



惰性气体空气混合电弧流场特性研究

杜百合 张松贺 葛强 王茂刚

Study on flow field characteristics of inert gas-air hybrid arc

DU Baihe, ZHANG Songhe, GE Qiang, WANG Maogang

引用本文:

杜百合, 张松贺, 葛强, 等. 惰性气体空气混合电弧流场特性研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(5): 69–75. DOI: 10.11729/sytlx20210052

DU Baihe, ZHANG Songhe, GE Qiang, et al. Study on flow field characteristics of inert gas-air hybrid arc[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics | J Exper Fluid Mech, 2022, 36(5): 69–75. DOI: 10.11729/sytlx20210052

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11729/sytlx20210052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电弧加热器湍流平板试验流场计算分析

CFD analysis of the arc heater turbulent flow field of flat plate testing

实验流体力学. 2017, 31(2): 86–92 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160088>

电弧加热器超声速湍流平板烧蚀流场变化研究

Study on supersonic turbulence plate ablation flow field in arc heater

实验流体力学. 2018, 32(4): 72–77 <https://doi.org/10.11729/sytlx20170181>

Taylor–Couette流动特性与减阻实验研究进展

Advances in experimental research on Taylor–Couette flow characteristics and drag reduction

实验流体力学. 2021, 35(2): 104–111 <https://doi.org/10.11729/sytlx20190163>

基于等离子体合成射流的飞翼布局模型主动流动控制风洞实验研究

The wind tunnel test of the active flow control on the flying wing model based on the plasma synthetic jet

实验流体力学. 2019, 33(4): 81–88 <https://doi.org/10.11729/sytlx20190041>

高焓电弧风洞试验热化学非平衡流场数值模拟

Numerical simulation of thermochemical non-equilibrium flow field in arc-jet tunnel

实验流体力学. 2019, 33(3): 1–12 <https://doi.org/10.11729/sytlx20180138>

电弧加热器高温流场激光吸收光谱诊断

Laser absorption spectroscopy diagnostics in the arc-heater of an arcjet facility

实验流体力学. 2017, 31(4): 28–33 <https://doi.org/10.11729/sytlx20160179>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463376

Email: sytlx@163.com

网址: <http://www.sytlx.com>



关注微信公众号

获得更多资讯

惰性气体-空气混合电弧流场特性研究

杜百合*, 张松贺, 葛强, 王茂刚

中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所, 绵阳 621000

摘要:理论上小流率惰性气体添加到大流率空气电弧中不会影响到热防护材料的性能评估。采用控制电弧电流和惰性气体质量流率的方法,在电弧风洞实验平台上研究了分别在空气电弧中添加氦气(He)、氖气(Ne)、氩气(Ar)、氪气(Kr)等惰性气体-空气混合电弧的特性,测量了超声速喷管出口驻点热流密度、驻点压力和出口气流平均焓值等参数,分析了电弧电流、气体总质量流率、惰性气体质量流率占比等因素对流场特性的影响。实验结果表明:氦气质量流率占比 11.46%、总质量流率 0.2 kg/s、电弧电流 1300 A 条件下的氦气-空气混合电弧的出口气流平均焓值和热流密度分别比纯空气电弧增加了 6.07% 和 1.02%;氖气、氩气和氪气等惰性气体-空气混合电弧在超声速喷管出口的焓值和驻点压力均低于纯空气电弧,且随混合气体总质量流率和电弧电流的增大而增大,其增大程度与添加气体介质的种类和质量流率占比有关。

关键词:惰性气体;混合电弧;等离子体;流场特性

中图分类号:V211.74⁺4

文献标识码:A

Study on flow field characteristics of inert gas-air hybrid arc

DU Baihe*, ZHANG Songhe, GE Qiang, WANG Maogang

Hypervelocity Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and
Development Center, Mianyang 621000, China

Abstract: Adding a small mass flow rate of inert gas into the air arc flow field does not affect the performance evaluation of the thermal protection materials. In order to obtain the flow field characteristics of the inert gas-air hybrid arc, the flow field parameters of the supersonic nozzle exit were studied by controlling the arc current and inert gas mass flow rate in an arc heated wind tunnel. The experimental results show that the enthalpy and stagnation point heat flux of the helium-air hybrid arc are 6.07% and 1.02% higher than that of the air arc flow field respectively under the condition of helium mass ratio of 11.46%, total mass flow rate of 0.2 kg/s and arc current of 1300 A; the enthalpy and stagnation point pressure of the hybrid arc with inert gases such as neon, argon and krypton are lower than that of the air arc at the exit of the supersonic nozzle, and increase with the increase of mixed gas flow rate and arc current. The increase degree is related to the proportion of the added gas medium and total mass flow rate.

Keywords: inert gas; hybrid arc; plasma; flow field characteristics

0 引 言

电弧加热设备是开展高超声速飞行器再入气动加热研究的重要地面试验设备,通常将空气介质在电弧加热器内电离后,利用超声速喷管加速获得比

较均匀的高温流场试验条件^[1-2]。电弧加热器所产生的高电压直流电弧通过辐射、热传导和对流的换热方式对进入水冷加热器内部的约束气流传输热能,形成高温热气流。喷管出口的流场参数控制是实现热防护试验模拟的关键^[3-4]。某些情况下,采用纯空

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-07-16; 录用日期: 2021-07-29

基金项目: 载人航天领域预先研究项目(010502)

* 通信作者 E-mail: dubh@ustc.edu

引用格式: 杜百合, 张松贺, 葛强, 等. 惰性气体-空气混合电弧流场特性研究 [J]. 实验流体力学, 2022, 36(5): 69-75.

DU B H, ZHANG S H, GE Q, et al. Study on flow field characteristics of inert gas-air hybrid arc[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(5): 69-75.

气电弧并不能获得所需的试验条件,需要在空气电弧中添加其他气体介质进行参数调节。惰性气体性能稳定,常用作电极保护气体,电离后对空气电弧流场组分影响小,不参与试件表面化学反应,不影响热防护性能评估,可作为空气混合电弧流场研究的主要添加气体。

国内外学者对惰性气体电弧特性开展了广泛的研究,早期研究以氩气(Ar)电弧特性为主。文献[5-9]中以氩气为工作气体,研究了层流等离子体温度、电弧电压、射流长度、形貌等特性。文献[10-11]研究了氖气(Ne)、氦气(He)和氩气等工作气体的等离子体特性。文献[12]研究了直流纯氮气(N₂)层流等离子体的射流特性。在混合电弧研究方面,文献[13]研究了氩气和氩气-氢气(Ar-H₂)混合电弧的射流特性。王德文等^[14]在电弧风洞中研究了超燃冲压发动机模型中乙烯点火的动力学特征。文献[15]研究了一种用于灭弧开关的直流氢气-氮气(H₂-N₂)混合电弧在高压条件下的等离子体特征。文献[16]基于各向异性分析模型研究了转移电弧等离子炬中蒸气-空气混合电弧的伏安特性。文献[17]在电弧加热设备上进行了冷空气与电弧高温流场混合特性试验研究。

上述研究中,文献[5-13, 15-16]针对工业等离子体应用,以纯惰性气体电弧、Ar-H₂和H₂-N₂等混合电弧研究为主,主要集中在焊接和特种粉末材料制备等行业的应用方面。文献[14, 17]以空气电弧为主,研究了发动机点火性能和冷空气混合对流场特性的影响。本研究针对高超声速再入气动加热模拟需求,依托电弧风洞试验设备,对在空气电弧中添加惰性气体的超声速流场特性展开研究,探究流场参数调节的新技术和新方法。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

试验在20 MW电弧风洞中进行,设备本体由电弧加热器、超声速喷管、试验段、扩压器等组成,如图1所示。电弧加热器由直流电源系统供电,试验前可预先设定电弧电流;试验介质由压缩空气控制单元和惰性气体控制单元组成,能同时给出试验气体操作压力和质量流率测量结果;冷却水系统为电弧加热器和超声速喷管提供冷却供水,能同时给出冷却水质量流率和进出水的温差。

电弧加热器为固定弧长片段式结构,内径80 mm;

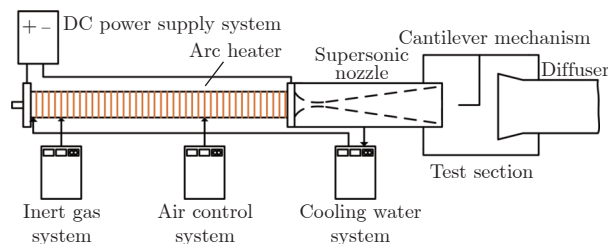


图1 实验设备原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

超声速喷管为轴对称型夹层水冷结构,喉道直径38 mm,出口直径150 mm。采用SR15 mm半球驻点热流探针和圆柱形测压探针(直径10 mm)分别测量驻点热流密度和驻点压力,驻点热流密度探针和驻点压力探针由固定在试验段内部的悬臂送入流场。

1.2 试验方法

预先设定电弧控制电流、气体介质和质量流率,建立稳定流场后,用悬臂将驻点热流密度探针和驻点压力探针分别送入喷管几何轴线位置完成测量。在添加惰性气体的试验中,先用空气电弧建立流场,再注入惰性气体介质,流场稳定后进行试验参数测量。

开展了5种气流(空气以及空气中分别添加氢气、氖气、氩气、氦气),3种电弧电流(1100、1300和1500 A)下的试验研究,具体试验参数如表1所示。

试验过程中测量了喷管出口驻点热流密度(q_s)、驻点压力(p_w)、出口气流平均焓值(H_0)以及电弧电压(U)等参数,数据记录由风洞数据采集系统完成。试验中,驻点热流和驻点压力探针与喷管出口距离均为40 mm。

1.3 测试方法

驻点热流密度探针由铜半球、隔热套、量热塞及热电偶组成。量热塞直径 $\Phi 4$ mm,高7 mm,热电偶为镍铬-镍硅材料,热电偶直径 $\Phi 0.1$ mm。热流密度的计算基于集总热容法,如式(1)所示:

$$q_s = \rho c_p \delta \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度,下标s表示驻点, MW/m²; ρ 为量热塞密度, kg/m³; c_p 为量热塞的定压比热, MJ/(kg·°C); δ 为量热塞厚度, m; T 为量热塞背壁面温度, °C; t 为升温历经的时间, s。量热塞灵敏度系数和精度由热流标定系统标定。

根据热力学第一定律,在忽略电弧加热器和喷管表面的辐射损失、电极或等离子体发生器材料内部热量损失以及气体初始焓值的条件下,喷管出口

表 1 试验参数 Table 1 Experimental parameters				
添加介质	介质质量流率 $G_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	空气质量流率 $G_{\text{air}}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	气体总质量流率 $G/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	电弧电流 I/A
空气(干燥)	—	0.1530	0.1530	1100
	—	0.2040	0.2040	1300
	—	0.2560	0.2560	1500
氦气	0.0224	0.1200	0.1424	1100
	0.0224	0.1730	0.1954	1300
	0.0224	0.2210	0.2434	1500
氖气	0.0797	0.0910	0.1707	1100
	0.0797	0.1240	0.2037	1300
	0.0797	0.1720	0.2517	1500
氩气	0.0564	0.1500	0.2064	1100
	0.0564	0.2030	0.2594	1300
	0.0564	0.2520	0.3084	1500
氪气	0.2267	0.0910	0.3177	1100
	0.2267	0.0920	0.3187	1300
	0.2267	0.0900	0.3167	1500

气体获得的能量等于输入能量(电弧功率, $P_{\text{电}}$)与电弧加热器和喷管冷却水带走能量(冷却功率, $P_{\text{冷}}$)的差值。由此可以得到喷管出口气流平均焓值:

$$H_0 = (P_{\text{电}} - P_{\text{冷}})/G$$

(2)

$$P_{\text{电}} = UI$$

(3)

$$P_{\text{冷}} = Wc_p\Delta T$$

(4)

式中: H_0 单位为 MJ/kg, $P_{\text{电}}$ 、 $P_{\text{冷}}$ 单位为 MW; I 为电弧电流; W 为冷却水质量流率, ΔT 为温升。

驻点压力采用量程 70 kPa 的 CYG 型绝压传感器测量。电弧电压采用高精度电阻分压器测量, 标定系统精度为 0.05%。电弧电流采用磁调制式直流比较仪测量, 标定系统精度为 0.2%。压缩空气质量流率采用节流孔板流量计测量, 测量精度为 3%。惰性气体质量流率采用涡轮流量计测量, 测量精度 1%, 重复性精度 $\pm 0.3\%$ 。

2 试验结果与讨论

图 2、3 分别给出了试验得到的驻点热流密度和驻点压力测量结果, 图 4 为利用能量平衡法测量得到的喷管出口气流平均焓值。

结合表 1 中的试验参数, 分析图 2 数据发现: 与纯空气电弧相同, 添加惰性气体后的惰性气体-空气混合电弧喷管出口热流密度也随电弧电流增大呈增大趋势, 增大的程度与气体介质种类相关。从图 3 可

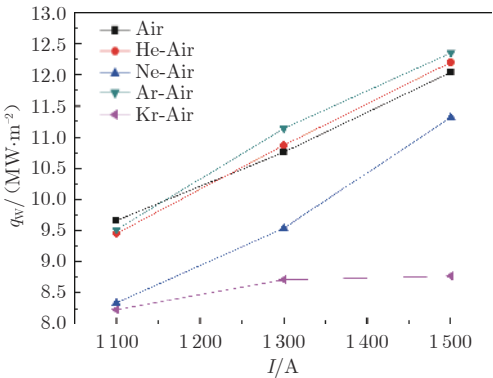


图 2 驻点热流密度测量结果
Fig. 2 Stagnation heat flux measurement results

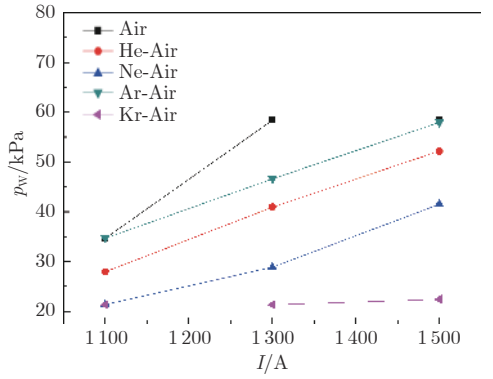


图 3 驻点压力测量结果
Fig. 3 Stagnation pressure measurement results

以看出: 添加惰性气体后, 喷管出口的驻点压力也表现出了随电弧电流增大而增大的趋势, 且纯空气电

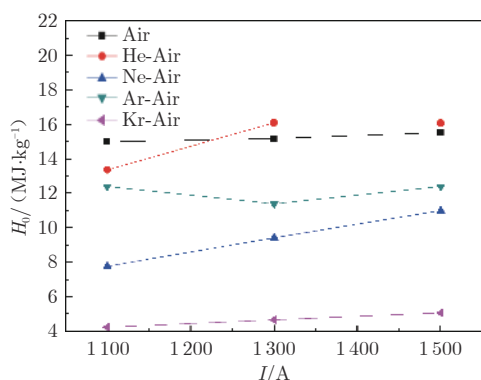


图4 出口气流平均焓值测量结果

Fig. 4 Measurement results of average enthalpy value of outlet gas flow

弧喷管出口驻点压力在电弧电流为 1300 A 时出现了压力突增现象。

分析图 4 中的出口气流平均焓值可知: 纯空气、氦气-空气、氖气-空气混合电弧焓值随电弧电流的增大呈增大趋势, 氦气-空气、氖气-空气混合电弧的出口气流平均焓值在电弧电流为 1300 A 时都出现了拐点, 在拐点之后, 氦气-空气混合电弧焓值下降, 而氖气-空气混合电弧焓值上升。

在给定的 1100、1300 和 1500 A 3 个电弧电流条件下, 对比纯空气电弧流场驻点热流密度、驻点压力和焓值测量结果, 进一步分析惰性气体-空气混合电弧对喷管出口流场参数的影响可知:

添加氦气的质量流率分别占混合气体总质量流率的 15.73%、11.46% 和 9.20%, 与纯空气电弧流场参数比较, 驻点热流密度分别增大了 -2.17%、1.02%、1.33%, 驻点压力分别降低了 19.27%、29.88% 和 10.65%, 出口气流平均焓值分别增加了 -10.82%、6.07% 和 3.55%。分析这些数据可知, 随着氦气质量流率占比的减小和电弧电流的增大, 驻点热流密度和气流焓值呈现增加的趋势。因此, 在空气流场中添加较小质量流率占比的氦气, 在大电流情形下可以获得比纯空气电弧更高的气流焓值和热流密度, 这对某些耐热材料的气动加热环境模拟非常有利。值得注意的是, 氦气-空气混合电弧驻点压力在 1300 A 电流条件下的降幅约为纯空气电弧的 30%。

氖气-空气混合电弧在喷管出口位置处的热流密度显著低于氦气-空气混合电弧。在给定的 3 个电弧电流 1100、1300 和 1500 A 条件下, 添加氖气的质量流率分别占混合气体总质量流率的 46.69%、39.13% 和 31.66%, 比纯空气电弧形成的喷管出口热流密度分别低 13.66%、11.34%、5.98%, 驻点压力分别低 38.26%、

50.51% 和 28.94%, 出口气流平均焓值分别低 48.16%、37.93% 和 29.14%。随着氖气质量流率占比的降低, 驻点热流密度和气流焓值降低的幅度随着电弧电流的增大而减小。氦气-空气混合电弧类似, 在 1300 A 电流条件下, 驻点压力下降幅度较大, 比纯空气电弧低 50.51%。

添加氩气的质量流率分别占气体总流率的 27.31%、21.73%、18.27%。与纯空气电弧流场参数比较, 驻点热流密度分别增加了 -1.55%、3.53% 和 2.57%, 驻点压力分别增大了 0.14%、-20.12% 和 -0.79%, 出口气流平均焓值降低了 17.30%、24.93% 和 20.18%。随着氩气质量流率占比的降低, 热流密度呈增大的趋势, 而出口气流平均焓值呈下降的趋势。随着电弧电流的增大, 热流密度和压力近似线性增长, 而出口气流平均焓值则非线性变化。

在所有的惰性气体-空气混合电弧流场中, 氦气-空气混合电弧在喷管出口位置处的热流密度最低。分析认为, 相同试验操作压力条件下, 氦气密度 (标准状况下相对密度为 3.736 kg/m³) 最大, 氦气-空气混合电弧流场后的总质量流率比纯空气电弧流场的质量流率分别增加了 107.64%、56.23%、23.71%。受试验操作压力限制, 试验中氦气的质量流率已经超过了空气质量流率, 氦气质量流率分别占实验气体总流率的 71.36%、71.13% 和 71.58%。相比于纯空气电弧流场的参数, 驻点热流密度分别降低了 14.80%、19.05% 和 27.16%, 驻点压力分别降低了 38.40%、63.44% 和 61.54%, 出口气流平均焓值降低了 71.74%、69.26% 和 67.38%。出口气流平均焓值的大幅降低引起了热流密度和压力的降低 (图 2、3)。

综合分析上述 4 种添加气体对气流焓值的影响可以发现: 氦气-空气、氖气-空气混合电弧在对应实验条件下的总质量流率与纯空气电弧的总质量流率非常接近 (表 1), 氦气质量流率在总质量流率中的占比约为氖气质量流率占比的 3 倍; 而相比于纯空气电弧, 混合电弧出口气体平均焓值最高下降了 48.16%, 最低也下降了接近 30%。分析认为: 相比于氦气, 对于氖气这种分子量较大的气体, 在混合气体总质量流率一定的情况下, 尽可能降低其质量流率的占比, 才能减小混合气体电弧喷管气流焓值降低的幅度, 这个结论同样适用于添加其他大分子量惰性气体的情况。

为了获得更宽参数范围内添加惰性气体对焓值的影响规律, 通过对影响焓值的控制参数试验相关性分析可知: 试验条件下喷管出口焓值与添加惰性

气体的质量流率占比、气体总质量流率和电弧电流相关。因此,可以假定出口气流平均焓值 H_0 与惰性气体的质量流量占比 η 、气体总质量流率 G 、电弧电流 I 存在以下关系:

$$H_0 = \eta^a G^b I^c \quad (5)$$

可利用多组试验数据求解上述方程,从而确定出待系数 a 、 b 和 c 。对于不同的惰性气体,可以得到不同的 a 、 b 、 c 值。根据求解的试验关联式,计算分析了添加不同惰性气体的混合电弧喷管出口平均焓值随电弧电流、总质量流率变化的规律。

图5为气体总质量流率 0.3 kg/s、惰性气体 (He/Ne/Kr) 添加质量流率占比 20% 条件下喷管出口平均焓值随电弧电流 I 的变化规律。从图5可以看出:添加惰性气体的混合电弧和纯空气电弧在喷管出口的平均焓值均随着电弧电流的升高而增大,但增大的幅度各不相同。氦气-空气混合电弧喷管出口平均焓值高于纯空气电弧,且随着电弧电流的增大,二者差值越大。氖气-空气混合电弧的焓值在电弧电流大于 5000 A 时超过了纯空气电弧,电弧电流大于 5800 A 时超过了氦气-空气混合电弧,说明在大电流情形下氖气-空气混合电弧可获得更高的焓值。氩气-空气混合电弧的喷管出口平均焓值远低于纯空气电弧,随电流增大而增大的趋势比较缓慢。

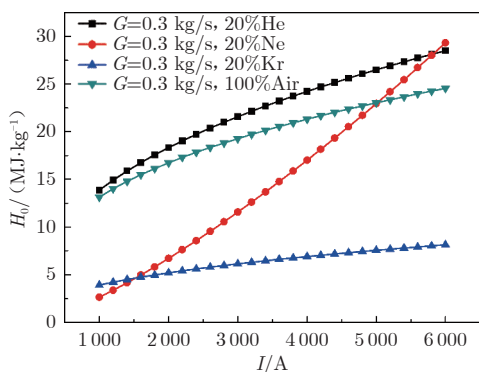


图5 出口气流平均焓值随电弧电流变化曲线

Fig. 5 Average enthalpy of outlet gas flow versus arc current curve

图6为 $I=2000$ A、惰性气体质量流率占比一定时,喷管出口平均焓值随总质量流率变化的规律。从图6中可以看出:2000 A 电弧电流条件下,添加 10% 氦气的混合电弧喷管出口平均焓值在总质量流率小于 0.2 kg/s 时低于纯空气电弧,总质量流率大于 0.2 kg/s 时高于纯空气电弧,且随总质量流率的增大而增大。值得注意的是:添加 10% 的氖气-空气混合电弧喷管出口平均焓值在总质量流率大于

0.8 kg/s 后超过了相同质量流量条件下纯空气电弧喷管出口平均焓值,总质量流率大于 0.9 kg/s 后超过了氦气-空气混合电弧喷管出口平均焓值,说明氖气-空气混合电弧在大质量流率条件下可获得比纯空气电弧和氦气-空气混合电弧更高的喷管出口平均焓值,这一现象还有待进一步研究。

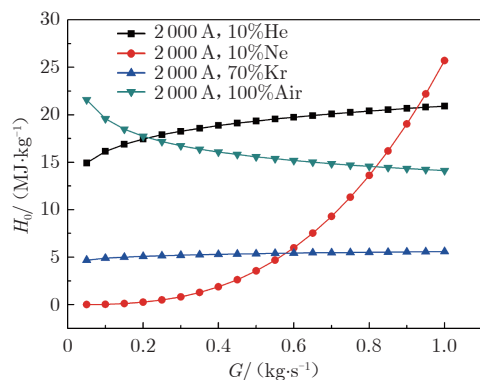


图6 出口气流平均焓值随总质量流率的变化曲线

Fig. 6 Average enthalpy of outlet gas flow versus mass flow rate curve

图7为电弧电流分别为 1000、2000 和 3000 A 条件下,添加 10% 氦气的混合电弧和纯空气电弧焓值随总质量流率变化的规律。从图7中可以看出:不同电流条件下,纯空气电弧的出口气流平均焓值随总质量流率的增大逐渐减小,符合纯空气电弧出口气流平均焓值与质量流率的一般规律。但添加氦气的混合电弧出口气流平均焓值在氦气质量流率占比一定的情况下,出口气流平均焓值随总质量流率的增大而逐渐增大,说明在大质量流率条件下,添加一定比例的氦气可获得比纯空气电弧更高的气流焓值,这为我们在大质量流率条件下获得更高的气流焓值提供了一种新的技术途径。

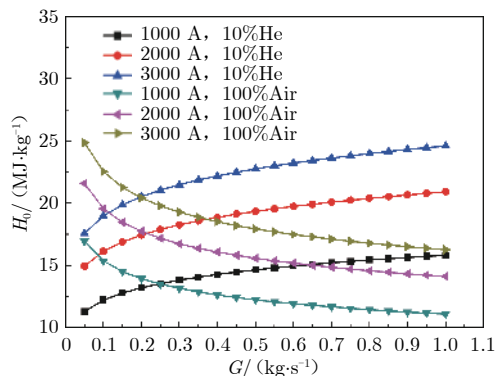


图7 氦气-空气混合电弧与纯空气电弧的出口气流平均焓值比较

Fig. 7 Comparison of average enthalpy of outlet gas flow between helium-air mixed arc and air arc

3 结 论

在电弧风洞空气电弧中,通过添加氦气、氖气、氩气和氮气等惰性气体获得惰性气体-空气混合电弧,研究了超声速喷管出口的流场参数变化规律。在本试验设备参数范围内,得到如下结论:

添加氦气的质量流率占比较小时,氦气-空气混合电弧可获得比纯空气电弧更高的出口气流平均焓值和热流密度;添加氖气、氩气或氮气形成的惰性气体-空气混合电弧出口气流平均焓值都低于纯空气电弧,且随电弧电流的增大呈增大趋势,增大的程度与添加气体介质的种类和质量流率占比有关;氖气-空气混合电弧在大电流情形下可获得比纯空气电弧和氦气-空气混合电弧更高的出口气流平均焓值。

在空气电弧中添加适量小分子量惰性气体(如氦气、氖气)形成的混合电弧可获得比纯空气电弧更高的出口气流平均焓值,这对大功率电弧加热器性能拓展以及防热材料性能试验评估需求条件(高焓、高热流密度流场)的实现具有重要意义,有必要在大功率电弧加热风洞中进一步开展更大电流条件下添加小分子量惰性气体对流场参数的影响规律以及大口径喷管流场均匀性和流场组分的测量研究,为将来工程应用研究积累技术基础。

参考文献:

- [1] GOLDSTEIN E M. Plasma arc testing of hypervelocity materials[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1968, 5(10): 1232-1233.
doi: 10.2514/3.29459
- [2] AMUNDSON M, SMITH D. Ground test and evaluation methodologies and techniques for the development of endoatmospheric interceptors[C]//Proc of the Annual Interceptor Technology Conference. 1993.
doi: 10.2514/6.1993-2679
- [3] BALTER-PETERSON A, NICHOLS F, MIFSUD B, et al. Arc jet testing in NASA Ames Research Center thermophysics facilities[C]//Proc of the AIAA 4th International Aerospace Planes Conference. 1992.
doi: 10.2514/6.1992-5041
- [4] Dorrance W H. Viscous hypersonic flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1962: 69-101
- [5] 孟显, 李腾, 潘文霞, 等. 层流氩等离子体射流温度的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 783-786.
MENG X, LI T, PAN W X, et al. Temperature measurements of laminar argon plasma jet[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 783-786.
doi: 10.3788/HPLPB20112303.0783
- [6] 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 W X, MENG X, WU C K. Length change of dc laminar-flow argon plasma-jet[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(4): 677-679.
doi: 10.3321/j.issn:0253-231X.2005.04.042
- [7] 查柏林, 江鹏, 袁晓静, 等. 等离子体射流特性分析[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2012, 32(2): 187-192.
ZHA B L, JIANG P, YUAN X J, et al. The study of plasma jet characteristics[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2012, 32(2): 187-192.
doi: 10.3969/j.issn.0254-6086.2012.02.016
- [8] 赵文华, 田阔, 刘笛, 等. 电弧等离子体射流核脉动及射流形貌[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(4): 442-445.
ZHAO W H, TIAN K, LIU D, et al. Fluctuations of the core and the jet shape of an arc plasma spraying jet[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(4): 442-445.
doi: 10.3321/j.issn:1000-0054.2002.04.005
- [9] 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): 3451-3457.
YAN J H, TU X, MA Z Y, et al. Characterization of DC argon plasma jet at atmospheric pressure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(7): 3451-3457.
doi: 10.3321/j.issn:1000-3290.2006.07.042
- [10] 雷泉, 方志, 邵涛, 等. 大气压氖气介质阻挡放电脉冲等离子体射流特性[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(5): 1206-1210.
LEI X, FANG Z, SHAO T, et al. Characterization of dielectric barrier discharge pulse plasma jet in neon at atmospheric pressure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5): 1206-1210.
doi: 10.3788/HPLPB20122405.1206
- [11] 牛铮, 邵涛, 章程, 等. 纳秒脉冲放电等离子体射流特性[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 617-620.
NIU Z, SHAO T, ZHANG C, et al. Characteristics of nanosecond-pulse atmospheric pressure plasma jet[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 617-620.
doi: 10.3788/HPLPB20122403.0617
- [12] 向勇, 余德平, 曹修全, 等. 直流纯氮层流等离子体射流特性的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 092005.
XIANG Y, YU D P, CAO X Q, et al. Experimental study on characteristics of direct-current laminar-flow nitrogen plasma-jet[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 092005.
doi: 10.11884/HPLPB201426.092005
- [13] 王德文, 杨月诚, 查柏林. 氩/氢等离子体射流特性研究[J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(7): 141-144.
WANG D W, YANG Y C, ZHA B L. Study on characteristics of Ar/H₂ plasma jet[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2013, 34(7): 141-144.
- [14] DO H, PASSARO A, LEE T, et al. Ethylene flame dynamics in an arc-heated hypersonic wind tunnel[R]. AIAA 2013-0700, 2013.
doi: 10.2514/6.2013-700

- [15] XIN C, WU J W, LIU B, et al. Plasma characteristics of DC hydrogen—nitrogen mixed gas arc under high pressure[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(10): 2722-2723.
doi: [10.1109/TPS.2014.2340432](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2340432)
- [16] BUBLIEVSKY A F, GORBUNOV A V, MARQUESI A R, et al. Generalization of the total current-voltage characteristics for transferred arc plasma torch with steam and air plasmas based on the analytical anisotropic model[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(10): 3707-3715.
doi: [10.1109/TPS.2015.2469675](https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2469675)
- [17] HAMMOCK G L. Expansion of the AEDC H₂ arc heater facility test envelope using cold-air mixing[R]. AIAA 2017-

4527 2017.

doi: [10.2514/6.2017-4527](https://doi.org/10.2514/6.2017-4527)**作者简介:**

杜百合(1970—),男,甘肃静宁人,正高级工程师。研究方向:高超声速气动热防护试验技术。通讯地址:四川省绵阳市涪城区二环路南段6号5信箱(621000)。
E-mail: dubh@ustc.edu

(编辑:宋嘉慧)