

文章编号: 1001-1455(2007)04-0325-06

# 低温下小尺度钝感炸药非理想爆轰实验研究\*

邹立勇, 谭多望, 文尚刚, 赵继波, 方 青

(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实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 钝感炸药爆轰波法向速度  $D_n$  与当地曲率  $\kappa$  密切相关, 为研究这种非理想行为, 测量了  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  下直径为 10、12.5、15、30 mm 的钝感炸药的定态爆轰速度和爆轰波形, 并与  $24\text{ }^\circ\text{C}$  下的实验结果进行了比较。研究表明, 低温下爆速随药柱直径的增加而增加; 直径相同时, 温度越高, 爆轰波形越平坦; 温度相同时, 直径越大, 爆轰波形越平坦; 直径较小时, 低温下的爆速小于常温下的爆速, 相应的法向爆速与当地曲率的关系曲线  $D_n(\kappa)$  位于常温下曲线的下方; 直径较大时, 低温下的爆速大于常温下的爆速, 相应的  $D_n(\kappa)$  关系曲线位于常温下曲线的上方。

**关键词:** 爆炸力学; 温度效应; 非理想爆轰; 钝感炸药; 定态爆速和波形

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引 言

经典的爆轰模型假定爆轰波流动是严格平面一维的, 没有考虑化学反应区的侧向和轴向能量的损失, 这是一种理想爆轰。实际上炸药的尺寸都是有限的, 爆轰时都存在一定厚度的反应区, 侧向稀疏波的侵入会造成化学反应区能量向外扩散, 其边部波阵面必然是弯曲的, 这种波阵面是曲面的爆轰就是非理想爆轰。曲面爆轰波的一个显著特点就是爆轰波阵面某点的法向传播速度  $D_n$  取决于该点处波阵面的当地曲率  $\kappa$ ,  $D_n(\kappa)$  关系是炸药的一种基本爆轰性能, 爆轰波阵面的运动几何上是由  $\kappa$  决定的, 给定  $D_n(\kappa)$  关系, 从数学上就决定了爆轰波阵面传播的运动学或几何学规律。爆轰波在均匀药柱中传播时, 不论其起爆方式和初始波阵面的形状如何, 经过较长距离的非定常传播后, 都会进入拟定常状态, 爆轰波阵面形状和传播速度不再变化, 形成拟定常二维爆轰波, 这时的传播速度和波阵面形状分别称为定态爆速和定态波形。

钝感炸药具有良好的安全性和高能输出特性, 在工程和武器实际中得到广泛的应用。20 世纪 70 年代后期以来, 钝感炸药逐渐成为了国外爆轰基础和应用研究的主要方向, 理解其爆轰性能已成为武器物理研究的主要方向。由于反应区较宽, 钝感炸药爆轰波传播的非理想行为非常明显, 与药柱直径、环境温度和约束条件等密切相关。实际使用过程中, 钝感炸药经常会遇到不同的环境温度条件。低温条件下, 通常炸药的密度增加, 引爆阈值提高, 这时炸药的爆轰性能非理想爆轰性能和  $D_n(\kappa)$  关系曲线如何? 需要通过实验给出确切的回答。

目前国内研究钝感炸药非理想爆轰行为的实验, 都是在常温下进行的。国外在低温条件下开展的研究工作也非常少见。针对美国的 PBX-9502, A. W. Campbell<sup>[1]</sup> 测量了  $-55$ 、 $24$  和  $75\text{ }^\circ\text{C}$  下药柱的临界直径和直径效应曲线, L. G. Hill 等<sup>[2]</sup> 测量了 3 个温度下药柱的定态爆速和波形, 研究了各个温度下的爆速曲率关系。针对英国的 EDC-35, C. D. Hutchinson 等<sup>[3]</sup> 研究了  $-40$  和  $20\text{ }^\circ\text{C}$  下药柱的爆速随药柱直径和密度的变化规律。

在本文中, 克服低温下小尺度炸药光学测试这一难点, 测量了  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  下直径为 10、12.5、15 和 30 mm 的 JB-9014 药柱 ( $w_{\text{TATB}}/w_{\text{binder}} = 95/5$ ) 的定态爆速和定态波形, 得到爆速、波形、爆速曲率关系随直径的变化规律, 然后将实验结果与常温下的结果进行对比, 进一步分析钝感炸药非理想爆轰行为随温度

\* 收稿日期: 2006-02-08; 修回日期: 2006-06-09

作者简介: 邹立勇(1975—), 男, 硕士, 助理研究员。

的变化规律。

## 2 实验装置

爆轰装置和实验装置分别如图 1、图 2 所示,其中爆轰装置由起爆雷管、导爆药柱、传爆药柱(成分  $(w_{TATB}/w_{TNT}=65/35)$ 、JB-9014 主装药、弹簧探针以及装置支架等组成。将爆轰装置放在刨花板制成的低温箱内,外加光测系统和电测系统构成实验装置。实验过程中,装置的温度由低温系统来控制,低温系统由温度传感器、温度控制仪、供液系统、线性阀、低温箱等组成;采用液氮冷却、自动电增压供液系统补液的方法,在可控压力下向低温箱内供给稳定的液氮流,在电动机风扇的搅动下,使箱体内强制循环冷却。降温过程中,低温系统将主传感器测得的温度输入温度控制仪,通过微机连续检测温度,经过运算处理控制液氮的流量和压力,使低温箱内炸药样品按规定的降温速度改变温度,并最终达到设定的实验温度。

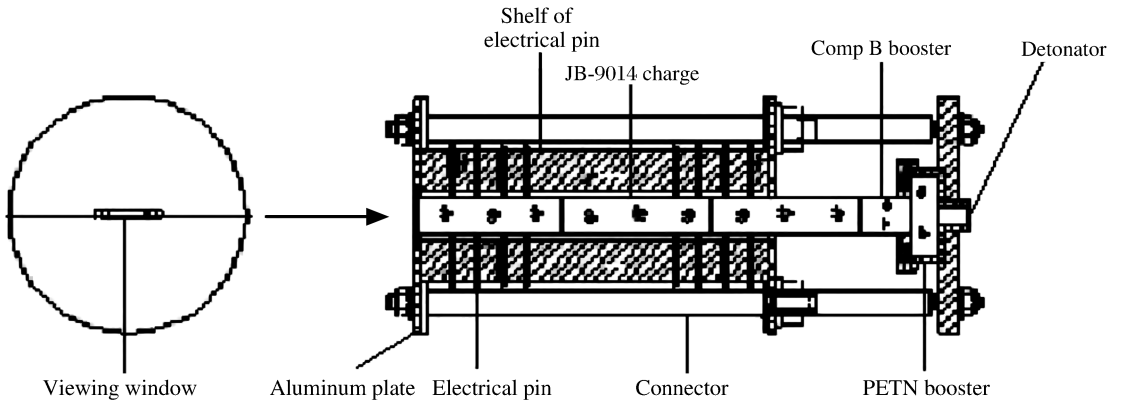


图 1 爆轰装置

Fig. 1 Rate stick design

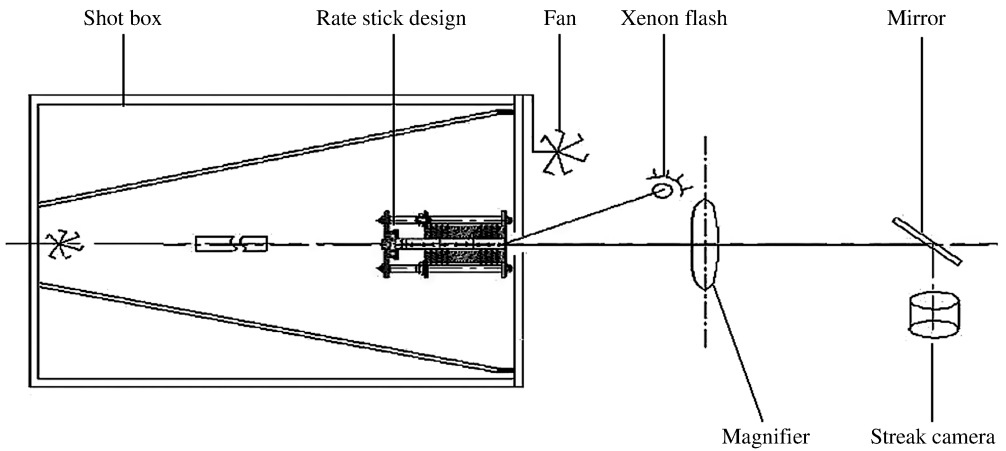


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental set-up

电学测试方面,本实验与谭多望等<sup>[4]</sup>常温下实验测试方法相类似。光学测试方面,传统大尺寸炸药低温实验中,通常是在低温箱一侧开孔安装双层玻璃真空窗。实验表明,对于小尺寸炸药,这种方法难以观测到爆轰波形。本文中,采用在低温箱中爆轰装置狭缝一端加隔热层,再沿光路方向开小孔的技术途径,克服了小尺度炸药低温实验光学测试的困难。需要注意的是,实验时要在低温箱上安装一个小风扇对氙灯吹风,以防从小孔出来的冷气流在氙灯上凝结使氙灯成为导体,进而导致起爆时将闪光控制仪烧坏。实验降温过程中,用真空封泥堵住小孔,当降温达到设定温度以后,保持低温箱恒温 2 h 以上,起爆前再将封泥拿走使光路畅通。低温箱小孔一端外侧使用氙灯光源、凸透镜和反光镜形成光测系统,以

便高速扫描相机拍摄到清晰的波形。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 定态爆速

表1中给出了4种药柱的实验温度和常温下的半径、长度、密度。可以看到,各发实验的温度误差在±0.4℃以内。根据PBX-9502炸药(与JB-9014炸药成分配比相同,粘结剂相近)的半径修正因子为 $3.9 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}^{[2]}$ ,计算得到低温下各种药柱相应的半径。用最小二乘法拟合距离-时间数据得到爆速,再将2组探针的爆速取平均值,即可得到定态爆速 $D_0$ 测量值。以 $1.890 \text{ g/cm}^3$ 为标准密度,同样根据PBX-9502炸药的爆速修正因子0.003,计算得到 $D_0$ 修正值 $D_m$ 。表中温度的不确定度为 $0.1^\circ\text{C}$ ;半径的不确定度为 $0.005 \text{ mm}$ ;长度的不确定度为 $0.01 \text{ mm}$ ;密度的不确定度为 $0.001 \text{ g/cm}^3$ ;定态爆速 $D_0$ 的不确定度为 $0.001 \text{ km/s}$ 。

图3中给出了2个温度下爆速随药柱半径倒数变化规律的拟合曲线,其中 $24^\circ\text{C}$ 下的数据是谭多望等<sup>[4]</sup>的实验结果。从图中可以看出,无论常温还是低温,随着药柱直径的增大,定态爆速逐渐增加,趋近于C-J爆速。2个温度下的直径效应曲线存在交点,当药柱直径小于 $11.21 \text{ mm}$ 时,常温下定态爆速大于低温下定态爆速,当药柱直径大于 $11.21 \text{ mm}$ 时,低温下定态爆速大于常温下定态爆速,这与国外钝感炸药PBX-9502<sup>[1]</sup>、EDC-35<sup>[3]</sup>的实验结果相类似。出现这一现象是由于药柱直径较大时,药柱反应充分,温度对于密度的影响是主要因素,随着温度的降低,热胀冷缩使药柱密度增加,从而爆速增加;药柱直径较小时,温度降低使临界直径增加,温度对于爆轰化学反应速率的影响是主要因素,随着温度的降低,化学反应速率降低,药柱反应不够充分,从而爆速降低。图3中的交点对应着密度效应和反应速率效应正好互相平衡的情形。

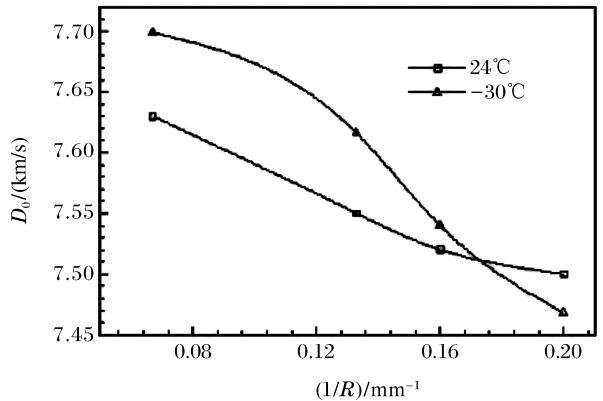


图3 2个温度下药柱直径效应曲线的比较  
Fig.3 Comparison of the diameter-effect curves obtained at the two test temperatures

表1 定态爆速测量结果

Table 1 Steady-state detonation velocity

编号	$t_e/^\circ\text{C}$	$R_{\text{nor}}/\text{mm}$	$R_{\text{low}}/\text{mm}$	$L_{\text{nor}}/\text{mm}$	$\rho_{\text{nor}}/(\text{g/cm}^3)$	$D_0/(\text{km/s})$	$D_m/(\text{km/s})$
1	-29.9	4.98	4.97	200.15	1.886	7.481	7.468
2	-30.3	6.23	6.22	200.06	1.890	7.538	7.540
3	-30.3	7.48	7.46	240.18	1.892	7.612	7.616
4	-30.4	14.97	14.94	300.25	1.893	7.690	7.699

注: $t_e$ 为实验温度; $R_{\text{nor}}$ 为常温半径; $R_{\text{low}}$ 为低温半径; $L_{\text{nor}}$ 为常温长度; $\rho_{\text{nor}}$ 为常温密度; $D_0$ 为测量值; $D_m$ 为修正值。

#### 3.2 定态波形

药柱端面爆轰波形由SJZ-15高速扫描相机测量,实验过程中,相机转速设定为 $2.4 \times 10^5 \text{ r/min}$ ,扫描速度为 $12 \text{ km/s}$ ,扫描速度的不确定度为 $0.2\%$ 。氙灯为直拉线,在氙灯高压触发端加高通磁环,以免氙灯加高压时产生的电磁干扰引起信号漂移。

实验观测到的典型爆轰波形见图4,对比谭多望等<sup>[4]</sup>的实验结果可以发现,本实验得到的波形前沿和边界非常清晰。结合表1中的实验温度,可知实验过程中一方面温度误差很小,另一方面爆轰波形十分清晰,这说明针对低温下小尺度钝感炸药非理想爆轰实验,本文中所采取的光学测量技术途径是完全可行的。

将测量底片数字化,可得到爆轰波到达药柱端面的时间,结合定态爆速可得到爆轰波形的离散实验数据。针对波形数据,目前最佳拟合公式是<sup>[5]</sup>

$$z(r) = - \sum_{i=1}^n a_i \left\{ \ln \left[ \cos \left( \eta \frac{\pi}{2} \frac{r}{R} \right) \right] \right\}^i \quad (1)$$

式中： $z(r)$ 是波阵面曲线； $r$ 是波阵面上的截面圆半径； $R$ 是药柱半径； $a_i$ 和 $\eta$ 是拟合参数。

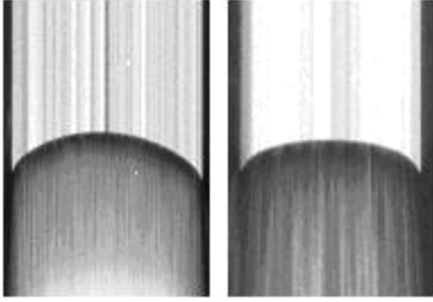


图4 典型爆轰波形

Fig. 4 Typical detonation wave shape

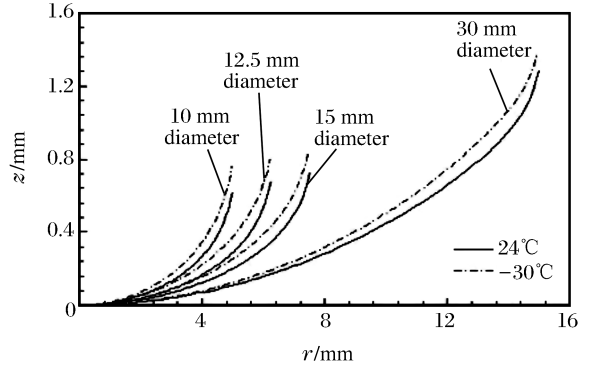


图5 2个温度下波阵面曲线的比较

Fig. 5 Comparison of the wavefront curves at the two test temperatures

对于钝感炸药,一般取前3项即可很好地模拟波阵面曲线,拟合时半径采用表1中的低温半径,定态爆速采用表1中的 $D_0$ 修正值 $D_m$ ,得到的低温实验拟合参数见表2,拟合曲线见图5,其中24℃下的波阵面曲线是谭多望等<sup>[4]</sup>的实验结果。从图中可以看到,药柱直径相同时,常温下的波形比低温下更理想。实验温度相同时,随着药柱直径的增加,爆轰波形更加平坦。这些变化规律与L. G. Hill等<sup>[2]</sup>针对PBX-9502得到的研究结果相同。

表2 低温实验波阵面曲线拟合参数

Table 2 Fitted parameters of wave front curves for JB-9014 fired at  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

编号	$R_{\text{low}}/\text{mm}$	$D_m/(\text{km/s})$	$a_1/\text{mm}$	$a_2/\text{mm}$	$a_3/\text{mm}$	$\eta$
1	4.97	7.468	0.398 3	0.060 7	0.013 1	0.938 0
2	6.22	7.540	0.449 6	0.093 2	0.015 4	0.954 1
3	7.46	7.616	0.455 8	0.098 5	0.015 8	0.960 9
4	14.94	7.699	0.919 8	0.259 1	0.032 0	0.978 0

### 3.3 $D_n(\kappa)$ 曲线

法向爆速 $D_n$ 与当地曲率 $\kappa$ 的关系曲线由定态爆速 $D_0$ 和波阵面曲线 $z(r)$ 计算得到。记波阵面法线与药柱轴线之间的夹角为 $\theta(r)$ ,由几何关系可以得到法向爆速的表达式

$$D_n(r) = D_0 \cos(\theta(r)) = D_0 / \sqrt{1 + (z'(r))^2} \quad (2)$$

波阵面上当地平均曲率 $\kappa$ 由以下表达式计算

$$\kappa(r) = \frac{z''(r)}{(1 + (z'(r))^2)^{3/2}} + \frac{z'(r)}{r(1 + (z'(r))^2)^{1/2}} \quad (3)$$

联立求解式(2)和(3)可得到图6的 $D_n(\kappa)$ 曲线,其中常温下的 $D_n(\kappa)$ 曲线是谭多望等<sup>[4]</sup>的研究结果。

从图6中可以看到,当曲率 $\kappa$ 向零趋近时, $D_n(\kappa)$ 曲线呈凹形向上,无法通过插值得到无限大直径药柱的定态爆速,这是所有非理想爆轰直径效应实验的共同特点。当曲率小于0.05时,定态爆速随曲率的增加而减小,与药柱直径和实验温度的关系不大。当曲率大于0.05时,定态爆速趋于发散,其大小不仅与曲率有关,还与药柱直径以及实验温度有关。相比常温下的 $D_n(\kappa)$ 曲线,低温下的爆速曲率曲线发散程度更高。这些变化规律与L. G. Hill等<sup>[2]</sup>针对PBX-9502实验得到的结论相同。与L. G. Hill等的研究结果不同的是,他们的实验得出低温 $D_n(\kappa)$ 曲线位于常温 $D_n(\kappa)$ 曲线的下方,而本实验得出直径较小时,低温 $D_n(\kappa)$ 曲线位于常温 $D_n(\kappa)$ 曲线的下方,直径较大时,低温 $D_n(\kappa)$ 曲线位于常温 $D_n(\kappa)$ 曲线的上方。出现这一差别的原因可能是由于JB-9014和PBX-9502炸药颗粒度的差别,也可能是由于低温流场的不均匀性,炸药密度的不均匀性,光路系统的偏差,或者波形底片数字化不够精确等。

## 4 结 论

克服了低温条件下小尺度炸药光学测试这一难点,实验温度误差控制在 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,爆速和波形达到拟定常状态,爆轰波形十分清晰。无论常温还是低温,爆速都随直径的增加而增加。直径较小时,低温爆速小于常温爆速;直径较大时,低温爆速大于常温爆速。药柱直径相同时,常温下的波形比低温下更为平坦;实验温度相同时,随着直径的增加,爆轰波形更加平坦。当曲率向零趋近时, $D_n(\kappa)$ 曲线呈凹形向上;当曲率很小时,定态爆速只与曲率有关,当曲率较大时,定态爆速与曲率、直径和温度三者均有关;相比常温下的 $D_n(\kappa)$ 曲线,低温下的曲线发散程度更高。

从实验温度控制来看,本实验的温度误差相比国外仍然较大,需要进一步减小温度的误差,可以通过采用特制的高透光率、低折射率玻璃制成的双层真空窗来实现。从爆轰波形来看,虽然测到的波形比较清晰,但是考虑到药柱边界处对波形清晰度的要求非常高,可以采用更高扫描速度的相机以及更好的胶片数字化设备。另外,低温下药柱半径的精确值需要通过设计精巧的实验装置测量得到。这些工作将在今后进一步开展。

本文的实验工作是在蒲正美、何智、张光升、高宁、黄淑萍、林俊、孙永强等的帮助下完成的。谨表谢意!

## 参考文献:

- [1] Campell A W. Diameter effect and failure diameter of a TATB-based explosive[J]. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1984, 9: 183-187.
- [2] Hill L G, Bdzil J B, Aslam T D. Front curvature rate stick measurements and detonation shock dy-namics calibration for PBX-9502 over a wide temperature range[C]// Wanda Morat. Proceedings of Eleventh International Symposium on Detonation. Colorado: Office of Naval Research, 1997: 1 029-1 037.
- [3] Hutchinson C D, Foam G C W. Initiation and detonation properties of the insensitive high explosive TA-TB/Kel-F 800 95/5[C]// Thonson-Shore. Proceedings of Ninth International Symposium on Detonation. Oregon: Office of Naval Research, 1989: 123-132.
- [4] 谭多望,方青,张光升,等. 钝感炸药直径效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 300-304.  
TAN Duo-wang, FANG Qing, ZHANG Guang-sheng, et al. Experimental study of the diameter effect for JB-9014 rate sticks[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 300-304.
- [5] Bdzil J B. Steady-state two-dimensional detonation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 108: 195-226.

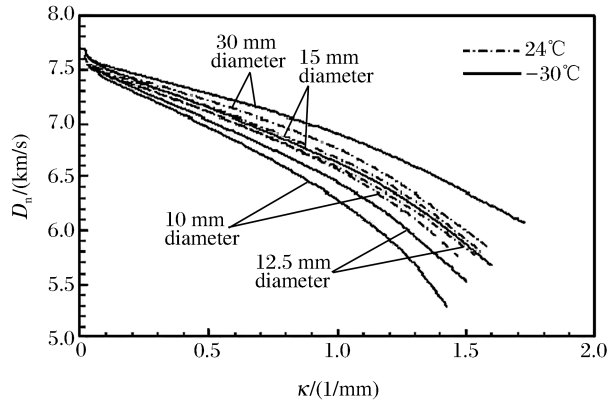


图 6 2 个温度下的  $D_n(\kappa)$  曲线

Fig. 6  $D_n(\kappa)$  curves at the two test temperatures

## Experimental study on the nonideal detonation for JB-9014 rate sticks at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

ZOU Li-yong<sup>\*</sup>, TAN Duo-wang, WEN Shang-gang, ZHAO Ji-bo, FANG Qing  
(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** The local normal detonation speed  $D_n$  of insensitive high explosive is closely relative to the local total curvature  $\kappa$ . To investigate the nonideal detonation of JB-9014 rate sticks (95wt. % TATB + 5wt. % binder) at low temperature, series experiments were carried out at  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  with diameters of 10, 12.5, 15 and 30 mm respectively and compared with those at  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wave shape data were fitted with an analytic form, by which  $D_n(\kappa)$  curves were calculated. The results show that for each diameter, wave shapes is slightly flatter in hotter charges than colder ones. For each temperature, waves propagate more ideally as charge diameter increases. When  $\kappa$  is smaller than 0.05,  $D_n(\kappa)$  curves are concave upward and trace nearly a common path for any diameter and any temperature. When  $\kappa$  is larger than 0.05,  $D_n$  varies with curvature, diameter, temperature and  $D_n(\kappa)$  curves diverge.

**Key words:** mechanics of explosion; temperature effect; nonideal detonation; insensitive high explosive; steady-state detonation velocity and wave shape

### 高压重复频率脉冲功率电源

10 kW/100 Hz 高压脉冲电晕脱硫电源 烟气脱硫治理酸雨保护环境是各国政府极为关注的大事,我国政府作为重点科技攻关项目。

脱硫技术有化学法、电子束法和脉冲电晕法。化学法设备庞大,投资大,运行费用高,有二次污染,污垢;电子束法和脉冲电晕法是当今世界重点发展的高新技术,电子束法中加速器造价高,有 X 射线危害;脉冲电晕法可利用现有静电除尘设备和线板电极结构,投资少、效率高、方法简便,主要问题是研制高平均功率高压窄脉冲电源技术难度大。

1997~1998 年,我们研制 10 kW 高压脉冲电晕烟气脱硫电源,主要技术指标:平均功率 10 kW,等效阻抗 48  $\Omega$ ,脉冲峰值电压 50~150 kV,上升时间小于 50 ns,脉冲宽度 200~500 ns,重复频率 50~200 Hz,系统效率大于 70%,在 1 000~3 000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  烟气现场进行脱硫实验,SO<sub>2</sub>脱除率大于 80%,收集微细硫酸铵产物效率可大于 90%。

10 kW 脱硫电源是脉冲电晕法研究的原理性实验,通过实验了解和验证脉冲电源各参数与脱硫效果之间的关系、为研制大功率脱硫电源提供实验数据,《10 kW 烟气脉冲电晕脱硫脱硝电源》荣获 1999 年军队科技进步二等奖。

2001 年研制了《100 kW 燃煤烟气脱硫实验装置》在 3 000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  烟气现场进行了实验。

600 kV/100 Hz 脉冲功率电源 采用两只大电流快速气闸流管作为高功率脉冲形成开关,产生的重复频率的高压脉冲经变压器升压,磁开关压缩陡化,再升压,在容性负载上达到 600 kV/100 Hz、1.5  $\mu\text{s}$  脉宽的超高压重复频率脉冲。

600 kV/100 Hz 脉冲电源已配合连续脉冲加速器投入使用。工作稳定可靠、技术先进,具有国内领先水平,《超高压重复频率脉冲功率技术研究》荣获 2004 年军队科技进步三等奖。

800 kV/100 Hz 脉冲功率电源 采用磁开关作为高压脉冲形成级和高压脉冲变压器一次升压方式,前者解决了重复频率高功率脉冲形成开关的使用寿命问题,后者可使电源系统具有最高传输效率,升压后的 800 kV、100 Hz、1  $\mu\text{s}$  高压脉冲加载到容性负载上,每个脉冲平均能量 112 J,功率 11.2 kW。

800 kV/100 Hz 脉冲电源是高功率脉冲加速器专用配套设备,各项性能指标均达到合同规定指标要求。

超高压脉冲功率电源样品图,见 338 页;10 kW/100 Hz 脉冲电晕脱硫电源高压脉冲波形和 10 kW 高压脉冲电晕脱硫电源连续工作脉冲串见 351 页。

(转 338、351 页)

(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)

\* Corresponding author: ZOU Li-yong

E-mail address: liyong.zou@gmail.com

Telephone: 86-816-2481143