

空心圆柱形永磁体内径对单畴 GdBCO 超导块材磁悬浮力的影响

马俊 陈章龙 县涛 魏学刚 杨万民 陈森林 李佳伟

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

Ma Jun Chen Zhang-Long Xian Tao Wei Xue-Gang Yang Wan-Min Chen Sen-Lin Li Jia-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 077401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172418

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[压力下铁砷基化合物的超导电性研究](#)

Superconductivities of pressurized iron pnictide superconductors

物理学报.2017, 66(3): 037402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.037402>

[时效 Ag-7wt.%Cu 合金的微观组织、电阻率和硬度](#)

Microstructure, resistivity, and hardness of aged Ag-7wt.%Cu alloy

物理学报.2017, 66(2): 027401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.027401>

[Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ 单晶 \(T_c=38.5K\) 磁通钉扎力与钉扎机理研究](#)

Investigation on the flux pinning force and flux pinning mechanism in Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ single crystal with T_c = 38.5 K

物理学报.2015, 64(11): 117401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117401>

[辅助永磁体磁化方式对单畴 GdBCO 超导块材捕获磁场分布及其磁悬浮力的影响](#)

The effect of additional permanent magnet magnetizing methods on magnetic field distribution and the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报.2013, 62(22): 227401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.227401>

[MgB₂ 超导膜的厚度与其 J_c\(5K,0T\) 的关系](#)

Thickness dependence of critical current density in MgB₂ films fabricated by hybrid physical-chemical vapor deposition

物理学报.2013, 62(19): 197401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.197401>

空心圆柱形永磁体内径对单畴GdBCO超导块材磁悬浮力的影响*

马俊^{1)†} 陈章龙¹⁾ 县涛¹⁾ 魏学刚¹⁾ 杨万民^{2)‡} 陈森林²⁾ 李佳伟²⁾

1)(青海师范大学物理与电子信息工程学院, 西宁 810008)

2)(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2017年11月9日收到; 2018年1月26日收到修改稿)

通过对空心圆柱形永磁体与单畴GdBCO超导体磁悬浮力的实验测量, 研究了空心圆柱形永磁体内径(d)的变化对超导体磁悬浮力的影响. 结果发现, 当空心圆柱形永磁体内径从0 mm增加到26 mm时, 超导磁悬浮力大小与空心圆柱形永磁体内径有着密切关系(最小测量间距 $Z = 2$ mm), 所有超导磁悬浮力曲线都存在磁滞现象. 随着空心圆柱形永磁体内径的增大, 最小间距处超导磁悬浮力逐渐减小, 从 $d = 0$ mm时的14.8 N减小为 $d = 26$ mm时的 -0.1 N, $d \geq 20$ mm时, 最小间距处超导磁悬浮力出现负值; 当 $0 \text{ mm} \leq d < 5$ mm时, 超导体最大磁悬浮力出现在最小间距处, $d \geq 5$ mm时, 超导磁悬浮力先增大后减小, 最大超导磁悬浮力产生的位置随着内径的增大而变大. 研究表明: 只有科学合理地设计永磁体结构参数, 才能获得较大的磁场强度, 提高超导磁悬浮力特性. 该结果对设计并优化磁悬浮轴承系统、环形轨道和超导体的实际应用具有一定的指导意义.

关键词: 单畴GdBCO超导体, 空心圆柱形永磁体, 磁悬浮力

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172418

1 引言

高温超导体因良好的力特性和自稳定性, 在超导磁悬浮轴承系统^[1]、高速磁悬浮列车、超导储能飞轮^[2]、运输系统^[3,4]和磁悬浮风力发电等领域有着广泛的应用. 超导体和永磁体间的相互作用力主要取决于超导材料的整体性能^[5-7]和应用外磁场的磁场分布, 超导磁悬浮力与超导材料的临界电流密度^[8]、材料内部的晶粒取向^[9]、块材制备时掺杂成分和比例^[10]、超导体的半径、厚度^[11]、冷却方式和永磁体的磁场分布^[12,13]等因素直接相关. 针对高温超导磁悬浮应用系统的相关理论研究表明^[14], 超导磁悬浮力特性同样与磁体的组态形式、磁体的

组合方式和磁悬浮系统中应用外磁场设计的结构参数密切相关, 这些都是决定超导磁悬浮系统磁悬浮力特性的重要因素. 文献^[15]通过实验研究了永磁体的组态形式对超导磁悬浮力的影响; 文献^[16]通过理论计算系统研究了对称条件下平移式超导磁悬浮系统中永磁体的组合形式及磁体之间的间距对超导磁悬浮力特性和稳定性的影响; 文献^[17]通过实验研究分析了长条形永磁体的组合方式及永磁体之间的间距对超导磁悬浮力特性的影响, 结果表明, 超导磁悬浮力与永磁体的数量、永磁体组态形式、永磁体之间的间距有关; 文献^[18-20]实验研究了辅助永磁体的引入方式、超导体的磁化方式对超导磁悬浮力特性和超导块材俘获磁场分布的影响, 结果表明, 只有合理引入永磁体的辅助方

* 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高层次人才资助和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: GK201305014)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mjun7302@163.com

‡ 通信作者. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn

式, 科学合理地设计超导体和永磁体的组合形式以及超导体的磁化方式, 才能有效地提高磁悬浮系统中超导磁悬浮力特性. 这些研究对磁悬浮系统设计具有一定的参考价值, 但这些研究主要是针对圆柱形永磁体、方形永磁体、条状永磁体以及组合磁体等对超导块材俘获磁场分布及其超导磁悬浮力的影响, 而针对空心圆柱形永磁体内径变化对超导磁悬浮力特性的影响规律尚未进行系统深入的实验研究. 为了弄清楚空心圆柱形永磁体内径变化对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响, 本文在零场冷、轴对称情况下通过对空心圆柱形永磁体与单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的测量, 实验研究了空心圆柱形永磁体内径变化对超导体磁悬浮力的影响, 并获得了一些可靠的实验数据和有参考价值的实验结论, 对磁悬浮轴承系统、磁悬浮环形轨道设计优化和超导体的实际应用具有一定的指导作用.

2 实 验

实验所用空心圆柱形永磁体的外径 (D) 均为 45 mm, 厚度 (H) 为 45 mm, 永磁体沿轴方向磁化, 所用的单畴 GdBCO 超导体是利用顶部籽晶熔融织构方法制备的^[21], 样品的直径为 20 mm, 厚度为 12 mm. 为了系统地研究空心圆柱形永磁体的内径变化对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力特性的影响, 我们用空心圆柱形永磁体和该超导体设计了实验方案, 图 1 为实验用单畴 GdBCO 超导体的宏观形貌, 图 2 为实验测量原理图. 我们利用三维空间磁场及磁力测试装置^[22,23], 测量了空心圆柱形永磁体的内径变化 ($d = 0, 2, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20$ 和 26 mm) 对单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的影响. 在每次进行实验测量前, 将空心圆柱形永磁体与超导体处于轴对称状态, 且沿轴向二者之间的垂直距离 $Z = 45$ mm. 用液氮开始冷却超导体, 待超导体



图 1 单畴 GdBCO 超导体宏观形貌
Fig. 1. The morphology of the sample.

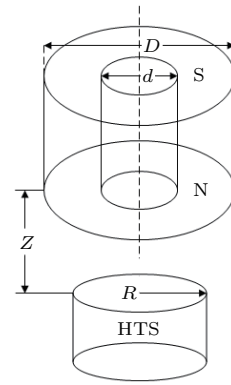


图 2 永磁体和超导体之间作用力测量示意图
Fig. 2. The force measurement diagram between the permanent magnet and the superconductor.

被冷却至液氮温度 (77 K) 后, 让空心圆柱形永磁体开始沿轴垂直向下接近超导体, 当两者间距为 $Z = 2$ mm 时, 让空心圆柱形永磁体沿原路返回, 完成一次实验测量.

3 结果与讨论

在零场冷条件下, 当空心圆柱形永磁体与超导体之间的垂直距离为 2 mm 时, 超导体所受的磁悬浮力 (F_{lf}) 与空心圆柱形永磁体内径 (d) 的关系如图 3 所示. 从图中可清楚地看到, 当空心圆柱形永磁体内径从 0 mm 增加到 26 mm 时, 超导磁悬浮力大小与空心圆柱形永磁体内径有着密切关系, 所有超导磁悬浮力曲线整体向左下方倾斜, 都存在磁滞现象, 随着空心圆柱形永磁体内径的增大, 超导磁悬浮力曲线磁滞不断减小, 最小间距处超导磁悬浮力逐渐减小, 从 $d = 0$ mm 时的 14.8 N 减小为 $d = 28$ mm 时的 -0.1 N, $d \geq 20$ mm 时, 最小间距处超导磁悬浮力出现负值; 当 $0 \text{ mm} \leq d < 5$ mm 时, 最大超导磁悬浮力出现在最小间距处, $d \geq 5$ mm 时, 在空心圆柱形永磁体下降过程中超导磁悬浮力先增大后减小, 最大超导磁悬浮力出现的位置随着空心圆柱形永磁体内径的增大而变大.

为了更详细地阐述空心圆柱形永磁体内径变化对超导磁悬浮力的影响, 我们将内径变化分三个阶段进行分析, 图 4 为空心圆柱形永磁体内径 $d = 0$ mm 和 $d = 2$ mm 时, 超导磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径变化的关系. 从图中曲线走势可清楚地看到, 超导磁悬浮力的曲线向左下方有一定的倾斜, 并存在明显的磁滞现象, 随着空心圆

柱形永磁体内径的增大, 超导磁悬浮力曲线磁滞不断减小, 下降过程中超导磁悬浮力逐渐增大, 最大超导磁悬浮力分别为14.78 N和12.17 N, 出现在最小测量间距处($Z = 2$ mm), 上升过程中超导磁悬浮力先减小后增大, 最大吸引力为 -2.24 N和 -1.83 N, 分别出现在空心圆柱形永磁体上升过程中 $Z = 17$ mm和 $Z = 18$ mm处. 这表明当空心圆柱形永磁体内径较小时, 内径变化对空心圆柱形永磁体上表面的磁场分布、磁场强度和永磁体与超导体之间的有效作用面积有一定的影响, 同时也影响了超导体内磁场的分布.

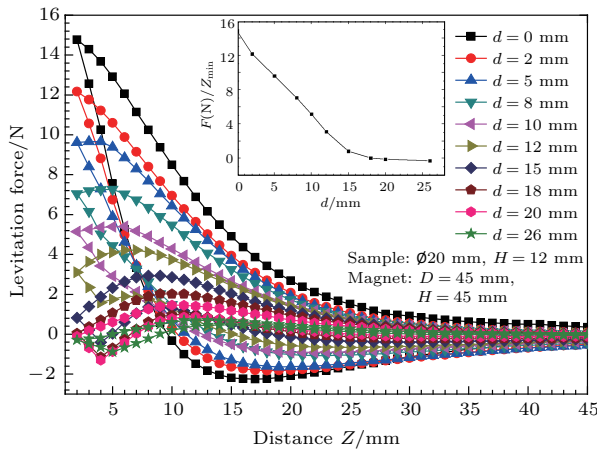


图3 磁悬浮力 ($Z = 2$ mm) 随空心圆柱形永磁体内径的变化
Fig. 3. The levitation force with inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnetic ($Z = 2$ mm).

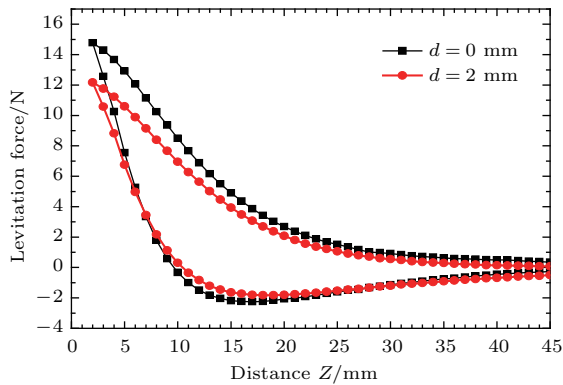


图4 磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径 ($d = 0, 2$ mm) 的变化
Fig. 4. The levitation force with inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnetic ($d = 0, 2$ mm).

图5为超导磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径 ($d = 5-10$ mm) 的变化关系曲线. 从图中可看到, 超导磁悬浮力曲线整体向左下方倾斜, 并存在明显的磁滞现象, 随着空心圆柱形永磁体内径

的增大, 超导磁悬浮力曲线磁滞不断减小, 但超导磁悬浮力曲线与图4相比发生了明显的变化, 在空心圆柱形永磁体下降过程中超导磁悬浮力先增大后减小, 最大超导磁悬浮力并非出现在最小测量间距处, 最小测量间距处超导磁悬浮力为9.62, 7.05和5.15 N, 而最大超导磁悬浮力为9.67, 7.26和5.40 N, 分别出现在 $Z = 4, 5, 6$ mm处, 上升过程中超导磁悬浮力先减小后增大, 最大吸引力为 $-1.64, -1.08, -0.92$ N. 这说明, 超导体所受的最大磁悬浮力与空心圆柱形永磁体内径有关, 并随空心圆柱形永磁体内径的变化而变化, 内径的变化导致空心圆柱形永磁体上表面的磁场分布、磁场强度和作用在超导体上表面的有效作用面积发生了较大的变化, 导致超导体内部磁场分布发生变化, 从而影响了超导磁悬浮力的变化, 其大小取决于空心圆柱形永磁体上表面的磁场分布、磁场强度及与超导体的有效作用面积.

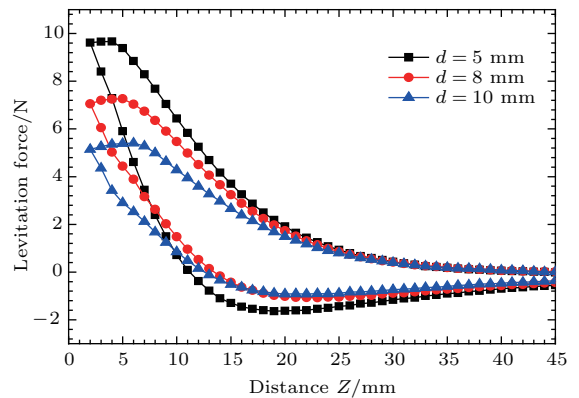


图5 磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径 ($d = 5-10$ mm) 的变化
Fig. 5. The levitation force with inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnetic ($d = 5-10$ mm).

图6 超导磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径 ($d = 12-26$ mm) 的变化关系曲线. 从图中可见, 超导磁悬浮力曲线整体向左下方倾斜, 曲线同样存在磁滞, 随着空心圆柱形永磁体内径的逐渐变大, 超导磁悬浮力整体在变小, 超导磁悬浮力曲线磁滞不断减小, 但超导磁悬浮力曲线与图4及图5有了很大的变化, 在 $Z < 25$ mm的范围内, 空心圆柱形永磁体下降过程中超导磁悬浮力先增大后减小, 最大超导磁悬浮力出现位置 Z 随着内径的增大而增大, 最小间距处超导磁悬浮力随着内径的增大而减小, $d \geq 20$ mm时, 最小测量间距处超导磁悬浮力为负值, 这表明产生了吸引

力; 上升过程中超导磁悬浮力先减小后增大再减小, 当 $2\text{ mm} < Z \leq 5\text{ mm}$ 时, 超导磁悬浮力减小, $5\text{ mm} < Z \leq 13\text{ mm}$ 时, 超导磁悬浮力增大, $13\text{ mm} < Z \leq 25\text{ mm}$ 时, 超导磁悬浮力减小. 这说明, 内径较大时, 超导磁悬浮力整体很小, 变化比较复杂, 超导体与空心圆柱形永磁体间的相互作用力受内径的影响逐渐减弱, 但超导磁悬浮力的大小仍取决于空心圆柱形永磁体上表面磁场分布、磁场强度和与超导体有效作用面积, 使得磁悬浮力和吸引力随着测量间距的变化而产生.

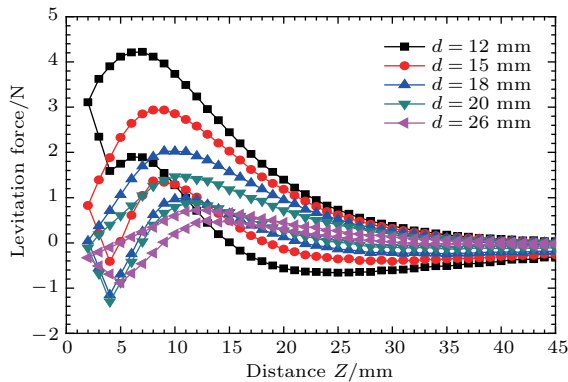


图6 磁悬浮力随空心圆柱形永磁体内径 ($d = 12\text{--}26\text{ mm}$) 的变化

Fig. 6. The levitation force with inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnetic ($d = 12\text{--}26\text{ mm}$).

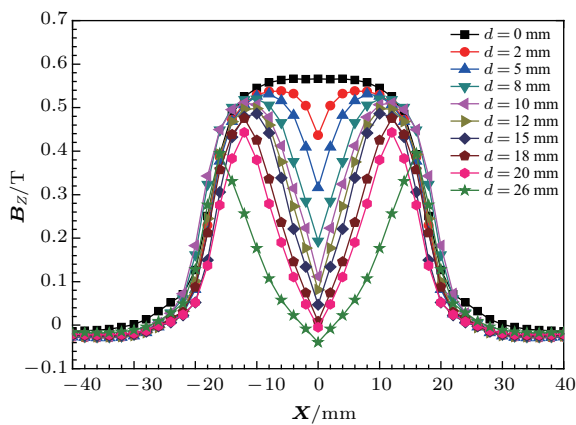


图7 空心圆柱形永磁体上表面 $h = 2\text{ mm}$ 处磁场的垂向分量随横向位移 ($B_z\text{-}X$) 的变化

Fig. 7. The vertical component of the magnetic field of the hollow cylindrical permanent magnet upper surface ($h = 2\text{ mm}$) with transverse displacement ($B_z\text{-}X$) curve.

为了弄清楚空心圆柱形永磁体内径的变化对超导磁悬浮力影响, 我们利用Lake shore低温霍尔探头, 对内径变化情况下距空心圆柱形永磁体上表面 $h = 2\text{ mm}$ 处磁场的垂向分量 B_z 进行了测量^[24,25]. 图7是 B_z 随横向位移 X 的变化曲线. 从

图7中可清楚地看出, 超导磁悬浮力主要取决于空心圆柱形永磁体中心轴磁场分布、磁场强度和作用在超导体上的有效作用面积, 随着内径的不断增大, 空心圆柱形永磁体中心轴磁场强度不断减小, 有效作用面积也不断减小, 磁场强度从 $d = 0\text{ mm}$ 时的 0.57 T 减小为 $d = 18\text{ mm}$ 时的 0.009 T , 该磁场强度几乎为零; 当 $d = 20\text{ mm}$ 时, 磁场强度为 -0.005 T , 作用在超导体上的有效作用面积几乎为零, 且当 $d \geq 20\text{ mm}$ 时, 空心圆柱形永磁体中心轴磁场强度为负值, 最小间距处作用力为吸引力, 这与图6中超导磁悬浮力的实验结果一致.

图8为沿空心圆柱形永磁体中心轴磁场的垂向分量随纵向位移 ($B_z\text{-}Z$) 的变化曲线, 从图中清楚地看到, 曲线整体向左下方倾斜, 当 $d = 0\text{ mm}$ 和 $d = 2\text{ mm}$ 时, 随着纵向位移从 30 mm 减小到 2 mm , 磁场强度的垂向分量呈单调增加, 由于超导体内俘获磁场及分布主要依赖于外磁场强度和分布, 在空心圆柱形永磁体下降过程中外磁场线进入超导体内的数量不断增加, 因抗磁特性和磁通钉扎作用, 超导体中产生的感应环流大小不断增加, 使超导体内磁场分布和强度随之发生变化, 导致超导磁悬浮力不断变大, 这与图4中的超导磁悬浮力实验测量结果一致; 当 $5\text{ mm} \leq d \leq 20\text{ mm}$ 时, 随着纵向位移从 30 mm 减小到 2 mm , 相同位置处的磁场强度逐渐减弱, 外磁场线进入超导体的程度也不断减弱, 磁场强度的垂向分量先增大后减小, 但在增大阶段, 磁场梯度不断减小, 而减小阶段磁场梯度不断增大, 随着内径的不断增大, 最大磁场强度沿中心轴出现的位置也随着变大, 分别出现在 $Z = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\text{ mm}$ 处, 这与图4和图5中最大超导磁悬浮力出现的位置相符合; 磁场强度的垂向分量增大阶段, 超导体内磁场强度随着外磁场强度的增大而增大, 此时在超导体内产生一个顺时针方向的感应环流, 相反, 减小阶段超导体内磁场线穿透数量减少, 在超导体内产生一个沿逆时针方向的感应环流, 超导体内磁场强度和分布发生改变, 致使超导体内的平均环流半径减小, 加上磁通钉扎作用、磁场分布变化和磁场蠕动, 超导磁悬浮力减小, 这与图5中超导磁悬浮力曲线相一致; 在空心圆柱形永磁体上升过程中, 当 $5\text{ mm} \leq d \leq 20\text{ mm}$, $2\text{ mm} \leq Z \leq 4\text{ mm}$ 时, 该范围内磁场较弱, 空心圆柱形永磁体中心轴磁场的垂向分量逐渐趋于零, 并出现了负值, 虽然磁场强度的垂向分量在

增大, 也产生相应的感应环流, 超导体内总磁场分布及其变化主要依赖于外磁场的变化, 同时因超导体内部磁通钉扎作用和磁场蠕动, 导致超导磁悬浮力减小, 当 $4\text{ mm} < Z \leq 13\text{ mm}$ 时, 磁场强度增加比较明显, 影响了超导体内磁场分布, 因空心圆柱形永磁体上表面磁场分布、磁场强度和与超导体有效作用面积共同作用, 加上磁通钉扎和蠕动等, 使总超导磁悬浮力增大, 这些结果与图 6 中的超导磁悬浮力实验结果相一致.

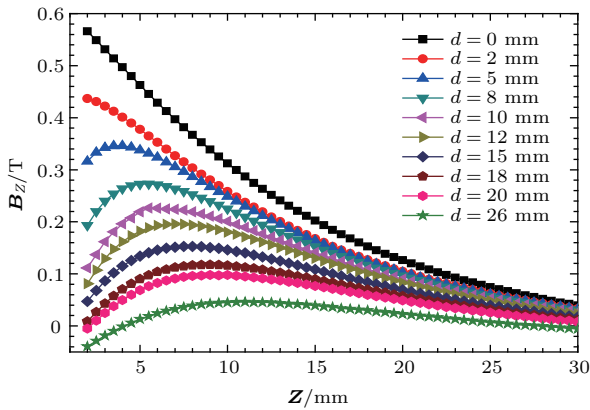


图 8 空心圆柱形永磁体沿中心轴磁场的垂向分量随纵向位移 (B_z - Z) 变化

Fig. 8. The vertical component along the central axis of the magnetic field of the hollow cylindrical permanent magnet with the vertical displacement (B_z - Z) curve.

为了进一步弄清空心圆柱形永磁体内径的变化对超导磁悬浮力影响, 我们采用有限元分析方法计算并绘制出了空心圆柱形永磁体内径 $d = 0, 5, 15, 26\text{ mm}$, 空心圆柱形永磁体运动至最小测量间距时超导磁悬浮力测量系统磁场分布图, 如图 9 所示. 从图中可清楚地看出, 在空心圆柱形永磁体移动的范围, 随着内径不断增大, 磁场穿过超导体数量逐渐减少, 磁场在超导体内的分布不断变化, 当 $d = 0\text{ mm}$ 时, 磁场穿过超导体数量最多, 分布最密集, 超导体内产生的感应环流最大, 使得最小测量间距处的超导磁悬浮力最大; 当 $d = 5\text{ mm}$ 时, 部分磁场通过空心圆柱形永磁体内部返回, 部分磁场穿过超导体, 在超导体内分布比较密集, 但数量与 $d = 0\text{ mm}$ 时相比不断减少, 产生的感应环流不断减小, 导致最小测量间距处的超导磁悬浮力减小; $d = 15\text{ mm}$ 时, 大部分磁场通过空心圆柱形永磁体内部返回, 只有小部分磁场穿过超导体, 在超导体内分布比较稀疏, 产生较小的感应环流, 对应的最小测量间距处的超导磁悬浮力较小; $d = 26\text{ mm}$ 时, 空心圆柱形永磁体与超导体有效作用面积为零, 绝大部分磁场通过空心圆柱形永磁体内部返回, 只有极少部分磁场穿过超导体, 在超导体内形成很小的感应环流, 导致最小测量间距处的超导磁悬浮力最小.

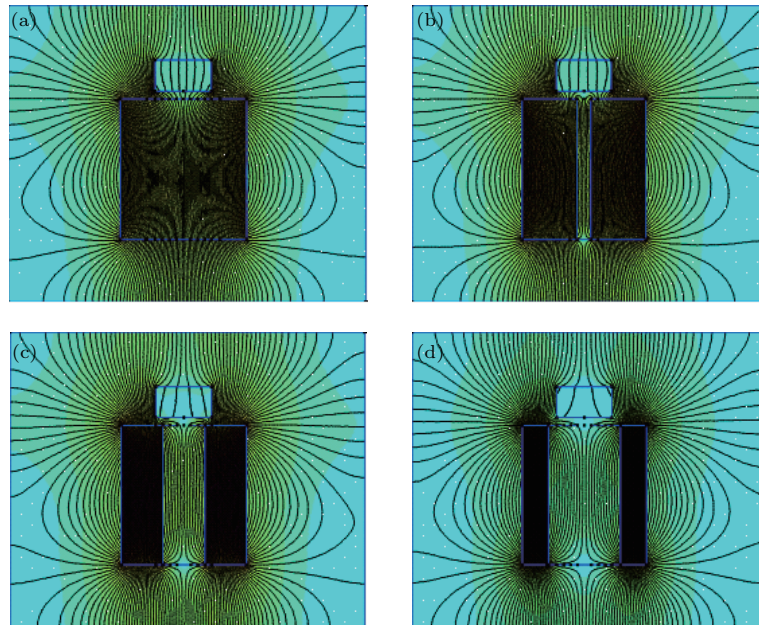


图 9 最小间距处测量系统的磁场分布图 (a) $d = 0\text{ mm}$ 磁场分布; (b) $d = 5\text{ mm}$ 磁场分布; (c) $d = 15\text{ mm}$ 磁场分布; (d) $d = 26\text{ mm}$ 磁场分布

Fig. 9. The magnetic field distribution of measurement system in minimum distance: (a) The magnetic field distribution ($d = 0\text{ mm}$); (b) the magnetic field distribution ($d = 5\text{ mm}$); (c) the magnetic field distribution ($d = 15\text{ mm}$); (d) the magnetic field distribution ($d = 26\text{ mm}$).

4 结 论

通过对空心圆柱形永磁体与单畴 GdBCO 超导体磁悬浮力的研究表明, 超导磁悬浮力大小与空心圆柱形永磁体内径直接相关. 随着空心圆柱形永磁体内径的增大, 最小间距处超导磁悬浮力逐渐减小, 当 $d \geq 20$ mm 时, 最小间距处超导磁悬浮力出现负值; 当 $0 \text{ mm} \leq d < 5 \text{ mm}$ 时, 最小间距处产生的超导磁悬浮力最大, $d \geq 5$ mm 时, 超导磁悬浮力先增大后减小, 最大超导磁悬浮力出现的位置随着内径的增大而变大. 这说明超导磁悬浮力与空心圆柱形永磁体内径和应用外磁场的磁场分布紧密相关, 内径的改变直接影响超导体内磁场分布和强度变化, 可调节超导磁悬浮力大小. 在实际应用中, 只有充分考虑空心圆柱形永磁体结构参数, 优化应用外磁场分布, 获得较大的磁场强度, 才能有效地提高超导体的磁悬浮力特性.

参考文献

- [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] Takahashi K, Ainslie M D, Fujishiro H, Naito T 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **27** 1
- [8] Shi Y, Babu N H, Iida K, Cardwell D A 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2984
- [9] Yang W M, Zhou L, Feng Y 1999 *Chin. J. Low. Temp. Phys.* **21** 351 (in Chinese) [杨万民, 周廉, 冯勇 1999 低温物理学报 **21** 351]
- [10] Wang M, Yang W M, Yang P T, Wang X M, Zhang M, Hu C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 227401 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 杨芑焘, 王小梅, 张明, 胡成西 2016 物理学报 **65** 227401]
- [11] Zhu M, Ren Zh Y, Wang S Y 2002 *Chin. J. Low Temperature Phys.* **24** 213 (in Chinese) [朱敏, 任仲友, 王素玉 2002 低温物理学报 **24** 213]
- [12] Carles N, Alvaro S 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214507
- [13] 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]
- [14] Alvaro S, Carles N 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214506
- [15] Yang W M, Zhou L, Feng Y 2001 *Physica C* **34** 5
- [16] Nuria D V, Alvaro S, Enric P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 042503
- [17] Ma J, Yang W M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 077401 (in Chinese) [马俊, 杨万民 2011 物理学报 **60** 077401]
- [18] Ma J, Yang W M, Li G Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李国政 2011 物理学报 **60** 027401]
- [19] Ma J, Yang W M, Li J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李佳伟 2012 物理学报 **61** 137401]
- [20] Ma J, Yang W M, Wang M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 227401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 王妙 2013 物理学报 **62** 227401]
- [21] Cheng X F, Yang W M, Li G Z 2010 *Chin. J. Low Temperature Phys.* **32** 150 (in Chinese) [程晓芳, 杨万民, 李国政 2010 低温物理学报 **32** 150]
- [22] Yang W M, Chao X X, Shu Z B, Zhu S H, Wu X L, Bian X B, Liu P 2006 *Physica C* **347** 445
- [23] Cheng S L, Yang W M, Zhou L, Li J W 2014 *Physica C* **496** 39
- [24] Guo L P, Yang W M, Guo Y X, Chen L P, Li Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077401 (in Chinese) [郭莉萍, 杨万民, 郭玉霞, 陈丽平, 李强 2015 物理学报 **64** 077401]
- [25] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Yang P T 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 035004

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor*

Ma Jun^{1)†} Chen Zhang-Long¹⁾ Xian Tao¹⁾ Wei Xue-Gang¹⁾ Yang Wan-Min^{2)‡}
Chen Sen-Lin²⁾ Li Jia-Wei²⁾

1) (College of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

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

(Received 9 November 2017; revised manuscript received 26 January 2018)

Abstract

The influence of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on the levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor is investigated by measuring the levitation force between the hollow cylindrical permanent magnet and the single domain GdBCO bulk superconductor. The results show that the levitation force is closely related to the inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnet when the inner diameter (d) increases from 0 mm to 26 mm (minimum measuring gap distance $Z = 2$ mm), and all the superconducting magnetic levitation force curve shows magnetic hysteresis phenomenon. With the increase of the inner diameter of the hollow cylindrical permanent magnet, the levitation force at a minimum distance decreases gradually from 14.8 N at $d = 0$ mm to -0.1 N at $d = 26$ mm. The levitation force at the minimum gap distance is negative when $d \geq 20$ mm. When $0 \text{ mm} \leq d < 5$ mm, the location of maximum magnetic levitation force of the superconductor is at the minimum spacing. But the levitation force first increases and then decreases when $d \geq 5$ mm. The larger magnetic field strength of the superconductor can be obtained, and the levitation force can be effectively improved by the scientific and reasonable designing of the permanent magnet structure. The results have certain guiding significance for designing and optimizing the magnetic suspension bearing system, ring track and superconductor.

Keywords: single domain GdBCO bulk, hollow cylindrical permanent magnet, levitation force

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172418

* Project supported the Natural Science Foundation of Qinghai Province, China (Grant No. 2016-ZJ-915), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51167016, 51342001), 135 High-Level Personnel in Qinghai Province, and Central Colleges of Basic Scientific Research Funded Special Fund Operating Expenses, China (Grant No. GK201305014).

† Corresponding author. E-mail: mjun7302@163.com

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