

# 悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力研究<sup>\*</sup>

史景文<sup>1, 2</sup>, 朱理铭<sup>1, 2</sup>, 周大进<sup>1, 2†</sup>, 程翠华<sup>4</sup>, 赵勇<sup>1, 2, 3</sup>

1. 福建师范大学物理与能源学院, 福建福州 350117;

2. 福建省先进高场超导材料与工程协同创新中心, 福建福州 350117;

3. 西南交通大学超导与新能源研究开发中心, 四川成都 610031;

4. 成都大学高等研究院, 四川成都 610106

收稿日期: 2021-12-02; 接收日期: 2021-12-29

**【摘要】** 为了探索悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力变化规律及影响因素, 建立高温超导磁浮系统的理论模型, 推导了纵向力表达式, 进一步搭建实验平台, 在不同通过速度、场冷高度和工作高度条件下, 对悬浮杜瓦脱离与进入永磁轨道时受到的纵向力进行测试. 理论与实验结果表明: 悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处时受到纵向力作用, 完全脱离前与进入后为阻力, 完全脱离后与进入前为主动动力; 在低速运行范围内, 通过速度对纵向力的影响不大; 随着工作高度的降低, 纵向力增大; 随着场冷高度的升高, 纵向力增大. 以上研究为高温超导磁浮系统的切换与发射提供设计参考.

**关键词:** 高温超导块, 永磁轨道, 纵向力, 脱离与进入

**PACS:** 74.81.-g, 74.25.ha

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2021.05.008

## Study on the Longitudinal Force of Levitation Dewar Running through the Breaking Border of Permanent Magnet Guideway

SHI Jingwen<sup>1, 2</sup>, ZHU Liming<sup>1, 2</sup>, ZHOU Dajin<sup>1, 2†</sup>, CHENG Cuihua<sup>4</sup>, ZHAO Yong<sup>1, 2, 3</sup>

1. College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;

2. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center for Advanced High-Field Superconducting Materials and Engineering, Fuzhou 350117, China;

3. Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

4. Institute of Advanced Study, Chengdu University, Chengdu 610106, China

Received date: 2021-12-02; accepted date: 2021-12-29

**【Abstract】** In order to explore the law of longitudinal force change and influencing factors of the levitation dewar running through the breaking border of permanent magnet guideway, the theoretical model of the high-temperature superconductor maglev system was established, the longitudinal force expression was deduced, and the experimental platform was further built. Under the conditions of different running speed ( $V$ ), cooling height ( $CH$ ) and working height ( $WH$ ), test the longitudinal force of the levitation dewar when it leaves and enters the permanent magnet guideway. The theoretical and experimental results show that the levitation dewar is subjected to the longitudinal force through the breaking border of permanent magnet guideway, and completely before detachment and after enter

<sup>\*</sup> 福建省科技厅工业引导性(重点)项目(批准号:2020H0013)与磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室开放课题基金资助的课题.

<sup>†</sup> zdj007008009@163.com

are resistance, completely after detachment and before enter are thrust; In the range of low-speed running, the running speed has little effect on longitudinal force; With the working height decreases, the longitudinal force increases; With the cooling height increases, the longitudinal force increases. The above research provides design reference for the switching and launching of the high-temperature superconductor maglev system.

**Keywords:** High temperature superconductor, Permanent magnet guideway, Longitudinal force, Detachment and entry

**PACS:** 74.81.-g, 74.25.ha

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2021.05.008

**Reference method:** SHI Jingwen, ZHU Liming, ZHOU Dajin, CHENG Cuihua, ZHAO Yong, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0311 (2021)

## 1 引言

高温超导磁悬浮系统通过悬浮杜瓦与永磁轨道间的相互作用力<sup>[1]</sup>,实现系统在静止、低速、高速、超高速状态下的自稳定悬浮与导向,因此广泛应用于轨道交通、磁悬浮列车、磁浮轴承、飞轮储能和磁浮发射等领域<sup>[2-7]</sup>.由于没有机械接触,基于高温超导磁悬浮技术的磁悬浮列车可以达到更高的运行速度,2018年底,福建师范大学建成标准轨距永磁轨道线路;2021年初,西南交通大学下线高温超导磁悬浮工程样车,再一次证明了高温超导磁悬浮技术在高速交通领域、超高速发射等领域具有广阔的应用前景.永磁轨道的应用外磁场沿纵向的分布特性,直接影响到磁浮系统的悬浮性能、安全性及可靠性.在实际的应用中,受永磁轨道成本限制,高温超导磁浮系统主要用于低速起步或高速发射阶段,在与其他系统的切换或发射过程中,永磁轨道纵向末端发生开断,导致永磁轨道上方磁场分布发生衰减,从而带来磁通突变和通过阻力,严重时损坏悬浮杜瓦,引起磁浮系统发生振动<sup>[8-9]</sup>,降低系统可靠性.在高速运行的条件下,这种振动将会进一步加强,其危害是不可估量的,因此研究高温超导磁浮系统永磁轨道开断时悬浮杜瓦的通过性能及其纵向力规律和成因具有重要意义.

目前,针对高温超导磁浮系统永磁轨道开断通过性能的研究相对较少,永磁轨道的开断可以看作是永磁轨道纵向间隙缺陷中的一种极端情况,文献[10-11]研究永磁轨道外磁场纵向不均匀性下的高温超导磁悬浮系统性能,揭示了永磁轨道组装缺陷对外磁场分布及悬浮力的影响;文献[12]报道了一种高温超导磁悬浮助推发射系统,通过理论和仿真的方法,设计、开发了发射系统中悬浮导向系统方案.综上所述,为了进一步研究、探索高温超导磁悬浮系统的过渡切换及发射过程,有必要从理论和实验两方面,对悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道开断处的动态性能进行更深入的研究.

在本文中,首先建立了高温超导磁浮系统的理论模型,对悬浮杜瓦通过永磁轨道的纵向力进行了理论推导与分析.进一步,搭建了纵向力测试实验平台,依次对悬浮杜瓦在不同通过速度、不同场冷高度和不同工作高度通过永磁轨道开端处的纵向力进行实验研究,同时发现了纵向力对悬浮杜瓦的影响,本

文的研究结果对高温超导磁浮系统发射及其与其他系统间的切换应用具有重要的意义.

## 2 理论与实验

### 2.1 理论分析

基于经典电磁理论与高温超导块材的非线性电阻率,采用  $E$ - $J$  本构方程的幂指数模型,建立高温超导磁浮系统的理论模型,如表达式(1)、(2)、(3)所示.

$$\vec{J} = \nabla \times \vec{H} \quad (1)$$

$$\vec{E} = E_0 \left( \frac{|\vec{J}|}{J_c} \right)^n \frac{\vec{J}}{|\vec{J}|} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

式中  $\vec{H}$ 、 $\vec{E}$ 、 $\vec{J}$  和  $J_c$  分别是外磁场,高温超导块材的电场强度,电流密度和临界电流密度,  $E_0$  和  $n$  为常数.

根据上述方程组,选取其中一个场量作为变量,给定边界条件后,可以对系统进行求解.进一步,通过洛伦兹力的积分公式,计算得到永磁轨道与高温超导块间的电磁力  $\vec{F}$  为:

$$\vec{F} = \iiint_V (\vec{J} \times \vec{B}) dV \quad (4)$$

假设  $z$  轴沿永磁轨道表面法向,  $y$  轴沿截面方向,  $x$  轴沿轨道运行方向,则电磁力  $\vec{F}$  沿  $z$  轴的分量产生悬浮力  $F_z$ ,沿  $y$  轴的产生导向力  $F_y$ 、沿  $x$  轴的分量产生纵向力  $F_x$ ,根据式(4)与  $B$ - $H$  本构方程展开后可以得到:

$$F_z = \mu \iiint_V (J_x H_y - J_y H_x) dV \quad (5)$$

$$F_y = \mu \iiint_V (J_z H_x - J_x H_z) dV \quad (6)$$

$$F_x = \mu \iiint_V (J_y H_z - J_z H_y) dV \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为介质磁导率,根据式(1)所示的安培定理展开,得到电流密度沿  $y$  轴与  $z$  轴的分量,进一步,代入式(7)可以得到纵向力  $F_x$  的表达式为:

$$F_x = \mu \iiint_V \left( H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} + H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} - H_z \frac{\partial H_z}{\partial x} - H_y \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) dV \quad (8)$$

根据上述表达式(8),假设永磁轨道沿纵向无限长、外磁场沿纵向均匀分布,其纵向场分量  $H_x$  为

零,且垂直场分量与横向场分量沿纵向的变化率为零,纵向力  $F_x$  为零. 当永磁轨道沿纵向开断时,将导致边界附近的纵向场分量  $H_x$  与垂直场分量及横向场分量沿纵向的变化率不为零,悬浮杜瓦通过时将受到纵向力的作用.

## 2.2 实验装置

为了测试悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力,搭建了如图 1 所示的纵向力测试实验平台,整体由水平滑台模组、垂直滑台模组、力传感器、悬浮杜瓦和永磁轨道组成,悬浮杜瓦底部铺设高温超导块

材,永磁轨道设置在水平滑台模组中央上方,进一步地,通过力传感器与水平滑台模组移动平台连接,永磁轨道正上方放置悬浮杜瓦,悬浮杜瓦与垂直移动横梁连接,通过垂直驱动电机调节垂直移动横梁的高度,间接控制永磁轨道和悬浮杜瓦之间的场冷高度和工作高度,通过水平驱动电机调节永磁轨道的水平移动速度与行程,间接控制悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的水平速度和位置,同时,力传感器对悬浮杜瓦动态运行过程中受到的纵向力进行测量,并通过上位机对测试数据进行记录和储存.

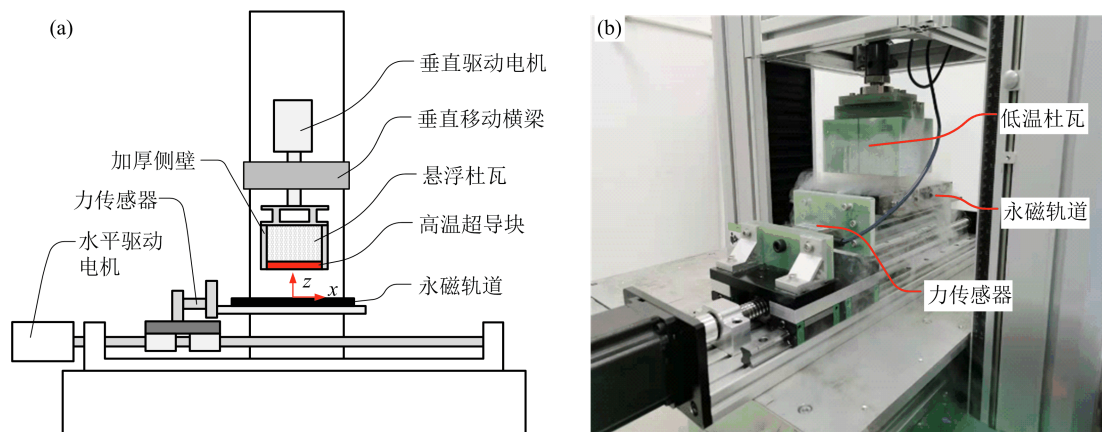


图 1 纵向力测试实验平台(a)结构原理图;(b)实验装置实物图

## 2.3 实验方法

如图 2 所示的纵向力测试原理图,高温超导块采用规格为  $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$  的单籽晶方形超导体,设置于悬浮杜瓦底部、永磁轨道中央正上方,沿

纵向铺设 2 列,纵向长度为 80 mm. 永磁轨道沿截面方向采用海尔贝克阵列结构,纵向长度 200 mm. 悬浮杜瓦的场冷高度为 CH,负载工作高度为 WH,水平初始位置  $X=0 \text{ mm}$ ,纵向行程  $S=240 \text{ mm}$ .

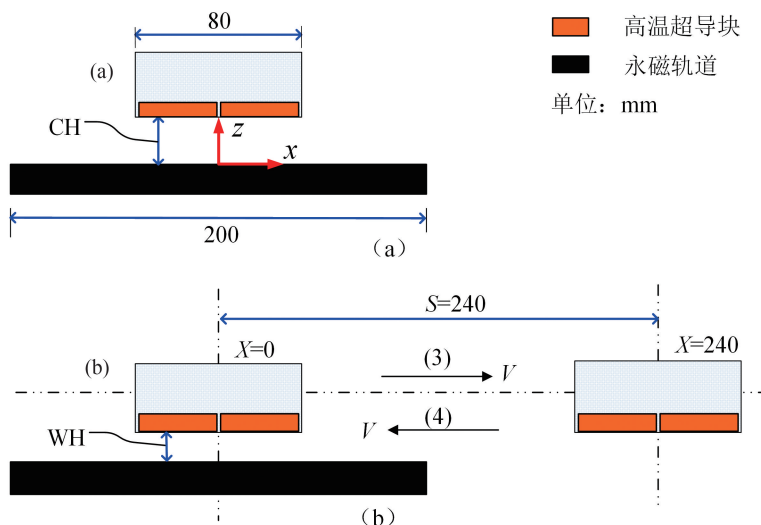


图 2 纵向力测试原理示意图,(a)场冷过程;(b)脱离过程与进入过程

纵向力测试过程主要包括高温超导磁浮系统的场冷过程及悬浮杜瓦脱离与进入永磁轨道的过程,具体步骤为:

(1)场冷过程,如图 2(a)所示,使悬浮杜瓦位于永磁轨道中心正上方,调节垂直移动横梁使悬浮杜瓦与永磁轨道的间隙为场冷高度(CH),向悬浮杜瓦内注入液氮,并完全浸泡高温超导块,直到液氮不再沸腾;

(2)负载过程,如图 2(b)所示,当高温超导块完全进行入超导态后,调节垂直移动横梁使悬浮杜瓦与永磁轨道的间隙为工作高度(WH);

(3)脱离过程,如图 2(b)所示,开启水平驱动电机,使悬浮杜瓦按给定的速度( $V$ )脱离永磁轨道,采用力传感器测量悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力;

(4)进入过程,如图 2(b)所示,开启水平驱动电机,使悬浮杜瓦按给定的速度( $V$ )进入永磁轨道,采

用力传感器测量悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力;

(5)采用控制单一变量法,分别改变通过速度( $V$ )、场冷高度(CH)和工作高度(WH),重复以上实验步骤(1)~(4),研究通过速度( $V$ )、场冷高度(CH)和工作高度(WH)对悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的纵向力影响.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 纵向力变化特性

为了探索悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道开断处时受到纵向力变化特性,根据图 2 所示的纵向力测试原理示意图,在场冷高度  $CH=30\text{ mm}$ ,通过速度  $V=1000\text{ mm/min}$ ,工作高度  $WH=10\text{ mm}$  的条件下进行了脱离与进入实验,得到了纵向力随纵向位移( $X$ )的变化关系曲线,如图 3 所示.

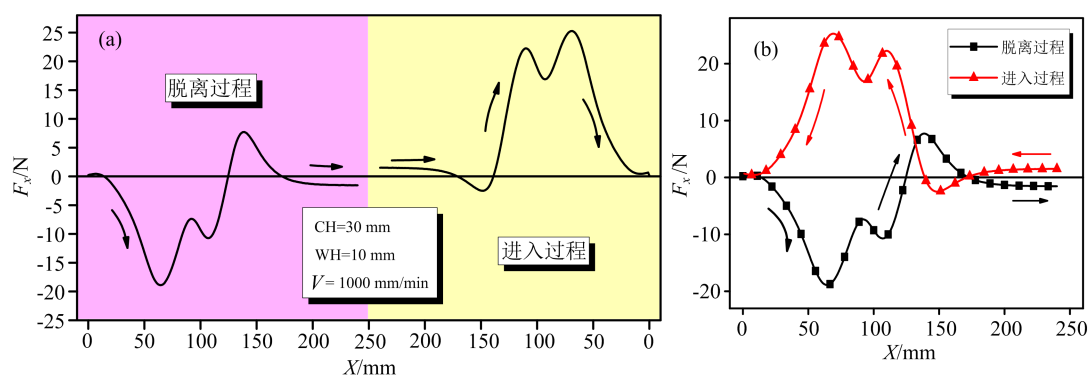


图 3 纵向力与纵向位移的变化曲线,(a)连续行程曲线;(b)脱离和进入行程曲线对比

纵向力沿  $x$  轴正方向(水平向右)时为正值,反之为负值,结合图 2(b)与图 3(a),首先,分析悬浮杜瓦脱离永磁轨道过程中的纵向力特性,当悬浮杜瓦位于永磁轨道中央,即  $X=0\text{ mm}$  时,其纵向力大小为零;当悬浮杜瓦沿正方向运行至完全脱离永磁轨道,即  $X=140\text{ mm}$  附近时,纵向力为阻碍的作用力,且先增大后减小;当悬浮杜瓦继续远离永磁轨道直到最大行程,即  $X=250\text{ mm}$  时,纵向力为主动推力,且先增大后减小.

同理,结合图 2(b)与图 3(a),分析悬浮杜瓦进入永磁轨道过程中的纵向力特性,在脱离过程结束后,悬浮杜瓦距离永磁轨道中央  $250\text{ mm}$ ,由于实验

装置带来的误差及高温超导磁浮系统的磁滞特性,导致纵向力具有一个较小的初值,当悬浮杜瓦沿反方向运行至永磁轨道开断处,即  $X=140\text{ mm}$  附近时,纵向力为主动拉力,且先增大后减小;当悬浮杜瓦继续进入永磁轨道直到永磁轨道中央,即  $X=0\text{ mm}$  时,纵向力为阻碍的作用力,且先增大后减小.

如图 3(b)所示的脱离和进入过程的纵向力曲线对比图,悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道时,往返行程中受到的纵向力近似镜像对称,考虑实验装置带来的误差及高温超导磁浮系统的磁滞特性,导致悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道不是一个完全可逆的过



程,且悬浮杜瓦脱离永磁轨道时所受的纵向力小于悬浮杜瓦进入永磁轨道所受的纵向力.综上所述,悬浮杜瓦在完全脱离永磁轨道前与进入永磁轨道后,纵向产生具有阻碍作用的阻力;相反,在完全脱离后与进入前则为起主动作用的推力与拉力.

### 3.2 不同通过速度

为了探索悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的速度对纵向力的影响,固定悬浮杜瓦的场冷高度  $CH=20\text{ mm}$  和工作高度  $WH=5\text{ mm}$ ,通过速度分别为  $V=500\text{ mm/min}$ 、 $1000\text{ mm/min}$ 、 $1500\text{ mm/min}$ 、

$2000\text{ mm/min}$  的条件下,对悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道进行实验,力传感器分别测量脱离和进入永磁轨道时的纵向力,得到如图 4(a)所示不同通过速度下的纵向力与纵向位移的变化曲线,4 条测试曲线基本上重合.如图 4(b)所示,当悬浮杜瓦在  $X=64\text{ mm}$  处时,脱离和进入时受到的纵向力基本上不随通过速度发生变化.综上所述,当通过速度较低时,通过速度对悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道时受到的纵向力基本上没有影响.

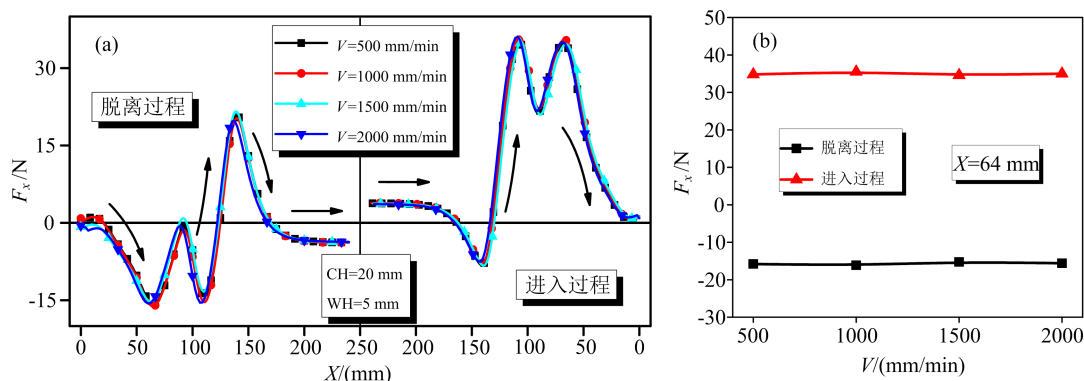


图 4 (a)不同通过速度下的纵向力随纵向位移的变化曲线;(b)纵向力随通过速度的变化曲线

### 3.3 不同场冷高度

为了研究场冷高度对悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处纵向力的影响,固定工作高度  $WH=10\text{ mm}$  和通过速度  $V=1000\text{ mm/min}$  不变,在不同场冷高度  $CH=25\text{ mm}$ 、 $30\text{ mm}$ 、 $35\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}$  条件下,对悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道进行实验,力传感器测量悬浮杜瓦所受的纵向力.测试结果如图 5(a)所

示,不同场冷高度下的纵向力随纵向位移的变化规律一致,具体可参考 3.1 节,这里不再具体描述,随着场冷高度的增加,悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道时受到的纵向力增大.如图 5(b)所示,当悬浮杜瓦在  $X=64\text{ mm}$  处时,脱离和进入时受到的纵向力随着场冷高度的增加而增大,且逐渐趋于饱和.

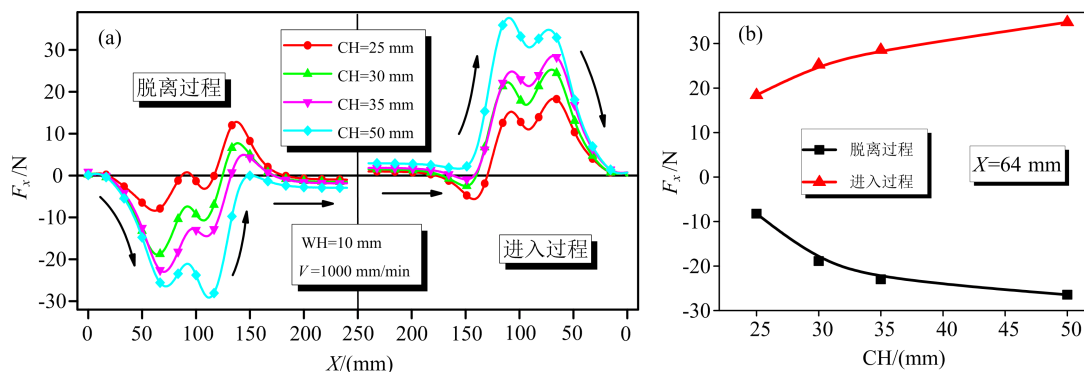


图 5 (a)不同场冷高度下的纵向力随纵向位移的变化曲线;(b)纵向力随场冷高度的变化曲线

### 3.4 不同工作高度

为了研究工作高度对悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处纵向力的影响,固定场冷高度  $CH=30\text{ mm}$  和通过速度  $V=1000\text{ mm/min}$  不变,在不同工作高度  $WH=5\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$  条件下,对悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道进行实验,力传感器测量悬浮杜瓦所受纵向力,实验结果如图 6(a)所示.

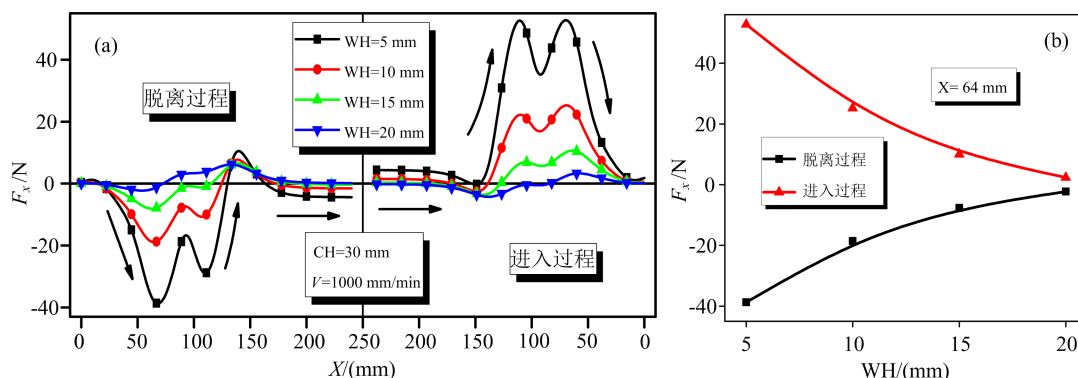


图 6 (a)不同工作高度下的纵向力随纵向位移的变化曲线;(b)纵向力随工作高度的变化曲线

## 4 结 论

本文建立高温超导磁浮系统的理论模型,推导了纵向力的表达式,初步分析了悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处时,将受到纵向力的作用.进一步,设计与搭建了纵向力测试平台,在不同通过速度、场冷高度和工作高度条件下,对悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处时所受的纵向力特性及其影响因素进行了系统研究与分析,理论与实验结果表明:

(1)悬浮杜瓦在完全脱离永磁轨道前与进入永磁轨道后,产生具有阻碍作用的纵向阻力;相反,在完全脱离后与进入前则受到主动作用的推力与拉

不同工作高度下的纵向力随纵向位移的变化规律一致,具体可参考 3.1 节,这里不再具体描述,随着工作高度的降低,悬浮杜瓦脱离和进入永磁轨道时受到的纵向力增大.如图 6(b)所示,当悬浮杜瓦在  $X=64\text{ mm}$  处时,脱离和进入时受到的纵向力随着工作高度的减小而增大.

力;脱离过程中受到的纵向力小于进入过程中受到的纵向力;

(2)当悬浮杜瓦通过永磁轨道开断处的速度较低时,改变通过速度对悬浮杜瓦所受的纵向力影响不大;

(3)在通过速度和工作高度不变的条件下,随着场冷高度的升高,悬浮杜瓦所受的纵向力增大,且逐渐趋于饱和;

(4)在通过速度和场冷高度不变的条件下,随着工作高度的降低,悬浮杜瓦所受的纵向力增大.

本文的研究成果为基于高温超导磁浮系统的混合磁浮系统切换及发射提供设计参考.

## 参 考 文 献

- [1] Z. H. Liu, Z. G. Deng, L. Kou, L. Wang, H. T. Li, Y. Yuan, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **31**(2021), 3600305
- [2] J. S. Wang, S. Y. Wang, Y. W. Zeng, H. Y. Huang, F. Luo, Z. P. Xu, Q. X. Tang, G. B. Lin, C. F. Zhang, Z. Y. Ren, G. M. Zhao, D. G. Zhu, S. H. Wang, H. Jiang, M. Zhu, C. Y. Deng, P. F. Hu, C. Y. Li, F. Liu, J. S. Lian, X. R. Wang, L. H. Wang, X. M. Shen, X. G. Dong, *Physica C: Supercon. Appl.*, **378**(2002), 809
- [3] L. Schultz, O. D. Haas, P. Verges, C. Beyer, S. Röhlig, H. Olsen, L. Kühn, D. Berger, U. Noteboom, U. Funk, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **15**(2005), 2301
- [4] L. Mattos, E. Rodriguez, F. Costa, G. Sotelo, R. D. Andrade, R. Stephan, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **26**(2016), 3600704

- [ 5 ] F. N. Werfel, U. Floegel-Delor, R. Rothfeld, P. Schirrmeister, T. Riedel, R. Koenig, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **26**(2016), 3602105
- [ 6 ] 闫兆盈,刘坤,杨文姣,叶常青,王瑞晨,马广同,低温物理学报, **40**(2018), 46
- [ 7 ] W. J. Yang, Z. Wen, Y. Duan, X. D. Chen, M. Qiu, Y. Liu, L. Z. Lin, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **16**(2006), 1108
- [ 8 ] H. Ueda, M. Itoh, A. Ishiyama, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **13**(2003), 2283
- [ 9 ] M Liu, Y Lu, S Wang, *J. Supercond. Nov. Magn.*, **4**(2011), 5
- [10] R. X. Sun, J. Zheng, B. Zheng, L. J. Zhan, S. Y. Huang, T. Lu, Z. Y. Wang, Z. G. Deng, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **26**(2016), 3600107
- [11] S. Y. Chen, J. Liu, D. J. Zhou, B. Zhuang, S. Y. Chen, Y. Zhao, *Physica C: Supercon. Appl.*, **569**(2020), 1353561
- [12] J. S. Wang, C. Y. Deng, J. Zheng, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **17**(2007), 2091