

滑动弧放电等离子体激励的值班火焰头部 放电特性实验

耿华东, 陈一*, 崔巍, 胡长淮, 苗慧丰, 吴云

(空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安, 710038)

摘要 滑动弧放电等离子体在拓宽燃烧室点熄火边界、缩短点火延迟时间、提高燃烧效率等方面具有显著优势。在已有燃油裂解头部的基础上, 优化滑动弧放电位置, 创新地研制了基于滑动弧放电等离子体激励的燃烧室值班火焰头部, 并对其放电特性开展了实验研究, 着重分析了不同空气流量和输入电压对电弧动态特性、滑动模式、平均击穿电压、平均功率、平均旋转角速度的影响。结果表明: 提出的方案能在文氏管与燃油喷嘴之间形成稳定的旋转滑动弧放电区域, 同时存在两种不同的放电模式, 即 steady arc gliding (A-G) 模式和 breakdown gliding (B-G) 模式, 受空气流量和输入电压的显著影响, 当空气流量小于 200 L/min 时, 在 140~240 V 的输入电压下, 主要以 A-G 模式放电, 随着空气流量的增加向 B-G 模式发展, 而随着输入电压的增加, A-G 模式占比逐渐增大; 放电平均击穿电压、旋转角速度随着输入电压的增加或空气流量的减小而减小, 但平均功率随输入电压的增大而增大。

关键词 滑动弧放电; 等离子体点火助燃; 值班火焰头部; 放电特性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.008

中图分类号 V235.11 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0053-11

An Experiment in Discharge Characteristics of Pilot Flame Dome Based on Gliding Arc Discharge Plasma Actuation

GENG Huadong, CHEN Yi*, CUI Wei, HU Changhuai, MIAO Huifeng, WU Yun

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force

Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract Gliding arc discharge plasma has obvious advantages in the aspects of broadening the ignition and extinction boundary of combustor, reducing ignition delay time and improving combustion efficiency. On the basis of exiting technology of fuel pyrolysis dome, this paper optimizes the position of gliding arc discharge and innovatively develops the pilot flame dome based on gliding arc discharge plasma actuation. And the experimental study on discharge characteristics is carried out to investigate the arc dynamic characteristics, gliding mode, average breakdown voltage, power under conditions of different airflow rates and input voltages. The results show that the Pilot flame dome can form a stable rotating gliding arc discharge area between Venturi tube and fuel nozzle, and there are two different discharge modes, i. e. Steady Arc

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(91941301)

作者简介: 耿华东(1995—), 男, 河南周口人, 硕士生, 研究方向为等离子体点火与助燃技术。E-mail: genghuadongkgd@163.com

通信作者: 陈一(1989—), 男, 贵州贵阳人, 讲师, 研究方向为等离子体点火与助燃技术。E-mail: cheniykgd@163.com

引用格式: 耿华东, 陈一, 崔巍, 等. 滑动弧放电等离子体激励的值班火焰头部放电特性实验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(1): 53-63. GENG Huadong, CHEN Yi, CUI Wei, et al. An Experiment in Discharge Characteristics of Pilot Flame Dome Based on Gliding Arc Discharge Plasma Actuation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 53-63.

Gliding (A-G) mode and Breakdown Gliding (B-G) mode, which are significantly affected by the airflow rate and input voltage. When the airflow rate is less than 200 L/min, the discharge is mainly in A-G mode at the input voltage of 140~240 V, and develop to B-G mode with the increase of airflow rate. However, the proportion of A-G mode increases gradually with the increase of input voltage. The average breakdown voltage and rotating angular velocity decrease with the increase of input voltage or the decrease of air flow, but the average discharge power increases with the increase of input voltage.

Key words gliding arc discharge; plasma ignition and assisted combustion; pilot flame dome; discharge characteristics

新一代航空发动机燃烧室朝着高温升、低污染的方向发展,在高原、高空、吸雨等极端自然条件和进气畸变、过渡态等极端使用条件下的点熄火问题也更为突出,熄火等燃烧不稳定性现象是燃烧室设计和使用中所面临的一个重要问题^[1-2],传统采用旋流、分级燃烧等物理控制方法已逼近火焰稳燃能力的极限,难以满足未来发展要求,所以迫切需要创新思路,探索新型的稳定燃烧方法。等离子体点火与助燃技术通过其化学效应、热效应、输运效应以及裂解效应实现对燃烧的调控,其作为一种新型的航空发动机辅助燃烧技术,近年来受到国内外的广泛关注^[3-5]。

在等离子体放电过程中,可以产生具有化学活性的组分、裂解燃料为轻质烷烃,一方面可以降低反应活化能,拓宽点火边界,另一方面提高了火焰的传播速度,增强了火焰的稳定性^[6],能起到提高燃烧效率、扩宽熄火边界、降低污染等作用^[7-10]。本文所采用的滑动弧放电^[11-12]是一种产生非平衡等离子体的典型方式,兼具热等离子体和冷等离子体的特性^[13],在放电过程中产生大量的活性粒子、自由基等^[14],这些活性粒子直接作用于燃烧化学反应,可以加速燃烧进程、提高燃烧效率以及火焰的稳定性^[15]。文献^[16]通过对三电极滑动弧放电等离子体反应器中的电子温度和气体温度进行测量,研究了滑动弧放电等离子体从平衡态等离子体向非平衡/非热平衡等离子体转变的机制,证明了滑动弧放电的非平衡特性。文献^[17~18]开展了滑动弧等离子体激励辅助甲烷燃烧的稳定性研究,证明了滑动的电弧可作为一个旋转的先导火焰,为燃烧提供活性自由基并伴随释放热量以维持火焰。文献^[19~20]研究了动态燃烧条件下滑动弧等离子体的助燃机制,认为滑动弧等离子体对预混旋流火焰稳定性的增强和熄火极限的拓宽,一方面是放电对燃烧系统注入更多的能量,另一方面是放电扩大了回流区域。从已公开的结果看,目前滑动弧等离子体点火助燃的研究主要集中于放电机理、反应动力学等

基础研究方面,而针对具体助燃装置,特别是在航空发动机燃烧室上的应用研究还较少^[21-22],所以等离子体点火助燃装置的研制亟待发展。

文献^[23]创新地提出了航发燃烧室头部与三维旋转滑动弧放电等离子体激励器相结合的方案,并通过实验验证了三维旋转滑动弧在改善航发燃烧室熄火性能上的可行性^[24]。结果表明,通过旋转滑动弧等离子体助燃后,燃烧室燃烧效率、出口温度场分布、熄火边界均有一定程度的改善。但由于只有小部分燃油经过放电区域限制了其助燃作用,且滑动弧放电同时受到头部两级反向旋流相互叠加的影响,导致其放电对环境的适应性较弱。

本文在原有方案基础上,通过改变滑动弧放电的位置,研制了一种新型基于滑动弧放电等离子体激励的点火助燃装置,即滑动弧放电等离子体值班火焰头部(以下简称值班火焰头部),并开展了值班火焰头部放电特性的实验研究,通过分析不同空气流量和输入电压对放电电弧动态特性、滑动模式、平均击穿电压、平均功率和平均旋转角速度的影响,进一步掌握新型滑动弧放电等离子体值班火焰头部放电规律,以更好地发挥值班火焰头部的辅助燃烧性能。

1 实验系统及实验工况

1.1 实验系统

值班火焰头部放电特性的实验系统示意图如图1所示,实验装置主要包括值班火焰头部、滑动弧电源、示波器、电压探针、电流探针以及高速相机等。实验采用南京苏曼公司生产的中频单高压等离子体电源(CPT-2000K)驱动值班火焰头部进行放电,该电源频率为5~25 kHz,最大峰值电压为30 kV,最大输出功率为500 W。以空压机和高压储气罐为气源,使用气体流量计调控入口空气流量。其放电过程中的电压和电流分别用电压、电流探针进行测量,由示波器进行采样,放电过程中的电弧形态由示波

器触发高速相机进行拍摄(拍摄频率 10 000 Hz,曝光时间 62.5 μs)。

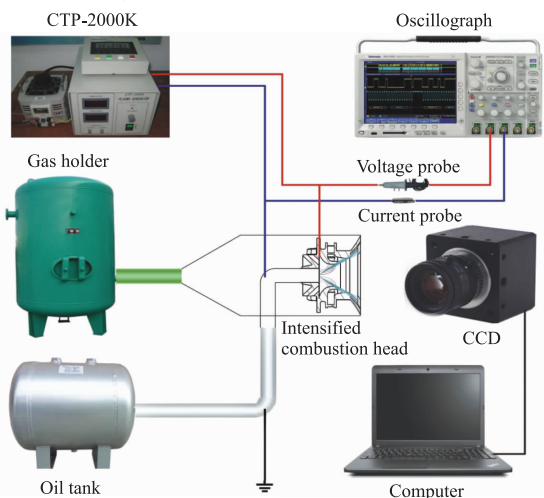


图 1 实验系统示意图

1.2 新型滑动弧等离子体值班火焰头部

滑动弧等离子体值班火焰头部主要由文氏管、旋流器、燃油喷嘴以及喇叭口等组成,高压电极布置在文氏管内弧面处,燃油喷嘴共地,放电原理示意图如图 2(a)所示,本文中定义为方案 1。空气通过一级旋流器在喷嘴与文氏管间形成旋流,当施加高压电时,在喷嘴与文氏管电极间击穿空气放电,形成初始的电弧,之后在旋流的驱动下,电弧旋转着一边拉长一边向下游运动,这样在喷嘴与文氏管之间就形成了较大范围的滑动弧中心放电区域,其放电效果如图 2(a)所示。由此充分发挥滑动弧等离子体辅助燃烧的化学动力学效应和裂解效应的优势,一方面,将对燃料空气混合气进行滑动弧放电,形成大量活性粒子,加快燃烧反应速率;另一方面将大碳链的燃料断碳链裂解为小碳链的气态烷烃类燃料,降低燃烧反应活化能、改善燃油喷雾品质,强化与空气的混合。图 3 为滑动弧等离子体值班火焰头部的实物图。

方案 1 较原有方案(以下简称方案 2)的放电区域有明显不同,前者利用一级旋流空气驱动,在喷嘴与文氏管之间形成中心滑动弧放电,而后者则是利用一级、二级(旋向相反)混合后旋流空气驱动,在文氏管与喇叭口之间形成环形滑动弧放电,此时文氏管接高压极,而喇叭口接地,放电原理示意图及放电效果如图 2(b)所示。

以上两种方案均可完全匹配替换原装的燃烧室头部,不改变原有燃烧室的结构特征,但方案 2 中,滑动弧放电同时受到燃烧室头部两级异向旋流的影响,导致其放电区域受流场影响较大,电弧的运动稳定性较差,适应不同来流条件的能力弱。而方案 1 中,滑动弧放电仅受一级强旋流的驱动,使得放电稳

定性较好,对放电电源参数要求较低,适应来流条件范围广。从放电区域与喷雾结合的角度看,方案 2 中滑动弧放电区域位于文氏管和喇叭口之间,只有在燃油雾化锥角较大的条件下,才能保证有一定的燃油经过。而方案 1 的放电区域位于文氏管与燃油喷嘴之间,有效增加了燃油经过放电区域的机率,更能发挥出滑动弧放电对燃料的裂解作用。

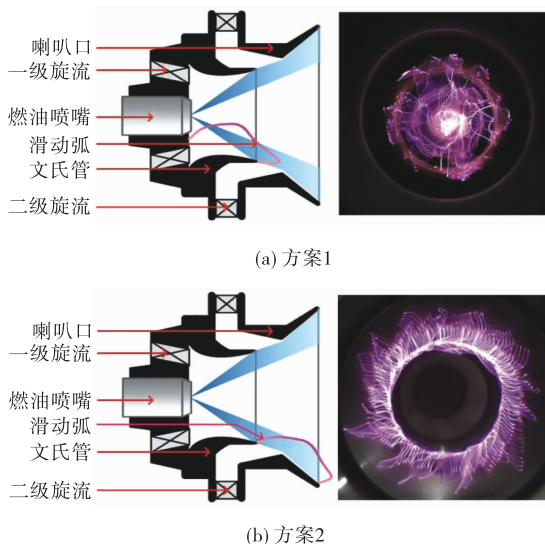


图 2 两种头部的结构与放电效果



图 3 值班火焰头部实物图

1.3 实验工况

为研究不同空气流量和输入电压对值班火焰头部放电特性的影响,参考燃烧室头部的实际使用工况,设置了 7 种不同的入口空气流量($W_a = 200 \sim 500$ L/min),和 6 种不同的输入电压($U_0 = 140 \sim 240$ V),开展放电特性实验,具体实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况表

输入电压/V	入口空气流量/(L/min)						
	流量 1	流量 2	流量 3	流量 4	流量 5	流量 6	流量 7
140	200	250	300	350	400	450	500
160	200	250	300	350	400	450	500
180	200	250	300	350	400	450	500
200	200	250	300	350	400	450	500
220	200	250	300	350	400	450	500
240	200	250	300	350	400	450	500

2 实验结果与分析

2.1 值班火焰头部放电电弧动态特性

当空气流量为 450 L/min, 电源输入电压为 240 V 时(输入电压指调压器输出供给等离子体电源的电压, 用 U_0 表示), 值班火焰头部的放电电压(加载在滑动弧放电电极两端的电压, 也是通过示波器测量得到的电压, 不同于前文所述的输入电压)和电流波形如图 4 所示。

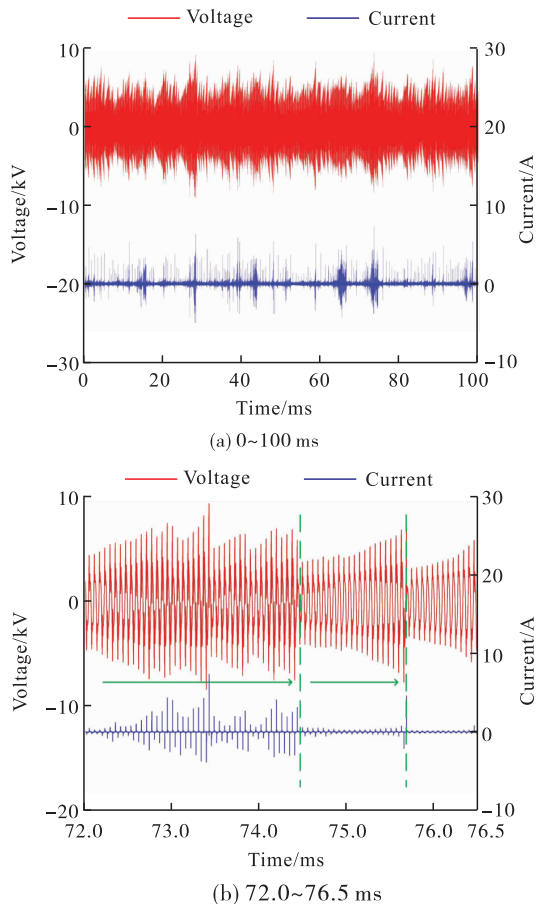


图 4 电压电流波形图($U_0 = 240$ V; $W_a = 450$ L/min)

图 4(a) 为第 0~100 ms 的测量结果, 由图可见, 该工况下滑动弧放电电压峰值约为 9 kV, 电流峰值约为 7 A。从电流波形中发现有绝对值较大的脉冲峰值, 且分布密集, 而在某些较小时间范围内电流波形较为平稳, 几乎没有出现脉冲峰值。为详细分析这两种典型的电压电流特征, 取图(a)中的第 72~76.5 ms 进行观察, 如图(b)所示, 电压电流波形表现出有两种截然不同的特征, 在第 72.6~74.5 ms 间, 电压峰值在不断波动, 电流有明显的正负向峰值; 而在第 74.5~75.7 ms 内, 放电电压幅值随时间逐渐增大, 电流较为稳定, 无明显正负向峰值。

图 5 为一组值班火焰头部在该工况下的高速 CCD 照片(拍摄频率为 10 kHz, 曝光时间 62.5 μ s),

对应图 4(b)中第 72.5~75.7 ms 的波形, 完整的展现了电弧击穿、滑动、发展最后熄灭的过程。图中红色虚线内圈代表阴极喷嘴, 红色实线外圈代表阳极文氏管。从图中可知, 放电电弧整体呈螺旋状, 电弧两端沿着阴极喷嘴和阳极文氏管进行逆时针滑动, 电弧在阴极喷嘴端滑动速度较快, 在阳极文氏管端滑动速度略微滞后, 因此放电电弧并不是由中心向外呈放射状, 而是蜿蜒曲折带有一定旋向。图中第 72.6 ms 为滑动弧的起弧阶段, 此时电弧开始出现并随着时间的发展沿逆时针开始滑动; 电弧在第 72.6~74.5 ms 这一阶段为一种类型的宏观滑动模式, 当两电极之间电压达到击穿电压时, 在阴极最先发生击穿并形成电弧通道, 电弧长度较短且弧线上褶皱较多, 尤其是起弧处呈现明亮的蓝白色; 电弧在第 74.5~75.7 ms 为另外一种宏观滑动模式, 电弧在旋转气流的作用下在两电极之间滑动, 该过程中电弧呈暗紫色, 长度较长且更为蜿蜒, 值得注意的是, 电弧沿空气旋流方向弯曲。电弧在运动过程中逐渐被拉长, 电弧消耗的功率随之增大, 当电源不能继续维持电弧消耗的功率, 电弧弧长达到极值后熄灭; 电弧在第 75.7 ms 进入下一个放电周期, 两极间再次击穿形成电弧, 其发展过程与上述相同, 周而复始, 形成连续的旋转滑动弧。

为更加直观的描述电弧发展过程, 取上述工况下第 72.6、73、73.5、74、74.5、75、75.5、75.7 ms 的共 8 张 CCD 照片, 在同一坐标系下进行叠加, 得到如图 6(a)所示的一组放电电弧运动轨迹图, 图 6(b)为方案 2 的一组电弧运动轨迹图^[25]。由图可见电弧在一级旋流的作用下, 沿逆时针呈螺旋状在燃油喷嘴与文氏管之间滑动, 弧根在阴极喷嘴端旋转速度较快, 同时弧梢在阳极文氏管旋转, 但速度略微滞后, 电弧阳极端点运动轨迹如图中黄色虚线所示, 由文氏管内侧逐步滑动到外侧, 滑动过程中电弧长度逐渐增大, 但亮度由明亮转暗淡, 蜿蜒更加明显, 电弧在长度达到极大值后熄灭。

2.2 值班火焰头部放电电弧滑动模式

2.2.1 击穿伴随滑动模式(B-G mode)

图 7(a)是图 4(b)中第 73.5~74.5 ms 电压电流波形的放大图, 从图中可见, 滑动弧放电过程中伴随着电压电流的单向击穿, 单个电源放电周期约为 60 μ s。对图中绿色虚线范围内的一个电源放电周期 T (第 74.11~74.17 ms) 进行分析, 在第 74.11 ms 出现第一次击穿, 击穿瞬间电压急剧减小趋于零, 电流同时产生一个极大的脉冲峰值, 由图 5 可知, 此时放电电极间开始出现电弧, 电弧在旋转气流的作用下在两极间滑动且长度逐渐增加, 电弧消耗

的功率及气流与电弧之间的换热同时增加,当电源功率即将不能维持电弧消耗的功率时,该电弧的长度、两端电压同时达到最大值^[26-27];第 74.14 ms 为前一个电弧即将消失而下一个新的电弧即将产生的临界时刻,此时电压电流波形发生了同样的明显变化,电压幅值急剧减少趋于零,电流产生一个极大的

脉冲峰值;在第 74.17 ms 进入下一个电源放电周期,其放电过程与上一个周期一致。滑动弧放电过程中伴随着电流电压单向击穿^[28-29],电弧长度随着击穿电压的增大而增加,电流有较明显的脉冲信号,将这一电弧滑动模式定义为伴随击穿滑动模式 (breakdown gliding mode, B-G)^[28]。

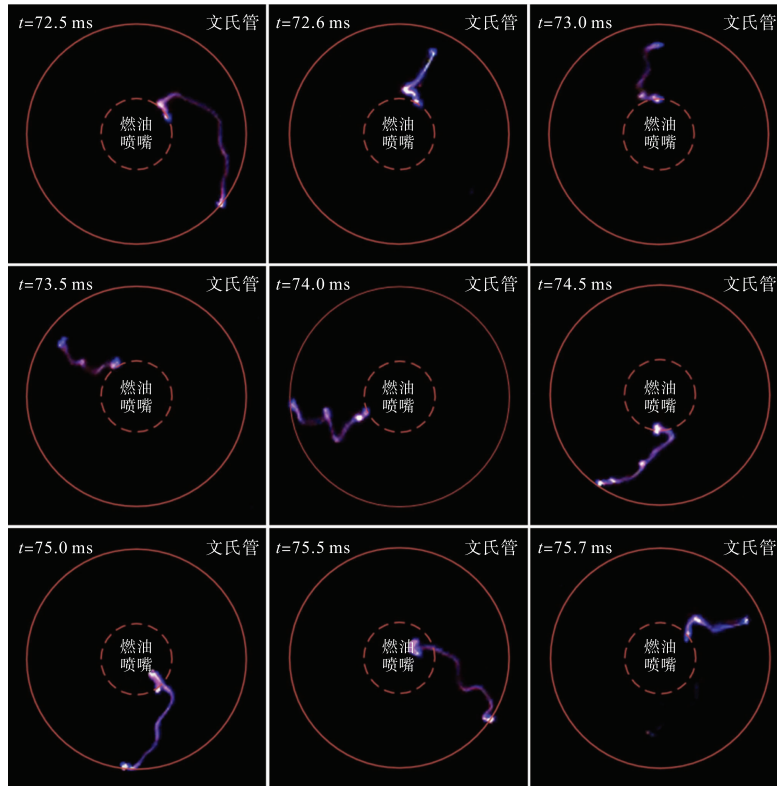


图 5 值班火焰头部放电电弧在某一周期内的 CCD 照片

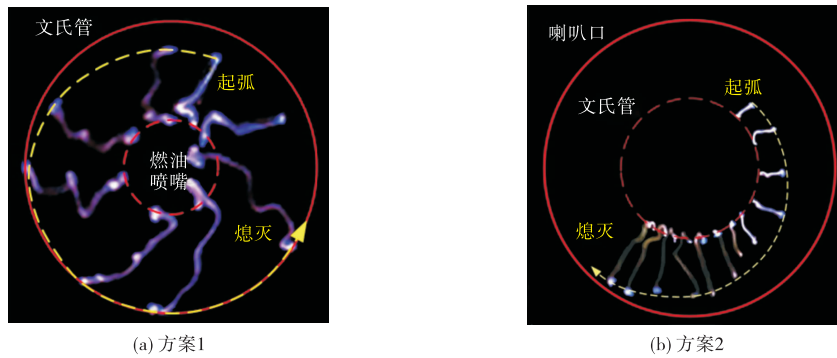


图 6 值班火焰头部放电电弧某一周期内的运动轨迹图

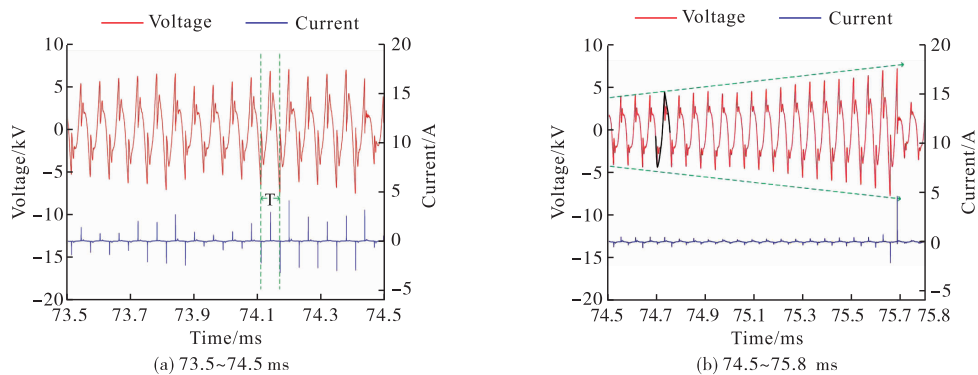


图 7 电压电流波形放大图($U_0 = 240 \text{ V}$; $W_a = 450 \text{ L/min}$)

2.2.2 稳定电弧滑动模式(A-G mode)

图 7(b)为图 4(b)中 74.5~75.8 ms 时间段的电压电流波形放大图,可以明显看出在第 74.5~75.7 ms 之间电压波形类似于幅值逐渐增大的正弦波,电流波形接近于一条直线,无明显脉冲峰值,结合图 5 可知,该阶段电弧长度与放电电压峰值大小同步发展,电弧长度达到最大时,电压幅值亦达到最大约为 7 kV。与 B-G 模式相比,每个电源放电周期中同样存在两次电压幅值达到最大又急剧减小的时刻,但此时电流波形较为平稳,未出现明显的脉冲峰值。第 75.7 ms 处为电弧熄灭新电弧即将产生的临界时刻,此时电压电流波形出现短暂的急剧变化,之后滑动弧放电再次趋于稳定。综上可知,在该模式下的电弧滑动过程中,电流的击穿信号仅仅出现在电弧产生或熄灭的临界时刻,在稳定滑动阶段则始终趋近于零。该电弧滑动模式定义为稳定电弧滑动模式(steady arc gliding mode, A-G)。

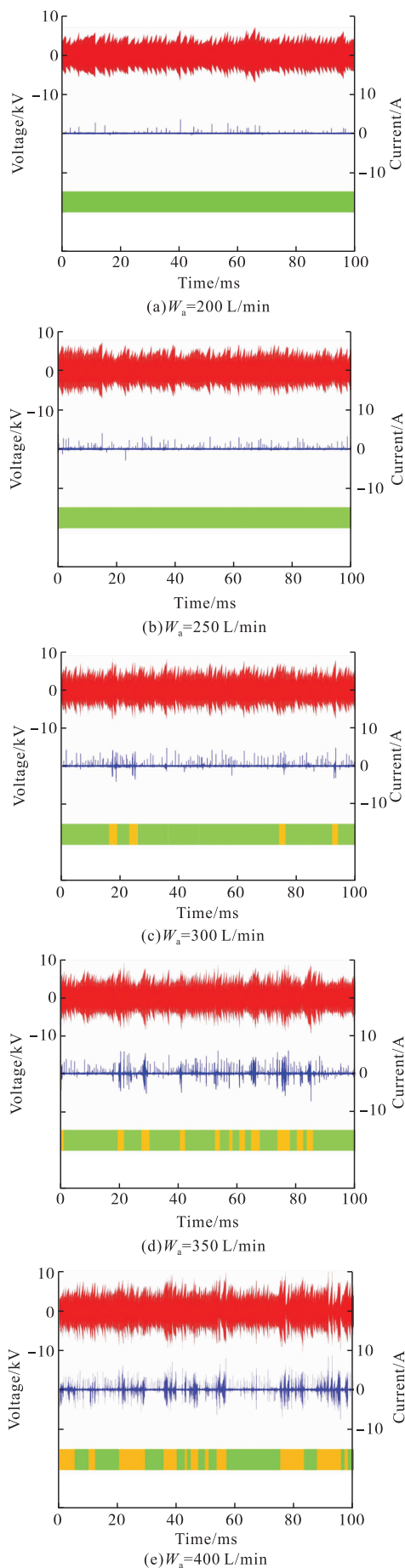
由上述分析可知,值班火焰头部在放电过程中存在两种明显不同的放电模式,分别为伴随击穿滑动模式(B-G)和稳定电弧滑动模式(A-G),这两种放电模式的电流电压波形存在明显差异。在 B-G 模式下,滑动弧放电过程中伴随有单向击穿,电压电流波形呈现出正负向交替峰值;而在 A-G 模式下,除在滑动弧产生的初始阶段或两个相邻滑动弧周期的临界时刻发生单向击穿外,电弧相对稳定且不再发生击穿现象。其主要原因在于 A-G 模式下滑动弧随着旋转气流运动,电弧形态逐渐变得蜿蜒且长度逐渐增大,两极间不再发生击穿,电压的幅值随时间推进逐渐增加,而电流波形则相对稳定。

2.3 不同参数对电弧滑动模式的影响

为研究不同空气流量对值班火焰头部放电特性的影响,根据 A-G 和 B-G 模式电压电流特征,讨论输入电压为 180 V 时,7 种不同空气流量对放电电压、电流的影响规律,如图 8 所示。图中 A-G 和 B-G 模式所占总时间分布用不同颜色的阴影加以区分。

当空气流量增加时,值班火焰头部的放电电压和电流幅值逐渐升高,且电流的脉冲峰值朝更密集的趋势发展。在空气流量为 200 L/min 时,电压幅值约为 5 kV,电流幅值约为 2.5 A,此时电流脉冲峰值密集程度最小;随着空气流量的升高,放电电压和电流幅值逐渐增加,电流脉冲峰值密集程度增加;当空气流量提高至 500 L/min 时,放电电压幅值达到 10 kV,电流幅值达到 6 A,此时电流的脉冲峰值最为密集。从两种放电模式的占比变化趋势来看,随着空气流量的增加,滑动弧从相对稳定 A-G 模式逐渐向不太稳定的 B-G 模式转变。在空气流量为

200 L/min 时,几乎全部为 A-G 模式;当空气流量增加到 500 L/min 时,B-G 模式占主导地位。



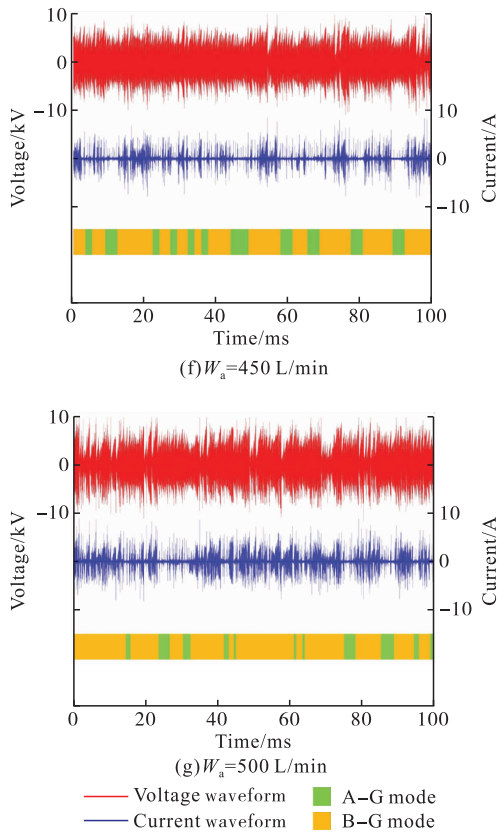


图 8 电压、电流波形和 2 种模式分布图($U_0=180$ V)

当空气流量为 400 L/min,不同输入电压条件下滑动弧放电电压、电流波形以及两种滑动模式所占总时间分布如图 9 所示。可以看出,当输入电压增加时,放电电压幅值逐渐降低,且电流的脉冲峰值疏密程度朝稀疏的趋势发展。在输入电压为 140 V 时,放电电压幅值约为 8 kV,此时电流脉冲峰值密集程度最大;随着输入电压的升高,放电电压幅值以及电流脉冲峰值密集程度逐渐降低;当输入电压升高至 240 V 时,放电电压幅值下降到 5 kV,电流的脉冲峰值密集程度最低。在输入电压为 140 V 时,几乎不存在 A-G 模式,提高输入电压后,A-G 模式的占比逐渐增加,输入电压达到 240 V 后,A-G 模式占比达到最大。

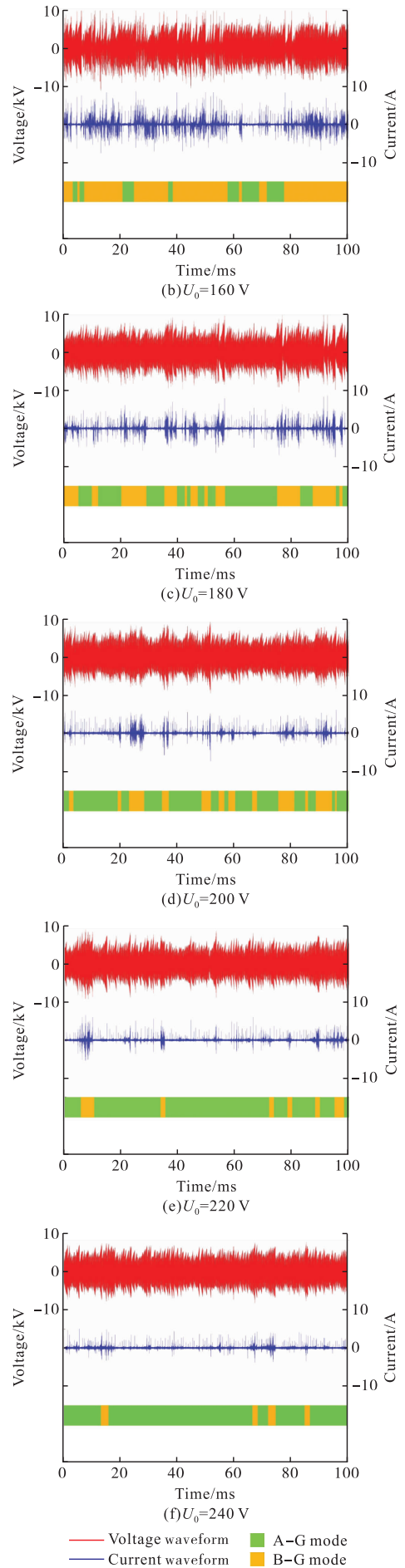


图 9 电压、电流波形和两种模式分布图($W_a=400$ L/min)

为进一步分析不同空气流量和输入电压下值班火焰头部放电过程中 A-G 与 B-G 模式的占比规律,对不同空气流量和输入电压条件下的 A-G 模式所占占比曲线进行比较,如图 10 所示。当输入电压为 140 V,随着空气流量从 200 L/min 增加到 500 L/min,滑动弧 A-G 模式占比逐渐从 100% 降低至 0。流量的增加,当输入电压为 240 V,空气流量为 200、250、300、350 L/min 时,滑动弧始终完全处于 A-G 模式。在较小的流量下,滑动弧在最小距离处击穿,形成电弧通道后,低速气流对电弧通道周围电离的电子、离子扩散作用有限,电源提供的能量大于电弧通道散失的能量,能够维持电弧的持续存在,因此电弧一直随着气流驱动的高电离度区域移动,而不被吹熄灭。只有空气流量增加到 400 L/min 才开始出现 B-G 模式,而后随着空气流量的继续增加,使得电弧的传热传质速率加快,电弧通道形成的电子和离子在高速气流作用下很快被吹至下游位置,那么原来形成电弧通道的位置不再具备电弧通道持续存在的条件,电弧被吹熄。当放电电压达到下一个交流周期的峰值时,再次发生击穿,形成电弧通道,形成了滑动弧运动过程中伴随有“击穿-熄灭-再击穿”现象,所以滑动弧中 B-G 模式的占比也不断增加。不难发现,当输入电压足够高时,放电将由 A-G 模式主导,而随着空气流量继续增加,B-G 模式占比逐渐增加,直至 A-G 模式消失。

同时可以发现,当空气流量为 200 L/min 时,放电电弧在 6 种输入电压条件下全部以 A-G 模式为主,只有空气流量超过 200 L/min 时 B-G 模式才开始出现。在空气流量为 400 L/min,输入电压从 140 V 增加至 240 V 的过程中,滑动弧中 A-G 模式占比从 13.5% 逐渐增加至 96.2%。综上所述,在同一空气流量下增大输入电压,或在同一输入电压下减小空气流量,A-G 模式占比将随之增加。

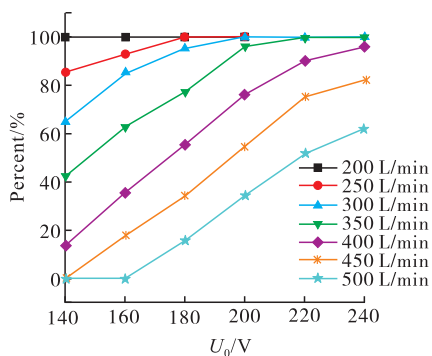


图 10 不同空气流量和输入电压条件下 A-G 模式占比

将两种头部方案的 A-G 模式占比进行对比可以发现,在空气流量为 250 L/min,输入电压从 140 V 增大到 240 V 的过程中,方案 1 中 A-G 模式占比

从 85.6% 增大到 100%,而方案 2^[25] 中 A-G 模式占比从 0% 增加到 28.4%;在输入电压为 240 V,空气流量从 250 L/min 增加到 500 L/min 的过程中,方案 1 中 A-G 模式占比从 100% 降低到 62.1%,方案 2 中 A-G 模式占比从 28.4% 降低到 0%。以上结果说明,两种方案的电弧滑动模式随空气流量、输入电压的变化规律基本一致,但总体来看,在同一工况下方案 1 更倾向于 A-G 模式,方案 2 更倾向于 B-G 模式。分析原因主要是方案 1 电弧滑动仅受一级旋流的影响,而方案 2 同时受到两级旋流互相叠加的影响,流场稳定性较差,导致放电模式更倾向于 B-G 模式。

2.4 不同参数对平均击穿电压的影响

击穿电压用于表征两极间气体击穿后导电能力的大小。为研究值班火焰头部放电时空气击穿形成电弧的平均电压,根据实验结果,绘制不同空气流量和输入电压条件下的放电平均击穿电压如图 11 所示。结果表明,击穿电压同时受到输入电压和空气流量的影响。

当空气流量增加时,击穿电压相应增加。在输入电压为 140 V,空气流量为 200 L/min 时,由图 11 知此时 A-G 模式占主导地位,放电过程中仅在滑动弧产生的初始阶段或相邻两个滑动弧周期的临界时刻发生单向击穿,其他时间内电流没有脉冲峰值,电弧滑动相对稳定,电源的能量主要用于维持电弧的滑动与发展,此时击穿电压最低,为 4 345.6 V。当空气流量逐渐增加时,电弧放电模式逐渐由 A-G 模式向 B-G 模式转变,而在 B-G 模式中,滑动弧放电过程中存在大量的反复击穿且电弧持续时间较短,电流波形呈现正负向交替峰值,击穿电压和电流脉冲峰值不断增大,当空气流量为 500 L/min 时,B-G 模式占比达到最大,同时平均击穿电压达到最大为 5 328.9 V。另一方面,击穿电压随着输入电压的增加而降低。当空气流量为 450 L/min,输入电压为 140 V 时,电弧滑动模式由 B-G 模式主导,此时击穿电压为 5 186.2 V,随着输入电压的增大,A-G 模式占比逐渐增高,电弧滑动过程越发稳定,电压和电流脉冲幅值逐步降低,当输入电压升高到 240 V 时,击穿电压降低至最低为 4 547.7 V。

两种方案在击穿电压的变化规律上是一致的,在空气流量为 250 L/min,输入电压从 140 V 增大到 240 V 的过程中,方案 1 击穿电压从 4.6 kV 降低到 4.15 kV,方案 2^[25] 击穿电压从 6.7 kV 降低到 5.26 kV。但同一工况下方案 1 的击穿电压明显小于方案 2,原因在于该工况下方案 1 的 A-G 模式占比始终在 85.6% 以上,而方案 2 的 A-G 模式占比最

大为 28.4%, B-G 模式占比始终多于方案 1, 导致放电过程中存在大量反复击穿, 电流脉冲峰值明显增多, 因此击穿电压较大。

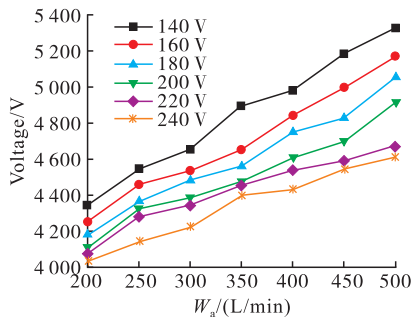


图 11 不同空气流量和输入电压条件下平均击穿电压

2.5 不同参数对平均功率的影响

放电功率表示滑动弧电源在单位时间内所释放的能量, 其大小直接影响燃料及周围空气在单位时间内所受到的裂解及电离程度, 从而影响值班火焰头部的强化燃烧效果。本文利用式(1)、(2)计算得到不同空气流量和输入电压条件下滑动弧放电平均功率如图 12 所示。

$$E = \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} U(t) I(t) dt \quad (1)$$

$$P = E / (t_{\text{end}} - t_0) \quad (2)$$

式中: E 为总能量; t_{end} 为终止时刻; t_0 为起始时刻; P 为平均功率。

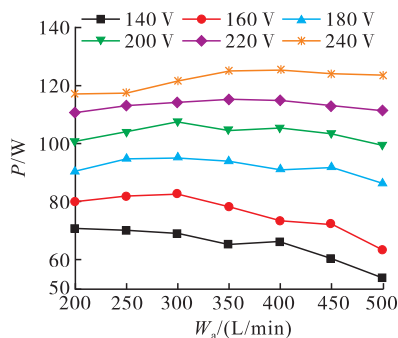


图 12 不同空气流量和输入电压条件下平均功率

结果表明, 平均功率同时受到输入电压和空气流量的影响, 其中输入电压的影响更为明显。在同一空气流量下, 输入电压的增加均导致平均功率明显增加。这是由于在同一空气流量条件下, 放电区域流场保持不变, 增大输入电压导致维持放电电弧滑动的两端电压增大, 电弧单位时间内消耗的电能增加。在空气流量为 200 L/min, 输入电压为 140 V 时, 平均功率最低为 70.8 W, 当输入电压增加至 240 V 时, 平均功率达到最大为 117.2 W。当保持输入电压, 增大空气流量时, 放电平均功率在 B-G 模式出现之前逐渐增大, 而在 B-G 模式出现后逐渐减小。在输入电压为 220 V, 空气流量从 200 L/min 增加至 350 L/min 时, 平均功率从 110.7 W 增加至

115.5 W, 当空气流量继续增加, 从 350 L/min 增加至 500 L/min 时, 平均功率从 115.5 W 减小至 111.6 W。这是因为在输入电压为 220 V, 空气流量少于 350 L/min 时电弧始终处于较为稳定的 A-G 模式, 空气流量的增加使空气旋转速度较快, 导致电弧旋转速度增大, 有利于电弧的运动与发展, 电弧拉伸长度增大, 单位时间内消耗的能量增大。但值得注意的是, 滑动弧放电的模式对功率消耗的影响也非常显著。当空气流量超过 350 L/min 并继续增大时, 电弧中 B-G 模式开始出现且占比逐渐增大, 在该模式下, 随着流量的增大, 使得电弧的传热传质速率加快, 电弧通道形成的电子和离子在高速气流作用下很快被吹至下游位置, 那么原来形成电弧通道的位置不再具备电弧通道持续存在的条件, 电弧还来不及滑动就被吹熄, 也就不需要较大的电流维持电弧的运动和发展, 因此所需功率反而降低了。所以随着流量的逐渐增大, 一方面 B-G 模式的占比逐渐提高, 而消耗的总功率随之减小。

对比方案 2 可知, 两种方案放电平均功率的变化规律有显著的差别。在输入电压为 240 V, 空气流量从 250 L/min 增加到 500 L/min 时, 方案 1 的放电功率在 B-G 模式出现前从 117.7 W 增大到 125.7 W, 在 B-G 模式出现后又减小到 123.5 W, 而方案 2^[25] 的放电功率则从 102.9 W 持续增大到 116.1 W; 在空气流量为 250 L/min, 输入电压从 140 V 增大到 240 V 的过程中, 方案 1 的放电功率从 70.2 W 增大到 117.7 W, 而方案 2 的放电功率则从 132.0 W 持续降低到 102.9 W。总体来看, 方案 1 受流量和输入电压的影响小于方案 2, 但受 A-G 模式影响较大, A-G 模式占比越大, 放电功率越高, 在越大的流量下工作, 需要输入一定较高的电压, 但不至于使其向 A-G 模式发生转变。

2.6 不同参数对电弧平均旋转角速度的影响

滑动弧放电等离子体是通过在放电过程中产生大量活性粒子, 作用于燃烧化学反应, 从而起到强化点火与辅助燃烧的作用, 同时其直接作用于煤油引起的裂解效应, 更易于煤油的点燃与稳焰。因此, 放电电弧旋转角速度的大小, 能够直接影响到单位时间内煤油与电弧的接触面积, 从而影响辅助燃烧效果。

本文利用 CCD 软件处理并计算放电电弧的平均旋转角速度, 根据值班火焰头部的放电形态, 定义旋转角速度 ω 为电弧在平面 $x-y$ 上的旋转角速度, 计算示意图如图 13 所示。图中点 P_1 和 Q_1 、点 P_2 和点 Q_2 分别为电弧在文氏管和喷嘴上的两个端点。 t 时刻, 电弧位于 P_1 和 Q_1 之间; $t + \Delta t$ 时刻电弧运动到 P_2 和 Q_2 之间, 电弧映射到平面 $x-y$ 上划过的角度为

$\Delta\theta$, 故电弧平均旋转角速度 $\Delta\omega$ 可由下式计算。

$$\Delta\omega = \Delta\theta / \Delta t \quad (1)$$

式中: $\Delta\omega$ 为平均旋转角速度; $\Delta\theta$ 为旋转角度; Δt 为所用时间。

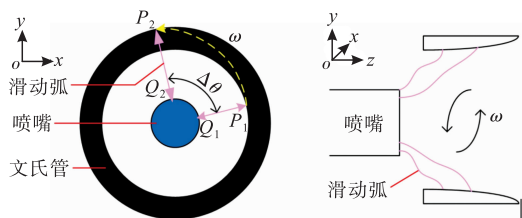


图 13 平均旋转角速度计算示意图

图 14 为值班火焰头部放电电弧平均旋转角速度与空气流量和输入电压的关系图。在空气流量相同, 气流旋转速度相同的情况下, 随着两级间输入电压的不断升高, 滑动弧的旋转角速度-逐渐降低。在空气流量为 500 L/min, 输入电压为 140 V 的工况下, 滑动弧的平均旋转角速度 ω 是 2.59 rad/ms, 由图 10、12 可知, 此时滑动弧放电完全处于 B-G 模式, 且放电平均功率最小 ($P=53.9$ W)。随着输入电压不断增大, 电弧滑动模式中 A-G 模式占比逐渐增加, 放电平均功率逐渐增加, 两电极间空气的电离程度加深, 因此旋转气流对电弧旋转角速度影响减弱, 进而导致电弧旋转角速度逐渐降低, 当输入电压增加至 240 V, 放电中 A-G 模式占比最大, 放电平均功率达到最大 ($P=123.5$ W), 旋转角速度降至最小为 2.24 rad/ms。

相较于输入电压, 空气流量的大小对电弧旋转角速度的影响更为显著。在输入电压相同的情况下, 随着空气流量的增加, 气流旋转速度增加, 电弧旋转角速度明显增加。当输入电压为 200 V, 空气流量为 200 L/min 时, 由图 10、12 可知, 此时电弧滑动模式为 A-G 模式, 放电平均功率为 100.9 W, 电弧旋转角速度为 0.97 rad/ms; 在空气流量逐渐增大至 500 L/min, 放电平均功率从 100.9 W 增大至 107.8 W, 再降低至 99.7 W, 但旋转角速度持续增大至 2.33 rad/ms。

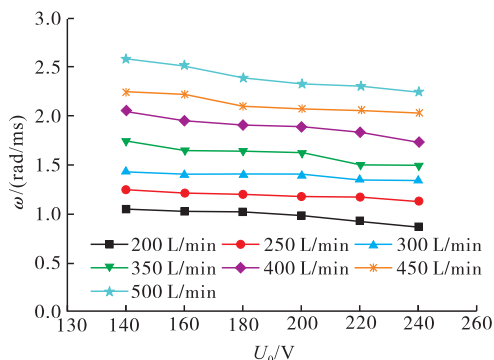


图 14 不同空气流量和输入电压条件下平均旋转角速度

3 结论

本文在当前航空发动机燃烧室辅助燃烧头部的研究基础上, 创新地研制了新型基于滑动弧放电等离子体激励的燃烧室点火助燃的值班火焰头部, 即值班火焰头部, 并针对其放电特性开展了实验研究, 着重分析了不同输入电压和空气流量对其放电电弧动态特性、滑动模式、平均击穿电压、平均功率和电弧平均旋转角速度的影响, 得到结论如下:

1) 值班火焰头部工作时, 在文氏管与喷嘴之间形成稳定的旋转滑动弧放电区域, 放电过程中存在 A-G 模式和 B-G 模式, 且受到空气流量和输入电压的显著影响。A-G 模式仅在放电初始阶段有明显击穿, 稳定滑动阶段不再出现击穿; 而 B-G 模式在放电过程中始终伴有大量的单向击穿。当空气流量足够小 (200 L/min 以下) 时, 在 140~240 V 的输入电压下滑动弧始终处于 A-G 模式; 在同一空气流量条件下增大输入电压, 或者在同一输入电压条件下减小空气流量, A-G 模式占比将随之增加。

2) 滑动弧放电过程中电弧平均击穿电压和平均旋转角速度同时受到空气流量和输入电压的影响。在输入电压一定时空气流量增加或在空气流量一定时输入电压减小, A-G 模式占比减少, 放电平均击穿电压和平均旋转角速度都会随之增大。

3) 同一空气流量下, 放电平均功率随着输入电压的增大而增大; 但当输入电压一定时, 随着空气流量的增大, 滑动模式由 A-G 向 B-G 转变, 平均功率呈现先增大后减小的趋势, 并在两种模式的过渡态附近达到极大值。当输入电压为 220 V, 空气流量从 200 增加至 500 L/min 的过程中, 平均功率在 350 L/min 即 B-G 模式即将出现时达到最大。

参考文献

- [1] LIEUWEN T, YANG V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines[M]. [S. l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [2] ECKSTEIN J, FREITAG E, HIRSCH C, et al. Experimental Study on the Role of Entropy Waves in Low-Frequency Oscillations in a RQL Combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(2): 264-270.
- [3] 吴云柯, 杨谦, 王慧汝, 等. 低温等离子体助燃技术及其在燃烧室中的应用[J]. 航空动力, 2020(3): 62-65.
- [4] 李平, 穆海宝, 喻琳, 等. 低温等离子体辅助燃烧的研究进展、关键问题及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 2073-2083.

- [5] 何立明,刘兴建,赵兵兵,等. 等离子体强化燃烧的目前研究进展[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1537-1551.
- [6] JU Y, SUN W. Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015(48): 21-83.
- [7] CRINER K, CESSOU A, LOUICHE J, et al. Stabilization of Turbulent Lifted Jet-Flames Assisted by Pulsed High Voltage Discharge[J]. Combustion and Flame, 2006, 144(1/2): 422-425.
- [8] SUN W, UDDI M, OMBRELLO T, et al. Effects of Non-Equilibrium Plasma Discharge on Counterflow Diffusion Flame Extinction[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 3211-3218.
- [9] KLIMOV A, BITIURIN V, MORALEV I, et al. Non-Premixed Plasma Assisted Combustion of Hydrocarbon Fuel in High-speed Airflow[C]//43th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2006.
- [10] KIM W, DO H, MUNGAL M G, et al. Flame Stabilization Enhancement and NO_x Production Using Ultra Short Repetitively Pulsed Plasma Discharges[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2006: 560.
- [11] CZERNICHOWSKI A. Gliding Arc: Applications to Engineering and Environment Control[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(6): 1301-1310.
- [12] LESUEUR H, CZERNICHOWSKI A. Device for Generating Low-Temperature Plasmas by Formation of Sliding Electric Discharge: FR2639172[P]. 1990-05-18.
- [13] 邵涛,章程,王瑞雪,等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705.
- [14] ZHU J, SUN Z, LI Z, et al. Dynamics, OH Distributions and UV Emission of a Gliding Arc at Various Flow-rates Investigated by Optical Measurements[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(29): 3727-3738.
- [15] STARIKOVSKIY A, ALEKSANDROV N. Plasma-assisted Ignition and Combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 61-110.
- [16] DIATCZYK J, PAWLAT J, STRYCZEWSKA H. Diagnostic of Temperature Distribution in the Chamber of GA Plasma Reactor[J]. Journal of Ecological Engineering, 2016, 17(5): 79-83.
- [17] KONG C, GAO J, ZHU J, et al. Characteristics of a Gliding Arc Discharge Under the Influence of a Laminar Premixed Flame[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 403-409.
- [18] GAO J, KONG C, ZHU J, et al. Visualization of Instantaneous Structure and Dynamics of Large-scale Turbulent Flames Stabilized by a Gliding Arc Discharge[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 5629-5636.
- [19] SUN J, TANG Y, LI S. Plasma-assisted Stabilization of Premixed Swirl Flames by Gliding Arc Discharges[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2020, 38(4): 6733-6741.
- [20] CUI W, REN Y, LI S. Stabilization of Premixed Swirl Flames Under Flow Pulsations Using Microsecond Pulsed Plasmas[J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(1): 190-200.
- [21] HE L, CHEN Y, DENG J, et al. Experimental Study of Rotating Gliding Arc Discharge Plasma-assisted Combustion in an Aero-engine Combustion Chamber[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(2): 337-346.
- [22] 费力,张磊,何立明,等. 环境压力对滑动弧放电等离子体助燃激励器特性的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 127-134.
- [23] 何立明,陈一,费力,等. 航空发动机燃烧室的旋转滑动弧等离子体燃油裂解头部: CN108180075B[P]. 2019-07-05.
- [24] 胡长淮,何立明,陈一,等. 燃烧室头部激励的等离子体强化燃烧特性实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(12): 2762-2771.
- [25] HU C, HE L, CHEN Y, et al. Electrical and Optical Characterizations of a Rotating Gliding Arc Plasma-enhanced Combustion Dome in an Aero-engine Combustor[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(20): 205202.
- [26] 陆胜勇,孙晓明,杜长明,等. 基于 Laval 喷管的滑动电弧放电等离子体发生器及其工作特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1059-1064.
- [27] 杜长明,乔良,王静,等. 新型滑动弧放电等离子体的特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 1016-1020.
- [28] 何立明,陈一,刘兴建,等. 大气压交流滑动弧的放电特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1921-1928.
- [29] 何立明,雷健平,陈一,等. 大气压交流旋转滑动弧的放电特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3061-3069.

(编辑:姚树峰)