



模拟舱室内部气云爆炸载荷的不同精度 WENO 格式比较

徐维铮, 吴卫国

引用本文:

徐维铮, 吴卫国. 模拟舱室内部气云爆炸载荷的不同精度 WENO 格式比较 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 042302.

XU Weizheng, WU Weiguo. Raman Evidences for Phase Transition of Sodium Perchlorate at High Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 042302.

[当期更多内容>>](#)

您可能感兴趣的其他文章:

[一种提高极值点处精度的三阶 WENO-Z 改进格式及应用](#)

徐维铮, 吴卫国

DOI: 10.11858/gywlxb.20170696

[泄压口大小对约束空间爆炸准静态超压载荷的影响规律](#)

徐维铮, 吴卫国

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.05.016

[破片式战斗部空中爆炸下冲击波与破片的耦合作用](#)

陈长海, 侯海量, 朱锡, 胡年明, 李典

DOI: 10.11858/gywlxb.20170849

[爆炸下限临界浓度丙烷-空气混合过程及可燃性研究](#)

任少云

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.05.017

[蒸汽爆炸推进机理的数值研究](#)

纪延亮, 周本谋, 黄亚冬, 李俊伟

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.05.013

模拟舱室内部气云爆炸载荷的 不同精度 WENO 格式比较^{*}

徐维铮^{1,2}, 吴卫国^{1,2}

(1. 武汉理工大学高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学交通学院船舶、海洋与结构工程系, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为了研究加权本质无振荡(WENO)格式精度对舱室内部气云爆炸载荷的影响规律, 基于 FORTRAN 平台, 采用三、五、七、九阶 WENO 格式, 开发了高精度舱室内部气云爆炸三维数值计算程序。选用 Sod 激波管、激波与熵波相互作用两个经典算例验证了程序编写的可靠性, 并初步考察了不同精度 WENO 格式的计算性能。采用已验证的程序开展了封闭舱室和泄压舱室内部球体气云爆炸的数值模拟, 并探讨了 WENO 格式精度对爆炸载荷的影响规律。研究表明: 舱室内部气云爆炸载荷主要包含瞬态冲击波和持续时间较长的准静态超压; WENO 格式精度对冲击波载荷影响较大, 高阶格式给出更陡峭的峰值, 而对形成的准静态超压影响较小。

关键词: WENO 格式; 高精度; 低耗散; 舱室内部气云; 爆炸载荷

中图分类号: O381

文献标识码: A

可燃性气云爆炸是石化工业灾害预防等领域研究的焦点。开敞空间中气云爆炸后将形成强度较大的带有负压区的空气冲击波, 对工作人员和周边结构设施造成较大的损害。近年来学者们针对可燃性气云、云雾爆炸进行了相应的数值、实验研究^[1-4]。这些研究中可燃性气云、云雾被等效地简化为一团均匀高压气体, 且主要采用低阶精度数值方法进行模拟; 而针对舱室内部可燃性气云爆炸的研究较少。

高精度激波捕捉格式对含激波流场的数值模拟具有重要意义, 不但可以降低网格的规模, 而且能较好地分辨流场中复杂的波系结构。Liu 等^[5]于 1994 年首次提出加权本质无振荡(Weighted Essentially Non-Oscillatory, WENO)格式。之后, Jiang 和 Shu^[6]通过引入新的光滑因子, 提出三阶 WENO 格式和五阶 WENO 格式, 并扩展了其应用^[7-8]。Balsara 等^[9]将 WENO 格式推广到更高阶形式, 给出七、九、十一阶 WENO 格式。本研究在参考上述文献的基础上, 采用三、五、七、九阶 WENO 格式, 基于 FORTRAN 平台自主开发了高精度舱室内部气云爆炸三维数值计算程序, 研究 WENO 格式精度对舱室内部气云爆炸载荷的影响规律。

1 控制方程

将可燃性气云简化为均匀高压气体, 采用三维可压缩欧拉方程描述爆炸流场, 其具体形式如下

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中

^{*} 收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2017-12-19

基金项目: 装备预研教育部联合基金(青年人才)(6141A020331); 国家自然科学基金(51409202); 中央高校基本科研业务费(2016-YB-016)

作者简介: 徐维铮(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事束空间内炸药爆炸场高精度数值计算方法及三维程序开发研究。E-mail: xuweizheng@whut.edu.cn

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ u(E + p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ v(E + p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ w(E + p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E = \rho e + \frac{1}{2}\rho u^2 + \frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{1}{2}\rho w^2 \quad (3)$$

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (4)$$

式中: ρ 是密度; u, v, w 是 x, y, z 方向上的速度分量; p 为流体压力; E 是单位体积流体的总能量; e 是比内能; γ 表示气体绝热指数, 取为 1.4。对于多维欧拉方程的计算, 采用 Strang 维数分裂法, 将欧拉方程分解为 x, y, z 3 个方向求解。

2 数值方法

程序中采用三阶、五阶、七阶、九阶 WENO 有限差分格式对欧拉方程进行数值离散和求解, 下面给出不同精度 WENO 格式的离散过程。

2.1 三阶 WENO 格式

三阶 WENO 格式(WENO-JS3)的数值离散和推导过程如下。单元面中心 $x_{i+1/2}$ 处数值通量 $f_{i+1/2}$ 的两种重构方式分别为^[6]

$$\begin{cases} f_{i+1/2}^0 = -\frac{1}{2}f_{i-1} + \frac{3}{2}f_i \\ f_{i+1/2}^1 = \frac{1}{2}f_i + \frac{1}{2}f_{i+1} \end{cases} \quad (5)$$

利用上述两种模板的凸组合计算数值通量 $f_{i+1/2}$, 即

$$f_{i+1/2} = \omega_0 f_{i+1/2}^0 + \omega_1 f_{i+1/2}^1 \quad (6)$$

对于含激波间断流场, (6)式中的 ω_k 根据下式求得

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{s=0}^1 \alpha_s, \quad \alpha_k = \frac{d_k}{(\epsilon + \beta_k)^2}, \quad k=0, 1 \quad (7)$$

式中: d_k 表示 WENO 格式的线性权值, 对于三阶 WENO 格式, 其值为 $d_0 = 1/3, d_1 = 2/3$ 。为避免分母为零, 取 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-6}$ 。光滑因子 $\beta_k (k=0, 1)$ 的表达式如下^[6]

$$\begin{cases} \beta_0 = (f_i - f_{i-1})^2 \\ \beta_1 = (f_{i+1} - f_i)^2 \end{cases} \quad (8)$$

2.2 五阶 WENO 格式

五阶 WENO 格式(WENO-JS5)的数值离散和推导过程如下。单元面中心 $x_{i+1/2}$ 处数值通量 $f_{i+1/2}$ 的 3 种重构方式分别为^[6]

$$\begin{cases} f_{i+1/2}^0 = \frac{1}{3}f_{i-2} - \frac{7}{6}f_{i-1} + \frac{11}{6}f_i \\ f_{i+1/2}^1 = -\frac{1}{6}f_{i-1} + \frac{5}{6}f_i + \frac{1}{3}f_{i+1} \\ f_{i+1/2}^2 = \frac{1}{3}f_i + \frac{5}{6}f_{i+1} - \frac{1}{6}f_{i+2} \end{cases} \quad (9)$$

利用上述 3 种模板的凸组合计算数值通量 $f_{i+1/2}$, 即

$$f_{i+1/2} = \omega_0 f_{i+1/2}^0 + \omega_1 f_{i+1/2}^1 + \omega_2 f_{i+1/2}^2 \quad (10)$$

对于含激波间断流场, (10)式中的 ω_k 根据下式求得

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{s=0}^2 \alpha_s, \quad \alpha_k = \frac{d_k}{(\epsilon + \beta_k)^2}, \quad k=0, 1, 2 \quad (11)$$

对于五阶 WENO 格式, $d_0 = \frac{1}{10}, d_1 = \frac{3}{5}, d_2 = \frac{3}{10}$ 。光滑因子 $\beta_k (k=0,1,2)$ 的表达式如下

$$\begin{cases} \beta_0 = \frac{13}{12} (f_{i-2} - 2f_{i-1} + f_i)^2 + \frac{1}{4} (f_{i-2} - 4f_{i-1} + 3f_i)^2 \\ \beta_1 = \frac{13}{12} (f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1})^2 + \frac{1}{4} (f_{i-1} - f_{i+1})^2 \\ \beta_2 = \frac{13}{12} (f_i - 2f_{i+1} + f_{i+2})^2 + \frac{1}{4} (3f_i - 4f_{i+1} + f_{i+2})^2 \end{cases} \quad (12)$$

2.3 七阶 WENO 格式

七阶 WENO 格式(WENO-JS7)的数值离散和推导过程如下。单元面中心 $x_{i+1/2}$ 处数值通量 $f_{i+1/2}$ 的 4 种重构方式分别为^[9]

$$\begin{cases} f_{i+1/2}^0 = -\frac{1}{4}f_{i-3} + \frac{13}{12}f_{i-2} - \frac{23}{12}f_{i-1} + \frac{25}{12}f_i \\ f_{i+1/2}^1 = \frac{1}{12}f_{i-2} - \frac{5}{12}f_{i-1} + \frac{13}{12}f_i + \frac{1}{4}f_{i+1} \\ f_{i+1/2}^2 = -\frac{1}{12}f_{i-1} + \frac{7}{12}f_i + \frac{7}{12}f_{i+1} - \frac{1}{12}f_{i+2} \\ f_{i+1/2}^3 = \frac{1}{4}f_i + \frac{13}{12}f_{i+1} - \frac{5}{12}f_{i+2} + \frac{1}{12}f_{i+3} \end{cases} \quad (13)$$

利用上述 4 种模板的凸组合计算数值通量 $f_{i+1/2}$, 即

$$f_{i+1/2} = \omega_0 f_{i+1/2}^0 + \omega_1 f_{i+1/2}^1 + \omega_2 f_{i+1/2}^2 + \omega_3 f_{i+1/2}^3 \quad (14)$$

对于含激波间断流场, (14)式中的 ω_k 根据下式求得

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{s=0}^3 \alpha_s, \quad \alpha_k = \frac{d_k}{(\epsilon + \beta_k)^2}, \quad k=0,1,2,3 \quad (15)$$

对于七阶 WENO 格式, $d_0 = \frac{1}{35}, d_1 = \frac{12}{35}, d_2 = \frac{18}{35}, d_3 = \frac{4}{35}$ 。光滑因子 $\beta_k (k=0,1,2,3)$ 的表达式如下^[9]

$$\begin{cases} \beta_0 = f_{i-3} (547f_{i-3} - 3882f_{i-2} + 4642f_{i-1} - 1854f_i) + \\ \quad f_{i-2} (7043f_{i-2} - 17246f_{i-1} + 7042f_i) + f_{i-1} (11003f_{i-1} - 9402f_i) + 2107f_i^2 \\ \beta_1 = f_{i-2} (267f_{i-2} - 1642f_{i-1} + 1602f_i - 494f_{i+1}) + \\ \quad f_{i-1} (2843f_{i-1} - 5966f_i + 1922f_{i+1}) + f_i (3443f_i - 2522f_{i+1}) + 547f_{i+1}^2 \\ \beta_2 = f_{i-1} (547f_{i-1} - 2522f_i + 1922f_{i+1} - 494f_{i+2}) + \\ \quad f_i (3443f_i - 5966f_{i+1} + 1602f_{i+2}) + f_{i+1} (2843f_{i+1} - 1642f_{i+2}) + 267f_{i+2}^2 \\ \beta_3 = f_i (2107f_i - 9402f_{i+1} + 7042f_{i+2} - 1854f_{i+3}) + \\ \quad f_{i+1} (11003f_{i+1} - 17246f_{i+2} + 4642f_{i+3}) + f_{i+2} (7043f_{i+2} - 3882f_{i+3}) + 547f_{i+3}^2 \end{cases} \quad (16)$$

2.4 九阶 WENO 格式

九阶 WENO 格式(WENO-JS9)的数值离散和推导过程如下。单元面中心 $x_{i+1/2}$ 处数值通量 $f_{i+1/2}$ 的 5 种重构方式分别为^[9]

$$\begin{cases} f_{i+1/2}^0 = \frac{1}{5}f_{i-4} - \frac{21}{20}f_{i-3} + \frac{137}{60}f_{i-2} - \frac{163}{60}f_{i-1} + \frac{137}{60}f_i \\ f_{i+1/2}^1 = -\frac{1}{20}f_{i-3} + \frac{17}{60}f_{i-2} - \frac{43}{60}f_{i-1} + \frac{77}{60}f_i + \frac{1}{5}f_{i+1} \\ f_{i+1/2}^2 = \frac{1}{30}f_{i-2} - \frac{13}{60}f_{i-1} + \frac{47}{60}f_i + \frac{9}{20}f_{i+1} - \frac{1}{20}f_{i+2} \\ f_{i+1/2}^3 = -\frac{1}{20}f_{i-1} + \frac{9}{20}f_i + \frac{47}{60}f_{i+1} - \frac{13}{60}f_{i+2} + \frac{1}{30}f_{i+3} \\ f_{i+1/2}^4 = \frac{1}{5}f_i + \frac{77}{60}f_{i+1} - \frac{43}{60}f_{i+2} + \frac{17}{60}f_{i+3} - \frac{1}{20}f_{i+4} \end{cases} \quad (17)$$

利用上述 5 种模板的凸组合计算数值通量 $f_{i+1/2}$, 即

$$f_{i+1/2} = \omega_0 f_{i+1/2}^0 + \omega_1 f_{i+1/2}^1 + \omega_2 f_{i+1/2}^2 + \omega_3 f_{i+1/2}^3 + \omega_4 f_{i+1/2}^4 \quad (18)$$

对于含激波间断流场, (18) 式中的 ω_k 根据下式求得

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{s=0}^3 \alpha_s, \quad \alpha_k = \frac{d_k}{(\epsilon + \beta_k)^2}, \quad k = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

对于九阶 WENO 格式, $d_0 = \frac{1}{126}, d_1 = \frac{10}{63}, d_2 = \frac{10}{21}, d_3 = \frac{20}{63}, d_4 = \frac{5}{126}$ 。光滑因子 $\beta_k (k=0, 1, 2, 3, 4)$ 的表达式如下^[9]

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_0 &= f_{i-4} (22\,658f_{i-4} - 208\,501f_{i-3} + 364\,863f_{i-2} - 288\,007f_{i-1} + 86\,329f_i) + \\ &\quad f_{i-3} (482\,963f_{i-3} - 1\,704\,396f_{i-2} + 1\,358\,458f_{i-1} - 411\,487f_i) + \\ &\quad f_{i-2} (1\,521\,393f_{i-2} - 2\,462\,076f_{i-1} + 758\,823f_i) + \\ &\quad f_{i-1} (1\,020\,563f_{i-1} - 649\,501f_i) + 107\,918f_i^2 \\ \beta_1 &= f_{i-3} (6\,908f_{i-3} - 60\,871f_{i-2} + 99\,213f_{i-1} - 70\,237f_i + 18\,079f_{i+1}) + \\ &\quad f_{i-2} (138\,563f_{i-2} - 464\,976f_{i-1} + 337\,018f_i - 88\,297f_{i+1}) + \\ &\quad f_{i-1} (406\,293f_{i-1} - 611\,976f_i + 165\,153f_{i+1}) + \\ &\quad f_i (242\,723f_i - 140\,251f_{i+1}) + 22\,658f_{i+1}^2 \\ \beta_2 &= f_{i-2} (6\,908f_{i-2} - 51\,001f_{i-1} + 67\,923f_i - 38\,947f_{i+1} + 8\,209f_{i+2}) + \\ &\quad f_{i-1} (104\,963f_{i-1} - 299\,076f_i + 179\,098f_{i+1} - 38\,947f_{i+2}) + \\ &\quad f_i (231\,153f_i - 299\,076f_{i+1} + 67\,923f_{i+2}) + \\ &\quad f_{i+1} (104\,963f_{i+1} - 51\,001f_{i+2}) + 6\,908f_{i+2}^2 \\ \beta_3 &= f_{i-1} (22\,658f_{i-1} - 140\,251f_i + 165\,153f_{i+1} - 88\,297f_{i+2} + 18\,079f_{i+3}) + \\ &\quad f_i (242\,723f_i - 611\,976f_{i+1} + 337\,018f_{i+2} - 70\,237f_{i+3}) + \\ &\quad f_{i+1} (406\,293f_{i+1} - 464\,976f_{i+2} + 99\,213f_{i+3}) + \\ &\quad f_{i+2} (138\,563f_{i+2} - 60\,871f_{i+3}) + 6\,908f_{i+3}^2 \\ \beta_4 &= f_i (107\,918f_i - 649\,501f_{i+1} + 758\,823f_{i+2} - 411\,487f_{i+3} + 86\,329f_{i+4}) + \\ &\quad f_{i+1} (1\,020\,563f_{i+1} - 2\,462\,076f_{i+2} + 1\,358\,458f_{i+3} - 288\,007f_{i+4}) + \\ &\quad f_{i+2} (1\,521\,393f_{i+2} - 1\,704\,396f_{i+3} + 364\,863f_{i+4}) + \\ &\quad f_{i+3} (482\,963f_{i+3} - 208\,501f_{i+4}) + 22\,658f_{i+4}^2 \end{aligned} \right. \quad (20)$$

2.5 时间项数值离散

欧拉方程时间项采用三阶 TVD-RK (Total Variation Diminishing Runge-Kutta) 法进行数值离散, 具体离散格式如下^[10]

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi^{(1)} &= \varphi^n + \Delta t L(\varphi^n) \\ \varphi^{(2)} &= \frac{3}{4}\varphi^n + \frac{1}{4}\varphi^{(1)} + \frac{1}{4}\Delta t L(\varphi^{(1)}) \\ \varphi^{(n+1)} &= \frac{1}{3}\varphi^n + \frac{1}{3}\varphi^{(2)} + \frac{2}{3}\Delta t L(\varphi^{(2)}) \end{aligned} \right. \quad (21)$$

式中: φ^n 表示 n 时刻的守恒通量, $\varphi^{(1)}$ 、 $\varphi^{(2)}$ 为中间变量, Δt 为时间步长, L 为运算算子。

3 经典算例

为了初步考察上述格式 (WENO-JS3、WENO-JS5、WENO-JS7、WENO-JS9) 的计算性能并验证所开发程序的可靠性, 选取两个经典一维黎曼算例进行计算。

3.1 Sod 激波管

该算例初始条件如(22)式所示^[11], 网格数为 400, 计算结束时间为 0.18。图 1 为计算结束时刻的密度曲线及其局部放大图。

$$(\rho, u, p)^T = \begin{cases} (1, 0, 1)^T & 0 \leq x < 0.5 \\ (0.125, 0, 0.100)^T & 0.5 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (22)$$

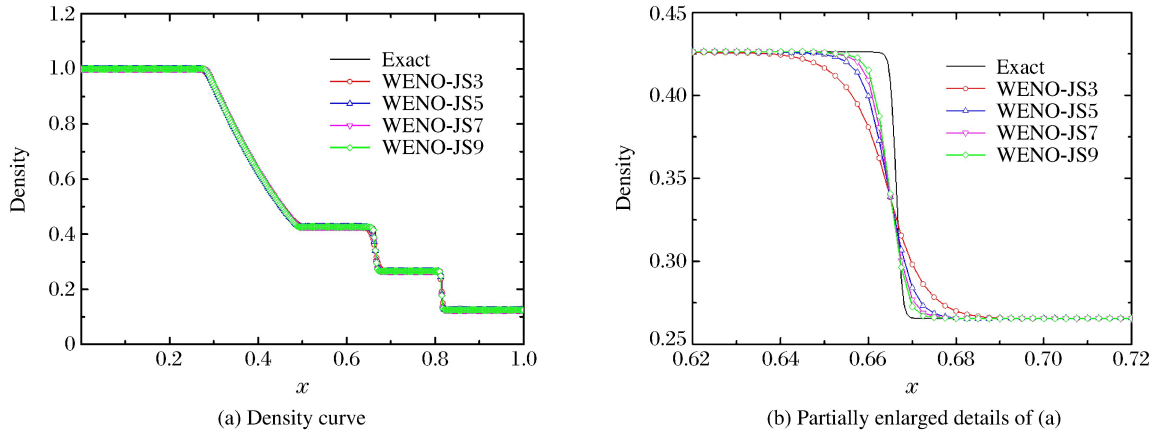


图 1 Sod 激波管算例密度曲线及其局部放大图

Fig. 1 Density curve and its partially enlarged details for Sod shock tube

3.2 激波与熵波相互作用

该算例初始条件如(23)式所示, 网格数为 400, 计算结束时间为 1.8。图 2 为计算结束时刻的密度曲线及其局部放大图。

$$(\rho, u, p)^T = \begin{cases} (3.857143, 2.629369, 10.333330)^T & -5 \leq x < -4 \\ (1 + 0.2 \sin 5x, 0, 1)^T & -4 \leq x \leq 5 \end{cases} \quad (23)$$

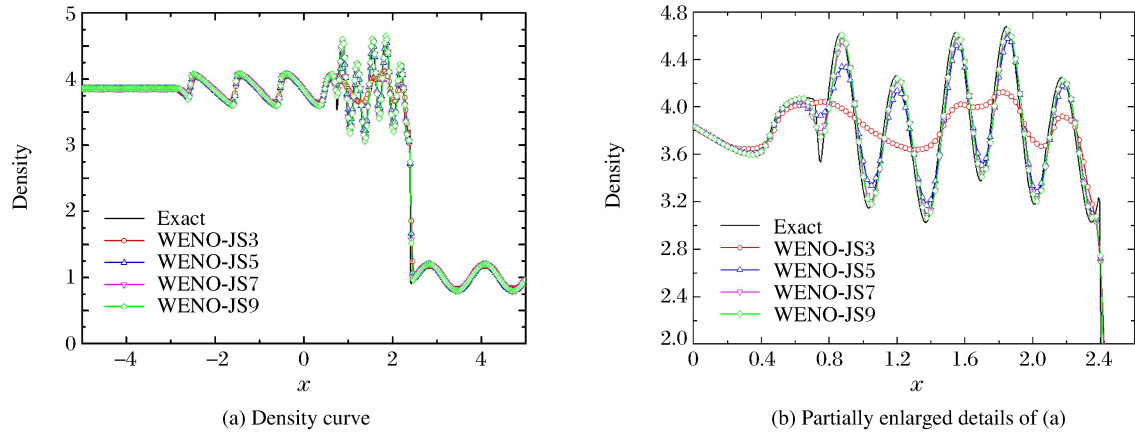


图 2 激波与熵波相互作用算例密度曲线及其局部放大图

Fig. 2 Density curve and its partially enlarged details for shock-entropy wave interaction

3.3 小 结

根据图 1 和图 2 的计算结果, 评估各格式的计算性能发现: WENO-JS9 格式的计算性能最优, WENO-JS7、WENO-JS5 格式次之, WENO-JS3 格式的计算性能最低。即高精度 WENO 格式对含激波间断流场具有更低的耗散特性和更高的分辨率。

4 舱室内气云爆炸载荷计算

为了考察不同精度 WENO 格式对舱室内部气云爆炸载荷的影响规律,采用所开发的三维程序开展封闭舱室和泄压舱室内爆炸载荷数值计算。

4.1 初始条件设置

舱室尺寸为 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,泄压舱室壁面上开有一个边长为 160 mm 的正方形泄压口。壁面上设置两个测点,分别编号为 No. 1、No. 2,对爆炸超压时间历程进行输出,如图 3 所示。

半径为 200 mm 的球体气云位于舱室中间,气云参数为^[12-13]:密度 1.99 kg/m^3 ,压力 1.38 MPa 。周围空气参数为:密度 1.225 kg/m^3 ,压力 0.1 MPa 。计算初始条件见图 4(a)。考虑计算时间及精度的要求,经多次数值试验,网格数为 $40 \times 40 \times 40$ (见图 4(b))。壁面边界条件设置为反射边界,泄压口处边界条件设置为透射边界条件^[14]。

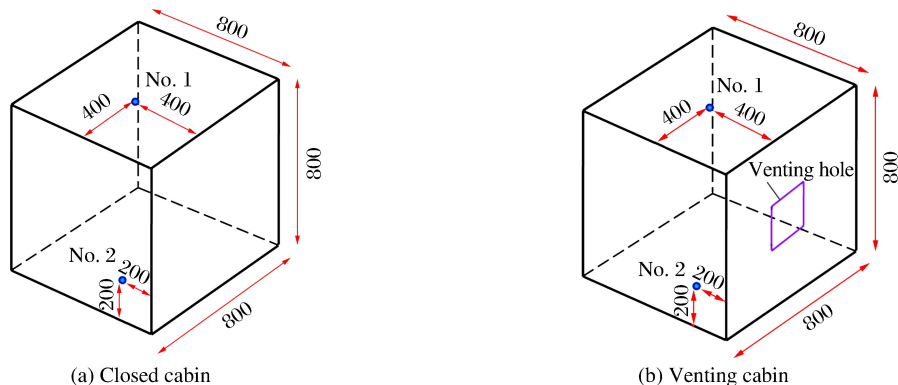


图 3 封闭舱室和泄压舱室及其测点分布(单位:mm)

Fig. 3 Closed cabin and venting cabin and their gauging points (Unit:mm)

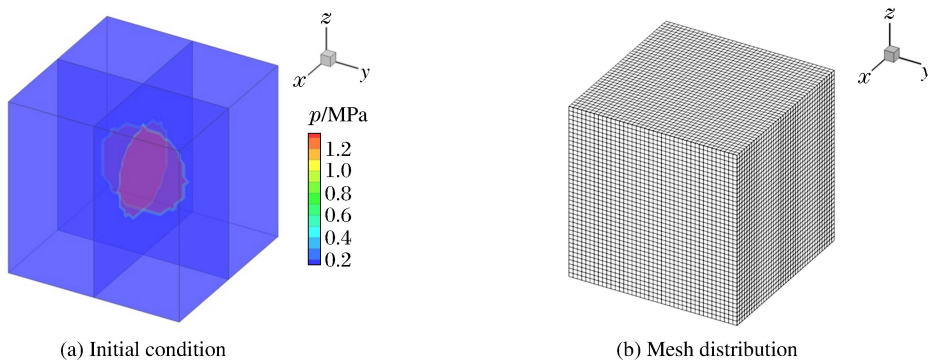


图 4 爆炸初场及网格分布

Fig. 4 Initial condition and mesh distribution

4.2 舱室内爆炸载荷特性

图 5 给出了舱室内部气云爆炸壁面测点 No. 1 和 No. 2 处的超压时间历程曲线。由图 5 可知:封闭舱室内爆炸载荷主要包含多峰值、强度逐渐衰弱的冲击波和持续时间较长、峰值保持稳定的准静态超压,泄压舱室内爆炸载荷主要包含多峰值、强度逐渐衰弱的冲击波和持续时间较长、呈指数衰减规律的准静态超压。

根据测点 No. 1 和 No. 2 的对比可知,测点的位置对爆炸前期的爆炸波超压峰值有较大的影响,而对形成的准静态超压时间历程几乎没有影响,说明舱室内部爆炸形成的准静态超压时间历程在空间上是近似均匀的。

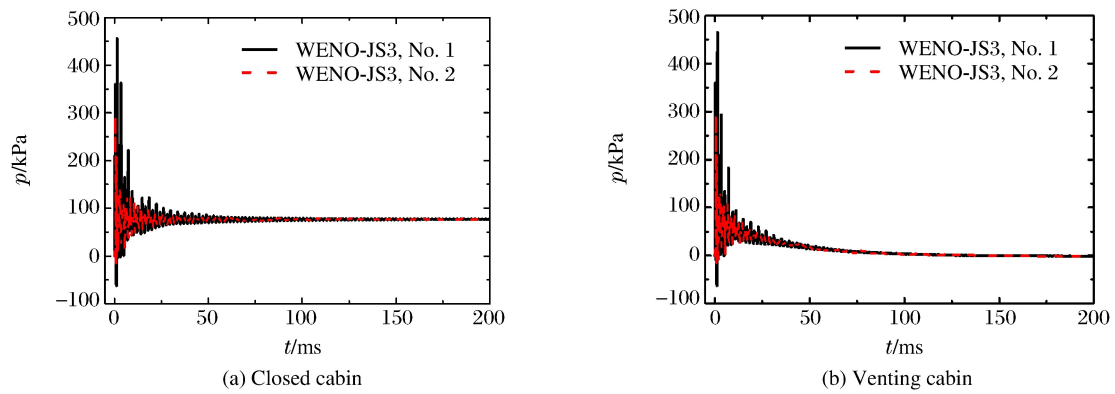


图 5 舱室内爆炸超压时间历程曲线

Fig. 5 Overpressure histories of all the gauging points inside the cabin

4.3 封闭舱室内爆炸载荷比较

选取壁面典型测点 No. 1 对爆炸载荷进行输出,探讨不同精度 WENO 格式对封闭舱室内气云爆炸载荷的影响规律。

通过对比图 6(a)~图 6(d)发现,高精度 WENO 格式能分辨出更精细的爆炸载荷特征,即高精度 WENO 格式具有更低的耗散特性和更高的分辨率。根据图 7 可知,高精度 WENO 格式对于激波间断具有更低的耗散特性,给出更陡峭的激波峰值。然而,不同精度 WENO 格式对最终形成的准静态超压峰值影响较小,如图 7(a)中的绿色粗实线所示。

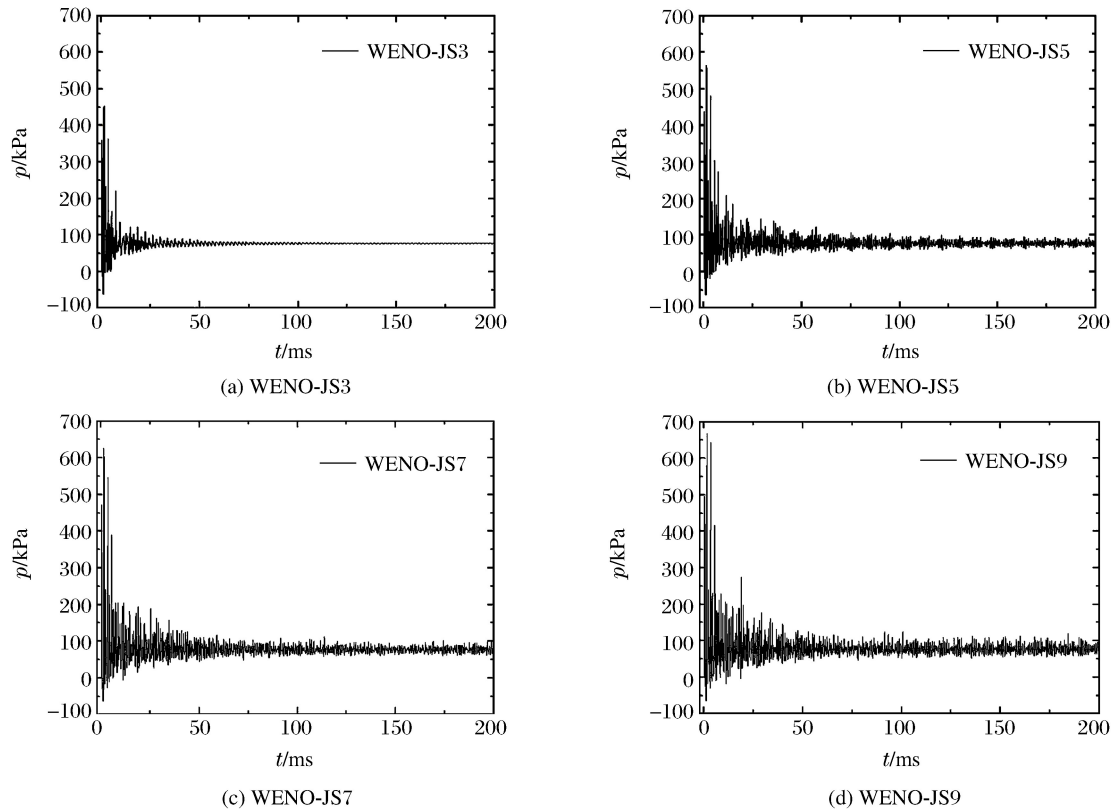


图 6 不同精度 WENO 格式下封闭舱室内气云爆炸测点 No. 1 处的超压时间历程曲线

Fig. 6 Overpressure histories at gauging point No. 1 for different schemes in closed cabin

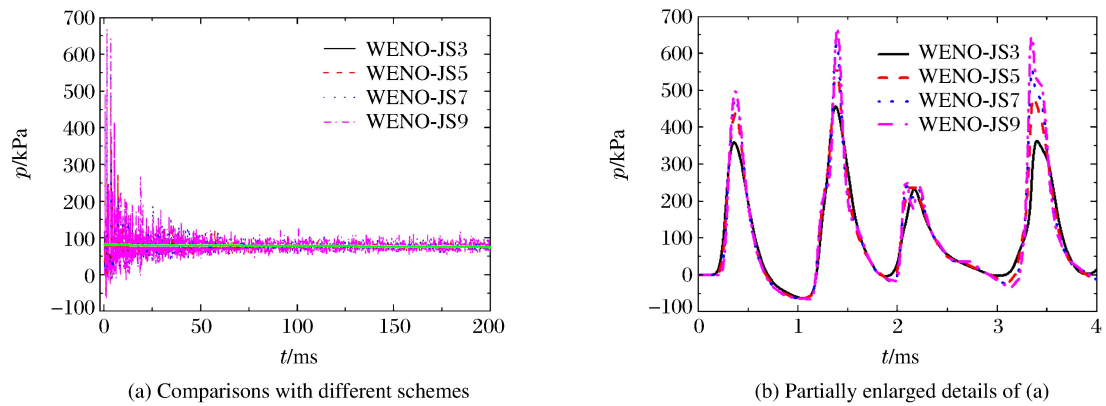


图7 不同精度 WENO 格式下封闭舱室内气云爆炸测点 No. 1 处的超压比较及其局部放大图
Fig. 7 Comparison of overpressure at gauging point No. 1 for different schemes in closed cabin and its partially enlarged details

4.4 泄压舱室内爆炸载荷比较

选取壁面典型测点 No. 1 对爆炸载荷进行输出,探讨不同精度 WENO 格式对泄压舱室内爆炸载荷的影响规律。

通过对比图 8(a)~图 8(d)发现,高精度 WENO 格式能分辨出更精细的爆炸载荷特征,即高精度 WENO 格式具有更低的耗散特性和更高的分辨率。根据图 9 可知,高精度 WENO 格式对于激波间断具有更低的耗散特性,给出更陡峭的激波峰值。然而,不同精度 WENO 格式对逐渐形成的、呈现指数衰减规律的准静态超压影响较小,如图 9(a)中的绿色粗实线所示。

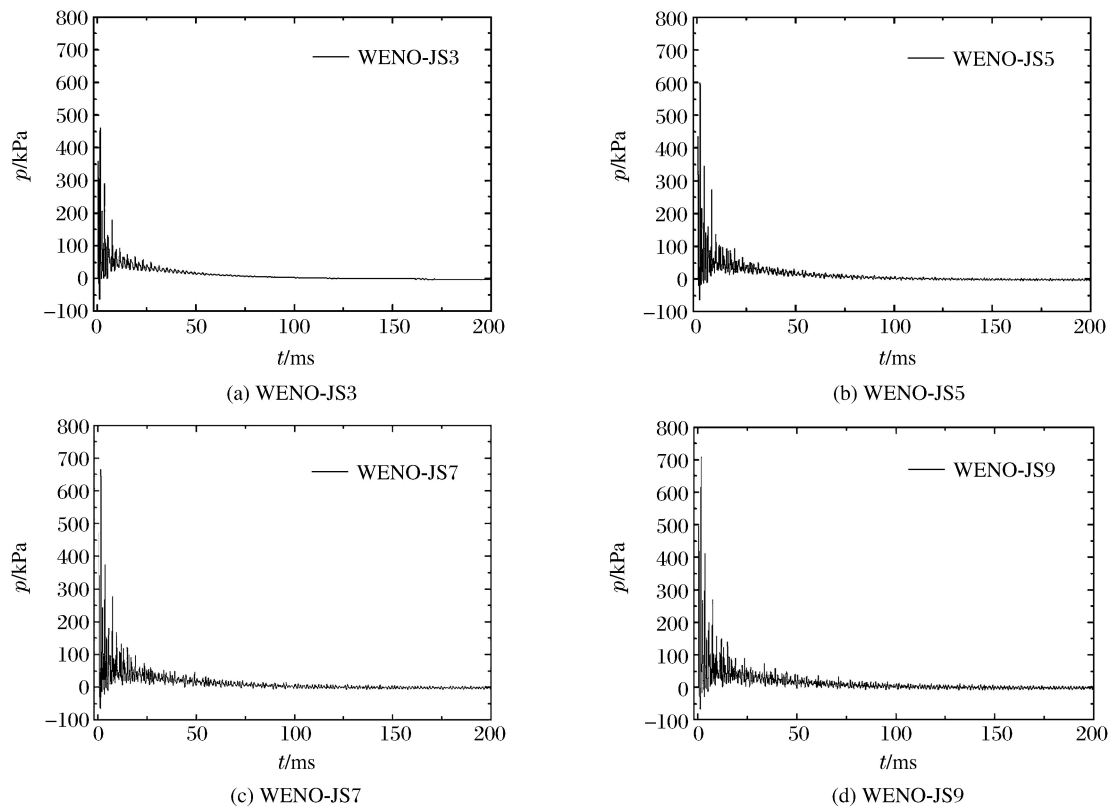


图8 不同精度 WENO 格式下泄压舱室内气云爆炸测点 No. 1 处的超压时间历程曲线
Fig. 8 Overpressure histories at gauging point No. 1 for different schemes in venting cabin

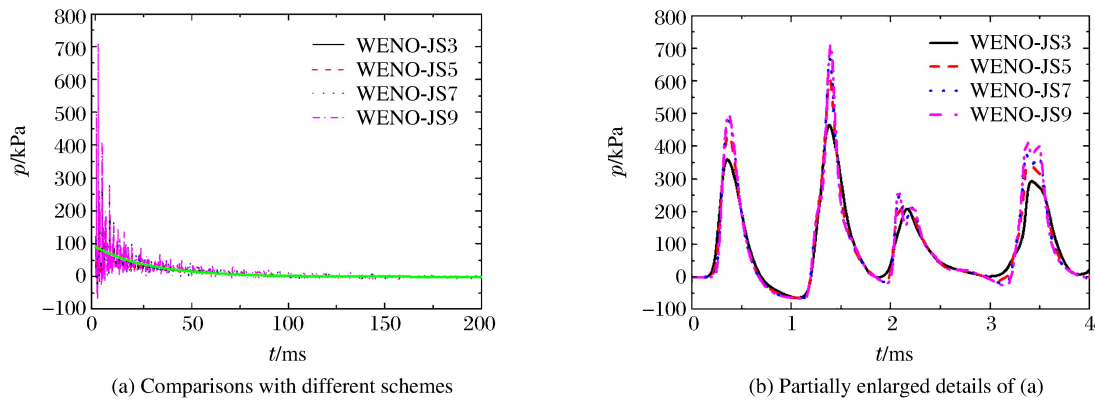


图 9 不同精度 WENO 格式下泄压舱室内气云爆炸测点 No. 1 处的超压比较及其局部放大图
Fig. 9 Comparison of overpressure at gauging point No. 1 for different schemes in venting cabin and its partially enlarged details

5 结 论

基于自主开发的高精度舱室内部气云爆炸三维数值计算程序研究了 WENO 格式精度对舱室内部气云爆炸载荷的影响规律,主要得到以下结论。

(1) 高精度 WENO 格式对含激波间断流场具有更低的耗散特性和更高的分辨率。

(2) 舱室内部气云爆炸载荷主要包含多峰值的瞬态冲击波和持续时间较长的准静态超压;封闭舱室内爆炸形成峰值保持不变的准静态超压,泄压舱室内爆炸形成呈指数衰减的准静态超压。

(3) WENO 格式精度对舱室内爆炸冲击波载荷影响较大,高精度 WENO 格式给出更陡峭的激波峰值,而对舱室内爆炸准静态超压载荷的影响较小。

参考文献:

- [1] 徐胜利,汤明钧,糜仲春. 近地空中气云爆炸波遇地面反射的研究 [J]. 爆炸与冲击,1996,16(4):298-304.
XU S L, TANG M J, MI Z C. Studies on reflection of blast waves for symmetric cloud explosion close to the ground [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(4): 298-304.
- [2] 徐胜利,彭金华. 多爆源云雾爆炸波相互作用的三维数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 1-6.
XU S L, PENG J H. Three dimensional computaion on the interaction of blast waves generated by multi-sources of FAE [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(1): 1-6.
- [3] 岳鹏涛,彭金华. FAE 爆炸波对地面目标作用的三维数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 97-102.
YUE P T, PENG J H. 3D numerical simulations on the interaction between FAE blast waves and ground targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 97-102.
- [4] 陈明生,李建平,白春华. 非圆截面云雾爆炸超压场数值模拟 [J]. 含能材料, 2015, 23(5): 484-489.
CHEN M S, LI J P, BAI C H. Simulation of explosion overpressure distribution for non-circular cross-section cloud [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(5): 484-489.
- [5] LIU X D, OSHER S, CHAN T. Weighted essentially non-oscillatory schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 115(1): 200-212.
- [6] JIANG G S, SHU C W. Efficient implementation of weighted ENO schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126(1): 202-202.
- [7] SHU C W. Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws [M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998: 325-432.

- [8] SHU C W. High order weighted essentially nonoscillatory schemes for convection dominated problems [J]. Siam Review, 2009, 51(1): 82-126.
- [9] BALSARA D S, SHU C W. Monotonicity preserving weighted essentially non-oscillatory schemes with increasingly high order of accuracy [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 160(2): 405-452.
- [10] SHU C W, OSHER S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 77(2): 439-471.
- [11] SOD G A. A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws [J]. Journal of Computational Physics, 1978, 27(1): 1-31.
- [12] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
ZHAO H Y. Principle of gas and dust explosion [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
- [13] 王建, 段吉员, 黄文斌, 等. 乙炔-氧气混合气体强爆轰参数的理论估算与实验研究 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(4): 365-369.
WANG J, DUAN J Y, HUANG W B, et al. Calculation and experiment of overdriven detonation parameters of $C_2H_2-O_2$ mixture [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(4): 365-369.
- [14] 徐维铮, 吴卫国. 泄压口大小对约束空间爆炸准静态超压载荷的影响规律 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(5): 619-628.
XU W Z, WU W G. Effects of size of venting holes on the characteristics of quasi-static overpressure in confined space [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(5): 619-628.

Comparisons of Different Precision WENO Schemes for Simulating Blast Load of Gas Cloud Explosion inside a Cabin

XU Weizheng^{1,2}, WU Weiguo^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Departments of Naval Architecture, Ocean and Structural Engineering, School of Transportation,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In the present work, we developed a high-resolution 3D code based on the FORTRAN platform to investigate the influence of accuracy of WENO schemes on the blast load generated by gas cloud explosion inside a cabin. The 3th, 5th, 7th and 9th WENO finite difference schemes were implemented in the code to capture the shock waves. Several one dimensional Riemann problems such as Sod shock tube and shock-entropy wave interaction were simulated to investigate the computing performance of the schemes preliminarily and validate the developed code. Then, the validated code was used to conduct the simulation of the gas cloud explosion inside a closed cabin and a venting cabin and the influence of the accuracy of WENO schemes on the blast load was discussed as well. The researches indicate that the blast load generated by gas cloud explosion inside the cabin mainly contains multiple peaks shock waves and long duration quasi-static overpressure. The accuracy of WENO schemes has considerable influence on the blast waves and higher order scheme gives sharper pressure peaks, whereas it has much less influence on the quasi-static overpressure.

Keywords: WENO scheme; high precision; low dissipation; gas cloud inside the cabin; blast load