第 49 卷 第 2 期：536-545　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 536-545
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221617

考虑化学反应强耦合的植被火焰条件下直流间隙多物理场耦合模型

普子恒[1,2]，张　隆[1,2]，叶　宽[3]，周　恺[3]，张睿哲[3]，黎　鹏[1,2]
（1. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002；2. 湖北省输电线路工程技术研究中心，宜昌 443002；
3. 国网北京电力科学研究院，北京 100075）

摘　要：为分析电场、温度场与燃烧化学反应的相互作用，更准确地模拟植被火焰条件下间隙带电粒子分布情况，建立了考虑化学反应强耦合的植被火焰条件下直流间隙多物理场耦合模型。并通过植被燃烧试验的结果对模型关键参数进行设置，利用模型仿真分析了不同极性电压、电极高度对带电粒子分布特性的影响及带电粒子对背景电场的影响。结果表明：该文试验条件下，松木热解反应方程系数修正为 $C_{10}H_{14}O_6 \rightarrow 4C+3CO+CO_2+2CH_4+2H_2+H_2O$、热解反应速率为 2.4×10^{-8} mol/(m^3·s)时，仿真与试验结果最为接近；随着电极高度的降低，电极附近与电极极性相异的带电粒子浓度由 10^{-9} mol/m^3 增加至 10^{-8} mol/m^3，变化趋势与泄漏电流相似；带电粒子对正电极附近初始背景电场的影响效果大于负极性，正电极附近背景电场的增幅为 70%~110%，负电极附近则增大了 40%~80%。
关键词：直流电压；植被燃烧；带电粒子；化学反应；泄漏电流

Multi-physical-field Coupling Model of DC Gap Under Vegetation Flame Condition Considering Strong Coupling of Chemical Reaction

PU Ziheng[1,2], ZHANG Long[1,2], YE Kuan[3], ZHOU Kai[3], ZHANG Ruizhe[3], LI Peng[1,2]
(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China;
3. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: In order to analyze the interaction between electric field, temperature field and chemical reaction of combustion, and to accurately simulate the distribution of charged particles in the gap under the condition of vegetation flame, this paper establishes a DC gap multi-physical-field coupling model in which the strong coupling of chemical reaction under the condition of vegetation flame is taken into account. The key parameters of the model are set according to the results of vegetation burning test. The effects of different polarity voltages and electrode heights on the distribution characteristics of charged particles and the effects of charged particles on the background electric field are analyzed by using the model simulation. The results show that, under the test conditions, when the coefficient of the pyrolysis reaction equation of pine is modified to $C_{10}H_{14}O_6 \rightarrow 4C+3CO+CO_2+2CH_4+2H_2+H_2O$ and the pyrolysis reaction rate is 2.4×10^{-8} mol/(m^3·s), the simulation results are the closest to the test results. With the decrease of electrode height, the concentration of charged particles with different polarity near the electrode increases from 10^{-9} mol/m^3 to 10^{-8} mol/m^3, which is similar to the leakage current. The effect of charged particles on the initial background electric field near the positive electrode is greater than that of the negative electrode. The increasement of the background electric field near the positive electrode is 70%~110%, and the increasement of the background electric field near the negative electrode is 40%~80%.
Key words: DC voltage; vegetation burning; charged particle; chemical reactions; leakage current

0　引言

近年来，受极端天气影响，森林火灾频发，多条特高压线路因山火跳闸，山火灾害已成为所有诱发线路跳闸灾害中的第二大灾害[1-4]。山火对绝缘间隙的影响因素主要包括火焰温度、带电粒子和颗粒物等[5-10]。其中，植被燃烧的化学电离、热电离效应被认为是引起间隙击穿的主要原因[11]。相对交流

基金资助项目：国家自然科学基金青年基金 (51607103)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51607103).

条件下电场极性的周期性变化，直流条件下电场极性是不可逆的。直流电压下，植被燃烧产生的带电粒子更容易被收集，更容易形成放电通道产生间隙放电，从而引发线路跳闸停运[11-12]。因此，研究植被燃烧产生的带电粒子在直流间隙中的运动分布规律对放电机理分析具有重要意义。

目前，一些学者通过试验方式对植被燃烧过程中的带电粒子浓度和带电粒子对间隙放电特性的影响进行了研究。植被的主要成分为碳氢氧有机物、碱土金属和金属氧化物等，燃烧过程中会发生化学电离与热电离反应，产生大量带电粒子，火焰中的带电粒子浓度可达到 10^{-11}~10^{-6} mol/m^3[13]。通过向木垛火中添加 KCl，火焰间隙绝缘强度明显下降，表明火焰中带电粒子数目增加会促进放电发展，降低间隙绝缘强度[14]。由山火条件下直流间隙击穿试验研究可知，直流间隙击穿存在明显的极性效应，正极性直流电压下的间隙击穿电压小于负极性，泄漏电流大于负极性，分析原因为不同极性电场中带电粒子的运动和分布特性不同[15]。但由于试验条件限制，难以测量火焰间隙中带电粒子的运动和分布规律以及带电粒子对间隙电场的作用效果，需结合试验建立合理的仿真模型进行分析。

部分学者通过建立植被燃烧模型，对森林可燃物的热解、燃烧和蔓延过程进行了研究[16-17]，但研究重点集中在燃烧过程的热量释放和质量损失，对植被燃烧过程中的化学过程和电场作用下植被燃烧的关注则较少。西安交通大学通过试验与仿真相结合的方式研究了直流电压作用下的甲烷气体燃烧，研究发现直流电压促进带电粒子运动，从而促进燃烧反应，但甲烷预混燃烧与植被燃烧差别较大[18-20]。Tihay V 等基于植被燃烧的气相反应建立燃烧模型模拟了 4 种植被的燃烧，得到与试验温度较一致的仿真数值，但该模型只考虑了简单化学反应，并未考虑反应中的电离过程和电离产生的带电粒子的运动可能对燃烧过程产生的影响[21]。Zhou C 等通过建立包含流体、温度、电场和颗粒运动的多物理场耦合模型，对植被燃烧产生带电颗粒物在电场中的运动分布规律和颗粒物对电场的作用进行了研究，但是该模型是通过设置热释放速率进行模拟燃烧，未考虑燃烧过程中带电粒子在电场的运动造成的温度分布变化以及带电粒子对间隙空间电场的影响，仿真结果与实际过程有一定差异[22]。

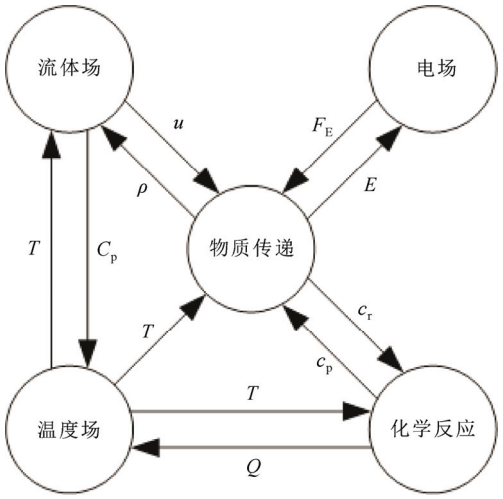
为此，本文充分考虑燃烧反应与电场和温度场等的相互作用，建立化学反应强耦合的直流电压下植被燃烧的多物理场仿真模型，结合植被燃烧试验结果对模型关键参数进行设置，并利用修正后的模型仿真分析不同工况下带电粒子在空气间隙中的运动分布规律和带电粒子对背景电场的作用效果。

1　基于化学反应的植被燃烧多物理场仿真模型建立

植被燃烧过程包括植被热解气体的扩散和氧化反应过程，反应过程中发光并释放大量热量[16]。在高温作用下，植被中的碱土金属以及植被热解产生的碳氢化合物(如 CH_4 等)发生电离反应，产生大量的电子、正离子和负离子[23]。因此，植被火焰中不仅包含大量挥发份气体，还含有许多带电粒子，如 H_3O^+、K^+、e^-等，电场、温度场、化学反应和带电粒子运动相互影响。

1.1　直流电压下植被燃烧的多物理场耦合关系

植被燃烧过程不仅包含了复杂的化学变化，还包含有复杂的物理变化，化学变化主要体现在化学反应部分，物理变化则主要体现在传热和传质的部分[17]。在电场作用下，带电粒子的传递和反应过程会发生变化，从而影响燃烧反应放热过程，燃烧反应的热量释放则会直接影响燃烧环境的温度分布，同时带电粒子也会对背景电场产生影响。多个物理场间的变量相互关联，耦合关系如图 1 所示。



ρ–密度；u–速度；T–温度；Q–热量；C_p–比热容；c_r–反应物浓度；c_p–生成物浓度；F_E–电场力；E–电场强度。

图 1　多物理场耦合关系

Fig.1　Coupling relation of multiple physical fields

1.2 控制方程

1.2.1 气相湍流流动方程

火焰燃烧气流为湍流流动，本文采用考虑涡旋影响的重整化群(renormalization group，RNG) k–ε 湍流模型来模拟流体场。RNG k–ε 模型是将标准 k–ε 模型和重整化群模型进行整合后所得的湍流计算模型。与标准 k–ε 湍流模型相比，其具有更高的计算精度，且能准确描述火焰等旋涡的高速流动状态[24-25]。其控制方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{\text{eff}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k+\rho\varepsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+\frac{C_{1\varepsilon}}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中：ρ 为密度；k 为湍动能；t 为时间；x_i 为空间坐标；α_k 为湍流动能 k 的普朗特数；μ_{eff} 为等效粘性系数；G_k 为湍动能 k 的产生项；ε 为湍流耗散率；u_i 为 i 方向上的瞬时速度；α_ε 为湍流耗散率 ε 的普朗特数；$C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 均为计算常数。

1.2.2 电场作用方程

电场会改变带电粒子的运动，进而影响粒子之间的化学反应。电场力的分量 F_i 是由电场强度分量 E_i 和带电物质浓度 n^+，n^-构成，如下式[26]。

$$F_i=eE_i\left(n^+-n^-\right) \tag{3}$$

$$E_i=-\frac{\partial V}{\partial x_i} \tag{4}$$

根据带电物质浓度随时间变化，求解每个时间步长下电势分布的泊松方程

$$\nabla^2 V=-e\frac{\left(n^+-n^-\right)}{\varepsilon_0} \tag{5}$$

式中：+和–分别表示正负载流子的性质；e 为电子电荷；V 为电势；ε_0 为真空介电常数。

1.3 化学反应

大量学者通过对植被的元素构成和热分解产物进行测量分析[27-31]，对植被热解和燃烧反应过程进行研究，分析认为可以将植被燃料的化学式简化为 $C_xH_yO_z$，植被热解产生的挥发份产物主要成分为可燃的 CO、CH_4、H_2 和非可燃的 CO_2、H_2O 等，因此植被发生热解时的化学反应可表示为

$$C_xH_yO_z\rightarrow C, H_2O, CO_2, CO, CH_4, H_2, \text{等} \tag{6}$$

热解气体离开燃料表面后，与周围空气发生混合，其中可燃气体成分在高温作用下进行氧化反应。可燃性热解气体与氧气的全局反应方程如下：

$$CH_4+2O_2\rightarrow CO_2+2H_2O \tag{7}$$

$$CO+0.5O_2\rightarrow CO_2 \tag{8}$$

$$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O \tag{9}$$

同时，热解过程中生成的碳氢燃料(如 CH_4)和植被中含有的碱金属和碱土金属在燃烧过程中会发生电离反应，生成大量的电子和离子[32-34]。主要离子反应如下：

$$CH+O\rightarrow HCO^++e^- \tag{10}$$

$$HCO^++H_2O\rightarrow CO+H_3O^+ \tag{11}$$

$$CaO+CO\leftrightarrow Ca^++e^-+CO_2 \tag{12}$$

$$K+CO+O\leftrightarrow K^++e^-+CO_2 \tag{13}$$

1.4 模型特性参数

植被燃烧过程中的化学反应速率符合阿伦尼乌斯方程。

$$k=AT^n\exp\left(-E_a/RT\right) \tag{14}$$

式中：A 为表观指前因子；T 为绝对温度；E_a 为表观活化能；R 为气体常数。

当前，对于 CO、CH_4、H_2 等单组分燃烧的研究已经比较成熟，对这些物质燃烧的化学反应速率已形成较为统一的认识，可燃性气体氧化燃烧反应和植被燃烧过程中电离反应的阿伦尼乌斯系数分别如表 1 和 2 所示。

2 模型参数的确定

考虑不同植被的热解产物比例和热解反应速率常数并不相同，本文以松木为例，通过试验与仿真相结合的方式，研究典型植被热解产物比例和反应速率参数的确定方法。

表 1 可燃性热解气体燃烧反应的阿伦尼乌斯系数

Table 1 Arrhenius coefficient of combustible pyrolysis gas combustion reaction

公式编号	A/s^{-1}	E_a/(kJ·mol^{-1})	n	文献来源
(7)	5.16×10^{13}	1.30×10^{8}	–1	参文[31]
(8)	1.00×10^{10}	1.26×10^{8}	0	参文[31]
(9)	2.20×10^{9}	1.09×10^{8}	0	参文[31]

表 2 电离反应的阿伦尼乌斯系数

Table 2 Arrhenius coefficient of ionization reaction

公式编号	A/s^{-1}	E_a/(kJ·mol^{-1})	n	文献来源
(10)	2.53×10^{11}	7.06	0	参文[33]
(11)	9.03×10^{15}	0	0	参文[33]
(12)	5.11×10^{15}	495.37	0.5	参文[34]
(13)	1.52×10^{12}	375.60	0.5	参文[34]

2.1　直流电压下的植被燃烧试验

直流电压下植被燃烧试验平台如图 2 所示。试验平台由直流电源、绝缘支架、电极、测量装置和木垛组成，测量装置包括红外摄像仪(IR)、可见光摄像机(DV)和泄漏电流测量装置等。试验中将充分烘干的松木条搭建为直径 20 cm，高 6 cm 的近似圆形木垛作为燃料。将 20 mL 浓度为 95%的酒精均匀的喷洒在木垛上进行引燃，使木垛能够全面燃烧。每种试验工况均进行 3 次试验。对比分析同一工况下各燃烧阶段的测量数据，植被稳定燃烧阶段的结果重复性最好。后续试验结果的分析主要基于植被稳定燃烧阶段。

2.1.1　火焰体的温度分布

植被火焰属于湍流火焰，在燃烧过程中火焰不断振荡。试验发现，植被火焰高度在稳定阶段的变化范围为 50~65 cm，稳定燃烧时长约为 200 s。因此，由木垛上表面 15 cm 处为起点，以 15 cm 为间隔距离设置 4 个测温点对温度进行测量，测温点设置如图 3 所示。

植被稳定燃烧阶段各测温点处的温度由下至上逐渐降低。测温点 1 处的温度在 680~750 ℃范围内变化；点 2 处的温度变化范围为 400~550 ℃；点 3 处的温度变化范围为 230~400 ℃；点 4 处的温度变化范围为 130~220 ℃。

2.1.2　直流电压下的泄漏电流

植被燃烧产生的带电粒子导致间隙更容易形成放电通道产生间隙放电，放电通道的存在使带电粒子在电场力作用下通过通道快速流出，从而形成泄漏电流。当电极电压或电极高度改变时，间隙中的电场变化，带电粒子在电场中受到的作用力变化，间隙中的电流也会随之变化。不同直流电压和不同电极高度下的间隙泄漏电流如表 3 所示。

由表 3 可知，同一电压等级下，正极性直流电压时的泄漏电流大于负极性电压时的值。10 kV 直流电压下的泄漏电流为–10 kV 时的 3.8~7.9 倍；20、30 kV 直流电压下的泄漏电流约为–20、–30 kV 直流电压下的 1.7~3.2 倍。且随着电极高度的降低，泄漏电流的幅值逐渐增大。当电极高度在 40~70 cm 之间变化时，电极高度每降低 15 cm，泄漏电流约增大为原来的 1.3~2.0 倍；当电极高度由 40 cm 降低至 25 cm 时，泄漏电流增加为原来的 1.8~2.6 倍。

分析认为：施加正极性电压时，以电子为主的负电粒子在电场力的作用下向电极运动，电子体积小、质量轻，电场力对其作用效果明显，很容易被棒电极吸收进入回路，形成较大的泄漏电流；棒电极上加载负极性电压时，通过棒电极进入回路的是正离子，正离子体积大、质量大，电场力对其作用效果稍弱，部分正离子在热气流的作用下脱离电场力的束缚，进入回路的正离子数量较少，使得施加负极性直流电压时的泄漏电流较小。在电极高度为 25~70 cm 时，–10 kV 直流电压下的泄漏电流均小于

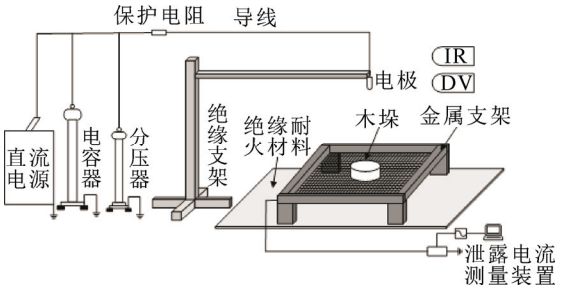


图 2　试验布置示意图

Fig.2　Layout of experimental equipment

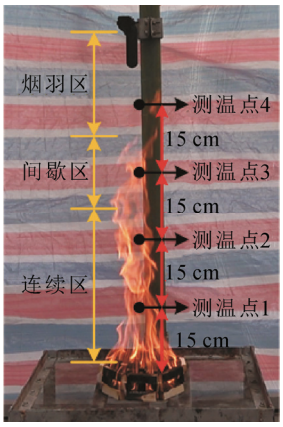


图 3　测温点设置示意图

Fig.3　Setting of temperature measuring points

表 3　不同电极高度时的泄漏电流幅值

Table 3　Leakage current at different electrode heights

电极高度/cm	电压极性	泄漏电流/mA		
		电压幅值 10 kV	电压幅值 20 kV	电压幅值 30 kV
70	正	0.61	6.94	22.99
	负	0.16	2.16	8.05
55	正	1.16	11.80	27.83
	负	0.30	3.87	13.81
40	正	2.52	16.51	36.26
	负	0.59	7.68	19.73
25	正	6.46	29.93	59.28
	负	0.82	17.95	35.92

1 mA。–10 kV 直流电压下，直流间隙中未能形成稳定的贯穿性泄流通道，导致泄漏电流远小于 10 kV 直流电压时的值。带电粒子在火焰体中做扩散运动，由下至上带电粒子浓度逐渐减小，当电极高度降低时，电极附近的粒子浓度增大，电场力对火焰中带电粒子的作用增强，同样时间通过泄漏通道流出的带电粒子数量增加，从而造成间隙泄漏电流增大。

2.2 模型参数影响特性

本文考虑火焰体和棒电极产生的背景电场均存在近似轴对称关系，将模型简化为二维轴对称模型，并将植被燃料等效简化为半径 10 cm、高 6 cm 的圆柱体。棒电极与木垛间的距离 h 参考试验设置，棒电极半径为 1.5 cm，长度为 9.5 cm。设置半径为 50 cm，高度为 250 cm 的空气包为外边界，边界条件设置为开放边界。仿真模型几何结构如图 4 所示。

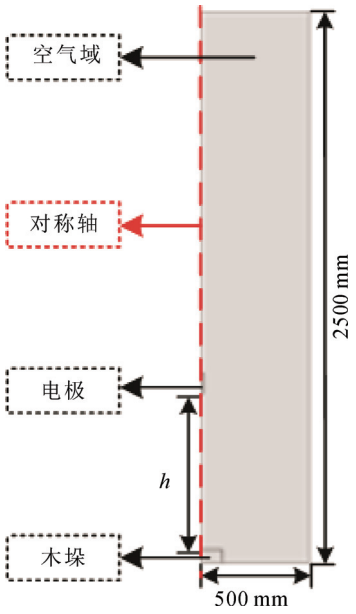


图 4 仿真模型的几何结构

Fig.4 Geometry of simulation model

2.2.1 不同热解反应方程系数时的温度分布

通过对松木热解产物的研究可知：热解燃烧完成后剩余炭的质量占比为原料的 13%~25%；挥发份中 CO 的体积分数为 25%~35%，CO_2 为 10%~15%，CH_4 为 15%~25%，H_2 为 10%~30%，H_2O 为 10%~25%[17]。由此确定松木各热解产物系数，不同系数下的热解反应方程如表 4 所示。

表 4 不同热解产物比例对应的反应方程

Table 4 Reaction equation corresponding to different pyrolysis product proportion

序号	热解反应方程	公式编号
1	$C_{10}H_{14}O_6 \rightarrow 4C+3CO+CO_2+2CH_4+2H_2+H_2O$	(15)
2	$C_6H_{10}O_5 \rightarrow 2C+2CO+CO_2+CH_4+2H_2+H_2O$	(16)
3	$C_8H_{14}O_6 \rightarrow 3C+2CO+CO_2+2CH_4+H_2+2H_2O$	(17)

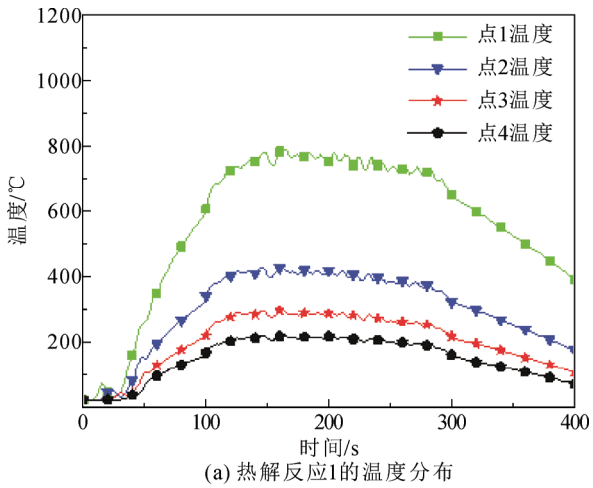
在与试验相同的位置设置测温点，测量不同热解反应时的温度分布，如图 5 所示。由图 5 可知，植被的热解反应方程为式(15)时，测温点 1 处的温度在 100~300 s 时稳定在 700~800 ℃；热解反应方程为式(16)时，测温点 1 处的温度在 90~320 s 时稳定在 500~600 ℃；热解反应方程为式(17)时，测温点 1 处的温度在 150~275 s 时稳定在 950~1050 ℃。将不同热解方程时各测温点处的温度与试验进行对比可知：植被热解方程为式(15)时，模型中松木燃烧的温度分布与与试验测量结果最为接近，热解反应方程为式(16)时的温度相对试验结果偏低，而植被热解反应表示为式(17)时则相对试验结果偏高。

2.2.2 不同反应速率对稳定燃烧时间的影响

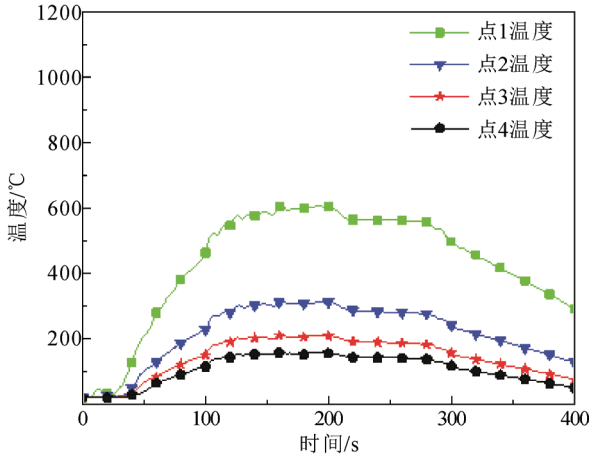
通过对植被热解的反应速率研究可知：植被的热解反应速率分散在 10^{-9}~10^{-7} mol/(m³·s)之间[16]。反应速率大小决定着反应物的消耗速率和生成物的生成速率，从而影响燃料的持续稳定燃烧时间。因此，热解方程为式(1)时，分别计算反应速率为 10^{-9}、10^{-8}、10^{-7} mol/(m³·s)时的植被稳定燃烧时间。不同反应速率下的松木稳定燃烧时间如图 6 所示。热解反应速率为 1.0×10^{-9} mol/(m³·s)时，植被燃烧过程中温度上升时间长，大量可燃性挥发份在燃烧过程中扩散流失，导致稳定燃烧时间缩短，且火焰温度相对试验结果偏低；热解反应速率为 10^{-8} mol/(m³·s)时，植被稳定燃烧时间和温度分布与试验结果相近；反应速率为 10^{-7} mol/(m³·s)时，植被热解释放挥发份的速度较快，热量释放速率变快，但燃料消耗速度也较快，维持稳定燃烧的时间小于 200 s。最终确定松木热解速率在 10^{-8} mol/(m³·s)左右。

2.3 模型参数的确定

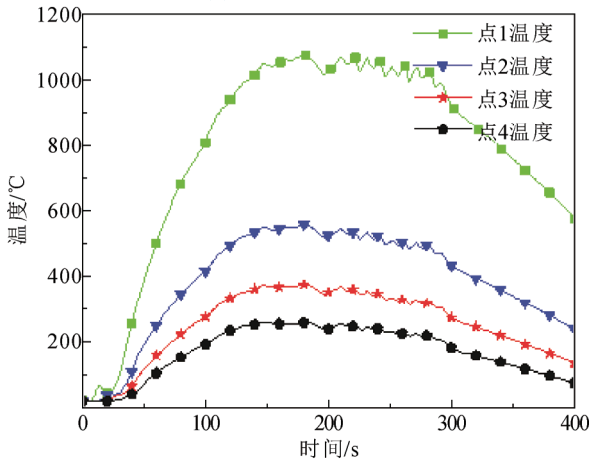
由 2.2 节可知，模型中的热解反应方程表示为 $C_{10}H_{14}O_6 \rightarrow 4C+3CO+CO_2+2CH_4+2H_2+H_2O$，热解反应速率在 10^{-8} mol/(m³·s)左右。通过对松木热解速率的进一步研究，得到设置松木热解反应速率为 2.4×10^{-8} mol/(m³·s)时的仿真结果与试验结果最相近。因此，本文模型以热解反应方程为式(15)，反应速率为 2.4×10^{-8} mol/(m³·s)开展后续研究。此参数下的仿真与试验稳定燃烧阶段的温度对比如图 7 所示。由图 7 可知，测温点 1 处试验和仿真的温度一



(a) 热解反应1的温度分布



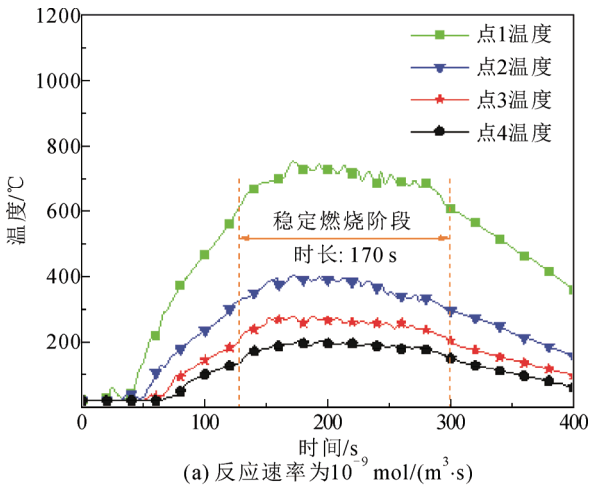
(b) 热解反应2的温度分布



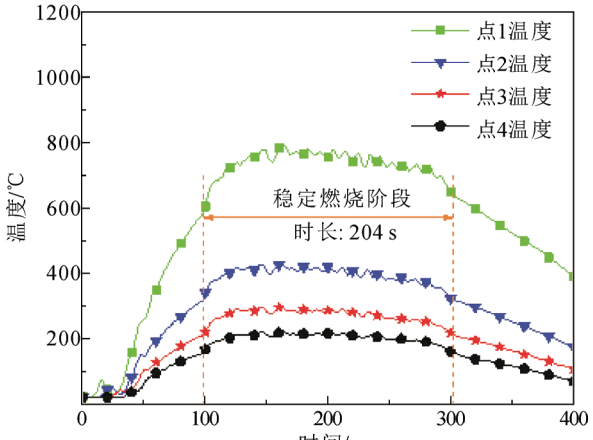
(c) 热解反应3的温度分布

图 5　不同的热解产物比例对温度分布的影响

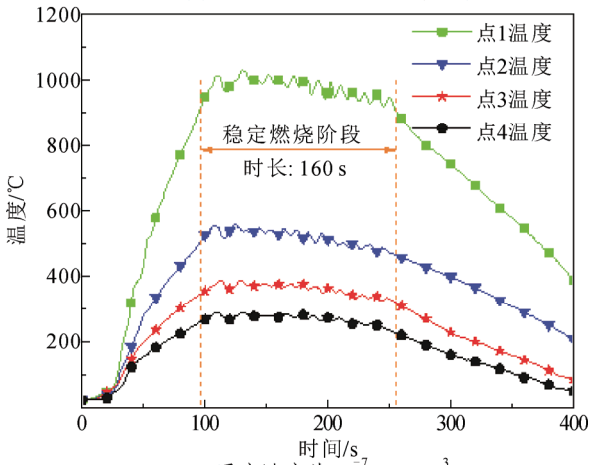
Fig.5　Effects of different vegetation pyrolysis reactions on temperature distribution



(a) 反应速率为10^{-9} mol/(m^3·s)



(b) 反应速率为10^{-8} mol/(m^3·s)



(c) 反应速率为10^{-7} mol/(m^3·s)

图 6　不同热解反应速率对稳定燃烧时间的影响

Fig.6　Effect of different pyrolysis reaction rates on stable combustion time

致性较好，而仿真中测温点 2—4 的温度变化范围虽然也与试验相近，但一致性不如测温点 1。分析认为：试验火焰中自然界无规律自然风的存在会使火焰的动荡更加剧烈，点 1 位于火焰的根部受到的影响较小，测温点 2—4 位于火焰的中上部易受火焰摆动的影响，波动相对仿真较大。

3　带电粒子分布特性及其对背景电场影响

3.1　直流电压对带电粒子分布的影响

由植被燃烧的反应产物分析可知：负电粒子中电子占绝大多数，正电粒子中 H_3O^+为主要成分，因此对不同工况下间隙内的 H_3O^+和电子浓度进行计算，以分析带电粒子在间隙中的分布情况。图 8 和

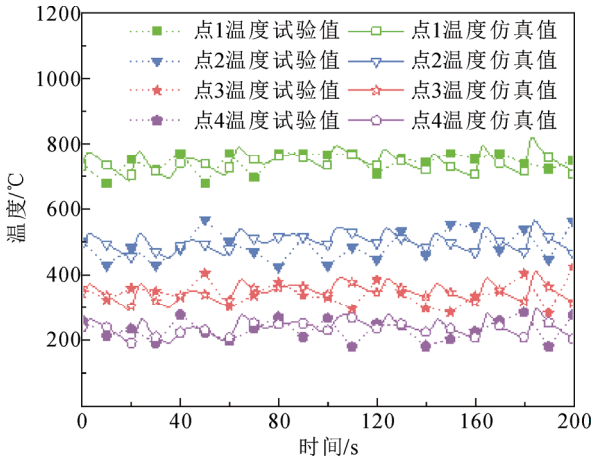
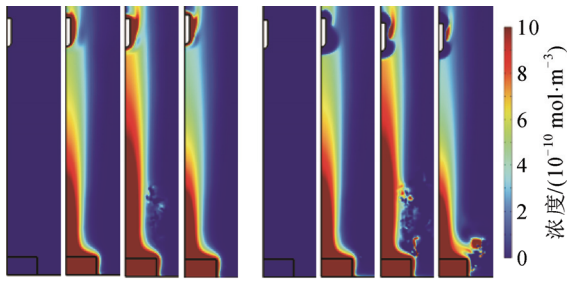


图 7 试验与仿真温度结果对比

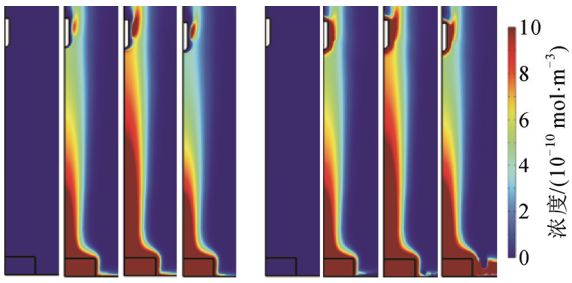
Fig.7 Test and simulation temperature results



(a) 负电粒子浓度分布 (b) 正电粒子浓度分布

图 8 正极性直流电压作用下不同时刻的带电粒子浓度分布

Fig.8 Distribution of charged particle at different times under positive DC voltage



(a) 负电粒子浓度分布 (b) 正电粒子浓度分布

图 9 负极性直流电压作用下不同时刻的带电粒子浓度分布

Fig.9 Distribution of charged particles at different times under negative polarity DC voltage

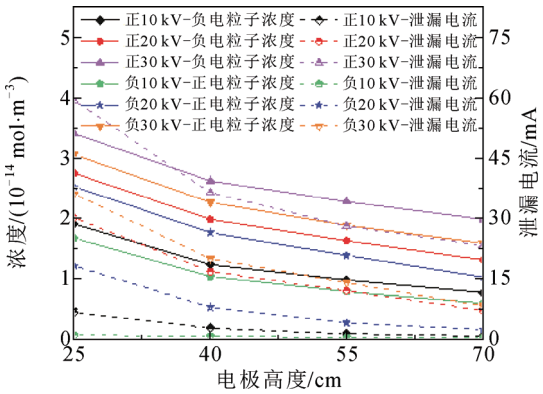


图 10 直流电压下电极附近的带电粒子浓度平均值

Fig.10 Average concentration of charged particles near the electrode at DC voltage

图 9 分别为正、负极性直流电压下不同时刻的带电粒子浓度分布。

由图 8 和 9 可知，间隙中不同时刻带电粒子的浓度分布与燃烧反应过程相关联，带电粒子浓度随着反应的物质的增加先逐渐增加，然后反应进入稳定阶段带电粒子浓度也趋于稳定，最后随着燃料的逐渐耗尽带电粒子的浓度也逐渐减小。在施加正极性电压时，负电粒子受到电极的吸引作用大量聚集在电极附近，正电粒子则由于排斥作用而远离电极；施加负极性电压时，电极附近的负电粒子和正电粒子分布情况与正电压时相反。直流电压作用下，电极附近与电极极性相异的带电粒子浓度由 10^{-11} mol/m^3 增加至 10^{-9}~10^{-8} mol/m^3。电压幅值相同时，正电极附近的负电粒子浓度约为负电极附近的正电粒子浓度的 1.2~1.7 倍。不同工况下，稳定燃烧阶段电极附近的带电粒子浓度如图 10 所示。

由图 10 可知，随着电极高度的降低，电极附近与电极极性相异的带电粒子浓度逐渐增大。电极高度由 70 cm 降低至 40 cm 时，与电极极性相异的带电粒子浓度约以 30%的增长率增加；在电极高度由 40 cm 降低至 25 cm 时，带电粒子浓度的增长率则达到 50%左右。电极高度为 40~70 cm 时，电极附近带电粒子浓度的增长与泄漏电流增大的趋势近似相同，但是当电极高度由 40 cm 降低至 25 cm 时，带电粒子浓度的增幅小于泄漏电流。

分析认为：带电粒子浓度由火焰根部至上逐步减小。随着电极高度的降低，电极附近的带电粒子浓度逐渐增加。当电极高度降低至 25 cm 左右时，电极已经处于火焰根部附近，此区域的高温会导致电离势能较低的碱金属等发生热电离，使此区域的带电粒子浓度增加，从而导致泄漏电流增大较多。当前学者对植被燃烧过程中参与热电离的碱金属数量还未得出定量结论，本模型中暂时不考虑碱金属热电离对仿真计算结果的影响。

3.2 带电粒子对背景电场的影响

由 3.1 节可知，火焰中的带电粒子受电场的影

响会改变原有的运动状态，正电极附近会聚集大量的电子和负离子，负电极附近聚集大量正离子。不同工况下带电粒子的运动和分布情况并不相同，电极附近的电场会随带电粒子的浓度变化而变化。不同工况下的电场分布如图 11 所示。

由图 11 可知，燃烧导致间隙的电场分布改变，电极附近的电场变得不均匀，且电极附近的电场最大值明显增大。在直流电压作用下，与电极极性相异的带电粒子在电极附近大量聚集，带电粒子产生的电场与电极附近的初始背景电场相互叠加致使电极附近的电场强度增大；与电极极性相同的带电粒子受排斥作用远离电极，在电极一定距离范围外扩散运动，对电场的削弱作用使该粒子聚集区域的电场相较初始背景电场减小。电场变化最明显的区域位于电极附近。因此，对不同工况下电极附近的场强平均值进行计算，结果如图 12 所示。

由图 12 可知，随着电极高度的降低，电极附近的电场强度近似线性增加，有火条件下电极附近电场强度的增长速度明显大于无火时，且正极性电极附近的电场强度明显大于施加负极性电压时。以电压幅值为 30 kV 时为例进行分析，当电极高度由 70 cm 降低至 25 cm 时，正极性电压下电极附近的电场强度最大值增幅为 28%，电极附近的场强平均值增幅为 45%；负极性电压下电极附近的电场强度最大值增幅为 24%，电极附近的场强平均值增幅为 40%。随着电极高度的降低，燃烧产生的带电粒子对电极附近的背景电场的作用效果逐渐增强。

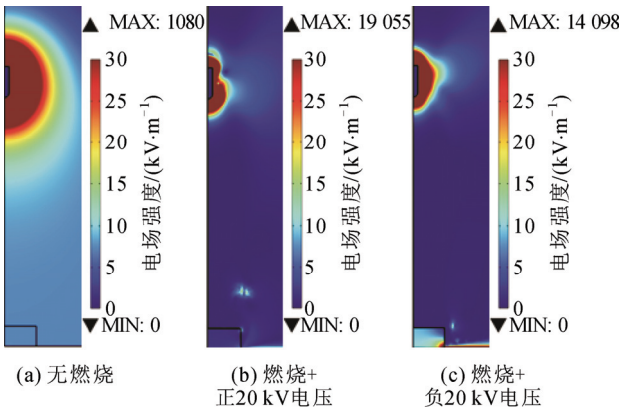


图 11　空间电荷对背景电场的影响

Fig.11　Distortion effect of combustion on electric field

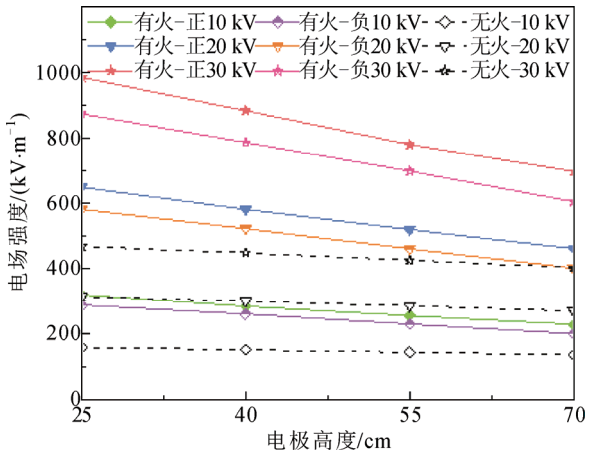


图 12　有火与无火条件下电极附近的电场平均值

Fig.12　Average value of electric field near the electrodes under fire and no fire conditions

4　结论

本文建立了考虑化学反应强耦合的植被火焰条件下直流间隙多物理场耦合模型，通过直流电压下的植被燃烧试验确定了模型关键参数，并对不同工况下电极附近的带电粒子浓度分布和背景电场进行计算，主要得到以下结论：

1）植被的热解反应方程和反应速率是模型的关键参数。燃料为松木时，热解反应方程表示为 $C_{10}H_{14}O_6 \rightarrow 4C+3CO+CO_2+2CH_4+2H_2+H_2O$，热解反应速率为 2.4×10^{-8} mol/(m^3·s)时，仿真得到的温度与试验结果最为接近。

2）由植被燃烧试验可知，20、30 kV 直流电压下的泄漏电流约为−20、−30 kV 直流电压时的 1.7~3.2 倍，随着电极高度的降低，泄漏电流逐渐增大；由仿真计算可知，正电极附近的负电粒子浓度为负电极附近正电粒子浓度的 1.2~1.7 倍，随着电极高度的降低，电极附近与电极极性相异的带电粒子浓度逐渐增大。而且电极附近带电粒子浓度的增长与泄漏电流增大的趋势近似相同。

3）植被燃烧产生的带电粒子会对背景电场产生较大影响。在植被燃烧产生的带电粒子作用下，正电极附近的背景电场增大至原来的 1.7~2.1 倍，负电极附近的背景电场则增大至原来的 1.4~1.8 倍。

参考文献　References

[1] 何　俊，于　华，邓长虹，等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1277-1285. HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1277-1285.

[2] 周特军，陆佳政，吴传平，等. 输电线路山火直升机喷洒灭火试验

与应用[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2811-2819.
ZHOU Tejun, LU Jiazheng, WU Chuanping, et al. Experiment and application of extinguishing agent drop test using helicopter for transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2811-2819.

[3] 周恩泽，樊灵孟，黄 勇，等. 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J]. 电网技术，2022，46(7)：2778-2785.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Risk distribution assessment of wildfire-induced trips in transmission line based on flame combustion model[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778-2785.

[4] 陆佳政，周特军，吴传平，等. 某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J]. 高电压技术，2016，42(1)：200-207.
LU Jiazheng, ZHOU Tejun, WU Chuanping, et al. Fault statistics and analysis of 220 kV and above power transmission line in province-level power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 200-207.

[5] 邵天颖，梅红伟，曾向君，等. 含悬浮导体的棒板间隙工频击穿特性[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1046-1054.
SHAO Tianying, MEI Hongwei, ZENG Xiangjun, et al. AC breakdown characteristics of rod-plane gap with floating conductor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1046-1054.

[6] 吴 田，胡 毅，阮江军，等. 交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1115-1122.
WU Tian, HU Yi, RUAN Jiangjun, et al. Air gap breakdown mechanism of model AC transmission line under forest fires[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1115-1122.

[7] 尤 飞，陈海翔，张林鹤，等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报，2011，31(34)：192-197.
YOU Fei, CHEN Haixiang, ZHANG Linhe, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 192-197.

[8] VOSLOO H F. The need for and contents of a life cycle management plan for Eskom transmission line servitudes[D]. Johannesburg, South Africa: Rand Afrikaans University, 2004.

[9] MPHALE K, HERON M. Wildfire plume electrical conductivity[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2007, 59(4): 766-772.

[10] 祝 贺，刘 程. 山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J]. 电瓷避雷器，2018(4)：150-159.
ZHU He, LIU Cheng. Breakdown characteristics of transmission line gap under forest fire condition[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4): 150-159.

[11] 伍泓乐. 电网山火灾害综合风险性研究[D]. 广州：广东工业大学，2020.
WU Hongle. Research on the risk assessment model of power grid wildfire disaster[D]. Guangzhou, China: Guangdong University of Technology, 2020.

[12] 张立莹，雷 洪，牛 宏，等. 线板型静电除尘器的电场、流场与颗粒浓度分布的数值模拟[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4144-4151.
ZHANG Liying, LEI Hong, NIU Hong, et al. Numerical simulation for electric field, flow field and particle concentration distribution in wire-plate electrostatic precipitator[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4144-4151.

[13] MPHALE K, HERON M. Measurement of electrical conductivity for a biomass fire[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9(8): 1416-1423.

[14] 吴 田，阮江军，胡 毅，等. 500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报，2011，31(34)：163-170.
WU Tian, RUAN Jiangjun, HU Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.

[15] 普子恒，阮江军，黄道春，等. 火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J]. 中国电机工程学报，2014，34(3)：453-459.
PU Ziheng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on DC voltage breakdown characteristics of gap under fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 453-459.

[16] 代 莉. 林业废弃物颗粒燃料燃烧特性研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2021.
DAI Li. Research on combustion characteristics of forest waste pellet fuel[D]. Changsha, China: Central South University of Forestry and Technology, 2021.

[17] 陈海翔. 生物质热解的物理化学模型与分析方法研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2006.
CHEN Haixiang. Physico-chemical decomposition model of biomass and relevant analysis methods[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2006.

[18] 卢夏然，高忠权，何子奇，等. 直流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究[J]. 西安交通大学学报，2020，54(3)：88-96.
LU Jueran, GAO Zhongquan, HE Ziqi, et al. Combustion characteristics of CH_4/air premixed flame under the effect of DC electric field[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 88-96.

[19] 郭致成，高忠权，鲍彦同，等. 直流电场对甲烷/氨/空气预混层流火焰的影响[J]. 西安交通大学学报，2021，55(10)：164-173.
GUO Zhicheng, GAO Zhongquan, BAO Yantong, et al. Influence of DC electric field on methane/ammonia/air premixed laminar flame[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 164-173.

[20] 张 灏，高忠权，高煦尧，等. 甲烷/空气预混湍流火焰的离子电流信号特征分析[J]. 西安交通大学学报，2021，55(5)：10-17.
ZHANG Hao, GAO Zhongquan, GAO Xuyao, et al. Characteristic analysis on the ion current signal of methane/air premixed turbulent flame[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 10-17.

[21] TIHAY V, SANTONI P A, SIMEONI A, et al. Skeletal and global mechanisms for the combustion of gases released by crushed forest fuels[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(8): 1565-1575.

[22] ZHOU C J, XIAO D P, BAO Y. Numerical analysis of the motion characteristics of combustion particles in gap based on multi-physical field coupling[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[23] MPHALE K M, HERON M, KETLHWAAFETSE R, et al. Interferometric measurement of ionization in a grassfire[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2010, 106(3/4): 191-203.

[24] 罗燕来. 小尺度射流扩散火焰特性的实验研究和数值模拟[D]. 广州：华南理工大学，2015.
LUO Yanlai. Experimental and numerical investigation on the characteristics of the small-scale jet diffusion flame[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2015.

[25] 吴玉新. 气流床煤气化炉数值模拟及颗粒−涡团作用建模研究[D]. 北京：清华大学，2007.
WU Yuxin. Numerical simulation studies on entrained flow coal slurry gasifiers and modeling for the particle-eddy interaction[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2007.

[26] BYRAM G M. Combustion of forest fuels[M]. DAVIS K P. Forest Fire Control and Use. New York, USA: McGraw-Hill, 1959: 61-89.

[27] MEVISSEN N, SCHULZKE T, UNGER C A, et al. Thermodynamics of autothermal wood gasification[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2009, 28(3): 347-354.

[28] REED T B. Principles and technology of biomass gasification[M].

BÖER K W, DUFFIE J A. Advances in Solar Energy. New York, USA: Springer, 1985: 125-174.

[29] BASU P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory[M]. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2013: 73-84.

[30] HURLEY M J. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. 5th ed. New York, USA: Springer, 2016: 633-658.

[31] GÓMEZ-BAREA A, LECKNER B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(4): 444-509.

[32] VLASOV P A, ZHILTSOVA I V, SMIRNOV V N, et al. Chemical ionization of *n*-hexane, acetylene, and methane behind reflected shock waves[J]. Combustion Science and Technology, 2018, 190(1): 57-81.

[33] ALKEMADE C T J, HERRMANN R. Fundamentals of analytical flame spectroscopy[M]. New York, USA: Wiley, 1979: 69-90.

[34] UHM H S. Properties of plasmas generated by electrical breakdown in flames[J]. Physics of Plasmas, 1999, 6(11): 4366-4374.



普子恒(通信作者)
1987—，男，博士，副教授，博导
主要从事高压电器设备绝缘试验技术和输电线路智能运维方面的研究工作
E-mail: pzhdq@ctgu.edu.cn

PU Ziheng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



张　隆
1996—，男，硕士生
从事高电压绝缘与试验技术、极端环境下间隙放电机理的研究工作
E-mail: 460281911@qq.com

ZHANG Long



叶　宽
1974—，男，高工
主要从事输变电设备状态评价与在线监测工作
E-mail: yekuan@sina.com

YE Kuan
Senior engineer



周　恺
1983—，男，硕士，高工
主要从事输变电设备状态评价与在线监测工作
E-mail: zhoukai@163.com

ZHOU Kai
Senior engineer



张睿哲
1989—，男，硕士，工程师
主要从事输变电设备状态评价与在线监测工作
E-mail: 441333351@qq.com

ZHANG Ruizhe



黎　鹏
1989—，男，博士，副教授
主要从事输变电设备智能运维、电工装备电磁多物理场分析的研究
E-mail: 820228470@qq.com

LI Peng
Ph.D.
Associate professor

收稿日期　2022-09-27　修回日期　2022-12-26　　编辑　卫李静