

条状永磁体的组合形式及间距对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响*

马俊¹⁾²⁾ 杨万民^{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8月13日收到;2010年10月10日收到修改稿)

通过对由条状永磁体组成的组合磁体与单畴 GdBCO 超导体在零场冷情况下磁悬浮力的测量,研究了 5 种不同组态下组合磁体之间距离的变化对超导体磁悬浮力的影响. 结果发现,当条状永磁体之间的距离 D 从 0 mm 增加到 30 mm 时,超导体的磁悬浮力大小与组合磁体排列形式有着密切关系(以 $Z=5$ mm 为例):1)对由 3 个条状永磁体组成的组合磁体,当中间磁体的磁极 N 向上、两侧磁体的磁极 N 均水平指向中间磁体时,超导体的磁悬浮力从 22.8 N 减小到 9.7 N;当中间磁体的磁极 N 向上、两侧磁体的磁极 N 均向下时,超导体的磁悬浮力先从 9.2 N 增加到 13.9 N、再减小到 10.4 N. 2)对由 2 个条状永磁体组成的组合磁体,当两个磁体的磁极 N 均向上时,超导体的磁悬浮力从 11.2 N 减小到 1.2 N;当两个磁体的磁极 N 均在水平方向且反平行时,超导体的磁悬浮力先从 6.0 N 增加到 6.8 N,再减小到 2.9 N. 3)对 1 个条状永磁体, $D=0$,当磁体的磁极 N 向上时,超导体的磁悬浮力为 9.5 N. 这些结果表明,只有通过科学合理地设计永磁体的组合形式和具体结构参数,才能获得最大的磁悬浮力,该结果对优化磁悬浮系统设计和超导体的应用具有重要的指导意义.

关键词: 单畴 GdBCO 块材, 磁体组合形式, 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]、储能飞轮^[2]和磁悬浮运输系统^[3,4]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^[5,6]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^[7]、厚度^[8]、冷却方式、所用永磁体的磁场分布^[9,10]等参数密切相关. 现有的超导磁悬浮理论研究表明^[11,12],超导体和永磁体之间的磁悬浮力同样与永磁体的组合形式和具体结构参数相关,这些都是磁悬浮系统优化设计和提高最大磁悬浮力的关键因素. 文献[12]通过理论研究了平移对称磁悬浮系统磁悬浮力和稳定性,计算了磁悬浮系统中磁悬

浮力随永磁体组合形式和间距的变化规律,磁悬浮力大小与永磁体间的间距有关;文献[13]研究了永磁体不同组态对超导体磁悬浮力的影响,结果表明,超导体磁悬浮力与永磁体的数量和永磁体组合形式有关,磁悬浮力的大小取决于永磁体不同组态下的感应环流半径及磁场分布;文献[14]研究了辅助永磁体对超导体磁悬浮力特性的影响,通过合理引入辅助永磁体可明显提高磁悬浮力特性. 这些研究对地面磁悬浮交通轨道设计具有一定的参考价值,但就磁悬浮系统中磁悬浮力与永磁体的数量、永磁体的组合形式和间距之间的内在关系未进行更加系统深入的实验研究. 为了弄清楚永磁体的组合形式及间距对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响,本文通过对由条状永磁体组成的组合磁体与单畴 GdBCO 超导体在零场冷情况下磁悬浮力的测量,研究了 5 种不同组态下组合磁体之间距离的对

* 国家自然科学基金(批准号:50872079),国家高技术研究发展计划(863)(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

超导体磁悬浮力的影响,并取得了一些有价值的结论.该结果对优化磁悬浮系统设计和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,是通过顶部籽晶熔渗方法(TSIG)制备的^[15],样品直径为 30 mm、厚度为 10 mm.所用条状永磁体的尺寸均为 30 mm × 10 mm × 10 mm,表面中心最大磁场约 0.5 T,永磁体沿短边方向磁化.为了能够有效地研究条状永磁体之间的距离对单畴 GdBCO 超导体在零场冷情况下磁悬浮力的影响,我们用条状永磁体设计了 5 种组合磁体实验方案,如图 1 所示.图 1(a),(b),(c),(d),(e) 分别表示超导体和单个条状永磁体 HTS - PM ↑,两个条状永磁体的磁极 N 均向上 HTS - (PM ↑ - PM ↑),两个条状永磁体的磁极 N 均在

水平方向且反平行 HTS - ($\overrightarrow{PM} - \overleftarrow{PM}$),三个条状永磁体的中间磁体的磁极 N 向上两侧磁体的磁极 N 均向下 HTS - (PM ↓ - PM ↑ - PM ↓),三个条状永磁体的中间磁体的磁极 N 向上两侧磁体的磁极 N 均水平指向中间永磁体 HTS - ($\overrightarrow{PM} - PM \uparrow - \overleftarrow{PM}$) 情况下的 5 种实验示意图,箭头表示永磁体的磁化方向.我们采用三维空间磁场及磁力测试系统^[16],测量了这 5 种情况下条状永磁体之间的距离 D (D 分别为 0 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, 22 mm, 24 mm, 26 mm, 28 mm 和 30 mm) 对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响.每次测量前,使超导体与条状组合磁体处于对称状态,且它们之间的垂直距离 $Z = 55$ mm.待超导体被冷却至液氮温度(77K)后,让超导体开始垂直接近条状组合磁体,当两者间距达到 $Z = 5$ mm 时,让超导体沿原路返回,完成一次测量.

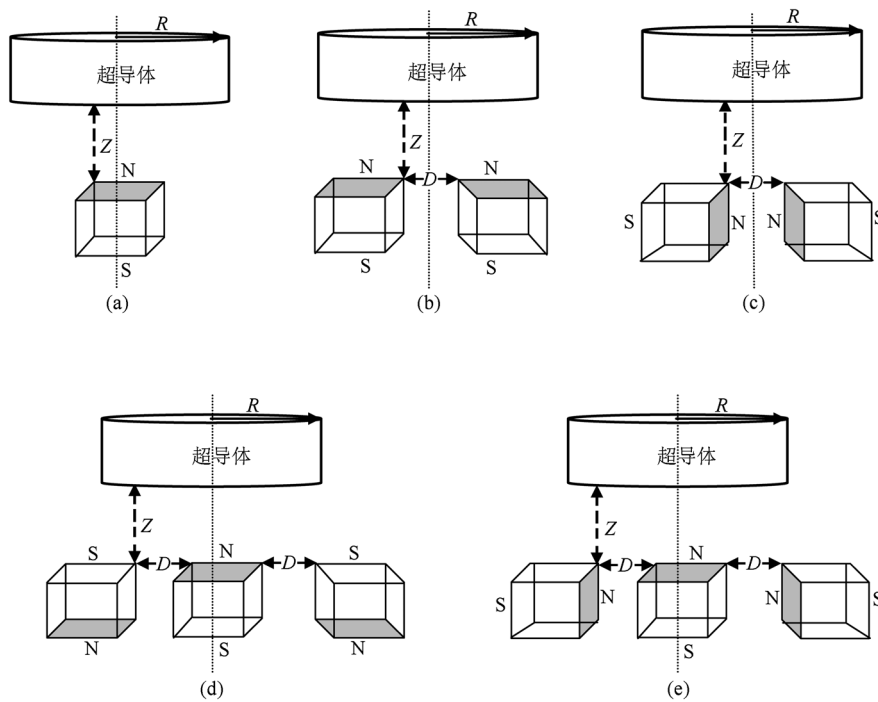


图 1 超导体和条状永磁体之间的组合方式示意图

3. 结果与讨论

在零场冷条件下,当超导体与永磁体之间的垂直距离为 5 mm 时,超导体所受的最大磁悬浮力 (F_{max}) 与条状永磁体之间距离 (D) 的关系如图 2 所示.从图中可清楚看到,总体而言,采用三个条状永

磁体组成的(d)和(e)组合磁体,可使超导体产生较大的磁悬浮力;而采用两个条状永磁体组成的(b)和(c)组合磁体时,超导体产生的磁悬浮力则较小,甚至小于只有单个条状永磁体情况下的磁悬浮力.这说明,超导体所受的最大磁悬浮力不仅与条状永磁体的组合形式有关,而且与组合磁体之间的距离密切相关.对图 1(a) 情况而言,由于只有一个条状

永磁体,永磁体之间距离无法改变,所以,超导体的磁悬浮力 F_{mf} 在图 2 中只有一个点,最大磁悬浮力为 9.5 N,对应于 $D=0$ 的情况.

对由两个条状永磁体组成的组合磁体而言,磁体的磁极取向对超导体的磁悬浮力有着重要的影响;在图 1(b) 中,两个条状永磁体的磁极 N 均向上,且指向超导体的表面,在这种情况下,当 $D=0$ 时,组合磁体中间部分的磁场最强,超导体的磁悬浮力最大为 11.2 N,随着两个永磁体间距 D 的增加,组合磁体中间部分的磁场强度逐渐减弱,所以,当 D 从 0 增加到 30 mm 时,超导体的磁悬浮力也就单调地从 11.2 N 减小到 1.2 N;在图 1(c) 中,两个条状永磁体的磁极 N 均在水平方向且反平行,且平行于超导体的表面,在这种情况下,当 $D=0$ 时,组合磁体中间部分的磁场最强,但作用在超导体上的磁场面积较小,超导体的磁悬浮力较小,约 6.0 N,随着两个永磁体间距 D 的增加,组合磁体中间部分的磁场强度逐渐减弱,但作用在超导体上的磁场面积则逐渐增加,导致超导体的磁悬浮力逐渐增加;当 $D > 8$ mm 时,作用在超导体上的磁场面积则已经比较大,但组合磁体中间部分的磁场强度则衰减较大,致使超导体的磁悬浮力从 6.8 N 减小到 2.9 N;但 $D \approx 8$ mm 时,当作用在超导体上的磁场面积和磁体的磁场强度均达到了一个最佳匹配值,所以,超导体的磁悬浮力在 $D \approx 8$ mm 时达到最大值 6.8 N. 另外,从图中可以看出,当 $D < 11$ mm 时,超导体的磁悬浮力在(b)组合情况下高于(c)组合;当 $D > 11$ mm 时,则相反.

对由三个条状永磁体组成的组合磁体而言,超导体的磁悬浮力大小与其磁体的磁极取向密切相关. 在图 1(d) 中,三个条状永磁体的中间磁体的磁极 N 向上两侧磁体的磁极 N 均向下,在这种情况下,当 $D=0$ 时,组合磁体中间部分的磁场强度与两侧的强度相同,但磁场方向相反,作用在超导体上的磁场在超导体中产生了三个磁感应环流,且中间磁体产生的感应环流与两侧的感应环流方向相反,这样就将单畴的超导体分成了三个部分,致使超导体的环流半径明显减小,因此,超导体的磁悬浮力较小,约 9.2 N,甚至比单个永磁体的磁悬浮力还小,这可以用文献[13]的方法进行解释;随着两个永磁体之间距离 D 的增加,组合磁体中间部分的磁场强度基本不变,磁场面积不断增大,而两侧磁体作用在超导体上的、与中间磁体磁场方向相反的磁

场强度则逐渐减弱,这样,中间磁体产生的感应环流半径和面积不断增加,两侧磁体产生的、与中间磁体方向相反感应环流半径和面积则不断减小,致使超导体的平均环流半径增大,磁悬浮力较快增加;当 $D > 8$ mm 时,作用在超导体上的磁场强度、磁场面积已基本不变,但两侧磁体产生的、作用在超导体上的反向磁场越来越弱,致使作用在超导体上的磁场梯度逐渐减小,磁悬浮力从 13.9 N 减小到 10.4 N;但 $D \approx 8$ mm 时,当作用在超导体上的磁场强度、磁场面积和磁场梯度均达到了一个最佳匹配值,所以,超导体的磁悬浮力在 $D \approx 8$ mm 时达到最大值 13.9 N. 在图 1(e) 中,三个条状永磁体的中间磁体的磁极 N 向上两侧磁体的磁极 N 均水平指向中间永磁体,在这种情况下,组合磁体作用在超导体上的磁场有两部分构成,一部分是由中间磁体产生的向上的磁场,另一部分则是两侧磁体产生的向上的磁场;当 $D=0$ 时,作用在超导体上的磁场强度、磁场面积和磁场梯度均达到了最大,这时超导体的磁悬浮力最大,为 22.8 N;随着两侧磁体与中间磁体之间距离 D 的增加,两侧磁体提供的磁场强度越来越弱,所以,当 D 从 0 增加到 30 mm 时,超导体的磁悬浮力也就单调地从 22.8 N 减小到 9.7 N;另外,从图中可以看出,当 $D < 8.5$ mm 时,超导体在(e)组合情况下的磁悬浮力大于(d)组合,当 $D > 8.5$ mm 时,(d)组合磁悬浮力则优于(e)组合.

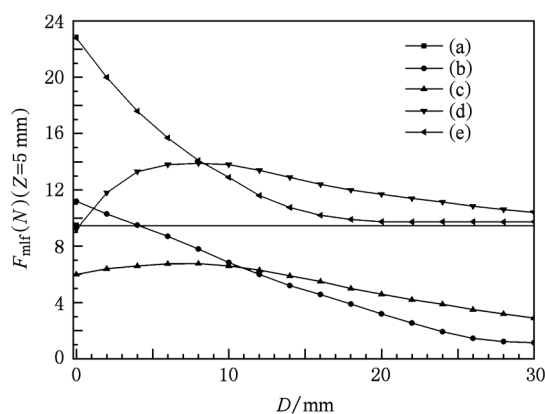


图 2 在 5 种组合中最大磁悬浮力 ($Z=5$ mm) 随条状永磁体之间距离 D 的变化关系曲线 (a) HTS - PM \uparrow ; (b) HTS - (PM \uparrow - PM \uparrow); (c) HTS - ($\overrightarrow{PM} - \overleftarrow{PM}$); (d) HTS - (PM \downarrow - PM \uparrow - PM \downarrow); (e) HTS - ($\overrightarrow{PM} - PM \uparrow - \overleftarrow{PM}$)

超导体与永磁体之间磁悬浮力可用下面的公式表述^[13]:

$$F = m \frac{dH}{dx}, \quad (1)$$

$m = Mv, M = AJ_c r$, 其中 m 是超导体的磁矩, $\frac{dH}{dx}$ 是永磁体产生的磁场梯度, M 是磁化率, A 是一个与样品几何相关的常数, v 是超导体的体积, J_c 是超导体临界电流密度, r 是感应电流环半径. 由此可知, 通过改善 r, J_c 和 $\frac{dH}{dx}$ 的值, 可提高超导体的磁悬浮力. 对于确定的超导体而言, 其磁悬浮力的大小主要取决于 r 和 $\frac{dH}{dx}$, r 的大小与磁体的组态、磁体的磁场强度

和作用在超导体上的磁场的面积等有关; $\frac{dH}{dx}$ 的大小则与磁体的组态、磁体的磁场强度等有关. 为了进一步弄清为什么(d)组合和(e)组合能获得较大的磁悬浮力, 我们选取了图2中磁悬浮力差别比较明显的 $D = 4 \text{ mm}$ 和 $D = 14 \text{ mm}$ 两个值, 利用 Lake Shore 低温霍尔探头, 对这5种情况下距磁体表面 $Z = 5 \text{ mm}$ 处磁场的垂向分量 B_z 进行了测量. 图3是 $D = 4 \text{ mm}$ 时5种组合情况下 B_z 随横向位移 X 的变化曲线(去掉(a)情况). 从图3中可清楚看出, (d)和(e)情况下组合磁体的磁场强度和梯度均大于其他情况下的磁场强度和梯度, (e)组合磁体的磁场强度和作用在超导体上的面积又明显大于(d)组合磁体; 这说明, 相对于其他组合情况而言, (d)和(e)组合磁体可给超导体提供更大的磁场梯度、使超导体产生更大屏蔽感应电流, 因此, 与(d)和(e)组合磁体相应的超导磁悬浮力高, 而(e)组合磁体相应的超导磁悬浮力最大; (c)组合磁体产生的磁场强度不仅最小, 而且作用在超导体上的面积最小, 因此(c)组合磁体可使超导体产生的屏蔽感应环流最小, 与(c)组合磁体相应的超导磁悬浮力最小; (b)组合磁体的磁场强度和梯度均介于(c)和(d)组合磁体之间, 因此, 与(b)组合磁体相应的超导磁悬浮力也介于(c)和(d)组合磁体之间. 这些结果与图2中 $D = 4 \text{ mm}$ 处几种组合情况下的超导磁悬浮力实验结果一致.

图4是 $D = 14 \text{ mm}$ 时5种组合情况下的 B_z 随横向位移 X 的变化曲线(去掉(a)情况). 从图4中可看出, 在(c), (d)和(e)三种情况下, 组合磁体的中心磁场分布基本都是单峰, 作用在超导体上的面积基本上都可覆盖整个超导体, 磁场梯度也无明显差别, 只是它们的磁场强度大小不同, 其中, (d)组

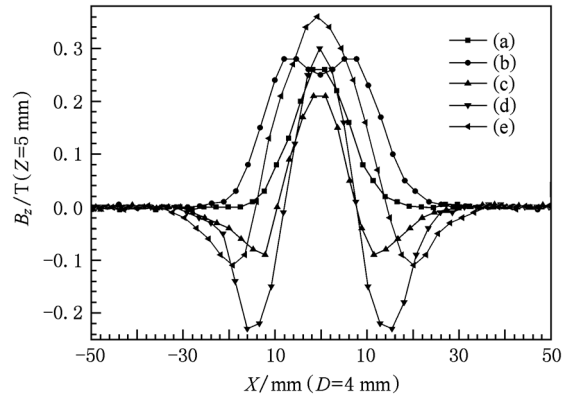


图3 在 $D = 4 \text{ mm}$ 时5种组合中磁场垂直分量随横向位移($B_z - X$)变化曲线 (a) HTS - PM \uparrow ; (b) HTS - (PM \uparrow - PM \uparrow); (c) HTS - ($\overrightarrow{\text{PM}} - \overleftarrow{\text{PM}}$); (d) HTS - (PM \downarrow - PM \uparrow - PM \downarrow); (e) HTS - ($\overrightarrow{\text{PM}} - \text{PM} \uparrow - \overleftarrow{\text{PM}}$)

合磁体磁场强度最大, (c)组合磁体磁场强度最小, (e)组合磁体磁场强度介于(c)和(d)组合磁体之间; 因此, 在这三种情况下, (d)组合磁体相应的超导磁悬浮力最大, (c)组合磁体相应的超导磁悬浮力最小, (e)组合磁体相应的超导磁悬浮力则介于(c)和(d)组合磁体之间. 对于(b)组合磁体, 其磁场分布呈现双峰、且中心部分的磁场强度明显低于(c), (d)和(e)三种情况下的值, 几乎接近零; 它将在超导体内产生两个超导环流, 使超导环流半径减小, 因此, 与(b)组合磁体相应的超导磁悬浮力比其他三种情况下的值都小. 这些结果与图2中 $D = 14 \text{ mm}$ 处几种组合情况下的超导磁悬浮力实验结果相一致.

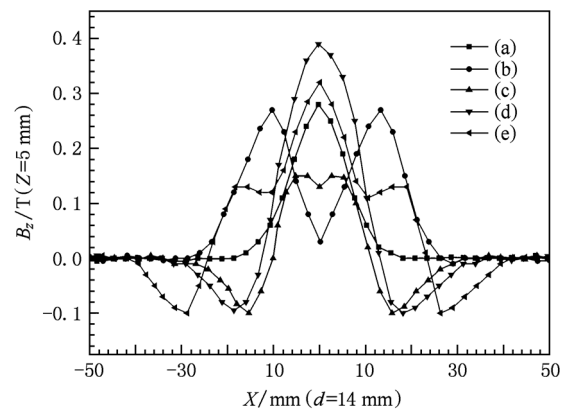


图4 在 $D = 14 \text{ mm}$ 时5种组合中磁场垂直分量随横向位移($B_z - X$)变化曲线 (a) HTS - PM \uparrow ; (b) HTS - (PM \uparrow - PM \uparrow); (c) HTS - ($\overrightarrow{\text{PM}} - \overleftarrow{\text{PM}}$); (d) HTS - (PM \downarrow - PM \uparrow - PM \downarrow); (e) HTS - ($\overrightarrow{\text{PM}} - \text{PM} \uparrow - \overleftarrow{\text{PM}}$)

4. 结 论

通过对单个和多个条状永磁体组成的组合磁体与单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的测量发现,超导体的磁悬浮力与条状永磁体的数目、间距、排列方式及磁极取向密切相关. 如在由 3 个条状永磁体组成的组合磁体中,当中间磁体的磁极 N 始终向上,两侧磁体的磁极 N 均水平指向中间磁体时,最大磁悬浮力为 22.8 N;当两侧磁体的磁极 N 均向下时,

其最大磁悬浮力只有 13.9 N. 在由 2 个条状永磁体组成的组合磁体,当两个磁体的磁极 N 均向上时,最大磁悬浮力为 11.2 N;当两个磁体的磁极 N 均在水平方向且反平行时,其最大磁悬浮力只有 6.8 N. 对单个条状永磁体,当磁体的磁极 N 向上时,磁悬浮力为 9.5 N. 这说明超导体的磁悬浮力与磁体的磁场分布密切相关,在实际应用中,我们必须充分考虑永磁体的数目、间距、排列方式及磁极取向等因素,设计出能够充分发挥超导材料磁悬浮特性的磁场分布,从而获得最大的磁悬浮力特性.

- [1] John R H, Shaul H, Tomotake M 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** S1
- [2] Miyagawa Y, Kameno H, Takahata R 1999 *IEEE Trans Appl. Supercond.* **9** 996
- [3] Nuria D V, Alvaro S, Carles N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042505
- [4] Wang J S, Wang S Y 2002 *Physica C* **378-381** 809
- [5] 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]
- [6] 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]
- [7] Yang W M, Zhou L, Feng Y 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 0533 (in Chinese) [杨万民 1999 物理学报 **48** 533]
- [8] Zhu M, Ren Zh Y, Wang S Y 2002 *Chinese Journal of Low Temperature Physics* **24** 213 (in Chinese) [朱敏、任仲友、王素玉 2002 低温物理学报 **24** 213]
- [9] Carles N, Alvaro S 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214507
- [10] Zhang F Y, Huang S L, Cao X W 1989 *Acta Phys. Sin.* **39** 830 (in Chinese) [张凤英、黄孙利、曹效文 1989 物理学报 **39** 830]
- [11] Alvaro S, Carles N 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214506
- [12] Nuria D V, Alvaro S, Enric P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 042503
- [13] Yang W M, Zhou L, Feng Y 2001 *Physica C* **354** 5
- [14] Ma J, Yang W M, Li G Z, Cheng X F, Guo X D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027401 (in Chinese) [马俊、杨万民、李国政、程晓芳、郭晓丹 2011 物理学报 **60** 027401]
- [15] 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]
- [16] Yang W M, Chao X X, Shu Z B 2006 *Physica C* **445-448** 347

Effect of assembled bar magnet configuration on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor*

Ma Jun¹⁾²⁾ Yang Wan-Min^{1)†}

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 13 August 2010 ; revised manuscript received 10 October 2010)

Abstract

By measuring the levitation forces between a single domain GdBCO bulk superconductor and assembled bar magnets (ABM) in different configurations at liquid nitrogen temperature, the effects of ABM configurations on the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor are investigated. The maximum levitation force is obtained at the same vertical gap distance $Z = 5$ mm between the superconductor and the ABM for configurations with different lateral gap distance (D) between the magnets of the ABM. It is found that 1) for the ABM consisting of 3 bar magnet, the levitation force of the GdBCO bulk decreases from 22.8 N to 9.7 N with the D value increasing from 0 to 30 mm, when the magnetic pole N of the middle magnet is pointed upwards and the directions of magnetic pole N of two side magnets are pointed to the middle magnet in horizontal direction; the levitation force of the GdBCO bulk increases first from 9.2 N to 13.9 N and then decreases to 10.4 N with D value increasing from 0 to 30 mm, if the magnetic pole N of the middle magnet is pointed upwards and the directions of magnetic pole N of two side magnets are pointed downwards; 2) for the ABM consisting of 2 bar magnets, the levitation force of the GdBCO bulk decreases from 11.2 N to 1.2 N with D value increasing from 0 to 30 mm, when the directions of magnetic pole N of two side magnets are pointed upwards; the levitation force of the GdBCO bulk increases first from 6.0 N to 6.8 N and then decreases to 2.9 N with D value increasing from 0 to 30 mm, if the directions of magnetic pole N of two magnets are anti-parallel in horizontal direction; 3) for the ABM consisting of only 1 bar magnets, $D \equiv 0$, and the levitation force of the GdBCO bulk is about 9.5 N. The results indicate that the magnet configuration and its detailed parameters of ABM are very important for improving the levitation force of a superconductor and helpful for designing and application based on the superconducting magnetic levitation system.

Keywords: single domain GdBCO bulk, assembled bar magnets configurations, 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), Plan of Research & Development on High Technology of China (Grant No. 2007AA03Z241), and Central Colleges of basic scientific research funded special fund operating expenses (Grant No. GK200901017).

† Corresponding author. Email: yangwm@snnu.edu.cn