

稀土永磁材料在永磁电机中的应用

郑大伟^{1,2}, 朱明刚¹, 郑立允^{1,2}, 李 卫¹

(¹钢铁研究总院 功能材料研究所, 北京 100081; ²河北工程大学, 邯郸 056005)

摘要:简要叙述了稀土永磁材料对永磁电机发展的影响和在永磁电机应用中反映出的一些问题, 重点介绍了低钴磁体和钕磁体在电机中的应用。在保证电机中永磁体磁性能的前提下, 不仅大大降低了电机的成本, 而且耐蚀性也有所改善, 在永磁电机未来发展应用中存在巨大前景。

关键词:稀土永磁体; 应用; 永磁电机; 低钴磁体; 钕磁体

中图分类号: TM271

文献标识码: A

文章编号: 1003-6952(2019)04-0000-00

0 引言

稀土永磁材料在永磁电机中的应用

稀土永磁材料在永磁电机中的应用, 不仅大大降低了电机的成本, 而且耐蚀性也有所改善, 在永磁电机未来发展应用中存在巨大前景。

稀土永磁材料在永磁电机中的应用, 不仅大大降低了电机的成本, 而且耐蚀性也有所改善, 在永磁电机未来发展应用中存在巨大前景。

1 引言

稀土材料是一种重要的功能材料, 广泛应用于国民经济和国防建设中。我国的稀土资源十分丰富, 已探明的资源约占世界已探明的 1/3, 不仅质量高, 而且品种齐全, 为我国稀土永磁体产业和永磁电机的发展提供了得天独厚的条件。

电机是一种基于电磁感应定律和电磁力定律工作原理, 以磁场为媒介实现电能和机械能之间相互转换的电磁装置。通过气隙磁场之间的相互耦合作用, 实现电机的电力系统与机械系统的相互转换。性能优异的永磁体在技术磁化至磁化饱和后, 撤除外磁场仍具有很强的磁性, 并具有 N/S 两极性, 可以用来替代传统电机中的电励磁, 这种采用永久磁铁作为励磁的电机称为永磁电机。

节能环保已成为当今世界的一大主题, 为了我们的生活环境更加美好, 则需要从社会各个方面发展绿色环保的产品。永磁电机具有高性能、轻量化和效率高优势, 可以替代工业电力拖动的大部分拖动设备, 大大降低了一次能源消耗, 减少有害气体

排放, 对于改善环境, 建设资源节约型、环境友好型社会, 实现国民经济可持续发展有着十分重要的意义。

2 永磁材料及永磁电机的发展简介

2.1 永磁材料的发展

钕铁硼稀土永磁出现于 1983 年, 短短的 10 年取得了迅猛的发展, 已成为如今磁学领域科研和开发的核心及热点。随着一系列优化的制备技术和先进设备的不断出现, 钕铁硼永磁体的最大磁能积不断被提升。

1983 年, 日本松下等人首次采用传统粉末冶金工艺制备出最大磁能积 $(BH)_{max}$ 约 100 kJ/m³ 的磁体。1985 年, 日本松下等人通过加强对氧含量的控制, 制得磁体的 $(BH)_{max}$ 高达 150 kJ/m³, 分析发现, 其名义成分为 Nd₂Fe₁₄B, 与 Nd₂Fe₁₄B 相的成分非常接近。1988 年, 住友金属公司等人用速凝甩带氢破和气流磨工艺成功制备出磁能积 $(BH)_{max}$ 为 180 kJ/m³ 的高性能烧结 Nd₂Fe₁₄B 永磁体。1989 年, 日本松下等人用双合金法成功制备出磁能积为 $(BH)_{max} 200 kJ/m³ 的超高性能烧结钕铁硼永磁体。仅过了三年, 1992 年, 日本松下等人对制备工艺实行优化, 成功地将烧结 Nd₂Fe₁₄B 永磁$

郑大伟等
稀土永磁材料在永磁电机中的应用

对钕铁硼永磁体产生了影响,用于永磁电机的高矫顽力含镨钕铁硼磁体更是不可避免地大大增加了成本,从而对永磁电机的扩大应用产生了不小的冲击。2011年12月全国稀土材料的价格动荡就是一个很好的例子。

温度特性差

用于稀土永磁电机的永磁材料需要有优良的温度系数和较高的居里温度，而这正是NdFeB永磁体致命的弱点。如果能突破永磁体温度系数和居里温度这一关键指标，使电机长期运行于600℃的高温条件下（有的高达700℃），则对电机行业来说将会是一场革命。为此，国内钕铁硼永磁科研和生产单位多采用添加元素（如Al、Zr等）的办法来改善钕铁硼永磁的温度稳定性。

• 抗蚀性能差 • 容易氧化

稀土永磁还有一个严重的弱点,就是易氧化和生锈。氧含量的增加将快速降低稀土磁体的矫顽力,这将大幅度降低稀土电机单位体积的功率,此外,稀土磁体容易生锈的缺点在很大程度上也限制了它在电机中的应用,为防止生锈而进行处理的成本是稀土永磁价格偏高的另一个重要原因。因此,无论从电机性能要求着眼,还是从降低稀土生产成本出发,都必须彻底解决稀土永磁的防氧化耐腐蚀性问题。

ú 新工艺磁体在永磁电机中应用

在烧结钕铁硼永磁体中,稀土元素含量一般占 15% 左右。对于不需要添加镝 1% 的低矫顽力钕铁硼磁体,Er 的质量分数约占 15%;对于需要添加 2% 的高矫顽力钕铁硼磁体,通常 2% 的加入量为 15%~20%,平均为 18% 左右^[5]。

以上海有色网公布的 2010 年 11 月 11 日平均稀土价格为例, 纯金属 La 的平均价格分别为 10.5 万元/吨、10.5 万元/吨、10.5 万元/吨, 对于不添加 La 的低矫顽力钕铁硼产品, 稀土元素在成本中占 10.5 万元 (纯 La); 对于添加 La 的产品, La 占成本 10.5 万元。我们发现, 添加 La 元素的成本居然比占质量分数为 10% 的 La 的成本还要高, 如果能在保证矫顽力要求的情况下降低 La 的含量, 其磁体的成本必然大大降低; 同时如果在满足磁性能的前提下能用价格更为低廉的铈 (Ce) 替代部分的 La , 同样可以大大地降低成本。此技术一旦时机成熟, 必将对稀土永磁材料在永磁电机中的应用产生巨大的推动力。

通过低镨调控技术和含铈磁体的开发有望能较好地满足使用温度较高的电机的要求,并且同传统

烧结钕铁硼磁体相比,将能够显著降低永磁电机的成本。

1.2 低镨磁体在永磁电机中的应用

由于长期以来 Nd 的价格始终居高不下,使得磁体的价格持续偏高,为此,近年来众多的科研单位和生产厂家在降镨的研发工作中做出了大量的尝试和摸索。这里以永磁电机中常用的高牌号 N45 磁体为例。钢铁研究总院提出采用双主相合金技术^[5]调控磁体中镨的含量,该技术首先制备两种名义成分的速凝片,浇铸合金溶液时水冷辊速为 $1.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$,获得的速凝薄带平均厚度范围在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 之间,然后将制得的速凝片进行氢破碎,氢气压力为 $0.8 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 。吸氢完毕后,氢破粉在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 脱氢 2 个小时后水冷至室温。然后将氢破粉在无氧环境中混入 $0.5\% \sim 1\%$ 的防氧化润滑剂均匀混合,防止在随后的气流磨过程中细粉团聚和氧化。气流磨分选轮的转速控制在 $1000 \sim 1500 \text{ r/min}$,所得到的磁粉粒度大约为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。将磁粉在磁场强度为 10 kA/m 的全封闭氮气保护下的成型压机中取向成型,冷等静压后得到素坯。

将毛坯置于真空烧结炉中在 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$ 烧结 2 h 水冷,在 1100°C 和 800°C 分别进行 2 h 二级回火水冷处理,最终得到单主相合金 $\text{Nd}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁体和双主相合金 $\text{Nd}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁体的退磁曲线,如图 1 所示。

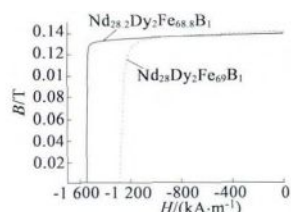


图 1 磁体室温时的退磁曲线

从图 1 中可看出, $\text{Nd}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和 $\text{Nd}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁体的矫顽力 H_{cJ} 分别为 1050 kA/m 和 800 kA/m 。磁体中添加净重 10% 的 Pr 后,虽然剩磁降低了 10% ,但矫顽力大幅度提高,提高了 25% 。磁体的最大磁能积 $(BH)_{\text{max}}$ 分别为 180 kJ/m^3 和 160 kJ/m^3 。

采用低镨调控技术,通过对磁体成分制备速凝片、氢破、全封闭压型、烧结、回火等整套工艺进行优化调控,真正做到了降镨的效果。它不仅大大降低了磁体的 Nd 含量,满足了矫顽力的使用要求,而且磁能积远远优于 N45 。通过调整 Pr 含量和对低镨调控工艺的进一步优化,必然能够成功研制更多低镨的性能优异的 N45 等牌号,这对于温度要求越来越高的永磁电机来说是非常必要的。

在稀土价格持续上涨,特别是镨等重稀土元素

的价格猛增的形势下,低镨调控技术的提出, Nd 的添加量的减少,大大降低了稀土永磁体的成本,同时有效地解决了稀土资源均衡利用的问题,具有十分重要的经济和社会意义。

1.3 钕磁体在永磁电机中的应用

众所周知,如果低镨或含钕的烧结钕铁硼磁体能够在需要较高的环境温度下工作的电机中得以应用,这将极大地降低电机的成本。然而由于 Nd 的饱和极化强度 J_s 和磁晶各向异性场 H_K 都远低于 Pr 的饱和极化强度 J_s 和磁晶各向异性场 H_K ,所制备的钕磁体的性能必然大打折扣,因此含钕磁体的开发让许多研发者们望而却步。

鉴于钕磁体的诱人的价格优势,不少科研单位还是投入了大量的精力对其进行开发,但一直以来,成效不大。最近,钢铁研究总院采用创新技术将高丰度稀土元素 Pr 应用于稀土永磁材料中,取得了较为显著的效果。对于含钕质量分数 10% 的钕磁体,其性能已经可以做到 N45 档的水平;对于含钕质量分数 20% 的钕磁体,其性能可以达到 N50 档水平。在耐蚀机理研究方面,钢铁研究总院的朱明刚、周丽娟进行了大量的工作,发现除了价格便宜外,钕磁体还有一个不容忽视的优点,即耐蚀性和抗氧化性能并不像原先想象得那么差^[6]。

通过对比从市场上随机选取的 Nd 和 Pr 两种牌号磁体,试验显示,含 Pr 磁体的耐蚀性能优于其它磁体。我们认为原因主要有两方面:一是我们制备的含 Pr 磁体的主相晶粒较小,富稀土相均匀分布于周围,其表面有许多黑色稀土氧化物形成了稀土氧化物的钝化膜,阻止了外界腐蚀介质的进入,并且降低了磁体本身的稀土总量;二是含钕磁体氧含量较常规含钕钕磁体低,减小了磁体晶间腐蚀的趋势,减小了失重。

这一结果已经充分地让我们看到了多 Pr 永磁体在未来电机中应用的希望。通过钕磁体制备工艺的进一步完善,以及钕钕复合添加技术的不断开发,相信在不久的明天廉价的钕磁体必将在永磁电机中发挥重要的作用。这对促进稀土资源的综合利用,降低烧结稀土永磁体的生产成本意义深远。

2 结 语

随着稀土永磁工艺和永磁电机技术的日益成熟,高性能的烧结钕铁硼磁体在永磁电机中发挥出无可替代的优势。混合励磁电机、新型横向磁通永磁电机、无铁心电机等新型电机也应运而生。除了永磁电机的多元化发展,新型稀土永磁材料在电机中的应用越来越受到更多的关注。

通过低谐波控制技术磁体的研发及其在永磁电机中的应用,必将极大地降低永磁电机的生产成本;此外,钕磁体方面的研发已取得可喜成绩,以目前的耐腐蚀性能及其价格优势,必将在永磁电机中占据更大的比重,受到越来越多的关注。

参考文献

- [1] 王景海. 用于永磁电机的理想的功能材料[J]. 永磁体, 2008, 1(1): 1-4.
- [2] 陈与恒. 稀土原材料价格上涨对稀土新材料生产的影响[J]. 稀土及稀有金属功能材料, 2008, 1(1): 1-4.
- [3] 周丽娟. 元素的取代对烧结铁硼耐蚀性能的影响[J]. 沈阳: 东北大学, 2008.

- [4] 李绿山, 张博利. 稀土永磁电机应用现状与发展[J]. 电机产品, 2008, 1(1): 1-4.
- [5] 黄刚. 稀土永磁材料在电机中的应用及存在问题[J]. 电机材料, 2008, 1(1): 1-4.
- [6] 王景海. 用于永磁电机的理想的功能材料[J]. 永磁体, 2008, 1(1): 1-4.
- [7] 陈与恒. 稀土原材料价格上涨对稀土新材料生产的影响[J]. 稀土及稀有金属功能材料, 2008, 1(1): 1-4.
- [8] 周丽娟. 元素的取代对烧结铁硼耐蚀性能的影响[J]. 沈阳: 东北大学, 2008.

作者简介: 郑大伟(1985-), 硕士研究生, 研究方向为金属磁性材料的制备技术及性能研究。

(上接第 10 页)

编译器对算法进行软件验证。对该最小系统板的 U_A 输出进行 U_A 滤波, I_A 和 I_B 接 U_A 低通滤波器后输出波形, 如图 1 所示。图中给定频率为 10Hz , 可以看到两组互差 120° 的波形, 与理论的理想波形相同。

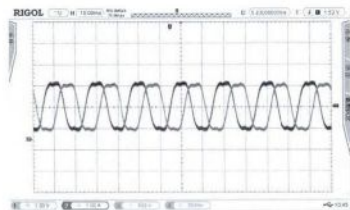


图 1 I_A 和 I_B 滤波后波形

最后, 使用基于 dSPACE 的 dSPACE 变频器样机进行了实验。利用改进 FOCM 控制算法, 在 10Hz 和 50Hz 给定频率下电机线电压和相电流的实验波形如图 2 所示。由图 2 可见, 改进 FOCM 控制下电动机相电流正弦度好, 畸变小, 电机运行平稳, 证明了该方法的可行性。

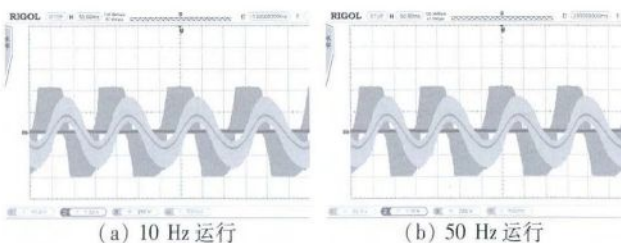


图 2 改进 FOCM 下电机相电流和线电压的波形

结 语

对于 FOCM 变频, 需要控制的变量只有输出频率和输出电压, 没有必要通过传统 FOCM 坐标矩阵变换间接获得 i_d 和 i_q 。来判断扇区。本文设计的 FOCM 调制方法, 省去了传统 FOCM 中的坐标变换, 简化了空间电压矢量脉宽调制的实现过程。并在变频器样机上取得了良好的实验效果, 具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 杨贵杰, 孙力, 崔乃政, 等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 1-4.
- [2] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 徐传芳, 张可畏, 王英, 等. 新型 FOCM 调制方法研究[J]. 微特电机, 2008, 1(1): 1-4.
- [4] 张寅孩, 汪松松, 葛金法, 等. 一种新的差值 FOCM 调制方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 1-4.
- [5] 吴丽华, 高慧芝, 刘政, 等. 一种改进型的 FOCM 算法研究[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 1-4.

作者简介: 贺虎成(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子技术、智能自动化装置、运动控制技术方面的研究。