Bi-2223高温超导带材液氮汽化温度以上温区临界电流特性研究

许姣姣¹, 杨天慧¹, 陈晓刚², 兰建西¹, 金辉¹, 李文鑫¹, 唐春州¹, 洪玮¹, 赵超群¹, 温雨雁¹, 杨超¹, 王峰渊², 熊佳玲¹, 张棣¹, 信赢^{1*}

1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007

* E-mail: yingxin@tju.edu.cn

收稿日期: 2019-09-24; 接受日期: 2019-12-12; 网络版发表日期: 2020-03-30

国家重点研发计划(编号: 2018YFB0904400)和国家电网公司科技项目(编号: 52110418003H)资助

摘要 (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (Bi-2223)高温超导带材是目前实现商业化应用的高温超导导线之一, 其超导临界转变温度为105~110 K, 高于另一种得到商业化应用的高温超导导线REBa₂Cu₃O₇涂层导体带材的超导临界转变温度(90~93 K). 在液氮汽化温度(77 K)以上, Bi-2223带材还有较大的超导温度区间. 为了掌握其在77 K以上温区的超导载流特性, 在该温区对两种不同的Bi-2223带材样品的临界电流进行了测量, 并对测量结果进行了总结分析. 在测量时对样品施加不同强度和角度的磁场, 研究磁场强度和磁场角度在此温区内对样品临界电流的影响, 得到了在温度范围77~92 K、外加磁场强度范围0~0.2 T、磁场角度变化范围0°~90°条件下的测量结果. 结果表明, Bi-2223超导带材在92 K时仍可承载具有实际使用意义的超导电流: 在无外加磁场或外加磁场接近于平行场且不大于0.1 T的条件下, 临界电流仍可保持为其在77 K自场下临界电流的40%~50%. 本研究结果对其在该温区的应用有重要的参考价值, 为开拓超导电缆应用范围提供一些基础信息.

关键词 Bi-2223超导带材, 临界电流, 磁场, 液氮以上温区

1 引言

1986年以来, 一系列高温超导体(high temperature superconductor, HTS)的发现使资源丰富、成本较低的液氮作为超导体应用的冷却剂成为可能, 也大大推进了超导技术的应用^[1]. 其中, 1988年发现的Bi₂Sr₂-Ca₂Cu₃O₁₀超导体的超导临界转变温度可达110 K

(-163℃). 在化学组成上加入少量Pb元素部分替代Bi元素的(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (Bi-2223), 改善了超导材料的超导性能^[2~4]. 在21世纪初期, 通过银包套粉末装管法(powder-in-tube, PIT)工艺制作的Bi-2223多芯带材成为第一代商业化应用的高温超导导线^[5~8]. 一方面, Bi-2223超导带材的自场临界电流比较高, 临界电流各向异性特征明显. 虽然在垂直磁场下临界电流随

引用格式: 许姣姣, 杨天慧, 陈晓刚, 等. Bi-2223高温超导带材液氮汽化温度以上温区临界电流特性研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1634–1642
Xu J J, Yang T H, Chen X G, et al. Critical current performance of Bi-2223 HTS tape in temperature range above liquid nitrogen vaporization temperature (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1634–1642, doi: [10.1360/SST-2019-0335](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0335)

磁场强度的增大衰减很快,但在中等强度(几个特斯拉)以下的平行磁场下,临界电流的衰减程度比较小^[9~11].另一方面,尽管银包覆层的使用加大了Bi-2223超导带材的生产成本,但由于其生产工艺的成熟,当前市场价格仍远低于总体性能相对优越的第二代高温超导导线(REBa₂Cu₃O₇涂层导体带材).在有些应用领域,Bi-2223超导带材仍然有着性价比和加工性能方面的优势.近些年,Bi-2223带材主要被应用于超导电缆、超导故障限流器、超导电机、超导磁体和超导储能装置中^[12~15].

临界电流的大小是衡量超导导线性能的重要指标之一^[16],也是超导带材应用在各种设备中时需要考虑的重要技术参数.到目前为止,国内外对Bi-2223超导带材在液氮温度以下温区的临界电流研究做得较为深入^[17~23].在液氮汽化温度以上,Bi-2223带材仍有较大的超导温度区间.随着应用范围的扩大,一些场景中对Bi-2223超导带材在液氮汽化温度以上温区的应用产生了需求.例如,国家“十三五”重点研发计划“超导直流能源管道的基础研究”项目(下文简称“能源管道项目”)中,以液化天然气为主的混合液体燃料与电力在同一管道中输运,其中输送电力的超导电缆拟工作在85~90 K温度区间内.考虑到超导临界转变温度,目前可以使用的超导导线只有Bi-2223超导带材可以作为其中超导电缆中的导体.然而,目前国内外对Bi-2223超导带材还缺乏在这一温区中载流特性研究,因此对Bi-2223超导带材在液氮汽化温度以上温区的通流特性进行研究具有重要和紧迫的意义.

近来,我们使用自主设计、建造的超导导线载流特性测量系统对能源管道项目备选的两个型号的Bi-2223超导带材样品,在温度区间77~92 K、磁场强度0~0.2 T和磁场角度0°~90°范围内的临界电流 I_c 进行了系统的测量.本文将给出在这个实验中得到的样品临界电流测量数据,并根据实验数据分析、总结在这一温区温度、磁场及磁场角度对Bi-2223超导带材通流性能的影响.

2 实验

本实验在样品临界电流测量中采用四引线法^[16,24,25],通过两根电流引线输入一个定值电流,同时完成样品上两根电压引线(间距5 cm)间电压的测量.

以目前国际通用的1 μ V/cm标准作为失超判据,当测量到的样品电压引线间的电压达到5 μ V时则判定为样品失超,此刻所记录的电流 I 即确定为该测量条件(温度、磁场、磁场角度)下的 I_c .

图1对磁场角度与带材的位置关系进行了定义,将磁场角度定义为磁场方向与带材表面形成的夹角 θ ,并将磁场角度 $\theta=0^\circ$ 定义为平行场,磁场角度 $\theta=90^\circ$ 定义为垂直场.

2.1 设备与方法

实验使用的测量系统由水冷机组、真空泵、制冷机、样品腔、超导磁体、控制台和仪表柜等部分组成.仪表柜中的仪表主要包括直流电源、纳伏表、高斯计和温度控制及测量仪表.图2是测量系统的现场照片.

本文采用的制冷设备信息如表1所示.超导磁体使用铌钛线制作,工作在4.2 K,产生的最大磁场强度为3.5 T.样品腔是自行设计的可自动推进、旋转和样品温度控制的真空绝热腔体^[26],通过控制台也可以手动

图1 磁场角度的定义
Figure 1 Definition of magnetic field angle.

图2 (网络版彩图)超导导线临界电流测量系统
Figure 2 (Color online) Critical current measuring system for superconducting wires.

表 1 实验用制冷系统设备信息

Table 1 Information of equipment in the cryogenic system

设备	生产厂商	型号
水冷机组	北京九州同诚科技有限公司	FL系列
真空泵	北京中科科仪股份有限公司	FJ-620分子泵机组
制冷机	中船重工鹏力(南京) 超低温技术有限公司	KDE415-KDC6000 GM

控制样品腔的旋转和推进。

水冷机组用于给真空泵和制冷机工作降温；真空泵为样品腔和磁体抽真空，实现样品腔和磁体的真空绝热环境，以减少系统漏热，并通过仪表柜中的复合真空计监测超导磁体杜瓦内真空度；两台制冷机分别满足样品腔和超导磁体的致冷需要。仪表柜中的数字温度测量仪监测超导磁体内部冷头及超导磁体温度，Lake Shore 336(精度为0.2%~0.5%)温控仪监测样品腔内两根超导电流引线的温度以及样品温度，并可控制内置加热器件，与制冷机配合，得到实验所需的稳定温度。

超导磁体为所测样品提供背景磁场，磁场强度可以通过改变高精度超导磁体电源励磁电流的大小进行

精确控制，并由仪表柜中Lake Shore 425高斯计(精度为 $\pm 0.2\%$)通过样品表面的霍尔传感器监测样品表面磁场强度。磁场角度可以通过控制改变样品腔的旋转角度实现精确控制。

仪表柜中的安捷伦6680A直流电源给样品提供直流电流，Keithley 2182A纳伏表(精度为1%)监测分流器与样品两端电压，并通过LabVIEW程序把分流器两端电压换算成电流，从而得到样品失超时的临界电流。

本测量系统的主要性能参数如表2所示。

图3是本测量系统的电路连接原理示意图，给出各个设备、仪表配合的相互关系。

表 2 临界电流测量系统主要性能参数

Table 2 Key functional parameters of the critical current measurement system

参数	量值
样品最大输入电流 (A)	300
样品测试温区 (K)	10~100
背景磁场强度范围 (T)	0~3.5
背景磁场角度范围 (°)	0~90

图 3 (网络版彩图)超导导线临界电流测量系统原理图

Figure 3 (Color online) Schematic of critical current measurement system for superconducting wires.

2.2 样品及样品准备

本实验使用的样品取自日本住友电工生产的Bi-2223超导带材, 具体型号和尺寸见表3. 两种超导带材横截面示意图如图4(a)所示^[27], 样品二(Type HT-CA)所用带材与样品一(Type H)所用带材相比, 上下表面覆盖了一个铜加强层, 所以具有更好的力学性能.

实验用样品架的制作考虑冷却过程中被测样品与样品架收缩系数不同的问题, 使用了与超导带材热胀系数接近的无氧高导铜板作为样品架的夹板, 表面喷覆了氮化铝涂层用于传热和电绝缘. 样品在样品架上的安装如图4(b)所示, 使用两夹板将超导带材夹在中间, 利用特殊设计的专用工装将这3层焊接在一起. 其中两个端头铜板分别与两根电流引线连接构成测量电流通路. 由于铜片具有良好的导冷性能, 采用无氧高导铜板可保证样品的充分冷却, 使样品整体温度更加均衡且精确. 另外, 在样品通以电流并完全失超后, 铜片的分流作用很大, 这样在很大程度上避免了带材被损坏甚至是烧断.

2.3 方法与步骤

本实验中测量一个样品大致需要完成如下步骤:

- (1) 安装样品至样品腔, 并完成样品腔的封闭和定位;
- (2) 开启水冷机组, 使其开始为真空泵以及两台制

- 冷机提供冷却水;
- (3) 开启真空泵, 为样品腔与超导磁体提升真空度, 一般将气压降至 1×10^{-4} Pa以下;
- (4) 开启两台制冷机, 分别为样品与超导磁体降温, 样品需降至所测温度, 超导磁体由于使用铌钛线提供背景磁场, 故将超导磁体降温至4 K以下;
- (5) 开启仪表柜相关仪表, 调整样品表面所需磁场强度及磁场角度, 测量样品在该温度、磁场强度、磁场角度的临界电流;
- (6) 根据需要在测量温度区间每隔3 K调整样品温度, 在每个温度点下调整表面磁场强度(0~0.1 T范围内每隔0.01 T, 0.1~0.2 T范围内每隔0.005 T), 并在每个磁场强度下调整磁场角度(分别为0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 90°), 重复测量样品临界电流;
- (7) 测量完毕后, 关闭制冷机, 等待样品回温至室温, 打开样品腔取出样品.

因所测量的反映样品电阻信息的电压信号量级很小, 需要针对主要噪声采取一些抗干扰措施来抑制噪声. 噪声主要与样品通流时的电流质量有关, 故使用低通滤波器以得到质量更好的直流电. 另外, 强磁场也会对小信号的测量产生干扰, 故选用上海懿宏科技有限公司生产的耐低温的双绞磁屏蔽线作为信号传输线, 以实现对干扰的抑制和磁场的屏蔽. 但为了避免信号的明显衰减, 导线仍不宜过长. 图5为系统所测样品二在80 K、自场下电流与电压关系的*I-V*曲线. 根据

表 3 Bi-2223样品本征特性^{a)}

Table 3 Intrinsic properties of the Bi-2223 tape specimen

样品	型号	宽度 (mm)	厚度 (mm)	长度 (mm)	标称临界电流 (77 K、自场) (A)	临界弯曲半径* (mm)	芯丝数目
样品一	Type H	4.3±0.2	0.23±0.01	60	180	80**	61
样品二	Type HT-CA	4.5±0.1	0.34±0.02	60	180	60**	61

a) *降低至临界电流的95%; **不是保证值.

图 4 (网络版彩图)样品带材及其安装. (a) 两种Bi-2223超导带材横截面示意图; (b) 样品安装示意图
Figure 4 (Color online) Tape specimen and its fixing. (a) Cross-sectional view of the two Bi-2223 tape specimens; (b) schematic drawing of specimen fixing.

图5 样品二在80 K、自场下的 V - I 曲线
Figure 5 The V - I curve of the specimen II at 80 K and self-field.

图5, 在160~180 A内的数据及普遍使用的 $V \propto I^n$ 关系推算出被测样品 n 值约为14.

我们将使用该系统在77 K、自场下得到的测量结果与将样品浸泡在液氮中并使用 x - y 记录仪测量的结果进行了对比, 发现差异在2%左右^[28]. 2%的误差对分析临界电流随磁场和温度变化的趋势影响不大, 可以满足研究需要.

3 结果与讨论

本实验分别在77~98 K温度区间内测试了上述两个样品, 但由于当温度超过92 K后所得到的数据的可比性大大降低, 对研究样品临界电流的变化规律没有什么帮助, 所以在本文只涉及77~92 K温度区间内的实验数据. 为了有利于比较不同环境温度 and 背景磁场下样品临界电流的变化规律, 本文对不同条件下的测量结果做了归一化处理. 取77 K、自场条件下所测得的临界电流为 I_{c0} . 以 I_{c0} 为基准, 定义临界电流变化率 I_c/I_{c0} , 其中 I_c 为在某一组温度、磁场条件下所测得的样品临界电流值. 在77 K、自场下测得的样品一和样品二的临界电流值 I_{c0} 分别为132和140 A.

现将样品一与样品二在86和92 K、平行场(0°)和垂直场(90°), 磁场强度0~0.1 T的磁场条件下测得的数据分别列表为表4和5, 括号里为临界电流变化率 I_c/I_{c0} .

这两个表中可以看出, 在 $B=0.1$ T的平行场下, $T=86$ K时, 样品一和样品二的临界电流分别衰减为各自 I_{c0} 的67%和74%; $T=92$ K时两样品临界电流分别衰减为各自 I_{c0} 的42%和50%. 在 $B=0.1$ T的垂直场下,

表4 样品一临界电流的测量结果(单位: A)^{a)}

Table 4 The critical current measurement results of specimen I (unit: A)

磁场强度 (T)	0°		90°	
	86 K	92 K	86 K	92 K
0	96 (73%)	70 (53%)	96 (73%)	70 (53%)
0.02	94 (71%)	70 (53%)	68 (52%)	39 (30%)
0.04	94 (71%)	69 (52%)	54 (41%)	26 (20%)
0.06	94 (71%)	64 (48%)	42 (32%)	18 (14%)
0.08	92 (70%)	59 (45%)	34 (26%)	12 (9%)
0.1	88 (67%)	55 (42%)	27 (20%)	8 (6%)

a) 括号内为临界电流变化率 I_c/I_{c0} .

表5 样品二临界电流测量结果(单位: A)^{a)}

Table 5 The critical current measurement results of specimen II (unit: A)

磁场强度 (T)	0°		90°	
	86 K	92 K	86 K	92 K
0	112 (80%)	80 (57%)	112 (80%)	80 (57%)
0.02	108 (77%)	80 (57%)	90 (64%)	55 (39%)
0.04	108 (77%)	80 (57%)	69 (49%)	36 (26%)
0.06	108 (77%)	76 (54%)	56 (40%)	27 (19%)
0.08	106 (76%)	75 (54%)	47 (34%)	18 (13%)
0.1	104 (74%)	70 (50%)	39 (28%)	13 (9%)

a) 括号内为临界电流变化率 I_c/I_{c0} .

$T=86$ K时, 两样品临界电流分别衰减为各自 I_{c0} 的20%和28%; $T=92$ K时两样品临界电流分别衰减为各自 I_{c0} 的6%和9%. 对于 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, 晶体结构决定了其 I_c 具有很强的各向异性. 其 I_c 在磁场角度由 0° 向 90° 增加过程中迅速衰减, 在 90° 时达到最小值. 在我们测试的温度区间里, 样品的 I_c 随磁场角度的变化趋势和Bi-2223超导带材在77 K或以下温区是一致的. 上面的测量结果显示样品二的 I_c 的衰减程度略小于样品一, 这可能是由于其上下两侧的铜加强层起到一定的磁场屏蔽作用, 但要做出确定结论还需要更多的实验数据支持.

下面分别就温度、磁场强度和磁场角度在所测试的温区内对 I_c 的影响做比较详细的分析和讨论.

3.1 温度对临界电流的影响

图6是在无外加磁场(自场)时样品临界电流随温

图6 自场下两样品 I_c/I_{c0} 随温度的变化

Figure 6 I_c/I_{c0} variations of the two specimens over temperatures at self-field.

度变化曲线. 可以看出, 两个样品在温度是92 K时, 临界电流下降至其 I_{c0} 的53%和57%. 从表4和5可知在92 K自场下, 这两个样品的 I_c 分别为70和80 A, 说明在这个温度和无外加磁场的条件下样品仍具有较高的超导载流能力.

图7分别给出了两样品在磁场强度 $B=0.05$ T, 磁场角度 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 条件下临界电流变化率随温度升高的变化情况. 在温度 $T=92$ K、磁场强度 $B=0.05$ T的平行场下, 临界电流分别衰减至温度 $T=77$ K时的50%和55%, 考虑到超导带材用于超导电缆时的背景磁场强度一般小于0.05 T, 且近似于平行场, 所以可以说Bi-2223带材制作的超导电缆在高于90 K的工作温度下仍具有一定实用意义的载流能力.

3.2 磁场强度对临界电流的影响

图8分别给出了两样品在77, 86, 92 K时, 不同磁场角度下临界电流变化率随磁场强度的变化情况. 可以

看出在平行场下, 样品临界电流变化率随磁场强度的增大由缓变急. 在磁场角度 $\theta=45^\circ$ 和 90° 的条件下, 临界电流变化率随磁场强度的增大逐渐变为由急变缓. 这些结果告诉我们: Bi-2223带材在平行场的条件下, 能更好地保留通流能力; 而在磁场角度较大的应用中, 由于带材临界电流下降迅速, 要着重注意背景磁场强度的控制.

3.3 磁场角度对临界电流的影响

考虑到超导导线应用于超导电缆时的背景磁场强度一般小于0.05 T, 我们在图9分别给出了两个样品在磁场强度 $B=0.05$ T, 温度为77, 86, 92 K条件下临界电流变化率随磁场角度增大的变化情况. 可以看出, 在0.05 T这样较弱的磁场条件下, 在所给出的几个测量温度上, 临界电流随磁场强度的变化趋势基本相似. 样品临界电流随磁场角度的增大而减小趋势为由快变慢, 而且这种趋势随着温度的升高更加明显一些.

4 结论

本文介绍了在77~92 K温度区间对两个不同类型商业化Bi-2223高温超导带材样品在磁场强度0~0.2 T和磁场角度 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的磁场条件下临界电流的测量结果, 分析了在所测量条件下样品临界电流的变化规律, 系统地获得了在液氮汽化温度以上温区Bi-2223超导导线临界电流的数据.

这项实验结果表明, Bi-2223超导带材在77 K以上温区仍可承载具有实际使用意义的电流, 即使92 K时在自场条件下或外加磁场接近于平行场且磁场强度不大于0.1 T条件下, 仍可保留其在77 K、自场条件下临界电流40%~50%的通流能力.

图7 $B=0.05$ T、不同磁场角度下两样品 I_c/I_{c0} 随温度的变化. (a) 样品一; (b) 样品二

Figure 7 I_c/I_{c0} variation of the two specimens over temperatures at 0.05 T with different magnetic field angles. (a) Specimen I; (b) specimen II.

图 8 不同温度、不同磁场角度条件下样品 I_c/I_{c0} 随磁场强度的变化. (a)~(c) 样品一; (d)~(f) 样品二
Figure 8 I_c/I_{c0} variations of the two specimens over magnetic field at different field angles and temperatures. (a)~(c) Specimen I; (d)~(f) specimen II.

图 9 $B=0.05$ T、不同温度下两样品 I_c/I_{c0} 随磁场角度的变化. (a) 样品一; (b) 样品二
Figure 9 I_c/I_{c0} variations of the two specimens over magnetic field angle at 0.05 T with different temperatures. (a) Specimen I; (b) specimen II.

这些结果不仅为能源管道项目提供了重要的数据, 而且填补了Bi-2223超导带材迄今为止缺乏液氮汽化温度以上温区系统的临界电流数据的空白, 对今后其在这一温区的应用具有重要的实用意义.

致谢 感谢富通集团(天津)超导技术应用有限公司对本实验研究的支持.

参考文献

- 1 Ma Y W. Recent developments of practical superconducting materials (in Chinese). Physics, 2015, 44: 674–683 [马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望. 物理, 2015, 44: 674–683]
- 2 Hikata T, Sato K, Hitotsuyanagi H. Ag-sheathed Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconducting wires with high critical current density. Jpn J Appl Phys, 1989, 28: L82–L84
- 3 Takano M, Takada J, Oda K, et al. High- T_c phase promoted and stabilized in the Bi,Pb-Sr-Ca-Cu-O system. Jpn J Appl Phys, 1988, 27: L1041–L1043

- 4 Mizuno M, Endo H, Tsuchiya J, et al. Superconductivity of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{Pb}_x\text{O}_y$ ($x=0.2, 0.4, 0.6$). *Jpn J Appl Phys*, 1988, 27: L1225–L1227
- 5 Kobayashi S, Kato T, Yamazaki K, et al. Controlled over pressure processing of Bi2223 long length wires. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 2534–2537
- 6 Ayai N, Kikuchi M, Yamazaki K, et al. The Bi-2223 superconducting wires with 200a-class critical current. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 3075–3078
- 7 Osamura K, Machiya S, Suzuki H, et al. Mechanical behavior and strain dependence of the critical current of DI-BSCCO tapes. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 054010
- 8 Feng F, Qu T M, Gu C, et al. Comparative study on the critical current performance of Bi-2223/Ag and YBCO wires in low magnetic fields at liquid nitrogen temperature. *Physica C*, 2011, 471: 293–296
- 9 Vyatkin V S, Kiuchi M, Otabe E S, et al. Current-carrying capacity of single layer cable using superconducting Bi-2223 tapes in a parallel magnetic field. *Supercond Sci Technol*, 2015, 28: 015011
- 10 Xin Y, Ren A L, Hong H, et al. Superconducting Power Cable (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2013. 31–32 [信赢, 任安林, 洪辉, 等. 超导电缆. 北京: 中国电力出版社, 2013. 31–32]
- 11 Maeda H, Yanagisawa Y. Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology (review). *IEEE Trans Appl Supercond*, 2014, 24: 4602412
- 12 Kharissova O V, Kopnin E M, Maltsev V V, et al. Recent advances on bismuth-based 2223 and 2212 superconductors: Synthesis, chemical properties, and principal applications. *Crit Rev Solid State Mater Sci*, 2014, 39: 253–276
- 13 Ma T, Dai S T, Song M, et al. Electromagnetic design of high-temperature superconducting DC bias winding for single-phase 500 kV saturated iron-core fault current limiter. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 5200805
- 14 Ding K, Zhou T, Liu C, et al. Results of the testing of ITER CC HTS current lead prototypes. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 4803404
- 15 Xin Y. Research and progress in developing key technologies for practical saturated iron-core superconducting fault current limiters (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2017, 47: 364–372 [信赢. 饱和铁心型超导限流器实用性技术研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 364–372]
- 16 Liu X K, Luo H, Zhang L, et al. Measurement of critical current for high temperature superconductors (in Chinese). *Chin J Low Temp Phys*, 2006, 28: 359–367 [刘先昆, 罗虹, 张莉, 等. 高温超导体临界电流的测量. 低温物理学报, 2006, 28: 359–367]
- 17 Godeke A, Abraimov D V, Arroyo E, et al. A feasibility study of high-strength Bi-2223 conductor for high-field solenoids. *Supercond Sci Technol*, 2017, 30: 035011
- 18 Nakashima T, Yamazaki K, Kobayashi S, et al. Drastic improvement in mechanical properties of DI-BSCCO wire with novel lamination material. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2015, 25: 1–5
- 19 Breschi M, Casali M, Contreras Corona N N, et al. Dependence of critical current and quench energy of BSCCO-2223 tapes on bending diameter. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 8000605
- 20 Chen W, Zhang H Y, Chen Y, et al. Impact of fatigue loading on the critical current of Bi-2223 tapes under background magnetic field. *Cryogenics*, 2018, 94: 1–4
- 21 van der Laan D C, van Eck H J N, ten Haken B, et al. Temperature and magnetic field dependence of the critical current of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ tape conductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2001, 11: 3345–3348
- 22 Bonura M, Barth C, Senatore C. Electrical and thermo-physical properties of Ni-alloy reinforced Bi-2223 conductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 6400205
- 23 Kiss T, Inoue M, Higashikawa K, et al. Comparison between Bi-2223 tape and RE-123 coated conductor from the view point of current transport properties influencing thermal stability. *Cryogenics*, 2016, 80: 221–228
- 24 Guo Z C, Suo H L, Liu Z Y, et al. Superconducting critical current measurement methods and principles (in Chinese). *J Funct Mater*, 2010, 41: 2041–2044 [郭志超, 索红莉, 刘志勇, 等. 超导临界电流测量方法与原理. 功能材料, 2010, 41: 2041–2044]
- 25 Fang J G, Huang H S, Yang Y C, et al. The measurements of superconductivity for high T_c superconductors (in Chinese). *Coll Phys*, 1995, 14: 32–35 [方家光, 黄贺生, 杨燕池, 等. 高临界温度超导材料超导性能的检测. 大学物理, 1995, 14: 32–35]
- 26 Dong Q, Tian B, Hong W, et al. Critical currents of 100-m class Ag-sheathed $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ tape under various temperatures, magnetic fields, and angles. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 7300705
- 27 Nakashima T, Kobayashi S, Kagiya T, et al. Overview of the recent performance of DI-BSCCO wire. *Cryogenics*, 2012, 52: 713–718
- 28 Dong Q. Study on the current carrying capacity of superconductor wire/tape under different temperatures and magnetic fields (in Chinese).

Dissertation for Master's Degree. Tianjin: Tianjin University, 2019. 34 [董乾. 超导导线/带材在不同温度、磁场条件下通流能力研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2019. 34]

Critical current performance of Bi-2223 HTS tape in temperature range above liquid nitrogen vaporization temperature

XU JiaoJiao¹, YANG TianHui¹, CHEN XiaoGang², LAN JianXi¹, JIN Hui¹, LI WenXin¹, TANG ChunZhou¹, HONG Wei¹, ZHAO ChaoQun¹, WEN YuYan¹, YANG Chao¹, WANG FengYuan², XIONG JiaLing¹, ZHANG Yan¹ & XIN Ying¹

¹ School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² State Grid Zhejiang Power Company Limited, Hangzhou 310007, China

(Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (Bi-2223) high temperature superconducting (HTS) tape is one of the high temperature superconducting wires for commercial applications recently. Its superconducting critical transition temperature is 105–110 K, which is higher than that of another commercially coated HTS REBa₂Cu₃O₇ conductor tape (90–93 K). The Bi-2223 tape has a wide range of superconducting temperatures above the vaporization temperature of liquid nitrogen (77 K). The critical currents of two Bi-2223 tape specimens were systematically calculated, and the findings evaluated to understand the superconductive current-carrying characteristics of Bi-2223 tape in the temperature range above 77 K. To research their effects on the critical current of the specimens in this temperature range, we applied magnetic fields of different intensities and angles to the specimens. The results of the measurement are recorded in this paper in the temperature range of 77–92 K, the magnetic field strength range of 0–0.2 T and the magnetic field angle range of 0°–90°. The results show that the Bi-2223 tape can still bear the practical significance of the superconducting current at 92 K. If there is no external magnetic field, or the external magnetic field is almost parallel to the HTS tape surface and weaker than 0.1 T, the critical current in the self-field can still sustain 40%–50% of its critical current at 77 K. For example, the results of this study have a significant reference price for its use in this temperature range, providing basic information for the creation of cable applications that are superconductive.

Bi-2223 superconducting tape, critical current, magnetic field, temperature range above liquid nitrogen vaporization temperature

doi: [10.1360/SST-2019-0335](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0335)