感应加热炉磁场和温度场的数值模拟及磁屏蔽环的参数优化

姬军鹏[1]，张　宁[1]，路景杰[1]，张志刚[2]，常　宏[3]

（1. 西安理工大学电气工程学院，陕西西安 710048；
2. 上海兆力电炉设备有限公司，上海 201607；
3. 西安北辰亿科电子科技有限公司，陕西西安 710399）

摘要：针对感应加热炉磁屏蔽环异常发热问题，以30 t坩埚型感应加热炉为对象，采用COMSOL有限元分析软件计算并通过试验验证了带磁屏蔽环感应加热炉的磁感应强度和磁屏蔽环的温度场分布规律。结果表明，通过调节磁屏蔽环与加热线圈的间距可以抑制磁屏蔽环的异常发热；增加磁屏蔽环的横截面积，可以降低其发热温度。通过数值模拟结果对比得到了优化方案：磁屏蔽环与加热线圈的间距为480 mm，磁屏蔽环横截面积为1 000 mm^2。现场测量结果表明，磁屏蔽环设计优化后漏磁场的磁感应强度由20.21 mT减小到19.54 mT，且温度由338 ℃降低到267 ℃，在保证屏蔽效果的基础上，抑制了磁屏蔽环的异常发热。

关键词：感应加热；数值模拟；磁场屏蔽；系统优化；温度场

作者简介：
姬军鹏（1979–）男，高级工程师，博士，主要从事磁场感应热处理研究。E-mail：jijunpeng@xaut.edu.cn

中图分类号：TM924.5
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）04-0529-08

基金项目：
2024年西安市科技计划科学家+工程师队伍建设项目（24KGDW0051）；2023年度陕西省教育厅科学研究计划服务地方专项政企联合资助项目（23JE032）；2023年碑林区应用技术研发储备工程项目（GX2341，GX2344，GX2343）。
收稿日期：
2024–12–19收到初稿，
2025–02–19收到修订稿。

感应加热技术基于电磁感应原理，在线圈上加载高频交变电流产生磁场，在磁场作用下被加热工件内部产生涡流，涡流的产生导致热量的生成，从而实现电能通过磁能转化为热能。该技术具有高效、节能和环保等显著特点，是工业热处理领域中的一项重要技术[1-3]。通常情况下，通过磁轭的设计集中和引导感应加热炉通电线圈周围产生磁场，使得线圈周围磁场分布可控。磁轭集中和引导磁场过程中有磁场泄露问题，泄露的磁场污染了感应加热炉周围的电磁环境，不仅干扰周边电子设备或电气设备的正常运行，还影响操作人员的健康和安全[4-5]。为了应对这一问题，在感应加热炉顶部设置磁屏蔽环被证明是一种有效地屏蔽漏磁感应强度的方法，磁屏蔽环设计成为热处理领域的研究热点[6-8]。

杜世俊等人将超导环向场磁体线圈盒磁场分解为两垂直分量求涡流，发现线圈盒屏蔽效应因磁场方向不同而差异大，对切向磁场渗透屏蔽作用强[9]。董全林等人构建3组垂直线圈磁场屏蔽系统，用毕奥-萨伐尔定律和Matlab软件分析比较矩形与圆形线圈磁场分布，试验显示矩形性能稍好[10]。管少华等人解决多级同步感应线圈发射器电枢相关问题，分析无屏蔽状况，对比不同屏蔽体效能，提出优化方案，如特定位置与组合，使磁感应强度降低，提升屏蔽效能[11]。王强等人通过详尽的数值模拟与试验验证，揭示了磁屏蔽技术对电磁出钢系统中感应加热电源功率损耗的实质影响[12]。邱德荣等人研究了高温超导带制成的无绝缘线圈，无绝缘线圈充放电延迟阻碍其用于交流电源器件，他们测试其屏蔽交变磁场能力，试验显示无绝缘线圈可屏蔽交变磁通，不受匝间电阻和频率影响[13]。李韵豪对比分析了多种磁屏蔽环性能，但在材料特性与工业环境多样性匹配，极端条件下的性能和可靠性方面研究需深化[14]。

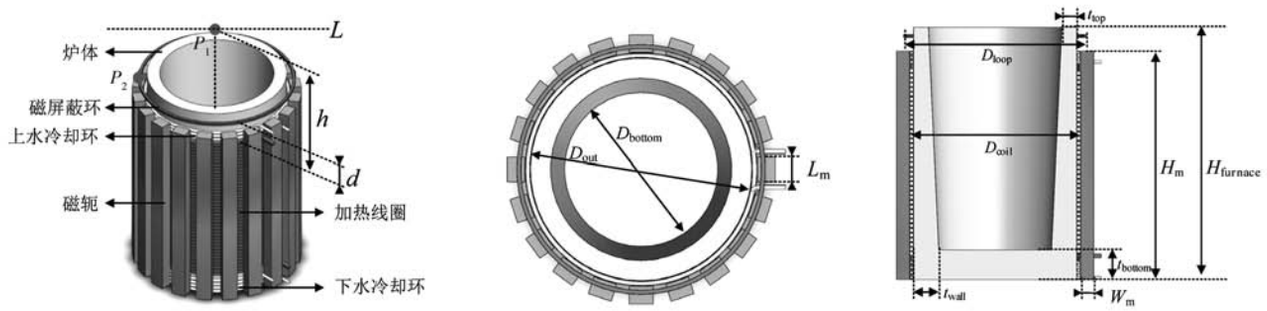
然而，以上这些研究不能反映出感应加热炉磁屏蔽环的磁场屏蔽分布规律，对磁屏蔽环本身异常发热的原因没有描述。基于此，本研究利用COMSOL软件，建立感应加热炉磁屏蔽环的磁场屏蔽和磁屏蔽环的温度场数值模型，分析屏蔽磁场和磁

屏蔽环温度场的分布规律，基于磁屏蔽环安装位置和横截面积两个参数研究磁屏蔽环的参数优化方法，在不降低漏磁感应强度屏蔽效果的前提下，有效抑制磁屏蔽环的异常发热。

1 数值模型的建立

1.1 物理模型

带有磁轭和磁屏蔽环的感应加热炉物理模型如图1所示，图示了炉体、上水冷却环、加热线圈、下水冷却环、磁轭和磁屏蔽环的结构。炉体盛金属熔炼液，其体积决定容量，加热线圈产生主要的感应加热的磁场，是热场能量的来源，调节主线圈流过的电流强度与频率，基于涡流效应，实现对加热深度和加热效果的调节。水冷却环的作用是增加磁屏蔽环与加热线圈之间的距离，从而提升系统的加热效率。磁轭集中并引导磁场分布，优化热场分布的均匀性。磁屏蔽环抑制感应加热炉顶端的磁场泄漏，避免漏磁感应强度对环境造成的干扰和污染。



（a）立体图　　（b）俯视图　　（c）切面图

图1　感应加热炉物理模型

Fig. 1 Physical model of the induction heating furnace

本研究以30 t坩埚型感应加热炉为研究对象，炉体高度$H_{furnace}$为4 250 mm，外径D_{out}为2 740 mm，炉底内侧直径D_{bottom}为1 890 mm，炉底内侧壁厚t_{wall}为425 mm，炉底厚度t_{bottom}为500 mm，炉顶壁厚t_{top}为250 mm。磁屏蔽环为1匝，直径D_{loop}为3 050 mm，位于距离感应加热线圈上方d=540 mm的位置，如图1所示。优化前，磁屏蔽环的截面为外边长Y=50 mm、内边X=20 mm的方形，如图2所示。加热线圈40匝，上水冷却环3匝，下水冷却环4匝，水冷却环和加热线圈的绕环直径D_{coil}均为2 830 mm，水冷却环的横截面外直径为45 mm的圆形，壁厚3 mm；加热线圈的横截面边长为60 mm的方形，其中内部直径为39 mm的中空结构。磁轭长L_m为300 mm、宽W_m为220 mm、高H_m为3 850 mm，共计20片，磁轭围绕感应加热炉周围圆周均匀分布。选取炉体中轴线与距离加热线圈上方一定高度h平面的交点作为参考点P_1，以及磁屏蔽环表面的指定点P_2作为第二参考点，分别用于磁场强度和温度的测量与分析，如图1所示。

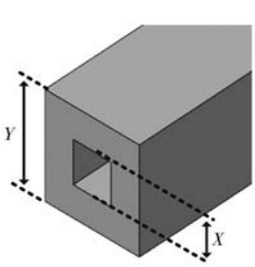


图2　磁屏蔽环横截环面

Fig. 2 Cross-sectional view of the magnetic shielding ring

1.2 模型假设

为了提高计算效率，在不影响计算准确性的条件下，对数值模型进行了如下假设。

（1）假设所有材料均质且各向同性。

（2）不考虑磁场对外部载物金属支架和底部支撑金属腿架的涡流作用。

（3）因为距离和辐射热量存在衰减，不考虑感应加热炉体内漏料对屏蔽磁环的热辐射作用。

（4）设定铜的电导率与温度的关系如式（1）所示。

$$\sigma(T)=\sigma_0[1-\alpha_{copper}(T-T_0)] \quad (1)$$

式中：$\sigma(T)$为温度T时铜的电导率，S/m；T为温度，℃；σ_0为参考温度T_0下的电导率；α_{copper}为铜的电导率温度系数，1/℃；T_0为参考温度。

（5）设定硅钢的磁导率与温度的关系如式（2）所示。

$$\mu(T)=\mu_0[1-\alpha_{Sisteel}(T-T_0)] \quad (2)$$

式中：$\mu(T)$为硅钢在温度T时的磁导率，H·m^{-1}；μ_0为硅钢在温度T_0时的磁导率；$\alpha_{Sisteel}$为硅钢的磁导率温度系数，1/℃。

1.3 网格划分

本模型采用非均匀网格划分，以平衡计算精度与仿真时效[15]。在感应加热炉系统中线圈弯折的几何复杂拐角与界面交互区域采用高密度网格，以提高计算精度。如在炉体周围空气部分的非关键空旷区域实施稀疏网格，以减轻计算负担，加速求解过程。对于模型中如磁轭的实体部分，考虑到不同材料属性和结构特征对网格密度需求的差异，网格尺寸范围设定为模型最小边界长度的5%~20%，图3给出了感应加热炉磁屏蔽环周围区域的非均匀网格划分结果。

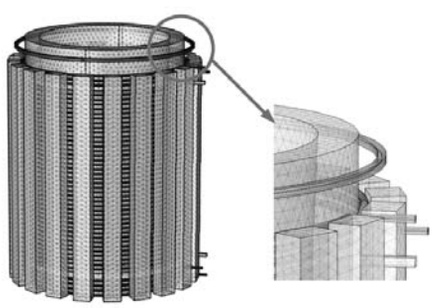


图3 感应加热炉模型非均匀网格划分

Fig. 3 Non-uniform grid meshing of the induction heating furnace model

为了提高仿真精度，在现有网格划分的基础上引入了边界层网格，以更好地模拟电流的趋肤效应。边界层网格的总厚度设置为电流的透入深度，并将其细分为6层。从外向内，每层网格的厚度按自然数倍数逐层递增，此设置有助于更准确地模拟电流在导体表面的集中及向导体中心逐渐衰减的过程。如图4所示的屏蔽环外表面的边界区域，采用考虑透入深度的边界层网格划分方法。

1.4 控制方程

采用COMSOL多物理场仿真软件，在电磁感应加热过程中，主要的控制方程有电磁感应方程、固体传热方程以及电磁热耦合方程。

（1）电磁感应方程

感应加热系统计算磁感应强度、电流密度和电场的频域方程如式（3）所示。

$$\begin{cases} \nabla\times H=J \\ B=\nabla\times A \\ J=\sigma E+j\omega D+J_e \\ E=-j\omega A \end{cases} \quad (3)$$

式中：∇为哈密顿算子；H为磁场强度，A/m；J为电流密度，A/m^2；B为磁感应强度，T；A为磁矢位，T·m；σ为电导率，S/m；E为电场强度，V/m；D为电通量密度，C/m^2；J_e为位移电流，A/m^2；ω为角频率，rad/s；j为虚数单位。

在电磁感应加热数值模拟过程中，式（3）的电磁感应方程可计算流过感应加热线圈电流产生的磁感应强度分布，可计算在线圈产生的磁感应强度作用下，磁屏蔽环内部的电流分布，进而分析电流分布所产生的反向磁感应强度的屏蔽效应。此外，还可计算磁屏蔽环在感应涡流作用下的热效应。

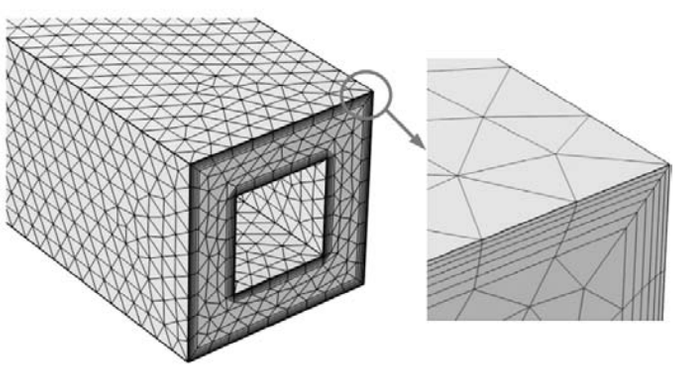


图4 虑及透入深度的磁屏蔽环边界层网格划分

Fig. 4 Grid division of the boundary layer in the magnetic shielding ring considering penetration depth

（2）固体传热方程

感应加热过程中，计算感应加热系统传热效应的固体传热瞬态方程如式（4）所示。

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q \quad (4)$$

式中：ρ为传热材料的密度，kg/m^3；C_p为比热容，J/（kg·K）；k为热导率，W/（m·K）；Q为内部热源

项，W/m^3。

通过固体传热瞬态方程，计算磁屏蔽线圈热量向周围的传导效应，以及感应加热过程中的热量向外传导的效应。

（3）电磁热耦合方程

电磁场中产生的焦耳热会作为热源项Q纳入热传导方程中，焦耳热的方程如式（5）所示。

$$Q=J\cdot E \quad (5)$$

式中：Q为焦耳热效应产生的内部热源密度，W/m^3；J为感应涡流的电流密度，A/m^2；E为感应电场强度，V/m。

通过焦耳热方程，描述磁感应强度与热场之间的转换，可以计算磁屏蔽环中涡流效应产生的热量，通过热传导方程，将热量转化成温度场。

1.5 边界条件设置

（1）感应加热炉周围区域设为空气，相对磁导率为1，相对介电常数为1。

（2）感应加热炉及周围区域的初始温度设置为20 ℃。

（3）磁感应强度的边界条件定义为无源边界条件，不允许磁场穿过边界，磁场线在边界上切向于边界。

2 结果与讨论

2.1 数值模拟数据与实测数据对比分析

为验证本研究所建立的感应加热炉有限元仿真模型的合理性及其预测能力，建立了与仿真工况参数及设置完全一致的测试现场，重点测量了感应加热炉的屏蔽漏磁场和磁屏蔽环的温度。

测量如图1所示的在加热线圈上方850 mm的线段L上的漏磁场分布，其中线段L中心为P_1点，线长6 m。使用型号为UNI-T UT335A的数字高斯计进行磁感应强度测量，每个测量点测量三次，并取三次测量值的平均值作为该点磁感应强度值。在L线上每隔0.5 m测量磁感应强度，共13个测量点，测取的磁感应强度值如图5中实测值所示。

图5同时给出了感应加热线圈上方850 mm线段L上的13个磁感应强度仿真值。通过对比磁感应强度的仿真值和测量值，可以看出，13个测试点的仿真值与实测值之间的误差（e）分别为7.42%、8.70%、8.86%、6.14%、1.97%、3.38%、2.33%、0.75%、2.40%、6.05%、3.19%、7.41%和5.85%，均保持在9%以内，表明仿真模型在大多数位置上能够较为准确地预测感应加热炉的磁场分布。

此外，测量了磁屏蔽环表面P_2点的温度，三次测量结果平均值为338 ℃，仿真温度为330 ℃，误差为2.42%。

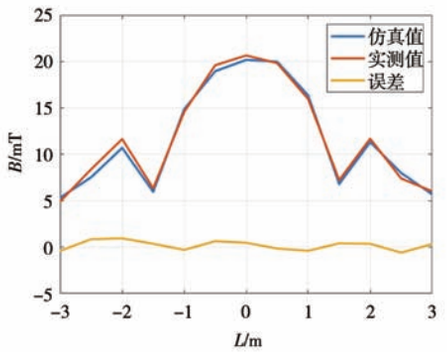


图5 磁感应强度实测值与仿真值对比图

Fig. 5 Comparison of the measured and simulated magnetic induction strengths

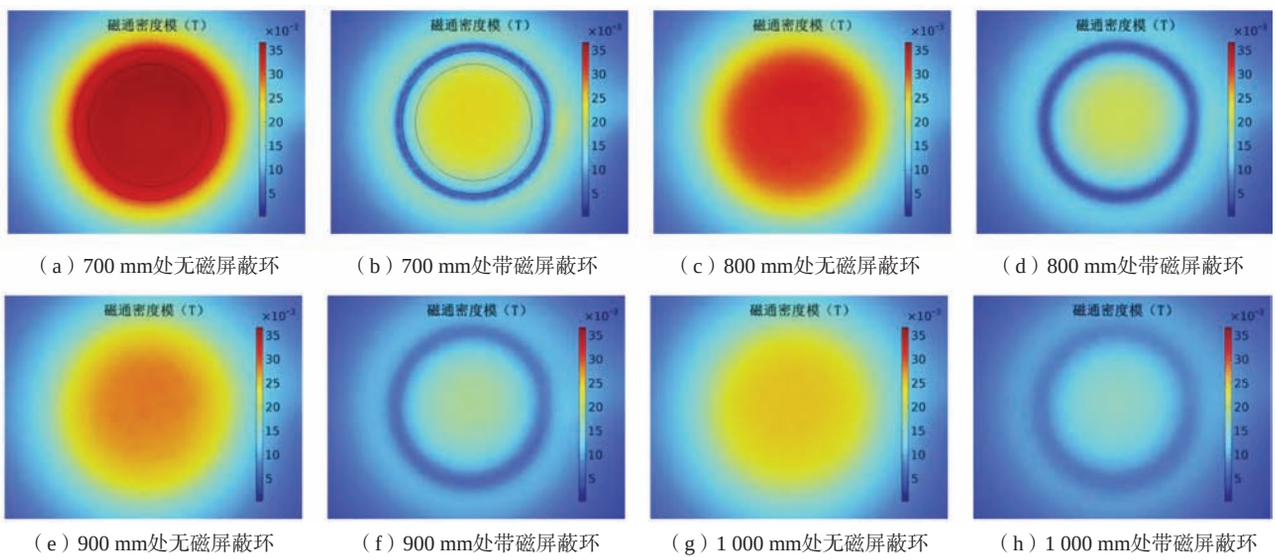
磁感应强度及磁屏蔽环温度的仿真值和实测值对比结果表明，所建立的感应加热炉有限元仿真模型对感应加热炉的磁场分布和磁屏蔽环的温度具有良好的预测能力，下一步能利用该模型对感应加热炉加热过程的磁感应强度和磁屏蔽环温度变化进行分析。

2.2 磁屏蔽环的磁屏蔽效果和热效应分析

2.2.1 磁屏蔽环的屏蔽效果分析

探究磁屏蔽环对感应加热炉产生的漏磁感应强度的屏蔽作用，需要建立带磁屏蔽环和不带磁屏蔽环两种情况的感应加热炉磁感应强度分布数值仿真模型，仿真出加热线圈上方不同距离处的漏磁感应强度分布。不带磁屏蔽环时，在距离加热线圈700、800、900和1 000 mm处的磁感应强度分布云图分别如图6（a）、6（c）、6（e）、6（g）所示；距离感应加热线圈上方540 mm处添加磁屏蔽环时，在距离加热线圈上端700、800、900和1 000 mm处的磁感应强度分布云图分别如图6（b）、6（d）、6（f）、6（h）所示。

对比图6（a）、6（c）、6（e）、6（g），或图6（b）、6（d）、6（f）、6（h），可以看出，无论带磁屏蔽环还是不带磁屏蔽环，距离加热线圈越高，感应加热炉顶端的磁感应强度分布强度越小，说明随着高度h增加，磁感应强度本身在减小。分别对比图6（a）与6（b）、或者6（c）与6（d）、或者6（e）与6（f）、或者6（g）与6（h），可以看出，带磁屏蔽环时，漏磁感应强度值小，说明磁屏蔽环可以有效屏蔽感应加热炉顶端的漏磁感应强度，如对比6（a）和6（b），漏磁感应强度在切面中心位置处最大可以屏蔽9.36 mT。在磁屏蔽环的投影区域内，磁感应强度屏蔽效果最好。距离加热线圈越高，磁屏蔽环的屏蔽效果越差。



（a）700 mm处无磁屏蔽环　（b）700 mm处带磁屏蔽环　（c）800 mm处无磁屏蔽环　（d）800 mm处带磁屏蔽环

（e）900 mm处无磁屏蔽环　（f）900 mm处带磁屏蔽环　（g）1 000 mm处无磁屏蔽环　（h）1 000 mm处带磁屏蔽环

图6　有无磁屏蔽环时加热线圈上方不同高度处的磁感应强度分布

Fig. 6 Magnetic induction intensity distribution at different heights above the induction heating coil with and without the magnetic shielding ring

通过数值仿真可得到距离加热线圈距离h处感应加热炉中心的磁感应强度，如图1所示的P_1点，以探究加热线圈上方的漏磁感应强度被屏蔽的分布规律。从700至1 050 mm每隔50 mm取一数据点，共计8个数据点，P_1处的带磁屏蔽环和不带磁屏蔽环的磁感应强度如图7所示。随着距离h增加，磁感应强度不断减小，在距离h为750 mm处，屏蔽效果最好，漏磁感应强度被屏蔽了10.43 mT。

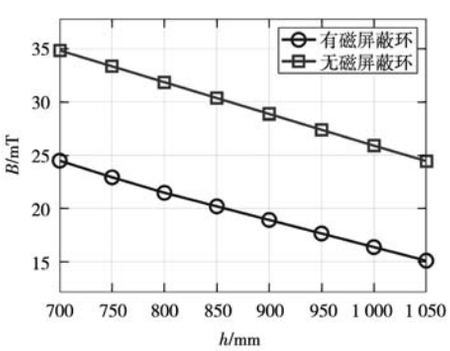


图7　有无磁屏蔽环的漏磁感应强度

Fig. 7 Magnetic leakage induction intensities with and without the magnetic shielding ring

2.2.2　磁屏蔽环的热效应分析

在加热线圈上方850 mm处加磁屏蔽环，通过数值仿真模型可以得到如图8所示的磁屏蔽环的热场分布云图。从云图上可以看出，磁屏蔽环的温度场分布，磁屏蔽环横截面环中心温度为330 ℃，屏蔽环上边缘处温度为334 ℃，屏蔽环下边缘处温度为331 ℃，屏蔽环左边缘处温度为328 ℃，屏蔽环右边缘处温度为327 ℃，平均温度为330 ℃。

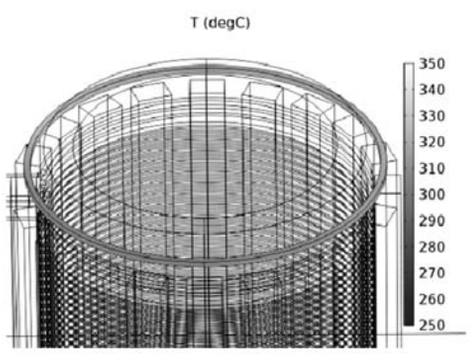


图8　磁屏蔽环的温度场分布

Fig. 8 Temperature field distributions of the magnetic shielding ring

2.3　磁屏蔽环设计对屏蔽效果及其发热效应的影响

2.3.1　磁屏蔽环安装位置的影响

在距离加热线圈顶端的不同位置安装磁屏蔽环，通过所建立的三维数值仿真模型，可以多次仿真得到如图1所示P_1处的磁感应强度，以分析磁屏蔽环安装位置对漏磁感应强度屏蔽效果的影响。同时也可以仿真得到磁屏蔽环横截面环中心温度，以分析磁屏蔽环安装位置对磁屏蔽环发热效应的影响。

数值仿真在d从370 mm至690 mm范围内，每隔40 mm取一个点，共计9个数据点的情况下，得出距离加热线圈顶端850 mm的感应加热炉中心处P_1的磁感应强度B，如图9所示。对比不带磁屏蔽环在距离加热线圈上方850 mm处30.36 mT的工况，其磁感应强度屏

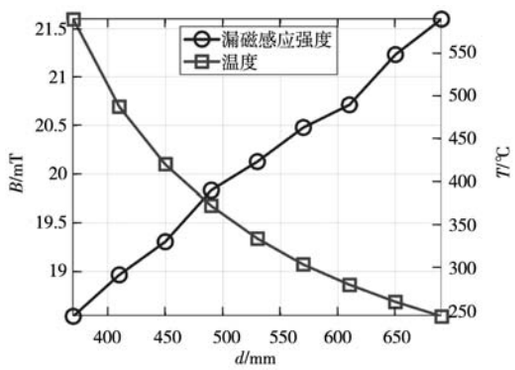


图9　不同磁屏蔽环位置的漏磁场磁感应强度和磁屏蔽环温度

Fig. 9 Magnetic flux densities of the leakage magnetic field and temperature distributions of the magnetic shielding ring at different positions

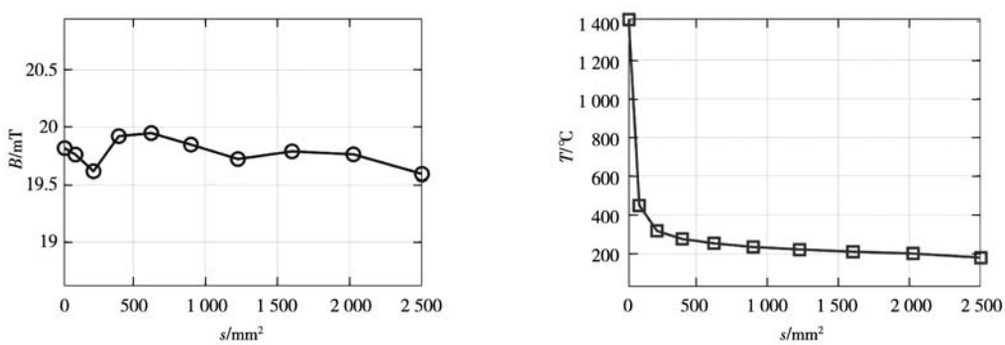
蔽效能分别为4.29、4.09、3.93、3.70、3.57、3.42、3.32、3.11、2.96 dB。同时，数值仿真的磁屏蔽环横截面环中心温度如图9所示。

从图9可以看出，当磁屏蔽环与加热线圈的距离d增加时，被屏蔽后的磁感应强度增大，同时磁屏蔽环上的温度减小，在图9两条曲线交点处，即h为480 mm处，虑及漏磁感应强度屏蔽效果与磁屏蔽环发热效应达到磁屏蔽环位置最优，此时被屏蔽后的磁感应强度为19.71 mT，而磁屏蔽环温度为372 ℃。

2.3.2　磁屏蔽环横截面积的影响

在距离加热线圈480 mm处，安装磁屏蔽环，通过所建立的三维数值仿真模型，在距离加热线圈850 mm的感应加热炉中心处，即图1的P_1处，可通过数值仿真得到磁感应强度B，以分析不同磁屏蔽环横截面积对漏磁感应强度屏蔽效果的影响。同时，也可以仿真得到磁屏蔽环横截面环中心温度，以分析不同磁屏蔽环横截面积对磁屏蔽环发热效应的影响。

当磁屏蔽环横截面积分别为25、100、225、400、625、900、1 225、1 600、2 025和2 500 mm^{2}时，数值仿真得出，距离加热线圈850 mm的感应加热炉中心处P_1的磁感应强度及磁屏蔽环横截面环中心温度，如图10所示。



（a）漏磁感应强度　　（b）磁屏蔽环横截面环中心温度

图10　不同横截面积的漏磁场磁感应强度和磁屏蔽环温度

Fig. 10 Magnetic flux densities and temperatures of the magnetic shielding ring for different cross-sectional areas of the leakage magnetic field

无磁屏蔽环时距离加热线圈850 mm的感应加热炉中心P_1处的磁感应强度为30.36 mT，结合图10（a），可以得出，磁屏蔽环的磁感应强度屏蔽效能分别为：3.81、3.73、3.72、3.75、3.70、3.65、3.66、3.73和3.71 dB。根据图10（a）和图10（b），对比在不安装磁屏蔽环时P_1处为30.36 mT的工况，可以看出，磁屏蔽环的横截面积变化对漏磁屏蔽效果的影响较小，漏磁值变化范围仅在10.41~10.77 mT时，影响较小。磁屏蔽环横截面积较小时，磁屏蔽环的温度会异常升高，当横截面积在1 000 mm^{2}以上时对磁屏蔽环的温度影响不大。

2.4　磁屏蔽环的系统优化

根据上述仿真分析结果，综合考虑漏磁感应强度屏蔽效果和磁屏蔽环的温度情况，对该感应加热系统磁屏蔽环提出优化方案：基于磁屏蔽环安装位置对屏蔽效果及其发热效应的影响分析，优化设计磁屏蔽环安装在加热线圈以上480 mm处。基于磁屏蔽环横截面积对屏蔽效果及其发热效应的影响分析，优化设计磁屏蔽环横截面的方形外围边长为50 mm，磁屏蔽环横截面积为1 000 mm^2。

根据该优化设计，上海兆力电炉设备有限公司搭建了一个感应加热炉系统，具体结构如图11和图12所示。对距离加热线圈850 mm感应加热炉中心图1所示P_1点的磁感应强度进行测量，发现优化前的磁感应强度为20.21 mT，屏蔽效果为3.53 dB；优化后的磁感应强度为19.54 mT，屏蔽效果为3.83 dB，屏蔽效果提高

图12　现场测试过程
Fig. 12 On-site testing process

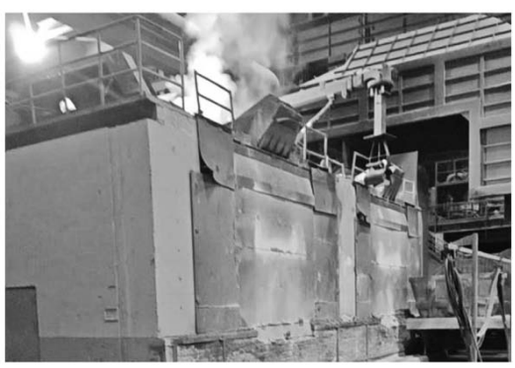


图11　现场感应加热炉实物图
Fig. 11 Physical model of the induction heating furnace on site

了8.5%。对磁屏蔽环的温度进行测量，发现磁屏蔽环的温度优化前为338 ℃，优化后为267 ℃，温度降低了21.01%。所以，此优化方案有效提升了漏磁场的屏蔽能力，并抑制了磁屏蔽环过度加热的现象。

3　结论

（1）磁屏蔽环可以有效地屏蔽感应加热炉产生的漏磁感应强度，磁屏蔽环距离加热线圈较近时，漏磁感应强度屏蔽效果越好，但是磁屏蔽环的温度越高，越容易出现异常发热，需要综合考虑漏磁感应强度屏蔽效果和磁屏蔽环温度以设计磁屏蔽环的安装位置。

（2）通过实际现场测量数据，验证了所建立的感应加热炉有限元仿真模型的合理性及其预测能力。

（3）磁屏蔽环的横截面积变化对漏磁屏蔽效果影响较小，但当横截面积减小时，对磁屏蔽环的发热影响较大。当磁屏蔽环的横截面积较小时，温度会异常升高，而当横截面积超过1 000 mm^2时，温度的变化趋于稳定。

（4）优化后的磁屏蔽环距离加热线圈480 mm，磁屏蔽环横截面积为1 000 mm^2时，通过实际测量验证了屏蔽后的磁感应强度为19.54 mT，磁屏蔽环测量温度为267 ℃，既实现了漏磁感应强度的有效屏蔽，又抑制了磁屏蔽环的异常发热。

参考文献：

[1]　陈强. 电感应加热技术在高速线材直接轧制中的应用 [J]. 轧钢，2023，40（6）：112–117.
[2]　任忠鸣，雷作胜，李传军，等. 电磁冶金技术研究新进展 [J]. 金属学报，2020，56（4）：583–600.
[3]　金辉. 电磁感应加热技术与应用 [J]. 连铸，2019，44（2）：62–65.
[4]　曹晨，沈艳，顾宁. 电磁辐射对人体健康影响的多组学研究进展 [J]. 南京医科大学学报（社会科学版），2019，44（2）：62–324.
[5]　GU C，LAI L，CHEN S，et al. Open magnetic shielding by superconducting technology [J]. IEEE Transactions on Applied

Superconductivity，2019，29（5）：1–4.
[6] NGUYEN D N，VO D T. Comprehensive finite element modeling for pulsed magnet design using COMSOL and java [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2020，30（4）：1–5.
[7] WU Jiancheng，WANG Shaopeng，WANG Youhua，et al. Sensitivity analysis of design parameters in transverse flux induction heating device [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2020，40（4）：1–6.
[8] 赵伟霞，董全林，孙茂多，等. 一种圆鞍形磁屏蔽线圈的设计与性能研究 [J]. 计量学报，2015，36（5）：540–545.
[9] 杜世俊，张永生. 超导环向场磁体线圈盒对磁场的屏蔽效应 [J]. 中国电机工程学报，2002，22（11）：124–128.
[10] 董全林，刘雪萍，范运强，等. 矩形线圈和圆形线圈屏蔽环境磁场的效能比较研究 [J]. 计量学报，2014，35（5）：484–487.
[11] 管少华，关晓存，郭灯华，等. 多级同步感应线圈发射器电枢内部强磁场屏蔽与优化 [J]. 电工技术学报，2020，35（S2）：333–340.
[12] 王强，何明，朱晓伟，等. 电磁场技术在冶金领域应用的数值模拟研究进展 [J]. 金属学报，2018，54（2）：228–246.
[13] QIU Derong，ZHANG Jianwen，WEI Bengang，et al. Feasibility study of closed-loop no-insulation coil to shield alternating magnetic field [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2017，27（6）：1–5.
[14] 李韵豪. 铸造工业的感应加热 第四讲 感应熔炼电炉设计和感应器参数计算（中）[J]. 金属加工（热加工），2020（4）：71–82.
[15] 安博，孟欣雨，杨双骏，等. 非均匀矩形网格的局部网格细化LBM算法研究 [J]. 力学学报，2023，55（10）：2288–2296.

Numerical Simulation of Magnetic and Temperature Fields in Induction Heating Furnace and Parameter Optimization of Magnetic Shield Ring

JI Jun-peng[1], ZHANG Ning[1], LU Jing-jie[1], ZHANG Zhi-gang[2], CHANG Hong[3]
(1. School of Electrical Engineering, Xi′an University of Technology, Xi′an 710048, Shaanxi, China; 2. Shanghai Zhaoli Electric Furnace Equipment Co., Ltd., Shanghai 201607, China; 3. Xi′an Polaris-Etek Co., Ltd., Xi′an 710399, Shaanxi, China)

Abstract:
To address the issue of abnormal heating of the magnetic shielding ring in an induction heating furnace, and taking a 30-ton crucible-type induction heating furnace as object of study, the magnetic flux density and temperature field distribution law of the magnetic shielding ring have been calculated by using of COMSOL finite element analysis software and validated through experiments for the induction heating furnace with magnetic shielding ring. The results showed that adjusting the distance between the magnetic shielding ring and the induction heating coil suppressed the abnormal heating of the ring, and increasing the cross-sectional area of the magnetic shielding ring reduced its temperature. An optimized design was derived based on the comparison of numerical simulation results: the distance between the magnetic shielding ring and the induction heating coil was 480 mm, and the cross-sectional area of the ring was 1 000 mm^2. On-site experimental results demonstrated that after optimization of the magnetic shielding ring design, the magnetic flux density of the magnetic leakage field was reduced from 20.21 mT to 19.54 mT, and the temperature decreased from 338 ℃ to 267 ℃ . This optimization effectively suppressed the abnormal heating of the magnetic shielding ring while ensuring the shielding performance.

Key words:
induction heating; numerical simulation; magnetic field shielding; system optimization; temperature field

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）