

## 铋系高温超导直流电缆的研制\*

林玉宝 林良真 肖立业

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

**摘要** 6 m长 2000A的铋系高温超导直流电缆在中国科学院电工研究所研制并试验成功.电缆的导体由8层共238根 Bi-2223/Ag带材在不锈钢波纹管骨架上螺旋绕制而成,导体的内径为41.5 mm,导体层间绝缘,导体层外侧有低温电绝缘.电缆芯的外径为48 mm,它安装在低温容器内,并与两个终端相连.电缆的直流耐压大于2.5 kV.在液氮下的实验表明,电缆的临界电流为2480 A( $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 判据),  $n$ 值为7.7,接头总电阻为 $0.1 \mu\Omega$ ,均超过设计指标.在1 h传输2 kA电流的运行中,电缆的传输特性稳定.经4次热循环,电缆的临界电流没有降低.

**关键词** 高温超导电缆,低温容器,终端,临界电流,  $n$ 值

### DEVELOPMENT OF BISMUTH-BASED HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING DC CABLE

LIN Yu-Bao LIN Liang-Zhen XIAO Li-Ye

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A 6 m, 2 kA bismuth-based high  $T_c$  superconducting DC cable has been developed and tested successfully at the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences. The conductor of the cable consists of 238 Bi-2223/Ag tapes, helically wound on a flexible stainless steel former layer by layer (8 layers in all), followed by layers of cryogenic dielectric tapes. Adjacent conductor layers are insulated from each other. The inner diameter of the conductor is 41.5 mm. The cable has an outer diameter of 48 mm and is housed in a cryogenic envelope, connected to a pair of terminations. The DC breakdown voltage is more than 2.5 kV. Tests show that the critical current of the cable is 2480 A, the  $n$  value is 7.7 and the joint resistance is  $0.1 \mu\Omega$  at 77 K. The cable transmitted 2 kA for 1 hour steadily and reliably, with no degradation of the critical current after 4 thermal cycles.

**Key words** high  $T_c$  superconducting cable, cryogenic envelope, termination, critical current,  $n$  value

高温超导电缆使用具有高临界电流密度的高温超导带材作导体,能够传输比同尺寸的常规电缆大3—5倍的功率,其功率损耗仅为传输功率的0.5% (常规铜电缆为5%—8%),因此它具有体积小、重量轻、损耗低和传输容量大的优点.利用高温超导电缆可以大大提高电网的总效率,实现低损耗、大容量输电,是解决大功率输电的有效途径.它还具有不污染环境、无火灾危险、安装过程中占地少、对外无电磁干扰、不易受意外灾害影响等独特优点.高温超导电缆在改造大城市现有配电网方面有广阔的应用前景.对于人口密集的城市地区,在电网需要扩容时,若采用高温超导电缆,则可使用现有的地下电缆沟,从而免去昂贵的破坏性的挖掘和建设,其总费用可

降低约20%.利用高温超导电缆可以改变传统输电方式,采用低电压大电流输电方式,能把发电机直接连到用户电网,可省去电力变压器,甚至可以采用直流输电方式;还可以用配电电压水平输送同样的功率,而不需建设新的变电站.在要求采用大电流直流输电的情况下,如铝电解工业,高温超导直流电缆将明显优于金属线路.在风景优美的旅游区,为不破坏景观,可以考虑用高温超导输电电缆来代替现有的架空线.高温超导输电电缆在现有电力系统升级和建设新电力系统中也将得到应用.高温超导电缆在

\* 国家超导技术联合研究与开发中心资助项目  
2001-01-04收到初稿,2001-02-05修回

短距离输电的应用可望在短期内实现。

和其他电力装置相比,超导电缆的磁场很低(通常为百高斯级),粉末装管法制备的 Bi - 2223/Ag 带材在该磁场和液氮下仍具有很高的电流密度,且能加工成千米以上的长带,因此高温超导输电电缆可能是最早实现超导电力应用的项目。目前,高温超导输电电缆的应用受制于 Bi - 2223/Ag 带材的价格,然而近年来其价格一直在下降,预计在今后 2—3 年内,它可望降到 50 美元/kAm 以下的水平,不久的将来,有可能降到与铜一样的“载流性能价格比”。因此高温超导输电电缆已成为当今世界各国在高温超导技术强电应用研究领域的首选项目。

在国家超导技术联合研究与开发中心的支持下,1997 年底我国开始进行铋系高温超导直流电缆的开发研究,这是我国“八六三”超导技术专项中的重要课题,是一项综合性很强的应用研究工作。该课题的目标是研制出 6m 长 2000A 的高温超导直流电缆。中国科学院电工研究所承担了高温超导电缆的研制任务。该电缆所需的超导带材由西北有色金属研究院和北京有色金属研究总院研制。

中国科学院电工所在高温超导直流电缆的研制过程中,首先建立了一套包括数据采集系统在内的测试装置;其次对 Bi - 2223/Ag 带材的输运特性、机械性能(拉应变和弯曲应变特性)、自由热收缩率和热循环特性进行了测试和研究;接着又进行了电缆导体层中电流分布及其输运特性仿真研究以及电缆的超导到常态的过渡接头电阻的实验研究和焊料的优选实验研究工作。为掌握高温超导电缆的设计方法和制造工艺,首先研制并试验了一根 1m 长 1000A 的高温超导模型电缆<sup>[1]</sup>。在此基础上,采用了有特色的优化设计和经改进的合理的制造工艺,建成了 6m 长 2000A 高温超导电缆系统。超导电缆的电缆芯由不锈钢波纹管骨架、导体和低温电绝缘组成。电缆的导体共 8 层,由总长达 1678m 的 238 根国产铋系带材组成。这些带材以约 27° 的螺旋角和小缝隙一根接一根地绕在骨架上,以防止从室温到液氮温度因冷收缩产生的应力损坏带材。高温超导体层中相邻共轭层的带材绕向相反,螺距相等,以消除电缆的轴向磁场,减小自场效应引起超导带材临界电流的退化。骨架上及导体层间缠绕绝缘带,以降低电缆因变流产生电磁耦合引起能量损耗。电缆芯的外径为 48mm,它安装在液氮低温容器内并通过两个 2kA 终端与电源及冷却系统相连。低温容器采用高真空和超级绝热技术,它是外径 108mm,长 6m 的

管结构,为补偿从室温到液氮温区下的冷收缩,容器的内管采用不锈钢波纹管,外管则用刚性的不锈钢管。高温超导电缆有两个终端,它们设计成能耐直流 2.5kV,并能载流 2kA,电流引线设计成冷氮气强迫冷却,从而大大降低了从终端进入电缆低温区的热流。在低温区,电流引线用液氮作电绝缘。而在常温区和温度过渡区,用玻璃纤维环氧套管作电绝缘。图 1 为 2000A 高温超导电缆的结构。图 2 是该高温超导电缆和终端的外貌。

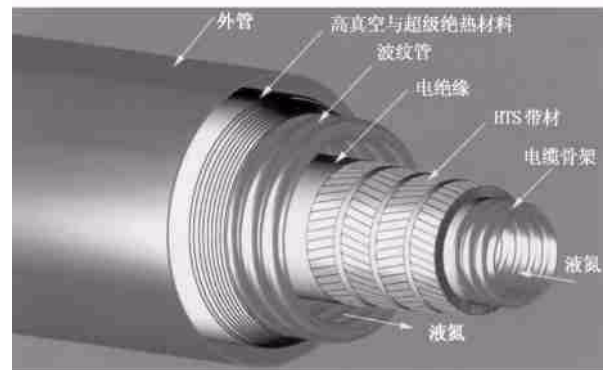


图 1 6m 铋系高温超导直流电缆的结构



图 2 6m 铋系高温超导直流电缆和终端的外貌

在液氮温度下的测试表明,6m 长、2000A 高温超导电缆的直流耐压大于 2.5kV,电缆的临界电流为 2480A( $1\mu\text{V}/\text{cm}$  判据),达到电缆单带材在自场下的临界电流总和的 69%, $n$  值为 7.7,电缆的总接头电阻为  $0.1\mu\Omega$ ,均超过该课题所确定的指标。图 3 为该电缆在 77K 下试验的  $E-I$  特性曲线,在 1h 传输 2000A 电流的运行中,电缆性能稳定。经 4 次热循环,电缆的临界电流没有退化。

6m 长 2000A 高温超导电缆的研制具有自己的特色并体现了创新性:(1) 在铋系带材特性研究中,我们发现,与临界电流  $I_c$  相比,带材  $n$  值随热循环、机械应变和外磁场的变化更为敏感,能及早地反映

物理

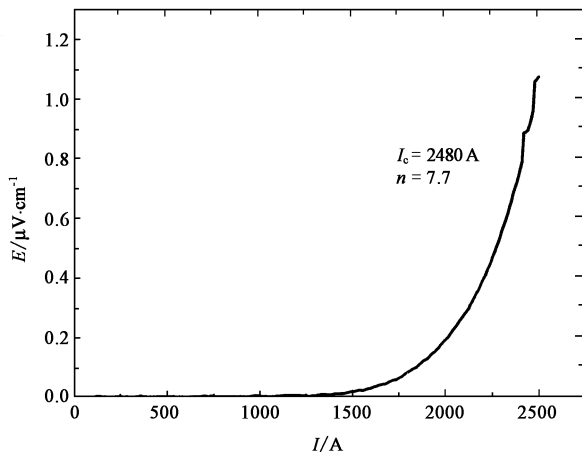


图3 6m 铋系高温超导直流电缆的  $E-I$  曲线

高温超导体晶界的损伤和电性能的退化程度<sup>[2]</sup>. 这对判断带材性能的变化有着极其重要的意义,至今国外尚无相关研究成果的报道;(2)首先采用  $I_c$  及  $n$  值双重标准选用铋系带材,其先进性和正确性在随后的电缆研制中得到了充分的验证;(3)采用优化的设计和计算及合理的绕制工艺,避免了带材性能在液氮中因冷收缩引起的拉应变和因弯曲引起的弯曲应变而退化,有效地消除了轴向磁场,合理地布置不同性能的超导带材,使导体层内电流分布趋于均

匀,提高了电缆的整体性能;(4)采用低熔点(114℃)的 In - Ag 合金作焊料,借助温控把温度维持在 155℃左右进行电缆终端铜接头与带材间的焊接,从而在不破坏带材超导性能的条件下获得  $0.1\mu\Omega$  的电缆接头电阻,达到国际先进水平.

6m 长 2000 A 高温超导直流电缆的研制成功表明,我国已掌握了研制高温超导输电电缆的关键技术,向高温超导技术的实用化迈出了关键的一步,使我国跻身于该项技术的国际先进行列,继美、日、德之后成为世界上少数几个掌握这一关键技术国家.该研究成果填补了国内空白,达到世界先进水平.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 林玉宝,林良真等.低温物理学报,1999,21(2):122[ Lin Y B, Lin L Z *et al.* Chinese Journal of Low Temperature Physics, 1999, 21(2):122(in Chinese) ]
- [ 2 ] 林玉宝,林良真等.铋系高温超导带材直流特性的实验研究.见:中国材料研究会'98 中国材料研讨会——材料研究与应用新进展.北京:化学工业出版社,1999.266—269 [ Lin Y B, Lin L Z *et al.* Experimental study on dc characteristics of Bi-based HTS tapes. In: C MRS '98 Chinese Materials Symposia——Advances in Materials Research & Application. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.266—269(in Chinese) ]

## 2001 年第 8 期《物理》内容预告

### 研究快讯

超高密度信息存储/分子存储及其存储机理(高鸿钧等).

### 评 述

反常色散介质“超光速”现象研究的新进展(张元仲);

极端黑洞的熵和拓扑(王斌等).

### 知识和进展

复杂性的刻画与复杂性科学(郝柏林);

中子弹与中子弹中的物理学(郑绍唐);

化学热解——一种优异的制备纳米材料的方法(I)(邹炳锁等);

实验室天体物理学中的标度变换规律(夏江帆等).

### 物理学和高新技术

水下探测与通信技术——声纳技术及其应用(王炳

和).

### 实验技术

氟化铅晶体的生长新技术及其 Cherenkov 辐射效应(沈定中等).

### 讲 座

光通信中的光电子器件讲座 第一讲 光通信中的光电子器件引论(余重秀);

半导体量子器件物理讲座 第五讲 弹道运输器件和量子干涉器件(李国华).

### 物理学史和物理学家

超导电性发现的历史回顾(刘冰等).

### 物理教育

对理论物理教学改革的几点看法(汤叔樵等).

### 科学基金

从物理研究看源头创新与创新的源头(方勤学).