

文章编号:1006-9941(2022)06-0591-06

新型氧化剂 AP-LiP 复合物对水下爆炸能量输出结构的影响

徐洋,王中

(中国船舶重工集团公司第705研究所, 陕西 西安 710000)

摘要: 为提高混合炸药二次反应的能量,采用溶剂蒸发法制备了新型氧化剂高氯酸铵(AP)-高氯酸锂(LiP)复合物,并采用扫描电镜(SEM)、X-射线衍射仪(XRD)对其形貌和晶型进行了表征,采用差示扫描量热法(DSC)对其热分解性能进行了分析;采用电测法对含有 AP-LiP 复合物、AP-LiP 机械混合物及 AP 的 3 种高聚物黏结炸药(PBXs)的水下爆炸威力场参数进行测试。结果表明, AP-LiP 复合物的晶体形貌较为规则,晶体表面较光滑,粒径分布比较均匀,未发生团聚。AP-LiP 复合物的晶型化程度高,晶形较为完整。AP-LiP 复合物的热分解性能优于 AP-LiP 机械混合物。水下爆炸试验结果表明,相对于含 AP 的 PBX 炸药,含 AP-LiP 复合物的 PBX 炸药的冲击波能、气泡能及水下爆炸总能量分别提高了 0.098~0.154、0.254 MJ·kg⁻¹ 以及 0.352~0.408 MJ·kg⁻¹,且随着距离的增加,能量衰减变慢。

关键词: 高氯酸铵;高氯酸锂;水下爆炸;能量输出结构

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021246

1 引言

氧化剂是混合炸药的重要组成成分,它不仅关系到炸药爆炸有效总能量的大小,而且影响爆炸能量输出结构,和爆炸能量利用率^[1-3]。在混合炸药中添加新型氧化剂,可为可燃剂氧化反应提供大量的氧,提高可燃剂的反应效率,使炸药获得较高的作功能力^[4-6]。作为混合炸药体系的重要组成成分,氧化剂不仅要含氧量高、生成焓高,同时氧化剂的爆炸反应产物应尽量不含或含有少量固体残渣,不对混合炸药的爆容产生较大影响。目前,国内外最具代表性的水中兵器用炸药都以高氯酸铵(AP)作为氧化剂,如美国的 PBXN-103、PBXN-105、PBXN-111,法国的 B2211B、B2211D,英国的 ROWANEX1301,德国的 KS57,澳大利亚的 PBXW-115,以及我国的 GUHL-1 等^[7]。但 AP 的供氧量有限,氧平衡为 34.04%^[8-10],因此研究开发了高氯

酸胍(N₂H₅ClO₄)、高氯酸硝酰(NO₂ClO₄)、硝仿胍(N₂H₅C(NO₂))和六硝基乙烷(C₂(NO₂)₆)等新型氧化剂,它们的供氧量都大于 AP。然而由于它们或是价格昂贵,或是机械感度高,或是有毒的原因,至今在炸药中应用并不广泛。

高氯酸锂(LiP)的热解气相成分只有氧,因此多用于火箭喷气燃料、锂电池电解质组分和催化剂^[11-12],由于 LiP 存在燃速低和点火性能不佳的问题,所以在混合炸药中的应用中很受限^[13-14]。然而 LiP 的氧平衡为 60.15%,是 AP 的 2 倍,生成焓为 AP 的 1.4 倍^[15-17],因此 LiP 能提高混合炸药的能量输出,同时可以改善炸药的力学性能^[18]。将 AP 和 LiP 混合作为炸药的新型氧化剂不失为一条提高炸药性能途径。为此,本研究采用溶剂蒸发法制备新型氧化剂 AP-LiP 复合物,并对其形貌和晶型进行了表征,对其热分解性能以及含有不同氧化剂的混合炸药的水下爆炸威力场参数进行了测试。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

AP 原料,工业级,大连北方氯酸钾厂;LiP 原料,工业级,大连北方氯酸钾厂;黑索今(RDX),工业级,辽宁

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2022-01-21

网络出版日期: 2022-01-22

作者简介: 徐洋(1988-),男,工程师,主要从事水中兵器战斗部技术研究。e-mail: xuy705@126.com

通信联系人: 徐洋(1988-),男,工程师,主要从事水中兵器战斗部技术研究。e-mail: xuy705@126.com

引用本文: 徐洋,王中. 新型氧化剂 AP-LiP 复合物对水下爆炸能量输出结构的影响[J]. 含能材料, 2022, 30(6):591-596.

XU Yang, WANG Zhong. Effects of Novel Oxidant Composite AP-LiP on the Energy Output Structure of Underwater Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(6):591-596.

庆阳化学工业公司;丙酮,分析纯,天津市恒兴化学试剂制造有限公司。

Hitachi S-4800冷场发射扫描电镜(FE-SEM),测试条件为:加速电压15 kV;发射电流10 μ A。XRD采用丹东浩元公司(中国)DX-2700型射线粉末衍射系统,衍射条件为:Cu靶K α 辐射;光管电压为30 kV;电流为50 mA;入射狭缝2.0 mm;步长为0.03 $^\circ$ 。DSC-131型差示扫描量热仪,测试条件为:铝坩埚加盖打孔;气氛为氮气;流量为50 mL \cdot min $^{-1}$;试样质量为(5 \pm 0.1)mg;参比物Al $_2$ O $_3$ 粉;升温速率 β 为10 $^\circ$ C \cdot min $^{-1}$ 。

水下压力传感器,型号W138A05,量程34.5 MPa;数据采集仪,型号Genesis IDH490,带宽为300 HZ。

2.2 机械混合氧化剂的制备

AP和LiP均具有较强的吸湿性,在制药前需对两种组分进行干燥。将AP和LiP样品分别摊开在白色瓷盘内,置于60 $^\circ$ C的烘箱内干燥6 h以上。为了使样品在和球磨罐接触时不因温差过大导致物料黏结,同时除去球磨罐内壁的水分,在干燥样品同时将球磨罐置于同样温度的烘箱中进行干燥。按照质量比为AP:LiP=23:20的混合比例,将AP和LiP倒入球磨罐内,加入五个柔性线圈,在球磨机中旋转,使两种样品均匀混合制成AP-LiP机械混合物。

2.3 新型氧化剂的制备

40 $^\circ$ C下,配置定质量AP的饱和丙酮溶液A;常温下配置定质量的LiP的饱和丙酮溶液B,在真空泵的作用下将溶液B通过喷头雾化小液滴,进入溶液A并形成混合溶液C,并且保持搅拌速率为80 r \cdot min $^{-1}$,搅拌1.5 h;将混合溶液C在40 $^\circ$ C下超声分散15 min,再在45 $^\circ$ C的水浴锅中,边搅拌边蒸发,直至晶体全部析出。将所得晶体在60 $^\circ$ C的烘箱中烘干,并过筛得到AP-LiP复合物。图1为实验装置示意图。

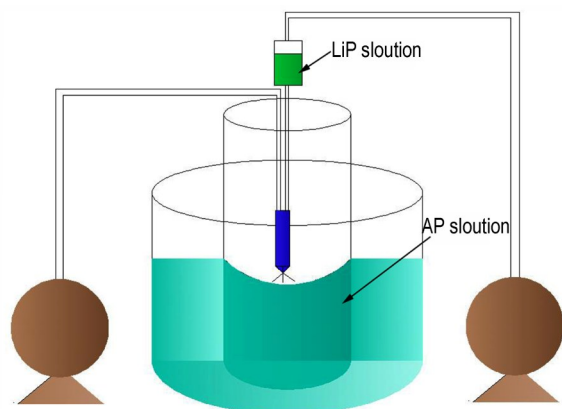


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

2.4 水下爆炸试验

装药样品:主装药(1.05 kg, ρ =1.816 g \cdot cm $^{-3}$)为圆柱形浇注PBX炸药,尺寸为 ϕ 86 \times 104 mm;传爆药为JH-14(0.108 kg, ρ =1.70 g \cdot cm $^{-3}$),JH-14传爆药柱内嵌于主装药中;8#军用雷管位于传爆药压制过程中预留的插孔中。

为了比较AP-LiP复合物、AP-LiP机械混合物以及AP对非理想炸药水下爆炸性能的影响,研究并制备了含AP-LiP复合物、AP-LiP机械混合物及AP的3种氧化剂的RDX基PBX炸药,3种炸药配方见表1。

表1 炸药配方

Table 1 Formulations of explosives.

No.	sample	formulation
1	PBX-1	RDX/Al/AP-LiP/binder(20:25:43:12)
2	PBX-2	RDX/Al/AP/binder(20:25:43:12)
3	PBX-3	RDX/Al/AP/LiP/binder(20:25:23:20:12)

采用电测法对三种含不同氧化剂的RDX基PBX炸药进行水下爆炸能量输出试验。水下爆炸试验中,试验区域的水深28 m,用网袋和绳索将试验药柱放入水下6 m,两侧布置压力传感器,试验药柱与传感器在同一水平面,两侧传感器距爆心距离分别为3.5、5、6.5、8和9.5 m,通过压力传感器测得冲击波压力-时程曲线。传感器为敏感型传感器,测试无角度差,固定安装时不需要正对爆心,所有传感器数据传输均采用专用电缆,压力传感器数据传输电缆在接头处作水密处理。水下爆炸试验布置情况见图2。

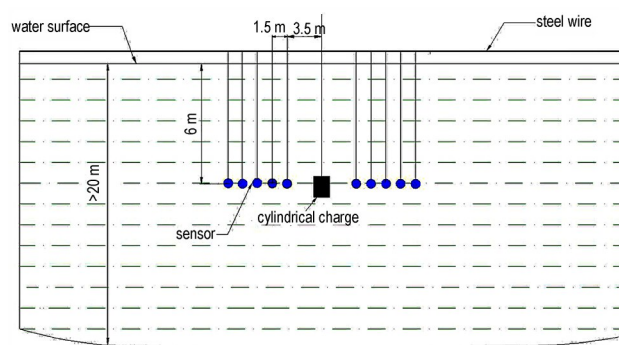


图2 水下爆炸试验现场布置简图

Fig.2 Sketch of the underwater explosion test arrangement

3 结果与讨论

3.1 形貌分析

AP、LiP、AP-LiP机械混合物以及AP-LiP复合物的

SEM结果如图3所示。从图3a可以看出,AP粒子流散性好,粒度分布比较均匀,无团聚出现,颗粒外观近似球形、表面光滑、基本无缺陷。由图3b可知,LiP颗粒外观呈不规则形状,以近似棒状为主,没有团聚现象,粒子表面粗糙、凹凸不平,缺陷较多。从图3c可知,AP-LiP机械混合物为AP和LiP纯粹的物理混合,没有改变2种原料的晶体形貌,LiP依然表面很粗糙,有较大缺陷。由图3d可知,AP-LiP复合物试样的晶体形貌较为规则,没有团聚现象,粒径分布比较均匀,晶体表面较光滑。与AP对比,AP-LiP复合物的晶体形貌发生了变化,形状变得更接近球形,晶体结构致密,晶形一致性较好,表明两种原料在分子间得到了均匀混合。

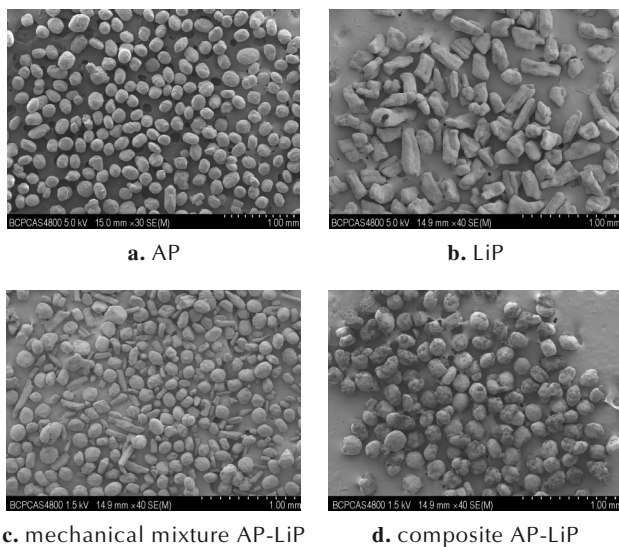


图3 AP, LiP, AP-LiP机械混合物和AP-LiP复合物的SEM图
Fig.3 SEM images of AP, LiP, mechanical mixture AP-LiP and composite AP-LiP

3.2 XRD分析

AP, LiP, AP-LiP机械混合物和AP-LiP复合物试样的XRD图谱如图4所示。

由图4可知,原料AP的特征主峰(011)、(210)、(211)主要出现在 2θ 分别等于 19.46° 、 24.73° 、 27.49° 处;LiP的特征主峰(101)、(110)、(201)主要出现在 2θ 分别等于 20.96° 、 23.03° 、 31.23° 处。AP-LiP机械混合物中同时存在AP和LiP的衍射峰,说明2种物质为物理混合状态。AP-LiP复合物的衍射峰是原料AP和LiP衍射峰相互叠加而成,说明溶剂蒸发法并没有对原材料的晶体内部原子在空间分布状况的结构产生影响,试样纯度较高,没有杂质相^[19],其衍射峰的峰形尖、峰强度高,说明AP-LiP复合物的晶型化程度高,晶形较为完整。

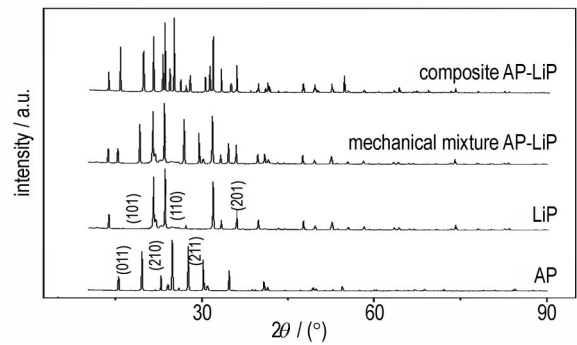


图4 AP, LiP, AP-LiP机械混合物和AP-LiP复合物的XRD谱图
Fig.4 XRD spectrum of AP, LiP, mechanical mixture AP-LiP and composite AP-LiP

3.3 热分解性能分析

分别对AP、LiP、AP-LiP机械混合物以及AP-LiP复合物的热分解特性进行测试,结果如图5所示。

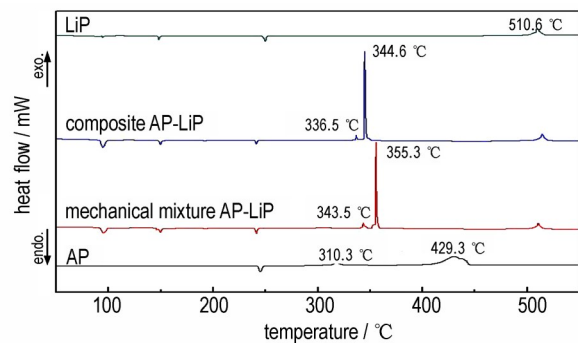


图5 AP, LiP, AP-LiP机械混合物和AP-LiP复合物的DSC曲线
Fig.5 DSC curves of AP, LiP, mechanical mixture AP-LiP and composite AP-LiP

由图5可知,AP首先出现特征峰时,第一阶段的分解放热峰温为 310.3°C ,第二阶段的分解放热峰温为 429.3°C 。相对于AP,AP-LiP机械混合物和AP-LiP复合物的第一放热峰温分别从 310.3°C 提高到 343.5°C 、 336.5°C ;第二放热峰温分别从 429.3°C 降低到 355.3°C 、 344.6°C 。第一放热峰温的提高说明了LiP对AP的第一阶段分解具有抑制作用,第二放热峰温的降低说明了LiP对AP的第二阶段的分解具有催化作用。与AP-LiP机械混合物相比,AP-LiP复合物的第一放热峰温和第二放热峰温分别降低了7和 10.7°C ,说明AP-LiP复合物的热分解性能优于AP-LiP机械混合物。

3.4 水下爆炸能量输出结构分析

冲击波冲量 I ,冲击波能 E_s ,气泡能 E_b 参照Cole^[20]给出的公式计算,如(1)~(3)所示。其中,冲量是指冲击波压力对时间的积分,理论计算中通常指定时间上限为 6.7θ 。当炸药中的爆轰波到达炸药球表面时向水中入射冲击波,释放的能量一部分随冲击波传出,被

称之为冲击波能 E_s ; 另一部分存在于爆轰产物形成的气泡中, 被称之为气泡能 E_b 。

$$I(t) = \int_0^{6.7\theta} P(t) dt \quad (1)$$

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w C_w} \int_0^{6.7\theta} P^2(t) dt \quad (2)$$

$$E_b = 0.6839 \frac{P_h^{5/2}}{\rho_w^{3/2}} \times \frac{T^3}{W} \quad (3)$$

式中, $P(t)$ 为压力, MPa; θ 为冲击波的指数衰减时间常数(峰值压力 p_m 衰减到 $p_m \cdot e^{-1}$ 所需的时间), R 为测点距炸药包中心的直线距离, m; ρ_w 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; W 为炸药的质量, kg; p_h 为试样处的静水压力, Pa; T 为第一次气泡脉动周期, s。炸药爆炸释放的总能量为冲击波能与气泡能之和: $E_t = E_s + E_b$ 。

结合实验结果, 同质量的传爆药水下爆炸能量约为主装药的 0.6 倍, 按此比例换算后进行水下爆炸威力场参数计算。将不同配方炸药水下爆炸能量输出的相关参数列于表 2。

表 2 炸药水下爆炸能量输出相关参数

Table 2 Results of underwater explosion experiments

explosive	R /m	p_m /MPa	T /ms	I /kPa·s	E_s /MJ·kg ⁻¹	E_b /MJ·kg ⁻¹	E_t /MJ·kg ⁻¹
PBX-1	3.5	13.01		3.375	1.538	4.687	6.225
	5	8.97		2.751	1.525	4.687	6.212
	6.5	6.93	259	2.281	1.514	4.687	6.201
	8	5.32		1.835	1.508	4.687	6.195
	9.5	5.08		1.502	1.491	4.687	6.178
PBX-2	3.5	12.98		3.175	1.423	4.433	5.856
	5	8.90		2.625	1.419	4.433	5.852
	6.5	6.89	239	2.187	1.416	4.433	5.849
	8	5.09		1.781	1.401	4.433	5.834
	9.5	4.71		1.458	1.337	4.433	5.77
PBX-3	3.5	12.38		2.931	1.387	4.287	5.674
	5	8.21		2.457	1.351	4.287	5.638
	6.5	5.98	230	2.063	1.312	4.287	5.599
	8	4.72		1.687	1.237	4.287	5.524
	9.5	3.78		1.417	1.105	4.287	5.392

Note: R is the distance between the pressure gauge and the center of the explosive; p_m is the peak overpressure of shock wave; T is the first bubble oscillation period; I is the impulse of shock wave; E_s is the shock wave energy; E_b is the bubble energy; E_t is the total energy.

为了更加直观的对比, 随着距离的变化, 不同炸药的冲击波峰值压力、冲量、冲击波能、气泡能及总能量的变化规律, 将以上参量进行拟合(图 6)。

由图 6a 可知, 在各测点处 PBX-1 炸药的峰值压力 p_m 最高, 同一炸药随着测点距离的增加峰值压力越小。说明新型氧化剂 AP-LiP 复合物的反应活化能较低, 更易参与到爆轰反应过程中, 因此 PBX-1 炸药的峰值压力较高。PBX-2 炸药压力峰值 p_m 略高于 PBX-3 炸药, 这是由于在混合炸药组分中 20% 的 AP 被 LiP 取代, 但 LiP 本身的燃烧性能差且点火性能不佳, 爆轰反应过程中相对于 AP, LiP 的能量贡献较低, 导致炸药水下爆炸的峰值压力有所降低。3 种炸药水下爆炸过程中, PBX-1 炸药的冲击波压力衰减最慢, 这是由于铝粉与爆轰产物进行二次反应为冲击波提供了能量补充, 铝粉反应越充分, 能量的释放和补充越充足, 冲击波峰值压力衰减越慢, 而且 PBX-1 炸药中氧化剂的供氧量最大, 利于铝粉的后续燃烧反应的发生与完成。PBX-3 炸药中 LiP 与铝粉发生反应很慢, 甚至部分不能反应完全, 故其冲击波峰值压力衰减最快。

由图 6b 可知, PBX-1 炸药的冲击波冲量 I 在不同位置都高于 PBX-2 炸药, 说明 AP-LiP 复合物优化了 2 种高氯酸盐氧化剂的燃烧性能, 降低了活化能, 加快了其与铝粉的燃烧反应, 延缓了冲量的衰减。PBX-2 炸药的冲击波冲量 I 在不同位置都高于 PBX-3 炸药。这是由于在 AP-LiP 机械混合物中, LiP 与 AP 没有完全紧密的结合在一起, 炸药混制时, 容易造成 LiP 和 AP 的分离, LiP 单独作为氧化剂时其点火性能较差, 因此在开始时基本不参与爆轰区的反应, 就整个氧化剂体系来说, 只有 AP 和极少量 LiP 参与到爆轰反应当中。所以, 相对于 PBX-2 中氧化剂 AP 参与爆轰反应的程度, AP-LiP 机械混合物在 PBX-3 中参与反应的程度较低。

由图 6c 可知, PBX-1、PBX-2 与 PBX-3 冲击波能随着距离的变化呈现减小的趋势, 其中 PBX-1 减小的幅度最小。相对于 PBX-2, PBX-1 炸药冲击波能平均提高了 $0.104 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这是由于 AP-LiP 复合物优化了炸药的燃烧性能, 加快了其在整个炸药体系中与铝粉的燃烧速率, 延缓了冲击波的衰减。PBX-3 的冲击波能平均值(5 个测点处冲击波能总和的平均值)比 PBX-1 降低了 $0.131 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 主要原因是 LiP 反应不完全造成的。

由图 6d 可知, 相对于 PBX-2, PBX-1 的气泡能提高 $0.254 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这是由于 AP-LiP 复合物的氧平衡比 AP 高, 其在炸药体系中能提供更多的氧参与铝粉的燃烧反应, 从而产生更多的能量。PBX-3 的气泡能比 PBX-2 降低了 $0.146 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。主要原因是 LiP 的点火性能与燃烧性能差, 在炸药的第一次脉动周期结束时

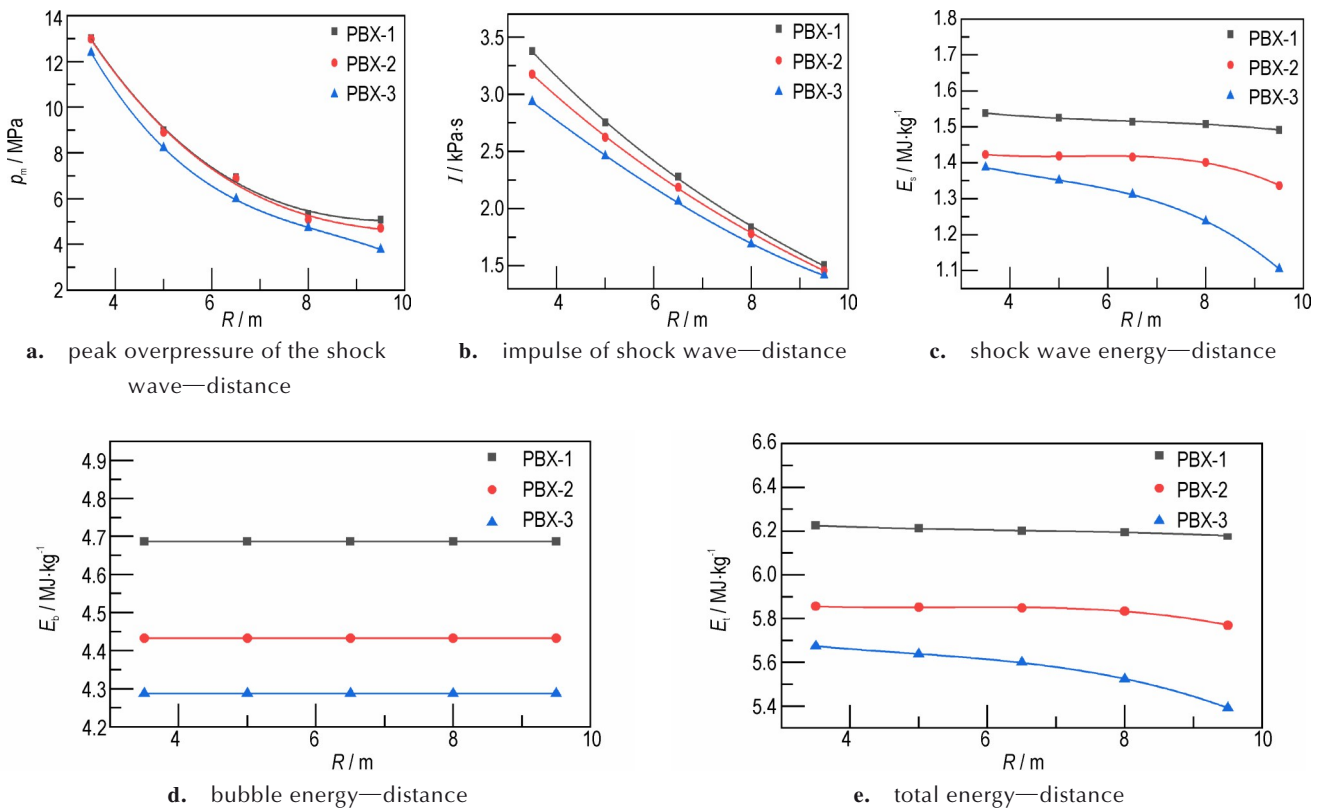


图6 不同配方炸药能量特性对比图

Fig.6 Comparisons of energy characteristics of explosives with different formulations

没有完全参与与铝粉的燃烧反应,放热不完全,这是与PBX-2相比气泡能降低的主要原因。

从图6e可知,3种PBX炸药的总能量都随着距离的增大而减少。PBX-1的总能量随着距离的变化,值的下降幅度最小。主要因为,AP-LiP复合物提高了混合炸药的反应效率,为水下爆炸二次反应提供了足够的能量,大幅延缓了能量衰减。

4 结论

(1)通过溶剂蒸发法制备的新型氧化剂AP-LiP复合物,其晶体结构为规则的类球状,没有团聚现象,粒径分布比较均匀,表面光滑,且晶体的晶化程度高,晶形完整。

(2)热分解性能测试结果表明,LiP对AP的第一阶段的分解具有抑制作用,第二放热峰温的降低说明了LiP对AP的第二阶段的分解具有催化作用。与AP-LiP机械混合物相比,AP-LiP复合物的第一放热峰温和第二放热峰温分别降低了7和10.7℃,说明AP-LiP复合物的热分解性能优于AP-LiP机械混合物。

(3)在PBX炸药中添加新型氧化剂AP-LiP复合

物,炸药的峰值压力、冲量、冲击波能、气泡能及水下爆炸总能量都有提高,特别是气泡能和总能量都有大幅提高,气泡能提高了0.254 MJ·kg⁻¹,总能量提高了0.352~0.408 MJ·kg⁻¹。这是因为AP-LiP复合物的氧化能力比AP强,能使铝粉燃烧反应更充分,其本身分解活化能降低,参与氧化还原反应的速率更快,更加有利于炸药能量的释放,同时延缓了水下爆炸能量的衰减。

参考文献:

[1] 周霖,杨启先. 铝氧比对含铝炸药水中爆炸冲击波的影响[J]. 兵工学报,2008,29(8):916-919.
ZHOU Lin, YANG Qi-xian. The effect of Al/O ratio on underwater explosion shock wave of aluminium-containing explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8):916-919.

[2] 冯晓军,韦国平,徐洪涛,等. Al/AP对RDX基复合炸药水中爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报,2012,35(4):10-14.
FEND Xiao-jun, WEI Guo-ping, XU Hong-tao, et al. Influence of AP on the underwater explosion parameters of RDX-based composite explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(4):10-14.

[3] 王晓峰. 军用混合炸药的发展趋势[J]. 火炸药学报,2011,34(4):1-4.
WANG Xiao-feng. Developmental trends in military composite explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(4):1-4.

- [4] 孙承伟,卫玉章,周之奎.应用爆轰物理[M].北京:国防工业出版社,2000.
SUN Cheng-wei,WEI Yu-zhang,ZHOU Zhi-kui. Applied detonation physics[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2000.
- [5] 王彩玲,赵省向,贾铭,等.含AP非理想炸药爆轰产物分析与计算[J].含能材料,2014,22(2):235-239.
WANG Cai-ling,ZHAO Sheng-xiang,JIA Ming, et al.Calculation of detonation products for non-ideal explosive with AP[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2):235-239.
- [6] 冯晓军,韦国平,肖奇,等.AI/AP对复合炸药爆轰性能及能量释放的影响[J].火工品,2011,5(4):17-20.
FEND Xiao-jun, WEI Guo-ping, XIAO Qi, et al. The influence of AI/AP on the detonation performance and energy release of composite explosive[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2011, 5(4):17-20.
- [7] 李瑶瑶.粘结对炸药水下爆炸能量输出结构影响研究[D].北京:北京理工大学,2016.
LI Yao-yao. Study on the influence of bond system on the energy output structure of underwater explosion[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [8] 郭学永,惠君明,李秀丽,等.高威力复合药剂的研究[J].含能材料,2007(1):1-5.
GUO Xue-yong, HUI Jun-ming, LI Xiu-li, et al. Study on composite explosive with high power[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007(1):1-5.
- [9] PRAKASH V, PHADKE V K, SINHA R K, et al. Influence of aluminium on performance of HTPB-based aluminised PBXs[J]. *Defence Science Journal*, 2004, 54(4):475-482.
- [10] WILLER R L, MCGRATH D K. High performance space motor solid propellants [P]. US:5798480. 1998.
- [11] DIAKITE Kahirou. Non-isothermal decomposition mechanism and kinetics of LiClO₄ in nitrogen[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2010, 26(2):300-303.
- [12] MOJTABA S, SEIED M P, SEIEDEH S H. An investigation on decomposition kinetics and thermal properties of copper-fueled pyrotechnic compositions [J]. *Combustion Science and Technology*, 2011, 186(6):575-587.
- [13] 邢岩.电解液生产用高氯酸锂脱水设备故障分析及改造方案[D].北京:北京化工大学,2014.
XING Yan. Equipment accident analysis and countermeasures of electrolyte workshop explosion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [14] SOLYMOST F, RÁNICS M. The thermal stability of ammonium perchlorate-lithium perchlorate mixture. The role of eutectic formation[J]. *Combustion and Flame*, 1966, 10(4):398-399.
- [15] 范士锋.氧化剂对炸药水中爆炸能量输出结构的影响[J].爆破器材,2017,46(2):43-46.
FAN Shi-feng. Influence of oxidant on the energy output configuration of underwater explosion [J]. *Explosive Materials*, 2017, 46(2):43-46.
- [16] JIN M, WANG G, DENG J, et al. Preparation and properties of NC/RDX/AP nano-composite energetic materials by the sol-gel method [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2015, 76(1):58-65.
- [17] KESHAVARZ M H. A simple correlation for assessment of the shock wave energy in underwater detonation[J]. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 2019, 645(19):1146-1152.
- [18] 杨坤.高热值氧化—可燃体系能量释放效率研究[D].北京:北京理工大学,2015.
YANG Kun. Research on releasing efficiency of high calorific value oxidation-combustible system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [19] CHEN R, LUO Y, SUN J, et al. Preparation and properties of an AP/RDX/SiO₂ nanocomposite energetic material by the sol-gel method [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(4):422-426.
- [20] COLE R H. Underwater explosions[M]: Princeton University Press, 1948.

Effects of Novel Oxidant Composite AP-LiP on the Energy Output Structure of Underwater Explosion

XU Yang, WANG Zhong

(The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to increase the energy of the secondary reaction of composite explosives, the novel composite oxidant ammonium perchlorate (AP)-lithium perchlorate (LiP) was prepared by solvent evaporation method. Scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD) were used to test and characterize the morphology, and crystal structure of the sample. The thermal decomposition properties of the samples were analyzed by differential scanning calorimetry (DSC). The underwater explosion power parameters of three polymer bonded explosives (PBXs) containing composite AP-LiP, mechanical mixture AP-LiP and AP were evaluated by electrometric method. The results show that, for composite AP-LiP, the crystal morphology is fairly regular, the crystal surface is smooth, the particle size distribution is fairly uniform, and no agglomeration is observed. Composite AP-LiP has a high degree of crystallization and a fairly complete crystal structure. The thermal decomposition performance of composite AP-LiP is better than that of mechanical mixture AP-LiP. The underwater explosion results show that, compared with the AP-containing PBX, the shock wave energy, bubble energy, and total energy of underwater explosion of PBX containing composite AP-LiP increase by 0.098-0.154, 0.254 MJ·kg⁻¹ and 0.352-0.408 MJ·kg⁻¹ respectively, and the energy decays slower as the distance increases.

Key words: ammonium perchlorate; lithium perchlorate; underwater explosion; energy output structure

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021246

(责编:王馨逸)