

文章编号: 1001-1455(2012)01-0067-06

# 金属壳体装药水下爆炸的冲击波特性\*

项大林<sup>1</sup>, 荣吉利<sup>1</sup>, 李健<sup>1,2</sup>, 杨荣杰<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

2. 广西工学院汽车工程系, 广西 柳州 545006;

3. 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究装药壳体厚度对水下爆炸冲击波特性的影响, 对 1 kg 柱形含铝炸药分别在厚 6 mm 的钢壳或硬铝壳装药下进行了水下爆炸实验与数值模拟研究。实验结果表明, 相对硬铝壳, 钢壳装药的冲击波冲量、衰减时间常数以及冲击波能都偏大, 而冲击波峰值相差不大。针对不同厚度钢壳装药的数值模拟表明, 随着壳体厚度的增加, 冲击波参数明显增强, 当壳体厚度超过最优值时这种效应减弱; 金属壳的存在导致冲击波峰值爬升产生滞后效应; 对一定质量的炸药, 存在可有效提高冲击波压力峰值的最优壳厚, 填充比可以作为衡量效果的重要指标。

**关键词:** 爆炸力学; 冲击波; 水下爆炸; 金属壳

**中图分类号:** O382.1

**国标学科代码:** 1303520

**文献标志码:** A

冲击波是水中武器爆炸毁伤效应的主要来源, 因此研究水下爆炸冲击波十分必要, 而近些年来这方面的研究也相对较多<sup>[1-5]</sup>, 但众多的研究内容中绝大多数都是针对裸药的。事实上, 水下武器的炸药一般都是填充在金属战斗部内的, 如鱼雷、水雷等, 所以针对金属壳体装药水下爆炸的研究十分必要。K. Takahashi 等<sup>[6]</sup>对装药在不同的厚度、金属以及药量条件下, 采用实验的方法开展了水下爆炸的特性研究, 发现了壳体对爆炸效果的加强作用。D. A. Jones 等<sup>[7]</sup>分别对 6、12 mm 钢壳约束下 10 kg 柱形 H6 炸药进行了实验与数值模拟研究, 佐证了文献[6]的结论。LI Yu-jie 等<sup>[8]</sup>也开展了有空隙带壳装药的研究。但上述研究都没能准确模拟出冲击波的峰值及波形, 而且数值模型中壳体材料模型的选择也存在一定不足, 因此更多的是利用实验结果进行分析研究, 大大增加了实验成本, 没能利用数值模拟成本低、效率高并可指导验证实验的优势。

考虑到铝粉在爆炸后期的高放热反应能够大大提高爆炸威力, 目前水下兵器普遍采用含铝炸药作为战斗部装药。爆距相同的测点处, 含铝炸药的冲击波峰值与冲量明显大于 TNT 等非含铝炸药的。

本文中, 使用实验与数值计算相结合的方法对冲击波传播进行研究。实验采用 CSISL/J0608 与 CSISL/J0609 水下爆炸标定与测试方法, 对 1 kg 柱形含铝炸药在铝壳与钢壳约束下, 进行水下爆炸实验; 数值计算采用 AUTODYN 软件进行模拟, 研究壳厚与材料对冲击波的影响。

## 1 实验研究

实验在直径 85 m、水深 14.5 m 的爆炸水池中进行。针对质量 1 kg 柱形含铝炸药, 使用厚 6 mm 的钢壳或硬铝壳装药, 每种装药各 2 发。药包和 3 个传感器均布放在水下 5 m 处, 传感器与药包水平相距分别 3、5 和 7 m。柱形含铝药竖直放置, 炸药的最终爆炸威力数据取实验数据均值。在正式实验前, 采用 1 kg 球形 TNT 裸药药包对测量系统进行标定。药包及实验场如图 1~2 所示。

表 1 为实验结果汇总表。从表中可以看出, 相对于硬铝壳装药, 钢壳装药爆炸产生的冲击波峰值  $p_m$  与衰减时间常数  $\tau$  相差不大, 而冲量  $P$  平均偏大约 16%、冲击波能  $e$  平均偏大约 20%。就钢与硬铝

\* 收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-03-25

基金项目: 国防科工局火炸药专项项目(D2220092904)

作者简介: 项大林(1985—), 男, 博士研究生。

材料而言,钢壳对炸药的约束加强效应明显优于硬铝壳,这说明装药壳体的约束越强,越能提高冲击波冲量和冲击波能,而壳体材料对冲击波峰值和衰减时间常数的影响并不明显。



图 1 试件外形图  
Fig. 1 Specimen outline

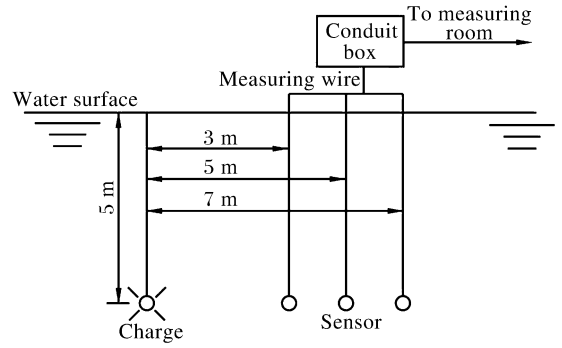


图 2 实验示意图  
Fig. 2 Sketch of experimental system

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

壳体	$l/m$	$p_m/MPa$	$\bar{p}_m/MPa$	$P/(kPa \cdot s)$	$\bar{P}/(kPa \cdot s)$	$\tau/ms$	$\bar{\tau}/ms$	$e/(MJ/kg)$	$\bar{e}/(MJ/kg)$
钢	3	17.9	17.70	2.92	2.87	0.154	0.155	1.60	1.56
		17.5		2.81		0.155		1.53	
	5	8.2	8.35	1.94	2.01	0.197	0.199	1.64	1.59
		8.5		2.08		0.201		1.53	
	7	6.0	5.95	1.48	1.54	0.199	0.201	1.58	1.57
		5.9		1.59		0.202		1.57	
硬铝	3	17.7	17.50	2.63	2.62	0.161	0.159	1.31	1.31
		17.3		2.61		0.156		1.31	
	5	8.3	8.15	1.61	1.62	0.179	0.186	1.31	1.31
		8.0		1.62		0.193		1.31	
	7	5.8	5.85	1.36	1.35	0.198	0.196	1.26	1.26
		5.9		1.34		0.194		1.26	

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元建模

柱形装药可简化为二维计算模型。由于准确性的需要,计算模型网格数量巨大,对此可采用 AUTODYN 中映射技术。即先选用小计算模型,计算域  $1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ , 网格尺寸  $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ , 当冲击波传播到边界附近时,停止计算;将小模型计算结果映射到大的计算域  $20\text{ m} \times 10\text{ m}$  中继续计算。映射前后人工粘性系数保持一致。由于不考虑气泡的脉动,不存在材料在欧拉域中流入的问题,因此将边界设置流出边界即可。人工粘性较小,冲击波尾随震荡明显,采用 Adjacent-Averaging 方法,对尾随震荡进行平滑处理。

### 2.2 状态方程

TNT 炸药和含铝炸药的状态方程都用标准 JWL 状态方程描述

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{r}} + B \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{r}} + \omega \eta \rho_0 e \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为常数,  $e$  为比内能,  $\eta = \rho/\rho_0$ ,  $\rho_0$  为参考密度。

水状态方程的选取非常重要,由于实验测点距爆心距离最远为  $7\text{ m}$ , 属于远场范围,采用 AUTODYN 中的冲击状态方程

$$p = p_H + \Gamma\rho(e - e_H) \tag{2}$$

式中： $p_H = [\rho_0 c_0 (1 + \mu)] / [1 + (s - 1)\mu]^2$ ， $e_H = p_H \mu / [2e_0 (1 + \mu)]$ ， $\lambda$  和  $c_0$  为常数， $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。由冲击波实验确定： $D = \lambda u + c_0$ ，这里  $D$  为冲击波速度， $u$  为波后速度。

金属壳材料采用 Johnson-Cook 模型<sup>[9]</sup>，它是一个考虑了应变率强化效应和温度软化效应的理想刚塑性强化模型，可以反映材料在高温、高压、高应变率以及大变形条件下的特性。

Johnson-Cook 材料模型由 2 部分内容组成，第 1 部分只涉及到应力

$$\sigma_e = [A + B(\epsilon_e^p)^n](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^*) \tag{3}$$

式中： $\sigma_e$  为 von Mises 流动应力； $\epsilon_e^p$  为等效塑性应变； $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$ ，为相对等效塑性应变率，取  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ； $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ，为量纲一温度， $T_m$  和  $T_r$  为材料的熔点与室温。

第 2 部分涉及到断裂时的应变

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \tag{4}$$

式中： $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$ ，即压力与 von Mises 等效应力的比值。

### 2.3 计算结果及分析

图 3~4 为冲击波实验结果与计算结果的对比曲线。可以看到，数值计算的冲击波衰减曲线与实验波形符合得较好，冲击波压力峰值基本一致。由于数值模型中网格尺寸偏大，冲击波压力的爬升与衰减都需要一定的时间，所以在冲击波到达前期计算值不是陡然增加的，此后回落也是较为平缓的，后期计算值与实验值高度一致。利用冲击波到达测点的时刻及测点之间的距离，可计算出冲击波波速为约 1.483 km/s，符合冲击波远场传播具有的声学特性。

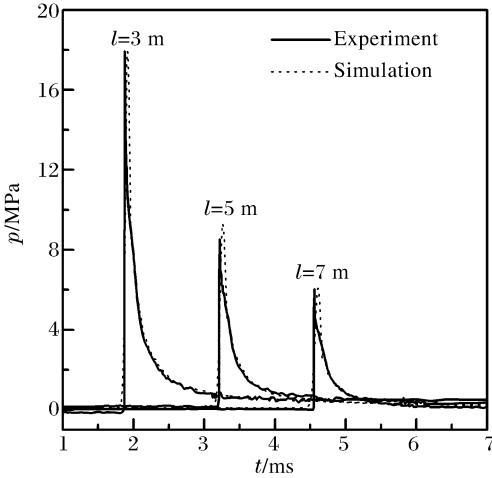


图 3 钢壳约束下冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Shock wave pressure-time curves for steel casing

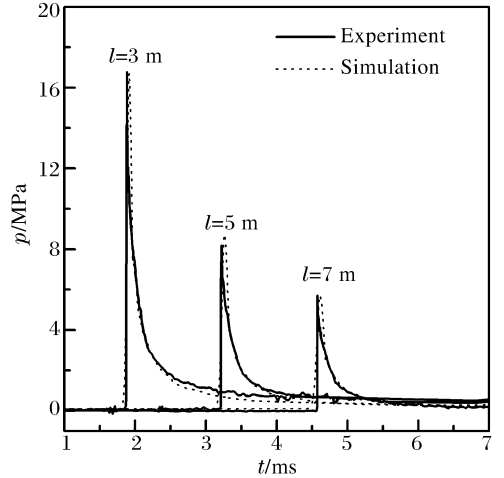


图 4 硬铝壳约束下冲击波压力时程曲线

Fig. 4 Shock wave pressure-time curves for Al casing

冲击波压力峰值是炸药水下爆炸的重要参数，从表 2 可以看出，计算值与实验值不但具有很好的一致性，而且钢壳装药产生的冲击波峰值总是比硬铝壳装药产生的偏大。对比实验值与计算值，硬铝壳装药爆距 5 m 处的压力峰值相差较大，极有可能是实验误差较大造成的。总体来说，冲击波峰值压力误差控制在 15% 以内。

表 2 冲击波峰值的实验结果与计算结果

Table 2 Comparison of experimental and calculation results

壳体	$l/m$	$p_{m,e}/\text{MPa}$	$p_{m,s}/\text{MPa}$	$\delta/\%$
钢	3	17.70	17.93	0.13
	5	8.35	9.31	11.5
	7	5.95	6.08	2.2
硬铝	3	17.50	17.85	0.20
	5	8.15	9.28	13.9
	7	5.85	6.05	3.4

为研究金属壳厚度对冲击波特性的影响,考虑到计算的简便,以 1 kg 球形含铝炸药钢壳装药水下 5 m 的爆炸为研究对象。

图 5 为不同爆距处冲击波压力峰值(相同爆距处带壳装药与裸药冲击波峰值的比值  $p_m/p_{m0}$ ) 随壳厚  $h$  变化的关系。峰值随着壳厚的增加先增大后减小,壳厚在 2~8 mm 时,峰值增大效果明显,在此区间壳厚的影响不大;壳厚在 6 mm 左右时有最大增幅,较裸药增加约 13%。这说明,对于一定质量的金属壳装药而言,存在一个可以有效增大冲击波峰值的最优壳厚。此外,钢壳的加强效果在爆距 1 m 处比较明显,爆距较大时,壳体的加强效果减弱。

图 6 为爆距 1 m 处冲击波压力随壳体厚度变化的关系。冲击波前期波形受壳体厚度影响较大,后期衰减波形趋于一致。此外,随着壳体厚度的增加,冲击波脉宽增大,冲击波压力爬升至峰值时刻有滞后效应而非超前效应,这与 D. A. Jones 等<sup>[7]</sup>的研究结果截然相反。这可能是由于壳体的约束延迟了爆轰波的释放与传播,而这种超前或滞后效应与药量或壳体有关。虽然这种延迟在冲击波的传播过程中表现并不明显,仅为 0.05 ms,但是延迟时间相对冲击波衰减时间常数却较大,对冲击波冲量将产生一定的影响。

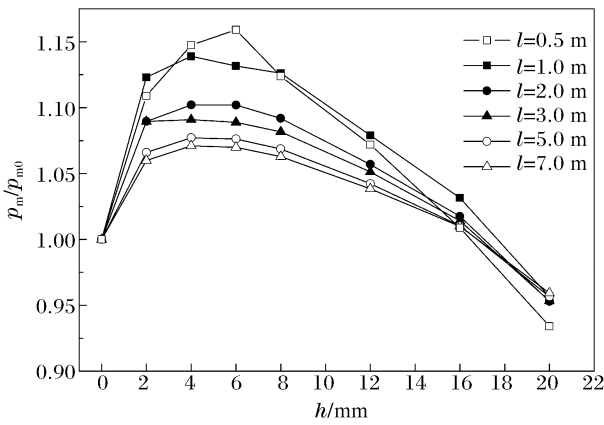


图 5 峰值压力随壳体厚度的变化

Fig. 5 Peak-pressure vs the thickness of shell

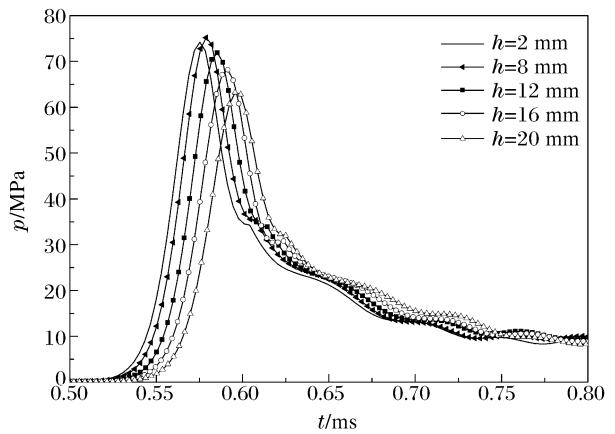


图 6 爆距 1 m 处冲击波随壳体厚度的变化

Fig. 6 Shock wave vs the thickness of shell at 1 m from charge centre

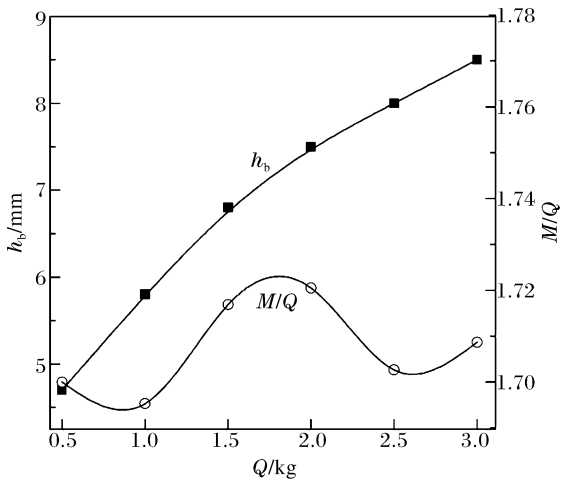


图 7 最优壳厚随装药量变化曲线

Fig. 7 Best thickness of shell vs the mass of charge

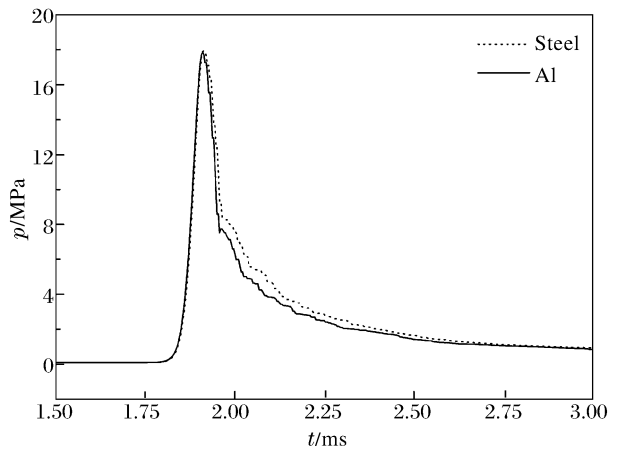


图 8 爆距 3 m 处 6 mm 钢壳与硬铝壳约束下冲击波曲线

Fig. 8 Shock wave vs the thickness of shell at 3 m from charge centre

以钢壳装药为例,对一定药量而言,最优壳厚的确定只能通过多次计算,尽量缩小范围而不能准确给出,因此图7只是给出了最优值附近的厚度值。如图所示,尽管随着药量的增加,最优壳厚也逐渐增加,但是若将填装比  $M/Q$  (壳体质量  $M$ /装药质量  $Q$ ) 作为衡量标准时,可以发现,尽管装药质量与壳厚同时增加,但填装比始终维持在 1.71 左右时,此时带壳装药爆炸产生的冲击波压力峰值达到极限。从炸药爆轰角度考虑,金属壳装药水下爆炸,由于外壳的存在,限制了爆轰产物侧向膨胀,减小了侧向稀疏波的进入所造成的能量损失,因而使得含铝炸药反应更加充分,最终炸药的威力得到一定的增强。壳体的影响中起主要作用的应是材料的密度和质量。密度大、质量大的外壳,爆炸时移动困难,能够有效地阻止爆轰产物侧向膨胀。

图8为厚度均为 6 mm 的钢壳与硬铝壳装药下,爆距 3 m 处的冲击波波形。虽然二者的冲击波峰值相差不大,但是相对硬铝壳,钢壳增大了时间常数,间接提高了冲击波能。对于约束强度相近的带壳而言,时间常数是用来衡量冲击波能的重要参数。数值计算结果表明,正是因为约束较强的壳体材料增大了时间常数,最终导致了冲击波能的增大。

### 3 结 论

通过实验与数值模拟方法,对某含铝炸药金属壳装药的水下爆炸冲击波进行研究,得到以下结论:

(1)相同厚度的钢壳和硬铝壳的含铝炸药装药,前者产生的冲击波冲量与冲击波能要明显大于后者,冲击波峰值与衰减时间常数相差不多。约束较强的钢壳对应的冲击波时间常数较大,间接提高了冲击波能,因此时间常数是衡量冲击波能的重要参数。

(2)壳体的存在使冲击波压力爬升到峰值的时间有滞后效应,壳厚越大,滞后效应越明显,延迟时间相对衰减时间常数较大。相同装药量下,冲击波压力峰值随着壳厚的增加呈现类似抛物线的变化趋势,即存在最优壳厚。随着装药量的增加,最优壳厚也逐渐增大。研究发现,填装比可以很好的衡量爆炸增强效果,对于钢壳而言,当填装比在 1.71 左右时可以最大限度的提高冲击波压力峰值。

### 参考文献:

- [1] Cole R H. Underwater explosion[M]. USA: Princeton University Press, 1948.
- [2] Zamyshlayev B V. Dynamic loads in underwater explosion[R]. AD2757183,1973.
- [3] 张振华,朱锡,白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):182-188.  
ZHANG Zhen-hua, ZHU Xi, BAI Xue-fei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):182-188.
- [4] 李健,荣吉利,杨荣杰,等. 水中爆炸冲击波传播与气泡脉动的实验及数值模拟[J]. 兵工学报,2008,29(12):1437-1443.  
LI Jian, RONG Ji-li, YANG Rong-jie, et al. Experiment and numerical simulation of shock wave propagation and bubble impulse of underwater explosion[J]. Acta Armamentarii, 2008,29(12):1437-1443.
- [5] 师华强,宗智,贾敬蓓. 水下爆炸冲击波的近场特性[J]. 爆炸与冲击,2009,29(2):125-130.  
SHI Hua-qiang, ZONG Zhi, JIA Jing-bei. Short-range characters of underwater blast waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):125-130.
- [6] Takahashi K, Murata K, Torii A, et al. Enhancement of underwater shock wave by metal confinement[C]//Proceedings of 12th International Detonation Symposium. San Diego, 2002:466-474.
- [7] Jones D A, Northeast E D. Effects of case thickness on the performance of underwater mines[R]. ADA293941, 1995.
- [8] LI Yu-jie, ZHANG Xiao-ci, WANG Jun, et al. Underwater explosion of TNT dynamite with a metal shell and annular gap[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005,9(3):118-125.
- [9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics. The Netherlands, 1983:541-547.

# Shock wave features of underwater explosion of explosives with metal shell<sup>\*</sup>

XIANG Da-lin<sup>1</sup>, RONG Ji-li<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, YANG Rong-jie<sup>3</sup>

- (1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
 2. Department of Automobile Engineering, Guangxi University of Technology,  
 Liuzhou 545006, Guangxi, China;  
 3. School of Material Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Experiment and numerical simulation were performed by using 1 kg cylindrical aluminized explosive cased by 6 mm thick steel and aluminum shells, respectively. The results show that the steel shell can enhance the impulse, shock wave energy and decay time compared with the aluminum shell. And the influences of the steel shell thickness were analyzed. With the increase of the thickness, the shock wave were enhanced and then weakened, and there was a lag-effect for the peak pressure of the shock wave. For a given mass of explosive, there lies an optimum shell thickness for enhancing the shock wave peak pressure. For different mass, the mass ratio of shell to explosive is an important parameter for estimating the underwater explosion of cased explosive.

**Key words:** mechanics of explosion; shock wave; underwater explosion; metal shell

\* Received 13 October 2010; Revised 25 March 2011

Corresponding author: RONG Ji-li, rongjili@bit.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)

## 第九届全国爆炸力学学术会议第一轮(征稿)通知

经中国力学学会批准,第九届全国爆炸力学学术会议计划于 2012 年 7 月底在青海省西宁市举行,本次会议由中国力学学会爆炸力学专业委员会主办,中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室承办。

### 一、征文范围

- |                 |                   |                 |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| (1) 爆炸驱动与冲击加载技术 | (2) 应力波理论与效应      | (3) 材料本构关系与动态断裂 |
| (4) 爆炸冲击效应及其应用  | (5) 爆轰学与钝感高威力炸药技术 | (6) 结构动态响应与安全防护 |
| (7) 冲击吸能与应用     | (8) 爆炸加工与爆破工程     | (9) 爆炸冲击实验与诊断技术 |
| (10) 爆炸与冲击数值模拟  | (11) 爆炸合成新材料      | (12) 其他爆炸力学问题   |

### 二、征文要求

(1) 凡未在国内学术刊物和会议上发表过的论文均可投稿,所投稿件需通过本单位保密审查。现接收论文全文。

(2) 来稿请用 Word 文档编排,内容包括题目(二号黑体)、作者姓名(小四号仿宋)、单位、地址、邮编(均为小五号宋体)、摘要(五号宋体)、关键词(五号仿宋)、正文(小四号宋体)、图表和参考文献等。

(3) 请将稿件通过电子邮件发送至会议专用邮箱(bzlxhy2012@163.com),投稿截止日期为 2012 年 4 月 20 日。请在稿件首页右上角注明专题代号和作者通讯方式。

所有来稿均交由会议学术委员会审稿,审查优秀的稿件将推荐在《爆炸与冲击》或《高压物理学报》增刊上发表。

### 三、投稿联系方式

联系人:王影(0816-2490042,13989285830);安焕新(0816-2485105,13689678097) 传真:0816-2485139

通信地址:621900 四川省绵阳市 919 信箱 110 分箱

电子邮箱: bzlxhy2012@163.com

中国力学学会爆炸力学专业委员会

中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室(代章)

2011 年 12 月