第 52 卷 第 7 期：3458-3467　　高电压技术　　Vol.52, No.7: 3458-3467
2026 年 7 月 31 日　　High Voltage Engineering　　July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251420

优化气路结构下三维滑动弧等离子体的固氮效率

邱方程[1]，王　琳[2]，郑　欣[1]，刘荣海[1]，蒋　帅[2]，裴学凯[2]
（1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650217；2. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072）

摘　要：氮是生命体必需元素，但自然界中的氮主要以稳定的氮气(N_2)形式存在，难以被直接利用，因此须将其转化为含氮化合物，即固氮过程。目前工业固氮普遍存在高能耗和高污染等问题。为此，设计了一种气驱滑动弧放电等离子体装置，用于高效固氮实验研究。该装置的放电模式包括稳定滑动(steady arc gliding，A-G)模式和击穿伴随滑动(breakdown gliding，B-G)模式。通过示波器采集不同工作参数下的电压与电流信号，并利用相机记录 2 种模式的放电形态。系统研究了电源输出功率、进气流量及原料气体中氧气含量对固氮效率的影响，并对不同放电模式进行了对比分析。结果表明，B-G 模式具有较低的能耗特征，但氮氧化物产率偏低；而 A-G 模式可显著提高氮氧化物浓度，但对应能耗较高。因此，在实际应用中应根据具体需求选择合适的工作模式。通过优化放电参数，产物中氮氧化物体积分数由 4 180×10^{-6} 提升至 12 097×10^{-6}，增加约 189%；固氮能耗由 4.6 MJ/mol 降至 2.4 MJ/mol，降低约 50%，显著提升了等离子体固氮效率。

关键词：气驱滑动弧；稳定滑动模式；击穿伴随滑动模式；等离子体固氮；固氮效率

Nitrogen Fixation Efficiency of Three-dimensional Gliding Arc Plasma Under Optimized Gas-flow Configuration

QIU Fangcheng[1], WANG Lin[2], ZHENG Xin[1], LIU Ronghai[1], JIANG Shuai[2], PEI Xuekai[2]
(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;
2. School of Electrical and Automation Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Nitrogen is an essential element for living organisms, but in nature, it mainly exists in the stable form of nitrogen gas (N_2), which is difficult to be directly utilized. Therefore, it needs to be converted into nitrogen-containing compounds, a process known as nitrogen fixation. At present, industrial nitrogen fixation generally suffers from high energy consumption and serious pollution problems. To address this issue, a gas-driven gliding arc plasma device was designed in this study for efficient nitrogen fixation research. The discharge modes of the device include the steady arc gliding (A-G) mode and the breakdown gliding (B-G) mode. The voltage and current signals under different operating parameters were collected using an oscilloscope, and the discharge patterns of the two modes were recorded using a camera. The effects of power output, gas flow rate, and oxygen content in the feed gas on nitrogen fixation efficiency were systematically investigated, and the differences between the two discharge modes were compared. The results show that the B-G mode features lower energy consumption but a relatively low yield of nitrogen oxides, while the A-G mode can significantly increase the nitrogen oxide concentration but at a higher energy cost. Therefore, in practical applications, an appropriate discharge mode should be selected on the basis of specific requirements. By optimizing the discharge parameters, the volume fraction of nitrogen oxides is increased from 4 180×10^{-6} to 12 097×10^{-6}, an improvement of about 189%, while the energy consumption for nitrogen fixation is decreased from 4.6 MJ/mol to 2.4 MJ/mol, a reduction of about 50%, significantly enhancing the plasma nitrogen fixation efficiency.

Key words: gas driven gliding arc; steady arc gliding mode; breakdown gliding mode; plasma nitrogen fixation; nitrogen fixation efficiency

0　引言

氮是组成生命体的重要元素之一，自然界中氮元素主要以氮气的形式存在，但其分子结构稳定，氮分子三键键能较高，这使得大部分生物体无法直接利用空气中的氮气，因此，需要将空气中的氮气转化为含氮化合物供给生物体吸收利用[1]，该过程即为固氮。自然界中的固氮方式主要以雷电固氮和生物固氮为主[2-3]。随着人口的急剧增长，自然固氮

基金资助项目：南方电网科技项目(YNKJXM20240034；YNKJXM20240035)；国家自然科学基金(52377155)。
Project supported by Science and Technology Projects of China Southern Power Grid (YNKJXM20240034, YNKJXM20240035), National Natural Science Foundation of China (52377155).

逐渐无法满足人类社会的需求，为解决这一问题，人工固氮技术应运而生。目前，工业固氮主要以哈伯法为主，哈伯法是在高温(450~600 ℃)、高压(15~35 MPa)的条件[4-5]下，氢气和氮气在铁催化剂的作用下生成氨气的过程，哈伯法固氮解决了全球约 50%人口的粮食产出问题[6]。但是，在利用哈伯法固氮的实际生产过程中，需要消耗大量的化石能源来提供反应原料和高温环境，同时其生产过程中会向大气中排放大量的温室气体，这不利于对自然环境的保护。据统计，利用哈伯法的固氮工业每年需要消耗全球 1%~2%的能源，其每年向大气中排放的二氧化碳超 3 亿 t，约占全球排放量的 2%[7]。尽管哈伯法的工艺能耗已经逼近其热力学下限(约 0.48 MJ/mol)[8]，但由于仍依赖化石能源供热和供氢，其总体能耗和排放难以适应当前低碳发展的要求。

近年来，随着能源结构的调整，可再生能源在能源体系中的占比持续上升，氢能、氨能等新的能源载体开始得到更多关注[9-10]。同时，风能和光伏制氢的成本逐步下降，使得利用绿色电力驱动固氮过程成为可能[11]。在此背景下，可再生能源的快速发展和“双碳”目标的推进，使固氮过程对清洁化、低能耗的要求更加突出[12-16]。因此，仅依靠改进传统哈伯工艺已难以满足未来固氮行业的需求，开发新的固氮技术具有必要性。

目前，常见的新型固氮技术主要有电催化合成氨[17-20]、生物固氮技术[21]和放电等离子体固氮技术[22-24]等。这些新型固氮技术中，放电等离子体固氮技术具有工作条件温和、产物清洁、原料易得等特点。同时，等离子体氧化固氮技术可直接利用空气作为反应原料，生成的氮氧化物可在本地直接使用，从而有效降低生产过程中产生的运输成本。

等离子体固氮技术的基本原理是气体在外加高压电场作用下发生电离形成等离子体，等离子体中含有各类带电粒子和激发态粒子，这些活性粒子可促进氮气氧化反应。目前，实验室中常见的等离子体产生方式主要有介质阻挡放电[25-27]、射流放电[28-29]、滑动弧放电[30-34]和微波放电[35-36]等。目前，等离子体固氮技术多采用氧化固氮路线。产物中的氮氧化物与氢气混合后，在催化剂作用下被还原为氨气，用于氮肥生产。与哈伯法相比，该技术路线有望实现更低的固氮能耗。

目前，利用微波放电将氮气转化为氮氧化物进行固定所需的能耗是最低的，可低至 0.29 MJ/mol[36]。与哈伯法相比，该技术路线有望实现更低的固氮能耗。但获得微波放电等离子体的设备造价较高，而其余几种方式中，目前射流放电等离子体固氮最低能耗可达 0.42 MJ/mol[37]，远小于介质阻挡放电最低能耗(6.8 MJ/mol)[38]，但其工作功率较小，气体处理量小，难以实现工业应用。因此，如何通过对装置设计和工作参数优化来提高固氮效率，是亟待解决的问题。在等离子体固氮反应过程中，约化电场强度的变化会影响等离子体中能量的沉积分布。当约化场强较高时，能量主要用于分子的转动激发，这不利于反应的进行。而滑动弧产生的等离子体中，其电子能量用于促进分子的振动激发，可有效促进非热 Zeldovich 反应，从而加速固氮反应，降低能耗并提高效率。

在气驱滑动弧放电等离子体装置设计中，旋转气流的产生是设计的关键。在固氮效率研究中如何通过优化工作参数来提高固氮效率仍是一大难题[39-40]。通过对气驱滑动弧放电等离子体发生装置中的绝缘子上设计斜孔，可在简化的气路结构下获得高流速的旋转气流。基于该设计，搭建了气驱滑动弧固氮效率研究实验平台。交流滑动弧有 2 种常见工作模式，分别为稳定滑动模式和击穿伴随模式[41-42]。利用搭建的实验平台，通过改变电源输出功率、进气流量和原料中氮氧比等工作参数，研究不同工作模式下各参数对滑动弧固氮效率的影响规律，为大规模工业固氮提供参考。

1　研究方案

1.1　实验平台

实验平台结构如图 1 所示，气驱滑动弧固氮效率实验平台主要由高频高压交流电源(CTP-2000K)、质量流量计(SEVENSTAR CS200)和傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer，FTIR)(型号为 Bruker INVENIO)等设备组成。

实验平台中采用的高频高压交流电源主要由调压器和变频器组成，通过两者上的旋钮实现对电源输出电压幅值和频率的调节。通过调节变频器旋钮，使电源输出频率保持为 6 kHz，通过调节变压器旋钮控制电源输出电压的幅值，从而将电源输出功率控制为 40~100 W。实验中涉及的气体主要有干燥空气、高纯氮气和高纯氧气。通过质量流量计控

制进气体积流量在 3~8 L/min 之间，并利用 2 台流量计分别调节进气原料中氮气和氧气的比例，从而使氧气的体积分数控制在 10%~70%。将放电处理后的产物通入 FTIR 中，对其中各组分进行定量分析。放电过程中的电压和电流信号分别由电流测量线圈(Pearson 2877)和高压探头(Tektronix P5200A)测量，并由示波器(Tektronix TDS2024)同步采集与记录。同时，利用相机(Nikon D7500)拍摄下不同工作模式下的放电图像。

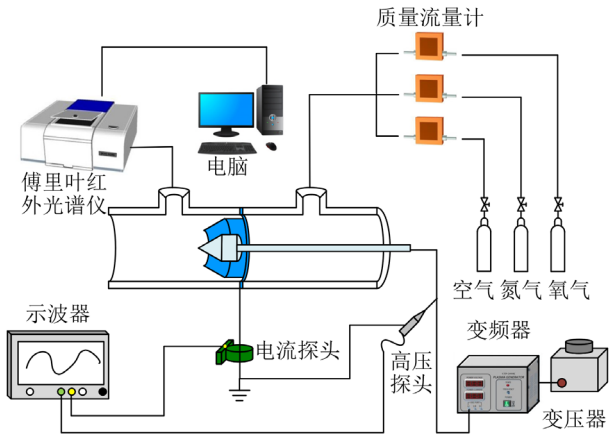
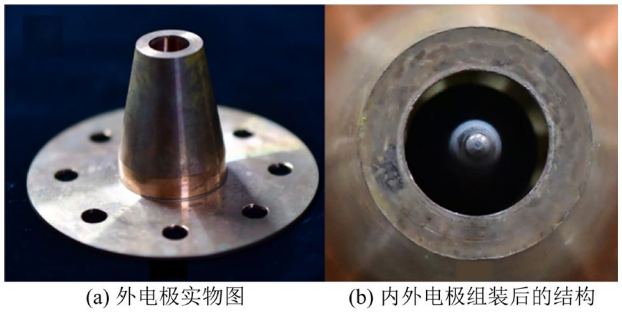


图 1 实验平台结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment platform structure

1.2 气驱滑动弧放电电极结构

气驱滑动弧放电装置采用内外电极同轴结构。内电极头由两部分组成，其底部为一高 3 mm、直径为 8 mm 的圆柱体，上方为一高 6 mm、直径为 8 mm 的圆锥，底部圆柱上开有 1 个 M2 螺孔，用于与螺杆连接并和电源输出相连。外电极下半部分为一内径 18 mm、外径 22 mm、高 6 mm 的圆筒，其上方为 1 个高 24 mm，下圆内径 14 mm、外径 22 mm，上圆内径 8 mm、外径 13 mm 的中空圆台，如图 2 所示。外电极底部有一法兰结构，用于与石英管连接，二者之间插入石墨垫片以确保装置的气密性。



(a) 外电极实物图 (b) 内外电极组装后的结构

图 2 内外电极结构及其组装实物图

Fig.2 Physical photographs of the inner and outer electrode structures and their assembly configuration

1.3 旋转气流的获取

气驱滑动弧放电装置中放电通道在气流的作用下绕内电极旋转，高速旋转气流的产生是装置设计中的关键环节。通过在陶瓷绝缘子上开孔，可有效隔离内外电极电位。同时，陶瓷绝缘子和内电极的嵌套结构可确保组装后的内外电极保持同轴。陶瓷绝缘子上开有 8 个斜向气孔，气孔下端孔径为 3 mm，上端孔径为 2 mm。气孔上下孔径的不同设计可在流量恒定的情况下，使气体以较高流速进入放电间隙，从而推动放电通道高速旋转。与传统产生旋转气流的方式相比，通过在陶瓷绝缘子上开孔仅需 1 个进气口，大大简化了固氮系统中的气路结构。和采用螺旋式石英管引气相比[35]，该设计组装更为简便，且结构更加稳固。

为验证上述结构对流场分布的影响，利用 COMSOL Multiphysics 对气驱滑动弧内部气流进行了三维数值模拟，如图 3 所示。仿真结果表明，气体通过陶瓷绝缘子斜向孔进入后，在放电间隙中形成明显的螺旋上升流场结构。该旋转流动具有切向速度分量，有助于放电通道围绕内电极旋转；同时，气孔的斜向角度还产生一定的径向速度分量，推动放电通道沿内电极方向朝出气口移动。

1.4 数据处理

通过气驱滑动弧装置放电时的电压、电流信号，对装置上耦合的放电功率进行计算，计算式为：

$$P_{\mathrm{dis}}=\frac{1}{T}\int_0^T I_{\mathrm{dis}}(t)V_{\mathrm{dis}}(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：P_{dis} 为气驱滑动弧放电装置上耦合的放电功率，W；V_{dis} 为装置中高压端处采集到的电压信号；I_{dis} 为回路中的电流信号；T 代表单次放电周期。

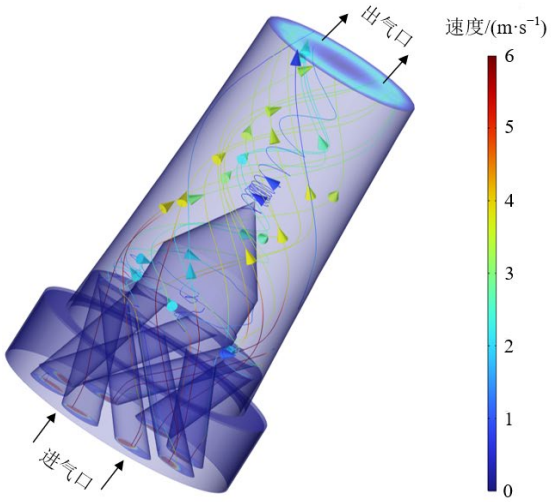
定义装置中能量密度 E_{SEI}(单位为 kJ/L)，该参数表示在放电处理过程中，单位原料气体对应的输入能量，计算式为：

$$E_{\mathrm{SEI}}=\frac{60\times10^{-3}P_{\mathrm{dis}}}{Q} \tag{2}$$

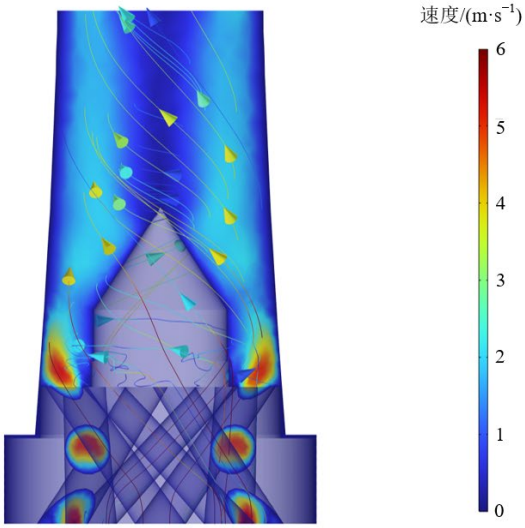
式中：Q 为装置中进气体积流量，L/min。装置在不同工作点下对应的固氮能耗 E_{N} 表示生成单位摩尔的氮氧化物所消耗的能量，其计算式为：

$$E_{\mathrm{N}}=\frac{10^{9}E_{\mathrm{SEI}}}{C_{\mathrm{NO}_X}/V_0} \tag{3}$$

式中：C_{NO_X} 表示产物中 NO 和 NO_2 的体积分数，10^{-6}；V_0 为理想气体的摩尔体积，L/mol，此处取 V_0=24 L/mol(0.1 MPa，293 K 环境下)。



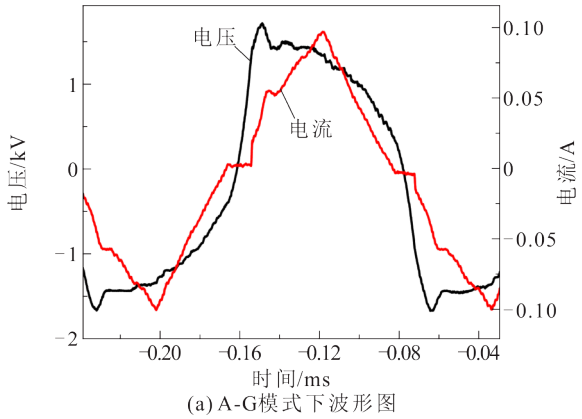
(a) 3D图



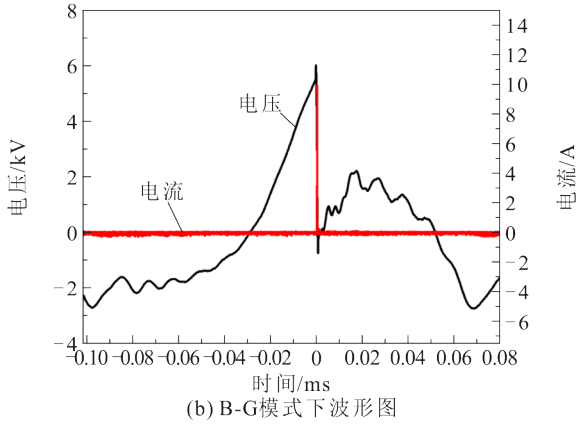
(b) 流场仿真剖面图

图 3　气驱滑动弧装置内部流场仿真图

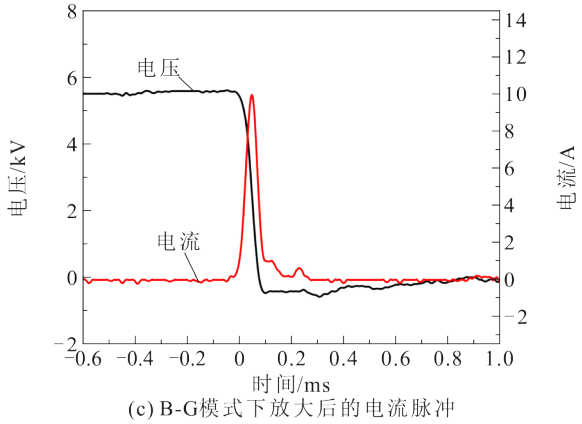
Fig.3　Simulated internal flow field of the gas-driven gliding arc device



(a) A-G模式下波形图



(b) B-G模式下波形图



(c) B-G模式下放大后的电流脉冲

图 4　不同工作模式下的电压、电流波形图

Fig.4　Voltage and current waveform diagrams under different working modes

在实际应用中，人们希望等离子体氧化固氮产物中的 NO 浓度较高，因此，在研究中将产物中 NO 的选择性 S_{NO} 作为固氮效率的重要评价指标[43-44]，其计算式为：

$$S_{NO}=\frac{C_{NO}}{C_{NO_X}} \tag{4}$$

式中：C_{NO} 表示产物中 NO 的体积分数，10^{-6}。

2　实验结果及分析

2.1　不同工作模式下的电压电流波形

气驱滑动弧放电有 2 个典型的工作模式，分别为稳定滑动(steady arc gliding，A-G)模式和击穿伴随滑动(breakdown gliding，B-G)模式，不同工作模式下的放电电压电流波形图如图 4 所示。

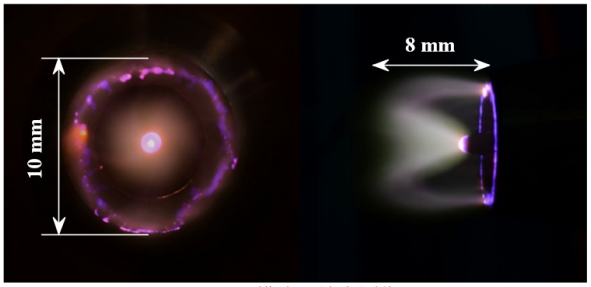
当气驱滑动弧放电装置工作在 A-G 模式下时，所采集到的波形如图 4(a)所示，该模式下电压电流的波形均为交流信号，其电流幅值约为 100 mA。这是由于在该模式下，电极间产生的放电通道在气流的驱动下稳定旋转，放电通道的熄灭和重燃随电源输出电压周期性变化，此时可将放电通道视为 1 个电阻，故电压和电流相位相同。

当气驱滑动弧放电装置工作在 B-G 模式下时，采集到的波形如图 4(b)所示，该模式下的电流波形中存在明显的脉冲特征，通过对该模式下的电流脉

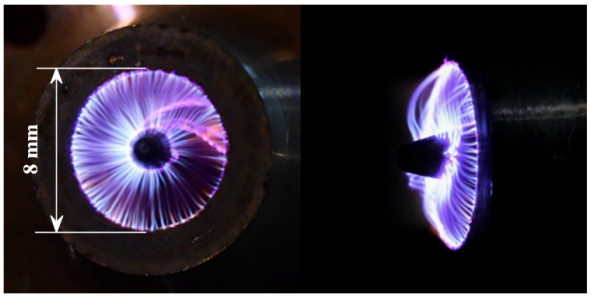
冲统计分析发现，其电流脉冲幅值为−20~20 A。这是由于在该模式下，两电极间不断进行着击穿-消弧-重燃的周期性循环。对该电流脉冲和电压下降沿进行放大后所得图像如图 4(c)所示，电流脉冲宽度约为 100 ns。

2.2 不同工作模式下的放电图像

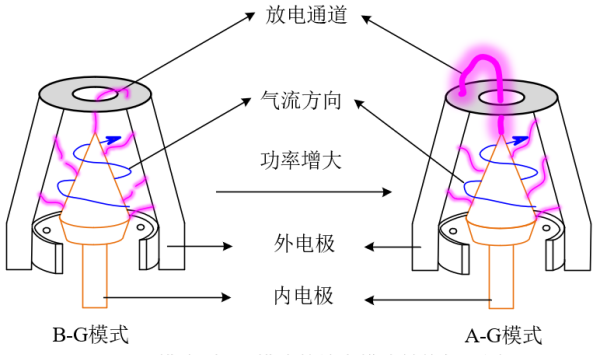
不同工作模式下的装置放电图像如图 5 所示，拍摄放电通道的正视图需要保证镜头对准管口位置；拍摄侧视图时须保证管口所在平面与镜头垂直。设置相机拍摄参数为：曝光时间 1/15 s；ISO-4000；光圈值为 f/25。



(a) A-G模式下放电图像



(b) B-G模式下放电图像



(c) B-G模式到A-G模式的放电模式转换机理图

图 5 不同工作模式下的放电图像

Fig.5 Discharge images under different working modes

当气驱滑动弧工作在 A-G 模式下时，对应的放电图像如图 5(a)所示。该模式下放电通道完全位于电极结构外，其颜色呈橘黄色。在放电通道的边缘可观察到微弱的绿光，这是由于铜电极受到灼烧所致。该模式下放电通道在气流的推动下绕内电极尖端稳定旋转，且未观察到明显的放电细丝，放电呈弥散且均匀分布。

当气驱滑动弧工作在 B-G 模式下时，对应的放电图像如图 5(b)所示。该模式下放电通道中部略微高于管口，放电区域内可观察到大量细小的蓝紫色放电通道，这是由于该模式下电极间不断有新的放电通道建立所致，在该过程中放电通道的运动呈不连续状态。

随着装置上耦合功率的增大，放电模式逐渐由 B-G 模式过渡至 A-G 模式，这一现象发生在电源输出功率由 40 W 逐渐增加至 80 W 的过程中。从图 5(c)的 B-G 模式到 A-G 模式的放电模式转换机理图中可以发现，在该过程中放电通道逐渐变粗且长度变长，使其可处理气体体积增大。

2.3 放电处理产物

产物采集装置为内径 46 mm、外径 52 mm 的石英管，其一侧开有一侧管，外径 10 mm、内径 7 mm、长 40 mm。该侧管与气管相连，通过稳定气流将滑动弧放电等离子体处理后的产物输送到 FTIR 吸收池以测量产物组分。获得典型的傅里叶红外吸收光谱如图 6 所示。对光谱图中峰的位置进行判断可知：滑动弧放电等离子体处理产物中主要为各类氮氧化物。

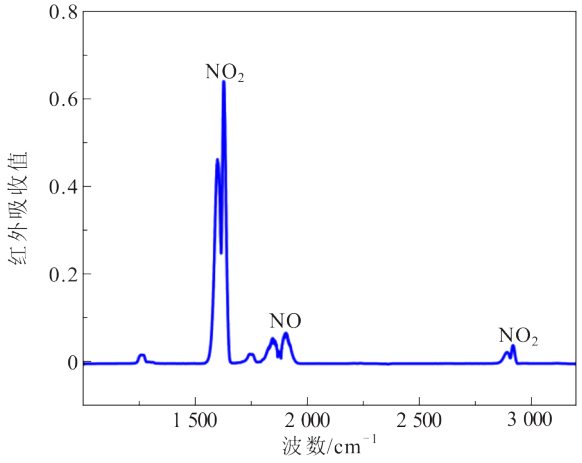


图 6 气驱滑动弧放电等离子体处理产物的傅里叶红外吸收光谱

Fig.6 Fourier transform infrared absorption spectrum of the gas-driven sliding arc discharge plasma treatment product

2.4 电源输出功率对固氮效率的影响

在进气体积流量(3、4、5 L/min)和原料中氮氧体积比($V_{N_2}:V_{O_2}$=4:1)不变的情况下，通过调节交流电源变压器旋钮改变输出功率，检测输出功率为 40、60、80、100 W 时的固氮反应参数，并据此计

算固氮效率，如图 7 所示。

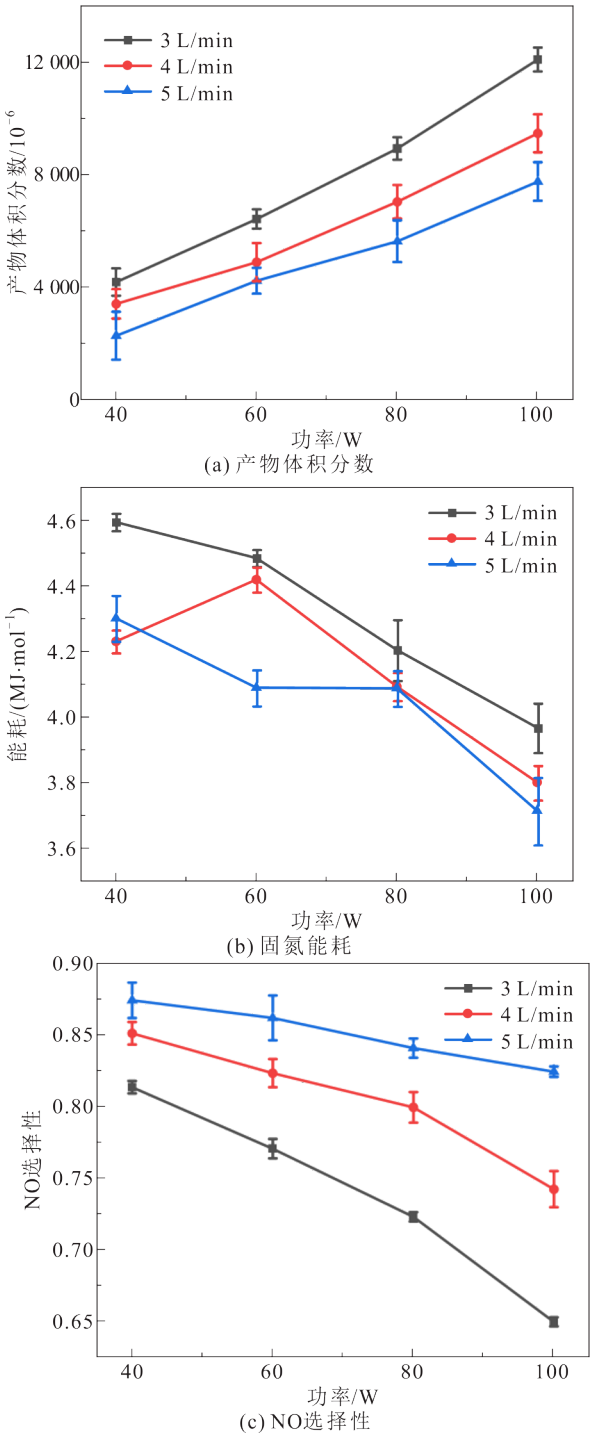


图 7　固氮效率随电源输出功率变化曲线

Fig.7　Curve of nitrogen fixation efficiency varying with the output power of the power supply

放电处理产物中氮氧化物体积分数随电源输出功率变化曲线如图 7(a)所示，随着放电功率的增大，产物中氮氧化物体积分数由 4 180×10^{-6} 增加至 12 097×10^{-6}。这是由于随着平均功率的增加，放电模式逐渐由 B-G 模式过渡至 A-G 模式(如图 5(c)所示)，放电的平均电压和平均电流均上升，从而使电子数密度提高[45]，促进了 N_2 的电离，使得更多的 N 原子以及活性物种产生[46](如式(5)所示)，进而促进等离子体通道逐渐变粗且长度变长。这些活性 N 原子的增加有利于 Zeldovich 机制相关反应的正向进行(式(6)和式(7))[47-48]，尤其促进了式(7)中活性 N 原子参与的 NO 生成过程，从而导致氮氧化物体积分数升高。

$$\begin{cases} e^- + N_2 \rightarrow N(^4S) + N(^4S) + e^- \\ e^- + N_2 \rightarrow N(^4S) + N(^2D) + e^- \\ e^- + N_2 \rightarrow N(^4S) + N(^2P) + e^- \end{cases} \quad (5)$$

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \quad (6)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (7)$$

此外，在放电模式逐渐由 B-G 模式过渡至 A-G 模式的过程中，回路中电流值逐渐增大，放电通道逐渐变粗且长度变长，使可处理气体体积增大[43]。因此，随着装置耦合功率的增大，其固氮能耗呈现下降趋势。

装置上耦合功率增大的过程中，回路中电流值也呈现增加趋势，这会加剧放电通道产生的热效应，从而提高环境温度。而反应环境中温度的提高会促进 NO 氧化为 NO_2。因此，随着电源输出功率的增大，产物中 NO 的选择性呈下降趋势。

2.5　进气流量对固氮效率的影响

在原料中氮氧比恒定的情况下，通过质量流量计调控进气流量，探究不同工作模式下固氮效率随进气流量变化规律。利用质量流量计对进气体积流量进行控制，区间为 3~8 L/min，得到对应的固氮效率并绘制图像如图 8 所示。

当电源输出功率(40、60、100 W)恒定时，随着进气体积流量的增加，装置中的能量密度下降，如图 8(b)所示。能量密度的下降使得等离子体区域中自由电子数减少，这不利于自由电子和重粒子碰撞产生活性粒子，因此。随着进气体积流量的增大，产物中氮氧化物的浓度下降，其中，A-G 模式中下降最明显，产物体积分数由约 8 128×10^{-6} 下降至 4 370×10^{-6}。

当装置工作在 B-G 模式下时，随着进气流量的增大，固氮效率呈现下降趋势，这是由于进气流量的增大会加剧气流对放电通道的驱动作用，放电通道滑动速度会增加，这使得其可处理的气体体积明

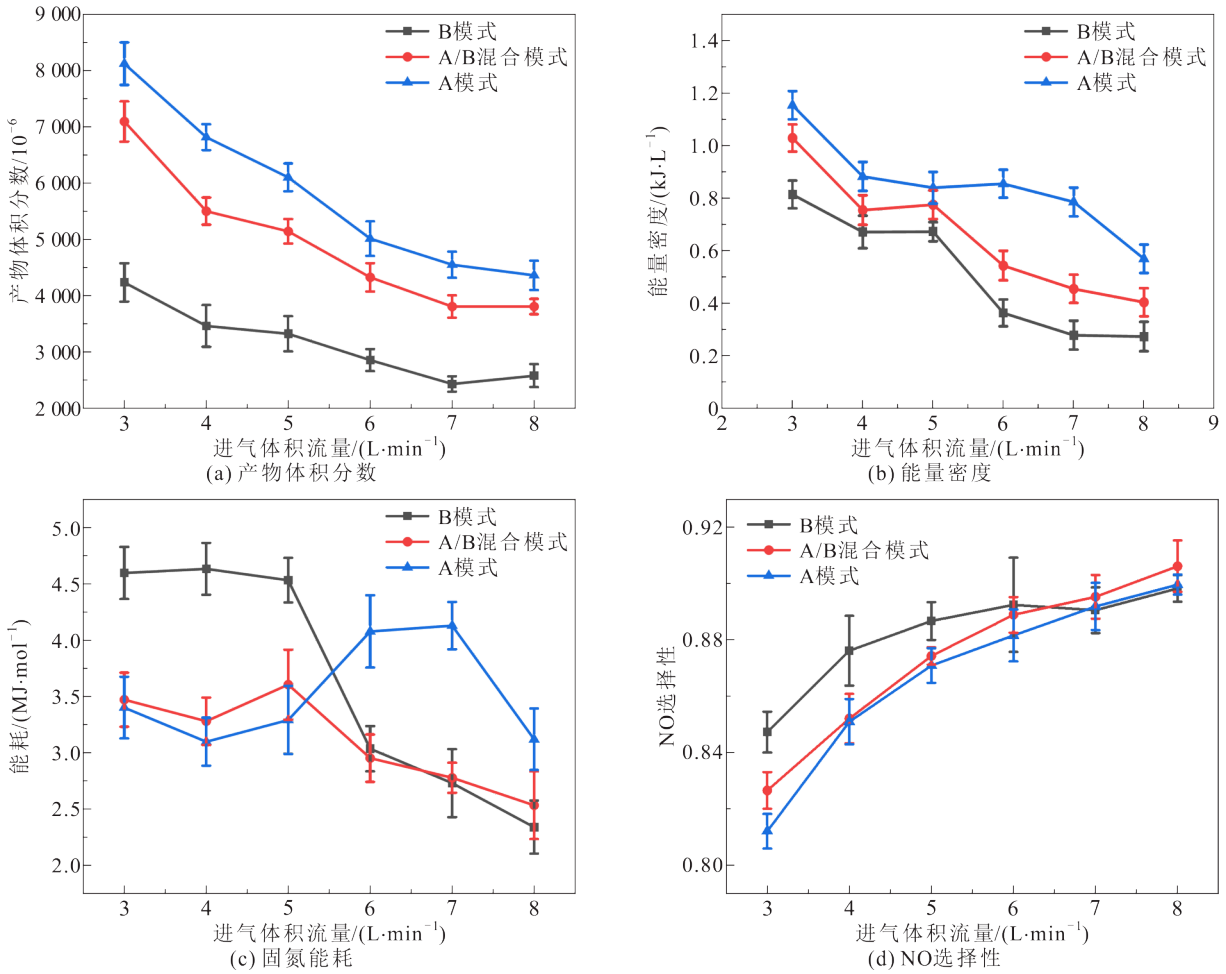


图 8 不同模式下固氮效率随进气体积流量变化曲线

Fig.8 Curve of nitrogen fixation efficiency varying with the intake flow rate under different working modes

显增大。而装置工作在 A-G 模式下时，随着进气流量的增大，固氮能耗呈现增加趋势，这是因为在 A-G 模式下，放电通道已可以覆盖整个管口区域，因此，进气流量增加对加剧放电通道旋转影响不显著。此时进气流量的增加反而会缩短等离子体和处理气体的接触时间，易使得处理不充分。

随着进气流量的增加，产物中 NO 的选择性呈现上升趋势，这是因为气流对放电通道有冷却作用，随着进气流量的增加，这一作用效果越发明显。同时，进气流量的增加会削弱产物中 NO 的浓度，这可有效阻碍 NO 氧化为 NO_2 的反应进程。

2.6 原料中氮氧比对固氮效率的影响

在进气流量恒定时，通过改变原料气体中氮氧比，探究不同工作模式下，固氮效率随原料中氧气浓度变化规律，并绘制曲线如图 9 所示。在 A-G 模式和 B-G 模式下，各固氮效率评价参数随原料中氧气含量变化规律相似。

根据图 9 可以发现，随着原料气体中氧气体积分数的提高，产物中氮氧化物体积分数先增加后趋于平稳。这是因为在氧气体积分数较低时，随着原料气体中氧气体积分数的提高，反应体系中的活性氧原子的浓度逐渐提高，这会促进氮气的氧化反应的进程。而随着氧气体积分数的进一步提高，原料中氮气体积分数下降，导致反应体系中活性氮原子浓度降低，此时，随着氧气体积分数的提高，产物中氮氧化物体积分数不再呈现上升趋势。

此外，随着原料气体中氧气体积分数的增加，固氮能耗下降。这是由于和氮气相比，原料气体中氧气更易发生解离获得活性氧原子，而活性氧原子可以促进氮气分子解离等反应的进行，因此，随着原料气体中氧气体积分数的提高，反应体系中活性氧原子的数目增加，从而促进固氮能耗的降低。随着原料中氧气体积分数的增加，产物中 NO 选择性呈下降趋势。这是由于原料气体中的氧气对产物中 NO 有氧化作用，因此，氧气体积分数的增加会促进 NO 氧化为 NO_2。

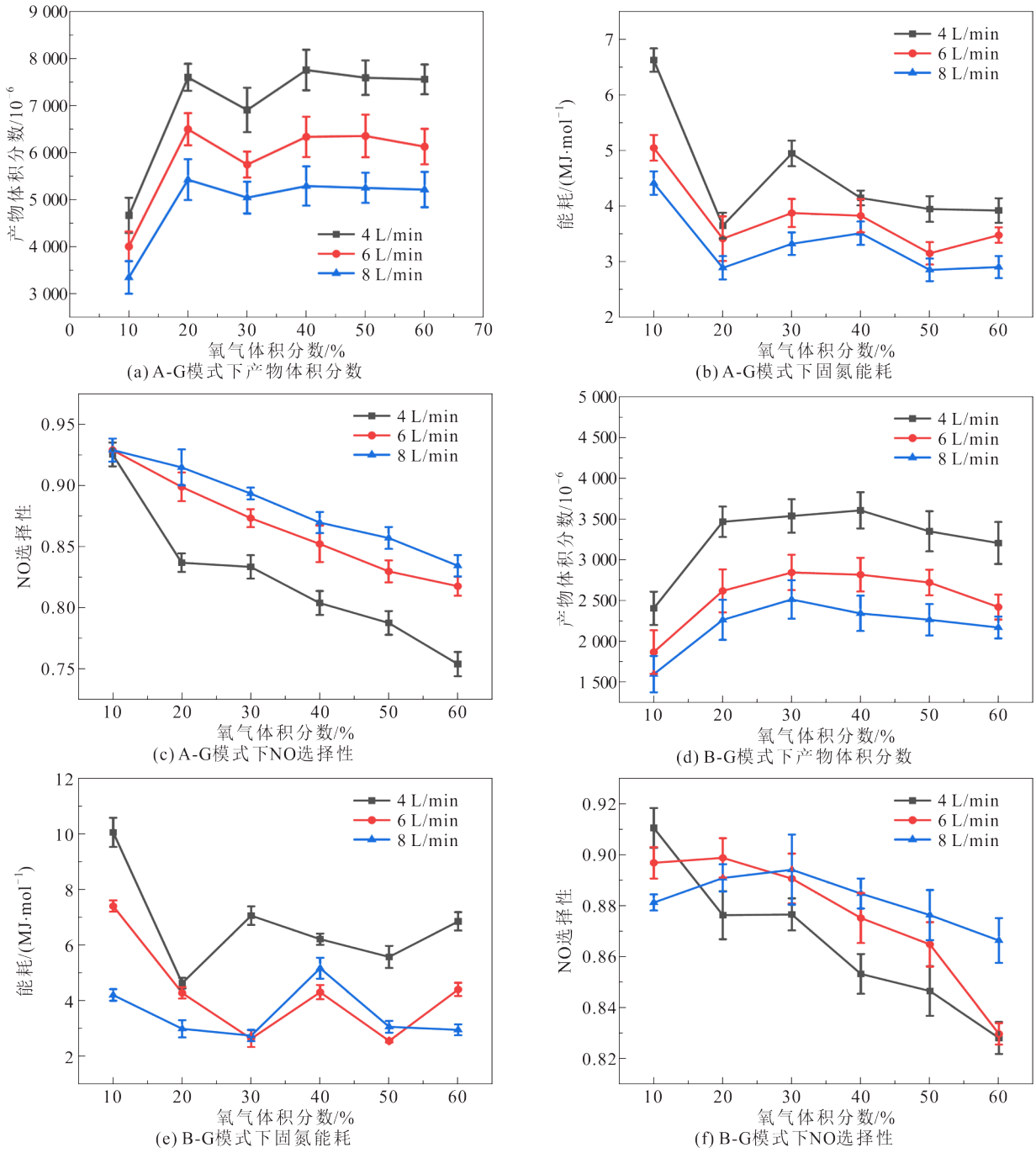


图 9　不同进气体积流量下固氮效率随氧气体积分数变化曲线

Fig.9　Curves of nitrogen fixation efficiency varying with the oxygen volume fraction under different intake flow rates

3　结论

1）通过在气驱滑动弧放电装置的绝缘子上设计小孔径斜孔结构，可在简洁的气路布局下实现高速旋转气流。基于该结构，搭建了气驱滑动弧放电等离子体固氮实验平台，系统研究了电源输出功率、进气流量及原料气体中氮氧比等参数对固氮性能的影响。结果表明，不同工作模式在固氮反应中表现出差异化优势：B-G 模式下固氮能耗较低，而 A-G 模式下固氮能耗较高且 NO 选择性较低。因此，在实际应用中应根据不同需求选取合适的工作模式。

2）此外，在相同原料气体和输出功率条件下，进气流量的增加会导致产物被稀释，而氧气含量的提高则促进 NO 向 NO_2 的转化，从而降低产物中 NO 的选择性。通过对工作参数的优化，在原料气体为干燥空气、进气体积流量为 3 L/min、电源输出功率为 100 W 的条件下，产物中氮氧化物体积分数由 4 180×10^{-6} 提升至 12 097×10^{-6}，增加约 189%；

同时，固氮能耗由 4.6 MJ/mol 降低至 2.4 MJ/mol，降低约 50%。该结果表明，气驱滑动弧放电在结构优化与参数调控后，可实现高效、低能耗的等离子体固氮过程。

参考文献 References

[1] CANFIELD D E, GLAZER A N, FALKOWSKI P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle[J]. Science, 2010, 330(6001): 192-196.

[2] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(5): 263-276.

[3] PATIL B S, WANG Q, HESSEL V, et al. Plasma N_2-fixation: 1900-2014[J]. Catalysis Today, 2015, 256: 49-66.

[4] 李天宇，孙静，高钰婷，等. 等离子体催化及其在电力多元转换的应用研究进展[J]. 电工技术学报，2024，39(17)：5461-5481.
LI Tianyu, SUN Jing, GAO Yuting, et al. Research progress on plasma catalysis and its applications in power-to-X[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5461-5481.

[5] WANG L, XIA M K, H WANG H, et al. Greening ammonia toward the solar ammonia refinery[J]. Joule, 2018, 2(6): 1055-1074.

[6] BHATTACHARYA A. Changing climate and resource use efficiency in plants[M]. London: Academic Press, 2019.

[7] 陈赦，刘红梅，吴婷，等. 低温等离子体增强催化氨合成机理的一维流体动力学模型[J]. 电工技术学报，2021，36(13)：2730-2739.
CHEN She, LIU Hongmei, WU Ting, et al. 1D fluid model of catalytic ammonia synthesis enhanced by low temperature plasma[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2730-2739.

[8] APPL M. The Haber-Bosch heritage: the ammonia production technology[C]//50th Anniversary of the IFA Technical Conference. Seville, Spain:[s. n.], 1997: 25-26.

[9] 曾振松，郑洁云，魏鑫，等. 微电网的氢-氨混合储能系统容量优化配置研究[J]. 广东电力，2024，37(7)：42-49.
ZENG Zhensong, ZHENG Jieyun, WEI Xin, et al. Research on capacity optimization configuration of hydrogen-ammonia hybrid storage system in microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 42-49.

[10] 苏娟，董彦君，赵晶，等. “东数西算”背景下多数据中心联合消纳可再生能源途径研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：55-64.
SU Juan, DONG Yanjun, ZHAO Jing, et al. Research of the approach to consuming renewable energy across multiple data centers in the context of “east data, west calculation”[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 55-64.

[11] 欧珊珊，江岳文. 氢能证书交易体系及其对制氢优化的影响[J]. 广东电力，2023，36(10)：30-38.
OU Shanshan, JIANG Yuewen. Hydrogen certificate trade system and its influence on hydrogen production optimization[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 30-38.

[12] 邓振宇，张润之，张文韬，等. 风光电解水制氢平准化成本优化空间分析[J]. 广东电力，2024，37(7)：22-31.
DENG Zhenyu, ZHANG Runzhi, ZHANG Wentao, et al. Levelized cost optimization space analysis for wind-solar electrolytic water electrolyzing hydrogen generation[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 22-31.

[13] 张力菠，吴一锴，王群伟. 考虑碳中和目标与成本优化的可再生能源大规模发展规划[J]. 广东电力，2023，36(7)：31-39.
ZHANG Libo, WU Yikai, WANG Qunwei. Large-scale development of renewable energy in consideration of carbon neutrality and cost optimization[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 31-39.

[14] 杨旭，王文军，薄雅婕. 电-碳市场协同运行研究现状综述与展望[J]. 广东电力，2023，36(11)：57-63.
YANG Xu, WANG Wenjun, BO Yajie. Review and outlook on synergy operation of electricity-carbon markets[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 57-63.

[15] 郝伟韬，蔡国田，卢俊暄，等. 源网荷储互动减碳研究综述[J]. 广东电力，2023，36(11)：64-74.
HAO Weitao, CAI Guotian, LU Juntong, et al. Review of source-grid-load-storage interactive carbon reduction research[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 64-74.

[16] 周峻，冀承泽，李儒欢，等. 电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2096-2113.
ZHOU Jun, JI Chengze, LI Ruhuan, et al. Recent development in the technology of water electrolysis and its applications to new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2096-2113.

[17] GENG Z G, LIU Y, KONG X D, et al. Achieving a record-high yield rate of 120.9 μg_{NH3} $mg^{-1}_{cat.}$ $h^{-}$for N_2 electrochemical reduction over Ru single-atom catalysts[J]. Advanced Materials, 2018, 30(40): 1803498.

[18] XUE X L, CHEN R P, YAN C Z, et al. Review on photocatalytic and electrocatalytic artificial nitrogen fixation for ammonia synthesis at mild conditions: advances, challenges and perspectives[J]. Nano Research, 2019, 12(6): 1229-1249.

[19] ZHOU F L, AZOFRA L M, ALI M, et al. Electro-synthesis of ammonia from nitrogen at ambient temperature and pressure in ionic liquids[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(12): 2516-2520.

[20] MCENANEY J M, SINGH A R, SCHWALBE J A, et al. Ammonia synthesis from N_2 and H_2O using a lithium cycling electrification strategy at atmospheric pressure[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(7): 1621-1630.

[21] 沈世华，荆玉祥. 中国生物固氮研究现状和展望[J]. 科学通报，2003，48(6)：535-540.
SHEN Shihua, JING Yuxiang. Research status and prospect of biological nitrogen fixation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 535-540.

[22] 高钰婷，周仁武，刘志杰. 气液放电技术在能源转化领域的应用研究进展[J]. 高电压技术，2026，52(3)：1482-1499.
GAO Yuting, ZHOU Renwu, LIU Zhijie. Recent advances in the application of gas-liquid discharge technology for energy conversion[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(3): 1482-1499.

[23] 徐海笑，姜慧，杨永杰，等. 交流激励下的锯齿环状表面介质阻挡放电特性[J]. 高电压技术，2025，51(4)：2049-2059.
XU Haixiao, JIANG Hui, YANG Yongjie, et al. Sawtooth annular surface dielectric barrier discharge characteristics under high frequency alternating current power[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 2049-2059.

[24] 李毅恒，范宁龙，彭斌祺，等. 空气放电产物快速吸收方法及灭菌研究[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2904-2913.
LI Yiheng, FAN Ninglong, PENG Binqi, et al. Study on fast absorption methods and sterilization of air discharge products[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2904-2913.

[25] GÓMEZ-RAMíRez A, COTRINO J, LAMBERT R M, et al. Efficient synthesis of ammonia from N_2 and H_2 alone in a ferroelectric packed-bed DBD reactor[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2015, 24(6): 065011.

[26] BARBOUN P, MEHTA P, HERRERA F A, et al. Distinguishing plasma contributions to catalyst performance in plasma-assisted ammonia synthesis[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(9): 8621-8630.

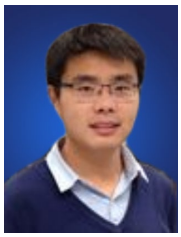
[27] IWAMOTO M, AKIYAMA M, AIHARA K, et al. Ammonia synthesis on wool-like Au, Pt, Pd, Ag, or Cu electrode catalysts in nonthermal atmospheric-pressure plasma of N_2 and H_2[J]. Acs Catalysis, 2017,

7(10): 6924-6929.
[28] KOROLEV Y D, FRANTS O B, LANDL N V, et al. Low-current plasmatron as a source of nitrogen oxide molecules[J]. IEEE transactions on plasma science, 2012, 40(11): 2837-2842.
[29] 郭莉，赵鹏瑜，黄玲玲，等. 等离子体活化水用于微生物消杀的意义和现状[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2955-2971.
GUO Li, ZHAO Pengyu, HUANG Lingling, et al. Significance and current status of plasma-activated water for microbial inactivation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2955-2971.
[30] PEI X K, GIDON D, GRAVES D B. Propeller arc: design and basic characteristics[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(12): 125007.
[31] LEI X Y, CHENG H, NIE L L, et al. Nitrogen fixation as NO_x enabled by a three-level coupled rotating electrodes air plasma at atmospheric pressure[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2022, 42(1): 211-227.
[32] JARDALI F, VAN ALPHEN S, CREEL J, et al. NO_x production in a rotating gliding arc plasma: potential avenue for sustainable nitrogen fixation[J]. Green Chemistry, 2021, 23(4): 1748-1757.
[33] CHEN X H, WANG C, SONG M, et al. The morphological transformation of carbon materials from nanospheres to graphene nanoflakes by thermal plasma[J]. Carbon, 2019, 155: 521-530.
[34] WANG C, CUI H C, ZHANG Z L, et al. Observation of arc modes in a magnetically rotating arc plasma generator[J]. Contributions to Plasma Physics, 2017, 57(9): 395-403.
[35] ROUSSEAU A, DANTIER A, GATILOVA L, et al. On NO_x production and volatile organic compound removal in a pulsed microwave discharge in air[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2005, 14(1): 70-75.
[36] AZIZOV R, ZHIVOTOV V K, KROTOV M, et al. Synthesis of nitrogen oxides in a nonequilibrium microwave discharge under electron-cyclotron resonance conditions[J]. Khimiya Vysok Energii, 1980, 14: 366-368.
[37] LU C, CHEN X Y, WANG Y Q, et al. Effect of dielectric parameters on the transformation of operation mode and the energy cost of nitrogen fixation of surface microdischarge in air[J]. Plasma Processes and Polymers, 2022, 19(2): 2100107.
[38] VERVLOESSEM E, GORBANEV Y, NIKIFOROV A, et al. Sustainable NO_x production from air in pulsed plasma: elucidating the chemistry behind the low energy consumption[J]. Green Chemistry, 2022, 24(2): 916-929.
[39] 陈卫鹏. 脉冲电弧放电合成一氧化氮的等离子体温度控制实验研究[D]. 武汉：华中科技大学，2011：1-7.
CHEN Weipeng. Experimental research to control the temperature of arc discharge plasma used to produce NO[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology, 2011: 1-7.
[40] 康少芬. 重频脉冲放电等离子体特性及其合成氨的基础研究[D]. 郑州：郑州大学，2021.
KANG Shaofen. Characteristics of repeat frequency pulsed discharge plasma and its basic research on ammonia synthesis[D]. Zhengzhou, China: Zhengzhou University, 2021.
[41] 潘如政，李怀宇，崔巍，等. 基于卷积神经网络与可视图像的类滑动放电模式识别[J]. 高电压技术，2024，50(1)：423-432.
PAN Ruzheng, LI Huaiyu, CUI Wei, et al. Pattern recognition of microsecond pulsed sliding-like discharge based on convolutional neural network and visual image[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 423-432.
[42] 雷健平，何立明，陈一，等. 旋转滑动弧放电等离子体滑动放电模式的实验研究[J]. 物理学报，2020，69(19)：195203.
LEI Jianping, HE Liming, CHEN Yi, et al. Experimental study on gliding discharge mode of rotating gliding arc discharge plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(19): 195203.
[43] 刘保旺. 平面电极磁驱旋转弧固氮及其影响机制研究[D]. 武汉：华中科技大学，2023.
LIU Baowang. Study on nitrogen fixation and its influence mechanism of magnetically driven rotating arc using planar electrodes[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
[44] WANG W Z, PATIL B, HEIJKERS S, et al. Nitrogen fixation by gliding arc plasma: better insight by chemical kinetics modelling[J]. ChemSusChem, 2017, 10(10): 2145-2157.
[45] MARCINAUSKAS L, KAVALIAUSKAS Ž, JONYNAITĖ K, et al. The influence of voltage on gliding arc discharge characteristics, the composition of air plasma, and the properties of BG-11 medium[J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 2135.
[46] GROMOV M, KAMARINOPOULOU N, DE GEYTER N, et al. Plasma-assisted nitrogen fixation: the effect of water presence[J]. Green Chemistry, 2022, 24(24): 9677-9689.
[47] LIU J L, NIE L L, LIU D W, et al. Plasma for nitrogen fixation by using N_2/O_2 mixture: reaction pathway, energy flow, and plasma reactor[J]. Plasma Processes and Polymers, 2024, 21(2): 2300153.
[48] ALEKSANDROV N L, KINDYSHEVA S V, NUDNOVA M M, et al. Mechanism of ultra-fast heating in a non-equilibrium weakly ionized air discharge plasma in high electric fields[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(25): 255201.



邱方程
1990—，男，博士，高工
研究方向为储氢材料、太赫兹检测
E-mail: 626572044@qq.com

QIU Fangcheng
Ph.D.
Senior engineer



裴学凯(通信作者)
1986—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压气体放电等离子体及应用方向的研究
E-mail: peixuekai@hotmail.com

PEI Xuekai
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-09-29　修回日期　2026-02-02　　编辑　曾文君