

真空开关 技术与应用

王季梅 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM561.2/2

2008

真空开关技术与应用

王季梅 编著

机械工业出版社

本书介绍了真空开关的发展简史、今后的发展动向和真空开关基础理论的要点,并着重阐述了纵向磁场和横向磁场的熄弧原理、真空中的击穿机理、绝缘强度和熄弧过程。还介绍了国内外真空开关正在开发的高电压等级新产品的趋势,尤其结合我国亦在向 126kV 和 252kV 真空断路器的研究状况以及以 126kV 为范例的高电压等级真空断路器的试验内容和技术要求等,如基本短路试验、近区故障试验、失步关合和开断试验、线路充电电流开断试验和试验方法。

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

图书在版编目 (CIP) 数据

真空开关技术与应用/王季梅编著. 北京:机械工业出版社, 2007.9

ISBN 978-7-111-22153-1

I. 真… II. 王… III. 真空开关—基本知识
IV. TM561.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 124452 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:王 玫

版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉

封面设计:王奕文 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市明辉装订厂装订)

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm·11.875 印张·348 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-22153-1

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书内容由四部分组成：第一部分介绍真空开关的基础理论，主要内容包括真空开关发展简史和国内外生产真空开关的现状，特别重点阐述了我国真空开关发展近况，值得骄傲的是我国真空开关产品产量已居世界首位，在产品质量上与世界水平相当，即技术上接近于无差距。在基础理论方面重点介绍真空电弧的阴极斑点和阳极斑点的作用以及真空电弧的电压特性，真空中的击穿理论，绝缘强度和熄弧过程。在真空灭弧室结构方面，重点阐述了横向磁场和纵向磁场的灭弧理论。这部分内容是读者学习和提高真空开关理论的主要部分，也是用来开发真空开关新产品的必备条件。第二部分介绍了真空开关当前研究和应用的状况，以使读者能进一步了解到国内外真空开关正在向哪一个方向发展和扩大应用，以立于不败之地。特别在本书中还提到我国对单断口 126kV 和单断口 252kV 的真空开关已着手进行研发，使其成为在高压开关中绿色产品之一。此外，有关真空开关的相控同步操作技术、真空度的在线监测、真空开关的直流应用、大容量真空发电机断路器的开发、特殊用的真空熔断器的应用等亦在书中作了重点介绍。第三部分介绍了真空开关在运行过程中产生操作过电压的抑制措施，并提出了如何彻底消灭操作过电压的探讨和列举了实现无操作过电压现象产品的具体措施，这些论点获得了国内外专家们的赞许。第四部分介绍了高压真空断路器的试验，包括试验的主要设备，试验线路图、试验方法以及典型的试验结果和结论等。自 20 世纪 50 年代末，出现真空和 SF_6 两种性能优异的灭弧介质和绝缘介质，并被成功地应用到断路器领域。从此后，真空断路器和 SF_6 断路器逐渐树立起高压断路器市场的主流产品地位，并占领了整个高压断路器领域。当前真空被限制在 10kV 和 35kV 电压等级的范围，而 SF_6 断路器应用在 72.5kV 及以上的高电压等级，但不久发现 SF_6 气体经过电弧的高温分解作用后可产生剧毒的分解物，更重要的是从环境保护角

度看, SF_6 气体是一种温室效应气体, 它对地球温暖化系数 (Global Warming Potential) 是 CO_2 的 24900 倍, 而且 SF_6 气体的分子结构非常稳定, 其寿命长达 3200 年。本世纪 SF_6 的产量主要用于断路器和输配电设备等电力工业, 在生产和运行过程中, SF_6 气体会有很大的泄漏。若 SF_6 气体的排放量继续增大的话, 其温室效应的影响将相当可观。

从全球环境保护出发, 1997 年在日本京都会议上提出了决议, 即《联合国气候变化框架公约京都议定书》, 到 2030 年将禁止 SF_6 气体的使用。为此, 当前尽快开发更高电压等级的真空断路器及有关重要课题外, 学习和熟悉高电压等级真空断路器试验也是十分重要的。

本书适用于从事高压电器产品的开发、设计、制造和使用单位的有关工程技术人员阅读, 并可作为高等院校电器、发输配电等专业的教学和科研人员、研究生参考用书。

本书的出版得到了机械工业出版社林春泉、王玫等编辑的大力支持, 对于她们对本书的文字修饰和大量的编辑工作, 在此表示感谢和致敬。

作者 王季梅

2007 年 1 月于西安

目 录

前言

第 1 部分 真空开关的基础理论

第 1 章 真空开关发展概况	1
1.1 真空开关发展简史	1
1.2 国内生产中等电压真空开关的现状	2
1.3 国内外开发研究高压真空断路器的概况	7
1.4 国内外对真空断路器向超高压电压等级的发展趋势	17
参考文献	20
第 2 章 真空电弧的基本理论	22
2.1 真空电弧的阴极斑点	22
2.2 真空电弧的电压特性	26
2.3 真空电弧的阳极斑点	33
参考文献	40
第 3 章 真空中的电击穿理论	42
3.1 真空间隙的绝缘强度和电击穿	42
3.2 影响真空击穿的各种因素	49
3.3 真空中固体绝缘介质的绝缘性能	55
参考文献	60
第 4 章 真空电弧熄灭后的绝缘恢复特性和熄弧原理	62
4.1 弧后绝缘介质恢复过程的分析	62
4.2 绝缘介质恢复过程时间的确定	65
4.3 真空电弧的弧后电流和过零现象	68
4.4 电流强迫开断后的绝缘恢复特性	70
4.5 横向磁场熄弧原理	72
4.6 纵向磁场熄弧原理	74

参考文献	83
------------	----

第2部分 有关真空开关的研究和应用

第1章 有关真空开关的研究	86
1.1 相控真空断路器同步关合电容器组的研究	86
1.2 真空断路器选相分断控制算法的研究	90
1.3 电子操动的基本概念研究	113
1.4 真空灭弧室的直流电弧老炼研究	119
1.5 126kV 真空灭弧室的排气和老炼研究	123
1.6 真空灭弧室真空度的在线监测	129
1.7 选用重力热管来提高 126kV 高压真空断路器额定 电流的研究	132
1.8 126kV 真空断路器性能的创新改革	142
1.9 发展 252kV 和更高电压等级真空断路器的 探讨性分析	145
1.10 高压大容量真空式短路电流开断器	151
参考文献	157
第2章 有关真空开关的应用	159
2.1 真空开关在电力、工业、交通和其他方面的应用	159
2.2 高压真空熔断器产品的开发	168
参考文献	185

第3部分 真空开关操作过电压的抑制

第1章 真空断路器产生操作过电压现象和抑制措施	186
1.1 操作过电压的发生种类	186
1.2 高频灭弧现象产生多次重燃过电压的分析	188
1.3 三相同时截流现象	191
1.4 过电压的控制方法	192
第2章 用于电动机电路中的真空断路器如何防止截流的 试验和研究	194
2.1 概述	194

2.2	试验	195
2.3	产生过电压的模拟试验	199
	参考文献	203
第3章	真空开关的截流现象和操作过电压	205
3.1	截流现象	205
3.2	操作过电压的类型及分类	213
3.3	操作过电压的抑制方法	225
3.4	实际负载的过电压及其保护方式	232
	参考文献	239
第4章	真空开关操作过电压的阻容保护装置	240
4.1	概述	240
4.2	RC 保护装置的工作原理及试验结果	240
4.3	RC 保护装置介绍	243
4.4	怎样选用操作过电压保护装置	245
4.5	使用 RC 保护装置的几个问题	245
4.6	实例	247
4.7	结论	251
	参考文献	251
第5章	改进触头材料抑制操作过电压的途径	252
5.1	低过电压触头材料之一	252
5.2	低过电压触头材料之二	258
5.3	高开断能力问题	263
第6章	真空开关操作过电压的测试	266
6.1	概述	266
6.2	测试系统的组成	266
6.3	软件编程	268
6.4	实例	269
第7章	采用永磁操动机构同步选相技术来抑制操作过 电压的分析	271
7.1	概述	271
7.2	永磁操动机构的结构和工作原理	271

7.3	用永磁操动机构实现同步操作技术	279
7.4	关于实现无操作过电压措施的探讨	289

第4部分 高压真空断路器的试验

第1章	试品基本考核试验	292
1.1	概述	292
1.2	试品基本考核试验的内容	292
第2章	试品绝缘性能、起消晕电压和无线电干扰电平及 机构箱防雨性能试验	299
2.1	概述	299
2.2	试品绝缘性能考核	299
第3章	高压真空断路器和有关试验原理及示波图符号 说明	305
3.1	高压真空断路器概述	305
3.2	试验回路原理	305
3.3	开断试验主要内容	306
3.4	试验回路原理和示波图符号说明	308
第4章	高压真空断路器的基本短路试验	311
第5章	峰值耐受电流和短时耐受电流试验以及额定短路电流 开断次数试验	315
5.1	峰值耐受电流和短时耐受电流试验	315
5.2	额定短路电流开断次数试验	315
第6章	近区故障试验方式 L90 试验和试验方式 L75 试验以及 失步关合、开断试验	318
6.1	近区故障	318
6.2	失步关合、开断试验	320
第7章	线路充电电流开断试验	322
7.1	概述	322
7.2	线路充电电流开断方式1 试验	322
7.3	线路充电电流开断方式2 试验	323
7.4	线路充电电流开断方式3 试验	324

7.5 线路充电电流开断方式 4 试验	326
---------------------------	-----

附 录

附录 A 日本研制成低过电压真空断路器的报导	327
附录 B 荷兰 Holec 公司采取真空断路器一极提早分开的措施	327
附录 C 采用避雷器保护的方法	329
附录 D 采用 RC 阻容保护的方法	330
附录 E 西安交通大学电气工程公司生产的 6~10kV 系统避雷器	333
附录 F 真空灭弧室和真空开关主回路的电阻值测量	335
附录 G 带脱离器复合外套金属氧化物避雷器	338
附录 H 金属氧化物避雷器	344
附录 I 无间隙和有串联间隙的金属氧化物避雷器	361

第 1 部分 真空开关的基础理论

第 1 章 真空开关发展概况

1.1 真空开关发展简史

18 世纪初,人们就开始设想到利用真空中的一些特点来分断电流^[1-3],到 1893 年美国里顿豪斯 (Rittenhouse) 设计的第一个结构简单的真空灭弧室以专利发表后,就引起了人们的重视。1920 年瑞典佛加 (Birka) 公司又第一次制成了真空开关,尽管其分断能力极小,尚无实用价值,但却吸引了人们的兴趣。1923 年前后,索伦森 (Sorenson) 教授和门登霍尔 (Mendenhall) 在美国加利福尼亚工学院开始进行了真空中分断电流的研究工作,并成功地在 41kV 下分断了 926A 工频电流,于 1926 年公布了研究成果。此后,美国和德国的一些电气公司便致力于真空开关的研究,但由于当时的科学技术对真空开关的要求也不迫切,所以研究成果不甚显著。直至第二次世界大战后,20 世纪 50 年代初期,随着科学技术的进步,才使真空开关的研究工作有了较快的进展。1955 年,罗斯 (H. C. Ross) 在美国詹宁斯 (Jennings) 无线电制造公司多年来生产几安的高频真空转换开关的基础上,制成了 15kV/200A 的真空开关,但在整个 50 年代,对真空开关触头尚未找到适当的材料,使其分断能力一直停留在 4~5kA 的水平。直到 60 年代初,由于半导体技术的迅速发展,提供了冶炼含气量极低的金属材料的方法后,同时在真空开关结构研究上也取得了突破,才有了一个跃变。1961 年,美国通用电气公司在此成果的基础上,在李天和 (T. H. Lee) 博士、考帮 (J. D. Cobine)、里斯 (M. P. Reece)、里奇 (J. A. Rich) 法拉尔 (G. A. Farral) 等许多人的

努力下,开始生产额定电压 15kV、分断能力 12.5kA 的真空断路器。1966 年进一步试制成功 15kV、25kA 和 31.5kA 的真空断路器,从此真空开关正式进入了电力开关的行列,为电力工业服务。到目前为止,开关的额定电流已达到 6300A,如合理地采用冷却措施可提高到 8000A,据日本东芝公司 2004 年^[4]报导,采用特大直径铜棒,加上强迫冷却措施,可以制成额定电流 10000A 的真空灭弧室,如图 1.1-1 所示。现在单断口真空灭弧室的工作电压已达到 145kV。日本对纵向磁场结构真空灭弧室的研究已突破了在 12kV 下分断 200kA 的能力。

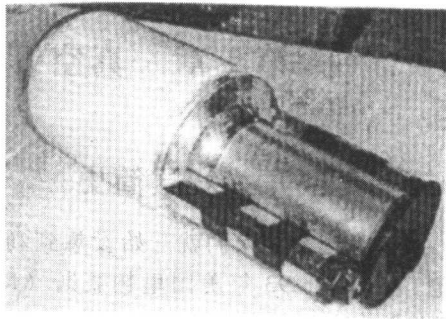


图 1.1-1 24kV/10000A 真空灭弧室

现在美国、日本、英国、德国和俄罗斯等国家都已大量生产不同规格的真空开关。应用范围也越来越广泛,据不完全统计,许多国家在 35kV 及以下电压等级的变电所所用的断路器中已有 70% ~ 80% 采用了真空断路器。

1.2 国内生产中等电压真空开关的现状

中等电压真空开关一般是指 3.6 ~ 72kV 这个范围。我国与俄罗斯设定的中等电压范围是指 7.2 ~ 40.5kV,日本中等电压范围是指 3.6 ~ 72kV,而欧洲国家的中等电压范围是指 3.6 ~ 36kV。

我国在此电压范围内,自 1991 年以来其产量每年的增长率仅次于日本,最近几年来年产量已占全世界总产量的 50% 左右,超过日本。其典型的产品如图 1.1-2 所示。图 a 和图 b 为 12kV 的户内真空断路器,图 c 为 40.5kV 的户内真空断路器,图 d 为南京电力自动化设备总厂自行设计制造的双稳态永磁操动机构(目前还未配装电子控制系统,不能实现同步合分闸,即无选相合闸和分闸功能)的 40.5kV/1600A 的真空断路器,图 e 为 12kV 的户外真空断路器。图 f

为 10kV 无撞击熔断器式结构的真空负荷开关, 图 g 为 10kV 带撞击熔断器式结构的真空负荷开关, 图 h 为 12kV ZFN□-12 (R. D) 真空负荷开关—熔断器组合电器。图 i 为 7.2kV/400A 的真空接触器剖面图,

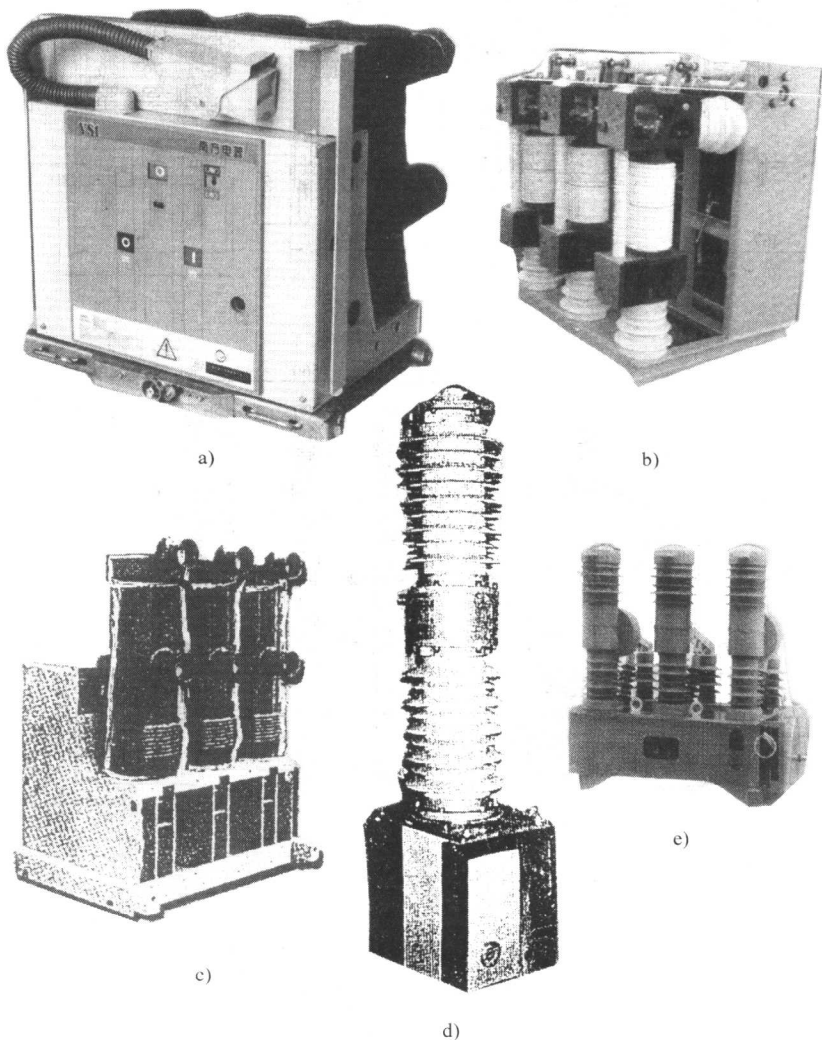


图 1.1-2 真空开关的典型产品外形

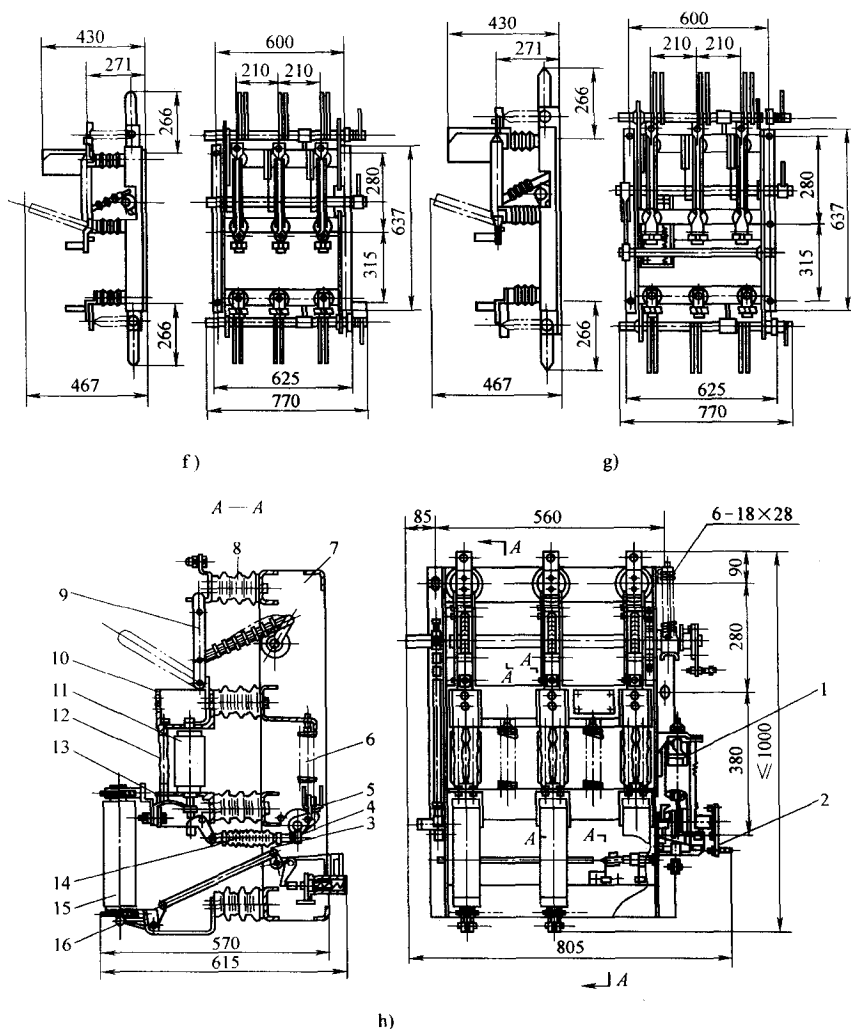


图 1.1-2 真空开关的典型产品外形 (续)

- 1—合闸弹簧 2—操动机构 3—接地开关 4—弹簧拉杆
 5—分闸缓冲器 6—分闸弹簧 7—底架 8—绝缘子
 9—隔离开关 10—上支架 11—真空灭弧室 12—绝缘柱
 13—下支架 14—绝缘拉杆 15—熔断器 16—脱扣装置

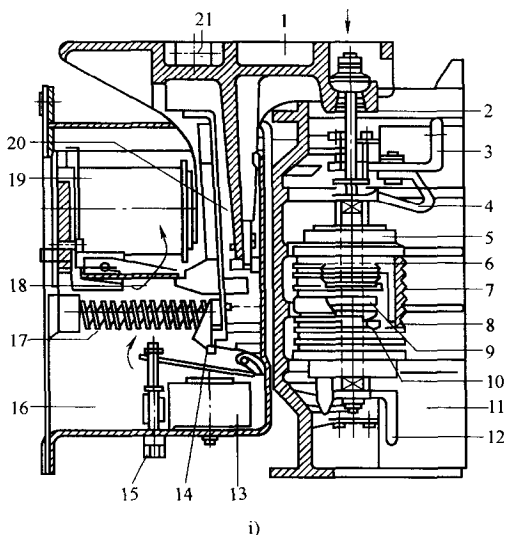


图 1.1-2 真空开关的典型产品外形 (续)

- 1—总操动杆 2—触头弹簧 3—主电路(上接线端) 4—软联结带 5—真空灭弧室
6—金属波纹管 7—陶瓷绝缘子 8—金属屏蔽罩 9—动触头 10—静触头 11—高压部分
12—主电路(下接线端) 13—脱扣电磁铁 14—分闸锁闭 15—脱扣栓 16—低压部分
17—反回弹簧 18—合闸锁闭 19—电磁操动机构 20—基础板 21—总操动杆回转点

其灭弧室外壳采用带有裙边的陶瓷结构。

关于中等电压等级的真空开关今后的发展方向大致有三个方向：真空灭弧室的继续小型化；采用永磁操动机构和不断提高改进制造工艺。自从真空灭弧室采用纵向磁场结构和设计上的改进以来，比初期生产的真空灭弧室外形尺寸差不多缩小了 $1/2$ 以上，还有进一步缩小的可能，这是一个具有十分显著的成果。

关于真空断路器选用永磁操动机构方面，ABB 公司是创新者之一，成绩尤其突出，其零件与弹簧操动机构对比差不多只有弹簧操动机构的 40% 或更少一些，而操动寿命可达到 10 万次以上，同时由于分合闸的速度和动作十分稳定，运用电子控制系统与电力电子器件精确地控制永磁操动机构后，可实现同步分合闸，进一步提高真空断路器的操作性能。目前已能对 12kV 的真空断路器实现同步合闸，又称选相合闸，可实现无合闸过电压和不出现涌流。采用同步分闸开断短

路电流时，可提高一个电流等级的开断性能，例如：按12kV 开断电流为 40kA 的真空断路器，可提高到 50kA。

关于制造工艺的改进，这里仅以 ABB 公司对真空灭弧室极柱浇注技术为例，使真空灭弧室的体积更小型化，结构紧凑而坚固，用环氧树脂浇注极柱大大地提高了真空灭弧室的散热，如图 1.1-3 所示。这种浇注式极柱有下列几个优点：模块化设计、结构简单、可拆卸零件少、可靠性高。图 1.1-4 所示为两种极柱的结构示意图，由于采用浇注式极柱，其优点是结构为模块化设计；可拆卸零件少；可靠性高；当真空灭弧室被嵌入到固体材料中时，不需作任何处理，即可达到很高的绝缘强度。这种制造

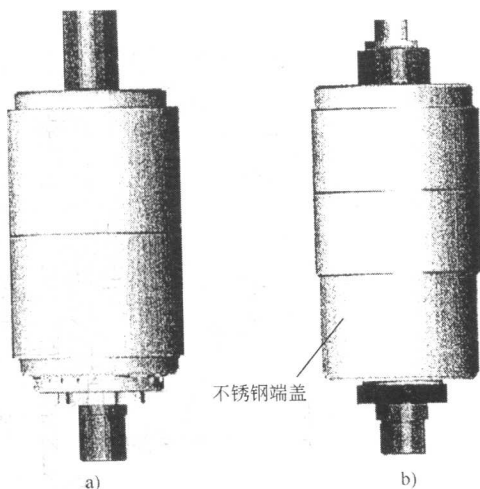


图 1.1-3 两种灭弧室示意图

a) 组装极柱灭弧室 b) 浇注极柱灭弧室

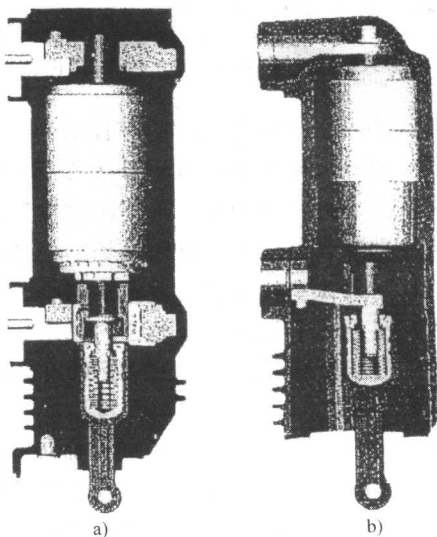


图 1.1-4 两种极柱结构示意图

a) 组装式极柱 b) 浇注式极柱

工艺,国内已有不少真空灭弧室制造厂根据开关制造公司的要求开始采用极柱浇注技术,提供具有浇注极柱的真空灭弧室。

1.3 国内外开发研究高压真空断路器的概况

1.3.1 我国高压真空断路器的发展情况

我国西安交通大学真空电弧理论研究及其产品开发小组曾于1989年开始与北京开关厂和北京东方电子管厂联合试制126kV/1250A/31.5kA的高压真空断路器。结构如图1.1-5所示,从图中可以看到,由两个72.5kV的真空灭弧室串联组成。在真空灭弧室的两端并联均压电容器。真空灭弧室的外绝缘采用SF₆气体。真空断路器的总高为3650mm。操动采用弹簧操动机构,平均分闸速度为2.4m/s,合闸速度为1.8m/s。72.5kV的真空灭弧室如

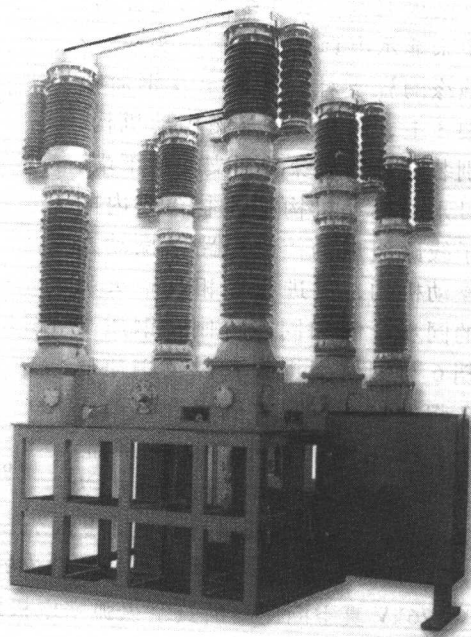


图 1.1-5 126kV 双断口高压真空断路器外貌

图1.1-6所示,触头开距为40mm,真空灭弧室总高为876mm,法兰盘间距离为6mm。

在联合国京都会议防止SF₆气体引起的地球温室效应以来,西安交通大学联合陕西宝光真空电器股份有限公司和浙江温岭紫光电器公司于2003年共同发起开发研制126kV/2000A/40kA单断口的真空灭