

# 低温电工绝缘



IWEN DIANGONG JUEYUAN

1

工业部桂林电器科学研究所

机械工业出版社

本书系根据国外超导电工绝缘、低温电缆和宇航系统用低温电工绝缘材料的有关资料，结合国内的实际情况编译而成。主要包括：电工绝缘材料在低温下的特性及其变化规律，低温电工绝缘材料在超导磁体、超导电机和电器、超导和低温电缆中的应用，以及低温电工绝缘材料的测量方法。

本书可供从事低温工程设计和低温电工绝缘研究的工程技术人员及有关大专院校师生参考。

### 低温电工绝缘

机械工业部桂林电器科学研究所

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张  $6 \frac{5}{8}$ ·字数 143 千字

1983年7月北京第一版·1983年7月北京第一次印刷

印数 0,001—6,300·定价 0.86 元

\*

统一书号：15033·5521

## 前 言

超导技术是一项新技术，它在电工中的应用日益发展，已在世界范围引起重视。在发展超导电工技术的过程中，电绝缘材料是不可避免要遇到和解决的问题之一，故近年来对低温电工绝缘材料及其性能的研究，不断增多和深入。鉴于目前系统介绍这方面的书尚不多见，我们编译此书，以供有关人员参考。

书中引用的数据大部分来自国外文献，我们虽作了一些比较选择，但因有关数据的分散性较大，请读者在选用这些数据时注意。

本书由吴炳川编译，由张书缙等同志校阅。全书承中国科学院电工所四室作了仔细审阅，该室的陈浩树、韩燕生、易昌炼和余运佳等同志还对第八章的磁体部分作了修改。还有一些同志为我们提供了有价值的参考资料，在此谨致深切的谢意。

---

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 低温气体 .....       | 1  |
| 一、气体击穿的基本过程 .....    | 2  |
| 二、均匀电场下的击穿特性 .....   | 3  |
| (一) 低温下的巴申定律 .....   | 3  |
| (二) 击穿电压与温度的关系 ..... | 6  |
| (三) 其他影响因素 .....     | 8  |
| 三、不均匀电场下的击穿特性 .....  | 10 |
| 四、真空的击穿特性 .....      | 13 |
| 第二章 低温液体 .....       | 19 |
| 一、物理性能 .....         | 19 |
| 二、电性能 .....          | 22 |
| (一) 介电常数 .....       | 22 |
| (二) 介质损耗 .....       | 24 |
| (三) 击穿特性 .....       | 28 |
| 三、击穿机理 .....         | 41 |
| (一) 气泡理论 .....       | 42 |
| (二) 电子理论 .....       | 44 |
| (三) 悬浮质粒理论 .....     | 44 |
| 第三章 超导绕组线绝缘 .....    | 47 |
| 一、绝缘材料 .....         | 47 |
| (一) 漆包线漆 .....       | 47 |
| (二) 纤维材料 .....       | 49 |
| (三) 薄膜材料 .....       | 50 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 二、绝缘工艺 .....            | 51 |
| (一) 漆包绝缘线的制造 .....      | 51 |
| (二) 纤维和带包绝缘线的制造 .....   | 51 |
| (三) 氧化绝缘线的制造 .....      | 53 |
| (四) 其他绝缘方法 .....        | 54 |
| 三、绝缘线的性能 .....          | 55 |
| (一) 可挠性 .....           | 55 |
| (二) 介质损耗 .....          | 57 |
| (三) 击穿电压 .....          | 57 |
| (四) 运行条件对绝缘线性能的影响 ..... | 62 |
| 第四章 低温电绝缘漆、胶和粘合剂 .....  | 65 |
| 一、浸渍漆与浇注胶 .....         | 65 |
| (一) 性能要求 .....          | 65 |
| (二) 环氧漆与胶的组份选择 .....    | 66 |
| (三) 环氧漆与胶的低温性能 .....    | 67 |
| 二、低温粘合剂 .....           | 77 |
| (一) 性能要求 .....          | 77 |
| (二) 品种与性能 .....         | 78 |
| (三) 提高粘结强度的方法 .....     | 83 |
| 第五章 电工薄膜的低温性能 .....     | 86 |
| 一、热性能 .....             | 86 |
| (一) 热收缩率 .....          | 86 |
| (二) 热导率 .....           | 87 |
| (三) 比热 .....            | 89 |
| 二、机械性能 .....            | 90 |
| 三、电性能 .....             | 94 |
| (一) 介电常数 .....          | 94 |
| (二) 体积电阻率 .....         | 96 |
| (三) 介质损耗 .....          | 96 |

## VI

|                        |     |
|------------------------|-----|
| (四) 击穿特性 .....         | 101 |
| (五) 电老化特性 .....        | 106 |
| 四、低温用电工薄膜的选择 .....     | 109 |
| 第六章 层压制品的低温性能 .....    | 113 |
| 一、热性能 .....            | 113 |
| (一) 热收缩率 .....         | 113 |
| (二) 比热 .....           | 116 |
| (三) 热导率 .....          | 117 |
| 二、机械性能 .....           | 120 |
| (一) 抗张强度与弹性模量 .....    | 120 |
| (二) 抗弯强度与弯曲模量 .....    | 126 |
| (三) 抗压强度与压缩模量 .....    | 129 |
| (四) 抗剪强度 .....         | 132 |
| (五) 极限拉伸应变 .....       | 134 |
| (六) 疲劳强度 .....         | 135 |
| 三、电性能 .....            | 137 |
| 四、低温用层压制品的选择 .....     | 137 |
| 第七章 无机绝缘材料 .....       | 143 |
| 一、玻璃与石英 .....          | 143 |
| 二、陶瓷 .....             | 147 |
| (一) 氧化铝陶瓷 .....        | 148 |
| (二) 钽酸铅锰陶瓷 .....       | 148 |
| (三) 高介陶瓷 .....         | 149 |
| 三、云母玻璃 .....           | 150 |
| 第八章 低温电工绝缘结构 .....     | 156 |
| 一、超导磁体 .....           | 156 |
| (一) 超导磁体对绝缘材料的要求 ..... | 156 |
| (二) 超导磁体用的绝缘材料 .....   | 157 |
| (三) 超导磁体的绝缘结构 .....    | 158 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| (四) 超导磁体制造中的若干绝缘问题 ..... | 162 |
| 二、超导电机与变压器 .....         | 163 |
| (一) 超导交流发电机 .....        | 164 |
| (二) 超导直流电机 .....         | 170 |
| (三) 超导变压器 .....          | 170 |
| 三、超导电力电缆与低温电力电缆 .....    | 171 |
| (一) 对绝缘材料的要求 .....       | 171 |
| (二) 超导电缆与低温电缆的绝缘方式 ..... | 172 |
| (三) 超导电缆与低温电缆的发展前景 ..... | 178 |
| 第九章 低温电工绝缘试验方法 .....     | 181 |
| 一、介质损耗试验 .....           | 181 |
| (一) 量热法 .....            | 182 |
| (二) 电桥法 .....            | 184 |
| (三) 超导空腔谐振法 .....        | 188 |
| 二、击穿试验 .....             | 189 |
| (一) 低温氮气的击穿试验例 .....     | 189 |
| (二) 低温液体的击穿试验例 .....     | 191 |
| (三) 固体绝缘材料的低温击穿试验例 ..... | 192 |
| (四) 超导线绝缘的击穿试验例 .....    | 193 |
| 三、热性能试验 .....            | 195 |
| (一) 导热系数测量 .....         | 195 |
| (二) 比热测量 .....           | 198 |
| (三) 热收缩率测量 .....         | 200 |
| 附录 .....                 | 203 |

# 第一章 低温气体

低温一般定义为永久气体（例如氧气和氮气）在大气压下变为液体的温度。由于液氧和液氮的沸点分别为 90 K 和 77 K，故通常把低于 100 K 的温度算作低温〔1〕。低温气体就是指在此温度下以气态存在的物质。在这种条件下以气态存在的物质为数不多，只有氦气、氢气、氖气、氮气、一氧化碳、氙气、氧气和某些有机化合物等。对低温电工设备来说，实际感兴趣的是氦气、氢气和氮气。

氦气是一种稀有气体，最先是太阳光谱中发现的，以后才在地球上找到它。空气中氦气的含量非常低，以体积计只占 0.0005%。采用现有的分离技术从空气中分离它，在经济上还不合算，所以现在主要是从天然气中分离制取。空气中氮气和氢气的含量较丰富，分别为 78.03% 和 0.01%，这两种气体一般是直接从液化空气中分离制备。

氦是单原子结构，为原子气体；氢和氮是双原子结构，

表1-1 低温气体的某些物理性能〔2〕〔3〕〔4〕

| 性 能 \ 气 体                   | 氦气(4.2K)           | 氢气(20K) | 氮气(77K)             |
|-----------------------------|--------------------|---------|---------------------|
| 热导率, mW/cm·K                | $1 \times 10^{-1}$ | 3.22    | 1.829(cal/cm·sec·K) |
| 热容量, mJ/g·K                 | $6 \times 10^3$    | 2.43    | 0.249               |
| 密度, g/cm <sup>3</sup>       | $8 \times 10^{-3}$ | 0.00127 | 0.00420             |
| 热扩散速度, cm <sup>2</sup> /sec | $2 \times 10^{-3}$ | —       | —                   |

为分子气体。在低温下，它们的某些物理性能如表 1-1〔2〕〔3〕〔4〕。

从常温气体绝缘的经验知道，对气体介质，击穿强度是最重要的性能，是气体绝缘的主要限制因素。因此，下面着重对气体，特别是氦气、氢气和氮气等，在低温下的击穿特性及其影响因素进行讨论。

## 一、气体击穿的基本过程

在讨论低温气体的击穿行为之前，先简单介绍一下气体击穿的基本过程。

气体击穿是由电子碰撞游离产生的电子崩发展为某种形式的自持放电 (self-sustaining discharge) 的复杂过程〔5〕。

这里，我们以两平板电极间的气体放电为例进行说明。在外来因素作用下，电子从阴极释出，它们在电压作用下沿电场方向向阳极迁移，电子在迁移过程中从电场获得附加能量，并被加速，当这种加速的电子与中性气体分子发生非弹性碰撞时，将能量转移给分子，使之电离成正离子和电子，这一过程通常称为游离或  $\alpha$ -过程。游离产生的电子在电场的作用下，进行新的飞越。在飞越过程中重新积累能量，再和中性分子发生碰撞电离，这样连续发展，在气体间隙中形成电子崩和离子崩，它们分别向符号相反的充电电极发展，这时，间隙中的电流迅速增大，但尚不能无限

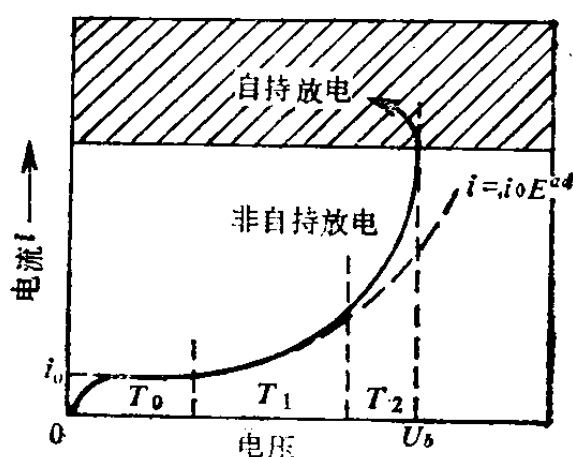


图1-1 气体放电电流与电压的关系〔5〕

增大，如图 1-1 的  $T_1 \sim T_2$  段所示。只有当发生二次电离（低密度小间隙）或者光游离（高密度大间隙）使产生足够的电子，也就是满足自持放电条件时，气体才迅速失去绝缘性能和发生自持放电，即气体间隙击穿。气体击穿时的电压称为击穿电压，其值除取决于气体的种类外，还受其他因素的影响。

## 二、均匀电场下的击穿特性

### （一）低温下的巴申定律

在均匀场中，如果温度和压力固定，气体的击穿电压  $U_b$  随电极距离  $d$  增大而升高，因为电极距离增大，电子须在更高的电压下才能获得足够使中性分子电离的能量，所以，气体只有在更高的电压下才能发生击穿。而如果电极距离固定，当气体压力很低时，单位体积中的分子数很少，缺乏足够的分子与电子发生碰撞电离，故间隙有较高的击穿电压。随着压力增大，单位体积中的分子数增多，电子和分子的碰撞次数增加，间隙的击穿电压下降。当气体压力增至一定值后，单位长度内分子碰撞次数虽进一步增加，但电子的平均自由行程开始随压力升高而变小，使电子在飞越中积累的能量下降。由于压力增大使碰撞电离的几率下降比游离次数增加来得快，故间隙的击穿电压随气体压力增大下降至最小值后又逐渐升高。对此，巴申首先在 1889 年从实验中发现并得出，气体的击穿电压  $U_b$  是气体压力（ $P$ ）和电极距离（ $d$ ）的乘积的函数，即  $U_b = f(Pd)$ ，后来，人们就把这一实验规律称为巴申定律。更确切地说，气体的击穿电压是气体密度和电极距离乘积的函数，因为压力受温度的影响。

在常温下，巴申定律已为许多气体的击穿特性所证实，

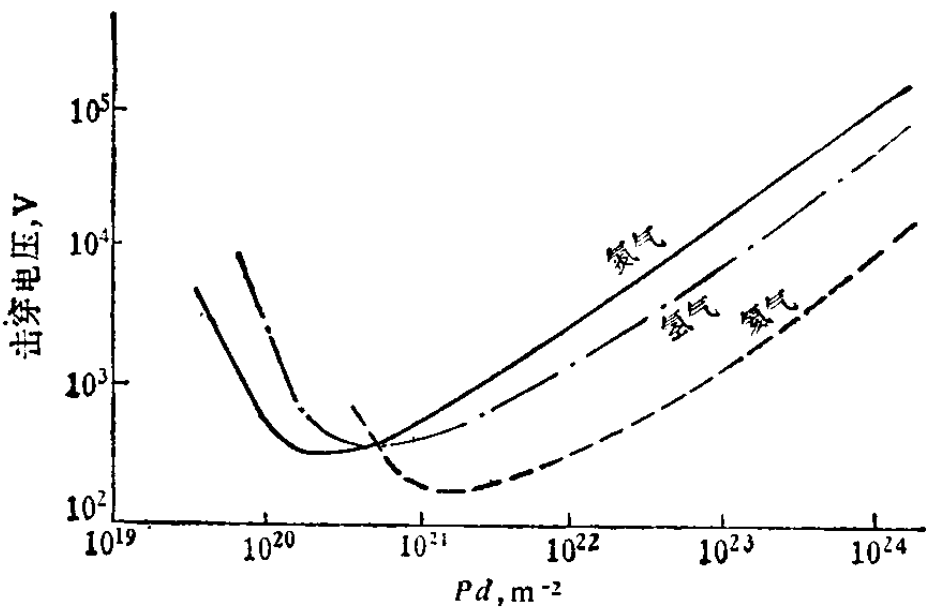


图1-2 氩气、氢气和氮气的巴申曲线〔1〕

图 1-2 是氩气、氢气和氮气在常温下的巴申曲线〔1〕。

在低温下，这些气体的击穿电压是否服从巴申定律，这是研究低温气体所关心的问题之一。从表 1-2 汇总的文献数据清楚看到〔6〕〔7〕，在表中的实验范围内，氩气、氢气和氮气的击穿特性在直至液化前的低温下都服从巴申定律。

在巴申定律成立的范围内，气体放电机理和常温时一样，

表1-2 巴申定律的适用范围·(均匀电场)〔8〕〔7〕

| 气 体 | 巴 申 定 律 | 实 验 范 围                                                                              |
|-----|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 空气  | 成立      | $\delta d < 12$ 温度293~-143K<br>$\delta d < 15$ 温度293~-113K                           |
| 氮气  | 成立      | $\delta d < 15$ 温度293~-193K                                                          |
| 氦气  | 成立      | $\delta d < 65$ 温度<20K<br>$E < 150\text{kV/cm}$ 温度<10K<br>$\delta < 20\text{kg/m}^3$ |
| 氢气  | 成立      | $p = 1\sim 5\text{bar}$ , $d = 0.4\sim 12.0\text{mm}$                                |

注：  $\delta$  ——密度     $d$  ——电极距离     $E$  ——击穿场强

汤申特碰撞游离起着支配作用，击穿电压随密度（或压力）和电极距离增大而升高。对于氦气，当场强小于  $15\text{kV/mm}$  时，击穿电压随密度呈指数上升。当密度小于  $20\text{kg/cm}^3$  时，氦气的击穿电压与  $\rho^{0.9}$  成正比，与  $d^{0.1}$  成反比，图 1-3 和图 1-4 分别为氦气的击穿电压与密度和电极距离的关系〔8〕〔9〕。

压力增大时，氢气和氮气的击穿电压也出现类似的现象，但氢气所受的影响比氮气的大，例如压力从  $1\text{bar}$ （巴）增至  $5\text{bar}$ （巴），氢气的击穿电压升高 2 倍，而氮气的只升高 30%。

在常温下，高压气体的击穿行为偏离巴申定律，在低温下，也观察到这种现象。当氦气的密度大于  $15\text{kg/m}^3$  时，其击穿行为开始偏离巴申定律，如图 1-3 中段所示，击穿强度随密度升高的速度逐渐变慢。当密度升至  $70\text{kg/m}^3$  时，击穿强度趋于稳定。但当密度进一步升高时，击穿强度复又

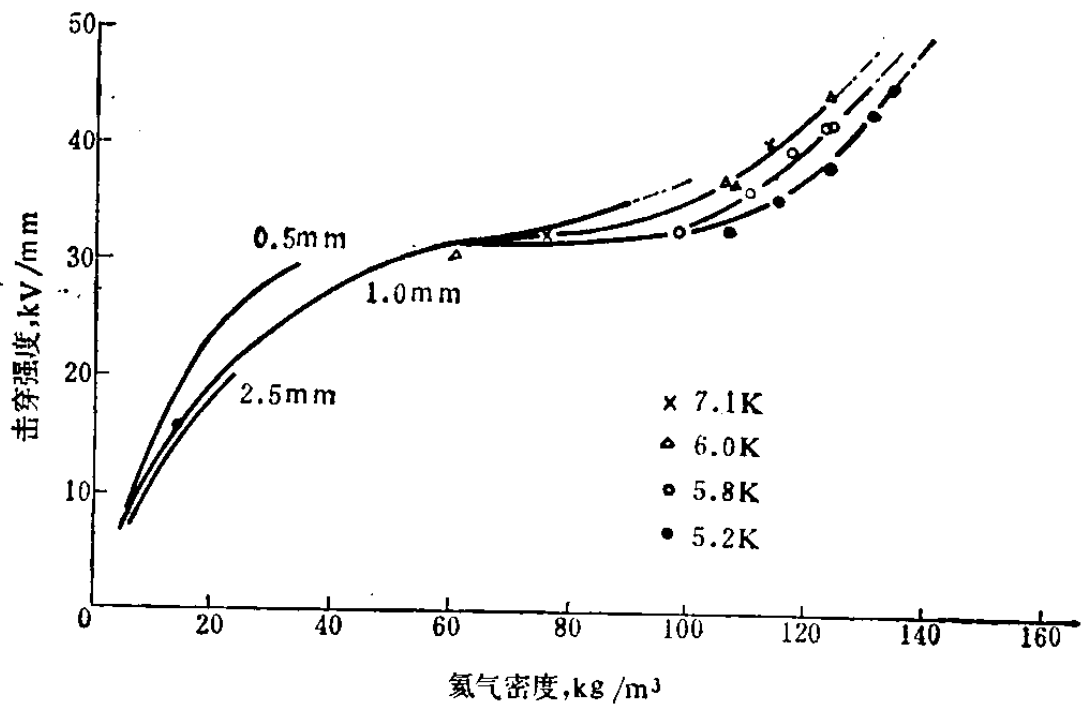


图1-3 氦气的击穿强度与密度的关系〔8〕  
( $\phi 50$ 黄铜电极,  $d = 1.0\text{mm}$ )

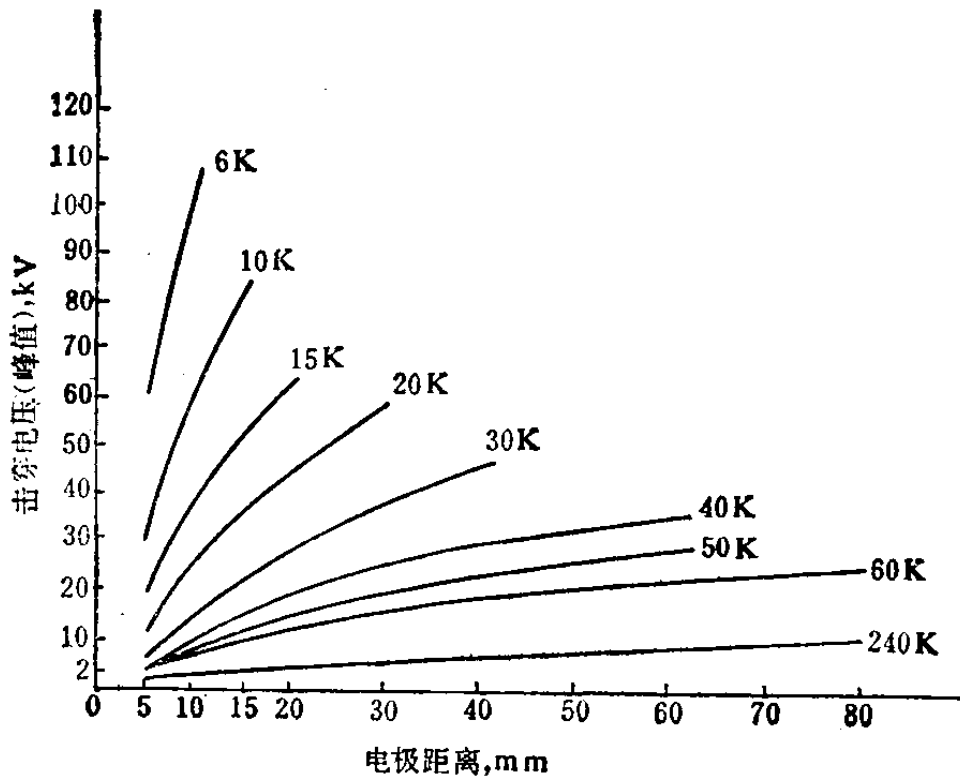


图1-4 氮气的击穿电压与电极距离的关系<sup>[9]</sup>

升高，表现出与其他高压气体不同的属性。当氮气的密度超过  $100\text{kg/m}^3$  时，击穿强度急速上升，如图 1-3 的右段所示。R. J. Meats 认为，这是由于氮原子被电子局部推斥，形成半径  $10^{-9}\text{m}$  的臃气泡或局部稀薄气体区，使电子的迁移率大大下降而阻滞了电子崩发展的结果。也有人提出，可能是形成负离子（或原子聚集体）或者存在小固体质粒，使发生类似于液体介质击穿等其他机理<sup>[10]</sup>。但从目前的实验事实还不能证实上述那种机理是正确的。在高密度的氢气和氮气中也观察到击穿电压比巴申击穿值低。

### （二）击穿电压与温度的关系

对气体的击穿电压和温度的关系的研究，不只是理论兴趣，而且具有实际的意义，这一方面是由于超导材料不断在向高临界温度发展，另一方面是可以根据这种研究结果，从常温下气体的击穿行为来预测低温下的击穿特性。图 1-5

是氦气和氮气的交流击穿电压与温度的关系<sup>[11]</sup>。由图可见，它们的击穿电压随温度下降而升高，例如氦气从室温降至4.4 K时，击穿电压至少升高60倍，这是由于气体密度随温度下降而增大的结果。实际上，这种变化在不同温区是不一样的。J. Gerhold发现，在恒定的密度和电极距离下，氦气的击穿电压在10~20 K之间出现最小值。如后所述，电压类型对这种变化也有影响。由于氦气在室温和低温下的击穿电压相差很大，在设计低温电工设备，特别是在设计室温和低温之间的高压接头时，要注意这一实验事实。

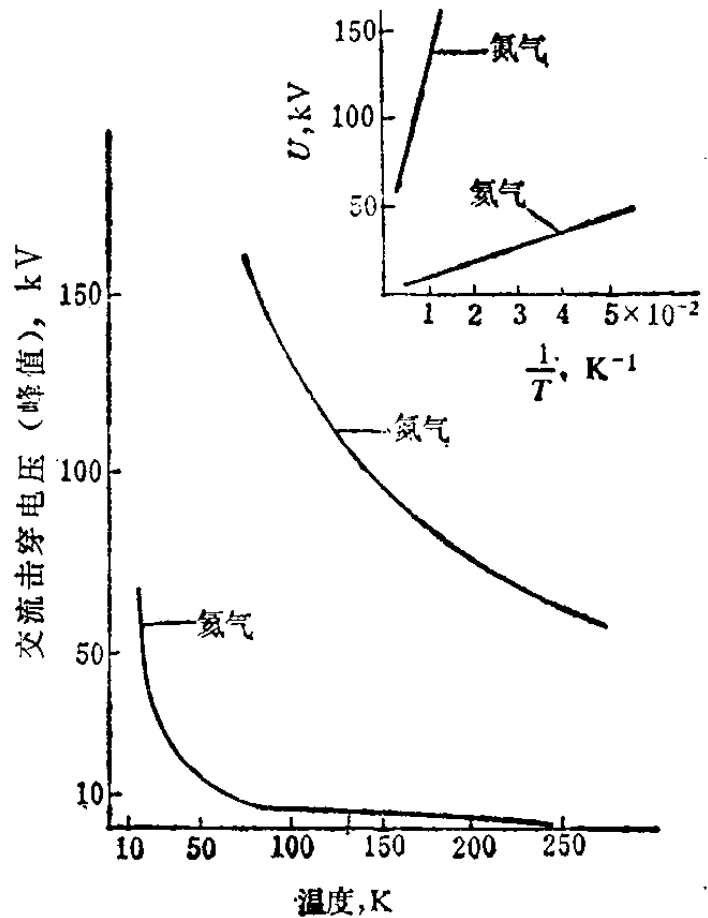


图1-5 氦气击穿电压与温度的关系<sup>[11]</sup>  
(50Hz交流电压，电极距离20mm)

从图 1-5 还看到，在相当宽的温度范围内，氦气的击穿电压比氮气的低得多，但在接近沸点时，两者的击穿电压趋于相同，对这种现象，如果分析一下这些气体的分子结构及其在低温下的物理状态变化，便可得到解释。

如前所述，氦是单原子结构，它和电子发生非弹性碰撞时的行为与氢和氮等分子气体不同。在氦气中，只有当电子获得至少和氦原子的电离能或激发能相当的能量时才有可

能发生非弹性碰撞。因此，电子在几次弹性碰撞过程中可积累足够高的能量，使氦气在小的  $E\bar{\lambda}$  值时就发生电离。在氢气和氮气中，电子和气体分子发生非弹性碰撞时，可将在一次飞越过程中得到的很小的能量，转移给气体分子，使其原子激发，这意味着只

有在足够高的电场下电子作一次飞越才能积累使气体分子电离所需的能量，也就是说，分子气体只有在比单原子气体高的  $E\bar{\lambda}$  条件下才会发生电离。图 1-6 是氦气、氢气和氮气的  $\alpha\bar{\lambda}$  与  $E\bar{\lambda}$  的关

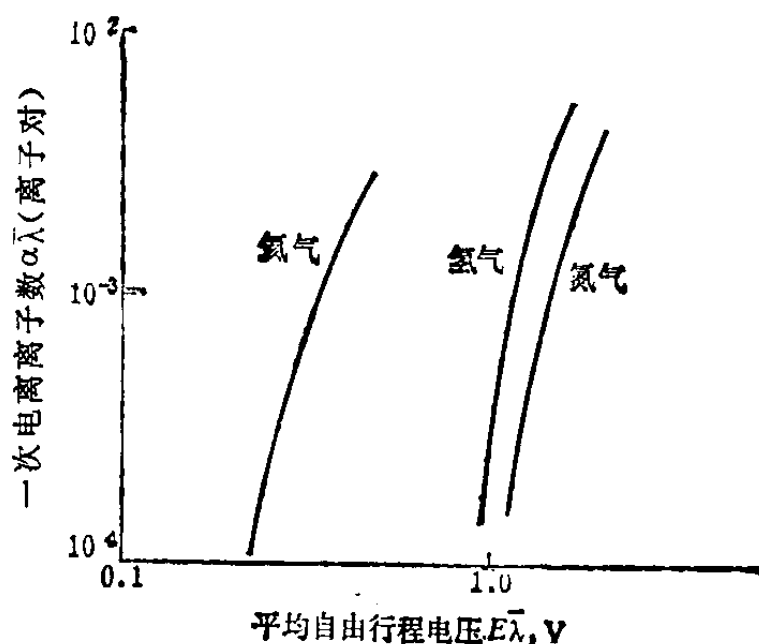


图1-6  $\alpha\bar{\lambda}$  与  $E\bar{\lambda}$  的关系<sup>[12]</sup>

系<sup>[12]</sup>，很明显，氦气的  $\alpha\bar{\lambda}$  值高得多。从气体放电理论得知， $\alpha\bar{\lambda}$  值越高，其击穿电压越低，例如，室温时氦气击穿电压仅为氮气的 1/5。但是，在低温下，氦处在液态的温度范围比氮的宽，在从室温降至液化温度的过程中，氦气的密度增加比氮气的快，特别是在 4.4~4.2 K 之间，氦气的密度增加更快，使氦气的击穿电压急剧上升，故这两种气体在其沸点附近的击穿电压大致在同一数量级<sup>[13]</sup>。当温度从沸点进一步降低时，在氦气中观察到击穿电压随密度线性升高，服从巴申定律。

### (三) 其他影响因素

除上述影响因素外，电压类型、辐射和电极表面状态对

低温气体的击穿电压也有影响，下面主要是在氦气中观察到的结果。

1. 电压类型

低温氦气和氮气的交流击穿电压与脉冲击穿电压示于图 1-7，脉冲击穿电压较高，但与后述低温液体的脉冲击穿电压相比，脉冲系数较小，应当指出，在不同温度和压力下，电压类型的影响是不同的〔14〕。

2. 辐射

Follou 在球电极中嵌入镭丝研究辐射对氦气击穿电压的影响时发现，在低温下，辐射对氦气的击穿电压有显著影响，由图1-8

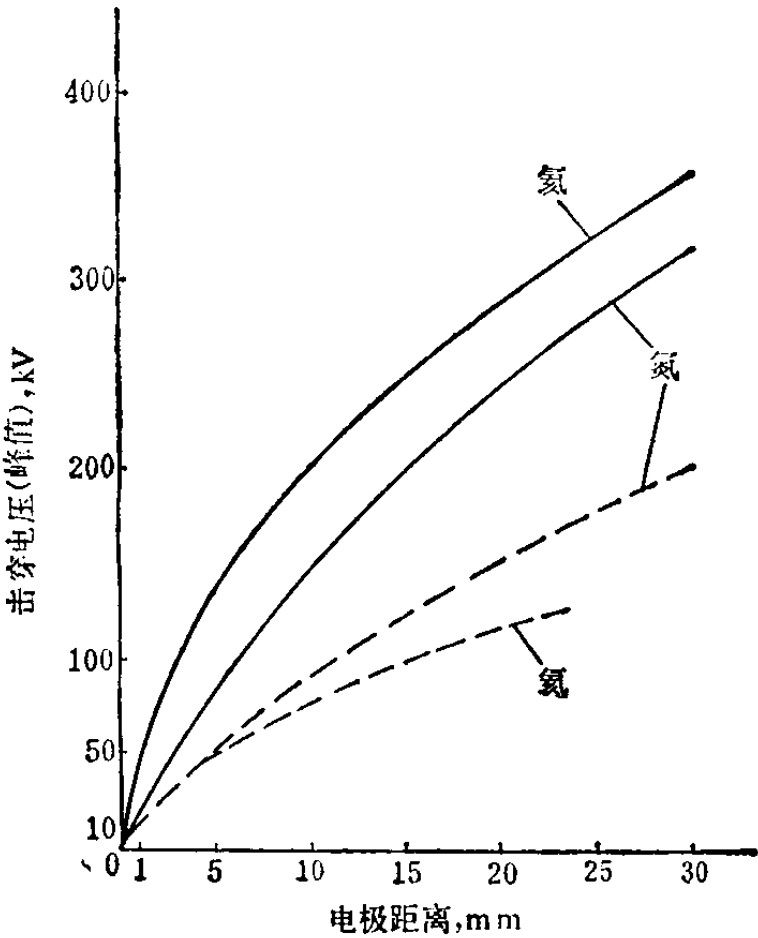


图1-7 氦气和氮气的击穿电压(沸点附近)  
----50Hz交流电压    —1/50μs脉冲电压

可见〔15〕，辐射后氦气的击穿电压约比辐射前的低 35%，比其他气体在室温下观察到的辐射效应明显。这可能是由于正离子的空间电荷效应增强所致。另外，在 4.4K 以下，辐射后氦气击穿电压随温度下降而升高的速度比辐射前快。

3. 电极表面状态

电极经仔细抛光，氦气间隙的击穿电压升高，重现性较

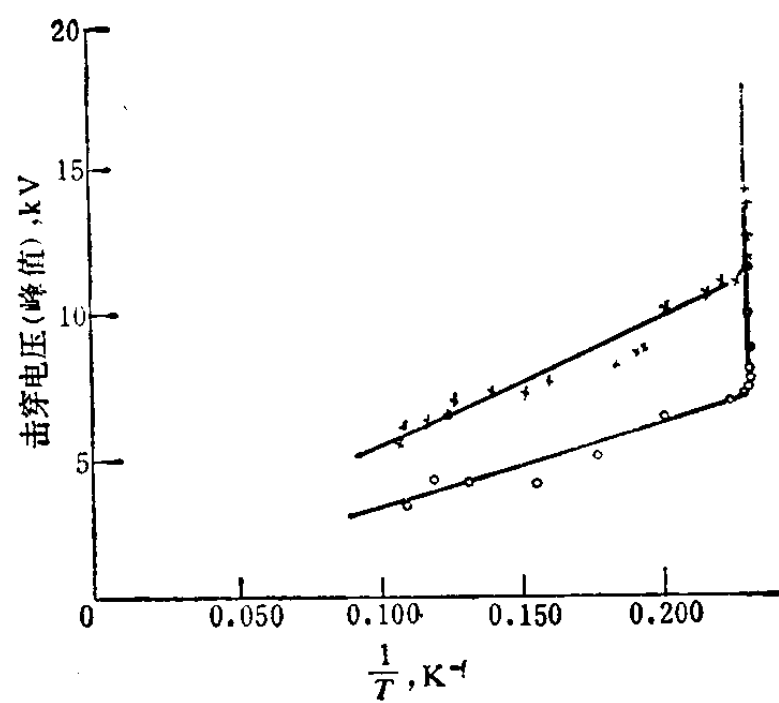


图1-8 低温下辐射对氦气击穿电压的影响 [15]  
(均匀电场, 电极距离0.7mm)  
。辐射间隙      + 未辐射间隙

好。电极经火花放电处理后，测得的氦气击穿电压也较高，这说明，采用某种方法（例如在低压氢气中对导体进行火花放电处理）来提高低温气体绝缘的电气强度，对超导或低温电缆似乎是必要的。实验还发现，铌电极在空气中暴露后，对氦气击穿电压的影响很小，这是由于铌表面容易形成一层稳定的氧化层，所以，铌可以考虑用作超导电缆的导体表层。

三、不均匀电场下的击穿特性

在不均匀电场中，氦气的击穿电压出现明显的极性效应，从图 1-9 可见 [15]，电极距离越大，温度越低，正负针电极击穿电压的比值越大，例如，在 5K、7mm 电极距离时，比值高达 5。这种极性效应与电负性气体和含杂质氮气相反。在正针电极时，氦气的击穿电压随电极距离增大而有规律地升高，这种现象与正针尖周围形成空间电荷有关，因为击