直射式喷嘴流动特性的数值和试验研究

熊溢威,李 锋,高伟伟,罗卫东,赵 凯,王昌盛 (北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京100191)

摘要:加力燃烧室喷油杆多采用直射式喷嘴,为进一步分析影响喷油杆通流能力的因素以及喷嘴内部燃油空化的问题,进行 了数值和试验研究。选取了 Schnerr-Sauer、Singhal 及 Zwart-Gerber-Be lamri 三种空化模型进行比较后,采用 Schnerr-Sauer 空 化模型进行计算,对喷嘴的流量系数、空化区域以及空化源进行了数值模拟,对 2 种典型直射式喷嘴进行了试验分析。结果表明:喷 孔长径比、开孔位置对流量系数影响较大,喷孔前加过渡段能够起到一定的稳流、消除空化的作用,在喷孔大锐角入口处形成明显 的空化源,空化体积分数随压力、壁厚和入口段变化,进一步计算发现当进口倒角为 30°~45°或者圆角,倒角比 *W/D*=0.2 左右时能 有效抑制燃油空化。

关键词:直射式喷嘴;加力燃烧室;流量系数;空化;喷油杆;航空发动机 中图分类号: V233.2+2 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.06.011

Numerical and Experimental Study of Flow Characteristic of Direct Sprayed Nozzle

XIONG Yi-wei, LI Feng, GAO Wei-wei, LUO Wei-dong, ZHAO Kai, WANG Chang-sheng

(School of Energy and Power, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Direct sprayed nozzles are always applied in the fuel injector of afterburner. In order to analyze the factors influencing the flow capacity of the fuel injector and find out the problem of kerosene cavitation in the orifice, numerical simulations and experiments were conducted. Comparing three cavitation models of Schnerr–Sauer, Singhal and Zwart–Gerber–Belamri, and the Schnerr–Sauer cavitation model was chosen. Simulations of nozzle's flow field were performed to analyze the discharge coefficient, cavitation areas and cavitation source. Experiments on two typical types of nozzle were conducted. The results show that L/D and location of the orifice both have obvious influence on discharge coefficient, and a transition in front of the orifice can steady the flow and weaken the cavitation in some degree. It also shows that apparent cavitation source is formed at the entry of orifice which is influenced by kerosene pressure, wall sickness and entry flow field. Thus the methods of lower cavitation come into being. A specially designed inner ring chamfer can effectively weaken the cavitation when the entry is rounded or the chamfer angle comes between 30° and 45° with a chamfer ratio of 0.2.

Key words: direct sprayed nozzle; afterburner; discharge coefficient; cavitation; fuel injector; aeroengine

0 引言

加力燃烧室喷油杆是接在燃油总管上负责燃油 在加力燃烧室中输运和雾化的组件,决定着燃油浓度 分布,直接影响加力燃烧室的台架性能和空中特性。 由于加力燃烧室对喷油杆与燃油间的通流性能要求 较高^[1-2],须保证全加力状态下具有最佳燃油浓度分 布,且在小加力和部分加力状态下也应有较好的燃油 浓度分布和燃烧效率,在发动机包线范围内任何飞行 状态点下和飞机的各种姿态下,燃油压力和发动机推力无明显脉动,即便在猛推油门和猛收油门的情况下均能可靠工作。因此,研究燃油管路的流动特性,是深入分析加力燃烧室中的流场特性和燃烧特性等重要参数的基础¹³⁻⁴。

加力燃烧室喷油杆多用直射式喷嘴,这种喷嘴结 构简单质量轻,流体阻力小,并具有较好的维护性^[5]。 喷嘴的流量系数是衡量喷嘴通流能力的指标,在数值 上等于喷孔的实际流量与理论流量之比。当燃油喷嘴

收稿日期:2016-04-07 基金项目:国家自然科学基金(50476005)资助

作者简介:熊溢威(1992),男,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机燃烧室热端部件流动传热;E-mail:xiongyiwei@buaa.edu.cn。

引用格式: 熊溢威,李锋,高伟伟,等. 直射式喷嘴流动特性的数值和试验研究[J]. 航空发动机,2016,42(6):68-75. XIONG Yiwei,LI Feng,GAO Weiwei,et al. Numerical and experimental study of flow characteristic of direct sprayed nozzle[J]. Aeroengine,2016,42(6):68-75.

通道中流动的局部静压等于蒸汽压力 Pv 时,部分燃 油蒸汽从燃油中释出,形成气液2相共存,造成流量 系数减小和流量不稳定,这种现象称为空化(cavitation)。喷嘴喷孔较小,直径一般在1mm以下,对于此 类小孔口出流的问题,已有很多研究,郭成富®对不同 几何参数喷孔进行了试验研究,得出了一系列喷孔流 量系数,但测得的数值偏高;曹睿四设计试验研究了孔 流内部的流动损失问题,以及不同种类的孔流损失的 差异。近年来,开始重视对小孔内的空化问题的分析, 有许多针对柴油机高压喷嘴空化的计算分析 [8-10],柴 油机喷嘴与直射式喷嘴空化原理相似;能够直接观察 到空化现象的是将喷孔按照相似准则放大,如 Giannadakis^{[11}将喷孔放大进行空化机理试验研究:王忠远^[12] 等针对柴油机喷嘴通过透明放大进行结构参数的研 究,但这种放大与真实小孔内部的流动有一定区别。 最接近喷孔真实流场的是直接对其测量。Alora Sou^[13] 应用 LDV 测量了喷嘴内的空化,探明空化初生的位 置;王少林¹⁴⁴采用高速摄像仪对直射式喷嘴的空化以 及雾化进行试验研究:Tomov^[15]通过高速摄像机观察 透明水平文丘里喷嘴内空泡的分布和结构。对于空化 计算的不同处理,有多种空化模型,薛瑞鸣对基于 Rayleigh-Plesset 方程的几种空化模型进行比较,认为 Schnerr-Sauer 模型得到的壁面压力系数分布和试验 值最为接近;还有对空化模型进行改进和优化的[17-19], 对空化生成和发展、溃灭机理进行模拟。

本文对 2 种典型的燃油支管直射式喷嘴进行了 计算和试验,以流量系数大小来衡量空化对喷孔通流 特性的影响,通过计算模拟来分析喷孔内部的空化 域、空化源和空化体积分数,并对喷孔长径比 L/D、倒 角度、倒角比 W/D 等喷嘴的结构进行计算,以得到抑 制空化的方案,并通过试验来对比验证。

1 数值计算

对如图 1 所示 A、B 2 型喷嘴的通流能力、空化 特点进行计算模拟。A 型喷嘴喷油杆(管)外径 12 mm、内径 10 mm,喷嘴孔距离端面尺寸分别为 10、 20、35 mm;B 型喷嘴喷油杆(管)外径 8 mm,内径 6 mm,喷孔出口距离管中心线 10 mm,喷嘴孔距离端面 尺寸也分别为 10、20、35 mm,每个喷油杆每次只开 1 个位置的孔。

1.1 建模及计算条件

由于结构简单,喷油杆前部的流动状况并不复

杂,只是在喷孔入口附近及靠近端面处的流动状况开 始变得复杂,按照流体域建立模型并分别在离端面相 应的距离设置喷孔。整个流域采用 Gambit 软件进行划 分,整体采用结构化网格,孔内区域、近壁面区域以及 喷孔进口附近压力及速度梯度较大的区域进行网格加 密,总网格数为11.3万。B型喷嘴网格如图2所示。



按照喷油杆的工作压力,依次取不同的进口压力 (0.2~4.0 MPa)进行计算,不同型号的喷嘴见表 1。喷 孔直径均为 0.6 mm,均取喷孔离喷油杆端面 20 mm

	表 1	喷嘴型号	mm
编号	管壁开孔	编号	管壁开孔
	(孔径/壁厚)		(孔径/壁厚)
A1	0.6/1.0	B1	0.6/0.3
A2	0.6/1.4	B2	0.6/0.6
A3	0.6/2.0	В3	0.6/1.0
A4	0.6/2.5	B4	0.6/1.2
A5	0.6/3.0	B5	0.6/2.0
		В6	0.6/2.5

处,但是支管的壁厚不同,也就是喷嘴的长径比不同。 需要指出的是,B型喷嘴长径比范围取得比较大,是 考虑到A型喷嘴是直接在壁面上开孔,壁厚既不能 太厚也不能太薄,而B型喷嘴带有侧向支管,侧向支 管端面厚度为喷孔壁厚,因此壁厚变化的范围相对A 型来说更大一些。

1.2 空化计算模型验证

在进行空化数值计算时多采用基于 Rayliegh-Plesset方程空化模型,其中比较有代表性的 有 Schnerr-Sauer、Singhal 及 Zwart-Gerber-Belamri3 种空化模型。对于这3种空化模型的比较和分析,已 有很多研究成果,但是对于数值计算来说,影响结果的 因素很多,不一而足.本文通过已有的试验数据与各种 模型进行对比,以此来选择当前情况下的最优方法。

以表 1 中 A2 型号的喷嘴进行计算,在不同进口 压力下,出口压力为标准大气压,湍流模型为 realizable *k*-ε 双方程模型,近壁面采用增强壁面处理,并 在计算中验证 *y**<2 或 *y**>15,微分方程的离散采用 SIMPLE 离散算法,采用 2 阶迎风差分格式进行计算。 将 3 种空化模型与不采取空化处理的算法以及试验 数据进行对比,得到如图 3 所示的结果。



从图中可见, 空化对喷油杆内的流动具有较大影 响, 不采取空化模型处理的计算结果所得出的流量系 数值最大, 随着压力的升高有进一步增大的趋势, 且 走势与试验及空化模型均不同; 在 3 种空化模型中, Schnerr-Sauer 模型和 Zwart-Gerber-Belamri 模型都与 试验结果比较接近, 并且在实际计算中发现 Schnerr-Sauer 模型收敛较快, 因此在此后计算中选用 Schnerr-Sauer 空化模型。

1.3 计算结果

采用 Schnerr-Sauer 空化模型和方案分别对 A、B

系列喷嘴进行计算,得到如图 4 所示的 A 型系列喷 嘴流量系数随进口压力的变化特性。从图中可见,在 各个工况下,随压力的升高,喷嘴的流量系数先增大 后减小,即喷嘴的通流能力先变大后减小,并且流量 系数最大时进口压力都在 2.0~2.5 MPa 之间;同时, 从喷嘴 A1 到 A5 出口壁厚由 1 mm 增加到 3 mm,流 量系数相应也在不断增大,但是这种增大的效果不明 显,几个型号的喷嘴流量系数大致都在 0.655 左右, 相差不大。



对于 B 型喷嘴的计算结果如图 5 所示。与 A 型 喷嘴的不同,B 型喷嘴流量系数随壁厚增大没有明显 变化,甚至当壁厚变大之后流量系数反而减小(如 B6 型),并且 B 型喷嘴的流量系数随压力变化都较为平 稳,各型喷嘴的流量系数在不同进口压力下基本差不 多,但是不同型号之间流量系数有一定差别,差值比 A 型喷嘴的大。



由于流场结构不同,A、B 2 型喷嘴流量系数随壁 厚变化呈现不同规律。前面提到,流场变化较大都是 在喷孔附近,A 型喷嘴的流体进入喷孔之前,流体速 度方向与喷嘴出口方向基本是垂直的关系,而B型 喷嘴在喷油杆与喷孔之间加了小支管进行过渡,由此 造成的结果是:B型喷嘴的流场更加均匀,在喷孔内 部沿流向是轴对称的,如图6、7所示。因此A型喷嘴 对于空化的影响更敏感,表现出来的结果就是对于壁 厚的变化和压力的变化更为显著。



图 7 B3 型喷嘴出口流场(2.0 MPa)

A1型喷嘴和 B3 型喷嘴具有相同的壁厚,只是喷 孔设置方式和结构不同,在不同供油压力下,2 型喷 嘴喷孔内部的气相体积分数分布如图 8、9 所示。取喷 孔中心截面的一半,供油压力从左至右依次为 1.0、 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 MPa,反映出空化的分布随 供油压力的变化情况。



图 8 A1 型喷嘴在不同压力下的气相体积分数

从图 8、9 中可见,随着喷射压力不断提高,空化 的程度越来越严重,表现为空化的长度越来越长,图 中的红色及黄色区域即空化发展源,A1 型在喷射压 力达到 3.0 MPa 时,空化区域到达出口处,为完全空 化状态,而 B1 型在 4.0 MPa 时仍未到达完全空化,并 且在相同压力下,B3 型喷嘴的空化域均小于 A1 型喷





嘴,B3型喷嘴随进口压力增大空化增强不明显,与之前对于流量系数的分析一样,B型喷嘴带有过渡支管,可以在一定程度上消除部分空化。

A 型喷嘴在 2.5 MPa 供油压力下,不同壁厚的喷 嘴喷孔内部的气相体积分数分布如图 10 所示。取喷 孔中心截面的一半,从左至右依次为 A1、A2、A3、A4 和 A5 型喷嘴。从图中可见,从 A4 开始,空化区域已 经完全填满出口,这是空化由喷孔入口处向后发展的 结果。



2 试验分析

为探究空化的影响,计算所采用的喷孔均位于距 喷油杆端面 20 mm 处,而实际上喷孔设置在喷油杆 的不同位置同样也会影响到流量系数的数值。这里分

别设计 A、B 型试验件各 3 件,分别设置喷孔在距 离端面 10、25、35 mm 处, 喷孔 直径均为 0.6 mm, 壁厚 1 mm,试验件如图 11 所示。



图 11 2 型喷油杆试验件

采用高压气瓶及压力油罐进行供油,由压力表指 示进口油压,分别用水和航空煤油进行试验,试验中 收集喷出的流体进行称重,试验时间保证在 60 s 以 上,电子秤精度为 0.1 g,每支喷嘴多次试验取平均 值,结果分别如图 12、13 所示(A10 代表喷孔距离端 面 10 mm 的 A 型喷嘴)。



从试验结果来看,流量系数与喷孔的开孔位置有 关,试验中取的3个位置中,离端面位置较近时流量 系数较大,A型和B型喷嘴用水和油试验都能表现出 这一规律;而且从曲线走势上看,B型比A型喷嘴流 量系数走势更稳定,波动更小,这也印证了之前的计 算结果。

在试验过程中,对于喷孔的空化现象虽无法直接 观察,但是在实际操作中发现,通过解压阀控制个别 点的进口压力时,解压阀从大往小调节和从小往大调 节得到的结果不一样,排除掉试验系统的原因之后, 认为这是由于空化域发展的大小不同引起的。上面说 到,进口压力大的情况下发展的空化区域大,而不同 调节方式正好对应了空化域从小到大和从大到小的 发展,而且在压力较小时这种现象就更为明显。

3 改进措施

喷嘴2相传质如图14所示。从图中可见,空化主 要产生于喷嘴的尖锐入口角处,入口角为直角,流体 倾向于分离并形成颈缩,形成低压区,低于燃油饱和 蒸汽压的区域就形成了空化的质量源。因此,若能改 变入口处的结构,使之不形成尖锐入口角,就能减少 燃油的空化。



图 14 A1 型喷嘴在 4 MPa 下喷孔空化质量源

3.1 建模及计算方法

在喷孔入口处加倒角能够有效地缓解燃油的空 化,对于如图 15 所示的直射式喷嘴的结构,上方为燃 油入口,入口倒角由角度 α 和倒角比 W/D 决定,分别 决定倒角的角度和深度。对其建模并进行网格划分, 如图 16 所示。总网格数为 18.9 万,最大网格质量为 0.59,采用整体结构化网格,近壁面采用边界层网格, 按照试验条件进行边界条件设定,进口采用压力进口 条件,根据不同状态调整进口压力,出口采用压力出 口,设定为标准大气压。喷嘴喷孔模型选用直径 D=1



3.2 计算结果

分别对倒角为圆角 0°、15°、30°、45°和 60°, 倒角 比 W/D=0、0.1、0.2、0.3、0.4 的喷孔进行计算。对倒角 角度的计算结果如图 17、18 所示。



通过分析不同进口倒角喷孔的流量系数可知,在 喷孔进口进行倒角可以显著提高喷嘴的流量系数。当 喷嘴为简单的锐角进口时,其流量系数稳定在0.693 左右,但当进口处设置成倒角孔时,无论是斜倒角还 是圆角,其流量系数都有很大程度地提高。其中倒



30°斜角孔增幅最大达到 15.2%,而倒 60°斜角孔增幅 最小也达到 7.1%,倒 15°斜角和倒 45°斜角增加幅 度相似,都在 12.5%左右。由此可知当喷嘴进口倒斜 角时,其对流量系数增大的影响程度与倒角大小有 关,即随着倒角的增大,流量系数的增大程度呈现先 增大后减小的趋势,在 30°左右时达到峰值。倒圆角 孔的增幅仅次于倒 30°斜角孔,对流量系数的增大程 度也非常显著。因此,若以单纯增大喷嘴流量系数为 目的,将喷嘴进口倒 30°~45°斜角或者是圆角可以达 到很好的效果。

进一步对圆角 30°、45°的倒角进行计算, 探究在 不同倒角深度,即不同倒角比下的流量特性,如图 19~21 所示。





图 21 倒角 45°不同 W/D 的流量系数

从图中可见,在相同倒角、不同 W/D 的情况下, 流量系数均随着 W/D 的增大而增大,造成这种现象 的原因是随着 W/D 的增大,喷孔入口处的开口面积 也就越大,流体在进入喷孔时的压力损失和速度损失 会相应减小,进而使流量系数增大。此外,当 W/D < 0.2 时,流量系数随 W/D 增大的增加幅度是比较大 的;当 W/D > 0.2 时,其增大的幅度减小。尤其对于倒 角 45°的情况,当 W/D > 0.2 时,其流量系数基本不 变,达到 1 个稳定值。说明 45°倒角在实际的应用过 程中有其独特优势,可以适应较大范围的倒角比,这 给加工带来了一定的便利性。

需要指出的是,这里是简化了喷孔的结构并利用 对称性进行计算,实际上在喷油杆侧壁上开孔的喷嘴 入口并不是严格对称的,因此在具体结构上,还可以 在喷孔周向不同位置上采用不同的倒角方案。

4 结论

通过商业计算流体软件 Fluent 进行模拟并结合 试验分析,得到加力燃烧室喷油杆直射式喷嘴的流 动特性,重点分析了喷嘴喷孔内部的空化现象,并 对减小喷嘴内空化的措施进行了探索,得到主要结 论如下:

(1)选用 Schnerr-Sauer 空化模型计算发现,流 量系数随长径比变大有先增大后减小的趋势,与在 喷油杆支管上直接开孔的 A 型喷嘴相比,在支管上 加过渡小管后再开孔的 B 型喷嘴的流动特性更加 稳定,表现为流量系数对压力变化、喷孔长径比变 化敏感度低。

(2)在喷嘴大锐角进口处产生明显的空化源,并 向后发展,压力越高、长径比越大,空化域越长,带过 渡段的 B 型喷嘴具有一定的消除空化的能力。

(3)试验发现,在相同长径比条件下,喷孔位置离

端面较近的流量系数大,B型喷嘴在试验中也表现出 较为稳定的流量系数曲线。

(4) 在喷嘴进口进行倒斜角或倒圆角对抑制空 化、提高喷嘴流量系数有很大作用,进口倒角在 30° ~45°或者倒圆角,倒角比 W/D=0.2 左右时具有较好 效果。

参考文献:

[1] 航空发动机设计手册总编委会编. 航空发动机设计手册:第11册
 [M].北京:航空工业出版社,2001:132-133.

Editor Committee of Aeroengine Design Manual. Aeroengine design manual:11th album [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2001: 132-133. (in Chinese)

- [2] Jeffery A L, Torence P B, Derk S P. Development needs for advanced afterburner design[R]. AIAA 2004–4192, 2004.
- [3] Fu Y, Tao Z, Xu G, et al. Experimental study of flow distribution for aviation kerosene in parallel helical tubes under supercritical pressure
 [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90(5):102-109.
- [4] Wang J, Wang H. Discrete method for design of flow distribution in manifolds[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89:927–945.
- [5] 熊成红, 涂泉, 黄河. 某型发动机燃油总管性能调试技术研究[CJ// 熊成红.第十五届中国科协年会第 13 分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集. 北京:航空动力学报,2013:1-5. XIONG Chenghong, TU Quan, HUANG He. A certain type of engine fuel manifold performance debugging technology research[C]// The 15th Annual Meeting of China Association for Science and Technology at the Venue 13: Aircraft Engine Design, Manufacturing and Application Technology Conference Proceedings. Beijing: Journal of Aerospace
- Power, 2013:1-5.(in Chinese) [6] 郭成富,王秀兰,王勇. 倒(圆)角进口圆孔流量系数的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997(4):10-15.

GUO Chenfu, WANG Xiulan, WANG Yong. The study of experiment for discharge coefficient of orifice with a chambering entry[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1997(4):10–15.(in Chinese)

[7] 曹睿,刘艳升,严超宇,等.垂直锐边孔口的自由出流特性(I)流动状态和孔结构参数对孔流系数的影响[J]. 化学工程,2008,59(9):
 2175-2180.

CAO Rui, LIU Yansheng, YAN Chaoyu, et al. Characteristics of vertical sharp-edged orifice discharge (I): effect of flow regime and configuration parameters on orifice discharge coefficient [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(9): 2175–2180 (in Chinese)

[8] 鄂加强,邢德跃,王曙辉,等.柴油机高压喷油嘴喷射过程空化效应 数值模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(2):45-51.

E Jiaqiang, XING Deyue, WANG Shuhui, et al. Numerical simulation of cavitation effect in the injection process of high pressure injector nozzle in diesel [J].Journal of Hunan University (Natural Science), 2013,40 (2):45-51.(in Chinese)

- [9] 沃恒洲,姚智华,王国丰,等. 发动机喷嘴内部空化流动的数值模拟 研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(5):651-654.
 WO Hengzhou,YAO Zhihua,WANG Guofeng, et al. Numerical simulation of cavitation flow in engine nozzle [J]. Journal of Hefei University of Technology,2011,34(5):651-654.(in Chinese)
- [10] 成晓北,黄荣华,王志,等. 柴油机喷油器喷孔空泡雾化的研究[J]. 内燃机工程,2002,23(2):60-64.
 CHENG Xiaobei,HUANG Ronghua,WANG Zhi,et al. The study on injector nozzle cavitation atomization in a diesel engine [J]. Chinese

Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23 (2):60–64. (in Chinese)

- [11] Giannadakis E, Papoulias D, Gavaises M, et al. Evaluation of the predictive capability of diesel nozzle cavitation models [R]. USA: SAE Technical Paper, 2007.
- [12] 王忠远,孙剑,董庆兵,等. 柴油机喷孔内部空化效应的可视化实验研究[J]. 燃烧科学与技术,2012(3):280-287.
 WANG Zhongyuan,SUN Jian,DONG Qingbing,et al. Visualization of cavitation in diesel nozzle orifice [J]. Journal of Combustion Science and Technology,2012(3):280-287.(in Chinese)
- [13] Sou A, Tomiyama A, Hosokawa S, et al. Cavitation in a two dimensional nozzle and liquid jet atomization [J]. JSME International Journal, 2006, 49(4): 1253–1259.
- [14] 王少林,黄勇,邹婷,等. 空化对燃油喷嘴雾化的影响[J]. 推进技术,2014,35(3): 397-402.

WANG Shaolin,HUANG Yong,ZOU Ting,et al. Effects of cavitation in nozzle on spray[J]. Journal of Propulsion Technology,2014,35(3): 397-402.(in Chinese)

- [15] Tomov P, Khelladi S, Ravelet F, et al. Experimental study of aerated cavitation in a horizontal venturi nozzle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 70: 85–95.
- [16] 薛瑞,张森,许战军,等.对不同空化模型的比较研究[J].西北水 电,2014(2):85-89.

XUE Rui, ZHANG Miao, XU Zhanjun. Comparison and study on different cavitation models[J]. Northwest Hydroelectric, 2014(2):85–89.(in Chinese)

[17] 王柏秋,王聪,黄海龙,等.考虑空泡界面相变作用的空化模型及应用[J].哈尔滨工业大学学报,2013(1):30-34.

WANG Baiqiu, WANG Cong, HUANG Hailong, et al. A cavitation model with phase change on the cavity interface and its application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013 (1): 30–34. (in Chinese)

[18] 洪锋,袁建平,周帮伦.空泡半径非线性变化的空化模型及应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2015,43(10):15-20.

HONG Feng, YUAN Jianping, ZHOU Banglun. Cavitation model considering non-linear variation bubble radius and its application [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technique (Natural Science Edition), 2015, 43(10):15-20.(in Chinese)

[19] 张瑶,罗先武,许洪元,等. 热力学空化模型的改进及数值应用[J]. 工程热物理学报,2010(10):1671-1674.

ZHANG Yao, LUO Xianwu, XU Hongyuan. The improvement and numerical applications of a thermodynamic cavitation model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010(10):1671-1674. (in Chinese)

(编辑:栗枢)