

## 常化温度对无取向电工钢 50W300 热轧板组织、织构和磁性能的影响

叶 铁<sup>1</sup>, 高振宇<sup>2</sup>, 卢志文<sup>1</sup>, 仲志国<sup>1</sup>, 马春华<sup>1</sup>

(1 南阳师范学院智能制造研究院, 南阳 473061; 2 鞍钢股份有限公司技术中心, 鞍山 114001)

**摘 要** 利用电子背散射 (EBSD-electron back-scattering diffraction) 检测分析技术和磁性能测量技术研究高牌号冷轧 50W300 无取向电工钢 2.3 mm 热轧板低温 (820 ℃) 和高温 (920 ℃) 常化对其组织、织构和电磁性能的影响。研究发现, 920 ℃ 2 min (45 m/min) 常化时, 电工钢成品的铁损最低, 磁感最高。此时, 电工钢卷外层晶粒组织发生脱碳并快速生长; 次表层晶粒生长较为缓慢, 晶粒尺寸较小, 且均匀。中心层组织晶粒再结晶时, 尺寸均匀。同时织构水平降低, 表层织构慢散, 次表层和中心层织构近似于冷轧织构, 有利于电工钢磁性能的织构比例提高。

**关键词** 无取向电工钢 50W300 2.3 mm 热轧板 常化 组织 织构 磁性能

### Effect of Normalized Temperature on Microstructure, Texture Transformation and Magnetic Properties of Hot Rolled Plate of Electrical Steel 50W300

YE Tie<sup>1</sup>, GAO Zhenyu<sup>2</sup>, LU Zhiwen<sup>1</sup>, ZHONG Zhiguo<sup>1</sup>, MA Chunhua<sup>1</sup>

(1 Intelligent Manufacturing Research Institute, Nan yang Normal University, Nanyang 473061;  
2 Technology Centre of Ansteel Co Ltd, Anshan 114001)

**Abstract** The microstructure, texture and electromagnetic properties of high-grade cold-rolled 50W300 non oriented electrical steel 2.3 mm hot-rolled plate with normalizing at low temperature (820 ℃) and high temperature (920 ℃) are studied by means of EBSD (electron back-scattering diffraction) detection etc analysis and magnetic property measurement technology. It is found that when the normalizing treated process is at 920 ℃ for 2 min (45 m/min), the iron loss of the finished electrical steel is the lowest and the magnetic induction is the highest. Under such process conditions, the grain structure of the outer layer of the electrical steel coil is rapidly decarburized. The grain growth of the subsurface layer is slow, and the grain is small and uniform. When the center layer structure is recrystallized, they are uniform in size. And the texture level reduces, the surface texture is slow, the texture in sub-surface and the central layer are similar to the cold-rolled textures, the texture ratio of the magnetic properties of electrical steel increase.

**Material Index** Non-Oriented Silicon Steel 50W300, 2.3 mm Hot Rolled Plate, Normalizing, Microstructure, Texture, Magnetic Properties

常化是采用一次冷轧法生产无取向硅钢高牌号产品的关键工序之一。常化处理以后, 整个钢卷的微观组织再结晶更加完善、晶粒尺寸更加均匀和粗大, 析出物 (AlN、MnS 等) 进一步聚集并粗化。因为析出物的粗化对后续退火过程中的晶粒长大起抑制作用; 同时, 经过常化工艺, 使得成品织构中对磁性有利的 (100)、(110) 位向组分增加, 不利的 (111) 组分减弱, 电磁性能得以提高<sup>[1-5]</sup>。

在产品研制过程中, 进行织构组分控制是提升电磁性能的主要技术手段之一。透射电镜可以进行显微组织和晶体结构的同步分析, 但所观察的区域很小, 结果的统计性较差; X-射线衍射可以测定宏观取向分布, 但无法获得单个晶粒的取向; 而背散射电子衍射 (EBSD-electron back-scattering diffraction) 检测技术, 利用其独特的衍射方法和图像原位分析相结合, 可在晶粒尺度上的微区的晶体学数据与显微

组织形貌结合起来, 空间分辨率可达到 0.5 μm, 为特定样品的织构分析研究提供了一种强有力的手段<sup>[6-8]</sup>。

采用低温、高温两种工艺对热轧板进行常化, 后再进行轧制及连续成品退火, 并检测电磁性能。利用 EBSD 检测分析技术, 研究了典型样品的常化温度对微观织构组织转变行为及电磁性能的影响, 为工业生产中进一步提升产品电磁性能指标奠定技术基础。

#### 1 试验材料与方法

##### 1.1 试验钢成分

选取大生产的高牌号无取向电工钢 50W300 热轧卷进行样品制备, 其主要化学成分如表 1 所示。

##### 1.2 试验样品的制备与检测

试验的原始热轧卷是在七架热连轧机上轧制的, 来料连铸板坯断面尺寸 (230 mm × 1 050 mm),

表1 试验钢 50W300 的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of 50W300 steel tested / %

C	Si	Mn	Als	S
0.002 0	2.834	0.120	0.625	0.002 8

热轧卷的成品厚度为 2.3 mm, 卷取温度为 680 ℃。常化试验在卧式连续常化生产线上进行。低温试验采用 820 ℃ 保温、工艺速度为 35 m/min、工艺时间 2.57 min; 高温试验采用 920 ℃ 保温、工艺速度 45 m/min、工艺时间 2 min。常化后的热轧卷经森吉米尔五架冷连轧机上冷轧至 0.50 mm; 连续退火是在卧式连续退火炉上进行, 工艺温度为 930 ℃, 工艺速度为 80 m/min, 工艺时间 2.5 min。

试验过程中进行相应样品的加工制备, 原始热轧板及常化后的样品采用 EBSD 进行显微组织和织构检测; 退火后的成品钢板采用爱泼斯坦方圈进行电磁性能测试。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 热轧板的原始组织

图 1(a、b、c) 为厚度 2.3 mm 热轧板表层(a)、次表层(b)和中间层(c)的 EBSD 菊池带衬度图。由图 1(a、b、c) 明显看出, 由表及里晶粒平均尺寸越来越大, 这主要是因为常规的冷轧过程中, 变形钢板表面温度较低, 使终轧后塑性变形在表面区域附近诱发的缺陷密度及再结晶驱动力偏高; 经高温卷取后往往会在热轧板表层附近形成等轴静态再结晶晶粒组织。热轧板中心层则因再结晶驱动力偏低, 而不容易在卷取中引发再结晶, 从而会保持变形组织形态。图 1(d、e、f) 为热轧板表层(d)、次表层(e)和中间层(f)的织构在欧拉角  $\Phi_2$  为 45° 时 ODF(取向分布函数) 截图。粗大等轴晶粒会在退火后形成较强的  $\{001\} \langle 110 \rangle$  典型的轧制织构。(见图 1e), 促进成品磁性能的改善。研究表明<sup>[9-13]</sup>, 等轴粗大的再结晶晶粒易造成后续冷轧过程中的剪切带变形, 并在非  $\{111\}$  晶粒中孕育出来, 形成有利织构的再结晶核。因此, 对高牌号无取向电工钢热轧板进行常化处理以获得粗大的再结晶组织是改善成品磁性能的重要技术手段。

图 1(a) 所示, 存放于原料库的热轧卷的平均晶粒尺寸为 26.9  $\mu\text{m}$ , 表面为细小的再结晶晶粒。因为在热轧过程中热轧卷表面变形剧烈, 晶粒储能较高, 再结晶驱动力强, 加之热轧的卷取温度较高, 最外层的晶粒在钢卷自身的温度作用下首先发生了再结晶。另外, 由于晶粒储能和温度等因素的影响使

得这部分再结晶晶粒没有继续长大。

图 1(d) 中欧拉角  $\Phi_2$  为 45° 时的 ODF 截图显示出典型的表层剪切织构, 这是热轧硅钢卷表层织构的普遍特征。高斯织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、铜型织构  $\{112\} \langle 111 \rangle$  和黄铜织构  $\{110\} \langle 112 \rangle$  共同存在。图 1(b) 所示为钢板次表层, 晶粒再结晶不够完全, 或者部分没有再结晶, 从而形成了混晶的现象。晶粒平均尺寸为 30.6  $\mu\text{m}$ 。

图 1(e) 所示为热轧板次表面欧拉角  $\Phi_2$  为 45° 时的 ODF 截图, 对照图 1(d) 进行观察发现, 两图中织构分布明显不同。图 1(e) 所示织构为明显的轧制织构,  $\gamma$  取向线织构分布均匀, 织构水平较高, 织构较为集中。

图 1(c) 所示为钢板的中心层(心部组织), 中心层组织为拉长的纤维组织, 由一些未被破碎而被拉长的晶粒和一些破碎晶粒构成。这些晶粒由于被拉长, 因此形成了图 1(c) 所示微观织构。

图 1(f) 所示为热轧板中心层欧拉角  $\Phi_2$  为 45° 时的 ODF 截图, 对照图 1(e) 进行观察发现, 热轧板中心层织构水平低于次表面, 但织构分布与次表面相似。造成织构水平低的原因在于中心层的晶粒部分是没有破碎而被拉长的晶粒, 晶粒变形程度低于次表层, 晶粒储能较低, 因而织构不够锋锐且水平较低。储能对织构分布有很大影响<sup>[14-15]</sup>, 该织构主要形成于因轧制而拉长的晶粒, 该部分晶粒没有发生再结晶也没有发生回复, 所以织构也是典型的变形织构。

热轧时, 由于温度及轧制变形状态的不同, 造成了热轧板表面与心部的晶粒取向差和形变储能有所不同。热轧板热轧卷取后表面为铁素体再结晶组织, 心部为部分铁素体变形组织。

在带钢热轧过程中, 表面为剪切变形, 逐渐向心部过渡, 心部为压应力变形, 热轧轧制形成组织梯度和织构梯度。表层主要是通过剪切发生变形, 而横截面的其它部分则受到压缩。热轧过程中因为高硅钢导热系数较低, 钢板表面温度低于心部, 热轧板表面剪切变形促进了再结晶的发生, 而心部受到压缩变形, 表面织构一般为高斯织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , 心部织构一般为  $\{100\} \langle 011 \rangle$  或  $\{112\} \langle 110 \rangle$ ; 其中  $\{100\} \langle 011 \rangle$  织构储能较小较难发生再结晶, 只有在较高的卷取温度和长时间保温的条件下才能发生再结晶, 且晶粒较大。

### 2.2 低温(820 ℃)常化时钢板的组织

采用 820 ℃ 工艺温度对热轧板进行常化退火,

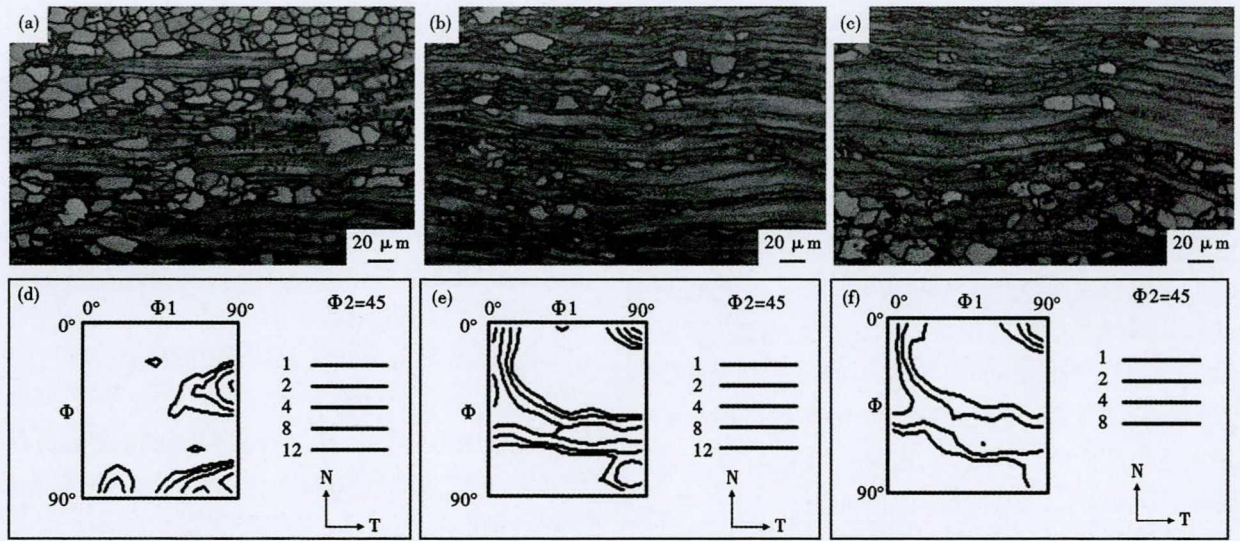


图 1 2.3 mm 热轧板的 EBSD 菊池带衬度图和  $\Phi 2$  为  $45^\circ$  时 ODF (取向分布函数) 截图: (a) 上表面 (晶粒度平均尺寸)  $AGS = 26.9 \mu\text{m}$ ; (b) 次表面  $AGS = 30.6 \mu\text{m}$ ; (c) 心部  $AGS = 31.3 \mu\text{m}$ ; (d), (e), (f) 分别为上表面、次表面和心部的组织在  $\Phi 2$  为  $45^\circ$  时取向分布函数 (ODF) 截图

Fig. 1 Kikuchi bands map with substrate and sections of ODF at  $\Phi 2 = 45^\circ$  of 2.3 mm hot rolled plate: (a)  $AGS$  (average grain size) =  $26.9 \mu\text{m}$  at upper surface; (b)  $AGS = 30.6 \mu\text{m}$  at sub-surface; (c)  $AGS = 31.3 \mu\text{m}$  at center; (d), (e), (f) sections of ODF at  $\Phi 2 = 45^\circ$  of hot rolled coil at upper surface, sub-surface and center

如图 2(a) 所示钢板表面全部再结晶, 但再结晶晶粒细小。主要是由于高温卷曲时晶粒发生了预先的回复和再结晶, 表层晶粒储能低, 再结晶长大驱动力小, 所以晶粒尺寸明显小于次表层发生再结晶的晶粒。图 2(d) 所示热轧卷在  $820^\circ\text{C}$  工艺温度常化退火的钢板上表面在欧拉角  $\Phi 2$  为  $45^\circ$  时的 ODF 截图, 对照图 1(d) 发现, 图 2(d) 中织构水平下降, 这是因为常化退火过程中钢板表面发生了再结晶。晶粒取向发生了变化, 原有的那些因轧制而产生锋锐弥散的织构开始弱化和向  $\alpha$  和  $\gamma$  取向线聚集。

图 2(b) 所示为试验用热轧卷采用  $820^\circ\text{C}$  工艺温度常化退火的钢板次表层的 EBSD 菊池带衬度图。如图所示组织均匀性较好, 晶粒发生了完全的再结晶, 部分晶粒长大明显。

图 2(e) 所示为试验用热轧卷采用  $820^\circ\text{C}$  工艺温度常化退火的钢板次表面在欧拉角为  $45^\circ$  时的 ODF 截图。对照图 1(e) 来看, 织构密度水平明显下降。织构主要为  $\{110\} \langle 001 \rangle$  和漫散的接近  $\{100\}$  和  $\{113\}$  取向晶粒。经过对照图 1(e) 轧制型织构分析认为, 此时为再结晶刚刚完成, 晶粒还没有长大, 织构不够锋锐。

对照图 2(b) 来看, 图 2(c) 所示钢板中心层处于回复和再结晶的一个并存过程。较小的晶粒为新的再结晶晶粒, 看起来较大的晶粒是钢板中心层处于回复状态的组织。图 2(f) 钢板中心层在欧拉角

为  $45^\circ$  时的 ODF 截图, 图中看出  $\gamma$  取向线上织构出现弱化, 织构水平降低,  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构增加, 织构水平上升, 织构向有利于磁性能方向发展。这是中心层晶粒发生回复和再结晶的结果。对照图 2(c) 可以验证此结论。

综合图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 来看, 在  $820^\circ\text{C}$  的常化工艺过程中, 材料发生了再结晶过程, 但是由于温度较低, 再结晶晶粒长大不完全, 钢板中心层的晶粒再结晶不充分, 甚至还处在回复状态, 存在混晶。

### 2.3 高温 ( $920^\circ\text{C}$ ) 常化时钢板的组织

采用  $920^\circ\text{C}$  对热轧卷进行常化退火, 对照图 2(a) 和图 3(a) 钢板外层晶粒, 不难看出, 高温时, 晶粒不但发生了完全再结晶, 而且晶粒发生显著长大。晶粒平均尺寸为  $93.3 \mu\text{m}$ 。图 3(a) 显示热轧卷表层晶粒大小并不均一, 这主要是表层的再结晶晶粒发生再次长大时, 表面由于温度较高发生了脱碳反应, 由于碳原子的溢出, 减少了再结晶晶粒长大的阻碍, 使得一部分晶粒得以快速长大。图 3(d) 所示热轧卷在  $920^\circ\text{C}$  工艺温度常化退火的钢板上表面在欧拉角  $\Phi 2$  为  $45^\circ$  时的 ODF 截图。对照图 2(d) 发现, 图 3(d) 中织构水平上升。这是因为常化退火过程中钢板表面发生脱碳, 一些晶粒因摆脱碳原子的束缚而得到了快速长大, 故而晶粒取向发生了变化。常化可以使热轧板脱碳更均匀, 再结晶组织更完全, 晶粒增大。对照图 1(d) 和图 3(d) 来看, 织构的弥

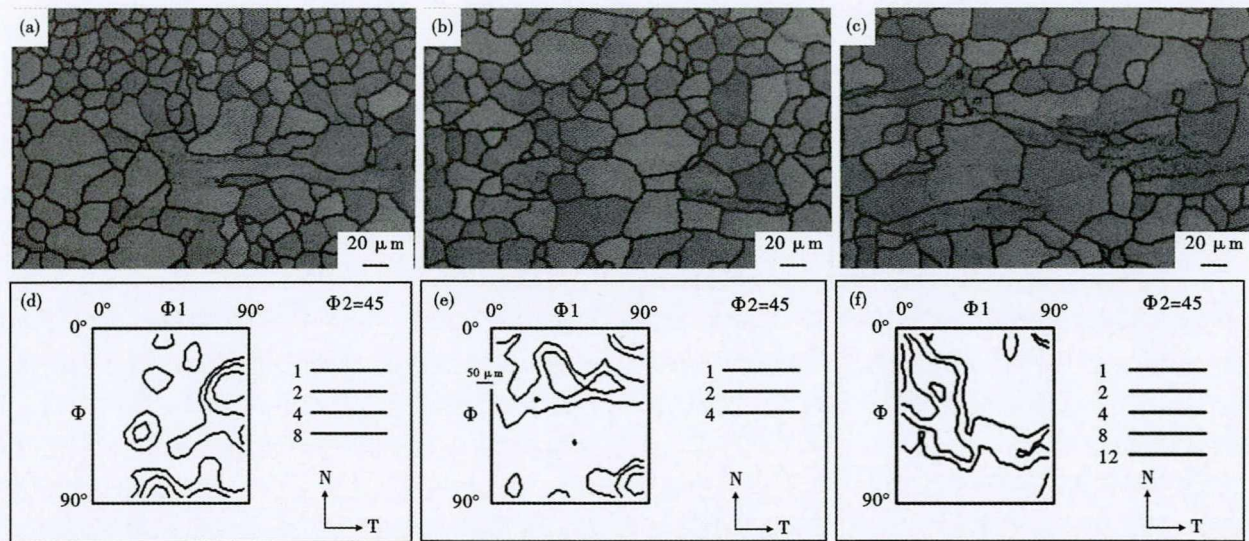


图2 820 °C常化后2.3 mm热轧板的EBSD菊池带衬度图和 $\Phi_2$ 为45°时ODF(取向分布函数)截图:(a)上表面(晶粒度平均尺寸)AGS=31.3  $\mu\text{m}$ ;(b)次表面AGS=33.9  $\mu\text{m}$ ;(c)心部AGS=55.5  $\mu\text{m}$ ;(d),(e),(f)分别为上表面、次表面和心部的织构在 $\Phi_2$ 为45°时取向分布函数(ODF)截图

Fig. 2 Kikuchi bands map with substrate and sections of ODF at  $\Phi_2 = 45^\circ$  of normalizing treated at 820 °C of 2.30 mm hot rolled plate:(a) AGS = 31.3  $\mu\text{m}$  at upper surface; (b) AGS = 33.9  $\mu\text{m}$  at sub-surface; (c) AGS = 55.5  $\mu\text{m}$  at center; (d), (e), (f) sections of ODF at  $\Phi_2 = 45^\circ$  of hot rolled coil at upper surface, sub-surface and center

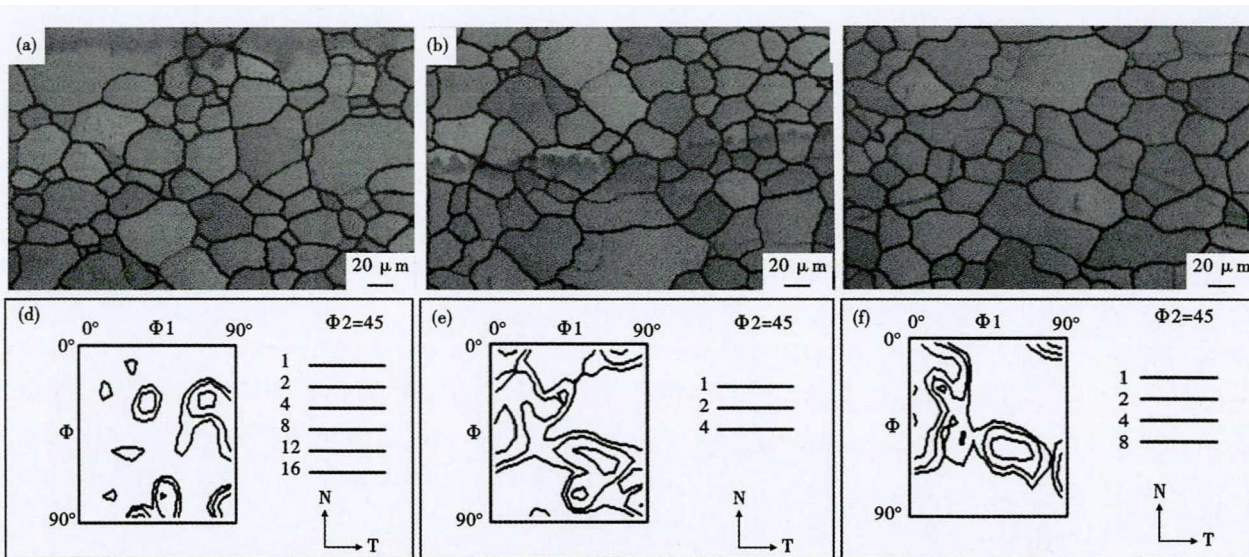


图3 920 °C常化后2.3 mm热轧板的EBSD菊池带衬度图和 $\Phi_2$ 为45°时ODF(取向分布函数)截图:(a)上表面(晶粒度平均尺寸)AGS=77.7  $\mu\text{m}$ ;(b)次表面AGS=93.3  $\mu\text{m}$ ;(c)心部AGS=100.4  $\mu\text{m}$ ;(d),(e),(f)分别为上表面、次表面和心部的织构在 $\Phi_2$ 为45°时取向分布函数(ODF)截图

Fig. 3 Kikuchi bands map with substrate and sections of ODF at  $\Phi_2 = 45^\circ$  of normalizing treated at 920 °C of 2.3 mm hot rolled plate:(a) AGS = 77.7  $\mu\text{m}$  at upper surface; (b) AGS = 93.3  $\mu\text{m}$  at sub-surface; (c) AGS = 100.4  $\mu\text{m}$  at center; (d), (e), (f) sections of ODF at  $\Phi_2 = 45^\circ$  of hot rolled coil at upper surface, sub-surface and center

散仍旧保持。这主要是因为外表面退火前有再结晶晶粒,有不完全长大的再结晶晶粒和轧制变形的晶粒共存,由于晶粒的储能和脱碳量的不均一,从而造成织构的弥散。

如图3(b)所示,钢板次外层晶粒发生了再结晶和晶粒长大,对照图3(a)发现平均晶粒值远小于外层晶粒值(77.7 < 93.3  $\mu\text{m}$ )。这是由于次外层晶粒

并没有像外层那些晶粒发生了脱碳反应,所以晶粒尺寸较小且均匀。

图3(e)所示为常化退火后热轧板次表面组织在欧拉角 $\Phi_2$ 为45°时的ODF截图对照图1(e)和图2(e)发现此时的织构密度水平降低, $\gamma$ 取向线上的织构减弱,不利于磁性能的 $\{111\} <112>$ 结构消失,有利于磁性能的 $\{001\} <100>$ 织构增加。

图 3(c) 显示热轧卷中心层平均晶粒尺寸为 100.4 μm, 超过表层和次表层的晶粒尺寸。这主要是由于高温卷后钢板表层和次表层都发生了一定数量的再结晶, 由于再结晶降低了晶粒储能, 使得后续再结晶动力降低, 再结晶速度减慢, 反而在后续这一阶段, 心部晶粒生长较快, 且均匀。图 3(f) 钢板中心层在欧拉角  $\Phi_2$  为 45° 时的 ODF 截图, 图中看出  $\gamma$  取向线上织构出现弱化, 织构水平降低, 此时的  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构增加, 织构向有利于磁性能方向发展。这是中心层晶粒发生再结晶的结果。对照图 3(c) 可以验证此结论。

热轧板常化退火使冷轧织构中对无取向硅钢最有利  $\{100\}$  织构强度得到了加强, 而不利织构  $\gamma$  织构强度减弱。这种差别在 920 °C 退火时更加明显, 热轧板常化退火试样还出现了有利的高斯织构。有利织构组分的增加 (对磁感有利影响) 被由于晶粒尺寸增大使磁畴尺寸增大 (对磁感不利影响) 所抵消, 结果使常化温度对磁感的影响大打折扣, 磁感提升不大。

#### 2.4 电磁性能

820 °C 和 920 °C 常化的热轧卷, 经过森吉米尔五架连轧机轧制成 0.35 mm 厚的冷轧卷, 然后经过连续退火 (工艺温度 930 °C) 进行成品退火。对退火后的钢卷取样, 进行铁损和磁感测量。测量结果如表 2 所示。常化工艺温度 920 °C 比 820 °C 时的成品铁损低 0.09 W/kg, 磁感高 0.08 T。如前述分析, 920 °C 常化后的热轧卷组织均匀, 平均晶粒尺寸大于 820 °C 常化的。920 °C 常化后的热轧卷织构水平低, 不利织构比例明显少于 820 °C 常化的织构。

#### 2.5 结果分析与讨论

铁素体钢 (包括冷轧无取向电工钢热轧卷) 的冷轧过程中通常会形成相似的轧制织构, 包括  $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 112 \rangle$  织构组分等。通常认为<sup>[16-20]</sup>, 铁素体轧制变形时各晶粒取向主要演变途径的顺序为:  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 、 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{113\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{223\} \langle 110 \rangle$  等。当钢中存在  $\{110\} \langle 001 \rangle$  织构时, 该顺序表现为:  $\{110\}$

$\langle 001 \rangle$ 、 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 、 $\{554\} \langle 225 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{223\} \langle 110 \rangle$  等。其中  $\{112\} \langle 110 \rangle$  取向附近和  $\{111\}$  面平行于轧面取向为冷轧过程的最终稳定取向区。从试验钢中未发现明显的  $\{110\} \langle 001 \rangle$  织构, 因而相关的晶粒取向演变途径应符合前一个顺序。对比图 1(d) 和图 1(f) 中热轧板表层和中心织构可以发现, 热轧卷的中心层织构具有明显  $\{001\} \langle 110 \rangle$  和  $\{112\} \langle 110 \rangle$  织构的轧制织构特征, 而高温卷取时表层区域的静态再结晶过程 (图 1a) 造成了表层非常弱的织构。当表层和中心层共同经历后续冷轧时, 中心层已有的  $\{001\} \langle 110 \rangle$  和  $\{112\} \langle 110 \rangle$  织构会继续增强并按照常规转向  $\{111\} \langle 110 \rangle$  结构; 而表层则需要很低的水平下积累  $\{001\} \langle 110 \rangle$  和  $\{112\} \langle 110 \rangle$  织构, 因而把  $\{112\} \langle 110 \rangle$  和  $\{111\} \langle 110 \rangle$  织构的增强过程推迟到更高的冷轧变形量, 进而可以增加退火钢板内有利于磁性的  $\{001\} \langle 110 \rangle$  织构 (图 1e, f), 并使得  $\{111\}$  面织构更均匀。由此可见, 从织构演变的角度看, 粗大、再结晶充分的热轧组织有利于改善成品织构和磁性能。

试验结果表明, 常化温度低, 再结晶不完全, 冷轧后形变量大, 线织构增强, 高斯剪切带形成能力弱, 再结晶织构应以线织构为主。相反, 常化温度高, 再结晶充分, 晶粒尺寸大, 冷轧后剪切带多, 退火后高斯晶粒多,  $\{100\}$  晶粒也多, 因此磁性能好。

### 3 结束语

(1) 常化不但使 50W300 电工钢热轧卷晶粒组织更加的均匀, 而且使轧制织构弱化, 进而使得不利于磁性能的织构比例下降、有利于磁性能的织构比例增加。

(2) 920 °C 的工艺温度比 820 °C 工艺温度更有利于 2.3 mm 热轧板铁损的降低和磁感的增加。磁感增加值接近半个牌号。适当提高常化温度可以增强对织构的有利影响, 进而可提高钢板磁性。

(3) 2.3 mm 热轧板表面、次表面和心部织构的差异及其在后续冷轧过程的演变表明, 取向变化规律先在  $\{001\} \langle 110 \rangle$  附近聚集, 再转向  $\{112\} \langle 110 \rangle$  附近, 随后逐渐向  $\{111\}$  聚集; 热轧表面的退火状态使得相关织构转变滞后于心部。

(4) 随着常化温度升高, 2.3 mm 热轧板晶粒尺寸明显增大, 有利于降低成品铁损, 因此, 适宜采用热轧板高温常化, 但过高的温度会引起第二相粒子的回溶和再析出, 对成品性能产生不利影响, 应注意

表 2 常化温度对 2.3 mm 热轧板磁性能的影响

Table 2 Effect of normalized temperature on magnetic properties of 2.3 mm hot-rolled plate

温度 / °C	$P_{15} / (W \cdot kg^{-1})$	$B_{50} / T$
820	2.69	1.673
920	2.60	1.681

避免。

(5)2.3 mm 热轧板经过 920 °C 常化工艺过程, 表层晶粒脱碳快速增长,次表层晶粒生长较为缓慢, 尺寸较小,且均匀,中心层晶粒相对均匀。

参考文献

[1] 何忠治,赵 宇,罗海文. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.

[2] Daem A, Sergeant P and Dupré L, et al. Modeling Interlocking Effects on Core Losses in Electrical Steel[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020,15(12):1836-1843.

[3] He Y L, Mehdi M and Liu H, et al. Angular Magnetic Barkhausen Noise of Incline- and Cross-Rolled Non-Oriented Electrical Steel Sheets [J]. Materials Characterization, 2021,177:111200.

[4] Yamamoto and Akihiro. Cold Rolling Mill Technologies for Electrical Steel [J]. AISTech-Iron and Steel Technology Conference Proceedings, 2020,2:1196-1203.

[5] Wang Z, Zhang Y L and Zhang D H, et al. Magnetostrictive Characteristics of the Grain-Oriented Electrical Steel in an Epstein Frame Magnetized with a DC Biased Magnetic Field [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2020,15(2):749-755.

[6] 杨 平. 电子背散射衍射技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2007,150-153.

[7] Li Y J, Fu Y and Dou Y, et al. Magnetic Properties Measurement and Analysis of Electrical Steel Sheet Under Cutting Influence [J]. AIP Advances, 2021,11(2).

[8] 李长一,黄 璞,冯大军,等. 冷轧无取向电工钢的点阵畸变储能及其对再结晶结构的影响[J]. 电工材料, 2007(4):10-13.

[9] 吕 科,李 军,赵 宇,等. 常化温度对无抑制剂取向硅钢性能影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(4):162-167.

[10] 耿京京,于 浩,范勇斐. 常化温度对热轧无取向硅钢组织与磁性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(S1):93-96.

[11] 宋中华,欧阳德刚. 中、低牌号无取向硅钢热轧卷常化技术 [J]. 武钢技术,2012,50(5):46-51.

[12] 董廷亮,岳尔斌,李建军,等. 常化温度对 TSCR 流程制备低碳低硅无取向硅钢组织和性能的影响[J]. 机械工程材料,2011, 35(3):15-17+21.

国家自然科学基金项目 (No. 51374132); 河南省自然科学基金项目 (NO. 182300410240); 河南省教育厅项目 (212300410377)

[13] 董 浩. 高磁性能冷轧无取向硅钢薄带的研制[D]. 沈阳:东北大学,2009.

[14] 董 浩,赵 宇,喻晓军,等. 常化温度对冷轧无取向硅钢薄带磁性能和织构的影响[J]. 钢铁研究学报,2008(5):45-47+51.

[15] Lakkonavar V, Kavi S and Jones P, et al. Edge-Quality Effects on Mechanical Properties of Stamped Non-Oriented Electrical Steel [C]// WCX SAE World Congress Experience, 2020.

[16] 谢 利,杨 平. 制备{100}织构无取向电工钢方法综述[J]. 材料热处理学报,2013,12:9-17.

[17] Mazgaj W, Sierzega M and Szular Z. Approximation of Hysteresis Changes in Electrical Steel Sheets [J]. Energies, 2021,14(14): 1-18.

[18] Ben T, Chen F Y and Chen L, et al. Magnetostrictive Model of Non-Oriented Electrical Steel Sheet Considering Force-Magnetic Coupling Effect[J]. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021, 41(15):5361-5370.

[19] Nguyen D T, Ho J R and Tung, P C, et al. An Improved Real-Time Temperature Control for Pulsed Laser Cutting of Non-Oriented Electrical Steel[J]. Optics and Laser Technology, 2021,136.

[20] Maeda Y, Urata S and Nakai H, et al. Study on Measuring Method of Magnetic Properties of an Electrical Steel Sheet in Applying Both in-Plane and Out-of-Plane Compressive Stress[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2021,141(5)339-344.

叶 铁(1974-),男,副教授,博士,电工钢研究。  
E-mail: yetie2009@ nynu. edu. cn

收稿日期:2021-12-20

“讲文明树新风”公益广告

