

· 组织和性能 ·

温度对 33EH 高性能烧结钕铁硼永磁体磁性能的影响

王凌燕 于旭光 张翼 刘丹 王俊帅

(石家庄铁道大学,河北省交通工程材料重点实验室,石家庄 050043)

摘要 试验研究了温度(25~200℃)对33EH烧结钕铁硼(成分:27.01Nd,64.75Fe,0.35Al,3.15Dy,1.56Co,2.27Cu,0.90Ga)剩磁、磁感损失等参数的影响。结果表明,随温度升高剩磁呈线性降低,100℃时剩磁下降7.6%,200℃时剩磁下降22%。25~100℃时,随温度升高开路磁感损失约1%,100~200℃,随温度升高,开路磁感损失急剧增加,至200℃时,开路磁感损失达44%,33EH烧结钕铁硼最佳使用温度为≤100℃。

关键词 33EH 烧结钕铁硼永磁体 磁性能 服役温度

Effect of Temperature on Magnetic Performance of 33EH High Quality Sintered NdFeB Permanent Magnets

Wang Lingyan, Yu Xuguang, Zhang Yi, Liu Dan and Wang Junshuai

(Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043)

Abstract The effect of temperature (25~200℃) on magnetic performance of 33EH sintered NdFeB (成分:27.01Nd,64.75Fe,0.35Al,3.15Dy,1.56Co,2.27Cu,0.90Ga) including residual magnet and magnet loss etc. has been tested and studied. Test results show that with increasing temperature, the residual magnet decreases linearly, at 100℃ the residual magnet decreases by 7.6% and at 200℃ the residual magnet decreases by 22%. At 25~100℃ with increasing the temperature, the open-circuit magnet decreases by about 1%, at 100~200℃ with increasing the temperature, the open-circuit magnet loss increases dramatically, at 200℃ the open-circuit magnet decreases by 44%. The optimum service temperature of 33EH sintered NdFeB permanent magnets is ≤100℃.

Material Index 33EH, Sintered NdFeB Permanent Magnets, Magnetic Performance, Service Temperature

永磁材料的重要参数是其磁性能的稳定性的,主要是指永磁材料充磁后,磁性能受内外因素的影响发生改变的程度^[1-3]。一般通过使用磁性能的变化率来表示其稳定性的好坏。引起磁性能变化的因素主要有:温度、时间、化学腐蚀、机械振动与冲击、射线等。永磁材料作为重要的功能材料在风力发电、航空航天等关键器件上以及磁力密封机械中已有广泛的应用^[4-7]。在影响永磁材料稳定性的各种因素中,温度对材料的稳定性影响最为显著^[8-10]。

永磁体一般用作磁场源,在一定气隙内提供恒定的磁场^[6]。为获得较高的磁场和可靠性,重要器件上选用的钕铁硼,人们大多选用高矫顽力、高性能的钕铁硼永磁材料作磁场源。根据钕铁硼材料的最大磁能积和矫顽力,将其划分为多个牌号,如“N”、“SH”、“UH”、“EH”等。在冶金密封、风力发电等领域往往选用矫顽力最高的“EH”牌号高性能烧结钕铁硼^[7,11-12],其最大磁能积大于271 kJ/m³。“EH”牌号烧结钕铁硼的标准中规定“工作温度”为“≤

200℃”^[13]。那么,是不是在200℃以下其磁性能都一样呢?为了弄清这个问题,对其温度稳定性进行了研究。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

试样选用从市面上购买的33EH牌号烧结钕铁硼永磁材料。其主要生产工艺是原材料通过成分设计进行配料,之后经过冶炼、铸锭、破碎、制粉、混料、磁场取向与压型、烧结、回火、机械加工、表面涂层处理等工序,最终通过质量检测和充磁制成成品。用KYKY-2800B型扫描电镜配以能谱对其进行成分分析(表1),利用GX-51型奥利巴斯显微镜对其组织进行观察(图1),放大倍数为1000倍,明亮的区域是基

表1 钕铁硼磁体的配料化学成分/%

Table 1 Chemical ingredient for NdFeB magnet

| Nd | Fe | Al | Dy | Co | Cu | Ga |
|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 27.01 | 64.75 | 0.35 | 3.15 | 1.56 | 2.27 | 0.90 |

注:B元素是轻元素,EDS无法对其进行扫描分析,在钕铁硼配料成分中一般含量为1.2%。

通讯作者:于旭光,教授,石家庄铁道大学材料学院,石家庄 050043

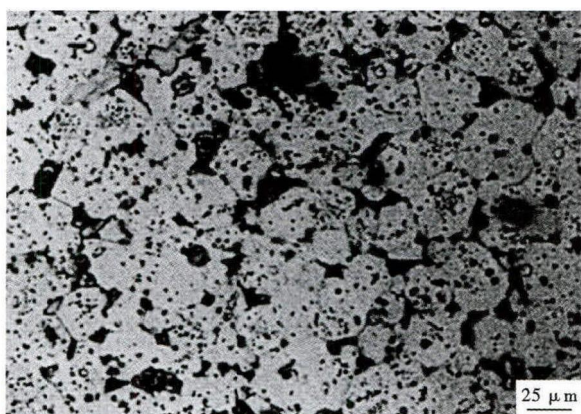


图 1 33EH 烧结钕铁硼永磁体组织形貌

Fig.1 Morphology of structure of sintered NdFeB permanent magnets

体相($Nd_2Fe_{14}B$ 相),灰色区域为富硼相和富钕相。

1.2 实验方法

在 33EH 牌号 50 mm × 50 mm × 25 mm 大块钕铁硼永磁材料上切取若干 $\Phi 10$ mm × 6 mm(磁场方向)圆柱试样。

对试样进行至少一次的温度循环处理。即从室温加热到高出测量温度 20 °C;之后自然冷却至室温。

用脉冲充磁机对试样进行充磁,将试样磁化至饱和或接近饱和状态。

加热到室温至 200 °C 指定温度保温 10 min 后,用 NIM-15000H 型永磁测量仪对永磁体进行磁性能测量。测量方法严格按照温度系数测量技术规范(JJF 1239-2010)^[14]进行。

使用 TA-102F 型高斯计测量永磁体在相应温度范围内不同温度随时间延长,试样表面开路磁感应强度的变化情况。

2 实验结果及分析

2.1 温度对永磁体磁性能的影响

由于永磁材料工作在退磁曲线阶段,那么衡量永磁材料性能好坏的 3 个评价指标就是:剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。永磁材料的磁性能会随着温度的升高而逐渐减弱,当温度升高至材料的居里温度点后,即从硬磁材料转变为顺磁材料。

测得的试样在不同温度下的退磁曲线如图 2 所示。曲线温度分别为 25, 40, 55, 70, 85, 100, 115, 130, 145, 160, 180, 200 °C。其中,室温 25 °C 时的磁学性能为剩磁 1.215 T,内禀矫顽力 > 3 100 kA/m,最大磁能积为 285.9 kJ/m³。

永磁体在空气气隙中产生的磁场强度主要决定

于磁铁内部的最大磁能积和剩磁,两者实测值越大,在气隙中产生的磁场越大。图 3 是 33EH 烧结钕铁硼的剩磁和最大磁能积随温度而变化的情况。40 °C 时二者的下降率分别为 1.4% 和 3.7%;55 °C 时分别下降 2.9% 和 6.0%;100 °C 分别下降 7.6% 和 14.9%。温度进一步升高时,二者的降幅急剧增加。当温度升高至 200 °C 时,剩磁相比于室温下降了约 22%,最大磁能积降低了约 49.4%。

由所处环境温度改变而引起的永磁体磁性能的变化程度被称为其温度稳定性。通常用温度稳定系数来表示磁性能随温度变化的程度^[15-16]。利用公式(1)和(2)计算磁体从室温(25 °C)至相应温度下的剩磁平均温度系数 α 和内禀矫顽力平均温度系数 β 。由于该试样属于超高矫顽力钕铁硼永磁材料,超出了仪器的测量范围,因此在计算平均矫顽力温度系数时选取 $T_0 = 40$ °C。根据计算结果绘制如图 4 所示的不同温度下的平均温度系数,由于通过计算得到的是负值,因此图 4 中纵坐标表示其平均

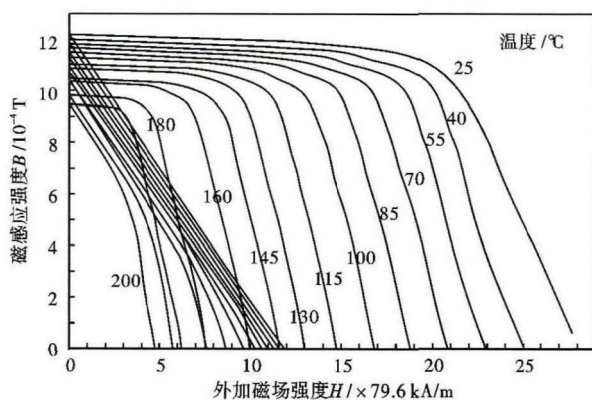


图 2 33EH 烧结钕铁硼试样在不同温度下的退磁曲线

Fig.2 Demagnetization curves of 33EH sintered NdFeB permanent magnets at different temperature

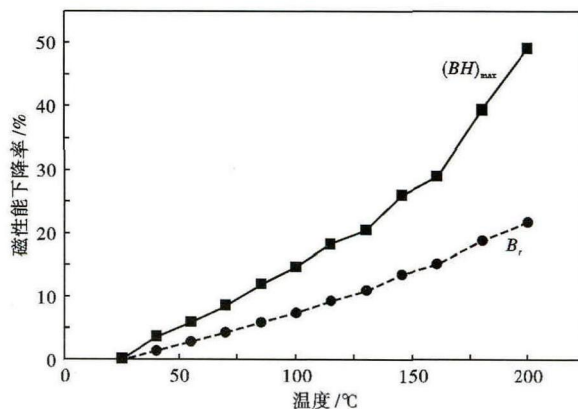


图 3 温度对 33EH 烧结钕铁硼磁性能的影响

Fig.3 Effect of temperature on magnetic performance of 33EH sintered NdFeB magnets

温度系数的绝对值。

$$\alpha = \frac{B_r(T) - B_r(T_0)}{B_r(T_0)(T - T_0)} \times 100\% \quad (1)$$

$$\beta = \frac{H_{cj}(T) - H_{cj}(T_0)}{H_{cj}(T_0)(T - T_0)} \times 100\% \quad (2)$$

由图 4(a)可以看出,剩磁平均温度系数 $\alpha(B_r)$ 的绝对值随温度升高而不断增大,由此说明,随温度的升高,剩磁降低的速度越来越快,超过 100 °C 时,剩磁降低急剧加快。

由图 4(b)可以看出,矫顽力平均温度系数 $\beta(H_{cj})$ 的绝对值随温度升高而逐渐减小,由此说明,随温度的升高,矫顽力降低的速度由快变慢。

为了更清楚地说明平均温度系数与温度之间的线性关系,使用 Origin 作图工具对两条曲线做了线性拟合,拟合结果如式(3)和(4)所示,拟合度分别为 0.96 和 0.92。

$$|\alpha(B_r)| = 2.089 \times 10^{-4} T + 0.0823 \quad (3)$$

$$|\beta(H_{cj})| = -6.590 \times 10^{-4} T + 0.6092 \quad (4)$$

通过对以上的实验结果进行分析,可以看出该永磁材料在标称的“工作温度”范围内,随着温度的升高,其磁性能逐渐降低,且这种降低的程度与温度之间符合线性关系。

2.2 温度对永磁材料开路磁感的影响

为了更加清楚地说明永磁体的最佳使用温度,对永磁材料开路磁感随温度的变化情况进行了研究。

随温度的升高,永磁材料自身的磁性会产生损失,称之为热磁损失。主要包括可逆损失和不可逆损失。前者磁性的变化主要是来源于温度升高导致磁性的磁结构发生了改变,这种损失是可以恢复的,即在温度恢复到室温时,磁性还会恢复到原始状态。而后者磁性的变化是来源于温度升高导致材料的组织结构或微结

构发生改变,这种损失是不可以恢复的,即使温度回到室温,磁性也不可能再恢复到原始状态了^[17]。

假设在室温(T_0)时,永磁体的开路磁感应强度为 $B(T_0)$,当温度升高至 T_1 时,永磁体开路剩磁变为 $B(T_1)$,当温度再恢复到室温(T_0)时,永磁体开路剩磁为 $B(T_0)$,开路剩磁与温度的关系可由公式(5)~(7)计算而得^[6]。图 5 为对永磁体在 50,80,100,130,170,200 °C 下分别用烘箱烘烤 6,12,24 h 后的开路磁感损失情况。

B 的总损失:

$$h_r = \frac{B(T_1) - B(T_0)}{B(T_0)} \times 100\% \quad (5)$$

B 的不可逆损失:

$$h_{irr} = \frac{B'(T_0) - B(T_0)}{B(T_0)} \times 100\% \quad (6)$$

B 的可逆损失:

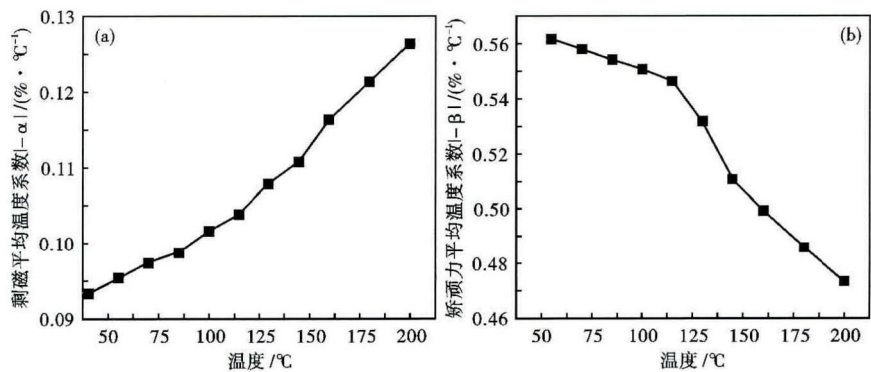


图 4 温度对钕铁硼永磁材料剩磁平均温度系数(a)和矫顽力平均温度系数(b)的影响

Fig.4 Effect of temperature on residual magnet average temperature coefficient (a) and coercive force average temperature coefficient (b) of NdFeB permanent materials

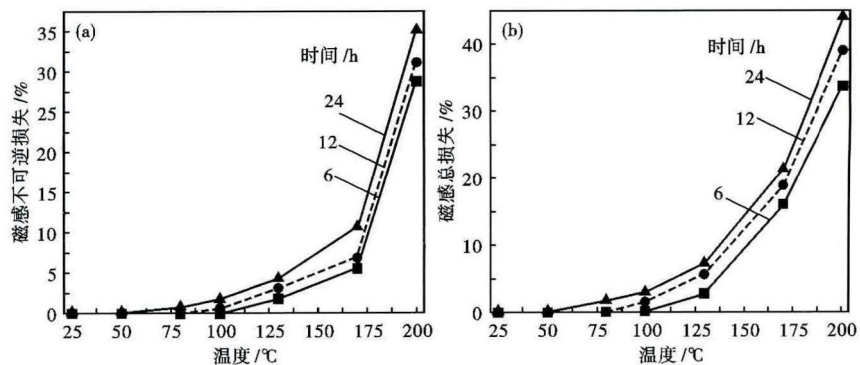


图 5 温度和时间对 33EH 烧结钕铁硼磁体磁感不可逆损失(a)和磁感总损失(b)的影响

Fig.5 Effect of temperature and time on irreversible loss of flux (a) and total loss of flux (b) of 33EH sintered NdFeB permanent magnets

$$\text{hrev} = \frac{B(T_1) - B'(T_0)}{B'(T_0)} \times 100\% \quad (7)$$

从图 5 中可以看出,随温度的升高,永磁体的开路磁感逐渐产生损失,不可逆损失和总损失逐渐增大。在 50 ℃ 以下时,烘烤时间的长短对永磁体不可逆损失几乎没有影响,在 80 ℃ 和 100 ℃ 温度内烘烤一天产生约 1% 的不可逆损失,当温度超过 100 ℃ 时,不可逆损失开始增加,当温度达到 200 ℃ 时,24 h 内不可逆损失和总损失分别达到 35% 和 44%。表明标称的“工作温度”不是最佳使用温度,33EH 烧结钕铁硼的最佳使用温度为 100 ℃ 以下。这是因为任何一个磁体都是由许多小的磁性分子组成的,由于磁极的同性相斥作用,在同一极面上的磁性分子产生排斥力相互间有抵消作用,也就是产生了退磁作用。当温度升高时,这种作用加剧进行,以致有些分子的磁矩转向,产生不可逆损失^[17]。

生产上可以通过水冷等措施使钕铁硼永磁体工作在 100 ℃ 以下,或定期对磁场源进行冷处理^[18],使永磁体恢复磁性能。

3 结论

(1) 随温度的升高,永磁体磁性能损失主要表

现为剩磁和最大磁能积的损失。当试样由室温升高到 40 ℃ 时,剩磁和最大磁能积的下降率分别为 1.4% 和 3.7%; 55 ℃ 时分别下降 2.9% 和 6.0%; 100 ℃ 时分别下降 7.6% 和 14.9%。温度进一步升高时,二者的降幅更大。当温度升高至 200 ℃ 时,剩磁降低了约 22%,最大磁能积降低了约 49.4%。表明 33EH 烧结钕铁硼可以在标称的“工作温度”下使用,但是该温度并不是最佳使用温度。

(2) 永磁体随温度的升高,剩磁降低的速度越来越快;矫顽力降低的速度由快变慢。在其标称的“工作温度”范围内,二者均具有线性关系。

(3) 随温度的升高和时间的延长,永磁体表面的开路磁感的不可逆损失逐渐增加,得出该永磁体的最佳使用温度为 100 ℃ 以下。在最佳温度下,开路磁感损失增加量仅约 1%; 在此温度以上,开路磁感损失急剧增加,到达该材料标称的“工作温度”上限时,开路磁感损失达 44%。

河北省自然科学基金重点项目资助(E2012210009),及河北省高校重点学科建设项目资助。

参考文献

- [1] 陈俊峰. 永磁电机基础[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [2] Cullity B D. Introduction to Magnetic Materials[M]. Philippines: Addison-Wesley Company,1972.
- [3] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [4] Chen C H, Talangi J. The Effects of Neutron on NdFeB and Sm₂Co₁₇-based High-temperature Magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(10):3832.
- [5] Yang L, Zhen L, Xu C Y, et al. Effects of Proton Irradiation on Structure of NdFeB Permanent Magnets Studied by X-ray Diffraction and X-ray Absorption Fine Structure[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2011,323:4-6.
- [6] 周寿增,董清飞,高学绪. 烧结钕铁硼稀土永磁材料与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [7] 于旭光,刘亮,秦茶,等. 烧结机缝隙磁场密封模拟实验[J]. 特殊钢,2009,30(2):25-26.
- [8] Fang Y K, Yang Li, Zhen L, et al. Magnetic Micro-structures of a High Coercivity Nd-Fe-B Sintered Magnet in Remanent and Incomplete Thermal Demagnetization States[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2010,322:3720-3723.
- [9] 李家节,李安华,朱明刚,等. 烧结 Nd-Fe-B 磁体的环境稳定性研究进展[J]. 中国稀土学报,2011,29(1):1-7.
- [10] 甄良,易忠,杨丽,等. 不同尺寸的 NdFeB 稀土永磁体热退磁行为研究[J]. 中国稀土学报,2013,31(1):26-30.
- [11] 白书欣,李顺,张虹,等. 稀土永磁材料在风力发电机中的应用[C]. 山东:第四届全国高新磁性材料及器件讨论论文集,2009:1-7.
- [12] 肖海航,曹宁,张辉. 永磁材料及其在风电永磁发电机上的应用[J]. 东方电机,2009,37(1):37-43.
- [13] GB/T13560-2009. 烧结钕铁硼永磁材料[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [14] 全国磁学计量技术委员会. JJF1239-2010. 稀土永磁材料磁性温度系数测量技术规范[S]. 北京:中国计量出版社,2010.
- [15] 郭策安,张健,林常海. 超高矫顽力 Nd-Fe-B 永磁体的温度稳定性研究[J]. 沈阳理工大学学报,2008,27(1):77-79.
- [16] 中国国家标准化委员会. GB/T24270-2009. 永磁材料磁性温度系数测量方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [17] 金瑞湘,陈敏勤,朱华,等. 烧结钕铁硼永磁材料的热稳定性[J]. 电工材料,1991(3):19-24.
- [18] 于旭光,张增强,丁占来. 冷处理对烧结钕铁硼磁性能的影响[J]. 石家庄铁道学院学报,2007,20(2):5-7.

王凌燕(1989-),女,硕士研究生(石家庄铁道大学),2012年石家庄铁道大学四方学院(本科)毕业,磁性材料及应用研究。E-mail:zjk_wly3595@126.com

收稿日期:2014-08-05