

文章编号: 1001-1455(2012)06-0561-07

# 冲击作用下夹层充液薄壁半球壳 组合结构的动力响应\*

路国运<sup>1</sup>, 秦 斌<sup>1</sup>, 张国权<sup>2</sup>, 韩志军<sup>1</sup>, 雷建平<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所, 山西 太原 030024;

2. 中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710089)

**摘要:** 采用 DHR9401 作为加载工具对充液夹层构形的薄壁半球壳组合结构受质量块冲击的动力响应进行了实验研究。给出了冲击力 and 内压力时程曲线, 结合实验变形过程的观察可以看出, 冲击引起半球壳的动力响应可分为 4 个阶段: 冲击点处的扁平化; 壳面凹陷形成塑性铰并向外扩张; 冲头对塑性铰区的压平以及弹性恢复。实验结果表明, 双层充液球壳在受到载荷冲击时, 由于液体作用使外壳受到的局部冲击转化成面载荷均匀加载在内壳上, 使之具有更大的承载能力。采用夹层充液组合构形的半球壳组合结构的耐撞性有了很大的提高, 在一定的冲击能量下, 内部的球壳变形量很小, 可以提供有效的安全防护空间。

**关键词:** 固体力学; 动力响应; 冲击; 半球壳; 充液

**中图分类号:** O347.3

**国标学科代码:** 13015

**文献标志码:** A

薄壁球壳作为一种基本结构元件, 广泛应用于各种运载工具和压力容器, 如航天器和深水工程的压力容器等。而且作为一种能量吸收体, 其动载行为在国防、工业等领域有着非常广泛的应用前景, 一直是人们关注的热点。最初的研究始于固支球壳结构受刚性板压缩的准静态分析, D. P. Updike<sup>[1]</sup>对刚性板压缩球壳的准静态过程进行了实验研究和理论分析, 分别把球壳材料看作完全弹性和理想塑性材料, 给出了压力和位移关系的表达式。后来又有几位学者<sup>[2-3]</sup>对此类问题进行了相关研究, 通过不同的简化方式, 给出了径厚比( $R/t$ )在不同范围时压力和位移的关系。N. K. Gupta 等<sup>[4-8]</sup>对球壳受刚性板准静态压缩和质量块动态冲击球壳的压溃机理和吸能能力进行了较系统的实验研究和理论分析,  $R/t$  的覆盖范围为 15~240。A. N. Kinkead 等<sup>[9]</sup>通过静态实验分析了径厚比  $R/t$  为 8~32 之间的半球壳体, 得出随着径厚比的减小, 壳体的承载能力越大的结论。宁建国等<sup>[10-11]</sup>、穆建春等<sup>[12]</sup>研究了球形薄壳在子弹撞击作用下的大变形动态过程, 并给出了简化分析方法。然而在工程实际当中, 大部分储液罐都是在内充介质流体的状态下工作的, 有时甚至内充高压液体, 因此考虑内充流体介质及其压力耦合作用下薄壁壳体受冲击的动力响应及破坏更富有工程实际意义<sup>[13-14]</sup>。这类问题除了研究薄壁壳体本身经受撞击作用的动力学过程外, 尚需涉及内充压力介质与壳壁在撞击过程中的相互耦合作用, 得到其变形及失效规律和有效的分析方法显然要困难得多, 而实验及数值分析则成为主要的分析手段。

本文中, 根据半球壳的构形对实验装置进行精心的设计使之适应充液密封的理想状态, 并按充液、内空、夹层充液等情况将实验分为 3 组, 给出质量块冲击作用下薄壁球壳动力响应的实验结果, 并对该问题进行数值分析, 研究 3 种构形的薄壁球壳在大质量块体冲击下的动力响应问题。

## 1 实验装置及试件参数

3 种半球壳的冲击实验是在 DHR9401 型落锤上实现的, 该试验机总高度为 13.47 m, 有效落距 12.6 m, 冲击实验中能量耗散极小, 锤体下落平稳, 动力重复性好, 冲击速度误差小于 0.2%。图 1 给出

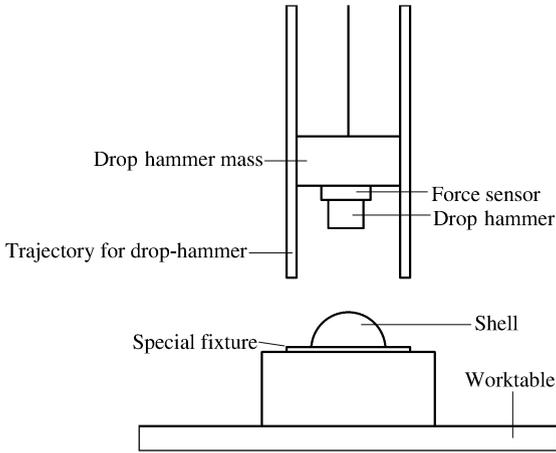
\* 收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072167); 山西省青年学术带头人支持计划

作者简介: 路国运(1973—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师。

了整个实验装置的示意图及现场照片,实验中采用 CY-YD-205 型石英压力传感器记录壳体中液体压力的变化;5115 型力传感器安装在落锤和弹体之间,两个传感器测得的信号经 YE5852 电荷放大器放大,再输入 TDS420A 数字存储示波器记录冲击力及内压力的变化。

(a) Schematic diagram



(b) Photo

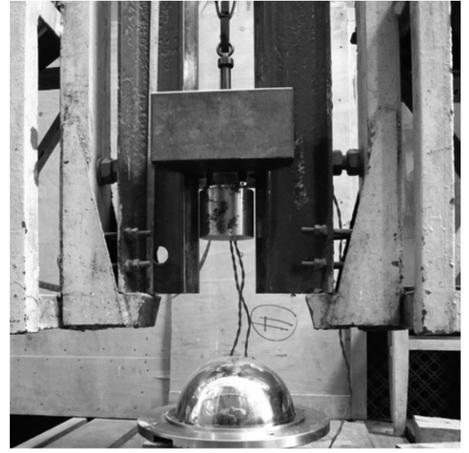


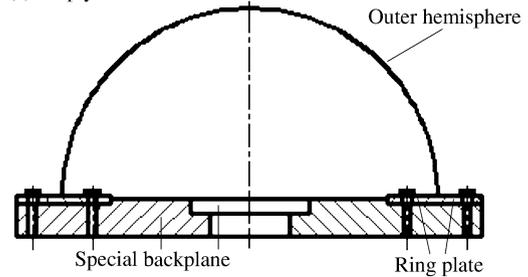
图 1 实验装置图

Fig. 1 Arrangement for the impact experiment

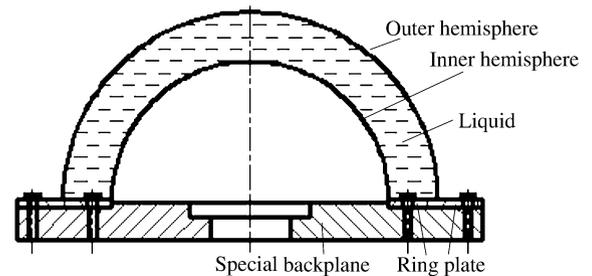
由于实验中涉及到液体,其密封及压力的测试需要特别注意,因此精心设计了实验用夹具,如图 2 所示,试件由专用底板和环片固夹。底板上预留了观察孔用来通过激光位移传感器测试壳体中心位移,在充液实验中,采用透明度好的玻璃片进行观察孔的封闭。固定支座孔主要起固定作用,即用螺栓通过固定支座孔将专用底板固定到支架上。环片孔可以固定环片,通过控制不同直径的环片来固夹不同径厚比的球壳,测压孔用来测试双层或单层充液壳体实验中液体的压强变化。在进行充液的时候,通过密封圈和胶来保证壳体的密封性。

实验所用试件为冲压成形的不锈钢半球壳,实验采用 SUMSCMT5105A 微机控制电子万能试验机及 YJW-8 型数字静态电阻应变仪对不锈钢半球壳进行力学性能测定,其屈服强度为 675 MPa,弹性模量为 209 GPa,失效强度 723 MPa。实验共分 3 组 20 个试件,分别研究了内空、内充液体和夹层充液情况下受质量块冲击时半球壳的动态响应。表 1 给出了在同一冲击速度  $v=4.42$  m/s 下,不同几何参数及组合半球壳实验条件及实验结果。表中  $R$  为外壳半径, $t$  为外壳厚度, $t'$  为内壳厚度, $M$  为落锤质量, $R'$  为内壳半径, $r$  为凹陷半径, $\Delta$  顶点位移, $F_{\max}$  最大峰值力。试件 L1~L4 为空壳,L5 和 L6 为单层充液结构球壳,L7 和 L8 为双层充液结构球壳。

(a) Empty shell



(b) double-wll shell



(c) Water-filled shell

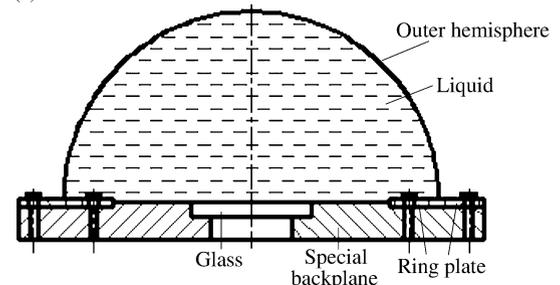


图 2 半球壳专用夹具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of chucking appliance setup of three kinds of shells

表 1 不同几何参数及组合半球壳实验条件及实验结果  
Table 1 Different geometrical parameters and experimental results

试件	$R/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$M/\text{kg}$	$R'/\text{mm}$	$t'/\text{mm}$	$R/t$	$r/\text{mm}$	$\Delta/\text{mm}$	$F_{\max}/\text{kN}$
L1	55	0.9	55.0			61.3	90.8	48.0	20.1
L2	80	1.4	55.0			56.7	89.7	32.6	34.9
L3	90	2.0	55.0			44.8	83.8	23.1	60.3
L4	80	1.4	27.5			56.7	76.4	21.5	27.8
L5	80	1.4	55.0			56.7	43.5	21.4	75.0
L6	90	2.0	55.0			44.8	39.2	15.7	102.0
L7	80	1.4	55.0	55.1	0.9	56.7	44.6	22.7	74.2
L8	90	2.0	55.0	55.2	0.9	44.8	39.5	20.8	97.8

## 2 实验结果

为分析落锤对充液球壳的动力响应行为,需要详细了解空壳的动力响应。因此,先对空壳做了相关的落锤冲击实验,得到了不同半径和不同质量下球壳的变形形状。根据实验观察,其变形过程与球壳静加载的变形过程基本一致,半球壳发生 3 阶段变形:即冲击点附近部位的壳顶局部展平而整个壳面则显现出弹性压缩;之后,冲击点及附近的壳面向内发生轴对称窝陷并向四周扩张,并在一定时间出现非轴对称变形,凹陷形状一般为规则多边形;最终冲击结束,壳体发生弹性恢复。图 3 给出了 4 个球壳的残余变形模态,从图中可以看出,相同质量的落锤从 1 m 高处下落冲击球壳,试件 L1 由于壳壁较薄,同时径厚比较大,其抵抗变形的能力较小,因此在冲击作用下球壳变形发展较为充分,由环形塑性环的向外扩展进入多边形的扩展变形阶段。而其余试件 L2、L3、L4 都处于向内凹陷的环形塑性铰扩张阶段。本次实验只在半径为 55 mm 的半球壳中出现了多边形的残余变形模式,其他尺寸的球壳都只有轴对称的环向塑性铰变形模式。而此前关于弹体冲击半球壳的实验结果显示<sup>[14]</sup>,半球壳受弹体冲击出现的多边形残余变形与冲击弹体的长径比有关,而冲击速度对于残余变形的影响则相对不敏感。本次实验采用的是圆柱形冲头加质量块的形式,长径比影响变形模式的说法不一定能成立,关于影响半球壳最终多边形的变形模式因素仍有待于进一步的研究。而实验中更大冲击能量下充液半球壳也没有出现多边形的变形模式说明,壳体内部充满液体之后,壳体内凹变形所产生的液体压力会使壳体的变形保持轴对称。关于 L1 的变形图还显示其内部五边形的凹陷在边缘部位出现了明显的熨平区。结合表 1 中给出的 L1、L2、L3 的相关变形值,可以看出,随着径厚比的减小,在相同的冲击能量下,半球壳的顶点位移随之减小。



图 3 不同半球壳的变形

Fig. 3 Deformation of different hemispherical shells

图 4 给出了 3 种不同径厚比半球壳在落锤冲击下的冲击力时程曲线,从图中可以看出,冲击引起的最大峰值载荷随着径厚比的增加而减小。在冲击的初始阶段,3 条曲线均有一个突变的波动,之后进入

稳定的增加。对于径厚比较大的 L1 试件来讲,其冲击力时程曲线有几个波动,这可能是由于其变形过程复杂,并可明显地分为几个阶段引起的。即冲击初始时刻,曲线先经过一个“突跳”之后,对应于壳顶部的局部压平的变形过程,之后壳体进入下凹的塑性铰环的扩张阶段,该阶段载荷继续增长到达峰值后又出现一个突然跌落的波动,这是由于薄壁球壳的向下凹陷变形半径达到了落锤锤头半径,锤头边缘对棱区下

压造成锤头内陷,如图 3 中试件 L1 外部的那圈“棱区”。之后的冲击力曲线对应于锤头压缩棱区壳体的变形,在棱区下凹变形到一定程度后,锤头开始使壳体下陷的五边形边缘部位出现反向压平,直到落锤弹起,加载结束。比较表 1 中给出的壳体顶点处的下陷值,可以发现内空半球壳壳顶的下陷值随着  $R/t$  减小而减小,而冲击力却是增大的,表明半球壳的刚度随着  $R/t$  减小而增大,因此其耐撞性与结构的变形能力一定是  $R/t$  的一个优化值。

图 5 给出了壳内充液情况下的冲击变形残余模态图,由图可知其变形形式基本与内空壳的变形模式相同,只是其棱区相对变化较缓,这可能是由于内部液体压力熨平作用所致。仔细观察发现试件 L5 和 L7 的内陷壳体边缘也发生了慰平的变形过程,内陷部位的塑性铰区及以内邻域都有不同程度的变平区,内陷的区域逐渐减小。比较表 1 中给出的壳体顶点处的下陷值可以发现单层充液壳体结构球壳随着  $R/t$  减小,冲击力峰值变大,壳顶中心变形位移减小,说明小的径厚比具有较大的刚度,而大径厚比有较大的变形能力,其结构耐撞性的设计需要对  $R/t$  进行优化,只是

随着内充液体与内部壳体的组合作用,内部流体抗冲击变形的参与,使得这种影响趋弱。对于双层充液壳这种影响就不很明显,不同径厚比球壳的变形凹陷值基本处于同一水平。观察充液球壳最后的变形模式发现,尽管球壳内部充满了液体,而且液体在球下凹变形过程中产生很大的内压力,但球壳仍然出现了镜面反射式的变形形式,因此对于内充液体球壳亦可考虑使用镜面反射的等度量变换进行理论分析<sup>[10-11]</sup>,只是对于棱区的处理需要注意其自身的特点。

图 6 给出了不同充液组合下的冲击力时程曲线,由图可知,内充液体的半球壳冲击力峰值较内空壳有较大的提高,而相应的冲击变形则减小了 30%,冲击作用时间也进一步缩短,可见内充液体的存在极

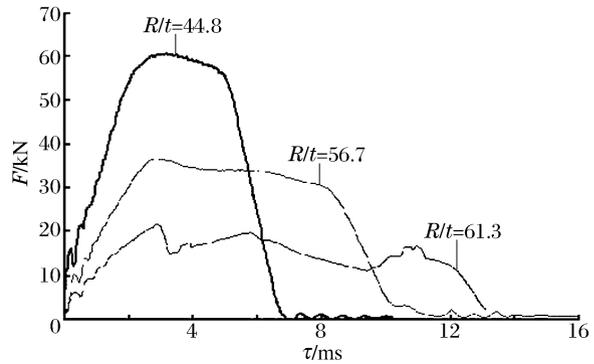


图 4 不同  $R/t$  的球壳力-时间曲线

Fig. 4 Force-time curves of hemispherical shells with different ratios of  $R/t$  subjected to same impact

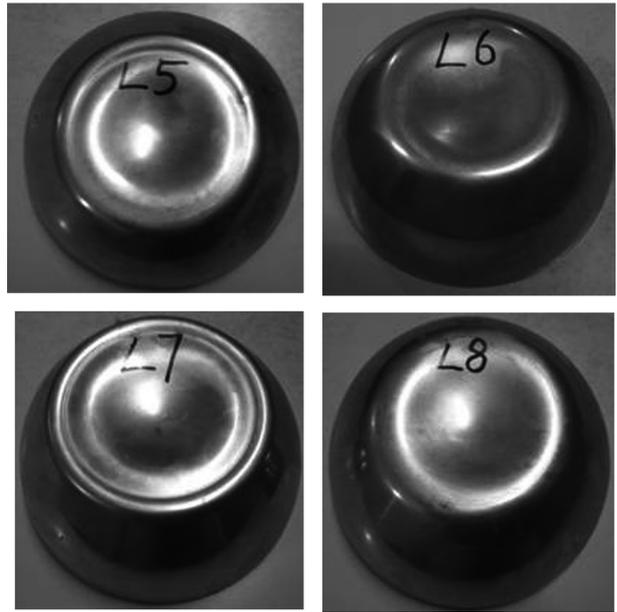


图 5 单层充液球壳和双层充液球壳的变形图

Fig. 5 Deformation of single- and double-wall liquid-filled hemispherical shells

大提高了半球壳的抗冲击能力。这是由于冲击发生时，壳体发生向内的凹陷，使内充液体压缩，冲击过程中很快形成相当高的液体压力，增强了整个壳体结构抵抗冲击的能力。进一步比较发现，对于双层充液结构壳体(L8)与单层充液壳(L6)的冲击力时程曲线相比，两者几乎是一致的，只是双层充液结构由于内壳的压缩变形而使得相对冲击力比单层的要低一些。但双层结构在提供可靠的抗冲击能力的同时又提供了安全的内部空间，提供了抗冲击安全防护的一种结构形式。从贴在内壳的应变片发现，整个冲击过程，内壳均保持在弹性变形范围之内。这是由于夹层液体的流体特性将局部冲击载荷转化为液体压力，从而向内、外壳体及基座传递载荷，同时起到分散传递作用力及将载荷均匀分布在内壳上的作用，这样就降低了内壳发生局部变形的几率，所产生的液体压力还直接抵抗外壳面的变形，从而提高了整个结构的耐撞性及抗变形能力。尽管由前面的比较(L7 与 L8)知道，对于不同径厚比的外壳在同样冲击载荷作用下其变形值基本一致，但其冲击力则还是随着  $R/t$  减小而增大。这是由于大径厚比的半球壳更多地 将冲击力由液体压力传到其他地方从而提高了球壳的抗变形能力，使得在同样冲击载荷作用下，两者产生的变形基本相同。

图 7 给出了单、双层充液半球壳内压力及相应的冲击力时程曲线，由图可知，对于单、双层充液壳来讲，其冲击力时程曲线基本相同，只是双层充液壳的冲击力稍比单层充液壳的小一点，比照图 6 中 L8 和 L6 的冲击力时程曲线也可发现同样的规律，这可能是由于内壳受液体传递的均布压力引起弹性变形从而使其对于冲击的抗力相对于单层充液壳有微小的变化。

### 3 结论与讨论

采用 DHR9401 型落锤作为加载工具对质量块撞击薄壁半球壳的动力响应进行实验，研究了不同壳体组合情况下内充液体对于壳体的变形及冲击力峰值的影响，得到以下结论：

(1)冲击引起半球壳发生 4 阶段变形：第 1 阶段，冲击点附近部位局部展平而整个壳面则显现出弹性压缩；第 2 阶段，冲击点及附近的壳面向内发生轴对称窝陷并向四周扩张，部分球壳进一步发展为多边形的凹陷形式；第 3 阶段，当凹陷棱区超过冲击冲头半径时，发生冲击对塑性棱区及其邻近内陷区的压平变形过程；最后发生弹性恢复。

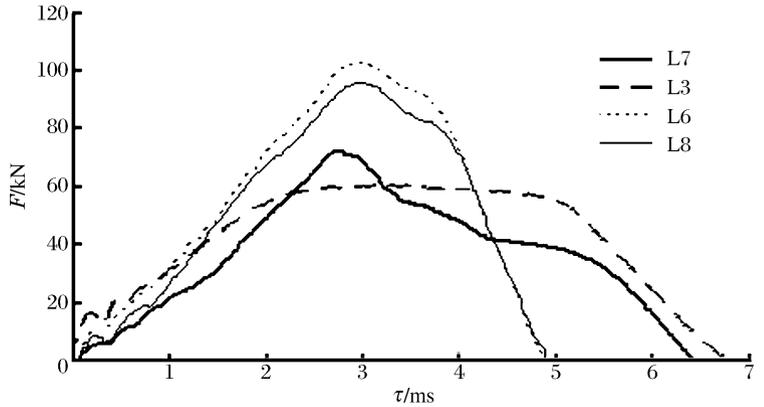


图 6 内空、充液及夹层充液球壳的力-时间曲线  
Fig. 6 Impact force-time curves of empty, liquid-filled and double-wall liquid-filled hemispherical shells

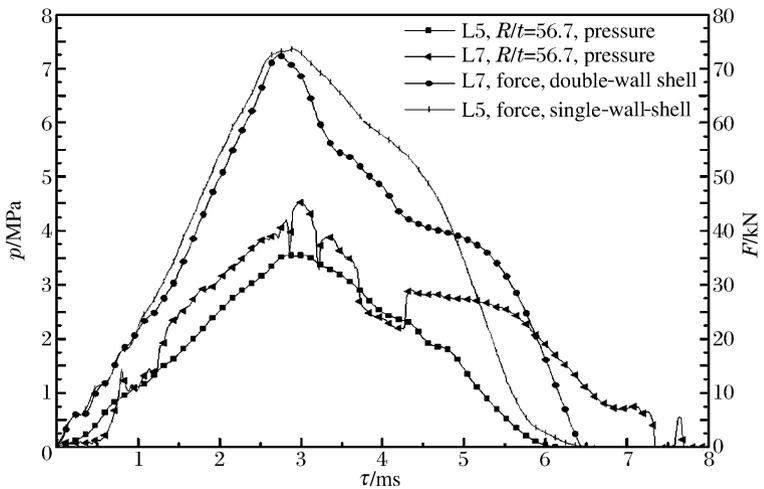


图 7 外壳同尺度充液及夹层充液球壳的力及压力时程曲线  
Fig. 7 Internal pressure- and impact force-time curves of single- and double-wall hemispherical shells

(2)内空球壳会在一定时间出现非轴对称变形,而充液球壳在本次实验的冲击能量范围内未出现多边形的非轴对称变形模式,说明内充液体有使球壳保持轴对称变形的影响。

(3)壳内充液情况下的冲击变形形式基本与内空壳的变形模式相同,只是其棱区相对变化较缓,这可能是由于内部液体压力熨平作用导致的。球壳抵抗冲击产生的冲击力峰值随着径厚比  $R/t$  的增大而减小。

(4)充满液体的半球壳抗冲击能力比内空半球壳承载能力大很多。这是由于壳内充满液体且液体压缩性很小,冲击过程中很快形成相当高的液体压力来抵抗变形,从而提高了壳体结构的抗冲击能力。而夹层充液球壳则具有更好的抗冲击变形能力,在本实验的研究范围内,内壳只发生很小的弹性变形,这对内部物体构成了极好的防护空间,因此,它在航空、航天及水下探测等领域将会有广阔的应用前景。

由以上的实验研究可以看出,对于半球壳受质量块冲击时,壳体顶点处在经过短暂的冲击扁平化之后,在壳面的冲击点附近产生凹陷变形,其凹陷边缘形成环向的塑性铰环,并向四周扩散。之后由于构形及内充介质等原因,壳体出现了丰富的响应形式,对于内空球壳,若冲击能量较大,最终塑性铰环变为多边形的形式,而内充液体则使其仍保持圆环状。若冲击能量仍未消耗完,则冲头会对塑性棱区及下凹边缘进行压平。球壳的整个动力响应过程表现出极强的瞬态行为及复杂几何变形形态,简单的理论分析很难将整个响应过程给出合理的描述,因而数值计算成为有力的研究手段,利用有限元进行系统的参数化分析是有必要的。

#### 参考文献:

- [1] Updike D P. On the large deformation of a rigid plastic spherical shell compressed by a rigid plate[J]. Journal of Engineering for Industry, 1972,94(3):949-955.
- [2] Wen H M, Jones N. Experimental investigation into the dynamic plastic response and perforation of a clamped circular plate struck transversely by a mass[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1994,208(2):113-134.
- [3] Kitching R, Houston R, Johnson W. A theoretical and experimental study of hemispherical shells subjected to axial loads between flat plates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1975,17(11/12):693-703.
- [4] Gupta N K, Easwara Prasad G L, Gupta S K. Axial compression of metallic spherical shells between rigid plates [J]. Thin-Walled Structures, 1999,34(1):21-41.
- [5] Gupta N K, Mohamed Sheriff N, Velmurugan R. Experimental and theoretical studies on buckling of thin spherical shells under axial loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008,50(3):422-432.
- [6] Gupta N K, Mohamed Sheriff N, Velmurugan R. Experimental and numerical investigations into collapse behaviour of thin spherical shells under drop hammer impact[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007,44(10):3136-3155.
- [7] Gupta N K, Venkatesh. Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(8/9):1225-1240.
- [8] Gupta P K, Gupta N K. A study of axial compression of metallic hemi-spherical domes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(4):2175-2179.
- [9] Kinead A N, Jennings A, Newell J, et al. Spherical shells in inelastic collision with a rigid wall-tentative analysis and recent quasi-static testing[J]. Journal of Strain Analysis, 1994,29(1):17-41.
- [10] 宁建国,杨桂通. 弹塑性球形薄壳在刚性柱体冲击下的破坏分析[J]. 北京理工大学学报,1997,17(5):545-551. NING Jian-guo, YANG Gui-tong. Failure analysis of elastic-plastic thin spherical shells impacted by a flat-nose rigid missile[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997,17(5):545-551.
- [11] 宁建国. 弹塑性球形薄壳在冲击载荷作用下的动力分析[J]. 固体力学学报,1998,19(4):313-320. NING Jian-guo. Dynamic analysis of elastic plastic thin spherical shells under impact[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998,19(4):313-320.
- [12] 穆建春,赵隆茂,吴文周. 一种薄扁球壳的动力响应和屈曲的实验分析[J]. 太原工业大学学报,1991,22(3):1-6. MU Jian-chun, ZHAO Long-mao, WU Wen-zhou. An experimental research on the dynamic response and buck-

ling of a shallow spherical shell[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1991,22(3):1-6.

[13] 张善元,路国运,程国强,等. 圆管及内充压力介质管道撞击大变形与破坏的研究进展[J]. 力学与进展,2004,34(1):23-31.

ZHANG Shan-yuan, LU Guo-yun, CHENG Guo-qiang, et al. The advances of research on the impact damage and failure of empty and half-filled tubes[J]. Advances in Mechanics, 2004,34(1):23-31.

[14] 张国权. 冲击载荷作用下空壳和充液球壳结构动力响应[D]. 太原:太原理工大学,2011.

## Dynamic responses of liquid-filled thin-wall hemispherical shells under impact \*

LU Guo-yun<sup>1</sup>, QIN Bin<sup>1</sup>, ZHANG Guo-quan<sup>2</sup>, HAN Zhi-jun<sup>2</sup>, LEI Jian-ping<sup>1</sup>

( 1. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology,*  
*Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

2. *AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd.,*  
*Xi'an 710089, Shaanxi, China)*

**Abstract:** Experiments were carried out to study the dynamic response of the liquid-filled thin-wall hemispherical shell under impact using the DHR9401 drop hammer as the loading device. According to the configurations of the hemispherical shells, the experimental device was elaborately designed to achieve the ideal seal for filling liquid. The time histories of the impact force and the internal pressure were recorded for different hemispherical shells. Four distinct deformation modes of the hemispherical shells under impact were observed as follows: (1) flattening of the upwardly protruding points, (2) inward dimpling with plastic hinges followed by outward expanding, (3) flattening of the plastic edge regions, and (4) elastic recovering. The experimental results show that double-wall liquid-filled hemispherical shells have better impact resistance than the single-wall hemispherical shells, for the liquid filled can reduce the deformation of the internal shell by turning point impact into even surface impact under the experimental impact conditions. So the double or multi-layer liquid-filled hemispherical shells can provide satisfying protection under a certain impact loading.

**Key words:** solid mechanics; dynamic response; impact; hemi-spherical shell; liquid-filled

\* Received 12 January 2012; Revised 8 June 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11072167)

Corresponding author: LEI Jian-ping, leijianping827@163.com