

SF₆替代气体的分子构效关系研究进展

沈腾达^a, 周文俊^a, 王宝山^b, 罗运柏^b, 郑宇^a

(武汉大学 a. 电气与自动化学院; b. 化学与分子科学学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:目前对SF₆替代气体的研究大多为试验筛选,成本高、工作量大、效率低。研究分子结构参数与其绝缘性能之间的理论关系,可以为SF₆替代气体的分子设计与筛选提供方向,提高SF₆替代气体的寻找效率。本文首先介绍了目前具有发展潜力的定量构效关系模型,尤其是涉及到分子电学参数、力学参数和几何参数的一种新型定量构效关系模型,随后介绍了基于该新型定量构效关系模型的分子设计方法,最后从气体绝缘性能数据库、预测性质的多样化和分子设计方法的改进3方面讨论了该新型定量构效关系模型在SF₆替代气体研究中有待深入研究的问题与发展方向。

关键词: SF₆替代气体; 气体分子结构; 定量构效关系; 气体绝缘分析

中图分类号: TM214; TM595 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)06-0001-05

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.06.001

Research Progress of Molecular Structure-activity Relationship of SF₆ Substitute Gas

SHEN Tengda^a, ZHOU Wenjun^a, WANG Baoshan^b, LUO Yunbai^b, ZHENG Yu^a

(a. School of Electrical Engineering and Automation; b. College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: At present, most of the researches on SF₆ substitute gas rely on experimental selection, with high cost, heavy workload, and low efficiency. Studying the theoretical relationship between molecular structure parameters and insulation performance of SF₆ can provide direction for the molecular design and selection of SF₆ substitute gas, and improve the researching efficiency. Firstly, we focused on the current quantitative structure-activity relationship model with development potential, especially a new type model involving molecular electrical parameters, force parameters, and geometric parameters. Then the molecular design method based on the new quantitative structure-activity relationship model was introduced. Finally, the problems and development directions to be further studied of the new quantitative structure-activity relationship model in the research of SF₆ substitute gases were discussed from the three aspects of gas insulation performance database, the diversification of predictive properties, and the improvement of molecular design methods.

Key words: SF₆ alternative gas; gas molecular structure; quantitative structure-activity relationship; gas insulation analysis

0 引言

SF₆由于其优异的绝缘性能和稳定的化学性质被广泛应用于气体绝缘中,在全球范围内,电力行业每年使用80%左右新生产的SF₆^[1]。但是SF₆具有

极强的温室效应,其全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)是CO₂的23 500倍^[2]。为响应构建人类命运共同体和实现“双碳”目标的号召,减少电力行业对SF₆的依赖和排放,获得GWP值低、性能良好的环保型SF₆替代气体已成为电力行业的一个重要研究方向。

传统SF₆替代气体的研究方法主要是试错法,在已知气体中,以气体的绝缘性能为首要关注指标,综合考虑液化温度等条件,通过大量试验,并对试验结果进行对比分析筛选出有潜力的SF₆替代气

收稿日期:2021-08-26 修回日期:2021-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1966211)

作者简介:沈腾达(1998-),男(汉族),安徽阜阳人,硕士生,研究方向为气体放电与SF₆替代技术;通信作者:周文俊(1959-),男(汉族),湖北汉川人,教授,研究方向为高电压绝缘与测试技术、防雷与接地技术、SF₆替代技术。

体^[1]。截至2021年,化学文摘社(chemical abstracts service, CAS)已经公布近2亿种无机和有机物质,且每天都有数以千计的新物质被公布。单纯以试验方法筛选得到SF₆替代气体,成本高、工作量大,效率低。

因此,如果能够通过理论研究,从分子结构的角度了解影响气体绝缘性能和液化温度的关键因素,即气体分子的结构与绝缘性能和液化温度的构效关系,就可以为SF₆替代气体的筛选提供有效的指导,甚至可能通过分子设计方法设计并合成出绝缘性能与适用性高于SF₆的环保型新气体。

1 气体绝缘性能的构效关系研究

1.1 定性构效关系研究

早在1942年,就有学者开始从分子结构层面分析气体分子的绝缘性能,B M HOCHBERG等^[4]对一些气体进行了相关试验,发现分子折射率与气体的绝缘性能具有相关性;W A WILSON等^[5]研究认为气体的绝缘性能与气体分子的相对分子质量有关,但研究范围较小,只包含了氟烃类气体;A E D HEYLEN等^[6]通过对烷烃气体分子进行研究,认为这些气体分子的绝缘性能与其紫外光谱、散射截面有关;之后,许多学者的研究支持了气体绝缘性能与气体分子相对分子质量有关的结论,认为两者近似呈一种线性关系,并有学者进行了相关解释:气体的相对分子质量越大,分子的电离截面越小,吸附截面越大,从而拥有了较高的临界约化场强,表现在宏观上就是绝缘性能越高^[7]。1976年,A K VIJH^[8]研究认为某些气体的绝缘性能与原子化焓相关,但适用范围很小;基于这个结论,他还提出气体的绝缘性能与液化温度存在关系,但有许多特例并不符合这个规律;之后他又通过试验研究了多种气体分子的绝缘特性,发现分子为极性和非极性时,气体的绝缘性能与标准状态下的密度呈现两种不同的线性关系,但无法进行理论上的解释,并且许多气体的绝缘性能与得到的线性关系评估的绝缘性能差距较大^[9]。

上述研究虽然定性解释了气体绝缘性能与一些分子结构参数的关系,但是误差较大,适用范围过小,使用到的分子结构参数过少。其中一些构效关系在实际应用中出现了矛盾,例如相对分子质量越大,绝缘性能越高。在相对分子质量较大时,分子间作用力变大,相应的液化温度也会升高,如何选择才能平衡绝缘性能与液化温度成为了新的问题。可见,定性构效关系的研究是一种一级近似,难以用于指导绝缘气体的分子设计,只能作为一种

辅助判断的方式。

1.2 定量构效关系研究

定量构效关系是分子结构与一些物理化学性质之间的定量函数关系,通过结合理论计算和各种统计学分析工具可以得到相应的定量构效关系模型。定量构效关系研究认为分子结构可以决定分子的性质,用数值的方式表示分子的结构特点,这种数值被称为分子描述符^[10]。

早在1974年,J C PAUL等^[11]就提出了气体绝缘性能定量构效关系的概念,以气体分子的极化率 α 、电离能 ϵ_i 、键解离能 ϵ_D 为分子描述符的定量公式,但是适用范围较小,大部分电负性气体的计算结果差距较大。

1979年,K P BRAND等^[12]基于临界约化场强击穿判据(净电离系数为0),结合气体分子的击穿行为,理论推导出定量计算绝缘性能的表达式,解释了气体绝缘性能的本质,明确了物理意义,但是许多参数的获得十分困难,难以用于指导SF₆替代气体的筛选与设计。并且理论推导时,对一些条件的简化与忽略也会带来误差,与现实中表现出的绝缘性能也有较大出入。

上述定量计算模型并不能算真正意义上的定量构效模型,直至1982年,K P BRAND^[13]建立了首个真正意义上的预测气体绝缘性能的定量构效模型,他提出了重要的数据训练集筛选标准:①均匀电场;②固定气压 p 与电极距离 d ,且 pd 数值较大;③试验数据之间可以交叉验证。之后通过回归分析的方法,以电离能 ϵ_i 和极化率 α 两个参数作为特征值,计算了气体绝缘性能。这个模型的相关性系数达到了0.91,说明了气体绝缘性能与这两个参数的密切相关性,但出现了许多例外,且对SF₆绝缘性能的预测误差较大,可靠性不佳,但这种方法的基本思想成为了后续相关研究的主要参考。

之后的学者们使用类似的方法建立了许多不同的预测气体绝缘性能的定量构效模型,取得了一个巨大的进步:量子化学计算方法开始用于获取气体分子的分子描述符。量子化学计算方法的引入使得许多气体分子结构参数的获取变得容易起来。例如,2004年,N MEURICE等^[14]首次采用量子化学计算方法得到不同气体分子的分子结构与积分光吸收强度IOA参数,发现气体绝缘性能与IOA参数近似呈现正比关系,但是相关系数 R 只有0.85,且有许多特例差距较大;M RABIE等^[15]基于从头计算方法,分析了极化率、偶极矩、亲和能、电离能等参数与电负性气体绝缘性能的关系,将分子分为极性、非极性,分别拟合得到绝缘性能和液化温度表达

式;陈庆国等^[16]以范德华表面参数、第一电离能和分子电负性为相关参数,用37种气体分子的绝缘性能为数据训练集,通过拟合方法得到了绝缘性能相关性表达式,并据此筛选出一些可能具有SF₆替代潜力的气体。

上述研究预测的准确性都有待提高,并且分子描述符存在的物理意义不明,仅使用了简单的分子物性参数的问题,但是使用的相关方法与基本思想为今后研究提供了重要参考。

1.3 新型定量构效关系模型研究

为解决以前研究中出现的问题,YU X等^[17]提出了新型定量构效关系模型。首先,由于定量构效关系模型的结果受训练集的影响较大,需建立可靠的气体绝缘性能数据库,在K P BRAND^[13]3条训练数据集筛选标准的基础上,又加入了两条标准:所有的气体绝缘性能均采用相对SF₆的数值;剔除一些绝缘性能争议较大的气体分子。使用的气体绝缘性能数据和气体种类较为齐全,绝缘强度的分布范围宽,适合作为定量构效关系模型的数据训练集。其次,由于绝缘性能体现的是气体对电场作用的耐受能力,此时不能只简单考虑分子本身的物性参数,而是要综合考虑到分子力参数和几何参数,尤其是分子的电参数。这种定量构效关系模型不同于以前研究,重点关注了分子的电参数,使用了相互作用性质函数(general interaction properties function, GIPF)来反映分子间的相互作用和在电磁作用下的变化。最后,以电子密度与静电势作为描述气体绝缘特性的基本物理量,使用GIPF构造反映气体分子之间相互作用的参数,经过筛选发现了与气体分子绝缘性能关系紧密的3组参数,正、负静电势的总表面积 A_s ,正、负静电势平衡度与总平方差的乘积 $v\sigma_{\text{tot}}^2$,静电势平均偏差 Π 。利用这3组参数构建了气体绝缘性能的新型定量构效关系模型,如式(1)所示。

$$E_r = 0.568A_s^2 + 1.001v\sigma_{\text{tot}}^2 - 2.042\Pi + 0.446 \quad (1)$$

式(1)中: E_r 为表示气体绝缘性能相对SF₆的值。

对模型进行进一步改进,加入已被发现的与气体绝缘性能显著相关的两个分子物性参数:分子极化率 α 与电负性参数 χ 。利用 α 和 χ 对总表面积 A_s 的依赖性,隐藏于 A_s 中,避免了过度参数化的问题;又考虑到在电子-分子碰撞过程中,实际上只有正表面积 A_s^+ 能直接决定气体的绝缘性能,总表面积 A_s 与 A_s^+ 、 A_s^- 也没有明显相关性,结合分子形貌的影响,引入约化表面积 A_{sr}^+ ;考虑到在电子与分子碰撞过程中,密度大的大分子可以大幅降低自由电子的动能,从而表现出更强的绝缘性能,由此引入了分子

密度 ρ (分子处于紧密堆积状态时的理想密度)。综合以上考虑,得到了最终的优化构效关系模型,模型公式如式(2)所示。

$$E_r = 0.299(A_s + 0.783)^2 + 0.922v\sigma_{\text{tot}}^2 - 1.837\Pi + 0.039(\rho A_{sr}^+)^2 \quad (2)$$

该模型的相关系数 R 达到了0.993,说明了该模型的准确性,平均绝对误差为0.061,方均根误差为0.080,最大偏差 δ_{max} 为0.28,并且对SF₆绝缘强度的预测数值为0.99(实际数值为1),与SF₆的实际绝缘性能十分接近。

该模型的适用范围与准确度相比以前的研究模型得到了极大提升,此外,模型参数具有明确的与气体绝缘性能相关的物理意义,并可以分析总结出气体分子结构对绝缘性能影响的规律。例如,对于目前研究较多的环保绝缘气体(C₄F₇N等),不仅预测结果准确,而且给出了氟化物的绝缘性能与链长、氟取代基的变化规律。模型表现出了分子结构对气体绝缘性能的影响规律,可以为未来SF₆替代气体研究中的分子设计提供重要的指导方向。

YU X等^[17]对气体的液化温度 T_b 构建了新的定量构效关系模型,以实现气体分子液化温度的预测,预测模型如式(3)所示。

$$T_b = 125.3\Pi^2 - 143.2/A_s + 194.7/\sqrt[3]{\eta} + 27.0 \quad (3)$$

式(3)中: η 是分子的化学硬度。

模型的预测结果与试验结果的对比表明,相关性系数 R 达到了0.985,标准差只有8 K,预测准确度比起传统的线性模型大幅提高。

2 SF₆替代气体的分子设计方法

构建出可靠的气体绝缘性能定量构效关系模型,可以为SF₆替代气体的分子设计提供指导方向,但是模型中的参数调节十分困难,因此SF₆替代气体的分子设计可以绕开参数调节,首先通过不同的分子设计方向得到不同的分子结构,再通过预测模型对分子结构进行评价,最后总结相关规律,判断出有替代潜力的分子。下面对两种有发展潜力的分子设计方法进行介绍。

2.1 官能团取代法

官能团取代法是指使用不同的化学基团对分子中的原子或者基团进行取代,从而获得新的化学分子的方法,官能团取代法在各个领域都有应用^[18-19]。3M公司提出的C₄F₇N就是利用这种方法,用氰基(CN)取代了八氟丙烷(C₃F₈)的一个氟原子得到了C₄F₇N。

由于官能团取代不仅会影响气体绝缘性能,也会对气体的液化温度产生影响,这两种影响在实际

应用中是相互矛盾的。王宝山等^[20]利用气体绝缘性能与液化温度的定量构效关系模型,分别使用CF₃、NF₂、Cl、CN对SF₆气体分子的氟原子进行取代,研究了不同官能团对气体绝缘性能和液化温度的影响,以寻找新的SF₆替代气体。

研究发现不同官能团取代对气体绝缘性能和液化温度的影响具有明显区别,考虑到绝缘性能与液化温度之间的平衡问题,分析结果表明,用CF₃或氰基(CN)取代可以最大程度地提高绝缘性能,同时尽可能地抑制液化温度的升高,并根据结果提出了一种具有一定潜力的SF₆替代气体SF₃CF₃,利用定量构效关系模型进行预测,得到其绝缘性能是SF₆的1.55倍,标准状态下的液化温度预测为-30℃,并且GWP值只有SF₆的5%左右。

2.2 分子杂化法

分子杂化法是通过将不同分子的结构进行杂化形成具有全新化学键和分子结构的新化合物,也是分子设计中常用的方法^[21],在SF₆替代气体分子设计中,分子杂化的方法也有所应用。YU X等^[22]参考了SF₆替代气体中混合气体的使用方法,通过将混合气体中不同气体分子组合在一起,并且在不同的杂化比例下,可以产生新的化学键。这些新的化学键也是这些新气体分子具有优异性能的关键。实际上,混合气体因协同效应产生的绝缘性能增强也可以从化学键的角度进行解释^[23]。利用上述方法,YU X等^[22]设计筛选出了一系列的SF₆替代气体,其相关特性如表1所示。

上述新气体分子并不存在于自然界中,为探究其实际特性,需要先进行人工合成。目前已实现了F₃SN、CF₃SO₂F两种气体的实验室百克级合成^[24-25]。

表1 杂化分子的绝缘性能、液化温度和GWP值
Tab.1 Insulating properties, boiling points, and GWP of the hybrid molecules

原分子	新分子	E_f	液化温度/℃	GWP
SF ₆ +N ₂	F ₅ SN ₂ F	1.37	-7	10
1/2 SF ₆ +1/2 N ₂	F ₃ SN	1.35	-30	916
2/3 SF ₆ +1/2 N ₂	F ₄ SNF	1.07	-17	9
2/3 SF ₆ +1/2 C ₂ F ₄	F ₄ SCF ₂	0.83	-4	0
1/2 SF ₆ +1/2 C ₂ F ₂	F ₃ SCF	1.02	4	1
3/4 c-C ₄ F ₈ +1/2 N ₂	c-C ₃ F ₅ N	1.42	-8	1 602
1/2 CF ₄ +1/2 N ₂	CF ₂ NF	0.93	-60	26
1/2 C ₂ F ₆ +1/2 N ₂	CF ₂ NCF ₃	1.07	-30	2 091
CF ₄ +SO ₂	CF ₃ SO ₂ F	1.33	-28	3 678
CF ₄ +CO ₂	CF ₃ OC(O)F	2.01	-37	1 739

HU S等^[26]对CF₃SO₂F气体及其与N₂和CO₂混合气体的绝缘性能进行了试验研究,研究发现纯CF₃SO₂F气体相对SF₆的绝缘性能在1.31~1.47之间,与模型预测得出的1.33十分接近,在误差范围内。并且CF₃SO₂F的液化温度、GWP值都较低,是一种具有一定潜力的SF₆替代气体。

3 有待深入研究的问题及发展方向

目前研究气体分子构效关系在SF₆替代气体领域应用的学者并不多,但这样一种在其他领域的材料研究中得到很好的应用并取得良好效果的方法,将极大推动SF₆替代气体的研究进程,在实际应用中发挥巨大作用。为此,分子构效关系及设计方法在SF₆替代气体中的应用应继续深入和拓展研究,基于上述介绍与讨论,提出了定量构效模型现存的重要问题与未来的发展趋势,相关内容主要包括以下3个方面。

3.1 建立统一条件下气体绝缘性能数据库

构效关系的关键是要建立气体绝缘性能的定量构效关系模型,首先需要能够获取统一的气体绝缘性能数据,上述已有的定量分子构效关系模型使用的数据来源于文献查找与独立进行的相关试验,不同学者使用的气体绝缘性能数据不统一、不完善,可能存在错误数据的问题。如果使用的气体绝缘性能数据不统一,定量构效关系模型之间难以进行对比与改进。此外,模型的训练数据集过于有限,甚至出现错误数据,定量构效关系模型的准确度会大幅下降。因此在获取不同气体的绝缘性能数据时,应保持相同的试验条件,使数据结果可以统一使用。此外,考虑到实际应用中的工况,应在不同电压形式、电极结构、放电距离等不同条件下进行试验,同时通过汤逊试验获得不同气体的电离系数、吸附系数和临界约化场强,从而构建完善的试验数据库,为未来定量构效关系模型的发展提供充足有效的数据。

3.2 预测性质的多样化

现存的定量构效关系模型还在探索研究阶段,学者们仅针对气体的绝缘性能与液化温度构建了相关定量构效关系模型。而绝缘气体的实际使用不止需要关注绝缘性能与液化温度,例如SF₆之所以能广泛应用于电气领域,不仅是因为SF₆具有优异的绝缘性能,灭弧性能高、液化温度低、无毒、不可燃等特点也十分重要。针对目前的SF₆替代气体,如何降低替代气体的温室效应是与绝缘性能同等重要的关注点,因此更需要关注GWP值的预测问题。如何对这些特性构建较为准确的定量构效

关系模型,是SF₆替代气体未来的研究趋势。

3.3 分子设计方法的改进

目前在SF₆替代气体领域使用的分子设计方法,主要是上述的官能团取代法与分子杂化法,在实际的设计过程中,往往也是设计出多种分子结构,再通过预测模型进行分析评价,减少了试验试错的成本,大幅提高了效率,但仍存在设计方向不明确的问题,难以朝着一个固定的方向,不断设计出具有更优秀性能的气体分子。如何改进分子设计方法,得到一个可以不断优化气体分子性能的SF₆替代气体的设计方向,是未来SF₆替代气体分子设计方法要解决的问题。

4 结束语

在人类命运共同体和“双碳”目标的要求下,环保型SF₆替代气体的研究仍需继续推进。气体分子的构效关系,尤其是定量构效关系模型在SF₆替代气体的研究中可以起到非常重要的指导作用,为SF₆替代气体分子设计提供重要的评估方法,并能从微观角度揭示分子结构对气体绝缘性能的影响规律,对基础科学和实际应用有着重要的意义。为不断推进分子构效关系在SF₆替代气体研究领域的发展,需要建立丰富实用的气体绝缘性能数据库,并根据气体实际应用中需要关注的GWP值、液化温度、毒性等其他特性,建立相关定量构效关系模型,在绝缘性能与这些物质特性中寻求平衡,并将定量构效关系模型的研究成果应用于分子设计方法中,为分子设计方法提供更为有效的设计方向,从而实现SF₆替代气体研究的突破。

参考文献:

- [1] KIEFFEL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF₆ in electrical grids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016,14(2):32-39.
- [2] 周文俊,郑宇,杨帅,等. 替代SF₆的环保型绝缘气体研究进展与趋势[J]. 高压电器,2016,52(12):8-14.
- [3] 张晓星,周俊杰,唐炬,等. CF₃I/CO₂与CF₃I/N₂两种混合气体局部放电绝缘特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(12):1948-1956.
- [4] HOCHBERG B M, SANDBERG E Y. Investigation of the disruptive strength of gases[J]. Journal of Technology Physics (USSR), 1942,12(2-3):65-75.
- [5] WILSON W A, SIMONS J H, BRICE T J. The dielectric strength of gaseous fluorocarbons[J]. Journal of Applied Physics, 1950,21:203-205.
- [6] HEYLEN A E D, LEWIS T J. The electrical strength of hydrocarbon gases[J]. British Journal of Applied Physics, 1956,7(11):411-415.
- [7] COOKE C M, COOKSON A H. The nature and practice of gases as electrical insulators[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1978,13(4):239-248.
- [8] VIJH A K. Correlation between electric strengths and heats of atomization of gaseous dielectrics[J]. Journal of Materials Science, 1976,11(4):784-785.
- [9] VIJH A K. Intermolecular bonding and the electric strengths of dielectric gases[J]. Journal of Materials Science, 1976,11(7):1374-1375.
- [10] TODESCHINI R, CONSONNI V. Handbook of molecular descriptors[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008.
- [11] PAUL J C, SAHA T N, CHAKRAVARTY B. On the gaseous breakdown[J]. Indian Journal of Physics, 1974,48(2):138-142.
- [12] BRAND K P, KOPAINSKY J. Breakdown field strength of unitary attaching gases and gas mixtures[J]. Applied Physics, 1979, 18(4):321-333.
- [13] BRAND K P. Dielectric strength, boiling point and toxicity of gases-different aspects of the same basic molecular properties [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982,17(5):451-456.
- [14] MEURICE N, SANDRE E, ASLANIDES A, et al. Simple theoretical estimation of the dielectric strength of gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004,11(6):946-948.
- [15] RABIE M, DAHL D A, DONALD S M A, et al. Predictors for gases of high electrical strength[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013,20(3):856-863.
- [16] 陈庆国,邱睿,林林,等. 基于密度泛函理论的SF₆潜在替代气体筛选[J]. 高压技术, 2019,45(4):1026-1033.
- [17] YU X, HOU H, WANG B. Prediction on dielectric strength and boiling point of gaseous molecules for replacement of SF₆[J]. Journal of Computational Chemistry, 2017,38(10):721-729.
- [18] 戴小强,朱亚波,汪洲洋,等. 2-位官能团化合物合成2-取代苯并噻唑的研究进展[J]. 有机化学, 2017,37(8):1924-1938.
- [19] 夏雨,关博文,薛振华,等. 官能团对PCE在氯氧镁水泥中吸附-分散性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019,38(11):3409-3415.
- [20] 王宝山,余小娟,侯华,等. 六氟化硫绝缘替代气体的构效关系与分子设计技术现状及发展[J]. 电工技术学报, 2020,35(1):21-33.
- [21] 孟鑫,田园,许树军,等. 一种新型有机-无机杂化超分子材料的合成与表征[J]. 化学与粘合, 2021,43(2):103-105.
- [22] YU X, HOU H, WANG B. Structure-activity relationship and molecular design for discovery of environmentally sustainable dielectric gases[C]//2020 IEEE Electrical Insulation Conference. Knoxville, USA:IEEE, 2020:124-127.
- [23] 胡世卓,周文俊,郑宇,等. C₄F₇N/CO₂和C₄F₇N/N₂混合气体工频击穿实验与协同效应分析[J]. 高压技术, 2019,45(11):3562-3570.
- [24] 彭敏,王宝山,于萍,等. 六氟化硫替代气体三氟化硫氮的制备及表征[J]. 应用化工, 2018,47(11):2301-2303.
- [25] 王易,高克利,王宝山,等. 一种由三氟甲基磺酰氟制备三氟甲基磺酰氟的方法:CN109824551A[P]. 2019-05-31.
- [26] HU S, WANG Y, ZHOU W, et al. Dielectric properties of CF₃SO₂F/N₂ and CF₃SO₂F/CO₂ mixtures as a substitute to SF₆ [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2020,59(35):15796-15804.