

Mg₄Al₃/Al 含量对烟火药水下燃烧声辐射特性的影响

陈琪汉, 关 华

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘 要: 为了探究燃烧反应的放热量对烟火药在水下燃烧的声辐射性能的影响, 在烟火药中可燃剂质量分数一定的条件下, 将镁铝合金粉(Mg₄Al₃)和铝粉(Al)比例按 100 0、80 20、60 40、50 50、40 60、20 80、0 100 的质量梯度设计配方, 研究烟火药水下燃烧声辐射特性的影响规律。结果表明, 在烟火药水下燃烧过程中, 随着体系中 Al 含量从 0 增至 100%, 烟火药燃烧放出的热量增大, 水中燃烧产生的宽频带声压级数值从 156.59dB 增至 162.93dB。

关键词: 烟火药; 水下燃烧; 声压级

中图分类号: TQ567, TJ53 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.012

Effect of Mg₄Al₃/Al Content on Acoustic Radiation Characteristics of Pyrotechnic Composition Underwater Combustion

CHEN Qi-han, GUAN Hua

(School of Chemical Engineering, NJUST, Nanjing, 210094)

Abstract: In order to exploring the effect of heat releasing on acoustic radiation of pyrotechnics in underwater combustion, the experiment of different proportion of magnesium-aluminium alloy powder(Mg₄Al₃) and aluminium powder(Al) in a certain pyrotechnic composition was carried out, with the aid of underwater acoustic devices. Results show that with the increase of Al content in the pyrotechnic composition from 0 to 100%, the heat releasing increases, which enhances acoustic sound pressure level from 156.59 dB to 162.93 dB.

Key words: Pyrotechnics; Underwater combustion; Sound pressure level

烟火药是由氧化剂、可燃剂、粘合剂和添加剂机械混合组成的特殊含能材料, 不同配方燃烧可产生烟、光、声、热、气动等特种效应^[1]。由于烟火药本身就含有氧化剂, 因此可以在水中自持燃烧, 产生的高温固、液、气产物与水作用产生声辐射效应。欧阳的华在 2008 年通过实验证明具有脉动燃烧效应的烟火药在水中具有声辐射特征^[2], 在 2010 年得到加入适量高热剂可以提高烟火药水下燃烧的声压级的结论^[3]。李捷在 2014~2015 年着重研究了烟火药水下燃烧气泡发声的机理^[4-5]。漆家洋在 2015 年研究得到烟火药作为水下声源声效应远高于压缩氮气的结论^[6]。具

有热效应的烟火药显然能产生更高的声压级, 说明放热量对烟火药水下发声的影响更为显著。常用的可燃剂铝的燃烧热较镁高, 本文将烟火药可燃剂中常用的镁铝合金用部分铝粉替代, 探究烟火药燃烧反应放热量对水下燃烧声辐射特性的影响。

1 实验部分

1.1 样品制备

本次实验使用的烟火药可燃剂含量占总质量的 35%, 氧化剂及其它组分质量分数为 65%。烟火药常

收稿日期: 2019-12-09

作者简介: 陈琪汉 (1994 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事烟火药剂的研究。

用的可燃剂为镁铝合金粉,这是由于其不仅具有铝粉放热量高的特点,同时还具有镁粉易点火的特点。而铝粉虽然较难发火,但在强的氧化体系下同样能发火,并且具有比镁铝合金粉更高的热值。改变可燃剂中镁铝合金粉(Mg_4Al_3)与铝粉(Al)的比例,得到 7 组配方,如表 1 所示。称取氧化剂、可燃剂混合均匀,筛混后以氯化橡胶作为粘合剂将各组分混合均匀并造粒,充分干燥制成直径 18 mm、质量 5 g、密度 $1.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的药柱。用白胶带包覆药柱表面,放入喷孔直径为 16 mm 的水下燃烧装置中即可进行水下燃烧表征。

表 1 各配方中可燃剂组成 (%)

Tab.1 Composition of combustible agent formulas

序号	Mg_4Al_3	Al
1	100	0
2	80	20
3	60	40
4	50	50
5	40	60
6	20	80
7	0	100

1.2 实验过程

实验仪器:水声测试系统,德国 B&K 出厂,主要包括 B&K-8104 水听器、B&K-2692 电荷放大器、B&K-3560 信号采集分析系统,测试频率范围为 $1 \sim 1 \times 10^5 \text{ Hz}$ 。将样品与水听器放入 0.5 m 深的水中,两者距离为 1 m,实验装置示意图如图 1 所示。

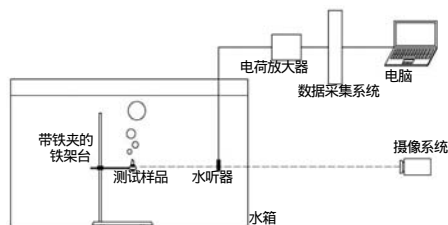


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

测试方法参照 GB/T 7965-2002 声学水声换能器测量和 GB/T 5265 -85 水下噪声测量,采用 1/3 倍频程带宽,水听器采集到的信号经放大器,再由信号采集系统记录,以 0.1 Pa 为参考声压,在计算机中进行分析处理。通过氧弹式量热仪及密闭爆发器可直接测试各样品的放热量及压力值,测试药量为 0.3 g。

2 结果与讨论

2.1 不同 Mg_4Al_3/Al 比例烟火药水下燃烧的现象

1[#]~7[#]样品水下稳定燃烧时刻的现象如图 2 所示,

表 2 为各样品水下燃烧的火焰平均长度及燃烧速度。样品在水下激发后均能正常燃烧,燃烧过程中伴有大量气泡及灰黑色残渣喷出。由表 2、图 2 可见,随着铝粉在可燃剂中的比例升高,燃烧速度呈现下降趋势,火焰亮度及长度明显减小,燃烧产生的气泡数量和气流速度均降低,喷口中喷出的黑色残渣数量有所降低。说明随着可燃剂中铝粉含量的增高(镁铝合金粉含量降低),燃烧的剧烈程度降低,产生的气体含量降低,同时固体产物氧化铝的增多,使得更多的残渣留存在壳体内,并没有被喷出。

表 2 各样品水下燃烧参数

Tab.2 Underwater combustion parameters of each sample

序号	$w_{Al}/\%$	$v_L/(mm\cdot s^{-1})$	h/mm
1	0	2.63	107.41
2	20	2.82	100.00
3	40	2.01	99.59
4	50	2.61	92.59
5	60	2.19	88.92
6	80	2.21	81.50
7	100	1.85	77.80

注: v_L 为线性燃烧速度; h 为平均火焰长度。

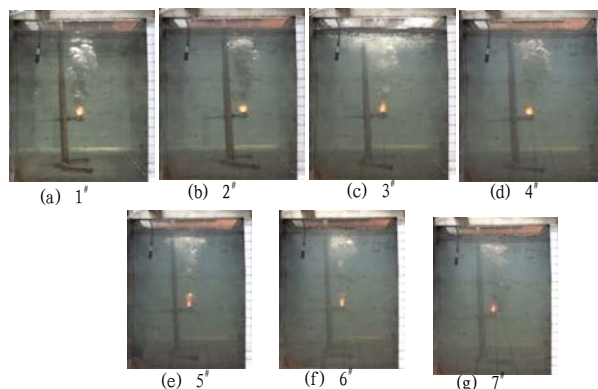


图 2 各样品水下燃烧现象

Fig.2 Underwater combustion phenomenon of samples

2.2 不同 Mg_4Al_3/Al 比例烟火药的水下燃烧声压级

通过水声测试系统可得到样品燃烧时在 $1.25 \sim 2 \times 10^4 \text{ Hz}$ 频段内的 1/3 倍频程声压级数据,通过宽频带声压级公式(1)可得到各样品的声压级。

$$L_{po} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{poi}} \right) \quad (1)$$

式(1)中: L_{po} 为宽频带声压级, dB; n 为频带内包含的 1/3 倍频程带宽个数; L_{poi} 为第 i 个 1/3 倍频程带宽的声压级, dB。所得到的各样品的 L_{po} 与可燃剂中 w_{Al} 对应关系曲线如图 3 所示。

随着可燃剂中铝粉含量的增高,烟火药在水下燃烧声压级整体呈现增长趋势:铝粉含量从 0 增长至 40%,声压级略有降低,从 156.59 dB 降至 155.30 dB;

铝粉含量从 40% 增至 80%, 烟火药的声压级从 155.30 dB 先增至 156.79 dB, 随后降至 156.24 dB; 铝粉含量从 80% 增至 100%, 声压级从 156.24 dB 增至 162.93 dB, 增幅明显。

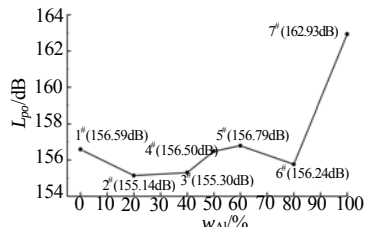


图 3 各样品水下燃烧 L_{po} — w_{Al} 的关系曲线

Fig.3 Curves of sound pressure level with aluminum powder content

药柱燃烧产生的气体在水中形成气泡, 气泡的形成、上升、合并、破裂、尾流等运动特征均伴随着声的产生^[7]。文献[6]所阐述的现象说明烟火药水下燃烧产生声的原因不仅与气泡有关, 还与燃烧产生的热量有关。Al 的燃烧热为 $60.93\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, Mg_4Al_3 的燃烧热为 $41.69\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由于烟火药在水环境中燃烧无法通过与空气中的氧进行二次反应而将可燃剂完全氧化, 因而氧平衡成为可燃剂完全氧化程度的制约因素, 设计的配方氧平衡在 -20% ~ -30% 范围内, 属于负氧平衡, 因而所有配方在水下均未完全燃烧。1g 氧能氧化 1.12 g Al 或 1.32 g Mg_4Al_3 , 通过计算, 得到在相同的氧化剂体系中, Al 的燃烧热是 Mg_4Al_3 的燃烧热 1.34 倍。燃烧产生的热量一部分由气体产物负载, 而另一部分则集中于灼热的固体残渣中。由于药剂与水接触, 能够与水进行热量交换, 使得在水环境下构成了单组分体系的三相平衡条件。根据 Clapeyron 方程 (2) 及声压级公式 (3) 可知, 热量的提高能引起压力的升高, 而压力的提高则能提升声压级。

$$\Delta p = \frac{\Delta H_m}{T \cdot \Delta V_m} \Delta T \quad (2)$$

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (3)$$

式 (2) ~ (3) 中: p 为压强, Pa; T 为相变温度, K; ΔH_m 为 1mol 物质的相变热, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; ΔV_m 为 1 mol 物质发生相变前后的体积变化, $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$; L_p 为声压级, dB; P 为声压, Pa; P_{ref} 为标准声压 0.1 Pa。

对于水的汽化过程 $\Delta V_m \approx 1.67\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, $\Delta H_m = 2257\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $T = 373.15\text{K}$, 数值均为正, 故当热量升高时,

温升 ΔT 升高, 压力变化数值 Δp 升高, 从而引起声压级的升高。

2.3 不同 $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{Al}$ 比例烟火药的气压、放热量与水下燃烧声压级的关系

烟火药水下燃烧发声的原因包括气体产物的气压以及燃烧放出的热量。密闭爆发器测得的最大压力值 p 可以用来表征烟火药气体产物的气压, 量热仪测得的燃烧热 Q 可用来表征烟火药燃烧放出的热量。

通过水声测试系统得到的各样品在 $1.25 \sim 2 \times 10^4\text{Hz}$ 的宽频带声压级参数 L_{po} , 以及通过密闭爆发器测得的气压最大值 p 、通过量热仪测得的燃烧热 Q 见表 3。

表 3 各样品的气压、燃烧热及宽频带声压级数据
Tab.3 Pressure, heat releasing and sound pressure level of each sample

序号	$w_{\text{Al}}/\%$	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	p/MPa	L_{po}/dB
1	0	12 566	1.534	156.59
2	20	12 159	1.523	155.14
3	40	12 458	1.518	155.30
4	50	13 049	1.601	156.50
5	60	13 642	1.500	156.79
6	80	12 849	0.877	156.24
7	100	22 133	0.410	162.93

根据表 3 数据, 得到 $L_{po}/Q/p$ 与可燃剂中铝粉含量 w_{Al} 的关系曲线, 如图 4 所示。压强 p 在铝粉含量为 0~60% 时变化不明显, 铝粉含量从 60% 增至 100%, p 从 1.500 MPa 降至 0.410 MPa, 降幅明显。铝粉含量从 0 增至 60%, 放热量 Q 呈上升趋势, 由 12 566 kJ/kg 增至 13 642 kJ/kg, 铝粉含量从 60% 增至 100%, 放热量 Q 先略有下降至 12 849 kJ/kg, 再骤升至 22 133 kJ/kg。

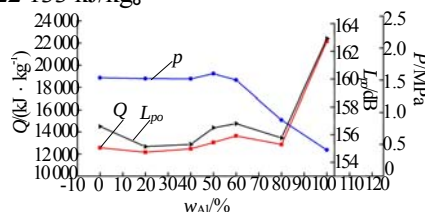


图 4 各样品水下燃烧 $L_{po}/Q/p$ 与 w_{Al} 的关系曲线

Fig.4 Curves of sound pressure level / heat releasing / pressure with aluminum powder content

对比图 4 中 3 条曲线可见声压级变化趋势与氧弹得到的放热曲线趋势基本一致, 而与密闭爆发器得到的压力曲线趋势相反。可通过具体的数值得到压力 p 与热量 Q 对烟火药水下燃烧声压级的贡献。以 1[#] 样品为例。假设烟火药燃烧产物产生的压强全转化为水声, 则由式 (3) 可得到 1[#] 样品产物产生的压强对水声贡献的声压级 L_{p1} , 即:

$$L_{p1} = 20 \times \lg \left(\frac{1.534 \times 10^6}{0.1} \right) = 143.72 \text{ dB} \quad (4)$$

假设烟火药燃烧产物产生的热量全作用于水的汽化增压,从而转化为水声,且作用的范围与火焰尺寸有关,喷口半径为 8mm,由表 2 中的火焰长度 107.41mm 可估算烟火药燃烧作用于水的体积为:

$$V = \pi r^2 h = 3.14 \times 0.008 \times \frac{107.41}{1000} = 2.16 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (5)$$

故作用的水的质量为:

$$m = \rho V = 1000 \times 2.16 \times 10^{-5} = 2.16 \times 10^{-2} \text{ kg} \quad (6)$$

由比热容公式可将燃烧的热量转化为水的升温:

$$\Delta T = \frac{Q}{Cm} = \frac{12566 \times 10^3}{4.2 \times 10^3 \times 2.16 \times 10^{-2}} = 692.67 \text{ K} \quad (7)$$

进而通过式(2)可以得到由水的变化所产生的压力变化:

$$\Delta p = \frac{\Delta H_m}{T \cdot \Delta V_m} \Delta T = \frac{2257 \times 10^3}{373.15 \times 1.67} \times 692.67 = 2.513 \text{ MPa} \quad (8)$$

则由式(3)可得到 1[#]样品燃烧放热对水声贡献的声压级 L_{p2} , 即:

$$L_{p2} = 20 \times \lg \left(\frac{2.513 \times 10^6}{0.1} \right) = 148.00 \text{ dB} \quad (9)$$

综合两种方式转换的声压级,可由(3)得到理论上的声压级:

$$L_p = 20 \times \lg \left(\frac{(1.534 + 2.513) \times 10^6}{0.1} \right) = 152.14 \text{ dB} \quad (10)$$

通过计算得到 1[#]~7[#]样品的声压级,见表 4。

表 4 各样品的理论声压级数据

Tab.4 Calculated sound pressure level of each sample

序号	$w_{Al}/\%$	p_1/MPa	p_2/MPa	p/MPa	L_p/dB	L_{p0}/dB
1	0	1.534	2.513	4.05	152.14	156.59
2	20	1.523	2.612	4.13	152.33	155.14
3	40	1.518	2.687	4.21	152.48	155.30
4	50	1.601	3.027	4.63	153.31	156.50
5	60	1.500	3.296	4.80	153.62	156.79
6	80	0.877	3.387	4.26	152.60	156.24
7	100	0.410	6.111	6.52	156.29	162.93

注: p_1 为气体产物产生的声压; p_2 为燃烧的热作用产生的声压; p 为燃烧过程的总声压; L_p 为计算得到的声压级。

由表 4 可见,计算得到的 L_p 与实际 L_{p0} 趋势一致,这说明烟火药水下燃烧发声同时受燃烧压强、水受热相变带来的增压影响, $p_2 > p_1$, 说明受到后者的影响更大。但实际值 L_{p0} 总体高于计算值 L_p 约 3 dB,一方面因为测试得到 p 、 Q 的条件与实际环境中的燃烧条

件不完全一致,另一方面则由于水下燃烧气泡生成后的合并、破裂、尾流等运动。

3 结论

通过含不同比例 $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{Al}$ 的烟火药水下燃烧声辐射特性曲线测定及氧弹、密闭爆发器实验,得到水声药剂水下燃烧及声辐射特性的影响规律:(1)随着烟火药中铝粉含量的增高,烟火药的燃烧速度降低,火焰亮度及尺寸明显减小,燃烧产生的气泡数量和气流速度均降低,喷口中喷出的黑色残渣数量有所降低;(2)铝粉含量从 0 增长至 40%,声压级略有降低;铝粉含量从 40%增至 80%,声压级先增后降;铝粉含量从 80%增至 100%,声压级从 156.24dB 增至 162.93 dB,增幅明显;(3)烟火药水下燃烧发声同时受燃烧压强 p 、燃烧放热量 Q 的影响,且受到后者的影响更大。

参考文献:

- [1] 潘功配.烟火药的创新和发展[J].含能材料,2011,19(5): 490-493.
- [2] 欧阳的华,潘功配,关华,等.具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧声频特性[J].含能材料,2008,16(5):603-605.
- [3] 欧阳的华,潘功配,关华,等.高热剂含量对烟火药水下燃烧声辐射特性的影响[J].含能材料,2010,18(1):55-57.
- [4] Li J, Guan H, Song D M, et al. Experimental study on bubble movement characteristics during underwater pyrotechnic combustion[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2014, 93(2): 249-258.
- [5] Li J, Guan H, Song D M, et al. Effects of gas production on acoustic radiation characteristics of underwater pyrotechnic combustion[J]. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2015, 34(1): 1-8.
- [6] 漆家洋,关华,李捷,等.烟火药和压缩氮气声源水下声辐射特征对比研究[J].应用声学,2015,34(1):000032-39.
- [7] 李捷.烟火药水下燃烧气泡运动特征及声源装药技术[D].南京:南京理工大学,2016.