无碰撞等离子体膨胀中电子流体模型的有效性评估*

胡远 1 孙泉华 1,2

1中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室,北京 100190 2 中国科学院大学工程科学学院,北京 100049

摘要 本文采用全粒子 particle-in-cell (PIC) 模拟对电子流体模型应用于无碰撞等离子 体膨胀流动问题的有效性进行了评估。研究发现,最广泛使用的基于局部平衡态和热力学 等温及多变过程假设的电子流体模型并不完全适用。在无碰撞等离子体膨胀中观察到强烈 的电子温度各向异性特征,并且确认造成流体模型失效的原因是电子偏离局部平衡态。。

关键词: PIC, 矩方程, 流体电子, 模型评估与发展。

无碰撞等离子体的膨胀是等离子体物理的一个经典问题,常见应用包括电推进器羽 流、空间等离子体绕过航天器所产生的尾流、极高强度激光脉冲与固体标靶作用所产生 的等离子体膨胀流等。在这类等离子体流动中,由于粒子间缺乏碰撞,等离子体处于非 平衡状态,需要动理学的方法来描述,一般求解无碰撞带电磁场的玻尔兹曼(Boltzmann) 方程。值得注意的是,无碰撞等离子体的流动物理远比无碰撞中性气体的自由分子流复 杂。无碰撞 Boltzmann 方程为线性方程,自由分子流中的中性气体分子没有外力场的影 响,本质上是一个线性问题。但等离子体的集体行为改变带电粒子的速度分布,使得无 碰撞等离子体的运动过程是非线性的。此外,由于电子质量远小于离子,电子运动远快 于离子,数值模拟时需要采用较小的时间尺度来捕获电子运动的所有细节,动理学研究 的计算代价大。为此,工程应用中常用简化流体模型来近似描述电子运动。经典的简化 模型包括基于等温过程的 Boltzmann 电子流体模型和基于热力学多变过程的电子流体模 型。这些经典的简化模型虽然在工程中被广泛使用,但对它们的有效性和适用范围一直 缺乏基于全动理论方法的详细评估。

我们采用全粒子 Particle-in-cell (PIC) 方法 (即离子与电子均采用粒子模型) 对电 推力器羽流和空间等离子体尾流膨胀问题开展了大时空尺度的精细化数值模拟研究。通 过全粒子 PIC 与基于电子流体模型的混合 PIC 进行对比研究,发现电子的热力学过程不 仅非等温,且呈现显著的各向异性特征,从而导致采用基于 Boltzmann 电子流体模型的 结果误差较大。此外,通过分析包含速度分布函数在内的电子动理学行为细节,我们探 讨了导致电子流体模型失效的微观机制,获得了常用电子流体模型在无碰撞等离子体膨 胀流的适用范围。最后,我们考察了常用于描述等离子体中电子组分的几种矩方程,分 析各应力及热流对流动演化的贡献,为进一步发展更为恰当的电子流体模型提供了基 础。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net