

doi: 10.7690/bgzdh.2013.01.017

爆炸反应装甲含能材料的发展及探索

黄鹤, 刘炜, 陈建申

(晋西集团技术中心第四研究所爆炸防护技术研究室, 太原 030041)

摘要: 针对 20 世纪 80 年代中期到 90 年代初期, 爆炸反应装甲内装的 2 种含能材料受到单一性制约, 已不能满足多元化战场环境需求的问题, 对爆炸反应装甲含能材料的发展进行研究。介绍前两代爆炸反应装甲用含能炸药, 探讨其发展方向, 提出爆炸反应装甲专用炸药新思路, 并对 HNIW 和 HMX 部分性能进行比较。结果表明: 前者明显优于后者, 能显著增加穿透深度或孔径。

关键词: I、II 代含能材料; 高能量; 成型性; 多元化

中图分类号: TJ510.4 **文献标志码:** A

Explosive Reactive Armor of Energetic Materials Development and Exploration

Huang He, Liu Wei, Chen Jianshen

(Blast Protection Technology Lab, No. 4 Research Institute of Technology Center, Jinxi Group, Taiyuan 030041, China)

Abstract: In mid 1980's to the early 1990's, explosive reactive armor inside 2 kinds of energetic materials by single conditionality, has been unable to meet the diversified needs of battlefield environment of explosive reactive armor, research the energetic material development. Introduction of two generation of explosive reactive armor with energetic explosive, discuss the development direction of explosive reactive armor, puts forward new ideas for explosives, and the HNIW and HMX properties are compared. The results show that the former is superior to the latter, can significantly increase the depth of penetration or aperture.

Key words: I, II energetic materials; high energy; moldability; pluralism

0 引言

爆炸反应装甲以结构简单、成本低及显著提高装甲的抗弹能力, 倍受各国的重视。爆炸反应装甲的各项技术指标是针对车体的挂装所提出的。爆炸反应装甲前后历经 5 代产品, 对于爆炸反应装甲内装的含能材料来说就只有 2 种混合炸药(简称 I、II 代炸药), 其炸药的单一性制约了它的应用。随着弹的不断发展和其环境变化多样, 爆炸反应装甲及其含能材料也应便于快速发展; 因此, 笔者对爆炸反应装甲含能材料的发展进行研究。

1 爆炸反应装甲引爆机理

说到爆炸反应装甲就要先考虑其引爆机理, 炸药在机械作用下起爆机理是一个非常复杂的问题, 现在公认的是“热点学说”: 当炸药受撞击或摩擦时, 机械能首先转化为热能, 聚集在小的局部范围内形成热点, 并在热点处产生热分解。但由于分解的放热性导致分解反应速度增加, 在热点内形成强烈反应, 结果引起局部或全部炸药爆炸。

在一般机械力作用下, 可以通过以下 3 种途径

形成热点:

- 1) 炸药由所含微小气泡绝热压缩形成热点;
- 2) 炸药由摩擦形成热点;
- 3) 炸药由粘滞流动而产生热点。

笔者将应用热点理论的基本思想, 结合模拟反应装甲结构特点来研究反应装甲引爆机理。为方便起见, 拟采用坐标系来描述问题。柱坐标系下的轴对称稳态热传导方程是:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

其中: q 为单位容积介质生成热量的速率; C_p 为比热容; ρ 为介质密度。

假设炸药反应速度服从阿列尼斯方程, 形成热点瞬间为开始时间。在时间 t 内距热点中心径向 r 处的温度比周围介质高 θ 。在柱坐标系中引用热传导方程 (1), 有方程 (2) 成立:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\rho C_p}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

方程 (2) 的定解条件为:

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-11-12

作者简介: 黄鹤(1984—), 男, 河北人, 学士, 助理工程师, 从事爆炸防护技术研究。

$$\begin{cases} t=0, & r=a \text{ 时: } \theta=0 \\ t=0, & 0 < r < a \text{ 时: } \theta=\theta_0 \end{cases}$$

设 $\theta_1(x, t)$ 为钢板内温度变化函数, $\theta_2(r, t)$ 为炸药内温度变化函数, 则热传导函数 $\theta(x, r, t) = \theta_1(x, t) \times \theta_2(r, t)$ 。在时间 t 内由热点传给板的热量:

$$q_1 = \int_a^{\infty} 2\pi a^2 \theta_1(x, t) \rho_1 C_1 dx$$

时间 t 内传给药的热量:

$$q_2 = \int_a^{\infty} 2\pi a h \theta_2(r, t) \rho_2 C_2 dr$$

而在时间 t 内由热点反应放出热量:

$$q = \pi a^2 h \rho_1 \theta A e^{-e/RT}$$

由此得到热平衡条件:

$$q = q_1 + q_2 \tag{3}$$

由热平衡方程 (3) 可以决定临界温度 t 及临界尺寸 a , 如测得其中之一则可求解方程 (3)。

当热平衡达到热爆炸的临界条件后, 经过一段时间, 炸药制品温度迅速上升。由炸药受热开始到出现快速升温的过程叫炸药粘滞期。为简化问题, 设此时热爆炸发生过程是绝热的, 由化学反应动力学得到方程 (4):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{QAE}{CRT_0^2} e^{E/RT_0} \cdot e^{-\theta} \tag{4}$$

方程 (4) 定解条件:

$$\begin{cases} t=0: & \theta_0=0 \\ t=t_c: & \theta = \frac{E}{RT_0^2} \cdot (T_c - T_0) \end{cases}$$

分离变量积分得到延滞时间:

$$t_c = \frac{CRT_0^2}{QAE} e^{E/RT_0} \cdot e^{-\theta} \Big|_{\theta_c}^{\theta_0}$$

近似为式 (5):

$$T_c = \frac{CRT_0^2}{QAE} e^{E/RT_0} \tag{5}$$

其中: q 为分解反应生成摩尔产物时放出的热量; θ_c 为热爆炸延滞期结束时的无因次温度; t_c 为热爆炸延滞时间; E 为化学反应活化能; T 为反应气体温度; R 为通用气体常数; A 为指前因子; T_0 为介质温度。

2 爆炸反应装甲含能炸药的发展

反应装甲的含能材料都是基于引爆机理设计研

究, 反应装甲的抗弹性能(穿、破甲弹)和安全性能(抗殉爆、抗枪击、火焰燃烧、抗气割、振动), 这两大性能由爆炸反应装甲试验规范来考核验证, 详见 GJB2336-95《反应装甲规范》^[1]。

我国先后研制了第 I、II 代 2 种反应装甲专用安全炸药。众所皆知, 炸药的威力与反应装甲的抗弹性能有直接的关系, 炸药的感度决定于反应装甲安全性能, 冲击波感度对反应装甲殉爆性能起着一定的作用, 冲击波感度隔板值 δ_{50} 低, 反应装甲抗殉爆性能愈可靠, 同时可以提高反应装甲的有效防护面积。根据当时条件, I 代专用炸药与其他炸药相比, 性能稳定, 安全可靠, 适用于批量生产, 成型工艺性好, 容易压制成型, 热安定试验数据见表 1; 与各种非金属、金属相容性良好; 但有压制高密度药柱易产生裂纹的缺陷。当时的 I 代反应装甲专用炸药填补了国内空白, 达到国外 20 世纪 80 年代先进水平, 是上代人的智慧结晶。

表 1 I 代炸药与 8701、钝化黑索今的热安定试验结果数据

炸药名称	100℃ 48 h 分解	失重法分解	备注
I 代炸药	0.02 mL/5g	150℃、240 min 失重 0.003%	5 年前
		240 min 失重 0.034%	5 年后
钝化黑索今	0.80 mL/g	20 mm × 20 mm 药柱 100℃ 48 h 失重 0.09%	
8701	0.64 mL/g	300 min 失重 0.11%	

I 代炸药组间和接触材料的放气增量均属可忽略等级, 证明其相容性良好, 不影响其使用性能, 有利于长期储存。

随着反坦克武器的快速发展, 战场变得更加恶劣, 需要研制一种能被破甲射流和大口径动能弹丸引爆, 但不能被小口径枪弹弹丸引爆的炸药。反应装甲 II 代专用安全炸药的问世, 显著提高抗弹威力, 其感度较低、安全性及相容性良好, 尤其能长期储存, 性能优良, 已应用与各种型号的反应装甲, “十一五”期间分阶段在不同储存地点对炸药取样进行测试, 各项指标满足产品要求。

3 爆炸反应装甲专用炸药新思路

提高爆炸反应装甲装药工艺性, 使其自动化程度提高, 有利于大规模工厂生产, 以求战时大规模需求。现在爆炸反应装甲专用炸药呈固态粒状, 适于进行平面压装, 但无法满足品种较多的平面异型装药需求, 手工装药虽对平面异型可以满足, 但装填密度和压药相比, 质量一致性较差。对于空间异型来说, 手工装药无能为力, 极大地限制了爆炸反应装甲结构的发展。

随着反坦克武器发展和轻型车辆特殊化要求, 爆炸反应装甲要求其含能炸药: 高爆速、易成型、局部起爆等, 抵抗威力更大的穿、破甲弹。新型高能量密度化合物相继合成, 1987 年, 美国首先合成了 HNIW (六硝基六氮杂异伍兹烷), 其性能很多方面优于 HMX (奥克托今), 如密度比 HMX 高 8%, 爆速高 6%, 爆压高 8%, 能量密度高 15% 以上^[2], 属多环硝铵化合物, 具有笼状结构。由 HNIW 与粘结剂组成的炸药或推进剂配方能显著提高武器的比冲、燃烧速度和起爆能, 有望成为推进剂及高能炸药配方的首选材料^[3-4]。

HNIW 较 HMX 敏感, 其摩擦感度和撞击感度与 HMX、RDX (黑索今) 相当; 爆发点低于 HMX,

高于 RDX 及 PETN (季戊四醇四硝酸酯); 其静电火花感度与 HMX、PETN 接近。

国外研究者对 HNIW 应用研究十分感兴趣。法国 SNPE 采用不同结晶或研磨工艺, 通过调整 HNIW 的质量参数, 增加含能粘结剂 GAP 含量, 以改善其配方性能。美国、日本、法国、瑞士等国家均致力于将 HNIW 应用到火箭推进剂及高能炸药中^[5]。

与 HMX 相比, 以 HNIW 为基炸药的能源非常诱人, 参数见表 2。对以 HTPN (端羟基聚丁二烯) 为粘结剂, 分别以 HNIW 和 HMX 为填充物的高能炸药性能进行比较, 结果表明, 前者比后者提高了 12% 以上。以 HNIW 配方制成的锥形装药, 其作用效应可提高 20%, 显著增加穿透深度或孔径。

表 2 HNIW 与 HMX 部分性能比较^[2]

性能	HNIW				HMX
	ϵ	β	α	γ	β
分子式			C ₆ H ₆ N ₁₂ O ₁₂		C ₄ H ₈ N ₈ O ₈
外观			白色晶体		白色晶体
密度/(g·cm ⁻³)	2.035	1.983	1.952(含 1/2 H ₂ O)		1.918
标准生成焓/(KJ·kg ⁻¹)	860	980			7.910
燃烧焓/(MJ·kg ⁻¹)	-8.21	-8.33			+250
爆热 ^① /(MJ·kg ⁻¹)	6.23				-9.34
爆速/(km·s ⁻¹)	9.5(计算值)				6.19
爆压/GPa	43(计算值)				9.0($\rho=1.88$ g·cm ⁻³)
爆发点(5 s)/°C	283.9				39
撞击感度 ^② (h50)/cm	15~20				327
摩擦感度 ^③ /%	100				24
静电火花感度 ^④ /J	0.68				100
					0.57

注: ①为按 Ornellas 法测定, 药量 25 g, 药柱直径 1.27 cm, 水为液态; ②为用 12 型仪测定, 锤重 2.5 kg, 药量 25 mg。感度值与药粒径及外形有关; ③为 90°, 3.92 MPa; ④为 50% 发火的能量, 未说明测定条件。

以 HNIW 等高能量密度化合物改良装药用于爆炸式装甲使其抗弹性能提高, 这是下一步有待检测的课题。

装药不但要有高能量, 同时要有较好的工艺性。第 I、II 代手工混药、手工装药或自动压装, 但其药面应力不够易脱落, 对于一些异型药盒更加不易装填, 基于此考虑, 对于反应药盒装填某种 PBX 炸药进行抗弹摸底试验, 由于 PBX 相当钝感, 40 破甲弹未能引爆, 所以考虑其钝感性不能太低, 应调节其感度。如果以 HNIW 为主体加入粘结剂, 增塑剂使其易成型, 钝感调节感度满足其指标, 制成具有挠性的主装药, 便于成型和单元模块装配。

4 结束语

对于多元化的战场来说, 根据战时的要求车辆披挂不同的爆炸反应装甲, 满足其抗弹性能。对于轻型车体, 超压考虑应装填局部起爆的装药避免车

体受到较大损害, 对于登陆作战坦克水中易受到威胁, 其装药应具有有一定抗水性, 加入弹性粘结剂改良, 使其在 -40~+70 °C 保持挠性, 对于多元战场环境, 爆炸反应装甲也应多元化, 这是爆炸反应装甲用含能炸药的发展趋势。

参考文献:

- [1] 刘天生, 李玫, 等. GJB2336-95 反应装甲规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1995.
- [2] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 263-264.
- [3] 曾贵玉, 聂福德, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)的研究进展[J]. 含能材料, 2000, 8(3): 130-134.
- [4] Hakoka Bazak, Shuichi Kawake, Hiroshi Miya. Synthesis and Sensitivity of Hexanitrohexaazaisowurtzitane[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1998, 23: 333-336.
- [5] 陆明. 炸药的分子与配方设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004: 145-146.