

文章编号: 1001-4888(2017)03-0326-07

高温超导带材多场特性测试系统研制进展(I)^{*}

张兴义, 周军, 周又和

(西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000)

摘要: 高温超导带材具有高的临界电流密度, 高磁场下优异的载流特性以及良好的成型性在强电领域如高场磁体、超导电缆等方面应用潜力巨大。在其应用过程中, 不可避免的低温-大电流-强磁场环境将对超导材料的载流能力产生影响, 而加工过程中的残余应力以及洛伦兹力的存在会显著的降低超导材料的临界电流, 造成相应超导装置功能性难以达到设计要求、且成为重要的安全隐患。本文介绍一种新型的适用于超导带材的力-磁-电多场耦合测试系统, 该系统目前采用浸泡式制冷, 可实现的主要功能有: (1) 超导材料临界电流密度测试; (2) 拉伸应变对超导带材临界电流的影响研究; (3) 磁场对超导带材临界电流的影响研究; (4) 力磁耦合情形下超导材料临界电流的变化规律; (5) 超导材料磁通稳定性测试。该设备的成功研制将为我国先进超导材料研发提供基础测试平台。

关键词: 高温超导带材; 多场耦合; 测试系统

中图分类号: O348.9

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-063

0 引言

1911 年荷兰科学家 Onnes 发现金属汞在 4.2K 附近电阻突降为零, 揭开了人类发现、探索超导现象, 并将其推向应用的篇章。基于超导体电阻为零的特征, Onnes 在 1913 年采用临界温度约 7.2K 的铅导线绕制线圈以求获得巨大磁场, 然而, 他发现很小的电流便可使超导体恢复至正常态^[1], 这一电流后来被定义为超导体的临界电流。接着, 实验发现^[2], 外加磁场也可使超导材料从超导态转变为正常态, 这样, 超导材料具有了三个特征参数, 即临界温度、临界电流和临界磁场, 且相互影响。因此, 描述超导电磁现象一般采用电场强度 E 、磁场强度 B 和临界电流 J , 考虑到温度 T 的影响, 一般意义的电磁本构方程可表示为: $f(r, E, B, J, T) = 0$, 其中 $f()$ 表示一种函数形式, r 表示坐标矢量。对于传统的低温超导体, 如汞、铅、铌等金属超导体, 临界电流较低, 难以实现大电流领域的应用。随着合金超导体的出现, 特别是 NbTi 和 Nb₃Sn 的出现使超导体的强电应用成为可能, 其临界电流密度在 4.2K 自场条件下一般高于 600A/m² (自场是指超导体所处环境仅存在由载流产生的磁场, 而无其他外加磁场)。然而, 早在 1964 年 Müller 等人就注意到应力会引起超导体临界电流密度的降低^[3]。随后 Ekin 等人对 Nb₃Sn 的应力许用特性进行了较深入的研究^[4-6]。近年来, 随着国际热核聚变试验堆 (ITER) 的进展, 针对其所使用的 NbTi 铜复合股线, 特别是 Nb₃Sn 复合股线在应力作用下临界电流的退化行为引起了国际上大量的关注, 相应地研制出 U-Spring, Pacmen, C-ring, Walters spring 等^[7-10]适用于低温超导体股线多场耦合特性研究的设备。而我国目前尚无相关的测试设备, 这已成为制约我国独立开展磁约束核聚变能开发利用的重要瓶颈, 详见周又和等的综述文章^[11]。另外, 高温超导体的出现, 由于其相较于低

^{*} 收稿日期: 2015-04-04; 修回日期: 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11372121), 创新研究群体 (11421042), 国家重大科研仪器专项 (11327802)

通讯作者: 张兴义 (1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域: 实验固体力学, 电磁固体力学。Email: zhangxingyi@lzu.edu.cn

温超导体具有更高的临界磁场,且制冷剂为更廉价、更普遍的液氮,较之液氦制冷,成本降低并不受外界约束,特别是已商品化的高温超导二代带材(主要是指 YBCO 2G)的出现,有力地推动了高温超导材料在强电领域的应用。同样,高温超导带材临界电流也受到应力作用的影响^[12-15],而截至目前,国际上尚无适用于超导带材的多场耦合测试系统(上面提到的测试系统由于受限于样品长度或螺旋状结构,难以满足超导带材的研究需要)。2003年,荷兰 Twente 大学研究人员 Ten 等^[16]采用悬臂梁弯曲模式对应力引起超导带材临界电流密度的退化进行了测试,由于受空间限制且须粘贴在悬臂梁表面的实验模式都限制了进一步对高温超导带材应力特性研究的可能性。本文基于一种直接拉伸模式,采用不锈钢材料制作的材料试验机,结合中心最大磁场可达 5T 的磁场发生器,成功完成了超导带材多物理场特性实验测试系统的研制,其功能对于进一步深入研究超导带材的多物理场特性提供了保障。

1 实验装置

1.1 装置结构

实验装置示意图如图 1 所示,装置主体由三大部分构成,分别为加载装置、磁体系统和测控系统。加载装置主体为电子万能试验机,其机身均由不锈钢材料特制而成,最大实验力 10000N,精度 0.5 级。铜材料制成的夹具不仅在低温下具有良好的夹持性,还可作为电流输入接头。两个夹头之间最大距离 150mm,夹头与材料试验机之间采用有机材料进行必要的绝缘。磁体系统为中科院电工所研制的超导磁体,中心最大磁场 5T,磁场均匀区直径 150mm,高度 110mm,磁场波动低于 1%。测控系统主要包括 Cryogenic 公司 SMS 600 电流发生器和吉时利 2182A 型纳伏表,电流发生器最大电流 600A,电流变化速率可控,电压表分辨率为 1nV。由于杜瓦容器空间有限,传统的引伸计难以使用,因此,在超导体上下表面粘贴低温应变片(由 KYOWA 公司生产)来获得其应变。测控系统的主要功能包括:(1)控制材料试验机,包括最大拉伸力和拉伸速度;(2)控制超导材料的输入电流并实时测试其电压值;(3)读取应变片的数据以获得材料应力应变曲线。图 2 为该测试装置的实物图。

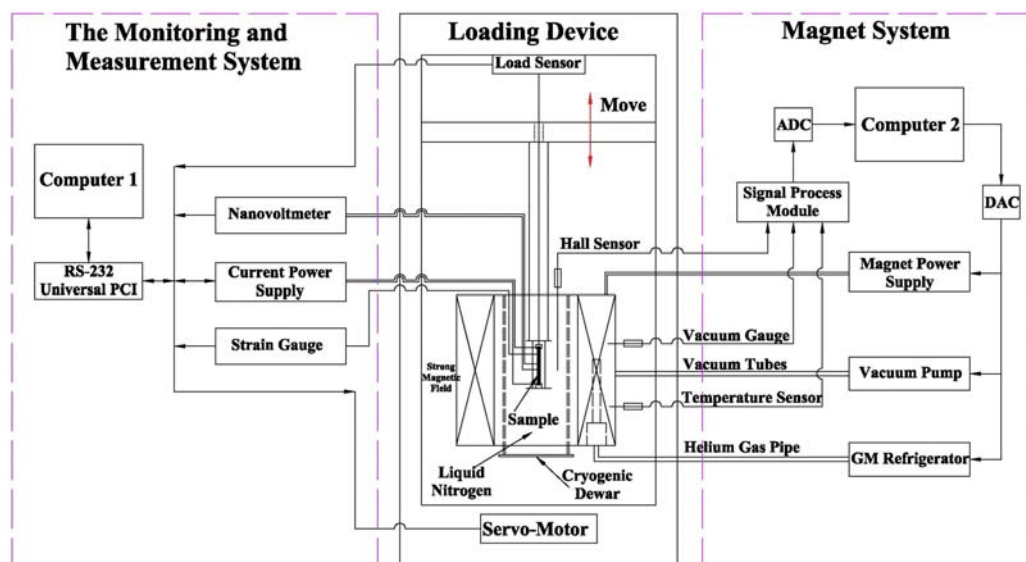


图 1 设备结构示意图,包括加载装置、磁体系统和测试控制系统

Fig. 1 The schematic illustration of the measurement system, which includes loading device, magnet system and the monitoring and measurement system

1.2 实验样品

实验样品采用西北有色金属研究院提供的 Bi-2223(图中用 B2223 缩写表示)系列超导带材,长度 100mm,宽度 4mm,厚度约为 0.2mm。两个电压测试点分别位于中心两端,间距 20mm,电压判据 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ (电压判据通常是指超导体由超导态恢复至正常态时的最小电压)。低温应变片长度 1.5mm,宽度

1mm,适用温度 4~423K,由专用的低温粘胶粘贴在超导带材上下表面,具体粘贴过程可见文献[17]。

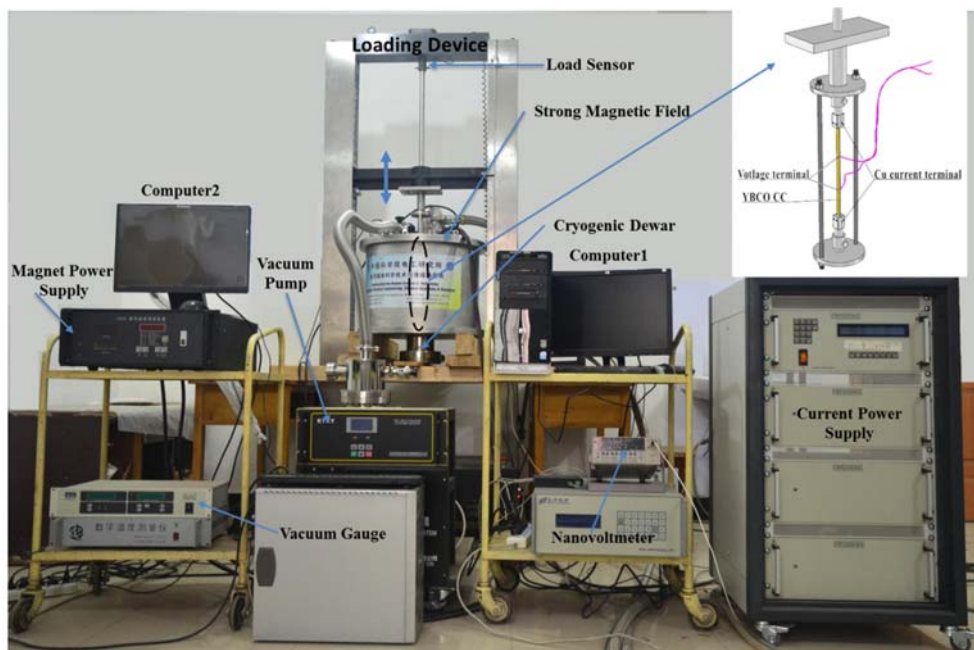


图 2 实验装置实物图

Fig. 2 Photo of the actual equipment of the measurement system

1.3 实验过程

首先,在超导体上下表面完成低温应变片的粘贴,接着在中心两端焊接两个电压测试引线,间距 20mm。将待测样品置入铜质夹具,进行一定量的预拉伸,使超导带材保持伸直状态(应变为零)。给低温容器注入液氮进行冷却,待热平衡后先进行液氮温度、自场条件下的临界电流测试,得到待测样品的初始临界电流 I_0 。之后可进行不同应变量的拉伸实验,拉伸过程为准静态。实验中应变一般选取 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、1.0%,完成不同应变对超导带材临界电流密度的影响规律测试之后,去除外力,测试当外力恢复至零时超导样品的临界电流。随后更换样品,进行外磁场实验。当超导样品完成冷却后,仍然是先进行初始临界电流测试,获得 I_0 ;然后施加外加磁场,磁场方向平行于超导材料的 ab 面,这样便可获得外加磁场对超导材料临界电流的影响规律。第三类实验是力-磁耦合实验,先对样品施加一定量的外加磁场,磁场方向平行于样品的 ab 面。然后对其拉伸,当样品应变达到预期值之后停止拉伸,测试样品此时临界电流,获得力-磁状态下超导体临界电流的变化规律。一般来讲,磁场和应变的施加顺序对测试结果存有影响,这一工作将另文叙述。

2 实验结果

2.1 77K 自场环境临界电流

图 3(a)所示为液氮温度自场环境下某个超导样品的临界电流,由图可以看出,该样品临界电流为 45.2A。

2.2 77K 自场环境应变对临界电流的影响

图 3(b)所示为液氮温度自场环境中超导带材的应变对临界电流的影响结果图。图中点 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K 对应拉伸应变为 0.005%、0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.1%、0.12%、0.145%、0.15%、0.19%、0.21%时的临界电流。A'、B'、C'、D'、E'、F'、G'、H'、I'、J'、K' 分布表示撤去外力待样品应变恢复至初始值时的临界电流。所有实验所得临界电流均以对应磁场下应变为 0 时的 I_0 (B) 为据进行归一化。由图可以看出如下几条结论:(1)超导带材临界电流随应变的增大先基本不变,一旦应变超过某临界值(图中所示为 0.1%),临界电流迅速衰减;(2)撤去外力待样品应变恢复至初始后,样品的临界电流均与拉伸状态时相当,图中所示为红颜色的点;(3)超导样品存在一个特征应变,即

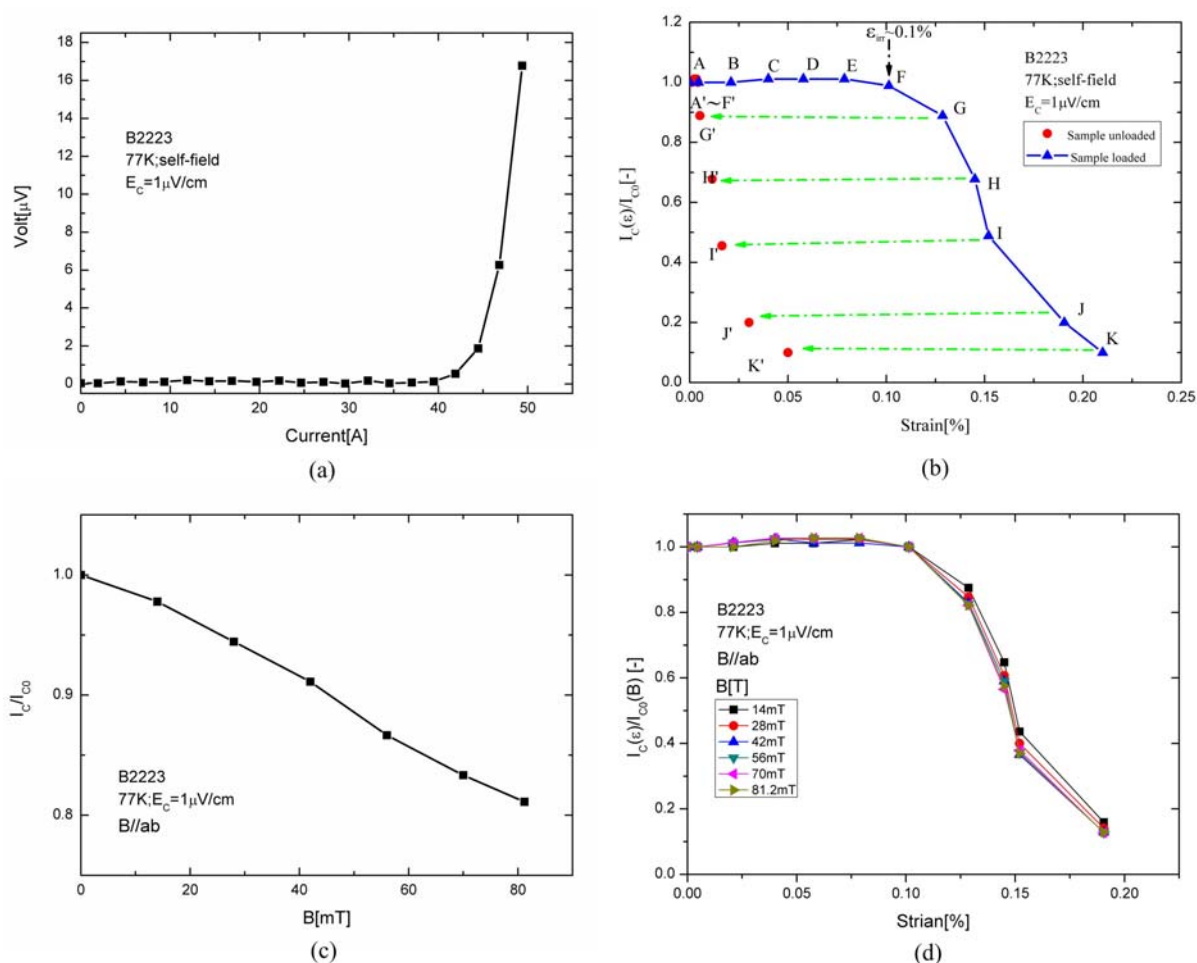


图3 主要实验结果图:(a)超导材料电压电流曲线;(b)临界电流随应变的变化规律;

(c)外加磁场对临界电流的影响;(d)力-磁耦合对临界电流的影响

Fig. 3 The collected experimental results: (a) voltage and current curve of one of the samples;

(b) critical current as a function of tension strain; (c) critical current as a function of magnetic field;

(d) influences of magnetomechanical coupling on critical current

一旦样品应变恢复至初始,临界电流也可完全恢复至初始值(图中F点)。根据研究的需要,通常将这一特征应变定义为可逆应变,其值决定了超导带材的工程应用。

2.3 77K 外加磁场对临界电流的影响

液氮温度下外加磁场(平行于样品 ab 面)对超导样品临界电流的影响实验结果如图 3(c)所示。可以看出,随着外加磁场的增大,超导材料临界电流呈现下降的趋势。同时,表明 77K 时对于 Bi-2223 超导带材,临界电流对外加磁场非常敏感,当外加磁场仅为 80mT 时,临界电流已经衰减到 80%。

2.4 77K 力-磁耦合对临界电流的影响

磁场方向同样是平行于超导材料的 ab 面,外加的拉伸沿着样品长度方向。实验中先设定外加磁场的大小,然后在保证外场不变的情形下,对样品进行拉伸,一旦超导材料应变达到预设值如 0.05%、0.1%等,测试其临界电流密度。图 3(d)所示为力磁耦合作用下超导带材临界电流密度的变化图。

3 讨论与展望

前面重点介绍了适用于超导带材多场耦合特征研究的测试平台构造及基本功能,在本小节中我们将对其测试精度进行讨论。由于设备的主要目的是在外加磁场、应变条件下对超导材料的临界电流进行测试,可将其测试精度分为三部分进行讨论:(1)应变测试精度。目前,我们采用粘贴低温应变片的方法来获得超导材料的应变,因此其精度就是电测法的基本精度;(2)磁场测试精度。磁场测试精度由采

用的 Hall 探头决定,实验中我们选用 Lakeshore 公司生产的 421 型台式高斯计,当选用最大量程为 30kg 时,直流磁场测试精度为 0.001kg;(3)电流测试精度。实验中采用 SEM600 直流电源和吉时利 2182A 型纳伏表,其精度分别为 0.1 μ A 和 1nV(可选),均可以满足实验要求。另外从装置的构造可以看出,磁体系统与试验机隔离,其控制和测试均独立,而拉伸和电流测试是同步测控的,因此使用过程中仅需注意保持试验机 and 电流测试系统绝缘即可。

另外,对于超导材料而言,尤其是高温超导材料,其磁通稳定性是影响超导装置安全性的重要因素之一。而磁通稳定性的研究手段主要是对超导样品的输出电压进行实时检测,图 4 是液氮温度下超导样品在不同条件下的电压随时间弛豫的过程图。可以看出既使是在很小的输入电流的情况下,磁场和应力都有可能使超导体发生电压跳跃,即发生不稳定的磁通运动。不同电流变化速度引起的高温超导带材磁通稳定性可参见我们小组的文章^[18]。

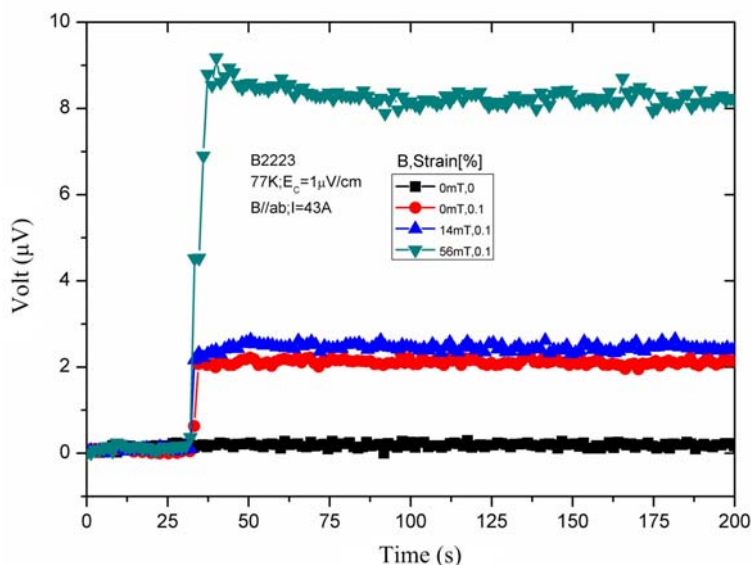


图 4 液氮温度下 43A 超导样品电压—时间曲线随不同应力和磁场演化图

Fig. 4 Time evolution of the $V-t$ curves with current of 43A at liquid nitrogen temperature under different magnetic fields and tension strains

最后,由于超导材料必须在低温环境中工作,所以温度对其自身超导特性也存在影响。目前我们完成的这一测试装置采用液氮浸泡方式冷却,可测试温度单一,极大地限制了该系统的研究范围。因此,我们将对浸泡式低温杜瓦进行改造,使用制冷机直接冷却方式,实现最低 4.2K 到室温范围内温度连续变化可控,建立超导材料力-电-磁-热四场耦合特性研究平台。另外,粘贴电阻应变片的应变测试方式仅可获得超导带材的平均应变,超导材料变形引起的内部结构变化特征无法得知。因此摒弃这一传统的应变测试方式,采用可视界面并寻求超导材料内部损伤演化的在线观测技术将成为我们下一步的研究方向。

4 结论

本文介绍了一种适用于高温超导带材力-磁-电多场耦合特性的研究平台,该系统可以对外加磁场和应变引起超导材料临界电流的改变进行深入研究,可实现功能具有一定的先进性,同时具有较高的精度。该装置的成功研制将为我国先进超导材料研发提供基础。另外,单一的温度环境和封闭内置的低温杜瓦难以对超导材料温度效应及其内部损伤进行有效观测,这为我们进一步的提升和改进该系统指明了方向。

致谢 感谢中科院理化所李来风研究员等在设备研制过程中给予的帮助,感谢参与此设备研制的研究生刘伟、岳动华等人。

参考文献:

- [1] 章立源, 张金龙, 崔广霁. 超导物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995 (ZHANG Liyuan, ZHANG Jinlong, CUI Guangji. Superconductivity Physics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995 (in Chinese))
- [2] Onnes H K. The appearance of galvanic resistance in supra-conductors which are brought into a magnetic field, at a threshold value of the field[M]. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1914, 139f.
- [3] Muller C B, Saur E J. Influence of mechanical constraints on critical currents of superconducting surface layers of Nb_3Sn on niobium and 3Ga on vanadium in transverse magnetic fields[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1964, 9: 338—341.
- [4] Ekin J W. Effect of the stress on the critical current density of Nb_3Sn multifilamentary composite wires[J]. Applied Physics Letters, 1976, 29: 216—219.
- [5] Ekin J W. Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part 1: Basic relationship and application to Nb_3Sn conductors [J]. Cryogenics, 1980, 20: 611—624.
- [6] Ekin J W. Stress/strain effects on critical current[J]. Cryogenics, 1995, 35: S25—S28.
- [7] van Eck H J N, van der Laan D C, Dhallé M, et al. Critical current versus strain research at the University of Twente[J]. Superconductors Science & Technology, 2003, 16(9): 1026.
- [8] Godeke A, Dhallé M, Morelli A, et al. A device to investigate the axial strain dependence of the critical current density in superconductors[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(12): 5112.
- [9] Nunoya Y, Isono T, Koizumi N, et al. Development of strain-applying apparatus for evaluation of ITER Nb_3Sn strand[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2588.
- [10] Uglietti D, Seeber B, Abächerli V, et al. A device for critical current versus strain measurements up to 1000A and 17T on 80cm long HTS and LTS technical superconductors [J]. Superconductors Science & Technology, 2003, 16(9): 1000.
- [11] 周又和, 王省哲. ITER 超导磁体设计与制备中的若干关键力学问题[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1558—1569 (ZHOU Youhe, WANG Xingzhe. Review on some key issues related to design and fabrication of superconducting magnets in ITER[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43: 1558 — 1569 (in Chinese))
- [12] Uglietti D, Seeber B, Abächerli V, et al. Critical currents versus applied strain for industrial Y-123 coated conductors at various temperatures and magnetic fields up to 19T[J]. Superconductors Science & Technology, 2006, 19(8): 869.
- [13] Laan D C V D, Ekin J W, Douglas J F, et al. Effect of strain, magnetic field and field angle on the critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors[J]. Superconductors Science & Technology, 2010, 23(7): 072001.
- [14] Hyung-Seop Shin, John Ryan C Dizon, Tae-Hyung Kim, et al. Critical current degradation behavior in YBCO coated conductors under torsional strain[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 3274.
- [15] Daniel C van der Laan, Timothy J Haugan, Paul N Barnes. Effect of a compressive uniaxial strain on the critical current density of grain boundaries in superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(2): 027005.
- [16] Ten Haken B, Godeke A, Ten Kate H H J. The strain dependence of the critical properties of Nb_3Sn conductors [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85: 3247.
- [17] Xingyi Zhang, Donghua Yue, Jun Zhou, et al. Thermal stresses in the large grain YBaCuO superconductors during zero field cooling[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2013, 26: 87—92.
- [18] Xingyi Zhang, Jun Zhou, Donghua Yue, et al. Experimental investigations on the vortex instability and time effects of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coated conductors [J]. Physica C, 2014, 497: 62—66.

Development of Multi Field Test System for High Temperature Superconducting Tapes

ZHANG Xing-yi, ZHOU Jun, ZHOU You-he

(Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China attached to the Ministry of Education of China, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: High temperature superconducting tapes with high critical current density, excellent current carrying characteristics and good formability in high magnetic field have huge potential application in strong electromagnetic fields, such as high field magnets and superconducting cables. In its application process, the inevitable environment, such as low temperature, high current and strong magnetic field will impact current carrying capacity of superconducting material. The residual stress due to processing and existing Lorentz force can significantly reduce the critical current of superconducting material, resulting in the function of corresponding superconducting device is difficult to meet the design requirement, and even resulting in potential safety hazard. In this paper, a new type of force-magneto-electric multi field coupling test system is introduced. At present, this system adopts immersion type refrigeration, can achieve the main functions are: (1) the critical current density measurement of superconducting material; (2) the influence of tensile strain on the critical current density of superconducting tapes; (3) the influence of magnetic field on the critical current density of superconducting tapes; (4) the critical current variation of superconducting material subjected to force-magnetic coupling action; (5) superconducting material magnetic flux stability test. Successful development of this equipment will provide a basic testing platform for the research and development of advanced superconducting materials in our country.

Keywords: high temperature superconducting tapes; multi field coupling; test system