

灭火弹气体发生器内流场数值模拟

李云峰^{1,2}, 邓康清^{1,2}, 鲁锐华², 秦沛文², 郭春亮², 闫立帆², 黄昌龙²

(1. 中国航天科技集团有限公司 湖北航天化学技术研究所

航天化学动力技术重点实验室, 湖北 襄阳 441003;

2. 中国航天科技集团有限公司 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

摘 要: 为了提高灭火弹灭火性能, 优化灭火弹结构设计, 利用 Fluent 对灭火弹气体发生器内流场进行仿真计算, 通过改变气体发生器开孔情况及发生剂参数调整弹内流场分布。计算结果显示: 当首孔距离等于 15 倍气体发生器排气孔孔径时, 灭火弹壳体近壁面存在 5 个大小相近且数值较高的压强峰, 压力分布最利于灭火弹壳体预制孔槽破裂; 灭火弹内气体发生器上排气孔对称性越强, 发生器内压力分布越均匀。经过试验验证, 仿真所得压力-时间曲线与试验测得数据吻合良好, 说明该模型适用于灭火弹内流场仿真。

关 键 词: 灭火弹; 气体发生器; 内流场; 数值模拟; 排气孔分布

中图分类号: V435

文献标志码: A

Numerical simulation of internal flow field in gas generator of fire extinguishing bomb

LI Yunfeng^{1,2}, DENG Kangqing^{1,2}, LU Ruihua², QIN Peiwen²,

GUO Chunliang², YAN Lifan², HUANG Changlong²

(1. Key Laboratory of Aerospace Chemical Power Technology,

Hubei Institute of Aerospace Chemical Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xiangyang Hubei 441003, China;

2. Hubei Institute of Aerospace Chemistry Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xiangyang Hubei 441003, China)

Abstract: In order to improve the fire-fighting performance and optimize the structure design of fire extinguishing bombs, Fluent was used to simulate the flow field in the gas generator of fire extinguishing bombs, and the flow field distribution in the bomb was adjusted by changing the opening of the gas generator and the parameters of the propellant. The calculation results showed that when the first hole distance was equal to 15 times the gas generator exhaust hole diameter, there were 5 pressure peaks of similar size and higher value on the near wall surface of the fire extinguishing bomb shell, and the pressure distribution was most conducive to the rupture of the prefabricated hole slot of the fire extinguishing bomb shell; the stronger symmetry of the exhaust holes on the gas generator in the fire extinguishing bomb indicated more uniform pressure distribution in the generator. The experimental verification showed that the pressure-time curve obtained by the simulation was in good agreement with the measured data, indicating that

收稿日期: 2020-09-13

作者简介: 李云峰(1995—), 男, 硕士生, 灭火弹设计与仿真。E-mail: fibonacci2037@163.com

引用格式: 李云峰, 邓康清, 鲁锐华, 等. 灭火弹气体发生器内流场数值模拟[J]. 航空动力学报, 2021, 36(9): 1942-1950. LI Yunfeng, DENG Kangqing, LU Ruihua, et al. Numerical simulation of internal flow field in gas generator of fire extinguishing bomb[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(9): 1942-1950.

the model is suitable for simulation of the internal flow field of the fire extinguishing bomb.

Key words: fire extinguishing bomb; gas generator; internal flow field; numerical simulation; vent distribution

现有灭火手段逐渐无法适应不断增多的各类消防人员难以接近的火灾,如高层建筑火灾,森林火灾等。灭火弹因其响应速度快,不受地形限制,灭火能力强,可远程作业等优点正逐渐改变灭火方案。

现有灭火弹大多通过引爆中心爆管中的炸药产生冲击波抛撒灭火剂,参考文献[1-3]分别使用TNT(三硝基甲苯),二元炸药等。现有对于灭火弹的研究主要是外弹道的设计^[4-6],或者是灭火剂的抛洒效应^[7-9]及其发射装置性能^[10-12],而对于灭火弹内流场则研究较少。本研究将某型号低温型复合固体推进剂(下文简称气体发生剂)置于气体发生器中作为灭火剂驱动源,类似于固体火箭发动机。相较于炸药,其能量释放更为平稳安全。由于Fluent标准界面及功能无法满足所有计算需求,当计算任务较为复杂时,会利用用户自定义函数(user defined function,UDF)接口对其进行二次开发,参考文献[13]中,作者利用UDF编写边界条件及源项条件,计算双脉冲固体火箭发动机分离装置的冷流冲击过程,监测点压力与实验数据吻合良好。参考文献[14]中,作者采用UDF模拟铝燃烧模型中的凝聚相与气相之间的耦合过程,其压力波动结果与验证用例在定量与定性上表现出良好的一致性。本文利用流体仿真软件Fluent对灭火弹气体发生器内流场进行数值模拟,得到点火过程灭火弹内升压曲线与压力分布情况,并设计试验对仿真计算进行验证,确认仿真结果的准确性之后再利用软件对不同设计状态下灭火弹工作过程进行分析对比,为该类灭火弹设计以及相关的优化研究提供理论依据。

1 计算模型

1.1 物理模型及基本假设

灭火弹工作原理为:灭火弹收到点火信号后引燃位于灭火弹尾部的点火药,生成的高温气流进入气体发生器并点燃管内的气体发生剂,气体发生剂燃烧产生高温高压气体从气体发生器上的排气孔喷出,在弹内积聚压力压裂弹体,灭火剂在高压气体驱动下弥散到灭火空间,实现灭火效果。灭火弹结构简图见图1,灭火弹弹体结构参数如

表1所示。

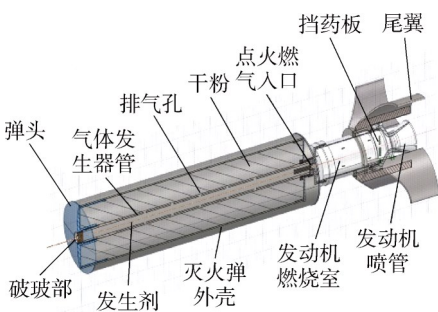


图1 灭火弹结构简图

Fig.1 Structural diagram of fire extinguishing bomb

表 1 灭火弹弹体模型参数

Table 1 Parameters of fire extinguishing bomb

参数	数值
灭火弹弹径/mm	120
弹体长度/mm	350
发生器管径/mm	20
发生器壁厚/mm	2
排气孔孔径/mm	5
排气孔总数	40

针对所研究的灭火弹内流场,采用SST(shear stress transport) $k-\omega$ 双方程湍流模型,压力-速度耦合方式采用PISO(pressure-implicit with splitting of operators)算法。将点火药作为质量流率入口,壳体作为壁面,无出口,将气体发生器管内气体发生剂作为源项加质到内流场而不考虑其具体的化学反应。为简化计算,对物理模型作出如下假设:

- 1) 点火燃气与发生剂燃烧产物看作可压缩理想气体,具有相同的理化参数,其状态方程 $\rho=(p_{op}+p)/(RT/M_w)$,其中 p_{op} 为参考压力, p 为Fluent计算的当地表压, R 为通用气体常数, M_w 为气体的相对分子质量, T 为当地温度。
- 2) 忽略燃气对壁面及气体发生剂药柱的对流传热与热辐射。
- 3) 气体发生剂采用固相点火准则,即当气体发生剂表面达着火温度时认为该处点火。

4) 假设发生剂燃烧加质在发生剂表面 0.1 mm 的气相薄层中进行, 由于发生剂药条体积较小, 不考虑燃面推移。

1.2 数学模型

1) 入口质量流率

将点火器点火燃气出口作为质量流率入口^[15], 采用如下简化模型模拟:

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{ty}{t_1} & t \leq t_1 \\ \frac{(t_2 - t)y}{t_2 - t_1} & 0 < t \leq t_2 \\ 0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $y = 2m_{ig}/t_2$, $m_{ig} = 0.2$ g, m_{ig} 为点火药总质量, 点火燃气温度 $T_{ig} = 2500$ K, 通过 UDF 宏函数 DEFINE_PROFILE 定义入口质量流率与时间关系。

2) 发生剂燃速

采用指数定律, $r = ap^n$, 其中 $a = 1.3668 \times 10^{-4}$, $n = 0.35$ 。

3) 换热模型

发生剂表面温度与点火燃气加热时间的关系^[16]

$$T_s = \frac{h\sqrt{t}T_g + 0.5\sqrt{\pi\rho_p c_p k}T_0}{0.5\sqrt{\pi\rho_p c_p k} + h\sqrt{t}} \quad (2)$$

其中 T_s 为发生剂表面温度, h 为表面传热系数, T_g 为点火燃气温度, ρ_p 为发生剂密度, c_p 为燃气比定压热容, T_0 为发生剂的初始温度, t 为点火燃气与发生剂表面的接触时间。

4) 燃气加质源项

通过 Fluent 中的 UDF 接口读取发生剂表面气相加质层单元格温度, 若小于发生剂着火温度, 则认为燃气未进行加质, 即质量源项, 动量源项, 能量源项均为零; 若大于发生剂着火温度, 认为此处已点燃, 在该处添加一层气相加质层网格单元作为燃面, 并垂直于燃面向流场加质, 各源项如下^[17]:

质量源项

$$\dot{m} = \rho_p r A_{bi} / V_{bi} \quad (3)$$

动量源项

$$\dot{m}v = \rho_p r A_{bi} v / V_{bi} \quad (4)$$

能量源项

$$\dot{m}h = \rho_p r A_{bi} c_p T_f / V_{bi} \quad (5)$$

其中 $\dot{m}$ 为发生剂加质的质量流率, ρ_p 为发生剂密度, r 为发生剂燃速, A_{bi} 、 V_{bi} 分别为气相加质层网

格单元的表面积和体积, v 为燃气径向加质速度, 根据质量守恒 $v = -r\rho_p/\rho_g$, ρ_g 为燃气密度, T_f 为发生剂绝热燃烧温度。

1.3 计算模型及网格划分

根据上节对气体发生器物理模型的假设和简化, 建立气体发生器及灭火弹弹体计算模型, 将灭火弹壳体作为内流场的外壁面条件, 并利用模型的对称性建立 1/8 模型进行计算, 利用 ICEM-CFD (integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics) 对模型划分结构网格, 网格单元总数为 157 913, 计算域网格划分见图 2。

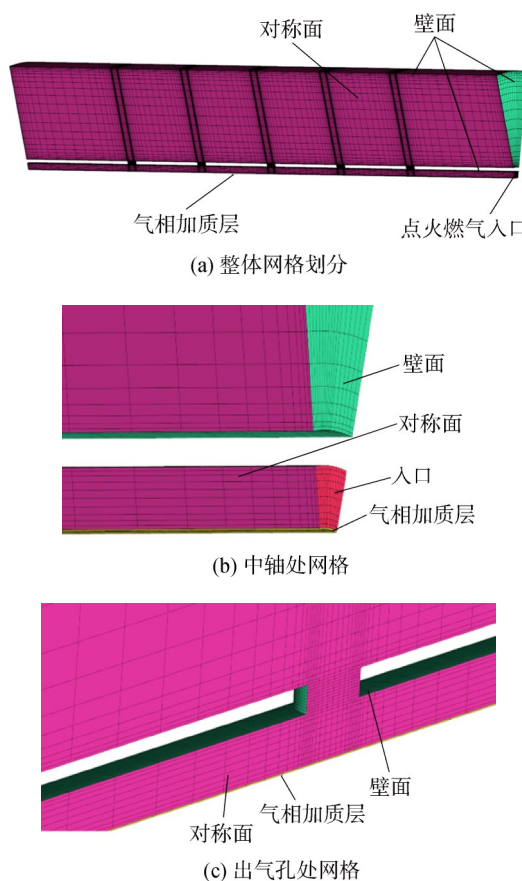


图2 计算域网格

Fig.2 Computational domain grid

2 数值模拟结果及分析

根据上述模型及相关条件设置, 对灭火弹内流场进行数值模拟求解, 得到如下计算结果及相应结论。

2.1 灭火弹气体发生器点火瞬态过程分析

以首排开孔到入口距离 7.5 cm 为例, 分析点

火过程,其温度和压力云图如图3。 $t=0.5$ ms时,点火燃气进入气体发生器内并成功点火,发生剂被点燃之后产生的高温燃气垂直于燃面加质进入

流场,与点火燃气混合后向下游流动,并继续点燃下游发生剂,点火燃气及点燃的发生剂不断产生压缩波。

$t=5$ ms时,根据温度云图,管内发生剂已全部点燃,生成的燃气通过管上排气孔向灭火弹内扩散,并发生表面传热,仅发生器排气孔附近空气被加热。灭火弹内压力还未受大幅扰动,保持在0.1 MPa。发生器管内原有冷空气被压缩到发生器尾端(左)附近,且由于尾端发生剂点燃产生高温燃气形成短暂高压区,又将冷空气略向右压缩。

$t=30$ ms时,发生剂燃烧产生的高温燃气继续向灭火弹内扩散,将灭火弹内空气加热至600 K以上温度,同时灭火弹内压力相应提升至0.5 MPa以上,达到壳体相应爆破压强后,壳体碎裂,高温高压气体驱动灭火剂向弹外抛洒,实现灭火效果。

2.2 首孔距离对灭火弹内压力场的影响

考虑到制造工艺、安全、重量以及工作原理等因素,选择表面覆膜的瓦楞纸作为壳体材质,厚度为1.5 mm。为了保证灭火剂抛撒均匀,在壳体压力峰值处预制应力集中孔槽。外壳在发生器的作用下,会在不超过0.5 MPa压力的作用下撕裂孔槽。这就要求各预置孔槽处压力大小相近,且峰值较高。

试验中发现,气体发生器结构对灭火弹灭火剂弥散性能有很大影响,其中气体发生器首排孔到点火燃气入口的距离 L (后文称为首孔距离)影响较大^[18]。

若首孔距离过小,可能导致提前泄压而造成初始压力不足;若首孔距离过大,则容易造成泄压滞后,近点火端产生高压,不利于安全点火。设置4组首孔距离分别为 $5d$ 、 $10d$ 、 $15d$ 、 $20d$ 的灭火弹,其他条件保持不变,其中 d 为气体发生器上排气孔孔径,分别计算灭火弹壳体近壁面上压力轴向分布。如图4,上图为灭火弹壳体近壁面上压力轴向分布曲线,下图为灭火弹壳体近壁面压力分布云图。

由图4可知,仅改变首排孔到入口的距离不仅能影响灭火弹内压力分布情况,而且对压力峰值影响较大。首孔距离为 $10d$ 的灭火弹壳体附近压力峰值仅为401 375 Pa,而首孔距离为 $5d$ 的灭火弹壳体附近压力峰值为461 836 Pa,压力峰值提升高达15.06%。同时可以发现,尽管首孔距离

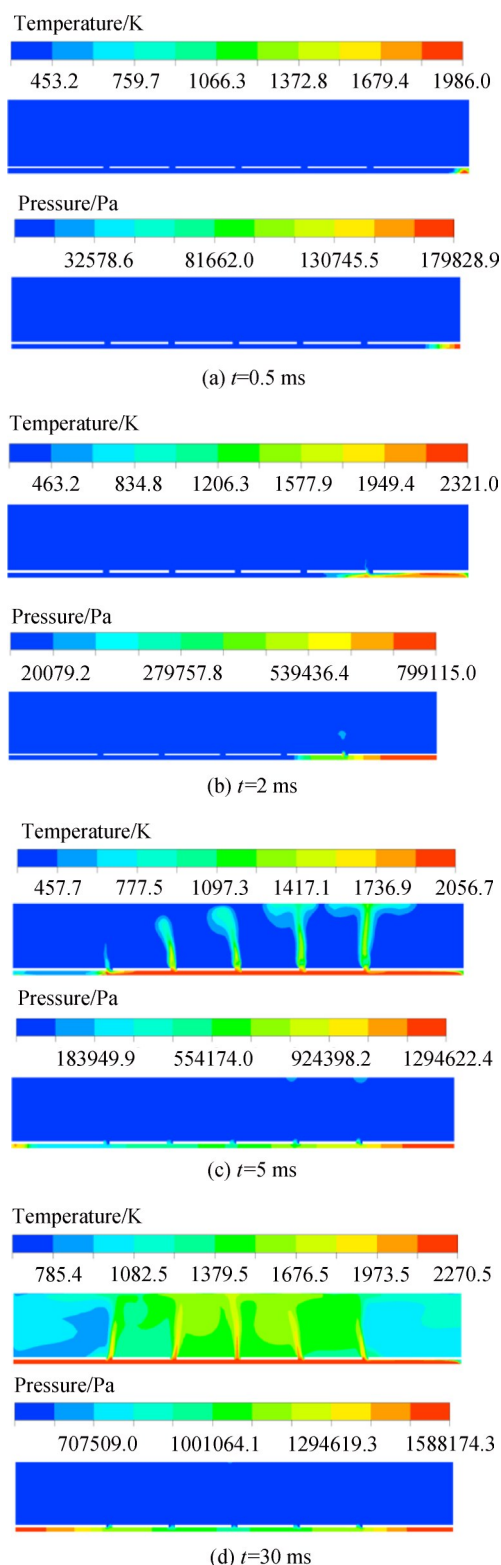
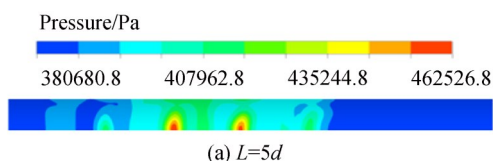
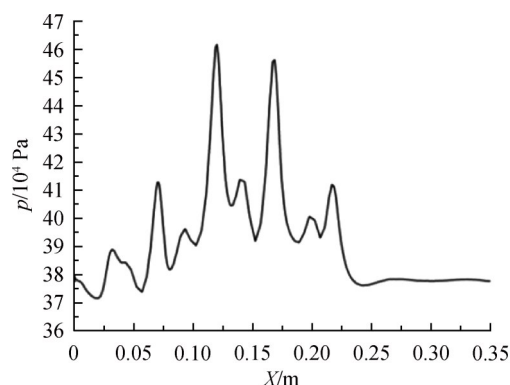


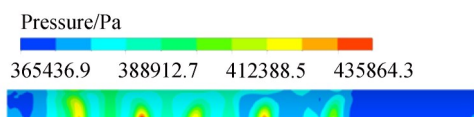
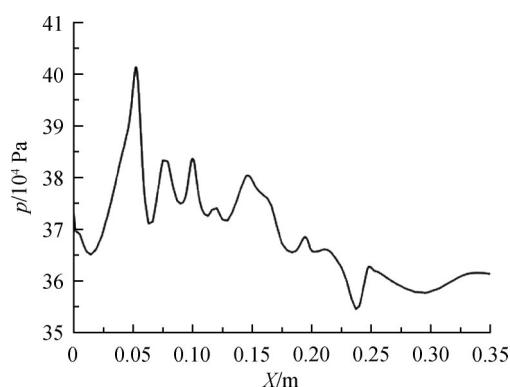
图3 不同时刻对称面温度及压力云图

Fig.3 Temperature and pressure contours of symmetry at different time

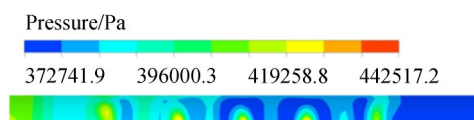
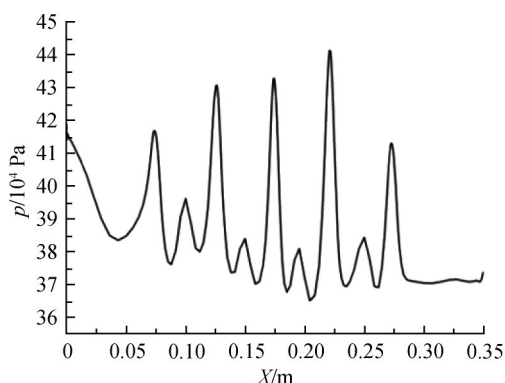
为 $5d$ 的灭火弹压力峰值最高,但分布极其不均匀。近点火端与尾端出现较长低压段,这对于灭



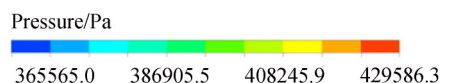
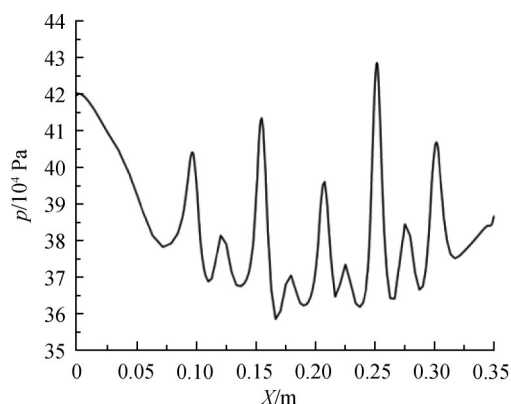
(a) $L=5d$



(b) $L=10d$



(c) $L=15d$



(d) $L=20d$

图4 不同首孔距离壳体近壁面压力轴向分布

Fig.4 Axial pressure distribution near the shell wall under different distance to first hole

火剂抛撒较为不利:为了保证灭火剂抛撒的均匀性,通常会在灭火弹壳体设置均匀分布的应力槽。当高压段达到壳体爆破压强后,该处应力槽会率先破裂导致提早泄压,低压段应力槽不易破裂,使灭火剂无法均匀抛撒,降低其灭火性能。上述多个算例中,首孔距离为 $15d$ 的灭火弹多个压强峰压强大小相近,且压力峰值较高。最利于灭火弹壳体预制孔槽的破裂。

2.3 排气孔结构对称性对灭火弹内压力场的影响

除首孔距离外,排气孔结构是否对称对管内外气压影响较大。点火燃气进入气体发生器时首先形成一个初始压力梯度。随着发生剂被点燃后加质速率的提高,压力梯度不断增大,越来越强的压缩波向下游传播并在排气孔及尾端反射,与之前的压缩波叠加,形成复杂的波系^[19]。设置4组首孔距离 L 与末孔距离 L_e 比值分别为3、2、1、0.5的灭火弹,其中末孔距离 L_e 为最后一排孔到发生器尾端的距离,其他条件保持不变,分别计算气体发生器内压力轴向分布,如图5。

根据四组结果分析,排气孔分布的不对称导致压力分布的不对称。当 $L_e=3L$ 时,管内压力峰值达到了2.1 MPa,而当 $L_e=2L$ 或 $L_e=0.5L$ 时,压力峰值均为1.8 MPa。当结构对称,即 $L_e=L$ 时,压力峰值降到1.4 MPa,且分布更为均匀。这说明灭火弹内气体发生器上对称的孔系结构有助于

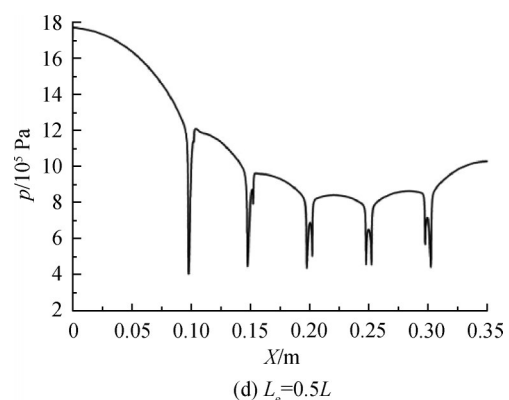
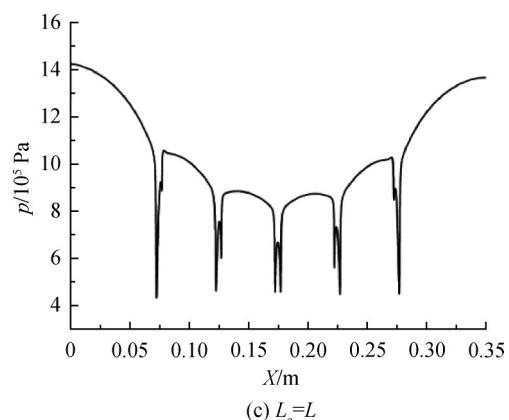
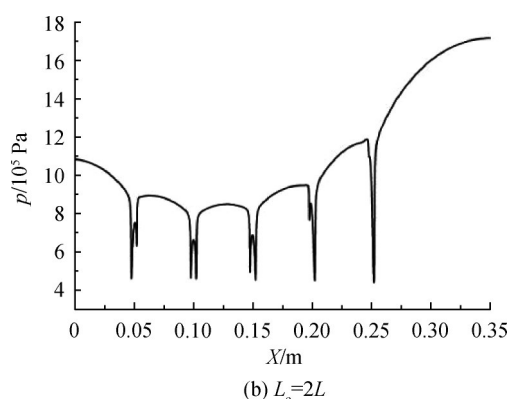
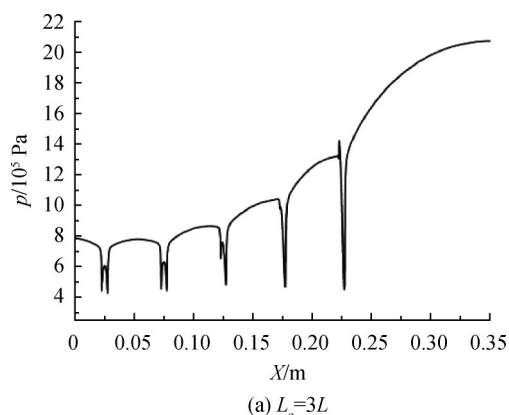


图5 不同 L_c/L 分布时气体发生器管内压力分布
Fig.5 Pressure distribution in gas generator under different L_c/L

压缩波叠加后形成对称的波系结构,更利于管内外压力的均匀分布与发生剂的安全点火。

2.4 发生剂绝热燃烧温度对灭火弹内压力、温度场影响

除了发生器结构,发生剂性能对灭火弹内流场影响也比较大,如绝热燃烧温度。绝热燃烧温度是燃料在绝热条件下实现完全燃烧时,燃烧产物所能达到的温度。设置3组不同绝热燃烧温度 T_i 的发生剂进行对比,分别为 1 500、1 800、2 100 K,灭火弹壳体近壁面上压力温度轴向分布如图6所示。

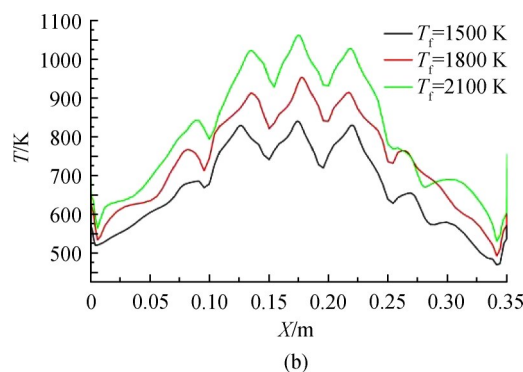
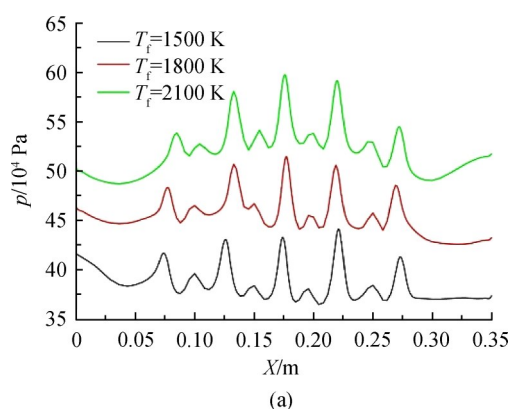


图6 不同绝热燃烧温度时压力温度分布
Fig.6 Temperature and pressure distribution under different adiabatic combustion temperature

从图6可以看出,发生剂绝热燃烧温度每提高 300 K 会使壳体近壁面内流场压力整体提高约 0.05 MPa,对温度场的影响则不太均衡,最大处温度提升约 100 K。提升绝热燃烧温度一方面直接导致内流场温度上升,根据理想气体状态方程,其压力随之升高。另一方面,根据燃速指数定律,发生剂燃速随压力升高而升高,燃气加质速率加快,内流场压力升高。从温度分布曲线可以看出,绝热燃烧温度为 2 100 K 的发生剂与绝热燃烧温度为 1 500 K 的发生剂相比,差异主要

体现在最高值,最低值十分接近,而弹内流场传热主要依靠对流传热,这说明仅改变绝热燃烧温度对流场的流动情况影响较小。另外,温度和压力变化主要是各位置绝对数值的提升,而轴向上相对分布变化不明显也说明流场流动受影响较小。

2.5 发生剂燃速对灭火弹内压力、温度场影响

发生剂燃速直接影响燃气加质速率进而改变弹内流场压力与温度分布。设置3组不同燃速的发生剂进行对比,3组发生剂在7 MPa下的燃速 r 分别为24、34、44 mm/s,灭火弹壳体近壁面上压力温度轴向分布如图7所示。

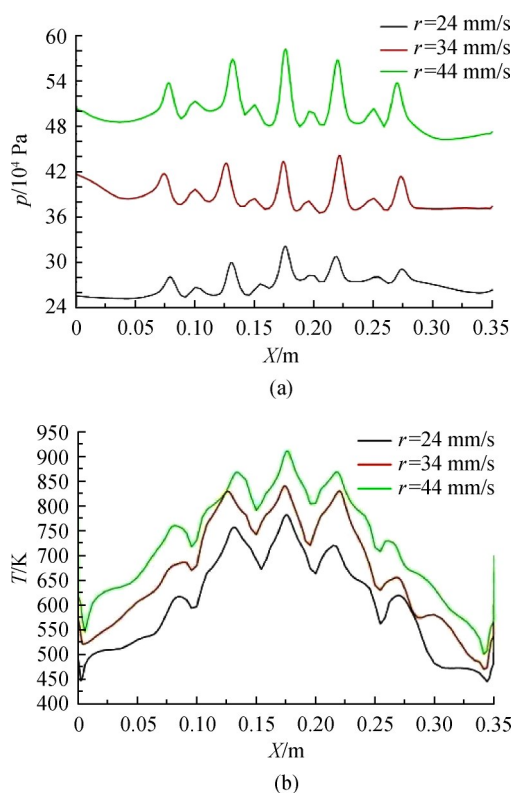


图7 不同燃速时压力温度分布

Fig.7 Temperature and pressure distribution under different burning rate

从图7可以看出,7 MPa下燃速每提高10 mm/s,会使壳体近壁面内流场压力整体提高约0.13 MPa,与改变绝热燃烧温度不同的是,提高发生剂燃速使得壳体近壁面温度场也较为均衡的整体升高,最高约100 K。提高发生剂燃速直接加快发生剂加质速率,进入流场的燃气量变大,压强随之增大,根据理想气体状态方程,温度也随之升高。根据压强分布图,燃速越高的发生剂在灭火弹壳体壁面附近最高压强与最低压强的压差越

大,根据温度分布图,燃速越高的发生剂在灭火弹壳体壁面附近最低温度越高,这说明改变发生剂燃速对于内流场流动影响较大。

3 灭火弹点火验证试验

为了验证仿真计算结果的准确性,在数值模拟的基础上设计了灭火弹的地面静止点火试验,试验装置(灭火弹引爆后),如图8。得到气体发生器管内尾端中心点压力-时间曲线,并与仿真结果(选择 $L=15d$ 且 $L_e=L$ 的发生器,发生剂绝热燃烧温度为1500 K,7 MPa燃速为34 mm/s)进行对比,如图9。



图8 实验装置

Fig.8 Experimental device

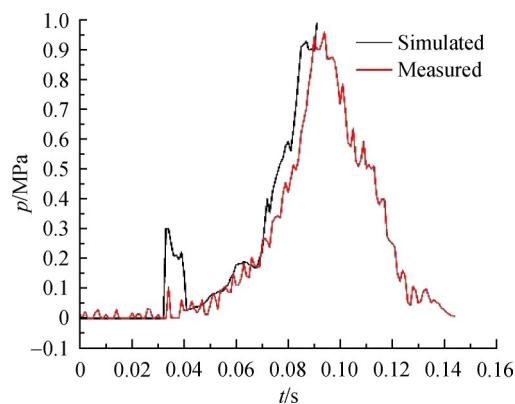


图9 仿真与实测压力-时间曲线

Fig.9 Simulated and measured pressure-time curves

从图9中可以看出,仿真所得到的压力-时间曲线在除0.03 s时出现一个高于试验值的压力峰及压力-时间曲线在时间上整体前移外,与试验测得的压力-时间曲线吻合良好。仿真结果曲线整体前移可能是由于点火判定温度低于实际着火温度,使得仿真中的点火提前。仿真结果中0.03 s时出现较高压力峰的原因可能是仿真中使用的点火药量大于实际点火药量,导致初始点火压力峰较高。

4 结 论

本文通过对灭火弹工作瞬态过程进行仿真计算,得到以下结论:

1) 本文创新性地利用Fluent的源项功能模拟灭火弹内发生剂燃烧加质的过程,建立了将固体火箭推进剂作为驱动源的灭火弹瞬态点火计算模型。将计算结果与试验结果对比,吻合良好,说明采用的计算模型及求解方法合理,计算结果能为后续的灭火弹设计提供参考。

2) 改变首孔位置对灭火弹内流场压力峰值与压力分布影响较大,首孔距离 $L=15d$ 时最利于灭火弹壳体预制孔槽的破裂;首孔距离与末孔距离相等时压力分布更加均匀,即发生器排气孔的对称结构有利于形成均匀的压力场。发生剂绝热燃烧温度每提高300 K,会使壳体近壁面压力提高约0.05 MPa。7 MPa下燃速每提高10 mm/s,会使壳体近壁面压力提高约0.13 MPa。

参考文献:

- [1] 刘耀鹏,王克印,黄勇,等.灭火弹爆炸抛撒效应数值模拟与分析[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2013,29(1):36-41.
LIU Yaopeng, WANG Keyin, HUANG Yong, et al. Numerical simulation and analysis of the effect of fire extinguishing bomb explosion[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 29(1):36-41. (in Chinese)
- [2] 牛兴林,张春阳,孟春祥.迫击炮森林灭火弹适用性及药剂分散技术[J].消防科学与技术,2012,31(2):177-179.
NIU Xinglin, ZHANG Chunyang, MENG Chunxiang. Applicability of mortar forest fire extinguishing bombs and agent dispersion technology[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(2):177-179. (in Chinese)
- [3] 吴长龙.森林灭火航弹二元中心爆管研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
WU Changlong. Research on two explosive tube in aerial bomb for forest fire fighting[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [4] 赵浩合,武建德,王紫民.一种新型迫击炮灭火弹的外弹道仿真研究[J].消防科学与技术,2016,35(4):546-548.
ZHAO Haohe, WU Jiande, WANG Zimin. Study on the exterior ballistic simulation of a new type of mortar fire extinguisher[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(4):546-548. (in Chinese)
- [5] 王紫民,武建德.一种新型森林灭火弹的仿真设计[J].消防科学与技术,2015,34(5):623-625.
WANG Zimin, WU Jiande. Simulation design of a new type of forest fire extinguishing bomb[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(5):623-625. (in Chinese)
- [6] 陈吉潮,王克印,刘耀鹏.基于MATLAB的某一森林灭火弹外弹道仿真与运用[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2012,28(1):53-58.
CHEN Jichao, WANG Keyin, LIU Yaopeng. Simulation and application of the exterior ballistic of a forest fire fighting bomb based on MATLAB[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 28(1):53-58. (in Chinese)
- [7] 韩宝成,雷红飞,徐豫新,等.液体灭火弹动态抛撒区域工程计算方法[J].含能材料,2011,19(3):310-314.
HAN Baocheng, LEI Hongfei, XU Yuxin, et al. Computational model of dynamic dispersed area of liquid fire-extinguishing ammunition[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(3):310-314. (in Chinese)
- [8] 陈玉昆,王克印,黄海英,等.中心装药灭火弹结构与爆轰抛撒关系分析[J].消防科学与技术,2014,33(8):946-948.
CHEN Yunkun, WANG Keyin, HUANG Haiying, et al. Analysis of the relationship between the structure of the central charge fire extinguishing bomb and the detonation and dispersal[J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(8):946-948. (in Chinese)
- [9] 朱聪,梁增友,邓德志,等.装药结构对灭火弹灭火剂抛撒影响研究[J].弹箭与制导学报,2020,40(4):85-88.
ZHU Cong, LIANG Zengyou, DENG Dezhi, et al. The influence of charge structure on detonation of fire extinguishing agent[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(4):85-88. (in Chinese)
- [10] 刘刚.气动发射式高层建筑灭火炮研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
LIU Gang. Research on pneumatic fire-extinguish cannon for high-rise building[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [11] 张亚东,熊敏,董明洋,等.电磁弹射灭火弹消防系统研究[J].强激光与粒子束,2020,32(2):127-132.
ZHANG Yadong, XIONG Min, DONG Mingyang, et al. Research on the fire-fighting system of electromagnetic ejection fire extinguishing bomb[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(2):127-132. (in Chinese)
- [12] 姚磊.基于PAC的航弹投放系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
YAO Lei. Research on aerial bomb delivery system based on PAC[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [13] LIU Wanli, CHEN Xiong, LI Yingkun. Numerical simulation on cold-flow impact of the soft pulse separation device in dual pulse solid rocket motor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1510(1):012016.1-012016.6.
- [14] FRENCH A D, PANELLI M, DI LORENZO G, et al. Combustion instability and pressure oscillation numerical simulation in a solid rocket motor[R]. AIAA 2017-4952, 2017.
- [15] FAVINI B, ZAGHI S, SERRAGLIA F, et al. 3D numerical

- simulation of ignition transient in SRM[R]. AIAA 2006 - 4953, 2006.
- [16] 汤亮, 邓康清, 余小波, 等. 隔舱式双脉冲发动机第Ⅱ脉冲点火过程数值仿真[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7):1541-1548.
- TANG Liang, DENG Kangqing, YU Xiaobo, et al. Numerical simulation for the second pulse ignition progress in compartment dual-pulse motor[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7):1541-1548. (in Chinese)
- [17] 孟亮飞, 田发林, 周长省. 阶梯装药固体火箭发动机点火内流场特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5):127-130.
- MENG Liangfei, TIAN Falin, ZHOU Changsheng. Study on the characteristics of flow field in the ignition of stepped-charge solid rocket motor[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5):127-130. (in Chinese)
- [18] 王珊珊, 王浩, 张博孜, 等. 大长径比、高密实火药床点火管点传火特性的影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4):489-494.
- WANG Shanshan, WANG Hao, ZHANG Bozi, et al. Factors affecting the ignition of a large length-to-diameter ratio igniter tube filled with consolidated charge[J]. Explosion And Shock Waves, 2014, 34(4):489-494. (in Chinese)
- [19] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

(编辑: 张 雪)