

文章编号: 1000-8055(2023)10-2415-15

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230292

注水参数对火箭喷流流场的影响规律研究

刘俊林¹, 张子赫², 张志成¹, 徐希海³

- (1. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191)

摘 要: 为了研究火箭起飞时不同注水参数对火箭尾焰喷流流场的影响规律, 以某火箭发动机缩比喷管为研究对象, 基于计算流体力学(CFD)方法及 Mixture 多相流模型开展了注水时单喷管火箭喷流流场的数值计算研究。以注水速度、流量、位置等注水条件为变量, 量化分析了注水对火箭喷流平均温度、压力、速度和湍动能场的影响。结果表明: 注水速度大于 30 m/s 时, 可有效降低喷管射流的温度和速度, 当注水速度低于 20 m/s 时, 注水对喷流轴线上物理量的影响变小; 注水速度为 30 m/s, 且流量大于 2.2 倍喷管射流秒流量时, 可以有效降低喷管射流温度和速度; 注水与喷流作用点位于喷管射流前三个激波位置时, 注水对喷流降温降速效果较好, 且作用点越靠近上游, 对喷管射流的影响越明显, 但实际工程应用中应避免注水溅到喷管上。

关 键 词: 火箭喷流; 注水; 气液多相流; 喷流流场; 降温降速

中图分类号: V411.6

文献标志码: A

Research on the influence of water injection parameters on flow field of rocket jets

LIU Junlin¹, ZHANG Zihe², ZHANG Zhicheng¹, XU Xihai³

- (1. Beijing Special Engineering Design and Research Institute,
Beijing 100028, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Research Institute of Aero-Engine,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A study on the effects of different water injection conditions on the jet flow field of a rocket model was performed. The numerical calculation of the jet flow field of a single nozzle rocket during water injection was carried out based on the computational fluid dynamics (CFD) and Mixture model. The effects of water injection on average temperature, pressure, velocity and turbulent kinetic energy field of rocket jet were analyzed in different water injection velocities and flow rate conditions. The results showed that when the water injection speed was greater than 30 m/s, the temperature and speed of the nozzle jet can be effectively reduced. When the water injection speed was lower than 20 m/s, the

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 专项课题(ZRHT2020T05); 国家科技重大专项(J2019-II-0006-0026);

航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-B-II-012-001)

作者简介: 刘俊林(1988—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事发射导流安全与射流环境控制等方面的研究。

通信作者: 徐希海(1986—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事气动声学、喷流噪声等方面的研究。E-mail: xuxihai@buaa.edu.cn

引用格式: 刘俊林, 张子赫, 张志成, 等. 注水参数对火箭喷流流场的影响规律研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2415-2429. LIU Junlin, ZHANG Zihe, ZHANG Zhicheng, et al. Research on the influence of water injection parameters on flow field of rocket jets[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2415-2429.

influence of water injection on physical quantity of the jet axis became smaller. When the water injection speed was 30 m/s and the flow rate was more than 2.2 times the nozzle jet second flow rate, the nozzle jet temperature and speed can be effectively reduced. When the action point of water injection and the jet were located at the first three shock wave positions of the nozzle jet, the water injection had a good effect on the jet cooling and velocity reduction, and the closer the operation point was to the upstream, the more obvious the impact on the nozzle jet was. However, in practical engineering applications, the injection should avoid splashing on the nozzle.

Keywords: rockets; water injection; gas-liquid multiphase flow; flow field of jet; cooling and slowing

运载火箭在火箭在发射过程中会产生强烈的噪声,对地面人员和各种设备带来严重的危害;同时,高温高速的燃气流也会对发射平台以及导流槽造成冲击与烧蚀。通过向火箭的喷流注水不仅可以降低喷流的噪声,同时也会降速喷流的速度和温度。因此,通过向燃气注水已经是目前火箭发射必须且有效的防护措施了。美国兰利实验中心最早对注水技术开展研究^[1-2],并在 20 世纪 60 年代将该技术应用在了火箭发射中,通过向火箭燃气射流尾焰喷水进而实现对发射场地的保护。20 世纪 90 年代中后期,在“阿里安-5”火箭发射工位,欧洲航天局开发并应用了注水降噪技术^[3]。根据美国以及欧洲航天局公开的资料可以总结出,大流量注水不仅是抑制噪声降低燃气流速和温度的有效手段,同时也是注水降噪技术的发展方向^[4]。国内对火箭喷流注水的研究主要集中在注水对喷流的降温降速。南京理工大学的卢晨宇等人^[5]比较了长征七号使用两种不同的注水系统时水对发射台的冷却效果。通过 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解三维 N-S 方程,建立了火箭羽流模型。采用欧拉分散相(EDP)模型对注入冷却水进行模拟,通过与实验对比,分别验证了上述模型的有效性。北京航天发射技术研究所的陈劲松等人^[6]基于其实际工程需求对大型火箭发射喷流噪声注水降噪技术进行了较为具体的综述。

然而,注水降噪降温技术的应用很大程度上得益于喷流注水机理的研究以及喷流噪声机理的研究。在喷流噪声方面,由于半经验方法和高精度数值模拟方法在低噪声工程设计应用上的不足,研究者在计算流体力学(CFD)方法高速发展的基础上建立了基于 RANS 的喷流噪声预测方法。在 20 世纪 90 年代, Tam 等人^[7-8]在考虑了喷流自由剪切层内的大尺度湍流结构下,提出了两噪声源模型。在这之后, Tam 和 Auriault^[9]建立了小尺

度湍流噪声理论预测模型,但难以预测喷流下游大尺度湍流结构主导的噪声。Karabasov 等人^[10]研究了两种喷流假设条件下的喷流噪声,得出局部平行流假设对喷流下游辐射噪声低频段的影响非常明显。2016 年徐希海等人^[11]在 Karabasov 的研究基础上研究了远场无限远假设对于喷流噪声预测的影响,研究发现远场无限远假设会使喷流静音区的预测结果偏差增加。2019 年徐希海等人^[12]在 Tam 喷流小尺度湍流噪声源模型的基础上,发展了针对喷流大尺度湍流结构噪声的各向异性湍流混合噪声模型,并采用民用飞机的亚声、低超声速喷流噪声的实验数据进行了验证,但目前尚未在火箭超高温、超高声速喷流噪声上得到应用与验证。关于喷流噪声的发展,李晓东等人^[13]已经进行了详尽的综述。在注水降温方面,由于注水系统的设计存在着复杂性,各个注水参数之间存在互相耦合关系,注水降温机理的研究较为困难。因此,实验是最为直观且可靠的研究方法。Margetts、Geery 等人^[14-15]最早开始对火箭发动机喷流注水降温实验研究。他通过研究两种不同的注水形式对喷流流场的影响,得出合理地匹配注水与燃气流量比可以实现燃气流的快速降温。Miller 等人^[16]也通过实验,得出了一个重要结论:注水对喷流的穿透作用以及水蒸发所产生的喷流的热量损失是影响喷流流场的主要因素。在注水降噪的实验方面, Sankaran 等人^[17]以注水流量、压力、角度等不同注水参数为实验变量开展了降温降噪模型实验,进而得出注水对降噪影响的规律。

无论是注水降噪还是降温,注水对喷流流场的影响都是关键部分。本文以某火箭发动机缩比喷管为研究对象,针对火箭起飞时不同的注水工况,基于计算流体力学及 Mixture 多相流模型开展了注水时单喷管火箭喷流流场的数值计算研究。

以注水速度、注水流量、注水管宽度以及注水高度为变量,研究不同工况对喷流速度、温度、压力和湍动能分布的影响规律,为后续分析喷流噪声和进行缩比实验提供基础。

1 喷管模型及数值计算方法

1.1 喷管模型及计算工况

本文以典型拉瓦尔超声速喷管为研究对象,喷管构型如图 1 所示:喷管入口直径为 50 mm,出口直径为 67 mm,喷管长度为 207 mm。具体的喷管参数及燃气物性参数见表 1 及表 2。其中,燃气的物性参数为某大型火箭发动机实验时现场测量得到的参数。

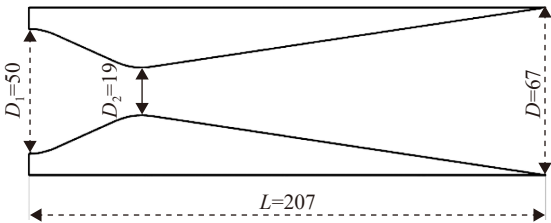


图 1 拉瓦尔喷管(单位: mm)
Fig. 1 Laval nozzle (unit: mm)

表 1 燃气喷管工况
Table 1 Gas nozzle condition

参数	数值
喷管入口直径 D_1 /mm	50
喷管喉道直径 D_2 /mm	19
喷管出口直径 D /mm	67
喷管长度 L /mm	207
喷管进口总压 $p^*/10^6$ Pa	5.5
喷管进口总温 T^*/K	3 700

表 2 燃气物性参数表
Table 2 Gas property parameter

参数	数值
摩尔质量 $M/(g/mol)$	25.88
比定压热容 $c_p/(kJ/(kg \cdot K))$	1.917 4
导热系数 $/(W/(m \cdot K))$	0.205
动力黏度 $/10^{-5} (kg/(m \cdot s))$	6.37

图 2 给出了注水管尺寸及与燃气喷管的相对位置。注水管中心与燃气喷管出口中心处于同一平面,并向射流方向偏转 30°将水注入火箭高温高速射流。并且,以喷管出口中心位置为原点,

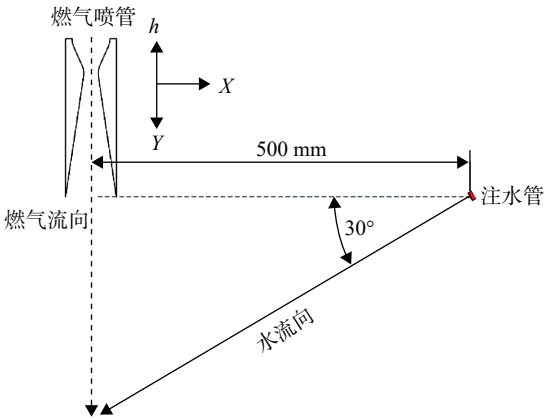


图 2 注水管与燃气喷管相对位置
Fig. 2 Relative position of water injection pipe and gas nozzle

喷管轴线上燃气流向为 Y 方向,垂直于燃气流向的方向为 X 方向,燃气流向相反的方向为 h 高度方向。

图 3 给出了方形注水管出口的示意图。 L_1 为注水管的厚度方向, L_2 为注水管的宽度方向,因此,注水管的出水口面积为 $L_1 \times L_2$ 。

针对不同的注水工况,文本分别研究了 4 种不同的注水参数对喷流流场的影响。分别是:①注水管尺寸与位置不变,通过改变出水速度,分析对流场的影响;②出水的速度不变,通过改变注水管的尺寸,分析对流场的影响;③保持出水流量不变,改变注水管的尺寸与注水速度,分析对流场的影响;④保持注水管的尺寸与出口流量不变,改变注水管高度,分析注水对流场的影响。

以上 4 种不同类型注水参数的计算工况如表 3~表 6。

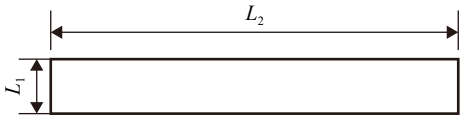


图 3 注水管尺寸示意图
Fig. 3 Size of water injection pipe

表 3 不同注水速度的工况说明
Table 3 Condition of different water infection velocity

序号	水管出口尺寸/mm	注水流速/(m/s)	注水流量/(kg/s)
1	4 × 30	20	4.8
2	4 × 30	30	7.2
3	4 × 30	35	8.4
4	4 × 30	40	9.6
5	4 × 30	45	10.8

表 4 不同注水管尺寸的工况说明
Table 4 Condition of different size of water injection pipe

序号	水管出口尺寸/mm	注水流速/(m/s)	注水流量/(kg/s)
1	4×6	30	1.44
2	4×10	30	2.4
3	4×20	30	4.8
4	4×30	30	7.2
5	4×50	30	12
6	4×70	30	16.8

表 5 相同注水流量的工况说明
Table 5 Condition of same water injection flow

序号	水管出口尺寸/mm	注水流速/(m/s)	注水流量/(kg/s)
1	4×6	66.66	3.2
2	4×10	40	3.2
3	4×20	20	3.2
4	4×30	13.33	3.2
5	4×50	8	3.2

表 6 不同注水管高度的工况说明
Table 6 Condition of different height of water injection pipe

序号	水管出口尺寸/mm	注水流速/(m/s)	注水管高度/mm
1	4×10	40	150
2	4×10	40	50
3	4×10	40	0
4	4×10	40	-25
5	4×10	40	-100

1.2 计算网格设置

在本文中,使用的是重叠网格进行计算。网格分为背景网格、喷流网格和注水网格三部分,如图 4~图 6 所示。在注水与喷流接触处的网格是重叠网格。网格全部采用结构化的六面体网格,在喷管出口处、喷管固壁、喷流自由剪切层和注水的区域进行加密处理,流向网格最小尺度为 0.075*D*,径向网格最小尺度为 0.01*D*,总网格量 779 万。其中,*D* 为喷管出口直径。图 7 和图 8 为

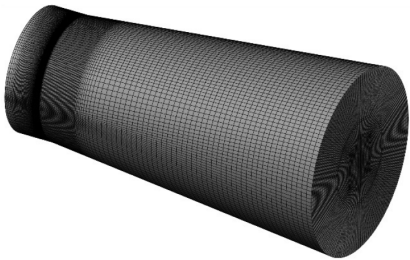


图 4 背景网格
Fig. 4 Background grid

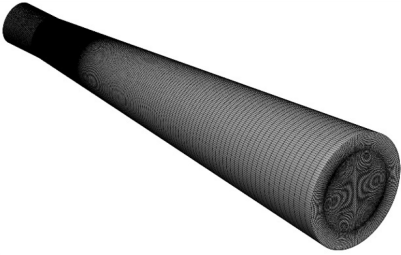


图 5 喷流网格
Fig. 5 Nozzle grid

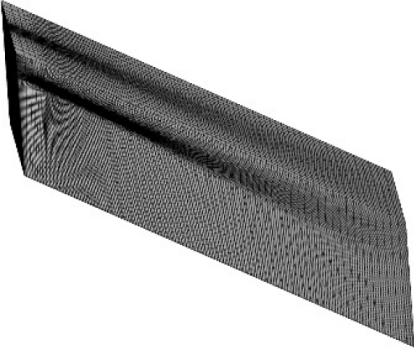


图 6 注水管网格
Fig. 6 Water injection grid

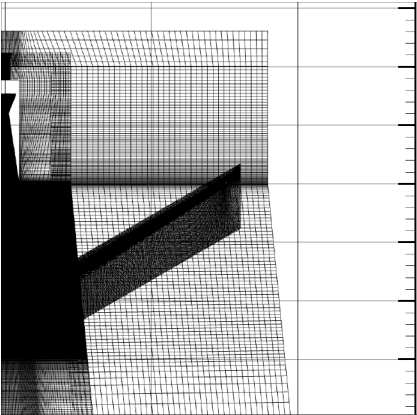


图 7 重叠网格部分
Fig. 7 Overset grid

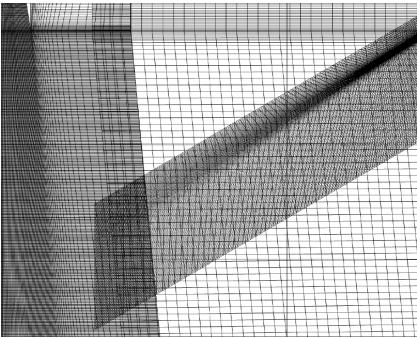


图 8 重叠网格局部放大
Fig. 8 Enlargement of overset grid

网格重叠部分示意图,在喷流与水的接触区域为网格重叠的主要部分。

1.3 喷流流场数值计算方法

火箭喷流注水流场数值计算软件采用 ANSYS FLUENT 商业计算流体力学软件,孤立喷流计算设置为:求解器采用压力基定常求解器;湍流模型为标准 $k-\omega$ 湍流模型;空间离散格式为二阶迎风格式。

本文选择简化欧拉多相流模型 Mixture 多相流模型进行数值模拟。由于水在遇到燃气之后还会产生大量水蒸气,涉及到水冷汽化,所以本文中 choice Fluent 中 Lee 水蒸发-冷凝模型。

火箭喷流注水流场数值计算设置为:求解器采用压力基定常求解器;湍流模型为标准 $k-\omega$ 湍流模型;多相流模型为 Mixture 模型;冷凝-蒸发模型为 Lee 模型;蒸发系数为 1;冷凝系数为 1;饱和温度为 373.15 K;空间离散格式为二阶迎风格式;在喷管近壁面处采用壁面增强处理函数,同时边界层网格 $y^+ < 1$ 。

1.4 计算方法的验证

由于目前尚没有公开发表的与本文计算工况一致的高温高速燃气喷流及注水工况的实验数据,因此本文选择 Langenais 等人^[18]在出口马赫数 $Ma=3.1$ 的不完全膨胀的拉瓦尔喷管喷流实验数据与数值模拟来验证本文计算方法及相关设置的正确性。喷管构型也选择为拉瓦尔喷管,依照气体动力学知识计算出绝热指数 $k=1.3$ 时拉瓦尔喷管出口面积与喉道面积的比值。喷管出口直径为 60 mm,总温为 1900 K,总压为 30×10^5 Pa,出口马赫数为 3.1,网格与图 5 类似,并进行了局部加密。

图 9、图 10 分别给出了验证算例 $Ma=3.1$ 不完全膨胀喷流平均速度和平均静压分布云图,从图中可以清楚地看出不完全膨胀喷流的激波系统

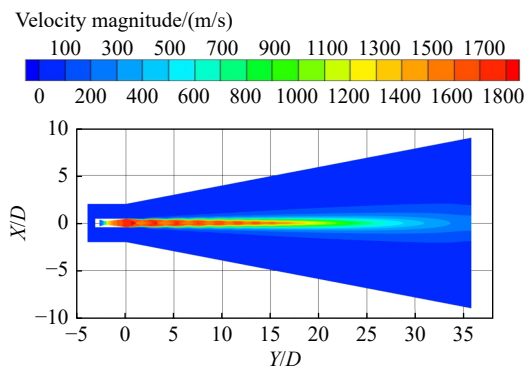


图 9 平均速度云图

Fig. 9 Contour of average velocity

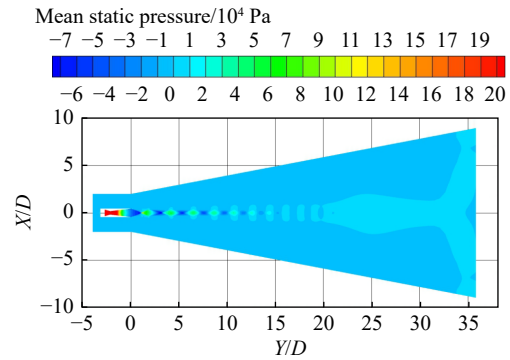


图 10 平均静压云图

Fig. 10 Contour of mean static pressure

构。图 11 给出了沿喷管出口轴线上的无量纲流向速度与 Langenais 等人^[18]的实验结果与本文验证算例数值模拟的结果对比。其中, U_j 为喷管出口流向速度, U_y 为喷管出口轴线上的流向速度。横坐标为以喷管出口直径 D 为无量纲的喷流流向 Y 坐标,纵坐标为以喷管出口流向速度 (U_j) 来无量纲化的流向速度。

对比结果可以看出,本文使用 $k-\omega$ 湍流模型计算的结果在前 4 个激波与实验值对照得较好。由于没有后面的实验数据,无法看到第 4 个激波之后的结果。

与实验结果的对照可以证明本文计算方法的正确性。

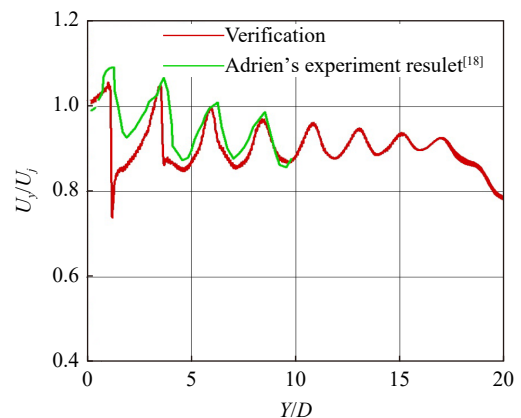


图 11 喷管轴线上的流向速度

Fig. 11 Flow velocity of nozzle axis

2 火箭喷流注水的影响分析

2.1 注水对喷流的影响

注水对火箭喷流流场的影响主要有两个方面。首先,在喷流两侧注水,水会挤压喷流,表现出冲击作用。在冲击作用的影响下,水的存在相当于收缩管道,会使得喷流第 2 个和第 3 个激

波之间出现高压区域,如图 12 所示。

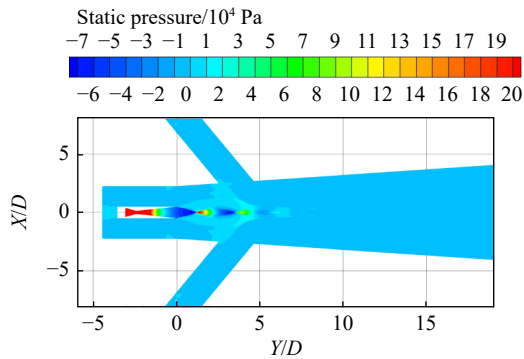


图 12 水与喷流接触区域的压力云图

Fig. 12 Pressure contour of the area water in contact with jet

水的冲击作用越强,喷流第 2 个和第 3 个激波间的压力越高,喷流中心轴线上的速度、温度也降低得越慢。其次,处于环境温度的水喷入高温燃气后,水还会吸收喷流的热量。水吸收的热量越多,喷流的高温区域也就越小,喷流轴线上的速度、温度就降低得越快。如图 13 和图 14 所

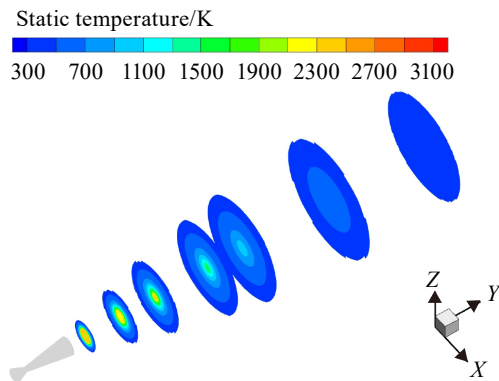


图 13 自由射流 Y 方向截面温度云图

Fig. 13 Temperature contour of free jet in Y direction section

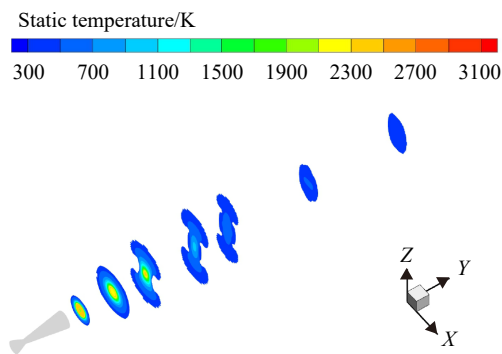


图 14 注水时喷管燃气流向截面温度云图

Fig. 14 Temperature contour of nozzle jet with water injection in direction of fluid

示,对比注水与自由射流的 Y 方向截面的温度云图(截去温度低于 420 K 的区域)可以看出,注水使得喷流流场的高温区域变小。

2.2 喷流对水的影响

当水注入到高温高速的喷流内时,喷流一方面会将水冲散并形成大量含有悬浮液滴的水雾,表现为对水的雾化作用;另一方面高温的燃气也会将部分水汽化,形成水蒸气,表现为汽化作用。并且,喷流对水的雾化作用占主导,汽化的水只占总流量的很小一部分。

如图 15 所示,在水与喷流刚接触的区域,几乎没有水被汽化。在喷流的下游,才逐渐有水被汽化。但此时水蒸气仍然占气体体积分数不足 1%。

为了分析水汽化所占的比重与对流场的影响,以注水管尺寸 4 mm × 50 mm、注水速度 30 m/s 的工况为例,计算了该工况下不使用 Lee 水蒸发-冷凝模型的算例。在不使用 Lee 水蒸发-冷凝模型时,当水的温度超过 373.15 K 时也不会汽化。图 16 和图 17 给出了使用与不使用该模型时轴线上密

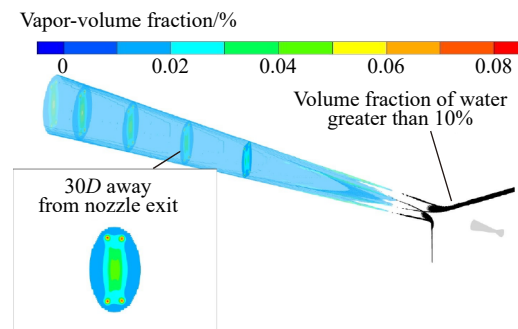


图 15 水蒸气体积分数图

Fig. 15 Volume fraction contour of vapour

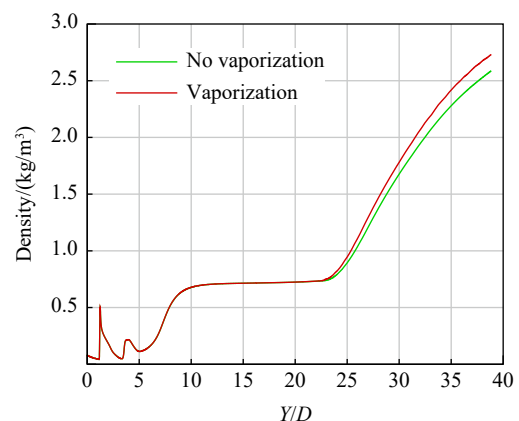


图 16 汽化与无汽化时喷管轴线上的密度对比

Fig. 16 Comparison of density on nozzle axis between vaporization and no-vaporization

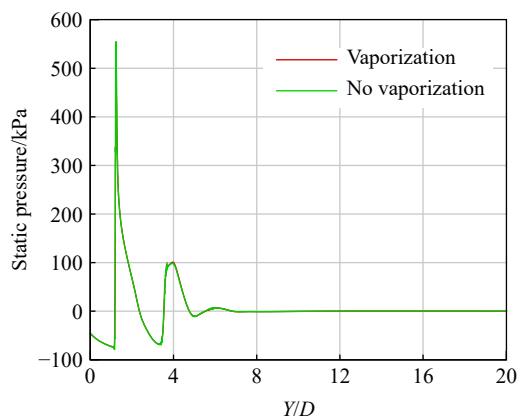


图 17 汽化与无汽化时喷管轴线上的静压分布

Fig. 17 Comparison of static pressure on nozzle axis between vaporization and no-vaporization

度和压力的对比。

从图 16 与图 17 的轴线上的密度与压力分布可以看出, 水的汽化与否对喷流轴线上各物理量的分布影响非常较小。

图 18 给出了汽化与无汽化时 X 方向的温度分布, 可以看出, 水的汽化使喷流的温度降低了 5 K 左右。对比水汽化与无汽化时的工况可以看出, 水的汽化对喷流的影响非常小。注水的速度、注水的流量和注水管的尺寸是影响喷流轴线上各物理量分布的主要原因。水的汽化与否只在喷流 20D 之后对喷流有明显影响。

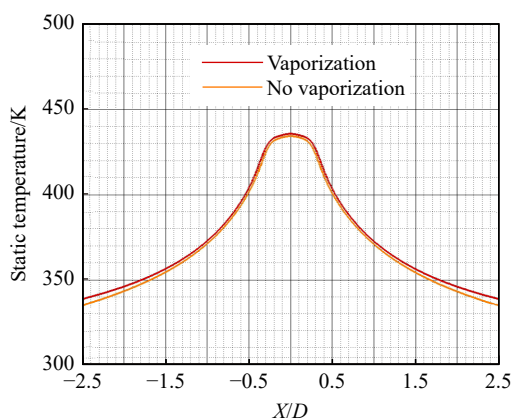


图 18 汽化与无汽化时距离喷管出口 20D 处
 X 方向上的温度分布

Fig. 18 Comparison of temperature in X direction on 20D between vaporization and no-vaporization

3 注水参数对火箭喷流的影响规律

3.1 注水流速对火箭喷流流场的影响

本节研究了不同注水流速对火箭喷流流场的影响。注水工况的参数已经由表 3 给出。在本节

中, 注水嘴的高度均为 $h=0$ mm; 在 X 方向, 喷流两侧各有一个注水管, 注水角度均为 30° ; 两个注水管的尺寸均为厚 $L_1=4$ mm, 宽 $L_2=30$ mm。当水从注水管射出还未接触喷流时, 水便与空气掺混使得一些网格单元内水的体积分数迅速下降到 10% 以下或者更低。因此, 将密度在 100 kg/m^3 以上、温度在 375 K 以下的网格单元认为是液态水占主导。在图例中, V_{water} 为注水流速。

当注水管尺寸不变, 增加注水速度时, 注水对喷流的冲击作用也在明显地增加。图 19 和图 20 为注水速度 20 m/s 和 45 m/s 的压力云图。可以明显地看出, 注水速度增加使得喷流下游的激波消失, 水与喷流接触形成的收缩区的压力更高。

图 21 为喷流中心轴线上的压力分布图, 可以明显看出, 注水速度的增加使得轴线上 3.5D~7D 间的压力升高。注水速度 45 m/s 相比于注水速度 20 m/s 时, 水与喷流接触区域的压力上升约

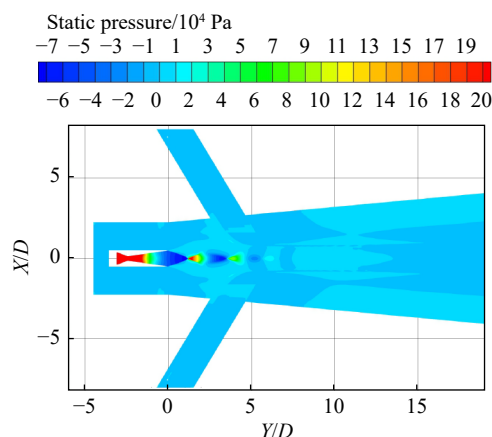


图 19 注水速度 20 m/s 时的静压云图

Fig. 19 Static pressure contour of 20 m/s water injection

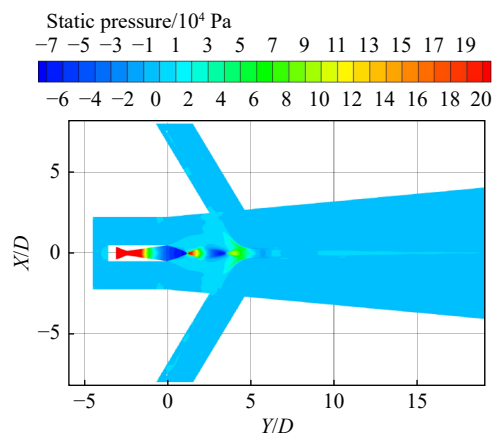


图 20 注水速度 45 m/s 时的静压云图

Fig. 20 Static pressure contour of 45 m/s water injection

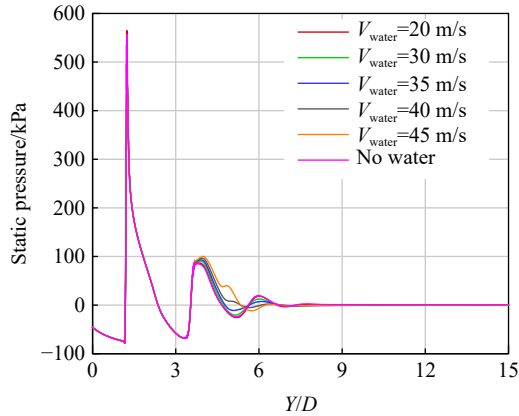


图 21 不同注水速度时喷管轴线上的静压分布图

Fig. 21 Static pressure on nozzle axis of different velocity of water injection

20 kPa; 并且喷流的第 2 个和第 3 个激波均被增强, 第 3 个激波的位置也向上游移动了约 $1D$ 的距离。

图 22 给出了距离喷管出口 $5D$ 处垂直于轴线方向上的温度分布。注水速度的增加不仅使得水注入喷流的程度加深, 使水更能接触到喷流的核心区域; 同时, 由于水的冲击使得喷流向轴线收缩, 轴线处的喷流温度反而会上升。当喷水速度为 45 m/s 时, 可以明显看出轴线上温度上升。

从图 22 还可以看出, 在 $5D$ 处, 从两侧到中心轴线, 温度出现拐点的位置就是水与喷流的交界处。当注水速度为 20 m/s 时, 水只能注入到距轴线约 $0.8D$ 的位置; 当注水速度达到 45 m/s 时, 水可以注入到距离轴线约 $0.3D$ 的位置。当注水速度从 30 m/s 增加到 45 m/s 时, 水的速度每增加 5 m/s , 注水深度就增加约 $0.1D$ 。水注入喷流的深度

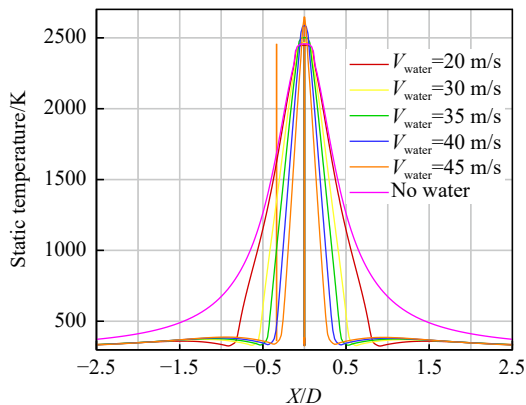


图 22 距离喷管出口 $5D$ 处 X 方向上的不同注水速度时的静温分布图

Fig. 22 Static temperature of different water injection velocity in X direction on $5D$

与注水速度近似为线性关系。

图 23~图 25 为喷流轴线上温度、速度和湍

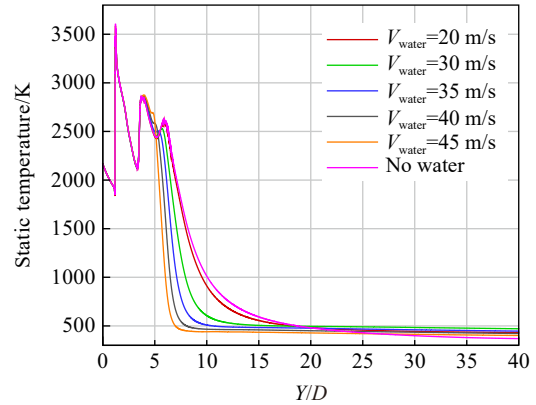


图 23 不同注水速度时喷管轴线上的静温分布线图

Fig. 23 Static temperature on nozzle axis of different velocity of water injection

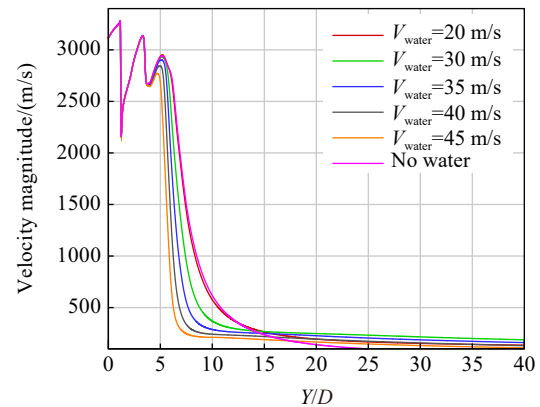


图 24 不同注水速度时喷管轴线上的速度分布线图

Fig. 24 Velocity magnitude on nozzle axis of different velocity of water injection

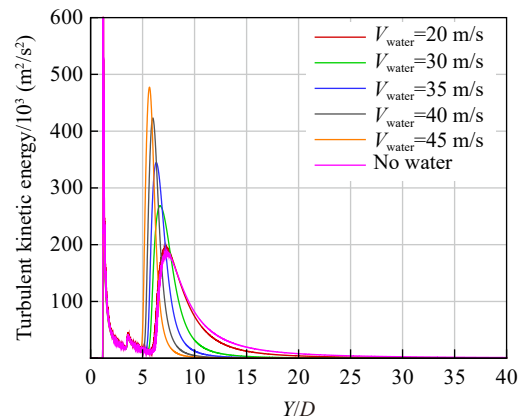


图 25 不同注水速度时喷管轴线上的湍动能分布线图

Fig. 25 Turbulence kinetic energy on nozzle axis of different velocity of water injection

动能的分布。显然,注水速度越快,轴线上温度、速度降低地也越快,湍动能的峰值也越高越靠近上游。当注水速度为 45 m/s 时,在 7D 处喷流的温度已经降低至 500 K 以下,喷流的速度也降低到 200 m/s 以下。而对于注水速度较低的 20 m/s 的工况来说,喷流的温度和速度分别在 20D 和 15D 处才降低到 500 K 和 200 m/s 以下。

图 26~图 28 为注水速度分别为 20、30 m/s

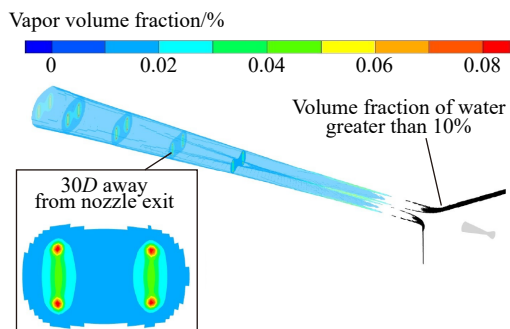


图 26 注水速度 20 m/s 时水蒸气体积分数图
Fig. 26 Volume fraction contour of vapour while the water injection velocity is 20 m/s

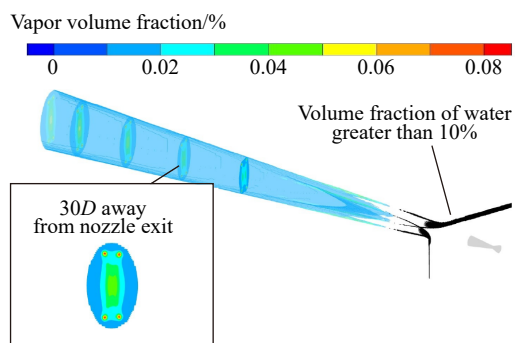


图 27 注水速度 30 m/s 时水蒸气体积分数图
Fig. 27 Volume fraction contour of vapour while the water injection velocity is 30 m/s

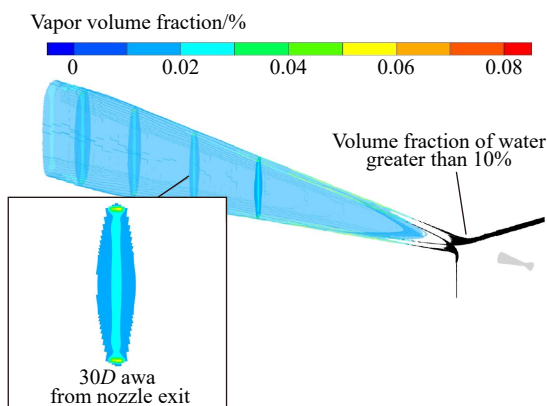


图 28 注水速度 40 m/s 时水蒸气体积分数图
Fig. 28 Volume fraction contour of vapour while the water injection velocity is 40 m/s

和 40 m/s 工况下的水蒸气的体积分数云图。三幅图对比中可以看出不同喷水速度下水蒸气分布存在明显区别。注水速度 20 m/s 时,水蒸气主要分布分燃气喷流外围;随着注水速度的增加,在注水速度 30 m/s 时,水蒸气已经出现在燃气喷流中心位置,表明注水速度 30 m/s 工况已经能够对燃气喷流产生全面的影响;注水速度 40 m/s 时,注水速度的增加使得水对燃气喷流的冲击也进一步增加,射流内的水蒸气分布更为扁平。

从水的体积分数大于 10% 的部分可以看出,随着注水速度的增加,注水管喷出的水与喷流接触后,边缘处的水向两侧扩散的程度逐渐增大。显然,喷流无法将注水管各个部位喷出的水均匀地雾化。

3.2 注水管尺寸对火箭喷流流场的影响

本节研究了相同注水速度的工况下,不同注水管宽度对火箭喷流流场的影响。注水工况的参数已经由表 4 给出。与文中第 3.1 节一样,在文中第 3.2 节中,注水嘴的高度均为 $h=0$ mm,在 X 的方向,喷流两侧各有一个注水嘴,注水角度均为 30° 。

在不改变注水速度的情况下,增加注水管的宽度,虽然也会增加水对喷流的冲击作用,但是增加的程度并不明显,如图 29 和图 30 所示。

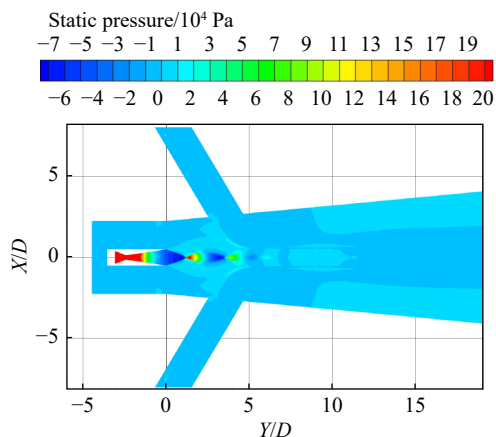
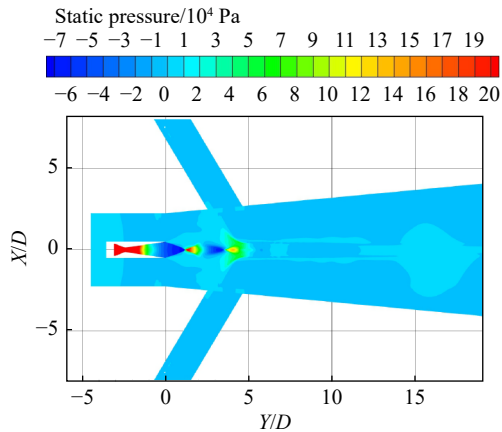


图 29 注水管宽度 $L_2=10$ mm 时的静压云图
Fig. 29 Static pressure contour of water injection pipe width at $L_2=10$ mm

从图 29 和图 30 可以看出,在注水速度不变的情况下,不同宽度注水管的水注入到喷流内部的程度是接近的。区别在于,当注水管尺寸较小时,喷出的水只能挤压喷流的一部分。当注水管的尺寸 $L_2=70$ mm 时,注水管的尺寸比喷管的尺寸更宽,绝大部分喷流都要流过由水形成的收缩

图 30 注水管宽度 $L_2=70$ mm 时的静压云图Fig. 30 Static pressure contour of water injection pipe width at $L_2=70$ mm

通道。

图 31 为喷流中心轴线上的压力分布图,可以明显看出,注水管宽度的增加同样使得轴线上 $3.5D \sim 7D$ 间的压力升高。但当注水管的宽度 L_2 低于 30 mm 时,注水的流量过小,几乎无法看出注水对喷流激波系的影响。当注水管宽度 $L_2=70$ mm 时,注水使得第 2 个激波明显地变强。相比于不注水自由喷流的工况,压力增加约 60 kPa。

当注水速度为 30 m/s 时,注水管宽度的增加也使得水更能接近喷流的核心区域。当水管出口尺寸大于 4 mm $\times$ 10 mm,即注水流量大于 2.4 kg/s (约为 2.2 倍喷管射流秒流量)时,可以有效改变喷管射流温度、速度和湍动能分布。显然,不管是注水速度增加还是注水管宽度增加,都成倍地增加水的流量。因此,从图 32~图 35 可以看出,

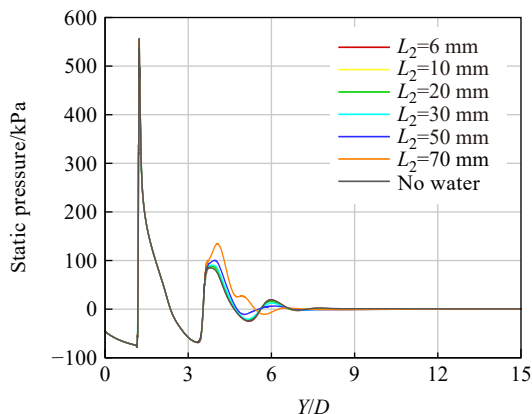


图 31 注水管在不同宽度时喷管轴线上的压力分布图

Fig. 31 Static pressure on nozzle axis of different size of water injection pipe

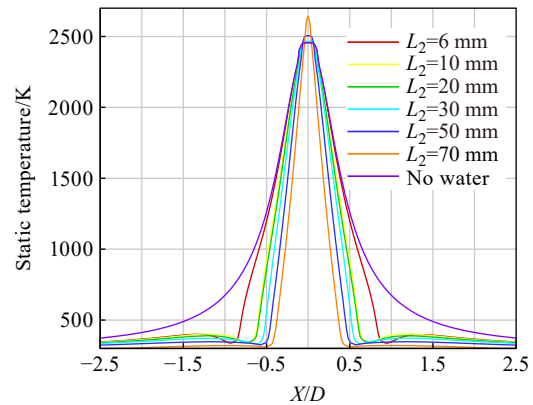
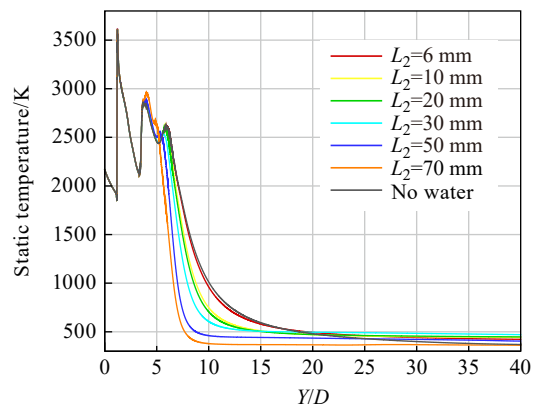
图 32 距离喷管出口 $5D$ 处 X 方向上不同注水管宽度时的温度分布图Fig. 32 Static temperature of different size of water injection pipe in X direction on $5D$ 

图 33 注水管在不同宽度时喷管轴线上的静温分布图

Fig. 33 Static temperature on nozzle axis of different size of water injection pipe

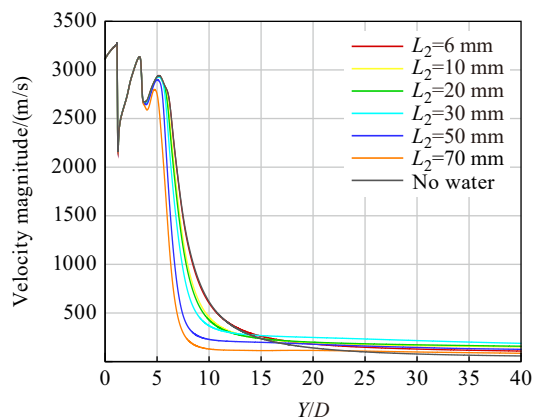


图 34 注水管在不同宽度时喷管轴线上的速度分布图

Fig. 34 Velocity magnitude on nozzle axis of different size of water injection pipe

增加注水管的宽度与增加注水速度对喷流流场的影响是极其相似的,这里不再重复分析。

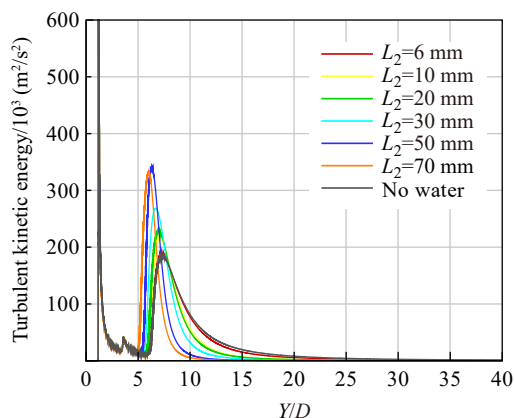


图 35 不同注水管宽度时喷嘴轴线上的湍动能分布图

Fig. 35 Turbulent kinetic energy on nozzle axis of different size of water injection pipe

图 36、图 37 给出了注水管宽度分别为 10 mm 和 50 mm 的工况下, 水蒸气的体积分数三维云图以及水的分布图。显然, 注水管的宽度增加使得水的流量成倍地增加, 注水管越宽, 汽化水的占比越小。当注水管的宽度达到 70 mm 时, 整个流

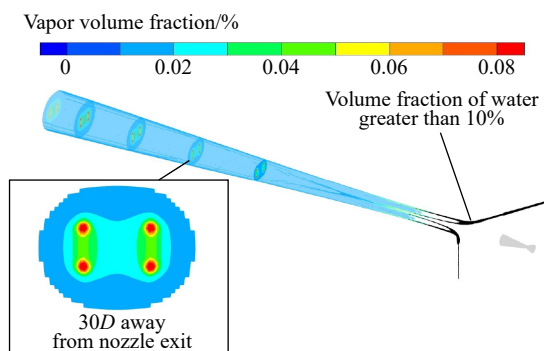


图 36 注水管宽度 10 mm 时水蒸气体积分数图

Fig. 36 Volume fraction contour of vapour while the water injection pipe width is 10 mm

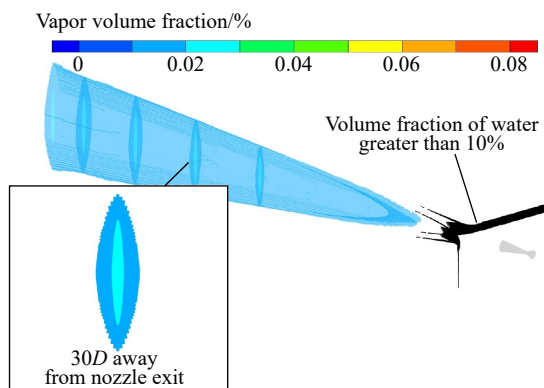


图 37 注水管宽度 50 mm 时水蒸气体积分数图

Fig. 37 Volume fraction contour of vapour while the water injection pipe width is 50 mm

场内水蒸气的体积分数小于 0.01%。

3.3 相同注水流量对喷流流场的影响分析

本节研究了在相同注水流量下, 不同注水速度与不同喷嘴宽度时, 注水对火箭喷流流场的影响。注水工况的参数已经由表 5 给出。注水嘴的高度均为 $h=0$ mm, 在 X 的方向, 喷流两侧各有一个注水嘴, 注水角度均为 30° 。

当注水流量相同时, 注水速度越快, 注水管的宽度越窄。通过前面的分析可以知道, 注水对喷流影响最关键的因素是水能否接触到喷流的核心区域。因此, 在注水流量相同时, 可以预见的是, 注水速度越快, 水对喷流的冲击作用越强, 注水对喷流降温降速的效果越好。从图 38 和图 39 中可以清楚地看出相同流量时注水速度的影响。由于注水速度 8 m/s 的工况水根本无法进入喷流的核心区域, 所以注水对喷流的影响最小。

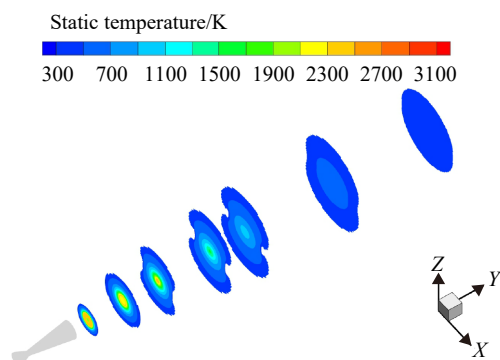


图 38 注水速度 8 m/s 时 Y 方向截面温度云图

Fig. 38 Temperature contour in Y direction while the water injection velocity is 8 m/s

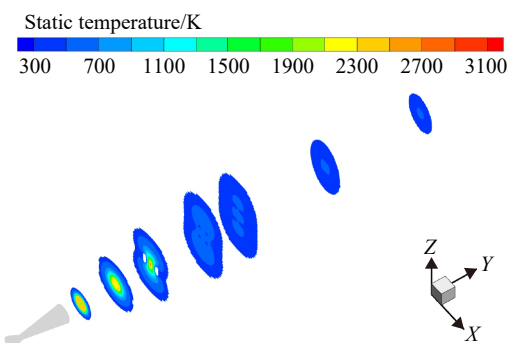


图 39 注水速度 66 m/s 时 Y 方向截面温度云图

Fig. 39 Temperature contour in Y direction while the water injection velocity is 66 m/s

从图 40~图 42 可以看出, 当注水速度低于 20 m/s 时, 注水对喷流轴线上的物理量的影响小到可以忽略。当注水速度为 66 m/s 时, 轴线上的

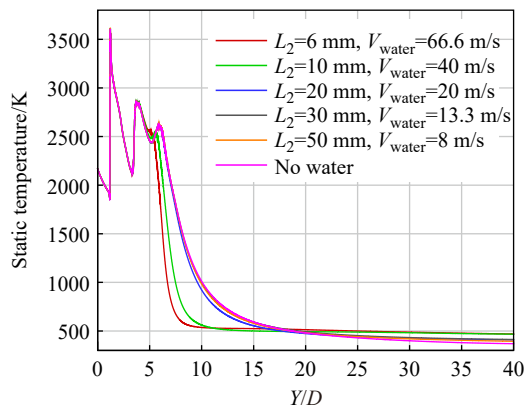


图40 不同注水速度时喷管轴线上的静温分布图

Fig. 40 Static pressure on nozzle axis of different velocity of water injection

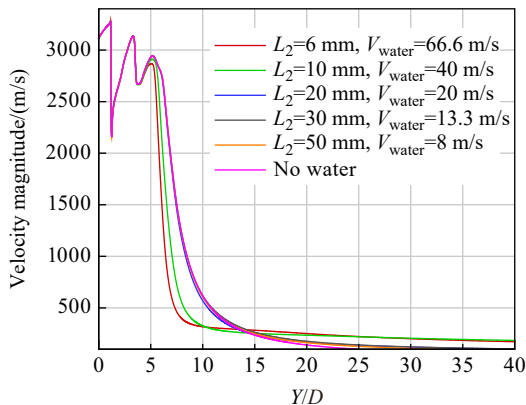


图41 不同注水速度时喷管轴线上的速度分布图

Fig. 41 Velocity magnitude on nozzle axis of different velocity of water injection

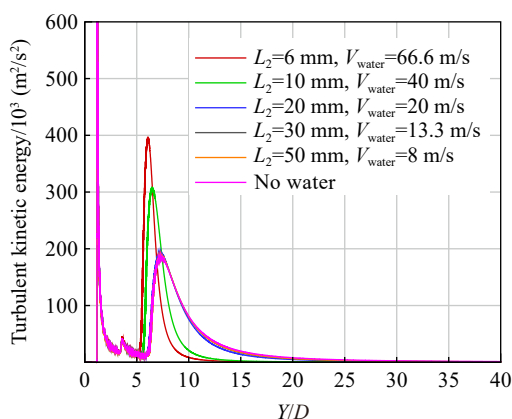


图42 不同注水速度时喷管轴线上的湍动能分布图

Fig. 42 Turbulent kinetic energy on nozzle axis of different velocity of water injection

温度在约 $9D$ 的位置处就已经降低到 600 K 以下, 轴线上的速度也在 $10D$ 的位置降低到 200 m/s 以下。并且, 湍动能的峰值也最高。显然, 注水速度 66 m/s 的工况对喷流降温降速的效果最好。

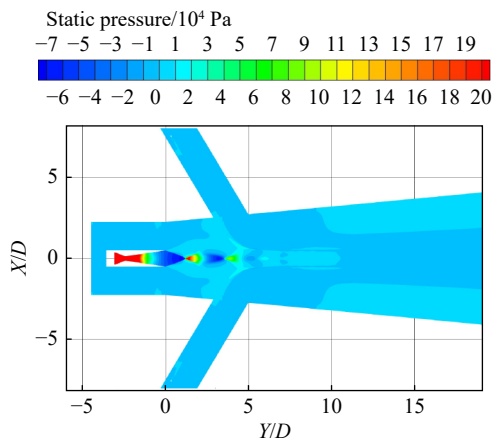
但同时也要注意, 由于注水速度过快使得水对喷流的冲击作用太强烈, 在 $15D$ 之后速度和温度反而更不容易降低到环境状态。

综上分析, 可以认为在相同注水流量时, 注水速度低于 20 m/s 时, 注水对喷流的影响最小。注水速度越快, 水对喷流的降温降速效果越好。但当注水速度过快时, 水强烈的冲击作用反而会使喷流轴线上的温度更难降低到环境温度。

3.4 注水位置对火箭喷流流场的影响

本节研究了在相同注水流量、相同注水管尺寸和注水速度的情况下, 不同注水高度对火箭喷流流场的影响。注水高度 $h=150\text{ mm}$ 时, 水与喷流接触的位置在喷流出口第2个激波前, 注水高度 $h=50\text{ mm}$ 时, 水与喷流接触的位置在第2个激波处, 注水高度 $h=0\text{ mm}$ 时水与喷流接触的位置在第2个和第3个激波间。注水工况的参数已经由表6给出。

由于注水速度和注水流量是相同的, 所以水对喷流的冲击作用也是相同的。不同在于, 当注水高度 $h=150\text{ mm}$ 时, 水与喷流在第2个激波附近接触, 水更能接触到喷流的核心区域, 水冲击作用起到的收缩喷管的效果更加明显。图43~图44给出 $h=-25\text{ mm}$ 和 $h=150\text{ mm}$ 工况下的压力分布云图, 可以看出, $h=150\text{ mm}$ 的工况由于吸收了喷流第1个激波之后大量的热量, 所以使得喷流第2个激波的强度明显降低, 同时注水的冲击作用对喷流的影响也更大。

图43 注水高度 $h=-25\text{ mm}$ 时的静压分布图Fig. 43 Static pressure contour of water injection height $h=-25\text{ mm}$

从图45~图47可以看出, 当 $h=150\text{ mm}$ 的时候, 注水明显使得喷流出口的第2个激波变弱, 并且第3个激波也消失。从温度的分布线图中可以

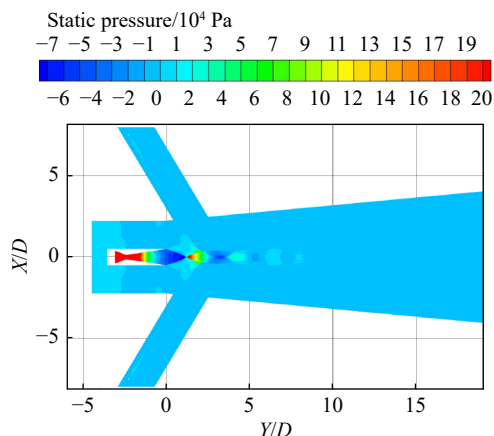


图 44 注水高度 $h=150$ mm 时的
静压分布图

Fig. 44 Static pressure contour of water injection
height $h=150$ mm

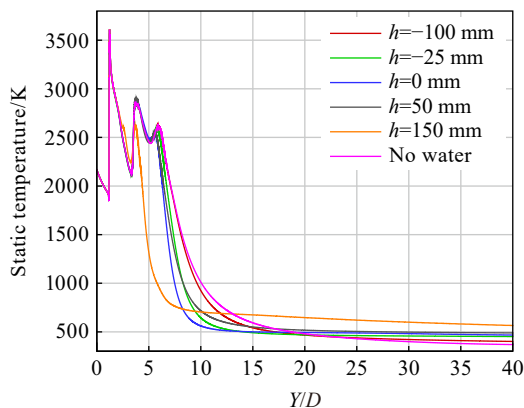


图 45 不同注水高度时喷管轴线上的
静温分布图

Fig. 45 Static temperature on nozzle axis of different water
injection height

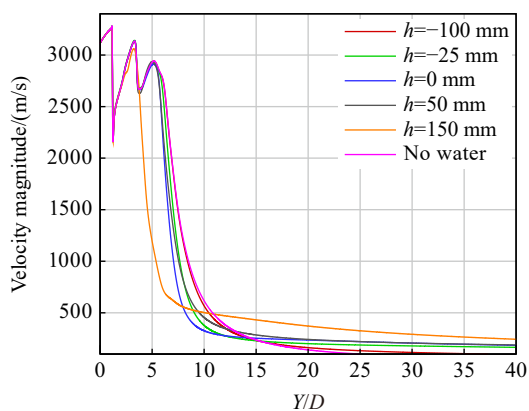


图 46 不同注水高宽度时喷管轴线上的
速度分布图

Fig. 46 Velocity magnitude on nozzle axis of different water
injection height

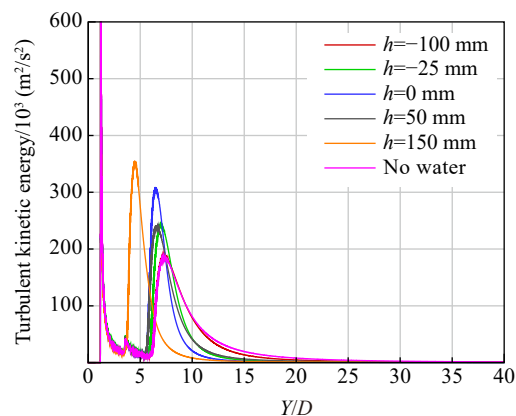


图 47 不同注水高宽度时喷管轴线上的
湍动能分布图

Fig. 47 Turbulent kinetic energy on nozzle axis of different
water injection height

看出,虽然 $h=150$ mm 的工况轴线上的温度迅速在 $8D$ 处降低到约 800 K 左右。但在 $8D$ 后,温度降速的速度反而更慢。在 $12D$ 之后, $h=150$ mm 的工况的轴线上的温度反而要比其他工况降低得要慢。从速度的线图中也可以看出, $h=150$ mm 的工况轴线上的速度在 $10D$ 处迅速降低到 500 m/s 时,后续降低的速度就变得非常缓慢。从湍动能的线图中也可以看出,注水高度 $h=150$ mm 的工况湍动能的峰值最高。

综上所述,注水高度对喷流影响的规律是,注水高度越高,水与喷流接触的区域越靠近喷流出口,水冲击作用形成的收缩管道的效应就越强烈。从图 48、图 49 可以看出,这种收缩管道效应对喷流的影响可以延伸到 $20D$ 之后。因此,水与喷流接触的位置在第 1 个激波和第 2 个激波间时,虽然水会迅速降低喷流的速度和温度,但水对喷流

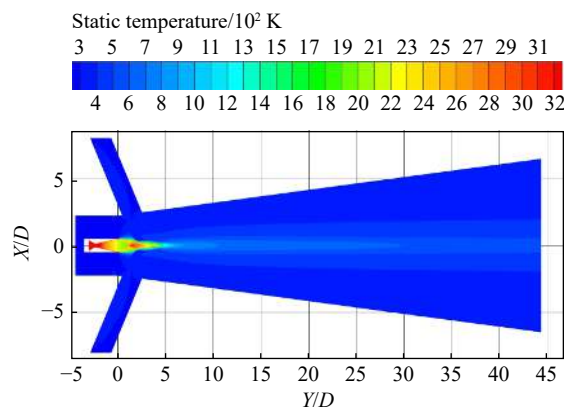
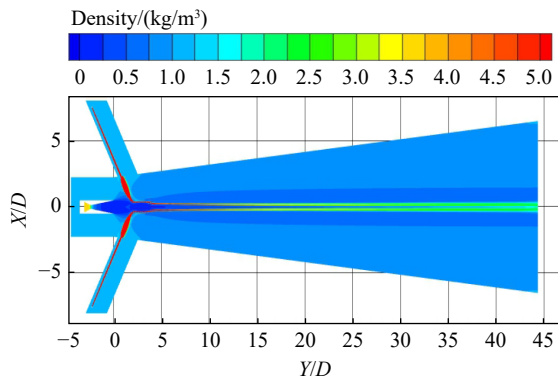


图 48 注水高度 $h=150$ mm 时的静温云图

Fig. 48 Static temperature contour of water
injection height $h=150$ mm

图49 注水高度 $h=150$ mm 时的密度云图Fig. 49 Density contour of water injection height at $h=150$ mm

的冲击作用也会使喷流下游轴线上的温度更难降低到环境温度。水与喷流接触的位置在第3个激波之后时,水不会对上游的喷流有影响;同时,对下游轴线上的影响也比较小。从图45~图47中可以看出,注水高度 $h=-100$ mm 时的轴线上各物理量几乎与不注水自由喷流时候的结果一致。

4 结 论

本文以某火箭发动机缩比喷管为研究对象,针对火箭发射典型工况,基于计算流体力学(CFD)及多相流模型数值计算方法研究了注水对火箭高温燃气喷流流场的影响。结论如下:

1) 影响注水对喷流降温的最关键因素是水能否触及到喷流的核心区域,即水的穿透作用。注水速度越快,注水管宽度越宽,水的穿透作用越强,水注入到喷流的深度越深,水越能触及到喷流的核心区域,降温降速的效果越好。当注水管尺寸为 $4\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 时,注水速度从 30 m/s 增加到 45 m/s 时,注水速度每增加 5 m/s ,注水深度就增加约 $0.1D$ 。相同注水速度时,增加注水管尺寸虽然也能使喷流的速度和温度显著降低,但由于水穿透喷流的程度有限,更多的是将喷流压扁,所以增加注水管尺寸的效果没有增加注水速度的效果明显。

2) 当注水流量一定时,注水速度越快,喷流轴线上的各物理量降低的程度越大。当注水速度低于 20 m/s 时,注水对喷流轴线上的各物理量的影响非常小。

3) 对于不同的注水高度来说,当水与喷流接触的区域在第3个激波之后的位置,即注水高度 h 小于 0 mm 时,注水对喷流轴线上速度和温度的

影响会越来越小。当水与喷流接触的区域在第2个激波前,即注水高度 h 大于 100 mm 时,水的降温效果会使第3个激波消失,轴线上的温度和速度迅速降低。但是此时水的冲击作用会使得喷流下游的速度和温度更难降低到环境状态。所以水与喷流接触的区域在第2个激波附近,即注水高度 $h=0\text{ mm}$ 时效果最好。

4) 当注水流量足够大时,汽化的水只占很小的一部分。喷流对水的雾化作用仍然是主导因素。

5) 本文采用喷管出口直径对数值模拟结果进行了无量纲分析,对全尺寸实际发动机射流注水降噪研究有一定的支撑作用,但火箭高温燃气射流的注水降温降噪问题涉及流体力学、热力学、声学多场耦合,仅采用喷管直径进行无量纲存在较大局限性,缩比模型结果如何推广到实际发动机还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] KURBJUN M C. Limited investigation of noise suppression by injection of water into exhaust of afterburning jet engine[R]. NACA-RM-L57L05, 1958.
- [2] GEERY E, GREENWOOD R. Water injection for rapid cooling of a flow of rocket exhaust gases[R]. AIAA 1969-514, 1969.
- [3] GELY D, ELIAS G, BRESSON C, et al. Reduction of supersonic jet noise-application to the Ariane 5 launch vehicle[R]. AIAA 2000-2026, 2000.
- [4] 刘俊林, 徐希海, 张志成, 等. 火箭高温高速喷流注水降噪数值计算与分析[J]. 航空学报, 2023, 44(7): 56-70.
LIU Junlin, XU Xihai, ZHANG Zhicheng, et al. Simulation and analysis of noise reduction in high-temperature and high-speed rocket jet by water injection[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(7): 56-70. (in Chinese)
- [5] LU Chenyu, ZHOU Zhitan, SHI Yue, et al. Numerical simulations of water spray on launch pad during rocket launching[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2021, 58(2): 566-574.
- [6] 陈劲松, 曾玲芳, 平仕良, 等. 大型火箭发射喷水降噪技术研究进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 94-100.
CHEN Jinsong, ZENG Lingfang, PING Shiliang, et al. Advances of water suppression technology for large rocket launching noise[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(2): 94-100. (in Chinese)
- [7] TAM C K W, CHEN P. Turbulent mixing noise from supersonic jets[J]. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1774-1780.
- [8] TAM C K W. Supersonic jet noise[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1995, 27: 17-43.
- [9] TAM C K W, AURIAULT L. Jet mixing noise from fine-scale turbulence[J]. AIAA Journal, 1999, 37(2): 145-153.
- [10] KARABASOV S, BOGEY C, HYNES T. Computation of the noise of initially laminar jets using a statistical approach for the acoustic analogy: application and discussion[R]. AIAA2011-2929, 2011.
- [11] XU Xihai, LI Xiaodong. Effect of farfield assumption on calculation of green's function for predicting jet noise[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2699-2710.

- [12] XU Xihai, LI Xiaodong. Anisotropic source modelling for turbulent jet noise prediction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 377(2159): 20190075.1-20190075.15.
- [13] 李晓东, 徐希海, 高军辉, 等. 喷流噪声研究进展与展望[J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(3): 398-409.
- LI Xiaodong, XU Xihai, GAO Junhui, et al. Progress and prospect on jet noise study[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(3): 398-409. (in Chinese)
- [14] MARGETTS M J, GEERY E L, GREENWOOD R N. Water injection for rapid cooling of a flow of rocket exhaust gases[R]. AIAA 1969-514, 1969.
- [15] GEERY E, MARGETTS M. Penetration of a high velocity gas stream by a water jet[R]. AIAA1968-604, 1968.
- [16] MILLER M J, KOO J H, SICKLER F M, et al. Effect of water to ablative performance under solid rocket exhaust environment[R]. AIAA1993-2475, 1993.
- [17] SANKARAN S, IGNATIUS J K, RAMKUMAR R, et al. Suppression of high Mach number rocket jet noise by water injection[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, 46(6): 1164-1170.
- [18] LANGENAIS A, VUILLOT F, TROYES J, et al. Accurate simulation of the noise generated by a hot supersonic jet including turbulence tripping and nonlinear acoustic propagation[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(1): 016105.

(编辑: 张 雪)