

分段式电磁感应加热牵伸辊筒涡流分布规律的仿真研究

宫海钰¹，李慧¹，王晓东³

1. 北京服装学院，北京，中国

2. 中国科学院大学，北京，中国

*通讯作者：李慧 gxylihui@bift.edu.cn

摘要：本课题针对“三河市汇诚光机电有限公司”生产的热牵伸辊存在的加热线圈易烧断问题进行了理论分析和软件仿真，从理论上分析了磁场和涡流的分布规律，并基于电磁场与温度场耦合计算方法，对设备的温度分布进行研究，最终通过磁场与温度场耦合计算方法，模拟计算热辊电磁加热条件下的涡流分布与传热。通过 COMSOL Multiphysics 建立热牵伸辊二维和三维物理模型，进行了多物理场设置，边界条件的设定和材料参数的选定，用有限元法计算热牵伸辊在不同材料下的不同部位的磁通密度模、感应电流（涡流）以及热功率和温度，讨论了辊筒和线圈的热量分布，分析了热牵伸辊线圈寿命短的原因，并提出了相应的解决方案。

关键词：电磁感应加热，涡流，磁屏蔽，热牵伸辊，电导率

1. 简介

热牵伸辊是纺织领域的关键设备之一，其加热的效率及温度精度对锦纶、涤纶、丙纶等化纤丝质量有着重要的影响。目前热牵伸辊加热方式主要为：电阻加热、热管式加热、单壳体感应及多区感应加热。虽然分段式电磁感应加热式热辊相对于其他热辊而言，极大的提高了升温速度，减少了预热时间，并且温度恒定，减小了生产资源的浪费，但是目前的电磁感应加热式热牵伸辊筒依旧存在一些问题。例如，导线的工作寿命短，辊筒温度有限，预热升温速度等相关问题还需要进行优化分析。

因此，本次课题主要是对现有的分段式热牵伸辊筒从不同领域进行相关理论分析与研究，找到相关问题点，以便产品的优化和改进，提升产品寿命，减少生产浪费。

根据理论分析得出产生线圈烧断主要有以下三大原因：①热牵伸辊中线圈的温度本身过高，即现有机电结构和材料参数等影响，使其线圈温度过高，最终导致线圈烧断；②辊筒内涡流场对线圈电流的影响，即辊筒内产生的涡流，会对等效电路里产生一个类似于阻抗的参数，使得效率变低，

从而导致线圈寿命变短。③控制电路对线圈的影响，即线圈中的谐波电流，以及在高频下，线圈导线间耦合电容会影响切换频率，使其不在谐振附近，降低效率，从而导致线圈损坏。本课题主要研究热牵伸辊的材料和频率对温度分布的影响，利用有限元法进行计算，通过 COMSOL Multiphysics 建立热牵伸辊二维和三维物理模型，进行了多物理场设置，边界条件的设定和材料参数的选定，模拟仿真不同条件下的不同点的磁通密度模、感应电流（涡流）以及热功率和温度，以及辊筒和线圈的热量分布，分析热牵伸辊线圈寿命短的原因，并提出了相应的解决方案。

2. 模型建立与分析:

2.1 二维模型建立

建立图 1 热辊的二维模型剖面图，在磁场条件下，对材料参数、边界条件进行设定，从而通过改变参数分析磁力线分布情况。

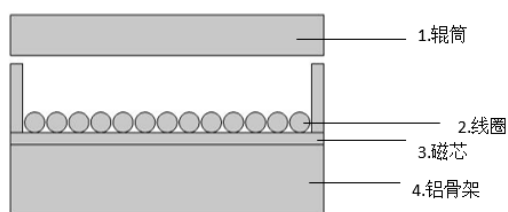
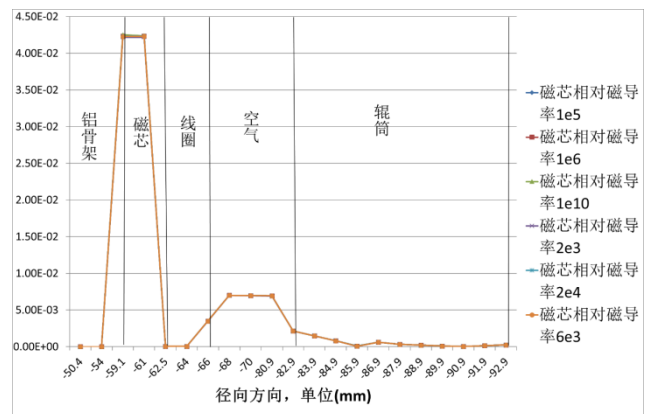


图 1 热辊的二维模型剖面图

2.2 影响磁力线的主要因素



注：横坐标为各点离轴心的距离，单位为 mm。
纵坐标为磁通密度模大小，单位 A/m²。

图 2 磁芯相对磁导率不同时磁通密度模分布图 (辊筒用 45 号钢)

①相对磁导率对磁力线的分布影响与分析:

通过 $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$ 可知，磁导率对磁力线有一定的影响。计算辊筒为 45 号钢时，磁芯相对磁导率不同时磁通密度模分布情况。

由图 2 可知，当磁芯的相对磁导率改变时，磁芯、空气和辊筒上的磁通密度模随相对磁导率增大没有明显的增大。磁力线大多数分布在磁芯上，其磁通密度模最大，值在 0.042185~0.042512 A/m²之间；其次分布在线圈与辊筒之间的空气隙中，其磁通密度模值在 0.003475~0.0070044 A/m²之间；而在辊筒壁上几乎没有磁力线其磁通密度模也非常小。由此看来，影响辊筒壁上磁通密度的大小不能通过改变磁芯材料来实现。

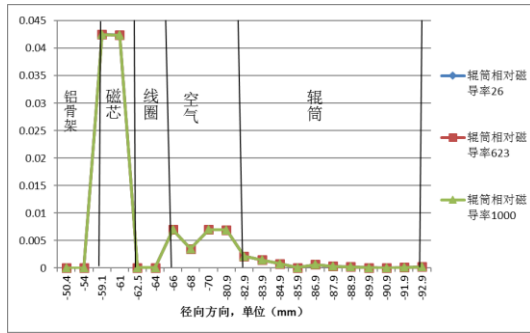


图 3 辊筒相对磁导率不同时磁通密度模对比折线图

由图 3 可知，其他参数相同的情况下，辊筒的相对磁导率改变对磁力线的分布和磁通密度模没有明显影响，同样是在磁芯上磁力线分布最多，在线圈和辊筒间的空气中分布次之，在铝筒骨架、线圈和辊筒内几乎没有磁力线分布。

②电导率对磁力线的分布影响与分析：目前辊筒采用 45 号钢，其电导率为 $2.74e7[S/m]$ ，由公式 $\sigma = J/E$ 可知，电导率高产生涡流较多，对其产生的热能、加热效率都有所提升。表 1 给出本次仿真所采用的不同材料辊筒的电导率对照表。

表 1 改变辊筒电导率仿真参数表

材料	硬度	电导率
45	35HRC	$2.74e7[S/m]$
40	36 HRC	$3.34e7[S/m]$
50	28 HRC	$1.12e5[S/m]$

根据表 1 给出的参数，进行辊筒电导率参数设定，并通过有限元计算

得出，不同电导率下，辊筒磁通密度模数据，并绘制图 4 辊筒电导率不同时磁通密度模对比折线图

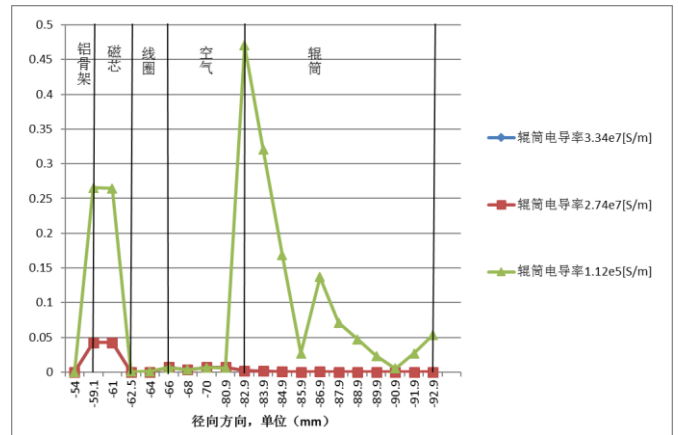


图 4 辊筒电导率不同时磁通密度模对比折线图

由图 4 可知，当电导率减小为 $\sigma = 1.12 e5[S/m]$ 时，辊筒上的磁力线分布明显增多，磁通密度模也明显增大，而磁芯中的磁通密度模减小，说明电导率对磁力线分布有明显的影 响。但是，当电导率高到一定程度时，磁力线就很难进入辊筒中。经过分析得到，该问题由磁屏蔽引起。

③不同辊筒材料影响分析：通过上述单一变量分析得出，电导率对于辊筒上磁通密度模的影响明显大于相对磁导率。但由于实际材料中，不能进行单一变量更改，因此进行材料整体参数对于磁力线影响大小的理论分析和计算。以此来证明上述分析的正确性。

参数表如表 2 所示，通过有限元法计算出图 5 所示各点磁通密度模，

得出辊筒采用不同材料时各点的磁通密度模数，并绘制折线对比图 6。图 7 为 45 号钢、40 号钢和 50 号钢的磁通密度模等值线图。

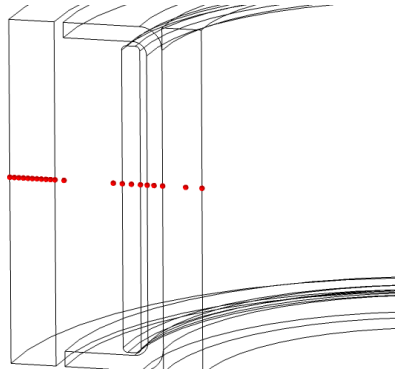


图 5 分布点

表 2 不同钢材参数表

材料	硬度	最大相对磁导率	电导率
45 号钢	35HRC	661	2.74e7[S/m]
40 号钢	36 HRC	512	3.34e7[S/m]
50 号钢	28 HRC	510	1.12e5[S/m]

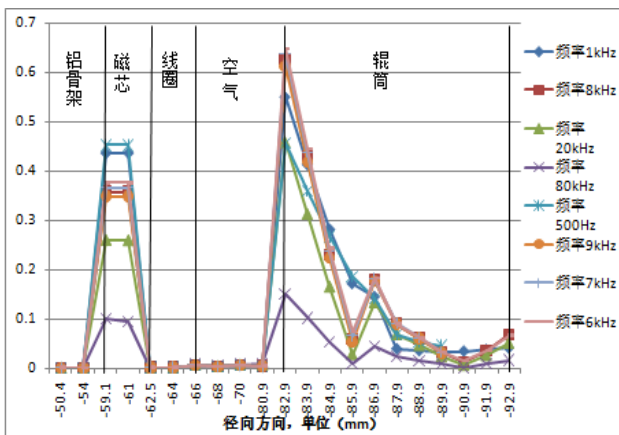


图 6 不同辊筒材料各部分磁通密度模对比分析图

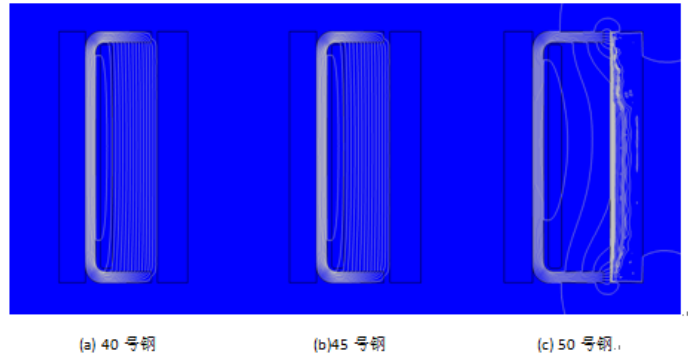


图 7 不同型号钢材料下的磁通密度模等直线图

由此可知，电导率对磁力线分布的影响因素较大，在此更推荐使用 50 号钢替代 45 号钢材料。

④不同磁芯材料影响分析：由于 45 号钢材料的电导率太大，出现了磁屏蔽现象，因此显示出磁导率的影响不明显。下面讨论在辊筒采用 50 号钢材料时，其他条件都不变的情况下，只改变磁芯材料时，绘制图 8 各点磁通密度模对比。

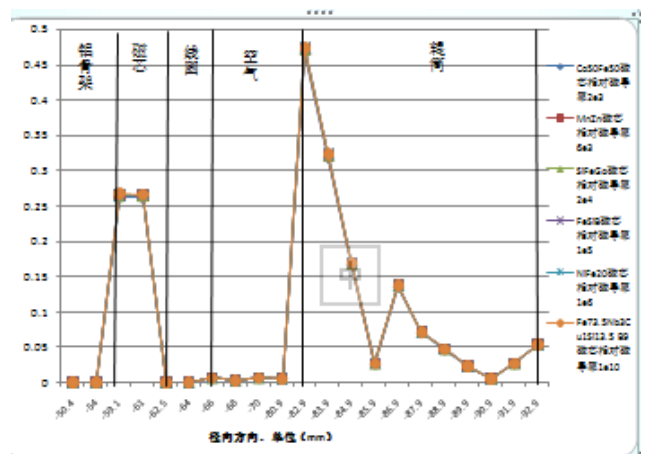
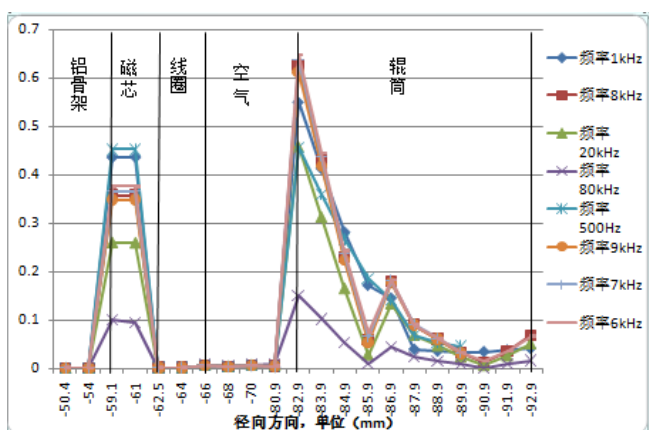


图 8 不同磁芯材料各部分磁通密度模对比分析图

根据图 8 可知，磁芯材料的磁导率大小不论在辊筒上是否出现磁屏蔽对各部分磁力线分布和磁通大小没有影响，在选择磁芯材料是主要考虑它的磁滞损耗的大小。

⑤频率对磁力线的分布影响与分析：由图 9 能清晰地看出频率对磁通密度模的影响，在磁芯上当频率增加时，磁通密度模减小，但是在辊筒上的磁通密度模就不完全符合这个规律，很显然当频率 $f=6\text{kHz}$ 时，在辊筒上的磁通密度模最大，其次是 $f=7\text{kHz}$ 时，再是 $f=20\text{kHz}$ 时， $f=80\text{kHz}$ 时的磁通密度模最小，但是频率为 500Hz 时，在辊筒上磁通密度模反而小。在辊筒上磁通密度模分布不均匀，从内壁到外壁具有减小趋势。越靠近内壁其磁通密度模越



大。

图 9 频率对比分析图

2.3 三维建模：

建立模型，并进行磁场与温度场的多物理场设定，设置边界条件，并加入二维分析中获得的最佳参数值，进行网格划分，如图 10 所示。加入频域和频域-稳态对 45 号钢与 50 号钢的进行对比分析和研究。

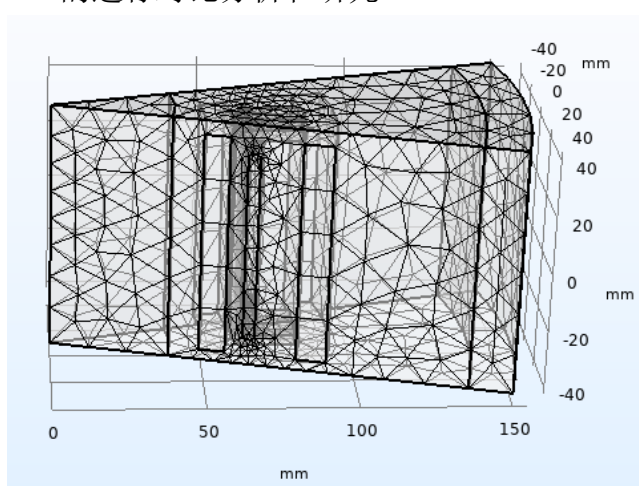


图 10 网格

①涡流分布情况：辊筒电导率在一定范围内，电流密度随着电导率的增加而增加，但是并不是都遵守这个规律。由图 11 可看出，45 号钢和 50 号钢的电导率相差 100 倍，但是其感应电流几乎相等。在辊筒壁上的分布也是其内壁上的值大，越往外也减小。

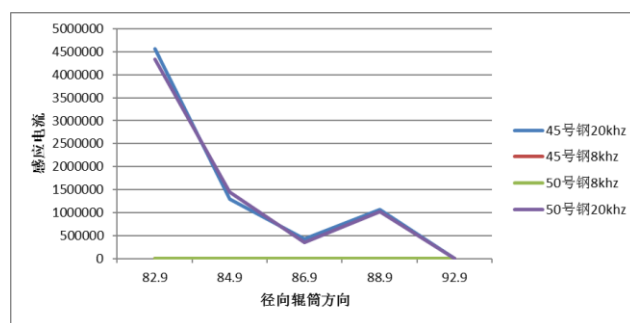


图 11 各点感应电流密度大小对比图

根据公式 $R = \frac{\rho L}{S}$ 可知,当其他情况相同时, R 随 ρ 增长而增长,而根据 $\rho = \frac{1}{\sigma}$ 可知,随着电导率 σ 的增大电阻率 ρ 减少。因此,随着电导率 σ 的增大电阻 R 减少。根据 $Q = i^2 R t$ 得到以下感应电流所产生的温度对比图。

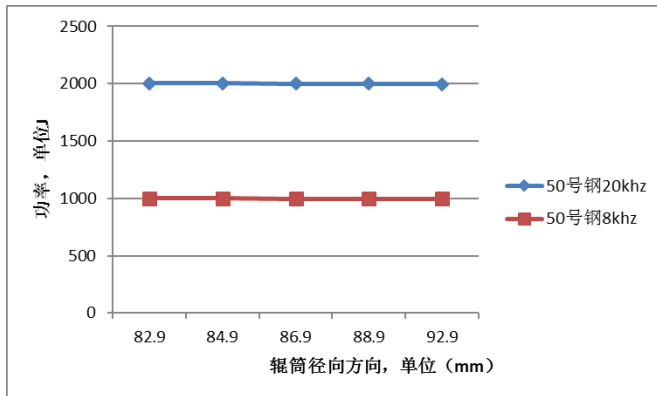


图 12 各点温度大小对比图

由对比图可知 R 的变化明显大于 i^2 的变化, R 由电导率 σ 决定。由此可知, 辊筒上希望得到较大的热功率时, 并非电导率越高产生的热能越大, 而是需要具体分析 i^2 与 R 的大小变化, 从而进行相关比较。因此可知 Q 的主要影响因素不仅仅跟涡流大小有关还跟电导率大小有关。

②温度结果分析与研究:

1) 不同材料对温度的影响: 根据温度场耦合后, 得到 50 号钢与 45 号钢的温度平面效果图, 如图 13 和图 14。

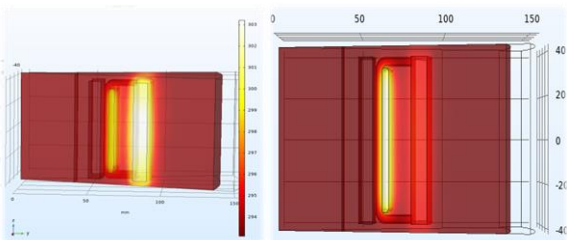


图 13 50 号钢平面温度

图 14 45 号钢平面温度

选取不同位置的点, 进行有限元计算各点温度, 得到数据采集分析, 绘制图 15 各点温度曲线折线图。

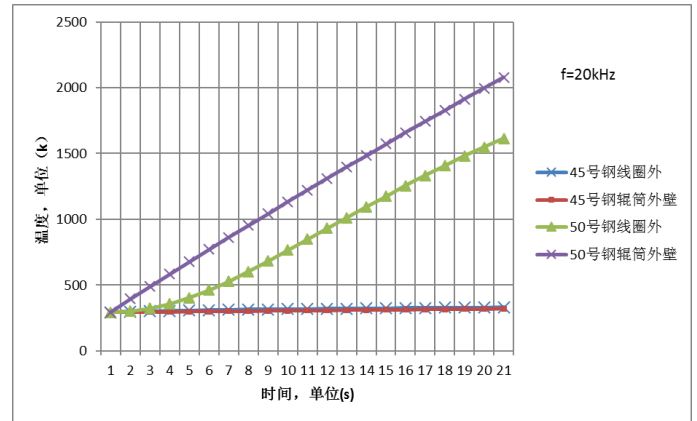


图 15 各点温度曲线

由图 15 可知, 当辊筒采用 45 号钢的电导率时, 由于电导率大, 在工作时线圈的温度高于辊筒的温度, 且加热速率慢, 升温速度慢。而辊筒采用 50 号钢时, 其相同时间的温度明显高于 45 号钢的温度, 而辊筒外壁的温度明显高于线圈温度, 且升温速度快。

2) 不同频率对温度的影响: 当辊筒选取 50 号钢, 其电导率为 1.12×10^5 , 对于线圈和热辊进行对应点求解温度, 并进行比较。本次抽取的点主要为线圈内外侧、辊筒内外侧。根据不同的频率, 不同的位置, 所产生的温度不同。

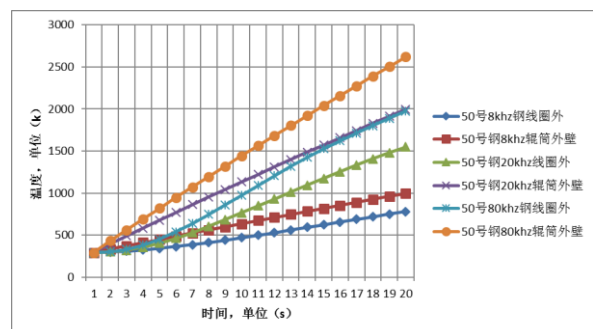


图 16 不同频率下各点温度分布图

通过取不同频率，相同时间，进行不同点的温度对比。得到对比图 16。

由图 16，在工作时辊筒的温度高于线圈温度。当频率为 80kHz 时，辊筒与线圈的温度明显高于频率为 20kHz 和 8kHz 时的辊筒与线圈温度。由此可知，频率越高辊筒与线圈的温度越高，且升温越快。

③不同材料的热功率与时间的关系：根据图 17 曲线的对比，可知电导率较高的热功率较高，热效应较大，其主要因为电导率较低时，辊筒内进入的磁力线较多，漏磁少，没有出现磁屏蔽现象。如图 4-17 所示对比图。由此可知，目前的目前设备中，导线经常烧毁的原因在于辊筒的电导率较高。因此，根据实际仿真得到结论，我建议辊筒使用电导率较低的材料，以此提高加热速度和加热效率，减少线圈损耗，增加线圈寿命。

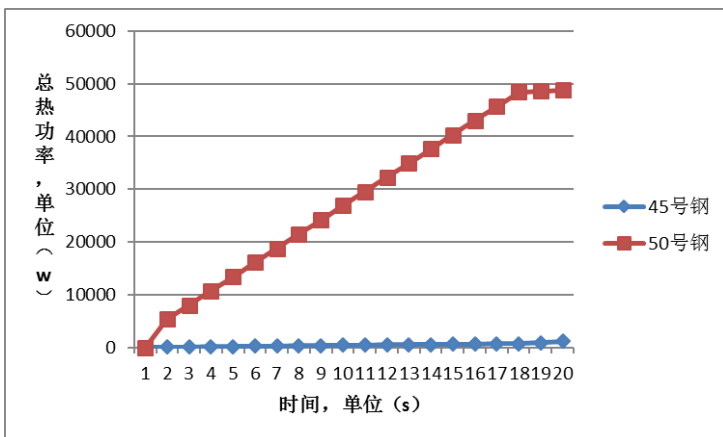


图 17 不同材料的热功率与时间的关系

3. 结论：

通过计算和仿真得出以下结论：

- ①磁芯和辊筒相对磁导率的大小，对辊筒上磁通密度模没有显著影响，在选择磁芯材料时应选择剩磁较小的材料，这样磁损耗小，热量更多地在线圈上产生。
- ②当辊筒的电导率大时，由于磁屏蔽，则磁通密度模小，热功率主要集中在在线圈上，线圈的温度高于辊筒上的，容易烧毁加热线圈。建议辊筒选择电导率相对小的材料 50 号钢。
- ③随着频率的增大，虽然磁通密度模减小，但是感应电流增加，热效率增加，温度升高快。
- ④相对介电常数对磁损耗几乎无影响。

参考文献：

- [1] 王江波. 行波磁场感应加热[A]. 河北：河北工业大学 2006
- [2] 于建英. 橡塑类机械内置式双边电磁感应加热关键技术研究[A]. 沈阳：沈阳工业大学 2015
- [3] 赵旭枫. 高频感应钎焊温度场分析与试验研究[A]. 南京：南京航空航天大学 2007
- [4] 郭松军. 钢基体无熔梁熔敷铜高频感应焊接数值模拟研究[A]. 南京：南京理工大学 2009
- [5] 吴金富. 基于 ANSYS 的感应加热数值模拟分析[A]. 浙江：浙江工业大学 2004
- [6] 中国纺织科学研究院. 热牵伸辊[J]. 纺织科学研究, 1998 (02) : 51-56
- [7] 王伟, 杨礼国, 叶斌, 彭森林, 宋文庆. 分区感应加热式热牵伸辊的开发概况 [J]. 纺织科学研究, 1995 (01) : 24-27.

- [8] 杨澍. 高频电磁感应加热成形热源模型建立及数值模拟研究[J]. 材料开发与应用, 2015, (04): 20-23
- [9] 谢贝贝, 王允建, 王国东, 余发山. 瓦楞辊的分区分段电磁感应加热仿真研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(04): 467-471
- [10] 侯立峰. 高频电磁烘筒加热过程建模与控制方法研究[A]. 河北: 河北科技大学 2013
- [11] 杨晓光, 汪友华. 横向磁通感应加热装置中线圈形状对涡流及温度分布的影响[J] 金属热处理, 2003, 25(07): 49-54
- [12] 刘俊杰. 电工纯铁的含碳量与磁性能的关系[J] 航空兵器, 2002(2): 45-46.
- [13] Zhu Z Q, Ng K, Schofield N, et al. Improved analytical modeling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets[C]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 2004, 151(6): 641-650.
- [14] Bellera A, Bali H, Belfkira R, et al. Analytical prediction of open-circuit eddy-current loss in series double excitation synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2011, 47(9): 2261-2268.
- [15] Tiegna H, Bellera A, Amara Y, et al. Analytical modeling of the open-circuit magnetic field in axial flux permanent-magnet machines with semi-closed slots[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2012, 48(3): 1212-1226.