

辅助永磁体厚度对单畴 GdBCO 超导体 捕获磁场分布及其磁悬浮力的影响

马 俊[†], 何晓明, 周永杰, 陈博行, 陈章龙

青海师范大学 物理与电子信息工程学院, 西宁 810008

收稿日期: 2018-05-20; 接收日期: 2019-01-09

【摘要】 研究了两种磁悬浮系统组态中圆台形辅助永磁体厚度对高温超导体捕获磁场和超导磁悬浮力的影响. 结果表明, 圆台形辅助永磁体的下表面和 GdBCO 超导体上表面同处在一个水平面上, 磁化用圆台形辅助永磁体的厚度 H 从 5 mm 增加到 45 mm 时, 超导体捕获磁场和磁悬浮力与圆台形辅助永磁体的厚度直接相关. (1) 当圆台形辅助永磁体的北极垂直向上且用液氮冷却后移除辅助永磁体时, 最大磁悬浮力从 21.8 N 增大到 26.5 N, 再减小到 22.9 N; (2) 当圆台形辅助永磁体的北极垂直向下且用液氮冷却后移除辅助永磁体时, 最大磁悬浮力从 20.5 N 减小到 11.9 N, 再增加到 20.4 N; (3) 两种磁悬浮系统组态中最大磁悬浮力不一致, 与零场冷情况下的最大磁悬浮力 14.6 N 也不同. 在超导磁悬浮应用系统设计中, 只有科学选择辅助永磁体形状和尺寸, 合理设计组合方式, 才能获得较强的磁场强度, 提高超导磁悬浮力特性, 该结果对促进高温超导体的实际应用具有重要的指导作用.

关键词: 圆台形辅助永磁体, 高温超导体, 超导磁悬浮力, 捕获磁场

PACS: 74.25.-q, 74.72.-h, 74.25.Ha

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.01.004

The Effect of Cone Additional Permanent Magnet Thickness on Magnetic Field Distribution and The Levitation Force of Single Domain GdBCO Bulk Superconductor

MA Jun[†], HE Xiaoming, ZHOU Yongjie, CHEN Bohang, CHEN Zhanglong

College of physics and electronic information engineering, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Received date: 2018-05-20; accepted date: 2019-01-09

【Abstract】 It has been investigated that the influence of two configurations in different thickness of conical auxiliary permanent magnets of single domain GdBCO bulk capture field and superconducting magnetic levitation force results. We found that the downward surface of auxiliary permanent magnet and upper surface of bulk GdBCO maintain at the same level, with the thickness of H permanent magnet assisted magnetization increased from 5 mm to 45 mm, the thickness of superconducting magnetic suspension force and the auxiliary permanent magnets are closely related (such as $Z=2$ mm): (1) when the round table auxiliary permanent magnet pole N vertical and field cooling after removing the auxiliary permanent magnet, the largest superconducting magnetic force first increases from 21.8 N to 26.5 N, and then reduced to 22.9 N; when the auxiliary permanent magnet N is vertical and downward and remove the auxiliary field after cooling The permanent magnet, the largest superconducting magnetic

* 青海省自然科学基金 (批准号: 2016-ZJ-915)、国家自然科学基金 (批准号: 51167016、51342001)、青海省 135 高层次人才资助的课题.

[†] mjun7302@163.com

force first decreases from 20.5 N to 11.9 N, and then increased to 20.4 N; (2) the two largest superconducting magnetic levitation force configuration is not equal, and the largest in the zero field cooling superconducting magnetic levitation force under 14.6 different. These results indicate that in the superconducting magnetic system design should be used only, the scientific selection of the auxiliary permanent magnet shape and size, reasonable design and combination of HTS magnet, application of an external magnetic field can get high and capture the strength of the magnetic field, effectively improve the superconducting magnetic levitation force characteristics, the result has a guiding role in promoting the practical application of the superconductor.

Keywords: cone auxiliary permanent magnet, HTSC, levitation force, trapped field

PACS: 74.25.-q, 74.72.-h, 74.25.Ha

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.01.004

1 引言

高温超导材料因具有抗磁特性,在应用外磁场中可提供较大的磁悬浮力和良好的自稳定悬浮,使得其在超导磁悬浮轴承系统^[1,2]、超导电子计算机、超导储能飞轮系统^[3,4]、高温超导器件、超导电磁发射系统^[5]、超导电机、地震隔离器^[6]、磁悬浮风力发电、高温超导磁悬浮系统和超导磁悬浮列车系统^[7,8]等领域得到广泛的应用.在实际应用中,如何有效提高永磁体和超导体之间的磁悬浮力特性显得尤为重要,永磁体和超导体之间的磁悬浮力主要与所用永磁体的磁场强度^[9]、磁场分布^[10-13]、超导块材的厚度^[14,15]、半径^[16]、冷却温度、晶粒取向^[17]、冷却高度、磁化程度^[18,19]、磁化方式^[20]等密切相关.而磁场强度及其分布依赖于永磁体设计、大小、形状和组合形式等.文献[21]研究了方形永磁体的不同组态对超导磁悬浮力特性的影响,文献[22]通过计算系统分析和研究了组合条状磁体及间距对磁悬浮力的影响,文献[23]通过实验系统研究了长条形永磁体的组合形式对超导块材磁悬浮力的影响.结果表明,超导磁悬浮力与磁体的组态形式、组合方式以及磁体间的间距紧密相关,文献[24,25]研究了在永磁体的辅助下超导磁悬浮系统中磁悬浮力特性,文献[26]研究了不同场冷下超导块材力特性,结果表明,永磁体的辅助方式、引入机制、磁体的结构布局、尺寸大小、辅助磁体对块材的磁化模式和捕获磁场是决定磁悬浮力大小的重要因素.文献[27]通过实验研究了方形辅助永磁体对超导块材的磁化方式对超导磁悬浮力和捕获磁场分布的影响.结果表明,辅助磁体沿水平方向不同位置磁化时,超导块材所捕获磁场分布呈非轴对称,水平方向不同位置处块材捕获磁场强度大小也不断变化,导致磁悬浮力大小也在变化.而就块材捕获磁场和磁悬浮力受圆台形辅助永磁体磁化方式影响方面的研究尚无报道.超导磁悬浮力实验研究表明^[28-30],超导块材的磁悬浮力的衰减与工作时间相关,系统工作时的悬浮间距与所承载负载的重量有关,随着载荷的增加悬浮间距减小,但当移除外负载时,系统无法恢复到原始状态(悬浮高度),很大程度上限制了块材的应用.研究表明,磁体和磁体之间的相互作用力强、刚度大^[31],但一个稳定的磁悬浮系统无法实现;永磁体与超导块材之间的相互磁悬浮作用力较大,因磁场穿过超导

材料时产生的磁通钉扎作用使磁悬浮系统具有很好的稳定性^[22],但磁悬浮刚度较差.为了充分利用超导块材良好的自稳定磁悬浮性能以及磁体间较大的磁悬浮作用力和良好的刚性,通过对圆柱形永磁体和圆台形辅助永磁体对超导块材磁化后超导磁悬浮力的实验测量,研究了两种磁悬浮系统组态中圆台形辅助永磁体的厚度对超导块材捕获磁场和超导磁悬浮力大小的影响规律,并取得了良好的实验效果.这对进一步促进超导体的实际应用具有一定的指导意义.

2 实验

实验所用的圆柱形永磁体(PM1)厚度为45 mm、直径为20 mm,表面中心最大磁场约0.5 T,圆台形辅助永磁体(PM2)是由厚度均为5 mm,直径相差4 mm、2 mm不等的圆柱形永磁体堆叠而成,保持底部D为30 mm不变,取厚度H分别为5 mm、15 mm、20 mm、25 mm、35 mm、40 mm、45 mm,对应的上表面直径d分别为30 mm、26 mm、22 mm、14 mm、10 mm、8 mm和6 mm,所用的超导块材(厚度为3 mm、直径为20 mm)是从超导块材^[32]上切割下来,我们利用该超导块材样品和这两种类型的永磁体设计了4种实验测量方案,如图1(a)、(b)、(c)、(d)所示,其中图1(a)、(b)分别为在液氮温度下圆台形辅助永磁体PM2的北极垂直向上PM2↑—HTSC和PM2的北极垂直向下PM2↓—HTSC对GdBCO超导块材进行磁化的两种组态方式,磁化后超导块材就变成超导磁体(SCPM),与两种磁化组态对应的超导磁体(SCPMs)分别为SCPM↑和SCPM↓,在磁化时PM2的下表面和超导块材的上表面同处在一个水平面上,PM2在GdBCO超导块材上表面中心轴位置;图1(c)、(d)分别为在图1(a)中超导块材通过磁化并移掉PM2后圆柱形永磁体(PM1)与超导磁体SCPM↑组成的PM1↓—SCPM↑,图1(b)中超导块材通过磁化并移掉PM2后圆柱形永磁体(PM1)与超导磁体SCPM↓组成的PM1↓—SCPM↓4种实验测试方案,箭头表示磁化方向,我们利用实验室三维空间磁场及磁力测试系统^[33],对图1(c)、(d)两种情况下的磁悬浮力进行了测量.

3 结果与讨论

图2为圆台形辅助永磁体厚度H分别为

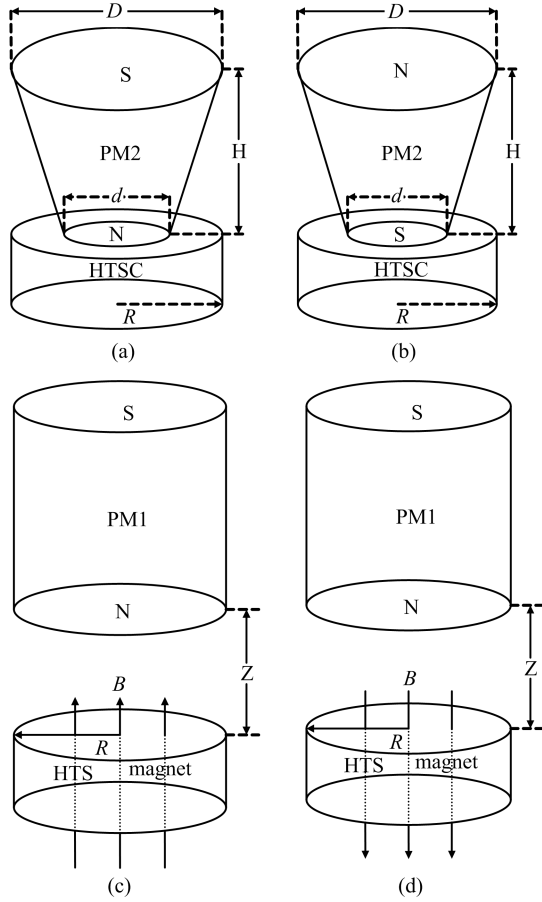


图1 永磁体和超导块材在两种组态方式下磁化和磁悬浮力测量示意图.

图1 永磁体和超导块材在两种组态方式下磁化和磁悬浮力测量示意图

5 mm、15 mm、20 mm、25 mm、35 mm、40 mm、45 mm时,距磁体上表面($h=2$ mm)处沿直径 d 方向磁场强度垂直分量随横向位移(B_z - X)的变化关系曲线,从图中可清楚看出,磁场强度垂直分量与辅助永磁体厚度有着密切关系,不同厚度下磁场强度大小和磁场分布存在差异,随着磁体的厚度从 5 mm 增加到 45 mm,磁场强度先增大后减小,最大值从 0.28 T 增加到 0.54 T,再减小到 0.25 T,这些最大值都是在 $x=0$ mm 处获得的,最大磁场强度的峰值在辅助永磁体厚度 $H=25$ mm(对应上表面直径 $d=14$ mm)所获得.

图3为超导块材用不同厚度的圆台形辅助永磁体在轴对称情况下被磁化后 $PM1 \downarrow -SCPM \uparrow$ 组态方式中超导磁悬浮力随悬浮间距的变化关系曲线.图中曲线表明,在 $PM1 \downarrow -SCPM \uparrow$ 组态方式中辅助永磁体不同厚度下超导磁悬浮力不同,当 H 从

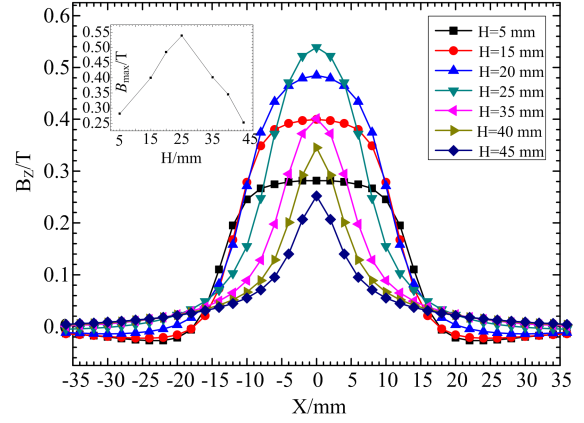


图2 辅助永磁体 PM2 上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量与横向位移(B_z - X)之间的关系曲线

5 mm 增加到 45 mm 时,磁悬浮力的最大值首先从 21.8 N 增大到 26.5 N,然后又减小到 22.9 N,该值不等于仅有圆柱形永磁体 PM1 和超导块材在零场冷情况下的磁悬浮力(14.7 N).通过合理的磁化超导块材后,可提高磁悬浮力的大小,最大磁悬浮力峰值是在磁化用圆台形辅助永磁体厚度 $H=25$ mm(对应上表面直径 $d=14$ mm)时获得的.

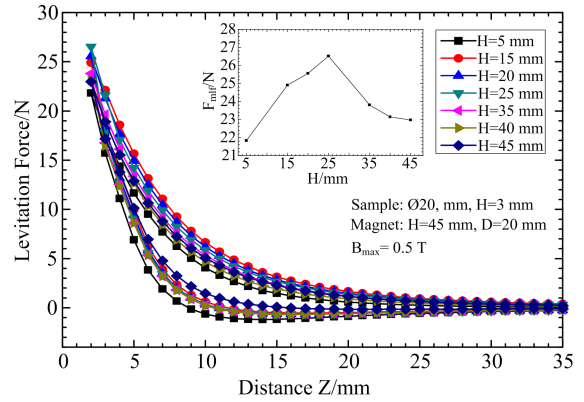


图3 $PM1 \downarrow -SCPM \uparrow$ 组态方式中永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 间磁悬浮力与悬浮间距之间的关系曲线

图4为超导块材用不同厚度的圆台形辅助永磁体被磁化后 $PM1 \downarrow -SCPM \downarrow$ 组态中磁悬浮力随间距的变化曲线.图中曲线表明,在 $PM1 \downarrow -SCPM \downarrow$ 组态方式中辅助永磁体不同厚度下超导磁悬浮力同样有很大变化,超导磁悬浮力特征与 $PM1 \downarrow -SCPM \uparrow$ 组态方式中有着明显的不同,当 H 从 5 mm 增加到 45 mm 时,磁悬浮力最大值先从 20.5 N 减小到 11.9 N,后又增大到 20.4 N,该值不等于仅有圆柱形永磁体 PM1 和超导块材在零场冷情

况下的磁悬浮力(14.7 N).通过合理的磁化超导块材后,可提高磁悬浮力的大小,最大磁悬浮力的谷值是在磁化用圆台形辅助永磁体厚度 $H=25$ mm(对应上表面直径 $d=14$ mm)时获得的.同时,可以看出当 PM1 上升至 4 mm、19 mm 时,出现了明显的吸引力,对比图 3 的 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\uparrow$ 组态方式,当 PM1 上升至 7 mm、19 mm 时的吸引力,PM1 $\downarrow$ —SCPM $\downarrow$ 组态方式吸引力明显大于 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\uparrow$ 组态方式,分析可知,在场冷高度不变,PM1 北极垂直向下测量时,吸引力的大小与辅助永磁体的磁化方式有关,当 PM2 为北极垂直向下磁化时,超导块材内部磁场与外部的辅助永磁体磁场方向相同,此时,对外表现出的吸引力较大,反之,PM2 为北极垂直向上磁化时,对外表现的吸引力较小.

通过合理的磁化超导块材后,可提高磁悬浮力的大小,最大磁悬浮力的谷值是在磁化用圆台形辅助永磁体厚度 $H=25$ mm(对应上表面直径 $d=14$ mm)时获得的.这表明,在 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\downarrow$ 组态方式中磁悬浮力大小很难被提高.在零场冷情况下,PM1 和超导体间的磁悬浮力最大值为 14.7 N.当超导体被磁化为 SCPM $\uparrow$ 和 SCPM $\downarrow$ 两类超导磁体后,在 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\uparrow$ 组态中最大磁悬浮力的峰值为 26.5 N,而 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\downarrow$ 组态中最大磁悬浮力的谷值为 11.9 N.这些变化与辅助磁体的形状、厚度、块材被磁化的方式、磁体与块材间有效作用面积、块材磁化时捕获的磁场强度和分布等直接相关.

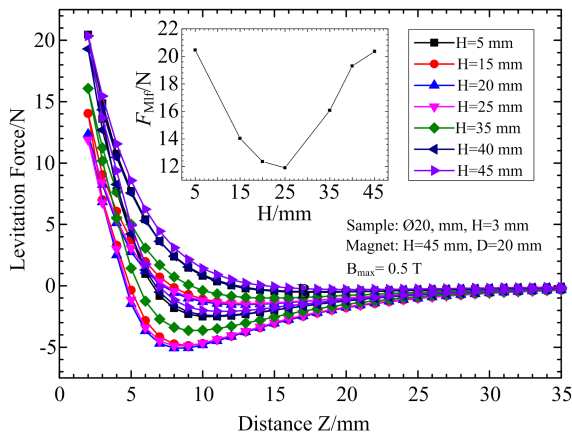


图 4 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\downarrow$ 组态方式中永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 间磁悬浮力与悬浮间距之间的关系曲线

为了解释两种组态中磁悬浮力存在的差别,我们采用 Lake shore 系列用于磁场测量的低温霍尔探头,通过实验设计分别测量了磁体 PM1 和两个超

导磁体 SCPM $\uparrow$ 和 SCPM $\downarrow$ 上表面($h=2$ mm)沿直径捕获磁场强度垂直分量,图 5 为磁体 PM1 上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量随横向位移(B_z -X)的变化关系曲线,在实验测试中该磁场分布和磁场强度始终保持不变.

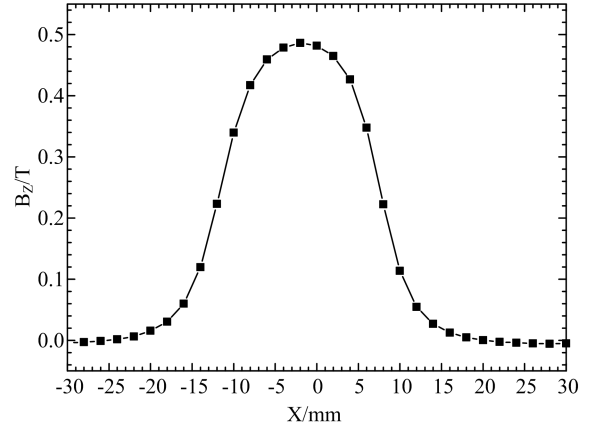


图 5 圆柱形永磁体 PM1 上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量随横向位移(B_z -X)的变化关系曲线

图 6 为 SCPM $\uparrow$ 上表面($h=2$ mm)处磁场强度垂直分量随横向位移(B_z -X)之间的变化曲线.图中曲线表明,SCPM $\uparrow$ 的捕获磁场强度垂直分量(B_z)均为正值,当磁化用圆台形辅助永磁体的厚度 H 从 5 mm 增加到 45 mm 时,超导块材的捕获磁场强度先增大后减小,最大值从 0.08 T 增加到 0.13 T,再减小到 0.07 T,这些最大值都是在 $x=0$ mm 处获得的,最大磁场强度的峰值在磁体厚度 $H=25$ mm(对应上表面直径 $d=14$ mm)所获得.在超导磁悬浮力测量中,SCPM $\uparrow$ 磁体与圆柱形永磁体 PM1 的磁场平行且方向相反,导致在 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\uparrow$ 组合系统中存在一个相斥的作用力.因而,在 PM1 $\downarrow$ —SCPM $\uparrow$ 组合系统中总的磁悬浮力由 PM1 的磁场与超导块材内感应环流产生磁场间的相互作用力和 PM1 的磁场与 SCPM $\uparrow$ 磁体磁场间的相互作用力(斥力,由辅助永磁体厚度、磁场强度以及磁化时有效作用面积共同决定)共同组成,除此,没有其它相互间的作用力.图 6 表明,当磁化用圆台形辅助永磁体的厚度 H 从 5 mm 增加到 45 mm 时,超导块材捕获磁场强度的峰值和总强度先增大后减小,最大的峰值 $B_z=0.13$ T,该捕获磁场由辅助永磁体厚度、磁场强度以及磁化时辅助永磁体与超导块材间有效作用面积等共同决定,对应于最大超导磁悬浮力峰值获得时的辅助永磁体厚度 $H=25$ mm,该结果与

图 2 中磁化用辅助永磁体 PM2 上表面最大磁场强度和图 3 中最大磁悬浮力结果相一致。

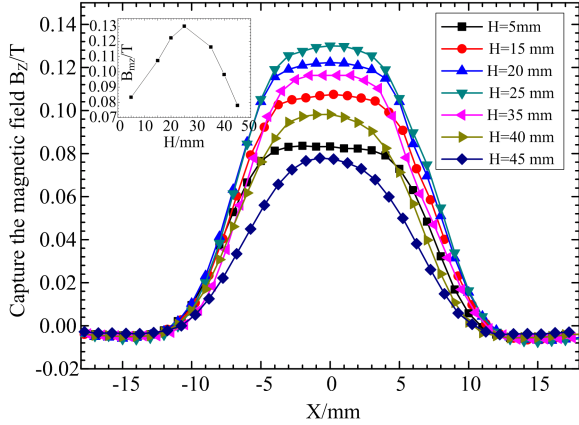


图 6 超导磁体 SCPM↑上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量随横向位移(B_z - X)的变化关系曲线

图 7 为 SCPM↓上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量随横向位移(B_z - X)之间的变化曲线。从图中可看出,SCPM↓磁体的捕获磁场强度垂直分量(B_z)均为负值,且有一个谷值,在磁悬浮力实验测量中,SCPM↓磁体的磁场与 PM1 磁体的磁场平行且方向同向,这种作用力导致在 PM1↓-SCPM↓组合系统中产生一个相互吸引的作用力(吸引力),因而,在 PM1↓-SCPM↓组合系统中总磁悬浮力由 PM1 磁体的磁场与超导块材内感应环流产生磁场间的相互作用力和 PM1 磁体的磁场与 SCPM↓磁体磁场间的作用力(吸引力,由辅助永磁体厚度、磁场强度以及磁化时有效作用面积共同决定)之和,除此之外,不存在其它相互间的作用力。图 7 表明,当磁化用圆台形辅助永磁体的厚度 H 从 5 mm 增加到 45 mm 时,超导块材捕获磁场强度谷值的绝对值和总磁场强度先增大后减小,最大的谷值 $B_z = -0.13$ T,该捕获磁场由辅助永磁体厚度、磁场强度以及磁化时辅助永磁体与超导块材间有效作用面积等共同决定,对应于最大超导磁悬浮力峰值获得时的辅助永磁体厚度 $H=25$ mm,该结果与图 2 中磁化用最大磁场强度和图 4 中最大磁悬浮力结果相一致。

在圆柱形永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 之间存在两个相互作用力,其中一个相互作用力是 PM1

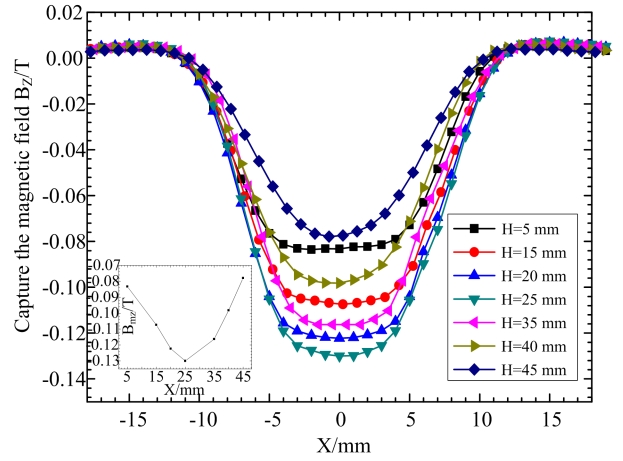


图 7 超导磁体 SCPM↓上表面($h=2$ mm)磁场强度垂直分量随横向位移(B_z - X)的变化关系曲线

和超导块材间所固有的相互作用力,另一个附加的相互作用力则是圆柱形永磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 捕获磁场间的相互作用力。因 PM1 和 PM2 表面最大磁场强度远小于超导块材内感应环流所产生的磁场强度。因此,可推断出超导块材在两种 SCPM↑和 SCPM↓组态磁化后超导磁悬浮力变化取决于 GdBCO 超导块材磁化用辅助永磁体厚度、磁化方式、有效作用面积和磁化时捕获磁场强度和磁场分布。在 PM1↓-SCPM↑和 PM1↓-SCPM↓组合系统中磁悬浮力被增大或减小且增减的多少取决于超导磁体 SCPM 的捕获磁场强度和分布。

4 结 论

通过对轴对称情况下磁化用辅助永磁体厚度对 GdBCO 超导块材磁悬浮力和捕获磁场分布影响的实验研究,结果表明,辅助永磁体厚度对磁悬浮力最大值有着很大的影响,磁悬浮力最大值随着辅助永磁体厚度变化而改变,变化原因主要来自磁体 PM1 和超导磁体 SCPM 捕获磁场间的相互作用力,超导块材在两种 SCPM↑和 SCPM↓组态下的磁悬浮力主要依赖于超导块材的磁化、捕获磁场强度和分布。在两种组合系统中磁悬浮力增减的多少与超导磁体 SCPM 捕获磁场的强度和分布紧密相关。这些结果表明,在实际磁悬浮应用系统设计中,通过科学合理的磁化超导块材可调节超导磁悬浮力大小,从而提高磁悬浮力特性。

参 考 文 献

- [1] John R H, Shaul H, Tomotake M, *Supercond Sci Technol*, **18** (2005), S1.
- [2] Werfel F N, Floegel—Delor U, Rothfeld R, *Supercond Sci Technol*, **18** (2005), S19.
- [3] Koshizuka N, *Physica C*, **1103** (2006), 445.
- [4] Miyagawa Y, Kamenno H, Takahata R, *IEEE Trans Appl Supercond*, **9** (1999), 996.
- [5] Wan MinYang, Guo Zheng Li, Jun Ma, et al, *IEEE Trans Appl Supercond*, **20** (2010), 2317—2321.
- [6] Tsuda, T Kawasaki, T Yagai, et al, *Journal of Physics:Conference Series*, **97** (2008), 012104.
- [7] H. Fujimoto, H. Kamijo, T. M. Murakami, et al, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **9** (1999), 301—307.
- [8] Jia su Wang, Su yu Wang, You wen Zeng, et al, *Physica C*, **378—381**(2002): 809—814.
- [9] Cheng T L, Shih C L, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **304**(2006), e454.
- [10] 张凤英, 黄孙利, 曹效文, *物理学报*, **39**(1989), 830.
- [11] Nuria DV, Alvaro S, Enric P, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007), 042503.
- [12] 王峰, 孙国庆, 孔祥木, *物理学报* 50(2001), 1590.
- [13] Yang W M, Chao X X, Ma J, Li G Z, *J Supercond Nov Magn*, **23**(2010), 1007.
- [14] Chan W C, *Physica C: Superconductivity*, **390**(2003), 27.
- [15] 朱敏, 任仲友, 王素玉, *低温物理学报*, **24**(2002), 213.
- [16] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, Zhang C P, *Cryogenics* **42**(2002), 589.
- [17] Koblishka A V, Mücklich F, Koblishka M R, *Crystal Engineering*, **5**(2002), 411.
- [18] 何国良, 贺延文, 赵志刚, 刘楣, *物理学报*, **55**(2006), 839.
- [19] Zhou J, Zhang X Y, Zhou Y H, *Physica C: Superconductivity*, **469**(2009), 207.
- [20] 马俊, 杨万民, 李佳伟, *物理学报*, **61**(2012), 137401.
- [21] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, *Physica C*, **5—12** (2001) 354.
- [22] Nuria D V, Alvaro S, Carles N, *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008), 042505.
- [23] 马俊, 杨万民, *物理学报*, **60**(2011), 077401.
- [24] 马俊, 杨万民, 李国政, *物理学报*, **60**(2011), 027401.
- [25] 马俊, 杨万民, 李佳伟, *物理学报*, **61**(2012), 137401.
- [26] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, *Physica C: Superconductivity* **398**(2003), 141.
- [27] 马俊, 杨万民, 王妙, *物理学报*, **62**(2013), 227401.
- [28] Zhang X Y, Zhou J, Zhou Y H, *Supercond Sci Technol*, **22** (2009), 1.
- [29] Deng Z, Zheng J, Song H, *IEEE Trans Appl Supercond*, **3** (2007), 2071.
- [30] He Q Y, Wang J S, Wang S Y, *Physica C*, **469**(2009), 91.
- [31] Tsuda M, Kawasaki T, Yagai T, *Journal of Physics*, **97** (2008), 1.
- [32] 程晓芳, 杨万民, 李国政, *低温物理学报*, **32**(2010), 150.
- [33] Cheng S L, Yang W M, Zhou L, Li J W, *Physica C*, **496** (2014), 39.