第 52 卷 第 5 期：2349-2365　　高电压技术　　Vol.52, No.5: 2349-2365
2026 年 5 月 31 日　　High Voltage Engineering　　May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250921

基于 FO-LIBS 技术的真空开关真空度在线检测方法

张飞龙，刘佳琪，袁　欢，杨爱军，王小华，荣命哲
（西安交通大学电气工程学院，西安 710049）

摘　要：真空开关作为现在电力系统的一种主要开关设备，在中压领域已占主导地位。由于缺乏可靠的真空度在线检测手段，限制了真空开关的日常运维和向更高电压等级推广。该研究将光纤结构与激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy，LIBS)技术结合，提出基于光纤式 LIBS(fiber-optic LIBS，FO-LIBS)的真空开关真空度在线检测方法，弥补了传统 LIBS 系统灵活性不足和现场操作繁琐的弊端，能够更好地保护检测设备和分析设备。该方法使用光纤传输激光并同轴收集等离子体信号，针对真空开关的应用场景，设计了镜样距 110 mm 的长聚焦双透镜再聚焦探头，其聚焦的光束直径为 930 μm，峰值密度更低且能量分布均匀，激发的等离子体在不同真空度下的膨胀动力学行为也与开放式 LIBS 有所差异。通过对等离子体光谱和图像的诊断，研究了气压对等离子体形貌和光谱时间演化的影响，讨论了 4 种特征光谱强度对气压的响应规律，指出其可以作为反向推导真空度的特征量，构建基于随机森林的光谱信号真空度分类算法，具有 91.3%的准确率。该装置在灵活性和复杂工况下的适应性上均有很好的表现。

关键词：真空开关；FO-LIBS；真空度；在线检测；等离子体光谱

Online Vacuum Degree Detection Method for Vacuum Circuit Breakers Based on FO-LIBS Technology

ZHANG Feilong, LIU Jiaqi, YUAN Huan, YANG Aijun, WANG Xiaohua, RONG Mingzhe
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As a primary switching device in modern power systems, vacuum circuit breakers have become dominant in medium-voltage applications. However, the lack of reliable online vacuum degree monitoring methods limits routine operation and maintenance, as well as the wider adoption of vacuum circuit breakers in higher voltage levels. In this study, a fiber-optic laser-induced breakdown spectroscopy(FO-LIBS) approach is proposed for online vacuum degree detection in vacuum circuit breakers, effectively addressing the issues of limited flexibility and complex field operation inherent in conventional LIBS systems, while enhancing protection for both detection and analysis equipment. By employing fiber optics for laser delivery and coaxial plasma signal collection, a long-focus double-lens refocusing probe with a mirror-to-sample distance of 110 mm was designed to suit the vacuum circuit breaker application scenario. The focused beam has a diameter of 930 μm, featuring lower peak intensity and more uniform energy distribution. The plasma generated under varying vacuum degrees exhibits distinct expansion dynamics that differ from those in conventional open-path LIBS. Through plasma spectral and imaging diagnostics, the influence of ambient pressure on plasma morphology and temporal spectral evolution was investigated. The pressure-response characteristics of four spectral features are analyzed, and these features are further used for inverse estimation of vacuum degree. Furthermore, a random forest-based spectral classification algorithm was developed, achieving an accuracy of 91.3%. The proposed FO-LIBS system also demonstrates excellent flexibility and adaptability under complex operational conditions.

Key words: vacuum circuit breaker; FO-LIBS; vacuum degree; online detection; plasma spectroscopy

0　引言

开关设备在电力系统中承担着控制与保护的重要作用，是保障电网安全运行的核心装备，其性能直接影响系统的安全与稳定[1]。传统的 SF_6 开关以 SF_6 气体作为绝缘和灭弧介质，被广泛应用于中高压输电系统[2]。然而，SF_6 是一种极强的温室气体，具有极长的大气寿命，其全球增温潜势远超 CO_2，且其环境影响会因在大气中的长期滞留而进一步加剧[3]。随着全球气候变暖，限制温室气体排放已成

基金资助项目：国家自然科学基金(51777154；52307184)；陕西省科学技术协会青年人才托举计划(20230459)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51777154, 52307184), Young Lalent Fund of Association for Science and Technology in Shaanxi, China(20230459).

为全球共识。2020 年 9 月，中国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标。2024 年 2 月，欧盟发布了氟化温室气体法规，宣布 2026 年起在 24 kV 及以下的电力设备中禁止使用 SF_6，2030 年起在 52 kV 及以下的配电设备中禁止使用 SF_6[4]。因此，从可持续发展的视角出发，依赖 SF_6 作为绝缘和灭弧介质并非长远之计，研发绿色、低碳的新型电力装备已成为行业发展的必然趋势[5-6]。

真空开关作为以真空为绝缘和灭弧介质的关键装备，相较传统空气和油类开关，具备结构紧凑、故障率低、分断能力强、维护便捷等突出优势[7]，真空开关在中压领域占据主导地位，并逐步向高压市场拓展[8-9]。2024 年，平高集团已成功研发并投运 126 kV 真空开关，并推出全球首套 252 kV/50 kA/4 000 A 单断口真空断路器[10-11]。同年，宝光股份自主研发的真空灭弧室与西开有限公司联合设计的环保型气体绝缘开关设备在国网河南栾川县罗庄 110 kV 变电站实现了国内首套大容量 126 kV 环保型瓷柱式真空断路器的挂网运行[12]。这标志着高压真空断路器已具备实际投运条件，但缺乏可靠的真空度在线检测手段仍是其推广应用的重要障碍。

现有真空开关真空度检测手段多为离线检测，只适用于设备出厂检测和停机检修，如工频耐压法和磁控放电法，而在线监测真空度的技术和方法不多，大多数仍处于实验室阶段，尚未实现工程化应用[13-15]。例如，电磁波法通过放置在断路器外部的环形天线接收脉冲放电产生的电磁波信号，从而判断真空环境的劣化程度[16-17]。局部放电法利用局部放电起始电压随着真空度降低先下降后上升的关系计算真空度[18-19]。上述方法都存在检测精度较低、抗干扰能力弱等问题，不能满足工程应用需求。

西安交通大学科研团队提出了一种基于激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy，LIBS)进行真空度在线检测的方法[20-23]。该技术原理为：将高能脉冲激光照射至屏蔽罩表面，诱发激发等离子体，环境气压对等离子体形成及演化具有显著影响，气压升高时，等离子体粒子与环境分子的碰撞增强，能量损耗与辐射衰减速度增加，通过采集其发射光谱与成像信息，实现对真空度状态的判别。

尽管该技术已在实验室环境下充分验证其可行性，但在向实际工程应用推广过程中仍有若干亟需解决的问题。首先，系统样机在现场部署时，需反复进行激光对焦与光路准直，以确保等离子体的激发条件最优。这一操作流程较为繁琐，对运维人员的专业能力提出较高要求，降低了现场应用的便捷性。其次，现场环境通常伴随强烈电磁干扰，且光谱仪与激光器等核心部件结构复杂、体积较大且成本较高，长期暴露于复杂工况下存在设备损伤和运行稳定性下降的风险。这些因素共同制约了该方法的工程化推广与普及。

随着光纤材料和高能激光的光纤传输技术发展，采用光纤传输脉冲激光并回传光谱信号的光纤式 LIBS(fiber-optic LIBS，FO-LIBS)正被越来越广泛地应用于远程获取材料的 LIBS 光谱信号，从而避免分析人员和精密光电设备暴露于极端环境，可在深海、高辐射、危险品等复杂环境中实现快速、多元素的同步检测[24]。20 世纪初，研究者开始将 FO-LIBS 应用于实际场景。例如英国 Applied Photonics Ltd.团队于 2001 年利用 75 m 长的 550 μm 大芯径光纤实现了核电站受限空间内的不锈钢管道的铜含量远程检测[25]。Hamed 等人 2022 年通过开发柔性光纤束传输系统与末端微型透镜耦合的探头设计，成功实现了首个柔性 FO-LIBS 内窥镜系统，证明 FO-LIBS 可以应用于传统 LIBS 无法胜任的狭窄、复杂空间检测场景[26]。Andrews 等人 2023 年使用 FO-LIBS 系统远程部署于核电站的熔盐反应堆中，用于监测气态裂变产物组分，光纤用于保护精密的光学设备免受高温和辐射损害[27]。Shi 等人提出了一种分析页岩成分的 FO-LIBS 系统，光纤式的结构使装置有条件直接部署在矿井下，现场测量可以避免有机物随时间的推移而分解和挥发[28]。尽管 FO-LIBS 技术已在多个极端环境下展现出显著优势，其应用范围正在不断拓展，但截至目前，尚无关于将 FO-LIBS 直接用于真空度在线检测的公开报道。

以往研究大多将光纤出口与聚焦探头布置于样品表面，采用近距离旁轴方式收集等离子体发射信号，这种设计便于提升信噪比和检测灵敏度。然而，对于结构密闭、空间受限且内部不可直接侵入的真空开关装置而言，传统 FO-LIBS 探头布置方式面临诸多挑战。如何在保证远距离高效激光聚焦与等离子体信号收集的同时，克服真空腔体和金属外壳的物理屏障，成为 FO-LIBS 实现真空度在线诊断首先必须攻克的关键技术难题。其次，需深入分析不同激发方式下等离子体产生与演化的差异，明确

气压变化对等离子体光谱与成像行为的影响机制，最后，提取能够敏感反映真空度变化的特征信号，建立基于 FO-LIBS 的真空度在线监测方法。

1　FO-LIBS 真空检测平台搭建

如图 1 所示，与传统 LIBS 需要将检测和分析装置集中布置于真空开关本体附近不同，FO-LIBS 通过光纤可以实现检测端与分析端的空间分离，大大提升了系统的布设灵活性与远程适应性，有效规避极端环境对精密分析设备的影响。

光纤式 LIBS 真空检测平台主要包含 FO-LIBS 部分和真空腔模拟系统，前者又分为激光光纤耦合、馈出激光束再聚焦和等离子体光纤回传 3 个部分。

1.1　激光光纤耦合部分

经过聚焦透镜聚焦的激光耦合进入光纤的示意图如图 2 所示。

从图 2 可以看出，想要为保证激光馈出后有足够大的能量聚焦激发等离子，需要满足 2 个条件：1）尽量多的激光能量进入光纤，同时落在端面的光斑直径 d_0 应小于光纤内芯直径 d_{core}；2）不能超过光纤的损伤阈值。满足第 1 个条件的前提是激光在光纤内芯内发生全反射，这要求激光光束的散射角度 θ 小于光纤的最大接收半角 θ_0，而 θ_0 取决于光纤的数值孔径。

$$\sin\theta_0 = A_{laser} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{1}$$

式中：A_{laser} 为光纤的数值孔径；n_1、n_2 分别为光纤内芯和包层的折射率。

因此，在进行光纤选型时，应选择大芯径，高 NA 的折射率阶跃型多模光纤。

为满足条件 2），需计算激光聚焦束腰处的能量密度，聚焦后光束在焦点附近形成的最小束腰 ω_0 计算式为：

$$\omega_0 = \frac{2\lambda f}{\pi d_{laser}} \tag{2}$$

式中：λ 为激光波长；f 为聚焦透镜的焦距；d_{laser} 为入射光束在透镜上的直径。

激光功率密度计算式为：

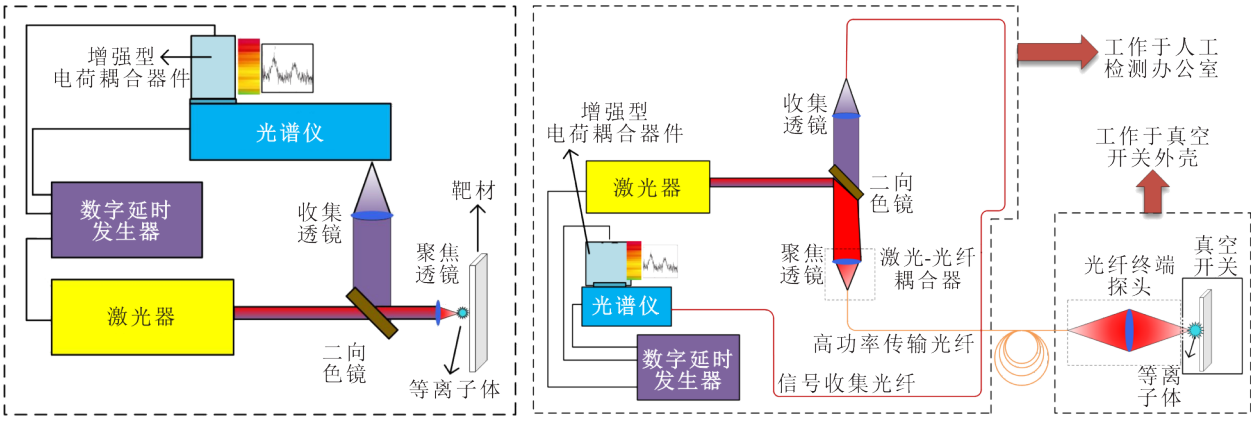
$$P_d = \frac{E}{\tau A} \tag{3}$$

式中：E 为单个脉冲的激光能量，J；τ 为激光脉宽；A 为激光作用面积。

代入相关参数，计算出来束腰区域的激光功率密度为 15.6 GW/cm^2，远超一般光纤的损伤阈值(约为 2 GW/cm^2)，需要将光纤端面远离聚焦光束的束腰区域。

综上，耦合效率最优设计时，要让光纤端面尽量靠近激光束的束腰位置，使入射光束的直径和数值孔径与光纤相匹配，但此时计算的能量密度会超过光纤端面能量阈值，因此在实际实验中，先将光纤远离束腰区，逐步靠近确认实际的安全距离 D_{safe}，最终这个距离被确认为 5.3 mm。

为了探究 FO-LIBS 的激光光纤耦合稳定性并计算耦合效率，使用长度为 1 m，芯径为 800 μm，数值孔径为 0.22 的光纤，分别设置激光器能量为 5、10、15、20、25、30 mJ，在激光光路中加入分光镜，使用能量计记录 10 次激光入射光纤的能量 E_{in} 和出射能量 E_{out} 如图 3 所示。从图 3 可以看出，激光光纤耦合部分的出射能量稳定，整体的耦合效率随着激光入射能量轻微降低，在 5 mJ 入射时耦合效率约



(a) 传统开放式 LIBS 结构示意图　　(b) FO-LIBS 结构示意图

图 1　传统 LIBS 和 FO-LIBS 结构对比图

Fig.1　Schematic comparison between conventional LIBS and FO-LIBS configurations

为 95%，在 30 mJ 入射时耦合效率约为 84%。实验证明，激光光纤耦合具有很高的稳定性和可重复性，并在光纤出射端的能量足以激发等离子体。

考虑实际工况下，需要灵活布设光纤传输激光，因此需探索激光光纤耦合效率与光纤长度和激光入射能量的关系。使用 3 根长度 L 分别为 0.5、1、2 m 的光纤，以 5、10、15、20、25、30 mJ 为激光入射能量，记录光纤另一端的激光出射能量如图 4 所示。从图 4 可以看出，激光光纤耦合效率整体随光纤长度增加而减小，也随着入射能量增大而减小。对于 0.5 m 长的光纤，整体的耦合效率都在 92%以上，对于 2 m 的光纤，在 30 mJ 入射时，仍有 78%的耦合效率。以往的研究中，通常 15 mJ 以上的激光能量即可激发的等离子体，用作真空腔真空度判断。因此，实验证明 FO-LIBS 可以配合长距离光纤使用。如果继续增大光纤长度，为保证相同的出射能量，需要增大激光的入射能量。但如果激光入射能量过大，超过了光纤端面的损伤阈值，或可能导致光纤纤芯层与外层之间的胶合剂溶解，在光纤端面上凝固成为微小的滴状结构，这种结构类似于一个微小的透镜，会在耦合时烧毁光纤端面。为了应对这种情况，可以将聚焦透镜的位置向前移动，增加 D_{safe} 的值，降低光纤端面的激光能量密度，同时增大光纤的纤芯直径作为补偿。

1.2 馈出激光束再聚焦部分

在传输光纤的出口，激光光束馈出光纤后呈发散状态，为将馈出光纤的激光重新聚焦到靶材表面激发等离子体，需要设计 1 款 FO-LIBS 探头，以满足真空开关的场景需要。由于真空开关内部结构特点，探头需安装于开关外壳之外，激光束需跨越外壳与屏蔽罩的空间距离，实现对屏蔽罩表面的远距离激发。

以往的 FO-LIBS 研究主要用于材料成分的远程分析，在样品表面布设单透镜探头，结构如图 5 所示。由光路可逆原理，激发的等离子光线会沿原光路返回，成像于光纤端面，逆向回传

使用两种常用规格的光纤，和索雷博公司的 4 款透镜进行仿真测试如图 5 所示，镜样距和理论光斑直径通过仿真计算如表 1 所示。

从表 1 可以看出，随着焦距和透镜直径的提高，理论光斑直径和镜样距逐渐增大，孔径数值(numerical aperture，NA)为 0.22 的单透镜系统均拥有足以激发等离子体的较小光斑，镜样距最大为

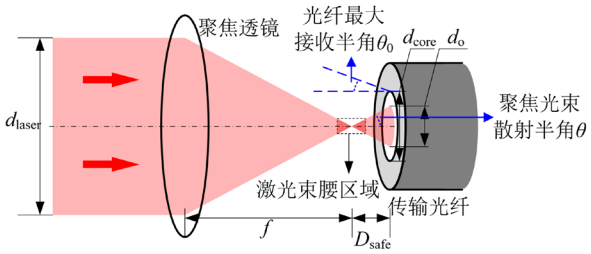


图 2 激光光纤耦合示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser-fiber coupling

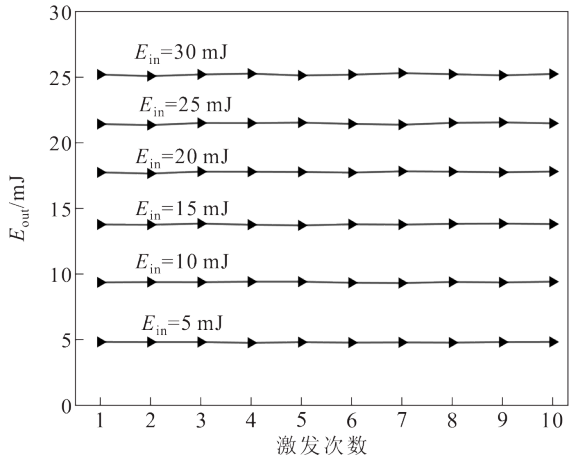


图 3 激光出射能量与入射能量关系图

Fig.3 Relationship between output and input laser energy

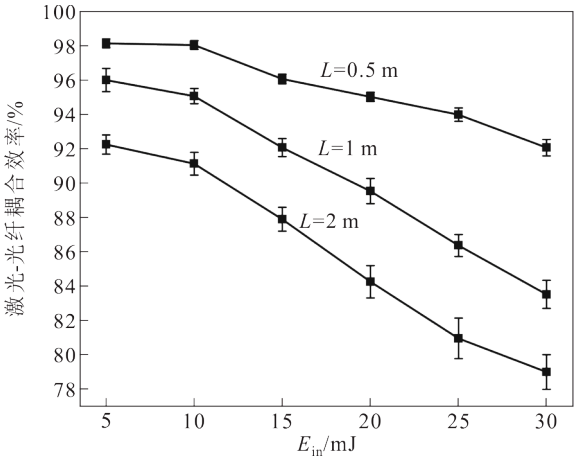


图 4 激光光纤耦合效率和光纤长度关系图

Fig.4 Dependence of fiber coupling efficiency on fiber length

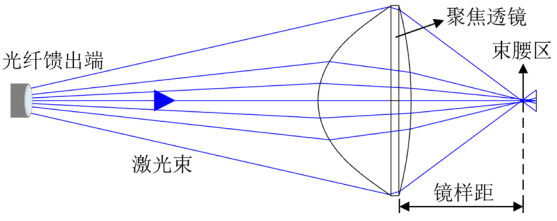


图 5 单透镜镜头再聚焦仿真图

Fig.5 Single-lens refocusing simulation

70.15 mm，虽然通过增加透镜焦距和直径在一定程度上可以延长镜样距，但 NA 为 0.22 的单透镜探头可实现镜样距仍然难以满足 110 mm 的聚焦距离要求，同时，过大的透镜尺寸也限制了实际使用中的便利性。如果通过增加光纤芯径和 NA 提高了镜样距，但光斑直径大幅增加，能量密度大幅降低，不足以激发等离子体。因此，单一透镜系统在本应用场景下难以应用。

为克服上述局限，结合已有文献和工程应用中的常见做法，本系统进一步选用双透镜结构，以实现长距离条件下的激光束准直与再聚焦。具体而言，首先利用第 1 枚透镜将光纤馈出的发散光束准直为近似平行光，随后通过第 2 枚聚焦透镜，在远距离处重新聚焦，获得所需的焦斑尺寸和能量密度。双透镜结构不仅有助于显著提升可实现的镜样距，也进一步优化了目标表面的聚焦效果与能量分布。

在双透镜系统的光学仿真设计中，将光纤输出端视作双透镜系统的光源。因此，光纤参数的选择直接决定了系统的初始光束特性，成为影响后续聚焦性能的关键因素。聚焦能力的根本限制源于光束参数乘积(beam parameter product，BPP)守恒原理。BPP 定义为光束束腰半径 ω_0 与远场发散半角θ的乘积，实际光束中，这一乘积等于：

$$\omega_0\theta = M^2\frac{\lambda}{\pi} \tag{4}$$

式中：M^2 为光束质量因子，表征光束的质量和聚焦能力。

BPP 守恒原理不仅量化了激光束的空间质量，还从理论上限定了系统所能实现的最小聚焦光斑尺寸。具体而言，输入光束的 BPP 越大，输出端可获得的最小焦斑直径也越大。探头系统中，BBP 在输入侧可理解为光纤内芯和数值孔径的乘积，以两英寸透镜，10 cm 镜样距为例，当光纤内芯为 600 μm，NA 为 0.22 时，结合式(4)，计算的理论光斑直径为 500 μm，若 NA 提升至 0.37 时，则理论光斑直径增大至 855 μm；而在 NA 维持 0.22 不变，芯径增大至 800 μm 时，理论光斑直径也将增至 667 μm。值得注意的是：受慧差、渐晕等实际光学像差影响，实际聚焦获得的光斑尺寸通常较理论值增大(100~200 μm)，能量密度会进一步降低。因此，权衡激光光纤耦合端和光束馈出光纤重聚焦端，最终光纤选型为 600 μm 芯径、0.22 的 NA。

通过 Zemax 设计仿真与优化，制作了双透镜结构探头如图 6 所示，镜片参数如表 2 所示，R_1 为第一面曲率半径，R_2 为第二面曲率半径，K 为圆锥常数，镜样距 110 mm，光斑直径小于 1 000 μm。

1.3　聚焦光斑光束质量分析

为了测试光纤式 LIBS 系统的激光能量与靶材的耦合效率，分别在 10^{-4}~10^5 Pa 下，激发等离子体 50 次，每个真空度移动平移台更换一次靶材位置，得到的光谱强度变化如图 7 所示。

从图 7 可以看出，在高真空和低气压下，20 次激发后光谱强度达到稳定状态，此时烧蚀坑形貌基本固定，在高气压中，50 次后达到稳定，这是因为此时空气密度大，等离子激发更剧烈。在某几根曲

表 1　不同聚焦条件下单透镜探头仿真结果

Table 1　Simulation results of single-lens probe under different focusing conditions

光纤芯径/μm	孔径数值 NA	透镜型号	透镜焦距/mm	透镜直径/mm	理论光斑直径/μm	镜样距/mm
600	0.22	ACL1512U	12	15	183	14.43
600	0.22	ACL50832U	32	50.4	122	33.65
600	0.22	ACL5040U	40	50	184	51.93
600	0.22	ACL7560U	75	60	190	70.15
600	0.37	ACL7560U	75	60	1150	178.63
800	0.37	ACL7560U	75	60	1085	153.54

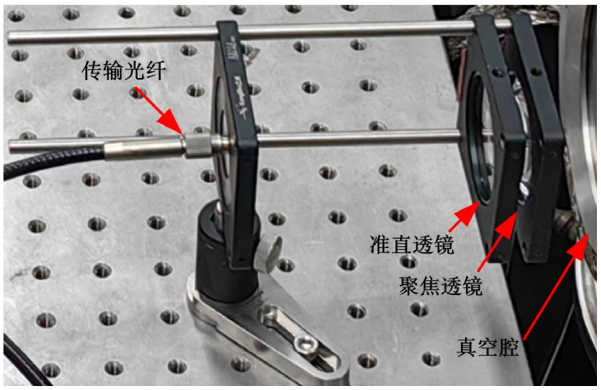


图 6　双透镜再聚焦探头实物图

Fig.6　Photograph of the dual-lens probe

表 2　双透镜再聚焦探头参数

Table 2　Parameters of the dual-lens refocusing probe

透镜类型	焦距/mm	直径/mm	中厚/mm	边厚/mm	R_1	K	R_2	材料
准直透镜	99.63	50	8	1.6	50.48	–0.49	平面	H-K9LGT
聚焦透镜	109.7	50	8	1.2	55.58	–0.70	平面	H-K9LGT

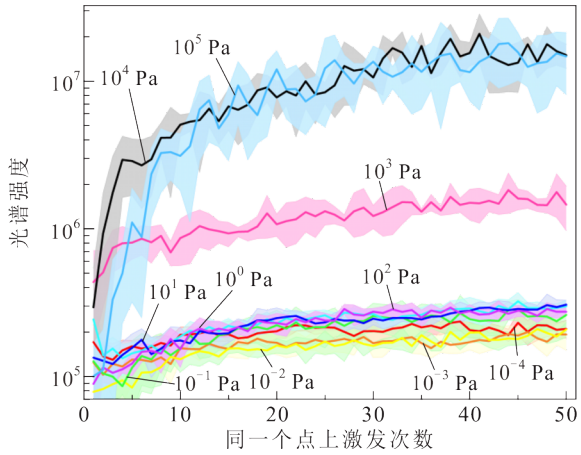


图 7 光谱强度与激发次数关系图

Fig.7 Spectral intensity as a function of excitation number

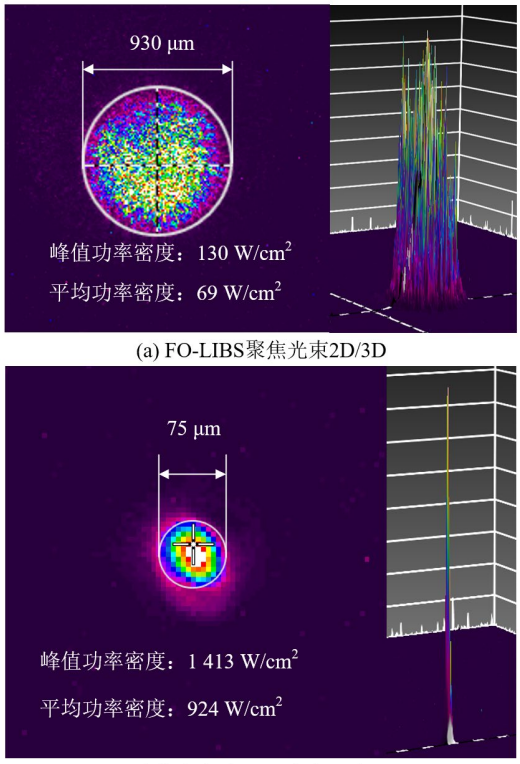
线中可以看到，最初几次的光谱强度较高，开始回落后上升，可能是因为铜靶材上的氧化层加剧了等离子体激发。因此，在后续实验当中，先对烧蚀坑进行 50 次激发后再进行光谱收集，可以降低对实验结果的干扰。

图 8 为使用光束质量分析仪拍摄到的相同激光条件下的 FO-LIBS 聚焦处光斑和直接聚焦式 LIBS 的聚焦光斑对比图。

从图 8 可以看出，FO-LIBS 经过双透镜探头重新聚焦后的光斑直径为 930 μm，而直接聚焦式的 LIBS 光斑直径为 75 μm，差距在 10 倍以上，观察光斑能量的 3D 图分布可以看出，FO-LIBS 的能量分布更加平坦均匀，而直接聚焦式 LIBS 的能量分布更加集中和尖锐，这也导致了相差 10 倍以上的峰值功率密度和平均功率密度。

图 9 为白光干涉仪拍摄到的激发 150 次所得到的光纤 LIBS 烧蚀坑形貌图，直径约为 1 000 μm，最大深度 22.9 μm。而开放光路的传统式 LIBS 烧蚀坑约在 100 μm，最大深度约为 400~500 μm[29]。

烧蚀形貌差异源于激光传输模式的根本性改变：传统 LIBS 采用自由空间传输的高斯光束，其径向能量分布遵循指数衰减规律，导致中心区域能量密度高，易引发熔融物喷溅与热累积效应；而 FO-LIBS 中激光经光纤传输后发生全反射，形成空间能量分布均匀的平顶光束，光强分部均匀性显著提升。以同样 28 mJ 的激光器能量计算，光纤 LIBS 的靶材处能量密度为 0.242 GW/cm^2，而开放式光路 LIBS 的能量密度高达 35.7 GW/cm^2，这种能量分布特性的改变不仅抑制了烧蚀坑边缘的熔融再沉积现象，还通过降低等离子体屏蔽效应提升了光谱信号



(a) FO-LIBS聚焦光束2D/3D

(b) 直接聚焦式LIBS聚焦光束2D/3D

图 8 FO-LIBS 和直接聚焦式 LIBS 的光束质量对比

Fig.8 Comparison of beam quality between FO-LIBS and direct-focusing LIBS systems

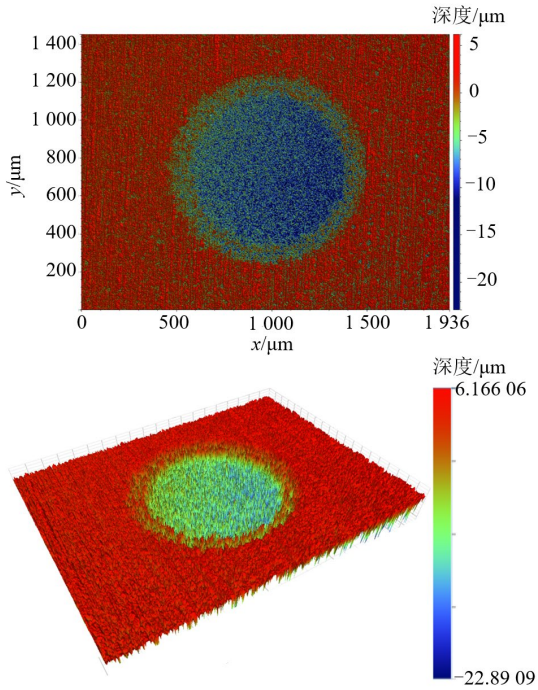


图 9 FO-LIBS 烧蚀坑形貌 2D 图与 3D 图

Fig.9 2D and 3D morphology of FO-LIBS ablation crater

稳定性，后续将通过等离子内部参数计算结合时间分辨图像诊断，深入探究光纤 LIBS 等离子体演化机制的差异机理。

1.4　等离子体光纤回传部分

激光通过光纤传输并由透镜重新聚焦激发等离子体后，等离子光线通常有 3 种收集方式进入光谱仪，如图 10 所示。

传统的材料分析场景通常采用图 10(b)或(c)的结构，在等离子激发处附近收集等离子体信号，采集的等离子体光线更强烈，信噪比更高。而对于内部空间受限的真空开关场景，设计了由原光路返回的同轴收集光路，如图 10(a)所示，不需要额外开窗。二向色镜可以允许 1 064 nm 的激光透射，并在可以反射 300~800 nm 等离子体光线，虽然牺牲了小部分等离子信号强度，但是增加了装置安装的灵活性和适应性。

1.5　真空腔模拟部分

真空腔系统用于模拟真空开关的真空腔与屏蔽罩。将与真空开关屏蔽罩相同材质的铜靶材放置在真空腔内的二维电控移动台上，1 个涡轮机械泵和 1 个分子泵用于抽气模拟真空腔内的真空环境。本实验使用 1 个量程为 5×10^{-5}~1×10^{5} Pa 的皮拉尼压力计和 1 个冷阴极电离真空计作为真空测量装置，以确保真空室内部压力保持在给定压力，腔内气压可以在 10^{-4}~10^{5} Pa 线性可调。整个系统搭建后如图 11 和图 12 所示，分别用于 FO-LIBS 等离子光谱诊断和等离子体图像诊断。光谱诊断通过光谱仪(中国卓立汉光公司)分光，并通过像增强型互补金属氧化物半导体(intensified complementary metal-oxide-semiconductor，ICMOS)相机(英国 Andor 公司)记录原始光谱数据。通过 Q-switch 开关触发激光器与相机，图像诊断由 ICMOS 相机在侧轴观察窗拍摄等离子体图像。

1.6　FO-LIBS 真空度平台测试

采用图 11 所示实验平台，采集 10^{-4}~10^{5} Pa 的等离子体光谱。设置激光能量为 28 mJ，ICMOS 延迟时间为 100 ns，门宽时间为 100 ns，增益系数为 3 000。每个气压采集 10 个点的光谱，减去背景强度后求平均光谱。实验采集到的 10^{-4}~10^{-2} Pa 和 10^{3}~10^{5} Pa 的原始光谱如图 13 所示。

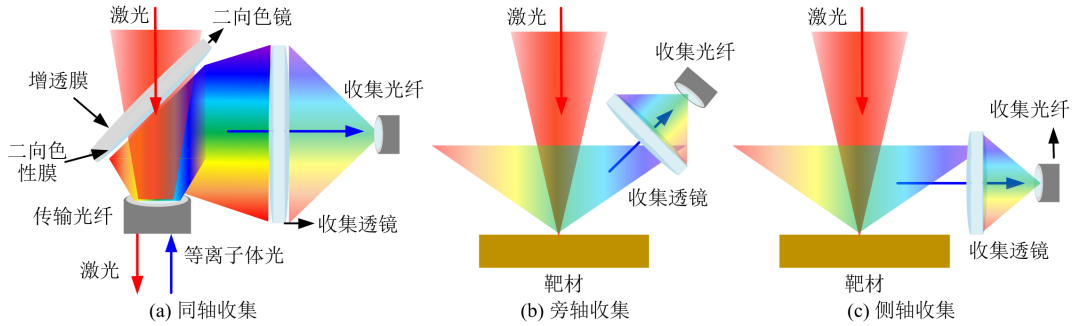


图 10　3 种不同的等离子体光线收集方式

Fig.10　Three different plasma collection schemes

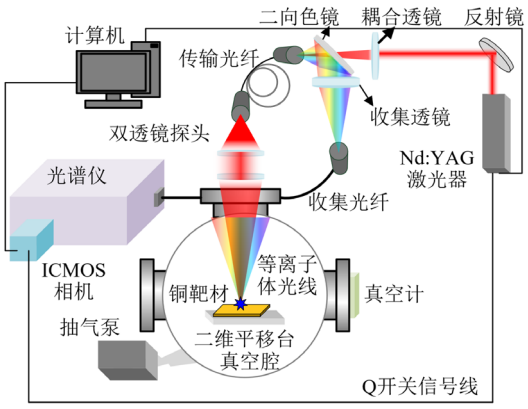


图 11　FO-LIBS 真空度等离子体光谱诊断平台示意图

Fig.11　Spectral diagnostic platform of FO-LIBS vacuum plasma

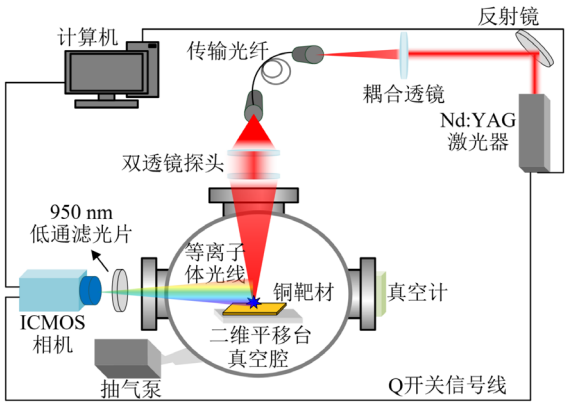


图 12　FO-LIBS 真空度等离子体图像诊断平台示意图

Fig.12　FO-LIBS vacuum plasma imaging diagnostic platform

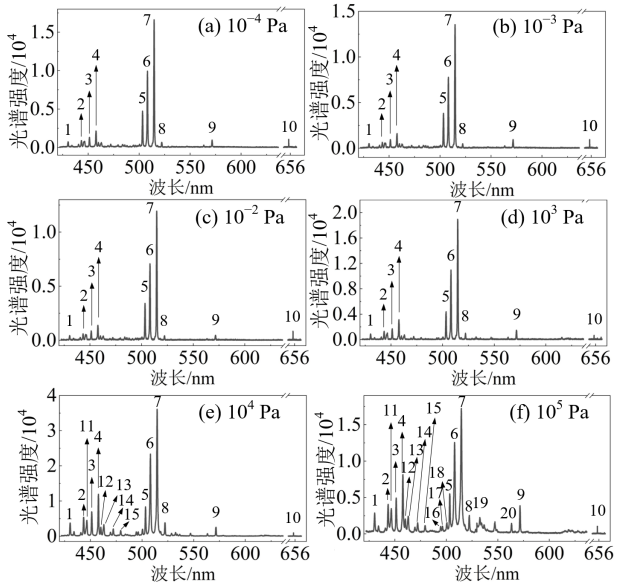


图 13 不同气压下采集到的光谱

Fig.13 Spectra acquired at different pressures

在 NIST 数据库[30]中查找谱峰对应的谱线，用数字标记，数字代表的谱线在表 3 中列出。

等离子产生初期，温度极高，以离子发射为主，背景发射和连续谱强，随着时间推移，离子发射逐步减弱，原子发射增强，连续谱迅速衰减，信噪比增强。选择 100 ns 作为延迟时间，此时等离子体温度仍较高，离子线信号较强，同时原子线已经开始出现。从图 13 可看出，气压为 10^{-4}~10^{-2} Pa 时，可观测到 3 条较强的 Cu I 510.55 nm，Cu I 515.32 nm，和 Cu I 521.82 nm 原子谱线，且还有较弱的 2 条铜原子线和离子线，这些铜元素谱线来自于无氧铜靶材。同时能观测到微弱的氧元素的 O I 575.47 nm 和氢元素的 Hα 656.28 nm，这两种元素来自于背景气体，因为真空度高，所以信号较为微弱。当气压从 10^3 Pa 增长到 10^4 Pa，谱线强度增强，且出现了更多的铜原子线和铜离子线，气压增长到 10^5 Pa 时，铜元素谱线强度减弱，同时出现了更多的铜离子线，连续背景大幅增强，出现了 530 nm 处由 529.25 nm 为主的多条 Cu I 原子线叠加形成的主线簇尾部，并且能在 575 nm 处观察到连续的氧分子带。

由实验结果可知，气压对光纤式激光诱导等离子体的光谱激发特性具有显著影响。随着气压变化，不同元素的特征谱线在光谱中表现出明显的出现与消失规律，同一元素的特定谱线强度也随气压变化呈现规律性变化。这一实验现象与理论预期一致，进一步验证了所搭建实验系统的可靠性与合理性，表明本实验平台能够有效满足研究设计的需求。

表 3 光谱中包含的元素原子谱线和离子谱线

Table 3 Atomic and ionic spectral lines of elements identified in the spectra

原子谱线	离子谱线
2: Cu I 448.00 nm	
3: Cu I 451.11 nm	
5: Cu I 510.55 nm	1: Cu I 427.51 nm
6: Cu I 515.32 nm	4: Cu I 454.16 nm
7: Cu I 521.82 nm	13: Cu I 459.71 nm
8: Cu I 529.25 nm	14: Cu I 473.97 nm
9: O I 575.47 nm	16: Cu II 493.16 nm
10: Hα 656.28 nm	17: Cu II 495.37 nm
11: Cu I 450.94 nm	18: Cu II 501.69 nm
12: Cu I 458.69 nm	16: Cu II 508.89 nm
15: Cu I 474.12 nm	18: Cu II 512.08 nm
19: Cu I 529.25 nm	
20: N I 567.89 nm	

2 气压对 FO-LIBS 光谱图像演化影响研究

为了研究不同气压与不同延时下的 FO-LIBS 等离子体动态膨胀行为，使用图 12 实验平台，分别在 10^{-4}、10^{-3}、…、10^4、10^5 Pa 下侧向采集等离子图像。实验中激光器能量设置为 28 mJ，ICMOS 增益系数为 2 000，门宽时间 5 ns，延迟时间分别设置 0、25、50、100、150、200、…、500、600、…、1 000、2 000 ns，每个条件下拍摄 10 次。选取 200、300、500、800、1 000 ns 延迟时间下的图像，并对像素点强度按照延迟时间进行归一化处理，如图 14 所示，图中每张图片是 ICMOS 拍摄的等离子体原始图像，激光由上方入射，红色横线对应靶材位置。图中右侧的色带映射同一延迟时间下的像素点强度。为了模拟在实际使用过程中激光烧蚀位置变化的情况，消除外界因素对等离子体图像的影响，在每组拍摄完后通过移动三维平移台，先激发 50 次稳定烧蚀坑，在第 51 发后进行拍摄。ICMOS 镜头前放置 1 064 nm 滤光片，减少激光脉冲对成像的影响。

从图 14 可以观察到，在光纤式结构下，真空度会对等离子体产生显著影响。值得注意的是，由于光纤式结构的加入和光路结构的改变，光纤激光诱导产生的等离子形态也与开放式光路结构激光诱导产生的等离子体在形态上表现出差异，是由于光纤将激光的高斯光束转化为了平顶光束，同时更大的烧蚀坑和更均匀的能量密度也改变了等离子的激发过程。

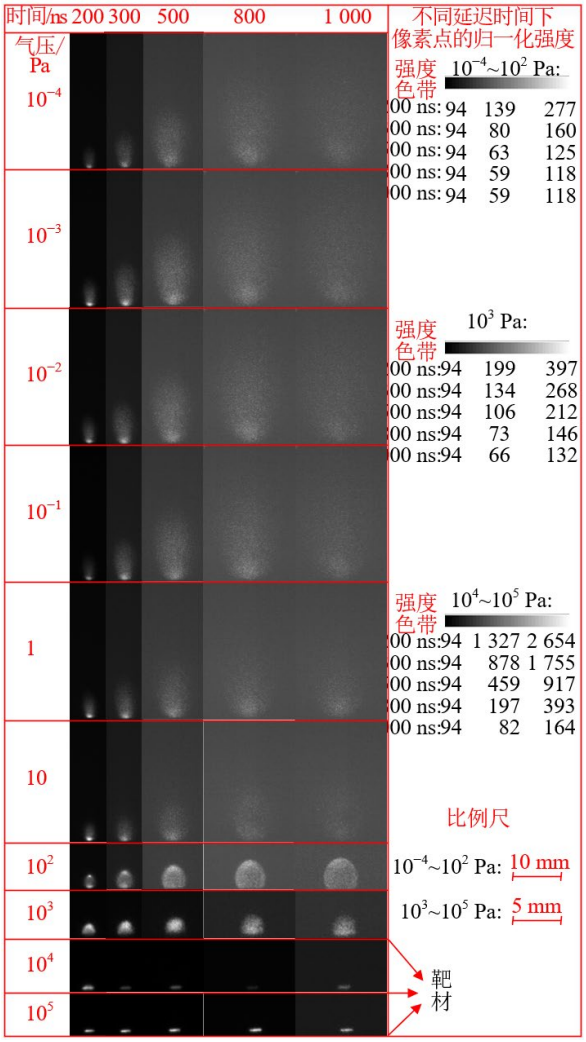


图 14　不同气压下 FO-LIBS 等离子体图像时间演化图

Fig.14　Temporal evolution of FO-LIBS plasma images at different pressures

从图 14 还可看出，随气压升高，等离子羽流逐渐改变，以 200 ns 延迟时间为例，等离子体羽流从 10^{-4} Pa 和 10 Pa 下的长圆柱状，到 10^{2} Pa 的分离形态，10^{3} Pa 下呈现水母型，10^{4}~10^{5} Pa 呈现扁圆柱型。以相同延迟时间下的图像来看，气压升高对等离子羽流形状有显著压迫效应；以同一气压不同延迟时间来看，气压也会显著影响等离子体的演化。

进一步可以看出，在光纤激光脉冲激发下，FO-LIBS 等离子体随延时增长呈显著膨胀。同气压下，200 ns 时等离子体尺寸最小，1 000 ns 时尺寸最大，对应的发射强度显著减弱。这反映了等离子体的自相似膨胀和能量耗散特征：随着膨胀体积增大温度下降、辐射冷却增强，从而导致发光强度下降。高真空与低气压(10^{-4}~10^{1} Pa)下等离子体几乎自由膨胀，形态无序且发射强度偏低。“自相似膨胀”(self-similar expansion)是等离子体动力学领域的一个经典概念，它指的是在一定假设条件下，等离子体膨胀过程中其密度、温度等物理量的空间分布形状在随时间演化时保持不变，仅整体尺度按某种规律扩大，即轮廓的形状相似、只是尺寸变大。随着气压增大到 10^{2} Pa，膨胀受阻，此时激发温度和电子密度进一步增加，辐射冷却减弱，发射强度增强。1 大于 10^{2} Pa 后，等离子体与空气强烈相互作用，形成冲击波壳层，使膨胀速度减慢、形貌收敛，并通过与气体分子碰撞迅速耗散能量。中高压下产生的冲击波遵循强爆炸理论传播，初始超声速膨胀后逐渐减速；气体分子碰撞会阻尼离子和电子的运动并转化为热能，导致等离子体快速冷却。此外，辐射冷却和离子-电子复合也加剧了能量损耗。气压 10^{4}~10^{5} Pa 时，气压对等离子形态表现出强烈的压迫效应，形状几乎维持不变，强度随着延迟时间逐渐降低，气压越高，强度降低越缓慢。

2.1　等离子体光谱图像提取方法

激光诱导等离子体在空间中的辐射强度分布在一定条件下可近似看作类高斯分布，类似于高斯激光束在传播截面上的横向强度分布。为了准确定义等离子体的空间边界，借鉴了国际光学工程学会对高斯激光束直径定义中经典的 $1/e^2$ 准则。对于一束理想的高斯激光，其横向光强分布可表示为：

$$I(r)=I_{\max}\exp\left(-2\frac{r^2}{\omega^2}\right) \tag{5}$$

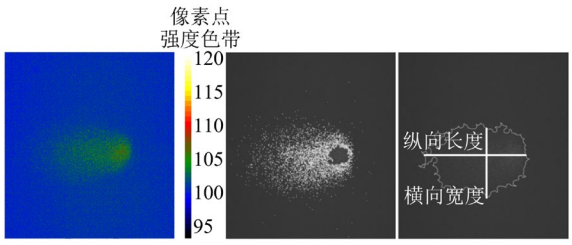
式中：$I(r)$为离光轴距离为 r 处的光强；$I_{\max}$ 是光轴上(r=0)的最大光强；ω 为激光束有效半径，定义为光强衰减到$I_{\max}/e^2$ 的位置所对应的半径。即：

$$I(\omega)=\frac{I_{\max}}{e^2}\approx 0.135I_{\max} \tag{6}$$

该区域包含了绝大部分能量(约 86.5%)，是光束能量的主要集中区域。类似地，等离子体的图像在中心处亮度最大，向外迅速衰减，图像灰度值亦呈现类高斯分布。

为准确获取等离子体辐射图像的发光轮廓及其对应的几何参数，如最大横向/纵向膨胀尺寸、面积、累计光强，本文提出了一种基于光强阈值分割与形态学处理相结合的等离子体边界提取方法。首先，通过背景估计修正法对原始图像进行预处理，以第 10 百分位像素强度作为背景水平进行扣除并归零，消除背景偏置。随后，依据设定的强度阈值对修正图像进行二值化，并采用 3×3 结构元进行闭

运算以消除内部空洞和断裂。主发光区域通过轮廓检测算法提取，选取面积最大的闭合轮廓作为分析对象，并据此构建二值掩码，计算最大水平/垂直尺寸、面积、周长及累计强度等几何与物理属性。在低气压与长延迟条件下，为克服信噪比降低导致的阈值分割失效，进一步引入高斯平滑、圆形结构元闭运算及连通域筛选，抑制高频噪声并去除小面积孤立区域，提升了弱信号情况下的轮廓提取准确性。相关处理流程及结果如图 15 所示。



(a) 原始图像 (b) 灰度图 (c) 处理结果

图 15 等离子体图像轮廓提取流程图

Fig.15 Flowchart for plasma image contour extraction

2.2 气压对等离子体轮廓面积的时间演化影响

不同气压条件下的等离子轮廓面积随延迟时间演化如图 16 所示，可以看出，从 10^{-4} Pa 到 10^{5} Pa，随着气压增大，轮廓面积单调下降。原因在于背景气体阻力显著增强，高压下粒子与气体分子的碰撞频率大幅提高，阻力使等离子体扩散受限。同时可以观察到，在 10 Pa 和 1 Pa 气压下，相比小于等于 10^{-1} Pa 时，曲线面积曲线增速更慢，而且更快达到稳定缓慢增长的平台期。这是因为，在中高气压条件下，等离子体前沿的冲击波在膨胀早期快速建立，与背景气体之间产生剧烈的压强和动量交换。当等离子体内部热压与背景气体的反向压强与动量阻力达到平衡时，冲击波进入稳定传播阶段，等离子体扩张速度大幅降低，轮廓面积趋于平台。这一现象体现了气压环境升高时背景气体对等离子体膨胀的显著抑制作用。

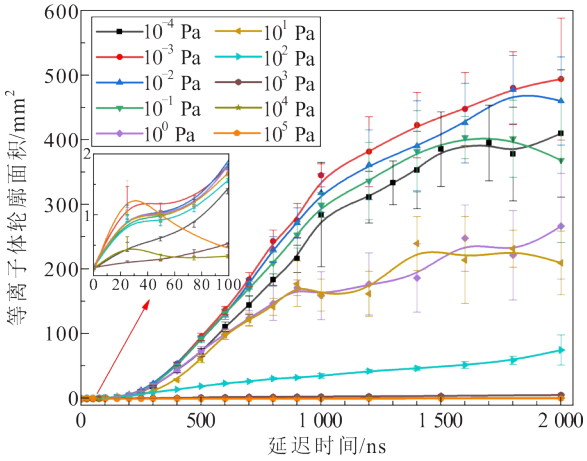


图 16 不同气压下等离子体轮廓面积时间演化图

Fig.16 Temporal evolution of plasma contour area under different pressures

从图 16 可观察到，等离子体的早期膨胀阶段(0~50 ns)表现出典型的“快速增长-急剧收缩-缓慢增长”的轮廓面积演化特征。如图 16 中放大区域所示，在多个气压条件下，轮廓面积均在数十纳秒内迅速上升至局部峰值，随后出现短暂回落，这一现象可归因于激光作用后等离子体内部复杂的非平衡动力学过程。

激光脉冲作用于靶材表面时，首先发生强烈的非线性吸收与等离子体屏蔽效应，导致材料瞬间汽化并电离，形成高密度、高温的初始等离子体区域。此阶段电子温度可达数万开尔文，电子密度可超过 10^{18} cm^{-3}，但此时系统尚未热力学平衡。由于电子质量远小于离子，其响应速度更快，初期主要由电子的高温高压驱动等离子体向外迅速膨胀，形成第一阶段的激波前沿推进，表现为小图中轮廓面积的迅速上升。然而，初始膨胀过程中，等离子体内部存在显著的电子-离子非平衡，即电子系统具有高温高压，而离子系统仍处于低温状态。这种非平衡状态将导致能量在电子与离子之间通过库仑碰撞与集体振荡快速交换。在数十纳秒时间尺度内，电子向离子转移能量，导致电子温度下降，部分区域的电离态降低，等离子体的辐射能力减弱，内部压强迅速衰减。与此同时，等离子体边界与背景气体之间的相互作用开始增强。即使在低气压下，背景气体分子的阻力与压缩效应亦逐渐显现，对外扩的等离子体产生反向作用力。在这种条件下，激波前沿传播速率下降，部分区域甚至发生边界“回缩”或形貌塌陷，导致轮廓面积在短时间内出现下降。50 ns 后，由于电子与离子能量交换趋于完成，电子能量快速向离子转移，电子温度显著下降，而离子逐渐获得较高动能，体系再次趋于热力学平衡状态。随后，等离子体的扩张过程进入相对稳定而缓慢的增长阶段。在此阶段，等离子体内部的压强逐渐减小但依然大于外部环境气体的压强，离子受剩余动能与内部压力的共同驱动持续缓慢外扩，表现为轮廓面积逐步增加的现象。最终，随着等离子体内部能

量损耗逐渐增加，内部压强进一步降低，直至与外界气体压力达到动态平衡，扩张速率不断降低并趋于稳定，形成面积增长的饱和平台期。

2.3　气压对等离子体轮廓长度与宽度的时间演化影响

尽管面积能综合反映等离子体整体膨胀特性，但未能体现其膨胀的具体方向与非均匀特征。绘制等离子长度和宽度在不同气压下随延迟时间演化的曲线图 17，长度指的是等离子羽在垂直于靶面方向的长度，宽度指的是平行于靶面方向的宽度，分析其中的差异性及演化规律。

从图 17 可以看出，等离子体纵向与横向膨胀在不同气压和延迟时间下均表现出显著的不对称性。低气压条件下，纵向膨胀长度远大于横向，纵向在初期迅速扩展，随后逐渐趋于稳定，分别在低气压下约 1 000 ns、中气压下约 800 ns 后达到平台期；而横向膨胀则始终保持缓慢、线性的增长趋势，在 0~2 000 ns 范围内未出现明显饱和。在真空或低压下，纵向扩展占优；而在高气压下，纵向膨胀所受阻碍更大。

这种各向异性的膨胀行为，源于初始膨胀驱动力的不同、自生电磁场的约束效应、激光场空间分布及能量沉积和等离子体壳层屏蔽等多重物理机制的共同作用。纵向膨胀主要受烧蚀物质高速喷出的动压主导，具有爆炸性特征，外加靶材的空间约束，更类似于半球爆炸，内部纵向压力分量更高；而横向扩散则主要由内部热压驱动，相对缓慢，造成了中低气压下，纵向膨胀大于横向膨胀。同时，等离子体膨胀产生环状自生磁场，磁场引起的洛伦兹力约束横向粒子扩散，形成磁场箍缩效应，使横向膨胀受限，进一步增强纵向膨胀的优势。

2.4　气压对等离子体轮廓纵横比的时间演化影响

为更直观地量化横纵向膨胀差异，本文引入了纵横比这一参数，即纵向长度与横向宽度的比值。纵横比的变化趋势能更直观的展示不同气压和延迟时间下的等离子体形貌特征。图 18 中展示了 5 种气压条件下等离子纵横比随时间的演化关系和 200 ns 延迟时间下不同气压下的等离子体形貌。

从图 18 可以明显看出，随气压增长，纵横比逐渐减小，等离子体由细长圆柱型逐步压缩至扁圆柱型。在低气压下，纵横比全部大于 1，在 10^{-3} Pa 下，等离子激发后纵横比快速上升，200 ns 时纵横比超过 1.9，随着延迟时间增长，纵横比逐渐下降，

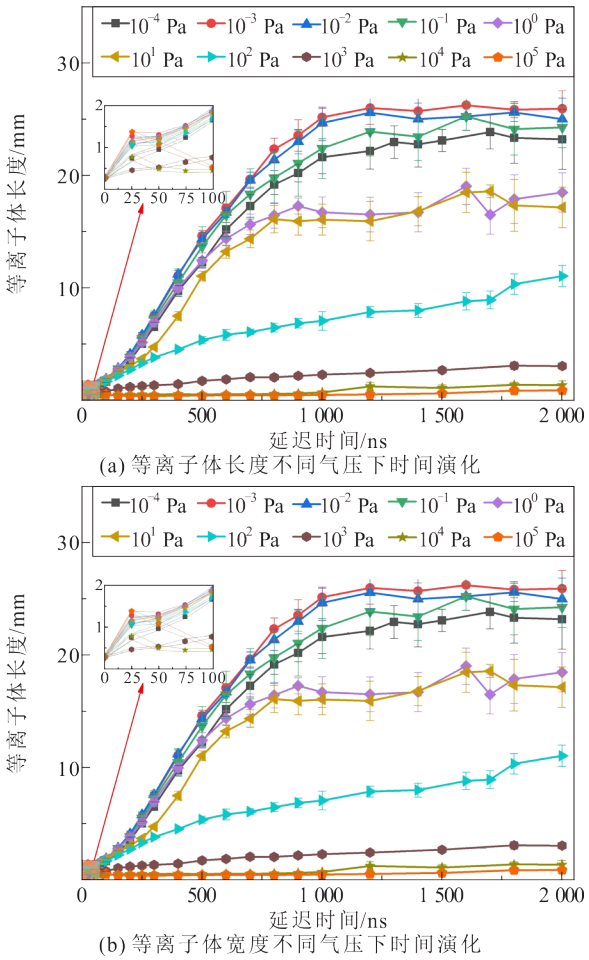


图 17　不同气压下等离子体长度和宽度时间演化图

Fig.17　Temporal evolution of plasma length and width under different pressures

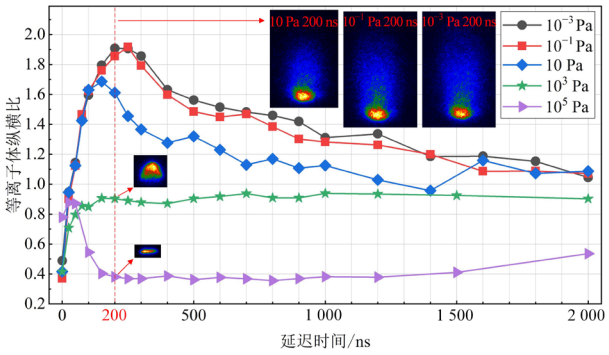


图 18　不同气压下等离子体纵横比时间演化图

Fig.18　Temporal evolution of plasma aspect ratio under different pressures

意味着等离子体从初始纵向拉长逐渐转变为横向扩展占优。结合之前的图分析，等离子纵向长度近乎不变，只发生横向匀速膨胀。在中气压下，纵横比从等离子初期开始迅速上升，200 ns 时 10 Pa 下羽流呈现典型“水母”形态：明亮的半球状前沿冲击

波突出于顶部，沿靶面法线方向拖拽出狭长的尾部，随后纵横比稳定在约 0.9。10^5 Pa 下，等离体初期纵横比约为 0.8，短暂上升后，25 ns 以后纵横比急速下降，至 200 ns 以后纵横比维持在 0.4 左右，此时等离子体被压缩成扁平的椭球状云团，垂直方向长度受限，在等离子后期纵横比渐显回升趋势。

3 真空度对 FO-LIBS 光谱的影响

3.1 真空度对光谱时间演化影响

使用图 11 实验平台，在 10^{-4}~10^5 Pa 下采集光纤等离子光谱，使用 300 g/mm 光栅采集 420~677 nm 光谱，使用 1 800 g/mm 光栅采集 649~667 nm 光谱。设置激光器能量 28 mJ。在 10^{-4}~10^1 Pa 下设置 ICMOS 延迟时间 T_d 分别为 0、50、100、200、300 ns，门宽时间 1 000 ns；在 10^2~10^5 Pa 下设置 ICMOS 延迟时间 T_d 分别为 0、50、100、200、500、1 000 ns。相机增益系数都为 3 000。每个条件拍摄 10 次光谱，扣除对应像素点的相机噪声后，计算平均光谱，得到的结果如图 19 所示。

从图 19 可以看出，延迟时间对等离子体发射的演化具有重要调控作用。实验和理论均表明，在激光击穿产生的等离子体中，发射谱随时间经历了由连续谱主导向特征谱线主导的过渡。在各种气压条件下，等离子体形成初期的连续辐射极强，随后迅速减弱。激光作用下，样品表面发生熔融和电离，导致电子密度和温度快速上升，韧致辐射增强。随着等离子体体积扩大，温度和密度降低，韧致及复合辐射减弱，连续谱强度随之下降。

在等离子早期，延迟为 0 ns 时，离子谱线强度较大，呈现带状展宽，如 Cu II 481.29 nm，甚至在 10^2 Pa 和 10^5 Pa 下的峰值强度超过了 Cu I 521.82 nm 原子谱线，这条谱线也是 NIST 数据库[30]和 LIBS 文献中公认[31]的铜离子主强线。在 10^4 Pa 条件下，离子发射信号显著高于 10^3 Pa 和 10^5 Pa。主要原因在于激光作用下，大量 Cu 原子发生电离，形成 Cu^{2+}；随后，等离子体演化过程中，Cu^{2+}与自由电子复合生成 Cu^+，伴随离子发射，进一步复合生成中性铜原子并伴随原子发射。因此，在等离子体形成的早期阶段，离子发射始终占主导地位。0 ns 延迟时时也可以观察到 O 分子带，随着气压上升呈增强趋势。延迟 50 ns 时，铜离子辐射大幅降低，铜原子谱线依旧保持很高的峰值强度。随着延迟时间继续增加，离子辐射迅速降低，气压越高，离子辐射衰减的越慢，这是因为环境气体的限制作用更强，等离子时间演化减缓，扩散作用引起的辐射衰减速度也将降低。当延迟时间为 100 ns 时，在低气压或高真空度条件下，光谱中仅能观测到 Cu I 510.55 nm、Cu I 515.32 nm 和 Cu I 521.82 nm 3 条铜原子特征线。延迟至 200 ns 时，在各气压条件下，铜元素发射谱线亦仅保留上述 3 条主特征峰，并具有较高的信噪比。

3.2 真空度对特征谱线强度时间演化影响

基于以上分析，选取来自铜靶材中的 Cu I 510.55 nm、Cu I 515.32 nm 和 Cu I 521.82 nm 这 3 条铜原子线和来自环境气体中的 Hα 656.28 nm 谱线作为真空度判断的特征谱线，讨论不同气压条件对特征谱线的时间演化影响和 4 条特征谱线对不同气压的响应规律。

为了探究气压对光纤激光诱导等离子体光谱时间演化的影响规律，使用图 11 中的实验平台，在 10^{-4}~10^5 Pa 下采集等离子光谱，使用 1 200 g/mm 光栅采集 503.82~528.04 nm 光谱，使用 1 800 g/mm 光栅采集 649~667 nm 光谱。设置激光器能量 28 mJ，ICMOS 延迟时间分别为 0、100、200、300、…、1 000、1 500、2 000、5 000、10 000 ns，门宽时间 100 ns，ICMOS 增益系数为 3 000。每个条件拍摄 10 次光谱，扣除对应像素点的相机噪声后，对光谱进行小波去噪，分别对每个特征峰进行洛伦兹拟合，计算平均积分强度和标准差得到的结果如图 20 所示。

从图 20 可以看出，所有气压下谱线积分强度均随延迟时间增长呈现单调递减趋势，但不同气压下强度衰减速率及信号持续时间存在显著差异。4 种特征谱线的等离子寿命随着气压增大逐渐延长，这主要归因于在低气压条件下，等离子体膨胀速率加快，粒子碰撞过程受限，导致激发态寿命缩短和辐射损失加剧，使特征谱线发射迅速减弱。氢谱线在高真空和中气压下寿命不足 500 ns。

随着气压升高至 10^3 Pa 及以上，4 种特征谱线的初始积分强度显著提升，且信号持续时间明显延长。尤其是在 10^4 Pa 和 10^5 Pa 条件下，谱线强度不仅在早期阶段达到较高峰值，且随时间衰减过程较为平缓，即便在数微秒量级仍能保持较强信号。

3.3 特征谱线强度的气压响应分析

为了更直观地反映气压对等离子体辐射特性的调控作用，绘制不同延迟时间下各特征谱线的积分强度随气压变化的曲线如图 21 所示。

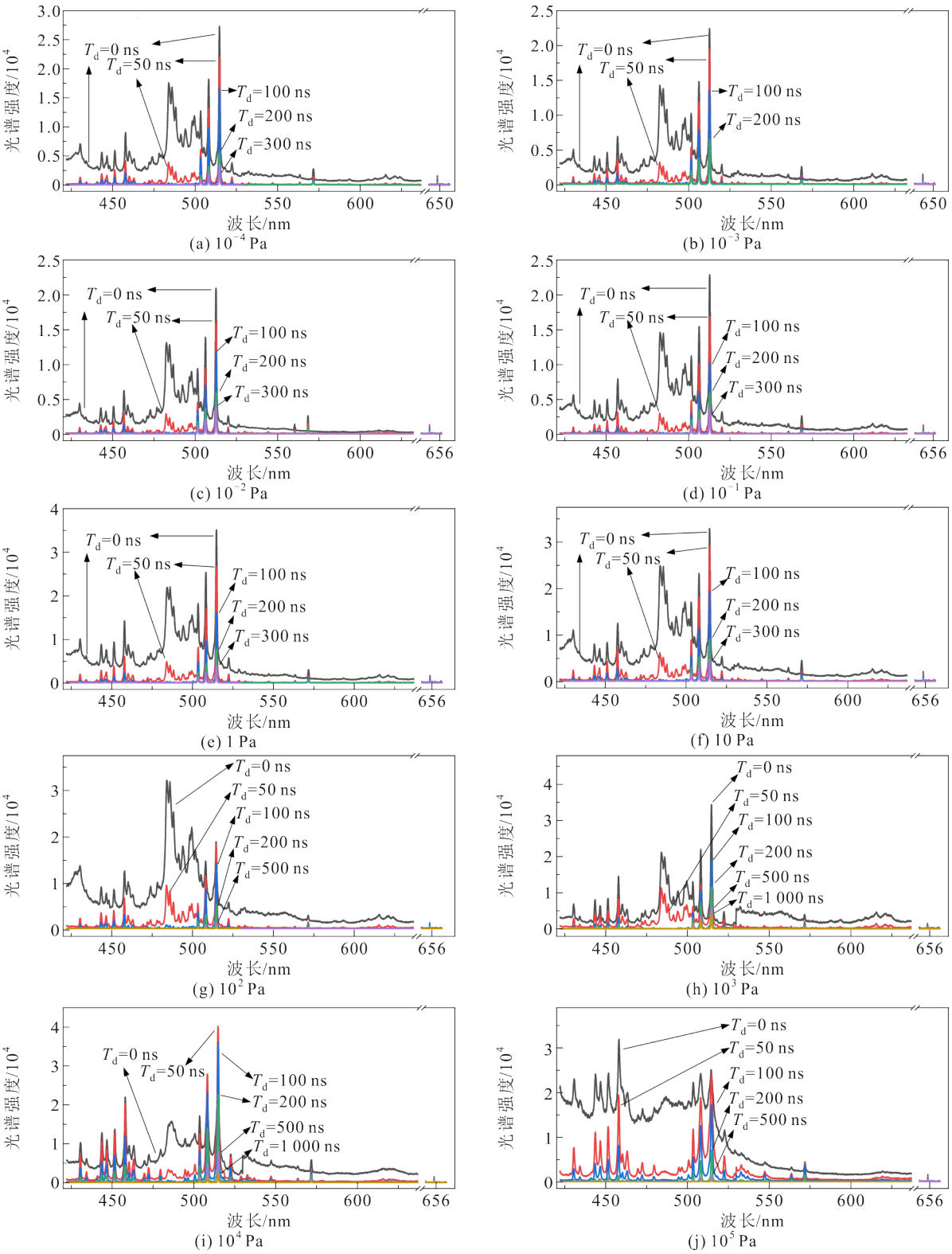


图 19　不同气压下等离子的光谱图

Fig.19　FO-LIBS plasma spectra at different pressures

从等离子运动学可以解释光谱强度随真空度变化的原因。对于铜元素，在气压低于 10 Pa 时，由于真空度很高，真空腔中的空气元素和靶材料激发形成的等离子之间平均自由程极大，因此这个阶段光谱强度较弱，甚至随着气压的升高，由于气压对等离子的抑制作用，光谱强度还在缓慢下降。

当气压从 10 Pa 上升到 10^4 Pa 的阶段内，真空腔内的气体对等离子的限制作用变得更强烈，导致

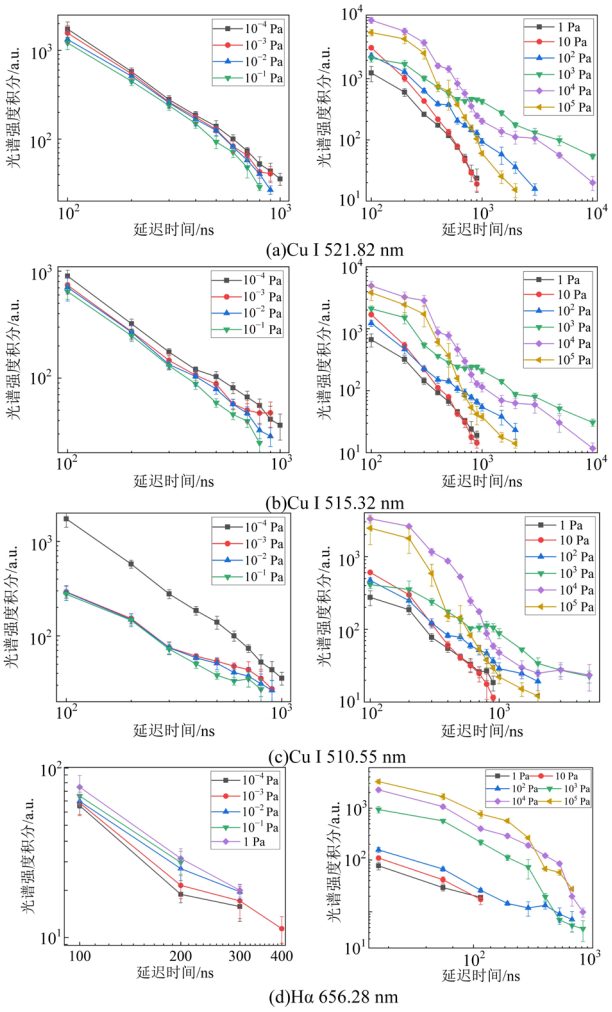


图 20 4 种特征谱线不同气压下的时间演化图

Fig.20 Temporal evolution of four characteristic spectral lines under different pressures

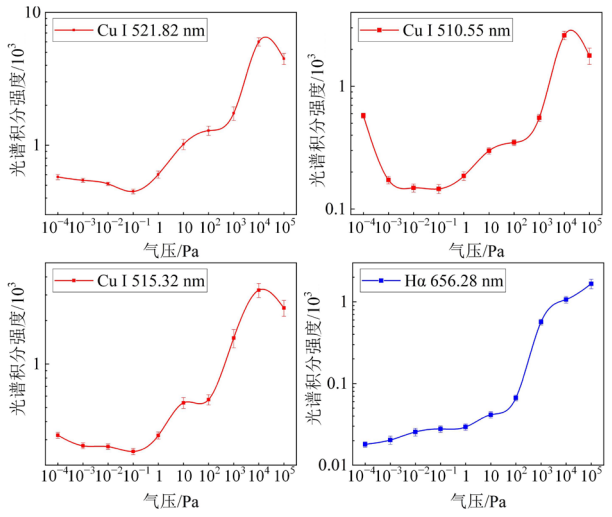


图 21 4 种特征谱线积分强度随气压的演化图

Fig.21 Evolution of integrated intensity of four characteristic spectral lines as a function of pressure

等离子内部粒子高频碰撞，10^5 Pa 强度降低，这是因为碰撞加剧后，等离子体对激光的屏蔽作用降低了激光和靶材的耦合效率。与铜谱线不同，Hα 谱线强度随压力增大而单调上升。在真空度较高时，环境氢原子稀少且激发机会有限，Hα 发射较弱；随着气压和环境水汽含量上升，氢原子供应充足，碰撞激发效率提升，从而显著增强 Hα 线强度。

3.4 基于光谱强度的真空度分类算法

构建基于随机森林的光谱数据分类模型，用于识别不同真空度状态。输入数据共包括 1 800 组一维光谱，每组数据覆盖 10 个不同真空度水平(10^{-4}~10^5 Pa)，每一真空度下包含 180 条独立光谱。单条光谱由 2 560×2 个波长强度数据组成，覆盖 503.82~528.04 nm 与 649~667 nm 两个光谱区间(每个区间 2 560 个波长采样点)，分别包含前文提到的 3 条铜元素特征谱线与一条氢元素特征谱线，并为每条光谱分配明确的真空度标签。在模型训练过程中，将全部 1 800 组数据划分为训练集、验证集和测试集，样本分配比例为 1 300:350:150，分别用于模型训练、参数调优及性能评估。最终，所建随机森林模型在 10 种真空度水平下实现了 91.3%的总体分类准确率。为进一步评价模型的分类性能，选取测试集 150 组光谱数据，统计其分类结果并绘制混淆矩阵热力图如图 22 所示，以便对各真空度类别的判别能力进行进一步分析。

为了重点分析高真空范围内(10^{-4}~10^{-2} Pa)的识别情况，引入真阳性率(true positive rate，R_{TP})，假

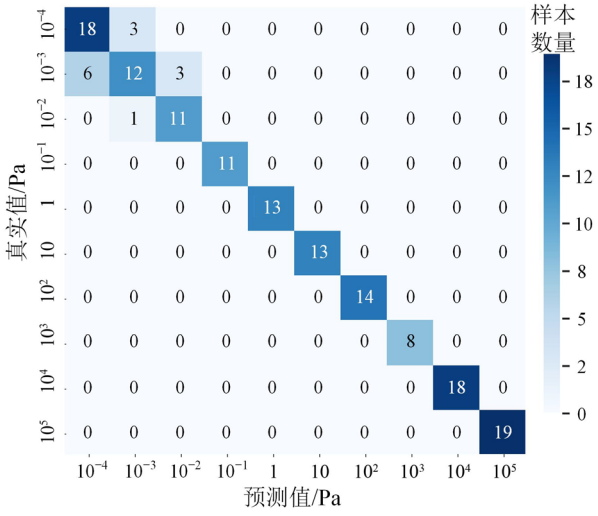


图 22 随机森林光谱真空度分类算法混淆矩阵热力图

Fig.22 Confusion matrix heatmap of the random forest-based spectral vacuum degree classification algorithm

阳性率(false positive rate，R_{FP})，准确率(accuracy，A_{cc})以及 F1 分数(F1-score，F_1)几个评价指标。

真阳性率，又称召回率，用于衡量模型对正类样本的识别能力。其定义为：

$$R_{TP}=\frac{N_{TP}}{N_{TP}+N_{FN}} \tag{7}$$

式中：N_{TP} 为真阳性数，即被正确分类为该类别的样本数；N_{FN} 为假阴性数，即被错误分类为其他类别的该类别样本数。

假阳性率反映了模型将其他类别误判为该类别的概率。其定义为：

$$R_{FP}=\frac{N_{FP}}{N_{FP}+N_{TN}} \tag{8}$$

式中：N_{FP} 为假阳性数，即其他类别被误判为该类别的样本数；N_{TN} 为真阴性数，即被正确判为非该类别的样本数。

准确率用于衡量所有样本中被正确分类的比例，定义为：

$$A_{cc}=\frac{N_{TP}+N_{TN}}{N_{TP}+N_{TN}+N_{FP}+N_{FN}} \tag{9}$$

F1 分数表示模型精确率(P_{re})和召回率(R_{ec})的调和平均，用于综合评价模型的分类性能，其定义为：

$$F_1=2\times\frac{P_{re}R_{ec}}{P_{re}+R_{ec}} \tag{10}$$

其中，精确率 P_{re} 为：

$$P_{re}=\frac{N_{TP}}{N_{TP}+N_{FP}} \tag{11}$$

对于 10^{-4} Pa 类别，R_{TP} 计算使用式(7)，N_{TP} 表示实际为 10^{-4} Pa 且被预测为 10^{-4} Pa 的样本数，为图 22 第 1 行第 1 列，18 个；N_{FN} 表示实际为 10^{-4} Pa 但被预测为其他类别的样本数，即图 22 第 1 行其余格子的数字之和，为 3。因此：

$$R_{\text{TP-}10^{-4}\text{ Pa}}=\frac{18}{18+3}\approx 0.857 \tag{12}$$

对于 10^{-4} Pa 类别，R_{TP} 约为 0.86，表示模型正确识别了约 86%的该类别样本；R_{FP} 为 0.046，说明将其他类别误分为 10^{-4} Pa 的概率较低；该气压下的准确率达到 0.94，F_1 分数为 0.80，表明精确度与召回率之间具备较好的平衡。相较之下，10^{-3} Pa 类别的 R_{TP} 为 0.57，R_{FP} 为 0.031，准确率为 0.91，F_1 分数为 0.65，整体表现略低于 10^{-4} Pa 但仍保持良好可辨识度。而 10^{-2} Pa 在 3 者中表现最佳，其 R_{TP} 达到 0.917，R_{FP} 仅为 0.022，准确率高达 0.973，F_1 分数为 0.847，说明模型在该气压下的识别精度和鲁棒性均处于较高水平。综合来看，分类模型在中低气压范围内能够有效区分不同真空度，高真空下也有较高的分类准确性。

根据我国现有标准 JBT 8738—2008《高压交流开关设备用真空灭弧室》规定，真空灭弧室出厂时内部气压应低于 1.33×10^{-3} Pa[32]。在电力行业标准 DL/T 403—2000《12 kV~40.5 kV 高压真空断路器订货技术条件》中明确规定在使用有效期内，真空灭弧室内部气压不得大于 6.6×10^{-2} Pa[33]，当实际气压高于该值时，即认为灭弧室真空度存在异常，需进行更换。根据图 22 真空度判断结果，对于 10^{-2} Pa 及以上的气压具有很高的准确率，说明本方法可为实际运行中的真空灭弧室漏气提供辅助诊断和早期预警，将真空度判断结果为 10^{-2} Pa 或高于 10^{-2} Pa 的样品判定为真空异常或失效，实现对真空开关真空度的在线检测。

针对本方法的实际工程应用的可行性，首先，对于玻璃外壳真空灭弧室可以直接在屏蔽罩激发等离子体，对于瓷柱式真空灭弧室，目前已与国内真空开关设备制造企业(如平高集团、成都宝光等)合作，成功开发出 10 kV 与 126 kV 开窗型真空灭弧室，实物图如图 23 所示。该产品在真空腔烧结工艺阶段，将高强度观察窗与灭弧室本体同步烧结一体，并通过了严格的漏气率检测，满足行业密封要求。其次，对于真空开关的绝缘外壳，相关的外壳开窗型号也已有项目合作，正在积极试制中。

4　结论

针对现有 LIBS 法真空度检测装置在实际工况中应用受限的问题，本研究将光纤结构加入传统的 LIBS 系统中，开发了基于 FO-LIBS 的真空开关真空度的在线检测方法。能够将检测端与分析端分离，

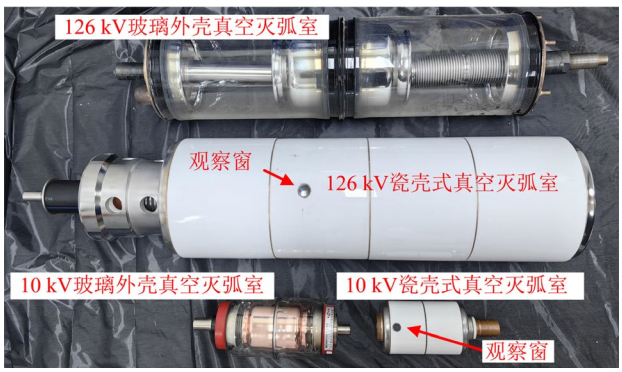


图 23　不同型号的透明真空泡和外壳开窗的瓷柱式真空泡

Fig.23　Various types of transparent vacuum tubes and porcelain housing vacuum tubes with observation windows

操作简便，安装灵活，同时保护了昂贵的分析设备，拥有巨大的应用潜力。本文得到以下结论：

1）开发了 FO-LIBS 系统。使用激光-光纤耦合部分传导激光，实验证明耦合系统的能量传输效率超过 80%，保证通过光纤传输的激光有足够的能量激发等离子体。通过实验和仿真设计了的长距离双透镜探头，可以在 110 mm 外实现 930 μm 的聚焦光斑。搭建同轴光路复用的等离子体收集光路，不需要额外的观察窗就可以收集等离子光线进行后续的分析。配合真空腔模拟系统，搭建了 FO-LIBS 真空度等离子体光谱诊断系统和图像诊断系统。通过对比 FO-LIBS 和直接聚焦式 LIBS 的光斑光束质量，两者的直径差距和能量密度差距约为 10 倍，因此也造成了二者激发的等离子体表现出不同的膨胀动力学行为。

2）使用真空度图像诊断系统研究了不同气压下 FO-LIBS 等离子体图像的时间演化规律，由于光纤和双透镜探头结构的加入，FO-LIBS 的光束光斑更大，峰值密度更低且能量分布更均匀，导致了差异于传统 LIBS 的等离子体膨胀动力学行为，但等离子体形貌仍然受真空度的变化影响显著，定量化的研究了等离子体轮廓面积、长度、宽度、膨胀速度和纵横比在不同气压下的时间演化规律，等离子体羽流在 10^{-4}~10 Pa 下为长圆柱状，10^{2} Pa 表现出分离形态，10^{3} Pa 下呈现水母型，10^{4}~10^{5} Pa 呈现扁圆柱型。随着气压升高，两方向速度均显著降低，且纵向速度的减缓更为突出，说明环境气体对纵向膨胀的抑制效应强于横向。

3）使用真空度光谱诊断系统研究了不同气压下 FO-LIBS 等离子体光谱的时间演化规律。实验发现等离子体发射行为对环境气压的高度敏感性，并选择了 Cu I 510.55 nm，Cu I 515.32 nm，和 Cu I 521.82 nm 原子谱线 Hα 656.28 nm 线的积分强度作为表征真空度变化的特征参量。

4）基于采集的光谱数据集，训练了基于随机森林的 FO-LIBS 光谱真空度分类模型，并在全气压下拥有 91.3%的准确率，在提高了装置灵活性和适用性的同时，保持了和离线检测手段相同的准确率。当前实验条件虽为模拟环境，均严格对标真实真空灭弧室工况，未来的研究中将进行现场实际测试，以验证本方法在实际工程中的可行性。

总之，本研究提出的方法为在线监测真空开关的真空度提供了一种可行的方法，为基于 LIBS 技术的真空度检测方法的实用化打开了道路，此外，还为其他在大型工业领域或极端现场工况下的真空度测量场景提供了宝贵的经验。

参考文献 References

[1] 柯 伟，陈敏源，袁 欢，等. 激光诱导等离子体中聚焦程度对真空开关真空度检测的影响[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4224-4232.
KE Wei, CHEN Minyuan, YUAN Huan, et al. Influence of focusing degree in laser-induced plasma on vacuum degree detection of vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4224-4232.

[2] 李辰辉，褚继峰，龙 潇，等. 基于弧触头接触振动特征分析的高压 SF_6 断路器电寿命在线监测方法[J]. 电工技术学报，2024，39(15)：4883-4895.
LI Chenhui, CHU Jifeng, LONG Xiao, et al. Online monitoring method of electrical life of high voltage SF_6 circuit breaker based on analysis of arcing contact vibration characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4883-4895.

[3] TSAI W T. The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF_6): reviews of environmental and health risk analysis[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2007, 128(11): 1345-1352.

[4] Official Journal of the European Union. Regulation (EU) 2024/573 of the European parliament and of the council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014[EB/OL]. (2024-02-20)[2025-06-19]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400573.

[5] 葛国伟，于雯伊，程 显，等. 罐式断路器高电压等级串联专用自均压真空灭弧室电场分析[J]. 高电压技术，2025，51(9)：4629-4637.
GE Guowei, YU Wenyi, CHENG Xian, et al. Analysis of the electric field in self-sharing vacuum interrupter for high voltage series connection of can-type circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(9): 4629-4637.

[6] 李 烁，修士新，贾申利，等. 金属罐体对真空灭弧室内部电场分布的影响[J]. 高电压技术，2024，50(2)：570-578.
LI Shuo, XIU Shixin, JIA Shenli, et al. Influence of metal tank on the internal electric field distribution of vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 570-578.

[7] 黄吕超，张露阳，胡源源，等. 基于长短期记忆网络的短路电流过零点预测方法[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5022-5031.
HUNAG Lüchao, ZHANG Luyang, HU Yuanyuan, et al. Fast prediction method of short-circuit current zero based on an algorithm of long short term memory[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5022-5031.

[8] 钟建英，孙广雷，杨葆鑫，等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：451-466.
ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.

[9] 董华军，马丽婷，李 杰，等. 基于图像处理技术的真空开关分闸速度检测[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2539-2544.
DONG Huajun, MA Liting, LI Jie, et al. Opening speed detection of vacuum switch based on image processing technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2539-2544.

[10] 葛生华. 国际领先水平、填补国内空白！平高集团环保型高端设备即将挂网试运行[EB/OL]. (2021-08-31)[2025-06-19]. https://www.pdsxww. com. cn/2021/08/31/99417459. html.
GE Shenghua. Pinggao group. Environmentally friendly high-end equipment will soon be put into trial operation on the grid[EB/OL]. (2021-08-31)[2025-06-19]. https://www.pdsxww.com.cn/2021/08/31/99417459. html.

[11] 平高集团. 平高集团成功研制世界首台单断口 252 kV/50 kA/4 000 A 真空断路器[EB/OL]. (2024-02-22)[2025-06-19]. https://www.ceegroup.cn/info/1246/5037. htm.
Pinggao Group. Successful development of the world's first single-break 252 kV/50 kA/4 000 A vacuum circuit breaker[EB/OL].

(2024-02-22)[2025-06-19]. https://www.cee-group. cn/info/1246/5037. htm.
[12] 中国电气装备，陕西宝光真空电器股份有限公司. 喜讯，宝光股份 126 kV 大容量真空灭弧室挂网投运！[EB/OL]. (2024-04-30) [2025-06-19]. https://www. baoguang. com. cn/info/1153/5115. htm.
China Electrical Equipment, Shaanxi Baoguang Vacuum Electric Co., Ltd. Good news: Baoguang's 126 kV large-capacity vacuum interrupter has been put into grid operation![EB/OL]. (2024-04-30) [2025-06-19]. https://www.baoguang.com. cn/info/1153/5115. htm.
[13] 赵子玉，宋焕生，江秀臣，等. 一种测量真空开关灭弧室真空度的新方法[J]. 中国电机工程学报，2006，26(16)：144-149.
ZHAO Ziyu, SONG Huansheng, JIANG Xiuchen, et al. Study on new method for measurement of internal pressure of vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 144-149.
[14] REZVANI M, BATHAEE S M T, AKBARI A. Investigating field emission current in vacuum interrupters to estimate vacuum pressure level using PIC simulation[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(10): 2193-2203.
[15] LIU S G, GUO Q, WU X X. A HFID-based online testing technique for internal pressure of vacuum breaker[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference. Changsha, China: IEEE, 2014: 1764-1767.
[16] 罗洪宏，张学敏，程义彬，等. 太赫兹波回波损耗在线检测断路器真空度[J]. 哈尔滨理工大学学报，2022，27(4)：46-52.
LUO Honghong, ZHANG Xuemin, CHENG Yibin, et al. Online detection of vacuum level of circuit breaker based on terahertz wave return loss[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(4): 46-52.
[17] 杨永旭，许　鑫，张慧媛，等. 太赫兹波光谱传输在断路器真空度检测中的应用[J]. 电气应用，2022，41(8)：45-51.
YANG Yongxu, XU Xin, ZHANG Huiyuan, et al. Application of terahertz wave spectral transmission in vacuum measurement of circuit breaker[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(8): 45-51.
[18] NAKANO Y, KOZAKO M, HIKITA M, et al. Partial discharge detection method for vacuum leakage diagnosis of a vacuum interrupter[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(6): 819-824.
[19] NAKAOKA T, TAI Y, KAMAROL M, et al. Development of partial discharge detection and diagnostic methods of vacuum circuit breaker[C]//Proceedings of the 2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Mumbai, India: IEEE, 2014: 485-488.
[20] 袁　欢，柯　伟，王小华，等. 基于激光诱导等离子体光路复用技术的真空开关真空度检测研究[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1160-1167.
YUAN Huan, KE Wei, WANG Xiaohua, et al. Vacuum degree detection of vacuum switch based on laser induced plasma optical path multiplexing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1160-1167.
[21] 袁　欢，宋立冬，刘　平，等. 基于激光诱导击穿光谱的真空灭弧室真空度在线检测实验研究[J]. 高压电器，2017，53(3)：230-234.
YUAN Huan, SONG Lidong, LIU Ping, et al. Experimental study of vacuum degree online detection of vacuum interrupter based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 230-234.
[22] LIU J Q, DING X K, ZHANG F L, et al. Vacuum degree detection performance improvement of vacuum switches based on NELIBS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2025, 40(1): 248-258.
[23] 柯　伟，袁　欢，刘佳琪，等. 基于激光诱导等离子体的真空开关真空度检测稳定性研究[J]. 高电压技术，2024，50(2)：561-569.
KE Wei, YUAN Huan, LIU Jiaqi, et al. Research on stability of vacuum detection for vacuum switch based on laser induced plasma[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 561-569.
[24] BOHLING C, HOHMANN K, SCHEEL D, et al. All-fiber-coupled laser-induced breakdown spectroscopy sensor for hazardous materials analysis[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2007, 62(12): 1519-1527.
[25] WHITEHOUSE A I, YOUNG J, BOTHEROYD I M, et al. Remote material analysis of nuclear power station steam generator tubes by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(6): 821-830.
[26] ABBASI H, GUZMAN R, CATTIN P C, et al. All-fiber-optic LIBS system for tissue differentiation: a prospect for endoscopic smart laser osteotomy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 148: 106765.
[27] ANDREWS H B, MYHRE K G, MCFARLANE J. Concept for an irradiation experiment to test a laser-induced breakdown spectroscopy off-gas sensor for molten salt systems[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1100536.
[28] SHI M X, WU J, LI J H, et al. Elemental quantitation and evaluation of hydrocarbon in shale using fiber-optic laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2024, 216: 106933.
[29] 袁　欢. 基于激光诱导等离子体技术的真空开关真空度带电检测方法研究[D]. 西安：西安交通大学，2019.
YUAN Huan. Research on live detection method of vacuum degree in vacuum switches based on laser-induced plasma technology[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2019.
[30] Kramida A, Ralchenko Yu, Reader J, and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (version 5.12)[DB/OL]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2024-11-07 [2025-04-02]. DOI: 10.18434/T4W30F.
[31] BURGOS-PALOP C, PUROHIT P, FORTES F J, et al. Ultrafast laser excitation improves LIBS performance for the analysis of optically trapped single nanoparticles owing to characteristic interaction mechanisms[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(39): 14541-14550.
[32] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 高压交流开关设备用真空灭弧室：JBT 8738—2008[S]. 北京：机械工业出版社，2008.
National Development and Reform Commission. Vacuum interruptors used in high-voltage alternating-current switchgear: JBT 8738—2008[S]. Beijing, China: China Machine Press, 2008.
[33] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 12 kV～40.5 kV 高压真空断路器订货技术条件：DL/T 403—2000[S]. 北京：中国电力出版社，2001.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. HV vacuum circuit-breaker for rated voltage 12 kV to 40.5 kV: DL/T 403—2000[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2001.



张飞龙
1995—，男，博士生
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估
E-mail: it12321@126.com

ZHANG Feilong
Ph.D. candidate



袁　欢(通信作者)
1992—，男，博士，副教授
研究方向为新型电力装备智能设计与数字孪生技术，入选中国科协青年人才托举工程、西安交通大学青年拔尖人才支持计划
E-mail: huanyuan@xjtu.edu.cn

YUAN Huan
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-06-20　在线出版日期　2025-07-14　　编辑　卫李静