

电工技术

(一)

科学技术文献出版社重庆分社

《汽轮机》杂志征订启事

《汽轮机》及《汽轮机副刊》自1973年发刊以来，已经分别出版了25期和31期。但由于系内部赠阅，印数受到限制。为了满足本行业各方面广大读者的需要，决定自1980年起向全国征订，不再赠阅。两刊合为一册出版，刊名为《汽轮机》。内容为有关汽轮机和燃气轮机科研、设计、制造、运行的文章和学会论文、专业会议及动态等，以国内为主、国外为辅。《汽轮机》为季刊，每期约15万字，定价全年为4元。欢迎本行业的广大读者订阅。订款请寄上海闵行上海发电设备成套设计研究所，银行帐号：上海分行徐汇区办闵行分理处3689240（拒收邮局汇款）。请各单位及读者大力支持，组织收订。订单函索即寄。

一机部上海发电设备成套设计研究所

《汽轮机》编辑部

1980年2月

电 工 技 术 (一)

中国科学技术情报研究所重庆分所	编 辑
科学技术文献出版社重庆分社	出 版
重庆市市中区胜利路91号	
四川省新华书店重庆发行所	发 行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂	印 刷

开本：787×1092毫米1/16	印张：7.00	字数：16万
1980年3月第一版	1980年3月第一次印刷	
科技新书目：152—100	印数：24400	

书号：15176·407

定价：0.75元

编 者 的 话

316409/06

从1972年起我们编辑出版了《电工科技参考》技术刊物,共出16期,后因故停刊。当时该刊受到广大读者的欢迎。在停刊后,许多的读者纷纷来信反映,希望我所继续编辑出版技术性报导刊物。现在《电工技术》正是在这种要求下和广大读者见面了,本刊将继续保持《电工科技参考》的特点,为广大从事电工技术工作的读者提供科技资料。

《电工技术》是综合性科技刊物,主要报导国外有关电工方面的设计、生产、运行、维修先进技术和科研成果、发展动向和消息。着重报导电工方面的实际应用科技资料。文章短小精悍,实用价值较大,易为人们理解和利用,这是本刊与单科性的学术性刊物不同之处,我们深信本刊的出版,将会得到广大读者的积极支持。

《电工技术》为双月刊,每期十四万字,于1980年二月出版试刊,由新华书店发行,欢迎广大读者提出办好本刊的宝贵意见。

《电工技术》编辑部一九八〇年二月

目 录

水平动向

- 高导磁率非结晶金属磁性材料.....(1)
- 高压断路器发展的几个问题.....(9)

能源合理利用

- 美国节省能源的技术政策.....(15)
- 节约照明用电的措施和动向.....(19)
- 焊接变压器自动断开装置.....(21)
- 焊接过程中电能的节约.....(23)
- 电熨斗节电措施.....(29)
- 电力管理的合理化和输变电设备的合理用电和节约用电.....(30)
- 工厂给水系统的节电措施.....(39)
- 关于提高自备电厂汽机低负荷时的效率问题.....(44)

厂矿电气设备

- 功率开关元件“控制极可关断可控硅”及其应用.....(49)
- 开关型高压电源用的阻尼方法.....(55)
- 变压器匝间短路保护装置.....(58)
- 6—10 千伏电网中的铁磁谐振.....(60)
- 110—220 千伏电网防止铁磁谐振的方法.....(62)
- 定子硅钢片损坏的原因〔电机修理知识〕.....(67)

日 用 电 器

- 低噪音电气吸尘器.....(67)
- 冷冻机用电机的浸漆处理.....(68)
- 全自动洗衣机的控制电路.....(70)

测试技术

- 旋转电机线圈层间短路测量方法.....(72)
- 怎样测量电动机的绕组温度.....(73)
- 电动机轴速度变化的高分辨率简易测量法.....(78)
- 锁相回路电动机控制系统中使用的快速测量鉴相器.....(79)
- 断路器工作线圈温升测量仪.....(81)
- 发现金属夹杂物的仪器.....(84)
- 手提式累加辐射高温计.....(85)
- 过热器管内高温氧化皮厚度测定器.....(87)



农 用 电气设备

35/10 千伏被控变电站的中央信号设备接线图.....	(89)
10千伏架空线用ACO-10 快速隔离开关自动分段.....	(90)
10千伏配电网中确定故障点的装置.....	(91)
6—35千伏配电网用的天线式电压变换器.....	(93)
电网自动接收发送器.....	(95)
农用电动机.....	(96)

基础知识 讲 座

晶闸管在电力拖动中的应用 第一讲 可控整流器——直流无环流调速系统.....	(100)
--	-------

小 资 料 与 科技消息

今日的哈尔滨锅炉厂.....	(14)
无级调速恒功率交流电动机.....	(66)
捷克斯洛伐克的50万千瓦汽轮发电机.....	(59)
阿根廷电力发展计划.....	(88)
瑞典第一座大型燃煤电站.....	(54)
美国-墨西哥互连输电线路.....	(57)
苏联汽发电机的极限容量和发展远景.....	(48)
超导线圈电动机.....	(48)

第二集目录预告.....	(110)
--------------	-------

封三《电工技术》征订和征稿启事



高导磁率非结晶金属磁性材料

成田 贤仁

1. 前言

作为高导磁率金属磁性材料来说,在电气设备中是广泛使用电工钢片,而在电子设备中是广泛使用坡莫合金。目前,这些材料的特性已达到很高的水平。为了制造更优异的金属磁性材料,曾考虑是进一步改善旧工艺还是开创全新的方法。看来,后一种方法是适宜的,所以近年来对新材料的研制很活

跃,并提出了今后所要求的高导磁率非结晶金属磁性材料。

2. 非结晶磁性合金及其高导磁率

日文“アモルファス”(amorphous)的意义即是非结晶物质(noncrystalline states)。因此,把原子不规则排列的金属称为非结晶金属。其不规则结构有三种模型,如图1所示。

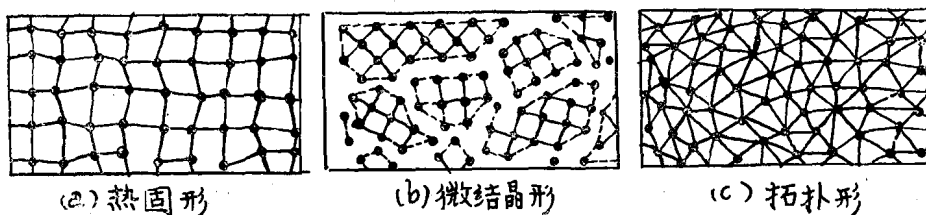


图1 不规则结构模型

第1种模型中的各原子相对位置不变,连接原子的键的长度和键间的角度具有不规则性,称为热固形不规则性(hot-solid disorder);第2种模型是微结晶的镶嵌结构组合,微结晶的大小和排列具有不规则性,称为微结晶形不规则性(microcrystalline disorder);第3种模型中的原子排列完全是无规则的,即具有本质上的不规则性,称为拓扑形不规则性(topological disorder)。

若上述结构内过渡元素Fe、Co、Ni的含量越多,就越有希望制造出非结晶磁性合金。这种合金的磁性因原子排列不规则性而有不同的变化。

在Fe单结晶的立方结晶中,磁化矢量具有形成各结晶轴的角的方向余弦 α_1 、 α_2 和 α_3 。该磁化矢量的内部能量,即所谓结晶磁异方向磁能量 E_a 用下式表示:

$$E_a = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$

式中 K_1 和 K_2 为结晶磁异方向性常数,其值视不同物质而定。从上式可以看出,若 K_1 、 K_2 的值小,磁化矢量就能以小能量很容易地转向任意方向,从而得到高的导磁率。若原子排列不规则,则由于结晶性的关系, K_1 、 K_2 的值就变得很小,因此非结晶磁性合金能具有高的导磁率。

当然,在这种合金中,若控制其组分使磁致伸缩为零,其导磁率就会象结晶合金一样,能进一步提高,从而获得更优异的高导磁率。

3. 非结晶磁性合金制造方法

3.1 生成条件

从比热的温度变化实测结果来看,在非结晶磁性合金中也存在从固相向玻璃状态转

移的所谓玻璃转移温度 T_g 。把熔融合金突然冷却时,在低于 T_g 温度,不发生原子扩散,而成为液相冻结状态的玻璃状态。为了获得非结晶合金,由于液相线的温度不能引起结晶化,所以必须急冷到 T_g 温度。实际上进行快速冷却时,在液相内不可避免地要生成引起结晶化的不均质核或均质核。为了制造非结晶合金,首先,必须使冷却速度大于不均质核的生成速度,其次,在达到均质核生成温度之后,结晶成长速度必须十分慢。为此,液相时的粘性及其与温度的关系、凝固的熵,以及固相-液相间的界面能,都应有大的值,为了容易地满足这些条件,通常在过渡元素中加入称为Si、B、P、C等非金属元素的类金属(metalloid)。

3.2 制造方法

作为高导磁率非结晶金属磁性材料使用的形状可以分为薄膜、薄带和粉粒等。

用蒸镀法或电镀法制造非结晶薄膜,是在60年代对非结晶合金进行基础研究阶段所采用的制造方法,而在1973年则是用溅射法制造Gd-Co薄膜。采用这些方法时,合金的组成和材料质量的调整有困难,不适合大批生产。

如图2所示,薄带的制造是广泛采用离心骤冷法、单辊法和双辊法。

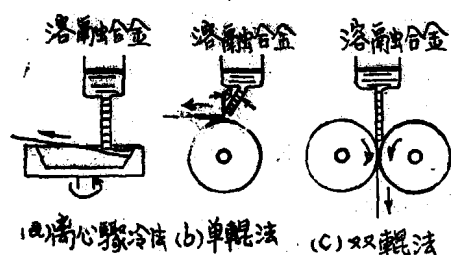


图2 用熔融合金骤冷法制造非结晶合金薄带的原理图

离心骤冷法是用喷嘴将熔融合金喷射到高速旋转的冷却鼓的内壁上,借助离心力的作用使合金在接触时形成薄带同时进行骤冷使之凝固。这种变形现象可以适用于单辊

法。可以推测,所获得的薄带形状将取决于旋转鼓的圆周速度、熔融合金喷嘴的形状、尺寸和喷射压力等等。关于采用这些方法来制造非结晶薄带的具体制造条件几乎没有文献阐述过,只有Liebermann等人提出了关于 $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ 合金的研究方法。该法没有熔融合金的浇铸、锻造和轧制工序,因而适于非结晶磁性薄带的大批量生产。

以前对非结晶磁性合金仅限于制成薄膜形状和薄带形状,因而应用时将会受到形状的限制。本文作者试图研制一种粉末状非结晶合金制造法。第1种方法是火花腐蚀法(Spark Erosion法)。这种方法是:在电火花加工机的正负电极上(例如用 $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$ 合金)于煤油中放电时集合金粉末,然后用丙酮洗掉,从而制成非结晶粉末。文中图片是Fe—Si—B系非结晶合金粉末的电子显微镜照片(略)。这种方法不一定适合大批量生产。第2种方法是喷雾法。这是一种在高速喷出的水流中滴下熔融合金并使之变成细粉末再骤冷凝固的方法(见图3)。这种非结晶合金粉末可压成适当的形状,因此可以制成用薄带材料所难以加工的磁心形状,其电阻比结晶合金的电阻大数倍,因而也适于作为高频磁心材料。该法另一个优点是:一次可以制造100公斤以上的大量的非结晶合金粉末。

离心骤冷法或喷雾法制成的非结晶材料含有20%以上的廉价元素Si和P等,而且其制造工艺也简单,所以价格便宜。

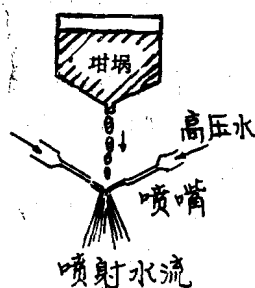


图3 用喷雾法制造非结晶合金粉末的原理图

4. 高导磁率非结晶磁性合金的磁特性

关于非结晶磁性合金的磁特性正从不同的观点进行大量的研究, 本文主要叙述高导磁材料的应用。

4.1 静态磁性

在以前的研究材料中, 实用价值高的非结晶磁性合金, 有Fe系、Fe-Ni系以及Fe-Co系合金。表1列出Fe和类金属组成的Fe系非结晶合金和作为对比用的50% Fe-Ni合金的静态磁特性。在磁场中退火的 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 和加拉力后的 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{B}_1\text{C}_3$ 的饱和磁通密度 B_s 、最大导磁率 μ_{Max} 比原来50% Ni-Fe的各参数都好。表2列出Fe-Ni系非结晶合金和对比用的Mo-坡莫合金的静态磁特性。表3列出Fe-Co系非结晶合金和对比用的坡莫合金C的静态磁特性。 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 在骤冷后的静态磁特性比Mo-坡莫合金的优异, 如施加拉力或在拉力下退火, 其特性能进一步改善。若将 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 和 $\text{Fe}_{4.7}\text{Co}_{7.3}\text{Si}_{15}\text{Bi}_{10}$ 在磁场中退火, 则其 B_s 比坡莫合金C(78% Ni, Co, Cu, Fe)的 B_s 稍许低些, 但是 μ_{Max} 则显著提高。这是由于饱和磁致伸缩 λ_s 几乎等于零所致。可以看出, 非结晶磁性合金的 B_s 、 μ_{Max} , 因组分的控制和进行热处理, 能进一步提高, 从而与结晶高导磁率磁性合金类似。

将非结晶磁性合金作为变压器铁心的材料时, 其饱和磁通密度、磁温度稳定性都能

增大, 并提高了居里温度。下面介绍这方面的研究结果。

关于 $\text{Fe}_a\text{Ni}_b\text{P}_c\text{B}_d$ 薄带, Becker等人求出了在 $a+b+c=100$, $a+b=80$, $c+d=20$ 的情况下每个过渡金属原子的磁矩 μ_B , 其公式如下:

$$\mu_B = (2.1a + 0.6b - 10c - 0.3d)/80$$

从上式可见, 如果使用B, 对相同的类金属量来说, μ_B 能提高, 从而也提高了 B_s 。

Chen等求出了 $\text{Fe}_{100-y}\text{M}_y$ (M: 类金属) 中M类和居里温度 T_c 的关系, 结果如下:

$$T_c(\text{Si}) > T_c(\text{B}) > T_c(\text{C}) > T_c(\text{P})$$

即若用Si、B作为类金属, 则能提高 T_c , 因而能获得温度稳定性良好的非结晶磁性合金。

在以前介绍的非结晶磁性合金中, 类金属的原子半径小, 因此, 过渡金属原子间的距离也比结晶合金的小, (B_s 和 T_c 有下降的倾向。

Hasegawa等用原子半径大的Mo来置换一部分过渡金属, 从而改善了 B_s 和 T_c 。表4是冷却速度为 $0.45^\circ\text{C}/\text{分}$, 在 370°C 下于磁场中处理的 $\text{Fe}_{38}\text{Ni}_{40}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ 的磁特性和在 325°C 下热处理2小时的 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 的磁特性的比较。表中的 W_c 是磁通密度为1000高斯时的铁损。前一种材料的 B_s 提高了10%, 温度稳定性也得到改善, 在高频工况下的铁损也降低了。

表1 Fe系非结晶高导磁率材料的静态磁特性

材 料	特性测定条件	B_s (千高斯)	B_r (千高斯)	B_r/B_s	H_c (奥)	μ_{Max} ($\times 10^3$)	λ_s ($\times 10^{-5}$)	ρ (微欧-厘米)	T_c ($^\circ\text{C}$)
50Ni-Fe		15.5	12~15		0.08	100		40	500
$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ ⁽¹²⁾	在磁场内退火	16.0	12.3		0.04	320	30	138	374
$\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{B}_1\text{C}_3$ ⁽¹¹⁾	骤冷后	17.1	4.0		0.65	62	29		292
	施加拉力 (15公斤/毫米 ²)	17.1	14.6		0.04	365			
$\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$	骤冷后	13.9	6	0.42	0.08	130	35	135	314
	施加拉力 (40公斤/毫米 ²) ⁽¹⁴⁾	13.9	12.9	0.95	0.16	81			
	扭力 (4公斤/毫米 ²)				0.018				
	在330 $^\circ\text{C}$ 退火后 在磁场中缓慢冷却 ⁽¹⁴⁾	13.9	13.0	0.36		180			

表2 Fe—Ni 系非结晶高导磁率材料的静态磁特性

材 料	特性测定条件	B_s (千高斯)	P_r (千高斯)	B_r/B_s	H_c (奥)	μ_{max} ($\times 10^3$)	λ_s ($\times 10^{-6}$)	ρ (微欧·厘米)	T_c ($^{\circ}C$)
80Ni—15Fe—5Mo		8	4~6.5		0.03	200		55	460
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	骤冷后	8.3	4.1	0.49	0.01	410	11		
	56MPa 施加拉力 (5.7公斤/毫米 ²)	8.3	7.7		0.007	1,100			
	140MPa 施加拉力 (14.3公斤/毫米 ²)								
	退火 (200 $^{\circ}C$, 2小时)	8.3	7.0		0.008	875			
$Fe_{29}Ni_{14}P_{14}B_6Si_2$	骤冷后	4.9	1.85		0.01	185	5		
	140MPa 施加拉力 (14.3公斤/毫米 ²)	4.9	3.8		0.005	760			
	140MPa 施加拉力 (14.3公斤/毫米 ²)	4.9	1.18		0.015	790			
	退火 (300 $^{\circ}C$, 1.5小时)								

表 3 Fe—Co系非结晶高导磁率材料的静态磁特性

材 料	特性测定条件	B_s (千高斯)	B_s (千高斯)	B_r/B_s	H_c (奥)	μ_{max} ($\times 10^3$)	λ_s (10^{-6})	ρ (微欧·厘米)	T_c ($^{\circ}C$)
坡莫合金C		7.0	2.5		0.015	150		60	350
$Fe_{45}Co_{35}P_{13}C_7$ ⁽¹⁵⁾	骤冷后		5.4	0.51	0.19	40	20.4	270	440
$Fe_6Co_{74}B_{20}$ ⁽¹⁶⁾		11.8		0.83	0.035		≤ 0.4		427
$Fe_5C_{70}Si_{15}$ B_{10} ⁽¹⁷⁾	骤冷后	6.7	2.3	0.35	0.01	130	≈ 0		430
	在 400 [奥] 磁场中从 350 $^{\circ}C$ 开始以 175 $^{\circ}C$ /小时冷却	6.7	5.5	0.82	0.015	200~300			
$Fe_{47}Co_{70.3}Si_{15}$ B_{10} ⁽¹⁶⁾	骤冷后	6.6	2.8	0.35	0.013	180	≈ 0	135	430
	在 400 [奥] 磁场中 150 $^{\circ}C$ 下退火 10 分钟	6.6		0.75	0.006	820			
$Fe_{45}Co_{70.5}Si_{15}$ B_{10} ⁽¹⁶⁾	骤冷后	6.5		0.35	0.01		≈ 0		430
	在 400 [奥] 磁场中 350 $^{\circ}C$ 下退火	6.5		0.82	0.015				
$Fe_3C_{72}P_{16}B_6Al_3$ ⁽¹⁶⁾	骤冷后	6.3		0.45	0.023	122	≈ 0	130	
	在 30 [奥] 磁场中 270 $^{\circ}C$ 下退火 45 分钟	6.3		0.71	0.013	300			

表 4 添加Mo的非结晶磁性合金的磁特性

材 料	$\text{Fe}_{38}\text{Ni}_{40}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$	$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$	4—79Mo坡莫合金
特 性			
B_s [千高斯]	8.8	7.9	7.8
B_r [千高斯]	7.0	6.0	6.6
H_c [奥]	0.007	0.006	0.017
W_c 5千赫 [瓦/公斤]	0.45	0.85	0.45
10千赫	1.9	2.4	1.3
μ	~ 33.000	~ 30.000	~ 67000
μ_{eff} (500千赫)	700	—	100

4.2 动态磁特性

使用非结晶磁性合金时,其动态磁特性很重要,从表可见,其电阻 ρ 比结晶合金的电阻大数倍,所以,对于涡流损耗小、静态磁特性好的非结晶磁性合金来说,可以获得良好的动态磁特性。

从非结晶磁性合金应用在电力设备上来看,主要问题是铁损特性,从应用在电子设备上来看,主要问题是起始导磁率 μ_i 、损耗系数 $\tan\delta$ 与频率特性的关系,下面主要介绍这些特性。

O'Handley等对 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 进行了研究。图4示出在磁场中退火的试料在其最大磁通密度 $B_m = 13000$ 高斯时每一周期内的铁损特性。该特性曲线用 $2.8 + 1.18f^{0.4}$ (f :励磁频率,赫)表示。在60赫时的铁损为0.53瓦/公斤,约为厚2密耳取向硅钢片铁损的1/3。经过各种热处理的 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 的高频铁损与磁通

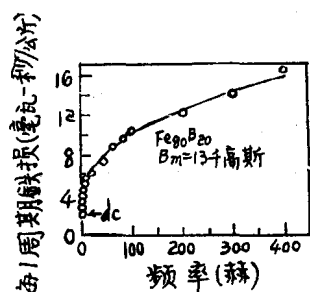
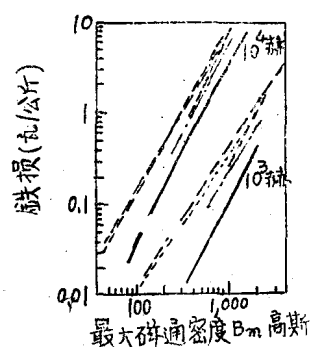


图4 在磁场中退火的 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 每一周期内的铁损频率特性

密度的关系曲线和50% Ni—Fe以及取向硅钢片的该特性曲线示于图5。在磁场中进行热处理的 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 的铁损比其他二种磁性合金的铁损小,其原因是其电阻约为它们的三倍。

O'Handley等对 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}_1$ 的铁损特性和Fe—Ni系非结晶磁性合金的铁损特性一起进行了研究。图6所示是 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}_1$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 以及 $\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{B}_6\text{Si}_2$ 在1千赫和10千赫时铁损和磁通密度的关系曲线。磁致伸缩小的 $\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$,在消除应力退火后,其高频铁损最小。在10千赫、 $B_m = 1000$ 高斯下,其铁损约为4—79Mo坡莫合金的1/2。

Luborsky等研究了磁场退火对 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}$



$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$:; 骤冷, 螺线管线圈; —; 磁场退火; - - - - -; 50%Ni—Fe(2密耳);; Si—Fe(2密耳); - - - - -; 6.5%Si—Fe纤维(69微米)

图5 经过各种热处理的 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, 50%Ni—Fe 和各向异性硅钢的高频铁损和磁通密度关系

表 5 磁场热处理对 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 动态磁特性的影响

材 料	热 处 理	$B_m = 1000$ 高斯时的 铁损[毫瓦/厘米 ³]		$\Delta B = 100$ 高斯时的 导磁率	
		10千 赫	50千 赫	100赫	50千赫
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$	不进行热处理	400	3000	—	200
	带状, 280℃, 1小时, 然后 是环状试料	200	4000	3000	300
	环状试料在磁场中325℃ 下, 2小时	18	180	12000	4300
4—79Mo坡莫合金		20	150	35000	3500

P_{14}B_6 磁特性的影响。表 5 示出热处理对铁损和导磁率的影响。在325℃、1奥斯特磁场中热处理2小时, 铁损降到 1/10 以下, 导磁率提高数倍到数十倍以上。这些特性可与 4—79Mo坡莫合金相比, 并且 B_s 也好。

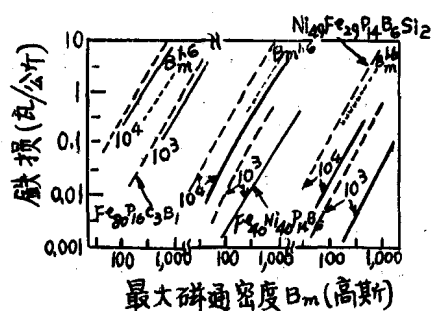


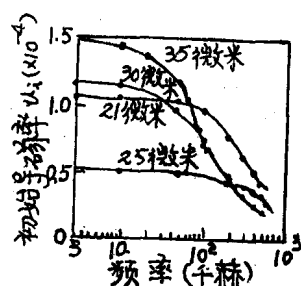
图6 Fe系和 Fe—Ni 系非结晶磁带高频铁损和磁通密度关系

Arai和藤森等对Fe—Co系非结晶磁性合金的动态磁特性进行了研究。图 7 示出以试料厚度作为参数, 磁致伸缩为零的 $\text{Fe}_{78}\text{Co}_{20}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的初始导磁率 μ_i 以及损耗系数 $\tan\delta$ 与室温下频率的关系。带厚25微米时, μ_i 成为最小。一般认为 $\tan\delta$ 可用下式表示:

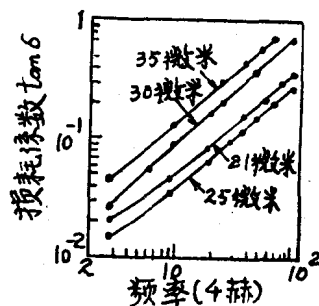
$$\tan\delta = R_m / \omega L = (R_{\text{eff}} - R_w) / \omega L$$

$$= h_i \sqrt{\frac{L}{V}} i + e_i f + r_i$$

式中 R_m : 磁心损耗电阻; R_{eff} : 带磁心的线圈的损耗电阻; R_w : 绕组损耗电阻; L : 带磁心的线圈电感; V : 磁心体积; h_i : 磁滞损耗系数; e_i : 涡流损耗系数; r_i : 剩余损耗系数。



(a) μ_i 的频率特性



(b) $\tan\delta$ 的频率特性

图7 $\text{Fe}_{78}\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的高频磁特性

表 6 示出 $\text{Fe}_{78}\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 和 5-Mo 坡莫合金的各特性值。

4.3 磁稳定性

使用非结晶磁性合金时, 应考虑磁特性的时间稳定性或热稳定性。

已知, 高频磁心的磁特性是用复导磁率 $\mu = \mu' - j\mu''$ 表示。正在研究 μ 与磁化力的相互关系以及随时间的变化关系。 $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 的复导磁率与磁化力的关系曲线如图8所示。 μ' 和 μ'' 在励磁幅值小时是恒定值, 在磁化力为 H_1 和 H_2 点时则变大。

表6 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 和5-Mo 坡莫合金的高频磁特性

材 料	$\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$				5-Mo 坡莫合金
特 性					
厚 (微米)	35	3.0	25	22	25
$\mu_i \times 10^{-4}$ (10千赫)	1.43	1.14	0.52	1.05	2.2
h_1 (厘米/安)	140	7.0	18.0	6.0	10.50
$e_1 \times 10^6$ (秒)	12.8	8.1	3.1	3.4	40
$r_1 \times 10^3$	3.9	4.3	6.5	8.0	94
$(\tan\delta/\mu_i) \times 10^6$ (10千赫)	12.0	7.8	6.9	4.3	25
ρ (微欧-厘米)	120	—	—	—	55

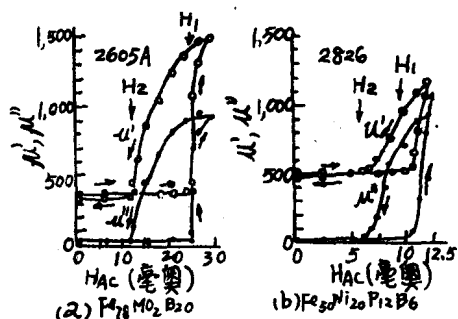
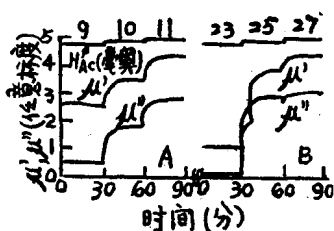


图8 μ' 与 μ'' 的磁化关系曲线



A: $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{B}_{20}$ (350℃, 30分, 15奥, 热处理) (Allied Chemical 公司)
B: $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{B}_{20}$ (购入资料)

图9 μ' 与 μ'' 随时间变化关系

$\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{B}_{20}$ 在 H_1 点附近, 磁化力成阶跃状变化时, μ' 和 μ'' 的变化如图9所示。 μ' 随时间的变化称为导磁率减弱, 其大小 D 如下式所示:

$$D = \{\mu'(0) - \mu'(\infty)\} \times 100 / \mu'(0) (\%)$$

式中 $\mu'(0)$: 施加磁化力后的初始导磁率;
 $\mu'(\infty)$: 施加磁化力后成为恒定值的初始导磁率。

$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 的 D 值约为10%。
 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的 D 值较小, 室温下约为2%。

下面介绍温度特性和热稳定性。图10示出 Fe 系和 Fe—Ni 系非结晶磁性合金的导磁率和损耗在 1 千赫时的温度特性曲线。图11示出以频率作为参数, $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 带材 (厚21微米) 的 μ_i 和 $\tan\delta$ 与温度关系的特性曲线。在高温下测定 μ_i 和 $\tan\delta$, 将试样保持在测试温度之后立即观察随时间而产生变化的现象, 图中示出30分钟后的测定结果。高温下 μ_i 和 $\tan\delta$ 与频率的关系曲线几乎与室温下的曲线相同。

μ_i 、 $\tan\delta$ 与温度的关系在宽的温度范围

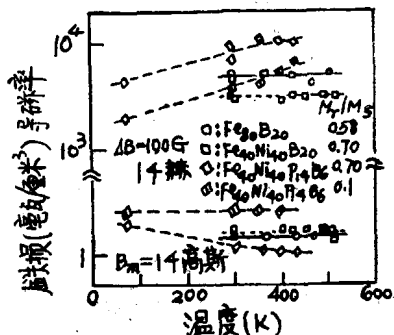


图10 Fe系和Fe—Ni系非结晶合金的导磁率和损耗与温度的关系

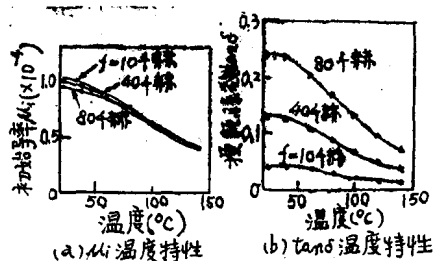


图11 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的磁性和温度的关系

内是不可逆的。 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的 μ_i 和 $\tan\delta$ 与温度的关系示于图12。形成这种不可逆性的原因,可以认为是由于结构上不稳定平衡状态的原子排列因老化而变为稳定平衡状态,即向结晶方向转移所致。将开始结晶前的时间定义为寿命,则各种非结晶磁性材料的保持温度和开始结晶前的时间关系如图13所示。尽管材料相同,但是由于保持温度不同,其寿命也不同,温度越低,寿命越长。例如, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 的寿命,在保持温度为200℃时,

为25年,在175℃时,为550年。对于机械性质,还必须注意观测热不稳定性。

5. 实际应用

高导磁率非结晶金属材料的实际应用有二个必要条件,即新材料的特性要比以前的材料特性远为优越,且能廉价地大量的供应。

如前所述,高导磁率非结晶金属磁性材料的原料费比以前的高导磁率金属磁性材料的低,制造工序简单,因此能廉价生产。关于制造方法,大多数是在实验室规模下进行了研究,但是,如果能使试样内的磁特性和试样形状均匀,并能确定大型试样的制造工艺,就能满足实际应用这种材料的一个重要条件。

在磁特性方面,其饱和磁通密度比硅钢片的低,铁损相当小,而导磁率和饱和磁通密度比坡莫合金的要高很多。所以,若能廉价供应,就可能代替原来的材料。美国通用电气公司不仅用这种材料作电子设备用的磁心,而且也用作配电变压器的铁心。

在机械特性方面,其机械强度很高,富有韧性,耐磨损性能也良好。在有效利用机械特性和磁特性方面,这种材料可作为磁头材料、磁屏蔽材料使用。

以上是高导磁率非结晶金属磁性材料实际应用中有利的一面,但是由于这种材料还存在不稳定平衡状态,所以还存在着磁特性和机械特性热态不稳定性的缺点。尽管考虑了积极利用这种热特性,但是这一问题仍然是实际应用中的一个严重障碍。若能解决这一问题,并能大量生产,则高导磁率非结晶金属磁性材料就能代替一部分原有的磁性材料。参考文献30种(略)。

[刘文琳译自《电气学会杂志》,1978, No12, 黄伟康校]

(本刊第二集将于1980年4月出版,将刊登“导电性高分子材料的研制动向”文章)。

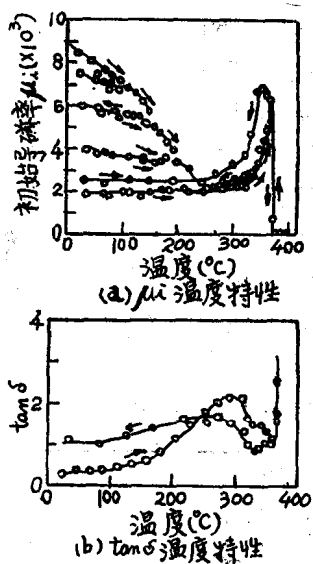
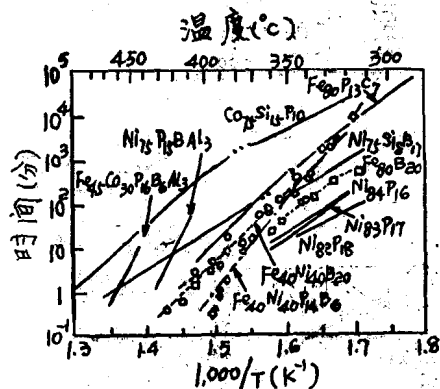


图12 $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ 的磁性和温度关系



高压断路器发展的几个问题

J. Schneider

内 容 提 要

本文以断路器单位容量的重量(公斤/兆伏安)为例,介绍了近一、二十年来高压断路器的进展。 SF_6 断路器在420千伏以下,其单位容量的重量特别低,致使这一技术能迅速进入市场。除户外断路器外,还介绍了 SF_6 全封闭组合电器及两种设备混合使用技术。

1. 现代开关技术的发展

电力网路并网的不断增多和发电机装机容量、额定电流特别是短路电流的增长,促使制造厂家在近一、二十年来不断地研制和发展新的断路器,使之满足愈来愈高的要求。开关技术在过去的年代里所取得的进展,可用图1加以说明。例如1960年,单位容量的重量,视其额定电压需要1.2~1.6公斤/兆伏安,但至1976年已降至0.2~0.35公斤/兆伏安,这就是说大约降到了1/5。

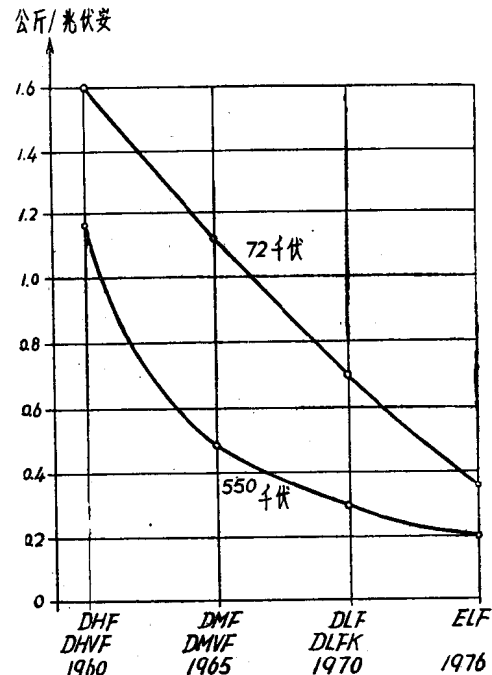
将来,断路器的开断电流从技术上讲不会有什么限制。但在限制短路电流方面主要是涉及网路运行和如何保证用户供电的可靠性及经济性。

在高压网路中,高压断路器也是最重要的电器之一。因此,必须能够在所有可能的网路条件下和各种环境条件下(污秽、温度等)保证其可靠性、可用性和动作的准确性。目前,已有三种经受过考验的,且又可靠的断路器,即:

1. 少油断路器;
2. 空气断路器;
3. SF_6 断路器。

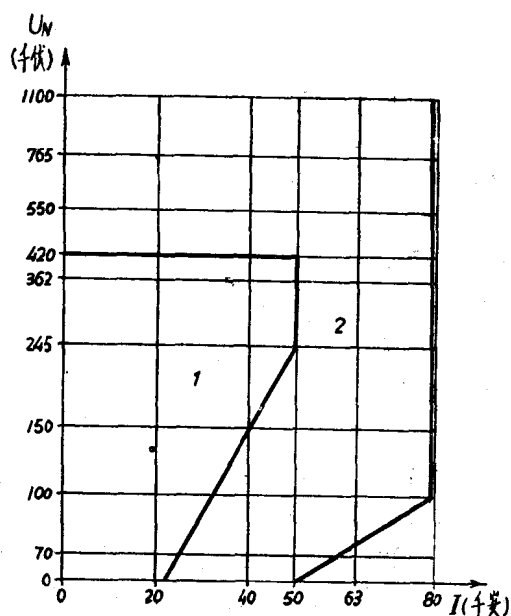
制造厂家当然希望在高压断路器的整个型谱中尽可能只采用一种最好的开断原理。到底那种最好呢?从BBC公司的产品型谱来看,目前已停止生产高压少油断路器。现在制订的型谱如图2所示。由图可见,最高额定电压和最大额定开断电流区域仍继续保留

空气断路器,而420千伏以下的中等开断容量区域采用新的 SF_6 断路器。 SF_6 断路器可以代替少油断路器,还可部份地替代空气断路器。空气断路器在低压范围内早已失去竞争能力。因此, SF_6 断路器占据了整个产品型谱的很重要位置。下节就采用这二种不同技术的原因进一步加以说明。



单位容量的重量 (1960~1970: 指 DHVF、DMVF 及 DLF 型空气断路器; 1976 年: 指 ELF 型 SF_6 断路器)

图1 1960年以来开关技术的进展



1 ELF型SF₆断路器；2 DLF/DLFK型空气断路器

图2 BBC公司高压断路器

2. 产品品种划分的理由

为什么气体断路器（包括空气和SF₆断路器）较之于少油断路器优先，而在较低电压范围内少油断路器又能获得广泛的使用呢？

对于高压户外断路器的选择来说，有许多衡量的标准，而这些标准往往有些部份是很不相同的。除了以满足标准中规定的和高压网路中遇到的开断情况为当然的先决条件外，还有可靠性、维修费和单位容量（每兆伏安）的造价等衡量标准。

每兆伏安容量的造价可用单断口开断容量的大小来表示。图3为近年来在不同灭弧介质中单断口所达到的开断容量。在SF₆和压缩空气中，BBC公司单断口的开断容量达到最大值，而且这几年来开断容量的增长量亦最大。相反，在少油断路器中，单个灭弧室所达到的容量及容量的增长量仅约为一半。

真空灭弧原理几乎一如既往，主要用于中压和低压，并且被限制在特殊场合。用于

高压领域，目前尚未取得进展。

经分析研究结果表明，采用SF₆和压缩空气之所以能大大提高断路器的开断容量，主要原因是因为对这方面的研究工作正大力开展。其次，近年来，已能做到科学探测和分析气体中的电弧开断现象，而在液体中（油中）开断电弧就相当复杂，而且要用“试探法”才能获得进展。在气体断路器中，开断电弧仅有两种物态（等离子体和气体），而在液体断路器，还附加有液态现象。此外，气体断路器容易做到系统的非破坏性试验，因为它的开断能力在交流电流第一次、第二次和第三次过零时大致相等，而在少油断路器中，灭弧室内的压力在电弧燃烧过程中才建立。还有一个因素，油在低温下，由于它的粘度高要想进行系统的试验亦较困难。因此，要确定少油断路器的容量极限必须耗用大量的资材。这就不难理解为什么少油断路器的开断容量提高得较慢的原因。

图4对各种灭弧原理与额定电压的关系作了对比。表明，少油断路器至少在低压范围内比空气断路器更为有利，这就是迄今它在这一领域内仍占统治地位的原因。对于245千伏以上的电压等级来说，少油断路器不如空气断路器。SF₆压气式断路器在420千伏以下比空气断路器和少油断路器更为有利。对于更高电压等级来说，空气断路器和SF₆断路器的单位容量重量相差无几。从图4中不难看出，空气断路器在低额定电压范围内要被取代，而在最高额定电压范围内从造价看没有必要由压缩空气过渡到其它开断原理。

压缩空气和SF₆曲线的交点可以由达到开断容量需用的能量来加以解释。需用能量的费用即操动机构的费用，取决于灭弧室的数目，从而间接取决于额定电压。随着灭弧室数目的增多，采取在一处产生熄弧能量，再分配给所需的各个部位（压缩空气断路器系统）的做法比用各个灭弧室各自产生灭弧介质压力（压气式SF₆断路器）的做法，在造价上更为合算。还有，在空气断路器中，灭

弧压力的建立和灭弧介质的分配可以有较长的时间(几分钟),而在压气式 SF_6 断路器中,这个过程必须在很短的时间内(约10毫秒)完成,因此,需要的操动功相当的大。

还有一个衡量的标准,那就是在超高压网路中断路器所能达到的开断时间。一般来说,开断时间应尽可能地短。由于空气断路器和双压力式 SF_6 断路器的灭弧介质相对排

气区有一个持续的压差,因此,这类断路器的结构较能符合快速开断的要求。在油断路器和压气式 SF_6 断路器中,灭弧所需的压差是由电弧本身或由活塞运动产生的,其结果必然是影响熄弧的速度。在空气断路器中,目前,一般的水平是,全开断时间为2周波(电网频率);而油断路的开断时间要3周波或3周波以上。对压气式 SF_6 断路器来说,目前一般达到 $2\frac{1}{2}\sim 3$ 周波,将来可望做到2周波。如果今后要求断路器能更快地开断,譬如1.5周波,看来,在费用适当的条件下只有空气断路器才能达到这种要求。而 SF_6 断路器由于 SF_6 的气流速度低得多,所以几乎不可能做到开断时间这样短。

3. SF_6 断路器的优点

SF_6 比空气更具有良好的特性,这主要基于 SF_6 气体三个独特的物理性能:

1) 击穿强度高。这是由于形成负电性离子的缘故。对于同一介电强度来说,在 SF_6 中的压力仅为空气中的 $1/3$ 左右;

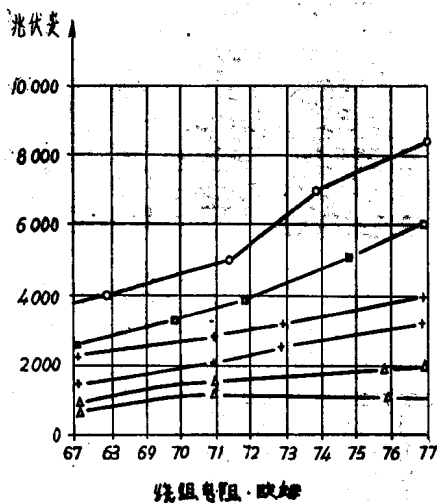
2) 灭弧性能好。这主要是由于在 $2000\sim 3000\text{K}$ 温度范围内 SF_6 气体比热高的缘故;

3) SF_6 中音速低(SF_6 中 137米/秒 ;压缩空气中 349米/秒),这才有可能应用压气式原理。由于压缩空气压气式断路器需要有巨大的能量,因此这种断路器的制造实际上是无法实现。

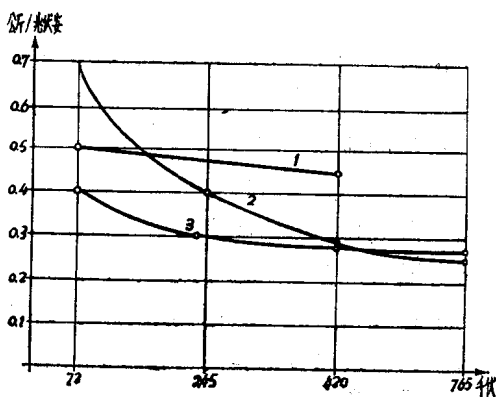
SF_6 较之压缩空气优越,这可由图5中看出。即使 SF_6 的压力为压缩空气的 $1/3$, SF_6 还是大大地优越于后者。但必须指出,在很大的电流下($60\sim 100$ 千安)两条曲线非常接近,这又说明了为什么在特大开断容量范围内继续选用空气断路器的缘故。

对于压缩空气来说,在特高额定电压下具有操作能源的费用低(图6),开断时间短,且在特大短路电流下特性好的特点,而 SF_6 断路器的优点主要表现在中等开断电流上,而且它的压气式原理极为简单(图7)。

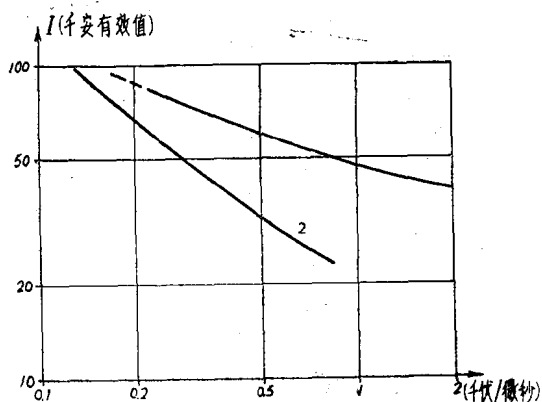
SF_6 压气式灭弧室的动作原理及其开断过程示于图8。



○ SF_6 □ 压缩空气 + 少油 △ 真空
图3 单断口的开断容量

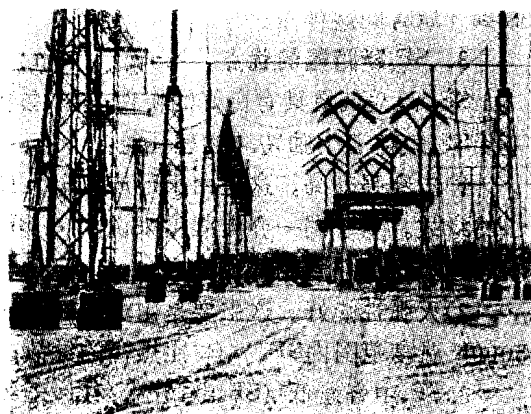


1. 少油; 2. 压缩空气; 3. SF_6 。
图4 支柱式断路器单位容量的重量 (公斤/兆伏安)



1. SF_6 (7巴) 2. 空气 (23巴)

图5 单断口的热极限



带合闸电阻；开断时间，二周波（电网频率为60周时）

图6 装于美国电力公司 Marysville 变电站的DLF765千伏空气断路器

4. SF_6 全封闭组合电器

SF_6 全封闭组合电器的发展大大解决了地皮、污秽（盐、砂、工业尘埃）或环境保护存在的问题（图9）。

BBC公司从1958年起就开始研究 SF_6 技术，1969年已为 EWZ 变电站提供了第一台设备。目前，已能提供三种规格的现代而成熟的组合单元。图10对用作带单相封闭母线电缆出线间隔的三种结构大小作了比较。至于封闭母线目前主要用作地下电站、 SF_6 全封闭组合电器引出线和高压线路的交叉处。它的使用范围主要在额定电流2000安以上和

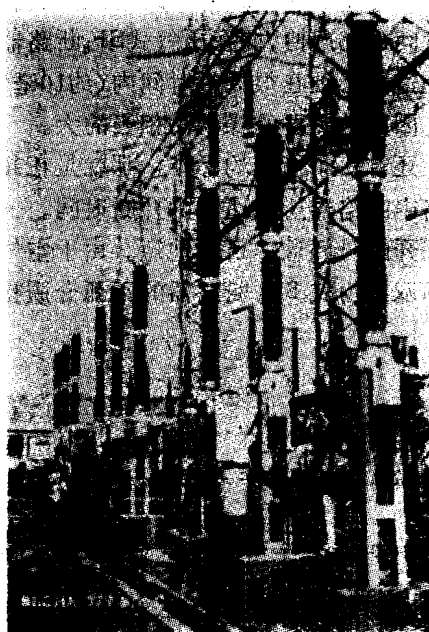


图7 装在土耳其Cukurova变电站的ELF型145千伏压气式 SF_6 断路器

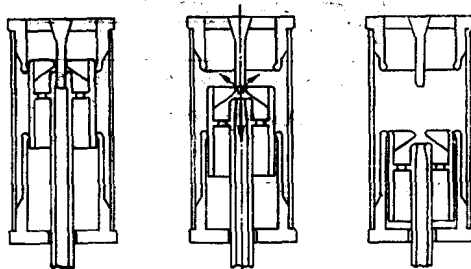


图8 压气式 SF_6 灭弧室的示意图及其开断过程

额定电压245千伏以上。对于2000安以下的额定电流，只用在那些不能用或不希望用普通充油电缆的地方。

从封闭母线具有良好的传输特性看，可以把它做成高压网路的完整敷设电缆，但从经济方面看，在今后的一段时间内还无法实现。不过在稠密的建筑区或风景保护区敷设几公里长的封闭母线还是可行的。

5. 混合布置

除传统的户外开关设备和 SF_6 全封闭设备外，还有一种敞开式和封闭式设备混合使用的方式。现有两种不同的型式，即：