

藤仓高温超导带材临界电流测试实验研究

高温超导带材应用于超导限流器、超导储能等超导电力装置时,会受到外界磁场的影响。在外界磁场的影响下,高温超导带材的临界电流会发生衰减,衰减程度由外界磁场的方向和强度决定。临界电流直接影响这些超导电力设备的性能,因此在背景磁场下开展高温超导带材临界电流实验研究就显得至关重要。在77 K温度、不同磁场方向(垂直磁场、平行磁场和30°倾斜磁场)以及不同磁场强度(0~0.9 T)的外界条件下,采用四引线法测量了日本藤仓公司生产的REBCO高温超导带材临界电流的变化情况。详细介绍了临界电流特性测试平台的搭建和测量方法,最后基于REBCO超导带材临界电流的测试结果,分析了临界电流特征的变化规律,为高温超导带材应用于超导电力装置提供了参考。

刘二伟/国网河北省电力公司行唐县供电分公司 诸嘉慧 陈盼盼/中国电力科学研究院 刘芮彤 范 维/国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院

0 引言

面对资源短缺、环境污染和全球气候变暖等问题,超导电力技术因其零电阻及零损耗的优点,被美国能源部誉为21世纪电力行业的高科技储备技术之一^[1]。在超导电力技术应用中,超导储能(SMES)系统以其具有储能密度高、功率密度高、响应速度快、储能效率高及四象限功率补偿能力的特点,在提高电力系统稳定性、改善供电品质方面得到了广泛关注和深入研究^[2]。由于第一代高温超导带材使用了贵金属银,所以其制作成本下降空间受到限制。第二代高温超导带材虽然对设备、工艺等有较高的要求,但是随着技术的进步,其带材的

生产成本必然会下降,这就给超导电力设备的大规模应用带来了希望^[3-5]。

当第二代高温超导带材应用于超导储能装备时,带材的临界电流在储能磁体的设计过程中是个重要的参数。储能磁体在运行过程中会产生强磁场,而超导带材的临界电流对磁场又非常敏感。因此磁场对高温超导带材临界电流影响的研究对于储能磁体的设计就必不可少。日本藤仓公司是生产REBCO超导带材的典型代表,同时也是IBAD技术的首创者。目前,藤仓公司已实现数百米级REBCO带材的制备能力,承担了多个日本国内科研项目和多个国际科研项目^[6]。本文采用了日本藤仓公司制备的REBCO超导带材(宽度为5 mm,厚度为0.15 mm),通过搭建超导带材临界电流测试平台,在不同外界磁场强度(0~0.9 T)和不同磁场方向(0°、30°和90°)下,实验测量了77 K温度下超导带材的临界电流 I_c ,分析了外界磁场变化对临界电流 I_c 的影响。为第二代高温超导带材在电力设备中的应用提供了参考^[7]。

1 临界电流测试实验原理

1.1 自场临界电流测试实验

为了测得自场下单根超导带材的临界电流,搭建了临界电流测试平台。超导带材临界电流测试的原理如图1所示,1 000 A直流电源、分流器和测试样品组成闭合回路。图中,1 000 A直流电源用于供电;分流器用来测流过超导带材的电流;纳伏表用来测量超导带材两端的



刘二伟/硕士研究生

关键词/Keywords

高温超导带材·
临界电流·
背景磁场·
磁场方向·
藤仓·

国家电网公司科技项目“自触发磁偏置超导限流器技术研究及原理样机研制(DG71-16-002)”资助。

电压。超导样品的电压和电流信号由NI数据采集装置采集，并输入到PC端的LabVIEW测试系统中进行数据记录及数据处理。

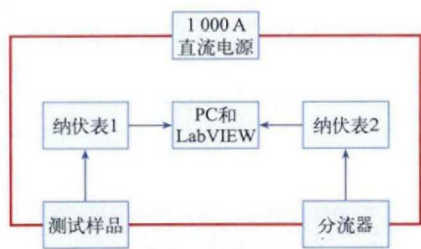


图1 超导带材临界电流测量原理

1.2 外场临界电流测试实验

为了测量得到不同磁场下带材的临界电流大小，需要将超导带材放置在具有均匀磁场强度的背景磁场环境中。背景磁场由直流磁体产生，由于铁心磁导率是空气的几千倍，直流磁体产生的磁通大部分经过铁心，从而能够在空气隙中形成一个均匀的磁场区域，这样便获得了一个稳定的外界磁场^[8]。

带空气隙铁心的背景磁场磁体（以下简称背景磁体）如图2所示。通过电流引线给背景磁体的线圈通入不同直流电流，按照标定的电流与磁场强度关系就可得到不同磁感应强度的背景磁场。超导带材样本架垂直穿过背景磁体铁心空气隙，其上部通过旋转杆接到低温杜瓦法兰外部，通过旋转能够改变超导带材样本与磁场的夹角。



图2 背景磁体

外场下超导带材临界电流测量原理如图3所示。REBCO超导带材、1 000 A直流电源和分流器形成一个闭合回路，而外界磁场则按已标定过的电流与磁场的关系由背景磁场电源提供，超导带材的电压和电流信号通过纳伏表由NI数据采集装置采集，并输入到PC端的LabVIEW测试系统中进行数据记录 and 数据分析。

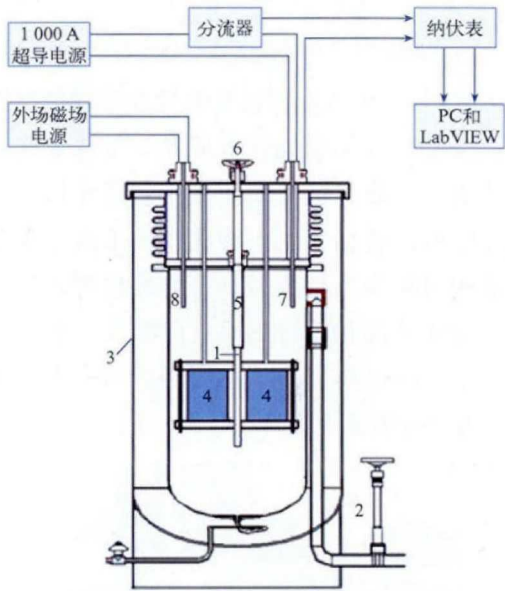


图3 外场下超导带材临界电流测量原理

1—超导样本架 2—抽气阀门 3—低温杜瓦 4—背景磁体 5—旋转杆
6—旋转把手 7—超导样本电流引线 8—背景磁体电流引线

当超导带材放入超导样品架后，通过调节外部磁场电源即可改变背景磁场的磁场强度；外部旋转杆经过事先标定，可以根据旋转杆上的标定刻度准确地判断高温超导带材与磁场的方向。

2 实验测试系统构造

实验过程中，首先将液氮注入低温杜瓦，根据放置在低温杜瓦内部的温度传感器（Pt100）来确定液氮是否完全浸没超导带材。Pt100在低温下阻值会发生改变。等待超导带材充分冷却，使用100 A直流电源为背景磁场供电，按照标定的电流与磁场强度关系调节直流电源，以到达所需的磁场强度。背景磁体电流与磁场强度的对应关系如图4所示。

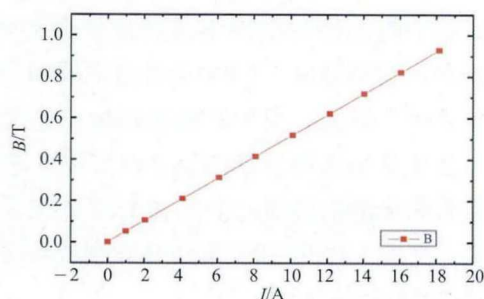


图4 背景磁体磁场参数

在PC端利用已经编好的LabVIEW测试软件程序,控制1 000 A直流超导电源为超导带材加载电流。通过NI数据采集设备采集分流器数据获得运行电流,在超导带材表面上安装测量接头并测量电压信号。根据电压引线之间的距离和测得的电压值即可得到失超判据。一组数据测完后,改变背景磁体电源和旋转把手可以继续实现不同磁场强度、不同磁场方向下超导带材的临界电流测试。临界电流测试实验系统如图5所示。

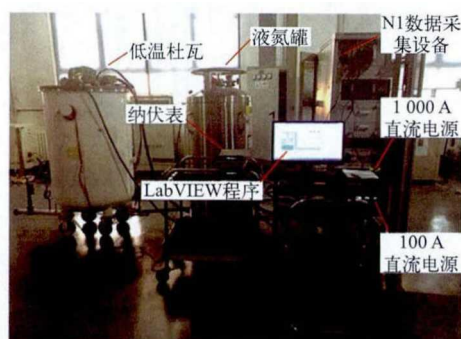


图5 临界电流测试实验

3 实验结果

3.1 自场下临界电流分布特性

应用自场临界电流测试平台,测量了日本藤仓公司生产的REBCO超导带材(5 mm×0.15 mm)在无外界磁场情况下的临界电流。单根带材的 $E-I$ 曲线如图6所示,根据临界电流判据(即当 $E=1\text{ }\mu\text{V/cm}$ 时,对应的电流值即为超导带材的临界电流^[9]),可以得到在无外界磁场的条件下,单根超导带材的临界电流 $I_c=300\text{ A}@77\text{ K}$ 。

3.2 平行磁场对带材临界电流的影响

超导带材在平行磁场下,临界电流随着磁

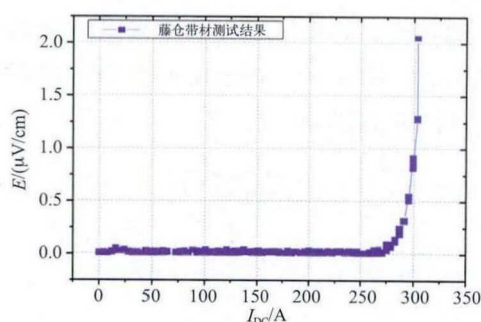


图6 单根超导带材 $E-I$ 伏安特性测试曲线
(无外界磁场,自场)

场大小的变化情况如图7所示。日本藤仓公司的REBCO超导带材(5 mm×0.15 mm)在自场下的临界电流为300 A。从图7中可以看出,随着磁场的增大,超导带材的临界电流逐渐变小。磁场强度为0.1 T时,带材的临界电流为216 A,衰减为自场下的72%;当磁场强度为0.9 T时,带材的临界电流变为70 A,衰减为自场下的23.3%。由此可见,磁场大小对于超导带材临界电流的影响非常大。在平行磁场的影响下,临界电流的衰减程度会随着磁场的增大而趋于平缓。

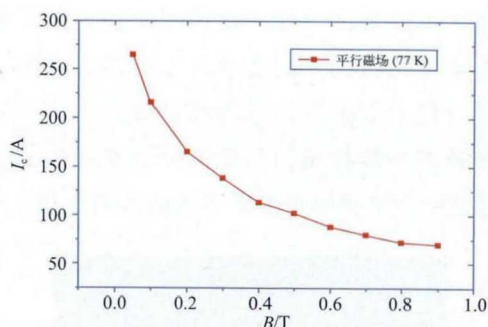


图7 平行磁场下超导带材临界电流与磁场强度的关系

3.3 垂直磁场对带材临界电流的影响

图8为超导带材在垂直磁场下临界电流的变化情况。与图7对比发现,带材的临界电流随着磁场的增大有着更为明显的衰减。当垂直磁场强度为0.9 T时,超导带材的临界电流仅为59 A,为自场下临界电流的19.7%。

3.4 磁场方向对临界电流的影响

图9给出了磁场为0.05~0.9 T,超导带材与背景磁场的角度分别为0°、30°和90°的情况下,带材

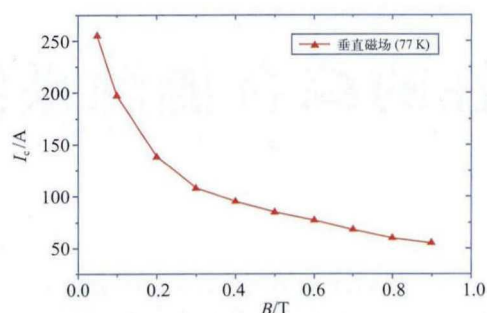


图8 垂直磁场下超导带材临界电流与磁场强度的关系

的临界电流随磁场的变化情况 (0° 为带材与背景磁场平行; 30° 为带材与背景磁场的夹角为 30° ; 90° 为带材与背景磁场垂直)。从图9中可以看出, 磁场强度为0.1 T时, 0° 、 30° 和 90° 磁场方向下超导带材的临界电流分别为216 A、210 A和197 A, 衰减为自场下临界电流值的72%、70%和65.7%; 当磁场强度为0.9 T时, 0° 、 30° 和 90° 磁场方向下超导带材的临界电流分别为70 A、63 A和59 A, 衰减为自场下临界电流值的23.3%、21%和19.7%。随着磁场方向由平行逐渐转为垂直, 临界电流的衰减程度逐渐变大。在磁场方向一定的情况下, 随着磁场强度的逐渐增大, 超导带材的临界电流逐渐变小, 但衰减程度会趋于平缓。

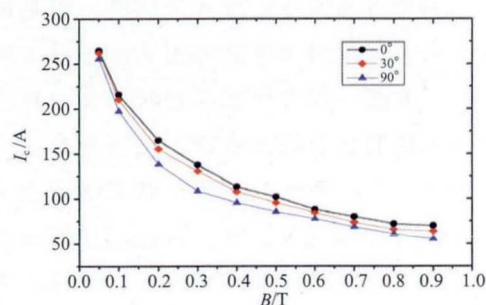


图9 不同磁场方向下超导带材临界电流与磁场强度关系

4 结束语

为了得到超导带材在外场下的临界电流情况, 采用四引线法搭建了临界电流特性测试平台。应用日本藤仓公司的REBCO超导带材 ($5\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$), 在温度77 K、磁场强度0~0.9 T条件下分别测量了垂直磁场、平行磁场和 30° 倾斜背景磁场下REBCO超导带材的临界电流。得到了不同

磁场强度和不同磁场方向下超导带材的临界电流变化规律。对实验结果进行分析得出: 随着磁场强度的不断增大, 超导带材的临界电流有着明显的衰减; 在外界磁场的方向由平行转为垂直的过程中, 临界电流衰减程度逐渐变大。实验结果对于超导储能磁体及其他超导电力设备的设计有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 肖立业, 林良真. 超导输电技术发展现状与趋势[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 1-9.
- [2] Mohd Hasan Ali, Bin Wu, Roger A Dougal. An overview of SMES applications in power and energy systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 38-47.
- [3] Satatou Yamaguchi, Yury Ivanov, Jian Sun, et al. Experiment of the 200-Meter superconducting DC transmission power cable in Chubu University [J]. Physics Procedia, 2012(36): 1131-1136.
- [4] Pascal Tixator. Development of superconducting power devices in Europe [J]. Physica C: Superconductivity and its applications, 2010, 470(20): 971-979.
- [5] Xin Y, Gong W Z, Sun Y W, et al. Factory and field tests of a 220 kV/300 MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5602305.
- [6] 王醒东. ReBCO超导材料及各国超导产业发展[J]. 新材料产业, 2014(8): 63-67.
- [7] 诸嘉慧, 宝旭峰, 丘明. 应用第2代高温超导体的冷绝缘超导电缆输电导体层均流技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 159-165.
- [8] 梁伟, 李敬东, 唐跃进, 等. 用于超导实验的背景磁体研制[J]. 低温与超导, 2006, 34(1): 1-3.
- [9] 诸嘉慧, 丘明, 田军涛. 一种新型YBCO高温超导带材临界电流测试方法[J]. 低温与超导, 2009, 37(5): 16-19.

(收稿日期: 2016-05-20) EA