

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.04.004

一种 DNAN/DNTF 基不敏感炸药金属驱动能力的研究^{*}

王红星 高 杰 沈 飞 王晓峰
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究复合载体 DNAN/DNTF 对熔铸炸药金属加速能力的影响,设计了一种复合载体基熔铸炸药 [$m(\text{DNAN}) : m(\text{DNTF}) : m(\text{HMX}) = 20 : 5 : 75$],研究其金属加速能力和 JWL 状态方程,并与 Octol 炸药进行对比。通过 $\varnothing 50$ mm 圆筒试验,获得了圆筒壁膨胀位移与时间的关系,计算了爆轰产物在特定相对比容下的比动能及装药的格尼系数,并依据圆筒试验数据拟合了该炸药的爆轰产物的 JWL 状态方程。结果表明:DNTF 对炸药的金属加速做功能力有促进作用,复合载体基熔铸炸药的格尼速度为 $2.93 \text{ mm}/\mu\text{s}$,较单一 DNAN 基炸药提高 7.7% ,较 Octol 炸药 [$m(\text{TNT}) : m(\text{HMX}) = 25 : 75$] 提高 4.6% 。计算值与试验结果吻合,表明圆筒试验得到的爆轰产物 JWL 状态方程参数是有效的。

[关键词] 爆炸力学;复合载体;圆筒试验;金属驱动能力;JWL

[分类号] TJ55

Metal Acceleration Ability of a DNAN/DNTF-based Insensitive Explosive

WANG Hongxing, GAO Jie, SHEN Fei, WANG Xiaofeng
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the effect of composite carrier(DNAN/DNTF) on the acceleration ability of molten explosive metal, a kind of composite carrier based molten explosive [$m(\text{DNAN}) : m(\text{DNTF}) : m(\text{HMX}) = 20 : 5 : 75$] was designed. Its metal acceleration ability and JWL state equation were studied in comparison with Octol explosive. Through the $\varnothing 50\text{mm}$ cylinder test, the expansion displacement of cylinder wall history over time was obtained, the specific kinetic energy of detonation product and the gunny coefficient of charge were calculated under the specific relative volume, and the JWL state equation of explosive product was fitted according to the cylinder test data. The results show that DNTF can promote the metal acceleration of explosives. The Gurney velocity of composite carrier based melt cast explosives is $2.93 \text{ mm}/\mu\text{s}$, which is 7.7% higher than that of single DNAN carrier based explosives and 4.6% higher than that of Octol explosives [$m(\text{TNT}) : m(\text{HMX}) = 25 : 75$]. The calculated values are in good agreement with the experimental results, indicating that the parameters of JWL equation of state for detonation products obtained from the cylinder test are effective.

[KEYWORDS] explosion mechanics; composite carrier; cylinder test; accelerating ability; JWL

引言

作为评价炸药金属驱动能力的常用方法,圆筒试验可以获得炸药的比动能、格尼系数和爆轰产物的状态方程。目前,国内已建立了标准($\varnothing 25 \text{ mm}$)圆筒试验和 $\varnothing 50 \text{ mm}$ 圆筒试验两种试验方法。研究人员利用圆筒试验对炸药的金属驱动能力进行了大量研究,并通过对试验数据拟合获得了炸药的 JWL 状态方程,对于评价金属加速型炸药在杀伤战斗部和聚能战斗部中的应用效果具有指导意义^[1-2]。

熔铸炸药作为一种传统炸药,具有能量水平高、工艺适应性好、安全性可调等优势。Octol(TNT/HMX)炸药是熔铸炸药的典型代表,在杀伤战斗部

^{*} 收稿日期:2020-01-06
第一作者:王红星(1981-),男,副研究员,研究方向为熔铸炸药技术。E-mail :hxwang204@126.com
通信作者:王晓峰(1967-),男,研究员,研究方向为混合炸药技术。E-mail :wangxf_204@163.com

和聚能战斗部中得到广泛应用,但 TNT 基熔铸炸药存在长期储存性能差、力学性能差等不足,难以满足当今高能钝感战斗部的要求。2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)是一种替代 TNT 的高安全性载体炸药,其感度和黏度均显著低于 TNT。DNAN 基熔铸炸药不仅提高了战斗部的长期储存性能和装药工艺性能,而且具有良好的安定性,提高了战斗部勤务处理过程的安全性以及在战场上的生存能力,其能量相对较低(90% TNT 当量)^[3]。3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)是当前备受关注的高能量密度含能材料之一^[4],具有较高的理论爆速(9 250 m/s),替代 TNT 作为熔铸载体可开发具有高驱动能力的混合炸药^[5]。基于此,研究人员开展了大量的 DNTF 基熔铸炸药的金属驱动能力研究。熊贤锋等^[6]研究了 DNTF 基熔铸炸药的金属加速做功能力,并与传统金属加速型炸药 Octol 进行对比。王浩等^[7]研究了 DNTF/HMX 炸药的金属加速做功能力,并获得其 JWL 状态方程。研究表明,DNTF 基炸药具有优良的金属驱动能力;但由于其安全性相对较差,影响其大量的应用。有研究人员通过装药结构设计以拓展 DNTF 炸药的应用领域。周涛等^[8]研究了内、外层不同爆速的 DNTF 基含铝炸药复合装药的驱动特性;沈飞等^[9]研究了 DNTF 基同轴双元装药的爆轰波形及驱动性能,获知在适当降低金属驱动能量的前提下,该组合装药能够有效提升冲击波能。

低共熔物炸药是指两种或两种以上的化合物混合后,其熔点低于任一组分、性能发生变化的一类共熔混合物^[10]。含能低共熔物除了获得较低熔点的共熔物外,还可对单一材料的某种性质进行改善。王浩等^[11]利用红外光谱、X 射线衍射和扫描电镜等试验,对不同比例的 DNTF/DNAN 共熔物进行了表征,并通过冲击波感度试验研究了共熔物冲击波感度变化情况,发现共熔物包覆在 DNTF 结晶表面,从而降低了 DNTF 感度。

本文中,设计了一种以 DNAN/DNTF 双元复合载体为基的不敏感熔铸炸药。通过圆筒试验和数据拟合的方法,获得该炸药的 JWL 状态方程,为该炸药的工程化应用研究提供参考依据。

1 试验

1.1 配方设计

称取不同比例的 DNAN 和 DNTF,将二者充分熔化、凝固、成粉,进行 DSC 测试。不同质量比混合体系的 DSC 曲线如图 1 所示;并绘制 DNAN/DNTF

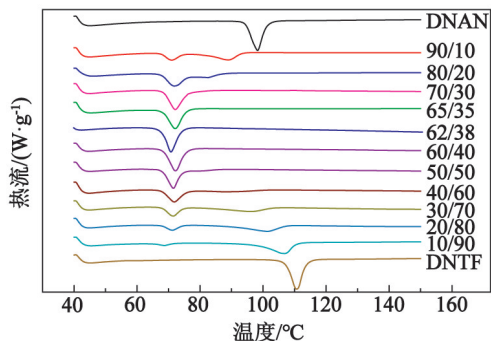


图 1 不同质量比 DNAN/DNTF 体系的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curves of DNAN/DNTF with different proportion

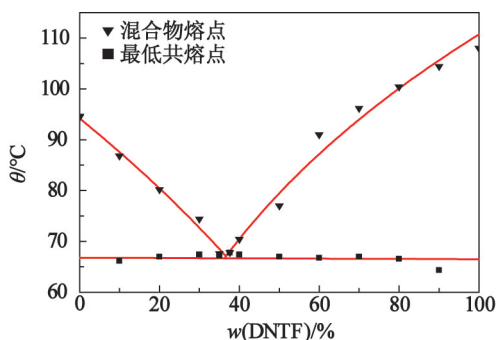


图 2 DNAN/DNTF 低共熔物的二元相图

Fig. 2 Binary phase diagram of DNAN/DNTF low eutectic

的二元相图,如图 2 所示。

由图 2 可知,DNAN/DNTF 体系可通过调节 DNTF 的质量分数,获得适合熔铸的熔点和比例。结合能量性能和安全性能,选取 DNAN 与 DNTF 的质量比为 4 : 1 的体系作为复合载体,设计一种双元复合载体基不敏感熔铸炸药,并开展炸药的金属驱动能力研究。

1.2 样品制备

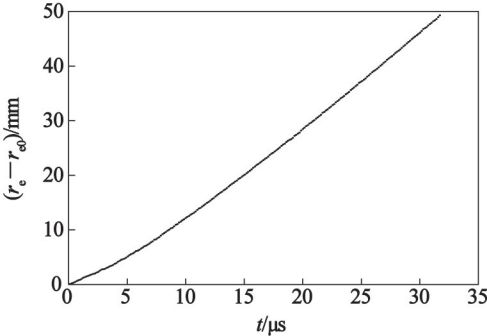
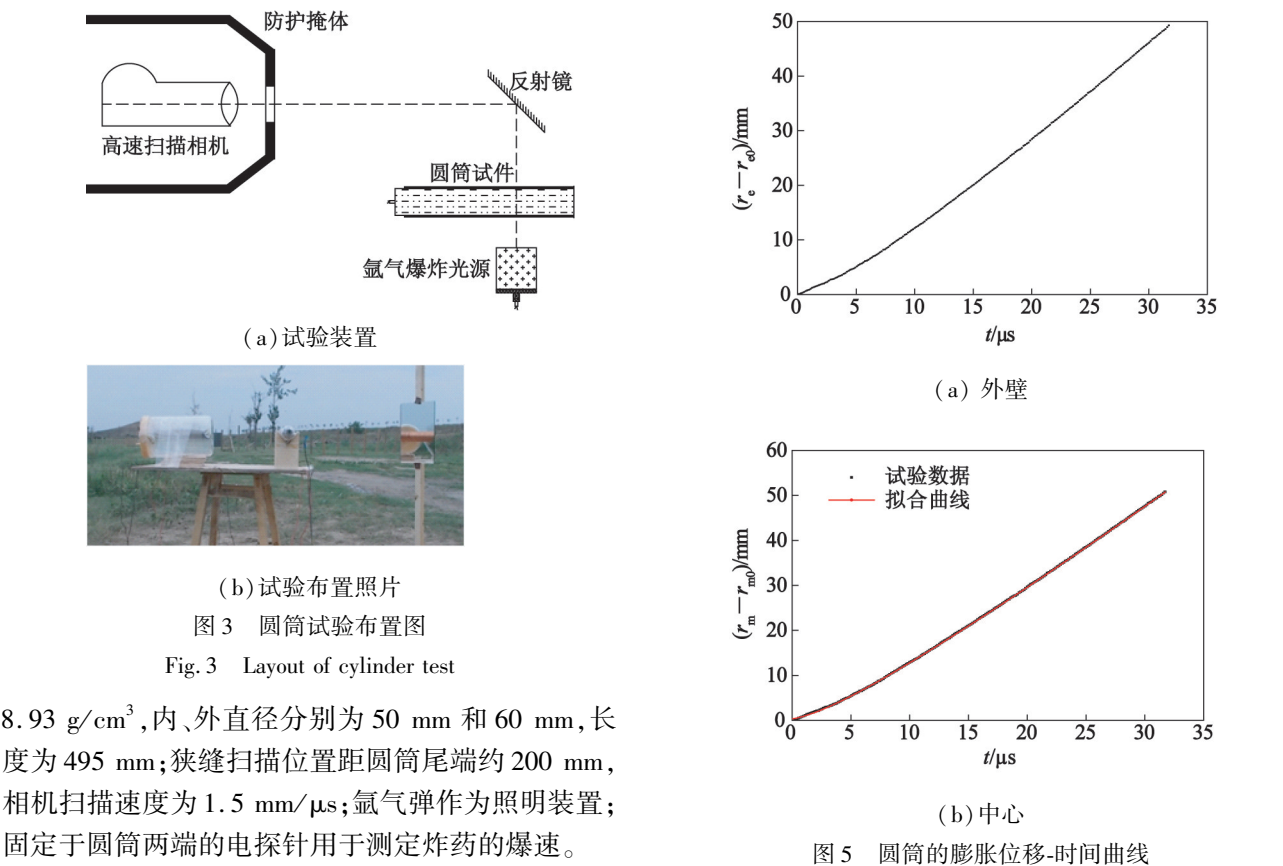
设计一种高能不敏感熔铸炸药(ROBF-1),理论计算和部分性能数据测试结果见表 1。该配方能量性能、安全性能和工艺性能良好,可采用传统工艺进行装填,通过真空处理,装药密度可达到理论密度的 98% 以上。将真空处理后的药浆浇注入 $\varnothing 50$ mm 的铜管内,供圆筒试验使用。与单一 DNAN 为载体的 ROB-1 炸药进行性能对比。

1.3 圆筒试验

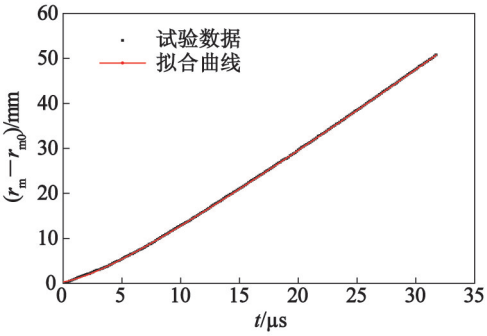
按照 GJB 772A—1997 中 705.3 方法,开展 $\varnothing 50$ mm 圆筒试验。圆筒试验装置由待测主装药、铜管、电探针、反射镜、GSJ 高速转镜相机等组成,如图 3 所示。其中,铜管的材料为 TU1 无氧铜,密度为

表1 炸药配方及性能参数
Tab.1 Formula and performance parameters of explosives

炸药	$w(\text{DNAN})$ %	$w(\text{DNTF})$ %	$w(\text{HMX})$ %	计算值			试验值		
				$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p/$ GPa	$\rho'/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D'/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p'/$ GPa
ROBF-1	20	5	75	1.824	8 470	32.2	1.796	8 430	31.2
ROB-1	25	0	75	1.808	8 369	30.1	1.783	8 236	28.6



(a) 外壁



(b) 中心

图5 圆筒的膨胀位移-时间曲线

Fig.5 Expansion displacement time curves of the cylinder

2 结果与讨论

2.1 圆筒膨胀位移

通过圆筒试验可以得到圆筒的某一截面由炸药爆炸驱动发生膨胀的高速扫描照片,如图4所示。通过对获得的扫描照片进行数据处理,得到ROBF-1炸药装药爆轰后圆筒外表面和圆筒中心的膨胀位移随时间的变化曲线,如图5所示。

数据处理采用文献[4]和文献[12]中的方法。



图4 圆筒壁膨胀的扫描照片
Fig.4 Photograph of expansion process
of the cylinder wall

假定圆筒膨胀过程中圆筒的横截面积保持不变,则圆筒质量中心面半径 r_m 与圆筒壁外表面半径 r_e 、内表面半径 r_i 之间满足如下关系:

$$r_e^2 - r_m^2 = r_m^2 - r_i^2 = \frac{r_{e0}^2 - r_{i0}^2}{2} \tag{1}$$

通过式(1),将试验得到的圆筒外表面的数据关系 $(r_e - r_{e0})-t$ 转换为圆筒质量中心面处的数据关系 $(r_m - r_{m0})-t$,然后将其代入式(2)进行拟合。

$$\Delta r_m = r_m - r_{m0} = \sum_{j=1}^2 a_j \left\{ (t + t_0) - \frac{1}{b_j} [1 - e^{-b_j(t+t_0)}] \right\} \tag{2}$$

式中: r_m 为圆筒壁中心面半径,mm; r_{m0} 为 r_m 的初始值,mm; a_j 、 b_j 均为拟合参数; t 为圆筒壁膨胀的时间,μs; t_0 为膨胀时间的修正参数,μs。 $t + t_0 = 0$ 时,圆筒壁的中心面开始膨胀。

图 5 圆筒试验曲线的拟合参数值和试验实测爆速值列于表 2。

表 2 ROBF-1 炸药的圆筒壁膨胀
位移曲线拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of expansion displacement
curve of the cylinder wall of ROBF-1 explosive

$D/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$a_1/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$b_1/\mu\text{s}^{-1}$
8.487	1.297 67	0.352 26
$a_2/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$b_2/\mu\text{s}^{-1}$	$t_0/\mu\text{s}$
0.638 49	0.058 85	1.177 20

2.2 圆筒壁膨胀速度和比动能

对式(2)中的时间进行求导,得到质量中心面的
的径向速度 u_m 和质量速度 u_s 的表达式,并计算出
圆筒的比动能 E 。

$$u_m = \frac{dr_m}{dt} = \sum_{j=1}^n a_j [1 - e^{-b_j(t+t_0)}]; \tag{3}$$

$$u_s = 2D \cdot \sin(\arctan \frac{u_m}{2D}); \tag{4}$$

$$E = \frac{1}{2} u_s^2. \tag{5}$$

式中: u_m 为筒壁中心面的径向速度,mm/μs; u_s 为圆
筒中心面的质点速度,mm/μs; D 为炸药在圆筒内的
爆速,mm/μs; E 为圆筒的比动能,kJ/g。

图 6 分别为圆筒质点速度随时间和膨胀位移的
变化曲线。

根据式(5)进行了炸药比动能的处理,拟合曲
线如图 7 所示。分别以 12、25、38 mm 和 50 mm 处
的 4 个特征膨胀位移时的筒壁膨胀速度 u_s 和比动
能 E 来表征炸药的金属驱动能力,试验结果如表 3
所示。

2.3 格尼系数

格尼系数是反应炸药驱动性能的重要参数,改
进后的格尼公式为:

$$\sqrt{2E_g} = u_{s,max} \sqrt{\frac{M}{m} + \frac{1}{2}}. \tag{6}$$

式中: E_g 为比格尼能,kJ/g; $\sqrt{2E_g}$ 为炸药的格尼系
数,mm/μs; M 为单位长度铜管的质量,g; m 为单
位长度炸药的质量,g; $u_{s,max}$ 为圆筒壁膨胀的最大速度,
mm/μs。一般将 $u_{s,max}$ 近似为相对比容为 7.0 时的
 u_s 进行计算。

格尼系数的计算,一般选择相对比容为 7.0 时的
参数。将表 3 中的数据代入式(6),可以计算出
ROBF-1 炸药的格尼系数,结果见表 4。其中,Octol
炸药[$m(\text{TNT}) : m(\text{HMX}) = 25 : 75$]的 $\sqrt{2E_g}$ 为文献

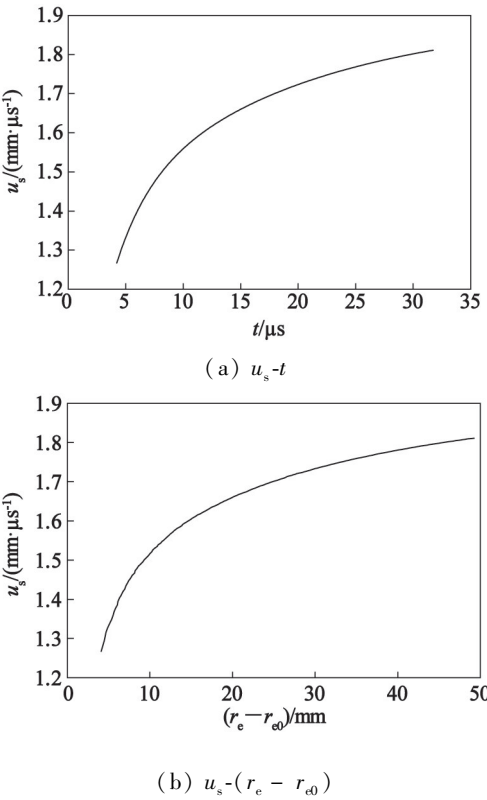


图 6 圆筒质点速度随时间和膨胀位移的变化
Fig.6 Velocity of cylinder particle changing
with time and expansion displacement

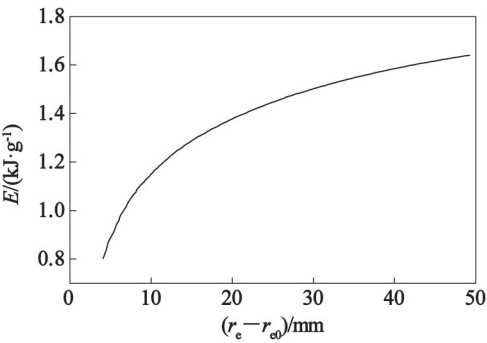


图 7 圆筒比动能的变化
Fig.7 Change curves of specific kinetic
energy of cylinder

表 3 ROBF-1 炸药在不同膨胀位移处
的比动能

Tab.3 Specific kinetic energy of ROBF-1 explosive
at different expansion displacement

膨胀位移/mm	$u_s/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
12	1.558	1.214
25	1.701	1.447
38	1.772	1.571
50	1.813	1.644

表 4 几种炸药的格尼系数

Tab. 4 Gurney coefficients of several explosives

炸药	计算值	试验值
Octol	2.82	2.80
ROBF-1	2.85	2.93
ROB-1	2.78	2.72

值^[12],ROB-1 炸药 $[m(\text{DNAN}):m(\text{HMX})=25:75]$ 为对比样。

2.4 对比分析

由表 4 可以看出,双元复合载体为基的 ROBF-1 炸药的格尼系数与 TNT 基的 Octol 炸药计算值相当,而试验值却较 Octol 炸药提高了 4.6%;ROBF-1 炸药的格尼系数计算值略高于 DNAN 为基的 ROB-1 炸药,而试验值却较 ROB-1 炸药提高了 7.7%。这是因为计算时仅考虑炸药的化学反应过程,未充分考虑炸药膨胀速度等综合因素。由炸药爆轰反应动力学与热力学知识可知,炸药爆轰产物总量的大小直接决定于炸药中氧元素的含量。作为第三代含能材料的典型代表,DNTF 炸药具有能量高、氧含量高、不含氢等特点。为此,以部分 DNTF 取代 DNAN 后,由于炸药中氧平衡得到显著改善,炸药爆轰产物中固相组分含量明显减少,气体组分含量显著增加。依据爆轰产物对金属加速能量的影响可知,相比于纯 DNAN 炸药体系,DNAN/DNTF 双元体系炸药金属加速能力显著加强。

3 ROBF-1 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程

爆轰产物 JWL 状态方程的标准表达式为:

$$p=A(1-\frac{\omega}{R_1V})\cdot e^{-R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})\cdot e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}。$$

(7)

式中: p 为爆轰产物的压力, GPa; V 为爆轰产物的相对比容; E_0 为单位体积的初始内能, GPa; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为待定的状态方程参数。

采用 ANSYS/LS-DYNA 程序对圆筒膨胀过程进行数值仿真。由于试验装置具有几何对称性,故取全尺寸的 1/4 进行建模,如图 8 所示。主炸药采用 * Mat_High_Explosive_Burn 模型和 JWL 状态方程,一端中心点起爆;圆筒采用 * Mat_Johnson_Cook 模型和 Gruneisen 状态方程。

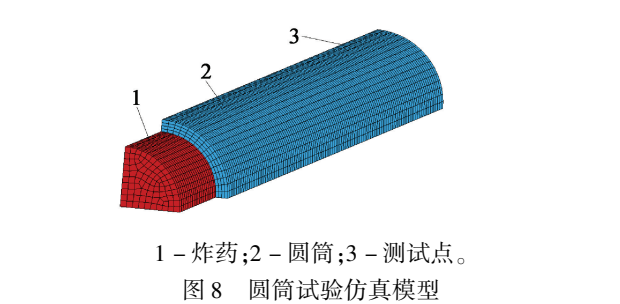


图 8 圆筒试验仿真模型

ROBF-1 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数先按照 Octol 炸药参数进行设定,拟合获得圆筒膨胀的时间-位移曲线,与圆筒试验获得的时间-位移曲线进行对比;调整状态方程参数,通过反复迭代、调整、对比,直到仿真结果与试验结果的时间-位移曲线两者基本吻合(一般误差在 1% 以内),从而确定出 ROBF-1 炸药的 JWL 状态方程参数(见表 5)。图 9 为圆筒膨胀过程仿真与试验的圆筒膨胀时间与位移的关系。图 10 为仿真与试验的圆筒膨胀速度与膨胀位移的关系。

表 5 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Tab. 5 Parameters of JWL equation of state for detonation products of explosives

A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E ₀ /GPa
748	11.13	4.75	1.12	0.33	11.2

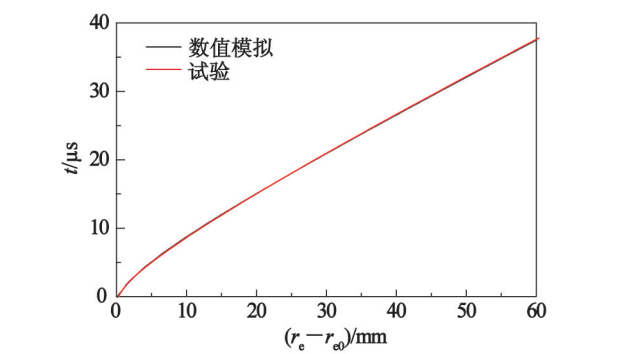


图 9 圆筒膨胀时间与位移的关系

由图 9 和图 10 可知,圆筒膨胀过程仿真结果与试验结果基本吻合(误差小于 0.5%)。因此,认为获得 ROBF-1 炸药的爆轰产物的 JWL 状态方程参数是较为准确的,能够比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动过程。

4 结论

1) 利用 $\varnothing 50$ mm 圆筒试验方法对 DNAN/DNTF 复合载体基 ROBF-1 炸药进行了圆筒试验,获得了

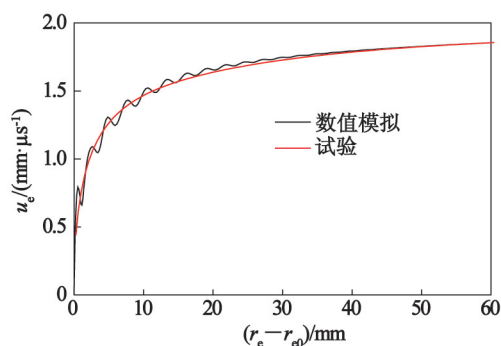


图 10 圆筒膨胀速度与膨胀位移的关系

Fig. 10 Expansion velocity-distance curve of cylinder

圆筒壁速度、位移与时间的关系;计算了爆轰产物在特定相对比容下的比动能,得到装药的格尼系数为 $2.93 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

2) DNTF 对炸药的金属加速驱动能力有促进作用;DNAN/DNTF 为基的 ROBF-1 炸药格尼系数较不含 DNTF 的 ROB-1 炸药提高 7.7%,较 Octol 炸药提高 4.6%。

3) 采用 ANSYS/LS-DYNA 程序对炸药的圆筒试验进行了数值仿真,通过与试验结果相比较,获得了复合载体基 ROBF-1 炸药的爆轰产物的 JWL 状态方程参数。

参 考 文 献

- [1] SOUERS P C, HASELMAN Jr L C. Detonation equation of state at LLNL, 1993; UCRL-ID-116113 [R]. Livermore, CA, US; Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.
- [2] 谭凯元,韩勇,罗观,等. HMX 基 PBX 的作功能力及其 JWL 状态方程[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 42-45.
TAN K Y, HAN Y, LUO G, et al. Power ability and JWL equation of state of a HMX-based PBX [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 42-45.
- [3] 王红星,罗一鸣,高杰,等. 熔铸载体 2,4-二硝基苯甲醚的热安全性研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(3): 16-21.
WANG H X, LUO Y M, GAO J, et al. Study on the thermal safety of the melt-cast carrier DNAN[J]. Explosive Materials, 2020, 49(3): 16-21.
- [4] 胡焕性,张志忠,赵凤起,等. 高能量密度材料 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃性能及应用研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 155-158.
HU H X, ZHANG Z Z, ZHAO F Q, et al. A study on the properties and application of high energy density material DNTF [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(2): 155-158.
- [5] 王亲会. DNTF 基熔铸炸药的性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 57-59.
WANG Q H. Properties of DNTF-based melt-cast explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(3): 57-59.
- [6] 熊贤锋,王浩,高杰,等. DNTF 基熔铸炸药的金属加速作功能力[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 32-34.
XIONG X F, WANG H, GAO J, et al. Metal accelerating ability of DNTF-based melt-cast explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(3): 32-34.
- [7] 王浩,高杰,罗一鸣,等. DNTF/HMX 炸药的金属加速作功能力及其 JWL 状态方程[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 60-62.
WANG H, GAO J, LUO Y M, et al. Metal accelerating ability and JWL EOS of DNTF/HMX explosive [J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(7): 60-62.
- [8] 周涛,程淑杰,王辉,等. DNTF 基含铝炸药复合装药的驱动特性[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 46-50.
ZHOU T, CHEN S J, WANG H, et al. Research on driving characteristic for compound charge of DNTF-based aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(5): 46-50.
- [9] 沈飞,王辉,罗一鸣. DNTF 基同轴双元装药的爆轰波形及驱动性能[J]. 含能材料, 2018, 26(7): 614-619.
SHEN F, WANG H, LUO Y M. Detonation wave-shape and driving performance of coaxial binary charge of DNTF-based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(7): 614-619.
- [10] 陈玲,舒远杰,徐瑞娟,等. 含能低共熔物研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 108-115.
CHEN L, SHU Y J, XU R J, et al. Review on energetic eutectic [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 108-115.
- [11] 王浩,王亲会,黄文斌,等. DNAN 降低 DNTF 冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 435-438.
WANG H, WANG Q H, HUANG W B, et al. Shock sensitivity of DNTF reduced by using DNAN [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(4): 435-438.
- [12] LINDSAY C M, BUTLER G C, RUMCHIK C G, et al. Increasing the utility of the copper cylinder expansion test[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, 35(5): 433-439.