

# 垂向磁场变化量对高温超导块材悬浮力特性的影响

胡尊祥, 邓自刚<sup>†</sup>, 刘珍, 黄志辉

西南交通大学, 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031

收稿日期: 2021-01-25; 接收日期: 2021-02-18

**【摘要】** 高温超导体因其无源自稳定的特性, 受到许多学者的重视, 具有广阔的应用前景. 目前针对高温超导块材悬浮性能的研究主要集中于由永磁体产生的低磁场环境. 本文基于超导磁体平台提供的强磁场环境, 通过改变高温超导块材不同的场冷高度, 实验研究了高温超导块材悬浮力与垂向磁场变化量的关系. 研究结果表明随着垂向磁场变化量的增加, 高温超导块材的悬浮力增长趋缓, 并最终出现悬浮力饱和的现象. 本文还对比了 YBCO 和 Gd-BCO 两种不同材料超导块材的悬浮性能, 结果发现 GdBCO 的悬浮力在强磁场环境中表现出更大的潜力. 这为高温超导磁浮在强磁场中的应用奠定了基础, 通过更加合理地调节磁场的分布, 可以更好地发挥高温超导块材的悬浮性能潜力.

**关键词:** 高温超导块材, 悬浮力, 垂向磁场, 超导磁体

**PACS:** 7425, 7490, 8471

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.06.002

## Effect of Vertical Magnetic Field Variation on Levitation Force Characteristics of High Temperature Superconducting Bulk

HU Zunxiang, DENG Zigang, LIU Zhen, HUANG Zhihui

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

Received date: 2021-01-25; accepted date: 2021-02-18

**【Abstract】** Due to the unique flux pinning characteristic and the advantages of the integration of levitation/guidance and passive self-stabilization, high temperature superconducting (HTS) materials have attracted the attention of many scholars. At present, the researches on the levitation performance of HTS bulks mainly focused on the low magnetic field environment generated by permanent magnets. In this paper, based on the strong magnetic field environment provided by a superconducting magnet platform, the relationship between the levitation force of the HTS bulk and the variation of the vertical magnetic field was experimentally studied by changing the different field cooling heights of the HTS bulk. The results show that the increment of levitation force decreases with the increase of vertical magnetic field variation, and finally the phenomenon of levitation force saturation appears. Moreover, the levitation performance of two kinds of HTS bulks with different materials, YBCO and GdBCO, were compared, and it was found that GdBCO bulk exhibited greater potential in levitation force performance in strong magnetic field environment. This lays a foundation for the application of HTS maglev in strong magnetic field. By adjusting the distribution of magnetic field more reasonably, the levitation potential of HTS bulk can be better exploited.

**Keywords:** High temperature superconductor, Levitation force, Vertical magnetic field, Superconducting magnet

---

<sup>†</sup> deng@swjtu.cn

**PACS:** 7425, 7490, 8471

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.06.002

**Reference method:** HU Zunxiang, DENG Zigang, LIU Zhen, HUANG Zihui, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0266 (2020)

## 1 引言

高温超导体无需主动控制即可实现稳定的自悬浮,主要归功于这种第二类非理想超导体的高临界电流与磁通钉扎效应.人们利用这种自稳定的物理特性,将高温超导体应用于磁悬浮列车、超导轴承等诸多领域<sup>[1-3]</sup>.由于现今永磁体制备技术的限制,没有办法提供较强的磁场环境.这也限制了高温超导体高临界电流性能的发挥.例如在高温超导磁悬浮列车系统中,由于永磁轨道磁场的磁场强度和结构的限制,虽然轨道表面磁通最高可达 1.5 T<sup>[4]</sup>,但在永磁轨道上方 10 mm 处(列车工作高度)磁场仅有 0.5 T 左右,在场冷工况下无法使高温超导块材达到感应电流密度上限,这限制了对高温超导块材悬浮力特性与磁场关系的系统研究.以往学者只能基于永磁体所形成磁场分析块材与  $B_z$ (垂向磁场)、 $dB_z/dz$ (垂向磁场梯度)之间的关系,得出块材悬浮力与垂向磁场、磁场梯度呈现出线性增长关系的结论<sup>[5-6]</sup>.但由于永磁轨道上的磁场分布较为复杂,且不同结构的永磁轨道磁场分布也各不相同<sup>[7]</sup>,因此结论集中在如何获得并使用尽可能大的悬浮力和导向力.为系统性地研究高温超导块材悬浮力与外磁场的关系,人们开始寻找一种高磁场环境来研究高温超导体的悬浮性能.从 20 世纪 90 年代起,日本的研究学者们开始使用超导磁体为高温超导块材提供外磁场环境,在强磁场环境中激发块材悬浮力达到

1000 N 以上<sup>[8-9]</sup>,近些年,也有西南交通大学研究小组利用超导磁体的磁场变化研究  $B_z$ 、 $dB_z/dz$  与块材悬浮力的线性关系以及强磁场下块材的鱼尾效应<sup>[10-11]</sup>.然而,垂向磁场变化量对块材悬浮力性能的影响仍然需要进一步的研究.

本文基于超导磁体系统所提供的强磁场环境,通过改变高温超导块材的场冷高度,研究高温超导块材悬浮力与垂向磁场变化量的关系,以探究垂向磁场变化量的改变对悬浮力的影响.实验研究发现了垂向磁场变化量对块材悬浮力的增益关系,得到了高温超导块材悬浮力和垂向磁场变化量的关系图,这为高温超导磁浮在高磁场下的应用奠定了基础,可以通过更加合理地调整磁场分布,从而更好地发挥高温超导块材的悬浮性能潜力.

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置

本文所基于的外磁场环境,由超导磁体提供,型号为 5 T Cryogen-Free Magnet (CRY-CFM-5 T-300-H3, Cryogenic Limited).超导磁体系统主要由水冷机、压缩制冷机、超导磁体主体组成.超导磁体主体高度为 800 mm,室温腔直径 300 mm.在此基础上,实验平台利用伺服电机可以实现在超导磁体中心轴线方向 500 mm 行程的位移.超导磁体实验装置具体结构如图 1 所示.

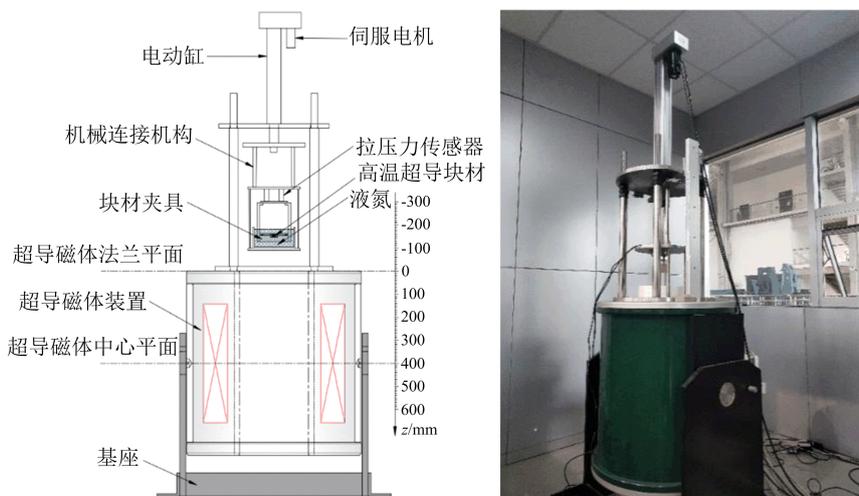


图 1 实验装置二维示意图(左)和实体图(右)

超导磁体由于其结构特性,超导磁体内部磁场沿腔体中心平面上下对称,横向磁场整体偏小,腔体

中心的横向磁场几乎为零.我们利用高精度高斯计测量了超导磁体室温腔的磁场分布,具体内部磁场

分布如图 2 所示. 根据测量结果发现, 在  $z$  轴坐标大于 320 mm 时, 横向磁场小于 10 mT, 由之前的在超导磁体开展的实验研究已知, 在这一区域块材的悬浮力基本为零<sup>[12]</sup>.

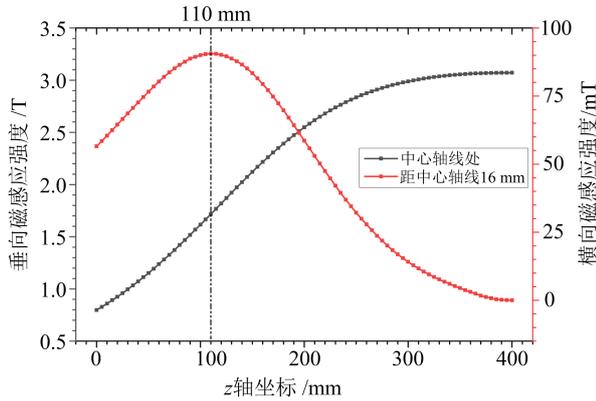


图 2 3 T 工况中超导磁体内部腔体的横垂直向磁场分布

由公式(1)可知在块材场冷工况下, 内部感应电流密度  $J$ 、横向磁场  $B_r$  都会对块材悬浮力有直接影响. 为同时兼顾垂直向磁场变化量和终点位置处的横向磁场, 本文选定在超导磁体中心磁场强度设定为 3 T 的工况下, 距离法兰盘平面零点 110 mm 处为块材运动终点, 终点处的垂直向磁场为 1.716 T, 横向磁场为 89.4 mT.

$$F_{Lev} = \int J \times B_r dv \quad (1)$$

式中  $F_{lev}$  是高温超导块材悬浮力(N);  $J$  是高温超导块材内部感应电流密度 ( $A/m^2$ );  $B_r$  是超导磁体内部横向磁场强度(T).

为了进一步研究垂直向磁场变化对块材悬浮力影响的规律性, 本文对五块尺寸、材料各不相同的块材进行了比较实验. 块材均采用顶部熔融织构法制备,

表 2 场冷位置处的垂直向磁场数据

| 场冷高度 (mm)        | 10    | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 垂直向磁感应强度 (T)     | 1.616 | 1.518 | 1.327 | 1.152 | 0.996 | 0.860 |
| $\Delta B_z$ (T) | 0.100 | 0.198 | 0.389 | 0.564 | 0.720 | 0.856 |
| 场冷高度 (mm)        | 120   | 150   | 180   | 200   | 250   | 300   |
| 垂直向磁感应强度 (T)     | 0.735 | 0.576 | 0.456 | 0.384 | 0.253 | 0.169 |
| $\Delta B_z$ (T) | 0.981 | 1.140 | 1.260 | 1.332 | 1.463 | 1.547 |

待块材充分冷却后, 以 2 mm/s 的速度匀速下降至终点位置处, 通过这种方式来实现块材在不同

具体形状尺寸等参数如表 1 所示, 图 3 为块材的实物图, 其中编号 YR64、YC31 两块块材由德国 ATZ 公司生产, 编号 YC41、GC31、GC41 由英国剑桥大学提供.

表 1 高温超导块材实验样品参数

| 块材编号 | 材料    | 形状  | 籽晶数 | 块材尺寸 (mm)                |
|------|-------|-----|-----|--------------------------|
| YC31 | YBCO  | 圆柱  | 单籽晶 | $\phi 31 \times 14.0$    |
| YC41 | YBCO  | 圆柱  | 单籽晶 | $\phi 41 \times 13.8$    |
| YR64 | YBCO  | 长方形 | 双籽晶 | $64 \times 32 \times 13$ |
| GC31 | GdBCO | 圆柱  | 单籽晶 | $\phi 31 \times 14.5$    |
| GC41 | GdBCO | 圆柱  | 单籽晶 | $\phi 41 \times 12.4$    |



图 3 实验块材实物图

## 2.2 实验过程

将超导磁体磁场强度设置为 3 T, 待升磁完毕后, 将块材放置在夹具内(块材和超导磁体内部腔体同轴心), 通过伺服电机分别移动块材至距终点位置上方 10 mm、20 mm、……、300 mm 处(各场冷位置处垂直向磁感应强度和各位置到 110 mm 终点坐标处的垂直向磁感应变化  $\Delta B_z$  如表 2 所示), 之后向低温容器中倒入液氮, 浸泡块材 20 分钟.

磁场位置的场冷, 从而研究不同的垂直向磁场变化对块材悬浮力产生的影响. 由于高温超导块材运动结

束时,悬浮力会有较为明显的衰减,故在块材运动结束后静置 10 分钟,待块材弛豫一段时间,悬浮力基本稳定后,再测量其悬浮力的大小.

### 3 结果与讨论

本文在距离终点不同高度处对编号 YC31 块材进行场冷,并记录记录运动过程中的悬浮力变化,具体数据如图 4 所示.从图 4 中可以看到高温超导块材悬浮力的增长具有明显的边际递减效应,场冷工况下高温超导块材经历的垂向磁场变量达到一定值后,悬浮力便会饱和达到峰值.我们选定达到实验测得的超过最大悬浮力的 99% 即为悬浮力饱和数值(23.84 N),此时的磁场为悬浮力饱和磁场 0.720 T.

编号为 YC31 的 YBCO 块材在场冷位置到终点的垂向磁场变化量 ( $\Delta B_z$ ) 为 0.389 T 时,悬浮力就已达峰值的 93.4%;0.564 T 时,达峰值的 98.7%,而当垂向磁场变化量  $\Delta B_z \geq 0.72$  T 后,悬浮力较峰值的变化没有超过 1%,各场冷位置具体的

悬浮力以及与峰值的比值如表 3 所示.由于块材运动终点位置处横向磁场没有产生变化,所以实验中块材悬浮力表现与块材内部感应电流  $J$  值密切相关,而图 4 中的变化趋势表明块材在磁场变化中产生感应电流会随垂向磁场变化量的增加迅速提升而随后变化趋缓,直至饱和.此时再单纯通过提高场冷高度,增加其垂向磁场变化量,悬浮力并不产生变化,换句话说,在强磁场中单纯的垂向磁场的增加已无法为块材悬浮力带来增益.

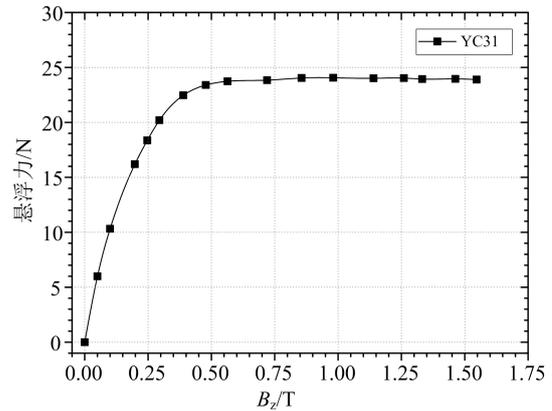


图 4 YC31 悬浮力与垂向磁场变化量的关系

表 3 不同垂向磁场变化量与 YC31 块材悬浮力对比

|                         |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta B_z$ (T)        | 0.050 | 0.100 | 0.198 | 0.247 | 0.295 | 0.389 | 0.478 | 0.564 |
| $F_{lev}$ (N)           | 5.99  | 10.32 | 16.2  | 18.36 | 20.2  | 22.47 | 23.4  | 23.74 |
| $F_{lev}/F_{lev}^{max}$ | 24.9% | 42.9% | 67.3% | 76.3% | 84.0% | 93.4% | 97.3% | 98.7% |
| $\Delta B_z$ (T)        | 0.720 | 0.856 | 0.981 | 1.140 | 1.260 | 1.332 | 1.463 | 1.547 |
| $F_{lev}$ (N)           | 23.84 | 24.04 | 24.06 | 24.01 | 24.03 | 23.94 | 23.96 | 23.89 |
| $F_{lev}/F_{lev}^{max}$ | 99.1% | 99.9% | 100%  | 99.8% | 99.9% | 99.5% | 99.6% | 99.3% |

随后我们对比了三种不同的 YBCO 块材,实验测试结果如图 5 所示,悬浮力的边际效应并无变化.对于 YBCO 块材来讲,形状和体积以及籽晶数量的改变,其悬浮力达到峰值的位置并没有明显的变化.相比于编号 YC31 号块材,YC41 号块材体积增大 72.4%,YR64 块材体积增大 152.0%,而三块块材饱和点磁场均为 0.720 T,悬浮力最大值都约在 0.856 T 的位置处测得.由此可推断,YBCO 块材在实际多块材组合应用中,其悬浮力饱和点的垂向磁场变化量  $\Delta B_z$  基本一致,与其形状、体积的变化关系较小.

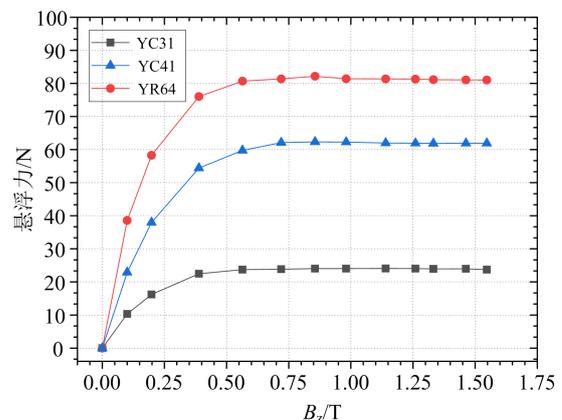


图 5 YBCO 块材不同尺寸、不同形状块材悬浮力实验数据对比图

图 6 是 YBCO 和 GdBCO 不同编号的块材在超导磁体中的悬浮力变化,由图 6 可以看出,在  $\Delta B_z$  较小的情况下,GdBCO 与 YBCO 悬浮力之间的差距较小,而随着  $\Delta B_z$  的增加,GdBCO 的悬浮力大小明显的与 YBCO 拉开差距.这表明随着场冷高度的增加,垂向磁场变化量的提升对 GdBCO 悬浮力增益效果要远好于 YBCO. YBCO 块材普遍在垂向磁场变量达 0.720 T 时,悬浮力便已饱和,而 GdBCO 仍有明显的悬浮力增长趋势. GdBCO 的悬浮力在 1 T 垂向磁场变化量时,已达至 YBCO 块材悬浮力的 200%,且随着场冷高度的继续提高,GdBCO 的悬浮力仍有继续增长的趋势,直到  $\Delta B_z$  达到 1.463 T 后,悬浮力才达到饱和点.

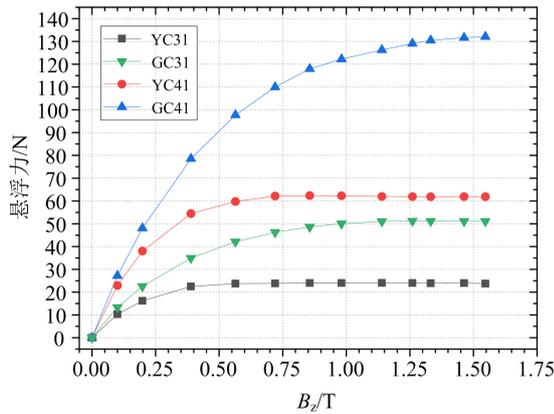


图 6 YBCO 与 GdBCO 块材的悬浮力实验数据对比图

通过对比相同 YBCO 和 GdBCO 块材在轨道场上方 60 mm 零场冷、30 mm 场冷运动到轨道上方 12 mm 高的悬浮力数据与超导磁体内部测得的悬浮力<sup>[13]</sup>,具体数据如表 4 所示.两种不同材料的块材仅有 1%左右的悬浮力差距,而在超导磁体中,直径  $\phi 41$  mm 的 GdBCO 的最大悬浮力要比同尺寸的 YBCO 高 111.8%.这一方面说明了现有的永磁轨道上方 10 mm 的磁场还远未达发挥出块材的悬浮力性能,没有展现出 YBCO 和 GdBCO 的性能差距,另一方面也说明在高温超导磁悬浮的应用中,GdBCO 更加适用于强磁外场中的应用.

观察图 6 中 YBCO 和 GdBCO 块材悬浮力对比曲线可以发现两种材质块材之间的悬浮力饱和点并不相同,由 GC31 和 GC41 两块 GdBCO 块材的悬浮力饱和点可以发现,两者横坐标差别较大,而这一现象与 YBCO 各尺寸块材间的规律并不相同,有理由推断高温超导块材除材料影响之外,块材本身仍

表 4 YBCO 和 GdBCO 轨道磁场与超导磁体磁场的悬浮力对比

|      | 轨道 60 mm<br>零场冷悬<br>浮力 (N) <sup>[13]</sup> | 轨道 30 mm<br>场冷悬<br>浮力 (N) <sup>[13]</sup> | 超导磁体<br>悬浮力<br>峰值 (N) |
|------|--|---|-----------------------|
| YC41 | 120.5                                      | 54.4                                      | 62.35                 |
| GC41 | 121.7                                      | 55  | 132.08                |
| 差值   | 0.9%                                       | 1.1%                                      | 111.8%                |

有决定其悬浮力饱和点的影响因素.根据以往研究可知,在温度、气压、外磁场不改变的情况下,块材自身临界电流密度  $J_c$  不会发生太大的变化,而由于块材内部缺陷、杂质等影响,每个块材实际性能表现都各不相同,很多学者通过测量块材俘获磁通来检测块材性能<sup>[14-15]</sup>.而通过比较 YC41、GC31、GC41 三块块材的上下表面的俘获磁通,发现块材悬浮力饱和点的磁场与其最大俘获磁通也有一定的关联性.两者对比如表 5 所示.虽然测得 GC31 号块材饱和点磁场略大于其俘获磁通峰值,但考虑到场冷位置之间距离的分散度,差值属于误差范围之内.而对比悬浮力饱和点的垂向磁场变量和最大俘获磁通,可以发现俘获磁通能力越强的块材达到悬浮力饱和点所需的垂向磁场变化量越大,悬浮力提升也越大.

表 5 块材悬浮力饱和点磁场和最大俘获磁通对比

| 编号   | $B_{max}^{top}$ <sup>[13]</sup> | $B_{max}^{bottom}$ <sup>[13]</sup> | $F_{lev}$ 饱和点磁场 |
|------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| YC41 | 0.94 T                          | -0.79 T                            | 0.72 T          |
| GC31 | 1.08 T                          | -0.77 T                            | 1.14 T          |
| GC41 | 1.47 T                          | -1.34 T                            | 1.46 T          |

## 4 结 论

本文通过控制不同的垂向磁场变量研究了高温超导块材悬浮力的变化规律,结果发现较低的垂向磁场变化量对块材悬浮力有较明显的线性增益,但随着垂向磁场变化量的增加,块材内部感应电流逐渐饱和,块材表现出悬浮力饱和的现象.具体结论如下:

1. 在强磁场环境中,随着高温超导块材所经历垂向磁场变化量的增加,其内部感应电流逐渐饱和,无法对悬浮力产生增益,从而在宏观上表现为悬浮力的饱和现象.对于实验所用的 YBCO 块材,在横向磁场不变的情况下,0.72 T 的垂向磁场变化量已

基本使其内部感应电流达到饱和,此时单纯的通过增加垂向磁场变化量已无法提高其悬浮力。

2. 对于现有的永磁轨道类的磁场环境来讲,其实际应用中的垂向磁场峰值变化仅有 0.3 T - 0.4 T,并且由于轨道上方磁场分布的不均匀,垂向磁场变化量远未达到块材的悬浮性能瓶颈,通过增加垂向磁场的强度仍然是一种有效提升高温超导块材悬浮力的有效手段。

3. 对比了 YBCO 和 GdBCO 块材在强磁场中的表现,发现较高的垂向磁场变化量能充分发挥出 GdBCO 块材的材料性能优势,相比于永磁轨道类的磁场环境,在强磁场中 GdBCO 块材的悬浮力要远大于 YBCO. 这为一些在强磁场环境中需要超导

磁浮的应用提供一种新的选择。

但由于超导磁体结构限制,本文只研究了垂向磁场对块材悬浮力的影响,但因为超导磁体内部横向磁场偏小,无法探究横向磁场对块材悬浮力的影响,后续可以通过合适的平台来设计探究横向磁场对块材悬浮力的作用效果. 同时受限于测量精度的限制,块材俘获磁通和悬浮力饱和点的垂向磁场变化量之间的关系仍未明确,有待进一步研究。

#### 致谢:

作者在此向借用实验所用的超导块材的英国剑桥大学 Cardwell 教授小组表示感谢,并对在研究过程中提供实验块材俘获磁通和轨道磁场悬浮力数据的同门张威风师兄表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 王家素,王素玉. 高温超导磁悬浮列车研究综述[J]. 电气工程学报. 2015, **10**(11): 1-10.
- [2] 余志强,张国民,邱清泉,等. 高温超导磁悬浮轴承的研究进展[J]. 电工电能新技术. 2014, **33**(07): 55-61.
- [3] Hull J R. Using high-temperature superconductors for levitation application[J]. JOM (1989). 1999, **51**(7): 13.
- [4] 秦公平,赵立峰,杨焯,等. 永磁轨道上高温超导块材排布方式与悬浮力关系的研究[J]. 低温物理学报. 2010, **32**(04): 257-261.
- [5] 任仲友,王家素,王素玉,等. NdFeB 永磁轨道上 YBaCuO 块材悬浮力与磁场和磁场梯度关系的研究[J]. 低温物理学报. 2002(04): 293-297.
- [6] Liu W, Wang S Y, Jing H, et al. Levitation performance of YBCO bulk in different applied magnetic fields[J]. PHYSICA C: SUPERCONDUCTIVITY AND ITS APPLICATIONS. 2008, **468**(13): 974-977.
- [7] 王璐琳,荆华,刘璐,等. 三种永磁轨道上 YBCO 的高温超导磁悬浮性能[J]. 低温与超导. 2007(04): 300-303.
- [8] Suzuki T, Araki S, Koibuchi K, et al. A study on levitation force and its time relaxation behavior for a bulk superconductor-magnet system [J]. PHYSICA C-SUPERCONDUCTIVITY AND ITS APPLICATIONS. 2008, **468**(15-20): 1461-1464.
- [9] Ito E, Suzuki T, Sakai T, et al. Levitation forces of bulk RE - Ba - Cu - O in high magnetic fields[J]. Physica. C, Superconductivity. 2006, 445-448: 412-416.
- [10] Jiang J, Gong Y M, Wang G, et al. Levitation forces of a bulk YBCO superconductor in gradient varying magnetic fields[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS B. 2015, **29**(154204725-26SI).
- [11] 闫兆盈,刘坤,杨文姣,等. 高温超导体在强磁外场下的磁悬浮性能仿真研究[J]. 低温物理学报. 2018, **40**(4): 46-50.
- [12] Zhao B, Deng Z, Hu Z, et al. Levitation Force Characteristics of High-Temperature Superconducting Bulks in a High Magnetic Field[J]. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. 2020, **30**(68003054).
- [13] Zhang W, Deng Z, Zhang Y, et al. Magnetic levitation and guidance performance of Y-Ba-Cu-O and Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors under low ambient pressure[J]. JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS. 2019, **52**(36500136).
- [14] Shi Y, Bergamo-Andreis G, Dennis A R, et al. The growth and superconducting properties of RE-Ba-Cu-O single grains with combined RE elements (RE = Gd and Y)[J]. Superconductor science & technology. 2020, **33**(3): 35003.
- [15] 徐克西,郑明辉,刘宜平,等. 块状高温超导体俘获磁通密度实验测试方法[J]. 低温物理学报. 2015, **37**(02): 110-116.