DOI: 10.11883/bzycj-2017-0412

柱状含铝炸药水下爆炸近场的特征线法研究*

李晓杰,杨晨琛,闫鸿浩,王小红,王宇新,张程娇
(大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116023)

摘要: 基于之前提出的一种含熵变项的特征线法,通过控制非等熵流中的能量释放来刻画铝粉燃烧的影响,结合简单 Chapman-Jouguet 模型和 JWL-Miller 状态方程,计算了柱形含铝炸药水下爆炸的近场参数。对比模拟结果与实验数据,发现这种特征线法可以较好地预测近场冲击波的传播迹线、爆轰产物的膨胀轨迹以及内部压缩波的反射过程。结果表明,这种特征线法可用于含铝炸药水下爆炸的近场计算,进一步可用于评估含铝炸药性能或计算水下能量输出。

关键词: 含铝装药;水下爆炸;非等熵流;特征线法
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

含铝炸药,也称铝化炸药,是一种由高能炸药、铝粉及添加剂组成的混合炸药,相比于常规炸药具有爆热高、爆速低、作用时间长的特性[1]。含铝炸药广泛应用于水雷、鱼雷、反舰导弹等水下武器,其对水中目标的主要有效毁伤形式是以近场冲击波和水中气泡为代表的近距离非接触爆炸作用[2]。长期以来,对含铝炸药水下爆炸近场特性的研究一直是重要的课题。

含铝炸药的实验测试方法主要包括常规的圆筒实验[3]和爆热实验[4]、水下爆炸法[5-6]、爆炸罐冲击响应法[7]、爆轰驱动激光干涉技术[8]以及爆轰产物光谱仪技术[9]。考虑到铝粉的燃烧延长了爆炸作用时间,一些基于爆轰产物早期膨胀规律以评估炸药性能的测试方法具有较大误差,例如不同尺寸的圆筒实验存在不满足几何相似律的情况[10-12]。从结果上看,含铝炸药的测试方法主要是测量水域可调、成本相对较低的水下爆炸法,其基本原理是通过测量爆炸冲击波衰减及气泡脉动的特征参数来评估含铝炸药的水下能量输出和做功能力。不同类型含铝炸药的主要区别在于铝的存在形态、铝粉粒度、铝氧比等,然而含铝炸药的爆轰机理尚不完全清楚[1],因此实验研究主要是通过连续调整炸药配方和对比测试结果来获取配方与水下能量输出的对应关系[13-16],这样总结的经验公式往往具有较大的局限性。

含铝炸药的爆轰涉及多个复杂的非平衡态物理化学过程,主要包括铝粉燃烧反应的热效应、铝粉与爆轰产物的相互作用,例如氧在铝粉表面的输运过程、铝粉与爆轰产物的两相流,以及由此产生的涡旋演化、湍流转捩、质量与热输运等。目前对于含铝炸药的数值模拟,研究重点集中于建立合适的铝粉燃烧模型以描述其能量释放过程。主要有以下两类模型:第 1 类是弱化非理想特征的冲击动力学模型,对爆轰反应区和铝粉燃烧进行简单解耦处理,适合描述爆轰波的传播和相互作用,比如 Wood-Kirkwood 模型[17]、DSD (detonation shock dynamics)模型[18];第 2 类是绕开反应机理的唯象模型,认为铝粉反应速率与状态量(压力、比容等)存在某种统计上的关系,适合反映含铝炸药的后燃效应,如 Lee-Tarver 模型[19]、Miller 模型[20]。由于后燃效应与水下能量输出关系密切,唯象模型广泛应用于含铝炸药的水下爆炸数值模拟[21-23]。

水下爆炸问题的主要研究内容之一是近场冲击波的传播和衰减,常用算法如有限差分法、有限体积法等一般采用激波捕捉法结合人工黏性来光滑冲击间断,虽然借助 ENO[24]、TVD[25]等高精度格式可以基本抑制数值振荡,但其他对峰压的抹平误差仍然难以消除。相比之下,特征线法可以采用激波装配法结合非结构网格来处理冲击间断,而不需要引入人工黏性以及随之而来的人工误差,而且具有高准确度、高效率、

* **收稿日期**: 2017-04-12; **修回日期**: 2018-01-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(11272081,11672067)
第一作者: 李晓杰(1963—),男,博士,教授,博士生导师,dalian03@qq.com。

可回溯的特点，特别适合水下爆炸这类间断已知、强度高、衰减快的冲击问题[26]。本文中基于之前对理想炸药水下爆炸的研究[27-28]，继续采用特征线法来研究柱状含铝炸药的水下爆炸问题。

1　柱状含铝炸药水下爆炸定常模型

如图 1 所示，考虑长径比无限大的柱状装药按 Chapman-Jouguet(CJ)假设定常爆轰，爆轰波与反应区是垂直轴线的无厚度平面。铝粉燃烧模型采用唯象模型来描述，忽略铝粉颗粒及其燃烧产物对流场的干扰，主要考虑铝粉燃烧对爆轰产物的供能作用且忽略传热时间差。对于爆炸近场的水介质，只考虑高速冲击下水的可压缩性和温升效应，而忽略水内部的热传递、黏性耗散以及水气界面的剪切稳定性。若将参考系放在 CJ 面上，图 1 的水下爆炸就变为轴对称二维可压缩定常流模型[29]，其中爆轰产物和水都是可压缩无黏流体。

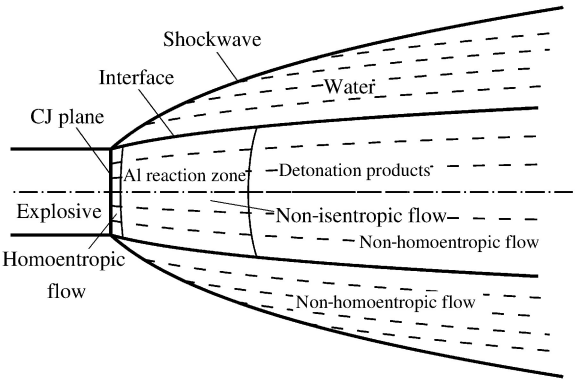


图 1　柱状含铝炸药水下爆炸定常模型

Fig. 1　The steady model for underwater explosion of cylindrical aluminized explosive

显然，在图 1 所示的爆轰模型中，如果炸药中没有铝粉或铝粉尚未反应，爆轰又完全满足 CJ 条件，波后爆轰产物的流动不仅是沿流线等熵，而且是不同流线上的总熵都相等的均熵流。当铝粉开始燃烧放热后，爆轰产物中的流动彻底变为非等熵流动，沿流线的熵增量与其对应的化学反应路径有关。最后当铝粉燃烧完毕后，流动又变成了沿流线等熵的，但不同流线上的总熵不等，即为非均熵流或等熵流。相应的，在图 1 中，由于水中冲击波是弯曲衰减变化的，波后熵增取决于冲击波强度，不同流线上的总熵存在差别，因此，水中冲击波后流动即为沿流线等熵的非均熵流。显然在该模型中完全的均熵流只有爆轰产物的早期阶段。

2　非等熵流的特征线方程组

对于大多数炸药的水下爆炸，当参考系转移至 CJ 面以后，爆轰产物和水中流动都是超声速的。此时二维定常可压缩无黏流的运动方程是双曲型偏微分方程，根据特征线理论，与连续性方程结合可以转化为 3 组沿特征线方向的常微分方程组[30]，如下：

$$\begin{cases}\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{I}}=\tan(\theta-\mu)\\ \left.-\dfrac{1}{\rho u^2}\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{I}}=-\tan\mu\left.\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{I}}-\dfrac{\cos\theta}{\rho u^2\cos\mu\cos(\theta-\mu)}\left(\dfrac{\partial p}{\partial e}\right)_{\rho}\left.\dfrac{T\mathrm{d}s}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{III}}+\dfrac{\delta\sin\theta\sin^2\mu}{y\cos(\theta-\mu)\cos\mu}\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{II}}=\tan(\theta+\mu)\\ \left.-\dfrac{1}{\rho u^2}\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{II}}=\tan\mu\left.\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{II}}-\dfrac{\cos\theta}{\rho u^2\cos\mu\cos(\theta+\mu)}\left(\dfrac{\partial p}{\partial e}\right)_{\rho}\left.\dfrac{T\mathrm{d}s}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{III}}+\dfrac{\delta\sin\theta\sin^2\mu}{y\cos(\theta+\mu)\cos\mu}\end{cases}\tag{2}$$

$$\begin{cases}\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{III}}=\tan\theta\\ \left.-\dfrac{1}{\rho u^2}\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{III}}=\left.\dfrac{\mathrm{d}u}{u\mathrm{d}x}\right|_{\mathrm{III}}\end{cases}\tag{3}$$

式中：p、u、ρ、e、s 和 T 分别为流体压力、流速、密度、比内能、比熵和温度，x 和 y 为空间坐标，θ 和 μ 为流动偏转角和马赫角；δ 为无量纲数，对平面流动取 0，轴对称流动取 1；下标Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别对应 3 个特征方向，Ⅰ、Ⅱ是 2 条马赫线，Ⅲ是流线。每一个方程组都包含一个特征线本身的几何方程和一个沿特征线的相容方程，

方程(1)和(2)的相容方程中的$(\mathrm{d}s/\mathrm{d}x)_{\mathrm{Ⅲ}}$代表沿流线方向的熵梯度，反映的是熵变对该马赫线上压力增减的贡献；而方程(3)的相容方程就是流线上的动量方程，与能量方程结合后就是一般的定常可压缩流伯努利方程，如下：

$$\mathrm{d}\left(e+\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}\right)\Bigg|_{\mathrm{Ⅲ}}=\delta q|_{\mathrm{Ⅲ}} \tag{4}$$

式中：q 为沿流线的吸热。另一方面，对于封闭体系内，$(T\mathrm{d}s)_{\mathrm{Ⅲ}}$代表可逆过程中体系吸的热[31]，即：

$$\frac{T\mathrm{d}s}{\mathrm{d}x}\Bigg|_{\mathrm{Ⅲ}}=\frac{\delta q}{\mathrm{d}x}\Bigg|_{\mathrm{Ⅲ}} \tag{5}$$

因此，通过描述铝粉在爆轰产物中燃烧的反应速率，可以计算每一段流线对应的放热量和熵变量，最终可以求解爆轰产物中的非等熵流动。至于水中的非均熵流动，可看作非等熵流的特例，即起始总熵不同但沿流线熵变量为零的情况，方程组退化到经典的特征线方程组。

3　含铝炸药中铝粉的后燃效应

3.1　铝粉燃烧的主要化学反应

关于铝粉对炸药爆轰的影响，一方面由于铝的导热性好，铝的吸热作用会降低维持爆轰的能量；另一方面部分铝也可能在爆轰区内反应，为爆轰波提供能量支持，而大部分铝的反应热只是作为爆轰产物的后续能量供应[32]。为了探究后燃效应与水下能量输出的关系，本文中认为铝粉不参与爆轰反应，并忽略铝的吸热作用。考虑到铝粉表面存在氧化膜以及热弛豫时间[33]，进一步认为铝粉需要在爆轰结束后经历几微秒到几十微秒的升温活化时间才开始发生燃烧。由于大多数含铝炸药含有氧化剂如高氯酸铵等，铝粉除了与爆轰产物中的 H_2O、CO_2 等发生反应，还可能跟氧化剂分解产物中的 O_2 发生反应，因此涉及铝粉燃烧的主要反应有：

$$\mathrm{Al(s)}+1.5\mathrm{H_2O(g)}\longrightarrow 0.5\mathrm{Al_2O_3(s)}+1.5\mathrm{H_2},\Delta_{\mathrm{f}}H=-472.2\ \mathrm{kJ/mol} \tag{6}$$

$$\mathrm{Al(s)}+1.5\ \mathrm{CO_2}\longrightarrow 0.5\mathrm{Al_2O_3(s)}+1.5\mathrm{CO},\Delta_{\mathrm{f}}H=-410.4\ \mathrm{kJ/mol} \tag{7}$$

$$\mathrm{Al(s)}+1.5\mathrm{CO}\longrightarrow 0.5\mathrm{Al_2O_3(s)}+1.5\mathrm{C(s)},\Delta_{\mathrm{f}}H=-669.2\ \mathrm{kJ/mol} \tag{8}$$

$$\mathrm{Al(s)}+0.75\mathrm{O_2}\longrightarrow 0.5\mathrm{Al_2O_3(s)},\Delta_{\mathrm{f}}H=-834.9\ \mathrm{kJ/mol} \tag{9}$$

由式(6)～(9)可知，铝粉放热与爆轰产物成分密切相关，当爆轰产物是正氧平衡时，铝的反应以式(9)为主；而当炸药爆轰产物零氧或负氧平衡时，铝的反应则以式(7)为主。若假设铝充分反应，且其他反应过程可忽略，则对每摩尔铝而言，其中最低的放热量是 410.4 kJ，最高的放热量是 834.9 kJ，而实际放热量介于两者之间。需要强调的是，这个范围本身是一个理想估算，若铝粉反应不充分，平均的放热量可能低于 410.4 kJ/mol。考虑到实际炸药中铝粉燃烧是复杂的链式反应，对放热量的计算也需考虑一连串基元反应与化学平衡，为避免过多讨论化学机理，本文中不对该范围做进一步的修正和细化，只选取放热量上限 834.9 kJ/mol 和下限 410.4 kJ/mol 进行计算。

3.2　含铝炸药的 Miller 唯象模型

针对在水下爆炸的含铝炸药，Miller 等[20]提出了 Miller 模型，认为铝粉只在 CJ 面后反应，而铝粉反应速率可表示如下：

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t}=a(1-\lambda)^{m}p^{n} \tag{10}$$

式中：λ、p 和 t 分别为已反应铝的分数($0\leqslant\lambda\leqslant1$)、压力和反应时间，$m$、$n$ 和 a 为与铝粉特性有关的常数。根据文献[20]，对于球形颗粒，m 和 n 分别取 1/2 和 1/6，$(1-\lambda)^{1/2}$代表反应表面积的减小，$p^{1/6}$来源于理论推导和实验拟合，而 a 取决于铝粉粒度，为了量纲和谐，其常用单位是$(\mathrm{Mbar})^{-n}\cdot\mu\mathrm{s}^{-1}$。Miller 模型常与 JWL 状态方程结合，其中 λ 作为 JWL 方程的扩展选项，表示如下：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega(E+\lambda Q)}{V} \tag{11}$$

式中：p 、V 和 E 分别为爆轰产物的压力、相对比容和体积内能，Q 为单位体积初始炸药所含的铝粉热能。

JWL-Miller 状态方程中的参数需要通过实验标定。先假设状态方程参数 A、B、R_1、R_2、ω 和 a 全部是关于 λ 的函数，再根据常规圆筒实验结果标定 $\lambda=0$，1 对应的 2 组参数，中间 λ 取值对应的参数使用内插法近似，计算过程中通过更新 λ 来确定放热量以及爆轰产物状态量。一般情况下，为了确定所标定状态方程的有效性，还可补充锰铜计测压[19]、水下高速摄影[21]或激光干涉测速[34]等进行验证。

4　算　例

选取一种 RDX 基含铝炸药[35]作为算例，其中 RDX、Al 和粘结剂的质量配比 w(RDX)∶w(Al)∶w(粘结剂)=75∶20∶5。认为铝粉放热量介于 410.4～834.9 kJ/mol 之间，炸药状态方程采用 JWL-Miller 状态方程，其中爆轰参数 $\rho_0=1.780$ g/cm^3，$D=8.069$ km/s，$p_{CJ}=31.3$ GPa；JWL 参数 $A=609.77$ GPa，$B=12.95$ GPa，$R_1=4.5$，$R_2=1.4$，$\omega=0.25$；Miller 参数 $m=1/2$，$n=1/6$，$a=0.025$ (Mbar)$^{-n}\cdot\mu s^{-1}$。由于实验限制只给出了一组参数，但对于本文的计算影响不大。

对水选用如下形式的 Mie-Grüneison 状态方程[36]：

$$p=\begin{cases}A_1\mu+A_2\mu^2+A_3\mu^3+(B_0+B_1\mu)\rho_{w,0}e & \mu\geqslant 0\\ T_1\mu+T_2\mu^2+B_0\rho_{w,0}e & \mu<0\end{cases} \tag{12}$$

式中：$\rho_{w,0}$为水初始密度，$\mu=\rho_w/\rho_{w,0}-1$ 为压缩率，e 为比内能；$\rho_{w,0}=1.000$ g/cm^3，$e_0=361.9$ J/kg，$A_1=2.2$ GPa，$A_2=9.54$ GPa，$A_3=14.57$ GPa，$B_0=0.28$，$B_1=0.28$，$T_1=2.2$ GPa，$T_2=0$ GPa。由于水在高速冲击后的卸载可看作等熵过程，因此计算水的卸载时需结合等熵条件。

5　计算结果

5.1　冲击波迹线以及爆轰产物气泡迹线

由于冲击波前后以及水气界面两侧都存在光的折光率突变，因而冲击波传播迹线及爆轰产物气泡膨胀迹线都可以通过光学手段测得[35]。图 2 展示了这 2 条迹线的实验结果(装药直径为 20.0 mm)和计算结果，其中计算结果有 3 组，分别对应着铝粉单位放热量为 410.4、834.9 kJ/mol 以及 0 kJ/mol(代表无铝的理想炸药)。经过对比可以看出：随着单位放热量增大，冲击波、水气界面迹线整体都是向上抬升；对于水气界面迹线，实验结果刚好介于 410.4 kJ/mol 线和 834.9 kJ/mol 线之间，而与 0 kJ/mol线的差距甚远，说明特征线法可以比较准确地捕捉到含铝炸药的气泡膨胀轨迹；对于冲击波迹线，3 组计算结果在$1<R/R_0\leqslant 5$的范围内几乎相互重叠，且与实验结果保持了良好的一致性，三者的差别在$R/R_0\geqslant 7$之后才变得明显，说明铝粉对近场冲击波的增压作用在一定距离以外才会变得显著。

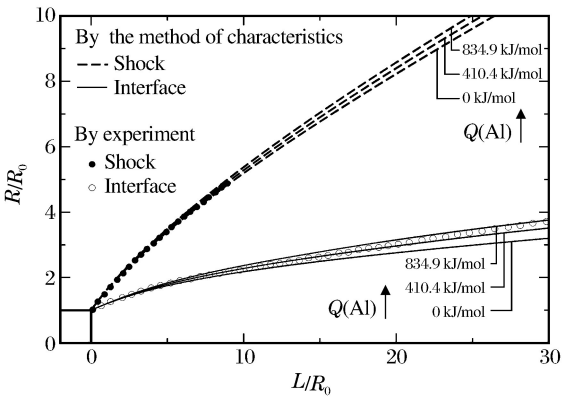


图 2　水下冲击波的传播迹线以及爆轰产物的气泡膨胀

Fig. 2　Trajectories of underwater shock wave and bubble expansion of detonation product

5.2　装药尺寸对含铝炸药水下爆炸的影响

本文中计算了同一含铝炸药在不同装药直径(25.4 和 50.0 mm)时的水下爆炸结果(放热量取 834.9 kJ/mol)，包括爆轰产物气泡膨胀迹线和已反应铝分数沿该迹线的分布曲线，以及一组为了对比而增加的理想炸药计算结果(non-Al，放热量取 0 kJ/mol)。如图 3 所示，可以看出：理想炸药的 2 条气泡膨胀迹线是重合的，说明理想炸药的水下爆炸满足几何相似律；而含铝炸药的 2 条迹线相差较大，其中∅50.0 mm装药的膨胀程度一直大于∅25.4 mm 装药的，从已反应铝分数分布曲线也可以看出，∅50.0 mm装药的反应度一直大于∅25.4 mm 装药的，说明铝粉的后燃效应引起了爆轰产物早期膨胀的几何不相似性。因此，基于爆轰产物早期膨胀规律(如圆筒实验)评估含铝炸药性能时，不同装药尺寸的测

试结果存在较大差别，其中大尺寸的结果往往大于小尺寸的结果；若基于测量水域可调的水下爆炸法来评估时，为了更完整地获取有关后燃效应的信息，水气界面的测试范围应该尽量覆盖铝粉燃烧区。以本文炸药为例，∅50.0 mm 装药时的水气界面最小测试范围应为$0<L/R_0\leqslant 10$，而在∅25.4 mm 装药时对应的范围更大一些，为$0<L/R_0\leqslant 25$。

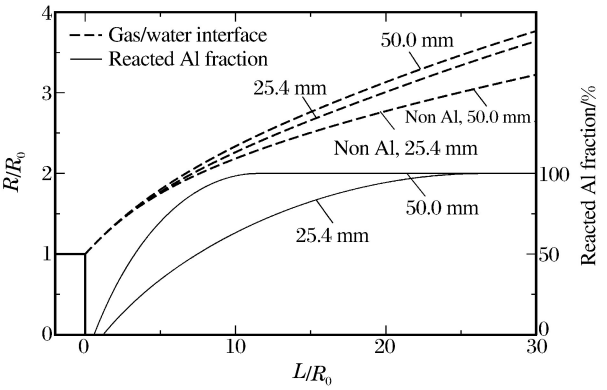


图 3　含铝炸药在不同装药直径时的水气界面迹线和已反应铝分数

Fig. 3　Bubble expansion and reacted Al fraction of aluminized explosive with different charge diameters

5.3　铝粉燃烧引起的各处压力增幅

为了考察铝粉燃烧在水下爆炸中的具体影响，本文还计算了装药直径取 100.0 mm 而放热量分别取 0 和 410.4 kJ/mol 两种情况下，轴线、界面、冲击波 3 处压力的相对增幅曲线。如图 4 所示，可以看出：(1)整体上增幅最大的是轴线压力，其次是界面压力，再次是冲击波压力；(2)3 条曲线都是从 0 开始上升，轴线压力和水气边界压力都存在一个或几个峰值，冲击波整体相对平稳；(3)各处峰值存在某种关联，如 $L/R_0=6$ 处和 $L/R_0=46$ 处轴线的峰值、$L/R_0=22$ 处和 $L/R_0=76$ 处水气边界的峰值。

利用如图 5 所示的特征线网格研究发现：$L/R_0=6$ 处轴线的第 1 个峰值对应着铝粉耗尽的位置，而 $L/R_0=22$处水气边界的第 1 个峰值对应着最后一条来自铝粉燃烧区的特征线，接着 $L/R_0=46$ 处轴线的第 2 个峰值是其沿着特征线向内汇聚形成二次压缩的结果，最后这个压缩峰向外传播就产生了 $L/R_0=76$ 处水气边界的第 2 个峰值。而对于冲击波，可以看出在 $L/R_0\leqslant 100$ 范围内冲击波的依赖域是 $L/R_0\leqslant 13$ 之前的水气边界，因此冲击波并未受到水气边界第 1 个峰值的影响，造成了冲击波压力增幅没有出现峰值的现象。因此，利用特征线法可回溯的特点，可以由内而外地研究铝粉燃烧对含铝炸药水下爆炸的影响。

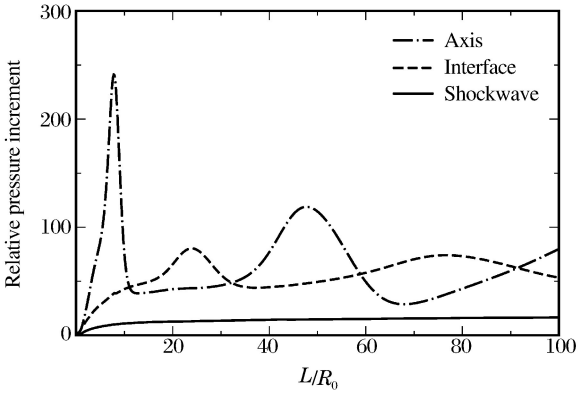


图 4　轴线、水气边界、冲击波 3 处压力的相对增幅

Fig. 4　Relative increment of the pressure at axis, interface and shockwave

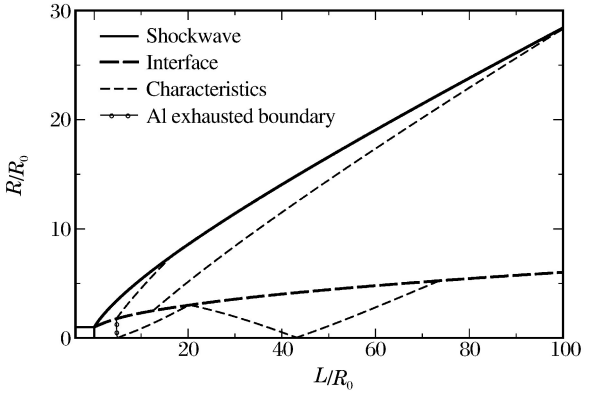


图 5　特征线网格上的近场冲击波与爆轰产物膨胀的关系

Fig. 5　Connections between near-field shock and detonation products expansion on characteristic net

6　结　论

基于之前提出的一种特征线法，对柱状含铝炸药的水下爆炸问题进行了数值模拟，得出了以下结论：

(1)通过对柱形含铝炸药水下爆炸的定常流场的计算和对比，得知这种特征线法不仅可用于一般的非均熵流问题，还可用于常规特征线法难以处理的非等熵流问题。

(2)通过研究装药直径对水下爆炸的影响，探究了后燃效应所引起的含铝炸药几何不相似性，据此给出了水下爆炸法测试含铝炸药时应该覆盖的水气界面最小被测范围。

(3)通过利用特征线法的可回溯性，发现沿特征线可以追踪铝粉的增压效果，这为以后研究铝粉燃烧究竟如何影响水中冲击波及其波后流场提供了一种新的视角。

参考文献:

[1] 陈朗. 含铝炸药爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,2004:11-17.

[2] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡:中国船舶科学研究中心,2002:2-32.

[3] 陈朗,冯长根,黄毅民. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 火炸药学报,2001,24(3):13-15. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.005.
CHEN Lang, FENG Changgen, HUANG Yimin. The cylinder test and jwl equation of state detontion product of aluminized explosives[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001,24(3):13-15. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.005.

[4] 冯晓军,王晓峰,李媛媛,等. 铝粉粒度和爆炸环境对含铝炸药爆炸能量的影响[J]. 火炸药学报,2013,36(6):24-27. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2013.06.004.
FENG Xiaojun, WANG Xiaofeng, LI Yuanyuan, et al. Effect of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion of aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013,36(6):24-27. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2013.06.004.

[5] KEICHER T, HAPP A, KRETSCHMER A, et al. Influence of aluminium/ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999,24(3):140-143. DOI:10.1002/(SICI)1521-4087(199906)24:033.0.CO;2-3

[6] KUMAR A S, RAO V B, SINHA R K, et al. Evaluation of plastic bonded explosive (PBX) formulations based on RDX, aluminum, and HTPB for underwater applications[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010,35(4):359-364. DOI:10.1002/prep.200800048.

[7] ZHANG F, ANDERSON J, YOSHINAKA A. Post-detonation energy release from tnt-aluminum explosives[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 2007:885-888. DOI:10.1063/1.2833268.

[8] 蒋小华,龙新平,何碧,等. 有氧化剂(AP)含铝炸药的爆轰性能[J]. 爆炸与冲击,2005,25(1):26-30. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2005.01.005.
JIANG Xiaohua , LONG Xinping , HE Bi, et al. Numerical simulation of detonation in aluminized explosives containing oxidiser (AP)[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(1):26-30. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2005.01.005.

[9] 胡栋,孙珠妹. 铝粉颗粒度对黑索金含铝炸药粉快速反应影响的微观特性研究[J]. 爆炸与冲击,1995,15(2):122-128.
HU Dong, SUN Zhumei. Studies on the micro-behaviour of the influence of the aluminum particle size on the high speed reaction for RDX powder containing aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(2):122-128.

[10] 陈朗,张寿齐,赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19(3):250-255. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.1999.03.010.
CHEN Lang, ZHANG Shouqi, ZHAO Yuhua. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):250-255. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.1999.03.010.

[11] 韩勇,黄辉,黄毅民,等. 不同直径含铝炸药的作功能力[J]. 火炸药学报,2008,31(6):5-7. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2008.06.002.
HAN Yong, HUANG Hui, HUANG Yimin, et al. Power of aluminized explosives with different diameters[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008,31(6):5-7. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2008.06.002.

[12] 计冬奎,高修柱,肖川,等. 含铝炸药作功能力和 JWL 状态方程尺寸效应研究[J]. 兵工学报,2012,31(5):552-555.
JI Dongkui, GAO Xiuzhu, XIAO Chuan, et al. Study on dimension effect of accelerating ability and JWL equation of state for aluminized explosive[J]. Acta Armamentarii, 2012,31(5):552-555.

[13] 周霖,徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构[J]. 火炸药学报,2003,26(1):30-32. DOI:0.3969/j.issn.1007-7812.2003.01.009.
ZHOU Lin, XU Gengguang. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003,26(1):30-32. DOI:10.3969/j.issn.1007-7812.2003.01.009.

[14] 赵继波,李金河,谭多望,等. 铝氧比对水中爆炸近场冲击波的影响[J]. 含能材料,2009,17(4):420-423. DOI:10.

3969/j. issn. 1006-9941. 2009. 04. 011.

ZHAO Jibo, LI Jinhe, TAN Duowang, et al. Effects of ratios of aluminum to oxygen on shock wave of cylindrical charge at underwater explosive close-field[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(4):420-423. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-9941. 2009. 04. 011.

[15] 林谋金，马宏昊，沈兆武，等. RDX 基铝薄膜炸药与铝粉炸药水下爆炸性能比较[J]. 化工学报，2014，65(2)：752-758. DOI:10. 3969/j. issn. 0438-1157. 2014. 02. 054.

LIN Moujin, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al. Difference in underwater detonation between RDX based aluminum film and aluminum particle explosives[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2014,65(2):752-758. DOI:10. 3969/j. issn. 0438-1157. 2014. 02. 054.

[16] 胡宏伟，严家佳，陈朗，等. 铝粉含量和粒度对 CL-20 含铝炸药水中爆炸反应特性的影响 [J]. 爆炸与冲击，2017，37(1)：157-161. DOI:10. 11883/1001-1455(2017)01-0157-05.

HU Hongwei, YAN Jiajia, CHEN Lang, et al. Effect of aluminum powder content and its particle size on reaction characteristics for underwater explosion of CL-20-based explosives containing aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):157-161. DOI:10. 11883/1001-1455(2017)01-0157-05.

[17] HOWARD W M, FRIED L E, SOUERS P C. Kinetic modeling of non-ideal explosives with CHEETAH[C]// The Eleventh International Symposium on Detonation. Snowmass, Colorado, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1998:998-1006.

[18] LEE J, KUK J H, CHO Y S, et al. Numerical modeling of underwater explosion properties for an aluminized explosive [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997,22(6):337-346. DOI:10. 1002/prep. 19970220608.

[19] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2372. DOI:10. 1063/1. 862940.

[20] MILLER P J, GUIRGUIS R H. Experimental study and model calculations of metal combustion in al/ap underwater explosives[J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1992:296-299. DOI:10. 1557/PROC-296-299.

[21] LU J P, KENNEDY D L. Modelling of PBXW-115 using Kinetic CHEETAH and the DYNA codes: DSTO-TR-1496 [R]. Australia: Defence Science and Technology Organisation(DSTO), 2003.

[22] 辛春亮，徐更光，刘科种，等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用[J]. 含能材料，2008，16(4)：436-440. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-9941. 2008. 04. 018.

XIN Chunliang, XU Gengguang, LIU Kezhong, et al. Application of miller energy release model for aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(4):436-440. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-9941. 2008. 04. 018.

[23] 荣吉利，项大林，李健，等. 含铝炸药水下爆炸特性研究[J]. 北京理工大学学报，2012，32(3)：221-225. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-0645. 2012. 03. 001.

RONG Jili, XIANG Dalin, LI Jian, et al. Study on underwater explosion character of aluminized explosive[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012,32(3):221-225. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-0645. 2012. 03. 001.

[24] SHU C W, OSHER S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes[J]. Journal of Computational Physics, 1988,7(2):439-471. DOI:10. 1016/0021-9991(88)90177-5.

[25] YANG H Q, PRZEKWAS A J. A comparative study of advanced shock-capturing shcemes applied to Burgers' equation [J]. Journal of Computational Physics, 1992,102(1):139-159. DOI:10. 1016/S0021-9991(05)80012-9.

[26] LI X J, ZHANG C C, WANG X H, et al. Numerical study of underwater shock wave by a modified method of characteristics[J]. Journal of Applied Physics, 2014,115(10):104905. DOI:10. 1063/1. 4868360.

[27] 李晓杰，张程娇，闫鸿浩，等. 水下爆炸近场非均熵流的特征线差分解法[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：604-608. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-1455. 2012. 06. 008.

LI Xiaojie, ZHANG Chengjiao, YAN Honghao, et al. Difference method of characteristics in isentropic flow of underwater explosion in near-field region[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):604-608. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-1455. 2012. 06. 008.

[28] 李晓杰，杨晨琛，张程娇，等. 水下爆炸非均熵二维定常流的三族特征线解法[J]. 爆炸与冲击，2018，38(4)：847-853. DOI:10. 11883/bzycj-2016-0314.

LI Xiaojie, YANG Chenchen, ZHANG Chengjiao, et al. A FDM of three characteristic lines of two-dimensional non-

isentropic steady flow of cylindrical explosive underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018,38(4):847-853. DOI:10.11883/bzycj-2016-0314.

[29] STEBNOVSKII S V, CHERNOBAEV N N. Initial stage of an underwater explosion of cylindrical charges with foliated cases[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1982,18(3):358-362. DOI:10.1007/BF00783052.

[30] YANG C C, Li X J, Zhang C J. Numerical study of two-dimensional cylindrical underwater explosion by a modified method of characteristics[J]. Journal of Applied Physics, 2017,122(10):105903. DOI:10.1063/1.4986881.

[31] 高执棣. 化学热力学基础[M]. 北京:北京大学出版社,2006.

[32] 陈朗,冯长根,赵玉华,等. 含铝炸药爆轰数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报,2001,21(4):415-419. DOI:10.3969/j.issn.1001-0645.2001.04.003.
CHEN Lang, FENG Changgen, ZHAO Yuhua, et al. Numerical simulations of the detonation of aluminized explosives [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2001,21(4):415-419. DOI:10.3969/j.issn.1001-0645.2001.04.003.

[33] 裴红波,聂建新,覃剑峰. 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):311-314. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.03.015.
PEI Hongbo, NIE Jianxin, QIN Jianfeng. Investigation on detonation velocity of aluminized explosives based on disequilibrium multiphase model[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(3):311-314. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.03.015.

[34] TARVER C M, TAO W C, LEE C G. Sideways plate push test for detonating solid explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996,21(5):238-246. DOI:10.1002/prep.19960210506.

[35] 沈飞,王辉,袁建飞,等. 含铝炸药水下滑移爆轰实验研究[J]. 实验力学,2014,29(5):641-646. DOI:10.7520/1001-4888-13-202.
SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jianfei, et al. Experimental study of underwater sliding detonation of aluminized explosives[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014,29(5):641-646. DOI:10.7520/1001-4888-13-202.

[36] AUTODYNA: interactive non-linear dynamic analysis software version 13: user's manual[M]. SAS IP Inc., 2010.

Numerical study of near-field underwater explosion of cylindrical aluminized explosive by the method of characteristics

LI Xiaojie, YANG Chenchen, YAN Honghao, WANG Xiaohong, WANG Yuxin, ZHANG Chengjiao

(*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian* 116023, *Liaoning, China*)

Abstract: Based on the previously proposed method of characteristics containing an entropy variate, the non-ideal effect of aluminum combustion is portrayed by controlling the energy release in non-isentropic flow. Combined with a simple Chapman-Jouguet model and a JWL-Miller equation of state, it is obtained the near-field parameters for the underwater explosion of the cylindrical aluminized explosive. Comparing the simulation results with the experimental data, it is found that this method can give a good prediction for the propagation of shock wave and the bubble expansion of detonation products as well as the reflection of internal compression wave. The results show that this method can be applied to the near-field calculation of underwater explosion of aluminum explosive, and even the evaluation of explosive performance or the estimation of underwater energy output.

Keywords: aluminized explosive; underwater explosion; non-isentropic flow; method of characteristics

(责任编辑　张凌云)