

强磁场技术进展*

曹 效 文

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 评述了强磁场技术的新进展: 超导强磁场已达到 21T; 40T 和 45T 场强的混合磁体即将建成; 用于脉冲强磁场磁体的导体材料和磁体增强技术也取得了进展.

关键词 强磁场, 超导磁体, 混合磁体, 脉冲磁体

Abstract Recent progress in high magnetic field technology is briefly reviewed. The magnetic field produced by superconducting magnets has already surpassed 21T. 40T and 45T hybrid magnets will soon be put into operation in Japan and the USA. The conducting materials used in resistive and pulsed magnets as well as magnet reinforcement techniques have been developed.

Key words high magnetic field, hybrid magnet, superconducting magnet, pulsed magnet

1 引言

强磁场下的凝聚态物理研究是富有成果的研究领域. 稳态磁场是集磁体设计与制造, 强制冷却系统和大功率直流电源为一体的综合性技

术. 强磁场在科学研究中的应用反映出一个国家的科学和技术发展水平. 从世界上已有的七大强磁场实验室的分布(见表 1)^[1]来看, 也反映出同样的现实, 除中国合肥强磁场实验室外, 它们皆分布在经济和科学发达的西方国家.

表 1 世界稳态强磁场装置

实 验 室	最高场强 (T)	超 导 磁 体				水 冷 磁 体		
		线 材	温 度 (K)	有效孔径 (mm)	磁 场 (T)	电源容量 (MW)	有效孔径 (mm)	磁 场 (T)
美国 MIT FBNM	31.8	NbTi	1.2	400	7.5	10	33	24.3
法国 Grenoble 欧共体	31.4	NbTi	1.8	420	11	10	50	21.1
日本仙台东北大学	31.1	Nb ₃ Sn + NbTi	4.2	360	12	8	32	19.6
荷兰 Nijmegen 大学	30.4	NbTi	1.8	360	11	6	32	19.6
英国牛津大学	20	NbTi	4.2	250	6.7	2	30	13
俄罗斯莫斯科 Kurchatov 研究所	25	NbTi + NbZr	4.2	300	6.7	7.5	28	18.4
中国合肥中国科学院 等离子体物理研究所	20	NbTi	4.2	266	8	4	32	13

* 1995 年 8 月 14 日收到初稿, 1995 年 11 月 20 日收到修改稿.

2 混合磁体

稳态强磁场实验室的重要标志之一是拥有能产生至少 20T 以上磁场强度的直流磁体. 在 90 年代以前, 20T 以上直流稳态磁场是由超导磁体和水冷磁体组成的混合磁体产生的, 如图 1 所示. 已运行的具有最高场强的混合磁体是美国 MIT 和 Francis Bitter 国家强磁场实验室的 Hybrid-II 和 III^[2], 场强 $B = 34.2\text{T}$, 磁体的净孔径为 32mm, 电源功率为 9MW. 如果在净孔径内插入一对钽磁极, 在 2mm 间隙内可产生 37.25T 的场强. 这些磁体已服务 13 年, 累计运行时间为 3000h.

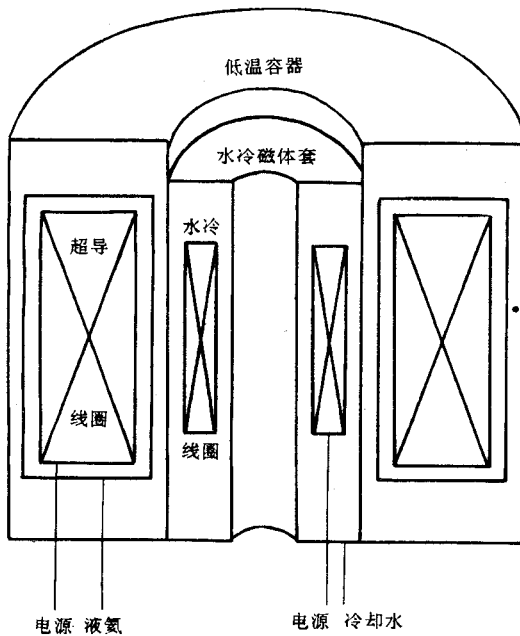


图 1 由超导线圈和水冷线圈组成的混合磁体

随着科学研究的深入和发展, 上述场强的稳态场已满足不了科学研究的要求. 同时作为磁体线圈导体材料研究的发展, 例如 Cu-Ag 合金的研制成功, 以及磁体设计水平和水冷技术的提高, 使得建立更高场强的混合磁体成为可能. 美国于 1990 年 8 月已开始实施建立新的国

家强磁场实验室 (NAMFL) 计划, 它座落在佛罗里达州立大学 (塔拉哈西). 它的核心装置是一台 $B = 45\text{T}$ 的混合磁体^[3,4]. 该混合磁体由一个 14T 的超导磁体 (外磁体) 和一个 31T 的水冷磁体组成. 该混合磁体将提供可使用的净孔径为 32mm. 磁体总重量 23t. 水冷磁体由多个 Bitter 盘组成的线圈组成. 导体是 Cu-Ag 合金. 水冷磁体的直流电源功率为 24MW, 冷却水的流量为 100l/s, 水压 3MPa, 备有容积为 4000m³ 的冷水池和 4 路功率为 7MW 的冷却水热交换器. 该强磁场设施面对的研究课题包括物理学、化学、材料科学、工程和生物学等. 这一装置原计划在 1995 年投入运行, 后因故推迟.

在日本, 一个新的强磁场研究中心——筑波强磁场实验室正在建造之中^[5,6], 它座落在东京东北 60km 的筑波市, 隶属于国立金属研究所. 这个强磁场实验室的核心装置是一台 35—40T 的混合磁体, 它包括一个 15T 的超导磁体, 其室温孔径为 400mm. 水冷磁体有两种可能的选择: (1) 净孔径为 30mm, 场强为 25T, 由多层螺旋线圈构成, 线圈材料为 Cu-0.73% Al₂O₃ 合金. 该水冷磁体和超导磁体组合形成一个净孔径为 30mm、场强为 40T 的混合磁体; (2) 净孔径为 50mm 的多层螺旋线圈磁体, 场强为 20T. 线圈材料为 Cu-Cr 合金. 该磁体和超导磁体组合形成一个净孔径为 50mm、场强为 35T 的混合磁体. 水冷磁体的直流电源功率为 15MW. 冷却水流速为 700m³/h, 三台功率为 5.2MW 的涡轮制冷机用于冷却水的冷却. 该混合磁体系统主要用于高温超导体的研究和评估.

在中国科学院等离子体物理研究所强磁场实验室, 已提出建立一台场强为 45T 的秒级半稳态水冷磁体的计划. 该磁体的净孔径为 32mm, 电源功率为 40MW (由两台飞轮发电机提供), 最大磁场持续时间大于 2s. 这台强磁装置将用于高温超导体的研究, 低维系统和纳米材料的输运性质研究, 各种导电材料的费米面性质研究以及磁场诱导的相变研究等.

3 超导磁体

随着低温超导磁体技术取得重要进展, 20T 超导强磁场已成为一项成熟技术. 它是由 Nb_3Sn 或 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 线圈(内线圈)和 NbTi 线圈(外线圈)组成的复合超导磁体产生的. 仅日本金属研究所就拥有 20T 以上超导磁体 3 台^[7], 表 2 给出了 3 个 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 线圈(内线圈)绕组的主要参数. 其中 1 台的最高场强为 21.1T^[8]. 在美国新建的 NHMFL 也将拥有 3 台 20T 超导磁体系统, 分别用于 NMR, ICR 和 ESR 专门化研究. 磁体孔径 52mm, 在 1cm 范围内的磁场均匀度为 5×10^{-4} . 该实验室还计划建立 1 台场强为 25T 的超导磁体, 用于 NMR 研究^[3].

表 2 3 个 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 线圈绕组的主要参数

	线圈 1	线圈 2	线圈 3
绕组内径(mm)	50	50	50
绕组外径(mm)	151.2	151.2	151.2
绕组高度(mm)	220.3	220.3	220.3
层数	22	22	22
总匝数	1760	1760	1760
净孔径(mm)	44	50	50
最高电流(A)	255.5	272.0	340.7
中心场强(T)	20.33	20.47	21.1

4 脉冲磁体

为产生相同的磁场强度, 用脉冲强磁场技术要比直流磁体便宜得多, 对于大部分物理过程而言, 毫秒级的脉冲半周期是充分的. 因此, 脉冲强磁场受到广泛重视. 通常场强低于 100T 的脉冲磁体可重复放电使用, 称为非破坏型脉冲磁体; 100T 以上磁场一般用电磁压缩和爆炸压缩磁通等方法产生, 只能一次性放电, 因此称为破坏型脉冲磁体.

作为绕制长脉冲周期磁体的导体, 冷拉硬

纯铜适用于绕制 50T 或更低场强的多层螺线管磁体, 例如 MIT 的 $B = 50\text{T}$, $t = 10\text{ms}$ 的脉冲磁体^[9], 荷兰 Kamalish 实验室的 $B = 51.7\text{T}$, $t = 16\text{ms}$ 的脉冲磁体^[10] 和中国科学院等离子体物理研究所的 $B = 41\text{T}$, $t = 22\text{ms}$ 的脉冲磁体^[11] 等. 在 90 年代前, 作为 50T 以上多层长脉冲磁体的最好材料是 Cu-18 Vol. %Nb 导体^[9], 它在室温的最终抗张强度 UTS(ultimate tensile strength) = 960MPa, 电导率是纯铜的 70%, 在 77K 时, UTS = 1240MPa, 室温与 77K 的电阻率比 $\rho_{300\text{K}}/\rho_{77\text{K}} = 3.5$. 还有用 Cu-Nb 合金导体绕制的长脉冲磁体, 如 MIT 的 $B = 68.4\text{T}$, $t = 5.6\text{ms}$ 的脉冲磁体^[9] 等.

高场脉冲磁体研制中的主要问题是励磁过程中产生的巨大的磁应力, 例如, 对于 50T, 100T 和 500T 的场强, 所产生的磁应力分别为 1GPa, 4GPa 和 100GPa. 解决这一难题的主要途径有: 一方面提高导体材料的抗张强度 (UTS), 而又保持尽可能高的电导率, 但是由上面所列举的导体材料的 UTS 值可以知道, 仅靠导体材料本身的抗张强度所能达到的最高脉冲场约 50—60T; 为了获得更高磁场, 另一方面还必须采取磁体的整体增强技术.

近年来人们发现 Cu-Ag 合金是一种比 Cu-Nb 合金更好的导体^[12]. 例如 Cu-16at% Ag 合金, 经过适当的冷加工和热处理, 在室温下 UTS = 1000MPa, 电导率是纯铜的 80%, 并且加工比 Cu-Nb 合金更容易.

脉冲磁体的增强技术, 除了用最佳化玻璃纤维进行层间增强外, 通常将线圈绕组整体塞进一个钢或不锈钢套内, 以提高绕组的抗张强度. 近来德国、日本、比利时和美国的一个联合研究小组^[13], 在铜线圈绕组与钢套间填充水和 SiC 粉末, 利用水结成冰的膨胀作用而做成所谓的冰线圈, 场强达到 51T, 放电曲线的半周期具有比通常的脉冲磁体更好的对称性, 表明这种增强技术是成功的, 并有希望达到更高场强或具有更长的使用寿命.

美国 AT&TBell 实验室^[14] 在线圈绕组与钢套之间填充 $\phi 1\text{mm}$ 的稳定化立方锆陶瓷球.

这种陶瓷球具有很高的抗压缩强度(3GPa),并且在钢套两端设计成活动滑块,可用螺钉控制其压紧程度,这一特殊设计的磁体,场强已达到72T, $t = 12-80\text{ms}$.

5 结论

强磁场技术,其中包括稳态场、脉冲场及其相关技术,近年来取得了长足进展.尤其是45T稳态强磁场装置的建成,为强磁场下的凝聚态物理、材料科学、化学和生物科学研究等提供了一个新的研究条件,并可望某些新现象和新效应的发现.

参 考 文 献

- [1] 中川康昭,日本金属学会会报,31(1992),406.
 [2] L. G. Rubin, R. J. Weggel, E. J. McNiff Jr. et al., *Physica B*, 201(1994), 500.
 [3] J. Brooks, J. E. Crow, D. M. Parkin et al., *Physica B*, 197(1994), 19.
 [4] J. R. Muller, M. D. Bird, S. Bole et al., *IEEE Transactions on Magnetics* 30(1994), 1563.
 [5] K. Inoue, T. Asano, T. Kiyoshi et al., *Physica B*, 177(1992), 7.
 [6] K. Inoue, T. Takeuchi, T. Kiyoshi et al., *Physica B*, 201(1994), 517.
 [7] T. Kiyoshi, K. Inoue, K. Itoh et al., *IEEE Transactions on Magnetics* 30(1994), 2110.
 [8] M. Oshikiri et al., *Physica B*, 201(1994), 521.
 [9] S. Fonet, *Appl. Phys. Lett.*, 49(1986), 982.
 [10] H. A. Jordaan, R. Wolf, D. Deklerk, *Physica*, 69(1973), 129.
 [11] 施嘉标、潘引年、查秀英等,核科学与工程,4(1984), 163.
 [12] Y. Sakai, K. Inoue, T. Asano et al., *Appl. Phys. Lett.*, 59(1991), 2965.
 [13] G. Machel et al., *Physica B*, 201(1994), 575.
 [14] G. S. Boebinger, A. Passner, J. Bevk, *Physica B*, 201(1994), 560.

共振腔内微波场强的测量方法*

谭立国 胡用时 张志强

(华中理工大学固体电子学系,武汉 430074)

摘 要 提出了一种利用定向耦合器确定共振腔内微波场强的新方法.该方法简单实用,引入误差较小.实验表明,这一方法得出的结果与现行方法符合很好.

关键词 微波场强测量,共振腔,定向耦合器,高功率微波材料

目前在高功率微波铁氧体材料的自旋波线宽 ΔH_k 的测试中,用 TE_{10n} 矩形共振腔产生高强度的微波场,被测样品放在腔内微波磁场最大处(零电场处).在加直流偏磁场的条件下,当微波功率升高到某一定值时,产生高功率非线性吸收现象,微波脉冲后沿开始畸变.这时加在样品上的微波磁场强度为阈值场强,根据阈值场强可以确定自旋波线宽.

确定阈值场强实际上是确定腔内最大的微波磁场.测试时, TE_{10n} 矩形腔处于共振状态,内

部的场强可以通过腔的品质因数、共振时的驻波比、共振频率、腔的入射功率以及腔的工作波型和尺寸计算出来.整个测试和计算比较复杂,引入误差也较大.

1 TE_{10n} 矩形共振腔内场强的确定

* 1995年8月14日收到初稿,1995年11月20日收到修改稿.