

文章编号:1006-9941(2024)09-0986-23

## 抗爆容器的内部爆炸效应和动态力学行为研究进展

胡俊华<sup>1</sup>,董奇<sup>1</sup>,胡八一<sup>2</sup>,任逸飞<sup>1</sup>,黄广炎<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 抗爆容器在内部炸药爆炸作用下的研究与应用是涉及含能材料、爆炸与冲击动力学、振动力学的多学科交叉问题。抗爆容器的内部爆炸效应与动态力学行为研究是提升装备抗爆性能的重要基础,其中的应变增长、反直观等行为与机理是具有重要科学价值的研究问题。本研究从抗爆容器的内部爆炸载荷特性与效应、金属抗爆容器的动力学响应机理、抗爆容器的复杂工况、温压炸药和破片战斗部的爆炸效应、复合材料抗爆容器等五个方面综述了相关研究进展和关键科学发现。分析指出只有在建立有效的力学分析模型和充分揭示结构动力学响应机理的基础上,才能有效指导复杂工况下的爆炸毁伤效应评估和防护结构分析设计。针对高能毁伤炸药和高性能防护材料带来的挑战和机遇,提出了爆炸毁伤与安全防护研究的重要方向和发展趋势。

**关键词:** 抗爆容器; 载荷特性; 动态响应; 新型炸药; 复合材料

中图分类号: TJ55; TJ03

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024236

### 0 引言

抗爆容器(explosion containment vessels, ECVs)能限制容器内部炸药爆炸产生冲击波、爆轰产物和破片的作用范围,有效保护人员、设备和环境的安全,在国防和公共安全等领域有重要应用<sup>[1-3]</sup>。ECVs是开展武器研究的重要实验场所,并用于储存和运输武器弹药等。公共安全中,ECVs是车站、机场等公共场所必备的防爆设备。提高ECVs的承载能力一直是抗爆容器领域的核心研究内容,开展抗爆容器的内部爆炸效应和动态力学响应及防护机理研究对于指导ECVs设计具有重要意义。

1945年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室研制出了首台抗爆容器<sup>[4]</sup>,最初的ECVs属于单层金属结构。随着新型抗爆材料的发展,纤维<sup>[5-6]</sup>、聚脲<sup>[7-8]</sup>、多孔材

料<sup>[9-10]</sup>等也逐渐受到抗爆领域的关注和应用,容器的结构也逐渐从单层金属结构发展为多层复合结构。在复合材料防护结构中,纤维材料主要因为其优异的力学性能被用于增强结构的抗爆性能;聚脲具有良好的延展性,主要被用于限制破片可能产生的二次破坏,也可增强结构的抗爆性能<sup>[11]</sup>;多孔材料具有优异的吸能效果,可用于多层结构的夹层位置。常见的ECVs根据形状可分为球形<sup>[12]</sup>和圆柱形<sup>[13]</sup>容器。根据使用目的和设计原则,可分为可重复使用型和单次使用型,可重复使用型容器的变形应在弹性范围内,单次使用型容器可发生塑性变形,但不允许出现爆炸产物泄露和产生飞溅破片。

抗爆容器在内部爆炸荷载作用下的动态响应非常复杂,是涉及含能材料、爆炸与冲击动力学、振动力学等的多学科交叉问题。美国三大国家武器实验室、俄罗斯实物院和我国多家科研单位对抗爆容器等装备的内部爆炸流场特性、动态力学行为和响应机理、失效模式等开展了大量的研究工作,我国已研制出了25 kg TNT当量可重复使用型抗爆容器、离散多层抗爆容器等高端抗爆装备<sup>[14-35]</sup>,并建立了抗爆容器的工程设计方法<sup>[26]</sup>。

本文结合国内外抗爆容器领域的研究进展,从抗爆容器的内部爆炸载荷特性与效应、金属抗爆容器的

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-09-10

网络出版日期: 2024-09-12

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3320504), 国家自然科学基金项目(11872343)

作者简介: 胡俊华(1997-),男,博士研究生,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:1075889264@qq.com

通信联系人: 董奇(1982-),男,研究员,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:dongqi@caep.com

引用本文: 胡俊华,董奇,胡八一,等. 抗爆容器的内部爆炸效应和动态力学行为研究进展[J]. 含能材料, 2024, 32(9):986-1008.

HU Jun-hua, DONG Qi, HU Ba-yi, et al. Research Progress on Internal Blast Effects and Dynamic Mechanical Behavior of Explosion Containment Vessels[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(9):986-1008.

动力学响应机理、抗爆容器的复杂工况、温压炸药和破片战斗部的爆炸效应、复合材料抗爆容器等5个方面综述了相关研究热点和关键科学发现,提出了含能材料的爆炸毁伤与安全防护研究中的重要方向和发展趋势。

## 1 抗爆容器的内部爆炸载荷特性与效应

抗爆容器中的爆炸冲击波传播是一个非常复杂的过程,涉及到多个波系的叠加及其与结构响应的耦合作用<sup>[36-41]</sup>。典型的球形容器内部壁上测得的爆炸载荷曲线如图1所示<sup>[42]</sup>。ECVs的内部爆炸载荷主要分为3个阶段,首先,炸药在容器内部爆炸后产生具有高强度和短时程特征的首个冲击波(图1中的first shock wave);随后,冲击波在容器内部多次反射形成反射波(图1中的reflected waves);最后,容器内经过多次反射以后的压力会逐渐趋于稳定,但压力值仍然会高于标准大气压,形成一个压力幅值较小,但持续时间很长的准静态压力(图1中的quasi-static pressure)<sup>[36]</sup>。

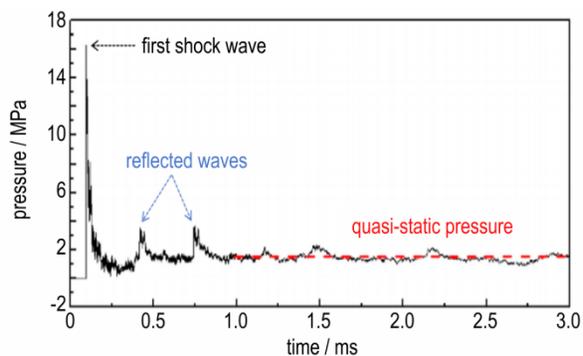


图1 典型的球形容器内部爆炸载荷实验曲线<sup>[42]</sup>  
Fig.1 Typical test curve of blast loading in a spherical vessel<sup>[42]</sup>

### 1.1 首个冲击波的载荷特性与效应

在研究初期,由于首个冲击波载荷的压力幅值高于其余载荷阶段,因此首个冲击波载荷也被作为容器抗爆的主要防护对象。Baker等<sup>[43-44]</sup>将首个冲击波简化为三角脉冲载荷,峰值超压、首个冲击波持续时间和冲量是决定简化载荷精确度和有效性的重要参数。典型的简化三角脉冲载荷曲线如图2所示<sup>[45]</sup>。

针对抗爆容器在内部爆炸载荷作用下的动力学响应分析,Baker<sup>[44]</sup>和Dumchuk<sup>[46]</sup>分别把球形壳体和圆柱形壳体的动力响应简化为一维分析模型,即抗爆壳体的动力响应过程始终保持为球形和圆柱形的呼吸模式响应模式。董奇等<sup>[47]</sup>将图2中的三角脉冲载荷均布加载到两端滑移的圆柱壳内壁上,模拟分析圆柱壳在内部轴线装药爆炸下的弹性动力响应,获得了如图3所示

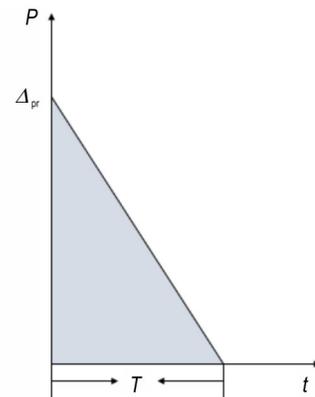
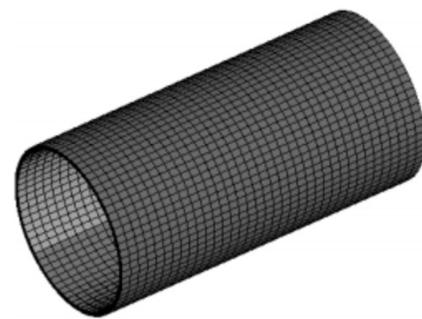
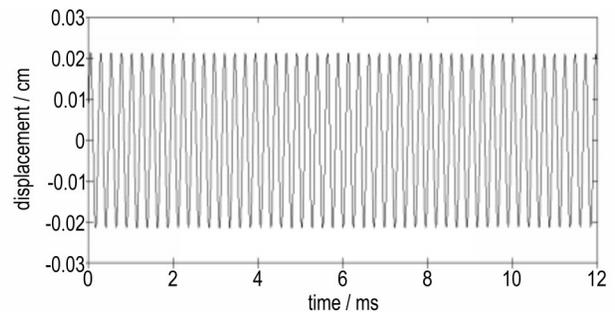


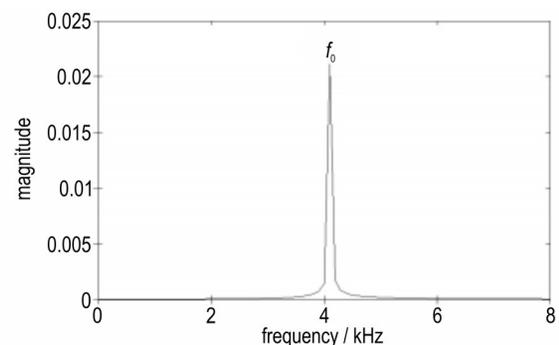
图2 简化的三角脉冲波<sup>[45]</sup>  
Fig.2 The simplified triangular pulse load<sup>[45]</sup>



a. breathing mode deformation



b. displacement-time curve

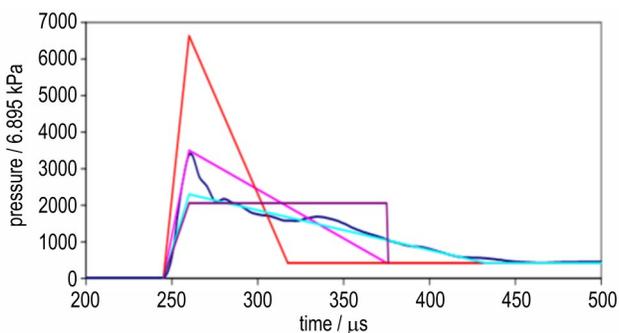


c. spectrum analysis

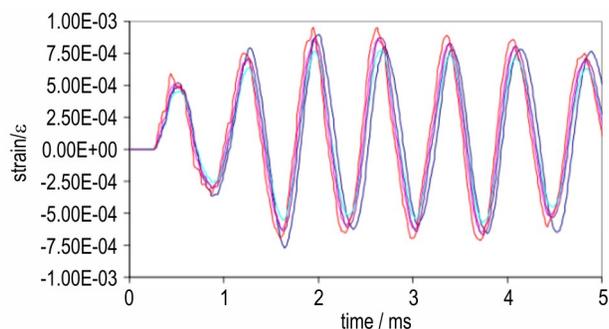
图3 两端为滑移边界条件的圆柱壳的呼吸振动响应<sup>[47]</sup>  
Fig.3 The breathing mode vibration response of the cylindrical shell with sliding-sliding boundary condition<sup>[47]</sup>

的呼吸振动响应模式,圆柱壳在响应过程中始终保持图 3a 中的圆柱壳形状,仅有图 3b 中的径向位移这个变量作等幅振动,图 3c 中的频谱分析表明仅有平面应变呼吸模态( $f_0$ )被激发。

Duffey 等<sup>[48]</sup>开展了冲击波形状对球壳响应影响的研究,在保持冲量一致的情况下,改变冲击波的形状,得到的壳体响应基本一致,认为影响壳体响应的主要因素在于首个冲击波的冲量,而不是冲击波的形状,相关曲线如图 4 所示。然而,这项研究没有考虑到载荷作用时间和壳体振动周期之间的关系。



a. blast loads with same impulse and different pressure durations



b. displacement response of the spherical shell

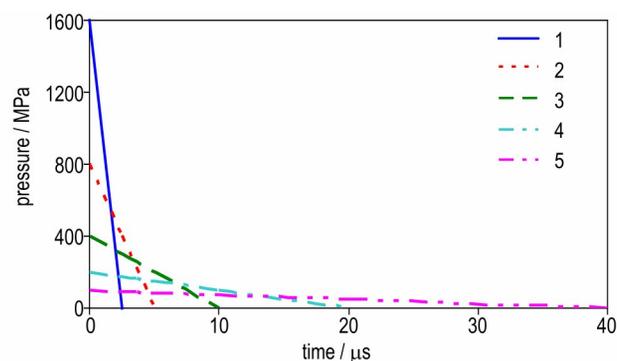
图 4 首个冲击波的载荷形状对球壳弹性响应的影响<sup>[48]</sup>

Fig.4 Influence of the load shape of the first shock wave on the elastic response of spherical shells<sup>[48]</sup>

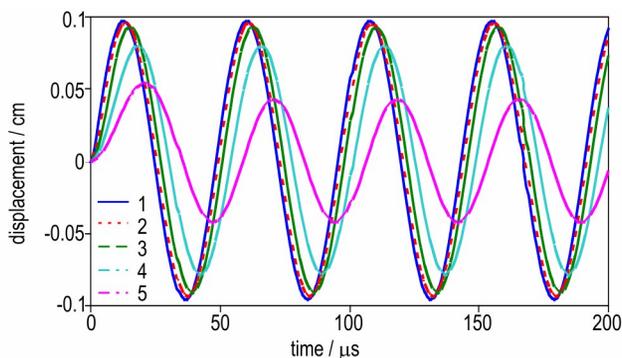
赵士达<sup>[49]</sup>和董奇等<sup>[50]</sup>进一步研究了首个冲击波的持续时间与球壳弹性响应的关系,结果表明,当首个冲击波持续时间( $T$ )小于球壳的振动周期( $T_0$ )的四分之一时,该冲击波可以简化为三角脉冲载荷形式,此时载荷历程对球壳响应无明显影响;当  $T > T_0/4$  时,载荷历程对球壳位移的响应存在明显影响,壳体的峰值位移会降低,相关曲线如图 5 所示。

## 1.2 反射波的载荷特性与效应

抗爆容器领域最初认为容器的动态响应主要取决于爆炸载荷的首个冲击波,容器在动态响应的初始阶



a. blast loads of the same impulse and different pressure durations



b. displacement response of the spherical shell

图 5 首个冲击波的载荷时间对球壳弹性响应的影响<sup>[50]</sup>

Fig.5 Influence of the duration of the first shock wave on the elastic response of spherical shells<sup>[50]</sup>

段就应该产生最大变形<sup>[48]</sup>。1976年,Buzukov<sup>[51]</sup>首次发现,金属抗爆容器在动态响应过程中,壳体变形的最大幅度不是在振动过程中的第一个周期到达,而是在受到爆炸载荷首个冲击波作用之后的某一个时刻出现,这一现象被称为应变增长现象,典型的应变增长曲线如图 6 所示<sup>[52]</sup>。响应后期的最大应变明显大于首个应变峰值,如果在设计抗爆容器时只考虑容器初始阶段的最大变形,则会因为忽略容器后期的应变增长而对容器的使用造成严重后果。

由于应变增长对抗爆容器的分析、设计和使用都有非常重要的影响,国内外同行一直非常重视应变增长机理这个困扰了抗爆容器领域多年的关键基础难题。从事抗爆容器研究三十余年的抗爆容器专家 Duffey<sup>[53]</sup>和美国机械工程师学会(ASME)前主席、美国 ASME 抗爆容器工作组前组长 Nickell<sup>[12]</sup>都重点强调过应变增长研究的重要性。

在抗爆容器一维模型中,冲击波在容器内部多次反射产生的反射波是解释应变增长现象产生的原因。Karpp 等<sup>[54]</sup>基于一维模型计算了反射波对容器响应的

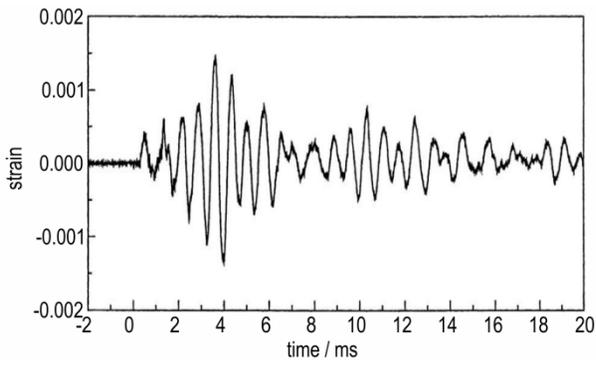


图6 典型的应变增长曲线<sup>[52]</sup>

Fig.6 Typical strain growth curve<sup>[52]</sup>

影响,当只考虑首个冲击波载荷作用时,即图7a所示的载荷曲线,壳体保持等幅呼吸振动;而在考虑反射波作用后,即图7b所示的载荷曲线,其应变响应如图7c所示,壳体的应变呈变幅振动,Karpp认为这是反射波与壳体运动之间的相互作用造成的。Zhdan<sup>[55]</sup>在研究球壳内部爆炸载荷对球壳响应的影响时发现,作用于球壳膨胀过程中的反射波的冲量可能高达原始冲量的50%,进而使容器的最大振幅增加50%。Buzukov<sup>[56]</sup>发现当容器的振动频率和反射波频率相近时,二者可能会存在共振现象,进而会增强容器的响应。

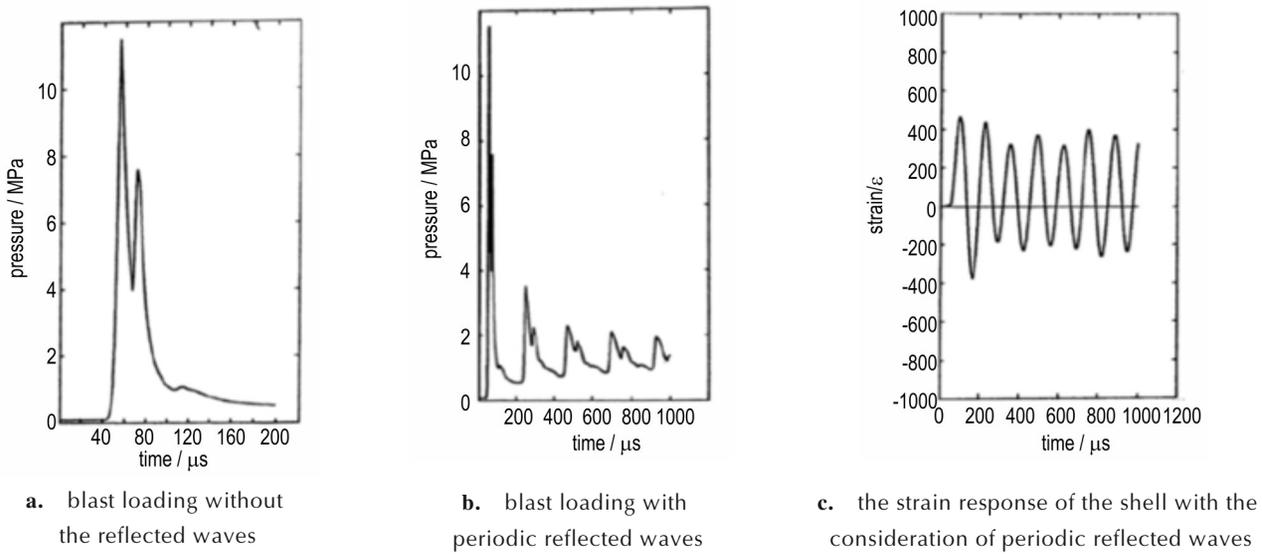


图7 反射波对球壳弹性响应的影响<sup>[54]</sup>

Fig.7 Effect of reflected waves on the elastic response of the spherical shell<sup>[54]</sup>

董奇等<sup>[50]</sup>通过数值模拟研究了球壳在内部球形炸药爆炸下的爆炸载荷,以及不同载荷阶段对壳体弹性振动的影响,并比对了反射波频率与容器振动频率之间的共振曲线,如图8所示。通过比对二者的相位可以清晰地发现,当容器内壁受到与容器振动频率相近的反射载荷时,容器的位移会逐步增长。

刘文祥等<sup>[57]</sup>在球形容器的弹塑性响应中也有类似发现,他们将试验中观察到的塑性变形中应变增长归因于结构响应和反射冲击波的共振,即第二个脉冲波(反射波)与壳体运动方向相同引起,如图9所示,证明了反射波会进一步增加容器的塑性变形。

### 1.3 准静态压力的载荷特性与效应

在抗爆容器和舰船舱室等有限空间内部的爆炸毁伤研究中,准静态压力是造成结构毁伤的重要原因<sup>[58-61]</sup>。研究表明,准静态压力在某些工况下能增强球形和圆柱形容器的动力响应幅值<sup>[62-65]</sup>。

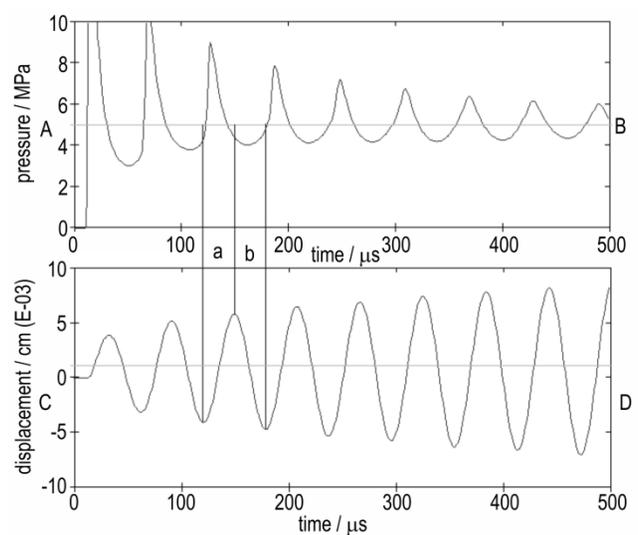


图8 球壳共振过程中的爆炸载荷和位移历程<sup>[50]</sup>

Fig.8 Blast load and displacement history of resonance processes in spherical shells<sup>[50]</sup>

Feldgun 等<sup>[66]</sup>在准静态压力载荷的预测与简化研究中,给出了如图 10a 所示的模拟获得的爆炸载荷曲线,在将首个冲击波作用后的脉冲振荡简化为图 10b 所示的准静压后,发现简化后的载荷曲线对容器的作

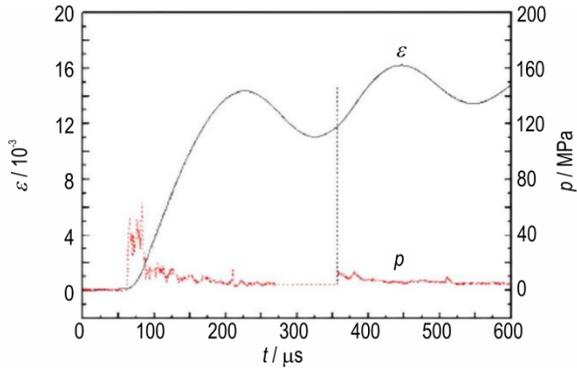


图 9 球形抗爆容器中“共振”引发的塑性应变增长<sup>[57]</sup>  
 Fig. 9 Plastic strain growth induced by “resonance” in a spherical explosive container<sup>[57]</sup>

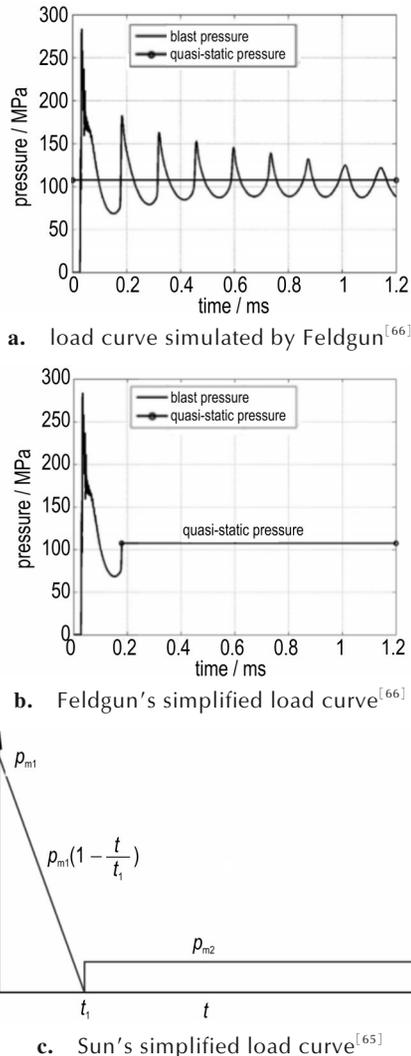


图 10 考虑了准静压的压力时程曲线<sup>[65-66]</sup>  
 Fig.10 Pressure histories considering the quasi-static pressure<sup>[65-66]</sup>

用效果与简化前一致。为分析抗爆容器中的准静压效应,孙琦等<sup>[63-65]</sup>将爆炸载荷曲线简化为了图 10c 中由首个冲击波和准静压组成的联合载荷模型。孙琦等<sup>[63-64]</sup>采用球形金属容器的一维力学模型,分析了内部爆炸准静态压力对球形容器弹性和弹塑性动态响应的影响。弹性响应的典型结果如图 11a 所示,随着准静态压力的增加,球壳的径向弹性振幅呈现略微增大的趋势;弹塑性响应的典型结果如图 11b 所示,相较于弹性响应,球壳的塑性变形呈现明显上升,弹塑性响应中的准静压效应更为显著。

由图 11 的分析可知,虽然准静态压力的作用时间长、冲量大,但结构变形的最大值并不会随着准静压作用时间或冲量的增加而无限增加,这种结构变形不会随着载荷冲量的持续增加而不断增长的现象被称为饱和和冲量现象。这一现象起源于板结构的冲击动力响应研究<sup>[67-70]</sup>,并已经受到舰船和抗爆容器领域的关注<sup>[71-72]</sup>。

在含能材料的爆炸效应研究及其对结构的毁伤评估中,除了要关注爆炸荷载本身的特性,还要关注爆炸

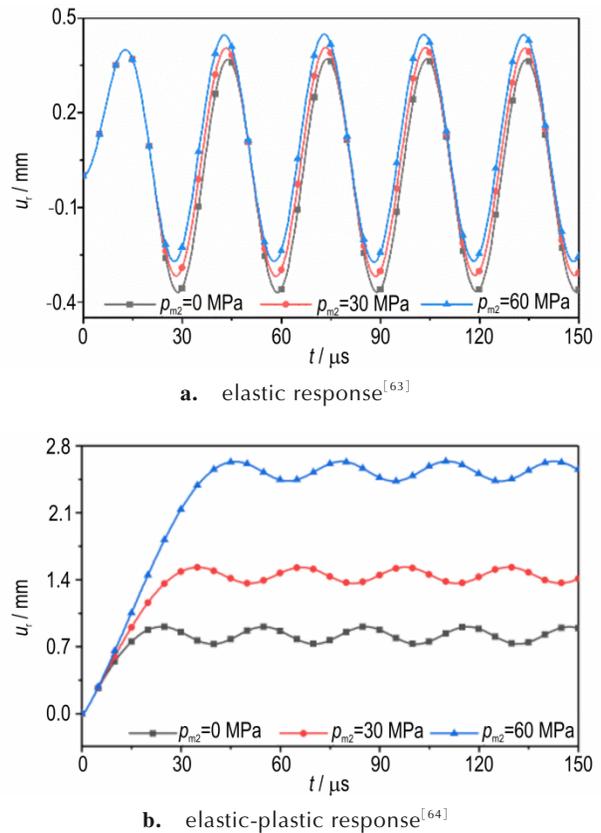


图 11 球壳内部爆炸准静态压力对结构响应的影响<sup>[63-64]</sup>  
 Fig. 11 Influence of quasi-static pressure inside a spherical shell on structural response<sup>[63-64]</sup>

荷载特性和结构响应之间存在的耦合机理,充分重视爆炸载荷历程对结构响应的影响和准静态压力的饱和冲量现象。

## 2 金属抗爆容器的动力学响应机理

早期关于抗爆容器的研究多数集中于简化的一维呼吸模态响应模型,在实际工况中,抗爆容器不是作单自由度的一维响应<sup>[73-79]</sup>。因此,在研究抗爆容器的防护效果时,除了需要关注爆炸载荷本身的特性,还需要关注结构响应过程中存在的复杂动力学行为和响应机理。

### 2.1 应变增长的模态线性叠加机理

相关实验结果表明<sup>[80-82]</sup>,抗爆容器的最大应变可能出现在准静压阶段,而根据第1章的介绍已知,准静压阶段的载荷强度较小,且不存在明显的周期性波动,此时反射波与容器之间的共振机理已经不能解释这种现象。因此,研究者们开始尝试从结构动力学的角度去研究壳体的复杂振动。

Buzukov<sup>[51]</sup>在实验过程中发现,柱壳不同位置的最大应变均出现在准静压阶段,于是推测应变增长现象可能是多个振动模态相互作用和叠加的结果。Kornev等<sup>[83]</sup>对带有半球形封头的圆柱形抗爆容器进行了实验研究,认为开孔和法兰等结构激发了多个振动模态,而应变增长现象是频率相近的径向振动和轴向振动相互叠加的结果,支持了Buzukov的观点。Abakumov等<sup>[84]</sup>建立了考虑Timoshenko方程的二维轴对称模型,较好地预测了球形容器在后期响应中的应变增长现象,而一维模型仅能较好地预测容器初期的一维响应,该结果也从侧面证实了应变增长现象来源于多个振动模态的线性叠加。

根据Buzukov<sup>[51]</sup>,Kornev等<sup>[83]</sup>和Abakumov等<sup>[84]</sup>的研究结果,应变增长现象是由多个频率相近的模态相互叠加导致的,然而,这些研究不能说明哪些模态会被激发。针对此研究的不足,朱文辉等<sup>[85-86]</sup>和Duffey等<sup>[52,87]</sup>分别对圆柱形和球形抗爆容器应变增长现象的机理进行深入研究,认为应变增长归因于壳体中频率相近的膜振动和弯曲振动的相互作用和叠加。董奇等<sup>[47]</sup>研究了两端自由的圆柱壳受轴线装药爆炸作用下的应变增长问题,将首个三角冲击波均布加载到圆柱壳内壁上获得的动态响应过程如图12所示,根据模态分析确定了参与振动的模态是平面应力呼吸模态( $f_1$ )和第一阶轴对称模态( $f_a$ 和 $f_r$ ),模态的线性叠加导

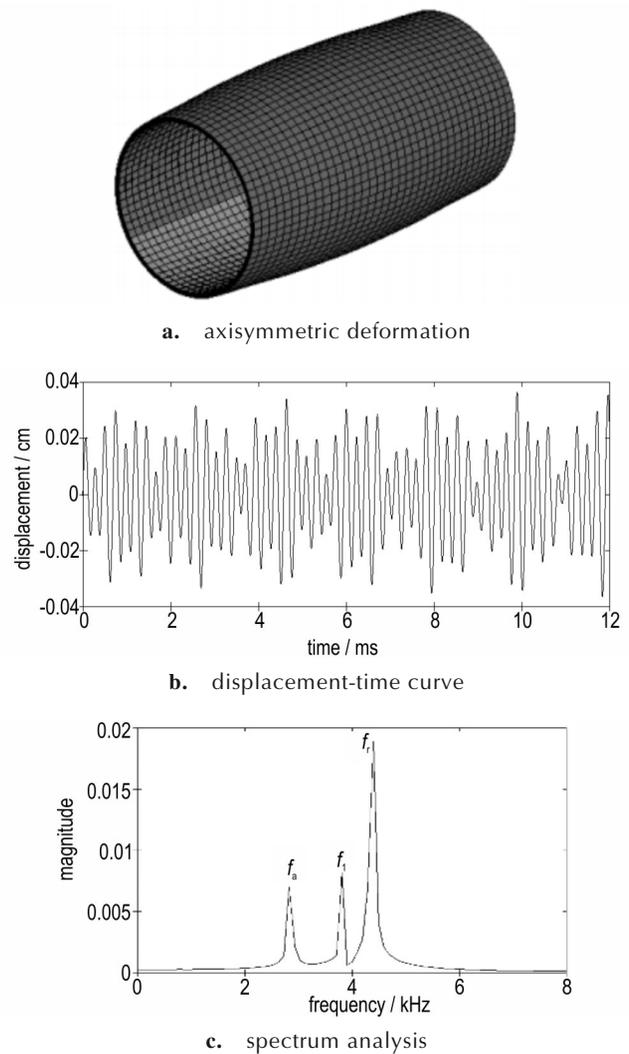


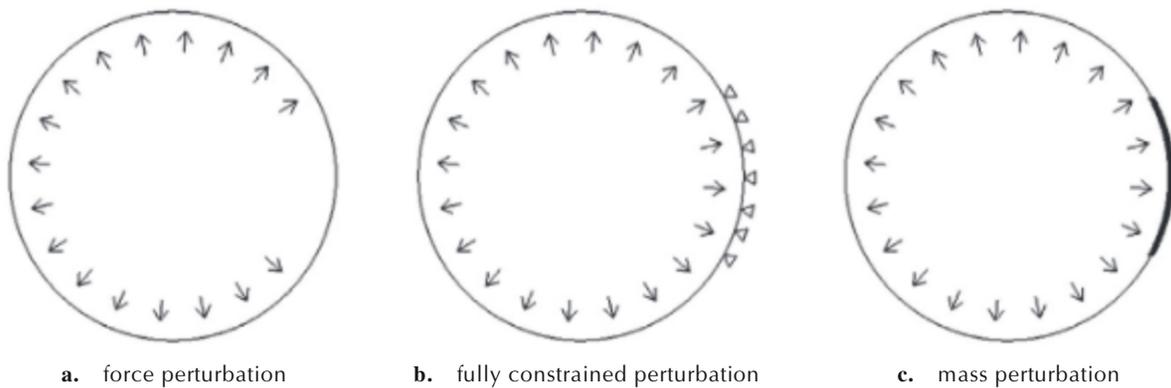
图12 两端为自由边界条件的圆柱壳在爆炸载荷作用下的模态叠加<sup>[47]</sup>

Fig. 12 Modal superposition of the cylindrical shell under the free-free boundary condition subjected to internal blast loading<sup>[47]</sup>

致了应变增长。在此过程中,壳体响应为如图12a所示的轴对称变形,采用二维分析模型可有效分析结构响应。

抗爆容器中存在由于机械设计和加工制造等因素导致的扰动源<sup>[88-89]</sup>。刘文祥等<sup>[90-91]</sup>将扰动源归纳为载荷扰动、约束扰动、质量扰动,如图13所示。

刘文祥等<sup>[91]</sup>、徐景林等<sup>[92]</sup>、程帅等<sup>[93]</sup>在试验中观察到了由扰动结构引发的应变增长,原因是扰动源激励了与呼吸模态振动频率相近的振动模式,而结构扰动的存在会放大应变增长现象。刘文祥等<sup>[91]</sup>对于结构扰动引起的应变增长的极限情况进行了数值模拟研究,发现极限应变增长系数可接近12。

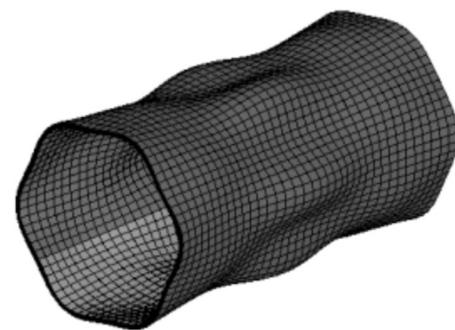
图13 壳体结构中扰动源示意图<sup>[91]</sup>Fig.13 Schematic representation of the perturbation sources in shell structures<sup>[91]</sup>

## 2.2 应变增长的模态非线性耦合机理

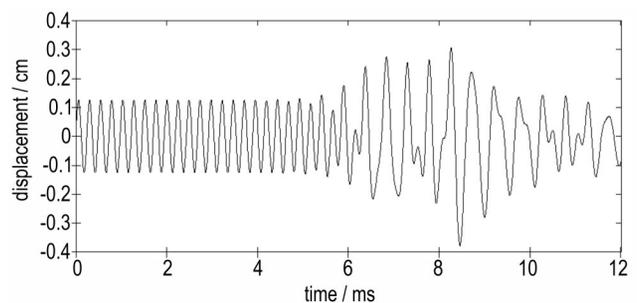
人们通常认为壳体在受到内部均布冲击载荷作用时,壳体的动态响应是球对称或轴对称的。然而,研究学者在研究抗爆容器弹性响应时发现,容器内壁仅受到首个冲击波载荷作用下,圆环<sup>[94]</sup>、球壳<sup>[95]</sup>、柱壳<sup>[47]</sup>结构经过多个拉伸和压缩阶段后会发动力屈曲失稳,其机理是由于几何非线性引发了呼吸模态和非轴对称模态之间的非线性耦合与能量转换,初始阶段变形峰值和结构尺寸是其中的关键影响因素。

相对于图3中两端为滑移边界条件圆柱壳的呼吸模态响应,施加更大冲击波载荷后获得的响应结果如图14所示<sup>[47]</sup>,其中图14a中的圆柱壳动力屈曲变形对应于图14b中的变形后期响应阶段。在响应初期,壳体作单自由度的呼吸振动,壳体振动仅受呼吸模态影响,如图14b中的变形前期阶段;随着呼吸振动的持续进行,潜在的不稳定非轴对称模态被逐渐激发,并与呼吸模态发生非线性耦合和能量转换,从而导致了图14b中后期发生的应变增长,其中被激发出的非轴对称模态频率( $f_b$ )约为平面应变呼吸模态频率( $f_0$ )的一半。

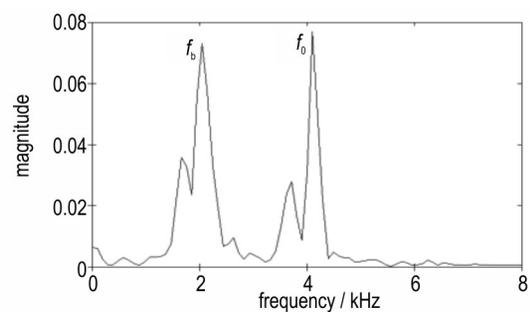
董奇等<sup>[47]</sup>通过采用两端滑移和两端自由的不同边界条件的圆柱壳动力响应模型,阐明了应变增长模态耦合机理与Duffey等<sup>[52]</sup>提出的模态叠加机理的本质区别。模态叠加机理是呼吸模态和二维轴对称模态的线性叠加,二维响应变形为图12a,典型特征曲线如图12b;模态耦合机理是呼吸模态和非轴对称模态的非线性耦合,三维响应变形为图14a,典型特征曲线如图14b。对于两端为自由边界条件的圆柱壳,图15a中位移曲线响应前期是图15b中的平面应力呼吸模态( $f_1$ )和二维轴对称模态( $f_0, f_1$ )的线性叠加,此时的柱壳响应是二维轴对称的;响应后期的复杂应变增长是由于前期模态线性叠加、后期模态非线性耦合两



a. non-axisymmetric deformation



b. displacement-time curve



c. spectrum analysis

图14 两端为滑移边界条件的圆柱壳在爆炸载荷作用下的模态耦合<sup>[47]</sup>Fig. 14 Modal coupling of the cylindrical shell with sliding-sliding boundary subjected to internal blast loading<sup>[47]</sup>

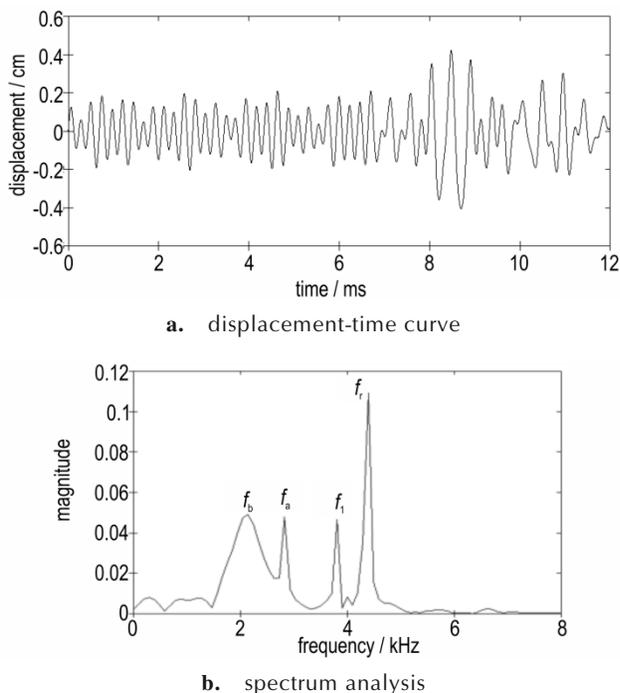


图15 两端为自由边界条件的圆柱壳在爆炸载荷作用下的模态叠加和模态耦合<sup>[47]</sup>

Fig. 15 Modal superposition and coupling of the cylindrical shell with free-free boundary subjected to internal blast loading<sup>[47]</sup>

种机理共同引发的,此时的柱壳响应是三维的,壳体的动力响应需采用三维模型才能合理地分析预测。

Hu等<sup>[96]</sup>进一步研究了中心装药起爆下的圆柱形壳体响应模型,其结果表明当药量较小时,壳体的响应是二维的,其响应机理是模态的线性叠加;而在大药量情况下,壳体会出现动力屈曲,其机理包含了模态的线性叠加和非线性耦合。且在研究过程中发现,容器振动过程中存在着一些响应幅度较弱的振动模态,但在响应过程中并没有发现对应的容器变形,认为模态的响应幅度也是决定容器响应的重要因素之一。

Ren等<sup>[97]</sup>在首个冲击波的基础上考虑了准静态压力对平面应变圆环动力屈曲的影响,其响应机理是模态的非线性耦合。在研究过程中发现动力屈曲受到首个冲击波与准静态压力的共同影响,进一步分析认为响应过程中圆环的运动状态是影响动力屈曲的关键因素,当圆环的压缩位移(相较于初始位置处于压缩状态的幅度)不存在时,动力屈曲更不易发生。

### 2.3 抗爆容器的反直观行为

材料性能是影响抗爆结构动态力学行为的关键影响因素之一。在金属抗爆容器一维响应研究模型中,壳体大多采用线弹性材料模型<sup>[63]</sup>或等向强化双线性

弹塑性材料模型<sup>[64]</sup>。当壳体采用随动强化双线性弹塑性等其它材料模型时,研究学者<sup>[98-100]</sup>发现了抗爆容器在首个冲击波作用下的反直观行为与机理。

反直观行为指结构动力响应最终位置与加载方向相反。Symonds和余同希<sup>[101]</sup>在1985年首次报道了梁的反直观行为,并在梁、板结构中得到了重点关注<sup>[102-105]</sup>,机理是材料弹塑性非线性和结构压缩失稳<sup>[101-105]</sup>。在圆环受到内部均布径向向外冲击载荷作用的研究中,Forrestal等<sup>[98]</sup>认为圆环在呼吸模态下经历一次弹塑性加卸载后可能发生反直观行为,即圆环最终的平衡位置(或最终弹性振动的中点)在圆环初始位置的内部而不是外部,如图16所示。

Li等<sup>[99]</sup>采用能量分析方法对金属圆环的反直观问题进行了深入研究,通过比较系统自身能量和到达反直观位置所需耗散塑性能的关系,发现对于双线性随动强化材料,圆环在经历两次或多次弹塑性加载后也会发生反直观行为,并通过有限元模拟结果证明了理论模型中预测的多个反直观区域,如图17中圆环最终位移为负的区域,而Forrestal正是忽略了更多的弹

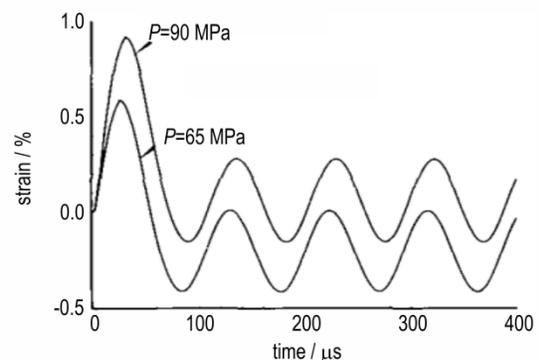


图16 圆环的反直观现象<sup>[98]</sup>

Fig. 16 Anti-intuitive phenomenon of the ring<sup>[98]</sup>

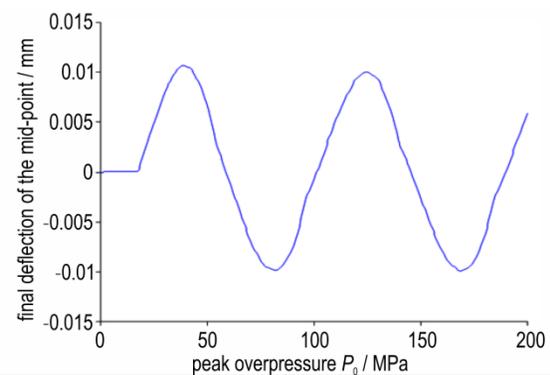


图17 圆环在不同超压峰值的冲击载荷作用下的最终位移<sup>[100]</sup>

Fig. 17 Final displacement of the ring under impulsive loads with the different peak overpressures<sup>[100]</sup>

塑性加卸载循环而仅预测出了一个反直观区域。Li等<sup>[99]</sup>认为这种反直观行为是塑性能耗散和材料弹性非线性共同作用导致的。

董奇等<sup>[100]</sup>在球形壳体受到内部均布径向向外冲击载荷作用的呼吸模态响应研究中,也发现了类似于圆环研究中<sup>[99]</sup>的反直观行为。从理论上预测了球壳中反直观行为发生的关键条件,发现硬化模量与弹性模量之比应该小于0.357,并得到了有限元模拟结果的支持。

在金属抗爆容器承受内部爆炸载荷作用下的动力学行为中,蕴含着十分丰富的结构动力学响应机理。随着对应变增长现象的共振、模态叠加、模态耦合等机理研究的深入,抗爆容器的分析模型经历了一维呼吸模态模型、二维轴对称模型和三维模型的发展历程,只有建立科学有效的力学分析模型才能充分揭示抗爆结构的动力学响应机理。反直观行为的研究表明,容器的最终变形可能与加载方向相反或者回到原位,而通常认为抗爆容器在经历较大的弹塑性变形后会在加载方向产生残余变形,反直观行为与机理的研究成果给抗爆容器的设计和使用带来新的思路,并进一步验证了载荷加载历程对结构动力学响应的重要影响。

### 3 抗爆容器的复杂工况

大量研究表明,炸药形状<sup>[106-115]</sup>、起爆位置<sup>[116-119]</sup>、容器结构<sup>[120-122]</sup>和内部气体环境<sup>[123-126]</sup>等复杂工况因素都会对载荷特性以及容器响应造成显著影响。

#### 3.1 炸药形状的影响

常见的炸药形状主要有球形炸药和柱形炸药两类,而炸药形状的差异可能导致产生的爆炸载荷具有明显的差异<sup>[106-107]</sup>。Stoner和Bleakney<sup>[108]</sup>以及Cole<sup>[109]</sup>认为,爆炸产生的爆炸冲击波波形是由炸药形状所决定的。Victor<sup>[110]</sup>发现在相同的爆炸参数和质量的条件下,非球形炸药产生的超压载荷可以达到球形炸药的2倍以上。

Xiao等<sup>[111]</sup>研究了圆柱形炸药的长径比超压峰值和最大冲量的影响,若是忽略炸药形状的影响,中心起爆的圆柱形炸药近场产生的超压峰值可能被低估3倍以上,最大冲量可能被低估1.9倍以上。所以,Xiao等<sup>[111]</sup>认为在研究结构的近场抗爆设计时,应该明确说明炸药的具体细节。应迪通和张彦春<sup>[112]</sup>对球形、柱形、方形装药的有限元爆炸模型进行求解,发现在比例距离小于等于 $1.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,相较于柱形炸药,方形

装药的超压峰值与球形装药的差异更大。

炸药形状不仅影响容器内爆炸载荷的超压峰值和冲量,对不同方向的载荷特性也有明显影响<sup>[113]</sup>。李金河等<sup>[114]</sup>研究了TNT装药形状对其水中爆炸近场冲击波的影响,研究表明柱形装药的长径比越大,初始冲击波越细长,近场冲击波在传播过程中逐渐球形化,球形化的中心位于炸药的质心。Fan等<sup>[115]</sup>采用数值模拟的方法证明了在近爆范围内,圆柱形炸药在轴向的压力峰值要大于径向范围的压力峰值,且圆柱形炸药引起的反射载荷远远大于等效球形炸药引起的反射载荷,炸药形状对爆炸载荷影响见图18。

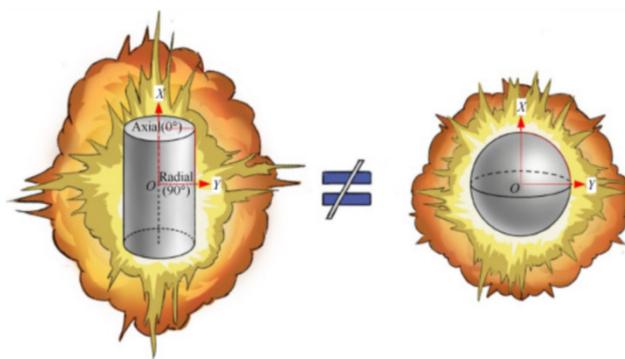


图18 炸药形状对爆炸载荷的影响<sup>[115]</sup>

Fig.18 Effect of charge shapes on the blast loading<sup>[115]</sup>

#### 3.2 起爆位置的影响

在实际抗爆防护中,炸药的起爆位置存在着不确定性,通常情况下,炸药的初始位置可能不在容器的中心位置,此时,受到起爆位置的影响,容器内部爆炸载荷的特性将会出现明显变化,进而对容器的动态响应造成显著影响,科研人员通常将偏离容器中心的起爆方式称为偏心起爆。偏心起爆主要分为两类<sup>[48]</sup>,第一类为炸药位于容器中心,起爆点不在炸药中心,如图19a所示;第二类为炸药不在容器中心,起爆点位于炸药中心,如图19b所示。

李旭等<sup>[116]</sup>开展了炸药位置对舱室内部爆炸的冲击波压力的影响研究,发现炸药位置的不同,会造成舱室内的冲击波压力出现变化。Stevens和Rojas<sup>[117]</sup>将炸药放置在球形容器内的中心位置,研究了起爆点对容器内载荷的影响,当起爆点不在炸药的质心位置时,容器内的最大超压和最大应力都存在着显著的提升。Belov等<sup>[118]</sup>和Stevens等<sup>[119]</sup>的研究结果表明,当炸药偏离容器中心位置时,在一定的偏心度范围内,赤道位置的最大响应可能与炸药的偏心度无关,其他位置的最大应变将受到偏心度的显著影响。

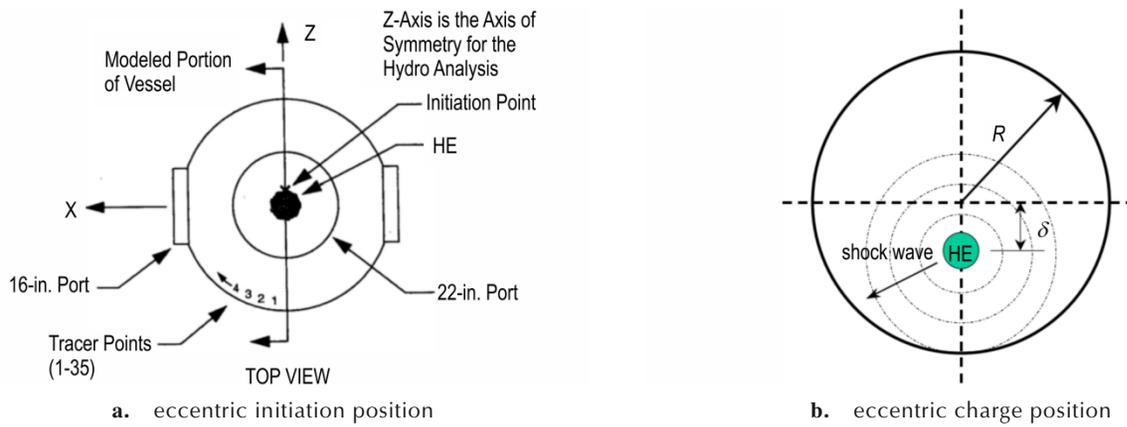


图 19 不同的偏心起爆方式<sup>[48]</sup>

Fig.19 Different eccentric initiation methods<sup>[48]</sup>

### 3.3 容器结构和内部气体环境的影响

实际的抗爆容器往往不是理想的球对称或轴对称容器,受到如容器端盖、法兰、开孔等结构因素的影响,容器内部爆炸载荷和容器响应可能会出现明显变化<sup>[120-122]</sup>。且相关研究表明,容器内的气体环境也会对爆炸载荷造成显著影响<sup>[123-126]</sup>。

胡八一等<sup>[39]</sup>通过数值模拟研究了半球形封头与椭球形封头的冲击波会聚效应,发现椭球形封头在削弱会聚效应方面明显优于球形封头。王震等<sup>[127]</sup>发现罐壁-底板、罐壁-顶盖的周向连接处是内部爆炸载荷作用下的明显薄弱位置,最容易出现断裂破坏,设计时应该根据“弱顶盖连接设计”原则进行加强。徐景林等<sup>[128]</sup>进一步研究了圆柱形容器的结构参数对容器内部爆炸载荷的影响,发现容器高径比  $H/D$  的增加会导致端盖中心点的超压峰值逐渐增大,在  $H/D=1.5$  时达

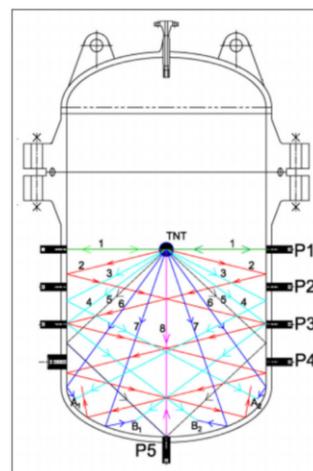
到最大值。椭球形端盖的短轴和长轴之比  $a/b$  会影响端盖会聚效应,随着  $a/b$  的增大,会聚效应会逐渐增大,当  $a/b=0.5$  时,会聚效应达到最大值。对于平板封头的圆柱形容器,  $H/D$  的增大有利于减小端盖处的反射超压和总冲量,但拐角处将会成为新的危险区域。

刘欣等<sup>[129-130]</sup>采用图 20 的圆柱形抗爆容器,表征了圆柱容器内复杂的冲击波传播过程,在首个冲击波达到容器内壁后,根据入射波角度的不同,内壁位置会发生正反射、斜反射、马赫反射等现象,且马赫波会沿着端盖内壁传播并在极点处会聚,因此端盖极点位置所受到的压力是最大的。

孔祥韶等<sup>[131]</sup>和李营等<sup>[59]</sup>开展了炸药在不同气体环境下的密闭空间内部爆炸实验研究,发现水雾和氮气均能有效降低空间内的准静态压力和温度,能有效地抑制封闭空间内的爆炸载荷,降低结构的损伤程度,



a. experimental container image



b. the propagation paths of shock waves

图 20 圆柱形容器内的冲击波传播<sup>[129-130]</sup>

Fig.20 Shock wave propagation in a cylindrical container<sup>[129-130]</sup>

且氮气的削弱效果优于水雾。

李孝臣等<sup>[132]</sup>在直径4 m的可调真空度球形抗爆容器内,开展了不同负压条件下的乳化炸药内爆实验,通过获得的超压时程曲线拟合得到了乳化炸药在不同负压环境下的峰值超压公式和正压冲量公式。研究结果表明,随着环境压力的降低,峰值超压也将随之降低,环境压力每降低20 kPa,峰值超压平均下降8.66%。

面对抗爆容器的实际应用环境,炸药形状和炸药位置的变化都可能显著增强容器内的爆炸载荷特性;不同的容器结构存在着不同的防护危险区域,对爆炸流场的会聚效应也有所差异。在抗爆容器的实际应用中,这些因素对抗爆容器提出了更高的防护要求,需要根据具体的应用环境开展有针对性的抗爆防护设计。

#### 4 温压炸药和破片战斗部的爆炸效应

上述研究成果多数使用的是传统TNT炸药及乳化炸药,并没有考虑炸药类型对载荷特性以及容器响应的影响。随着含能材料的不断发展,温压炸药和破片战斗部的概念逐渐受到广大科研人员的重视,相应的爆炸效应也逐渐成为毁伤与防护领域的重点关注对象。

##### 4.1 温压炸药的爆炸效应

温压炸药在密闭空间内产生的准静态压力与传统

TNT炸药具有明显的差别,其在有限空间内的传播如图21<sup>[133]</sup>所示。除了典型的3阶段冲击波特特性以外,温压炸药最大变化在于燃烧效应伴随的热毁伤,以及准静态压力的幅值高、冲量大、可设计性强等特点。

温压炸药可利用环境中的氧发生反应来提高释放的能量,在有限空间内部爆炸时造成高效毁伤<sup>[134]</sup>。图22为2 kg温压炸药和TNT炸药在大型圆柱形容器中的爆炸载荷特性对比<sup>[134]</sup>,同质量温压炸药的首个冲击波超压和准静态压力分别比TNT高18.0%和62.9%,温压炸药的有氧后燃效应显著提高了准静态压力幅值和冲量,从而增强有限空间内部爆炸的毁伤威力。通过调节炸药中铝粉粒度、形状和质量分数等参数,可提高炸药二次反应释放的能量,获得更高的准静态压力<sup>[135-136]</sup>。

目前对于温压炸药的研究,主要采用允许发生弹性变形的可重复使用型容器来关注爆炸载荷等参数。而实际应用中,弹药会使结构塑性变形和破坏。因此,针对温压炸药准静压较高的爆炸载荷特性,如果从结构响应和爆炸载荷两方面综合评估爆炸威力,重点研究和获得结构弹塑性及损伤破坏的行为、机理,可建立更加科学、有效的威力评估方法。

##### 4.2 破片战斗部的爆炸效应

典型的冲击波载荷和破片的联合毁伤见图23,毁伤过程中除了要防护冲击载荷,还要防护高速破片群的侵彻,迎爆面出现了严重的局部损伤,有较多弹坑分

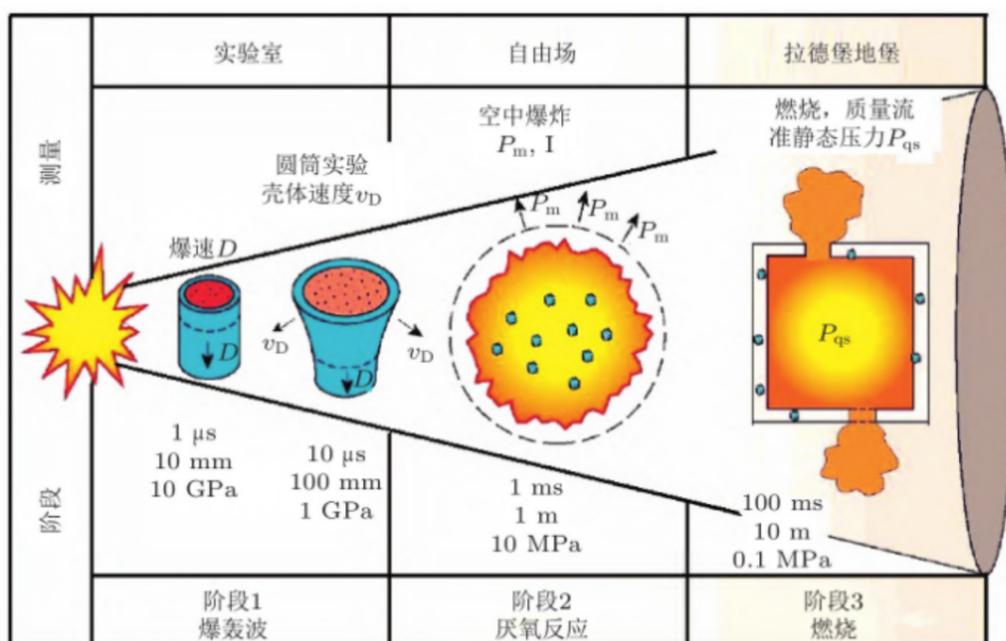


图21 温压炸药在有限空间内部爆炸的不同阶段示意图<sup>[133]</sup>

Fig.21 Diagram of different stages of explosion of a thermobaric explosive in a confined space<sup>[133]</sup>

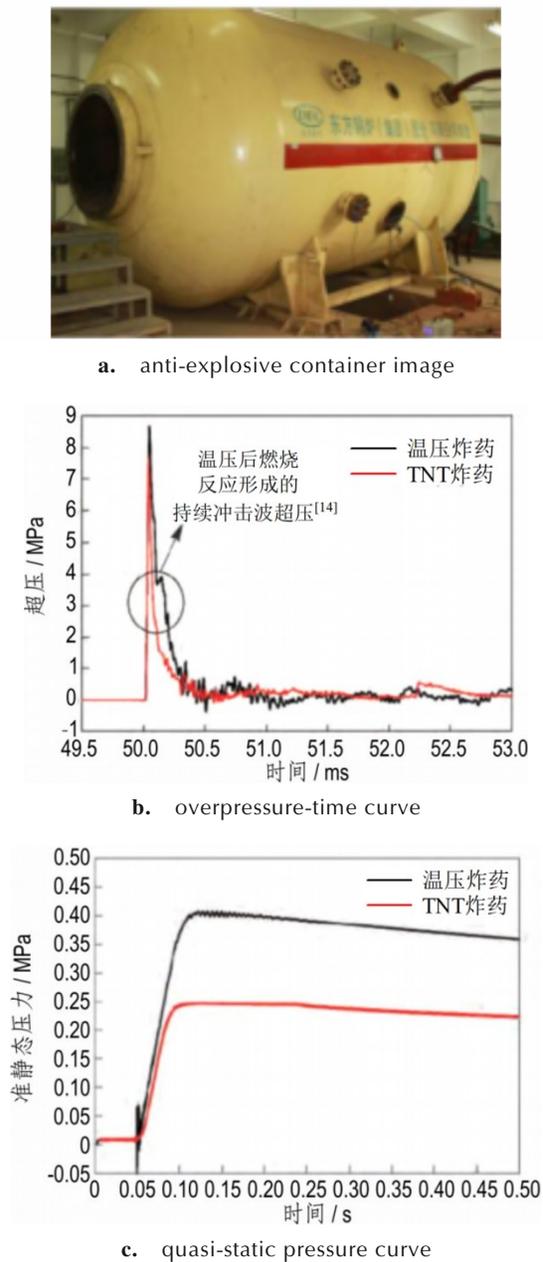


图22 2 kg温压炸药与TNT在抗爆容器中的载荷曲线对比<sup>[134]</sup>  
**Fig.22** Load curves comparison of 2 kg thermobaric explosive and TNT in anti-explosive container<sup>[134]</sup>

布在板的中心位置<sup>[137]</sup>。

舰船领域的相关研究表明,在破片和冲击波毁伤的联合作用下,结构的毁伤会存在明显的增强<sup>[138]</sup>,因此在考虑破片战斗部的毁伤效应时,不仅需要考

虑两种毁伤的先后顺序,还需要考虑两种毁伤之间可能存在的耦合增强效应。目前关于破片战斗部在密闭空间内的防护研究主要集中在舰船防护领域<sup>[139-143]</sup>,在抗爆容器领域内相关报道较少。

本文已经展示了壳体结构在爆炸冲击波下的复杂

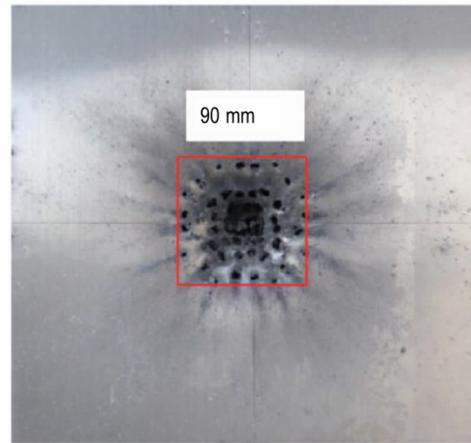


图23 破片战斗部的联合毁伤效应<sup>[137]</sup>

**Fig.23** The joint damage caused by the fragmentation warhead<sup>[137]</sup>

动力学响应机理,破片侵彻和爆炸冲击波联合加载下的壳体结构动态力学行为尚有待系统研究。建议在未来开展相关探索,揭示抗爆容器在破片侵彻和爆炸冲击波联合加载下的动态力学行为和响应机理。

## 5 复合材料抗爆容器

为了满足抗爆容器轻质化、便携性和防护高能炸药等高强度毁伤的需求,采用新型高性能防护材料提升结构的抗爆性能是爆炸防护领域的发展趋势,而聚脲、泡沫和纤维等复合材料在结构抗爆防护领域展现出了较大的潜力与优势<sup>[144-193]</sup>。

### 5.1 纤维复合抗爆容器

俄罗斯从20世纪70年代开始,已经对纤维复合材料抗爆容器的爆炸承载能力、纤维材料性能、尺寸效应、缠绕方式和失效模式等问题开展了大量研究<sup>[178-183]</sup>。

Fedorenko等<sup>[159]</sup>发现,在几何相似的前提下,1:4到1:9.3的尺度范围内,玻璃纤维复合材料抗爆容器无明显的尺寸效应。而纤维的缠绕方式是影响容器抗爆性能的主要因素<sup>[160]</sup>,VNIIEF的研究人员认为柱形复合容器与球形复合容器应该采用不同的纤维缠绕方式,柱形复合容器应该采用环向缠绕与螺旋缠绕等厚度交叉缠绕的方式,并且缠绕的方向数需要大于3,而球形复合容器应该采用均匀厚度缠绕的方式,并且缠绕的方向数需要大于10<sup>[161]</sup>。胡八一等<sup>[162]</sup>在球形玻璃纤维复合材料抗爆容器的实验中,发现了壳体纤维断裂和端盖螺栓断裂等失效行为。甘云丹等<sup>[163]</sup>认为复合材料之间的相互摩擦以及复合材料与金属内衬之

间的摩擦耗能,显著削弱了爆炸载荷作用在容器上的能量,从而降低了最大变形和塑性变形。对于单次使用型的纤维复合容器,胡洋<sup>[164]</sup>提出了最优缠绕方式为螺旋与环向交替缠绕,且最佳螺旋缠绕角度为 $40^\circ$ 左右。

对于中心位置球形炸药起爆作用下的圆柱形纤维复合容器,结构失效主要集中在中部区域<sup>[165]</sup>,表现为外部纤维断裂,如图24所示。Bian等<sup>[166]</sup>研究了在内爆载荷作用下聚氨酯/纤维环形中空结构的抗爆性能,发现聚氨酯作为内层缓冲介质,可以有效降低聚乙烯纤维中的拉伸应力,显著减少纤维材料在冲击作用下的屈曲和断裂,纤维层的失效模式包括屈曲、层裂、基体脱粘3种失效模式。

关于纤维复合容器失效模式的研究经历了两个阶段。在没有金属内衬的情况下,纤维壳体在首个应变峰值较低的情况下发生动力屈曲的失效模式<sup>[167]</sup>;当在玻璃纤维圆柱壳内部加上一层薄的金属内衬,并且金属内衬与玻璃纤维层的厚度之比大于 $1/8$ 时,能有效阻止动力屈曲失效模式的发生<sup>[168]</sup>。

董奇等<sup>[79,169]</sup>针对柱形纤维复合容器,开展了碳

纤维和玻璃纤维对抗爆容器抗爆性能影响的研究,并基于不同纤维存在的力学性能差异和破坏模式,提出了抗爆容器混杂纤维壳体的设计思路。在某些情况下,玻璃纤维复合材料圆柱壳的内衬钢筒会发生动力屈曲,屈曲发生的主要原因是纤维层与金属层的界面脱粘和二次碰撞,典型的复合容器内衬屈曲如图25所示。王尧鑫等<sup>[170]</sup>通过数值模拟的方法,在双层复合材料容器中观察到了金属内衬发生屈曲的现象,认为金属内衬和外层复合材料发生分离现象以后,外层的复合材料在振动过程中会强烈压缩金属内衬,从而导致了金属内衬发生不规则变形。

内层金属壳体在爆炸载荷和外层纤维作用下发生屈曲,进一步导致外层纤维在局部发生分层和断裂失效,其中涉及到金属材料的弹塑性非线性、纤维复合材料的失效和动力屈曲的几何非线性,以及爆炸载荷与结构响应耦合、金属内衬与复合材料筒体以及多层结构相互作用的状态非线性,是抗爆容器研究中典型的关键基础科学问题。其中的机理和影响因素,值得进一步探索。

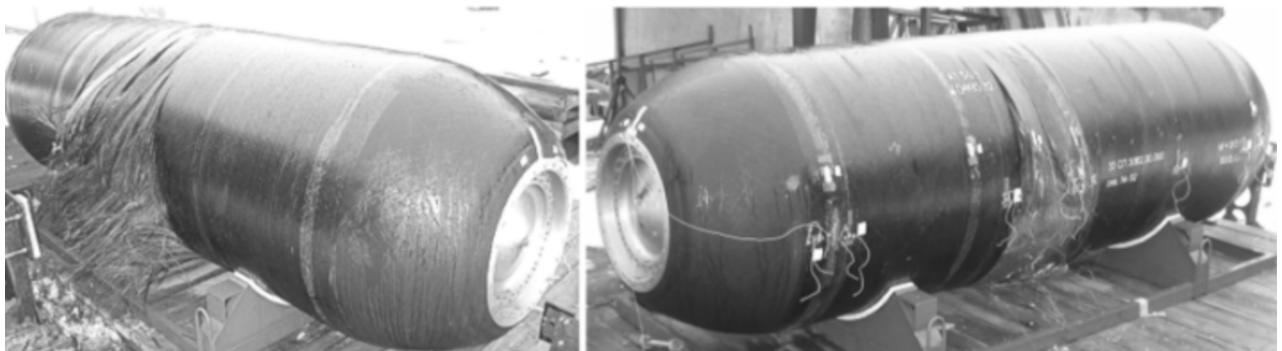


图24 纤维复合容器的失效模式<sup>[165]</sup>

Fig.24 Failure pattern of fiber composite vessels<sup>[165]</sup>



a. 302 g

b. 188 g

图25 不同当量TNT炸药作用下玻璃纤维圆柱壳中心截面图<sup>[79]</sup>

Fig.25 Central section of glass fiber cylindrical shell imploded by different equivalent TNT explosives<sup>[79]</sup>

## 5.2 聚脲复合抗爆容器

聚脲是国内外近年来兴起的一种新型抗爆材料,具有化学性质稳定、力学性能优异、可调配性好等优点<sup>[171]</sup>。相关研究表明,聚脲具有优异的断裂伸长率<sup>[172]</sup>,且在动态加载的情况下,聚脲表现出显著的应变率效应,其强度和模量会随着应变率的增加而增加<sup>[173-174]</sup>,并且具有明显的平台应力区域。因此,聚脲在强动载环境下具有优异的能量吸收能力,目前正在混凝土墙体<sup>[175-179]</sup>、钢结构<sup>[180-183]</sup>和复合材料结构<sup>[184-187]</sup>的防护中得到了应用,并表现出优秀的抗爆性能和防破片侵彻能力。

聚脲在抗爆容器的防护应用中体现出了良好的吸能特性<sup>[188-190]</sup>,宋彬<sup>[189]</sup>研究了不同弹性体夹层对防爆罐抗爆性能的影响,发现夹层材料的波阻抗对抗爆性

能有着重要影响。Jiang等<sup>[191-192]</sup>发现聚脲涂层和金属内衬之间的粘接力对聚脲复合容器的抗爆性能有着重要影响,若二者之间的粘接力不足,可能会发生聚脲涂层与金属内衬相互分离的现象。

Tian等<sup>[193]</sup>研究了聚脲对金属-纤维复合壳体抗内爆作用动态响应特性的影响,给出了不同聚脲厚度下的柱壳毁伤结果,如图26所示。研究表明,聚脲的引入能够降低等质量复合壳体在初始变形过程中的弯矩、显著改变内衬和纤维复合材料的吸能,在层间喷涂聚脲能够有效抑制金属内衬的屈曲现象,在外层喷涂聚脲能够限制内部材料的变形与纤维碎片的飞散,提高抗爆容器的安全距离,通过优化设计内外层聚脲喷涂厚度可以提升复合壳体的抗爆性能。

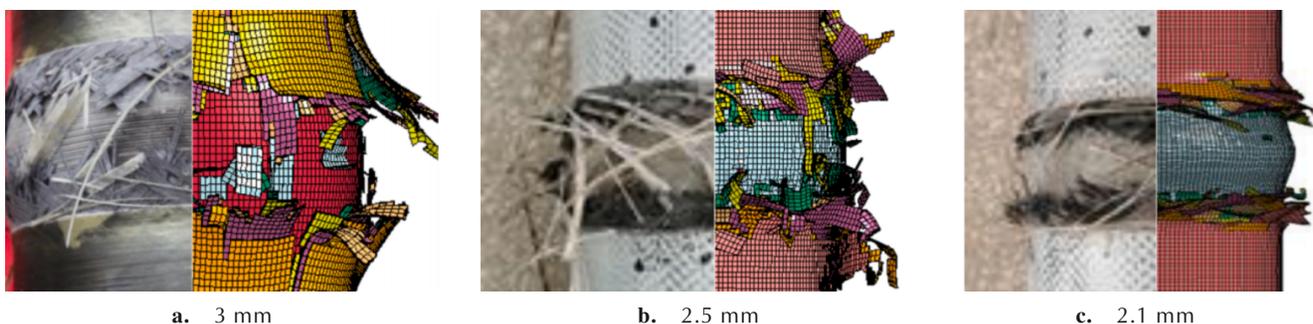


图26 聚脲厚度对柱形容器失效模式的影响<sup>[193]</sup>

Fig.26 Effect of the polyurea thickness on the failure pattern of the cylindrical container<sup>[193]</sup>

相对于金属结构在爆炸作用下的动态力学行为,聚脲等新型高性能防护材料和复合结构的研究更为复杂,多层多功能复合防护结构的防护机理和优化设计还需要深入研究。在较为复杂的抗爆容器系统中,通过建立有效的力学分析模型及简化构型可以揭示结构的动力学响应机理,从而有效指导装备设计。人工智能的发展为复杂抗爆装备的研究提供了进一步的技术支持<sup>[194-195]</sup>,通过采用建立基于简化构型的爆炸毁伤效应数据库和发展能准确预测结构动态响应的分析计算模型等方法,可应对聚脲等复合防护结构对抗爆领域带来的挑战。

## 6 结论与展望

在含能材料和爆炸力学行业中,含能材料的爆炸能量释放和毁伤机理、强动载荷作用下结构的力学行为是两个重点研究方向。抗爆容器的相关研究成果为行业发展带来了较为系统的创新性认识。

在抗爆容器内部爆炸载荷的首个冲击波、反射波和准静压三个阶段中,爆炸载荷的加载历程对容器结构的动态响应都具有重要的影响。随着对应变增长现象的共振、模态叠加、模态耦合等机理研究的深入,抗爆容器的分析模型经历了一维呼吸模态模型、二维轴对称模型和三维模型的发展历程。在建立有效的力学分析模型和充分揭示抗爆结构在爆炸载荷作用下动力学响应机理的基础上,才能有效指导复杂工况下的爆炸毁伤效应评估和防护结构分析设计。高能毁伤炸药和高性能防护材料的出现为毁伤与防护领域带来了更多的机遇和挑战。基于现状,建议未来研究重点包括以下两个方面:

(1)在爆炸效应与安全防护研究中,加强含能材料和爆炸与冲击动力学等学科的交叉融合,从含能材料设计、爆炸载荷分析和结构动力响应的全链条来开展工作。目前针对有限空间内温压炸药等高能炸药爆炸效应的研究,主要采用允许发生弹性变形的抗爆容器来关注爆炸载荷幅值等参数。实际应用中,弹药会

使金属结构或新型防护材料复合结构发生塑性变形与破坏,后续应加强温压炸药和破片战斗部对防护结构毁伤效应及相关威力评估方法的研究工作。

(2)在爆炸防护装备的材料、结构和功能一体化设计中,加强对聚脲等新型高性能防护材料和多层多功能复合防护结构的研究工作。基于精密实验获得复合防护结构的动态力学行为和响应机理,重点关注载荷特性、材料性能及加工制造等因素对防护性能的影响。建立基于简化构型的爆炸毁伤效应数据库,发展能准确预测结构动态响应的分析计算模型,结合人工智能方法实现防护结构和装备的数字化设计,提高我国爆炸防护领域的基础研究水平、分析设计能力和装备性能。

**致谢:**感谢张锐博士、田超博士、杨磊、徐昊和刘璐对论文写作过程中提供的材料支持与修改建议。

#### 参考文献:

- [1] 胡八一, 刘大敏, 刘光祚, 等. 爆炸容器的研究及应用概况[J]. 爆炸波与冲击波, 1998, (3): 1-6.  
HU Ba-yi, LIU Da-min, LIU Guang-zuo, et al. Research and application overview of explosive containers [J]. *Bomb Blast Waves and Shock Waves*, 1998, (3): 1-6.
- [2] 段卓平, 栗玉斌. 突发事件用爆炸容器设计方法及寿命评估[J]. 高压物理学报, 2003, 17(4): 295-300.  
DUAN Zhuo-ping, LI Yu-bin. Design of blast chamber for break out affair and its life-span evaluation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(4): 295-300.
- [3] 郑津洋, 邓贵德, 陈勇军, 等. 离散多层厚壁爆炸容器抗爆炸性能试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 506-511.  
ZHENG Jin-yang, DENG Gui-de, CHEN Yong-jun, et al. Experimental investigation on dynamic response and fracture characteristics of discrete multilayered thick-walled explosion containment vessels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 506-511.
- [4] ZHENG J Y, CHEN Y J, DENG G D. Recent progress of explosion containment vessels methods for design of explosion containment vessels [J]. *Journal of Pressure Equipment and Systems*, 2008, 6: 185-198
- [5] 甘云丹. 玻璃纤维复合材料柱形爆炸容器的变形与破坏[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.  
GAN Yun-dan. Deformation and failure of the glass fiber reinforced composite cylindrical explosion vessel [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [6] RYZHANSKII V A, MINEEV V N, IVANOV A G, et al. Failure of cylindrical glass-epoxy shells filled with water under internal pulse loading [J]. *Polymer Mechanics*, 1978, (2): 283-289.
- [7] 李鹏. 聚脲涂层及其涂敷防爆罐的抗爆性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.  
Li Peng. Research on anti-explosion performance of polyurea coating and its coated explosion-proof tank [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [8] 李俊南. 聚脲涂覆金属圆筒抗爆性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.  
LI Jun-nan. Researchs on anti-explosion properties of metal cylinder coated by polyurea [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [9] 张国栋. 内部爆炸载荷下梯度泡沫铝夹心柱壳抗爆性能仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.  
ZHANG Guo-dong. Blast resistance of sandwich cylinders cored with gradient aluminum foam under internal blast loading: numerical study [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [10] 梁民族. 内部爆炸载荷下梯度泡沫夹芯圆筒动态响应及其抗爆性能多目标优化[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.  
LIANG Min-zu. Dynamic response and multiobjective optimization of graded foam cored sandwich cylinder under internal blast loading [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [11] 张锐, 黄微波, 吕平, 等. 抗爆型聚脲涂层性能及其防护钢筋混凝土板接触爆炸与断裂机制研究[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 218-227.  
ZHANG Rui, HUANG Wei-bo, LVU Ping, et al. Study on the performance of blast-mitigation polyurea and fracture mechanism of the coated reinforced concrete slabs under contact explosion [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(5): 218-227.
- [12] NICKELL R E, ROMERO C. Containing explosions [J]. *Mechanical Engineering*, 2003, 125(9): 62-72.
- [13] ASAHINA J K, SHIRAKURA T. Detonation chamber of chemical munitions: its design philosophy and operation record at Kanda, Japan [C]//Asme Pressure Vessels & Piping/icpvt-11 Conference, 2006: 139-147.
- [14] 胡八一, 肖智强, 谷岩, 等. 40 kg TNT 当量爆炸塔的振动监测及分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 918-924.  
HU Ba-yi, XIAO Zhi-qiang, GU Yan, et al. Vibration monitoring and analysis of the 40 kg TNT equivalent blast containment chamber [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 918-924.
- [15] 苏红梅, 胡八一, 王晓燕. 80 g TNT 当量爆炸容器的研制[J]. 机械工程师, 2011, (02): 41-42.  
SU Hong-mei, HU Ba-yi, WANG Xiao-yan. Development of explosion-containment vessel with 80 g TNT equivalent [J]. *Mechanical Engineer*, 2011, (02): 41-42.
- [16] 管永红, 胡八一, 黄超. 基于小波包的爆炸容器振动分析[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 551-555.  
GUAN Yong-hong, HU Ba-yi, HUANG Chao. Vibration analysis of an explosion vessel based on wavelet packet transform [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(5): 551-555.
- [17] 陈石勇, 胡八一, 谷岩, 等. 球形爆炸容器动力响应的实验研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 504-509.  
CHEN Shi-yong, HU Ba-yi, GU Yan, et al. Experimental investigation on dynamic response of spherical explosive chamber [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 504-509.
- [18] 胡八一, 刘仓理, 陈石勇, 等. 25 kg TNT 当量爆炸容器的冲击隔震研究[J]. 振动与冲击, 2006, (06): 43-45+177.  
HU Ba-yi, LIU Cang-li, CHEN Shi-yong, et al. Study on isolation of shock induced vibration of a 25 kg TNT equivalent explosion vessel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, (06): 43-45+177.

- [19] 龙建华, 苏红梅, 胡八一. 小当量密封爆炸容器的设计[J]. 机械工程师, 2005, (11): 86-87.  
LONG Jian-hua, SU Hong-mei, HU Ba-yi. Design of a small-equivalent sealed explosion vessel[J]. *Mechanical Engineer*, 2005, (11): 86-87.
- [20] 胡八一, 刘仓理, 谷岩, 等. 真实爆炸容器水压应变测试及分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, (03): 279-282.  
HU Ba-yi, LIU Cang-li, GU Yan, et al. Strain measurement and analysis of explosion containment vessel under hydrostatic test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, (03): 279-282.
- [21] 胡八一, 刘宇, 燕乐伟, 等. 10 kg TNT当量爆炸容器的冲击振动监测[J]. 振动与冲击, 2001, (04): 67-69+101.  
HU Ba-yi, LIU Yu, YAN Le-wei, et al. Shock induced vibration monitoring of the 10 kg TNT equivalent explosion vessel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2001, (04): 67-69+101.
- [22] 胡八一, 刘仓理, 刘光祚. 浅谈提高爆炸容器使用安全性的技术措施[J]. 中国安全科学学报, 2001, (05): 28-30+85.  
HU Ba-yi, LIU Cang-li, LIU Guang-zuo. An elementary introduction to the operation safety technology of the explosion containment vessel[J]. *China Safety Science Journal*, 2001, (05): 28-30+85.
- [23] 胡八一, 柏劲松, 张明, 等. 真实爆炸容器壳体动力响应的强度分析[J]. 应用力学学报, 2001, (03): 91-95+153.  
HU Ba-yi, BAI Jin-song, ZHANG Ming, et al. The dynamic response analysis of a real explosion-container vessel[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2001, (03): 91-95+153.
- [24] 胡八一, 罗兵, 孙承伟, 等. 球形爆炸容器水压试验应力测试及分析[J]. 实验力学, 2001, (02): 207-212.  
HU Ba-yi, LUO Bing, SUN Cheng-wei, et al. Stress measurement and analysis for a spherical vessel under hydrostatic test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, (02): 207-212.
- [25] 胡八一, 柏劲松, 张明, 等. 球形爆炸容器动力响应的强度分析[J]. 工程力学, 2001, (04): 136-139+129.  
HU Ba-yi, BAI Jin-song, ZHANG Ming, et al. Dynamic analysis of effective stress for seismic subsidence of pile foundations[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, (04): 136-139+129.
- [26] 胡八一, 柏劲松, 刘大敏, 等. 爆炸容器的工程设计方法及其应用[J]. 压力容器, 2000, (02): 39-41.  
HU Ba-yi, BAI Jin-song, LIU Da-min, et al. The engineering design method of explosion-containment vessel and its application[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2000, (02): 39-41.
- [27] 胡八一, 刘大敏, 柏劲松, 等. 脉冲载荷下球形爆炸容器的弹性响应[J]. 振动与冲击, 1998, (03): 22-26+90-91.  
HU Ba-yi, LIU Da-min, BAI Jin-song, et al. Rectification of equipment error for pseudo-dynamic test by artificial neural network method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1998, (03): 22-26+90-91.
- [28] 邓贵德. 离散多层爆炸容器内爆载荷和抗爆特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
DENG Gui-de. Research on internal explosion loadings and blast resistant characteristics of discrete multi-layered explosion containment vessels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [29] 陈勇军. 离散多层爆炸容器动力响应及其工程设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
CHEN Yong-jun. Research on dynamic responses and design methods of discrete multi-layered explosion containment vessels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [30] 田锦邦. 扁平绕带式压力容器在爆炸载荷作用下的动力特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.  
TIAN Jin-bang. Study on dynamic characteristics of pressure vessels with flat-wound steel ribbon subjected to explosion loading[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [31] 邓贵德, 郑津洋, 陈勇军, 等. 离散多层爆炸容器的抗爆性能和尺寸效应[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 215-219.  
DENG Gui-de, ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, et al. Anti-explosion capability and scale effect of discrete multi-layered explosion containment vessels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 215-219.
- [32] 宋延泽, 田锦邦, 赵隆茂, 等. 离散多层绕带容器在爆炸载荷作用下动力响应的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 324-330.  
SONG Yan-ze, TIAN Jin-bang, ZHAO Long-mao, et al. Dynamic responses of discrete multilayered wound ribbon vessels subjected to blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(4): 324-330.
- [33] 吴晓丹, 郑津洋, 陈勇军, 等. 离散多层圆筒在热冲击载荷下的弹性动力响应[J]. 工程力学, 2008, (01): 109-115.  
WU Xiao-dan, ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, et al. Dynamic response of a discrete multi-layered cylinder due to thermal shock[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, (01): 109-115.
- [34] 郑津洋, 陈勇军, 邓贵德, 等. 强动载荷下离散多层圆筒的弹性动力响应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, (12): 1847-1853.  
ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, DENG Gui-de, et al. Dynamic elastic responses of discrete multilayered cylinder under intensive dynamic loading[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, (12): 1847-1853.
- [35] 田锦邦, 赵隆茂, 郑津洋. 扁平绕带式压力容器的刚塑性动力响应分析[J]. 应用力学学报, 2005, (03): 426-430+508-509.  
TIAN Jin-bang, ZHAO Long-mao, ZHENG Jin-yang. Rigid-Plastic dynamic response analysis of multi-walled pressure vessels with flat-wound steel Ribbons[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2005, (03): 426-430+508-509.
- [36] WHITE I J, TROTT B, BACKOFEN J J. The physics of explosion containment[J]. *Physics in Technology*, 1977, 8(3): 94.
- [37] 刘博文, 龙仁荣, 张庆明, 等. 舱内爆炸角隅汇聚反射冲击波超压特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(1): 35-51.  
LIU Bo-wen, LONG Ren-rong, ZHANG Qing-ming, et al. Study on the corner overpressure characteristics of concentrated reflected shock wave due to internal blast in cabin[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(1): 35-51.
- [38] 胡八一, 张亚军, 谷岩, 等. 40 kg TNT当量爆炸塔的等效静载荷计算[J]. 特种结构, 2011, 28(6): 9-11.  
HU Ba-yi, ZHANG Ya-jun, GU Yan, et al. Calculation of the equivalent static loading for blast containment chamber with 40 kg TNT equivalence[J]. *Special Structures*, 2011, 28(6): 9-11.
- [39] 胡八一, 李平, 张振宇, 等. 爆炸塔内壁特征点的反射压力数值模拟[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 573-578.  
HU Ba-yi, LI Ping, ZHANG Zhen-yu, et al. Numerical simulation of characteristic points reflective pressure on the inner surface of the explosion chamber[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(4): 573-578.

- [40] 成凤生. 密闭空间内爆炸冲击波压力测试及内壁超压分布研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
CHENG Feng-sheng. Study on explosive shock wave pressure test and inner wall overpressure distribution in confined space [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [41] 胡宏伟, 宋浦, 赵省向, 等. 有限空间内部爆炸研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 539-546.  
HU Hong-wei, SONG Pu, ZHAO Sheng-xiang, et al. Progress in explosion in confined space[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 539-546.
- [42] 刘文祥, 张德志, 钟方平, 等. 球形爆炸容器内炸药爆炸形成的准静态气体压力[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1045-1050.  
LIU Wen-xiang, ZHANG De-zhi, ZHONG Fang-ping, et al. Quasi-static gas pressure generated by explosive charge blasting in a spherical explosion containment vessel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1045-1050.
- [43] BAKER W E, ALLEN F J. The response of elastic spherical shells to spherically symmetric internal blast loading[C]//Proceedings of the Third U.S. National Congress of Applied Mechanics, Brown University, Providence, R. I. June 11-14, 1957:79-87.
- [44] BAKER W E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1960, 27: 139-144.
- [45] 刘文祥. 球形爆炸容器的应变增长现象及机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.  
LIU Wen-xiang. Mechanism of strain growth phenomenon in spherical containment vessel subjected to internal blast loading [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [46] DEMCHUK A F. Method for designing explosion chambers[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1968, 9(5): 47-50.
- [47] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Strain growth in a finite-length cylindrical shell under internal pressure pulse[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, 139(2): 1-8.
- [48] DUFFEY T A, RODRIGUEZ E A, ROMERO C. Detonation-induced dynamic pressure loading in containment vessels: LA-UR-02-0366[R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2002.
- [49] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, (01): 85-96.  
ZHAO Shi-da. Blast chamber[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1989, (01): 85-96.
- [50] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Interactive mechanisms between the internal blast loading and the dynamic elastic response of spherical containment vessels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(4): 349-358.
- [51] BUZUKOV A A. Characteristics of the behavior of the walls of explosion chambers under the action of pulsed loading [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1976, 12(4): 605-610.
- [52] DUFFEY T A, ROMERO C. Strain growth in spherical explosive chambers subjected to internal blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28: 967-983.
- [53] DUFFEY T A. Containment of explosions in spherical shells [C]//Proceedings of 7th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Beijing, China, 2007.
- [54] KARPP R R, DUFFEY T A, NEAL T R. Response of containment vessels to explosive blast loading[R]. Los Alamos Scientific Laboratory, LA-8082, 1980.
- [55] ZHDAN S A. Dynamic load acting on the wall of an explosion chamber [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1981, 17(2): 142-146
- [56] BUZUKOV A A. Forces produced by an explosion in an air-filled explosion chamber [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1981, 16(5), 555-559.
- [57] 刘文祥, 张庆明, 钟方平, 等. 球壳塑性变形下的应变增长现象[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 893-898.  
LIU Wen-xiang, ZHANG Qing-ming, ZHONG Fang-ping, et al. Strain growth of spherical shell subjected to internal blast loading during plastic response [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 893-898.
- [58] TROTT B D, BACKOFEN J, JOSEPH E, et al. Design of explosion blast containment vessels for explosive ordnance disposal units [R]. ADB016707: 1975.
- [59] 李营, 张磊, 杜志鹏, 等. 舱内爆炸准静态压力形成机理的研究[J]. 中国造船, 2020, (02): 28-34.  
LI Ying, ZHANG Lei, DU Zhi-peng, et al. Theoretical and experimental study on formation of quasi-static pressure in internal blast[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, (02): 28-34.
- [60] 李营, 杜志鹏, 陈赶超, 等. 舰艇爆炸毁伤与防护若干关键问题研究进展[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 3-60.  
LI Ying, DU Zhi-peng, CHEN Gan-chao, et al. Fundamental problems in blast-induced damage and protection of naval vessels: A state-of-the-art review [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(3): 3-60.
- [61] 周沪, 孔祥韶, 罗峰, 等. 基于结构响应的舱室内爆TNT等效方法[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 86-95.  
ZHOU Hu, KONG Xiang-shao, LUO Feng, et al. TNT equivalency method in confined cabin based on structural response [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(3): 86-95.
- [62] 张鹏宙, 董奇, 杨沙. 爆炸载荷特征参数对无限长圆柱壳弹性动态响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 48-57.  
ZHANG Peng-zhou, DONG Qi, YANG Sha. Influence of blast loading parameters on elastic dynamic response of an infinite-length cylindrical shell [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 48-57.
- [63] 孙琦, 董奇, 杨沙, 等. 内爆炸准静态压力对球形容器弹性动态响应的影响[J]. 含能材料, 2019, 27(8): 698-707.  
SUN Qi, DONG Qi, YANG Sha, et al. Effects of quasi-static pressure on dynamic elastic response of spherical vessels under internal blast [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(8): 698-707.
- [64] 孙琦, 董奇, 杨沙, 等. 内爆炸准静态压力对球形容器弹塑性动态响应的影响[J]. 含能材料, 2020, 28(1): 25-31.  
SUN Qi, DONG Qi, YANG Sha, et al. Effects of quasi-static pressure on dynamic elastic-plastic response of spherical vessels under internal blast[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(1): 25-31.
- [65] 孙琦. 壳体在内爆炸载荷作用下的动态响应与力学模型研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.  
SUN Qi. Dynamic response and mechanical model of shell under internal explosive load[D]. Mianyang: The Chinese Academy of Engineering Physics, 2019.
- [66] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explo-

- sions and its application to blast response simulation of flexible structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90:46-60.
- [67] JONES N. Structural impact[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [68] ZHAO Y P, YU T X, FANG J. Large dynamic plastic deflection of a simply supported beam subjected to rectangular pressure pulse [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1994, 64 (3) : 223-232.
- [69] ZHAO Y P, YU T X, FANG J. Saturation impulses for dynamically loaded structures with finite-deflections[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 1995, 3(6): 583-592.
- [70] 余同希, 朱凌, 许骏. 结构冲击动力学进展(2010-2020)[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(12): 4-64.  
YU Tong-xi, ZHU Ling, XU Jun. Progress in structural impact dynamics during 2010-2020[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 4-64.
- [71] 孔祥韶, 周沪, 郑成, 等. 基于饱和响应时间的封闭空间内爆炸载荷等效方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(9): 15-25.  
KONG Xiang-shao, ZHOU Hu, ZHENG Cheng, et al. An equivalent calculation method for confined-blast load based on saturated response time [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 15-25.
- [72] 蔡林刚, 李晓彬, 杜志鹏, 等. 密闭空间中内爆载荷冲量饱和和现象研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(1): 85-90.  
CA Lin-gang, LI Xiao-bin, DU Zhi-peng, et al. Study on impulse saturation of internal explosion load in confined space [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(1): 85-90.
- [73] DUFFEY T A, ROMERO C. Vibration Modes of Spherical Shells and Containment Vessels [C]//ASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2002, 46512: 177-184.
- [74] DUFFEY T A, BAKER W E, LEWIS B B, et al. Containment of explosions in spherical vessels[J]. *ASME Pressure Vessels and Piping Division*, 1993, 264: 85-91.
- [75] DONG Q. Investigation on the mechanisms of the strain growth phenomenon in containment vessels subjected to internal blast loading[D]. The University of Manchester, Ph.D thesis, 2008.
- [76] 马圆圆. 圆柱形爆炸容器壳体动力响应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
MA Yuan-yuan. Investigation of dynamic responses of the cylindrical explosion containment vessels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [77] 年岗. 内爆炸载荷作用下密闭爆炸容器振动特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
NIAN Gang. Study on the vibration characteristics of a closed explosive container under the action of internal explosive load [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [78] 张亚军. 爆炸流场及容器内爆流固耦合问题计算研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
ZHANG Ya-jun. Numerical studies on three-dimensional explosion flow field and dynamic responses of explosion vessel [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [79] DONG Q, WANG P L, YI C H, et al. Dynamic failure behavior of cylindrical glass fiber composite shells subjected to internal blast loading [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2016, 138(6): 060903.
- [80] MALTSEV V A, KONON Y A, ADISHCHEV V V, et al. Experimental investigation and analysis of oscillations of thin-walled spherical shell during pulse loading [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1984, 20(2): 97-102.
- [81] MALTSEV V A, STEPANOV G V, KONON I A, et al. Estimation of maximum stresses in thin-walled spherical shell structures loaded by a short pressure pulse [J]. *Strength of Materials*, 1985, 17(12): 100-103.
- [82] BELOV A I, BELYAEV V M, KORNILO V A, et al. Calculation of wall loading dynamics in a spherical combustion chamber [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1985, 21(6): 132-135.
- [83] KORNEV V M, ADISHCHEV V V, MITROFANOV A N, et al. Experimental investigation and analysis of the vibrations of the shell of an explosion chamber[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1979, 15(6): 155-157.
- [84] ABAKUMOV A I, EGUNOV V V, IVANOV A G, et al. Calculation and experiments on the deformation of explosion-chamber shells [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1984, 25(3): 455-458.
- [85] 朱文辉. 圆柱形爆炸容器动力学强度的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1994.  
ZHU Wen-hui. Theoretical and experimental study of the dynamical strength of a cylindrical explosive vessel[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1994.
- [86] ZHU W H, XUE H L, ZHOU G Q, et al. Dynamic response of cylindrical explosive chambers to internal blast loading produced by a concentrated charge[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9-10): 831-845.
- [87] DUFFEY T A, PEPIN J E, ROBERTSON A N, et al. Vibrations of complete spherical shells with imperfections [J]. *Vibration and Acoustics*, 2007, 129: 363-370.
- [88] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Effects of structural perturbations on strain growth in containment vessels [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2010, 132(1): 1-7.
- [89] DONG Q, YANG S, ZHANG L C. Influence of defect distribution on dynamic elastic buckling of rings under internal uniformly-distributed pressure pulse [C]//ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. Hawaii, USA, 2017.
- [90] LIU W X, ZHANG Q M, ZHONG F P. Further research on mechanism of strain growth caused by superposition of different vibration modes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104: 1-12.
- [91] 刘文祥, 张德志, 程帅, 等. 球形爆炸容器应变增长现象的极限情况[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 901-906.  
LIU Wen-xiang, ZHANG De-zhi, CHENG Shuai, et al. Limit of strain growth in a spherical explosion vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 901-906.
- [92] 徐景林, 顾文彬, 刘建青, 等. 圆柱形爆炸容器的应变增长现象 [J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 96-101.  
XU Jing-lin, GU Wen-bin, LIU Jian-qing, et al. Strain growth in cylindrical explosion vessel subjected to internal blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 96-101.
- [93] 程帅, 张德志, 刘文祥, 等. 球形爆炸容器法兰联接螺栓的应变增长现象[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3): 93-100.

- CHENG Shuai, ZHANG De-zhi, LIU Wen-xiang, et al. Strain growth of flange bolts of the spherical explosive vessel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 93–100.
- [94] LI Q M, DONG Q, ZHENG J Y. Strain growth of the in-plane response in an elastic cylindrical shell[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(10): 1130–1153.
- [95] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Further study on strain growth in spherical containment vessels subjected to internal blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(2): 196–206.
- [96] HU J H, DENG Y J, DONG Q, et al. Elastic response analysis of cylindrical vessels subjected to internal explosion[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 202: 104880.
- [97] REN Y F, DENG Y J, DONG Q, et al. The effect of quasi-static pressure on strain growth in an elastic ring[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024 (185) : 104862.
- [98] FORRESTAL M J, TZOU D Y, LI J. A counterintuitive region of response for elastic-plastic rings loaded with axisymmetric pressure pulses [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(3): 219–223.
- [99] LI Q M, DONG Q, ZHENG J Y. Counter-Intuitive breathing mode response of an elastic-plastic circular ring subjected to axisymmetric internal pressure pulse [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008; 35(8): 784–794.
- [100] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Further study on counter-intuitive response of single-degree-of-freedom structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38 (5): 305–308.
- [101] SYMONDS P S and YU T X. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics[J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1985, 52: 517–522.
- [102] KOLSKY H, RUSH P, SYMONDS P S. Some experimental observations of anomalous response of fully clamped beams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11 (4) , 445–456
- [103] 席丰, 杨嘉林, 黎在良. 再访结构弹塑性动力响应的异常行为 [J]. 固体力学学报, 1999, 20(2): 113–122.  
Xi Feng, YANG Jia-lin, LI Zai-liang. Anomalous behaviour revisited: Dynamic response of elastic-plastic structures[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 1999, 20(2): 113–122.
- [104] 吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通. 冲击载荷作用下弹塑性板的反常动力响应研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 420–424.  
WU Gui-ying, QIN Dong-qi, YANG Gui-tong. A study on anomalous response of elasto-plastic plates under impulsive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23 (5) : 420–424.
- [105] 李海旺, 树学峰, 秦冬祺. 球面扁壳在径向脉冲载荷作用下的弹塑性动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2010, 21(9): 58–63.  
LI Hai-wang, SHU Xue-feng, QIN Dong-qi. Elastic-plastic analysis on behaviors of thin spherical shell subjected to radial rectangular impulse loadings [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 21(9): 58–63.
- [106] 邓贵德, 郑津洋, 陈勇军, 等. 两种典型形状装药的近场爆炸载荷研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(4): 462–467.  
DENG Gui-de, ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, et al. Near-field blast loadings from explosion of two typically shaped charges[J]. *Journal of Army Engineering University of PLA*, 2010, 11(4): 462–467.
- [107] SHERKAR P, SHIN J, WHITTAKER A, et al. Influence of charge shape and point of detonation on blast-resistant design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142 (2) : 04015109.
- [108] STONER R G, BLEAKNEY W. The attenuation of spherical shock waves in air[J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19, 670–678.
- [109] COLE R H. Underwater Explosions[J]. *Science*, 1948, 108: 2818.
- [110] VICTOR A C. Warhead performance calculations for threat hazard assessment [C]//Department of Defense Explosives Safety Seminar, Las Vegas. 1996: 2–26.
- [111] XIAO W, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Effect of charge shape and initiation configuration of explosive cylinders detonating in free air on blast-resistant design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(8): 04020146.
- [112] 应迪通, 张彦春. 基于LS-PrePost的不同形状装药爆炸仿真研究 [J]. 刑事技术, 2023, 48(1): 76–82.  
YING Di-tong, ZHANG Yan-chun. LS-PrePost-based simulative explosion with shape-different charging [J]. *Forensic Science and Technology*, 2023, 48(1): 76–82.
- [113] 刘文祥, 张德志, 钟方平, 等. 球形和等长径圆柱装药在爆炸近区内载荷差异的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 330–336.  
LIU Wen-xiang, ZHANG De-zhi, ZHONG Fang-ping, et al. Blast loading difference between spherical charge and cylindrical charge with length equal to diameter at small scaled distances [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33 (3) : 330–336.
- [114] 李金河, 汪斌, 王彦平, 等. 不同装药形状TNT水中爆炸近场冲击波传播的实验研究[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 461–464+500.  
LI Jin-he, WANG Bin, WANG Yan-ping, et al. Experimental study on near-field shock wave propagation of underwater explosion of TNT with different charge shapes[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(5): 461–464+500.
- [115] FAN Y, CHEN L, LI Z, et al. Modeling the blast load induced by a close-in explosion considering cylindrical charge parameters[J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 83–108.
- [116] 李旭, 焦志刚, 李帅孝, 等. 舱室结构对炸药内爆响应特性的数值模拟研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(2): 88–94.  
LI Xu, JIAO Zhi-gang, LI Shuai-xiao, et al. Numerical simulation of response of cabin structure to explosive implosion [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2022, 41(2): 88–94.
- [117] STEVENS R R, ROJAS S P. Confinement vessel dynamic analysis[R]. LA-13628-MS, Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States), 1999.
- [118] BELOV A I, KLAPOVSKII V E, KORNILO V A, et al. Dynamics of a spherical shell under a nonsymmetric internal pulse loading[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1984, 20: 312–314 .
- [119] STEVENS R R. Confinement vessel HE eccentricity study. ESA-EA:00-008, Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, 2000.
- [120] 张亚军, 胡八一, 谷岩. 爆炸塔内120 kg TNT当量爆炸载荷的

- 数值分析[J]. 应用力学学报, 2012, 29(4): 393-397+484.  
ZHANG Ya-jun, HU Ba-yi, GU Yan. Numerical studies on 120 kg TNT equivalence blast loadings in an explosion tower [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(4): 393-397+484.
- [121] 宜晨虹, 胡八一, 谷岩. 爆炸容器卡箍式人孔门结构的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2009, (11): 51-52.  
YI Chen-hong, HU Ba-yi, GU Yan. The strength analysis of man hole with yoke of blast chamber[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (11): 51-52.
- [122] 徐景林, 陈立, 朱俊光, 等. 圆柱形爆炸容器抗爆特性的试验研究[J]. 防护工程, 2023, 45(4): 14-19.  
XU Jing-lin, CHEN-Li, ZHU Jun-guang, et al. Experimental research on the anti-blast characteristics of cylindrical explosive containers[J]. *Protective Engineering*, 2023, 45(4): 14-19.
- [123] 陆军伟. 负压条件下爆炸容器内爆炸冲击波传播规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.  
LU Jun-wei. Study on propagation principles of shock waves in explosion containers under negative pressures [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [124] 李志敏. 负压环境下炸药爆炸冲击波传播特性及有害效应研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.  
LI Zhi-min. Study on propagation characteristics of explosive blast wave and harmful effects of explosive explosion in negative pressure environment [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [125] 徐海斌. 水对封闭空间爆炸载荷的消减效果及影响机理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.  
XU Hai-bin. Mechanism and effect of water mitigation on confined explosion loading [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [126] 李琳娜. 水介质爆炸容器动力响应分析与实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.  
LI Lin-na. Dynamic responses analysis and experimental study on the water medium explosion vessels [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [127] 王震, 胡可, 赵阳. 拱顶钢储罐内部蒸气云爆炸冲击荷载的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 35-40.  
WANG Zhen, HU Ke, ZHAO Yang. Numerical simulation for internal vapor cloud explosion loading in dome-roof steel tanks [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20): 35-40.
- [128] 徐景林, 顾文彬, 刘建青, 等. 圆柱形爆炸容器内爆炸载荷的分布规律[J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 276-282.  
XU Jing-lin, GU Wen-bin, LIU Jian-qing, et al. Distribution of blast loading in cylindrical explosive containment vessels [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(18): 276-282.
- [129] 刘欣, 顾文彬, 蔡星会, 等. 圆柱形爆炸容器的内壁爆炸载荷[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(2): 19-30.  
LIU Xin, GU Wen-bin, CAI Xing-hui, et al. Blast loads on the inner wall of cylindrical explosion containment vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 19-30.
- [130] LIU X, GU W B, LIU J Q, et al. Dynamic response of cylindrical explosion containment vessels subjected to internal blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020 135: 734-743.
- [131] 孔祥韶, 王子棠, 况正, 等. 密闭空间内爆炸载荷抑制效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 24-37.  
KONG Xiang-shao, WANG Zi-tang, KUANG Zheng, et al. Experimental study on the mitigation effects of confined-blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 24-37.
- [132] 李孝臣, 汪泉, 谢守冬, 等. 负压条件下球形爆炸容器内乳化炸药冲击波参数研究[J]. 火炸药学报, 2023, 46(3): 252-259.  
LI Xiao-chen, WANG Quan, XIE Shou-dong, et al. Study of shock wave parameters of emulsified explosives in spherical explosive containers under negative-pressure conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(3): 252-259.
- [133] 胡宏伟, 宋浦, 邓国强, 等. 温压炸药的特性及发展现状[J]. 力学进展, 2022, 52(1): 53-78.  
HU Hong-wei, SONG Pu, DENG Guo-qiang, et al. Characteristics of thermobaric explosives and their advances [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53-78.
- [134] 张玉磊, 李芝绒, 蒋海燕, 等. 温压炸药内爆炸压力特性及威力试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1333-1338.  
ZHANG Yu-lei, LI Zhi-rong, JIANG Hai-yan, et al. Experimental study of the characteristics of internal explosion pressure and power of thermobaric explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(7): 1333-1338.
- [135] MURAVYEV N, FROLOV Y, PIVKINA A, et al. Influence of particle size and mixing technology on combustion of HMX/Al composition [J]. *Propellants Explosive Pyrotechnics*, 2010, 35(3): 226-232.
- [136] 段晓瑜, 郭学永, 焦清介, 等. 铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在密闭空间内爆炸特性的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 472-478.  
DUAN Xiao-yu, GUO Xue-yong, JIAO Qing-jie, et al. Effect of aluminum size and content on explosion performance of aluminized explosives in confined space [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(6): 472-478.
- [137] 程远胜, 谢杰克, 李哲, 等. 冲击波和破片群联合作用下高强聚乙烯/泡沫铝夹芯复合结构毁伤响应特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1753-1762.  
CHENG Yuan-sheng, XIE Jie-ke, LI Zhe, et al. Damage response characteristics of UHMWPE/aluminum foam composite sandwich panel subjected to combined blast and fragment loadings [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1753-1762.
- [138] 吴震. 破片与冲击波对舰船板架的耦合毁伤效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.  
WU Zhen. Research on ship Stiffened Plates Under the Synergistic Effects of Fragments and Shock Wave [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [139] JIN J, HOU H, CHEN P, et al. Experimental study on the combined damage of liquid cabin structure subjected to charge explosion with preset fragments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 130: 19-26.
- [140] 张成亮, 朱锡, 侯海量, 等. 爆炸冲击波与高速破片对夹层结构的联合毁伤效应试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33: 184-188.  
ZHANG Cheng-liang, ZHU Xi, HOU Hai-liang, et al. Tests for combined damage effect of blast waves and high-velocity fragments on composite sandwich plates [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33: 184-188.
- [141] 李茂, 朱锡, 侯海量, 等. 冲击波和高速破片联合作用下固支板毁伤效应数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39: 64-70.  
LI Mao, ZHU Xi, HOU Hai-liang, et al. Numerical simulation

- of the damage effects of clamped square plate subjected to the impact of blast wave and fragments [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39: 64-70.
- [142] 李典, 侯海量, 戴文喜, 等. 爆炸冲击波和破片联合作用下玻璃纤维夹芯复合结构毁伤特性实验研究[J]. 兵工学报, 2017, 5: 877-885.
- LI Dian, HOU Hai-liang, DAI Wen-xi, et al. Experimental investigation on damage of glassfiber sandwich structure under explosion and fragment loadings [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 5: 877-885.
- [143] 李茂, 朱锡, 侯海量, 等. 冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2015, 10: 60-67.
- LI Mao, ZHU Xi, HOU Hai-liang, et al. Numerical simulation of steel plates subjected to the impact of both impact waves and fragments [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10: 60-67.
- [144] 王立科. 复合材料抗爆容器载荷规律及动力响应研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- WANG Li-ke. Investigation of blast loading regularity and dynamic response of composite explosion containment vessel [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2012.
- [145] PASTRNAK J, HENNING C, GRUNDLER W, et al. Composite vessels for containment of extreme blast loading [R]. UCRL-CONF-205423, Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 2004.
- [146] 胡八一, 刘仓理, 龙建华, 等. 玻璃纤维缠绕容器的水压应变测试及分析[J]. 纤维复合材料, 2006, (04): 3-6.
- HU Ba-yi, LIU Cang-li, LONG Jian-hua, et al. Strain test and analysis of fiberglass winding pressure vessels [J]. *Fiber Composites*, 2006, (04): 3-6.
- [147] 胡八一, 刘仓理, 陈石勇, 等. 玻璃纤维增强复合材料抗爆容器的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2007, (03): 468-470+433.
- HU Ba-yi, LIU Cang-li, CHEN Shi-yong, et al. Research progress survey of anti-explosion container twined with fiberglass reinforced composite [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2007, (03): 468-470+433.
- [148] ZHOU Y, WANG T, ZHU W, et al. Evaluation of blast mitigation effects of hollow cylindrical barriers based on water and foam [J]. *Composite Structures*, 2022, 282: 115016.
- [149] ZHOU Y, XIE Y, PAN T, et al. Flexible materials and structures for mitigating combined blast and fragment loadings—A review [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 181: 104759.
- [150] 周颖, 黄广炎, 王涛, 等. 多孔聚氨酯基复合削爆屏障的防护性能[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(10): 138-151.
- ZHOU Yin, HUANG Guang-yan, WANG Tao, et al. Blast mitigation performance of porous polyurethane-based composite explosion-proof barrier [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(10): 138-151.
- [151] YANG L, WANG T, BIAN X, et al. Evaluation of blast mitigation performance of cylindrical explosion containment vessels based on water containers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 181: 104729.
- [152] YANG L, QI S, ZHI X, et al. Strain rate and temperature rate behavior of ultra-high-strength 1770 steel: Base for transverse impact analysis [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 6858-6869.
- [153] 杨磊, 刘瀚, 黄广炎, 等. 典型防爆装备对TNT爆炸冲击波的防护性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(10): 2871-2884.
- YANG Lei, LIU Han, HUANG Guang-yan, et al. Protection performance of typical explosion-proof equipment against TNT blast shock wave [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44 (10): 2871-2884.
- [154] LI M, QI S, HUANG G, et al. Blast mitigation effects of TPU polymers-based inflated membrane structures under external explosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 427: 136237.
- [155] 潘腾, 卞晓兵, 袁名正, 等. 爆炸冲击波作用下聚氨酯-半球夹芯结构的动态响应[J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3580-3589.
- PAN Teng, BIAN Xiao-bing, YUAN Ming-zheng, et al. Dynamic response of polyurethane-hemispherical sandwich structure under action of explosive shock wave [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3580-3589.
- [156] 袁名正, 潘腾, 卞晓兵, 等. 曲面型纤维复合材料防护掩体在爆炸冲击波下的响应特性[J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3909-3920.
- YUAN Ming-zheng, PAN Teng, BIAN Xiao-bing, et al. Response characteristics of curved fiber composite protective shelter under the action of explosive shock wave [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3909-3920.
- [157] ZHU W, HUANG G, LIU C, et al. Experimental and numerical investigation of a hollow cylindrical water barrier against internal blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 789-806.
- [158] ZHU W, HUANG G, LIU H, et al. Experimental and numerical investigation of a hollow cylindrical water based barrier against internal blast induced fragment loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 138: 103503.
- [159] FEDORENKO A G, TSYPKIN V I, IVANOV A G, et al. Deformation and failure of different-scale cylindrical glass-reinforced plastic shells in internal pulsed loading [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1986, (4): 658-664.
- [160] FEDORENKO L G, SYRUNIN M A, IVANOV A G. Effect of the reinforcement pattern of oriented fiberglass plastics on the strength of circular shells under internal explosive loading [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1991, (4): 631-640.
- [161] IVANOV A G, SYRUNIN M A, FEDORENKO A G. Dynamic strength of spherical shells under internal explosive loading [J]. *The Review of High Pressure Science and Technology*, 1998, 8(4): 302-305.
- [162] 胡八一, 刘仓理, 胡海波, 等. 树脂基玻璃纤维复合材料爆炸容器的研制[J]. 压力容器, 2005, (06): 10-12+45.
- HU Ba-yi, LIU Cang-li, HU Hai-bo, et al. Development of resin matrix fiberglass composite explosive containment vessel [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2005, (06): 10-12+45.
- [163] 甘云丹, 张庆明, 张秀珍, 等. 内爆作用下金属壳体与纤维复合材料增强壳体动态响应特性[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 128-134.
- GAN Yun-dan, ZHANG Qing-ming, ZHANG Xiu-zhen, et al. Dynamic responses of metal shell and fiber-reinforced composite shell subjected to internal blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S2): 128-134.
- [164] 胡洋. 玻璃纤维复合材料抗爆容器动力响应研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2016.
- HU Yang. Research on dynamic response of fiberglass composite explosion containment vessels [D]. Zhejiang: Zhejiang Uni-

- versity, 2016.
- [165] ABAKUMOV A I, DEVYATKIN I V, MELTASA V Y, et al. Development of A595 explosion-resistant container design: Numerical, theoretical and experimental justification of container design parameters [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 849: 51–56.
- [166] BIAN X, YANG L, WANG T, et al. Numerical investigation on anti-explosion performance of non-metallic annular protective structures[J]. *Materials*, 2023, 16(24): 7549.
- [167] FEDORENKO A G, TSYPKIN V I, IVANOV A G, et al. Peculiarities of the dynamic deformation and fracture of cylindrical glass-fiber reinforced plastic shells upon internal impulse loading[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1983, (1): 91–94.
- [168] FEDORENKO A G, SYRUNIN M A, IVANOV A G. Dynamic strength of shells made of a glass-fiber reinforced plastic [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1989, 25(3): 425–430.
- [169] DONG Q, HU B Y. Dynamic behavior of carbon fiber explosion containment vessels [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2016, 138(1): 011202.
- [170] 王尧鑫, 龙仁荣, 张庆明, 等. 双层复合材料爆炸圆筒内爆载荷作用变形特征数值模拟 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (S2): 189–199.  
WANG Yao-xin, LONG Ren-rong, ZHANG Qing-ming, et al. Numerical simulation analysis of deformation characteristics of double-layered metal-plastic cylindrical shells under internal explosive loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41 (S2): 189–199.
- [171] 冯加和, 董奇, 张刘成, 等. 聚脲弹性体在爆炸防护中的研究进展 [J]. 含能材料, 2020, 28(4): 277–290.  
FENG Jia-he, DONG Qi, ZHANG Liu-cheng, et al. Review on using polyurea elastomer for enhanced blast-mitigation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(4): 277–290.
- [172] 黄微波. 喷涂聚脲弹性体技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
HUANG Wei-bo. Spray polyurea elastomer technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [173] ROLAND C M, TWIGG J N, VU Y, et al. High strain rate mechanical behavior of polyurea [J]. *Polymer*, 2007, 48: 574–578.
- [174] SARVA S S, DESCHANEL S, BOYVE M C, et al. Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates [J]. *Polymer*, 2007, 48: 2208–2213.
- [175] DAVIDSON J S, PORTER J R, DINAN R J, et al. Explosive testing of polymer retrofit masonry walls [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2004, 18(2): 100–106.
- [176] DAVIDSON J S, FISHER J S, HAMMONS M I, et al. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005, 131(8): 1184–1205.
- [177] 蔡桂杰. 弹性体涂覆钢筋混凝土板抗爆作用设计方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.  
CAI Gui-jie. The design method of the reinforced concrete plate coated polyurea under the action of explosion [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [178] BAYLOT J T, BULLOCK B, SLAWSON T R, et al. Blast response of lightly attached concrete masonry unit walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1186–1193.
- [179] HA J H, YI N H, CHOI J K, et al. Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading [J]. *Composite Structures*, 2011, 93: 2070–2082.
- [180] 贺红鹰, 倪爱清, 王继辉, 等. 聚脲弹性体/纤维增强树脂基复合材料抗冲击性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017, 5: 89–92.  
HE Hong-ying, NI Ai-qing, WANG Ji-hui, et al. Impact resistance study of polyurea elastomer/glass fiber reinforced vinyl resin composite [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017, 5: 89–92.
- [181] AMINI M R, ISAACS J B, NEMAT-NASSER S. Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37: 82–89.
- [182] AMINI M R, AMIRKHZI A V, NEMAT-NASSER S. Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37: 90–102.
- [183] 甘云丹, 宋力, 杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能数值模拟 [J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 15–18.  
GAN Yun-dan, SONG Li, YANG Li-ming. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 15–18.
- [184] TEKALUR S A, SHUKLA A, SHIVAKUMAR K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials [J]. *Composite Structures*, 2008, 84: 271–281.
- [185] GARDNER N, WANG E, KUMAR P, et al. Blast mitigation in a sandwich composite using graded core and polyurea interlayer [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52: 119–133.
- [186] 许帅. 聚脲弹性体复合结构抗冲击防护性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
XU Shuai. The impact resistance study of polyurea composite structures [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [187] 王小伟, 何金迎, 祖旭东等. 聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(5): 63–68.  
WANG Xiao-wei, HE Jin-ying, ZU Xu-dong, et al. Antidetonation properties on composite sandwich structure with polyurea elastomer [J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(5): 63–68.
- [188] 宋彬, 黄正祥, 翟文等. 聚脲弹性体夹芯防爆罐抗爆性能研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 138–144.  
SONG Bin, HUANG Zheng-xiang, ZHAI Wen, et al. Anti-detonation properties of explosion-proof pots made of sandwich structures with polyurea elastomer [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 138–144.
- [189] 宋彬. 聚脲弹性体夹层防爆罐抗爆性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
SONG Bin. Study on the anti-explosive performance of polyurea elastomer sandwich explosion-proof tank [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- [190] 张镇洲. 复合结构防爆罐抗爆性能研究 [D]. 辽宁: 沈阳理工大学, 2020.  
ZHANG Zhen-zhou. Research on anti-explosion performance of composite structure explosion-proof tank [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.
- [191] JIANG Y X, ZHANG B Y, WEI J S, et al. Study on the dynamic response of polyurea coated steel tank subjected to blast loadings [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 67: 104234.

- [192] JIANG Y X, WANG L, WEI J S. Dynamic response of polyurea coated thin steel storage tank to long duration blast loadings [J]. *Thin Walled Struct* 2021; 163(1): 107747.
- [193] TIAN C, YANG S, FENG J H, et al. Influence of polyurea on dynamic response behaviors of cylindrical composite shells under internal explosion load [J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117800.
- [194] 徐景林, 夏成量, 刘欣, 等. 基于BP神经网络对爆炸容器多层复合结构的多目标优化[J]. *防护工程*, 2023, 45(2): 47-56.
- XU Jing-lin, XIA Cheng-liang, LIU Xin, et al. Multi-objective optimization of explosion container's multi-layer composite structure based on BP neural network [J]. *Protective Engineering*, 2023, 45(2): 47-56.
- [195] 顾君. 基于Stacking模型融合的水下爆炸容器动态响应预测[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
- GU Jun. Dynamic response prediction of underwater explosive containers based on stacking model fusion [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.

## Research Progress on Internal Blast Effects and Dynamic Mechanical Behavior of Explosion Containment Vessels

HU Jun-hua<sup>1</sup>, DONG Qi<sup>1</sup>, Hu Ba-yi<sup>2</sup>, REN Yi-fei<sup>1</sup>, HUANG Guang-yan<sup>3</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China; 3. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The study and application of explosion containment vessels (ECVs) subjected to internal blast loading is a multidisciplinary and interdisciplinary issue encompassing energetic materials, explosion and impact dynamics, and vibration mechanics. The investigation on the internal blast effects and dynamic mechanical behavior of ECVs is an important foundation for enhancing the explosion-resistant performance of equipments, and the mechanisms of strain growth and anti-intuitive phenomenon are important scientific issues. The relevant research progress and key scientific findings are reviewed from five aspects: the internal blast loading characteristics and effects within ECVs, the dynamic response mechanisms of metal ECVs, the complex working conditions of ECVs, the blast effects of thermobaric explosives and fragmentation warheads, as well as composite ECVs. The analysis demonstrates that establishing an effective mechanical analysis model and fully revealing the dynamic response mechanisms of structures can effectively guide blast damage assessment and protective structures' analysis and design under complex working conditions. Considering the challenges and opportunities posed by high destructive explosives and high-performance protective materials, this study proposes the fundamental directions and emerging trends in the study of blast damage and safety protection.

**Key words:** explosion containment vessel; loading characteristic; dynamic response; new explosive; composite material

**CLC number:** TJ55; TJ03

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024236

**Grant support:** National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3320504), National Natural Science Foundation of China (No. 11872343)

(责编: 高毅)