

变频压缩机电动机冲片退火对铁损性能变化的实验研究

钱建忠 李家颂 倪海林 王 刨

(加西贝拉压缩机有限公司, 浙江 嘉兴 314006)

摘要 电动机效率是影响压缩机性能的关键因素之一。本文主要针对压缩机电动机铁损的构成及其影响因素进行了理论推导, 通过对比分析硅钢片退火前后定子铁心铁损的测试, 变频压缩机电动机空载铁损测试、变频压缩机电动机效率、整机性能等的测试结果, 得出了退火后硅钢片的适用范围, 为电动机设计、工艺降本提供参考和实验依据。

关键词: 变频压缩机电动机; 硅钢片; 退火; 铁损; 性能

Experimental study on the change of core loss performance of motor sheet annealing on the inverter compressor

Qian Jianzhong Li Jiasong Ni Hailin Wang Zhao

(Jaxipera Compressor Co., Ltd, Jiaxing, Zhejiang 314006)

Abstract Motor performance is one of the key factors affecting compressor performance. This paper mainly introduces the compositions of core loss of the compressor's motor and its influence factors. Then it compares and analyzes the core loss test of stator core before and after annealing. Finally, according to the results about the idling core loss test and the performance test of the inverter compressor motor, the application scope of electrical steel is obtained and reduced process cost for the reference for the motor design.

Keywords: inverter compressor motor; electrical steel; annealing; core loss; performance

压缩机作为一个高精度高要求的机电产品, 其中电动机部份又被称为其“心脏”, 是电能转换成机械能的重要部件。电动机性能直接影响了压缩机的整机性能, 如何有效提升电动机性能和降低制造及工艺成本是一项重点和难点。电动机铁心一般用一定厚度的无取向硅钢片冲切成要求的冲片并层叠成形, 在冲剪成定转子冲片的制程中, 钢带受到剪切力等作用使冲片局部产生塑性变形, 硅钢片受到机械应力和应变的影响, 从而使得电动机冲片沿分离线 1mm 左右的边缘磁畴会引起破坏、晶格会发生畸变、晶粒会产生弯曲等情况^[1]。定转子硅钢冲片的导磁性能会恶化、铁心铁损会升高、磁感会降低, 另外冲片的槽口受冲剪边缘效应的影响, 磁阻会增大, 等效于气隙长度加大, 致使励磁电流升高, 电动机功率因数下降; 同时齿部的磁密增加, 电动机的铁损也会增加, 最终会使电动机的效率和性能下

降^[2]。一般电动机厂家采用对定转子冲片进行退火兰化的热处理方式, 以达到消除内应力, 恢复改善材料原有的磁性能, 兰化膜起到表面防锈功能。而要进行退火处理需要将已冲切成型的定转子冲片放到热处理炉里进行加热处理, 一般退火处理要加热到近 800℃ 的高温, 这就需要花费较大的能源和时间。而随着国民经济的发展和绿色低碳环保要求的不断提升, 变频压缩机的应用也日益广泛, 永磁交流同步或永磁无刷直流等电动机技术也已较为成熟应用于变频压缩机中。对于一般只在 50Hz 工频运行的固定频率工作的压缩机, 其电动机的极对数又相对要少^[3], 而变频压缩机电动机的极对数就要多些, 其运行频率一般有超过 100Hz 的变化范围, 而变频压缩机在实际工作中会有较多时间在高频率高转速下工作。针对这个实际情况, 需要进一步分析电动机在各频率点的磁感铁损值, 通过对比退火硅

钢片与未经退火处理的电动机铁心的铁损磁感等的差异分析，结合电动机效率及变频压缩机整机性能等多方面来评价其综合性能与工艺成本的关系。

1 影响铁损因素的理论研究

1.1 铁损同频率间的关系

所谓电动机铁损是指将硅钢片处于交变的磁场中磁化下所消耗的铁心功耗，一般以单位重量内的功率损耗进行度量。根据 Bertotti 等人提出的当铁磁性材料在交变磁场的作用下，磁性材料所产生损耗发热的不同铁心损耗分离理论，进而进行分离叠加后，求得铁磁材料总的损耗值。铁损一般包括三部分，即磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗^[4]。

1) 磁滞损耗。当磁性材料存于交变的磁场经反复磁化作用，引起磁性由于磁畴的反复翻转，材料内部摩擦发热所消耗的能量即为磁滞损耗。

2) 涡流损耗。交变的磁通在金属中会感应电动势，由于该电动势产生的电流称为涡流，由涡流引起的损耗称为涡流损耗。

3) 附加损耗。磁性材料工作中所消耗的其他能量称为附加损耗。

电动机铁损组成为

$$P_{\text{Fe}} = P_h + P_e + P_{\text{ex}} \quad (1)$$

式中， P_{Fe} 为单位重量内的铁心总损耗 (W/kg)； P_h 为单位重量内的磁滞损耗 (W/kg)； P_e 为单位重量内的涡流损耗 (W/kg)； P_{ex} 为单位重量内的附加损耗 (W/kg)。

针对式 (1) 通过展开进一步细化，可以变换为

$$P_{\text{Fe}} = K_h f B^\alpha + K_e (fB)^2 + K_{\text{ex}} (fB)^{1.5} \quad (2)$$

式中， K_h 为磁滞损耗系数， f 为频率 (Hz)， B 为正弦波磁密幅值 (T)， α 为可变系数， K_e 为涡流损耗系数， K_{ex} 为附加损耗系数。

在式 (2) 中第一项是磁滞损耗值，其磁滞损耗 P_h 同频率的一次方和磁密幅值 B 的 α 次方成正比；第二项是涡流损耗值，其涡流损耗 P_e 同频率的二次方和磁密幅值 B 的二次方成正比；而第三项是附加损耗值 P_{ex} ，其附加损耗 P_{ex} 同频率 f 的 1.5 次方和磁密幅值 B 的 1.5 次方成正比^[5]。

这 3 个 K_h 、 K_e 、 K_{ex} 都是与磁性材料的性能有关的可变系数。因为相对这 3 个可变系数中的第三个 K_{ex} 值要小得多，在很多情况下可以忽略不计，

所以电动机的铁损又可简化为

$$P_{\text{Fe}} = K_h f B^\alpha + K_e (fB)^2 \quad (3)$$

一般电动机中所采用的无取向硅钢片，定转子冲片厚度均较为薄，在工作频率不是很高情况下，如 50Hz 工频或几百 Hz 以下，通常取可变系数取值范围在 1.6~2.2 间，一般根据理论和实践取可变系数 $\alpha=2$ 是有一定准确性的，因此电动机铁损又可简化为

$$P_{\text{Fe}} = K_h f B^2 + K_e (fB)^2 \quad (4)$$

对于式 (4) 中的不同材料的磁滞损耗系数 K_h ，当磁导率 μ 不变或者变化不是很大时，可用式 (5) 表示，即

$$K_h = \frac{1}{2\rho_{\text{Fe}}\mu} \quad (5)$$

也就是说，磁滞损耗系数 K_h 同磁导率 μ 间近似成反比关系。其中 ρ_{Fe} 表示硅钢片的密度。

而对于式 (4) 中的不同材料的涡流损耗系数 K_e ，可用式 (6) 表示，即

$$K_e = \frac{4K_{\text{Nm}}d^2}{3\rho\rho_{\text{Fe}}} \quad (6)$$

也就是说，涡流损耗系数 K_e 同电阻率 ρ 间成反比关系，用 ρ_{Fe} 表示硅钢片的密度， ρ 表示硅钢片的电阻率^[6]。

通过上述的公式推导，结合电动机的铁损理论分析，由式 (4) 可以知道磁滞损耗 P_h 与频率 f 的一次方成正比，涡流损耗 P_e 与频率 f 间是二次方的关系。当频率 f 增大时，总的电动机铁损 P_{Fe} 和磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 都会随着增大，而涡流损耗 P_e 会随频率 f 成倍增加。频率的影响相比涡流损耗的增加值要大于磁滞损耗的增加值，也就是说，磁滞损耗增加速度会小于涡流损耗的增速。从磁滞损耗和涡流损耗的相对比例来看，对于低频率段，涡流损耗远小于磁滞损耗，但到了高频率段后，因频率成二次方关系的影响，磁滞损耗反过来会远小于涡流损耗。

1.2 磁导率同频率间的关系

除了上述电动机铁损与频率间成正比关系外，还不应忽视频率对磁导率所产生的影响，因此需要掌握在不同所用频率下的材料磁化特性。磁感应强度同磁化频率间成反比关系，即随着磁化电流频率

的降低，磁感应强度会升高，而磁化电流频率升高，磁感应强度就会下降。当采用磁感应强度相对比较高的磁性材料时，在电动机设计时可以忽略工作频率对电动机性能的影响。一般来说，频率对磁感应强度的影响也只发生于磁化电流出现拐点的以下部位^[7]。

对于冲切成型的定转子硅钢冲片进行退火处理的目的主要是促进电动机硅钢冲片中在高温下晶粒重新组合生长，恢复晶体颗粒的有序排列，达到消除因冲剪过程中所产生的内应力，晶粒组合长大后达到降低磁滞损耗的作用，但同时晶粒长大也会使涡流损耗增加^[8]。对于固定工频的感应电动机，在频率稍低情况下电动机的铁心铁损中磁滞损耗占主导地位^[9]。因此，从对电动机铁心的铁损、磁感同频率间关系的研究，在铁心不同热处理方式后进行不同频率段的对比测试，值得进行相关研究和实验。针对此研究，进行了退火兰化与不退火只兰化处理变频机的电动机铁心、定转子和压缩机整机不同频率段的铁损值对比测试。

2 定子铁心的铁损测试

对于一般生产定频压缩机电动机的厂家来说，通常只使用在工频下的硅钢片导磁性能检测的设备。为了能达到电动机定子铁心在不同频率下的磁性指标，我们采购了根据爱泼斯坦方圈测试原理适用于变频的专用硅钢片及铁心电磁性能测试的设备^[10]（如图 1 所示）。选用某一型号的变频压缩机电动机，使用高速冲床将硅钢片冲压叠片成定转子铁心，各取十套分别跟踪进行热处理，其中十套只进行表面兰化未经过退火处理工序，使用此台专用测试设备测得在 45Hz/80Hz/100Hz/150Hz/250Hz/400Hz 的频率下，磁感应强度又称磁通密度分别从 0.2T 一直到 2T 时对应的铁心铁损曲线，如图 2 所示。从图 2 中可以看到，在 45Hz（因使用的变频稳压电源限制只能测到最低为 45Hz，选用更好的电源可测更低频率）的频率段，不退火处理的定子铁心铁损比退火处理的定子铁损值要高；而在高频率段且磁通密度达到 1.5T 时，不退火处理的定子铁心铁损值同退火处理的定子铁心铁损比较接近，但在磁通密度超过 1.6T 后，不退火处理冲片铁心铁损值就要比退火处理铁心的铁损低，这样电动机性能会相对要优些。



图 1 电动机铁心磁性测试专用装置

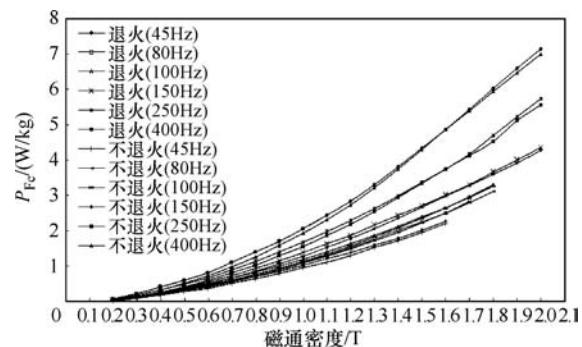


图 2 不同频率磁感下定子铁心铁损对比

3 变频电动机的效率测试

将上述试验中的经退火处理及不退火只进行兰化处理的定子铁心，按正常生产工艺分别制造成某型号变频压缩机的定子，搭配同一个转子，使用电动机测功机进行电动机效率的对比测试，其测试值平均结果如图 3 所示。由图 3 可知，在约 60Hz（1800r/min 左右）之前，退火处理定子电动机效率比不退火只兰化处理的定子效率稍高些，但在中高速的 80Hz 后铁心只兰化不退火的电动机效率则要好些。

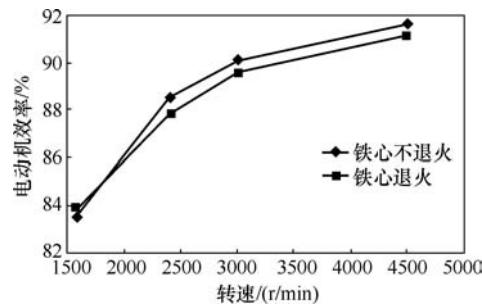


图 3 某型号电动机在各转速下其效率平均值对比

4 变频压缩机的整机性能测试

选取经退火兰化处理的定转子及只经过表面兰

化不退火处理的电动机分别装配成某型号的变频压缩机，在量热计上按照《GB/T 9098—2008 电冰箱用全封闭型电动机-压缩机》标准规定测试压缩机性能，进行 53.3Hz/80Hz/100Hz/150Hz 多个频率段的整机性能对比测试，对比实验平均值结果如图 4 所示。由图 4 可知，在低转速下退火处理的定子电动机效率比不退火处理的电动机性能稍好，而在 80Hz、100Hz 和 150Hz 时则只进行表面兰化不退火处理铁心的变频压缩机整机性能要优些。这样匹配到冰箱制冷系统其能耗同样会得到提升。

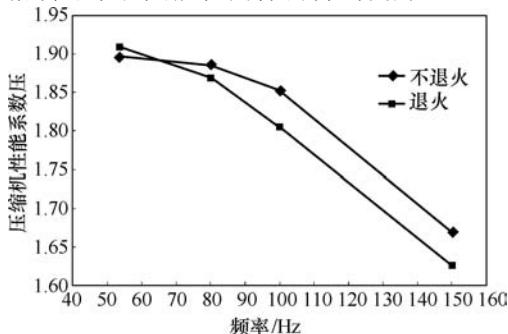


图 4 某型号变频压缩机在各频率段的性能平均值对比

5 结论

本文只针对某型号的变频压缩机电动机进行了退火处理与不退火处理的对比实验测试，如选用极对数更多及硅钢片厚度更薄的冲片，根据理论研究对比实验结果将会更加明显。变频压缩机的电动机启动运行是通过变频板来控制的，电动机运行转速由低到高变化范围较大，且其极对数比定频压缩机要多，因为不退火只进行兰化处理的硅钢片较退火兰化处理的硅钢片在高频率时涡流损耗相对要低，使得总的电动机铁心铁损下降明显，这样会对电动机的效率、压缩机的性能以及冰箱等制冷设备的能效产生较好的提升，达到高效节能的效果。因此对于在冰箱上经常处于高转速运行的变频压缩机来说，电动机铁心可采用不退火只进行兰化处理即可提高电动机性能降低功耗，而且可以降低生产制造成本和缩短热处理时间，减少工序有效提升效能。这对于考虑综合性能及成本因素的电动机制造厂家

来说，在电动机产品的设计和工艺布局上，提供了有效的实验支撑。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电动机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [3] 王宝龄. 电磁电器设计基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [4] 张俊杰, 李琳, 刘兰荣, 等. 进入硅钢叠片内的漏磁通和附加损耗的模拟实验与仿真[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 148-153.
- [5] 刘光伟, 赵新刚, 张凤阁, 等. 高速永磁爪极电机铁耗与空气摩擦损耗计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 148-154.
- [6] 陈萍, 唐任远, 佟文明, 等. 高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 1-9.
- [7] 王永鑫, 金立军, 庄火庚, 等. 不同频率下电磁吸力的影响[J]. 低压电器, 2008(1): 18-21.
- [8] Kolondzovski, Zlatko, Arkkio, et al. Power limits of high-speed permanent-magnet electrical machines for compressor applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011.
- [9] Nam H, Ha K H, Lee J J, et al. A study on Iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using Iron loss curves tested on Epstein samples[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3, 1): 1472-1475.
- [10] Guo Youguang, Zhu J, Lu Haiyan, et al. Core loss calculation for Soft magnetic composite electrical machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3112-3115.

收稿日期: 2017-10-10

作者简介

钱建忠 (1972-), 男, 浙江省嘉兴市人, 本科, 工程师, 主要从事有关压缩机实验及可靠性研究等相关工作。