

高压纳秒脉冲气体放电试验研究进展

邵涛^{1,2}, 孙广生¹, 严萍¹, 高魏¹, 彭燕昌¹, 王珏¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

Progress in the Experiment and Research of Gas Breakdown under HV Nanosecond Pulse

SHAO Tao^{1,2}, SUN Guang-sheng¹, YAN Ping¹, GAO Wei¹, PENG Yan-chang¹, WANG Jue¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

摘要: 按时间顺序综述了纳秒脉冲下气体放电的试验研究结果, 简述了几种纳秒脉冲下放电机理假说, 并总结了相关的经验公式。目前, 重频纳秒脉冲下气体放电的试验研究有较多空白, 有必要开展此项研究。

关键词: 脉冲功率; 纳秒脉冲; 气体放电

中图分类号: TM89

文献标识码: A

Abstract: This paper summarizes some research development of nanosecond-pulse breakdown in gas dielectrics chronologically, simply shows some gas breakdown mechanism and sums up the relevant empirical formulae. Experimental gas breakdown research under repetitive nanosecond pulse voltage is relatively undeveloped. It is desirable to carry out the work with respect to it.

Key words: pulsed power; nanosecond pulse; gas discharge

1 前言

脉冲功率技术中的关键问题之一是绝缘问题, 介质绝缘特性的研究水平又必定直接影响脉冲功率技术的发展。气体作为绝缘介质在脉冲功率技术中使用较多, 气体介质在纳秒脉冲作用下绝缘特性的试验研究举足轻重。

总结国内外有关纳秒脉冲下气体击穿等方面的文献, 综述试验结果、相关的放电机理假说以及相应的经验公式等, 为开展纳秒脉冲下气体介质绝缘特性的研究提供借鉴。

2 纳秒脉冲放电试验

纳秒脉冲下气体放电试验以单次脉冲下的结果居多, 高压脉冲源也多是以 MARX 发生器加脉冲形成线输出纳秒级脉冲, 得到击穿场强 E , 压强 P , 击

穿时延(或形成时延) τ , 气体密度 ρ , 间隙距离 d 等参数间的关系。气体介质主要有常用的空气, SF_6 , N_2 , H_2 , 惰性气体等。从 20 世纪 40 年代开始不断有相关的试验成果发表。

R. C. Fletcher 于 1949 年最早发表纳秒脉冲下空气击穿试验结果^[1], 通过脉冲形成线产生幅值 20 kV 纳秒级脉冲电压加在充一个大气压的毫米级间距的平板电极上, 用紫外线的照射消除统计时延, 得到形成时延与击穿场强的关系。在场强很高时, 形成时延只与场强有关系, 与间隙距离(或施加电压)无关; 在相对低的场强下, 击穿时延与间隙距离有关, 相同场强时, 间隙越小, 形成时延越短。用单一电子崩主导放电的机理向多电子崩机理的转变来解释放电过程, 击穿时延发生变化的临界电场等于使主电子崩走完间隙距离且达到临界电子崩时的场强。试验结果符合经典流注机理。

在 R. C. Fletcher 的试验基础上, 文 [2] 介绍了 Nesterikhin 等在更陡脉冲前沿(约 0.2 ns), 气压 2.133~146.66 kPa, 平板电极和尖-板电极的条件下的试验结果。分析了击穿时延及其特征时间 t_1 等与电极距离、 E/P 的关系, 以及击穿时延的概率分布。均匀电场下, 阴极被照射时的击穿时延分散性较小, 间隙越小, 击穿时延的分散性也越小; 在拥有足够的初始电子(约 $10^3 \sim 10^4$) 时, 击穿时延基本等于电子崩发展到临界值的时间, 与 R. C. Fletcher 的试验结果比较吻合, 且 t_1 等于电子崩发展到临界时的时间。该文也从电子崩发展到临界值的时间小于受激粒子寿命的角度解释了经典流注机理在解释击穿时延方面的缺陷。

其次, P. Felsenthal 和 J. M. Proud 在与 R. C. Fletcher 类似的试验条件下, 得到了 9 种不同气体击穿的试验结果^[3], 采用平板电极, 脉冲幅值 4~30 kV, 气压 0.133~101.33 kPa, 电极间距 0.05~6 cm 时,

放电形成时延 0.5~30 ns, 9 种气体介质 (空气, N₂, O₂, Ar, He, SF₆, 3 种氟里昂 Freon) $P\tau$ - E/P 的关系曲线见图 1, 其中空气下试验数据与 Fletcher 等前人的试验数据比较吻合, 用一种改进的脉冲微波气体击穿理论来解释放电机理, 并推导出 $P\tau=f(E/P)$ 理论关系式(1), 理论与试验的结果较一致。

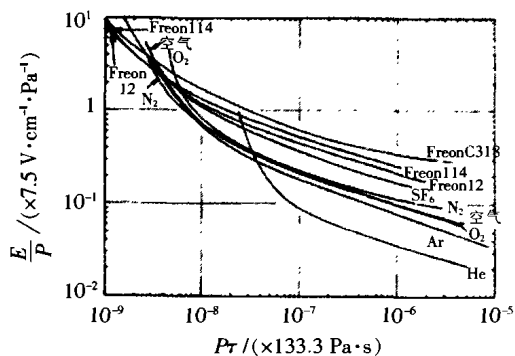


图 1 9 种气体的 $P\tau$ 与 E/P 的关系^[3]

G.A. Mesyats 等进一步总结了由少量和大量初始电子引燃的纳秒脉冲气体放电特征。少量电子引燃的放电形成时延要大于大量初始电子引燃的放电形成时延, 指出 Townsend 机理和流注机理在解释放电发展过程中的缺陷, 并用基于逃逸电子的线性电子崩链理论来解释纳秒脉冲下气体放电的发展过程^[4]。

20 世纪 80 年代初, 由 E.E. Kunhardt 等提出了一种适合于高压、高过电压的放电模型——逃逸电子模型, 并基于气体放电动力学在放电过程中的作用, 对纳秒脉冲下电子崩的发展、放电过程进行了理论分析, 但缺乏试验验证^[5]。随后, W.W. Byszewski 等人研究了纳秒气体放电暂态发展过程, 尤其关注放电过程中电流的发展^[6]。根据一种简化的电子连续方程, 考虑空间电荷及二次电离在放电形成阶段中的作用, 对放电过程中电流的发展进行了分析, 并将放电电流的理论曲线与试验曲线进行了对比。

20 世纪 80 年代末, Y. Kawada 等报道了在纳秒脉冲(脉宽半峰值时间为 30 ns, 74 ns; 上升沿时间为 10.8 ns; 电压峰值最大为 130 kV)下平板电极间隙击穿的试验结果^[7]。空气, N₂, O₂ 等在纳秒脉冲下 Pd 与放电电压 $U_{50\%}$ 的关系见图 2。其中电压信号(上升沿时间×脉宽半峰值时间): T_{hs} (10.8 ns×30 ns), T_{hw} (10.8 ns×74 ns)。在 T_{hs} 的电压信号下, 对空气, N₂, 仅在间距 $d=1, 2$ cm 时 Paschen 定律有效, $d=3$ cm 时有待进一步研究; 而对 O₂, 在 $d=1, 2, 3$ cm 时 Paschen 定律不适用。在 T_{hw} 的电压信号下, 对空气, N₂, O₂, 在 $d=1, 2, 3$ cm 时 Paschen 定律均适用。Kawada 对空气间距 $d=1, 2$ cm 时的试验结果, 用经典的电子崩-流注机理来解释放电发展过程, 并计算出满足经典流注机理时电子崩的临界长度为 0.048~0.18 cm; 采用变像高速扫描相机记录放电的发展过程, $U_{50\%}$ 的值与阴极照射强度无关; 放电图像

表明, 放电发展过程中较多呈现线状放电通道, 也可能是大面积放电通道; 高速扫描放电发展过程发现, 在形成流注后仍需要几个纳秒的时间完成击穿, 流注的发展速度是 10⁸ cm/s 量级^[8]。文[9]报道了在一个大气压, 脉宽 100 ns, 峰值电压 72~91 kV 的脉冲电压作用在同轴电极间隙上, 试验得到流注发展的最大速度是 $(1.8\sim3.3)\times 10^8$ cm/s。

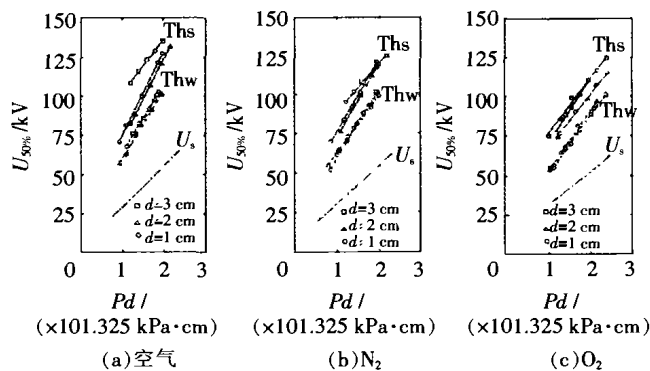


图 2 3 种气体的 Pd 与放电电压 $U_{50\%}$ 的关系^[7]
 U_s ——静态击穿电压

J. Mankowski 对纳秒、亚纳秒级脉冲下气体(空气, N₂, H₂, He, SF₆)的击穿特性进行了试验研究^[10]。采用半球形电极, 脉冲电压幅值电压 40~400 kV, P 最高达 11 MPa, $d=1\sim5$ mm, 放电形成时延在几个纳秒以内, 对每种气体介质施加不同的压强, 击穿时延随场强增加而减小的规律是一致的, 同时压强对击穿影响很大, 以空气为例, 在 100 kPa 和 1 MPa 以上, 击穿场强相差几倍以上, 但压强太高, 其影响又会减小。几种气体在纳秒脉冲下试验结果与直流下的 Paschen 曲线见图 3^[11], 试验结果也符合 Paschen 定律, 只是击穿电压值比直流条件下高很多。在 T. H. Martin 关于 $\rho\tau=f(E/P)$ 的经验公式(4)的基础上, Mankowski 进一步修正了在亚纳秒范围内适用的经验公式(5), (6)。

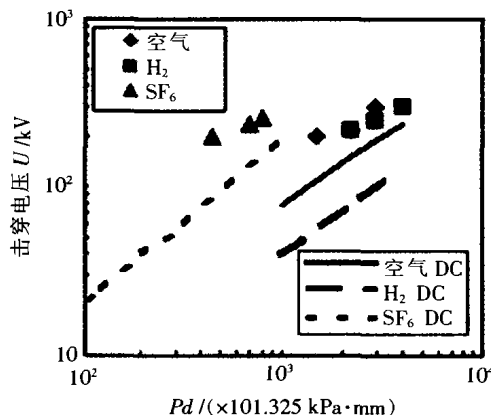


图 3 3 种气体 Pd 与击穿电压的关系^[11]

文[12]介绍了 $P=0\sim 101.325$ kPa, 电压幅值小于 15 kV, mm 级尖-板间隙, 亚纳秒级脉冲等条件下的试验结果, 得到在极不均匀电场中击穿时延随气压变化的关系曲线。气压越低, 击穿时延越长, 击穿

电压一样时,尖为正时的击穿时延比尖为负时约小30%。击穿可能发生在脉冲电压的上升沿,也有可能发生在电压到达峰值后,当加负极性脉冲电压在尖极上,击穿更容易发生在脉冲电压的上升沿阶段。电子的场致发射被用来解释击穿机理。

3 纳秒脉冲放电机理

目前解释纳秒脉冲下放电发展过程的主要有经典流注机理^[13]、电子崩链模型^[14]、逃逸电子模型^[5]等。

Townsend 机理适用于 Pd 较小,过电压 <20%;而流注机理适用于 Pd 较大,过电压 >20%的情况^[7]。纳秒脉冲电压下的放电应属于经典流注机理解释的范围,但经典的流注机理在解释纳秒、亚纳秒级击穿时延上存在缺陷,因此基于流注机理发展了诸如电子崩链模型、逃逸电子模型等。几种模型都是在形成临界电子崩的基础上,考虑空间电荷场,发展二次过程,最后都形成流注;不同之处在于形成流注前的二次过程是不一样的。经典流注放电强调放电的二次发展需要在临界电子崩时辐射足以引发空间光电离的光子,空间光电离的作用很重要;电子崩链模型和逃逸电子模型都是基于放电过程中辐射的逃逸电子,考虑气体放电动力学在放电过程中的作用。电子崩链模型是在主电子崩的崩头发展二次电子崩,逐步形成贯穿阴极和阳极的线性电子崩链;逃逸电子模型认为逃逸电子主导主电子崩逐步向阳极的发展。电子崩链模型、逃逸电子模型强调放电继续发展的二次过程是电子崩内部逃逸的高能量电子,不考虑空间光电离。

4 经验公式

工程设计、改进绝缘结构常依靠试验或利用各种经验公式来计算,对纳秒脉冲同样不例外。

P. Felsenthal 等推导的理论关系式^[3]:

$$P\tau = \frac{\ln(n_b/n_0)}{k(E/P)(\alpha/P - \beta/P)} \quad (1)$$

式中: P 为气压; τ 为形成时延; n_b/n_0 为击穿电子密度与起始密度之比; $k(E/P)$ 为漂移速率; α 为汤逊电离系数; β 为附着系数。

W.W. Byszewski 等也提出一个理论关系式^[6]:

$$\tau N = \frac{\ln(n_b/n_0)}{(\alpha/N - \beta/N)v_d} \quad (2)$$

式中: N 为电子密度; v_d 为漂移速率。

式(1), (2)其实本质一样,只是式(1)中参数 P 换成了 N ,但不能直接表现 E, τ, P 等宏观参数间的关系,而且很多气体的诸如 α, β, v_d 等都是未知的,这两种公式在工程实际中不实用。

J.C. Martin 等在进行大量试验的基础上,总结

出击穿场强与时间、极性等都有关系,其经验公式^[15]:

$$(E_{\pm})(d \cdot t)^{1/6} = k_{\pm} \cdot P^n \quad (3)$$

其中: E 为平均击穿场强; d 为间隙距离; t 为放电时间(场强大于 0.899 倍平均击穿场强的时间); k, n 见表 1。

表 1 3 种气体的 k, n ^[15]

	空气	Freon	SF ₆
$k+$	22	36	44
$k-$	22	60	72
n	0.6	0.4	0.4

从图 1 可以发现,这几种气体虽然 $P\tau$ 与 E/P 的关系不一致,但其变化趋势是一致的,将其中参数 P 换成密度参数 ρ ,可以发现几乎曲线都吻合。T. H. Martin 在总结 J.C. Martin 和文 [3] 等对空气, N₂, He, SF₆ 等不同气体,击穿时延在 0.5 ns~10 μ s, 击穿场强 5~100 kV/cm 范围内的试验结果,提出了一个更为实用的经验公式^[16]:

$$\rho\tau = 97\,800 \left(\frac{E}{\rho}\right)^{-3.44} \quad (4)$$

其中: ρ 为气体密度; E 为平均击穿场强; τ 为击穿时延。

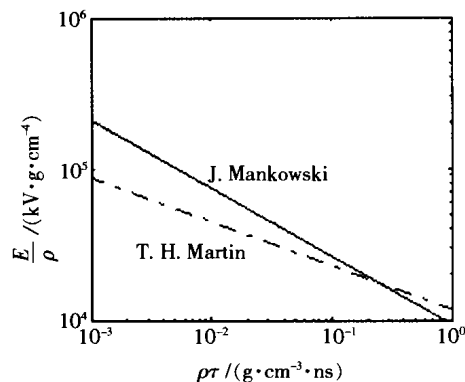
T. H. Martin 公式对包括空气, N₂, He 等气体都适用,尤其可较准确地预测空气和 SF₆ 混合气体的击穿时延^[16]。T. H. Martin 的公式是在较大范围的试验数据总结而得,因此在较大范围内其结果较吻合,但对只在纳秒、亚纳秒击穿时延范围内,或击穿场强很高的情况下不一定适用。J. Mankowski 发现,在达到 MV/cm 级的击穿场强下,击穿时延在几个纳秒到亚纳秒范围内的试验结果与 T. H. Martin 存在差异,修正的经验公式是^[10]:

$$\rho\tau = 0.9 \left(\frac{E}{\rho}\right)^{-2.25} \quad (5)$$

式(5)与击穿时延小于几个纳秒范围内的击穿数据较吻合,适用的气体包括空气, N₂, SF₆, He 等,但对氢气的击穿数据并不十分吻合,修正得到式(6),与式(5)的差别仅指数不同。

$$\rho\tau = 0.9 \left(\frac{E}{\rho}\right)^{-2.05} \quad (6)$$

T. H. Martin 和 J. Mankowski 的经验公式都是很实用的, T. H. Martin 的经验公式在较大范围内适用, J. Mankowski 的则在击穿时延几个纳秒到亚纳秒范围内较适用。两者经验公式的比较见图 4, 在 J. Mankowski 的试验范围内 ($\rho\tau = 10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{ns}/\text{cm}^3$), 其 E/ρ 值要比根据 T. H. Martin 经验公式预测得出的数值高一些。即要求击穿时延尽量小(如 <5 ns), 就要使 E/ρ 的值尽量大。在不同的击穿时延范围内,需要通过大量试验对 T. H. Martin 的经验公式进一步修正,得到较准确、小范围内适用的经验公式。

图4 两种经验公式 E/ρ 与 $\rho\tau$ 关系曲线对比

5 结语

从国外有关纳秒脉冲方面的试验研究结果看,基本都是单次脉冲下的试验结果,各自关注的侧重点不同,试验均是在不同的条件下(mm级,cm级的平板、尖-板气体间隙,从133.329 Pa到几十或几百个大气压)的结果,且为了各自试验的目的,对某些参数(如击穿时延)等定义各异,使得试验结果的对比困难。纳秒脉冲下几种放电机理假说有经典流注机理、电子崩链模型、逃逸电子模型等。比较实用的经验公式是T. H. Martin和J. Mankowski的经验公式,其中T. H. Martin公式在大范围内适用,而J. Mankowski公式适用于击穿时延在亚纳秒范围内。

随着脉冲功率技术向高能量、高平均功率、高重复率、长寿命等方向发展,尤其是重复纳秒脉冲放电得到了广泛的应用,应关注重复频率下纳秒气体放电的击穿特性。已有的试验结果缺乏重频脉冲下的结果,故有必要开展重频纳秒脉冲气体放电特性的研究。

参考文献:

- [1] R C Fletcher. Impulse Breakdown in the 10^{-9} Sec. Range of Air at Atmospheric Pressure[J]. Phys. Rev., 1949, 76(10): 1501-1511.
- [2] Yu E Nesterikhin, V S Komel' kov, E Z Meilikhov. Pulsed Breakdown of Small Gaps in the Nanosecond Range[J]. Soviet Phys. Tech. Phys., 1964, 9(1): 29-39.
- [3] P Felsenthal, J M Proud. Nanosecond-pulse Breakdown in Gases [J]. Phys. Rev., 1965, 139(6A): 1796-1804.
- [4] G A Mesyats, Yu I Bychkov, V V Kremnev. Pulsed Nanosecond Electric Discharges in Gases [J]. Soviet Phys. Usp., 1972, 15(3): 282-296.
- [5] E E Kunhardt, W W Byszewski. Development of Overvoltage Breakdown at High Gas Pressure[J]. Phys. Rev. A., 1980, 21(6): 2069-2076.
- [6] W W Byszewski, M J Enright, J M Proud. Transient Development of Nanosecond Gas Discharges [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1982, 10(4): 281-285.
- [7] Yukimitsu Kawada, Sumikazu Shamoto, Tatsuzo Hosokawa. Nanosecond-pulsed Breakdown of Gas-insulated Gaps [J]. J. Appl. Phys., 1988, 63(6): 1877-1881.
- [8] Yukimitsu Kawada, Tatsuzo Hosokawa. Observation of Nanosecond-pulse Breakdown of Gas-insulated Gaps by Image Converter Camera[J]. J. Appl. Phys., 1990, 67(3): 1249-1252.
- [9] Takao Namihira, Wang Duoyan, Sunao Katsuki, et al. Propagation Velocity of Pulsed Streamer Discharges in Atmospheric Air [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2003, 31(5): 1091-1094.
- [10] J Mankowski. High Voltage Subnanosecond Dielectric Breakdown [D]. Dissertation for the Ph. D. Degree, Texas Tech University, 1997.
- [11] J. Mankowski, J Dickens, M Kristiansen. High Voltage Subnanosecond Breakdown [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1998, 26(3): 874-881.
- [12] H Kromholz, L L Hatfield, M Kristiansen, et al. Gas Breakdown in the Subnanosecond Regime with Voltage below 15 kV [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(5): 1916-1920.
- [13] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [14] G A Mesyats. 大功率毫微秒脉冲的产生 [M]. (邵贵荣译), 北京: 原子能出版社, 1982.
- [15] T H Martin, A H Guenther, M Kristiansen. J C Martin on Pulsed Power [M]. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [16] T H Martin. An Empirical Formula for Gas Switch Breakdown Delay [A]. Proceeding of 7th IEEE Pulsed Power Conference [C], Monterey, CA, 1989.

作者简介:邵 涛(1977-),男,博士生,从事脉冲功率、高电压技术方面的研究。电话:010-62551456。

广西将新增 145 万千瓦发电机组

简 讯

今年下半年,广西全区将有总计 145 万千瓦的机组开始发电,电力供应紧张的形势将有所好转。

上半年,自治区给柳州的用电指标是一天 65 万千瓦,可是柳州一天最高曾达到了 90 万千瓦,缺口为 25 万千瓦,这也是上半年频频拉闸限电的主要原因。下半年,7~10 月为丰水期,电力供应相对正常,但 10 月以后枯水期来临,电力紧张的矛盾将重现。

今年下半年全区将新增一批机组发电:7 月份,合山电厂一台 30 万千瓦机组发电;10 月份,北海电厂、田东电厂开始发电;12 月份,合山电厂另一台机组发电,同时乐滩、桥巩两个水电站也开始发电。预计下半年将有总计 145 万千瓦的机组发电投产,可增加 100 万千瓦的供电能力。