

层流等离子体发生器设计关键技术研究之双弧现象

曹修全, 余德平*, 李超, 向勇, 姚进

(四川大学 制造科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:分段式结构设计通常被应用于层流等离子体发生器的结构设计中,以避免产生大尺度分流现象,进而避免层流等离子体射流产生脉动。然而,在分段式层流等离子体发生器中,当中间电极长度较长时,经常在该中间电极上产生一个新的阳极弧根和阴极弧根(即双弧现象),导致该电极热负荷严重,造成电极的严重烧蚀和等离子体射流的波动。为了延长层流等离子体发生器中间电极寿命,提高层流等离子体射流稳定性,必须对双弧现象加以抑制。本文基于假设条件,首先建立了层流等离子体发生器正常工作时和产生双弧现象时的分析模型,分析了双弧现象产生机理,并基于最小电压原理,推导出层流等离子体发生器不产生双弧现象对中间电极的尺寸要求;然后,基于前述双弧现象产生原理分析和理论推导,确定了抑制层流等离子体发生器产生双弧现象的措施如下:一是,增加冷气膜击穿电压 U_b ,使电弧与弧室壁的电势差不足以击穿二者间的冷气膜;改善等离子体发生器冷却通道,优化其对弧室壁的冷却效果,进而降低冷气膜的温度;增大工作气体流量,增强对电弧的压缩,进而增加冷气膜的厚度。二是,限制中间电极轴向长度,降低电弧在对应中间电极区间的电压降,即任意中间电极在轴向的长度均满足最小电压要求。

关键词:层流等离子体;双弧现象;抑制措施

中图分类号:TG142.71

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)03-0223-04

Study on the Key Design Technology of the Laminar Plasma Torch: Double Arc Phenomenon

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

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

Abstract: Segmented anode structure is always used to the structure design of the laminar plasma torch to avoid the large scale shunting, which would result in a pulsation of the laminar plasma jet. However, when the length of the inter-electrode is longer than its limitation, a new anode attachment and a new cathode attachment always appear on the inter-electrode, which is named as double arc phenomenon. The double arc phenomenon leads to a serious heat load of the inter-electrode, resulting in a serious ablation of the inter-electrode and a fluctuation of the plasma jet. In order to prolong the service life of the inter-electrode and improve the stability of the plasma jet, the double arc phenomenon should be avoided. Firstly, based on the assumptions, the analysis models of the laminar plasma torch working with normal condition and double phenomenon were built to analyze the underlying mechanism of the double phenomenon. Besides, according to the principle of minimum voltage, the design requirements of the inter-electrode to avoid the generation of double arc were derived. Then, based on the above analysis, the measures of suppressing the double arc phenomenon were proposed, which included improving the cooling channels of the plasma torch to optimize the cooling effect of arc chamber wall, then decreasing the temperature of the cold layer; increasing the working gas flow rate to enhance the arc compression, which could increase the thickness of the cold layer; limiting the axial length of the inter-electrodes to decrease the corresponding arc voltage drop.

Key words: laminar plasma torch; double arc; suppressing measures

层流等离子体射流是在电源、等离子体发生器结构、气流量等的综合配合下,直流电能将工作气体电离,并从层流等离子体发生器阳极喷射而出,形成

的长径比较大且稳定性好的等离子体射流。与湍流等离子体射流相比,层流等离子体射流具有能量密度高,射流长度长,热焓值高,轴向温度梯度小,可控

收稿日期:2016-11-08

基金项目:四川省科技厅高新技术发展与产业化重点研究项目(2017GZ0096);四川大学引进人才基金资助项目(yj2012043)

作者简介:曹修全(1989—),男,博士。研究方向:机械设计及理论。E-mail: cao_comeon@126.com

*通信联系人 E-mail: williamydp@scu.edu.cn

性高,工作噪声低等优点^[1-2],是激光等昂贵热源的良好替代品,更适合应用于喷涂^[3-4]、熔凝^[5-7]、纳米材料合成与粉末球化^[8-10]等高精密加工场合,提高其加工生产精度。为了获得层流等离子体射流,潘文霞^[11-12]、余德平^[2]、Solonenko^[13-14]与Osaki^[15]等基于湍流等离子体技术开发了产生层流等离子体射流的装置,即层流等离子体发生器。潘文霞等^[11]设计出三段式小功率层流等离子体发生器并在专利《产生长弧等离子体射流的装置及方法》中对该发生器的结构设计和其射流特性进行了介绍,明确该等离子体发生器产生层流等离子体射流的条件与要求;余德平等基于自制的分段式层流等离子体发生器对层流等离子体发生器设计时进气方式^[16]与发生器结构^[17]对射流特性的影响进行了研究,结果表明:以与等离子体发生器轴向角度呈 30° 时,等离子体射流长度最长,而分段式层流等离子体发生器结构更有利于产生长的层流等离子体射流;Solonenko等^[13-14]基于试验数据给出了分段式层流等离子体发生器设计过程中各零部件尺寸设计的建议值,并确定了其设计的层流等离子体发生器产生层流等离子体射流的条件;Osaki等^[15]则基于自制的分段式层流等离子体发生器研究发现工作气流量越大,层流等离子体发生器热效率越高,而气流量旋向分量的大小对发生器热效率影响不大。通过上述分析,分段式结构设计通常被应用于层流等离子体发生器的结构设计中,以避免产生大尺度分流现象,进而避免层流等离子体射流产生脉动。然而,在分段式层流等离子体发生器中,当中间电极长度较长时,经常在该中间电极上产生一个新的阳极弧根和阴极弧根(即双弧现象),导致该中间电极热负荷严重,造成电极的严重烧蚀和等离子体射流的波动。虽然部分课题组对分段式层流等离子体发生器设计过程进行了一定的研究工作,但尚未见对分段式层流等离子体发生器设计关键技术之一的双弧现象进行相关研究工作的报道。因此,作者对双弧现象产生过程进行建模与分析,根据最小电压原理,确定抑制其产生的措施与要求,对层流等离子体发生器的设计具有一定的指导意义。

1 双弧产生过程建模与分析

为了简化双弧现象研究过程,现做如下假设:

假设1 等离子体发生器共有 n 段中间电极,第 n 段中间电极的轴向宽度对应为 l_n ,第 j 段绝缘层的轴向厚度为 l_j ,电弧在阳极段对应的长度为 l_s ;

假设2 电弧在 m 段中间电极处发生双弧现象,且阳极压降均为 V_a ,阴极压降均为 V_c ,电弧电场强度为 E 。

层流等离子体发生器正常工作时,电弧在阴极与阳极之间燃烧,只在阴极和阳极上产生电弧弧根,而不会在中间电极上产生电弧弧根,且此时受弧室壁的冷却作用,在电弧与弧室壁之间形成了一层温度较低、绝缘性能较好的冷气膜,从而形成气稳定,简化模型如图1所示。

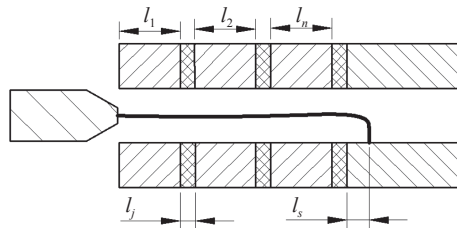


图1 分段式层流等离子体发生器正常工作示意图

Fig.1 Schematic diagram of a normal working process of segmented laminar plasma torch

此时,层流等离子体发生器总弧压 $U_{正}$ 有:

$$U_{正} = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_n} E dl + V_a + V_c + \int_0^{l_s} E dl + n \int_0^{l_j} E dl \quad (1)$$

假设在某一条件下,当电弧与弧室壁间的电势差达到冷气膜被击穿的击穿电压 U_b ,则冷气膜被击穿,气稳定被打破,在 m 级中间电极上产生了新的阳极弧根和阴极弧根,即产生了双弧现象,简化模型如图2所示。此时,层流等离子体发生器主弧消失,被两段或多段小弧替代,当每一级中间电极上均产生双弧现象时,则称之为串弧现象。为简化分析过程,同时考虑到串弧是双弧现象的特殊情况,故下面以只在 m 级上产生双弧现象进行分析。特别地,在层流等离子体发生器的调试过程中发现,当气流量较小而中间电极长径比较大时,极易造成该中间电极的烧蚀,即在该中间电极处产生了双弧现象。

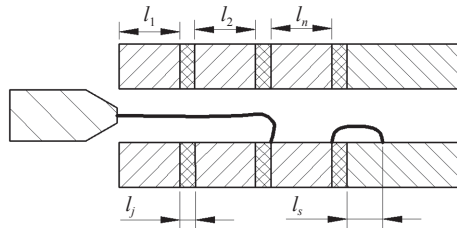


图2 双弧产生过程模型图

Fig.2 Schematic diagram of the generation of double arc

基于上述假设,此时电弧总弧压 $U_{双}$ 有:

$$U_{双} = \sum_{i=1}^{n \neq m} \int_0^{l_n} E dl + V_a + V_c + \int_0^{l_s} E dl + n \int_0^{l_j} E dl + V_a + V_c \quad (2)$$

由最小电压原理,则不产生双弧现象的条件是:

$$U_{正} \leq U_{双} \quad (3)$$

从而有:

$$\sum_1^n \int_0^{l_n} Edl + V_a + V_c + \int_0^{l_s} Edl + n \int_0^{l_j} Edl \leq \sum_1^{n \neq m} \int_0^{l_n} Edl + V_a + V_c + \int_0^{l_s} Edl + n \int_0^{l_j} Edl + V_a + V_c \quad (4)$$

合并同类项后有:

$$\int_0^{l_m} Edl < V_a + V_c \quad (5)$$

通过上述分析,当电弧与弧室壁的压差达到其间冷气膜的击穿电压 U_b 后仍不产生双弧现象的条件即为 $\int_0^{l_m} Edl < V_a + V_c$ 。

2 双弧现象抑制措施

当产生双弧现象时,某一中间电极(产生双弧现象的中间电极)或某几个中间电极上同时存在阳极弧根和阴极弧根,产生大量的热量,难以被冷却水及时带走,从而加速该中间电极的烧蚀速率。事实上,当产生双弧现象时,往往在几秒钟的时间内就造成中间电极的严重烧蚀和密封圈的烧毁。因此,必须对该类现象采取必要的措施予以避免。

基于上述建模与分析,可采取以下措施避免双弧现象的产生:

1)增加冷气膜击穿电压 U_b 。在产生双弧现象之前,必须首先击穿冷气膜,其所需的最小电压即为冷气膜击穿电压 U_b ,因此,增加冷气膜的击穿电压 U_b ,使得冷气膜不能被击穿,则不能产生双弧现象。而冷气膜的击穿电压 U_b 与冷气膜的温度和厚度有关,因此通过以下措施可增加击穿电压:①改善等离子体发生器冷却通道,优化其对弧室壁的冷却效果,进而降低冷气膜的温度;②增大工作气体流量,增强对电弧的压缩,进而增加冷气膜的厚度。然而,由于层流等离子体发生器往往工作于较小气流量下,随着气流量的增加,其射流会逐渐转变为湍流等离子体射流,因此不适合采用增大工作气流量的措施。

2)任意中间电极在轴向的宽度均满足 $\int_0^l Edl < V_a + V_c$ 。根据前述推导,即使冷气膜达到击穿条件而被击穿,当中间电极在轴线的宽度满足 $\int_0^l Edl < V_a + V_c$ 时,仍无法满足最小电压原理,不会产生双弧现象。

3 结论

1)对层流等离子体发生器设计关键技术中的双

弧现象进行了研究,对其产生过程进行建模分析,并根据最小电压原理推导出避免产生双弧现象的充分条件。

2)基于对双弧现象产生过程的建模与分析,确定双弧现象的抑制措施:①增加冷气膜击穿电压 U_b ,使电弧与弧室壁的电势差不足以击穿二者间的冷气膜;②保证中间电极轴向长度满足 $\int_0^l Edl < V_a + V_c$ 要求。

参考文献:

- [1] Chen X, Pan W, Meng X, et al. What do we know about long laminar plasma jets?[J]. Pure and Applied Chemistry, 2006, 78(6):1253-1264.
- [2] Cao X, Yu D, Xiao M, et al. Design and characteristics of a laminar plasma torch for materials processing[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2016, 36:693-710.
- [3] Vilotijevic M, Markovic P, Zec S, et al. Hydroxyapatite coatings prepared by a high power laminar plasma jet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211:996-1004.
- [4] Wu Hongchen, Yang Xiangdong. Features of laminar plasma jet and preliminary process for preparing of WC/Co coatings [J]. New Process, Technology and Equipment, 1997(1):28-29. [武洪臣, 杨向东. 层流等离子射流特性及其制备WC/Co涂层的初步工艺试验[J]. 新工艺新技术新设备, 1997(1):28-29.]
- [5] Fei Qunxing, Li Gang, Pan Wenxia, et al. Surface melted and solidified hardening of cast iron by non-transferred arc-Laminar plasma jet[J]. Heating Treatment of Metals, 2004, 29(7):60-63. [费群星, 李罡, 潘文霞, 等. 非转移弧层流等离子体射流铸铁表面熔凝强化[J]. 金属热处理, 2004, 29(7):60-63.]
- [6] Ma W, Fei Q, Pan W, et al. Investigation of laminar plasma remelting/cladding processing[J]. Applied Surface Science, 2006(252):3541-3546.
- [7] Fei Qunxing, Pan Wenxia, Ma Wei. Wear resistance of cast iron remelted by non-transferred laminar plasma jet[J]. Applied Surface Science, 2004(10):6-8. [费群星, 潘文霞, 马维. 非转移弧层流等离子体射流熔凝铸铁表面耐磨性的研究[J]. 热加工工艺, 2004(10):6-8.]

- [8] Solonenko O P, Smirnov A V. Advanced oxide powders processing based on cascade plasma[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 550: 1–10.
- [9] Solonenko O P, Gulyaev I P, Smirnov A V. Thermal plasma processes for production of hollow spherical powders: theory and experiment[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011, 6(2): 219–234.
- [10] Solonenko O P, Nishiyama H, Smirnov A V, et al. Visualization of arc and plasma flow patterns for advanced material processing[J]. Journal of Visualization, 2015, 18: 1–15.
- [11] 吴承康, 潘文霞, 张文华, 等. 产生长弧等离子体射流的装置及方法: 中国, CN99121825.6[P]. 1999–10–18.
- [12] Pan W, Zhang W, Zhang W, et al. Generation of long laminar plasma jets at atmospheric pressure and effects of flow turbulence[J]. Plasma Chemistry and Plasma Process, 2001, 21(1): 23.
- [13] Hideki H, Sunao T, Fuminori W, et al. Plasma torch: WIPO, WO2012/115533 A1[P]. 2012–12–01.
- [14] Solonenko O P, Kuxmin V I, Belashchenko V. Plasma jet generating apparatus and method of use thereof: WIPO, WO2006/012165 A2[P]. 2006–07–10.
- [15] Osaki K, Fukumasa O, Kobayashi A. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing[J]. Vacuum, 2000, 59(1): 47–54.
- [16] Cao X, Yu D, Xiang Y, et al. Influence of the gas injection angle on the jet characteristics of a non-transferred DC plasma torch[J]. Plasma Chemistry and Plasma Process, 2016, 36(3): 881–889.
- [17] Cao X, Yu D, Xiang Y, et al. Influence of the laminar plasma torch construction on the jet characteristics[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(7): 740–743.

(编辑 黄小川)

引用格式: Cao Xiuquan, Yu Deping, Li Chao, et al. Study on the key design technology of the Laminar plasma torch: double arc phenomenon[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 223 – 226. [曹修全, 余德平, 李超, 等. 层流等离子体发生器设计关键技术研究之双弧现象[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 223 – 226.]