

不同拼接方式对纳米晶磁芯软磁性能的影响

苗艳龙*, 赵梓祥, 杨 灿, 方允樟#

浙江师范大学, 物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年12月20日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年2月20日

摘 要

本研究采用单辊快淬法制得业界特有的、宽度为1 mm的Fe基非晶窄带, 经540°C自由退火、固化剂固化、模型机械压制形成条状磁芯。采用TD8220-A软磁直流测试仪和TD8120软磁交流测试仪测试不同拼接方式纳米晶磁芯样品的交、直软磁特性。研究表明: 采用斜接口拼接的正方形磁芯直流软磁性能受拼接影响最小, 直流软磁性能较好; 采用斜接口三角形拼接的磁芯交流软磁性能受拼接影响最小, 交流软磁性能较好。磁芯拼接方式是影响磁芯性能重要工艺, 研究不同拼接方式在现实应用场景下具有重要意义, 本研究结果对纳米晶磁芯不同拼接方式的改进具有重要的参考价值。

关键词

纳米晶磁芯, 磁芯拼接, 交流软磁特性, 直流软磁特性

The Influence of Different Splicing Methods on the Soft Magnetic Properties of Nanocrystalline Magnetic Cores

Yanlong Miao*, Zixiang Zhao, Can Yang, Yunzhang Fang#

School of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Dec. 20th, 2023; accepted: Jan. 31st, 2024; published: Feb. 20th, 2024

Abstract

This study used a single roll rapid quenching method to obtain an industry-specific, 1 mm wide Fe based amorphous narrow band, which was subjected to 540°C free annealing, curing agent curing, and model mechanical pressing to form a strip-shaped magnetic core. TD8220-A soft magnetic DC

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 苗艳龙, 赵梓祥, 杨灿, 方允樟. 不同拼接方式对纳米晶磁芯软磁性能的影响[J]. 材料科学, 2024, 14(2): 77-91. DOI: 10.12677/ms.2024.142011

tester and TD8120 soft magnetic AC tester were used to test the AC and DC soft magnetic characteristics of nanocrystalline magnetic core samples with different splicing methods. Research has shown that the DC soft magnetic performance of square magnetic cores with oblique interface splicing is least affected by splicing, and the DC soft magnetic performance is better; the AC soft magnetic performance of magnetic cores using oblique interface triangle splicing is minimally affected by splicing, and the AC soft magnetic performance is better. The splicing method of magnetic cores is an important process that affects the performance of magnetic cores. Studying different splicing methods in practical application scenarios is of great significance. The results of this study have important reference value for improving the splicing methods of nanocrystalline magnetic cores.

Keywords

Nanocrystalline Magnetic Core, Magnetic Core Splicing, AC Soft Magnetic Characteristics, DC Soft Magnetic Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

继日本日立公司 Yoshizawa [1] [2] 等人于二十世纪后半期首次发现了一类成分为 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (商品名称为“FINEMET”) 物质显示出优异的软磁性能的新型 Fe 基合金后, 人类 Fe 基纳米晶合金的应用价值逐步开始了解。纳米晶磁芯[3]作为现代电子设备中重要的软磁材料, 具有广泛的应用潜力。在变压器磁芯、电机磁芯、高频电源、传感器和储能等领域, 纳米晶磁芯已经显示出优异的性能, 例如高磁导率、低矫顽力、低损耗等软磁特性[4] [5] [6], 这些优异的性能使得纳米晶磁芯成为了提高电子设备效率和性能的理想选择。然而, 纳米晶磁芯的制备过程中存在着多种拼接方式[7] [8], 这些不同的拼接方式对磁芯软磁性能会产生显著的影响。拼接方式的不同决定了磁芯内部晶粒的排列方式和晶界的结构, 从而影响了磁芯的磁滞、矫顽力以及导磁性能等关键指标[9] [10] [11]。因此, 深入研究不同拼接方式对纳米晶磁芯软磁性能的影响, 对于优化纳米晶磁芯的设计和制备过程具有重要的指导意义。过去的研究中, 一些拼接方式的影响已经得到了初步的探索。例如, 焊接和粘接是常见的拼接方式, 它们可以实现磁芯的连接, 并且具有不同的热处理工艺和晶界结构。此外, 还有一些新兴的拼接方式, 如纳米颗粒填充, 它们在纳米晶磁芯的制备中得到了越来越广泛的应用。然而, 尚缺乏系统性的研究, 以全面评估这些不同拼接方式对纳米晶磁芯软磁性能的影响。因此, 本文通过对不同拼接方式纳米晶磁芯样品的性能测试, 并对其磁滞回线、饱和磁感应强度、矫顽力以及磁导率等关键性能进行详细的表征和比较, 探讨不同拼接方式对纳米晶磁芯软磁性能的影响。

2. 实验

2.1. 磁芯制备与拼接

本研究根据所需成分进行原料配比, 通过单辊快淬法制得 $\text{Fe}_{85.75}\text{Cu}_{1.32}\text{Nb}_3\text{Si}_{7.4}\text{B}_{1.65}\text{C}_{0.0332}$ (Fe 基合金) 非晶薄带[12], 如图 1 所示, 使用交流感应熔炼母合金至熔融状态, 将熔融态下的母合金液在氩气作用下从石英玻璃管下的喷嘴喷出, 经高速旋转的水冷铜棍作用后甩出成带。

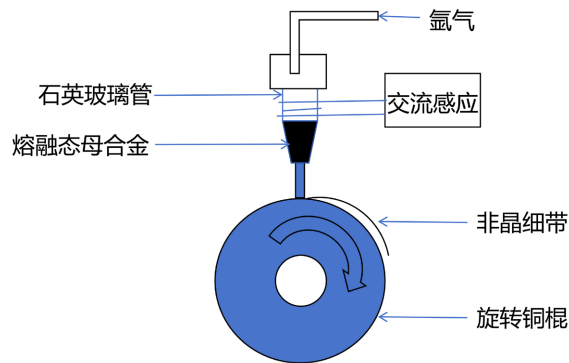


Figure 1. Schematic diagram of narrow band preparation device using single roll rapid quenching method
图 1. 单辊快淬法窄带制备装置示意图

制带时的各参数如下：铜辊转速 1300 转/min (铜辊周长为 1.2 m)，氩气压强 0.03 MPa，喷嘴直径 0.85 mm，辊嘴间距 0.2 mm。制备得到的非晶带材见图 2，其宽 500 μm 、厚 19 μm 。

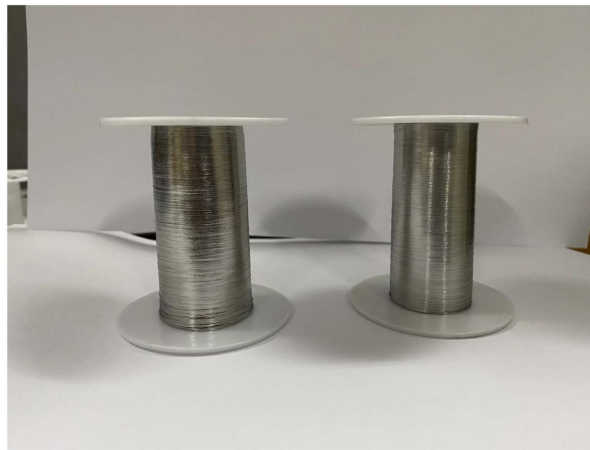


Figure 2. Schematic diagram of amorphous narrowband
图 2. 非晶窄带示意图

在氮气作用保护下，经 540 $^{\circ}\text{C}$ 退火 40 min，将其采用绝缘塑料纸外包、棉线困扎，一端浸入调配好的环氧树脂固化剂中，另一端采用抽真空浸泡，直至固化剂全部浸没至磁芯。然后采用机械模具压制成长 80.0 mm，宽 6.0 mm，高 3.5 mm 的条状磁芯，常温下干燥 24 h。将压制好的条形磁芯通过机械打磨拼接成斜接口三角形磁芯、斜接口正方形磁芯、斜切口圆环磁芯(磁芯规格：长 300.0 mm，宽 6.0 mm，高 3.5 mm) (图 3)。

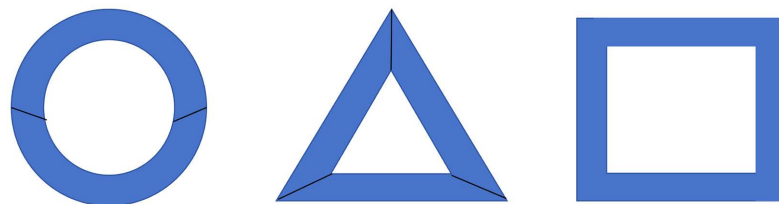


Figure 3. Schematic diagram of magnetic core splicing method
图 3. 磁芯拼接方式示意图

2.2. 磁芯性能测试

实验使用环氧树脂固化剂为环氧树脂 AB 胶 2:1 的比例混合液。

使用天恒测控 TD-8220A 软磁直流测试系统测试磁芯样品在 $H_m = 1000 \text{ A/m}$ 下的直流软磁特性, 得到磁滞回线、饱和磁感应强度 B_s 、起始磁导率 μ_i 、最大磁导率 μ_{\max} 、矫顽力 H_c 。

使用天恒测控 TD-8120 软磁交流测试系统测试磁芯样品在 $B_m = 0.1 \text{ T}$, $f = 2 \text{ k}$ 、 4 k 、 6 k 、 8 k 、 10 k 、 20 k 、 30 k 、 40 k 、 50 k 、 60 k 、 70 k 、 80 k 、 90 k 、 100 kHz 的交流软磁特性, 得到 $P_{cm}-f$ 曲线、 $P_{cv}-f$ 曲线 (图 4)。



Figure 4. Tianheng measurement and control AC and DC soft magnetic performance tester

图 4. 天恒测控交、直流软磁性能测试仪

3. 结果与讨论

3.1. 拼接缝宽对纳米晶磁芯直流软磁特性的影响

3.1.1. 拼接缝宽对斜切口三角形磁芯直流软磁特性的影响

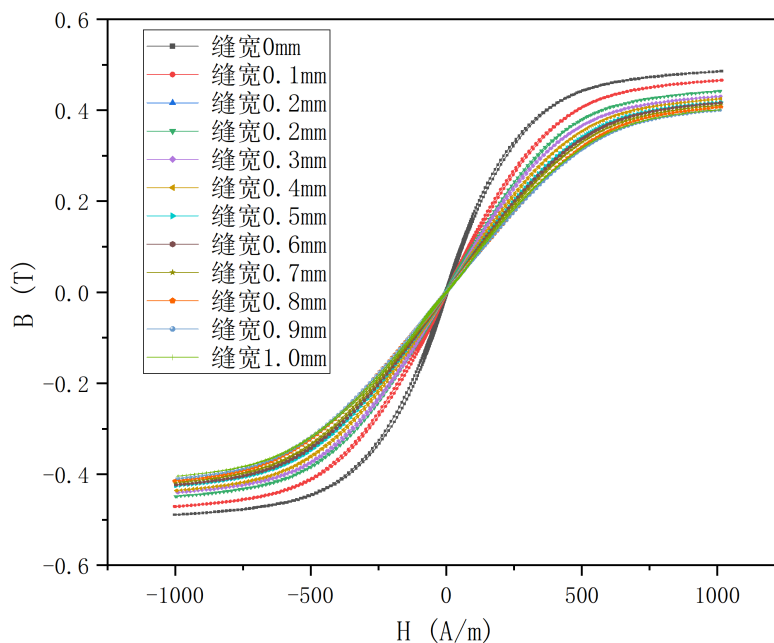


Figure 5. Hysteresis loop diagram of oblique interface triangular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths

图 5. 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的磁滞回线图

图5 为非晶细带经过 540°C 自由退火后形成的纳米晶磁芯采用斜切口拼接时缝宽分别为 0 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm 对应的斜切口三角形闭环磁芯的磁滞回线的曲线图。

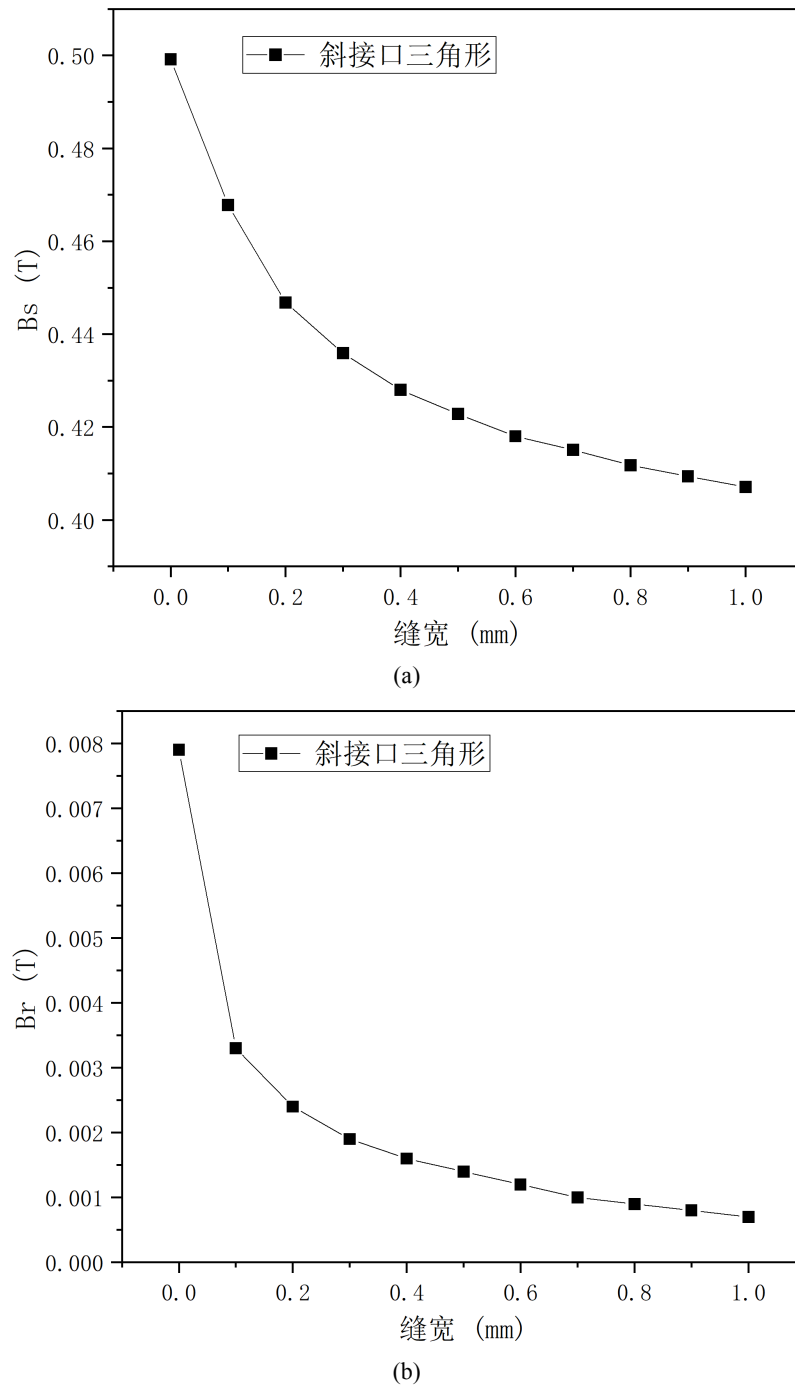


Figure 6. (a) Saturated magnetic induction intensity B_s of oblique interface triangular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths; (b) Residual magnetic induction intensity B_r of diagonal interface triangular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths
图6. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的饱和磁感应强度 B_s ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的剩余磁感应强度 B_r

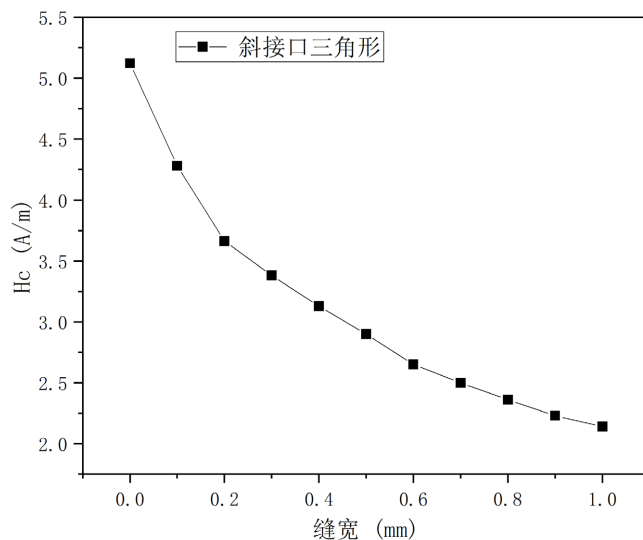
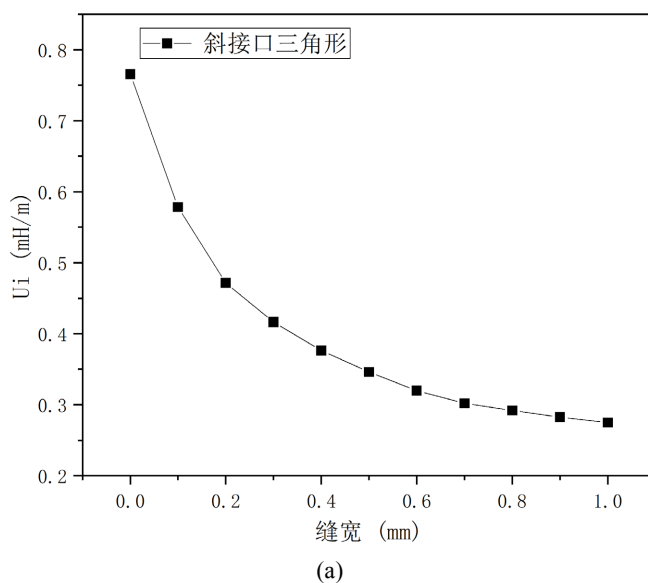


Figure 7. Coercive force H_c of oblique interface triangular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths

图 7. 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的矫顽力 H_c

由图 5~8 可知拼接缝宽对磁芯软磁性能具有显著的影响：当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最大为 0.4992 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.4031 T，与不拼接相比，饱和磁感应强度下降了 19.25%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的剩余磁感应强度最大为 0.007 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.0007 T，与不拼接相比，剩余磁感应强度下降了 90.0%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的矫顽力最大为 5.123 A/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的矫顽力最小为 2.141 A/m，与不拼接相比，矫顽力下降了 58.21%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的起始磁导率最大为 0.7656 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的起始磁导率最小为 0.2749 mH/m，与不拼接相比，起始磁导率下降了 64.09%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的最大磁导率最大为 1.3205 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的最小磁导率最小为 0.3452 mH/m，与不拼接相比，最大磁导率下降了 97.53%。



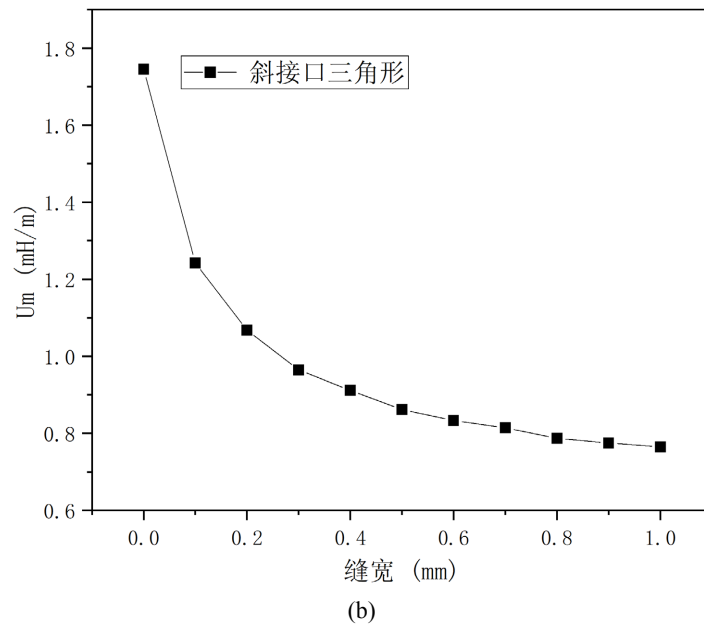


Figure 8. (a) Initial magnetic permeability u_i of diagonal interface triangular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths; (b) Maximum magnetic permeability u_m of the diagonal interface triangular magnetic core corresponding to different splicing seam widths

图 8. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的起始磁导率 u_i ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口三角形磁芯的最大磁导率 u_m

对于斜接口三角形磁芯而言，角型斜切口导致磁通更为集中，减少了磁通的漏磁，从而提高了磁芯相应的软磁性能。通过减小磁通的非均匀分布，有助于减小磁芯的磁滞损耗和涡流损耗。因此，随着拼接缝宽的增大，斜接口三角形磁芯对应的饱和磁感应强度、剩余磁感应强度、矫顽力、磁导率逐渐减小。

3.1.2. 拼接缝宽对斜切口圆环磁芯直流软磁特性的影响

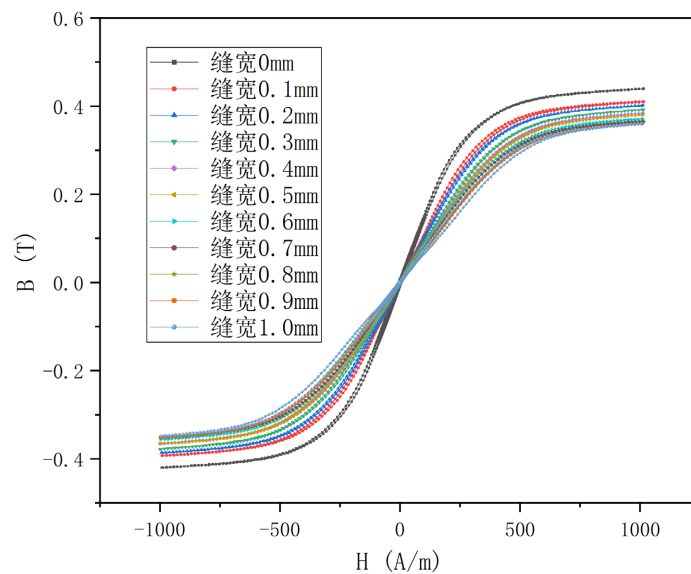


Figure 9. Influence curve of different splicing seam widths on the hysteresis loop of the oblique interface circular magnetic core

图 9. 不同拼接缝宽对斜接口圆环磁芯磁滞回线的影响曲线图

图 9 为非晶细带经过 540℃ 自由退火后形成的纳米晶磁芯采用斜切口拼接时缝宽分别为 0 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm 对应的圆环磁芯磁滞回线的曲线图。

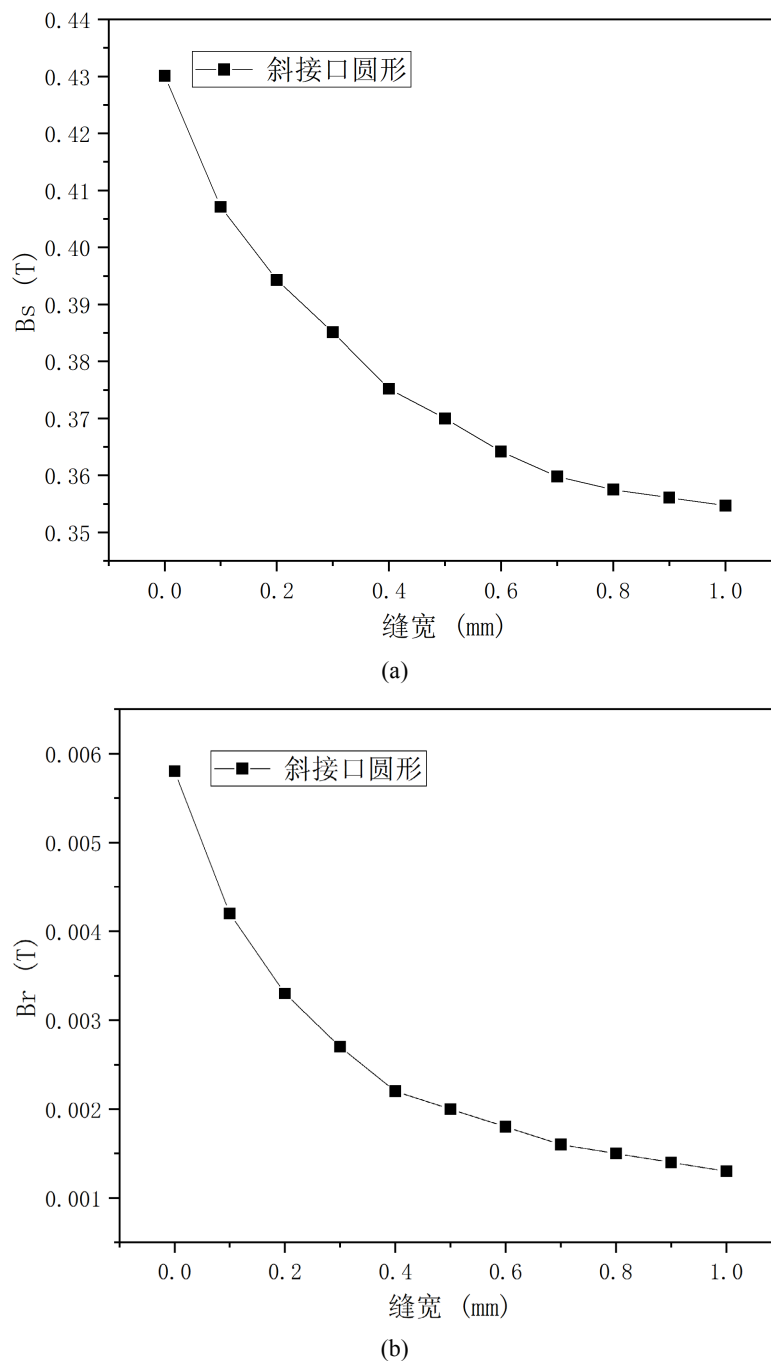


Figure 10. (a) Saturated magnetic induction intensity B_s of oblique interface circular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths; (b) Residual magnetic induction intensity B_r of the oblique interface circular magnetic core corresponding to different splicing seam widths

图 10. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口圆环磁芯的饱和磁感应强度 B_s ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口圆环磁芯的剩余磁感应强度 B_r

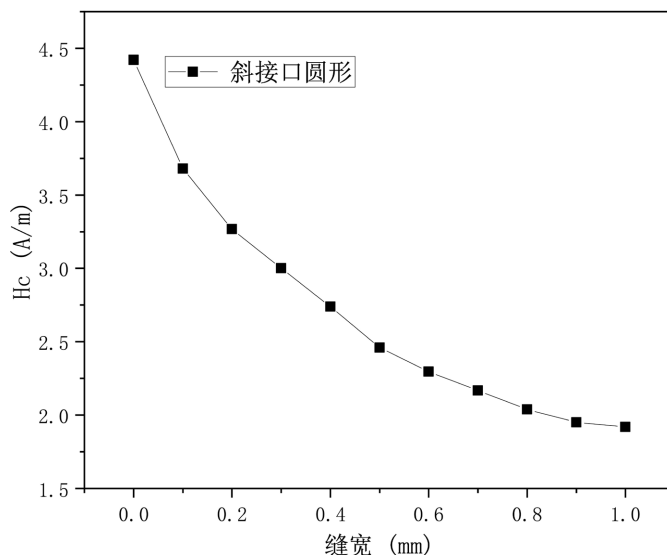
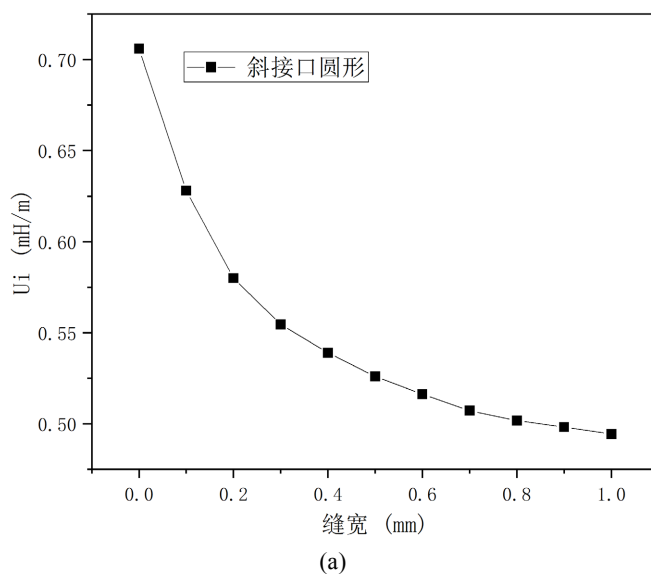


Figure 11. Coercive force H_c of oblique interface circular magnetic core corresponding to different splicing seam widths

图 11. 不同拼接缝宽对应的斜接口圆环磁芯的矫顽力 H_c

由图 9~12 可知拼接缝宽对磁芯软磁性能具有显著的影响。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最大为 0.4301 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.3547 T，与不拼接相比，饱和磁感应强度下降了 17.53%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的剩余磁感应强度最大为 0.0058 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.0013 T，与不拼接相比，剩余磁感应强度下降了 77.59%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的矫顽力最大为 4.421 A/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的矫顽力最小为 1.92 A/m，与不拼接相比，矫顽力下降了 56.57%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的起始磁导率最大为 0.706 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的起始磁导率最小为 0.4944 mH/m，与不拼接相比，起始磁导率下降了 29.97%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的最大磁导率最大为 1.434 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的最小磁导率最小为 0.747 mH/m，与不拼接相比，最大磁导率下降了 47.91%。



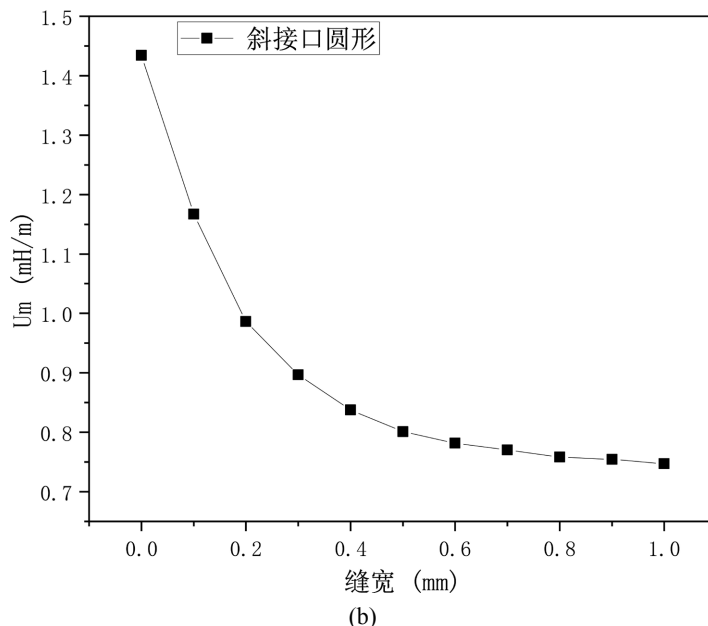


Figure 12. (a) Initial magnetic permeability u_i of oblique interface circular magnetic cores corresponding to different splicing seam widths; (b) Maximum magnetic permeability u_m of the oblique interface circular magnetic core corresponding to different splicing seam widths

图 12. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口圆环磁芯的起始磁导率 u_i ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口圆环磁芯的最大磁导率 u_m

对于斜接口圆环磁芯而言，斜切口的圆环磁芯通过调整磁通路径，减小涡流损耗和磁滞损耗。这种设计可以改善磁芯的整体性能，使其更适用于特定频率范围内的应用。因此，随着拼接缝宽的增大，斜接口圆环磁芯对应的饱和磁感应强度、剩余磁感应强度、磁导率、矫顽力会逐渐减小。

3.1.3. 拼接缝宽对斜切口正方形磁芯直流软磁特性的影响

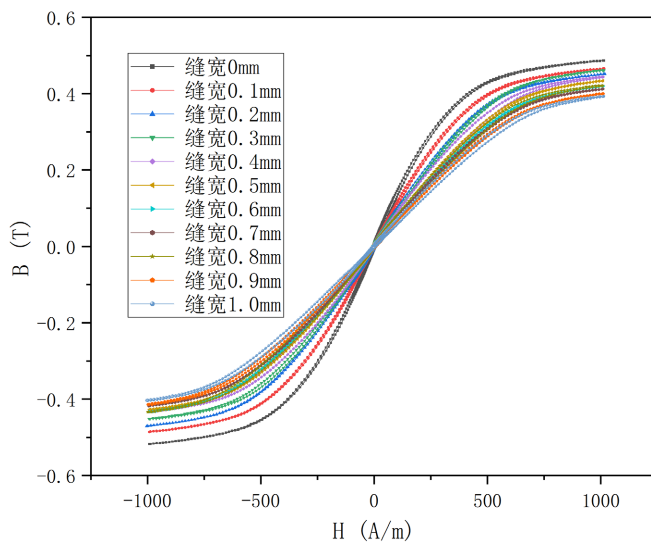


Figure 13. Influence curve of different splicing seam widths on the hysteresis loop of square magnetic cores with oblique interfaces

图 13. 不同拼接缝宽对斜接口正方形磁芯磁滞回线的影响曲线图

图 13 为非晶细带经过 540°C 自由退火后形成的纳米晶磁芯采用斜切口拼接时缝宽分别为 0 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm 对应的正方形闭环磁芯磁滞回线的曲线图。

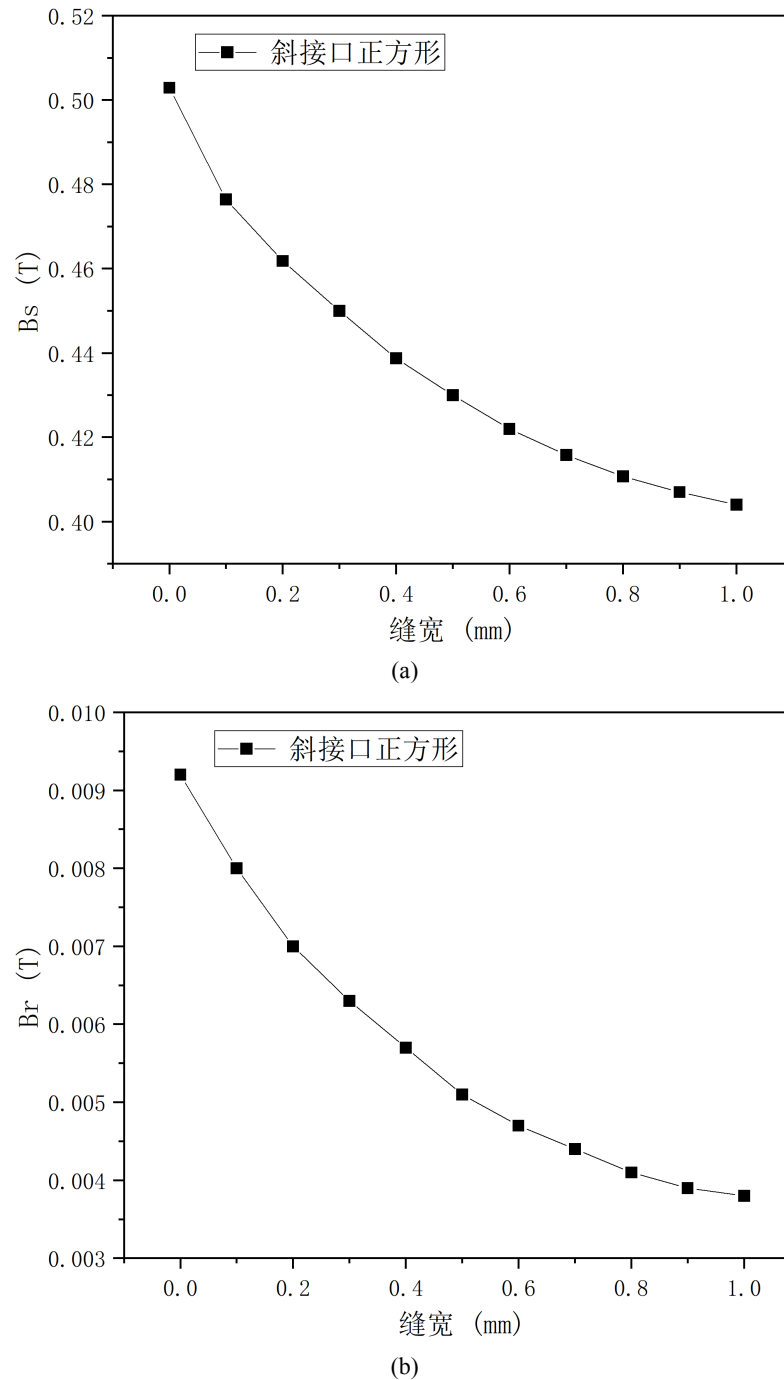


Figure 14. (a) Saturated magnetic induction intensity B_s of oblique interface square magnetic cores corresponding to different splicing seam widths; (b) Remaining magnetic induction intensity B_r of oblique interface square magnetic cores corresponding to different splicing seam widths

图 14. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口正方形磁芯的饱和磁感应强度 B_s ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口正方形磁芯的剩余磁感应强度 B_r

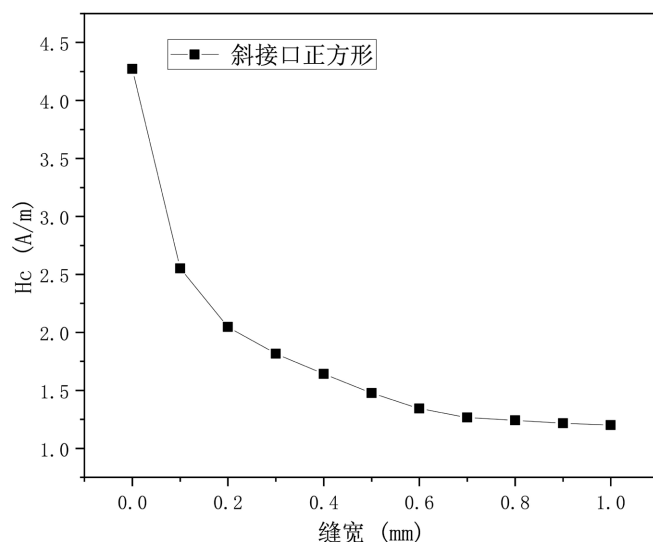
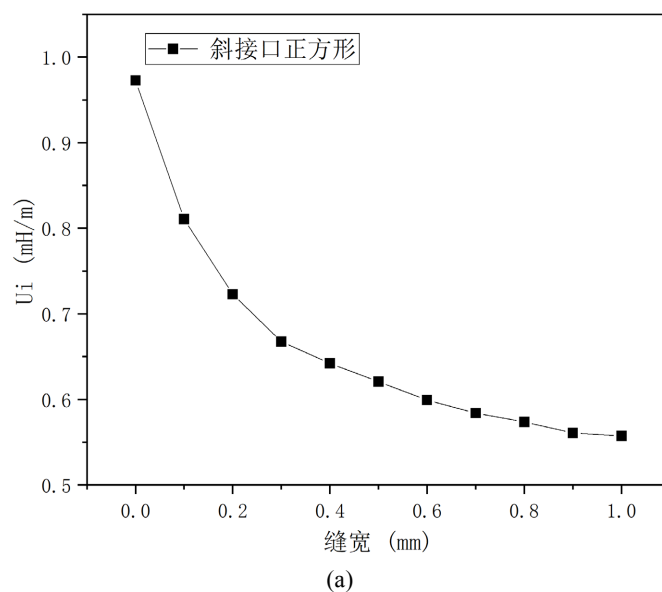


Figure 15. Coercive force H_c of oblique interface square magnetic cores corresponding to different splicing seam widths

图 15. 不同拼接缝宽对应的斜接口正方形磁芯的矫顽力 H_c

由图 13~16 可知拼接缝宽对磁芯软磁性能具有显著的影响：当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最大为 0.5029 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.404 T，与不拼接相比，饱和磁感应强度下降了 19.67%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的剩余磁感应强度最大为 0.0092 T；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的饱和磁感应强度最小为 0.0038 T，与不拼接相比，剩余磁感应强度下降了 58.70%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的矫顽力最大为 4.273 A/m；当拼接缝宽为 1.0mm 时，磁芯对应的矫顽力最小为 1.201 A/m，与不拼接相比，矫顽力下降了 71.89%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的起始磁导率最大为 0.9727 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的起始磁导率最小为 0.5573 mH/m，与不拼接相比，起始磁导率下降了 42.71%。当拼接缝宽为 0 时，磁芯对应的最大磁导率最大为 1.7017 mH/m；当拼接缝宽为 1.0 mm 时，磁芯对应的最小磁导率最小为 0.8311 mH/m，与不拼接相比，最大磁导率下降了 51.16%。



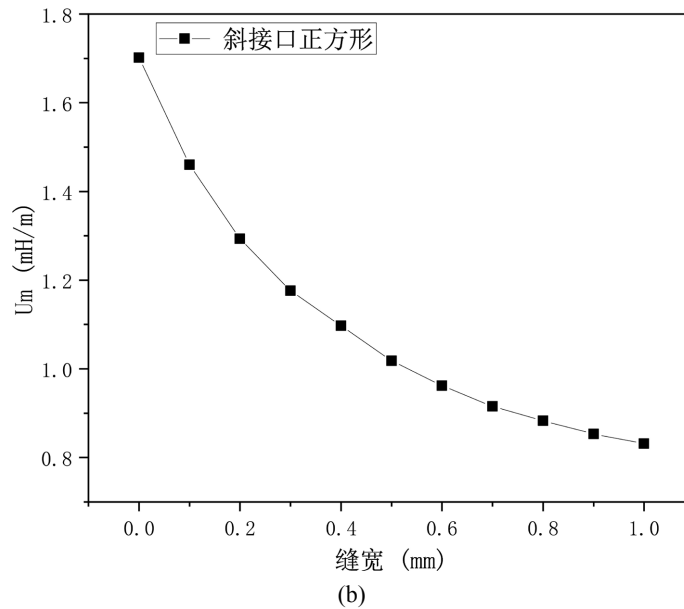
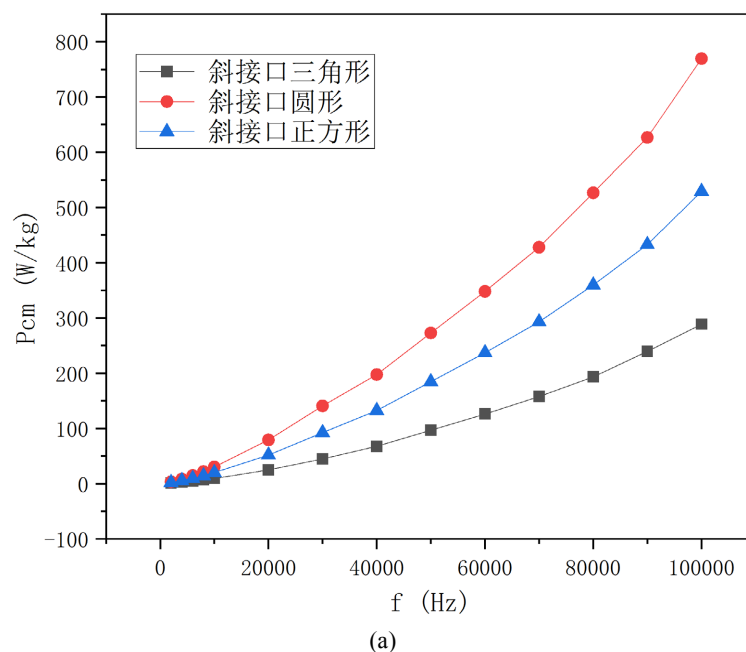


Figure 16. (a) Starting magnetic permeability μ_i of square magnetic cores with oblique interfaces corresponding to different splicing seam widths; (b) Maximum magnetic permeability μ_m of square magnetic cores with oblique interfaces corresponding to different splicing seam widths
图 16. (a) 不同拼接缝宽对应的斜接口正方形磁芯的起始磁导率 μ_i ; (b) 不同拼接缝宽对应的斜接口正方形磁芯的最大磁导率 μ_m

对于斜接口正方形磁芯而言，正方形斜切口使磁通更为均匀地分布在磁芯中，减小了局部磁场的均匀性。这有助于减小涡流损耗，并且可以提高磁芯的磁导率，使其更适用于频率较高的应用。因此，随着拼接缝宽的增大，斜接口正方形磁芯对应的饱和磁感应强度、剩余磁感应强度、磁导率会逐渐减小，矫顽力会逐渐增大。

3.2. 不同拼接方式对纳米晶磁芯交流软磁特性的影响



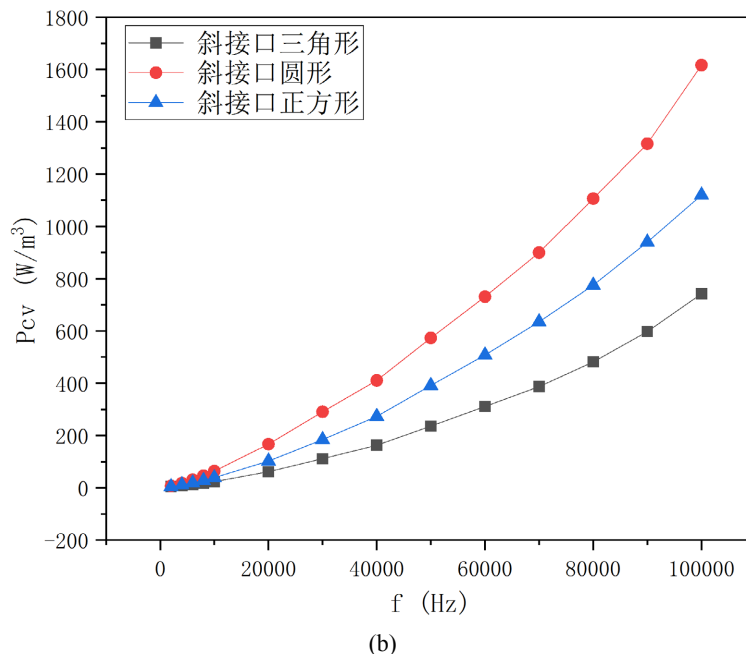


Figure 17. (a) Frequency characteristic curve of unit mass loss P_{cm} of Fe based alloy magnetic core sample; Frequency characteristic curve of unit volume loss P_{cv} of Fe (b) based alloy magnetic core samples

图 17. (a) Fe 基合金磁芯样品的单位质量损耗 P_{cm} 的频率特性曲线; (b) Fe 基合金磁芯样品的单位体积损耗 P_{cv} 的频率特性曲线

图 17(a)是 Fe 基合金磁芯不同拼接方式磁芯样品退火后单位质量 P_{cm} 与频率特性曲线。从图中可以看出随着外加频率的增大, 单位质量损耗 P_{cm} 逐渐增大, 且在同一频率条件下斜接口圆环的单位质量损耗要大于其他两种拼接方式的样品, 斜接口三角形磁芯对应的单位质量损耗最小。

图 17(b)是 Fe 基合金磁芯不同拼接方式磁芯样品退火后单位体积损耗 P_{cv} 与频率特性曲线。从图中可以看出随着外加频率的增大, 单位体积损耗 P_{cv} 逐渐增大, 且在同一频率条件下斜接口圆环磁芯的单位体积损耗要大于其他两种拼接方式的样品, 斜接口三角形磁芯对应的单位质量损耗最小。

4. 结论

本研究采用单辊快淬法制备宽度约为 1 mm、业界所特有的 Fe 基非晶窄带, 利用此窄带可制备各种特异形磁芯, 规避了所需带材宽度的限制和因宽带切割而引入应力的情况, 也避免了对材料的浪费。

基于三种拼接方式对 Fe 基合金纳米晶磁芯软磁性能的影响, 研究表明: 斜切口正方形磁芯的形状规则, 可以更好地利用磁通的空间, 使得磁通密度更加均匀, 在电感器件中应用较为广泛。斜切口三角形磁芯的尖角可以减小磁芯的长度, 从而降低高频信号的损耗和噪音。此外, 三角形磁芯的磁阻比正方形磁芯更小, 使其在高频条件下具有更好的性能。斜切口圆环磁芯由于其弧形特征, 可以更好地减小磁芯的磁通泄漏, 提高磁通密度和整体效率, 而且, 在高频应用中, 圆环磁芯的损耗和噪音也较小, 所以在高频条件下具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Yoshizawa, Y., Oguma, S. and Yamauchi, K. (1988) New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044-6046. <https://doi.org/10.1063/1.342149>
- [2] Yao, K.F., Shi, L.X., Chen, S.Q., et al. (2018) Research Progress and Application Prospect of Iron-Based Soft Mag-

- netic Amorphous/Nanocrystalline Alloys. *Journal of Physics*, **67**, 8-15. (in Chinese)
- [3] 江进波, 程廷强, 黄国良, 等. 铁基纳米晶磁芯的脉冲磁化特性测量及其在磁开关中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(5): 117-123.
- [4] Yoshizawa, Y. and Yamauchi, K. (1990) Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Materials Transactions*, **31**, 307-314. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.31.307>
- [5] Yoshizawa, Y. and Yamauchi, K. (1991) Magnetic Properties of Fe-Cu-M-Si-B (M =Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) Alloys. *Materials Science and Engineering A*, **133**, 176-179. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90043-M](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90043-M)
- [6] Tejedor, M., Hemando, B. and Sánchez, M.L. (1998) Magnetoimpedance effect in zero magnetostriction nanocrystalline Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{16.5}B₆ Ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **185**, 61-65. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00005-5)
- [7] 司超新, 王凯, 杨远军, 等. 一种组合拼接磁芯[P]. 中国专利, CN202220429538.4, 2022-06-28.
- [8] 张名虎. 一种拼接式铁氧体磁芯[P]. 中国专利, CN202023052396.4, 2021-07-02.
- [9] 王伟. 掺 Co Sendust 合金的微结构和磁性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [10] 朱紫藤. FeSiBNbCuP 非晶纳米晶软磁合金的制备及磁性能调控的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27721/d.cnki.gyzjc.2021.000574>
- [11] 郭皓, 黄刚, 李崇华. 宽温高效率软磁铁氧体材料及磁芯制备方法和应用[P]. 中国专利, CN201810388361.6, 2021-02-26.
- [12] 徐晓瞳. 新型铁基非晶——纳米晶合金软磁性能与宽带材制备技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.