

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.022

不同类型气源的大气压等离子体射流的放电特性研究

石朝阳¹, 郝小龙¹, 缪龙宇¹, 张一波²

(1. 江南大学环境与生态学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 文中研究了典型的同轴射流装置在不同实验条件(气源组分、流速(含雷诺数 Re 分析)、电压和功率)下对大气压等离子体射流特性(主要是射流长度、实际温度和放电启动电压)的影响。结果表明:单气源射流时,电压或流速的增加使射流长度先增加后趋于稳定或下降;施加电压升高会使射流温度上升,流速的增加对氮气和氩气源的射流温度影响不大;氧气源射流的启动电压和功率高于氮气和氩气源。2种气源混合时, O_2 比例的增加会抑制射流长度,增加启动电压;而 N_2 的加入不会对等离子体射流的长度和温度产生明显影响。随着流速的增加, Ar/O_2 和 N_2/O_2 源的射流长度先增加后趋于稳定, Ar/N_2 源的则会逐渐增加。3种气体混合时,射流长度随着电压或流速的增加先增加后趋于稳定;而射流温度会随着施加电压的增加先升高后趋于稳定,随着流速的增加而降低;启动电压则会随着氩气比例的减小(或氧气比例的增加)而逐渐增加。因此,不同类型的气源条件对大气压等离子体射流的特性影响较大,在实际应用中应值得关注和重视。

关键词: 大气压等离子体射流; 射流长度; 射流温度; 放电启动电压; 单气源; 混合气源; 雷诺数

Study on Discharge Characteristics of Atmospheric Pressure Plasma Jet with Different Types of Air Sources

SHI Chaoyang¹, HAO Xiaolong¹, MIAO Longyu¹, ZHANG Yibo²

(1. School of Environment and Ecology, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China)

Abstract: In this paper, the effects of a typical coaxial jet device under different experimental conditions (gas source composition, flow rate (including Reynolds number (Re) analysis), voltage and power) on the characteristics of atmospheric plasma jet (APPJ) (mainly jet length, actual temperature and discharge starting voltage) are studied. The results show that in case of single gas source jet the increase of voltage or flow rate causes the jet length to initially increase and then to stabilize or decrease. The increase of applied voltage can increase the jet temperature, and the increase of flow rate has little effect on the temperatures of nitrogen and argon source jets. The starting voltage and power of oxygen source jet are higher than those of nitrogen and argon sources. In case of mixture of the two gas sources, the increase of O_2 ratio can suppress the jet length and increase the starting voltage. While, the addition of N_2 has no obvious effect on the length and temperature of plasma jet. With the increase of flow rate, the jet lengths of Ar/O_2 and N_2/O_2 source jets are firstly increased and then became stable, and that of Ar/N_2 source can be gradually increased. In case of the mixture of three gas sources, with the increase of voltage or flow rate, the jet length is increased firstly and then is tended to be stable. While, the jet temperature is increased firstly and then tended to be stable with the increase of applied voltage, and is decreased with the increase of the flow rate. The starting voltage can be gradually increased with the decrease of the argon ratio (or the increase of the oxygen ratio). Therefore, the conditions of different types of gas sources have greater influence on the characteristics of APPJ, which should deserve attention and emphasis in practical application.

Key words: atmospheric pressure plasma jet; jet length; jet temperature; discharge starting voltage; single gas source; mixed gas source; Reynolds number

收稿日期:2025-08-25; 修回日期:2025-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(21376108)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(21376108).

0 引言

大气压等离子射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)是近年来发展起来的一种新型的放电技术,相较于其他形式的等离子体放电技术,具有安全简便、射流宏观温度低、富含多种活性物质等方面的特点,在多种领域如材料表面的改性、医学应用以及杀菌去污等有着广泛的应用前景,是国内等离子体领域的研究热点和焦点之一^[1-4]。

大气压等离子体射流的特性在很大程度上影响和制约着APPJ的实际应用^[5-7]为了更加有效地利用等离子体射流,已有学者对大气压射流的放电特性进行了研究^[6-10]。孙振宇^[11]等通过研究空气、氮气、氩气、氦气等4种气源对大气压氩等离子体射流特性的影响发现,气源会介入大气压氩等离子体射流的演变过程,并导致等离子体射流特性改变。周亦骁^[12]等向Ar中混入相同体积分数的O₂和H₂O来比较大气压下Ar/O₂和Ar/H₂O等离子体射流放电特性的区别。结果表明,Ar/H₂O会射流有更低的气体温度。Teschke等^[13]认为,利用处于层流状态的APPJ能够更好地将活性物质的能量传递给处理对象。卢新培教授课题组^[14]研究了He-APPJ长度变化的影响因素。Chang等^[15]研究发现将少量的氮气混合到氩气中,射流的长度会明显增加。而当氮气的比例达到一定值时(N₂流量约为8 mL/min),射流长度则会缩短。Fang等^[16]研究了O₂体积分数对Ar/O₂等离子体放电特性的影响。结果表明,放电起始电压随着氧体积分数的增加而增加。Shen等^[17]报道了添加氧气会使等离子体射流的长度减小,气体温度升高。关于射流特性的研究大多是以单一惰性气体(如Ar、He、Ne等)或另外添加一种活性气体成分作为载气产生的射流而进行的,而对不同混合气源条件下的射流特性缺乏对比和系统性的研究,特别是3种气源的条件,如在Ar等离子体射流中加入了两种气体(N₂/O₂),会产生(RNOS),即活性氮氧化物^[18-19]。因此,考察研究多种气源条件下的大气压等离子射流特性,如射流长度、宏观实际温度和放电启动电压等,对于提高APPJ的实用和调控性具有很重要的意义。

文中研究了在单一气体,混合二种气体以及混合3种气体等的气源条件下,通过改变射流放电电压和流速等工况条件,对大气压等离子体射流特性(主要是射流长度、宏观实际温度和放电启动电压)的影响,考察射流的工况条件,得到射流特性的相关规律,为大气压等离子体射流在实际应用中提供一定的实验基础和科学依据。

1 实验与材料

1.1 APPJ实验装置

实验采用的同轴电极等离子体射流系统见图1。实验装置主要包括高压电源、射流发生器、气源钢瓶、气体流量计、电流表和限流电阻。其中高压电源主要由调压器(0~220 V)与高压激发电源(0~15 kV)组成,主要组件是AC高压变压器和外接安全电阻(10±5%) kΩ,而射流发生器是由不锈钢制成的,内电极下端由陶瓷管套住,见图2。

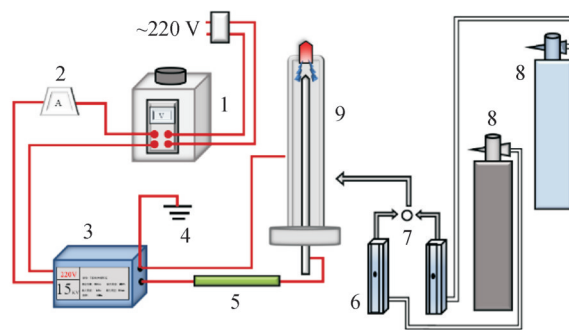


图1 大气压等离子体射流发生装置

Fig. 1 Generation equipment of atmospheric pressure plasma jet

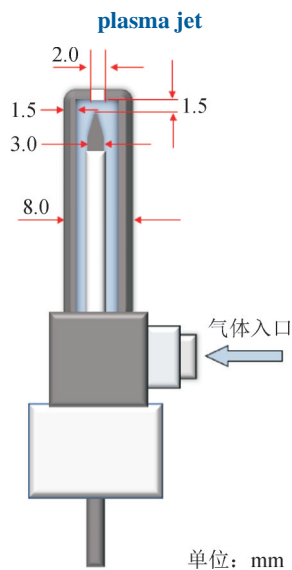


图2 等离子体射流发生器的结构图

Fig. 2 Structure diagram of plasma jet generator

实验采用不同的气源组合(单气源和混合气源),分别是:氮气(99.99%)、氧气(99.99%)、氩气(99.99%)作为气源。通过流量计来调节气体流速及气体之间的比例,气体由进气孔进入电极间隙,在高压电极间隙被激发电离产生等离子体,由气流携带射出,形成大气压等离子体射流,由此建立了等离子体射流放电装置体系。

1.2 测试方法

1) APPJ 长度/温度测定。在调节气体流速、放电电压和气体比例, 达到稳定明显的射流状态后, APPJ 长度采用数显卡尺进行测量, 并配以数码相机来拍照记录(每次现象记录 3 次, 射流长度取其平均值和标准偏差); APPJ 温度采用温度计在离喷头(2.0±0.5) mm 处测定, 待温度趋于稳定时读数记录(每次现象记录 3 次, 射流温度取其平均值和误差范围值)。

2) APPJ 功率和放电启动电压。由调压器的电压和高压射流电源的变压比, 可以计算出放电启动

电压(启动电压是指等离子体射流装置在管内电极开始击穿放电时需要达到的电压)。通过电流表的电流和调压器的电压, 可以计算施加在等离子体射流间隙上的放电功率。

2 实验结果与分析

2.1 单气源的等离子体射流特性

在气流速率为 6.0 L/min 的条件下, 考察了不同外施电压对单气源(O₂, Ar, N₂)下产生的 APPJ 长度的影响见图 3。

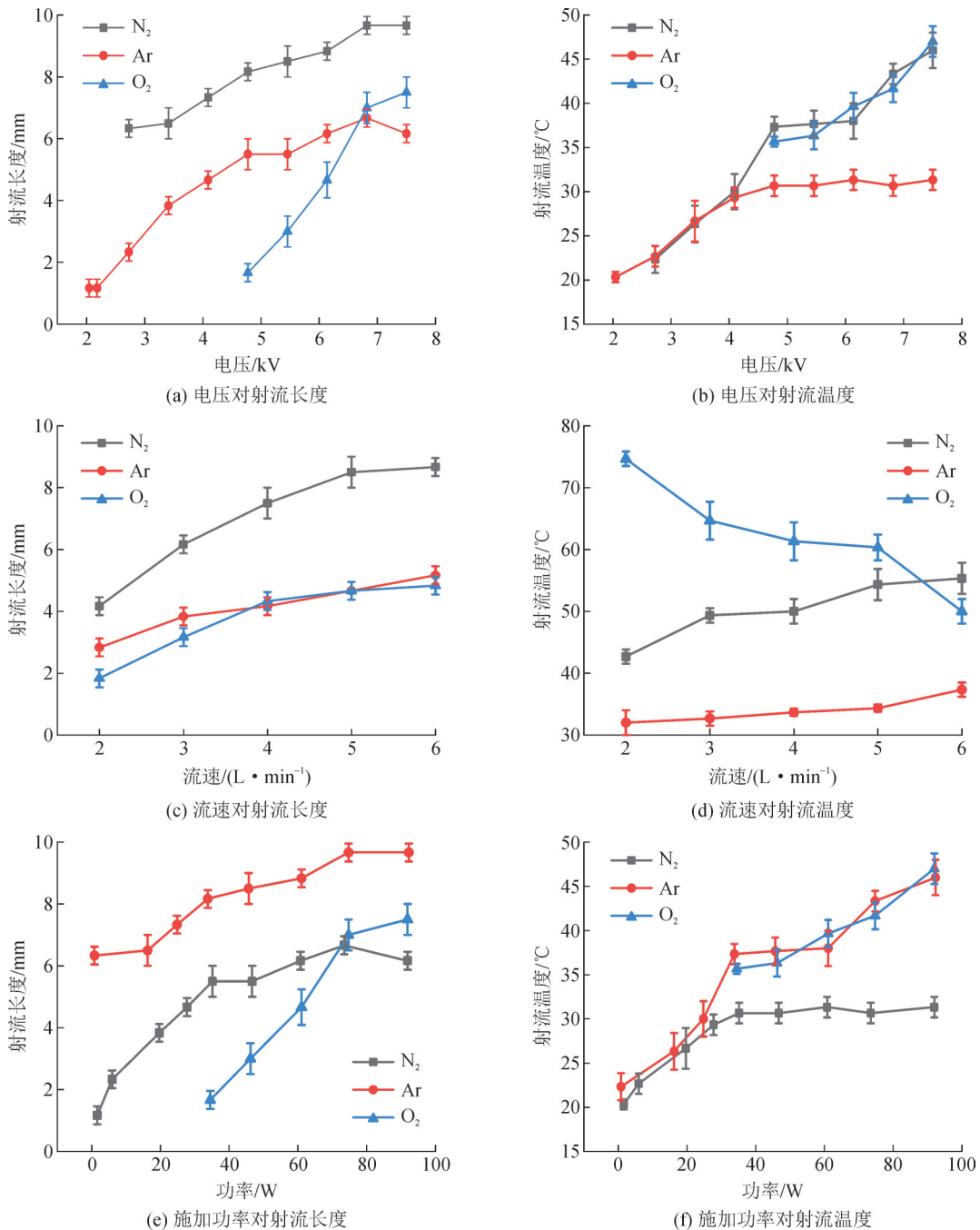


图3 电压、流速及施加功率对射流长度和温度的影响

Fig. 3 Influences of voltage, flow rate and applied power on jet lengths and temperature

射流长度先是随着电压的增加而增长,随后的增长开始逐渐放缓,当电压到达6.8 kV时,射流长度呈现出稳定或下降的趋势见图3(a)。射流长度随着功率的变化趋势和电压的情况相同,但是不同气体之间的启动功率和启动电压存在差异见图3(e)。其中氮气的启动功率最低(0.8 W),氩气次之(1.6 W),氧气的启动功率最大(34.3 W)。由图3(a)中还可以观察到氧气(非惰性气体)的启动(激发)电压(4.8 kV)要高于氮气(2.8 kV)和氩气(2.2 kV)(惰性气体)的启动(激发)电压。氧气的电负性会吸附空间中的电子,导致电子碰撞过程减弱,削弱 Townsend 过程,使得放电启动电压增大^[20]。3种不同气源的射流温度随着电压和功率的变化曲线分别见图3(b)-(f):在气体流速为6.0 L/min时,随着电压的增大,射流温度总体呈增长趋势,O₂和N₂射流温度的变化趋势要明显大于Ar的。射流温度随着功率的变化趋势与电压的情况基本相同。

流动气体服从流动气体的流体动力学规律,可能是影响大气压等离子体放电的原因之一^[21]。在施加电压为6.8 kV的条件下,射流长度随气体流速的变化见图3(c),不同的背景气体产生的射流长度均会随着气流速率的增加而增加并逐渐趋于稳定。气体流速对等离子体射流长度的影响,可以通过气体流态进行分析。层流、过度流状态和湍流的区分在理论上可以用雷诺数来判断^[6]。雷诺数 Re 定义为^[22]

$$Re = \frac{v\rho D}{\mu} \quad (1)$$

式(1)中: v 为气体流速,m/s; D 为管道直径,m; μ 为动力粘度,kg/(m·s); ρ 为气体密度,kg/m³。

不同流速下的气体雷诺数见表1。从表1可以看出,气体流态的初始状态为层流态,随着气体流速的增加,氮气和氩气在6 L/min时达到过渡态,而氧气在5 L/min时达到过渡态,在6 L/min时为湍流状态。因此,等离子体射流的长度会随着流速的增加而增加,而在气体流速达到过渡态时,其射流长度的增加趋势变缓,趋于平稳^[7,23]。

表1 不同流速下的气体雷诺数

Table 1 Reynolds numbers of the gas at different flow rates

气体	Re				
	2 L·min ⁻¹	3 L·min ⁻¹	4 L·min ⁻¹	5 L·min ⁻¹	6 L·min ⁻¹
N ₂	768.03	1 152.05	1 536.06	1 920.08	2 304.09
Ar	772.62	1 158.93	1 545.24	1 931.55	2 317.86
O ₂	1 122.43	1 683.65	2 244.87	2 806.08	3 367.30

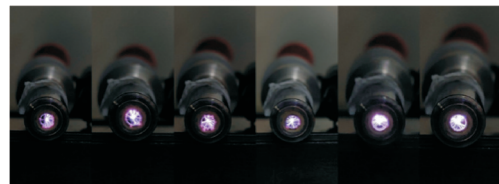
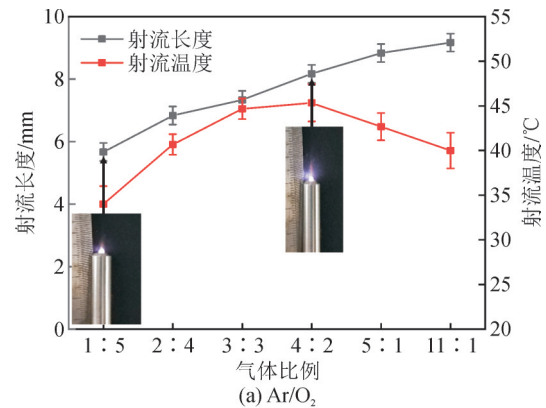
2.2 两种混合气源射流特性

APPJ大多数使用单独的惰性作为载气,研究表

明,向载气中添加少量O₂或H₂O蒸汽可以促进高浓度活性物种的产生,这些活性物种(ROS或RNS)在等离子体处理过程中起着关键的作用^[24-27]。因此,本实验将氮气和氩气分别与氧气按不同的比例进行混合来考察射流的特性(长度、温度),这是极为重要的研究工作。

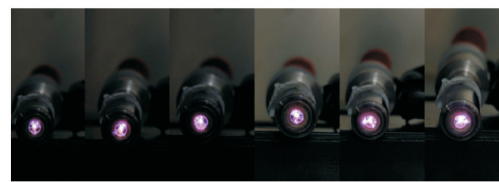
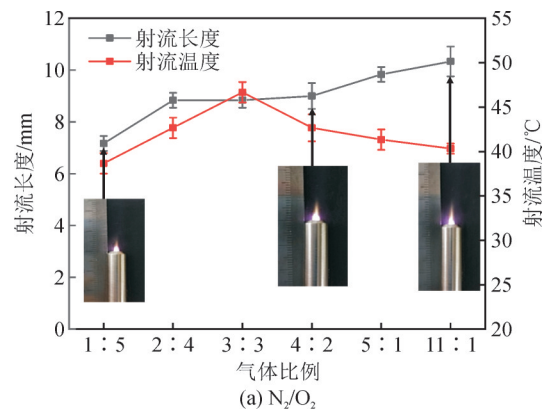
2.2.1 惰性气体、氮气与O₂组合

Ar/O₂、N₂/O₂射流长度及其剖面图随气体比例的变化分别见图4、5。



(b) 剖面

图4 Ar/O₂射流长度及其剖面图随气体比例的变化
Fig. 4 Changes of the length and profile of Ar/O₂ jet with gas ratios



(b) 剖面

图5 N₂/O₂射流长度及其剖面图随气体比例的变化
Fig. 5 Changes of the length and profile of N₂/O₂ jet with gas ratios

从图4、5可以看出,在电压为6.8 kV和流速为6.0 L/min的情况下,射流的长度随着氧气比例的降低逐渐增加,Ar/O₂射流从5.7 mm增长到9.2 mm,N₂/O₂射流从7.2 mm增长到10.3 mm。由于氧气对激发和电离粒子具有淬灭作用。氧气是电负性气体,加入氧气越多,对电子的吸附就越多,导致电子减少,等离子体射流放电强度随之变弱^[28]。如图4、5中的剖面图所示:随着氧气体积分数的减少,等离子体射流产生的放电丝逐渐变密,且发光亮度越来越强。相对于N₂/O₂气源,Ar/O₂气源产生的大气压等离子体的电流丝分布要更加均匀一些。

从射流实际温度看,在电压和流速保持不变的情况下,两种混合气源射流的温度会随着氧气比例的减小而增加,在N₂/O₂比例为1:1,即氧气体积分数为50.0%(或Ar/O₂比例为4:2,氧气体积分数为33.3%)的时候达到一个最大值,分别达到(47.0±1.0)℃和(45.0±2.0)℃,之后继续减小氧气的体积分数,温度随之减小。

Ar/O₂和N₂/O₂气体比例为3:3和电压为6.8 kV时,射流长度和温度随气体流速的变化见图6。

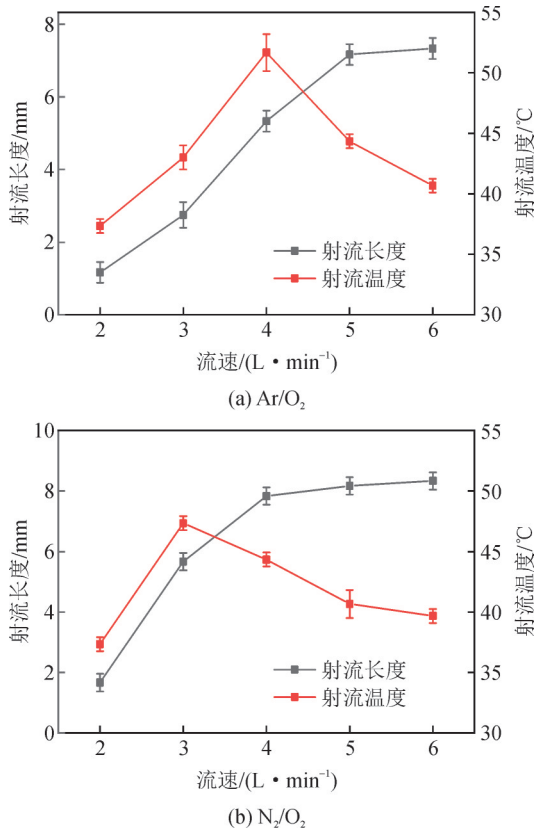


图6 Ar/O₂和N₂/O₂射流长度和温度随气体流速的变化曲线
Fig. 6 Change curves of Ar/O₂ and N₂/O₂ jet length and temperature with gas flow rates

Ar/O₂射流和N₂/O₂射流的长度都随着气体流速的增加先增加后趋于稳定,增加的幅度大体相同

(Ar/O₂射流从1.2 mm增加到7.3 mm,N₂/O₂射流从1.7 mm增加到8.3 mm),其雷诺数见表2。随着气体流速的增加,Ar/O₂气源和N₂/O₂气源在5 L/min时均达到过渡态,所以射流长度会随着气体流速的增大先增加后趋于平稳。射流温度随着气体流速的增加先增大后减小,Ar/O₂射流在4.0 L/min流速时达到最大值(51.7℃),N₂/O₂射流在3.0 L/min时达到最大值(47.3℃)。这是因为在低流速时,射流温度上升的速度要大于其冷却的速度,随着气体流速的增加,射流温度会逐渐达到热平衡状态,即趋于一个最大值。

表2 不同流速下的气体组分雷诺数

Table 2 Reynolds numbers of gas components at different flow rates

气体组合	Re				
	2 L·min ⁻¹	3 L·min ⁻¹	4 L·min ⁻¹	5 L·min ⁻¹	6 L·min ⁻¹
Ar/O ₂	904.70	1 357.05	1 809.40	2 261.75	2 714.10
N ₂ /O ₂	923.64	1 358.46	1 847.28	2 309.10	2 770.93

2.2.2 Ar与N₂组合

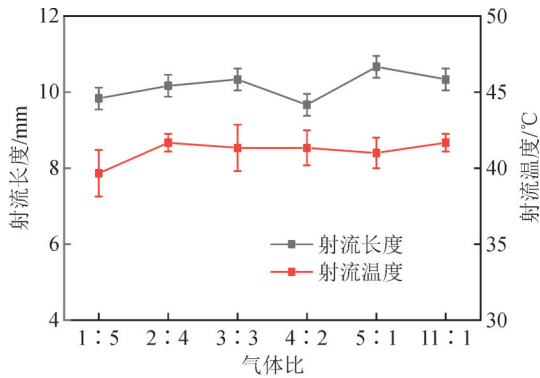
在以混合气源产生大气压等离子体射流的研究中,大部分是通过往惰性气体中掺杂一定比例的活性气体,如O₂或者H₂O,鲜有将惰性气体与N₂相混合作为射流气源的射流特性研究。

在放电电压为6.8 kV和流速为6.0 L/min的工况条件下,分析了Ar/N₂射流在不同比例下射流长度和温度的变化情况见图7。由图7(a)可以看出,两者混合后产生的APPJ射流长度和温度并没有随着两者之间比例变化有太大波动,趋于平稳:长度在10.0 mm左右波动,温度在41.0℃左右波动。这种状态与添加氧气产生的射流状态有着明显不同。

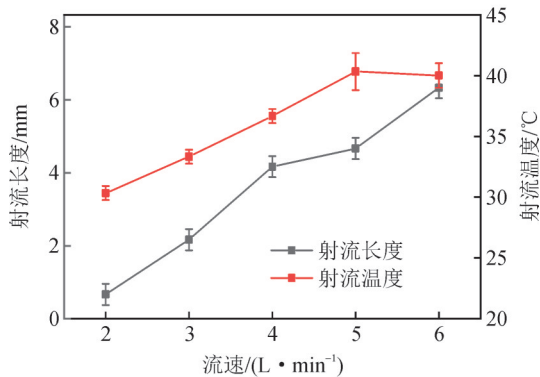
此外,在气体比例为3:3和电压为6.8 kV下,改变气体流速(2.0~6.0 L/min),其射流长度和温度的变化如图7(b)所示。射流长度随着流速的增加而增加,从0.7 mm增加到6.3 mm;而射流温度则随着流速的增加先增加后趋于稳定,从30.3℃增加到40.3℃,其雷诺数见表3,仅在气体流速为6.0 L/min,雷诺数略大于2 300,其气体流态达到过渡态,其等离子体射流长度随着流速的增加而增加。

不同比例下3种不同气源组合的启动电压随气体比例的变化曲线见图8。Ar/O₂射流的启动电压随着氧气比例的降低而逐渐降低,从4.4 kV降低到3.3 kV,而N₂/O₂射流的启动电压随着氧气比例的降低而缓慢增高,从4.8 kV提升到5.5 kV,Ar/N₂射流的启动电压则随着氮气比例的降低并无太大的波

动,仅从1.7 kV降低到1.3 kV。



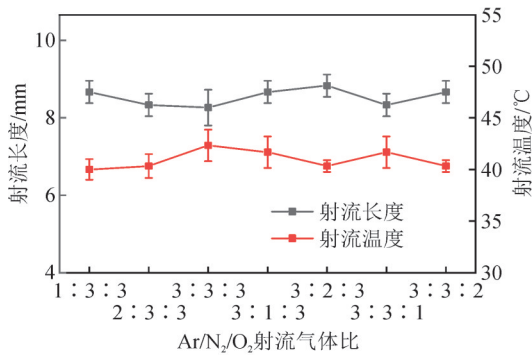
(a) Ar/N₂射流气体比



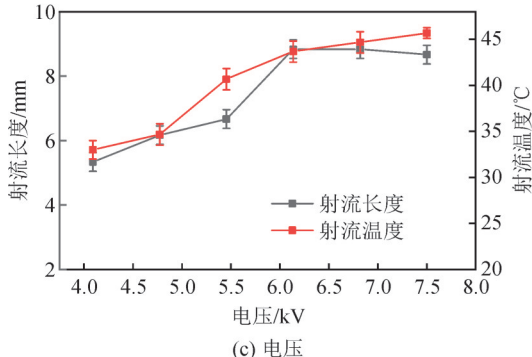
(b) Ar/N₂流速

图7 Ar/N₂射流长度和温度随气体比和流速的变化曲线

Fig. 7 Change curves of Ar/N₂ jet length and temperature with gas ratios and flow rates



(a) 气体比



(c) 电压

表3 不同流速下的Ar/N₂雷诺数

Table 3 Reynolds numbers of Ar/N₂ at different flow rates

流速/ (L·min ⁻¹)	2	3	4	5	6
Re	770.62	1 155.92	1 541.23	1 926.54	2 311.85

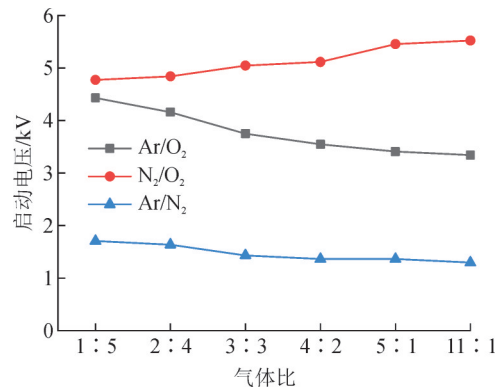


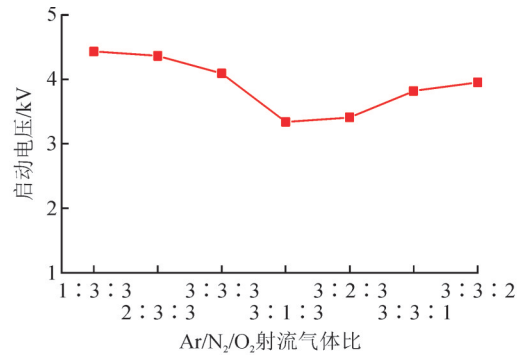
图8 不同气源组分的启动电压随气体比例的变化曲线

Fig. 8 Change curves of starting voltages of different gas source components with gas ratios

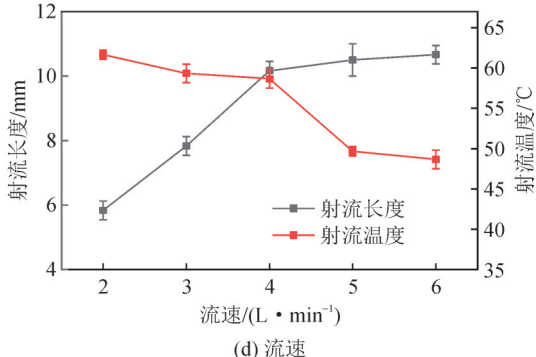
2.3 3种(Ar/N₂/O₂)混合气源射流特性

2.3.1 不同气体比例对射流特性的影响

3种气体混合状态下的射流见图9(a)、(b)。其和Ar/N₂射流的特性有着类似的情况:在电压为6.8 kV和流速为6.0 L/min的条件下,射流长度和温度随着气体比例的变化并无明显的变化,射流长度在8.3~8.8 mm之间波动,射流温度在40.5~42.3 °C之间波



(b) 启动电压



(d) 流速

图9 Ar/N₂/O₂混合气源射流长度和温度随气体比、电压和流速的变化及启动电压随气体比的变化

Fig. 9 Changes of jet length and temperature of Ar/N₂/O₂ mixed air source with gas ratios, voltages and flow rates as well as change of starting voltage with gas ratios

动。但是其放电启动电压随着各气体之间比例的变化出现两种不同的变化情况,当氩气比例逐渐增加时,放电启动电压从4.4 kV减小到4.1 kV;当氮气和氧气的比例增加时,放电启动电压呈现增加的趋势,分别从3.3 kV增加到4.1 kV,从4.0 kV增加到4.1 kV。

2.3.2 不同电压对射流特性的影响

气体比为3:3:3和流速为6.0 L/min的条件下电压对射流特性的影响见图9(c)。射流长度和温度随着电压的增加而增加(射流长度从5.3 mm增长到8.3 mm,射流温度从33.0 °C增加到45.7 °C)。电压在达到6.1 kV后,射流长度的增长速率变慢,逐渐趋于稳定;而射流温度同样在电压达到6.1 kV后,其增长速率也开始变慢(6.1~6.8 kV时仅仅增加了2.0 °C,从43.7 °C增加到45.7 °C)。

2.3.3 不同流速对射流特性的影响

在电压为6.8 kV和气体比例为3:3:3的情况下,射流长度随着气体流速的增加而增加,当流速为4.0 L/min时达到增长速率开始变慢,趋于稳定;而温度随着流速的增加而降低见图9(d)。3种混合气体随着流速变化时的雷诺数见表4,气体流速在6.0 L/min时,其雷诺数大于2 300,气体流态处于过渡态。所以其射流长度随着气体流速的增加先增加后逐渐趋于稳定。

表4 不同流速下的Ar/N₂/O₂混合气源雷诺数

Table 4 Reynolds numbers of Ar/N₂/O₂ mixture source at different flow rates

流速/ (L·min ⁻¹)	2	3	4	5	6
雷诺数	2 311.85	1 290.33	1 720.44	2 150.55	2 580.66

3 结论

文中采用了典型的同轴射流装置,对不同实验条件下(主要是气源组分、流速、启动电压和功率)的大气压等离子体射流的一些特性(主要是射流长度、宏观实际温度和放电启动电压)进行了研究,主要结论如下:

1)在单气源下,射流长度在流速为6.0 L/min的条件下随着外施电压的升高呈现先增长后趋于稳定或下降的现象。射流的温度则随着外施电压的升高而升高。射流长度和温度随功率的变化趋势和电压的情况基本相同,其中氮气的启动功率最低,氩气次之,氧气的启动功率最大;氮气(2.8 kV)和氩气(2.2 kV)的启动电压远低于氧气的启动电压(4.8 kV)。在电压为6.8 kV的条件下,射流长度随着

气体流速的升高先呈增长趋势后趋于平稳;氧气源射流的温度随着气体流速的升高而降低,而氮气和氩气源射流温度则变化幅度不大。

2)两种气体组分混合条件下,在电压为6.8 kV和流速为6.0 L/min的条件下,射流的长度随着氧气的比例降低而增加,射流温度则先增大后减小。当气体比例为3:3和电压为6.8 kV时,Ar/O₂射流和N₂/O₂射流的长度均随着气体流速的增加先增加后趋于稳定,射流温度则先增加后减小。Ar/N₂混合气体下,改变两者之间的比例不会对射流的长度和温度产生太大的实际影响。在气体比例为3:3和电压为6.8 kV的条件下,其射流长度随着流速的增加而增长,射流温度则先增加后趋于稳定。

3)3种Ar/N₂/O₂气体混合气源下产生的射流,其射流长度和温度在流速为6.0 L/min和电压为6.8 kV的条件下,随着气体比例的变化呈稳定的趋势;而放电启动电压随着氩气比例逐渐增加逐渐减小,但随着氮气和氧气比例的增加而增加。在气体混合比为3:3:3和流速为6.0 L/min的条件下,射流长度和温度随着电压的增加保持稳定,而在电压为6.8 kV和气体混合比为3:3:3的条件下,射流长度随着流速的增加先增加后趋于稳定,而温度随着流速的增加而降低。

以上结论将为大气压等离子体射流特性的进一步研究及具体应用提供重要的参考。

参考文献:

- [1] CUI Xinglei, SHEN Jiefei, ZHOU Yangyang, et al. Nanosecond pulse-driven atmospheric-pressure plasmas for polymer surface modifications: Wettability performance, insulation evaluation and mechanisms[J]. Applied Surface Science, 2022(597): 153640.
- [2] CHENG Cheng, SHEN Jie, XIAO Dezhi, et al. Atmospheric pressure plasma jet utilizing Ar and Ar/H₂O mixtures and its applications to bacteria inactivation[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(7): 524-530.
- [3] LI Yang, HAN Shitong, LI Zhanguo, et al. Decontamination of 2-chloroethyl ethyl sulfide on the surface by atmospheric pressure plasma jet[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424(Pt B): 127536.
- [4] 左坤, 杨鼎革, 柳杰, 等. 大气压Ar等离子体射流对环氧树脂表面绝缘性能提升研究[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 111-116. ZUO Kun, YANG Dingge, LIU Jie, et al. Research on the improvement of epoxy resin surface insulation performance treated by atmospheric pressure Ar plasma jet[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 111-116.
- [5] 张冠军, 詹江杨, 邵先军, 等. 大气压氩气等离子体射流长度的影响因素[J]. 高压技术, 2011, 37(6): 1432-1438.

- ZHANG Guanjun, ZHAN Jiangyang, SHAO Xianjun, et al. Influence factor analysis on jet length of atmospheric pressure argon plasma Jets[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1432-1438.
- [6] 邵先军, 张冠军, 詹江杨, 等. 气体流速对大气压氩气等离子体射流影响的实验与仿真[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1499-1504. SHAO Xianjun, ZHANG Guanjun, ZHAN Jiangyang, et al. Experimental and simulation research on the influence of gas flow rate on ar APP[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1499-1504.
- [7] SHAO Xianjun, ZHANG Guanjun, ZHAN Jiangyang, et al. Investigation on spurt length of atmospheric - pressure plasma Jets[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2340-2341.
- [8] 常正实, 邵先军, 张冠军. 基于OH基团二级光谱的氩大气压等离子体射流温度诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1736-1741. CHANG Zhengshi, SHAO Xianjun, ZHANG Guanjun. Diagnosis of temperature for argon atmospheric pressure plasma jets with oxyhydrogen grating secondary spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1736-1741.
- [9] MOTRET O, HIBERT C, PELLERIN S, et al. Rotational temperature measurements in atmospheric pulsed dielectric barrier discharge-gas temperature and molecular fraction effects[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(12): 1493.
- [10] IZA F, HOPWOOD J A. Rotational, vibrational, and excitation temperatures of a microwave-frequency microplasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(2): 498-504.
- [11] 孙振宇, 孙敏, 曹慧娟, 等. 背景气体对大气压氦等离子体射流特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3383-3392. SUN Zhenyu, SUN Min, CAO Huijuan, et al. Effect of background gas on the characteristics of atmospheric pressure helium plasma jet[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3383-3392.
- [12] 周亦骁, 方志, 邵涛. Ar/O₂和Ar/H₂O中大气压等离子体射流放电特性的比较[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 229-238. ZHOU Yixiao, FANG Zhi, SHAO Tao. Comparison of discharge characteristics of atmospheric pressure plasma jet in Ar/O₂ and Ar/H₂O mixtures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 229-238.
- [13] TESCHKE M, KEDZIERSKI J, FINANTU-DINU E G, et al. High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 310-311.
- [14] XIONG Qing, LU Xinpei, OSTRIKOV K, et al. Length control of He atmospheric plasma jet plumes: Effects of discharge parameters and ambient air[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(4): 043505.
- [15] CHANG Zhengshi, YAO Congwei, MU Haibao, et al. Study on the property evolution of atmospheric pressure plasma jets in helium [J]. Plasma Science and Technology, 2014, 16(1): 83-88.
- [16] FANG Zhi, SHAO Tao, WANG Ruixue, et al. Influences of oxygen content on characteristics of atmospheric pressure dielectric barrier discharge in argon/oxygen mixtures[J]. The European Physical Journal D, 2016(70): 1-9.
- [17] SHEN Jie, CHENG Cheng, ZHAO Ying, et al. Observation of inactivation of bacillus subtilis spores under exposures of oxygen added argon atmospheric pressure plasma jet[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(11): 110310.
- [18] JIANG Song, SHI Guojie, WANG Yonggang, et al. Discharge characteristics of atmospheric pressure Ar/N₂/O₂ a plasma jet under a square wave pulse[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(10): 3652-3658.
- [19] KYLIÁN O, ROSSI F. Sterilization and decontamination of medical instruments by low-pressure plasma discharges: application of Ar/O₂/N₂ ternary mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(8): 085207.
- [20] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 氧气含量对氦氧等离子体射流特性影响[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(4): 57-61. HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangan, et al. Effect of oxygen content on characteristics of helium oxygen plasma jet[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(4): 57-61.
- [21] LI Qing, LI Jiangtao, ZHU Wenchao, et al. Effects of gas flow rate on the length of atmospheric pressure nonequilibrium plasma jets [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(14): 141502.
- [22] JIN Dongjun, UHM H S, CHO G. Influence of the gas-flow reynolds number on a plasma column in a glass tube[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(8): 083513.
- [23] ABDEL-FATTAH E. Atmospheric pressure helium plasma jet and its applications to methylene blue degradation[J]. Journal of Electrostatics, 2019(101): 103360.
- [24] LEE H J, JUNG H, CHOE W, et al. Inactivation of listeria monocytogenes on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets[J]. Food Microbiology, 2011, 28(8): 1468-1471.
- [25] KURITA H, MIYAMOTO J, MIYACHIKA S, et al. Production of reactive oxygen and nitrogen species in a cell culture medium exposed to an atmospheric pressure plasma jet[J]. MRS Advances, 2017, 2(18): 987-993.
- [26] REN Yu, WANG Chunxia, QIU Yiping. Aging of surface properties of ultra high modulus polyethylene fibers treated with He/O₂ atmospheric pressure plasma jet[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(12): 2670-2676.
- [27] JUNG M H, BEAUDOIN S P, CHOI H S. Comparison of He/O₂ and Ar/O₂ atmospheric - Pressure plasma for photoresist etching[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2007, 154(6): 422-429.
- [28] FANG Zhi, ZHOU Yaodong, YAO Zhengqiu. The influences of water and oxygen contents on length of atmospheric pressure plasma Jets in Ar/H₂O and Ar/O₂ mixtures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2618-2619.

石朝阳(1999—),男,硕士研究生,研究方向为等离子体环境应用(E-mail: 739687551@qq.com)。

郝小龙(1978—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为环境等离子体应用(通信作者)(E-mail: xlhao@jiangnan.edu.cn)。