

文章编号:1006-9941(2009)04-0431-05

## 小尺寸装药爆轰在有机玻璃隔板中的衰减规律

徐新春<sup>1</sup>, 焦清介<sup>1</sup>, 曹 雄<sup>1,2</sup>, 胡双启<sup>2</sup>, 赵海霞<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**利用锰铜压阻传感器法测量了某聚奥传爆药在不同直径下的小尺寸装药爆轰输出冲击波经不同厚度有机玻璃隔板衰减后的冲击波压力,通过对实验数据进行拟合,得到了有机玻璃介质中冲击波衰减系数与装药直径的指数型关系。实验中传爆药装药密度为 90% 的理论密度,约束条件分 45° 钢和有机玻璃两种,装药直径为 1.5 mm、3 mm、5 mm 和 8 mm。结果表明:衰减系数随装药直径增大而减小,装药的约束条件越弱,这种变化越明显。

**关键词:**军事化学与烟火技术;冲击波衰减;小尺寸装药;冲击波压力;锰铜压阻法

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.014

### 1 引言

冲击波在介质中传播的过程中,由于波后和边侧的稀疏作用,或者由于波阵面熵增、粘性阻尼损耗以及与应变率有关的本构关系等原因,冲击波在密实介质中会不断衰减,波速和波阵面压力逐渐下降,并最终衰减为应力波或甚至声波<sup>[1]</sup>。

在弹药的典型传爆序列中,上下级火工品之间常采用不同厚度的密实介质作为隔板来实现能量传递的匹配<sup>[2]</sup>,以达到准确的传爆或隔爆效果,从而提高传爆序列的可靠性和安全性。随着火工品的小型化及爆炸逻辑网络的发展,要求对小尺寸装药爆轰特性进行研究,因此,研究小尺寸装药爆轰冲击波在隔板中的衰减规律可以为弹药传爆序列的小型化设计提供实验参数和科学依据。从理论上讲,小尺寸装药爆轰为爆轰波能够稳定传播的非理想爆轰<sup>[3]</sup>,本实验研究的装药直径介于临界直径和极限直径之间的传爆药装药是典型的小尺寸装药。

关于冲击波在有机玻璃中的衰减规律,已经有一些报道。胡湘渝<sup>[4]</sup>采用装药直径为 50 mm 的 8701 为施主装药、王作山<sup>[5]</sup>采用装药直径为 5.1 mm RDX 为施主装药、F. X. Jetté<sup>[6]</sup>采用装药直径为 50 mm 的硝基甲烷为施主装药,分别得到了冲击波在有机玻璃隔板中的衰减规律,但主要是对大直径装药的爆轰输出进行研究,并且只得到了单一装药直径下有机玻璃隔板的衰减规律。韩秀凤<sup>[7]</sup>采用 1 号火花式电雷管为施主装药,得到了冲击波在有机玻璃隔板中的衰减规律,并指出衰减系

数与施主装药的装药直径有关,并且装药直径越小,衰减系数越大,定性地给出了衰减系数随装药直径变化的结论,但并没有对此结论进行具体的实验研究。

本实验则对装药直径在极限直径以下的小尺寸传爆药装药爆轰输出冲击波在有机玻璃隔板中衰减规律进行研究,发现衰减系数随着装药直径的减小而呈指数型增长。

### 2 隔板冲击波压力测试

#### 2.1 锰铜压阻传感器测压原理

本实验测试的圆柱形装药为 8 mm 以下的小尺寸装药直径,侧向稀疏效应导致爆轰反应的能量损失已不可忽略,使爆轰波阵面呈弯曲状,如果将装药轴线处的爆轰波阵面近似为平面波,因此锰铜压阻传感器的敏感区尺寸越小,测量结果的精度越高。采用微型 H 型锰铜压阻传感器,敏感区尺寸为 0.127 mm × 0.254 mm,厚度为 10 μm,由绝缘膜封装,其敏感区结构图见图 1。

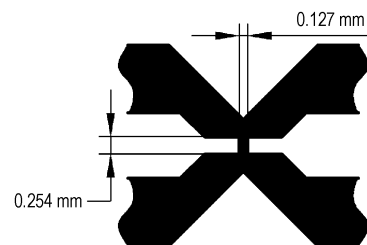


图 1 微型 H 型锰铜压阻传感器敏感区结构图

Fig. 1 Structural sketch of sensitivity section of micro H type manganin gauge

收稿日期:2008-10-15;修回日期:2009-04-21

作者简介:徐新春(1983-),男,博士研究生,研究方向为小尺寸装药隔爆传爆机理。

利用恒流源为锰铜压阻传感器供电,当传感器受到冲击波的压力作用时,传感器的电阻变化与其两端

的电压变化有如下关系:

$$\Delta V/V_0 = I\Delta R/IR_0 = \Delta R/R_0 \quad (1)$$

式中,  $\Delta V/V_0$  为传感器两端电压的变化率,  $\Delta R/R_0$  为传感器的电阻变化率,  $I$  为恒流源提供的恒定电流。

该锰铜压阻传感器的  $p \sim \Delta R/R_0$  关系标定曲线为:

$$p = 53.22 \times (\Delta R/R_0) \quad (0 \sim 5.907 \text{ GPa}) \quad (2)$$

$$p = 1.978 + 35.28 \times (\Delta R/R_0) \quad (> 5.907 \text{ GPa}) \quad (3)$$

实验中利用示波器采集传感器在冲击波峰值压力作用下的电压变化曲线,即可得到  $\Delta V/V_0$  的值,利用式(1)的关系:  $\Delta V/V_0 = \Delta R/R_0$ ,代入到传感器的标定曲线式(2)和式(3)可以计算出相应的冲击波压力峰值大小。

## 2.2 测试系统

本测试系统的主要实验装置包括 MH4E 型高速脉冲恒流源、DPO4054 式数字示波器和小型爆炸容器。主要实验过程为:手动触发恒流源上控制雷管起爆的输入端,雷管起爆后,缠于其底部的触发探针因爆轰产物的导电性而导通,从而触发恒流源上控制为锰铜压阻传感器供电的输入端,使得恒流源为锰铜压阻传感器输入恒流,以保证小尺寸装药由雷管起爆后爆轰波传播至锰铜压阻传感器上时能够得到有效的电压信号,最后将示波器上捕捉到的电压信号保存。爆炸容器内的组件安装结构如图 2 所示。

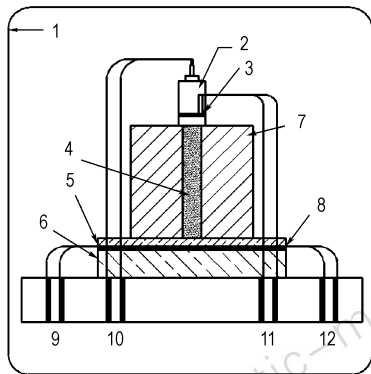


图 2 爆炸容器内组件安装结构图

- 1—小型爆炸容器, 2—雷管, 3—触发探针, 4—传爆药柱,  
5—保护介质(PMMA), 6—有机玻璃承压块, 7—约束套筒,  
8—锰铜压阻传感器, 9,10—接恒流源输出端,  
11—接恒流源输入端, 12—接示波器

Fig. 2 Structural sketch of subassemblies in explosion proof bomb

- 1—small-sized explosion proof bomb, 2—detonator,  
3—triggering probe, 4—booster pellet,  
5—protective medium(PMMA), 6—PMMA support,  
7—holder sleeve, 8—manganin gauge,  
9,10—to pulse constant-current output,  
11—to pulse constant-current input, 12—to oscilloscope

## 2.3 药柱压制

本实验所用传爆药为中北大学研制的某聚奥细颗粒传爆药,约束套筒材料为 45# 钢和有机玻璃(PMMA),套筒外径为 20 mm,装药高度为 38 mm,装药密度为  $(1.707 \pm 0.005) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (90% TMD),为保证压药密度并避免密度梯度,本实验采用定位压药的方法分七次将药柱压制成型。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 压力测试结果

通过改变装药直径和有机玻璃隔板的厚度,多次测量  $p_{\text{mx}}$ ,得到了相应装药参数下的实验结果(见表 1)。

表 1 装药参数和实验结果

Table 1 Charge parameters and experimental data

$d/\text{mm}$	$x/\text{mm}$	$p_{\text{mx}}/\text{GPa}$	
		45# steel	PMMA
8	1	20.147	19.583
	1.5	18.912	18.277
	2	18.454	17.607
	3	16.549	15.561
5	4	14.820	13.620
	1	19.195	17.889
	1.5	17.642	15.455
	2	16.513	14.044
3	3	14.255	11.609
	4	12.244	8.963
	1	15.984	14.255
	1.5	12.985	11.539
1.5	2	10.410	9.598
	3	7.623	6.423
	4	5.535	4.258
	1	8.434	5.588
1.5	1.5	6.564	4.311
	2	4.683	2.980
	3	2.821	1.863
	4	1.650	1.011

Note:  $d$  is charge diameter;  $x$  is the thickness of PMMA gap.

### 3.2 不同装药直径下的有机玻璃隔板衰减规律

关于冲击波在密实介质中的传播规律,王礼立<sup>[8]</sup>得到了衰减规律的指数型表达形式:

$$p_{\text{mx}} = p_{\text{m0}} e^{-\alpha x} \quad (4)$$

式中,  $p_{\text{m0}}$  为冲击波进入有机玻璃中的初始入射压力, GPa;  $p_{\text{mx}}$  为在有机玻璃片中距入射表面  $x$  处的冲击波压力, GPa;  $\alpha$  为冲击波在有机玻璃中的衰减系数。

通过改变隔板厚度  $x$ ,根据实验测得的  $p_{\text{mx}}$  值,利用数据处理软件拟合即可得到衰减系数  $\alpha$ 。

采用式(4)作为有机玻璃隔板的衰减规律来处理表 1 中的实验数据。为了方便实验数据的处理,等号两边同时取自然对数即可得到如下的线性关系式:

$$\ln p_{mx} = \ln p_{m0} - \alpha x \quad (5)$$

这样,对于实验测得的  $p_{mx}$ - $x$  值,采用最小二乘法对实验数据  $\ln p_{mx}$ - $x$  进行线性拟合,即可得到不同装药条件下有机玻璃隔板对冲击波的衰减关系,同时可以得到有机玻璃片表面所受到的初始冲击波压力,拟合得到的  $\alpha$  和  $\ln p_{m0}$  值列于表 2,拟合曲线如图 3 和图 4 所示。

表 2 实验数据拟合结果

Table 2 Fitting parameters of experimental data

confinement	$d/\text{mm}$	$\alpha$	$\ln p_{m0}/\text{GPa}$	$p_{m0}/\text{GPa}$
45# steel	8	0.1005	3.103	22.26
45# steel	5	0.1483	3.099	22.18
45# steel	3	0.3495	3.088	21.93
45# steel	1.5	0.5453	2.673	14.48
PMMA	8	0.1191	3.095	22.09
PMMA	5	0.222	3.092	22.02
PMMA	3	0.4007	3.056	21.24
PMMA	1.5	0.5654	2.282	9.80

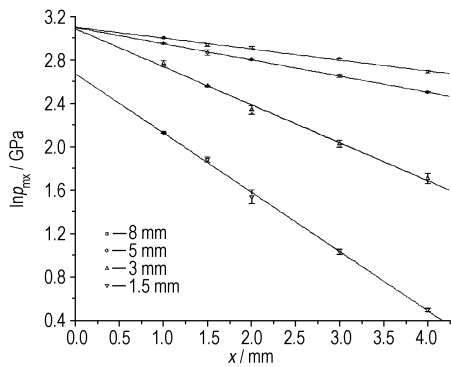


图 3 45# 钢约束不同直径装药的  $\ln p_{mx}$ - $x$  图  
Fig. 3 Fitted  $\ln p_{mx}$ - $x$  curves of different charge diameter under 45# steel restraint

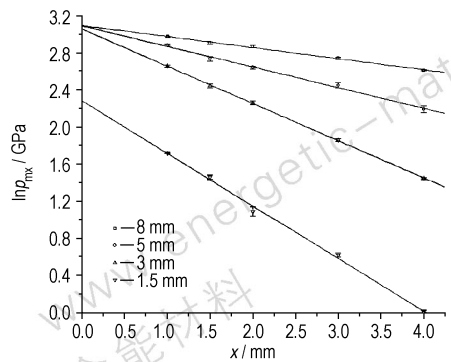


图 4 PMMA 约束不同直径装药的  $\ln p_{mx}$ - $x$  图  
Fig. 4 Fitted  $\ln p_{mx}$ - $x$  curves of different charge diameter under PMMA restraint

从图 3 和图 4 可以看出,在同一约束条件下,各条直线的斜率即衰减系数  $\alpha$  随着装药直径的减小而增大,并且装药直径越小,衰减系数增大得快,说明小直径下

冲击波经过有机玻璃隔板材料所损耗的能量占初始冲击波能量的比例越来越大;对于有机玻璃隔板上表面的初始入射冲击波压力,随着装药直径的增大而趋于稳定,说明该传爆药在两种约束条件下的极限直径约为 3 mm。

为了更好地得出不同约束下衰减系数随装药直径的变化规律,将同一直径下 45# 钢和 PMMA 约束装药的实验数据拟合曲线相互对比,如图 5 ~ 图 8 所示。

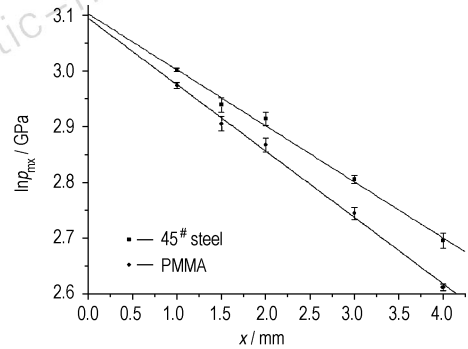


图 5 45# 钢和 PMMA 约束 8 mm 装药的  $\ln p_{mx}$ - $x$  图  
Fig. 5 Fitted  $\ln p_{mx}$ - $x$  curves of 8 mm charge under 45# steel and PMMA restraint

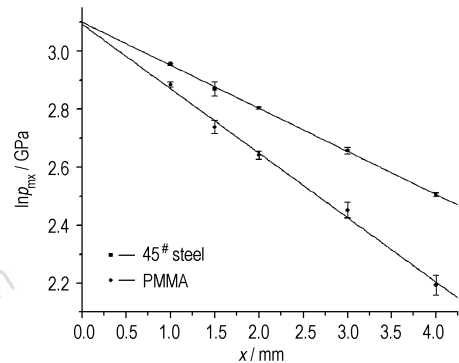


图 6 45# 钢和 PMMA 约束 5 mm 装药的  $\ln p_{mx}$ - $x$  图  
Fig. 6 Fitted  $\ln p_{mx}$ - $x$  curves of 5 mm charge under 45# steel and PMMA restraint

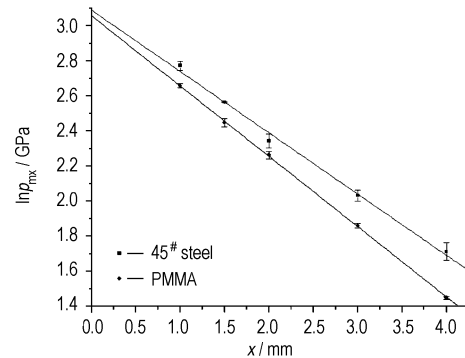


图 7 45# 钢和 PMMA 约束 3 mm 装药的  $\ln p_{mx}$ - $x$  图  
Fig. 7 Fitted  $\ln p_{mx}$ - $x$  curves of 3 mm charge under 45# steel and PMMA restraint

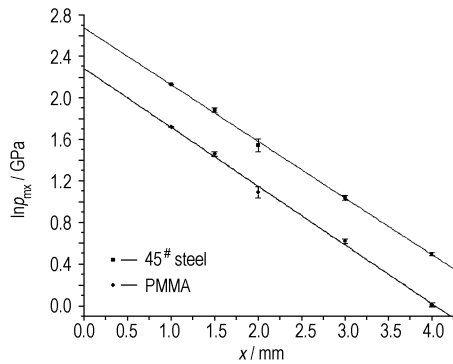


图8 45#钢和PMMA约束1.5 mm装药的  $\ln p_{\max}-x$  图

Fig. 8 Fitted  $\ln p_{\max}-x$  curves of 1.5 mm charge under 45# steel and PMMA restraint

从图5~图8可以看出,同一直径的传爆药装药,45#钢约束下的衰减系数比PMMA约束要小,说明阻抗大的约束壳体更有益于爆轰波的传播,由于约束壳体的存在,减弱了侧向稀疏波侵入爆轰反应区而引起的能量损失。

根据装药直径  $d$  和衰减系数  $\alpha$  的一一对应关系,利用数学处理软件对其进行拟合,可以得到其散点图和拟合曲线图,如图9和图10所示。

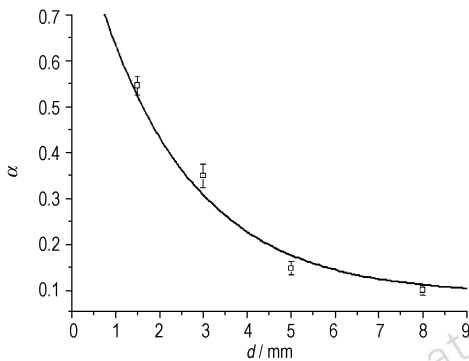


图9 45#钢约束衰减系数  $\alpha$  随装药直径  $d$  的变化规律

Fig. 9 Fitted  $\alpha-d$  curve of charge under 45# steel restraint

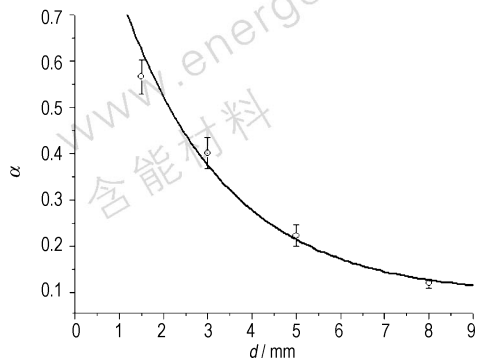


图10 PMMA约束衰减系数  $\alpha$  随装药直径  $d$  的变化规律

Fig. 10 Fitted  $\alpha-d$  curve of charge under PMMA restraint

对于45#钢约束下的小尺寸装药,对实验数据进行拟合可以得到衰减系数随装药直径变化的指数型规律:  $\alpha = 0.0906 + 0.8615e^{-\frac{d}{2.1743}}$ 。

对于PMMA约束下的小尺寸装药,对实验数据进行拟合可以得到衰减系数随装药直径变化的指数型规律:  $\alpha = 0.0924 + 0.9967e^{-\frac{d}{2.3805}}$ 。

从以上的实验结果可以看出,在不同的装药直径下,衰减系数  $\alpha$  的大小是变化的,并且随着装药直径的减小而增大。从理论上分析,随着装药直径的不断减小,侧向稀疏效应引起的爆轰反应区内的能量损失比例越来越大,用于对隔板进行压缩、加热和驱动加速的能量占总能量的比例增大,导致冲击波在有机玻璃隔板中的衰减幅度增大。因此,小尺寸装药爆轰输出冲击波在有机玻璃隔板中传播时,其峰值压力随隔板厚度呈指数衰减特征,且衰减指数为装药直径的函数:

$$p_{\max} = p_{m0} e^{-\alpha(d)x} \quad (6)$$

其中,45#钢约束时,  $\alpha = 0.0906 + 0.8615e^{-\frac{d}{2.1743}}$ ; 有机玻璃约束时,  $\alpha = 0.0924 + 0.9967e^{-\frac{d}{2.3805}}$ 。

## 4 结论

(1) 本实验所研究的某聚奥传爆药的小尺寸装药爆轰输出冲击波经有机玻璃隔板传播时,其峰值压力随隔板厚度增加呈指数型衰减,且衰减系数随装药直径也呈指数型变化规律。

(2) 装药直径越小,衰减系数越大,当装药直径为8 mm时,衰减系数趋于恒定值:45#钢约束下  $\alpha$  趋于0.0906,PMMA约束下  $\alpha$  趋于0.0924。

(3) 衰减系数受约束介质阻抗的影响,在同一装药直径下,约束介质的冲击阻抗越强,衰减系数越小。

## 参考文献:

- [1] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [3] 冯长根. 小尺寸微通道爆轰学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [4] 胡湘渝. 凝聚炸药二维冲击波起爆研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1999.
- [5] 王作山, 刘玉存, 郑敏, 等. 爆轰冲击波在有机玻璃中衰减模型的研究[J]. 应用基础与工程材料科学学报, 2001, 9(4): 316-319. WANG Zuo-shan, LIU Yu-cun, ZHENG Min, et al. Study on the attenuating model of detonation shock wave in the PMMA gap[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(4): 316-319.
- [6] Jetté F X, Goroshin S, Higgins A J. Shock reactivity of non-porous

mixtures of manganese sulfur [C] // Shock Compression of Condensed Matter, 2007.

- [7] 韩秀凤, 蔡瑞娇, 严楠. 雷管输出冲击波在有机玻璃中传播衰减的实验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(6): 329 - 332.

HAN Xiu-feng, CAI Rui-jiao, YAN Nan. Study on attenuation of detonator shock wave in PMMA [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 329 - 332.

- [8] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

## Attenuation Regularity of Detonation Wave of Small Charge in PMMA

XU Xin-chun<sup>1</sup>, JIAO Qing-jie<sup>1</sup>, CAO Xiong<sup>1,2</sup>, HU Shuang-qi<sup>2</sup>, ZHAO Hai-xia<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The output shock wave pressure attenuated by different thicknesses of PMMA gaps of booster JO with small size charge diameter was measured by manganin piezoresistance method. The exponential regularity of the shock wave attenuation coefficient versus the charge diameter in PMMA was obtained by fitting experimental data. The load density of the booster was 90% of the theoretical density, and the charge diameter was 1.5 mm, 3 mm, 5 mm and 8 mm with confinement of 45# steel and PMMA. Results show that the attenuation coefficient tends to decrease with the increasing of the charge diameter under the same confinement. The confinement of the charge is stronger, the change is more obvious.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; shock wave attenuation; small size charge; shock wave pressure; manganin piezoresistance method

(上接 430 页)

- [2] 周业明, 李莉, 胡志勇. 有限元模拟预测铸钢件的宏观缩孔缺陷 [J]. 铸造, 2003, 50(12): 743 - 745.

ZHOU Ye-ming, LI Li, HU Zhi-yong. Shrinkage defect in steel casting predicted by FEM software [J]. *Foundry*, 2003, 50(12): 743 - 745.

- [3] HOU Shu-ping, ZHAO Wei-min, REN Fu-zhan. Progress in the micro-modeling of the casting solidification process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123: 361 - 370.

- [4] ZHAO Hai-dong, Ohnaka Itsuo, ZHU Jin-dong. Modeling of mold filling of Al gravity casting and validation with X-ray in-situ observation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 32: 185 - 194.

- [5] Hamilton R W, See D, Butler S, et al. Multiscale modeling for the

prediction of casting defects in investment cast aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A343: 290 - 300.

- [6] 黄亨建, 董海山, 张明. B 炸药的改性研究及其进展 [J]. 含能材料, 2001, 9(4): 183 - 186.

HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming. Problems and developments in composition B modification research [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2001, 9(4): 183 - 186.

- [7] 马兆敏, 沈炜良, 李文娟. 复杂铸件三维温度场有限元分析 [J]. 广西工学院学报, 2003, 14(1): 54 - 58.

MA Zhao-min, SHEN Wei-liang, LI Wen-juan. An analysis of finite elements in 3-dimension temperature field of complex castings [J]. *Journal of Guangxi University of Technology*, 2003, 14(1): 54 - 58.

## Numerical Simulation and Experimental Validation of RHT Solidification Process

LI Jing-ming, TIAN Yong, ZHANG Ming, GUO Peng-lin, ZHANG Wei-bin

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to understand the solidification process of casting explosive, the temperature fields of RHT explosive during solidification process were simulated by finite element method. The shrinkage of RHT explosive after solidification was also predicted. The results show that the temperature difference between inner and outer of RHT explosive during solidification process is quite great. There exists an inflexion on the temperature curves in the centre area. And the porosity will be presented on the middle position of solidified RHT explosive. On the other hand, the temperature of RHT explosive during solidification process was also tested by thermocouple and the interior quality was inspected by ICT, and the simulated results and tested results were also compared. The results show that the finite element method can be used to simulate the RHT explosive solidification process.

**Key words:** physical chemistry; RHT explosive; solidification; numerical simulation