

HTSFCL

高温超导限流器

High T_c Superconducting Fault Current Limiter

王科 曹昆南 胡南南 周年荣 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高温超导限流器

主编 王 科 曹昆南 胡南南 周年荣
参编 冯 峰 黑颖顿 盛 杰 马 仪 杨明昆 吴其红
徐肖伟 翟胜军 刘光祺 马宏明 周兴梅 钱国超

机械工业出版社

本书对目前国内外几个典型电阻型超导限流器的应用实例进行了详细阐述。书中通过对相关的文献、报告以及新闻公告等信息的整合,将目前该领域的国内外研究现状进行了清晰的梳理,以供读者学习和参考。

本书将为初学者或在电力系统工作的人员提供一个普适性的电阻型超导限流器的设计策略,一方面使得读者更容易理解超导限流器的工作原理及结构,另一方面也展示了超导限流器作为最接近电力系统应用的超导电力产品并可大规模生产的潜力。

图书在版编目(CIP)数据

高温超导限流器/王科等主编. —北京:机械工业出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-111-58426-1

I. ①高… II. ①王… III. ①高温超导性-继电保护装置 IV. ①TM774

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第271061号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王康 责任编辑:王康 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13.25印张·256千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58426-1

定价:55.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

高温超导技术在电力、能源、交通、信息各领域有巨大的应用前景，因此被广泛认为是 21 世纪的战略技术，是欧美与日本等发达国家重点支持的能源、材料及军事技术，被列入我国国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）。当前正是高温超导技术开始进入大规模应用的关键时刻，其技术发展将给电力能源领域带来重大变革，其中高温超导限流器具有重大的应用价值，目前的技术发展也较为完善。

本书针对高温超导限流器技术进行了系统的介绍，在第 1 章中简要概括了超导材料的研究情况、超导技术的应用领域以及典型的超导电力技术；在第 2 章中详细分析了二硼化镁、铋锶钙铜氧和稀土钡铜氧这三类典型的高温超导导线研究现状以及技术问题；在第 3 章中针对故障限流器的核心器件——高温超导磁体进行了深入介绍，主要包括磁体的设计方法、线圈绕制方法和制冷系统；在第 4 章中重点分析了饱和铁心型限流器的设计，具体包括电抗系统、绕组线圈、制冷系统和应用实例等；在第 5 章中重点分析了电阻型超导限流器，具体包括材料选型、模块化设计、本体设计和应用实例等；在第 6 章中补充介绍了其他类型的超导限流器，包括桥路型、磁屏蔽型、有源型、三相电抗器型等类型。

本书由王科、曹昆南、胡南南、周年荣主编。冯峰、黑颖顿、盛杰、马仪、杨明昆、吴其红、徐肖伟、翟胜军、刘光祺、马宏明、周兴梅、钱国超参与了本书的编写。在此，编者对本书所列参考文献的作者，一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有不妥和错误之处，衷心希望读者不吝批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 超导材料研究	2
1.1.1 超导材料研究历程	2
1.1.2 超导材料特性简介	3
1.1.3 高温超导材料产业化	8
1.2 超导应用领域	10
1.2.1 超导技术与智能电网	10
1.2.2 其他领域的超导技术	11
1.3 典型超导电力能源技术	13
1.3.1 超导限流器技术	13
1.3.2 超导电缆技术	14
1.3.3 超导风力发电技术	16
1.3.4 超导储能技术	18
1.4 本章小结	20
参考文献	20
第2章 高温超导材料及制备技术	23
2.1 高温超导导线材料概述	23
2.1.1 二硼化镁导线	23
2.1.2 铋锶钙铜氧导线	24
2.1.3 稀土钡铜氧导线	25
2.2 超导材料研究现状	26
2.2.1 二硼化镁材料的研究与生产	26
2.2.2 Bi-2223/Ag 高温超导导线国内外现状	27
2.2.3 Bi-2212/Ag 高温超导导线国内外现状	27
2.2.4 ReBCO 高温超导材料国内外现状	28
2.3 超导材料制备技术研究	30
2.3.1 二硼化镁导线关键技术	30

2.3.2 Bi-2223/Ag 高温超导导线关键技术	31
2.3.3 Bi-2212/Ag 高温超导导线关键技术	33
2.3.4 ReBCO 高温超导导线关键技术	34
2.4 超导材料技术问题分析	35
2.4.1 二硼化镁导线的主要问题	35
2.4.2 Bi-2223/Ag 高温超导导线的主要问题	36
2.4.3 Bi-2212/Ag 高温超导导线的主要问题	38
2.4.4 ReBCO 高温超导导线的主要问题	38
2.5 结论与展望	40
2.5.1 低温超导材料产业化及应用情况	40
2.5.2 高温超导材料产业化及应用情况	41
2.5.3 发展前景	43
参考文献	43
第3章 高温超导磁体技术	47
3.1 背景概述	47
3.1.1 高温超导磁体技术介绍	47
3.1.2 高温超导磁体交流损耗	49
3.1.3 高温超导磁体失超保护	49
3.2 超导磁体设计方法	53
3.2.1 常用超导磁体设计方法介绍	53
3.2.2 螺线管形超导磁体设计方法	55
3.2.3 外凹螺线管形超导磁体设计方法	56
3.3 双饼线圈绕制方法	58
3.3.1 常规超导磁体绕制方法介绍	58
3.3.2 卡带式双饼线圈绕制方法	59
3.3.3 绕制方法可行性研究	60
3.3.4 线圈模型绕制工艺	62
3.4 杜瓦和制冷系统	63
3.4.1 杜瓦与制冷技术介绍	63
3.4.2 杜瓦设计方法	64
3.4.3 电流引线设计方法	64
3.4.4 磁体热稳定性分析	64
3.5 结论与展望	65
参考文献	66
第4章 饱和铁心型超导限流器设计分析	70

4.1 概论	70
4.1.1 发展现状	70
4.1.2 饱和铁心型超导限流器工作原理	70
4.2 饱和铁心型超导限流器电抗系统设计案例	74
4.2.1 220kV 超导限流器的绕组结构设计	74
4.2.2 220kV 超导限流器的绝缘设计	76
4.2.3 220kV 超导限流器的直流励磁系统设计	78
4.3 超导限流器直流绕组线圈设计案例	79
4.3.1 直流绕组超导带材选择	79
4.3.2 直流绕组双饼线圈结构	82
4.3.3 双饼线圈间的接头焊接	82
4.3.4 超导线圈绕制受力分析	83
4.3.5 双饼线圈骨架设计	86
4.3.6 双饼线圈绝缘与固化设计	86
4.4 饱和铁心型超导限流器制冷系统设计案例	88
4.4.1 制冷系统总体方案设计	88
4.4.2 杜瓦设计	90
4.4.3 抽空减压系统及电气连接	91
4.5 35kV 超导限流器设计案例简介	92
4.5.1 案例背景	92
4.5.2 35kV 超导限流器	93
4.5.3 35kV 超导限流器工作原理	93
4.5.4 35kV 超导限流器直流系统	95
4.5.5 35kV 超导限流器超导绕组设计	95
4.5.6 35kV 超导限流器直流控制电源	96
4.5.7 35kV 超导限流器直流系统动作特性测试	99
4.5.8 35kV 超导限流器限流效果分析	102
4.6 饱和铁心型超导限流器并网运行案例	102
4.6.1 案例背景	102
4.6.2 直流励磁系统运行	104
4.6.3 低温系统运行	105
4.7 本章小结	105
参考文献	106
第5章 电阻型超导限流器设计分析	108
5.1 电阻型超导限流器基本工作原理	108

5.2 国内外电阻型超导限流器研究现状分析	109
5.2.1 近十年电阻型超导限流器挂网案例综述	109
5.2.2 电阻型超导限流器行业测试标准	110
5.3 高温超导材料选型	112
5.3.1 高温超导材料电工参数测定	112
5.3.2 高温超导材料过电流失超特性研究	113
5.4 电阻型超导限流器的模块化设计	123
5.4.1 模块化限流单元结构拓扑设计	123
5.4.2 电气尺寸综合优化设计	124
5.4.3 模块标准化测定	127
5.5 交流电阻型超导限流器本体设计	129
5.5.1 交流超导限流器核心组件设计	130
5.5.2 整机基本参数标定测量	134
5.6 直流电阻型超导限流器本体设计	137
5.6.1 直流超导限流器核心组件设计	137
5.6.2 整机基本参数标定测量	142
5.7 典型电阻型限流器挂网应用实例	146
5.7.1 欧盟 ECCOFLOW 项目超导限流器应用实例分析	146
5.7.2 意大利首台兆瓦级高温超导限流器应用实例分析	149
5.7.3 上海交通大学 10kV/70A 交流超导限流器项目实例分析	154
5.7.4 上海交通大学 4kV/2.5kA 直流超导限流器项目实例分析	163
5.8 本章小结	166
参考文献	168
第6章 其他类型超导限流器分析	173
6.1 桥路型超导限流器	173
6.1.1 基本桥路型超导限流器分析	173
6.1.2 电阻辅助型桥式超导限流器的结构与特点	175
6.1.3 互感型桥式超导限流器的结构与特点	176
6.1.4 全控混合桥式超导限流器分析	179
6.2 磁屏蔽感应型超导限流器	180
6.2.1 磁屏蔽感应型超导限流器工作原理	181
6.2.2 磁屏蔽感应型超导限流器工作要求	183
6.2.3 磁屏蔽感应型超导限流器设计要素	183
6.2.4 磁屏蔽感应型超导限流器改进设计	185
6.3 电压补偿型有源超导限流器	186

6.3.1 电压补偿型有源超导限流器工作原理	187
6.3.2 电压补偿型有源超导限流器的电流控制	191
6.3.3 电压补偿型有源超导限流器故障检测算法	192
6.4 三相电抗器型超导限流器	195
6.4.1 不同短路故障下阻抗计算	196
6.4.2 与传统限流电抗器的比较	199
6.5 本章小结	200
参考文献	200

能源是人类文明进步的先决条件，它的开发利用是衡量一个国家经济发展水平、科技水平和民族振兴的重要标志。能源尤其以煤炭、石油等为代表的不可再生能源与我们的生活息息相关。在目前的科技水平下，高污染、高消耗、高浪费的工业发展模式造成能源的巨大浪费，能源危机引发了全球的忧虑。在我国，能源危机带来的社会发展问题主要体现在，随着经济的进一步发展和人们物质生活水平的提高以及现代化建设的需要，人均能源资源不足、分布不均匀，人均能源消费量低、单位产值的能耗高，以煤为主的石化能源结构面临严峻的挑战。

因此，开发创新技术以缓解能源危机在我国乃至全世界范围内都受到普遍重视。具体来说，从发电、输电、配电、用电等各个环节的新技术创新都有助于解决上述的能源危机带来的严峻挑战。创新技术在缓解能源危机的同时，也可以使得工业发展对生态环境的破坏降到最低，实现人类和环境的和谐共处。在这类创新技术的发展中，超导技术占据了重要的地位。

超导材料具有广阔的应用前景，将为人类社会的生产生活带来重大革新^[1,2]。高温超导材料的载流能力强，没有直流电阻，在电力、能源、交通、信息等多领域将发挥重大作用，可以用于制造多种高效节能、高功率密度的发电、输配电和用电设备。以超导风力发电、超导储能、超导电缆、超导限流器为代表的超导装备可以在电力系统的相应环节起到显著的节能效果，从而为缓解能源危机提供积极有效的解决方案。

虽然超导材料走向大规模的应用还存在一些明显的障碍：一方面，高温超导导线的成本现在仍然相对较高，而且供应不足；另一方面，高温超导材料的制备技术和应用技术的门槛很高，研发难度较大。但是，由于高温超导材料及其应用技术在节能方面的众多优势，被认为是 21 世纪的战略技术而受到广泛重视。特别是高温超导材料由于可以在液氮温度（77K）工作，所需的制冷成本和技术在很多产业领域中都能够被接受，发展潜力极大，因此各国政府都对超导材料非常重视，国内外在该产业领域的研发如火如荼。

1.1 超导材料研究

超导材料技术是通向未来高科技的关键,随着超导材料技术的发展,低温超导已在若干领域进入实际应用,而高温超导材料研究近年来的巨大进步,使得高温超导材料的大规模应用将紧随其后^[2-4]。预计在不久的将来,超导材料将迎来进一步实用化、产业化的契机。随着低温超导和高温超导技术的进一步发展,超导技术将进入一个新的应用研究发展阶段,并对相应的低温技术提出了新的要求。超导材料技术的进步将进一步促进低温技术研究新热点的增长,并推动多学科的发展,从而迎接未来电力科技发展的机遇与挑战。本节对超导材料的研究历程和超导材料的特性进行介绍。

1.1.1 超导材料研究历程

1911年,荷兰物理学家昂纳斯(Heike Kamerlingh Onnes)在实验中发现,在液氮温度(4.2K)下,汞单质的电阻率突然降至几乎为零,首次揭示了超导这一神奇现象。1933年,Meissner和Ochsenfeld发现,超导体的磁性质与理想导体不同,如果把超导体放在磁场中降温,当超导体电阻消失时,与理想导体不同,磁感应线并不能通过超导体,而是会从超导体中被排斥出来,这种现象被称为完全抗磁性(Meissner效应)。超导电性和完全抗磁性是超导体的两个重要特性。只有同时满足这两个特性的材料,才能称之为超导体。超导特性开始出现的温度,被称为该超导体的超导临界转变温度(T_c)。

一开始所发现的超导体大多数为金属及合金,它们的 T_c 都低于30K。 T_c 最高的超导体为 Nb_3Ge (23K),与1911年的4.2K相比,只提高了不到19K。这类超导体被称为常规超导体。常规超导体在应用过程中一般都需要用液氮制冷。液氮高昂的价格增加了包含常规超导体设备的运转成本,从而极大地限制了常规超导体的应用。1957年,Bardeen、Cooper和Schrieffer建立了BSC理论,并用之很好地解释了超导现象^[5]。超导体相对于常规导体具有直流下无传输电阻的特性,自然可以想到,使用超导体代替常规导体就可以减少导线上的电能损失,节省能量。因此,将超导体投入实际应用(如输电)一直是人类的梦想。然而超导现象发现之后多年,人类发现的超导体的临界温度都在30K以下。甚至超导理论中的经典BCS理论预言,超导体的临界温度不可能超过40K,这令人们一度以为超导现象只是一种极低温现象。图1.1为超导材料临界温度的升高示意图。

1986年,Bednorz和Muller在La-Ba-Cu-O体系中发现了超导体 $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ^[8,9],其 T_c 可以达到40K以上。与以往发现的金属合金超导体不同,这是一种陶瓷材

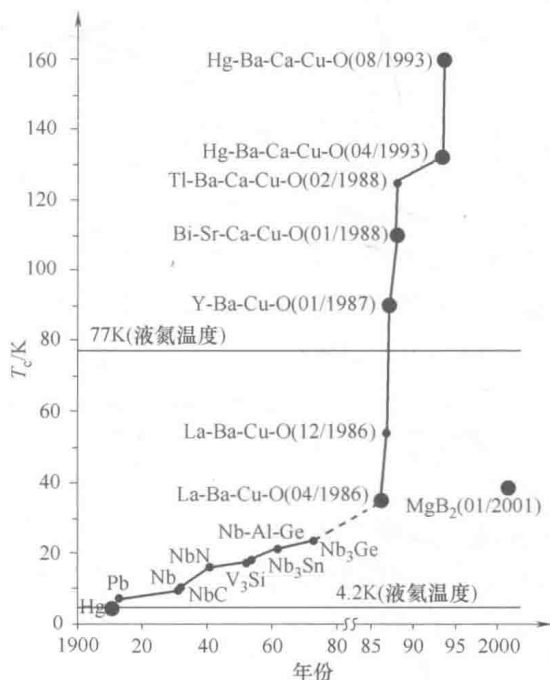


图 1.1 超导材料临界温度的升高示意图

料^[8]。更重要的是，它的 T_c 超过了之前发现的所有金属合金体系的 T_c 。La_{2-x}Ba_xCuO₄ 超导体的发现，开拓了高温超导电性这一既具有重要理论意义又具有巨大应用前景的研究领域，并引发了一场全球性的高温超导热潮。1987 年，朱经武和赵忠贤发现的 Y-Ba-Cu-O 超导体的 T_c 达到 93K^[9,10]。1988 年春，两个不含稀土元素的高温超导体体系 Bi-Sr-Ca-Cu-O^[11] 和 Tl-Ba-Ca-Cu-O^[12] 被发现了。在 Tl-Ba-Ca-Cu-O 体系中，盛正直所获得的超导相 Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀ 的 T_c 达到 125K。由于 Y-Ba-Cu-O 等新发现的一系列铜基超导材料的 T_c 超过了液氮的温度 77K，因此把它们称为高温超导体。

2001 年 1 月，一种 T_c 为 39K 的二元化合物超导体 MgB₂^[13] 被发现。由于 Mg 和 B 的资源丰富而且比较廉价^[14]，这引发了人们对超导材料在电力领域应用的新兴趣。近几年来，铁基超导体的发现，又引发了人们研究超导机理的兴趣。铁基超导体可能有助于人们更进一步地认识超导，特别是高温超导的机理。

1.1.2 超导材料特性简介

如前文所述，临界转变温度 T_c 是超导材料的一个重要参数，尤其是在电阻率与温度的变化关系中，当温度降至 T_c 附近，超导体的电阻率陡变为零。典型的超导体电阻率随温度变化曲线如图 1.2 所示。

超导材料按照使用温度范围，可以划分为低温超导材料（主要运行在液氮

温区)和高温超导材料(可运行在液氮温区)。低温超导材料主要分为金属、合金和化合物三类。具有实用价值的低温超导金属是 Nb (铌), T_c 为 9.3K, 已制成薄膜材料用于弱电领域。合金系低温超导材料是以 Nb 为基的二元或三元合金组成的固溶体, T_c 在 9K 以上, 最常用的是 NbTi 合金, 其使用已占低温超导合金的 95% 左右。NbTi 合金可用一般难熔金属的加工方法加工成合金。化合物低温超导材料主要是 Nb_3Sn , 这是脆性化合物。虽然低温超导材料已得到较为广泛应用, 但是由于其 T_c 低, 必须在液氮温度下使用, 运转费用昂贵, 因此低温超导材料的应用受到限制。高温超导材料是具有高临界转变温度, 大都能在液氮温度 (77K) 条件下工作, 因此应用前景更为广阔。目前, 实用化的高温超导材料成分多是以铜为主要元素的多元金属氧化物, 由于铜氧体系的高温超导材料具有明显的层状二维结构, 因此其超导性能具有很强的各向异性。表 1.1 中给出了常用的五种超导材料的关键参数^[1]。

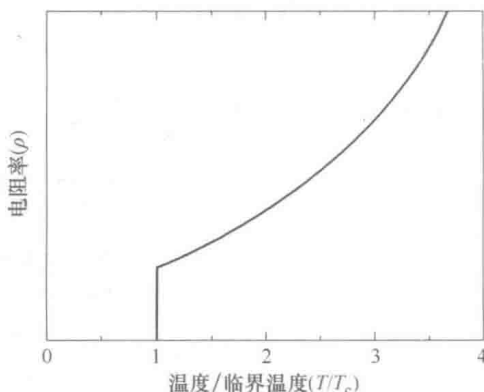


图 1.2 超导体电阻率随温度变化曲线

表 1.1 五种超导材料的关键参数

材料	T_c/K	H_{c2}/T	H^*/T	面内相干 长度/nm	面内穿透 深度/nm	临界电流 密度/(A/cm ²)
NbTi	9	12 (4K)	10.5 (4K)	4	240	4×10^5
Nb_3Sn	18	27 (4K)	24 (4K)	3	65	$\sim 10^6$
MgB_2	39	15 (4K)	8 (4K)	6.5	140	$\sim 10^6$
YBCO	92	> 100 (4K)	6 (77K)	1.5	150	$\sim 10^7$
BSCCO	108	> 100 (4K)	0.2 (77K)	1.5	150	$\sim 10^6$

注: H_{c2} 为上临界场, 该磁场下超导体的超导电性被破坏; H^* 为不可逆场, 该磁场下超导体的临界电流变为 0。

虽然在临界温度以下超导材料具有直流电阻率为零的特征, 但是超导体并不是简单的电阻为零的“理想导体”, 它具有独特的磁性质, 被称为“迈斯纳效应”(Meissner Effect), 也称为完全抗磁性。Meissner 等人当时将锡和铅样品放在磁场中冷却到临界温度以下, 发现当样品从正常态变到超导态后, 原来穿过样品的磁通量完全被排除到样品外, 同时样品外的磁通密度增加。当外加磁场强度继续加大到某一值时, 样品会失去超导电性, 转变为正常态, 这一外加磁场强度值被称为临界磁场。对实验结果的定量分析表明, 无论在超导体转变为

超导态前还是在转变后加外磁场，在超导体内部的磁感应强度一直为0。当超导体进入超导态以后，它会将磁通排出其体外（无论其是否在磁场中冷却到超导态），这个性质是独立的，并不是由电阻为零性质所引起的。迈斯纳效应将超导体与理想导体区分开来，证明超导现象本质上是一种全新的物理现象。

除临界温度以外，衡量超导材料性能的另一个重要指标为临界电流（ I_c ）或临界电流密度（ J_c ）。即在某种环境（包括温度、压强、磁场等）下，超导体能够无阻传导的最大电流（密度），如果超导体内的电流超过这一电流，超导体内会产生电势差，失去超导性（简称失超），即存在能量损耗。超导材料的临界电流与其所处温度、磁场环境有关，温度越高、外磁场越大，其临界电流越小。由温度、磁场决定的临界电流可表示为一个临界面。由于人们往往希望将超导材料应用于无阻地传输大电流上，所以测量以及提高超导材料的临界电流，是超导应用研究的重要方面。

然而，对于很多超导材料，在极微弱的外磁场下，其临界电流密度就接近于零了，这样的超导材料是不具备实用价值的。根据超导材料是否具有迈斯纳效应（完全抗磁性），可以将超导材料分为第一类超导体和第二类超导体^[15]。第一类超导体表现出理想的迈斯纳效应，会将磁场完全排出体外，当磁场大于一定值（临界场 H_c ）时，则进入正常态；只有大部分纯净的金属单质才是第一类超导体。超导体中的大多数是第二类超导体，存在“混合态”，当外磁场大于一定值（下临界场 H_{c1} ）时，不表现出完全抗磁性，而是呈现部分抗磁性，超导体中一些局部区域被外磁场穿透变成正常态；当外磁场更大（大于上临界场 H_{c2} ）时，才会完全变成正常态。具备实用价值的超导材料一般是“非理想第二类超导体”，其磁化曲线是不可逆的。并且其 H_{c1} 很小，而 H_{c2} 很大，在较大的磁场下仍然具有较高的临界电流密度。第二类超导材料被磁场穿透的过程可以使用临界态模型描述，其基本思想在超导体的外侧处于临界态而超导体的内侧处于零场态。临界态模型是基于大量实验数据的经验模型，对于工程应用有直接的帮助，最常用的临界态模型包括 Bean 模型^[16] 以及 Kim 模型^[17,18]。

高温超导材料的超导转变条件不仅需要温度小于转变温度 T_c ，还需要工作的磁场 H 与电流密度 J 小于一定值。从图 1.3 中可以看出，对于高温超导体转变温度、磁场与电流密度是相互影响的。通常在实际应用中，电流、磁场接近 0 的转变温度被称为 T_c 。高温超导体由于钉扎效应，可以

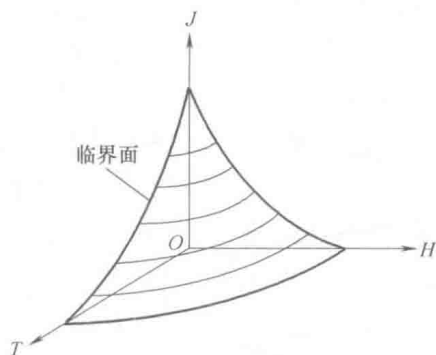


图 1.3 超导材料临界面的示意图， J 、 T 、 H 分别为电流密度、温度、磁场

承受极强的磁场强度, H_c 非常高, 但随着磁场增加, 特别是垂直场的增加, 超导带材的性能也会有明显下降。

而且, 高温超导带材有着极强的各向异性, 主要表现为沿材料的不同方向, 超导体的临界电流密度与临界磁场不同。对于 Bi2223 和 YBCO, 沿其晶胞短轴方向 (平行于带材表面) 临界电流密度大; 沿其长轴方向 (垂直于带材表面) 临界电流密度小。同时, 当外加磁场方向平行于短轴方向时 (平行场), 临界磁场高; 平行于长轴方向时 (垂直场), 临界磁场低。一般而言, 在讨论临界电流/电流密度时都是指平行于带材表面的临界电流, 且会指出相应的温度及磁场, 如果没有说明的话即默认是在 77K 及自场下。

超导体在直流下, 特别当电流处于临界电流以内时, 可以被认为是无阻的。然而当超导体中通过交流电流时, 会产生能量损耗。广义上讲, 交流下的损耗都是交流损耗。一般来讲, 交流损耗包括磁滞损耗、电阻性损耗和耦合损耗。其中, 主要是磁滞损耗。一般情况下, 电阻性损耗主要出现在高电流情况; 耦合损耗远小于磁滞损耗, 只有当频率高于 2500Hz 时, 耦合损耗才与磁滞损耗相当^[19]。通常所讲的交流损耗 (AC Loss) 都是特指磁滞损耗。

高温超导材料的交流损耗是基于其磁化过程。高温超导体属于第二类超导体, 即当磁场在下临界场 H_{c1} 以下时, 超导体具有完全抗磁性; 当磁场超过 H_{c1} 时, 会有部分区域被磁通 (以磁通量子的形式, 一个磁通量子大小为 $2.1 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) 穿过; 随着磁场逐渐增强, 进入超导体的磁通线不断增多变密, 直到覆盖整个超导体, 阻断了超导体内部的超导区域的连通, 使得超导体不再具有超导性, 恢复正常态, 这时候的磁场大小称为上临界场 H_{c2} 。在实际情况下, 由于工艺不可能完美, 超导体中必然存在晶格缺陷、杂质等, 使得磁通 (Flux) 在某些位置能量处于最低, 即磁通被固定在这些位置上, 这种效应称作钉扎 (Pinning)。钉扎的存在使高温超导体的磁化曲线不可逆, 当施加一个外磁场再撤去后, 超导体内还会有剩磁保留, 这种磁滞现象正是第二类超导体交流损耗的主要来源。交流损耗原理示意图如图 1.4 所示。

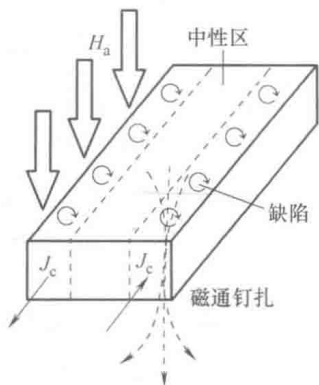


图 1.4 交流损耗原理示意图

在超导体的磁场穿透过程中, 在被磁场穿透区域, 磁通被钉扎在缺陷处, 会受到洛伦兹力 ($F_L = J \times B$), 该力方向与钉扎力方向相反, 试图使得磁通离开钉扎位置。随着电流、磁场增强, 洛伦兹力增强, 最终将使得磁通流动起来, 出现电阻, 此时的电流即被认为是 J_c 。磁通还存在蠕动效应, 就是说磁通线有一定的概率跃迁出钉扎位置, 在驱动力作用下进入下一个钉扎的位置, 在这个过程中会产生损耗。交

流损耗即是洛伦兹力克服钉扎力做功, 最终转化为热能。

对于交流损耗也可以从宏观角度来进行理解: 由于交变磁场会在高温超导体中感生出平行于电流 J 方向的电场 E ($\nabla \times E = -\partial B / \partial t$), 从而产生损耗 ($P = J \cdot E$)。由于交流损耗正比于频率, 通常将交流损耗的单位写作 J/cycle/m, 即单位长度单位周期所产生的损耗。一般为了方便比较, 也将交流损耗做归一化处理: $Q = Q_0 \pi / (\mu_0 I_c^2 L f)$, 即将损耗除以长度、频率和临界电流的二次方。

在交流损耗计算中, 通常采用临界态模型 CSM (Critical State Model) 或者幂函数关系 (Power Law) 来描述超导体

$$\text{CSM: } |J| = \begin{cases} 0 & \text{当 } B = 0 \text{ 时} \\ J_c & \text{其他} \end{cases} \quad (1-1)$$

$$\text{Power Law: } J = J_c \left(\frac{E}{E_c} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-2)$$

式中, E_c 一般取 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 。 n 称为 n 指数 (n value), 表征电阻随电流上升的速度。若不考虑磁场下临界电流的衰减, CSM 即是 Bean 模型。磁场下临界电流 $J_c(B)$ 比较复杂, 受磁场角度、大小影响, 由于钉扎的存在, 各向异性非常严重。一般地, 可以用经典公式来近似描述^[20,21]

$$J_c(B_{\perp}, B_{\parallel}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{K^2 B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2}}{B_0} \right)^{\beta}} \quad (1-3)$$

式中, $B_{\perp}$ 为垂直于带材表面的磁场, $B_{\parallel}$ 为平行于带材表面的磁场, K 为常数。

在二维模拟中, 假设超导带材横截面为 x - y 平面, 磁矢势 A 和电流密度 J 只有 z 分量, 电势 φ 在整个横截面上一致。若在 (x_0, y_0) 处电场 $E=0$, φ 在 z 方向上有

$$\partial \varphi = -\partial t A_z(x_0, y_0; t) \quad (1-4)$$

对于满足 Bean 模型的高温超导体, 其交流损耗可以利用在最大电流 ($I = I_m$) 时积分获得, 即

$$Q(I_m) = 4 \int J(x, y) \psi(x, y) dS \quad (1-5)$$

式中, $\psi(x, y)$ 是在 (x, y) 位置处与中性区之间的磁通, 可以用 A_z 表示为

$$\psi(x, y) = A_z(x, y) - A_z(x_0, y_0) \quad (1-6)$$

式中, $A_z(x_0, y_0)$ 是中性区内的磁矢势。

也可以将交流损耗的通用情况下的表达形式写出

$$Q = \oint dt \int J(x, y; t) E(x, y; t) dx dy \quad (1-7)$$

即是电流密度 J 与电场 E 乘积的积分。可以将时间上的积分重写写作对电流的积分

$$Q = 2 \int_{-l_m}^{l_m} dI \int J(x, y; I) \times [\partial I A_z(x_0, y_0; I) - \partial I A_z(x, y; I)] dx dy \quad (1-8)$$

对于单带情况, 在 1970 年, Norris 利用 Bean 模型给出了计算方法^[22], 并指出了交流损耗是一种抗磁体的磁滞损耗, 对于相同的电流幅值, 单位周期中的交流损耗是一个定值, 与频率无关。Norris 给出了针对 BSCCO 椭圆截面材料与针对 YBCO 薄带截面材料的交流损耗公式

$$Q_{\text{ellipse}} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left\{ (1 - F) \ln(1 - F) + \frac{(2 - F)F}{2} \right\} = \mu_0 I_c^2 L_1(F) \quad (1-9)$$

$$Q_{\text{strip}} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left\{ (1 - F) \ln(1 - F) + (1 + F) \ln(1 + F) - F^2 \right\} = \mu_0 I_c^2 L_2(F) \quad (1-10)$$

式中, $F = I_m / I_c$, 为约化电流。在相同条件下, 一般有 $Q_{\text{ellipse}} > Q_{\text{strip}}$ 。

在有外磁场或者在线圈中, 实际的交流损耗会大于 Norris 公式中给出的结果。但 Norris 公式是用来估算交流损耗, 检测实验、计算正确与否的重要方法。

交流损耗是高温超导交流应用中的关键问题。交流损耗产生的热量会引起制冷剂 (通常是液氮) 升温沸腾, 或者增加制冷机负担。例如, 对于一根独立的超导带材, 其交流损耗约在 $10^{-4} \text{ J/cycle/m}$ 量级; 而对于一个没有进行优化的大型磁体系统, 其交流损耗可高达 0.1 J/cycle/m 。则 50Hz 下 1000m 线圈需要 5kW 制冷量, 这是对制冷的一个巨大挑战。对交流损耗缺乏考虑的话可能导致整个系统失效。另一方面, 由于高温超导磁体中的交流损耗分布不均, 使得磁体中温度分布不均, 可能引起局部失超。因此, 交流损耗是高温超导应用技术设计中必须要考虑的问题。

1.1.3 高温超导材料产业化

相对于低温超导材料而言, 高温超导材料的主要优势是可以应用在更高的温度下, 这不仅降低了制冷的成本, 也大大提高了应用的便利性。从 1986 年高温超导材料发现至今, 高温超导材料已逐步实现产业化生产与应用^[23]。高温超导带 (线) 材是其中最主要的产品之一。目前, 高温超导带材根据材料种类主要分为两大类^[24]: 一类为铋锶钙铜氧化物 $\text{Bi}_2\text{Si}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) 多芯带材, 称为第一代高温超导带材; 通常使用粉末套管法生产, 即将超导粉末包套在金属 (银) 管内, 进行机械加工与热处理烧结而成^[25,26]; 另一类为以钇钡铜氧化物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ (YBCO) 超导薄膜为功能核心的涂层导体, 称为第二代高温超导带材, 一般通过在有织构的基底或过渡层上进行多层镀膜, 最终生长高性能的高温超导层来制备^[27,28]。第一代和第二代高温超导导线结构示意图如图 1.5 所示。

第一代高温超导导线是利用银合金包覆超导材料方式制备的, 这种制备技