

文章编号: 1000-4750(2020)11-0248-09

高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统的研制

潘远洲^{1,2}, 何天虎¹, 辛灿杰², 关明智^{1,2}

(1. 兰州理工大学理学院, 甘肃, 兰州 730050; 2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃, 兰州 730000)

摘要: 实用化高温超导带材(如Bi系与ReBCO高温超导复合带材)在高磁场下拥有较高的临界电流密度、广泛的温度裕度、较强的抗粒子辐照能力及良好的机械特性, 因此这类材料在加速器超导磁体系统、高场超导磁体、超导电力等方面表现出巨大的应用潜力。而作为典型的多层功能复合性材料, 虽然高强度的基底层增强了高温超导带材拉伸强度, 使其在强磁场、高载流条件下可以承受很高的应力, 在其加工与运行过程中, 不可避免地受到多种疲劳载荷的作用, 从而其临界载流能力会显著地降低, 进一步, 会造成相应高温超导装置功能性难以达到设计标准等。该文介绍一种自主研制的高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统, 基于该测试系统: 一方面, 可以实现对高温超导材料在低/变温、疲劳载荷等环境下力学、热学等宏观参数的实验表征研究; 另一方面, 可以对高温超导材料开展低温疲劳载荷环境下力-电弱化等临界特性的实验研究。利用所研制的低/变温疲劳性能测试系统, 对受拉-压疲劳荷载下的YBCO超导带材的力学行为、载流特性开展了初步的实验研究, 并分析了应力比、温度等外部环境因素对实验结果的影响规律等。结果表明: 在相同的疲劳次数的情况下, YBCO超导带材的力学性能及载流特性与其应力比成明显的非线性关系。该测试系统的成功研制将为中国粒子加速器用高温超导磁体的设计与研发提供基础测试平台。

关键词: 高温超导带材; 低温疲劳测试系统; 力学特性; 载流特性; 应力比

中图分类号: O511+4; TQ175.1+5 文献标志码: A doi: [10.6052/j.issn.1000-4750.2019.12.0797](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.12.0797)

DEVELOPMENT OF A CRYOGENIC FATIGUE TEST FACILITY FOR HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING TAPES

PAN Yuan-zhou^{1,2}, HE Tian-hu¹, XIN Can-jie², GUAN Ming-zhi^{1,2}

(1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Because of the high critical current density in the intense magnetic field, wider temperature margin, resistance irradiation and good mechanical properties, high temperature superconducting tapes (BSCCO and ReBCO tapes) have a huge potential application in accelerator magnets, high field magnets and superconducting electric power systems. Some expectable opportunities will be created for modern high-tech electromagnetic equipment. High temperature superconducting tapes with substrate layers usually have high tensile strength. Thus, they can be applied under an intense electromagnetic field. However, in its application process and under the operation conditions, many kinds of inevitable fatigue loads will occur, which have an impact on the current-carrying capacity of the high temperature superconducting tapes and can destroy the high temperature superconducting magnets. A cryogenic fatigue test facility for high temperature superconducting tapes is introduced, the system can be used to measure the mechanical, thermal and strain-field-dependent behaviors of fatigued superconducting wires and tapes under variable cryogenic temperatures. Based on the cryogenic fatigue

收稿日期: 2019-12-19; 修改日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672120, 11932008); 中国科学院青年创新促进会项目(2019404); 中国科学院“西部青年学者”A类等项目资助项目

通讯作者: 关明智(1983—), 男(锡伯族), 辽宁人, 副研究员, 博士, 从事超导结构力学、实验固体力学研究(E-mail: mzg615@impcas.ac.cn)。

作者简介: 潘远洲(1993—), 男, 甘肃人, 硕士生, 从事高温超导材料力学研究(E-mail: panyuanzhou@outlook.com);

何天虎(1973—), 男, 甘肃人, 教授, 博士, 从事多物理场耦合、电磁固体力学研究(E-mail: heth@lut.edu.cn);

辛灿杰(1984—), 男, 河南人, 高工, 博士, 从事实验固体力学研究(E-mail: xincj@impcas.ac.cn)。

test facility, the mechanical behaviors and current-carrying characteristics of tension-compression fatigued YBCO tapes were experimentally studied. The preliminary test results show that their mechanical behaviors and current-carrying characteristics showed a nonlinear dependence on the stress ratio during the fatigue test. The successful development of the cryogenic fatigue test facility will provide a basic fatigue test platform for the design and development of accelerator high temperature superconducting magnets.

Key words: high temperature superconducting tapes; cryogenic fatigue test facility; mechanical behaviors; current-carrying characteristics; stress ratio

超导材料作为 20 世纪的最伟大的发现之一，其零电阻、迈斯纳效应是在极端低温的超导态条件下才能得以实现。超导材料具有的优异特性使其从 1911 年被发现之日起，就展示出了诱人的应用前景。目前超导材料以及相关技术正在越来越多地应用于科研、交通、电力、能源、生物医学、国防军事等诸多领域；据统计，这其中约有 95% 为低温超导系统（如 NbTi/Cu、Nb₃Sn/Cu 磁体），全球市值超过上千亿美元^[1-3]。然而，由于受极端低温工作环境的制约和高成本（低温冷却的液氦价格昂贵），以及核心原材料供给问题（铌材全球供应量正在逐年锐减），低温超导与应用正在面临着越来越显著的危机与挑战^[4]。

近年来，随着高温超导带材的实用化进程进一步加快（年产值达到几十万米，成本降低到几美元），世界上许多高科技公司、研究机构和大学实验室相继开展了基于高温超导带材绕制超导磁体的项目，如在高温、高场超导磁体应用方面，2017 年 12 月 8 日美国佛罗里达国家高场实验室（NHMFL）宣布研制出中心场为 32 T 的超导磁体，打破了该类磁体的世界纪录^[5]。该内插磁体系统是在由低温超导（LTS）线材绕制的磁体中内插能产生 17 T 磁场的 ReBCO 磁体，通过磁场叠加而实现 32 T 的中心场。而随着无绝缘技术的提出以及高温超导带材性能的快速提升，美国 MIT 弗朗西斯比特实验室也正在研制 30.5 T 的低/高温混合高精度超导 NMR 磁体系统^[6]，与此同时，日本理化技术研究所^[7]、韩国 SuNAM 公司^[8]、日本东北大学 HFLSM 实验室^[9]、我国的中国科学院电工研究所等研究机构在基于高温超导材料的高场磁体技术（>20 T）研究方面也开展了一系列卓有成效的工作^[10]。除了在高场超导线圈方面的应用，高温超导磁体也由于其宽泛的工作裕度、抗辐照特性、超导电性等在高能加速器和探测器、散射中子源、磁约束聚变和重离子加速器等大科学装置中

得到了逐步的应用，并成为了该领域关注的热点问题^[11]。然而，进一步的大量工程实践与研究表明^[12-16]：高温超导材料在外界机械压力或变形情形下，会出现其临界温度 T_c 或临界磁场 H_c 的改变，通电超导体出现临界电流 I_c 的退化现象，甚至失去超导性。可见高温超导材料的特性不但受到其物理性能的影响，还受到其力学性能的显著影响。而在实际应用中，外界的机械载荷、内部的电磁力载荷等，甚至制备过程中的加工机械荷载等均是无法避免的。因此，极端多场条件下的力学问题和多场耦合特性直接关系到高温超导磁体的安全设计和稳定运行，亟需发展相应的可以提供极端多场环境并能表征高温超导电磁材料热学、电磁学和力学宏微观性能的测试平台和评估手段等。目前，可以表征超导材料相关多物理场性能的测试平台大致可以分为以下两类。

第一类极端测试平台主要针对具体的工程项目，可以实现固定温度（如液氮、液氦温度）下的力学加载。如 SULTAN^[17-18] 是目前国际上最重要也是最大的高载流超导体、线缆检测与评估平台，为包括 ITER 等众多国际项目中的超导线缆样品进行专业的检测与认证。除此之外，许多发达国家研究机构基于承建的大型科学工程也分别建立起各自的超导检测装置，如欧洲 CERN 研究中心 FRESCA 超导性能测试装置^[19]，德国 KIT 的低温力学测试系统^[20] 等。在国内，中科院等离子研究所、中科院理化技术研究所等也根据中国航空航天和应用超导领域大科学工程的背景需求，在低温环境下的材料与结构力学性能测量平台建设方面围绕工程需要研制了相关的急需测量设备^[21]。主要用于特殊钢材料在固定低温下的拉、压、弯测试等。

第二类极端测试平台主要针对超导材料与结构多场的实验基础表征研究，可以实现低温/变温环境、背景磁场和力学的多场共同加载。如近些

年, 兰州大学电磁固体力学研究组在超导结构多物理场测量仪器研发方面率先开展了一系列卓有成效的工作, 该研究组研发了超低温/变温超导线材力学测量系统, 实现了连续变温下(77 K~室温)的力-热耦合行为测试, 并开展了低温/变温环境下的高、低超导材料拉伸力学性能随温度的依赖关系的研究, 获得了包括拉伸强度、断裂拉伸百分比、屈服强度、弹性模量等力学特性相关的一些有意义的结果^[22~23]。新近, 该研究组与中科院近代物理研究所研制成功了国际首台极端多场下超导材料力学性能的全背景场测控大型仪器^[24], 可以实现对超导线/带材准静态力学性能和材料参数随温度、磁场、载流、力学加载等变化的全测控。

近年来, 随着高温超导磁体技术在大型粒子加速器等科学工程中的广泛应用, 其高温超导复合材料在疲劳等动态载荷(包括交变荷载、热循环、绕制荷载等)下的力学、热学和电磁学等行为引起了国际上大量的关注。美国 MIT 超导磁体研究组对其在建的 1.3 G 高/低温混合超导 NMR 磁体项目中 18.7 T 高温超导 YBCO 非绝缘磁体结构外部绑扎层厚度及其张力效应进行较详细的数值优化分析, 并给出了多场环境对其电磁-力行为的影响以及降低层间摩擦的具体有效措施等, 基于动态荷载下测得的力学强度参数, 提出了其优化分析强度的判断准则^[25]。此外, 随着欧洲强子对撞机超导磁体改造项目的进展, 针对所使用的 YBCO、Bi 系等高温超导带材, 特别是 YBCO、Bi 系等高温超导电缆在交变动态荷载作用下超导临界特性的退化行为, 各国研究机构相应研制出简易的适用于交变荷载下高温超导带材测试设备, 并利用这些设备, 开展了一系列疲劳荷载下高温超导结构力学行为的相关研究^[26~31], 并指出, 疲劳荷载下的高温超导材料分层、裂纹、剥离等是其临界电流退化的可能原因。因此, 极端环境下动态荷载作用下超导材料的低温多场测试系统逐渐受到人们的关注。

综上所述, 目前各类相关极端环境下的超导材料性能测试系统大多仅限于固定低温环境下的物理量测试技术, 以及少量的极端变化环境下的多场测量系统与技术。由于极端环境的限制, 这些测量系统的机械加载部分大多只能实现准静态运行模式。而对于低/变温或大幅变温等极端条件下受疲劳荷载作用后高温超导带材的力学、电学

等多场耦合性能的实验研究及其相关测试设备的研发尚且较少涉及, 这些也已成为制约我国大型加速器高温超导磁体研发与建造的重要瓶颈。

本文采用了基于微机控制的电子式疲劳试验机系统和非线性 PID 控制系统, 成功研制出高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统, 该系统可实现对各类实用高温超导材料实现疲劳荷载下的力学多场耦合测试, 此外, 在低温箱体设置有直径 3 mm 的光学观察窗, 可以结合非线性 CCD 全场变形测试技术, 对低温环境下高温超导带材的疲劳与变形行为开展基础的实验表征。最后, 基于所研制的低/变温疲劳性能测试系统, 对受拉-压疲劳荷载下的 YBCO 超导带材的力学行为、载流特性开展了初步的实验研究等。该设备的成功研制对于进一步深入高温超导材料低温疲劳及其多物理场特性研究提供了基础保障。

1 高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统

1.1 系统的总体设计

系统由五大部分组成, 分别为基于计算机控制的电子式疲劳试验机系统、基于非线性 PID 控制的低/变温环境系统、强电流加载和控制系统、非接触光学测量系统、强背景磁体系统(预留空间设计, 未安装), 整体系统设计如图 1 所示。

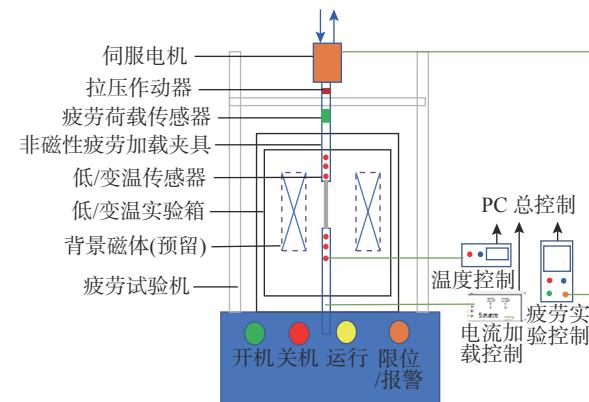


图 1 高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic fatigue testing systems for high temperature superconducting tapes

1) 基于计算机控制的电子式疲劳试验机系统的设计与研制。

电子疲劳试验系统如图 2 所示, 采用 PD-5 微控电子式疲劳试验机实现对测试样品交变(低频疲劳)力学的加载, 主要技术参数如表 1 所示。该系

统采用全数字交流低惯量伺服电动机与超精密行星齿轮减速机采用胀套连接，实行无间隙传动，并安装在移动横梁的上表面。减速机的输出轴与精密滚珠丝杠副采用胀套连接驱动，滚珠丝杠丝母与导向筒精密配合导向，可将旋转运动变为直线运行，实现无间隙传动，以及良好的抗失稳性能。此外，考虑到疲劳机械加载部分与低温控制箱、超导磁体等的集成，实现了加高、加宽型的试验机的设计；疲劳试验机采用无级变速的位移加载方式，加载速度大幅范围内可控以提供不同的加载需求(如静态加载和疲劳加载等)；整机的设计采用门式预应力结构和高精度测力系统，配备以低温、抗磁夹具实现对测试样品拉伸、压缩、弯曲多种变形模式加载。

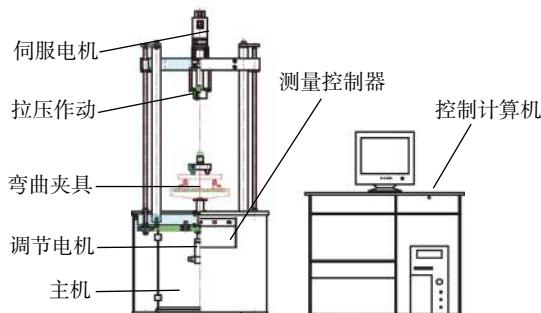


图 2 电子疲劳试验系统
Fig. 2 Electronic fatigue testing systems

表 1 电子疲劳试验系统主要技术参数
Table 1 Parameters of electronic fatigue testing systems

技术指标	技术参数
测力范围	$\pm 5000 \text{ N}$
测量范围	50 N~5000 N
测量精度	$\pm 1.5 \text{ N}$
控制精度	<1%FS(量程)
频率	0.1 Hz~10 Hz
作动器行程	100 mm
调整空间	0 mm~500 mm
外形尺寸(长×宽×高)	900 mm×610 mm×2000 mm

2) 基于非线性 PID 控制的低变温环境系统的设计与研制。

本系统采用低温、真空控制箱体，实现两阶段制冷的方式：对于室温~77 K 温区采取液氮喷淋制冷；对于 77 K~20 K 温区采用 GM 制冷机制冷。因此，箱体采用双重真空模式，即内部空间为高真空度的真空室、箱体外壳采用真空、内部采用钛合金冷屏隔热模式，最大限度地保证了在长时间的疲劳试验过程中低温腔内无对流传热损

失。此外，低温箱体内的温度控制采用非线性 PID 调控单元和微热源的方式，以实现低变温的高精度控制与测量，测量精度达到 1 K。

3) 强电流加载和控制系统的研制。

对于高温超导材料，其电流载流能力高并伴随电流、磁场、变形场因素存在临界电流的退化现象，为此需要配备具有相应的失超检测与反馈功能的大功率电源；为了实现对试样的强电流加载，设计和采用具有承载高电流的高温超导材料制成的电流引线；设计并提供针对实验样品所需电流大小的调换使用功能。此外，在本测试系统设计中，将正极固定，负极与导冷板之间做燕尾形滑轨，保证下凸轮在推动负极时，可以使其活动，样品正负极块装夹平面可加工成不同角度的斜面，从而实现在长时间疲劳机械-电共同加载下夹具的自动调节功能(如图 3 所示)。

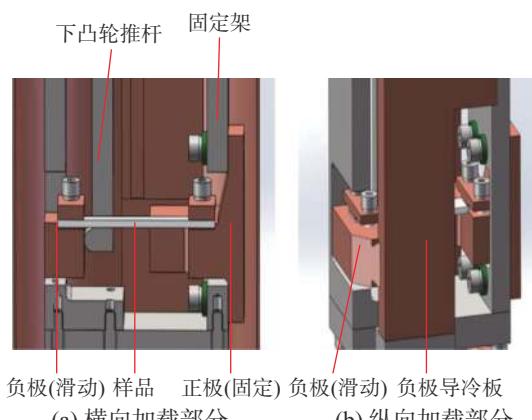


图 3 电流加载内部关键部件示意图
Fig. 3 Illustration of key current lead parts

4) 非接触光学应变测量系统的设计与研制。

如图 4 所示，非接触光学应变测量系统由 CCD 摄像头、分离镜、滤光镜、前述低变温环境系统组成，通过在该环境系统前方设置的直径 3 mm

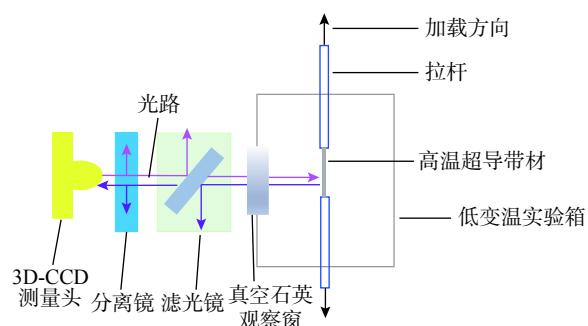


图 4 非接触光学应变测量系统示意图
Fig. 4 Schematic diagrams of non-contact optical strain measurement systems

的光学观察窗，可以实现在低温环境下对高温超导带材的疲劳与变形行为开展非接触实验研究。此外，在进行应变测量时将多组聚焦镜放到低温真空部，可实现低温真空环境下高精度的三维应变场测量。

1.2 系统的总体装配与测试

高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统的研制将分为两阶段进行，第一阶段采用液氮喷淋制冷方式，可实现室温~77 K 温区下通电试样的疲劳试验，第二阶段采用 GM 制冷机制冷方式，可实现室温~10 K 温区下的大载流试样的疲劳试验。目前，已完成室温~77 K 温区疲劳测试系统的总体装配与调试，图 5 为完成全部装配的仪器实物图。

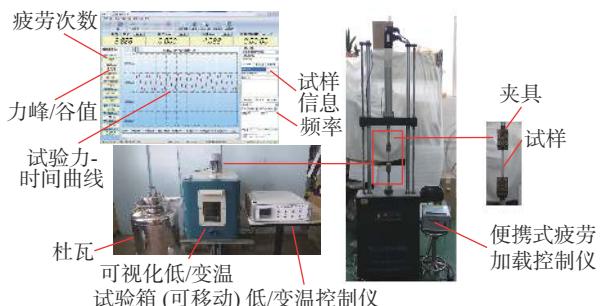


图 5 高温超导带材低/变温疲劳性能测试装置实物图
Fig. 5 Actual equipment of cryogenic fatigue testing systems for high temperature superconducting tapes

2 实验研究

2.1 实验样品与实验过程

基于上述自主研制的高温超导带材低/变温疲劳性能测试系统，开展了拉-压疲劳荷载后 YBCO 超导带材的力学行为、载流特性初步的实验研究。实验样品采用上海超导科技股份有限公司提供的 YBCO 高温超导带材，厚度约为 0.25 mm，长度 150 mm，宽度 12 mm。由于本实验的测试温度环境为室温~77 K，应变测量采用的是日本共和低温应变片，内设半桥路温度补偿电路^[32]，其测量温度范围为：293 K~4.2 K，采用 CC-3A 将工作应变片贴至加载试样的表面，温度补偿片贴至参考试样的表面（不受机械载荷作用）。疲劳载荷的测量由安装于作动器下方的美国世铨机密级拉压传感器完成；在作动器的两侧，安装了绝对式光栅尺，以进行位移高精度的测量与控制。此外，考虑到疲劳加载过程中的数据采集，数据采集系统由 SOC 芯片控制系统组成，内部有多个 DSP 系

统，并可自定义 CPU，其数据采集速度最高可达 5000 Hz。

对于疲劳载荷下的超导样品临界电流测试的实验过程，首先，将超导电流源与样品电流引线连接、电压引线与 Keithley 2700 多通道数据采集卡采集通道连接，连接完成后将测试的疲劳加载后的 YBCO 样品置于测试用低温箱体中。待样品充分冷却后，开启电流源和 NI 数据采集卡，打开并启动测试程序；其次，不断增大加载电流，电压达到临界转变电压，工程上以 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 为失超判据，测得临界电流值后，将电流卸载至 0 A。绘制电流加载过程 V - I 曲线。考虑测试样品两端的接触电阻 R ，根据 $V = V_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n + IR$ ，指数拟合测得的 V - I 曲线，可得到样品的临界电流 I_c/I_{c0} 值和电阻转变陡度指数 n 。

此外，实验的误差分析也是测试过程中一个重要环节，实验前，对实验测试各子系统的机械误差进行了分析，在本测试系统中，电阻应变仪的误差是 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ ，高精度力学传感器误差是 $\pm 1.5 \text{ N}$ ，疲劳机的控制误差是 $< 1\% \text{FS}$ （量程），电压测量的误差是 $\pm 1 \times 10^{-4} \mu\text{V}$ ，而由于温度的波动所产生的力学测量误差为 $\pm 1 \times 10^{-2} \text{ N}$ 。为保证实验测试的精度，尽量减少测试系统误差的产生，实验时，对每组样品进行 4 次~6 次实验，对多次实验结果进行平均处理也可以避免实验中随机误差的产生。

2.2 实验结果

在本文的疲劳试验中，初始疲劳载荷中的位移量是参照单向拉/压实验的结果确定的，研究表明：载荷循环的频率对实验结果影响很小，可忽略不计，所以本文选用的实验频率是 5 Hz。而疲劳试验中的应力比是指试件循环加载时的最小荷载与最大荷载之比，在加速器磁体的应用中，由于需要实时地控制粒子运动的偏转路径，超导磁体结构时常处于变应力比的循环加载环境，因此，基于笔者自主研发的高温超导带材低/变温疲劳性能测试装置，考察 1 万次、5 万次和 10 万拉压循环加载时应力比效应下 YBCO 高温超导带材力学性能和电学性能对于其磁体结构设计是非常必要的。

2.2.1 屈服强度

YBCO 高温超导带材的屈服强度是其磁体力

学分析的一个重要参考指标。在实际工程设计过程中, 屈服强度也是设计人员主要关心的问题。通常, 屈服强度是指材料发生屈服现象时的屈服极限, 亦即抵抗微量塑性变形的应力。而对于 YBCO 高温超导复合材料, 它们没有明显的屈服极限, 因此, 规定以产生 0.2% 的残余变形的应力值为其屈服极限^[33-34]。图 6 分别是室温下 1 万次、5 万次、10 万次疲劳荷载后 YBCO 高温超导带材屈服强度与应力比的关系。一方面, 该样品在其他设备下测量的静态屈服强度为 528 MPa^[35], 而本文设备测量的拉伸强度为 529 MPa, 相对误差小于 1%, 表明该设备的力学功能具有很好的稳定性, 完全满足后续实验要求。随着应力比逐渐的变小, YBCO 高温超导复合材料的屈服强度缓慢的提高, 且与疲劳荷载应力比成非线性关系。在 1 万次疲劳荷载下的样品, 当疲劳荷载应力比降低至 0.1 时, 其相比静态载荷实验测得的屈服强度提高了约 5%, 这是由于其内部的位错力随应力比的下降而增大, 而使材料中位错的运动更加困难, 表现出在屈服阶段强度的提高。此外, 随着疲劳次数增加, 缺陷密度逐渐增大, 当应力比变小时, 屈服强度呈先增大后下降的趋势。

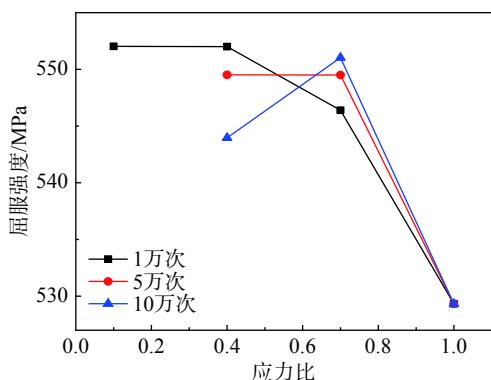


图 6 室温下不同次数疲劳荷载 YBCO 高温超导带材屈服强度与应力比依赖关系

Fig. 6 Yield strength-stress ratio curves of a YBCO tape under different fatigue cycles at room temperature

2.2.2 弹性模量

图 7 是室温下 1 万次、5 万次、10 万次疲劳荷载后 YBCO 高温超导带材弹性模量与应力比的依赖关系。

由于其弹性段很短, 通过初始段确定其弹性模量离散性较高。因此, 本试验中, 通过塑性段的回载曲线的斜率来确定材料的弹性模量。从图中可以看出, 其弹性模量与循环载荷应力比之间

存在一定的线性关系, 通过线性拟合, 可得出其复合材料结构的弹性模量与循环载荷应力比之间的关系, 进而方便工程设计人员灵活使用。从图 7 还可以看出, 随着应力比逐渐的变小, 其弹性模量也在减小, 在 1 万次疲劳荷载下的样品, 相比于应力比 1 时的弹性模量, 当应力比达 0.1 时, 测量值下降了约 10%, 这表明随着应力比降低, 超导样品的疲劳缺陷密度在提高。而在没有形成位错环之前, 高密度的缺陷分布会一定程度上降低 YBCO 高温超导带材的力学性能。此外, 随着疲劳次数的增加, 应力比对弹性模量的影响呈明显的非线性趋势。这说明应力比与疲劳次数叠加效应将共同影响其弹性模量。

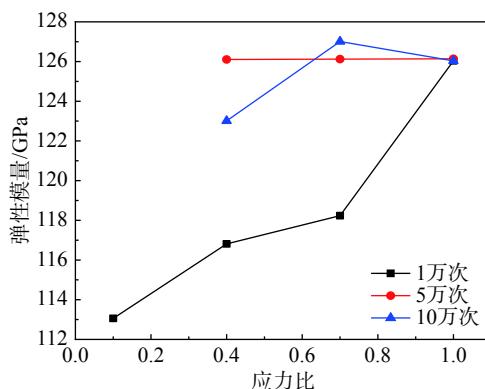


图 7 室温下不同次数疲劳荷载 YBCO 高温超导带材弹性模量与应力比的依赖关系

Fig. 7 Young's modules-stress ratio curves of a YBCO tape under different fatigue cycles at room temperature

2.2.3 临界电流

图 8 给出了 YBCO 高温超导带材在液氮环境下的临界电流随疲劳加载的应力比的衰减规律, 从图中可以看出, 当应力比达到 0.4, 疲劳荷载的

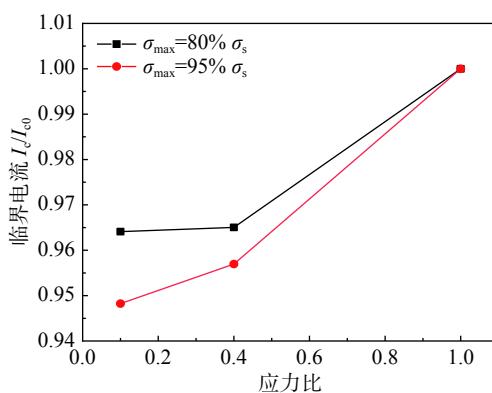


图 8 室温下 1 万次疲劳荷载 YBCO 高温超导带材临界电流与应力比的依赖关系

Fig. 8 Critical current-stress ratio curves of a YBCO tape after 10000 fatigue cycles at room temperature

最大应力提高到屈服强度的 80% 时, 临界电流衰减了大约 4%, 这表明, 当应力比减小时, 会引起 YBCO 超导带材内部的微裂纹^[36–37], 进而引起临界电流降低, 当应力比继续降低时, 内部的裂纹间相互制约, 造成相对的平衡态, 裂纹不再扩展, 临界电流相对保持不变。此外, 当疲劳荷载的最大应力提高到屈服强度的 95% 时, 临界电流衰减了达到 5% 以上, 这说明疲劳荷载的最大应力提高可以加速带材内部的微裂纹的扩展, 从而使临界电流衰减速率加快。

2.2.4 n 值

图 9 是 n 值与应力比之间的关系, 当应力比为 0.7, 最大应力为屈服强度的 80% 时, n 值为 41, 而应力比不变, 最大应力为屈服强度的 90% 时, n 值为 40.6, 只有一些小的波动。当应力比达到 0.4 时, 两种工况下的 n 值快速下降; 而当应力比达到 0.1 时, 最大应力为屈服强度的 80% 的工况变化很小, 最大应力为屈服强度的 90% 的工况下降了约 5%, 这说明, 当最大应力强度提高, 且应力比降低时, 带材中的预应变会相应的提高, 带材可能出现过度的分层现象, 进一步地影响了 n 值的变化。总的来说, n 值的变化与临界电流的变化大体相似, 说明在疲劳荷载时, YBCO 高温超导带材的超导层中会出现裂纹, 并且随着应力比的减小, 裂纹逐渐向外延伸传播, 破坏超导层, 使得电流进入银层和铜稳定层, 电压逐渐增加, 最终造成一定的分流现象。

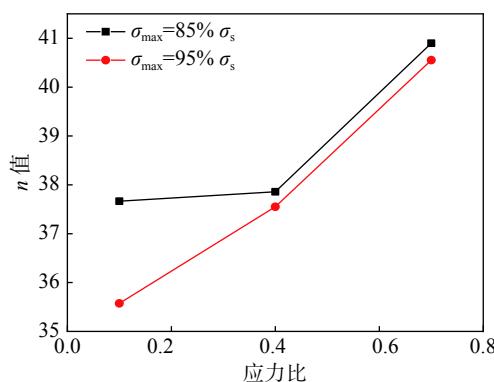


图 9 室温下 1 万次疲劳荷载 YBCO 高温超导带材 n 值与应力比的依赖关系

Fig. 9 n value-stress ratio curves of a YBCO tape after 10000 fatigue cycles at room temperature

3 结论

本文介绍了一种适用于高温超导带材低/变温

疲劳性能测试系统, 该系统可以在低/变温环境下对疲劳载荷和各种应变引起超导材料临界电流的改变进行深入研究, 同时具有高精度的静动态力学、热学、电磁学测量功能。该装置的成功研制将为我国加速器用高温超导材料与磁体结构的研发提供相关的基础。此外, 在本测试系统的设计阶段, 通过预留设计位置, 研制成功了大空间的低温真空箱, 为未来的超导背景磁体安装提供了相应空间, 为系统的进一步指标提升和电磁功能实现奠定了基础。

基于所搭建的测试系统, 本文对受拉-压疲劳荷载下的上海超导 YBCO 高温超导带材的力学行为、载流特性开展了初步的实验研究, 实验发现, 在 1 万次、5 万次、10 万次拉压疲劳荷载的工况下, YBCO 高温超导带材的力学性能与载流特性与其应力比成明显的非线性关系, 其中, 在 1 万次疲劳荷载工况下, 材料的弹性模量随着应力比的降低而减小, 其屈服强度随着应力比的降低而增大, 临界载流特性随着应力比的降低而减小, 并且随着疲劳次数的增加, 应力比对于材料力学性能的非线性效应越明显, 而疲劳荷载最大应力会加剧其临界载流特性的退化, 这些性能的变化与其疲劳荷载下微观损伤机制是直接相关的。未来, 将会增加样品的种类及数目, 改进实验装置, 使其能在低变温环境下实现超导材料在疲劳变形过程中电磁、机械等特性的非接触测量。为我国粒子加速器用高温超导磁体的设计与研发提供基础测试平台, 相关基础实验的研究也将为 YBCO 超导带材的机械和电磁特性研究及交变载流高温超导磁体的设计分析奠定基础。

参考文献:

- [1] Aymar R, Genevey P, Palanque S, et al. A NbTi 10T 388mm bore magnet working at 1.8 K in pressurized superfluid helium [J]. Cryogenics, 20(9): 521 – 524, 1980.
- [2] Banks M. Superconductivity: The first 100 years [N]. United Kingdom: Physics World, 2011.
- [3] 张博. 超导电力材料发展的现状和前景[J]. 新材料产业, 2014, 3: 53 – 55.
Zhang Bo. Status and prospects of the development of superconducting materials [J]. Advanced Materials Industry, 2014, 3: 53 – 55. (in Chinese)
- [4] 王秋良. 高磁场超导磁体科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Qiuliang. High magnetic field superconducting

- magnet science [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [5] Weijers H W, Markiewicz H W, Voran A J, et al. Progress in the development of a superconducting 32T magnet with REBCO high field coils [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(3): 1—5.
 - [6] Iwasa Y, Bascunan J, Hahn S, et al. A high-resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR magnet [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25: 4301205.
 - [7] Matsumoto S, Kiyoshi T, Otsuka A, et al. Generation of 24 T at 4.2 K using a layer-wound GdBCO insert coil with Nb₃Sn and Nb-Ti external magnetic field coils [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(2): 108—112.
 - [8] Yoon S, Kim J, Cheon K, et al. 26 T 35 mm all-REBCO multi-width no-insulation superconducting magnet [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2016, 29: 1—6.
 - [9] Awaji S, Watanabe K, Oguro H, et al. New 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet Project at Tohoku University [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(3): 4302005.
 - [10] Liu J, Li Y. High-field insert with Bi-and Y-based tapes for 25 T all-superconducting magnet [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(7): 4602705.
 - [11] 刘建华, 程军胜, 王秋良, 等. 高场超导磁体研究进展及其应用[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 1—12.
Liu Jianhua, Cheng Junsheng, Wang Qiliang, et al. Research progress and application of high-field superconducting magnets [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2017, 36(11): 1—12. (in Chinese)
 - [12] Takahashi H, Igawa K, Arii K, Kamihara Y, et al. Superconductivity at 43 K in an iron-based layered compound LaO(1-x)F(x)FeAs [J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 376—378.
 - [13] Chen X, Struzhkin V V, Yu Y, et al. Enhancement of superconductivity by pressure-driven competition in electronic order [J]. *Nature*, 2010, 466: 950—953.
 - [14] Duan Y, Ta W, Gao Y. Numerical models of delamination behavior in 2G HTS tapes under transverse tension and peel [J]. *Physica C: Superconductivity and Its Implications*, 2018, 545: 26—37.
 - [15] Gao P, Wang X. Analysis of torsional deformation-induced degeneration of critical current of Bi-2223 HTS composite tapes [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 141: 401—407.
 - [16] Gao P, Wei X, Wu B, et al. Numerical investigation on decreasing radial stress in epoxy impregnated REBCO pancake coils by overband [J]. *Cryogenics*, 2019, 103: 102971.
 - [17] Elen J D, Franken W M P, Horvath I, et al. The superconductor test facility SULTAN [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1981, 17(1): 490—493.
 - [18] Bruzzone P, Stepanov B, Wesche R, et al. Operation and test results from the SULTAN test facility [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22(3): 9501704.
 - [19] Verweij A. The 10 T dipole magnet of the FRESCA facility: An overview of 6 years of operation, magnets and superconductors group AT-MAS [J]. Internal Note, 2005: 2005—04.
 - [20] Ulbricht A, and the ITER L2 Project Team. Test results of the ITER toroidal field model coil experiment in the TOSKA facility of the KIT [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, 66-68: 103—118.
 - [21] 钱莉, 武玉, 刘华军, 等. ITER CC导体测试装置数据采集系统的设计与应用[J]. 超导技术, 2012, 40(9): 27—31.
Qian Li, Wu Yu, Liu Huajun, et al. Design and application of data acquisition system for ITER CC testing apparatus [J]. *Superconductivity*, 2012, 40(9): 27—31. (in Chinese)
 - [22] 王省哲, 周又和, 关明智. 极端低温环境下超导材料力学性能测试系统的研制与应用 [C]. 昆明: 第十三届全国实验力学会会议, 2012: 112.
Wang Xingzhe, Zhou Youhe, Guan Mingzhi. A test facility for investigating mechanical properties of superconducting wires and tapes under extreme environments [C]. Kunming: The 13th National Conference on Experimental Mechanics, 2012: 112. (in Chinese)
 - [23] Guan M, Wang X, Zhou Y H. Cryogenic temperature dependence of tensile response of NbTi/Cu superconducting composite wires [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22(6): 8401106.
 - [24] Wang X, Zhou Y, Guan M, et al. A versatile facility for investigating field-dependent and mechanical properties of superconducting wires and tapes under cryogenic-electro-magnetic multifields [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 085117.
 - [25] Guan M, Hahn S, Bascuñán J, et al. A parametric study on overband radial build for a REBCO 800 MHz insert of a 1.3 GHz LTS/HTS NMR magnet [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 430120.
 - [26] Rogers S, Schwartz J. Tensile fatigue behavior and crack growth in GdBa₂Cu₃O_{7-x}/stainless-steel coated conductor grown via reactive co-evaporation [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2017, 20: 045013.
 - [27] Sugano M, Yoshida Y, Hojo M. Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K for MOCVD-YBCO-coated conductors [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2008, 21: 054006.
 - [28] Shin H, Dizon J, Kim K, et al. I_c degradation behaviors of Bi-2223 superconducting tapes under axial fatigue loading [J]. *Cryogenics*, 2006, 46: 378—384.
 - [29] Hojo M, Osawa K, Adachi T, et al. Effect of fatigue loading on critical current in stainless steel-laminated DI-BSCCO superconducting composite tape [J]. *Physica C*, 2010, 470: 1373—1376.
 - [30] Chen W, Zhang H, Chen Y, et al. Impact of fatigue loading on the critical current of Bi-2223 tapes under background magnetic field [J]. *Cryogenics*, 2018, 94: 1—4.

- [31] Chen W, Zhang H, Chen Y, et al. Fatigue behavior of critical current degradation for YBCO tapes at 77 K [J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2018, 28(3): 8400905.
- [32] 关明智, 王省哲, 马力祯, 等. 液氮低温环境下电阻应变片测试性能的试验研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(11): 350—354.
Guan Mingzhi, Wang Xingzhe, Ma Lizhen, et al. Experiment study on mechanical properties based on resistance strain gauge under liquid nitrogen cooling environment [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(11): 350—354. (in Chinese)
- [33] Shin H, Gorospe A, Bautista Z, et al. Evaluation of the electromechanical properties in GdBCO coated conductor tapes under low cyclic loading and bending [J]. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, 29: 014001.
- [34] 班慧勇, 白日升, 刘明, 等. 钛-钢复合钢材力学性能及本构模型研究 [J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 57—66.
Ban Huiyong, Bai Risheng, Liu Ming, et al. Study on the material properties and constitutive model of Titanium-Clad steel [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 57—66. (in Chinese)
- [35] 辛灿杰. 超导材料低温力学实验及多场性能测试仪器原型机研制中的若干关键技术研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
Xin Canjie. Experiment of cryogenic mechanical properties on superconducting materials and key technologies R & D of multi-field prototype test facility [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [36] 廖小伟, 王元清, 石永久, 等. 低温环境下桥梁钢Q345qD疲劳裂纹扩展行为研究 [J]. *工程力学*, 2018, 35(10): 85—91.
Liao Xiaowei, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu, et al. Experimental study on the fatigue crack growth behavior of bridge steel Q345qD at low temperatures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(10): 85—91. (in Chinese)
- [37] Rogers S, Chan W K, Schwartz J. Effects of room-temperature tensile fatigue on critical current and n-value of IBAD-MOCVD $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ /Hastelloy coated conductor [J]. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, 29: 085013.

(上接第 218 页)

- [20] GB50010—2010, 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB50010—2010, Concrete structure design specification [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [21] Liu Fangzhou, Battin J M, Pacoste C, et al. Experimental and numerical dynamic analyses of hollow core concrete floors [J]. *Structures*, 2017(12): 286—297.
- [22] Casagrande D, Giongo I, Pederzolli F, et al. Analytical, numerical and experimental assessment of vibration performance in timber floors [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 748—758.
- [23] 陆春华, 金伟良, 宋志刚. 基于振动舒适度要求的混凝土楼板自振频率分析 [J]. *建筑科学*, 2010, 26(7): 43—46.
Lu Chunhua, Jin Weiliang, Song Zhigang. Study on natural frequency of concrete floor based on vibration serviceability [J]. *Building Science*, 2010, 26(7): 43—46. (in Chinese)
- [24] 严世鑫, 陈隽, 叶艇. 大跨楼盖振动舒适度分析中阻尼比取值讨论 [J]. *建筑结构*, 2014, 9(增刊 44): 460—464.
Yan Shixin, Chen Jun, Ye Ting. Values of damping ration in long-span floor vibration serviceability assessment [J]. *Building structure*, 2014, 9(Suppl 44): 460—464. (in Chinese)
- [25] 逯静洲, Sim S H, Jr B F S. 基于随机减量法的分布式结
构模态参数识别 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 48—54.
Lu Jingzhou, Sim S H, Jr B F S. Modal parametric identification of distribution type structures based on random decrement technique [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(17): 48—54. (in Chinese)
- [26] 金忠谋. 材料力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 191—193.
Jin Zhongmou. Material mechanics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 191—193. (in Chinese)
- [27] European Committee for Standardization. General rules and rules for buildings: EN 1995-1-1: 2004 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [28] 杜浩, 胡夏闽, 王汉成, 等. 胶合木-混凝土组合楼盖人行荷载激励下振动舒适度研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(1): 140—148.
Du Hao, Hu Xiamin, Wang Hancheng, et al. Vibration serviceability of glulam-concrete composite floor under pedestrian excitation [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(1): 140—148. (in Chinese)
- [29] 陈隽, 王玲, 陈博, 等. 跳跃荷载动力特性与荷载模型实验 [J]. *振动工程学报*, 2014, 27(1): 16—24.
Chen Jun, Wang Ling, Chen Bo, et al. Experimental study on dynamic characteristics and load model of jump loads [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(1): 16—24. (in Chinese)