

电场与燃烧耦合研究进展

许秦坤¹,周煜琴¹,唐中华²

1. 西南科技大学环境与资源学院中心实验室,四川绵阳 621010

2. 西南科技大学土木工程与建筑学院,四川绵阳 621010

摘要 为了提高能源转换效率、降低燃烧副产物的排放,利用电场增强燃烧、控制燃烧火焰特性已逐渐引起研究人员的注意。本文从竖向、横向(即径向)和单电极式等不同的电场形式对燃烧场的影响展开论述。不同的电场形式下,通过改变电场参数,对电场中不同燃料的燃烧火焰特性变化规律进行研究,以此考查电场与燃烧耦合时的特性。研究表明,利用竖向电场力来平衡浮力可以粗略模拟微重力下燃烧时的扩散火焰,燃烧速率受电场强度影响,4kV 时最小;利用横向电场可以改变火焰形状(如高度降低)及颜色,也可以助燃低热值燃料,实现可靠点火和稳定燃烧;对于单极式电场,观察到 3 种不同类型的振荡火焰。阐述了利用电场降低燃烧副产物的可行性。文献调研表明,对不同电场形式与燃烧火焰特性的研究,仍缺乏相应的基础数据、电场参与下的燃烧反应动力学模型以及完备的燃烧场耦合机制分析。

关键词 电场;燃烧反应动力学;火焰;耦合

中图分类号 TK16

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.13.012

Progress in the Coupling Between Electric Field and Combustion

XU Qinkun¹, ZHOU Yuqin¹, TANG Zhonghua²

1. Center Laboratory of School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

Abstract Recently, in order to improve energy translation effect and decrease the emission of combustion byproducts, many researchers have gradually paid attention to enhance combustion and control combustion flame by utilizing an electric field. The effect of different electric fields, such as vertical electric field, horizontal (or radial) electric field, scattered (viz single electrode) electric field, and alternation electric field, etc, on various fuel combustion flame characters were firstly discussed. Secondly, the feasibility for decreasing combustion byproducts by using the electric field was described. Finally, up to now, the complete research on the relation between different electric fields and the combustion flame characters does not exist. Its relative base data, perfect mechanism analysis, and combustion reaction dynamics with electric field are lack of. Enhancing combustion and controlling combustion flame by utilizing various electric fields possesses the practical significance for saving energy and reducing emission.

Keywords electric field; combustion reaction dynamics; flame; coupling

0 引言

燃烧在能源利用领域是普遍存在的,燃料的燃烧过程是一个极为复杂的传热传质过程,如何提高能量转换效率、降低燃烧副产物的排放甚至零排放是当前国内外研究的热点^[1-8]。

利用电场来控制燃料的燃烧行为,能够提高燃烧效率、减少环境污染甚至无环境污染。1951年,Calcote等^[9]研究了纵向(竖向)电场下 Bunsen 火焰的电特性,发现电场对 Bunsen 火焰的稳定性影响强烈,同时利用正离子与环境空气动量转

收稿日期:2012-11-19;修回日期:2013-01-21

基金项目:西南科技大学博士基金项目(12zx7120);西南科技大学青年基金项目(11zx3112)

作者简介:许秦坤,博士,研究方向为火灾、安全管理等,电子信箱:uxqk@mail.usstc.edu.cn

移的力学模型定性地解释了多数实验结果。用电场控制燃烧是利用了电场与燃烧火焰的耦合机理,使得燃料的燃烧行为出现了很大不同(与通常燃烧相比),如火焰的振荡、稳定性、焰色、焰温、生成的烟粒子、燃烧产物成分等,而这些与施加的电场形式、强度、施加方式等有关。燃烧行为易受周围空气流场的影响,特别是火焰根部(或下部)更易受到电场的影响,表明电场施加的部位不同导致燃烧火焰特性有很大不同。燃烧火焰特性主要根据具体的研究对象来确定,从气或液相燃料供应流态可以分为层流和湍流,燃料是否提前与氧化剂混合分为预混与非预混,是否处于重力环境分为通常重力环境与微重力环境下的燃烧等,这些燃烧火焰特性区别较大,如果再叠加电场的作用,火焰特性区别将更大。国外对这方面的研究较多,但国内较少,特别是不同电场形式下燃烧火焰特性的基础研究。

1 不同电场形式下的燃烧

根据电场方向与火焰方向是否平行与垂直,可以把电场分为竖向(纵向)电场、横向(水平)电场及发散电场(即单电极式电场);根据电场是否均布可分为均匀电场和非均匀电场;一般来说,采用均布电场的较少,主要以针-板式、针-环式及板-环式这样非均匀电场来研究燃烧火焰特性。下面从竖向电场、横向电场和单电极式电场来阐述电场与燃烧火焰特性的一些研究进展。

1.1 竖向电场

Osamu 等^[10]利用两相距 50mm 和 60mm×60mm 方形平行水平金属网孔板与高压直流电源正负两极连接,在两板间形成较为均匀的竖向电场,在两板间放入由不导电的硅纤维作支撑的液滴火焰,通过改变电场电压(电场强度)及极性研究 3 种燃料(乙醇、正辛烷、甲苯)液滴火焰形状参数及烟粒子并给出合理解释。实验发现,利用电场力平衡浮力只可粗略模拟微重力下的燃烧火焰,也就是说,当电场力与浮力平衡时,液滴燃烧火焰并不是想象中的球形扩散火焰;同时发现,液滴的燃烧速率在约 4kV 时最小;当电场力方向与浮力方向一致时,没有出现预期的燃烧明显增强现象,甚至燃烧速率反而有下降趋势(相对于不施加电场),这一点,认为是由于反应区的电子吸附在中性分子或烟粒子上形成带负电的粒子,由于其质量大,在电场加速易形成向下运动的负电粒层,从而降低火焰下部上升气流速度,进而影响对流传热的进一步发展。但并未考虑液滴火焰在电场不同高度处等其他一些情况。张扬等^[12]利用近似针-板式的竖向电场对非预混射流扩散火焰进行研究,通过火焰形状观察、施加不同电压、改变燃空当量比等实验发现,随着电压的增加,烟气中 CO 的排放先增大,后减小,进入等离子态后突然增大,而 NO 的排放与 CO 正好相反,先减小后增大,进入等离子态后突然减小,CO 和 NO 的极值都出现在 1kV 左右。但并没有考虑不同交变电场频率的影响,仅给出实验结果,也没有给出相关机理分析。

由此可见,利用燃烧时所产生的带电物质在电场中所受

的电场力来平衡燃烧时火焰所受的热浮力,可以粗略地模拟微重力下的燃烧火焰,这对于开展微重力下的燃烧火焰特性研究具有重要意义;对于不同的施加电压,也就是对应不同的电场强度,燃料的燃烧速率及燃烧产物不同,燃烧速率和燃烧产物受电场强度影响较大;如果电压持续升高,电场强度持续增加,达到空气击穿状态形成等离子电场,这时的燃烧产物发生了显著变化,如 CO 和 NO 分别突然增大和减小。

1.2 横向电场

Cha 等^[13]巧妙地利用介质阻挡放电装置(DBD)对火焰和静电进行研究。通过实验研究发现,火焰高度及颜色随电场强度增加而减少或改变,并得出临界电压或临界电场强度,以此来区分静电区域和放电区域。随着横向电场的增强,由于纵(轴)向对流与径向对流平衡破坏,导致径向对流增强而致火焰高度减小。该研究表明,利用 DBD 的低温等离子体控制燃烧火焰高度及烟粒子产生是可行的。胡宏斌等^[14]利用 DBD 产生的非平衡等离子体助燃由 H₂ 和 CO 组成的低热值混合气体,实现了燃烧室可靠点火和稳定燃烧。该研究表明,等离子体点火能够在极低的氢含量和当量比下可靠点燃火焰;在等离子体助燃下,火焰传播速度增大,稀态熄火极限有所拓宽,低当量比下的燃烧效率和燃烧稳定性都有所提高。尽管其给出了一定的机理分析,但无法给出电离条件下的燃烧反应动力学模型。夏云春等^[15]利用放入横向电场的四角切圆的油池旋转火焰研究不同强度直流电场和不同频率交变电场对火焰内部和顶部以及边缘温度的影响。实验发现,随着电压的升高,火焰的温度分布发生了一定改变,温度改变量最大达到 30℃,随着交变电场的频率增加,其火焰温度也有一定变化,但应小于 5℃。任晓丽等^[16]利用 Bunsen 预混火焰放入 12kV 横向电场研究电场对火焰形状及速率的影响,通过改变丙烷预混气化学当量比研究电场对燃烧速率的影响。实验发现,高压水平电场对富燃料及理想当量比燃烧影响明显;同时,就电场对丙烷预混气在细长玻璃管竖向蔓延燃烧速率影响进行研究,发现在不同的当量比下,其火焰峰面都有明显增大的蔓延速率;最后提出,利用火焰由于受离子风影响始终无法接近其上方垂直火焰放置的负极铁板这一特性,以燃烧室壁面作负极来防止火焰对燃烧室壁的烧蚀,但这与原来理论分析不符,需进一步研究,同时其研究也较为单一,仅考虑 12kV 高压电场。陈邵有等^[17]利用针形和平板电场从不同角度施加到火焰上,研究不同电场参数对火焰特性影响,但仅对火焰高度、高宽比及熄灭特性进行定性研究。实验表明,外加电场的角度对火焰特性有十分重要的作用,针形电场仅通过离子风影响火焰特性,而平板电场通过电场力对火焰中离子的作用来影响火焰,针形电场产生的离子风对火焰的影响更大。

同样,对于典型的横向电场来说,即 DBD 也存在一个临界电压,也就是说存在一个临界电场强度,该临界电场强度就是让空气处于击穿状态形成等离子电场,可以改变火焰形状(如高度降低)和颜色;可以利用横向电场产生的低温非平

衡等离子体助燃低热值燃料,实现可靠点火和稳定燃烧;除了电场强度对燃烧作用明显外,施加电场的角度也有一定影响,但缺乏定量研究。

1.3 单电极式电场

Ryu 等^[18]利用单电极结构电场形式对层流抬升火焰多尺度振荡和低频(小于 30Hz)交变电场关系进行了研究,观察到 3 种不同类型的振荡火焰。一种是与施加交变电场频率无关的、周期约为 10s 的大尺度振荡;一种是与施加交变电场频率同步的小尺度振荡;最后一种是小尺度振荡嵌入大尺度振荡的双频耦合振荡。同时发现,随着施加的交变电场频率由 30Hz 逐渐减小,这 3 种类型依次出现,最后在考虑 Reynolds 数和 Richardson 数条件下给出各种尺度振荡的机制分析,认为其振荡可能还是浮力导致的不稳定性产生的,只不过所施加的交变电场的离子风对振荡起着触发作用。因此,有必要通过具有足够失重时间(大于 10s)的落塔进行验证实验,但这样长时间的落塔实验难度较大,数值模拟可能是其先行验证的一个有效方法。另外,该实验没有考虑燃料管口径的影响,而燃料管口径直接决定火焰的功率,火焰功率是影响燃烧火焰振荡与稳定性的一个重要因素,因此有必要对燃烧功率与火焰稳定性关系进行研究;实际上,该实验所采用的火源功率低于 58W,有必要在更大燃烧功率范围内进行研究,以期确定更具一般性的火焰振荡与交变电场频率及场强的关系,最终实现通过电场控制或增强燃料的燃烧。Kim 等^[19]利用化学纯级的丙烷作燃料,固定的单电极式电场结构参数,仅通过改变施加的电场参数(交直流、电压、频率等)研究悬空速度与交流电压及频率相互关系,发现在施加较低交流电压范围内,随着交流电压的升高,喷射火焰脱离喷嘴的喷射速度(即悬空速度)增大,也就是层流状态的喷射火焰的稳定性得以增加;同时发现,在较低交流电压范围内,随着频率的增加,在一定范围内,悬空速度随频率而成倍增加。但是,在高压交流电作用下,由于放电的扰动作用,极大地影响了燃烧的稳定性,悬空速度随电压而减小,频率对其影响小。采用固定的单电极式电场的结构参数,同样缺少更大燃烧功率范围内的研究。

对于单极式电场,主要从施加电场频率方面考虑燃烧火焰特性,单电极结构电场形式下层流抬升火焰多尺度振荡与低频(小于 30Hz)交变电场关系仅给出可能的机理解释,缺乏进一步验证的试验技术手段。同时,缺少更大燃烧功率范围内的研究。

2 电场与燃烧副产物

燃料在燃烧过程中会产生一定的燃烧副产物,如不完全燃烧时的碳烟粒子。碳烟粒子的形成,不仅减小能量转换率,而且污染空气。对于碳烟粒子的产生机理,已有很多研究^[20,21]。Sunderland 等^[22]在乙炔层流扩散火焰中对烟粒子的形成、凝结和生长进行研究,发现当温度达到约 980℃时,烟粒子开始产生,燃料分解;烟粒子凝结速率也在一阶乙炔反应相关;当温度高于 980℃且燃料当量比大于 1.14 时,烟粒子凝结与生长水平明显。通过添加剂可以控制烟粒子。Du 等^[23]报道了各种

气相添加剂对烟粒子产生限值的影响,氢的添加可以提升火焰温度,从而有效抑制火焰中烟粒子产生。Chung 等^[24]开展了关于在燃烧聚苯乙烯过程中添加金属剂抑制烟粒子的实验研究,报道了在相同添加率的情况下,两金属联合添加抑制烟粒子的效果远大于单个金属添加的效果,两金属联合添加抑制烟粒子的最大百分数达到近 90%。

利用电场控制燃烧,许多学者对抑制碳烟粒子产生也进行了研究^[20-25,31]。Weinberg 等研究了施加电场对扩散火焰中烟粒子形成过程的影响;烟粒子凝结、热解区的生长和沉淀。研究发现,当对某一火焰施加一电场时,来自该火焰的烟粒子量明显减少;粒子的形成速率取决于通过热解区的离子流的极性和大小;正离子对烟粒子的形成起到凝结核的作用,负电荷不起凝结核作用,但其倾向于通过中和正离子凝结核来减少烟粒子形成。为了研究火焰中碳颗粒形成的早期阶段(凝结阶段)施加电场时烟粒子的产生过程,当在平流逆向扩散火焰施加电场时,通过对粒子移动速率和碳颗粒尺寸进行测量,发现粒子具有 $0.001\sim 0.03\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ 的迁移速率,而迁移速率取决于施加的电压;借助电子放大镜进行详细地尺寸分析发现,施加只有几千伏的弱电场时,碳颗粒直径由不施加电场时的 50nm 减小到约 10nm。Lawton 等^[25]从理论和实验上说明了电场对火焰、带电粒子以及电场力诱导粒子速率的影响;研究了火焰在均匀电场和非均匀电场中偏斜以及利用电镜观察烟粒子大小。Bradley 等^[26]回顾了电场对燃烧过程的影响,并研究了在圆柱型燃烧器边缘附近空间产生电晕时预混甲烷火焰的吹散规律。直流电场应用表明,火焰尖部的负电晕导致吹散处流率的增加,通过施加电场,吹散流率增加,甚至在开始电晕之前。Ohisa 等^[27]报道了直流或交流电晕放电对来自于丙烷湍流扩散火焰的烟粒子释放的影响,就直流或交流电晕放电来说,当电晕施加到横窜火焰下部,即烟粒子开始形成的地方,烟粒子释放有相当大的减少;当直流电晕放电施加到火焰上时,电晕风的卷吸减少了烟粒子的产生。Mizutani 等^[28]研究了交互式电场对伴随流(co-flow)式丙烷扩散火焰的影响。在施加电场和不施加电场情形下都测试了烟颗粒的大小、结构和浓度。当施加交互式电场时,由于电场控制了烟颗粒的形成与生长,烟颗粒的氧化得以加强^[29]。Masahiro 等^[20,21]采用板-环结构的电场形式,通过改变施加在板-环两电极间的高压直流电源电压及极性,研究电场强度、方向与燃烧火焰高度、宽度、温度分布及烟粒子产量的关系。得出,施加与火焰方向一致的正极性电场更有利于减少烟粒子的生成;相对于不施加电场,正极性电场强度为 0.2kV/cm 时,烟粒子量减少 90%以上。王宇等^[28,29]就电场对火焰形状及烟粒子形成进行了研究,并指出深入研究各种污染物的协同效应的必要性,包括煤粉等固体燃料的多样性,磁场、温度场、声场等与电场复合形成多场作用的拓展性,最后提出焰-场数值模拟的急需性。陈丹之等^[30]就磁场与电场对火焰的作用分别进行了研究,并给出了磁场影响火焰的机理分析。

燃烧不完全产生的碳颗粒,不仅降低燃烧效率,而且污

染环境。电场可以增强一些反应物的活性,同时利用有序的电晕风可以强化反应物的混合强度,从而达到充分燃烧,抑制碳颗粒的产生。

3 结论

研究燃烧火焰特性大部分采用了气、液相燃料火,但对固相燃料火在电场中的火焰特性缺乏研究,一方面因为固相燃料火在电场中难以控制,另一方面可能是因为固相燃料火燃烧机制更为复杂。

通过以上分析可以看出,利用静电场增强燃烧、控制燃烧火焰特性,从而提高能源转换效率、降低燃烧副产物的排放已引起学者注意。部分学者通过改变电场形式和电场参数,对放入其中的各种燃料的燃烧火焰特性变化规律进行了研究。但还没有人对不同电场形式与燃烧火焰特性开展系统研究,缺乏相应的基础数据、电场参与下的燃烧反应动力学模型以及完备的电场与燃烧场耦合机制分析、电场下固相燃料的火焰特性、磁场、声场、重力场、燃烧场等多场耦合研究。

参考文献(References)

- [1] Jens H, Rahul A. Carbon capture and storage (CCS) options for co-production of electricity and synthetic fuels from indigenous coal in an Indian context[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2009, 13(1): 56–63.
 - [2] Energy Information Administration. International Energy Annual 2006[R]. Washington DC: US Department of Energy, 2008.
 - [3] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2007–China and India Insights[R]. Paris: IEA Publications, 2007.
 - [4] Toftegaard M B, Brix J, Jensen P A, et al. Oxy–fuel combustion of solid fuels[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(5): 581–625.
 - [5] Zhang L, Eleanor B, Qiao Y, et al. *In situ* diagnostics of victorian brown coal combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ mixtures in drop–tube furnace[J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 2703–2712.
 - [6] Jacob B, Peter A J, Anker D J. Modeling char conversion under suspension fired conditions in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres [J]. *Fuel*, 2011, 90(6): 2224–2239.
 - [7] Edge P, Gharebaghi M, Irons R, et al. Combustion modelling opportunities and challenges for oxy–coal carbon capture technology [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(9): 1470–1493.
 - [8] Damen K, van Troost M, Faaij A, et al. A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage–Part B: Chain analysis of promising CCS options[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(6): 580–609.
 - [9] Calcote H F, Pease R N. Electrical properties of flames[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1951, 43(12): 2726–2731.
 - [10] Osamu I, Yasuyuki K, Jun O, et al. A study on single fuel droplets combustion in vertical direct current electric fields [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 1949–1956.
 - [11] Osamu I, Chen B, Nishida S, et al. Combustion of ethanol fuel droplet in vertical direct current electric field[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2005–2011.
 - [12] 张杨, 张海, 杨海瑞, 等. 交变高压电场对扩散火焰燃烧过程及 NO_x 生成的影响[C]// 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2009.
- Zhang Yang, Zhang hai, Yang Hairui, et al. The effect of alternative HV electric field on diffusion flame combustion and its byproduct NO_x[C]// Proceedings of Combustion Conference of the Committee of Engineering Thermophysics of China. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2009.

- [13] Cha M S, Lee S M, Kim K T, et al. Soot suppression by nonthermal plasma in coflow jet diffusion flames using a dielectric barrier discharge. *Combustion and Flame*, 2005, 141(4): 438–447.
- [14] 胡宏斌, 房爱兵, 徐纲, 等. 非平衡等离子体助燃低热值气体燃料的实验研究[C]//中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2009.
- Hu Hongbin, Fang Aibin, Xu Gang, et al. Experimental study of non–equilibrium plasma–assisted combustion for low caloric gas fuel[C]// Proceedings of Combustion Conference of the Committee of Engineering Thermophysics of China. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2009.
- [15] 夏云春, 吴静. 电场对旋转火焰温度的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(2): 126–130.
- Xia Yunchun, Wu Jing. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(2): 126–130.
- [16] 任晓丽, 金鹏验, 张佳心. 1 万 2 千伏直流高压电场对火焰传播速度影响的研究[J]. *应用科技*, 1993, 20(1): 59–65.
- Ren Xiaoli, Jin Pengyan, Zhang Jiabin. *Applied Science and Technology*, 1993, 20(1): 59–65.
- [17] 陈邵有, 甘云华, 杨泽亮, 等. 电场对乙醇扩散小火焰的影响[J]. *节能技术*, 2009, 27(4): 293–295.
- Chen Shaoyou, Gan Yunhua, Yang Zeliang, et al. *Energy Conservation Technology*, 2009, 27(4): 293–295.
- [18] Ryu S K, Kim Y K, Kim M K, et al. Observation of multi–scale oscillation of laminar lifted flames with low–frequency AC electric fields[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(1): 25–32.
- [19] Kim M K, Ryu S K, Won S H, et al. Electric fields effect on liftoff and blowoff of nonpremixed laminar jet flames in a coflow [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(1): 17–24.
- [20] Masahiro S, Arai T, Arai M. Control of soot emitted from acetylene diffusion flames by applying an electric field [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 119(3): 356–366.
- [21] Masahiro S, Sato M, Sawada K. Variation of flame shape and soot emission by applying electric field[J]. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39(4): 305–311.
- [22] Sunderland P B, Faeth G M. Soot formation in hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1996, 105(1–2): 132–146.
- [23] Du D X, Axelbaum R L, Law C K. Soot formation in strained diffusion flames with gaseous additives[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 102(1): 11–20.
- [24] Chung S L, Lai N L. Suppression of soot by metal additives during the combustion of polystyrene [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1992, 41(6): 821–826.
- [25] Lawton J, Weinberg F J. *Electrical aspects of combustion* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1969.
- [26] Bradley D, Haq M Z, Hicks R A, et al. Turbulent burning velocity, burned gas distribution, and associated flame surface definition[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(4): 415–430.
- [27] Ohisa H, Kimura I, Horisawa H. Control of soot emission of a turbulent diffusion flame by DC or AC corona discharges [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116(4): 653–661.
- [28] 王宇, 姚强. 电场控制火焰中细颗粒生成及分布的研究进展[J]. *煤炭转化*, 2005, 28(10): 86–92.
- Wang Yu, Yao Qiang. *Coal Conversion*, 2005, 28(10): 86–92.
- [29] 王宇, 姚强. 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 237–239.
- Wang Yu, Yao Qiang. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(2): 237–239.
- [30] 陈丹之, 韩绍辛, 贾理群, 等. 外加电、磁场对火焰结构及燃料燃烧特性的影响[J]. *西安交通大学学报*, 1990, 24(4): 127–134.
- Chen Danzhi, Han Shaoxin, Jia Liqun, et al. *Journal of Xi’an Jiaotong University*, 1990, 24(4): 127–134.
- [31] Wang Y, Nathan G J, Alwahabi Z T, et al. Effect of a uniform electric field on soot in laminar premixed ethylene/air flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1308–1315. (责任编辑 吴晓丽, 张玉肖)