

文章编号: 1001 - 2486(2011)01 - 0039 - 05

## 化学激光器环形与线形分流管道对比的数值分析\*

靳冬欢, 刘文广, 陈 星, 陆启生, 赵伊君  
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 环柱型化学激光器中使用的分流管道的总管为环形弯曲管道, 支管分布在内侧圆弧或外侧圆弧上, 结构与线形分流管道有较大差别。应用计算流体力学方法, 对上述各分流管道进行了三维的数值模拟及对比分析。结果表明, 线形分流管道总管内的总压高于支管分布在外侧圆弧上的环形管道, 但低于支管分布在内侧圆弧上的环形管道; 无论是支管分流, 抑或环形管道内的二次流现象都会使总管截面上产生径向速度, 使得流体流动呈现明显的三维特征; 分流管道各支管流量沿主流流动方向基本上是上升的, 这与总管的总压分布趋势相反, 而与总管的静压分布趋势相似; 比较而言, 支管分布在外侧圆弧上的环形分流管道的支管流量波动幅度最小, 在均匀分配气流方面最具优势, 线形分流管道居中, 支管分布在内侧圆弧上的环形分流管道最差。

**关键词:** 化学激光器; 分流; 数值模拟; 线形管道; 环形管道

**中图分类号:** TN248.5; O354.2 **文献标识码:** A

## Numerical Investigation of Comparing Annular with Linear Distribution Flow Pipeline in Chemical Laser

JIN Dong-huan, LIU Wen-guang, CHEN Xing, LU Qi-sheng, ZHAO Yi-jun

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Distribution flow pipeline used in cylindrical chemical laser is composed of an annular general pipeline and a limited quantity of branch pipelines that are connected with the inner or outer circular arc of general pipeline. Its structure and flow field characteristics differ from those of linear distribution flow pipeline used in conventional chemical laser. Flow field characteristics of above-mentioned three kinds of distribution flow pipelines were analyzed contrastively based on three-dimension computational fluid dynamics methods. The numerical simulation results demonstrate that total pressure of general pipeline in linear distribution flow pipeline is higher than that in outer-circular-arc annular pipeline, but lower than that in inner-circular-arc annular pipeline. Both distribution flows of branch pipelines and secondary flows produced in annular general pipeline can excite radial velocity on the section plane of general pipeline. These phenomena enable the gas flow of general pipeline to have remarkable three-dimension characteristics. Mass flow rates of branch pipeline outlets are higher and higher along the direction of main gas flow movement. Its trend is contrary to upward tendency of total pressure in general pipeline, but is similar to downward tendency of static pressure in general pipeline. By comparison, Mass flow rate fluctuating amplitude of branch pipeline outlets in outer-circular-arc annular distribution flow pipeline is smaller than that in linear distribution flow pipeline, and the amplitude in inner-circular-arc annular distribution flow pipeline is the biggest of the three. As a result, outer-circular-arc annular distribution flow pipeline is of advantage among the three methods in distributing uniformly gas flow, while inner-circular-arc annular pipeline is the lowest and the linear distribution flow pipeline goes between the other two.

**Key words:** chemical laser; distribution flow; numerical simulation; linear pipeline; annular pipeline

在化工、石油、通风供热、水利喷灌等工程中, 往往需要一种均匀分配气体或液体的装置——分流管道, 它由一根总管和与总管的侧面连接的若干结构相同的支管组成。连续波化学激光器中也大量使用了分流管道, 如燃烧室喷注器、副喷管阵列、气幕喷管的供气管道等都存在着多级分流管道结构<sup>[1-2]</sup>。

一般的化学激光器使用的是线形分流管道, 而环柱型化学激光器由于采用了环形喷管阵列及圆柱型燃烧室<sup>[3]</sup>, 与之配套的供气管道便是环形分流管道。环形分流管道与线形分流管道的一个显著区别在于总管的形状及支管的喷射方向。气流分配的均匀程度是分流管道的主要技术指标, 在化学激光器中, 它直接关系到气流的混合效率

\* 收稿日期: 2010 - 09 - 09

作者简介: 靳冬欢(1981—), 男, 博士生。

及燃烧的稳定性和光腔区光束质量、气幕的保护效果等。国内关于分流管道的研究多使用一维理论模型或实验研究的方法<sup>[4-7]</sup>,无法获得立体的流场细节信息。

### 1 计算模型及分析方法

各分流管道都是由1个总管和18个支管组成,根据管道结构的对称性,提取出各分流管道的三维计算模型如图1所示。图1(a)线形分流管道:总管为圆形截面的直管,直径为5mm,长度为95mm,支管为“喇叭形”喷注孔,喉道直径为0.5mm,扩张段半角为15°,孔间隔为5mm;图1(b)环形分流管道I:总管为圆形截面的弯管,截面直径为5mm,旋转半径80mm,转角68.04°,轴线弧长为95mm,支管分布在环形管道的外侧圆弧上,结构参数与线形分流管道相同;图1(c)环形分流管道II:与环形分流管道I的不同之处在于支管分布在总管内侧圆弧上。环形分流管道I主要用做环柱型激光器的副气流供气管道;环形分流管道II主要用做燃烧室注入气流的供气管道。

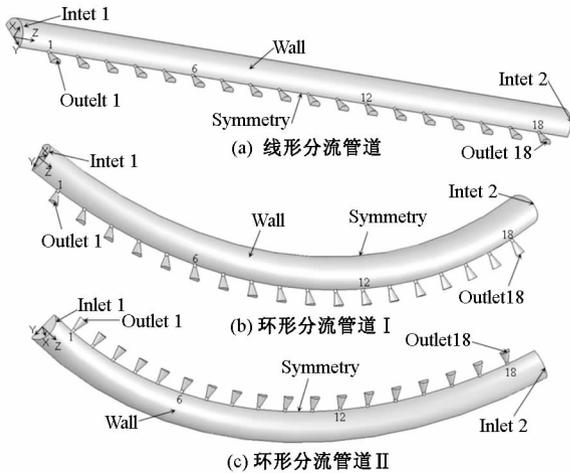


图1 分流管道计算模型

Fig.1 Computational models of three kinds of distribution flow pipelines

网格划分过程中利用了体分解技术将整个模型分成多个互连的几何体,每个几何体采用Cooper技术生成非结构化体网格,网格单元总数100万左右;工作介质选用单一组分 $N_2$ ,视为可压缩的理想气体,介质的粘性系数及导热系数皆采用分子动力学理论进行计算,其中的分子间作用力模型使用的是Lennard-Jones(6,12)势。粘性模型使用Realizable  $k-\epsilon$  两方程湍流模型,该模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟,包括旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动,以及带有分离的

流动等<sup>[8]</sup>;立足于Navier-stokes守恒型方程组,利用有限体积法对控制方程离散,对各分流管道进行了三维的数值模拟。主要边界条件设置如表1所示。

表1 计算模型的边界条件设置

Tab.1 Boundary conditions of computational models

边界名称	具体设置
Inlet1 ~ Inlet2	压力入口,总压 3.03975bar,总温 300K
Wall	光滑、钢质壁面,恒温 300K
Symmetry	对称边界,法向速度分量及所有变量的法向梯度为零
Outlet1 ~ Outlet18	压力出口

### 2 计算结果及讨论

模型假设气流流动过程中各物理量均与时间无关,即为定常流动,这与管道的稳定工作状态是相符的,此时总管内为亚音速流,平均马赫数 $Ma < 0.05$ ,支管内大部分为超音速流。三维模拟结果主要给出了双端供气方式、恒温壁面条件下,总管截面平均压力的沿程分布、速度矢量及支管出口流量分布等。

图2给出了总管截面的平均静压及总压的沿程分布。对线形管道来说,该截面是指平行于入口平面Inlet1或Inlet2的一组等距平面,间距为5mm;对于环形管道来说,该截面是指入口平面Inlet1或Inlet2绕环形管道的回转中心旋转得到的一组角间距相等的平面,角间距为 $3.58^\circ$ 。图2的横坐标表示各平面与Inlet1的距离,对于环形管道来说,这个距离指截面角间距对应的总管轴线上的弧长,和线形管道的各截面间距一样,也为5mm。从图2中可以看出,受粘性摩擦阻力作用,

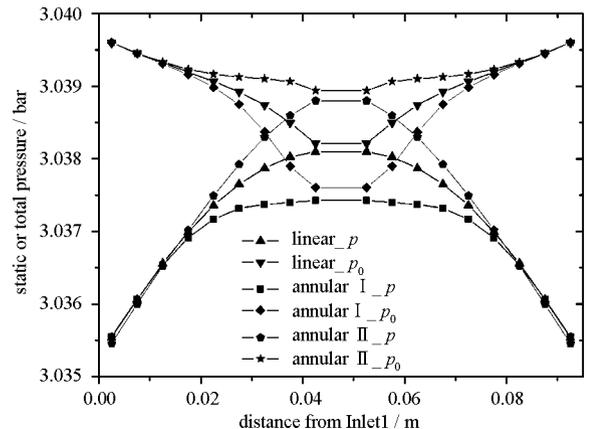


图2 总管截面的平均静压及总压的沿程分布

Fig.2 Mean static or total pressure distributions on the section plane of general pipeline

总压沿流向逐渐降低,分布趋势与文献[1]的计算结果一致。静压沿流向则逐渐升高,这说明气流进入总管以内后,速度不断减慢,动压转换为静压,使得静压升高,即静压改变由动量交换所决定,这种情况称之为“动量交换控制模型”<sup>[7]</sup>。在总管中部,气流速度接近于零,静压和总压几乎相等。对比来看,线形分流管道总管内的总压高于环形分流管道 I,但低于环形分流管道 II。这是因为不管是线形管道,还是环形管道,有支管分布的一侧,因气流分流而使流动边界层被周期性破坏,边界层未能充分发展,产生的摩擦阻力较小<sup>[4]</sup>;而另一侧边界层厚度明显大于有支管分布的一侧,是摩擦阻力的主要作用区域。气流在环形管道内流动时,受到离心力的作用,为了维持运动的平衡,则外侧压强必须大于内侧的压强,这也造成了管道外壁边界层变薄,内壁边界层变厚,边界层呈现非对称状态<sup>[9]</sup>。对于环形分流管道 I 来说,管道外壁边界层变薄效应被支管分流破坏,内壁边界层变厚效应使得总的摩擦阻力超过了线形分流管道,总压损失增大;对于环形分流管道 II 来说,管道内壁边界层变厚效应被支管分流破坏,而外壁边界层变薄效应使得总的摩擦阻力小于线形分流管道,总压损失减小。从图 3 的总管对称面上的速度云图可以看出速度边界层的分布,结果与上述分析一致。图 3 中速度大于 20 m/s 支管区域,统一着色为白色,并根据两端供气的对称性,只显示了总管长度的一半区域。

气流在总管内主要沿总管轴线方向流动,但

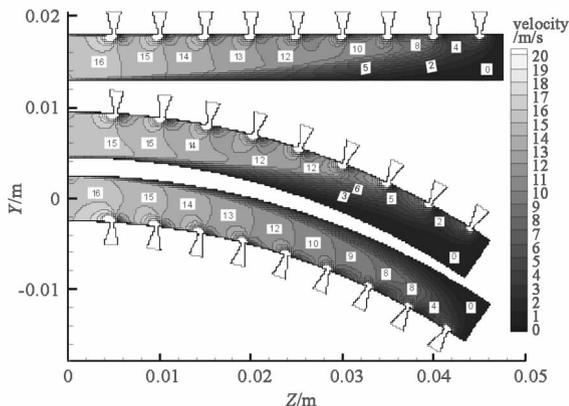


图 3 总管对称面上的速度云图  
Fig.3 Velocity contour distributions on the symmetry plane of general pipeline

分流管道的支管一般连接在总管侧面,在支管分流的作用下,气流需要转弯才能进入支管,这就在总管截面上产生径向速度,使得流体流动呈现明显的三维特征。图 4 给出了距离入口平面 Inlet1 22.5 mm 的总管截面上的速度矢量图,图 4 (a)、(b)中,支管分布在截面左侧;图 4(c)中,支管分布在截面右侧。从图中可以看出,总管截面气流总体上是向有支管分布的一侧流动,再加上轴向速度的情况下,可以想象气流在总管内的流线是螺旋式的,即产生了涡结构。这种情况在环形分流管道 I 中尤其明显,在总管内外侧压差的作用下,气流沿壁面由外壁向内壁流动,为了保证截面上的质量守恒,在内壁的气流则由中间区域向外壁流动,从而在整个截面上形成两个旋转方向相反的旋涡,即迪恩(Dean)涡,这就是弯曲管道中的二次流现象<sup>[9]</sup>,如图 4(b)所示。

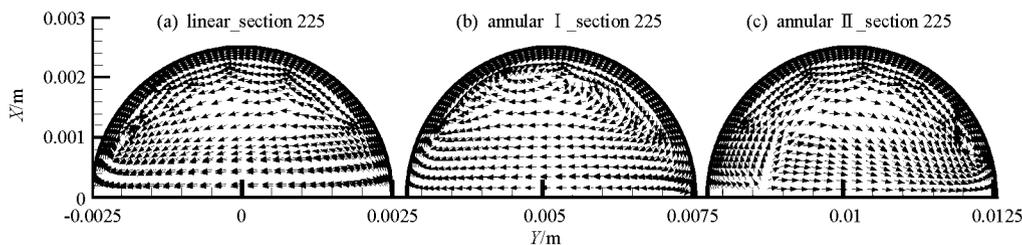


图 4 总管截面上的速度矢量图  
Fig.4 Velocity vector field on the section plane of general pipeline

通过引入涡量的定义进一步说明涡结构的发展。涡量定义为速度矢量的旋度,可以理解为流体微团绕其中心作刚性旋转的角速度之两倍<sup>[10]</sup>。从图 5 所示的涡量图中可以看出,随着气流由总管入口向下游流动,旋涡会逐渐由于粘性作用被耗散。环形分流管道 I 总管内的内外侧压差产生的二次流方向与支管分流产生的旋流方向相同,二者叠加使得总旋涡强度有所提高;环形分流管道 II 总管内的内外侧压差产生的二次流方向与支

管分流产生的旋流方向相反,二者叠加使得总旋涡强度有所下降。

分流管道的主要作用是均匀分配各支管气流。图 6 给出了分流管道的各支管气流的流量分布。从图 6 中可以看出,分流管道各支管流量沿总管流向基本上是上升的。从图 2、图 6 对比来看,支管流量分布与总管的静压分布趋势相似,而与总管的总压分布趋势相反。分流管道模型中,支管出口都带有扩张段,管内已达到超音速流动

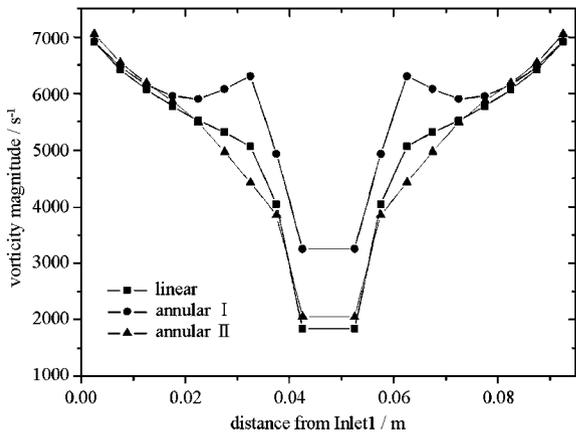


图5 总管截面上的涡量平均值曲线  
Fig.5 Mean vorticity magnitude curves on the section plane of general pipelines

状态,此时喷管质量流量与气流总压成正比。而总管内的动压主要是沿总管轴线方向的,支管轴线与总管轴线垂直,那么支管入口处的总压取相应位置处总管的静压,就显得更合理一些。总管静压高的位置,支管入口总压也高,相应的喷管质量流量也大一些。另外,气流在环形管道 I 内流动时产生的离心力方向与支管流动方向相同,对支管流动有促进作用,总管入口附近,气流速度快,产生的离心力大,这种促进作用就明显一些;气流在环形管道 II 内流动时产生的离心力方向与支管流动方向相反,对支管流动有阻碍作用,这种阻碍作用也在总管入口附近更为明显一些。这就造成了靠近总管两端的支管,环形分流管道 I 的流量比线形分流管道大,环形分流管道 II 比线形分流管道小。从图 6 中还可知,靠近总管中心位置处,总管内气流速度慢,离心力作用不明显,且环形分流管道 II 的总管静压比线形分流管道高,但环形分流管道 II 相应位置处的支管流量却比线形分流管道低。这是因为二者支管的边界层厚度不一样,环形分流管道 II 支管的边界层相对线形

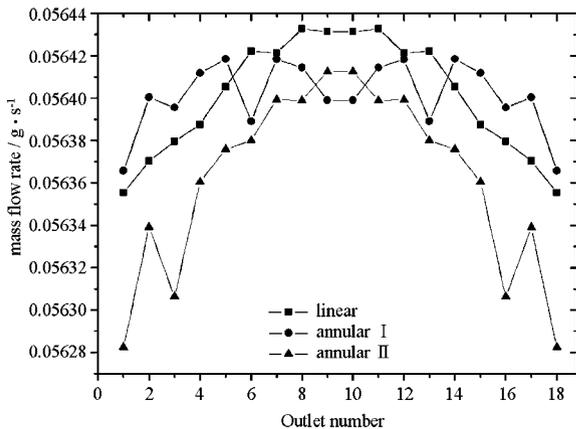


图6 支管出口流量分布  
Fig.6 Mass flow rate fluctuations of branch pipeline outlets

分流管道厚一些。在分流管道的对称面(图 1 中的 Symmetry)上,环形分流管道 I 的支管入口处的尖角结构为钝角,环形分流管道 II 的为锐角,而线形分流管道的则为直角。三者比较而言,环形分流管道 I 的支管入口处最为自然,气流由总管进入支管最为顺畅,支管边界层相对较薄,线形分流管道居中,环形管道 II 支管边界层则相对较厚。

为了更好地说明各分流管道质量流量的变化,定义流量变化幅度  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{\max} - \dot{m}_{\min}}{\dot{m}} \times 100\%$$

各分流管道的流量变化幅度列于表 2。环形分流管道 I 静压波动幅度小,离心力又促进了总管入口处的支管流动,因此流量波动幅度最小,在均匀分配气流方面最具优势;线形分流管道基本无离心力作用,静压波动直接决定了流量波动,流量波动幅度居中;环形分流管道 II 静压波动幅度大,离心力阻碍了总管入口处的支管流动,导致流量波动幅度最大。

表 2 流量波动幅度

Tab.2 Relative fluctuation ranges of mass flow rates

分流管道类型	$\alpha$
线形分流管道	0.137%
环形分流管道 I	0.0935%
环形分流管道 II	0.2308%

另外,从表 2 中可以看出,各供气管道的流量波动幅度均小于 0.5%,主要有两个原因:其一是管道结构的设计,有一个参数可以说明这一点,即分流管道的支管总的截面积与总管截面积之比,该值越小,流场均匀程度越高<sup>[1]</sup>,本文取值 0.18;其二是供气方式的选择,相对于单端供气方式,本文中采用的双端供气意味着每个入口只对一半的支管供气,相当于将各分流管道的支管总的截面积与总管截面积之比降为原来的一半,在本文中该值变为 0.09,这就有效地减小分流管道总管压力和支管流量的波动。

### 3 结论

分流管道在化学激光器供给系统中是不可或缺的气体分配装置,管道结构的改变对气流的流动状态及分配的均匀性等都会产生较大的影响。本文应用计算流体力学方法,对一般化学激光器中使用的线形分流管道及环柱型激光器中使用的两种环形分流管道进行了三维的数值模拟及对比分析。分流管道的总管直接为支管供气,是支管的上游管道。受粘性摩擦阻力作用,总管总压沿

流向逐渐降低。有支管分布的一侧,气体分流使得流动边界层未能充分发展,而气流在环形管道内流动时,总管的内外侧压差会导致外壁边界层变薄、内壁边界层变厚效应。在二者的综合作用下,线形分流管道总管内的总压高于环形分流管道 I,但低于环形分流管道 II。无论是支管分流抑或环形管道内的二次流现象都会使总管截面上产生径向速度,使得流体流动呈现明显的三维特征,再加上轴向速度的情况下,气流在总管内的流线是螺旋式的,即产生了涡结构。环形分流管道 I 总管内的内外侧压差产生的二次流方向与支管分流产生的旋流方向相同,二者叠加使得总旋涡强度有所提高;环形分流管道 II 总管内的内外侧压差产生的二次流方向与支管分流产生的旋流方向相反,二者叠加使得总旋涡强度有所下降。

支管是管道分流作用的直接体现,形式多样,本计算模型中,支管为“喇叭形”喷注孔,管内已达到超音速流动状态。计算结果表明,分流管道各支管流量沿总管流向基本上是上升的。这与总管的总压分布趋势相反,而与总管的静压分布趋势相似,即支管流量很大程度上是受总管内的静压控制。另外,气流在环形管道 I 内流动时产生的离心力方向与支管流动方向相同,对支管流动有促进作用;气流在环形管道 II 内流动时产生的离心力方向与支管流动方向相反,对支管流动有阻碍作用。尤其在总管入口附近,这种作用的效果更为明显。在这些因素的综合作用下,环形分流管道 I 的流量波动幅度最小,在均匀分配气流方

面最具优势,线形分流管道居中,环形管道 II 最差。在分流管道的实际应用中,还可以通过增大总管截面积、采用多端供气方式、将支管孔径进行不均匀设计等方法进一步改善气流分配效果。

**致谢** 感谢国防科学技术大学高性能计算应用研究中心提供了开放式高性能计算资源。

### 参考文献:

- [1] 袁圣付. 连续波 DF/HF 化学激光器新型增益发生器的理论设计[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2002.
- [2] 施建华. 燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器 HYLTE 喷管流场的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.
- [3] 靳冬欢, 刘文广, 陆启生. 环形 HYLTE 喷管叶片的简化设计及加工方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1286 - 1290.
- [4] 王峻晔, 章明川, 吴东棣. 流体在多孔管分支系统中的流动机理研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 1999, 14(1): 34 - 44.
- [5] 李瑞江, 陈春燕, 吴勇强, 等. 大型径向流反应器中流体均布参数的研究[J]. 化学工程, 2009, 37(10): 28 - 31.
- [6] 吕志敏, 李春忠, 丛德滋, 等. 环形流道变质量流动的静压分布模型[J]. 华东理工大学学报, 2001, 27(6): 623 - 625, 665.
- [7] 李瑞江, 陈允华, 朱子彬. 列管反应器中环形分布器内流体均布的探讨[J]. 化学工程, 2009, 37(3): 20 - 22, 26.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [9] 周松, 王传傅, 马强. 内燃机换气系统弯曲圆形管道流场的三维数值模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(5): 35 - 42.
- [10] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.

(上接第 24 页)

### 3 结论

(1)在低飞行高度或高飞行马赫数时,发动机有较宽的推力调节范围;

(2)在同一燃气发生器喷喉面积时,随着飞行高度降低或飞行马赫数增加,补燃室压强升高,空燃比增大,但发动机推力系数降低;

(3)在同一飞行马赫数或飞行高度时,随着燃气发生器喷喉面积变小,燃气发生器流量增加,补燃室压强增加,空燃比降低,而发动机推力和推力系数增加。

### 参考文献:

- [1] Fry R S. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(1): 27 - 57.

- [2] Besser H L, Strecker R. Overview of Boron Ducted Rocket Development During the Last Two Decades[M]. Kuo K K, Pein R, eds, Begell House Publishing Co. and CRC Press, Inc., 1993: 133 ~ 181.
- [3] 牛文玉, 于达仁, 鲍文, 等. 燃气流量可控的固体火箭冲压发动机燃气发生器动态特性[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(2): 145 - 148.
- [4] 鲍福廷, 黄熙君, 张振鹏. 固体火箭组合发动机[M]. 北京:中国宇航出版社, 2006: 31 - 43.
- [5] Wilkerson F S, Laucac J T. Variable Flow Solid Propellant Gas Generator for Missile Control System[R]. AIAA Paper 81 - 1464.
- [6] 郭健. 固体燃料冲压发动机工作过程理论与试验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [7] 张炜, 方丁酉, 夏智勋. 固体火箭冲压发动机的工作特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(4): 19 - 22.
- [8] 曹军伟, 徐东来, 王虎干. 固体火箭冲压发动机工作包线分析[J]. 航空兵器, 2006, 19(1): 53 - 56.
- [9] 孙娜, 吴虎, 郑书娥, 等. 壅塞可调固体火箭冲压发动机性能计算[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(11): 2893 - 2897.