

热等离子体喷枪在垃圾焚烧飞灰处理中的应用*

高 飞 马增益# 王 勤 陆胜勇 严建华

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 采用了一种自行设计的具有二路进气双阳极特殊结构的热等离子体喷枪作为等离子体发生装置,通过等离子体电弧电压电流诊断系统测量直流氩等离子体射流的工作情况,对其工作特性进行了分析,并探讨了电弧电压在不同工作模式下随工作气体流量变化的趋势及机制。对二路进气下电弧电压信号进行傅里叶变换,发现高频脉动基本消失,而给阳极Ⅱ供电的电源Ⅱ可能存在 150 Hz 的固有波动。采用热等离子体喷枪对当地垃圾电厂的飞灰进行处理,其熔渣的微观结构紧密光滑且无空隙,这与熔融前的飞灰区别明显。该熔渣对重金属有很好的固定效果,经熔融处理后,Cd、Cr、Ni、Pb 浸出浓度已无法检出。Cu、Zn 在熔渣中浸出质量浓度为 0.13、0.30 mg/L,其重金属浸出浓度远远低于熔融前。结果显示,该热等离子技术是一种处理垃圾焚烧飞灰的有效手段。

关键词 飞灰 二路进气 等离子体 电弧脉动 垃圾焚烧

Application of a new plasma torch for municipal wastes incinerators fly ashes treatment GAO Fei, MA Zengyi, WANG Qin, LU Shengyong, YAN Jianhua. (State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027)

Abstract: The self designed thermal plasma furnace was applied for the treatment of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash. In this thermal plasma furnace, two gas inlets double anode plasma torch was employed as plasma generator, and the direct argon plasma jet conditions was detected by the arc voltage diagnosis system. The variation of the arc voltage with the working gas flow rate in the different working mode was discussed. After the Fourier transformation of arc voltage in two gas inlets mode, high-frequency pulse was disappeared and electric power appeared a 150 Hz inherent pulse. The MSWI fly ash was melt treated in thermal plasma furnace, the microstructures and crystalline phases of the produced slag was obviously superior to the original ash. Toxicity characteristic leaching procedure results showed that the slag had an excellent resistance against leaching of heavy metal ions, as Cd, Cr, Ni, Pb could not be detected and the leaching concentrations of Cu and Zn were 0.13 mg/L, 0.30 mg/L. These results indicated that the thermal plasma disposition is an alternative technology with highly efficiency to dispose MSWI fly ash.

Keywords: fly ash; two gas inlets; plasma; arc fluctuation; waste incineration

垃圾焚烧飞灰中含有大量的 Cd、Cr、Ni、Pb 等有害重金属物质,并且吸附了许多高毒性难降解的持久性有机污染物。因此,《国家危险废物名录》明确规定其为危险废物,必须经过稳定化、无害化处理。目前,较常用的垃圾焚烧飞灰的处理方法主要有分离技术、固化稳定化技术以及热处理技术^[1-5]。

热等离子体技术作为一种近年来在工业中得到广泛应用的新技术^[6,7],也可以用于垃圾焚烧飞灰的处理。与传统的热处理技术相比,热等离子体技术具有更高的温度和能量密度,可以实现飞灰的玻璃化,抑制重金属迁移。对热等离子体技术在工作中的许多基本参数,如电子激发温度、脉动特性、伏安特性等国内外相关研究也取得了许多结果^[8-12],但

是热等离子体设备性能仍不够可靠、电极腐蚀等问题并没有彻底解决,这些影响了热等离子体飞灰处理设备的寿命,增加了处理成本,限制了这种技术的进一步推广应用。

笔者采用了一种自行研制的用于垃圾焚烧飞灰处理的热等离子体喷枪。与传统设备相比,其具有二路进气双阳极的特殊结构。在实验中,以氩气为工作气体。通过对等离子弧的电信号进行分析,对工作气体流量和电弧电压之间的关系及各种工作模式对等离子体射流脉动特性的影响进行了研究。同时,对不同工作模式下电极腐蚀的情况进行了对比,并使用热等离子体喷枪对飞灰进行熔融处理,通过扫描电镜和重金属毒性浸出实验检验处理效果,以

第一作者:高 飞,男,1984 年生,硕士研究生,主要从事热等离子体污染物处置研究。# 通讯作者。

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(No. 2007BAC27B04);浙江省重大科技专项项目(No. 2007C03003);浙江省科技计划项目(No. 2008C23090)。

此为依据探寻该装置的最佳工作状态,为后续研究提供参考。

1 材料与方法

热等离子体装置由热等离子体喷枪、等离子体直流电源、熔融反应炉和气源构成。实验采用非转移弧类型的直流电弧类热等离子体喷枪的结构见图1,由阴极、阳极Ⅰ、阳极Ⅱ和中间件构成。阴极为直径5 mm的钨钨棒,阳极Ⅰ和阳极Ⅱ均为拉法尔型铜阳极。中间件介于2个阳极之间,和阳极Ⅰ相连,中间件和阳极Ⅱ之间用陶瓷圆环绝缘。阴极、阳极Ⅰ、阳极Ⅱ和中间件均采用水冷却。

区别于传统的直流电弧类热等离子体发生器,该热等离子体喷枪由1根具有圆锥尖头的阴极、2个拉法尔型的阳极及2路进气装置构成。第1路气体通过气体分离器进入阳极Ⅰ,第2路气体则通过中间件上的斜孔直接进入阳极Ⅱ。这些独特的结构设计使得热等离子体喷枪具有多种不同的工作模式,可调节性大大增强,等离子弧的电弧长度增加,功率升高,具有很好的稳弧作用。

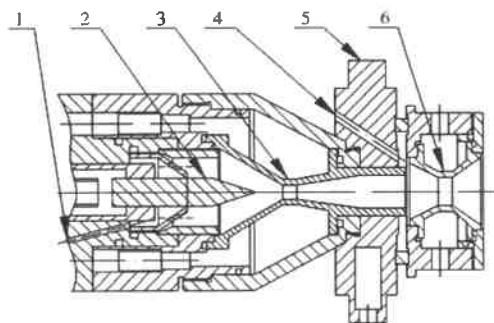


图1 二路进气双阳极热等离子体喷枪结构
Fig.1 Structure diagram of two gas inlets double arc plasma torch

1—一路进气口;2—阴极;3—阳极Ⅰ;
4—二路进气口;5—中间件;6—阳极Ⅱ

利用示波器监测分析等离子体的电压信号,采用美国 Tektronix 公司的 TDS2024 数字储存示波器,其主要的特征参数:4 通道,带宽 200 MHz,最快的采样速率为 2×10^3 次/s;电压探头采用 P2200 1X~10X 可切换无源探头,电流探头采用 TCP303 探头和 TCPA300 放大器组合。在实验中,2 路电源输入电流均保持为 100 A,通过调整一路进气和二路进气的流量改变工况。

采用当地垃圾电厂的飞灰作为研究对象。该厂采用流化床工艺焚烧垃圾,飞灰通过布袋除尘器收集。将飞灰置于刚玉坩埚中,放置在等离子体电弧下,熔融 20 min 后用水迅速冷却,可得到黑色玻璃

状熔渣。

2 结果与讨论

2.1 二路进气双阳极等离子体电弧电压与工作气流量的关系

图2显示的是在一路进气双弧工作模式下,调整一路进气流在 $8 \sim 28$ L/min 变化,所得到的阳极Ⅰ、阳极Ⅱ电弧电压信号为 U_1 、 U_2 。随着一路进气流量的增大, U_1 从 13.4 V 升高至 15.6 V,与一路进气流基本呈线性上升关系。笔者认为这可能是在气流的作用下,阳极斑点向下游移动,导致电弧长度增加,进而使电弧电阻升高,电弧电压也随之升高。另一方面,从能量平衡的角度来看,更多的气体需要更多的能量来加热,也就需要更高的电场强度提供能量。这现象跟 RAMASAMY 等^[13]报道的相符合。 U_2 随着一路进气流量的增大而升高,至 78 V 左右进入一个相对平缓的区域。笔者认为这可能是由于阳极Ⅱ的长度较短,阳极Ⅱ电弧所能够伸长的范围有限,并且外界冷空气对电弧温度、电离程度的影响进一步限制电弧的伸长,且由于阳极喷嘴颈部直径较小,在热压缩效应的作用下,电弧横截面积基本不会增大。

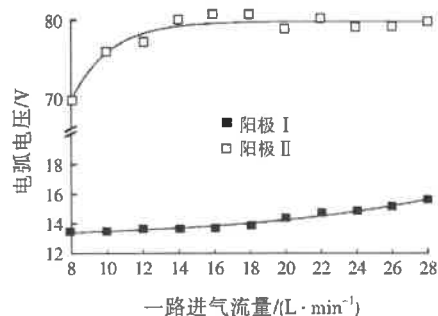


图2 一路进气双弧工作模式下电弧电压—进气流量的关系曲线

Fig.2 Voltage-current characteristic of one gas inlet double arc mode

图3显示的是热等离子体喷枪工作在双弧工作模式下,在中间件处引入第2路工作气体后,调整一路进气流在 $8 \sim 20$ L/min,二路进气流在 $0 \sim 7$ L/min 变化,所得到的阳极Ⅱ电弧电压信号为 U_2 。当二路进气流在 $0 \sim 5$ L/min 时, U_2 呈下降趋势,且下降的斜率绝对值随着一路进气流量的增加而降低,但当二路进气流增大至 6 L/min 以上时, U_2 均保持在 53 V 左右。这种现象可能是多种因素共同作用的结果。首先,中间件处温度极高。引入二路进气后,氩气会迅速电离,提高了喷枪内部带电粒子密度,使得电导率迅速下降。其次,二路进气的引入

使喷枪内部流场、温度场发生改变,对热压缩效应产生抑制,使电弧横截面积增大。而仅增加一路进气流量不可能使流场、温度场在中间件发生急剧的变化。在这些因素的影响下,阳极Ⅱ电弧电压随二路进气流量的增大而下降,呈现出与一路进气显著不同的趋势。

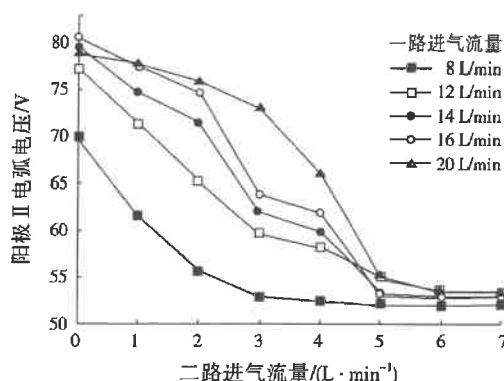


图 3 二路进气双弧工作模式下电弧电压-进气流量的关系曲线

Fig. 3 Voltage-current characteristic of two gas inlets double arc mode

通过对 2 种不同的工作模式下的电弧电压-进气流量关系曲线的分析可以发现,在一路进气双弧工作模式时,电弧电压在一路进气流量大于 14 L/min 时上升幅度有限,功率基本达到峰值,从节省工作气体的角度考虑,一路进气流量不宜高于 14 L/min;在二路进气双弧工作模式时,可以看到电弧电压随二路进气流量的增大而不断下降,因此在电弧工作稳定的情况下,应尽量减少二路进气流量。

2.2 二路进气双阳极等离子体电弧的脉动特性

引起等离子体电弧脉动的因素是多方面的:第一,等离子体供电电源中不可避免地含有一定的交流分量;第二,由于大尺度分流造成的阳极斑点在阳极内壁上的滑动也会导致电弧发生脉动;第三,阳极出口的等离子体电弧对周围空气的卷吸。等离子体电弧的脉动特性会随着工作气体流量、进气方式、电弧电流、电压的变化而变化,往往造成阳极壁面严重腐蚀,从而影响了电极的使用寿命^[14-16]。

笔者对等离子体电弧的脉动特性的研究,主要通过快速傅里叶变换(FFT),分析等离子体电弧的脉动频率与脉动强度。图 4、图 5、图 6 分别是热等离子体喷枪处于一路进气单弧、一路进气双弧、二路进气双弧 3 种工作模式下,所得到的电弧电压 FFT 图像,其中一路进气流量均为 14 L/min。

从图 4 可以发现,在一路进气单弧工作模式下,电弧电压的脉动频率可分为 2 类:第 1 类是低频区,

在 680 Hz 处出现很强的峰值;第 2 类是高频区,有 6 个较小的波峰分别出现在 1 360、2 040、2 720、3 400、4 080、4 760 Hz。在一路进气单弧工作模式下,热等离子体喷枪工作时伴随有 90 dB 左右的高频噪音,等离子体电弧伸出喷口长度约 3~5 cm,且工作不稳定。

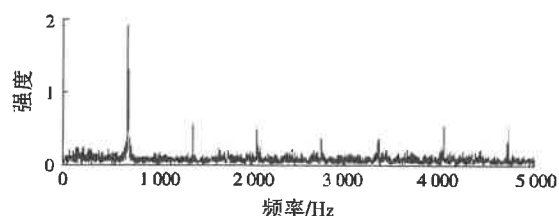


图 4 一路进气单弧工作模式下电弧电压 FFT 图像
Fig. 4 FFT analysis of arc voltage fluctuation in one gas inlet single arc mode

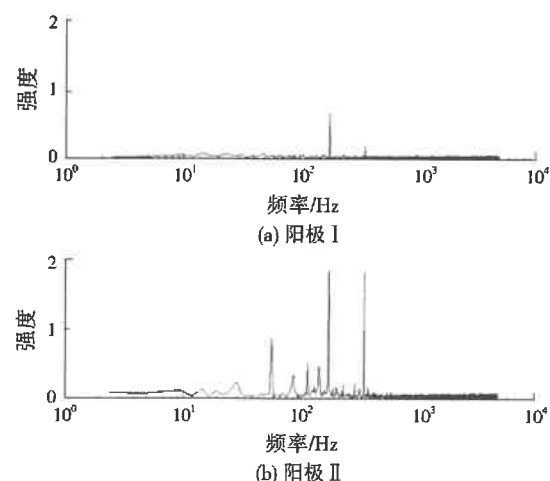


图 5 一路进气双弧工作模式下电弧电压 FFT 图像
Fig. 5 FFT analysis of arc voltage fluctuation in one gas inlet double arc mode

经过图 5(a)与图 4 的对比,可以明显发现阳极 I 在较高频率(1 000 Hz 以上)下的波动明显减弱,使产生的等离子体电弧更加稳定。但阳极 I 在低频处又出现了 150、300 Hz 的新波动,这与图 5(b)中阳极 II 的电弧电压脉动频率完全一致,这可以说明阳极 I 中 150、300 Hz 频率的电弧电压脉动是由阳极 II 的点燃而引起的,此时双阳极脉动频率相同,两者处于同一种工作状态。通过阳极 II 的点燃,热等离子体喷枪进入双阳极工作模式,工作时的噪音明显减轻,约为 75 dB。等离子体电弧伸出喷口长度大大增长,约为 20 cm,但仍存在工作不稳定的情况,亮度和长度均有明显的波动。

在中间件处引入 4 L/min 的第 2 路工作气体,得到阳极 I、阳极 II 电弧电压 FFT 图像,见图 6。与图 5(b)相比,图 6(a)与图 6(b)中的波峰明显减少,说明阳极 I 和阳极 II 处的电弧电压脉动进一步减

弱。由图 6(b)可以发现,150 Hz 及其谐波 300 Hz 处的波动始终存在,这可以说明给阳极 II 供电的电源 II 有可能存在着 150 Hz 的固有波动。在二路进气双弧工作模式下,工作时的噪音显著减轻,约为 55 dB 左右,等离子体电弧伸出喷口长度约为 20 cm,工作更为稳定,且亮度和长度均基本保持稳定。

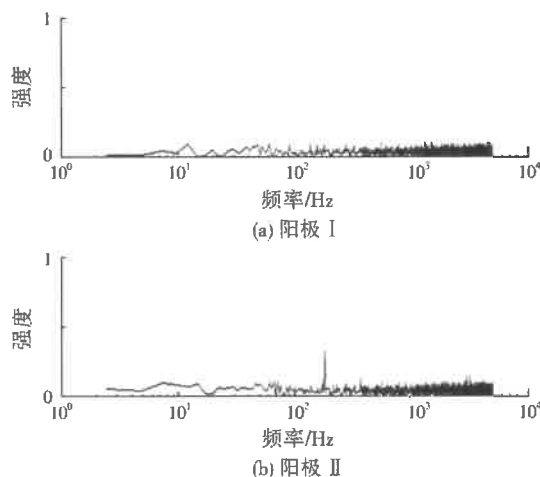
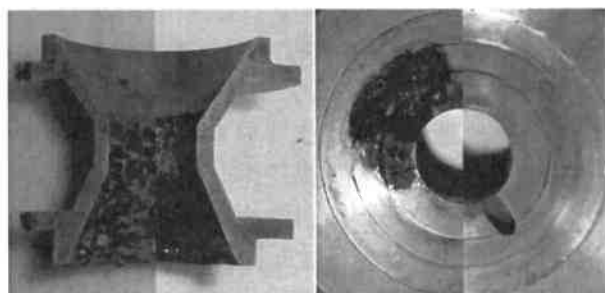


图 6 二路进气双弧工作模式下电弧电压 FFT 图像
Fig. 6 FFT analysis of arc voltage fluctuation in two gas inlets double arc mode

在其他参数均一致的情况下,使热等离子体喷枪分别在一路进气、二路进气模式下工作相同的时间,之后取出两者的阳极 II 和中间件,其中阳极 II 沿中轴线剖开,实物对照见图 7。一路进气模式下的阳极 II 内壁凹凸不平,存在较为严重的电极腐蚀现象,而二路进气模式下的阳极 II 内壁相对平滑,电极腐蚀现象较轻。中间件处的对比更为明显,一路进气模式下的中间件上出现了较大的腐蚀凹坑,深度约为 2 mm,在凹坑还有由熔融的铜材料构成的突起,而二路进气模式下的中间件则没有发现明显的电极腐蚀痕迹。说明在二路进气模式下,该热等离子体喷枪的工作更为稳定,电极腐蚀明显改善,阳极 II、中间件等部件使用寿命延长,降低危险废弃物的处理成本。



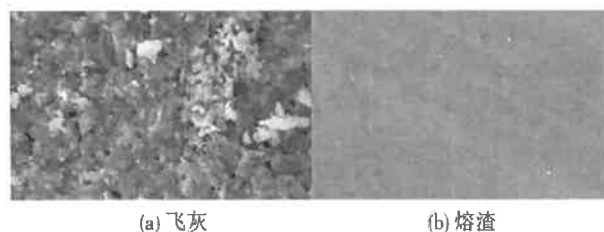
(a) 一路进气模式下的阳极 II (b) 二路进气模式下的阳极 II (c) 一路进气模式下的中间件 (d) 二路进气模式下的中间件
图 7 阳极 II 及中间件的电极腐蚀对比

Fig. 7 Comparison of electrode corrosion in anode II and middle section

2.3 飞灰处理结果

采用英国马尔文仪器有限公司 Mastersizer2000 粒度分析仪对当地垃圾电厂的飞灰进行分析,粒径分布为 0.45~420.37 μm ,平均粒径(D_{50})为 54.15 μm 。飞灰的化学成分通过 X 射线能量色谱仪(ENESIS 4000)测得,主要由 SiO_2 (48.87%)、 Al_2O_3 (17.84%)、 CaO (10.32%)、 Fe_2O_3 (5.86%)、 Na_2O (1.88%)、 K_2O (1.77%)、 P_2O_5 (1.54%)、 MgO (1.44%)、 TiO_2 (0.88%) 以及 SO_3 (0.70%) 等构成(括号内均为质量分数)。将飞灰置于等离子体电弧下,熔融 20 min 后用水迅速冷却,得到黑色玻璃状熔渣。该熔渣表面光滑,质地坚硬。采用阿伏伽德罗法测量其密度,结果为 2.80 g/cm^3 。采用维氏硬度计测量硬度,可达 6.0 GPa。当使用马弗炉熔融该飞灰时,需在 1350 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h 才可得到类似熔渣。这说明该技术具有能量密度高、处理速度快的优点。

通过场发射扫描电子显微镜(SIRION-100)比较飞灰和熔渣的微观结构,其 SEM 图像见图 8。图 8(a)中飞灰的微观结构非常复杂,内部布满了大小空隙,外形极不规则;而图 8(b)中熔渣却恰好相反,微观结构紧密光滑无空隙,整体呈现良好的均一性。这种紧密光滑的结构使熔渣可以用于微晶玻璃的制备^[17]。



(a) 飞灰 (b) 熔渣
图 8 飞灰及其熔渣 SEM 图像
Fig. 8 SEM photo of fly ash and slag

重金属毒性浸出采用了美国环境保护署制定的重金属毒性浸出程序(TCLP)。通过电感耦合等离子质谱仪(Agilent 7500a)对该程序的浸出液进行分析,得到的重金属浓度见图 9。由图 9 可知,熔渣中的各种重金属浸出浓度均大大降低。其中,Cd、Cr、Ni、Pb 在飞灰中浸出质量浓度均不大于 0.50 mg/L,而在经过熔融处理后的熔渣中已无法检出。Cu、Zn 在飞灰中浸出质量浓度相对较高,分别为 1.20、21.50 mg/L,其熔渣浸出结果分别为 0.13、0.30 mg/L,浓度大幅降低。这说明熔渣对重金属

有很好的固定效果,其重金属浸出浓度远远低于熔融前。TU 等^[18]将该技术应用于炉排炉飞灰的处理,结果显示在熔渣中 Pb、Ni、Cd 无法检出, Ni、Cu、Zn 浸出质量浓度分别为 0.018、0.025、0.021 mg/L,可见该技术对于该种炉排炉飞灰中的重金属具有很好的固定效果。与飞灰的传统处理方法相比,该热等离子体技术处理效果更好。

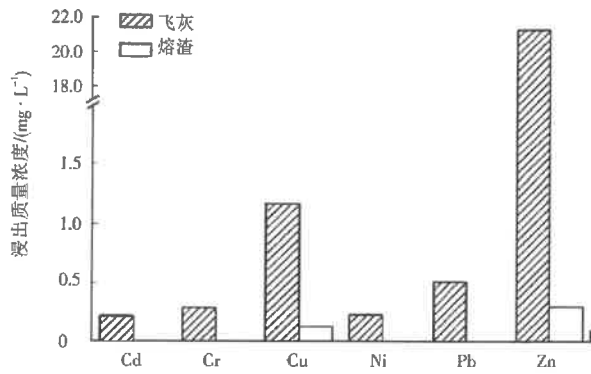


图 9 飞灰及熔渣的 TCLP 结果
Fig. 9 TCLP result of fly ash and slag

3 结 论

(1) 在一路进气模式下时, U_1 随着进气流量增大而升高, U_2 随着一路进气流量的增大而升高, 至 78 V 左右时进入了一个相对平缓的平台期, 这可能与阳极斑点向下游移动有关。二路进气对电弧电压的影响与一路进气相反, 呈下降趋势, 使 U_2 最终趋于 53 V 左右。

(2) 在双弧模式下, 1 000 Hz 以上高频脉动明显减弱, 使产生的等离子电弧更加稳定。在二路进气模式下, 热等离子体喷枪的工作更为稳定, 电弧电压高频脉动进一步减弱, 电极腐蚀也有明显改善。在双弧模式下, 150 Hz 及其谐波 300 Hz 处的波动始终存在, 说明给阳极 II 供电的电源 II 有可能存在着 150 Hz 的固有波动。

(3) 飞灰熔渣的微观结构紧密光滑无空隙, 与熔融前的飞灰呈现出了明显区别。熔渣对重金属有很好的固定效果, 经过熔融处理后 Cd、Cr、Ni、Pb 浸出浓度无法检出, Cu、Zn 浸出结果分别为 0.13、0.30 mg/L, 熔渣重金属浸出浓度远远低于熔融前。

参考文献:

[1] 宋珍霞, 王里奥, 林祥, 等. 城市垃圾焚烧飞灰特性及水泥固化试验研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 163-168.
[2] 张沛君, 章灿刚, 章骅, 等. 垃圾焚烧飞灰污染特性及其控制对

策[J]. 环境卫生工程, 2004, 12(1): 3-5.
[3] 席北斗, 王琪, 姜永海, 等. 垃圾焚烧飞灰熔融渣特性分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 110-112.
[4] VAN DER SLOOT H A, DKOSSON D S, HJELMAR O. Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration[J]. Waste Management, 2001, 21(8): 753-765.
[5] 王雷, 金宜英, 李润东, 等. CaO/SiO₂ 对流化床焚烧飞灰熔融过程中重金属挥发的影响[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(8): 16-19.
[6] VENKATRAMANI N. Industrial plasma torches and applications[J]. Current Science, 2002, 83(3): 254-262.
[7] BONIZZONI G, VASSALLO E. Plasma physics and technology: industrial applications[J]. Vacuum, 2002, 64(3): 327-336.
[8] NITYALENDRA S, MANITRA R, JAN H. Characterization of a dc plasma torch through its light and voltage fluctuations[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2000, 33(3): 270-274.
[9] DUAN Z, HEBERLEIN J. Arc instabilities in a plasma spray torch[J]. J. Thermal Spray Technology, 2000, 11(1): 44-51.
[10] 严建华, 屠昕, 马增益, 等. 大气压直流氦等离子体射流工作特性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(7): 3451-3453.
[11] 潘新潮, 严建华, 马增益, 等. 直流双阳极等离子体特性的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 132-136.
[12] PAN W X, MENG X, CHEN Xi, et al. Experimental study on the thermal argon plasma generation and jet length change characteristics at atmosphere pressure[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2006, 26(4): 335-345.
[13] RAMASAMY R, SELVARAJANA V. Current-voltage characteristics of anon-transfer red plasma spray torch[J]. The European Physical Journal D, 2000, 8(1): 125-129.
[14] BRILHAC J F, PATEYRON B, DELLUC G, et al. Study of the dynamic and static behavior of dc vortex plasma torches: part I: button-type cathode[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1995, 15(2): 231-255.
[15] BRILHAC J F, PATEYRON B, COUDET J F, et al. Study of the dynamic and static behavior of dc vortex plasma torches: part II: well-type cathode[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1995, 15(2): 257-277.
[16] PLANCHE M P, COUDERT J F, FAUCHAIS P. Velocity measurement for arc jets produced by a dc plasma spray torch[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1998, 18(2): 263-283.
[17] CHENG T W, UENG T H, CHEN Y S, et al. Production of glass ceramic from incinerator fly ash[J]. Ceramics International, 2002, 28(7): 779-783.
[18] TU Xin, WANG Qin, YU Liang, et al. Diagnostic of novel atmospheric plasma source and its application to vitrification of waste incinerator fly ash[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(5): 3057-3064.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2010-01-18)

