿陆. 第四届全国冲击动力学会议文集 (1994)
- 17 朱文辉, 薛鸿陆. 爆炸与冲击 (待发表)
- 18 Voitenko A E, et al. Instru. and Experi. Tech. (in Russian), 1 (1970) : 250
- 19 Konon U A, et al. Explosive Welding (in Russian). Press of Mechanical Industry, Moscow (1987) : 188
- 20 Buzukov A A. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 12, 4 (1976) : 605
- 21 Baker W E, et al. J. Appl. Mech., 27 (1960) : 139
- 22 Baker W E, et al. J. Appl. Mech., 33 (1966) : 800
- 23 Benham R A, et al. Sci. LA-73-05-08
- 24 Ivanov A G, et al. Appl. Mech. & Tech. Phys. (in Russian), 6 (1968) : 94
- 25 Kornev V M, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 15, 6 (1979) : 155
- 26 Bolotin V V. Appl. Math. and Mech. (in Russian), 5 (1960) : 831
- 27 Goodier J N, et al. J. Appl. Mech., 31 (1964) : 259
- 28 Lindberg H E. J. Appl. Mech., 31 (1964) : 267
- 29 Lindberg H E. J. Appl. Mech., 41 (1974) : 392
- 30 Abakumov A E, et al. Appl. Mech. & Tech. Phys. (in Russian), 3 (1984) : 127
- 31 Lugovoi P Z. (Translated) Soviet Appl. Mech. (1991) : 715
- 32 Belov A E, et al. Phys. Combustion & Explosion (in Russian), 26, 1 (1990) : 111
- 33 Demchuk A F. Proc. 7th Int. Symp. on "Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties", Pardubice (1988) : 513

- 34 Lugovoi P Z, et al. Proc. 7th Int. Symp. On "Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties", Pardubice (1988) : 523
- 35 Maltsev V A, et al. *Phys. Combustion & Explosion* (in Russian), 20, 1 (1984) : 97
- 36 Maltsev V A, et al. *Problem of Strength* (in Russian), 12 (1985) : 100
- 37 Tsipkin V E, et al. *Atomic Energy* (in Russian), 41, 5 (1976) : 349
- 38 Tsipkin V E, et al. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 2 (1981) : 249
- 39 Tsipkin V E, et al. *Atomic Energy* (in Russian), 4 (1975) : 251
- 40 Ivancv A G, et al. *Phys. Combustion & Explosion* (in Russian), 17, 3 (1981) : 327
- 41 Ivanov A G, et al. *Phys. Combustion & Explosion* (in Russian), 15, 5 (1979)
- 42 Ivanov A G. *Problem of Strength* (in Russian), 6 (1988) : 49
- 43 薛鸿陆等. 863—409 汇报资料, 国防科技大学 (1990)
- 44 Maltsev V A, et al. Proc. 7th Int. Symp. On "Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties", Pardubice (1988) : 517
- 45 Anderscn P D. SC-DR-72-0591 (圣地亚实验室报告)
- 46 Afanosenko S I, et al. Proc. 7th Int. Symp. On "Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties", Pardubice (1988) : 508
- 47 Abrosimov N A. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 4 (1987) : 647
- 48 Fedorenko A G, et al. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 4 (1986) : 664
- 49 Fedorenko A G, et al. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 2 (1988) : 306
- 50 Sirunin M A, et al. *Phys. Combustion & Explosion* (in Russian), 25, 4 (1989) : 108
- 51 Fedorenko A G, et al. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 3 (1989) : 425
- 52 Fedorenko A G, et al. *Mech. Composite Materi.* (in Russian), 1 (1983) : 90
- 53 Vorontsova O S, et al. Proc. Int. Symp. Intense Dynamic Load and its Effectiveness, Chengdu (1992) : 469
- 54 韩钧万. 私人通信

THE RESEARCH ADVANCES IN THE DYNAMICS OF EXPLOSIVE CHAMBERS

Zhu Wenhui* Xue Honglu

Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha 410073

Han Junwan Liu Guangzhuo

Southwest Research Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003

Abstract Theoretical and experimental achievements on the dynamic behavior of explosive chambers under internal explosive loading are reviewed together with their prospective developments and some suggestions are made.

Keywords *explosive chamber; dynamic behavior; load characteristics*

* New address; University of Science and Technology of China, Hefei 280026