

脉冲等离子体射流摩尔质量对其扩展特性的影响

徐付强, 岳明凯, 车 龙, 董朋超, 权康男

(沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 脉冲等离子体射流特性是电热化学发射技术研究的重要内容。依据实验研究结果, 采用 Fluent 软件中的 VOF 多相流模型对脉冲等离子体射流在大气中的扩展过程进行模拟, 研究脉冲等离子体射流在近流场中的扩展特性及摩尔质量对扩展特性的影响规律。结果表明: 仿真结果与实验数值基本吻合, 射流形态和激波结构与等离子体射流图像基本相符, 建立的模型比较可靠; 摩尔质量越大, 等离子体射流发展越迟缓, 头部压力峰轴向位移越滞后, 扩展初期的高温聚集区宽高比越大, 射流的轴向扩展位移、速度以及掺混程度越小。本文研究结果可为电热化学发射技术及毛细管消融控制的相关研究提供参考。

关键词: 等离子体射流; VOF 模型; 扩展特性; 摩尔质量

中图分类号: TJ399 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.05.010

Effect of Molar Mass on the Expansion Characteristics of Pulsed Plasma Jets

XU Fuqiang, YUE Mingkai, CHE Long, DONG Pengchao, QUAN Kangnan

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The characteristics of pulsed plasma jets are an important subject to study electrothermal chemical propulsion technology. Based on the experimental results, the VOF model in Fluent software is used to simulate the expansion process of pulsed plasma jets in the air, the expansion characteristics of pulsed plasma jets in the near flow field and the effect of molar mass on the expansion characteristics are studied. The results show that the simulation results are basically consistent with the experimental values, the jet morphology and shock wave structure are basically the same as the plasma jet images, and the established model is reliable. The larger the molar mass, the slower the development of the plasma jet, and the more delayed the axial displacement of the head pressure peak; at the initial stage of expansion, the aspect ratio of high temperature agglomeration area at jet head increases with the increase of molar mass; the axial expansion displacement, velocity and mixing degree of plasma jet decrease with the increase of molar mass. The results of this study can provide reference for the research of electrothermic chemical propulsion technology and capillary ablation control.

Key words: plasma jet; VOF model; expansion characteristics; molar mass

脉冲等离子体是电热化学发射技术中使发射药释放化学能的点火源和实现能量转换的工作介

质, 脉冲等离子体射流特性是电热化学发射技术中的关键性基础问题之一^[1], 许多学者对其进行

了深入研究。

Almoussa 等^[2]研究了将液态或气态高能材料(EM)注入等离子体源的等离子体射流特性,结果表明,等离子体射流参数对注入等离子体源的EM类型有很强的依赖性。Kim^[3]利用通量校正运输(FCT)格式求解了脉冲等离子体的二维非定常无黏性动力学方程,并结合焦耳加热和质量消融模型,获得了消融管内的放电特征以及等离子体射流进入大气后的结构形态。Zhang 等^[4]为研究电热等离子体与含能材料相互作用的特性,建立了考虑聚乙烯(PE)和铜烧蚀的新型模型以及等离子体点火实验系统,计算和分析了放电电流为9 kA 条件下等离子体的静压、总压、温度、速度、铜浓度和PE浓度等参数变化,模拟结果与实验数值相符。Kim 等^[5]利用激光诱导荧光(LIF)和光学发射光谱方法研究脉冲等离子体射流特性,获得了空间分辨率较高的射流流场,显示等离子体温度和电子密度在马赫盘上发生了突跃。张琦等^[6]建立了脉冲等离子体射流在空气中扩展的二维非定常模型,并使用Fluent软件进行了仿真模拟,获得了等离子体射流在空气中扩展过程的各项流场特征参数。赵雪维等^[7]研究了脉冲等离子体射流在空气中的膨胀特性,着重讨论了不同喷射压力和不同喷口直径对等离子体和空气交界面的影响以及射流流场中的参数分布。

综上,国内外学者已对脉冲等离子体射流展开了广泛的理论和实验研究,为电热化学发射技术的相关研究提供了经验和方法。摩尔质量是影响脉冲等离子体射流特性的重要参数之一,但目前对该相关研究报道较少。由于脉冲等离子体摩尔质量的测量比较困难,故本文根据文献[8]中的实验结果,使用Fluent软件中的VOF多相流模型模拟摩尔质量为12、26和63 kg/kmol的等离子体射流的扩展过程,得到流场中速度、压力、温度、密度等物理参数的分布及变化规律,分析摩尔质量对等离子体射流扩展特性的影响,并总结相关规律。

1 数学模型的建立与求解

1.1 模型基本假设

根据文献[8]的实验结果,结合脉冲等离子体射流和VOF多相流模型的特点,对计算模型作出如下假设。

在仿真计算中,将等离子体视为理想气体,并

忽略其在扩展过程中与其他物质的化学反应;施加电能后,金属爆炸丝发生完全电离,PE毛细管经烧蚀、裂解、电离等作用形成单元素粒子;忽略电极烧蚀和蒸发,且毛细管烧蚀均匀;不考虑相间传质和辐射作用;忽略质量力、体积力、电磁力的影响;流场中的湍流效应使用k-epsilon模型进行模拟。

1.2 控制方程

根据上述基本假设和其他相关研究^[6-8],给出瞬态VOF模型控制方程如下。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: t 为时间; α_p 为等离子体相的体积分; ρ_p 为等离子体相密度; \mathbf{v} 为速度矢量。

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: μ 为分子黏度; p 为气体压力; \mathbf{g} 为重力加速度; ρ 为网格单元中空气相和等离子体相的平均密度, $\rho = \alpha_a \rho_a + \alpha_p \rho_p$,其中 α_a 为空气相的体积分, $\alpha_a + \alpha_p = 1$, ρ_a 为空气相密度。

3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中: E 为能量, $E = (\alpha_a \rho_a E_a + \alpha_p \rho_p E_p) / \rho$,其中 E_a 和 E_p 分别为空气相和等离子体相的能量; T 为温度, $T = (\alpha_a \rho_a T_a + \alpha_p \rho_p T_p) / \rho$,其中 T_a 和 T_p 分别为空气相和等离子体相的温度; k_{eff} 为有效导热系数; S_h 为能量源项。

4) 气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (4)$$

式中 R 为气体常数。

5) 湍流控制方程

湍流动能方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

式中: k 为湍流动能; X_i 和 X_j 表示坐标方向; u_i 为速度在 X_i 方向上的分量; μ_t 为湍流黏度; σ_k 为湍流动能的湍流普朗特数; G_k 为由速度梯度产生的湍流动能; ε 为湍流耗散率; Y_M 表示在可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献。

湍流耗散率方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: σ_ε 为湍流耗散率的湍流普朗特数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; G_b 为浮力作用下产生的湍流动能。

上述方程利用 Fluent 软件进行求解, 压力 - 速度耦合使用 PISO 算法求解, 压力使用 PRESTO! 离散方案, 体积分数采用几何重构离散方案, 动量采用二阶迎风格式, 密度、湍流动能以及湍流耗散率均采用一阶迎风格式。

1.3 边界条件与网格无关性验证

1.3.1 边界条件

计算域如图 1 所示, 长度为喷嘴直径的 175 倍, 长宽比为 10:1。采用结构化网格对计算域进行网格划分。初始条件下计算域设为静止的大气环境, 空气的摩尔质量取为 29 kg/kmol。

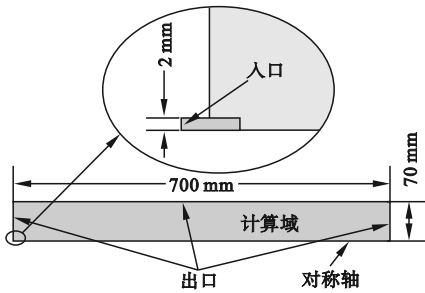


图 1 计算域

Fig. 1 Computational domain

入口边界采用压力入口边界条件, 压力数据如图 2 所示, 为 CY-YD-205 型压电式压力传感器在 3 000 V 放电条件下测得的毛细管内的压力^[8], 水力直径为 4 mm, 温度为 5 000 K^[9]。

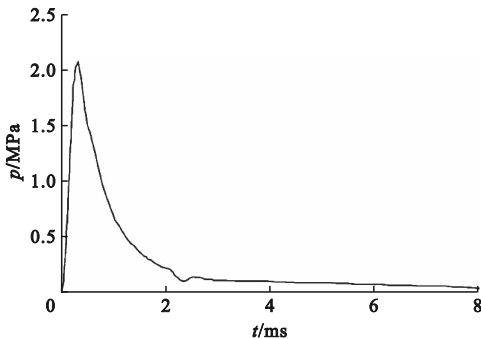


图 2 入口 $p-t$ 曲线

Fig. 2 $p-t$ curve of inlet

由图 2 可见, 在电能激励下, 等离子体源腔体内压力先急剧升高, 当压力达到等离子体源预制

隔膜的临界压力时, 预制隔膜被撕裂, 等离子体通过喷嘴喷入外部环境形成等离子体射流, 腔体内部压力逐渐减小并趋于外部环境压力。

1.3.2 网格无关性验证

为保证仿真计算的精度和效率, 使用上述控制方程及边界条件分别对网格数为 7.5 万、15 万和 22.5 万三种网格划分方案进行计算, 验证网格无关性。等离子体摩尔质量设置为 29 kg/kmol, 以射流轴向扩展位移 x 作为衡量参数。如图 3 所示: 当网格数量从 7.5 万增加到 15 万时, 计算得到的轴向扩展位移 x 明显增大, 两者最大相差约 26.8%; 将网格数量由 15 万增加到 22.5 万时, x 变化不大, 两者最大相差约 4.3% (小于 5%)。故本文采用 15 万网格划分方案。

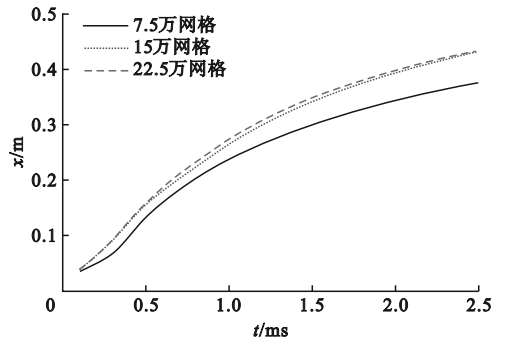


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence verification

2 仿真计算及结果分析

2.1 模型验证

脉冲等离子体摩尔质量与等离子体中各粒子占比有关, 对于 PE 材质的毛细管, 等离子体摩尔质量 M 计算式为

$$M = \frac{N_M m_M M_M + N_C m_C M_C + N_H m_H M_H}{m_p} \quad (7)$$

式中: N_M 、 N_C 和 N_H 分别为毛细管内金属粒子、C 元素粒子和 H 元素粒子的数量; m_M 、 m_C 和 m_H 分别为金属元素、C 元素和 H 元素的原子质量; M_M 、 M_C 和 M_H 分别为金属粒子、C 粒子和 H 粒子的摩尔质量; m_p 为毛细管内等离子体的质量。

图 4 为 PE 毛细管内等离子体摩尔质量 (M) 随放电电压 (U) 的变化曲线, 分别以铝箔 (19.71 mg) 和铜丝 (46.21 mg) 为爆炸丝, 由脉冲等离子体混合物的零维绝热非稳态数学模型^[10] 计算得到。由图 4 可知, 铝箔或铜丝发生电爆炸产生的金属等离子体烧蚀 PE 毛细管形成混合等

离子体,其摩尔质量约在 12 ~ 63 kg/kmol 之间。

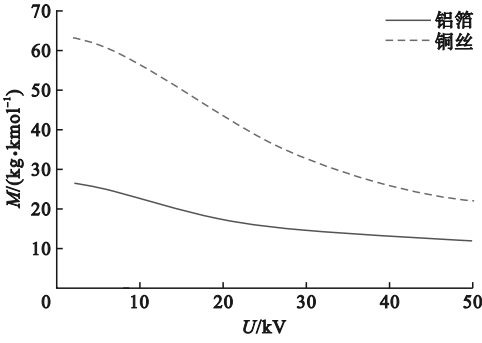


图4 毛细管内等离子体摩尔质量随放电电压的变化曲线
Fig.4 The curves of plasma molar mass with discharge voltage in capillary

文献[8]中等离子体混合物由铝箔起爆丝和 PE 消融管产生,放电电压为 3 000 V,其形成的混合等离子体的摩尔质量约为 26 kg/kmol。按照该实验条件,对前文所建立的数学模型进行求解,得到脉冲等离子体轴向扩展位移,并与文献[8]中的实验值进行比较,结果如图 5 所示。可见,计算数值与实验测量值基本吻合。将计算结果与由 CCD 相机 (Princeton Instruments, ICCD-576) 获得的实验图像^[11]进行对比,结果如图 6 所示,图中 r 表示射流流场径向坐标。可见,射流形态和激波结构基本相符。

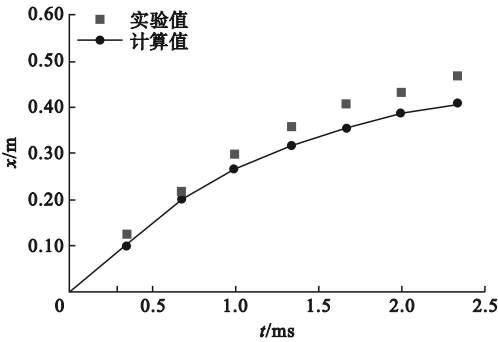


图5 等离子体射流轴向扩展位移
Fig.5 Axial expansion displacement of plasma jet

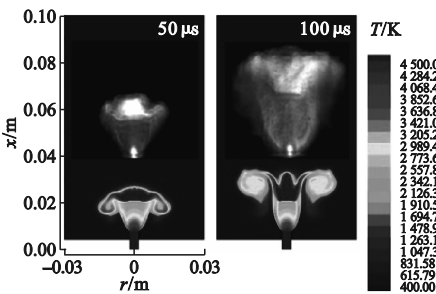


图6 等离子体射流初期结构形态
Fig.6 The initial structure of plasma jet

2.2 摩尔质量对射流近流场扩展特性的影响

由铜制或铝制爆炸丝和 PE 毛细管形成脉冲等离子体,分别对三种不同摩尔质量 (12、26 和 63 kg/kmol) 的等离子体射流进行相关计算。

图 7 为不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在近流场中的马赫数 (Ma) 分布序列云图。由于等离子体源腔内外压差较大,射流喷出后,射流压力逐渐向背压调整,在喷嘴处形成了特殊的瓶状激波;同时射流在喷嘴附近阻塞,使喷嘴附近产生了近似于平面的马赫盘;随着射流的发展,马赫盘下游的速度分布呈现出中间低、两侧高的空心分叉结构;射流形态及激波结构类似于膛口的欠膨胀射流^[12-14]。对比射流初期不同摩尔质量的马赫数分布云图可以看出,摩尔质量越大的射流,其马赫盘直径越大,空心分叉结构存在时间越长,射流的发展速度越缓慢。以摩尔质量为 12 kg/kmol 的射流在 100 μ s 时刻的马赫数分布为基准进行比较,摩尔质量为 26 kg/kmol 和 63 kg/kmol 的射流马赫数分布出现该近似结构的时刻分别约为 115 μ s 和 128 μ s。

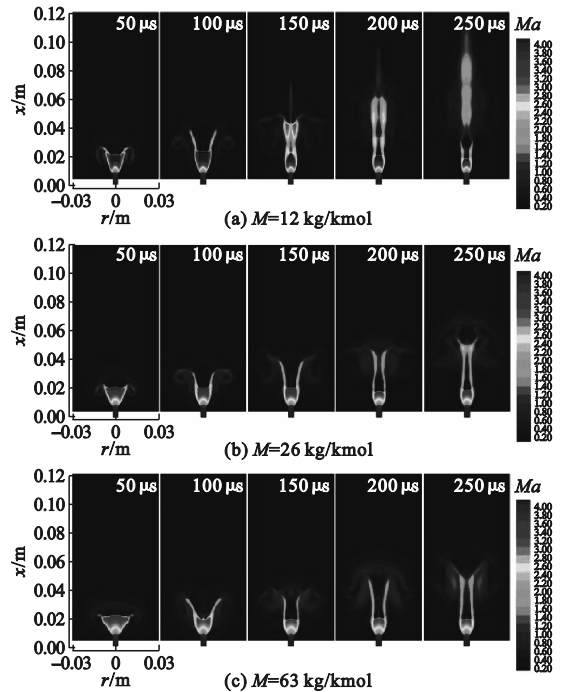


图7 不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在近流场中的马赫数分布序列云图
Fig.7 Mach number distribution of pulsed plasma jets with different molar mass in near flow field

图 8 为 500 μ s 时不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在轴线上的速度分布曲线。可见,射流经过瓶状激波区域时速度陡然上升,在受到马赫盘的阻碍后,速度急剧下降,马赫盘下游的射流速度又逐渐增大,最终射流速度在空气的阻碍作用下

逐渐趋于零。对比三条曲线可以看出,速度随射流摩尔质量的增大而减小。

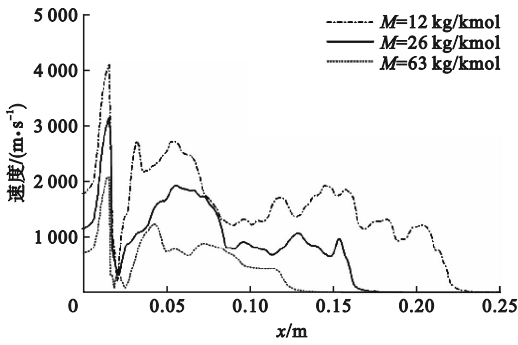


图 8 500 μs 时不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在轴线上的速度分布曲线

Fig. 8 Velocity distribution curves of pulsed plasma jets with different molar mass on the axis at 500 μs

图 9 为不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在近场中的温度分布序列云图。射流初期,由于受到马赫盘的阻碍,射流出现空心分叉结构;马赫盘下游区域出现高温聚集区,该高温聚集区随着射流的发展逐渐演变为锥形结构;射流头部向两侧扩展形成涡旋结构,使外部空气不断被卷入,并逐渐演化为湍流运动。

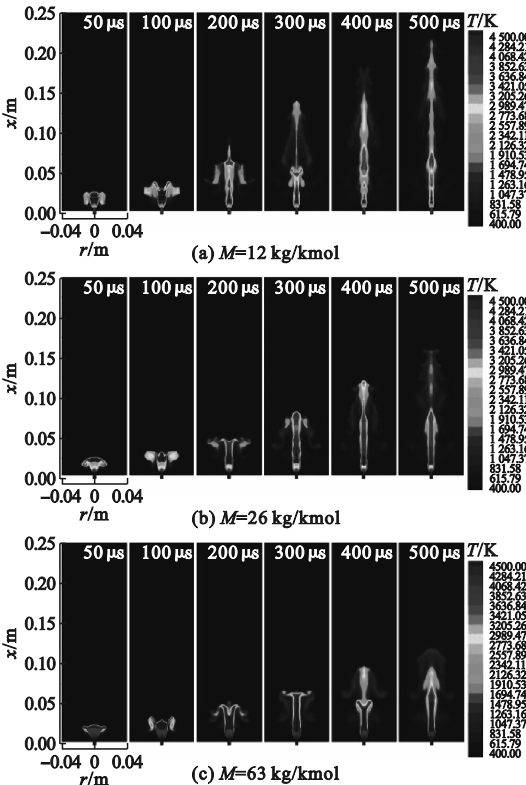


图 9 不同摩尔质量的的脉冲等离子体射流在近场中的温度分布序列云图

Fig. 9 Temperature distribution of pulsed plasma jets with different molar mass in near flow field

对比三种摩尔质量的射流温度分布云图可以看出,摩尔质量越大,马赫盘上游温度越高,且该区域温度分布越均匀。对比 50 μs 时刻,马赫盘下游的高温聚集区宽高比随着等离子体摩尔质量的增大而减小;100 μs 时,等离子体射流两侧的涡旋结构尺寸随摩尔质量的增大而增大;200 μs 时,摩尔质量越大,射流空心分叉结构的滞留时间越长,射流发展越缓慢,同时射流轴向扩展位移出现明显的差异。

图 10 所示为不同摩尔质量等离子体射流的轴向扩展位移曲线,可见,摩尔质量越大,等离子体射流的轴向扩展位移越小。

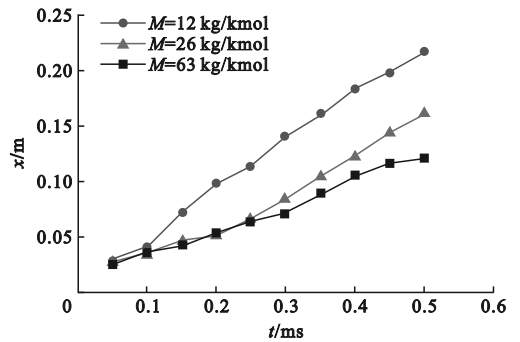


图 10 不同摩尔质量脉冲等离子体射流的轴向扩展位移曲线

Fig. 10 Axial displacement curves of pulsed plasma jets with different molar mass

图 11 和图 12 分别为 500 μs 时不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在轴线上的密度和压力分布曲线。由图 11 可以看出,由于空气不断掺入射流内部,导致密度曲线以脉冲的形式呈现,从曲线峰值数量可以判断出,射流头部掺混剧烈,且摩尔质量越小,掺混程度越剧烈。由图 12 可以看出,压力分布以脉冲形式呈现,由于射流头部与空气相互挤压,在压力分布曲线的尾部出现压力峰,从峰值大小判断,不同摩尔质量的射流和空气之间的挤压强度相当。相对于摩尔质量为 12 kg/kmol 的等离子体射流而言,摩尔质量为 26 kg/kmol 和 63 kg/kmol 的射流头部压力峰的轴向位置分别滞后了 26.1% 和 45.0%。

3 结论

本文对摩尔质量分别为 12、26 和 63 kg/kmol 的等离子体射流在空气中的扩展过程进行了仿真计算,得出以下结论。

1) 仿真计算结果与实验数据基本吻合,等离

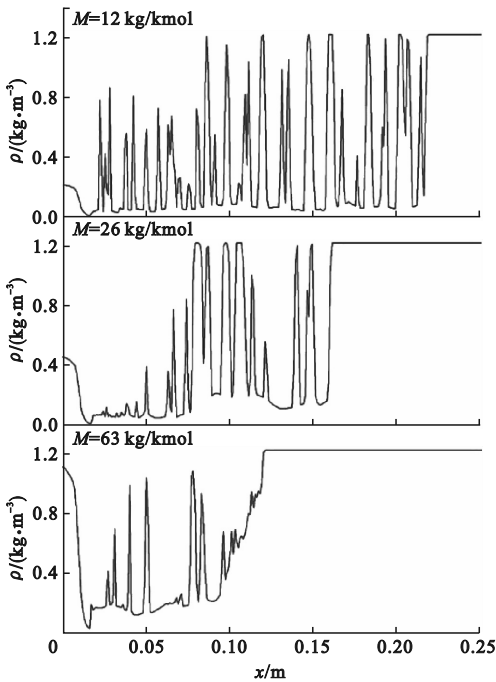


图 11 500 μs 时不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在轴线上的密度分布曲线

Fig. 11 Density distribution curves of pulsed plasma jets with different molar mass on the axis at 500 μs

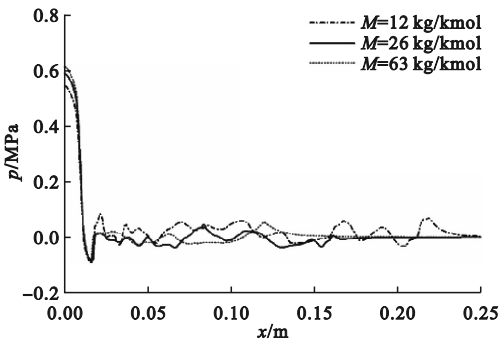


图 12 500 μs 时不同摩尔质量的脉冲等离子体射流在轴线上的压力分布曲线

Fig. 12 Pressure distribution curves of pulsed plasma jets with different molar mass on the axis at 500 μs

子体射流形态及激波结构与实验图像基本相符;由铝箔或铜丝发生电爆炸烧蚀 PE 毛细管产生等离子体,其摩尔质量在 12 ~ 63 kg/kmol 之间;脉冲等离子体射流内部的激波结构类似于膛口欠膨胀射流,在喷口附近产生了瓶状激波和近似于平面的马赫盘。

2) 脉冲等离子体射流存在空心分叉结构,且等离子体射流摩尔质量越大,其结构特征存在的时间越长,射流发展越迟缓;马赫盘下游出现高温聚集区,该区域的宽高比随摩尔质量的增大而增大;压力分布曲线尾部出现压力峰,从峰值大小判

断,不同摩尔质量的射流和空气之间的挤压强度相当,摩尔质量越大,压力峰轴向位置越滞后;摩尔质量越大,等离子体射流的轴向扩展位移、速度以及掺混程度越小。

参考文献 (References):

- [1] 刘怡. 等离子体射流在液体介质中的扩展特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- [2] ALMOUSA N M, BOURHAM M. Performance of capillary plasma source with combustible materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(11): 4873–4878.
- [3] KIM K. Transient flowfield characteristics of polycarbonate plasma discharge from pulse-powered electrothermal gun operation[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(4): 517–524.
- [4] ZHANG J B, LI X W, HANG Y H, et al. An electrothermal plasma model considering polyethylene and copper ablation based on ignition experiment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(23): 235204.
- [5] KIM J U, SUK H. Characterization of a high-density plasma produced by electrothermal capillary discharge[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(3): 368–370.
- [6] 张琦, 余永刚, 宇文聪. 非稳态等离子射流场的二维模型及数值模拟[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 1–5.
ZHANG Q, YU Y G, YUWEN C L. Two-dimensional model and numerical simulation of unsteady plasma jet[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(3): 1–5. (in Chinese)
- [7] 赵雪维, 余永刚, 莽珊珊. 喷射压力变化对脉冲等离子射流扩展特性的影响[J]. 兵工学报, 2016, 37(9): 1617–1623.
ZHAO X W, YU Y G, MANG S S. Influence of injection pressure change on expansion characteristics of pulsed plasma jet[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(9): 1617–1623. (in Chinese)
- [8] 张琦, 余永刚, 陆欣, 等. 等离子射流在大气中扩展特性实验研究[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 97–101.
ZHANG Q, YU Y G, LU X, et al. Experimental study on plasma jet propagation in air[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(4): 97–101. (in Chinese)
- [9] 陈一波, 栗保明. 电热化学炮同轴浮动电极式表面放电等离子体的数值模拟[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(3): 44–49.
CHEN Y B, LI B M. Numerical simulation of the physical field of the coaxial floating electrode type surface discharge plasma generator of an ETC gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(3): 44–49. (in Chinese)
- [10] 刘东尧, 周彦煌, 余永刚. 放电毛细管等离子体模拟研究[J]. 高压物理学报, 1999, 13(3): 205–210.
LIU D Y, ZHOU Y H, YU Y G. Study on simulation of plasma in a discharge capillary[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3): 205–210. (in Chinese)
- [11] KOHEL J M, SU L K, CLEMENS N T, et al. Emission spectroscopic measurements and analysis of a pulsed plasma jet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1): 201–206.
- [12] 刘宗超, 焦志刚, 郭秋萍, 等. 含运动弹丸的某火炮膛口流场数值模拟[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(6): 74–77.
LIU Z C, JIAO Z G, GUO Q P, et al. Numerical simulation of muzzle flow field of gun with moving projectile[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011, 30(6): 74–77. (in Chinese)