



凝力著工隆基筑梦  
(HTTP://GXEN.LZU.EDU.CN/)  
李正演

# 学院新闻

## 兰州大学在超导带材损伤演化检测技术方面取得突破性进展

发布日期: 2021-05-28 | 栏目: 学院新闻 | 内容来源: 兰州大学土木工程与力学学院

YBCO二代高温超导带材因其具有高临界转变温度、高不可逆磁场和高载流能力,已成为国际学界高度关注并竞相开发应用的一类高性能超导材料,以期用于提升如REBCO高场磁体(如图1(a))、超导电机、超导电缆等电磁装置的更高性能,我国上海、苏州也将其列为高新技术材料进行研制开发制备。由于YBCO二代高温超导带材是一典型的层合材料,如图1(b)所示,其脆性超导薄层通过沉积在具有较高力学性能的哈氏合金基底上,用金属银和铜层进行包覆来保证其在使役环境下的力学变形与载流需求。然而,超导电磁装置在极端使役环境下(即极低温、强电流和高磁场)的力学变形不可避免地存在热失配应力和强电磁应力等因素导致的材料损伤破坏行为,进而制约着这类超导材料及其磁体性能的提升与稳定运行。为此,如何有效检测出极端低温和强磁场受力条件下的材料损伤起源与裂纹演化就成为当前这类材料获得有效工程应用的一个重要环节。由于金属包覆层阻止了对超导层裂纹的直接观测和损伤的定位,通常的实验测量手段均难以直接应用于这一观测研究。为此,建立新的有效实验检测方法对于弄清这类先进超导材料内部损伤特征并揭示其破坏模式就一直成为提升

YBCO二代超导材料性能有效设计与性能评估的挑战性研究课题。

Q

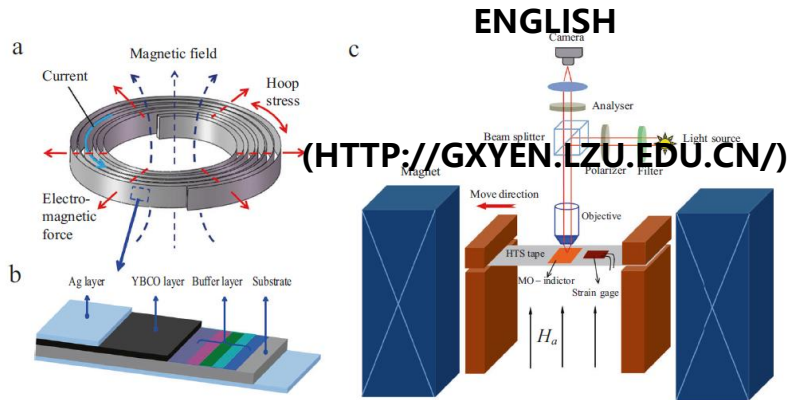


图1. YBCO二代高温超导带材(b)制备的典型超导磁体(a)和兰州大学提出的极端加载环境下超导带材原位磁光法损伤检测的示意图(c)

兰州大学超导力学研究团队在周又和教授的领导和指导下，团队主要成员张兴义、刘聪等人自2016年以来针对这一难题开展攻关研究，获得的突破性研究进展包括：（1）解决了磁光法在低温冷屏介质中的非均匀光照图像标定等技术难题（相关成果发表在Review of Scientific Instruments, 87: 075106, 2016和Measurements of Scientific Technology, 30:115904, 2019），提出了模拟极端使役环境条件下超导带材的磁光与拉伸耦合的原位测量方法（见图1(c)）；（2）实现了YBCO超导带材在不同环境温度、不同环境磁场下的高清晰度磁光图像随拉伸应力的变化特征，即随着应变值的升高，超导带材的磁光测量图像从穿透起源及其发展的全过程演化（如图2所示），这一演化过程为认知超导带材内部损伤与裂纹扩展的定量研究提供了基本的关联信息特征。

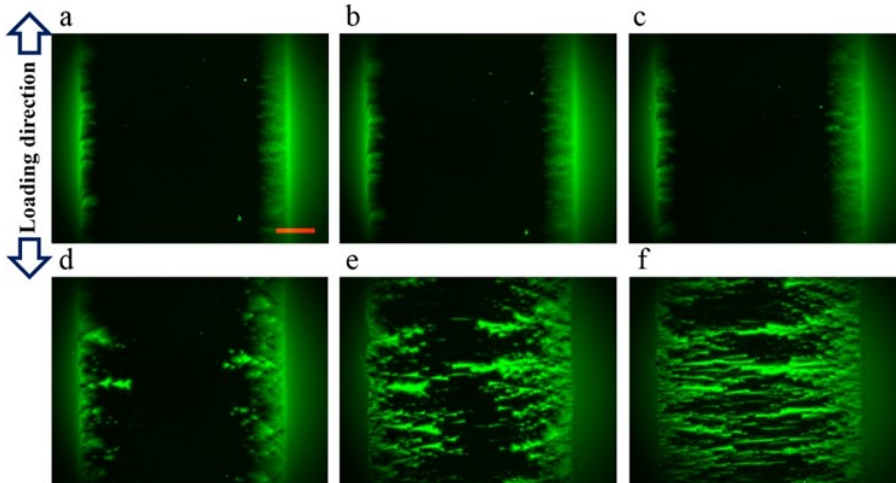


图2 在40K 63mT实验环境条件下 磁通穿透图像随拉伸应变升高的磁光

图2. 在40K、60K和77K实验条件下，磁通穿透图像随应变 $\epsilon$ 方向的磁光图像演化过程a-f: 外加应变值分别为0%, 0.40%, 0.72%, 0.75%, 0.78%, 0.80%

ENGLISH

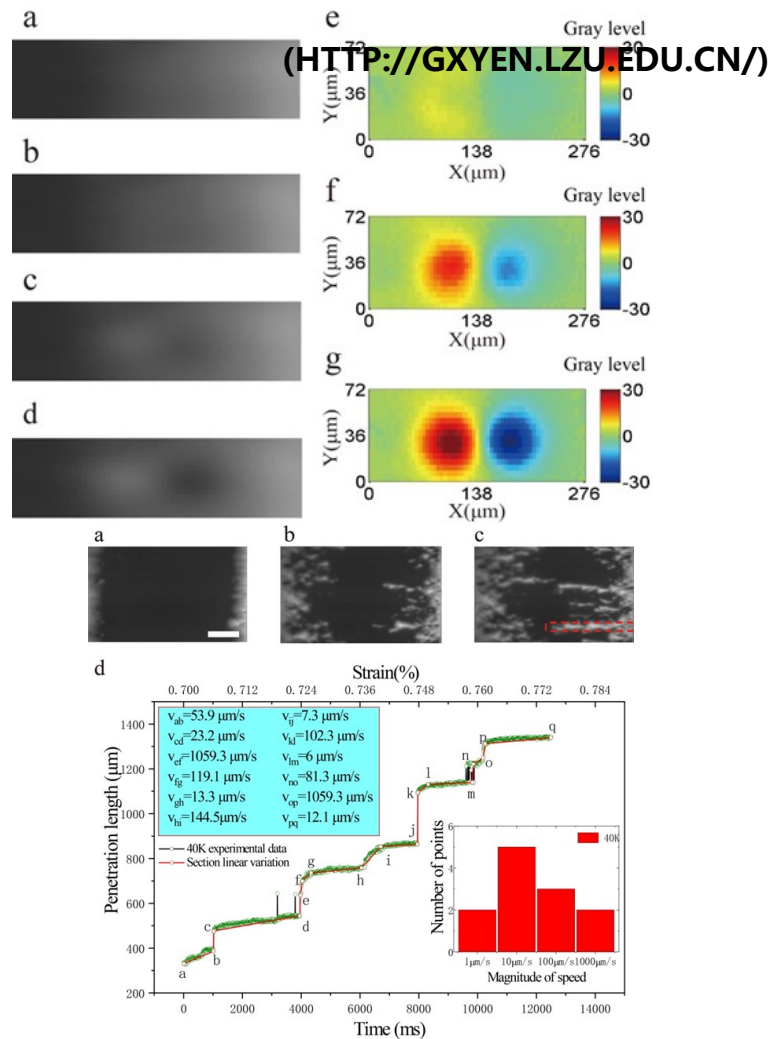


图3. 点状磁通运动的时间尺度图

图4. 不同的速度分布

依照磁光法的磁通图像演化过程特征，进一步提出了对磁通运动与损伤机制认知研究的新途径，取得的主要成果有：（1）发现了如图3所示的一种点状磁通运动的新模式及其运动时间尺度的变化特征，即随着环境温度从40K升高到60K和77K，运动时间尺度从 30ms增加至60ms和100ms；

（2）随着应变的增大，磁通运动由点状结构变化为纺锤状的穿透模式，其速度分布具有多级特征（如图4所示），位于（6  $\mu\text{m/s}$ , 1059.3  $\mu\text{m/s}$ ）区间；（3）通过对穿透面积的统计分析，得到了这种应变驱动的磁通运动模式具有自组织临界态(SOC)特征，其特征参数为 $-1.43 \pm 0.27$ ；

（4）提出了磁光穿透图像与内部损伤关联的研究途径。亦即，将实验样品采用逐层化学腐蚀处理，由磁光图像定位出穿透位置处的SEM扫描结果进行对比（见图5），由此得到了带材内部损伤与裂纹扩展的特征规律。

基于这一新的实验研究途径及其实验结果，发现了YBCO二代超导材料在使役环境下材料损伤的磁场敏感性，即穿透深度远大于贯穿裂纹，进而

揭示出这种损伤模式完全不同于传统推测的贯穿裂纹破坏模式。其次，通过逐层腐蚀和SEM扫描，还发现了这种YBCO二代带材从基底向上传播的新破坏模式，且损伤尖端存在一种非晶化现象，如图6所示。

## ENGLISH

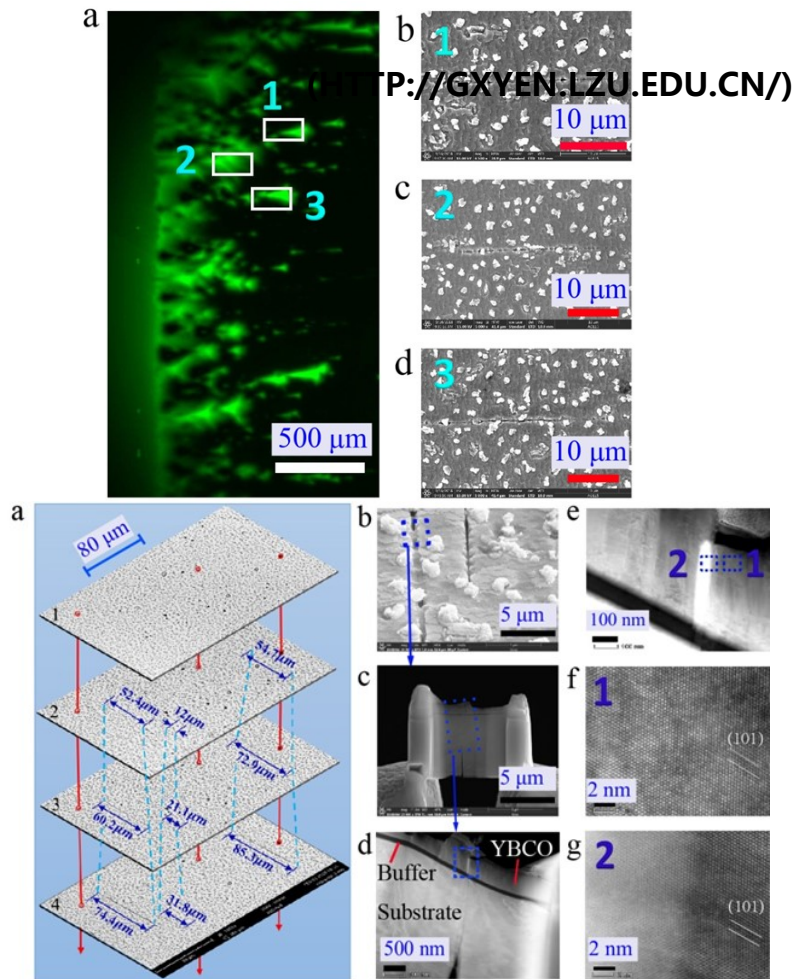


图5. 损伤与磁光图像的对应

图6. 自下而上的破坏模式和裂尖非晶化

近日，上述研究成果以“Probing of the internal damage morphology in multilayered high-temperature superconducting wires”为题在国际知名期刊《Nature Communications》上发表，周又和教授与张兴义教授分别为论文第一作者和通讯作者，团队成员刘聪副教授和博士生沈磊为其余作者。该论文研究得到了国家自然科学基金青年项目(No. 11902130)、面上项目(No. 11872196)和国家111引智项目(No. B14044)的资助。

论文评阅人认为对于YBCO二代超导带材的实时损伤形貌检测是一具有挑战性的课题（即“The detection of real-time damage morphology of the YBCO layer (2G HTS) under tension strain is a challenging issue and it is crucial to their applications”），并高度肯定本论文发现了系列新现象和新机制（“series of new phenomena”和“a new mechanism”）；指出作者们采用这一装置，首次观测到了二代高温超导带材在拉应变作用下的不同于磁通崩塌的点状磁通成核和仿锤状磁通

穿透现象，对于理解II型超导的涡动力学是有帮助的（即“With this device, the authors first observed the point-like flux nucleation and spindle shape flux penetration induced by the stretching strain in the 2G HTS wires. **ENGLISH**ors are indeed different from the flux avalanche triggered by traditional magnetic and thermal instability, which help us to understand the vortex dynamics of type-II superconductors”），以及这一研究显著提升了对电-力特性的理解，并可直接用于改进CCs机械性能的评价等（即“**(HTTP://GXYEN.LZU.EDU.CN/)**This work significantly enhances the understanding of electro-mechanical behavior, and also be directly useful to improve the mechanical performance of CCs, and thus, it could attract more people who involve in superconducting materials and/or related industrial fields”）。



论文连接网址：<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23487-0>  
(<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23487-0>)

## 学院简介

## 联系方式

**联系地址：**兰州市城关区天水南路222号理工楼830室

**邮政编码：**730000

联系电话: 0931-8914560

传真号码: 0931-8914561

## 相关链接



## ENGLISH

» 兰州大学 ()

([HTTP://GXYEN.LZU.EDU.CN/](http://gxyen.lzu.edu.cn/))

兰大主页 (<http://www.lzu.edu.cn>)

English (<http://gxyen.lzu.edu.cn>)

Copyright © 兰州大学土木工程与力学学  
院



(<http://bszs.conac.cn/sitename?>

[method=show&id=5701B3C7A3E46C8FE053022819AC1458](http://bszs.conac.cn/sitename?method=show&id=5701B3C7A3E46C8FE053022819AC1458))