

# 稳态强磁场实验装置 及其科学研究

匡光力 邵淑芳

(中国科学院强磁场科学中心 230031)

稳态强磁场实验装置(Steady High Magnetic Field Facility, SHMFF)是我国自主研发的国内唯一能提供稳态强磁场实验条件的国家重大科技基础设施,已于2017年9月竣工,完成国家验收。SHMFF的磁体技术和装置综合性能达到国际领先水平,为我国材料、物理、化学、生命科学等多学科的前沿研究提供了一流水平的强磁场极端实验条件。来自国内外的众多科学家们正在利用SHMFF开展多学科研究,已经取得一大批重要的科学研究成果,不断地推动多学科基础科学前沿的发展。

## 1. 引言

随着科学技术的迅猛发展,利用常规实验条件进行科学研究取得突破已经越来越难,极低温、超高压、强磁场等极端实验条件为探索物质的新物性、新现象提供了新的机遇。强磁场作为一个极端实验条件能非常有效地诱导原子核外电子自旋、轨道有序,并改变电子能态和原子、分子间的相互作用,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。从而引起国际上科学家的关注,自1913年以来已有19项与磁场相关成果获诺贝尔奖,包括1985年和1988年的量子霍尔效应和分数量子霍尔效应。虽然强磁场可以为多学科研究提供重要的实验条件,但是建设20T(特斯拉,磁场单位,1T=10000G(高斯),地球磁场约为0.5G)以上的稳态强磁场装置是涉及多学科和高难度的大型综合性科学工程,而且建设费用高,装置运行费也高,1960年美国在麻省理工学院建成了世界上

第一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,强磁场下的科学研究获得广泛开展,强磁场极端实验条件已成为科技界公认的探索科学宝藏的国之重器。

我国早在1964年就计划在陕西汉中建立强磁场实验室,后因故未能实施。1992年,中科院等离子体所建成了20 T稳态强磁场实验装置,使我国成为当时世界上为数不多的拥有20 T稳态强磁场装置的国家。但之后未能抓住机遇进一步发展强磁场技术和实验条件,使得我国与国际先进水平差距越来越大。

2007年1月25日,国家发改委正式批复建设稳态强磁场实验装置,该装置由中科院合肥物质科学研究院承建,中国科学技术大学共建,稳态强磁场实验装置于2017年9月27日完成全面验收工作,验收专家组认为:项目单位高质量完成了稳态强磁场实验装置建设任务,建成了磁体技术和综合性能国际领先的稳态强磁场实验装置,对于提升我国相关前沿学科的基础研究水平、带动相关新兴高技术产业的发展具有重要意义。

## 2. 装置介绍

我国承担的稳态强磁场实验装置建设内容包括十台磁体装置(其中包括1台混合磁体、5台水冷磁体和4台超导磁体),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。

目前我国稳态强磁场实验装置建成了磁场强

度世界第二的40T稳态混合磁体装置;建成的水冷磁体中有三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 38.5T 稳态磁场, 32 mm 孔径水冷磁体 WM4 在 10 MW 功率下产生了 27.5T 稳态磁场, 50 mm 孔径水冷磁体 WM5 产生了最高 35T 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国际水平的、有特色的、有自主知识产权的科学实验测试设备, 如建成了集扫描隧道显微镜 (STM)、磁力显微镜 (MFM)、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 200GPa)、强磁场 (最高 35T) 和低温 (1.8K) 三种极端条件的超高压物性测量系统、 $^3\text{He}$  极低温输运测量系统、25T 电子磁共振系统等, 使得我国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。图 1 为我国稳态强磁场实验装置概况图。

## 2.1 磁体装置

我国稳态强磁场实验装置建设的磁体有三种, 分别是水冷磁体 (又称电阻性磁体)、超导磁体和混合磁体。

超导磁体: 超导指的是某些材料在温度降低到某一特定温度的时候, 其电阻突然消失为零 (零电阻) 且外部磁场被排出体外 (完全抗磁性), 同时具备这两种特性的材料称为超导体。当螺线管线圈的导体为超导体, 并处于超导临界温度以下, 这种超导螺线管线圈通电流时将不消耗电功率。由于超导磁体受到超导材料临界性能和制造工艺的限制, 直到 20 世纪 60 年代人们发现第 II 类超导体后, 才开始利用超导线圈产生较高的磁场。正是由于超导线圈不消耗电功率, 以及磁场稳定等优点, 超导

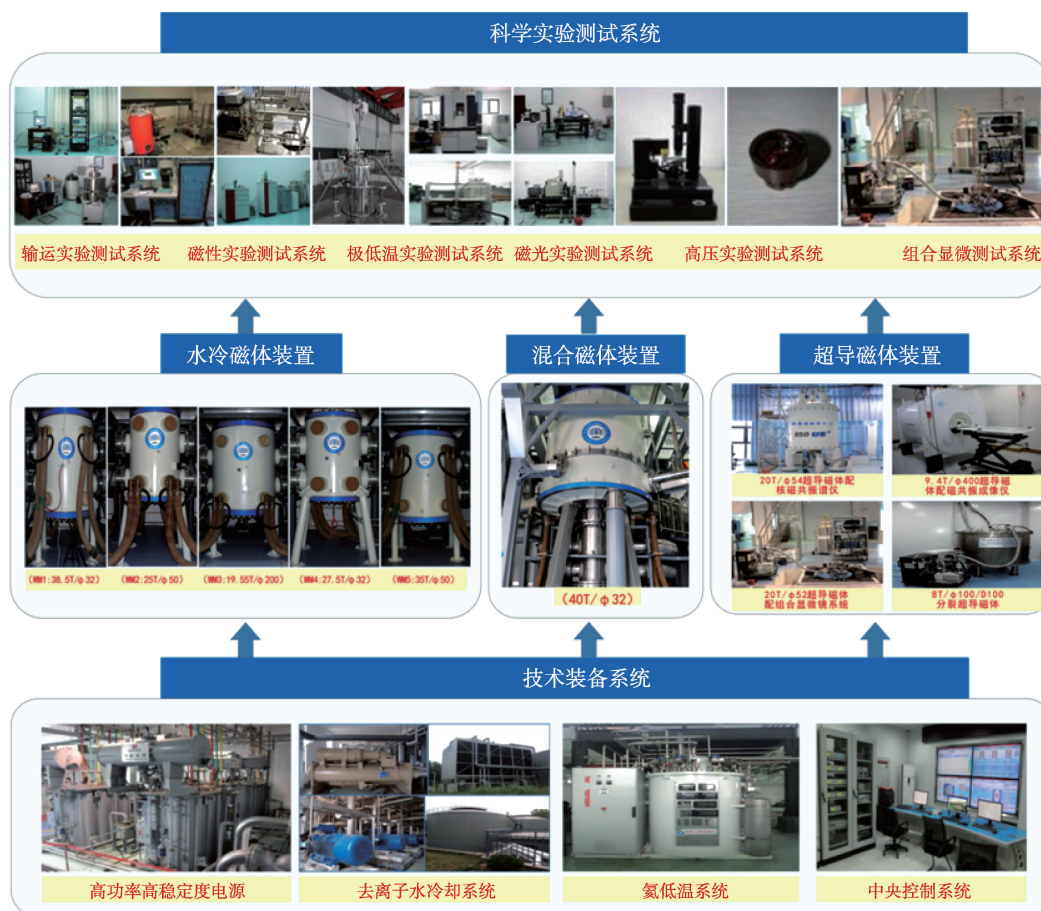


图 1 我国稳态强磁场实验装置概况图

磁体实验装置在科学工程、科学仪器和生物医学中已经得到了实际应用。但是由于超导体受到临界磁场和临界电流的限制,超导磁体的磁场强度无法达到很高,超导磁体的磁场强度很长一段时间停留在二十几个特斯拉,2017年年底,由美国强磁场实验室设计制造的由低温超导和高温超导组合而成的超导磁体的磁场强度达到了32 T,是目前超导磁体所能达到的最高磁场记录。随着高温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。

水冷磁体:水冷磁体通常是由电阻率较低的导体加工成的线圈构造而成,水冷磁体通电将产生磁场,同时产生磁场的过程中将产生大量的热量,需要用冷却水带走,水冷磁体因此而得名。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,为此,电源功率的大小是产生强磁场的第一要素。目前水冷磁体线圈主要采用两种结构,一种称为比特(Bitter)线圈,另一种称为多螺旋线圈(poly-helix magnet)。其中 Bitter 线圈由麻省理工学院(MIT)的比特(F. Bitter)教授于1936年提出,它由带有冷却孔的导体(通常为铜合金)片和绝缘片叠加而成,高速流动的水通过其中分布的小孔将磁体运行过程中产生的热量及时带走,冷却效果好;同时,由于磁体是一个整体结构,因而具有很强的机械性能。我国稳态强磁场实验装置水冷磁体采用Bitter线圈设计,每个水冷磁体由成百上千的Bitter片叠加而成。目前国际上最高水冷磁体记录41.4T(32MW)是美国强磁场实验室产生的,我国稳态强



图2 超导磁体(850MHz核磁共振谱仪、9.4T/400 mm磁共振成像仪)

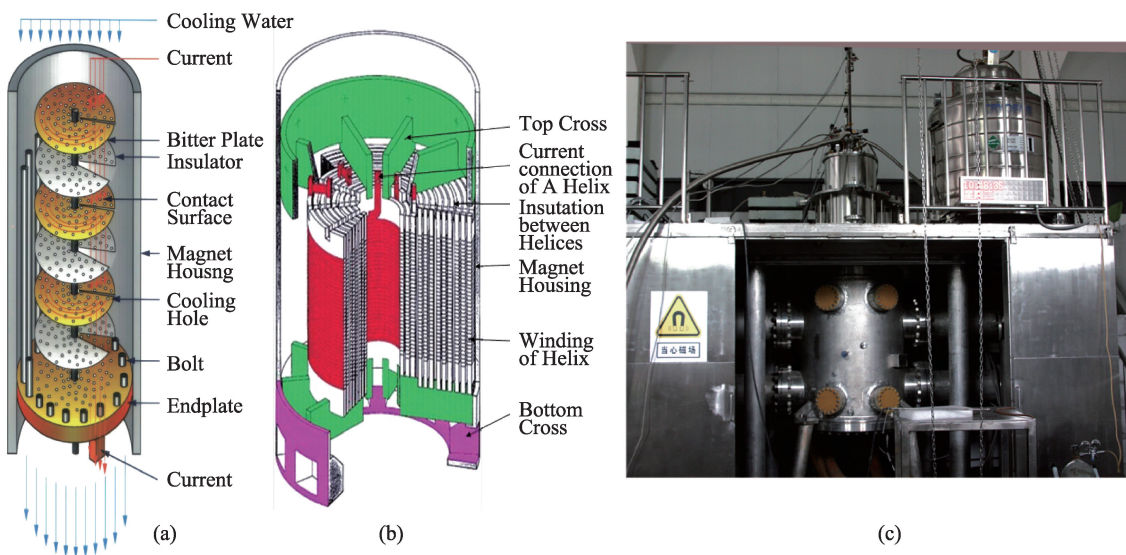


图3 Bitter磁体结构(a)、Polyhelix磁体结构(b)、水冷磁体(SHMFF)(c)



磁场实验装置水冷磁体受到目前电源功率的限制,产生的最高磁场强度为38.5T(25.2MW)。

**混合磁体:**水冷磁体虽然能产生很高的磁场,但是其设计精密,受到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,但受到超导材料临界磁场的限制。为了产生更高的磁场,M. F. Wood和D. B. Montgomery于1965年提出混合磁体的概念,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。目前国际上稳态磁场最高的磁场记录45T就是在混合磁体上产生的。我国稳态强磁场实验装置最近调试的磁场强度为42.9T,稳态磁场强度居世界第二,未来有望创造世界纪录。

## 2.2 技术装备系统

磁体运行中需要技术装备系统的保障,如冷水磁体运行过程中需要高功率、高稳定度直流电源系统;为了及时带走水冷磁体运行过程中产生的热量,需要去离子水冷却系统;超导磁体的运行需要氦低温系统;另外还有用于磁体控制和保护的中央控制系统。

(1)28MW高稳定度直流电源:输出电流稳定度为10 ppm、输出电流纹波小于25 ppm;

(2)22MW去离子水冷却系统:磁体入口水温为10 °C,蓄水能力3000 m<sup>3</sup>;

(3)低温系统:氦液化能力130.8升/小时;

(4)中央控制系统:遥控切换磁体电源、水冷系统,具备多测量系统数据采集和信息交换能力。

## 2.3 科学实验测试系统

为方便科学家在磁体装置上进行科学实验,根据科学研究的需要,要在磁体装置上搭建一系列的实验测试系统,稳态强磁场实验装置建设的实验测试系统包括输运测量、磁性测量、磁光测量、凝聚态核磁共振、高场电子顺磁共振、高场下扫描隧道显微镜、高场下特殊材料制备,以及极低温实验系统、超高压实验系统;还包括超导强磁场下的组合显微实验测量系统、生物核磁共振系统,以及大型动物磁共振成像实验系统等。

## 3. 强磁场条件下的科学研究

强磁场作为一种极端实验条件在物理、化学、材料和生命科学等多学科研究方面的作用愈来愈凸显:(1)发现新现象:强磁场可非常有效地诱导自旋、轨道有序,并改变电子能态和原子、分子间的相互作用,使之出现全新的物质状态,呈现多种多样的物理、化学现象和效应。最典型的例子,就是在强磁场条件下发现的量子霍尔效应和分数量子霍尔效应,这两种新现象的发现者分别获得1985年和1998年的诺贝尔物理学奖。(2)认识新现象:强磁场可以抑制一些因素,凸显一些效应,从而使原来很复杂,甚至混乱的过程变得较为简单,易于直

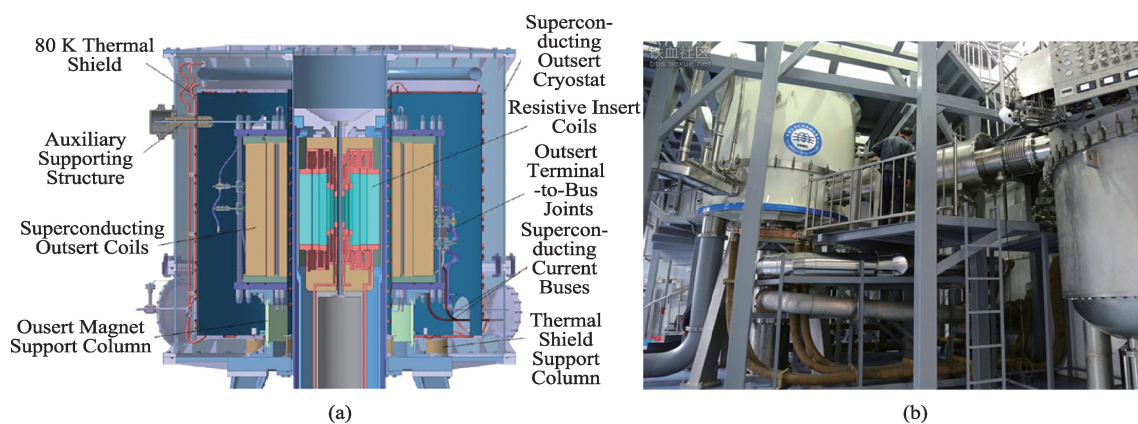


图4 混合磁体剖面图(a)、混合磁体(SHMFF)(b)



接了解其物理实质。最典型的例子,如对高温超导体正常态反常行为的认识,就离不开强磁场条件。(3)催化出新的重大应用技术:例如强磁场作用下的电磁冶金技术、化学反应合成以及脑功能成像技术等。

为使我国重大科技基础设施尽早发挥效益,稳态强磁场实验装置在建设之初就确定了“边建设边开放”的建设模式,建成的装置陆续投入运行,为用户提供测试服务。截至2017年年底,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,1区论文236篇,包括*Nature* 4篇,*Science* 2篇。产出了一大批具有国际影响力的科研成果,对我国基础科学研究的发展起到了重要的推动作用。

### 3.1 凝聚态物理学

凝聚态物理学是当代自然科学的主要研究领域之一。近年来发现的高温超导、介观系统中的量子运输、光子晶体、碳纳米管、巨磁电阻、石墨烯、拓扑绝缘体等,都是凝聚态物理研究的重要发现。强磁场作为一种极端实验条件对于凝聚态物理研究作用巨大,例如,石墨烯二维电子气、拓扑绝缘体表面态的奇异量子特性、低维有机导体、重费米子材料的量子临界特性和相变、低维磁体与自旋电子材料的奇异磁结构等当代重要的科学发现无不与强磁场条件密切相关。

#### (1) 半导体物理

半导体不仅是当代电子工业的基础,而且对基础科学有着巨大的推动作用。在半导体能带结构研究以及元激发及其相互作用研究中,磁场有着特别重要的作用,因为磁场是唯一能够在保持晶体结构不变的情况下改变动量空间对称性的物理因素;而且在强磁场下回旋共振能可以接近甚至超过半导体材料的费米能以及载流子间库仑相互作用等半导体中的各种固有能量,因此磁场一直是研究半导体材料强有力的工具,例如20世纪80年代,人们利用强磁场技术,在半导体二维电子气中发现了整数和分数量子霍尔效应,为凝聚态物理的发展开辟了全新的领域,而近年来以石墨烯为代表的狄拉克费米子体系中的非常规量子霍尔效应研究,以及黑磷、拓扑绝缘体等半导体的研究,也离不开强磁场的实验环境,比如复旦大学张远波教授课题组和中国科技大学陈仙辉教授课题组合作首次观测黑磷中的量子霍尔效应的部分数据就是在稳态强磁场实验装置的水冷磁体上采集完成的(*Nature Nanotechnology*11, 593-597 (2016))。

#### (2) 超导物理

在超导研究中,磁场是一种调控超导态的有效手段,不但可以帮助人们了解不同超导态自身的特性,还能揭示隐藏在超导态之下的“正常态”或“竞争态”等相关物理性质,甚至可以诱导新奇的超导

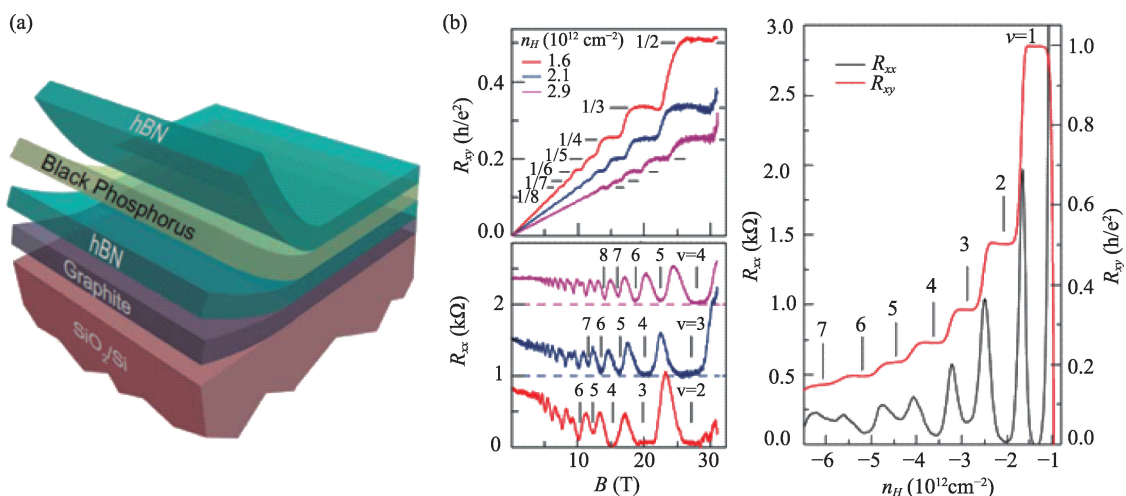


图5 黑磷晶体管结构示意图(a)以及其在稳态强磁场中表现出的量子霍尔效应(b)(*Nature Nanotechnology*11, 593-597 (2016))

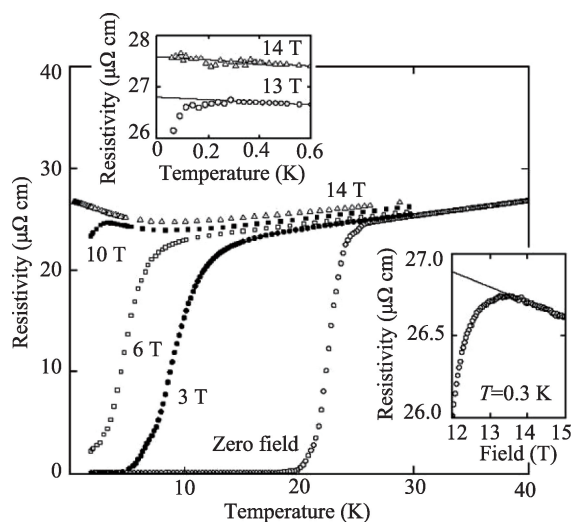


图6 不同垂直平面磁场下PCCO电阻随温度的变化  
(Hill RW et al. *Nature*, 2001, 414: 711)

态,是探索超导现象和机理的重要手段之一。近年来,随着磁体技术的不断发展,强磁场在超导研究领域的作用也越来越重要,超导材料及超导机理研究取得了许多进展。比如2001年Hill等人通过强磁场抑制电子型氧化物超导体( $\text{Pr, Ce}$ ) $\text{CuO}$ ( $T_c=20\text{K}$ )超导电性,测量了极低温下正常态的输运性质,获得了高温超导体正常态非费米液体行为的一

个直接证据(Hill RW et al. *Nature*, 2001, 414: 711)。

### (3) 拓量子材料研究

拓扑绝缘体是近年来发现的一个新物质态,其内部是有能隙的绝缘体,在其表面却存在着受时间反演对称性保护的表面态,该表面态来源于强烈的自旋-轨道耦合诱导的导带与价带间的能带反转,而且其表面态电子的动量与自旋相耦合,使其自旋方向永远与动量正交,成为具有无质量的Dirac费米子特征的手性电子。理论研究发现:破坏拓扑绝缘体表面态的时间反演对称性,将展现出丰富多彩的物理特性,这些奇异性导致拓扑绝缘体材料在量子信息和量子计算等方面具有极大的潜在应用前景,成为凝聚态物理研究中的热点和前沿。寻找潜在的拓扑超导单晶材料是当前拓扑超导研究中的一个重要课题。我国科学家成功制备得到 $\text{Srx-Bi}_2\text{Se}_3$ 单晶体,并利用稳态强磁场实验装置的水冷磁体对 $\text{SrxBi}_2\text{Se}_3$ 单晶体的拓扑性质进行研究,给出了这个体系存在拓扑保护的表面态的证据,结果表明 $\text{SrxBi}_2\text{Se}_3$ 单晶体是研究拓扑超导电性的理想材料(*Journal of the American Chemistry Society* 137, 10512 (2015))。

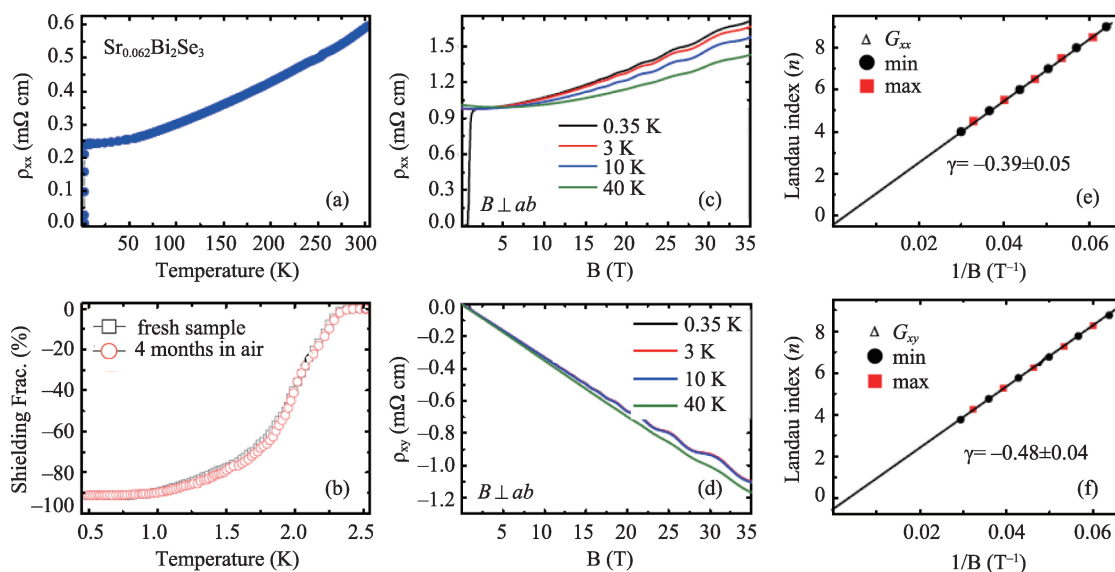


图7 (a)  $\text{SrxBi}_2\text{Se}_3$  单晶体的超导转变; (b) 样品的超导体积分数; (c)和(d) 利用稳态强磁场水冷磁体装置测量得到的样品的量子振荡; (e)和(f) 通过对量子振荡数据进行分析,得到反映拓扑表面态的证据:朗道指数和  $1/B$  的截距接近 0

(*Journal of the American Chemistry Society* 137, 10512 (2015))

(4) 磁性材料

强磁场是研究磁性材料的强有力手段之一。在磁性材料中,磁性原(离)子间的不同类型交换作用是导致丰富磁结构和磁性多样性的直接原因,深入研究各种交换作用是磁学研究最重要的课题之一。但目前一般实验室所能达到的磁场(低于 20T)远远低于磁性材料中由于交换作用所对应的内磁场,使磁性材料的研究受到很大的限制。例如,对于稀土磁性材料,稀土原子与过渡族原子的交换作用所对应的内磁场一般在 30T 以上。因此,磁性材料研究的深入程度完全依赖于磁场的大小。利用强磁场研究整个磁化过程可以得到磁性体系中的磁结构与交换相互作用等非常重要的信息,对深入研究磁现象和新型磁性功能材料的开发具有重要意义。

(5) 自旋电子材料

近年来钙钛矿氧化物超大磁电阻(CMR)的发现,出现一系列过去人们很少见到的输运行为:自旋极性选择导电、极化子和可变频跃迁,并带来了电荷序、轨道序和自旋序等新的自由度。强磁场是控制超大磁电阻等自旋电子材料的电荷、自旋和轨道有序度和其相互作用的至关重要的手段,对这些新自由度的研究将可能发现新的原理。

3.2 化学

采用强磁场诱发新化学反应并合成新材料,将极大丰富化学的内涵,是人们关注的课题。1971 年美国布朗大学的劳勒教授指出,处于磁场中的反应体系,反应物中未配对电子的自旋将受到影响,从而影响体系的熵,影响化学反应进程。强磁场对化学反应物质电子自旋和核自旋的作用,可导致相应化学键的松弛和新键生成,使反应物活化,反应选择性提高,获得一系列原来无法制备的新材料和化合物。由于强磁场对自由基有很大的影响,与常规方法相比,在强磁场下聚合不仅转化率高,而且所制得高分子具有力学强度高和热稳定性强等特点。借助强磁场快速合成聚合物大分子的方法曾被美国科学界列为 1986 年科学大事。

3.3 材料科学

材料是现代物质文明的基础,它支撑着其他新技术的发展,已成为经济发展的重要支柱之一。新材料的研制往往依赖于极端技术条件,如强磁场、极低温、极高温、超高压、超高真空等。其中强磁场技术在新材料研制中的重要作用正在被人们逐步认识。强磁场在材料制备过程中可以调控制备过程中的热力学和动力学条件,从而实现对材料的显微组织、微观结构的改变,进而获得有特殊性能的新材料。在纳米材料制备领域中,纳米材料形状和性能的控制是非常关键的问题,而利用强磁场巨大的磁力作用,有可能控制液相法制备纳米材料的成核过程,它可以控制纳米颗粒朝某一优先方向生长,从而获得高度各向异性的纳米材料;10T 以上的强磁场对化学反应的影响非常显著,可以改变反应

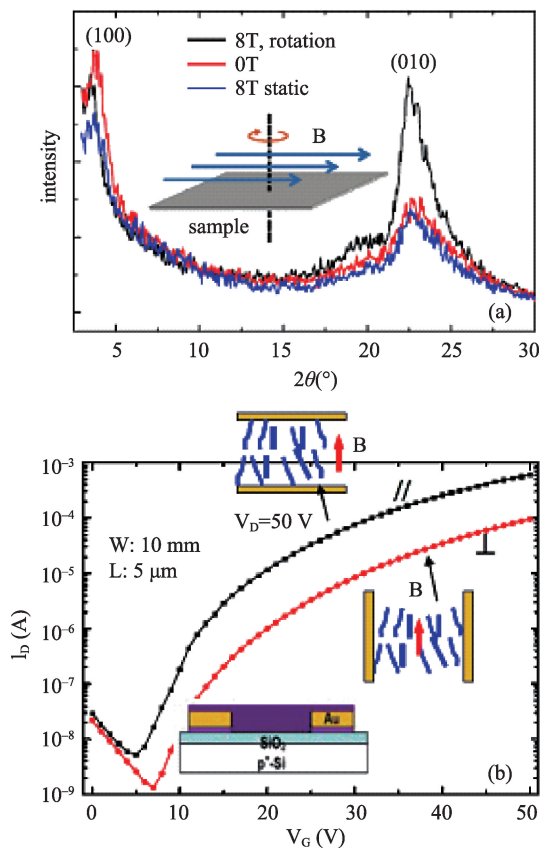


图 8 (a)不同磁场条件下制备的P(NDI2OD-T2)薄膜的镜面扫描X光衍射图,插图为样品在磁场中旋转条件下的取向生长;(b)磁致取向生长的P(NDI2OD-T2)薄膜OFET器件的转移曲线(Adv. Funct. Mater. 2015, 25, 5126-5133)



热、pH值、化学反应进行的方向、反应速率、活化能、熵等诸多方面,因此,强磁场下的材料科学研究引起了国际上广泛重视,尤其是随着超导技术的发展,大口径超导磁体实现商业化,大大推动了强磁场下材料科学研究发展。

我国科学家利用 SHMFF 稳态强磁场诱导手段,成功实现了新型高性能半导体聚合物薄膜的结构调控并显著提高其电荷传输能力。利用强磁场生长的薄膜制备高性能场效应晶体管(OFET)器件,发现强磁诱导取向可显著提高聚合物半导体的载流子迁移率(达4倍),并产生强的载流子迁移率各向异性(*Adv. Funct. Mater.* 2015, 25, 5126-5133)。

### 3.4 生命科学

#### (1) 核磁共振(NMR)

核磁共振(NMR)是利用原子核在外磁场作用下的核自旋能级跃迁所产生的吸收电磁波来研究有机化合物结构和组成的一种方法。NMR是一种非常独特的和强有力的物质科学的研究手段,已经成为物理学、化学以及生命科学等多学科研究物质成分、分子结构和动力学的有力手段,广泛应用于

科学研究的前沿。核磁共振的发展是不断地追求更高的探测度和灵敏度。由于核磁共振振动频率正比于磁场强度,这就对磁场强度有了更高的要求。我国稳态强磁场实验装置建设的核磁共振谱仪磁场强度为20T(54 mm孔径),研究人员利用稳态强磁场实验装置对STIM1蛋白的研究中取得进展,研究得到STIM1蛋白跨膜区的一个功能获得性(gain-of-function)突变,并围绕该突变进行了一系列生化和细胞研究提出一个新的STIM1蛋白由非活化状态到活化状态的作用模型。该项研究工作提出了新的信号由内向外传导的分子机制,强调了跨膜区构象变化在信号传导过程中起到了至关重要的作用(*Nature Communications* 6,7826(2015))。

#### (2) 磁共振成像(MRI)

磁共振成像(MRI)已经成为临床的核心医疗诊断手段。MRI既可以无创伤地获得体内组织清晰的解剖构造和反映器质性病变的结构图像,也可以提供丰富的生理学信息,如血管造影、弥散成像、频谱成像等。MRI技术的发展使直接、动态地观测大脑认知功能成为可能,这极大地拓展了MRI的应用

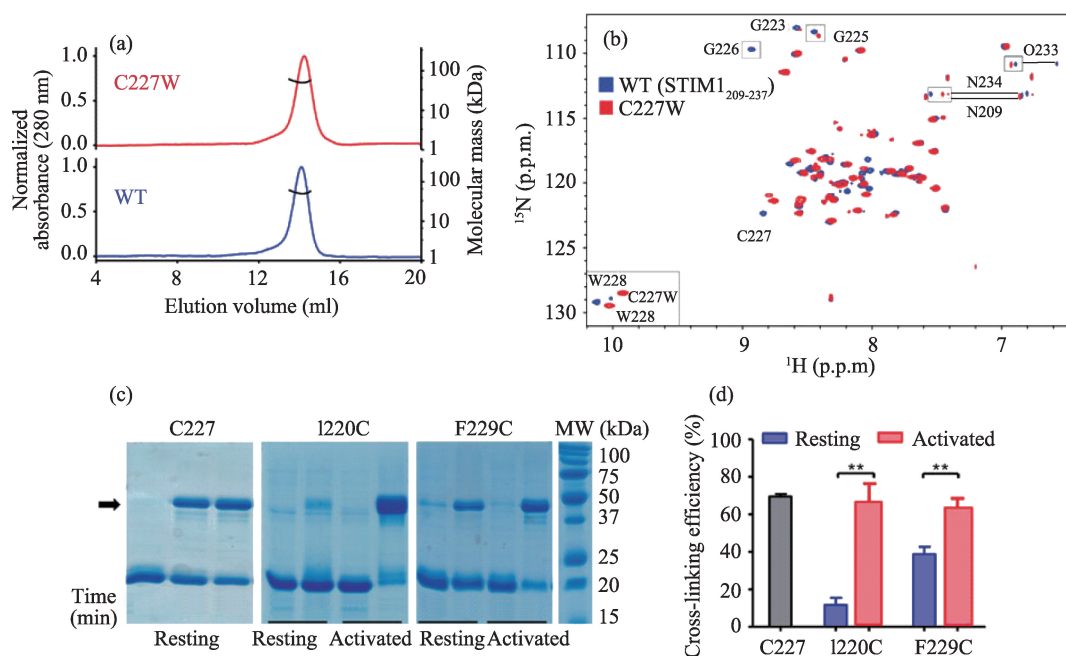


图9 STIM1跨膜区被激活后的结构变化:(a)野生型(蓝色)和C227W突变体(红色)TM-CC1的分子量测定;(b)野生型(蓝色)和C227W突变体(红色)组装到bicelle后的HSQC光谱叠加;(c)二硫键交联结合非还原SDS-PAGE揭示了蛋白的二聚体性质;(d)STIM1-TM单半胱氨酸突变体交联效率的bar图(*Nature Communications* 6,7826(2015))

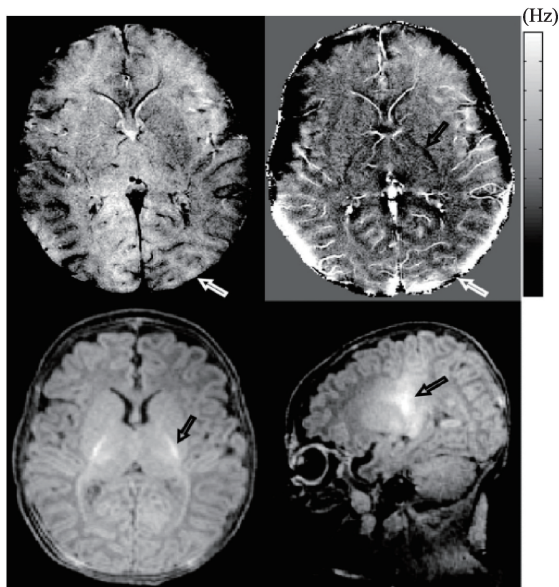


图10 3T下新生儿大脑成像(Neuroimage, 2011, 55(3):1068-72)

领域,并对临床医学和生命科学产生了重要的影响。强磁场下的磁共振成像(MRI)为重大神经与精神疾病(神经退行性疾病、老年痴呆、神经内分泌疾病、抑郁症、药物与网络游戏成瘾等疾病)相关的认知障碍、基因(Bio-X组)功能及两者的关系研究提供有力工具。此外,MRI在探索有关疾病的早期预测方法(如探索AD早期预测的个体标准)、新药物、手术、脑干细胞移植与干预等方法效能的评价和药物动力学等方面也发挥重要作用。如早期在3T磁共振成像系统中借助对猴子脑成像的研究,可以研究

幼猴早期发育,以及幼猴到成年猴脑部结构的变化,但是在高场下脑结构和脑功能磁共振成像的研究尚属空白。利用中国稳态强磁场实验装置中的9.4T(孔径40 cm)大口径动物磁共振成像系统建设的磁共振-高洁净动物实验一体化研究平台可以开展从啮齿类小型动物(鼠)到大型非人类灵长类动物(猕猴)等综合性的研究,并为多学科方向上的神经认知与临床科学研究提供关键技术支持。

### (3) 磁场下的生物学效应研究

许多观测与研究都表明,磁场能诱发生命机体的一些特殊响应,例如,诱导单细胞分裂的极性分布、肿瘤细胞在磁场条件下生长减缓、昆虫和候鸟利用地磁场进行导航等。磁场的生物学效应是磁场和生物体共同作用的结果,相关的磁场参数包括磁场类型、场强大小、均匀性、方向性、作用时间等;生物性因素包括生物体内的磁性、种类、敏感性、作用部位等。利用稳态强磁场实验装置水冷磁体研究发现磁场可以通过影响肿瘤细胞的分裂来抑制其生长。首次发现27 T稳态磁场能够显著改变人类细胞有丝分裂纺锤体的排布方向及形态,特异性地靶向纺锤体和细胞分裂对非分裂期的正常细胞影响较小,但却可以干扰肿瘤细胞的快速分裂增殖,从而抑制肿瘤的生长。这也是目前国际上唯一一例20 T以上稳态强磁场下的细胞生物学效应研

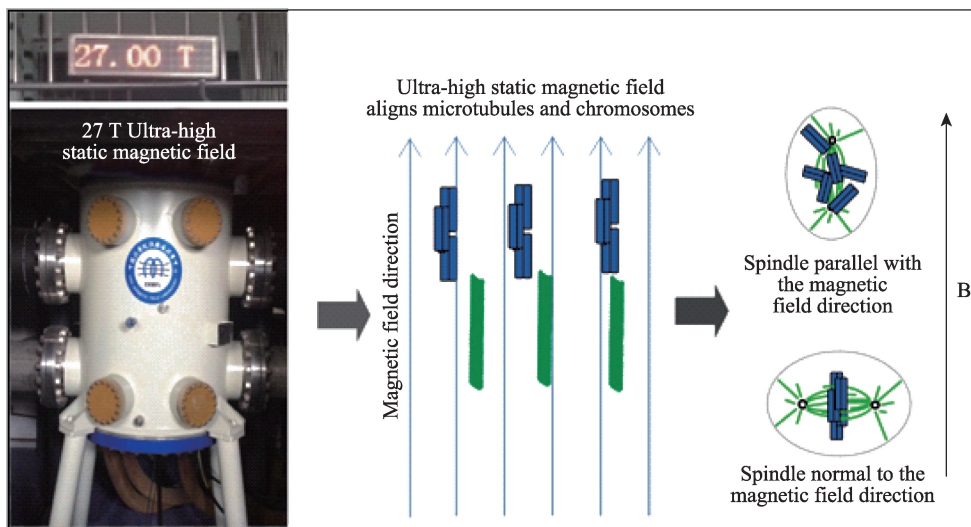


图11 27T稳态强磁场可以通过微管和染色体来影响细胞纺锤体的取向(*eLife*, 6:e22911(2017))



究(*eLife*, 6:e22911(2017))。

### 3.5 地球科学

通过研究熔体的核磁共振波谱特征来推测硅酸盐和铝硅酸盐熔体的结构特性,对熔体结构的深入研究不仅可以获得硅酸盐熔体转变成硅酸盐矿物这一重要地质过程发生的机理及控制因素的基础信息,而且对于研究和开发硅酸盐材料具有理论指导的意义。

### 3.6 强磁场下的实验新技术、新方法

强磁场作为一种极端条件,不仅在科学研究方面具有重要的意义,还在应用方面催化出一系列新的重大技术,而这些新技术新方法不论是对科研还是对国民经济的发展都起到了极大的促进作用。随着科学研究的逐步深入和经济生产的飞速发展,人们对测量手段提出了越来越高的要求,特别是对于强磁场下出现的科学问题,许多现有的测量技术、方法已不能满足人们日益增长的需求。因此,依托强磁场装置进一步发展强磁场下的测量新技术、新方法具有十分重要的科学意义和应用价值。

我国科学家利用稳态强磁场实验装置水冷磁体在国际上首次实现了27 T强磁场环境下的扫描隧道显微镜(STM)原子分辨率成像,得到了石墨样品的原始成像数据。目前国际上使用的高场STM成像主要在超导磁体,受到超导磁体磁场强度限制,目前磁场强度不超过20 T,我国27T水冷磁体STM成像目前也是国际上最高磁场STM成像(*Nano Research* 2015, 8 (12) :1-7)。

## 4. 展望

本文介绍了我国一个重大科技基础设施——国家稳态强磁场实验装置的建设意义、建设内容、性能参数及开展的科学研究工作。随着强磁场下科学研究工作的开展,利用强磁场条件进行科学研究的领域将进一步被挖掘、拓展,为基础科学前沿探索提供新的机遇,必将产生许多重大原创研究成果;随着我国稳态强磁场科学技术的发展,未来有望为科学家们提供更加先进的稳态强磁场科学实验手段,支撑并推动我国多学科基础科学研究更好、更快地发展。

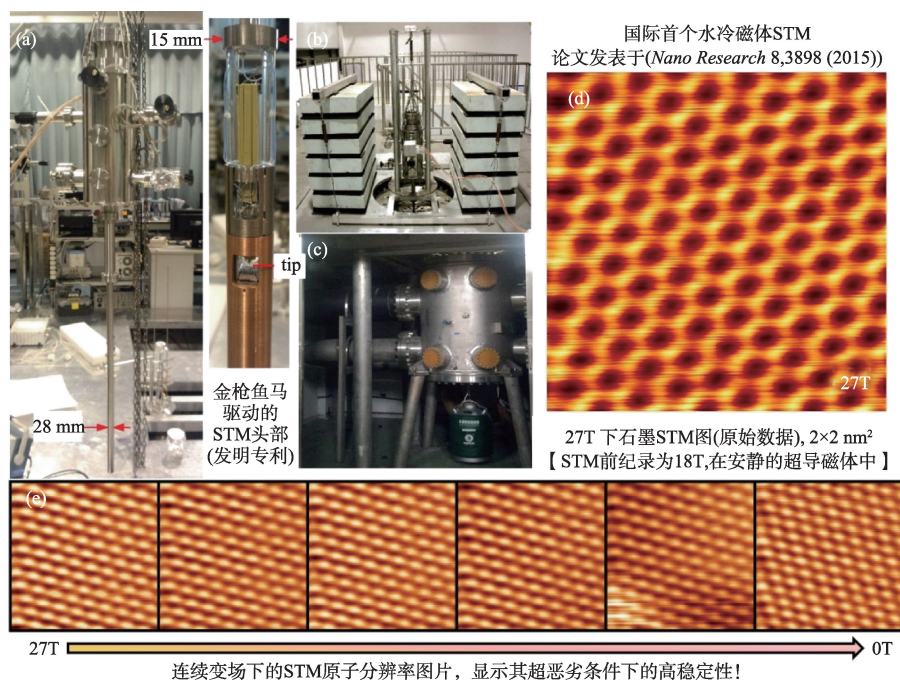


图12 (a) 首个水冷磁体原子分辨率扫描隧道显微镜(STM)的实物照片;(b),(c) 强磁场科学中心编号为WM4的水冷磁体的实物照片;(d) 在WM4中测得的27T强磁场中的石墨STM原子分辨率图像;(e) 在WM4中测得的变场条件下的石墨STM原子分辨率图像系列。

所有的STM成像数据均为未加工的原始数据[*Nano Research* 2015, 8(12):1-7]