

变压器铁心制造工艺探讨研究

金 康 李宏赫

天津珠峰硅钢股份有限公司 天津 301700

摘要：变压器铁心作为变压器的核心部件，其制造工艺至关重要。材料选择、制造过程、工艺优化及质量控制均对变压器性能产生决定性影响。本研究深入探讨变压器铁心的制造工艺，从材料选择、制造流程、优化措施及质量控制等方面进行详细分析，旨在提高铁心的生产效率、降低成本并提升产品质量。通过优化制造工艺，可确保变压器的高效稳定运行，满足电力系统的需求，推动变压器行业的可持续发展。

关键词：变压器；铁心制造；工艺优化

引言：变压器铁心作为电力传输与转换的关键组件，其制造工艺的优劣直接关系到变压器的性能、效率及使用寿命。随着电力工业的快速发展，对变压器铁心的制造要求日益提高。本研究旨在深入探讨变压器铁心的制造工艺，分析材料选择、加工流程、质量控制等关键环节，以期提出有效的优化措施，提升铁心制造水平，满足现代电力系统对高效、稳定变压器的迫切需求。

1 变压器铁心制造的材料选择

1.1 材料的重要性

在变压器铁心的制造过程中，材料的选择是至关重要的一步。铁心作为变压器的核心部件，不仅提供了磁通路径，还直接影响到变压器的效率、噪音、体积和重量。因此，材料的品质直接决定了铁心的性能，进而影响变压器的整体表现。选择适合的材料，可以在保证变压器性能的同时，降低制造成本，提高生产效率。

1.2 常用材料

(1) 硅钢片：硅钢片是制造变压器铁心的传统材料。它以其低磁导率、低矫顽力的特性而著称，这些特性使得硅钢片在变压器中能够有效地减少磁阻，提高磁通量，从而提高变压器的效率。此外，硅钢片还具有良好的加工性能和较低的价格，使其成为制造变压器铁心的理想选择。特别是在频率低于50Hz的变压器中，硅钢片在低磁通密度下具有较高的电阻率和低的涡流损耗。

(2) 非晶合金：非晶合金是一种新型的变压器铁心材料。与硅钢片相比，非晶合金具有更低的涡流损耗和磁滞损耗，这使得它在变压器中的应用能够显著降低铁损（空载损耗），提高电力转换效率。非晶合金的磁化和消磁过程比传统磁性材料更容易，因此在使用中能够表现出更优异的性能。然而，非晶合金的制造成本较高，且加工难度也相对较大，这在一定程度上限制了其广泛应用^[1]。

1.3 材料选择标准

(1) 磁导率、饱和磁感应强度、磁滞损耗、涡流损耗等参数：这些参数直接影响变压器的效率和性能。磁导率越高，变压器的效率越高；饱和磁感应强度越高，变压器能够存储的能量越大；磁滞损耗和涡流损耗越低，变压器的铁损越小，效率越高。(2) 材料表面质量、厚度均匀性要求：材料的表面质量和厚度均匀性对于变压器的性能和稳定性至关重要。表面质量好的材料能够减少磁通的不均匀分布，从而降低磁致伸缩引起的振动和噪音；厚度均匀的材料则能够保证铁心的整体性能和稳定性。

2 变压器铁心的制造过程

2.1 材料准备

变压器铁心的核心材料是硅钢片，也称电工钢片。硅钢片因其高磁导率、低磁滞损耗和优异的机械性能而成为理想选择。在材料准备阶段，硅钢片需经过一系列特殊处理，以提升其磁性能和加工性能。(1) 退火处理：硅钢片在出厂前通常已进行初次退火，以消除材料内部的应力，提高其磁导率。但在制造过程中，根据具体需求，可能还需进行二次退火，以确保铁心达到最佳磁性能。(2) 表面绝缘处理：为防止铁心在运行时产生涡流损耗，硅钢片表面需涂覆一层薄薄的绝缘层，如无机氧化物或有机涂层。这层绝缘层不仅隔离了相邻的硅钢片，减少了涡流损耗，还增强了铁心的绝缘性能^[2]。

2.2 模具设计与制造

根据变压器的设计规格与铁心的形状要求，需设计并制造高精度的模具。模具的精度直接影响到硅钢片的裁剪精度与铁心的堆叠质量。(1) 模具设计：利用CAD（计算机辅助设计）软件进行模具的三维建模，确保模具尺寸、形状与铁心设计要求完全吻合。同时，需考虑模具的强度、耐磨性以及易于维护等因素。(2) 模具

制造：模具的制造通常采用数控铣削、磨削等高精度加工技术。制造过程中，需严格控制加工精度与表面光洁度，以确保模具的精度与耐用性。

2.3 裁剪与堆叠

裁剪与堆叠是铁心制造过程中的关键步骤，直接关系到铁心的质量与性能。（1）硅钢片裁剪：使用高精度裁剪设备对硅钢片进行裁剪，确保裁剪后的硅钢片形状、尺寸与设计要求的精度一致。裁剪过程中，需严格控制裁剪误差与边缘质量，避免对铁心的性能造成负面影响。

（2）堆叠：将裁剪好的硅钢片按设计要求进行堆叠，形成铁心的主体结构。堆叠过程中，需确保各层硅钢片之间的紧密配合与均匀分布，以消除气隙，提升铁心的磁性能。堆叠方式可包括单向堆叠、交错堆叠等，具体取决于变压器的设计需求。

2.4 非晶铁心制造

非晶铁心制造工艺独特，对变压器性能影响重大。制造起始于非晶合金带材的生产。采用快速凝固技术，将熔化的合金以极高速度冷却，使原子来不及规则排列，形成非晶态结构，具备优异软磁性能。接着是铁心的成型工序。通常将薄带状的非晶合金材料，按照一定的形状和尺寸，通过卷绕或叠片的方式，制作成铁心的基本轮廓。卷绕工艺能保证带材连续性，减少磁路中的气隙，提升磁导率。但此时的铁心性能尚未稳定，还需进行退火处理。退火温度、时间和冷却速率都需精准控制。合适的退火能消除内部应力，优化磁畴结构，显著提升磁性能。例如，在特定温度下保持一定时间，使原子趋向有序排列，降低磁滞损耗。

2.5 表面处理

表面处理是提升变压器铁心耐腐蚀性与外观质量的重要环节。（1）防腐处理：通过喷涂或电镀的方式，在铁心表面形成一层防腐涂层或金属镀层，以提高其耐腐蚀性能。常用的防腐涂层包括环氧树脂、聚氨酯等有机高分子材料，而金属镀层则包括锌、铬、镍等金属元素。这些防腐处理措施能有效保护铁心免受环境腐蚀的侵害，延长其使用寿命。（2）外观美化：除了防腐性能外，表面处理还能提升铁心的外观质量。通过选择合适的涂层颜色与纹理，可以使铁心更加美观大方，符合不同用户的审美需求。同时，良好的外观质量也能反映出制造商对产品质量的重视与追求。

3 变压器铁心制造工艺的优化

3.1 材料选择与质量把控

在变压器铁心制造工艺的优化中，材料选择与质量把控处于基础且关键的地位。不同类型的变压器对铁心

材料性能要求各异。例如，电力变压器需长期稳定运行，应选用磁导率高、损耗低的硅钢片，以降低电能损耗，提高能源利用效率。而在高频变压器领域，非晶合金材料凭借其优异的高频磁性能成为首选，能有效减少涡流损耗，提升变压器在高频环境下的性能。除考虑材料类型，材料的具体参数也至关重要。对于硅钢片，其厚度、铁损值、磁感强度等参数直接影响变压器性能。较薄的硅钢片虽能降低涡流损耗，但可能增加加工难度与成本，需权衡利弊。在非晶合金材料方面，成分比例的微小差异会显著改变其磁性能，必须严格按照设计要求选择。材料质量把控同样不容忽视。从原材料采购环节开始，就要选择信誉良好、生产工艺成熟的供应商。对每一批次材料进行严格检验，不仅要检测其磁性能、物理性能等关键指标，还要检查外观质量，如硅钢片表面是否有划痕、锈斑，非晶带材是否存在破损、褶皱等。只有确保每一份材料都符合质量标准，才能为后续制造出高性能的变压器铁心奠定坚实基础。

3.2 优化措施

（1）引入先进的生产设备和自动化技术。在变压器铁心制造中，引入先进的生产设备和自动化技术是实现工艺优化的关键。通过采用激光切割、数控冲床、自动化堆叠机器人等高精度、高效率的生产设备，可以大幅提升裁剪与堆叠的精度与效率，减少人为因素导致的误差。同时，利用物联网、大数据、人工智能等先进技术，实现生产过程的智能化监控与管理，实现生产数据的实时采集与分析，为生产决策提供科学依据，进一步提升生产效率与产品质量。（2）优化模具设计，提高精确度。模具是变压器铁心制造中的关键工具，其设计质量直接影响铁心的精度与性能。通过采用计算机辅助设计（CAD）与计算机辅助制造（CAM）技术，可以实现模具的精确设计与制造。通过优化模具结构，减少加工误差，提高铁心的尺寸精度与形状精度。同时，采用高精度加工设备，如五轴加工中心等，可以确保模具的精度与耐用性，满足高质量铁心的制造需求^[3]。（3）改进裁剪和堆叠工艺，减少浪费。裁剪与堆叠是变压器铁心制造中的两大关键环节，也是材料浪费的主要来源。通过引入智能裁剪系统，实现裁剪方案的优化与自动调整，可以显著降低边角料的产生，提高材料利用率。同时，采用先进的堆叠技术，如精密定位与压力控制技术，可以确保铁心的紧密堆叠与均匀分布，减少因堆叠不当导致的铁损与噪音。这些改进措施不仅减少了材料浪费，还提升了铁心的整体性能。

3.3 加工工艺改进

加工工艺改进是提升变压器铁心制造质量与性能的关键环节,对变压器整体效能影响深远。在冲剪工艺上,传统冲剪易使硅钢片边缘产生毛刺、变形,增加磁滞损耗与涡流损耗。改进后的数控冲剪技术,能精准控制冲剪尺寸与形状,有效降低毛刺高度,提升冲片精度。例如,采用高精度模具与先进的数控系统,可将冲片尺寸公差控制在极小范围内,大幅减少因尺寸偏差导致的铁心装配问题。对于非晶铁心的卷绕工艺,优化要点在于保证带材卷绕的张力均匀与紧密程度^[4]。通过引入先进的张力控制系统,实时监测并调整卷绕张力,避免因张力不均造成带材松散或内部应力集中,影响磁性。同时,优化卷绕速度与角度,确保带材以最佳状态卷绕成型,减少气隙,提高磁导率。在铁心叠装工艺方面,改进重点是提高叠片的整齐度与紧密性。采用自动化叠片设备,配合高精度定位系统,能够精确控制每一片硅钢片或非晶带材的位置,使叠片间隙均匀,降低磁阻。

4 变压器铁心的质量控制

4.1 质量控制的重要性

铁心作为变压器的主要构成部分,其质量对变压器的性能具有决定性的影响。一方面,铁心的磁性能决定了变压器的电磁转换效率与损耗。高质量的铁心具有较低的磁滞损耗和涡流损耗,能够提升变压器的能效比,降低电能损耗。另一方面,铁心的机械强度与稳定性直接关系到变压器的运行安全。若铁心质量不达标,可能导致变压器在运行过程中产生振动、噪音甚至损坏,影响电力系统的稳定运行。因此,加强变压器铁心的质量控制,对于提升变压器性能、保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

4.2 质量控制措施

(1) 材料选择阶段确保材料符合标准和要求。铁心的材料选择是质量控制的首要环节。应优先选择质量稳定、性能优良的硅钢片作为铁心的制造材料。硅钢片应具有较低的磁滞损耗和涡流损耗,以确保铁心的高效运行。同时,硅钢片的厚度、硬度、导电性等性能指标均需满足相关标准和要求。在材料采购过程中,应加强对供应商的审核与评估,确保所采购的材料质量可靠、来源合法。此外,还应建立材料检验与追溯机制,对每批

材料进行严格的质量检测,确保材料质量符合设计要求。(2) 严格控制加工工艺,保证尺寸精度和表面光洁度。加工工艺是影响铁心质量的关键因素之一。在铁心的制造过程中,应严格控制各道工序的加工精度与表面光洁度。通过采用先进的加工设备与工艺,如数控冲床、激光切割、精密磨削等,实现对铁心尺寸与形状的精确控制。同时,加强对加工过程的监控与调整,确保加工质量稳定可靠。此外,还应注重铁心的表面处理,如采用喷涂、电镀等工艺,提高铁心的防腐性能与表面光洁度,延长使用寿命。(3) 磁通密度测试、绝缘电阻测试、铁心平直度测试等检测手段。为确保铁心的质量,还需采用多种检测手段对其进行全面检测。磁通密度测试可以评估铁心的磁性能,确保其在额定磁通密度下能够稳定工作。绝缘电阻测试可以检测铁心与绕组之间的绝缘性能,防止因绝缘不良导致的短路与故障。铁心平直度测试则可以评估铁心的形状与尺寸精度,确保其在组装过程中能够紧密配合、稳定运行。这些检测手段不仅可以及时发现铁心制造过程中的质量问题,还可以为后续的质量改进提供数据支持。

结束语

综上所述,变压器铁心的制造工艺是一个复杂而精细的过程,涉及材料选择、加工技术、质量控制等多个环节。通过深入研究与实践,我们不断优化制造工艺,提升铁心的性能与稳定性。未来,随着电力行业的发展和技术进步,变压器铁心的制造工艺将继续创新,以更高效、环保的方式满足电力系统的需求。本研究旨在为后续研究与实践提供有益参考,共同推动变压器技术的持续进步与发展。

参考文献

- [1] 贾殿朋. 浅议变压器铁心制造工艺[J]. 科技致富向导, 2019, (07): 69-70.
- [2] 熊雪松, 王耀强, 陈伟, 等. 变压器铁心工艺系数波动的原因分析[J]. 变压器, 2021, (09): 102-103.
- [3] 陈卓, 孙竹. 节能配电变压器铁心制造技术及选材分析[J]. 电工钢, 2020, (02): 12-13.
- [4] 吴连云. 变压器铁心制造工艺探讨研究[J]. 装备维修技术, 2019, (05): 47-48.