

高压氦气平行极板击穿电压实验研究

岳姗 刘兴男 时振刚

Experimental study on breakdown voltage between parallel plates in high-pressure helium

Yue Shan Liu Xing-Nan Shi Zhen-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 105101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.105101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压耦合高功率脉冲磁控溅射的增强放电效应

Enhanced discharge of high power pulsed magnetron sputtering coupling with high voltage

物理学报.2014, 63(18): 185207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.185207>

高功率脉冲磁控溅射的阶段性放电特征

Phasic discharge characteristics in high power pulsed magnetron sputtering

物理学报.2014, 63(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.175201>

磁控溅射辉光放电特性的模拟研究

Computer simulation of the glow discharge characteristics in magnetron sputtering

物理学报.2012, 61(16): 165101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.165101>

外磁场对介质表面次级电子倍增效应的影响

Effects of an external magnetic field on multipactor on a dielectric surface

物理学报.2012, 61(7): 075101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075101>

强直流场介质表面次级电子倍增效应的数值模拟研究

Numerical simulation of multipactor on dielectric surface in high direct current field

物理学报.2011, 60(8): 085101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.085101>

# 高压氦气平行极板击穿电压实验研究\*

岳姗 刘兴男<sup>†</sup> 时振刚

(清华大学核能与新能源技术研究院, 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

(2014年10月6日收到; 2014年11月30日收到修改稿)

为获得高温气冷堆核电站电气设备绝缘设计所需基础数据, 本文设计了一套测量高压氦气绝缘性能的装置. 利用该装置进行了15—20 °C, 0.1—7 MPa氦气, 间距0.25, 0.35, 0.5 mm平行极板击穿实验. 实验表明: 氦气的绝缘性能远低于空气; 气压越高, 氦气的击穿电压越大, 3.0 MPa氦气的击穿电压与常压空气基本一致; 根据低气压实验数据和巴申定律推导的公式, 在高气压下计算值偏大, 且偏差随着气压和间距乘积的增大不断增大; 提出了可计算0.1—7 MPa氦气击穿电压的简易公式, 同时修正了高气压氦气的巴申公式, 并进行了理论分析.

**关键词:** 氦气, 巴申定律, 击穿电压, 高气压

**PACS:** 51.50.+v, 52.80.-s, 52.80.Dy, 52.80.Tn

**DOI:** 10.7498/aps.64.105101

## 1 引言

清华大学设计制造的模块式高温气冷堆具有第四代核反应堆的安全性、经济性等特点<sup>[1]</sup>. 氦气因高比热、高导热系数、化学性质稳定、中子吸收截面小等优点被选用为一回路冷却剂. 高温堆压力容器内, 氦气压力高达7 MPa, 温度也较高, 工作于压力容器中的电磁轴承、氮风机、电气贯穿件、控制棒驱动机构等多种电气结构在高压氦气下的绝缘性能尚不明确, 在设计时只能采取较大的余量<sup>[2]</sup>.

低压氦气的绝缘性能已有广泛研究. Hackma和Govinda Raju<sup>[3]</sup>研究了 $10^{-4}$  Pa量级高真空条件下点-面极板在空气、氮气、氦气、六氟化硫和氙气中的直流击穿电压, 发现相同极板间距下, 氦气的击穿电压最高, 而且点电极为正极时击穿电压较大; 还开展了 $10^{-4}$ —1 Pa范围内空气、氮气、氦气和氙气在不同间距下击穿电压随气压的变化, 发现氮气和氦气的击穿电压较大. Hartmann等<sup>[4]</sup>研究了低气压氦气的击穿电压和巴申曲线形状(Paschen curve)并进行了数值模拟, 他们使用直径36 mm, 间距10 mm的平行铜极板在182—1000

Pa开展实验, 得出氦气最小击穿电压为173 V, 出现在5.5 Pa·m条件下. Hassouba等<sup>[5]</sup>测量了阳极为Al, 阴极为Ag, Mg, Al等不同材料, 直径50 mm, 间距10 mm的平行极板间13—650 Pa氦气的击穿电压, 得出不同阴极材料对应的最小击穿电压依次为168, 162, 152 V——随着阴极材料逸出功减小而减小, 并且最小击穿电压都出现在气压与极板间距乘积约为5.3 Pa·m条件下.

也有关于0.1 MPa左右氦气击穿性能的研究. Matejcik等<sup>[6]</sup>记录了钨和钼两种材料平行极板在极小间距1—100  $\mu\text{m}$ , 3000 Pa—0.1 MPa氦气条件下的电流-极板间电压曲线, 得出氦气击穿电压, 绘制了巴申曲线的左半部分, 发现进行了绝缘保护的钨极板得出的数据与Hartmann等<sup>[4]</sup>的结论近似, 只是在极小间距下, 由于场致发射作用, 击穿电压减小, 偏离巴申曲线, 而没有绝缘防护的钼极板实际发生了长距离放电, 击穿电压几乎等于最小击穿电压, 巴申曲线左半部分比钨极板低很多. Matejcik等<sup>[6]</sup>没有直接给出氦气最小击穿电压数据, 从图中可以判断最小击穿电压约为160 V, 出现在大约5 Pa·m条件下. 对于0.1 MPa氦气放电现象的研究还见于介质阻挡放电<sup>[7,8]</sup>, 这类放电现

\* 国家科技重大专项(批准号: ZX069)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: liuxingnan@tsinghua.edu.cn

象不单纯和氦气本身的绝缘性能有关,还主要受到电压频率、功率、极板间绝缘介质的影响,是近期研究的热点.

目前见到的研究中,氦气最大压力为1 MPa. Meats等<sup>[9]</sup>研究了4.2—10 K, 0.1—1.0 MPa, 5—140 kg·m<sup>-3</sup>条件下液氦和氦气的击穿行为,使用黄铜或铌电极板,直径50 mm或60 mm,间距0.5—3 mm.发现无论液氦还是氦气,击穿电压都随着压力升高而增大;对于较低密度氦气(0.1—0.2 MPa,密度小于60 kg·m<sup>-3</sup>),在击穿场强大于15 MV·m<sup>-1</sup>时实验值偏离巴申定律,而且偏差与间距有关,间距越小,同等密度与间距乘积下击穿电压越小;对于较高密度氦气,当密度介于60—100 kg·m<sup>-3</sup>时击穿场强随密度缓慢增大,而大于100 kg·m<sup>-3</sup>后,气体密度已经接近液氦,击穿场强随密度又快速增大,同时,温度越低,同等密度与间距乘积下的击穿电压越小.

对于氦气绝缘性能的研究还在液氦方面展开,这主要是受超导研究的推动. Blank和Edwards<sup>[10]</sup>使用球电极、点面电极、平行极板等研究了1.2—4.2 K极低温下液氦的击穿电压. Hara等<sup>[11]</sup>研究了电场对液氦中气泡形状的影响,以及气泡形状对击穿电压的影响,发现由于气泡的出现,液氦的击穿电压急剧下降. Gerhold<sup>[12]</sup>利用统计学的方法研究了液氦击穿电压实验数据的分散性,实验采用直径50 mm的Cr18 Ni8不锈钢或铌电极,间距固定为0.5 mm,发现液氦的击穿电压分成两类,较低的击穿电压对应着液氦中气泡或空穴的击穿机理,而较高的击穿电压取决于液氦的密度而不是压力,对应着与气泡或空穴不同的击穿机理. Azzola等<sup>[13]</sup>研究了当SMES-ETM超导磁储能系统发生磁体失超情况下,冷却系统中的液氦因线圈发热而全部汽化成氦气时电气结构的绝缘性能,由于实验测量的是特殊绝缘结构在0.25—1个大气压氦气下的耐击穿电压,因此对其他领域研究者,其参考意义有限.

在理论研究方面, Reder和Brown<sup>[14]</sup>求解玻尔兹曼输运方程,预测了纯氦气中高频击穿场强,与实验数据基本一致. Hartmann等<sup>[4]</sup>对低压氦气下阴极的电子发射和粒子在气隙中的运动进行了数值模拟,击穿电压较小时数值模拟结果和实验基本一致,击穿电压较高时模拟结果与实验定性符合.

总结以上研究现状,关于氦气绝缘性能的研究大多集中于低气压、低温氦气或液氦的击穿实验、

理论分析,针对高压(无论常温还是高温)氦气放电的实验数据和理论分析较少.因此,有必要对于高压氦气绝缘性能进行研究.

研究气体绝缘性能可以从多方面入手,平行极板均匀电场下的气体击穿是最基础的实验.本文设计了一套可提供高压氦气实验环境的装置,进行了15—20 °C, 0.1—7 MPa氦气,间距0.25, 0.35, 0.5 mm平行极板击穿实验,获得了高气压下氦气的击穿电压数据.同低气压数据建立的巴申公式进行了对比,对巴申公式的偏差进行了分析.

## 2 实验装置

### 2.1 压力炉

高压氦气绝缘实验的压力炉需满足耐高压、密封性、可抽真空、可加热、可通过电气贯穿件测量内部参数等要求.本文设计了一套实验装置,如图1所示.装置由压力炉、温控系统、电气贯穿件、气压表、安全阀、泄压阀、真空泵、高纯氦气瓶等组成.压力炉设计耐压10 MPa,可加热至200 °C,内部放置被测样品;气压表为四位数字表,量程9.999 MPa,精确到1 kPa;安全阀在气压高于8 MPa时触发;真空泵为机械式;氦气瓶中氦气纯度99.999%.本文在15—20 °C常温下开展实验,气压范围0.1—7 MPa.

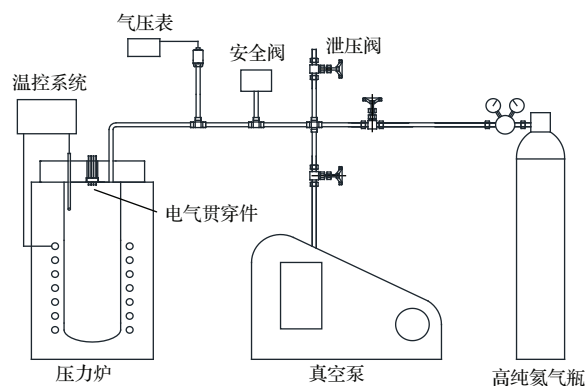


图1 高压氦气绝缘实验装置

Fig. 1. Schematic of the apparatus for high pressure helium gas insulation experiment.

### 2.2 极板间距调整机构

在进行平行极板实验时,需要对极板间距进行调整、测量和固定.本文设计了调整机构,如图2所示.机构最外层为铝板,安装调整螺栓,并保证机构整体刚度.中间层为20 mm厚的聚四氟乙烯绝

缘板, 根据已有研究<sup>[15]</sup>, 其耐表面闪络和耐击穿性能可以在本实验条件下保证电极板与铝板之间的绝缘. 最内层为铜电极板, 固定在绝缘板上, 直径100 mm, 厚10 mm, 平面度误差小于0.005 mm, 经MarSurf PS1便携式粗糙度仪测量, 表面粗糙度约2.7 μm. 为减少边缘效应, 对电极边缘倒圆角, 半径3 mm, 如图2所示. 利用Ansoft软件计算了0.25 mm间距、1000 V电压时极板间电场强度分布, 如图3所示, 气隙内沿极板半径方向的电场强度具体值如图4所示. 可见, 极板边缘电场强度小于内部, 不会在边缘击穿. 厚铝板圆周均布6个螺栓作为调整机构, 其中两两相间的一组为拧紧螺栓, 另外一组为顶紧螺栓. 两类螺钉互相配合, 既调整两极板的间距, 又保证两极板不因库仑力相互靠近. 通过塞尺测量极板多点间距, 保证极板平行, 测量误差不超过0.01 mm. 本文选择3种间距实验, 分别为0.25 mm, 0.35 mm, 0.5 mm.

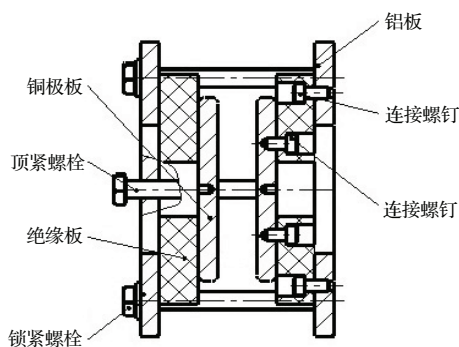


图2 平行极板间隙调整机构

Fig. 2. Adjusting mechanism for the distance between the two parallel plane electrodes.

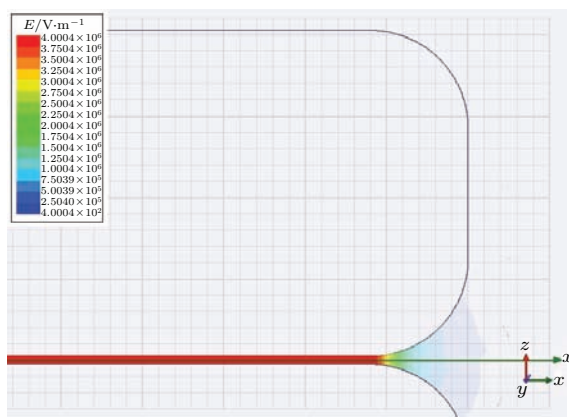


图3 (网刊彩色) 间距0.25 mm, 1000 V时极板间电场强度分布

Fig. 3. (color online) Distribution of the electric field intensity between the two parallel plane electrodes under 0.25 mm distance and 1000 V.

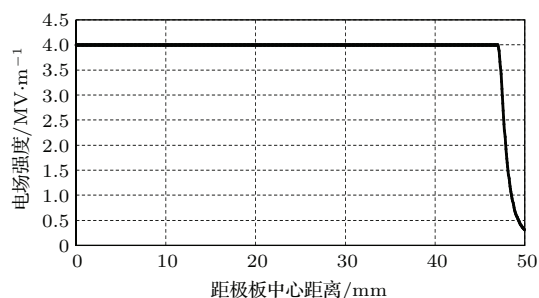


图4 间距0.25 mm, 1000 V时极板气隙内电场强度沿半径的分布

Fig. 4. The electric field intensity along radial direction in the gas gap between the two parallel plane electrodes under 0.25 mm distance and 1000 V.

### 2.3 直流绝缘测试仪

平行极板实验采用GW Instek公司的GPI-735A耐压绝缘测试仪, 最大输出直流电压6000 V, 其电压上升曲线如图5所示. 实验中设定的电压值为曲线中平台对应的电压值, 当测得的电流大于0.1 mA时, 仪器报警, 认为极板间气体击穿, 此时测试仪将会记录击穿瞬间的电压值和电流值, 电压值将作为本文中平行极板的击穿电压. 有文献指出, 高压气体放电存在“锻炼”现象<sup>[16]</sup>, 因此本文在进行击穿实验时, 多次测试直到击穿电压达到稳定.

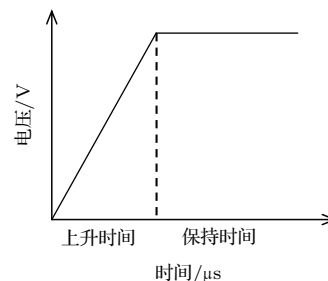


图5 直流绝缘测试仪产生的电压波形

Fig. 5. DC voltage waveform produced by the withstand voltage and insulation tester.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 氦气巴申公式

巴申定律 (Paschen law) 是针对平行极板等均匀电场下气体击穿进行解释的理论, 由于巴申定律的简洁性, 且能够较好地符合常用情况的实验数据, 因而被广泛地运用到电气结构设计中. 巴申公式如下<sup>[17]</sup>:

$$U_b = Bpd \left\{ \ln \left[ \frac{Apd}{\ln(1/\gamma)} \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

其中  $U_b$  表示气体击穿电压;  $p$  表示气压;  $d$  表示极板间距;  $A, B$  为公式常数;  $\gamma$  为电离系数.

根据巴申公式, 可以画出  $U_b$ - $(pd)$  曲线, 即巴申曲线. 由于公式中的未知系数无法直接获得, 需要通过已知的数据推导出氦气的巴申公式. 对 (1) 式求极值, 可得 (2), (3) 式, 其中  $U_{b-\min}$  表示最小击穿电压,  $(pd)_{\min}$  为击穿电压最小时  $p$  和  $d$  的乘积.

$$U_{b-\min} = 2.718B \frac{\ln(1/\gamma)}{A}, \quad (2)$$

$$(pd)_{\min} = \frac{2.718 \ln(1/\gamma)}{A}. \quad (3)$$

对于氦气, Hartmann 等 [4] 给出了  $U_{b-\min} = 173$  V,  $(pd)_{\min} = 5.5$  Pa·m; Hassouba 等 [5] 给出了  $U_{b-\min} = 152-168$  V,  $(pd)_{\min} = 5.3$  Pa·m; 徐学基等 [17] 给出了  $U_{b-\min} = 156$  V,  $(pd)_{\min} = 5.33$  Pa·m. 以上各文献给出的数值都比较接近, 本文选取上述文献数值 [4,5,17] 分别做计算, 并取相同的有效数位, 可得公式所需系数如 (4), (5) 式:

$$B = \frac{U_{b-\min}}{(pd)_{\min}} \approx 30, \quad (4)$$

$$\frac{A}{\ln(1/\gamma)} \approx 0.5. \quad (5)$$

将 (4), (5) 式代入 (1) 式, 得到氦气的巴申公式如 (6) 式, 据此可计算出某  $pd$  值对应的理论击穿电压.

$$U_b = \frac{30pd}{\ln(0.5pd)}. \quad (6)$$

### 3.2 氦气击穿实验结果

平行极板击穿实验在常温 (15—20 °C)、不同间距、不同气压氦气下进行, 极板间距分别为 0.25, 0.35, 0.50 mm, 气压范围 0.1—7 MPa.

图 6 描述了不同间距  $d$  下, 击穿电压  $U_b$  与气压  $p$  的关系, 其中三条直线为各组数据的线性拟合. 可以看出, 气压大于 0.1 MPa 时, 三种间距下平行极板的击穿电压都随着气压的升高而逐渐增大, 上升速度有所区别, 升速从小到大依次为: 0.25, 0.35, 0.50 mm.

将 (6) 式计算的理论值和实验数据进行比较, 做出  $U_b$ - $(pd)$  曲线, 如图 7, 从中可以直观地看出实验值和理论值的偏差. 首先可以看出三条实验曲线非常接近, 正如巴申定律所描述的形式  $U_b = f(pd)$ , 即击穿电压近似是  $pd$  的函数. 但具体数值上, 巴申公式的计算值大于实验值, 且随着  $pd$  值的增大, 两者差异变大. 在  $pd$  值较大时, 计算值

已经远大于实验值, 7 MPa 下理论值已经是实际值的数倍. 这说明高压下的巴申曲线函数还需要修正.

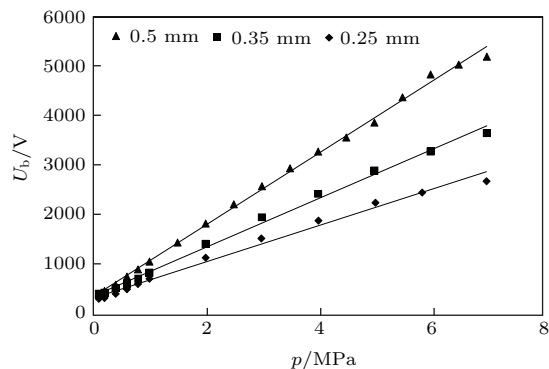


图 6 不同间距  $d$  下 (0.25, 0.35, 0.5 mm) 的  $U_b$ - $p$  曲线  
Fig. 6.  $U_b$ - $p$  curves under different distance  $d$  (0.25, 0.35, and 0.5 mm).

理论值和实验值存在偏差的一个原因是  $\gamma$  被假设为常数, 而实际上  $\gamma$  不仅是  $E/p$  的函数 ( $E$  为电场强度), 也是  $p$  的函数, 即高低气压下的  $\gamma$  值不相同 [16]. 本文的巴申公式 (6) 是通过低气压下击穿电压值推导出来的, 因此会与高压下的实验值有所不同.

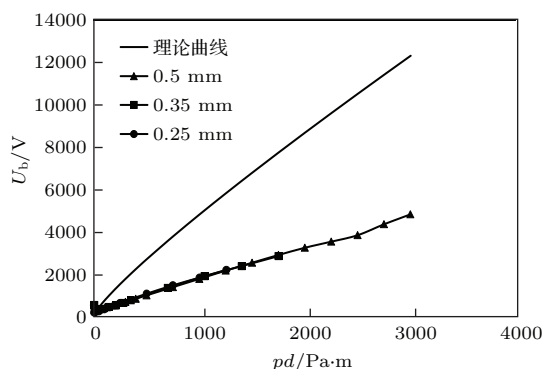


图 7  $U_b$ - $(pd)$  理论曲线与不同间距下的实测曲线 (0.25, 0.35, 0.5 mm)  
Fig. 7. The theoretical and measured  $U_b$ - $(pd)$  curves under different distance  $d$  (0.25, 0.35, and 0.5 mm).

### 3.3 简易线性公式与巴申公式修正

将三种间距实验值汇总到一幅图上, 如图 8, 数据近似线性分布. 进行线性拟合, 得到 (7) 式, 拟合直线绘于图 8 中, 与实验数据符合较好. 可见, 当氦气气压处于 0.1—7 MPa 范围内时, 平行极板击穿电压可以由 (7) 式估计. 经计算, 最大绝对误差为 222 V, 出现在高压范围,  $p = 7$  MPa,  $d = 0.35$  mm, 此时  $U_b = 3641$  V, 相对误差为 6%; 而最大相对误差为 31.7%, 出现在低气压范围,

$p = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $d = 0.25 \text{ mm}$ , 此时  $U_b = 285 \text{ V}$ , 绝对误差为  $90 \text{ V}$ .

$$U_b = 302.7 + 1.453pd. \quad (7)$$

击穿电压  $U_b$  与  $pd$  在  $pd$  较大时成线性这一点从巴申定律 (1) 式中也可以判断出来. 从数学意义上讲, 当  $pd$  值较大时, (1) 式的分母变化较小, 而分子线性变化, 因此  $U_b$  与  $pd$  近似成线性关系. 也就是说, 用 (1) 式的形式也可以表达图 8 中的实验数据分布, 只是其中的系数要根据大  $pd$  时的实验数据得出. 本文通过 Matlab 软件进行了非线性方程的求解, 并限定  $A/\ln(1/\gamma) = 0.5$ , 得到适合氦气大  $pd$  值的巴申公式如 (8) 式. (8) 式计算值与实验值的比较如图 9 所示, 两者基本符合.

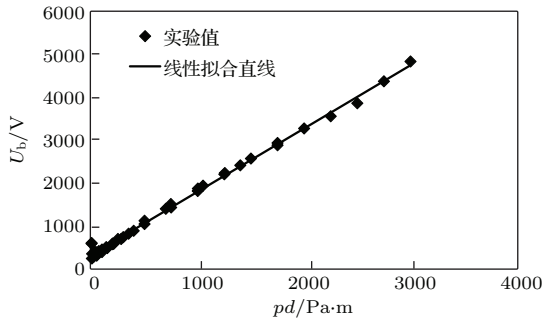


图 8 三种间距实验数据汇总并线性拟合  
Fig. 8. Total data under three distances and their linear fitting curve.

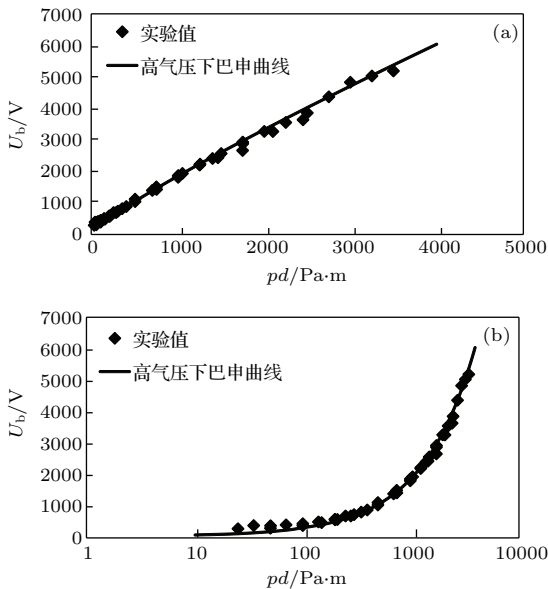


图 9 高压巴申公式 (8) 式计算值与实验数据对比  
(a) 线性坐标; (b) 半对数坐标  
Fig. 9. The comparison of calculated values by Eq. (8) and the experimental values: (a) linear coordinate; (b) semilog coordinate.

根据 (3) 式, 限定  $A/\ln(1/\gamma) = 0.5$  是为了使  $(pd)_{\min} = 5.4 \text{ Pa}\cdot\text{m}$ , 即保证 (8) 式反映的最小击穿电压出现条件与其他研究者一致. 而满足 (8) 式的击穿电压最小值  $U_{b-\min} = 63 \text{ V}$ , 大大小于其他研究者  $U_{b-\min} = 150\text{--}200 \text{ V}$  的实验结论 [4,5,17]. 这既反映出高压数据与低压数据的规律存在巨大差异, 也提示了本文实验数据小于 (6) 式计算值的另一个原因——同等  $pd$  下本文的击穿电压值比较小, 而其根本原因也许是因为本文采用的极板面积较大、表面粗糙度不高, 或者极板间距较小等.

$$U_b = \frac{11.5Pd}{\ln(0.5Pd)}. \quad (8)$$

### 3.4 高压氦气的巴申曲线形状的影响因素

在本实验  $pd$  值范围内, 当  $pd$  较大时, (7) 式右边第一项相对第二项可以忽略不计, 该公式可简化为 (9) 式的形式:

$$U_b = Kpd, \quad (9)$$

其中  $K$  为高压下近似为直线的氦气巴申曲线的斜率. 将  $E_b = U_b/d$  代入 (9) 式并整理, 可得

$$K = \frac{E_b}{p}, \quad (10)$$

其中  $E_b$  为击穿电压下的电场强度. (10) 式表示高压下巴申曲线的斜率  $K$  与击穿场强  $E_b$ , 气压  $p$  有关, 这是从实验结果 (7) 式中推导出来的结论. 本文试图通过碰撞理论进一步探究  $K$  的影响因素.

在氦气放电过程中, 电子获得的能量  $W$  为平均自由程内被电场加速的动能, 如 (11) 式:

$$W = eE\lambda, \quad (11)$$

其中  $e$  为元电荷,  $E$  为电场强度,  $\lambda$  为平均自由程——其与粒子碰撞截面  $\sigma$  和粒子数量密度  $N$  成反比, 即有 (12) 式:

$$\lambda = \frac{1}{\sigma N}. \quad (12)$$

理想气体状态方程可写为

$$p = NkT, \quad (13)$$

其中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度. 将 (12) 和 (13) 式代入 (11) 式, 得到电子能量  $W$  的新表达式:

$$W = \frac{ekTE}{\sigma p}. \quad (14)$$

本文假设只有当  $E$  增大到使电子能量  $W$  大于等于电离能  $W_i$  时, 才可能发生电离进而击穿, 此时

$E = E_b$ , 则有

$$\frac{E_b}{p} = \frac{\sigma W_i}{ekT}. \quad (15)$$

对比(10)和(15)式可得(16)式. 由于 $e, k$ 均为常数, 因此影响高气压下巴申曲线斜率 $K$ 的因素有碰撞截面 $\sigma$ , 电离能 $W_i$ 和温度 $T$ .

$$K = \frac{\sigma W_i}{ekT}. \quad (16)$$

### 3.5 氦气与空气对比

表1是氦气和空气在相同环境下的击穿电压. 可以看出在相同温度、气压、极板间距条件下, 氦气的击穿电压远低于空气, 大约只有空气的1/5, 这意味着对于氦气环境下的电气设备, 其绝缘性能的要求难以参考制定于空气下的各类标准.

表1 空气和氦气击穿电压对比 ( $T = 15-20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 0.1\text{ MPa}$ )

Table 1. The comparison of the breakdown voltage of air and of helium ( $T = 15-20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 0.1\text{ MPa}$ ).

$d/\text{mm}$	$U_b/\text{V}$	
	空气	氦气
0.25	1592	268
0.35	1700	370
0.50	2005	364

表2中列出了常压空气和不同压力氦气下的击穿电压值. 可以看到, 常压空气下的击穿电压值约等于3.0 MPa氦气下的击穿电压值, 而7 MPa氦气下击穿电压值大约是3 MPa氦气的2倍. 根据这个结论, 在平行极板实验或其他绝缘实验中, 可以通过测量常压空气下的击穿电压, 来确定3 MPa氦气下的击穿电压, 再乘以2倍粗略估算7 MPa下氦气的击穿电压值. 氦气氛围下的实验难度和成本较高, 上述结论提供了一种简化思路.

表2 常压空气与部分气压氦气的击穿电压值

Table 2. The breakdown voltage of atmospheric air and of helium under some different pressures.

极板间距 $d/\text{mm}$	空气 0.1 MPa $U_b/\text{V}$	氦气 3.0 MPa $U_b/\text{V}$	氦气 7.0 MPa $U_b/\text{V}$
0.25	1592	1496	2660
0.35	1700	1927	3641
0.50	2005	2503	5202

## 4 结 论

1) 根据低气压数据确定的氦气巴申公式在气压高于0.1 MPa时明显大于实验值. 7 MPa下, 理论值已高出实验值数倍. 因此, 由低压下推导的氦气巴申公式在气压较高情况下无法使用, 偏差主要因为气压相差较大引起 $\gamma$ 系数的不同, 也与本文采用较大面积、表面粗糙度不是特别好的极板有一定关系.

2) 气压大于0.1 MPa的 $U_b$ -( $pd$ )曲线近似为直线, 拟合线性公式为 $U_b = 302.7 + 1.453pd$ . 此方程形式简单, 便于工程应用. 依据高气压下数据, 将巴申公式也做出了修正, 公式为 $U_b = 11.5pd/\ln(0.5pd)$ .

3) 高气压下, 可进一步将公式简化为过零点的直线方程. 巴申曲线的斜率 $K$ 可由 $E_b/p$ 计算, 进一步, 影响巴申曲线斜率 $K$ 的因素有碰撞截面 $\sigma$ , 电离能 $W_i$ 和温度 $T$ .

4) 氦气的绝缘性能远差于空气, 常温常压下, 前者击穿电压约为后者的1/5. 相同极板间距时, 常压空气的击穿电压值相当于3 MPa氦气的击穿电压值, 而7 MPa氦气下击穿电压值大约是3 MPa的2倍. 因此, 对于某些实验, 有可能通过低成本、空气条件下的测试, 得出高压氦气条件下所需的结论.

## 参考文献

- [1] Zheng Y H, Shi L 2010 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **44** s253 (in Chinese) [郑艳华, 石磊 2010 原子能科学技术 **44** s253]
- [2] Yu X L, Yang X Y, Zhou S X, Wang J 2011 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **45** 426 (in Chinese) [于晓丽, 杨小勇, 周世新, 王捷 2011 原子能科学技术 **45** 426]
- [3] Hackam R, Govinda Raju G R 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4784
- [4] Hartmann P, Donko Z, Bano G, Szalai L, Rozsa K 2000 *Plasma Sources Sci. T.* **9** 183
- [5] Hassouba M A, Elakshar F F, Garamoon A A 2002 *Fizika A* **11** 81
- [6] Matejcik S, Klas M, Radjenovic B, Durian M, Savic M, Radjenovic M R 2013 *Contrib. Plasm. Phys.* **53** 573
- [7] Wang X Q, Dai D, Hao Y P, Li L C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 230504 (in Chinese) [王敦青, 戴栋, 郝艳捧, 李立涅 2012 物理学报 **61** 230504]
- [8] Dai D, Wang Q M, Hao Y P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 135204 (in Chinese) [戴栋, 王其明, 郝艳捧 2013 物理学报 **62** 135204]

- [9] Meats R J 1972 *Proc. IEE* **119** 760
- [10] Blank C, Edwards M 1960 *Phys. Rev.* **119** 50
- [11] Hara M, Kaneko T, Honda K 1988 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **23** 769
- [12] Gerhold J 1988 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **23** 765
- [13] Azzola J H, Hackworth D T 1995 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **5** 278
- [14] Reder F, Brown S C 1954 *Phys. Rev.* **95** 885
- [15] Zheng N, Yu K K, Liu G Q, Zhang G J 2009 *Adv. Technol. Electr. Eng. Energy* **28** 33 (in Chinese) [郑楠, 于开坤, 刘国清, 张冠军 2009 电工电能新技术 **28** 33]
- [16] Yang J J 1983 *Gas Discharge* (Beijing: Science Press) p183, 115 (in Chinese) [杨津基 1983 气体放电 (北京: 科学出版社) 第 183, 115 页]
- [17] Xu X J, Zhu D C 1996 *Gas Discharge Physics* (Shanghai: Fudan University Press) pp106–108 (in Chinese) [徐学基, 诸定昌 1996 气体放电物理 (上海: 复旦大学出版社) 第 106—108 页]



# Experimental study on breakdown voltage between parallel plates in high-pressure helium\*

Yue Shan Liu Xing-Nan<sup>†</sup> Shi Zhen-Gang

( The Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety, Ministry of Education, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 6 October 2014; revised manuscript received 30 November 2014 )

## Abstract

To obtain the base data for insulation design of the electrical equipment used in the high temperature gas cooled reactor nuclear power plant, an experimental apparatus for testing helium insulation property under high pressure is designed. The apparatus is composed of a pressure vessel, a heating system, an electrical penetration assembly, a vacuum pump, a pressure gauge, a safety pressure valve, a release valve, and a helium bottle. The highest pressure that the vessel can hold is 10 MPa, and in this experiment the safety pressure valve is set to be 8 MPa. The temperature inside the vessel can be heated to 200 °C by a heating system. The resolution of the pressure gauge is 1 kPa, and the highest pressure that the gauge can measure is 9.999 MPa. The purity of the helium used in this experiment is 99.999%. The breakdown voltage of helium gas between two parallel plane electrodes is measured by the apparatus under the conditions of 15–20 °C and 0.1–7 MPa. The electrodes are made of copper, and their diameters are both 100 mm. The distances between the parallel electrodes are 0.25 mm, 0.35 mm and 0.5 mm respectively. The error of the distance is less than 0.01 mm. The DC voltage between the electrodes is supplied by GPI-735A, a withstand voltage and insulation tester produced by GW Instek corporation. The voltage increases slowly from 0 to 6000 V (highest), until the current more than 0.1 mA is detected. The highest voltage recorded is the breakdown voltage. With other researchers' experimental data under low pressure, the Paschen equation for helium gas is obtained. It is found that the calculated breakdown voltage for this equation is larger than the experimental result in this paper under high pressure. And the deviation becomes larger as the product of the pressure and the distance increases. Firstly, it is because the ionization coefficient  $\gamma$  in the equation is influenced by the gas pressure. Secondly, because of larger areas of electrodes, worse surface roughness and less electrode distance, under the same product of the pressure and the distance, the breakdown voltages in this paper are less than the ones in other researches, which are the base of the calculated values. The Paschen equation is modified to accord with the values under high pressure. Under high pressure, the Paschen curve is almost a straight line. A linear equation is presented for calculating the breakdown voltages of helium gas under 0.1–7 MPa. And an equation is presented to calculate the slope of the line. The slope is influenced by the collision cross section, the ionization energy and the temperature of the helium. The experimental data also show that the breakdown voltage of helium is far lower than that of air under the same condition. As the pressure increases, the breakdown voltage of helium increases. The value of helium under 3 MPa is equal to the one of air under atmosphere, and the value of helium under 7 MPa is about twice as high as that of helium under 3 MPa. So, it is possible to replace some experiments or tests under high pressure helium by the same operations under atmospheric air.

**Keywords:** helium, Paschen law, breakdown voltage, high pressure

**PACS:** 51.50.+v, 52.80.–s, 52.80.Dy, 52.80.Tn

**DOI:** 10.7498/aps.64.105101

\* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. ZX069).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liuxingnan@tsinghua.edu.cn