

VACUUM ARCS

Theory and Application

真空电弧理论和应用

[美] J. M. 拉弗蒂 主编

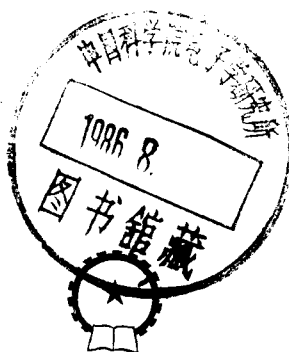
机械工业出版社

真空电弧理论和应用

〔美〕 J. M. 拉弗蒂 主编

程积高 喻立贵 译

袁文川 校



机械工业出版社

8610629

本书总结了美国在发展真空开关过程中所进行的大量基础研究工作和取得的成果，系统地论述了真空开关的物理基础，特别是对真空中的电击穿机理、电弧的阴极和阳极现象作了精辟的阐述，并在真空电弧理论方面提出了一些新的论点。本书内容丰富，取材新颖，对真空开关的发展有着指导性的意义。

本书可供真空开关研究、制造和使用部门的工程技术人员、从事等离子体、静电学方面的科研人员以及大专院校有关专业的师生参考。

VACUUM ARCS
Theory and Application
J. M. LAFFERTY, Editor
1980 by John Wiley & Sons, Inc

真空电弧理论和应用

〔美〕J. M. 拉弗蒂 主编
程积高 喻立贵 译 袁文川 校
机械工业出版社出版

（北京阜成门外百万庄南里一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

金 堂 县 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 $12 \frac{3}{4}$ 字数 274千字

1985年12月北京第一版·1985年12月成都第一次印刷

印数：0,001—1,920·定价：3.05元

统一书号：15033·6224

序 言

普林斯顿大学 K.T. Compton 教授把电弧定义为在气体或蒸气中两个电极之间的放电,放电时,阴极上的电压降等于气体或蒸气的最小电离电位或最小激励电位。应当补充一点,电弧是一种自持放电,并通过阴极的电子发射机理而可保持很大的电流。大自然的电弧是以闪电的形式出现的。西屋电气公司试验研究室的顾问工程师 J. Slepian 博士说,事实上,即使大自然不产生电弧,我们似乎也有必要创造电弧。不然,就得要有更昂贵和复杂的相应设备去分断大容量电路。很明显,大自然没有真空电弧,它是人为创作的。“真空电弧”一词并不确切,本书要讨论的真空电弧实际是“真空环境中的金属蒸气电弧”,但由于科技文献业已普遍采用“真空电弧”一词,所以本书仍沿用旧名。

本书不拟详细讨论真空电弧,而是主要论述在真空中开断电流至关重要的电弧的特点,特别是要论述通用电气公司研究与发展中心在过去25年中对大容量真空灭弧室所进行的大量研究和发展工作。

下面扼要地叙述一下高压交流电路中真空开关的动作,以便更容易了解通过真空电弧来分断电流的种种优点及研制实用真空开关的种种困难。当开关的两个电极处于闭合位置并通过额定电流时,电极发热。由于真空中无对流损失,且辐射损失可忽略,所以电极上产生的热必须由导电杆传导出去。因此,接触电阻必须很低,以免温升太高。当发生故障

电流（例如由于短路所致）时，两电极被操作机构分开，因而在电极间形成真空电弧。这种大电流电弧是在电极蒸发出的金属中形成的。

电流通过在阴极上许多快速运动的“阴极斑点”流入电弧。这些小斑点上的电流密度往往高达每平方厘米一百万安培以上。离子及金属熔滴的喷射也源于阴极斑点。这种喷射是真空电弧蒸气的主要来源，阴极每发射10个电子就可能伴随一个金属原子。如果阴极斑点由于外加磁场而保持不停地运动，则除非电流很大时，阴极的总熔化是很不明显的。不过，通过阴极斑点的痕迹往往可以看到由于轻微熔化而引起的金属损失。阴极斑点的电子发射及金属蒸气喷射的准确机理尚未完全弄清楚，但由于正离子轰击和空间电荷效应分别在阴极表面产生了极高的局部加热和极高的局部电场强度，所以热电子发射和场致发射无疑起了重要作用。

在电弧点燃后，由部分电离的金属蒸气组成的扩散等离子体很快充满电极之间的空间。真空中的大电流金属蒸气电弧与敞露于大气中的电弧不一样：它没有被一个弧焰层包围，而是等离子体扩展到电极周围的空间。当电流足够大时，等离子体可到达灭弧室内壁，而在那里形成正离子层。

在小电流时，阳极从等离子体收集的电子电流均匀分布在阳极表面；但在更大电流时，会出现明显的“阳极斑点”。这种斑点总是在靠近阴极的阳极端面上形成；与此相反，阴极斑点则往往离开阴极端面而移到电极的各侧。与在阴极上不停运动的斑点相反，每个阳极斑点都有保持在自己位置上的趋势。阳极斑点是由于阳极上的一种不稳定的现象引起的。在正常情况下，阳极不是正离子源，而是正弧柱的电场试图把正离子赶出阳极。这使得阳极周围形成一层电子空间电荷，

并产生阳极电位降。当电子流向阳极时，电子穿越这个电位降，加速向阳极流动。在阳极上，撞击表面的离子约为电流的10%，电流的其余部分则由已发射出的电子提供。所以，在两个电极表面上耗散的功率是有差别的。阴极受到能量相当低的离子的轰击，但因为离子是落在阴极斑点的小面积上，故其功率密度大。相反，阳极受到一个具有相当于阳极电位降、平均电子温度能量及电子凝聚热的总能量的强电子流轰击，所以总的功率输入比阴极大得多。当电流密度足够大时，阳极因局部发热（一般为导热不良的边缘）而产生金属蒸气，这种蒸气一产生就被流入的高能电子流电离。离子中和了放出金属蒸气的阳极面附近的电荷，并使阳极电位降显著减小。较低的电压降使更多的电流流入这一阳极部位。此外，由于金属蒸气密度增加而引起的等离子体中随机电子电流密度的增加也有助于电流向电压降较低的地方集中。到阳极的电流的局部增加，更会造成阳极发热，因而引起更多的金属蒸气的蒸发与电离。这样就会产生一种集中效应，使阳极上的电弧收缩而产生阳极斑点。阳极斑点处产生严重的局部发热会造成阳极严重的熔化。所以，如果没有散热措施，或没有迫使阳极斑点迅速运动的措施，则容许通过的最大电流就受到限制。不过，电极的磨损量一般以阴极为最大。假定阳极没有熔化金属流走的损失，则阳极的金属损失不会超过温度升高时所预期的正常蒸发所引起的损失。

由于真空开关触头的开距小，假如不强迫电流过零或不是交流电流，则大电流真空电弧也许会一直维持下去。但在交流电流波形的第一次过零时，阴极斑点的数目减少，在 10^{-8} 秒内，最后残存的阴极斑点消失，于是电弧熄灭。

真空电弧的一个重要特点是，它不在电流正常过零时，

而是在电流过零之前的某一电流时熄灭。在电流过零前突然降到零的电流值通常称为“截断电流”。对于短的真空电弧，截断电流取决于阴极材料的蒸气压力及电子发射特性。对于蒸气压力高及逸出功低的材料，其截断电流值最低。电弧电流的这种突然截断对电感电路是一个严重的问题，因为由此而引起的过电压可破坏绝缘。真空开关对这个问题特别敏感，因为它的真空间隙的介质强度恢复很快，若不把截流值限制到足够低的水平，就会在设备中引起高的过电压。

电流过零之后，真空间隙两端的电压改变极性，并以 $5\sim 10\text{kV}/\mu\text{s}$ 或更高的速率进行恢复（视电路的瞬变参数而定）。如果真空开关间隙的介质恢复速率超过所加电压的上升速率，则电弧就不会重燃，电路就被分断。真空开关独有的特点是，维持电弧所需的导电介质仅由燃弧过程中磨损的触头金属蒸气来提供。所以当电弧熄灭后，间隙中金属蒸气的散逸和凝结的速率将部分地决定开关介质强度的迅速恢复特性。电弧熄灭后，阴极的残余蒸发很小，可略去不计；但在大电流下可能发生熔化的阳极则不然，它的残余蒸发相当大，对介质强度的恢复有显著的影响。

真空开关分断电流的优点很多：由于真空的绝缘强度高，所以真空间隙的长度只需 1 或 2 cm，因而驱动触头的操作机构可以做得相当简单，而且动作快速；真空开关分闸后，电流一般在接近第一次过零时被分断，燃弧时间小于半个周波，因而真空开关耗损的能量相当小；由于真空间隙强度的迅速恢复，不需用分断介质（如油或气体），因而省去了维护工作；真空开关是完全密封的，所以没有火灾和爆炸的危险。人们早就认识到利用这些优点有可能制造出一种简单、小巧、动作快的分断电流的装置，从而大大推动了实用真空开

关的发展。

把密封在真空中的两个金属触头拉开就能可靠地分断高压电路的大电流，这是一种简便而别致的分断电流的方法，因而这种方法一直吸引着科学家和工程师们。不过，他们早期的努力都因缺乏现代真空工艺和冶金工艺而先后宣告失败。

从发明真空开关发展到把它变成实用的电力开关装置经历了很长的过程。

本世纪二十年代初，加州理工学院 R.A. Millikan 教授在研究金属电子的场致发射过程中，观察到真空间隙有很高的介质强度：在只有几 mm 长的真空间隙两端加几万伏的电压而不击穿。Millikan 和 R.W. Sorensen 教授在研究这种现象的应用时发明了真空开关。随后，Sorensen 及其研究生 H.E. Mendenhall 发表了真空开关的研究论文，介绍了他们在这方面的开创性工作。不久，通用电气公司从加州理工学院获得了真空开关的专利权，并提出了发展规划。虽然早期的一些试验结果表明，真空开关是很有希望的，但很快就发现，三十年代初封接的真空开关不能满足电力用户要求的高度可靠性。

三十年代初进行的试验暴露出了一些严重的弱点：当时，真空工艺处于初期阶段，大型玻璃和金属封接很脆弱而且不可靠；不能获得和测量低于 10^{-6} torr (托) 压力的真空系统；保持寿命长而不出毛病的密封真空开关需要的高度除气的真空技术还没有发展起来。

铜以其截流水平和接触电阻比较低而曾被选作触头材料，但它却带来一些严重的问题。象铜这样的软金属用作触头材料时，往往在正常触头压力和没有通电的情况下，两个

十分清洁的触头表面就焊在一起了，即这种材料抗焊性能不好。另一个问题是，这种触头在燃弧过程中放出大量气体。在大的燃弧电流下，因连续操作而在真空开关中积累的气体造成真空度的下降，在低电压下开关可被击穿。当时通用电气公司研究试验室曾一度试图用真空熔炼来获得不含气体的铜，但都没有成功。

为了获得无气触头，曾试用过钨这类的难熔金属，因为烧结钨可在高真空中进行高温加热来除气。虽然这样制备的钨解决了含气问题，也减少了熔焊，但却带来了截流问题，因为钨的蒸气压力低，逸出功高，所以用它做的电极，其截流值高达 $50\sim 100\text{A}$ 。此外，还发现用钨电极的真空开关不能开断大电流，这是由于过热的触头引起的热电子发射而造成介质恢复强度不高所致。所以虽然用钨触头有可能发展商用真空开关，但只限于用来分断小电流、电容器组和无线电发射机的天线。

在同一时期即二十年代末到三十年代初，试验研究室的 A.W.Hall 博士和 E.E.Burger 积极从事作避雷器用的真空间隙的研究。虽然他们研究的真空间隙是间隙固定的真空器件，而不象真空开关是带有动触头的器件，但触头放气和不规则的击穿电压这些基本问题，则与真空开关的相同。这些间隙所用真空熔炼的铜电极是由试验研究室的 F.C.Kelley 及 E.E.Charlton 博士用石墨坩埚加热到 2000°C 炼成的。开始时，电极似乎没有气体，并在模拟雷电脉冲击穿后分断了频率为 60Hz 的电流。但在重复燃弧后，所有真空间隙都无例外地产生了气体，最后导致分断失败。此外 Hall 间隙也存在不规则击穿（尤指燃弧后）及冲击击穿电压与工频击穿电压比值低的问题。

Hall 间隙抽真空所用的技术是当时最好的。这种早期真空处理的良好效果，是在前些年才得到证实的：当时对闲置在通用电气公司高压试验室长达30年之久的一只真空间隙进行了耐压试验，发现它还能承受额定电压。

在早期研究工作以后的年代里，Hall、Burger和J. Gallagher 虽曾偶尔研究过真空开关和真空间隙的有关问题，但一直到1952年才由J.M. Lafferty 博士领导的通用电气公司物理研究室的J.D. Cobine 及其同事 E. Burger、W.D. Davis 博士、G.A. Farrall、J.A. Rich博士及T.A. Vanderslice博士开始了真空开关的专题研究。

当时，真空和冶金工艺有了迅速的进展，从前难于观察的真空电弧现象已可用新式电子仪表来研究，对金属蒸气电弧研究所得的基础科学知识可望大有益于真空开关的生产工艺。因此，当年曾在加州理工学院作为 Sorensen教授的学生学习真空开关的Cobine博士感到，用新眼光来看待这个老问题的时机已经来到了。

很明显，在早期讨论过的未解决的问题中，首要的问题是如何获得并在苛刻的运行条件下保持真空开关的高真空度问题。这时，Hall正好研制成功了一种Fernico合金。这种合金以其具有与玻璃匹配的膨胀特性而可用来设计能经受得住大容量真空灭弧室可能产生的机械应力和热应力的大型玻璃-金属封接。此外，当时真空工艺已进展到能够获得和测量 10^{-6} torr 数量级的真空度。多年的发展，至此总算解决了两个基本问题。

但是，在燃弧过程中触头材料（钨和钨除外）的放气仍然是一个没有解决的严重问题。用当时市售最好的“无气”金属进行的最初试验表明，开关在大电流下连续燃弧后积累

的气体使压力上升了几个数量级。计算结果表明,如欲在一个典型的10000A开关中保持低于 10^{-5} torr的压力,则触头的气体杂质(或由于燃弧面被分解成不凝结的气体的化合物)应低于 10^{-7} 。Lafferty、Cobine和Burger特为测试灭弧室的瞬变压力而设计了一种专用电离规,以便研究燃弧中放出的气体。这种研究表明,如果燃弧后灭弧室内的气体压力超过 10^{-6} torr,开关就不再可能立即可靠地工作,因为吸除放出的气体需要一定的时间。

根据M.H.Hebb博士的建议,Cobine试用单晶铜及特制的区域提纯铜作电极,发现了能够满足上述低含气量的金属材料。W.W.Tyler博士炼出的单晶铜含气量相当低,首次出现了重大突破。但用此法制备的铜电极价格奇昂,有碍大量生产。F.H.Horn博士首先研制成功真空开关触头用的区域提纯铜,用这种铜触头作的燃弧试验表明,含气量低于 10^{-7} 。Lafferty建议把一台质谱仪长期封接到真空灭弧室上,这样就能分析燃弧后残留的少量剩余气体。Davis和Vanderslice研制了一种小型的、不怕烘烤的、带有二次电子发射倍增器的高灵敏度质谱仪,可测低到 10^{-16} torr的分压强。这种质谱仪接到真空灭弧室上,并在真空处理后和灭弧室一起封离。

(这种质谱仪的改进型后来被Davis和C.C.Miller博士用来分析燃弧过程中金属离子的能量和组分。)Vanderslice的测试结果表明,区域提纯铜残留的总含气量为 10^{-3} ,其中甲烷占60%,一氧化碳占40%,且有痕量的氢。

这项工作表明了真空开关触头工艺方面的重大突破。这是由于半导体的迅速发展及对此感兴趣的科学家们紧密合作的结果。在发现了能达到所要求纯度的铜之制备方法以后,就可以把它加以修改来制备大量其他金属、合金和混合物的无

气触头，从而可对大容量真空灭弧室所要求的其他性能进行试验。用Cobine、Burger和Farrall研制的冲击耐压试验系统对一些金属和合金在燃弧后的介质恢复强度进行了研究。在这些试验中，是在电流过零后的不同时间距里给真空开关加一高压脉冲来确定间隙的击穿强度的。

Cobine和Farall通过试验证实了对于某些金属来说，直流真空电弧的燃弧时间是一种随机现象，且遵循幸存律。一些触头材料的稳定数据表明，在任意选定电弧平均寿命值的情况下，与这平均寿命相应的电流是与蒸气压力成反比的。从这些研究中，Farrall找出了真空灭弧室在开断直流电流时的稳定数据与开断交流电流时的截断电流值之间的关系。Rich的研究表明，对于导热率和导电率相当的触头材料（例如铍、铁和铋），阴极斑点上的焦耳热是产生蒸气的重要因素。此外，他还找出小的金属蒸气电弧的稳定性与产生蒸气的阴极材料的热性能之间的关系。Bochum大学G. Ecker教授（兼通用电气公司顾问）也作过类似的研究；此外，他还研究过阳极上的不稳定性及阳极斑点的形成。

真空开关触头的理想材料必须同时满足下述要求：间隙在燃弧后必须立即迅速恢复介质强度而具有极高的最终击穿强度；触头在通过大的瞬时电流或在短路条件下关合电路时，不得发生熔焊，这就要求触头的电阻低，才能在通过额定电流的过程中使触头发热最小；最后，在触头之间引燃的电弧在小电流时必须稳定，以免截流而引起过电压。

由于上述每一个特性一般都涉及到触头材料的各种物理性能，所以这些要求不易同时满足，有时甚至是相互矛盾的。例如锌有很高的蒸气压力，截流值也很低，只有0.5A，但由于在电流过零后阳极以很高的速率不断喷出金属蒸气，因而

介质恢复强度很差。中等蒸气压力的金属（例如铜）一般质软，故两触头在真空中容易粘或焊在一起；此外，这类金属在灭弧室通常都会遇到的快速分闸和重合闸所引起的大的机械应力作用下不能保持其外形。低蒸气压力的难熔金属（例如钨）质硬而不熔焊，但却存在严重的截流问题。很明显，没有一种纯金属是理想的触头材料。

Lafferty 考虑的一些金属混合物和两相二元合金作真空开关的触头同时满足了介质恢复强度高、截流值低和抗熔焊的要求。这些复合材料质硬、熔点相当高、导电好，且其中至少一种成分具有高的蒸气压力。最常用的合金之一是含少量铍的两相铜合金。在液相，铍可溶于铜；而在固态下，铍则析出铜晶界而到铜表面上。由于铍实际上没有溶入铜中，所以保持了铜的高导电率。铍析出铜晶界，合金变硬，并在两触头接触面上只产生轻微的脆性熔焊，因而操作机构可轻易地拉开触头。此外，由于合金中含有高蒸气压力的铍，因而可降低燃弧过程中的截流值。根据真空开关的特定用途，也可选用其他元素的一些组合来满足触头材料所要求的特性。

在许多场合中，都要求真空开关具有二十年的保存寿命。由于用普通检漏仪不可能检出太小的漏泄或扩散，所以在这样长的保存时间里密封灭弧室内的真空度可能下降。为了确保不漏，Davis和 Vanderslice 研制了一种可检测漏率低至 10^{-12} 毫·升/秒的高灵敏度质谱仪，以便分析触头放出的气体。

综上所述，真空电弧或真空中的金属蒸气电弧是极复杂的，而且没有现成的可靠分析方法。但在许多方面，它又比敞露的大气中的电弧简单。在多数工作条件下，真空电弧中

的金属蒸气是不足的，可把它当作这样一个模型来分析，即其中的金属蒸气保持不变，且只需耗用极少的能量即能产生蒸气。虽然真空电弧很复杂，但它已成功地用于大容量真空灭弧室中，这是与电子学、等离子物理、真空工艺和冶金学这些学科的广泛应用分不开的。希望这篇序言能使读者对真空电弧有一个简略的了解，对本书的内容以及对通用电气公司研究与发展真空电弧用于大容量电路分断方面的工作有一个概貌。虽然基础研究对指引新产品的前进道路很有价值，但它本身不能实现创新。这就需要有一个有正确判断力、有想象力、愿意承担风险、着眼于将来的有进取的制造单位来把新的科学与新产品结合起来。大容量真空灭弧室也不例外。本书没有包括通用电气公司费城开关和控制设备部在研制并应用大容量真空灭弧室于各种高电压系统方面所作的工作。在这方面作出贡献的研究人员有：C. Bailey, P. Barkan, V. L. Cox, D. W. Crouch, G. Frind, A. N. Greenwood, D. R. Kurtz, T. H. Lee, G. R. Mitchell, W. J. Pearce, G. Polincko, J. W. Porter, C. C. Potadick, H. N. Schneider, W. F. Skeats, J. C. Stofinek, M. M. Slomon, A. L. Streater, J. L. Talento, C. H. Titus, W. R. Wilson, J. E. Zlupko。要叙述他们的贡献，需要另一部象本书这样厚的专著。正是由于他们的努力，才有世界第一流的大容量真空断路器商品。现在，生产真空灭弧室不仅有几家美国公司，而且也有日本、英国和德国公司，这证明真空灭弧室是成功的。

J. M. Lafferty

1979年11月于纽约

目 录

第 1 章 真空电弧导论	1
1.1 基础放电	1
1.2 各种类型电弧的主要特性	4
1.3 真空电弧的一般特性	5
1.4 真空开关中的表面现象	9
1.5 电极能量平衡	13
1.6 辅助电极与表面	17
第 2 章 真空中的电击穿	22
2.1 早期的研究	22
2.2 发射原理	23
2.3 场致发射和真空击穿	26
2.4 阳极的相互作用	38
2.5 电极形状	41
曲率半径和边缘效应	46
均匀电场中的电极	51
2.6 电极材料	53
2.7 电极老炼	56
2.8 气体影响	62
2.9 微粒影响	66
2.10 真空中的绝缘体	71
2.11 动触头效应	76
第 3 章 电弧引燃过程	88
3.1 导电触头的接触面积	88
3.2 触头熔焊	95
实际的接触面积	95

熔焊强度和吸附气体	97
真空中的熔焊	99
3.3 真空电弧的触发	116
等离子态	117
电弧的引燃过程	122
第4章 电弧阴极现象	131
4.1 阴极斑点的特点	131
4.2 阴极斑点的发射结构	144
4.3 电弧电压	168
4.4 阴极斑点的离子流	176
4.5 总结	183
第5章 真空电弧阳极现象	187
5.1 阳极故障	188
5.2 阳极斑点的发生	189
5.3 阳极斑点的不稳定性	190
5.4 材料对阳极斑点的影响	195
5.5 阳极斑点的温度	196
5.6 磁场效应	198
第6章 电流过零现象	202
6.1 真空电弧的稳定性	202
6.2 电流截断	213
6.3 熄弧后介质强度的恢复	222
介质恢复强度的测试结果	223
中性金属蒸气对真空间隙恢复的影响	226
离子对真空间隙恢复的影响	233
6.4 总结	242
第7章 真空电弧理论	249
7.1 电弧的定义	249
7.2 阴极斑点模型	251

7.3 阴极斑点现象概述	252
关于电极内部问题	252
关于阴极表面问题	257
关于等离子球问题	263
不确定性的问题	271
稳定性问题	273
7.4 光滑表面斑点 (SS)	275
历史的回顾	276
固定的光滑表面斑点 (LSS)	282
移动的光滑表面斑点 (MSS)	289
光滑表面斑点的统一分析	296
7.5 粗糙表面斑点 (RS)	303
历史的回顾	304
带平均结构效应的粗糙表面斑点 (RSA)	309
带个体结构效应的粗糙表面斑点 (RSI)	314
粗糙表面上的阴极斑点的型式	320
7.6 以光滑表面和粗糙表面理论为基础的阴极斑点机理	322
7.7 极间现象和阳极现象	325
极间区的等离子体流	325
电位最大值	329
阳极斑点不稳定性	331
7.8 截流: 相关现象的例子	339
根据光滑表面理论来分析截流现象	340
第8章 真空电弧的应用	350
8.1 电力开关的任务	351
8.2 真空中的开断	356
8.3 真空灭弧室的结构	357
8.4 开关装置的功能	361
8.5 触头材料的重要性	361
8.6 截流	364