

## 日本取向电工钢生产工艺最新研发进展

齐殿威 牟昊 丁伟

(鞍钢股份有限公司技术中心, 鞍山 114009)

**摘要** 根据相关的取向电工钢典型专利技术,概述了日本高磁感低铁损取向电工钢低温板坯加热、抑制剂合理调节、关键成分 Mn、C、Sn 和 Sb 调节与利用、新型退火剂和绝缘溶液的制备及细化磁畴等生产工艺最新动态和进展情况,并提出了国内企业申请取向电工钢专利时应当借鉴之处。

**关键词** 取向电工钢 研发进展 专利技术

### Recent Progress of Research and Development on Production Process for Grain-Oriented Electrical Steel Sheets in Japan

Qi Dianwei, Mu Hao and Ding Wei

(Technology Center, Angang Steel Co Ltd, Anshan 114009)

**Abstract** According to related typical patent technology for grain-oriented electrical steel sheets, the recent trends and progress situation for production process of grain-oriented electrical steel sheets with high magnetic flux density and low core loss in Japan are summarized including low temperature slab heating, suitably regulating inhibitors, adjusting and utilizing key element Mn, C, Sn and Sb, manufacturing for new annealing agent and insulating solutions, and fining magnetic domain, and some suggestions are put for domestic grain-oriented electric steel producer to apply for a patent.

**Material Index** Grain-Oriented Electrical Steel Sheet, R&D Progress, Patented Technology

日本新日铁和 JFE 公司是生产取向电工钢最著名的先进钢铁企业。2008 年至 2009 年上述两企业在其本国专利局、WIPO(世界知识产权组织)和 EP(欧洲专利局)共申请公开数量达 66 件有关取向电工钢生产技术和方法的专利。本文根据上述两个日本公司公开的典型专利,针对化学成分方案、生产工艺要点、磁畴细化控制技术等方面概要介绍了生产取向电工钢的专利技术,以便让国内相关钢铁企业在开发类似钢产品过程中有所启发和借鉴,并生产出各种电力变压器、配电变压器和大型发电机定子用具有良好磁性能和力学性能的取向电工钢产品。

#### 1 取向电工钢低温板坯加热技术

取向电工钢板是一种硅含量在 7% 以下、晶粒具有 {110} <001> (高斯织构)取向度的钢。生产这种取向电工钢是利用所谓“二次再结晶”的晶粒长大现象,对晶粒取向进行控制而获得的。因此钢铁业不断开发出各种生产高磁感( $B_8$  值超过 1.90 T)取向电工钢的工艺。这些工艺技术根据板坯加热温度可以分成如表 1 所示几种类型<sup>[1]</sup>。

热轧前在对板坯加热时,作为控制这种所谓的二次再结晶方法之一就是首先完全固溶粗大析出物,并在随后的热轧和退火过程中形成较细析出物,

表 1 按照板坯加热温度分成的几种生产取向电工钢板的类型

Table 1 Types of technologies for producing grain-oriented electrical steel sheet according to slab heating temperature

类型	板坯加热温度/℃	氮化处理	高斯取向度
1 完全固溶,非氮化处理型	≥1 300	禁止	良好
2 充分析出型	<1 280	必要	尚可
3 部分析出氮化型	1 200 ~ 1 350	必要	难以工业化生产
3 完全固溶,大量氮化处理型	1 200 ~ 1 350	必要	良好
4 完全固溶,少量氮化处理型	≥1 280	必要	很好

即“抑制剂”,这种工艺已经实现工业化。采用这种方法,要使析出物完全固溶,就必须将板坯加热至 1 350 ~ 1 400 °C 甚至更高的温度,比其他普通钢的板坯加热温度都高,因此就需要专门的加热炉来加热板坯,而高温加热板坯则会产生氧化铁皮量增加等系列问题。

根据这两家公司近两年公开的专利,将其有关采用板坯低温加热技术生产取向电工钢的典型技术和工艺要点列于表 2<sup>[1-6]</sup>。

从表 2 可知,JFE 较为注重调节晶粒的面积率,这主要基于即使当脱碳退火加热速度适当提高后,调节好脱碳退火晶粒尺寸(直径)能够使二次再结晶更为稳定的机理。而另一方面,新日铁则采用两步加热方法来控制温度范围,实现采用低于 1 350 °C

的板坯加热方法进行热轧,从而实现热轧板退火处理,并在热轧板脱碳退火时控制晶粒织构薄层间距,以实现生产高磁感取向电工钢的目的。另外,在高温脱碳退火过程中采用较高的加热速度来维持温度上限,从而可进一步保证随后进行的首次再结晶晶粒织构。完成脱碳退火后,可以将温度上限设定在较低范围,但在该较低温度范围仅能采用感应加热方法进行加热,这样更容易获得磁性能优良的取向电工钢板。将板坯加热温度控制在 1 280 ~ 1 300 °C 是最为适宜的温度。

## 2 取向电工钢的生产方法

### 2.1 专用取向电工钢板

#### 2.1.1 高频用取向电工钢板

为了降低高频铁损,通常采用提高制造铁芯用取向电工钢板 Si 含量、增加电阻系数或减薄取向电工钢板厚度的方法来实现。为此,JFE 研发人员进行了各种研究和试验,通过采取将晶粒取向度控制在适宜范围的手段,开发出具有良好加工性能、高频用高磁感取向电工钢板的生产技术。相应的生产技术要点如下<sup>[7-9]</sup>:

(1) 控制取向电工钢板表面和中心部的 Si 含量及钢中平均晶粒尺寸。如果钢板厚度用“ $t$ ”表示,平均晶粒尺寸用“ $d$ ”表示,那么“ $t$ ”和“ $d$ ”应分别满足公式  $0.03 \text{ mm} \leq t \leq 0.15 \text{ mm}$  和  $1 \leq d/t < 5$  的要求。与高斯织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  偏离角度小于  $15^\circ$  的晶粒占总面积的比率应控制在 10% ~ 90%。在距离钢板表面的板厚  $\times 0.1$  的深度范围内平均 Si 含量要调控在 6.0% ~ 6.6%,而钢板厚度中心部位的平均 Si 含量要调控在 3.8% ~ 5.0%,调控的手段一般采用渗硅处理和扩散处理工艺。

(2) 在不检测磁畴壁移动条件下有效抑制晶粒长大。一方面对采用析出物抑制晶粒长大的作用进行详尽研究,结果表明作为已知的细致析出物如 Ti、V 和 Nb 等碳化物析出物,在进行 Si 固体渗入过程中,可以用在钢中以固态相存在的析出物如氮化物代替,而当利用析出物的液态相时,在进行 Si 固体渗入的温度区域会出现处理结果不符合控制目标

表 2 板坯低温加热技术生产取向电工钢最新技术

Table 2 Latest technologies for producing grain-oriented electrical steel sheet by low temperature heating slab

公司	主要抑制剂	板坯加热温度/°C	技术要点
JFE	AlN	1 100 ~ 1 300 优选 1 150 ~ 1 250	(1) (%) 1.00 ~ 5.00Si, 0.02 ~ 0.12C, $\leq 0.010\text{Al}$ , $\leq 0.005\text{N}$ , 以及 0.02 ~ 2.0Mn, 0.005 ~ 2.0Ni, 0.01 ~ 2.0Sn, 0.005 ~ 0.5Sb, 0.01 ~ 2.0Cu, 0.01 ~ 0.50Mo 等元素一种以上; (2) 热轧开轧温度 $\geq 950$ °C; (3) 热轧总压下率 $\geq 75\%$ ; (4) $\leq 3 \text{ mm}$ 晶粒比率占钢板表面积率 $\leq 20\%$ , $\geq 20 \text{ mm}$ 的 $\leq 15\%$ ; (5) 成品钢板厚度: 0.27 mm 和 0.35 mm。
NSC	AlN、MnS、MnSe 结合 Sn 和 Sb	$\leq 1 280$	(1) (%) 0.80 ~ 7.00Si, $\leq 0.085\text{C}$ , 0.01 ~ 0.065Al, $\leq 0.012\text{N}$ , 并可适当添加 Mn, Cr, Cu, P, Sn, Sb, Ni, S 和 Se 等元素一种以上; (2) $\text{Mn}/(\text{S} + \text{Se}) \geq 4$ ; (3) 第 1 步退火在 1 000 ~ 1 150 °C, 第 2 步退火在 850 ~ 950 °C; (4) 冷轧终轧压下率 $\geq 80\%$ ; (5) 脱碳退火温度: 首先 550 °C 加热至 720 °C, $\geq 40$ °C/s, 然后感应加热至 770 ~ 900 °C, 75 ~ 125 °C/s; (6) 成品钢板厚度: 0.22 mm。
NSC	AlN	$\leq 1 350$	(1) (%) 0.80 ~ 7.00Si, $\leq 0.085\text{C}$ , $\leq 0.5\text{P}$ , 0.01 ~ 0.065Al, $\leq 0.075\text{N}$ , $\leq 1.0\text{Mn}$ , $\leq 0.015(\text{S} + \text{Se})$ , 0.003 ~ 0.05 ( $\text{S}_{\text{Mn}} = \text{S} + 0.406 \times \text{Se}$ ), $\leq 0.3\text{Cr}$ , $\leq 0.4\text{Cu}$ , $\leq 0.03\text{Sn}$ , $\leq 0.03\text{Sb}$ , 其余为铁和杂质; (2) 板坯加热温度 ( $T/^\circ\text{C}$ ): $T_1 = 10 062/[2.72 - \log([\text{Al}] \times [\text{N}])] - 273$ , $T_2 = 14 855/[6.82 - \log([\text{Mn}] \times [\text{S}])] - 273$ , $T_3 = 10 733/[4.08 - \log([\text{Mn}] \times [\text{Se}])] - 273$ ; (3) 热轧板于 1 000 ~ 1 150 °C 再结晶处理, 然后 850 ~ 1 100 °C 退火, 控制退火晶粒织构薄层间距 $\geq 20 \mu\text{m}$ 。

的要求,也就是在 Si 固体渗入过程中在钢中出现以液态相存在的析出物,对此的研究结果表明:

①在进行 Si 固体渗入过程中,如果析出物以液相形式存在于钢中,那么该析出物具有比以固相存在于钢中的析出物较大的抑制力;②既然析出物尺寸大,且是在常温情况下,因此不易检测到磁畴壁位移;③利用上述①和②的协同效应,可以显著改进取向钢的高频铁损。

另一方面 JFE 还对化学元素进行了调节,并给出主要成分 (%) 方案:  $\leq 0.02\text{C}$ , 4.5 ~ 7.5Si,  $\leq 2.0\text{Mn}$ ,  $\leq 3.0\text{Al}$ ,  $\leq 0.2\text{P}$ ,  $\leq 0.02\text{N}$ ,  $\leq 0.02\text{O}$ , 其余为铁和杂质。此外,还可以添加 Bi、Ag 和  $\text{Ag}_2\text{S}$  等。钢板适宜的厚度范围为 0.03 ~ 0.5 mm。

(3) 控制钢板表面的张应力和钢板厚度方向中心位置的内部应力。通常取向电工钢板表面具有张应力,而其与轧制方向相平行的厚度方向还具有内部应力(亦称压缩应力),这些应力如果被控制在 70 ~ 160 MPa 内对改进用于制造变压器、电抗器等铁芯用的钢板的高频特征有很大帮助,而且还能够降低铁芯的高频铁损和磁滞伸缩。钢板表面的张应力和钢板厚度方向中心位置的内部应力,可以根据钢板沿纵向方向形成的宽度不超过 30 mm、长度在

100 mm 以上、钢板表面仅有一面经过化学抛光处理的钢板弯曲部分的曲率半径计算获得。需要注意的是,化学抛光深度最深只能抛到钢板两个表面厚度的1/2位置。取向钢板表面的张应力的差值应控制在 8 MPa 以下。

这种取向电工钢板的主要化学元素(%)应包括  $\leq 0.005\text{C}$ 、 $4.0 \sim 7.0\text{Si}$ 、 $0.005 \sim 2.50\text{Mn}$ 、 $\leq 0.008\text{Al}$ 、 $\leq 0.003\text{S}$ 、 $\leq 0.005\text{N}$  等。为避免在随后进行的氮化处理、渗硅处理和消除应力回火处理时降低钢板磁性能,还可以适当添加 Sb、Sn 和 Bi 等其它一些元素。这种生产取向电工钢板时采用生产工艺调节,并结合控制钢板应力的生产技术适合生产厚度 0.05 ~ 0.25 mm 的产品。

### 2.1.2 直流电抗器用取向电工钢板

当直流电流过直流电抗器线圈时,就会出现铁芯直流磁偏差现象,而且磁化作用趋于饱和。因此就增量磁导率而言,电感将会降低,消除交流分量的能力减弱。有时尽管直流电流磁化作用比磁饱和程度足够低,但是直流电磁场仍然增大。因此随着次级磁滞环路的倾角在数量上减少,增量磁导率也下降,从而不能获得充分的电感,导致在滤波时产生问题。为了解决该问题,新日铁研发人员开发了一种制造直流电抗器铁芯专用的取向电工钢板,这种板钢具有很高增量磁导率。生产工艺方案<sup>[10]</sup>要点包括:

(1) 制造直流电抗器铁芯用的取向电工钢经过激光照射,使用于制造铁芯的取向电工钢板被激光照射的单位面积的能量  $E$  (能量,  $\text{mJ}/\text{mm}^2$ ) 在直流电抗器用的铁芯出现直流电磁场  $H$  ( $\text{A}/\text{m}$ ) 时,  $E$  和直流电磁场  $H$  的关系应满足下式要求:  $E \geq 1.51 \times 10^{-7} \times H^3 - 7.8 \times 10^{-5} \times H^2 + 2.96 \times 10^{-2} \times H - 1$ 。

(2) 直流电抗器用铁芯的特征取决于铁芯磁路长度和绕线匝数,这样采用取向电工钢板制造的铁芯其直流电磁场  $H$  值在 40  $\text{A}/\text{m}$  以上。

### 2.2 超高磁感取向电工钢板

变压器制造业对低铁损低噪音的最大限度需求愈发强烈,因而对具有优良磁性能的 HiB 取向电工钢需求逐渐增加。而另一方面生产 HiB 取向电工钢及采用该材料制造变压器铁芯等产品同时还符合节能环保的要求。对此, JFE 和新日铁进行了持续研发,并公开了相关专利技术。这些生产 HiB 取向电工钢的最新技术和方法的进展情况见表 3<sup>[11~18]</sup>。

JFE 尝试采用了一种新的抑制剂,这是该公司生产取向电工钢板第一个显著特征。生产该取向电工钢板时, JFE 向钢中添加 Ti、Zr、V、Nb、Hf 和 Ta 元

素中的一种和两种或多种,形成 TiC、ZrC、VC、NbC、HfC 和 TaC 抑制剂,这样就可以通过向钢中添加适量的 IV<sub>B</sub> 族元素群,如 Ti, 或 V<sub>B</sub> 族元素以及增加 C 含量等,沉淀形成 TiC 等复合物作为抑制剂,然后直接对冷轧板实施终退火处理。在这种情况下,板坯加热温度为 1 250 °C 左右,从而降低了生产成本。

### 2.3 取向电工钢用退火隔离剂

在取向电工钢板进行终退火前,向其表面涂覆退火隔离剂是生产取向电工钢板重要的步骤之一。JFE 向氧化铝为主要成分的抑制剂中添加一点丙烯酸系列物质,涂覆到钢板后有利于降低钢板的铁损,改进磁性能。JFE 研发人员提出如下技术方案<sup>[19]</sup>:

这种取向电工钢板用的退火隔离剂主要包含丙烯酸、丙烯酸酯、丙烯酸盐及其聚合物,或者共聚物,选取这些物质中的至少一种物质添加到隔离剂中,添加量为 0.001% ~ 5.0% 的质量分数。添加物包括:(1) 丙烯酸酯类:丙烯酸甲酯、丙烯酸乙酯、丙烯酸丁酯和丙烯酸异丁酯;(2) 丙烯酸系列聚合物类:聚丙烯酸钠和聚丙烯酸铵;(3) 丙烯酸系列共聚物类:丙烯酸-羧酸共聚物的氯化钠以及丙烯酸-磺酸共聚物的氯化钠。

将这种新制备的退火隔离剂涂覆到取向电工钢板时,与常规情况下采用传统的氧化铝系列退火隔离剂相比,能够显著降低取向电工钢板的铁损,改进钢板的磁性能。采用该新开发的退火隔离剂、厚度为 0.23 mm 的取向电工钢板的铁损值最大限度可以降低至 0.598 W/kg。

### 2.4 取向电工钢板用绝缘层处理剂或处理剂

为了降低变压器噪音,就得要求取向电工钢板的磁滞伸缩越小越好。采取的有效方法就是在钢板表面涂覆绝缘层,但绝缘层对涂层张力、抗吸湿性、防锈性及叠层系数等特征均有严格要求。在这些特征中,为了保证涂层的张力,很重要的一点就是如何降低磁滞伸缩。所说的涂层张力是指在涂覆绝缘层处理溶液或制剂过程中在钢板表面形成的拉力。为满足环保的要求,对无铬绝缘层处理溶液的需求逐年增加,新日铁和 JFE 均不断尝试开发各种绝缘层处理溶液。

(1) JFE 开发的取向电工钢板用无铬绝缘层处理溶液

该处理溶液<sup>[20,21]</sup>包括从下列物质中选取的一种或多种物质:含有 Mg、Ca、Ba、Sr、Zn、Al 和 Mn 金属元素的磷酸盐、0.2 ~ 10 mol 的硅胶(按在选取的磷酸盐中的 PO<sub>4</sub> 1 mol 的前提下,就二氧化硅而言

表 3 最新生产 HiB 取向电工钢工艺和方法的要点

Table 3 Key points of latest technologies or methods for producing grain-oriented electrical steel sheets with Hi-B characteristic

公司	主要抑制剂	厚度/mm	$B_8/T$	$W_{17/50}/(W \cdot kg^{-1})$	技术要点
NSC	MnS 和/或 MnSe	0.23	$\geq 1.960$		(1) (%) 2.50 ~ 4.50Si, 0.02 ~ 0.10C, 0.01 ~ 0.15Mn, 0.001 ~ 0.050S, 0.01 ~ 0.05Al, 0.002 ~ 0.015N, 0.0005 ~ 0.1000Te, 0.0005 ~ 0.1000Bi; (2) 脱碳退火前, 加热钢板 $\geq 800$ °C, $\geq 50$ °C/s; (3) 终退火 750 ~ 1150 °C, $\leq 20$ °C/h。
NSC	AlN + MnS 和/或 MnSe	0.22 0.23 0.27	$\geq 1.901$ $\geq 1.917$ $\geq 1.922$		(1) (%) 2.00 ~ 5.00Si, 0.02 ~ 0.10C, 0.010 ~ 0.065Al, 0.003 ~ 0.015N, 0.001 ~ 0.040(S + Se), 0.02 ~ 0.30Mn, 0.0010 ~ 0.0100Bi, 可添加 Te, Cu, B, Pb, Mo, Sb, Sn, Ti 和 V 一种以上; (2) 钢板表面镁橄榄石层含 Ce 和 La 一种或两种。钢板表面色彩谱调度, 按照 $L^* a^* b^*$ 色度系统, 对黄色调 $b^*$ , $1.0 \leq \text{色度} \leq 7.0$ ; (3) 冷轧压下率 $\leq 95\%$ , 最后道次 $\leq 80\%$ ; (4) 在脱碳退火时, 采用 $MgO$ 为主的退火隔离剂, 添加 Ce 或 La 复合物, 或一起添加。
NSC	AlN + MnS, MnSe, Cu-S	0.22	$\geq 1.941$	$\leq 0.80$	(1) (%) 2.80 ~ 4.00Si, 0.040 ~ 0.085C, 0.022 ~ 0.035Al, 0.003 ~ 0.010N, 0.005 ~ 0.027S, 0.03 ~ 0.16Mn, 0.05 ~ 0.30Cu, 0.003 ~ 0.05 (Seq <sub>当量</sub> = S + 0.405 × Se)。可适量添加 Se, Te, P, Sn, Sb, Cr, Ti, Ni, Mo 和 Cd 等元素; (2) 没有对板坯加热温度做出规定, 板坯加热适用于高、中、低温范围; (3) 冷轧终轧压下率 80% ~ 93%; 可在 150 °C 进行 1 道次或多道次冷轧; 将首次再结晶-脱碳退火开始及冷轧终轧结束之间的时间段设定在 24 h 以内。
JFE	MnSe, MnS, Cu <sub>2-x</sub> Se 和 Cu <sub>2-x</sub> S	0.23 0.27	$\geq 1.945$ $\geq 1.951$		(1) (%) 2.00 ~ 7.00Si, 0.015 ~ 0.100C, 0.02 ~ 0.20Mn, 0.001 ~ 0.040Al, 0.001 ~ 0.030(S 和/或 Se), 0.003 ~ 0.013N。可适量添加 Sb, Cu, Sn, Cr, Mo, P 和 Bi 等; (2) 二次再结晶应沿钢板轧制的钢板曲率半径 1000 ~ 3100 mm 进行。在相同的二次再结晶晶粒范围内, 其沿轧制方向的 $\beta$ 角的变化速率在 0.018 ~ 0.06 °/mm。 (3) 进行二次再结晶退火时, 板卷直径为 2000 ~ 6200 mm, 比常规板卷直径 (600 ~ 1200 mm) 大。
JFE	不清楚	0.23 0.20		0.675 ~ 0.734 0.598 ~ 0.641	(1) (%) 2.00 ~ 8.00Si, $\leq 0.10C$ , 0.0010 ~ 0.020Al, 0.0005 ~ 0.010N, 0.005 ~ 0.10Se, 0.005 ~ 1.00Mn, 0.0005 ~ 0.0060S, 其余为铁和杂质。另外还可进一步添加 Ni, Cr, Cu, P, Nb, Sn, Sb, Mo, Bi 和 Mo 等其它元素; (2) 在进行钢板终退火前, 将算术平均粗糙度 $R_a$ 调整在 0.3 $\mu\text{m}$ 以下, 方法是采用 5% 氟酸双氧水溶液浸渍处理, 以及用 600# 砂纸打磨钢板表面。
NSC	AlN, MnS 或 MnSe	0.23 0.27	$\geq 1.905$		(1) (%) 2.50 ~ 4.50Si, 0.02 ~ 0.10C, 0.010 ~ 0.050Al, 0.003 ~ 0.013N, 0.040 ~ 0.120Mn, 0.015 ~ 0.40S, 0.010 ~ 0.20Cu, 0.0010 ~ 0.0040Ti, 0.0005 ~ 0.0200Bi。可适量添加 Sn, Sb, Bi, B, Pb, Mo, C, Te 和 V 等元素; (2) 假设 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 取向度的晶粒密度和平均晶粒直径分别用 $\rho$ 和 $D$ 表示, 则应满足 $8 \times \rho \times D^3 > n \times d^3$ ; (3) 脱碳退火温度 600 ~ 800 °C, $\geq 80$ °C/s; (4) 冷轧终轧压下率 85% ~ 93%。
JFE	TiC, ZrC, VC, NbC, HfC 和 TaC	0.23 0.25 0.35	1.901 ~ 1.930	0.810 ~ 1.29	(1) (%) 2.00 ~ 4.50Si, 0.03 ~ 0.15C, $\leq 0.050Al$ 。还可适量添加 Ti, Zr, V, Nb, Hf 和 Ta 等一种或两种以上, 添加总量为 0.1 ~ 0.5; (2) 完成二次再结晶之前或之后, 在钢板表面形成低 Ti 复合物层。

的添加量), 以及从含 Mg, Sr, Zn, Ba 和 Ca 金属元素的高锰酸中选取的一种或多种物质, 选取方法根据包含在所选取的磷酸盐中金属元素的 0.01 ~ 4.0 mol 的添加量。在绝缘层涂覆溶液涂覆在钢板上后, 烘干的温度范围为 350 ~ 1100 °C。

(2) 新日铁开发的具有良好附着性的张力绝缘层

新日铁研发人员开发出包含氧化铁或氢氧化铁为主要成分的绝缘层涂覆溶液<sup>[22]</sup>, 涂覆量在 10 mg/m<sup>2</sup> 以下。这种溶液涂覆在取向电工钢板后, 利用氧化反应在钢板表面形成以 SiO<sub>2</sub> 为主要成分的涂层。在钢板上形成涂层氧化膜后, 钢板表面没有了终退火薄层, 最终在钢板涂层的表层形成具有张

力的绝缘层。这种绝缘层附着性优良。这是因为该涂层溶液所包含的主要成分可以在不低于 400 °C 散发氧或蒸汽, 为氧化反应创造了有利条件。

(3) 新日铁开发的绝缘层处理剂

新日铁开发的绝缘层处理剂<sup>[23]</sup> 主要成分包含磷酸盐和胶状二氧化硅。处理剂成分配比为每 100 g 的磷酸盐中应混配 30 ~ 70 g 胶状二氧化硅。其中磷酸盐含有 20% ~ 80% 二价金属元素、10% ~ 70% 三价金属元素及 3% ~ 20% 四价金属元素。二价金属元素包括 Mg, Ca, Sr, Ni 和 Co 等金属元素。三价金属元素包括 Fe, Al 和 Mn 等金属元素。四价金属元素包括 Mo, V 和 Zr 等金属元素。

根据试样的试验结果, 新开发的处理剂被涂覆

到取向电工钢板表面后,绝缘层具有优良的附着性和耐腐蚀性,同时还提高了钢板涂层张力,使电工钢板获得良好的磁性能。通过对试样测定绝缘层张力值,获得的数据显示绝缘层的张力可以提高6%~60%,铁损值可以降低6%以上。

### 2.5 生产取向电工钢新方法

为了防止退火处理时钢板之间相互粘连,一般做法是在高温状态下给钢板表面涂覆一层性能稳定的无机物,即退火隔离剂。不过涂覆这种MgO为主要成分的退火隔离剂存在二次再结晶不明显不容易的问题。而且涂覆的隔离剂使钢板表面易存在湿气,会恶化钢板的磁性能。因此为了解决这些问题,JFE研发人员开发了一种不采用涂覆退火隔离剂生产取向电工钢板的新方法,该方法的核心是采用连续式不涂覆隔离剂的终退火系统来替代传统的涂覆隔离剂的罩式终退火方法。新退火系统的技术要点包括<sup>[24]</sup>:

(1)适用于采用该退火方法生产取向电工钢的主要化学成分(%)为:≤0.10C、2.0~8.0Si、0.005~1.00Mn、0.0005~0.0070N、≤0.010Al、≤0.0010S、≤0.0010Se、0.010~1.50Ni、0.01~0.50Cr、0.01~0.50Cu、0.005~0.50P、0.005~0.50Sn、0.005~0.50Sb、0.005~0.50Bi、0.005~0.10Mo、0.003~0.10Nb,其余为铁和杂质。方案要求尽可能地将S和Se含量控制得越低越好,这是实现不采用涂覆退火隔离剂进行连续终退火处理的重要前提之一。

(2)生产方法要点:①板坯加热至1250℃以下后进行热轧;②热轧板应在800~1100℃进行退火处理;③对经过退火处理的热轧板进行两次或多次冷轧,两次冷轧之间应进行一次退火处理。如果需要脱碳处理,那么首次再结晶退火应在湿气氛下进行;如果不需要脱碳,则可以在干燥气氛下进行首次再结晶处理;④首次再结晶后,在700~1000℃再进行二次再结晶退火处理,退火时间必须在5h以上;⑤不采用退火隔离剂进行连续终退火处理的温度在1100℃以上相对的低温范围,退火处理时间不应超过30min(在10min以内则更有利于获得优良的磁性能)。退火气氛可以是Ar气氛,也可以使用诸如H<sub>2</sub>和He等气体作为终退火气氛用气体。

根据JFE开发的厚度为0.20mm厚取向电工钢试样的测试结果显示,该钢的铁损值( $W_{17/50}$ )在0.584~0.648W/kg,表明该电工钢的磁性能十分优良。

### 2.6 磁畴细化处理新工艺

电工钢的功率损耗可以粗略地分为磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗主要受钢板晶粒取向度、各种缺陷、晶界等因素的影响;而涡流损耗则受钢板厚度、电阻、磁畴宽度等因素的影响。为了降低磁滞损耗,目前控制和改进晶粒的取向度工艺存在许多局限。因此,为了进一步提高钢板磁性能,业界将更多的精力集中在降低涡流损耗方面,促使不少公司提出了很多有关降低涡流损耗的新工艺或新方法,主要就是有关磁畴宽度细化工艺,亦称为磁畴控制工艺。该工艺可以大幅降低功率损耗。JFE公司研发人员就一直在进行这方面的研发工作。经过反复试验,研究人员发现通过采用氧化物可以作为磁畴细化处理介质,可进一步提高磁性能,达到降低涡流损耗的目的,该方案的主要工艺要点<sup>[25]</sup>包括:

(1)在钢板表面磁畴细化时刻入部分一般呈线状和/或连续的圆点状,且刻入部分与钢板轧制方向呈60°~90°;(2)将含有下列至少一种以上氧化物如氧化铁、氧化钼、氧化锰、氧化锡、氧化钨、氧化镓、氧化锗、氧化铜、氧化铬及氧化铈涂覆在那些刻入的线状和/或连续的圆点状的细化部位;(3)钢板表面刻入部分的宽度应在5~500μm,深度在0.5~30μm,线段之间的间隔或圆点之间的间距在1~30mm;(4)这种磁畴细化处理工艺所适用的取向电工钢的主要化学成分(%)包括:≤0.08C、2.0~8.0Si、0.005~1.00Mn,其余为铁和杂质。钢中还可以适量添加Ni、Cr、Cu、P、Sn、Sb和Bi等元素。

根据JFE研发人员试制的0.20、0.23、0.27mm取向电工钢板,经过取向测定后,这些电工钢的铁损值在0.592~0.900W/kg,铁损大幅降低,表明钢的磁性能十分优良。

## 3 结语

近两年来,新日铁和JFE两家公司一直在加强研发采用各种方法和工艺来生产具有高磁感低铁损,尤其是Hi-B高等级的取向电工钢板,并将研发过程中形成的技术、工艺和方法在其日本国内、欧洲专利局和世界知识产权组织申请公开了相应的专利,表明这两家公司已经在较大地域范围内建立了强大的生产取向电工钢板的专利技术保护网和防御网。因此,建议我国以武钢、宝钢和鞍钢等顶级钢铁企业为主的厂家应充分利用新日铁和JFE在日本、EP和WIPO,尤其是在中国公开的专利,在认真调研后,及时规避与本国钢铁公司技术相关的技术;同

时利用其尚未在中国公开的专利技术,在研发各种取向电工钢生产工艺和技术时,尽可能在中国国家专利局申请公开尚未被这两家公司圈占的取向电工

钢专利技术,以便在与国外钢铁企业竞争中处于有利地位。

### 参考文献

- JFE Steel KK. Grain-Oriented Electrical Steel Sheet and its Production Method; JP, 2008-031498. [DB/OL]. 2008-02-14 [2010-08-26]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel KK. Manufacturing Method of Grain-Oriented Electrical Steel Sheet; JP, 2008-031495. [DB/OL]. 2008-02-14 [2010-08-26]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Method for Producing Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet with High Magnetic Flux Density; JP, 2008-001983. [DB/OL]. 2008-01-10 [2010-08-26]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Process for Producing Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet with High Magnetic Flux Density; JP, 2008-001982. [DB/OL]. 2008-01-10 [2010-08-26]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Process for Producing Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet with High Magnetic Flux Density; EP, 2025766. [OB/OL]. 2009-02-18 [2010-09-1]. [http://ep.espacenet.com/searchResults?DB=ep.espacenet.com&locale=en\\_EP&ST=advanced&compact=false&PN=ep2025766](http://ep.espacenet.com/searchResults?DB=ep.espacenet.com&locale=en_EP&ST=advanced&compact=false&PN=ep2025766).
- Nippon Steel Corporation. Process for Producing Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet with High Magnetic Flux Density; EP, 2025767. [OB/OL]. 2009-02-18 [2010-09-1]. [http://ep.espacenet.com/searchResults?DB=ep.espacenet.com&locale=en\\_EP&ST=advanced&compact=false&PN=ep2025767](http://ep.espacenet.com/searchResults?DB=ep.espacenet.com&locale=en_EP&ST=advanced&compact=false&PN=ep2025767).
- JFE Steel Corporation. Electromagnetic Steel Sheet for High Frequency; JP, 2009-235529. [DB/OL]. 2009-10-15 [2010-09-08]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Corporation. High-Silicon Steel Sheet and Method for Producing the Same; JP, 2009-287121. [DB/OL]. 2009-12-10 [2010-09-08]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Corporation. Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet and Manufacturing Method Therefore; JP, 2009-263782. [DB/OL]. 2009-11-12 [2010-09-08]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Grain Oriented Silicon Steel Sheet Having High Incremental Permeability and Iron Core for Direct Current Reactor Using the Same; JP, 2008-255454. [DB/OL]. 2008-10-23 [2010-09-09]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Method for Manufacturing Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet with Remarkably High Magnetic Flux Density; JP, 2009-209428. [DB/OL]. 2009-09-17 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Grain Oriented Electrical Steel Sheet Excellent in Magnetic Properties and Adhesiveness of Film, and Manufacturing Method Therefore; JP, 2009-270129. [DB/OL]. 2009-11-19 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Method for Manufacturing Grain-Oriented Electrical Steel Sheet; JP, 2009-256713. [DB/OL]. 2009-11-05 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Method for Manufacturing Grain-Oriented Electrical Steel Sheet Having Extremely High Magnetic Flux Density; JP, 2009-235574. [DB/OL]. 2009-10-15 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Corporation. Grain Oriented Electrical Steel Sheet and Manufacturing Method Therefore; JP, 2009-235471. [DB/OL]. 2009-10-15 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Corporation. Grain Oriented Electrical Steel Sheet and Manufacturing Method Therefore; JP, 2009-228117. [DB/OL]. 2009-10-08 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Grain Oriented Electrical Decarburized Annealed Steel Sheet and Method for Producing the Same; JP, 2008-261022. [DB/OL]. 2008-10-30 [2010-09-10]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Method for Producing Grain Oriented Electrical Steel Sheet Excellent in Productivity; JP, 2008-115421. [DB/OL]. 2008-05-22 [2010-09-14]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel KK. Annealing Separation Agent for Grain Oriented Electrical Steel Sheet and Method for Producing Grain Oriented Electrical Steel Sheet; JP, 2009-030105. [DB/OL]. 2009-02-12 [2010-09-14]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel KK. Treatment Liquid for Forming Chromium-Free Insulation Film on Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet, and Method for Producing Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet Provided with Insulation Film; JP, 2009-057591. [DB/OL]. 2009-03-19 [2010-09-14]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Corporation. Insulation Film Treating Liquid for Grain Oriented Electromagnetic Steel Plate, and Process for Producing Grain Oriented Electromagnetic Steel Plate with Insulating Film; WIPO, WO2009025389. [DB/OL]. 2009-02-26 [2010-09-14]. [http://wo.espacenet.com/searchResults?DB=wo.espacenet.com&submitted=true&locale=en\\_EP&ST=advanced&PN=WO2009025389&compact=false](http://wo.espacenet.com/searchResults?DB=wo.espacenet.com&submitted=true&locale=en_EP&ST=advanced&PN=WO2009025389&compact=false).
- Nippon Steel Corporation. Production Method of Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet with Excellent Adhesion to Insulation Film and Extremely Low Core Loss; JP, 2009-019274. [DB/OL]. 2009-01-29 [2010-09-14]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- Nippon Steel Corporation. Insulating Film Treatment Agent, Grain-Oriented Electrical Steel Sheet Coated with the Film Treatment Agent and Insulating Film Treatment Method Therefore; JP, 2010-013692. [DB/OL]. 2010-01-21 [2010-09-14]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel Group. Method for Manufacturing Grain-Oriented Electrical Steel Sheet; JP, 2009-228118. [DB/OL]. 2009-10-08 [2010-09-15]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.
- JFE Steel KK. Grain-Oriented Electrical Steel Sheet and its Manufacturing Method; JP, 2008-111152. [DB/OL]. 2008-05-15 [2010-09-16]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>.

齐殿威(1965-),男,译审,电工钢技术研究。

收稿日期:2010-11-08