

高压交流 熔断器及其应用

王季梅 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高压交流熔断器 及其应用

王季梅 编著



机械工业出版社

本书介绍了高压交流熔断器的发展史,当今国内外高压交流熔断器的科研动态、成果和今后发展的方向,并阐述了国内外生产的各种高压交流熔断器的工作原理和结构特点以及数学模型分析等,还简述了我国国家标准规定的高压交流熔断器的试验方法及各项要求,最后还推荐了一种有关高压交流熔断器在生产过程中保证产品质量的管理体系。

本书适用于从事高压电器行业设计、制造和使用部门的有关工程技术人员参考,并可作为高等院校电器、发输配电等专业的教学科研和研究生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高压交流熔断器及其应用/王季梅编著. —北京:机械工业出版社, 2005.10

ISBN 7-111-17476-3

I. 高… II. 王… III. 高压熔断器 IV. TM563

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 112039 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:林春泉 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新

封面设计:马精明 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm $1/32$ · 9.625 印张 · 256 千字

0 001—4 000 册

定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

我国的高压交流熔断器制造技术水平经历了几十年的实践,从 20 世纪 80 年代末又引进了国外高压交流熔断器的近代制造技术,在各方面取得了极大的进步。到目前为止,已基本上达到了国际 20 世纪 90 年代的制造技术水平,并已具备自行设计和开发新产品的能力,满足了我国电力工业的发展和工矿企业生产的需要,但开发的品种和发展的速度与国外先进国家相比,还有一定的差距,有待于继续努力。

作者自 20 世纪 50 年代开始从事于熔断器的研究工作,尤其自 1984 年起以熔断器专家和教授的身份被国际熔断器及其应用学术会议组织选聘为该学术组织的科学委员会委员,经过了 20 多年的参与国际有关熔断器学术活动和国外制造厂相互进行有关熔断器技术经验交流,不断为我国高压交流熔断器的制造行业提供了国际间的信息、报道了科学研究的动态和制造技术的动向等。作者认为,当今总结有关高压交流熔断器的制造技术经验和介绍国内外的情况以及其动向,对推动我国高压熔断器的进一步发展是极其有帮助的,为此重新整理编写了本书。

本书的主要内容:介绍了国内外对高压交流熔断器的科研动态、成果和今后发展的方向;阐述了高压交流熔断器的发展简史以及基本参数、结构、工作原理和试验等。本书反映了我国高压交流熔断器的今后发展方向和趋势。

作 者

2005 年 8 月于西安

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 高压交流熔断器发展简介	1
1.2 高压交流熔断器的基础知识	4
1.3 国际标准和国家标准的现状	12
1.4 当前熔断器的基础研究概况	19
参考文献	27
第 2 章 高压交流限流熔断器	29
2.1 概述	29
2.2 高压交流限流熔断器的分类与应用	39
2.3 高压交流限流熔断器的试验	56
2.4 保护电动机的高压熔断器耐受过载特性试验	64
参考文献	70
第 3 章 高压交流非限流熔断器	72
3.1 概述	72
3.2 非限流熔断器的结构	72
3.3 我国生产的非限流熔断器	76
3.4 喷射跌落式熔断器用熔断件	82
3.5 喷射跌落式熔断器的试验	84
3.6 高压交流跌落式熔断器的今后发展方向	91
参考文献	94
第 4 章 并联电力电容器外保护用高压交流熔断器	95
4.1 概述	95
4.2 有关并联电力电容器装置技术要求	96
4.3 电力电容器故障电流开断的分析	103
4.4 保护电力电容器的高压熔断器试验	107
4.5 举例设计保护三相 10kV Δ 形联结、容量为 3 (4 $\times$ 500kvar)	

电力电容器用的高压限流熔断器	111
参考文献	113
第 5 章 高压交流真空熔断器的设计、计算和应用	114
5.1 真空熔断器的发展简史	114
5.2 高压真空熔断器的设计、计算和分析	119
5.3 高压真空熔断器的应用	142
参考文献	149
第 6 章 高压交流限流熔断器组成的快速开断器	151
6.1 法国 FERRAZ 公司生产的高压交流快速开断器	152
6.2 德国 ABB 公司生产的高压交流快速开断器	163
6.3 英国 EC&M 公司生产的高压交流快速开断器	168
6.4 英国电力研究所 (EPRI) 生产的高压交流快速 开断器	170
6.5 我国生产的高压交流快速开断器	172
参考文献	183
第 7 章 熔断器与其他电器配合的有关问题	184
7.1 熔断器与负荷开关配合的转移电流和交接电流	184
7.2 隔离开关与全范围保护熔断器组合的优越性	196
参考文献	212
第 8 章 限流熔断器的电弧数学模型	214
8.1 限流熔断器的弧前现象描述	214
8.2 限流熔断器电弧数学模型的建立	220
参考文献	234
第 9 章 产品质量保证体系	235
9.1 概述	235
9.2 质量保证体系	235
9.3 外购材料和配件的检验	236
9.4 巡回检查制度	240
9.5 最后检查	242
9.6 其他零部件检查	243
参考文献	243
附录	244

附录 A 高压熔断器过载因数 K 的计算	244
附录 B 用于起动电动机的高压熔断器图表	248
附录 C 石英砂固化技术	258
附录 D 硼酸熔断器与限流元件的组合	260
附录 E 开关设备用油密封熔断件温升试验时的布置	262
附录 F 关于限流熔断器焦耳积分的计算公式	263
附录 G 高压交流熔断器的配合	266
附录 H 熔断器密封用硅橡胶	273
附录 I 检查熔断器熔体的 X 光射线诊断设备	276
附录 J 保护高压电压互感器用的熔断器	285
附录 K 用并联谐振电路测试高压交流限流熔断器的时间- 电流特性	292
附录 L 高压交流熔断器术语	299
参考文献	301

第 1 章 概 论

熔断器已生产了 100 多年，现在世界上很多国家和我国均已大量生产和使用熔断器。它们承担着保护电气设备和电网的重要任务，并且限制了不可避免的事故发生和确保了用户供电安全。

熔断器不仅电气工程师熟悉，而且大多数人都熟悉，都会使用，因为熔断器从各方面来看是一个简单的电器，它的结构确实并不复杂，但要设计和制造出达到性能优良的熔断器确实也是很不容易的。为此，一个比较正规能生产出合格熔断器产品的熔断器制造厂，应具备一定数量的设计工程师和工艺工程师，优良齐全的测试和检验手段，以及有一套完整的制造装备。

当前世界各国制造厂和研究单位除在不断努力改进熔断器产品的性能，尤其是提高熔断器的分断能力外，还随着当今电子技术和计算机技术的飞速发展，促使电力系统的各项保护设备向自动化、智能化和小型化方向迈进，以满足我国国民经济快速进入小康社会和尽快达到国际先进水平而成为世界电力大国的要求。

作者认为，论述高压交流熔断器是一项很重要和很有意义的工作，所以决定整理有关材料和出版这本书。书中介绍了熔断器的历史和早期发展过程，并描述了现在生产的高压交流熔断器的结构及其今后的发展方向，叙述了近期国内外的理论研究和今后研究的动向。最后还介绍了我国正在开发的几种新颖的高压限流熔断器。

1.1 高压交流熔断器发展简介

根据查阅到的文献资料得知，发电机的发明早在 1878 年左右，由德国的西门子（Siemens）和美国的爱迪生（Edison）等人

分别同时发明制造成功的。图 1-1 所示为 Edison 公司发明生产的双极直流发电机，用当时的往复式蒸汽机作为动力来拖动直流发电机，并且很快地推广到英国、法国和俄罗斯等欧洲国家，不久很快地参照直流发电机的原理为基础制造出单相和三相交流发电机，频率为 50Hz 和 60Hz，曾同时产生过 25Hz、125Hz 和 133Hz 的交流发电机（使用上存在不少缺陷），但很快地被淘汰了。当时的交流发电机主要用于由爱迪生发明的弧光灯和钨丝灯作城市照明用。

发电机和各种电气设备包括照明电器设备均采用简单的低熔点金属丝作为电路的断路保护。并且已开始有专门的学者研究熔断器的熔断过程和分析熔断机理，一个有意义的有关熔断器的论文就是 1886 年由 A.C. Cockburn 完成的^[1]，他研究了热作用是如何从熔断器熔体向两端传导，以及如何传递到和熔断器熔体相连接的电缆上，从而认为热传导可以明显地影响一个熔断器熔化的最小电流值。他还研究了导体的特性，并且考虑了比热、温度系数和电导率，以及其他一些参数，目的是要选择最适合作为熔断器熔体的材料。他认识到材料如易于氧化就不适合作为熔断器的熔体，因为这样的熔断器，其性能将随着时间增长而发生变化。

19 世纪的最后 10 年中，熔断器已成为惟一有用的保护装置，那时在德国、美国、英国和法国等已开始广泛使用高压熔断器，它是由一个两端开口并有插头引线的陶瓷管、绝缘管、硬化橡胶管或类似的绝缘材料制造的。铜或合金的熔丝穿过管子，用螺钉和平板夹住焊到接线端上。用于 2000 ~ 5000V 电压的熔断器，管子的长度在 200 ~ 400mm 之间。那时德国曾采用粗大的管式熔断器用于电站，它们的长度为 1200 ~ 1500mm，在英国曾制造了造价很高的油浸式熔断器，对开断高压线路的短路电流事故变得十分容易。在美国也是如此，在较高的电压下推广应用油浸式熔断器。

在 20 世纪期间，世界各国实施了继电保护方案，当时已有

了油断路器，由它和继电保护结合来进行线路的保护。然而，由于世界范围内使用电气设备数量的剧增，对熔断器的需求仍一直在增加，为了与油断路器竞争，这就引起研究者们对熔断器一些基本现象的研究，例如电弧过程的研究以及寻找如何来提供具有旋转电机等特性的熔断器。从参考文献中可知，研究所取得的进展是很大的，但熔断器在某些方面的特性仍得不到充分了解，直到 20 世纪 70 年代在欧洲成立了熔断器俱乐部。不久，于 1976 年在英国利物浦（Liverpool）召开了第一届国际熔断器及其应用会议。以后于 1984 年在挪威特隆赫姆（Trondheim），于 1987 年在荷兰爱汀豪闻（Eindhoven），于 1991 年在英国诺丁海姆（Nottingham）、于 1995 年在德国依尔米诺（Ilmenau），于 1999 年在意大利托里诺（Torino）和 2003 年在波兰克唐斯克（Gdansk）分别召开了第二、三、四、五、六届国际熔断器及其应用会议。

关于我国高压熔断器的发展情况，在解放前基本上还没有高压熔断器制造业。最早生产高压熔断器的工厂，据调查只有一家，即位于南京的南京电瓷厂，当时该厂已生产了 10 多年从国外引进欧洲模式的 6kV 喷射跌落式高压熔断器产品，开断能力大约在几千安左右，广泛用于户外变压器的保护。

解放后，为了满足国民经济发展的需要，在党的领导下，在前苏联的援助下，在全国各地布点建起了制造高压熔断器的制造厂，由于高压熔断器的主要部件为陶瓷产品，故多数附设在电瓷厂，如抚顺电瓷厂、南京电瓷厂、上海电瓷厂和西安电瓷厂等内生产。制造的产品除各种高压喷射跌落式熔断器外，还生产各种高压限流熔断器，它们的电压等级最高可达到 63kV。对于我国高压熔断器的发展起了积极的推动作用。由于在发展过程中，对高压熔断器的制造技术和新产品的开发不够重视，仿苏的老产品已逐渐不受供电部门的欢迎，用各种高压断路器取代，迫使高压限流熔断器处于滞销阶段。

直到改革开放初期，即 20 世纪 80 年代初，由于高压真空接触器得到了广泛应用，中小熔断器的配电变压器采用熔断器保护

已无能为力，急需高压限流熔断器的配套，而国内现有的仿苏产品性能已满足不了配套的要求。在此情况下，西安交通大学和西安熔断器厂在 1982 年试制成功额定参数为 10kV、100A、31.5kA 的高参数高压限流熔断器，并全部通过了型式试验，投入了市场，受到用户们的欢迎。为了扩大生产，提高高压熔断器的制造技术，于 1988 年由西安交通大学王季梅教授亲自带领西安熔断器制造公司的工程师们去英国，在英国 Brush 熔断器制造公司实习并引进了全套高压熔断器制造技术和设备。目前国内已有很多能生产高压交流熔断器的制造厂，有些制造厂还具备开发新产品的能力。

1.2 高压交流熔断器的基础知识

熔断器是电气设备的主要保护元件之一，为了尽可能地满足被保护电气设备的各项要求，必须对高压熔断器的基础知识有一个了解。

一、熔体狭颈的形状对时间-电流特性的影响

熔体狭颈形状有很多种式样，一般有下列几种，这里列举两个比较典型的狭颈形状作为例子来说明其对时间—电流特性的影响。

第一种狭颈形状如图 1-1 所示，狭颈呈方框形状，图中设曲线 I 的长度为 Y ，曲线 II 的长度为 $2Y$ 。在这种情况下，狭颈长度从 Y 增长到 $2Y$ ，时间-电流特性曲线的上半部将向左移动，即在过载电流较小时，曲线 II 的动作时间明显地比曲线 I 要短得多。

第二种狭颈形状如图 1-2 所示，狭颈呈半圆形状，图中设曲线 I 的狭颈宽度为 $X/2$ ，曲线 II 的狭颈宽度为 $X/4$ ，在此情况下，狭颈宽度从 $X/2$ 减小到 $X/4$ ，时间-电流特性曲线的下半部将向左移动。即在大的过载电流到短路电流的范围时，曲线 II 的动作时间明显地比曲线 I 的短。

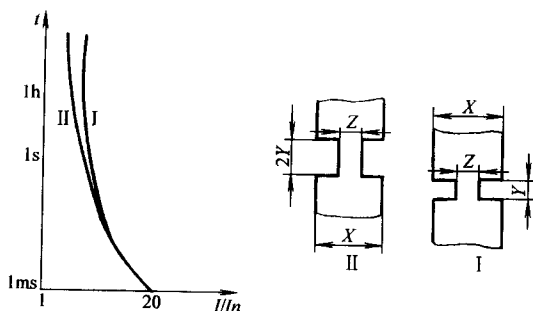


图 1-1 方框形狭颈熔体的时间-电流特性曲线

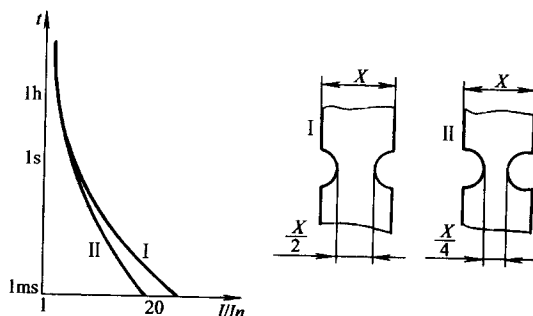


图 1-2 半圆形狭颈熔体的时间-电流特性曲线

二、熔体材料和熔体厚度的应用范围

在高压限流熔断器中，常采用纯银或电解铜作为熔断器的熔体材料。由于电解铜易氧化，至今尚未普遍采用。

熔体厚度的选择需要从各方面因素来考虑，例如熔体结构的强度、在正常工作下的散热状况和在开断短路电流时的突然发热等，但主要考虑在正常工作下的散热，例如额定电流为 200A 的熔断器，经常选取 2 片 100A 的熔体并联来替代 1 片相同电流密度的熔体，如图 1-3 所示。这样，在正常工作下的温升有显著降低。

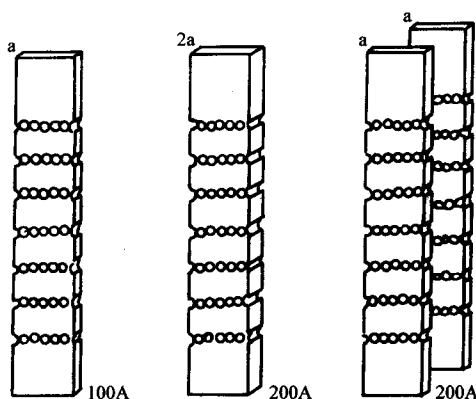


图 1-3 熔体厚度的对比图

三、冶金效应的应用

为了缩短熔断器在过载电流时的熔化时间，常在熔体上设置软锡焊点。当熔断器一旦发生过载电流现象时，则在熔体的软锡点上发生扩散过程，即软锡焊点处的锡会渗透到纯银熔体材料中去，这种现象称作金属的扩散作用，也称作冶金效应。它可使这部分电阻不断增大，最终导致软锡焊点处加速熔化，而开断电路。利用软锡焊点可降低纯金属的熔化温度，例如，电解铜的熔点为 1080°C ，纯银的熔点为 960°C ，而加入软锡后，软锡焊点处的熔点可降低到 220°C 左右。这样，可使过载电流时的熔化时间缩短到几分钟甚至几秒钟，例如，图 1-4 所示为具有软锡焊点的熔体和无软锡焊点的熔体之间的时间-电流特性曲线的对比。图中曲线 I 为无软锡焊点的时间-电流特性曲线和曲线 II 为有软锡焊点的时间-电流特性曲线。在软锡中再加入少量其他不同的金属后，还可不同程度地降

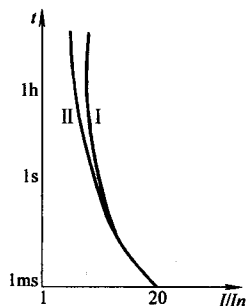


图 1-4 有软锡焊点和无软锡焊点的熔体的时间-电流特性曲线

I—熔体无软锡 II—熔体有软锡

低熔体熔化温度。当前各熔断器制造厂都有各自的配方。

冶金效应的缺点是容易使熔体老化,即使时间-电流特性曲线不稳定,为此,国外已有一些熔断器制造厂正在采取其他措施来改善过载电流的性能。

四、外壳

外壳是用来安放熔体和石英砂(灭弧介质)的容器。它应具有良好的电气绝缘性能和能承受熔断器开断短路电流过程中产生的冲击压力。同时它能经受短路电流产生的暂时的高温,短路电流通过时外壳的温度可能达到约 300°C 。所以到目前为止,大多数高压熔断器制造厂一直采用高强度陶瓷或高氧化铝陶瓷作为熔断器的外壳。

根据发展的趋势,熔断器的外壳,有些国家包括我国已部分开始采用耐高温的高强度玻璃纤维管来替代陶瓷外壳。

五、三种熔断器不同工作状态的分析

(1) 正常电流下的工作状态

熔断器处于正常工作状态是指通过的电流始终保持在等于或小于额定电流下的工作状态。这时熔断器熔体所产生的热量将使熔体温度升高,同时不断地向其四周扩散热量,当产生的热量与扩散的热量达到平衡状态时,温度不再升高,最终的温度分布如图 1-5 所示。

为了确定高压熔断器在正常工作状态下的温升,应将高压熔断器垂直布置,如图 1-6 所示。在上出线端测量其温升,得 ΔT_1 , 在上端帽端测量

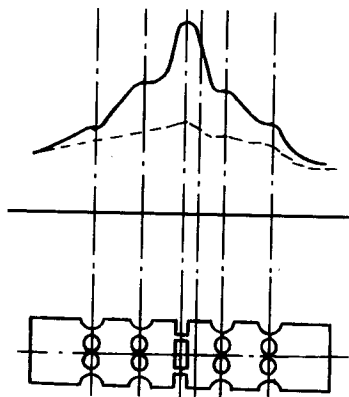


图 1-5 熔断器的温度分布曲线图
(虚线为额定电流,实线为过载电流)

其温升, 得 ΔT_2 。根据国际电工委员会标准和我国国家标准规定: 导电部分在铜镀银的条件下, 上出线端温升不应超过 50K 和上端帽端温升不应超过 65K。

(2) 过载电流下的工作状态

当熔断器超过一定数值的额定电流后, 经一定时间, 熔体的温升将达到熔化的温度。这时的功率损耗为

$$W = I^2 R_t$$

式中 I ——过载电流 (A);

R_t ——熔体的电阻 (Ω)。

但随着温度的升高, 熔体的电阻将随温度的上升而增大, 因此熔体的电阻值应按下式调整:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

式中 R_0 ——环境温度时的电阻 (Ω);

Δt ——温度的升高 (K);

α ——熔体的电阻温度系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

由于电阻的增大, 温度将加速地向熔体熔点升高, 在达到这一温度后, 熔体便在恒定的温度下开始熔化, 因为电流在这一时期内所产生的热能都转变为熔化潜热, 这一过程可由图 1-7 来表达。在熔化期内熔体呈液体状态, 所以其重量未发生作用, 仍留在原先位置, 并一直升温到汽化点。熔体的汽化也是需要一些时间, 在这一时期内, 电流将提供熔体汽化所需的潜热。

熔体在熔化点时, 由于热量突然增加使狭颈处电阻迅速上升。对于大多数的金属熔体的比电阻都存在一种熔化的不稳定的现象, 同时达到熔化点时狭颈处截面产生恶化也会引起大量的热量。狭颈处截面的恶化称作电磁收缩效应 (Pinch-Effect), 就是说液态金属熔体被电流途径的磁场形成了聚焦状态, 结果使熔体和电弧发生断裂。此时, 电流迅速下降, 同时电压迅速上升, 在

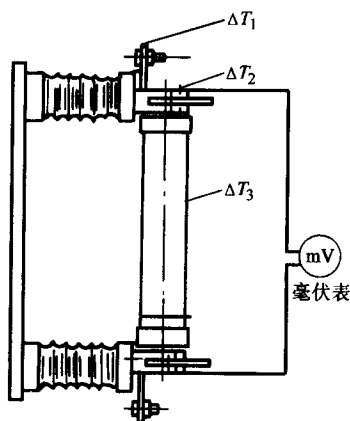


图 1-6 高压熔断器的温升测量

燃弧时间终了时，电弧电压将大于电源电压和感应电压为

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

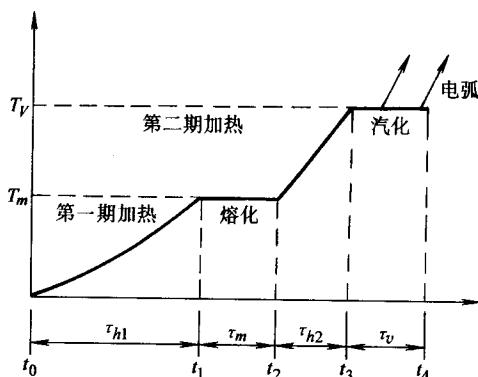


图 1-7 熔体温度上升直到电流开断的物理过程
($t_0 - t_1$)—开始升温至熔点的时间 ($t_1 - t_2$)—熔化潜热时间 ($t_2 - t_3$)—升温至汽化点的时间 ($t_3 - t_4$)—汽化潜热时间 (t_4)—汽化和产生电弧至电流开断

当电弧熄灭后，电压即降到电源电压，电路被开断。

高压熔断器在过载电流下的开断过程的电压和电流波形如图 1-8 所示。

从以上分析可得出下列结论：熔化时间是过载电流的函数，电流越大，熔化时间就越短。也就是说，熔体产生的热量增加与电流呈二次方的关系，而散出的热量对最小熔化电流的增加却为接近线性增加。

(3) 短路电流下的工作状态

在短路电流时，由于极陡的电流上升率和极高的电流密度使熔体所有狭颈在几毫秒内熔化和汽



图 1-8 高压熔断器在过载电流下的开断过程的电压和电流波形图

化。熔化和汽化的瞬间使所有狭颈处像爆炸般地产生电弧，这时几乎无热量传输，通常称这个状态为绝热状态。

在短路电流期间所产生的电弧能量，熔断器应能可靠地承受，并且持续到所谓允通电流的数值。由于石英砂周围熔体电弧的强烈熄弧和冷却作用，引起了非常高的电压上升，使所有电弧产生的总电弧电压将增加到大于电源电压和达到制造厂所指出的最高允许值。电弧的活动能力直到被石英砂冷却到相当程度后，即行熄弧。这时电流很快地下降到零，在电流过零时，电流被开断。

熔断器的开断时间（动作时间）由熔化时间和燃弧时间两部分组成，即

$$\text{开断时间} = \text{熔化时间} + \text{燃弧时间}$$

短路电流的开断过程首先是按正弦波上升，达到一定的限流值时即被开断。在短路电流下的开断过程典型电流和电压示波图如图 1-9 所示。

六、熔断器的焦耳积分值

按照国际标准和国家标准规定，制造厂应提供短路电流的熔化电流焦耳积分最低值和开断电弧电流焦耳积分最高值，利用这些给出的积分值可以鉴别电气设备上下级的保护范围。

在一般情况下，熔化电流焦耳积分和开断电弧电流焦耳积分是通过熔断器的型式试验来确定的。开断电弧电流焦耳积分值是在进行临界电流试验的方式 2 作为其最高焦耳积分值，由于这时产生的电弧能量最大，而熔化电流焦耳积分值是在进行开断能力试验的方式 1 作为其最低焦耳积分值。

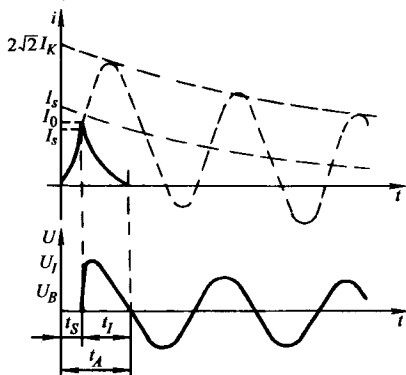


图 1-9 熔断器开断短路电流时的
电流和电压示波图