

节能技术



JIE NENG JI SHU

第 4 辑

科学技术文献出版社重庆分社

节 能 技 术

第 四 辑

中国科学技术情报研究所重庆分所	编 辑
四川省电机工程学会农电专业委员会	
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: 9.25 字数: 24万
1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷
科技新书目: 33—294 印数: 6.400

书号: 15176·530

定价: 1.00元

目 录

电气设备的节省资源和节省能源

I. 总论	(1)
II. 材料	
第1章 导电材料	(3)
第2章 磁性材料	(7)
第3章 绝缘材料	(13)
III. 静止电气设备	
第1章 变压器	(15)
第2章 电力电容器	(18)
第3章 开关保护装置	(21)
第4章 静态电力变换装置	(25)
IV. 旋转电机	
第1章 通用旋转电机	(31)
第2章 电力和工业用旋转电机	(35)
V. 输电线、地下电缆	
第1章 架空输电线	(39)
第2章 地下电缆	(40)
VI. 照明装置	(45)
VII. 冷暖设备	
第1章 商用空调设备	(50)
第2章 家用冷暖设备	(53)
VIII. 家用电器	
第1章 概述	(55)
第2章 彩色电视接收机	(56)
第3章 电冰箱	(59)
IX. 节能法	(62)

电力网降损节电

1. 电力网中电能损耗的计算和分析	(65)
2. 降低农村电网的电能损耗	(66)
3. 农村电力网中电能损耗的测量	(70)
4. 10千伏和 0.4 千伏农村电网电能技术损耗的计算	(73)
5. 运用电子计算机计算电能损耗	(75)

6. 罗斯托夫电力系统运用电子计算机计算电能损耗.....	(77)
7. 计算动力系统主电力网电能损耗时的负荷曲线校正法.....	(78)
8. 6千伏电网接地电容电流的补偿.....	(81)
9. 10/0.4千伏配电变压器的无功补偿.....	(83)
10. 选择补偿设备容量时年无功负荷图的计算.....	(86)
11. 电能损耗倍数监控仪.....	(88)
12. 农村电网中各相负载不平衡对功率损耗和电能损耗的影响.....	(88)
13. 降低电力系统电网电能损耗的若干措施.....	(91)
14. 电力系统电网中降低电能损耗的组织措施的效果.....	(93)
15. 电力系统电力网中降低电能损耗的技术措施的效果.....	(96)
16. 农村配电线路系统的可靠性.....	(98)
17. 城市电网的电压调节.....	(102)
18. 关于规划电网中的能量损耗问题.....	(108)
19. 电网能量损失的规划.....	(111)
20. 电网能量损失的规划问题.....	(113)
21. 拉脱维亚线路故障分析及供电可靠性的提高.....	(114)
22. 电力网优化运行中计算机的使用.....	(118)
23. 《电网优化设计与降低电能损耗》的全苏科技会议.....	(119)
24. 工厂配电.....	(123)
25. 生物能开发的研究动向.....	(130)

节能的永磁旋转机

1. 磁铁驱动的旋转装置.....	(134)
2. 自动旋转发动机.....	(136)
3. 特殊发动机.....	(137)
4. 永久磁铁磁力旋转机.....	(138)
5. 永磁旋转机.....	(139)
6. 永磁旋转机的转子.....	(141)
7. 磁铁式连续运转装置.....	(142)
8. 永磁连续传送装置.....	(144)
9. 永磁行走装置.....	(145)

电气设备的节省资源和节省能源

I. 总 论

〔日〕 三井恒夫 著 董汝宣译 刘文琳校

一、日本能源情况与节能作用

1978年日本的能源供给量约为 455×10^{13} 大卡, 其中, 75% 依赖于进口石油。这些一次能源经电力、城市煤气、石油和煤炭加工等二次能源的转换部门, 最后, 被输送到需要部门。在输送过程中损耗全部能源的25%, 使用部门损耗约45%, 有效使用能源只不过占全部一次能源的40%强。因此, 发展原子能、液态天然气(LNG)和煤炭等代替石油能源的同时, 还必须提高能源利用率和减少能源损耗。另一方面, 按不同使用部门的能源消耗量来看, 工业部门占60%强, 剩余的能源在输送和民用两部门各占一半。与美国的情况相比, 日本在工业部门的消耗量就显得很高。所以, 工业部门的节能意义也就不言而喻了。

日本主要工业在能源利用率方面水平较高。这说明在各领域从1973年石油危机以来对节能作了很大的努力, 且收到一定效果。

为谋求节能, 采取的具体措施有:

(1) 缩小耗能范围, 适当控制使用计算机的能源消耗, 提高使用率; (2) 提高电灯、电动机和变压器等耗能设备的效率; (3) 提高废热回收系统的效率。

二、电气部门的节省资源和能源

1978年电能占整个能源比例的32%, 预计到2000年时可达50%。为此, 从有效地利用能源观点出发, 必须在供电和用电两方面发挥更高效率。

1. 电力部门的节能

(1) 发电部门 日本的发电设备从60

年代开始移向《火主水从》, 1966年开始使用原子能。其构成比例: 1979年水力占20%, 火力占68%, 原子能占12%。其中, 火力发电机组逐渐提高了发电效率, 1951年为19%, 1979年达38%, 即提高效率一倍以上。

提高发电效率的主要因素为: ①加大机组尺寸; ②采用二次再热循环; ③使用超临界压力锅炉; ④给水泵采用汽动泵驱动方式, 以降低厂用电率。就目前情况来看, 以蒸汽参数提高效率, 锅炉的耐热材料差不多已达到极限, 再想提高效率困难较大。

在此情况下, 可认为要提高向电能转换效率的方法, 有下述三种形式。

第一, 对一直发展着的热机, 力争扩大高温高压领域, 使之提高效率。当前, 燃气轮机的入口燃气温度约在1100℃, 单机效率为29%, 由于叶片的冷却方式和陶瓷等耐高温材料得到了发展, 所以, 扩大高温领域是可能的。在《月光计划》中, 第一步措施就是研制入口燃气温度在1300℃, 单机效率为34%的设备。

第二, 发展与过去不同的新型发电方法。过去的方法是将一次能转换成机械能的发电方法。但是, 若在未转换机械能之前就直接进行发电, 则是最为理想的。

燃料电池就是基于这种想法, 利用氢和氧的化学反应直接发电的, 理论效率很高, 可达70%。东京电力公司以4.8兆瓦发电机进行试验, 第一阶段的效率达40%, 目前, 在进一步提高效率。

第三, 采用联合循环结构提高效率。目

前,已计划研制利用燃气轮机排气作为汽轮机热源的联合循环发电。采用与燃气入口温度1100℃的燃气轮机的联合循环结构,总效率可达42%。对高效率燃气轮机,逐步提高入口燃气温度达1300℃和1500℃,采用联合循环结构的总效率使节能目标可达50%。

进而、再考虑采用该联合循环发电和煤气化技术,假如气化技术的转换效率为90%,就可以改善煤炭火力发电效率,从36%提高到40~42%。因此,作为节能技术发展前途较为乐观。

(2) 输电,变电和配电部门 日本输配电损耗率1979年在6%以下,与世界各国相比,达到了较高水平。50年代采取了下述措施:①电源采用火力发电,缩短输电距离;②输配电采用高电压(154千伏→275千伏→500千伏);③粗导线输电;④变电设备低损耗等。60年代以来的措施是:①大容量火力、原子能电源等普遍采用遥控;②扩大地下电缆系统和加大支路电抗器的使用量;③使用高阻抗设备。损耗率处于平稳状态。

作为提高输电电压手段,目前在研究大容量输电用1000千伏的超高压输电技术。10千兆瓦600公里输电时的节能效果,与500千伏的情况相比,如表1所示,输电损耗下降到60%。此外,采用大容量地下电缆,目前275千伏的是采用常时输电容量40万千瓦单回线的设备。不过,为再进一步提高大容量和高效率,正在设计提高电压、降低介质损耗和最适冷却方式。对于设备,也根据铁芯设计,用合成绝缘纸降低介质损耗等来争取变压器、电容器的低损耗,进而努力实现支路电抗器的低损耗。

2. 电力消耗部门的节能

(1) 工业部门 近来,主要工业部门的节能成绩如表1所示,按其部门不同,成绩也不一样。现在打算按单位能量来降低10—20%。采取的节能办法为重新评价生产工艺;改善操作运行技术,废热回收再处理和新技术应用等。特别是钢铁工业的高炉炉顶

表1 10千兆瓦600公里输电中的损耗比较

	500千伏	超高压1100千伏
线路数, 线路	7	2
电路数/线路	2	2
线路损耗, 兆瓦	542	145
设备损耗, 兆瓦	62	102
总损耗, 兆瓦	604	247

压力发电、水泥工业的NSP窑(新悬挂式预热器)等使用的新技术都是较好的实例。

电气设备中值得注意的是,在大耗电部门的工业用电中,多采用电动机(90%以上为感应电动机)的节能运行控制方法,利用可控硅变频器的调速控制得到节能效果。对于鼓风机、泵和压缩机的负荷变动,以前是对调节阀进行控制,未曾想到对电动机输出进行控制。现在,是利用可控硅变频器对电源一次频率按负荷情况进行变换,这就提高了电动机的运行效率。虽然工艺程序和流量不同效果也不一样,但是,有例子说明节能会取得20—50%的效果。钢铁和铝生产等部门的感应加热炉用的电源,利用可控硅变频器代替电动发电机,可节能约10%。

(2) 运输部门 运输部门使用的二次能源,作为汽车、船舶和飞机用燃料,石油能源占有绝对地位,即93%,而电力则占7%以下。可以预计,这个比例今后还会变化,但在节能方面需要着实的努力才能完成。

当前,普及到4—5%的换流器的控制,与一直使用的电阻控制车相比,争取可节能25—30%。随着交流机代替直流机技术的发展,也在考虑用变频器来控制。如果实现,可预计比换流器控制车更能节能15%。

(3) 民用部门 日本民用部门的能源消耗率,与欧美各国相比水平较低。虽然日本的自然环境和气候处于温和地带,家用能源消耗较少,但民用部门中,特别是照明、电视、冰箱和洗衣机等耗电设备今已相当普

及,室内空调机和磁带录相机的潜在需用量今后还会发展,所以耗能率还会继续上升。

现在,民用电气设备的单机效率逐渐上升,电视机和冰箱与10年前相比,耗电量降低了 $2/3-3/4$ 。再以日光灯为例,近来生产的节电型日光灯可提高照明效率5%,假如日本全国将40瓦以上的日光灯更换成节电型的,那么,节能效果可达约3亿度。

三、结束语

作为今后推进节能的课题,首先,要确立自立更生的技术发展体制。目前,大型节能技术的推进计划正在进行中,为积极采用民间力量,去年10月成立了新能源综合发展机构。不管这种措施如何,估计必会得到更好的效果。

其次,发展新材料很重要。在进一步执行节能计划中,深感材料方面不适应。因此,必须发展耐高温材料、低铁损材料和低介电损耗材料等。材料过关,快速发展节能才能成为可能。

再之,必须提高系统的效率。在工业部门中力求提高整个系统的效率。不过,提高单体设备的效率也是必要的。例如,现已实施利用变压器、电缆等废热进行建筑物上层的采暖办法。今后这种技术有待逐步扩大,并用于发电方面。所以,必须从热和电的综合观点来考虑供给系统。

〔《电气学会杂志》,1981,101, №5, 375—378〕

II. 材 料

第1章 导电材料

〔日〕 长沼义裕 三宅保彦 著 杨成林译 林君毅校

1. 前 言

提供电阻小、电力传输损耗小的导电材料,是节省资源和能源的一项基本措施。本文从这一考虑出发,论述了导电材料开发的现状和方向。

2. 支配金属电阻的基本法则

众所周知,电阻与导体的长度和电阻系数成正比,与截面积成反比。根据马希森(Matthiesen)法则,电阻率表示为与温度成正比的部分 ρ_T 及剩余电阻 ρ_R 的和。 ρ_T 是由于晶格热振动使电子散射而产生的,根据布洛-格里雷森(Bloch-Grünesen)公式,电阻与德拜(Debye)温度的关系是:在德拜温度以上电阻与温度成正比地增加,在此温度以下则与温度的5次方成比例地急剧减小。剩余电阻 ρ_R 是由于杂质或合金元素的存在,

以及由于晶格缺陷产生的晶格变形而使电子发生散射所产生的,而杂质元素的影响,根据林德(Linde)法则,1原子%的杂质元素所引起的电阻率的增加,与杂质元素和基体金属的价电子数的差的平方成正比。关于晶格缺陷,布莱威特(Blewitt)指出,它与加工时的剪断应变量成比例增加。若是在复合材料时,按照混合法则,其电阻率当然是合成电阻率。

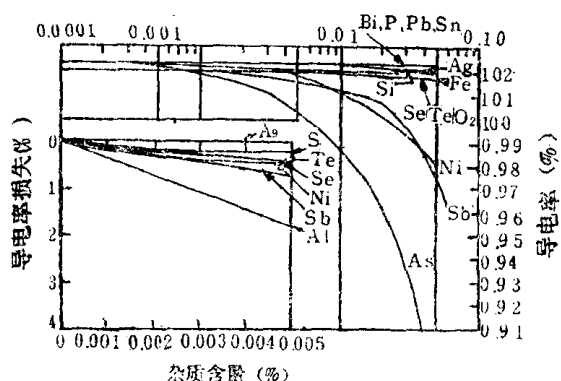
3. 利用高纯度化提高导电率

由于Al、Cu的高纯度化能够提高导电率,铝在最高时为65.5% IACS (International Annealed Copper Standard——国际退火软铜标准),可以推断99.999%纯度的Cu为103.06% IACS。通常,因为这类高纯度金属都是用特殊的精制法制造的,所以

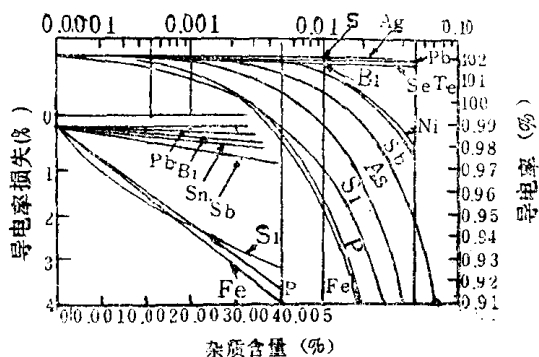
与价格上升来比, 导电率增加不多, 机械强度明显小了, 因此应用受到限制。然而, 用工业制得的典型纯铜 (无氧铜) 的导电率比韧铜约高1% IACS, 因此, 在减少电力损失方面显示出有利性。

目前, 工业上利用区域精制法也能得到纯度为99.999%, 重量达数10公斤~100公斤左右的铜、铝的坯料。

图1(a)、(b)及图2分别示出了铜和铝的杂质元素引起导电率下降的实际数字。



(a) 韧铜的杂质和导电率的关系



(b) 无氧铜中的杂质和导电率的关系

图1 铜中杂质引起的导电率变化

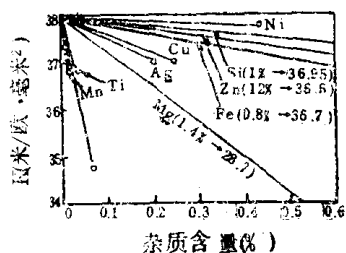


图2 铝中杂质量和导电率的关系

4. 利用热处理提高导电率

利用热处理来提高导电率是利用了晶体缺陷的消除, 杂质或合金元素的固溶、析出

等存在状态的变化而获得的。对于前者, 即使是在完全退火的强加工材料, 也不可能期望获得Al约1% IACS, Cu约2% IACS的提高。

通过控制元素的存在状态可使导电率发生明显的变化, 这是早就知道的, 最近从这方面着手, 提供了既有良好的机械性能, 又改善了导电率的方法, 并有了广泛的应用。Al-Fe合金的三重态E, Al-Fe-Co合金的超T就是其中一例。用传送带回转方式连续铸造小断面铸件过程中, 由于冷却速度快, 比较多的合金元素被强迫固溶, 所以导电率低, 即使将其拉丝后退火, 由于析出微细的Al₃Fe等, 在赋予良好的韧性和耐蠕变性的同时, 也能得到接近60~61% IACS这种高导电率的电气用铝。

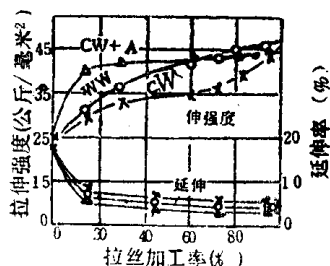
5. 利用加工和热处理相配合提高导电性

对金属材料进行塑性加工和热处理, 可以获得用单一工艺所不能获得的性能, 此即所谓加工热处理法 (Thermomechanical Treatment)。主要有: ①同时进行塑性加工和变态等的热处理; ②把这些加工组合, 并分阶段进行。

导电材料用①方法加工的例子, 有同时实行析出处理和进行加工的温热加工法。

图3是在510℃下对Al-Mg-Si-Fe合金进行溶体化处理后, 在140℃进行热拉丝, 其拉伸强度和导电率的变化, 温热加工的结果, 与通常所用的溶体化处理-冷加工-回火的方法一样也能得到同等甚至更好的性能, 而且工序也少了。同样的结果在Cu-Cr合金线上也可得到。可是在有色金属的场合, 温热加工法中析出处理和加工的组合加工度明显加大, 在充分控制的条件下进行较长工序的加工, 出现了要求加工工时较多等问题。

用方法②时, 可以制得高强度、高导电率的Cu-Cr合金, 比之通过组合析出和加工的方法, 可以使性能大大地提高。此外, 使1号铝合金线得到高性能的方法已广泛地使用, 制造厂的专门技术已公开。

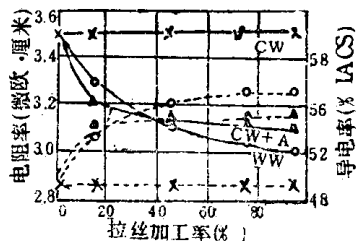


(a)机械性质

x: CW: 冷拉丝线材

△: CW + A: 冷拉丝回火材料

O: WW: 温热拉丝线材



(b)导电率

实线: 电阻率

虚线: 导电率

图3 Al-Mg-Si-Fe合金的温热拉丝引起的性能变化

图4是最近发表的有关比较数据, 从图中看出, 通过对1号铝合金和同类的 Al-Mg-Si系合金的热处理和加工的适当组合, 其拉伸强度和导电率都提高了。以这些作为基本成份, 研究了中强度铝合金线, 并已用于架空配电线路。这是由于析出现象和加工所引起的晶格缺陷的相互作用, 使机械性能和导电率得到了飞跃的提高, 实际上通过控制合金元素添加量的增减而获得所需要的性能的例子是很多的。进一步通过对合金元素系统的研究, 得到了具有相同性能的纯加工硬化型合金线, 并在上述的用途中得到了多方面的应用。

6. 利用合金元素和热处理相结合来改进导电率

为了对已设置铁塔不进行增强、加固等, 仅在电线拉紧时增加电流容量, 研制了耐热 ACSR。可是, 耐热铝合金线的导电率为 58% IACS, 比硬铝线低 3% IACS, 由于输电损耗大, 就要求提高导电率。现在已经得

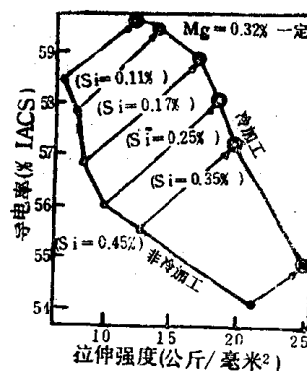


图4 Al-Mg-Si 系合金的时效特性及受冷加工的影响

到导电率60%的高导电性耐热铝合金线。制造举例: 对Zr进行溶体化处理而得到强制固溶体, 导电率60%以上时减少添加量, 而用添加Y来补偿由此引起的耐蠕变性的降低。实际上, 用更简单的方法就得到了同样的效果, 合金元素和热处理组合效果是, 既保持了耐热性, 又有很高的导电率。

这样, 得到的 60% TACSR, 由于电阻改善了约3%, 使功率损耗也减少了约3%。对于大规格导体就减少了导体数, 并减少了建设施工费。若对各种费用进行综合计算, 如果是58% TACSR, 其经济效果不大, 采用 60% TACSR才开始有效, 例如在154千伏、50万千瓦输电中, 用两根610毫米²导体 ACSR 作成 60% TACSR 的1160毫米²单导体, 核算结果, 包括损耗在内, 年经费减少了4%, 建设费减少了8%。预计可以收到节省资源和能量的良好效果。

在最近, 更进一步开发了耐热性更高的超超耐热铝合金线, 由于特殊的钢芯组合, 使之在使用现有的铁塔的情况下, 就具有几乎两倍的输电容量, 现正在出现倍增容量输电线, 在这种超超耐热铝合金线中适当控制 Zr 的用量及其存在状态, 就可获得卓越的耐热性和导电率兼备的合金线。

7. 利用复合化提高导电性

在母材上压接被覆导电率比较高的金属而制得的复合线, 根据混合规律, 其合成导电率也是高的, 典型的为钢芯铝线。这种复

合线之所以现在比较容易得到,是由于压接等固相接合技术已取得很大进步。现在已工业化的钢芯铝线制造法,有在美国已企业化的 Alumoweld 和日本开发的 EFT-AS 线两种。Alumoweld 线是在中碳钢线周围,将电气用铝粉用4方滚筒粉压成型为同心圆状,将其反复烧结、压延,并覆上高密度铝烧结体而制成导线材料。将其作为坯料,利用强制润滑方式的特殊组合模进行拉丝直到所定的尺寸为止。

EFT-AS 线是把仔细研磨的钢线预热,并引入铝挤压机压模盒中,在其周围挤压铝,同时在钢线上施加前向张力制得导线材料,这称为压接被覆 EFT 法。然后,利用为此工艺所开发的特殊拉丝法拉丝到所定的尺寸为止,最后就得到了不同的被覆厚度的导线。

这样得到的钢芯铝线有如下特征:①和 ACSR 用镀锌钢线有同等的机械强度,但导电率著显提高了;②有良好的耐腐蚀性;③和同一强度的镀锌钢线相比较,电线比重较轻。利用这些特点,这种高性能钢线可用于不同用途,典型的是 ACSR 用钢芯,以及架空地线。前者最大特点是电阻低,特别是交流阻抗低,电力损耗减小。也就是说,在通常的 ACSR 中,电流大半沿铝线方向呈螺旋状流动使钢芯磁化,由于产生磁滞损耗和涡流损耗,这就增加了交流阻抗。但在钢芯铝线的场合,其本身具有 20% IACS 以上的高导电率,再则,由于钢线一根一根用铝被覆,故磁阻增大,由磁动势引起的阻抗则小了。因为钢截面积很小,铁损也小,以上种种原因,使交流阻抗减小,从而减少了电力损耗。图 5 为对 795 MCM (约 400 毫米²)

(原文如此——译注)的普通 ACSR 和 ACSR/AS 或 AW 的最大损耗功率及每年损耗功率量的计算结果,钢芯铝线的功率损耗降低 4~6%,因而具有较大的实用价值。另外电流容量也增加了 2~3%。在 58% TACSR 钢芯采用 AS 线,过去的报告曾指出,由于耐热铝合金线的导电率降低,也能使输

电损耗减少,同样,超耐热和超超耐热铝合金也不会增加损耗而增加了电流容量,如果能使 60 TACSR/AS 或 AW 的电流容量增加的同时,谋求减少电力损耗,那么,又将成为省资源和能量的大有希望的材料。

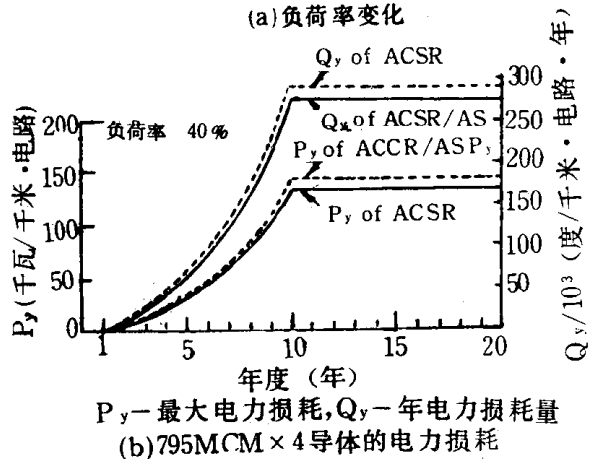
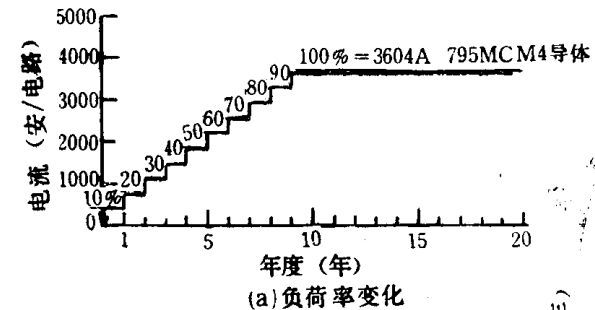


图5 4导体×795MCM ACSR和ACSR/AS或AW的电力损耗比较

8. 极低温电缆用导电材料

在第2节中已介绍,金属的电阻率随着温度的降低而急剧地下降。这种趋向特别强烈的有 Be、Al、Cu 等。

将来对于用作 10 千伏安/线路级大电力输电的架空输电线和用作在 1 比 1 对应可能的电缆,将推荐使用液氮冷却的极低温电缆。经初步估算,其输电损耗仅次于超导电缆,从省能方面来看是一种有用的电缆。

比较了用作这种电缆的导体的 Cu 和 Al,如果在液氮温度范围内,两者的电阻率几乎相同,由纯度引起的差别也小。而从机械性能来看,则需采用 99.9% 纯度的 Al。另外,Al 的密度低,从热容量方面考虑也是有利的,铝表面氧化膜对单线间的涡流来说,可视为是完全绝缘体,从集肤效应方面来看也

是优异的,这意味着虽然整个导体截面积大了,但是可采用比较细的裸线作为多分割导体。

9. 超导材料

超导现象的应用范围大致分为三个方面:①强磁场的产生;②大电流的输送;③元件。其中①和②对节省资源和能量有重大意义。现在已达到超导实用化研究阶段,超导线材也成为实用材料综合高性能化技术的研究主题。

(1) 各种超导材料的高性能化

超导现象产生在三个临界值 T_c (临界温度), H_c (临界磁通密度), J_c (临界电流密度) 的范围内,但从实用的观点来看,一般都致力于提高这些临界值的研究。

关于提高 T_c ,如 Nb_3Sn 、 V_3Ga 等的A-15型化合物就显示出高性能,是很有名的材料,但目前已知道的具有20K以上的高 T_c 的 Nb_3Ge 、 Nb_3Ga 、 $Nb_3(Ge, Al)$ 等的线材化工作正在用淀积法等方法进行研究。

对现有的A-15型化合物以及提高其 H_{c2} 进行了研究,此外,对可以塑性加工的 V_2Hf 基C-15型化合物系的 $V_2Hf_xZr_{1-x}$,以及对在4.2K时,具有50T的高 H_{c2} 的 Mo_3S_4 基Chevrel型化合物的线材化进行了研究。

J_c 随超导体的金属组织而变化, Nb-Ti

合金系超导线材中, α -Ti等微细析出物以及晶格缺陷作为钉扎中心是有效的,在加工热处理法中,研究了引入这些效应的制造法,取得了相当的成绩。另外,把化合物超导体中的晶粒边界作为钉扎中心,研究了包括晶体微细化法在内的高 J_c 化合物生成技术。

(2) 稳定化技术

在超导应用的飞速发展,与高性能材料的开发研究的同时,线材稳定化技术的研究有很大的意义。为了稳定化,Cu、Al等大量被覆的技术(完全稳定化)和极细的多芯线材(本质的稳定化)的制造技术是很重要的。关于前者,主要进行Cu的各种被覆法研究,最近Al稳定法也已确立了工业规模。关于极细的多芯线制造技术,已研制了拉丝法、热挤压法、液压挤压法等各种方法。特别是还进行了大规模的应用试验,由于大容量超导线材用液压挤压法制造高性能均匀性良好的极细多芯线的制造技术很引人注目。这种技术的进一步发展,正在确立化合物系线材的大规模生产制造。另外,最近用原位法使线材制造技术有显著的进展,此法具有制造容易,对变形的稳定性等许多优点,正期待其实用化。参考文献75篇(略)。

〔《电气学会杂志》,1981,101, No.5, 379~383〕

第2章 磁性材料

〔日〕 成田贤仁 著 杨成林译 杜祥瑛校

1. 前言

关于电机、电器设备节省资源和节能问题,从磁性材料方面来看,应努力降低使用材料的损耗和改善使用方法。而且,对于各种电机、电器设备应采用在使用时的损耗评价和设备本身的成本之和为最小的经济设计思想。

本文将述及有关降低硅钢片铁损和新铁芯材料的开发动向。

2. 降低无方向性硅钢片的铁损

无方向性硅钢片为硅含量约0~3%的Si-Fe合金薄板。体心立方晶粒无规则分布,磁性是各向同性的。这种硅钢片用于电机、电器设备中时,其铁损 W_M 主要是由正弦波交变磁场、非正弦波交变磁场、旋转磁场下的铁损,即所谓交变铁损、非正弦波铁损和旋转铁损所组成。

2.1 交变铁损的降低

对于制造要素来说，主要的有Si含量、杂质含量、晶粒直径（D）及晶粒的分布状态，即所谓集合组织。另一方面，交变铁损 W_A 主要是由磁滞损耗 W_h 和涡流损耗 W_e 所组成。

Si的添加带来的优点是：减少了晶体磁性各向异性常数 κ 及磁性畸变常数 λ ，提高了电阻率 ρ ，因而分别减小了 W_h 和 W_e ，但同时也带来了饱和磁通密度 B_s 下降的缺点。图1为目前市销的无方向性硅钢片的Si含量和交变铁损 $W_{A15/50}$ （该符号表示为，最大磁通密度1.5特斯拉，励磁频率为50赫时的铁损，以下同）的关系。这一结果不能只简单说明是由于Si含量的增加引起的 κ 、 λ 和 ρ 的变化造成的，而且还与采用控制晶粒直径、减少杂质含量、添加Al和轧制条件的选择等方法从而控制集合组织的变化有关。另外，对图中的 W_F 和 W_R 将在后面加以说明。

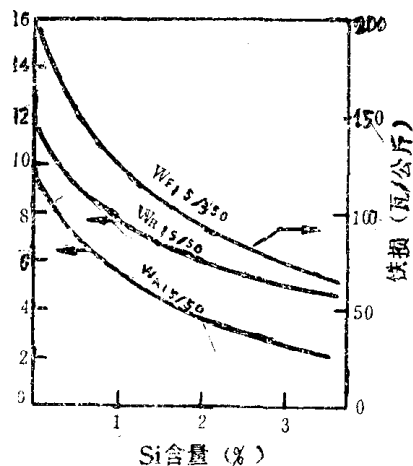


图1 无方向性硅钢片（0.5毫米厚）的Si含量和铁损的关系

对同一坯料来说，改变晶粒直径 D ，则 W_h 与 $1/D$ 、 W_e 与 D 大致成比例，如图2所示，由坯料成分所确定的最佳平均晶粒处， W_A 为最小。

钢中所含的杂质异相粒子，主要有碳化物、氧化物、氮化物、硫化物，其直接的结果是阻碍了磁畴壁移动，间接结果是使晶粒微细化，这样有可能使铁损增大。关于C，现在减除它，使其达到没有显著影响的程度，是没有问题的。图3示出了O、N、S对3%无

方向性硅钢片铁损的影响。现在高级硅钢片的制造技术已到了很高的技术水平，可冶炼高纯度钢，O、S含量都可控制在10ppm。在炼钢阶段要将N消除到20ppm以下是相当困难的，减轻不良影响的办法是添加适量的Al，以形成粗大的AlN。图4示出了不同Al含量和采用2次轧制法不同压延率对3%无方向性硅钢片铁损的影响。提高铝含量并选择适合的压延条件，就会增大磁通密度，同时还使铁损下降。这表明，由于包含平行于板

表 1 高级无方向性硅钢片的铁损
 $W_{15/50}$ （瓦/公斤）

板厚(毫米)	0.35	0.50
类别		
S-9	2.40	2.90
高级硅钢片	2.20	2.70

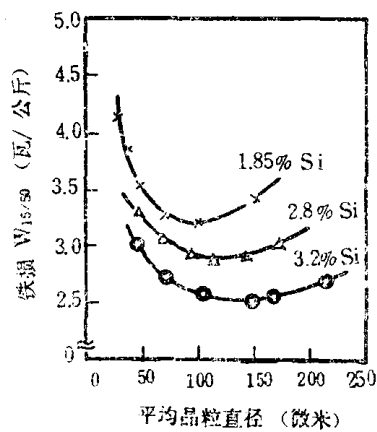


图2 无方向性硅钢片的铁损与晶粒直径的关系

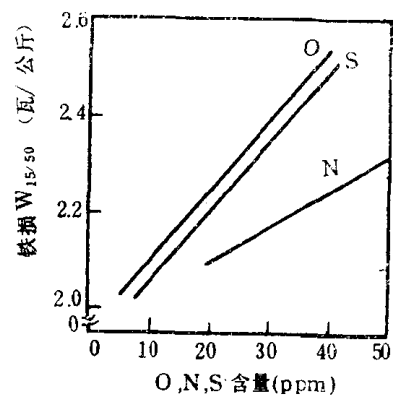


图3 O、N、S杂质对无方向性硅钢片铁损的影响

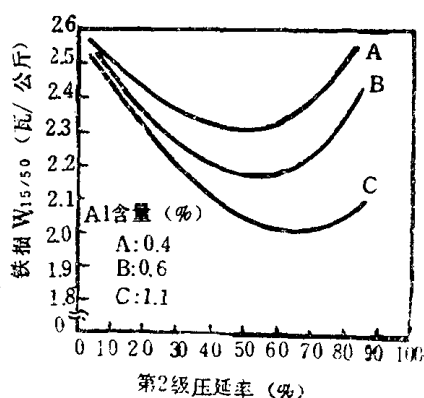


图4 Al含量和第2级压延率对无方向性硅钢片铁损的影响

面的易磁化轴[100]的(100)、(110)面的晶粒增大了。

由于做了以上的改进,研制出了表1示出的JIS标准的最高级产品,即比S-9损耗更低的无方向性硅钢片。

2.2 非正弦波铁损及旋转铁损的减小

无方向性硅钢片中的高频铁损 $W_{F15/350}$ 及旋转铁损 $W_{R15/50}$ 和Si含量的关系示于图1。非正弦波铁损是由于非正弦波磁通的高次谐波成分引起的损耗,其大小用 W_F 值来评价。随着频率 f 的上升,由于 W_F 大致与 f^2 成比例地增加,在 W_F 中 W_R 占有的比率上升了。在无方向性硅钢片中,为了减小 W_F ,或者将钢板厚度减薄或者增加Si含量,提高电阻率 ρ ,此外没有别的办法。因此,对非正弦波铁损较大的电机、电器设备适合于采用Si含量高的硅钢片。

旋转铁损也随着Si含量的增加而减小。实际上,对相同的Si含量, W_R 也随集合组织的不同而有相当大的变化。按照旋转磁滞损耗与晶体方位的关系,对 W_R 有利的晶面是(100)面,其次可推断为(110)面。因此为了降低 W_R ,用降低 W_A 的方法调整集合组织是有效的。

3. 方向性硅钢片的损耗降低

方向性硅钢片中Si含量约为3%, (110)面在轧制面上, [001]方位在接近于轧制方向,晶粒分布多,沿轧制方向磁性最好,有所

谓的方向性。本节仅解决交变铁损问题,首先说明铁损发生的原因,再介绍控制这个原因对铁损减小的结果。

3.1 交变铁损的产生机理

方向性硅钢板的铁损主要由磁滞损耗和涡流损耗组成。磁滞损耗是由于磁畴壁的生成消减及其不可逆移动而产生的,受晶体方位的集积度、内部变形、杂质等影响。如前节所述,在杂质不致对磁特性产生不良影响的程度内,可用热处理除去内部变形。晶体方位的集积度,也就是(110) [001]方位的集积度给予磁滞损耗以显著的影响,若集积度增高,则晶粒变大,磁滞损耗明显减小。

一般实测确定的涡流损耗比根据经典理论算出的涡流损耗大(钢硅片内磁化是一样的变化)。两者的差称为涡流异常损耗,为了说明这个问题,曾做过许多努力,R. H. Pry和C. P. Beam通过引入磁畴构造,对其完成了定性的说明。如图5所示,间隔为 $2L$ 的 180° 磁畴壁认为是排列为无限长的,对磁畴壁以相同的速度移动时的涡流损耗计算表明, $2L/d$ 愈小,涡流损耗愈接近于用经典理论计算出的值。因此要减小涡流损耗必须将磁畴细分化。

从以上的结果可见,为了降低铁损,要提高晶粒的集积度,同时要减薄板厚,增大电阻率,进一步还要将磁畴细分化。

3.2 利用晶体方位的高集积化减小磁滞损耗

晶体方位的高集积化意味着偏离各晶粒易磁化轴[100]轧制方向的平均角度的减小。具有(110) [001]附近方位的单晶体的磁滞损耗如图6中所见,它随着对[001]轴的晶体表面倾斜角 β 的减小而减小。因此,如上所述,晶体方位的高集积化,随着晶粒的粗大化和偏离[001]轴轧制方向的平均角度的减小,而使磁滞损耗得以减小。

3.3 利用磁畴细分化减小涡流损耗

磁畴的细分化是利用(1)外加张力、(2)附加刻痕、(3)晶体方位的控制等来实现的。

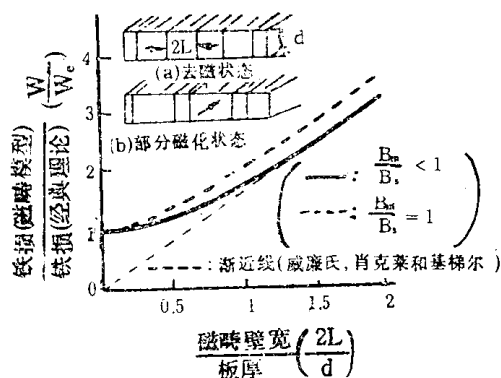
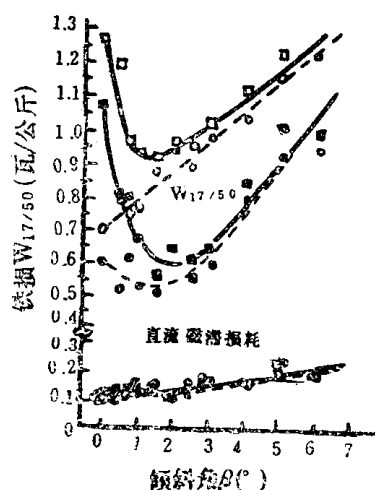


图5 涡流损耗和已规格化的180°磁畴宽的关系



- 刻痕前无张力
- 刻痕前张力为1.5公斤/毫米²
- 刻痕后无张力
- ▲ 刻痕后张力为1.5公斤/毫米²

图6 具有(110)[001]附近方位的0.2毫米厚的3%Si-Fe单晶体的磁滞损耗和铁损 $W_{17/50}$ 受倾斜角 β 、外加张力及刻痕的影响

(1) 外加张力的效果

从图6上可见, 由于外加张力, 不管倾斜角 β 如何, 铁损都得到减小, 如考虑到磁滞损耗, 外加张力引起涡流损耗的减小是可以理解的。

(2) 附加刻痕的效果

可以看到, 在垂直于高集积度的方向性硅钢片的轧制方向加工刻痕, 就会使铁损情况得到改善。为了理解这种现象, 在不加应力时, 对厚度为0.20毫米的3%Si-Fe单晶体的各种 β 值, 求出刻痕间隙所带来的铁损 $W_{17/50}$ (瓦/公斤)变化。其结果示于图7。

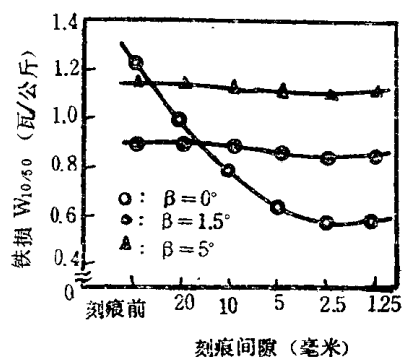


图7 0.2毫米厚的3%Si-Fe单晶体的铁损 $W_{17/50}$ 与刻痕间隙的关系

这种场合的刻痕是在与磁化轴垂直方向, 同带有直径0.6毫米圆球的笔尖, 在300克的载荷下加工而成的。在 $\beta = 0^\circ$ 时, 构成的刻痕间隙越狭, 铁损的减小就越显著, β 超过 1° , 则刻痕所引起的铁损减小的效果就不明显了。从图6中还可看到刻痕间隙5毫米时的这种倾向。根据同一图还可看到, 若在加工刻痕后, 再外加上1.5公斤/毫米²的张力, 则0.20毫米厚的2%Si-Fe单晶体上 β 约等于 2° 时, 铁损 $W_{17/50}$ 达到最低值0.5瓦/公斤。这种情况下铁损的减少基本上是由于涡流耗损的减少。

(3) 利用附加微小倾斜角的效果

如图6所示, 由于张力所引起的铁损减小效果, 是在[001]轴与晶体表面呈约 2° 倾斜时最为明显。然而, 在硅钢片整体上要造成这种倾斜, 在技术上是非常困难的。因此, 曾试用了不是在整个硅钢片上产生这种倾斜, 而是采用局部地和周期性地产生倾斜的方法。具有(110)[001]方位的二次再结晶核在带有微小弯曲的硅钢片内生长时, 利用晶核生长与弯曲无关且保持同一方位的性质。即沿与轧制方向垂直方向给钢板造成周期性的微小弯曲, 进行最终精退火, 平整后, [001]轴的倾斜产生周期性地变动。事实证明, 这样所得到的硅钢片在轧制方向外加张力后, 180°磁畴均匀地被细化。

此外, 还可考虑控制晶粒的粒度把磁畴细化。接受了以上的研究成果并利用晶粒的高集积化和由表面绝缘薄膜引起的外加张

力, 研制出高取向性硅钢片。

3.4 高取向性硅钢片的研制动向

高取向性硅钢片是在1968年首次由新日本制铁公司, 然后在1973年由川崎制铁公司开始制造的。新日本制铁公司方法是抑制一次再结晶粒生长, 采用所谓以AlN为主, 以MnS为付的阻化剂, 通过压下率约85%的一次强冷轧, 脱碳退火及最终精退火, 以达到高集积化, 用形成表面绝缘薄膜的方法在硅钢片上加张力。川崎制铁公司方式的阻化剂是用MnSb, 采用二次冷轧, 但第二次压下率比以往的有所提高, 为65~70%。在这些方面与新日本制铁公司方式不同。其后美国的G. E公司也积极地进行了开发研究, 阻化剂成分确定采用Mn、B、S、N, 在Allegheny Ludlum公司, 这种钢板称为“Boron Steel”, 已经工业化生产。意大利的Terni公司认为在热轧板退火时, 施以急冷操作是有利的, 已确定采用这种方式。可是, 这两家公司还并没有生产。

3.5 低铁损的界限

下面计算一下上述方向性硅钢片铁损减小的界限。例如板厚0.3毫米, 电阻率45微欧-厘米的3%Si-Fe方向性硅钢片的最大磁通密度为1.7特斯拉, 励磁频率50赫时的涡流损耗为0.45瓦/公斤(相对于在实验室所得到的 $2L/d$ 的最小值的涡流损耗和按经典理论计算值之比设为1.5时)。目前, 如图6中磁滞损耗界限值若为0.15瓦/公斤, 则全部铁损为0.62瓦/公斤。而现在实际使用的0.3毫米厚高取向性硅钢片的 $W_{17/50} \approx 1$ 瓦/公斤, 故仍有减小铁损的余地, 但预计将会越发困难。

4. 新铁芯材料的开发动向

无方向性与方向性硅钢片降低损耗的工作有显著发展, 为了进一步超过其界限或者是在以往研究方向上继续进行研究, 或者从事新型材料的研制以及引进新制造方法等。在新型材料方面, 如作为铁心材料有高导磁率非结晶合金薄带和高硅薄带是很有发展前途的。

4.1 低铁损高磁通密度非结晶合金薄带

关于非结晶合金高导磁率材料, (1)采用使磁致伸缩值接近于零的方法来提高导磁率, (2)利用控制组成来得到高磁通密度。在这两方面都正在进行试验。前者被用来代替原来的坡莫合金, 后者是用来代替原有的硅钢片, 很引人注目。

(1) 提高磁通密度

非结晶合金一般含有原子20%左右的C、B、Si、P等的所谓非金属, 和一般硅钢片比较, 饱和磁通密度 B_s 也低、居里温度 T_c 也低。因此想用非结晶合金薄带来代替硅钢片, 最好是提高使用温度下的 B_s 和 T_c 值。由アライド化学公司在1976年发表了高磁通密度的非结晶合金 $Fe_{80}B_{20}$ 。若用Co代替部分Fe, 虽然可以提高 B_s , 但不令人满意的是原料费增高。因此, 又试验了用Si来代替部分B。图8示出了用Fe-Si-B合金的高饱和磁化 M_s 、 T_c 和结晶温度 T_{cr} 所得到的合金组成范围。图中水平的直线表示Si含量, 与它成60°夹角的左面和右面的直线分别表示Fe和B含量的基准线, 复杂的弯曲曲线分别表示 M_s 、 T_c 和 T_{cr} 值的等高线。除此以外还作了几个试验, S. Hatta等人求出了Fe-B-C、Fe-Ni-B-C、Fe-Co-B-C系的 B_s 等与合金组成的关系, 将 $Fe_{80}B_8C_2$ 在523K进行热处理, 得到 $B_s \approx 1.73$ 特斯拉。

(2) 降低损耗

非结晶合金高导磁率薄带是利用超急冷制作的, 本身也能显示出优异的磁特性, 但通过试验证明, 采用适于结晶性材料的消除应力退火、磁场中热处理等, 可以使磁特性得到进一步改善。八田等人用 $Fe_{84}B_{12}C_4$ 进行磁场中退火, 或者消除应力退火, 结果表明磁特性有了明显的改善。另外, 为了减小铁损, 藤森等人试验了用热处理控制各向异性, 进而控制磁畴构造。我们还利用结晶化和外加张力来减少铁损。图9中示出了每一周期的铁损减小率, (a)只有外加张力的效果,

(b)将赤热的钨丝沿薄带纵向成直角贴上,使薄带局部结晶化后,进行外加张力的效果。试验表明:用这种方法可使 $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ 的铁损减小10~15%。

(3)使用上的问题

若将非结晶合金薄带作为铁芯材料使用时,主要问题是磁特性的温度特性和时效变化。解决这个问题的办法之一是希望有高的 T_{cr} 。从这点出发,Fe-Si-B系合金是符合要求的,如图8所示,把 σ_s 、 T_c 及 T_{cr} 作为最大的组成范围是不一致的,考虑到上述问题,认为如 $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{15}$ 那样,Si原子为百分之几,B原子为百分之十几,其余为Fe的非结晶合金薄带是合适的。

含有80%以上Fe原子的非结晶合金薄带比硅钢片具有更大的磁致伸缩,因此用作变压器铁芯时,必须减小磁致伸缩造成的噪声和由振动引起的磁特性变化等。

4.2 高硅硅钢带

我们知道,Si-Fe合金的Si含量为6.5%左右,磁致伸缩为零,它具有高导磁率、低磁滞损耗及由于高电阻率而降低涡流损耗等优异的磁特性,但Si量超过4%冷轧就困难了。目前尚未工业化。

以前,石崎等人研究过在6.5%的Si-Fe的热轧温度对冷轧性能的影响,另外,C. A. Clark等人也研究过添加Ni对3~5.5%Si-

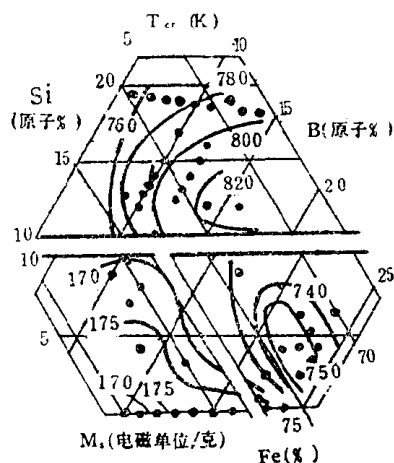


图8 具有高饱和磁化 σ_s 、居里温度 T_c 及结晶化温度 T_{cr} 的Fe-Si-B组成关系

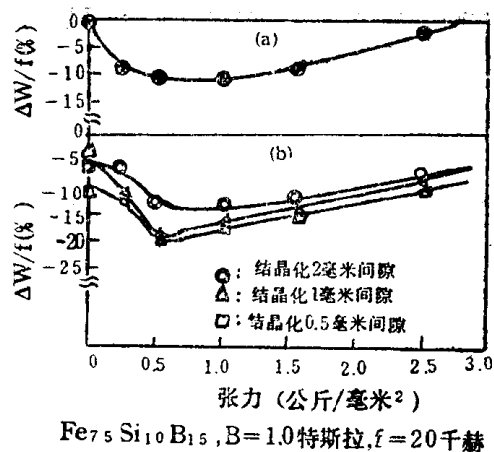


图9 采用结晶化和外加张力方法对Fe-Si-B系薄带铁损的减小

Fe的冷轧性的影响,但均未取得很大的成果。

笔者发现,①添加0.12%Mn,冷轧前的退火温度为873K,进而②置换一部分Si,具体的就是采用5.0%的Si-Fe,1.5%Al-Fe合金,冷轧就变得易于进行。另外,将6.5%的Si-Fe在1273K进行5小时热处理,以293K/小时速度冷却,其后在773K下保持1小时,进行油浴淬火,得到初导磁率=4000极优异的磁特性。

再则,为了提高6.5%Si-Fe的实用性,成功的试验了纤维化。在适当材料的玻璃管内用高频感应加热,将6.5%Si-Fe粉末熔融,从其底部拉伸,可得到直径10~250微米的纤维。其直流磁特性比方向性极钢带还优异,50千赫左右的高频磁损耗也低,可与非结晶合金 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{14}\text{C}_6$ 薄带匹敌。如能大量生产,就可实现如小型电动机铁芯制造工序的自动化等多方面的应用。该制造法类似于非结晶合金薄带,同时以此为契机,开始了6.5%Si-Fe急冷薄带的研究。

1978年日本东北大学的津屋教授等明确了6.5%Si-Fe的超急冷薄带化的可能性以来,进行了许多研究。这种急冷薄带由于有结晶性,没有非结晶合金薄带那样的致命缺点——热磁不稳定性,因此,在非结晶合金薄带实用化之前,是值得注意的。

图10示出了用双辊轧法制得的厚60微米,宽2毫米的6.5%Si-Fe薄带的铁损,随

热处理条件开始变化的情况。虽然是无方向性的薄带，但可得到和高取向性匹敌的低铁损。6.5%Si-Fe合金不容易使晶体取向，若把4~5%Si-Fe作成薄带并使晶体取向，那么，它比6.5%Si-Fe薄带有更高的饱和磁通密度，可以得到几乎相同程度铁损的硅钢。图11示出了4%Si-Fe薄带在25%压下率下进行冷轧加工、退火，其铁损就能明显减小的情况。

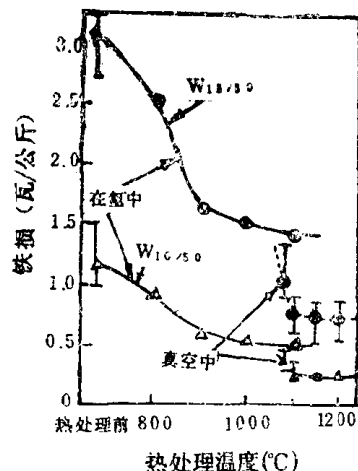


图10 6.5%Si-Fe薄带铁损与热处理温度的关系

5. 结束语

从铁芯材料方面看，为了在电机、电器设备上节省资源和节能，要求降低铁损和改善使用方法，而在材料制造方面引进省资源和节能的超急冷技术是十分有利的，今后还有待进一步研究。

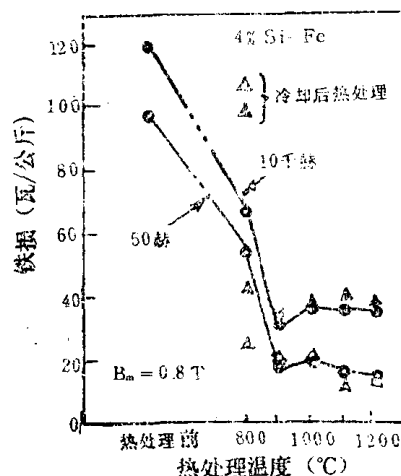


图11 4%Si-Fe薄带铁损与热处理温度的关系

参考文献24篇(略)。

[《电气学会杂志》，1981，101，№5，384~389]

第3章 绝缘材料

〔日〕 家田正之 著 王鸿志译 刘文琳校

随着对节能、节省资源有了更高的要求，以及装备使用环境的日益复杂和苛刻化，因此对电气设备的大功率化、小型化、可靠性也有了更高的要求。

通常，电气设备中的薄弱环节是绝缘技术及绝缘材料。在采用超高压技术情况下，解决这些问题更成为保证机械寿命的重要课题。

另外，由于对节能、节省材料的要求，必然导致了电气设备的超高电压化和小型化。因此，电气绝缘结构发展趋势是要求耐高压电场。绝缘材料也使用于电子部门，作介质、插件、底板等用。随着半导体整流元件、薄膜元件的发展以及集成电路的超大规模

模集成电路化，此时虽然电压的绝对值较低，但由于其绝缘层厚度极薄，必然在内部形成高压电场，高压电场会对电气绝缘的物理性能有所影响。因此，对于电力和电子两个部门来说，高压电场绝缘是带有共性的新问题，这些高压电场工程学是一门新的知识领域。

绝缘技术可以研究的课题很多，但若与节能、省料等问题结合起来看主要是：

(1) 高压电场化

为了减少系统的电力损失，需要高电压化。如果能控制由此而成倍递增的设备尺寸、减少占地面积并能解决制造技术及输送等问题，则这是一种间接的节能、省料的有效措施。