

圆柱壳体内部多点爆炸冲击波流场演化及压力分布特性

刘璐,徐昊,任逸飞,董奇

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

摘要: 多点爆炸产生的多个冲击波在传播过程中会发生叠加、汇聚,当多点爆炸发生在容器内部时,还会受到容器内壁反射的影响,传播历程复杂。为探索壳体内部多点爆炸的流场特性及其关键影响因素,采用数值模拟的方法,建立二维的平面应变模型对圆柱壳内部多点爆炸的爆炸流场进行研究。研究表明,壳体内部多点爆炸的流场演化具有周期性。当爆炸点数量为2时,圆环内壁附近观测点的反射波压力较中心单点爆炸显著提升,尤其当爆炸点距环心距离为0.6倍圆环半径时,该压力值可达中心单点爆炸的4.58倍。爆炸点数量取2和3时,冲击波耦合对圆环的变形存在增强效果,但随着爆炸点数量的进一步增加,圆环的径向位移会逐渐减小。在保持炸药总质量不变且爆炸点距环心0.2~0.8倍圆环半径范围内,爆炸点数量为2的工况对圆环造成的结构变形最为显著。

关键词: 多点爆炸;流场特性;冲击波系演化

中图分类号: TJ5;TJ0;O383

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025092

0 引言

抗爆容器是一类特殊的密封压力容器,能够将爆炸产生的冲击波、碎片等产物约束在容器内部,保护人员、设备和环境的安全^[1]。对容器内爆炸流场及载荷特性的研究是有效指导容器设计的基础,动载系数法即是基于中心单点爆炸载荷的一种容器设计方法^[2]。

容器内部的爆炸流场受容器形状、装药种类等因素的影响,较为复杂^[3]。研究者对此开展了大量研究^[4-9],在抗爆容器几何参数确定的条件下,不同装药量爆炸产生的冲击波及其流场的演化历程不具备相似性^[4],导致难以通过理论计算分析爆炸流场。在试验和数值模拟研究中发现,不同容器结构内部的爆炸流场分布有显著差异。当球形炸药在球形容器内部中心点处爆炸时,容器内壁面受到的载荷可近似看作均布载荷^[5-6];相比之下,柱形容器内壁的载荷分布呈现非对称特征^[7],易在端盖等结构处发生冲击波汇聚,引发

局部压力与冲量升高^[8-9]。

爆炸容器在内部爆炸载荷作用下的动态响应也受到重点关注^[10-13]。无限长圆柱壳体在中心沿轴线无限长装药爆炸载荷下的动态响应可以简化为平面应变模型,通过对平面应变模型进行研究,可以探索壳体结构的动态响应机理,从而指导三维壳体的结构设计。Dong等^[11-12]利用平面应变圆环模型对圆柱壳体的动态响应进行研究,结合理论推导和数值模拟发现了壳体应变增长的主要影响因素;通过计算和推导,发现平面应力圆环中的能量分析方法在平面应变圆环和球壳中仍然成立,并通过数值模拟加以验证。张鹏宙等^[13]将柱壳结构简化为平面应变圆环,在二维模型的基础上研究了圆柱壳在简化爆炸载荷作用下的动态响应,并在此基础上推导得到大变形下柱壳结构的运动方程。

现有研究集中于容器承受内部单点爆炸,而抗爆容器服役时可能面临多爆炸物的情形。当多个爆炸源按一定空间位置排布并同时引爆,冲击波的相互叠加会在特定区域增强爆炸载荷。美国早在70年代就开展了多点爆炸试验研究^[14]。研究初期,冲击波相交处的压力增益效应是研究者们关注的重点^[15-20],与单点爆炸相比,同当量的多点爆炸通常能在特定区域产生高于单点爆炸的爆炸载荷。Wang等^[17]通过数值模拟研究发现,对于1 kg当量的TNT,随着爆炸点和爆炸

收稿日期:2025-04-30;修回日期:2025-08-11

网络出版日期:2025-10-21

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3320504)

作者简介:刘璐(2000-),女,硕士研究生,主要从事爆炸防护结构研究。e-mail:pomelo0717@163.com

通信联系人:董奇(1982-),男,研究员,主要从事爆炸防护结构研究。e-mail:dongqi@caep.cn

引用本文:刘璐,徐昊,任逸飞,等.圆柱壳体内部多点爆炸冲击波流场演化及压力分布特性[J].含能材料,2025,33(10):1176-1191.

LIU Lu, XU Hao, REN Yi-fei, et al. Key Influencing Factors of Multi-point Explosions Flow Field Characteristics inside Cylindrical Shells[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(10):1176-1191.

点间隔的改变,特殊区域的峰值压力最大提升5.23倍,冲量最大提高4.71倍。胡宏伟等^[19-20]通过试验发现,冲击波叠加导致的压力增益效应在近地/水介质环境中具有适用性。对多点爆炸的研究逐渐深入至威力场^[21-22],柴晨等^[22]对多点爆炸进行数值模拟发现,将大药量TNT拆分为多点能够有效提升爆轰超压场的覆盖面积。然而,上述多点爆炸的研究多为开放环境,针对有限空间内多点爆炸的研究仍旧有限。翟红波等^[23]在舱室内部开展两点爆炸试验,发现舱室各位置变形均大于单点爆炸,冲击波汇聚处结构变形增幅达57%,但并未给出爆炸流场的分布特性。

当前针对容器内爆炸流场及容器动态响应的研究往往采用中心单点爆炸,而较少考虑多点爆炸等复杂载荷;针对多点爆炸的研究则多在开放环境中进行,较少关注密闭环境中的多点爆炸。当容器内发生多点爆炸时,各个爆炸点之间、爆炸载荷与容器之间将相互影响,产生复杂的流场,载荷特征及容器的响应行为都将呈现出新的特点。因此,本研究将针对圆柱壳体的弹塑性动力响应过程,通过数值模拟研究爆炸点位置和数量对容器内爆炸流场的影响规律。研究结果对抗爆容器在复杂载荷下的防护设计具有一定的参考价值。

1 有限元模型

1.1 工况设置

为了研究抗爆容器内部多点爆炸流场特性,本研究建立了平面圆环内爆炸的二维有限元模型,如图1所示。利用ANSYS/LS-Dyna软件,采取流固耦合算法进行计算。圆环的内径 R 为57.5 cm,厚度 h 为2 cm;炸药为TNT炸药,采用*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY关键字生成,中心单点爆炸工况下,炸药的半径 r 为3.32 cm。本研究设计了不同位置

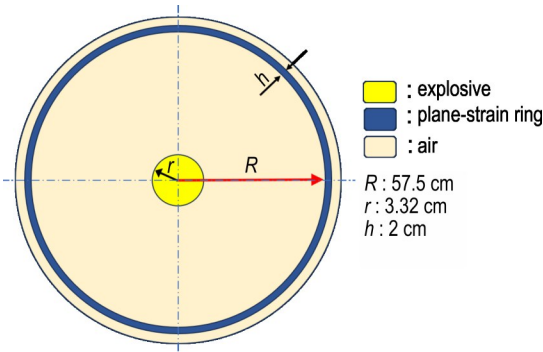


图1 中心单点爆炸的有限元模型
Fig.1 FE model of the centrally located single-point explosion

和不同炸药数量的工况,保证所有工况中炸药总质量不变。由于研究采用二维模型,将无限长圆柱壳体简化为平面应变圆环,内部的炸药也是无限长的圆柱形装药。在不同工况中保持圆柱形装药的总截面面积一致,则可以认为不同工况下炸药的总质量一致。圆环采用拉格朗日单元,空气和炸药采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)单元,空气边界采用无反射边界条件。

为了研究爆炸点数量和位置对壳体内部冲击波流场演化及压力分布的影响,在不同工况中改变爆炸点的数量及炸药与圆环中心点的距离。炸药点数量(P)分别为1、2、3、4、5、6,炸药中心点和圆环中心点的距离(L)分别为0、0.2 R 、0.4 R 、0.6 R 和0.8 R 。所有爆炸点均围绕圆环中心点对称分布。部分工况的参数如表1所示。不同炸药位置及不同炸药点数量的模型示意图分别如图2和图3所示。

表1 部分工况的详细参数
Table 1 Detailed arrangement of some configurations for numerical simulations

configuration	P	L	r / cm
$P1L0$	1	0	3.32
$P2L0.2$	2	0.2 R	2.34
$P3L0.4$	3	0.4 R	1.92
$P4L0.5$	4	0.5 R	1.66
$P5L0.6$	5	0.6 R	1.48
$P6L0.8$	6	0.8 R	1.36

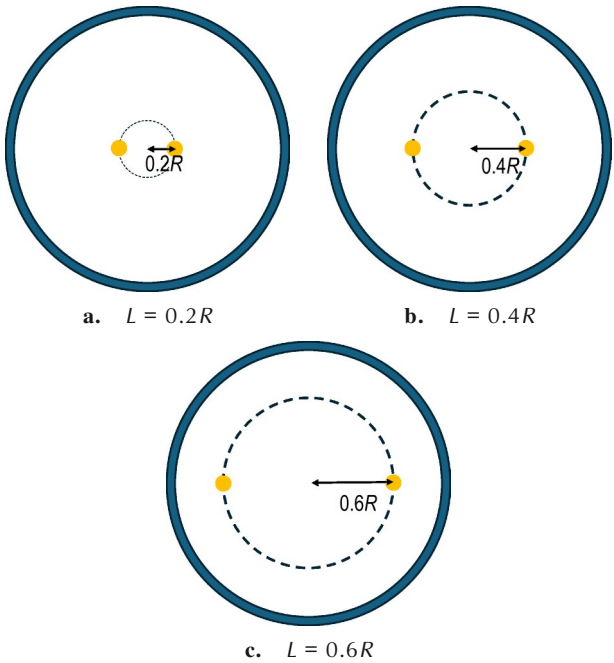


图2 不同炸药位置示意图
Fig.2 Diagram of different arrangements of explosives

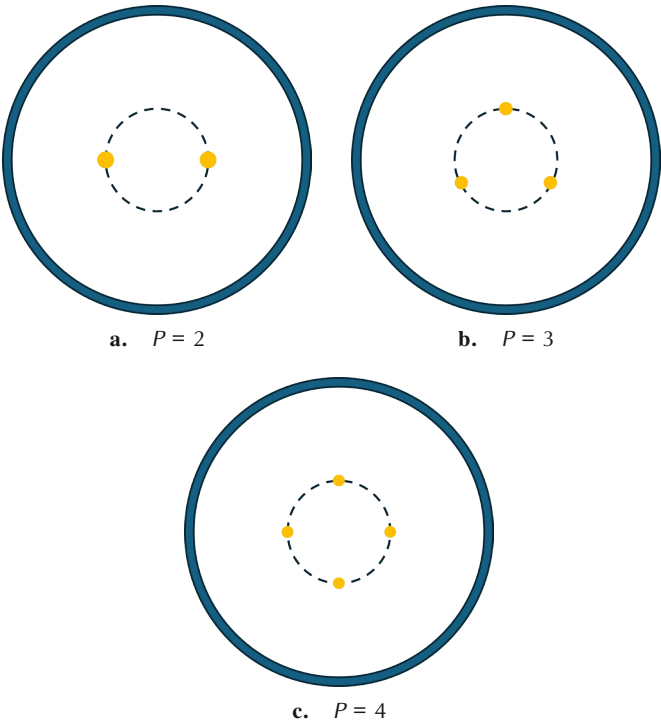


图3 不同炸药数量示意图
Fig.3 Diagram of different numbers of explosives

在实际响应过程中,圆环不同位置的压力及变形均不同。结合多点爆炸的特点,作用于壳体的冲击波可分为单个爆炸点形成和两个波系相互耦合形成。为了更好的对比不同条件下的载荷大小及结构变形,本研究选取爆炸点与圆环中心点连线方向记为 V 方向,这一方向首先受到单个波的作用;选取两爆炸点之间所夹对称轴方向记为 U 方向,这一方向首先受到耦合波的作用。研究中以这两个方向为主要观察方向,如图4所示。

1.2 材料模型

圆环材料采用* $\text{MAT_JOHNSON-COOK}^{[23]}$ 材料

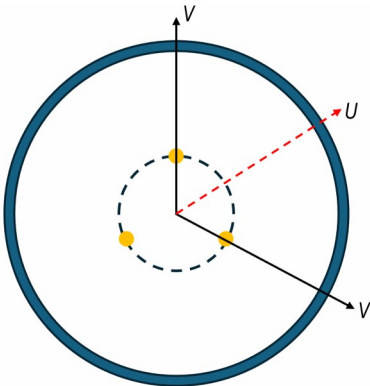


图4 主要观察方向
Fig.4 Typical viewing direction

模型进行描述,该模型可以同时考虑材料的应变硬化、应变率强化和热软化,相关参数如表2所示。

表2 钢材料参数^[23]
Table 2 Material parameters of steel^[23]

ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	G / GPa	ν	JC model				
			A / MPa	B / MPa	n	C	m
7.87	82.82	0.3	454	1962	0.752	0.1732	0.699

Note: ρ is density. G is shear modulus. A , B and C are constants, ν is the Poisson ratio.

TNT材料的本构模型采用* $\text{MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN}^{[24]}$,同时用* EOS_JWL 来描述其状态方程,相关参数如表3所示。

表3 TNT材料参数^[24]
Table 3 Material parameters of TNT^[24]

ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	D / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	P_{CJ} / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω
1.63	6930	21.0	371.2	3.231	4.15	0.95	0.35

Note: D is detonation velocity of TNT. P_{CJ} is Chapman-Jouguet pressure. A and B are constants. R_1 , R_2 and ω are dimensionless constant.

空气材料的状态方程使用关键字* $\text{EOS_LINEAR_POLYNOMIAL}^{[25]}$ 来定义,相关参数如表4所示。

表4 空气材料参数^[24]
Table 4 Material parameters of Air^[24]

ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	C_0-C_3, C_6	C_4	C_5	e / $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$
0.00129	0	0.4	0.4	2.5×10^5

Note: C_0-C_6 are dimensionless constants, e is energy per unit volume.

1.3 网格收敛性分析

计算中,TNT炸药采用* $\text{INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY}$ 关键字生成,无需单独划分网格。圆环的网格尺寸取 $0.4\text{ cm}\times0.45\text{ cm}$,环向网格数量为800,径向网格数量为5,网格总数为4000个。为保证计算结果的可靠性,对空气网格进行收敛性分析。空气网格平均尺寸分别取1,0.8,0.6,0.5,0.4,0.35 cm,取中心单点爆炸(即 $P1L0$ 工况)下紧贴内壁面处同一位置的空气压力时程图进行比较,结果如图5a所示。当网格小于0.5 cm时,其峰值压力基本不变,即计算所得压力值不再随着网格尺寸而变化,可以认为计算结果收敛。针对两冲击波的耦合,同样进行收敛性分析。网格平均尺寸分别取0.6,0.5,0.4,0.35,0.3 cm,以 $P2L0.4$ 工况进行计算,比较不同网

格尺寸下圆环中心点位置的压力峰值。结果(图 5b)表明当网格尺寸小于 0.35 cm 时,压力峰值计算结果基本不变,认为计算结果收敛。

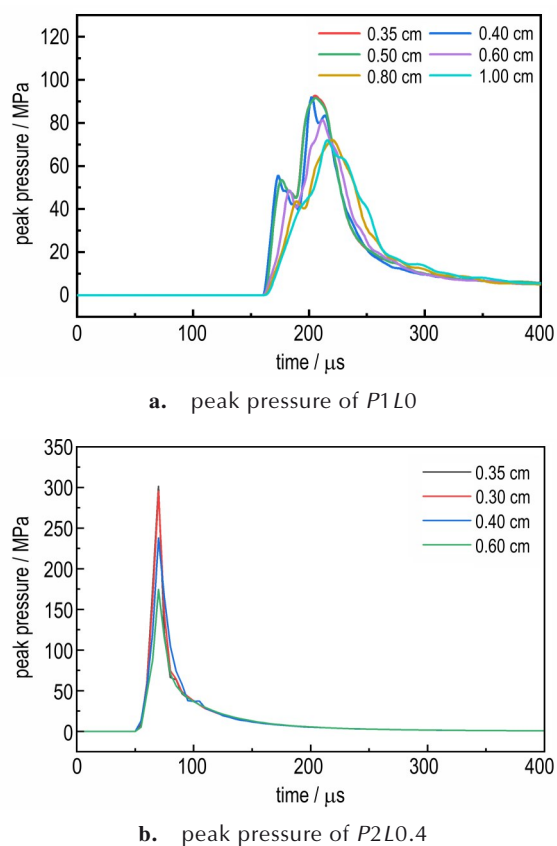


图 5 压力值随网格大小的变化

Fig.5 Variation of the pressure value with the mesh size

为兼顾计算效率与计算精度,本研究取空气网格平均尺寸为 0.35 cm,空气网格总数约 10.3 万个。

2 爆炸点位置对冲击波流场演化及压力特性的影响

为研究爆炸点位置对冲击波流场演化的影响规律,本研究针对两点爆炸工况分析流场的演化历程及圆环的结构响应进行分析,并在此基础上探讨爆炸点位置改变对冲击波流场特性的影响。

2.1 两点爆炸的冲击波流场演化历程

当多个爆炸点同时爆炸,产生的多个冲击波会在传播过程中相互碰撞、叠加,造成压力峰值升高和毁伤效应增强;当多点爆炸发生在密闭容器中,还会受到反射波的影响,形成复杂的耦合波系。当爆炸点位于圆环半径 1/2 处时,单个爆炸点产生的冲击波将在同一时刻到达圆环中心及圆环内壁,故针对 P2L0.5 工况,对两点爆炸情形下圆环内部冲击波传播过程及冲击波流场的演化情况进行分析。

冲击波的传播行为可以根据不同波系相互耦合的位置划分为两个阶段。第一阶段中,冲击波经过反射与耦合,在 U 方向对应的圆环内壁处发生汇聚,如图 6 所示;第二阶段中,冲击波的汇聚位置由 U 方向演变为 V 方向对应的圆环内壁,如图 7 所示。

第一阶段的冲击波流场演化历程如图 6 所示。初始时刻起爆后,两冲击波从爆炸点所在位置向外传

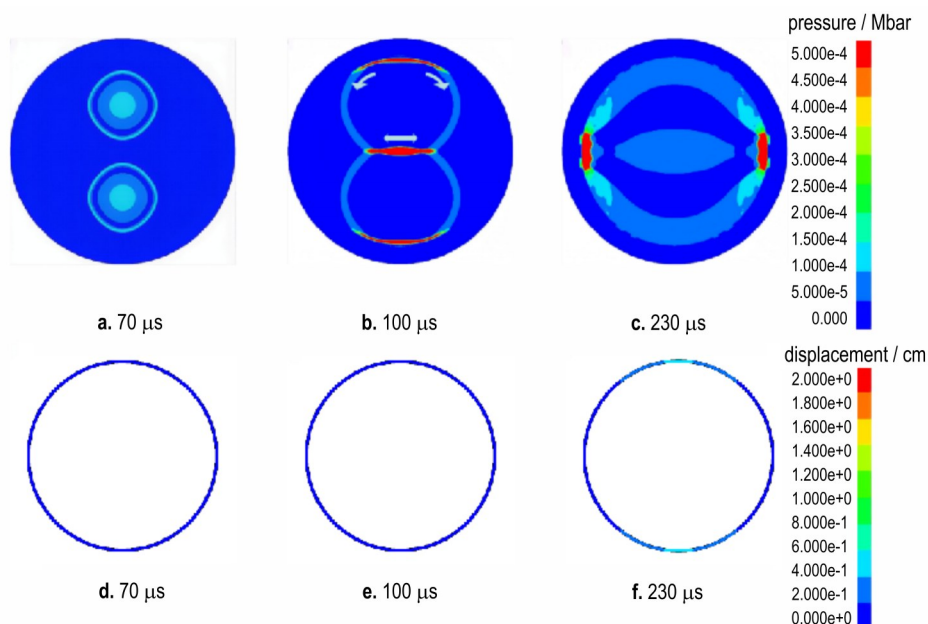


图 6 P2L0.5 流场演化第一阶段压力云图及圆环变形示意图

Fig.6 Pressure cloud map and deformation diagram of ring at the first stage of flow field evolution for configuration P2L0.5

播(图6a)。冲击波经过一段时间的传播,起爆后约100 μs 时在上下两个V方向分别与圆环内壁发生碰撞并反射,反射波沿圆环内壁向U方向对应的圆环内壁处传播;此外,两冲击波在圆环中心区域发生正碰撞并相互耦合,形成压力值较高的耦合波并沿U方向向外传播(图6b)。在第一阶段末尾(起爆后约230 μs),沿U方向传播的耦合波、沿圆环内壁传播的两反射波先后到达U方向所对应的圆环两侧内壁,多个波系之间相互耦合,使该处压力值升高,形成一个压力增强区域(图6c)。冲击波在U方向对应的圆环内壁处发生了汇聚,完成了流场第一阶段的演化。对于P2L0.5而言,冲击波传播过程中压力最大值即出现在起爆后230 μs 前后,圆环也会受到较大的载荷,在后续响应过程中在U方向上出现明显的形变。

图6d~f分别为70,100 μs 和230 μs 时刻圆环的变形情况。在冲击波传播的第一阶段中,圆环的形状基本保持不变。在图6f中,圆环在V方向出现小幅度位移,但此刻内部冲击波已经在U方向完成汇聚;V方向的位移是此前历程中冲击波传播至圆环V方向对应内壁(图6b)并对圆环产生作用的结果。

第二阶段的冲击波流场演化历程如图7所示。第二阶段开始后,如图7a所示,沿U方向传播的耦合波到达圆环内壁后被反射,经反射后仍沿U方向返回圆环中心;且经过多个波系之间的复杂相互作用,该耦合波的波面结构形态发生变化,压力值出现高-低-高的分层现象。在起爆后510 μs 前后如图7b所示,两侧

的波在圆环中心处相遇,在压力云图中呈现为一个上下两端凸起的高压力区域,并沿U、V两个方向向外扩展。其次,沿圆环内壁传播的反射波在U方向相遇后发生反射,仍然沿圆环内壁向V方向传播。在第二阶段末尾即起爆后约700 μs ,如图7c所示,沿V方向扩展的耦合波和沿圆环内壁传播的反射波在圆环V方向内壁处相遇,使该处压力值升高,形成第二阶段的压力增强区域。冲击波的汇聚位置从U方向演化为V方向对应的圆环内壁,完成了冲击波流场演化的第二阶段。但由于冲击波在空气中传播的衰减及耦合、碰撞等行为造成的能量损失,此时增强区域的压力峰值小于第一阶段。

图7d~f分别为350,510,700 μs 时刻圆环的变形情况。在冲击波传播的第二阶段中,圆环发生塑性变形,在U、V两个方向均出现径向位移,且U方向的位移大于V方向,圆环沿U方向伸长。沿U方向的伸长是第一阶段末尾冲击波在U方向对应的圆环内壁处汇聚的结果。

对于工况P2L0.5而言,前述的两个阶段组成了冲击波传播的一个完整周期。两点爆炸的冲击波在圆环内部不断进行周期性的反射与耦合,其在圆环内部形成的压力增强区域的位置也随之呈现周期性变化。如图8所示,在后续传播过程中,P2L0.5内部的压力增强区域的位置在圆环U、V两个方向的内壁附近交替变化,在800 μs 时刻压力增强区域位置为V方向内壁(图8a),在1200 μs 则变化为U方向内壁(图8b)。

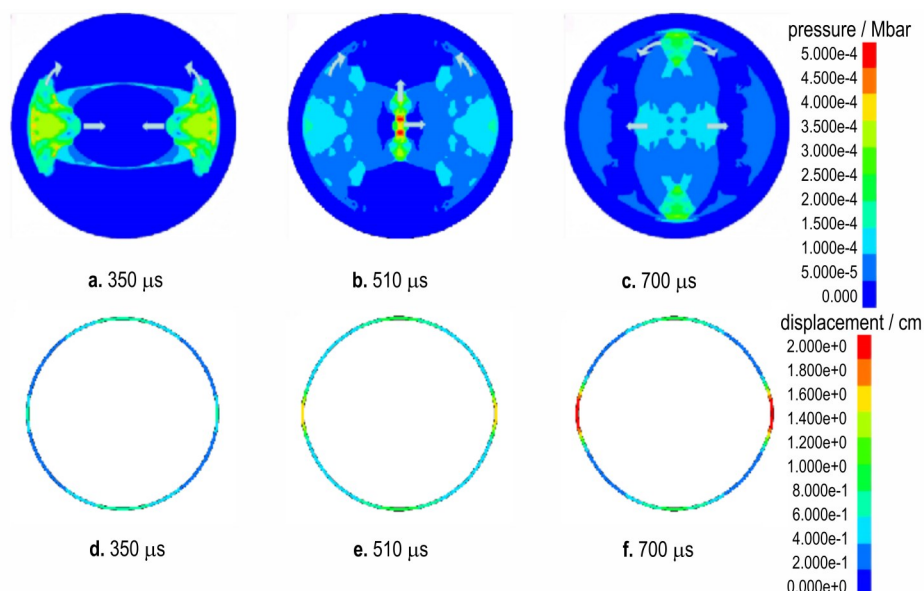


图7 P2L0.5流场演化第二阶段压力云图及圆环变形示意图

Fig.7 Pressure cloud map and deformation diagram of ring at the second stage of flow field evolution for configuration P2L0.5

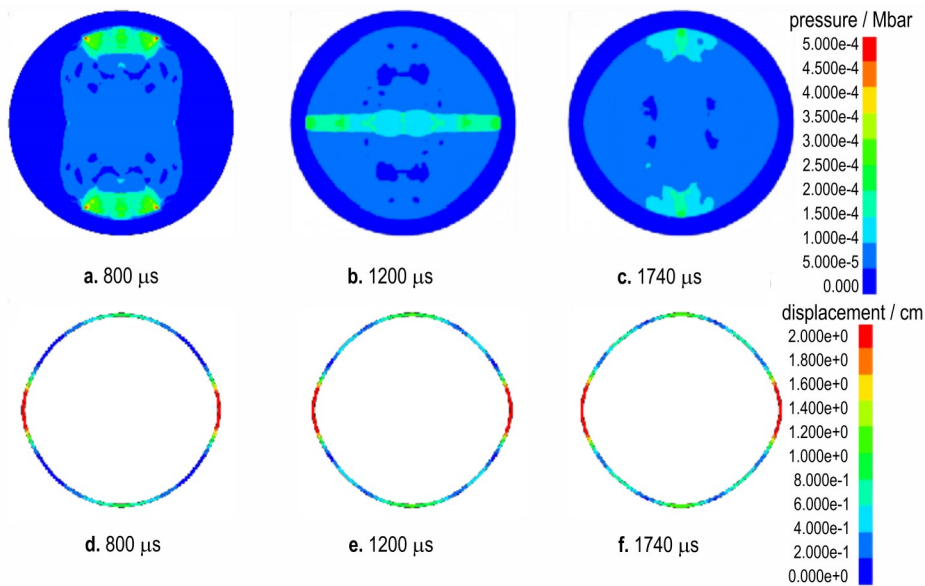


图8 P2L0.5 流场演化的后续历程
Fig.8 Subsequent flow field evolution for configuration P2L0.5

为了更好地观察结构的响应,图9给出了圆环在U、V方向上压力和位移的时程曲线。由图9可知,计算时长内圆环在U方向上的位移最大值约为2.7 cm,V方向上的位移最大值约为0.82 cm。U、V两个方向上,径向位移的增长均发生在首个冲击波峰值之后;V方向上冲击波峰值出现的时刻略早,圆环首先在V方向出现变形,随后U方向的径向位移才开始增长。根据压力时程曲线,后续周期内冲击波的汇聚导致压力升高,但圆环在相应位置的径向位移变化幅度很小。U方向上首次冲击波的压力大于V方向,圆环在U方向上的变形也大于V方向。这说明圆环的变形主要受到首次冲击波作用的影响;与首次冲击波作用相比,后续周期内的耦合冲击波对圆环变形产生的影响很小。

当爆炸点与圆环中心点的距离发生改变时,冲击波到达圆环中心和圆环内壁的传播时间会随距离发生相应改变,传播历程与冲击波流场的形态也会随之变化。选取爆炸点距离相差最大的P2L0.2与P2L0.8两种工况进行比较,如图10所示。当爆炸点更加靠近中心位置,如P2L0.2,两冲击波首先在中心点相遇并耦合,之后冲击波才会到达V方向(图10a);当爆炸点更加靠近圆环内壁,如P2L0.8,两冲击波则首先到达圆环V方向内壁并反射,一段时间后才会在圆环中心处相遇(图10b)。对于两点爆炸的不同工况,冲击波传播历程的改变会使得压力增强区域的形状随之改变,但压力增强区域的位置始终遵循着在U、V方向之间交替变化的规律。

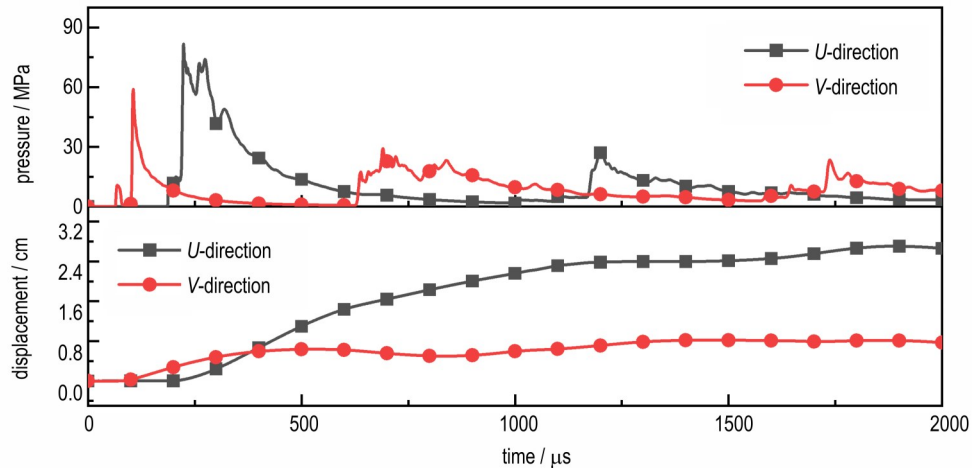


图9 P2L0.5 圆环在U、V方向的压力和径向位移
Fig.9 Pressure and radial displacement of the P2L0.5 ring in U and V directions

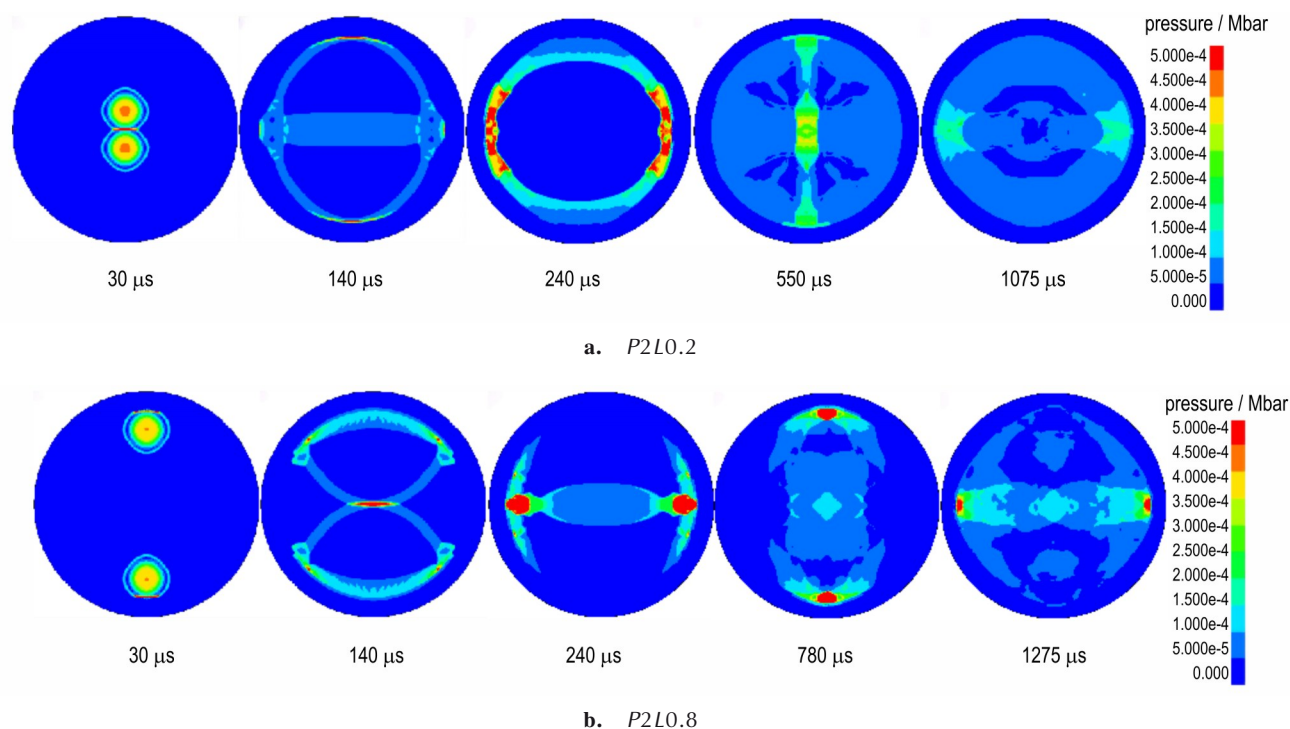


图 10 $P2L0.2$ 和 $P2L0.8$ 流场演化历程的差异

Fig. 10 Differences in the flow field evolution between configurations $P2L0.2$ and $P2L0.8$

2.2 流场特征位置的壓力特性

结合两点爆炸的流场演化历程,流场的特征位置为冲击波发生汇聚的位置,也即 U 、 V 两个方向所对应的圆环内壁附近。本研究将结合两点爆炸的不同工况,研究爆炸点间距(即 L/R 的取值)对 U 、 V 方向特征位置处压力特性的影响。

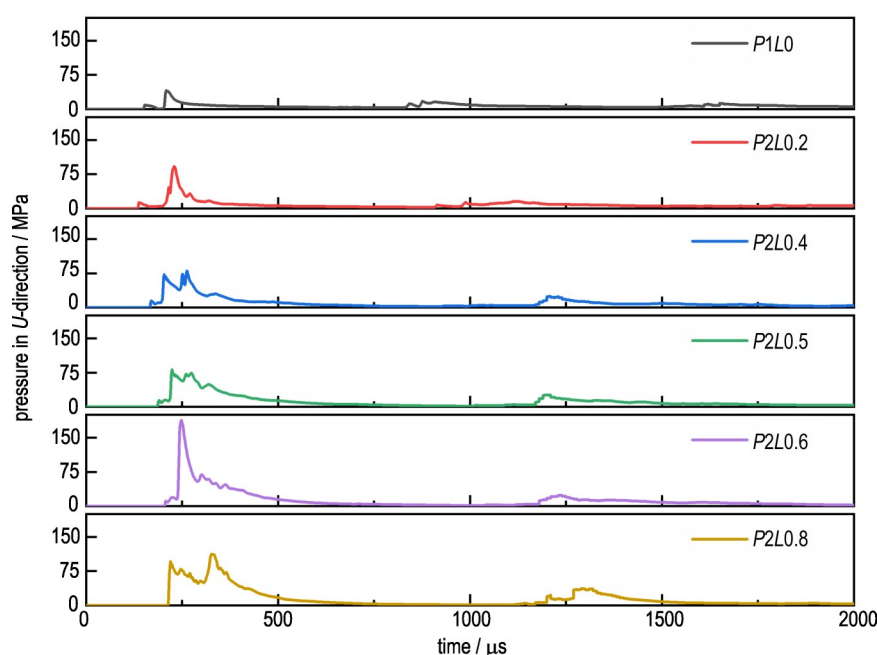
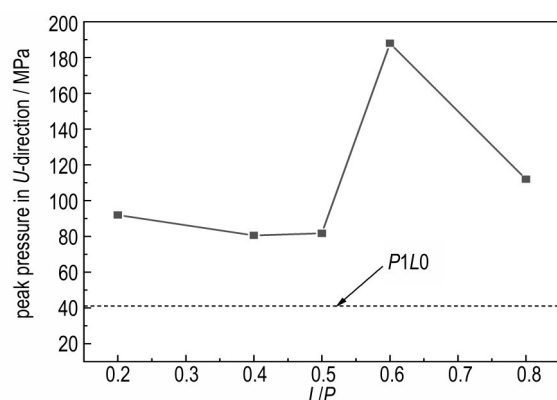
2.2.1 U 方向压力特征

受到冲击波传播行为的影响,容器壁受到的载荷也呈现出与中心单点爆炸不同的特征,主要表现在载荷的非均匀性上。对于两点爆炸工况而言,结合对容器内流场演化历程的分析,两点同时爆炸的压力耦合增强区域会在 U 方向和 V 方向交替变化,考虑到冲击波的不断衰减,且冲击波在后续传播周期内作用于圆环的载荷影响较小,此处重点关注装药位置对第一周期内耦合冲击波压力峰值的影响。

为研究容器内壁附近特征位置的壓力分布情况并分离入射波和反射波,在 U 方向圆环内壁附近取距离环心 55 cm 的一点为特征点,重点关注特征点处反射波的壓力值。不同工况下特征点处的壓力时程曲线如图 11 所示。由图 11 可知,中心单点爆炸工况出现一低一高两个峰值,出现较早、壓力較低的峰值是入射波,而后续壓力較高的峰值是经圆环内

壁反射增强后的反射波。两点爆炸的冲击波在圆环 U 方向特征位置发生汇聚,造成特征点处的壓力峰值大于中心单点爆炸工况,且表现出了显著的多峰效应。 $P2L0.2$ 工况中,由于两爆炸点之间距离相对较小,多峰效应不如其他工况显著,但壓力得到增强,反射波壓力峰值达到 91 MPa,与单点爆炸相比壓力峰值提升了约 2.24 倍。随着 L 的增加, U 方向特征点处的壓力峰值和持续时间也增加。值得关注的是 $P2L0.6$ 工况中,壓力时程曲线出现一个较高的峰值,壓力值达到 188 MPa。这一峰值的形成与冲击波的传播行为有关。

不同工况中 U 方向观测点处反射波壓力峰值的大小如图 12 所示, $P2L0.6$ 工况的壓力远高于其它工况,这是由于该工况爆炸点的初始位置较为特殊,影响了冲击波的传播历程。 $P2L0.6$ 工况时程曲线中单峰值的形成过程如图 13 所示,自 V 方向沿圆环内壁向 U 方向汇聚的反射波系与沿 U 方向向外传播的耦合波几乎同时到达圆环的左右两端,造成多个波系在观测点附近同时发生汇聚,使得特征点处的壓力时程曲线表现为单峰值,且该峰值为所有工况中壓力的最大值。与中心单点爆炸相比, $P2L0.6$ 工况下 U 方向的壓力峰值提升约 4.58 倍。

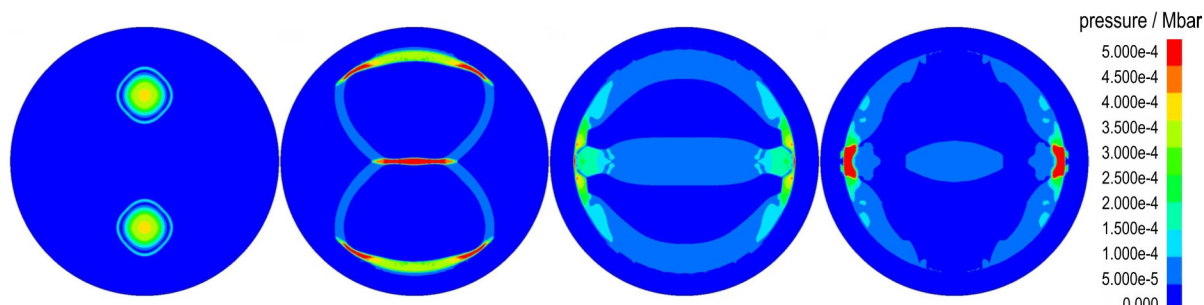
图 11 不同工况 U 方向特征点压力时程曲线Fig.11 Pressure-time histories at the feature point along the U -direction for different configurations图 12 不同工况 U 方向特征点压力峰值Fig.12 Peak pressure at the feature point along the U -direction for different configurations

2.2.2 V 方向压力特征

为了研究 V 方向的压力分布特征,在 V 轴上同样取距离环心 55 cm 的点为特征点。不同工况下特征点

处的压力时程曲线及前两次反射的压力峰值分别如图 14、15 所示。首次反射压力值的大小受到药量和传播距离的影响,随着爆炸点与环心距离的增加,特征点处首次反射的压力峰值不断增加。第二次反射的压力峰值则受到冲击波传播历程及耦合作用的影响。

比较图 11、图 14, V 方向的压力时程曲线呈现出与 U 方向不同的特征。爆炸点处于不同位置时, V 方向压力时程曲线的首次反射波形均保持一致;第二次反射才表现出多个波系耦合汇聚造成的多峰效应。将 V 方向的第一次反射峰值记为 V_{1st} , 第二次反射峰值记为 V_{2nd} , 如图 14 所示。这是因为 V 方向的首个峰值都是单个爆炸点产生的冲击波传播至 V 方向内壁并反射形成的, 第二个峰值则是多个冲击波在 V 方向汇聚形成的。随着爆炸点与环心距离的增加, V 方向内壁处的首次反射压力峰值升高, 峰值对应时刻提前。

图 13 $P2L0.6$ 压力单峰值形成示意图Fig.13 Forming processe of the single peak pressure value for configuration $P2L0.6$

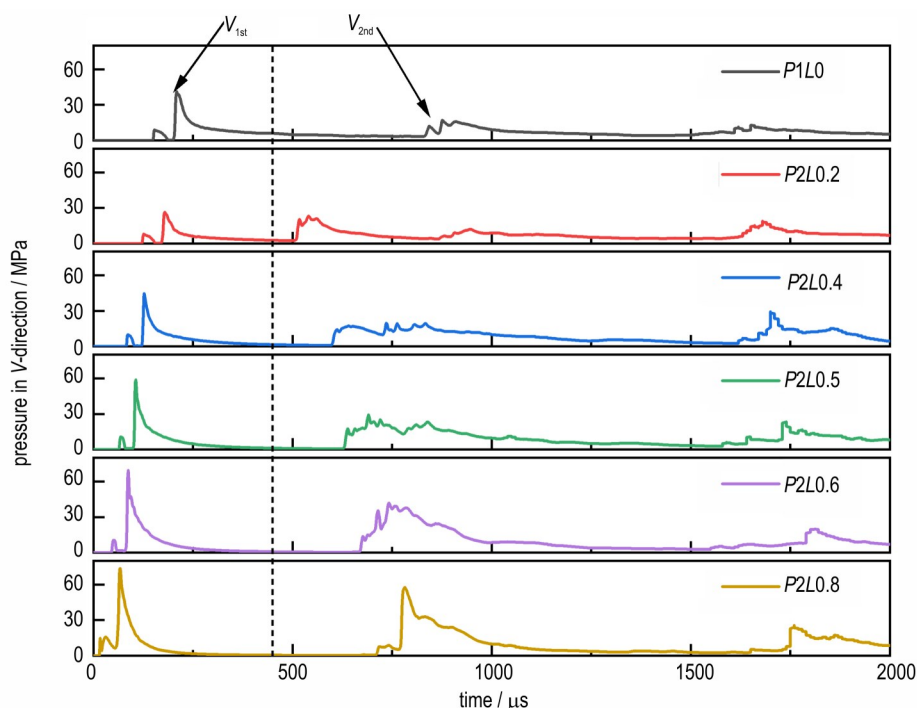


图 14 不同工况 V 方向特征点压力时程曲线

Fig. 14 Pressure-time histories at the feature point along the V-direction for different configurations

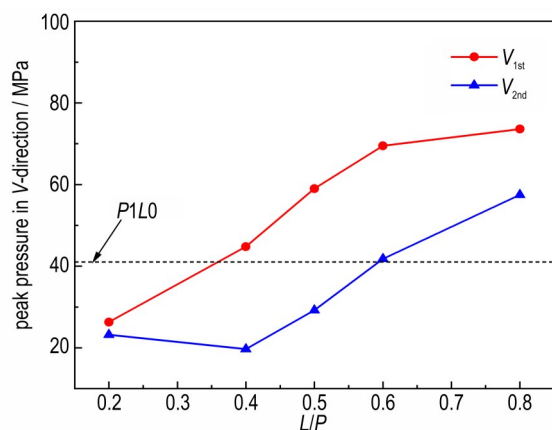


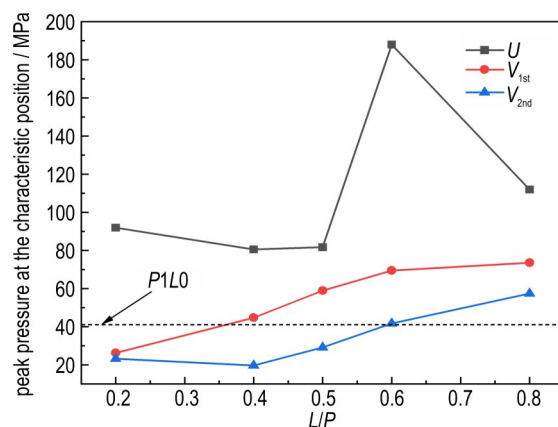
图 15 不同工况 V 方向特征点压力峰值

Fig. 15 Peak pressure at the feature point along the V-direction for different configurations

与中心单点爆炸相比,两点爆炸在 V 方向第二次反射峰值 (V_{2nd}) 波形出现较大的差异,这种差异同样来源于冲击波的传播行为。对于中心单点爆炸而言,冲击波自圆环中心向外传播,到达圆环内壁后反射回中心点,随后再次由中心点向内壁传播,在冲击波在这一历程中不断衰减,曲线中的 V_{2nd} 是冲击波第二次到达圆环内壁并反射造成的,压力远小于首个峰值。对于两点爆炸而言,压力时程曲线的第一个峰值是在单个冲击波作用下形成的,第二个峰值则是多个波系在圆环上下端发生汇聚而形成的,因而尽管冲击波经过

了一段时间的衰减,第二个周期的压力峰值仍然较高,且作用时间较长。多个波系耦合作用导致的多峰效应也体现在第二个峰值中。图 15 给出了两点爆炸工况下 V_{1st} 和 V_{2nd} 随爆炸点位置的变化趋势。 V_{1st} 随着爆炸点与圆环中心距离的增加而增加;但 V_{2nd} 受到流场演化历程的影响,由多个波系耦合形成,其峰值与 L/R 之间不再满足单调变化的数量关系。

对比两处特征位置的压力值,如图 16 所示,图中虚线为中心单点爆炸工况下 U 、 V 方向的首个压力峰值。中心单点爆炸造成的压力在容器内均匀分布, U 、

图 16 U 、 V 两方向特征点压力峰值对比Fig. 16 Comparison of peak pressures at the feature point between the U -direction and V -directions

V 方向的压力峰值相等,而两点爆炸由于冲击波的耦合作用,圆环内壁附近压力分布表现出明显的方向性,且 U 方向的压力值大于 V 方向。在 U 方向上,两点爆炸的压力值均大于中心单点爆炸,压力峰值与中心单点爆炸相比提升约2~2.7倍;在 $P2L0.6$ 这一特殊工况下,压力峰值提升约4.58倍。

2.2.3 圆环在 U 、 V 方向的变形情况

取 U 轴和 V 轴与圆环厚度中线的交点为观测点。圆环在 U 、 V 方向上的径向位移如图17所示。在中心单点爆炸下,圆环在 U 、 V 方向上的径向位移相等,呈现较为规律的振动现象。而在两点爆炸中,由于首个周期内压力在 U 方向上得到显著增强,圆环在 U 方向

上的位移与中心单点爆炸相比也出现了显著的增长(图17a)。中心单点爆炸工况下,计算时长内 U 方向的径向位移最大值约为0.7cm,但两点爆炸工况下,无论 L 取何值,圆环在 U 方向上的径向位移最大值均在2.7~3cm范围内。在 V 方向上,圆环的径向位移则随着 L/R 的增加而增大(图17b)。结合图16中不同工况在 U 、 V 方向的压力峰值与图17中圆环的径向位移,可以发现尽管 $P2L0.6$ 工况在 U 方向造成的压力值很高,但该工况下圆环在 U 方向上的径向位移与其他工况差别不大。这说明多波系耦合造成的压力值最高并不意味着该工况下圆环的变形最大,不同方向的冲击波汇聚虽然使压力值升高,但并未对圆环的变形产生影响。

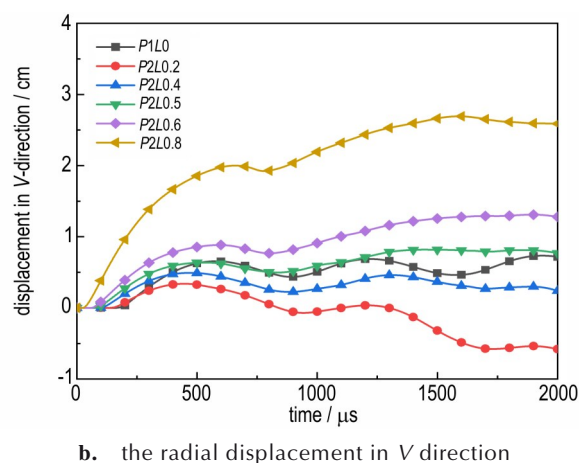
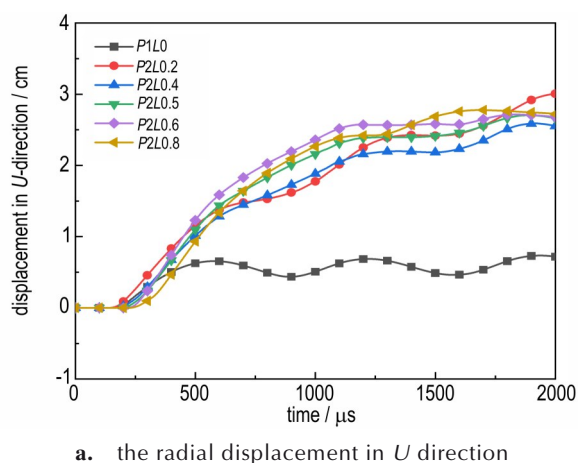


图17 圆环在 U 、 V 方向的径向位移

Fig.17 Radial displacement of the ring in U and V directions

同样选取 U 轴和 V 轴与圆环厚度中线的交点为观测点,观察圆环在相应位置的塑性应变。结合圆环在 U 、 V 方向对应位置的塑性应变最大值(图18), U 方向对应特征位置的塑性应变远大于 V 方向。中心单点爆炸工况下,圆环各处的塑性应变最大值约为0.011,在

U 方向上,两点爆炸各工况的应变均大于该值,而 V 方向上,各工况的塑性应变值均小于该值。值得注意的是,在 U 方向上,塑性应变的最大值在 $L=0.6R$ 处取得,说明圆环在该种工况下受损伤程度较大,这与 $P2L0.6$ 工况取得 U 方向压力的最高值相符合。

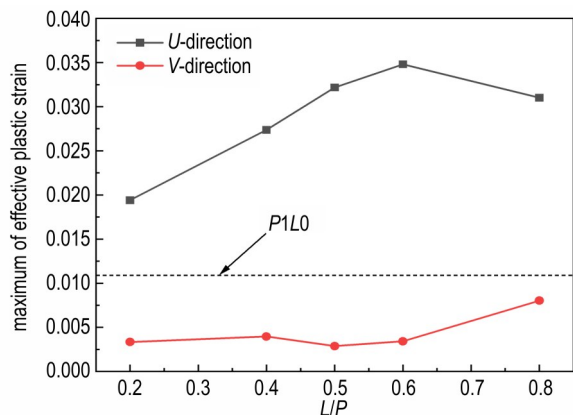


图18 U 、 V 方向的有效塑性应变最大值

Fig.18 Maximum effective plastic strain in U and V directions

结合对两点爆炸流场演化历程及特征位置压力变化的分析,可知容器内部的多点爆炸会造成压力增强区域,其位置在 U 、 V 方向之间交替变化;压力的增强效应在 U 方向上体现得更加明显,两点爆炸与单点爆炸相比首个周期的压力峰值提升2~2.7倍。压力峰值的大小受冲击波传播历程的影响很大,在 $P2L0.6$ 这一特殊工况下, U 方向圆环内壁附近的压力取得所有工况的最大值,为等药量中心单点爆炸的4.58倍;相应的,圆环在这一工况下的有效塑性应变也最大。 L/R 越大,圆环在 V 方向上的位移越大;但圆环在 U 方向上的径向位移与 L/R 无关,无论 L/R 取何值,计算时长内

U 方向的径向位移均在2.7~3 cm左右。

3 爆炸点数量对流场演化历程及压力特性的影响

为了研究爆炸点数量对流场演化历程及压力特性的影响规律,本研究针对3、4、5和6点爆炸的工况进行了数值模拟,研究爆炸点数量增加对流场演化和特征位置压力造成的影响。

3.1 多点爆炸的流场演化历程

图19a~c分别给出了爆炸点数量为3~5时,圆环内部冲击波流场的演化过程及冲击波耦合形成压力增强区域的位置。当爆炸点数量增加,相邻爆炸点之间的直线距离缩短,冲击波总是在到达圆环中心点之前

就在 U 轴上发生两两之间的耦合。沿 U 轴传播的耦合波系一方面在环心处汇聚,形成一个高压区域;另一方面向圆环内壁传播,在内壁附近处形成多个压力增强区域。但中心点处的高压力区域在后续传播中逐渐衰减,并不能直接作用于圆环。内壁附近处压力增强区域的数量与爆炸点数量相等,位置则表现出与两点爆炸相似的变化规律,随着流场的演化进程在 U 、 V 两个方向对应的圆环内壁附近交替出现。

图20a~c给出了对应工况下圆环的变形情况。 $P2L0.5$ 工况中,圆环在 U 方向发生明显的形变(图8f);但爆炸点数量增加后,圆环的形变不如两点爆炸中明显,如图20所示。圆环在 U 轴的径向位移大于 V 轴,且随着爆炸点数量由3增加至5,圆环在 U 轴的径向位移逐渐减小。

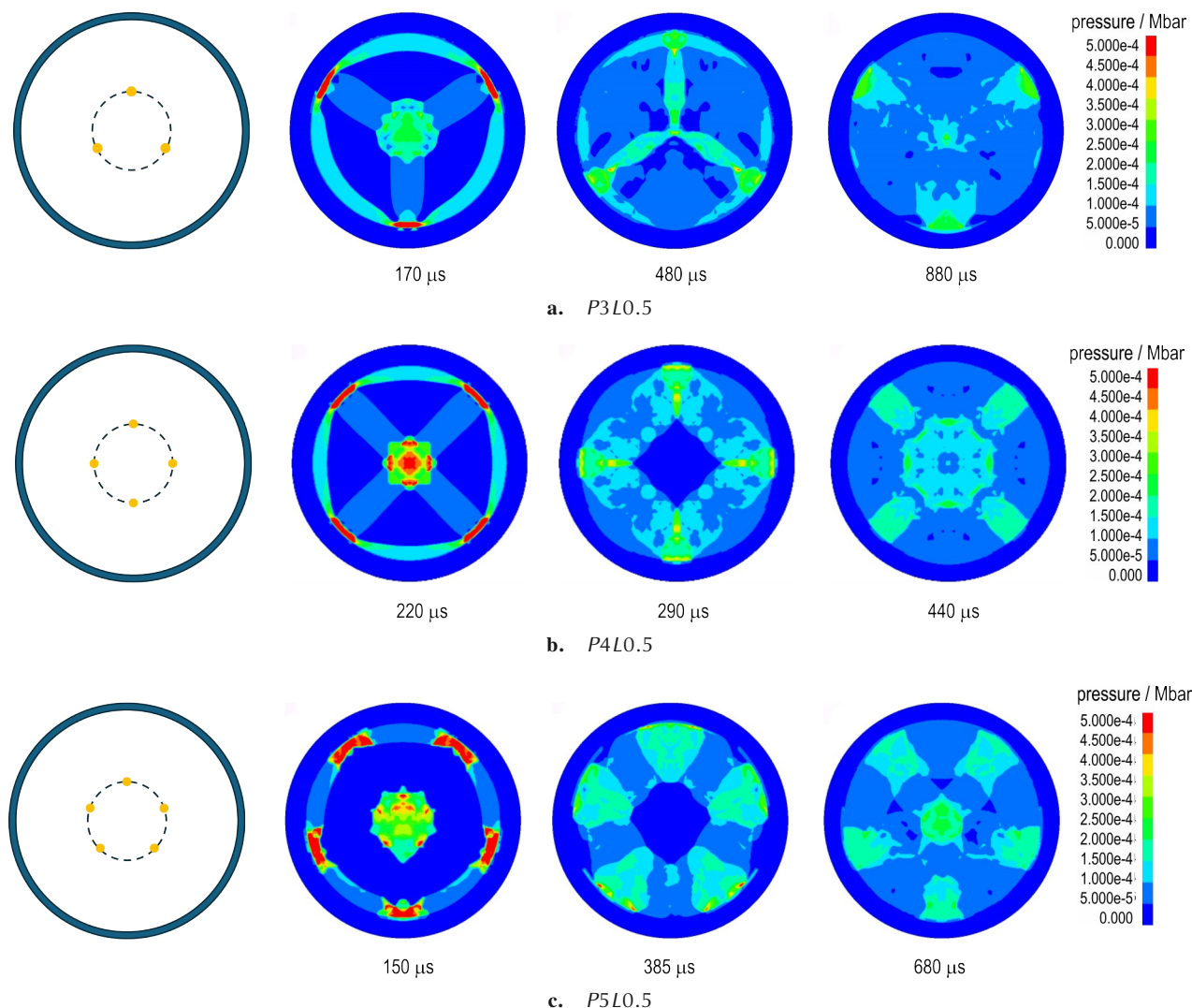


图19 不同爆炸点数量下流场演化历程的差异

Fig.19 Differences in the flow field evolution for configurations with varying explosive point numbers

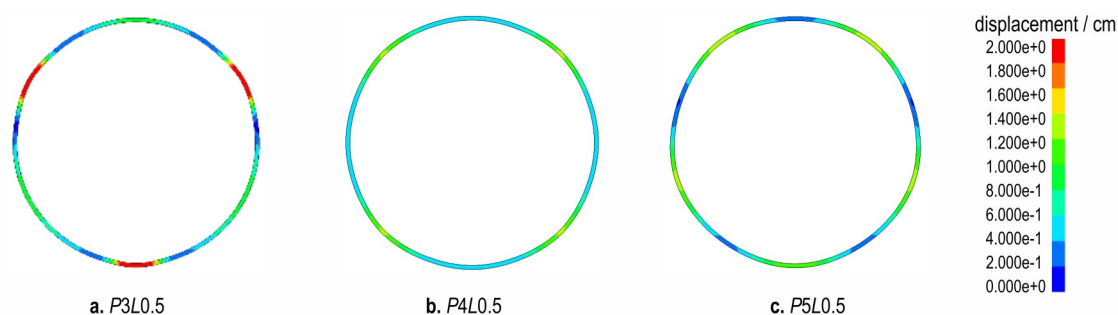


图20 不同爆炸点数量下圆环的最终形态

Fig. 20 Typical deformation diagrams of the ring subjected to detonations with varying number of explosive points

3.2 流场特征位置的壓力特性

3.2.1 U方向壓力特征

为了研究爆炸点数量和位置对爆炸冲击波流场的影响规律,图21给出了不同工况下U方向内壁附近特征位置处的压力峰值,特征点与圆环中心的距离与前述各工况保持一致,为55 cm。

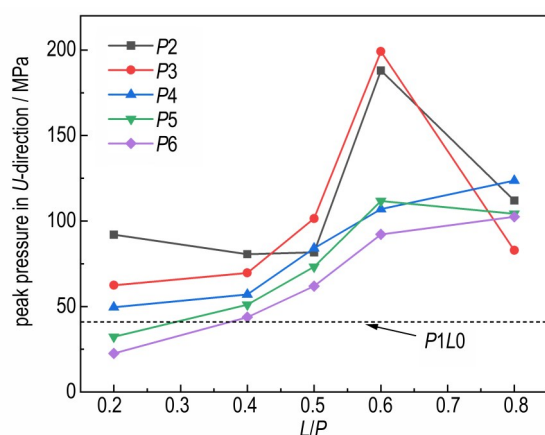


图21 多点爆炸在U轴方向的特征点压力峰值

Fig. 21 Peak pressure at the feature point along the U-direction for all configurations

由图21可知,爆炸点数量为2、3、5时,均在 $L=0.6R$ 处取得压力的最大值;当爆炸点数为4和6时,U方向观测点处的峰值压力与 L 呈正相关,在 $L=0.8R$ 处取得最大值。对于不同的爆炸点数量,压力峰值随 L 变化的规律存在差异,这是由于爆炸点数量的改变使得冲击波流场的演化历程发生改变。总药量不变时爆炸点数量增加,单个爆炸点的药量减少,从而使初始冲击波的压力值降低。在 L 小于 $0.5R$ 时,沿壁面传播的反射波影响较小,U方向压力峰值随爆炸点数量增加而减小;当 L 大于等于 $0.5R$ 时,反射波的影响增大,观测点处的压力峰值涉及多个波系的耦合汇聚,即便爆炸点数量增加,单个爆炸点炸药质量减小,仍然可能

受到冲击波传播历程的影响形成较高的压力峰值,如 $L=0.8R$ 时U方向压力最高值在爆炸点数量为4时取得。

3.2.2 V方向壓力特征

与两点爆炸类似,在V方向上圆环首先会受到单个冲击波的作用,之后才会受到多个冲击波叠加汇聚的作用。为了观察不同工况下V方向上内壁附近的压力分布情况,图22给出了不同工况下V方向特征点处的前两次反射波压力峰值 V_{1st} 和 V_{2nd} 。特征点与圆环中心距离与前述各工况保持一致,为55 cm。

由图22a可知,除去P5和P6以外,当爆炸点与圆环中心点距离 L 一定时, V_{1st} 随爆炸点数量的增加而减小;在爆炸点数量 P 一定时, V_{1st} 随 L 的增加而增大。这符合冲击波传播的一般规律,爆炸点数量增加,单个爆炸点药量减少,则压力值降低;爆炸点数量不变,传播距离缩短,则压力值增加。由图22b可知, V_{2nd} 与爆炸点位置、数量的关系较为复杂,难以用单调变化进行概括。这同样是流场演化历程受到初始条件影响,冲击波传播汇聚行为出现较大改变的结果。 V_{2nd} 由多个波系耦合形成,爆炸点数量改变后流场演化历程不具备相似性,因而压力值没有表现出随 L 单调变化的趋势。

P5和P6工况的 V_{1st} 之所以出现反常,是受到爆炸点位置的影响。 P 取5、6时相邻的U轴与V轴的夹角分别为 36° 和 30° ,夹角较小;在 L 小于 $0.5R$ 时爆炸点距离圆环内壁较远,U方向上的耦合波系在传播历程中向外扩散,这导致当V方向上的单个冲击波到达圆环内壁并反射回观测点时,U方向上的耦合波系也在同一时刻经过观测点,与V方向的单波混杂在一起,如图23所示。提取到的 V_{1st} 实际上是多个波系叠加后的峰值,因而这两种工况的 V_{1st} 出现异常增高。

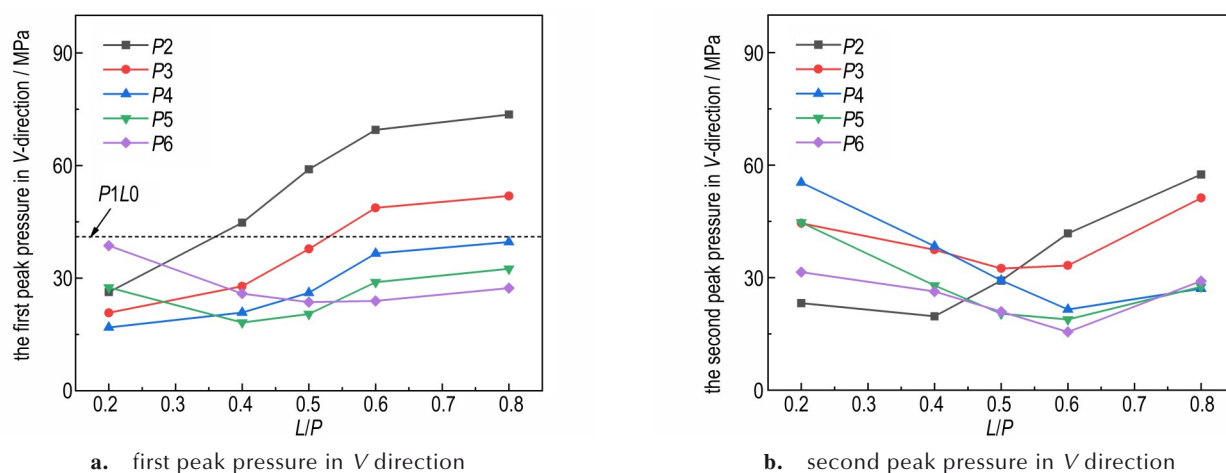
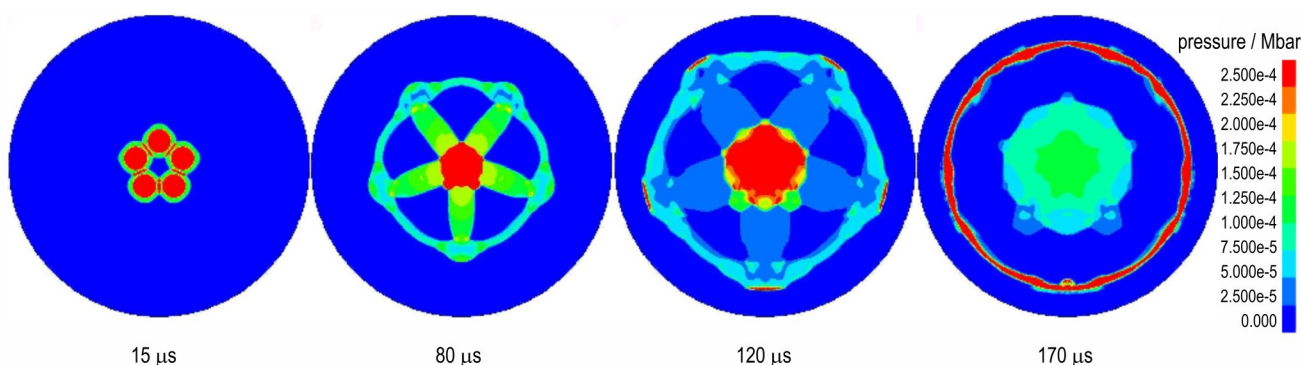


图 22 多点爆炸在 V 轴方向的特征点压力峰值

Fig.22 Peak pressure at the feature point along the V-direction for all configurations

图 23 $P5L0.2$ 中 V_{1st} 叠加示意图Fig.23 Superimposed schematic diagram of V_{1st} in $P5L0.2$

3.2.3 圆环在 U、V 方向的变形情况

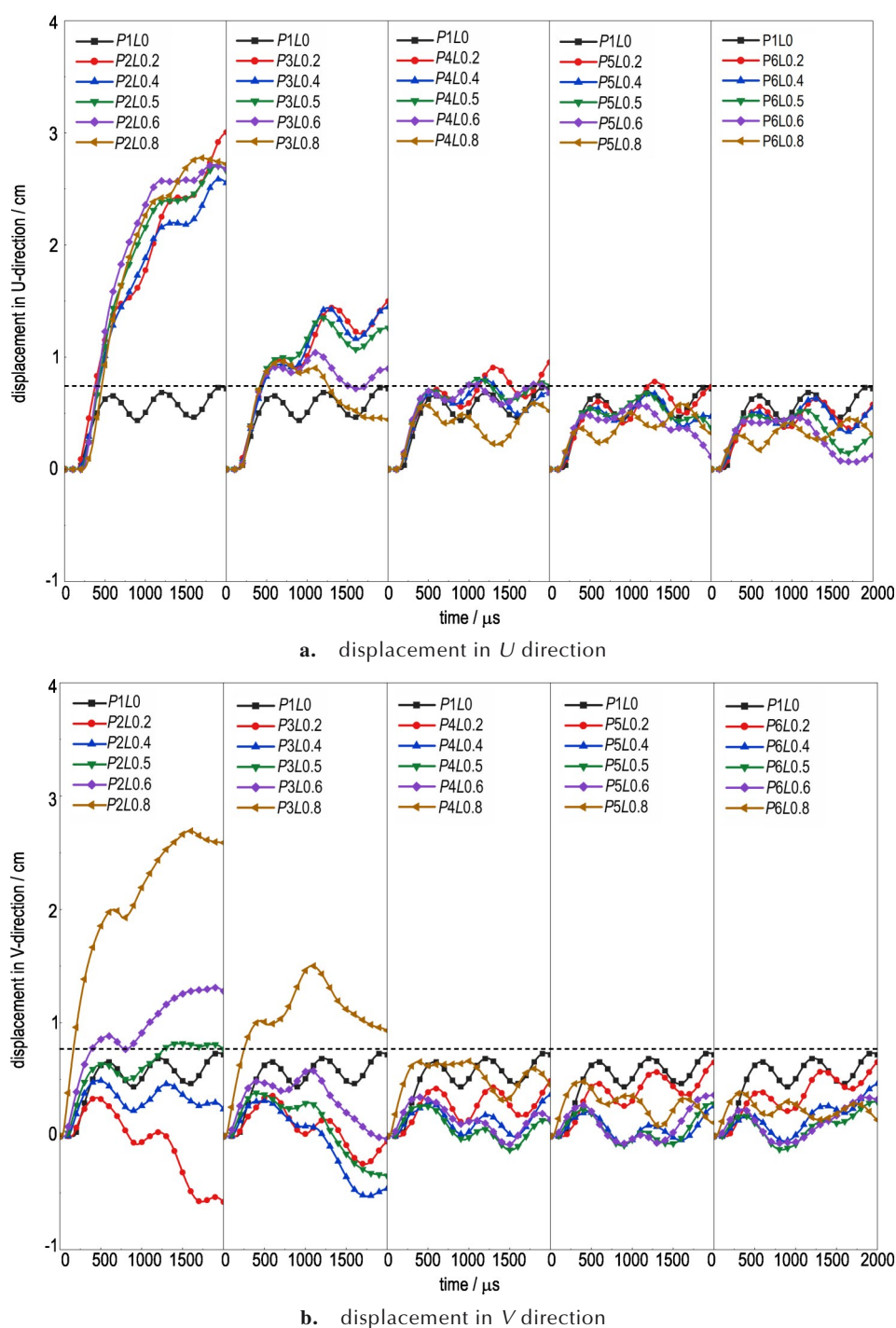
圆环在 U、V 方向的变形情况同样通过圆环在 U、V 方向的径向位移来描述。取圆环厚度中线上的点为观测点,不同工况下,圆环在 U、V 方向的位移时程曲线分别如图 24a~b 所示,图中横虚线的纵坐标为 0.73 cm,对应中心单点爆炸工况下计算时长内圆环径向位移的最大值。

由图 24a,两点爆炸即 P 取 2 的五种工况下,圆环在 U 方向上的径向位移最大值约为 3 cm,与中心单点爆炸相比显著增加,且受爆炸点位置的影响很小。当爆炸点数量增加到 3,不同工况下 U 方向径向位移最大值约为 1.58 cm,仍然大于中心单点爆炸的工况,但与两点爆炸相比,位移显著降低。此外,爆炸点数量增加到 3 后,圆环在 U 方向的径向位移受到爆炸点位置即 L 取值的影响。在 P 取 3, L 分别取 0.2R、0.4R、0.5R 的三种工况中,圆环 U 方向的位移时程曲线几乎一致;而在 L 取 0.6R 和 0.8R 的两种工况中,圆环 U 方向的径向位移均在 1000 μs 后迅速减小。随着爆炸点数

量进一步增加,圆环在 U 方向上的径向位移最大值逐渐减小, P 取 6 时无论 L 取何值,圆环的位移均小于中心单点爆炸,表明多点爆炸造成的耦合波系对圆环的变形不再产生增益效果。

圆环在 V 方向上的径向位移如图 24b 所示。爆炸点数量取 2 和 3 时,圆环 V 方向径向位移的最大值均在 L 取 0.8R 的工况中取得。在所有的 25 种工况中,只有 $P2L0.8$ 、 $P2L0.6$ 、 $P2L0.5$ 和 $P3L0.8$ 四种工况下 V 方向的径向位移超过了中心单点爆炸,其余工况中 V 方向的径向位移均小于中心单点爆炸。

结合对多点爆炸中特征位置压力变化及圆环变形情况的分析,爆炸点数量取 2 和 3 时,冲击波在 U 方向的耦合汇聚对圆环在 U 方向上的变形有增益效果,圆环 U 方向上的径向位移大于中心单点爆炸;爆炸点数量增加至 5、6 之后,冲击波的耦合对圆环的变形几乎不再产生增益, P 取 6 时圆环的径向位移甚至小于中心单点爆炸。在所有工况中,爆炸点数量取 2 时圆环产生的变形最大。

图 24 不同爆炸点数量下圆环 U 、 V 方向的位移Fig.24 Displacement of ring in the U and V directions under different numbers of explosion points

4 结论

本研究通过数值模拟研究了圆环内多点爆炸的冲击波流场特性,在此基础上,研究了爆炸点数量和位置对流场特性及结构弹塑性响应的影响。具体结论如下:

(1)壳体内部多点爆炸的冲击波流场演化具有周期性,冲击波发生耦合汇聚的位置在 U 方向(两相邻爆炸点连线的垂直平分线方向)和 V 方向(爆炸点与圆环中心连线方向)之间交替变化;其中 U 方向的耦合波对圆环变形的作用更为显著。

(2)当爆炸点距圆环中心点距离 L 小于 $0.5R$ 时,

同一距离下圆环 U 方向内壁附近的压力峰值随着爆炸点数量 P 的增加而减小。在两点爆炸 ($P=2$) 时, U 方向特征点处的压力峰值相较于中心单点爆炸显著提高, 在 L 取 $0.2R$ 、 $0.4R$ 、 $0.5R$ 、 $0.8R$ 的不同工况下, 压力提升倍数约在 2~2.7 倍之间。特别地, 当 $L=0.6R$ 时, 压力提升倍数达到最大值 4.58。

(3) 爆炸点数量取 2 和 3 时, 冲击波耦合对圆环在 U 方向上的变形存在增强效果, 增加至 5、6 之后, 冲击波的耦合对圆环的变形几乎不再产生增益。计算时长内, 爆炸点数量为 2、 L 在 $0.2\sim 0.8R$ 范围内时, 圆环在 U 方向的径向位移均在 $2.7\sim 3$ cm 范围内, 与中心单点爆炸相比提升约 3.86~4.28 倍。在保持炸药总质量不变的前提下, 两点爆炸工况造成的圆环结构变形最为显著。

致谢:感谢化工材料研究所的张锐、胡俊华在本文写作中给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] ZHENG Jin-yang, DENG Gui-de, CHEN Yong-jun, et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(5): 616-622.
- [2] 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 Jing-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.
- [3] 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*, 2024, 32(9): 986-1008.
- [4] 张亚军, 张梦萍, 徐胜利, 等. 爆炸容器内冲击波系演化及壳体响应的数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2003 (04): 331-336.
ZHANG Ya-jun, ZHANG Meng-ping, XU Sheng-li, et al. Numerical investigation on blast wave propagation and dynamic response of an explosion vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003 (04): 331-336.
- [5] DUFFEY T A, RODRIGUEZ E A, ROMERO C. Detonation-induced Dynamic Pressure Loading in Containment Vessels[R]. Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-0741, 2003.
- [6] 刘文祥, 谭书舜, 景吉勇, 等. 球形爆炸容器的内部载荷和响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 594-600.
LIU Wen-xiang, TAN Shu-shun, JING Ji-yong, et al. Internal loads and structure responses of spherical explosive vessel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 594-600.
- [7] LIU Xin, GU Wen-bin, LIU Jian-qing, et al. Dynamic response of cylindrical explosion containment vessels subjected to internal blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 135: 734-743.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] GOODIER J N, MCIVOR I K. The elastic cylindrical shell under nearly uniform radial impulse [J]. *ASME J Appl Mech* 1964, 31(2): 259-66.
- [11] LI Qi-ming, DONG Qi, ZHENG Jin-yang. Strain growth of the in-plane response in an elastic cylindrical shell [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(10): 1130-1153.
- [12] DONG Qi, LI Qi-ming, ZHENG Jin-yang. Further study on counter-intuitive response of single-degree-of-freedom structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38 (5) : 305-308.
- [13] 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.
- [14] PHILLIPS J S, BRATTON J L. Misers Bluff Phase I: Ground Shock Analysis of the Multiple Burst Experiments [R]. AD-A-088510, Defense Nuclear Agency, 1978.
- [15] BAI Fan, LIU Yan, YAN Jun-bo, et al. Study on the characteristics of blast loads due to two simultaneous detonated charges in real air [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2022, 146: 104108.
- [16] QIU Shi, ELIASSEN V. Interaction and coalescence of multiple simultaneous and non-simultaneous blast waves [J]. *Shock Waves*, 2016, 26: 287-297.
- [17] WANG Shu-you, QIU Jiu-lu, WANG Ya-wei, et al. Study on the factors influencing the interaction and coalescence of shock waves from multiple explosion sources in free field [J]. *Shock Waves*, 2023, 33(1): 51-60.
- [18] AMIR Z, ALEX R, BRIAN U. Enhancement of blast wave parameters due to shock focusing from multiple simultaneously detonated charges [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2021, 12(4): 541-576.
- [19] 胡宏伟, 宋浦, 郭炜, 等. 地面爆炸冲击波的相互作用[J]. 高压物理学报, 2014, 28(3): 353-357.
HU Hong-wei, SONG Pu, GUO Wei, et al. Interaction of shock waves in ground burst [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(3): 353-357.
- [20] HU Hong-wei, SONG Pu, GUO Shuang-feng, et al. Shock wave and bubble characteristics of underwater array explosion of charges [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(8): 1445-1453.
- [21] 郑监, 毛致远, 张代鑫, 等. 不同间距两点空中爆炸威力场特性数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3590-3600.
ZHENG Jian, MAO Zhi-yuan, ZHANG Dai-xin, et al. Numerical research on the power field of two-point array explosion with different spatial intervals in air [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3590-3600.

- [22] 柴晨, 白春华, 赵星宇, 等. 多点爆轰超压场仿真计算[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 128-133+184.
CHAI Chen, BAI Chun-hua, ZHAO Xing-yu, et al. Simulation calculation of multipoint detonation overpressure field[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(7): 128-133+184.
- [23] 翟红波, 李芝绒, 苏健军, 等. 多点同步内爆炸下典型舱室的毁伤特性[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 169-174+181.
ZHAI Hong-bo, LI Zhi-rong, SU Jian-jun, et al. Damage characteristics of a typical cabin with multi-point simultaneous inner explosion[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(2): 169-174+181.
- [24] WANG Zhen, CHEN Heng, YUAN Qi, et al. Anti-explosion performance and dynamic response of an innovative multi-layer composite explosion containment vessel [J]. *Defence Technology*, 2024, 36: 105-121.

Key Influencing Factors of Multi-point Explosions Flow Field Characteristics inside Cylindrical Shells

LIU Lu, XU Hao, REN Yi-fei, DONG Qi

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: When multi-point explosions occur within a cylindrical shell containment, the generated multiple shock waves experience superposition and coupling, interact with the vessel walls to produce reflected waves, and ultimately resulting in a highly complex internal flow field. To investigate the flow field characteristics and the key influencing factors for multi-point explosions within a cylindrical shell, a two-dimensional plane-strain ring model was employed and studied. The results demonstrate that the evolution of the flow field exhibits periodic behavior. Specifically, when there are 2 explosion points, the reflected wave pressure at the observation points near the inner wall of the circular ring is significantly increased compared with that of the central single-point explosion. Especially when the distance from the explosion points to the center of the ring is 0.6 times the radius of the circular ring, this pressure value can reach up to 4.58 times that of the central single-point explosion. Shock wave coupling in configurations with two or three explosion points enhances structural deformation of the circular shell. However, as the number of explosion points increases further, the radial displacement of the shell gradually diminishes. Under conditions where the total explosive mass remains constant and the radial distance of the explosion points from the center is constrained between 0.2 and 0.8 times the shell radius, the two-point configuration induces the most significant structural deformation.

Key words: multi-point explosions; flow field characteristics; evolution of shock waves

CLC number: TJ5; TJ0; O383

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025092

Grant support: National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3320504)

(责编: 高毅)