



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I869198 B

(45)公告日：中華民國 114 (2025) 年 01 月 01 日

(21)申請案號：113105309

(22)申請日：中華民國 113 (2024) 年 02 月 15 日

(51)Int. Cl. : C22C38/16 (2006.01)

C21D8/12 (2006.01)

H01F1/147 (2006.01)

H01F1/18 (2006.01)

(30)優先權：2023/02/15 日本

2023-021568

(71)申請人：日商日本製鐵股份有限公司 (日本) NIPPON STEEL CORPORATION (JP)
日本

(72)發明人：屋鋪裕義 YASHIKI, HIROYOSHI (JP)；名取義顯 NATORI, YOSHIAKI (JP)；片岡隆史 KATAOKA, TAKASHI (JP)；竹田和年 TAKEDA, KAZUTOSHI (JP)；升光尚人 MASUMITSU, NAOTO (JP)；鄉元佑哉 GOHMOTO, YUUYA (JP)；井本靖志 IMOTO, YASUSHI (JP)

(74)代理人：劉法正；尹重君

(56)參考文獻：

TW 201940712A

TW 202140811A

CN 104136637A

審查人員：陳子明

申請專利範圍項數：4 項 圖式數：0 共 27 頁

(54)名稱

無方向性電磁鋼板及其製造方法

(57)摘要

一種無方向性電磁鋼板，其母材之化學組成為：以質量%計，C：0.0040%以下、Si：大於 3.50%且在 4.50%以下、Mn：小於 0.60%、Al：0.30~0.90%、P：0.030%以下、S：0.0018%以下、N：0.0040%以下、Ti：小於 0.0040%、Nb：小於 0.0050%、Zr：小於 0.0050%、V：小於 0.0050%、Cu：小於 0.200%、Ni：小於 0.500%、Sn 及 Sb 之 1 種或 2 種的合計：0.005~0.060%、及剩餘部分：Fe 及不純物，且滿足 $4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9$ ；母材之平均結晶粒徑為 10~40 μm ； $\{111\} < 112 >$ 方位之聚集度為 8.0 以下；並且，母材之板厚為 0.10~0.30mm。



I869198

【發明摘要】

【中文發明名稱】

無方向性電磁鋼板及其製造方法

【中文】

一種無方向性電磁鋼板，其母材之化學組成為：以質量%計，C：0.0040%以下、Si：大於 3.50%且在 4.50%以下、Mn：小於 0.60%、Al：0.30~0.90%、P：0.030%以下、S：0.0018%以下、N：0.0040%以下、Ti：小於 0.0040%、Nb：小於 0.0050%、Zr：小於 0.0050%、V：小於 0.0050%、Cu：小於 0.200%、Ni：小於 0.500%、Sn 及 Sb 之 1 種或 2 種的合計：0.005~0.060%、及剩餘部分：Fe 及不純物，且滿足 $4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9$ ；母材之平均結晶粒徑為 10~40 μm ；{111}<112>方位之聚集度為 8.0 以下；並且，母材之板厚為 0.10~0.30mm。

【指定代表圖】(無)

【代表圖之符號簡單說明】

(無)

【特徵化學式】

(無)

【發明說明書】

【中文發明名稱】

無方向性電磁鋼板及其製造方法

【技術領域】

【0001】 本發明涉及一種無方向性電磁鋼板及其製造方法。

【先前技術】

【0002】 近年來，地球環境問題備受矚目，對節省能源之對策的要求愈發提高。其中，又以電氣機器之高效率化受到強烈要求。因此，就作為馬達或發電機等之鐵心材料而受到廣泛使用的無方向性電磁鋼板而言，對於提升磁特性之要求也更加增強。該傾向在電動汽車及動力混合車用的驅動馬達、以及空調之壓縮機用馬達中十分顯著。並且，在驅動馬達或壓縮機用馬達方面，對有益於機器小型化的高輸出化的需求也逐漸增強。

【0003】 要達成馬達之高效率化，降低作為損耗主體的鐵損及銅損十分重要。降低作為馬達之鐵心使用之電磁鋼板的鐵損可有效降低鐵損，而提高電磁鋼板之磁通密度可有效降低銅損。另一方面，要達成馬達之高輸出化，高轉矩化及高速旋轉化十分重要。提高電磁鋼板之磁通密度對高轉矩化很有效，而提高電磁鋼板之強度對高速旋轉化有效。因此，為了促進馬達之高效率化與高輸出化，要求一種低鐵損、高磁通密度及高強度的電磁鋼板。

【0004】 上述那樣各種馬達的馬達鐵芯係由靜定子即定子(stator)及轉動子即轉子(rotor)構成。對於構成馬達鐵芯之定子及轉子所要求之特性並不同。對於定子係要求優異之磁特性(低鐵損及高磁通密度)，相對於此，對於轉子則要求低鐵損與優異之機械特性(高強度)。

【0005】 由於在定子與轉子上所要求之特性不同，故可藉由分別製造定子用無方向性電磁鋼板與轉子用無方向性電磁鋼板來實現所期望之特性。然而，

準備2種無方向性電磁鋼板會造成鐵心之製造步驟繁雜，同時會導致產率降低。於是，為了實現對於轉子所要求之低鐵損與高強度，並實現對於定子所要求之低鐵損與高磁通密度，自以往便持續研討強度優異且磁特性亦優異之無方向性電磁鋼板。

【0006】 例如，在專利文獻1~4中，進行了為了實現高強度與優異之磁特性的嘗試。

先前技術文獻

專利文獻

【0007】 專利文獻1：國際公開第2019/017426號

專利文獻2：國際公開第2020/091039號

專利文獻3：國際公開第2021/210672號

專利文獻4：日本專利特開2010-90474號公報

【發明內容】

【0008】 發明欲解決之課題

然而，如專利文獻1~4中所揭示，欲實現兼顧高強度與低鐵損之無方向性電磁鋼板，必須大量含有合金元素，而有韌性降低從而容易發生冷軋延時之斷裂的問題。

【0009】 本發明係為了解決上述問題而成者，其目的在於穩定提供一種具有高強度及優異磁特性之無方向性電磁鋼板。

【0010】 用以解決課題之手段

本發明主旨在於下述無方向性電磁鋼板及其製造方法。

【0011】 (1)一種無方向性電磁鋼板，其母材之化學組成以質量%計為：

C：0.0040%以下、

Si：大於3.50%且在4.50%以下、

Mn：小於0.60%、

Al：0.30~0.90%、

P：0.030%以下、

S：0.0018%以下、

N：0.0040%以下、

Ti：小於0.0040%、

Nb：小於0.0050%、

Zr：小於0.0050%、

V：小於0.0050%、

Cu：小於0.200%、

Ni：小於0.500%、

Sn及Sb之1種或2種的合計：0.005~0.060%、及

剩餘部分：Fe及不純物，且

滿足下述(i)式；

前述母材之平均結晶粒徑為10~40 μ m；

從前述母材表面起算板厚1/4之位置的{111}<112>方位之聚集度為8.0以下；並且

前述母材之板厚為0.10~0.30mm；

$4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9$. . . (i)

惟，上述式中之元素符號為各元素之含量(質量%)。

【0012】 (2)如上述(1)之無方向性電磁鋼板，其拉伸強度為650MPa以上。

【0013】 (3)如上述(1)或(2)之無方向性電磁鋼板，其於前述母材表面具有絕緣被膜。

【0014】 (4)一種無方向性電磁鋼板之製造方法，係製造如上述(1)至(3)中

任一項之無方向性電磁鋼板的方法；

該製造方法係對鋼塊依序施行以下步驟：

熱軋延步驟；

熱軋板退火步驟，其均熱溫度為800~920°C且均熱時間為1秒~10分鐘；

去鏽皮步驟，其係在施行噴珠後進行酸洗；

冷軋延步驟，其係將板厚軋縮成0.10~0.30mm；及

精加工退火步驟，其係以500~850°C之溫度範圍中之升溫速度達400°C/秒以上之方式加熱至850°C以上且低於900°C之溫度後，再以在850°C以上之維持時間達20秒以下之方式進行冷卻；

其中，前述鋼塊具有下述化學組成：

以質量%計，

C：0.0040%以下、

Si：大於3.50%且在4.50%以下、

Mn：小於0.60%、

Al：0.30~0.90%、

P：0.030%以下、

S：0.0018%以下、

N：0.0040%以下、

Ti：小於0.0040%、

Nb：小於0.0050%、

Zr：小於0.0050%、

V：小於0.0050%、

Cu：小於0.200%、

Ni：小於0.500%、

Sn及Sb之1種或2種的合計：0.005~0.060%、及

剩餘部分：Fe及不純物，且

滿足下述(i)式：

$$4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9 \quad \cdot \cdot \cdot (i)$$

惟，上述式中之元素符號為各元素之含量(質量%)。

【0015】發明效果

根據本發明，可穩定獲得一種具有高強度及優異磁特性之無方向性電磁鋼板。

【實施方式】

【0016】用以實施發明之形態

本發明人等為了解決上述課題而專心致力研討，結果達至獲得以下知識見解。

【0017】為了確保冷軋延時之韌性並同時獲得低鐵損、高磁通密度且高強度的無方向性電磁鋼板，必須使主要合金元素之Si、Mn及Al的含量最佳化。

【0018】具體而言，係含有大於3.50%且在4.50%以下之Si，該Si之固溶強化能力最高，且對增加電阻之助益也最高。並且，為了改善晶粒成長性以穩定獲得優異之磁特性，而含有0.30%以上之Al。另一方面，為了抑制韌性劣化，而將Al含量設為0.90%以下。

【0019】又，Mn係一種雖然固溶強化能力在3種元素中最低，但韌性劣化較少而有助於增加電阻之元素。然而，本發明人等反覆研討，結果可知若含有過多固溶強化能力比Si及Al更低之Mn，則相較於強度上升那部分，磁通密度之降低會更明顯，且當Mn含量高時，會難以使磁特性穩定提升。因此，Mn含量設為小於0.60%。

【0020】在無方向性電磁鋼板之製造過程中，一般係在冷軋延之前進行熱

軋板退火。然而，當鋼板中之Si含量高且為了降低鐵損而必須降低板厚時，為了抑制冷軋延時之板斷裂、邊裂等問題，期望將熱軋板退火中之均熱溫度低溫化。另一方面，已知熱軋板退火中之均熱溫度愈高，磁通密度便愈上升，而均熱溫度之低溫化會導致磁通密度降低。

【0021】於是，本發明人等針對使熱軋板退火時之均熱溫度降低、且使磁通密度提升的方法進行了研討。結果，發現了：在冷軋延後之精加工退火中，藉由進行急速加熱可抑制不利於磁特性之集合組織的發達，而即便在熱軋板退火時之均熱溫度低的情況下，仍可抑制磁通密度降低。

【0022】又，本發明人等進行了急速加熱至各種到達溫度之實驗，結果可知：即便進行了急速加熱，當到達溫度低時仍無法確認到磁特性提升之效果，而進行急速加熱至850°C以上之溫度能提升磁特性。

【0023】並且，將到達溫度抑制成低於900°C並縮短在850°C以上之溫度區中維持的時間，藉此可使晶粒微細化，而在確保預定之磁特性的同時還可使強度提升。

【0024】本發明係根據上述知識見解而成者。以下，針對本發明之各要件詳細說明。

【0025】 1.整體構成

本發明一實施形態之無方向性電磁鋼板具有高強度且具有優異之磁特性，因此適於定子及轉子兩者。又，本實施形態之無方向性電磁鋼板宜於以下說明之母材表面具備有絕緣被膜。

【0026】 2.母材之化學組成

各元素之限定理由如下所述。此外，在以下說明中，關於含量之「%」意指「質量%」。

【0027】 C：0.0040%以下

C(碳)係一種會引起無方向性電磁鋼板之鐵損劣化的元素。C含量若大於0.0040%，無方向性電磁鋼板之鐵損便會劣化，而無法獲得良好之磁特性。因此，C含量設為0.0040%以下。C含量宜為0.0035%以下，較宜為0.0030%以下。此外，因C有助於無方向性電磁鋼板之高強度化，當欲獲得該效果時，C含量宜為0.0005%以上，較宜為0.0010%以上。

【0028】 Si：大於3.50%且在4.50%以下

Si(矽)係一種會使鋼之電阻上升而降低渦電流損耗，從而改善無方向性電磁鋼板之鐵損的元素。又，Si之固溶強化能力大，故為亦有用於無方向性電磁鋼板之高強度化的元素。為了獲得該等效果，Si含量設為大於3.50%。Si含量宜為3.60%以上，較宜為3.70%以上，更宜為3.80%以上。另一方面，Si含量若過多，加工性便會明顯劣化，而變得難以實施冷軋延。因此，Si含量設為4.50%以下。Si含量宜為4.40%以下，較宜為4.30%以下。

【0029】 Mn：小於0.60%

Mn(錳)係一種會使鋼之電阻上升而降低渦電流損耗，從而有效改善無方向性電磁鋼板之鐵損的元素。然而，Mn之固溶強化能力比Si及Al差，故為了獲得高強度而須含有大量，從而磁通密度之降低會變大。因此，Mn含量設為小於0.60%。Mn含量宜為0.55%以下，較宜為0.50%以下。對Mn含量無須設置下限，但當欲獲得上述效果時，Mn含量宜為0.10%以上，較宜為0.20%以上。

【0030】 Al：0.30~0.90%

Al(鋁)係一種藉由使鋼之電阻上升而降低渦電流損耗，從而具有改善無方向性電磁鋼板之鐵損之效果的元素。又，Al雖程度不及Si，但亦為藉由固溶強化而有助於無方向性電磁鋼板之高強度化的元素。並且，添加適量之Al能抑制與鋼中之N鍵結所產生之AlN的微細化，從而具有改善精加工退火時之晶粒成長性的效果。為了獲得該等效果，Al含量設為0.30%以上。Al含量宜為0.40%以上，較

宜大於0.45%，更宜為0.50%以上。另一方面，Al含量若過多，韌性便會劣化，從而增加冷軋延時之斷裂的危險性。因此，Al含量設為0.90%以下。Al含量宜為0.80%以下，較宜為0.70%以下。

【0031】 在本實施形態中，係藉由適當控制Si、Al及Mn之含量來確保鋼的電阻。又，由確保強度的觀點來看，亦須適當控制Si、Al及Mn之含量。另一方面，由確保磁通密度及韌性的觀點來看，亦必須有上限。因此，除了Si、Al及Mn之含量各在上述範圍內之外，還必須滿足下述(i)式。下述(i)式之中間的值宜為4.3以上，較宜為4.4以上，且宜為4.8以下，較宜為4.7以下。

$$\text{【0032】 } 4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9 \quad \cdot \cdot \cdot (i)$$

惟，上述式中之元素符號為各元素之含量(質量%)。

【0033】 P：0.030%以下

P(磷)係作為不純物被包含於鋼中，其含量若過多，無方向性電磁鋼板之韌性便會明顯降低。因此，P含量設為0.030%以下。P含量宜為0.025%以下，較宜為0.020%以下。此外，極度降低P含量有時會引起製造成本增加，因此P含量宜為0.003%以上，較宜為0.005%以上。

【0034】 S：0.0018%以下

S(硫)係一種會形成MnS之微細析出物而使鐵損增加，從而使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化的元素。因此，S含量設為0.0018%以下。S含量宜為0.0016%以下，較宜為0.0014%以下。此外，極度降低S含量有時會引起製造成本增加，因此S含量宜為0.0001%以上，較宜為0.0003%以上，更宜為0.0005%以上。

【0035】 N：0.0040%以下

N(氮)係一種無法避免地會混入鋼中的元素，且其係一種會形成氮化物而使鐵損增加，從而使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化的元素。因此，N含量設為0.0040%以下。N含量宜為0.0030%以下，較宜為0.0020%以下。此外，極度降低

N含量有時會引起製造成本增加，因此N含量宜為0.0005%以上。

【0036】 Ti：小於0.0040%

Ti(鈦)係一種無法避免地會混入鋼中的元素，其可與碳或氮鍵結而形成析出物(碳化物、氮化物)。當形成有碳化物或氮化物時，該等析出物本身會使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化。並且，會阻礙精加工退火中之晶粒成長，使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化。因此，Ti含量設為小於0.0040%。Ti含量宜為0.0030%以下，較宜為0.0025%以下。此外，極度降低Ti含量有時會引起製造成本增加，因此Ti含量宜為0.0005%以上。

【0037】 Nb：小於0.0050%

Nb(鈮)係一種會與碳或氮鍵結而形成析出物(碳化物、氮化物)，藉此有助於高強度化的元素，惟該等析出物本身會使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化。因此，Nb含量設為小於0.0050%。Nb含量宜為0.0040%以下，較宜為0.0030%以下，更宜為0.0020%以下。此外，極度降低Nb含量有時會引起製造成本增加，因此Nb含量宜為0.0001%以上。

【0038】 Zr：小於0.0050%

Zr(鋯)係一種會與碳或氮鍵結而形成析出物(碳化物、氮化物)，藉此有助於高強度化的元素，惟該等析出物本身會使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化。因此，Zr含量設為小於0.0050%。Zr含量宜為0.0040%以下，較宜為0.0030%以下，更宜為0.0020%以下。此外，極度降低Zr含量有時會引起製造成本增加，因此Zr含量宜為0.0001%以上。

【0039】 V：小於0.0050%

V(釩)係一種會與碳或氮鍵結而形成析出物(碳化物、氮化物)，藉此有助於高強度化的元素，惟該等析出物本身會使無方向性電磁鋼板之磁特性劣化。因此，V含量設為小於0.0050%。V含量宜為0.0040%以下，較宜為0.0030%以下，

更宜為0.0020%以下。此外，極度降低V含量有時會引起製造成本增加，因此V含量宜為0.0001%以上。

【0040】 Cu：小於0.200%

Cu(銅)係無法避免地會混入鋼中的元素。若刻意含有Cu，無方向性電磁鋼板之製造成本便會增加。因此，在本實施形態中，不須積極含有Cu，為不純物程度即可。Cu含量係設為在製造步驟中無法避免地可能會混入之最大值，即設為小於0.200%。Cu含量宜為0.150%以下，較宜為0.100%以下。此外，Cu含量之下限值無特別限定，惟極度降低Cu含量有時會引起製造成本增加。因此，Cu含量宜為0.001%以上，較宜為0.003%以上，更宜為0.005%以上。

【0041】 Ni：小於0.500%

Ni(鎳)係無法避免地會混入鋼中的元素。但，Ni亦為會使無方向性電磁鋼板之強度提升的元素，故亦可刻意含有。惟，Ni之價格昂貴，故Ni含量設為小於0.500%。Ni含量宜為0.400%以下，較宜為0.300%以下。此外，Ni含量之下限值無特別限定，惟極度降低Ni含量有時會引起製造成本增加。因此，Ni含量宜為0.001%以上，較宜為0.003%以上，更宜為0.005%以上。又，刻意含有時，Ni含量宜設為0.200%以上。

【0042】 Sn及Sb之1種或2種的合計：0.005~0.060%

Sn(錫)及Sb(銻)能改善集合組織，而具有提高無方向性電磁鋼板之磁通密度的效果。又，其等會於母材表面偏析而抑制退火中之氧化及氮化，故亦為對於無方向性電磁鋼板可有效確保低鐵損之元素。為了獲得該等效果，Sn及Sb之1種或2種的合計含量設為0.005%以上。上述合計含量宜為0.010%以上，較宜為0.015%以上。另一方面，Sn及Sb的合計含量若過多，鋼之韌性便會降低而變得難以冷軋延。因此，Sn及Sb之1種或2種的合計含量設為0.060%以下。上述合計含量宜為0.050%以下，較宜為0.040%以下。

【0043】 本發明無方向性電磁鋼板之母材的化學組成中，剩餘部分為Fe及不純物。在此所謂的「不純物」係指在工業上製造鋼時，由礦石、廢料等原料或因製造步驟之種種因素而混入的成分，且係指在不會對本發明造成不良影響之範圍內所容許之物。

【0044】 此外，作為不純物元素，關於Cr及Mo之含量無特別規定。在本實施形態之無方向性電磁鋼板中，即便在各0.5%以下之範圍含有該等元素，也不會特別影響本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。又，即便在各0.002%以下之範圍含有Ca及Mg，也不會特別影響本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。即便在0.004%以下之範圍含有稀土族元素(REM)，也不會特別影響本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。此外，在本實施形態中，REM係指由Sc、Y及鑼系元素構成之合計17種元素，而上述REM之含量係指該等元素之合計含量。

【0045】 O亦為不純物元素，惟即便在0.035%以下之範圍含有O，也不會影響本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。O有時亦會在退火步驟中混入鋼中，因此以扁胚階段(亦即，澆桶取樣分析值)之含量來說，即便在0.010%以下之範圍含有O，也不會特別影響本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。

【0046】 又，除了上述元素外，還可包含Zn、Pb、Bi、As、B、Se等元素作為不純物元素，若各自之含量在0.0050%以下之範圍，便不會損及本實施形態之無方向性電磁鋼板的特性。

【0047】 本實施形態之無方向性電磁鋼板之母材的化學組成可利用公知之各種測定法。例如，只要使用ICP發射光譜分析法、重量法或火花放電發射光譜分析法進行測定即可。又，C及S使用燃燒-紅外線吸收法來測定即可，N使用非活性氣體燃燒-熱傳導率法來測定即可，而O使用非活性氣體熔解-非分散式紅外線吸收法來測定即可。

【0048】 3.結晶粒徑

在本實施形態中，係將母材之平均結晶粒徑設為 $10\sim 40\mu\text{m}$ 。藉由將母材之平均結晶粒徑設為 $10\mu\text{m}$ 以上，可抑制磁滯損失變差而改善磁特性。另一方面，藉由將平均結晶粒徑設為 $40\mu\text{m}$ 以下，可獲得提升鋼之強度的效果。平均結晶粒徑宜為 $12\mu\text{m}$ 以上，較宜為 $14\mu\text{m}$ 以上。且，平均結晶粒徑宜為 $38\mu\text{m}$ 以下，較宜為 $36\mu\text{m}$ 以下。

【0049】 此外，本發明中，母材之平均結晶粒徑係依循JIS G 0551：2020「鋼-結晶粒度之顯微鏡試驗方法」而求出。

【0050】 4.集合組織

在本實施形態中，係抑制會使磁特性劣化之集合組織的發達。具體而言，係將 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度設為8.0以下。藉由抑制 $\{111\}<112>$ 方位之發達，可改善磁特性。 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度宜為7.5以下，較宜為7.0以下。對 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度無須設置下限，惟1.0即為實質下限。

【0051】 此外， $\{111\}<112>$ 方位之聚集度係藉由X射線繞射裝置來測定。又，聚集度係指下述數值：在相同條件下藉由X射線繞射法測定沒有往特定方位聚集之標準試樣與受測材的X射線強度，並將所得受測材的X射線強度除以標準試樣的X射線強度而獲得之數值。具體之測定方法如下。測定係在藉由化學研磨對受測材之無方向性電磁鋼板的母材從單側表面去除至板厚 $1/4$ 之深度為止後，在研磨後表面實施。 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度係從表現3維集合組織之結晶方位分布函數ODF(Orientation Distribution Functions)求算，該結晶方位分布函數ODF係以藉由X射線繞射裝置測定之 $\alpha\text{-Fe}$ 相之 $\{200\}$ 面、 $\{110\}$ 面、 $\{310\}$ 面、 $\{211\}$ 面的極圖為基礎，利用級數展開法計算所得。將ODF顯示之 $\phi_2=45^\circ$ 剖面之在 $\Phi=55^\circ$ 且 $\phi_1=30^\circ$ 之聚集度定義為 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度。

【0052】 5.磁特性

在本實施形態之無方向性電磁鋼板中，所謂磁特性優異意指鐵損 $W_{10/400}$ 低且磁通密度 B_{50} 高。

【0053】 在此，磁特性(鐵損 $W_{10/400}$ 及磁通密度 B_{50})係依據JIS C 2550-1：2011中規定之愛普斯坦(Epstein)試驗法進行測定。又，此時，鋼板之密度係設為 7.65g/cm^3 來實施磁測定。此外，鐵損 $W_{10/400}$ 意指在最大磁通密度為 1.0T 且頻率 400Hz 之條件下產生的鐵損，磁通密度 B_{50} 意指在 5000A/m 之磁場中的磁通密度。

【0054】 關於本實施形態之無方向性電磁鋼板，所謂鐵損 $W_{10/400}$ 低意指以下情形：當板厚 0.26mm 以上時，鐵損 $W_{10/400}$ 在 22.5W/kg 以下；當板厚 $0.21\sim 0.25\text{mm}$ 時，鐵損 $W_{10/400}$ 在 22.0W/kg 以下；當板厚 0.20mm 以下時，鐵損 $W_{10/400}$ 在 21.5W/kg 以下。又，所謂磁通密度 B_{50} 高意指以下情形：當板厚 0.26mm 以上時，磁通密度 B_{50} 在 1.64T 以上；當板厚 $0.21\sim 0.25\text{mm}$ 時，磁通密度 B_{50} 在 1.63T 以上；當板厚 0.20mm 以下時，磁通密度 B_{50} 在 1.62T 以上。

【0055】 6.機械特性

本實施形態之無方向性電磁鋼板具有高強度。關於拉伸強度無須特別限定，拉伸強度宜為 650MPa 以上。拉伸強度較宜為 660MPa 以上，更宜為 670MPa 以上。又，關於降伏應力亦無須特別限定，降伏應力宜為 550MPa 以上，較宜為 560MPa 以上，更宜為 570MPa 以上。在此，拉伸強度及降伏應力係藉由進行遵循JIS Z 2241：2022之拉伸試驗來測定。此外，降伏應力在有明確產生上降伏點時，將上降伏點作為降伏應力。又，在未產生上降伏點時，將 0.2% 偏位降伏強度作為降伏應力。

【0056】 7.板厚

關於本實施形態之無方向性電磁鋼板，由冷軋延與精加工退火之製造成本的觀點來看，係將母材之板厚設為 0.10mm 以上。另一方面，由降低鐵損的觀點

來看，係將母材之板厚設為0.30mm以下。因此，本實施形態之無方向性電磁鋼板之母材之板厚為0.10~0.30mm。母材之板厚宜為0.15~0.27mm。

【0057】 8.絕緣被膜

在本實施形態之無方向性電磁鋼板中，宜於母材表面具有絕緣被膜。無方向性電磁鋼板係在沖裁出鐵芯毛胚後進行積層，然後才加以使用，因此藉由於母材表面設置絕緣被膜，可降低板間之渦電流，從而作為鐵芯可降低渦電流損耗。

【0058】 關於絕緣被膜之種類無特別限定，可使用作為無方向性電磁鋼板之絕緣被膜使用之公知的絕緣被膜。上述絕緣被膜可舉例如以無機物為主體且更包含有有機物之複合絕緣被膜。在此，所謂複合絕緣被膜例如係下述絕緣被膜：以鉻酸金屬鹽、磷酸金屬鹽、或膠質氧化矽、Zr化合物、Ti化合物等無機物中之至少任一者為主體，且分散有微細有機樹脂粒子者。尤其，由近年需求高漲之降低製造時之環境負荷的觀點來看，可適宜使用下述絕緣被膜：使用磷酸金屬鹽、Zr或Ti之耦合劑、或者該等之碳酸鹽或銨鹽作為起始物質者。

【0059】 絕緣被膜之附著量無特別限定，例如宜設為每單面為200~1500mg/m²左右，較宜設為每單面為300~1200mg/m²。藉由以成為上述範圍內之附著量之方式來形成絕緣被膜，可維持優異之均一性。此外，在事後測定絕緣被膜之附著量時，可利用公知之各種測定法，例如只要適當利用測定浸漬於氫氧化鈉水溶液前後之質量差的方法、或使用檢量曲線法之螢光X射線法等即可。

【0060】 9.製造方法

關於本實施形態之無方向性電磁鋼板，針對製造方法無特別限制，例如可藉由以下方式製造：在以下所示條件下對具有上述化學組成之鋼塊依序實施熱軋延步驟、熱軋板退火步驟、去鏽皮步驟、冷軋延步驟及精加工退火步驟。又，

要於母材表面形成絕緣被膜時，係在上述精加工退火步驟後進行絕緣被膜形成步驟。以下，針對各步驟詳細說明。

【0061】 <熱軋延步驟>

加熱具有上述化學組成之鋼塊(扁胚)，並對經加熱之鋼塊進行熱軋延，而獲得熱軋板。在此，關於供於熱軋延時之鋼塊的加熱溫度無特別規定，宜設為例如1050~1250℃。又，關於熱軋延後之熱軋板的板厚亦無特別規定，但考慮到母材之最終板厚而宜設為例如1.5~3.0mm左右。

【0062】 <熱軋板退火步驟>

之後，為了使鋼板之鐵損降低，而實施熱軋板退火。熱軋板退火宜使用連續退火爐；相較於批次退火，連續退火爐之生產性高且退火後之金屬組織之均質性高。又，如上述，當鋼板中之Si含量高且為了降低鐵損而須降低板厚時，期望將熱軋板退火中之均熱溫度低溫化。因此，熱軋板退火係在均熱溫度為800~920℃且均熱時間為1秒~10分鐘之條件下進行。為了獲得良好之磁特性，宜為820℃以上。而為了獲得良好之韌性，宜為900℃以下。

【0063】 <去鏽皮步驟>

對上述熱軋板退火後之鋼板，在施行了噴珠後實施酸洗，去除生成於母材表面之鏽皮層。在熱軋板退火時鏽皮層會發達，故藉由在酸洗前施行噴珠，而容易在後續利用酸洗進行去鏽皮。在此，酸洗所使用之酸的濃度、酸洗所用之促進劑的濃度及酸洗液之溫度等酸洗條件無特別限定，可採用公知之酸洗條件。

【0064】 <冷軋延步驟>

對上述去鏽皮後之鋼板實施冷軋延。在冷軋延中，係以可使母材之最終板厚達0.10~0.30mm的軋縮率來軋延。

【0065】 <精加工退火步驟>

在上述冷軋延後實施精加工退火。在本實施形態之無方向性電磁鋼板之製

造方法中，精加工退火宜使用連續退火爐。在精加工退火步驟中，係在加熱至850°C以上且低於900°C之溫度後，以在850°C以上之維持時間達20秒以下之方式進行冷卻。宜將氣體環境設為H₂之比率為1~100體積%的H₂及N₂之混合氣體環境(亦即，H₂+N₂=100體積%)，且宜將氣體環境之露點設為-50~+10°C。

【0066】 精加工退火步驟中之最高到達溫度低於850°C時，會無法充分獲得精加工退火之效果，從而磁特性劣化而不佳。另一方面，最高到達溫度為900°C以上時，會強度不足。又，在850°C以上之維持時間若超過20秒，則強度不足。

【0067】 在本實施形態中，係藉由在精加工退火步驟中進行急速加熱，來抑制不利於磁特性之集合組織的發達。因此，在精加工退火步驟中，係以使500~850°C之溫度範圍中之升溫速度達400°C/秒以上之方式加熱至850°C以上之溫度。

【0068】 藉由將升溫速度設為400°C/秒以上，可抑制不利於磁特性之集合組織的發達。升溫速度宜為800°C/秒以上，較宜為1000°C以上。升溫速度愈快愈佳，故無須特別設置上限，但若考慮到設備上之限制，則升溫速度宜為2000°C/秒以下。又，如上述，藉由進行急速加熱至850°C以上之溫度，可使磁特性提升。此外，以還包含了低於500°C之溫度區及均熱溫度在內之升溫步驟整體來說，亦可將平均升溫速度設為1~2000°C/秒。

【0069】 此外，以一般之氣體燃燒之直接加熱、輻射管、電加熱器等來說，要以上述條件來進行急速加熱十分困難。因此，在本實施形態中，期望使用通電加熱、感應加熱等。

【0070】 <絕緣被膜形成步驟>

在上述精加工退火後，視需要可實施絕緣被膜形成步驟。在此，絕緣被膜之形成方法無特別限定，使用能形成如下述所示公知之絕緣被膜的處理液，並

藉由公知之方法進行處理液之塗佈及乾燥即可。公知之絕緣被膜可舉例如以無機物為主體且更包含有有機物之複合絕緣被膜。

【0071】 所謂複合絕緣被膜例如係下述絕緣被膜：以鉻酸金屬鹽、磷酸金屬鹽等金屬鹽、或膠質氧化矽、Zr化合物、Ti化合物等無機物中之至少任一者為主體，且分散有微細有機樹脂粒子者。尤其，由近年需求高漲之降低製造時之環境負荷的觀點來看，可適宜使用以下絕緣被膜：使用磷酸金屬鹽、Zr或Ti之耦合劑作為起始物質的絕緣被膜，或者使用磷酸金屬鹽、Zr或Ti之耦合劑之碳酸鹽或銨鹽作為起始物質的絕緣被膜。

【0072】 關於母材之供形成絕緣被膜之表面，亦可在塗佈處理液之前施行利用鹼等進行之脫脂處理、或利用鹽酸、硫酸、磷酸等進行之酸洗處理等任意之前處理。亦可不施行該等前處理而在精加工退火後直接於母材表面塗佈處理液。

【0073】 依上述方式獲得之本發明無方向性電磁鋼板，其鐵損低並具有高磁通密度且高強度之優異特性，因此亦適宜作為轉子鐵芯及定子鐵芯中之任一胚料。

【0074】 以下，藉由實施例更具體地說明本發明，惟本發明不受該等實施例所限。

【0075】 實施例

將具有表1所示化學組成之扁胚加熱至1150°C後，以精加工溫度850°C、精加工板厚2.0mm來施行熱軋延，並在600°C下進行捲取而製成熱軋鋼板。對於所得熱軋鋼板，藉由連續退火爐以表2所示條件來施行熱軋板退火。對以上述方式獲得之鋼板利用噴珠及酸洗進行去鏽皮後，藉由冷軋延製成表2所示板厚之冷軋鋼板。

【0076】 並且，在H₂：20%、N₂：80%、露點：-30°C之混合氣體環境中，

以表2所示條件施行精加工退火。此外，在精加工退火時之升溫中係使用感應加熱，急速加熱至表2所示之最高到達溫度。其後，以在到達溫度下維持0~1秒以內之方式立即冷卻並控制其冷卻速度，藉此調整在850°C以上之維持時間。對精加工退火後之鋼板塗佈下述絕緣被膜並在大氣中以350°C烘烤，該絕緣被膜係由磷酸鋁及粒徑0.2 μ m之丙烯酸-苯乙烯共聚物樹脂乳液構成。

【0077】 [表1]

表 1

鋼種	化學組成 (質量%、剩餘部分：Fe及不純物)														(i)式 [†] 中間值	
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti	Nb	Zr	V	Cu	Ni	Sn	Sb	
A	0.0025	3.81	0.45	0.013	0.0010	0.60	0.0018	0.0015	0.0008	0.0007	0.0002	0.029	0.023	0.029	<0.001	4.6
B	0.0020	3.81	0.15	0.012	<u>0.0022</u>	0.46	0.0017	0.0016	0.0010	0.0011	0.0005	0.021	0.024	0.024	<0.001	4.3
C	0.0022	3.75	0.25	0.014	0.0017	0.47	0.0018	0.0017	0.0009	0.0010	0.0006	0.022	0.023	0.051	<0.001	4.3
D	0.0018	3.98	0.55	0.013	0.0012	0.46	0.0025	0.0008	0.0007	0.0008	0.0008	0.015	0.011	0.002	0.001	4.7
E	0.0018	4.05	0.56	0.008	0.0012	0.50	0.0012	0.0012	0.0006	0.0007	0.0006	0.010	0.015	<u>0.034</u>	<u>0.035</u>	4.8
F	0.0018	4.00	0.15	0.008	0.0004	0.68	0.0016	0.0014	0.0007	0.0006	0.0007	0.019	0.026	0.015	0.015	4.8
G	0.0018	4.01	<u>0.73</u>	0.010	0.0004	0.44	0.0025	0.0022	0.0006	0.0005	0.0003	0.025	0.020	0.010	<0.001	4.8
H	0.0024	3.55	0.15	0.025	0.0012	0.48	0.0024	0.0020	0.0009	0.0006	0.0004	0.018	0.032	0.015	0.005	4.1
I	0.0025	3.60	0.15	0.025	0.0005	0.85	0.0035	0.0025	0.0008	0.0007	0.0005	0.021	0.030	0.015	0.005	4.5
J	0.0015	4.42	0.20	0.015	0.0009	0.50	0.0014	0.0014	0.0006	0.0005	0.0003	0.018	0.023	0.035	<0.001	5.0
K	0.0015	4.21	0.18	0.010	0.0009	0.50	0.0013	0.0012	0.0041	0.0039	0.0004	0.024	0.030	0.015	<0.001	4.8
L	0.0030	<u>3.44</u>	0.45	0.010	0.0014	0.60	0.0020	0.0025	0.0008	0.0008	0.0006	0.018	0.021	0.024	<0.001	4.3
M	0.0024	<u>4.55</u>	0.10	0.012	0.0008	0.32	0.0013	0.0012	0.0007	0.0006	0.0005	0.018	0.024	0.025	<0.001	4.9
N	0.0035	3.83	0.38	0.012	0.0010	<u>0.23</u>	0.0025	0.0015	0.0009	0.0006	0.0004	0.023	0.031	0.025	<0.001	4.3
O	0.0035	3.93	0.40	0.012	0.0010	0.65	0.0026	0.0015	0.0008	0.0007	0.0002	0.025	0.028	0.024	<0.001	4.8
P	0.0018	3.83	0.20	0.013	0.0009	<u>0.96</u>	0.0018	0.0019	0.0007	0.0005	0.0003	0.150	0.350	0.025	<0.001	4.9
Q	0.0010	3.75	0.41	0.010	0.0006	0.70	0.0011	0.0035	0.0022	0.0009	0.0042	0.155	0.313	0.021	<0.001	4.7
R	0.0025	3.81	0.42	0.010	0.0010	0.53	0.0018	0.0018	0.0007	0.0006	0.0003	0.022	0.031	0.026	<0.001	4.6

[†] 4.2≤Si+Al+0.5×Mn≤4.9 ... (i)

底線表示在本發明範圍外。

【0078】 [表2]

表2

試驗 No.	鋼種	熱軋板退火		精加工退火			平均 結晶 粒徑 (μm)	{111}<112> 方位聚集度 (×random)	板厚 (mm)	拉伸 強度 (MPa)	降伏 應力 (MPa)	W _{10/400} (W/kg)	B ₅₀ (T)	備註
		均熱 溫度 (°C)	均熱 時間 (秒)	升溫 速度 ^{#1} (°C/秒)	到達 溫度 ^{#2} (°C)	維持 時間 ^{#3} (秒)								
1	A	850	40	1000	850	1	14	7.0	0.20	693	612	20.9	1.65	發明例
2	A	850	40	1000	850	1	14	6.8	0.25	695	614	20.9	1.65	發明例
3	A	850	40	1000	850	1	15	6.6	0.30	695	615	21.8	1.66	發明例
4	A	850	40	1000	850	1	15	6.2	0.35	696	615	22.7	1.67	比較例
5	B	900	50	800	870	2	10	7.3	0.20	716	646	22.2	1.67	比較例
6	C	900	50	800	870	2	13	7.4	0.20	690	613	21.1	1.67	發明例
7	D	825	40	1000	860	3	16	8.3	0.20	712	631	19.8	1.61	比較例
8	E	825	40	在冷軋延時斷裂										比較例
9	F	825	30	400	890	9	30	7.8	0.20	692	589	13.5	1.63	發明例
10	G	825	30	400	890	9	28	7.8	0.20	679	580	13.7	1.61	比較例
11	H	875	40	1000	860	0.5	13	6.9	0.20	640	558	21.7	1.68	比較例
12	I	875	40	1000	860	0.5	13	6.7	0.20	681	604	21.1	1.67	發明例
13	J	800	50	在冷軋延時斷裂										比較例
14	K	800	50	300	860	3	15	8.2	0.20	730	650	19.6	1.61	比較例
15	K	800	50	500	860	3	15	7.3	0.20	733	654	19.7	1.62	發明例
16	K	800	50	1000	860	3	14	6.8	0.20	736	657	19.9	1.63	發明例
17	K	800	50	1000	800	0	9	8.4	0.20	761	693	21.8	1.61	比較例
18	L	900	50	800	870	2	15	7.6	0.20	645	563	20.9	1.67	比較例
19	M	820	40	在冷軋延時斷裂										比較例
20	N	850	40	1000	860	1	9	7.0	0.20	673	605	22.1	1.66	比較例
21	O	780	40	400	860	1	15	8.5	0.20	702	619	20.0	1.60	比較例
22	O	860	40	400	860	1	16	7.8	0.20	700	617	19.0	1.62	發明例
23	O	930	40	在冷軋延時斷裂										比較例
24	P	800	60	在冷軋延時斷裂										比較例
25	Q	890	60	1000	880	5	21	6.8	0.20	685	589	16.8	1.64	發明例
26	R	890	40	1000	890	30	42	7.4	0.20	646	527	13.0	1.64	比較例
27	R	890	40	1000	890	20	36	7.2	0.20	655	552	13.6	1.64	發明例
28	R	890	40	1000	890	3	20	7.0	0.20	682	587	17.2	1.65	發明例
29	R	890	40	1000	930	15	49	7.8	0.20	640	522	12.7	1.64	比較例

底線表示在發明例之範圍外。

- #1 升溫速度意指在500~850°C之溫度範圍中之升溫速度。
- 惟，在到達溫度低於850°C時，則意指在500°C~到達溫度之溫度範圍中之升溫速度。
- #2 意指利用急速加熱之到達溫度。
- #3 意指在850°C以上之維持時間。

【0079】 針對所得各試驗材，依循JIS G 0551：2020「鋼-結晶粒度之顯微鏡試驗方法」計測出母材之平均結晶粒徑。又，從各試驗材之軋延方向及寬度

方向採取愛普斯坦試驗片，藉由依據JIS C 2550-1：2011之愛普斯坦試驗來評估鐵損 $W_{10/400}$ 與磁通密度 B_{50} 。此外，鋼板之密度係設為 7.65g/cm^3 來實施磁測定。

【0080】藉由化學研磨對各試驗材之母材從單側表面去除至板厚1/4之深度為止後，從表現3維集合組織之結晶方位分布函數ODF(Orientation Distribution Functions)求出在研磨後表面 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度，該結晶方位分布函數ODF係以藉由X射線繞射裝置測定之 $\alpha\text{-Fe}$ 相之 $\{200\}$ 面、 $\{110\}$ 面、 $\{310\}$ 面、 $\{211\}$ 面的極圖為基礎，利用級數展開法計算所得。

【0081】接著，從各試驗材中，依循JIS Z 2241：2022，以長邊方向與鋼板之軋延方向一致之方式採取JIS5號拉伸試驗片。然後，使用上述試驗片並依循JIS Z 2241：2022進行拉伸試驗，測定出拉伸強度及降伏應力。

【0082】將上述結果一同列示於表2。

【0083】關於滿足本發明規定之試驗No.1~3、6、9、12、15、16、22、25、27及28，可知具有650MPa以上之高拉伸強度，且鐵損 $W_{10/400}$ 低，磁通密度 B_{50} 高。

【0084】相對於該等，關於比較例之試驗No.4、5、7、8、10、11、13、14、17~21、23、24、26及29，其等拉伸強度差、或鐵損 $W_{10/400}$ 差、或磁通密度 B_{50} 差，韌性明顯劣化而變得難以製造。

【0085】具體而言，關於試驗No.4，因板厚厚於規定範圍，故得鐵損差的結果。關於試驗No.5，因S含量高於規定範圍，故MnS之析出量變多而得鐵損差的結果。關於試驗No.7，因Sn及Sb之合計含量低於規定範圍，故 $\{111\}<112>$ 方位之聚集度大於規定範圍，而得磁通密度差的結果。

【0086】關於試驗No.8，因Sn及Sb之合計含量高於規定範圍，故韌性劣化而在冷軋延時斷裂，從而無法實施拉伸強度及磁特性之測定。關於試驗No.10，因Mn含量高於規定範圍，故得磁通密度差的結果。關於試驗No.11，因

Si+Al+0.5×Mn低於規定範圍，故得鐵損及拉伸強度差的結果。關於試驗No.13，因Si+Al+0.5×Mn高於規定範圍，故韌性劣化而在冷軋延時斷裂，從而無法實施拉伸強度及磁特性之測定。

【0087】關於試驗No.14，因精加工退火中之升溫速度低於規定範圍，故{111}<112>方位之聚集度大於規定範圍，而得磁通密度差的結果。關於試驗No.17，因精加工退火中之急速加熱的到達溫度低於規定範圍，故{111}<112>方位之聚集度大於規定範圍而得磁通密度差的結果，並且平均結晶粒徑變得小於規定範圍而得鐵損差的結果。

【0088】關於試驗No.18，因Si含量低於規定範圍，故得拉伸強度差的結果。關於試驗No.19，因Si含量高於規定範圍，故韌性劣化而在冷軋延時斷裂，從而無法實施拉伸強度及磁特性之測定。關於試驗No.20，因Al含量低於規定範圍，故精加工退火後之平均結晶粒徑變得小於規定範圍而得鐵損差的結果。

【0089】關於試驗No.21，因熱軋板退火中之均熱溫度低於規定範圍，故{111}<112>方位之聚集度大於規定範圍，而得磁通密度差的結果。關於試驗No.23，因熱軋板退火中之均熱溫度高於規定範圍，故韌性劣化而在冷軋延時斷裂，從而無法實施拉伸強度及磁特性之測定。

【0090】關於試驗No.24，因Al含量高於規定範圍，故韌性劣化而在冷軋延時斷裂，從而無法實施拉伸強度及磁特性之測定。關於試驗No.26，因在850℃以上之維持時間超過規定範圍，故得拉伸強度差的結果。關於試驗No.29，精加工退火中之到達溫度變得高於規定範圍，平均結晶粒徑變得大於規定範圍，而得拉伸強度差的結果。

【0091】產業上之可利用性

如以上所述，根據本發明，可穩定地以低成本獲得具有高強度及優異磁特性之無方向性電磁鋼板。

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種無方向性電磁鋼板，其母材之化學組成以質量%計為：

C：0.0040%以下、

Si：大於3.50%且在4.50%以下、

Mn：小於0.60%、

Al：0.30~0.90%、

P：0.030%以下、

S：0.0018%以下、

N：0.0040%以下、

Ti：小於0.0040%、

Nb：小於0.0050%、

Zr：小於0.0050%、

V：小於0.0050%、

Cu：小於0.200%、

Ni：小於0.500%、

Sn及Sb之1種或2種的合計：0.005~0.060%、及

剩餘部分：Fe及不純物，且

滿足下述(i)式；

前述母材之平均結晶粒徑為10~40 μ m；

從前述母材表面起算板厚1/4之位置的{111}<112>方位之聚集度為8.0以下；並且

前述母材之板厚為0.10~0.30mm；

$4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9$. . . (i)

惟，上述式中之元素符號為各元素之含量(質量%)。

【請求項2】 如請求項1之無方向性電磁鋼板，其拉伸強度為650MPa以上。

【請求項3】 如請求項1或請求項2之無方向性電磁鋼板，其於前述母材表面具有絕緣被膜。

【請求項4】 一種無方向性電磁鋼板之製造方法，係製造如請求項1至請求項3中任一項之無方向性電磁鋼板的方法；

該製造方法係對鋼塊依序施行以下步驟：

熱軋延步驟；

熱軋板退火步驟，其均熱溫度為800~920℃且均熱時間為1秒~10分鐘；

去鏽皮步驟，其係在施行噴珠後進行酸洗；

冷軋延步驟，其係將板厚軋縮成0.10~0.30mm；及

精加工退火步驟，其係以500~850℃之溫度範圍中之升溫速度達400℃/秒以上之方式加熱至850℃以上且低於900℃之溫度後，再以在850℃以上之維持時間達20秒以下之方式進行冷卻；

其中，前述鋼塊具有以下化學組成：

以質量%計，

C：0.0040%以下、

Si：大於3.50%且在4.50%以下、

Mn：小於0.60%、

Al：0.30~0.90%、

P：0.030%以下、

S：0.0018%以下、

N：0.0040%以下、

Ti：小於0.0040%、

Nb：小於0.0050%、

Zr：小於0.0050%、

V：小於0.0050%、

Cu：小於0.200%、

Ni：小於0.500%、

Sn及Sb之1種或2種的合計：0.005~0.060%、及

剩餘部分：Fe及不純物，且

滿足下述(i)式：

$$4.2 \leq \text{Si} + \text{Al} + 0.5 \times \text{Mn} \leq 4.9 \quad \cdot \cdot \cdot (i)$$

惟，上述式中之元素符號為各元素之含量(質量%)。