

磁喷管非平衡等离子流动的全粒子 PIC 模拟研究¹⁾

黄子霖^{*,2)}, 胡远^{*,2)}, 孙泉华^{*,2)}

* (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: 磁喷管 (magnetic nozzle, MN) 通过收缩-扩张型磁场引导等离子体膨胀加速, 因其外形和作用都类似于传统火箭发动机的拉瓦尔喷管而得名。由于磁喷管可为无电极电推力器如螺旋波等离子体推进器、电子回旋共振推进器提供额外推力而受到广泛关注。但是磁喷管等离子体流动与电磁效应耦合, 理论求解困难, 研究手段主要为实验。流体建模需假设等离子体处于平衡态, 但磁喷管中碰撞不足偏离热平衡, 无法完全解释实验现象, 忽略的非平衡效应对流动有重要影响。使用完全动理学方法 (Fully Kinetic PIC), 无需对流动进行任何假设就可以模拟得到等离子体流动流场结构。但受限于计算量, 以往模拟未能获得与实验相当的结果。

本文使用轴对称全粒子 PIC 方法对磁喷管磁推力等离子体流动进行了大尺度模拟, 获得与实验一致的计算结果。结果显示, 磁喷管额外推力全部由体积洛伦兹力贡献。体积洛伦兹力由角向电流与磁场相互作用产生, 其中逆磁角向电流产生正推力提高电推进器推力性能, 顺磁电流产生负推力。常用忽略惯性项与流体应力张量的流体动量方程来建模磁喷管等离子体流动, 称为简化模型。由于未考虑系统非平衡效应对角向电流的贡献, 预测结果与模拟差异较大。对全粒子 PIC 结果求速度矩, 可以获得电子惯性和应力张量项补全简化模型, 评估流体模型求解磁喷管流动的可行性。结果证明流体动量方程可以用于无碰撞非平衡的磁喷管磁推力的建模, 但需要合理考虑与电子输运相关的应力张量项。输运效应会诱导产生顺磁电流, 损害磁推力产生。

关键词: 磁喷管; 完全动理学方法; 非平衡效应; 对角应力张量

1) 资金资助项目 (高温气体动力学国家重点实验室青年创新基金(Grant No. LHD2019CX12))