

# HTS 电流引线助推超导磁体应用开发

毕延芳

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 对磁体致冷是维持超导态必不可少的条件, 由于深低温技术的复杂性和昂贵的造价曾制约了超导磁体应用的推广, 其中电流引线是磁体系统最主要热负荷。经历高温超导 (HTS) 材料 20 多年的研发, 人们认识到产生强磁场的超导磁体仍需运行在 30K 以下。热导率与不锈钢可比的 HTS 材料在 80K 以下可承载电流而无焦耳热, 采用 HTS 电流引线可使超导磁体的致冷运行费和设备投资大幅度降低, 操作简便。因此, 它是超导磁体扩大应用的助推器。介绍其使用特点和应用举例。

关键词: 电流引线; 高温超导; 超导磁体

## Superconducting magnet application promoted by HTS current leads

Bi Yanfang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract** Cryogenic refrigeration is a necessary condition to operate a superconducting (SC) magnet and conventional current leads are the major heat load source. Complicated technology and expensive cost of the helium refrigerators limited SC magnet development in China. Now the Tesla-level superconducting magnets still operate below 30 K although past 25 years after high critical temperature superconductor (HTS) discovery. But HTS can carry current without resistance at 80 K or below and its thermal conductivity is comparable to stainless steel. So HTS current leads can reduce costs for the magnet cooling equipment and operation and can simplify its running. Therefore HTS leads promote SC magnet application and development. The paper introduces its property and the some samples.

**Keywords** Current lead, HTS, SC magnet

## 1 引言

超导磁体必须励磁才能建立磁场, 电流引线是室温电源与超导线圈端头 (或经超导母线) 的不可或缺的连接部件。超导磁体系统的热负荷分析表明, 常规电流引线产生的焦耳热 (焦耳热与传导热) 占全部热负荷的 45% ~ 95%。

固体物理学将电导率与热导率都归结为金属材料的输运特性, 电子是导电和传热的主要载体。如导电优良的银、铜和铝, 也具有传热好的特性。Wiedemann-Franz-Lorentz 定律告诉我们, 常规金属材料的热导率和电阻率的乘积与温度成正比。采用低电阻率材料制造电流引线可减小焦耳热, 但它会增大从室温向低温的传导热; 反之, 采用低导热材料, 则造成焦耳热增大。减小常规电流引线的唯一出路是根据材料的电阻率选择最佳

的电流密度与长度的乘积, 即使按优化设计的常规气冷电流引线仍需消耗液氦每支 0.057 g/s/kA。有些文献常表示为: 4.2 K 的热负荷为每支 1.14 W/kA, 在此需特别指正的是电流引线同时需 0.057 g/s 氦蒸汽冷却, 如果没有气冷, 则传导冷却常规电流引线的 4.2 K 最小热负荷为每支 45 W/kA, 这比气冷引线大近 40 倍。对于中型 (数百 W) 氦制冷机, 1 g/s 氦液化率折合为 4.5 K 制冷量 ~ 100 W。一对采用气冷的 500 A 电流引线要求制冷机提供 ~ 6 W 冷量; 而一对 500 A 传导冷却电流引线需 45 W, 二者相差 7.5 倍。

磁体电流选择与其贮能量相关 (大体成比例), 这涉及磁体的安全性。磁体失超后其正常区会迅速升温, 过高的热点温度将导致超导线性能退化; 能量泄放速率取决于磁体容许承受端电压水平要求, 通常限制在数百伏至 2 kV 水平。一

收稿日期: 2010-09-03

作者简介: 毕延芳 (1943-), 男, 研究员, 研究领域为超导电工程与低温技术。

旦发生击穿,整个磁体报废,故大型磁体采用小电流引线是不可能的。

超导磁体系统的热负荷还包括辐射热,支撑结构的传导热和真空绝热恒温器内残留气体的对流传热。对于精心设计的恒温器,这三项热负荷都可降到很低的水平。如医院中常见的核磁成像仪(即 MRI)在磁体励磁后将电流引线拔去,其液氮补充的周期可长达 1 年多。虽然磁体电流只有 100~200 A,但如果不拔去,需消耗液氮 0.01 g/s,365 天的消耗量为 2 523 升。这样每个月都需补充液氮。可见,电流引线是超导磁体的最主要热负荷源。

因此,在高温超导(HTS)材料被发现后不久就有人提出将它应用于超导磁体的电流引线,会大大减小磁体系统的热负荷,从而降低致冷费用。目前不用补充液氮,只用 G-M 制冷机冷却的超导磁体都引入了 HTS 电流引线。

## 2 超导磁体发展前景

电磁场与现代工业、科学研究和日常生活已密不可分。如人们熟悉的发电机、马达、开关和阀门上的电磁铁都由铜线圈和铁心产生,铁磁材料的高导磁率大大降低了励磁电流;但由于磁饱和,它同时也限制了磁场的最大值。要使电磁铁运行在高于饱和场强,则励磁的功耗将大幅度增加。超导体可承载电流密度比铜导体大数十倍,而且无焦耳热损耗,因此它是产生大体积磁场最好的方法。

带电粒子具有在垂直场内作圆周运动,或顺磁力线进动的特性。高能粒子加速器是超导磁体最大的科学研究用户,如欧洲核中心投入运行不久的强流质子对撞机 LHC 在约 27 km 隧道内有 1 232 台二极磁体(使粒子弯转),长度 15 m,场强 8.36 T;有 392 台四极磁体(聚焦粒子束流);还有测量碰撞后微粒子轨迹的探测器磁体。LHC 大量应用 HTS 电流引线,运行电流 600 A 至 13 kA,总共 507 对。在过去 40 年,美德日都建造了采用超导磁体的加速器。

核聚变试验装置是超导磁体第二大科研用户,除了上面已提及的 ITER 和我国 EAST 外,还有德国在建的超导仿星器 W-7X,印度的 SST-1

超导托克马克和已运行的韩国 KSTAR;还有日欧合作已开始建的 JT-60SA;早年建的超导托克马克还有俄罗斯 T-7,法国 Tore Supra 和日本 Trillium。其中 EAST、ITER、W-7X 和 JT-60SA 已或将采用 HTS 电流引线。

提供强磁场下物性研究的 40~45 T 稳态装置由水冷比特线圈和超导线圈组成,这种混合磁体建造已获得“十一·五”国家大科学工程的支持。欧、美、日、俄都已建成类似的混合磁体和场强 20 T 上下的超导磁共振谱仪磁体。近 10 年建的这种超导磁体,无一例外地采用 HTS 电流引线。

在医院中已相当普及的磁共振成像仪(MRI)是超导磁体最成功的应用,目前较普遍使用的稳态场强 1.5~3 T,使医生能看到病人体内内脏和软组织状况是否正常,免去了开刀检查的痛苦。与此类似的是科研和工业界常用的核磁共振谱仪(NMR)磁体,可对工程材料进行非破坏性的分析研究。

磁分离、电感贮能和电机等也是超导磁体可能应用领域。近年,在国内正开发提高微波发射集束性的超导磁体,在煤炭传送过程清除铁磁杂质的超导除铁器。这些小型超导磁体都采用 HTS 电流引线,由一台微型制冷机供冷。预期在 21 世纪超导磁体将在中国扩大应用。

## 3 超导磁体的制冷和 HTS 贡献

在 20 世纪 60 年代实用超导合金多丝铌钛-铜复合线研发成功后,超导磁体都采用液氮浸泡冷却(1.8 K~4.2 K)或超临界氦迫流冷却。常用低温超导工程材料铌钛的临界温度为 9.2 K,在 4.2 K 温度、5 T 磁场下,其临界电流可达 2 900 A/mm<sup>2</sup>。金属化合物铌三锡的临界温度虽然达 18.3 K,但通常也运行在 4.5 K 附近,主要利用它产生更高的磁场。

氦液化和制冷是难度较高的技术,至今国内仍无生产氦制冷机的专业厂家。上世纪国内曾制造过液化率每小时数十升的液氮机,都未达到长周期可靠运行。低温是超导磁体正常运行的必要条件,落后的低温技术水平制约了国内超导磁体的应用。

1986 年后的十多年里,中国兴起 HTS 材料研

发热潮,特别是临界温度高于 90K 的钇系和铋系金属氧化物超导材料被发现后,人们误以为超导告别了液氮低温。近 25 年研究表明,目前可绕制磁体的 HTS 带材 Bi-2223 和 YBCO 要产生实用的磁场还需冷却到比液氮低得多的温度(20 K 附近),否则其临界电流密度相当低。由于现在 HTS 材料价格比低温超导高数十倍,而且性能脆弱,所以绕制大型磁体仍然得采用铌钛或铌三锡。

虽然 HTS 材料未能取代低温超导绕制大磁体,但它为超导磁体的发展提供了节冷的电流引线,它起了重要的助推器作用。HTS 在液氮温区以下能无阻地承载电流,而其热导率与不锈钢相当(指 YBCO)或更低(指 BSCCO)。早在 1988 年 Mumford F J 就提出将 HTS 用于电流引线<sup>[1]</sup>,到

20 世纪末期,2kA 以下的 HTS 电流引线已商用化。传导冷却的(无液氮浸泡)小型磁体也相继推出和商用化,由于 HTS 电流引线大大减少了制冷热负荷,一台或多台 G-M 微型制冷机即可维持磁体正常运行,使用户操作很简便,几乎与家用电器可比。

液氮浸泡冷却的磁体具有很好的稳定性,氦气在磁体降温期间又能靠它对流冷却磁体,因此零蒸发的浸泡冷却的磁体也发展得很快。有的贮能磁体重达 1 吨左右,采用多台 G-M 制冷机供冷。图 1 是一台典型的采用 HTS 电流引线的铌钛铜复合线绕制的超导磁体,用一台 1.5 W/4 K G-M 制冷机供冷。



图 1 采用 HTS 电流引线的由 GM 微型制冷机供冷的铌钛超导磁体

Fig 1 A SC magnet with HTS leads cooled by a GM cooler

#### 4 CASIPP 开发的 HTS 电流引线

中国科学院等离子体物理研究所(CASIPP)从 2003 年起开发 HTS 电流引线,当时处于在建的大型超导托卡马克核聚变试验装置(EAST)低温系统 2 kW/4.5 K 制冷量短缺,因为上下对称的 6 对极向场线圈由原先 6 台电源供电改为 12 台电源各自独立供电。增加的 6 对 15 kA 电流引线若采用常规技术,并按脉冲电流模式优化设计,需消耗约 6 g/s 液氮,大致相当于 600 W/4.5 K 制冷量,这大大超过了制冷机原先的 300 W 裕度。采用 HTS 电流引线是最佳解决方案,既可避

免低温系统扩容和追加投资,又能节省运行费。在 2006 年 EAST 工程调试时有 5 对 HTS 电流引线投入运行,操作人员发现这些电流引线比铜电流引线的降温容易得多,运行也可靠;在 2008 年剩余的 8 对都添加了 HTS 段。使 4.5 K 的热负荷将降低至 120 W 以下,当然其铜电流引线段冷却还需消耗液氮。

与目前 HTS 在电力工业的其他应用相比,电流引线具有显著的经济效益。如对 EAST 装置而言,不仅省去了 1 kW/4.5 K 制冷机的投资,而且减少运行电力消耗约 500 kW,每年 4 个月的电费可节省 50 万元。

即将建造的国际热核试验堆(ITER)的超导

线圈需要的电流引线容量和数量的乘积 2 64 MA, 远大于 EAST 装置的 0 19 MA。据 ITER 低温系统设计文件, 它比常规电流引线可节省制冷电耗 2 5 MW, 同时减少相关设备投资 54%。

ITER 的超导磁体的供冷、供电的馈线由中国承担, 至 2008 年底我们已完成了 68 kA 和 52 kA 试件研发, HTS 组件的技术参数全面达到国际组要求, 掌握了设计关键和核心工艺。

在过去的 6 年中, 我们不仅发展了 EAST 的大电流引线和 ITER 的特大电流引线, 而且还提供了 7 套小电流引线, 如表 1 所示。图 2 展示了我们已开发的各等级电流引线的 HTS 电流引线照片, 希望引起有需求单位的兴趣。这些电流引线所使用的 HTS 材料是银 - 5 3 wt% 金为包套的 Bi- 2223 带材, 由美国超导公司提供。近两年我们又从日本住友和欧洲 HTS 公司进口了同类带材。与绕制磁体或制造超导电缆的银基 Bi- 2223 带材相比, 银金包套 Bi- 2223 带材在低温下具有低得多的热导率; 但价格也贵得多。与 Bi- 2212 带材相比, HTS 两端的接头焊接比较容易, 接头电阻也小得多; 采用结构合理的分流器还能达到机械强度高、安全性好的要求。用于电阻型超导限流器的二代 YBCO 超导带也可用于小型

表 1 已提供的 HTS 小电流引线

Tab 1 Small HTS current leads

序号	电流 (A)	需求单位	用途
1	380	中科院电工研究所	钕钐贮能磁体
2	410	中科院电工研究所	钕钐贮能磁体
3	90	合肥物质科学研究院	钕钐磁体
4	120	中科院等离子体所	钕钐磁体
5	800	万瑞公司	磁体试验杜瓦
6	280	中科院等离子体所	低温超导变压器
7	140	万瑞公司	钕钐磁体

电流引线。这种电流引线系传导冷却, 其 4 5 K 的热负荷与其上端运行温度、HTS 段有效长度和失超后的安全性要求相关。如果 HTS 的温端温度  $\leq 60$  K, 该处的杂散磁场  $\leq 50$  mT, 对失超后安全性无特殊要求, 当 HTS 的有效长度为 0 25 m 时, 则可做到  $\leq 0 13$  W /kA。一级冷头处的热负荷最低为 43 W /kA, 铜电流引线必须作电流密度和长度的优化。此外还需考虑 60 K 处的接头电阻产生的焦耳热, 如接头电阻 10 微欧, 2 条 500 A 电流引线的接头电阻发热为 5 W。运行经验证

明, 只要将 HTS 电流引线冷却到位, 即中间段也冷却到低于上端温度, 并维持上下正常冷却, HTS 段不会像超导磁体那么容易失超, 因为超导带是锡焊在分流器支撑筒上, 不受电磁力扰动的影响。



图 2 在等离子体物理所开发的 HTS 电流引线照片  
Fig 2 HTS current leads developed in Institute of Plasma Physics Academy of Sciences

## 5 结语

采用 HTS 电流引线可大幅度降低超导磁体系统热负荷, 不仅大量降低制冷设备投资, 还显著节省运行费, 已被在建的或计划建造的大型超导磁体系统所普遍接受; 对于中小磁体只需一台或数台微型制冷机供冷, 使用户操作简便。所以它是促进超导磁体应用开发的助推器。

中国科学院等离子体物理研究所在成功开发 EAST 和 ITER 的 HTS 大电流引线同时, 也为小型磁体提供了 15 条这类电流引线, 用户的反馈是满意的。

## 参考文献

[ 1 ] Mumford F J Superconducting current - leads made from high Tc superconductor and normal metal [ J ]. Cryogenics, 1989, 29 : 206