

超导磁体在磁约束托卡马克中的应用与展望

秦经刚 王维俊 金环 韩厚祥 吴逸飞 周孟良 顾为杰

(中国科学院等离子体物理研究所 230031)

1. 引言

一部人类文明的进步史,从某种意义上来说可以称之为是一部能源发展史,纵观人类社会的演变过程,能源一直被视为是推动社会进步与发展的动力源泉,当今时代能源短缺是日益严峻的全球性挑战。我国新型能源体系的加快构建,能源保障基础的不断夯实,为经济社会发展提供了有力支撑。同时我国能源发展仍面临需求压力巨大、供给制约较多、绿色低碳转型任务艰巨等一系列挑战。应对这些挑战,出路就是大力发展新能源。而聚变能是无污染、无放射性核废料、资源无限的理想能源,是目前认识到的可以最终解决人类能源和环境问题的最重要的途径之一^[1]。

核聚变,又称聚变反应或热核反应,即两个较

轻的核结合而形成一个较重的核和一个极轻的核(或粒子)的一种核反应形式。原子核中蕴藏巨大的能量,聚变发生时质量发生亏损并伴随大量能量的释放。自然界中最容易实现的聚变反应是氢的同位素——氘与氚的聚变^[2-3]。氘存在于海水中,储量极为丰富,氘可在反应堆中通过锂再生,锂在地球上的储量也十分丰富,如果可控热核氘氚聚变反应能够实现,这一聚变新能源可供人类使用至少数十亿年。氘氚聚变反应原理如图1所示。由于氘氚核聚变能与太阳产生能量的方式相同,因此受控热核聚变实验装置被人们称为“人造太阳”。

实现核聚变反应,需要同时满足三个条件:足够高的温度、一定的密度和一定的能量约束时间,三者的乘积称为聚变三乘积。根据劳逊判据,只有聚变三乘积大于 $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$,才能产生有效的

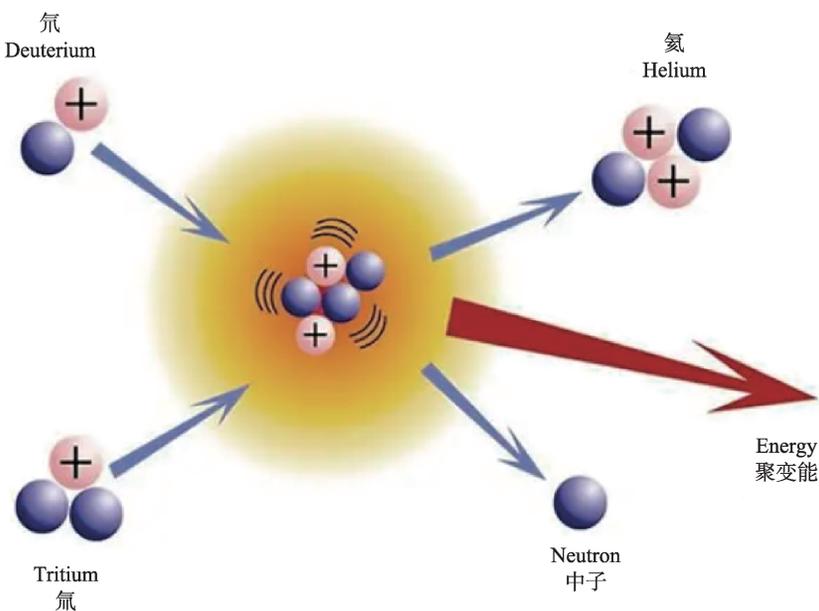


图1 氘氚聚变反应原理图

聚变功率输出。首先必须要有足够高的温度以克服粒子间的库仑势垒;其次需要保持足够的密度,从而有效提高原子核间的碰撞效率;最后是能约束足够长的时间以实现长脉冲稳态运行,获得持续的核聚变能。实现可控聚变约束有三种途径:重力约束、惯性约束和磁约束。其中,重力约束主要是靠强大的万有引力来提供对聚变燃料的约束力,无法在地球上实现,惯性约束难以实现持续的聚变功率输出,因此磁约束核聚变是实现聚变能开发的有效途径^[2]。

20世纪50年代,苏联科学家就提出了磁约束的概念,并建成了一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容容器装置,称为托卡马克(Tokamak),如图2所示。在托卡马克环形真空室周围,分布着若干个环向场(纵场)线圈、中心螺管(欧姆加热)线圈、极向场线圈等几类磁体,等离子体运行中磁体通入电流产生磁场,以激发和控制等离子体。

对于磁约束核聚变装置,磁场越高,约束越好,聚变功率与磁场强度的四次方成正比,要实现强磁场必须依赖于超导技术。超导体具有零电阻效应,且承载电流密度更高,未来聚变堆要向着紧凑型、长时间稳态核聚变能源方向发展,高场超导技术是

关键。

2. 托卡马克超导磁体

我国自20世纪90年代开始托卡马克研究,先后成功建成并运行合肥超环(HT-7)、中国环流器三号(HL-3)以及EAST等装置。2006年中国正式加入国际热核聚变实验堆(ITER)项目,如图3所示,由欧盟、美、俄、中、日等七方联合实施,是目前全世界规模最大、影响最深远的国际科技合作项目,如图4所示为ITER装置最重要的组成部分之一——超导磁体系统。超导磁体系统包括纵向场磁体(TF)、中心螺管磁体(CS)、极向场磁体(PF)和校正场磁体(CC)。纵向场线圈用以约束高温等离子体,极向场线圈保证等离子体电流正常稳定运行。对于ITER,其TF线圈最高场达到11.8 T,等离子体芯部最高场5.3 T,线圈最高运行电流68 kA。对于EAST,当16个TF线圈在3.8 K的工作温度和14.3 kA的工作电流下运行时,将在等离子体中心产生3.5 T的磁场,且其最高磁场可达5.8 T,其低温系统由中国科学院等离子体所自主设计建造,用于实现EAST装置中NbTi超导磁体的迫流冷却。国内外

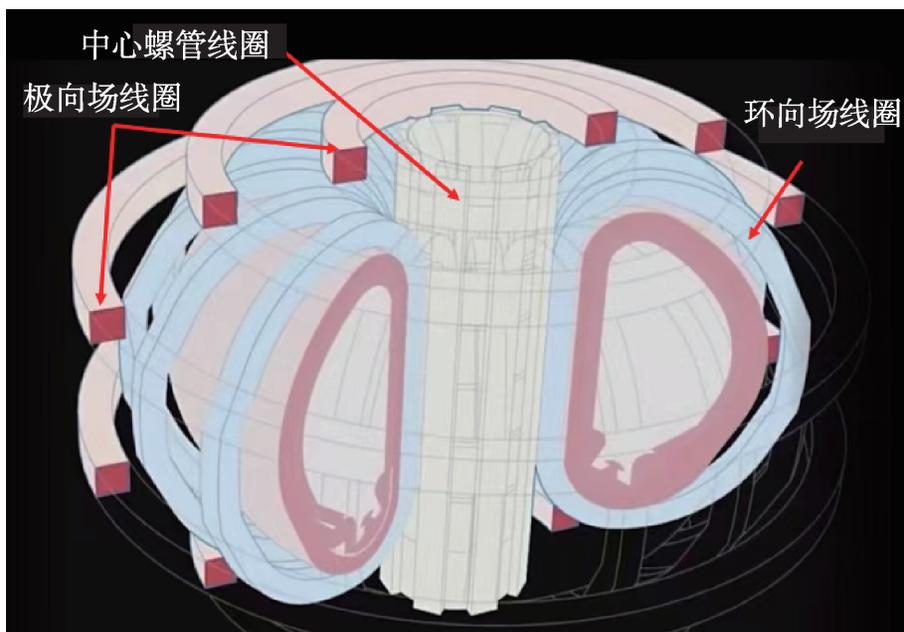


图2 托卡马克示意图

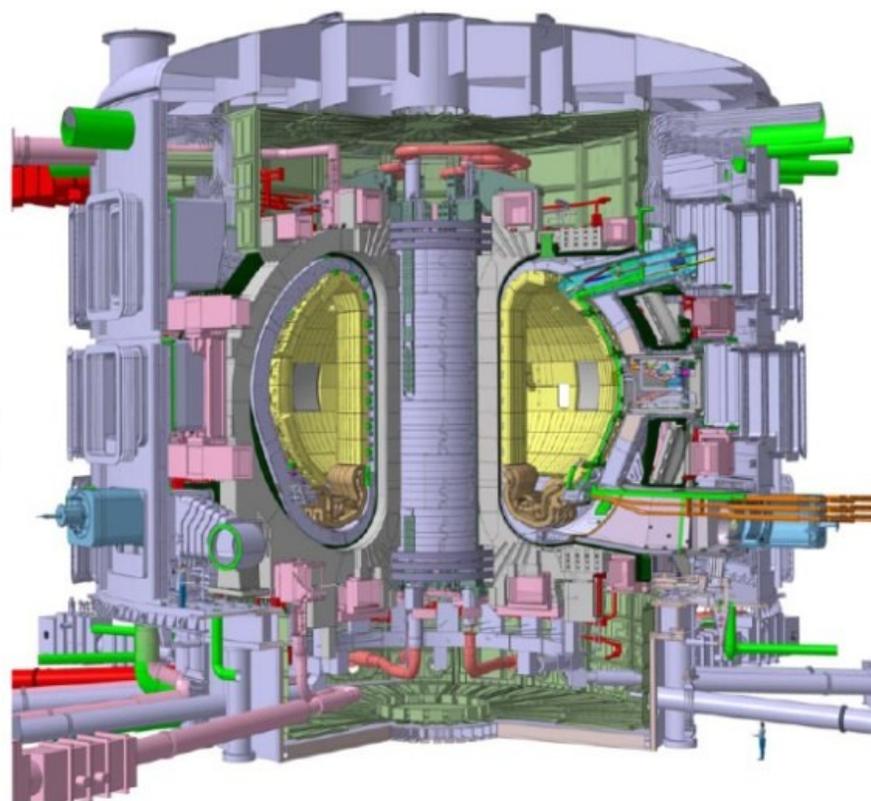


图3 国际热核聚变实验堆主机(ITER)

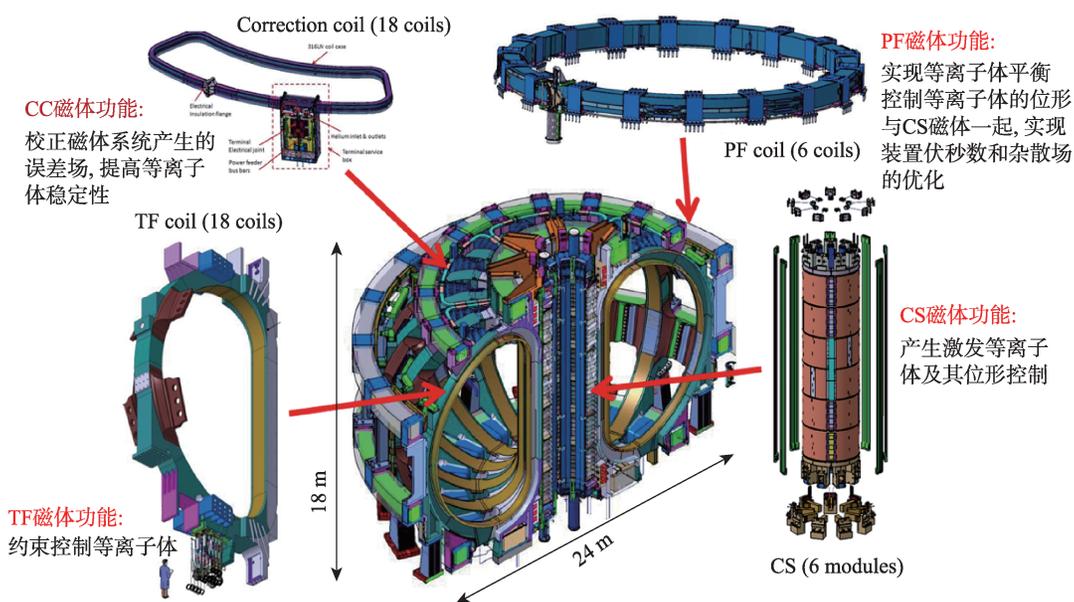


图4 ITER超导磁体系统图^[4]

著名托卡马克装置的磁场参数如表1所示。

托卡马克的大型超导磁体是实现兆安级、上亿度高温等离子体精准约束和稳定运行的核心系统。

超导线圈一般采用管内电缆导体(CICC)进行绕制,它具有良好的自支撑、较低的交流损耗、所需低温冷却介质少、运行安全可靠、性能高等特点,是目

表1 国内外著名托卡马克装置的磁场参数^[5-11]

磁体装置类型	名称	国家	大半径(m)	小半径(m)	磁场强度(T)	电流(MA)
常规磁体装置	JET	英国	2.96	1.25	3.5	5.0
	JT-60	日本	3.0	3.0	4.0	5.0
	TFTR	美国	2.65	1.1	5.1	2.5
	EAST	中国	1.85	0.4	3.5	1.0
	HL-3	中国	1.78	0.65	3	3
全超导磁体装置	KSTAR	韩国	1.8	0.5	3.5	2.0
	JT-60SA	日本&欧盟	2.967	1.18	2.25	5.5
	ITER	ITER IO	6.2	2.0	5.3	15

前国际上公认的受控热核聚变装置中的大型超导磁体、强磁场磁体等装置的首选导体结构。通常，CICC导体由超导电缆、不锈钢铠甲、冷却剂通道等组成，如图5所示。

核聚变的持续稳定进行必须依赖于高场强的超导磁体，聚变功率与场强的四次方成正比。目前聚变堆超导磁体应用最成熟的是低温超导体NbTi和Nb₃Sn。我国通过参加ITER计划，实现低温超导材料大规模制备从无到有，并实现了稳定的批量化生产。由国内自主研发的聚变用高性能Nb₃Sn超导材料已取得千米量级长度的突破，临界电流密度超过2500 A/mm²@(12 T, 4.2 K)。随着聚变装置的更新换代，未来聚变装置将对系统提出更高磁场强度和更高运行功率的物理设计目标。

传统低温超导材料因其低临界温度和低临界磁场，已经不能满足聚变装置对更高磁场的需求。高温超导材料，具有高临界温度、高临界磁场及高载流能力等独特优势，在高场磁体应用中具有不可替代的作用。世界各国已经纷纷开始了高温超导体在聚变堆超导磁体技术上的研发，积极验证高温

超导体应用于未来聚变堆的可行性。

3. 托卡马克高温超导磁体

高温超导磁体是指采用高温超导材料制造的磁体，聚焦的是高温超导材料在聚变堆磁体技术上的工程化应用。根据国际电工委员会(IEC)的定义，临界转变温度在25 K以下的超导材料称为低温超导材料，25 K以上的超导材料称为高温超导材料^[12]。现阶段具有实用化应用前景的高温超导材料主要有Bi-2212、Bi-2223、REBCO、MgB₂和铁基超导材料。前四种高温超导材料，它们的临界电流(T_c)分别约为85 K、110 K、92 K、39 K。铁基超导材料根据其内部晶体结构的不同可分为不同的体系，其中“1111”体系和“122”体系为当前研究较多的铁基超导体，其T_c分别约为55 K和38 K。由于高温超导材料各自的物理属性及其实用化进展程度的不同，目前业内主要围绕Bi-2212超导线材和REBCO超导带材来开展聚变堆高温超导磁体应用层面的研究。Bi-2212线材和REBCO带材实物图如图6所示。

Bi-2212线材加工工艺简单，易加工成圆线且对磁场表现各向同性，并且Bi-2212可以采用先绕制后反应(R&W)的工艺制备磁体。这些都表明Bi-2212超导磁体在制备时不仅可以避免产生残余应力，而且Bi-2212超导圆线适配CICC电缆绞缆工艺。因此，面向未来聚变堆高温超导磁体，Bi-2212超导材料的研究主要聚焦以多级子缆绞缆结构为基础的Bi-2212 CICC型导体及磁体制备技

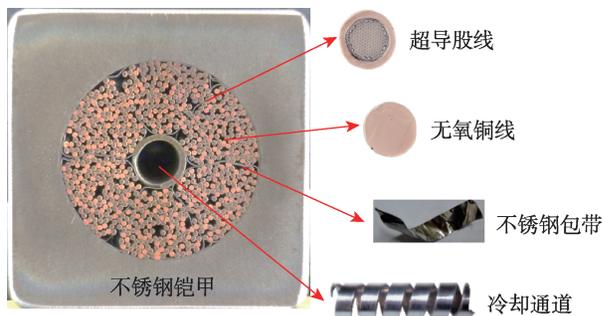


图5 CICC导体结构 (ITER CS)



图6 Bi-2212线材(a)和ReBCO带材(b)

术^[12-13],如图7所示。与Bi-2212圆线高温超导材料相比,REBCO超导体晶粒结合较弱,无法像Bi系超导材料那样产生取向高度一致的晶粒结构,其成材必须建立在薄膜外延生长技术上。因此,它对磁场表现各向异性,这也是它被称为涂层导体的原因^[12-13]。由于REBCO高温超导材料的各向异性,因

此未来聚变堆高温超导磁体面向REBCO超导体主要以堆叠与缠绕结构为主,如图8所示。

针对Bi-2212线材多级子缆绞缆结构的CICC型导体,中国科学院等离子体物理研究所自2020年以来与西北有色金属研究院合作,先后在Bi-2212电缆绞制、导体制造,热处理以及磁体绕制等方面

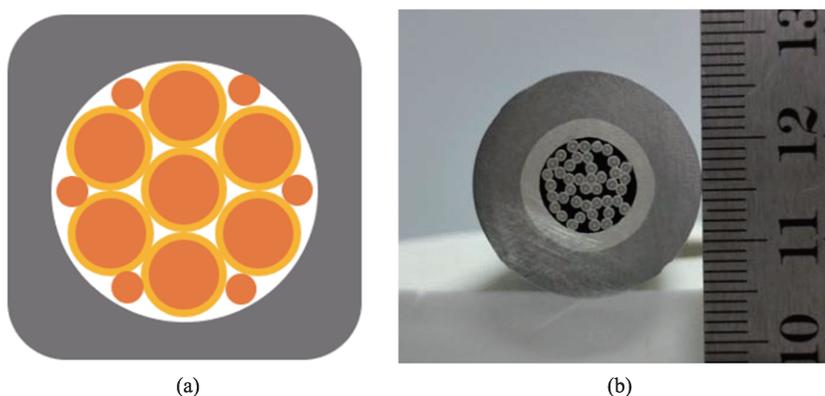


图7 Bi-2212多级子缆绞缆结构的CICC导体

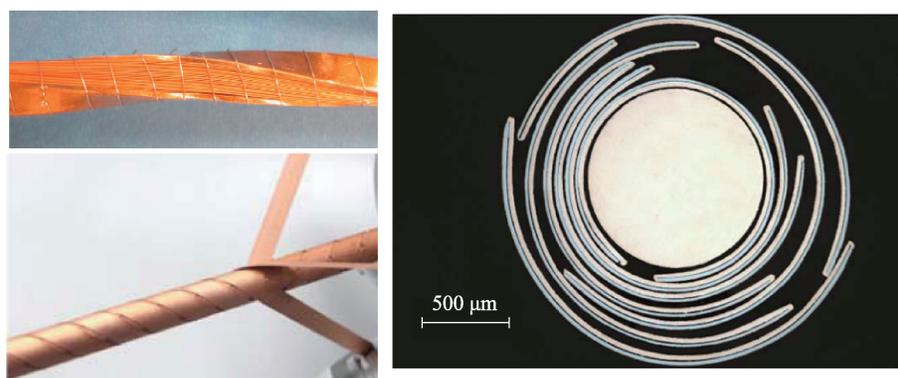


图8 堆叠型与缠绕型REBCO超导体示意^[14-16]

取得技术突破,并成功研制出世界上首个 Bi-2212 高温超导多级扭绞电缆, Bi-2212 CICC 高温超导体以及 Bi-2212 CICC 型高温超导高场内插磁体。2021 年 7 月,成功研制出首个 Bi-2212 三级扭绞高温超导电缆。该电缆由 84 根 Bi-2212 超导圆线组成,经液氦低温实验表明性能优异:4.2 K, 5.8 T 背场下,临界电流达到 35.7 KA,并且在随后的电磁循环测试实验中,电缆在 20 KA & 10 次电磁循环、25 KA & 10 次电磁循环以及 28 KA & 5 次电磁循环下,临界电流没有明显下降^[17]。2023 年 12 月,成功研制出首个 Bi-2212 CICC 型高温超导高场内插磁体,验证了电缆绞制、导体成型,磁体热处理等一系列新型关键核心技术在 Bi-2212 高温超导材料上应用的可行性。该内插磁体由 24 根 Bi-2212 超导线组成的三级缆 CICC 导体绕制而成,最大外径 150 mm,结构为 2 层共 7 匝。实验测试结果表明,临界电流在 4.2 K, 20 T 背景磁场下达到 5.1 KA,并产生 0.35 T 的中心自场。Bi-2212 CICC 型磁体的结构示意图和实物图如图 9 所示。

针对 REBCO 带材缠绕的特点,中国科学院等离子体所基于 CORC 结构,研制首个由 REBCO CICC 子缆绕制而成的 4 层共 25 匝高场内插线圈(结构示意图和实物图如图 10 所示)^[18],其中子缆为 CORC 型结构,内插线圈在 4.2 K 液氦温区,其临界电流约为 7.8 kA,在 10-18.5 T 的背场中,经历数次大电流循环后,没有明显的性能衰退。2023 年 7 月,成功研制出 REBCO HFRC 子电缆导体^[19],在 4.2 K

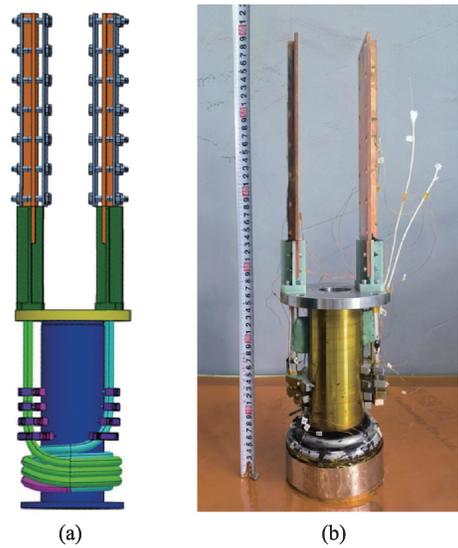


图 9 Bi-2212 CICC 型高温超导高场内插磁体
(a)结构示意图;(b)实物图

及 20T 背场下,其临界电流为 10.6 kA。

目前,除了中国的等离子体物理研究所(ASIPP)以外,国际上多个研究结构也同步开展了基于 REBCO 超导带材的 CICC 导体研制,比较具有代表性的有:美国麻省理工学院(MIT: Massachusetts Institute of Technology)与美国联邦聚变系统公司(CFS: Commonwealth Fusion Systems)、美国先进导体有限公司(ACT: Advanced Conductor Technologies)、瑞士等离子体中心(SPC: Swiss Plasma Center)、意大利国家新技术、能源和可持续经济发展署(ENEA: the National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development)。其中,美国 ACT 与欧洲 CERN 等基于缠绕型结构

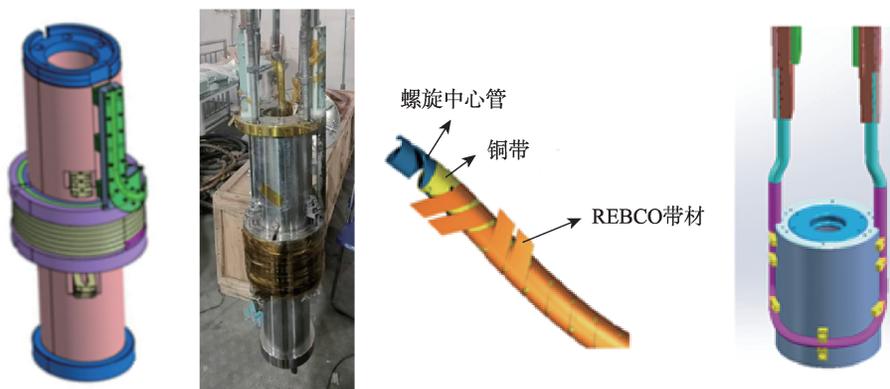


图 10 REBCO CICC 型高温超导高场内插磁体(左)及 REBCO HFRC 子缆导体(右)

研制 4.5 K, 10T 下能够载流 80 kA 的高温超导体 (图 11), 但由于单边样品的机械承载能力不足导致结构变形, 测试性能仅达到设计值的 30%~40%, 这也导致了另一样品没法在 45 K 以下温度进行测试^[20]; 美国 MIT 基于堆叠结构研制的导体样品 (图 11) 在 10.85 T 背景磁场强度下实现最高载流约 45.6 kA@10 K, 且其在最大电磁负载约 382 kN/m 的条件下, 经历 500 次电磁循环后, 临界载流特性出现约 3.4% 的退化^[21]; 瑞士 EPFL 同样采用堆叠结构研制 4.5 K, 12 T 下载流 60 kA 的高温超导体, 测试过程可加载最大加载电流为 50 kA (图 11), 此外, 在 1000 次电磁循环后, 载流性能出现约 3% 的退化^[22]。

现阶段, 学界除了在高温超导体及磁体实体研制方面进行了不同结构的探索, 此外针对未来高温超导磁体在可控磁约束核聚变反应堆中的应用模式, 提出了两种应用方案: 一种是全超导式, 另一种是内插式。

全超导式即聚变堆磁体全部为高温超导材料制造的超导磁体, 例如美国“SPARC”聚变装置, 其磁体系统的所有线圈将由高温超导材料 REBCO 制造, 其装置纵向截面图分别如图 12 所示。SPARC 为紧凑型高磁场托卡马克装置, 目前已完成工程设计, 未来建成将有望实现等离子体燃烧状态。此外, “SPARC”装置由美国麻省理工学院等离子体科学

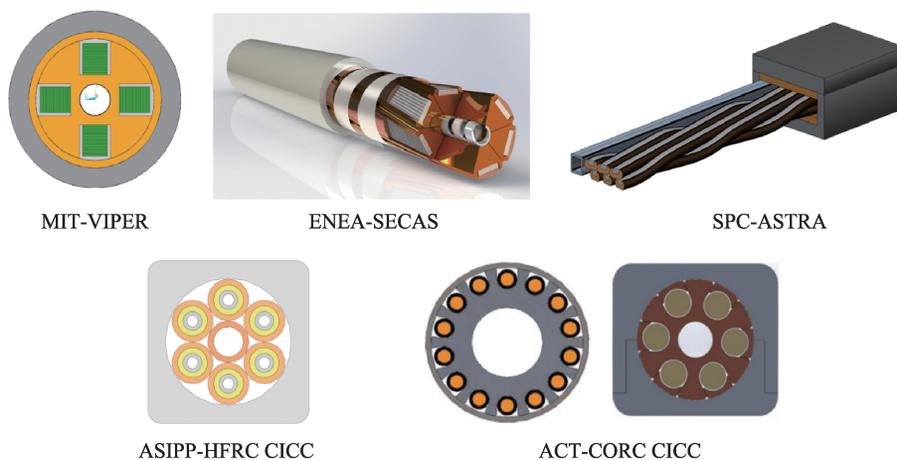


图 11 国际上已初步验证过的高温超导体结构

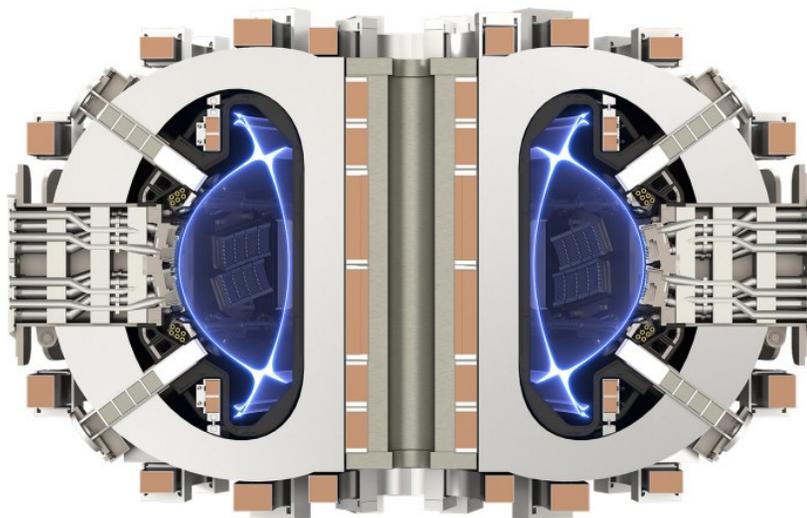


图 12 SPARC 装置纵向截面图^[23]

和聚变中心(MIT Plasma Science and Fusion Center, MIT PSFC)与 Commonwealth Fusion Systems (CFS)公司联合开发,并且CFS公司享有该聚变装置的所有商业版权。其环向磁场将达到12.2 T,大半径为1.85 m,小半径为0.57 m,额定运行电流为8.7 MA,额定总聚变功率为140 MW^[23-25]。早在2018年,CFS公司为了探索无绝缘大型REBCO超导磁体在聚变堆

磁体技术上的应用,并同步验证磁体的设计、制造及安装的全套技术路线,开始了环向场磁体模型线圈(Toroidal Field Model Coil, TFMC)的研制,如图13所示。至2021年,完成了该环向场模型线圈(TFMC)的设计、制造和测试。测试结果显示,当线圈运行电流达到40.5 KA时,线圈中心处产生的最大磁场超过20 T^[26]。模型线圈的主要参数如表2所示。

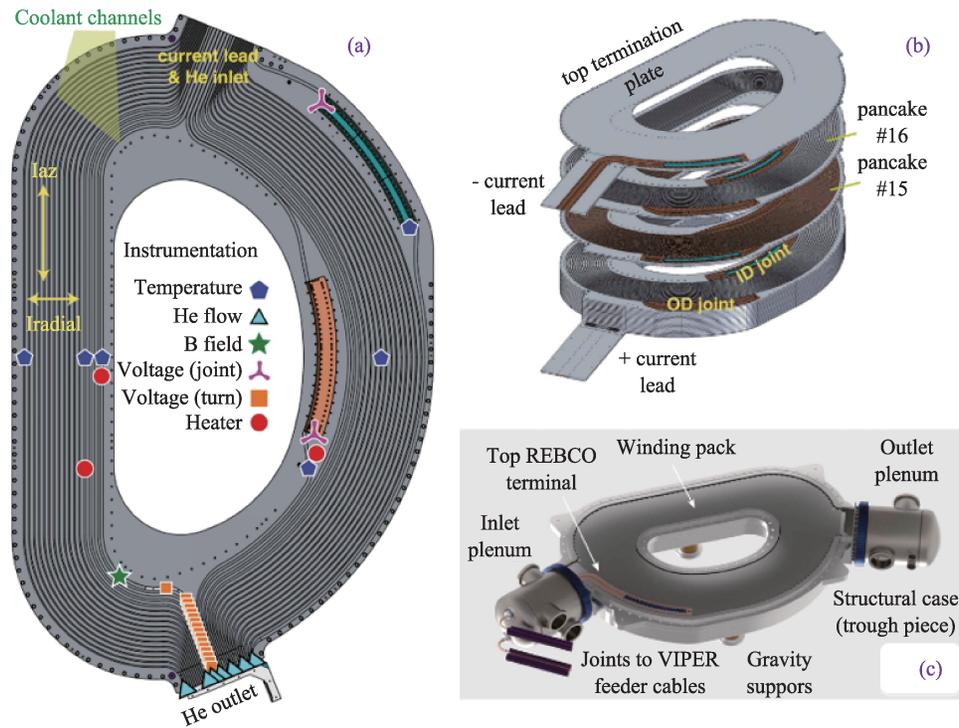


图13 (a) TFMC 测试原理图; (b) TFMC 部分三维结构显示图; (c) TFMC 总装测试图^[26]

表2 TFMC 主要参数^[26]

总重量	10058 kg
磁体总规模	2.9 m × 1.9 m
绕组重量	5311 kg
绕组电流密度	153 A/mm ²
层数	16
每层的匝数	256
REBCO带材总长度	270 km
冷却类型	超临界氦
最大冷却压力	25 bar
运行温度	20 K
最大磁场	20.3 T
最大电磁负载	822 Kn/m
磁场储能	110 MJ
REBCO带材堆叠类型	无绝缘、无扭绞

内插式高温超导磁体一般作为混合磁体的内线圈,即高温超导磁体内插在低温超导磁体内部,两种磁体混合运行,以便产生更高的中心场。例如,欧盟(EU)的DEMO装置中的CS磁体,用REBCO制造的高温超导磁体内插在用Nb₃Sn和NbTi制造的低温超导磁体的内部。整个CS磁体从里往外依次是RE-123高温超导磁体、Nb₃Sn低温超导磁体和NbTi低温超导磁体,三者分别处在磁场的高场区、中场区和低场区,磁体径向截面图如图14所示^[27]。此外,中国聚变工程实验堆(CFETR)是中国可控核聚变事业下一步重点发展的示范项目,旨在弥补ITER聚变实验堆和示范聚变动力堆

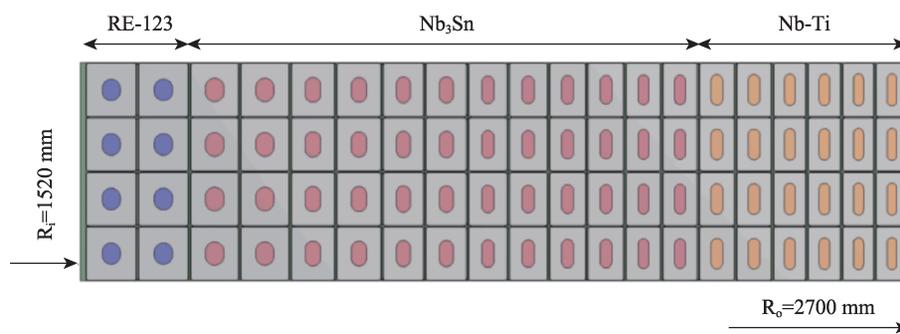


图 14 EU DEMO 装置中 CS 磁体 2#绕组经向截面分布图^[25]

(DEMO)之间的技术鸿沟^[28]。

CFETR 中 CS 磁体整体将采用内插式设计,即采用高温超导材料制造高场区线圈插在低温超导材料 Nb₃Sn 制造的中场区和低场区线圈的内部以便产生 20 T 以上的高磁场,其 CS 磁体系统如图 15 所示^[29-30]。

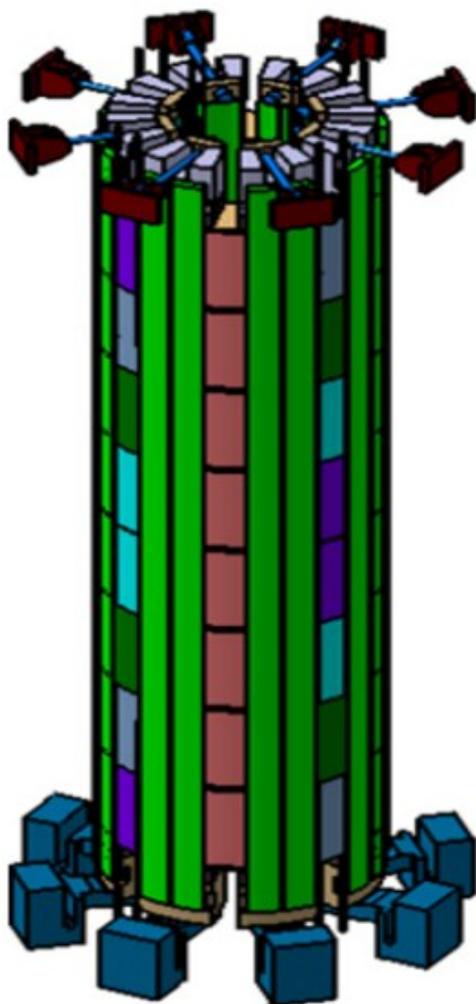


图 15 CFETR CS 磁体结构示意图^[29-30]

4. 总结与展望

未来聚变反应堆是真正意义上的稳态运行,这要求装置的磁体系统是全超导的。回眸过去,HT-7 装置和 EAST 装置的成功建造和运行,开辟了中国超导托卡马克研究的先河,为未来聚变堆发展提供物理研究和工程技术保障。放眼未来,中国聚变团队谋划了清晰的发展路线图,形成了以紧凑型聚变实验堆为基石,兼顾示范堆实验目标,进而到聚变电站相关问题研究的完整聚变路线。

可控核聚变正迎来一个新的时代,未来聚变堆向着紧凑型,超强磁场方向发展,对磁场强度提出了更高的要求,低温超导磁体难以满足应用需求,因此高温超导材料在聚变堆磁体技术上的应用将是大势所趋。紧凑型聚变堆对高温超导材料的巨量需求更将引发超导行业整体的爆发,高温超导领域正迎来难得的发展机遇。但是高温超导也是未来聚变路线发展最主要的技术瓶颈,仍存在较多应用技术难题需要攻克。

参考文献

- [1] 李建刚,我国超导托卡马克的现状与发展[J]. 中国科学院院刊, 2007, (5):404-410.
- [2] 万宝年,我国磁约束聚变研究进展和展望[J]. 中国科学基金, 2008, 22(1):1-7.
- [3] 王腾,超导磁体技术与磁约束核聚变[J]. 南方能源建设 2022, 9 (4):108.
- [4] 冯开明,可控核聚变与国际热核实验堆(ITER)计划[J], 中国核电, 2009, 2(3):212-219.
- [5] F. Sartori, G. de Tommasi and F. Piccolo. The Joint European To-

- rus. IEEE Control Systems Magazine, vol.26, no.2, pp.64-78, 2006.
- [6] H. Kishimoto, S. Ishida¹, M. Kikuchi¹ and H. Ninomiya, "Advanced tokamak research on JT-60," Nuclear Fusion, vol.45, no.8.
- [7] McGuire, K.M., Adler, H., Alling, P., Ancher, C., Anderson, H., Anderson, J. L., Anderson, J. W., Arunasalam, V., Ascione, G., Ashcroft, D. and Barnes, C.W., "Review of deuterium-tritium results from the Tokamak Fusion Test Reactor," Physics of Plasmas, 2(6), pp.2176-2188, doi: 10.1063/1.871303.
- [8] Chen, W., Pan, Y., Chen, Z. and Wei, J., "The design and the manufacturing process of the superconducting toroidal field magnet system for EAST device," Fusion engineering and design, 83(1), pp.45-49, doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.05.042.
- [9] Kim, K., Park, H.K., Park, K.R., Lim, B.S., Lee, S.I., Chu, Y., Chung, W.H., Oh, Y.K., Baek, S.H., Lee, S.J. and Yonekawa, H., "Status of the KSTAR superconducting magnet system development," Nuclear Fusion, 45(8), pp. 783, doi: 10.1088/0029-5515/45/8/003.
- [10] Holtkamp, N. and ITER Project Team, "An overview of the ITER project," Fusion Engineering and Design, 82(5-14), pp. 427-434, doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.029.
- [11] 胡毅, 曹曾, 曹诚志, 等. 中国环流三号多发破弹丸注入器初步工程设计[J]. 真空与低温, 2024, 30(3):295-301.
- [12] 马衍伟, 超导材料科学与技术[M]. 科学出版社, 2022.
- [13] 王乃舟, 石孟竹, 雷彬, 等. FeSe基超导体的探索与物性研究[J]. 物理学报, 2018, 67(20):7.
- [14] Kar, Soumen, *et al.* "Optimum Copper Stabilizer Thickness for Symmetric Tape Round (STAR) REBCO Wires With Superior Mechanical Properties for Accelerator Magnet Applications." IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2019):1-1.
- [15] Laan, D C Van Der, J. D. Weiss, and D. M. Merae. "Status of CORC cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction." Superconductor Science and Technology (2019).
- [16] Fietz W H, Wolf M J, Preuss A, *et al.* High-Current HTS Cables: Status and Actual Development[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1-5. DOI:10.1109/TASC.2016.2517319.
- [17] Yang, Dong sheng, *et al.* "Performance of first Bi-2212 cable with pre-over pressure and over pressure heat treatment." Superconductor Science and Technology 35.1(2022):015007-.
- [18] Chao Z., *et al.* "Performance of first insert coil with REBCO CICC sub-size cable exceeding 6 kA at 21 T magnetic field." Superconductor Science and Technology 35.11 (2022): 114003.
- [19] Huan J., *et al.* "Performance test of REBCO CICC sub-cables with 10 kA current under 20 T background field." Superconductor Science and Technology 36.12 (2023): 12LT01.
- [20] Mulder, Tim, *et al.* "Recent Progress in the Development of CORC Cable-In-Conduit Conductors." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30.4(2020):1-1.
- [21] Hartwig, Zachary S, *et al.* "VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable." Superconductor Science and Technology.
- [22] Uglietti, D., *et al.* "Test of 60 kA coated conductor cable prototypes for fusion magnets." Superconductor ence and Technology 28.12(2015):124005.
- [23] Luo, X., Chen, X. "Crystal structure and phase diagrams of iron-based superconductors". Sci. China Mater. 58, 77-89 (2015).
- [24] A. J. Creely, D. Brunner, R. T. Mumgaard, M. L. Reinke, M. Segal, B. N. Sorbom, M. J. Greenwald. SPARC as a platform to advance tokamak science. Phys. Plasmas 1 September 2023; 30 (9): 090601.
- [25] Rodriguez-Fernandez P, Creely A J, Greenwald M J, *et al.* "Overview of the SPARC physics basis towards the exploration of burning-plasma regimes in high-field, compact tokamaks" [J]. Nuclear Fusion, 2022, 62(4):042003.
- [26] D. G. Whyte *et al.*, "Experimental Assessment and Model Validation of the SPARC Toroidal Field Model Coil," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 2, pp. 1-18, March 2024, Art no. 0600218.
- [27] A V C, B C V, C K S, *et al.* "The DEMO magnet system - Status and future challenges", 2021.
- [28] Yuanxi Wan *et al.* "Overview of the present progress and activities on the CFETR." Nucl. Fusion, 2017, 57 102009.
- [29] Yuntao Song *et al.* Engineering design of the CFETR machine. Fusion Engineering and Design, Volume 183, 2022, 113247.
- [30] G. Zhuang *et al.* Progress of the CFETR design. Nucl. Fusion, 2019, 59: 112010.