

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 97122975.9

[45] 授权公告日 2002 年 1 月 9 日

[11] 授权公告号 CN 1077601C

[22] 申请日 1997.11.28 [24] 颁证日 2002.1.9

[21] 申请号 97122975.9

[30] 优先权

[32] 1997.2.28 [33] US [31] 808894

[73] 专利权人 阿姆科公司

地址 美国俄亥俄州

[72] 发明人 J·W·肖恩 N·A·达尔斯特伦
C·G·克拉费克

[56] 参考文献

EP743370A 1996.11.20 _

审查员 葛松生

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

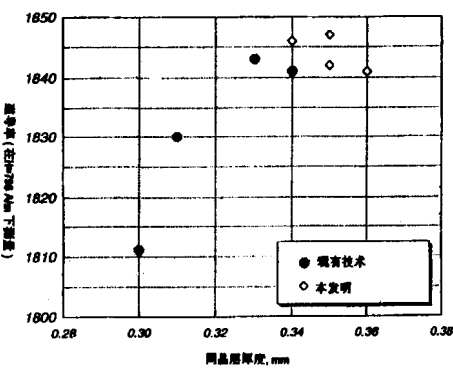
代理人 赵 辛 黄力行

权利要求书 3 页 说明书 15 页 附图页数 2 页

[54] 发明名称 硅铬晶粒取向电工钢的制造方法

[57] 摘要

一种制造晶粒取向电工钢的方法。原材料为热加工钢板,含硅 2.5—4.5%,铬 0.1—1.2%,碳低于 0.05%,铝低于 0.005%,硫最高至 0.1%,硒最高至 0.14%,锰 0.01—1%,其余是铁和残留元素。钢板含碳量至少为 0.010%,奥氏体体积含量($\gamma_{1150^{\circ}\text{C}}$)至少为 2.5%,且每一面有一层同晶体。钢板先冷轧至一中间厚度,然后退火再冷轧至最终厚度,并进行脱碳处理使含碳量低于 0.003%。此后至少在其一面上涂以退火隔离层,并进行最后退火。



ISSN 1008-4274

权 利 要 求 书

1. 一种具有优良磁性能的晶粒取向电工钢的制造方法，包括以下步骤：

提供具有一定奥氏体体积含量且每一面都有同晶层的热加工钢

5 板；

钢板的成分主要包含 2.5-4.5% 的硅，0.1-1.2% 的铬，0.05% 以下的碳，0.005% 以下的铝，最高至 0.1% 的硫，最高至 0.14% 的硒，0.01~1% 的锰，其余主要是铁和残留元素；

10 钢板的体电阻率至少为 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，含碳量至少为 0.01%，因而奥氏体体积含量至少为 2.5%，且每一同晶层的厚度至少为热加工钢板总厚度的 10%；

将钢板冷轧至某一中间厚度；

将经过冷轧的钢板退火；

将经过退火的钢板冷轧至最终厚度；

将冷轧钢板进行充分的脱碳退火处理以防止磁老化；

15 至少在已退火钢板的一面涂上退火隔离涂层；

将已涂上涂层的钢板作最后的退火以产生二次晶粒生长，使在 796A/m 下测量的磁导率至少为 1780。

2. 权利要求 1 的方法，其中每一面上的同晶层厚度为热加工钢板总厚度的 15-40%。

20 3. 权利要求 1 的方法，其中每一面上的同晶层厚度为热加工钢板总厚度的 20-35%。

4. 权利要求 1 的方法，其中冷轧至最终厚度前钢板的微观结构由铁素体基体中的精细碳化铁沉淀物构成，基体中含有小于 1% 体积含量的马氏体和/或残余奥氏体。

25 5. 权利要求 4 的方法，其中冷轧至最终厚度之前经过退火的钢板以不大于 $10^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的速率缓慢冷却至 650°C ，然后以至少 $23^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的速率快速冷却至 315°C 左右。

6. 权利要求 1 的方法，其中钢板在冷轧至中间厚度之前在 $750-1150^\circ\text{C}$ 温度退火最长 10 分钟，然后缓慢冷却至 500°C 以下。

30 7. 权利要求 6 的方法，其中钢板冷轧至最终厚度之前的微观结构由铁素体基体中的精细碳化铁沉淀物构成，基体中含有小于 1% 体积含量的马氏体和/或残余奥氏体，而且钢板冷轧至最终厚度前的含碳量至少为 0.010%。

8.权利要求 1 的方法，其中体电阻率至少为 $50\mu\Omega\text{-cm}$ 。

9.权利要求 1 的方法，其中碳含量不超过 0.03%，因此，奥氏体体积含量不大于 10.0%。

10.权利要求 1 的方法，其中铬含量为 0.2-0.6%。

5 11.权利要求 1 的方法，其中锰含量为 0.05-0.07%，硫含量为 0.02-0.03%。

12.权利要求 1 的方法，其中硅含量为 2.9-3.8%。

13.权利要求 1 的方法，其中脱碳后的钢板含碳量低于 0.003%。

14.权利要求 1 的方法，其中钢板在冷轧至最终厚度前要经中间退火，温度至少为 800°C ，时间至少 5 秒钟。

10 15.权利要求 1 的方法，其中钢板在冷轧至最终厚度后进行脱碳退火，温度至少 800°C ，时间至少 5 秒钟。

16.权利要求 1 的方法，其中钢板在至少 1100°C 的温度作至少 5 小时的最后退火。

15 17.权利要求 16 的方法，其中钢板在至少 1200°C 的温度进行至少 20 小时的最后退火。

18.权利要求 1 的方法，其中热加工钢板的厚度为 1.7-3.0mm。

19.一种具有优良磁性能的晶粒取向电工钢的制造方法，包括以下步骤：

提供厚度为 1.5-4.0mm 且具有一定奥氏体体积含量的热加工钢板，板的每一面都有一层同晶体；

20 钢板主要包含 2.5-4.5%的硅，0.1-1.2%的铬，不高于 0.03%的碳，低于 0.005%的铝，最高至 0.1%的硫，最高至 0.14%的硒，0.01~1%的锰，其余为铁和残留元素；

钢板的体电阻率至少为 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，每一同晶层厚度为热加工钢板总厚度的 10-40%，

25 钢板在至少 800°C 经退火处理；

经退火后的钢板含碳量至少为 0.01%，因而奥氏体体积含量为 2.5-10%；

将钢板冷轧至中间厚度；

将冷轧后的钢板退火，其中钢板的微观结构由铁素体基体中的精细碳化铁沉淀物构成，基体中包含 1%以下体积含量的马氏体和/或残余奥氏体；

30 将已退火的钢板冷轧至最终厚度；

将冷轧钢板作充分脱碳退火，以防止磁性老化；

至少在已退火钢板的一面上涂以退火隔离层；

将已涂层的钢板作最后退火，以产生二次晶粒生长，使在 796A/m 下测量的磁导率至少为 1780。

20.一种具有优良磁性能的晶粒取向电工钢的制造方法，包括以下步骤：

提供厚度为 1.7-3.0mm，具有一定奥氏体体积分含量的热加工钢板，板的每

5 一面有一层同晶体；

钢板主要包含 2.9-3.8%的硅，0.2-0.7%的铬，碳不高于 0.03%，铝少于 0.005%，含 0.020%-0.030%的硫，0.015-0.05%的硒，0.05~0.07%的锰，其余基本是铁和残留元素；

将热加工钢板在 1000 - 1125℃下退火最长至 10 分钟；

10 经退火的钢板体电阻率至少为 $50\mu\Omega\text{-cm}$ ，含碳量至少为 0.010%，因而，奥氏体体积分含量为 4.0-10.0%，钢板每一面的同晶层厚度为 0.17-1.20mm；

将钢板冷轧至中间厚度；

将冷轧钢板在至少 800℃下退火至少 5 分钟，然后以不大于 10℃/秒的速率缓慢冷却至 650℃，再以至少 23℃/秒的速率快速冷却至 315℃左右，这样，

15 钢板的微观结构就由铁素体基体中的精细碳化铁沉淀物构成，基体中马氏体和/或残余奥氏体的体积分含量低于 1%；

将退火后的钢板冷轧至最终厚度；

对冷轧钢板作脱碳退火，使其含碳量低于 0.003%；

至少在退火后的钢板的一面涂以退火隔离层；

20 将已涂层的钢板至少 1100℃下进行至少 5 小时的最后退火，以产生二次晶粒生长，使得在 796A/m 的下测得的磁导率至少为 1780。

说明书

硅铬晶粒取向电工钢的制造方法

本发明涉及从热加工钢板经过至少两次冷轧来制造晶粒取向电工钢的方法。更确切地说，热加工钢板包含 2.5~4.5% 的硅，0.1~1.2% 的铬，少于 0.050% 的碳和少于 0.005% 的铝，且其体电阻率至少为 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，碳含量至少为 0.010%。因此，钢板中奥氏体体积百分数 ($\gamma_{1150^\circ\text{C}}$) 至少为 2.5%，且钢板每一面都有一层同晶层，其厚度至少为钢板总厚度的 10%。

电工钢从广义而言可以分为两类。一类是非定向电工钢，用来制造磁性能在各个方向几乎均匀的钢片。这类钢包含铁、硅和/或铝，因而钢片的电阻率较高，铁芯损耗较低。非定向电工钢还可能含有锰、磷和其它本领域已知的元素，以提高体电阻率，使磁化过程中产生的铁芯损耗降低。

另一类是晶粒取向电工钢，用于制造高体电阻率的薄钢片。由于晶粒择优取向，其磁性能具有很强的方向性。按照所产生的磁性能的高低，所用的晶粒生长阻止剂，产生所需磁性能所用的加工步骤，又将晶粒取向电工钢分为几种。常规（普通）晶粒取向电工钢含有硅，因而体电阻率较高，其磁导率在 796A/m 下测量时至少为 1780。高磁导率晶粒取向电工钢也含有硅且体电阻率较高，在 796A/m 下测量的磁导率至少为 1880。商业生产的含硅晶粒取向电工钢的体电阻率在 45 至 $50\mu\Omega\text{-cm}$ 的范围，含硅量在 2.95% 至 3.45%，还含有铁和其它杂质，因所采用的熔化和炼钢方法而异。我们还知道，提高含硅量也要求增加含碳量，以保持加工过程中所需的奥氏体含量较少。然而，这些成分上的变化将使钢板的机械性能变差并增加加工过程的困难，因为高的含硅和含碳量使钢板变脆。

普通晶粒取向电工钢一般还加有锰和硫（还可能有硒），用作主要的晶粒生长阻止剂。有时含有铝、铋、硼、铜、氮等其它元素，还可能加进硫化锰或硒化锰作为阻止剂以抑制晶粒生长。

普通晶粒取向电工钢可能有一层研磨玻璃膜（通称镁橄榄石），或绝缘涂层（通称二次涂层），它也许是处于研磨玻璃膜上面，也许就代替研磨玻璃膜；另外，普通晶粒取向电工钢可能有一层二次涂层为冲加工之用，这时希望铁芯片上没有研磨玻璃膜以避免模具过度磨损。通常在最后的高温退火之前在钢的表面上加上氧化镁，主要用作退火隔离层；但是，这些涂层也可能影响到最后的高温退火过程中二次晶粒生长的发展和稳定性，并发生反应而在钢表面形成

镁橄榄石（或研磨玻璃）涂层，从而影响退火过程中钢的脱硫效果。

为获得很高程度的边缘立方体（cube on edge）定向，在最后的高温退火前，材料必须是具有所需取向的再结晶结构，而且还须具有晶粒生长阻止剂，以抑制最后退火中的一次晶粒生长，直至发生二次晶粒生长。二次晶粒生长的力度和完全性对电工钢的磁性能是至关重要的。这与两个因素有关。第一，要求在 535—925℃ 的温度范围内能抑制一次晶粒生长的硫化锰（或别的）阻止剂颗粒能够很好的扩散。第二，钢及其表面和近表面层的晶粒结构和组织必须提供适于二次晶粒生长的条件。近表面层是指钢表面缺碳的那个具有单相或同晶型铁素体微观结构的区域。这个区域在本领域中称为表面脱碳层，或者换一种说法，就是同晶型表面层和多晶型（铁素体和奥氏体或其分解物的混合相）内层，如断带等之间的边界区域。同晶型层的作用在大量的文献中已有报道：在经最后退火的晶粒取向电工钢中，最有可能使晶粒急剧生长并提供边缘立方体晶粒取向的边缘立方体二次晶粒核，就是位于同晶型层之中，或换种说法，位于同晶型表面层与多晶型内断层之间的边界附近。具有足够的有利条件引发二次晶粒生长的边缘立方体核，可使一次晶粒中取向不太好的基体消失。

普通晶粒取向电工钢一般是经过一次或几次冷轧制造出来的，以达到所要求的磁性能。经过两级冷轧制造普通晶粒取向电工钢的一个有代表性的方法已在美国专利 5,061,326 中作了说明，该专利已被本发明用作参考。美国专利 5,061,326 指出，多加硅能降低晶粒取向电工钢的铁芯损耗。这类添加物将使钢的物理特性变坏并给加工带来较大的困难，这主要是由于材料的脆性增加而造成的。

人们也希望通过增加钢的体电阻率而采用单次冷轧来制造铁芯损耗小的晶粒取向电工钢。被本发明用作参考的美国专利 5,421,911 指出，铬可能是用单次冷轧制造定向电工钢的一种有用的添加物，只要其它的加工处理要求得到满足，这些要求包括：未化合的锰和锡的含量不大于 0.030%，原始钢板要经退火，退火后冷轧前的碳含量不低于 0.025%，奥氏体体积含量（ γ 1150℃）超过 7%，以及采用含硫的退火隔离层。

因此，人们很早就希望对合金的成分和处理过程加以控制，以提供晶粒生长阻止剂及适当的微观结构和组织，因为它们对于生产具有均匀和一致性好的磁特性的晶粒取向电工钢是至关重要的。人们也早就希望，除硅外或代替硅，增加更多的铬来生产具有高度边缘立方体取向和高体电阻率的晶粒取向电工钢。另外，也很希望能提供具有稳定的二次晶粒生长的晶粒取向电工钢。

本发明的主要目标是提供一种晶粒取向电工钢，其成分包含硅、铬和适当的阻止剂。这种钢至少通过两次冷轧加工，且制成品的磁性能有所改善。

本发明的另一个目标是提供一种含有硅、铬和适当阻止剂的晶粒取向电工钢，为获得均匀和一致性好的磁性能至少需经两次冷轧。

5 本发明的另一个目标是提供一种含有硅和铬及适当阻止剂的晶粒取向电工钢，至少经过两次冷轧，且具有很高程度的边缘立方体取向和高体电阻率，在晶粒取向电工钢中，除硅之外或代替硅，添加了大量的铬。

10 本发明的另一个目标是提供一种含有硅和铬及适当阻止剂的晶粒取向电工钢，至少经过两次冷轧，且具有产生均匀和一致性好的磁性能的晶粒取向电工钢所必须的微观结构和组织。

本发明提供了一种具有优良机械和磁性能的晶粒取向电工钢的制造方法，其特征在于在 796A/m 下测得的磁导率达 1780。所用热加工钢板的成分主要包含 2.5%~4.5%的硅，0.1~1.2%的铬，低于 0.050%的碳，低于 0.005%的铝，最高至 0.1%的硫，最高至 0.14%的硒，0.01%至 1%的锰，其余为铁和残留元素。
15 这里的百分数是按重量来计算的。钢板的体电阻率至少为 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，含碳量至少为 0.010%，因此奥氏体的体积含量在热加工钢板中 (γ 1150℃) 至少为 2.5%。此外，钢板的每一面都有同晶型层，其厚度至少为热加工钢板总厚度的 10%。钢板首先冷轧至某个中间厚度，经过退火再冷轧至最终厚度并脱碳，以使钢板的磁性能不会老化。经过脱碳处理后的钢板至少在一面涂上退火隔离层
20 并经最后退火以产生二次晶粒生长。这种电工钢在 796A/m 下测得的磁导率至少为 1780。

本发明的另一个特点是，上述一面的同晶层的厚度等于热加工钢板总厚度的 15~40%。

25 本发明的另一个特点是，上述钢板在冷轧至中间厚度之前要在 750~1150℃的温度下退火，然后缓慢地冷却至 650℃以下。

本发明的另一种特点是，上述在冷轧至最终厚度之前经退火的钢板含有至少 0.010%的碳。

本发明的另一个特点是，上述在冷轧至最终厚度之前经退火的钢板中碳的含量不大于 0.03%。

30 本发明的另一个特点是，上述钢板的铬含量为 0.2~0.6%。

本发明的另一个特点是，上述钢板在冷轧至最终厚度之前的退火温度至少为 800℃。

本发明的另一个特点是，上述钢板是在至少 1100℃ 的温度下作最后退火处理。

本发明的另一个特点是，上述热加工钢板的厚度为 1.7~3.0mm。

本发明的优点包括，这种铬硅晶粒取向电工钢具有很高的体电阻率，而且
5 与以前的高硅晶粒取向电工钢相比，其物理性能和可加工性都不差。另一优点是能生产出体电阻率约为 $50\mu\Omega\text{-cm}$ 的电工钢。第三个优点是，这种电工钢的机械性能有所改善，因而具有极好的韧性，且在加工过程中钢板不容易破裂。第四个优点是，这种电工钢含有硅、锰、硫和/或硒，因此在热处理前重新加热的过程中，使硫化物或硒化物容易溶解。

10 本发明的上述及其它目标、特点和优点，在看了下面的详细说明和附图后，将会更加明确。

图 1 的曲线比较了两种原始热加工钢板的冲击韧性及延展性—脆性转变特性，一种是现有技术的硅合金晶粒取向电工钢，另一种就是本发明的硅铬合金晶粒取向电工钢，其体电阻率约为 $50\sim 51\mu\Omega\text{-cm}$ 。

15 图 2 比较了上述两种电工钢中间晶层厚度对磁导率的影响，一种是现有技术的硅合金晶粒取向电工钢，另一种是本发明的硅铬合金晶粒取向电工钢，图中的层厚度是冷轧至中间厚度之前在热加工退火钢板上测量的，而磁导率是在 796A/m 下测量的。

本发明提供了一种生产具有优异机械和磁性能的晶粒取向电工钢的方法。
20 生产中采用厚度为 1.5 至 4.0mm 的热加工钢板，其成分主要包含 2.5~4.5% 的硅，0.1~1.2% 的铬，低于 0.050% 的碳，低于 0.005% 的铝，最高至 0.1% 的硫，最高至 0.14% 的硒，0.01~1% 的锰，其余主要是铁和残留元素。本专利申请中所有关于合金成分的百分数（%）除特别说明外，都是指重量百分数（wt.%）。热加工钢板的体电阻率至少为 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，含碳量至少为 0.01%，因此在冷轧之前其奥氏体的体积含量（ γ 1150℃）至少为 2.5%，且每一面都有一层同晶体，其厚度至少为热加工钢板总厚度的 10%。首先将热加工钢板冷轧至某个中间厚度，经过退火，再冷轧至最终厚度，钢板的最终厚度优选为 0.15~0.50mm，并经脱碳处理使碳的含量低于 0.003%。经脱碳处理的钢板至少在一面涂有退火隔离层，并经最后退火产生二次晶粒生长。这种电工钢在 796A/m 下测得的磁
25 导率为 1780。钢板经脱碳后碳的含量低于 0.003%，因此钢板经最后退火后磁性能不会老化。本发明的铬硅晶粒取向电工钢具有高的体电阻率，二次晶粒生长很稳定，磁性能优越，机械性能特征得到改善，因此韧性非常好，且在加工
30

过程中钢板不容易破裂。

本发明中所用的原始钢为热加工钢板。所谓“热加工钢板”是指采用诸如钢锭铸造，厚板坯铸造，薄板坯铸造，板料铸造或其它小型钢板生产方法制造的很长的钢板，所用的熔料成分包含铁、硅、铬和适量的阻止剂。

5 晶粒取向电工钢按惯例是碳硅铁三元合金，而对其中的锰、硫、铬、氮和钛的成分加以限制，因为这些元素对生产出的材料的磁性能有影响。本发明的发现是研究碳、硅和铬对钢板微观结构特性影响的结果，这种微结构应该适合于制造铬硅普通晶粒取向电工钢。本发明提供了一种生产晶粒取向电工钢的方法，由于铝含量小于 0.005%且至少经过两次冷轧，这种钢具有高质量的边缘
10 立方体取向而且体电阻率超过 $45\mu\Omega\text{-cm}$ ，因此铁芯损耗低。方程（1）表示铁的各种添加物对合金体电阻率（ ρ ）的影响：

$$(1)\rho=13+6.25(\%\text{Mn})+10.52(\%\text{Si})+11.82(\%\text{Al})+6.5(\%\text{Cr})+14(\%\text{P})$$

式中 ρ 为合金的体电阻率，单位为 $\mu\Omega\text{-cm}$ ，Mn、Si、Al、Cr 和 P 分别为组成该晶粒取向电工钢的化学成分中锰、硅、铝、铬和磷的百分数。商业生产的
15 定向硅铁电工钢的体电阻率在 45 至 $51\mu\Omega\text{-cm}$ 的范围，含硅量为 2.95-3.45%，所含的其它杂质则与所用的熔化和炼钢方法有关。虽然长时间以来都希望材料的体电阻率比较高，但现有技术的制造方法一般是依靠增加合金中的硅含量来达到这一目的。正如本领域所指出的那样，增加硅含量一般都要求相应地增加碳的含量。众所周知，较高的含硅和含碳百分数将会降低电工钢的物理性能，
20 这主要是由于脆性的增加以及在脱碳退火阶段很难完全将碳除尽所致。人们认定，硅和碳含量的增加对急剧的二次晶粒生长所需的微观结构特性也是有害的。本发明的一个重要特点是，硅和碳的成分可以改变冷轧前钢板的表面同晶层的厚度。

在以前的采用两次或更多次冷轧来制造晶粒取向电工钢的方法中，人们发
25 现，铬不利于所希望的边缘立方体组织的形式。在本发明中，由于铬对奥氏体形成和加工过程中碳损耗的影响，它也会使同晶层减薄。我们发现，这种迄今为止尚未认识的变化对于二次晶粒生长的稳定性和力度有不利的影

响。二次晶粒生长不稳定是一直困扰着晶粒取向硅钢生产者的问题。这有多方面的原因，其中包括但不只限于晶粒生长阻止剂的质量，还包括原始钢板微观
30 结构的质量，或与特定制造方法有关的合金成分中其它元素的质量。例如，美国专利 5,421,911 中指出，采用单次冷轧加工时，不与硫化合的过量锰的百分数和/或奥氏体的含量对二次晶粒生长的稳定性影响很大。本发明的一个重要

特点是，二次晶粒生长的稳定性及所希望的边缘立方体组织的形成与冷轧之前表面同晶层的厚度和奥氏体含量有关。

本发明的优选成分是 2.9~3.8% 的硅，0.2~0.7% 的铬，0.015~0.030% 的碳，低于 0.005% 的铝，低于 0.010% 的氮，0.05~0.07% 的锰，0.02~0.030% 的硫，0.015~0.05% 的硒以及低于 0.06% 的锡。更优选的成分包含 3.1~3.5% 的硅。加入硅主要是为增加体电阻率以降低铁芯损耗。此外，硅能促进铁素体的形成和/或稳定性，而且它是影响奥氏体体积含量 (γ 1150℃) 的主要元素之一。虽然我们希望通过增加含硅量以改善磁性能，但还必须考虑这样做对维持所希望的相平衡和微观结构特征以及机械性能的影响。

本发明的晶粒取向电工钢含铬量可以在 0.10~1.2% 的范围，优选为 0.2~0.7%，最好是 0.3~0.5%，加入铬主要是为增加体电阻率从而降低铁芯损耗。当含铬量低于 1.2% 时，铬能促进奥氏体的生成和稳定性，并影响奥氏体的体积含量 (γ 1150℃)。更高的含铬量对脱碳不利。虽然希望增加含铬量以改善磁性能，但必须考虑到它对维持所希望的相平衡和微观结构特征的影响。

本发明的晶粒取向电工钢包含碳和/或铜、镍等添加物，这些成分可促进奥氏体的形成并且/或者使之稳定，用于维持加工过程中的相平衡。热加工钢板应有足够的碳含量才能用作原始钢板，也就是说，在冷轧之前，碳含量为 0.010~0.050%，优选地在 0.015~0.030%，最好是在 0.015~0.025%。我们不希望在就要冷轧至中间厚度之前的碳含量低于 0.010%，因为这时二次再结晶变得不稳定，而且产品的边缘立方体定向质量不高。含碳量高于 0.05% 也是不利的，因为这将使同晶层厚度变薄，从而减缓二次晶粒生长，导致低质量的边缘立方体取向，并增加最终的冷轧钢板中获得 0.003% 以下的碳以防止磁老化的困难。

在本发明以前的生产方法中，热加工钢板在冷轧至中间厚度之前一般是在 1025~1050℃ 的氧化环境中退火 15~30 秒钟，这样碳的损失量最高为 0.010%。在许多情况下，退火中碳的损失量对产生适当厚度的同晶层是个关键。但是，在冷轧至中间厚度之前的退火过程中损失过量的碳将产生不适当的相平衡和微观结构，因而必须提高热加工钢板的含碳量，以补偿以后的工序中碳的损失。对于本发明，在脱碳退火中需要除去的碳量大大减少了。

本发明的钢中含有 0.01~0.15% 的锰，优选地含 0.04~0.08%，最好是 0.05~0.07%。如果采用普通的钢熔炼和铸造方法，即用铸锭或连续浇铸的扁钢锭束制造本发明所要处理的原始钢板，则过量锰，即未化合成硫化锰或硒化锰

的锰的百分数低一些为好，以利于热轧前钢锭再加热过程中硫化锰的溶解。

在熔料中加入硫和硒是为了与锰化合生成硫化锰和/或硒化锰的沉淀物以阻止一次晶粒生长。如果只加硫，其含量为 0.006~0.06%，优选地为 0.020-0.030%。如果只加硒，含量为 0.010~0.14%，而且优选地为 0.015~0.05%。也

5 可以硫和硒同时加。

本发明的钢中溶于酸的铝含量维持在 0.005%以下，最好不超过 0.0015%，以产生稳定的二次晶料生长。虽然铝对控制钢熔料中溶解氧的量有帮助，但可溶铝的百分数必须维持在上限以下。

10 钢中还可能含有其它的元素，为锑、砷、铋、铜、钼、镍、磷等，其中有的是有意加入的，有的是作为残留元素，即炼钢过程中的杂质。这些元素可影响奥氏体体积含量 ($\gamma_{1150^{\circ}\text{C}}$) 及/或二次晶粒生长的稳定性。

我们发现，对本发明中硅、铬和适当的阻止剂以及依炼钢方法而异的其它元素的含量必须进行规定，以便在冷轧前原始钢板有不多的但是必需的奥氏体含量的同时，得到适当厚度的同晶层。下面的方程 (2) 是 Sadayori 等人发表的论文“低铁芯损耗晶粒取向硅钢片的研制”，Kawasaki Seitetsu Giho, Vol.21, no.3, pp.93-98, 1989 中一个方程的推广形式，用以计算在 1150℃ 的温度下，含有 3.0~3.6% 硅和 0.030~0.065% 碳的铁中奥氏体的体积含量 ($\gamma_{1150^{\circ}\text{C}}$)。方程 (2) 是根据我们的研究结果推广得到的计算 1150℃ 下奥氏体的体积分数的公式：

20 (2)

$$\gamma_{1150^{\circ}\text{C}} = 64.8 - 23(\% \text{Si}) + 5.06(\% \text{Cr} + \% \text{Ni} + \% \text{Cu}) + 694(\% \text{C}) + 347(\% \text{N})$$

虽然硅和碳是我们考虑的主要元素，但其它一些元素如铬、镍、铜、锡、磷等，不论是有意加入的或是作为炼钢过程中的杂质而存在的，也会影响奥氏体的含量，而且当这些元素的含量较高时，必须予以考虑。本发明中，同晶层厚度和奥氏体的体积含量与下列因素有关：原始热加工钢板的成分，将钢熔料转变成原始热加工钢板时碳含量的变化，热加工钢板的厚度 (t)，以及，如果钢板在冷轧成中间厚度之前退火的话，热加工钢板含碳量的变化。将熔料转变成原始热加工钢板中含碳量的变化为：

(3)

30
$$C_1 = \frac{0.231(\% C_{\text{melt}})}{t^2}$$

式中 C_{melt} 是钢熔料中碳的重量百分数, C_1 是钢熔料转变成热加工钢板时损失的碳的重量百分数, t 是热加工钢板的厚度, 单位为 mm。如果热加工钢板在冷轧至中间厚度之前经过退火, 还可能产生附加的碳损失, 其值为:

(4)

$$C_2 = \frac{1}{t^2} [0.413(\%C_{\text{melt}} - C_1) - 0.153(\%Cr)]$$

式中 C_2 是热加工钢板退火时损失的碳的重量百分数, $\%Cr$ 是合金中铬的重量百分数。假定碳的含量与热加工钢板的厚度 (t) 及铬的含量有关, 则本领域的技术人员显然必须对这些成分作仔细的选择。这就意味着在冷轧至中间厚度之前钢板的含碳量必须足以提供所需的奥氏体百分数, 后者对于稳定而一致的二次晶粒生长是必须的。在冷轧之前的碳含量 (C_3) 可用方程 (5) 计算:

(5)

$$C_3 = \%C_{\text{melt}} - C_1 - C_2$$

综合以上述诸因素, 表面同晶层的厚度可用下式 (6) 计算:

(6)

$$I = \frac{1}{t^2} [5.38 - 4.47 \times 10^{-2} \gamma_{1150^\circ\text{C}} + 1.19(\%Si)]$$

式中 I 是计算的同晶层厚度单位为 mm, $\gamma_{1150^\circ\text{C}}$ 是计算的冷轧至中间厚度之前钢板中的奥氏体体积含量, $\%Si$ 是合金中硅的重量百分数。在冷轧至中间厚度之前热加工钢板每一面的同晶层厚度至少应为热加工钢板总厚度的 10%。优选地, 每一同晶层的厚度为 10—40%, 更优选地是 15—35%, 最好是在 20—25%。若热加工钢板厚度为 1.5-4.0mm, 则在冷轧至中间厚度之前热加工钢板每一面同晶层的最小厚度约为 0.15mm。

本发明的晶粒取向电工钢可能还有另外一些优点, 也可能需要对加工工艺进行一些调整。按本发明生产的晶粒取向电工钢片的体电阻率高, 韧性有所改善, 如图 1 所示, 在加工处理过程中对温度敏感性降低, 而且由于钢熔料的可铸造性较好使得铸锭、铸坯或偏锭铸造过程中凝固特性有所改善。

生产本发明的普通晶粒取向电工钢所用的热加工钢板可以用几种不同的方法来制造。将钢锭铸造或连续扁锭铸造生产的钢锭和扁锭重新加热至 1260°C — 1400°C , 然后进行热轧, 可以得到厚度 1.5-4.0mm 的原始热加工钢板。也可以将连续扁钢锭或由钢锭制成的扁钢锭经或不经高温加热直接送热轧; 或将钢锭热轧成温度足够高的扁钢锭, 然后经或不经进一步加热面热轧成钢板; 也可将

熔融的金属直接铸造成适于进一步加工的钢板。在某些情况下，设备的能力可能不足以提供本发明所需的适当的原始钢板厚度，但是，可以在钢板退火之前进行冷轧使其减薄 30% 或更小，或将钢板进行热轧而减薄最高至 50%，以获得适当的厚度。

- 5 当设备和条件许可时，原始热加工钢板优选地在 750°C—1150°C 退火至 10 分钟，更优选地是在 1100°C 下退火 10—30 秒钟，以获得第一次冷轧至中间厚度之前所需的微观结构。由于在退火过程中要损失碳，可能需要对熔料的成分作适当的调整，以在退火后维持所需的相平衡。在本发明中，碳在退火过程中的损失量受下列变化因素的影响：所含硅和铬的百分数发生变化，原始钢板的厚度变化及/或退火环境中的氧化势和退火的时间及温度发生变化。在本发明中，经过退火的钢板还要在周围空气中冷却。退火后的冷却过程要求不严格，我们相信，如果存在奥氏体分解反应，应当能生成碳饱和铁素体和/或珠光体。而且，高体积分含量的马氏体或残余奥氏体是不希望有的。除了空气冷却以外，也可将钢缓慢冷至 650°C 以下，如用周围空气冷却一样，最好是冷至 500°C 以下，然后快速冷却至 100°C 以下，就象进行水淬火那样。
- 10
- 15

- 在冷却至中间厚度之后，钢板在以后经每一个冷轧阶段之前要进行退火处理。例如，若钢冷轧三次，则在第一和第二次冷轧以及第二和第三次冷轧之间都要进行中间退火，其目的是为了对以后任何一次冷轧提供适宜的微观结构和组织。通常，这些中间退火是在下列条件下进行的：使得冷轧过的材料再结晶以使原来奥氏体中的碳分解成碳饱和铁素体。而中间退火之后的冷却过程是在有利于加速奥氏体分解的条件下进行的，以在含有少于 1% 体积分比的马氏体和/或残余奥氏体的铁素体基体中形成细碳化铁沉淀物的微观结构。因此，中间退火可以在 800—1150°C 之间较宽的温度范围内持续 3 秒至 10 分钟。优选地，中间退火在 900—1100°C 的范围内，更优选地在 915—950°C 进行 5—30 秒钟，并在有利于所希望的奥氏体分解反应的情况下进行冷却。中间退火之后，将钢板从均热温度，一般为 800°C，925°C 则更好，缓慢冷却至约 650°C，550°C 左右更好。所谓缓慢冷却，意思是冷却速度不大于 10°C/秒，最好不大于 5°C/秒。此后，将钢板急速冷却至约 315°C，并在这个温度进行水淬火以完成急速冷却。所谓急速冷却，意思是冷却速度大于 23°C/秒，优选地至少是 50°C/秒。
- 20
- 25

- 30 在本发明涉及的加工过程中，第一次冷轧至中间钢板厚度和第二次冷轧至最终钢板厚度的冷轧减薄量，取决于钢板的初始和最终厚度。只要采用的冷轧量合适，钢板的最终厚度范围可以很宽。本发明试用两次冷轧，得到了厚度

0.18-0.35mm 的普通晶粒取向电工钢。所需的减薄量可通过试验确定，其中磁性能，尤其是边缘立方体取向的质量，是由不同最终厚度的冷轧钢板决定的。采用厚度为 2.03-2.13mm 的热加工钢板，经第一冷轧至中间厚度 0.56mm，0.58mm,0.61mm,0.66mm 和 0.81mm。最后得到厚度分别为 0.18mm，

- 5 0.21mm,0.26mm,0.29mm 和 0.35mm 的标准产品厚度，它们都具有优良的磁性能。一般地，第一次冷轧的优选减薄量(%)可由 $\ln(a/b)>0.8$ 表示，最好是 >1.2 ，这儿 a 是热加工钢板厚度， b 是钢板的中间厚度。第二次冷轧的优选减薄量可表示为 $C^{1/2}\ln(b/c)=0.48$ ，式中 c 为钢板的最终厚度，所有厚度均以 mm 为单位。

- 钢冷轧至最终厚度后，要在中等氧化环境中经退火将含碳量降低以减少磁
10 老化，通常低于 0.003%。退火的温度优选地在 800℃以上，更优选地至少为 830℃，可以在含湿氢的环境，例如纯氢气或氢和氮的混合气中进行。另外，脱碳退火为在最后的高温退火中通过表面氧化层和氧化镁(MgO)退火隔离层的反应而生成镁橄榄石或“研磨玻璃”涂层作准备。本发明中硅和铬的含量应该适当，以保证在最后形成边缘立方体取向的高温退火之前，脱碳电工钢板的组织
15 完成是铁素体。

- 为了形成边缘立方体晶粒取向，需要进行最后的高温退火。通常在湿氢环境中将钢加热到 1100℃以上的均热温度。加热过程中(110)[001]核在约 850℃开始三次晶粒生长过程，并在 1100℃左右完成。本发明采用的典型退火条件如下：在 815℃以下加热速率低于 80℃/小时，以后降至小于 50℃/小时，最好
20 是 25℃/小时或更低些，直至二次晶粒生长完成。一旦二次晶粒生长完成，加热的速率就不再那么严格，可以增加些，直至达到所需的均热温度，其中将材料放置至少 5 小时，最好至少是 20 小时，以清除硫和/或硒阻止剂以及其它的杂质，如氮。

25 实施例 1

- 表 1 列出了本发明的一系列晶粒取向电工钢的化学成分。我们将这些钢的熔料连续不断地铸成 200mm 厚的板坯，重加热至约 1150℃后轧成 150mm 厚的板坯，再加热至约 1400℃并经热加工成适于进一步加工的厚为 2.03mm 的钢板。熔料成分除碳、硅和铬外，还含有铁和一般的残留元素，如 0.0005%或更
30 少的硼，0.16%或更少的钼，0.15%或更少的镍，0.10%以下或更少的磷，0.005%或更少的铝。本发明的热加工钢板的体电阻率(ρ)约为 $50\mu\Omega\text{-cm}$ ，奥氏体体积含量($\gamma_{1150^\circ\text{C}}$)在 10%以上，钢板每一面的同晶厚度(I)超过 0.30mm。

根据 ASTM E - 23 中“金属材料制成的有凹口棒的冲击试验的标准测试方法”所规定的程序,对热加工钢进行了冲击韧性以及在 23-230℃ 下延展性-脆性转变温度的温度敏感度的测试。表 I 中将这些创新的钢的性能与现有技术电工钢的性能作了比较。

5

表 I

晶粒取向电工钢成分一览表

ID	Si	C	Cr	Mn	S	Al	N	Sn	Mn	过量过量		P	%γ @CR1	%C @CR1	I	I/I ₁
										Mn+	0.46Sn					
现有技术 的合金	A	3.41	0.032	0.05	0.059	0.022	0.0004	0.0038	0.009	0.021	0.026	50.4	5.5%	0.026	0.33	16%
	B	3.42	0.032	0.05	0.061	0.022	0.0003	0.0040	0.008	0.023	0.027	50.3	5.4%	0.026	0.33	16%
	C	3.38	0.029	0.06	0.061	0.022	0.0002	0.0040	0.012	0.023	0.029	50.3	4.8%	0.024	0.35	17%
本发明 的合金	D	3.25	0.025	0.33	0.059	0.024	0.0006	0.0039	0.004	0.018	0.020	50.2	8.7%	0.024	0.34	17%
	E	3.16	0.025	0.34	0.058	0.025	0.0005	0.0035	0.006	0.015	0.018	49.4	10.5%	0.023	0.35	17%
	F	3.26	0.024	0.34	0.065	0.024	0.0006	0.0031	0.006	0.024	0.027	50.4	7.6%	0.022	0.36	18%
	G	3.25	0.024	0.34	0.060	0.024	0.0006	0.0031	0.004	0.018	0.020	50.0	8.6%	0.023	0.35	17%

10

从表 II 和图 1 综合的测试结果表明,新发明的电工钢比现有技术电工钢

具有更好的韧性和较低的延展性-脆性转变温度特性。

表 II

现有技术和本发明的晶粒取向电工

钢冲击能与温度的变化关系

测试温度 ℃	冲击能 (J/mm ²)					冲击能 (J/mm ²)				
	现有技术的钢					本发明的钢				
℃	A	B	C	Ave.		D	E	F	G	Ave.
24	0.068	0.062	0.043	0.058		0.130	0.061	0.142	0.082	0.104
38	0.084	0.074	0.074	0.078						
66	0.087	0.105	0.106	0.099		0.265	0.162	0.174	0.161	0.190
93	0.087	0.112	0.157	0.119						
121	0.368	0.292	0.272	0.311		0.522	0.294	0.585	0.352	0.438
149	0.931	0.387	0.656	0.658		0.698	0.578	0.604	0.500	0.595
204						0.867	0.671	0.782	0.751	0.768
232						1.006	0.855	0.933	0.894	0.922

20

实施例 2

我们将例 1 中由熔料 D 至 G 制造的钢板,以及成分如表 III 所示的现有技术熔料制造的钢板一起进行处理。

25

表 III

晶粒取向电工钢成分一览表

ID	Si	C	Cr	Mn	S	Al	N	Sn	Mn	过量过量		P	%γ @CR1	%C @CR1	I	I/I ₁
										Mn+	0.46Sn					
现有技术 合金	H	3.42	0.031	0.09	0.060	0.023	0.0008	0.0029	0.007	0.020	0.026	50.4	4.6%	0.025	0.34	17%
	I	3.39	0.031	0.13	0.058	0.023	0.0006	0.0037	0.006	0.020	0.022	50.3	6.3%	0.026	0.33	16%
	J	3.40	0.031	0.22	0.058	0.022	0.0008	0.0036	0.008	0.020	0.024	51.1	7.0%	0.027	0.31	15%
	K	3.43	0.031	0.26	0.059	0.023	0.0009	0.0039	0.008	0.020	0.024	51.8	7.0%	0.027	0.30	14%

30

对材料进行试验，其中由熔料 D 至 G 制造的热加工钢板在中等氧化环境中在 1065℃ 进行 5—15 秒钟的退火处理，而由熔料 H 至 K 制成的钢板则在 1010℃ 作类似的退火处理。经酸洗后将已退火的钢板冷轧至中间厚度 0.58-0.61mm，再在 920℃—950℃ 下进行 5—25 秒的中间退火，最后冷轧至最后厚度 0.18-0.21mm。冷轧完毕后，将钢板涂上氧化镁隔离层，在氢—氮环境中，在 860℃—870℃ 温度下，进行脱碳退火，并在 1200℃ 下在干氢中作 10 小时的最末退火，试验得到的磁性能列于表 IV。

表 IV

厚度为 0.18mm 和 0.21mm 的钢磁性能一览表

		0.18mm 厚的钢板性能			0.21mm 厚的钢板性能		
		铁芯损耗		磁导率	铁芯损耗		磁导率
		ID	ρ	1.5T 60 Hz (W/kg) at H=796 A/m	1.5T 60 Hz (W/kg)	at H=796 A/m	
15	本发明 的合金	D	50.2	0.82	1838	0.86	1846
		E	49.4	0.82	1842	0.87	1847
		F	50.4	0.81	1838	0.86	1841
		G	50.0	0.82	1837	0.87	1842
20	现有技术 合金	H	50.4	---	---	0.87	1841
		I	50.3	---	---	0.88	1843
		J	51.1	---	---	0.88	1830
		K	51.8	---	---	0.92	1811

表 IV 所示在 796A/m 下测得的磁导率和在 1.5T 60Hz 下测得的铁芯损耗表明，由本发明的熔料 D 至 G 获得的磁性能与现有技术的熔料 H 获得的磁性能是较好的。但是，铬成分远高于 0.1% 的现有技术的熔料 I 至 K 的磁导率明显地低，铁芯损耗明显地高。而由本发明的方法制造的含铬量 0.33-0.34% 的熔料 E 至 G 可获得非常好的磁性能，这是因为其中碳、铬、硅及其它与炼钢方法有关的元素成分适当，达到了较好的平衡，所以磁导率高，铁芯损耗低而且始终不变。

实施例 3

取四种成分列于表 V 的熔料用本发明的方法进行试验。这些熔料包含约 3.25% 的硅，0.20-0.25% 的铬，其余为铁和一般的残留元素，如 0.0005% 或更少

的硼，0.06%或更少的钼，0.15%或更少的镍，0.020%以下或更少的磷，和 0.005%或更少的铝，两种方法都提供 50 至 $51\mu\Omega\text{-cm}$ 的体电阻率 (ρ)，5—6%的奥氏体体积含量 ($\gamma_{1150^\circ\text{C}}$)，和 0.34-0.36mm 的同晶层厚度 (I)。

表 V

晶粒取向电工钢成分一览表

过量过量 _{Mo}																
ID	Si	C	Cr	Mn	S	Al	N	Sn	Mn	0.46Sn	ρ	% γ	%C	I	I/I	
												@CR1	@CR1			
本发明	L	3.35	0.027	0.21	0.059	0.023	0.0009	0.0040	0.007	0.020	0.023	50.5	6.2%	0.024	0.34	17%
	M	3.35	0.026	0.21	0.061	0.023	0.0009	0.0036	0.006	0.025	0.028	50.5	4.9%	0.023	0.36	18%
	N	3.38	0.026	0.25	0.060	0.024	0.0007	0.0036	0.007	0.019	0.022	51.0	5.2%	0.023	0.34	17%
	O	3.35	0.025	0.25	0.059	0.022	0.0007	0.0038	0.005	0.021	0.023	50.7	5.6%	0.023	0.35	17%

由熔料 L 至 O 制造的原始钢板按例 2 的程序加工成 0.21mm 的最终厚度。试验所得到的磁性能列于表 VI。

表 VI

0.21mm 厚钢板的磁性能一览

0.21mm 厚钢板的磁性能				
ID		铁芯损耗		磁导率
		ρ	1.5T 60 Hz (W/kg)	at H=796 A/m
本发明合金	L	50.2	0.86	1846
	M	49.4	0.87	1847
	N	50.4	0.86	1841
	O	50.0	0.87	1842

本发明中碳、硅和铬的成分适当，因而可提供二次晶粒急剧生长和优异磁性能所需的特性。

实施例 4

表 VII 所示为现有技术的本发明中两种含碳量很低的熔料。本发明的熔料包含 3.15%的硅和 0.3%的铬，其余为铁和一般的残留元素，例如 0.0005%或更少的硼，0.06%或更少的钼，0.15%或更少的镍，0.020%以下或更少的磷，以及 0.005%或更少的铝。该熔料的体电阻率 (ρ) 约为 $50\mu\Omega\text{-cm}$ 。现有技术的熔料 P 的奥氏体体积含量 ($\gamma_{1150^\circ\text{C}}$) 小于 2%，而本发明的熔料 Q 的奥氏体体积含量则为 5.6%左右。

表 VII

晶粒取向电工钢成分一览表

	ID	Si	C	Cr	Mn	S	Al	N	Sn	过量	过量	ρ	% γ @CR1	%C @CR1	I	LI
										Mn	Mn+					
现有技术的合金	P	3.42	0.022	0.07	0.060	0.022	0.0007	0.0043	0.007	0.022	0.0253	50.4	< 2.0%	0.018	0.40	20%
	Q	3.17	0.018	0.32	0.051	0.024	0.0007	0.0040	0.007	0.010	0.0134	49.3	5.6%	0.016	0.41	20%

本发明的合金

5 除下面说明的事项以外，两种熔料都按例 2 的程序进行处理。熔料 Q 的中间厚度为 0.66mm，最终厚度为 0.26mm。两种熔料中的含碳量都比现有技术的典型含量低；但本发明的熔料 Q 中硅和铬的含量适合于二次晶粒的急剧生长。熔料 P 中奥氏体的百分数低，这对二次晶粒的稳定生长以形成高质量的边缘立方体取向是不利的。因此，熔料 P 是经过 0.8mm 的中间厚度而加工成不太严格的最终厚度 0.35mm。试验所得磁性能列于表 VIII。

表 VII

0.26mm 和 0.35mm 厚的钢板磁性能一览表

	ID	ρ	0.26mm 厚的性能		0.35mm 厚的性能	
			铁芯损耗	磁导率	铁芯损耗	磁导率
			1.7T 60Hz (W/kg)	at H=796 A/m	1.7T 60Hz (W/kg)	at H=796 A/m
15 现有技术	P	50.4	---	---	1.87	1810
本发明	Q	49.3	1.51	1838	---	---

表 VIII 表出的在 796A/m 下测得的磁导率和在 1.7T 60Hz 测得的铁芯损耗表明，本发明的熔料 Q 尽管含碳百分数低，磁性能却很优异；而现有技术制造的熔料 P 的磁性能仅仅勉强合格。由于用以前的方法制造的晶粒取向电工钢含碳量很低，这是在预料之中的。

实施例 5

我们对用现有技术制造的晶粒取向电工钢进行了使体电阻率增至 $53\mu\Omega\text{-cm}$ 以上的实验，方法是将其中的硅含量提高到 3.5% 以上。但是，为提供冷轧前要求的奥氏体含量所必需的碳的含量将使表面同晶层的厚度变薄，因而二次晶粒的生长较缓慢。表 IX 列出了这些现有技术熔料的化学成分和微观结构。现有技术制造的熔料 R 和 S 按例 2 的程序加工成 0.21mm 的最终厚度，所得磁性能较差而且不太一致。在 $H=796\text{A/m}$ 下测得的磁导率在 1799—1831 之间，在 1.5T 60Hz 下测出的铁芯损耗在 0.87-0.91W/kg 之间。在这些试验中，加工过程明显地增加了二次晶粒生长的不稳定性，这很可能是由于同晶层厚度很薄

造成的。另外，机械性能也变坏，反映在韧性差和延展性—脆性转变温度较高上。

表 IX
晶粒取向电工钢成分一览表

	ID	Si	C	Cr	Mn	S	Al	N	Sn	过量过量		ρ	$\frac{\%Y}{\%CR1}$	$\frac{\%C}{\%CR1}$	I	LI
										Mn	$\frac{Ma}{0.46Sn}$					
现有技术	R	3.74	0.040	0.05	0.055	0.024	0.0006	0.0038	0.009	0.014	0.0181	53.7	2.1%	0.032	0.25	13%
	S	3.65	0.039	0.07	0.064	0.022	0.0010	0.0028	0.010	0.026	0.0302	55.1	5.2%	0.032	0.24	12%
本发明	T	3.15	0.010	1.00	0.060	0.025	0.0010	0.0040	0.005	0.017	0.0195	53.5	5.0%	0.010	0.43	21%
	U	3.35	0.015	1.20	0.060	0.025	0.0010	0.0040	0.005	0.017	0.0195	56.9	5.0%	0.015	0.36	18%

我们相信，本发明的合金成分可提供电阻率高而且二次晶粒生长稳定的晶粒取向电工钢，因为其中的奥氏体体积含量和同晶层厚度都比较适当。另外，本发明的晶粒取向电工钢的物理性能也很优良。

以上对优选实施方案的讨论表明，采用本发明的铬硅合金并经过至少两次冷轧可以制造出低铁芯损耗的晶粒取向电工钢，其磁性能很好而且很一致，优于现有技术的硅铁合金。本发明也可采用由下列方法生产的钢板作为原始钢板：钢锭铸造，厚板坯铸造，薄板坯铸造，板料铸造，或其它小型钢板生产方法。

可以理解，在不背离本发明的思路和范围的条件下，我们可以对本发明作各种各样的修改。因此，本发明的范围可以从下面列出的权利要求确定。

说明书附图

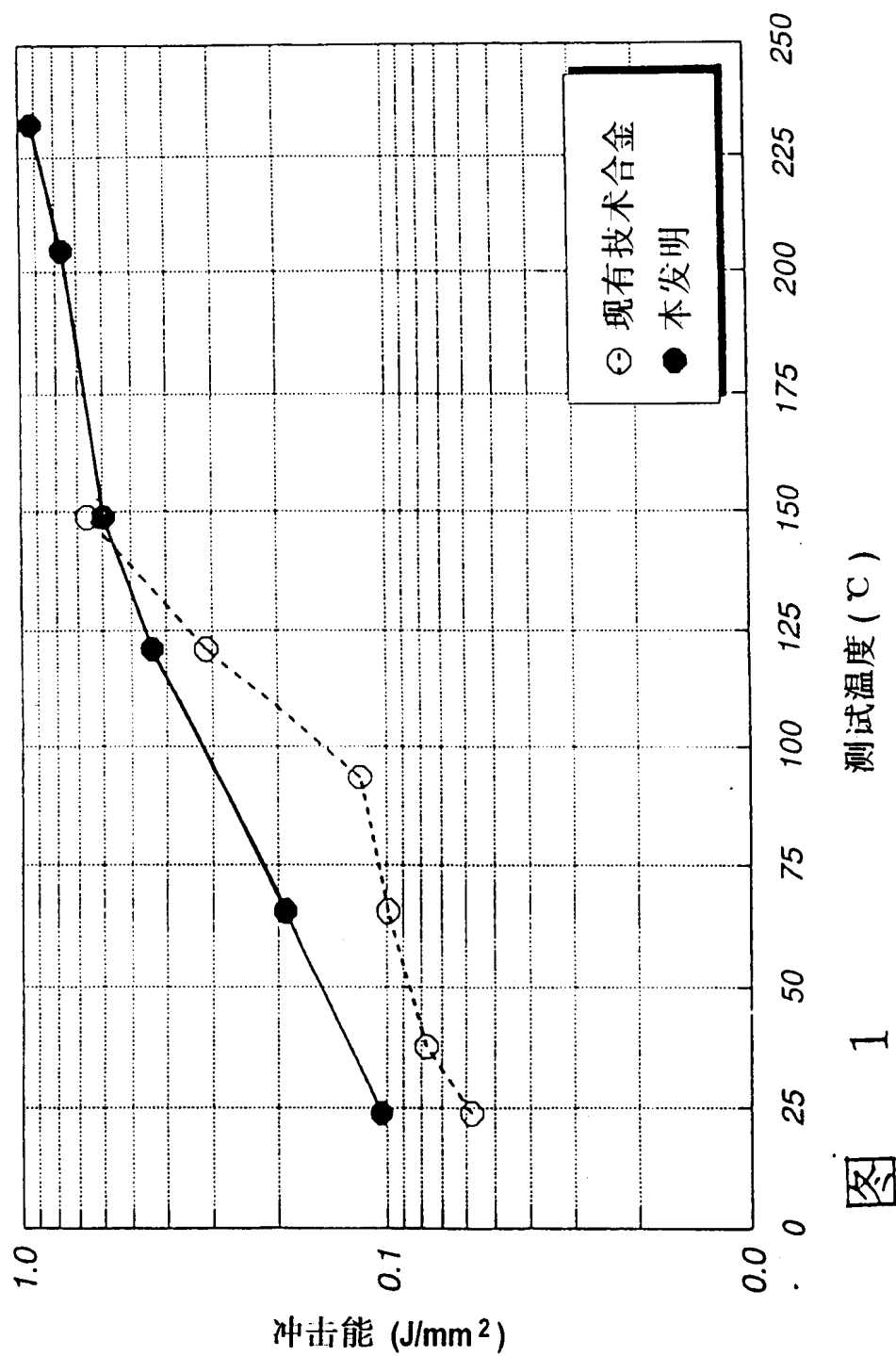


图 1

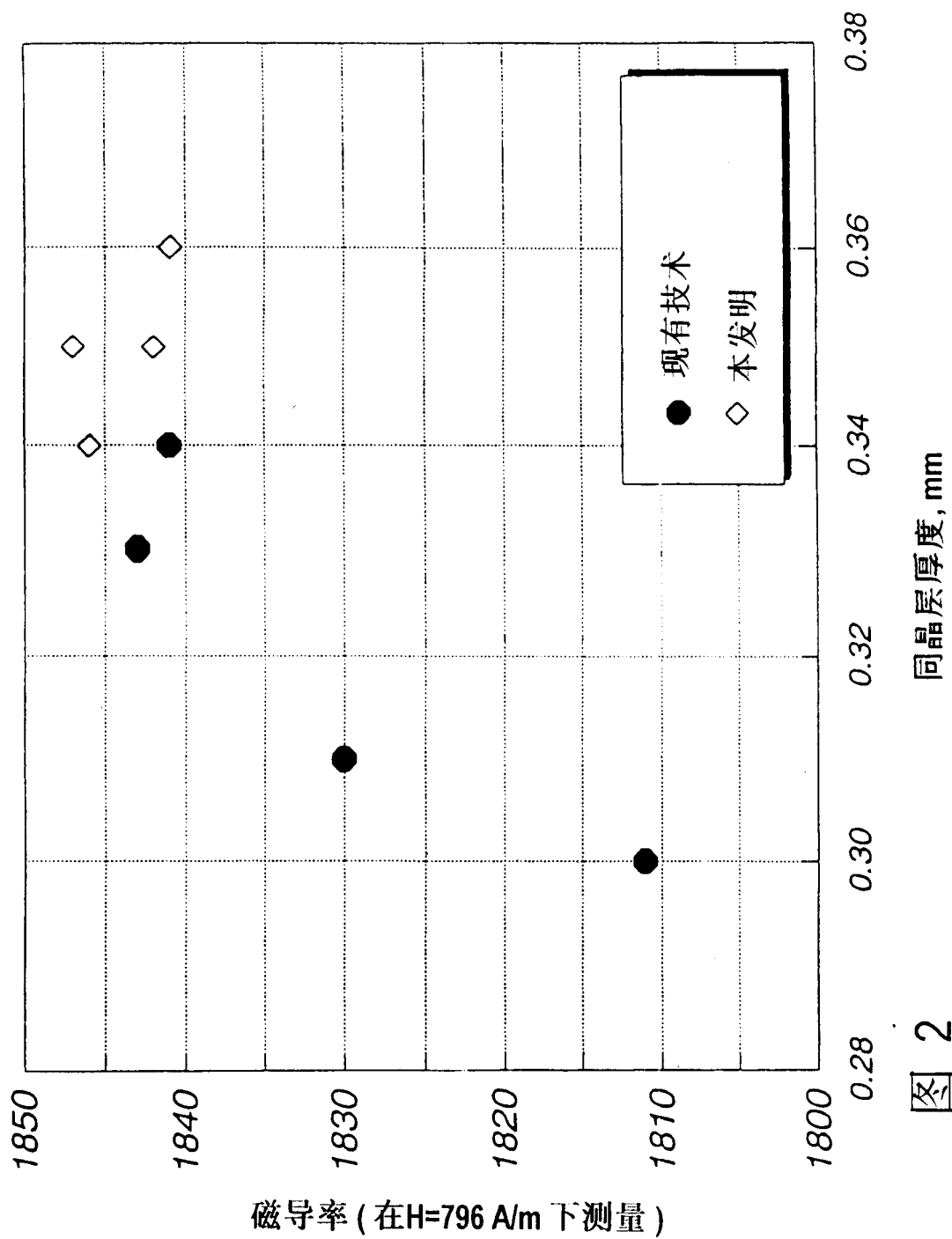


图 2