

制冷机传导冷却的超导磁体冷却系统研究进展

张楷浩, 邱利民, 甘智华, 周晓晓

(浙江大学 制冷与低温研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 回顾并总结了低温制冷机传导冷却的超导磁体系统的发展历程和最新研究进展. 与传统的液氦浸泡冷却方式不同, 低温制冷机传导冷却系统主要依靠低温下固体之间的热传导对超导磁体线圈进行冷却. 基于小型低温制冷机的研究进展, 集中讨论超导磁体中的制冷机传导冷却系统; 结合传导冷却的超导磁体应用, 讨论传导冷却中低温制冷机性能、低温恒温器传热以及加速冷却等技术要点, 对低温制冷机传导冷却磁体系统的发展进行了展望.

关键词: 超导磁体; 低温制冷机; 传导冷却; 加速冷却

中图分类号: TK 1

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2012)07-1213-14

Advance in cryogenic system of cryocooled superconducting magnet

ZHANG Kai-hao, QIU Li-min, GAN Zhi-hua, ZHOU Xiao-xiao

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A review of recent advances and research of cryocooled superconducting magnetic system was given. Cryocooled superconducting magnet coils are cooled by thermal conduction between solids in low temperature, compared to the convective heat transfer in liquid helium bath. The research of conduction cooling system in superconducting magnet was discussed based on the development of cryocooler. Typical designs of conduction cooling systems were illustrated and compared. Key technical issues about cryocoolers, heat transfer in conduction cooled coils and cool down time reduction were discussed. The development tendencies of the cryocooled superconducting magnetic technology were forecasted.

Key words: superconducting magnet; cryocooler; conduction cooling; faster cool-down

根据超导应用联盟 2002 年的预计: 2020 年超导产品的全球市场将达到 380 亿美元^[1], 其中, 超导磁体系统的应用将主要集中于超导电力、超导储能以及医学诊断和研究等领域, 且对磁感应强度的要求越来越高.

众所周知, 超导应用离不开低温技术. 超导磁体正常运行需要稳定的低温环境以克服系统的热负荷. 目前投入应用的超导磁体系统运行环境大多都处于液氦温区(4.2 K). 对于外界处于室温(300 K)的磁体系统, 需要考虑如何克服包括外界向磁体的漏热和磁体内部产生的交流损耗、焦耳热等负荷以及如何安全、快速地将磁体从室温降至运行温度等

一系列问题.

本文主要针对低温制冷机传导冷却的超导磁体系统进行总结与比较; 回顾了传导冷却系统的研究进展; 总结了超导磁体系统传导冷却中的技术问题与要点, 并对未来的发展进行了展望.

1 低温制冷机传导冷却超导磁体系统研究进展

1.1 超导磁体冷却系统的主要类型及特点

目前, 超导磁体系统运行的低温环境主要由 3 种方式提供, 分别是低温液体浸泡冷却、再冷凝式

冷却和制冷机传导冷却,典型结构及特点如表 1 所示.液氮冷却的超导磁体系统应用最为广泛.受到国际氦资源限产等因素影响,液氮价格持续上扬,我国曾一度出现无液氮可用的情况;另一方面,液氮冷却系统需要专业的运输和充灌操作,增加了系统应用的复杂性和运行成本.采用低温制冷机再冷凝蒸发的氦气的“零蒸发”系统,会存在复杂的低温输送问题,并且由于制冷机冷量不够而使冷凝速率低于蒸发速率,造成容器承压或氦气溢出.采用低温制冷机代替液氮作为冷源,通过传导冷却方式将超导线圈温度降至运行温度 T_c 以下,无需液氮运输及灌注操作;另一方面,由于系统只消耗电能,大幅降低了运行成本.如表 2 所示为日本东北大学与东芝公司

合作研制的制冷机传导冷却的 18.1 T 超导磁体系统与传统液氮浸泡冷却的 18T 超导磁体运行成本的比较.新系统由 1 台 GM-JT 制冷机冷和 2 台单极 GM 制冷机分别冷却超导线圈和辐射屏,设计该系统运行 200 d,较传统的液氮浸泡冷却系统可以节省一半以上的运行费用.该无液氮冷却系统展现出体积小、结构简单、操作方便、方向可调整、适用性强等优势,逐渐取代传统液氮冷却技术成为超导磁体系统应用的热点^[2],以期广泛应用于核磁共振成像、磁分离、超导储能、材料加工和空间探测等领域.当然,小型低温制冷机提供冷量有限、制冷机振动影响磁体运行稳定性及系统降温时间较长等不足影响了传导冷却系统的研究与发展.

表 1 超导磁体冷却系统的主要类型及特点^[3-4]

Tab.1 Main approaches for superconducting magnet cooling^[3-4]

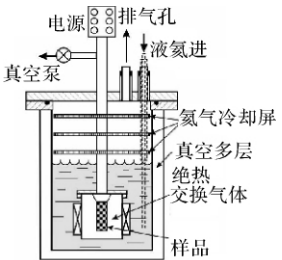
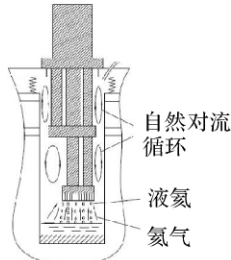
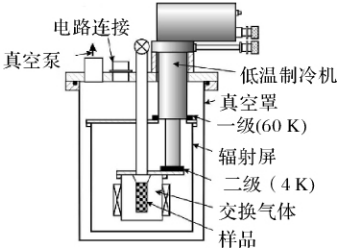
主要冷却方式	典型结构	优势	局限
低温液体浸泡冷却		<ul style="list-style-type: none"> 结构简单 温度稳定性好 无机械振动影响 	<ul style="list-style-type: none"> 液氮消耗量大,成本高 液体补充操作不便 受方向影响 低温容器须耐压设计
再冷凝式冷却		<ul style="list-style-type: none"> 零蒸发模式,液氮消耗小 磁体不受机械振动影响 	<ul style="list-style-type: none"> 受方向影响 结构复杂,成本提高 容器须耐压设计
制冷机传导冷却		<ul style="list-style-type: none"> 结构简单,操作方便 质量和体积大幅减小 任意方向获得所需场强 无低温液体输送和补充操作 系统无高压危险 能够长期运行 	<ul style="list-style-type: none"> 制冷机功率低,冷却均匀性差,磁体稳定性较弱 预冷时间较长 制冷机振动影响 尚不适用于大型超导装置

表 2 18 T 制冷机冷却的超导磁体系统(18 T-CSM)与传统液氮冷却磁体(18 T-SM)运行费用对比^[5]

Tab.2 Operation costs for cryocooled superconducting magnet (18 T-CSM) and liquid helium cooled superconducting magnet (18 T-SM) ^[5]

冷却类型	液氮消耗量 ¹⁾ (运行 200 d)	耗电量 ²⁾			总运行费用
		GM-JT(运行 200 d)	GM-JT(待机 165 d)	GM(运行 365 d)	
18 T-CSM	0	8.8 kW×200 d	5.1 kW×165 d	(2×6.1 kW)×365 d	135 万日元
18 T-SM	10 000 L	0	0	0	300 万日元

注:1)液氮价格:300 日元/升;2)不考虑供电电源耗电量;电价:8 日元/kWh.

1.2 低温制冷机传导冷却的超导磁体研究进展

表 3 低温制冷机传导冷却的超导磁体系统的研究进展

Tab. 3 Research of cryocooled superconducting magnet system

时间	研究机构	超导磁体	B/T	T_o/K	Φ_{RT}/mm	制冷系统	t_c/h
1983	麻省理工学院 ^[6]	Nb ₃ Sn 线圈(12 kg),工作电流为 40 A	3.3	14	—	CTF-1020 CP 两级制冷机: 30 W@70 K, 2.5 W@13 K	<24
1993	日本东北大学 ^[7]	(Nb, Ti) ₃ Sn 线圈,冷重 80 kg,工作电流为 465 A	4.6	11	38	两级 GM 制冷机: 50 W@67 K, 1.2 W@10 K	<55
	日本大学 ^[8]	NbTi 线圈,最大磁感应强度为 6.3 T	5.4	6	—	2 台两级 GM 制冷机(最低制冷温度为 4.0 K, 500 mW@5.4 K, Er ₃ Ni 填料)	8
1995	日本东芝 ^[9]	NbTi 线圈,工作电流为 138 A,用于实验室和 NMR	6.45	3.61	180	4 KGM 制冷机(0.5 W~1 W@4 K; Er ₃ Ni 填料); 20 KGM 制冷机	21
	美国通用 ^[10]	Nb ₃ Sn 线圈(3 600 kg),工作电流为 65 A,用于 MRI	0.5	10	—	2 台 Kelcool UCH-130 Balzers 制冷机	120
1996	日本东芝 ^[11]	Nb ₃ Sn、NbTi 线圈,冷重 88 kg,工作电流为 130 A,用于实验室和 NMR	10	4	100	4 K 两级 GM 制冷机(0.5 W@4.2 K, Er ₃ Ni 填料); 20 K 两级 GM 制冷机(铅丸填料)	24
		Nb ₃ Sn 线圈,工作电流为 149 A	11.5	4.4	100	4 K 两级 GM 制冷机(0.7 W@4.2 K, 二级蓄冷器分层采用 Pb、Er ₃ Ni、HoCu ₂ , 所处磁场的磁感应强度为 1 T); 20 K 两级 GM 制冷机	—
	日本东北大学 ^[12]	(Nb, Ti) ₃ Sn、NbTi 线圈,冷重 120 kg,工作电流为 150 A	11	6	52	2 台两级 GM 制冷机(Er ₃ Ni 填料); 0.5 W@4.2 K, 20 W@40 K	—
	牛津仪器	用于中型规模的高梯度磁选机	6	4.7	75	Leybold 制冷机,参数: 200 V 三相 50/60 Hz, 6.5 kW, 11 L/min 冷却水	24
	住友重工 ^[13]	NbTi/Cu 线圈,冷重 120 kg,用于电化学和医疗实验	6	4.9	220	2 台两级 GM 制冷机(二级蓄冷器采用铅丸、ErNiCo 填料): 0.4 W@4.5 K, 15 W@40 K	44
	JASTEC	Nb ₃ Sn、NbTi 线圈,冷重为 79.5 kg,工作电流为 79.4 A,可水平或垂直放置	10	4	101	系统正常运行时,制冷机一、二级温度达 25 K 和 4 K	45
1997	日本东北大学 ^[14]	NbTi 线圈,冷重 130 kg,工作电流为 122 A	5	4.2	50	两级 GM 制冷机(二级蓄冷器采用铅丸和 Er ₃ Ni 填料): 0.7 W@4.2 K, 40 W@46 K	62
1998	日本东北大学 ^[15-16]	Nb ₃ Sn、NbTi 线圈,工作电流为 162 A,磁体任意方向放置	10	4	100	4 K 两级 GM 制冷机(载流 162 A 时二级冷负荷 0.2 W)	48
		Nb ₃ Sn、NbTi 线圈,工作电流为 90、157 A	15	5	52	4 K 2 台 GM 制冷机(一、二级冷负荷分别是 80.3 和 1.14 W)	110
	德国吉森大学 ^[17]	Nb ₃ Sn 线圈(2.6 kg),工作电流为 120 A	2.8	5.9	—	两级 GM 型脉管制冷机(回热器填料采用 HoCu ₂ 、ErNi 和 Pb); 二级最大冷量为 0.49 W@4.2 K; 制冷机引起的振动不超过 1.5×10^{-4} g	6
	Kobe Steel ^[18]	NbTi 线圈,冷重 160 kg,工作电流为 81.66 A,采用 Ne 热开关	5	—	300	—	65
		NbTi、Nb ₃ Sn 线圈,冷重 130 kg,工作电流为 79.37 A,采用 Ne 热开关	10	—	100	—	45
	美国通用 ^[19]	NbTi 线圈(273 kg),工作电流为 158 A,用于 MRI	0.5	5.1	—	4.2 K 两级 GM 制冷机	36

续表							
时间	研究机构	超导磁体	B/T	T_o/K	Φ_{RT}/mm	制冷系统	t_c/h
1999	住友重工 ^[20]	(Nb, Ti) ₃ Sn, NbTi 线圈, 工作电流为 151 A, 用于中子散射实验	10	4	51	2 台两级 GM 制冷机(二级蓄冷器采用铅丸和 HoCu ₂ 填料): 0.9 W@4.2 K, 30 W@41 K	52
	日本东北大学 ^[21]	CuNb/(Nb, Ti) ₃ Sn, NbTi 线圈, 工作电流为 180、120 A	10.3	5	360	4 台 GM 制冷机(每台 1 W@4 K)	120
	中国科学院电工技术研究所 ^[22]	NbTi 线圈(5 kg), 工作电流为 98.2 A	5	5.8	30	住友重工 GM 制冷机: 1 W@4.2 K, 31 W@40 K 两级 GM 制冷机(二级蓄冷器采用 Er ₃ Ni 和铅丸填料): 0.58 W@4.2 K(一级 40 K 无冷负荷); 通过液氮预冷辐射屏至 77 K	21 22.5
2001	Cryomagnetics ^[23]	NbTi 线圈, 工作电流为 47.5 A	9.5	4.2	32	4 K 两级脉管制冷机	8
2002	日本东北大学 ^[24]	混合磁体, 其中超导线圈: CuNb/Nb ₃ Sn (3.41 T@145 A) 和 NbTi (4.59 T@198 A) 组成	23	—	52	4 台两级 GM 制冷机, 二级总冷负荷为 1.24 W	<100
2004	德国吉森大学 ^[25]	NbTi 线圈, 冷重 16 kg, 工作电流为 35 A	5.5	—	—	两级脉管制冷机: 二级最低温度 2.4 K, 0.4 W@4.2 K	44
	中国科学院电工技术研究所 ^{S^[26]}	NbTi 线圈, 冷重 102 kg, 工作电流为 116 A, 可以 0°、45°、90° 旋转, 用于材料的电磁加工	6	—	180	住友 RDK-408 D 两级 GM 制冷机: 1 W@4.2 K, 31 W@40 K	74
	日本东北大学 ^[27-28]	Bi(2223)、NbTi、Nb ₃ Sn 线圈, 工作电流为 169、449、191 A 混合磁体, 其中超导线圈: Cu/NbTi/(Nb, Ti) ₃ Sn (5.8 T@303 A) 和 NbTi (5.3 T@350 A) 组成	19 30	— —	52 360	GM-JT 制冷机冷却超导线圈; 2 台单级 GM 制冷机冷却辐射屏和电流引线 4 台两级 GM 制冷机(每台一、二级冷负荷分别为 20、1.1 W): 1.5 W@4.2 K, 35 W@50 K	— —
2006	中国科学院电工所 ^[29]	Nb ₃ Sn 线圈, 冷重 115 kg, 工作电流为 115 A	10	4.2	100	住友 RDK-408 D 两级 GM 制冷机: 1 W@4.2 K, 31 W@40 K; 冷头位于 0.3 T	76
	日本东北大学 ^[5, 30]	Ag/Bi(2223)、Cu/NbTi、Nb ₃ Sn 线圈, 工作电流为 161.5、427、181.5 A	18.1	4.5	52	GM-JT 制冷机(冷却超导线圈, 4.3 W@4.3 K); 2 台单级 GM 制冷机冷却辐射屏	264
		混合磁体, 超导线圈: Nb ₃ Sn (5.8 T@303 A); NbTi (5.3 T@350 A) 组成, 冷重 3200 kg, 用于控制回旋振荡管振荡频率	27.5	—	32	4 台两级 GM 制冷机: 1.5 W@4.2 K, 35 W@50 K	210
2008	JASTEC ^[31]	NbTi、Nb ₃ Sn 线圈	7	3.5	240	2 台两级 GM 制冷机(1 W@4.2 K)	160
2009	日本东北大学 ^[32]	Y(123)、Cu/NbTi、Nb ₃ Sn 线圈, 工作电流为 187、427、181.5 A	23.3	—	52	GM-JT 制冷机(冷却超导线圈, 4.3 W@4.3 K); 2 台单级 GM 制冷机冷却辐射屏	—

表 3 总结了近 30 年来低温制冷机传导冷却的超导磁体系统的主要研究进展情况. 表中, B 为中心磁感应强度, T_o 为运行温度, Φ_{RT} 为室温孔直径, t_c 为冷却时间. Hoenig^[6] 提出小型低温制冷机传导冷却的超导磁体设计, 该系统与传统液氮浸泡冷却的

不同主要表现为: 采用一台两级低温制冷机提供冷量, 二级冷头冷却 12 kg 的 Nb₃ Sn 线圈; 杜瓦内部处于高真空以减小残余气体导热, 磁体与真空罩之间设置辐射屏以减小外界辐射漏热, 电流引线依靠热传导进行冷却, 如图 1 所示. 设计获得 $B=3.3$ T, 线圈载

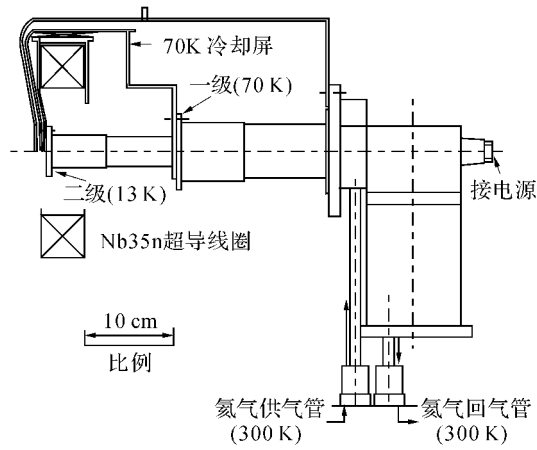


图 1 两级 GM 制冷机传导冷却的超导磁体设计示意图^[6]

Fig. 1 Assembly of conduction cooled superconducting magnet with two-stage GM cryocooler

流 40 A, 计算出铜制电流引线对制冷机一、二级的漏热量分别为 5 和 1 W, 制冷机一级在 70 K 时提供 30 W 冷量, 二级在 13 K 时有 2.5 W 冷量, 设计制冷机运行约 24 h 可将超导线圈冷却至 13 K.

随着 1986 年氧化物高温超导材料的发现, 由高温超导材料制成的超导电流引线运行于超导态, 消除了焦耳热量; 同时由于高温超导体热导率很低, 降低了沿引线向系统低温端的传导热流. 传统铜制电流引线在大工作电流下产生的焦耳热不再阻碍传导冷却的超导磁体系统发展, 无液氦的超导磁体开始步入实用化; 采用不同材料、不同电流的超导混合线圈(如内层 Nb₃Sn 线圈、外层 NbTi 线圈), 由低温制冷机冷却可以获得 10 T 以上的磁场感应强度^[12, 16], 1996 年, 日本东北大学和住友重工利用 2 台 GM 制冷机将 NbTi/Nb₃Sn 线圈冷却至 4.1 K, 载流 149 A 时在直径 $\Phi_{RT} = 52$ mm 的室温孔内获得 10.7 T 的磁感应强度, 这种混合布置使得磁体各部分载流能力与所处磁场环境匹配, 提高磁体性价比,

减少磁体质量^[3]; 另一方面, 由于低温超导材料临界磁感应强度的限制, 需要在低温超导线圈内插入高温超导或常规磁体内芯来进一步提高制冷机冷却的超导磁体系统的场强^[5]. 以 2004 年日本东北大学与东芝公司研制的传导冷却的 19 T 超导磁体为例^[27], 表 4 列出磁体线圈的设计. 表中, d_w 为丝径, d 为线圈内径, h 为线圈高度, I 为工作电流, B_{max} 为最高磁感应强度. 系统采用 1 台 GM-JT 制冷机和 2 台一级 GM 制冷机分别冷却超导线圈和辐射屏、电流引线. 将表 4 中 Bi2223 高温超导内芯替换成 Y123 高温超导线圈, 该系统可以获得 23 T 的中心磁感应强度^[32]; 2004 年, 世界首台低温制冷机冷却的 21.5 T 混合型磁体研制成功^[33], 该系统由内径为 360 mm、 $B = 7.5$ T 的传导冷却超导线圈和 $B = 15.5$ T 水冷磁体组成. 目前这种由制冷机冷却的超导线圈和水冷磁体组合的混合磁体系统已获得 30 T 以上的中心磁感应强度^[30], 系统结构如图 2 所示.



图 2 29 T 制冷机传导冷却的混合型超导磁体系统结构示意图^[30]

Fig. 2 29 T liquid helium free hybrid magnet system cooled by 4 GM cryocoolers^[30]

表 4 19 T 低温制冷机冷却的超导磁体线圈设计参数^[27]

Tab. 4 Design parameters of coils for 19 T cryocooled superconducting magnets^[27]

线圈 ¹⁾	超导材料	d_w /mm	d /mm	h /mm	I /A	B_{max} /T	T_c /K
H1	Bi2223/Ag	4.3×0.21	90	250	169	19.1	<4.5
L1	内锡法 Nb ₃ Sn	$\Phi 2.00$	196	316	191	16.5	<4.5
L2	Nb ₃ Sn/Cu ²⁾	$\Phi 1.82$	273	453	191	14.9	<4.5
L3	Nb ₃ Sn/Cu ²⁾	$\Phi 1.50$	372	561	191	12.2	<4.5
L4	Nb ₃ Sn/Cu ²⁾	$\Phi 1.35$	451	617	191	9.3	<4.5
L5	NbTi	$\Phi 1.70$	519	710	449	7.7	<4.5

注: 1) H1: HTS 内芯; L1~L4: 内部 LTS 线圈; L5: 外部 LTS 线圈; 2) NbTi-Cu 加固.

笔者总结归纳了各时期低温制冷机传导冷却的超导磁体系统的主要研究成果,展示了该研究领域的主要研究进展及发展趋势,如图 3 所示.图中,实线表示当时系统能达到的最高中心磁感应强度的变化.从制冷机冷却超导磁体概念的提出到目前 30 T 以上的混合磁体系统的发展,由于高温超导电流引线的引入以及小型低温制冷机性能的提高,制冷机冷却的超导磁体系统不断向高磁感应强度迈进.

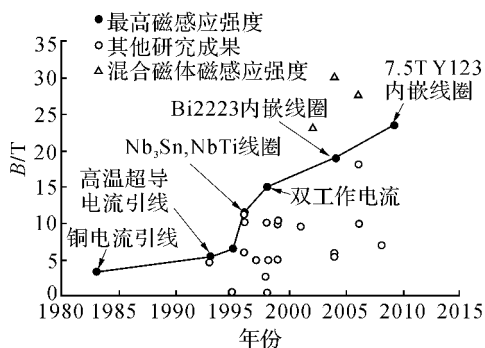


图 3 低温制冷机传导冷却的超导磁体系统的研究进展
Fig. 3 Progress in development of cryocooled superconducting magnets

1.3 提供制冷机传导冷却的超导磁体系统的主要研究机构

目前世界上提供制冷机传导冷却的超导磁体产品的机构主要集中于美国、日本和英国,如表 5 所示.中国科学院电工研究所在 GM 制冷机传导冷却的 6 T、10 T 低温超导磁体系统方面进行了深入研究,但目前国内没有可以投入商业应用的相关产品.

表 5 提供低温制冷机冷却的超导磁体的机构

Tab. 5 Worldwide suppliers for cryocooled superconducting magnet systems

地区	公司/科研机构	网址
	Cryomagnetics	www.cryomagnetics.com
美洲	National High Magnetic Field Laboratory	www.magnet.fsu.edu
欧洲	Cryogenic Limited	www.cryogenic.co.uk
	Oxford Instruments	www.oxford-instruments.com
	Sumitomo Heavy Industries, Ltd	www.shi.co.jp
亚洲	JASTEC Superconductor	www.jastec-inc.com
	High Field Laboratory for Superconducting Materials	www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp
	中国科学院电工研究所	www.iee.ac.cn

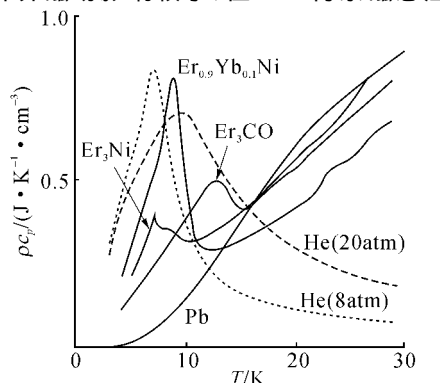
2 低温制冷机传导冷却系统关键技术及存在的主要问题

2.1 可用于超导磁体传导冷却的小型低温制冷机技术

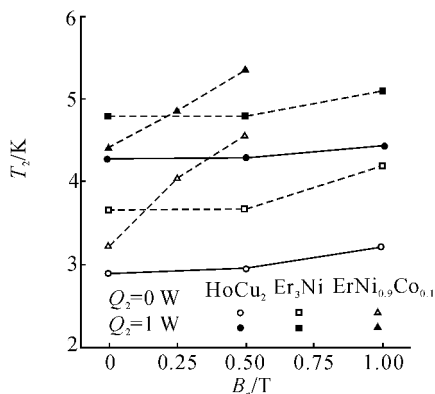
传统低温超导材料 NbTi ($T_c = 9\text{ K}$), Nb_3Sn

($T_c = 18\text{ K}$) 工作于液氦温区. 1988 年三菱公司采用 GdRh 、 $\text{Gd}_{0.5}\text{Er}_{0.5}\text{Rh}$ 和 ErRh 3 种磁性材料构成复合蓄冷材料用于三级 GM 制冷机获得 3.3 K 最低温度,首次在回热式低温制冷机中不需预冷实现了氦液化^[34]. 上世纪 90 年代初, Er-Ni 系列磁性蓄冷材料代替铅丸作为低温蓄冷器填料的研究使得小型低温制冷机的制冷温度从 10 K 降至 4 K 以下,这让小型低温制冷机传导冷却超导磁体成为可能.

磁性蓄冷材料是利用材料在磁相变处的比热容峰值来提高制冷机低温下的性能,如图 4(a) 所示. 图中, c_p 为比定压热容. 随着温度的降低, Er-Ni 材料的比热容会出现峰值,高于制冷机工质气体 He ; 而磁性材料的这种比热性质会受到外界磁感应强度的影响,如强磁性材料在较高的外界磁场中,低温下比热容峰值显著减小,使得以这种磁性材料作为蓄冷材料的低温制冷机在强磁场中的制冷性能大幅降低,如图 4(b) 所示. 图中, B_e 为外加的磁感应强度, T_2 为二级冷头温度. 采用 $\text{ErNi}_{0.9}\text{Co}_{0.1}$ 作为蓄冷材料的 GM 制冷机在 0.5 T 外界磁场下, T_2 已超过 4 K. 而使用 HoCu_2 、 Er_3Ni 等反磁性蓄冷材料,制冷机性能受外界磁场影响较小,在 1 T 背景磁感应强度下,



(a) 低温下回热材料比热容随温度的变化^[34]



(b) 不同磁性蓄冷材料的 4 K GM 制冷机在外加磁场中的二级制冷温度比较^[37]

图 4 低温制冷机回热材料受温度及外加磁场的影响

Fig. 4 Variation of regenerative materials in cryocoolers vs. temperature and applied magnetic fields

制冷机性能略微降低^[35].用于超导磁体冷却的回热式低温制冷机二级应采用反磁性蓄冷材料.

另一方面,低温制冷机对磁体本身的运行会产生影响.制冷机运行时由于压缩机、旋转阀和周期性压力波动等因素会产生一定的机械振动及制冷温度波动,而在直接冷却中,这些机械振动和温度波动会通过固体导热传递至磁体线圈,进而影响磁场的均

匀性以及 MRI、SQUID 等敏感仪器的图像分辨率等性能^[38].除了制冷机自身的减振设计外,目前冷头与超导磁体之间主要通过柔性热连接以降低冷头机械振动和温度波动对磁体运行造成的干扰.表 6 列举了目前可以应用于超导磁体冷却的小型低温制冷机型号及主要技术指标.

表 6 可用于传导冷却超导磁体的液氦温区小型低温制冷机

Tab. 6 4 K cryocoolers used for conduction cooling in superconducting magnetic systems

供应商	类型	型号	主要技术指标
Sumitomo Heavy Industries, Ltd	GM	RDK-205 D	0.5 W@4.2 K; 3.0 W@50 K
		RDK-408 D2	1.0 W@4.2 K; 34 W@40 K
	Pulse	RDK-415 D	1.5 W@4.2 K; 35 W@50 K
		SRP-082 B	1.0 W@4.2 K; 40 W@45 K
Cryomech, Inc	Pulse	SRP-062 B	0.5 W@4.2 K; 30 W@65 K
		PT405	0.5 W@4.2 K; 25 W@65 K
	Tube	PT407	0.7 W@4.2 K; 25 W@55 K
		PT410	1 W@4.2 K; 35 W@45 K
TransMIT (University of Giessen)	Pulse	PT415	1.5 W@4.2 K; 40 W@45 K
		PTD405	0.5~0.7 W@4.2 K; 6 kW 输入
Daikin	GM-JT	CG304 SC	1.0 W/1.2 W@4.3 K (50 Hz/60 Hz)
		CG308 SC	3.0 W/3.5 W@4.3 K (50 Hz/60 Hz)
		CG310 SC	4.2 W/5.0 W@4.3 K (50 Hz/60 Hz)

用于超导磁体传导冷却系统的液氦温区小型低温制冷机主要有 GM 型、脉管型和 GM-JT 型. GM 的制冷机具有制冷效率高、在液氦温区能够提供较大的制冷功率且无故障运行时间较长(约 10 000 h)等优点^[39],是目前应用最广泛的低温制冷机之一,得到了商业化大批量生产.1993 年,日本东芝公司通过在二级回热器中采用复合磁性蓄冷材料使得 GM 制冷机在 4.2 K 下能提供 1.05 W 冷量,并具有与 GM-JT 制冷机相当的效率^[40].而目前住友重工提供的小型两级 GM 制冷机在 4.2 K 下具有 1.5 W 冷量(一级在 50 K 下有 45 W 冷量)^[41].但是,由于在低温部分含有运动部件,GM 制冷机的运行寿命难以进一步提高,并且存在一定的振动和噪声.为了避免冷头过大的振动对超导磁体运行和应用造成影响,制冷机冷头与磁体之间需要通过软连接传导冷却,这会减小传热面积,影响冷量传递;另外,在强磁场条件下 GM 制冷机会出现活塞驱动电机转动动力矩不足而造成的旋转不良等问题^[40].

随着新型磁性蓄冷材料的应用和调相机构的改进,脉管制冷机的性能已接近 GM 制冷机,并且脉管制冷机在低温端取消了运动部件(排出器),没有密封材料的磨损问题,无故障运行时间超过 20 000 h,且噪声较小,冷头的机械振动较 GM 制冷机小 2 个

数量级,脉管制冷机有望更广泛地应用于超导磁体的冷却.为了达到最佳的工作性能,减小“气体混合损失”,脉管制冷机冷头应尽可能竖直放置,倾斜角在 30°以内对低温下性能影响不是很大^[35].德国吉森大学 1997 年研制的两级脉管制冷机在 4.2 K 下能够提供 370 mW 冷量^[42];美国 Cryomech 公司 1999 年推出 PT405 型两级脉管制冷机在 4.2 K 下具有 0.6 W 冷量(一级在 65 K 下有 30 W 冷量),二级冷头最大振幅为 52 μm ^[35].目前,Cryomech 公司提供的两级脉管制冷机 PT415 在 4.2 K 下能够提供 1.5 W 冷量(一级在 45 K 下有 40 W 冷量)^[43].

脉管制冷机首次商业化应用于传导冷却超导磁体系统是美国 Cryomagnetics 公司 2001 研制的 9.5 T 磁体系统,室温孔直径为 32 mm^[23].1998 年,德国吉森大学利用一台两级 GM 型脉管制冷机将 2.6 kg Nb₃Sn 线圈冷却至 4.1 K,载流 120 A 时中心磁感应强度达 2.8 T^[44].制冷机二级蓄冷器采用 HoCu₂、ErNi 和 Pb 填料,4.2 K 下提供 0.49 W 冷量,磁体初始冷却时间约为 6 h,持续运行 25 h.2004 年,吉森大学利用两级脉管制冷机将 NbTi 线圈冷却至 2.7 K,励磁后产生 5.5 T 磁感应强度^[25],并连续运行了 21 d,其中制冷机在 4.2 K 下提供了 0.4 W 冷量.

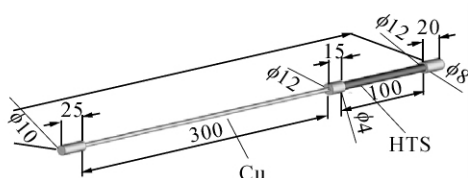
2.2 高温超导电流引线

2.2.1 高温超导电流引线的引入 如表 3 所示, Hoenig 提出的小型低温制冷机传导冷却的超导磁体系统由于铜电流引线的漏热过大, 系统难以维持较大的工作电流来获得高的磁感应强度. 可见, 电流引线作为连接室温电源与液氦温区超导线圈的部件, 温度跨越范围大, 是当时低温制冷机直接冷却的超导磁体系统的主要热负荷. 常规金属电流引线的漏热主要包含: 室温端的传导漏热、励磁时引线电阻产生的焦耳热. 氧化物高温超导 (HTS) 材料的发现, 一方面使得高温超导电流引线工作于临界温度以下的超导态, 可以消除材料电阻引起的焦耳热量; 另一方面由于高温超导材料热导率很低, 降低了沿引线的传导漏热, 高温超导电流引线代替常规金属引线的低温段迅速应用于传导冷却的超导磁体系统 (铜-高温超导二元电流引线), 如图 5(a) 所示. 结合上世纪 90 年代低温制冷机性能的提高, 制冷机直接冷却的超导磁体系统有了长足的发展与应用, 无液氦冷却的超导系统开始步入实用化.

铜-高温超导二元电流引线基本结构如图 5(b) 所示, 高温段为常规金属, 连接室温电源; 低温段采用 HTS 材料, 由制冷机二级冷头冷却, 金属引线与 HTS 引线的连接点由制冷机一级冷头冷却, 使 HTS 引线处于材料临界温度以下. 二元电流引线漏热可以降至铜引线漏热的十分之一以下^[45].



(a) 高温超导电流引线



(b) 铜-高温超导电流引线

图 5 二元电流引线示意图

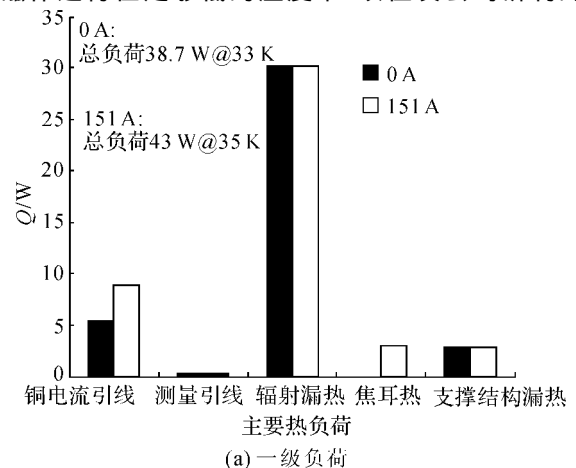
Fig. 5 Sketch of binary current leads

2.2.2 铜-高温超导电流引线的主要技术和应用

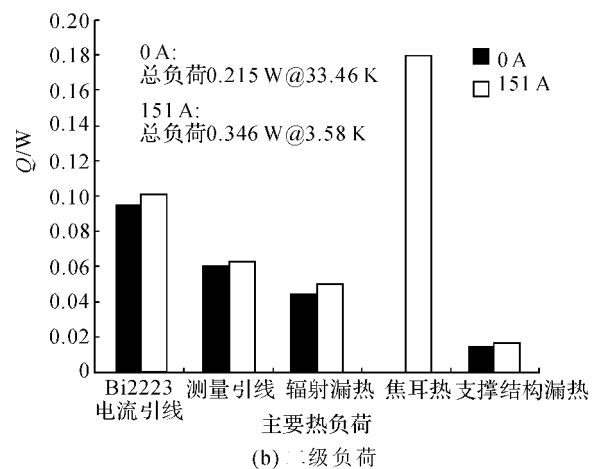
应用于二元电流引线中的 HTS 材料主要有 Bi2223、Bi2212、Y123 以及银基 Bi2223 带材. 1993 年, 日本东北大学和住友重工首次将 (Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ 高温超导引线应用于制冷机传导冷却的超导磁体, 系统载流 500 A 时在 $\Phi_{RT} = 38$ mm 的室温孔内获得了 4.6 T 的中心磁感应强度, 其中二级计算漏热量约为 0.34 W^[7]. 二元电流引线的长度和横截面积的比值是影响电流引线漏热量的主要因素, 因此, 电流引线设计的主要目的是优化二元电流引线几何参数, 使得对磁体线圈漏热最小.

2.3 传导冷却结构

2.3.1 传导冷却超导磁体系统主要热负荷 超导磁体的冷却系统需要克服外界漏热以及系统运行时磁体内部的发热, 由于主要通过固体传导冷却, 须尽可能减小磁体自身及磁体与制冷机冷头之间的热阻来使磁体运行在足够低的温度下. 以住友公司研制的



(a) 一级负荷



(b) 二级负荷

图 6 10 T 低温制冷机冷却超导磁体系统的漏热量 Q 和温度估算^[20]

Fig. 6 Calculated heat loads to cryocooler and estimated temperatures in 10 T cryogenic free superconducting magnet system^[20]

10 T 超导磁体的漏热量估算为例^[20],如图 6 所示,制冷机一级负荷主要来自于外界辐射漏热以及铜电流引线导热和焦耳热;测量引线的漏热和高温超导电流引线的导热在制冷机二级负荷中比较明显;各引线连接处的接触电阻和线圈励磁过程中由于交流损失而产生的焦耳热也是系统运行时的主要热负荷。

2.3.2 超导线圈的传导冷却 制冷机通过冷头与超导线圈的端盖板热连接将冷量传导至线圈进行冷却,对于强化超导线圈内部的导热,主要采用低温下传热性能好的黄铜或紫铜作为线圈骨架。对于层绕螺线管磁体,在线圈外包裹紫铜套筒,之间垫入铜箔,并用不锈钢绑扎以增强磁体轴向导热和传导均匀性,如图 7(a)所示,由于线圈被环氧树脂固化,降低了整体的导热性能,目前还没有很好的方法强化线圈内部径向的热传导;在线圈环氧树脂中掺入 AlN、Al₂O₃、MgO 等高导热粉末来增强线圈径向导热。对于饼式线圈可以通过在层间插入紫铜片以提高线圈的径向导热性能,如图 7(b)所示。

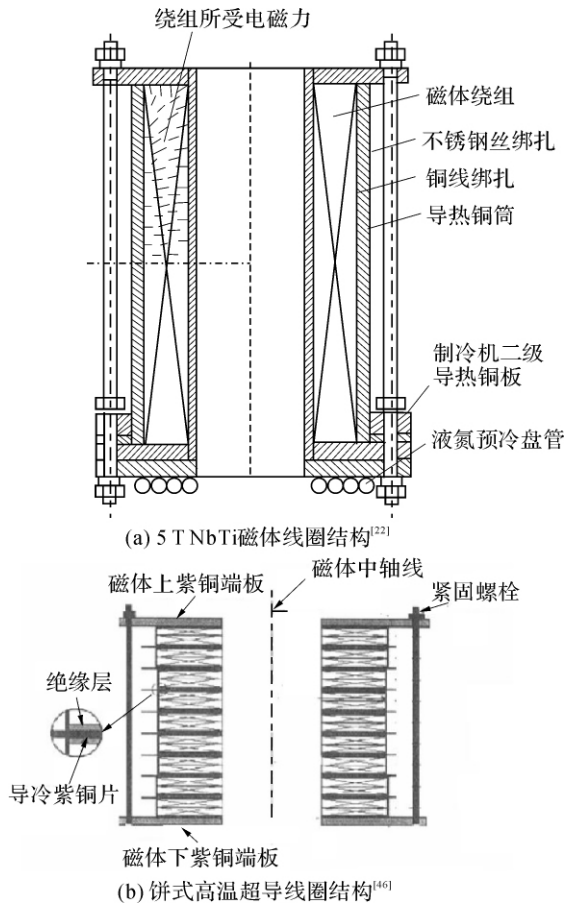


图 7 传导冷却的超导磁体线圈结构示意图

Fig. 7 Schematic drawings of conduction cooled superconducting magnetic coils

2.3.3 低温恒温器的传导冷却结构 系统大部分漏热是通过磁体与制冷机冷头之间的热阻再流至冷

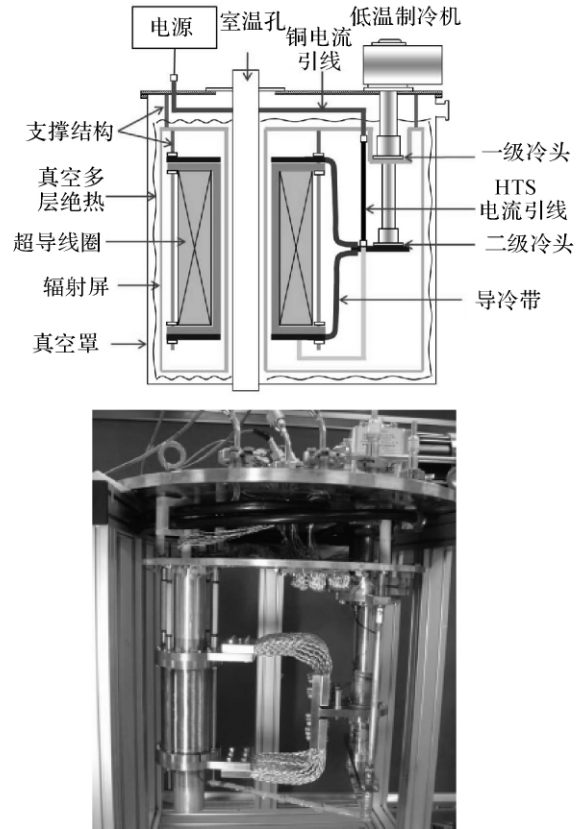


图 8 用于物料控制的低温制冷机传导冷却的超导磁体系统冷却结构示意图^[47]

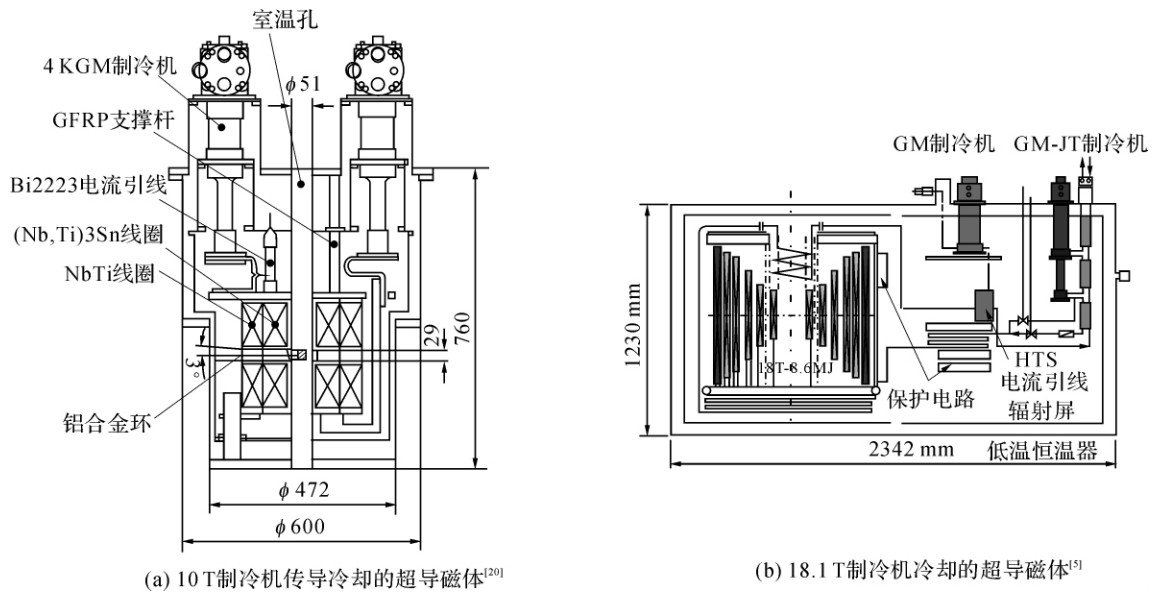
Fig. 8 Configuration of cooling system of cryocooled superconducting magnet for material control^[47]

头,所以尽可能减小磁体与制冷机冷头之间的热阻是低温恒温器设计的关键。常用的单台两级低温制冷机冷却的超导磁体系统结构如图 8 所示。一级冷头连接辐射屏和高温超导电流引线的热端;二级冷头连接电流引线冷端,为了避免制冷机冷头由于运行时受冷收缩而受力被损坏,冷头通过柔性热连接(如铜制编织带、铜箔)将冷量传导至线圈骨架对线圈进行冷却。

为了保证线圈在励磁过程中具有足够的温度裕度而不致失超、提高磁体运行安全性、缩短初始冷却时间,采用 2 台低温制冷机对磁体进行冷却,如图 9(a)所示。

传导冷却的超导磁体可以利用制冷机一二级冷头冷却管内的氦气,通过氦气循环来冷却超导线圈。图 9(b)给出 1 台 GM-JT 制冷机和 2 台 GM 制冷机通过氦气回路冷却的超导磁体冷却系统。2 台单极 GM 制冷机冷却预冷回路,但当系统温度降至约 60 K 时,气体循环切换到由 GM-JT 制冷机冷却的主回路,进一步对线圈进行冷却。

传导冷却的超导磁体区别于传统磁体的一个优点是磁体可以转动以适应不同应用的要求,而设置



(a) 10 T制冷机传导冷却的超导磁体^[20]

(b) 18.1 T制冷机冷却的超导磁体^[5]

图 9 低温制冷机传导冷却的超导磁体系统结构示意图

Fig. 9 Sketch of cryocooled superconducting magnet system

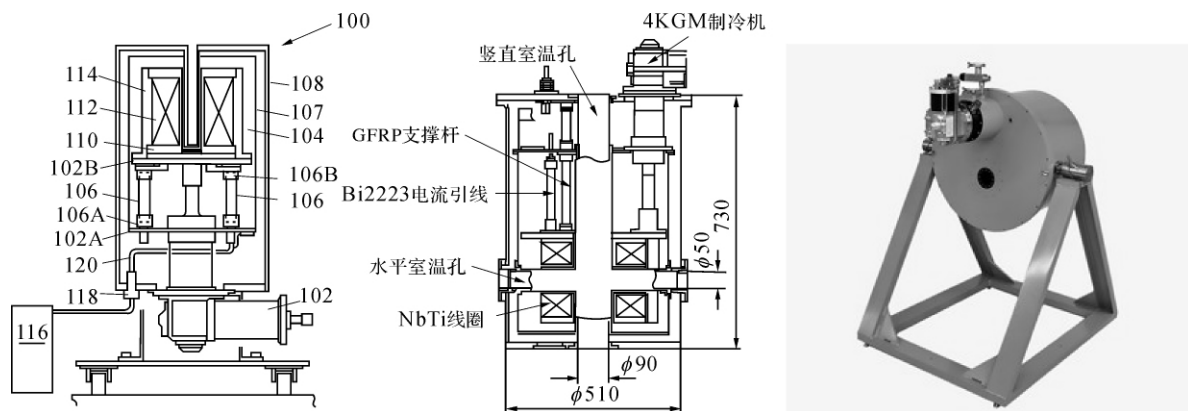


图 10 传导冷却的超导磁体结构示意图^[14, 48-49]

Fig. 10 Typical structures for conduction-cooled superconducting magnet systems^[14, 48-49]

水平和竖直室温孔可以方便对处于高磁场中的样品进行观察和测量,如图 10 所示。

2.3.4 加速磁体冷却的主要方式 目前小型低温制冷机提供的制冷量有限,使得初始传导冷却时间较长.为了缩短系统的初始冷却时间,主要可以通过提高制冷机冷量和降低系统冷却质量等途径.另外,采用液氮预冷和低温热开关也是加速冷却的有效措施。

在两级制冷机一二级设置热开关联结,在初始冷却阶段磁体温度较高时,利用热开关将一级较大冷量传导至二级,从而加速二级冷头对磁体的降温,当二级降至一定温度下时,热开关切换到关闭状态,利用二级冷量对磁体进一步冷却.热开关的形式主要有气体型热开关、低温热管以及一二级气体循环,如表 7 所示.1996 年日本神户制钢报道的利用一台两级 GM 制冷机冷却的 10 T 超导磁体,系统采用

氮气热开关,使超导线圈从室温降至 4 K 的冷却时间小于 45 h,将初始冷却时间缩短了约 1/3^[50]。

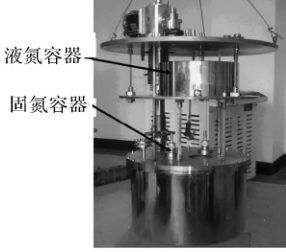
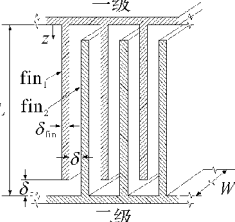
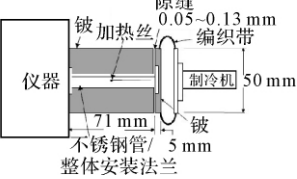
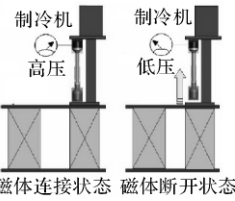
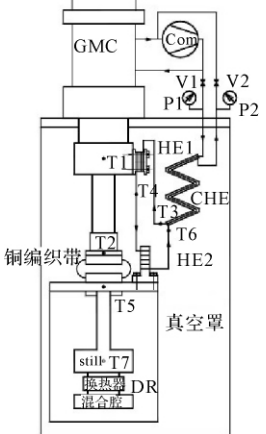
需要注意的是,超导线圈运行时产生的应变源于热应力与电磁应力,采用液氮预冷的超导线圈从常温降至液氮温度,由于冷收缩引起的应力和骤冷带来的冲击热应力很大,易造成超导线圈及接头运行的不稳定,甚至导致失超^[2].当缩短磁体初始冷却时间时,须考虑超导线圈和超导接头的结构强度及运行的稳定性。

2.4 制冷机传导冷却超导磁体运行稳定性

超导磁体失超过程释放出的能量可能导致超导磁体局部迅速升温,进而引起超导线圈的烧毁;因此保证超导磁体稳定运行在临界温度以下以及磁体失超过程中的保护措施对于超导磁体系统的应用尤为重要.这需要在磁体本身临界特性、系统制造加工工

表 7 加速传到冷却系统冷却速率的主要结构形式

Tab.7 Typical methods to reduce cool down time for conduction-cooled superconducting magnet systems

类型	结构示意图	工作原理
液氮预冷	 <p>液氮容器 固氮容器</p>	<p>给辐射屏液氮储槽灌注液氮,将辐射屏温度降低并稳定在液氮温度,再向磁体冷却盘中灌注液氮,对超导线圈预冷;温度稳定后,管内抽真空,制冷机开始工作^[22].</p>
气体型热开关	 <p>一级 二级</p>	<p>热开关由同轴、交错的薄壁圆管组成,其中充注气体,圆管两端分别连接制冷机一、二级冷头,利用管内气体的相变和气体对流将一级冷量传递至二级^[51].</p>
传导式热开关	 <p>仪器 制冷机 50 mm 71 mm 5 mm 整体安装法兰 不锈钢管 铍 铍加热丝 编织带 隙缝 0.05~0.13 mm</p>	<p>利用同轴的 2 种材料冷收缩性的不同,在导热元件与制冷机冷头之间形成一定的缝隙,使传导冷却存在开关状态^[52].</p>
可脱离式低温热管	 <p>制冷机 高压 低压 磁体连接状态 磁体断开状态</p>	<p>利用金属波纹管结构,使得低温热管在二级温度低于一级时与二级冷头脱离,从而避免了传统热管结构作为导热元件造成的冷量损失^[53].</p>
热分流器	 <p>铜编织带 真空罩</p>	<p>利用从压缩机抽取的一部分氦气流驱动连接在制冷机一、二级冷头之间的氦气循环,将一级冷头的冷量预冷二级元件.通过调节回路阀门控制氦气冷却循环性能^[54].</p>

艺以及冷却系统设计上考虑如何在磁体局部失超时迅速将磁体内部储存的大量能量释放出去,避免磁体内部升温引起线圈烧毁.

失超保护措施一般分为主动保护和被动保护.主动保护是将能量转移到外加设备,如释能电阻,然后进行释放;被动保护依靠加速磁体的失超传播使能量在磁体内部消耗,进而保护磁体.针对低温制冷机传导冷却的超导磁体系统,由于制冷机提供的冷

量有限,不能如传统的液氮浸泡冷却那样通过大量液氮蒸发来消耗磁体失超时内部产生的热量,一般采用主动式失超保护方式,如图 11 所示.图中, i_1 为磁体工作电流, i_2 为失超保护回路电流.

进一步研究制冷机传导冷却磁体系统的稳定性,需要考虑制冷机提供的冷量与磁体失超时产生热量之间的平衡.研究表明,可将磁体的运行温度与电流分流温度之间的焓差:

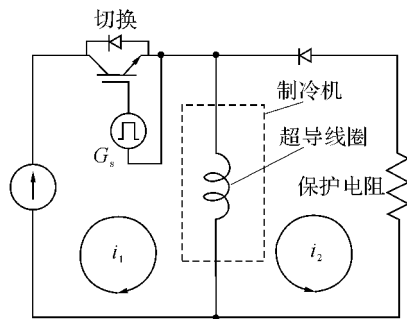


图11 制冷机传导冷却的超导磁体失超保护电路示意图^[55]

Fig. 11 Quench protection system for cryocooled superconducting magnet^[55]

$$H = \int_{T_{DP}}^{T_{CS}} C(T) dT$$

作为传导冷却超导磁体系统稳定性的判据,即超导磁体所能接受的扰动能量.当扰动能量低于 H 时,局部失超可以通过超导基线的分流实现自保护,恢复超导态;当扰动能力大于 H 时,局部的阻态将使磁体迅速升温,导致磁体失超^[4].

3 总结与展望

超导磁体技术在高能物理、受控热核反应、生物医学、物质结构分析等很多科学探索研究中得到越来越广泛的应用,近几年来,内插高温超导线圈或者水冷磁体的混合型超导磁体设计使系统达到了30 T以上的中心磁感应强度;同时磁体系统的应用对超导磁体的场强、系统结构、操作性和稳定性提出新的要求.由于高温超导材料作为电流引线极大地降低了常规金属引线漏热,同时大冷量的小型低温制冷机性能的逐步提高,低温制冷机传导冷却已逐渐成为超导磁体冷却系统的主流.

基于低温制冷机的超导磁体冷却技术已基本成熟,但在具体应用中尚存在以下若干技术问题需要注意和优化.

(1) 大冷量小型低温制冷机技术.为了获得更高的磁感应强度,采用内插高温超导线圈和水冷磁体的混合型超导磁体系统需要较大的线圈直径,超导线圈需要承受较大的电磁应力,需要掺入不锈钢等加强材料,这使得磁体冷却质量增加,对制冷机性能提出了较高要求.低温制冷机需要如低温流体一样提高稳定的运行温度,目前商业化的小型低温制冷机单台在4.2 K下最大提供1.5 W制冷量;浙江大学研制的两级脉管制冷机在4.2 K下具有508 mW制冷量^[56],改进后系统能够提供1 W以上冷量.

此外,由于制冷机内工质气体的周期性膨胀等因素造成的冷头温度波动、机械振动和噪声干扰,将影响磁场均匀性等性能,国内外对此进行了相关研究^[36, 57-58].

(2) 传导冷却磁体的稳定性.传导冷却的磁体运行稳定性基于制冷机提供的冷量与磁体热负荷之间的平衡.超导线圈励磁时的交流损耗是制冷机二级主要热负荷之一;超导线材的扰动及内部结构的应力释放等因素也使传导冷却的磁体温度上升至临界温度以上,甚至导致失超.因此,磁体内部的导热结构和失超保护设计是制冷机传导冷却的超导磁体系统的一项关键技术.

(3) 缩短初始冷却时间.本文列举了目前加速传导冷却的主要方式,对于较大的超导磁体,采用低温热管连接仍需要较长时间的预冷,而通入液氦等低温流体预冷,则需要考虑冷却对象所能承受的冲击热应力.

参考文献(References):

- [1] Uses for superconductors [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www.superconductors.org/Uses.htm>.
- [2] 王秋良. 高磁场超导磁体科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 南和礼. 超导磁体设计基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 刘宏伟. 制冷机冷却的超导磁体的稳定性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2006.
LIU Hong-wei. Stability study on cryocooler-cooled superconducting magnet [D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy Of Sciences, 2006.
- [5] NISHIJIMA G, AWAJI S, HANAI S, et al. 18 T cryocooled superconducting magnet with a Bi2223 high-Tc insert [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(20/21/22): 2425-2432.
- [6] HOENIG M O. Design concepts for a mechanically refrigerated 13K superconducting magnet system [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1983, 19 (3): 880-883.
- [7] WATANABE K, YAMADA Y, SAKURABA J, et al. (Nb, Ti)3Sn superconducting magnet operated at 11-K in vacuum using high-Tc (Bi, Pb)2Sr2Ca2Cu3O10 current leads [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 2: Letters*, 1993, 32 (4A): L488-L490.
- [8] MASUYAMA S, YAMAMOTO H, MATSUBARA H. A NbTi split magnet directly cooled by a cryocooler [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1993, 3 (1): 262-265.
- [9] URATA M, KURIYAMA T, YAZAWA T, et al. A 6T refrigerator-cooled NbTi superconducting magnet with 180mm room-temperature bore [J]. *IEEE Transactions on*

- Applied Superconductivity**, 1995, 5 (2): 169-172.
- [10] LASKARIS E T, ACKERMANN R, DORRI B, et al. A cryogen-free open superconducting magnet for interventional MRI applications [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 1995, 5 (2): 163-168.
- [11] URATA M, KOYANAGI K, KURIYAMA T, et al. A 10 T cryo-cooled superconducting magnet with 100 mm room temperature bore [J]. **Physica B**, 1996, 216 (3/4): 209-211.
- [12] WATANABE K, AWAJI S, SAKURABA J, et al. 11 T liquid helium-free superconducting magnet [J]. **Cryogenics**, 1996, 36 (12): 1019-1025.
- [13] WATANABE K, AWAJI S, FUKASE T, et al. A cryocooler cooled 6T NbTi superconducting magnet with room temperature bore of 220mm [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 1996, 32 (4): 2594-2597.
- [14] JIKIHARA K, WATAZAWA K, MITSUBORI H, et al. A cryocooler cooled 5T superconducting magnet with a horizontal and vertical room temperature bore [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 1997, 7(2): 423-426.
- [15] HASEBE T, SAKURABA J, JIKIHARA K, et al. Cryocooler cooled superconducting magnets and their applications [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. Portland: [s. n.], 1998: 291-297.
- [16] WATANABE K, AWAJI S, MOTOKAWA M, et al. 15 T cryocooled Nb₃Sn superconducting magnet with a 52 mm room temperature bore [J]. **Japanese Journal of Applied Physics**, 1998, 37 (10A): 1148-1150.
- [17] WANG C, THUMMES G, BEST K J, et al. Use of a two-stage pulse tube refrigerator for cryogen free operation of a superconducting niobium-tin magnet [C] // **Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference**. Bournemouth: IOP Publishing, 1998: 69-72.
- [18] SHIBUTANI K, ITOH S, OZAKI O, et al. Development of two types of cryogen free superconducting magnets (5T-phi 300mm and 10T-phi 100mm) [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. Portland: Plenum, 1998: 299-305.
- [19] OORT J M V, LASAKARIS E T, THOMPSON P S, et al. A cryogen-free 0.5 tesla MRI magnet for head imaging [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. Portland: Plenum, 1998: 139-147.
- [20] JIKIHARA K, MITSUBORI H, OOKUBO H, et al. A cryocooler cooled 10 T split-pair superconducting magnet for neutron scattering experiment [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 1999, 9(2): 436-439.
- [21] WATANABE K, AWAJI S, MOTOKAWA M, et al. Cryocooled large bore superconducting magnet for a hybrid magnet system employing highly strengthened (Nb, Ti) 3Sn wires with CuNb stabilizer [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 1999, 9(2): 440-443.
- [22] 宋乃浩. GM 制冷机直接冷却的 NbTi 超导磁体系统 [D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 1999.
- SONG Nai-hao. A GM cryocooler directly cooled superconducting magnet system [D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, 1999.
- [23] SHEN W J, COFFEY M, MCGHEE W. Development of 9.5 T NbTi cryogen-free magnet [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2001, 11 (1): 2619-2622.
- [24] WATANABE K, AWAJI S, TAKAHASHI K, et al. Construction of the cryogen-free 23 T hybrid magnet [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2002, 12 (1): 678-681.
- [25] GIEBELER F, THUMMES G, BEST K J. A 5T persistent current niobium-titanium magnet with a 4K pulse tube cryocooler [J]. **Superconductor Science and Technology**, 2004, 17 (5): 135-139.
- [26] 赵保志, 王秋良, 宋守森, 等. GM 制冷机作为冷凝泵在传导冷却超导磁体系统中的应用 [J]. **低温工程**, 2004 (5): 18-21.
- ZHAO Bao-zhi, WANG Qiu-liang, SONG Shou-sen, et al. Using GM refrigerator as cryopump in conduction cooled superconducting magnet system [J]. **Cryogenics**, 2004 (5): 18-21.
- [27] KURUSU T, ONO M, HANAI S, et al. A cryocooler-cooled 19T superconducting magnet with 52 mm room temperature bore [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2004, 14 (2): 393-396.
- [28] HASEBE T, OKADA S, ISHIZUKA M, et al. Design of a cryocooler-cooled large bore superconducting magnet for a 30T hybrid magnet [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2004, 14 (2): 368-371.
- [29] DAI Y M, YAN L G, ZHAO B Z, et al. Tests on a 6 T conduction-cooled superconducting magnet [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2006, 16 (2): 961-964.
- [30] WATANABE K, NISHIJIMA G, AWAJI S, et al. Performance of a cryogen-free 30 T-class hybrid magnet [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2006, 16(2): 934-939.
- [31] HIROSE R, KAMIKADO T, OKUI Y, et al. Development of 7 T cryogen-free superconducting magnet for gyrotron [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2008, 18 (2): 920-923.
- [32] WATANABE K, AWAJI S, NISHIJIMA G, et al. Cryogen-free 23 T superconducting magnet with a 7.5 T YBa₂Cu₃O₇ insert coil [J]. **Applied Physics Express**, 2009, 2 (11): 113001-1(3 pages).
- [33] WATANABE K, NISHIJIMA G, AWAJI S, et al. Advances in the first cryogen-free hybrid magnet [J].

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2004, 14 (2): 388-392.
- [34] NAGAO M, INAGUCHI Y, YOSHIMURA H, et al. Helium liquefaction by Gifford-McMahon cycle cryogenic refrigerator [J]. **Japanese Journal of Cryogenic Engineering**, 1989, 24 (4): 222-227.
- [35] WANG C, GIFFORD P E. Performance characteristics of a 4K pulse tube in current applications [C] // **Proceedings of International Cryocooler Conference**. Colorado: Plenum, 2000: 205-211.
- [36] HASHIMOTO T, NAKANE H, TSUKAGOSHI T, et al. Recent progress in the application of magnetic regenerator materials [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. Portland: Plenum, 1998: 1541-1547.
- [37] ONISHI A. 4K GM cryocoolers having little orientation dependency and small influence from magnetic field [J]. **Japanese Journal of Cryogenic Engineering**, 1999, 34 (5): 233-235.
- [38] 王超, 邱利民, 董文庆, 等. 脉管制冷机振动的形成机理及减振方法研究 [J]. **低温与超导**, 2009, 37 (8): 1-8. WANG Chao, QIU Li-min, DONG Wen-qing, et al. Study on vibration mechanism of pulse tube cryocooler and vibration-reduction methods [J]. **Cryogenics and Superconductivity**, 2009, 37(8): 1-8.
- [39] 雷沅忠, 王秋良. 传导冷却超导磁体系统的技术发展与应用 [J]. **低温与超导**, 2003, 31 (1): 47-51. LEI Yuan-zhong, WANG Qiu-liang. Technology development of conduction-cooled superconducting magnet system and its application [J]. **Cryogenics and Superconductivity**, 2003, 31 (1): 47-51.
- [40] KURIYAMA T, TAKAHASHI M, NAKAGOME H, et al. Development of 1 watt class 4 K GM refrigerator with magnetic regenerator materials [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. New Mexico: Plenum, 1993: 1335-1342.
- [41] Sumitomo cryogenics group: 4 K cryocoolers [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www.sumitomocorp.co.jp>.
- [42] THUMMES G, WANG C, HEIDEN C. Small scale 4He liquefaction using a two-stage 4K pulse tube cooler [J]. **Cryogenics**, 1998, 38 (3): 337-342.
- [43] CRYOMECH PT415 [EB/OL]. [2009-05-07]. <http://www.cryomech.com/DEVELOPMENTS/PT415.htm>.
- [44] WANG C, THUMMES G, BEST K J, et al. Use of a two-stage pulse tube refrigerator for cryogen free operation of a superconducting niobium-tin magnet [C] // **Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference**. Bournemouth: IOP Publishing, 1998: 69-72.
- [45] IMAGAWA Y, KAKIMOTO K, SHIOHARA Y. Effect of unidirectional solidification rate on J_c for current lead [J]. **Physica C: Superconductivity**, 1997, 280 (4): 245-252.
- [46] 周超. 传导冷却高温超导磁分离磁体的杜瓦设计和研制 [D]. 合肥: 中国科学院研究生院, 2009. ZHOU Chao. Design of cryostat for conduction-cooled high temperature superconducting magnet in magnetic separation system [D]. Hefei: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [47] CHOI Y S, KIM D L, LEE B S, et al. Conduction-cooled superconducting magnet for material control application [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2009, 19 (3): 2190-2193.
- [48] SAKURABA J, HATA F, KUNG C C, et al. Compact superconducting magnet system free from liquid helium; US, 5623240 [P]. 1997-04-22.
- [49] Cryogen free superconducting magnets system [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www.cryomagnetics.com/cryogen-free.php>.
- [50] SHIBUTANI K, ITOH S, TAKAGI T. Design and fabrication of cryogen free superconducting magnet [C] // **Proceedings of 16th International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference**. Kitakyushu: Elsevier, 1996: 1129-1132.
- [51] CHANG H M, KIM H J. Development of a thermal switch for faster cool-down by two-stage cryocooler [J]. **Cryogenics**, 2000, 40 (12): 769-777.
- [52] MARLAND B, BUGBY D, STOUFFER C. Development and testing of an advanced cryogenic thermal switch and cryogenic thermal switch test bed [J]. **Cryogenics**, 2004, 44 (6/8): 413-420.
- [53] JEONG S, KIM Y, NOH C, et al. Experimental investigation on the detachable thermosiphon for conduction-cooled superconducting magnets [J]. **Cryogenics**, 2006, 46 (10): 705-710.
- [54] UHLIG K. Thermal shunt for quick cool-down of two-stage closed-cycle refrigerator [J]. **Cryogenics**, 2002, 42 (1): 67-69.
- [55] TAKEUCHI K, NANATO N, MURASE S, et al. Fundamental studies for the application of quench protection systems based on an active power method for cryocooled LTS coils [J]. **Cryogenics**, 2008, 48(3/4): 148-153.
- [56] QIU L M, HE Y L, GAN Z H, et al. A separate two-stage pulse tube cooler working at liquid helium temperature [J]. **Chinese Science Bulletin**, 2005, 50(10): 1030-1033.
- [57] WANG C, HARTNETT J G. A vibration free cryostat using pulse tube cryocooler [J]. **Cryogenics**, 2010, 50(5): 336-341.
- [58] ALLWEINS K, QIU L M, THUMMES G. Damping of intrinsic temperature oscillations in a 4 K pulse tube cooler by means of rare earth plates [C] // **Proceedings of Cryogenic Engineering Conference**. Chattanooga: American Institute of Physics, 2008: 109-116.