

# 大型环形对撞机中的前沿技术

靳松 徐庆金

(中国科学院高能物理研究所 100049)

粒子物理是研究物质最微观组元及其相互作用的学科,是70年来最基础、最重要的前沿科学之一。几百年来,对最小物质结构的研究引领着科学发展的不断深入,是许多新领域、新理论和新技术的源头和推动力。

2012年希格斯粒子发现以后,粒子物理面临着重大转折:一方面标准模型得到完全的验证;另一方面理论和实验的研究都表明这不是终点,必然存在比标准模型更为基础的物理原理。精确研究和测量希格斯粒子的性质是公认的寻找新物理的最佳突破口(Physics Briefing Book, <https://arxiv.org/abs/1910.11775>)。为此,中国科学家于2012年9月首先提出环形正负电子对撞机(CEPC),并可以在相同隧道中升级为超级质子-质子对撞机的设想。CEPC的基准设计周长为100 km,质心能量优化在240 GeV,在无需硬件改动的前提下,可在Z(91 GeV)和WW(~165 GeV)能区高亮度运行。此后,在发现更高能量粒子实验的线索以及技术成熟条件下,利用同一条隧道建造~100 TeV质子-质子对撞机(SppC),直接寻找超出标准模型的新粒子和新物理现象,理解宇宙中暗物质和暗能量的本质,揭示宇宙演化的奥秘,探索更基础的物理规律。

粒子对撞机的工作原理是将两束动量相反的粒子束团,在加速器内加速到接近光速后进行碰撞,现将涉及的前沿技术介绍如下。

## 一、环形正负电子对撞机(CEPC)中的前沿技术

### 1. 超导高频技术

超导高频系统主要作用是为正、负电子束流提

供能量。主要包括超导腔、主耦合器、调谐器、高阶模(HOM)耦合器和吸收器、恒温器等部件。其中,超导腔是核心部件,除为粒子提供能量,还为束流提供纵向聚焦力;主耦合器负责将微波馈入超导腔;HOM耦合器和吸收器负责超导腔内高阶模的导出和吸收;调谐器用于补偿超导腔运行时的频率扰动;恒温器则为超导腔提供约零下271℃(2K)的低温环境。

CEPC超导高频系统包括两部分:对撞环40个11米长的650 MHz超导高频模组,每个模组含6只650 MHz 2-cell腔,如图1所示;以及增强器12个12米长的超导高频模组,每个模组含8只1.3 GHz 9-cell腔。

其中,高性能超导腔(高Q值、高梯度)是超导高频领域最核心的技术。650 MHz 2-cell和1.3 GHz 9-cell超导腔如图2所示,由高纯铌制成,设计指标如表1所示,超过了当前国际上的最高水平。目前,氮掺杂和电抛光是研究高性能超导腔的两项关键技术,CEPC超导高频团队通过研发,取得了重大进

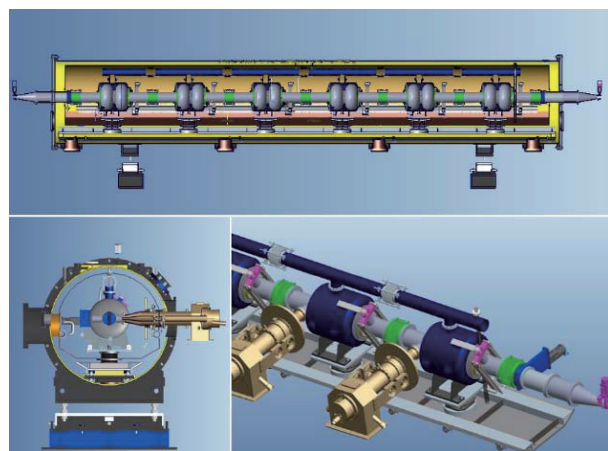


图1 CEPC 650 MHz超导高频模组

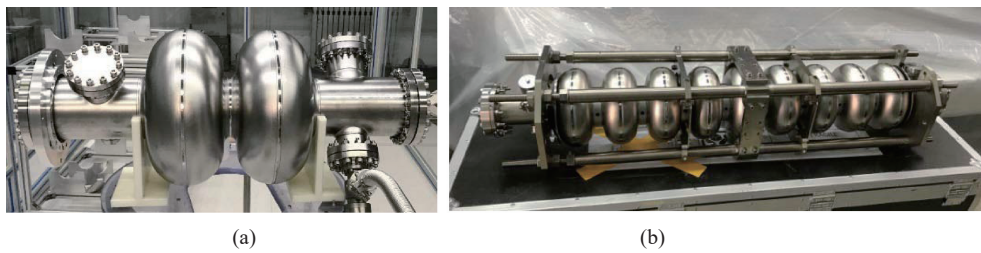


图2 650 MHz 2-cell(a)及1.3 GHz 9-cell超导腔(b)

表1 CEPC超导腔主要性能指标

	运行梯度(MV/m)	运行Q值	垂测梯度(MV/m)	垂测Q值
650 MHz 2-cell 超导腔	19.7	1.5E10	22	4E10
1.3 GHz 9-cell 超导腔	19.8	1E10	24	3E10

展。1.3 GHz 1-cell 超导腔 Q 值已经达到  $4.0E10@21MV/m$ , 并希望最终能够达到  $4.0E10@30MV/m$  国际领先水平。此外,还在积极研发 Nb<sub>3</sub>Sn 镀膜等新技术作为超导腔的备选方案。

目前,射频超导加速技术已成为国际加速器的主流核心技术,该领域的突破,将为上海硬 X 射线光源的建设、开展 ILC 国际合作等奠定基础,提高我国加速器的国际地位以及国际合作交流的话语权。

## 2. 高效速调管技术

功率源系统是加速器重要的组成部分之一,将市电功率转换为微波功率,用于束流能量的提高和弥补同步辐射等因素引起束流能量的损失。在百千瓦量级连续波功率源方面,速调管凭借其较高的效率成为 CEPC 对撞机首要选择。高效速调管的研发将在现有技术的基础上,采用 CSM、COM 等新的群聚方法逐步实现 80% 以上的效率,比目前国际水平提高 20%。

国际上对高效率速调管的研究刚刚起步,近年成立了合作组织 HEIKA(High Efficiency International Klystron Activity),目前第一支高效率速调管处于设计阶段。

为推动并实现我国高功率高效率微波源的设计、制造及产业化,满足未来大型加速器及其他行业的需求,CEPC 团队组建新型高效率微波源研制

合作组。合作组聘请日本 KEK 和巴基斯坦 PIN-STECH 专家并联合国内相关研究所、大学和企业,采用产、学、研结合的方式对 CEPC 高效率速调管进行联合技术攻关,力争 80% 以上的效率,达到世界先进水平。

提高速调管的效率以实现能源的高效利用是缓解高能耗问题的重要突破点。尤其对于国际上提出的大科学工程,如 CEPC、FCC、ILC、CLIC 等,速调管的成本和效率很大程度上决定了它们的造价和运行成本。此外,速调管作为尖端产品,还可以应用于电真空行业的相关领域,有着极其广泛的用途,如,高能加速器装置、核聚变研究试验装置、国防、医用加速器、工业辐照加速器、航空空中道路监控雷达和工业用微波加热设备等。

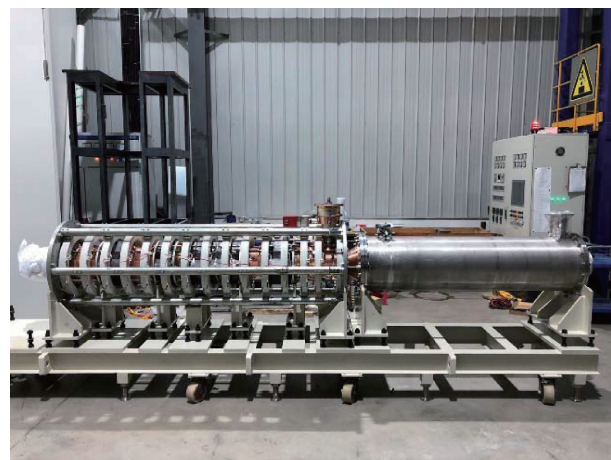


图3 CEPC 首支速调管样管下线

### 3. 高精度磁铁系统

加速器磁铁设备是环形对撞机中种类数量最多的器件,其长度约占据总环周长的70%~80%。正负电子束流先由直线加速器加速到10 GeV的能量,然后再由增强器加速到对撞环所需要的120 GeV的能量。全环磁铁系统中包括二极磁铁,四极磁铁,六极磁铁和校正磁铁等多种类型。因此,磁铁研制的主要方向之一为降低磁铁造价和磁铁功率损耗。

此外,对于CEPC增强器的二极磁铁的磁场必须随着正负电子能量的增加而同步增加。当直线加速器10 GeV的正负电子束流注入到增强器时,二极磁铁的工作磁场为28高斯,当正负电子束流加速到120 GeV时,二极磁铁的工作磁场为338高斯。从正负电子束流性能角度考虑,二极磁铁的磁场精度和励磁重复性都必须满足比较高的要求,但是由于地磁场大约为0.5高斯,以及通用的铁芯纯铁材料剩磁大约4~6高斯,对于最低工作磁场只有28高斯的磁铁来说,磁场精度和励磁重复性的要求很难达到。目前在国际上,高精度二极磁铁最低工作磁场大约127高斯,而最低工作磁场为28高斯的高精度交变磁场磁铁从来没有成功研制过,其设计和研制都极具挑战性,如果能够研制成功,就能达到国际先进水平。

CEPC主环磁铁大部分二极磁铁和四极磁铁采用双孔径磁铁的方案,相比单孔径磁铁方案,可降低约50%的磁铁功率损耗。双孔径四极磁铁需要解决两个孔径内磁场的耦合干涉问题;同时磁铁长度长,高场要求高。我们需要优化磁铁设计,最佳的解决与物理、真空系统之间的问题。完成预研后,将使我国在高精度磁铁研制和测量上走在国际前列,也将带动我国一批传统机加企业成为高精度、自动化、数字化和智能化方向的高新企业。

### 4. 准直技术

CEPC的束流轨道由数万个元件构成,其中包

括各种磁场约束元件、电场加速元件、束流探测元件和真空设备等。要保证直径仅有几十微米的粒子束沿设计轨道运行和加速,在设计的位置上实现对撞、出光,提高束流的寿命和品质,就必须对所有元件的位置精度提出严格要求,使其实际束流轨道与理论设计束流轨道的几何误差小于要求的限差。CEPC对撞环周长为100 km,要求相邻元件间的横向、高程位置精度优于0.1 mm,要在如此大的范围内实现如此高的元件定位精度,这给CEPC准直工作提出了难度极高的挑战,为此我们开展了三维定向平差数据处理技术、大地水准面精化、视觉测量仪的研究。

目前国际各大加速器装置在测量数据处理方面普遍采用平面方向和高程方向数据分开平差计算的方法,在原理上存在模型缺陷,不利于提高数据处理精度。在大地水准面精化方面,目前只有CERN开展了大地水准面精化研究,建立了CERN的大地水准面精化模型,垂线偏差小于1秒。我国尚未开展过用于大型加速器装置的大地水准面精化研究。在测量仪器方面,CERN和费米实验室将摄影测量系统应用于大型探测器的组装测量,我国在加速器摄影测量方面目前还处于实验探索阶段。国外多个加速器实验室联合HEXAGON METROLOGY, ETALON, ELTOS等多家仪器行业领头公司成立了多国联合研究组织PACMAN,开展了多方面的研究,包括将摄影测量方法引入到全站仪中建立可自动化瞄准识别的高精度测角网络Micro-triangulation、基于激光干涉测量的多路激光测量系统FSI。国内对准直测量新仪器的研究一直处在停滞阶段。

未来,三维定向平差研究成果可以应用于所有大型工程测量中多站搭接测量数据的平差处理,提高数据处理精度,完成后将达到国际领先水平。大地水准面是一项基础性数据研究,可以为其他测量工作提供起算基准,其研究成果在空间科学、地球科学和工程技术中有着广泛的应用,完成后将达到

国际一流水平。视觉测量仪,如图4所示,是一项创新性研究,可以满足目前广泛存在的高效高精度测量需求。以上研究将有助于我国在大尺度(千米以上)高精度准直技术方面走在国际前列。

### 5. 超高真空技术

真空系统是加速器的基础工程,束流只有在真空环境中运行,才能保持足够的寿命。加速器真空系统由真空盒、波纹管、同步辐射光吸收器、阀门、真空获得和测量等设备组成。在设计真空盒时,除了要满足真空方面的性能要求外,还要满足束流动力学的要求。

在CEPC真空系统预研阶段进行了6米长铝合金和无氧铜弯转真空盒的研制,解决了真空盒挤压成型和焊接等技术难题。通过弯转真空盒预研,实现了真空盒材料、挤压成型和焊接工艺国产化。RF

屏蔽波纹管的主要功能是用于补偿真空盒的热胀冷缩,减小整个束流管道的阻抗。NEG(Non-Evaporable Getters)镀膜是由欧洲核子研究中心(CERN)发明的一项技术,在LHC上,约有1200根真空盒进行了NEG镀膜,总长约6千米。NEG薄膜可以压缩电子倍增和束流导致的压强上升,并且提供线性抽速。通过预研掌握真空盒内表面镀吸气剂膜工艺方法,达到与CERN同样的技术水平,为CEPC的100千米真空盒镀膜打下基础。图5为镀膜实验系统,等离子体放电和膜的微观结构。

铝真空盒的挤压成型技术可用于工程上复杂铝真空室的制造,铝和不锈钢复合板的研制可以取代进口材料。镀吸气剂膜技术已在新型太阳能热板中起到隔热功能,大大提高热转化效率。另外,吸气剂膜在真空器件和半导体工业也可得到应用。

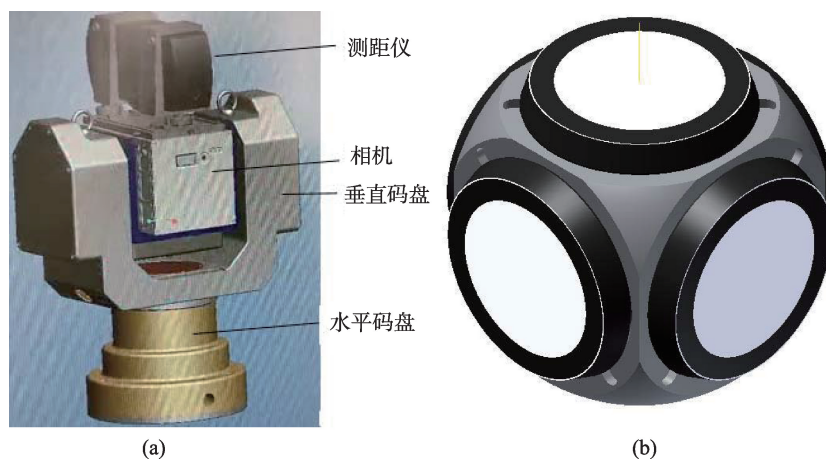


图4 视觉测量仪(a)及五面体靶标(b)

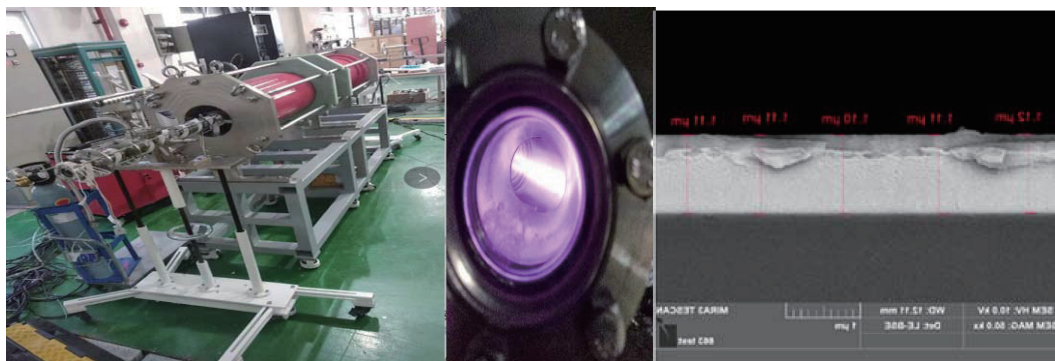


图5 镀膜实验系统、等离子体放电和膜的微观结构

## 6. 大型低温技术

CEPC 将采用超导腔加速器方案,运行环境为 2K。低温系统布局图如图 6 所示,东、西两侧共有 4 个超导腔低温站点,每个站点配有一台制冷功率为  $18\text{ kW}@4.5\text{ K}$  的氦低温制冷机,为超导腔提供稳定可靠的低温环境。南、北两侧有两个磁铁低温站点,对撞区超导磁铁提供  $4.5\text{ K}$  的低温环境,为每个对撞区提供  $3\text{ kW}@4.5\text{ K}$  的制冷能力。

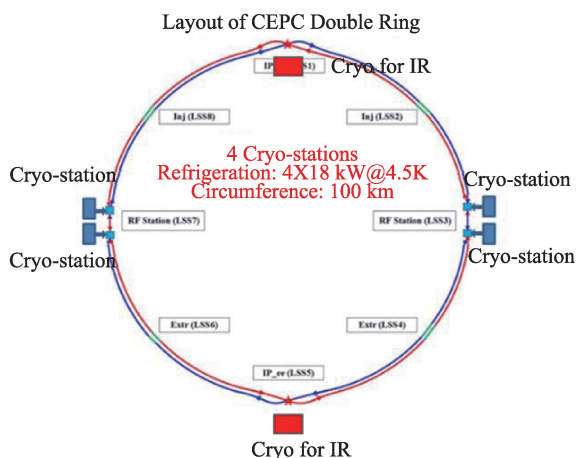


图6 CEPC-SppC 低温系统布局图

大型低温系统集成以及安全、可靠和稳定运行是 CEPC 建设的关键。低温系统涉及氦制冷机、2K JT 换热器、冷压缩机、高性能低温传输管线、精密测量系统(流量、温度、压力、液位等),高性能恒温器设计、低漏热绝热支撑等多类型关键部件和技术。CEPC 低温系统的预研,将是我国首次实现大学低温系统的搭建。

氦制冷机是低温系统最为重要的设备,目前国际上大型氦制冷机主要是林德和法液空两家公司进行商业生产。我国的氦制冷机刚刚起步,处于技术积累和研发阶段,目前已研发出  $250\text{ W}@4.5\text{ K}$  和  $500\text{ W}@4.5\text{ K}$  氦制冷机,  $2.5\text{ KW}@4.5\text{ K}$  制冷机正在研制中。通过 CEPC 的推动,将能实现  $18\text{ kW}@4.5\text{ K}$  等万瓦级大型制冷机的成功研制,达到国际先进水平。

大型低温技术在超导加速器装置、热核聚变装

置、宇宙深低温环境模拟、氢气液化和储运等领域有着广泛的应用,是大科学工程、航空航天、新能源等高新技术产业的核心技术设备,是国家综合竞争力的重要体现。

## 7. 束测电子学

束测系统被称为加速器的“眼睛”,能够提供束流在真空管道中的位置、束流强度、束团横向截面、束团长度和束流损失等信息,此外还有束流反馈系统用于抑制束流不稳定性。束测系统基本组成包括探测器、前端电子学,系统电子学以及局域网,完成束流测量、处理和数据共享。束测设备分布在隧道,本地站和中央控制室。

束测系统重点解决束流位置测量电子学长期稳定等关键问题。通过电路板精确控温系统,在线校正技术等实现电子学长期稳定运行。其中,电路板精确控温系统,在线校正技术更可推广至民用领域,对于高精度测试测量仪器的稳定运行和在线校正提供解决方案;超高真空陶瓷穿墙件可以广泛应用于类似的真空系统中,用于信号提取和馈入,对于提升国内陶瓷金属化技术水平,促进相关产业升级等有重要作用。通过束流反馈系统的预研,完成束流反馈系统电子研制和调试,实现反馈系统的国产化,抑制束流不稳定性,实现 CEPC 大流强对撞,提高对撞亮度。

CEPC 预研完成后,束流位置测量电子学控制精度好于  $0.1\text{ }^\circ\text{C/hr}$ ,电子学稳定度  $10\text{ }\mu\text{m/day}$ 。超高真空穿墙件真空漏率小于  $1.3 \times 10^{-10}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ,耐  $800\text{ V}$  高压,达到最好商业产品水平。束流反馈电子学通过与专注于反馈系统研制的 Dimtel 公司进行国际合作提升自身的水平,与国际接轨。

## 8. 直线注入器

CEPC 直线加速器的主要功能是为增强器提供  $10\text{ GeV}$  正负电子,总长度约  $1.2\text{ km}$ 。如图 7 所示,主要构成有电子枪、聚束系统、直线加速段、正电子源、电子旁路传输线等部分组成。

在整个直线加速器中发展的关键技术有两个:

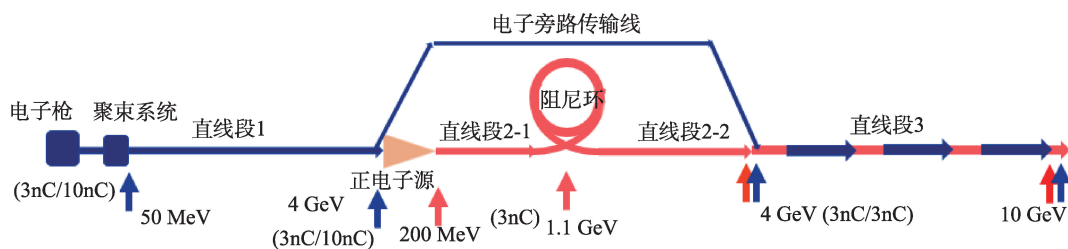


图7 直线加速器主要构成

一个是用于提升电子能量的行波加速管,另一个是正电子源的重要组成部分磁号。加速管是将微波能量转换为电子能量的慢波结构。磁号则在脉冲电源的作用下,提供6~0.5特斯拉的脉冲磁场,它产生的磁场在5 mm之内上升到最大值并在100 mm内急剧下降,用于将4 GeV,单束团电荷量要达到10 nC的高能电子束打靶产生的小横向尺寸、大发散角的正电子束转换到大横向尺寸、小发散角正电子束,便于后续的俘获和加速。

国际上先进的常温直线加速器以韩国浦项10 GeV S波段常温直线加速器为代表,其在高功率测试台上测得的加速梯度为30 MV/m。通过CEPC预研,我们目前已完成的加速管在高功率测试台上加速梯度已大于30 MV/m,达到国际同类结构的平行水平。此后,将进一步开展带束流平均梯度验证。对于CEPC正电子源,与其设计参数接近的是日本KEK研究机构SuperKEKB直线加速器中的正电子源系统,项目组与KEK的相关人员紧密合作,目前已成功完成CEPC正电子源所需磁号的研制,达到国际先进水平。

加速管是常温直线加速器的核心部件,磁号是正电子源必不可少的部分,该技术水平的提高,不仅有助于我国加速器水平的提高,还将有助于我国在国际合作中占有一席之地。其产业化,可培育一批企业走向国际市场。

## 9. MDI

加速器和探测器的接口(MDI)是对撞机设计里最具挑战性的领域之一。它覆盖了探测器本底、挡板和屏蔽的设计、螺线管场补偿、超导磁铁的设计、对撞区Beam pipe的设计、辐射防护、对撞区的整体

设计及优化以及亮度监测等加速器和探测器所有普遍存在的问题,是衡量加速器和探测器设计性能好坏的标准之一。

其中,磁铁是核心部件。目前国际上同类磁体中技术水平最先进的为日本SuperKEKB对撞区超导四极磁体。国内目前在这方面的研究是空白。CEPC对撞区超导四极磁体设计为带铁芯的 $\cos 2\theta$ 型双孔径超导磁体,两孔径中心线夹角为33 mrad,结构紧凑,很好解决了两孔径之间的磁场干涉问题。这是国际上首次提出的两孔径带夹角、共享磁轭 $\cos 2\theta$ 型双孔径超导四极磁体设计方案。其磁场梯度、长度和技术复杂程度均比SuperKEKB对撞区超导四极磁体要大。预研完成后,将系统掌握其设计、制造工艺、磁场测量、失超保护、低温测试等关键技术,使我国在对撞区超导磁体领域达到世界领先水平。该预研初步计划与俄罗斯BINP实验室合作进行。

此外,CEPC MDI远程连接位置距探测器厄铁边缘距离长,远超北京正负电子对撞机(BEPC)、日本SuperKEKB及FCC方案,设计难度大。目前建成的对撞机中,日本SuperKEKB设计比较先进且得到成功应用,我们将在其基础并借鉴BEPC的经验,进行技术创新。预研完成后,将会令我国MDI机械技术跻身世界前沿。

## 二、超级质子-质子对撞机(SppC)中的高场超导磁体技术

二战之后的欧洲,各个国家支离破碎,彼此刚脱离敌对状态;为了促进国与国之间的合作,消除战争阴影,欧洲政府首脑们一致同意,共同成立一个以基础科学研究为目的欧洲核子研究组织,也

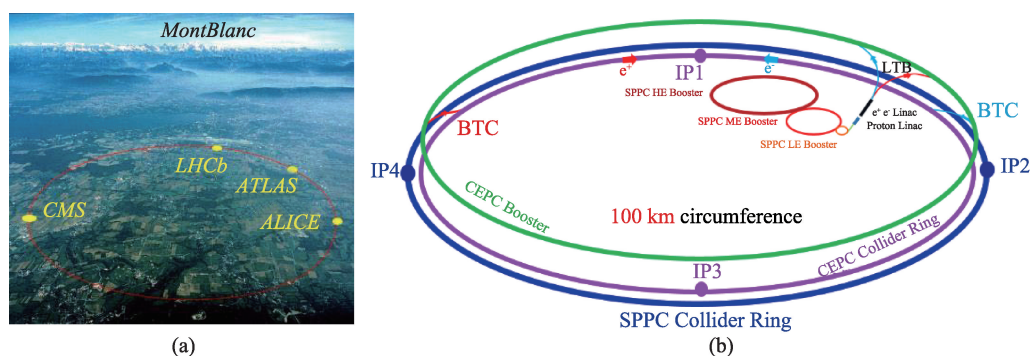


图8 (a)大型强子对撞机LHC;(b)CEPC-SPPC粒子加速器布局

就是后来的CERN。目前世界上最著名的粒子加速器就是CERN的大型强子对撞机(LHC),这个粒子对撞机坐落于瑞士和法国的边界,地下100米深,总长27千米的环形隧道内,如图8所示。在随后几十年里,CERN取得了众多的科学成就,最近的一个为世人所熟知的就是2012年发现了上帝粒子“希格斯玻色子”。CERN开展的研究,不仅推动了基础科学的进步,高能粒子加速器与探测器的研制及建设,也带动了众多先进技术的进步。

对于环形加速器,粒子束可以在环里面反复加速及碰撞,如图2所示。我们需要在直线段部分对带电粒子加速提高其动能:  $F=eE$ , 然后在圆弧部分将粒子转向:  $F=ev \times B$ 。在对撞机周长不变的情况下,磁场强度  $B$  的大小直接决定了最终对撞机能达到的最高能量。能提供更高场强的超导磁体,以及更高加速梯度的高频超导腔,是高能粒子加速器的必须选择。为了在100千米隧道内达到75~150 TeV的对撞能量,二极磁体的偏转磁场强度需要达到12~24 T。

对于环形加速器,粒子束可以在环里面反复加速及碰撞,如图9所示。我们需要在直线段部分对带电粒子加速提高其动能:  $F=eE$ , 然后在圆弧部分将粒子转向:  $F=ev \times B$ 。在对撞机周长不变的情况下,磁场强度  $B$  的大小直接决定了最终对撞机能达到的最高能量。能提供更高场强的超导磁体,以及更高加速梯度的高频超导腔,是高能粒子加速器的必须选择。

加速器二极磁体和四极磁体是构成这种环形加速器的主要部件,如图9所示。粒子注入到加速器后,首先会经过二极磁体偏转,之后由于粒子所具有的动能不完全相同,粒子轨迹会发散开,因此需要四极磁体来进行聚焦,其原理类似光学透镜原理。可以提供二极磁场的线圈具有多种结构,如图10(a)所示,有Costheta结构、Common coil结构、Block结构和CCT结构等。我们对比一下加速器中的二极磁体和螺线管磁体的结构,如图10(b):假设  $J_c$  为电流密度,  $t$  为线圈厚度,我们可以计算该二极磁体的场强为  $B=\mu_0 J_c t/2$ ; 但是同样厚度的螺线管磁体,其场强为  $B=\mu_0 J_c t$ 。同样参数下,二极磁体的场强只有螺线管磁体的一半,同时二极磁体当中的磁场还需要保持足够高的场均匀度。

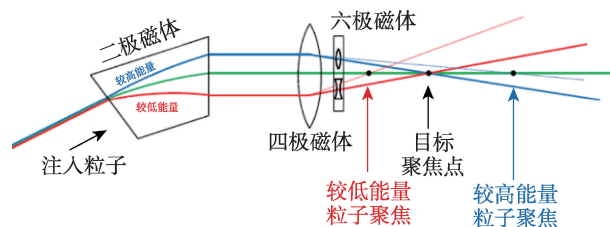


图9 加速器中磁体工作原理示意图

高能粒子加速器需要更高场强的磁体,同时磁体数量众多,体积又受到隧道内空间限制,运行功率及造价又必须在合理范围内;具有更高载流密度的超导材料是唯一的选择。超导材料即使在高背景磁场下,载流性能也可以达到铜线的100倍以上,如图11所示。目前实用化的超导线材,通常以芯线形式被制作成细长的细丝,并嵌入铜基体里

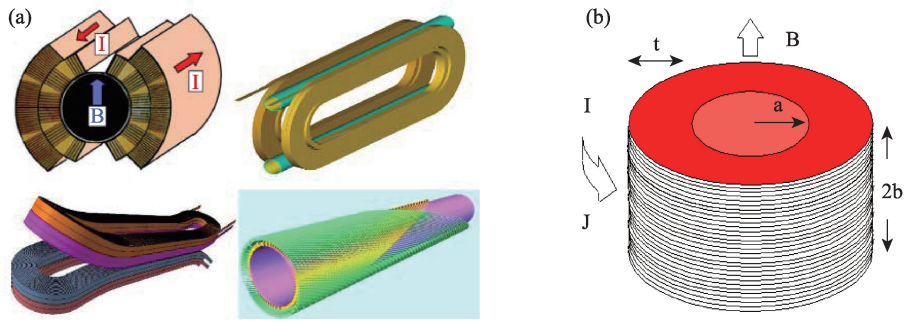


图10 (a)加速器二极磁体不同线圈结构;(b)螺线管磁体线圈结构

面,同时细丝和线材扭绞在一起,以减少其中的磁通跳跃和交流损耗,同时增加失超后的保护作用及运行稳定性。目前基于低温超导材料NbTi的超导磁体已经广泛应用于国际上多个在运行的粒子加速器中,如美国费米实验室的Tevatron、布鲁克海文实验室的RHIC、德国DESY的HERA、欧洲核子研究中心的LHC等,如图12所示。其中LHC加速器上的二极磁体场强8.3 T,为目前在运行的超导加速器磁体场强最高值,也已经非常接近NbTi超导磁体的场强临界值。基于低温超导材料Nb<sub>3</sub>Sn的更高场二极实验磁体,美国费米实验室于2019年9月创下最新世界纪录14.3 T。理论上基于Nb<sub>3</sub>Sn超导材

料的加速器磁体临界磁场为16~17 T,若想进一步提升场强,必须使用具有更高临界场的高温超导材料。

在现有的超导材料中,传统的低温超导体铌钛(NbTi)成本最低,同时具有较好的机械性能。其他的超导材料均比铌钛造价高出数倍甚至数百倍。如要建设SPPC加速器,将需要成千上万个高场超导磁体,对超导材料性能及造价都提出了挑战。未来高能粒子加速器的建设,需要超导材料性能的进一步提高以及成本的大幅度降低。铁基超导材料,从其高场性能到其实用化线材的制作成本,我们认为比目前其他已经实用化的超导材料有明显优势。2016年高能所联合国内相关科研机构和企业,成立了“实用化高温超导材料产学研合作组”。合作组开展从超导机理、超导材料到超导磁体及高频腔技术,从基础科学到应用的全链条研究。合作组的十年研究目标如下:

1) 将铁基超导材料的电流密度提高至目前水平的5~10倍,成本降低到20元/kAm,同时实现实

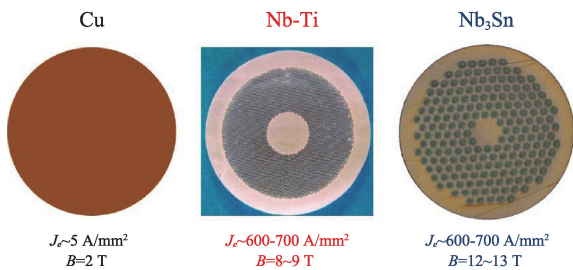


图11 同样截面铜及超导线材高背景磁场下载流性能对比

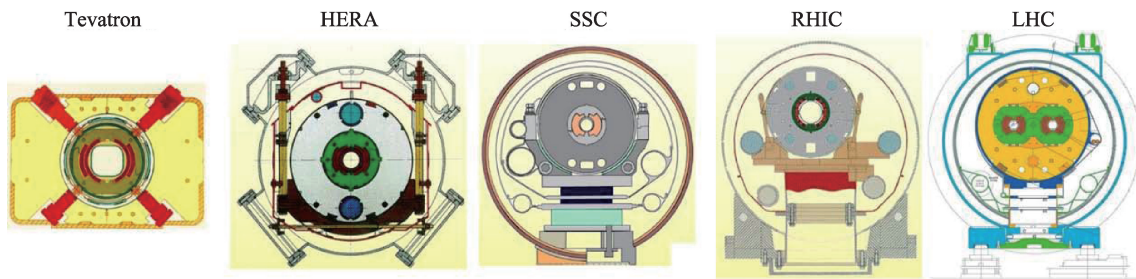


图12 国际上已经建设完成的超导加速器二极磁体结构



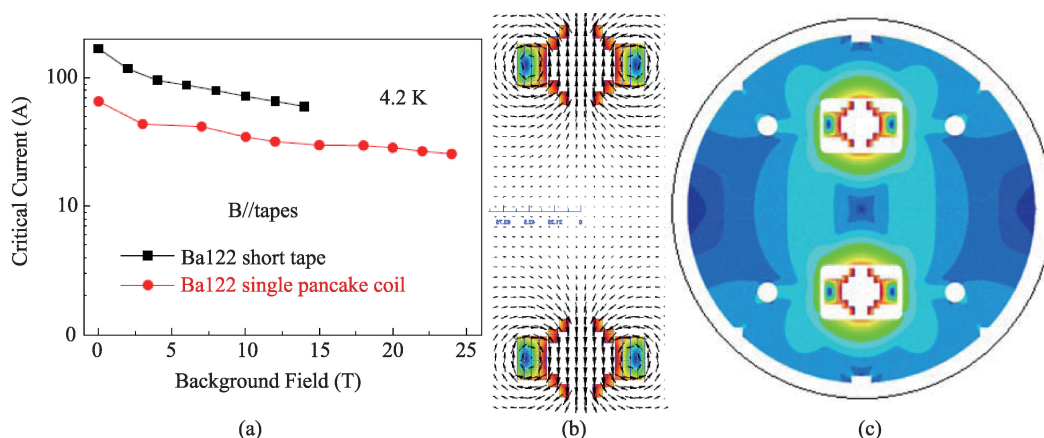


图 13 (a)铁基超导线材及线圈在高场下载流能力测试;12 T 铁基超导二极磁体磁力线分布(b)及截面结构(c)

用化超导线材的产业化;

2) 将 ReBCO 等二代高温超导线材的造价降低到 20 元/kAm;

3) 基于先进高温超导材料的高场超导磁体及超导腔技术产业化。

合作组在各成员单位的互相协作下,若干研究工作已经取得了突破性进展:铁基超导材料的短样电流密度已经突破了  $1450 \text{ A/mm}^2$ , 国际领先。研制的国内第一个高场超导二极磁体,在 4.2 K、两个孔径内最高磁场已经达到 10.7 T。国际上首次完成基于铁基超导材料的超导线圈研制及 24 T 高场下性能测试,验证了铁基超导材料高场应用的可行性,如图 13(a)所示。美国高场实验室对此结果发表专题评述,赞同“铁基超导是理想的应用候选材料,在高场下仍具有高载流能力,并且造价会比  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  低 4~5 倍”。图 13(b、c)是一个基于铁基超导材料的 12 T 二极磁体概念设计,束流孔直径为 40~50 mm;场均匀度为  $10^{-4}$ 。

高场超导磁体是未来高能粒子加速器技术的核心装备,其对先进高温超导材料的性能及造价

均提出了很高的要求。铁基超导材料在未来十年有望取得突破性进展,达到粒子加速器等大科学工程超导技术“实用化”的要求:性价比得到数十倍的提升。同时有望带动整个超导技术的普及化,应用于可控核聚变、高场核磁谱仪及磁悬浮装置中,推动我国高新技术产业的发展与进步。

大型环形对撞机 CEPC-SPPC 的建设,将带动国内包括高场超导磁体、超导高频、高效功率源、大型低温系统、大尺度高速准直、超高真空、高精度磁铁、大规模电子学等十余个领域尖端技术的突破性发展及工业化水平的进步。这些技术在其他大科学装置及民用领域也有广泛需求,并有望培养一大批在各自领域占据国际领先地位的中国高科技企业,为国民经济的长期稳定发展及国家安全做出重大贡献。

## 致谢

本文作者在写作期间得到了娄辛丑、高杰等老师有益讨论和建议,以及 CEPC-SppC 团队沙鹏、翟纪元、周祖圣、康文、杨梅、王小龙、李少鹏、随艳峰、张敬如、白莎等同事提供的大量材料、校核和讨论,在此表示感谢。