

考虑汽化的喷嘴高温气流注水两相流动规律

张江华, 史琼艳

(常州机电职业技术学院 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 针对某火箭发动机考虑汽化的注水气液两相流问题,研究了液态水的汽化机理。根据不同环境压力下水的饱和温度建立了汽化模型,编制适合于液态水的专用汽化相变求解程序,并通过添加汽化组分源项及热源项的方法将汽化相变计算嵌入到多相流场控制方程中,实现了考虑液态水汽化相变的三维多相流场求解。结合经典算例进行了对比,特征点的两相流场温度计算值和试验的误差控制在8.5%以内,验证了程序三维计算的可靠性。距火箭喷嘴不同距离横截面的两相质量转化率曲线显示,质量转化率从最低值上升到最高值,然后降低到最低值,揭示了考虑相变的气液两相相间反应转化机理。该方法可为运载火箭发射平台发射起始阶段水室的汽化降温提供参考。

关 键 词: 喷嘴; 气液两相流; 汽化相变; 演化机理; 质量转化率

中图分类号: V211; O359+.1

文献标志码: A

Regularity of two-phase flow with vaporization produced by injecting water to the high temperature airflow for nozzle

ZHANG Jianghua, SHI Qiongyan

(College of Mechanical Engineering, Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Changzhou Jiangsu 213164, China)

Abstract: In order to research the gas-liquid two-phase flow problem considering vaporization phenomenon for the rocket engine, the vaporization mechanism of liquid water was studied. The vaporization model for water was established according to the saturation temperature of water at different pressures. A program to solve the vaporization phase change process for liquid water was written on the basis of vaporization model, and the vaporization phase change calculation results were added to the multi-phase flow field equations as vaporization component source term and heat source term, so the three-dimensional multiphase flow field numerical solution considering the liquid water vaporization phase change was realized. Combining with the classical example, the errors of the temperature calculating values and experimental values of the two-phase flow field for the feature points were controlled within 8.5%, verifying the reliability of the three-dimensional calculation of the program. The mass conversion rate curves of two-phase from the different distance of the rocket nozzle showed that the mass conversion rate of two-phase rose from the lowest value to the highest value and then decreased to the lowest value, the transformation mechanism of the liquid and gas phases was revealed. The method can provide direct reference for the vaporization and

收稿日期: 2016-12-01

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20160296)

作者简介: 张江华(1973—),男,副教授,硕士,主要研究领域为机电一体化。

引用格式: 张江华,史琼艳. 考虑汽化的喷嘴高温气流注水两相流动规律[J]. 航空动力学报,2017,32(7):1545-1553. ZHANG Jianghua, SHI Qiongyan. Regularity of two-phase flow with vaporization produced by injecting water to the high temperature airflow for nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1545-1553.

cooling of the water chamber in the launching stage of launch platform for launch vehicle.

Key words: nozzle; gas-liquid two-phase flow; vaporization phase change; evolution mechanism; mass conversion rate

射流(包括水射流和气体射流)系统中,喷嘴是起着压力负载与能量转换作用的关键部件。以喷嘴射流为研究对象的气液两相流问题广泛存在于农业^[1]、核电^[2]以及航空航天^[3]等领域。研究者们已经通过大量试验研究了喷嘴喷水气液两相流问题。朱兴业等^[4]以喷洒动能为评价标准,采用激光雨滴谱仪测量技术建立了全射流喷嘴单个水滴动能分布规律的预测模型,通过大量试验研究了各单因素和喷洒动能分布之间的关系。杨友胜等^[5]通过试验研究了高压高速水射流通过喷嘴后能量损失的原因和影响系数。Mohammed等^[6]研究了多个压力下全射流喷嘴单位体积动能的分布规律,发现沿径向的单位体积水滴动能随压力减小而增大。Thompson 和 James^[7]通过试验研究发现喷洒水滴落地时的水滴动能与土壤表面结构的破坏程度密切相关,土壤的入渗能力随水滴动能的增大而降低。随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的深入发展,研究气液两相的作用机理成为研究热点^[8-10],从目前的发展趋势来看,这也是科学解释众多试验现象的必要手段。计算流体力学^[11]利用离散化数值计算方法,通过边界设置以及数值模拟,在理论的基础上,解决一些复杂的流体流动和相变问题。它具有耗时短、成本低、不受物理模型限制的优点,能给出有效计算结果。

针对两相流问题发展了很多理论模型, Drew, Ishii 等^[12-13]推导了两相流基本方程,为两相流的发展奠定了基础。两相流理论模型有宏观连续介质模型和微观运动模型^[14]。对于三维两相瞬态复杂流动问题,采用微观运动模型还无法推导出完整的解析解,而宏观连续介质数理模型的发展经过了均相流动、分相流动、漂移、双流体模型等阶段^[15]。目前,在气液两相流领域应用较多的模型有 VOF^[16]模型(volume of fraction model),混合物模型^[17](mixture model),这两种模型足以捕捉多数试验现象。VOF 模型多用于多相界面的捕捉^[18],mixture 模型考虑了界面传递特性以及两相间的扩散和脉动,主要用于模拟各相有不同速度的耦合效应的两相流^[19]。

郑陆松等^[2]主要研究了核电传热管内外两侧的温差及其产生的热应力分布规律。文献[2]中

对水介质的相变、传热管内外温度温差产生的原因并没有给出论述,而这又是工质水相变降温,减小热应力的直接因素。朱进林等^[8]基于计算流体力学方法讨论了不同喷嘴方案对应的气液两相流的流场特征分布规律,包括静压场、速度场,但液态水的相变问题没有研究,而这是冷凝喷淋器对关键设备降温的核心问题。袁丹青等^[9]采用计算流体力学的方法为多喷嘴射流泵内部流动规律的理论研究和结构参数设计提供了新手段,并结合试验验证了该方法的可靠性。Hou 等^[20]在两相流基础上对喷嘴喷射特性进行了研究,分析了入口参数对流体速度场和运动轨迹的影响。Datta 等^[21]利用 VOF 对旋转压力式喷嘴内部流场进行模拟,探讨了喷嘴几何参数对喷嘴喷淋时空气芯以及雾化锥角等特性参数的影响。Lee^[22]采用 mixture 模型计算气液两相流动,并推导出详细的汽化和液化理论。曹嘉怡、甘晓松等^[23-24]采用 mixture 两相流模型研究了水下喷嘴超声速射流动力特性。

从目前研究来看,采用计算流体力学的方法研究气液两相流内部流动问题的案例较多,而关于气液两相流相变问题的直接研究论述较少。基于以上研究现状,本文以高温气体射流注水试验为基础,研究液态水的汽化相变问题。高温高速气流和液态水接触,液相遇到高温气流汽化相变,并通过质量、动量交换和热量传递,使流场结构和热环境发生明显变化,这是典型的考虑汽化的复杂气液两相流动问题。结合学者们前期的研究,综合考虑计算成本和计算精度,本文采用 mixture 模型,编制汽化相变求解程序并嵌入到两相流控制方程,建立考虑汽化的气液两相流模型。最后,以火箭发动机为对象,建立了三维模型,实现了考虑液态水汽化相变的三维多相流场求解,并通过算例验证了汽化相变程序三维计算的可靠性与有效性。

1 气液两相流模型和数值计算控制方法

1.1 基本控制方程与湍流模型

在理论计算中,为实现多相流求解方程的封闭性,对气体和液态水的性质及流动状态作如下假设:①气体为理想气体,液态水不可压缩;②气体参

数取平均参数;③多组分气体满足理想气体混合。

根据质量守恒定律,对多相流的质量守恒方程表达式如下:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \text{div}(\rho_m \mathbf{v}_m) = S_m \tag{1}$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \tag{2}$$

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \tag{3}$$

式中 ρ_m 为混合物的平均密度; ρ_k 是第 k 相物质的密度; $\mathbf{v}_m$ 是混合物的平均速度矢量; $\mathbf{v}_k$ 是第 k 相物质速度矢量; φ_k 是第 k 相物质体积分数,通过方程(4)求解; S_m 表示液态混合物的总质量的源项。

对于多相流模型,除了混合物质量守恒方程外,还需要一个辅助的副相的体积分数的求解方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_k \rho_k) + \text{div}(\varphi_k \rho_k \mathbf{v}_k) = \sum_{j=1}^n (\dot{m}_{jk} - \dot{m}_{kj}) \tag{4}$$

式中 $\dot{m}_{jk}$ 表示从 j 相到第 k 相的质量传输率, $\dot{m}_{kj}$ 表示从 k 相到第 j 相的质量传输率。

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_{m,i}) + \text{div}(\rho_m \mathbf{v}_m u_{m,i}) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_m g_i + \\ & \text{div}(\mu_m \text{grad} \mu_{m,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k u_{\text{dr},k,i} u_{\text{dr},k,i} \right) + F_i \end{aligned} \tag{5}$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \mu_k \tag{6}$$

$$\mathbf{v}_{\text{dr},k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \tag{7}$$

其中 $u_{m,i}$ 表示混合平均速度 $\mathbf{v}_m$ 在 i 方向上的速度分量; n 表示第 n 相; p 表示离数单元内压力; x_i 表示坐标分量; F_i 表示由其他体积力和其他现象引起的动量源项在 i 方向的分量; μ_m 为混合物的平均黏度,如式(6); $\mathbf{v}_{\text{dr},k}$ 为第 k 相的迁移速度,如式(7),使得生成了式(5)等号右边的第 4 项; $u_{\text{dr},k,i}$ 表示第 k 相的迁移速度 $\mathbf{v}_{\text{dr},k}$ 在 i 方向上的速度分量。

混合模型的能量守恒方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\varphi_k \rho_k h_k) + \text{div} \sum_{k=1}^n (\varphi_k \rho_k \mathbf{v}_k h_k) = \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\kappa_{\text{eff}} \text{grad} T_e) + S_{\text{vap}} + S_e \end{aligned} \tag{8}$$

式中 h_k 表示第 k 相物质的总比焓; κ_{eff} 为有效热导率, $\kappa_{\text{eff}} = \sum_{k=1}^n \varphi_k (\kappa_k + \kappa_t)$, κ_t 为湍流热导率; κ_k 为第 k 相的热导率; T_e 为此刻单元内温度; t 为时间;本文中 S_{vap} 表示液态水汽化相变热源项, $S_{\text{vap}} = -(\dot{m}_{\text{lv}} - \dot{m}_{\text{vl}})Q_q$, Q_q 为液态水的汽化潜热, $\dot{m}_{\text{lv}}$ 为液态水到水蒸气的质量转化率, $\dot{m}_{\text{vl}}$ 为反向质量转化率; S_e 为其余体积热源项。

1.2 基本液态水汽化模型

液态水在不同压力下达到饱和温度时,液态水就会相变转化为气态,反之气态水就会液化。液态水在不同温度下的饱和温度和汽化潜热参考文献[25],部分参数如表 1 所示。

水的汽化相变过程(冷凝为逆过程)如图 1 所示,图中 T 为气液混合物温度, $S_1 \sim S_4$ 为气液混合物的 4 个状态。单位质量的液态水,起初状态

表 1 液态水汽化相变参数表

Table 1 List of vaporization phase change of liquid water

压力/ MPa	饱和 温度/K	汽化潜热/ (kJ/kg)	压力/ MPa	饱和 温度/K	汽化潜热/ (kJ/kg)	压力/ MPa	饱和 温度/K	汽化潜热/ (kJ/kg)	压力/ MPa	饱和 温度/K	汽化潜热/ (kJ/kg)
0.001	279.98	2484.5	0.080	366.51	2274.3	1.000	452.88	2014.4	5.000	536.33	1638.2
0.002	290.51	2459.8	0.090	369.71	2265.9	1.100	457.06	1999.3	6.000	548.56	1569.4
0.003	297.98	2444.2	0.100	372.63	2258.2	1.200	460.96	1985.0	7.000	558.80	1503.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.009	316.79	2397.5	0.250	400.43	2181.8	1.800	480.10	1910.5	13.000	603.81	1129.4
0.010	318.83	2392.6	0.300	406.54	2164.1	1.900	482.79	1899.6	14.000	609.63	1065.5
0.015	327.00	2372.9	0.350	411.88	2148.2	2.000	485.37	1888.8	15.000	615.12	990.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.050	354.35	2305.4	0.700	437.96	2065.8	3.000	506.84	1793.5	20.000	638.71	585.0
0.060	358.95	2293.7	0.800	443.42	2047.5	3.500	515.54	1751.5	21.000	642.79	448.0
0.070	362.96	2283.4	0.900	448.36	2030.4	4.000	523.33	1711.9	22.000	646.68	184.8

为 S_1 ,持续加热,直到其变成过热蒸汽,3 个阶段 $S_1 \rightarrow S_2, S_2 \rightarrow S_3, S_3 \rightarrow S_4$ 分别如图 1 所示。其中 $S_1 \rightarrow S_2$ 为定压加热阶段,水相在这一阶段以液相存在,由于水相处在开放环境中,可以视为等压吸热阶段,这阶段吸收的热量为 Q_{21} ;对 S_2 状态的液态水继续加热,液态水沸腾汽化,如图中 $S_2 \rightarrow S_3$ 段所示,汽化过程中,液态水不断汽化成水蒸气,水蒸气与水的温度、压力均不变,所吸收的热量全部用于汽化相变过程,这阶段吸收的热量为 Q_{32} ;干饱和蒸汽持续吸收热量,温度会升高,该阶段的蒸汽称为过热蒸汽,这阶段吸收的热量为 Q_{43} ;单位质量的液态水从初始状态汽化为过热水蒸气,全过程所吸收的热量 $Q=Q_{21}+Q_{32}+Q_{43}$ 。

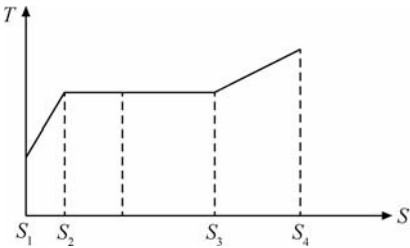


图 1 液态水的汽化流程

Fig. 1 Vaporization process of liquid water

对计算域中的每一个网格内的气相和液相进行求解,当混合物的温度大于水的饱和温度时,液态水吸收能量汽化为水蒸气;当混合物的温度小于水的饱和温度,水蒸气凝结为液态水。

液态水汽化、凝结公式:

$$\begin{cases} \dot{m}_{lv} = \lambda_{vap} \varphi_l \rho_l |T_l - T_{sat}| / T_{sat}, & T_l \geq T_{sat} \\ \dot{m}_{vl} = \lambda_{con} \varphi_v \rho_v |T_v - T_{sat}| / T_{sat}, & T_v < T_{sat} \end{cases} \quad (9)$$

式中 λ_{vap} 和 λ_{con} 分别为液相和气相的松弛因子,其数值大小会影响数值计算的收敛速度和稳定性,本文设 λ_{vap} 和 λ_{con} 均为 0.1; φ_l 和 φ_v 为计算单元内液相和气相的体积分数; T_l 为液态水的温度; T_v 为水蒸气的温度; T_{sat} 为当前状态下液态水的饱和温度。

在数值计算中,研究液态水的汽化规律,根据不同压力下水的饱和温度建立了汽化模型,编制适合于液态水的专用汽化求解程序,并将组分源项和热量源项添加到流场控制方程中,进而在 mixture 多相流模型的基础上耦合了适合液态水的汽化模型,实现喷嘴气体射流中考虑液态水汽化现象的多相流场的数值求解。

1.3 流场计算方法

采用有限体积法对流场的控制方程进行离散

处理;使用基于压力的耦合算法对气液两相流场进行解算,并采用双精度计算;湍流模型采用适合高雷诺数和低雷诺数的 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 模型^[26-27];壁面湍流计算采用标准壁面函数进行处理。

2 喷嘴注水汽化的数值计算与试验验证

2.1 边界条件与网格模型

为验证自编汽化程序的可靠性,将汽化程序嵌入到 mixture 模型中,并针对经典算例,展开气液两相流场验证计算。计算边界如图 2 所示,网格模型如图 3 所示,图 3(b)中给出了 xOy 截面网格示意图。算例^[28]采用的是从喷嘴两侧往喷嘴轴线方向倾斜注水的方式,注水方向与喷嘴两侧夹角为 60° 。根据对称性算例选取 1/4 面对称三维模型计算域进行计算。水流交汇点距离喷嘴处约为 0.26 m,喷嘴出口距离冲击平板为 1.76 m,计算中,布置了和算例中一致的监测点。边界条件

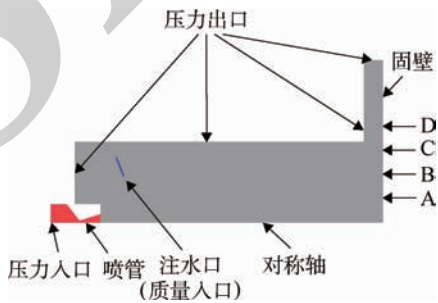
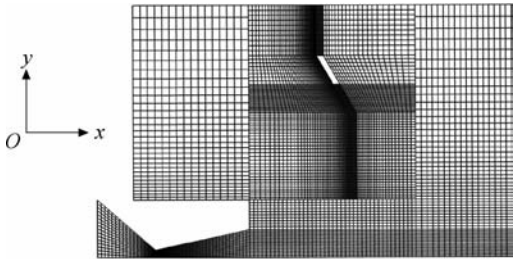


图 2 计算边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computation boundary



(a) 1/4 面对称三维结构网格



(b) xOy 截面网格示意图

图 3 网格示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mesh

设置如表 2 所示。在轴线区域和水管喷出区域,网格加密,网格总数量为 60 万,注水管数量为 2。

表 2 边界条件参数^[28]

Table 2 Parameters of boundary condition ^[28]			
边界	温度/K	压力/MPa	质量流量/(kg/s)
喷嘴入口	3 000	7	
压力出口	300	0.101 325	
注水口	300	0.301 325	3.6

2.2 喷嘴注水汽化模型验证

图 4(a)给出了算例计算稳定后轴线上温度的变化规律对比曲线,包括文献[28]中的不注水、注水工况。图 4(b)、图 4(c)中分别给出了注水工况及不注水工况的轴线温度相对误差绝对值分析曲线。可以看出本文在注水方案中轴线上的温度计算值和文献[28]中的计算值吻合较好,最大相对误差为 7.3%;不注水工况的最大相对误差 7.7%,吻合也较好。验证了本节采用 mixture 模型求解气液两相流的合理性和自编汽化程序的正确性,所采用的数值模型合理,且有效说明采用注水汽化方案对高温气流具有明显的降温效果。另外,为直观说明注水时液态水汽化对高温气流的降温效果,图 5 给出了注水与不注水的温度对比云图。从图中可以看出注水后,高温气流的影响范围明显缩小,撞击固壁面混合气流的温度明显降低。

结合图 4~图 6,可看出由于水射流的阻滞作用,气流核心区的部分动能转化为内能,前两个波节处,温度高于无注水射流;在距喷嘴 0.8 m 后,伴随着液态水大量汽化,吸收大量热,注水流场中轴线的温度大幅下降,同时在气液两相流离壁面的中间位置水蒸气的质量分数最大,聚集的水蒸气最多,在壁面液态水基本汽化完毕,水蒸气多表现为扩散,水蒸气的质量分数有所降低。

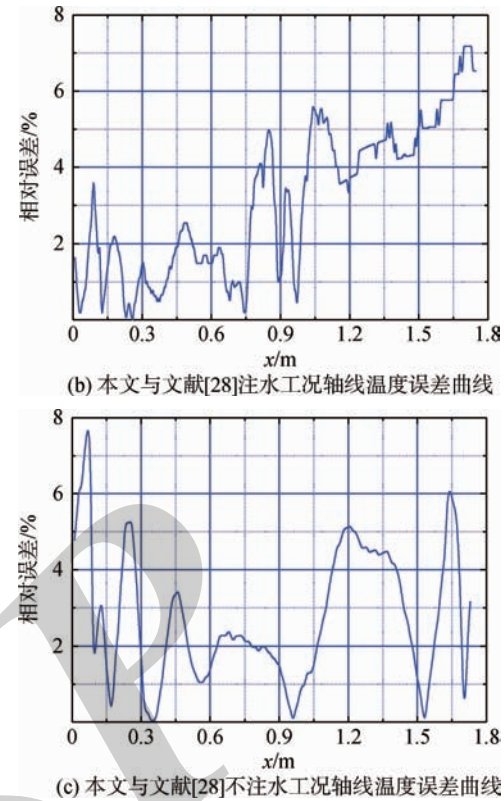
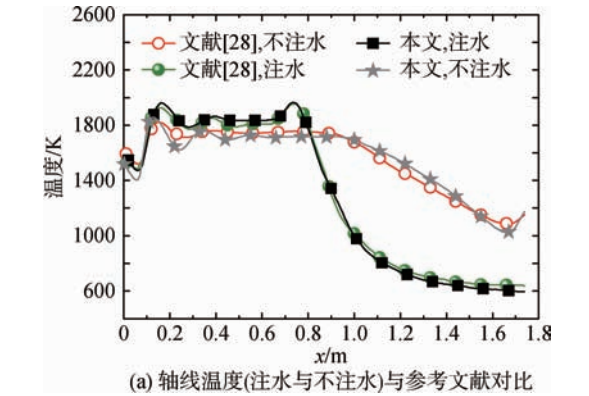


图 4 轴线温度对比
Fig. 4 Contrast of axis temperature

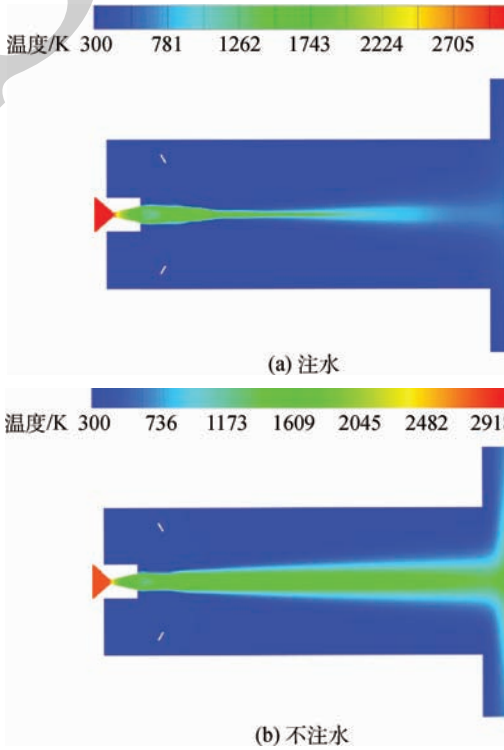


图 5 温度分布
Fig. 5 Temperature distribution

为验证壁面传热模型的准确性,参照文献[28]在相同地方布置 4 个观测点 A,B,C,D,将计算结果和文献[28]中的试验结果进行了对比,如

表 3 所示。从表 3 可以看出,在固壁观测点处,本文壁面温度的计算结果和文献[28]中的试验值吻合度良好,最大误差控制在 8.5% 以内,验证了汽化程序的有效性和壁面传热模型的合理性;另外,从观测点 A,B,C,D 的温度计算值可以看出,离流场轴线越远,温度越低,这是由于液态水不断和高温气流掺混,汽化现象不断发生,大量水蒸气生成,气流温度不断降低所导致的。图 6(e)给出了注水工况下用红外线热像仪拍摄的图片,从注水工况的红外特征可以看出,液态水和燃气射流尾焰接触后,红外特征下降非常明显,这说明水的汽化相变带走了大量热量,混合气体的温度显著降低,红外特征明显下降,和图 4(a)中注水工况的

的轴线温度变化规律相一致;和注水流场的高速摄影纹影图(图 6(d))也吻合较好,同时和文中注水流场的计算阴影图也基本匹配。

表 3 典型观测点温度对比
Table 3 Comparison of typical observation points temperature

观测点	壁面温度/K		相对误差 绝对值/%
	试验值 ^[28]	计算值	
A	545	590	8.26
B	535	570	6.54
C	520	550	5.77
D	515	535	3.74

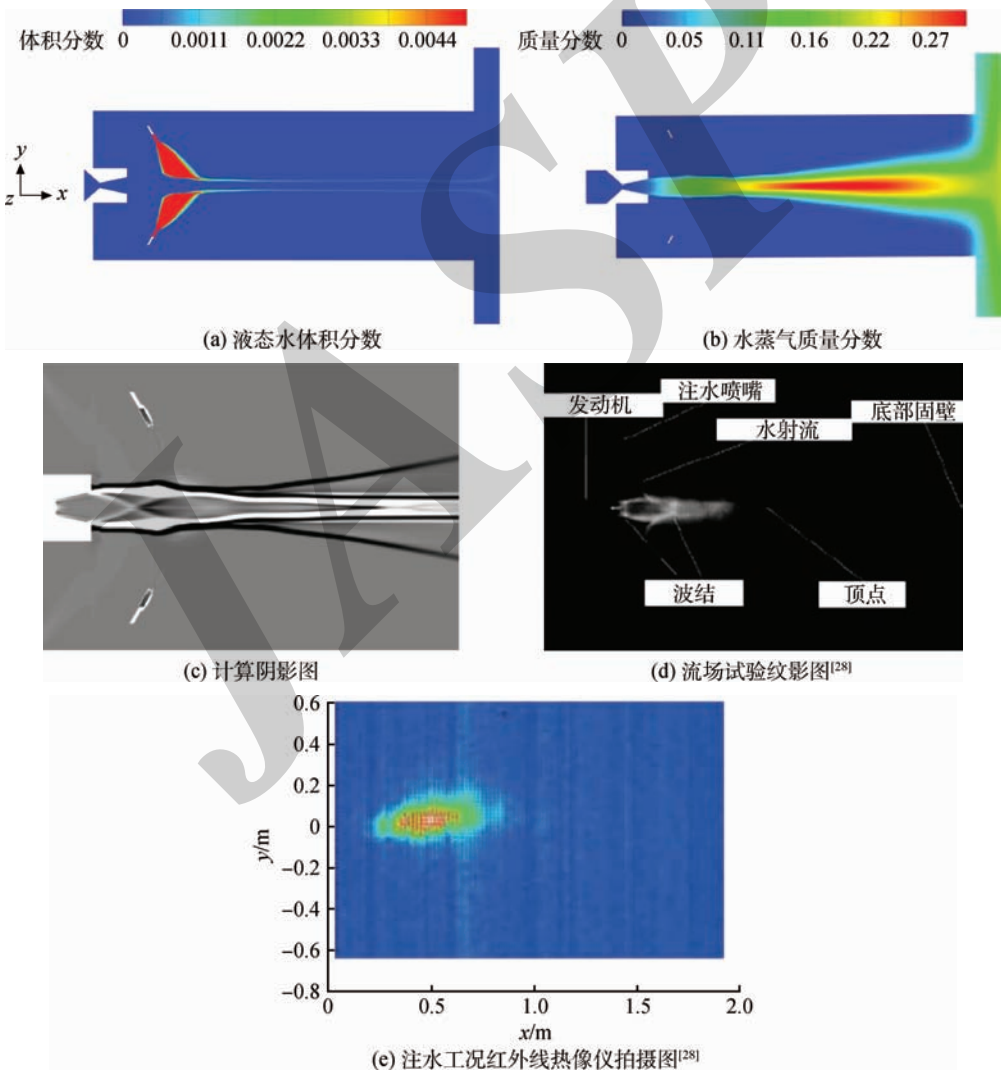


图 6 注水稳定后流场参数计算结果和试验结果对比

Fig. 6 Comparison of flow field parameters between calculations and experiments after water injection

3 气液两相相间反应演化历程

图 7 给出了气液两相的相间反应演变历程。

从图 7 中可以清晰地看到各典型时刻相间反应的所在区域和相变剧烈程度以及演化历程。从图 7 可以看出,在 28 ms 时刻,液态水挤压气流并附着

气流表层,在气液交界面发生了较为强烈的汽化反应,在液态水的动量冲击和湍流脉动的影响下,汽化区域出现了较大波动,并使得汽化区域在气流的尾部区域相交,交汇点明显;在 40 ms 左右,气流时仍未充分发展稳定,在液态水的动量冲击和湍流脉动的影响下,反应区域在气流的中下部仍出现了交汇点,交汇点附近气流和液态水混合充分,相间交汇点阻滞了气流的进一步发展,气流再次冲破相间反应区域的交汇点,在该区域也显示出相间动量的差异会导致相间流场结构和流场形态的不稳定性。在 68 ms 以后,随着气流的充分发展和流场结构的进一步稳定,相间反应区域呈现出小幅振荡稳定的特点,从 68ms 到 92ms 相

间反应的区域和剧烈程度来看,相间反应处于一个动态平衡过程。

进一步讨论液态水在遇到高温气流时相间的转化规律,图 8 给出了算例两相流场计算稳定后各截面相间反应云图和曲线。从质量转化率云图可以看出,从液态水和高温气流刚接触到两相混合物撞击壁面,液态水一直较少,不断转化为气态水,水增长率一直为负。另外,液态水的质量转化率逐步增大,之后质量转化率减小,这是因为液态水刚和高温气流接触时,只有少部分水被吸附到气流上,液态水较少,两相之间的质量转化率较低,为 $-55\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$;然后大量液态水 and 高温气流接触,水的质量转化率迅速攀升,达到

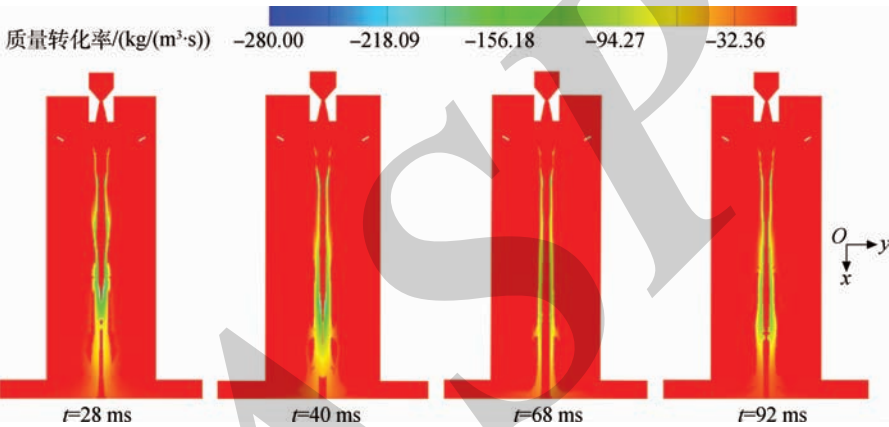


图 7 相间反应演化历程

Fig. 7 Evolution course of interphase reaction

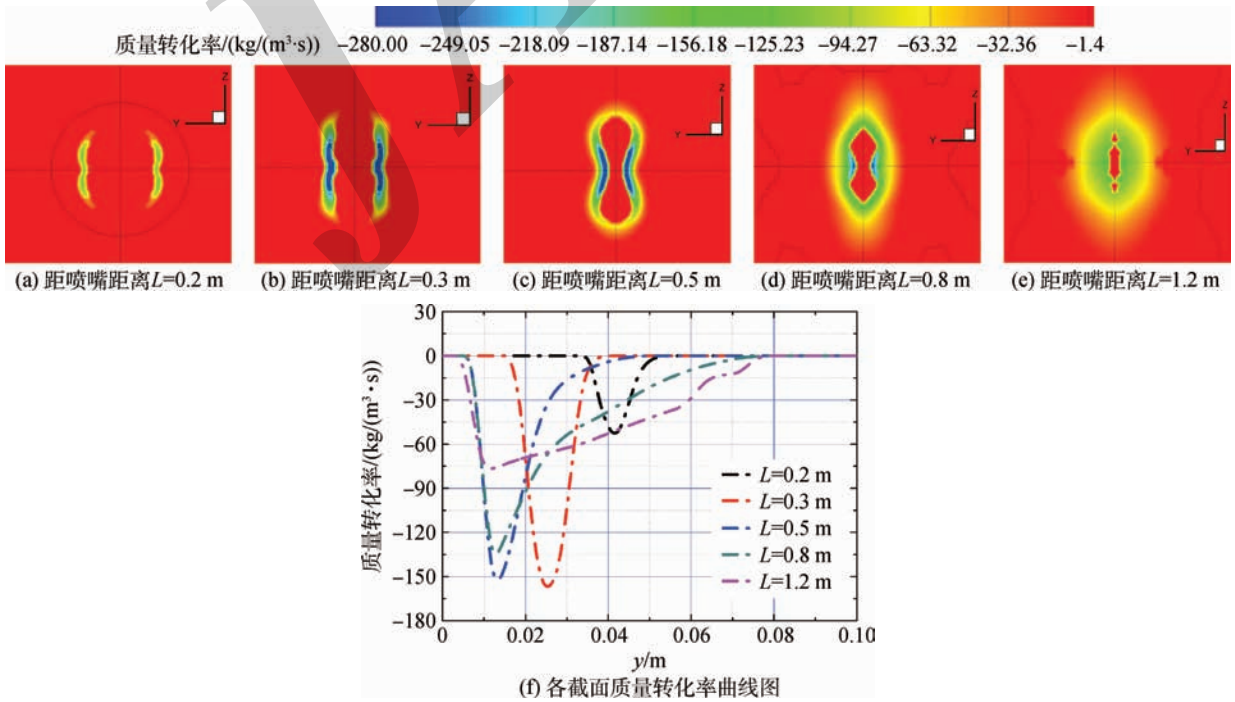


图 8 横截面相间反应质量转化率云图和曲线

Fig. 8 Contours and curves of mass conversion rate of interphase reaction on cross section

$-157 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;随着大量水汽化,液态水越来越少,气流的温度降低,质量转化率降低,液态水的质量转化率降到 $-76 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。从 yOz 各截面上侧的质量转化率分布曲线可看出质量转化率从 $0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 上升到最高值,然后降低到 $0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,呈现出先升高后降低的趋势。这是因为水和高温高速气流的接触面内侧由于汽化带走的热量和水蒸气最多,温度降低明显,内侧离散单元内水蒸气质量分数明显增大,抑制了气液质量转化率,使得质量转化率降低;在水的外侧,没有高温气流和水接触,质量转化率很低;在水和高温气流接触的径向中间段,传热现象明显,流场温度较高,同时离散单元内部水蒸气的质量分数更小(图6(b)),有利于水的汽化反应正向进行,质量转化率最高。

4 结 论

1) 研究了液态水的汽化相变规律,根据不同压力下水的饱和温度和汽化潜热建立了汽化相变模型,编制适合于液态水的汽化相变程序,并通过添加源项的方法将相变计算嵌入到 mixture 气液两相流控制方程中,实现了考虑液态水汽化相变的气液两相流数值计算。

2) 实现了考虑液态水汽化相变的三维多相流场求解,并通过算例验证了汽化相变程序三维计算的可靠性与有效性。本文在注水试验中轴线上的温度计算值和文献[28]中的计算值吻合较好,误差稳定在3.5%左右,最高误差为7.3%;汽化后,两相流撞击壁面的温度计算值相对于试验的误差控制在8.5%以内。

3) 在考虑汽化的气液两相流算例中,轴线上液态水不断汽化,水蒸气大量生成,液态水的质量转化率先增大后减小,液态水的质量转化率最高达到 $-157 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;在径向截面上,质量转化率从 $0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 上升到最高值,然后降低到 $0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。从相间反应的区域和剧烈程度来看,相间的反应处于一个动态平衡过程。

参考文献:

[1] 周良富,周立新,薛新宇,等.射流式在线混药装置汽蚀特性数值分析与试验[J].农业工程学报,2015,31(7):60-65.
ZHOU Liangfu, ZHOU Lixin, XUE Xinyu, et al. Numerical analysis and test on cavitation of jet mixing apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 60-65. (in Chinese)

[2] 郑陆松,孙宝芝,杨元龙,等.基于流热固耦合的核电蒸汽

发生器传热管热应力数值模拟[J].原子能科学技术,2014,48(1):74-80.

ZHENG Lusong, SUN Baozhi, YANG Yuanlong, et al. Numerical simulation on thermal stress of tube in steam generator of nuclear power plant based on fluid-thermal-structure interaction[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 74-80. (in Chinese)

[3] 刘静.超声速气流中横向燃油喷雾的数值模拟和实验研究[D].北京:北京航空航天大学,2010.

LIU Jing. Numerical and experimental investigation of fuel spray in supersonic cross flow[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

[4] 朱兴业,刘兴发,刘俊萍,等.全射流喷头洒水水滴动能分布规律[J].农业工程学报,2015,31(15):26-31.

ZHU Xingye, LIU Xingfa, LIU Junping, et al. Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 26-31. (in Chinese)

[5] 杨友胜,张建平,聂松林.水射流喷嘴能量损失研究[J].机械工程学报,2013,49(2):139-145.

YANG Yousheng, ZHANG Jianping, NIE Songlin. Energy loss of nozzles in water jet system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 139-145. (in Chinese)

[6] MOHAMMED D, KOHL R A. Infiltration response to kinetic energy[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1987, 30(1): 108-111.

[7] THOMPSON A L, JAMES L G. Water droplet impact and its effect on infiltration[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1985, 28(5): 1506-1510.

[8] 朱进林,谢晶,王金锋,等.蒸发式冷凝器喷嘴喷淋性能的数值模拟及实验[J].农业工程学报,2014,30(19):38-47.

ZHU Jinlin, XIE Jing, WANG Jinfeng, et al. Numerical simulation and test on nozzle spraying uniformity in evaporative condenser[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 38-47. (in Chinese)

[9] 袁丹青,王冠军,乌骏,等.多喷嘴射流泵数值模拟及数值研究[J].农业工程学报,2008,24(10):95-99.

YUAN Danqing, WANG Guanjun, WU Jun, et al. Numerical simulation and experiment study on multi-nozzle jet pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 95-99. (in Chinese)

[10] 梅登飞,范浩杰,田凤国,等.黏性与非黏性颗粒在流化床中的气泡行为模拟[J].上海交通大学学报,2015,49(5):577-582.

MEI Dengfei, FAN Haojie, TIAN Fengguo, et al. Simulation of bubble behavior of cohesive and non-cohesive particles in fluidization[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(5): 577-582. (in Chinese)

[11] 朱红钧,林元华,谢龙汉. Fluent 流体分析及仿真使用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010.

[12] DREW D A, SEGEL L A. Averaged equations for two-phase flows[J]. Studies in Applied Mathematics, 1971, 50

(3):205-231.

[13] ISHII M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phased flow [M]. Paris:Eyrolles,2005.

[14] 徐济堃. 沸腾传热和气流两相流[M]. 北京:原子能出版社,2000.

[15] 郭锦烈. 两相与多相流动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[16] 牛钰森. 自发式发射内弹道流场特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

NIU Yusen. Research on internal ballistic flow filed characteristics of self-eject launch[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2016. (in Chinese)

[17] WEN C Y, YU T H. Mechanics of fluidization[J]. Chemical Engineering Progress,1966,62(1):100-111.

[18] 万鹏程. 舰船气泡尾流的数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2012.

WAN Pengcheng. Numerical simulation on bubbly ship wake[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2012. (in Chinese)

[19] MANNINEN D, TAIVASSALO V, KALLIO S. On the mixture model for multiphase flow[M]. [S. l.]: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) Publications,1996.

[20] HOU Y,TAO Y J,HUA X L,et al. Numerical characterization of multi-nozzle spray cooling[J]. Applied Thermal Engineering,2012,39:163-170.

[21] DATTA A,SOM S K. Numerical prediction of air core diameter,coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl pressure nozzle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2000,21(4):412-419.

[22] LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling[D]. Los Alamos,USA:Los Alamos National Laboratory,1979.

[23] 曹嘉怡,鲁传敬,李杰,等. 水下超声速气射流动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展,2009,24(5):575-582.

CAO Jiayi,LU Chuanjin,LI Jie,et al. Research on dynamic characteristics of underwater supersonic gas jets[J]. Journal of Hydrodynamics,2009,24(5):575-582. (in Chinese)

[24] 甘晓松,贾有军,鲁传敬,等. 水下燃气射流流场数值研究[J]. 固体火箭技术,2009,32(1):23-26.

GAN Xiaosong,JIA Youjun,LU Chuanjing,et al. Research on numerical simulation of combustion gas jet under water [J]. Journal of Solid Rocket Technology,2009,32(1):23-26. (in Chinese)

[25] 陈则韶. 高等工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.

[26] ORSZAG S A,YAKHOT V,FLANNERY W S. Renormalization group modeling and turbulence[R]. Tempe,US: International Conference on Near Wall Turbulence Flows,1993.

[27] 杨风波,马大为,任杰,等. 新型同心筒自力发射热环境优化设计[J]. 固体火箭技术,2015,38(2):172-178.

YANG Fengbo,MA Dawei,REN Jie,et al. Optimization design for thermal environment of a new roadbed concentric canister launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2015,38(2):172-178. (in Chinese)

[28] 周帆,姜毅,郝继光. 火箭发动机尾焰流场注水降温效果初探[J]. 推进技术,2012,33(2):249-252.

ZHOU Fan,JIANG Yi,HAO Jiguang. Exploring on cooling effect of water injection on rocket motor exhaust[J]. Journal of Propulsion Technology,2012,33(2):249-252. (in Chinese)

(编辑:陈 越)