

直流电弧等离子体点火器射流特性研究

兰宇丹, 何立明, 杜宏亮, 王峰, 陈鑫

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:采用光谱仪测量了等离子体点火器出口射流的发射光谱, 利用玻尔兹曼曲线斜率法计算了射流的电子温度, 并通过电离平衡方程计算了射流气体温度, 获得点火器出口射流长度、射流速度、电子温度和射流温度随弧电流及进口氩气流量的变化规律。并分析了航空等离子体电弧射流中是否可使用电子温度来代替射流气体温度。实验表明: 弧电流随着进口氩气流量的增大而减小; 出口射流长度和速度随弧电流的增大而增大, 随进口氩气流量的增大先增大后减小; 出口电子温度、电子密度和射流温度随弧电流的增大而升高, 随氩气流量的增大而降低。

关键词:电弧; 等离子体; 电子温度; 电子密度; 射流

中图分类号: O536

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)02-0216-07

Characteristic Study of DC Electric Arc Plasma Ignitor Jet

LAN Yu-dan, HE Li-ming, DU Hong-liang, WANG Feng, CHEN Xin

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The spectrometer was adopted to measure the emission spectrum of Ar plasma jet at the ignitor exit. Boltzmann curve slope method was applied to calculate the jet electron temperature. Ionization equilibrium equation was used to calculate jet temperature and measure the laws that jet length, jet velocity, electron temperature and jet temperature of ignitor exit change with arc current and inlet Ar flow rate. Whether the electron temperature could be used to replace jet temperature in aircraft plasma arc jet was also discussed. The experiment results show that arc current reduces with the rising of inlet Ar flowrate; exit jet length and velocity increase with the rising of arc current, and increase at first and then reduce with the rising of inlet Ar flow rate; exit electron temperature, electron density and jet temperature increase with the rising of arc current and reduce with the rising of inlet Ar flow rate.

Key words: electric arc; plasma; electron temperature; electron density; jet

等离子体点火是利用等离子体射流中的高温(高达 5 000 K)特性来点燃可燃混合气体。

航空等离子体点火器具有点火能量大、火舌穿透力强等特点, 因而等离子体点火能力特别强,

有利于提高在恶劣工作条件(特别是高空)下启动发动机的可靠性。Wang等^[1]于2004年研制出等离子体点火器,并将其用于丙烷和空气混合物的爆震试验中,用于降低点火延迟时间及缩短爆燃到爆震的转换时间。试验结果表明,点火延迟时间降低了约5%,爆燃-爆震的转换时间也显著降低。Matveev^[2]对所研制的等离子体点火器在12 km高度成功进行了高空等离子体点火试验,展示了良好可靠的高空点火性能。Jose等^[3]对乙烯-空气混合气的脉冲爆震发动机等离子体点火进行试验,试验结果表明等离子体点火比电火花点火的DDT距离缩短了约20%,DDT时间减少超过2.5 ms,爆震初始成功率高于94%。因此,详细研究航空等离子体点火器的射流特性可为等离子体点火器在航空发动机中的实际应用提供理论基础和技术储备,具有重要的意义,相关方面研究一直受到国内外学者和工程技术人员的重视^[4-6]。

本文针对自行设计的航空等离子体点火器,保持等离子体电源的直流输出电压24 V不变,测量不同条件下等离子体点火器出口射流长度、射流速度、电子温度、电子密度和射流温度随弧电流及进口氩气流量的变化规律和光谱特性,并通过光谱数据分析点火器出口的射流温度和电子温度的变化规律,并对在等离子体电弧射流中是否可使用电子温度来代替射流气体温度进行讨论。

1 实验系统与设备

等离子体点火器的射流特性实验系统如图1a所示,射流图像如图1b所示,系统主要由等

离子体电源、等离子体点火器、测量设备、数据采集系统等组成。直流电弧等离子体点火器采用电压为3 kV的高频高压脉冲引弧,24 V直流电压维持电弧,电源的直流输出保持24 V不变,研究点火器中电弧电流特性的变化规律。等离子体点火器的阴极与阳极采用75%钨铜合金制作,既耐高温、腐蚀又具有良好的导电性,外部覆盖3 mm厚的胶木进行绝缘,且由于点火器内部温度较高,内部采用氧化铝陶瓷进行绝缘。等离子体点火器阴、阳电极的间距为2 mm,气体工作介质采用氩气。等离子体点火电源的输出电压、放电电流分别采用Tektronix公司的高压探针P6015A和TCPA300+TCP312电流组合探针测量,使用Tektronix公司的数字示波器DPO4014记录,同时使用高速CCD相机和Canon数码相机记录等离子体射流的产生过程。光谱测量采用Ocean Optics公司生产的四通道CCD光谱仪,发射光谱测试系统包括光谱仪、光纤和计算机数据采集系统。

2 实验结果与分析

2.1 等离子体点火器的放电特性

由于等离子体点火电源维持电弧的直流电压为24 V不变,等离子体点火器的弧电流与电源输出电流和氩气进口流量的变化有关。在不同电源输出电流下,等离子体点火器的弧电流随进口氩气流量的变化如图2所示。

由图2可知,不同电源输出电流下,等离子体点火器内的弧电流随进口氩气流量的增大而逐渐减小,工作气体的加热功率也有一定减小。这是由于随着进口氩气流量的增大,氩气对电

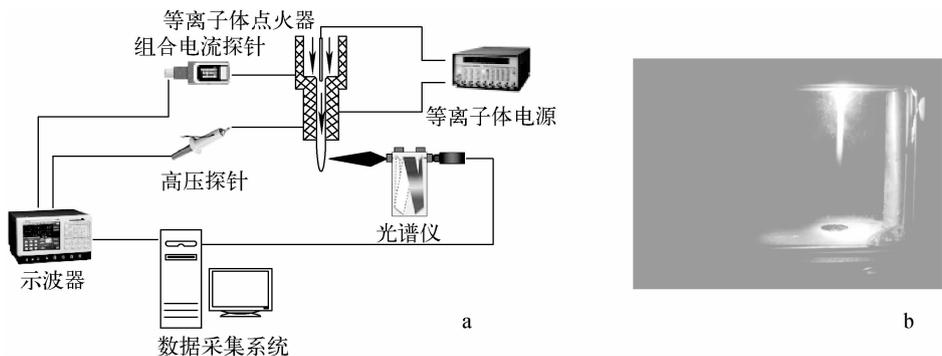


图1 等离子体点火器射流特性实验系统(a)及射流图像(b)

Fig. 1 Schematic of plasma ignition jet characteristic experiment system (a) and torch picture (b)

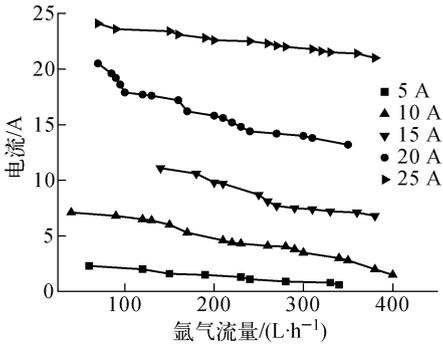


图2 不同电源输出电流下

弧电流随进口氩气流量的变化

Fig. 2 Arc currents change with inlet Ar flow rate under different source output currents

弧柱的冷却作用增强,电弧的压缩程度增加,电弧截面变小,电极的间隙电阻增加,电导率下降,弧电流减小,而维持电压不变,导致加热功率下降。

图2中不同电源输出电流下弧电流随进口氩气流量的增大而减小的程度不同,在电源输出电流为20 A时最大。茹科夫^[7]的实验和理论研究表明弧室中的电弧存在着大尺度分流现象,表现为电弧阳极斑点有规律地前后运动,这是在等离子体气体气动力和电击穿现象的共同作用下产生,造成的脉动频率取决于等离子体点火器的工作参数和工作气体的成分^[8-9]。阳极斑点向喷嘴上下方移动会使电弧的长度剧烈减少或增加,而在电弧长度和电极贴附区等状况基本不变的情况下,气体的电导率与其温度以及相应条件下的电离度等有关^[10],阳极斑点的上下移动会导致电导率下降,电极间隙电阻增加,加热功率下降。

2.2 等离子体点火器的射流特性

等离子体点火器的进口氩气流量为250 L/h时,不同弧电流条件下等离子体点火器产生的射流如图3所示。

不同进口氩气流量条件下,等离子体点火器产生的射流长度随弧电流的变化如图4所示。

由图4可知,等离子体点火器的出口射流长度随弧电流的增大而增大,随氩气流量的增大,射流长度先增大后减小。点火器弧电流的增加会引起电弧对氩气流的加热功率增加,氩气流中会有一部分能量转化为动能^[10],增大出

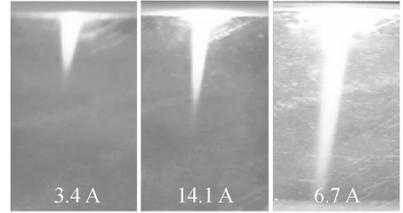
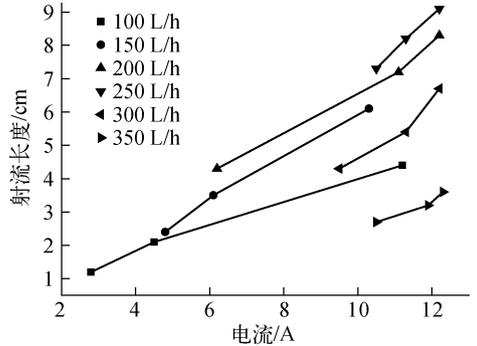
图3 氩气流量为250 L/h时的等离子体射流图
Fig. 3 Pictures of plasma ignition jet with Ar flow rate of 250 L/h图4 不同进口氩气流量下
等离子体射流长度随弧电流的变化

Fig. 4 Jet lengths of plasma jet change with working current under different inlet Ar flow rates

口的流动速度,从而导致火舌长度增加。然而随着氩气流量的增大,点火器出口处的射流速度增大,导致射流长度增长,与文献^[10]中的计算数值一致。实验结果中进口氩气流量为250 L/h、弧电流为12.2 A时射流长度最大,为9.1 cm,而当进口氩气流量过大时,会导致等离子体点火器中的电弧加热效率降低,甚至电弧被吹走,从而使火舌长度急剧减小,在进口氩气流量为350 L/h、弧电流为12.3 A时射流长度仅3.6 cm。

采用高速CCD相机记录等离子体射流产生过程中各时间段(10^{-4} s)的图像,测量等离子体高温火舌的长度 L_p ,可得等离子体点火器出口射流的流速 $v=L_p/\Delta t$ 。不同进口氩气流量条件下,等离子体点火器产生的射流速度随电流的变化如图5所示。

由图5可知,等离子体点火器出口的射流速度随弧电流的增大而增大,随氩气流量的增大,射流速度先增大后减小,与等离子体点火器的射流长度表现出相同的发展趋势。点火器弧

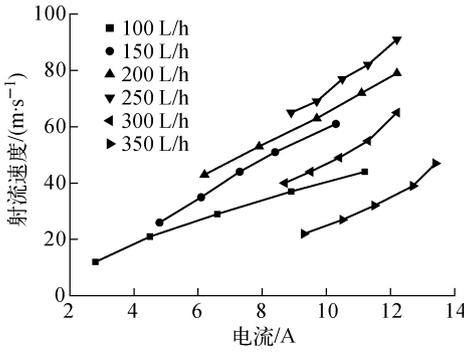


图5 不同进口氩气流量下
等离子体射流速度随电流的变化

Fig. 5 Jet velocities of plasma jet change with working current under different inlet Ar flow rates

电流的增加会引起电弧对氩气流的加热功率增加,氩气流中会有一部分能量转化为动能,增大出口的流动速度。随着氩气流量的增大,点火器出口处的射流速度增大,与文献[10]中的计算数值一致。然而当氩气流量过大时,会导致等离子体点火器中的电弧加热效率降低,甚至电弧被吹走,从而使火舌速度急剧减小。

改变等离子体点火器出口处的外部物理参数(燃烧室内的流速、温度压力等),可改变射流在点火器出口处的温度和速度分布,从而影响点火器出口射流形状。当出口射流为湍流状态,对周围冷气体的卷吸状况不会改变,射流的轴向高温区域(射流长度)不会有明显变化^[10],但在一定氩气流量下,随着弧电流增加,点火器出口射流逐渐转变为层流状态,而在弧电流一定的条件下,氩气流量的增加会导致点火器出口射流湍流度增加,由层流逐渐向湍流转变。

2.3 等离子体射流的光谱特性

实验测量了氩气进口流量为 100 L/h、弧电流为 11.2 A 时,距离等离子体点火器出口 3 mm 处的光谱,如图 6 所示。由于等离子体点火器中的工作介质(99%氩气和其他成分)和电极中夹杂的其他成分,导致光谱谱线很复杂,为计算点火器出口等离子体射流的电子温度,图 6 仅显示 1 组 ArI 的谱线。

采用相对强度比值法可计算电弧等离子体点火器出口电子温度,计算公式^[11]为:

$$T_{exc} \left(\ln \frac{I_1 \lambda_1}{A_1 g_1} - \ln \frac{I_2 \lambda_2}{A_2 g_2} \right) = \frac{E_1 - E_2}{k} \quad (1)$$

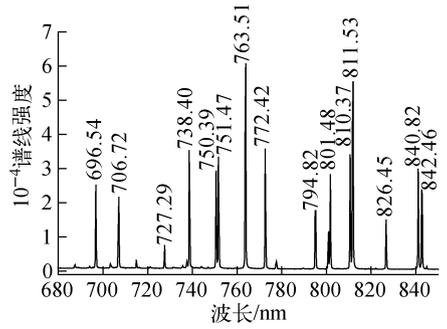


图6 等离子体点火器出口射流光谱

Fig. 6 Jet optical spectrum at exit of plasma ignitor

式中: T_{exc} 为射流的激发温度; I_1 、 g_1 、 A_1 和 I_2 、 g_2 、 A_2 分别为能级 E_1 和 E_2 的辐射光谱强度、统计权重与跃迁几率; k 为玻尔兹曼常数; λ_1 与 λ_2 分别为谱线1与谱线2的波长。

根据文献[12]中关于等离子体射流的激发温度和电子温度 T_e 的分析,等离子体射流的 T_{exc} 近似等于 T_e 。采用727.29和750.39 nm两条谱线进行计算,具体参数列于表1。

表1 氩气727.29 nm和750.39 nm谱线参数^[12]

Table 1 Spectrum lines of Ar 727.29 nm and 750.39 nm^[12]

波长/nm	跃迁几率/s ⁻¹	能级/eV	统计权重
727.29	1.83×10 ⁶	13.33	3
750.39	4.45×10 ⁷	13.48	1

不同氩气流量下等离子体射流电子温度随弧电流的变化如图7所示。

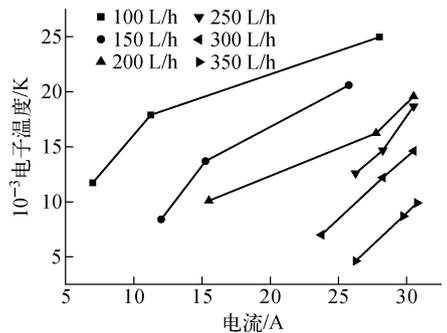


图7 不同进口氩气流量下
等离子体射流电子温度随弧电流的变化

Fig. 7 Electron temperatures of plasma jet change with increasing arc current under different inlet Ar flow rates

由图7可见,等离子体点火器出口射流的电子温度随弧电流的增大而升高,随氩气流量的增大而减小。这是由于随着弧电流的增大,等离子体点火器中的电流增加,而点火器电弧的维持电压不变,电弧的功率升高,等离子体点火器出口射流的温度升高,而光谱强度与温度成正比,所以弧电流的增大会导致光谱强度增加,而不同谱线间的相对强度随之增大,射流的电子温度随之升高,在进口氩气流量为100 L/h、弧电流为28 A时,最高电子温度为24 970 K。而氩气流量的增大会减小加热效率,导致等离子体点火器射流的温度降低,从而导致光谱强度减小,射流的电子温度降低,在进口氩气流量为350 L/h、弧电流为30.7 A时,最高电子温度仅为9 898 K。

根据准静态微场理论,谱线展宽仅与等离子体的电子密度有关,而与等离子体是否满足局域热力学平衡无关^[12]。因此不必知道谱线的绝对强度,只要测量谱线轮廓的半高宽即可得到电子密度。斯塔克效应谱线轮廓的半高宽可由下式^[13-14]表示:

$$H = 2 \times 10^{-16} \omega n_e (1 + 1.75 \times 10^{-4} n_e^{1/4} \alpha (1 - 0.068 n_e^{1/6} T_e^{-1/2})) \quad (2)$$

将等离子体射流电子温度代入式(2),可得到不同氩气流量下等离子体射流的电子密度随电流的变化,如图8所示。

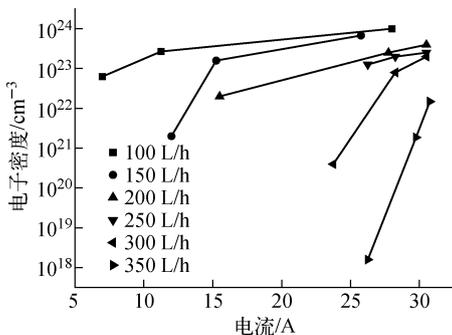


图8 不同氩气流量下等离子体射流电子密度随电流的变化

Fig. 8 Electron densities of plasma jet change with increasing arc current under different inlet Ar flow rates

由图8可见,等离子体点火器出口射流的电子密度随弧电流的增大而升高,随氩气流量

的增大而减小,与射流电子温度随弧电流的变化趋势相似。这是由于随着弧电流的增大,电弧的功率升高,电弧强度增大,等离子体点火器出口射流的电离度升高,从而导致电子温度和电子密度增大。由式(2)可知,射流的电子密度与电子温度有关,随电子温度的升高而升高,在进口氩气流量为100 L/h、弧电流为28 A时,最高电子密度为 10^{24} cm^{-3} ,但在电子密度接近并超过 10^{24} cm^{-3} 后,随弧电流的增加趋势减缓。而氩气流量的增大会减小单位体积内电弧的功率,导致等离子体点火器的电离率降低,从而导致光谱强度减小,射流的电子温度和电子密度降低,在进口氩气流量为350 L/h、弧电流为30.7 A时,最高电子密度仅 10^{22} cm^{-3} 。

2.4 等离子体点火器出口的射流温度

由于等离子体点火器出口射流的温度高,且温度传感器无法测量点火器出口的温度,因此通过建立电离平衡方程组来计算。由于氩等离子体射流的发射光谱是以弱连续光谱为背景的线光谱结构^[15],而在实验中光谱采集点距离等离子体点火器的出口很近,仅3 mm左右,射流卷吸的空气量很少,可忽略点火器出口卷吸的空气,从而将射流当作纯氩气射流处理。由已知的电弧等离子体射流的温度范围可知,二次电离可忽略^[16]。在局域热力学平衡条件下,根据道尔顿定律、电中性准则和沙哈定理,各粒子浓度间采用绝对强度法可建立如下电离平衡方程组^[16]:

$$p = (n_{\text{Ar}} + n_{\text{Ar}^+} + n_e)kT \quad (3)$$

$$n_{\text{Ar}^+} = n_e \quad (4)$$

$$\epsilon_{\nu, \text{Ar}} = \frac{h\nu_{\text{Ar}}}{4\pi} A_{\nu, \text{Ar}} g_{u, \text{Ar}} \frac{n_{\text{Ar}}}{Z_{\text{Ar}}(T)} \exp\left(-\frac{E_{\nu, \text{Ar}}}{kT}\right) \quad (5)$$

$$\frac{n_e n_{\text{Ar}^+}}{n_{\text{Ar}}} = 2 \frac{Z_{\text{Ar}^+}(T)}{Z_{\text{Ar}}(T)} \cdot \frac{2\pi m_e kT}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{\text{ion}, \text{Ar}}}{kT}\right) \quad (6)$$

其中: p 为气体压强; n 为粒子密度; k 为波尔兹曼常数; T 为点火器出口射流温度; h 为普朗克常数; ϵ_{ν} 为光谱发射系数; A_{ν} 为跃迁几率; g_u 为统计权重; $Z(T)$ 为配分函数; E_{ν} 为高能级的能量; m 为粒子质量; E_{ion} 为粒子电离能;下标Ar、 Ar^+ 和e分别表示氩原子、氩离子和电子。

式(3)为气体状态方程,式(4)为电荷守恒

公式,式(5)为氩气中波长 696.54 nm 的光谱发射系数公式,式(6)为 $\text{Ar} \leftrightarrow \text{Ar}^+ + e$ 反应的沙哈方程。从图 6 的谱线中并未发现 Ar^{2+} , 这可能是因为在等离子体射流中不存在 Ar^{2+} 或量很少,所以,式(3)、(4)不考虑在二次电离时由方程组计算得到的点火器出口等离子体射流温度。

在不同进口氩气流量下将测得的数据代入式(3)~(6)可得等离子体射流温度随电流的变化曲线,如图 9 所示。

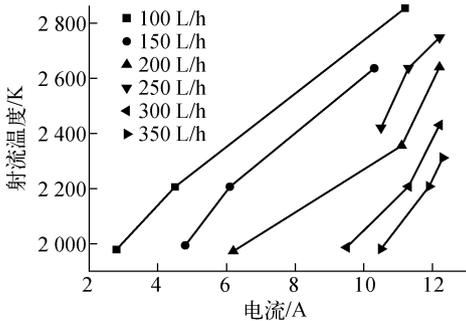


图 9 不同进口氩气流量下
等离子体射流温度随弧电流的变化

Fig. 9 Temperatures of plasma jet change
with arc current under different inlet Ar flow rates

由图 9 可知,等离子体点火器出口射流的温度随弧电流的增大而升高,随氩气流量的增大而降低。随着弧电流的增大,等离子体点火器中的实际电流增加,而点火器的维持电压不变,电弧的功率升高,等离子体点火器出口射流的温度升高,同时光谱强度与温度成正比,弧电流的增大会导致光谱强度增加。最高温度在进口氩气流量为 100 L/h、弧电流为 11.2 A 时为 2 866 K,与电子温度最高点的流动条件相同。而氩气流量的增大会减小弧电流,从而减小对氩气流的加热效率,导致等离子体点火器出口射流的温度降低,在进口氩气流量为 350 L/h、弧电流为 12.3 A 时为 2 342 K。

对比图 7 和 9 可看出,等离子体点火器出口的电子温度和射流温度随进口氩气流量和弧电流的变化趋势相似,但点火器出口射流的温度明显比电子温度低,且随电流的增大两者之间的差距变得更大。尽管等离子体点火器中的电弧能形成平衡态等离子体(电子温度等于气

体温度),但当平衡态氩气等离子体远离等离子体区域后,失去电场的维持,且等离子体流动不断向外散热,导致等离子体射流温度不断降低,氩气等离子体明显偏离局部热力学平衡状态。

德列斯文^[17]和 Pfender 等^[18]从射流的流体动力学角度入手,通过实验研究了等离子体射流的结构和湍流特征,提出等离子体射流过程是一附加有对周围冷气体卷吸作用的湍流发展过程。随着点火器出口射流不断向外流动,射流温度越来越低,使得射流温度相对于电子温度随电流增大而上升的速度较低,从图 7 和 9 中可明显看出两者之间的差距在不断增大。

3 结论

通过航空等离子体点火器的射流特性实验,测量了点火器出口射流长度、速度、电子温度、密度和射流温度随弧电流以及进口氩气流量的变化规律,分析结果可得到以下结论:

- 1) 等离子体点火器内弧电流随进口氩气流量的增大而减小,加热功率也有一定的减小;
- 2) 等离子体点火器的射流长度和速度随弧电流的增大而增大,随着进口氩气流量的增大,射流长度先增大后减小;
- 3) 等离子体点火器出口射流的电子温度和电子密度随弧电流的增大而升高,随氩气流量的增大而降低;
- 4) 等离子体点火器出口射流的温度随电源输出电流的增大而升高,随氩气流量的增大而降低。

参考文献:

- [1] WANG F, JIANG C, KUTHI A, et al. Transient plasma ignition of hydrocarbon-air mixtures in pulse detonation engines, AIAA 2004-0834 [R]. US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [2] MATVEEV I. Multi-mode plasma igniters and pilots for aerospace and industrial applications [R]. [S. l.]: Applied Plasma Technologies, Inc., 2006.
- [3] JOSE O S, JOEL R, BRENT C. Investigation of transient plasma ignition for pulse detonation engines, AIAA 2005-3774 [R]. US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

- [4] 袁行球,李辉,赵太泽,等. 直流电弧等离子体炬的特性研究[J]. 物理学报,2004,53(11):3 806-3 811.
YUAN Xingqiu, LI Hui, ZHAO Taize, et al. Study of the characteristic of DC arc plasma torch [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(11): 3 806-3 811(in Chinese).
- [5] 王丰华,金之俭,朱子述. 直流电弧炉电弧等离子体射流的数值模拟[J]. 高压电器,2005,41(4):241-244.
WANG Fenghua, JIN Zhijian, ZHU Zishu. Numerical simulation of plasma in DC electric arc furnace[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 241-244(in Chinese).
- [6] 雷玉成,李彩辉,郁雯霞,等. 钨极氮弧焊接电弧数值分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(1):47-50.
LEI Yucheng, LI Caihui, YU Wenxia, et al. Numerical analysis on nitrogen protecting of TIG welding arc[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(1): 47-50(in Chinese).
- [7] 茹科夫. 热等离子体实用动力学[M]. 赵文华,周力行,译. 北京:科学出版社,1981:19-24.
- [8] PLANCHE M P, DUAN Z, LAGNOUX O, et al. Study of arc fluctuations with different plasma spray torch configurations[C]// Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry. [S. l.]: [s. n.], 1997: 1 460-1 465.
- [9] SINGH N, RAZAFINIMANANA M, HLINA J. Characterization of a DC plasma torch through its light and voltage fluctuations[J]. J Phys D: Appl Phys, 2000, 33: 270-274.
- [10] 潘文霞,孟显,吴承康. 直流纯氩层流等离子体射流的长度变化[J]. 工程热物理学报,2005,26(4):677-679.
PAN Wenxia, MENG Xian, WU Chengkang. Length change of DC laminar-flow argon plasma-jet[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(4): 677-679(in Chinese).
- [11] 李驰,唐晓亮,邱高. 常压射流等离子体发射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(12):388-391.
LI Chi, TANG Xiaoliang, QIU Gao. Spectral diagnosis of plasma jet at atmospheric pressure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(12): 388-391(in Chinese).
- [12] 屠昕,陆胜勇,严建华,等. 大气压直流氩等离子体光谱诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(10):1 785-1 789.
TU Xin, LU Shengyong, YAN Jianhua, et al. Spectroscopic diagnostics of DC argon plasma at atmospheric pressure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(10): 1 785-1 789(in Chinese).
- [13] GRIEM H R. Plasma spectroscopy[M]. New York, US: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [14] GRIEM H R. Spectral line broadening by plasma[M]. New York, US: Academic Press, 1974.
- [15] 严建华,屠昕,马增益,等. 大气压直流氩等离子体射流工作特性研究[J]. 物理学报,2006,55(7):3 451-3 457.
YAN Jianhua, TU Xin, MA Zengyi, et al. Characterization of DC argon plasma jet at atmospheric pressure[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(7): 3 451-3 457(in Chinese).
- [16] 赵文华,唐皇哉,田阔,等. 存在空气卷吸时等离子体射流光谱诊断应做的修正[J]. 光谱学与光谱分析,2004,24(4):388-391.
ZHAO Wenhua, TANG Huangzai, TIAN Kuo, et al. The correction to spectroscopic diagnostics of plasma jet with air engulfment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(4): 388-391(in Chinese).
- [17] 德列斯文. 低温等离子体物理及技术[M]. 唐福林,陈允明,毛斌,等译. 北京:科学出版社,1980:21-31.
- [18] PFENDER E, FINCKE J, SPORES R. Entrainment of cold gas into thermal plasma jets[J]. Plasma Chemistry and Plasma Process, 1991, 11(4): 529.