

文章编号: 1006-9941(2010)03-0351-05

柔性导爆索输出性能测试及传爆规律

白颖伟, 王可暄, 任西, 奥成刚, 李军, 褚恩义

(陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室, 陕西西安 710061)

摘要: 为了进一步简化弹药结构, 提高武器系统安全性和可靠性, 对影响柔性导爆索多点同步起爆网络输出性能的主要参数——爆速和爆压进行了研究。利用探针法, 采用时间间隔测试仪对柔性导爆索爆速进行测试, 探讨了靶距对爆速测试结果的影响, 结果发现, 影响柔性导爆索爆速的主要因素是装药密度、约束强度和装药直径, 在同样条件下, 银导爆索比铅导爆索的爆速明显提高。研究了微型 H 型锰铜压力计测试导爆索爆压的方法, 结果表明, 只有极小尺寸下爆压变化与约束材料有关, 利用这些结果, 能更精确地设计柔性爆炸网络。

关键词: 爆炸力学; 导爆索; 输出性能; 爆速; 爆压

中图分类号: TJ55; O38

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.025

1 引言

导爆索自出现以来, 已广泛应用在军事、航空航天等领域中。目前, 国外常用的小直径导爆索有柔爆索、封闭式导爆索、铠装式柔爆索和切割索^[1]。

将导爆索应用到爆炸网络中就得到了柔性爆炸网络。柔性爆炸网络可以集延期、传爆、点传火和爆炸切割等功能于一身, 从而在弹药系统中方便地实现以上部分或全部功能, 可以简化弹药结构, 提高武器系统安全性和可靠性^[2]。

爆速和爆压是影响柔性导爆索多点同步起爆网络输出性能的主要参数。爆速决定所选用导爆索能否满足系统作用时间和输出同步性要求, 系统作用时间只要选择合适爆速范围的导爆索即可, 而输出同步性受柔性导爆索装药工艺、柔性导爆索装药密度、长度及传爆连接点等因素影响。要控制柔性爆炸同步网络的同步性偏差, 就要从影响柔性导爆索爆速的主要因素入手, 将柔性导爆索的爆速误差控制在理想的范围内, 从而在组网的过程中进行优化组合, 得到高同步性的柔性爆炸网络。爆压则量化验证柔性导爆索输出威力能否满足起爆输出药柱要求, 从而选择适合的导爆索。

在火工品装药尺寸较小的情况下, 理论推导的爆速爆压测算方法^[3]并不完全适合, 还应该考虑到约束状态、装药直径、装药的初始温度等状态。本工作首先探索导爆索爆速和爆压测试方法, 在确保测试方法可行的基础上, 对影响导爆索爆速和爆压的主要因素进行试验研究。

爆速测试方面, 目前用于导爆索爆速测试技术已经比较成熟, 但是根据行业标准, 长度为 400 mm 的试件每次只能得到一个有效数据, 这种方法在试验时成本极高^[4], 与柔性导爆索在柔性爆炸网络中的应用尺寸差异较大。本文在分析靶距对实验结果影响的基础上对该方法进行了改进。

对于常用的较大尺寸的火工品, 可采用压力传感器测量爆压^[5-6]。由于导爆索装药尺寸很小, 常用的火工品测试爆压方法也不适用, 其爆压测试方法还处在探索性研究阶段^[7]。本工作主要采用改进型锰铜计测试导爆索爆压。

2 导爆索爆速测试

2.1 导爆索爆速测试方法探讨

利用探针法, 采用时间间隔测试仪进行导爆索爆速的测试。通用的测试方法试件长度采用 400 mm, 靶距 300 mm 进行, 为了研究不同靶距对测试数据的影响, 首先进行了误差理论计算。导爆索爆速测试时, 首先测试导爆索的作用时间 t , 按式(1)求得爆速:

收稿日期: 2009-10-14; 修回日期: 2009-12-03

基金项目: 火工品安全性可靠性国防科技重点实验室基金课题资助(9140C3705050806)

作者简介: 白颖伟(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 从事火工品研制。
e-mail: baiyw@126.com

$$D = \frac{L}{t} \quad (1)$$

式中, L 是靶距, t 是作用时间, D 是导爆索爆速。其测试误差按式(2)计算,

$$\Delta D = \pm \sqrt{(\alpha_1 \Delta L)^2 + (\alpha_2 \Delta t)^2} \quad (2)$$

式中, ΔD 是导爆索的爆速误差, ΔL 是由于各种原因引起的长度误差, Δt 是作用时间误差, α_1 和 α_2 可由多点作用时间关系式进行偏微分得到:

$$\alpha_1 = \frac{\partial D}{\partial L} = \frac{1}{t}, \quad \alpha_2 = \frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{1}{t^2}$$

从理论分析来看, 当导爆索爆速在 $6000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时候, 假定导爆索靶线装配位置误差引起的长度误差是 0.1 mm , 作用时间测试误差为 50 ns , 采用靶距 300 mm 和 50 mm 时的爆速测试误差分别为 24.6 , $61.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从理论分析来看, 如果导爆索爆速稳定, 采用大靶距测试误差比较小。但是导爆索的制作工艺决定了其爆速不可能特别稳定, 本试验采用的 8 种不同尺寸导爆索, 在测试靶距为 300 mm 时, 测试所得标准偏差最大的达到了 $180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了研究不同靶距对测试的影响, 本试验采用在一根导爆索上以 20 mm 至 300 mm 为间距的几种靶距, 每种情况均布 6 根靶线的方法进行比较, 结果见表 1。

表 1 不同靶距下柔性导爆索爆速

Table 1 Detonation velocity testing results of detonating cords at different sampling distances

No.	distances /mm	detonation velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	standard deviation / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	20	6875	99
2	50	6860	45
3	100	6861	47
4	150	6881	42
5	200	6882	37
6	300	6900	38

从试验结果来看, 只要都以一靶信号为基准, 在靶距不同时, 所得爆速平均值与靶距为 300 mm 时没有明显差异, 但 20 mm 时测试结果的标准偏差较大, 故采用 50 mm 进行爆速测试试验, 其装置如图 1 所示。

2.2 导爆索爆速测试

确定了爆速测试方法后, 对某外包覆为银和铅锡合金、主装药为 JO9CIII 的柔性导爆索进行了爆速测试, 分别进行了以下试验: 采用探针法对不同内径径向尺寸 ($\Phi 0.5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 1 \text{ mm}$ 、 $\Phi 1.5 \text{ mm}$ 和 $\Phi 2 \text{ mm}$) 的柔性导爆索进行爆速测试; 进行了高低温环境的爆速测试; 对

部分导爆索进行了柔性导爆索非直线传爆爆速测试。其中高温环境为 $(80 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温 3 h , 低温环境为 $-45 \sim -40 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温 3 h 。非直线传爆是将试件利用模具弯曲成如图 2 所示平面圆弧形进行爆速测试, 由于圆弧相切, 爆速在该点不会有明显改变, 通过这种方式测试有一定长度的圆弧形导爆索爆速变化。每种试件取得 30 发有效数据后得到平均爆速, 实验结果见表 2。



图 1 靶距为 50 mm 的试件装配图

Fig. 1 Set-up with 50 mm sampling distances

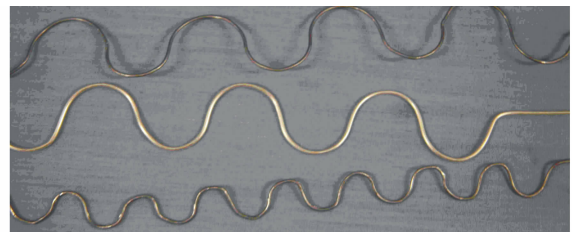


图 2 非直线传爆试件装配图

Fig. 2 Samples with different curving diameter

表 2 柔性导爆索爆速测试值比较

Table 2 Tested detonation velocity of detonating cords at different states

cords	lead				silver				
	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
inside diameter /mm	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
outside diameter /mm	1.2	1.55	2.31	3.11	1	1.3	2.0	2.66	
$\rho_1 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.00	1.12	1.58	1.22	1.69	1.76	1.81	1.67	
D_1 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	20 $^\circ\text{C}$	6376.0	6982.0	6795.0	6677.8	8115.9	8119.0	8151.0	8204.4
	80 $^\circ\text{C}$	6350.5	6857.5	6781.4	6631.1	8139.1	8134.2	8175.5	8230.7
	-45 $^\circ\text{C}$	6439.8	7088.2	6917.3	6811.2	8111.3	8109.8	8132.1	8198.2
D / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$R=5\text{mm}$	6057	-	6421	6343	8141	-	8079	-
	$R=3\text{mm}$	5904	-	6250	6209	8097	-	8061	-

Note: “-” means the items were not tested.

从初步的实验结果来看, 存在一定的最大爆速直径范围, 尺寸太小和太大时爆速会相对降低, 但这种差异并不是很大。考虑到炸药爆速与装药密度成线性关系^[3], 认为这种变化可能与装药密度有关。严格控制装药尺寸, 使导爆索装药直径 ($(15 \pm 0.03) \text{ mm}$) 相同但

密度不同,进行导爆索爆速测试,结果见表3。调整初始装药,严格控制装药密度为 $(1.75 \pm 0.5) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,得到相同装药密度但装药尺寸不同的导爆索试件,进行导爆索爆速测试,结果见表4。

表3 柔性导爆索爆速与装药密度关系

Table 3 Detonation velocity with different charging densities

No.	1	2	3	4	5
$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.3	1.6	1.69	1.76	1.77
$D_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	6648	7643	8177	8283	8292

Note: silver, charging diameter $(1.50 \pm 0.03) \text{ mm}$.

表4 柔性导爆索爆速-直径关系

Table 4 Detonation velocity with different charging diameters

No.	1	2	3	4	5	6
d/mm	1.5	1.09	0.98	0.9	0.6	0.3
$D_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8432	8379	8373	8317	8292	8165

Note: silver, charging density $(1.75 \pm 0.5) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

2.3 柔性导爆索爆速传爆规律分析

从上述试验结果可以看出,影响柔性导爆索爆速的主要因素有导爆索径向直径、约束材料或约束条件、导爆索装药密度等。

装药密度对爆速有一定影响(表3),在达到极限装药密度之前,符合线性变化规律,而随着密度接近极限装药密度,导爆索爆速增加速度变慢,接近装药的理想爆速。

由表4可见,当导爆索装药密度相同时,随着装药直径的变大,其爆速随之变大。因此,可以确定表2中直径较大的导爆索爆速较低是由于装药密度太小造成的。

由表2可见,同样条件下银导爆索比铅导爆索的爆速明显高,说明约束条件对爆速的影响很大。用该批次 MDF1.0 内径导爆索加工成限制性导爆索(CDF)后,爆速有了明显改变,再次说明外界约束对爆速影响很大。

高低温环境实验对爆速的影响有一定规律,银约束的导爆索 $D_{\text{高温}} > D_{\text{常温}} > D_{\text{低温}}$; 而铅铋导爆索 $D_{\text{高温}} < D_{\text{常温}} < D_{\text{低温}}$ 。这只能从约束的变化使药剂的密度发生了变化来解释。从约束材料来看,由于铋是一种热缩冷胀的材料,随着温度升高,装药密度趋于变小; 而银约束则随着温度升高使得装药密度趋于变大。由于爆炸网络在实际使用中承受的是同一种环境温度,所以这种差异在网络设计时可不予考虑。

对于非直线传爆,在导爆索传爆距离较长的情况

下,弯曲对爆速的影响较大,在网络设计时应予以考虑。

3 导爆索爆压测试

3.1 导爆索爆压测试方案

用北京理工大学设计的爆轰和冲击波波阵面压力测试系统,系统由高速数字记录仪器、小型爆炸容器、多通道高速同步脉冲恒流源组成。采用特制的 H 型微型锰铜压力传感器作为采样传感器,其敏感元厚度为 $10 \mu\text{m}$,双面包覆聚酰胺(密度为 $1.02 \sim 1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 成型膜,面积为 $0.127 \text{ mm} \times 0.254 \text{ mm}$ 的长方形。传感器及测试线路示意图如图3所示。

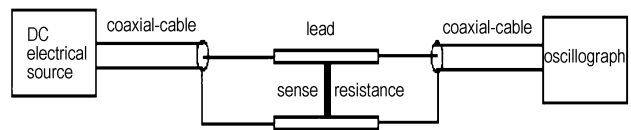


图3 传感器及测试线路示意图

Fig.3 Sketch of sensors and testing circuit

测试系统要求数字存储示波器分辨率优于 8 bit,采样率不低于 $1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$,记录时间大于 $10 \mu\text{s}$ 。多通道脉冲恒流源输出电流大于 8 A,在 $10 \mu\text{s}$ 时间内,电流不恒定度小于 1%; 至少有两个通道,分别用于起爆雷管、给锰铜电阻供电。爆炸罐为密闭式爆炸容器。导爆索与传感器装配外形如图4所示。



图4 导爆索与传感器装配图

Fig.4 Sensor assembled with the cord

实验过程如下:测试件装配好后,确保示波器和恒流源达到稳定工作状态后,用同轴电缆接通起爆回路,确保示波器处在准备状态后就可触发电源起爆雷管。捕捉到压力信号后,存储实验数据并记录存储时间。如图5所示分别读取 ΔV 和 V_0 。根据传感器标定的经验方程式(3)和(4)计算得到距离装药与有机玻璃界面 1 mm 处有机玻璃中的冲击波压力 p_{m1} 。

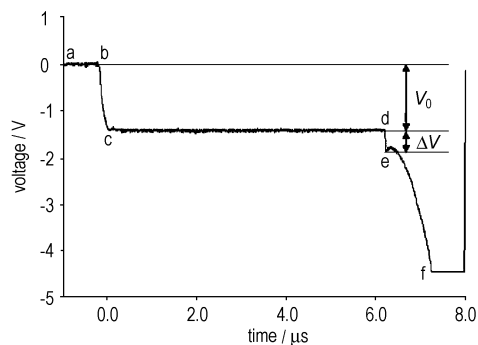


图5 读取信号图形

Fig.5 Ideal sampling wave

$$\rho_{m1} = 53.22 \times (\Delta V/V) \quad (0 \sim 5.907 \text{ GPa})$$

$$\rho_{m1} = 1.978 + 35.28 \times (\Delta V/V) \quad (> 5.907 \text{ GPa}) \quad (3)$$

根据根据(4)式求得导爆索输出端爆压 p_1 。

$$\rho_1 = \rho_{m1} \frac{\rho_{m0} D_{m0} + \rho_1 D_1}{2\rho_{m0} D_{m0}} \quad (4)$$

式中, ρ_{m0} 、 ρ_1 分别为有机玻璃和装药的密度, D_{m0} 、 D_1 分别为有机玻璃中冲击波初始速度和装药的爆速, 可通过测试或计算得出。

3.2 导爆索爆压测试与分析

采用上述方法, 对某外包覆为银和铅铋合金的柔性导爆索进行了爆压测试, 每种样品测试 6 发取平均值, 结果见表 5。通过爆压的比较可以看出, 在爆速比较接近的情况下, 不同径向尺寸的爆压有很大的差别。通过银索和铅索爆压数值的比较可以看出, 在小尺寸情况下, 约束条件是影响爆压的主要因素。

从试验数据来看, 当导爆索装药直径小于 1 mm 时, 银导爆索和铅铋导爆索直径越小爆压差别越大, 但当装药直径大于 1.5 mm 后, 爆压变化与约束材料的关系并不大。分析所采用的导爆索尺寸可以看出, 同样内径尺寸情况下, 随着内径增大, 铅铋导爆索在外径尺寸上变化很大。根据最常用的爆压近似计算公式(6)^[3], 药柱直径明显大于炸药的极限直径时, 爆压和装药初始密度成正比, 与爆速的平方成正比, 而与炸药的约束状态无关。从测试结果可以推断, 当导爆索装药直径逐渐变大时, 爆压应逐渐趋于该装药密度下的理想爆压而与约束状态无关。

4 理论分析

在理想爆轰时, 炸药的爆速完全由其流体热力学确定, 也就是爆速只与炸药的初密度 ρ_0 及其化学组成有关, 可表达为式(5), 对于炸药药柱的输出爆压, 可

以采用爆压近似计算公式(6)进行估算^[3], 这种方法在炸药药柱直径明显大于炸药的极限直径时, 认为爆压只与爆轰参数有关, 而与约束状态无关。

$$D_1 = D_0 + M(\rho_1 - \rho_0) \quad (5)$$

$$p = \frac{1}{4} \rho_0 D_1^2 \quad (6)$$

式中, D_0 为密度 ρ_0 时已知的理想爆速, D_1 为密度 ρ_1 时未知的理想爆速, M 是该炸药爆速密度曲线的斜率, p 为炸药炸药密度 ρ_0 时的理想爆压。

据式(5), 当 M 一定时, 相同装药的铅索和银索爆速计算值应该相同, 而实际测试的结果则相差 20% 左右, 所以(5)式在导爆索爆速计算方面很不精确, 为了解释这种不同, 参照小尺寸非理想装药爆轰波传播理论^[8], 通过建立导爆索爆轰波传播理论模型, 得到数学表达式(7)。结合对导爆索爆速和爆压测试结果进行分析, 得到了导爆索爆速和爆压表达式(8)和(9)。

$$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^2 = 1 + \frac{\gamma^2}{(\gamma+1)r_0^2} [2\Delta r_0 \tan\varphi + \Delta^2 \tan^2\varphi] \quad (7)$$

$$D_1 = [1 - 4.5 \frac{K}{d_0} + 9(\frac{K}{d_0})^2] [D_0 + M(\rho_1 - \rho_0)] \quad (8)$$

$$p_0 = [1 - 4.5 \frac{K}{d_0} + 9(\frac{K}{d_0})^2]^2 \times \frac{1}{4} \rho_0 D_1^2 \quad (9)$$

式中, D_0 为密度 ρ_0 时已知的爆速, D_1 为密度 ρ_1 时未知的理想爆速, γ 为爆轰产物状态参数, 对于 RDX、HMX 为主体的高能炸药, $\gamma \approx 3$; r_0 为装药半径, Δ 为反应区厚度, $\Delta = 2\eta r_0$, η 为反应区相对厚度, 可由 VISAR 测试系统测试得出^[9], 初步试验后得到 JO9CIII 型在小尺寸情况下反应区厚度约为 0.06 mm; $K = \Delta/\beta$, $\beta = 1/\tan\varphi$ 为约束强度, 由圆筒膨胀模型给出近似解析解; φ 为反应区内爆轰产物膨胀角。

将测试所得未知量和测试所得爆速带入公式(8)和式(9), 计算得到的爆速和爆压值见表 5。

从表 2 和表 5 可以看出, 导爆索测试爆速和爆压与根据式(6)计算的炸药的理想爆压之间存在较大差别。而利用考虑了约束条件和反应区宽度的式(8)、(9)计算所得导爆索爆速和爆压, 其变化规律与实验所得规律相同, 但具体数值之间还存在一定差异, 总体来说测试值小于计算值。但是个别数据反常, 这可能是计算式有一些影响导爆索传爆的因素未考虑, 还有待进一步完善, 但初步证明测试结果比较可信。

对于非直线传爆, 文献[8]中的传爆公式也能很好地解释爆速随着弯曲弧度不同的变化规律, 但要准确地计算出导爆索的非直线传爆值, 该公式还需进一步完善。

表5 理论计算爆速与爆压测试值

Table 5 Detonation velocity and shockwave pressure by testing and calculation

cords	lead				silver			
	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
inside diameter /mm	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
charging density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.38	1.62	1.36	1.30	1.69	1.76	1.81	1.67
p_1 /GPa by testing	8.68	12.73	14.92	20.65	15.69	12.78	16.65	17.66
D_1 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ by Eq. (8)	6499	6982	6795	6707.7	8355	8410	8419	8440
p_1 /GPa by Eq. (9)	11.06	12.94	13.49	15.48	28.51	29.00	28.24	28.10
p /GPa by Eq. (6)	33.4							

5 结论

对不同装配条件和使用环境下柔性导爆索爆速和爆压进行测试,结果表明,装药密度、约束材料或约束条件、装药直径是影响爆速和爆压的主要因素。在同样条件下,银导爆索比铅导爆索的爆速明显提高;在导爆索装药直径较小的范围内,银导爆索和铅梯导爆索直径越小爆压差别越大,但在一定尺寸后,爆压变化与约束材料的关系并不大。

对于非直线传爆,在导爆索传爆距离较长的情况下,弯曲对爆速的影响较大,网络设计时应予以考虑。

Testing Methods and Factors Affecting Detonation Performance of Mild Detonating Cords

BAI Ying-wei, WANG Ke-xuan, REN Xi, AO Cheng-gang, LI Jun, CHU En-yi

(Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, State Key Laboratory of Applied Physics-Chemistry Research, Xi'an 710061, China)

Abstract: The influence of difference sampling distances in detonation velocity testing for the detonating cords was studied and the testing method was improved. A thin film Mn-Cu sensor was used to test the output shockwave pressure of the detonating cords. On basis of the testing methods, the key affecting factors detonation velocity and shockwave pressure of detonating cords were researched. The testing conditions include temperature, flexibility, linear and non-linear. The conclusions was theoretically analyzed which was based on the semi-empirical formula and the testing results. On basis of the conclusions, mild explosive circuits can be designed more accurately.

Key words: explosive mechanics; detonating cord; output performance; detonation velocity; shockwave pressure

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.025

参考文献:

- [1] 王凯民,温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社,2006.
- [2] 艾鲁群. 国外火工品手册[M]. 国家机械工业委员会兵器标准化研究所. 1988: 494-507.
- [3] BAI Ying-wei,JIANG Zhuang-de,ZHAO Yu-long, et al. Study on the key factors interfered detonation velocity of detonating cords [C]//2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Xi'an,2007.
- [4] 李国新,程国元,焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社,1998: 151-162.
- [5] 蔡瑞娇,韩秀凤,严楠. 锰铜压阻法定量测量2号电雷管的轴向起爆能力[J]. 含能材料,2004((增刊)): 352-354.
CAI Rui-jiao, HAN Xiu-feng, YAN Nan. The measuring of axial initiating ability of No.2 electric detonator with manganin piezo-resistance method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2004(Supplement): 352-354.
- [6] BAI Ying-wei,JIANG Zhuang-de,ZHAO Yu-long, et al. Study on the shockwave pressure testing method for detonating cords [C] //2nd Intergration and commercialization of Micro and Nano-systems International Conference & Exhibition. Hong Kong, 2008.
- [7] 白颖伟,王可喧,秦国圣. 柔性导爆索输出性能量化研究[C] //2007 中国兵工学会青年学术年会暨陕西省兵工学会第九届青年学术交流会议论文集,西安,2007: 535-538.
- [8] 温玉全,焦清介. 小尺寸非理想装药爆轰波传播理论研究[C] //火工技术研讨会,杭州,2006.
- [9] 彭其先,马如超,刘俊,等. VISAR 测试技术研究炸药反应区厚度[J]. 流体力学实验与测量,2003,17(1): 43-45.
PENG Qi-xian, MA Ru-chao, LIU Jun, et al. VISAR used in explosive reaction zone measurement [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*,2003,17(1): 43-45.