

脉冲爆震发动机流动形态与推力相关性研究

刘金元, 祝成民

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要:采用数值分析方法研究了加装扩张、收敛、收扩型喷管 PDE 的流动情况,发现爆震波的传播、反射产生的波系是影响 PDE 推力的主要因素。本文对前人关于喷管构型与 PDE 推力关系互相矛盾的结论进行了分析,研究结果表明:加装扩张喷管的 PDE,存在最优的面积比使冲量增益最大。加装收敛喷管的 PDE,随面积比减小冲量增益逐渐减小。加装收扩喷管的 PDE,当出口面积固定时,收敛角越大,冲量增益越小;当收敛角固定时,面积比越大,冲量增益会先增大后减小,但是收扩喷管总体冲量增益小于相应的扩张喷管。

关键词:脉冲爆震发动机;喷管;非稳态性;冲量增益;数值仿真

本文引用格式:刘金元,祝成民.脉冲爆震发动机流动形态与推力相关性研究[J].兵器装备工程学报,2018(3):51-56.

Citation format:LIU Jinyuan, ZHU Chengmin. Investigation of Correlation Between Flow Structure and Thrust of Pulse Detonation Engine[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2018(3):51-56.

中图分类号:V430;TJ02

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2018)03-0051-06

Investigation of Correlation Between Flow Structure and Thrust of Pulse Detonation Engine

LIU Jinyuan, ZHU Chengmin

(School of Aerospace, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between pulse detonation engine thrust and internal flow pattern, the flow of PDEs with divergent, convergent, convergent-divergent (CD) nozzles are analyzed by the method of numerical analysis method in this work. We found that the series of waves result from the transmission, reflection of detonation determine the thrust of PDE. In this paper, the contradictory conclusions drawn from previous studies on the relationship between nozzle configuration and thrust of PDE are analyzed. The simulation results indicated that the PDE of the divergent nozzle has the optimal area ratio to maximize the impulse gain. For PDE with convergent nozzle, the smaller area ratio means lower impulse gain. For PDE with CD nozzles, when the exit area is fixed, the larger the convergence angle and the smaller the impulse gain; when the convergence angle is fixed, the larger the area ratio is, the impulse gain will increase first and then decrease. Overall the impulse gain of convergent nozzle is smaller than the corresponding expansion nozzle.

Key words: pulse detonation engine(PDE); nozzle; transient flow; impulse gain; numerical simulation

脉冲爆震发动机(PDE)^[1]是利用爆震波产生的高温高压气体提供推力的非稳态发动机,理论上具有热循环效率

高,结构简单,成本低、质量小、燃料消耗低,适用范围广等优点。自该类型发动机问世以后,引起众多研究者的兴趣。

收稿日期:2017-10-30;修回日期:2017-12-09

作者简介:刘金元(1987—),男,硕士,主要从事航天发动机内流体研究,E-mail:kobeone123@buaa.edu.cn。

通讯作者:祝成民(1972—),男,副教授,主要从事流体力学的研究,E-mail:cmzhu@buaa.edu.cn。

在众多的研究方向中,作为发动机的重要指标——推力,成为PDE研究中的一个重要方向。在实验研究方面,Stuessy和Wilson^[2]通过实验证实加装喷管后爆震管会维持较高的爆震波速,提高了发动机的推进性能。Cooperl等^[3]通过实验测量了单循环脉冲爆震发动机的冲量,分析了管内添加障碍物后对DDT过程的影响。Allgood和Gutmark^[4]通过实验结果表明,最佳尾喷管面积比和爆震管填充系数之间存在一定的函数关系。西北工业大学范玮等^[5]选取了3类10种不同尺寸和结构形式的尾喷管模型加装在PDE上进行了实验研究。结果表明,各种构型喷管对推力性能均有提高,每种构型喷管均存在一最佳面积比,使推力增益最大。在数值模拟方面,2003年S. Yungster^[6]研究了不同角度的扩张喷管对PDE推力性能的影响。T. Peace和K. Lu^[7]观察不同面积比的扩张喷管爆震管推力效应,当面积比在2.25~2.5时,增推性能达到最佳。空军工程大学曾昊等^[8]使用氢氧混合燃料研究了尾喷管收敛-扩张角度对脉冲爆震发动机推力性能的影响。中国科学技术大学李辉煌等^[9]研究了不同喷管形式及充气状况对PDE推进性能的影响。秦亚欣等^[10]选取了不同结构的尾喷管进行单循环数值模拟,分析其对PDE推力性能的影响。2013年靳乐等^[11]采用数值模拟和实验方法研究不同喷管形式和环境压强对PDRE推力增益的影响。2015年王志武^[12]采用不同收敛角和扩张角喷管进行单循环数值模拟,研究其对PDE推力性能的影响。

上述研究得到了PDE在不同喷管构型情况下的推力变化情况。但是,因为PDE工作过程的强非稳态性,而现有推力分析的有关方法主要适用于定常情况,造成上述研究出现相互矛盾的结论。如文献[10]结论为扩张喷管产生的比冲增益最大,而文献[11]则认为收敛喷管产生的比冲增益最大,扩张喷管的增益为负值;文献[12]的部分结论认为:对于收敛喷管,不管其收敛角度在5°~10°如何变化,其比冲增益都为正值。而在文献[13]中,收敛角度为10°的收敛喷管的比冲增益却为负值。

为研究单脉冲爆震管和尾喷管的内流场流动形态与不同时刻瞬时推力产生和变化,本文对添加扩张、收敛、收扩等不同构型尾喷管的PDE进行了系统的数值仿真模拟。发现激波结构在传播过程中会和壁面发生相互作用形成不同的演化形态,瞬时推力随之发生相应变化。本研究可为深入了解脉冲爆震发动机流动机理以及合理设计尾喷管构型提供理论支持。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理模型

本文研究的PDE模型如图1所示。其中爆震管长 $L=1\ 059\text{ mm}$,直径 $D=50\text{ mm}$,左端封闭,右端连接多种构型的尾喷管。爆震管内填充完全化学当量比的氢氧混合气体,尾喷管中填充空气。初始状态压强为1 atm,温度为300 K。点火区位于PDE头部,采用激波诱导起爆。设定点火区矩形

区域宽度为2 mm。该区域填充 N_2 ,压强为 $P=3\text{ MPa}$,温度为 $T=2\ 000\text{ K}$ 。

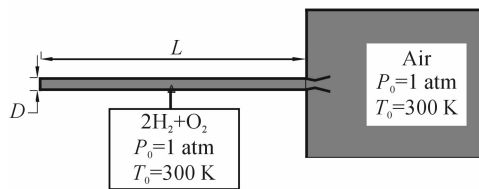


图1 PDE的物理模型

在仿真计算中,假设混合气体为理想气体,不考虑热辐射;所有壁面按照绝热、无滑移处理。采用有限速率化学反应模型,化学反应选取6组分9步的氢氧反应,其组分为: $H_2, O_2, O, H, OH, H_2O^{[14]}$ 。

1.2 瞬时推力计算

对于PDE这种具有强非定常性的发动机,利用喷管出口截面参数计算瞬时推力的方法不再适用,需要更通用的推力计算公式^[15]:

$$F = \oint_{\pi} (P dA + \tau \cdot dA)$$

其中: P 为微元面上的压强; dA 为微元面的法矢量,其方向指向控制体内部,大小为微元面面积; τ 为粘性应力张量,其与 dA 之积($\tau \cdot dA$)为微元面所受切向力; T_1 为发动机的内外表面。

1.3 数值计算方法

数值计算模型为轴对称二维模型,采用PISO格式计算非定常粘性有化学反应流动,湍流模型选择标准的k-epsilon模型。

计算区域网格为四边形结构网格,为了更好地捕捉激波流场,在内流场近壁面区域对网格适当加密。通过网格无关性验证,内流场区域的网格边长选为1 mm。网格的形式如图2所示。

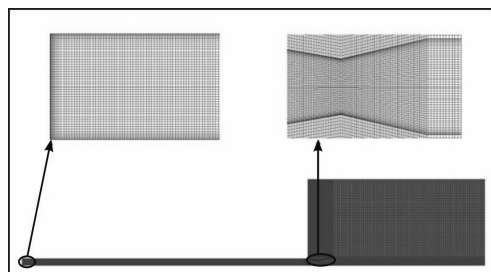


图2 数值分析的网格

2 激波与瞬时推力的关系分析

2.1 PDE单循环流动形态演化

考虑到流动形态的典型性,以安装收扩喷管(其收敛段长度37 mm,收敛角为7.5°,扩张段长度57.5 mm,出口直径

120 mm)的PDE为例说明流动形态的演化过程。PDE流动形态变化的第一个阶段为点火开始到爆震波传播到喷管前。点火后,爆震波立刻在PDE头部形成,开始向喷管方向传播。被爆震波扫过的可燃混合气体迅速发生化学反应,释放的能量推动爆震波以稳定的速度持续传播,爆震波波后流体被爆震波加速,向喷管方向运动,造成波后气体压强下降。从宏观上看,可看作膨胀波向PDE头部传播。这一阶段的典型流动形态如图3(a)所示。

当爆震波进入尾喷管后,由于喷管中没有可燃气体,无法发生化学反应,爆震波成为一道普通激波。在收缩段,激波在壁面发生马赫反射,这种反射造成激波“聚焦”,在收敛段形成局部高温高压区(见图3(b))。激波“聚焦”的程度与收敛角有关。

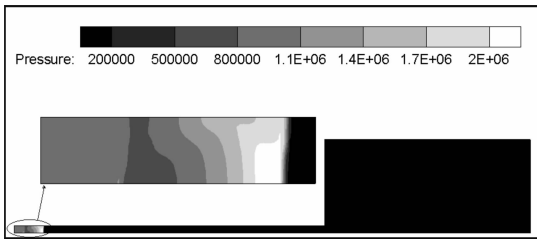
当激波传播到喷管喉部时,激波“聚焦”程度达到最大。之后,聚焦产生的高温高压区作为新的波源分别向PDE头部和喷管出口方向传播。从宏观上看,向头部传播的波可看作初始激波在收敛段的反射波,而向出口传播的波则是初始激波继续传播的结果。

首先分析初始激波通过喷管喉部继续向扩张段传播的

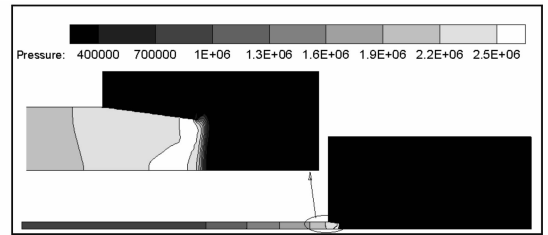
流动形态。初始激波首先将波前未受扰流体加压、升温、加速。之后,由于流通截面扩张的影响,波后的高压高温流体之间的速度差使流体膨胀降压,这种膨胀降压首先发生在扩张段壁面附近(见图3(c)),之后随着初始激波向周围传播。同样受流通截面增大的影响,初始激波的强度也在传播过程中逐渐减弱,直到到达喷管出口(见图3(d))。初始激波通过喷管出口后,因为流通截面的突变,削弱会更快,而且会对环境流体产生引射等作用,形成更复杂的流动形态。限于篇幅,这里不对其作更深入地分析。

初始激波在收敛段的反射波,因为激波聚焦作用,该反射波初始强度远大于激波的强度,而且不是平面波。随着反射波向头部传播(见图4(a)),该波会与向上游传播的膨胀波叠加,强度逐渐削弱,到达头部后被反射(见图4(b)),转而向喷管方向传播。

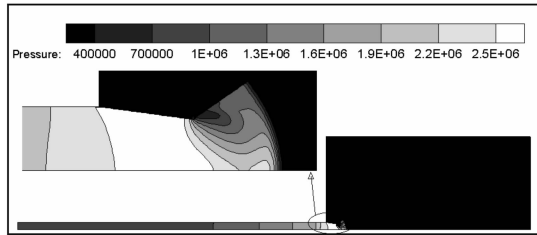
上面所述的各种波系会随着时间的推移互相叠加,而且由于壁面的作用还会产生新的波系,所以之后的流动形态越来越复杂。但是,随着发动机内气体不断排出,压强会越来越小,这些越来越复杂的流动形态对推力的作用很小,所以本文不对后续的流动作详细分析。



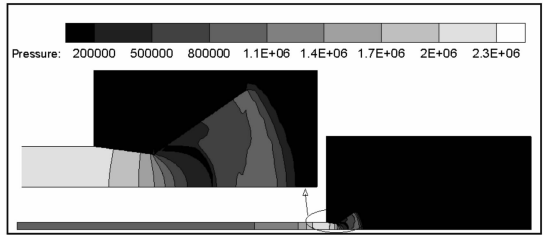
(a) 爆震管中激波的传播



(b) 收敛段激波的“聚焦”(0.36 ms)

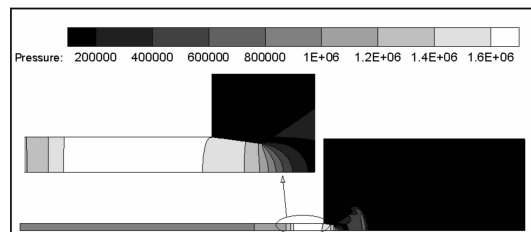


(c) 扩张段中激波的传播

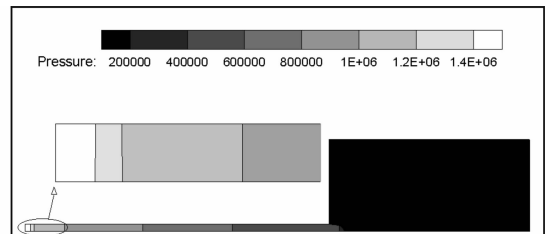


(d) 激波传播到喷管出口(0.405 ms)

图3 PDE中典型的激波结构



(a) 反射激波向爆震管上游传播



(b) 反射激波到达爆震管头部(0.985 ms)

图4 收敛段反射激波的传播

2.2 流动形态与瞬时推力之间的关系

根据推力计算公式应用于带有收扩喷管的 PDE 计算结果,可以作出图 5 所示的瞬时推力变化曲线。因为粘性力对推力的贡献很小,所以在下面的分析中,只讨论压强所产生的推力。由于流动的轴对称特性,由压强产生的 PDE 侧壁上的法向力相互抵消,所以对推力有贡献的只有发动机头部和喷管。图 5 分别显示了头部和喷管产生的推力以及总推力。

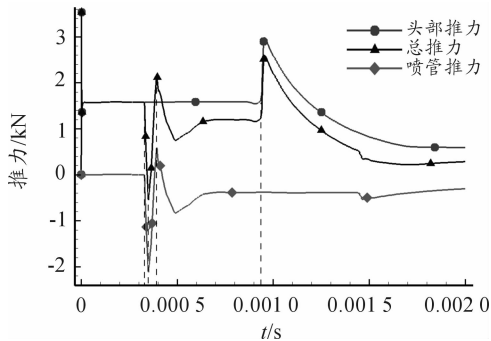


图 5 收扩喷管的瞬时推力曲线

由图 5 可见,在 0.335 ms 之前,爆震波在爆震管中传播(见图 3(a)),由于爆震波未到达喷管,喷管的内外压强差为零,不产生推力,此时的推力由 PDE 头部的内外压强差产生。在这一阶段,因头部压强基本保持恒定,所以图 5 所示的推力曲线保持平台状。

图 5 中,在 0.335 ms,爆震波传播到喷管,爆震波变为普通激波。在 0.335 ~ 0.36 ms,激波在喷管收敛段传播,因流通截面变小造成的“聚焦”现象使喷管收敛段附近产生远高于初始激波的高压区(图 3(b)),而压强差在轴向的投影指向喷管出口,所以这个高压区作用于收敛段产生负推力。在 0.36 ms 激波到达喷管喉部时负推力达到最大值,所以在此阶段,喷管产生的推力急剧下降,而头部产生的推力因头部压强基本不变仍保持平台状。

图 5 中,在 0.36 ~ 0.405 ms,初始激波在喷管扩张段中传播(图 3(c)(d)),虽然由于流通截面变大导致初始激波的强度降低,壁面附近的波后气体压强减小,但内部压强仍远高于环境压强。由于压强差在扩张段的轴向投影指向头部,所以在扩张段的压强差产生正推力。由于气体的不断排出,收敛段的压强逐渐降低,所以收敛段的负推力也逐渐减小,扩张段的正推力逐渐增加。所以在此阶段,喷管产生的推力急剧上升,在 0.405 ms 达到峰值,而头部产生的推力因头部压强基本不变仍保持平台状。

在图 5 中还可见:在 0.405 ms 之后,喷管产生推力下降是由于流体的继续膨胀导致喷管附近压强下降。

从图 5 所示的头部产生推力的变化情况可以看到初始激波在喉部反射产生的影响。在 0.36 ~ 0.985 ms,反射波在爆震管中传播,头部的压强基本保持不变,因而头部产生的推力保持稳定。直到 0.985 ms 反射波到达 PDE 头部,造成

头部压强的突越式升高,使头部产生的推力产生继点火压力峰之后的第二个峰值。之后,反射波在头部反射后向出口传播,造成头部压强逐渐下降,头部产生的推力也逐渐下降。

3 计算结果的分析

3.1 扩张喷管构型对 PDE 推力的影响

为了分析扩张喷管构型对 PDE 推力的影响,选取一系列加装不同面积比喷管构型的 PDE 进行研究。

加装扩张喷管的 PDE,相对于加装收扩喷管的 PDE,内部流动缺少了收敛段的激波“聚焦”以及随后向上游传播的反射激波。其瞬时推力变化曲线如图 6 所示,图中 AR 代表喷管出入口面积比。因为没有收敛段产生负推力,该类型 PDE 的推力始终为正值,且不存在因反射激波到达头部产生的推力峰。对于不同面积比的喷管,瞬时推力峰值差异很大。

面积比对 PDE 比冲的影响如图 7 所示。在面积比 1 ~ 3 范围内,喷管扩张角逐渐增大,轴向投影面积随着扩张角的增大而增加。在喷管中,激波膨胀后的压强仍大于环境压强,不断增加的轴向投影面积使喷管产生的冲量由零开始逐渐增加。而爆震管中的平均压强由于喷管膨胀作用加速了气体的排出而减小,头部对冲量的贡献逐渐变小;随着面积比的增大,流体的加速膨胀作用对头部压强的影响越来越小。在这个面积比范围内,喷管对 PDE 冲量变化的影响大于头部的影响,PDE 总冲量呈上升趋势。

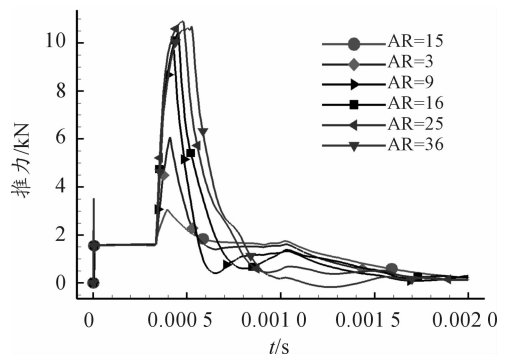


图 6 加装扩张喷管的 PDE 瞬时推力曲线

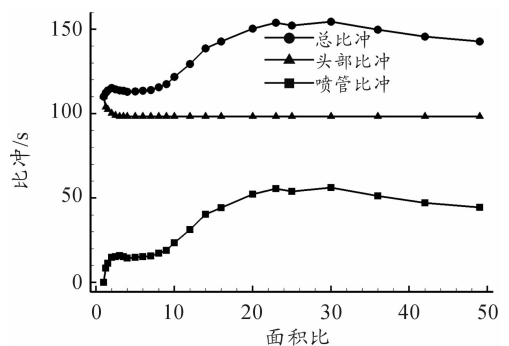


图 7 加装扩张喷管的 PDE 比冲曲线

在面积比 3~7 范围内,喷管对冲量的贡献几乎没有变化,这是因为在此范围内,喷管膨胀作用导致气体压强的减小和喷管轴向投影面积的增大两者对 PDE 冲量的影响趋于平衡。

在面积比 7~49 范围内,流体膨胀更为剧烈,喷管内压强继续减小;由于喷管扩张角不断增大,喷管轴向投影面积也在急剧增大,喷管对 PDE 冲量的贡献持续增加。当面积比超过临界值时,激波在喷管中达到过膨胀状态,其压强小于环境压强,对冲量的贡献为负。此后随着面积比的不断增大,冲量反而会变小。如图 7 所示,当面积比大于 3 时,PDE 头部对冲量的贡献趋于定值,面积比的变化不会影响头部的冲量。总之,扩张喷管构型对 PDE 冲量影响很大。

3.2 收敛喷管构型对 PDE 推力的影响

加装收敛喷管的 PDE 内部流动形态与收扩喷管不同的是缺少了扩张段的激波扩张部分。其推力曲线没有扩张段产生的正推力峰,存在收敛段产生的负推力峰以及反射激波到达头部后产生的二次正推力峰,如图 8 所示。

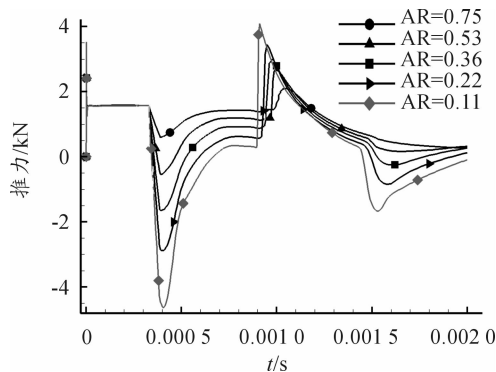


图 8 加装收敛喷管的 PDE 瞬时推力曲线

需要说明的是收敛角为 0° 时的直喷管情况。相对于无喷管状态的 PDE,添加直喷管后激波传播时间延长,使 PDE 头部维持恒定高压的时间更久,从而增加了 PDE 的总冲量。当面积比减小时,喷管出口面积越来越小,这对爆震产物的排出起到了一定的阻碍作用,有利于头部保持较长时间的正推力。如图 9 所示,随着面积比的减小,喷管产生的负推力峰值变得很大,作用时间也相应变长,其对总冲量的贡献已经远大于头部正推力产生的贡献。因此,PDE 的冲量随着面积比的减小而减小,当面积比为 0.11 时,PDE 总冲量减小到 2.2%。

3.3 收扩喷管构型对 PDE 推力的影响

由于收敛喷管产生负推力,扩张喷管产生正推力,那么两者综合起来对 PDE 的冲量产生什么样的影响呢?鉴于此,分别选取了固定出口面积、不同收敛角和固定收敛角、不同面积比两个系列的收扩喷管来分析其对 PDE 冲量的影响。

由于扩张喷管在喷管出口直径为 240 mm 左右时可以产生最大的冲量,因此固定出口面积喷管的直径选取为 240 mm。当收敛角越大,激波“聚焦”后产生的压强越大,壁面法向力在轴向投影的比值也会越大。因此收缩段产生的负冲量会随着收敛角的增大而增加,而收敛角对扩张段冲量影响相对较小,所以喷管比冲随着收敛角的增大而呈下降趋势,如图 10 所示。收敛角的增大延长了喷管的排气时间,增强了反射激波的强度,因此头部会维持较高的压强值,其正冲量也随着收敛角的增大而增大。但是,随着收敛角的增大,喷管冲量减小量大于头部相应的增加量,综合起来 PDE 冲量呈下降趋势。

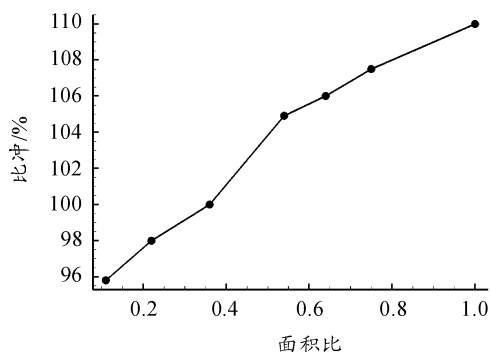


图 9 加装收敛喷管的 PDE 比冲曲线

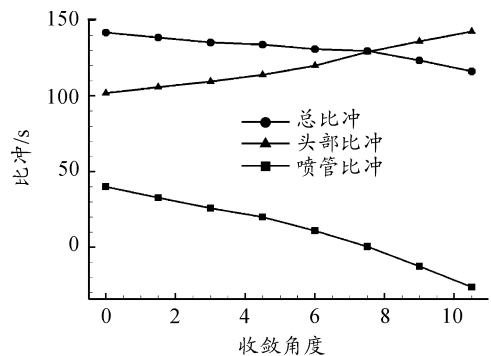


图 10 加装收扩喷管的 PDE 比冲曲线

对于固定收敛角、不同面积比的喷管构型对 PDE 冲量的影响,选取加装收敛角为 7.5° ,面积比在 2~42 等不同构型喷管的 PDE 进行研究。如图 11 所示,当收敛角不变时,PDE 头部与喷管收敛段产生的冲量趋于稳定。在面积比 2~6 时,PDE 冲量随着面积比的增大而减小,这是因为轴向投影面积的增大对冲量的贡献不足以抵消壁面压强减小对冲量的影响。在面积比 6~42 时,其冲量曲线走势与加装扩张喷管 PDE 的情况类似。冲量先是随着面积比的增大而增大,达到最大临界值后,冲量逐渐减小。但由于存在收敛段,冲量增益小于相同出口面积的加装扩张喷管 PDE 的冲量增益。

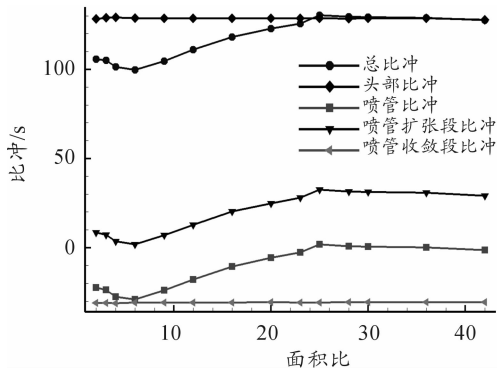


图 11 加装收扩喷管的 PDE 瞬时推力曲线

4 结论

1) 对发动机壁面受力进行积分是计算发动机推力的简便方式,适用于各种流动情况。

2) PDE 内部爆震波的传播、反射等所导致的各种流动形态直接影响发动机推力,PDE 瞬时推力曲线可以通过流动形态的变化解释。

3) 直喷管和扩张喷管都会产生正推力,扩张喷管的推进性能更为显著。

4) 随着喷管面积比不断增大,PDE 冲量增益逐渐增大维持一段稳定值,之后在一定的面积比范围急剧增大,达到临界值,再缓慢减小。对本文研究的 PDE 构型,当面积比达到 23 时,PDE 冲量增益达 57%。

5) 对于收敛型喷管,随着面积比的减小,产生的冲量越来越小。对本文研究的 PDE 构型,当面积比为 0.2 时产生的冲量增益已经为负。

6) 对于收扩喷管,当出口面积固定时,收敛角越大,冲量增益越小;当收敛角固定时,面积比越大,冲量增益会先增大后减小。但是总体冲量增益小于相应的扩张喷管。

参考文献:

[1] BUSSING T R A, PAPPAS G. An introduction to pulse detonation engines [C]//Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1994.

[2] COOPER M, JACKSON S, AUSTIN J, et al. Direct Experi-

mental Impulse Measurements for Detonations and Deflagrations [J]. Journal of Propulsion & Power, 2002, 18 (5): 1033 - 1041.

- [3] STUESSY W, WILSON D, et al. Experimental investigation of an annular multi-cycle pulsed detonation wave engine [J]. AIAA Journal, 2013.
- [4] ALLGOOD D, GUTMARK E, HOKE J et al. Performance Measurements of Multi-Cycle Pulse Detonation Engine Exhaust Nozzles [C]. AIAA - 2005 - 0222.
- [5] 范玮, 严传俊, 李强, 等. 脉冲爆震发动机尾喷管的实验 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 869 - 872.
- [6] YUNGSTER S. Analysis of Nozzle Effects on Pulse Detonation Engine Performance [C]. AIAA - 2003 - 1316.
- [7] PEACE J T, LU F K. Numerical Study of Pulse Detonation Engine Nozzle and Exhaust Flow Phenomena [C]//AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2013.
- [8] 曾昊, 何立明, 章雄伟, 等. 喷管收敛 - 扩张角对爆震发动机性能影响分析 [J]. 推进技术, 2011, 32(1): 97 - 102.
- [9] 李辉煌, 杨基明, 徐立功. 脉冲爆震发动机喷管流动的数值模拟 [J]. 推进技术, 2004, 25(6): 553 - 556.
- [10] 秦亚欣, 于军力, 高歌. 脉冲爆震发动机喷管性能数值分析 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 366 - 368.
- [11] 靳乐, 范玮, 王伟, 等. 喷管形式和环境压力对 PDRE 比冲的影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2013(3): 440 - 445.
- [12] 王治武, 张昆, 郑龙席, 等. 喷管角度对脉冲爆震发动机性能影响数值研究 [J]. 西北工业大学学报, 2015(3): 456 - 461.
- [13] 王研艳, 翁春生. 带收敛喷管脉冲爆震发动机的性能分析 [J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2010, 10(4): 35 - 40.
- [14] 聂万胜. 液体火箭发动机燃烧动力学模型与数值计算 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [15] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

(责任编辑 周江川)