

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0339

## 泡沫铝内衬对抗内部爆炸钢筒变形的影响\*

程 帅, 师莹菊, 殷文骏, 刘文祥, 唐仕英, 张德志

(西北核技术研究院强动载与效应实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为提高承受内部爆炸载荷钢筒的抗爆性能, 研究了泡沫铝内衬对钢筒变形的影响。首先通过对比实验, 发现在本文的实验条件下, 泡沫铝内衬导致钢筒变形增大, 甚至发生了严重的破坏; 进而建立有限元模型, 研究了钢筒变形随爆炸当量、泡沫铝内衬厚度的变化机理和规律。结果表明, 添加足够厚度的泡沫铝内衬能够减小钢筒变形, 但泡沫铝厚度不足时, 则可能起到相反的效果。对于固定尺寸的含泡沫铝内衬钢筒, 随着爆炸当量增加, 泡沫铝内衬对钢筒塑性变形的影响主要包含3种模式。模式1, 泡沫铝可通过塑性变形吸收爆炸载荷, 从而减小钢筒变形。模式2, 泡沫铝内衬导致钢筒承受的载荷强度增大, 钢筒塑性变形增大。模式3, 泡沫铝对载荷强度的影响可忽略, 泡沫铝通过增大结构质量减小钢筒塑性变形。

**关键词:** 爆炸容器; 钢筒; 泡沫铝; 内衬; 内部爆炸

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

## Influence of aluminum foam lining on deformation of steel cylinders subjected to internal blast loading

CHENG Shuai, SHI Yingju, YIN Wenjun, LIU Wenxiang, TANG Shiyong, ZHANG Dezhi

(*Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China*)

**Abstract:** In order to improve the anti-explosion ability of steel cylinders subjected to internal blast loading, the effect of aluminum foam lining on the deformation of the steel cylinders was explored. First of all, contrast experiments displayed that under the experimental conditions in this paper, the steel cylinders deformed more greatly due to foam aluminum lining, and some were even seriously damaged. Then the finite element models were established to study the change mechanism and law of the deformation of the steel cylinders with the equivalent of explosion and the thickness of aluminum foam lining. The results show that the aluminum foam lining with enough thickness will reduce the deformation of the steel cylinders, however, if the thickness of the aluminum foam lining is insufficient, there may be an opposite effect. For the aluminum-foam lined steel cylinder with a fixed size, the effect of aluminum foam lining on the plastic deformation of the steel cylinder mainly includes three modes as the explosive equivalent increases. In mode 1, the aluminum foam will absorb explosive loading through plastic deformation, thus reducing the deformation of the steel cylinder. In mode 2, the steel cylinder endures higher load and suffers larger plastic deformation due to adding the foam aluminum lining. For mode 3, the effect of the aluminum foam on the explosive loading can be ignored, and the aluminum foam decreases the plastic deformation of the steel cylinder by increasing the total mass of the structure.

**Keywords:** explosive containment vessel; steel cylinder; aluminum foam; lining; internal blast loading

\* 收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2020-05-13

第一作者: 程 帅(1988—), 男, 博士研究生, 助理研究员, [chengshuai@nint.ac.cn](mailto:chengshuai@nint.ac.cn)

通信作者: 张德志(1973—), 男, 博士, 研究员, [zhangdezhi@nint.ac.cn](mailto:zhangdezhi@nint.ac.cn)

泡沫铝具有轻质、可加工性强、成本低等优点;且承受动态载荷时,能够在固定的应力下发生较大的塑性变形,被认为是一种理想的缓冲、吸能材料,已经广泛应用于各类抗爆结构的设计。任新见等<sup>[1]</sup>采用泡沫铝夹心结构,提高了圆柱形排爆管的性能并减少了质量。刘新让等<sup>[2]</sup>通过数值模拟发现在相同的质量和爆炸当量下,泡沫铝夹芯筒的整体变形小于实心钢筒。Goel等<sup>[3]</sup>和 Santosa等<sup>[4]</sup>通过实验和数值模拟研究了泡沫铝提升结构抗爆性能的机理,并指出泡沫铝的厚度是影响抗爆性能的重要因素。张培文等<sup>[5]</sup>通过数值模拟分析了钢板厚度对泡沫铝夹芯结构抗爆性能的影响,发现泡沫铝能够有效降低爆炸载荷下结构的变形。

然而,总结成功应用泡沫铝提高结构抗爆能力的工作不难发现,这些案例中存在爆炸比距离偏大、爆炸载荷强度不高、泡沫材料厚度使被防护结构尺寸显著增大等问题。随着爆炸比距离减小,泡沫防护结构的变形、破坏模式将发生变化<sup>[6]</sup>。低强度冲击波与泡沫材料作用时,泡沫材料只在弹性和平台应力区域工作,可通过变形吸收冲击波能量;但高强度冲击波会引起泡沫材料的致密化,导致被防护结构发生更严重的破坏<sup>[7]</sup>。Skews等<sup>[8]</sup>发现强冲击波作用下泡沫材料中形成的速度低于空气冲击波的压缩波可能是导致变形增大的重要原因。Li等<sup>[9]</sup>使用一维弹簧-质量模型分析了泡沫材料导致冲击波强化的条件;Tan等<sup>[10-11]</sup>使用一维冲击模型分析了泡沫材料对冲击载荷的增强作用,并指出惯性和局部压缩现象是导致载荷增强的主要原因。Lopatnikov等<sup>[12]</sup>通过数值模拟和霍普金森杆实验研究了强冲击载荷下泡沫金属的响应。大量的研究表明,当冲击波强度足够、压缩波可以到达被保护结构时,波的反射就会引起载荷增强现象,导致结构发生更严重的破坏<sup>[13-14]</sup>。

综上,采用泡沫材料可以减少结构质量,提高结构的抗爆能力,但同时必须确定泡沫材料能够起防护作用的极限载荷强度,否则可能导致结构发生更严重的破坏。为在不改变钢筒内径、壁厚等特征尺寸的情况下,提高承受内部爆炸载荷钢筒的抗爆能力,本文中通过数值模拟分析泡沫铝内衬对钢筒变形的影响,总结泡沫铝内衬影响钢筒变形的主要机制,以期为钢筒抗爆能力提升设计提供参考。

## 1 实验

如图1所示,本文实验以内径为100 mm、壁厚为6和12 mm的钢筒为加固对象,在钢筒内部添加泡沫铝内衬,对比钢筒在内部爆炸载荷下的变形,研究泡沫铝内衬对抗爆能力的影响。根据秦学军等<sup>[15]</sup>的研究结果,承受内部爆炸载荷的细长柱形钢筒,当钢筒长径比超过6时,可以忽略边界对爆心环面变形的影响。因此,实验中选取的钢筒长度为600 mm。钢筒材料为Q345R,是压力容器、抗爆结构设计的常用材料。

实验时用卡箍将钢筒固定在图2所示的刚性平台上,再将泡沫铝内衬和炸药装入钢筒中心。其中泡沫铝内衬的外直径为100 mm,密度为0.48 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率约为82%,其静态条件下测得的应力应变曲线如图3所示。由于内部爆炸载荷作用下,钢筒的变形主要集中在爆心环面2倍半径距离之内<sup>[16]</sup>,因此实验中选用泡沫铝的长度为200 mm。使用基于多普勒干涉原理的光子多普勒测速仪<sup>[17-18]</sup>(PDV, photonic Doppler velocimetry)测量钢筒爆心环面外表面的响应历程。通过调节结构使光纤探头垂直对准到钢筒爆心环面的外表面。

共进行了5次对比实验,实验的工况设置如表1所示。爆炸当量为10 g TNT的实验中使用了壁厚为6 mm的钢筒。在钢筒内部增加10 mm厚的泡沫铝内衬后,钢筒爆心环面结构响应的位移峰值小幅度增加;2次实验后钢筒爆心环面均无径向膨胀,可认为钢筒变形较小、处于弹性状态。爆炸当量约为180 g TNT时,实验后钢筒存在明显的径向膨胀:在没有泡沫铝内衬的情况

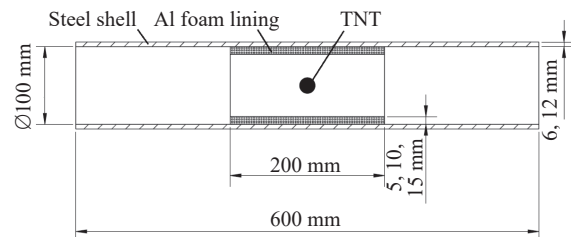


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experiment device

下, 测得爆心环面径向膨胀 5.3 mm, 计算对应的塑性变形约为 8.4%; 泡沫铝内衬厚度为 5 mm 时, 爆心环面径向膨胀达到 7.8 mm, 对应的塑性变形约为 12.4%; 泡沫铝内衬厚度为 15 mm 时, 实验后钢筒破裂, 如图 4 所示。综上, 由爆炸当量为 180 g TNT 的对比实验可知, 泡沫铝内衬厚度增加后, 不但没有起到防护作用, 反而导致结构发生了更严重的破坏。

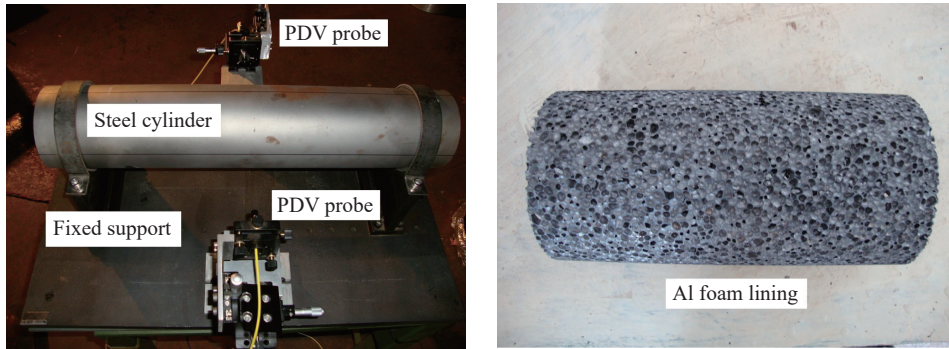


图 2 实验用钢筒和泡沫铝内衬

Fig. 2 The steel cylinder and aluminum foam lining used in the experiment

表 1 实验设置和钢筒外表面的变形情况

Table 1 The experimental setup and deformation of the outer surfaces of the steel cylinders

实验编号	炸药质量/g	厚度/mm		钢筒径向膨胀/mm		钢筒残余应变/%	
		钢筒	泡沫铝	实验	模拟	实验	模拟
1	10	6	0	0.13	0.17	0	0
2	10	6	10	0.15	0.19	0	0
3	183	12	0	5.30	5.40	8.4	8.6
4	183	12	5	7.80	7.20	12.4	11.1
5	180	12	15	破裂	13.00		19.6

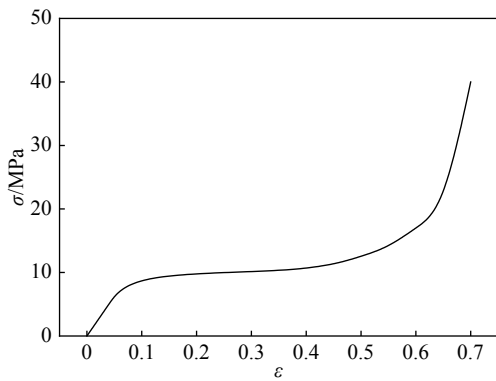


图 3 泡沫铝静态应力应变曲线

Fig. 3 Static stress-strain curve of aluminum foam



图 4 钢筒破碎情况

Fig. 4 The cracked steel cylinder

## 2 数值模拟

为深入分析实验数据, 找出泡沫铝内衬起防护/破坏作用的机理和规律, 使用商业软件建立如图 5 所示的二维轴对称模型。模型主要包括钢筒、泡沫铝内衬、炸药和空气 4 部分。其中钢筒和泡沫铝内衬采用 Lagrange 网格, 网格尺寸为 2 mm×2 mm。采用双线性本构模型描述钢的力学行为, 材料密度为 7 830 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 切线模量为 7.7 GPa。考虑到动态加载条件下, 由于应变

率效应钢的屈服强度会提高,模型中设置钢的屈服强度为 700 MPa<sup>[19]</sup>。对泡沫铝内衬采用 CRUSHABLE\_FOAM 模型,模型中采用如图 3 所示的应力应变曲线。

采用欧拉网格计算爆炸流场,其中对空气采用理想气体状态方程,初始密度为 1.29 kg/m<sup>3</sup>,初始比内能为 2.068×10<sup>5</sup> J/kg。对炸药采用 JWL 状态方程:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega'}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega'}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \omega' e \quad (1)$$

式中:  $p$  为爆轰产物的压力;  $V$  为爆轰产物的相对比容,且  $V = v/v_0$ ,  $v = 1/\rho$  为爆轰产物的比容,  $v_0$  为爆轰前炸药的初始比容;  $e$  为爆轰产物的比内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega'$  为材料常数。炸药初始密度  $\rho_0$ 、初始比内能  $e_0$ 、C-J 爆轰压力  $p_{CJ}$  和爆轰波速度  $D$  见表 2。当炸药体积膨胀到 10 倍以后, JWL 状态方程自动转化为绝热指数为 1.35 的理想气体状态方程。

表 2 TNT 炸药的 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters in the JWL equation of state for TNT explosive

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$e_0/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$p_{CJ}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega'$
1 630	4.26×10 <sup>6</sup>	6930	21	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3

模型的边界条件设置如图 5 所示,下边界为轴对称边界,左边界为对称边界,上边界和右边界为自由流出边界。通过流固耦合方法计算钢筒和泡沫铝的动态响应,输出钢筒爆心环面变形的计算结果,图 6

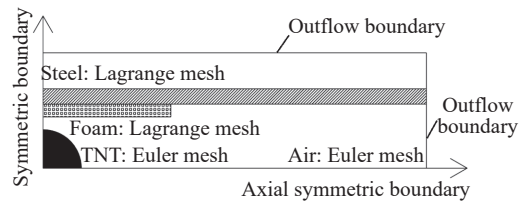
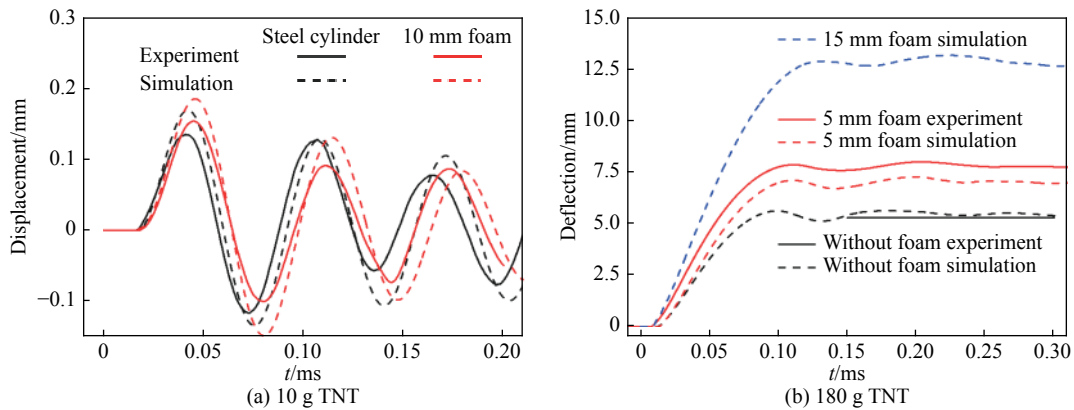


图 5 用于数值模拟的二维轴对称模型

Fig. 5 The two-dimensional axisymmetric model used in numerical simulation



(a) 10 g TNT

(b) 180 g TNT

(c) 10 g TNT

图 6 计算结果与实验数据的对比

Fig. 6 Comparison of simulated and experimental results

对比了数值模拟与实验的变形历程曲线, 表 1 对比了爆炸当量为 10 g TNT 时钢筒弹性变形的应变峰值和爆炸当量为 180 g TNT 时钢筒的残余应变。对于爆炸当量为 10 g TNT 的 2 次实验, 钢筒处于弹性变形阶段, 数值模拟得到的挠度曲线的第 1 个峰值和后期振动趋势与实验数据基本一致。对于爆炸当量约为 180 g TNT 的 3 次实验, 钢筒中未添加泡沫铝的实验仅有实验后测得的残余应变数据<sup>[16]</sup>, 数值模拟得到的钢筒变形与实验数据基本一致。添加厚度为 5 mm 的泡沫铝内衬时, 数值模拟得到的钢筒外表面变形历程与实验数据基本一致。添加厚度为 15 mm 的泡沫铝内衬时, 实验中钢筒破碎, 通过数值模拟预计的钢筒外壁位移达到 13 mm; 同时计算的钢筒外壁塑性变形达到 19.6%, 内壁塑性变形达到 25.7%, 超过 Q345R 材料的断裂延伸率<sup>[20]</sup>, 因而钢筒破碎。图 6 中还比较了 10 g TNT 实验中泡沫铝塑性变形分布的实验和数值模拟结果, 两者基本吻合。综上, 数值模拟结果与实验数据具有较好的一致性, 计算模型基本可靠。

### 3 讨 论

本部分将结合实验结果, 讨论弹性变形和塑性变形 2 种情况下, 泡沫铝对钢筒变形的影响机制, 解释实验中泡沫铝内衬导致钢筒变形增大的原因。

对于弹性变形情况, 结合表 1 中爆炸当量为 10 g TNT 的实验, 计算了在壁厚为 6 mm 的实验钢筒内不添加内衬、添加厚度为 10 mm 的泡沫铝内衬、添加厚度为 18 mm 的泡沫铝内衬时, 爆心环面的内壁载荷和外壁位移曲线, 结果如图 7 所示。添加泡沫铝内衬后, 钢筒内壁受到载荷峰值显著降低, 但载荷的作用时间显著拉长。随着泡沫铝厚度增大, 载荷到时逐渐提前, 原因是波在固体介质中传播速度更快; 但受泡沫铝塑性变形过程的影响, 载荷峰值的到时越来越晚。另一方面, 随着泡沫铝内衬厚度增大, 钢筒外壁径向膨胀先增大后减小, 说明泡沫铝内衬厚度足够时, 才能对钢筒起到保护作用; 相反, 如果泡沫铝内衬厚度不足, 还可能导致钢筒发生更严重的变形。图 8 对比了爆炸当量为 6~10 g TNT 时, 无泡沫铝内衬、泡沫铝内衬厚度分别为 10 和 18 mm 时爆心环面外壁的径向膨胀位移峰值, 进一步证明了上述泡沫铝内衬厚度对加固效果的影响规律。

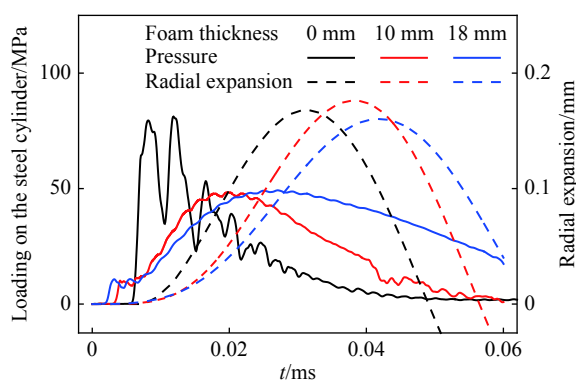


图 7 泡沫铝内衬对钢筒内壁载荷历程的影响 (10 g TNT)

Fig. 7 Influences of aluminum foam linings on the pressure loading on the inner surfaces of steel cylinders (10 g TNT)

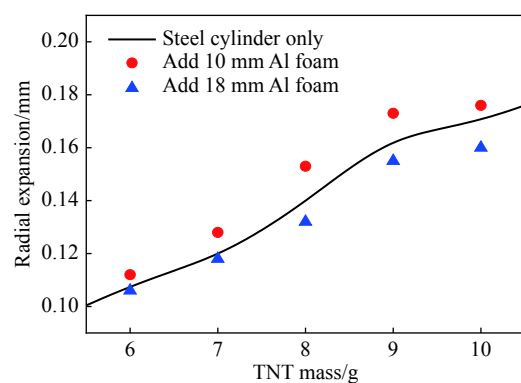


图 8 泡沫铝内衬对钢筒外壁弹性径向膨胀的影响

Fig. 8 Influences of aluminum foam linings on the elastic radial expansion of the outer walls of steel cylinders

为研究塑性变形条件下, 泡沫铝内衬对钢筒变形的影响, 仍然以壁厚 6 mm 的实验钢筒为对象, 比较爆炸当量为 8~140 g TNT, 钢筒内添加 10、18 mm 厚的泡沫铝内衬和不添加内衬时的钢筒塑性变形的计算结果, 如图 9 所示。爆炸当量超过 10 g TNT 后, 钢筒开始进入塑性变形状态; 随着爆炸当量的增大, 泡沫铝对钢筒变形的影响分为 3 种模式。

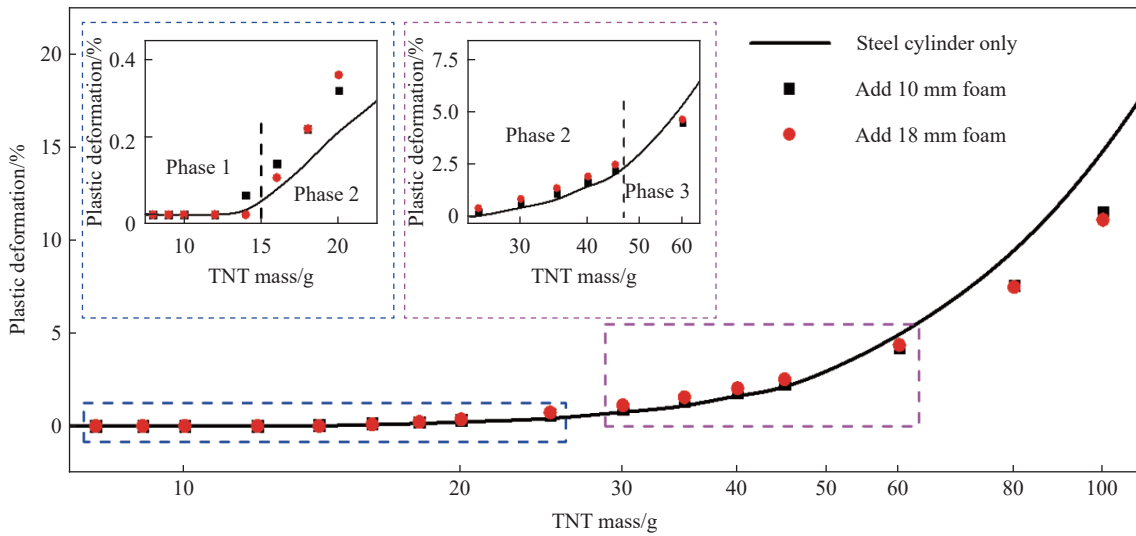


图9 泡沫铝内衬对钢筒塑性变形的影响

Fig. 9 Influences of aluminum foam linings on plastic deformation of steel cylinders

模式1发生在钢筒刚刚开始发生塑性变形时。如图9所示,爆炸当量为14 g TNT时,添加10 mm厚泡沫铝内衬的钢筒塑性变形增大,而添加18 mm厚泡沫铝内衬的钢筒未发生塑性变形。这说明泡沫铝内衬厚度足够时,泡沫铝内衬可通过塑性变形吸收能量,起到理想的防护效果。

随着爆炸当量增大,泡沫铝内衬对钢筒变形的影响变为模式2:此时爆炸载荷的强度超过了泡沫铝内衬变形吸能的能力,泡沫铝内衬不再起到防护效果,反而导致钢筒塑性变形增大。由图10(a)可见,爆炸当量为30 g TNT时,添加厚度为10和18 mm的泡沫铝内衬后,受泡沫铝内衬塑性变形的影响,钢筒内壁应力曲线的峰值到时延迟,应力峰值提高,且载荷的持续时间延长、载荷冲量大幅增加,因此钢筒塑性变形增大。模式2中,可将泡沫铝内衬视为冲击波传播的可压缩介质,由于冲击波在固体中传播衰减弱于在空气中,因此钢筒变形增大。

继续增大爆炸当量,泡沫铝内衬对钢筒变形的影响进入模式3:泡沫铝厚度越大,钢筒的塑性变形越小。由图10(b)可见,爆炸当量为100 g TNT时,泡沫铝内衬仅影响钢筒内壁载荷峰值到时,对载荷峰值和峰值后的衰减历程影响较小。但在特征相近的载荷下,泡沫铝内衬越厚,结构整体的质量就越大,因而钢筒的塑性变形减小。

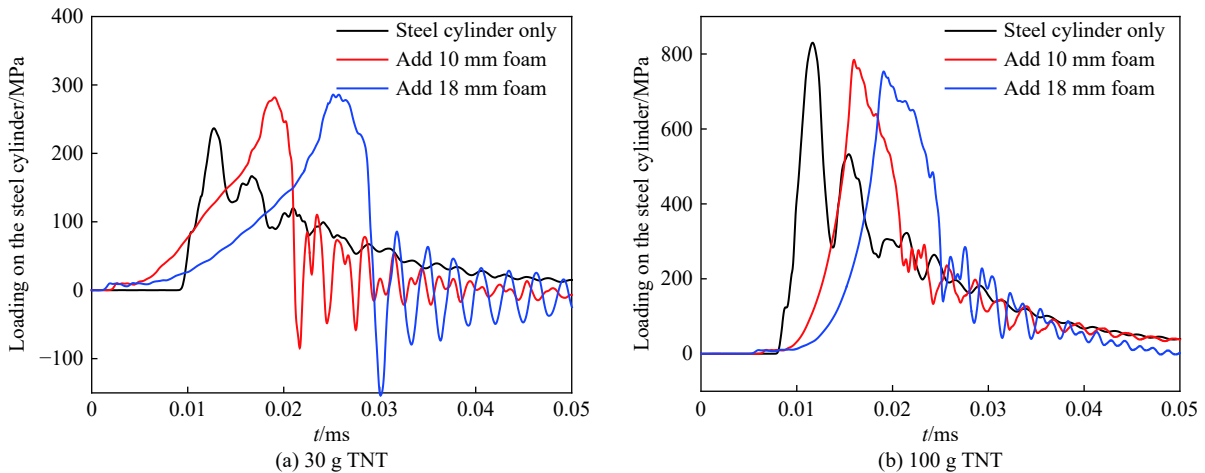


图10 泡沫铝内衬对钢筒内壁载荷历程的影响

Fig. 10 Influences of aluminum foam linings on pressure loading on the inner surfaces of steel cylinders

## 4 结 论

为在不改变钢筒尺寸的前提下提高钢筒的抗爆性能,通过实验和数值模拟分析了泡沫铝内衬对承受内部爆炸载荷钢筒变形的影响规律,并发现只有当添加足够厚度的泡沫铝内衬时才能减小钢筒变形;如果泡沫铝内衬厚度不足,反而会导致钢筒发生更大的变形,甚至破裂。根据进一步的数值计算结果可以发现,对于固定尺寸的含泡沫铝内衬钢筒,随着爆炸当量和载荷强度提高,泡沫铝内衬对钢筒内壁载荷特征的影响机理不同,泡沫铝内衬对钢筒变形的影响可能包含3种模式:

模式1,泡沫铝通过塑性变形吸收能量,减小钢筒变形;

模式2,爆炸载荷强度超过泡沫铝变形吸能能力,此时泡沫铝内衬将导致钢筒内壁载荷峰值提高、持续时间延长,钢筒变形增大或破坏;

模式3,泡沫铝内衬对载荷特征的影响较小,但可增大结构质量,减小钢筒塑性变形。

## 参考文献:

- [1] 任新见,李广新,张胜民. 泡沫铝夹心排爆罐抗爆性能试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 213–217. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.044.  
REN X J, LI G X, ZHANG S M. Antidetonation property tests for explosion-proof pots made of sandwich structure with aluminium foam [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 213–217. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.044.
- [2] 刘新让,田晓耕,卢天健,等. 泡沫铝夹芯圆筒抗爆性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(23): 166–173. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.23.031.  
LIU X R, TIAN X G, LU T J, et al. Blast-resistance behaviors of sandwich-walled hollow cylinders with aluminum foam cores [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(23): 166–173. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.23.031.
- [3] GOEL M D, MATSAGAR V A, GUPTA A K. Blast resistance of stiffened sandwich panels with aluminum cenosphere syntactic foam [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 77: 134–146. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.017.
- [4] SANTOSA S P, ARIFURRAHMAN F, IZZUDIN M H, et al. Response analysis of blast impact loading of metal-foam sandwich panels [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 495–502. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.073.
- [5] 张培文,李鑫,王志华,等. 爆炸载荷作用下不同面板厚度对泡沫铝夹芯板动力响应的影响 [J]. *高压物理学报*, 2013, 27(5): 699–703. DOI: 10.11858/gywlb.2013.05.007.  
ZHANG P W, LI X, WANG Z H, et al. Effect of face sheet thickness on dynamic response of aluminum foam sandwich panels under blast loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(5): 699–703. DOI: 10.11858/gywlb.2013.05.007.
- [6] 王涛,余文力,秦庆华,等. 爆炸载荷下泡沫铝夹芯板变形与破坏模式的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1456–1463. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.017.  
WANG T, YU W L, QIN Q H, et al. Experimental investigation into deformation and damage patterns of sandwich plates with aluminum foam core subjected to blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1456–1463. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.017.
- [7] 周佩杰,王坚,陶钢,等. 泡沫材料对冲击波的衰减特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 675–681. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0675-07.  
ZHOU P J, WANG J, TAO G, et al. Attenuation characteristics of shock waves interacting with open and closed foams [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 675–681. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0675-07.
- [8] SKEWS B W, ATKINS M D, SEITZ M W. The impact of a shock wave on porous compressible foams [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 253: 245–265. DOI: 10.1017/S0022112093001788.
- [9] LI Q M, MENG H. Attenuation or enhancement: a one-dimensional analysis on shock transmission in the solid phase of a cellular material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(10): 1049–1065. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00016-7.
- [10] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams: Part I:

- experimental data and observations [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2174–2205. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.05.007.
- [11] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams: Part II: ‘shock’ theory and comparison with experimental data and numerical models [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206–2230. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.05.003.
- [12] LOPATNIKOV S L, GAMA B A, HAQUE J, et al. Dynamics of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment [J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1–2): 61–71.
- [13] HARRIGAN J J, REID S R, YAGHOUBI A S. The correct analysis of shocks in a cellular material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 918–927. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.03.011.
- [14] ALEYAASIN M, HARRIGAN J J, REID S R. Air-blast response of cellular material with a face plate: an analytical-numerical approach [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 91: 64–70. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.027.
- [15] 秦学军, 张德志, 杨军, 等. 内部爆炸作用下钢筒塑性变形研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 135–138.  
QIN X J, ZHANG D Z, YANG J, et al. Research on plastic deformation of cylindrical steel shells under internal explosion loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 135–138.
- [16] 张德志. 柱形爆炸容器载荷与塑形结构响应研究 [D]. 西安: 西北核技术研究所, 2012: 66–68.  
ZHANG D Z. Investigation on load and plastic structure response of cylindrical explosion vessel [D]. Xi’an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2012: 66–68.
- [17] 杨军, 王克逸, 徐海斌, 等. 光纤位移干涉仪的研制及其在 Hopkinson 压杆实验中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 102–107. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2013.01.019.  
YANG J, WANG K Y, XU H B, et al. Development of an optical-fiber displacement interferometer and its application in Hopkinson pressure bar experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 102–107. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2013.01.019.
- [18] 杨军, 李焰, 张德志, 等. 光子多普勒测速仪与压杆相结合的冲击波反射压力测试技术 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(7): 1368–1374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.07.015.  
YANG J, LI Y, ZHANG D Z, et al. Measuring technique of reflected blast wave pressure based on pressure bar and Photonic Doppler Velocimeter [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(7): 1368–1374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.07.015.
- [19] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0893-06.  
LIU W X, ZHANG Q M, ZHONG F P, 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0893-06.
- [20] 闻邦椿. 机械设计手册: 第一卷 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 2–39.

(责任编辑 张凌云)