

# 电机定子铁芯叠压工艺对铁损的影响分析

孔维刚

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550008

**【摘要】**：定子铁芯叠压质量直接影响磁路连续性、片间绝缘及局部涡流分布，是决定电机铁损水平的关键环节。文章分析了叠压工艺对铁损的作用机制，重点讨论材料边缘状态、片间绝缘、压紧系数、叠压偏差及退火后组织变化对磁滞损耗与涡流损耗的耦合影响。研究表明，铁损变化并非由单一参数决定，而是片材性能、加工扰动和装配应力共同作用的结果。基于此，提出通过叠片质量控制、压装一致性、铁损试验校核及工艺反馈修正等手段构建降损路径，以提升铁芯制造稳定性和整机效率。在高效及高频电机中，叠压工艺稳定性尤为重要，其影响通常通过整机空载性能体现。批次稳定性因此成为评价工艺优劣的重要尺度，有助于工艺成熟度量化、分层评估及持续跟踪，并为批量产品一致性评估、工艺验收和现场核验提供参考。

**【关键词】**：电机定子；铁芯叠压；铁损；片间绝缘；工艺控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.017

## 引言

电机铁损不仅受材料牌号和工作频率影响，制造过程中的叠压质量同样会显著改变实际损耗水平。理论上具备较低铁损指标的硅钢片或非晶材料，一旦在冲片、叠装和压紧过程中出现片间短路、边缘毛刺、叠压偏斜或应力集中，其实际运行损耗就可能明显高于材料样本值。定子铁芯叠压工艺因此并不是单纯的装配工序，而是将材料性能转化为电机效率表现的关键中间环节。研究叠压工艺对铁损的影响，核心就在于厘清“哪些工艺动作改变了磁路与损耗分布、这些改变如何被检测和纠正”。这也是为什么许多整机效率问题最终都可以回溯到铁芯制造一致性不足。因此，叠压工艺分析本身就是效率制造分析的重要组成部分。制造一致性因此成为铁损控制无法绕开的主题。工艺一致性因而具有基础性意义。对制造企业而言，这种差异最终会直接反映到批次效率表现上。

## 1 定子铁芯铁损形成与叠压工艺关联基础

### 1.1 磁滞损耗与涡流损耗共同决定铁损底座

电机定子铁损主要由磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗与材料磁化反转特性、应力状态和磁畴运动阻力密切相关，涡流损耗则高度依赖片材厚度、片间绝缘和局部导电回路形成条件。叠压工艺看似发生在材料成形之后，实则会重新塑造这两类损耗的发生边界：冲片后的边缘硬化与微裂纹会提高局部磁化阻力，片间绝缘受损又会为涡流闭合提供通道。非晶电机定子铁芯的制备工艺及最新研究进展指出，高性能软磁材料对加工扰动极其敏感，材料优势只有在制造过程控制到位时才能转化为低损耗表现<sup>[1]</sup>。分析叠压工艺不能绕开损耗机理本身，而要从磁路连续性和电流回路形成条件两条线同步展开。如果制造环节把磁滞损耗和涡流损耗的放大条件同时触发，整机空载性能就会显著恶化。损耗机理理解越细，后续工艺控制点的设置就越有针对性。这也是材料样本值与整机实测值经常出现差距的原因。机理越清晰，控制越精准。

### 1.2 片间绝缘状态是叠压工艺影响铁损的核心接口

定子铁芯叠压后，每一片硅钢之间理论上应保持有效绝缘，以阻断大面积环流形成。叠压过程中若因毛刺过大、压力过高、夹杂物嵌入或搬运摩擦导致绝缘层被破坏，片间就会由面接触绝缘状态转向局部导通状态，从而显著抬升附加涡流损耗。片间绝缘失效的危险之处在于，它未必在外观上立即显现，却会在空载运行和升温过程中逐步放大。大型水轮发电机定子铁损试验技术研究表明，铁损试验本质上也是对铁芯片间绝缘和装配质量的综合检验<sup>[2]</sup>。从工艺视角看，绝缘状态并不是检验端的孤立指标，而是冲片、去毛刺、叠装、压紧和搬运全过程共同作用的结果。片间绝缘状态既是材料问题，也是制造过程问题，更是出厂性能问题。片间绝缘一旦退化，很多损耗问题会在运行后才集中显现出来。绝缘接口一旦失守，附加损耗增长通常会非常迅速。绝缘稳定性因此不容忽视。

### 1.3 装配应力改变了材料损耗特性转化方式

叠压工艺对铁损的影响还体现在装配应力重分布上。定子铁芯在压装、焊接、胀紧或紧固过程中形成的径向和轴向应力，会改变片材局部磁导率和磁滞回线形态，进而影响磁通分布与损耗密度。对于较薄片材和高频工况电机，这种影响更为显著，因为材料对加工应力的容忍度更低。异频电流激励下发电机定子铁芯损耗试验实测分析表明，不同频率条件下铁芯局部损耗与温升表现存在明显差异<sup>[3]</sup>。这说明叠压工艺带来的应力问题并不会均匀作用于整个铁芯，而会在高磁密、边角和局部短路位置率先积累。因此，工艺分析不能只看叠压后的外形尺寸是否合格，还要关注装配应力如何改变材料的实际损耗响应。装配应力若长期处于不可控状态，还会让同一牌号材料在不同批次中表现出明显差异。应力控制既服务于结构可靠性，也直接服务于低损耗目标。应力变化越复杂，局部损耗越容易提前抬升。应力管理同样如此。

## 2 叠压工艺中的关键过程对铁损的作用机制

### 2.1 冲片边缘质量决定局部附加损耗水平

冲片是定子铁芯叠压的前置工序，边缘毛刺、剪切硬化层和微裂纹都会对后续铁损产生持续影响。毛刺高度超限时，相邻片层在压紧后更容易形成局部金属桥接，导致片间导通；而剪切硬化层会削弱边缘区域的磁性能，使磁通在齿顶、齿根等高密度部位出现附加损耗。发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究表明，叠片局部结构差异会显著改变涡流损耗在铁芯截面上的分布形态<sup>[4]</sup>。冲片工序的模具间隙、刃口磨损和去毛刺质量，实质上决定了叠压工艺的损耗起点。若边缘质量控制失守，后续即使压装精度较高，也难以完全抵消前端引入的附加铁损。模具状态管理做得越细，后续叠压与压装环节承担的纠偏压力就越小。前端工序失衡越严重，后续检测越难以通过局部修正完全补回。所以冲片质量管理本身就是降损管理。前端失控往往代价最高。模具维护和冲片质量评估因此应保持常态化。

### 2.2 叠片错位与压紧系数波动破坏磁路均匀性

定子铁芯叠压要求片层在圆周和轴向上保持良好一致性，一旦出现错位、歪斜或压紧系数不均，磁路截面就会产生局部收缩与间隙变化。对磁通而言，这种几何不均匀会造成局部磁密升高，使部分区域先于整体进入高损耗状态；对机械结构而言，则会诱发局部松动与振动，进一步破坏片间绝缘。大型定子铁芯在分段叠压和套装过程中更容易暴露这一问题，因为工序多、累积误差长、压装力分布不均。叠压工艺分析因此应把压紧系数视作动态指标，而不是压装完成后的静态结果，需要在分段装配、整圆闭合和最终固化三个环节分别校核。对大尺寸铁芯而言，错位误差一旦累积，往往会同时带来磁路和机械两方面的不稳定。几何一致性维持得越好，磁路分布和整机振动表现通常也越稳定。误差累积一旦形成，后续往往难靠单点修整恢复。因此必须抑制累积误差。

### 2.3 焊接与紧固方式改变片层导通和应力分布

为保证定子铁芯整体稳定性，制造过程中常采用焊接、铆接、黏结或机械紧固等方式形成整体约束。不同约束方式对铁损的影响并不相同：焊接热输入可能破坏局部绝缘层并引入热影响区，铆接和机械紧固则可能造成局部应力集中，黏结工艺对片间均匀性较友好但对工艺洁净度要求更高。非晶合金高速永磁电机定子铁芯空载损耗分析计算研究表明，材料与结构配置变化会显著改变铁芯不同区域的损耗分布<sup>[5]</sup>。放到叠压工艺上，同样意味着紧固方式不能只看结构强度是否满足，还要关注其对局部导通、磁路畸变和后续温升的影响。工艺选择不当时，约束方式本身就可能成为附加铁损源。紧固方式的选择应同时服从结构稳定、绝缘保护和低损耗目标三项要求。约束方式选择本身就应纳入铁损控制评价之中。约束方式选择不当

时，还会放大后续温升问题。温升影响也要同步考虑。

## 3 叠压工艺影响铁损的典型表现与检测判断

### 3.1 空载电流与温升变化是最直接的外部表征

叠压质量变化最先反映到整机表现上，往往体现为空载电流偏高、空载损耗上升和局部温升异常。由于铁损增加会直接拉高无功吸收和发热水平，空载试验常成为判断叠压工艺优劣的第一道外部窗口。但仅凭总量变化仍不足以定位问题，因为空载异常既可能来自材料牌号偏差，也可能来自局部短路、压装应力或工艺污染。此时需要把空载电流、温升分布和铁损试验结果结合起来分析，特别关注端部、齿部和分段拼接区是否存在局部热点。对制造企业而言，若能将空载试验结果回溯到具体叠压批次和工装条件，就能显著提升问题追溯效率。把外部表征和工艺记录对应起来，才能避免只知道损耗升高却不知道问题出在哪里。把这些外部表征纳入批次分析，才能看见波动背后的工艺成因。只有把这些外部信号和工艺过程联动起来，诊断才更准确。外部表征不能孤立看待。

### 3.2 局部铁损集中常出现在齿部与拼接过渡区

铁损在定子铁芯中的分布并不均匀，齿顶、齿根、轭部转角以及分段拼接过渡区往往更容易成为损耗集中位置。这些区域磁通密度高、结构变化大、装配应力复杂，既容易受到毛刺和绝缘损伤影响，也更容易在叠压偏差存在时出现局部磁路突变。发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究表明，损耗并非均匀扩散，而是在几何与材料条件突变部位更早集中<sup>[6]</sup>。检测判断不能只停留在总体损耗值，还应结合红外测温、磁密分布分析和局部绝缘检查，识别高风险区域是否与叠压缺陷位置相对应。只有把分布特征识别清楚，后续工艺调整才有针对性。局部分布识别越准确，工艺整改就越不需要大面积返工和反复试错。高风险区域识别清楚后，局部复检和工艺抽查才有明确抓手。损耗集中区识别越早，返修和调整成本越低。区域识别越早越有利。

### 3.3 铁损试验结果需要回到工艺过程重新解释

铁损试验的意义不只是判定合格与否，更重要的是把试验结果重新解释回工艺过程。若试验中出现整体损耗偏高但温升分布均匀，问题更可能与材料状态、应力水平或压紧系数有关；若表现为局部温升尖峰，则更应怀疑片间短路、毛刺桥接或拼装错位。大型水轮发电机定子铁损试验技术研究说明，试验方法、接线组织和温升判断本身也会影响问题识别精度。企业在使用铁损试验结果时，不能仅将其作为出厂检验结论，而应建立试验数据与工艺记录的双向映射机制，明确每一种异常特征最可能对应哪些工序失衡，从而把检测真正转化为工艺修正依据。只有完成这种回溯解释，铁损试验结果才会真正转化为工艺优化抓手。如果不能回到工艺过程重新解释，检测价值就会被显著削弱。这正是检测结果服务工艺改进的核心意义。检测

与工艺必须连起来。否则检测结果很难形成持续改进价值。

## 4 降低铁损的叠压工艺优化路径

### 4.1 以前端片材质量和模具状态控制附加损耗源

要降低叠压工艺引起的铁损,关键在于将控制点前移至片材和冲片环节。在此阶段,应严格管理片材表面涂层的完整性、厚度一致性以及入厂批次的稳定性,同时结合模具间隙、刃口磨损和冲切速度等工艺参数进行综合控制,避免材料性能在进入叠压前就因前端加工而受损。模具状态若长期波动,即便单件尺寸仍在公差范围内,也可能导致毛刺趋势上升,从而持续提高片间短路风险。对于高效电机制造而言,前端工艺质量越稳定,后续压装和检测所承担的纠偏压力越小,有助于整体铁损控制。将毛刺高度、去毛刺效果及边缘硬化控制纳入首件确认和批次抽检,是降低附加损耗的最直接手段。一旦前端控制稳定,后续铁损波动通常呈现出更明显的可预测性。前端质量控制的稳定性不仅有助于整机空载和温升表现保持一致,还能收窄整机性能波动范围,从而提升批次稳定性,保证高效电机产品在量产中的一致性和可靠性。前端加工环节的质量管控越严格,整机性能稳定性和批次可控性就越高,对整机效率和可靠性具有直接而深远的影响。

### 4.2 以压装一致性和绝缘保护维持低损耗状态

叠压和压装阶段的目标,不仅是将片层压成整体,更是维持低损耗所需的片间绝缘完整性与应力均衡状态。压紧力若过小,会导致片层松散、振动增大,从而影响磁路连续性;而过大则可能损伤绝缘层并加重局部应力集中,增加磁滞损耗和涡流损耗。需根据片材厚度、铁芯直径及结构形式,合理设定压装力的控制窗口。对于分段定子或大尺寸铁芯,还应采用分步压装、分区复测和对称紧固等措施,降低累积误差,保证各片层受力均匀。压装完成后,如缺乏对片间绝缘、电阻变化及局部温升风险的复核,即使初次压装成功,也难以稳定保持低损耗状态。工艺优化的真正标志,并非单次装配成功,而是不同批次铁芯均能维持接近的损耗水平和装配一致性<sup>[6]</sup>。压装一致性管理的核心,不在于一次装配的结果,而在于批次间的可重复性。批次一致性控制越到位,后续铁损试验的波动区间就越小,整机空载性能和温升表现也越稳定。可见,稳定压装不仅

是保持低损耗状态的基础,也直接决定了整机性能的批次稳定性和制造可靠性。一致性越高,铁损越稳,整机效率越易保持在设计水平。

### 4.3 建立试验反馈驱动的工艺修正闭环

定子铁芯叠压工艺的降损控制最终应形成闭环反馈体系。试验端若发现空载损耗偏高、热点集中或片间局部短路迹象,应能够追溯到具体冲片批次、叠压工装、压装参数及约束方式;同时,工艺端做出的调整也必须通过后续铁损试验和整机性能验证其有效性。不同频率工况、材料体系及电机规格之间的损耗差异较大,说明单一经验阈值难以长期适用。更稳妥的做法是建立“工艺记录—铁损试验—异常定位—参数修正—再验证”的完整闭环,使叠压工艺控制逐步从依赖经验转向数据驱动的稳定优化。闭环建立后,叠压工艺对铁损的影响才能被持续压缩至可控范围。随着闭环的持续运行,经验判断逐渐转化为可积累、可复制的制造规则,优化不再停留在一次性经验修补上。闭环坚持时间越久,工艺参数沉淀成规则的速度越快,规则的可复用性和可验证性也越高。通过不断回写数据和验证工艺调整,优化措施才能真正稳定,铁损波动也会明显减小。工艺闭环持续得越充分,产品批次间铁损离散性就越容易被压缩,整机性能稳定性与可重复性也随之提升,为高效电机的大规模、稳定制造提供可靠支撑。

## 5 结语

电机定子铁芯叠压工艺对铁损的影响,本质上体现为制造过程如何改变片间绝缘、磁路连续性和局部应力状态。片材质量、冲片边缘、叠压一致性、压装方式和检测反馈都不是孤立因素,而是共同决定实际损耗水平的工艺链条。只有把叠压工艺从单纯装配动作提升为面向低铁损目标的系统控制过程,企业才能稳定释放材料性能优势,并将铁损控制真正落实到可复核、可追溯、可迭代的制造环节中。降损控制真正有效的标志,是不同批次产品都能保持接近的铁损和温升表现。这也是电机制造从合格导向转向低损耗导向的关键一步。只有这样,低损耗目标才不会停留在材料指标层面。制造过程控制的价值也由此得到体现。这也是提升整机效率一致性的基础条件。这一点对批量制造场景尤为关键,也对工艺稳定性评估十分重要。也更有利于制造质量持续提升。

## 参考文献:

- [1] 施飞,罗剑,安静,等.非晶电机定子铁芯的制备工艺及最新研究进展[J].功能材料,2024,55(04):4080-4093.
- [2] 陈博,曹建军.发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究[J].科学技术创新,2023(25):34-37.
- [3] 常九健,王晨,郑昕昕,等.新型软磁材料的轴向磁通轮毂电机特性研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(05):20-27.
- [4] 邓凯,罗建军,李锐.大型水轮发电机定子铁损试验技术研究[J].人民长江,2014,45(5):81-84.
- [5] 陈彦龙,赵佳豪.异频电流激励下发电机定子铁芯损耗试验实测分析[J].大电机技术,2024(2):32-38.
- [6] 张宏宇,刘昌盛.非晶合金高速永磁电机定子铁芯空载损耗的分析计算[J].微特电机,2018,46(10):12-18.