

超导材料拉伸应力下临界电流测试装置^{*}

田朝,马红军,刘华军[†],刘方

中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031

收稿日期:2018-06-26;接收日期:2019-04-09

【摘要】 本文提出了一种测试装置,用于测试超导材料在拉伸应力下的临界电流特性. 装置的固定臂与活动臂配合,给样品材料施加拉伸应力. 测试前对作为称重传感器的固定臂进行了应力标定,并通过理论计算验证了标定的准确性. 在此基础上,本文对固定臂进行了三维有限元分析,探究装置是否满足后续实验的要求. 分析结果表明,固定臂与活动臂相互配合可以给样品施加满足实验条件的拉伸应力.

关键词: 临界电流;拉伸应力;三维有限元分析

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.02.006

A Instrument for Measuring the Critical Current Characteristics of Superconducting Materials under Variable Tensionstress

TIAN Chao, MA Hongjun, LIU Huajun, LIU Fang

Institute of plasma physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Received date: 2018-06-26; accepted date: 2019-04-09

【Abstract】 This paper describes a design of a instrument for measuring the critical current characteristics of superconducting materials under variable tensionstress. The flexible arm of the instrument cooperates with the tension arm to apply tensile stress to the sample material. The flexible arm as a load cell was calibrated, and the accuracy of the calibration was verified by theoretical calculations. Besides, a three-dimensional finite element analysis of the flexible arm is carried out to investigate whether the instrument meets the requirements of the experiments. The analysis results show that the tensile stress provided by flexible arm and the tension arm satisfies the experimental conditions.

Keywords: Critical current; Tensionstress; Three-dimensional finite element analysis

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.02.006

Reference method: TIAN Chao, MA Hongjun, LIU Huajun, LIU Fang, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0117 (2019)

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(专项编号:XDB25000000)资助的课题.

[†] liuhj@ipp. ac. cn

1 引言

超导材料自被发现之日起就备受人们关注. 经过一系列的研究, 人们发现铋系高温超导材料临界转变温度高, 载流能力强^[1-2]; MgB_2 是是临界转变温度最高的常规超导体, 且超导体成型工艺简单, 原材料成本低廉, 具有明显的技术和成本优势^[3]; 钇钡铜氧(YBCO)是首个超导转变温度在液氮温度以上的高温超导材料, 具有很高的实用价值和应用前景^[4]; 铁基超导体有较高的临界电流密度、极高的上临界磁场和较小的各向异性^[5-6].

从技术应用的角度来说, 临界电流是超导材料最重要的参量之一, 对其的研究不仅可以帮助我们了解超导材料的性能, 也能为超导材料的开发与应用提供重要参考^[7]. 而在实际应用当中, 超导体受到如洛伦兹力等外力的影响, 使其临界电流特性发生改变. 因此, 研究超导体在不同应力下的临界电流特性是十分重要的.

本文提出了一种测试装置, 用于测试超导材料在不同拉伸应力下的临界电流^[8-9]. 为了在实验当中能够较准确地读取样品上的受力数值, 我们在装置中的固定臂上安装了应变片, 组成惠斯通全桥电路, 进行了应力标定实验, 并通过数据拟合得到了固定臂载荷大小与全桥电路输出电压的关系. 此外, 我们对固定臂进行了三维有限元分析, 确定了装置结构可以满足后续实验要求.

2 测试装置结构

超导材料拉伸应力下临界电流测试装置结构图如图 1 所示. 通过转动胶木手轮将转矩转递至测试装置的旋转轴, 旋转轴的转动带动驱动螺母的向下移动, 推动活动臂张开, 拉伸样品, 从而达到给样品施加应力的目的. 如图 1(7)、(8)所示, 样品可安装在两个位置, 分别是固定臂和活动臂的两长圆孔之间以及两臂端部. 实验所用的磁体系统产生的磁场方向垂直向下, 场强为 0~14 T. 若在背景磁场下进行样品测试实验, 图 1(7)样品平面将与磁场方向水平, 而图 1(8)样品平面则与磁场方向垂直. 该测试装置可测试的最大样品长度为 50 mm.

固定臂作为称重传感器^[9], 材料为钛合金 Ti6Al4V, 在固定臂上下表面分别粘贴了两个应变片, 组成惠斯通全桥电路, 实验时通过应变片输出信号可知施加在样品上的应力大小.

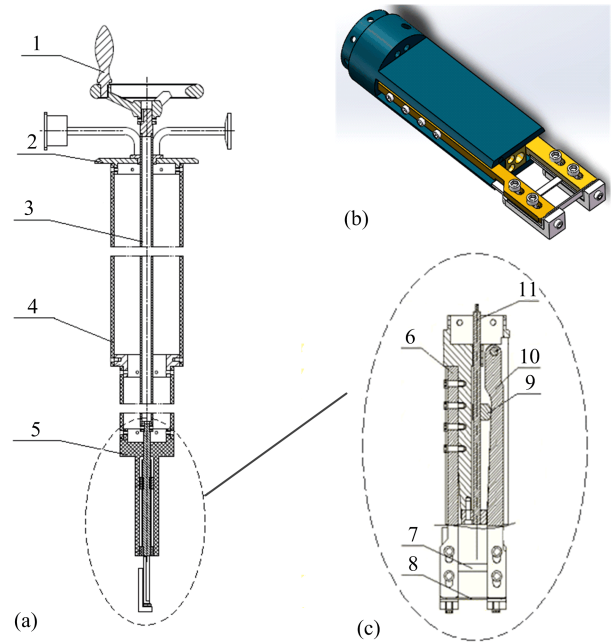


图 1 超导材料拉伸应力下临界电流测试装置: (1) 胶木手轮, (2) 过渡法兰, (3) 旋转轴 1, (4) 环氧管, (5) 样品支撑座; (b) 应变测试装置三维图; (c) 应变测试装置简图: (6) 固定臂, (7) 样品, (8) 样品, (9) 驱动螺母, (10) 活动臂, (11) 旋转轴 2

Fig. 1 Drawing (a), (c) and schematic sketch (b) of the tension test instrument: (1) handwheel, (2) flange, (3) rotating shaft 1, (4) epoxy tube, (5) holder, (6) flexible arm, (7) sample, (8) sample, (9) pusher, (10) tension arm, (11) rotating shaft 2.

3 力臂标定

固定臂作为应变测试装置中的称重传感器, 对测试结果是否准确有着决定性的影响. 因此在装置使用之前, 首先对固定臂进行应力标定实验, 并对实验数据进行分析.

固定臂的应力标定实验在中国科学院理化技术研究所进行. 如图 2(a)所示, A 为固定臂端面, $L_{AB} = 70$ mm. 标定时, 分别在固定臂中间段 C 处、端部 D 处施加应力, 模拟实验时样品给固定臂施力的状态, $L_{BC} = 70$ mm, $L_{BD} = 87$ mm.

固定臂 B 处上下两面分别粘贴了两个应变片, 组成惠斯通全桥电路. 惠斯通全桥电路是由四个电阻组成的电桥电路, 利用电阻的变化来反映被测物理量的变化. 实验时测量电阻两端的电压并进行相应的计算, 即可得到被测物理量的变化情况.

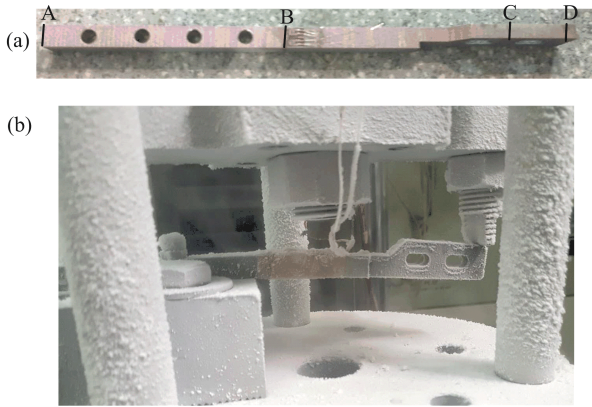


图 2 (a)固定臂实物图, (b)固定臂标定实验图
Fig. 2 (a)flexible arm, (b)picture of experiment

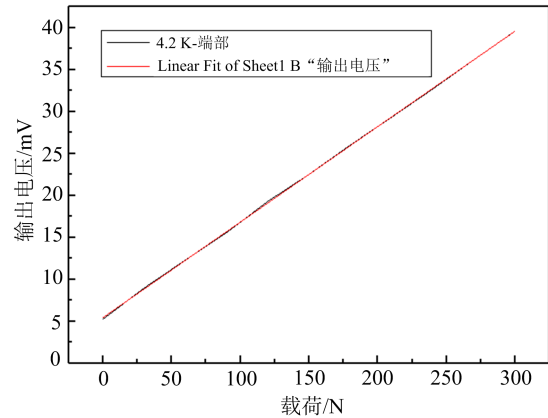


图 4 4.2 K 时全桥电路输出电压与固定臂端部
载荷大小的关系

Fig. 4 The relationship between the output voltage of the full-bridge circuit and the load at the end of flexible arm at 4.2 K

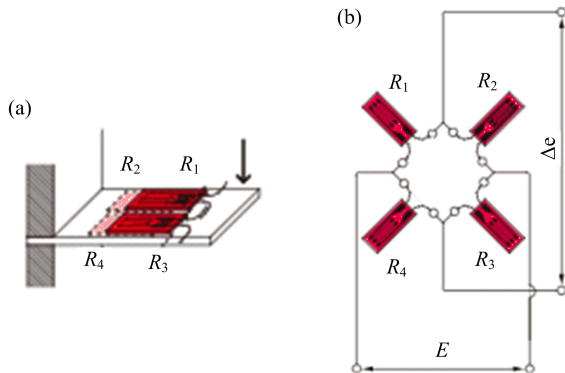


图 3 (a)弯曲应力实验的应变片安装示意图,
(b)惠斯通全桥电路图

Fig. 3 (a)Strain gauge installation diagram for bending stress test, (b)Wheatstone full bridge circuit

标定实验分别在 77 K 以及 4.2 K 温度下进行, 全桥电路输入电压为 5 V. 在固定臂受力位置施加载荷, 同时记录全桥电路的输出电压数值, 并通过 Origin 软件将数据进行拟合分析, 发现两者存在线性关系, 如图 4 所示.

两个温度下的实验数据拟合结果如表 1 所示.

表 1 77 K 及 4.2 K 温度下固定臂不同受力位置实验数据拟合结果

Tab. 1 Experiment data fitting results at 77 K and 4.2 K

温度	受力位置	拟合直线斜率($\frac{\Delta U_{out}}{\Delta F}$)
77 K	端部	0.1110
	中间段	0.0962
4.2 K	端部	0.1098
	中间段	0.0946

根据 Ti6Al4V 弹性模量数据可知, $E_{Ti6Al4V} = 113.8 \text{ GPa}$, 在 77 K 与 4.2 K 温度下相差极小. 为了验证标定实验的可靠性, 我们选取了实验数据进行了如下计算.

根据:

$$\frac{Fl}{I} \frac{h}{2} = E\epsilon \quad (1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{U_{out}}{KU_{in}} \quad (3)$$

综合三式, 可得:

$$\frac{U_{out}}{F} = \frac{6lKU_{in}}{bh^2E} \quad (4)$$

式中: F —施加在固定臂上的力
 l —受力点到应变片的距离
 h —固定臂 B 处截面长

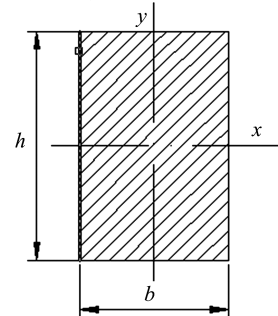


图 5 固定臂 B 处截面
Fig. 5 flexible arm section at B

b —固定臂 B 处截面宽

I —截面对 x 轴的惯性矩

E —Ti6Al4V 的弹性模量

ϵ —固定臂应变

U_{in} —全桥电路输入电压

U_{out} —全桥电路输出电压

K —应变片灵敏度系数, $K=2.09$

选取 77 K 温度下施力为 300 N 时的实验数据, 分别对两个受力位置进行计算, 计算结果如下表:

表 2 $\frac{U_{out}}{F}$ 理论值计算结果

Tab. 2 The theoretical calculation result of $\frac{U_{out}}{F}$

T(K)	受力位置	F (N)	$\frac{U_{out}}{F}$
77	端部	300	0.1152
77	中间段	300	0.0927

结合表 1、表 2 可知, $\frac{U_{out}}{F}$ 的理论值与实验数据处理结果基本吻合, 由此可知标定实验结果是准确的。

4 结构分析与讨论

使用 ANSYS 软件对固定臂进行三维有限元受力分析, 以了解测试装置的极限情况。

首先为了确定固定臂在 77 K 和 4.2 K 温度时的弹性模量, 分别仿真分析了两个温度下在固定臂端部施力的情况. 在固定臂端面施加 300 N 的力, 通过有限元分析的应变结果, 调整软件内设定的材料弹性模量, 使分析的应变结果贴近实验结果, 最后确定 77 K 温度时固定臂弹性模量取 112 GPa, 4.2 K 温度时取 114 GPa, 两个温度下的有限元分析结果如图 6 所示:

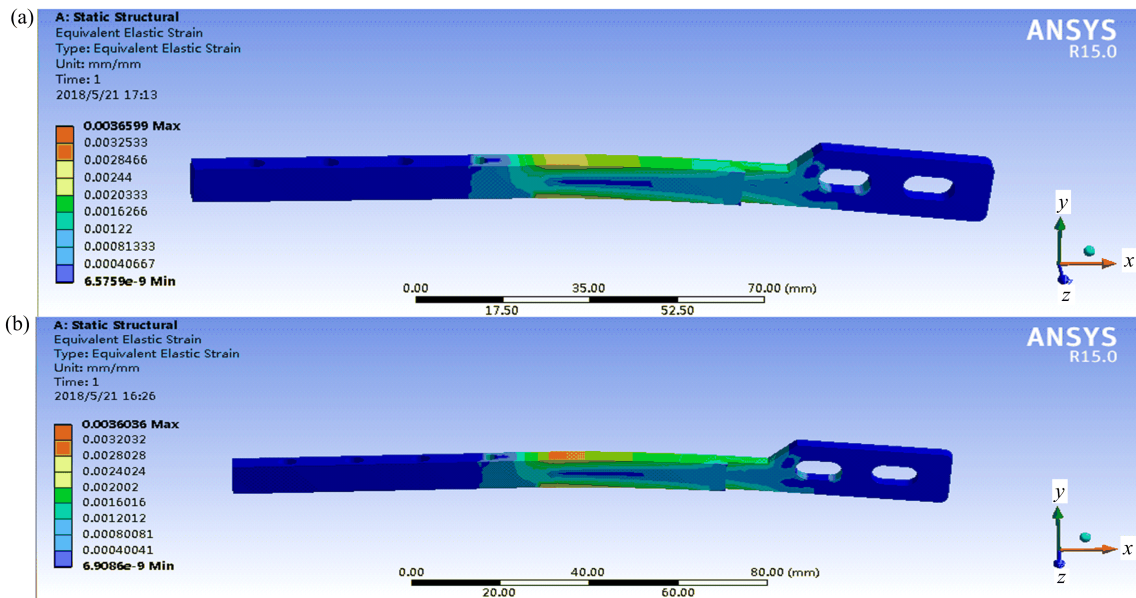


图 6 (a)77 K 时的应变结果; (b)4.2 K 时的应变结果

Fig. 6 (a)Strain results at 77 K, (b)Strain results at 4.2 K

由于人为误差的存在, 每次在固定臂中间段安装样品时, 安装位置会有些许的变化. 为了探究样品安装位置不同会给全桥电路输出电压的读数带来什么影响, 我们在固定臂的受力面取了一系列不同的点, 在这些点上使用 ANSYS 软件模拟施加相同的力, 并取在应变片安装位置上读出的应变值, 在 Origin 软件中进行数据分析, 结果如图 7 所示:

由图中可以看出, 固定臂受力点离端面距离与应变片安装位置处读出的应变呈线性关系, 也就是说, 前者与全桥电路输出电压的数值也呈线性关系. 因此, 即使样品安装位置产生偏差, 同样可以通过输出电压推算出样品所受的力的大小。

由于弹性模量越小, 材料受力时形变越大, 因此选择在 77 K 温度下分析测试样品时固定臂形变的情况。

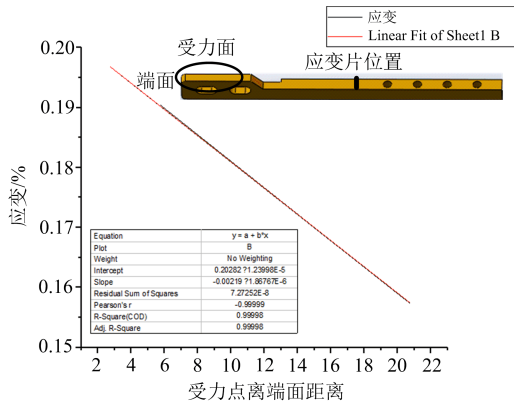


图7 数据拟合图

Fig. 7 Data fitting diagram

以 YBCO 样品带材安装在固定臂端部为例,带材长 $L=22$ mm,截面宽 $b=0.1$ mm,高 $h=5$ mm, 77 K 温度时, YBCO 的弹性模量 $E=113.4$ GPa. 当 YBCO 样品带材有 0.3% 的应变时,伸长量为 0.066 mm,由:

$$\frac{F}{bh} \frac{\Delta l}{l} = E \quad (5)$$

可得:施加在样品上的力 $F=0.17$ kN=170 N.

在 ANSYS 软件中将 170 N 的力施加在固定臂端部上,得到形变结果,如图 8.

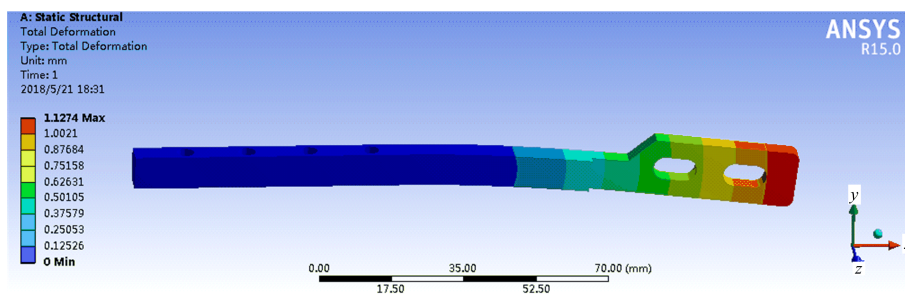


图8 固定臂端部受力的形变结果

Fig. 8 Deformation results of the flexible arm

由图中可以看出,此时固定臂的最大位移为 1.127 mm. 则活动臂向外延伸的总长为 $L=0.066 + 1.127=1.193$ mm.

由于磁体直径的限制,允许活动臂向外展开的最大距离为 8.1 mm;而当装置的驱动螺母运动到

旋转轴最底端,使活动臂向外展开的距离达到极限时,其展开距离长度为 6.3 mm,在允许范围之内.

在 ANSYS 软件中分别给样品和固定臂端部施加 900 N 的力,得到图 9 的形变结果.

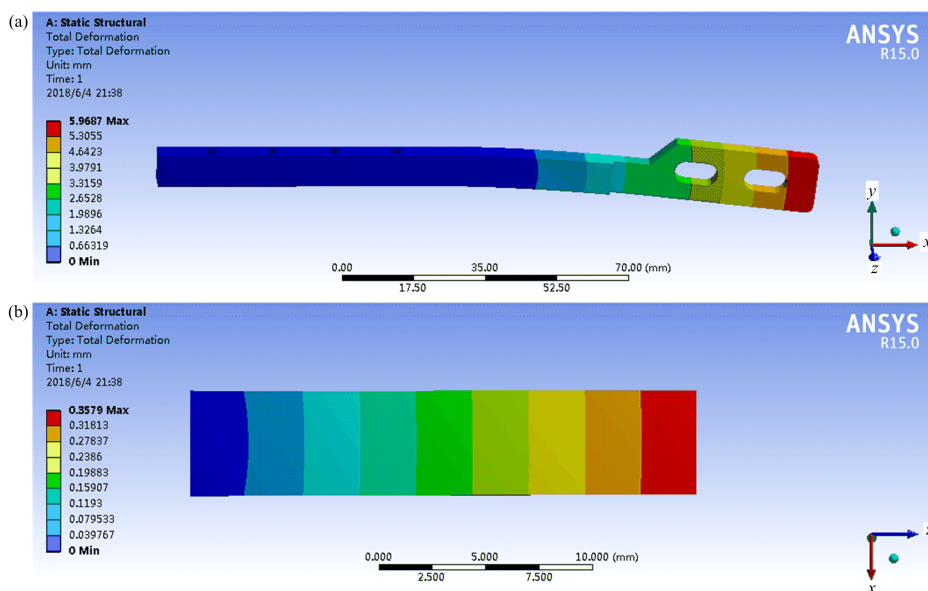


图9 (a)固定臂受力形变结果,(b)样品受力形变结果

Fig. 9 (a) Deformation results of the flexible arm, (b) Deformation results

由图中可以看出,此时固定臂的最大位移为 5.9687 mm,样品最大伸长量为 0.3579 mm,则活动臂向外展开的总长 $L = 5.9687 + 0.3579 = 6.3266$ mm.与此同时,固定臂与样品带材产生的应变分别为 0.85%,1.65%,均超过了二者的极限范围,即活动臂在展开到极限距离之前,在样品上施加的应力大小就可以满足实验要求.

5 总 结

本文提出了一种在拉伸应力下测试超导材料临

界电流的装置,并对装置中重要部件固定臂进行了应力标定实验,得到了较为准确的实验数据,为之后装置投入实验并准确了解样品的受力情况打下基础.根据标定实验数据,又对固定臂进行了三维有限元分析,确定其弹性模量,并由此分析了活动臂实验时的向外展开情况,明确了装置两臂配合使用时可以达到实验要求.

参 考 文 献

- [1] 熊泉,技术与市场, **22**(2015),202.
- [2] 蒋志君,中国材料进展, **28**(2009),28.
- [3] 霍堡垒,中山大学研究生学刊(自然科学与医学版), **03**(2015),8.
- [4] 金建勋,郑陆海,电子科技大学学报, **s1**(2006),612.
- [5] Kautz. R. , *Physics Today*, **65**(2012), 54.
- [6] Gurevich A. , *Nature Materials*, **10**(2011),255.
- [7] 郭志超,索红莉,刘志勇,功能材料, **41**(2010),2041.
- [8] Ková P, Melišek T, Kopera L, *Superconductor Science & Technology*, **22**(2009), 075026.
- [9] Kopera L, Ková P, Melišek T, *Nanoscale Research Letters*, **21**(2008), 115001.