

基于等离子体动力学的电弧焊烟尘捕集与净化新方法探索

李江勇

华电伊犁煤电有限公司, 新疆伊犁哈萨克自治州, 835000;

摘要: 本文依据等离子体动力学理论, 探索电弧焊烟尘捕集和净化的方法。全文详细阐述等离子体基本性质、动力学原理以及其在电弧焊过程中的形成机制, 接着分析等离子体跟烟尘颗粒相互作用机制, 并在此基础上设计出集成等离子体发生器、反应室和尾气处理的净化装置, 并且制定包含烟尘预处理、等离子体反应及尾气处理的工艺流程。通过构建实验装置平台利用激光粉尘仪、SMPS、FTIR 等仪器对等离子体动力学方法和传统滤筒式除尘器开展对比实验。结果显示等离子体动力学方法在颗粒物捕集效率 (75.3%) 和 NO_x 去除率 (41.25%) 上优于传统方法, 为等离子体技术在工业烟尘治理中的应用提供技术参考。

关键词: 等离子体动力; 电弧焊; 烟尘捕集; 净化新方法

DOI: 10.64216/3080-1508.25.09.099

电弧焊过程产生的烟尘包含大量有害颗粒物和气体污染物, 对环境以及工人健康构成威胁。离子体属高活性物质状态, 具备导电性强、准中性等多方面特点^[1]。其动力学原理揭示等离子体能够通过电荷附着、电场驱动以及化学反应等途径高效捕集和分解污染物。基于此, 本文设计集成化净化装置和优化工艺流程, 结合实验验证其性能优势。

1 等离子体动力学基础理论

1.1 等离子体概述

等离子体是一种很独特的物质状态, 属于物质存在的第四种状态, 和固态、液态以及气态有所区别。其由大量带电粒子。在电弧焊这类高温环境当中, 气体分子会受到高温或者强电场的作用, 进而发生电离现象^[2]; 原本呈中性的气体分子会失去或者获得电子, 这样就形成了电子和离子, 同时部分未发生电离的中性粒子依然存在, 这些粒子共同构成了等离子体。同时, 等离子体具备一系列独特基本性质: 首先是导电性, 因其内部存有大量可自由移动带电粒子, 等离子体能够很好地传导电流, 其导电能力远超普通气体且与金属导体类似, 这让等离子体在电磁场中会受到显著作用力; 其次是准中性, 从宏观尺度来看等离子体整体呈现出电中性, 也就是正电荷总数和负电荷总数大致相等, 不过在微观尺度上, 受带电粒子热运动和电磁场影响, 等离子体内部会出现局部电荷分离, 形成电荷密度不均匀分布并产生电场。这种准中性特性是等离子体区别于其他带电粒子体系重要标志。

1.2 等离子体动力学原理

等离子体里面粒子的运动规律特别复杂。例如, 电

子因质量小, 在电场和磁场作用下能迅速做出响应, 其运动轨迹常呈现复杂曲线; 离子质量较大, 运动相对迟缓, 不过也会受电磁场和其他粒子相互作用影响; 这些粒子之间还会通过碰撞等方式进行动量和能量的交换^[3]。

并且, 电磁场能够对等离子体里粒子运动状态进行改变, 运动着的带电粒子又会产生出全新的电磁场, 等离子体当中能量可借助热传导、对流以及辐射等方式在等离子体内部进行传递, 带电粒子的加速和减速过程还会伴随着能量的转换^[4]。

2 电弧的产生机制

电弧焊的关键核心点是电弧的产生, 而电弧产生的根源是电场作用下气体电离。当焊接电源成功接通以后, 电极和工件之间会形成强大电场, 让电极与工件间隙里的气体分子, 受到电场力这种力的作用而产生变化: 气体分子当中的电子获取到足够能量之后, 会克服原子核施加的束缚从原子中逸出, 进而形成自由电子和正离子, 这一过程就被称作气体电离。

值得注意, 初始电离被一些外界因素所引发。例如, 电极表面的尖端放电现象、周围环境里宇宙射线或者放射性物质产生的电离作用等。一旦产生少量自由电子以及正离子, 在强电场的作用之下, 自由电子会加速朝着阳极 (工极) 方向运动, 而正离子会加速朝着阴极 (电极) 方向运动。在运动的过程当中, 自由电子会和中性气体分子发生碰撞, 当电子具备的能量足够高的时候, 就会让中性气体分子再次发生电离, 进而产生更多的自由电子和正离子, 这种过程被称作碰撞电离。随着碰撞电离不断持续地进行, 电离区域会不断地进行扩大, 最终在电极和工件两者之间形成一个导电的电弧。大量的电流会通过这个通道进行流动, 同时还伴随着强烈的光

和热辐射现象。

3 电弧焊中等离子体特征

一方面,在电弧焊里等离子体的温度和密度分布有明显特点:电弧中心区域的温度能达到非常高的程度,可达数千甚至上万摄氏度,这是由于该区域电子和离子的碰撞极为频繁,能量交换十分剧烈,大量电能都转化成了热能;随着与电弧中心距离不断增加,温度会逐渐降低。等离子体的密度分布和温度也是密切相关的:在电弧中心高温区域,气体分子高度电离,带电粒子的浓度处于很高水平,所以等离子体密度相对比较大;而在电弧边缘区域,温度相对较低,电离程度出现明显减弱,等离子体密度也就相对小一些^[5]。另一方面,等离子体在电弧中呈现复杂流动特性,由于电弧内部存在温度梯度和压力梯度,等离子体会从高温高压区域向低温低压区域流动,这种流动会形成各式各样的涡流和射流,进而对电弧形状和稳定性产生影响。与此同时外部气流环境如保护气体(氩气、二氧化碳等)的流动会与等离子体相互作用,进一步改变等离子体的流动方向和流动速度。

4 等离子体与烟尘颗粒的相互作用

在电弧焊所产生的等离子体环境当中,烟尘颗粒会和等离子体里的带电粒子产生相互作用:等离子体中的自由电子以及正离子会附着于烟尘颗粒的表面之上,让烟尘颗粒带上电荷。通常情况下,电子更易于附着在烟尘颗粒上面,使烟尘颗粒带上负电。带电之后的烟尘颗粒在电场的作用影响之下,会受到电场力作用进而改变其运动轨迹。并且,等离子体在流动的时候会产生相应气流,这种气流会对烟尘颗粒产生拖曳力^[6]。该拖曳力能驱动烟尘颗粒随等离子体流动。同时带电的烟尘颗粒在电场和磁场综合作用下,还会受到洛伦兹力作用影响其运动。

5 基于等离子体动力学的烟尘捕集法

5.1 净化装置设计集成

净化装置主要是由等离子体发生器、反应室和尾气处理等部分组成。等离子体发生器是整个系统的核心关键部分,其作用是产生稳定且具有高活性的等离子体。等离子体发生器分为两种,其一电晕放电等离子体发生器结构相对简单,不过产生的等离子体区域较小。其二,介质阻挡放电等离子体发生器能够产生大面积且均匀的等离子体,适合大规模烟尘净化处理。反应室作为烟尘和等离子体进行化学反应的具体地方,其设计得考虑

烟尘流动特性、等离子体分布均匀性以及反应时间等众多因素。反应室建议采用圆柱形或者方形的结构,同时在内部设置合适的导流装置,以此让烟尘能够充分与等离子体接触反应。尾气处理主要作用是处理经过等离子体反应后剩余的气体,需要去除其中可能残留的有害物质和异味,目的是确保排放气体能够符合环保标准,尾气处理可以采用湿式洗涤、活性炭吸附等相关方法。

5.2 净化工艺流程的制定

首先将电弧焊所产生的烟尘通过抽风系统收集起来,经过过滤、降温这样的预处理之后进入等离子体反应室。在反应室里面,烟尘和等离子体充分接触发生氧化、分解等化学反应,让有害物质转化成无机物质或易于处理的形式。接着,经过反应后的气体进入尾气处理部分,进一步去除残留有害物质和异味。最后,净化后的气体通过烟囱排放到大气当中。值得注意,在整个工艺流程中,需要严格控制各个环节的参数,像等离子体发生器功率、反应室温度和压力、烟尘的流速等,以此确保净化效果稳定可靠。

6 实验研究

6.1 等离子体捕集与净化实验装置构建

本研究搭建了一套可评估等离子体技术用于焊接烟尘捕集净化效能的实验装置平台。该平台整合多个功能子系统来保障实验准确性和可重复性。焊接烟尘模拟与产生系统采用标准化发生器,能按实验需求产生不同粒径分布及浓度的焊接烟尘,产生速率可在 5 g/min 至 5 g/min 范围精确调节,且模拟典型焊接烟尘化学成分。核心的等离子体捕集与净化单元选用介质阻挡放电(DBD)等离子体发生器,其结构为两平行板电极间填充介质层,通过频率 $(5 - 50\text{ kHz})$ 和电压 $(5 - 20\text{ kV})$ 均可调的高频高压电源激发以空气为主的气体产生等离子体场,实现烟尘捕集净化。为进行性能对比,平台集成了一个传统滤筒式除尘器作为对照组。烟尘输送与混合系统利用可控风速 $(5 - 5\text{ m/s})$ 的送风装置,确保产生的烟尘与气流充分混合,并稳定输送至等离子体反应区入口或直接引入对比单元。尾气处理与排放系统负责对净化或过滤后的气体实时检测分析,还配备简易活性炭吸附装置对尾气初步处理,以满足环保排放基本要求。此综合实验平台为深入探究等离子体动力学方法在工业烟尘治理中的潜力与特性提供必要硬件基础。

6.2 实验测量仪器与设备

表 1：实验测量仪器与设备列表

测量项目	仪器/设备名称	型号/规格	主要功能
烟尘浓度检测	激光粉尘仪	TSI DustTrak DRX 8545	实时监测颗粒物质量浓度
粒径分布分析	扫描迁移率颗粒物粒径谱仪	TSI Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) 3936L	测量颗粒物粒径分布（亚微米）
粒径分布分析	气动粒子粒径谱仪	Malvern Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3321	测量颗粒物粒径分布（微米）
等离子体参数测量	高压探头	Tektronix P6015A	测量等离子体发生器输入电压波形
等离子体参数测量	霍尔效应电流探头	Tektronix TCP003	测量等离子体发生器输入电流波形
等离子体参数测量	数字示波器	Teledyne LeCroy SDA 810Zi	显示、记录电压和电流波形，计算平均输入功率
气体成分分析	傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR)	Thermo Fisher Gasmet DX403	检测出口气体中的气态污染物浓度
环境参数监测	温度计	SIKA	记录实验环境温度
环境参数监测	湿度计	SIKA	记录实验环境湿度
数据采集系统	数据采集软件/程序	Python	实时采集并记录各传感器数据

6.3 实验方案

基础组采用传统的滤筒式除尘器来开展烟尘捕集工作，模拟电弧焊烟尘产生情况后将其送入滤筒式除尘器，接着测量该除尘器进出口的烟尘浓度并计算捕集效率。

基于等离子体动力学的烟尘捕集新方法组运用基于等离子体动力学的捕集与净化单元进行烟尘捕集与净化操作，同样模拟电弧焊烟尘产生后将其送入等离子体单元，然后测量该单元进出口的烟尘浓度以及气态污染物浓度并计算捕集效率和净化效率，实验参数设置方面将烟尘产生速率设定为 2 g/min 且送风风速设定为 2 m/s，等离子体参数中电压设定为 10 kV、频率设定为 20 kHz 以及空气流量设定为 5 L/min，对比单元参数时要保证滤筒式除尘器的风量与等离子体单元的进风量保持一致。

6.4 实验流程

启动烟尘发生器以及送风系统来产生稳定浓度烟尘气流，分别把烟尘气流输送到基础组和实验组的处理单元之中；等系统稳定运行 5 分钟之后开始采集数据且持续采集 15 分钟；记录并整理实验数据进而计算捕集效率与净化效率；对比分析两组实验结果评估基于等离子体动力学新方法较传统方法性能优劣。

6.5 实验结果

实验对比结果表明等离子体动力学方法作为实验组技术，与基础组的滤筒式除尘器相比在污染物控制效率上更优，该技术不但提升了颗粒物的捕集效果还增强了 NOx 去除能力。然而尽管等离子体动力学方法提升净化效率优势明显，但臭氧生成和能耗增加是需权衡的关键因素。详见表 2。

表 2：实验结果对比

测量项目	基础组（滤筒式除尘器）	实验组（等离子体动力学方法）	优势幅度
入口颗粒物浓度 (mg/m³)	8.56	8.57	优势幅度
出口颗粒物浓度 (mg/m³)	3.81	2.12	N/A（无差异）
颗粒物捕集效率 (%)	55.3%	75.3%	1.69 mg/m³ ↓
入口 NOx 浓度 (ppm)	0.5	0.52	20.% ↑
出口 NOx 浓度 (ppm)	0.41	0.34	N/A（无差异）
NOx 去除率 (%)	22.24%	41.25%	0.07 ppm ↓
出口 O₃ 浓度 (ppm)	ND	0.15	19.01% ↑
能耗 (W)	15	35	0.15 ppm ↑

7 结束语

等离子体动力学方法在颗粒物捕集和NO_x去除方面呈现出显著的效率提升。但需要权衡臭氧生成和能耗增加等潜在问题。未来需通过优化等离子体参数、改进反应室设计以及开发高效尾气处理技术进一步提升等离子体动力学方法在环保与工业领域有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1]路浩,巩照坤,邢立伟,等. 300M 超高强钢电弧焊修复试验研究[J]. 焊管,2025,48(04):47-53.
- [2]孙何雨. 太阳风中离子和电子动力学不稳定性研究[D]. 中国科学技术大学,2021.

[3]马新文,朱小龙,刘惠萍,等. 离子与原子碰撞多体动力学过程成像研究[J]. 中国科学(G辑:物理学 力学 天文学),2008,(01):1-11.

[4]离子伯离斯坦波驱动电流实验研究. 安徽省,中国科学院等离子体物理研究所,2004-01-01.

[5]王泽力. 低碳钢三丝间接电弧焊电弧特性及熔池流动行为研究[D]. 大连理工大学,2024.

[6]王飞. 等离子体辐射研究: 应用于焊接电弧诊断和光辐射危害评定[D]. 天津大学,2018

作者简介: 李江勇, 1976.6, 男, 汉, 山东省郓城人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 锅炉。