

JFE 开发的软磁材料

Sadahiro Kenichi 等

摘要 铁基软磁材料广泛用于变压器、电动机和发电机等设备的铁芯。JFE 开发的软磁材料包括取向电工钢、无取向电工钢、超级磁芯(6.5% Si-Fe)、软磁铁和铁粉。这些软磁材料的频率范围广泛,从商业用频到大约 1MHz 的频率。JFE 除了改进上述每种材料的性能外,还通过评估变压器和电动机的性能来研究这些材料的最佳应用方法。

1 前言

铁磁材料分为硬磁材料和软磁材料两类。硬磁材料如永磁体,一旦被磁化,将会半永久地向外界提供磁通量;而用于电磁铁芯的软磁材料,当通过线圈的电流停止时,磁通量的供应也停止。本文将讨论后一种类型,即软磁材料。

铁基软磁材料用于变压器、发电机和电动机等电气设备。降低这些材料应用时所产生的损耗可以直接提高能量转换效率。近年来,人们非常重视节能和环保,因此,改进软磁材料是关系到整个社会的重要课题。

JFE 具有代表性的软磁材料介绍如下。

(1) 电工钢

电工钢是向高纯铁粉中添加大约 3% 的硅生产出来的板材材料。采用先进的冶金处理方法能将交变磁场下的铁损降到最小值。取向电工钢板的厚度范围主要为 0.23~0.35mm,而无取向电工钢产品厚度主要为 0.20~0.65mm。在这两种类型钢板的表面上均涂覆薄绝缘层,然后烘烤,以降低交变磁场下所产生的涡电流。

电工钢主要应用于变压器和电动机的叠层铁芯,这种钢平时很少见,但目前电工钢的全球产量已超过 500 万 t/a。通常发电用的大型发电机都使用电工钢制造的铁芯。为了供应居民和工业用电,电压通过变压器时逐步升压或降压,而变压器所使用的铁芯也是由电工钢制造的。电力终端用户包括照明、加热以及机械电力等各个领域,尤其是机械电力方面,涉及到各种类型的电动机。因此,可以说电工钢被应用于发电、电力传送、电力配置和电力消耗的所有过程。不过,从本质上说,电工钢是一种具有电导性的金属材料,采用 JFE 生产

的超级磁芯,即使厚度降至 0.10mm,其直流电最高应用频率仍可达到 100kHz。

(2) 软磁铁

JFE 开发、生产和销售的软磁铁包括 MnZn 型、NiZn 型软磁铁材料粉和 MnZn 软磁铁芯。由于 MnZn 软磁铁芯的基体材料电阻系数比电工钢等金属材料高 $10^6 \sim 10^{10}$,所以软磁铁芯可应用的频率较高,范围为 0.1~1MHz。此外,虽然软磁铁芯的饱和磁感应强度仅为电工钢的 1/4,只有 0.5T,但由于软磁铁芯频率高,大约是电工钢的 1000 倍,所以,被广泛应用在紧凑式开闭电源领域中诸如 MOS-FET 和 IGBT 等开闭装置上,而目前这些开闭装置的性能正得到显著的提高。

(3) 铁粉

与电工钢以板材的形式生产不同,铁粉磁芯能以三维方式,通过切断涡电流路径来进一步降低涡电流。JFE 的铁粉属纯铁型还原铁粉,粒度约为 100 μ m。因此,不采用硅等元素来提高铁粉磁芯的电阻系数,而是涂覆绝缘树脂,即绝缘树脂和铁粉两者的微粒在压实过程中混在一起。这种类型的铁粉磁芯被广泛应用在开闭电源扼流圈磁芯和噪音过滤器上,所使用的频率范围通常为 10~100kHz。

下面分别详细介绍这些软磁材料的特征。

2 JFE 开发的软磁材料

2.1 电工钢

2.1.1 取向电工钢

取向电工钢是一种高性能材料,其<001>取向是铁容易磁化的轴向方向,与成品线圈的轧制方向平行。这种材料由晶粒度以毫米计的单晶体

构成,因而与普通多晶体钢板完全不同(多晶体晶粒度仅稍大于 $10\mu\text{m}$)。另外,取向电工钢 $\langle 001 \rangle$ 易磁化的轴向与轧制方向的偏差被控制在 8° 以内,所以几千米钢板内的晶粒方向都能控制在几度范围内,真正称得上是钢中的“艺术之作”。

探讨取向电工钢产品的性能时,通常一看其磁感应强度 B_0 (磁场强度为 800A/m 时的磁感应强度),而磁感应强度与晶粒取向排列有关;二看其铁损(例如 $W_{17/50}$, 指 50Hz 、 1.7T 磁感应强度下的单位重量损耗)。JFE 目前具有代表性产品的 B_0 和 $W_{17/50}$ 性能值见表 1 所示。JFE 产品 B_0 值为 $1.85\sim 1.93\text{T}$, $W_{17/50}$ 值为 $0.78\sim 1.33\text{W/kg}$ (所有数字都是代表值)。磁感应强度 B_0 值按照 JG、JGH 和 JGS 顺序依次递增, JGH 磁感应强度 B_0 最高值为 1.89T , JGS 最高值为 1.93T 。JFE 综合采用了包括二次再结晶在内的先进冶金技术,可以稳定生产大于 1.88T 的高磁感应强度的各种取向电工钢,通过控制晶粒取向、减薄材料厚度的方法降低铁损。广泛应用的产品有 23JGH 和 23JGS (厚度为 0.23mm)。23JGSD 是一种铁损极低的产品,它是通过在 23JGS 上形成精细线性刻痕生产出来的。23JGSD085 的 $W_{17/50}$ 值可降到 0.78W/kg 。

表 1 JFE G—磁芯的典型磁性

| 型号 | 符号 | 厚度/mm | $W_{17/50}/\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ | B_0/T |
|------|-----------|-------|---|----------------|
| JG | 35JG135 | 0.35 | 1.33 | 1.85 |
| JGH | 30JGH105 | 0.30 | 1.03 | 1.89 |
| JGH | 23JGH090 | 0.23 | 0.88 | 1.89 |
| JGS | 30JGS105 | 0.30 | 0.99 | 1.93 |
| JGS | 23JGS090 | 0.23 | 0.87 | 1.92 |
| JGSD | 23JGSD085 | 0.23 | 0.78 | 1.88 |

高性能取向电工钢可以降低铁损和励磁电流,主要用于高频率变压器。具有低磁致伸缩值的高磁感应强度材料能降低变压器的噪音,通过提高变压器的磁感应设计强度能实现变压器的小型化。

2.1.2 无取向电工钢

与上文所讨论的取向电工钢不同,无取向电工钢由晶粒度约为 $100\mu\text{m}$ 的多晶体构成,这样设计的目的是为了最大程度地减小钢板水平方向的

磁各向异性。与取向电工钢类似,评价无取向电工钢的性能主要看其磁感应强度 B_0 (磁场强度为 5000A/m 时的磁感应强度)和铁损(例如 $W_{15/50}$, 指 50Hz 、 1.5T 磁感应强度下的铁损)。

JFE 生产的无取向电工钢主要产品如图 1 所示。

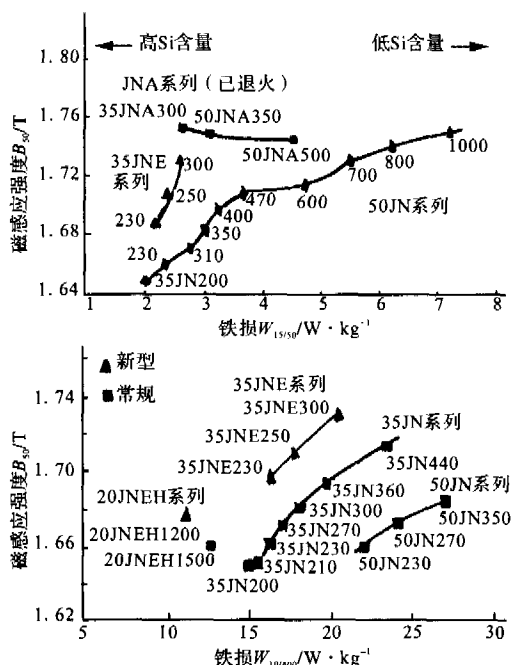


图 1 JFE 生产的无取向电工钢产品

JN 铁芯符合 JIS 标准,其产品的厚度规格为 0.35mm 和 0.50mm 。JN 铁芯系列包括铁损为 $W_{15/50}$ 的产品,范围从铁损为 7.2W/kg 的 50JN1000 低硅产品到 1.98W/kg 的 35JN200 高硅产品。

这些符合 JIS 标准的材料磁感应强度值均随着铁损的降低而减小。但 JNE 铁芯是一种新型产品,在相同铁损条件下具有较高的磁感应强度值,比 JN 铁芯的 B_0 值高 $0.03\sim 0.05\text{T}$ 。此外,在铁损相同条件下进行性能比较时, JNE 铁芯还具有硬度低的优点。为提高性能,设计材料成分时,通过增加晶界偏析元素和优化中间工艺,对能增强电阻系数的元素 Si、Mn 和 Al 对导电性和硬度的影响进行了深入的研究。因为 $\langle 001 \rangle$ 织构会损害磁性,所以应用了减少 $\langle 001 \rangle$ 织构的技术。这些性能的改进不仅提高了电动机等电气设备的效率,

而且还因为材料硬度较低而减轻了压模磨损。

JNEH 铁芯厚度为 0.20mm, 开发这种材料是为了满足近年来对高频应用的需求。该材料的性能标准是 $W_{10/400}$, 而不是常规的 $W_{15/50}$ 。例如, 20JNEH1200 的 $W_{10/400}$ 为 11W/kg, 与 35JN230 (16.2W/kg) 和 50JN250 (24W/kg) 相比, 分别减小了 32% 和 54%。 $W_{15/50}$ 条件下这些材料之间的差异不明显, 充分说明了在高频范围内降低钢板厚度的效果。

近年来, 以无取向电工钢为原料的电动机已经在型号、控制技术和用途方面发生了巨大变化。主流电动机型号已经从感应电动机发展到永磁电动机, 换流器控制也大都取代了商业电源控制。此外, 硬盘电机和混合动力汽车用电动机等高速旋转装置的需求量还在不断增加。由于铁芯励磁和较高谐波叠加中的高频是不可避免的, 因此上述这些应用领域都需要不断改进铁芯材料高频铁损指数。

2.1.3 超级磁芯(含 6.5%Si 的钢)

超级磁芯是一种 Si 含量为 6.5% 的薄板。正如前文所述, 硅可以提高电阻系数, 增加硅含量可有效降低涡电流。但是上文所述的通过轧制和退火生产的电工钢内, 一旦硅的添加量超过 3.5%, 材料就会变脆, 难以进行轧制操作。另一方面, 添加 6.5% 的硅对提高导磁率和降低磁致伸缩的效果极佳。因此, JFE 在生产高硅含量的钢板时, 采用了 CVD(化学蒸气沉淀)技术连续硅化处理, 克服了难以轧制的困难。首先应用 3% 的硅钢生产薄板, 然后再利用 CVD 技术将硅扩散在薄板中, 从而获得高硅含量的钢板。JFE 是目前世界上唯一实现商业化生产硅含量为 6.5% 薄板的企业。

超级磁芯系列产品见表 2 所示。钢板厚度范围为 50~100 μ m, 超级磁芯具有高电阻系数。所以这些产品的频率高, 应用范围为 400~100kHz, 比采用常规电工钢的效果好。

表 2 超级磁芯的典型磁性

| 符号 | 厚度/mm | $W_{10/1k}$ W · kg ⁻¹ | $W_{1/10k}$ W · kg ⁻¹ | $W_{0.5/20k}$ W · kg ⁻¹ | 磁致伸缩/ $\times 10^{-6}$ |
|--------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 10JNEX | 0.10 | 18.7 | 8.3 | 6.9 | <0.1 |
| 20JNEH | 0.20 | 42.0 | 21.0 | | 8.0 |
| 23JGSD | 0.23 | 35.0 | 26.5 | | 1.0 |

评估超级磁芯的性能主要看其铁损($W_{1/10k}$: 在 0.1T 磁感应强度和 10kHz 条件下的铁损量; $W_{0.5/20k}$: 在 0.05T 磁感应强度和 20kHz 条件下的铁损量)。就 100 μ m 厚的超级磁芯而言, 其 $W_{1/10k}$ 为 8.3W/kg, 与 0.20mm 厚的无取向电工钢 (21W/kg) 和 0.23mm 厚的取向电工钢 (26.5W/kg) 相比, 超级磁芯的铁损大幅降低。

超级磁芯通常用在由 MOS-FET 和 IGBT 高速开闭装置驱动的电抗器上。超级磁芯产品的饱和磁感应强度如图 2 所示, 略低于常规电工钢的饱和磁感应强度 (2.0T), 但却高于软磁铁芯 (0.5T) 两倍多。因此, 铁芯截面积小型化成为可能, 应用超级磁芯可以实现电气设备小型化。

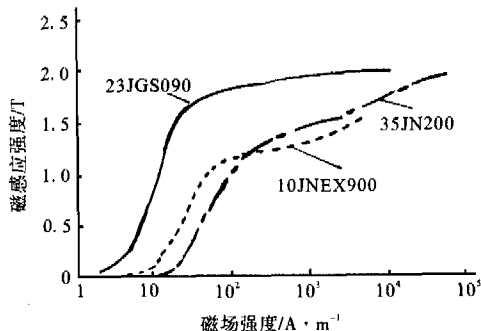


图 2 JFE G-铁芯、N-铁芯和超级磁芯典型磁化曲线

此外, 超级磁芯的磁致伸缩基本为 0, 这是它的另一个优点。磁致伸缩是引起噪音的主要因素之一, 而超级磁芯的磁致伸缩值仅为取向电工钢的 1/10, 比无取向电工钢 (1/80) 还低, 显著降低噪音。

综上所述, 超级磁芯产品是一种高饱和磁感应强度、金属类的软磁材料。该产品不仅弥补了电工钢和软磁铁芯材料之间中级频率的空白, 而且还是理想的低噪音材料。

2.1.4 电工钢应用技术的开发

综上所述, JFE 除了开发电工钢以外, 还采用电动机和变压器评估系统对软磁材料的改进效果进行评估。图 3 所示为材料磁感应强度 B_s 和变压器噪音等级之间关系的评估情况。图 3 充分证明, 降低取向电工钢晶粒取向的分散度, 能提高材料的磁感应强度, 有效降低变压器的噪音等级。

图 4 所示为无电刷 DC 电动机评估示意图。评估结果显示, 高于基频 (100Hz) (例如 $W_{10/400}$) 的

频率段铁损决定了电动机的性能。基于此, JFE 开发了上文所述的高频低铁损软磁材料。

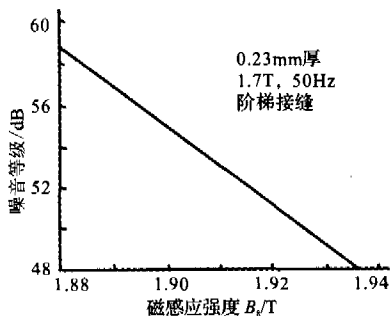


图3 材料磁感应强度和变压器噪音等级的关系

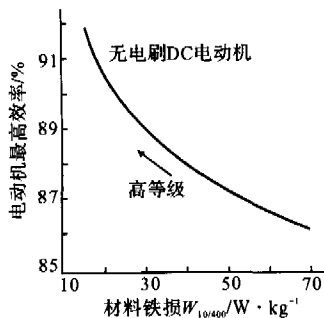


图4 材料铁损 $W_{10/400}$ 和电动机最高效率的关系

2.2 软磁铁

JFE 生产和销售的 MnZn 型软磁铁芯广泛应用于在开闭供电装置上, 频率高达几万赫兹以上。MnZn 型软磁铁芯是由 Fe_2O_3 、MnO 和 ZnO 三重氧化体系组成的烧坯。由于 JFE 自己生产软磁铁芯用高纯度氧化铁, 所以 JFE 拥有原材料开发和货源稳定的双重优势。JFE 成功地开发出世界上第一台具有先进大气控制装置的辊底式炉及高效、高产工艺, 材料性能不断提高。JFE 应用这一先进的烧结技术生产出了晶体结构均匀、电阻系数高的 MnZn 软磁铁芯, 并成功烧结出 180mm 的超大型铁芯。

世界先进的低铁损材料 MB₃ 和 MB₄ 就是采用烧结质量控制技术开发的。除了满足用户对低铁损材料不断变化的需求外, JFE 还开发出了 MBT₂、MBF₄ 等特殊材料。其中, MBT₂ 在室温到大约 120℃ 范围内的铁损值较低, 是最佳的车载材料; 而 MBF₄ 的应用频率范围广, 能与其它软磁铁芯产品一起使用。

一般在 200mT 和 100kHz 条件下评估 MnZn 型软磁铁芯的铁损, 如图 5 所示。以上述 MB₃ 为例, 100℃ 时, 其铁损值 < 300kW/m³; 在 20~120℃ 范围时, MBT₂ 铁损变化值控制在 280~360kW/m³; MBF₄ 是高频低铁损材料, 在 200mT/100kHz 和 100mT/300kHz 条件下, 其铁损值均为 300kW/m³。这些软磁铁芯被用于各种家用电器的供电电路, 比如电脑的电源开关等。预计将来上述低铁损铁芯能够提高功效, 尤其可以应用在 DC-DC 变流器电路中, 将主电池电压逐步降低到混合动力汽车辅助装置所要求的电压。

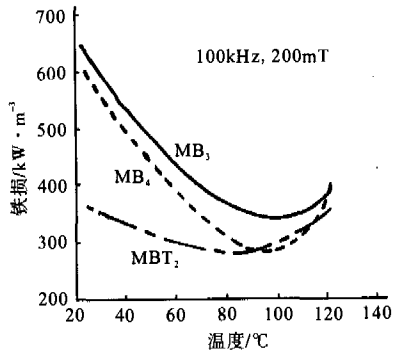


图5 100kHz, 200mT 时 MB₃、MB₄ 和 MBT₂ 铁损值与温度的关系

2.3 铁粉

JFE 还生产和销售改进磁性的材料——JIP MG270H 还原铁粉。为了提高铁粉磁性, JFE 针对铁粉中的杂质含量、粒度和残余应变对初始磁导率的影响进行了详细分析, 并在相同的压制条件下, 生产出初始磁导率 (≥ 74) 高于常规铁芯的铁芯材料。

由该材料制造的环状压制铁粉磁芯与由 50JN250、20JNEH1200 无取向电工钢制造的铁芯铁损特征曲线比较结果见图 6。频率 $\geq 2kHz$ 时, 铁粉磁芯的铁损性能优于 50JN; $> 20kHz$ 时, 优于 20JNEH。因此, 在中频范围内, 压制铁粉磁芯弥补了常规电工钢和改进后的软磁铁芯性能上的不足。

如果提高压坯的密度, 既可在高频下降低铁损, 又能提高初始磁导率和饱和磁感应强度, 那么具有三维可成型优势的铁粉磁芯的应用范围还会进一步扩大。

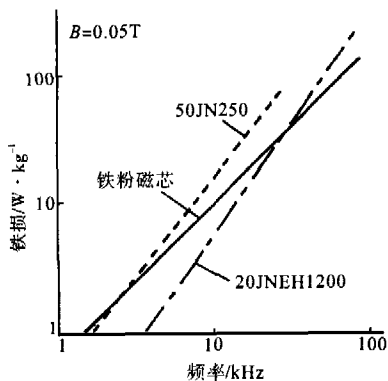


图6 铁粉磁芯和无取向电工钢的铁损比较

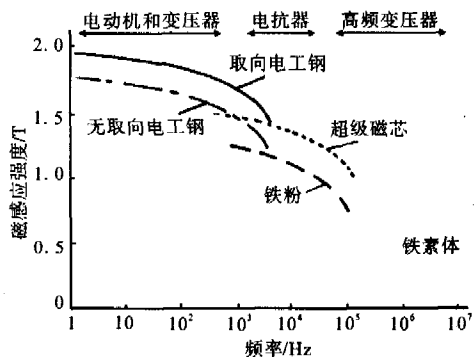


图7 各种软磁材料主要的应用范围

3 结论

本文介绍了 JFE 开发的特有的软磁材料,包括具有世界最高取向清晰度的取向电工钢 JGS;改进了磁感应强度、铁损和硬度协调性的新型无取向电工钢 JNE 铁芯;1~100kHz 频率范围内,铁损低、噪音低的超级磁芯 JNEX;能实现三维形状设计的铁粉 JIP MG270H;世界最高级低铁损软磁铁芯 MB₄;不受温度影响的最佳车载材料 MBT₂铁芯等。图7从磁感应强度和频率角度示出了上述每种软磁材料主要的应用范围。

为了逐步扩大上述每种软磁材料的应用范围,JFE 将从材料性能和应用技术方面继续开发新型材料。

齐殿威 郭春玲 译自《JFE Technical Report》,2005,6
张春雷 校

(编辑 许平静)

收稿日期:2005-10-25

鞍钢 0.15mm 超薄冷轧板成功下线

日前,鞍钢冷轧厂成功生产出 0.15mm 超薄规格冷轧板,刷新了国内冷轧板的最薄纪录。

薄规格冷轧板对于设备和操作技术都有很高要求,这次轧制出 0.15mm 厚冷轧板的生产线,是一条鞍钢自行设计、国内制造、自主集成的冷轧生产线,不仅突破了它自身的设计能力,也显示了鞍钢在冷轧生产线技术集成与输出能力以及冷轧生产的技术实力。

创造“最薄纪录”的轧机是鞍钢冷轧厂两座 1250mm 冷连轧机组中的一个,其关键工艺和核心技术都由冷轧厂工程技术人员自行研制、开发,投资远远低于同类轧机,工艺技术和装机水平达到这一领域的世界一流。

两座 1250mm 轧机投入生产后,广大技术人员和操作人员不断总结出适合轧机特点的操作方法,优化了工艺参数。2005 年 7 月成功轧制出厚度仅 0.16mm 的极薄冷轧板,超出了设计极限,今年又成功轧制出 0.15mm 的极薄冷轧板。专家认为,0.15mm 超薄“冷轧极品”在鞍钢诞生,是鞍钢冷轧单机架可逆轧机集成技术成熟的标志。