

真空断路器与开关

(日) 电器学会东京分部

国营西南向阳机械厂

1976

毛主席语录

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

就知识的总体来说，无论何种知识都是不能离开直接经验的，任何知识的来源，在于人的肉体感官对客观外界的感觉，否认亲自参加变革现实的实践，他就不是唯物论者。

内 容 提 要

本书系日本电气学会东京分部多位工程技术人员所编写，由该学会1971年出版。

书中从日本研制真空开关电器的实况出发，分章简要地叙述了真空开关电器的基本理论及应用，深刻地反映出真空开关电器的全貌。

本书适合于从事真空开关电器专业的工程设计、技术人员和研究人员阅读，以及大专院校师生作为教学参考。

真空スイッチング装置・開閉器

(日) 電気学会東京支部

昭和46

*

真空断路器与开关

国营西南向阳机械厂出版 (1976年)

云南新华印刷厂印刷 定价 1.50

出 版 前 言

在毛主席革命路线光辉指引下，在全国亿万军民攻读无产阶级专政理论的热潮中，国防科研与生产取得了很大的成绩，遵照毛主席“洋为中用”的伟大教导，我们编译出版了日本电气学会东京分部编著的《真空断路器与开关》一书。本书从日本研制真空开关电器的实况出发，系统地叙述了真空开关电器的基本理论及应用，确对我国真空开关电器的研制有一定参考价值，同时对船舶电器真空化也有一定的意义。由于有关真空开关电器的书籍在国内尚未出版过，而且有关真空开关电器的资料大多数散见于一些科技文献之中，因此，本书的问世将对我国大规模研制真空开关电器的工作有所裨益。

本书的出版得到有关领导同志的支持与帮助，本书初稿经科学出版社第一编辑室有关同志审阅，对此我们深表由衷的谢意。

由于我们的水平有限，书中错误之处在所难免，敬望读者批评指正。

国营西南向阳机械厂情报室

1976年1月10日

真空断路器与开关

(日) 电气学会东京分部

中野義映 (第一章)	森官 脩 (2·1节)
高砂常義 (2·2节)	中西邦夫 (3·3节)
尾崎勇造 (3·4节)	难波江章 (4·1节)
齐騰 修 (5·5—5·7节)	信崎泰秀 (5·1—5·4节) 合著
梅谷英二 (6·2节, 第七章)	尾崎勇造 (6·1节)
说田義辉 (6·2节, 第七章)	松田朝夫 (6·5节)
廣瀬健吾 (6·3·2节)	川添雄司 (6·4节)

译者: 汪元美

技术校对: 原幼民

国营西南向阳机械厂

1 9 7 6

目 录

第一章 概 述

1.1	特点	(1)
1.2	历史	(1)
1.3	真空电弧的开断特性	(3)
1.4	开断时的截流现象与过电压	(3)
1.5	用途与未来	(5)

第二章 真空中的放电现象与绝缘强度

2.1	真空电弧的一般性质	(7)
2.1.1	小电流域的性质	(7)
2.1.2	大电流真空电弧	(15)
2.1.3	大电流域的电弧电压特性	(16)
2.1.4	弧柱分析举例	(18)
2.2	真空中的绝缘强度	(21)
2.2.1	绝缘击穿的机理	(21)
2.2.2	电极的影响	(23)
2.2.3	间隙长度的影响	(25)
2.2.4	压力的影响	(26)
2.2.5	电压波形的影响	(26)

第三章 熄弧与截流现象

3.1	熄弧现象	(28)
3.1.1	熄弧与电弧的重燃	(28)
3.1.2	开断极限特性	(28)
3.1.3	电极形状等因素的影响	(30)
3.1.4	屏蔽罩的影响	(31)
3.1.5	磁场的影响	(32)
3.1.6	电弧剩余电流	(33)
3.2	绝缘恢复特性	(35)
3.2.1	各种绝缘材料与绝缘恢复特性的关系	(35)

3.2.2	绝缘强度的恢复	(37)
3.2.3	电流强迫开断后的绝缘恢复特性	(40)
3.3	截流现象	(40)
3.3.1	真空断路器截流现象与空气断路器截流现象的区别	(40)
3.3.2	真空电弧截流理论的分析	(41)
3.3.3	电极材料的影响	(43)
3.3.4	回路常数的影响	(46)
3.3.5	其他诸因素的影响	(47)
3.4	截流值	(50)
3.4.1	有关截流的测量数据	(50)
3.4.2	高频电弧的熄灭	(53)

第四章 构造

4.1	真空外壳的构造	(54)
4.1.1	触头材料	(54)
4.1.2	电极部分的构造	(57)
4.1.3	真空容器	(60)
4.1.4	电弧屏蔽罩	(62)
4.1.5	波纹管	(63)
4.1.6	真空外壳与真空技术的关系	(64)
4.2	操作机构	(65)
4.2.1	真空开关的种类、定额与重量	(65)
4.2.2	7.2/3.6KV 级真空断路器	(67)
4.2.3	24KV 级真空断路器	(69)
4.2.4	真空开关的构造	(71)
4.2.5	高压真空接触器的构造	(72)

第五章 性能

5.1	定额、开闭特性、开断特性、耐流特性①	(75)
5.1.1	定额	(75)
5.2	开闭特性	(76)
5.2.1	合闸时间	(77)
5.2.2	分闸时间②	(77)
5.2.3	加在电极上的压力	(77)
5.2.4	过行程	(78)

译注① 原书误为“电波耐量”，应为“电流耐量”，译为“耐流特性”。

译注② 原书误为“しや断特性”，应为“しや断时间”，译为“分闸时间”。

5.2.5	极间距离	(78)
5.3	开断特性	(78)
5.3.1	伏安特性	(78)
5.3.2	小电流开断特性	(79)
5.3.3	大电流开断特性	(81)
5.3.4	其他的开断特性	(82)
5.4	耐流特性	(83)
5.4.1	合闸电流容量	(83)
5.4.2	短时电流容量	(83)
5.4.3	通电电流容量	(84)
5.5	耐压特性	(85)
5.5.1	引言	(85)
5.5.2	耐压特性随机械负荷的变化	(85)
5.5.3	耐压特性随电负载的变化	(86)
5.6	寿命特性	(90)
5.6.1	电气开闭寿命	(90)
5.6.2	机械开闭寿命	(93)
5.7	其他问题	(95)
5.7.1	真空度下降时的开断特性	(95)
5.7.2	在大气压下充电电流的开断特性	(96)
5.7.3	真空外壳的机械强度	(98)

第六章 应 用

6.1	应用时的注意事项	(101)
6.1.1	应用程序	(101)
6.1.2	开闭电涌	(102)
6.2	在电力系统中的应用	(113)
6.2.1	应用理由	(113)
6.2.2	应用与型式试验	(114)
6.2.3	应用举例	(114)
6.2.4	说明书	(116)
6.3	在工业中的应用	(119)
6.3.1	真空开关电器在高压配电设备中的应用	(119)
6.3.2	机器用真空断路器与接触器的种类、规格及现用产品的性能	(129)
6.3.3	机器用真空断路器与接触器的特性及实际应用的趋势	(132)
6.3.4	机器用真空断路器与接触器使用注意事项	(138)
6.4	在铁路机车中的应用	(140)
6.4.1	机车用真空断路器的特性	(140)

6.4.2 应用举例.....	(142)
6.4.3 使用成绩.....	(145)

第七章 真空断路器与开关的维护检修

7.1 序 言.....	(146)
7.2 跋.....	(150)

产品介绍 (略)

第一章 概 述

交流电路可以在真空容器内开断。电流自然过零时的去离子作用是由于高真空中的电子扩散，其熄弧原理与众不同，显示出其优良的开断性能。我们把真空外壳内的动、静两电极封装在排气后的容器内，其真空度达 10^{-6} — $10^{-8}mmHg$ 柱。这种结构简单的装置就是所谓的真空开关。

一般来说，通过波纹管传递驱动力可以使动电极在真空外移动。由于电流开断时电弧的作用会使金属电极气化并产生金属蒸气，金属蒸气蒸镀在外壳的内壁，引起所谓“溅射现象”，将会使极间耐压降低，为防止这一点，须加上一电弧屏蔽罩。

如上述，外壳内的初始气压在小电流开断时会高达 $10^{-4}mmHg$ 柱，一般认为不会引起真空性能的恶化。在大电流开断的情况下，大电流等离子区的（游离和去游离）过程会持续数毫秒至数十毫秒，而在数秒钟内，由于过渡气压的上升与电极中的吸收的残余气体而使真空度永久地恶化。要解决前一问题就须增大真空外壳的容积与采用适当形式的屏蔽罩；后一问题的解决只须在真空外壳制造中加强排气技术及排气中的干燥处理，精心选择电极材料就可以了。在小电流开闭时，会产生金属蒸气，由于等离子区的吸气作用，慢慢地吸收残余气体，而使真空度升高，例如，据一篇报告⁽⁴⁾所述，经过2000次开闭，真空度由 10^{-4} — $10^{-5}mmHg$ 柱变为 $10^{-7}mmHg$ 柱。

1.1 特 点

真空开关体积小重量轻，触头部分无须维修。一般真空外壳到了使用期限的时候，就应调换新外壳。如后述，由于电弧电压低、燃弧时间短、电弧能量低，因而电流开断时所产生的热也很少，另外，开关运动部分重量轻、惯性小，对于频繁动作的开关来说，其性能仍然很好。真空开关还有下述特点：开断时的电弧可以在很小的真空容器内处理、非常安全、性能稳定，不会产生有害的声和光。真空断路器与其他断路器相比，它的动电极行程短、重量轻、操作机构小，整个断路器也是很小的，如后述。

真空开关除上述优点外，还存在一些缺点，在小电流开断时会产生截流，很容易引起过电压，如后述。

1.2 历 史

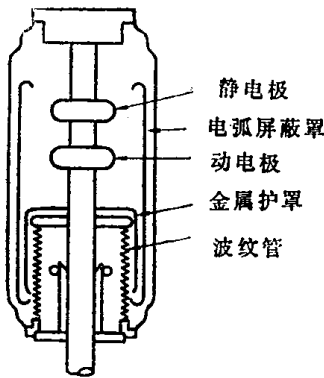
真空作为断路器的熄弧介质早在上世纪末期就已发现。1893年里顿豪斯(Rittenhouse)的设计被作为专利发表。此后，在1926年加利福尼亚工学院索伦森(Sorensen)教授⁽¹⁾发表了有关真空开关的实验结果，暗示出真空开关实用化的可能性。直到现在，

随着真空技术的发展，真空开关才投入批量生产。为此目的，在20~30年，人们对真空开关进行了煞费苦心的研究，才使其实用化，可是，依然还有一些空白没有被填补。

在最近，特别是由于真空技术的发展，才逐渐开始制造可靠性高的真空开关。在这段时间内，真空漏电检验器的发明，玻璃或陶瓷与金属耐真空熔敷技术的发展，波纹管的进步使得从真空外向真空内传递驱动力技术的发展，电极材料的进步，耐大电流、低截流开关的实现，所有这些都是在解决许多技术问题的成果。真空开关发展成现代型式的产品也是工程技术的综合成果。

现在较详细地叙述一下真空开关的发展经过。从索伦森 (Sorensen) 的论文发表起大约经过二十年，科勒 (R. Koller)⁽²⁾ 发表了关于真空开关基本性能的论文。但是，在当时 (1946年，昭和21年，在第二次世界大战之后) 这篇论文并没有引起日本电力系统技术人员的注意，因为战后的日本还没有余力关心它。此后又经过了十年，罗斯 (H. C. Ross) 等人在技术报告中发表了真空开关用于实际电力系统的试验结果，罗斯 (H. C. Ross) 和詹宁斯 (J. E. Jennings) 等人写的这篇论文的发表对当时断路器技术人员来说具有划时代的意义。下面我们较详细地来叙述这一问题。

在这篇论文中所发表的真空开关外壳是詹尼斯无线电制造公司制造的，该公司改进了这一产品用于高频回路，同时又试制了电力网用的产品。在本论文中也谈到了，对于高频回路用的真空开关外壳来说，采用了玻璃密封和金属护罩，开断电流小到几 mA 的量级，开断时电极金属的蒸发极小；对于电力网用的产品来说，开断电流很大，电极金属的蒸发也很大，在玻璃容器内壁吸附了一层导电性的金属薄膜，但是，由于这一金属薄膜会形成导电通路，就有产生内部飞弧的可能性，为防止这一金属薄膜的有害的影响，便设置了玻璃屏蔽罩。另外大电流真空电弧与波纹管接触，为防止波纹管的烧损，便加上了一金属护罩 (第1.1图)。在这篇论文中也发表了真空开关的容许气压为 $10^{-4}mmHg$ 柱以下，真空开关的寿命是由真空度决定的；由于真空开关在电力网中的重复动作，会引起外壳内气压的上升，当超过某一动作次数，外壳内气压会升到上限值，加强排气技术，特别是排出所吸收的电极蒸气及其他金属气体，是真空开关制造的关键。根据这篇论文所述，对当时的产品来说，在开断电流为50 A时，允许的开断次数在10000以上，在100 A时，允许的开断次数为5000，在250 A时，可以开断2000次。对于这种产品来说，触头分开后1/20秒，触头间隙可达2.5mm，这样短的开距，可得到10000 V (有效值) 的绝缘强度，并不会发生电弧的重燃。因此，真空开关触头打开的时间与电源电压的初相位无关，因为在开始1/2周内开断就已结束。



第 1.1 图 真空开关外壳

总之，罗斯 (Ross) 试作的真空开关供电容器组开闭用的有：12.5KV、5,400KVA，115KV、10,250KVA，而供超高压系统线路充电电流开闭用的有：供 115KV 和 230KV 输电线用的两种，同时本文也报导了在 BPA150 哩长输电线上所进行的大范围开断试验结果。但是，对于 230KV 输电线用的开关是采用了 4 个真空开关串联起来。

此后, *GE* 公司许多制造厂家开始研制真空开关, 而真空开关的基础研究是由于李 (*T·H·Lee*)⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾、科拜恩 (*J·D·Cobine*)⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾、勒斯 (*M·P·Reece*)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、里奇 (*J·A·Rich*)⁽¹⁵⁾ 费雷尔 (*G·A·Ferral*)⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 等多人的努力, 才达到今日之进展的。

1.3 真空电弧的开断特性

真空开关外壳内的电弧的熄灭取决于低气压电弧的载流子、尤其是电子强烈的扩散。在电弧弧心处, 充满了高压 (开断电流为数十 KA 时, 外壳内气压接近于大气压) 金属蒸气, 离开弧心压力急剧下降, 容器壁附近压力降到 $10^{-4} \sim 10^{-6} mmHg$ 柱的低气压, 由于中性原子很少, 载流子的迁移率很高, 电子的扩散非常强烈。电子和离子复合的平均自由行程远大于容器的尺寸 (在 $10^{-2} mmHg$ 柱的气压下, 平均自由行程为 $10^3 cm$ 的数量级)。由于这一原因, 去离子作用几乎不能获得期望的结果, 亦即, 真空开关的去离子作用完全是以电子扩散作用为基础的, 这种熄弧方法和别的高气压电弧的各种熄弧方法比较有很大的差异, 并具有特殊的本质。对于这种熄弧作用来说, 电流过零后电极间的绝缘性恢复很快, 在电流截断后极短时间内有同极性的剩余电流通过, 在恢复电压极性翻转后, 通过的剩余电流是极小的 (和其他熄弧方式的断路器比较)。所以, 虽然开距短, 但仍能承受 (很高的) 恢复电压, 开距比其他断路器短, 这是一个优点。例如, 对于 $10-20 KV$ 线路用的断路器而言, 开距在 $10mm$ 以内就够了。

从一方面来看, 低气压电弧的优点之一是电弧电压极小。如前述, 虽然载流子强烈扩散作用, 但低密度弧柱周围的热传导及热辐射损失很小, 弧柱的热损失便很小, 电弧电压的很大一部分是阴极附近的电压降, 几乎与电弧间隙长度 (弧隙短还是有益的) 无关。根据里克 (*Reeca*) 的报告, 电弧电压是由阴极材料决定的 (与各种材料的沸点与热传导系数之积有关), 当电流增加时, 电弧电压略有增加的倾向。根据罗斯 (*Ross*)⁽⁴⁾ 的报告, 当电流为 $200A$ 时, 电弧电压为 $21 \sim 22V$; 当电流为 $5 KA$ 时, 电弧电压为 $32 \sim 35V$; 当电流为 $14 \sim 20 KA$ ^③ 时, 电弧电压达到 $75 \sim 100V$ 。根据日本的实验情况报告⁽¹⁸⁾: 采用钨电极在电流为 $7 KA$ 时, 电弧电压为 $55V$; 采用铜及其合金的电极在电流为 $1 KA$ 时, 电弧电压为 $20 \sim 25V$; 在 $7 KA$ ^④ 时, 电弧电压为 $40V$; 这两篇报告的结果基本上是一致的。总而言之, 真空断路器和断路器相比不同之处是电弧电压低。但是, 根据真空断路器损失小的优点, 能很好适合频繁动作的情况下使用, 这一点是人所共知的。然而, 在真空断路器电弧电流存在时, 电弧电阻是很小的, 在电流截断之后, 这一留下痕迹的空间能够很快地恢复绝缘性, 因而开断特性具有接近于理想特性的优点。

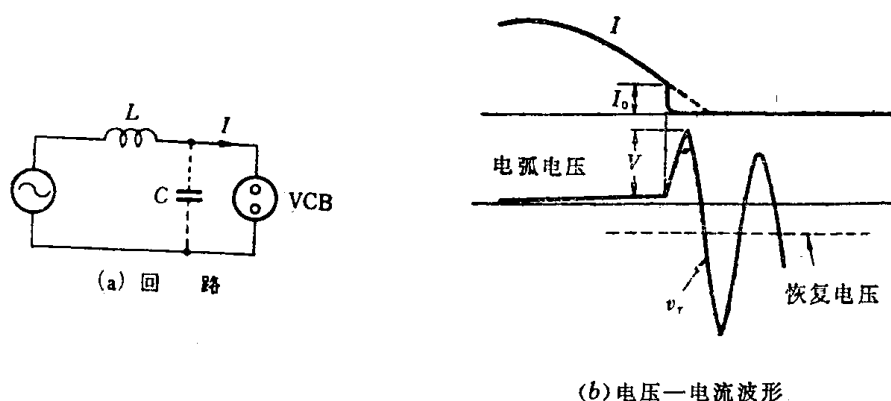
1.4 开断时的截流现象与过电压

对于真空断路器来说, 虽然具有上述的优良熄弧性能, 但是这一优点反而带来了不

译注③ 原书误为 $14 \sim 20 KV$, 应为 $14 \sim 20 KA$ 。

译注④ 原书误为 $7 KV$, 应为 $7 KA$ 。

足之处。在开断电流尚未到达自然零点之前，会发生电流从某一数值（数A级）突然下降到零的现象（第1.2图），我们称之为截流现象。这一现象和水银整流器在器壁温度下降时工作所发生的失弧现象相似类。这一现象产生的机理如下：当电流降到某一数值时，阴极辉点会消失；由电子的扩散作用会使弧柱中的载流子损失的数量超过产生的数量。由于这些原因就使得阴极——阳极间的整个等离子空间的全部电子突然一扫而光，全路程中只留下离子本身，从而留下的等离子空间的全路程都由离子所置换，截流现象应运而生。这一现象是复杂的，在这些原因中，究竟那一个为主、那一个为辅？我们还没有弄清楚。总之，真空弧柱中的电子扩散是很强烈的，这一点是毋庸置疑的。其他型式的断路器也不是绝对不会产生这一现象，就熄弧性很强的断路器来说，当它开断小电流时也会产生截流现象。然而真空断路器容易产生较大的截流而引起过电压。



第 1.2 图 截流与恢复电压

由于截流在负载回路中会产生过电压 V ，我们用 L 表示负载回路的总电感，用 C 表示回路并联的有效电容（如图1.2），注意到断路器端的回路，我们用 $\sqrt{L/C}$ 近似地表示电涌阻抗，截断前的电流为 I_0 ，那么过电压 V 由下式表示，

$$V \approx I_0 \sqrt{L/C}。$$

如果过电压很大的话，那么从装有真空开关的其他设备的绝缘保护来考虑是不够理想的。为了降低过电压 V ，我们考虑增大与开关并联的静电电容 C 的值，这就会使 $\sqrt{L/C}$ 降低；另外，据有关报告所述，对于户内工作的开关来说，可用适当的方法增大 I_0 。在断路器两端并联电阻（特别是非线性电阻）和选择电极材料是降低 I_0 最有效的方法。截流现象的根本原因是由于金属蒸气压过低，阴极触头材料热传导系数较小，假使采用蒸气压高的材料， I_0 会降低。但是，对于采用蒸气压比较高的材料铈、锶、铜等的情况与采用蒸气压比较低的材料钨、钼的情况比较一下就可以看出， I_0 显著下降。根据李 (T·H·Lee) 的报告⁽⁷⁾，前者的 I_0 为 $0.5 \sim 4 A$ ，后者的 I_0 为 $0.2 \sim 1.4 A$ ，但是这种高蒸气压材料不一定阴阳两极都采用，不管那一级采用低蒸气压的材料，都可以达到降低 I_0 的效果。然而，必须适度考虑电极的损耗。由这种金属组成的合金可考虑用作长寿命、小截流的优良电极。采用这种电极材料、并加有并联电阻的断路器在绕线式感应电动机、空载变压器的励磁电流、电容器组等开闭时多次测量截流所引起的过电压的例子

表明,在各种设备绝缘级的裕度内是比较安全的。截流所引起的过电压问题,除特殊情况外,一般都得到解决。

1.5 用途与未来

在1.1节中已经谈到了真空断路器具有开距短、开断速度比一般断路器低(约为 $1m/s$ 数量级)、运动部件重量很轻、操作机构重量轻、整个断路器体积小重量轻等优点。加之损失小、可频繁动作、温升小。开断部件封装在真空外壳内,开断时几乎没有噪音;开断部件几乎不受外界有毒气体、湿气等的影响;在数百安级小电流开闭时,电极损耗小;由于离子对容器内壁的冲击引起的损耗是十分小的;由于耐压下降较小,所以可承受连续万次开闭;在维护管理方面可以节省人力,如前述。

由于这些优点,因而非常适用于电炉、高压电动机、电容器组的开闭。考虑到其体积小、重量轻、损失小等优点,所以可用于负载电压调整分压器中,同时,真空断路器用作配电线上的开关也是很有利的,或者用于大城市地下变电所,更可以发挥其体积小的效用。

最后,对于超高压电网用的断路器来说,要求其熄弧性能好,并望在开断数万安的大电流时确保其开断性能,这当中要求解决的问题是很多的。对于超高压电网的断路器来说,要求其动作轻捷、能耐频繁动作,根据这些特点我们可以看到,对于超高压电网用的真空断路器来说,对于其耐大电流的问题必须经过一番努力的研究。

参 考 文 献

- (1) R. W. Sorensen, et al.; *Vacuum Switching Experiment at California Institute of Technology*, AIEE Trans, Vol 45, P.1102 (1926)
- (2) R. Koller; *Fundamental Properties of the Vacuum Switch*. AIEE. Tech. Paper, 46—126, (1946—5)
- (3) J. E. Jennings, et al.; *Vacuum Switches for Power System*. AIEE Trans. Vol. 75, P.462 (1956—6)
- (4) H. C. Ross; *Vacuum Power Switches, 5 years of field Application and Testing*, Power App. and Sys., P. 697 (1961—12)
- (5) T. H. Lee; *T-F Theory of Electron Emission in High-Current Arcs*, Appl. Phys., Vol. 30, P. 166 (1959—2)
- (6) T. H. Lee, et al.; *Theory for Cathode Mechanism in Metal Vapor Arcs*, J. Appl. Phys., Vol. 32, P. 916 (1961—5)
- (7) T. H. Lee, et al.; *Design of Vacuum Interrupters to Eliminate Abnormal Overvoltages*, power app. and sys., Vol. 71, P. 376 (1962—10)

- (8) T. H. Lee, et al., *Development of Power Vacuum Interrupters, Power APP. and sys.*, P. 629 (1963—2)
- (9) T. H. Lee, *Plasma Physics and the Interruption of an Electric Circuit, Proceedings of the IEEE*, Vol. 57—3, P. 307 (1969—3)
- (10) J. D. Cobine, et al., *Electrode Erosion and Gas Evalution, AIEE, Trans. Commun. and Electro.*, P. 240 (1963—5)
- (11) G. A. Ferral, et al., *Electrode Materials and their Stability Characteristics in the Vacuum Arc, Power App. and sys.*, P. 253(1963—5)
- (12) J. D. Combine, at al., *Recovery Charachteristics of Vacuum Arcs, Power app. and sys.*, P 246 (1963—5)
- (13) M. P. Reece, *The Vacuum Switch, Part 1. Properties of the Vacuum Arc, Proceeding of IEEE*, Vol—110—4, P. 793 (1963—4)
- (14) M. P. Reece, *The Vacuum Switch, Part 2. Extinction of an a. c. Vacuum Arc, 1 bid, Vol—110, P. 803 (1963—4)*
- (15) J. A. Rich, et al., *Vacuum Arc Recovery Phenomena, Proc. Instn. Elect. Engrs*, P. 1293 (1964—11)
- (16) George A. Farral, et al., *Recovery Strength Measurements in Arcs from Atomospheric Pressure to Vacuum, IEEE Trans. on Pomer App. and sys.*, Vol—PAS—86—8, P. 927 (1967—8)
- (17) George A. Farral, *Decay of Residual Plasma in a Vacuum Gap after forced Extinction of a 250—Ampere Arc. Proceedings of the IEEE*, Vol—56—12, P. 2137 (1968—12)
- (18) 水谷,他: 真空しや断器のしや断電流と電極, 昭39電学東京支部大会, 159

第二章 真空中的放电现象 与绝缘强度

2.1 真空电弧的一般性质

2.1.1 小电流域的性质

这里引用了里斯 (Reece)⁽¹⁾⁽²⁾ 提出的真空电弧的定义, 并以下面的情况作为研究对象, 亦即, 电弧是由电极金属蒸气电离来维持的, 一对电极是面对面放置的。在本章中分别叙述与开断现象有关的小电流域 ($10A \sim 5KA$) 及大电流域 ($5 \sim 10KA$ 以上) 的基本性质。小电流域与大电流域的区分大致是以阴极辉点运动形式决定的, 在小电流域多数阴极辉点作所谓反向运动, 在大电流域电弧是沿着 $J \times B$ 的力方向运动的。

显而易见, 小电流域的最重要的现象是阴极辉点的形成机理^⑤, 其基本原因是由于阴极发射电子及金属蒸气的放出。

里斯 (Reece) 对小电流域进行了仔细的观察, 下面介绍电弧中心处的性质:

(1) 电弧的形状

在电弧由简单的阴极辉点构成的情况下, 阴极有一圆锥形顶点, 顶点相当于阴极辉点强烈发光的部分。

(2) 阴极辉点的电流密度

随着观测技术的进步, 我们可观测到阴极辉点的电流密度有增加的倾向, 一般取 $10^5 A/cm^2 \sim 10^6 A/cm^2$ 是适当的。

(3) 阴极辉点的运动

假设简单阴极辉点在外加电场和磁场作用下不会作不规则的运动, 但是, 阴极辉点沿电极表面机械加工刀痕运动的倾向较大。其原因是电极端部热传导恶化, 在能量小的情况可以产生高温。电极表面吸收的气体多, 阴极辉点运动加快, 这些原因都是与能量小、放出的气体多有关的。

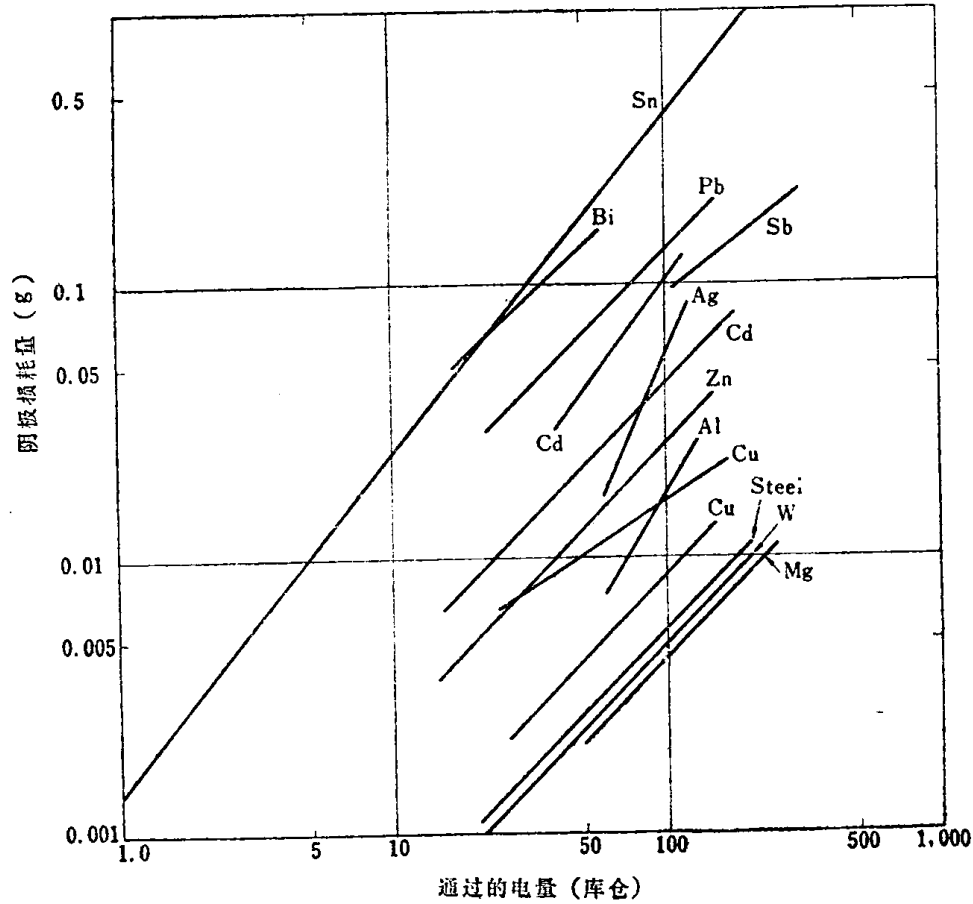
增大电弧电流并把阴极辉点分成两部分, 用铜电极大致分为 $100 \sim 200 A$, 对于电弧电压低的材料而言分裂电流值低, 例如: 用汞电极, 其值为 $5 \sim 10 A$ ⁽³⁾。分离后的阴极辉点作所谓反向运动⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 其速度为 $0.1 \sim 0.5 m/s$, 电流为数千安时, 其速度可达 $10 m/s$ 。

(4) 电极的蒸发

在小电流时阴极辉点的能量密度大, 它是由金属的蒸发引起的。整理一下文献⁽¹⁾⁽⁶⁾可

译注⑤ 这里把“机构”一词译为“形成机理”。

得出电极损耗与通过的电量之间的关系，如图 2·1·1 所示⁽⁷⁾。在表 2·1·1 中比较详细地说明了这一关系。损耗量由 $M = A(I \cdot t)^n$ 表示，式中蒸发速度 $n = 0.63 \sim 2.33 \mu g/\text{库}$ ，假设 $n = 1$ ，对通过的电量须考虑适当的比例。

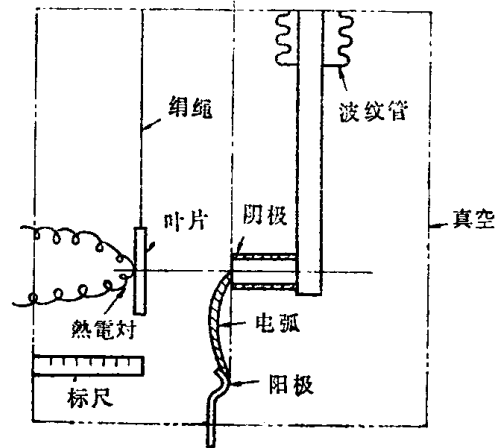


第2·1·1图 电极损耗量与通过电量的关系

在大电流域内会引起熔融金属的飞溅，从而使阳极（同阴极相比）损耗增加，详细整理的资料很少，但根据真空断路器与开关的使用情况发表过一些有关电极损耗量的数据，将留在下一章讨论。

(5) 阴极的蒸气喷流

坦伯格(Tanberg)⁽⁸⁾、科贝尔(Kobel)⁽⁹⁾、伯基(Berkey)⁽¹⁰⁾很早就进行了蒸气喷流速度的测量，测量装置概略地如第 2·1·2 图所示。叶片接收入射蒸气的动量和热能并根据入射蒸气的质量求出其速度。伯基(Berkey)、马逊(Mason)采用铜电极所获得的蒸气速度为 $2 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ，里斯(Reece)⁽¹⁾采用铜电极获得的蒸气速度为 $1 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 。



第2·1·2图 蒸气喷流测量装置