

文章编号: 1006-9941(2015)03-0275-04

# 高温粒子特性对气泡动力学与声辐射特性的影响

欧阳的华, 寇炜材, 段东立

(武警工程大学, 陕西 西安 710086)

**摘要:** 为探讨烟火药水下燃烧高温粒子与水作用的声辐射特性, 基于传热传质理论构建了烟火药水下燃烧高温粒子与水作用的气泡动力学模型, 计算分析了高温粒子的初始温度和粒径对气泡动力学与声辐射特性的影响。结果表明, 当燃烧深度为 1 m 时, 随着高温粒子初始温度和高温粒子初始半径的增加, 所形成气泡的体积、体积变化的加速度以及声压级均随之增大: 高温粒子初始温度每增加 200 K, 气泡的体积、体积变化的加速度和声压级分别平均增加 1.01 倍、1.78 倍和 1.04 倍; 其初始半径每增加 0.4 mm, 则气泡的体积、体积变化的加速度和声压级分别平均增加 1.78 倍、2.28 倍和 1.15 倍。

**关键词:** 烟火药; 水下燃烧; 高温粒子; 气泡

**中图分类号:** TJ530; O35

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.014

## 1 引言

烟火药水下燃烧时会与水之间发生剧烈的传质传热作用而向外辐射噪声。早在 1961 年, 美国专利就报道了一种利用烟火药水下燃烧形成的声能来扫除水雷的声源装置<sup>[1]</sup>。作者前期也开展了烟火药水下燃烧的相关研究<sup>[2-4]</sup>, 发现其声辐射主要来自气泡的形变噪声<sup>[4]</sup>。而气泡的形变噪声主要包括燃烧气体和高温粒子分别与水作用形成的气泡噪声两部分。目前, 对于燃烧气体形成的气泡噪声研究较多, 尤以 Wilson 等人<sup>[5-7]</sup>的研究为代表。Wilson 等人不仅进行了燃烧形成的气泡动力学特性和声辐射机理的研究, 而且还对其实际应用等开展了相关研究。而对于高温粒子与水作用形成的气泡噪声, 虽然文献<sup>[8]</sup>有所提及, 但是至今未见相关的研究报道。

为了研究烟火药水下燃烧高温粒子与水作用的声辐射特性, 首先要开展高温粒子与水作用形成气泡的动力学特性研究。但上述作用过程十分复杂, 且燃烧产生的高温粒子的体积小、作用的瞬时性强, 实验研究往往难以开展。而在探讨传热、传质过程的内在规律时, 数值模拟往往能给出定性或定量的描述。笔者<sup>[9]</sup>曾以单个高温粒子与水作用形成的气泡为对象, 依据

烟火药水下燃烧产生的高温粒子与水作用的特点, 结合传热、传质理论, 对所形成气泡的动力学特性进行了研究。本研究在此基础上, 计算分析了高温粒子产物特性对所形成的气泡动力学特性和声辐射特性的影响, 以期在今后进一步的相关研究奠定基础。

## 2 计算模型

### 2.1 气泡动力学模型

基于传热、传质理论, 烟火药水下燃烧产生的高温粒子与水作用的气泡动力学模型为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dr_i}{dt} = u_i = \frac{RT_i}{p_\infty} \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

式(1)即为气泡半径增长速度的表达式, 式中,  $R$  为理想气体常数,  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $p_\infty$  是静水压力, Pa;  $T_i$  为水的沸点, K;  $dm/dt$  为水蒸发时水蒸气的质量速度,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其具体表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{(q_c + s\varepsilon\sigma T_d^4)(r_d/r_i)^2 - p u_i}{L - \rho/\rho_w} \quad (2)$$

高温粒子的温度变化为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dT_d}{dt} = -\frac{3(q_c + \varepsilon\sigma T_d^4)}{\rho_d C_d r_d} \quad (3)$$

式中,  $q_c$ , 气泡内的蒸汽热传导通量,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $s$ , 被高温粒子与其周围的水接触的表面层所吸收的热量占总辐射量的份数, 对于无穷的边界层, 计算时认为  $s$  为常数, 通常取  $s = 0.5$ ;  $\varepsilon$  为高温粒子的热辐射率,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $\sigma$ , 黑体的辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ;  $T_d$ , 高温粒子的温度, K;  $r_d$ , 高温粒子半径, m;  $r_i$ , 气泡

收稿日期: 2014-03-16; 修回日期: 2014-04-13

基金项目: 飞行器海基测试与控制联合实验室开放基金(FOM2014 OF 016); 国家自然科学基金(11202109)

作者简介: 欧阳的华(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事烟火技术研究。  
e-mail: oydh2013@126.com

半径,  $m$ ;  $p$ , 气泡内的压力,  $Pa$ ;  $u_i$ , 气泡半径的变化速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $L$ , 水由液态变为气态的汽化潜热, 约为  $2.26 \times 10^6 J \cdot kg^{-1}$ ;  $\rho_w$ , 水的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\rho_d$ , 高温粒子的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c_d$ , 高温粒子的比热容,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ , 相关参数的计算见文献[9]。

## 2.2 气泡体积形变引起的声辐射模型

依据文献[10]可知, 水中声产生的一般方程为:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = -\dot{q} + \nabla f - \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4)$$

式中,  $p$  为声压,  $Pa$ ;  $c_0$  为液体中的声速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $q$  为液体中单位体积内质量的脉动速率,  $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ ;  $f$  为作用在单位体积流体上的脉动外力,  $N \cdot m^{-3}$ ;  $\tau_{ij}$  为流体应力张量,  $N \cdot m^{-1}$ 。

等式(4)左边为无源的声压波动方程, 右边三项分别代表了主要的声源辐射类型。其中第一项代表进入流体中的非平稳质量流, 作用上基本与一个单极子相当。第二项代表施加在某些界面上的非平稳力的散度, 具有偶极子的性质。第三项代表流体本身的湍流应力, 是具有四极子性质的项<sup>[10]</sup>。

如果没有外界振动力的影响, 也不考虑切变应力作用的话, 则式(4)可简化为<sup>[10-11]</sup>:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = -\dot{q} \quad (5)$$

对于水中气泡而言, 其作为一种有效的单极子声源(体积或质量的起伏构成的简单声源), 噪声是气泡在不断的生长、形变、合并以及溃灭等过程中所引起的<sup>[10]</sup>, 则式(5)的解为:

$$p_s(r, t) = \frac{\dot{Q}(t-r/c_0)}{4\pi r} = \frac{\dot{Q}(t')}{4\pi r} \quad (6)$$

式中,  $p_s(r, t)$  为  $t$  时刻距离气泡中心为  $r$  处的声压值,  $Pa$ ;  $\dot{Q}(t-r/c_0)$  为  $t$  时刻距离气泡中心为  $r$  处的质量通量变化率,  $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $t' = t - r/c_0$  为延迟时间,  $s$ 。又由于文献[10]:

$$Q = \int q dV = \frac{d}{dt} (\rho_0 V) \quad (7)$$

且, 水可以视为不可压缩的流体, 则将(7)式化简并代入(6)式, 得到(8)式<sup>[10]</sup>:

$$p_s(r, t) = \frac{\rho_0 \dot{V}(t')}{4\pi r} \quad (8)$$

由于计算时  $r$  通常取为  $1 m$ , 故可忽略  $r/c_0$  的影响, 则  $t' \approx t$ , 式(8)可以写为<sup>[10-11]</sup>:

$$p_s(r, t) = \frac{\rho_0 \ddot{V}(t)}{4\pi r} \quad (9)$$

式中,  $\rho_0$  为液体密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $V$  为气泡体积,  $m^3$ ;  $\ddot{V}(t)$  为气泡体积变化的加速度,  $m^3 \cdot s^{-2}$ 。

这就是作为单极子气泡噪声源的声辐射计算公式的最一般形式, 由(9)式可以看出, 单个气泡声源的强度正比于周围水的密度和气泡体积变化的加速度。对于气泡体积变化的加速度, 可依据公式(1), 先求出气泡体积随时间的变化, 再进行二次求导即可获得。在此基础上, 可计算出气泡体积形变引起的声压级变化<sup>[10-11]</sup>:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_{ref}} \quad (10)$$

式中,  $p$  即为声压,  $Pa$ ;  $p_{ref}$  为参考声压, 水中其值取为  $1 \mu Pa$ 。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 高温粒子初始温度对气泡特性的影响

为了探讨烟火药水下燃烧产生的高温粒子与水作用所形成的气泡相关特性, 以高温粒子不同的初始温度(1400, 1200, 1000 K 和 800 K)为对象进行计算分析。其中高温粒子取为三氧化二铝, 其半径  $r_d = 1.0 mm$ , 燃烧深度  $H = 1.0 m$ ,  $\gamma = 1.01$  (气泡的初始半径与高温粒子半径的比值), 所得结果如图 1 ~ 图 3 所示。

图 1 是依据给定的高温粒子在不同初始温度时, 计算得到的气泡体积变化情况。由图 1 可知, 随着高温粒子初始温度的升高, 所形成的气泡的体积随之增大, 通过计算可知, 高温粒子初始温度每增加 200 K, 气泡体积平均增加 1.01 倍。由气泡体积变化的加速度曲线(图 2)可知, 随着高温粒子初始温度的增加, 气泡体积变化的加速度也在增大, 且高温粒子初始温度每增加 200 K, 气泡体积变化的加速度平均增加 1.78 倍。这主要是由于随着高温粒子初始温度的增加, 其

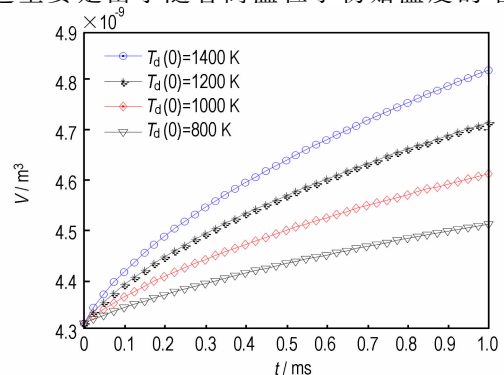


图 1 不同初始温度的高温粒子与水作用产生的气泡体积随时间的变化曲线

Fig. 1 Volume vs time for bubble induced by particles with different initial temperature and water

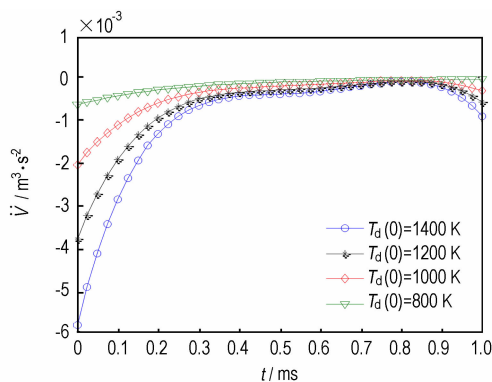


图2 不同初始温度的高温粒子与水作用产生的气泡体积变化的加速度曲线

Fig.2 Volume change acceleration vs time curves for bubble introduced by different initial temperature of particles and water

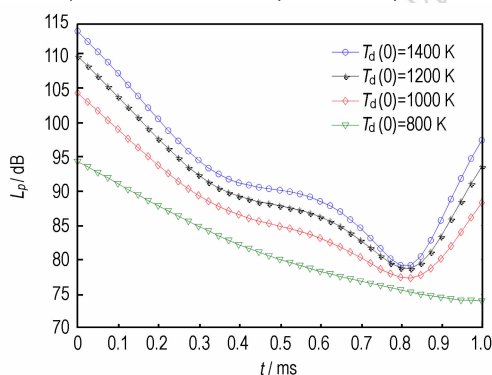


图3 不同初始温度的高温粒子与水作用产生的气泡声压级随时间的变化曲线

Fig.3 Sound pressure vs time curves for bubble introduced by different initial temperature of particles and water

与周围水之间的温差加大,使得两者之间的传热加剧,从而导致传质过程也更加剧烈,这样水蒸发成水蒸气的速度加剧,故在相同的时间内所形成的气泡体积也就明显增加。

图3是在图2的基础上利用公式(9)和(10)计算获得的,由公式(9)可知,由气泡体积形变引起的声压与气泡体积形变的加速度成正比,所以声压级的变化如图3中所示,整体上也是随着高温粒子初始温度的增加而增加,且计算可得高温粒子初始温度每增加200 K,声压级则平均增加1.04倍。此外,图3中声压级出现的凸凹峰,是与图2中的凸凹峰相对应的,主要是由于气泡体积在增长的过程中,由于内部蒸气压、Bjerknes力和惯性的作用下引起的振荡。

### 3.2 高温粒子半径对气泡特性的影响

为了探讨高温粒子半径对气泡动力学特性及声辐射特性的影响,计算了半径分别为0.2,0.6,1.0,1.4 mm的四种高温粒子所形成的气泡体积和体积变化的加速度等随时间的变化情况,当气泡的初始半径为高温粒子半径的1.01倍,燃烧深度为1 m,高温粒子的初始温度

为1200 K时,所得的计算结果如图4~图6所示。

图4是采用不同半径的高温粒子进行计算得到的气泡体积随时间变化的曲线。由图4可知,随着高温粒子半径的增加,所形成的气泡的体积增加,通过计算可知,高温粒子半径每增加0.4 mm,气泡体积平均增加1.78倍,其对应的气泡体积增长的加速度如图5所示。

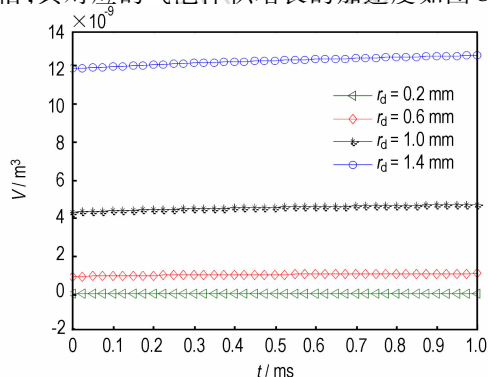


图4 不同半径的高温粒子与水作用产生的气泡体积随时间的变化曲线

Fig.4 Volume vs time curves for bubble introduced by different radius of particles and water

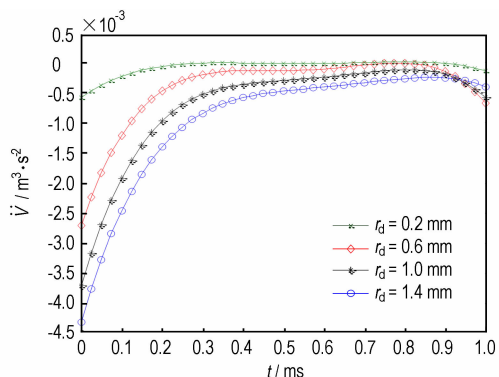


图5 不同半径的高温粒子与水作用产生的气泡体积变化加速度曲线

Fig.5 Volume change acceleration vs time curves for bubble introduced by different radius of particles and water

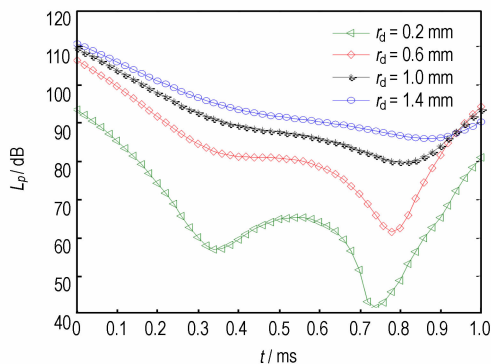


图6 不同半径的高温粒子与水作用产生的气泡声压级随时间的变化曲线

Fig.6 Sound pressure vs time curves for bubble introduced by different radius of particles and water

由图 5 可知,随着高温粒子半径的增大,其气泡体积变化的加速度也随之增大,且高温粒子半径每增加 0.4 mm,气泡体积变化的加速度平均增加 2.28 倍。这主要是由于在初始温度和传热系数一定的前提下,高温粒子的粒径越大,其表面与水接触的部分越大,单位时间内传入水中的热量也就越大,从而使水蒸发形成气泡的加速度相应的增大。

同理,在图 5 的基础上依据式(9)和(10)计算得到的不同半径的高温粒子与水作用产生的气泡声压级随时间的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可见,随着高温粒子半径的增大,所形成的气泡由于体积形变而辐射的声压级整体上随之增加,计算可得高温粒子初始半径每增加 0.4 mm,声压级则平均增加 1.15 倍。由图 5 可知,随着高温粒子粒径的增大,其所形成的气泡体积加速度也相应增大,而由式(9)和(10)可知,声压与气泡体积变化的加速度成正比,故会出现图 6 所示的结果。这说明,在今后的水下燃烧烟火药的配方设计中,在没有其他条件限制的情况下,需注意烟火药水下燃烧时形成的高温粒子的大小。在其他条件不变的情况下,其大小决定了高温粒子与水之间作用的传热时间、所形成的气泡动力学和声辐射特性。

## 4 结 论

(1) 对于半径以及燃烧深度一定(1 m)的高温粒子,随着其初始温度的增加,所形成气泡的体积、体积变化的加速度以及声压级均随之增大,其初始温度每增加 200 K,气泡的体积、体积变化的加速度和声压级分别平均增加 1.01 倍、1.78 倍和 1.04 倍。

(2) 对于初始温度以及燃烧深度一定(1 m)的高温粒子,随着其初始半径的增加,所形成气泡的体积、体积变化的加速度以及声压级亦均随之增大,其初始半径

每增加 0.4 mm,则气泡的体积、体积变化的加速度和声压级分别平均增加 1.78 倍、2.28 倍和 1.15 倍。

## 参考文献:

- [1] John C Watson. Apparatus for sweeping acoustic mines: USA, 2994268[P], 1961.
- [2] 欧阳的华, 关华, 潘功配. 基于高速摄影的烟火药水下燃烧气泡与噪声研究[J]. 声学学报, 2010, 35(6): 641-645. OUYANG Di-hua, GUAN Hua, PAN Gong-pei, et al. Study on the bubble and noise of exit from pyrotechnic composition combustion underwater base on high speed photography[J]. *Acta Acustica*, 2010, 35(6): 641-645.
- [3] 欧阳的华, 潘功配, 关华, 等. 烟火药水下燃烧气泡的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(4): 347-352. OUYANG Di-hua, PAN Gong-pei, GUAN Hua, et al. Experimental study of bubbles by pyrotechnic composition combustion underwater[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 24(4): 347-352.
- [4] OUYANG Di-hua, Guan Hua, Pan Gong-pei. Acoustic radiation mechanism and experimental research on pyrotechnic composition combustion underwater[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(5): 74-78.
- [5] Preston S Wilson, Janet L Ellzey, Thomas G Muir. Experimental investigation of the combustive sound source[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1995, 20(4): 311-320.
- [6] Gopu R Potty, James H Miller, Preston S Wilson, et al. Geoacoustic inversion using combustive sound source signals[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2008, 124(5): 146-150.
- [7] PKNobles D, Wilson P S. Seabed acoustics of a sand ridge on the new jersey continental shelf[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2008, 124(3): 151-156.
- [8] Dornyak O R, Levitskii S P, Shabunina Z A, et al. Interaction effects in film boiling on spherical particles[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermo-physics*, 2001, 74(3): 560-567.
- [9] 欧阳的华. 烟火药水下燃烧高温粒子与水作用的气泡动力学模型[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 460-463. OUYANG Di-hua. Dynamic model of bubble induced by the interaction between pyrotechnic composition combustion particles and water[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 460-463.
- [10] [美] D 罗斯著. 水下噪声学[M]. 《水下噪声原理》组译, 关定华校. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [11] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

## Effects of Particles Characteristics at High-temperature on Bubble Dynamic Behaviors and Acoustic Radiation Characteristics

OUYANG Di-hua, KOU Wei-cai, DUAN Dong-li

(Engineering University of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristic of the acoustic radiation induced by the interaction between water and high temperature particles produced by underwater combustion of pyrotechnic composition, a bubble dynamic model was deduced based on the heat transfer and mass transfer theory. The effect of initial temperature and radius for high temperature particles on the bubble dynamic behaviors and acoustic radiation characteristics were calculated and analyzed with the burning depth of 1 m. Results show that with the increase of the initial temperature and the radius, the bubbles volume, volume change acceleration and the sound pressure all increase. With the initial temperature of high temperature particle increasing by 200 K, the volume of the bubbles, the volume change acceleration and the sound pressure all increase by an average of 1.01 times, 1.78 times and 1.04 times, respectively. And with the initial radius of high temperature particle increasing by 0.4 mm, the volume change acceleration and the sound pressure all increase by an average of 1.78 times, 2.28 times and 1.15 times, respectively.

**Key words:** pyrotechnic composition; combustion underwater; high-temperature particles; bubble

**CLC number:** TJ530; O35

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.014