

稳态强磁场技术及科学意义

匡光力, 邵淑芳

中国科学院强磁场科学中心, 合肥 230031

摘要 强磁场极端实验条件为基础科学研究工作提供了新的机遇。介绍了稳态强磁场技术及科学意义, 并展望了中国未来的强磁场技术。

关键词 强磁场; 磁体技术; 极端实验条件

利用常规科研条件开展的科学研究工作已经日臻完善, 强磁场、超高压、极低温等极端实验条件由于能观测到常规条件不能观测到的实验现象而受到科学研究工作者的关注。中国建成的“十一五”国家重大科技基础设施——稳态强磁场实验装置于2017年9月完成竣工验收工作, 建成的磁体参数和装置综合性能达到国际先进水平, 为中国基础前沿科学研究工作提供了强磁场极端实验条件, 推动了中国强磁场科学技术和多学科前沿科学研究的发展。

1 科学意义

原子核的自旋、核外电子的自旋和轨道运动都会产生磁矩, 而磁场对磁矩有作用力, 因此, 在磁场作用下, 物质的特性会发生改变, 使之出现全新的物质状态, 呈现多种多样新的物理、化学现象和效应, 从而为基础科学研究开辟新的研究空间。

利用强磁场可以对物质进行调控, 因而能发现新现象、揭示新规律, 为多学科的交叉研究提供新机遇。据统计, 至今国际上强磁场相关的科学研究成果先后获得19项诺贝尔奖, 其中1项医学奖, 5项化学奖, 13项物理学奖。另外, 强磁场在推动技术发展方面也发挥了重要作用, 如在特殊冶金、化学合成、功能材料、生物、医疗及新型药物等技术研究方面, 国际上已有许多

发明成果并得到广泛应用。强磁场极端实验装置已成为科技界公认的探索科学宝藏的“国之重器”。

2 稳态强磁场技术及发展现状

随着科学研究的蓬勃发展, 对强磁场技术发展也提出了更高的要求。为发展强磁场技术, 1960年, 美国在麻省理工学院(MIT)建成了世界上第1个国家高场磁体实验室, 后来, 法国、荷兰、日本等国家相继成立强磁场实验室, 中国建设完成的稳态强磁场实验装置是世界第五大稳态强磁场实验装置。

产生强磁场的磁体装置可分为3种类型: 水冷磁体(又称电阻性磁体, resistive magnet)、超导磁体(superconducting magnet)和混合磁体(hybrid magnet)。

2.1 水冷磁体技术

水冷磁体是用高速流动的去离子水冷却的由常规导体载流的磁体, 水冷磁体所产生的磁场强度与其消耗的电功率的平方成正比, 因此电源功率的大小直接影响磁场大小。

1936年, 麻省理工学院教授Bitter^[1]最早提出制作水冷磁体所需的线圈——Bitter线圈(图1(a)^[2])。Bitter磁体因为结构简单、整体性好而被广泛采用。但Bitter磁体受到磁体内部电流密度和应力的限制, 无法产生更高的磁场(当时Bitter磁体用10 MW的电源功率产生

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-09-27

作者简介: 匡光力, 研究员, 研究方向为强磁场技术与工程, 电子邮箱: kuang_gl@ipp.ac.cn

引用格式: 匡光力, 邵淑芳. 稳态强磁场技术及科学意义[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 93-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.19.014

20 T 磁场强度)。20 世纪 80 年代早期,德国马克斯-普朗克研究所和法国国家科研中心(MPI-CNRS)发展了多螺旋磁体技术(polyhelix magnet),这种结构较好地解决了高应力问题^[3]。为进一步减小磁体的冷却线圈应力,美国国家强磁场实验室创新设计了一种新型 Bitter 磁体片,优化了磁体片冷却孔的形状和位置,大大改善了冷却效果,极大地减小了应力。这种改进的 Bitter 片被称作“Florida-Bitter”(图 1(b)^[2]),成功地将水冷磁体的稳态强磁场逐步提高到 27、30 和 33 T。2015 年 6 月,中国科学院强磁场科学中心将水冷磁体的稳态强磁场提高到 38.5 T(电源功率 25.2 MW);2017 年 8 月,美国强磁场实验室又将其水冷磁体(图 2)的磁场强度提高至 41.4 T(孔径 32 mm、电源功率 32 MW)^[4],是目前水冷磁体中最高磁场强度。

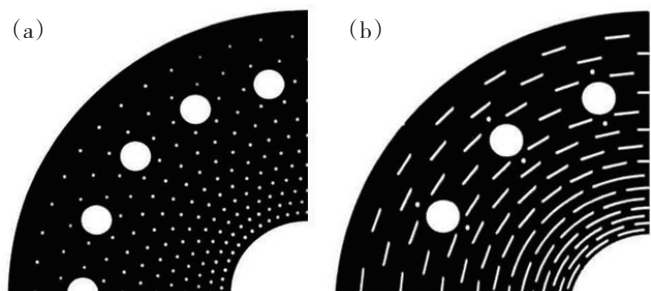


图 1 一般的 Bitter 片(a)和 Florida Bitter 片(b)

Fig. 1 Classical Bitter magnet (a) and Florida Bitter magnet (b)

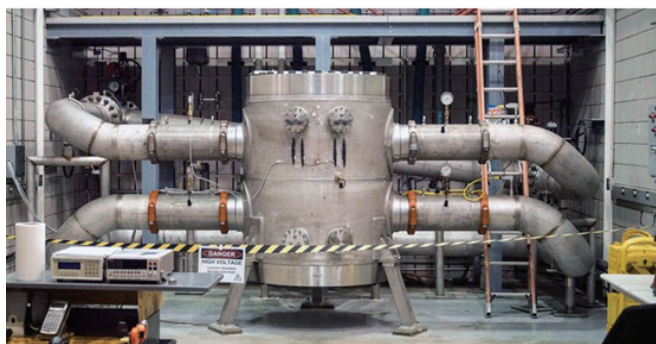


图 2 美国强磁场实验室 41 T 水冷磁体

Fig. 2 World-record 41-tesla resistive magnet

高场水冷磁体为科学研究提供了强磁场实验条件,但是,在向更高磁场发展的过程中,在能耗和材料等方面受到制约。高场水冷磁体的运行需要几十兆瓦的电源输入功率,同时还需要同样功率的去离子水冷却系统,因此,其运行时耗电量巨大,成本很高。此外,水冷磁体对材料的导电性能和机械强度都有非常高的要求。

2.2 超导磁体技术

1911 年,荷兰物理学家 Onnes^[5]发现了汞在 4.2 K 下具有超导电性。由于处于超导态的超导材料具有零电阻特性和完全抗磁性,不消耗电功率,因而引起广泛关注。之后,一些新的超导材料逐渐被科学家发现。

超导磁体是用超导材料绕制的磁体,一般由多种超导材料的线圈嵌套组成。超导磁体相比较水冷磁体,具有高稳定性、高均匀度、低运行成本等优势,在科学工程、科学仪器和生物医学中已经得到实际应用。但是,超导磁体由于受超导材料临界电流和临界磁场的限制,在发展更高场强过程中受到限制,很难做到高磁场强度,磁场强度很长一段时间仅停留在 20 T 左右。目前,大规模应用的超导材料有 NbTi 和 Nb₃Sn 两种,工作在 10 T 以下磁场区域的磁体一般采用低温超导材料 NbTi 制造,10~20 T 的磁体一般采用低温超导材料 NbTi 和 Nb₃Sn 制造。1986 年,随着高温超导材料的发展,采用高温超导材料产生了 20 T 以上的超导磁体^[6];2017 年底,美国强磁场实验室采用低温超导材料 NbTi、Nb₃Sn 和高温超导材料 YBCO(REBCO,图 3)组合产生了 32 T(孔径 34 mm)的磁场强度,是目前世界上最高的超导磁体磁场强度^[7]。随着超导材料研究和磁体技术的发展,超导磁体磁场强度未来有望继续提高。

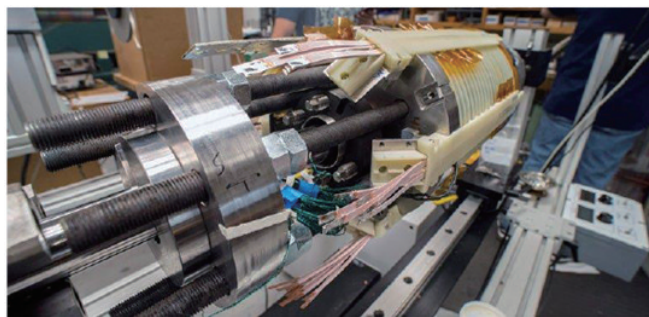


图 3 32 T 磁体 REBCO 线圈

Fig. 3 First REBCO coil for the 32 tesla magnet

2.3 混合磁体技术

水冷磁体虽然能产生很高的磁场,但是其设计精密,易受电源功率和热应力的限制。超导磁体相比较水冷磁体能够稳定运行,商业化程度高,但易受超导材料临界电流和临界磁场的限制。为了产生更高的磁场,牛津大学的 Wood 和麻省理工学院的 Montgomery^[8]于 1965 年提出混合磁体(剖面见图 4)的概念,即在水冷磁体的外围增加超导线圈来减少电能损耗,同时保证磁体能够产生较高的磁场。2000 年 1 月,美国的混合磁

体产生了 45 T 的最高稳态强磁场,其内水冷磁体磁场强度 31 T,外超导磁体磁场强度 14 T^[9]。2016 年 11 月,中国稳态强磁场实验装置混合磁体产生了 40 T 的高稳态强磁场,位居世界第 2,其内水冷磁体磁场强度 30 T,外超导磁体磁场强度 10 T,后期通过进一步调试,中国稳态强磁场实验装置混合磁体产生了 42.9 T(内水冷磁体磁场强度 31.9 T,外超导磁体磁场强度 11 T)的磁场强度,未来有望创造世界纪录。

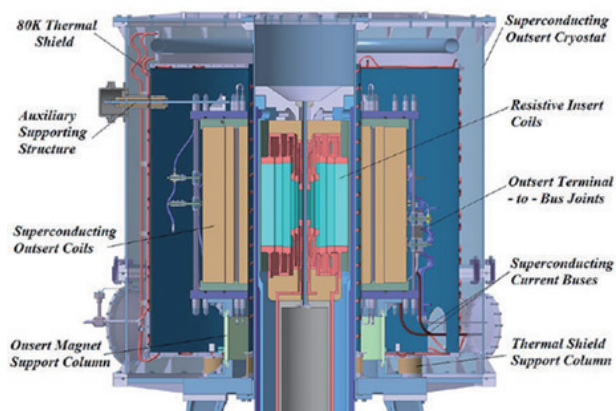


图 4 混合磁体剖面

Fig. 4 Cross-section of hybrid magnet

3 中国稳态强磁场实验装置概况

随着磁体技术和超导材料的发展,磁场强度逐渐提高,强磁场条件下的科学研究工作蓬勃开展,相关科学研究取得重要成果。中国于 1964 年计划建立强磁场实验室,后因故未能建立。1992 年,中国科学院等离子体物理研究所建成了 20 T 稳态强磁场实验装置,使中国成为为数不多的拥有 20 T 稳态强磁场实验装置的国家,但是之后一直未能继续发展磁体技术,磁体技术水平与其他国家相比差距越来越大。

由于中国磁体技术水平发展不高,不能提供科学家需要的强磁场实验条件,中国科学家若想开展强磁场条件下的科学研究,需要预约到美、荷、法、日等国家去开展实验,实验周期长、花费大,因而错失了很多磁体技术发展和强磁场条件下科学研究开展的机会。鉴于强磁场实验条件对中国基础科学研究发展的重要性,建设拥有中国自主知识产权的强磁场实验装置迫在眉睫。

2007 年 1 月 25 日,中国发展和改革委员会正式批复建设稳态强磁场实验装置。稳态强磁场实验装置由

中国科学院合肥物质科学研究院筹建,中国科学技术大学共建。中国建设的稳态强磁场实验装置建设内容包括 10 台磁体装置(其中 1 台混合磁体、5 台水冷磁体和 4 台超导磁体)以及磁体装置运行所需要的技术装备系统和搭建在磁体装置上开展科学研究工作的实验测量系统。为使中国重大科技基础设施尽早发挥效益,鉴于稳态强磁场实验装置的特殊性,2010 年 10 月,稳态强磁场实验装置进入“边建设、边运行”阶段,该装置已建成的磁体和系统陆续投入开放运行供科学家开展科学研究。2017 年 9 月 27 日,稳态强磁场实验装置全面完成建设任务,正式获得国家验收,全面开放共享。

中国稳态强磁场实验装置(图 5)中的稳态混合磁体,磁场强度 42.9 T,位居世界第 2。建成的 5 台水冷磁体中,有 3 台磁体的性能指标创世界纪录:32 mm 孔径水冷磁体 WM1 产生了最高 38.5 T 稳态磁场,32 mm 孔径水冷磁体 WM4 在 10 MW 功率下产生了 27.5 T 稳态磁场,50 mm 孔径水冷磁体 WM5 产生了最高 35 T 稳态磁场,均为国际同类磁体的最高水平。同时,围绕磁体装置建成了一系列具有国际先进水平的、有特色的、有自主知识产权的科学实验测试设备,如集扫描隧道显微镜(STM)、磁力显微镜(MFM)与原子力显微镜(AFM)为一体的组合显微系统(SMA),综合了极高压(最高 200 GPa)、强磁场(最高 35 T)和低温(1.8 K)3 种极端条件的超高压物性测量系统、³He 极低温输运测量系统、25 T 电子磁共振系统等,使得中国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。

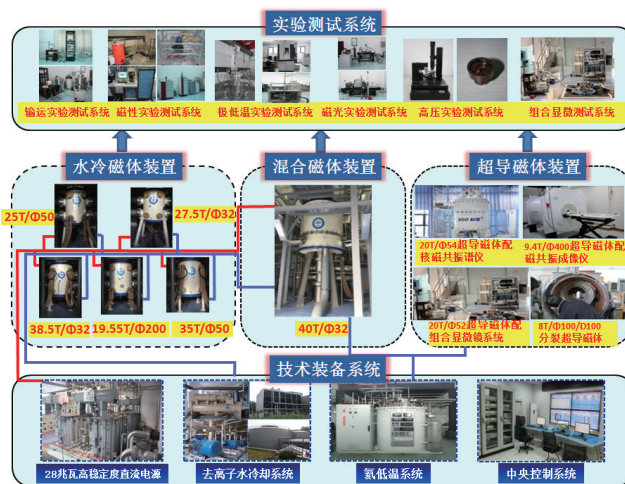


图 5 中国稳态强磁场实验装置概况

Fig. 5 Steady High Magnetic Field Facility

中国科学家利用稳态强磁场实验装置的磁体系统开展科学研究工作,产出了一大批具有国际影响力的科研成果:截至2017年底,依托稳态强磁场实验装置共发表论文1057篇,其中SCI论文共计944篇,I区论文236篇,包括Nature 4篇,Science 2篇,对中国基础科学研究的发展起到重要的推动作用。

4 展望

中国稳态强磁场实验装置是国际上五大稳态强磁场实验装置之一,建设完成的稳态强磁场装置磁体技术和综合性能达到国际领先水平,稳态强磁场实验装置的建成进一步推动了中国强磁场技术的发展,同时推动了中国多学科基础前沿科学研究的发展。未来稳态强磁场实验装置将进一步发展高场磁体技术,使中国的强磁场技术保持国际先进性,为中国科学家开展科学研究工作提供更加先进的强磁场实验条件;同时,中国科学家利用稳态强磁场实验条件进行科学研究必将进一步推动中国基础前沿科学探索,推动中国相关学科发展。

参考文献 (References)

- [1] Bitter F. The design of the powerful electromagnets Part II. The magnetizing coil[J]. Review of Scientific Instruments, 1936, 7(12): 479-482.
- [2] Schneider-Muntau H J. Polyhelix magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, 17(5): 1775-1778.
- [3] Debray F, Jongbloets H, Joss W, et al. The Grenoble High Magnetic Field Laboratory as a user facility[J]. Physica B, 2001, 294-295: 523-528.
- [4] 41.5-Tesla resistive magnet[EB/OL]. [2018-07-25]. <https://nationalmaglab.org/magnet-development/magnet-science-technology/magnet-projects/28-mw-magnet>.
- [5] Onnes H K. The disappearance of the resistance of mercury[J]. Communication Physics, Leiden university, 1911, 120: 122b.
- [6] 王秋良. 高磁场超导磁体科学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. Wang Qiuliang. Sciences of high-field superconducting magnet [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [7] 32 Tesla all-superconducting magnet[EB/OL]. [2018-07-25]. <https://nationalmaglab.org/magnet-development/magnet-science-technology/magnet-projects/32-tesla-scm>.
- [8] Pugat P, Schneider-Muntau H J. Hybrid magnets-past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 24(3): 1-6.
- [9] Magnet projects[EB/OL]. [2018-07-25]. <https://nationalmaglab.org/magnet-development/magnet-science-technology/magnet-projects>.

The technology and scientific significance of high magnetic field

KUANG Guangli, SHAO Shufang

High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The high magnetic field provides a unique opportunity to study new scientific issues. This paper reviews the magnet technology and its scientific significance, and finally highlights the prospect of the magnet technology and the scientific researches in the high magnetic field.

Keywords high magnetic field; magnet technology; extreme research environment ●



(责任编辑 王丽娜)