

doi: 10.7690/bgzdh.2024.04.005

PBT/A3 基 RDX 含铝炸药爆炸能量特性研究

彭泓铮¹, 黄开书¹, 陈文¹, 肖师云¹, 李国平², 谭正军¹, 肖伟¹, 高位¹

(1. 重庆红宇精密工业集团有限公司科技发展部, 重庆 402760; 2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081)

摘要: 为掌握 PBT/A3 粘结剂体系对含铝炸药爆炸能量的影响特性, 以 PBT/A3 粘结剂体系为研究对象, 复合 RDX 和 Al 粉设计 PBT/A3 基 RDX 含铝炸药配方。测试炸药复合体系密度、爆速、爆热等性能, 并与相同条件 HTPB 基 RDX 含铝炸药进行对比, 探讨 PBT/A3 粘结剂对炸药密度及爆炸本征能量爆速和爆热影响; 开展 PBT/A3 基含铝炸药冲击波超压性能测试, 对其近/远场冲击波能量释放特性进行分析和讨论。研究结果表明: 较于 HTPB 基 RDX 含铝炸药, PBT/A3 粘结剂对复合体系装药密度提升 9.1%, 爆速和爆热分别提升 1.45% 和 11.47%, 能量密度提升较为明显; PBT/A3 基炸药近场超压当量为 1.6 倍, 远场超压当量为 1.69 倍, PBT/A3 含能粘结剂体系的引入改善了复合体系氧平衡, 有利于 Al 粉充分燃烧提高其远场能量释放。

关键词: PBT/A3 粘结剂; RDX 含铝炸药; 爆炸能量; 含能粘结剂

中图分类号: TJ55 文献标志码: A

Study on Explosion Energy Characteristics of PBT/A3-Based RDX Aluminized Explosive

Peng Hongzheng¹, Huang Kaishu¹, Chen Wen¹, Xiao Shiyun¹, Li Guoping², Tan Zhengjun¹, Xiao Wei¹, Gao Wei¹

(1. Department of Science and Technology Development, Chongqing Hongyu

Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to master the influence of PBT/A3 binder system on the explosion energy of aluminized explosive, the PBT/A3 binder system was taken as the research object, and the formulation of PBT/A3-based RDX aluminized explosive was designed by compounding RDX and Al powder. The density, detonation velocity and explosion heat of the composite explosive system were tested and compared with those of the HTPB-based RDX aluminized explosive under the same conditions, and the effects of PBT/A3 binder on the density, explosion energy, detonation velocity and explosion heat of the explosive were discussed. The shock wave overpressure performance of the PBT/A3-based aluminized explosive was tested, and the shock wave energy release characteristics of the PBT/A3-based aluminized explosive were analyzed and discussed. The results show that compared with HTPB-based RDX aluminized explosive, PBT/A3 binder can increase the charge density by 9.1%, increase the detonation velocity and heat of detonation by 1.45% and 11.47%, respectively, and increase the energy density obviously; The near-field overpressure equivalent of PBT/A3 based explosive is 1.60 times, and the far-field overpressure equivalent is 1.69 times. The introduction of PBT/A3 energetic binder system improves the oxygen balance of the composite system, which is beneficial to the complete combustion of Al powder and the energy release in the far field.

Keywords: PBT/A3 binder; RDX aluminized explosive; explosion energy; energetic binder

0 引言

含铝炸药于 1899 年被提出, 通过向爆炸体系中加入铝粉, 提高体系爆热能量输出, 实现其较高的做功能力^[1], 其能量释放特性较理想炸药而言, 不同特征在于铝粉通常在爆轰波 C-J 面后与气相产物发生二次反应, 呈现出典型的二次反应特征^[2-6], 其作为军用混合炸药的一个重要系列, 现已广泛用于对空、水下、对舰、空地等各类武器弹药主装药, 如何提升威力性能一直是研究者关注的重点。含能粘结剂是炸药成型的重要载体, 由于分子链上带有

含能基团(-ONO₂、-NO₂、-N₃等), 燃烧或爆炸时能够释放出大量热, 并生成大量低相对分子质量气体, 提高爆燃和做功能力, 现已被验证成为提高炸药特别是含铝炸药能量水平的有效技术途径之一^[7-8], 国内外研究者在此方面做了大量研究工作。

罗运军等^[9]通过“含能粘结剂+含能增塑剂+主体炸药”的方式得到了以 AFNOL、液体炸药 FEFO 和 HMX 为主要成分的 RX-08 系浇注型炸药, 其中 AFNOL 作为含能黏合剂, FEFO 起增塑剂作用; Cliff 等^[10]则以含能粘结剂为载体, 复合硝酸酯类为增塑

收稿日期: 2023-12-09; 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 国防基础科研基础产品火炸药创新项目(HZYXZ2018001)

第一作者: 彭泓铮(1987—), 男, 四川人, 硕士。

剂,以 RDX 为主体炸药,研发出了 ARX 系列炸药,但未对该炸药力学性能和安全性能进行说明;Frankel 等^[11]以含能聚合物 GAP 为粘结剂,通过 2 种含能增塑剂 TMETN 和 TEGDN(BDNF/A)的复配,有效降低了体系的黏度,具有良好的加工流动性,使炸药组分 HMX 或 RDX 的含量可达 80%;国内相关研究单位^[12-15]通过 GAP、ETPE、PNP 等含能粘结剂,使用 CL-20、HMX 等猛炸药进行了含能粘结剂在炸药中的应用探索,尚处于起步阶段。

PBT 粘结剂(化学名称“3,3-双叠氮甲基氧丁烷与四氢呋喃共聚酯”)密度 1.26 g/cm^3 ,氧平衡 -60.5% ^[7];A3 增塑剂(双 2,2-二硝基丙醇缩乙醛(BDNPA)/双 2,2-二硝基丙醇缩甲醛(BDNPF)混合物(50/50))密度 1.39 g/cm^3 ,氧平衡 -57.5% ^[14-15]。PBT/A3 粘结剂体系相较于传统浇注载体 HTPB 密度、氧平衡、能量均有明显的提高或改善,主要集中于合成改性、力学性能改性和推进剂性能影响方面^[16-18],现已广泛应用于固体推进剂中,但在浇注 PBX 含铝炸药中应用特别是其对能量性能的影响研究鲜有报道。

为探索 PBT/A3 粘结剂体系在炸药中应用可行性,笔者以其为浇注成型载体,RDX 和 Al 粉为含能固相颗粒,获得了 PBT 基浇注 PBX 含铝炸药配方,并将 HTPB(化学全称“端羟基聚丁二烯”)基含铝炸药配方进行了样品对比,研究了 PBT 粘结剂对含铝炸药密度、爆速、爆热等本征能量增益特性影响规律,并对其冲击波超压进行了测试,为含能粘结剂基炸药配方设计和能量评估提供技术参考。

表 1 HTPB 基和 PBT 基炸药配方组成及相关理论参数

序号	样品名称	粘结剂体系	配方组成及配比	理论参数			
				密度/(g/cm^3)	爆速/(m/s)	爆热/(J/g)	爆压/ GPa
1	样品 1	HTPB/DOA	粘结剂/RDX/Al=18/45/37	1.739	7 215	8 339	22.63
2	样品 2	PBT/A3		1.945	待定	待定	待定

注: 1) HTPB 粘结剂体系特征密度取 0.95 g/cm^3 ,特征爆速取 $5 400 \text{ m/s}$,特征爆热 0; 2) PBT/A3 粘结剂体系特征密度取 1.35 g/cm^3 。

1.3 样品制备

根据表 1 炸药配方组成和比例,采用加料-捏合-真空-振动的混制浇注工艺,制备密度、爆速、爆热等样品,对密度、爆速、爆热性能参数测试。为进一步验证含能粘结剂基对炸药样品爆炸能量特性影响,制备了 8 kg 级、直径为 $\phi 170 \text{ mm}$ 冲击波超压测试样品进行冲击波超压性能测试。图 1 为 PBT/A3 基浇注 PBX 炸药工艺状态,图 2 为 PBT/A3 基浇注 PBX 炸药样品。TNT 药柱按照传统熔注工

1 试验样品

1.1 原材料

PBT 粘结剂,数均分子量 $M_n=3 700 \text{ g/mol}$,羟值 0.83 mmol/g ,官能度 $2.3\sim 3.0$,黎明化工研究设计院有限责任公司;A3 增塑剂,分析纯,黎明化工研究设计院有限公司;端羟基聚丁二烯(HTPB),数均分子量 $M_n=2 800$,羟值 0.74 mmol/g ,黎明化工研究设计院有限责任公司;己二酸二辛脂(DOA),分析纯,天元新材化工有限责任公司(营口);甲苯 2,4-二异氰酸酯(TDI),甘肃银光化学工业集团有限公司;三苯基铋(TPB),特制品,中国科学院上海有机化学研究所;黑索今(RDX),工业级,甘肃银光化学工业集团有限公司;2,4,6-三硝基甲苯(TNT),工业级,湖北东方化工有限公司;球形铝粉(Al),工业级,鞍钢实业微细铝粉有限公司;力学功能助剂,自制。

1.2 配方设计

为研究 PBT/A3 含能粘结剂体系对炸药爆炸能量影响规律,特别是本征能量增益影响规律,笔者设计了 BT/A3 含能粘结剂基 RDX 含铝炸药配方,并在相同条件下(固相含量、RDX 和铝粉及其比例)设计了 HTPB 基炸药配方作为对比样品,具体方法是:分别以 HTPB/DOA 和 PBT/A3 为粘结剂载体,RDX 为猛炸药,复配相同大小粒度和配比的铝粉,固相含量为 82%,RDX 和 Al 粉含量分别为 45%和 37%,并对 2 种炸药密度、爆速、爆热、爆压等相关理论参数进行了计算,具体结果如表 1 所示。

艺成型,装药密度 $1.58\sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ 。



图 1 PBT/A3 基炸药工艺状态

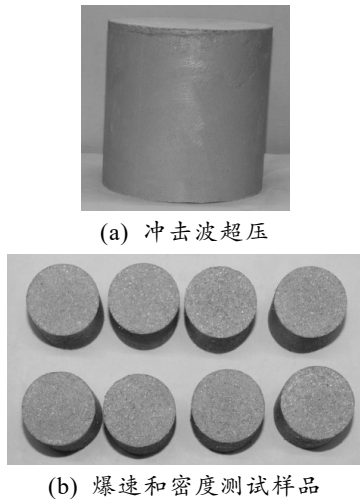


图 2 PBT/A3 基浇注 PBX 炸药样品

2 试验部分

爆速 (explosion velocity)、爆热 (explosion heat)、爆压 (explosion pressure)、爆温 (explosion temperature)、爆容 (explosion volume) 是描述炸药本征能量性能水平的“5E”参数，其中爆热被认为是炸药爆炸能量总化学能源，常用来评价炸药装药 TNT 当量^[19-21]。由于当前测试技术的限制，炸药本征能量性能参数能够准确测试获得的只有爆速和爆热。为研究 PBT/A3 含能粘结剂体系对炸药本征能量影响规律，对炸药的密度、爆速、爆热进行测试，并与 HTPB 基炸药样品对比，掌握含能粘结剂对爆炸本征能量增益特性影响规律；为进一步研究含能粘结剂体系对炸药爆炸能量影响规律，对 PBT/A3 基炸药进行 8 kg 级冲击波超压性能测试，考查其冲击波超压做功能力。

2.1 性能测试

2.1.1 密度

按照《炸药试验方法》GJB772A-97 中方法 401.2 《药柱(块)密度-液体静力称量法》进行测试。药柱尺寸规格为 $\phi 40\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。

2.1.2 爆速

按照《炸药试验方法》GJB772A-97 中方法 702.1 《爆速电测法》进行测试。药柱规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。

2.1.3 爆热

参照《炸药试验方法》GJB772A-97 中方法 701.1 《爆热-绝热法》进行测试。药柱规格为 $\phi 28\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ，药柱质量约 40 g。

2.2 冲击波超压测试

冲击波超压测试待测样品起爆装配如图 3 所示，测试按照图 4 布置。其中，爆心距离地面 1.5 m，在距离爆心 4、5、7、9、11、14 和 18 m 设置自由场超压传感器，共设 2 路 (2 路夹角 60°)。使用 TNT 药柱 ($\phi 170\text{ mm}$ ，质量约 8 kg) 对超压传感器进行标定，标定完成后对 PBT/A3 基炸药进行冲击波超压测试，样品规格为 $\phi 170\text{ mm}$ ，质量约 8 kg，采用端面起爆。

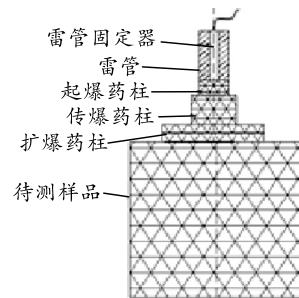


图 3 待测样品起爆

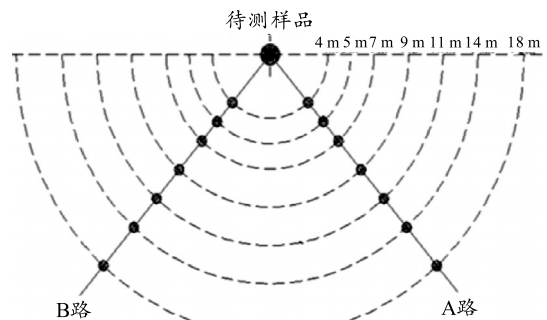


图 4 冲击波超压布置

3 结果与讨论

3.1 炸药爆炸本征能量增益特性

HTPB/DOA 粘结剂体系是当前浇注 PBX 炸药广泛应用的粘结剂体系，为此，笔者制备了 2 种粘结剂体系基炸药样品，测试了其密度、爆速、爆热等性能，结果如表 2 所示。从表中可知，相较于传统的 HTPB 粘结剂基浇注 PBX 炸药，使用 PBT/A3 含能粘结剂为载体的炸药密度、爆速、爆热均有不同程度的提高，其中提升较为明显的是密度和爆热。

表 2 种样品性能测试结果

序号	项目	样品 1	样品 2	提升率/%
1	密度/(g/cm ³)	1.695	1.850	9.10
2	爆速/(m/s)	7 034	7 136	1.45
3	爆热/(J/g)	7 030	7 837	11.47

3.1.1 装药密度

装药密度方面。PBT/A3 基炸药装药密度从

1.695 g/cm³ 提高到 1.850 g/cm³, 提升率为 9.1%, 这主要是因为 HTPB/DOA 粘结剂体系密度仅为 0.90~0.95 g/cm³, 而 PBT/A3 含能粘结剂密度在 1.35~1.40 g/cm³, 从而使得整个复合体系密度出现了明显提升。进一步探究 2 种粘结剂样品装药密度发现, HTPB/DOA 粘结剂样品装药相对密度为 97.5%(装药密度/理论密度×100%), 而 PBT/A3 粘结剂样品相对密度仅为 95.1%。分析认为, 在样品制备过程中, PBT/A3 粘结剂体系虽然可对 RDX 和 Al 粉颗粒完全浸润和包覆, 由于 PBT/A3 粘度偏大的物理特性, 导致整个复合体系粘度较 HTPB/DOA 基炸药明显增大, 装药过程中气体不易排出, 使得装药内部存在气孔, 导致装药相对密度偏低。下一步研究方向是对 PBT/A3 基浇注 PBX 炸药装药工艺进行优化, 根据以往工程经验, 预计可达到 1.89~1.90 g/cm³。

3.1.2 爆速

笔者使用 PBT/A3 粘结剂为载体, 与 HTPB/DOA 粘结剂体系不同, 体系中含有“-N₃”和“-N-NO₂”含能基团, 其对整个炸药混合体系爆速提高可能有所贡献, 这一点从表 1 中爆速 7 034 m/s 提升至 7 136 m/s(提升率 1.45%)可得到验证。为进一步掌握含能粘结剂对复合体系爆速增长贡献, 笔者根据军用混合炸药相关理论, 运用工程算法对 PBT/A3 含能粘结剂和 HTPB/DOA 粘结剂体系特征爆速分别进行了计算。

目前混合炸药理论爆速工程计算按照 Urizar 公式进行计算^[22]:

$$V_{Di} = \sum(D_i V_i) \quad (1)$$

式中: V_{Di} 为混合炸药理论爆速, m/s; D_i 为混合炸药中 i 组分的特征爆速, m/s; V_i 为混合炸药中 i 组分的体积分数。其中 V_i 按照式(2)进行计算:

$$V_i = (m_i / \rho_i) / \sum(m_i / \rho_i) \quad (2)$$

式中: m_i 为混合炸药中 i 组分的质量分数; ρ_i 为混合炸药中 i 组分的密度, g/cm³。

考虑到装药密度对爆速的影响, 装药密度与爆速之间的关系可按照式(3)进行计算:

$$V_D = V_{Di}(1 + 3 * \rho_0 / \rho_i) / 4 \quad (3)$$

式中: V_D 为装药密度下理论爆速, m/s; V_{Di} 为理论密度下理论爆速, m/s; ρ_0 为装药密度, g/cm³; ρ_i 为理论密度, g/cm³。

根据式(1)~(3), 可得 PBT/A3 基炸药理论密

度 1.945 g/cm³ 下理论爆速为 7 407 m/s, 特征爆速为 5 500 m/s; HTPB/DOA 粘结剂体系在理论密度 1.739 g/cm³ 下理论爆速为 7 215 m/s, 特征爆速为 5 400 m/s。比较 2 种体系, PBT/A3 粘结剂体系特征爆速有所提高, 其对含铝炸药的爆速有一定增益贡献。文献[23]采用水悬浮法比较了聚氨酯热塑性弹性体(Estane)、GAP 基弹性体、BAMO/AMMO 基弹性体 3 种载体对炸药能量输出影响规律, 在相同条件下 GAP 基弹性体、BAMO/AMMO 基弹性体较 Estane 弹性体爆速仅增加了 109 和 182 m/s, 表明含能粘结剂载体在炸药复合体系中对爆速提高有限, 这在一定程度上验证了笔者的观点。

3.1.3 爆热

从表 2 中可知, HTPB/DOA 基炸药样品爆热 7 030 J/g, 同样测试条件下 PBT/A3 基炸药样品爆热 7 837 J/g, 提升率 11.37%, 由此可见, PBT/A3 粘结剂的加入可明显提高炸药复合体系的爆热。分析认为, 这是由于 PBT/A3 粘结剂体系中含能基团, 改善了整个复合体系中氧平衡, 促进了体系中铝粉的反应程度, 提高了炸药的爆热。由于爆热是表征炸药总能量水平性能参数, 爆热提高意味着炸药化学潜能水平提高, 可有更多的能量转化为冲击波、破片等毁伤元能量对目标进行作用^[24]。为进一步验证 PBT/A3 基炸药爆炸性能, 笔者对其冲击波超压做功能力进行了测试, 研究近/远场爆炸能量释放特性。

3.2 冲击波超压性能测试

为准确掌握 PBT/A3 基炸药冲击波超压性能和威力当量, 需使用标准 TNT 样品对超压测试系统进行标定, 确保测试数据准确性和有效性, 笔者使用 TNT 和 PBT/A3 基炸药 2 种样品进行性能测试。测试现场超压测试分为 2 路, 取 2 路测试超压峰值数据的算术平均值作为有效数据, 图 5 为 2 种装药待测样品, 表 3 为 TNT 和 PBT/A3 基炸药样品在不同距离处的超压峰值, 其中 PBT/A3 近场为 1.60 倍 TNT 当量, 远场为 1.69 倍 TNT 当量。



(a) TNT

(b) PBT/A3 基炸药

图 5 待测样品

表 3 PBT/A3 基炸药样品与 TNT 炸药的超压峰值测试结果

样品名称	$\Delta P/\text{MPa}$	4 m	5 m	7 m	9 m	11 m	14 m	18 m
TNT	ΔP_1	0.211	0.137	0.104	0.067	0.046	0.034	0.021
PBT/A3	ΔP_2	0.280	0.213	0.148	0.088	0.066	0.043	0.026

根据入射冲击波与反射冲击波在传播过程中的相互作用关系, 可知产生马赫波的入射角极限值为 40° ^[25-26]。结合入射角与装药量及爆心高度的关系, 可知本次试验 1.5 m 高位置的自由场传感器将在距爆心 9 m 之后接收到的马赫波压力信号, TNT 和 PBT/A3 基炸药样品在近场 7 m 处典型的超压-时间曲线如图 6 所示, 在远场 14 m 处典型的超压-时间曲线如图 7 所示。

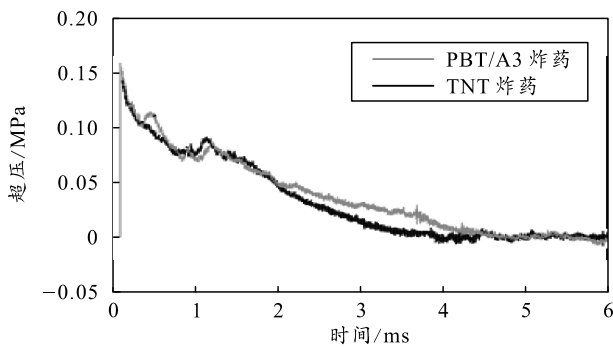


图 6 典型的 7 m 处超压-时间曲线

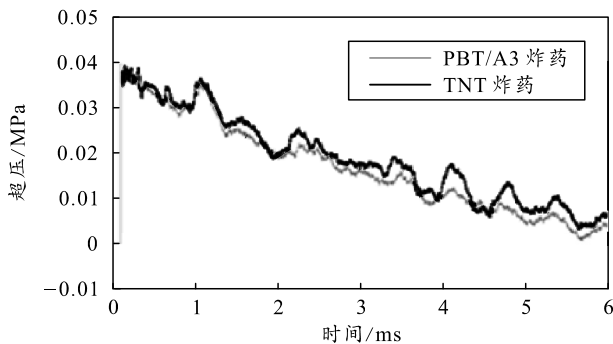


图 7 典型的 14 m 处超压-时间曲线

由图 6 和 7 的超压-时间曲线可知, PBT/A3 基炸药爆炸过程中, 其近场和远场的超压较 TNT 炸药具有显著的优势, 能够提高炸药样品的爆炸威力。分析认为: 1) PBT/A3 基炸药中 RDX 炸药具有比 TNT 更高的能量; 2) 由于 PBT/A3 基炸药中铝粉二次燃烧释能的缘故, 该部分能量能够在一定时间内维持爆炸波的继续传播, 从而增强了爆炸总能量^[23]。为进一步了解其近远场爆炸特性, 根据 TNT 炸药爆炸过程中入射波超压的衰减规律, 采用 Sadovskiy 经验公式^[27-29](见式(4)), 将其在近场和远场的超压进行拟合标定, 得到近场超压计算式(见式(5))和远场超压计算式(见式(6)), 拟合系数均 > 0.98 。

$$\Delta P = a\sqrt[3]{\omega/R} + b\left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^2 + c\left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^3; \quad (4)$$

$$\Delta P = 0.455 \times \sqrt[3]{\omega/R} - 0.943 \times \left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^2 + 1.739 \times \left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^3; \quad (5)$$

$$\Delta P = 0.081 \times \sqrt[3]{\omega/R} + 0.524 \times \left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^2 + 0.128 \times \left[\sqrt[3]{\omega/R}\right]^3. \quad (6)$$

式中: ΔP 为入射波超压峰值, MPa; ω 为装药量, kg; R 为爆心距离, m; a 、 b 、 c 均为常数。

将表 3 中近场 (4~9 m) 和远场 (9~18 m), 超近场和远场的超压峰值, 根据式(5)和(6), 将 PBT/A3 基炸药的超压峰值进行非线性拟合, 得到其近场和远场超压的拟合曲线(拟合系数均 > 0.98), 分别如图 8 和 9 所示。经计算, PBT/A3 基炸药近场和远场综合 TNT 当量分别为 1.60 和 1.69。

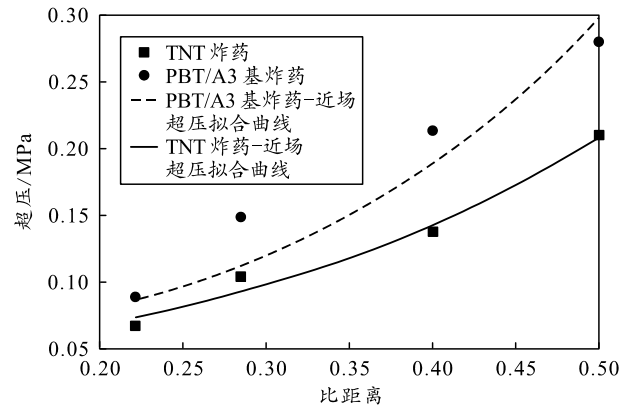


图 8 PBT/A3 基炸药在近场的超压峰值拟合曲线

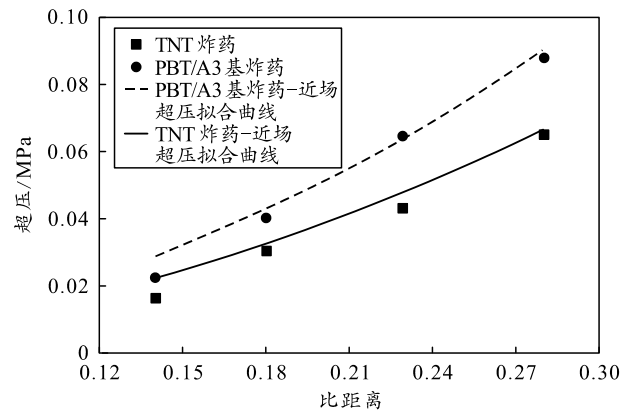


图 9 PBT/A3 基炸药在远场的超压峰值拟合曲线

由此可见, PBT/A3 基炸药远场超压当量高于近场当量, 其远场爆炸能量更加有利于释放。分析

认为,这可能与含铝炸药爆炸特点和 PBT/A3 粘结剂体系有关:

1) 含铝炸药爆炸特点。

含铝炸药爆轰反应区结构的特殊性,其化学反应区长度长,反应产物组成复杂,存在后续二次反应,有利于远场爆炸能量释放。

2) PBT/A3 基粘结剂。

相较于传统的 HTPB 粘结剂体系, PBT/A3 粘结剂体系密度和氧平衡明显提高,其中密度从 0.9 g/cm^3 提升至 1.32 g/cm^3 ^[9, 14-15],提升率 46.67%,而粘结剂体系自身“-N₃”含能基团,其中每摩尔的 N₃ 分子可提供 341~389 kJ 的正生成热^[23];因此,可使复合体系生成热提高,并改善了整个体系的氧平衡,导致铝粉在高温高压爆轰环境下有利于进一步燃烧释放能量,持续推动空气压缩做功,提高了炸药复合体系远场能量释放的持续性。由此认为含能粘结剂的密度和氧平衡是提高含铝炸药爆炸能量的 2 个重要因素,可提高复合体系能量密度和单位质量化学能,这一点在文献[24]中已得到验证;因此,含能粘结剂在含铝炸药中应用应注意密度和氧平衡性能参数,以为含能粘结剂基炸药能量设计提供参考。

4 结论

1) 较于 HTPB 基 RDX 含铝炸药, PBT/A3 粘结剂对复合体系密度、爆速、爆热均有不同程度的提高,其中装药密度提升 9.1%,炸药复合体系爆炸本征能量爆速和爆热分别提升 1.45%和 11.47%。

2) PBT/A3 基炸药近场超压当量 1.60 倍,远场超压当量为 1.69 倍, PBT/A3 含能粘结剂体系的引入有利于复合体系远场能量的释放。

3) 含能粘结剂的密度和氧平衡是影响含铝炸药爆炸能量的 2 个重要因素,因此,含能粘结剂在含铝炸药中应用应注意密度和氧平衡性能参数,可为炸药能量设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王晓峰,郝仲璋. 炸药发展中的新技术[J]. 火炸药学报, 2002(4): 35-38.
- [2] VIRGINIA W M, STEVEN J P, JAKE A G, et al. The Role of Aluminum in the Detonation and Post-Detonation Expansion of Selected Cast HMX-Based Explosives[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 198-206.
- [3] NATSUBORI M. Effects of Aluminum on the Energy of Underwater Explosion for the Insensitive PBXs[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2014, 39(2): 230-235.
- [4] 李瑶瑶,崔庆忠. 不同粘结体系对 PBX 炸药能量输出特性的影响[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 1-4.
- [5] 裴红波,聂建新,覃剑锋,等. 基于非平衡多相模型的含铝炸药爆速研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 313-314.
- [6] 沈飞,王辉,袁建飞,等. 铝含量对 RDX 基含铝炸药驱动能力的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 50-53.
- [7] 陶俊,赵省向,韩仲熙,等. 含能高聚物粘结剂及其在炸药中应用的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2013, 30(11): 10-14.
- [8] 董军,赵省向,韩涛,等. ETPE 粘结剂对 RDX-Al 体系包覆研究[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 295-298.
- [9] 罗运军,吴晓青,葛震. 含能聚合物[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 2.
- [10] CLIFF M. PolyGLYN Binder Studies and PBX Formulation: Technical Achievements from a LTA to DERA Fort Halstead[R]. Salisbury SA: DSTO-TR-0884, 1999.
- [11] FRANKEL M B, WILSON E R. Energetic binder explosives: US, 5316600[P]. US, 1994.
- [12] 李玉斌. 一种含 LLM-105 的 HMX 基低感高能 PBX 炸药[J]. 火炸药学报, 2008, 31(5): 1-3.
- [13] 陈鲁英,杨培进,张林军,等. CL-20 炸药性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(8): 65-67.
- [14] 孙亚斌,周集义. 含能增塑剂研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2003, 1(5): 20-26.
- [15] 朱天兵,刘长波,张寿忠,等. BDNPF/A 含能增塑剂在炸药中的应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(4): 29-32.
- [16] 张在娟,葛震,罗运军. 软段 PBT 基含能热塑性弹性体的热分解性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(5): 5-62.
- [17] 营晓霞,郑启龙,胡义文,等. PBT 弹性体力学性能及低温脆性研究[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 189-192.
- [18] 邓蕾,张炜,鲍桐,等. PBT 与含能增塑剂相互作用的分子动力学模拟[J]. 含能材料, 2017, 25(1): 32-38.
- [19] 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 149-151.
- [20] 王新颖,王树山,徐豫新,等. 杀爆战斗部炸药毁伤能量转换研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(增刊): 184-187.
- [21] 彭泓铮,黄开书,吴欣欣,等. 含铝炸药爆热性能与破片加载特性关系探讨与验证[J]. 兵工自动化, 2022, 41(3): 80-84.
- [22] 周霖. 爆炸化学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 83-84.