

制造过程对电机硅钢软磁材料磁滞损耗的影响

王德成, 崔荣高, 宋明建, 贾小丽, 任伟, 王奉双

潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为明确磁滞损耗在制造过程中的演化规律,从计算精度、适用范围、计算复杂程度等方面对比分析自然状态下和含残余应力的磁滞损耗计算方法的优缺点,并总结磁滞损耗计算方法的发展方向。结果表明:较小的拉应力可提高材料的磁性能,较大的拉应力导致材料的磁性能下降;对于存在残余应力的铁磁材料,应采用随峰值磁感应强度和应力变化的模型参数计算磁滞损耗;对于存在塑性应变的铁磁材料,将模型的非磁滞磁化行为参数和磁畴壁集中系数表示为位错密度的函数,可以较好地预测铁磁材料的磁滞损耗;未来铁磁材料磁滞损耗的计算应考虑残余应力和塑性应变的耦合影响。

关键词:铁磁材料;磁滞损耗;计算方法;制造

中图分类号:TK405

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0026-08

引用格式:王德成,崔荣高,宋明建,等.制造过程对电机硅钢软磁材料磁滞损耗的影响[J].内燃机与动力装置,2025,42(4):26-33.

WANG Decheng, CUI Ronggao, SONG Mingjian, et al. Effect of manufacturing process on hysteresis loss of motor silicon steel soft magnetic material[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4):26-33.

0 引言

能源节约和环保减排已成为当今社会发展的主题之一,也是高能耗产业转型升级的必然方向^[1-2]。在资源环境挑战与经济转型的双重驱动下,我国于 2020 年提出碳达峰和碳中和目标,对碳排放控制提出了更高标准和更严要求。

铁磁材料广泛应用于各种能量转换设备中,是决定设备能量转换效率的关键磁功能材料。提高铁磁材料磁性能是实现节能减排的重要途径之一,也是相关学者关注的重点。在外界磁场作用下,铁磁材料内部磁畴发生不可逆运动,磁畴运动需克服各种阻力,因而材料磁感应强度的变化滞后于外界磁场变化,这一现象即为磁滞特性,是铁磁材料的固有属性^[3]。铁磁材料的磁滞特性在制造过程中因加工工艺而发生变化^[4],其中残余应力和塑性应变是关键影响因素,两者显著改变材料内部磁畴运动的阻力特性^[5-6]。深入理解并准确表征铁磁材料在自然状态及不同制造工艺条件下的磁滞特性演化规律,对提高以电机为代表的能量转换设备性能预测精度具有重要价值,不仅能够优化电磁设备的能量转换效率,还将为推动绿色制造、构建资源节约型社会提供重要的理论支撑和技术保障。

磁滞损耗指材料因磁滞特性消耗的能量,是铁磁材料磁滞特性的重要表征指标。本文中系统分析不同类型铁磁材料的磁滞损耗计算方法,从计算精度、适用范围、计算复杂程度等方面分析不同计算方法的优缺点,研究制造因素对材料磁滞特性的影响,预测磁滞损耗计算方法的发展方向,为高性能磁性材料的开发与应用提供参考。

收稿日期:2025-02-22

基金项目:泰山产业领军人才工程资助项目(甲醇增程式混合动力系统关键技术开发及应用)

第一作者简介:王德成(1978—),男,辽宁大连人,工学博士,正高级工程师,主要研究方向为道路用发动机开发设计,E-mail:wangdc@weichai.com。

1 自然状态的铁磁材料

严格来说,自然状态下的铁磁材料内部依然存在残余应力,但其量级很小,因此在研究铁磁材料特性时,一般不考虑自然状态下残余应力的影响^[7]。以应用于电机铁芯的无取向电工钢为例,其轧制成型后内部的残余压应力通常不超过 5 MPa。电工钢制造商提供的标准磁滞特性曲线是基于存在微量残余压应力的材料状态测试所得,与完全退火状态下的材料性能相差不大,这一现象为工程应用中直接采用厂商提供的磁性能提供了理论依据。

针对自然状态下的铁磁材料,学者们提出了经验公式法、经典磁滞模型法等许多磁滞损耗计算方法。磁滞模型发展大致可以划分为 3 个阶段,如图 1 所示。第一阶段为以 Langevin 模型为代表的顺磁材料磁性能计算;第二阶段为以 Jiles-Atherton 磁滞模型为典型代表的铁磁材料磁滞特性计算;第三阶段为考虑制造因素的磁滞特性定量分析。

1.1 经验公式法

早期学者基于磁滞损耗的产生机理,通过分析大量试验数据,得到相应的半经验拟合公式,用于计算自然状态下铁磁材料磁滞损失。铁磁材料的磁滞损耗功率^[8]

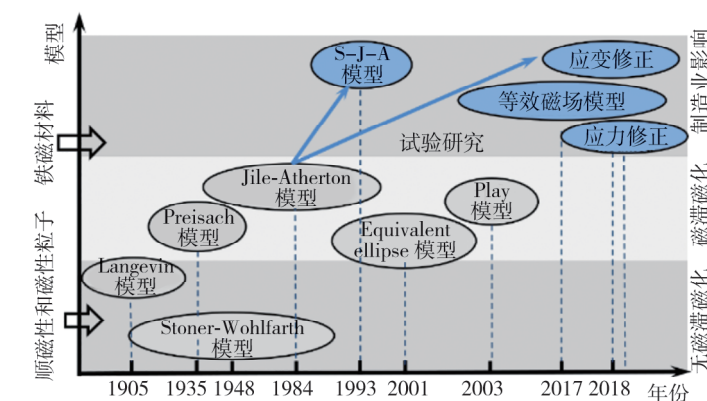


图1 磁滞模型的发展历程

合公式,用于计算自然状态下铁磁材料磁滞损失。铁磁材料的磁滞损耗功率^[8]

$$P_h = k_h f^c B_m^d, \quad (1)$$

式中: k_h 为经验系数, f 为磁场交变频率, B_m 为峰值磁感应强度, c 、 d 为幂指数。

铁磁材料被交变外磁场反复磁化的每个周期内,内部磁畴均发生转向和重排,因此单位时间内发生的磁化次数越多,即频率越高,累积的磁滞损耗越大。铁磁材料的振幅磁导率受磁场交变频率影响^[9]。当磁场交变频率为 0~1 000 Hz 时,超薄电工钢振幅磁导率的变化幅度通常不超过 5%,故在中、低频的应用场景下,频率对电工钢振幅磁导率的影响可以忽略,即可视为振幅磁导率与频率无关,此时磁滞损耗与频率呈线性关系。随频率增大,反复磁化次数增多,材料的磁滞损耗增大。研究表明:材料磁滞损耗与磁滞环包络的面积正相关,磁滞环面积又是峰值磁感应强度的函数,因而磁滞损耗可以表示为峰值磁感应强度的函数。

通过试验测试铁磁材料在某频率和峰值磁感应强度组合下的磁滞损耗,采用最小二乘法进行拟合可确定式(1)中的各待定系数,进而预测同种铁磁材料的磁滞损耗随频率和峰值磁感应强度的变化规律^[10]。

经验公式法能够较好地描述自然状态下铁磁材料的磁滞特性,未知参数少,精度高,便于工程应用。但是,对含残余应力和塑性应变的铁磁材料,当其所含残余应力和塑性应变改变时,材料磁滞损耗的变化规律将发生变化^[11-12],因而经验公式不适合用于预测材料在不同制造过程中的磁滞损耗。

1.2 Preisach 模型法

Preisach 模型由 Preisach 于 1935 年提出,认为铁磁材料的磁滞特性由许多微观磁滞算子组成^[13]。经典 Preisach 磁滞模型中,材料的磁感应强度

$$B(t) = \iint_{\theta \geq \beta} \mu(\theta, \beta) \gamma_{\theta\beta} [H(t)] d\theta d\beta, \quad (2)$$

式中: $\mu(\theta, \beta)$ 为 Preisach 分布函数, θ 、 β 为算子的上、下阈值; $\gamma_{\theta\beta} [H(t)]$ 为控制正负翻转的单元磁滞算子,其中, $H(t)$ 为外磁场强度, $\gamma_{\theta\beta} [H(t)] = \pm 1$, t 为时间。

利用 Preisach 模型计算铁磁材料磁滞损耗时,其分布函数的准确性决定了预测结果的精度。为简化

计算,便于该模型的实际应用,有学者提出了 Everett 函数,用于精确识别该模型的分布函数。Everett 函数和分布函数的关系^[14]为:

$$E_v(\theta, \beta) = \iint_{\theta \geq \beta} \mu(\theta, \beta) d\theta d\beta. \quad (3)$$

不同材料具有不同的磁滞特性,应根据具体材料的属性确定 Preisach 模型的分布函数,提高预测精度。

经典 Preisach 模型适合描述高磁场强度,或者磁化曲线趋近矩形的材料磁化过程;当磁场强度较小时,模型预测的磁化曲线与实际存在显著偏差,尤其在磁化曲线的拐角处,预测精度更差^[15]。

1.3 经典 Jiles-Atherton 模型法

1984 年, Jiles 和 Atherton 通过分析磁畴壁移动过程,并基于能量守恒定律,明确了畴壁运动所需的外界功、静磁能和磁各向异性能的定量关系,建立了经典的 Jiles-Atherton 磁滞模型^[16]。该模型实现了从顺磁材料磁性能描述到铁磁材料磁性能描述的跨越,成为了应用最广泛的磁滞模型之一,能较好地描述自然状态下铁磁材料的软磁特性。

Jiles-Atherton 模型首先确定单位体积磁畴的能量:

$$E = -\mu_0 m (H + \alpha M), \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; m 为单位体积磁畴磁矩; M 为磁化强度; α 为主要场分量,主要由磁滞环在矫顽力处磁化曲线的斜率决定。单位体积磁畴示意图如图 2 所示。

自然状态的顺磁物质的磁性能可用郎杰文函数描述^[17-18]:

$$M_{an} = M_s \left[\coth \frac{\mu_0 (H + \alpha M)}{a} - \frac{a}{\mu_0 (H + \alpha M)} \right], \quad (5)$$

式中: M_{an} 为无磁滞磁化强度,即材料内部没有磁滞现象

时,应该达到的磁化强度; M_s 为材料的饱和磁化强度,主要与材料本身的属性相关; a 为非磁滞磁化行为参数(与主要场分量 α 不同),主要是取决于材料磁滞环的峰值磁感应强度, $a = k_B T_K / m$, 其中, k_B 为波尔兹曼常数, T_K 为热力学温度。

通过分析磁畴壁移动的过程,可确定外磁场做的功 W_E 和磁畴克服阻力消耗的功 W_{pin} :

$$W_E = \frac{1}{\mu_0} \int B dB - \int M dB, \quad (6)$$

$$W_{pin}(M) = k \int_0^M dM, \quad (7)$$

式中: k 为磁畴壁集中系数,主要与材料的矫顽力相关,材料的矫顽力越大, k 越大; B 为磁感应强度。

基于能量守恒定律对磁畴壁移动过程进行分析,磁畴静磁能的变化、外力所做的功以及克服阻力消耗的能量应该符合

$$\int M dB_e = \int M_{an} dB_e - W_{pin}(M), \quad (8)$$

式中: B_e 为有效磁感应强度, $B_e = \mu_0 (H + \alpha M)$ 。

简化式(8)可得到:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \alpha (M_{an} - M_{irr})}, \quad (9)$$

式中: M_{irr} 为不可逆磁化强度; δ 为变常数,当外磁场增大时, $\delta = 1$, 当外磁场减小时, $\delta = -1$ 。

式(9)即为经典的 Jiles-Atherton 磁滞模型,能较好地描述自然状态下铁磁材料的磁滞曲线,工程应用难度小^[19-21]。磁场强度较大或者趋向于饱和时,该模型的预测结果较好;但当磁场强度较小时,该模型对磁化曲线拐角处的预测误差较大。在实际应用 Jiles-Atherton 磁滞模型时,常需编写程序识别模型参数

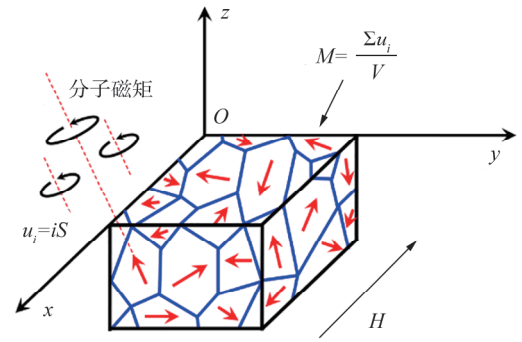


图 2 单位体积磁畴示意图

才能开展铁磁材料磁滞损耗的预测。

2 含残余应力的铁磁材料

铁磁材料的磁化过程本质上是能量最小化的过程,磁畴所含的畴壁能越小越稳定。残余应力和塑性应变分别改变了磁化前、后畴壁的能量密度和面积,进而影响材料的磁滞特性。

当铁磁材料内部存在残余拉应力时,磁化开始前的磁畴能量密度比初始母材大,使得磁化结束时磁畴壁的迁移距离增大,磁化阻力减小,材料磁性能提高;反之,当材料内部存在残余压应力时,磁畴壁的能量密度低于母材,使得磁化完成时磁畴壁的移动距离减小,磁化阻力增大,材料的磁性能下降。较小的拉应力可提高材料的磁性能,但较大的拉应力使得材料内部退磁场增强,导致材料的磁性能不升反降。

制造后自然状态下的铁磁材料,内部通常含有残余应力^[22-23]。含残余应力铁磁材料磁滞损耗的主要计算方法有基于试验的唯象模型法、等效场法、修正 Jiles-Atherton 模型参数法等。

2.1 基于试验的唯象模型法

残余应力对材料软磁特性的影响很大,并且残余拉应力和残余压应力对材料软磁特性的影响规律不同^[24]。压应力抑制材料磁化,较小的拉应力促进材料磁化,较大的拉应力抑制材料磁化。2017年, Perevertov^[25]对不同状态下的电工钢磁畴进行了观测,测试了含有不同弹性应力的电工钢磁化曲线,通过分析材料关键磁性能指标(如矫顽力和剩磁等)的变化规律,提出了用于描述应力对电工钢软磁特性影响的唯象数学模型,其中,不同应力下唯象模型参数如图3所示。

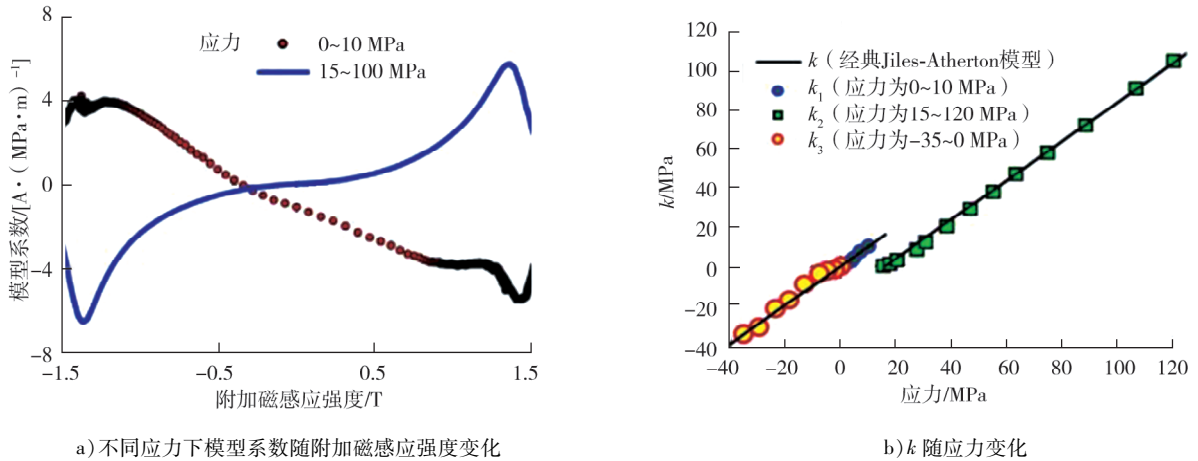


图3 不同应力下唯象模型参数

在明确图3所示材料关键磁性能指标变化规律的基础上,Perevertov提出了含应力电工钢磁化曲线的计算式:

$$H(\sigma, M) = H(\sigma_0, M) + \frac{\Delta H_a}{\Delta \sigma(M)} f_1(\sigma), \quad (10)$$

$$\frac{\Delta H_a}{\Delta \sigma(M)} = f_2(\mu_0 M), \quad (11)$$

$$k = \begin{cases} c_1 \sigma, & \sigma < \sigma_m \\ k_0 + c_2 \sigma, & \sigma \geq \sigma_m \end{cases}, \quad (12)$$

式中: σ 为材料内部应力; σ_0 为最小残余应力; σ_m 为临界应力,对于超薄电工钢, σ_m 通常为10~20 MPa; $\Delta H_a / \Delta \sigma(M)$ 为模型系数,其中, ΔH_a 为磁各向异性场的变化量, $\Delta \sigma(M)$ 为特定磁化强度对应的应力变化; c_1 、 k_0 、 c_2 为系数。

通过式(10)~(12),可以计算含应力的材料磁化曲线。但是,式(11)极其复杂,因此限制了唯象模

型的进一步工程化应用。

2.2 等效场法

Sablik 等^[26]对经典 Jiles-Atherton 磁滞模型进行修正,建立了包含多种应力影响项的磁滞特性数学模型并进行对比验证,最终确定了具有最优拟合精度的应力影响项表达式,成功揭示了弹性应力对材料磁滞特性的影响。

修正后的等效场强度

$$H_e = H + \alpha M + \frac{3\lambda_s M \sigma}{2\mu_0 M_s^2}, \quad (13)$$

式中 λ_s 为材料的饱和磁滞伸缩系数。

用等效场强度代替公式(4)中的外磁场强度进行求解,即可得到基于等效场强度的 Jiles-Atherton 修正模型。该模型虽然能够有效表征应力作用下铁磁材料的软磁特性,但是,在其表达式分母中存在高阶非线性项,使得该模型的求解过程十分复杂,并且容易出现计算不收敛的情况,制约了模型在实际工程中的应用效率。

2.3 修正 Jiles-Atherton 模型参数法

为描述总磁化强度和不可逆磁化强度的关系,在经典 Jiles-Atherton 磁滞模型中引入参数 C , C 为不可逆磁化强度与总磁化强度的比,与磁滞环包络的面积有关^[27]。不同磁感应强度和应力下电工钢材料磁滞环如图 4 所示^[27]。

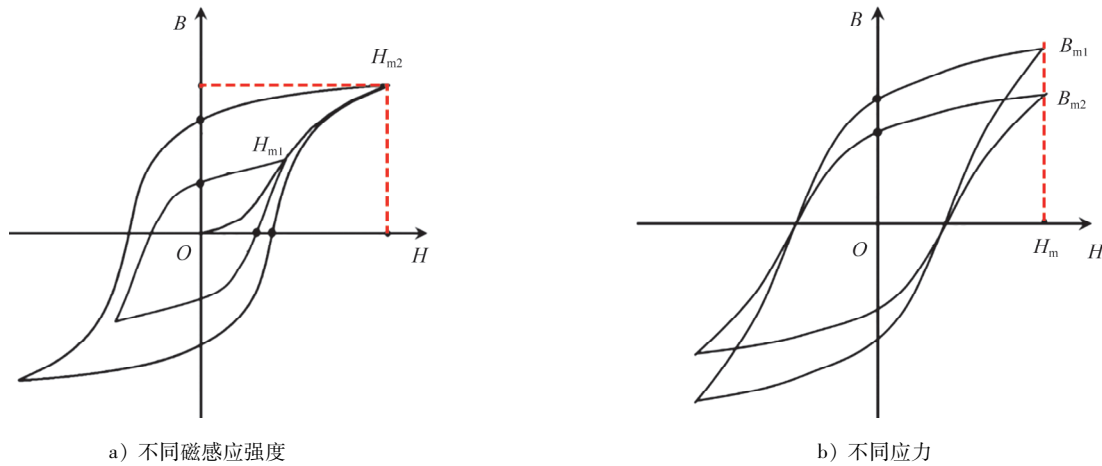


图 4 不同磁感应强度和应力下电工钢材料磁滞环

由图 4 可知:当外磁场强度和应力逐渐增大时,磁滞环的峰值磁感应强度、矫顽力、矫顽力处斜率以及磁滞环包络的面积均发生变化,磁滞模型的参数 a 、 k 、 α 、 C 也相应发生变化,这 4 个参数可表示为外磁场强度/磁感应强度、应力的函数。

基于上述分析,对经典 Jiles-Atherton 磁滞模型的参数 a 、 k 、 α 、 C 进行修正,将其表示成 B_m 和 σ 的函数,用来计算残余应力对于材料软磁特性的影响:

$$a = f_1(\sigma, B_m), \quad (14)$$

$$k = f_2(\sigma, B_m), \quad (15)$$

$$\alpha = f_3(\sigma, B_m), \quad (16)$$

$$C = f_4(\sigma, B_m). \quad (17)$$

利用式(9)、(14)~(17),编写相关的程序,可以求解铁磁材料的磁化曲线。修正 Jiles-Atherton 模型参数法能较好地反映应力对铁磁材料磁滞特性的影响,计算精度较高。但是,该方法计算过程较复杂,且对于应力为 $-20 \sim 20$ MPa 的磁化曲线的预测精度较低,原因为:该范围内的应力对材料磁滞损耗的影响显著,磁滞损耗随应力的变化规律复杂,增大了铁磁材料磁滞损耗的预测难度。

3 含塑性应变的铁磁材料

塑性应变导致铁磁材料的磁性能下降,对磁滞特性影响较大。原始状态时,磁畴壁处于位错的正中央,此时磁畴壁的面积最小,能量最低,系统呈热力学稳定状态。当材料受到塑性应变作用时,该平衡态被打破,磁畴壁发生移动,磁畴壁的面积增大,畴壁能量增大,材料的矫顽力及磁导率下降,磁滞损耗增大。

包含塑性应变的铁磁材料磁滞损耗计算方法主要有位错影响因子法、磁滞模型参数修正法。

3.1 位错影响因子法

磁畴壁集中系数 k 反映了磁畴壁在运动过程中受到的阻力,塑性应变对磁滞特性的影响机制主要表现为改变磁化前、后磁畴壁的面积。研究塑性应变对材料磁滞特性的影响,应先描述电工钢材料的流动应力与应变的关系。材料屈服后的应力增量^[28]

$$\sigma_F = K_{sw}(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n - \sigma_y, \quad (18)$$

式中: K_{sw} 为拟合方程的系数, ε_0 为材料内部的初始塑性应变, ε 为材料内部的塑性应变, n 为幂指数, σ_y 为材料的屈服强度。

通过材料的单向拉伸试验,可以确定硅钢材料的流动方程,从而确定各个参数。

材料内部的塑性应变通过位错运动实现。材料内部的位错密度^[26]

$$\zeta_d = \left(\frac{|\sigma_F|}{\alpha_k G b} + \frac{|\sigma_y|}{\alpha_b Y b} + \zeta_{d0}^{0.5} \right)^2, \quad (19)$$

式中: α_k 为材料常数, G 为材料的剪切模量, b 为 burgers 矢量的模量, α_b 为与弹性变形相关的系数, Y 为材料的弹性模量, ζ_{d0} 为材料内部初始位错密度。通过式(19)可以建立材料内部位错密度和材料屈服后应力增量的关系。

磁畴壁集中系数 k 和非磁滞磁化行为参数 a 均与磁畴壁密度相关^[28],因此有:

$$k = \left[\left(G_1 + \frac{G_2}{d} \right) \zeta_d^{0.5} \right] k_0, \quad (20)$$

$$a = \left[\left(G_3 + \frac{G_4}{d} \right) \zeta_d^{0.5} \right] a_0, \quad (21)$$

式中: G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 均为系数, d 为磁畴宽度, k_0 和 a_0 为参数的初值。根据式(9)(20)(21)可对含塑性应变的磁滞模型进行求解。该模型能够较好地反映塑性应变对材料磁滞损耗的影响。但是,该模型的求解同样需要编写相关的程序,才能更好地进行工程化应用。

3.2 磁滞模型参数修正法

通过对经典磁滞模型的参数进行修正,将受塑性应变影响的参数表示成塑性应变的函数,准确识别模型参数,可以预测含塑性应变的铁磁材料在不同磁场强度下的磁化特性。2017年, Hergli^[29]对经典磁滞模型式(9)进行了拓展研究,修正了材料的非磁滞磁化行为参数 a 、饱和磁化强度 M_s :

$$a = \frac{(119 + 650\varepsilon_p)}{1 + \varepsilon_p}, \quad (22)$$

$$M_s = \frac{B_s}{\mu_0} - H_s, \quad (23)$$

式中: ε_p 为塑性应变, B_s 为饱和磁感应强度, H_s 为饱和磁场强度。

根据(9)(22)(23)可以求解磁滞模型,获得铁磁材料在含塑性应变下的磁性能表现。

现有的电磁仿真软件中,通常增加一个可变系数——铁耗系数,用于描述加工制造对材料磁性能的影响。对于不同的加工制造工艺参数引起的不同影响,在实际的工程实践过程中很难给予准确的考虑。

残余应力和塑性应变对畴壁能量的影响存在耦合作用,因而未来材料磁滞损耗的计算应向考虑残余

应力和塑性应变耦合影响的方向发展。

4 结论

研究铁磁材料在自然状态以及不同制造过程中的磁滞特性演化规律,对准确预测以电机为典型代表的能量转换设备的性能非常重要。通过研究制造因素对材料磁滞特性的影响,分析磁滞损耗计算方法的发展方向,得到以下结论:1)对于自然状态下的铁磁材料,采用经验公式和经典 Jiles-Atherton 磁滞模型都能够较好地预测铁磁材料的磁滞损耗;2)对于存在残余应力的铁磁材料,采用随峰值磁感应强度和应力变化的模型参数能够较好地预测铁磁材料的磁滞损耗;3)对于存在塑性应变的铁磁材料,准确考虑位错密度的影响,将模型的非磁滞磁化行为参数 a 和磁畴壁集中系数 k 表示为位错密度的函数,可以较好地预测铁磁材料的磁滞损耗;4)未来铁磁材料磁滞损耗的计算,需要考虑残余应力和塑性应变的耦合影响。

参考文献:

- [1] ZHANG H, CAI G X. Subsidy strategy on new-energy vehicle based on incomplete information: a case in China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 541: 123370.
- [2] LI Y M, ZHANG Q, LI H L, et al. The impact of dual-credit scheme on the development of the new energy vehicle industry[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4311–4317.
- [3] 夏天锐. Dy-Co 基体系合金结构及吸波性能研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [4] NAKAZAKI O, KAI Y, TODAKA T, et al. Iron loss properties of a practical rotating machine stator core at each manufacturing stage[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(1/2): 79–86.
- [5] 欧昊, 张祥林. 基于残余应力检测与磁畴观察的 2%Si 无取向硅钢冲裁冲片的最佳退火温度[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 95–99.
- [6] 宋守许, 刘涛, 王文哲. 弯曲形变对无取向硅钢磁畴结构和磁性能的影响[J]. 钢铁钨钛, 2017, 38(6): 147–152.
- [7] THOMPSON S M, TANNER B K. The magnetic properties of specially prepared pearlitic steels of varying carbon content as a function of plastic deformation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 132(1/2/3): 71–88.
- [8] STEINMETZ C P. On the law of hysteresis[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1892, IX(1): 1–64.
- [9] 陈德志, 张玉庸, 白保东, 等. 不同温度及谐波下硅钢片电磁-力特性与变频电机振动[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4647–4656.
- [10] 赵志刚, 刘佳, 郭莹, 等. 非正弦励磁环境磁性材料改进损耗模型的研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2693–2699.
- [11] PÉREZ-BENITEZ J A, CAPO-SANCHEZ J, ANGLADA-RIVERA J, et al. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel[J]. NDT & E International, 2008, 41(1): 53–58.
- [12] SABLIK M J, RIOS S, LANDGRAF F J G, et al. Modeling of sharp change in magnetic hysteresis behavior of electrical steel at small plastic deformation[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(10): 10E518.
- [13] MAYERGOYZ I D, FRIEDMAN G. Generalized preisach model of hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 212–217.
- [14] BERGQVIST A, ENGBAHL G. A stress-dependent magnetic Preisach hysteresis model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(6): 4796–4798.
- [15] BARKER J A, SCHREIBER D E, HUTH B G, et al. Magnetic hysteresis and minor loops: models and experiments[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences, 1983, 386(1791): 251–261.
- [16] JILES D, ATHERTON D. Ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1983, 19(5): 2183–2185.
- [17] ZWANZIG R. Nonlinear generalized Langevin equations[J]. Journal of Statistical Physics, 1973, 9(3): 215–220.
- [18] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, 61(1/2): 48–60.
- [19] 王洪泽. 电工钢叠片激光焊接界面传热行为与磁性能劣化机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

- [20] ZHUKOVA V, IPATOV M, TALAAT A, et al. Effect of stress annealing on magnetic properties and GMI effect of Co-and Fe-rich microwires[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 189–194.
- [21] 钟文定. 技术磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] WANG Z, LI S H, CUI R G, et al. Influence of grain size and blanking clearance on magnetic properties deterioration of non-oriented electrical steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(5): 2000607.
- [23] VOIRNA P, KTENA A, TSAKIRIDIS P E, et al. A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels[J]. NDT & E International, 2015, 71: 33–42.
- [24] 张殿海, 贾梦凡, 任自艳, 等. 无取向电工钢应力依赖矢量磁特性测量研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊2): 449–456.
- [25] PEREVERTOV O. Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe-3%Si non-oriented steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 428: 223–228.
- [26] SABLİK M J, KWUN H, BURKHARDT G L, et al. Model for the effect of tensile and compressive stress on ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(8): 3799–3801.
- [27] LADJIMI A, MEKIDECHE M R. Modeling of thermal effects on magnetic hysteresis using the Jiles-Atherton model[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(4a): 253–256.
- [28] MALCZYK R, IZYDORCZYK J. The frequency-dependent Jiles-Atherton hysteresis model[J]. Physica B: Condensed Matter, 2015, 463: 68–75.
- [29] XUE G M, ZHANG P L, HE Z B, et al. Approximation of anhysteretic magnetization and fast solving method for Jiles-Atherton hysteresis equation[J]. Ferroelectrics, 2016, 502(1): 197–209.

Effect of manufacturing process on hysteresis loss of motor silicon steel soft magnetic material

WANG Decheng, CUI Ronggao, SONG Mingjian, JIA Xiaoli,
REN Wei, WANG Fengshuang

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to study the evolution law of hysteresis loss in the manufacturing process, the advantages and disadvantages of hysteresis loss calculation methods under natural state and with residual stress are compared and analyzed from the aspects of calculation accuracy, applicability, and computational complexity. The development direction of hysteresis loss calculation methods is also analyzed. The results show that smaller tensile stress can improve the magnetic properties of the material, but larger tensile stress leads to a decrease in the magnetic properties of the material. For ferromagnetic materials with residual stress, the hysteresis loss should be calculated using model parameters that vary with peak magnetic induction intensity and stress. For ferromagnetic materials with plastic strain, expressing the non hysteresis magnetization behavior parameters and magnetic domain wall concentration coefficient of the model as a function of dislocation density can effectively predict the hysteresis loss of ferromagnetic materials. The calculation of hysteresis loss in future ferromagnetic materials should consider the coupled effects of residual stress and plastic strain.

Keywords: ferromagnetic material; hysteresis loss; calculation method; manufacture

(责任编辑: 臧发业)