引文格式：朱相陈, 张伟, 张森南, 等. 电子束高速扫描线圈电磁仿真和优化[J]. 航空制造技术, 2026, 69(21): 26020035.
ZHU Xiangchen, ZHANG Wei, ZHANG Sennan, et al. Electromagnetic simulation and optimization of high-speed scanning coils for electron beams[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(21): 26020035.

电子束高速扫描线圈电磁仿真和优化

朱相陈，张　伟，张森南，李嘉乐
（北京航空航天大学，北京 100191）

[摘要] 针对电子束选区熔化增材制造中大角度高速扫描的要求，深入开展扫描线圈设计及其高频性能优化研究。基于Helmholtz线圈和空心结构设计了低感抗扫描线圈，并通过ANSYS软件建立了扫描线圈有限元模型，仿真结果与理论计算值及试验实测值吻合良好，磁感应强度的最大偏差仅为5.65%，且磁感应强度的大小能够满足大角度偏转的要求。本文重点研究了不同频率电流激励下线圈内衬材料和线圈外部屏蔽材料对偏转扫描磁场的影响，在此基础上优选绝缘且相对磁导率接近1的氧化铝陶瓷作为扫描线圈内衬材料，同时定制锰锌铁氧体材料作为扫描线圈外部磁屏蔽体，大大提升了扫描线圈的高频性能，不仅使线圈内部偏转磁场增强34.7%，而且大幅降低了高频电流激励下电子枪外壳中的涡流损耗，实现了扫描线圈电子束流通道的防护。本文设计的高速扫描线圈可应用于60 kV和120 kV电子束选区熔化增材制造电子枪中，实现了电子束大角度高速扫描。

关键词：电子束增材；扫描线圈；偏转磁场；高频；电磁仿真
中图分类号：V26；TP211　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.16080/j.issn1671-833x.26020035

Electromagnetic Simulation and Optimization of High-Speed Scanning Coils for Electron Beams

ZHU Xiangchen, ZHANG Wei, ZHANG Sennan, LI Jiale
(Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] To meet the requirements of large-angle high-speed scanning in electron beam selective melting additive manufacturing, this paper conducts in-depth research on scanning coil design and its high-frequency performance optimization. A low-inductance scanning coil is designed based on the Helmholtz configuration with a hollow structure, and its finite-element model is established via ANSYS. The simulation results show good consistency with theoretical calculations and experimental measurements; The maximum deviation of magnetic induction intensity is only 5.65%, and the magnetic induction intensity satisfies the requirement for large-angle deflection. This work investigates the effects of coil inner-lining material and outer shielding material on the deflection-scanning magnetic field under current excitation of different frequencies. On this basis, electrically insulating alumina ceramic with relative permeability close to unity is selected as the coil inner-lining material, and custom-fabricated manganese-zinc ferrite is adopted as its outer magnetic shield. These treatments substantially improve the high-frequency performance of the scanning coil: The internal deflection magnetic field is enhanced by 34.7%, eddy-current loss in the electron-gun housing under high-frequency current excitation is greatly reduced, and protection for the electron-beam channel of the scanning coil is realized. The proposed high-speed scanning coil has been implemented in 60 kV and 120 kV electron guns for electron beam selective melting additive manufacturing, enabling large-angle high-speed electron-beam scanning.

Keywords: Electron beam additive manufacturing; scanning coil; Deflection magnetic field; High frequency; Electromagnetic simulation

收稿日期：2026-01-30；**退修日期：**2026-03-02；**录用日期：**2026-06-02
基金项目：国家重点研发计划（2023YFB4605000）
通信作者：张伟，副教授，博士，研究方向为电子束焊接装备及工艺。

电子束选区熔化增材制造技术是在真空环境下以高能电子束为热源，熔化金属粉末逐层堆积成形的制造技术[1–3]。该技术具有能量密度高、成形质量好等优点[4–6]，同时真空环境还可以有效避免零件氧化[7–8]，在航空航天、医疗和汽车等领域具有广泛的发展前景[9–11]。电子束扫描系统作为选区熔化增材制造设备的核心部件，主要由扫描线圈及其驱动电路构成，通过扫描线圈产生磁场控制电子束偏转扫描，熔化金属粉末实现零件成形。同时，利用电子束偏转扫描还可以实现粉末床预热、成形区域温度补偿、零件随行退火等工艺，可以有效减小温度梯度、降低热应力[11–12]。此外，提高扫描速度还可以缩短零件单层扫描时间，有助于加工件的快速成形和金属元素蒸发的减少，从而提升成形质量和效率[12–14]。然而，电子束的扫描速度是由偏转磁场决定的，而偏转磁场的变化速度又取决于驱动扫描线圈的电流变化速率。根据电路欧姆定律可知，提高扫描驱动电路输出电压、减小线圈电感量是提升驱动电流变化速率的有效途径。当线圈驱动电路输出电压一定时，通过线圈结构设计和优化来减小线圈电感量，对于实现电子束高速扫描尤为重要。在扫描线圈驱动电流高速变化时，线圈内外的磁场同步高速变化，很容易在电子枪金属部件中激发涡流，涡流产生的磁场会抵消线圈内部的偏转磁场，引起偏转磁场衰减，不仅降低电子束的偏转范围，而且会影响电子束的偏转精度。因此，提升扫描线圈偏转磁场的高频特性，是实现电子束高速偏转扫描亟需解决的问题。

传统扫描线圈多采用带磁芯的环形或多极靴形结构[15–16]。其中，环形结构由于线圈内部磁场相互抵消，难以获得较高的磁场强度；多极靴形结构虽然能够保证较好的磁场均匀性，但对机械加工、极靴定位精度，以及线圈绕制工艺要求较高[17]。更重要的是，以上两种结构的线圈都具有磁芯，其电感量较大，很难实现驱动电流的快速变化。张伟等[18]基于Helmholtz线圈结构设计了一种扫描线圈，并配合所设计的高频驱动电路开展了试验研究，获取了较为均匀的偏转磁场。由于Helmholtz线圈结构简单且无磁芯，电感量较低，实现了电子束较高速度的偏转扫描。同时，赵攀峰[17]、路开通[19]和李平林[20]等也开展了相关的研究，然而上述研究大都侧重于线圈结构与驱动电路设计，对高频电流激励下偏转扫描磁场的变化及其影响因素的研究较少。与此同时，在工程应用中电子束大角度偏转时往往会出现少量电子逸出轰击线圈骨架而导致线圈烧蚀的现象，从而影响电子束选区熔化增材制造装备运行的可靠性。

为实现电子束的高速扫描并提高扫描线圈高频性能，本文深入开展了电子束扫描线圈的设计及优化研究。首先，基于Helmholtz线圈工作原理，采用空心结构设计扫描线圈；然后，建立了扫描线圈仿真模型并采用ANSYS软件进行了电磁场仿真，并通过试验进行验证。在此基础上，重点研究了不同频率电流激励下线圈内衬材料和线圈外部屏蔽材料对偏转磁场的影响，进而对偏转扫描线圈进行了优化，所研制的偏转扫描线圈用于60 kV和120 kV电子束选区熔化增材制造电子枪，实现了电子束大角度高速扫描及可靠运行。

1 电子束扫描线圈仿真

1.1 电子束偏转原理

在电子枪中，电子经高压电场加速后沿着扫描线圈轴线进入偏转磁场中，在洛伦兹力的作用下做圆周运动，产生一定的偏转角度，电子束偏转原理如图1所示[17]。

考虑到电子偏转区域对磁场均匀性的要求，在理论分析中假设扫描线圈产生的是匀强磁场B，电子偏转角度为θ，根据洛伦兹力公式和几何关系，可得[17]：

$$\theta=\arctan\left(\frac{L}{H_2}\right) \tag{1}$$

$$B=\frac{\sin\theta}{H_1}\cdot\sqrt{\frac{2Um}{e}} \tag{2}$$

式中，L表示扫描要求距离150 mm；H_2表示工作距离500 mm；H_1表示磁场厚度100 mm；U表示加速电压60 kV；$\frac{e}{m}$为电子荷质比，为1.758×10^{11} C/kg。计算可得电子偏转角度为16.7°，所需的磁感应强度B_N=2.37 mT。

1.2 建立仿真模型

基于Helmholtz线圈原理，采用两组相同且相互垂

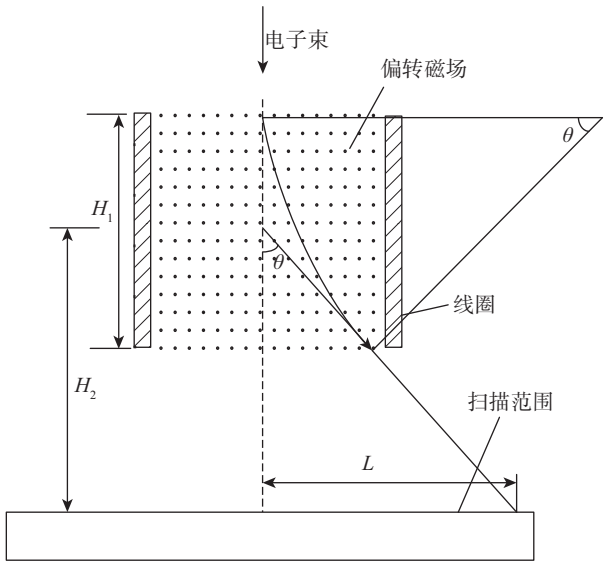


图1 电子束偏转示意图[17]

Fig.1 Schematic diagram of electron beam deflection[17]

直的线圈（X方向和Y方向）构成扫描线圈，其中单个方向线圈的结构如图2所示。

扫描线圈的匝数为$2N$，通过线圈的电流为I，扫描线圈轴线上在中心O点产生的磁场磁感应强度最大，根据毕奥–萨戈尔定律，线圈上的每一单元都会在O点产生磁场$\mathrm{d}\boldsymbol{B}$[21]：

$$\mathrm{d}\boldsymbol{B}=\frac{\mu}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{e}_{\mathrm{b}}}{b^2} \tag{3}$$

式中，μ表示空气的磁导率，因为空气和真空的磁导率几乎相等，所以$\mu=4\pi\times10^{-7}$ T·m/A；$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$表示微小导线单元矢量；b表示导线单元到点O的距离；$\boldsymbol{e}_b$表示距离b的单位矢量。

根据式(3)和线圈的尺寸参数，对线圈上每一单元在O点处产生的磁场进行积分，当线圈间距g=35 mm时，可以得到O点磁感应强度和NI的关系为

$$B_O=NI\frac{\mu}{\pi}\left(\frac{1.41}{a}+\frac{1.41R}{r^2}\right) \tag{4}$$

式中，a表示线圈竖直段到O点的距离，R表示线圈圆弧段的半径，$R=a=37.5$ mm，r表示线圈圆弧段到O点的距离，$r=62.5$ mm。

根据磁感应强度B_{N}和式(4)计算得到N=116.7 A，因为扫描线圈产生的磁场并不是完全均匀的磁场，为了保证电子束偏转角度能够满足要求的扫描范围，需要进行冗余设计，所以选取NI=120 A，将确定的NI值代入式(4)，可以得到修正后$B_O=2.45$ mT；设定通过线圈的电流为2 A，扫描线圈匝数为60。

利用ANSYS软件平台对扫描线圈进行三维电磁仿真分析。由于X与Y方向线圈在结构参数上完全一致，产生的磁场强度及分布理论上也相同，为提高计算效率，仅选取其中一个方向的线圈进行仿真。仿真模型中空气域的尺寸设定为线圈模型的5倍，如图3所示。针对扫描线圈、空气域及磁场的有效区域分别进行了网格划分，线圈和磁场有效区域采用较密的网格，空气域则采用较疏的网格。为便于后续的数据提取与分析，建立了坐标系：以线圈的几何中心O点为坐标原点，以X方向线圈的法线为X轴，以扫描线圈的轴线为Z轴；Y轴则经过O点并垂直于X轴与Z轴所构成的平面；同时，在X轴上设置了关于原点O对称的采样路径W，总长度为200 mm，如图3所示。

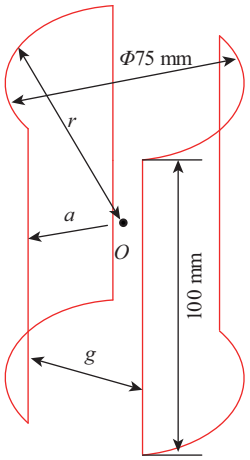


图2 单方向扫描线圈结构

Fig.2 Unidirectional scanning coil structure

对X方向线圈加载2 A的直流电流，在图3中的路径W上采样电子偏转区域内的数据，得到图4中电子束偏转区域内的静磁场磁感应强度曲线。

1.3 仿真模型验证

为验证仿真模型的准确性，进行静磁场试验；根据设计的线圈参数，采用绝缘胶木作为骨架绕制扫描线圈，其电子偏转区域直径为60 mm，如图5所示。在X方向线圈上施加2 A的直流电流，在图3中的采样路径W上以原点O为对称中心，间隔5 mm，共设13个采样点，

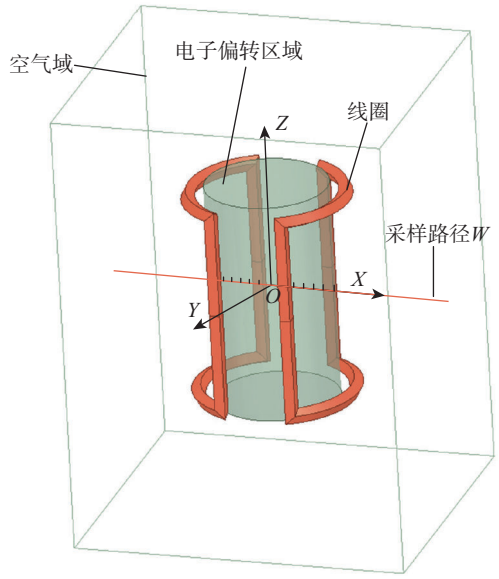


图3 电磁仿真模型

Fig.3 Electromagnetic simulation model

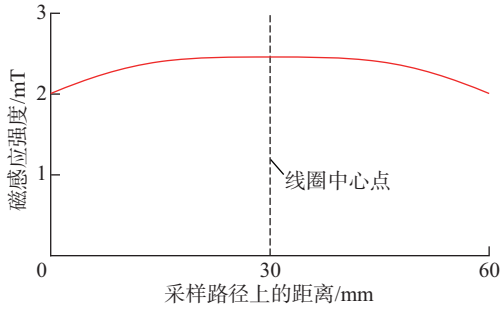


图4 静磁场中采样路径上的磁感应强度曲线

Fig.4 Curve of magnetic flux density along the sampling path under static magnetic field

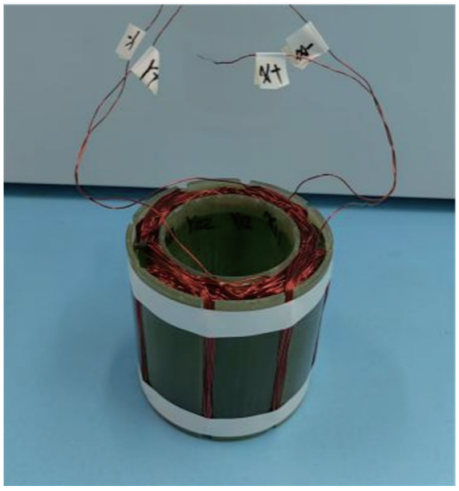


图5　绕制的扫描线圈实物

Fig.5　Photograph of the wound scanning coil

其中两端采样点位于线圈骨架内侧，受限于测量探头的厚度以及骨架的圆弧，无法测量准确位置，于是将其位置设定为2 mm和58 mm，使用高斯计测量采样点的磁感应强度。试验测量结果与对应位置的仿真计算结果如表1所示，并计算了仿真值相对于试验值的相对偏差。

根据表1的数据可知，仿真计算结果与试验测量值之间差异较小，最大相对偏差为5.65%。分析试验结果可知，扫描线圈中心路径上的磁场分布均匀性良好，且测得的最大磁感应强度与理论计算值吻合较好。由此表明，所建立的电子束扫描线圈仿真模型能够准确反映实际模型的磁场特性。因此，基于该有限元仿真模型，深入开展高频电流激励下扫描线圈偏转磁场的高频特性研究。

2　扫描线圈高频性能优化

2.1　高频电流激励下线圈内衬材料对偏转磁场的影响

为解决逸出电子烧蚀线圈骨架的问题，本文提出在线圈骨架内侧增加内衬的保护方案。内衬为紧贴骨架内壁的薄壁圆管结构，高度110 mm、外径60 mm、壁厚2 mm。为避免内衬对偏转磁场产生较大的影响，初步选用黄铜作为内衬材料，其相对磁导率接近空气磁导率，理论上对静磁场影响较小。增加黄铜内衬后的仿真模型如图6所示。为分析黄铜内衬在不同频率激励下的电磁响应，对无内衬扫描线圈及加装黄铜内衬的优化模型分别施加峰值2 A，频率为0 Hz、1 kHz与20 kHz的正弦激励电流进行仿真比较。仿真参数保持为默认网格及5倍模型尺寸的空气域。仿真计算后，采样路径W上的磁感应强度分布曲线对比如图7所示。

仿真结果显示，在电子束偏转区域内，高频激励下加

表1　模型试验结果与仿真结果

Table 1　Experiment and simulation results of model

路径位置/mm	X方向磁感应强度/mT	仿真结果/mT	仿真结果偏差/%
2	2.2	2.08	5.45
5	2.3	2.17	5.65
10	2.4	2.31	3.75
15	2.4	2.40	0
20	2.4	2.44	1.67
25	2.4	2.45	2.08
30	2.4	2.45	2.08
35	2.4	2.45	2.08
40	2.4	2.44	1.67
45	2.4	2.40	0
50	2.4	2.31	3.75
55	2.3	2.17	5.65
58	2.1	2.08	0.95

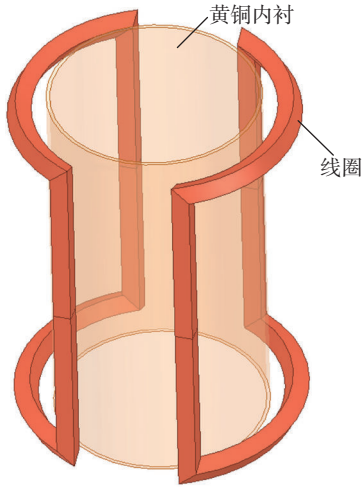
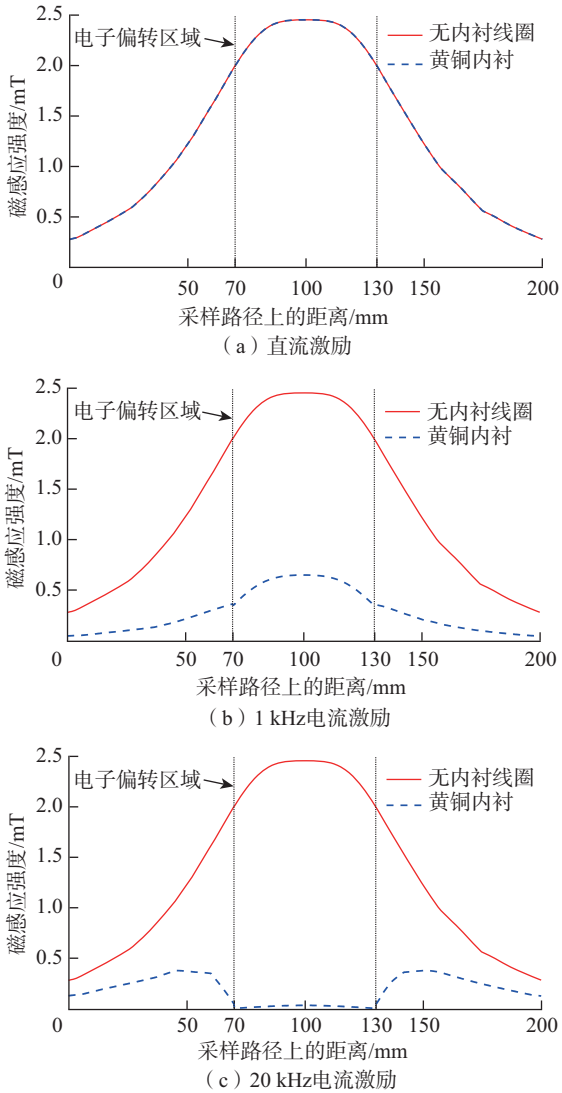


图6　增加黄铜内衬的优化模型

Fig.6　Optimized model with brass inner-lining

装黄铜内衬线圈的磁感应强度显著降低，且随频率升高衰减加剧。在20 kHz激励下，磁感应强度由静磁场的2.45 mT急剧下降至42 μT。进一步分析黄铜内衬中的电流分布发现，其在1 kHz与20 kHz条件下均呈现出高感应电流密度，最大值达1.3×10^7 A/m^2，如图8所示。分析上述现象可知，黄铜作为优良导电体，在高频交变磁场中会感应出涡流，该涡流产生的磁场会抵消线圈内部的偏转磁场，导致偏转磁场衰减。因此，内衬材料的选择除了考虑磁导率外，还必须考虑高频电流激励下感生涡流的影响。氧化铝陶瓷是一种绝缘材料，具有优良的耐高温性能，其相对磁导率接近1，在导电性与导磁性方



（a）直流激励

（b）1 kHz电流激励

（c）20 kHz电流激励

图7　不同频率电流激励下的磁感应强度曲线对比

Fig.7　Comparison of magnetic induction intensity curves under current excitation at different frequencies

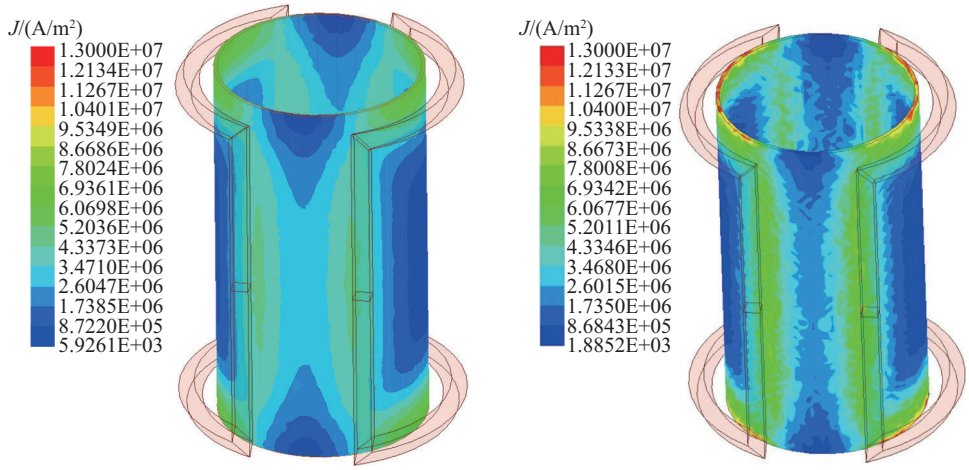
面与空气相似，所以采用氧化铝陶瓷作为扫描线圈内衬。氧化铝陶瓷与无内衬线圈模型具有相同的偏转磁场分布，不仅能够满足线圈保护的要求，而且对高频变化的偏转磁场没有影响。

2.2　高频电流激励下线圈外部屏蔽材料对偏转磁场的影响

随着电子束扫描速度提高，线圈内部的偏转磁场和外部的磁场也高速变化，在电子枪的金属外壳（主要材料为304不锈钢）中会感应出涡流，该涡流产生的磁场也会引起线圈内部偏转磁场的衰减。此外，涡流效应还会造成能量损耗，降低扫描线圈本身的效率。因此，有必要增加磁屏蔽装置，将磁场有效地与外部隔离。为模拟实际工况，设置了304不锈钢模型代表电子枪壳体。该模型为空心圆柱体，外径160 mm、内径140 mm、高度110 mm。

磁屏蔽的基本原理是构建低磁阻路径，引导磁通集中通过，从而减少向外部空间泄露磁感应强度。根据磁路欧姆定律，磁阻 $R_m=\frac{l}{\mu S}$，其中 l 为磁路长度，S 为截面积。磁阻与磁路长度成正比，与磁导率和截面积成反比。理想情况下，通过优化磁路几何尺寸可以降低磁阻，但在结构受限时，选用高磁导率材料是更加可行的方案。本研究选用锰锌铁氧体作为磁屏蔽材料，其相对磁导率为2000，电阻率为7 Ω·m；设计的磁屏蔽体为空心圆柱结构，套置于偏转线圈外部，高度110 mm（略高于线圈）、外径125 mm、内径105 mm。增加锰锌铁氧体磁屏蔽体后的优化模型如图9(a)所示；为进行对比分析，设置了无磁屏蔽体的对照模型，如图9(b)所示。

针对无屏蔽扫描线圈模型及增加锰锌铁氧体磁屏蔽体后的优化模型，分别在峰值电流2 A，频率0 Hz，1



（a）1 kHz电流激励　　（b）20 kHz电流激励

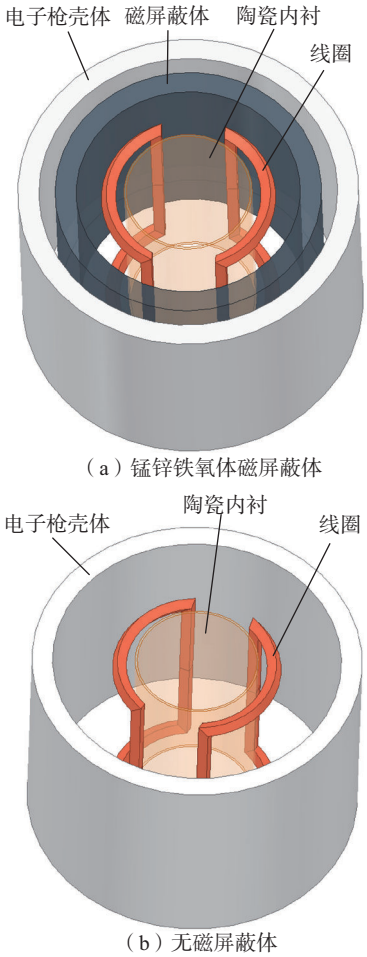
图8　在高频激励下黄铜内衬上的感应电流密度分布云图

Fig.8　Contour of induced current density on brass inner-lining under high-frequency excitation

kHz和20 kHz的正弦激励条件下进行了电磁仿真。路径W上的磁感应强度仿真结果如图10所示，结果表明，在各频率激励下，锰锌铁氧体磁屏蔽体外部空间的磁感应强度均衰减至接近0，有效验证了该磁屏蔽结构对线圈偏转磁场的屏蔽能力。分析激励电流频率对偏转磁场的影响可以发现，在无额外磁屏蔽的对照模型中，偏转磁场的磁感应强度随频率增加而降低，且在20 kHz激励下，偏转区域内的磁感应强度峰值从2.45 mT衰减至2.15 mT。相比之下，增加锰锌铁氧体磁屏蔽体模型的磁感应强度则不受激励电流频率的影响。图11与12分别给出了在交流激励下，锰锌铁氧体磁屏蔽模型与无屏蔽模型中电子枪壳体上的涡流分布。对比分析可知，无屏蔽模型中的电子枪壳体在高频下产生了强烈的涡流效应，磁感应强度受涡流影响而衰减。在采用锰锌铁氧体屏蔽后，电子枪壳体上的感应电流密度降至原有水平的约1/400，从而显著减小了涡流的影响，也降低了涡流损耗。此外，从图10中可观察到，加装锰锌铁氧体磁屏蔽体后，偏转区域内的磁感应强度峰值由原模型的2.45 mT提升至3.3 mT，增幅达34.7%。该增强效应可从磁路角度解释，根据磁路欧姆定律$\phi=F/R_m$，其中，ϕ为磁通量，可表示为$\phi=\int B\cdot \mathrm{d}S$；$F=NI$为磁动势，$R_m$为磁阻，$S$为面积。由于锰锌铁氧体具有高磁导率，其磁阻远低于空气路径。在磁动势F保持不变的情况下，磁阻的降低使磁通量ϕ显著增大。在偏转区域磁路横截面积不变的条件下，磁感应强度B相应提高。综上可知，增加锰锌铁氧体磁屏蔽体不仅能够有效抑制外部磁场、降低涡流损耗，还能因磁路优化显著增强偏转磁场强度，从而整体提升扫描线圈的效能与效率。

2.3 扫描线圈优化

根据上述仿真结果，最终的扫描线圈基于Helmholtz线圈原理，采用空心结构进行绕制；扫描线圈内部采用氧化铝陶瓷作为内衬，以实现电子束流通道的防护；扫描线圈外部定制专门的锰锌铁氧体圆筒作为电磁屏蔽



（a）锰锌铁氧体磁屏蔽体

（b）无磁屏蔽体

图9 增加磁屏蔽体的优化模型和无屏蔽对照模型

Fig.9 Optimization model for adding magnetic shielding bodies and control model without shielding

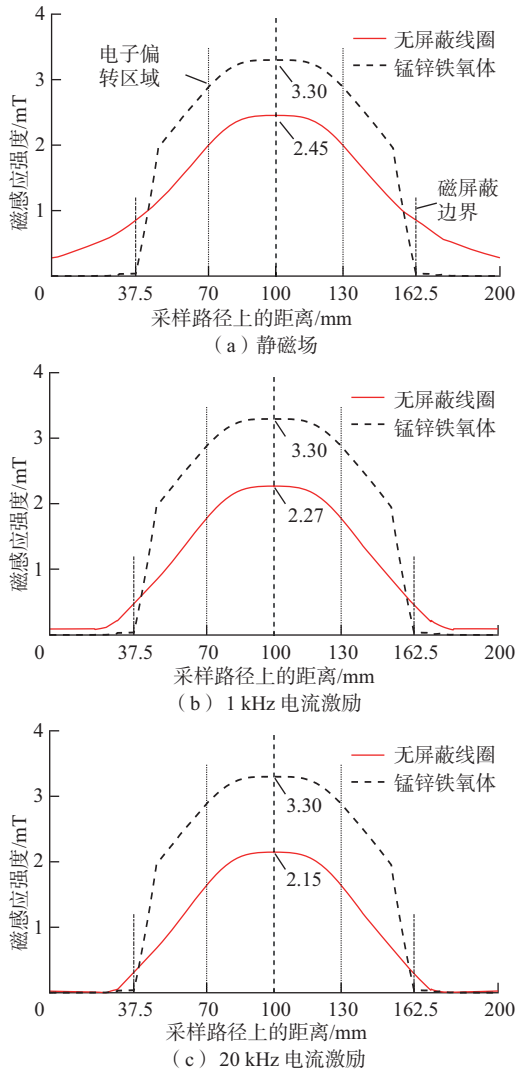
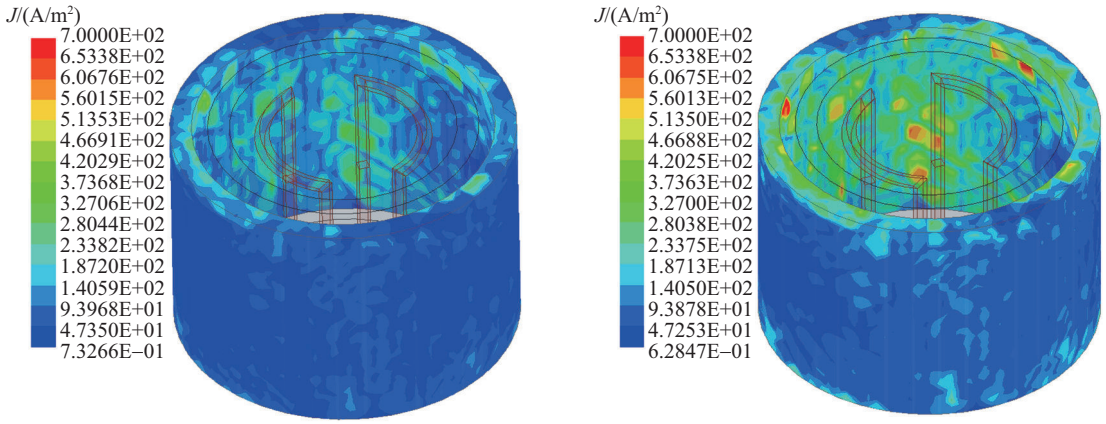


图10 不同频率电流激励下的磁感应强度曲线对比

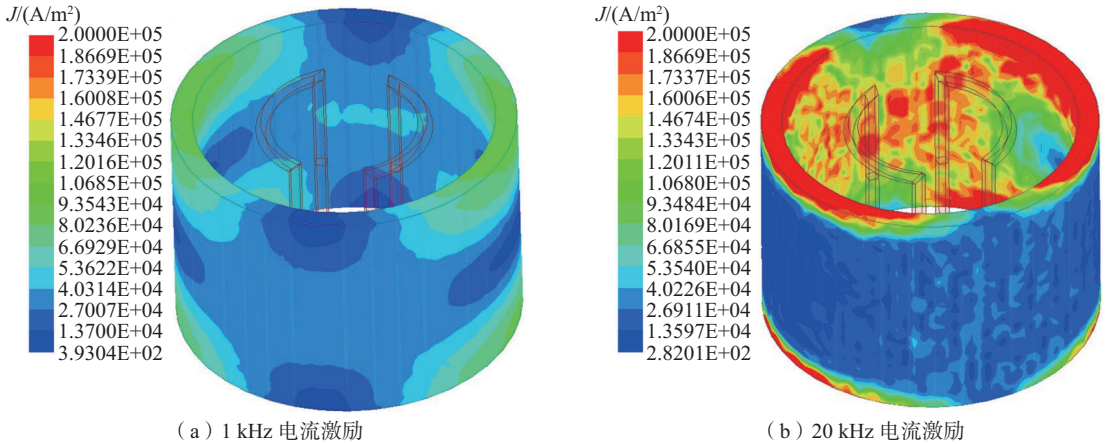
Fig.10 Comparison of magnetic induction intensity curves under current excitation at different frequencies



（a）1 kHz 电流激励　　（b）20 kHz 电流激励

图 11　具有锰锌铁氧体屏蔽体的电子枪壳体上的感应电流密度分布云图

Fig.11　Contour of induced current density on electron-gun housing with manganese-zinc ferrite magnetic shield



（a）1 kHz 电流激励　　（b）20 kHz 电流激励

图 12　无屏蔽体的电子枪壳体上的感应电流密度分布云图

Fig.12　Contour of induced current density on unshielded electron-gun housing

体，实现高频磁场的屏蔽，提升扫描线圈的高频性能。

将所设计的扫描线圈应用于 60 kV 和 120 kV 电子束选区熔化增材制造电子枪中，开展电子束高速扫描试验。试验结果表明，在 60 kV 电子枪中，工作距离为 500 mm，扫描线圈驱动电流在–2~+2 A 变化时，扫描范围可达 360 mm × 360 mm，偏转角度约 20°；在 120 V 电子枪中，工作距离为 800 mm，扫描线圈驱动电流在 –2~+2 A 变化时，扫描范围可达 410 mm × 410 mm，偏转角度约 14°；在间距为 1 mm 的两点之间扫描，频率可达到 200 kHz，实现了电子束大角度高速扫描。

3　结论

（1）基于 Helmholtz 线圈原理和空心结构，设计了电子束高速扫描线圈，通过 ANSYS 软件建立了仿真模型；仿真结果与理论计算值及试验实测值吻合良好，磁感应强度的最大偏差仅为 5.65%，且磁场分布均匀，其强度能够满足大角度偏转的要求。

（2）研究了内衬材料对扫描线圈高频性能的影响，在 20 kHz 高频激励下，内衬材料为黄铜时产生明显涡流（电流密度达 1.3×10^7 A/m²），使线圈内部的偏转磁场从 2.45 mT 衰减至 42 μT，因此选用绝缘且相对磁导率接近 1 的氧化铝陶瓷作为内衬材料，以实现电子束流通道的防护。

（3）探究了线圈外部材料对线圈高频性能的影响，采用锰锌铁氧体作为线圈外部磁屏蔽体可将电子枪 304 不锈钢壳体上的感应涡流的电流密度降低至 1/400，而且使线圈内部偏转磁场增强 34.7%，提升了扫描线圈的高频性能。

（4）基于上述研究，开展了高速扫描线圈优化，扫描线圈内部采用氧化铝陶瓷作为内衬，扫描线圈外部定制锰锌铁氧体圆筒作为电磁屏蔽体，提升了扫描线圈的高频性能并实现了线圈防护；本文所设计的高速扫描线圈可应用于 60 kV 和 120 kV 电子束选区熔化增材制造电子枪中，实现了电子束大角度高速扫描。

参 考 文 献

[1] 李宏新 . 90 kV 高压电子束粉末床熔融增材制造技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2022.

Li Hongxin. 90 kV high-voltage electron beam powder bed fusion additive manufacturing technology research[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022.

[2] Sigl M, Lutzmann S, Zaeh M F. Transient physical effects in electron beam sintering[C]//2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2006: 464–477.

[3] 钱虎虓, 梁啸宇, 李阳, 等 . 电子束粉床熔融制备镍基高温合金构件的研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 46–58.

Qian Huxiao, Liang Xiaoyu, Li Yang, et al. Research progress in fabrication of nickel-based superalloy components by electron beam powder bed fusion[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(1): 46–58.

[4] 严侃, 高志杰, 高磊, 等 . 电子束选区熔化增材制造金属材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2024, 53(11): 7–13.

Yan Kan, Gao Zhijie, Gao Lei, et al. Research progress of electron beam selective melting additive manufacturing metal materials[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(11): 7–13.

[5] 李子硕, 刘方军, 张伟, 等 . 电子束选区熔化增材制造多点同步测温系统[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(6): 464–476.

Li Zishuo, Liu Fangjun, Zhang Wei, et al. Multi-point synchronous temperature measurement system for electron beam selective melting additive manufacturing[J]. Journal of Sensor Technology and Application, 2023, 11(6): 464–476.

[6] 李宏新, 李阳, 余业锋, 等 . 电子束选区熔化成形工艺与组织模拟[J]. 电加工与模具, 2021(S1): 5–15.

Li Hongxin, Li Yang, Yu Yefeng, et al. Electron beam selective melting forming process and the simulation for its microstructure[J]. Electromachining & Mould, 2021(S1): 5–15.

[7] Tan X P, Kok Y, Tor S B, et al. Application of electron beam melting (EBM) in additive manufacturing of an impeller[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing. Research Publishing Services, 2014: 327–332.

[8] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Materials & Design, 2021, 209: 110008.

[9] Ponader S, Vairaktaris E, Heinl P, et al. Effects of topographical surface modifications of electron beam melted Ti–6Al–4V titanium on human fetal osteoblasts[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2008, 84A(4): 1111–1119.

[10] Carriere P R. Energy and charge transfer during electron beam melting[M]. Montreal: McGill University, 2018.

[11] 韩建栋, 林峰, 齐海波, 等 . 粉末预热对电子束选区熔化成形工艺的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 77–80.

Han Jiandong, Lin Feng, Qi Haibo, et al. Effects of powder preheating in electron beam selective melting process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 77–80.

[12] Jiao M H, Long H Y, Xiao B W, et al. Electron beam powder bed fusion additive manufacturing: A comprehensive review and its development in China[J]. Additive Manufacturing Frontiers, 2024, 3(4): 200177.

[13] Gong X B, Lydon J, Cooper K, et al. Beam speed effects on Ti–6Al–4V microstructures in electron beam additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(17): 1951–1959.

[14] 周俊, 周斌, 李宏新, 等 . 电子束选区熔化线能量密度对钛铝合金粉末中铝元素挥发的影响[J]. 电加工与模具, 2018(4): 52–56.

Zhou Jun, Zhou Bin, Li Hongxin, et al. Influence of line energy density of electron beam selective melting on volatilization of aluminum in TiAl alloy powders[J]. Electromachining & Mould, 2018(4): 52–56.

[15] 张业成 . 电子束选区熔化偏转扫描系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

Zhang Yecheng. Research of deflection scanning system for electron beam selective melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[16] 魏红燕 . 电子束正交偏转扫描磁场数值模拟分析与研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.

Wei Hongyan. Numerical simulation analysis and study of electron beam orthogonal deflection scanning magnetic field[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022.

[17] 赵攀峰, 刘方军, 张伟 . 电子束高频偏转扫描线圈的设计与仿真[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 75–80.

Zhao Panfeng, Liu Fangjun, Zhang Wei. Design and simulation of high-frequency electron beam scanning deflection coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 75–80.

[18] 张伟, 蒋布辉, 陈晓, 等 . 基于Helmholtz线圈的电子束高速扫描系统设计[J]. 电焊机, 2021, 51(6): 7–12.

Zhang Wei, Jiang Buhui, Chen Xiao, et al. Design of high-speed electron beam scanning system based on Helmholtz coil[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(6): 7–12.

[19] 路开通, 许海鹰, 彭勇 . 基于亥姆霍兹线圈的电子束偏转扫描技术研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(7): 73–79.

Lu Kaitong, Xu Haiying, Peng Yong. Research of electron beam deflection scanning coil based on Helmholtz coil[J]. Aeronautical Science and Technology, 2019, 30(7): 73–79.

[20] 李平林, 张伟, 许海鹰, 等 . 基于Helmholtz的低感抗电子束偏转扫描线圈仿真[J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 89–93.

Li Pinglin, Zhang Wei, Xu Haiying, et al. Design and simulation of electron beam low impedance deflection scanning coil based on Helmholtz coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 89–93.

[21] 程守洙, 江之永 . 普通物理学—上册[M]. 7版 . 北京: 高等教育出版社, 2016.

Cheng Shouzhu, Jiang Zhiyong. General physics—Volume I[M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016.

（责编　七七）