中国ITER计划采购包进展

罗德隆¹, 宋云涛^{2*}, 段旭如³, 房同珍¹, 何开辉¹, 黄素贞², 傅鹏², 武玉², 陆坤², 卫靖², 杨青巍³, 钟光武³, 赵君煜², 胡立群², 谌继明³, 李鹏远³, 李波³, 王英翹³, 沈光²

1. 中国国际核聚变能源计划执行中心, 北京 100084;

2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

3. 核工业西南物理研究院, 成都 610225

*联系人, E-mail: songyt@ipp.ac.cn

收稿日期: 2018-08-14; 接受日期: 2018-10-09; 网络出版日期: 2019-03-07

摘要 国际热核聚变实验堆(ITER)计划, 是我国以平等、全权伙伴身份参加的迄今为止规模最大的国际科技合作项目. 它的实施结果将决定人类能否迅速地、大规模地使用资源丰富且无污染的聚变能, 并从根本上解决未来能源问题. 本文简要介绍了中国参与ITER计划的主要背景和总体情况, 并概述了中国ITER采购包的执行成果, 展示了中国的聚变实力, 并为中国聚变工程实验堆(CFETR)奠定了丰富的科学与技术基础.

关键词 ITER, 磁约束核聚变, 采购包

PACS: 07.55.Db, 28.52.-s, 52.55.Fa, 84.71.Ba

1 引言

能源短缺和环境污染是限制人类社会进步和经济发展的两大主要问题. 作为持续高速发展的世界中大国, 能源问题已成为制约我国经济社会可持续发展的瓶颈. 燃料资源丰富、清洁无污染的核聚变能源是改善未来能源结构, 彻底解决能源问题的根本出路之一^[1-4]. 为实现聚变能源利用的商业化, 共同攻克技术难关, 包括中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯及美国七方正开展为期35年, 投资超过100亿欧元的国际合作项目——国际热核聚变实验堆计划(“ITER”计划)^[5,6]. 中国于2003年正式加入ITER谈判, 2007年正式加入ITER计划, 2008年全面开展ITER计划采购包执

行工作^[7].

中国参加ITER计划将全面介入ITER装置的设计、建造、运行和实验以及装置的去活化和退役全过程, 在整个国际合作执行期间, 将与其他六方共享ITER产生的全部知识产权. 中国在ITER计划建设中的投入占总额的9.1%, 其中约80%以实物贡献方式(即制造、提供ITER装置部件)投入, 其余约20%以现金方式投入. 中国共承担了14个采购包制造任务(即实物贡献), 于2008年6月签署了第一个ITER计划采购安排协议, 其后陆续签署了涉及ITER导体、电源、磁体支撑、诊断、包层等多个系统的采购安排协议^[8,9], 如图1所示. 国内采购包主要承担单位是中国科学院等离子体物理研究所(Institute of Plasma Physics, Chinese

引用格式: 罗德隆, 宋云涛, 段旭如, 等. 中国ITER计划采购包进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 045203

Luo D L, Song Y T, Duan X R, et al. Progress of ITER procurement in China (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 045203, doi: 10.1360/SSPMA2018-00285

图 1 (网络版彩图)我国ITER计划采购包承担情况^[9]

Figure 1 (Color online) ITER procurement packages undertake by China [9].

Academy of Sciences, ASIPP)和核工业西南物理研究院(Southwestern Institute of Physics, SWIP), 如表1所示.

中国承担的采购包技术从总体结构上看, 覆盖了托卡马克装置大部分重要部件, 如大型超导磁体系统、大规模电源系统、包层和第一壁系统、诊断系统等, 这些技术都是ITER和今后聚变反应堆的关键技术, 通过对这些技术的突破, 可以使我国独立开发聚变能源堆的能力实现跨越式发展^[5].

2 ITER计划的执行进展

中国承担的14个ITER采购包其中一部分是照图加工(Built to Print, BP)任务, 即由ITER国际组提供详细工程设计图纸, 采购包承担单位按时保质完成制造任务并负责运输到指定地点, 如磁体系统的超导导体采购包; 另一部分是ITER国际组提供功能指标(Functional Specification, FS), 采购包承担单位提供详细设计经批准后并完成制造任务, 如气体注入系统和辉光放电清洗系统(Gas Injection System and Glow Discharge Cleaning System, GIS&GDC)、诊断、磁体线圈电源等采购包.

超导导体(TF, PF, Feeder&CC conductors)、校正场线圈(Correction Coil)、电源系统(AC/DC Converters及PPEN)、磁体馈线(Feeder)、诊断系统采购包中径向X射线相机(Radial X-ray Camera, RXC)和12号赤道

窗口集成(Port Integration, PI)由ASIPP承担; 包层第一壁(First Wall, FW)、包层屏蔽模块(Shield Block, SB)、磁体支撑系统(Magnet Supports, MS)、GIS&GDC、诊断采购包中中子通量监测器(Neutron Flux Monitors, NFM)、朗缪尔探针(Divertor Langmuir Probes, DLP), 由SWIP承担.

此外, 凭借具有大型超导磁体的建造经验以及质量进度优势, ASIPP通过国际竞标还承接了原欧盟F4E承担的PF6线圈制造任务.

2.1 超导体采购包

铠装超导体以其大电流、自支撑结构、迫流冷却、良好绝缘等特点应用于磁约束核聚变, 大型铠装超导体是实现大型磁体技术的唯一选择. ITER磁体系统由18个纵场线圈(Toroidal Field, TF)、6个中心螺管线圈(Central Solenoid, CS)、6个极向场线圈(PF)以及18个校正场线圈(CC)组成.

中国承担的导体采购包任务包括: 11根TF导体及2根工艺认证导体的生产, 占TF全部导体的7.5%; 44根PF2/3/4导体和16根PF5导体, 以及4根工艺认证导体的生产, 约占PF全部导体的65%; CC导体和馈线系统(Feeder)导体23根, 以及6根工艺认证导体. 超导导体截面图见图2^[10]所示.

在国际尚无完善的大型铠装超导体技术的情况下, 我国攻克了多个大型铠装超导体关键技术难题.

表 1 ITER计划中国采购包一览表

Table 1 The list of ITER Procurement packages in China

采购包名称	与国际组签署协议时间	国内承担单位
环向场线圈导体(TF: Toroidal Field coil conductors)	2008.6	ASIPP
极向场线圈导体(PF: Poloidal Field coil conductors)	2010.10	ASIPP
磁体支撑系统(Magnet Supports)	2010.5	SWIP
校正场线圈(CC: Correction Coils)	2010.5	ASIPP
磁体馈线与校正场线圈导体(Feeder&CC conductors)	2010.5	ASIPP
磁体馈线系统(Feeders)	2011.1	ASIPP
包层第一壁(FW: First Wall)	2016.11	SWIP
包层屏蔽模块(Blanket Shield Block)	2013.11	SWIP
气体注入系统(GIS: Gas Injection system)	2012.2	SWIP
辉光放电清洗系统(GDC: Glow Discharge Cleaning)	2013.12	SWIP
脉冲(负荷)高压变电站设备 (PPEN: Pulsed Power Electrical Network)	2012.6	ASIPP
交直流功率变流器(AC/DC Converters)	2011.4	ASIPP
诊断系统(Diagnostic System)	2013.5/2014.7	SWIP+ASIPP

图 2 (网络版彩图)中国承担的ITER超导体截面图^[10]Figure 2 (Color online) Cross-sectional views of ITER conductors manufactured by China ^[10].

(1) 自主创建了多场(磁场、应力场及温度场)耦合条件下超导材料性能实验系统, 解决了超导材料测试的国际化问题^[11],

(2) 发明了微张力自动控制与非圆截面多级紧压成型相结合的超导电缆全退扭绞制新技术, 解决了超导电缆由多重介质、多层级螺旋、不规则结构引起的股线损伤、三维异向弯曲变形等技术难题^[12,13], 实现

了超导电缆国产化生产;

(3) 发展了梯度加热多级润滑热挤压和全氢保护快冷光亮热处理工艺, 解决了ITER磁体热处理工艺引起的材料晶粒分布不均和晶间腐蚀技术难点;

(4) 提出多阵列、64位全方位扫描的超声相控阵与内涡流相结合的异性铠甲无损检测方法, 并成功完成异形钢管的工业化无损检测^[14],

(5) 建成了国内唯一、国际最长的穿管线, 构建了全方位自动监控调节为一体的大长度、大尺寸、高精度导体收绕系统, 实现了导体的产业化生产^[15,16].

2015年12月, ITER TF导体采购包完成全部产品的交付, 成为中国首个完成的采购包. 截至2018年5月, 中国已成功交付ITER国际组89根合格导体, 见图3. ITER导体生产已完全实现了100%国产化, 中国也成为ITER合作七方成员中唯一一方所有试验样品全部一次性通过严苛的Sultan验证, 且产品性能优异的国家.

2.2 电源采购包

ITER磁体电源是世界上最大的非常规电源系统, 占地大约70万平方米, 是最复杂的大型电源系统之一. 其中交直流变流系统具有世界上最大的变流系统(4600 MVA)以及电压最高的SVC无功补偿系统(66 kV/750 MVar)^[17,18], 是我国承接的最大的, 也是需

图 3 (网络版彩图)ITER PF 910 m导体
Figure 3 (Color online) ITER PF conductor (910 m).

要自主完成设备设计、生产、测试和集成的采购包。

2.2.1 AC/DC Converters采购包

集成多单元串联、并联、反并联、外旁通等技术,提出了新的电源设计方案,该方案取代了ITER原专家组设计,成为了ITER电源设计新基准,实现各组电源所需大电流(数万安培)、高电压(数十千伏)的输出和动态运行,解决了现代聚变电源的设备研制难题;同时也为大功率聚变电源解决电网准入和负载兼容等问题提供了可能^[19,20]。

创建了数十个强耦合线圈及等离子体的多变量解耦反馈控制模型;基于串联顺序控制方式下的系统无功最小化模型、无功提前预测模型;四象限有环流运行变流系统模型等,研发了新型聚变电源控制系统,解决了巨大的脉冲无功对电网的冲击以及动态电源系统运行、电网接入、负载兼容等问题^[21]。

针对大功率变流单元多物理场耦合设计问题,建立了多耦合场分析方法,首次提出了结构一体化设计的非同相逆并联四象限变流器方案,建立了其电磁、热、力多物理场耦合模型,创建了多耦合场分析方法,从集总和分散参数两个层面揭示了电磁耦合的规律,解决了大电流变化磁场引起涡流损耗、集肤效应等诸多问题,完成了聚变电源变流装置的研发。

建立了国内最大功率的直流测试平台及短路及稳态测试平台(图4),并通过中国合格评定国家认可委员

图 4 (网络版彩图)变流器集成测试平台
Figure 4 (Color online) ITER PF converter integration test site.

会检测和校准实验室认可,检测中心出具的15项认可项目的检测报告,得到包括法国、德国、意大利、英国、日本、美国等国家在内的35个国家和地区的认可。

目前,中国已完成11套变流器设备的生产制造及集成测试,第一批5套设备已于2018年5月向ITER现场发运。

2.2.2 PPEN采购包

PPEN是ITER所有脉冲功率的核心配电,其功能是在ITER装置不同的运行模式下,供给40路各类超导磁体功率电源及60路各类辅助加热系统功率电源并提供相应的控制和保护,供电总功率达到900 MVA,最大脉冲周期3600 s^[22]。中国需向ITER国际组提供总价值约3—4亿元的电力电气电子等设备和现场技术支持与服务。

截至2018年5月,700多种设备和材料已陆续全部抵达ITER现场,通过所有的现场交付查验并全部顺利通过ITER国际组的认可,由欧盟方在2017年至2020年全面展开安装和调试,见图5。

中方通过该采购包执行将我国特种脉冲高功率配电变压器、大尺寸电气舱、特种开关技术等设备和集成的制造和试验水平提升了一个新台阶。

2.3 超导磁体馈线(Feeder)采购包

超导磁体馈线系统为装置主机超导磁体供给零下269°C的超导临界氦,并从室温电源向零下269°C超导磁体传输超大电流,是聚变实验装置的“生命线”。ITER超导磁体馈线系统100%由中国设计和制造,是中国承担的以加工、测试为主的最复杂的ITER采购

图 5 (网络版彩图)PPEN开关设备安装现场

Figure 5 (Color online) PPEN switchgear installation site.

图 6 (网络版彩图)超导馈线系统总体图

Figure 6 (Color online) ITER Feeder system.

包, 其界面众多、结构复杂, 共31套不同功能的超导馈线, 约6万个零部件, 总重约1600 t, 如图6所示为超导磁体馈线系统结构总体图。

中国承担该采购包期间, 在高温超导电流引线、低温绝热、低温高压绝缘等核心技术方面取得了诸多创新成果:

(1) 创新性地提出了新型高温超导电流引线的设计方法, 替代了由日本主导的ITER原常规铜电流引线的设计. 研发的68 kA高温超导电流引线最大运行电流达到90 kA, 该成果被ITER国际组评为2008年度ITER五大进展之一^[23].

(2) 创新了高载流下热平衡的方法, 解决了最优冷却流量下保持低流阻和高失冷的安全难题。

(3) 自主研制叠片式换热技术, 效率近99%, 盒式超导接头性能优于ITER要求的2 nΩ。

(4) 首次提出二元分流器的技术, 解决了大型磁体在失超分流时能量转移时间参数器要求^[24]。

2017年10月, ITER首个超导磁体系统部件——PF4过渡馈线成功运送至法国ITER现场, 如图7所示. 目前采购包认证工作已完成99%, 处于批量生产阶段。

2.4 校正场线圈(CC)采购包

ITER校正场线圈100%由我国制造, 覆盖了从超导材料和磁体制造的所有工序. ITER校正场线圈分别位于装置的顶部、侧部和底部, 共18个. 其中顶、底部线圈拥有共同的形态成60°扇形, 横跨3个纵场线圈, 整体尺寸约2.5 m×7 m. 侧部线圈布置在径向占位36.195°, 横跨2个纵场线圈, 成三维拱形, 外形尺寸约7 m×7.22 m^[25,26]. 如图8所示为ITER校正场线圈结构图。

图 7 (网络版彩图)PF4过渡馈线运送至法国ITER现场

Figure 7 (Color online) PF4 CFT delivered to ITER site.

中国通过承担校正场线圈制造任务, 自主研发了大型非圆截面无张力超导磁体绕制生产线, 开创了三维曲面高精度绕制成型技术; 开发了绕制过程中用自动包绕机缠绕由玻璃纤维带和聚酰亚胺带叠包的复合绝缘材料技术, 在ITER所有磁体中首个通过绝缘工艺的认证^[27]; 首次将超高功率激光焊接技术运用于大型三维形态的316LN特种不锈钢盒体的焊接, 并且建成目前国内工程应用领域最大功率——20 kW激光焊接系统, 大幅度提高工作效率. 中国大型超导磁体的建造水平由此得到了重大提升。

目前, 校正场线圈采购包已全面进入批量生产阶段, 在严格的质量管控下, 所有工序均按照已经审核通过的工艺流程有序进行, 满足ITER国际组的进度和质量要求。

2.5 诊断采购包

ITER诊断采购包属于功能性包(FS), 除具体物项

图 8 (网络版彩图)ITER校正场线圈总体图
Figure 8 (Color online) Overview of ITER Correction coils.

外, 承担方还需提供各项诊断的详细设计方案. 中国承担了四项子任务, 其中, PI和RXC任务由ASIPP承担, NFM和DLP由SWIP承担.

作为诊断窗口集成的PI采购包, 中国负责对氢阿尔法及可见光谱系统、可见与红外宽角度观察系统、径向视场下的软X射线相机、硬X射线监视器、辉光放电系统、相干汤姆逊散射系统以上6个系统的集成设计工作, 图9所示为水平诊断窗口总体分布图, 目前已完成了基本概念设计^[28].

径向X射线相机系统(RXC)是安装在第12号赤道面窗口插件的中间模块, 主要用作高时空分辨率地测量完整极向剖面的X射线辐射及其分布. RXC采购包是首批完成初步设计评审的诊断采购包, 目前已经完成了相机机械结构、电子学、采集于控制系统的设计, 处于最终设计阶段. 并且通过创新发展碳化硼火花与线切割相结合的加工工艺, 加工出低粗糙度任意形状的板材和孔洞, 从而提高了ITER部件的核屏蔽效率(填充率)^[29,30].

NFM拟安装于ITER装置4个位置: 赤道面1号、7号、8号和17号窗口, 包括探测器和电子学控制及数据采集部分, 用以测量ITER聚变中子的通量. 其中7号支撑结构已完成最终设计评审; 支撑结构模拟件已完成制造, 开展了探测器安装和拆卸实验, 正在进行探测器和电子学的最终设计^[31].

DLP拟安装于ITER装置2号、10号、14号扇段偏滤器位置, 包括单探针和三探针, 总数多达数百个, 包括探针体、电源、电子学控制及数据采集部分, 对探针的材料、结构、支撑、导热等要求极高, 考虑到维

图 9 (网络版彩图)ITER水平诊断窗口总体分布
Figure 9 (Color online) Distribution of ITER equatorial diagnostic port.

护和运行需求, 对探针电子学要求也很高. 目前已开展探针热工分析和评估, 迭代重新设计探针结构和与偏滤器连接接口, 进行了钨管铸铜工艺试验用以改善热导性能, 电子学及其接口的研发正在推进^[31].

2.6 包层第一壁(FW)采购包

包层第一壁(FW)是聚变反应堆的核心部件, 将直接面对上亿度高温等离子体, 起到屏蔽高热负荷从而保护反应容器的重要作用. 中国于2004年开始ITER第一壁板设计研发工作, 于2010和2011年与ITER其他参与方同步实现第一壁材料连接技术和材料国际认证, 结束了我国无高纯真空热压铍的历史, 打破了世界上少数国家对该产品的垄断和对我国出口的限制.

中国承担10%的第一壁设计研发与制造任务, 全部为该类型的增强热负荷第一壁部件. 在无过往经验可循的情况下, 研究人员大胆尝试, 取得了一系列创新突破, 部分核心技术达到国际先进水平^[32].

(1) 创新设计超级蒸发器冷却通道, 使第一壁的高热负荷疲劳寿命提高1个数量级以上, 被俄罗斯推广应用到ITER偏滤器部件上.

(2) 发明无飞溅激光焊接技术, 解决了ITER第一壁不锈钢冷却水道激光焊缝的背面成型与飞溅问题, 实现无飞溅控制, 达到ITER要求.

(3) 发展异种材料连接界面的超声波无损探伤技术, 发明缺陷修复技术, 解决了ITER级CuCrZr/316L材料爆炸焊复合板的质量控制难题.

(4) 优化第一壁铠甲与热沉材料的热等静压扩散连接技术, 发明防粘隔离和应力缓释技术, 显著提升第一壁半原型部件全尺寸高热负荷手指单元的成品率, 实现从无到90%的跨越.

2016年8月, 由SWIP研制的增强热负荷第一壁半原型全尺寸手指对部件在国际上率先通过了ITER国际组的认证(图10), 成功经受住了满负载及过载试验

图 10 (网络版彩图)增强热负荷第一壁中子辐照模块(a)、评估模块(b)、手指对(c)和半原型(d)的实物照片

Figure 10 (Color online) Enhanced heat flux (EHF) components of (a) irradiation mock-up, (b) evaluation mock-up, (c) finger pair, (d) semi-prototype.

运行下无破坏的高热负荷疲劳试验的考验,标志着中国在规模化制作ITER第一壁板的关键技术已成熟^[33].

生产制造ITER第一壁板的多台核心设备已建成投产. 包括世界上首台ITER第一壁高温高压热氢检漏装置, 实现本底漏率远优于ITER指标要求, 成功解决了世界级难题, 带动了国内真空行业相关技术的发展. 建成了国内唯一的400 kW电子束高热负荷试验装置等, 进一步增强了中国承接ITER第一壁生产制造任务的能力, 同时也为中国今后自主研发核聚变反应堆第一壁、产氦包层和偏滤器等关键部件打下了坚实的基础.

2.7 包层屏蔽模块(SB)采购包

屏蔽模块是ITER包层系统的一部分, 主要功能是提供核屏蔽, 支撑第一壁板以及为第一壁板供应冷却水, 其设计制造涉及未来聚变堆建造所需的热工水力学、中子屏蔽和焊接等关键技术. 目前, 中国已率先完成ITER包层屏蔽模块全尺寸原型件的认证和制造(图11), 并于2018年2月完成了屏蔽模块全尺寸原型件

图 11 (网络版彩图)全尺寸屏蔽包层模块认证件

Figure 11 (Color online) Full scale prototype for ITER Blanket Shield Block.

的高温氢检漏测试^[34], 这将为屏蔽模块系列生产及未来大型磁约束核聚变装置真空件的高温检漏标准积累丰富的经验.

2.8 磁体支撑系统采购包

ITER磁体支撑系统(MS)由3个子系统构成, 即18个TF线圈支撑、6套PF线圈共90组支撑、18个CC线圈支撑^[3]. MS将承载100 MW的磁体系统的重量, 同时还要承受系统冷却时产生的强热应力、正常放电运行时产生的强电磁力等复杂工况. 中国承担了100% MS建造任务.

MS关键工艺技术之一是TF支撑座的制造, ITER制造工艺原设计为真空束焊接, 在国内外并无经验可循. 通过充分调研、设计分析和工艺实验, SWIP成功完成了TF线圈支撑结构的设计与制造工艺, 实现了高精度复杂形状的大型特殊支撑构件的试制, 开展磁体支撑部件的产品制造, 首套GS, PFCS, CCS已经完成生产^[35], 如图12所示首套GS及PFCS已完成交付.

2.9 气体注入系统(GIS)采购包

ITER GIS系统是送气系统, 即气体注入系统, 主要由气体分配系统、气体加料系统和聚变功率关闭系统三部分构成. 气体注入系统采购包提供的物项主要包括: 气体分配系统中的气体加料汇集管路、汇集管路和阀门箱; 气体加料系统中的加料阀门箱及其注入管线(包括真空穿透); 聚变功率关闭系统的阀门箱和专用注入线(包括真空穿透); 一套GIS控制系统等. 气体注入系统的主要功能是为ITER装置氘氚聚变等离子体的运行、维持、控制和壁处理提供所需燃料气体和

图 12 (网络版彩图)首套GS、PFCS产品

Figure 12 (Color online) The first set of GS and PFCS.

杂质气体,并为加热和诊断中性束、弹丸加料系统、破裂缓解系统提供所需的燃料气体和杂质气体;聚变功率关闭系统的功能是在事故工况下(如Loss of Coolant Accident (LOCA))提供ITER装置的安全关堆。

中国目前已解决了控制器件的可控制性问题,同时在深入研究分析的基础上,提出更改ITER基准设计文档并得到了ITER国际组织的认可,GIS管道系统的最终设计评审已获批准,预备开展系统的建造^[31]。

2.10 辉光放电清洗系统(GDC)采购包

ITER GDC系统是辉光放电对真空室内壁进行清洗的系统,主要用于清洗吸附在器壁上的杂质、氢类燃料气体和氧。GDC系统由中国提供以下物项:6套辉光放电电极、6套冷却回路、6套直流电源和1套程序控制系统。该系统处于真空室内,结构非常复杂,并且在不同的运行工况下,电极面临复杂的载荷,丢保护、传动、维护等要求苛刻。

目前GDC处于初步设计阶段,其中已完成临时电极的穿透结构单层真空设计偏离申请,并获ITER国际组织批准^[31];开展并完成了临时电极的穿透结构设计。GDC系统的研发正有序推进。

3 PF6线圈采购包

中国凭借建设EAST装置(世界首台非圆截面全超导托卡马克装置)过程中积累的超导磁体建造经验,通过国际竞标承接了原欧盟F4E承担的ITER极向场6号线圈(以下简称PF6线圈)采购包制造任务,这也是中国首次承接中方采购包以外的项目。

PF6线圈是国际上在建的重量最大、难度最高的超导磁体,储能是EAST装置最大极向场磁体的60倍。线圈本体总重260 t,含支撑附件则总重近400 t,其总

体结构见图13,它的研制成功将为中国未来聚变堆大型超导磁体的研发奠定基础。

在研制过程中,创新发展了超大型超导磁体的关键制造技术,突破了发达国家在这一领域的技术壁垒,形成了符合中国技术研发条件下的超导磁体制造的一系列标准和规范。

(1) 实现生产线系统的全自主研发及95%以上关键设备的国产化,如图14所示为PF6线圈生产线;

(2) 国内首创大型超导磁体高精度自动化双线并绕技术,绕组放送及成型精度达其径向尺寸的万分之五以内,通过工艺优化及大幅的设备升级,其生产效率可达30天/饼,达到国际一流水平^[36,37];

(3) 创新采用导体焦耳加热对绕组进行真空压力绝缘浸渍,成功突破超大截面绕组充分凝胶固化这一关键技术瓶颈,绝缘凝胶固化过程温度均匀($\pm 5^{\circ}\text{C}$),控制精度达到预期要求^[38];

(4) 研发基于极向场线圈超导接头制造的一整套工艺技术,实现了所有接头脱离与绕制的在线制造,大大提高了生产效率。通过对共计36个绕组单接头生产及3件Sultan试件的生产性验证,超导接头电性能优

图 13 (网络版彩图)PF6超导线圈总体图

Figure 13 (Color online) ITER PF6 coil.

图 14 (网络版彩图)PF6厂房一览

Figure 14 (Color online) Overview of ITER PF6 workshop.

异, 接头电阻($\sim 3.6 \text{ n}\Omega$)及涡流损耗($\sim 45 \text{ J/cycle}$)优于 ITER 要求, 尤其是所有接头质量稳定.

通过对 PF6 线圈的整体研制, 使得我国在大型超导磁体制造关键工艺技术上实现了突破, 也为该领域在工程建造方面创新了具有示范性的方法, 并积累了丰富的实践经验.

截至目前, PF6 线圈的所有 9 个线圈双饼即将(2018 年 9 月)全部完成. 根据采购包进度计划, 2019 年将正式经欧盟交付 ITER.

4 ITER 采购包的核心技术应用与发展

十年来, 中国持续攻克了 Nb_3Sn 和 NbTi 超导线线的工业规模生产、高温超导电流引线、高纯真空热压钎材料制备和钎-铜热等静压连接等多项关键技术. 目前, 除少数采购包外, “挑战性”技术瓶颈基本已被突破^[39]. 在 ITER 采购包的执行过程中, 中国不但发展了一批具有自主知识产权的核心技术, 还建立了国际实验平台, 如 Nb_3Sn 及 NbTi 超导线性能测试的实验室、大功率电气设备检测中心、低温电性能测试和高电压测试平台等, 这些实验平台的建成将成为聚变创新体系的重要支撑.

聚变工程技术在国民经济中也得到了广泛应用. 依托超导、低温、射频等聚变工程技术的延伸发展, 大力推动质子高端医疗技术装备的国产化和产业化, 提升了高端医疗装备产业层次和竞争优势. 超低温下高强度绝缘材料制备技术、薄壁不锈钢管断续控温手工焊、特种钢厚板超高功率激光焊接、大型变压器特殊技术等关键技术的突破和应用, 促进了我国在低温

高压绝缘、特种焊接、高精密材料成型等众多领域的应用发展. 如中国在参加 ITER 计划之前, 国内并没有低温超导材料的工程化生产能力, 西部超导公司建立了一条低温超导材料生产线, 并在此基础上成功开发了医用核磁共振超导磁体用超导线材; 将 NbTi 合金熔炼和锻造技术进一步转化到高性能钛合金制备开发中, 实现了我国多种航空用关键牌号钛合金材料的国产化, 为我国航空、航天、航海等领域的先进装备研发和生产提供了高质量钛合金材料.

目前, 中国已拥有国际先进的聚变工程技术研发和生产能力, 初步实现从基础研究到产业化创新价值链的形成.

5 总结

中国自参加 ITER 计划以来, 通过不断地创新发展, ITER 采购包执行进度已走在合作七方的前列, 交付部件的质量赢得国际赞誉. 通过吸收、消化、掌握 ITER 计划核心技术, 大幅提升了我国磁约束核聚变工程技术创新能力, 不仅自主发展了一批具有自主知识产权的关键核心技术, 建立了国际先进实验测试平台, 而且有效地促进了国内聚变产业链的形成. 同时, 培养了一批极具国际竞争力、掌握 ITER 相关知识产权的工程技术人才和国际项目管理专业人才.

未来, 中国聚变发展应继续瞄准国际前沿, 广泛利用国际合作, “以我为主”开展中国聚变工程实验堆建设, 为我国进一步独立自主地开发和利用聚变能奠定坚实的科学技术与工程基础, 从而实现我国能源的跨越式发展.

参考文献

- 1 Feng K M. Controlled nuclear fusion and ITER project. *China Nuclear Power*, 2009, 2: 212–219
- 2 Pan C H. The International Thermonuclear Experimental Reactor and the future of nuclear fusion energy (in Chinese). *Physics*, 2010, 39: 375–378 [潘传红. 国际热核实验反应堆(ITER)计划与未来核聚变能源. *物理*, 2010, 39: 375–378]
- 3 Wan Y X. Current status and prospect of magnetic confinement fusion research (in Chinese). *Modern Phys*, 1999, 11: 17–19 [万元熙. 磁约束核聚变研究现状和前景展望. *现代物理知识*, 1999, 11: 17–19]
- 4 Pan Y, Zhuang G, Zhang M, et al. The ITER program and its impact on China's nuclear energy development (in Chinese). *Physics*, 2010, 39: 379–384 [潘垣, 庄革, 张明, 等. 国际热核实验反应堆计划及其对中国核能发展战略的影响. *物理*, 2010, 39: 379–384]
- 5 Li J G. Present status and development of superconducting Tokamak research in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2007, 22: 404–410 [李建刚. 我国超导托卡马克的现状与发展. *中国科学院院刊*, 2007, 2: 404–410]
- 6 Li J G. The status and progress of tokamak research (in Chinese). *Physics*, 2016, 45: 88–97 [李建刚. 托卡马克研究的现状与发展. *物理*, 2016,

45: 88–97]

- 7 Luo D L, He K H. International Thermonuclear Experimental Reactor—from initiative to implementation (in Chinese). *Chin Basic Sci*, 2008, 2: 3–8 [罗德隆, 何开辉. 国际热核聚变实验堆计划——从倡议到实施. *中国基础科学*, 2008, 2: 3–8]
- 8 Pan Y, Zhuang G, Zhang M, et al. The ITER program and its impact on China's nuclear energy development. *Physics*, 2010, 39: 379–384
- 9 Li H. ITER decade: Contribute Chinese wisdom to artificial sun (in Chinese). *China Scitech Busi*, 2018, 1: 37–40 [李浩. ITER 十年: 为“人造太阳”贡献中国智慧. *科技中国*, 2018, 1: 37–40]
- 10 Wu Y, Qin J G, Liu B, et al. Status of the ITER conductors in China. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–5
- 11 Qin J G, Wu Y, Liu B, et al. Manufacturing of ITER PF5 and CC sample conductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2014, 24: 62–66
- 12 Qin J, Dai C, Liao G, et al. Tensile test of SS 316LN jacket with different conditions. *Cryogenics*, 2014, 64: 16–20
- 13 Peng J Q, Wu H P, Wu Y, et al. Numerical simulation on the rollers' temperature of ITER PF compaction machine (in Chinese). *Cryo Supercond*, 2011, 39: 1–6 [彭晋卿, 吴会平, 武玉, 等. ITER PF 导体缩径机轧辊温升数值模拟研究. *低温与超导*, 2011, 39: 1–6]
- 14 Liu X C, Wu Y, Liu H J. Reentrant test for ITER PF butt welds (in Chinese). *Nondestruct Testing*, 2014, 36: 69–71 [刘小川, 武玉, 刘华军. ITER 超导体钨钼焊缝的渗透检测. *无损检测*, 2014, 36: 69–71]
- 15 Yu Z Z, Wu Y, Xia Y S, et al. Synchronous speed control for conductor twisting system of ITER (in Chinese). *J Hefei Univ Tech (Nat Sci)*, 2011, 34: 709–711 [余中正, 武玉, 夏永胜, 等. ITER 导体收缆系统速度同步控制方案分析. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 34: 709–711]
- 16 Wu Y, Han Q Y, Lin F, et al. Study on fabrication of ITER TF conductor (in Chinese). *Cryo Supercond*, 2009, 37: 33–37 [武玉, 韩奇阳, 凌峰, 等. TERTF 导体制造研究. *超导技术*, 2009, 37: 33–37]
- 17 Fu P. Introduction of power supply system for International Fusion Reactor ITER (in Chinese). *Power Electron*, 2014, 48: 1–7 [傅鹏. 国际聚变堆装置电源系统综述. *电力电子技术*, 2014, 48: 1–7]
- 18 Fu P, Gao G, Xu L W, et al. Review and analysis of the AC/DC converter of ITER coil power supply. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Palm: Springs, 2010. 1810–1816
- 19 Fu P, Gao G, Song Z H Q, et al. Preliminary design of the poloidal field AC/DC converter system for the ITER coil power supply. *Fusion Sci Tech*, 2013, 64: 741–747
- 20 Tao J, Benfatto I, Goff J K, et al. ITER coil power supply and distribution system. In: *Proceedings of the IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering*. Chicago, 2011. 1–8
- 21 Wu W S, Song Z Q, Fu P. Short circuit fault analysis of ITER poloidal field converter power supply (in Chinese). *Chin J Power Sources*, 2014, 38: 337–340 [吴万松, 宋执权, 傅鹏. ITER 极向场变流器电源短路故障分析. *电源技术*, 2014, 38: 337–340]
- 22 Yang Z G, Fu P, Huang Y Y, et al. Study and implementation of primary system for ITER pulsed power electrical network (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2017, 29: 065009 [杨志刚, 傅鹏, 黄懿赟, 等. ITER 脉冲功率变电站一次系统研究与实现. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 065009]
- 23 Bi Y F, Ding K Z, Cheng A Y, et al. R&D on a 68 kA HTS current lead for ITER project (in Chinese). *Chin J Low Temper Phys*, 2009, 31: 41–45 [毕延芳, 丁开忠, 成安义, 等. ITER 68 kA 高温超导特大电流引线研发. *低温物理学报*, 2009, 31: 41–45]
- 24 Lin X J, Bi Y F, Ding K Z, et al. R&D on shunt for high safety hts current leads for ITER (in Chinese). *Chin J Low Temper Phys*, 2009, 31: 171–174 [林贤军, 毕延芳, 丁开忠, 等. ITER 高温超导电流引线的高安全分流器研究. *低温物理学报*, 2009, 31: 171–174]
- 25 Foussat A, Libeyre P, Mitchell N, et al. Overview of the ITER correction coils design. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2010, 20: 402–406
- 26 Foussat A, Dolgetta N, Jong C, et al. From design to development phase of the ITER correction coils. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 21: 1960–1963
- 27 Libeyre P, Cormany C, Dolgetta N, et al. Qualification of the manufacturing procedures of the ITER correction coils. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2017, 27: 1–5
- 28 Jin C S, Hu Q S, Xu T J, et al. Structural analysis and optimization for equatorial diagnostic port plug of ITER (in Chinese). *Vacuum*, 2011, 48: 68–71 [金传山, 胡庆生, 许铁军, 等. ITER 水平诊断窗口插件结构分析及优化. *真空*, 2011, 48: 68–71]
- 29 Zhang S, Ge J, Zhang B, et al. Cooling circle design and testing for ITER radial X-ray camera. *Fusion Eng Des*, 2017, 125: 77–84
- 30 Hu L, Chen K, Chen Y, et al. Preliminary design and R&D of ITER diagnostic-radial X-ray camera. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2017, 870: 50–54
- 31 Liu Y. Overview of ITER procurement and fusion research progress in SWIP (in Chinese). In: *Proceedings of the 10th Anniversary of the ITER*. Beijing, 2017 [刘永. 核西物院 ITER 计划执行和核聚变研究进展. 见: *ITER 十年学术报告论文集*. 北京, 2017]

- 32 Wang P, Chen J, Li Q, et al. Study on the microstructure and properties evolution of CuCrZr/316LN-IG explosion bonding for ITER first wall components. *Fusion Eng Des*, 2017, 124: 1135–1139
- 33 Chen J M, Wang Pi H, Jin F Y, et al. The first wall material of ITER (in Chinese). In: Proceedings of the 10th Anniversary of the ITER. Beijing, 2017 [谌继明, 王平怀, 金凡亚, 等. 国际热核聚变实验堆第一壁材料. 见: ITER十年学术报告论文集. 北京, 2017]
- 34 Kang W S, Chen J M, Wu J H, et al. Design and key manufacturing technologies R&D of full scale prototype for ITER blanket shield block (in Chinese). *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2015, 35: 35–40 [康伟山, 谌继明, 吴继红, 等. ITER包层屏蔽块全尺寸原型件的设计与关键制造技术的研发. 核聚变与等离子体物理, 2015, 35: 35–40]
- 35 Xu W Y, Li P Y, Wei H H, et al. Cooling pipe system of ITER's poloidal field coil support (in Chinese). *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2018, 38: 69–73 [许婉韵, 李鹏远, 魏海鸿, 等. ITER 极向场磁体支撑冷却系统设计与、分析与优化. 核聚变与等离子体物理, 2018, 38: 69–73]
- 36 Xu J, Wen W, Chen J, et al. ITER PF6 winding line multi-axis automatic controlling system. *Fusion Eng Des*, 2017, 121: 124–129
- 37 Du S, Wen W, Chen J, et al. ITER PF6 double pancakes winding line. *Fusion Eng Des*, 2017, 116: 10–16
- 38 Du S, Wen W, Shen G, et al. Qualification of ITER PF6 helium inlet. *Fusion Eng Des*, 2018, 134: 1–4
- 39 Pan C H. Key technology R&D activities and Test of ITER procurement in China (in Chinese). In: Proceedings of the 10th Anniversary of the ITER. Beijing, 2017 [潘传红. ITER采购包关键技术预研和测试总体情况报告. 见: ITER十年学术报告论文集. 北京, 2017]

Progress of ITER procurement in China

LUO DeLong¹, SONG YunTao^{2*}, DUAN XuRu³, FANG TongZhen¹, HE KaiHui¹,
HUANG SuZhen², FU Peng², WU Yu², LU Kun², WEI Jing², YANG QingWei³,
ZHONG GuangWu³, ZHAO JunYu², HU LiQun², CHEN JiMing³, LI PengYuan³, LI Bo³,
WANG YingQiao³ & SHEN Guang²

¹ China International Nuclear Fusion Energy Program Execution Center, Beijing 100084, China;

² Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

³ Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is one of the largest and the most influential international scientific and technological cooperation projects in the world. China is participating in ITER project as an equal partner. The successful implementation of ITER project would probably ensure that human kind rapidly and widely utilizes the fusion energy without pollution emission, thus permanently solving the energy problem. In this paper, the progress of ITER Implementation in China is introduced. Its rapid progress indicates that China has already taken the lead position towards the manufacture of ITER components, and pushes the scientific and technological development forward in fusion energy research field. On the other hand, the rich experience resulted from ITER project will be of benefit in our next DEMO: China Fusion Engineering Experimental Reactor (CFETR).

ITER, magnetic confinement fusion, procurement

PACS: 07.55.Db, 28.52.-s, 52.55.Fa, 84.71.Ba

doi: 10.1360/SSPMA2018-00285