

电机定子铁芯叠压工艺对铁损的影响分析

熊怀韬

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机运行效率的提升依赖于定子铁芯电磁性能的稳定性。针对叠压工艺对铁损的作用机制展开分析，阐明冲片边缘毛刺、绝缘涂层缺陷及叠压应力分布对磁畴结构与涡流路径的干扰规律。结构缺陷引发局部磁通畸变与跨层电流通道，使涡流损耗与磁滞损耗在宽频工况下呈非线性增长。基于工艺参数与磁特性之间的响应关系，确定叠压压力与退火制度的容差匹配区间。通过冲片精度、绝缘完整性与应力释放的协同调控，降低磁密分布离散度与层间接触电阻，抑制热-磁耦合放大效应，使铁损在全工况范围内趋于稳定。

【关键词】：电机定子铁芯；叠压工艺；铁损；涡流损耗；磁滞损耗

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.050

引言

电机运行效率提升对能耗控制提出更高要求，定子铁芯作为磁路核心结构，其加工精度直接影响电磁性能表现。叠压过程中冲片边缘状态、绝缘涂层完整性及装配应力分布会改变磁通通道稳定性，引起局部损耗增加。生产环节中细微工艺偏差即可引发铁损上升并削弱运行性能表现。针对叠压工艺与铁损之间的内在关联展开分析，有助于明确损耗形成路径并为工艺优化提供技术依据。

1 叠片成形质量与磁能损耗关系特征解析

冲片成形质量直接影响定子铁芯磁路的连续性与材料电磁特性表现。硅钢片冲裁过程中边缘几何精度受模具磨损与冲裁间隙控制影响，容易形成不规则微观毛刺与边缘撕裂现象，导致局部磁导率下降。绝缘涂层在高频冲击与热处理过程中出现厚度分布不均，使片层间绝缘电阻产生差异，叠压系数随之波动。铁芯内部微观空气隙与接触界面缺陷叠加后，使磁通路径发生偏折，局部磁密分布不再均匀，磁化响应呈现各向异性增强趋势。

叠压结构缺陷对电磁损耗的影响主要体现在多层界面耦合效应上。冲片边缘残留毛刺在高压叠压条件下形成层间导电桥接通道，引发局部短路环路，增强涡流闭合路径。绝缘涂层失效区域降低层间电阻，使感应电流在片层间横向扩展，扩大涡流损耗范围^[1]。叠压压力分布不均导致接触应力差异，铁芯局部区域产生松动或过紧状态，使磁致伸缩效应加剧并引入附加应力磁各向异性。磁阻波动在多界面叠加作用下增强漏磁通比例，磁通密度沿铁芯路径出现非线性畸变。

铁损构成在复杂结构影响下呈现耦合增强特征。磁滞损耗受晶粒取向与残余应力共同控制，冲裁变形区晶格畸变使磁畴壁运动阻力增加，反转磁化过程能量损耗提升。涡流损耗与片厚、电导率及磁通变化率相关，局部短路路径缩短电流回路尺度，使损耗集中于边缘与接触界面区域。叠压非均匀性引起的磁通密度局部升高进一步放大焦耳热效应，形成热-磁耦合反

馈，使材料局部磁性能退化并改变整体损耗分布形态。

2 结构缺陷诱发损耗增大的成因与抑制路径

结构缺陷在电机定子铁芯运行过程中对电磁场分布与损耗机制具有显著影响，冲片加工形成的边缘微观形貌直接决定磁路连续性与导磁稳定性。冲裁过程中刀具磨损与间隙偏差使局部材料发生塑性变形，形成硬化层与微裂纹区域，这类区域磁导率下降明显，磁通在通过过程中产生绕行与集中现象，局部磁密峰值抬升，进而诱发附加涡流损耗增强。边缘粗糙度较高时，磁畴壁运动受阻，磁化过程中的不可逆损耗增加，使磁滞损耗呈现上升趋势。微观尺度下的几何不连续性还会改变片层间接触状态，使原本均匀分布的磁场发生畸变，铁芯内部出现局部磁通密集区与弱磁区并存的状态。

片间绝缘状态对电磁损耗的调控机制根植于其对感应电流空间路径的约束能力。绝缘涂层的厚度均匀性与附着力直接决定层间电阻分布的一致性，当涂层局部变薄或固化过程中产生微观缺陷时，该区域层间绝缘电阻下降，在交变磁场感应电动势驱动下形成跨片导电路径，使原本被限制在单片内的涡流沿叠压方向横向扩展，闭合环路的等效面积显著增大，感生电流的幅值与路径长度同步攀升。更为隐蔽的影响在于涂层缺陷处产生的微导电通道使感应电动势沿叠层结构纵向传输，不同片层的感应电势因相位差异而叠加，在 PWM 高频谐波激励下形成谐振增强效应，使高频损耗分量不成比例地放大。涂层失效区域因局部涡流密度升高而出现温升集中现象，硅钢片电阻率的负温度特性使该区域电阻进一步降低，电流密度持续上升，形成电热正反馈机制。这种耦合效应使初始微小的涂层缺陷在运行过程中自行扩展，涡流损耗呈递进式恶化趋势，最终削弱铁芯整体的电磁性能稳定性^[2]。

叠压过程中的应力分布状态对磁性能的影响远超常规认知，其作用深度根植于磁畴结构与机械应力之间的强耦合关系。机械加压过程中若压力梯度控制不均，铁芯内部将形成高密区与松弛区并存的非均匀结构。高密区域内晶格被压缩，磁

致伸缩效应增强,磁弹耦合能使磁畴壁钉扎点位增多,磁化反转所需外加能量提升;松弛区域层间接触刚度不足,在交变磁场激励下产生微幅相对振动,接触界面的动态分离与闭合使接触电阻发生瞬态波动,感应电流路径随之实时变化,引入额外的损耗波动分量。冲裁加工预先引入的残余应力与叠压机械应力在时间与空间维度上叠加累积,晶粒内部晶格畸变程度进一步上升,磁各向异性增加,磁化曲线斜率在低场区变缓,磁导率下降。应力集中区域磁畴壁迁移阻力最大,磁化循环过程中的不可逆磁畴占比升高,磁滞回线包围面积扩大,对应磁滞损耗的增加更为显著。分段加载工艺通过逐级压实方式降低瞬态冲击应力峰值,使各片层接触界面逐步稳定;应力退火处理利用热激活机制促进晶格原子重排,弥散分布的内应力被释放,磁畴排列一致性改善,钉扎效应减弱,磁通在叠层结构中的传播均匀性显著提升,为磁性能的全面恢复提供了结构性保障。

多工艺协同调控条件下,铁芯结构完整性得到系统性改善。冲片边缘质量提升使磁通入射界面趋于平整,叠压压力均匀化消除了层间接触刚度差异,绝缘体系的完整修复则阻断了跨层电流通道,三者叠加使磁路连续性显著增强。涡流被有效约束于单片层内,闭合路径长度增加使感应电流密度下降;残余应力的充分释放降低了磁畴壁迁移阻力,磁滞回线面积收敛,两种损耗之间的耦合效应随之减弱。磁通在叠层结构中的传播由局域集中转向全域均匀分布,磁密峰值趋于平缓,消除了热-磁正反馈形成的损耗热点。加工缺陷引发的非线性磁响应被有效抑制,电磁场在多层界面间的相位一致性提升,高频谐波激励下的损耗增长速率明显降低。铁损构成比例向稳定状态转移,材料磁性能在宽频范围内保持更平稳的运行特性,电机整体效率在全工况区间内获得持续性改善。

3 交变励磁工况下叠压缺陷的损耗放大效应与临界条件

电机定子铁芯在实际运行中承受的磁化状态并非恒定工频正弦波,变频调速、PWM脉宽调制及负载突变等复杂工况使铁芯内部磁通密度与励磁频率持续变化,叠压工艺缺陷在此类动态条件下的损耗贡献程度相较于稳态评估呈现显著放大趋势。冲片边缘毛刺在低频高磁密工况下主要表现为局部磁阻增加,当励磁频率上升至中高频段时,毛刺区域的导电桥接效应使涡流路径长度缩短,感应电势随频率线性增长,涡流损耗密度在缺陷周边区域呈平方倍率上升,其增幅速率远超材料本征涡流损耗的理论计算值,导致实际铁损与设计值之间出现显著偏差。这种频率依赖性的损耗放大机制使工艺缺陷在宽频运行范围内的影响权重发生动态迁移,低频时磁滞损耗占主导地位,高频下涡流损耗的增速优势使缺陷区域的损耗占比迅速攀升,铁芯整体损耗构成比例随工况改变而发生非线性重构。

磁通密度幅值变化对缺陷敏感度同样具有调制作用。在轻

载或低速运行区间,磁密较低,缺陷引起的局部磁通畸变程度相对有限,附加损耗占比处于可接受范围。当电机进入重载或过载状态,磁密上升至接近饱和区段时,缺陷区域周边的磁通被迫绕行,局部磁密峰值可达平均值的1.5至2倍,该区域的磁化曲线进入非线性饱和段,微分磁导率急剧下降,磁畴壁迁移阻力骤增,不可逆磁化过程中的能量耗散呈指数式攀升。与此同时,局部高磁密区域与相邻低磁密区域之间的磁通梯度增大,在界面处形成强烈的涡流集中效应,涡流在片层内的闭合路径被压缩至狭窄区域,电流密度显著升高,焦耳热呈平方增长,形成热斑效应。热斑区域温度升高后,硅钢片电阻率温度系数为正值,高温使局部电阻率上升,看似能抑制涡流,但电阻率变化幅度远小于涡流电动势的增长率,因此整体涡流损耗仍呈上升趋势,且热应力进一步加剧局部晶格畸变,使磁滞损耗同步增长。

临界条件的界定对于工程实践具有直接指导意义。通过建立缺陷几何参数与励磁工况之间的耦合模型可以发现,毛刺高度存在与频率相关的阈值区间,当毛刺控制在一定精度以内且励磁频率处于常规中低频段时,附加涡流损耗增量维持在较低水平。一旦毛刺高度超出阈值且运行频率进入中高频段,涡流损耗增量急剧攀升,毛刺区域电流密度超过材料临界值,引发微区磁性能加速退化。绝缘涂层破损面积与铁损增幅之间呈现非线性强化关系,破损范围扩大后,高频工况下的铁损增幅以更高倍数跃升,表明缺陷耦合效应在动态条件下被显著放大。叠压压力分布不均时,高磁密区域应力敏感度急剧升高,单位应力变化引起的磁滞损耗增量成倍增加。基于上述规律,电机设计阶段应根据目标调速范围和典型负载谱,设定相应的叠压工艺缺陷容限等级,使工艺控制标准与实际运行工况精确匹配,避免过度设计或控制不足。

4 基于磁特性重构的叠压工艺窗口判定与容差匹配策略

叠压工艺对铁损的影响并非单一参数的线性作用结果,冲片厚度、绝缘涂层状态、叠压压力与热处理制度之间存在着复杂的交互效应,单独控制某一项工艺指标难以保证铁损的整体稳定性。工艺窗口的精确界定需要建立在磁特性重构的基础之上,即通过系统试验获取不同工艺组合下的铁损响应数据,构建涵盖多变量耦合关系的响应面模型,进而反推满足铁损设计指标所需的各工艺参数安全区间。响应面分析结果显示,叠压压力与退火温度之间存在显著的交互作用,低压区(20MPa以下)叠压时铁芯密实度不足,层间空气隙比例偏高,磁阻增大使磁滞损耗上升,此时即使提高退火温度至750℃以上,应力释放效果也难以弥补结构疏松带来的磁导率损失。而在高压区(50MPa以上)叠压时,冲片表面绝缘涂层承受的机械应力超出其弹性极限,涂层出现微裂纹甚至局部剥离,层间电阻下降引发涡流损耗上升,此时过度退火反而会加速涂层老化,使绝

绝缘性能进一步恶化。响应面模型表明,在30至42MPa的压力区间内搭配720至745°C的退火制度,铁芯磁性可稳定处于最优区间,铁损波动幅度控制在 $\pm 2.5\%$ 以内。

容差匹配策略强调的是在工艺波动不可避免的现实条件下,通过合理分配各工序的允许偏差来保证最终铁损合格率。冲裁间隙、模具磨损状态、材料批次差异等客观因素决定了冲片边缘质量必然存在一定散布范围,与其对所有工序施加严苛控制增加制造成本,不如利用工艺参数之间的容差互补特性实现稳健设计。边缘毛刺高度因模具磨损从0.01mm逐渐增大至0.03mm的过程中,若能叠压压力从标称值35MPa适当提升至40MPa,同时延长退火保温时间15分钟,则毛刺增长引起的附加涡流损耗可被补偿约60%。绝缘涂层厚度若因涂覆工艺波动从标称值2 μm 降至1.5 μm ,层间电阻下降引发的涡流损耗增量,通过降低叠压压力至32MPa以减少涂层机械损伤,再配合氢气保护退火使涂层部分修复,可将最终铁损增量控制在可接受范围内。容差匹配的核心在于识别各工艺参数的敏感度系数与调节范围,敏感度高的参数优先确保控制精度,敏感度低的参数可作为补偿变量灵活调整。

工艺窗口的数字化判定还需要考虑工况适配性。不同应用场景的电机对铁损的敏感度差异显著,工业驱动电机注重宽频范围的平均效率,新能源汽车驱动电机则更关注高频低磁密区的损耗控制。针对高频应用场景,绝缘层电阻率成为首要控制变量,叠压压力窗口应向低压端偏移以保护涂层完整性,但需辅以更充分的退火处理补偿低压叠装带来的应力释放不足问题。面向工频恒定工况时,磁滞损耗占比更高,叠压压力窗口向高压端调整有利于降低层间间隙,但必须严格控制压力均匀性以避免局部绝缘破损。通过建立工况-工艺-磁性能三维匹配图谱,铁损控制策略可针对具体需求进行差异化定制,避免单一标准导致部分场景下性能过剩或控制不足,实现工艺经济性与电磁性能的综合平衡。

5 工艺协同优化后的铁损控制与性能改善表现

叠压工艺链在电机定子铁芯制造过程中对磁性能稳定性具有决定性影响,多工序协同优化后形成的结构一致性直接作用于铁损分布特征。冲片加工精度提升与叠压参数精细化控制使铁芯层间接触电阻趋于均匀状态,磁通在铁芯内部传播路径更加连续,磁密分布离散度明显降低。硅钢材料在叠层结构中的磁导率差异被有效抑制后,磁场畸变现象减少,磁滞回线面

积收敛趋势增强,对应铁损中的磁滞损耗比例下降,电磁转换过程中的能量损失结构发生优化调整。

叠压压力控制精度提升后,铁芯内部压实状态更加稳定,层间微间隙数量减少,使局部磁阻突变现象得到削弱。磁通在高频交变工况下的传递稳定性增强,边缘区域磁密集效应明显缓解,涡流形成条件被限制在更窄范围内。绝缘体系改进后,片层之间的电阻均匀性提高,跨层感应电流路径被有效切断,涡流闭合环路长度增加,单位体积内的感应电流密度下降,高频损耗比例同步减小。材料内部磁畴运动环境趋于稳定,磁致伸缩引起的微振动效应减弱,使运行状态下的附加损耗得到进一步抑制。

工艺协同优化还体现在加工应力释放与结构稳定性提升方面。冲裁应力残留通过热处理与分级加载得到释放后,晶粒内部畸变程度降低,磁各向异性减弱,磁化过程更加平滑^[3]。铁芯整体结构刚度提升使运行状态下的机械振动幅值下降,避免了振动引起的磁场扰动与附加损耗叠加效应。磁通在叠层结构中的分布由局部集中转向均匀扩散状态,铁损构成中涡流损耗与磁滞损耗均呈现同步下降趋势,电机在不同负载区间内的效率曲线更加平滑,低负载与高负载状态下的能量损失差异被明显压缩。

系统化工艺优化作用于电磁与结构双重维度后,铁芯磁导一致性提升带来的直接结果表现为磁路稳定性增强与损耗路径收敛。局部高磁密区域减少使热集中效应减弱,温升梯度下降进一步稳定材料电阻率分布,避免热-磁耦合放大机制出现。电机运行过程中电磁转矩波动幅度降低,输出稳定性增强,效率提升体现在全工况区间的持续表现,铁损整体水平维持在较低区间并呈现稳定化特征。

6 结语

叠压工艺对定子铁芯铁损的影响贯穿于冲片成形、绝缘涂覆、应力控制与工况适配全链条,各环节缺陷通过磁路畸变与涡流通道扩展相互耦合,共同决定最终损耗水平。工艺优化需超越单一参数调控思维,建立涵盖几何精度、电热特性与应力状态的多维协同控制体系。未来应着力于叠压过程原位监测技术的开发,实现缺陷的在线识别与工艺参数的自适应调整;同时深化高频宽温域下磁性能退化机理研究,为新一代高功率密度电机铁芯制造提供更精准的理论支撑与工艺指南。

参考文献:

- [1] 王天宁,朱静,王子夫,等. 基于不同焊缝结构的电机定子铁芯凸片控制及优化[J].焊接技术,2025,54 (8):58-63.
- [2] 张颖.面向永磁同步电机铁芯封装工艺的优化研究[D].江南大学,2025.
- [3] 施飞.非晶定子铁芯的加工工艺及性能研究[D].钢铁研究总院,2025.