

文章编号: 1006-9941(2003)02-0061-05

# 弹钢材料与炸药装药爆炸特性耦合关系的 实验分析与探讨

陈雪莲, 张宝, 张庆明, 刘长林, 林 江

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 采用转镜式狭缝扫描摄影技术与整破片回收实验, 通过研究贝氏体钢与 30CrMnSiNi2A 钢在装填两种不同猛度炸药下的爆炸加速性态和破碎性能, 对弹钢材料与炸药装药特性的耦合匹配进行了探讨。

**关键词:** 耦合匹配; 爆炸加速; 破碎性能

**中图分类号:** TQ560.72

**文献标识码:** A

## 1 引 言

弹药壳体材料力学性能与炸药装药爆炸性能的最佳匹配是设计研制威力俱佳的战斗部的核心问题之一。良好强韧性的壳体材料与适当爆炸性能炸药的最佳耦合匹配可以获得块度合理且速度高的高威力破片, 从而达到对目标的最大毁伤效能。

本文主要研究了两种弹体钢材料(贝氏体钢、30CrMnSiNi2A 钢)在不同爆炸载荷(TNT 炸药、8701 炸药)条件下的破碎性能。并以实验模拟方法研究了破片的形成规律, 得到了破片的质量、数量、结构参数分布规律。在此基础上对弹钢材料与炸药装药特性的耦合问题进行了初步的探讨。

## 2 测试技术

### 2.1 圆管爆炸加速测试(高速摄影实验)

为了研究不同材料钢管的爆炸膨胀加速过程, 实验按以下三种情况进行:

(1) 对装药相同, 壳体材料不同的筒形弹进行实验; (2) 对装药相同, 装填系数(不同的筒形弹进行实验; (3) 对装药不同的筒形弹进行实验。

装填系数  $\alpha$  是用来衡量弹药装填炸药的多少, 其表达式为

$$\alpha = m/M$$

式中:  $m$  为装填炸药的质量, kg;  $M$  为弹丸的总质量, kg。

恰当的选择装填系数, 对提高弹药威力和炸药能量利用率有着重要的意义。

实验中设计了表 1 所示几种规格的弹体圆管, 装填用炸药为 TNT、8701, 其爆速分别为  $6.964 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $8.425 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [1]; 密度分别是  $1.606 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $1.716 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

表 1 试件规格

	Table 1 Specification of specimen mm				
	30CrMnSiNi2A			贝氏体钢	
	1	2	3	4	5
长度 $L$	160	160	160	140	140
内径	$\phi 26$	$\phi 26$	$\phi 26$	$\phi 26$	$\phi 26$
外径	$\phi 30$	$\phi 32$	$\phi 34$	$\phi 30$	$\phi 34$

在本实验中采用了带有背景光的狭缝扫描摄影技术以观测圆管的直径随时间的变化规律。如图 1 所示, 为捕捉到圆管爆炸膨胀过程的良好照片, 除了爆炸光源具有足够长的发光时间之外, 必须做到背景光源药柱爆炸与试件爆炸的良好同步[2]。

图 2 展示的是实验得到的一幅典型的高速摄影扫描照片, 其中水平部分为壳体仍处于静止时的扫描线, 斜线为壳体膨胀过程的轨迹, 黑暗部分中的白色亮线显示当壳体破裂以后, 从裂缝泄漏出的发光爆炸产物的扫描线。显然, 这种扫描照片不但提供了壳体爆炸膨胀加速过程的信息, 而且还提供了壳体发生破裂的时间及半径等的信息。

收稿日期: 2002-11-27; 修回日期: 2003-02-20

作者简介: 陈雪莲(1975-), 女, 硕士研究生, 研究方向为材料与结构动力学。

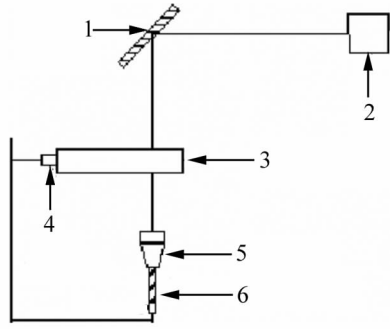


图1 高速摄影试件安装位置图

1—反光镜, 2—GSJ 摄影记录仪, 3—实验圆筒, 4—高压雷管, 5—爆炸光源, 6—延时导爆索

Fig. 1 Sketch of experimental setup

1—mirror, 2—GSJ camera, 3—specimen, 4—detonator, 5—explosive light source, 6—time-delay primacord

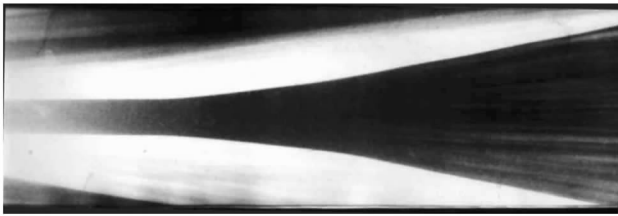


图2 高速摄影扫描图

Fig. 2 Typical scanning photograph of the expansion of steel shell taken in experiment

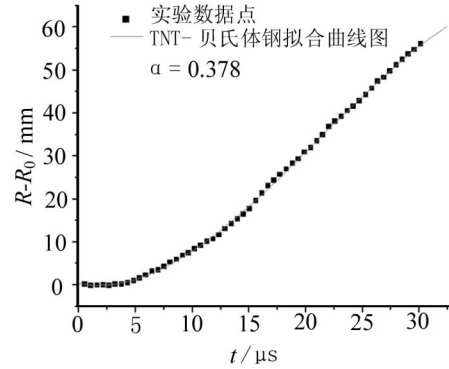
图3 是将实验数据拟合处理后得到的  $R-t$  图, 其中壳体运动轨迹可用如下的三项式描述:

$$R - R_0 = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 \quad (1)$$

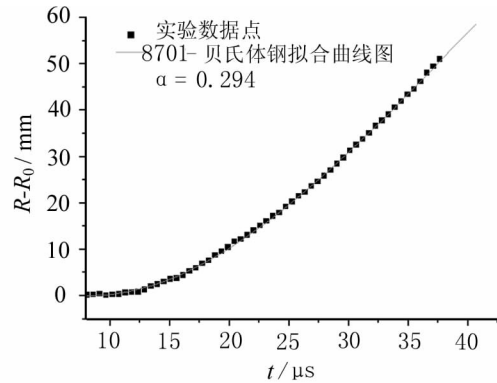
式中:  $A, B, C, D$  为曲线拟合系数;  $R$  为圆管膨胀的外壁半径, mm;  $R_0$  为圆管真实半径, mm。

对(1)式进行求导, 得到圆管外壁膨胀速度  $V$  与时间  $t$  的关系:

$$V = B + 2Ct + 3Dt^2 \quad (2)$$



(a)  $R - R_0 = 0.318 - 0.495t + 0.148t^2 - 0.002t^3$



(b)  $R - R_0 = 6.321 - 1.592t + 0.108t^2 - 0.001t^3$

图3 高速摄影实验结果  $R-t$  曲线

Fig. 3  $R-t$  curves of the steel shell expansion

数据处理过程中, 破片初速用实验测得的壳体膨胀速度的最大值来近似表示。表2即为两种弹钢圆管的爆炸实验结果。

表2 两种弹钢圆管在内部炸药爆轰作用下的实验结果

Table 2 Experimental data for two different steel shell

	贝氏体钢					30CrMnSiNi2A 钢							
	TNT	0.219		0.395		0.294		0.232		0.403		0.293	
装填系数 $\alpha$	0.378	0.219	0.395	0.294	0.232	0.403	0.293	0.230	0.420	0.307	0.243		
$A$	0.318	15.320	-2.035	6.321	39.850	24.020	16.475	14.546	38.580	24.011	47.573		
$B$	-0.495	-2.236	1.828	-1.592	-4.738	-3.999	-2.615	-2.220	-5.480	-3.248	-4.529		
$C$	0.148	0.142	0.033	0.108	0.205	0.183	0.114	0.092	0.207	0.116	0.123		
$D$	-0.002	-0.002	$-3.9e^{-4}$	-0.001	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001		
破片初速 $V_0$	2.626	1.803	3.098	2.673	2.093	2.682	2.216	1.861	3.134	2.542	2.118		
$/mm \cdot \mu s^{-1}$													

由圆管膨胀的  $R-t$  关系和  $V-t$  关系可得到圆管膨胀的  $V-(R - R_0)$  关系。图4、图5、图6、图7分别为不

同装填系数条件下贝氏体钢、30CrMnSiNi2A 钢与炸药 TNT, 8701 耦合匹配的  $V-(R-R_0)$  曲线。

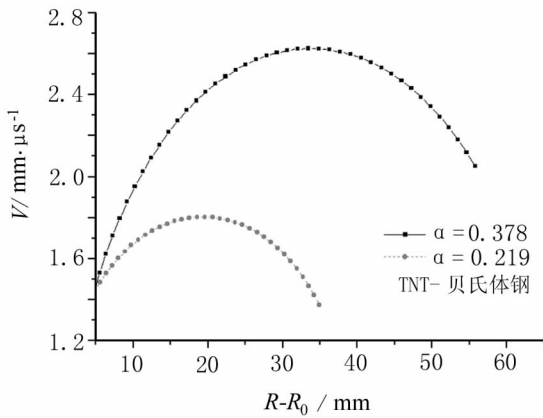


图 4 不同  $\alpha$  时贝氏体钢与 TNT 耦合的  $V-(R-R_0)$  曲线

Fig. 4  $V-(R-R_0)$  curves of Bainitic steel coupling with 8701 explosive at different  $\alpha$

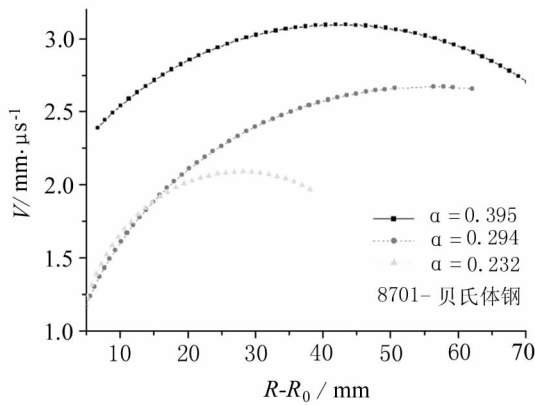


图 5 不同  $\alpha$  时贝氏体钢与 8701 耦合的  $V-(R-R_0)$  曲线

Fig. 5  $V-(R-R_0)$  curves of Bainitic steel coupling with 8701 explosive at different  $\alpha$

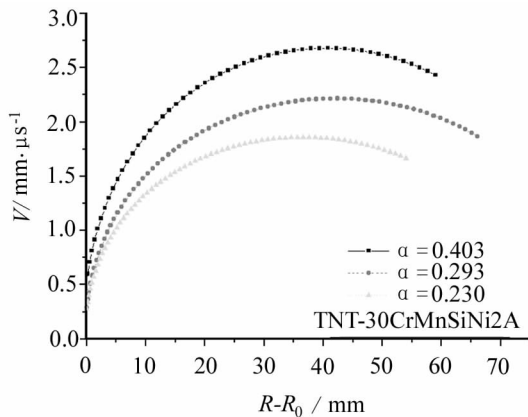


图 6 不同  $\alpha$  时 30CrMnSiNi2A 钢与 TNT 耦合的  $V-(R-R_0)$  曲线

Fig. 6  $V-(R-R_0)$  curves of 30CrMnSiNi2A steel coupling with TNT explosive at different  $\alpha$

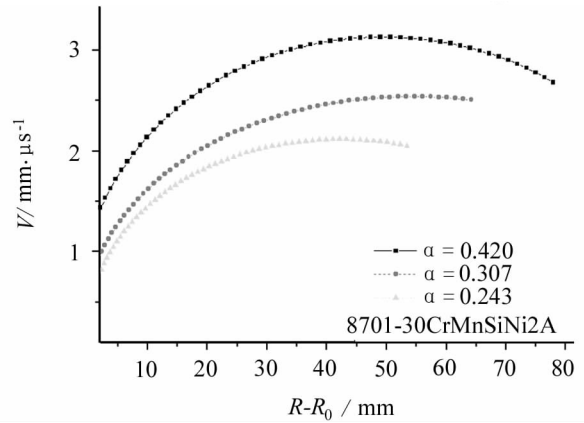


图 7 不同  $\alpha$  时 30CrMnSiNi2A 钢与 8701 耦合的  $V-(R-R_0)$  曲线

Fig. 7  $V-(R-R_0)$  curves of 30CrMnSiNi2A steel coupling with 8701 explosive at different  $\alpha$

从上述实验结果明显地看出：

(1) 作为战斗部弹体用钢，贝氏体钢比 30CrMnSiNi2A 钢的破片初速大。由表 2 数据可知，在贝氏体钢装填 8701 炸药条件下，当  $\alpha = 0.294$  时， $V_0 = 2.673 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ；而在 30CrMnSiNi2A 钢装填 8701 条件下， $\alpha = 0.307$  时， $V_0 = 2.542 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。假设破片初速随着装填系数呈线性变化，对其它几组数据进行计算，均可得到在相同  $\alpha$  条件下前者比后者的破片初速高的结论。

(2) 对于相同材料的圆管试件，装填 8701 炸药所形成的破片初速要比装填 TNT 炸药形成的破片初速高。这可从表 3 实验数据得出结论。

(3) 由图 4 ~ 图 7 明显看到，对于相同的弹体钢材，装填同一种炸药时，装填系数越大，破片初速  $V_0$  就越大。

表 3 两种弹钢圆管不同装填炸药的破片初速值

Table 3 Initial velocity of fragment for two different steel shell with different explosive loadings

	贝氏体钢 <sup>1)</sup>		30CrMnSiNi2A 钢 <sup>2)</sup>	
	TNT	8701	TNT	8701
$V_0/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	2.626	3.098	2.682	3.314

注：1) 贝氏体钢试件外径  $R = 30 \text{ mm}$ ，内径  $r = 26 \text{ mm}$ ，长度  $L = 140 \text{ mm}$ ；2) 30CrMnSiNi2A 钢试件外径  $R = 30 \text{ mm}$ ，内径  $r = 26 \text{ mm}$ ，长度  $L = 160 \text{ mm}$ 。

## 2.2 破片软回收实验

壳体在爆炸后形成的破片总数  $N$  及其按质量的分布规律，是衡量壳体与装药耦合好坏的标志，同时也是计算战斗部杀伤作用的重要依据。为考察破片的质

量分布规律,通过沙中静爆试验,将表1中的试件1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>分别与炸药TNT、8701交叉匹配,对爆炸后壳体形成的自然破片进行了软回收。实验装置如图8所示。

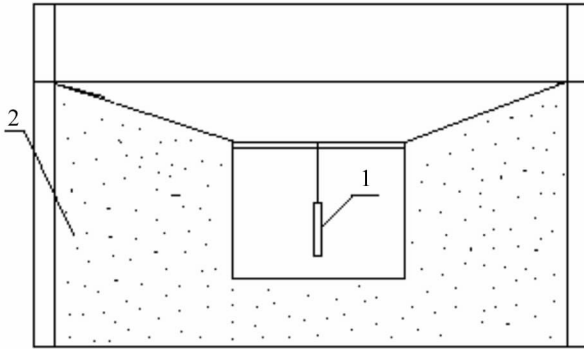


图8 破片软回收实验装置示意图

1—实验试件, 2—细砂子

Fig. 8 Experimental setup for soft-recovering fragments

1—specimen, 2—sands

将回收的破片按质量区间进行分组、统计,并将试件4<sup>#</sup>按回收率折算为试件1<sup>#</sup>的规格,得到各质量区间的破片分布数量和质量<sup>[3]</sup>。(为叙述方便,贝氏体钢-TNT下标为1,贝氏体钢-8701下标为2,30CrMnSiNi2A-TNT下标为3,30CrMnSiNi2A-8701下标为4。以下内容均遵从此规定)。

大量试验表明,战斗部爆炸后壳体形成的自然破片的质量分布规律可以采用Held公式来描述<sup>[4,5]</sup>

$$M(N) = M_0(1 - e^{-Bn^\lambda})$$

式中:  $M_0$  为所有破片总质量;  $M(n)$  为累积  $n$  个破片质量;  $n$  为累积破片数量(从最大质量破片开始计算);  $B, \lambda$  为常数。

由试验结果确定常数  $B$  和  $\lambda$  如下:

$$B_1 = 10^{-2.00816} = 0.00981 \quad \lambda_1 = 0.96165$$

$$B_2 = 10^{-1.80433} = 0.01569 \quad \lambda_2 = 0.79752$$

$$B_3 = 10^{-1.71560} = 0.01925 \quad \lambda_3 = 0.78415$$

$$B_4 = 10^{-1.90922} = 0.01232 \quad \lambda_4 = 0.85796$$

上述拟合结果的相关系数  $R$  分别为: 0.99167、0.99865、0.99777、0.99915。可见Held公式能很好地表述弹体爆炸破片的质量分布情况。

由此破片的质量分布规律分别表为

$$\begin{cases} M(n) = M_0(1 - e^{-0.00981n^{0.96165}}) \\ M(n) = M_0(1 - e^{-0.01569n^{0.79752}}) \\ M(n) = M_0(1 - e^{-0.01925n^{0.78415}}) \\ M(n) = M_0(1 - e^{-0.01232n^{0.85796}}) \end{cases} \quad (3)$$

对上述四式两边分别求导,得到

$$\begin{cases} m = \frac{dM(n)}{dn} = 0.00943M_0n^{-0.03835}e^{-0.00981n^{0.96165}} \\ m = \frac{dM(n)}{dn} = 0.01251M_0n^{-0.20248}e^{-0.01569n^{0.79752}} \\ m = \frac{dM(n)}{dn} = 0.01509M_0n^{-0.21585}e^{-0.01925n^{0.78415}} \\ m = \frac{dM(n)}{dn} = 0.01057M_0n^{-0.14204}e^{-0.01232n^{0.85796}} \end{cases} \quad (4)$$

上式反映了质量不小于  $m$  的破片数量  $n$  与  $m$  之间的关系。由式(4)确定的破片数随破片质量的分布曲线如图9所示。

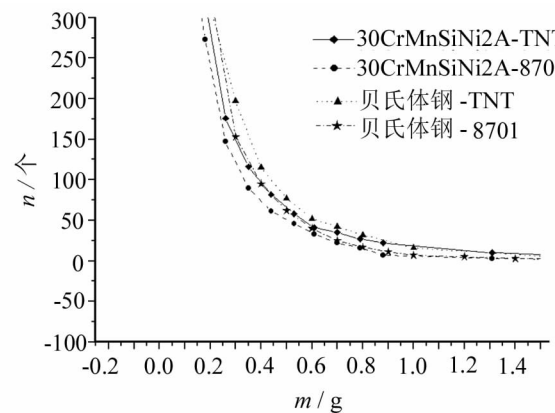


图9 破片数  $n$  随破片质量  $M$  的分布图

Fig. 9 Change of fragments number ( $n$ ) with the mass ( $m$ ) of fragments

由图9可以看出: 贝氏体钢装填TNT炸药后形成的质量大的破片数较多,而30CrMnSiNi2A钢装填TNT炸药后形成的质量较大的破片数相对较少。这表明,贝氏体钢对TNT装药的耦合性能优于30CrMnSiNi2A钢,两种弹钢对8701炸药的耦合情况也是如此。但是,8701炸药与这两种弹钢匹配后形成的破片质量小,较碎。这显然表明,装填8701炸药对这两种弹钢来说显然太过猛烈了。

式(3)确定的相对累积破片质量  $M(n)/M_0$  随累积破片数  $n$  的变化曲线展示于图10。

从图10中,我们又可以有以下结论: 在相同的累积破片数  $n$  下,无论是贝氏体钢还是30CrMnSiNi2A钢,装填TNT炸药时的相对累积破片质量  $M(n)/M_0$  均大于装填8701炸药时的  $M(n)/M_0$ 。这说明: 相同材料的圆管在装填不同猛度的炸药条件下,载荷越强,圆管碎裂越严重,破片分布更加细小,数目更多。这与图9所获的结论具有很好地一致性。

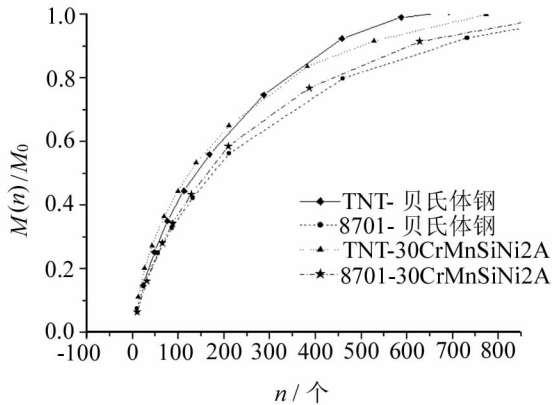


图 10 破片质量相对累积值随累积破片数  $n$  的分布图  
 Fig. 10 Change of relative cumulate value of fragments with the cumulate number( $n$ ) of fragments

### 3 结 论

通过以上实验分析,可以得到如下结论:

(1) 弹钢材料与炸药装药爆炸特性存在着一定的

耦合关系。耦合关系的好坏直接影响着战斗部的杀伤威力和毁伤效能。

(2) 作为弹体钢材料,贝氏体钢比 30CrMnSiNi2A 钢在爆炸加载下表现出韧性好、强度高。

(3) 贝氏体钢装填 TNT 及 8701 炸药后形成的破片质量相对较大,初速高,其破片动能高,杀伤威力大,是一种与炸药耦合性能较好的弹钢材料。

#### 参考文献:

- [1] 张宝,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2001.
- [2] GJB772.302-90. 炸药试验方法 标准圆筒试验[S]. 1993.
- [3] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [4] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
- [5] Joseph Carleone. Tactical Missile Warheads[J]. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1993.

## Experimental Analysis and Exploration on the Coupling of Shell-steels to Explosion Performances of Explosive Loadings

CHEN Xue-lian, ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, LIU Chang-lin, LIN Jiang

(National Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The rotating mirror type slot scanning photography and fragment recovery technique were applied to study the explosive acceleration and fragmentation behaviors of both bainitic and 30CrMnSiNi2A steel shells driven by different explosive loadings. Based on the experimental results obtained, the coupling of shell steels to explosive performances of loadings have been analyzed and discussed.

**Key words:** coupling; explosive acceleration; fragmentation behavior

\*\*\*  
 \* 投稿须知 \*

本刊拟从 2003 年开始拓宽刊登的内容,有关武器弹药设计、爆轰数值模拟、爆炸技术及其应用、爆炸灾害预防以及与含能材料领域相关的新材料、新技术等方面的文章也将予以刊登,真诚欢迎您及您的同事不吝笔墨为本刊撰写稿件,我们会竭尽全力及时报道您的研究课题进展,真诚为您服务。欢迎来稿,欢迎为本刊提出宝贵建议。

《含能材料》编辑部

\*\*\*