

等离子体发生器结构对热效率的影响

曹修全,余德平*,向勇,姚进

(四川大学制造科学与工程学院,四川成都610065)

摘要:为了研究层流等离子体发生器结构对发生器热效率的影响,进而指导层流等离子体发生器的设计,通过实验获取了两种不同结构层流等离子体发生器在相同工作参数下的弧压和热效率。根据实验结果对两种不同结构层流等离子体发生器的弧压特性和热效率进行对比分析。分析结果表明:采用纯氮气作为工作气体时,在相同工作参数下,虽然分段式阳极结构层流等离子体发生器的弧压较高,但其热效率较传统两极式层流等离子体发生器低。

关键词:层流等离子体;发生器结构;伏安特性;热效率

中图分类号:O536

文献标志码:A

Influences of the Plasma Torch Structures on the Thermal Efficiency

CAO Xiuquan, YU Deping*, XIANG Yong, YAO Jin

(School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study the influence of the torch constriction on the thermal efficiency, and then to guide the design of laminar plasma torch, the arc voltage and thermal efficiency of two laminar plasma torches with different constriction, working with the same working parameters, were obtained by experiments. Based on the experimental results, the arc voltage and thermal efficiency of the two plasma torch were compared and analyzed. The results showed that working with pure Nitrogen, although the arc voltage of the segmented anode laminar plasma torch (MEPT) is much higher than that of the conventional laminar plasma torch (TEPT), the thermal efficiency of MEPT is much lower than that of TEPT.

Key words: laminar plasma; torch structure; $V-A$ characteristic; thermal efficiency

热等离子体具有高温、高热焓、高能量密度等优异特性,被广泛应用于纳米材料合成^[1-2]、表面改性^[3-4]、危险废弃物处理^[5-6]等诸多领域^[7]。然而,由于湍流等离子体射流的波动特性导致其对周围空气卷吸严重,从而使其具有射流长度短、轴向温度梯度大、噪声大、可控性和加工精度差等缺陷^[8]。近年来,为了弥补湍流等离子体射流的缺陷,国内外科研人员基于湍流等离子体技术,开发了不同结构形式的层流等离子体发生器(根据发生器结构形式可分为:分段式阳极结构发生器和传统两极式发生器^[3]),以产生具有射流长度长、轴向温度梯度小、噪声小、可控性好等优点的层流等离子体射流^[8]。

基于这两种典型结构的层流等离子体发生器,国内外科工作者对层流等离子体技术进行了研究。潘文震等利用自制的分段式阳极结构层流等离子体发生器对层/湍流等离子体射流特性进行了对比研究^[9],并研究了中间级内径对射流特性的影响^[10]; Osaki等^[11]用分段式层流等离子体发生器研究了气体成分对发生器热效率的影响;向勇等^[12]基于自制的分段式阳极结构发生器研究了工作参数对层流等离子体发生器伏安特性及射流长度的影响;苗建国等^[13]则基于传统两极式层流等离子体发生器研究了进气方式等因素对发生器伏安特性和射流长度的影响。

收稿日期:2015-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405315);四川大学引进人才科研启动资助项目(yj2012043)

作者简介:曹修全(1989—),男,博士生.研究方向:等离子体发生器开发与应用. E-mail:cao_comeon@126.com

*通信联系人 E-mail:williamydp@scu.edu.cn

分析上述文献可知,虽然已经有诸多科研工作者基于单一结构的层流等离子体发生器对其产生的等离子体射流特性进行了研究,但尚未发现有关层流等离子体发生器结构对热效率的影响的相关研究报道。因此,作者基于自制的两种典型结构的层流等离子体发生器,利用自制的数据采集系统,通过实验获取了两种结构的发生器在相同工作参数下的弧压和热效率。根据实验结果,对两种结构层流等离子体发生器的弧压特性和热效率特性进行对比分析与讨论。

1 实验

1.1 实验装置

实验采用的层流等离子体发生系统如图1所示,由供气子系统、冷水机组、直流电源和等离子体发生器组成。供气子系统包括氮气气瓶、流量控制器(LF400S)、流量显示仪和管道组成。工作气体氮气从氮气气瓶经减压阀减压至0.4 MPa后,由流量控制器精确控制其流量,并供给给等离子体发生器。MGFW风冷柜式冷水机组,将去离子水冷却至20℃供给给等离子体发生器,以冷却等离子体发生器各组成部件。直流电源采用JCL-DL80等离子体电源,以转换效率高达90%以上的逆变电源技术将三相交流电转换为直流电供给给等离子体发生器,并采用高频引弧技术完成等离子体发生器的自动起弧。

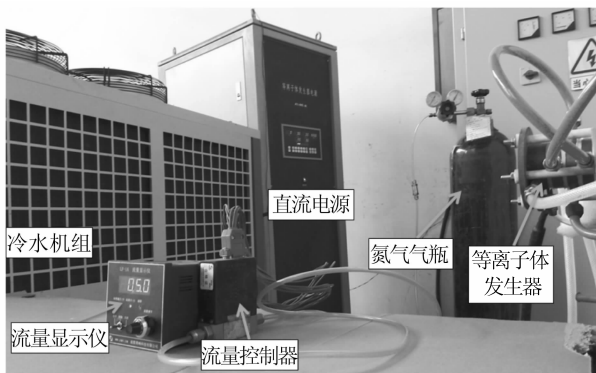


图1 层流等离子体发生系统实物图

Fig. 1 Laminar plasma jet generating system in the experiments

等离子体发生器是整个系统的核心部件,采用如图2所示的两种典型结构形式的层流等离子体发生器。图2(a)为分段式阳极结构发生器,简称MEPT,由棒状钨极、中间级(引弧环、压缩环和中间环)和圆柱状铜阳极组成,各级之间采用六方氮化

硼绝缘环电绝缘并单独冷却,采用轴向进气的方式为弧室供气。该发生器工作时,首先通过高频高压将电弧在棒状钨极与引弧环之间引燃,后自动转弧到阳极,并在给定电流下稳定工作。图2(b)为传统两极式发生器,简称TEPT,由棒状钨极和圆锥状铜阳极组成,两极之间采用六方氮化硼绝缘环电绝缘并单独冷却,采用轴向进气方式供气。该发生器工作时,电弧直接在钨极与阳极之间引燃,并稳定工作。

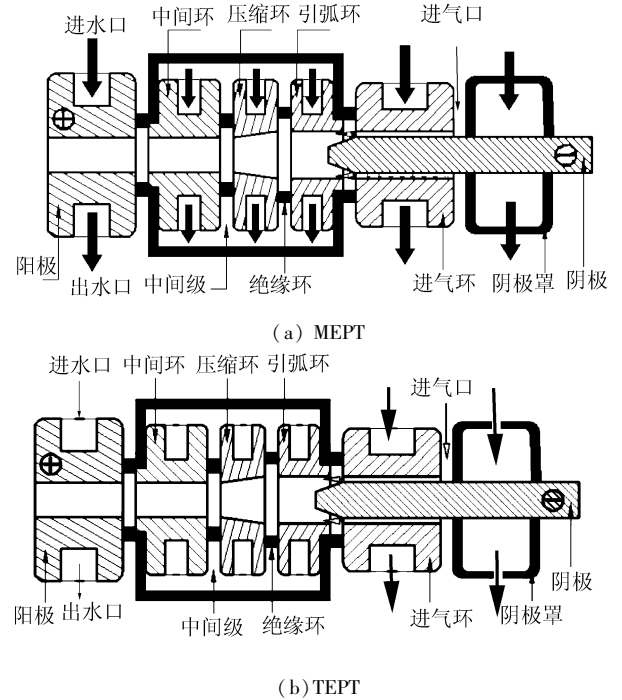


图2 两种典型结构形式的层流等离子体发生器简图

Fig. 2 Schematic diagrams of two typical laminar plasma torch structures

1.2 实验方法

采用两种典型结构的层流等离子体发生器,分别采集3组不同电流:40、70和100 A时,气流量分别为3、4、5、6、7 L/min对应的电压值及进出口冷却水温度和流量。利用装有Labview采集程序的笔记本电脑实时记录由数据采集卡(NI USB-6210, 16 inputs, 16-bit, 250 kS/s)采集的电压和电流信号,并利用温度传感器和涡轮流量计分别测量冷却水进出口温度和冷却水流量。为了保证测量结果的准确性和科学性,利用采集所得电压信号的平均值作为发生器弧压,并读取3次冷却水进出口温度取平均值作为冷却水温差。然后根据如式(1)所示热效率计算公式计算各参数下发生器的热效率:

$$\eta = \frac{UI - CQ\Delta T_p}{UI} \quad (1)$$

式中, η 为热效率, U 为电压, I 为电流, C 为冷却水的比热容, Q 为冷却水流量, ΔT 为冷却水进出口温差, ρ 为冷却水密度。

2 结果与讨论

2.1 弧压

图 3 为两种结构的层流等离子体发生器在相同工作参数下的弧压特性。

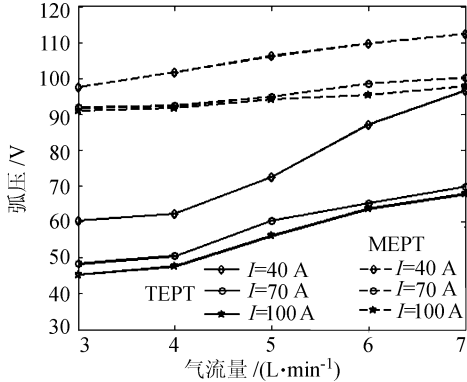


图 3 两种结构层流等离子体发生器弧压特性

Fig. 3 Arc voltages of two plasma torches at different working parameters

由图 3 可知,分段式阳极结构层流等离子体发生器(MEPT)弧压高于传统两极式层流等离子体发生器(TEPT)弧压。MEPT 工作时,平均弧压约为 95 V,而 TEPT 平均弧压则低于 70 V。这是由于 MEPT 阴阳极间距离较 TEPT 长,弧长更长,因此工作弧压更高,更易在相同工作参数下获得较大的功率。因此,在相同功率下,MEPT 的工作电流更小,有利于降低电极的烧蚀,延长电极的使用寿命。

此外,由图 3 可知,两种典型结构的层流等离子体发生器弧压均随着气流量的增加呈增加的趋势,且 TEPT 较 MEPT 增加的更明显。随着气流量的增加,阳极弧根在气动力的作用下沿着轴线方向向喷口移动,从而略微增加了电弧长度,进而增加弧压。同时,冷气层的厚度随着气流量的增加而不断增厚,对电弧的压缩作用增强,从而略微增大了电弧电阻,由欧姆定律可知,弧压也随之增大。由于 TEPT 阳极弧根可在气动力的作用下从阳极锥面部分逐渐移动到圆柱段,电弧长度变化明显,从而 TEPT 弧压增加较 MEPT 明显。此外,在图 3 中,当气流量低于 5 L/min 时,MEPT 的弧压基本相同。这是由于在 100 A 时,MEPT 工作功率增加,导致电弧温度增加,电弧截面增大,进而降低电弧电阻。由于电流增加的比例和电阻降低的比例相近,故而虽然 100 A 是增

大了电流,其弧压仍与 70 A 时基本相同。

2.2 热效率

图 4 为两种典型结构层流等离子体发生器的热效率特性图。由图 4 可知,MEPT 的热效率较 TEPT 的热效率低。MEPT 的热效率最高仅约 43%,而 TEPT 则可高达 76% 以上。由于 MEPT 电弧通道长,电弧与被冷却水冷却的弧室壁接触面积更大,更多的热量被冷却水带走,从而其热效率较 TEPT 低。

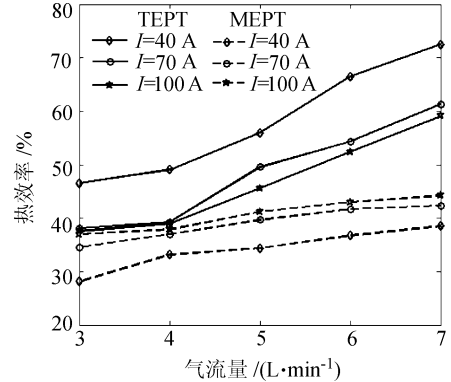


图 4 两种结构层流等离子体发生器热效率特性

Fig. 4 Thermal efficiencies of two plasma torches at different working parameters

同时,由图 4 可知,虽然 TEPT 和 MEPT 的热效率均随着气流量的增加而呈上升趋势,但 TEPT 的热效率变化较 MEPT 更明显,与弧压的变化趋势相符。随着气流量的增加,电弧受到的压缩作用逐渐增强,导致冷气层的厚度和弧压逐渐增加。冷气层厚度的增加减少了传导给弧室壁的热量,而弧压的增加则增加了电弧功率,在二者的共同作用下,发生器热效率随着气流量的增加而逐渐增加。由于 TEPT 的弧压增加更明显,即电弧功率增加更明显,从而其热效率较 MEPT 增加明显。

此外,随着电流的增加,TEPT 的热效率呈下降趋势,而 MEPT 却呈上升趋势。随着电流的增加,由于 TEPT 产生的电弧在圆锥段受弧室壁的机械压缩作用较小,使其在圆锥段的径向尺寸不断增加,与弧室壁的距离逐渐缩短,从而更多的热量传导给弧室壁,并被冷却水带走,致使其热效率下降。由于 MEPT 弧室内径较小,电弧在整个弧室内均受到弧室壁的强机械压缩,电弧直径受电流影响较小,而随着电流增加,电弧功率不断变大,因此其热效率逐渐增加。同时,由图 3 可知,当气流量为 3 和 4 L/min 时,TEPT 热效率基本相同。这是由于在此气流量下,与电流为 70 A 时相比,电流在 100 A 时增大了电弧功率,导致电弧温度升高,截面积增加,从而传

递给弧室壁的热量增加。而电弧功率增加的比例恰好近似等于被带走的热量增加的比例,故而此时热效率在两种电流下基本相同。

3 结 论

采用实验研究的方法,对比研究了层流等离子体发生器结构对弧压特性和热效率的影响,进而指导层流等离子体发生器的设计工作,主要得出以下结论:

1) 在相同工作参数下,MEPT的弧压高于TEPT,且两种结构的发生器弧压均随着气流量的增加而不断增加,但TEPT的弧压增加较MEPT弧压增加明显。

2) 在相同工作参数下,TEPT的热效率较MEPT热效率高,且两种结构的发生器热效率均随着气流量的增加而增加,但TEPT的热效率增加较MEPT热效率增加明显。此外,随着电流的增加,TEPT的热效率呈降低趋势,而MEPT的热效率则呈上升趋势。

3) 虽然MEPT的弧压较高,可在相同功率下降低电弧电流,从而延长电极使用寿命,但其热效率较TEPT低。

基于上述试验结果,在诸如危废处理、冶炼、大型工件的焊接和切割、喷涂等需要大功率的场合,更适合采用分段式结构的等离子体发生器,以在相同功率下降低其工作电流,进而降低电极的烧蚀速率,延长其使用寿命。而在诸如纳米材料合成、表面淬火等对功率要求较小的场合,更适合采用传统两极式结构的等离子体发生器,以利用其高效率,减少能量损失,降低工作成本。

参考文献:

[1] Shigeta M, Murphy A B. Thermal plasmas for nanofabrication [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(17): 4025 - 4040.

[2] Solonenko O P, Smirnov A V. Advanced oxide powders processing based on cascade plasma [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 550: 012017.

[3] Vardelle A, Moreau C, Themelis N J, et al. A perspective on plasma spray technology [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(3): 491 - 509.

[4] Pan Wenxia, Meng Xian, Li Gang, et al. Feasibility of laminar plasma-jet hardening of cast iron surface [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 197(2/3): 345 - 350.

[5] Gao Fei, Ma Zengyi, Wang Qin, et al. Application of a new plasma torch for municipal wastes Incinerators flyashes treatment [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(7): 10 - 14. [高飞, 马增益, 王勤, 等, 热等离子体喷枪在垃圾焚烧飞灰处理中的应用 [J]. 环境污染与防治, 2010, 32(7): 10 - 14.]

[6] Heberlein J, Murphy A B. Thermal plasma waste treatment [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(5): 3001 - 3020.

[7] Mostaghimi J, Boulos M I. Thermal plasma sources: How well are they adopted to process needs? [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(3): 421 - 436.

[8] Pan Wenxia, Zhang Wenhua, Zhang Wenhong, et al. Generation of long, laminar plasma jets at atmospheric pressure and effects of flow turbulence [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2001, 21(1): 23 - 35.

[9] Pan Wenxia, Meng Xian, Wu Chengkang. Arc voltage fluctuation in DC laminar and turbulent plasma jets generation [J]. Plasma Science and Technology, 2006, 8(4): 416 - 421.

[10] Pan Wenxia, Meng Xian, Chen Xi, et al. Experimental study on the thermal argon plasma generation and jet length change characteristics at atmospheric pressure [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2006, 26(4): 335 - 345.

[11] Osaki K, Fukumasa O, Kobayashi A. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing [J]. Vacuum, 2000, 59(1): 47 - 54.

[12] Xiang Yong, Yu Deping, Cao Xiuquan, 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. [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.]

[13] Miao Jianguo, Yu Dengping, Cao Xiuquan, et al. Experimental study on the characteristics of a miniature laminar plasma torch with different gas flow patterns [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(3): 1090 - 1104.