

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.017

不同绝缘气体对内部故障电弧压力效应的影响

张俊鹏¹, 袁端磊², 李 美¹, 孙玉书¹, 吴 翊¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 故障电弧会引起开关柜内气压上升而破坏设备危害附近工作人员, 是较为严重的常见事故之一。由于 SF₆ 具有严重的温室效应, 为了减少其使用量, 笔者研究了不同替代气体对故障电弧压力效应的影响。笔者通过大量实验研究了密闭腔体内氮气和二氧化碳绝缘气体发生内部故障电弧时的压力上升特性, 并通过计算总结了不同气体能量转移系数(k_p)的规律。研究表明: 相同电弧能量下氮气比二氧化碳压力上升更大; 压力上升和能量转移系数都随初始充气压力增大而上升; 相同电弧电流时, 二氧化碳比氮气的能量转移系数大。这些发现有利于更好地了解和利用替代气体氮气和二氧化碳, 减少 SF₆ 的使用量。

关键词: 开关柜; 内部故障电弧; 绝缘气体; 压力效应

Influence of Insulating Gas on Pressure Rise in Switch Cabinet Due to Internal Arc Fault

ZHANG Junpeng¹, YUAN Duanlei², LI Mei¹, SUN Yushu¹, WU Yi¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: Arc fault causes pressure rise in the switch cabinet to damage equipment and harm people nearby. Because SF₆ gas produces serious greenhouse effect, the influences of different substitutive insulating gases on the pressure rise due to internal arc fault were investigated in this study to reduce the usage of SF₆. Many experiments were carried out to reveal the pressure rise in a chamber filled with nitrogen or carbon dioxide, and the energy transfer coefficient (k_p) of each substitutive gas was calculated. Results showed that the pressure rise was greater in nitrogen than in carbon dioxide under the same arc energy, the pressure rise and k_p increased with the initial gas pressure of experimental vessel, the k_p was bigger in carbon dioxide than in nitrogen under the same arc current. These findings are conducive to better understanding and utilization of alternative gases N₂ and CO₂, to reduce the amount of SF₆ used.

Key words: switchgear cabinet; internal arc fault; insulating gas; pressure effect

0 引言

随着用电需求的增加, 发电机、变压器、配电设备的容量不断提高^[1]。从 20 世纪末开始, 人们对用电的可靠性、连续性及安全性提出更高要求^[2], 中高压开关柜作为电力系统中非常重要的电器设备, 相应的对它的可靠性也提出了更高的要求^[3]。但是由于金属封闭开关设备的缺陷或异常的环境和工作条件导致绝缘性能劣化, 也可能出于工作人员误操

作等原因, 都可能在箱体内部由于气体间隙击穿而引燃电弧, 这种故障称为金属封闭开关设备的内部电弧故障^[4]。内部故障电弧的物理效应有压力效应、热效应、声效应和光效应^[5]。压力效应破坏巨大, 是研究内部故障电弧主要关心的问题。故障电弧会引起隔室中压力的变化, 其巨大的能量释放过程是以气体爆炸方式实现的^[6], 会引起柜内压力迅速上升^[7], 可导致设计不当的开关柜门板、柜体爆裂, 破损的零件高速飞出柜体并伴随火焰喷出^[8]。内部故障电弧发生时, 时间短, 但能量大, 破坏力极强^[9], 导致装置的机械部件承受极大的应力, 造成柜体的损坏^[10],

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51177124)。

Project Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51177124).

不仅可能使供电中断,甚至会造成操作人员的伤亡和设备的严重损坏^[11]。随着中国经济社会的发展,电力设备的安全性受到了广泛的关注,提高开关柜的可靠性、确保人员安全已成为一种趋势^[12]。

SF₆ 于 1947 年已实现商业化应用^[13],在中高压开关柜中 SF₆ 是除空气外最重要的绝缘气体,缺点是严重的温室效应^[14],SF₆ 气体及其分解物对人体的危害和影响设备的正常运行也不容忽视^[15]。在可能的地方用其他气体取代 SF₆ 是减少其排放量的途径之一^[16],因而 N₂ 和 CO₂ 得到越来越多的关注。不同绝缘气体性质的差异会导致故障电弧压力效应有一定的差异,这对不同绝缘气体的开关柜的设计提出了不同的要求。因此研究 N₂ 和 CO₂ 绝缘气体下的内部故障电弧尤为重要。

笔者通过大量实验研究了密闭容器内部故障电弧的压力效应,发现了氮气和二氧化碳这两种不同的绝缘气体对内部故障电弧压力效应影响的规律,这些发现对更好地利用替代气体,减少 SF₆ 的使用有重要意义。

1 实验装置和实验内容

1.1 实验装置

实验用密闭腔体的示意图见图 1。装置主体是基于 252 kV GIS 的圆柱状腔体,腔体内径 600 mm,高 1 900 mm。两个铜电极对称竖直安装在腔体中间位置,电极通过螺纹和电极棒相连,电极棒通过母排和外部高压直流源回路相连。引弧方式是铜丝引弧,通电后很短时间内细铜丝发热熔化蒸发后电极间产生电弧,其后电弧稳定燃烧,通电结束电弧熄灭。

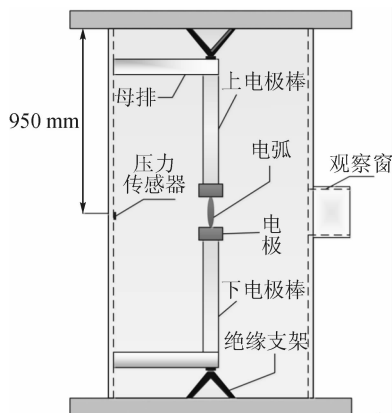


图 1 实验腔体示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental chamber

1.2 实验内容

实验原理图见图 2。实验需要测量的量有电弧电流、电弧电压和气压变化。电弧电流和电弧电压分别用霍尔传感器和高压探头测量。气压变化用压

力传感器测量,压力传感器安装在腔体内壁与电弧等高的位置,压力传感器的响应时间少于 1 μ s,可以实时测量腔体内气压的变化。电弧电流、电弧电压和气压信号同时用示波器采集。可以调节高压直流回路输出的电压电流以及通电的时间。

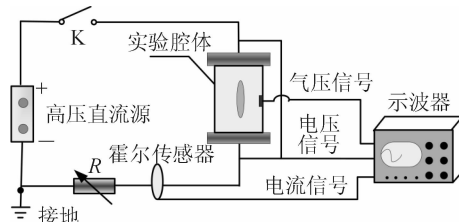


图 2 实验原理图

Fig. 2 Experimental arrangement

2 实验结果及分析

2.1 典型实验结果

电弧电流 10 kA, 初始充气压 400 kPa N₂ 的情况下的实验结果见图 3。在初始的约 15 ms, 电流上升而电压先上升后下降有个峰值,这是因为细铜丝的熔化和蒸发。其后电弧以较稳定的电弧电压和电流燃烧。在最后的约 15 ms 电流下降到零, 电弧熄灭。在电弧燃烧的约 100 ms 内, 电弧通过传导、对流、辐射的方式将能量转移给周围绝缘气体引起气压上升^[17]。在约 100 ms 时, 电弧熄灭, 电弧不再给周围绝缘气体传递能量, 气压上升到最大值。

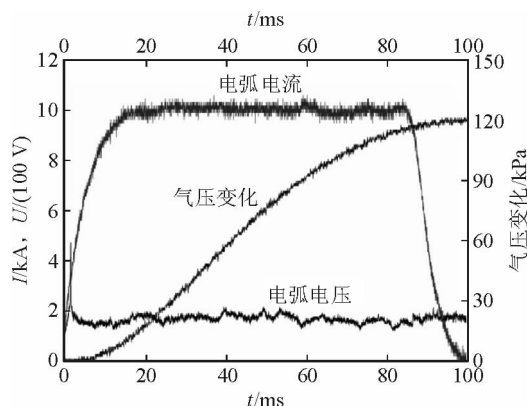


图 3 N₂(初始充气压 400 kPa, 电弧电流 10 kA) 的电弧电流、电弧电压和气压上升曲线

Fig. 3 Arc current, voltage and pressure development for a test in N₂(filling pressure 400 kPa, arc current 10 kA)

不同绝缘气体(初始充气压 400 kPa, 电弧能量 180~200 kJ) 的气压变化见图 4, 电弧能量 180~200 kJ, 氮气和二氧化碳气压随时间的变化明显不同, 氮气的气压峰值约是二氧化碳的两倍。在电弧燃烧约 100 ms 时间内, 氮气比二氧化碳气压上升曲线高, 这主要是因为氮气比二氧化碳的定容比热容低^[18]。

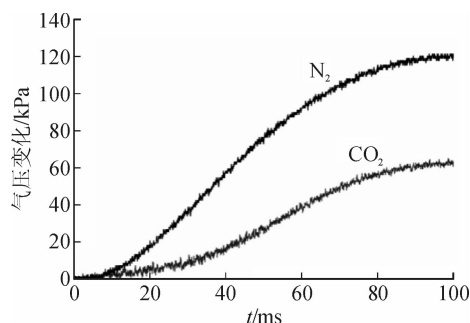


图4 不同绝缘气体(初始充气压 400 kPa, 电弧能量 180~200 kJ)的气压变化

Fig. 4 Pressure development in the test vessel(filling pressure 400 kPa, arc energy 180 to 200 kJ) for different insulating gases

2.2 初始充气压与气压变化的关系

不同初始充气压的二氧化碳和氮气的气压随时间的变化见图5、6。从图5、6可以看出,初始充气压越大,电弧燃烧时气压上升也越大。

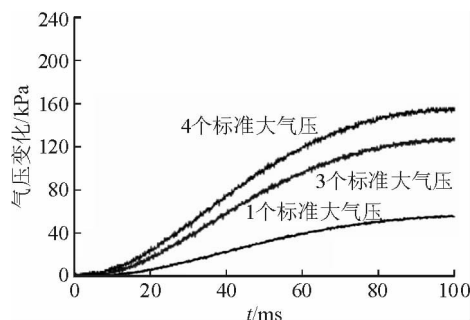


图5 不同初始充气压的 CO₂(电弧电流 10 kA)压力上升

Fig. 5 Pressure development of different filling pressures of CO₂(arc current 10 kA)

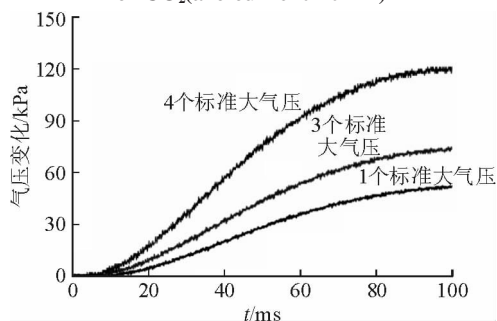


图6 不同初始充气压的 N₂(电弧电流 10 kA)压力上升

Fig. 6 Pressure development of different filling pressures of N₂(arc current 10 kA)

2.3 电弧能量

密闭腔体内发生故障电弧,燃烧的电弧会在很短时间内释放大量的能量,引起腔体内绝缘气体内能增大,气压增大。电弧能量的大小是决定气压上升的高低主要因素之一。

电弧能量是通过电弧电压和电流的乘积对时间积分得到。电弧电流 10 kA,初始充气压 400 kPa的

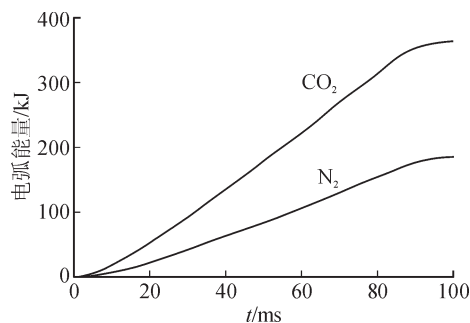


图7 2种绝缘气体的电弧能量(初始充气压 400 kPa, 电弧电流 10 kA)随时间变化

Fig. 7 Arc energy development of different insulating gases(filling pressure 400 kPa, arc current 10 kA)

两种绝缘气体的电弧能量随时间的变化曲线见图7。在电弧燃烧约 100 ms 内电弧能量随时间平稳增加。

由于电弧电流 10 kA 不变,电弧电压决定着电弧能量的大小。氮气和二氧化碳的电弧电压随初始充气压的变化见图8。从图8可以看出,电弧电压随初始充气压增大而升高,这是因为初始充气压增大电极之间要电离的气体分子密度增加,电弧电阻增大。在相同的电极条件下,由于在高温下二氧化碳比氮气更难电离^[18-19],电阻率更大,因此二氧化碳的电弧电阻更大,电弧电压更高。

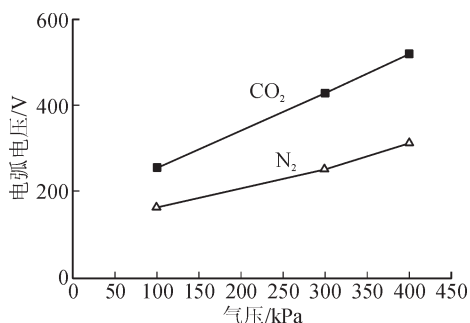


图8 不同绝缘气体(电弧电流 10 kA)电弧电压随初始充气压变化

Fig. 8 Measured arc voltages in the test vessel (arc current 10 kA) for different filling pressures

电弧电流都是 10 kA 时,不同初始充气压的氮气和二氧化碳电弧能量的比较见图9。从图9可以发现,随着初始充气压的增大,电弧能量增大。另外,因为二氧化碳的电弧电压更高,二氧化碳的电弧能量也更大。

2.4 能量转移系数

能量转移系数 k_p 是电弧加热气体的能量与电弧能量的比值,它不是一个常量,会随着绝缘气体种类及初始充气压的不同发生变化^[20]。可以根据实验结果计算出相应条件下的 k_p ,并总结出 k_p 变化的规律。

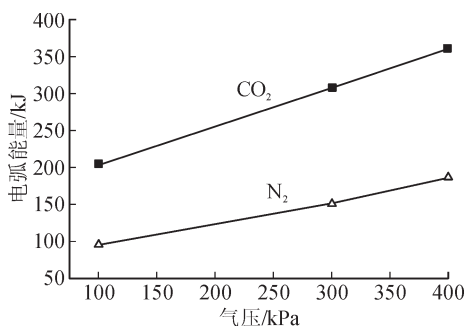


图9 不同绝缘气体(电弧电流 10 kA)的电弧能量随初始充气压的变化

Fig. 9 Energy in the test vessel (arc current 10 kA) for different filling pressures

文中使用标准计算方法(SCM)计算 k_p , SCM 基于热力学第一定律和理想气体状态方程^[21]得出 k_p 计算公式为

$$k_p = \frac{MC_v dP}{RE_{arc}} \quad (1)$$

式(1)中: M 是气体的摩尔质量; C_v 是气体的定容比热; dP 是燃弧前后气压差; V 是装置体积; R 是气体常数。

不同初始充气压的不同绝缘气体(电弧电流 10 kA)的 k_p 变化见图 10, 从图 10 可以发现, 二氧化碳的能量转移系数比氮气高, 而且能量转移系数随着初始充气压增大而增大。

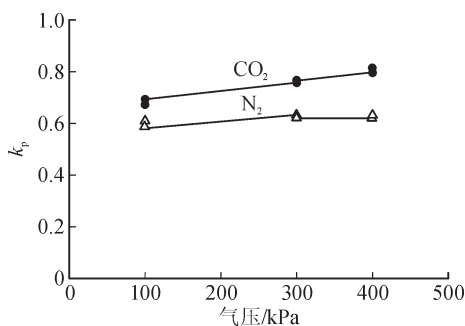


图10 不同初始充气压的不同绝缘气体(电弧电流 10 kA)的 k_p 变化

Fig. 10 k_p depending on filling pressure (gas density) and different insulating gases(arc current 10 kA)

3 结论

笔者通过实验和计算的方法研究了氮气和二氧化碳这两种不同绝缘气体的内部故障电弧压力效应, 研究结果表明:

1) 电弧能量相同时, 由于氮气比二氧化碳的定容比热小, 氮气的气压上升会更大。

2) 电弧电流相同时, 气压上升随初始充气压的增大而增大。

3) 电弧电流相同时, 两种气体的能量转移系数随初始充气压增大而增大, 但二氧化碳比氮气的能量转移系数更高。

参考文献:

- [1] 赵淑敏. AFCI(故障电弧断路器)的研制[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
ZHAO Shumin. Development of AFCI(arc fault circuit interrupters)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [2] 年培新, 罗时璜, 董葆生, 等. 低压配电领域中的故障电弧防护[J]. 低压电器, 2000(1): 22-26.
NIAN Peixin, LUO Shihuang, DONG Baosheng, et al. Arc fault protection In the field of low-voltage distribution[J]. Low Voltage Apparatus, 2000(1): 22-26.
- [3] 李玲, 刘成学. 中压开关柜内部故障电弧计算及防护措施[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 131-138.
LI Ling, LIU Chengxue. Calculation and prevention of internal fault arc in medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 131-138.
- [4] 崔可. 浅谈高压开关柜内部电弧故障的维护[J]. 电子世界, 2012(12): 51-51.
CUI Ke. Introduction to the maintenance of high voltage switch cabinet internal arc fault[J]. Electronics World, 2012 (12): 51-51.
- [5] 蔡彬, 陈德桂, 吴锐, 等. 开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 83-87.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Rui, et al. Online detecting and protection system for internal faults arc in switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (10): 83-87.
- [6] 熊泰昌. 内部电弧故障试验情况下中压开关柜强度计算[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 42-44.
XIONG Taichang. Strength calculation of medium voltage swttchgear under internal arc-fault test[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 42-44.
- [7] GEMME C, PASINETTI M, PICCARDO R. AE 快速消弧装置[J]. 电气技术, 2010(1): 82-85.
GEMME C, PASINETTI M, PICCARDO R. A matter of timing [J]. Electrical Engineering, 2010(1): 82-85.
- [8] 朱东升. 开关设备内部电弧故障的分析及应用[J]. 电工电气, 2012(9): 32-34.
ZHU Dongsheng. Analysis and appli-cation of internal arc fault inswitchgear[J]. Electrotechnics Electric, 2012(9): 32-34.
- [9] 王冬梅, 侯神林. 金属封闭开关设备的内部燃弧故障浅析[J]. 电气制造, 2011(1): 34-35.
WANG Dongmei, HOU Shenlin. Analysis of metal-enclosed switchgear of internal arc fault[J]. Electrical Manufacturing, 2011(1): 34-35.

- [10] 李启业. 中低压开关柜弧光短路分析及操作工具的改进[J]. 供电企业管理, 2010(6):45-47.
- LI Qiye. Medium low voltage switchgear arc short circuit analysis and operation tools improvement[J]. Power Supply Enterprise Management, 2010(6):45-47.
- [11] 程 飞. 航空故障电弧的仿真和试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- CHENG Fei. The simulation and experimental research on aviation fault arc[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [12] 蔡 彬, 陈德桂. 中压开关柜中内部电弧故障的计算方法和防护措施[J]. 高压电器, 2003, 39(1):8-11.
- CAI Bin, CHEN Degui. The calculation and protection measures of internal arcing faults in mv metal-clad switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1):8-11.
- [13] 李旭东, 周 伟, 屠幼萍, 等. 0.1~0.25 MPa 气压下二元混合气体 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 和 $\text{SF}_6\text{-CO}_2$ 的击穿特性[J]. 电网技术, 2012, 36(4):260-264.
- LI Xudong, ZHOU Wei, TU Youping, et al. Breakdown characteristics of binary gas mixtures $\text{SF}_6\text{-N}_2$ and $\text{SF}_6\text{-CO}_2$ under 0.1~0.25 MPa atmosphere pressures[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):260-264.
- [14] 唐 嘉. SF_6 电气绝缘设备故障时气体特征分解物的检测及应用[J]. 中国电力, 2011, 44(5):30-33.
- TANG Jia. Detection of gas decomposition products of SF_6 gas-insulated electric equipment under faults and its applications[J]. Electric Power, 2011, 44(5):30-33.
- [15] 张强华, 谭 燕, 邬建刚. 40.5 kV 无 SF_6 C-GIS 开关柜研究[J]. 高压电器, 2011, 47(6):29-33.
- ZHANG Qianghua, TAN Yan, WU Jiangang. Research of 40.5 kV non SF_6 C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6):29-33.
- [16] 李惠芬. SF_6 气体替代面临的诸多挑战[J]. 高电压技术, 2000, 26(3):50-51.
- LI Huifen. Many challenges to substitution for SF_6 [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3):50-51.
- [17] WU Yi, LI Mei, RONG Mingzhe, et al. Experimental and theoretical study of internal fault arc in a closed container[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2014, 47(50):1-14.
- [18] WETZELER S, CRESSAULT Y, PIETSCH G J. Influence of insulating gas on pressure rise in electrical installations due to internal arcs[C]//20th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Orléans: [s.n.], 2014:442-445.
- [19] CRESSAULT Y, CONNORD V, HINGANA H, et al. Transport properties of CF₃I thermal plasmas mixed with CO₂, air or N₂ as an alternative to SF_6 plasmas in high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2011, 44(49):1-22.
- [20] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G J. Influence of arc current on fraction k_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):2028-2029.
- [21] IWATA M, TANAKA S, OHTAKA T, et al. CFD calculation of pressure rise due to internal AC and DC arcing in a closed container[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3):1700-1709.
- 张俊鹏(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为开关电器。