

直线电机用高温超导块材磁体作用力—磁场特性分析^{*}

韩 乐,李 婧[†],李 想,唐俊杰,赵正伟,马光同

西南交通大学,牵引动力国家重点实验室,成都 610031

收稿日期:2018-12-14;接收日期:2019-03-05

【摘要】 本文以探究高温超导块材磁体在同步直线电机实际应用特性为目标,搭建了对磁场、三维电磁力信号同时采集的多物理场测试平台.实验探究了作为直线电机次级的高温超导块材磁体所受电磁力、俘获磁通随充磁电流、电机初级三相交流电流幅值、频率等参数的变化规律.理论分析了高温超导块材俘获磁通在行波磁场中的衰减规律.基于所得结论,提出可有效抑制磁场衰减的方法—引入铁磁材料,并重点讨论该方法对初次级间电磁力的影响.

关键词: 高温超导块材,直线电机,电磁力,俘获磁通

PACS: 84.71.Ba, 74.25.N-, 85.25.Am, 03.50.De

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.009

引用方式: 韩乐,李婧,李想,唐俊杰,赵正伟,马光同, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0055 (2019)

Analysis on the Force - Magnetic Field Characteristics of High-Temperature Superconducting Bulk Magnets in Linear Motors

HAN Le, LI Jing, LI Xiang, TANG Junjie, ZHAO Zhengwei, MA Guangtong

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Received date: 2018-12-14; accepted date: 2019-03-05

【Abstract】 With the purpose of exploring the application characteristics of high-temperature superconductor bulk magnet in linear motor application, the force characteristics and trapped flux inside the bulk subject to traveling wave magnetic field are studied experimentally. A multi-physical parameters testing platform was set up to measure the electromagnetic force and trapped flux of bulk materials at the liquid nitrogen temperature of 77 K. Based on the test data, the relationship among the electromagnetic force, trapped flux in HTS bulk, magnetization current for field cooling process, amplitude and frequency of ac current feed to three-phase winding primary is studied. The long-time decay characteristics of the trapped magnetic field at different stator current amplitudes, frequencies were measured. An effective method of adding ferromagnetic disk to YBCO bulk to suppress the flux decay was discussed.

Keywords: HTS bulks, Linear Motor, Electromagnetic Force, Capture Flux

PACS: 84.71.Ba, 74.25.N-, 85.25.Am, 03.50.De

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.009

Reference method: HAN Le, LI Jing[†], LI Xiang, TANG Junjie, ZHAO Zhengwei, MA Guangtong, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0055 (2019)

^{*} 国家自然科学基金(51407148),中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682017CX013),牵引动力国家重点实验自主课题(2015TPL_T04)资助的课题.

[†] jingli324@163.com

1 引言

相较于旋转电机,直线电机具有结构简单、无需传动装置、散热性好等明显优势,现已被应用于传统列车^[1]、常导磁悬浮列车^[2]、超导磁悬浮列车^[3]等交通领域.由于直线电机本身结构特征,比如次级气隙较大、边端效应等原因,电机的效率、功率因数和推进力密度相对较低,很难满足未来更高的推进力、高速及超高速行驶的需求.在其电机主体结构没有突破性创新的情况下,利用新型材料替代传统材料是有效提高电机性能的方式之一.自1987年美国休斯顿大学朱经武与和中国物理所赵忠贤相继发现了临界转变温度为90 K的钇钡铜氧超导体(YBCO)以来^[4,5],其材料制备工艺以及磁化方法得到不断改进.高温超导体的俘获磁通可实现远超过稀土永磁材料约1.6 T的剩磁密度^[6-8].日本M. Tomita和M. Murakami实现3.7 T(77 K)以及17.42 T(29 K)的目前最高俘获磁通记录^[9,10].将具有超强磁场的高温超导磁体取代同步电机中的常规磁体可有效改善电机的运行性能,并能实现提高电机工作效率、能量密度的目的.

高温超导块材直线电机研究始于上世纪末,国内外学者做了大量的相关工作.日本S. Sadakata等人给出利用高温超导块材磁体作为次级的单边型^[11]、双边型^[12]结构的高温超导同步直线电机设计方案,测量了行波磁场中单块高温超导块材磁体的静态启动推力和气隙磁场分布,讨论分析了高温超导块材磁体应用于直线电机的可行性^[13,14].金建勋等人在双边型交流直线电机中引入高温超导磁体^[15,16],研究内容主要涉及锁定推进力与行波磁场参数对俘获磁通衰减^[17]的影响.作者所在团队针对单块圆形高温超导块材在行波磁场中的电磁力特性展开了一系列工作.研究了行波磁场参数、不同俘获磁通大小、气隙高度等对块材磁体所受作用力的影响,得到了俘获磁通、推进力最大值随时间的变化趋势^[18,19].从研究现状看,关于超导块材的性能、磁热稳定性、机械性能方面已经有了较为全面细致的研究^[20-24].实际应用中,由于高温超导块材的俘获磁通是依靠感应电流来维持,不同于具有强矫顽力和相对稳定磁特性的稀土永磁材料,高温超导块材磁体内部的超导感应电流强弱、分布等对外磁场变化较为敏感,这将会直接导致直线电机中高温超导块材

磁体的俘获磁通和电磁特性的变化.

本文将考虑块材在直线电机中运行的实际情况,对磁体承载的电磁力以及俘获磁通的变化特性展开实验研究,解释和预测块材俘获磁通衰减现象.本文利用自制的多物理场测试平台,对高温超导块材在单边扁平型直线电机中的力学特性、俘获磁场开展了以下研究:实验测量初级电流幅值、行波磁场频率、充磁电流对高温超导块材磁体电磁力、俘获磁通的影响;提出改善俘获磁通衰减的措施并通过实验探究改善效果.所得结论为高温超导同步直线电机主体结构设计打下实验基础.

2 实验原理与装置

本文利用Lake Shore恒磁场充磁机为高温超导块材进行场冷充磁.多物理场实验平台(图1)可以同时实现液氮环境中高温超导块材磁体三维电磁力及俘获磁通的测量.该实验平台主要包括机械支撑台、S型力传感器、低温霍尔片传感器、力学信号放大器、Lake Shore 460 高斯计以及数据采集软件.力传感器型号为佰易控 ModelBT5331,一个用于测试水平推进力,另外两个用于测试垂向法向力;信号放大器为佰易控 BX188 高速信号变送器;霍尔传感器为Lake Shore 低温横向霍尔传感器(型号: Hall Generator 3020);高斯计型号 Lake Shore Model 460.

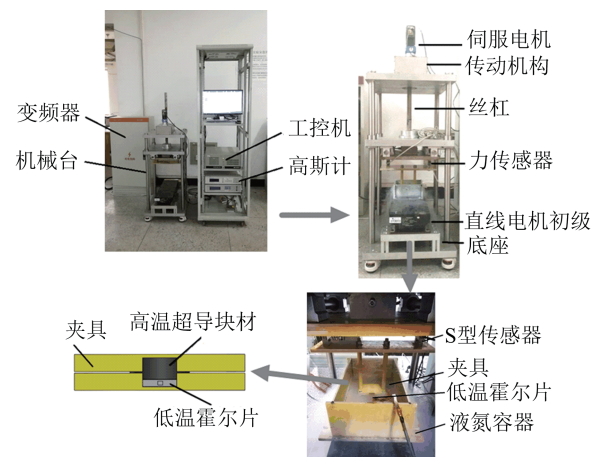


图1 多物理场实验平台

实验时需用自制环氧树脂材质的封装保护低温霍尔片,同时也能使霍尔片紧贴在块材表面.本论文以单晶 YBCO 圆柱形块材展开研究,相关性能参考生产商公布的数据^[25].实验中块材下表面与电机表面距离 10 mm,该气隙高度下初级电流有效值对应

水平分量 B_{trx} 和法向分量 B_{try} 幅值如表 1, 可以看出 B_{trx} 、 B_{try} 随初级电流有效值线性变化。

表 1 10 mm 气隙高度下初级电流有效值对应的行波磁场幅值

	3 A	6 A	9 A
B_{trx}	0.0172 T	0.0312 T	0.0505 T
B_{try}	0.0152 T	0.0285 T	0.0417 T

3 实验结果与分析

3.1 充磁电流对块材俘获磁通、电磁力的影响

用低温霍尔片测量不同充磁电流对高温超导块材俘获磁场大小的影响, 测量位置在块材表面上方 2 mm 处、充磁机充磁磁铁间距 30 mm. 测量结果显示, 充磁机充磁区域磁场强度随着充磁电流的增加线性递增, 块材俘获磁通密度在充磁电流到达 30 A 后饱和, 饱和俘获磁场为 0.225 T, 之后, 块材俘获磁通不再随充磁电流增加而增大。

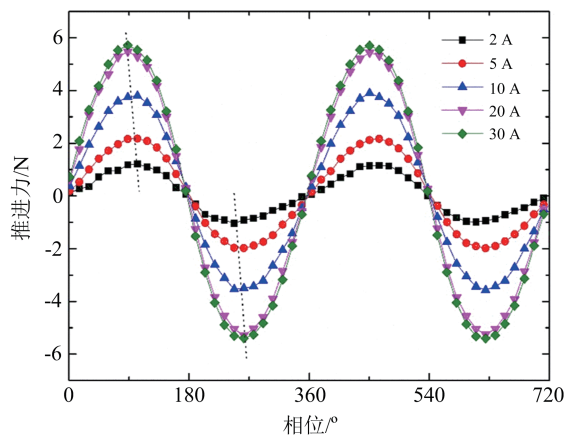


图 2 不同充磁电流下的推进力曲线

图 2 是电机初级电流有效值为 9 A, 频率为 5 Hz 时, 不同充磁电流下充磁的块材受到的推进力随时间的变化规律. 从图中可以看出充磁电流越大, 高温超导块材的推进力越大^[19]. 对比各充磁电流下推进力曲线, 可以发现推进力曲线相位随着充磁电流的减小产生偏移. 高温超导块材在行波磁场中会产生新的感应电流, 而新的感应电流与行波磁场存在相位差. 块材磁体在行波磁场中受到的电磁力是同步力和感应力的叠加, 其中同步力与高温超导块材在充磁时内部产生的感应电流有关, 感应力的大小由块材在行波磁场感应出的新电流决定. 当感应力远小于同步力时, 电磁力随时间变化规律与行波

磁场几乎相同, 如图中充磁电流 30 A 时推进力曲线; 当感应力与同步力相接近时, 电磁力相位偏移明显, 如图中充磁电流 2 A 时的推进力曲线. 传统永磁直线电机初次级间只存在同步力, 因此作用力间不会产生相位偏移。

图 3 是初级电流有效值为 9 A, 频率 5 Hz 时, 不同充磁电流下块材在行波磁场中俘获磁通密度的衰减规律. 实验结果显示不同充磁电流对应的俘获磁通密度在前几秒都有明显的衰减. 另外, 充磁电流越小, 块材俘获磁通密度的衰减趋势越早趋于平缓; 充磁电流的增大会导致其俘获磁通密度衰减量的增大. 充磁电流 2 A 时, 俘获磁通密度 300 秒内只衰减了约 7%; 而当充磁电流为 30 A 时, 相同时间内的俘获磁通密度衰减了约 20%. 充磁电流对高温超导块材俘获磁通在行波磁场中衰减的影响可以从能量角度解释: 块材在场冷充磁过程中俘获磁通越多, 剩余的钉扎势能越低, 施加行波磁场后磁通量子所受洛伦兹力越容易超过钉扎力, 发生磁通蠕动和流动现象, 磁通的流动会产生大量的热. 局部温度的升高必然导致块材临界电流密度减小, 因此块材俘获磁通密度衰减越严重。

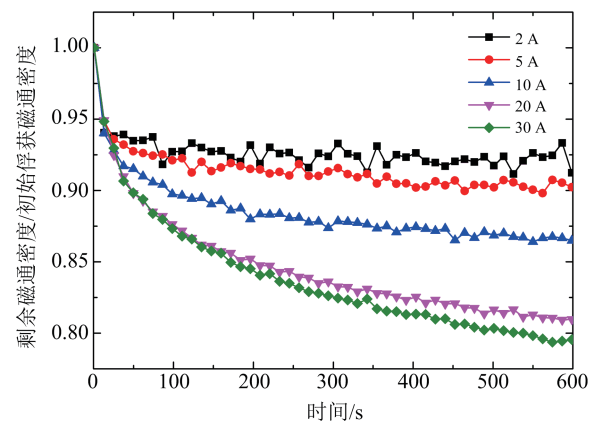


图 3 不同充磁电流下块材俘获磁通密度衰减曲线

充磁电流是影响块材俘获磁通和电磁力的重要因素之一. 将块材充磁到饱和可以保证在前期得到最大的推进力, 然而最大的充磁磁场强度意味着块材在行波磁场中俘获磁通衰减率增大, 进而导致推进力衰减量也最大。

3.2 初级电流有效值对块材俘获磁通、电磁力的影响

图 4 是行波磁场频率为 5 Hz、充磁电流为 30 A 时, 高温超导块材在不同初级电流下的推进力曲线。

从图中可以看出:高温超导块材推进力变化规律与行波磁场变化规律相同.块材推进力幅值和初级电流有效值成正比,9 A时块材推进力幅值为 6.20 N,6 A时为 4.15 N,3 A时为 2.21 N.

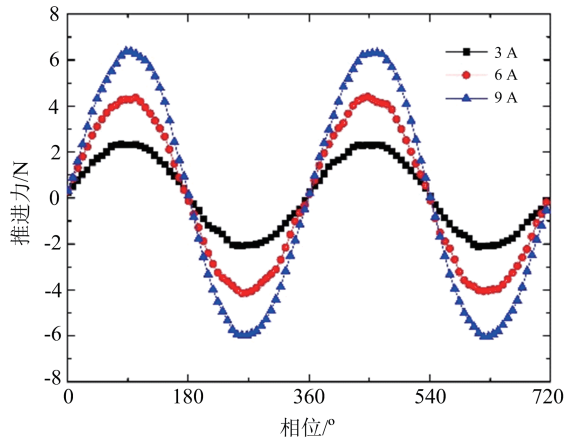


图 4 在不同初级电流下的推进力曲线

图 5 是行波磁场频率 5 Hz,充磁电流为 30 A 时,高温超导块材在不同初级电流下的法向力曲线及法向力振荡值的变化规律.实验结果显示:块材法向力变化规律与行波磁场变化规律相同,幅值随着初级电流有效值的增加而增加.法向力为负表示两者间为吸引力,法向力为正表示两者间为排斥力,法向力振荡中心始终低于零点.法向力的恒定分量主要来源于块材磁体与绕组铁芯间的恒定吸引力.由于受到交变行波外磁场影响,磁场越强,块材俘获磁场的衰减越明显,因此法向力振荡中心值随着初级电流有效值增大而逐渐减小,正如图 5(b)中所示.

图 6 是行波磁场频率 5 Hz,充磁电流为 30 A 时,高温超导块材在初级电流有效值为 3 A、6 A、9 A 时俘获磁通衰减规律.从图中可以看出,初级电流有效值越大俘获磁场衰减越明显,其规律呈对数衰减趋势.

造成高温超导块材俘获磁通密度衰减的原因有两种:磁通蠕动和磁通跳跃.从理论上来说,高温超导块材有零电阻特性,只要块材内部的感应电流不超过临界电流密度,则对应的洛伦兹力小于块材内部的钉扎力,此时磁通就不会发生流动.事实上,高温超导块材内部能量分布不均匀,在某些部分相对集中,就可能导致在这些局部区域发生磁通逃离,钉扎力产生移动,这种移动非常微弱,称为磁通蠕动.

另外磁通跳跃也可能造成高温超导块材俘获磁

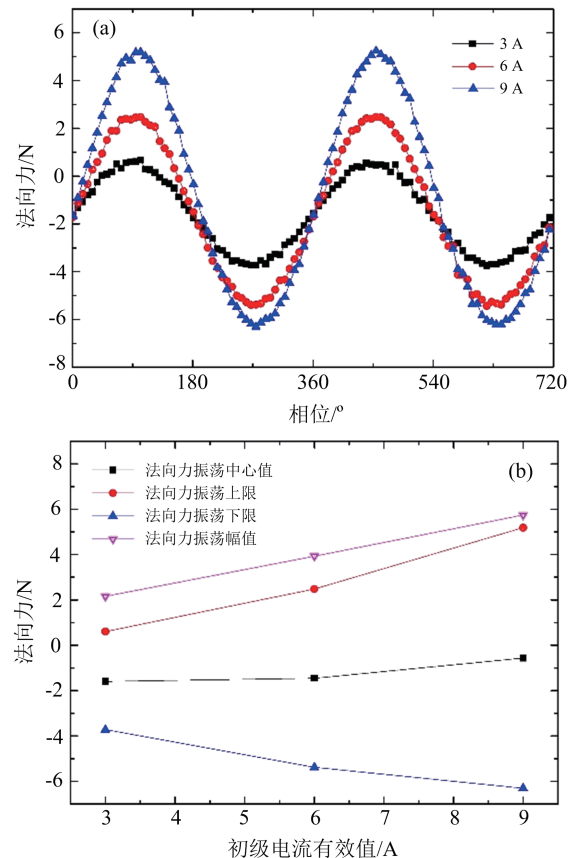


图 5 (a)不同初级电流下法向力曲线;
(b)法向力振荡值随初级电流变化规律

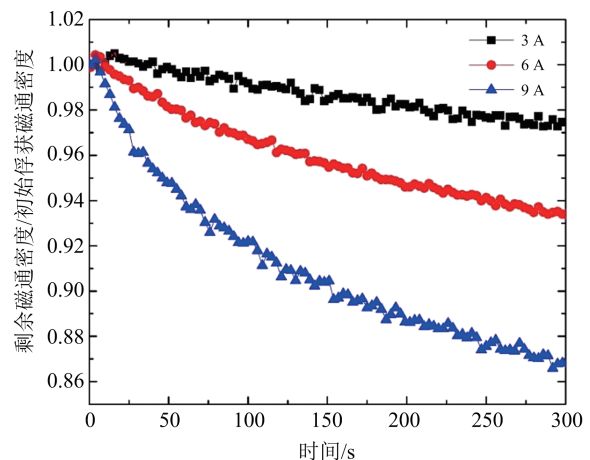


图 6 不同初级电流下的俘获磁通衰减率

通衰减,即大量磁通线进入超导体或排出超导体的现象,磁通线的运动会造成块材温度明显升高,从而导致俘获磁通减小甚至失超.产生磁通跳跃的根本原因是高温超导块材的热扩散率和磁扩散率相差过大,磁扩散非常迅速,而热量扩散非常缓慢.其次是

由于洛伦兹力和钉扎力随温度变化不同,洛伦兹力不受温度影响,而钉扎力随着温度升高而减小^[26].初级电流有效值越大行波磁场越强,块材磁体内部引起的磁通蠕动越剧烈,从而导致俘获磁通密度衰减越大.

3.3 行波磁场频率对俘获磁通的影响

图7是初级电流有效值6 A、充磁电流30 A时,高温超导块材在不同频率行波磁场下的俘获磁通密度衰减规律.结果显示俘获磁通衰减率随行波磁场频率增大而增大.块材内的交流损耗是磁滞损耗,从理论上讲,块材的俘获磁通在幅值相同、频率不同的行波磁场中,在相同周期内应具有相等的衰减量.实际上,随着频率增大,单位时间内行波磁场对块材作用的次数增多,造成更多的交流损耗总量,导致温度升高临界电流密度下降,最终导致俘获磁通密度衰减.

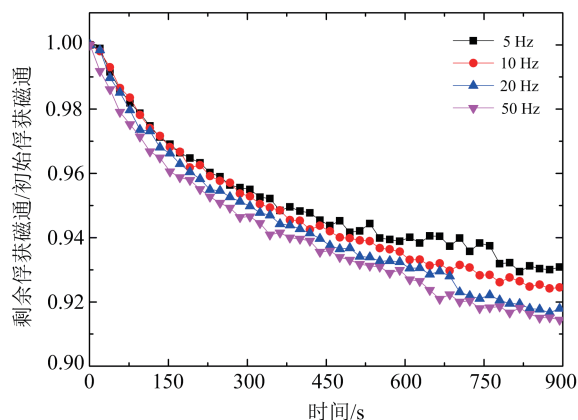


图7 不同频率行波磁场下的俘获磁通衰减率

4 抑制俘获磁通衰减的措施

高温超导块材俘获磁通密度在行波磁场造成衰减的主要原因有两个:一是交变磁场在块材中感应出新的超导电流,与原有电流相互抵消从而减弱俘获磁通;二是交流损耗导致高温超导块材温度上升,临界电流密度降低,俘获磁通逐渐减小^[27].块材交流损耗主要是磁滞损耗,提高超导块材的本身钉扎性能可有效抑制减缓磁通蠕动流动的发生,降低热损耗,达到抑制磁通衰减的目的.降低俘获磁通衰减的方法有两种:(1)提升高温超导块材超导性能及导热性能;(2)屏蔽外界交变磁场.有研究表明,块材添加铁磁片、铜或超导带材可抑制块材俘获磁通在交变磁场中的衰减并减小交流损耗^[24,28],本文选择导

磁性好的软磁材料硅钢片作为屏蔽材料,并针对此方法进行了实验研究.实验如图8(a)(b)所示,分别在高温超导块材上方和下方添加2 mm厚的铁磁片,图8(a)中低温霍尔片位于块材下表面,图8(b)中位于上表面.

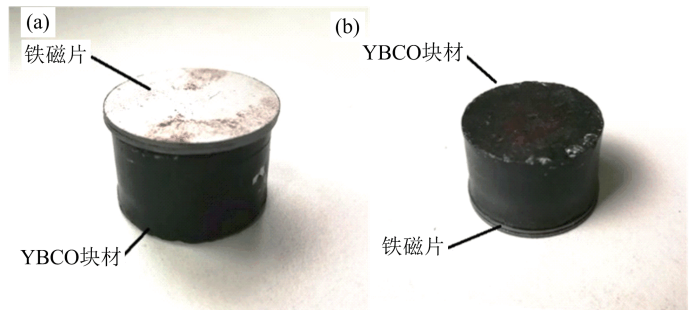


图8 (a)块材上方添加铁磁片;(b)块材下方添加铁磁片

图9是初级电流有效值9 A、频率5 Hz、充磁电流30 A时,在块材表面添加铁磁片的俘获磁场衰减率.不添加铁磁片时,块材上方和下方俘获磁场衰减率明显不同,600秒时下方测得的衰减率约为5.2%,上方测得的衰减率约为9.8%.将霍尔片同在上方和下方的实验结果进行对比:在块材上方添加铁磁片俘获磁通衰减率减小约0.6%;块材下方添加铁磁片俘获磁通衰减率减小约4%.铁磁片在下方时,可以降低块材俘获磁通的衰减率;在上方时对俘获磁通的衰减几乎没有抑制效果.

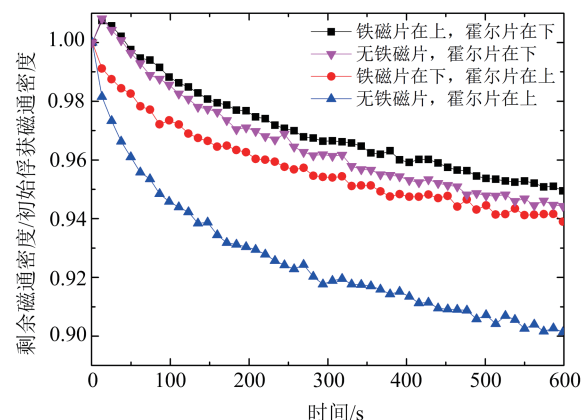


图9 铁磁片不同位置时的俘获磁通衰减率

图10是初级电流有效值9 A、频率5 Hz、充磁电流30 A时,块材的俘获磁通密度.实验发现:霍尔片在下方测得磁场更大;且上下分别添加铁磁片后,高温超导块材的俘获磁通密度都有所提高^[29].添加铁磁片后,俘获磁通密度上升是由于铁磁材料本身

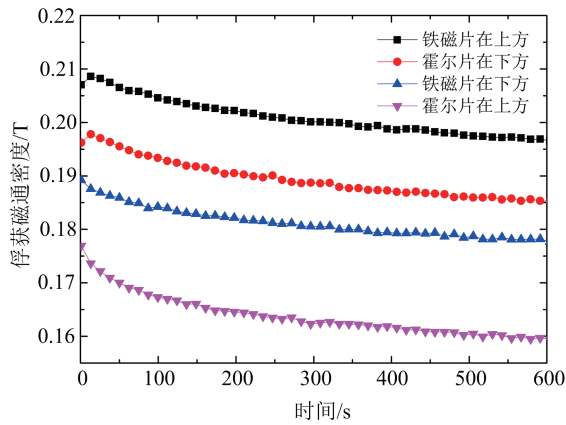


图 10 块材的俘获磁通密度

的聚磁特性.霍尔片在下方测得磁场强度之所以比霍尔片在上方大,是因为直线电机定子中的铁芯即硅钢片聚集空间磁场,使更多的磁感线穿过低温霍尔片导致测量的数值增大.观察图 10、图 11,发现当铁磁材料在块材下方时可以更有效的抑制磁场衰减,这是因为行波磁场在空间中分布不均匀,越靠近

电机表面行波磁场强度越大,铁磁片在块材下方可以将更多的 B_{trx} 导入到硅钢片中,从而减弱 B_{trx} 对俘获磁场的穿透.

图 11、12 是初级电流有效值 9 A、频率 5 Hz、充磁电流 30 A 时,在块材表面添加铁磁片推进力和法向力变化规律.实验结果表明:在块材上方添加铁磁片时,推进力幅值略有减小,变化规律与不加时基本一致;在块材下方添加铁磁片时,推进力幅值有减小,并且推进力曲线出现明显的畸变.造成图 11(b) 现象主要有两个原因:(1)铁磁材料被行波磁场磁化产生感应力,与推进力存在相位差,实验最终测得的是感应力与块材的推进力的叠加,导致推进力幅值略微减小且产生畸变;(2)铁磁材料在块材下方对行波磁场垂向分量有一定的屏蔽效果, B_{try} 减小则推进力减小.法向力在块材上方添加铁磁片时基本一致,在下方添加时曲线产生畸变,同样是由铁磁片的感应力所导致.

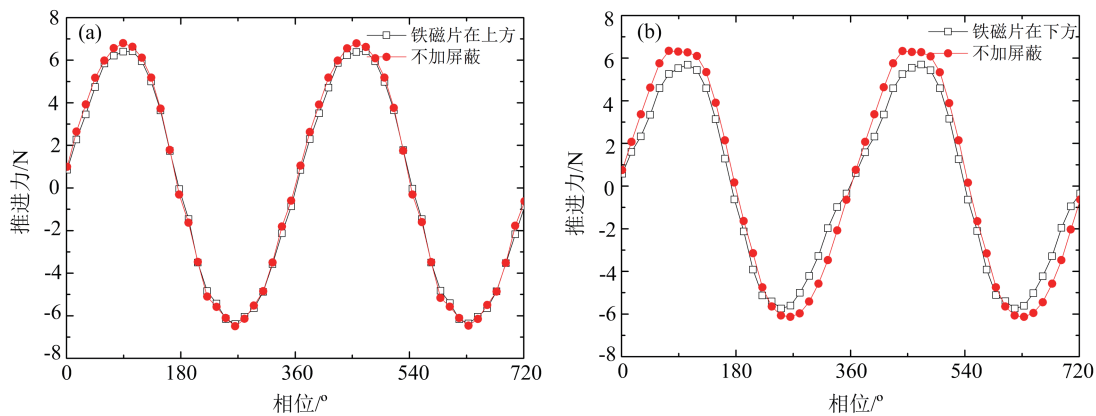


图 11 (a)块材上方添加铁磁片时推进力曲线;(b)块材下方添加铁磁片时推进力曲线

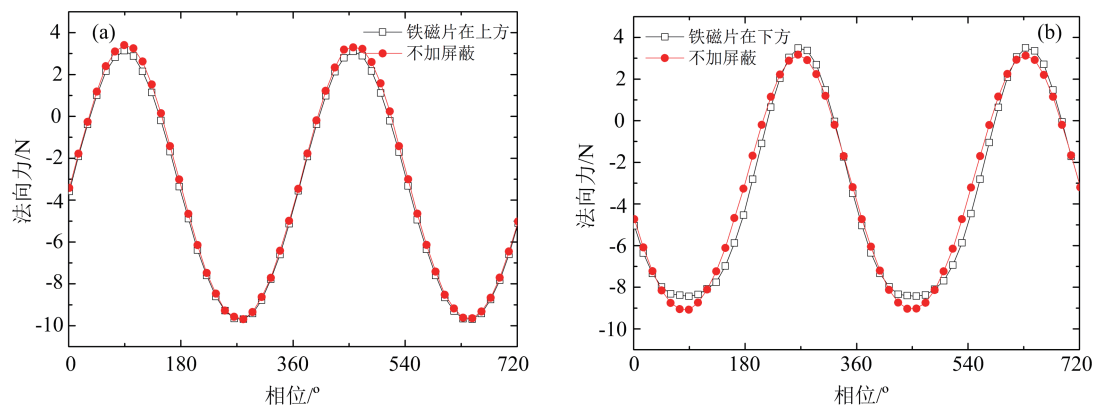


图 12 (a)块材上方添加铁磁片时法向力曲线;(b)块材下方添加铁磁片时法向力曲线

5 总结

本文旨在探索高温超导块材在行波磁场中的电磁力,俘获磁通的变化规律.通过搭建多物理场测试平台,完成了液氮环境下,不同充磁电流、电机初级电流幅值、频率时,块材俘获磁场、俘获磁场衰减率及电磁力的测量.并且提出了通过在块材表面添加铁磁片来抑制块材俘获磁通衰减的措施.得出的主

要结论:①俘获磁通及其衰减率随着充磁电流的增大而增大,且充磁电流存在一个阈值,当达到这个值后,块材俘获磁通饱和,不再随充磁电流增加而增加;②充磁电流越小,电磁力曲线相位偏移越明显;③电机初级电流越大,电磁力和块材俘获磁场衰减率越大;行波磁场频率越高,块材俘获磁场衰减率越大;④在块材下方添加铁磁片能有效的抑制俘获磁场衰减,但会造成推进力和法向力曲线畸变.

参 考 文 献

- [1] 魏庆朝,蔡昌俊,龙许友.直线电机轮轨交通概论[M]中国科学技术出版社,2010.
- [2] 钟俊坚,吴晓,黄新民等.轨道交通,**4**(2007),61.
- [3] Wang Jiasu, Wang Suyu, Zhu Min, Ren Zhongyou, Jiang He, Tang Qixue. *The 16th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Rio de Janeiro, Brazil, June 7-10, 2000,44.
- [4] M. K. Wu, J. R. Ashburn, et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987),908.
- [5] 赵忠贤,陈立泉,杨乾声,等.科学通报, **32**(1987),817.
- [6] M. Muraldihar, et al. *Phys. Rev. Lett.***89**(2002),237001.
- [7] S. Nariki, et al. *Sci. Technol.* **18**(2005),s126.
- [8] J. Yoshioka, et al. *Sci. Technol.***15**(2002),712.
- [9] M. Murakami. *Phys. C*, **357**(2001),751.
- [10] Tomita M and Murakami M. *Nature*, **421** (2003),517.
- [11] R. Muramatsu, S. Sadakata, M. Tsuda, and A. Ishiyama. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **11**(2001),1976.
- [12] Shungo Sadakata, Hiroshi Ueda, Makoto Tsuda, and Atsushi Ishiyama. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **12**(2002),824.
- [13] Atsushi Takahashi, Hiroshi Ueda, and Atsushi Ishiyama. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **13**(2003),2251.
- [14] Asuka Sato, Hiroshi Ueda, and Atsushi Ishiyama. *IEEE. Trans. on Appl. Supercond*, **15**(2005),2234.
- [15] Zheng L, Jin J. *Journal of Applied Physics*, **110** (2011),043915.
- [16] Jin J X, Zheng L H, Guo Y G, et al. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **22**(2012),5202617.
- [17] Jin J, Zheng L, Xu W, et al. *Journal of Applied Physics*, **109**(2011),113913.
- [18] Li J, Yen F, Zheng S, et al. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **22**(2012),5200304.
- [19] Jing Li, Suyu Wang, Jiasu Wang, Fei Yen, Lu Liu, Jun Zheng, Wei Liu, Qunxu lin. *IEEE. Trans. on Appl. Supercond*, **20**(2010),929.
- [20] Ohyama T, Shimizu H, Tsuda M, et al. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **11**(2002),1988.
- [21] Ogawa J, Iwamoto M, Tsukamoto O, et al. *Physica C*, **372** (2002),1754.
- [22] Yamagishi K, Asaba I, Sekizawa S, et al. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **15**(2005),2879.
- [23] Yamagishi K, Tsukamoto O, Ogawa J. *IEEE. Trans. on Appl. Supercond*, **19**(2009),3561.
- [24] Zou J, Ainslie M D, Hu D, et al. *IEEE.Trans. on Appl. Supercond*, **26**(2016),1.
- [25] <http://www.atz-gmbh/HTS/Properties/properties.html>
- [26] 朱敏.2002.博士学位论文(成都:西南交通大学).
- [27] Ogawa J, Iwamoto M, Yamagishi K, et al. *Physica C*, **386** (2003),26.
- [28] Philippe M P, Fagnard J F, Wéra L, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, **695**(2016).
- [29] Philippe M P, Fagnard J F, Kirsch S, et al. *Physica C*, **502** (2014),20.