

高等学校教材
发电厂电气部分电影教材

高压断路器

南京工学院 朱家果
西安交通大学 李朝阳 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书对高压断路器进行了较全面的介绍。主要讲述了熄灭电弧的原理和基本方法；分别叙述了屋内少油、屋外少油、压缩空气和SF₆高压断路器的结构及工作原理；较详细地讲述了电磁、液压及弹簧储能三种操动机构。

本书可作为高等学校“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”、“水电站动力设备”专业的教材，并可供电业系统的工程技术人员参考。

高等学校教材

发电厂电气部分电影教材

高压断路器

南京工学院 朱家果 主编
西安交通大学 李朝阳

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 4.125印张 91千字

1985年5月第一版 1985年5月北京第一次印刷

印数0001—9620册 定价0.90元

书号 15143·5674

目 录

前 言

第一章 灭弧原理	(1)
第一节 开关电器的基本概念	(1)
第二节 电弧及其特性	(3)
第三节 熄灭交流电弧的基本方法	(11)
第四节 恢复电压与并联电阻	(34)
第五节 断路器开断能力的试验	(44)
第二章 高压断路器	(45)
第一节 概述	(45)
第二节 屋内少油式高压断路器——SN10-10型	(49)
第三节 屋外少油式高压断路器——SW6系列.....	(57)
第四节 高压空气断路器——KW4系列	(69)
第五节 SF ₆ 高压断路器	(82)
第三章 操动机构	(96)
第一节 电磁操动机构——CD10型	(96)
第二节 液压操动机构——CY3型	(103)
第三节 弹簧储能操动机构——CT6-X型.....	(112)

第一章 灭弧原理

第一节 开关电器的基本概念

在发电、供电和用电单位，都大量使用着各种开关电器。据一般统计，每一万千瓦发电设备需100~120台高压断路器、400~500台隔离开关和其它相应的高压电器配套设备。如一个年产几千万吨钢铁的国家需要十多万台高压断路器，近几百万台隔离开关和其它电器设备。在所需设备中，110kV及其以上的约占(1~2)%，35~60kV的约占(8~9)%，3~10kV的约占90%。

断路器的主要任务是接通与切断电路，特别是要求能很快地、安全地切断很大的短路故障电流，以便及时使故障电路与其它部分断开，保证完好的部分回路照常工作。

常见的110kV少油断路器的基本组成部分可见图1-1。

在高压断路器中，直接用于接通或断开电路的金属触头是密封在灭弧室内的，人们不能直接看到断路器的触头是合着的还是打开的。为了保证检修电气设备的安全，使检修的设备与带电部分可靠的隔离，在高压电路中断路

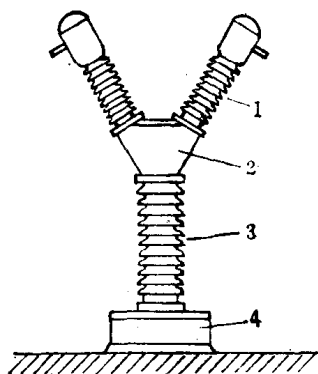


图 1-1 110kV少油断路器外形
1—灭弧室，2—机构箱，3—支持瓷套，4—底座

器的两侧都必须串联接入一种电压隔离器，这种电压隔离器被称为高压隔离开关。隔离开关打开后，在空气中形成一个明显可见的绝缘间隙。

隔离开关的结构很简单，没有灭弧装置，一般不能用于切断负荷电流，更不能切断短路故障电流。但在某些电流特别小的电气回路中，有时也作切换电路之用。

开关最基本的部件是触头。图1-2所示为一种面接触式触头。在一对触头中，一般有一个是固定不动的，称为静触头；另一个可动的称为动触头。

触头的接触表面，即使经过精密的加工，放大来看还是凹凸不平的，如图1-3所示。因此两个触头之间的接触面实际上只有若干小块面积相接触，或是许多点的接触。两触头之间接触面积的大小随接触压力 F 的增大而增大。当接触压力减小时，由于触头金属材料的弹性变形，接触面积也就有某些减小。

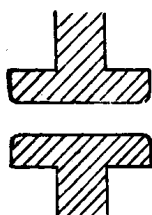


图 1-2 面接触式触头

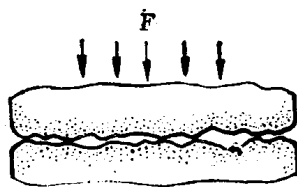


图 1-3 触头接触面放大示意图

由于触头之间的接触只是若干小块面积或点的接触，再加上触头金属表面容易氧化、沾污，因此触头表面的接触实际上不是金属接触，而是金属氧化膜接触或是经污物杂质薄层接触。这就使得接触处除接触面的金属电阻之外还有比较大的接触间隙电阻，它们称为接触电阻 R_j 。

接触电阻 R_j 与接触压力 F 有很大的关系，随着接触压力的增大，接触面积增大，接触电阻减小。当接触压力减小时，接触面积减小，接触电阻增大。接触电阻 R_j 与接触压力 F 的关系如图1-4所示。从图中可看出，接触压力减至较小时，接触电阻迅速增加。

不管采用什么形式的触头，在分闸过程中快到触头完全分离阶段，接触面积和接触压力都减小，接触电阻迅速增大。

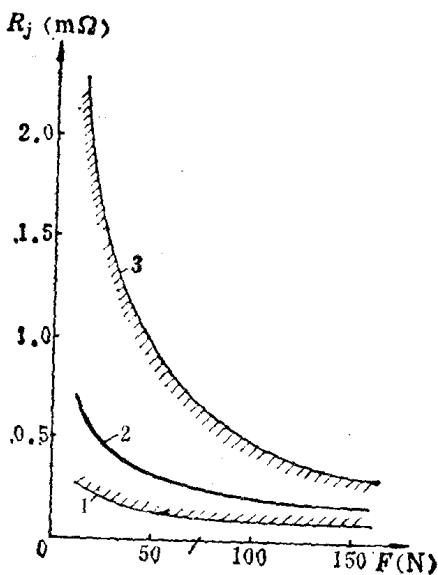


图 1-4 接触电阻 R_j 的试验曲线
1— R_j 下限；2— R_j 曲线；3— R_j 上限

第二节 电弧及其特性

电弧的产生及其熄灭问题是开关电器的主要研究课题。

一、电弧现象

开关切断电路时，只要电源电压大于 $10\sim 20\text{V}$ ，电流大于 $80\sim 100\text{mA}$ ，在动、静触头之间就会出现电弧。对于 220V 的低压闸刀开关只要开断不大的负荷电流人们就可见到电弧。开断的负荷电流愈大，电弧就愈强。在高电压电路中，开断大电流时会产生极强烈的电弧。

电弧的温度很高，可达 $6000\sim 7000^\circ\text{C}$ 以上，如果不能很快使电弧熄灭，就很容易烧坏触头，甚至烧坏其它设备并造成重大的事故。

通过实验还可看到另一种情况：在电弧燃烧期间，触头虽已分开，但是电路中的电流还在继续流通，电路并未真正开断，一直到触头分开到足够大的距离，电弧熄灭后，电路才完全开断。这一情况说明电弧是导电的。

动、静触头之间的绝缘介质或空气为什么会变成导电的呢？这是因为电弧燃烧时电极之间产生了大量导电的电子和离子，如图1-5所示。

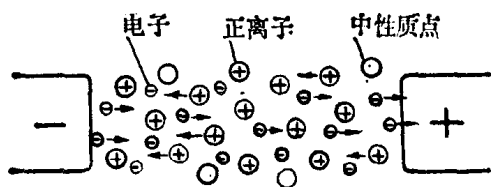


图 1-5 电弧中的导电质点运动示意图

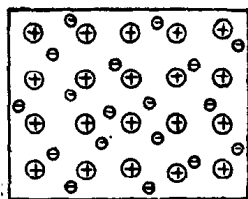


图 1-6 金属中的自由电子示意图

二、弧隙中导电质点的产生

触头之间电弧燃烧的区域叫做弧隙。弧隙中电子和离子的产生主要有下面四种形式：

1. 热电子发射

开关的触头是由金属材料做成的。在常温下，金属内部就存在大量运动着的自由电子，如图1-6所示。随着温度的升高，自由电子能量增加，运动加剧。当温度达到足够高时，有的自由电子就会跑出金属表面，这种现象就叫做热电子发射。

2. 强电场发射

如果在一对分开的电极（即触头）间加上电压，电极间就存在电场。随着电压的升高，电场强度加强。当电场强度加强到每公分距离十万伏以上时，就会从阴极内部拉出电子，这种现象就叫做强电场发射。

3. 碰撞游离

在电场力的作用下，电极（或触头）之间的电子会向正极作加速运动。当电子获得足够的动能撞击中性质点（分子或原子）时，可使其中的电子释放出来，形成自由电子和正离子，见图1-7。原来的电子和新产生的电子又向正极加速运动，如果获得足够的动能，再撞击其它中性质点时，又会产生更多的新电子和正离子。这样发展下去，使电子和离子迅速增加，这种现象就叫做碰撞游离。

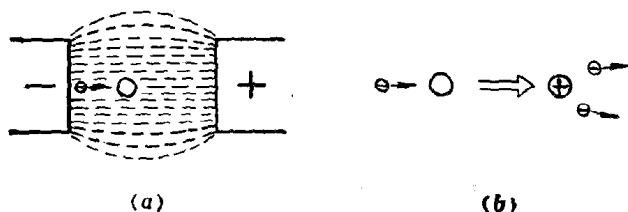


图 1-7 碰撞游离

(a)电子在电场中向正极加速运动，(b)电子碰撞中性质点后产生游离

空气间隙的击穿放电现象就是由于碰撞游离引起的。这是因为外层空间来的各种射线及周围环境等因素的作用，空气中总是存在少量的自由电子，当两电极间加上足够高的电压时，这些自由电子就会高速运动引起碰撞游离，最后使介

质击穿而放电。

4. 热游离

在常温下，气体分子都处在不规则的热运动中，如图 1-8 所示。随着温度升高，气体分子的热运动加剧。当温度升高到 $3000\sim 4000^{\circ}\text{C}$ 以上时，它们互相碰撞就会产生电子与正离子，这种现象就叫做热游离。

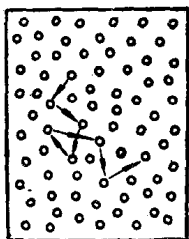


图 1-8 气体分子热运动示意图

在开断电路时，电弧的形成主要就是由于存在上述四种游离过程，而维持电弧燃烧的，主要是热游离。

三、开断电路时电弧的形成过程

开关的触头在合闸状态下有良好的接触，电流 I 比较均匀地流过触头，如图 1-9(a) 所示。在分闸过程中，随着接触压力减小，接触面积也减小。触头快完全分开时，只剩下少数点的接触，电流集中地通过接触点，如图 1-9(b) 所示。由

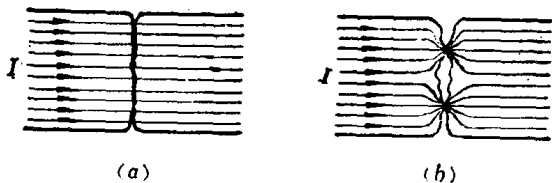


图 1-9 触头分开过程中电流分布的变化
(a) 合闸状态接触良好时；(b) 触头快分开时

于此时接触电阻很大，将引起接触点附近的局部温度迅速升高。当触头刚分开时，全部电源电压加在这极小的间隙上，造成极强的电场。在高温和强电场作用下，触头发射出电子，这些电子在电场力作用下高速运动撞击中性质点，引起碰撞游离，导电质点迅速增加。在发生碰撞游离时，电场能转变成热能，使介质温度迅速升高。当温度超过 $3000\sim 4000^{\circ}\text{C}$ 时，产生热游离，形成电弧。

电弧形成后，弧柱温度可达 $6000\sim 7000^{\circ}\text{C}$ 以上，此时导电质点的产生主要由热游离维持。电极表面由于受到正离子的轰击，温度常常超过金属的汽化点，使电弧中出现金属蒸气，不利于电弧熄灭。

四、去游离与电弧的熄灭

电弧燃烧时，弧隙中除了存在上述游离过程之外，同时还存在着去游离过程。去游离方式主要有以下两种：

1. 再结合去游离

电子向正极运动过程中，如果接近正离子时速度较小，则电子就会被正离子吸引而结合成中性质点。有的电子则是先附着在中性质点上形成行动迟缓的负离子，然后再与正离子结合。以上这些都叫再结合去游离。

2. 扩散去游离

由于弧柱中导电质点的密度很大，再加上质点的热运动，弧柱中的导电质点会不断地向周围空间扩散，扩散出去的带电质点在周围介质中进行再结合，因而减少了弧柱中的导电质点数目，这种现象就称为扩散去游离。

游离与去游离是电弧内部同时进行着的性质完全相反的两物理过程。当游离占优势时，电弧就会发生和加强；当去游离占优势时，电弧就趋于熄灭。若能采用某些加强去游

离的措施，就会有利于电弧的熄灭。

五、影响电弧燃烧的因素

电弧形成与熄灭的物理过程都相当复杂，影响电弧燃烧的因素也是多方面的。总的来说，影响电弧燃烧的因素大致有如下四种。

1. 电场的影响

前面已谈到，电场强度强时，使电子运动的加速度就大，电子容易获得足够的动能去撞击中性质点而引起碰撞游离。当电场强度弱时，使电子运动的加速度就小，也就不易发生碰撞游离，有利于去游离。因此减弱电场强度有利于灭弧。

2. 温度的影响

温度越高，气体分子热运动的速度就越大，热游离也就越强。当温度降低时，分子热运动的速度减慢，热游离也就减弱或停止，去游离则加强。由于电弧形成后导电质点的数量主要由热游离维持，因此采用各种冷却电弧的措施，对熄灭电弧都非常有利。

3. 压力的影响

容器中压力小时，分子密度就小，电子运动的自由行程就大，电子要走较大的距离才可能碰撞上中性质点，因此在电场力作用下电子容易积累起足够的动能去撞击中性质点而发生碰撞游离。反之，容器内压力大时，分子密度大，电子的自由行程小，在发生碰撞之前，不易积累到足够的动能，因此，也就不易发生碰撞游离，而有利于去游离。另一方面分子密度越大，电弧的热传导和对流换热就越强，也有助于去游离。因此增大灭弧室内的压力有利于灭弧。

4. 触头材料的影响

由于电弧温度很高，容易造成触头烧损，使弧隙中存在

金属蒸气，不利于电弧的熄灭。因此，触头应采用耐高温的金属材料。目前许多触头的端部就镶有耐高温的铜钨合金。

六、电弧特性

1. 直流电弧的电压与电流的关系

电弧电压与电流的关系称为电弧的伏安特性。通过对直流电弧的实验可看到：

电流较小时，电弧电压较高；而电流较大时，电弧电压较低。电弧电压与电流之间的关系曲线如图 1-10 所示。这是因为当电流小时，注入电弧的能量较少，热游离弱，电弧电阻较大，因此电弧电压就高；反之，如果电流大，注入电弧的能量多，热游离强，电弧电阻小，电弧电压就低。

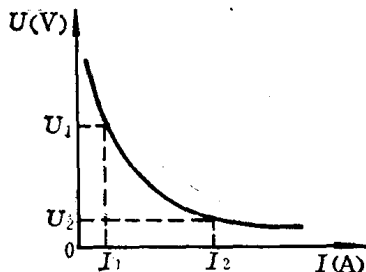


图 1-10 直流电弧的伏安特性

2. 交流电弧的特性

对于交流电弧，电流的大小是随时间而周期性变化的，电弧的温度、直径以及电弧电压也随时间而变化。

电弧电压 u_a 与电流 i 随时间的变化曲线如图 1-11 所示。电流在每半个周波内都有一次经过零值，此时电弧自然熄灭。在电流由零开始增大时，电弧电压随电流的增大而迅速上升到最大值 u_d ，即电弧的点燃电压，也称弧隙的击穿电压，此时电流仍很小。此后，随着电流的增大，游离急剧增加，电弧加强，使电弧电阻迅速减小，所以电弧电压又很快降低。当电流较大时，弧隙已充分游离，电弧电压的变化较小，故在半周波内的中间部分电弧电压较平坦。此后随电流减小到

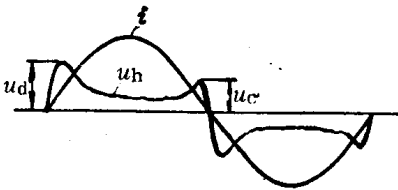


图 1-11 交流电弧电压及电流变化曲线

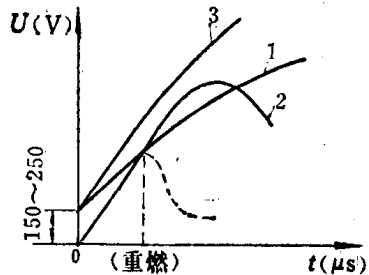


图 1-12 介质强度与恢复电压的增长过程

接近零时，热游离减慢，去游离加强，电弧电压又很快升高至熄弧电压 u_c 。由于热惯性，去游离作用来不及跟上电流的变化，所以熄弧电压 u_c 比燃弧电压 u_d 小。

当电流过零时，电弧暂时熄灭，这时弧隙迅速去游离，弧隙间介质的耐压强度（又称弧隙介质强度）迅速增加，如图1-12曲线1所示。另一方面，电路中加在弧隙上的电压，称为系统恢复电压，往往也是增加的，如图1-12中曲线2所示。每当电流过零电弧暂时熄灭后，电弧重燃与否，取决于弧隙介质强度与系统恢复电压二者增长的快慢。如果出现弧系统恢复电压大于弧隙介质强度，则弧隙又被击穿，电弧重燃，弧隙电压将如图中虚线所示。如果加强灭弧措施，使弧隙介质强度（图1-12中曲线3）永远大于系统恢复电压，电弧便不再重燃。

电流过零后的弧隙介质强度增长过程有一个特点，就是当电流过零后，在 $0.1 \sim 1 \mu s$ 的极短时间内，弧隙就达到 $150 \sim 250V$ 的介质强度。如果电极的温度很高，则介质强度较小，近于 $150V$ 。如果电极的温度很低，则介质强度近于 $250V$ 。

电流过零后弧隙立即出现 $200V$ 左右介质强度的原因可

解释如下：当电流过零极性改变时，弧隙中剩余带电质点的运动方向也要随极性的改变而改变，当极性改变后瞬间，质量轻的电子迅速地转向新的正极，而此时质量比电子大1000倍左右的正离子还来不及变更运动方向，几乎还停留在原来的地方未动，造成新的阴极附近缺少导电的电子而充满正离子空间电荷，如图1-13所示，这就使阴极附近立即出现了150~250V的介质强度。这种现象称为近阴极效应。

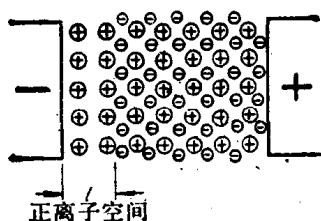


图 1-13 电流过零后瞬间弧隙内部电荷分布示意图

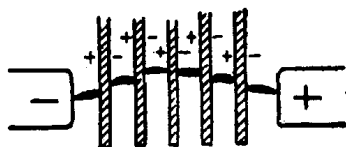


图 1-14 用金属片分隔电弧

根据交流电弧中弧隙介质强度恢复过程的上述特点，如果用金属板把一条电弧分隔成几段短弧，如图1-14所示，则每段短弧都有自己的阴极，在电流过零时每段弧隙中都会立即出现200V左右的介质强度。如果它们的总和大于弧隙外加电压，则电弧便不再重燃。这是熄灭交流电弧的一种方法。

对于很高的电压，近阴极效应是无足轻重的。

第三节 熄灭交流电弧的基本方法

熄灭交流电弧的方法大致有以下几种：

一、拉长灭弧

在空气中把电弧拉长可以使电弧熄灭，因为电弧被拉长后增加了散热面，电弧的热量容易散出去，有利于去游离。

为了说明电弧与电压、电流的关系，同时了解高压隔离开关的结构及其开断电流的能力，下面对几种不同电压等级的隔离开关分别进行拉弧试验。

(1) 对110kV双柱式隔离开关拉弧试验。该试验是在10kV电压下，以电阻为负载进行的。当电流分别为20A、30A、40A、50A时进行拉弧开断试验，发现当电流大于40A以上时所产生的电弧，该隔离开关已不能顺利拉断。试验时，往往由于燃弧时间超过保护整定值而被试验设备的保护开关所切断。

(2) 对500kV三柱式隔离开关拉弧试验。试验电压500kV，以电容作负荷，开断电流为0.35A。开断时电弧已很长。如果电流大于1A，此开关已不能开断。

(3) 对500kV剪刀式隔离开关拉弧试验。其情况同(2)。

(4) 对220kV三柱式隔离开关拉合空载母线。这是通过220kV配电装置中的隔离开关拉合150多米长的空载母线，开断的电流只是很小的空载母线之间以及对地的电容电流，此时就已产生了不小的电弧。

由于隔离开关只能开断很小的电流，开断大电流时会产生强烈的电弧，可能引起严重的事故，所以高压隔离开关一般不允许带负荷操作。

利用在大气中增大拉弧距离来熄灭电弧，在高电压下是不现实的办法。例如在大气中开断交流110kV、5A的电流时，电弧的长度已超过7m。

电弧的熄灭还与分闸速度有关。在其它条件相同的情况下，分闸越快，电弧的散热面增加得就越快，这就使得热游离迅速减弱，有利于灭弧。当然，由于机构方面的原因，分闸速度的提高是受到限制的。

二、磁吹灭弧

磁吹灭弧就是利用磁场对电弧产生作用力，使电弧在新鲜的介质中移动，并被拉长而熄灭。

图1-15就是一种磁吹灭弧原理示意图。当电流通过磁吹线圈1时，产生磁场。磁场的方向可用“右手法则”确定，磁吹线圈内的磁场方向指向读者，以点表示；磁吹线圈外触头处的磁场方向背离读者，以“叉”表示。触头附近的磁场对电弧产生作用力，力的方向可按“左手法则”确定。在电磁力的作用下，电弧向上运动，并被拉长而熄灭。

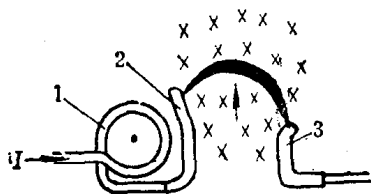


图 1-15 磁吹灭弧原理示意图
1—磁吹线圈；2—静触头；3—动触头

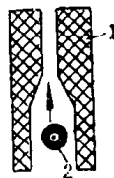


图 1-16 窄缝灭弧
1—灭弧罩；2—电弧

三、窄缝灭弧

如果迫使电弧进入由耐高温绝缘材料制成的窄缝，见图1-16，可以加速电弧的熄灭。其灭弧因素大致有以下几个方面：

(1) 窄缝限制了电弧直径，增加了弧隙压力，加强了电弧内的再结合过程。

(2) 导电质点与固体表面接触，有利于其在此处进行再结合。

(3) 冷的固体表面对电弧有冷却作用，可减弱热游离，而有利于去游离。

窄缝的结构形式很多。图1-16所示为一种最简单的窄缝灭弧罩的断面。电弧在下部宽阔处产生，并被磁吹线圈产生的磁场吸入上部窄缝。

图1-17所示的接触器，就是利用磁吹的办法使电弧进入窄缝灭弧罩来灭弧的。它被广泛地应用在500V及以下的交流或直流电路中。

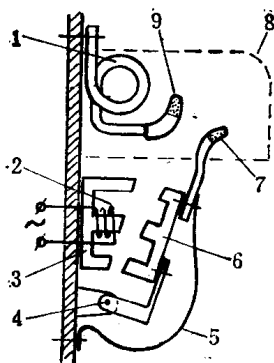


图 1-17 磁吹接触器示意图
1—磁吹线圈；2—合闸线圈；3—铁芯；4—转轴；5—挠性连接条；6—衔铁；7—动触头；8—灭弧罩；9—静触头

在窄缝灭弧罩8的两侧还有导磁的钢板(图中未示出)，它将电流通过磁吹线圈所产生的磁场较集中地引导到电弧燃烧的区域，以加强磁吹能力。

接触器动作过程如下：

合闸线圈2通电后，衔铁6被吸向铁芯3，带动动触头7运动，使触头闭合。合闸线圈失电或电压降低后，触头和衔铁靠其自身重量(或弹簧力)而打开。

接触器适宜于频繁操作。

由于其灭弧装置较简单，只能用于切断负荷电流，不能切断很大的短路电流，但可与熔断器配合使用。

我们通过对额定电流为400A的磁吹接触器所进行的试验，表明了窄缝灭弧罩和磁吹联合作用下的灭弧效果。在有