

永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和 永磁体之间的磁悬浮力研究*

马俊¹⁾²⁾ 杨万民^{1)†} 李国政¹⁾ 程晓芳¹⁾ 郭晓丹¹⁾

1) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

2) (青海师范大学物理系, 西宁 810008)

(2010年5月11日收到; 2010年6月4日收到修改稿)

通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和圆柱形永磁体在液氮温度、零场冷、轴对称情况下磁悬浮力的测量, 研究了两种不同组态下辅助永磁体对超导体磁悬浮力特性的影响. 实验结果表明, 当长方体辅助永磁体水平磁化、且磁极 N 指向超导体时, 超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体的 29.8 N 增加到 61.5 N, 增加为没有引入辅助永磁体时的 206%. 当长方体辅助永磁体的 N 极与圆柱形永磁体的 N 极反平行时, 超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体的 29.8 N 减小到 19.6 N, 减小为无辅助永磁体时的 65.8%. 这些研究结果说明, 通过科学合理地设计超导体和永磁体的组合方式, 能有效地提高超导体的磁悬浮力. 该研究结果对促进超导体的应用具有重要的指导意义.

关键词: 单畴 GdBCO, 永磁体, 磁悬浮力

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

1. 引言

高温超导体因具有高的磁悬浮力和良好自稳定磁悬浮特性, 使得其在超导磁悬浮轴承^[1,2]、储能飞轮^[3,4]和磁悬浮运输系统^[5,6]等领域具有广泛的应用前景. 超导体和永磁体之间的磁悬浮力主要依赖于超导材料的性能^[7-9]和永磁体磁场分布, 超导体磁悬浮力与其临界电流密度、超导块材的半径、晶粒取向^[10]、厚度^[11]、冷却方式、磁化程度^[12-14]、所用永磁体的磁场分布^[15-19]、以及永磁体的运动速度^[20]等参数密切相关. 文献[21]研究了单块和多块组合超导样品与永磁轨道之间的相互作用力关系, 文献[22,23]通过将一块样品切成不同小块研究单块样品和多块样品之间的磁悬浮力关系, 同时也研究了不同永磁体组态对超导体磁悬浮力的影响. 现有的超导磁悬浮实验表明^[24-26], 超导体的磁悬浮力会随着时间的增加而衰减, 悬浮高度会随着

外加荷载的增加而降低, 但当外加荷载移除后, 磁悬浮系统并不能恢复到原来的高度, 这些问题严重地阻碍了超导体的应用进程. 众所周知, 永磁体之间的相互作用力强、刚度好^[27], 但无法实现稳定的磁悬浮; 超导体与永磁体之间的磁悬浮力较大, 磁悬浮稳定性好^[5,17], 但磁悬浮刚度较差. 为了有效利用永磁体间较大的磁悬浮力、良好的刚性、以及超导体良好的自稳定磁悬浮特性, 本文通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和圆柱形永磁体在液氮温度、零场冷、轴对称情况下磁悬浮力的测量, 研究了两种不同组态下辅助永磁体对超导体磁悬浮力特性的影响, 并取得了明显的效果. 这些结果对促进超导体的应用具有重要的指导意义.

2. 实验

实验所用的单畴 GdBCO 超导块材是通过顶部籽晶熔融织构方法 (MTG) 制备的^[28], 样品直径为

* 国家自然科学基金 (批准号: 50872079)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA03Z241) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: GK200901017) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn

20 mm, 厚度为 10 mm. 所用永磁体有两种, 包括一个是圆柱形永磁体, 直径为 20 mm, 厚度为 30 mm, 表面中心最大磁场约为 0.5 T; 两个长方体永磁体的尺寸均为 20 mm × 10 mm × 10 mm, 表面中心最大磁场约为 0.5 T, 永磁体沿短边方向磁化. 为了能够有效地研究辅助永磁体对单畴 GdBCO 超导体和圆柱形永磁体在液氮温度、零场冷、轴对称情况下磁悬浮力的影响, 我们用该超导体和这些永磁体设计了 5 种实验方案, 如图 1 所示. 其中两个长方体辅助永磁体与超导体处于同一平面, 且沿长边一侧与超导体紧密地固定在一起. 图 1(a)–(e) 分别表示圆柱形永磁体和超导体呈轴对称 ($PM \downarrow - HTS$), 在图 1(a) 的基础上超导体两侧引入极化方向 N 指向超导体的长方体永磁体 ($PM \downarrow - (\overrightarrow{PM} - HTS - \overleftarrow{PM})$), 在图 1(b) 的基础上去掉超导体 ($PM \downarrow -$

$(\overrightarrow{PM} - \overleftarrow{PM})$), 在图 1(a) 的基础上超导体两侧引入极化方向 N 反平行与圆柱形永磁体磁极 N 的长方体永磁体 ($PM \downarrow - (PM \uparrow - HTS - PM \uparrow)$), 在图 1(d) 的基础上去掉超导体 ($PM \downarrow - (PM \uparrow - PM \uparrow)$) 的 5 种实验方案, 箭头表示永磁体的磁化方向. 在实验过程中, 辅助永磁体是和超导体一起冷却的. 我们采用三维空间磁场及磁力测试系统^[29], 对这几种情况下的磁悬浮力进行了测量. 每次测量前, 圆柱形永磁体与超导体一直处于轴对称状态, 且它们之间的距离 $Z = 52$ mm, 待超导体被冷却 (无超导体时不需要冷却过程) 至液氮温度 (77 K) 后, 让圆柱形永磁体从 $Z = 52$ mm 的位置开始垂直接近超导体 (或辅助永磁体) 上表面, 当两者间距离达到 $Z = 2$ mm 时, 让圆柱形永磁体沿原路返回, 完成一次测量.

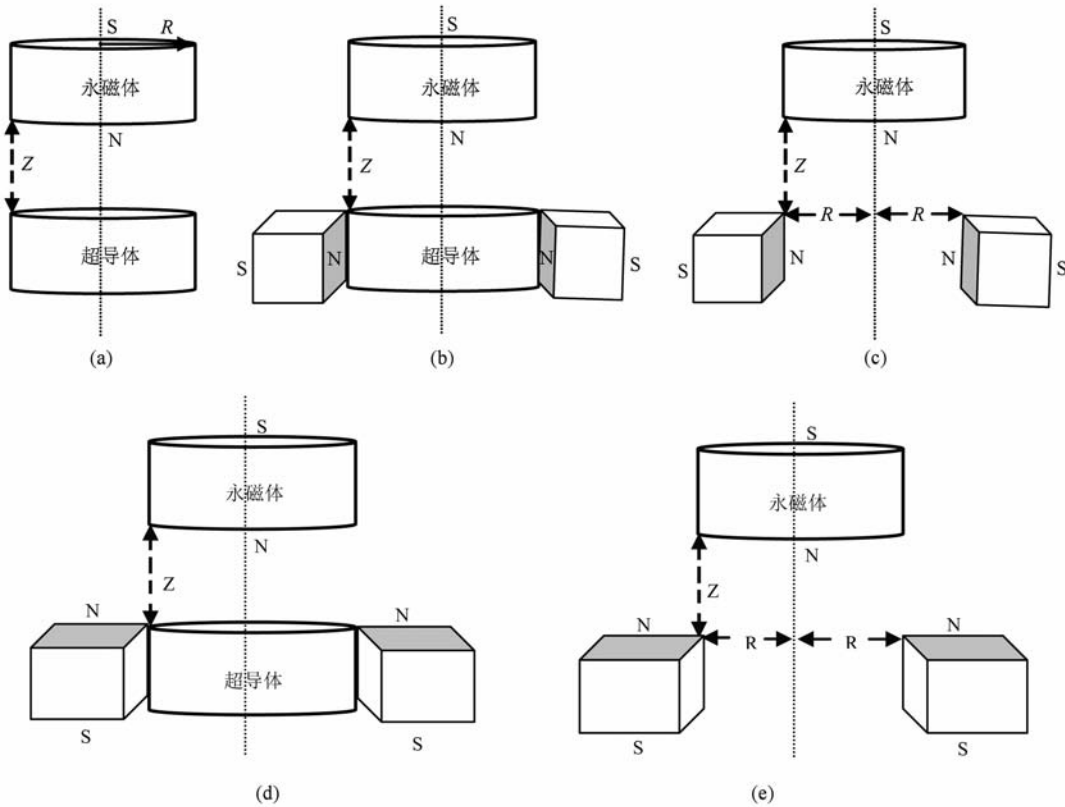


图 1 圆柱形永磁体、超导体和长方体永磁体之间不同组合方式示意图 (a) ($PM \downarrow - HTS$) 组合, (b) ($PM \downarrow - (\overrightarrow{PM} - HTS - \overleftarrow{PM})$) 组合, (c) ($PM \downarrow - (\overrightarrow{PM} - \overleftarrow{PM})$) 组合, (d) ($PM \downarrow - (PM \uparrow - HTS - PM \uparrow)$) 组合, (e) ($PM \downarrow - (PM \uparrow - PM \uparrow)$) 组合

3. 结果与讨论

图 2 为图 1 中(a)组合、(b)组合和(c)组合情

况下圆柱形永磁体所受的磁悬浮力随其与超导体 (或辅助永磁体) 上表面垂直距离 ($F-Z$) 变化曲线. 从图中可看到, 上述三种情况下, 圆柱形永磁体所受的磁悬浮力都随着两者之间距离的减小逐渐增

加,但增加的幅度不同.其中(a)组合的磁悬浮力曲线反映了超导体和圆柱形永磁体之间的相互作用力,最大磁悬浮力为 29.8 N;(c)组合的磁悬浮力曲线表明,圆柱形永磁体和两个辅助永磁体之间的相互作用力,在圆柱形永磁体接近和离开辅助永磁体上表面时磁相互作用力曲线几乎是完全重合的,无磁滞现象,表明永磁体之间的相互作用力具有很好的重复性和刚度,最大磁悬浮力为 31.7 N;(b)组合的磁悬浮力曲线与(a)组合的磁悬浮力曲线类似,但整体向右上方向移动,最大磁悬浮力为 61.5 N,是(a)组合最大磁悬浮力 29.8 N 的 206%.同时还发现,当 $Z \leq 40$ mm 时,(b)组合的磁悬浮力不但比(a)组合有明显提高,而且其悬浮系统的刚度也明显提高.譬如在下降至 $Z = 10$ mm 时,(a)组合和(b)组合的磁悬浮力分别为 5.2 和 22.0 N,刚度分别为 1.3×10^3 和 3.5×10^3 N/m,显然(b)组合中磁悬浮力有了较大的提高,增加的部分来自辅助永磁体的贡献.在有超导体的(a)组合和(b)组合中,磁悬浮力曲线均存在着明显的磁滞现象,但在有辅助永磁体作用下的磁悬浮力却有了成倍的增加,磁悬浮系统的刚度也明显提高.这说明在这种情况下超导体和永磁体间的组合明显地提高了系统的磁悬浮力特性,对超导磁悬浮的应用具有积极的促进作用.

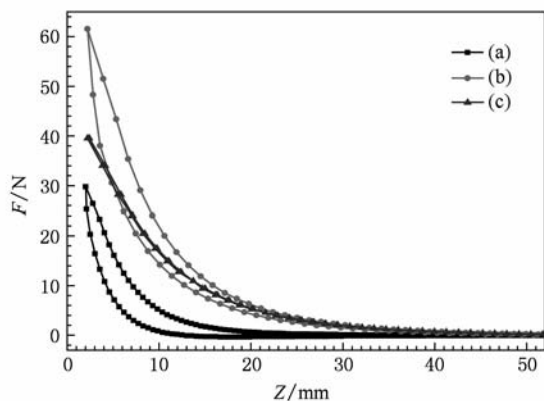


图2 在(a)组合、(b)组合和(c)组合中磁悬浮力随间距($F-Z$)的变化关系

图3为(a)组合、(d)组合和(e)组合情况下圆柱形永磁体所受的磁悬浮力随其与超导体(或辅助永磁体)上表面垂直距离($F-Z$)的变化曲线.从图中可清楚看到,在(a)组合和(d)组合情况下,圆柱形永磁体所受的磁悬浮力都随着两者之间距离的减小逐渐增加.但(e)组合的情况则大不

相同,圆柱形永磁体和辅助永磁体之间的磁悬浮力在 $Z \geq 8.5$ mm 时,随着两者之间距离的减小逐渐增加, $Z \leq 8.5$ mm 时,则随着两者之间距离的减小而逐渐减小.与(d)组合情况不同,(d)组合的磁悬浮力曲线并不是都在(a)组合磁悬浮力曲线的右上侧,当 $Z \geq 8.5$ mm 时,曲线整体向右上方向移动,(d)组合的磁悬浮力比(a)组合的明显偏高,如 $Z = 10$ mm 时,(a)组合和(d)组合的磁悬浮力分别为 5.2 和 13.4 N;但当 $Z \leq 4.7$ mm 时,曲线相对于(a)组合则向左下方向偏移,导致(d)组合的磁悬浮力比(a)组合的明显偏低,如 $Z = 3.7$ mm 时,(a)组合和(d)组合的磁悬浮力分别为 23.4 和 19.0 N;当 $Z = 2$ mm 时,(d)组合的最大磁悬浮力只有 19.6 N,仅为(a)组合最大磁悬浮力 29.8 N 的 65.8%.这些结果表明,(d)组合情况下圆柱形永磁体所受的磁悬浮力只有无辅助永磁体时最大磁悬浮力的 65.8%,(b)组合情况下磁悬浮力的 31.9%,这些变化与辅助永磁体的磁场分布及其对超导体的磁化方式密切相关.

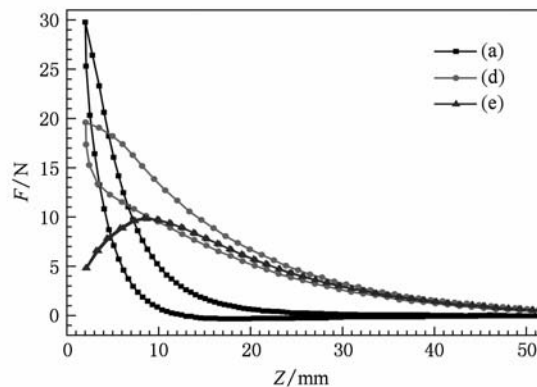


图3 在(a)组合、(d)组合和(e)组合中磁悬浮力随间距($F-Z$)的变化关系

为了弄清为什么(b)组合情况下的最大磁悬浮力能达到(d)组合情况的3倍多,我们采用有限元分析方法,计算并绘制出了这两种组合情况下系统的磁场分布,如图4所示.从图中可清楚看出,(b)组合情况下,在圆柱形永磁体移动的范围,辅助永磁体产生的磁场和超导体冻结的磁场方向都是竖直向上的,刚好与圆柱形永磁体产生的磁场方向相反,所以,使得在该组合形态下,圆柱形永磁体所受的最大磁悬浮力比无辅助永磁体时的最大磁悬浮力大得多.(d)组合情况下,在圆柱形永磁体移动的范围,辅助永磁体产生的磁场方向部分与圆柱

形永磁体产生的磁场方向相同,部分相反,而超导体冻结的磁场方向则与圆柱形永磁体产生的磁场方向相同.由于与圆柱形永磁体磁场方向相反的部分对其产生具有排斥性的悬浮力,相同的部分则产生吸引力,因此在这两种作用力的共同作用下,使

得(d)组合情况下圆柱形永磁体所受的总磁悬浮力为 19.6 N,在两者间距很小的情况下,小于无辅助永磁体时的最大磁悬浮力 29.8 N,远远小于(b)组合情况下圆柱形永磁体所受的最大磁悬浮力 61.5 N.

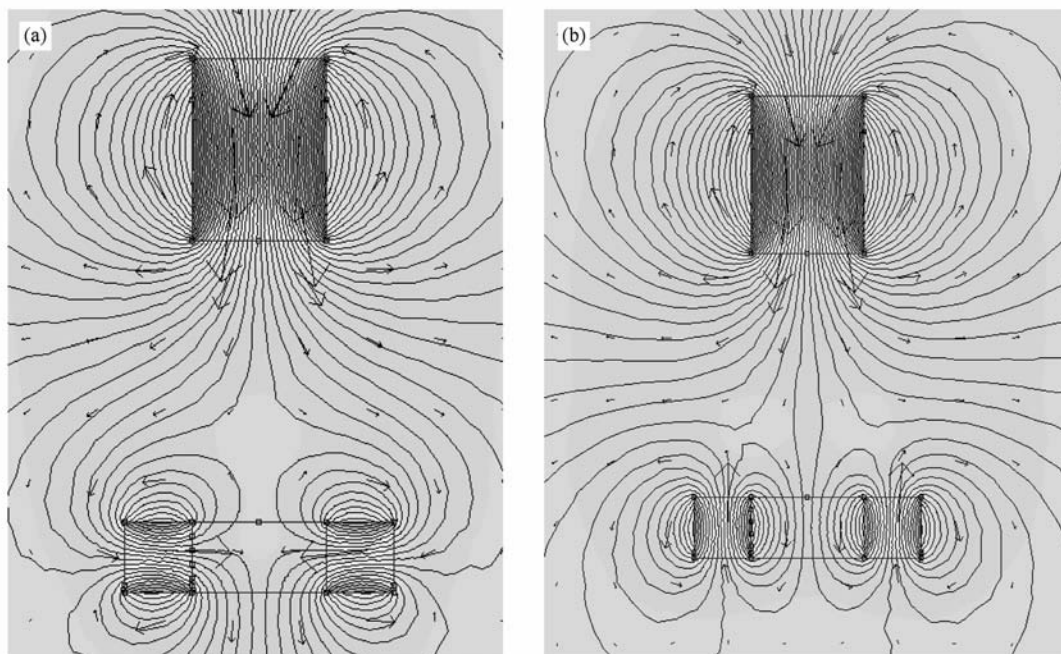


图4 (b)组合和(d)组合情况下磁悬浮系统初始状态下的磁场分布 (a)为(b)组合情况,(b)为(d)组合情况

4. 结 论

通过对永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和圆柱形永磁体磁悬浮力特性的研究发现,当长方体辅助永磁体的磁极 N 指向超导体时,超导体的最大磁悬浮力从没有引入辅助永磁体时的 29.8 N 增加到 61.5 N,辅助永磁体的引入使其最大磁悬浮力提高了 206%,同时,超导体与圆柱形永磁体间的刚度明显提高.当长方体辅助永磁体的 N 极与圆柱形永磁体的 N 极反平行时,辅助永磁体的引入却使其最大磁悬浮力从 29.8 N 减小到 19.6 N,

只有无辅助永磁体时的 65.8%;超导体与圆柱形永磁体间的刚度在两者之间距离大于 12 mm 时明显提高,但小于 12 mm 之后却明显下降.此外还发现,超导体和圆柱形永磁体之间的最大磁悬浮力与辅助永磁体和圆柱形永磁体之间的最大磁悬浮力之和,并不等于永磁体辅助下单畴 GdBCO 超导体和圆柱形永磁体之间的最大磁悬浮力.这些结果说明,辅助永磁体的引入对超导体的磁悬浮力具有显著的影响,只有通过合理设计超导体和永磁体的组合方式,才能有效地提高超导体的磁悬浮力,研究结果对促进超导体的应用具有重要的指导意义.

- [1] John R H, Shaul H, Tomotake M 2005 *Supercond Sci. Tech.* **18** S1
 [2] Werfel F N, Floegel-Delor U, Rothfeld R 2005 *Supercond Sci. Tech.* **18** S19
 [3] Miyagawa Y, Kameno H, Takahata R 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 996

- [4] Ohashi S, Tamura S, Hirane Y 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 988
 [5] Nuria D V, Alvaro S, Carles N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042505
 [6] Wang J S, Wang S Y 2002 *Physica C* **378**—**381** 809
 [7] Sha J J, Yao Z W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1356 (in Chinese)
 [沙建军、姚仲文 2000 物理学报 **49** 1356]

- [8] Feng Y, Zhou L, Yang W M, Zhang C P 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 146 (in Chinese) [冯勇、周廉、杨万民、张翠萍 2000 物理学报 **49** 146]
- [9] Li G Z, Yang W M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5028 (in Chinese) [李国政、杨万民 2010 物理学报 **59** 5028]
- [10] Yang W M, Zhou L, Feng Y 1999 *Chin. Phys.* **8** 533
- [11] Zhu M, Ren Z Y, Wang S Y 2002 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **24** 213 [朱敏、任仲友、王素玉 2002 低温物理学报 **24** 213]
- [12] Hu L F, Zhou L, Zhang P X 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1359 (in Chinese) [胡立发、周廉、张平祥 2001 物理学报 **50** 1359]
- [13] He G L, He Y W, Zhao Z G, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 839 (in Chinese) [何国良、贺延文、赵志刚、刘楣 2006 物理学报 **55** 839]
- [14] Liu M X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017401 (in Chinese) [刘敏霞 2011 物理学报 **60** 017401]
- [15] Carles N, Alvaro S 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214507
- [16] Zhang F Y, Huang S L, Cao X W 1989 *Acta Phys. Sin.* **38** 830 (in Chinese) [张凤英、黄孙利、曹效文 1989 物理学报 **38** 830]
- [17] Nuria D V, Alvaro S, Enric P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 042503
- [18] Alvaro S, Carles N 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214506
- [19] Wang F, Sun G Q, Kong X M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1590 (in Chinese) [王峰、孙国庆、孔祥木 2001 物理学报 **50** 1590]
- [20] Yang W M, Zhu S H, Wu X L 2009 *Cryogenics* **49** 299
- [21] Ren Z Y, Oliver de Hass, Wang X R 2003 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **25** (suppl) 182 [任仲友、Oliver de Hass、王晓融 2003 低温物理学报 **25** (增) 182]
- [22] Yang W M, Zhou L, Feng Y 2002 *Brazilian Journal of Physics* **32** 763
- [23] Yang W M, Zhou L, Feng Y 2001 *Physics C* **354** 5
- [24] Zhang X Y, Zhou J, Zhou Y H 2009 *Supercond Sci Tech.* **22** 1
- [25] Deng Z, Zheng J, Song H 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2071
- [26] He Q Y, Wang J S, Wang S Y 2009 *Physica C* **469** 91
- [27] Tsuda M, Kawasaki T, Yagai T 2008 *J. Phys.* **97** 1
- [28] Cheng X F, Yang W M, Li G Z 2010 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **32** 150 [程晓芳、杨万民、李国政 2010 低温物理学报 **32** 150]
- [29] Yang W M, Chao X X, Shu Z B 2006 *Physica C* **445—448** 347

Effects of additional permanent magnet on the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor*

Ma Jun¹⁾²⁾ Yang Wan-Min^{1)†} Li Guo-Zheng¹⁾ Cheng Xiao-Fang¹⁾ Guo Xiao-Dan¹⁾

1) (*College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

2) (*Department of Physics, Qinghai Normal University, Xining 810008, China*)

(Received 11 May 2010; revised manuscript received 4 June 2010)

Abstract

Effects of additional permanent magnet on the levitation force of a single domain GdBCO bulk superconductor have been investigated with a cylindrical permanent magnet in their coaxial configuration under zero field cooled state at liquid nitrogen temperature. The magnetic polarity N of cylindrical permanent magnet is pointed to the GdBCO bulk superconductor, and the two additional permanent magnet of rectangular parallelepiped shape are fixed on two sides of the GdBCO bulk superconductor in different arrangements. It was found that the levitation force can be improved to about 61.5 N, which is more than 2 times higher than that (29.8 N) of the system without the additional permanent magnet, when the magnetic polarity N of two additional permanent magnets points to the GdBCO bulk superconductor in horizontal direction. The levitation force is reduced to 19.6N, which is about 65.8% of the levitation force 29.8N of the system without the additional permanent magnets, when the magnetic polarity N of two additional permanent magnet are antiparallel to the magnetic polarity N of the cylindrical permanent magnet. The results indicate that the levitation force of high temperature bulk superconductors can be effectively improved by introducing additional permanent magnet based on reasonably designing the system configuration, which is very important during the practical design and applications of superconducting magnetic levitation systems.

Keywords: single domain GdBCO, permanent magnet, levitation force

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

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50872079), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z241) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. GK200901017).

† Corresponding author. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn