

铁磁材料低温磁性能测量研究

汪天龙^{1,2,3}, 邱清泉^{1,2}, 靖立伟^{1,2}, MyongChol. Ri^{3,4}, 丁大伟⁴

(1. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190)

(2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

(3. 中国科学院大学, 北京 100049)

(4. 中国科学院物理研究所, 北京 100190)

摘要: 采用模拟冲击法研究了铁磁材料在 300 和 77 K 环境下的磁性能。以电工领域常用的铁磁材料 DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 为研究对象。结果表明, 在液氮环境下, DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 的饱和磁感应强度均略有增加, 其中非晶 FeSiB 的饱和磁感应强度增幅最大为 5.3%; DT4、非晶 FeSiB 和 2Cr13 的矫顽力增幅较大, DT4 的矫顽力增幅为 106%, 而 1J22 的矫顽力减小了 1.7%; 频率为 50 Hz 时, 在液氮环境下 DT4 的损耗相比室温急剧增加, 增幅达 263.2%, 非晶 FeSiB 和 2Cr13 的损耗相比室温略有增加, 而 1J22 的损耗相比室温变化不大。最后, 以超导线圈激磁的强磁场磁控溅射阴极的磁场计算为例, 在铁芯结构相同的情况下, 采用 1J22 作铁芯的磁控阴极靶面磁场水平分量的最大值为 0.2344 T, 相比 2Cr13 作铁芯磁场水平分量最大值增加了 14.8%。有关铁磁材料的低温磁性能研究可以为超导电磁装置的铁芯磁路设计提供依据。

关键词: 软磁材料; 磁化曲线; 损耗曲线; 磁控溅射阴极

中图分类号: TM27

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)03-0898-07

自 20 世纪 90 年代以来, 高温超导电工技术和新材料的研究在超导磁体和超导电力设备等方面取得了较大的进展^[1-5]。超导变压器、超导电机和部分高温超导磁体等超导电磁装置在结构上往往都存在由高磁导率的铁磁材料构成的铁芯磁路。由于超导状态下, 超导带材的电阻接近于零, 由此导致超导电磁装置的线损非常小, 超导装置的损耗主要体现在铁损方面^[6]。因此, 超导装置铁芯材料的选取对提高设备整体的效率至关重要。另一方面, 为了充分冷却超导带材和简化低温杜瓦设计, 有些超导设备是直接浸泡在液氮中运行的, 铁磁材料在液氮中的磁性能和损耗特性需要进行全面的研究。周若安^[7]研究了 1J50 软磁合金的磁性能随温度由 -70~170 °C 的变化规律: 其饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 、磁各向异性常数 K_u 及矫顽力 H_c 均随温度的升高逐渐下降。张文峰^[8]采用模拟冲击法测试了 9%Ni 钢在 77 和 293 K 下的磁性能, 发现低温下 9%Ni 钢的磁导率变化不大, 在不饱和区, 磁导率有所减小, 饱和磁感应强度略有增加。陈敏^[9]研究了牌号为 27QG110 的硅钢片与牌号分别为 SA1 和 RF1-1000 的非晶合金在室温和低温下的磁性能。得出在低温下, 硅钢片和非晶合金的饱和磁感应强度和损耗均略有增加。Jankowski^[10]对不同

粒径的铁基软磁材料在液氮下的磁性能进行了测试, 发现低温会导致损耗增加, 相对磁导率减小。Suzuki^[11]对 Ni-Fe-Co 合金在 4.2 和 298 K 下的磁性能进行了测试。研究发现 $Ni_{0.81}Mo_{0.045}Fe_{0.145}$ 合金在 4.2 K 下的饱和磁感应强度略有增加, 矫顽力基本不变, $Ni_{0.8}Mo_{0.05}Fe_{0.15}$ 合金在 4.2 K 下的饱和磁感应强度大幅减小, 矫顽力大幅增加。Oxley^[12]在室温和液氮温区分别对 10 种不同的铁素体和马氏体不锈钢的磁性能进行了测试。研究发现, 在液氮温区, 10 种材料的最大磁导率均减小, 矫顽力均增加, 而剩磁和饱和磁感应强度的变化没有规律可循。Llamazares^[13]对 Ni-Mn-Sn 合金在 150 和 270 K 下的磁性能进行了测试。发现在 150 K 磁滞回线变宽, 饱和磁感应强度略有减小。

不同材料的磁性参数在低温下的数值均有差异, 尚没有统一的理论依据去解释这种变化。本研究选取电工领域常用的铁磁材料 DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 4 种样品为研究对象, 对室温和液氮环境下的磁性能和损耗特性进行了研究, 并研究了低温对超导磁控溅射阴极靶面磁场分布的影响。

1 实验

收稿日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51277172); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (51721005)

作者简介: 汪天龙, 男, 1991 年生, 硕士生, 中国科学院电工研究所, 北京 100190, E-mail: wangtianlong@mail.iee.ac.cn

对铁磁材料在室温和低温下的磁性参数采用模拟冲击法进行测量。模拟冲击法的测量原理如图 1 所示。测试系统主要由磁化线圈 N_1 、测试线圈 N_2 、励磁电源、数据采集电路组成。材料的磁场强度和磁感应强度都是通过间接测量完成的。在磁化线圈 N_1 的回路中串联无感电阻，通过测试无感电阻上的电压降确定磁化电流，进而通过式 (1) 得到磁场强度(H)。测量线圈 N_2 连接电子积分器，通过对测量线圈 N_2 上的感应电压进行数字积分确定磁通密度(B)，如式 (2)。模拟冲击法依照传统冲击法的测量原理，采用电子积分器代替机械式的冲击检流计，运用了 A/D、D/A 转换和计算机控制技术。传统冲击检流计测量中，测量线圈上的感应电压脉冲总有一定的宽度，较宽的脉冲宽度将使检流计不能准确对电动势脉冲进行时间积分，从而测量的灵敏度下降，引起误差^[14]。模拟冲击法不仅具有经典冲击法的灵敏度高等优点，而且可以大大减小传统冲击检流计产生的非瞬时性误差。

$$H = \frac{N_1 I_1}{L} \tag{1}$$

$$B = -\frac{l}{N_2 S} \int E_2 dt \tag{2}$$

式中， N_1 为磁化线圈匝数， N_2 为测量线圈匝数， I_1 为磁化电流， L 为铁芯磁路的有效长度， S 为铁芯磁路的有效截面积， E_2 为测量线圈的感应电压。

本实验中采用的测试样品均为环形，其中 DT4、1J22、2Cr13 样品是由原材料直接切削加工成型，非晶 FeSiB 是由 2.5 μm 厚的带材卷绕成环形。其规格如表 1 所示。

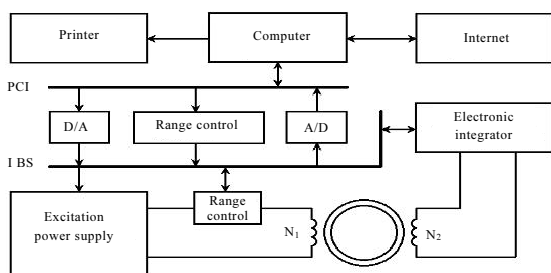


图 1 模拟冲击法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of analog impact method

表 1 样品规格

Table 1 Sample specification

Sample type	External diameter/mm	Internal diameter/mm	Height/mm	Mass/g
DT4	60	40	10	123.6
1J22	60	40	10	128.7
2Cr13	60	40	10	121.7
FeSiB	21.71	15.92	10	10.32

样品的有效磁路长度和截面积，按照中国电子工业行业标准 SJ/T10281 计算，该标准等同采用 IEC205 号标准。对于环形样品，磁芯常数 C_1 、 C_2 如式 (3)、式 (4)，由磁芯常数可以计算样品的有效磁路长度和截面积，如式 (5)、式 (6)。其中， A 、 B 、 C 分别指环形磁芯的外径、内径和高度。

$$C_1 = \frac{2p}{C \ln \frac{A}{B}} \tag{3}$$

$$C_2 = \frac{2p \left(\frac{2}{B} - \frac{2}{A} \right)}{C^2 \ln^3 \left(\frac{A}{B} \right)} \tag{4}$$

$$L = \frac{C_1^2}{C_2} = \frac{p \ln \left(\frac{A}{B} \right)}{\frac{1}{B} - \frac{1}{A}} \tag{5}$$

$$S = \frac{C_1}{C_2} = \frac{C \ln^2 \left(\frac{A}{B} \right)}{\frac{2}{B} - \frac{2}{A}} \tag{6}$$

2 结果与分析

2.1 铁磁材料低温磁性测量结果

根据计算的磁路有效长度和截面积，按照图 1 所示对样品进行线圈绕制。应用模拟冲击法对样品进行测试，其中低温测试是把样品浸泡在液氮里待充分冷却后进行的。DT4、1J22、2Cr13 在 300 和 77 K 的基本磁化曲线如图 2 所示。非晶 FeSiB 合金在 300 和 77 K 的基本磁化曲线如图 3 所示。被测样品在不同温度下的磁性参数见表 2。其中 $P_{s1.0}$ 和 $S_{s1.0}$ 分别指在磁感应强度为 1.0 T 时样品的铁芯损耗和激磁功率。

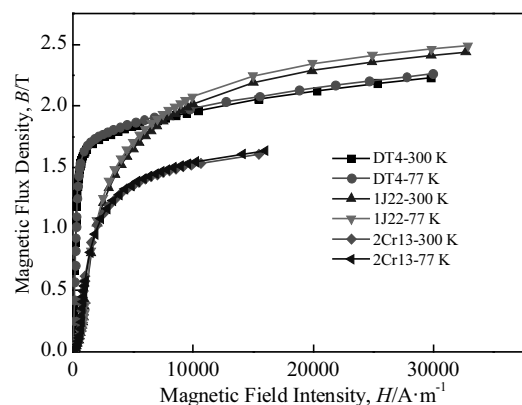


图 2 DT4、1J22、2Cr13 在 300 与 77 K 下的磁化曲线

Fig.2 Magnetization curves of DT4, 1J22 and 2Cr13 at the temperatures of 300 and 77 K

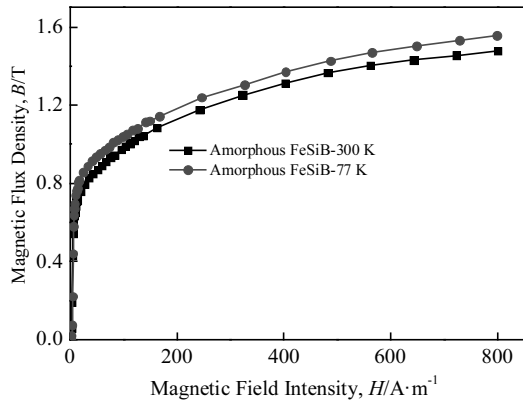


图 3 非晶 FeSiB 在 300 和 77 K 下的磁化曲线

Fig.3 Magnetization curves of FeSiB at the temperature of 300 and 77 K

从测试结果可以得到以下结论：（1）在液氮环境下，DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 的饱和磁感应强度均略有增加，其中非晶 FeSiB 的饱和磁感应强度增幅最大为 5.3%，纯铁 DT4 的饱和磁感应强度增幅最小为 1.4%；（2）在液氮环境下，DT4、非晶 FeSiB 和 2Cr13 的矫顽力增幅较大，DT4 的矫顽力增幅达 106%，而 1J22 的矫顽力却减小了 1.7%；（3）在剩磁方面，液氮环境下 DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 的剩磁均增加，增幅最大的为 DT4，增幅为 35.3%，增幅最小的为 1J22，增幅为 4.3%。

顺磁性或者铁磁性材料的磁化率一般是温度的函数，磁化率与温度的关系一般服从居里定律或者居里-外斯定律。随着温度的降低，材料的磁化率变大，因此在同一磁化场下，低温下的磁感应强度要大于室温下的磁感应强度。另一方面，在温度远低于居里温度的情况下，饱和磁感应强度可用式（7）~（10）计算^[7,15]。

$$B_s = \mu_0(H + M) \tag{7}$$

$$M = NgJ\mu_B B_J(y) \tag{8}$$

$$B_J(y) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}y\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J}y\right) \tag{9}$$

$$y = \mu_0 g J \mu_B H / kT \tag{10}$$

式中， μ_0 是真空磁导率， H 是外加磁化场， M 是饱和磁化强度， N 是原子个数， g 是朗德因子， J 是原子总角动量， μ_B 是波尔磁子， $B_J(y)$ 是布里渊函数， k 是玻尔兹曼常数， T 是温度。对（9）式关于 y 求导可得 $dB_J(y)/dy > 0$ ，布里渊函数是增函数，从式（10）可得，随着温度降低，磁化强度 M 增大，从而 B_s 增大。

在 50 Hz 情况下，采用 MATS-2010M 硅钢测试仪对样品的损耗特性进行了研究。DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 合金在 300 和 77 K 的损耗曲线如图 4 所示，损耗和激磁参数如表 2 所示，磁化线圈 N_1 的激磁功率曲线如图 5 所示。实验结果表明：（1）在液氮环境下，频率 50 Hz 时 DT4 的铁芯损耗随着磁感应强度增加而急剧增加，增幅达 263.2% 与在液氮温度下矫顽力增幅 106% 相对应，2Cr13 和非晶 FeSiB 合金的铁芯损耗略有增加，1J22 的铁芯损耗变化不大；（2）对 1J22 和非晶 FeSiB 合金，在较低磁感应强度下，在液氮温度下的激磁功率要高于室温下的激磁功率，随着磁感应强度的增加，样品逐渐饱和，液氮温度下的激磁功率反而降低。从减小损耗方面看，非晶 FeSiB 合金和 1J22 适合用在低温环境下的铁芯磁路设计中，而 DT4 不适合。

铁芯损耗主要包括磁滞损耗和涡流损耗，磁滞损耗与铁芯体积、磁滞回线的面积及磁场交变的频率成正比，涡流损耗与材料电阻率、磁场交变频率有关。由图 2、图 3 可知，77 K 时，饱和磁感应强度均增加，只有 1J22 的矫顽力稍有减小，磁滞损耗与磁滞回线的面积成正比。因此，所研究的 4 种材料的磁滞损耗在液氮环境下会增加。另一方面，电导率随温度会发生变化，一般在高温区，电阻率随温度线性变化。沈保根^[16]研究发现对非晶态 $Fe_{87-x}Si_xB_{13}$ ，在低温区电阻率出现极小值，但是在低温区电阻率仍然小于高温区。因此，对本研究的 4 种样品，涡流损耗在液氮温区要高于室温。综合而言，4 种材料在 77 K 时铁芯损耗要低于 300 K(见图 4)。

表 2 样品在不同温度下的磁性参数

Table 2 Magnetic parameters of samples at different temperatures

Sample type	Saturated magnetic density, B_s/T	Coercivity, $H_c/A \cdot m^{-1}$	Residual flux density, B_r/T	Loss power, $P_{S1.0}/W \cdot kg^{-1}$	Excitation power, $S_{S1.0}/(V \cdot A) \cdot kg^{-1}$
DT4 (300 K)	2.2305	96.96	0.9828	111.2	137.4
DT4 (77 K)	2.2615	199.8	1.33	403.9	495.9
1J22 (300 K)	2.4369	1143	1.071	61.89	80.98
1J22 (77 K)	2.4895	1123	1.117	62.16	79
2Cr13 (300 K)	1.6097	707	0.8864	55.78	71.27
2Cr13 (77 K)	1.6361	870.2	0.9718	66.27	83.2
FeSiB (300 K)	1.4771	6.094	0.7497	0.1552	1.134
FeSiB (77 K)	1.5558	7.36	0.8544	0.1918	0.9815

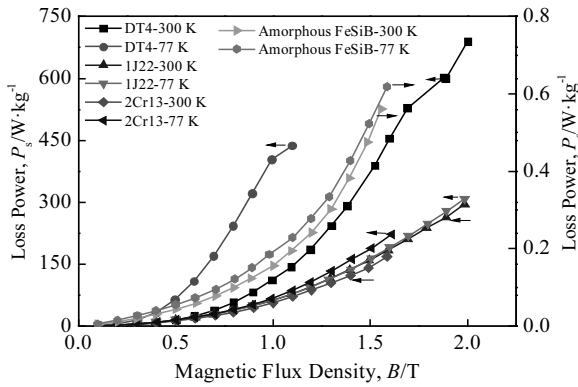


图 4 不同样品在 300 和 77 K 下的损耗特性

Fig.4 Loss characteristics of different samples at 300 and 77 K

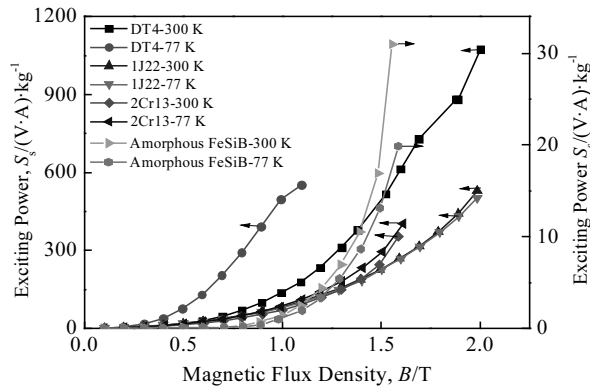


图 5 不同样品在 300 和 77 K 下的激磁功率

Fig.5 Exciting power of different samples at 300 and 77 K

2.2 铁磁材料低温磁性的应用对比分析

磁控溅射技术是物理气相沉积技术的一个分支，是制备功能薄膜材料的关键技术之一。常规磁控溅射阴极采用永磁体产生约束等离子体的磁场，靶面磁场水平分量一般在 $(300\sim 500)\times 10^{-4}$ T。Ishibashi 研究了永磁强磁场磁控溅射装置^[17]，该装置可以在较低的电压下放电，从而得到低电阻率薄膜。Mizutani^[18,19]采用圆柱形超导块激磁，将靶面磁场水平分量提高到 0.64 T，比常规磁控溅射阴极靶面磁场大了 1 个数量级。随后，Yamaguchi^[20]、Ikuta^[21]和 Hazama^[22]分别应用超导块激磁的磁控溅射装置制备了光学镜片薄膜、透明导电薄膜和 Cu 薄膜导线。由此，强磁场磁控溅射在制备高质量的光学薄膜和电学薄膜中得到了应用。然而，超导块激磁存在磁场无法调节的问题，不利于探索最优镀膜工艺。Qiu^[23]提出了采用超导线圈代替超导块来激磁的磁控溅射装置，研究发现靶面磁场水平分量可以达到 1300×10^{-4} T，为探索强磁场磁控溅射最优镀膜工艺奠定了基础。

本研究分别以 1J22 和 2Cr13 作为磁轭材料，以超导线圈激磁的磁控溅射装置为例，分析不同铁芯材料对靶面磁场分布的影响。采用超导线圈激磁的磁控溅射装置如图 6 所示，主要由超导线圈、内磁轭、外磁轭、靶材、基片等构成。超导线圈所用带材由 AMSC 公司生产，具体性能参数如表 3 所示。

对铁芯采用 1J22 材料的超导磁控阴极进行优化，铁芯的磁化曲线为 1J22 在 77 K 下测得的数据。优化变量分别取内磁轭半径 R_{in} 、外磁轭厚度 W_{out} 、底磁轭厚度 H 、平均电流密度 J_{av} 。目标函数为靶面磁场水平分量平均值的最大值。约束条件为超导带材的临界电流和临界弯曲半径。采用二维轴对称有限元法计算靶面磁场，采用蒙特卡洛方法对优化变量随机抽样，探索设计空间，进行优化。

优化目标函数：

$$f = \frac{1}{l} \int_0^l B_r dr \tag{11}$$

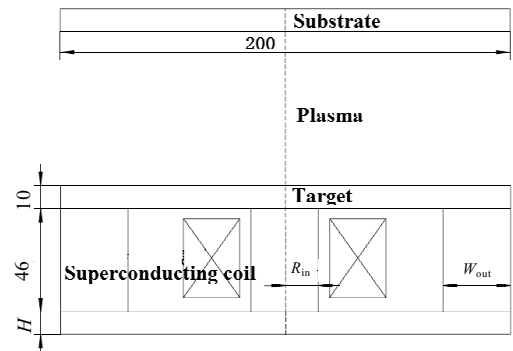


图 6 超导线圈激磁的磁控溅射装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of magnetron sputtering device for superconducting coil excitation

表 3 超导带材性能指标

Table 3 Performance index of superconducting tapes		
Tape property parameter	Temperature/K	Value
Average thickness/mm	300	0.3
Average width/mm	300	12
Minimum bending diameter/mm	300	75
Maximum tensile stress/MPa	300	150
Critical current/A	77	≥ 225

约束条件:

$$J_{av} / d - J_c(B, \theta) \leq 0 \quad (12)$$

$$R_{in} + 5 \geq R_{critical} \quad (13)$$

优化变量:

$$20 \text{ mm} \leq R_{in} \leq 40 \text{ mm} \quad (14)$$

$$20 \text{ mm} \leq W_{out} \leq 40 \text{ mm} \quad (15)$$

$$5 \text{ mm} \leq H \leq 20 \text{ mm} \quad (16)$$

$$10 \text{ A/mm}^2 \leq J_{av} \leq 30 \text{ A/mm}^2 \quad (17)$$

式中, B_r 为靶面磁场的水平分量, l 为靶面半径, J_{av} 为超导线圈的平均电流密度, d 为超导线圈的占空比, J_c 为超导带材的临界电流密度, $R_{critical}$ 为超导带材的临界弯曲半径。

超导带材的临界电流密度(J_c)与外加磁场(f)的大小和角度有关。对 AMSC 生产的超导带材, 临界电流密度随外加磁场的关系如式 (18)、(19) 所示^[24]:

$$J_c(B, \theta) = J_{c0} \left(1 + \left(\frac{f(\theta)B}{B_0} \right) \right)^{-\alpha} \quad (18)$$

$$f(\theta) = \sqrt{g^2 \sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)} \quad (19)$$

$$\theta = \arctan(B_r/B_z) \quad (20)$$

对 AMSC 生产的该型号超导带材, 通过参数拟合, 可以得到在 77 K 下, $\alpha = 1.37$, $B_0 = 0.76$, $g = 2.16$ ^[25]。

优化后的结果如表 4 所示。根据磁场与临界电流密度的关系, 可以计算超导线圈的临界电流密度分布, 如图 7 所示。保持优化后的参数不变, 将铁芯的磁化曲线换成 2Cr13 在 77 K 下的数据, 计算靶面磁场分布。铁芯材料为 1J22 和 2Cr13 的超导磁控溅射阴极磁场密度模和靶面磁场分布如图 8、图 9 所示。

从临界电流分布可以看出, 超导线圈内侧上部区域的临界电流密度最低, 为 66.3 A, 超导线圈下部中间和外侧区域的临界电流最大, 为 218 A。从磁场分布图可以看出, 采用 1J22 作铁芯的超导磁控阴极, 靶面磁场水平分量的平均值 0.1013 T, 最大值为 0.2344 T。保持铁芯结构不变, 将材料换成 2Cr13 时, 靶面磁场水平分量的平均值为 0.0937 T, 最大值为 0.2043 T。靶面磁场水平分量的平均值和最大值分别增加了 11.0%和 14.8%。因此, 在设计超导强磁场磁控溅射阴极磁体时, 在铁芯材料选择方面 1J22 要优于 2Cr13。

表 4 优化结果

Table 4 Optimization result

Parameter	Before optimization	After optimization
R_{in}/mm	30	38.242
W_{out}/mm	30	25.862
H/mm	10	8.4571
$J_{av}/\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$	13	13.721
f/T	937.30	1012.5

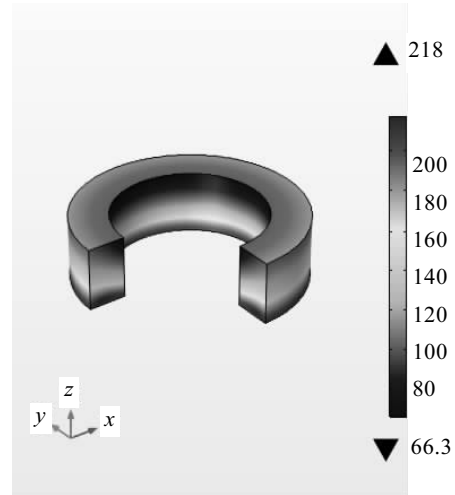


图 7 超导线圈区域的临界电流分布

Fig.7 Critical current distribution in the superconducting coil region

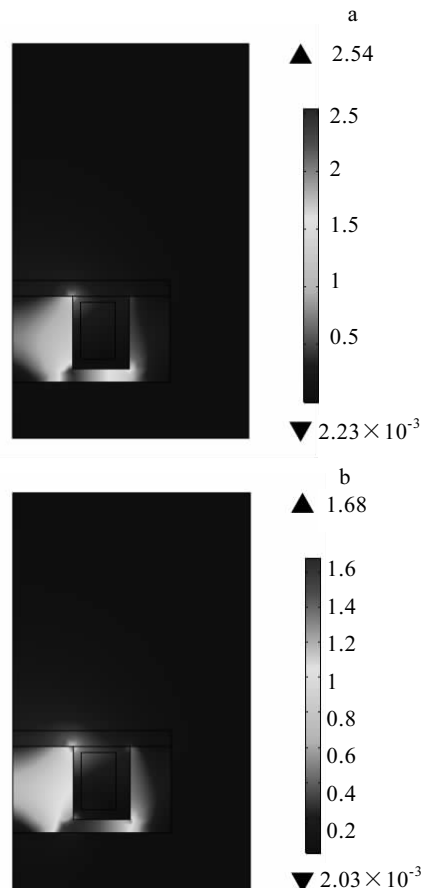


图 8 1J22 和 2Cr13 作铁芯的磁控阴极磁场密度模分布

Fig.8 Magnetic field density distribution of magnetron sputtering cathode with 1J22 (a) and 2Cr13 (b) as cores

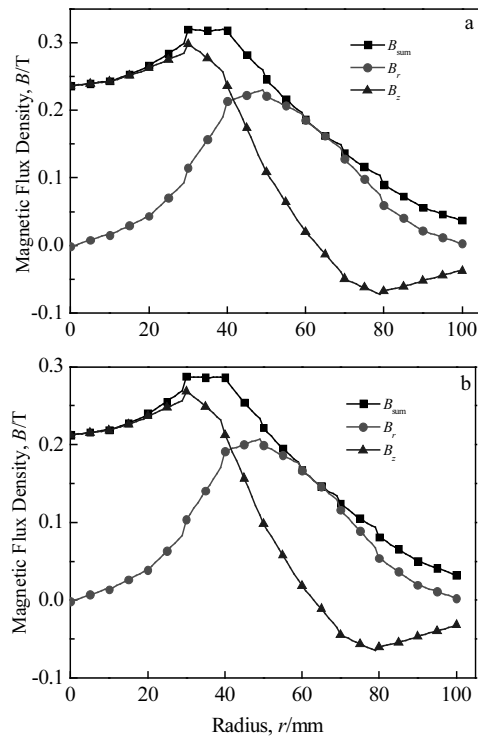


图9 1J22 和 2Cr13 作铁芯的磁控阴极靶面磁场分布

Fig.9 Magnetic field distributions on the cathode target surface with 1J22 (a) and 2Cr13 (b) as cores

3 结论

1) 在液氮温度下, 4 种软磁材料的饱和磁感应强度均增加, 但是增幅不大。

2) 不同材料在液氮温度下的变化相差很大, DT4 的矫顽力增加了 106%, 而 1J22 的矫顽力却减少了 1.7%。

3) 液氮环境下 DT4、1J22、2Cr13 和非晶 FeSiB 的剩磁均增加, DT4 的增幅最大为 35.3%, 1J22 的增幅最小为 4.3%。

4) 在铁芯损耗方面, 频率为 50 Hz 时, DT4 在液氮下的损耗增加 263.2%, 而其他 3 种材料变化不明显, 这与低温下材料的电导率变化相关, 有关电导率随温度的变化关系需要进一步研究。

5) 采用 1J22 作为铁芯相比 2Cr13 能在靶面产生更强的磁场, 在超导强磁场磁控溅射阴极磁体设计方面, 铁芯材料选取 1J22 的效果要优于 2Cr13。有关铁磁材料的低温磁性能研究可以为超导电磁装置的铁芯磁路设计提供参考。

参考文献 References

- [1] Xiao Liye(肖立业). *Chinese Science Bulletin(科学通报)*[J], 2015, 60(25): 2367
- [2] Xiao Liye(肖立业), Gu Hongwei(古宏伟), Wang Qiuliang(王秋良) et al. *Physics(物理)*[J], 2017, 46(8): 536
- [3] Bai Lifeng(白利峰), Zhang Pingxiang(张平祥). *Chinese Journal of Low Temperature Physics(低温物理学报)*[J], 2016, 38(5): 1
- [4] Jin Tao(金涛), Xu Ying(徐颖), Zhou Shiping(周世平) et al. *Cryogenics & Superconductivity(低温与超导)*[J], 2013, 41(1): 13
- [5] Liu Q, Zhang G M, Yu H et al. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*[J], 2016, 30(3): 1
- [6] Choi K D, Lee H J, Cha G et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2000,10(1): 853
- [7] Zhou Ruohan(周若安), Ma Yilong(马毅龙), Chen Dengming(陈登明) et al. *Journal of Functional Materials(功能材料)*[J], 2014, 45(16): 16 030
- [8] Zhang Wenfeng(张文峰). *Researchs on the Electro-magnetic Field Problems of High Temperature Superconducting Wind Generators Considering the Structure of Damping and Screening System(考虑阻尼屏蔽系统时超导风力发电机相关电磁问题的研究)*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017
- [9] Chen Min(陈敏), Qiu Ming(丘明), Xiao Liye(肖立业) et al. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy(电工电能新技术)*[J], 2003, 22(1): 35
- [10] Jankowski B, Kapelski D, Karbowski M et al. *Powder Metallurgy*[J], 2003, 57(2): 155
- [11] Suzuki Y, Horikoshi E, Niwa K. *Magnetic Properties and Ferromagnetic Shielding of Ni-Fe-Mo Alloys at Cryogenic Temperatures*[M]. New York: Springer, 1984: 469
- [12] Oxley P, Goodell J, Molt R. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*[J], 2009, 321(14): 2107
- [13] Llamazares J L S, Quintananelcos A, Ríosjara D et al. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*[J], 2016, 401: 38
- [14] Hua Ying(华瑛). *Physics Examination and Testing(物理测试)*[J], 2009, 27(5): 28
- [15] Zhang Jianke(张建可). *Cryogenics & Superconductivity(低温与超导)*[J], 1990(4): 33
- [16] Shen Baogen(沈保根), Zhan Wenshan(詹文山), Zhao Jianguo(赵见高) et al. *Acta Physica Sinica(物理学报)*[J], 1985, 34(8): 1009
- [17] Ishibashi S, Higuchi Y, Ota Y et al. *Journal of Vacuum Science & Technology A*[J], 1990, 8(3): 1403

- [18] Mizutani U, Hazama H, Matsuda T *et al. Superconductor Science & Technology*[J], 2005, 18(2): S30
- [19] Mizutani U, Hazama H, Matsuda T *et al. Superconductor Science & Technology*[J], 2003, 16(10): 1207
- [20] Yamaguchi T, Ikuta H, Yanagi Y *et al. Physica C Superconductivity & Its Applications*[J], 2007, 463(1): 1342
- [21] Ikuta H, Yokouchi K, Ohta I *et al. Vacuum*[J], 2008, 83(3): 475
- [22] Hazama H, Matsuda T, Mizutani U *et al. Japanese Journal of Applied Physics*[J], 2004, 43(9A): 6026
- [23] Qiu Q Q, Qu F, Wang T L *et al. Physica C Superconductivity*[J], 2017, 542(15): 40
- [24] Rostila L, Lehtonen J, Seiler E *et al. Superconductor Science Technology*[J], 2007, 20(12): 1097
- [25] Sun Q, Zhang Z, Lin L *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2014, 24(3): 1

Measurement of Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials at Low Temperature

Wang Tianlong^{1,2,3}, Qiu Qingquan^{1,2}, Jing Liwei^{1,2}, MyongChol. Ri^{3,4}, Ding Dawei⁴

(1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The magnetic properties and loss characteristics of ferromagnetic materials in 300 and 77 K environments were investigated by a simulated impact method. The ferromagnetic materials DT4, 1J22, 2Cr13 and amorphous FeSiB alloy were used as the research samples. The results show that in nitrogen environment, the saturation magnetic induction intensity of DT4, 1J22, 2Cr13 and amorphous FeSiB slightly increased, and the saturation magnetic induction intensity of FeSiB increases by 5.3%. The coercive forces of DT4, amorphous FeSiB and 2Cr13 increase greatly, of which the coercive force of DT4 increases by 106%, while the coercive force of 1J22 decreases by 1.7%. When the frequency is 50 Hz, the loss of DT4 in liquid nitrogen environment increases sharply compared with at normal temperature, while the loss of amorphous FeSiB and 2Cr13 increases slightly compared with at normal temperature, and the loss of 1J22 varies little. Finally, the magnetic field calculation of the magnetron sputtering cathode excited by superconducting coil is taken as an example. Under the same structure of iron core, the maximum value of the horizontal component of magnetic field is 0.2344 T when using 1J22 as the core of the magnetron sputtering cathode. Compared with that using 2Cr13 as the iron core, the maximum value of the horizontal component of magnetic field increases by 14.8%. The study on the low temperature magnetic properties of ferromagnetic materials can provide a reference for the design of magnetic circuit of superconducting electromagnetic equipment.

Key words: soft magnetic material; magnetization curve; resistive loss curve; magnetron sputtering cathode

Corresponding author: Qiu Qingquan, Ph. D., Associate Professor, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China, E-mail: qiuqingquan@mail.iee.ac.cn