

# 氮氧混合气体平衡态电弧的微观模型研究

臧春艳<sup>1,2</sup>, 何俊佳<sup>1</sup>, 周玮<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 西安电力机械制造公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 氮气是开关电器的各类保护性气体中比较常见的一种,以其化学稳定性好、性价比高而得到广泛应用。但即使是高纯氮气也不可避免含有其他杂质气体,其中部分气体会对氮气气氛下的电弧产生较大的影响,从而影响触头灭弧和侵蚀特性。笔者针对高纯氮气中混有部分氧气的情况建立了热平衡态电弧微观模型,对电弧微观参数进行了计算,并改变 N 和 O 元素的比例来分析氧气的影响,得到了一些有用的结论。

**关键词:** 氮气; 氧气; 杂质; 电弧; 微观模型

中图分类号: TM501.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0197-03

## Microscopic Model of Thermal Equilibrium Arc in Nitrogen and Oxygen Mixture

ZANG Chun-yan<sup>1,2</sup>, HE Jun-jia<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan 430074, China; 2. )

**Abstract:** Nitrogen is one of the popular protective gases in switches with good chemical stability and high performance-cost ratio. Some trace gas impurities in nitrogen have obvious influence on arc, resulting in the changes of arc quenching properties and erosion characteristics of contacts. This paper proposes a microscopic model of thermal equilibrium arc burning in mixture of nitrogen and oxygen, and calculates the microscopic parameters of arc with this model. The influence of oxygen on arc is investigated by changing the ratio of nitrogen to oxygen, and the result is analyzed.

**Key words:** nitrogen; oxygen; impurity; Arc; microscopic model

## 0 引言

密封型开关电器出厂后,触点就被密封于保护气体环境中,基本可以忽略外界污染的可能,但是保护气体中多少会含有一些杂质气体,这些杂质气体对开关电器触头性能、寿命和可靠性的影响不容忽视。高纯氮气是最常见的保护性气体。高纯氮电弧中如果有氧气存在,可能会延长燃弧时间,加剧触头的侵蚀,或者促进各类金属触头表面氧化膜的形成,引起接触电阻增加,从而影响到开关电器工作的可靠性,这一点对密封型继电器的影响尤为明显。所以研究杂质气体对触头间电弧的影响是开关电器领域一个值得深入研究的问题。

电弧作为一种热等离子体,其特征为:粒子温度较高,约  $10^3 \sim 10^4$  K 量级,接近于局域热力学平衡状态<sup>[1]</sup>。学术界已有一些文献对混合气体电弧等离子体进行了研究,但大多是围绕有机气氛或大功率开关电器用 SF<sub>6</sub> 等气体的研究<sup>[2-4]</sup>,对于氮氧混合气体

的研究涉及不多,笔者对此进行了较为详细的研究。

根据对粒子碰撞过程的电、力作用的分析,可建立描述等离子体过程的微观模型。文[5]在这方面现有的模型进行了集中总结,主要有 Potapov 模型、Eindhoven 模型、基于化学反应动力学的模型和基于最小吉布斯自由焓原理的模型等。笔者的电弧微观模型主要以 Eindhoven 模型为基础,兼考虑所研究的具体密闭工作气氛情况进行修正。

## 1 热平衡态电弧微观模型

热力学平衡态是指描述系统的宏观物理量不随时间变化,但组成系统的大量微观粒子仍在不停运动,只是这些微观粒子的平均效果不变。此时,电弧中的各种粒子成分内部经过充分的碰撞,温度已经达到平衡,也即电子温度和重粒子温度相等,都等于气体的温度(统一的热力学温度)。由于处于热力学平衡状态,就可以应用 Maxwell 速度分布、Boltzmann 粒子能态几率分布和 Saha 方程等确定电弧等离子

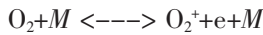
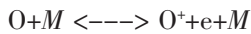
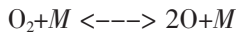
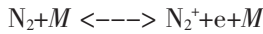
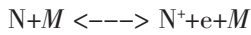
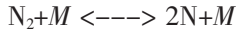
收稿日期:2007-12-03; 修回日期:2008-04-09

作者简介:臧春艳(1978-),女,湖北省宜昌市人,博士后,讲师,主要从事电弧电接触、在线监测、数字图象处理等方面的研究。

体的状态和参数。

热平衡态电弧微观模型的建立还需要其他一些前提条件,包括:①假设所有的化合物都是气态的;②气体压强为已知(1个大气压);③混合气体中各气体的组分起始比例预先设定。

主要考虑如下可能的化学反应存在:(M为任意粒子)



由此得平衡态氮氧混合气体环境的电弧等离子体微观参量计算方程组为

$$\frac{n_{N^+}^2}{n_{N_2}} = \left(\frac{2\pi m_N k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{N^+}^2}{Z_{N_2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{N_2}^d}{k T_e}\right) \quad (1)$$

$$\frac{n_e n_{N^+}}{n_N} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{N^+}}{Z_N} \cdot \exp\left(-\frac{E_N}{k T_e}\right) \quad (2)$$

$$\frac{n_e n_{N_2^+}}{n_{N_2}} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{N_2^+}}{Z_{N_2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{N_2}}{k T_e}\right) \quad (3)$$

$$\frac{n_{O^+}^2}{n_{O_2}} = \left(\frac{2\pi m_O k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{O^+}^2}{Z_{O_2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{O_2}^d}{k T_e}\right) \quad (4)$$

$$\frac{n_e n_{O^+}}{n_O} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{O^+}}{Z_O} \cdot \exp\left(-\frac{E_O}{k T_e}\right) \quad (5)$$

$$\frac{n_e n_{O_2^+}}{n_{O_2}} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{Z_{O_2^+}}{Z_{O_2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{O_2}}{k T_e}\right) \quad (6)$$

$$p = (n_{N_2} + n_{N_2^+} + n_N + n_{N^+} + n_{O_2} + n_{O_2^+} + n_O + n_{O^+} + n_e) k T_e \quad (7)$$

$$n_e = n_{N_2^+} + n_{N^+} + n_{O_2^+} + n_{O^+} \quad (8)$$

$$\frac{2n_{N_2} + 2n_{N_2^+} + n_N + n_{N^+}}{2n_{O_2} + 2n_{O_2^+} + n_O + n_{O^+}} = C \quad (9)$$

式中 C 为比例常数;n 代表数密度;下标 N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub><sup>+</sup>、N、

N<sup>+</sup>、O<sub>2</sub>、O<sub>2</sub><sup>+</sup>、O、O<sup>+</sup>、e 分别代表氮气分子、氮分子离子、原子、一价氮离子、氧气分子、氧分子离子、氧原子、一价氧离子和电子;k 为 Boltzmann 常数;h 为普朗克常数;p 为标准大气压;T<sub>e</sub> 为电弧等离子体中的电子温度;Z 为配分函数。为求得 n<sub>N<sub>2</sub></sub>、n<sub>N<sub>2</sub><sup>+</sup></sub>、n<sub>N</sub>、n<sub>N<sup>+</sup></sub>、n<sub>O<sub>2</sub></sub>、n<sub>O<sub>2</sub><sup>+</sup></sub>、n<sub>O</sub>、n<sub>O<sup>+</sup></sub>、n<sub>e</sub> 这 9 个未知参量,需要联立上述 9 个方程求解。

### 2 计算结果与分析

图 1 给出了氮、氧元素比为 100:1 时在混有氧气的高纯氮气中燃烧的电弧,热平衡态下各种粒子随温度变化的数密度曲线。可以看到:随着温度的增加,氮分子和氧分子的数密度快速下降,氮原子的数密度则急剧上升,而电离的氮气分子数密度虽然快速增加,但数量级较小不占主要优势;同时,电离的氧气分子数和氧原子密度却快速减少,变化趋势与氮的相反。当温度继续增加时,氮、氧原子的一次离子和自由电子数密度继续增加并占主要优势,其他粒子则减少。

进一步分析图 1 的计算结果,可以发现:

(1)从各类粒子数密度达到的数量级来看,较多的是 N<sub>2</sub>、N、N<sup>+</sup>、e 这 4 种粒子,其次是 O 和 O<sup>+</sup>,最少是 N<sub>2</sub><sup>+</sup>、O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>+</sup>,这说明产生 N<sub>2</sub><sup>+</sup>和 O<sub>2</sub><sup>+</sup>的化学反应进行的不多。数量最多的几种粒子也恰是氮气的主要成分,这说明氮等离子体的化学反应在该气氛下的电弧过程中占主导地位。虽然 O<sub>2</sub> 在燃弧起始阶段的电离和解离反应也很明显,但因粒子数密度较低,影响不如氮显著。

(2)从各类粒子数密度曲线的走向来看,N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>+</sup>相似,从一开始就是下降的;N<sub>2</sub><sup>+</sup>和 N 相似,都是先下降后上升,这说明 N<sub>2</sub> 的电离和解离反应是该

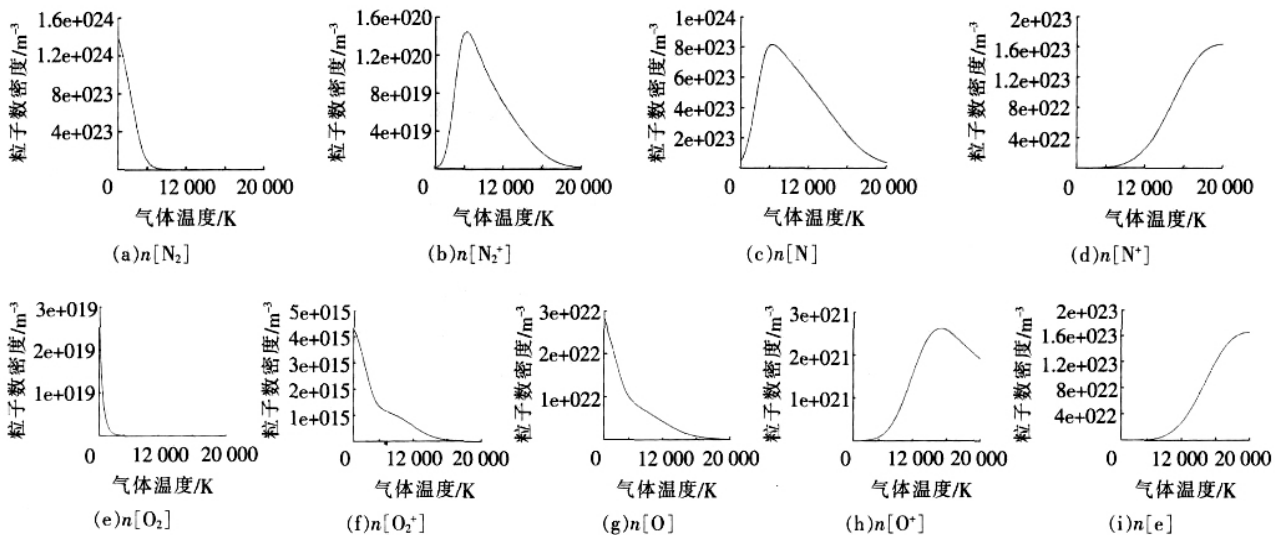


图 1 各类粒子数密度曲线(氮、氧比为 100:1)

气氛中开始的电弧内部主要反应。 $N^+$ 、 $O^+$ 和 $e$ 相似,前期缓慢上升,后期略有下降。 $N_2$ 和 $N$ 的4个数量级差别仍表明 $N_2$ 解离反应的程度更重,此时 $N_2$ 的电离反应对 $e$ 的增加影响不明显;到中后期电弧内部的主要反应是 $N$ 和 $O$ 的电离,这从几种粒子的曲线情况可以很明显看出。但 $e$ 的来源仍主要是一次电离。本来 $O^+$ 的粒子数增加可能会使 $e$ 有明显增加,但 $O_2^+$ 的粒子数密度快速下降部分抵消了这一影响。

另外,对比发现 $O$ 和 $N$ 、 $O_2^+$ 和 $N_2^+$ 的曲线变化趋势完全相反,这一现象应该是由氮气和氧气的化学性质不同造成的。由于 $O_2$ 化学性质十分活泼,其分解和电离的反应温度比 $N_2$ 低的多,所以5000 K时 $O_2$ 大部分已经基本分解和电离了,也即已经越过了类似 $N$ 和 $N_2^+$ 曲线的峰值点,直接从曲线后半部开始下降了。

(3)从各曲线峰值出现的先后来看, $N_2$ 、 $O_2$ 、 $O$ 和 $O_2^+$ 的峰值出现在最开始5000 K时; $N_2^+$ 的峰值出现在6000~7000 K; $N$ 的峰值出现在8000~9000 K;

$N^+$ 和 $e$ 的峰值均出现在16000~17000 K。 $O^+$ 的峰值出现在18000~19000 K,而且数量级达 $10^{22}$ ,说明随着电弧温度的升高,该粒子对电弧导电过程的影响已不可忽视。

(4) $O$ 和 $O_2^+$ 的粒子数密度曲线在中部8000 K附近出现明显的拐点。拐点之前曲线的切线斜率很大,即粒子数密度下降很快;拐点之后切线斜率变缓,反映粒子数密度下降速度变缓。6000 K时 $O_2$ 粒子数已降到极低数量级,说明此时氧分子已完全分解和电离。

进一步分析电弧在不同氮、氧比例下各粒子随温度变化的情况,如氮、氧元素比为50:1,可得图2。如果研究一种极端的情况,即氮、氧元素比为4:1,这个比例就接近于空气的情况了。空气的组成非常复杂,是由78%的 $N_2$ 、21%的 $O_2$ 、0.03%的 $CO_2$ 、少量的惰性气体、其他杂质气体以及一些灰尘微粒等组成。假设只考虑最主要的两种成分,即氮和氧,那么可以用此模型来近似研究空气中触头的燃弧情况,结果见图2。

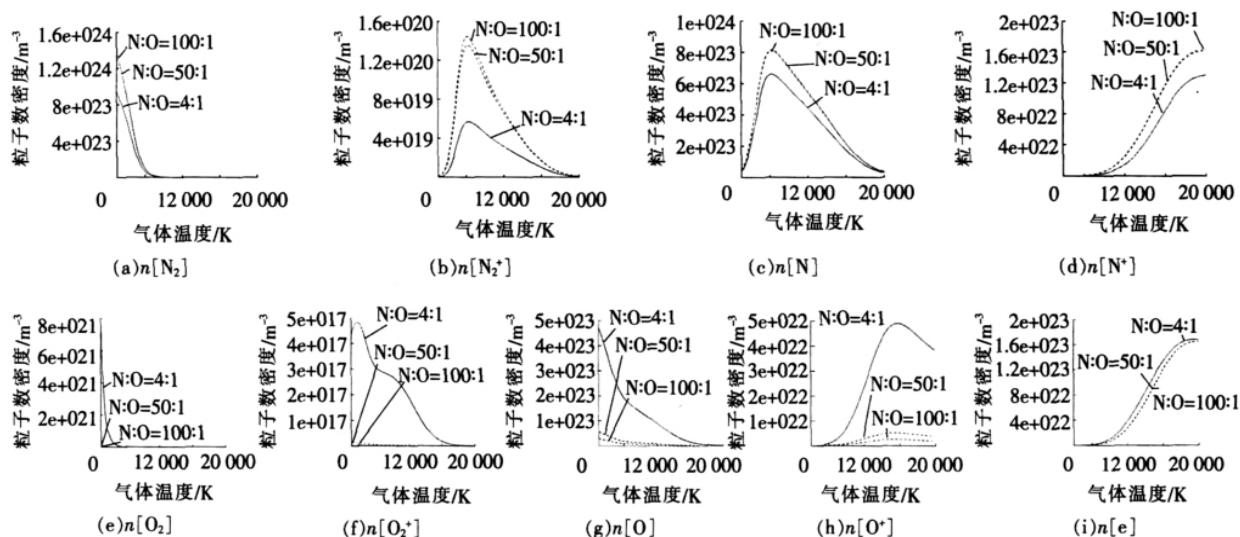


图2 各类粒子数密度曲线(氮、氧比分别为100:1,50:1和4:1)

从图2发现:100:1和50:1时各类粒子数密度曲线变化不大,部分曲线甚至重合的很好,但4:1时各曲线都有较大变化。 $N_2$ 、 $N$ 、 $N_+$ 、 $N_2^+$ 的曲线大体形状没有改变,数量级也未变,但由于氮元素比例下降(不再在混合气体中占绝对优势地位),故相应粒子数幅值有十分明显的下降; $e$ 基本不变; $O_2$ 、 $O$ 和 $O^+$ 的曲线大体形状也没有改变,但幅值明显上升,部分粒子如 $O$ 和 $O^+$ 的数量级达到与氮元素相同或相近的程度; $O_2^+$ 的变化最为明显,在8000 K左右出现曲线的峰值点,幅值也增加了两个数量级。

从图2明显可见,在氮氧比4:1时,氧元素各类粒子的含量激增,表明此时电弧的性质由氮和氧共同决定,特别是带电离子总数的增加使电弧的导电性大大增强。 $O_2^+$ 的变化证实了前文的推断,即由于

$O_2$ 活泼的化学性质,5000 K时 $O_2$ 大部分已经分解和电离了;只是由于 $O_2$ 的比例大幅度增加,使得所有 $O_2$ 分解和电离需要更多的能量,从而使粒子数密度曲线的峰值点后移,在图2中得以反映出来。 $O$ 和 $O_2^+$ 的曲线拐点仍然存在,且位置基本不变,说明拐点的存在是 $O_2$ 的固有性质。 $e$ 在3种不同氮、氧元素比例时的粒子数密度变化最小,这说明 $e$ 的生成受杂质气体氧的存在的影响很小。

### 3 结语

笔者研究了高纯氮气中混有一定量氧气时,开关电器触头在该气氛下燃弧时的电弧微观参数。研究了氮、氧元素的几个不同的比例100:1(氮占绝对优势)、50:1(氮占绝对优势)和4:1(下转第202页)

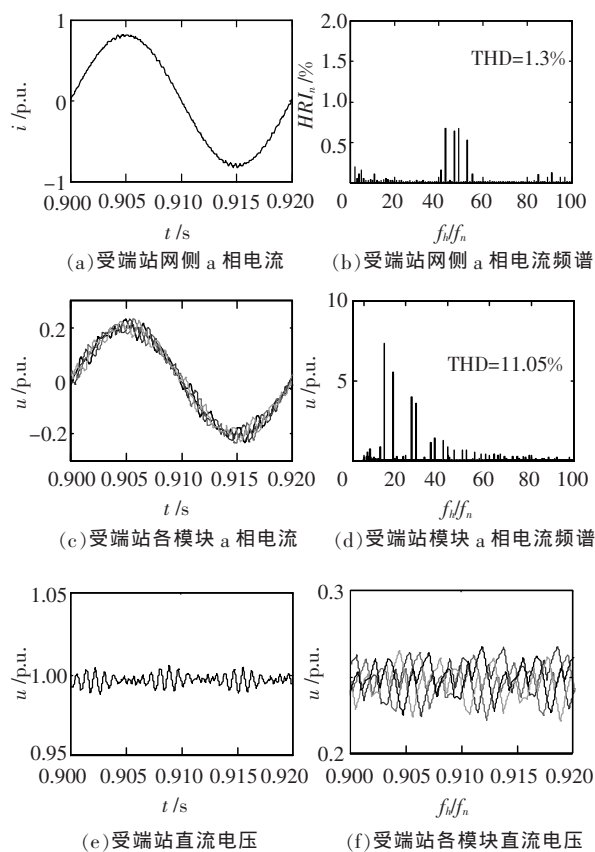


图5 受端站稳态波形

系统直流侧电压平衡方法进行分析,同时为了提高系统波形质量、降低开关频率采用了载波移相的控制方法,针对 VSC-HVDC 系统自身不平衡和外部交流故障进行了仿真验证,结果表明:

(1) 为提高系统功率等级,可采用直流侧串联的多 VSC-HVDC 并联运行系统。

(2) 基于有功分量调节的直流侧电压平衡控制可平衡各 VSC-HVDC 模块的直流电压。

(3) 载波移相(CPS-PWM)方法非常适合于多

VSC-HVDC 并联运行系统,可在同等波形质量基础上大大降低器件开关频率,从而降低系统开关损耗。

### 参考文献:

- [1] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [2] 柔性(轻型)直流输电系统关键技术研究框架[M]. 北京: 国家电网公司科技部, 2006.
- [3] AXELSSON U, HOLM A, LIJEGREN C, et al. The Gotland HVDC Light Project Experiences from Trial and Commercial Operation[C]// CIGRE Conference Publication, 2001: 23-29.
- [4] PETERSSON A, EDRIS A. Dynamic Performance of the Eagle Pass Back-to-back HVDC Light Tie [C]// Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, 2001: 220-225.
- [5] MATS H, LAMELL J O, TOM F N. New Application of Voltage Source Converter (VSC) HVDC to be Installed on the Gas Platform Troll A[C]// CIGRE Conference Publication, 2004: 397-402.
- [6] JACOBSON B, JIANG-HAFNER Y, REY P, et al. HVDC with Voltage Source Converters and Extruded Cables for up to  $\pm 300$  kV and 1 000 MW [C]// CIGRE Conference Publication, 2006: 1 973-1 979.
- [7] 刘洪涛, 徐政. 基于三电平电压源换流器的高压直流输电系统的控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 102-106.
- [8] ANDERSON B R, XU L, HORTON P J, et al. Topologies for VSC Transmission[J]. Power Engineering Journal, 2002(6): 142-150.
- [9] HAGIWARA M, FUJITA H, AKAGI, H. Performance of a Self-commutated BTB HVDC Link System under a Single-line-to-ground Fault Condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 278-285.
- [10] BAKARI M. Multimodular Multilevel Converters with Input/Output Linearity[J]. IEEE Trans. Industry Applications, 1997, 33(5): 1 214-1 219.

(上接第 199 页)

(氮、氧数量级接近)下各类粒子数密度情况,发现由于氧的化学性质比较活泼,其对应粒子的数密度变化规律和氮在 5 000~20 000 K 有所不同。无论氮、氧元素比例如何,电子数密度基本不变,但随着氧的比重增加,电弧受氧的影响逐渐明显,导电能力逐渐增强。这些结论对混合气体电弧等离子体的研究是很好的补充,对密封型开关电器的研制和生产也有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 过增元. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] HERMANN P K, WERNER F R. Influence of Physical/Chemical Characteristics of Organic Vapour and Gas Mixtures

on Their Contact Compatibility[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, 1999, 22(3): 439-445.

- [3] BENJAMIN C, HASSAN R, ALAIN G. Calculation of the Interruption Capability of  $SF_6-CF_4$  and  $SF_6-C_2F_6$  Mixtures-part I: Plasma Properties [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1996, 24(1): 198-209.
- [4] VIAL L, CASANOVAS A M, DIAZ J, et al. Decomposition of High-pressure (400 kPa)  $SF_6$  and  $SF_6/N_2$  (10:90) Mixtures Submitted to Negative or 50 Hz AC Corona Discharges in the Presence of Water Vapour and/or Oxygen[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34(7): 2 037-2 051.
- [5] 臧春艳, 何俊佳, 程礼椿. 平衡态和非平衡态等离子体的微观模型研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 416-419.