ITER计划实验包层项目概述

盛 倩[1] 吴姝琴[1] 王晓宇[2] 赵奉超[2] 罗晓芳[2] 钱小勇[1] 罗德隆[1]

1（中国国际核聚变能源计划执行中心 北京 100037）

2（核工业西南物理研究院 成都 610000）

摘要 产氚包层技术是未来发展聚变能源所必须解决的关键技术，且是三大难题之一，国内外对此均开展了大量的研究工作。国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）将是世界上第一座核聚变实验堆，可为验证产氚包层技术提供真实的聚变环境，参与ITER实验包层（Test Blanket Module，TBM）项目是当前各参与方获得和掌握产氚包层技术唯一途径。本文简要介绍了ITER TBM项目的内容、必要性、运行策略及组织实施情况，概述了TBM项目的发展及ITER窗口重大变更后的最新状态，梳理了ITER TBM项目各参与方当前的研究进展，并就后续重点研究工作进行了展望。ITER TBM项目的成功实施将为未来聚变能发展奠定坚实的科学和工程基础，希望本文能为中国聚变工程试验堆（China Fusion Engineering Test Reactor，CFETR）包层的设计与研发提供有价值的参考。

关键词 ITER计划，TBM项目，氚增殖，实验包层

中图分类号 TL6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070001

Overview of the ITER TBM program

SHENG Qian[1] WU Shuqin[1] WANG Xiaoyu[2] ZHAO Fengchao[2] LUO Xiaofang[2]
QIAN Xiaoyong[1] LUO Delong[1]

1(*China International Nuclear Fusion Energy Program Execution Center*, *Beijing 100037*, *China*)

2(*Southwestern Institute of Physics*, *Chengdu 610000*, *China*)

Abstract The tritium breeding blanket (TBB) technology is one of the key technologies to be solved and also one of three major issues in the development of fusion reactor in the future. The international thermonuclear experimental reactor (ITER) will be the first nuclear fusion experimental reactor in the world whilst ITER test blanket module (TBM) program is the only way to test and validate the tritium breeding blanket technologies under a real fusion environment at present. The successful implementation of ITER TBM program will provide a solid scientific and engineering foundation for fusion energy development. This paper briefly introduces the content, necessity, strategy, organizing and implementation of ITER TBM program, and summarizes the development status and achievement of test blanket system (TBS) made by the participants of ITER members. Prospects of the TBS research activities for the next phase and subsequent research focuses are presented. It is expected to provide valuable references for tritium breeding blanket design and development of China fusion engineering test reactor (CFETR), as well as the development of the TBB technologies.

Key words ITER, TBM program, Tritium breeding, Testing blanket module

核聚变能源资源丰富、燃烧释放能量大、清洁无污染，被誉为未来的理想能源之一。研究核聚变、开发核聚变能具有极其重要的科学意义和战略意义。氚是核聚变堆所必需的燃料之一，但由于其半衰期

第一作者：盛倩，女，1989年出生，2017年于北京大学获博士学位，研究领域为聚变堆材料及ITER TBM项目组织实施及工程管理

收稿日期：2022-04-02，修回日期：2022-06-07

First author: SHENG Qian, female, born in 1989, graduated from Peking University with a doctoral degree in 2017, focusing on the organization and implementation of the fusion reactor materials and ITER TBM project

Received date: 2022-04-02, revised date: 2022-06-07

较短，自然界中存量极少，且价格昂贵。为了补充聚变堆中氚的消耗，需要在核聚变堆的包层中进行氚的“在线增殖”，以维持核聚变反应的持续运行。

国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）计划旨在探索磁约束可控核聚变技术的可行性，为示范堆和聚变能电站提供科学和技术基础。ITER计划成立之初，即将产氚包层测试列为ITER计划的主要目标之一[1]，并成立了实验包层工作组（Test Blanket Working Group，TBWG）协调和评估实验包层的相关的工作[2]。2003年TBWG重组，继续协调与评估实验包层相关的工作[3-4]。2008年11月，ITER理事会（ITER Council）决定设立ITER TBM项目[5]，并正式纳入ITER协议框架。实验包层计划（Test Blanket Module，ITER TBM项目，又称“实验包层项目”）正式成为ITER计划三大工程目标之一[6-7]。

1 ITER TBM项目重要性

作为氘氚聚变反应堆的主要燃料之一，氚的单堆（1 GW聚变功率）年消耗量高达几十千克。由于氚是放射性元素，且半衰期只有12.3 a，自然界中几乎不存在，通常由中子与锂-6元素的核反应获得。由于制备难度大，造价昂贵，1 kg的氚价格约上亿美元[8]。为降低聚变反应堆的总体成本，更大程度地满足其商用需求，氚在核聚变堆中的在线增殖与自持技术是核聚变堆技术中必须掌握的关键技术。

产氚包层在聚变堆型中承担了增殖氚燃料、提取聚变能等功能，以补充聚变堆内消耗的氚，维持聚变堆的持续稳定运行[9]。因此，产氚包层是聚变工程实验堆、示范堆和商用聚变电站的核心部件，是聚变能源能否实现商业化应用的关键。

ITER装置建成后将是人类历史上第一个磁约束核聚变实验堆，并首次在全球提供接近真实聚变电站条件的实验环境，也是目前实验包层项目在真实聚变环境下实验验证氚增殖和能量提取等关键技术的唯一机会，可为未来聚变堆包层发展提供真实、有效的测试数据。由此可见，ITER TBM项目的成功实施是连接聚变实验堆和聚变示范堆的技术桥梁，也是发展聚变能源的关键一环。另外，与ITER计划其他采购包不同，TBM项目在设计与研制阶段各方知识产权不共享。因此，参加ITER TBM项目是当前各方获取和掌握产氚包层技术全部知识产权的唯一途径，对未来各方自主掌握产氚包层技术并发展聚变能源具有极其重要的意义。

2 ITER TBM项目发展历程

ITER TBM项目开始于20世纪90年代，并在ITER装置最初的设计中预留了3个窗口（2号、16号和18号）用于安装6个实验包层模块及其辅助系统（合称实验包层系统，Test Blanket System，TBS）并进行实验测试[10]。包层模块及其辅助系统的设计、制造等任务均由各方独自完成，在功能上也相互独立。早期，ITER计划各参与方提出了多种不同的TBM设计方案[11]，主要包括以下5个基本设计概念：氦冷陶瓷氚增殖剂铁素体/马氏体钢，氦冷液态锂铅铁素体钢/马氏体钢，水冷陶瓷铁素体钢/马氏体钢，自冷液态锂钒合金以及自冷熔盐。后经各方评估论证等，最终确定了以下参加ITER计划测试的TBM概念[9]，见表1。这6个TBS均已成功通过ITER组织的概念设计评审。

2018年初，印度提出不再参与ITER TBM项目。以此为契机，同时考虑到与等离子体运行密切相关的等离子体破裂缓解系统（Disruption Mitigation System，DMS）的需求，ITER组织提议对ITER TBM项目进行调整，将TBM测试窗口由3个减少为2个。由于2号窗口的窗口房间（Port Cell，PC）没有水冷界面，无法用于水冷TBM概念的测试，且处于已有DMS窗口的对面，是新增DMS窗口的最佳位置，ITER组织建议将2号窗口用于DMS，只保留16和18号窗口用于TBM测试。

2018年11月ITER理事会批准了ITER TBM项目的窗口变更方案，仅保留了两个窗口（16和18号）用于测试TBM，这也意味着在ITER装置上最多只能同时安装和测试4个TBM[12]。2020年，欧盟正式确定以水冷锂铅（Water-Cooled Lithium Lead，WCLL）TBM代替HCLL（Helium-Cooled Lithium Lead）TBM作为ITER TBM的参试概念[13]。为利用有限的窗口尽可能测试多种TBM概念，经ITER组织及各方谈判，最终商定将ITER TBM项目实验运行分为初始配置阶段（ITER装置非核运行阶段-2（Pre-Fusion Power Operation-2，PFPO-2）到核运行阶段-2（Fusion Power Operation-2，FPO-2））和第二配置阶段（核运行阶段-3（FPO-3）-2040年左右）。2020年底，ITER理事会批准了TBM窗口初始配置的最终方案，同时保留了其他概念的TBM（比如Dual-Coolant Lithium-Lead、Lithium-Lead Ceramic Breeder等）在FPO-3阶段测试的权利。

ITER TBM的窗口初始配置方案见表2，在ITER装置布局如图1所示[12]。

表1 ITER TBM项目参试概念
Table 1 The concepts of the ITER TBM program

ITER成员方 ITER member	概念 Conception	类型 Type	特点 Characteristic
中国 China	Helium-Cooled Ceramic Breeder (HCCB) TBM	氦冷固态 Helium-cooled solid breeder	氦气冷却，铍球床为中子倍增剂，硅酸锂为氚增殖剂 Coolant: helium, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_4SiO_4 pebbles
欧盟 European Union	Helium-Cooled Pebble-Bed (HCPB) TBM	氦冷固态 Helium-cooled solid breeder	氦气冷却，铍球床为中子倍增剂，硅酸锂/钛酸锂为氚增殖剂 Coolant: helium, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_4SiO_4 or Li_2TiO_3 pebbles
	Helium-Cooled Lithium Lead (HCLL) TBM	氦冷锂铅 Helium-cooled lithium lead	氦气冷却，液态锂铅为中子倍增剂和氚增殖剂 Coolant: helium, multiplier/breeder: Pb-16Li
日本 Japan	Water-Cooled Ceramic Breeder (WCCB) TBM	水冷固态 Water-cooled ceramic breeder	水冷却，铍球床为中子倍增剂，钛酸锂为氚增殖剂 Coolant: H_2O, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_2TiO_3 pebbles
韩国 Korea	Helium-Cooled Ceramic Reflector (HCCR) TBM	氦冷固态 Helium-cooled solid breeder	氦气冷却，铍球床为中子倍增剂，钛酸锂为氚增殖剂，石墨反射层 Coolant: helium, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_2TiO_3 pebbles, reflector: graphite
印度 India	Lithium-Lead Ceramic Breeder (LLCB) TBM	锂铅陶瓷 Lithium lead ceramic breeder	氦气冷却，液态锂铅，陶瓷增殖剂 Coolant: helium, multiplier: Pb-16Li, breeder: Pb-16Li & Li_2TiO_3 pebbles

表2 TBM窗口初始配置方案
Table 2 The arrangement on the initial port allocation for TBM

窗口 Port cell	采购方 ITER member	参试概念 Conception	类型 Type	特点 Characteristic
16号 #16	欧盟 European Union	WCLL TBM	水冷锂铅 Water-cooled lithium lead	水冷却，液态锂铅为中子倍增剂和氚增殖剂 Coolant: H_2O, multiplier/breeder: Pb-16Li
	欧盟&韩国 European Union & Korea	Helium-Cooled Solid Breeder (HCSB) TBM*	氦冷固态 Helium-cooled solid breeder	氦气冷却，铍球床为中子倍增剂 Coolant: helium, multiplier: Be pebbles
18号 #18	中国 China	HCCB TBM	氦冷固态 Helium-cooled solid breeder	氦气冷却，铍球床为中子倍增剂，硅酸锂为氚增殖剂 Coolant: helium, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_4SiO_4 pebbles
	日本 Japan	WCCB TBM	水冷固态 Water-cooled ceramic breeder	水冷却，铍球床为中子倍增剂，钛酸锂作为增殖剂 Coolant: H_2O, multiplier: Be pebbles, breeder: Li_2TiO_3 pebbles

注：* 欧盟与韩国合作TBM，目前暂未确定采用哪一概念
Note: * HCSB is jointly procured by European Union and Korea, but now it has not yet been decided which concept could be adopted

3 ITER TBM的测试目标

ITER作为世界上第一座聚变实验堆，将为开展聚变示范堆（Demonstration Fusion Reactor，DEMO）产氚包层实验验证提供真实聚变环境，包括：1）等离子体体积分布的聚变中子源及能谱；2）包层试验体积径向梯度分布的中子通量；3）包层区域（结构材料、增殖剂和中子倍增等）径向梯度分布的体积热源；4）第一壁表面热负载；5）典型的磁场强度及分布；6）充分长的功率循环（脉冲时间大于400 s）。

通过设计和研制ITER TBM模块和配套的辅助系统，并在ITER不同运行阶段（H-H、D-D、低参数D-T、高参数D-T）进行不同功能模块的实验，可以验证聚变堆产氚包层的设计、材料、制造、运行、测量、涉氚技术、能量提取等关键工程技术，为未来设计、建造聚变示范堆提供实验基础。ITER TBM的测试目标主要包括[9]：

1）验证热、机械、电磁等多种负载下包层结构的完整性；

2）验证包层氚增殖技术可行性以及对氚增殖性能分析的准确性；

3）验证包层在线氚提取、计量等技术的可行性

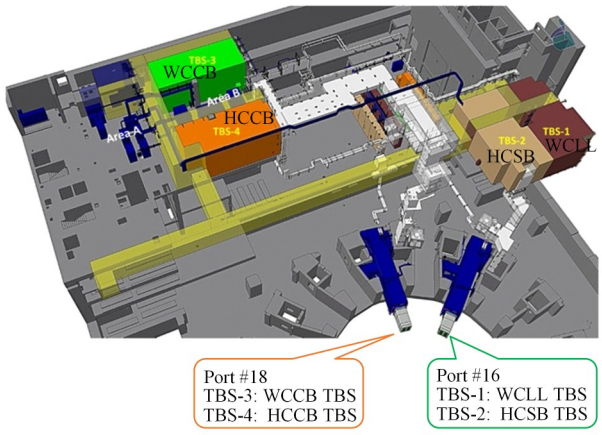

图1 TBS在ITER装置布局图
Fig.1 Overall view of the four TBSs located in various rooms of the Tokamak

及氚回收效率；

4）验证包层系统的能量提取技术；

5）验证并校准DEMO包层设计所需的设计工具和数据库；

6）验证产氚包层系统的集成工作性能；

7）验证产氚包层系统核安全技术；

8）在一定程度上研究聚变中子辐照对包层材料性能的影响，包括结构材料、中子倍增材料、氚增殖材料等。

TBS一般由实验包层模块组件（TBM-set）、冷却系统、冷却剂净化系统、氚提取系统、氚测量系统、中子测量系统、仪控系统、连接管道、辅助设备单元和管道森林等组成。其中：1）实验包层模块组件由实验包层模块（TBM）和屏蔽块（shield）及其连接附件组成，TBM是核心测试模块，是DEMO包层在ITER上的模拟实验件，主要作用是产氚并将聚变中子能量转化为可以利用的热能，用于验证产氚包层的工艺技术路线和产氚性能，以及包层在真实聚变环境下的结构安全性与完整性；2）冷却系统是TBM的主冷却系统，主要功能是为TBM提供冷却剂，并将沉积在TBM中的核热提取出来，用于验证包层冷却技术；3）冷却剂净化系统的主要功能是净化冷却剂，将渗入到冷却剂中的氚提取出来，保证冷却剂成分的稳定并回收氚；4）氚提取系统主要功能是提取TBM中产生的氚，用于验证包层的氚提取与纯化技术；5）氚测量系统主要用于ITER TBS系统中氚的计量；6）中子测量系统主要用于测量TBM中的中子通量与能谱，为中子学分析提供实验数据；7）仪控系统主要用于ITER TBS系统的运行控制。

根据ITER的运行和研究计划，ITER TBM又分为4个不同的功能模块：电磁模块（Electro-Magnetic TBM，EM-TBM）、热工水力学/中子学模块（Thermal-Neutronic TBM，TN-TBM）、中子学/氚增殖&热机械模块（Neutronic-Tritium/Thermo-Mechanic TBM，NT/TM-TBM）和集成模块（Integral TBM，INT-TBM），分别在ITER装置的非核运行阶段和核运行阶段进行相应的实验测试[10]。

4 ITER TBM项目安全要求

ITER TBM是DEMO包层的实验模拟件，其总体设计取决于DEMO包层的目标，同时还需要满足ITER的测试策略以及ITER实验的安全要求，必须兼顾安全和功能两大目标。TBM项目大致分为设计（包括概念设计、初步设计和最终设计）、制造、安装、运行、维护、退役等阶段，涉及材料、机械、力学、电磁、测量（试）及诊断、中子屏蔽、氚防护等多学科领域知识和技术，是一项综合性的系统工程。

ITER TBM的测试活动既不能影响ITER的可靠性及安全运行，也不能违背ITER实验运行计划，同时还需要满足ITER复杂的界面和服务需求，因此，其设计活动必须在ITER安全设计框架下开展，实验策略制定必须严格遵守ITER运行计划。为验证未来DEMO产氚包层概念、论证DEMO氚自持技术以及直接用于热-电转换的高品质热量提取技术，ITER TBM的设计运行等还需同时考虑DEMO的需求。另外，由于ITER装置是建造在法国的核装置，它的设计、制造、运行和维护需要满足法国的法律、法规和标准的要求，通过法国核设施有关的认证，包括压力容器（ESP）、核压力容器（ESPN）等认证[14]。

5 ITER TBM项目运行策略

空间布局上，两个TBS共用ITER装置一个窗口，但每个TBS又相互独立运行，即同一窗口的两个TBS共享相应的窗口插件（Port Plug，PP）和窗口房间（Port Cell，PC）区域。Port Plug由两个TBM-sets（或Dummy TBM，在ITER TBM计划执行过程中，如果TBM-set未能研发成功，将由Dummy TBM代替）和TBM框架组成。以中国氦冷固态增殖剂实验包层系统（HCCB TBS）为例，其系统布局示意图如图2所示。其中窗口插件、辅助设备单元、管道森林等安装在ITER Building 11中，其他辅助系统安装在Building 14中，并通过连接管道相连[10]。

根据ITER TBM项目总体进度安排，各参与方TBS均已完成并通过ITER组织概念设计评审，当前处于初步设计阶段。为满足ITER装置整体进度安排，保证TBS能顺利安装运行，各参与方需在2025年底完成TBS的最终设计评审，2029年完成电磁模

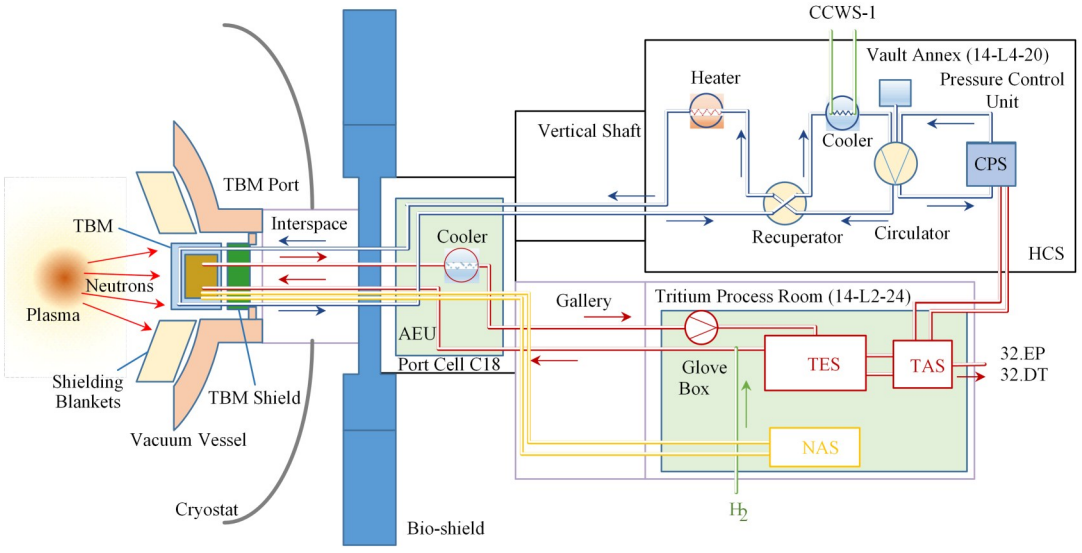

图2 HCCB TBS布局示意图
Fig.2 Layout diagram of the HCCB TBS

块及TBS辅助系统的交付。TBS实验运行计划从非核阶段PFPO-2（2032年左右）开始，持续到ITER D-T高参数运行阶段（2040年左右）[12]。整个过程，将分别测试TBM 4个不同的功能模块，因此，中间需要停止运行并更换几次不同的TBM及相关部件。具体进度安排如图3所示。根据ITER装置整体运行进度安排，TBM的更换将在ITER装置长期维护期间进行。

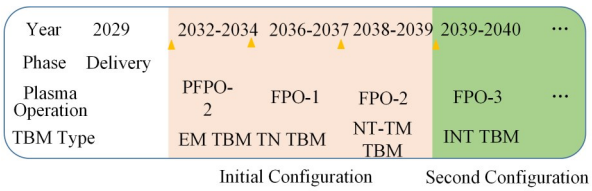

图3 ITER TBM项目进度安排
Fig.3 The schedule of the ITER TBM program

对于各个TBS均需用到的公共部件，包括TBM框架/Dummy TBM、连接管道、管道森林&辅助设备单元、TBM Port Cell维护工具、TBM热室维护工具，目前由ITER组织统一负责设计；后续根据ITER组织与各方的协商情况，部分工作如管道森林&辅助设备单元的最终设计、制造等任务将移交各参与方，具体组织实施仍需进一步讨论。进度安排上，TBM框架/Dummy TBM、管道森林&辅助设备单元、TBM Port Cell维护工具三部分与各TBS整体进度基本一致；TBM热室维护工具预计于2027年完成最终设计评审，2034年交付ITER现场；鉴于连接管道需预埋在ITER建筑不同楼层与房间中，将在2023年初交付ITER现场。

6 各参与方研究进展

6.1 HCCB TBM（中国）

我国自2003年起开始参与ITER TBM相关活动，2009年确定以HCCB TBM作为我国参与ITER TBM计划的参试概念，并于2014年初与ITER组织签订了中方氦冷固态增殖剂实验包层系统安排协议（CN HCCB TBS TBMA）。2015年，中国HCCB TBS完成概念设计并顺利通过ITER组织概念设计评审。目前，HCCB TBS初步设计已基本固化，中国TBM项目团队正在筹备初步设计预评审（Preliminary Design Workshop，PDRW）相关工作，预计于2025年底完成最终设计评审（Final Design Review）。

HCCB TBM设计以高温高压氦气为冷却剂、正硅酸锂（Li_4SiO_4）陶瓷球床为氚增殖剂、金属铍球床为中子倍增剂、低活化铁素体/马氏体钢（RAFMs）为结构材料；整体结构为带有冷却通道的箱体结构，由4个子模块构成和连接子模块的大后板组成；每个子模块由第一壁、冷却板、氚增殖球床、中子倍增球床、盖板等结构组成。HCCB TBM的设计及主要参数如图4和表3所示。

在结构材料研发方面，国内针对HCCB TBM开发了两种候选结构材料：由核工业西南物理研究开发的CLF-1钢和由中国科学院合肥物质研究院开发的CLAM钢，目前两种候选结构材料均已实现5 000 kg级的工业生产，正有序开展工程化认证工作。

在功能材料研发方面，我国成功掌握中子倍增剂铍小球制造工艺，达到10 kg级的生产能力；多个

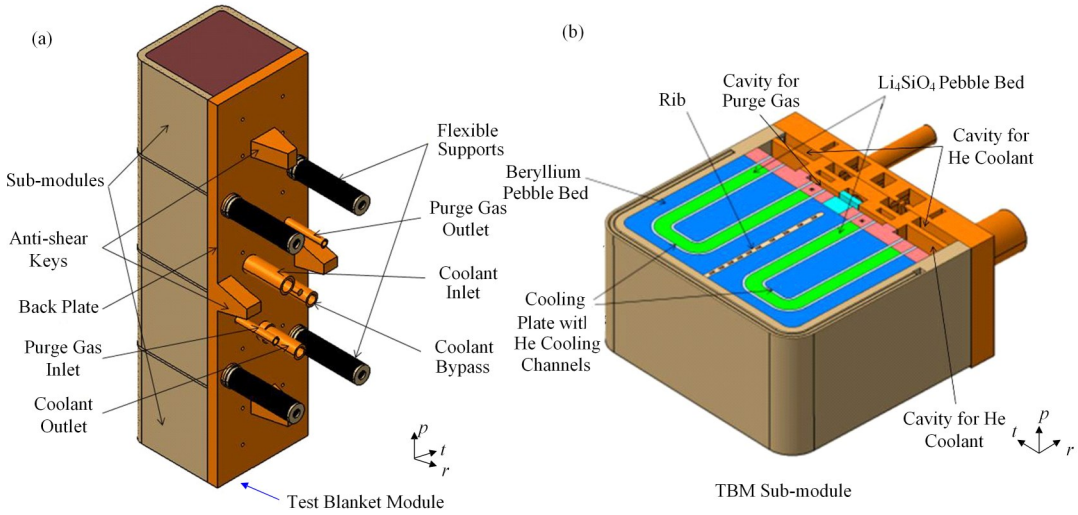

图4 HCCB TBM结构设计(a)和TBM子模块结构设计(b)[15]
Fig.4 Structure design of HCCB TBM (a) and structure design of HCCB TBM sub-module (b) [15]

表3 HCCB TBM主要设计参数
Table 3 Main design parameters of HCCB TBM

冷却剂 Coolant	氦气 Helium
进口/出口温度 Inlet/outlet temperature	第一壁（First Wall, FW）: 300 ℃/~390 ℃ 子模块(sub-module): ~390 ℃/500 ℃
压力 Pressure	8 MPa
流量 Flow rate	1.04 $kg·s^{-1}$
提氚气体 Purge gas	氦气与氢气混合气体（氢气占比0.1%）Helium with 0.1% H_2
进口/出口温度 Inlet/outlet temperature	室温 (Room Temperature, RT)/500 ℃
压力 Pressure	0.3 MPa
流量 Flow rate	3 $g·s^{-1}$
氚增殖剂（单尺寸）Tritium breeder (single size)	Li_4SiO_4小球 Li_4SiO_4 pebbles
Li-6 富集度 Li-6 enrichment	90%
填充因子 Packing factor	62%
温度范围 Temperature range	390~900 ℃
中子倍增剂 (单尺寸) Neutron multiplier (single size)	铍小球 Beryllium pebbles
填充因子 Packing factor	62%
温度范围 Temperature range	300~650 ℃
结构材料 Structure material	RAFM (CLAM or CLF-1)
最大允许温度 Maximum allowable temperature	550 ℃

国内研究机构和大学开发了氚增殖剂正硅酸锂（Li_4SiO_4）小球生产工艺，通过前期的研究和筛选，目前中国HCCB TBM中主要采用熔融喷雾法制备正硅酸锂小球，相关工程化认证工作正在开展。

在设计方面，基于前期概念设计，中方TBM项目团队开展了中子学、热工、流体、电磁等工程分析和设计评估，进一步优化了的HCCB TBM的设计，包括冷却剂分配、提氚气体流动和冷却系统设计；改进制造工艺，进一步降低制造工艺要求。目前，HCCB TBM初步设计已基本固化。

针对制造工艺研究，开展了原型尺寸关键部件的制造，包括第一壁、冷却隔板、厚板、增殖单元、双层管道等，并进行了尺寸检测、水压和气密性测试；开展了TBM小模块和半原型样件的制造与测试，为TBM模块制造奠定基础[16-18]。

目前，HCCB TBM包层概念具有广泛的研究基础和相对高的技术成熟度，作为产氚包层候选概念之一，其主要优点为：冷却剂氦气为惰性气体，与材料的兼容性较好，基本可避免材料腐蚀和冲蚀等问题；不存在事故情况下水与增殖剂或中子倍增剂反应的可能，安全性相对较高；此外，氦气的中子慢化和吸收截面小，有利于提高HCCB TBM的产氚性

能。铍作为最好的中子倍增材料（裂变材料除外），可有效提高中子倍增和实验包层的产氚性能。子模块的设计概念可以在未来测试不同子模块结构设计，氦冷包层可以实现更高的出口温度，有利于提高未来聚变堆的经济性。

HCCB TBS研发已形成了成熟的技术发展路线，但仍存在一些技术挑战：

1）结构材料的认证。作为新开发的材料，RAFM钢在TBM上使用需要获得特殊材料批准（PMA/NPMA）。目前，CLF-1钢和CLAM钢虽已实现工业化生产，但其数据可靠性以及系统性还需要进一步研究。

2）制造工艺和无损检测。由于HCCB TBM内部设计大量特殊结构，制造与焊接工艺复杂，部分焊缝难以开展无损检测，为满足法规和标准要求，需开展大量的研发工作。

3）球床技术。球床作为HCCB TBM的主要功能结构，其性能和稳定性是保障HCCB TBM正常可靠运行的保证。目前对于球的填充技术、球床性能的测量还存在大量的不足，特别是在辐照条件下球床的性能的预测还处于起步阶段。

4）TBM运行参数及性能测量。为验证TBM实验模块设计及相关的技术，需在高中子辐照和强磁场的环境下，测量TBM内中子通量与能谱、磁场、变形、温度等运行参数，这些参数测量面临巨大挑战。

6.2 WCCB TBM（日本）

日本选用WCCB TBM概念参与ITER TBM测试。WCCB TBM由56个带有冷却通道的径向圆筒状子模块、基板和冷却集板等组成，以日本开发的RAFM钢（F82H）作为结构材料，模块内部包含氚增殖区（氚增殖剂为Li_2TiO_3）和中子倍增区（中子倍增剂为铍小球）。为了移除来自等离子体的表面热负载，子模块的半球形壁中设计了冷却流道，并通过插入中子倍增区和氚增殖区的冷却管道移除来自等离子体的中子产生的核热；冷却剂为压水堆参数的水，冷却剂压力15.5 MPa，进口温度280 ℃，出口温度为325 ℃。提氚气体为氦气和氢气的混合气体，提氚气体的压力为0.1 MPa，在氚增殖区流动进行氚的吹扫和提取[19]。WCCB TBM设计如图5所示[20]。

在设计与分析方面，日本已经开展了中子学、电磁、热机械、计算流体力学、结构完整性等分析，并开展了辅助系统的RAMI（可靠性、可用性、可维护性和可检测性）分析；通过FMECA分析了氚提取系统的主要危险源，并对设计方案进行了初步验证。预计2025年完成最终设计评审。

在结构材料研发方面，日本开发的F82H低活化

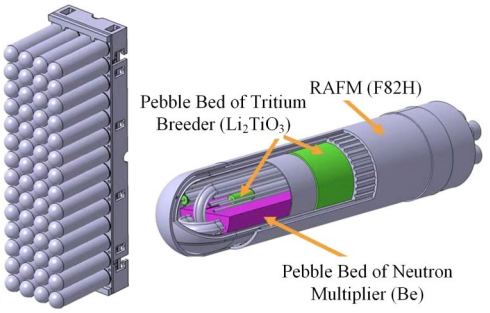

图5 WCCB TBM结构设计
Fig.5 Design of WCCB TBM and its sub-modules

铁素体/马氏体钢已经达到20吨级的生产水平，正在ANB（Authorized Notify Body，授权第三方）的协助下准备NPMA；针对WCCB TBM的材料要求，已经完成了材料坯锭和板件的试生产和板材、管道和铸件等TBM部件材料的试制，将在今年开展板材焊接的试制与测试。在功能材料研发方面，日本是世界上首个完成旋转电极法制造铍小球工艺研发的国家，并形成了成熟的制造工艺；也已经建立了Li_2TiO_3小球的乳化成球制造工艺，并研究了纯化和元素分离技术；同时，也基于现在的设计方案开展了球床填充实验。在材料兼容性研究方面，日本开展了F82H和Li_2TiO_3在焊后热处理工况下的兼容性研究。

目前，日本正在建设包层测试平台用于WCCB TBM技术研究与测试，其中流动腐蚀测试平台、In-box LOCA（Loss Of Coolant Accident）、高热负荷测试平台和铍水反应测试平台[20]已经安装完成，正在进行验收测试，将在今年进行调试。

WCCB TBM作为水冷固态增殖剂概念，冷却技术相对成熟；但是由于WCCB TBM子模块众多，内部流产结构复杂，在制造工艺方面还需要进行大量的研发工作，比如子模块壁内部流道的加工、增殖区管道的弯曲等；同时，如何提高WCCB TBM可靠性也将是未来关注的重点。由于WCCB TBM属于核压力容器，用于制造的F82H钢必须通过NPMA，这对WCCB TBM也是一个巨大的挑战。

6.3 WCLL TBM（欧盟）

WCLL TBM在初步概念设计阶段采用的是箱式结构（TBM-box），结构材料为低活化铁素体/马氏体钢（RAFM）EUROFER-97，冷却剂为水[21]，中子倍增剂和氚增殖剂为液态金属Pb-16Li。WCLL的水冷却剂的参数与WCCB TBM相同，也采用的压水堆的参数，运行压力为15.5 MPa，进口温度280 ℃，出口温度为325 ℃；液态锂铅Pb-16Li在内部缓慢流动以降低磁流体效应。由于使用了液态Pb-16Li作

为增殖剂，WCLL TBM的氚提取在TBM外部进行的，TBM内部不存在氚提取功能。WCLL TBM的箱体由U形第一壁、两侧的盖板和后端的后板采组成。箱体内部用了垂直的插槽设计，使用加强板将包层模块分割成小的增殖单元。第一壁（First wall）内分布有冷却管道，箱体侧面是冷却盖板，箱体后部被4片钢板（Back plate1-4）分隔开，用于分配和收集第一壁和增殖区冷却管道的冷却剂与增殖区的Pb-16Li。径向和环向的非冷却板形成加固格栅用于加固TBM箱体，用于保证箱体内失去冷却剂工况下箱体的结构完整性。增殖区冷却流道采用了双层管设计，WCLL TBM具体结构如图6所示。

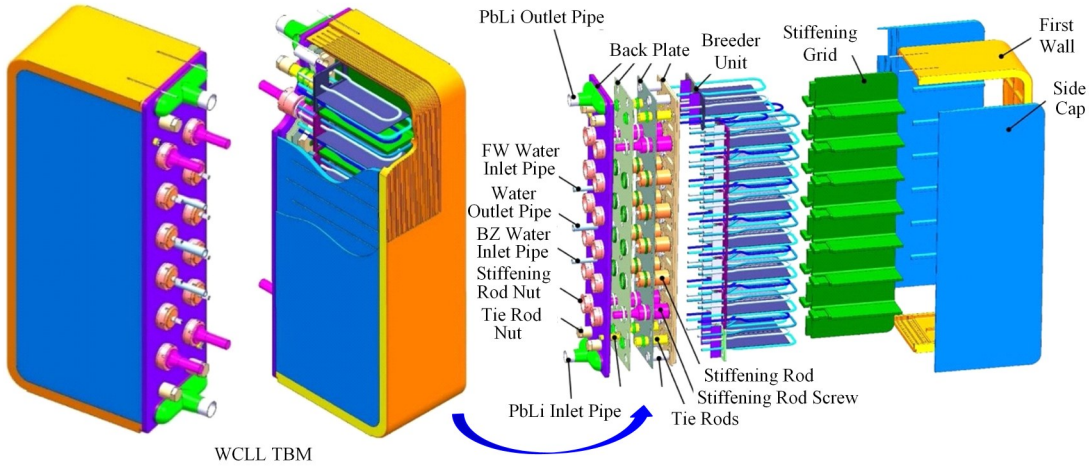

图6 WCLL TBM总体和内部结构[21]
Fig.6 WCLL TBM global views and internal structures[21]

2019年WCLL TBM通过概念设计评审，目前正在开展设计优化和制造工艺研发。在设计方面，更新了工艺流程图、系统描述文件以及相关的设备规格书等[22]；在研发方面，EUROFER-97是目前成熟度最高的RAFM钢之一，已经达到了10 t级的工业化生产水平，具备了比较完善的性能数据库，包括涉氚性能，并已经开展了与冷却剂、增殖剂和兼容性能实验；在制造工艺和部件研发方面，WCLL TBM大部分使用了欧洲以前HCLL（氦冷锂铅）TBM制造技术和研发成果，其中双层管制造工艺正在进行研发。进度上，预计2025年完成最终设计评审。

WCLL TBM是4个初始安装方案中唯一一个液态增殖剂概念的实验包层模块。由于Pb16Li存在较强的腐蚀性，且在事故工况下存在潜在的水与Pb16Li反应风险。因此，材料兼容性、系统安全设计与分析、安全验证是未来WCLL TBM设计的重点和难点之一。

6.4 HCSB TBM（欧盟&韩国联合）

前期，欧盟与韩国分别独立研发HCPB TBM和HCCR TBM。TBM测试窗口变更后，欧盟与韩国共同研发一个氦冷固态实验包层系统，目前暂未确定合作系统的参试概念。

HCPB TBM结构材料为EUROFER-97，氚增殖剂为Li_4SiO_4/Li_2TiO_3，中子倍增剂为铍球，包层球床被加固板分隔，同时由冷却板冷却[23]。面向等离子体的壁是U型结构，它与包层模块另外两侧的壁共同构成第一壁。HCPB TBM为箱式结构，第一壁上分布着出口集合管、入口歧管等多个通道。冷却剂为氦气，氦气在U型结构内以径向-环向-径向的形式在第一壁氦气通道中流动，氦气的进出口温度为300/500 ℃，工作压力为8 MPa。分离净化气体系统带走增殖的氚，工作压力为0.1 MPa。

HCCR TBM结构材料为ARAA钢，TBM由4个子模块组成，主要组成部分为：第一壁、侧壁、增殖区以及通用Back Manifold（BM）。选择4个子模块概念主要考虑了可制造性、辐照后易于检查、降低洛伦兹力、在In-box LOCA情况下承受内部超压的能力等。增殖区采用3层Li_2TiO_3小球作为增殖剂，3层铍小球作为中子倍增剂，一层石墨作为中子反射层[24-25]。

根据进度安排，HCSB TBM预计于2025年完成最终设计评审。

7 ITER TBM项目组织实施

与ITER计划其他采购包不同，TBS由ITER TBM项目各参与方自行开展设计、研发和制造，其系统所有权属于项目各参与方。但由于TBS需要安装在ITER装置上进行测试运行，为满足ITER装置整体部署和进度要求、保障ITER装置安全性，ITER TBM项目在组织实施过程中参照采购包模式

进行统一管理，包括进度、质量、核安全、风险等各方面。

早期，由ITER实验包层工作组（Test Blanket Working Group，TBWG）负责组织、协调ITER TBM项目的设计、研制等工作[26]。2008年底，TBWG的工作被正式移交到ITER组织管理，TBS必须根据ITER计划的管理要求，由参与方交付并在ITER现场装配、调试、运行实验，ITER组织为其提供场地、界面接口、部分服务设施等。2009年，TBM项目委员会（Program Committee，TBM PC）成立并全面负责TBM项目工作，TBM PC也是ITER理事会下的四个最高级别的官方委员会之一。为加强ITER组织和各方对TBM项目的有效管理，2017年ITER理事会决定将TBM项目委员会的相关功能进行整合，成立TBM项目工作组（Project Team，TBM-PT），由ITER组织总干事直接管理。TBM-PT由ITER组织及TBM各参与方成员组成，工作组成员实行动态管理，负责TBS质量、安全、进度、界面、接口等全流程工作，共同推进ITER TBM项目的组织实施。

8 结语

作为ITER计划三大工程目标之一，实验包层项目旨在验证氚增殖和能量提取等关键技术。本文简要介绍了ITER TBM项目的内容、运行策略、各方TBS研究进展和组织实施等情况。由于TBM测试窗口变更，只能在ITER装置上同时安装测试4个TBS，在初始配置阶段为HCCB TBS、WCCB TBS、WCLL TBS以及HCSB TBS，采购方分别为中国、日本、欧盟和欧盟&韩国。目前，这4个TBS均已通过ITER组织概念设计评审，处于初步设计阶段，预计2025年完成最终设计。

ITER计划承载着人类和平利用核聚变能的美好愿景，ITER TBM项目是ITER与聚变示范堆（DEMO）之间的纽带，产氚包层技术也是未来建造聚变电站所必须解决的关键技术之一。目前，ITER TBM项目各参与方根据各自的测试目标和系统设计，开展了大量的研究工作，包括结构材料、功能材料、TBM-set以及辅助系统的设计与研发等，但是仍不足以满足ITER TBM的要求。当前及后续很长一段时间的研究重点主要包括以下几个方面：

1）结构材料的工业化制备与性能评价和材料性能数据库的完善，包括辐性能，以支撑TBM的设计；

2）中子倍增剂制备工艺开发和性能评价，包括辐照性能，以支撑TBM的设计；

3）氚增殖剂制备工艺开发和性能评价，包括辐照性能，以支撑TBM的设计；

4）TBM-set的制造与检测工艺。由于TBM结构复杂，制造困难，对制造和检测的工艺要求高，目前常用的制造与检测工艺不能满足TBM制造与检测的要求。适用于TBM的制造和检测工艺一直都是研究的重点；

5）氦冷系统及关键部件研发。氦冷系统设计与制造技术目前尚未成熟应用，关键部件如氦气风机、安全隔离阀等技术难度高、研发难度大，是未来TBM氦冷系统需要攻克的难点之一；

6）TBM系统涉及的氚提取、纯化、分离等工艺，如何高效地实现氚的提取、分离和回收是TBM涉氚工艺研究的关键，包括系统氚安全分析方法；

7）适用于强磁场和中子场的测量和控制设备、抗辐照测量方案是未来必须要解决的关键难题；

8）TBS是由多个子系统组成的复杂系统，集成设计验证是保证系统设计可靠性的必要手段，用于验证TBS集成设计验证的实验平台也是未来研究的重要方向。

ITER TBM项目将充分利用有限的资源尽可能测试更多的TBM概念，但无论哪一种测试概念，都将面对聚变堆较为恶劣的服役条件以及氚增殖的需求，这也意味着各参与方应在产氚包层的功能质量、进度和核安全等方面合理设计、严格把关，并贯穿TBM项目整个生命周期。鉴于ITER在法国被定义为基础核设施，根据相关规定，ITER TBM项目亦需要遵守相关核安全管理法规。当前，ITER TBM项目各参与方在整体进度方面差异不大，为保证实验包层系统及ITER装置安全性，顺利完成实验包层测试这一重大工程目标，后续应进一步验证结构材料和功能材料的可靠性，优化完善TBS系统与ITER的界面、接口、资源配置等，优化核安全等相关设计和活动方案，改进并逐步固化实验包层系统的设计，以便为TBS的制造、安装及运行奠定良好基础。

作者贡献声明 盛倩：论文策划、起草及修改；吴姝琴：技术指导；王晓宇：技术指导和审阅；赵奉超：文献搜集，论文部分内容修改；罗晓芳：文献搜集；钱小勇：研究思路指导；罗德隆：研究思路指导。

参考文献

1 Morley N. Fusion nuclear science and technology research needed now for magnetic fusion energy[R]. Fusion Power Associates Annual Meeting, Gaithersburg, Maryland, December 14, 2004.

2 Chuyanov V A, ITER Test Blanket Working Group. ITER test blanket working group activities: a summary, recommendations and conclusions[J]. Fusion Engineering

and Design, 2002, **61 – 62**: 273 – 281. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00119-9.

3 Giancarli L M, Chuyanov V A, Abdou M, *et al*. Objectives and progress of the ITER test blanket working group activities[C]//Proceedings of the 20th IAEA Fusion Energy Conference, Vilamoura, Portugal, Nov.2004.

4 Agency I. Initial meetings of the re-established test blanket working group[N]. NewsletterITER ITA, International Atomic Energy Agency, 2004.

5 Chuyanov V A, Campbell D J, Giancarli L M. TBM program implementation in ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, **85**(10 – 12): 2005 – 2011. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.07.005.

6 Aymar R. Summary of the ITER final design report[R]. ITER document G A0 FDR, 2001.

7 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.
FENG Kaiming. Controlled nuclear fusion and ITER project[J]. China Nuclear Power, 2009, **2**(3): 212 – 219.

8 中核集团核工业西南物理研究院 . 托起明天的太阳[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2021: 176.
China National Nuclear Corporation Southwestern Institute of Physics. Hold up tomorrow's sun[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 2021: 176.

9 Giancarli L M, Abdou M, Campbell D J, *et al*. Overview of the ITER TBM program[J]. Fusion Engineering and Design, 2012, **87**(5 – 6): 395 – 402. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.11.005.

10 Giancarli L M, Chuyanov V A, Abdou M, *et al*. Breeding blanket modules testing in ITER: an international program on the way to DEMO[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, **81**(1 – 7): 393 – 405. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2005.08.096.

11 冯开明 . ITER实验包层计划综述[J]. 核聚变与等离子体物理 , 2006, **26**(3): 161 – 169. DOI: 10.16568/j. 0254-6086.2006.03.001.
FENG Kaiming. Overview of the ITER test blanket module program[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, **26**(3): 161 – 169. DOI: 10.16568/j.0254-6086.2006.03.001.

12 Giancarli L M, Bravo X, Cho S, *et al*. Overview of recent ITER TBM Program activities[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **158**: 111674. DOI: 10.1016/j. fusengdes. 2020.111674.

13 Federici G, Boccaccini L, Cismondi F, *et al*. An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, **141**: 30 – 42. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.01.141.

14 Couso D, Fano J, Ferna´ndez F, *et al*. Development of codes and standards for ITER In-vessel components[C]// Proceedings of ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference. Baltimore, Maryland, USA. July 17-21, 2011, Vol. 1: Codes and standards: 313 – 322. DOI: 10.1115/PVP2011-57611.

15 Wang X Y, Feng K M, Chen Y J, *et al*. Current design and R&D progress of the Chinese helium cooled ceramic breeder test blanket system[J]. Nuclear Fusion, 2019, **59**(7): 076019. DOI: 10.1088/1741-4326/ab0c32.

16 Chen J M, Wang X Y, Wang P H, *et al*. FW and blanket technology development progress at SWIP[J]. Journal of Fusion Energy, 2021, **40**(1): 10. DOI: 10.1007/s10894-021-00301-9.

17 王晓宇, 段旭如, 赵奉超, 等 . 中国ITER氦冷固态增殖剂实验包层系统设计研发进展[J]. 中国核电, 2020, **13**(6): 753 – 758.
WANG Xiaoyu, DUAN Xuru, ZHAO Fengchao, *et al*. Development progress of Chinese helium cooled ceramic breeder test blanket system[J]. China Nuclear Power, 2020, **13**(6): 753 – 758.

18 Wu X H, Cao Q X, Liao H B, *et al*. Design and fabrication R&D progress of CN HCCB TBM[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **173**: 112797. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112797.

19 Tanigawa H, Gwon H, Hirose T, *et al*. Cylindrical breeding blankets for fusion reactors[J]. Fusion Engineering and Design, 2018, **136**: 1221 – 1225. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.105.

20 Kawamura Y, Gwon H, Guan W H, *et al*. Progress of water cooled ceramic breeder test blanket module system [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **161**: 112050. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112050.

21 Aubert J, Aiello G, Alonso D, *et al*. Design and preliminary analyses of the new Water Cooled Lithium Lead TBM for ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **160**: 111921. DOI: 10.1016/j. fusengdes. 2020. 111921.

22 Tincani A, Arena P, Bruzzone M, *et al*. Conceptual design of the main Ancillary Systems of the ITER Water Cooled Lithium Lead Test Blanket System[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **167**: 112345. DOI: 10.1016/j.

fusengdes.2021.112345.

23 Zmitko M, Vladimirov P, Knitter R, *et al*. Development and qualification of functional materials for the European HCPB TBM[J]. Fusion Engineering and Design, 2018, **136**: 1376–1385. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.05.014.

24 Cho S, Ahn M Y, Choi J H, *et al*. Investigation of technical gaps between DEMO blanket and HCCR TBM [J]. Fusion Engineering and Design, 2018, **136**: 190–198. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.01.050.

25 Cho S, Ahn M Y, Chun Y B, *et al*. Status of HCCR TBM program for DEMO blanket[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **171**: 112553. DOI: 10.1016/j. fusengdes. 2021.112553.

26 Gaincarli L. Report from the re-established test blanket working group (TBWG) for the period of the ITER Transitional Arrangement (ITA)[R]. St. Paul-lez-Durance, France, 2005.