静磁场协同增强冷大气压等离子体处理的物理机制理解

Ramin Mehrabifard[1], ZeinabKabarkouhi[2], FatemehRezaei[3], KamalHajisharifi[1],Hassan Mehdian[1], Eric Robert[4]

[1] 花拉子米大学物理系和等离子体研究所，伊朗德黑兰莫法特赫博士大道49号

[2] 激光一nd 等离子体研究所，沙希德·贝赫什提大学，埃温，德黑兰，伊朗

[3] 离开 物理系，K. N. Toosi理工大学，沙里亚蒂，德黑兰，伊朗

[4]GREMI，UMR 7344，法国国家科学研究中心/奥尔良大学，45067 奥尔良，法国

通讯作者：k.hajisharifi@gmail.com，hajisharifi@khu.ac.ir ，fatemehrezaei@kntu.ac.ir

摘要

在过去几十年中，为提高冷大气压等离子体处理效率，人们广泛研究了其与其他物理作用方式结合产生的生物效应。然而，对大多数所谓协同效应的物理机制仍缺乏深入理解。在这方面，冷等离子体与磁场的协同效应已被用于不同的应用中，尤其是由于其在生物介质反应性方面表现出显著的协同作用。在本文中，使用一个420mT的N42磁体，基于光发射光谱法，并利用玻尔兹曼图法、萨哈-玻尔兹曼方程和Specair软件模拟，研究了垂直外加静磁场（SMF）对冷大气压等离子体（CAP）特性的影响，例如电子温度和密度。结果表明，在SMF存在时，转动温度和电子激发温度分别升高了100K和550K。而振动温度和平动温度保持不变。此外，在无SMF时，电子温度估算为1.04eV；在SMF存在时，电子温度升高至1.24 eV。此外，萨哈-

玻尔兹曼方程表明，在额外 SMF 的作用下，电子密度增加了。本研究结果表明，磁场可以增强冷等离子体效应，通过改变等离子体温度和电子密度，有利于医学应用。

关键词：冷等离子体、静磁场、等离子体温度、电子密度。

1. 引言

近年来，冷大气压等离子体（CAP）因其广泛的应用而受到广泛关注，例如表面改性 [1], 、医学 [2,3], 以及材料加工 [4]。等离子体射流反应器或典型的 CAP 会产生大量活性物种，如电子、离子和自由基；这些物种随流出物延伸至大气中。同时，气体温度相对较低，与室温 [5]相当。

如今，人们尤其关注如何提升冷等离子体效应，以用于医学应用 [6]。其中一种方法是辅助施加外加静磁场（SMF）。一般而言，SMF 具有独特的性质，难以屏蔽且能迅速渗透到任何系统中。在包括伤口愈合 [7] 和细菌灭活 [8] 在内的各种医学应用中，已观察到磁场的治疗作用。例如，根据 Sadri 等人 [9], 的研究，间充质干细胞排列和增殖率会受到最高达 24 mT 的 SMF 照射的影响。此外，过去十年中，磁场对不同癌细胞的治疗作用也得到了研究 [10–12]。

CAP 和 SMF的协同效应已用于等离子体应用的不同领域，例如抗菌处理 [13,14]。例如，Mackinder等人[15] 研究了外部磁场存在条件下的冷等离子体灭菌。他们表明，在外部磁场作用下，最佳压力能够实现最高效的灭菌。Han 等人 [16] 利用外部 SMF改善了等离子体对水处理的作用。他们得出结论，在磁场增强作用下，活性氧增加，而黑色素瘤细胞的活力显著下降。最近，Cheng等人 [6] 通过同时使用磁体和等离子体射流，引入了一种针对癌细胞的新型有效方法

处理。Xu 等人通过参考文献 [17] 研究了磁场与冷等离子体在生物医学应用中对水样的联合作用。他们发现，这种方法增加了电离碰撞和等离子体射流的放电强度。他们还表明，随着横向磁场增强，水溶液中 O_2, OH 和 H_2O_2 等活性物种的浓度，以及灭活癌细胞和大肠杆菌等活组织的效率也随之提高。在本研究中，我们表明，冷等离子体与 SMF 的协同效应将增强对乳腺癌细胞的等离子体处理效果 [18]。结果证实，在 SMF 存在的情况下，细胞存活率和迁移率显著降低，这与其他文献报道的结果高度一致 [6,19]。

在以往所有研究中，外部磁场对 CAP 处理效率的影响仅从生物学角度进行了报道，而对相关作用机制的物理认识仍然缺失。本研究旨在填补这一空白，从物理层面阐明为什么冷等离子体在外部磁场作用下更加有效。为此，我们将研究外部磁场对在 CAP 处理生物学响应中发挥关键作用的等离子体参数的影响，包括等离子体温度、电子密度和电子温度。需要指出的是，在等离子体射流处理过程中，气体温度和电子浓度是至关重要的参数。

2. 实验装置搭建

实验装置主要由等离子体射流、磁体、校准气体计量阀、射频（RF）发生器以及图1所示的诊断系统组成。带电电极是一根直径为 1 mm 的钢丝，通过阻抗匹配网络连接至射频电源（13.56 MHz）；接地电极缠绕在一根直径为 5 mm 的玻璃管上（玻璃管外覆盖一条特氟龙带）。 在流量为 650 SCCM、输入功率为 20 W 的大气压氩气流中产生稳定等离子体。所用永磁体（IRmagnet，IR）由 N42 合金制成，其磁场强度使用高斯计（HT201 便携式数字高斯计）测量。

光发射光谱法（OES）是研究大气压放电及其组成的常用方法 [20]。此外，光谱法还可评估磁场对冷等离子体中活性物种混合比例的影响。在本实验中，使用一台 Avantes 多通道光纤光谱仪提取等离子体参数，其波长范围为 200–1200 纳米，分辨率为

0.19纳米。值得一提的是，所有光谱均为扣除背景发射后的记录光谱，如图2所示。此外，光谱仪定期使用卤钨氘灯光源进行绝对辐照度校准。一些研究通过原子谱线相对强度的比值计算激发温度，并假定该值与放电中的电子温度相当 [21]。发射光谱学的另一种应用，是通过将羟基自由基或氮分子等分子物种的转动/振动光谱与模拟光谱进行拟合，并改变假定的系统温度，以估算气体温度 [22]。例如，Bruggeman等人 [23]对这一方法进行了严格评估，并确认了解读计算所得温度时应注意的事项。

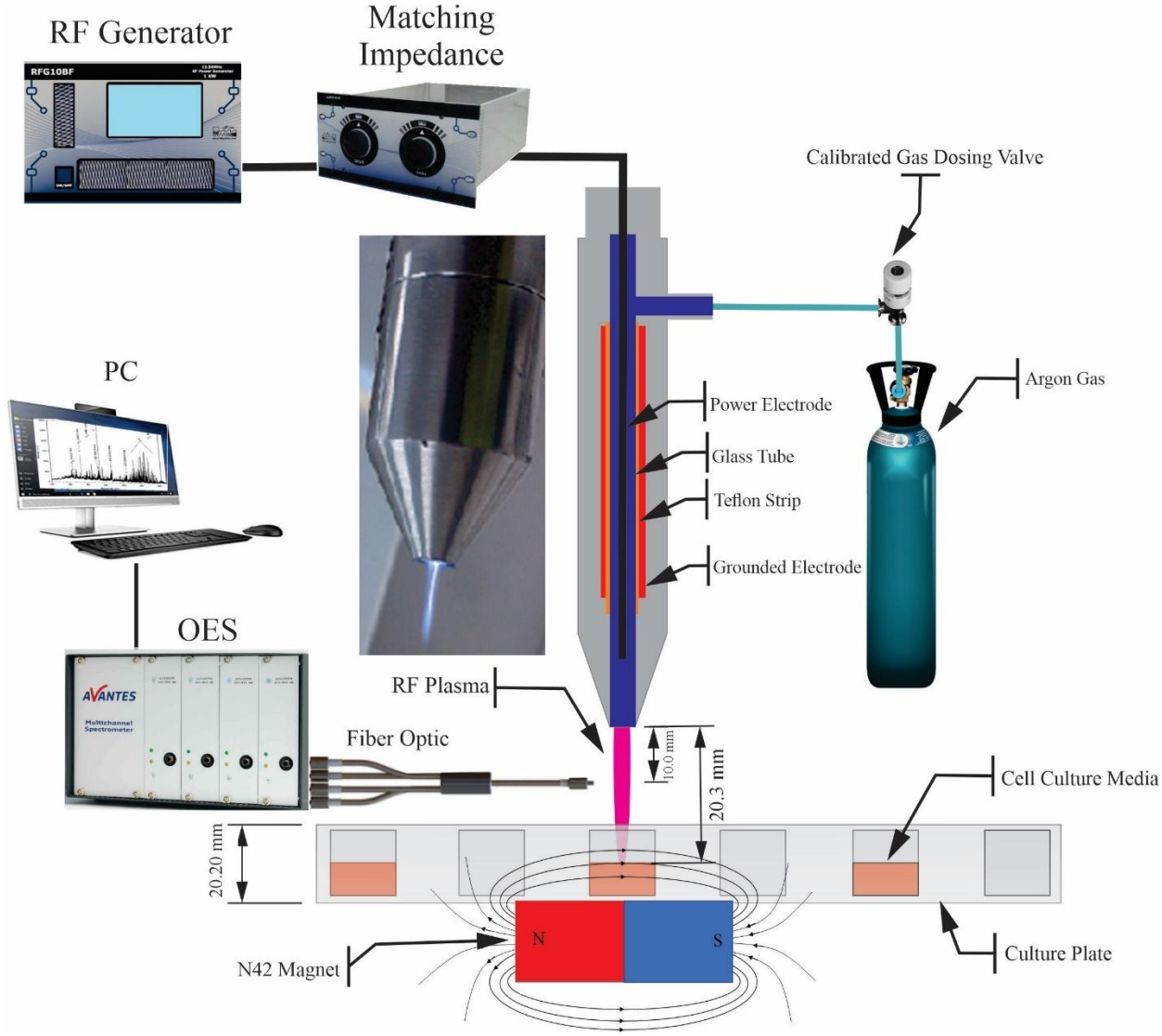


图1。包括实际喷嘴、光发射光谱法和磁体的射频等离子体装置示意图。

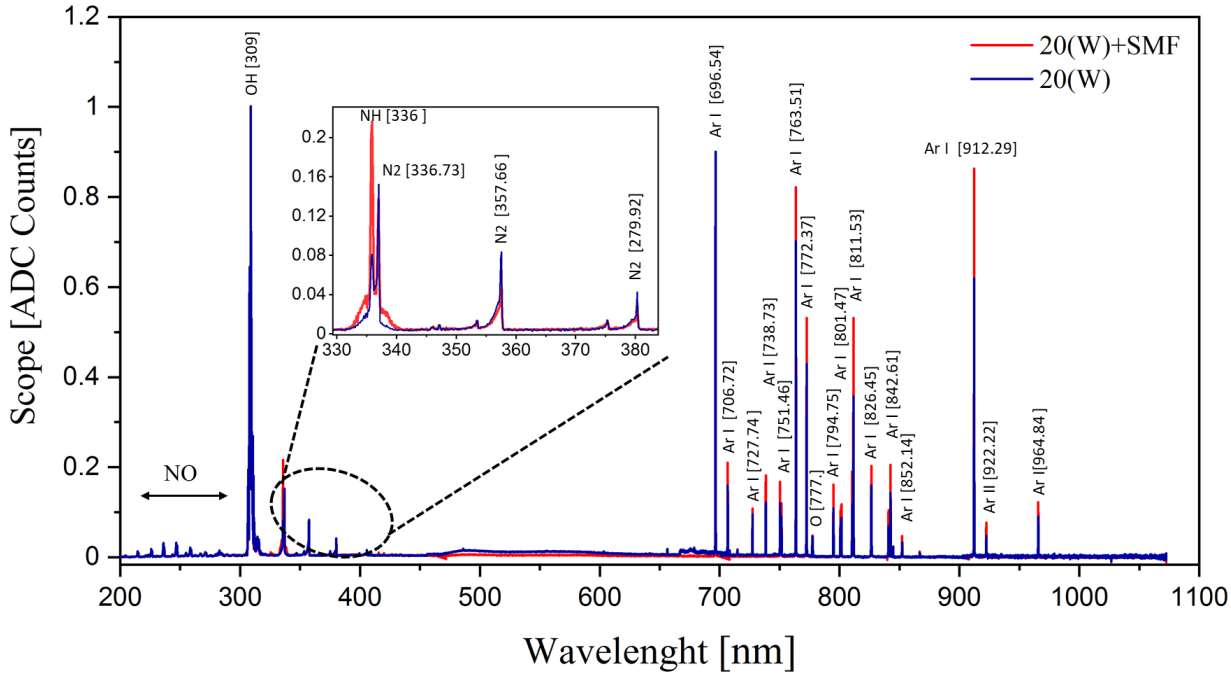


图2。存在和不存在 SMF 时的光发射测量。

3. 理论方法

3.1. 用于温度测量的玻尔兹曼法

在对CAP进行物理研究时，电子温度是一个需要考虑的关键指标。需要指出的是，局部热力学平衡（LTE）原理 是计算等离子体电子温度的一项重要判据。通常，等离子体在完全热力学平衡（CTE）条件下满足LTE，但即使不存在CTE，仍可能达到部分局部热力学平衡（PLTE）。这种情况下，可以在受限条件下使用通用热力学方程。本研究探讨了用于治疗癌细胞的冷等离子体发射（射频射流）满足PLTE和LTE条件的有效性要求。根据Griem判据[24]，要满足PLTE和LTE条件，必须达到一定的最低自由电子密度。下式分别表示PLTE和LTE所要求的电子密度：

$$N_e \geq 7.4\times10^{18}\frac{z^7}{n^{17/2}}\left(\frac{K_B T}{E_x}\right)^{\frac{1}{2}}\ [cm^{-3}] \qquad (1)$$

and

$$N_e \geq 9.2\times10^{17} z^7 (\frac{K_B T}{E_x})^{\frac{1}{2}} (\frac{E_2 - E_1}{E_x})^3 \ [cm^{-3}], \quad (2)$$

其中，z为束缚电子的有效电荷，n为部分LTE条件下最低能级的主量子数，为玻尔兹曼’常数，为电子温度，为下能级，为上能级的能量，而为电离能。对于处于LTE状态的此类等离子体系统，可使用玻尔兹曼图计算电子温度，计算公式为[25,26]：

$$Ln(\frac{I_{ij}\lambda_{ij}}{A_{ij} g_j}) = \frac{-E_i}{K_B T_e}, \quad (3)$$

其中，是发射光的强度，是波长，是上能级的统计权重，是从能级跃迁到能级，且是上能级的能量，是玻尔兹曼常数。

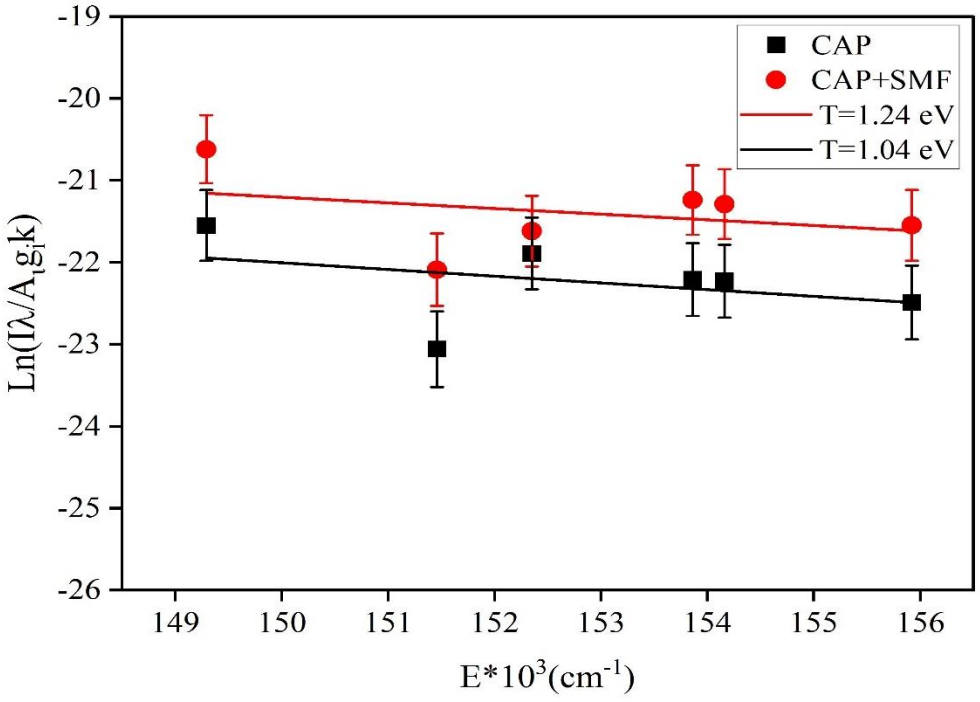


图3显示了与的关系图，用于提取。激发温度等于电子温度，此时处于局部热力学平衡（LTE）条件下。

3.2. 用于密度测量的萨哈-玻尔兹曼方程

使用萨哈-玻尔兹曼方程，利用等离子体辐射发出的原子谱线和离子谱线计算电子密度，如下所示：[27]:

$$n_e = \frac{I_Z^*}{I_{Z+1}^*} 6.04\times10^{21}(T)^{3/2}\times\exp[(-E_{k,z+1}+E_{k,z}-\chi_z)/K_BT]\ cm^{-3} \quad (4)$$

其中 和 是该物种在相应电离阶段的电离能。需要指出的是，等离子体相互作用导致的电离能降低可以忽略不计。因此，可以在公式 (4) 中忽略这一项。为获得 n_e 的值，最好对根据 Ar I 谱线与 Ar II 谱线的强度比提取的电子密度取平均值（912 *nm* Ar I，922 *nm* Ar II）（738 *nm* Ar I，922 *nm* Ar II）。

3.3. 振动温度、平动温度和转动温度

分子在大气压等离子体中大量存在，并对发射光谱有显著贡献。通过发射光谱可以计算分子的转动温度、振动温度和电子激发温度，从而获得有关分子间相互作用（即等离子体条件）的重要信息 [28]。这些分子温度与相应能级之间的平衡假设有关。例如，转动温度可以根据转动能级的玻尔兹曼分布求得。然而，当大气压等离子体处于非平衡状态时，不同的物种会具有不同的温度。通常，较轻的电子直接从电场中获得平动能，因此电子温度显著高于重粒子的温度，后者称为气体温度。不同物种之间存在更复杂的相互作用，且分子还具有多种自由度。由于大气压等离子体中转动-平动平衡建立得很快，通常认为等离子体中双原子分子的转动温度等于气体平动温度 [29–31]。但应谨慎看待这一假设，因为在气体平动过程中，碰撞可能不足以使转动能级的分布达到平衡 [32,33]。

在本研究中，利用氮分子的第二正带系（SPS）光谱进行温度测量。这里的“

振荡器。根据相邻位置上光谱中相似跃迁的变化，将电子-振动-转动能级间的

4. 结果

本研究采用光发射光谱法分析冷等离子体特性。图2展示了在存在和不存在 SMF 的情况下，氩等离子体在 100 至 1100 nm 波长范围内的光谱发射情况。如图中所示，在磁场存在时，大多数波长处的发射强度均有所增加。

计算表明，电子温度 和电子密度 在无 SMF 时分别估算为 1.04 *eV*，而在有 SMF 时分别为 1.24 *eV* 和 。另一方面，对 PLTE 和 LTE 电子密度标准进行了评估，其数值估算为 和 ，分别。因此，这些结果表明，射频等离子体同时满足 PLTE 和 LTE 标准。

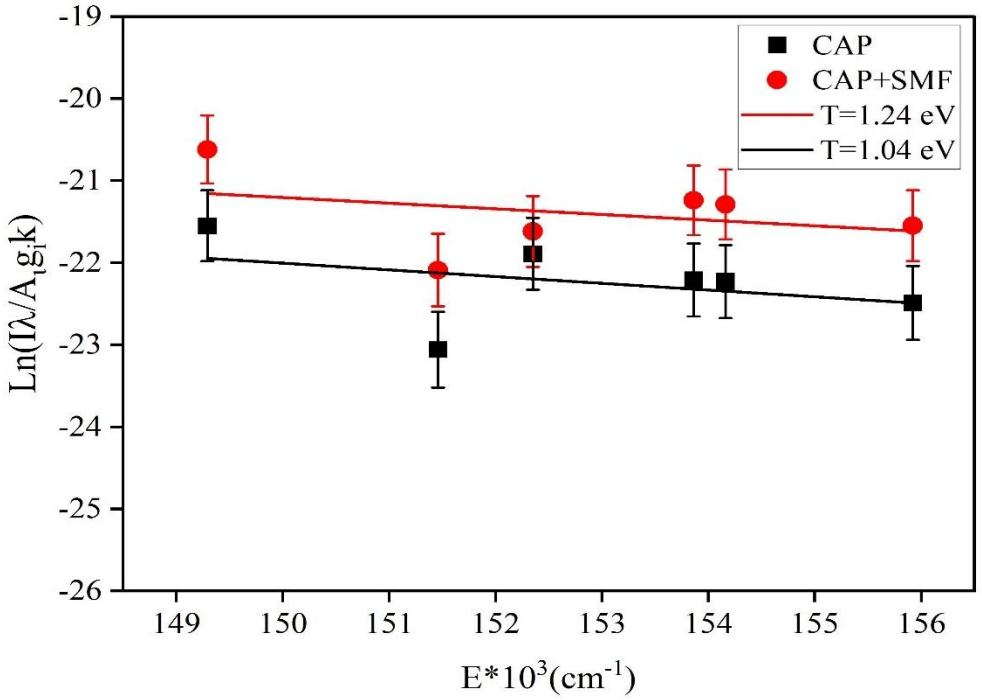


图 3. 用于计算电子温度的玻尔兹曼图。

图 4 展示了波长范围为 305–385纳米的记录光谱，其中呈现了活性氧和氮物种，包括 N_2, OH、NO 和氮 SPS。来源于环境空气的氮在大气压等离子体的发射中占相当大的比例。图中标出了 SPS 谱带，表明其重要性。显然，放电无法将 N_2 分子电离为氮离子分子 N_2^+。

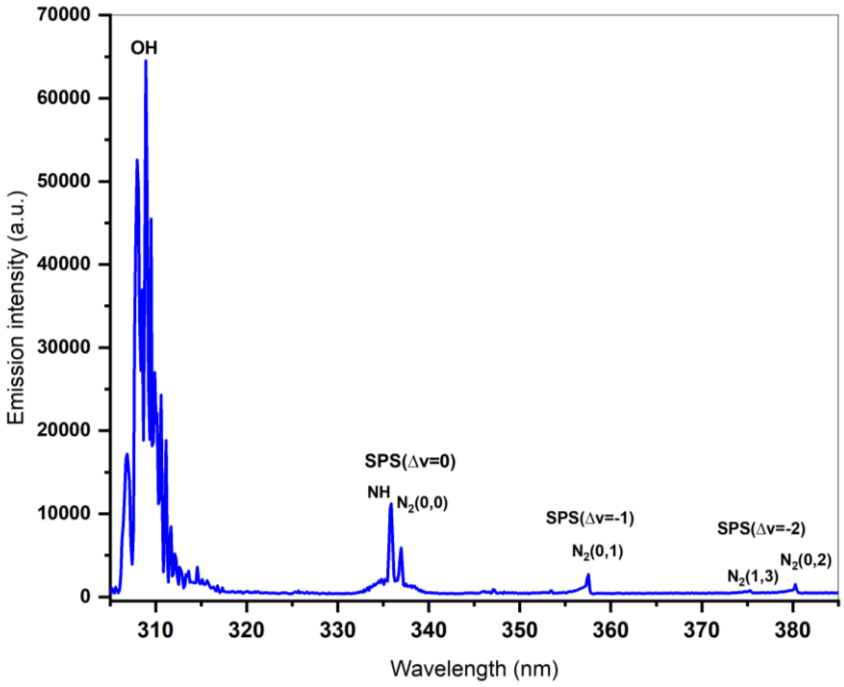


图4. CAP在305–385纳米光谱范围内的光谱。

图5展示了有无磁场时光谱的对比。从图中可以看出，磁场仅通过增强强度影响OH跃迁。这种影响仅限于较窄的范围，可归因于这些跃迁的强度较高，因此磁场效应表现得尤为显著。

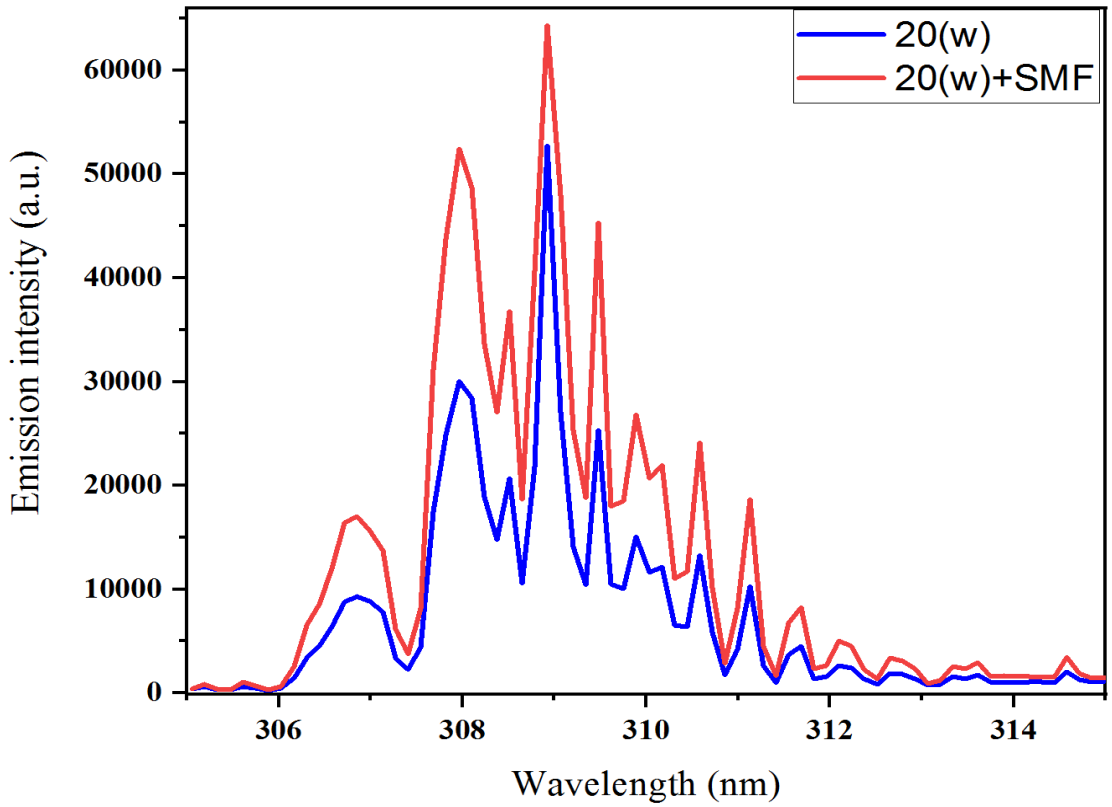
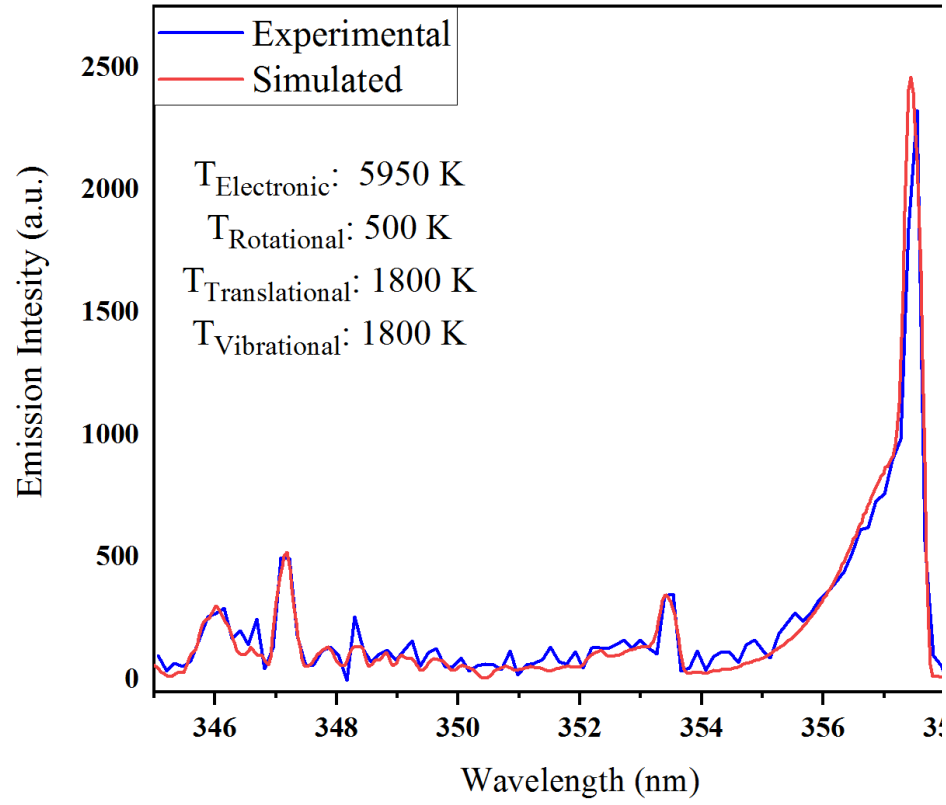


图5. 通过放大受影响范围，比较有磁场和无磁场两种情况下的光谱。

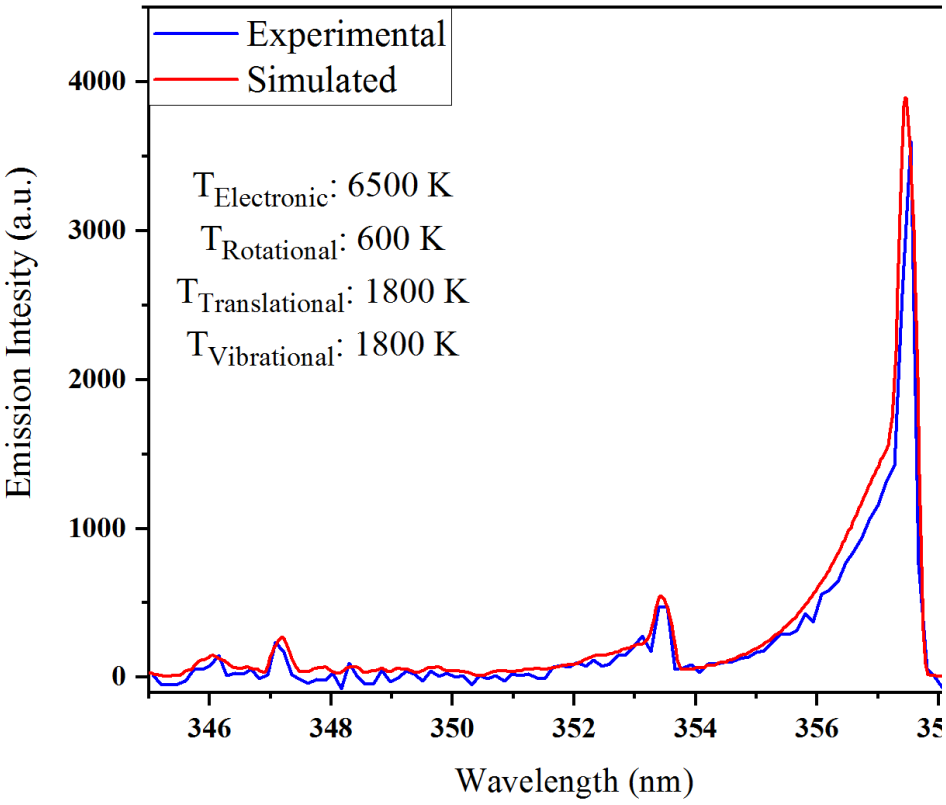
接下来，采用Specair模拟确定存在和不存在静磁场时的温度。图6表明，无论是否存在磁场，平动温度和振动温度均相等，约为1800 K，这说明振动-平动平衡条件得以维持。对于大气压等离子体而言，这并非预期情况，因为转动-平动平衡更为常见。

如图6中清晰所示，磁场使转动温度从500K略微升高至600 K。 所获得的温度远高于等离子体应用于细胞所需的冷处理条件。此外，结果表明，估算的温度并不代表气体温度。有人’提出，氩等离子体中电子向转动布居的大量能量传递将提供较高的 T_{rot} [40]。因此，等式并非一个明确的假设。

总体而言，只有转动温度和电子激发温度受到磁场作用的影响。


Experimental
Simulated
$T_{Electronic}$: 5950 K
$T_{Rotational}$: 500 K
$T_{Translational}$: 1800 K
$T_{Vibrational}$: 1800 K
Emission Intesity (a.u.)
Wavelength (nm)
2500
2000
1500
1000
500
0
346
348
350
352
354
356

(a)


Experimental
Simulated
$T_{Electronic}$: 6500 K
$T_{Rotational}$: 600 K
$T_{Translational}$: 1800 K
$T_{Vibrational}$: 1800 K
Emission Intesity (a.u.)
Wavelength (nm)
4000
3000
2000
1000
0
346
348
350
352
354
356

(b)

图6. 模拟光谱与实验光谱的对比；(a) 无磁场时，(b) 有磁场时。

5. 讨论

近年来，为提高冷大气压等离子体处理效率，人们广泛研究了其与其他物理作用方式相结合时产生的生物效应。然而，对于最具协同作用的效应，相关物理机制仍未得到阐明。在这方面，冷大气压等离子体与外部磁场的协同作用受到了广泛关注，这是由于其在生物介质中表现出显著的协同增强作用。通常，这种效率提升可能源于磁场对产生的等离子体、靶标或细胞的作用，也可能源于磁场和等离子体同时作用于靶标 [6,18,19]。鉴于活性氧和活性氮可能在等离子体与组织或细胞的相互作用中发挥关键作用，协同效应可能伴随着系统中活性物种生成的增加。除了活性物种的直接作用外，近期研究提出，电子是具有重要影响的短期物种，对等离子体特性有着显著影响。电子被认为是等离子体的关键组成部分之一，其温度和密度的任何变化都会影响系统的许多参数和行为。通常，提高等离子体中电子的数密度能够显著影响生物靶标，从而使处理过程更快。此外，随着电子密度的增加，活性物种将呈现良好的增长趋势[41]。在许多癌细胞治疗中，包括使用由较高电子密度的等离子体对卵巢癌、脑肿瘤和皮肤癌进行治疗时，冷等离子体的表现远优于常规等离子体[47–50]。因此，在本研究中，为探究磁场-冷大气等离子体处理协同增强作用的物理机制，研究旨在基于存在磁场时电子参数的变化，关注磁场对等离子体特性的影响，包括

不同电子温度和电子密度。

电子密度计算结果表明，在磁场存在时，电子密度会发生显著变化（从 到 ），而这一磁场可能仅由将磁体放置在等离子体附近产生。这些数值与文献 [42–45] 报告的数据较为吻合。由此可得出结论，先前研究 [6,18] 中观察到的部分效应，可能归因于电子密度增大，从而促进了活性物种生成。

除粒子密度外，等离子体温度作为等离子体特性之一的重要性也已得到广泛阐述 [46–48]。测定等离子体温度对于表征其他等离子体性质至关重要，例如能级的相对布居数和粒子速度分布 [49]。它决定了等离子体的有效性和效率，并影响等离子体系统中各种反应的起始 [50]。不同的电子能量对应不同活性物种的生成率。因此，若干反应速率可由电子温度（T_e）直接调控。许多反应的速率系数取决于电子的能量和温度。一般而言，无需电子能量“参与”的反应不会受到电子温度变化的影响。几乎所有需要电子能量“参与”的反应，其速率常数往往在最高电子能量下达到最大值 [51]。低压氢等离子体中负离子的密度是电子温度和中性气体压力的函数。事实上，电子温度下降时，负离子的数量会减少 [52]。混合等离子体（氩-甲烷）中也观察到了这一效应，因此负氢离子生成受电子温度调控 [53]。基于这些原因，大多数关于等离子体应用的论文都讨论了电子温度在冷等离子体中的重要作用及其对各种参数，尤其是负离子密度的影响 [53]-[54] ，并探讨了多种调控或提高电子温度的方法 [55]。

根据图 3，在存在 SMF 的情况下，观察到电子温度变化了 0.8 eV。因此可以认为，先前报道中观察到的效应，例如我们此前关于 MF-CAP系统处理后细胞活力和迁移率的研究结果，是由于电子温度升高导致等离子体和细胞培养基中的负离子增加所致。

气体温度是中性粒子动能的尺度，也是等离子体化学中的一个有效参数。因此，测定气体温度可视为大多数等离子体应用诊断中的目标。通过氮分子的转动温度推断气体温度得出了较高的转动温度。由于我们在未影响细胞健康的情况下对其进行了处理，这有力地表明 T_g 与 T_{rot}相等这一假设是错误的。通常，高度碰撞的高压等离子体中的极端状态可确保转动-平动弛豫；然而，已有大量研究讨论指出，气体温度与转动温度相等并非普遍成立。因此，需要确认是否满足以下条件之一，即具有热化的

转动分布，或具有快速的转动能量传递以使非热转动分布达到平衡 [32]。应事先完成验证，以避免根据转动温度错误估算气体温度。此外，氩原子可能并不是促使粒子激发至更高转动能级的唯一影响因素，$N_2(C)$的振动态也会影响转动分布 [56]。

对图6 a、b中报告的量进行比较可见，磁场作用下平动温度保持不变。这表明氮分子的动能与磁场无关。振动温度是另一项可用于了解粒子间能量交换的信息。在此，氮分子的平动-振动平衡体现了振动和平动自由度之间的高效能量传递，且不受磁场影响。研究等离子体动力学中的振动-平动（V-T）能量传递，有助于对分子物种在加热现象中的弛豫效应进行建模。V-T能量传递通常较慢，而且由于转动与平动能量转换更容易发生，因此预计不会达到平衡。要阐明等离子体中的激发-弛豫竞争，还需要进行动力学机制调查 [57–59]。

SMF 对 CAP 的影响因其位于等离子体羽流前方的位置而有所不同。垂直于放电对称轴的磁场会由于电子在磁场作用下的曲线运动而导致更多的激发和电离 [60]。这并不一定意味着电子温度更高，而在轴向磁场中通常假定情况如此 [61]。可以预期，在磁场存在时激发温度更高；如图6所清楚显示，温度从 5950 K 提升至 6500 K 证实了这一点。

6. 结论

过去已有研究探讨冷大气压等离子体与磁场的联合作用，以改善等离子体性能；然而，这种提升的主要原因尚不明确。本研究考察了磁场作用下射频等离子体的特性。结果表明，与等离子体羽流垂直的外部磁场会提高电子温度和密度。值得一提的是，等离子体温度的提升是许多生物学和

医学应用中的一个重要因素。使用Specair软件对氮气光谱进行模拟后发现，在磁场作用下，电子激发温度和转动温度升高，而振动温度和平动温度保持不变且相等。然而，结果证实，利用转动分布估算气体温度时，必须检查热化判据。此外，结果表明，温度升高以及短寿命活性物种（电子）的增加是等离子体效应增强的主要原因。由于这种联合作用最常用于等离子体的医学应用，因此应考虑温度变化，以防止热损伤。

参考文献

[1] Izdebska-Podsiadły J 2021 等离子体表面改性对可生物降解 PLA 薄膜印刷质量的影响 Appl. Sci. 11[2] Plattfaut I, Besser M, Severing A L, Stürmer E K and Opländer C 2021 等离子体医学与伤口管理：对经医学认证的冷大气压氩等离子体射流抗菌效能的评估 Int. J. Antimicrob. Agents 57[3] Mehrabifard R, Mehdian H and bakhshzadmahmodi mahdi 2017 非热大气压等离子体对 MDA-MB-231 乳腺癌细胞的影响 Pharm. Biomed. Res. 3 12–6[4] Xu L, Yepez X, Applegate B, Keener K M, Tao B and Garner A L 2020 高压大气冷等离子体在半固体材料中的穿透与微生物灭活 Food Bioprocess Technol. 13 1688–702[5] Joh H M, Kang H R, Chung T H and Kim S J 2014 针电极产生的大气压氦等离子体射流的电学和光学表征：电极材料、接地环电极和喷嘴形状的影响 IEEE Trans. Plasma Sci. 42 3656–67[6] Cheng X, Rajjoub K, Shashurin A, Yan D, Sherman J H, Bian K, Murad F and Keidar M 2017 静磁场增强冷大气压等离子体对癌细胞的处理 Bioelectromagnetics 38 53–62[7] Jing D, Shen G, Cai J, Li F, Huang J, Wang Y, Xu Q, Tang C and Luo E 2010 180 mT 静磁场对糖尿病大鼠伤口愈合的影响 Bioelectromagnetics 31 640–8

[8] Brkovic S, Postic S and Ilic D 2015 磁场对口腔微生物的影响 J. Appl. Oral Sci. 23 179–86[9] Sadri M, Abdolmaleki P, Abrun S, Beiki B and Samani F S 2017 静磁场对人脐带来源间充质干细胞细胞排列、生长和分化的影响 Cell. Mol. Bioeng. 10 249– 62[10] Ghodbane S, Lahbib A, Sakly M and Abdelmelek H 2013 静磁场的生物效应：氧化应激、遗传毒性效应及癌症研究 Biomed Res. Int. 2013 1–12[11] Li J, Ma Y, Li N, Cao Y and Zhu Y 2014 天然静磁场诱导肝癌细胞凋亡 Electromagn. Biol. Med. 33 47–50[12] Dobson J 2012 癌症治疗：磁力致死 Nat. Mater. 11 1006[13] Liu C, Kumakura T, Ishikawa K and Hashizume H 辅助磁场对大气压等离子体射流在等离子体-表面界面处自由基生成及杀菌功能的影响 [14] Xu H, Guo S, Zhang H, Liu D and Xie K 2021 对电磁辅助冷等离子体射流活性物种生成和生物灭活的响应 Phys. Plasmas 28 123521[15] Mackinder M A, Wang K, Zheng B, Shrestha M and Fan Q H 2020 磁场增强的冷等离子体灭菌 Clin. Plasma Med. 1718 100092 –[16] Xu H, Guo S, Zhang H and Xie K 2021 外部轴向磁场增强冷等离子体射流的放电和水处理 Appl. Phys. Lett. 119 054102[17] Xu H, Quan L, Liu Y, Zhang H, Shao M and Xie K 2022 外部 E × E 和 E × B 配置对大气压等离子体射流和等离子体活化水的影响：实验与模拟 外部 E 3 E 和 E 3 B 配置对大气压等离子体射流和等离子体活化水的影响 073503[18] Mehrabifard R, Mehdian H, Hajisharifi K and Amini E 2020 利用维生素C和静磁场提高冷大气压等离子体对乳腺癌细胞的控制效能和死亡率 Plasma Chem. Plas ma Process. 40 511–26[19] Keidar M, Cheng X, ... A S-U P A 15 and 2018 未定义 2016 系统

以及通过磁力介导并增强选择性的癌症等离子体处理方法 谷歌专利
[20] Griem H R 1997年 等离子体光谱学原理 Princ. Plasma Spectrosc.
[21] Walsh J L 和 Kong M G 2008年 线性场与交叉场大气压等离子体射流的对比特性 Appl. Phys. Lett. 93 111501[22] Herzberg G 和 Mrozowski S 1951年 分子光谱与分子结构。I. 双原子分子的光谱 Am. J. Phys. 19 390–1[23] Bruggeman P、Schram D、González M Á、Rego R、Kong M G 和 Leys C 2009年 通过光发射光谱法表征水中的直流激发放电 Plasma Sources Sci. Technol. 18 025017[24] Griem H R 1963年 等离子体光谱学中局域热平衡的有效性 Phys. Rev. 131 1170[25] Förster S、Mohr C 和 Viöl W 2005年 通过光发射光谱法研究大气压等离子体射流 Surf. Coatings Technol. 200 827–30[26] Gomba J M、D'Angelo C、Bertuccelli D 和 Bertuccelli G 2001年 通过光谱表征激光诱导铝锂合金样品中的击穿以定量测定痕量元素 Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. 56 695–705[27] Unnikrishnan V K、Alti K、Kartha V B、Santhosh C、Gupta G P 和 Suri B M 2010年 通过中性原子和离子发射的时间分辨光谱法测量激光诱导铜等离子体中的等离子体温度和电子密度 Pramana - J. Phys. 74 983–93
[28] Zhu X M 和 Pu Y K 2008年 使用光发射光谱法测定低压氮气和氩等离子体中的电子温度和电子密度 Plasma Sources Sci. Technol. 17[29] Laux C O、Spence T G、Kruger C H 和 Zare R N 2003年 大气压空气等离子体的光学诊断 Plasma Sources Sci. Technol. 12 125–38[30] Moon S Y 和 Choe W 2003年 转动温度的比较研究

s

利用大气压等离子体发射的双原子 OH、O_2 和 $N2^+$ 分子光谱 Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc. 58 249–57[31] Happold J、Lindner P 和 Roth B 2006年 利用 A2 Σ+、$v' \leq 0 \rightarrow$ X 2 进行大气压等离子体炬的空间分辨温度测量

Π、v″ ≤ 0 OH 谱带 J . *Phys. D. Appl. Phys* 39 3615 20
. –[32] Bruggeman P J、Sadeghi N、Schram D C 和 Linss V，2014年，气体温度 e
通过非平衡等离子体中的转动谱线测定：综述《等离子体源科学与技术》23[33] Bruggeman P、Schram D C、Kong M G 和 Leys C 2009年液体内部及与液体接触的放电中 OH(A-X) 的转动温度是否是一个良好的 d
用于测定气体温度的诊断方法？Plasma Process. Polym. 6 751 62–
[34] Huber K P 和 Herzberg G 1979 双原子分子的常数 Nature 138 8–689[35] Gaydon A G 和 A C E 1944 氮的带状光谱：新的单重态系统 Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci. 182 286–301[36] Lofthus A 和 Krupenie P H 1977 分子氮的光谱 J. Phys. Chem. Ref. Data 6 113–307[37] Staack D、Farouk B、Gutsol A F 和 Fridman A A 2006 空气中大气压正常辉光等离子体放电的光谱研究以及转动和振动温度测量 Plasma Sources Sci. Technol. 15 818–27[38] Machala Z、Janda M、Hensel K、Jedlovský I、Leštinská L、Foltin V、Martišovitš V 和 Morvová M 2007 用于生物医学和环境应用的大气压等离子体发射光谱学 J. Mol. Spectrosc. 243 194–201[39] Park C 1985 非平衡空气辐射（NEQAIR）程序：用户手册 美国国家航空航天局艾姆斯……
[40] Labelle F、Durocher-Jean A 和 Stafford L 2021 大气压非热氩等离子体中的转动-平动平衡 Plasma Sources Sci. Technol. 30[41] Iwasaki M、Inui H、Matsudaira Y、Kano H、Yoshida N、Ito M 和 Hori M 2008 具有超高电子密度、可高效清洁玻璃表面的非平衡大气压等离子体 Appl. Phys. Lett. 92[42] Tanaka H、Mizuno M、Ishikawa K、Nakamura K、Kajiyama H、Kano H、Kikkawa F 和 Hori M 2011 等离子体活化培养基通过下调生存信号分子 AKT 激酶，选择性杀死胶质母细胞瘤脑肿瘤细胞 Plasma Med. 1 265–77

[43] Torii K、Yamada S、Nakamura K、Tanaka H、Kajiyama H、Tanahashi K、Iwata N、Kanda M、Kobayashi D、Tanaka C、Fujii T、Nakayama G、Koike M、Sugimoto H、Nomoto S、Natsume A、Fujiwara M、Mizuno M、Hori M、Saya H 和 Kodera Y 2015 等离子体处理对胃癌细胞的有效性 Gastric Cancer 18 635–43[44] Iseki S、Nakamura K、Hayashi M、Tanaka H、Kondo H、Kajiyama H、Kano H、Kikkawa F 和 Hori M 2012 非平衡大气压等离子体通过诱导细胞凋亡选择性杀死卵巢癌细胞 Appl. Phys. Lett. 100[45] Yajima I、Iida M、Kumasaka M Y、Omata Y、Ohgami N、Chang J、Ichihara S、Hori M 和 Kato M 2014 非平衡大气压等离子体调节 RET 转基因小鼠黑色素细胞肿瘤中与细胞周期相关的基因表达 Exp. Dermatol. 23 424–5[46] Safi A、Tavassoli S H、Cristoforetti G、Legnaioli S、Palleschi V、Rezaei F 和 Tognoni E 2019 使用柱密度 Saha-Boltzmann 图测定激光诱导等离子体中的激发温度 J. Adv. Res. 18 1 7–[47] Aguilera J A 和 Aragón C 2002 不同环境气体压力下铁样品产生的激光诱导等离子体温度和电子密度分布 Appl. Surf. Sci. 197–198 273–80[48] Villagran-Muiz M、Sobral H、Rinaldi C A、Cabanillas-Vidosa I 和 Ferrero J C 2008 1064 nm 下 CaF2、BaF2 和 NaCl 激光烧蚀过程的光发射和能量耗散特征 J. Appl. Phys. 104[49] Hahn D W 和 Omenetto N 2010 激光诱导击穿光谱（LIBS），第一部分：基本诊断和等离子体-粒子相互作用综述：分析等离子体领域仍面临的挑战 Appl. Spectrosc. 64[50] Ananthanarasimhan J、Gangwar R K、Leelesh P、Srikar P S N S R、Shivapuji A M 和 Rao L 2021 利用光学和电学测量估算氩旋转滑动弧中的电子密度和温度 J. Appl. Phys. 129[51] Holmes T D、Rothman R H 和 Zimmerman W B 2021 应用于等离子体化学反应工程的图论 Plasma Chem. Plasma Process. 41 531–57[52] Bacal M、Bruneteau A M、Graham W G、Hamilton G W 和 Nachman M

1981 氢等离子体中 H^- 密度对压力和电子温度的依赖关系 《应用物理学杂志》52 1247–54[53] Iizuka S、Koizumi T、Takada T 和 Sato N 1993 甲烷对低压氩放电等离子体中负氢离子生成的电子温度影响 Appl. Phys. Lett. 63 1619–21[54] Karakas E、Donnelly V M 和 Economou D J 2013 CH_3F/O_2感应耦合等离子体中物种数密度和等离子体参数的突变 Appl. Phys. Lett. 102[55] Kang Z De 和 Pu Y K 2002 通过添加氩/氦控制感应耦合氮等离子体中的电子温度 《中国物理快报》19 1139 40–[56] Nguyen T D 和 Sadeghi N 1983 态选择的Ar($^3P_2$)和Ar($^3P_0$)亚稳态原子激发的 N_2(C 3Πu)转动和振动分布 Chem. Phys. 79 41–55[57] Adamovich I V.、Li T 和 Lempert W R 2015 低温空气-燃料等离子体中分子能量传递与化学反应的动力学机制 《皇家学会哲学汇刊A辑：数学、物理与工程科学》373[58] Biabani S 和 Foroutan G 2019 混合物中高功率微波放电的能量平衡与气体热化 《国际光学与光子学杂志》13 155–70[59] Yang W、Zhou Q、Sun Q、Dong Z 和 Yan E 2020 氮放电等离子体中的振动-平动弛豫：主方程建模及对朗道-泰勒模型的重新审视 《AIP Advances》10[60] Liu Y、Yan H、Guo H、Fan Z、Wang Y 和 Ren C 2018 平行磁场下重复纳秒脉冲介质阻挡放电的实验研究 Phys. Plasmas 25[61] Tschang C Y T、Bergert R、Mitic S 和 Thoma M 2020 外部轴向磁场对氦大气压等离子体射流及其处理水的影响 《物理学杂志D辑：应用物理》53

利益冲突 作者声明不存在利益冲突。

数据可用性声明
本研究生成或分析的数据集均可获取，并仅在本文中呈现。