

磁约束核聚变国际发展态势分析

吴勘^{1*} 赵晏强¹ 仇华炳¹ 郭楷模¹ 陈伟¹ 李富岭² 汪其²

¹ 中国科学院武汉文献情报中心 武汉 430071

² 中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023

*通讯作者 E-mail: wuk@mail.whlib.ac.cn

[摘要] 核聚变能被视为人类可持续发展最理想的未来能源,受控核聚变研究的最终目标是实现聚变能的商业化应用。主要发达国家纷纷制定了聚变能研究战略,探索和发展能直接用于商用聚变堆的各种新技术和新概念,以加快这一进程。经过半个多世纪的不懈努力,世界各国已在磁约束核聚变理论方法、关键技术和实验装置上取得了突破性进展。该文主要从国际相关战略规划、ITER计划现状、理论与实验工艺上的研究进展及关键前沿技术等几个方面对磁约束核聚变国际发展态势进行分析,从文献计量角度揭示出核聚变领域的主要国家、机构和科研人员特征,并提出了中国核聚变未来发展的对策建议。

[关键词] 核聚变 磁约束 托卡马克 战略规划 ITER

DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.201803002

1 引言

作为低碳能源,核能凭借能量密度高、资源丰富、无温室气体排放等优点获得了各国政府的广泛关注。核能分为核裂变能和核聚变能,核聚变能被视为人类可持续发展最理想的新能源。世界主要发达国家纷纷制定了相关核聚变研究战略,探索和发展能直接用于商用聚变堆的各种技术。国际热核聚变实验堆(ITER)计划是当前规模和影响最大的国际科研合作项目之一,该计划将集成当今国际上受控磁约束核聚变的主要科技成果,构建可实现大规模聚变反应的聚变实验堆,将能够研究解决大量技术问题,是人类受控核聚变从研究走向应用的

关键步骤,因而受到各国政府与科技界的高度重视和支持。受控核聚变研究的根本目标就是实现聚变能源的商业化应用,目前的实现方式主要有两种,即惯性约束核聚变和磁约束核聚变。随着聚变研究的发展,托卡马克逐渐成为国际磁约束核聚变研究的主流装置,并在世界范围内掀起了托卡马克的研究热潮。

2 主要国家战略规划分析

2.1 美国

美国是聚变研究的大国和强国。进入21世纪,美国制定了一系列相关能源开发战略和计划,均将聚变能列



为重点研究对象。美国能源部2016年发布的《聚变能科学战略框架》集中在四个主要研究范畴^[1]，即燃烧等离子体下的基本行为、燃烧等离子体下的壁材料研究，面向燃烧等离子体的高功率注入以及等离子体诊断。在该框架内，包括五个重点领域：以验证整个核聚变设备建模为目标的大规模并行计算、与等离子体和核聚变科学有关材料的研究、对可能有害于环形聚变等离子体约束的瞬变事件的预测和控制的研究、重点解决前沿科学问题的等离子体科学管理探索以及聚变能科学设施的定期升级。

2.2 欧盟

核聚变能是最终解决人类能源和环境问题的主要途径之一，对于欧盟长远的经济与社会可持续发展非常重要。欧盟长期重视、支持受控核聚变研究。欧洲受控核聚变50%以上的研发经费由欧盟承担，约30%的经费由欧洲原子能共同体（EURATOM）承担，有一小部分经费来自成员国。欧盟核能研究的投资主要集中在聚变能的研究和开发上，有关欧盟聚变研究的所有决策都是由欧盟部长理事会决定的。欧盟第7个研发框架计划（FP7，2007–2013年）中用于聚变研究的经费为19.47亿欧元（5年），用于EURATOM的总经费为27.51亿欧元，其中有9亿欧元用于ITER建造等活动，还有各成员国提供经费约150万欧元用于核聚变研究。欧盟针对聚变研究制定了详细的实施计划，并辅以充分的研究经费，以保障研究的顺利推进，其战略路线分为三个阶段^[2]：（1）2014–2020年（地平线2020计划）：在计划内建设ITER及其扩建方案，确保ITER成功，为DEMO奠定基础；（2）2021–2030年：充分开发ITER使其达到最高性能，并启动DEMO建设的准备工作；（3）2031–2050年：完成ITER开发，建造及运行DEMO。

2.3 日本

日本由于资源相对贫乏，因而有着更为紧迫的聚变能需求。早在1998年，日本核聚变会议组织就建议将ITER作为第三阶段核聚变研究开发计划的主力装置，且得到了日本原子能委员会的批准。2005年，日本原子能委员会（AEC）发布的《未来核聚变研发策略》提出了

相关聚变研究战略^[3]：（1）使用实验反应堆在自持状态下演示燃烧控制，制定基于实现ITER的实验反应堆的技术目标计划；（2）用实验反应堆实现持续时间超过1 000秒的非感应稳态运行，制定基于实现ITER目标的计划；（3）利用实验反应堆建立集成技术，获取与制造、安装和调整部件整合相关的集成技术，验证安全技术；（4）通过国家托卡马克装置进行ITER的支持研究和前期研究，对高比压稳态等离子体进行研究，建立高比压系数的稳态运行模式，获取经济效益；（5）DEMO反应堆相关的材料和核聚变技术，在ITER的功能测试中使用完整的制造测试组件；（6）确定DEMO的总体目标，结合未来聚变堆的概念设计，对聚变等离子体研究和核聚变技术的发展提出要求。目前，先进的托卡马克研究和核聚变工程的发展在更广泛的框架中得到推广。与其他基础研究相比，日本的螺旋磁约束和激光惯性约束装置作为其他有吸引力的方法已被列为优先考虑。因此，LHD螺旋磁约束项目和FIREX激光项目得到了日本政府的大力支持^[4]。

2.4 中国

为了尽快促使聚变能源在中国的早日利用，中国政府也积极制定了聚变能开发战略，将战略划分为三个阶段，即“聚变能技术—聚变能工程—聚变能商用”，同时设定了清晰的近、中、远期目标：2010–2020年，建立接近堆芯级稳态等离子体实验平台，吸收消化、开发和储备后ITER时代聚变堆关键技术，设计并筹备建设200~1 000兆瓦中国聚变工程实验堆（CFETR）；2020–2035年，建设、研究和运行聚变堆；2035–2050年，发展聚变电站。战略的总目标是^[5]：依托现有的中、大型托卡马克装置开展国际核聚变前沿问题研究，利用现有的装置开展高参数、高性能等离子体物理实验和氚增殖包层的工程技术设计研究；扩建HL-2A和EAST托卡马克装置，使其具备国际一流的硬件设施并开展具有国际领先水平的核聚变物理实验；开展聚变堆的设计研究，建立聚变堆工程设计平台；发展聚变堆关键技术；并通过参与ITER计划，掌握国际前沿的聚变技术，同时培养高水平专业人才。

2.5 俄罗斯

俄罗斯在ITER项目建设期间仍将独立开展自己的核能研究工作,其核聚变战略目标就是建造高温磁约束氘氚等离子体热核聚变反应堆,开发并建造聚变中子源(FNS)来解决原子能问题,以加速聚变应用。俄罗斯制定了在月球上大量开采氦-3的计划,未来发展规划主要包括三个方面^[6]:首先,将T-15改造为T-15MD,进行以中子源为基础的混合堆物理基础研究,解决部分核能实际问题;其次,在3~5年内与意大利合作在俄罗斯建成IGNITOR反应堆,在强磁场装置上完成“点火”;第三,在3~5年内与哈萨克斯坦合作建成KTM托卡马克,进行混合堆堆芯物理、材料和偏滤器实验研究。

3 各国参与ITER计划现状

ITER计划的目标是全面验证聚变能源和平利用的科学可行性和工程可行性,利用在ITER取得的研究经验和成果,建造一个用聚变能发电的示范反应堆(图1)。根据联合实施协定,将由7个参与方对所有的部件分别进行研制,并按照规定的时间节点提交安装。ITER综合

装置的建设于2013年开始,截止到2015年6月其耗资已超过140亿美元,约为原定数额的3倍。原本计划在2019年完成建设并开始试运行,2020年开展等离子体实验,2027年开始完整的氘氚聚变实验,但由于经费大幅超支和各种技术工程难题,ITER项目延误非常严重,其实验启动时间预计将推迟5年。

3.1 美国

ITER国际组织与美国ITER国内机构(US-ITER)2013年10月31日签署了两项托卡马克冷却水系统(TCWS)的相关协议。2014年,由于ITER的延期,美国参议院的预算决策者曾建议美国退出ITER计划。在当年10月1日生效的美国能源部2015财年预算申请中,参议院仅同意为美国参与ITER计划提供7 500万美元,使得美国不得不暂停参与ITER计划。鉴于ITER科学项目的前景,预计美国在2018财年仍将作为ITER的合作伙伴,因为ITER依然是研究燃烧等离子体最快的途径。美国将继续向其他成员国施加压力,继续提高预算透明度,并保持项目预定交付成果的及时性,以减少进一步延误导致成本增加的可能性^[8]。

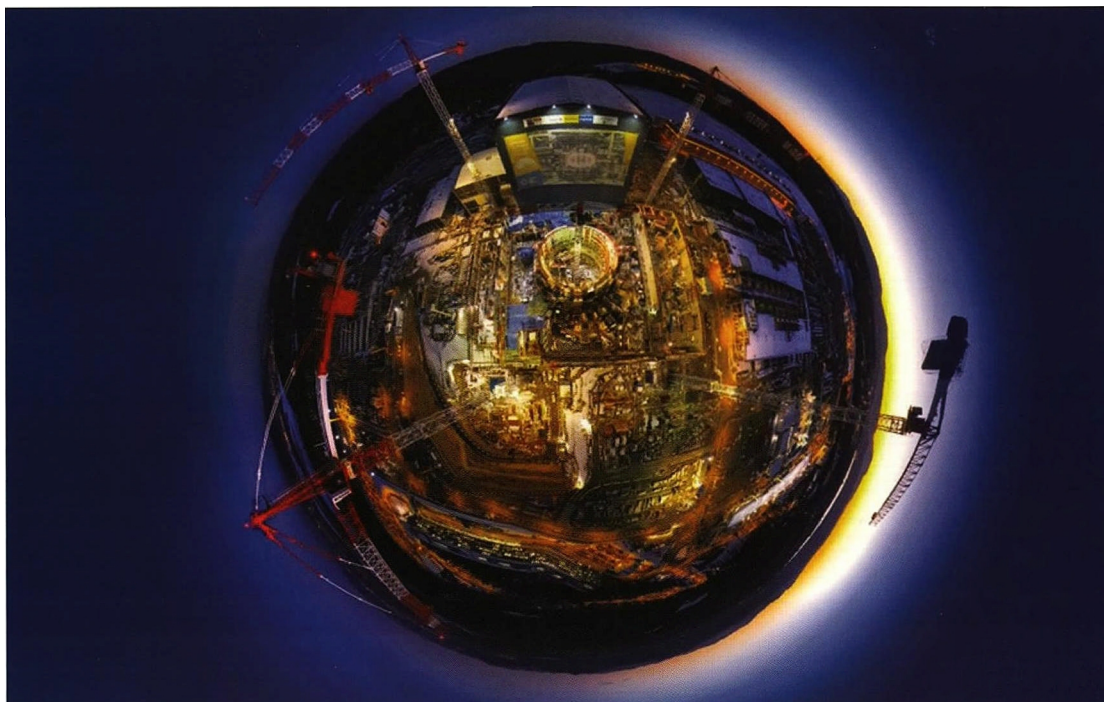


图1 ITER装置现场图^[7]



3.2 欧盟

作为ITER计划东道主的欧盟,除了在ITER计划中所承担的经费和刚性任务外,为配合ITER计划的正确实施和体现欧盟的科学管理能力,围绕ITER计划开展了以下一系列主要活动:(1)整合欧盟聚变模拟的EUFORIA计划,将整合欧盟的计算机联网,协调欧盟各聚变领域开展的模拟;(2)拟建立一个针对ITER的可持续财政框架,要求各成员国承担欧盟在ITER计划中的一部分费用,提供财政支持;(3)设立欧盟ITER署,负责管理欧盟参与ITER活动;(4)在材料研究、聚变数据管理、教育事务等3方面采取协调和援助行动。

3.3 日本

日本量子科学技术研究开发机构(QST)于2016年11月10日宣布,在其用于ITER加热等离子体的100万伏加速器中产生了能够持续60秒的强电流密度粒子束。60秒是实验设备限定的运转时间,而此前的时间仅为0.4秒,这标志着长时间维持核聚变燃烧等离子体状态取得了重大进展,并有望进一步实现ITER提出的3 600秒的目标。在法国南部建设的ITER反应堆将运用该技术,100万伏负离子加速器可长时间保持等离子体上亿度高温中性束注入装置中。

3.4 中国

中国在ITER装置建设期间,负担约10%的费用及设备制造任务。ITER计划中国超导线项目于2017年3月13日全面竣工,超导线分为 Nb_3Sn 材料和 NbTi 材料两种。 Nb_3Sn 超导材料主要用于ITER环向场导体和中心螺线管导体,其余导体采用 NbTi 材料。 Nb_3Sn 和 NbTi 材料在液氮温度4.2K下处于超导状态,其作为关键的基础材料,在ITER装置内能形成强大的磁笼以约束高温等离子体。

3.5 俄罗斯

俄罗斯科学家在超导磁力系统和低温恒温器、真空室和辐射保护系统、信号抑制和外壁系统、等离子加热和电流控制系统、热核反应堆冷却系统等方面进行聚变的理论与实验研究,完成了20亿美元工作量的ITER方

案设计,参与建造ITER关键设备、开发工艺技术等方面的工作。

3.6 韩国

韩国KSTAR装置获得的经验为ITER装置设计、采购和初始运行打下了重要基础,预计ITER联机运行前,KSTAR有望高功率长脉冲运行4~5年,能够为ITER运行提供有效的数据和技术支撑。

3.7 印度

印度聚变界将在工业界的参与合作下,开发出与聚变研究相关的前沿技术。未来10年,印度将为ITER项目提供大约5亿美元的设备及部件,这对于印度工业界是一项挑战,同时也将提升和拓展其在部件生产制造方面的能力,参与ITER加快了天球参考框架(ICRF)、电子回旋共振加热(ECRH)和中性束注入(NBI)等技术的研发步伐。

4 研究进展及关键前沿技术分析

4.1 研究进展

2017年以来,各国科研人员在磁约束核聚变研发上取得了多项重要成果。在聚变理论研究上,美国麻省理工学院等离子体科学与聚变中心(PSFC)研究人员于8月2日被授予美国物理学会的约翰道森奖,其在等离子体物理研究方面开创性地使用质子射线照相法揭示了高能量密度(HED)等离子体的流动性以及不稳定性。与此同时,普林斯顿等离子体物理实验室于8月18日宣布,其研究人员在国家球形托卡马克实验设备(NSTX-U)上发现了一种非常简单快捷的方式来抑制可能停止聚变反应并损坏反应堆壁的不稳定性问题。被抑制的不稳定性被称为全域阿尔芬本征模式(GAE),是一种常见的湍流扰动模式,可能导致聚变反应失败。研究表明,只有少量具有足够能量的粒子能够抑制GAEs。通过使用该代码,可以对ITER的GAE稳定性进行合理的预测。

在核聚变材料开发上,普林斯顿等离子体物理实验



室科研人员于7月5日宣布,采用轻质银色金属锂涂层的托卡马克第一壁,能够提高装置壁材料承受核聚变反应时的高能粒子轰击的能力,并且改善等离子体的约束。其采用的锂超导托卡马克实验装置(LTX)是用液态锂完全包围等离子体的首个装置,实验表明锂涂层可以使等离子体芯部到边界的温度分布保持不变。研究结果证实了之前的预测:在边缘温度高、几乎恒定的温度分布情况下,冷却气体经过等离子体的边缘回到托卡马克壁表面,主要是由于锂的特性能够降低边界的再循环。

在核聚变工程和物理实验研究方面,中国全超导托卡马克实验装置EAST于2017年7月3日首次实现了101.2秒的稳态长脉冲高约束等离子体运行,创造了新的世界纪录。这一里程碑式的重大突破,标志着我国磁约束聚变研究在稳态运行的物理和工程方面将继续保持国际领先地位,为ITER计划和将来CFETR的建设和运行打下了坚实的基础。2017年7月26日,由中国科学院等离子体物理研究所负责研究的ITER计划首个超导磁体系统部件——馈线(FEEDER)采购包PF4线正式完成,在超导接头、低温绝热、高温超导电流引线、低温高压绝缘等核心技术方面取得了多项世界领先成果。2017年9月12日,美国通用原子公司在圣地亚哥DIII-D国家核聚变装置上进行的实验中外推得到,对ITER级别的等离子体,当被用于模拟阿尔法粒子和高能粒子束的氦离子激发多个阿尔芬波时,将会损失高达40%的高能粒子。根据实验结果,普林斯顿等离子体物理实验室物理学家在DIII-D托卡马克建立了这些阿尔芬波对高能氦束影响的定量准确模型。

4.2 关键技术分析

4.2.1 超导磁体材料

当前,托卡马克超导磁体大多采用低温超导体(LTS)技术,采用NbTi和Nb₃Sn材料来建造超导线圈。经过数年的研究,低温超导托卡马克磁体的制作技术已不断完善,已形成了相对丰富的基础实验数据库。然而,随着超导材料和制作技术的发展,高温超导(HTS)材料尤其是第二代HTS带材性能的不断提高,HTS具有的较高的运行温度和较强的磁场等特性降低了

低温制冷系统的技术难度和能量消耗,显示出一些优于LTS的特性,使其具备了更为广阔的应用空间^[9]。近年来,HTS在核聚变设施中的实际应用大多集中在制作电流引线或小型试验磁体方面。对于大型核聚变堆磁体的应用,只是体现在HTS大电流导体的设计、制作以及测试,和HTS聚变堆磁体的概念设计上^[10,11]。2011年8月,Tokamak Solutions公司与牛津仪器公司、捷克理工大学等离子体研究院合作率先在托卡马克装置上使用了HTS磁体^[12]。在试验过程中,HTS线材替换了Golem托卡马克上的两个铜磁场线圈,然后放入一个平常的低温恒温器中,等离子体脉冲被正常激发,托卡马克设施像预期的一样正常运转。这次试验使托卡马克装置上的磁场线圈首次真正使用上了高性能的HTS线材。

4.2.2 增殖包层模块设计

磁约束核聚变系统中的聚变反应区主要分为里外两层,里层是一团被磁场约束的等离子体,外面被包层包围。未来的DEMO中的增殖包层(DEMO-BB)要具备四种作用^[13]:一是包层作为面向等离子体部件,是组成等离子体的物理边界的主要成分(另外的部分为偏滤器),这就要求选择合适的面向等离子体包层材料,在事故工况下其整体结构不会被高温等离子体破坏;二是要求包层材料必须要有较强中子吸收能力,能够屏蔽核辐射保护真空室和磁体,使得沉积到真空室和磁体的中子通量低于限值;三是能够把聚变能转化为冷却剂的热能带出真空室;四是通过聚变中子产氚,完成氚的增殖,即除去氚在回收过程中的损耗后总体氚增殖比(TBR)大于1。要同时完成这四个任务是一项巨大的挑战并可能产生出许多复杂的工程问题。考虑到核安全,在DEMO正式运转之前,这些问题都必需获得充分的验证。前期研究结果显示,现有实验条件均不能完全模拟包层所经受的苛刻工况,大多数工程可行性问题只有在聚变堆环境下才有可能得到验证^[14]。

4.2.3 钨基材料强韧化技术

等离子体在放电过程中会产生很高的热负荷、离子通量以及中子负载,造成表面材料失效,为此,面对等离子体的第一壁材料(PFM)必须具有良好的导热性、



抗热冲击性、低溅射率、氦（氘、氚）再循环作用低等特性^[15]。目前，完全满足要求的PFM并不存在，研究最多且实际使用的三种第一壁材料是碳（C）、铍（Be）和钨（W）。其中，钨具有高熔点（3 410℃）、高导热率、低物理溅射率、低氦滞留、低肿胀等特点^[16]。相比于碳和铍，钨是最受瞩目的PFM^[17]，也是ITER即将采用的第一壁材料。然而，钨存在韧脆转变温度高（100~400℃）、再结晶温度低的不足。研究表明：要增强钨的强韧性，可以从强化晶界、提高再结晶温度方面着手。可以通过加入商业钨丝，实施多种涂层工艺改善其界面性能，从而增强钨基体韧性，还可以通过改进技术和大塑性变形获得超细晶/纳米晶的钨合金，从而提高钨合金的脆性、延展性、高温性能和抗冲击性^[18]。

4.2.4 低活化铁素体/马氏体钢（RAFM）中氦行为分析

由于产氦实验包层模块结构材料将在恶劣的辐射、热量、应力等聚变堆环境下使用，聚变堆包层结构材料的研发就成为了实验增殖模块（TBM）的主要研究内容。国内外在RAFM中氦行为研究方面仍处于起步阶段，各种材料的研制缺乏大量氦及衰变氦-3输运行为以支持实验结果，而氦在材料中继续衰变并积累氦-3，这种方法所带来的破坏效应不会通过含有微量氦的实验推断出来。惰性涂层材料主要为氧化物、氮化物、碳化物和其他陶瓷类化合物^[19]，它们的氦扩散系数比金属低得多，这大大减少了氦扩散到材料中的量。

4.2.5 扩散连接技术在包层模块制造中的应用

TBM是磁约束核聚变实验堆的核心部件之一，主要用于氦的增殖和能量采集。由于结构复杂，包层模块体积大，服务环境差等原因，焊接点成为影响反应堆安全运行的薄弱环节。作为ITER项目的成员国之一，中国科学院以中国科学院等离子体物理研究所和核工业西南物理研究所为牵头单位，承担了实验包层模块的制备工作，并开发了以低活化马氏体钢（CLAM）为代表的高性能RAFM^[20]，但使用RAFM仍存在一定的瓶颈，例如：ITER条件下的工作温度仍然较低；抵御辐射损伤的

能力仍有待提高；与液体锂和其他增殖剂的相容性差。为了解决这一系列问题，铁素体钢（ODS）开始应用于包层模块的制造。其合金成分与RAFM（Cr含量可能增加）基本相似，但制备过程改为机械合金化+热压，或电火花烧结。通过引入具有高热稳定性的纳米氧化物颗粒，ODS的高温耐久性可以大大超过RAFM^[21,22]。

4.2.6 包层脱粘缺陷的声发射检测技术

包层是ITER中的关键部件之一，主要作为对真空室及其外部元件的热量和核的屏蔽。每个包层由第一壁，一个屏蔽块和一个柔性支架组成。在包层中的第一壁界面的脱粘是损伤的主要形式之一，因此检测脱粘缺陷具有重要意义^[23]。

5 研发创新能力定量分析

5.1 数据来源与分析方法

本次分析采用Web of Science数据库源数据构建核聚变相关SCI论文分析数据集，使用核聚变、聚变等离子体、托卡马克、仿星器等关键词进行主题检索，数据采集时间为2017年10月10日，发文时间段为2007—2016年，文献类型限定为Article、Letter、Review，共得到25 504篇论文。利用汤森数据分析器（Thomson Data Analytics, TDA）进行数据清洗、机构规范化后进行数据挖掘和分析。

5.2 整体发展态势

该领域2007—2016年每年发文量均在2 000篇以上，参与国家、机构众多（图2），核聚变领域10年来一直是热点研究方向。

从全球核聚变研究被引频次最高的前10篇SCI论文来看（表1），俄罗斯杜布纳联合核研究所、通用原子公司、法国核技术研究中心（Cadache）、ITER、德国波鸿鲁尔大学、法国原子能委员会、美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室、欧洲原子能共同体等机构的相关人员所做工作具有较高影响力。

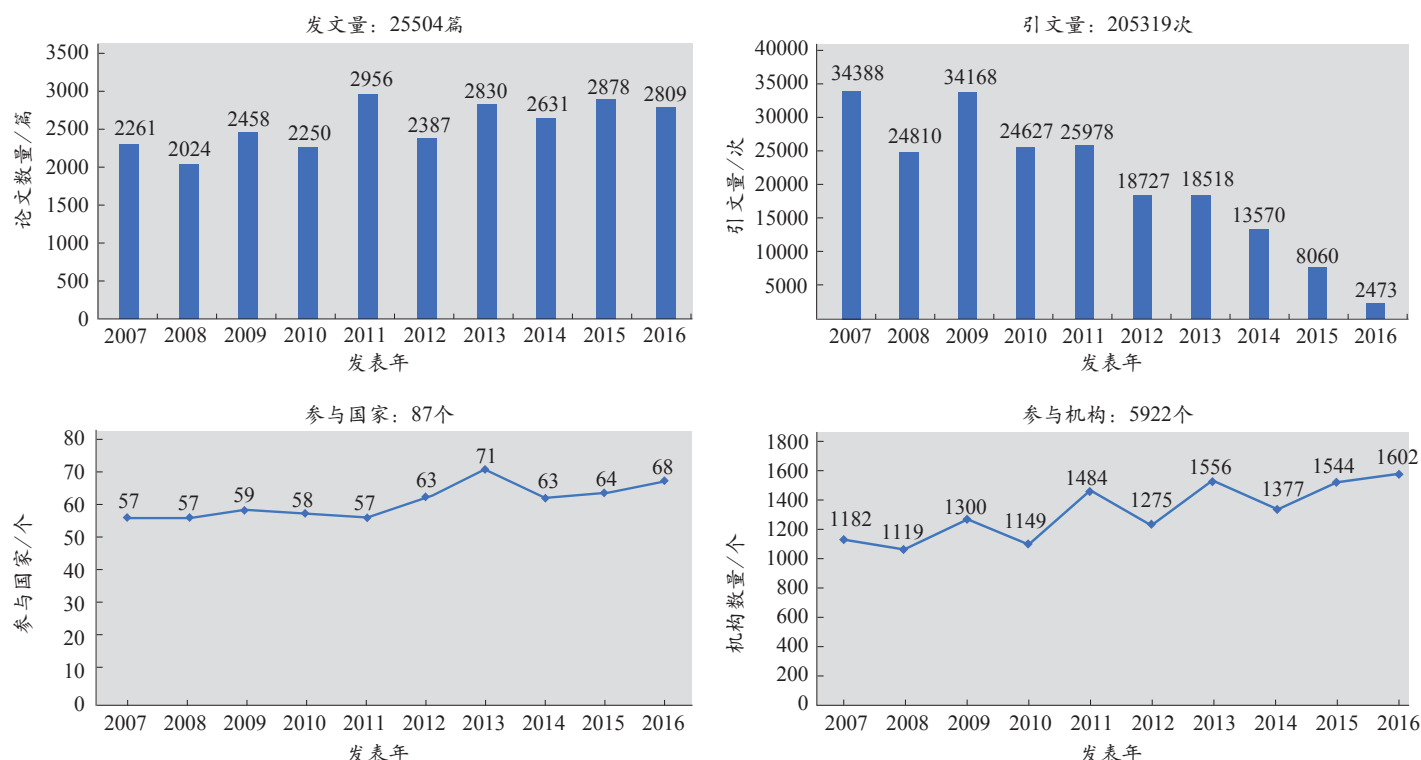
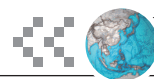


图2 全球核聚变研究SCI论文发文章、引文量、参与国家与机构数量年度变化态势 (2007—2016)

表1 全球核聚变研究被引频次最高的10篇SCI论文

| 序号 | 论文题目 | 第一作者 | 所在机构 | 来源期刊 | 被引次数 |
|----|----------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Heaviest nuclei from Ca-48-induced reactions | Oganessian, Yuri | 杜布纳联合核研究所 | <i>J.Phys. G</i> 34, (2007):R165-R242 | 525 |
| 2 | Recent developments in irradiation-resistant steels | Alinger, M J | 通用原子公司 | <i>Annual Review of Materials Research</i> , 2008, 38 (1):471-503 | 479 |
| 3 | Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions | Bialek, J | 欧洲原子能共同体-CEA协会 | <i>Nuclear Fusion</i> , 2007, 39 (12):2251 | 442 |
| 4 | Chapter 4: Power and particle control | Asakura, N | 法国核技术研究中心 (Cadache) | <i>Nuclear Fusion</i> , 2007, 47 (6):S203-S263 | 433 |
| 5 | Progress in the ITER Physics Basis - Chapter 1: Overview and summary | ITER | 国际热核聚变实验堆 (ITER) | <i>Nuclear Fusion</i> , 2007, 39 (6):2137-2174 | 390 |
| 6 | Colloquium: Fundamentals of dust-plasma interactions | Eliasson, B | 德国波鸿鲁尔大学 | <i>Reviews of Modern Physics</i> , 2010, 81 (1):25-44 | 362 |
| 7 | Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER | Alimov, V | 法国原子能委员会 | <i>Journal of Nuclear Materials</i> , 2009, s 390-391 (1):1-9 | 354 |
| 8 | National ignition facility laser performance status | Auerbach, J M | 劳伦斯-利弗莫尔国家实验室 | <i>Applied Optics</i> , 2007, 46 (16):3276 | 331 |
| 9 | Chapter 2: Plasma confinement and transport | Bateman, G | 欧洲原子能共同体 | <i>Nuclear Fusion</i> , 2007, 47(6) | 324 |
| 10 | X-ray Thomson scattering in high energy density plasmas | Glenzer, Siegfried H | 劳伦斯-利弗莫尔国家实验室 | <i>Reviews of Modern Physics</i> , 2009, 81 (4):1625-1663 | 306 |

5.3 主要国家分析

美国在聚变等离子体物理领域的发文数量、总被引次数和H指数均位列全球第1，且大幅领先于排在第2位的德国及后续国家，我国发文量位列第3（图3）。从发文时序看，我国在近10年的论文数量快速增长，年度发文量在2015年接近美国，并在2016年超过美国；从趋势变化来看，我国在核聚变研究的论文数量仍将保持快速增长趋势。虽然我国在核聚变领域的论文数量排名世界前三位，但是从论文影响力来看，我国在篇均被引次数、H指数方面较美国仍存在很大差距（表2）。

5.4 主要机构分析

本次分析的25 504篇文献共涉及5 922个机构，表3给出了发文量排名前10机构的被引情况。排名第一的美国能源部国家实验室，无论是从论文数量指标还是被引指标来看，都是该领域的最顶尖机构（图4）。通用原子公司发文量不多，但其影响力一流，篇均被引达到了16.8次。中国科学院整体在该领域的发文量排名第二，但论文影响力离顶尖机构还有很大差距，下属研究机构中发文量最多的是合肥物质科学研究所和中国科学技术大学。

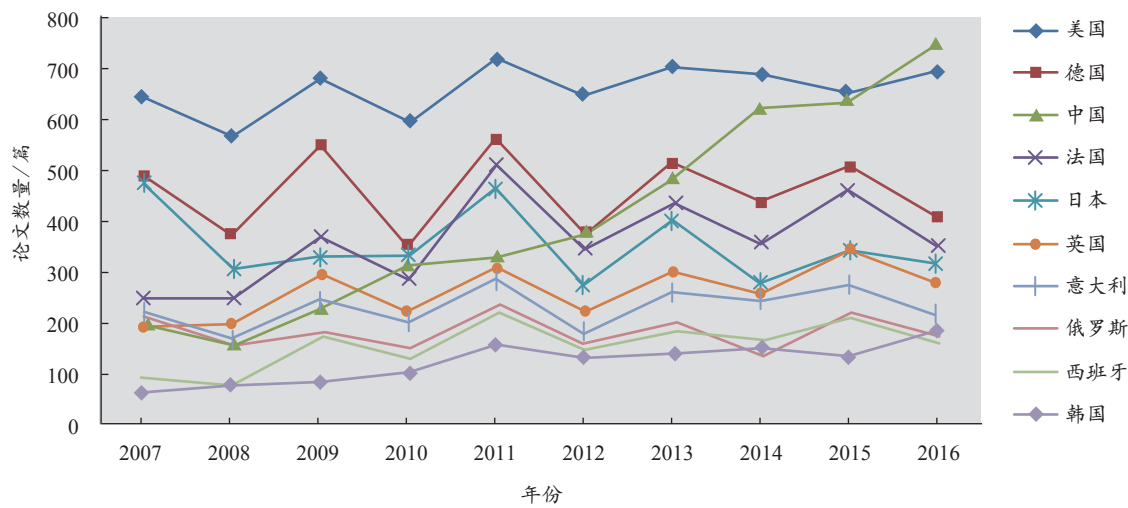


图3 核聚变主要研究国家发文趋势（2007—2016）

表2 核聚变领域主要研究国家文献计量数据（以2007—2016年为统计年限）

| 国家/地区 | 论文总数 | 总被引次数 | 篇均被引次数 | 论文被引率 | H指数 |
|-------|------|-------|--------|-------|-----|
| 美国 | 6591 | 85032 | 12.9 | 86.2% | 88 |
| 德国 | 4581 | 54116 | 11.8 | 87.9% | 71 |
| 中国 | 4092 | 22506 | 5.5 | 71.6% | 50 |
| 法国 | 3606 | 36684 | 10.2 | 84.4% | 63 |
| 日本 | 3509 | 27669 | 7.9 | 78.8% | 58 |
| 英国 | 2611 | 32767 | 12.5 | 88.1% | 61 |
| 意大利 | 2300 | 21813 | 9.5 | 84.5% | 50 |
| 俄罗斯 | 1834 | 16037 | 8.7 | 79.9% | 49 |
| 西班牙 | 1545 | 12478 | 8.1 | 81.8% | 41 |
| 韩国 | 1212 | 7070 | 5.8 | 73.8% | 33 |

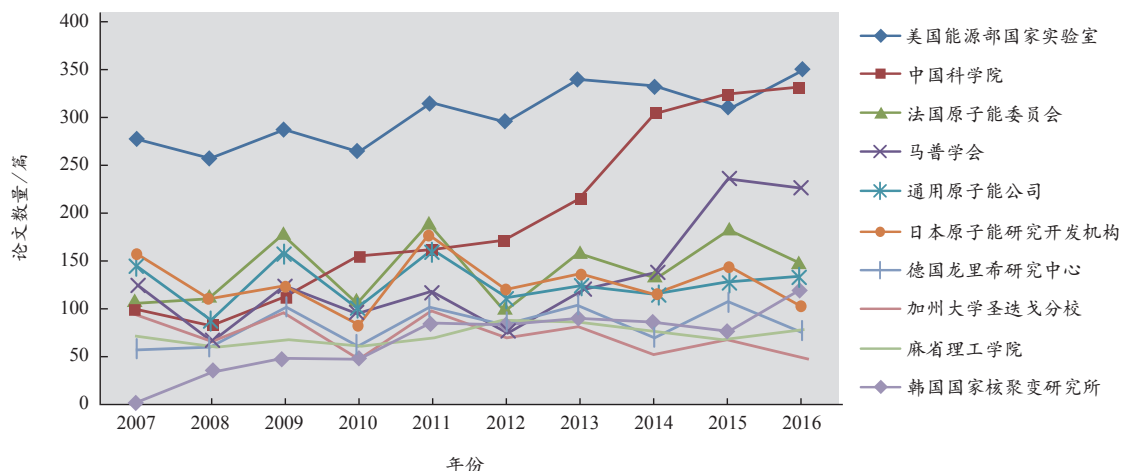
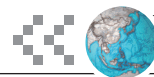


图4 核聚变主要研究机构发文趋势 (2007—2016)

表3 核聚变领域主要研究机构文献计量数据 (以2007—2016年为统计年限)

| 研究机构 | 论文总数 | 总被引次数 | 篇均被引次数 | 论文被引率 | H指数 |
|--------------|------|-------|--------|--------|-----|
| 美国能源部国家实验室 | 3018 | 44160 | 14.6 | 86.6% | 80 |
| 中国科学院 | 1945 | 11122 | 5.7 | 72.5% | 41 |
| -合肥物质科学研究院 | 1553 | 8387 | 5.4 | 70.9% | 36 |
| -中国科学技术大学 | 583 | 2947 | 5.1 | 100.0% | 26 |
| -兰州近代物理研究所 | 71 | 824 | 11.6 | 84.5% | 13 |
| -上海光学精密机械研究所 | 32 | 80 | 2.5 | 71.8% | 5 |
| 法国原子能委员会 | 1441 | 14929 | 10.4 | 86.5% | 47 |
| 德国马普学会 | 1310 | 15943 | 12.2 | 86.7% | 50 |
| 通用原子公司 | 1261 | 21219 | 16.8 | 90.5% | 59 |
| 日本原子能研究开发机构 | 1260 | 12633 | 10.0 | 82.0% | 43 |
| 德国尤里希研究中心 | 811 | 10538 | 13.0 | 89.5% | 42 |
| 加州大学圣迭戈分校 | 711 | 12286 | 17.3 | 92.8% | 47 |
| 麻省理工学院 | 710 | 12367 | 17.4 | 91.5% | 47 |
| 韩国国家核聚变研究所 | 653 | 3244 | 5.0 | 73.2% | 23 |

5.5 主要研究人员分析

表4给出了主要研究人员论文被引情况。综合比较可以看出(图5),英国卡拉姆科学中心的S Brezinsek和V Philipps、ITER的A Loarte在该领域最具有影响力,无论从发文量还是被引情况均位居前列。第二梯队是ITER的R A Pitts、英国卡拉姆科学中心的C Giroud、法国原子能委员会的X Garbet、普林斯顿等离子体物理实验室的R Maingi、通用原子公司的A Nikroo、欧洲原子能共同体

的A Kirk和罗切斯特大学的T C Sangster,虽然这几个研究人员的发文量不是最多,但其论文影响力处于相对领先地位。日本自然科学研究机构的K Ida、英国卡拉姆科学中心的A Murari和伊斯兰自由大学的M Ghoranneviss等也有不错的表现。中国科学家发文较多的是中国科学院合肥物质科学研究院的宋云涛研究员。他主要从事磁约束核聚变装置工程及相关技术的研究。

表4 核聚变领域主要研究人员文献计量数据（以2007—2016年为统计年限）

| 研究人员 | 论文总数 | 总被引次数 | 篇均被引次数 | 论文被引率 | H指数 |
|-----------------|------|-------|--------|-------|-----|
| Brezinsek, S | 195 | 2976 | 15.2 | 93.8% | 27 |
| Philipps, V | 160 | 3687 | 23.0 | 96.2% | 29 |
| Loarte, A | 133 | 4202 | 31.5 | 95.4% | 32 |
| Giroud, C | 127 | 2581 | 20.3 | 96.8% | 28 |
| Ida, K | 124 | 1338 | 10.7 | 90.3% | 20 |
| Murari, A | 123 | 975 | 7.9 | 82.9% | 15 |
| Garbet, X | 121 | 2306 | 19.0 | 92.5% | 25 |
| Ghoranneviss, M | 121 | 919 | 7.5 | 82.6% | 18 |
| Nikroo, A | 120 | 2220 | 18.5 | 95.0% | 23 |
| Pitts, R A | 119 | 2854 | 23.9 | 94.9% | 27 |
| Maingi, R | 117 | 2245 | 19.1 | 96.5% | 26 |
| Sangster, T C | 114 | 2155 | 18.9 | 98.2% | 27 |
| Kirk, A | 113 | 1972 | 17.4 | 96.4% | 26 |
| 宋云涛 | 110 | 252 | 2.2 | 58.1% | 7 |
| Heidbrink, W W | 109 | 2369 | 21.7 | 94.4% | 26 |
| Reiter, D | 109 | 2037 | 18.6 | 95.4% | 22 |
| Frenje, J A | 107 | 2004 | 18.7 | 93.4% | 25 |
| Hidalgo, C | 105 | 1587 | 15.1 | 91.4% | 21 |
| Jachmich, S | 104 | 2099 | 20.1 | 97.1% | 25 |
| Samm, U | 104 | 1834 | 17.6 | 97.1% | 25 |
| Diamond, P H | 103 | 1926 | 18.6 | 94.1% | 24 |

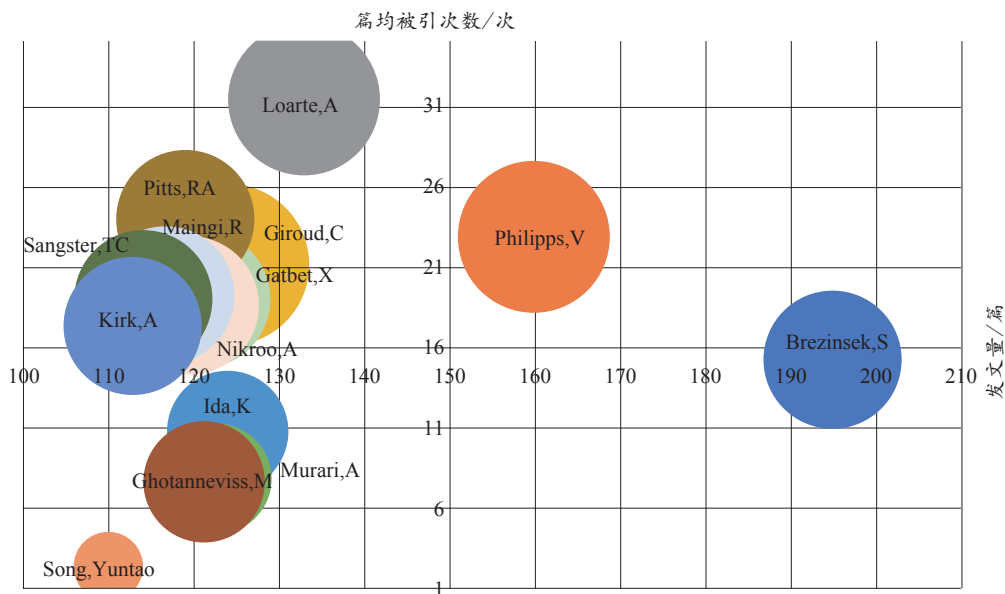


图5 核聚变领域主要研究人员发文量、篇均被引用次数及H指数的比较

注：圆圈大小代表研究人员的H指数



6 我国核聚变发展建议及展望

6.1 建议

6.1.1 建成知名的磁约束核聚变等离子体实验基地

我国聚变大型科学装置不断取得技术突破,为ITER做出重要贡献。未来聚变发展战略应瞄准国际前沿,广泛利用国际合作,巩固中国磁约束核聚变能源发展研究的坚实基础,加快人才培养,依托现有大中型托卡马克装置开展国际合作,研究核聚变前沿课题。通过合作研究建成知名的磁约束核聚变等离子体实验基地,探索未来稳定、高效、安全实用的聚变工程堆的物理及工程技术基础问题。

6.1.2 加强与燃烧等离子体物理相关的技术研究

在未来的核聚变领域,需要重点开展聚变燃料包层材料及聚变裂变混合堆功能材料方面的研究、新型辅助加热加料技术、聚变设施在放射性环境下的故障监测与诊断技术、各类低温等离子体发生新技术、偏滤器物理研究等。在高比压、高参数条件下,研究一系列和聚变堆有关的工程和技术问题,着重开展和燃烧等离子体物理有关的研究课题。

6.1.3 加大磁约束聚变装置的实验研究力度

对EAST和HL-2A这两种主要磁约束装置进行高水平的实验研究,重点开发专门的物理诊断系统,特别是针对深入了解等离子体稳定性,运输,快速颗粒等的物理

诊断。基于对物理机制的深入理解,开发针对等离子体剖面参数和不稳定性的实时控制理论和技术,并研究稳态条件下先进的托卡马克操作模式和手段。

6.2 未来展望

我国加入ITER计划10年以来,认真履行承诺和义务,完成了所有ITER采购包制造任务,严格按照时间表和要求高标准提交了相关制造设备和部件,展示了中国创造和制造的实际能力,ITER参与各方也给予充分肯定。由于ITER项目,中国的超导技术取得了长足的进步,如高功率连续波加热,遥控机器人维护,大型低温系统和大型电源等,在核聚变各领域都获得了快速发展,并进入国际一流行列。

CFETR项目已于2015年完成了工程概念设计,在国际上引起了很大的反响,世界聚变研究发达国家美国、德国、法国、意大利等都和我国建立了密切的联系,全面参与CFETR的联合设计。2017年12月5日,“CFETR集成工程设计研究”项目启动会在合肥举行,宣布CFETR正式开始工程设计,并按照“三步走”战略最终解决人类终极能源问题的发展路线图。CFETR项目的成功实施不仅为中国进一步自主开发和利用聚变能源奠定了科技和工程的坚实基础,也使中国有可能率先使用聚变发电,实现跨越式发展。随着我国在磁约束核聚变领域研发能力和科技水平的提升,未来将继续推动ITER计划的实施。同时,中国将加强国际合作,贡献中国的智慧,引领世界聚变能研发的未来。

参考文献

- [1] DOE. 2015-12-29. Fusion Energy Science Program A Ten-Year Perspective (2015-2025). https://science.energy.gov/~media/fes/pdf/workshop-reports/2016/FES_A_Ten-Year_Perspective_2015-2025.pdf.
- [2] EUROfusion. 2013-01-20. A roadmap to the realisation of fusion energy. <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>.
- [3] Yamada H, Kasada R, Ozaki A, et al. 2015. Development of Technology Bases for Japanese Strategy to Fusion Power. Fusion Power Associates, 36th Annual Meeting and Symposium “Strategy to Fusion Power”.
- [4] Yuichi Ogawa. 2016. Fusion Studies in Japan. Journal of Physics: Conference Series 717. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/717/1/012003/pdf>.
- [5] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展[J]. 物理, 2016, 45(2): 88-97.
- [6] 王海. 世界首个托卡马克诞生地 俄罗斯的聚变研究之路[J]. 科技情报开发与经济, 2014, 24(3): 157-160.
- [7] The TIER Organization. 2017-12-11. Building ITER Halfway to First Plasma[DB/OL]. <https://www.iter.org/newsline/-/2877>.
- [8] DOE. 2016-05-30. U.S. Participation in the ITER Project. https://science.energy.gov/~media/fes/pdf/DOE_US_Participation_in_the_ITER_Project_May_2016_Final.pdf.



- [9] 孙林煜, 李鹏远. 第二代高温超导体研究与在聚变领域应用前景[J]. 低温与超导, 2012, 40(9):44-47.
- [10] Ballarino A, Fleiter J, Hurte J, et al. First tests of twisted-pair HTS 1 kA range cables for use in superconducting links[J]. Physics Procedia, 2012, 36: 855-858.
- [11] Kario A, Vojenciak M, Grilli F, et al. Investigation of a Rutherford cable using coated conductor Roebel cables as strands[J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(8): 085019.
- [12] Gryaznevich M, Svoboda V, Stockel J, et al. Progress in application of high temperature superconductor in tokamak magnets[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9-10): 1593-1596.
- [13] Giancarli L M. Overview of the ITER TBM program[J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87(5/6): 395-402.
- [14] Zmitko M, Poitevin Y. Development and qualification of functional materials for the EU test blanket modules: Strategy and R&D activities[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417(1/3): 678-683.
- [15] Pitts R A, Carpentier S. Physics basis and design of the ITER plasma-facing components[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 415(3): S957.
- [16] Rieth M, Akta J, Antusch S. Recent progress in research on tungsten materials for nuclear fusion applications in Europe[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 432(1-3): 482.
- [17] Philipps V. Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 415(S1): S2.
- [18] Zhou Z J, Pintsuk G, Linke J. Transient high heat load tests on pure ultra-fine by resistance sintering under ultra-high pressure[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(1): 115.
- [19] Causey R A, Karnesky R A, Marchi C. Tritium barriers and tritium diffusion in fusion reactors[J]. Comp Nucl Mater, 2012, 4: 511.
- [20] 黄璞, 杨善文, 王炯, 等. CLAM钢搅拌摩擦焊温度场有限元分析[J]. 精密成形工程, 2013, 5(3):35-39.
- [21] Miller M K, Parish C M, Li Q. Advanced Oxide Dispersion Strengthened and Nanostructured Ferritic Alloys[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(10):1174-1178.
- [22] Pasebani S, Charit I. Effect of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Nano-structured Ferritic Steels Produced by Spark Plasma Sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 599:206-211.
- [23] 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[J]. 核聚变与等离子体物理, 2015, 35(1): 35-40.

International Development Trend Analysis of Magnetic Confinement Nuclear Fusion

Wu Kan^{1*}, Zhao Yanqiang¹, Qiu Huabing¹, Guo Kaimo¹, Chen Wei¹, Li Fuling², Wang Qi²

1 Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071

2 Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023

*Corresponding author, E-mail: wuk@mail.whlib.ac.cn

[Abstract] Nuclear fusion can be regarded as the most ideal future energy for human renewable development. The ultimate goal of controlled nuclear fusion research is to realize the commercial application of fusion energy. The major developed countries have developed fusion energy research strategies and explored various new technologies and concepts that can be directly used in commercial fusion reactors to speed up this process. After more than half a century of unremitting efforts, countries all over the world have made breakthroughs in magnetic confinement fusion theory, key technologies and experimental devices. This article mainly analyzes the international development trend of magnetic confinement fusion from aspects of international relevant strategic planning, status of ITER program, research progress and key frontier technologies, reveals the main characteristics of national institutions and scientific research personnel in the field of nuclear fusion from the perspective of bibliometrics, and put forward suggestions for the future development of nuclear fusion in China.

[Keywords] nuclear fusion, magnetic confinement, tokamak, strategic planning, ITER.