

高压限流熔断器

王 季 梅

GAOYAXIANLIURONGDUANQI 西安交通大学出版社

TM 563

368166

W 222

高 压 限 流 熔 断 器

王 季 梅

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了国内外熔断器的发展概况,基本参数和要求。重点讨论了高压限流熔断器的分类、结构及电弧的数学模型。介绍了高压限流熔断器的设计计算、材料选择及其试验与应用,并论述了高压限流熔断器的特殊生产工艺和测试设备。

本书可供从事熔断器设计、制造、运行和维修人员参考,也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

DL91/05
(陕)新登字007号

高压限流熔断器

梅 壮 梦 云

西安交通大学出版社出版
(邮发编码 710049)

西安交通大学出版社电脑排版
西安交通大学出版社印刷厂印装
陕西省新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 6.625 字数: 137 千字

1991 年 12 月第 1 版 1991 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1 — 2000

ISBN7-5605-0426-4/TM·20 定价: 1.75 元

序 言

熔断器已生产了一百多年，现在世界各国和我国已大量生产和使用各种熔断器。电力用熔断器已广泛安装于保护电气设备和配电系统的各个部门，并且起到了限制事故扩大和确保用户安全供电的重要作用。

熔断器不仅电气工程师熟悉，而且所有的人都会使用，因为熔断器从各方面来看是一个比较简单的电器。它的结构确实并不复杂，但必须指出，要设计和制造出使用满意和符合性能要求的熔断器并非容易的事，必须在设计时经过一番精心的考虑，并在制造过程中严格控制才能完成。

当前对高压限流熔断器性能的进一步改进和提高还在继续不断地研究。例如，如何通过数学模型的分析方法来深入地研究熔断器的燃弧过程，如何扩大熔断器低过载的保护范围和不断提高熔断器的分断能力等。本书对这些方面在编写的过程中都已有所注意。

为了满足当时国内低压熔断器生产和广大读者学习的需要，作者曾于1979年编写出版过一本低压熔断器的参考书，起到了良好的效果。目前国内已开始生产高标准和高分断能力的高压限流熔断器，并对引进的国外高压限流熔断器制造技术进行消化和国产化工作，以满足电力部门使用的需要。作者认为当今出版一本论述高压限流熔断器的书籍是十分必要的和有意义的工作，它将有助于推进我国高压限流熔断器

的发展。

本书着重介绍了近几年来国内外熔断器的发展概况；熔断器的基本参数和要求；高压限流熔断器的分类和结构；限流熔断器的电弧数学模型；高压限流熔断器的设计计算及其材料的选择，并举了典型的设计计算实例；高压限流熔断器的试验和应用；最后，还论述了制造厂生产熔断器的特殊生产工艺和测试手段。

本书可供从事熔断器设计、制造、运行和维修人员参考，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

本书由西安交通大学王季梅教授主编，蔡龙权、石小雨工程师助编。其中，除第六章由石小雨执笔，其余各章均由王季梅教授执笔。

本书在编写和出版过程中，得到了西安熔断器厂的支持和资助，提供了部分资料，充实了本书内容。本书定稿时，还请机械电子工业部第七设计研究院夏先梅副总工程师（研究员高级工程师）进行了审阅，在此一并表示感谢。

编者

1991年4月于西安

目 录

序 言

第一章 绪 论

- § 1-1 发展概况 (1)
- § 1-2 高压熔断器的基本要求和参数 (10)
- § 1-3 国内外熔断器的生产情况 (11)

第二章 高压限流熔断器的分类与结构

- § 2-1 高压限流熔断器的分类 (13)
- § 2-2 一般高压限流熔断器的结构 (14)
- § 2-3 全范围限流熔断器的结构 (17)

第三章 限流熔断器的电弧数学模型

- § 3-1 限流熔断器的弧前现象描述 (32)
- § 3-2 限流熔断器电弧数学模型的建立 (40)

第四章 高压限流熔断器的设计计算及其材料选择

- § 4-1 基本概念 (57)
- § 4-2 熔断器零部件的设计和计算 (65)
- § 4-3 主要材料和零件的选择 (70)
- § 4-4 设计计算实例 (73)

第五章 高压限流熔断器的试验

- § 5-1 概述 (83)
- § 5-2 外观检查和外形尺寸检查 (84)
- § 5-3 直流电阻值测量 (85)
- § 5-4 温升试验和功耗测定 (87)
- § 5-5 时间-电流特性试验 (90)

§ 5-6	电气绝缘性能试验	(93)
§ 5-7	I^2t 和限流特性测试	(94)
§ 5-8	耐受过载特性试验	(94)
§ 5-9	分断能力试验	(97)
§ 5-10	油密封试验	(107)
§ 5-11	触发器试验	(107)

第六章 高压限流熔断器的应用

§ 6-1	高压限流熔断器使用导则	(110)
§ 6-2	电动机的保护	(116)
§ 6-3	电力变压器的保护	(118)
§ 6-4	发电机的保护	(123)
§ 6-5	电压互感器的保护	(130)
§ 6-6	电力电容器的保护	(133)

第七章 特殊生产工艺和特殊测试设备

§ 7-1	玻璃纤维管外壳制造工艺	(138)
§ 7-2	铝上镀铜和镀银工艺	(140)
§ 7-3	铝熔体的点焊工艺	(151)
§ 7-4	铝导电板的导电氧化工艺	(151)
§ 7-5	石英砂的固化工艺	(153)
§ 7-6	检查熔断器熔体的 X 光射线诊断设备 ...	(154)

附 录 一

I.E.C 推荐的高压限流熔断器熔体管外形尺寸	(160)
-------------------------------	-------

附 录 二

并联电力电容器外保护用的高压限流熔断器的基本

要求	(164)
----------	-------

附 录 三

国产 X 光射线诊断熔断器熔体设备线路图	(168)
----------------------------	-------

附 录 四

户外高压限流熔断器的特殊试验	(174)
----------------------	-------

附 录 五

城市环网供电单元简介和熔断器的选择	(175)
-------------------------	-------

附 录 六

西安熔断器厂生产的高压限流熔断器规格	(179)
--------------------------	-------

附 录 七

高压限流熔断器名词术语	(197)
-------------------	-------

参考文献	(200)
------------	-------

第一章 绪 论

§ 1-1 发展概况

熔断器作为一种保护电器，在电力系统中使用已有一百多年的历史了。由于熔断器在运行和操作过程中具有独特的优点，因此至今还被广泛地应用在各个方面。

目前，熔断器的研究仍然是人们感兴趣的课题之一，其内容包括：熔断器的弧前现象和温升问题，熔断器的电流分断和电弧现象，熔断器的应用技术和熔断器产品的发展，熔断器的试验技术和试验标准，熔断器的老化现象及可靠性问题研究等等，并且各个方面的研究工作均取得了不同程度的进展。本章将简要介绍熔断器在各个方面的研究工作状况及今后的发展方向。

一、熔断器的弧前现象和温升问题

在熔断器弧前现象的研究方面，发表的论文比较多，研究工作也进行得比较深入。很早以前，由于熔断器的熔体形状比较简单，一般都是圆丝状或条状形的，人们对弧前特性的分析大都是以绝热假设为基础，利用 $\int i^2 dt$ 为常数来进行计算。然而，由于熔断器的发展，熔体大多采用了变截面的带状熔体，这时再用前面这种方法来分析就不够准确了。当

代，由于计算机的发展和应用，这一研究课题得以不断地向纵深发展。英国的 A. Wright^[1]应用计算机对熔断器的弧前现象进行了分析。他在分析中，对特大的短路电流情况，由于时间极短，可以认为热量不会发生传导和扩散，即以绝热为基础，利用 $\int i^2 dt$ 为常数来分析；而对处于一般短路电流的情况，他认为热量只有熔体间发生传导，而不考虑砂子及端子的传热，采用有限差分方法计算其热过程；如果熔断器上通过小的过载故障电流时，则必须考虑砂子的传热；在最小熔化电流或稳态工作电流时，应考虑熔断器各部分的传热。这样各种电流下的热分析与实际情况相接近，因此计算结果也就比较精确了。此后，其他的一些学者也发表过不少有关这方面的文章，提出了各种理论计算方法或半经验分析模型。在各种不同型式的熔断器的弧前现象研究中，人们通过真空和空气中的细丝状熔体熔断器热损耗机理的测量，得出结论：真空熔断器的动作总功率要比小管子中无填料熔断器的小得多。在熔断器承受周期性负载的弧前现象进行的研究表明，空气中弯曲形状的熔体能提高其抗张能力。熔体散热和电流分布的均匀性对熔断器承受周期性负载的稳定性有很大裨益，熔体埋置于石英砂中，也能提高周期性负载的稳定性。熔断器填料对弧前特性也有很大影响，研究表明采用氧化铝砂填料，熔断器的弧前温升要比氧化硅砂填料的低。有关熔断器弧前现象的研究工作，无论在理论计算和试验研究方面，均取得了很大的进展。目前，这方面的研究工作仍在不断地进行，尤其是在向更精确的计算和模拟方法的方向发展。

熔断器稳定运行的温升，是熔断器性能指标的重要参

数，特别是大容量熔断器，温升问题是产品研制过程中要解决的首要问题之一。目前，有关这方面的研究工作也做过不少。为了降低熔断器稳定运行时的温升，改善熔断器的性能，研究者们采取了许多有效的措施，比如：熔体上采用冶金效应点。这种冶金效应点有两个作用，第一是改善熔断器低过载故障电流的分断性能；第二是降低熔断器的温升，如对熔断器采用强迫冷却措施，即采用水冷管对熔断器进行冷却，在熔断器两端加散热片等，还有采用金属作为熔断器外壳，以改善其稳定运行时外壳的散热条件。在熔断器稳定温升的理论计算方面，也做过一些工作。由于在稳定运行条件下，熔断器各处部件的热作用对温升均有影响，从理论上精确地描述熔断器各部分的热作用还比较困难，因此要很精确地计算熔断器的稳态温升还不太容易。然而，这一热过程的研究与熔断器弧前现象的研究一样，研究者对熔断器的各部分的热作用（如石英砂、端盖、外壳以及触刀等）采用热阻、热容进行等效，建立一个比较易于分析和计算的等效模型，这种模型能较好地计算熔断器的稳定温升，并能达到一定的精度。对熔断器稳定运行的温升的研究，直接影响着熔断器产品的设计，特别是大额定电流的高电压熔断器，其稳态温升是产品设计要解决的主要问题。

二、熔断器的电流分断和电弧现象

熔断器的电流分断和电弧现象的研究，一直受到广大研究者的重视，因为它直接关系到与其他保护装置和控制设备的匹配，关系到保护的各种电路和设备的安全以及工作人员的人身安全。有关这方面的研究工作，开展得较多，发表的

论文数目在熔断器研究领域占有较大的份量。

研究者们研究了熔体的结构、熔体的厚度、宽度、并联数和窄颈数等对熔断器电流分断的影响。结果发现，在许多的因素中，熔体的厚度对熔断器电流分断性能的影响比较显著，减小熔断器熔体的厚度，有利于提高熔断器的电流分断性能。对于同一电流等级的熔断器，如果采用许多细薄的熔体并联，要比采用单个较大尺寸的熔体好得多。因为采用许多细薄熔体并联，熔断器的散热条件有所改善，且燃弧期间的 I^2t 值明显地减小，燃弧过程中弧柱的金属蒸汽扩散面也大大增加，有利于介质恢复强度的提高。

在有填料熔断器的研究中，熔断器填料的颗粒度、填充密度、填料的材料组分等等对熔断器灭弧性能的影响，也是人们较关心的课题之一。许多学者对很多不同材料的填料，或者许多材料混合采用不同的组分等作为熔断器的材料，进行了试验研究，全面比较这些材料对燃弧过程中各参数（如燃弧时间、燃弧 I^2t 等）的影响，认为石英砂作为熔断器的填料是最理想的。近年来，又发现了石英砂填料固化后，即通过胶合作用使石英砂填料的颗粒合成为一个牢固的整体，能提高熔断器的极限分断能力。因为石英砂固化以后，可以有效地抑制燃弧过程中电弧直径的扩展。

熔断器在分断电流以及燃弧过程中所产生的压力，有许多文章进行了论述。许多学者对此进行过大量的理论分析和试验研究，并且认为熔断器在分断大短路电流时所产生的压力有两个阶段，第一个阶段为熔体熔化并汽化产生的压力，称为爆炸压力；这一阶段以后，由于电弧能量使压力逐渐增加，这个阶段的压力称为燃弧压力。这两种压力均有可能引

起熔断器外壳炸裂。目前，有关这方面的研究工作仍在不断地进行，并对压力产生的机理，以及压力的分析计算，压力波的传播过程等作出理论解释和建立数学模型。

石英砂的低过载电流分断性能，一直是难以解决的问题，关于这一问题的研究，人们也颇为重视。为了提高熔断器的低过载电流分断性能，已采取了许多有效措施，如采用电弧电极方法，其熔体结构是由主熔体、辅助熔体、冶金效应点以及电极间隙组成；或者采用产气熄弧方法，主要利用产气有机材料（如聚氯乙烯、聚四氟乙烯等）作支撑，电弧燃烧后，由于电弧的高温作用，使得有机材料分解而产生气体，这种气体便可起熄弧作用，使电弧以较快的速度熄灭。近年来，由于全范围熔断器的出现，这一方面的研究工作就更为活跃了。

对于熔断器电弧数学模型的研究，发表的论文数量也不少。在 70 年代以前，人们建立电弧数学模型时，基本上是假定其电弧直径为常数。然而实际电弧通道是随着电弧的燃烧而不断发生变化的，到 70 年代后期，许多研究者如英国的 A.Wright^[10]和 Gnalingam.S^[11]等，通过试验观察和对熔断器分断电流后的残体分析，提出了电弧通道随电流、时间等参数变化的概念，并在所建立的电弧模型中设法考虑这一因素的影响。此后，许多研究者在建立电弧数学模型时，均考虑了电弧通道变化这一因素。然而，由于熔断器在电流分断过程中，随故障电流的大小不同，分断电流的方式和性能也不同，所以熔断器在分断短路电流时的电弧特性与分断低过载电流时的电弧特性完全不同。短路情况下熔断器的分断过程比较简单，研究的人较多。而低过载电流情况下熔断器的分

断过程比较复杂，建立电弧数学模型比较困难，这方面的工作做得比较少。直到目前为止，在低过载电流下，只有极为简单的条件如直流电路条件下，单根均匀熔丝的熔断器分断小电流时的电弧数学模型。有关这方面的研究，也正在向更精确，且通用性更强的理论模型方向发展，特别是随着全范围分断能力熔断器的出现和应用，对熔断器在交流条件下的变截面熔体分断低过载电流时电弧数学模型的研究的要求也日益迫切起来。

总之，有关熔断器的电流分断和电弧现象的研究工作进行得比较深入，它的涉及面也很广。除了上述介绍的几个方面外，还有熔断器在不同电流条件和电路条件下的分断性能，熔断器的燃弧速度，电弧通道的扩展速度等等，几乎在涉及影响电流分断性能的每一个方面均做过不同程度的工作，这一方面的研究工作仍然是目前和今后的一个重要课题。

三、熔断器的发展和应用技术

由于计算机的迅速发展，计算机模型的广泛使用，使熔断器的设计工作有了新的发展。人们可以非常容易地研究和计算出参数的基本变化及其对熔断器动作性能所产生的影响，而不需要进行大量的试验研究，这样不仅节约了研制熔断器的费用，而且缩短了研制周期。尽管最终的设计完成后仍然需要进行试验，但是，在研制过程中的许多研究性工作，可以在计算机上模拟完成。

随着电力系统的不断发展，对各种保护电器的要求也愈来愈高，熔断器的性能也随之向更高要求的特性方向发展，

且产品的种类和用途也不断扩大。通过对熔体强制冷却的方法，研制出了快速动作的大容量限流熔断器，并且对几种冷却剂进行试验研究，发现用水作为冷却剂效果最佳，这种设计可将直流和交流高压限流器结合起来，保护交-直流变换的晶闸管。采用镉作为熔体，制造的高压熔断器，能得到较高的分断特性，且熔体不需要支撑。近年来，还研制出一些新型的全范围熔断器，它不仅能分断大短路电流，而且可以实现低过载故障电流的分断保护，同时其性能指标也大为改善。

在自复熔断器的研究方面，也得到了进一步发展。对许多材料，如石英玻璃，金刚砂，块滑石，萤青石等介质及铟、镓、铅、钾-钠合金与氧化铍的低共熔混合物等等均做过研究。

为了满足工业发展的需要，迄今为止已研究出了许多特殊用途的熔断器。例如，利用元件的热作用，在元件进入热逸出状态时，熔体颈缩处的电迁移增加，从而达到高阻状态来分断电路，这一原理可用来设计保护光谱仪端部电子元件的特殊电迁移熔断器。

为了降低熔断器功耗，目前已生产出了真空熔断器。这种熔断器熔体可采用铜，在陶瓷管内有一对铜燃弧电极，同时还有一对产生磁场的线圈。在正常情况下，由于熔体长度短，内阻小，因此消耗的功率很低；在分断电流时，线圈可以产生纵向磁场，以利于电弧的熄灭，这种熔断器具有一般保护和电动机保护特性。

迄今为止，还出现许多新型熔断器，如 SF_6 气体介质熔断器、旋弧熔断器、热熔熔断器、用以保护电子电路的超微型

熔断器、混合式熔断器、电子熔断器等。

在熔体的设计和填料方面的研究工作也取得了一些进展，如铝熔体的应用，通过固化作用提高填料的导热率和分断性能，在骨芯上或熔体上加产气材料提供电弧控制等等。

熔断器的应用和保护范围已进入到越来越复杂的电子电路的保护和对设备及电路元件更紧密的保护。半导体器件的保护，必须用快速动作的限流式熔断器。目前，对各种解决办法均作过探讨，并且能提供对典型电路保护时熔断器的选择指南。变压器的保护已有各种不同的改进方法，如采用喷射式熔断器和金属氧化锌避雷器来解决由于熔断器动作时产生的过电压而导致变压器的损坏问题。电动机的保护，可通过熔断器的特殊设计和熔断器与其他保护装置紧密配合来完成，或者用 MCCB 的恒定功率熔断器串联保护来实现。近来，应用电子计算机计算断路器和熔断器串联时动作和脱扣特性的配合，以及用来经济地选择电缆大小和熔断器的配合。

随着科学技术的不断发展，熔断器设计和应用将会向着更高性能和更紧密的保护方向发展，以不断满足生产和实际的需要。

四、熔断器的试验技术和试验标准

熔断器的试验技术，也是熔断器的一个研究课题，特别是随着熔断器断流容量的不断增大，研究一种等效的试验方法以加速试验进程，缩短试验周期，节约试验费用，就显得愈为迫切了。目前正在研究对高分断能力熔断器极限分断能力试验采用一种合成回路的等效试验方法，研究的核心问题

是如何解决在限流峰值以后恢复电压的加入及其等价性的论证。此外，通过数学推导，研究出一种确定限流熔断器的最大电弧能量时的预期电流值。

熔断器的试验标准也随着实践经验的不断积累和生产技术发展的需要不断地改进。当前全范围熔断器产品已生产出来了，如何进行熔化电流的开断试验及其标准的制订工作也更为迫切了。

五、熔断器的老化现象及可靠性问题

熔断器的老化问题，特别是冶金效应材料对它的影响，一直是人们感兴趣的课题之一。对于这一方面的研究，如扩散、温度、冶金效应点的形状和材料对时间-电流特性的影响，熔体的形状和材料、冶金效应点相对于窄颈的位置对熔断器老化问题的影响，已有许多论文进行过阐述。对于有冶金效应点的铜熔体熔断器，在循环承受电流负载条件下进行研究，得出两种老化机理：在承受大电流而短时间通电的循环负载电流情况下，窄颈老化问题显著。即老化主要是由于熔体氧化所致，老化主要发生在熔体的窄颈部位。而在承受小电流而长时间通电的循环负载电流情况下，扩散过程起主要作用，即熔体上冶金效应点材料扩散而导致熔断器老化的作用非常显著。对于无冶金效应的铜熔体熔断器，其老化主要是由于氧化引起的。熔断器电接触部分的老化问题也有研究者论述过，通过镀银、镀镍、镀锡熔断器在高温环境无载情况下的接触电阻研究，发现镀银时，电接触能维持较低的接触电阻，即使在长时间缓慢变化的温度循环时也是如此。