大气压射流等离子体起弧噪声特征分析与抑制探究研究

付新龙
湖南工程学院，湖南 长沙 411104

DOI: 10.61369/TACS.2026090027

摘　　要： 大气压射流等离子体在材料处理、生物医学等领域有广泛应用，但是起弧阶段产生的强烈噪声会危害操作人员健康，而且影响精密环境下的使用能效。本文主要研究起弧噪声的多维特性，从声学频谱、电磁干扰和放电形貌变化等方面揭示起弧噪声时频分布、能量耦合规律和参数敏感性，并提出包含电源激励优化、气路流场调节、电极—介质结构改善和隔离吸收技术等各个层次的抑制措施与策略。研究显示，起弧噪声是由于流注—弧光迅速转变时气体热膨胀和电磁脉冲所造成的，利用纳秒脉冲匹配、层流稳流、介质阻挡加强以及阻抗渐变吸收等方式可以明显降低噪声，为低噪声等离子体源的工程实现提供理论依据。

关 键 词： 大气压射流等离子体；起弧噪声；特征分析；噪声抑制；介质阻挡放电

Analysis on Arc-starting Noise Characteristics and Suppression Exploration of Atmospheric-pressure Jet Plasma

Fu Xinlong
Hunan Institute of Engineering, Changsha, Hunan 411104

Abstract: Atmospheric-pressure jet plasma has extensive applications in material processing, biomedicine and other fields. However, intense noise generated during the arc-starting phase endangers operators' health and weakens operational efficiency in precision working environments. This paper mainly investigates multi-dimensional characteristics of arc-starting noise, reveals its time-frequency distribution, energy coupling rules and parameter sensitivity from perspectives including acoustic frequency spectrum, electromagnetic interference and discharge morphology evolution, and proposes hierarchical suppression measures covering power supply excitation optimization, gas circuit flow field regulation, electrode-dielectric structure improvement as well as isolation and absorption technologies. Research results indicate that arc-starting noise originates from gas thermal expansion and electromagnetic pulses during the rapid transition from streamer to arc discharge. Strategies such as nanosecond pulse matching, laminar flow stabilization, reinforced dielectric barrier and gradient impedance absorption can remarkably reduce noise, which provides theoretical foundations for the engineering development of low-noise plasma sources.

Keywords: atmospheric-pressure jet plasma; arc-starting noise; characteristic analysis; noise suppression; dielectric barrier discharge

引言

大气压射流等离子体由于不需要真空腔室、活性粒子丰富、温度可控等特点，已经成为先进制造和表面改性的关键技术。但是放电启辉到稳定运行的过程中常常伴随着可听频段的爆裂声和高频电磁噪声，即起弧噪声。噪声是由击穿瞬间流注向收缩弧光转变时产生的一系列压力波和电磁辐射所引起的，其峰值声压级可达90dB以上，频谱从几十赫兹一直到兆赫兹之间，对医疗、精密电子等领域设备的正常工作造成很大影响。目前的研究大多集中在等离子体化学活性的调控上，对于起弧噪声的产生机理、特征规律以及抑制方法缺少系统探究[1]。本文主要研究起弧噪声的多物理特性，针对其提出相应的抑制措施，为开发低噪声大气压等离子体装置提供理论依据。

一、大气压射流等离子体起弧噪声特征分析

（一）声学时频特征与感知特性

起弧噪声在时域上是不稳定的脉冲序列，它是由放电通道的收缩、膨胀、湮灭和再击穿三者同时发生而产生的[2]。用精密传声器和高速纹影成像同步测量得到，单次电弧脉动引起的声压波具有陡峭的前沿和指数衰减，脉冲宽度在50~200 μs之间，对应的是冲击性的听觉感受。频谱分析显示，噪声能量主要分布在两个地方，一是几百赫兹到2kHz的低频区，是由于气体宏观热膨胀造成的气流振荡和腔体共振引起的，该频段和人耳最敏感的区域

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

高度重合，表现为沉闷的“嗡嗡”基频和谐波，二是10 ~ 50kHz的高频区，是微放电丝快速流注传播时产生的局部压缩波所导致的，表现为“嘶嘶”的声音。随着输入功率增大，脉冲重复频率提高，频谱向高频扩展，响度和尖锐度同时增大，心理声学烦恼度急剧上升。另外不同的工作气体（氦气、氩气、氮气）由于热导率和声速的不同，噪声频谱重心偏移明显，氦气环境噪声高频分量更明显，氩气起弧低频冲击感更强[3]。

（二）电磁干扰噪声的辐射特征

除可听声外，起弧过程伴随强烈的传导与辐射电磁干扰。放电通道的快速阻抗突变产生陡峭电流脉冲，上升时间常为纳秒级，其激励的电磁场通过电极引线传导及空间辐射两种路径传播。采用近场探头与天线测量表明，电磁干扰频谱在30 MHz至1 GHz范围内存在多个峰值，与放电脉冲的重复频率及其谐波相关。在起弧瞬间，电流从零突变至数十安培，回路寄生电感与分布电容形成高频阻尼振荡，电磁辐射强度可比稳态辉光放电高出40 dBμV/m以上，严重干扰周边数字电路与传感器[4]。时频分析进一步显示，这种电磁噪声具有间歇性和宽带特性，初始击穿帧的干扰带宽可达百兆赫兹，随后因等离子体驰豫而迅速衰减。接地回路、电缆屏蔽不完善时，传导干扰会耦合至电网，导致电能质量下降，因此起弧噪声既是声学问题，更是电磁兼容性难题。

（三）放电形貌演变与噪声的关联机制

通过ICCD高速摄影观察可知，起弧噪声时序与放电通道时空演化存在高度对应。在电压达到击穿阈值的亚微秒内，首先出现曲折的流注丝，这时伴随着微弱的先导噪声；当流注桥接电极间隙形成导电通道后，等离子体从高阻抗的辉光态迅速变为低阻抗的弧光态，电流密度瞬间增大，通道温度在纳秒级内上升到几千开尔文，导致局部气体发生爆炸式的膨胀，产生明显的压力脉冲，这就是主噪声脉冲。如果电源特性无法及时控制电流的增长，电弧收缩就会加剧，噪声强度就会饱和，并且会伴随着通道飘移，噪声源的位置会在射流出口和下游之间跳跃。随着外部参数的变化（电压幅值、频率、气体流量），放电形态可以从弥散、丝状、弧光之间转变，噪声级出现阶梯式的跃变。尤其是当从丝状转变为弧光的时候，通道收缩比最大，噪声增量也最大[5]。由此可知，调节放电形态，防止剧烈收缩弧产生，就是噪声抑制的主要途径。

（四）起弧噪声的多参数敏感性及统计分布特征

起弧噪声不是固定不变的，它对于工作气体组分、流量、电源频率和电极间距等宏观参数都具有很高的敏感度，并且自身也具有明显的随机统计特性。气体流量增大虽然可以提高散热、抑制单次电弧能量，但是过高时会造成湍流，使放电通道产生抖动，噪声声压级的标准差增大，脉冲序列由准周期变为混沌，频谱峰值呈宽带随机化。电源频率变化也很重要，低频时每次起弧充分发展，脉冲幅值大但是稀疏；高频（几千赫兹）时残余电离使击穿电压降低，起弧变得连续但强度减弱，响度反而可以下降3—5dB。电极间距增大，弧柱变长，弧压、功率注入增大，噪声级近似线性增长，脉冲宽度变宽[6]。统计分析可知，单次起弧脉冲峰值声压服从对数正态分布，脉冲间隔在层流条件下服从正态分布，在湍流下退化为威布尔分布，为预测噪声暴露水平、设定主动控制触发阈值提供数据基础。因此噪声特征诊断要在一个多维参数空间里进行，它所体现的统计规律显示了工况改变时噪声行为边界，也给后来的抑制策略参数优化指明了敏感维度。

二、大气压射流等离子体起弧噪声抑制策略

（一）电源激励参数优化与动态匹配

电源特性直接影响起弧时电流增长速度和能量注入方式，是第一个降噪点。第一，用纳秒级上升沿高压脉冲代替正弦驱动，可以使击穿发生在电压峰值区并且迅速关断，限制电弧能量积累，抑制热收缩和强压力波，可以将起弧声压级降低10到15dB。第二，加入自适应阻抗匹配网络，在放电刚开始时输出高电压可靠击穿，起弧后毫秒级切换到低电压大电流驱动，防止弧光过热，使放电维持在弥散模式。第三，采用放电电流闭环反馈阶梯软启动方式，即逐级增加电压或者脉宽实现平稳气体加热，使噪声频谱中低频能量显著降低。通过实验可知，优化后的脉冲参数（幅值6 ~ 8kV、脉宽200 ~ 500ns、重复频率1 ~ 5kHz）配合快速电流限制电阻，可以大大缩短电弧收缩时间，使噪声级接近稳态辉光。

（二）气路结构与流场稳流调控

气流状况经由对击穿通道产生和保持影响间接控制噪声。首先在放电管上游加装层流元件（多孔介质、蜂窝筛管），使工作气体以均匀层流而不是湍流的状态进入放电区，减少随机局部密度扰动，大大降低流注分叉几率和起弧重复性噪声。其次，采用同轴保护气鞘，用低速惰性气体包裹活性射流，既可以隔离环境空气对射流尾迹不稳定掺混，又可以稳定放电通道的径向边界，抑制通道飘移和再起弧，可以将射流噪声级降低5 ~ 8dB。另外，利用流场仿真匹配气体流速和放电频率，使得每一个脉冲周期内气体微团位移和放电丝的尺度差不多，防止单个通道长时间加热造成热不稳定。另外，适量提高氦气中氮气或者氧气的比例，用高电负性的气体吸附电子，使放电变得均匀化为多丝弥散态，削弱单丝集中收缩，从而大幅度降低压力波冲击[7]。

（三）电极构型与介质阻挡强化设计

利用电极结构和介质层设计从源头抑制电弧收缩。第一，用圆角化、大面积贴合或者丝网电极代替尖锐针电极降低局部电场增强因子，使放电以多通道、低电流密度的形式出现，防止单点起弧。单环—平板、环形同轴结构的电场分布比针—环结构要均匀一些，噪声比针—环结构低8~12dB。第二，用金属电极表面烧结或者涂覆厚度均匀的陶瓷介质层（Al_2O_3、石英等），利用介质阻挡效应，每次微放电后电荷积累在介质表面形成反向电场自动熄灭微弧，限制单个放电丝的能量注入，使放电表现为大量微弱丝状脉冲叠加，其声学频率上升到超声范围，可听噪声大幅减少[8]。介质介电常数和厚度要加以优化，介电常数过高或者过薄容易产生局部强弧，一般厚度在1mm到2mm之间，相对介电常数在6到10之间。第三，采用双介质层或者介质嵌入方式，使放电在两个介质层之间的窄间隙内发生，减小了放电体积，提高了表

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

面分布均匀性，从根本上消除了贯穿性收缩弧光，实现了准无声放电起弧。

（四）声学隔离与有源噪声控制技术

对于已经产生的残余噪声可以采用被动隔离、主动控制的方法。被动层面，在等离子体射流枪体周围加装双层隔声罩，内层用微孔铝板或者纤维金属毡复合结构，通过粘滞耗散把声能转化为热能，外层用高密度阻尼材料阻挡透射；射流出口处可以装上微型消声末端，依靠扩张室原理衰减中高频噪声，结构紧凑，不会明显影响射流的长度。低频线谱噪声用有源降噪系统自适应滤波来处理，在靠近噪声源的参考传声器拾取起弧噪声信号，控制器生成反相次级声波，通过放置在操作者耳区附近的扬声器产生相消干涉[9]。由于起弧噪声脉冲重复频率较高，自适应算法可以锁定基频和谐波，得到10dB到15dB的窄带降噪效果。还可以在放电枪体内壁贴附电磁吸波材料，并优化接地环路，切断电磁—声耦合路径，减小由于微放电丝电致振动辐射引起的结构传声。上述复合策略一起使用，可以使起弧噪声的总声压级小于60dB(A)，符合办公和实验室环境的要求。

三、结语

本文对大气压射流等离子体起弧噪声的声学特性、电磁干扰特性以及与放电形貌演变之间的关系进行了系统的分析，发现噪声是由流注、弧光剧烈收缩造成的瞬时热膨胀和强电磁脉冲辐射引起的。在此基础上，从电源动态匹配、气流稳流、介质阻挡电极设计和隔离吸收四个方面建立了多层次抑制体系[10]。结果表明，利用纳秒脉冲软启动、层流保护以及介质阻挡增强，可以将电弧转化成弥散状态，从而避免高强噪声脉冲；加上隔声吸波和有源控制，可以达到低频舒适化的目的。未来的工作可以结合机器学习优化多维参数的协同，还可以发展出无弧的“全辉光”放电模式，从根本上消除起弧噪声，扩大大气压等离子体射流在人机共融精密场景的应用前景。

参考文献

[1] 石朝阳，郝小龙，缪龙宇，张一波 . 不同类型气源的大气压等离子体射流的放电特性研究 [J]. 高压电器，2025，62(3)：183-190.

[2] 李牧洋，谢竟成，周国平，万薇薇，黎华敏 . 大气压等离子体射流改性聚乙烯隔膜提高亲水性研究 [J]. 绝缘材料，2025，59(3)：140-147.

[3] 薛爽 . 大气压等离子体射流沉积氧化铬薄膜机理及特性研究 [D]. 北京化工大学，2025.

[4] 单瑞康，王伟伟，侯佳讯，樊智慧，王景全，刘富成，刘峰 . 内置悬浮电极对大气压等离子体射流的光电特性影响 [J]. 河北大学学报 (自然科学版)，2025，45(6)：601-608.

[5] 王涛，王紫婷，徐学张，时礼平，李蒙，饶思贤 . 大气压冷等离子体射流表面微加工技术研究进展 [J]. 中国表面工程，2025，38(4)：23-41.

[6] 仝源 . 大气压氦气等离子体射流与复杂处理物相互作用的数值模拟研究 [D]. 河北大学，2025.

[7] 李晏，郑宏烨，许奥浠，赵亚军，金珊珊，张旭，韦禹帆，张亦恒，朱荔，李席如 . 大气压冷等离子体射流装置的凝血作用及其机制初步研究 [J]. 医疗卫生装备，2025，46(6)：20-27.

[8] 缪龙宇，郝小龙，石朝阳，张传宗，戴欣颖 . 大气压等离子体射流中负氧离子和臭氧特性研究 [J]. 高电压技术，2026，52(1)：405-415.

[9] 武珈存 . 大气压氩气等离子体射流中流光传播行为及放电模式研究 [D]. 河北大学，2024.

[10] 夏凌寒，常泽洲，李伊濛，石若立，成永红，孟国栋 . 开放环境中大气压氩气微等离子体射流特性 [J]. 高电压技术，2024，50(12)：5638-5647.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License