

# 低功率非冷却等离子体炬试验研究

王 飞, 韩先伟, 张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了一款新型等离子体炬的结构设计和试验研究情况。在地面试验条件下, 低功率非冷却直流等离子体炬能够可靠启动并长时间稳定运行, 并在多种燃油、燃气燃烧器中实现可靠点火。试验发现: 电流大小和工质气体成分对等离子体炬的电极使用寿命和运行稳定性影响明显。

**关键词:** 等离子体; 等离子体炬; 点火

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2016) 01-0033-04

## Experimental studies of low-power uncooled plasma torch

WANG Fei, HAN Xianwei, ZHANG Mengzheng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The structural design of a novel plasma torch and its experimental investigation status are introduced. The low-power uncooled plasma torch can start reliably, work with excellent stability for a long time under the condition of ground test, and realize reliable ignition in various gas and oil burners. The investigation result indicates that electric current and gas-flow components can affect service life of the electrode and stability of the plasma torch obviously.

**Keywords:** plasma; plasma torch; ignition

## 0 引言

近几十年, 等离子体炬作为点火和辅助燃烧设备, 在喷射引擎燃烧室、工业锅炉、焚烧裂解炉中获得了广泛应用。美国空军实验室和 NASA 对高马赫数来流条件下的等离子体点火和辅助燃烧问题进行了大量研究<sup>[1-7]</sup>。海军新型“福特”级

核动力航母配备了等离子体废弃物处理系统<sup>[8]</sup>, Westinghous 和 Geoplasma 已经将等离子体强化炉用于废弃物处理和发电。俄罗斯 RD-161 液氧煤油发动机采用高频高压交流放电产生氧气等离子体实现了多次启动。俄罗斯科学院在古西诺杰尔斯基电厂建立了 TNE-2215 型锅炉等离子体点火系统。目前, 大型等离子体炬的应用和推广在国

收稿日期: 2015-06-23; 修回日期: 2015-08-21

基金项目: 航天支撑技术项目(617010602)

作者简介: 王飞 (1981—), 男, 高级工程师 (硕士), 研究领域为等离子体点火技术和电弧推进技术

内也得到迅速发展,如煤电点火、垃圾处理、燃料重整方面的应用。小型低功率非冷却等离子体炬虽有部分院校在研究,却得不到推广应用,主要原因是电路复杂、电极使用周期短、技术成熟度一般、成本高<sup>[9]</sup>。

此低功率非冷却等离子体炬具有体积小重量轻、点火能力强、安全可靠、可重复使用等优点,相对于目前常规的点火装置,如电蚀电嘴、火花塞、化学点火剂等,有较强的点火能力。就航空飞行器动力系统燃烧室而言,此类等离子体炬不失为一个很好的点火装置。

本文介绍了一款低功率非冷却等离子体炬的结构设计和其试验运行情况。

## 1 等离子体炬的组成及电源

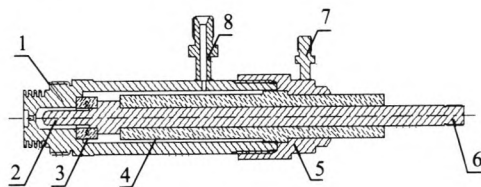
### 1.1 等离子体炬结构

等离子体炬结构如图 1 所示。阳极内侧和阴极前端构成放电室,阳极喷口无喇叭扩张段,由喉部小孔直接转为大孔,阴极前端为球形,涡流器采用 4 个切向孔实现气旋,绝缘体将阴极和阳极隔离,壳体接地。

### 1.2 电源

电源内部主要组件如图 2 所示,低压模块为等离子体炬运行提供恒定电流,高压模块用于启动瞬间产生触发脉冲。高压硅堆用于隔离高压脉冲,阻止等离子体炬启动瞬间高压模块产生的高压脉冲沿电缆传递到低压模块,保护低压模块。

高压继电器用于续流,在等离子体炬启动后闭合,电流绕过高压硅堆,通过高压继电器形成回路。电流表和电压表用于显示等离子体炬运行时的电流和电压。此电源具有启动可靠性高,运行稳定性优,电磁兼容性好的优点。



1-阳极; 2-阴极; 3-涡流器; 4-绝缘体; 5-螺帽;  
6-阴极接线柱; 7-地线; 8-气体入口

图 1 等离子体炬结构示意图

Fig. 1 Structure of plasma torch

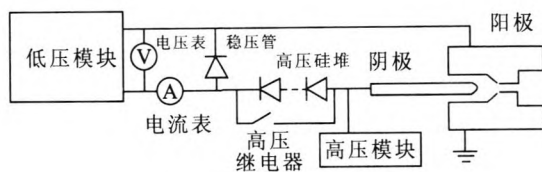


图 2 电源结构原理图

Fig. 2 Structure diagram of power supply

## 2 试验及数据处理

### 2.1 等离子体炬试验

试验原理如图 3 所示。主要由等离子体炬、气瓶、减压器、管路、电源及辅助设备组成。

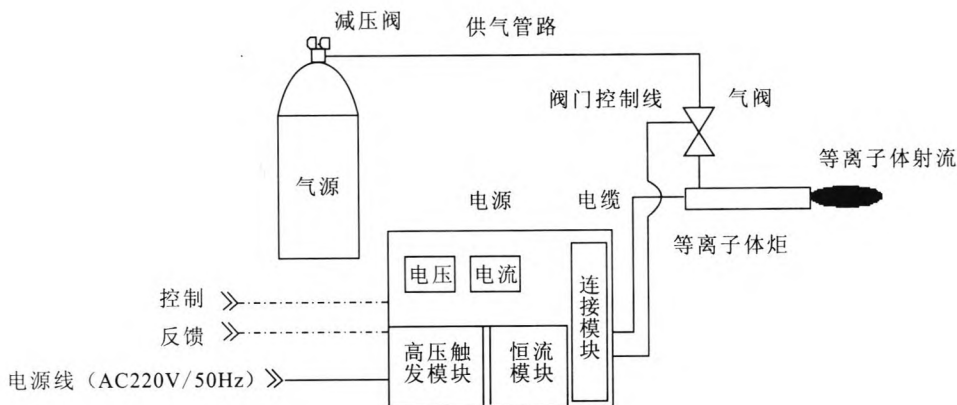


图 3 低功率非冷却等离子体炬试验系统原理图

Fig. 3 Diagram for testing system of low-power uncooled plasma torch

气瓶为等离子体炬提供工质气体, 减压阀将气体压力降低至 6 atm。电源为等离子体炬的运行提供高压触发脉冲和恒定电流, 并且可以实时显示输出电压和电流。启动等离子体炬前, 提前 1 s 通入工质气体; 等离子体炬工作结束后, 继续通入工质气体 10 s, 以便冷却电极。等离子体炬运行期间, 记录电源的输出电压和电流, 对等离子体射流进行录像。

## 2.2 试验结果分析

分别采用氩气、氮气和空气作为工作气体, 进行了大量可靠性考核试验, 等离子体炬均可启动, 并持续稳定运行。图 4 显示的是等离子体炬工作时产生的等离子体射流 (为了避免强光影响拍摄效果, CCD 相机镜头前加了一片蓝色太阳镜镜片)。

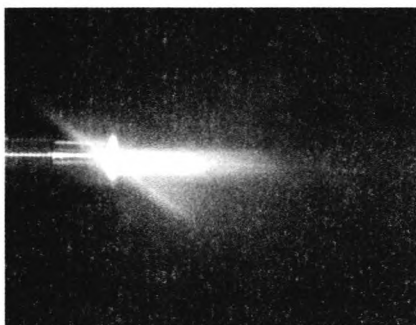


图 4 等离子体射流图

Fig. 4 Photo of plasma jet

图片显示, 等离子体射流根部呈现耀眼的白光, 外围呈淡黄色。采用不同的工作气体、调整电流大小, 等离子体射流的颜色和长短会有一定的改变。

在设定电流为 9 A 和 12 A 时, 分别以氩气、氮气和空气作为工作介质, 单次运行 5 s, 各重复 10 次, 等离子体炬运行电压和电流如图 5 所示。在相同工作电流情况下, 使用氩气时, 等离子体炬工作电压远低于氮气和空气, 氮气运行电压稍低于空气。

等离子体炬具有负阻特性, 电阻随电流的增大而减小。图 6 为氮气工作介质情况下, 等离子体炬运行电压随电流的变化趋势。电流较小时,

电阻随电流的增加而迅速减小, 电流越大, 电阻随电流增大而减小的变化趋势减弱。电流增大时, 等离子体射流的亮度明显增加, 不同工质, 等离子体射流的亮度也有所不同, 空气的亮度稍高于氮气, 氩气的亮度最弱。这一现象和等离子体的运行功率一致, 电流 9 A, 空气、氮气和氩气的功率分别为 1.55 kW, 1.51 kW 和 0.81 kW; 电流 12 A, 空气、氮气和氩气的功率分别为 1.86 kW, 1.82 kW 和 0.91 kW。不同工质和不同电流条件下的等离子体射流如图 7 所示。使用氩气可以获得更好的启动可靠性和更长的电极使用寿命, 相同电流条件下, 运行电压远低于氮气和空气。增大等离子体炬运行功率, 可以扩大等离子体射流尺度, 提高点火能力。

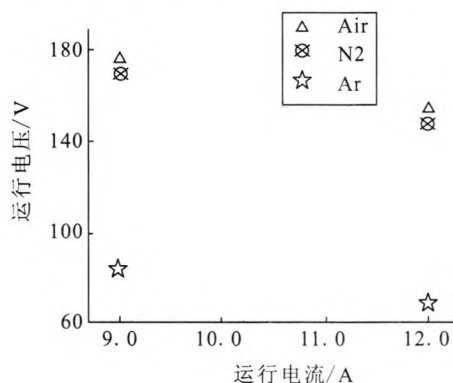


图 5 不同工质的运行电压(电流为 9 A 和 12 A 时)

Fig. 5 Running voltages with different working mediums (current 9 A and 12 A)

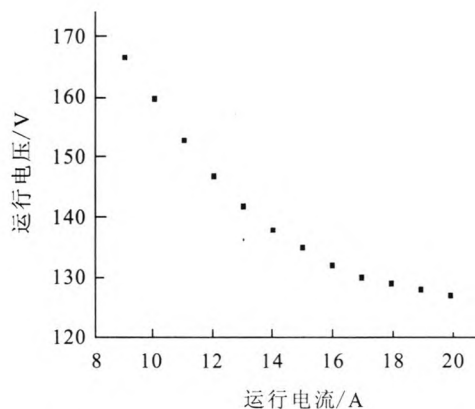


图 6 不同电流情况下运行电压(工质为氮气)

Fig. 6 Running voltages at different current (working medium is nitrogen)

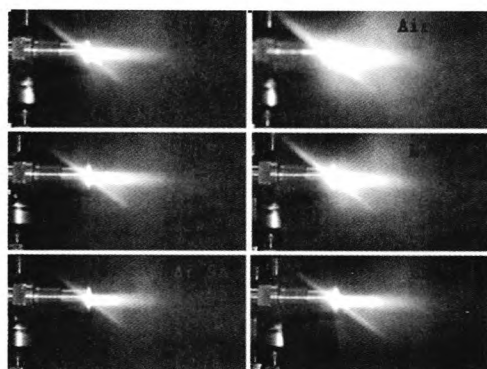


图7 不同工况等离子体射流图

Fig. 7 Photo of plasma jet under different working conditions

等离子体炬在运行过程中, 阴极是烧蚀最严重的部位。图8显示的是直径为4 mm和9 mm的阴极前端(运行电流为15 A, 工作时间分别为10 min和15 min)。阴极前端有明显烧蚀, 随着时间的增长, 阴极前端的烧蚀面积和深度明显增加。相同工作时间, 直径为9 mm的阴极比直径为5 mm的阴极烧蚀变形小很多, 直径为9 mm的阴极表面只有少许黑褐色痕迹, 而直径为4 mm的阴极表面颜色更深。增加阴极直径可以提高阴极抗烧蚀能力, 可能由于增加直径, 提高了阴极前端散热效果。

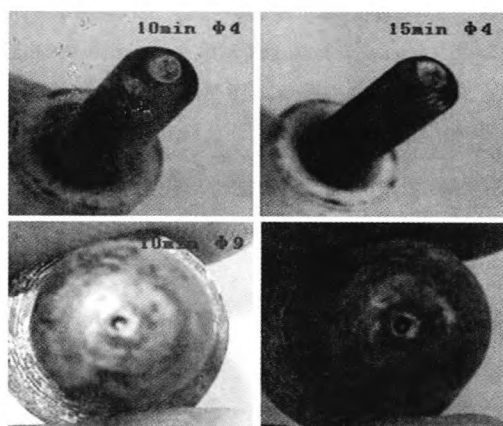


图8 阴极前端烧蚀图片

(直径为 $\varphi 4$ 和 $\varphi 9$ , 工作时间为10 min和15 min)

Fig. 8 Ablation of  $\varphi 4$  mm and  $\varphi 9$  mm cathode front-ends after working in 10 min and 15 min

### 3 结论

低功率非冷却等离子体炬启动可靠, 运行稳定。通过改变工质气体、调整工作电流及调整电极结构进行试验研究, 获得以下结论:

1) 和氮气、空气相比, 氩气可以明显降低等离子体炬的运行电压。

2) 提高运行电流, 可以增加等离子体炬运行功率。

3) 增大阴极直径, 改善散热效果, 可以减缓阴极前端烧蚀速度, 提高电极使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] LANCE S J, CAMPBELL D C, ROBERT A B. Toward plasma-assisted ignition in scramjets, AIAA 2003-0871 [R]. USA: AIAA, 2003.
- [2] KLIMOV A, BYTURIN V, BROVKIN V. Plasma assisted combustion, AIAA 2001-0491 [R]. USA: AIAA, 2001.
- [3] KLIMOV A, BYTURIN V, MORALEV I, et al. Plasma assisted ignition and combustion, AIAA 2005-3428 [R]. USA: AIAA, 2003.
- [4] BILLINGSLEY M C, O'BRIEN W F, SCHETZ J A. Plasma torch atomizer-igniter for supersonic combustion of liquid hydrocarbon fuels, AIAA 2006-7970 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [5] SANDER D D, O'BRIEN W F. An investigation of controlled oscillations in a plasma torch for combustion enhancement, AIAA 2006-7968 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [6] BILLINGSLEY M C, SANDERS D D, O'Brien W F. Improved plasma torches for applications in supersonic combustion, AIAA 2005-3423 [R]. USA: AIAA, 2005.
- [7] BONANOS A M, SCHETZ J A, O'BRIEN W F. Scramjet operability range studies of multifuel integrated aeroramp injector/plasma igniter, AIAA 2005-3425 [R]. USA: AIAA, 2005.
- [8] 吴始栋. 关键技术对“福特”级航空母舰建造进度的影响 [J]. 中外船舶科技, 2009, 10(2): 11-16.
- [9] 王飞, 周前红, 郭少峰, 等. 电弧推力器流场的数值计算 [J]. 火箭推进, 2010, 36(2): 24-29.

(编辑: 王建喜)