

脉冲强磁场技术发展现状与趋势*

彭涛^{1,2} 李亮^{1,†}

(1 华中科技大学 国家脉冲强磁场科学中心 武汉 430074)

(2 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室 武汉 430074)

2015-04-24收到

† email: liangli44@mail.hust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160102

The status and future development of pulsed high magnetic fields

PENG Tao^{1,2} LI Liang^{1,†}

(1 Wuhan National High Magnetic Field Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘 要 脉冲强磁场是现代科学研究的重要工具, 因其可以较容易地实现 50 T 以上磁场, 因而在最近 20 年快速发展。最高磁场强度已经由 70 T 左右发展到目前的 100 T, 磁场波形也由以前单一的短脉冲发展到现在的长脉冲、平顶脉冲、长短合成脉冲等多种波形。随着电源与控制技术的发展, 脉冲强磁场技术也在一定时间内实现了高稳定度磁场, 拓宽了脉冲强磁场的实用范围; 同时, 脉冲磁体技术发展催生出能快速冷却的、具有高重频和异形结构的脉冲磁体, 以满足 X 射线实验、中子实验和太赫兹实验要求。文章详细介绍了脉冲强磁场技术的发展现状与发展趋势, 还介绍了武汉国家脉冲强磁场科学中心的磁场技术。

关键词 强磁场, 脉冲强磁场, 脉冲磁体

Abstract A pulsed magnetic field is one of the most important tools for scientific research, in particular for condensed matter physics. With pulsed magnets it is easy to obtain fields over 50 T. In the last 20 years the technology has developed rapidly, and the record non-destructive field has increased from 60 to 100 T. Besides the half-sine waveform, the long pulse, multi-stage pulse and flat-top waveforms are also available. With the development of pulsed power and control technology, pulsed magnetic fields with high stability over a certain period have been achieved, which broadens the scope of applications. To meet the demands of X-ray experiments, neutron scattering experiments and terahertz science, high pulse repetition rate and special structure fast cooling magnets have been developed. In this paper the status and future development of pulsed high magnetic fields will be described.

Keywords high magnetic field, pulsed high magnetic field, pulsed magnet

* 国家自然科学基金(批准号: 51177064)、教育部新世纪优秀人才(批准号: NCET-12-0220)资助项目

1 引言

脉冲强磁场技术最早可以追溯到上世纪初。1924年,前苏联物理学家P. Kapitza利用铅酸蓄电池在1 mm直径的线圈内实现50 T磁场^[1]。在获得50 T磁场后,他声称只要有足够的经费支持,就可以实现200—300 T的磁场。然而,由于没有意识到巨大磁应力对磁体所造成的破坏,他并没有实现更大的磁场。到上世纪60年代左右,随着测量技术的发展,科学家能实现脉冲场下的de Haas-van Alphen效应、磁致电阻效应等测量,因此,欧洲、美国以及日本开始纷纷建立脉冲强磁场实验室^[2, 3],这一时期的电源多为电容器电源。1986年,脉冲强磁场技术实现一次突破,美国麻省理工学院S. Foner教授将高强度铜铌合金线引入脉冲磁体,研制出高强度脉冲磁体,实现了68 T的磁场^[4]。随后,比利时鲁汶大学F. Herlach教授发明了脉冲磁体的分层加固技术^[5],将磁场提高到80 T。进入90年代,为满足科学研究的迫切需要,欧洲、美国以及日本提出100 T脉冲磁场的计划^[6-8]。面对如此超强磁场所带来的挑战,脉冲磁体走向多线圈结构。2012年,美国国家强磁场实验室利用四线圈磁体实现100.7 T的世界纪录^[9],德国德累斯顿强磁场实验室和武汉国家脉冲强磁场科学中心利用双线圈磁体分别实现了94.2 T和90.6 T的磁场^[10, 11]。

在脉冲强磁场产生装置中,脉冲电源提供能量,脉冲磁体流过电流产生磁场,二者对脉冲强磁场技术的发展起到至关重要的作用,任何一次电源和磁体技术的升级都给脉冲强磁场带来新的发展机遇。

2 脉冲电源

脉冲电源提供产生脉冲强磁场所必须的大电流。常用的脉冲电源包括电容器、脉冲发电机、蓄电池、储能电感以及电网等。

电容器电源功率大,能瞬间输出大电流,适合产生超高短脉冲磁场;同时,电流中无纹波,

对科学实验的测量影响小,是磁化测量实验的理想电源。电容器电源的另一大优点是,运行维护简单,操作便捷,即使小型脉冲强磁场实验室也能运行。早期电容器电压通常在3—5 kV,储能300—500 kJ。随着对磁场要求的提高,电容器的电压与能量也快速增加,目前电容器电源电压都在20 kV以上,能量在数兆焦耳。其中德国德累斯顿强磁场实验室拥有世界上最大的电容器电源,最高电压24 kV,总储能50 MJ^[12]。武汉国家脉冲强磁场科学中心和法国图卢兹强磁场实验室电容器储能分别达到14.8 MJ和14 MJ。

脉冲发电机电源储能高达数百兆焦耳,与整流系统配合对磁体供电,通过控制整流系统的触发角,能方便地调节磁场波形,特别适合产生平顶波磁场或其他特殊波形的磁场。不过,由于整流过程产生纹波,该电源系统不适合磁化等实验研究。同时,脉冲发电机以及整流系统运行控制复杂,维护费用高,一般仅在大型实验室运行。目前最大的脉冲发电机电源位于美国国家强磁场实验室,该发电机输出峰值功率达1430 MVA,输出能量达650 MJ^[13]。武汉国家脉冲强磁场科学中心与校内托克马克装置J-TEXT共享一个100 MJ/100 MVA的脉冲发电机。该发电机既可为J-TEXT装置供电,也可为脉冲强磁场装置供电。用作脉冲磁场电源时,与两套整流系统配合使用,空载电压为3 kV,满载电流为50 kA^[14]。

蓄电池电源兼具脉冲发电机电源储能高和电容器电源无纹波的优点。另外,蓄电池电源可以实现单次充电和多次放电,使用方便。不过,单个蓄电池输出的电压低,电流小。为适应脉冲强磁场的需要,蓄电池电源通常由若干个蓄电池串并联组成。在蓄电池电源设计中,一个重点是设计出安全的电流关断开关,单个磁场脉冲无法消耗电源内部的能量,如果不能强制关断脉冲磁体上的电流,电流将一直流过磁体,磁体将由于焦耳热而损坏。武汉国家脉冲强磁场科学中心建成了全球最大的蓄电池电源,该电源由975个12 V蓄电池串并联组成,总储能高达8 GJ,输出电压770 V,最大电流为35 kA,整个电源内阻为3 mΩ^[15]。

为实现磁体上直流电流的可靠关断，电路中设计了一个晶闸管强制换流电路和另一个直流断路器，三者串联工作，以防止其中一个设备失灵造成事故。

电感储能电源是利用电感作为储能元件，在较长时间内，以较小的低功率将电能转换成磁能储存起来，然后在短时间内释放到脉冲磁体内，产生大电流和强磁场，在这一过程中，也实现了功率的放大。电感储能电源能量密度高，储能元件实际上就是一个电感，维护简单，建造成本低。该电源的缺点是效率低。法国格勒诺布尔强磁场实验室建有全球唯一的脉冲强磁场电感储能电源。储能电感由铝板绕制而成，外径 2.16 m，内径 1.14 m，高 1.05 m，重 10 t。储能时，电流在 3 s 内达到 120 kA，储能 72 MJ。利用该电源，格勒诺布尔强磁场实验室实现了 60 T 的磁场^[16]。

电网电源是直接将电网的电压进行整流成需要的参数后给磁体供电，中间没有储能环节，磁体所需的功率就是电网输出的功率。由于一般电网容量有限，难以承受巨大的负载冲击，所以用于脉冲强磁场的电网电源功率都在 20 MW 以下，仅用于 40 T 以下脉冲磁场^[17]。目前该类电源已完全在脉冲强磁场中被淘汰。

3 脉冲磁体

脉冲磁体本质上是一个空心螺线管线圈，孔径一般在 10—30 mm 之间，以提供足够的空间开展科学实验。最初的脉冲磁体是由铜线连续绕制而成，由于铜线机械强度低，只有 300 MPa 左右，不能抵抗强电磁力作用，所以只能产生 40 T 以下的磁场。1986 年，美国麻省理工学院 S. Foner 教授首次将高强、高导铜铌合金线引入脉冲磁体。由于该导线具有 900 MPa 左右的抗拉强度，能极大地提高脉冲磁体的力学强度，因此实现了 68 T 的峰值磁场。受这一突破鼓舞，世界上各强磁场实验室纷纷研发新的高强度导体材料，以期获得更高的磁场。其中，英国牛津大学和法国图卢兹强磁场实验室开发了铜—不锈钢复合导线。

他们将铜棒插入高强度不锈钢管中，然后进行多次挤压变形和热处理，制造出不锈钢加固的铜芯复合导线^[18]。该导线强度达到 1 GPa 左右，能产生 80 T 的磁场。俄罗斯无机材料研究所则在铜铌合金研究方面取得重大突破，他们研制出强度高达 1.1 GPa，电导率达 66% IACS(International Annealed Copper Standard，中文译名为国际退火铜标准)的合金，该合金导线广泛用于欧美等国家^[19]。另外，日本在铜银合金导线研究方面也取得了巨大进展，导线强度达到 1.2 GPa，导电率高达 71.5%^[20]。

尽管提高导线强度是提高磁场的一个重要方法，但导线强度的提高伴随着电导率的降低。当导线强度达到 1 GPa 左右时，无法在保证电导率的情况下继续提高强度。因此，磁场的提高必须另辟蹊径。上世纪 90 年代，比利时鲁汶大学的 F. Herlach 提出了分层加固的脉冲磁体结构，实现了脉冲磁体结构的历史性突破。在以往的脉冲磁体中，线圈都是采用导线连续缠绕的方式加工，整个脉冲磁体仅由最外层加固，而我们在进行详细的脉冲磁体受力分析后发现，线圈导体层受力并非连续。在线圈最内层，层与层之间会出现自由分离界面，因此，不论最外层加固多厚，线圈内层都无法得到有效加固，只有将每层导线进行加固，才能从根本上实现脉冲磁体力学强度的提高^[21]。采用分层加固技术，不仅实现了每层导线的加固，而且能根据不同层受力大小的不同实现最优化加固。分层加固技术是脉冲磁体发展历史上的一次重大突破，将磁场从 60 T 提升到 80 T 左右。目前世界上所有的超强脉冲磁体都采用该技术方案。

然而，面对 80 T 以上磁场所产生的磁应力，分层加固技术也显得无能为力。唯一的办法是增加脉冲磁体的体积，降低磁应力。不过，增加脉冲磁体体积意味着磁体电感和能量的增加。从电源的角度出发，要为一个体积庞大的脉冲磁体供电，也就是要电源同时具有高功率和大能量，这对脉冲电源来说是不现实的。因此，多线圈多电源供电的多级脉冲强磁场系统被提出来。

多级脉冲强磁场系统的基本思路是采用两个或者两个以上线圈，每个线圈由一个脉冲电源独立供电。所有线圈同轴安装，磁场相互叠加。磁体的外线圈电感大，由大能量脉冲电源供电，产生一个长的背景磁场；内线圈电感小，采用一个低能量但高功率的电源供电。内线圈系统在背景磁场达到峰值时刻开始工作，产生一个快速上升的叠加磁场，与背景磁场一起形成超强磁场。由于两个线圈独立供电，可以独立设计，对电源的要求低，因此是超强脉冲磁场的最佳方法。2003年，由欧盟资助的“ARMS”项目是世界上第一个超高磁场双线圈系统^[22]。该系统在法国图卢兹强磁场实验室测试，内外线圈分别采用112 kJ和14 MJ的电容器电源，实现了76 T的磁场。随后，美国国家强磁场实验室研制了60 T的三线圈脉冲磁体、100 T的四线圈脉冲磁体^[23, 24]；德国德累斯顿强磁场和武汉国家脉冲强磁场科学中心分别研制了94.2 T和90.6 T的双线圈磁体。

传统脉冲磁体线圈，无论是连续缠绕还是分层加固，都是线绕式结构。当导线强度很高或横截面较大时，绕制非常困难，而且线圈内层导线承受巨大的弯曲应力，影响使用寿命。因此，铜皮线圈被发明出来。铜皮线圈采用1 mm厚左右的铜皮连续绕制，相当于每层只有一匝。层与层之间放置一层Kapton或Nomex纸作为电绝缘。该结构极大降低了线圈绕制难度，但问题是层与层

之间无法实现分布式加固，力学强度较低。为解决这个问题，人们提出了多螺旋结构线圈。多螺旋线圈的每一层导线是由铜管按螺旋线方式切割出来的。组装时，切口垫上绝缘材料，外面再缠绕一层加固材料。不同直径的铜管加工成不同的导线层，最后组装成线圈。采用该工艺，导线由铜管直接加工而成，加工简单，线圈无预应力，特别适合需要大截面的线圈结构。武汉国家脉冲强磁场科学中心将多螺旋与铜皮结构结合起来，研制了9层多螺旋和108层铜皮串联的脉冲磁体，实现了峰值35 T、脉宽长达2000 ms的超长脉冲磁场^[25]。

4 脉冲磁场

脉冲磁场的发展取决于脉冲电源与脉冲磁体的发展，但脉冲磁场的波形特性由科学实验的需要决定。衡量一个脉冲磁场的性能好坏，通常用磁场强度、磁场脉宽、磁场稳定度以及磁场重复频率来判断。对于特定的研究对象，对磁场特性的要求不同。例如，研究高温超导体的上临界场，需要超高的磁场强度；研究比热、荧光寿命以及大电阻样品输运特性，需要超长磁场脉宽，而对于NMR谱研究，需要具有超高稳定度的平顶磁场。

4.1 超高磁场强度

要实现超高磁场强度，首先要解决的问题是如何优化磁体结构以及磁体与电源的配置，解决巨大磁应力对磁体结构的破坏。当磁场为50 T时，磁应力为1 GPa；当磁场达到100 T时，磁应力是4 GPa，超过目前任何实用导体材料的强度，唯一的解决方法是采用分层加固结构和多线圈系统。2012年，美国国家强磁场实验室采用四线圈结构，最内层线圈采用俄罗斯生产的高强、高导铜铌合金线绕制，由电容器供电，外面三层线圈采用Glidcop导线绕制，由脉冲发电机供电，实现100.7 T磁场，成为目前世界纪录。由于

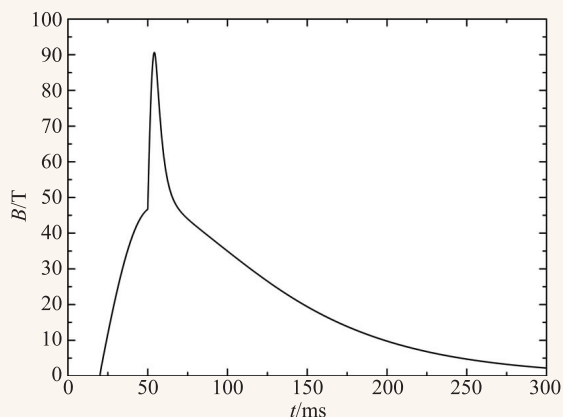


图1 武汉国家脉冲强磁场科学中心双线圈90.6 T磁场波形

发电机电压较低,必须采用大横截面导线绕制,因此该磁体体积庞大,重量达9752 kg。德国德累斯顿、法国图卢兹以及武汉国家脉冲强磁场科学中心均采用双线圈结构和双电容器供电方案。相对美国发电机电源方案,电容器电源电压高,导线横截面小,磁体体积小。后三个实验室的磁体重量均在数百公斤左右。但由于电容器能量远小于发电机电源,后三个实验室目前实现的最强磁场分别为94.2 T、90.6 T和80 T。图1是武汉国家脉冲强磁场实验室90.6 T磁场波形图;图2是以上实验室最高磁场对比图。

4.2 超长磁场脉宽

对于电输运测量,如果样品本身的电阻高达几万或几十万欧姆,测量回路的时间常数可能达到磁场脉宽的数量级,实验得到的数据就会失真。因此,对于这类实验,需要提高磁场的脉宽。由于电容器电源储能相对较小,通常只有几兆焦耳到数十兆焦耳,所产生的磁场脉宽在毫秒到数十毫秒之间。一个延长磁场脉宽的办法是,在脉冲磁体两端反并联一个由二极管和电阻构成的续流回路,当电容器电源上两端电压反向时,二极管导通,电流从续流回路流过,这样磁场脉宽可以大幅增加,而且电阻越小,磁场脉宽增加幅度越大。但续流回路只能延长磁场的下降沿脉宽,而上升沿仍然只有数十毫秒,该时间段内的数据几乎不能使用。因此,脉冲强磁场下大电阻样品电输运性能测试一直是个挑战。

美国国家强磁场实验室依靠能量巨大的脉冲发电机,采用三线圈磁体实现了峰值60 T、全脉宽2000 ms、平顶时间100 ms的磁场波形。武汉国家脉冲强磁场科学中心也利用脉冲发电机电源实现了峰值50 T、全脉宽1000 ms、平顶时间100 ms的磁场波形(图3)^[26]。目前,以上两个实验室可以实现该类波形的磁场。

除采用发电机电源外,武汉国家脉冲强磁场科学中心还采用蓄电池电源,也成功地实现超长无纹波磁场。依靠高达8 GJ的储能^[27],该电源能

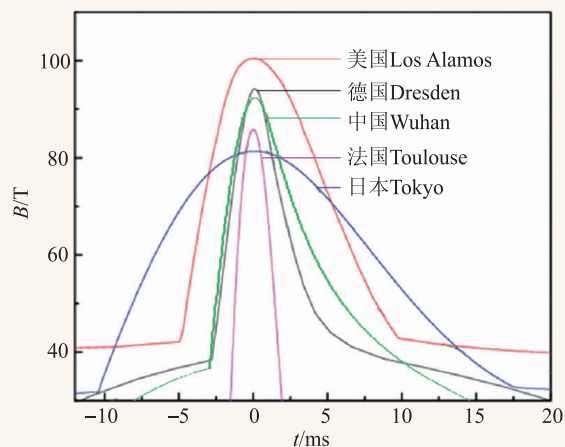


图2 目前世界上主要脉冲强磁场实验室最高磁场对比

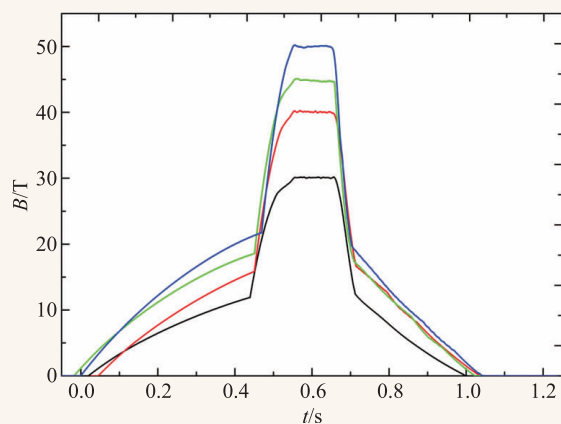


图3 脉冲发电机电源产生的长脉冲磁场

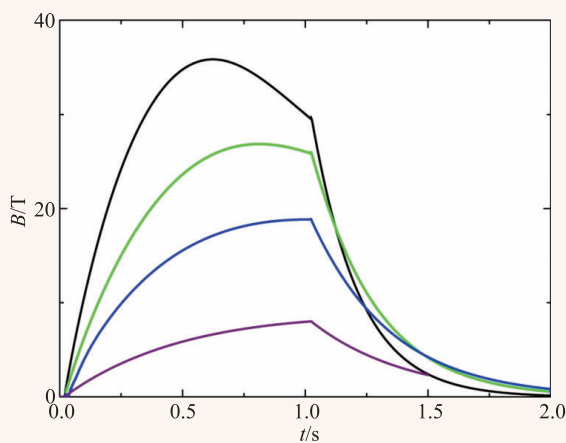


图4 蓄电池电源产生的35.8 T超长脉冲磁场

提供长达2000 ms的磁场脉宽,仅磁场上升时间就长达600 ms,使很多常规脉冲强磁场下不能开展的实验成为可能。图4是蓄电池电源产生的35.8 T超长脉冲磁场。

4.3 超高磁场稳定度

NMR 实验需要磁场在一定时间内具有较高的稳定度, 过去一直是在稳态磁场下开展研究工作。

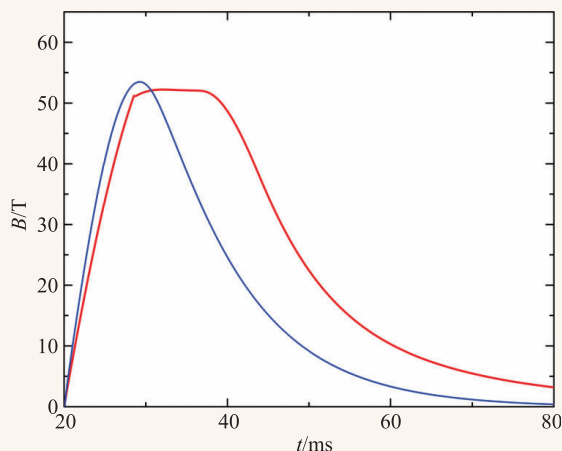


图5 电容器电源产生的超高稳定脉冲磁场波形

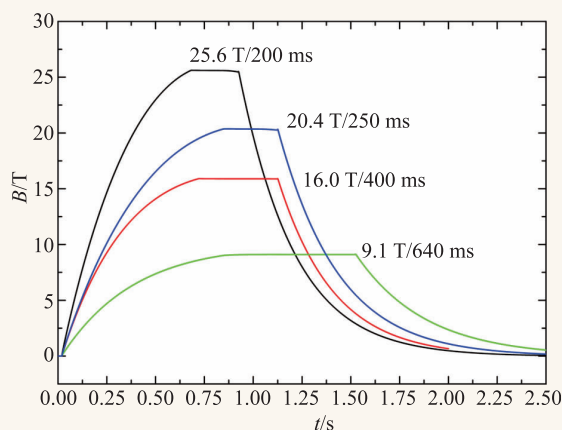


图6 蓄电池电源产生的超高稳定脉冲磁场波形

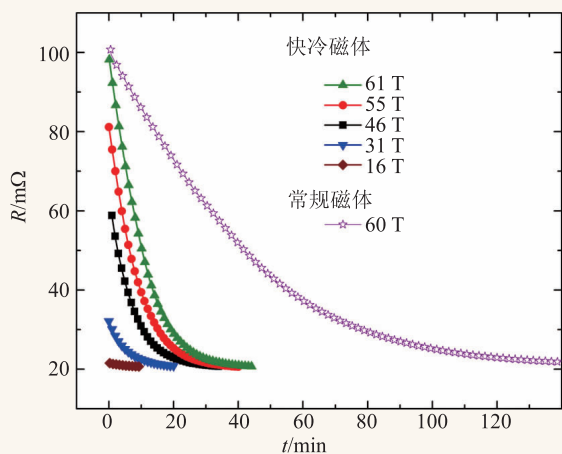


图7 快冷磁体与常规磁体冷却时间对比

作。但由于稳态磁场相对降低, 无法满足高场实验需要, 因此, 科学家开始尝试提高脉冲磁场的稳定度, 以开展脉冲强磁场下的 NMR 研究。对于采用电容器电源的强磁场系统, 由于放电电流不可控, 难以实现稳定的磁场。德国强磁场实验室采用了一个近似的方法。他们利用 43 MJ 的电容器和一个重 2000 kg 的超大脉冲磁体, 产生峰值为 55 T、脉宽为 1500 ms 的磁场^[28], 然后利用峰值附近磁场变化相对较小的时间段开展实验。因为磁场全脉宽长达 1500 ms, 在峰值附近 10 ms 时间内, 磁场变化率仅为 0.5% 左右, 基本可满足实验要求。不过, 该系统使用非常不便。为了产生超长脉宽, 不得不使用大容量电容器和大电感磁体, 不仅普通实验室无法实验, 而且由于磁体体积庞大, 冷却时间更是长达 8 小时, 实验效率非常低。武汉国家脉冲强磁场科学中心提出了一种利用电容器电源实现高稳定度平顶磁场的新方法^[29]。该系统采用双电容器电源和一个耦合变压器, 主电容器对磁体放电产生磁场, 耦合变压器与辅助电容器相连, 利用电磁耦合, 将主回路的电流调控成平顶磁场。该系统产生 52 T 磁场仅需 5 MJ 左右的能量, 磁场在 10 ms 内的变化率同样达到 0.5%。但磁体只有 15 kg, 冷却时间仅为半小时。图 5 是武汉国家脉冲强磁场科学中心利用电容器电源产生的高稳定度平顶磁场波形。

另外, 武汉国家脉冲强磁场科学中心在蓄电池电源上安装电流旁路系统, 以 500 Hz 的频率调节磁体端电压, 实现了超高稳定度的平顶磁场。目前已实现峰值为 25 T、平顶时间为 200 ms 以及峰值为 9 T、平顶时间为 640 ms 等系列磁场, 磁场稳定度达 200 ppm, 属脉冲磁场稳定度最高者, 为 NMR 和比热研究提供了独特的条件。磁场波形见图 6。

4.4 高重频磁场

在研究 X 射线散射与衍射实验以及中子散射实验时, 要测大量数据, 因此, 需要脉冲磁体在两次脉冲之间的冷却时间尽可能短, 以提高实验

效率。一般脉冲磁体冷却时间在1—4小时之间,难以满足这类实验的需要。研发快速冷却和高重频磁体系统迫在眉睫。

由于脉冲磁体主要追求高场强,线圈中大量采用抗拉强度高、但导热系数低的纤维加固材料,电流在磁体内产生焦耳热难以向外传导。英国牛津大

学在磁体线圈端部安装一个铜盘,将磁体绕组与外部77 K液氮环境连接起来,提高磁体内热量向外传递的效率。德国德累斯顿强磁场实验室则利用蓝宝石棒将磁体绕组与液氮连接起来提高冷却效率。不过,以上热传导部件都设计在磁体端部,离磁体中心距离较远,效果并不明显。法国图卢兹强磁场实验室和武汉国家脉冲强磁场科学中心巧妙地利用磁体内层线圈在电磁力作用下分离的特性,在线圈内部设计轴向液氮冷却通道,从而将冷却介质直接引入磁体内部,大大提高了冷却速度。采用这一技术,武汉国家脉冲强磁场科学中心将60 T磁场的磁体冷却时间从180分钟缩短至35分钟^[30]。图7是快冷磁体与常规磁体冷却时间对比。对于X射线散射与衍射实验和中子散射实验,当磁场强度只有30 T时,冷却时间更是可以缩短至5分钟,极大地提高了实验效率。

5 武汉国家脉冲强磁场科学中心

武汉国家脉冲强磁场科学中心承担国家“十一五”重大科技基础设施项目——脉冲强磁场实验装置的建设^[31]。脉冲强磁场实验装置于2007年1月由国家发展改革委员会批复在华中科技大学建设。目标是建成技术指标先进、开放环境优良、装置规模及综合水平世界一流的大型公用科学实验装置,开展物理、材料、化学、医学和生命科学等领域的研究,探索和认识新现象,研究



图8 武汉国家脉冲强磁场科学中心

和揭示新规律,使我国脉冲强磁场科学研究达到国际一流水平。装置于2008年4月开工建设,2013年10月建设完成。主体包括磁体、电源、监控、科学实验及配套低温系统。其中磁体的最高磁场达90.6 T,样品温度低温系统包括1.3 K氦四、385 mK氦三、39 mK氦三/氦四稀释制冷机等,可开展电输运、磁特性、磁光特性、电子自旋共振等不同类型科学实验。图8是武汉国家脉冲强磁场科学中心。

截止到2014年5月,脉冲强磁场实验装置已累计向国内外用户提供机时4910小时,执行47个科研单位的用户课题145个,涵盖物理学、材料学、化学、生命科学等多个学科。特别针对高温超导体、狄拉克电子体系、量子临界材料等前沿基础领域和科学热点展开研究。

6 结束语

从上世纪初至今,脉冲强磁场技术经历了近100年的发展,最高磁场已突破100 T,磁场波形也实现多样化,但脉冲磁场的发展不会就此停止,尤其是在凝聚态物理发展的推动下,脉冲磁场将在“高、长、稳”三个方面向更高性能发展。为满足这一需求,电源将向更高功率、更大储能以及高重频方向发展;脉冲磁体将采用更高强度、更高电导率的导线,向多线圈、异形结构等方向发展。

参考文献

- [1] Kapitza P. Proc. R. Soc. A, 1924, 105: 133
- [2] The LNCMP team. Physica B, 2004, 346—347: 668
- [3] Jones H, Nicholas R J, Siertsema. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 1552
- [4] Foner S. Applied Physics Letter, 1986, 49(15): 982
- [5] Witters J, Herlach F. Journal of Physics D, 1983, 16: 255
- [6] Kindo K. Physica B, 2001, 294—295: 585
- [7] Challis L J. Physica B, 1995, 211: 50
- [8] Bacon J, Baca A, Coe H *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 514
- [9] <http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/news/pressreleases/2012/100tshot.html>
- [10] Peng T, Jiang F, Sun Q Q *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 4300604
- [11] Zherlitsyn S, Wustmann B, Herrmannsdörfer T *et al.* Journal of Low Temperature Physics, 2013, 170: 447
- [12] Krug H, Doerr M, Eckert D *et al.* Physica B, 2001, 294—295: 605
- [13] Schillig J B, Boenig H J, Rogers J D *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 1994, 30(4): 1770
- [14] Ding H F, Hu J H, Liu W W *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5400504
- [15] Lv Y L, Peng T, Wang G B *et al.* Journal of Low Temperature Physics, 2013, 170: 475
- [16] Aubert G, Defoug S, Joss W *et al.* Pulsed Power Supply Based on Magnetic Energy Storage for Non-Destructive High Field Magnets. In: Proceedings of the VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Hans J Schneider-Muntau Held 18—23 October 1998, Florida, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA, 2004. 91—94
- [17] Klamut J, Palewski T, Suski W *et al.* Physica B, 2001, 294—295: 547
- [18] Lecouturier F, Spencer K, Thilly L *et al.* Physica B, 2004, 346—347: 582
- [19] Han K, Topolsky V J, Walsh R *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 1176
- [20] Sakai Y, Schneider-Muntau H J. Acta Mater., 1997, 45(3): 1017
- [21] Li L, Herlach F. Measurement of Science and Technology, 1995, 6: 1035
- [22] Jones H, Frings P, Portugall O *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 1684
- [23] Sims J R, Schillig J B, Boebinger G S *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2002, 12 (1): 480
- [24] Sims J R, Rickel D G, Swenson C A *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2008, 18 (2): 587
- [25] Lv Y L, Peng T, Wang G B *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 4300204
- [26] Xu Y, Yuan Y, Ding H F *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 3801305
- [27] Ding T H, Lv Y L, Tang J X *et al.* Journal of Low Temperature Physics, 2013, 170(5-6): 481
- [28] Weickert F, Meier B, Zherlitsyn S *et al.* Measurement of Science and Technology, 2012, 23: 105001
- [29] Jiang F, Peng T, Xiao H X *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 045106
- [30] Peng T, Sun Q Q, Zhao J L *et al.* Review of Scientific Instruments, 2013, 84: 125112
- [31] Li L, Peng T, Ding H F *et al.* IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3): 676

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰，色泽饱满，具有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

被选用的封面素材提供者，均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029

《物理》编辑部