

2025年09月13日

证券研究报告|行业研究|行业深度报告

机械设备

可控核聚变行业深度报告：能源领域终极畅享，行业卖铲人率先受益

我国核能领域迎来首部基础性、综合性的法律：9月12日，《中华人民共和国原子能法》由第十四届全国人民代表大会常务委员会第十七次会议通过，并给予公布，自2026年1月15日起施行。此次颁布的《原子能法》是我国首部统领原子能领域的基础性法律，其完善了涉核领域法规体系，有利于促进原子能事业健康、可持续发展。原子能法明确，国家鼓励和支持受控热核聚变的科学研究与技术开发，并将建立符合受控热核聚变特点、促进核聚变应用的监督管理制度，对聚变燃料、聚变装置（设施）实行分级分类管理。

能源领域的终极畅享：可控核聚变被视为能源领域的“终极解决方案”，其一旦实现商业化落地，或将如蒸汽机、电气化的出现一样，主导新一轮科技革命。当能源不再稀缺，以资源为基础的国际秩序也将被改写，而率先掌握可控核聚变技术的国家将成为新一轮科技革命中的领先国，从而在全球能源领域掌握核心话语权。FIA 调查表明，多数企业认为具备商业化价值的托卡马克聚变堆有望在2031-2035年及以后诞生。

顶层政策引领叠加资本持续加码，核聚变技术商业化奇点已致：可控核聚变已成为全球主要国家未来能源战略布局的重点方向，在海外头部经济体的政策持续加码下，我国陆续出台相关政策，共同引领可控核聚变行业发展建设提速，政策释放的前瞻信号较为明确。目前可控核聚变多条技术路径仍处于齐头并进态势：托卡马克是目前全球范围内投资额最大、技术发展最为成熟的路线，已处于工程可行性阶段，国际合作及国家级项目多采用托卡马克，较多民营企业正在向高温超导托卡马克装置方向发展；Helion、瀚海聚能等创业公司则采用了FRC技术路径，瀚海聚能于2025年7月实现等离子体点亮标志着FRC步入工程可行性阶段，Helion计划于2028年实现商业化运营并向微软交付50MW电力；Z-FFR为聚变裂变混合路线，江西“星火一号”项目以及成都先觉聚能均计划采用该路线，项目正在有序推进中。随着国内聚变项目融资的如火如荼，以及招标建设的加速推进，民营企业与“国家队”形成优势互补、共同促进聚变商业化落地，行业进展日新月异。在我国原子能法及顶层行业政策的指引下，核聚变行业已兼具了科研及制造的发展沃土，国有和社会资本的加速涌入也推动了聚变能从实验室走向商业化的进程，核聚变行业已迎来奇点时刻。

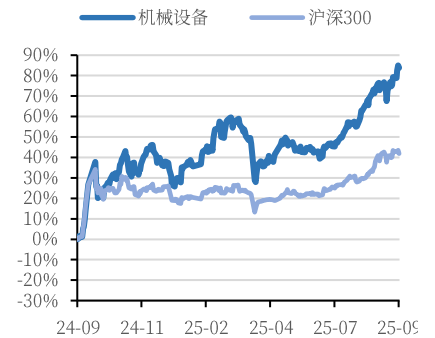
聚变堆撬动万亿蓝海市场，推动中上游环节产业化提速：根据FIA的调查显示，高温超导、第一壁材料、低温系统、热交换器、真空室等一系列材料和零部件被多数企业

投资评级

增持

维持评级

行业走势图



作者

邓轲

分析师

SAC执业证书: S0640521070001

邮箱: dengke@avicsec.com

相关研究报告

【中航新材料】合锻智能(603011.SH):首次覆盖,深度绑定核聚变链主企业,拓展尖端制造业务 —2025-09-05

股市有风险 入市需谨慎

中航证券研究所发布 证券研究报告

请务必阅读正文之后的免责声明部分

联系地址:北京市朝阳区望京街道望京东园四区2号楼中航产融大厦

中航证券有限公司

公司网址: www.avicsec.com

联系电话: 010-59219558 传真: 010-59562637

视为装置的关键部分，而下游总装企业对氦和氦燃料、燃料循环系统、第一壁材料、特种金属等环节在未来的批量化供应仍有隐忧，上述环节的产业化进程值得关注。国内核聚变链主企业的招标建设将带动上游材料及中游加工企业共享行业初期高增长的红利，行业卖铲人将率先受益：

1) **高温超导有望迎来市场空间倍增**：由于核聚变功率与磁场强度的四次方成正比，高温超导具备的高磁场强度能为核聚变反应提供更高的功率上限。目前低温超导材料因具有优良的机械加工性能和成本优势，在超导市场中的占比超过 90%，而高温超导带材仍处于产业化初期阶段，Conectus 预计至 2030 年高温超导材料将占据全球超导行业 25% 的市场份额，YBCO 高温超导带材在托卡马克中应用渗透率的提升和核聚变行业需求的增长将共同推动其市场空间的倍增，**建议关注高温超导带材生产环节：永鼎股份、上海超导（未上市）；核聚变用高温超导磁体系统组装环节建议关注：联创光电。**

2) **包层模块为托卡马克核心部件**：包层模块涵盖第一壁、氦增殖区和屏蔽块，其中第一壁直接面向高温等离子体的核心部件，是制约可控核聚变未来发展的主要“瓶颈”之一，**建议关注包层模块第一壁板核心生产企业：国光电气。**随着未来托卡马克装置步入氦氦燃料聚变反应阶段，后续包层模块将升级为氦增殖包层以解决“氦自持”问题，这也是聚变堆能否实现商业化的核心，我们认为未来率先掌握高效产氦技术的链主企业将率先推动聚变堆向商业化迈进，行业进展值得持续关注。

3) **钨铜偏滤器为未来主流方案**：偏滤器的主要功能为排出聚变反应产生的等离子体污染和其携带的热量，其服役要求与第一壁相似，因此偏滤器的结构设计、高热流密度材料的应用、制造加工技术等多个关键要素缺一不可。钨铜偏滤器能满足高功率长脉冲的工程使用要求，是较为理想的方案，**建议关注国内钨铜偏滤器核心供应商：安泰科技**；偏滤器中热沉材料的性能决定了部件能否承受高热负荷及中子辐照，目前来看铬钼铜合金具备较大的应用空间，**建议关注上游特种铜合金材料供应商：斯瑞新材。**

4) **真空室具备较高的加工壁垒**：真空室作为容纳等离子体反应的场所，其结构稳定性和使用功能安全性对聚变堆的安全运行有着非凡的意义。由于聚变功率和腔体体积成正比关系，因此大型真空室的应用或为未来商业聚变堆的大势所趋。这也相应地对真空室的大尺寸、高精度成型加工技术提出了更为严格的公差要求，掌握相关加工技术、检测技术和一体化解决方案的企业也将具备较强竞争优势，**建议关注具备聚变堆真空室制造加工经验并与下游聚变堆总装客户深度绑定的企业：合锻智能；建议关注上游材料研发及锻件产品供应企业：派克新材、久立特材。**

风险提示：可控核聚变技术及产业化进程不及预期、关键公司融资进度或募投项目进展不及预期、可控核聚变行业政策支持不及预期、可控核聚变技术路径迭代风险、资本市场估值波动风险等。

正文目录

一、 可控核聚变行业奇点已至	6
1.1 可控核聚变战略意义非凡	6
1.2 行业政策导向发出前瞻信号.....	10
1.3 核聚变项目资本开支逐步提速.....	12
1.4 托卡马克装置产业链全景概览.....	20
二、 聚变堆建设撬动万亿蓝海市场	24
2.1 高温超导有望迎来增量拐点.....	25
2.2 包层模块对材料服役提出高要求.....	29
2.3 偏滤器材料应用持续迭代中.....	35
2.4 真空室高精度加工具备高壁垒.....	39
三、 投资建议	43
四、 风险提示.....	44

图表目录

图 1 氘和氚的聚变反应方程式.....	6
图 2 氘和氚原子核聚变产生氦核和中子并释放能量	6
图 3 太阳的引力聚变反应	7
图 4 美国国家点火装置 (NIF) 采用惯性约束路线.....	7
图 5 托卡马克装置中电流和磁场示意图.....	7
图 6 直线型场反位形 (FRC) 装置	7
图 7 三条核聚变技术路线对比.....	8
图 8 氘氚 (D-T) 反应的聚变三乘积在 1 亿多摄氏度时可达到最小值	9
图 9 近年来全球各国出台的核聚变行业部分相关政策	11
图 10 我国出台的核聚变行业部分相关政策	12
图 11 企业对首个给电网送电的聚变堆并网时间预期.....	13
图 12 企业对首个具备商业化价值聚变堆的时间预期.....	13
图 13 可控核聚变创业公司成立数量保持快速增长趋势.....	13
图 14 海外可控核聚变创业公司融资概况及项目时点.....	14

图 15 中国磁约束聚变能发展技术路线图	15
图 16 我国聚变行业核心企业分布	16
图 17 BEST 工程总装启动仪式	17
图 18 BEST 总装正式启动	17
图 19 七方签署中国聚变公司增资扩股协议	18
图 20 我国可控核聚变装置情况汇总	19
图 21 ITER 托卡马克的截面示意图	20
图 22 ITER 装置中各部件功能及参数概况 (1)	21
图 23 ITER 装置中各部件功能及参数概况 (2)	21
图 24 ITER 中各部件成本占比	21
图 25 国内托卡马克装置相关材料、部件及系统供应商	23
图 26 磁约束聚变装置关键材料及零部件	24
图 27 磁约束聚变装置中当下及未来紧缺的材料及零部件	24
图 28 托卡马克装置用超导磁体产业链相关企业	25
图 29 低温超导与高温超导对比	26
图 30 实用化超导导线的截面结构	26
图 31 托卡马克装置磁位型	27
图 32 实用化超导材料的温度和磁场关系	27
图 33 上海超导	29
图 34 东部超导	29
图 35 ITER 的包层被固定于真空室中	30
图 36 包层结构的内部视角	30
图 37 包层系统模块结构拆分	31
图 38 包层模块示意图	31
图 39 包层模块工作原理	31
图 40 典型第一壁材料的物理属性及其主要优缺点	32
图 41 ITER 真空腔室截面图	32
图 42 ITER 第一壁板	32
图 43 2016 年 11 月中方与 ITER 组织签署《ITER 计划中方增强热负荷型第一壁 采购安排协议》	33
图 44 首件 ITER 增强热负荷第一壁在贵州制造完成	33
图 45 氦循环原理	34
图 46 氦增殖剂-正硅酸锂小球 (左), 中子倍增剂-铍小球 (右)	34
图 47 聚变堆偏滤器概述图	35
图 48 ITER 偏滤器位于真空室底部环形位置	36
图 49 ITER 偏滤器盒式组件构成	36
图 50 材料腐蚀会影响其力学、热学性能	37

图 51 安泰天龙使用“两步热等静压扩散焊接”金属复合技术实现了钨铜复合组件
高质量异种材料连接 37

图 52 磁约束聚变装置中的钨/铜偏滤器结构 38

图 53 (a) ITER 全钨偏滤器示意图; (b) 垂直靶板处面向等离子体单元; (c) 穹
顶处面向等离子体单元 39

图 54 ITER 真空室示意图 40

图 55 单个真空室扇区示意图 40

图 56 ITER 真空室搭建 41

图 57 电子束焊接和相控阵超声检测 41

图 58 重力支撑安装验收 41

图 59 全球首台全高温超导托卡马克装置 HH-70 主机系统发运 42

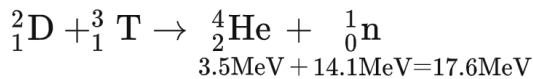
图 60 全球首台 EXL-50U 紧凑型聚变装置新奥真空室整体交付 42

一、可控核聚变行业奇点已至

1.1 可控核聚变战略意义非凡

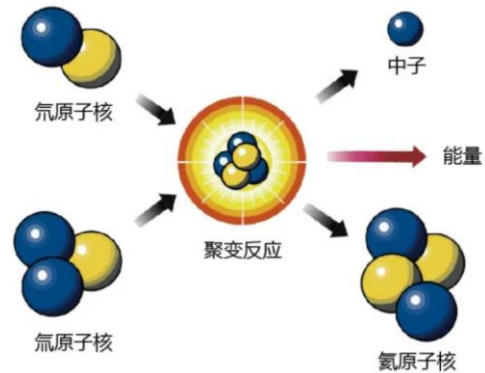
核聚变是能源领域的“终极解决方案”，有望引领新一轮的科技革命。核聚变是两个较轻的原子核聚合为一个较重的原子核，并释放出能量的过程。自然界中最容易实现的聚变反应是氢的同位素“氘”与“氚”聚变形成氦核并释放能量，该过程能释放出 17.6 兆电子伏的能量，太阳正是通过这种反应来持续发光发热。可控核聚变模仿了太阳的核聚变反应，又称“人造太阳”，是指在一定条件下控制核聚变的速度和规模，以实现安全、持续、平稳的能量输出的核聚变反应。目前我国正在运行的核电站都是核裂变电站，核裂变虽然能产生巨大的能量，但裂变堆的核燃料蕴藏极为有限，而且存在棘手的废物处置问题；相比之下，1 吨氘氚聚变反应释放的能量，相当于 5.7 吨裂变燃料或 700 万吨原油燃烧释放的能量，地球上蕴藏的核聚变能约为全部可进行核裂变元素释出能量的 1000 万倍。因此，可控核聚变被认为是人类解决能源问题的重要出路，其一旦实现商业化落地，或将如蒸汽机、电气化的出现一样，主导新一轮科技革命，这也意味着人类能从根本上解决能源危机，进入能源取之不尽、用之不竭的时代。

图1 氘和氚的聚变反应方程式



资料来源：《Tokamaks》，中航证券研究所

图2 氘和氚原子核聚变产生氦核和中子并释放能量



资料来源：中国网新闻，中航证券研究所

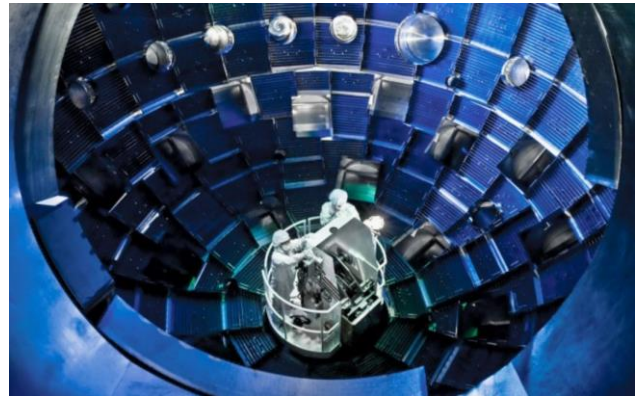
可控核聚变可分为引力约束、惯性约束和磁约束三种技术路线，当前磁约束路线最为主流。在核聚变的三类约束方式中，引力约束无法在地球上实现，惯性约束由于电--激光转化的能量损耗较高且能量的输出和转移暂不成熟，仍有较多的技术难点需要克服，因此当前更常用于军事领域。相比之下，磁约束路线的能量转化效率更高，反应也更为可控，是更具发展潜力、更成熟的路线，也因此成为了世界级、国家级工程以及众多民营企业的主流选择路线。

图3 太阳的引力聚变反应



资料来源：搜狐，中航证券研究所

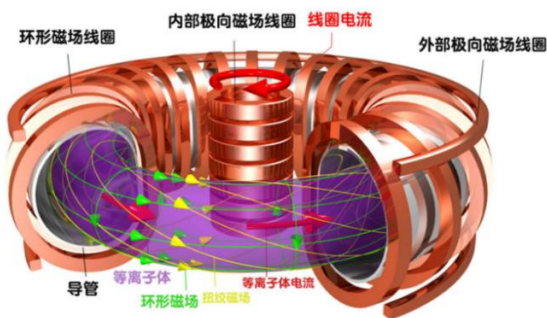
图4 美国国家点火装置（NIF）采用惯性约束路线



资料来源：LLNL，中航证券研究所

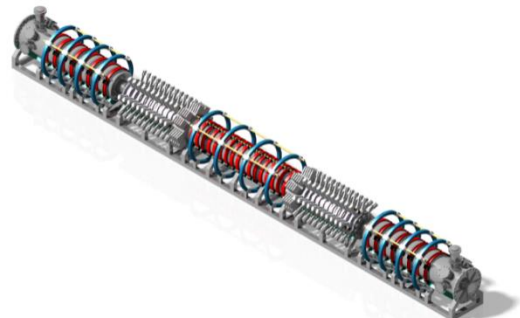
磁约束聚变是利用磁场与高热等离子体来引发核聚变反应的技术，目前可控磁约束聚变仍处于多条技术路线齐头并进的阶段。磁约束聚变通过加热氘、氚聚变燃料，使它成为等离子体形态，再利用强磁场来约束高热等离子体中的带电粒子，使它进行螺线运动，进一步加热等离子体，直到产生核聚变反应。为实现磁力约束，需要一个能经受高温、产生足够强的磁场、能将等离子体约束起来持续反应的装置。根据国家核安全局，在核能发展“三步走”路径的明确指引下，我国已成功建设了一系列独具特色的磁约束等离子体研究装置，包括环形托卡马克、球型托卡马克、反场箍缩、仿星器、直线型场反位形装置以及偶极磁场装置等多种类型的研究装置。

图5 托卡马克装置中电流和磁场示意图



资料来源：The Kharkiv Times，中航证券研究所

图6 直线型场反位形（FRC）装置



资料来源：可控核聚变，中航证券研究所

核聚变装置的发展阶段可被概括为“科学可行性”、“工程可行性”及“商业可行性”。托卡马克装置 (Tokamak)、直线型场反位形装置 (FRC)、Z 箍缩聚变裂变混合堆 (Z-FFR) 是目前受较多项目采纳的核聚变装置路线。目前托卡马克是全球范围内投资额最大、技术发展最为成熟的路线，已处于工程可行性阶段，国际项目 ITER 以及国内的 EAST、CRAFT、CFETR 等大型科学装置均采用了托卡马克路线。当前采

用 FRC 技术路径的多为核聚变创业公司，包括海外的 Helion Energy、TAE Technologies 以及国内的瀚海聚能、星能玄光、诺瓦聚变等，瀚海聚能在 2025 年 7 月实现等离子体点亮标志着 FRC 步入工程可行性阶段。Z-FFR 为聚变裂变混合路线，由中国工程物理研究院在 2008 年提出，目前中核集团与联创光电联合推进建设的“星火一号”项目以及国光电气与天府创新能源研究院等共同出资成立的先觉聚能均计划采用 Z-FFR 路线。

三条路线对比而言：1) 装置构成方面，三者的核心部件各不相同，托卡马克装置对超导磁体的需求量较大；FRC 因需毫秒级脉冲能量输入，其对电源系统的要求较高；Z-FFR 对驱动器系统和次临界能源堆的需求较高；2) 商业化时间预期上，多数企业预计托卡马克装置有望在 2030 年代实现商业化供电；美国 Helion 的场反位形装置目标最早将于 2028 年投入运营，并开始向微软数据中心交付 50MW 电力；Z-FFR 预计将于 2040 年代进入商业化推广阶段。上述技术路线处于齐头并进的发展阶段，尽管目前托卡马克路线具备较为成熟的技术储备并已获得较高的资本开支，但若 FRC 的商业化落地进程先于托卡马克，则有可能带动可控核聚变主流技术路线的更迭，进而牵动技术路线的低成本复制和相关企业的投融资力度，这会对不同路线的装置需求量造成更为深远的影响，因此需要以辩证的思维去看待未来各个路线的发展。

图7 三条核聚变技术路线对比

装置	托卡马克	直线型场反位形 (FRC)	Z 箍缩聚变裂变混合堆 (Z-FFR)
工作原理	强磁场约束高温等离子体，产生核聚变反应	通过中性束注入技术，在装置中心直接生成、加热并稳定等离子体，产生核聚变反应	通过聚变中子源产生中子，驱动次临界裂变堆实现能量放大，实现聚变-裂变混合反应
磁场原理	等离子体电流自身会产生极向磁场，该极向磁场与环向场线圈产生的纵场耦合后形成螺旋形磁场，等离子体在耦合磁场中做环形螺旋运动	通过等离子体自身产生的磁场与外部磁场相互作用，形成闭合环形结构约束高温等离子体	利用强电流产生的自生磁场压缩等离子体以实现聚变条件
核心挑战	保持等离子体稳定性	保持高能粒子约束时间	对高参数脉冲驱动器要求苛刻
最大优势	1. 物理模型成熟 2. 大型项目经验丰富	1. 更低的建造、运行成本 2. 更高的能量效率 3. 更强的稳定性和安全性	1. 经济高效 2. 安全性好 3. 铀资源利用率高
技术成熟度	全球多个装置已完成放电演示，但对于低温/高温超导的应用方案仍在持续调整中，新装置的建设持续推进中，处于从实验堆向商业堆迈进的阶段。	2025年7月瀚海聚能HHMAX-901主机建设完成并实现等离子体点亮，标志着场反位形装置逐步从实验室阶段迈向应用落地阶段。	仍处于关键技术攻关阶段。2021年，“电磁驱动大科学装置”项目立项，重点验证“局部体点火靶”技术。2023年，研制大功率超快半导体开关以满足Z-FFR驱动器重频长寿命的应用需求。
商用化时间预测	多数项目预计将在2030年代实现商业化供电。	Helion计划于2028年实现商业化供电；瀚海聚能计划于2030年底前初步实现聚变发电商业化。	2035年开始建设1000兆瓦级电功率Z-FFR，2040年进行发电演示，之后进入商业推广阶段。

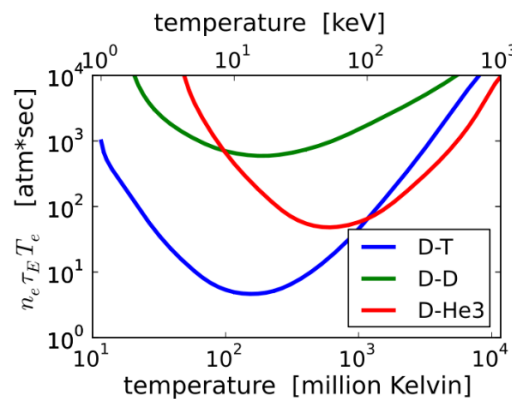
资料来源：国家核安全局，腾讯网，新浪网，中航证券研究所

磁约束聚变实现能量增益并走向商业化的关键科学标准包括“劳森判据”和“聚

变能量增益因子（Q 值）”的大小：

- 1) 根据劳森判据，核聚变反应实现稳态运行的前提是聚变三乘积大于临界值。实现可控核聚变反应需要同时满足三个条件：足够高的温度，一定的粒子密度和一定的约束时间，以上三者的乘积被称为“聚变三乘积”。英国科学家提出的“劳森判据”阐述了核聚变反应堆能量平衡的前提条件，劳森判据建立的基础是能量守恒定律，即聚变产生功率需补偿等离子体辐射损失和系统热传导损耗。该判据包含温度、密度和约束时间三个核心参数，其中等离子体需维持 1 亿摄氏度以上高温使聚变燃料充分电离。判据指出，维持聚变能量平衡需要粒子密度（ n ）与约束时间（ τ ）的乘积超过临界阈值 6×10^{13} ($n\tau \geq 6 \times 10^{13}$)，当满足劳森数 $nT\tau \geq 3 \times 10^{21}$ （单位： $m^{-3} \cdot keV \cdot s$ ）时，聚变反应产生的能量将超过加热输入能量，实现自持燃烧。三乘积越高反应难度也越大，而氘-氘（D-D）反应在一亿多摄氏度时聚变三乘积可达最小值，相对氘-氘（D-D）、氘-氦 3（D-He3）更低，也就是说氘-氘点火温度的门槛相对较低，且在工程上最容易实现。这也是除了原料获取难易程度之外，氘和氘被选为核聚变主要原料的原因之一。

图8 氘氘（D-T）反应的聚变三乘积在 1 亿多摄氏度时可达到最小值



资料来源：维基百科，中航证券研究所

- 2) 聚变能量增益因子（Q 值）是核聚变反应产生的能量与输入装置能量之比，其意义体现在能量效率、技术可行性及商业化潜力等多个维度。从核聚变装置的理论可行性角度出发， $Q=1$ 是聚变反应自持的物理门槛，若要投入实际使用，则输出装置的能量需要高于输入的能量（也就是需要 $Q>1$ ），装置才具有可行性和实用性，且 Q 值越高能量转换效率越高。国际上公认 Q 值要达到 10 以上核电站才能有收益，而如果想成为商业化的核聚变发电站，Q 值还需要达到 30 以上。

当今可控核聚变行业的最终目标是建成经济性能优异、安全可靠、无环境污染的核聚变电站，使之成为人类未来的永久能源。当能源不再稀缺，以资源为基础的国际秩序也将被改写，而率先掌握可控核聚变技术的国家将成为新一轮科技革命中的

领先国，从而在全球能源领域掌握核心话语权。

1.2 行业政策导向发出前瞻信号

可控核聚变行业具备很高的市场天花板和十分庞大的潜在市场规模，也是全球主要国家未来能源战略布局的重点方向。根据普林斯顿大学的研究人员测试，一座1000MW的核聚变电厂成本在27亿美元到97亿美元之间；若核聚变完全商业化，根据Ignition Research的估算，到2050年将成为至少1万亿美元的市场。然而，核聚变行业作为一个耗资巨大、投资回报周期较长的行业，在聚变堆尚未真正实现商业化落地、达到盈亏平衡之前，行业的持续发展离不开各国政策所提供的底层支持。

海外各个发达国家政府率先对可控核聚变行业加大财政投入，积极把握行业发展机遇。2025年1月，美国能源部（DOE）为核聚变创新研究引擎（FIRE）合作组织提供1.07亿美元，并与“里程碑计划”8家企业达成协议撬动了超过3.5亿美元的私营投资，支持进一步创建聚变能创新生态系统；英国政府于同日宣布为2025-2026年“聚变未来计划”投资4.1亿英镑，计划2027年前向聚变能领域投资总额达6.5亿英镑；德国自2023年9月起，计划未来五年通过“聚变2040计划”增加投入3.7亿欧元（到2028年投入总额达到10亿欧元）；日本大力支持核聚变技术开发，从2023年开始启动专项支持政策，支持小型化、精密化、独创性的新兴技术探索，加速未来核反应堆原型开发，推进核聚变相关基础研究。

图9 近年来全球各国出台的核聚变行业部分相关政策

国家	政策制定者	时间	政策要点
美国	美国能源部 (DOE)	2025年1月	为核聚变创新研究引擎 (FIRE) 合作组织提供1.07亿美元，并撬动私营投资3.5亿美元，支持聚变能创新生态系统建设。
	美国能源部、白宫科技政策办公室	2024年9月	联合发布《2024年聚变能战略》，提出了能源部在聚变领域战略的三大支柱，分别是：缩小商用聚变科技差距；为商业化聚变能源铺平道路；建立和利用内外部伙伴关系。
	美国核管会 (NRC)	2023年	通过立法将聚变装置与核反应堆分类分离，简化审批流程，推动商业化进程。
英国	英国政府	2025年1月	宣布投入4.1亿英镑支持“聚变未来计划”，重点推进STEP项目及聚变级钢量产，目标2040年实现商业运营。
	英国原子能管理局 (UKAEA)	2023年	与韩国聚变能源研究所 (KFE) 签署了一份谅解备忘录 (MOU)，以合作研发远程处理和未来发电厂的维护。目的是使核聚变成为世界未来能源供应的一部分。
欧盟	欧盟委员会	2025年4月	欧盟委员会研究与创新司发布的《聚变专家组意见报告》，旨在为欧盟聚变能源战略提供建议，以加速聚变能源的商业化并确立欧洲在全球聚变领域的领导地位。目标包括：通过ITER项目验证核聚变技术可行性；建设有竞争力的工业生态系统；建立协调的监管框架与国际合作机制；确保欧盟在全球核聚变领域的领导地位。
德国	德国国家科学与工程院	2025年1月	发布《德国制造的聚变》报告，建议制定《聚变能源法》，将聚变电站与裂变分开监管，营造创新友好环境。
	德国联邦教育和研究部 (BMBF)	2023年9月	将在未来5年大幅增加研究经费，追加3.7亿欧元（约合28.78亿元人民币），使聚变能研究资助到2028年超过10亿欧元。新研究计划将同时研发磁约束核聚变和激光约束核聚变两种技术，目的是建成第一座核聚变发电厂。
日本	日本政府	2024年4月	敲定首个核聚变能源开发战略方案，计划2050年左右实现发电，重点支持小型化、精密化技术研发。
		2023年4月	制定了首个以核聚变为主题的国家战略《聚变能源创新战略》，将聚变能源定位为新兴产业，并通过2024年3月设立产业协议会等举措，持续完善产业化环境。
韩国	韩国核聚变创新联盟	2024年12月	成立产学研合作机构，整合91个机构资源，推动聚变能工业化，支持韩国托卡马克装置KSTAR技术输出。战略目标是在2030年代建成核聚变示范反应堆 (DEMO)，并在2050年代实现核聚变发电的商业化。
	韩国科学技术信息通信部	2024年7月	通过“核聚变能源实现加速战略”，计划投入1.2万亿韩元建设示范反应堆，并修订试点电站路线图。

资料来源：中国节能网，国家核安全局，中国核技术网，可控核聚变公众号，中国科学院，界面新闻，客观日本，中国核电网，韩宣网，腾讯网，中航证券研究所

国内政策为核聚变行业供给侧提供了较多支持，可控核聚变行业奇点已至。我国可控核聚变行业的发展起点可追溯至 1983 年，由国家科委牵头召开了核电技术政策论证会，与会单位议定了《核能发展技术政策要点》，并首次阐明了我国核电“热堆—快堆—聚变堆”的三步走战略。近年来党中央、国务院及有关部门陆续出台文件以落实核聚变能相关工作的部署：国家发展改革委、国家能源局在《“十四五”现代能源体系规划》中强调了对受控核聚变前期研发的支持，并鼓励积极开展国际合作，以提升我国在该领域的国际竞争力；工业和信息化部等七部门在《关于推动未来产业创新发展的实施意见》中将核聚变列为重点领域，推动超导材料等前沿新材料创新应用；2025 年 4 月，国家能源局召开新闻发布会，明确表示“大力支持第四代核电技术、小型模块化反应堆、核聚变等前沿技术的研发攻关”，这是继生态环境部等国家部委提出后续

将“开展聚变监管法规标准体系研究”后，官方再次给出的一个前瞻信号。2025年9月12日，第十四届全国人大常委会第十七次会议表决通过了原子能法，自2026年1月15日起施行，原子能法明确，国家鼓励和支持受控热核聚变的科学研究与技术开发，并会建立符合受控热核聚变特点、促进核聚变应用的监督管理制度，对聚变燃料、聚变装置（设施）实行分级分类管理。政策的陆续出台为可控核聚变行业发展提供了成长的沃土，未来核聚变技术有望在政策引领和国家级项目的带头示范作用下迎来突破。

图10 我国出台的核聚变行业部分相关政策

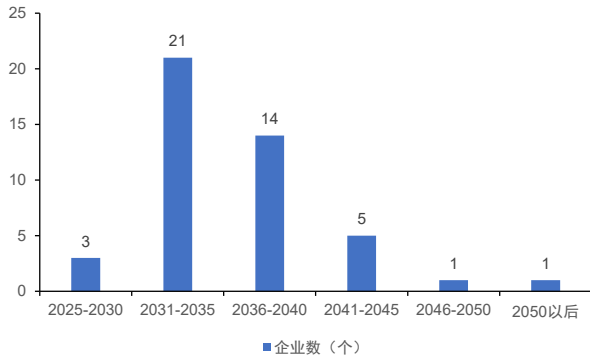
时间	政策名称	发布部门	相关内容
2025年9月	《中华人民共和国原子能法》	全国人民代表大会常务委员会	国家鼓励和支持受控热核聚变的科学研究与技术开发。国家建立符合受控热核聚变特点、促进核聚变应用的监督管理制度，对聚变燃料、聚变装置（设施）实行分级分类管理。
2025年4月	《关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知》	生态环境部	聚变装置可划分为等离子体物理实验装置、氘氚聚变实验装置和聚变能应用装置三大类，并实施分类管理。
2024年9月	关于公开征求《聚变装置分级分类监管要求（征求意见稿）》意见的函	生态环境部	当前国内已有和拟建的聚变研究装置中，技术路线不同、工作介质不同，辐射安全风险也不同。因此，应在有效保护生态环境、保护人员和公众的前提下，建立一种分级分类的监管方法，基于不同装置的辐射安全风险，规定相应的辐射安全要求。
2024年1月	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》	工业和信息化部等七部门	将核聚变列为重点领域，推动超导材料等前沿新材料创新应用。未来材料领域，推动有色金属、化工、无机非金属等先进基础材料升级，发展高性能碳纤维、先进半导体等关键战略材料，加快超导材料等前沿新材料创新应用。
2023年8月	《前沿材料产业化重点发展指导名录（第一批）》	工信部、国务院国资委	稀土钡铜氧超导材料、“铜系”超导材料、“钇系”铜基超导材料、“铋系”超导材料、MgB ₂ 超导材料、Nb ₃ Sn超导线材、超导同轴缆材等高性能超导材料，被列入第一批目录。
2022年1月	《“十四五”现代能源体系规划》	国家发展改革委、国家能源局	实施科技创新示范工程。支持新燃料、新材料等新技术研发应用。支持受控核聚变的前期研发，积极开展国际合作。
2021年10月	《2030年前碳达峰行动方案》	国务院	强化应用基础研究。积极研发先进核电技术，加强可控核聚变等前沿颠覆性技术研究。加大绿色技术合作力度，推动开展可再生能源、储能、氢能、二氧化碳捕集利用与封存等领域科研合作和技术交流，积极参与国际热核聚变实验堆计划等国际大科学工程。
2021年9月	《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	中共中央、国务院	强化基础研究和前沿技术布局。推进高效率太阳能电池、可再生能源制氢、可控核聚变、零碳工业流程再造等低碳前沿技术攻关。培育一批节能降碳和新能源技术产品研发国家重点实验室、国家技术创新中心、重大科技创新平台。

资料来源：可控核聚变公众号，前瞻网，新华网，中航证券研究所

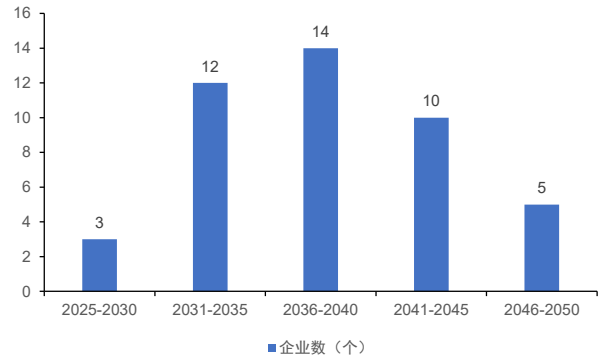
1.3 核聚变项目资本开支逐步提速

商业化聚变堆的出现时点是目前业界关注的核心议题之一，多数企业认为首个给电网送电的聚变堆以及具备商业化价值的聚变堆有望在2031-2035年及以后诞生。根据核聚变行业协会（FIA）发布的报告，从企业对实现可控核聚变给电网送电的时间节点预期来看，被调研的45家聚变能企业中有21家预计将在2031-2035年间出现，

而对于何时能够出现兼具低成本和高 Q 值的商业化聚变堆，在 44 个被调查企业样本中，有 12 家认为会在 2031-2035 年间实现，14 家认为会在 2036-2040 年间实现。

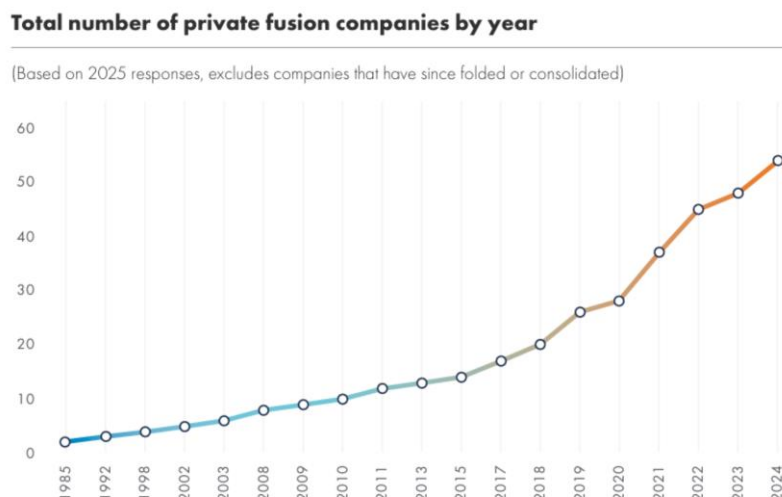
图11 企业对首个给电网送电的聚变堆并网时间预期


资料来源：FIA，中航证券研究所

图12 企业对首个具备商业化价值聚变堆的时间预期


资料来源：FIA，中航证券研究所

近年来，全球风险资本对可控核聚变“独角兽”企业的投资热度快速提升。随着人们对可控核聚变的研究热情和重视度提升，可控核聚变项目也逐渐从实验室传导至一级投资机构和创业公司，过去 30 年间全球成立的可控核聚变创业公司数量呈指数级增长。据 FIA 统计表明，2025 年全球核聚变公司数量已从五年前的 23 家增长至 53 家，2025 年核聚变产业吸引了 97 亿美元的投资（同比+36.6%），其中绝大部分来自于私营资本。

图13 可控核聚变创业公司成立数量保持快速增长趋势


资料来源：FIA，中航证券研究所

2025 年，海外多家科技巨头继续加注可控核聚变赛道，核聚变创业公司融资进程再度提速。1) TAE Technologies 在 2025 年 6 月初最新一轮融资中筹集了 1.5 亿

美元，此次融资得到了包括谷歌、雪佛龙及 New Enterprise 等多家知名投资者的支持。TAE 自成立以来的累计融资额达到约 18 亿美元，是资金支持最多的融合能源公司之一。2) 谷歌母公司 Alphabet 于 6 月底宣布，已与联邦聚变系统公司 (Commonwealth Fusion Systems, CFS) 达成协议，将购买其弗吉尼亚州聚变发电项目的 200 兆瓦电力，此次签约标志着核聚变能源首次实现商业化电力采购。CFS 于 2018 年从美国麻省理工学院剥离，迄今已融资逾 20 亿美元，是世界上最大、最受关注的核聚变公司之一，其投资者包括老虎环球资本、比尔·盖茨、谷歌和能源巨头埃尼等。其他获得大额融资的创业公司还包括 Helion Energy、Tokamak Energy、General Fusion 等，除了 Helion 计划于 2028 年开始运营商业化聚变发电厂并向微软和电网供电以外，多数企业规划在 2030 年及以后开始实现商业化聚变堆的运营。

图14 海外可控核聚变创业公司融资概况及项目时点

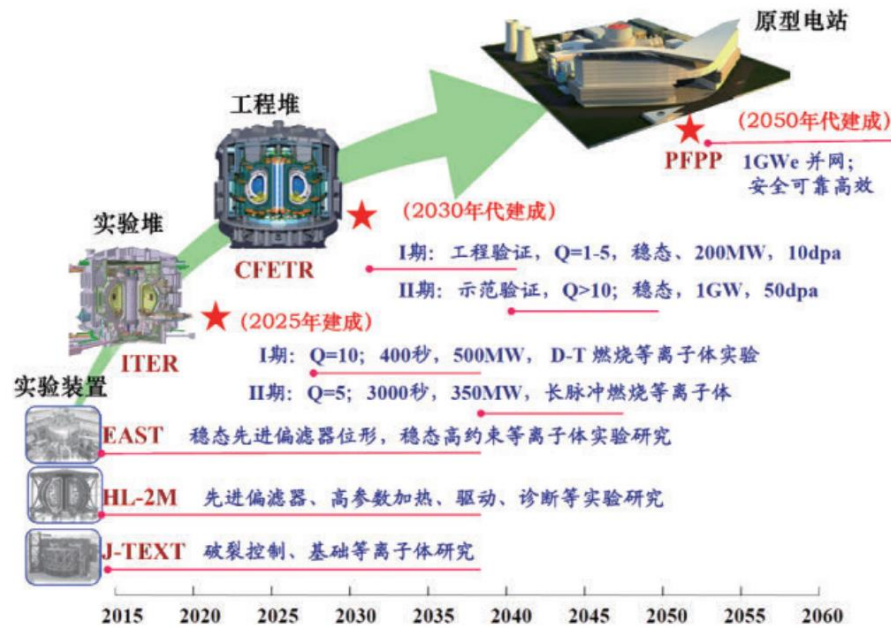
公司	装置名称	装置类型	融资概况	项目重要时点	预计商业化时间
TAE Technologies	Norman	场反位形	累计融资逾18亿美元，投资者包括谷歌、雪佛龙、Reimagined、NEA等	2017年，第五代“Norman”平台于投入使用；目前，第六代“Copernicus”平台正在建设中；2030年代初期，预计实现首批商用核聚变电力的交付。这包括完成“Da Vinci”原型电站的建设，并将其接入电网	2030s
Commonwealth Fusion Systems	CSMC	托卡马克	累计融资逾20亿美元，投资者包括Tiger、Google、Bill Gates、Coatue、DFJ、淡马锡等	2024年11月，CFS成功测试了中央螺线管模型线圈(CSMC)，这是其SPARC托卡马克反应堆设计的关键组成部分之一；2024年底至2025年初，CFS继续推进其SPARC项目，目标是在2026年实现等离子体的第一束光；2030年代初，该公司还计划建造商业规模的核聚变发电厂Arc投入运营	2030s
HELION	Polaris	场反位形	累计融资逾5.77亿美元，由OpenAI CEO Sam Altman投资，历史投资人Mithril、Capricorn Investment Group等	2021年，原型机Trenta诞生，标志着直接从核聚变反应中获取电能的概念得到了验证；2023年，Helion启动了第七代原型机Polaris的建设工作，计划于2024年底展示净发电能力，但是没有实现预期；2028年，预计开始运营商业规模聚变发电厂的建设并向微软、电网供电，进一步推进了商业化进程	2028年
Tokamak Energy	ST40	球形托卡马克	累计融资约2.5亿美金，投资者包括加拿大石油巨头Genovus以及马来西亚政府的战略投资基金等	2015年，Tokamak Energy推出了名为ST25的小型实验性装置；2017年，Tokamak Energy成功设计并建造更大规模的ST40装置；2026年，计划在建造另一个球形托卡马克原型 ST80-HTS；2033年，预计建成一座示范性的并网聚变电站，推进商业化进程	2033年
General Fusion	LM26	球形托卡马克	累计融资逾1亿美元，最近一轮融资1.3亿美元，投资者包括亚马逊创始人贝佐斯等	2023年，开始计划建设LM26原型机，预计2025年实现超过1亿℃的聚变条件，并在2026年实现科学能量盈亏平衡；2030年代初期至中期，General Fusion计划向电网提供商业聚变能源	2030s

资料来源：中国核技术网，中国科学院文献情报中心，麻省理工科技评论，中国核电信息网，新浪网，至顶网，今日头条，澎湃新闻，百度百科，中航证券研究所

我国在核能“三步走”发展路径的指引下，计划于 2030 年建成 CFETR 工程堆，于 2050 年建成商业聚变示范电站。我国于 2006 年加入 ITER 项目，积极融入国际合作，通过 ITER 计划积累工程经验，大幅提升了在核聚变领域科研技术、项目管理、专业人才培养等方面的能力，并已形成超导磁体、抗辐照材料等配套产业链，我国在核聚变工程中的身份已逐渐从技术学习者转变为技术输出者。东方超环、中国环流器等国家级实验堆的进展在我国核聚变技术研发领域起到了领头作用——2025 年 1 月

20日，中国科学院合肥物质科学研究院部署的“东方超环（EAST）”成功实现了超过亿度 1066 秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行，再次创造了托卡马克装置高约束模运行新的世界纪录，标志着我国聚变能源研究实现从基础科学向工程实践的重大跨越；2025年5月29日，中核集团核工业西南物理研究院再次创下我国聚变装置运行新纪录，“中国环流三号”装置同时实现等离子体电流一百万安培、离子温度1亿度、高约束模式运行，综合参数聚变三乘积再创新高，达到10的20次方量级，中国聚变快速挺进燃烧实验。

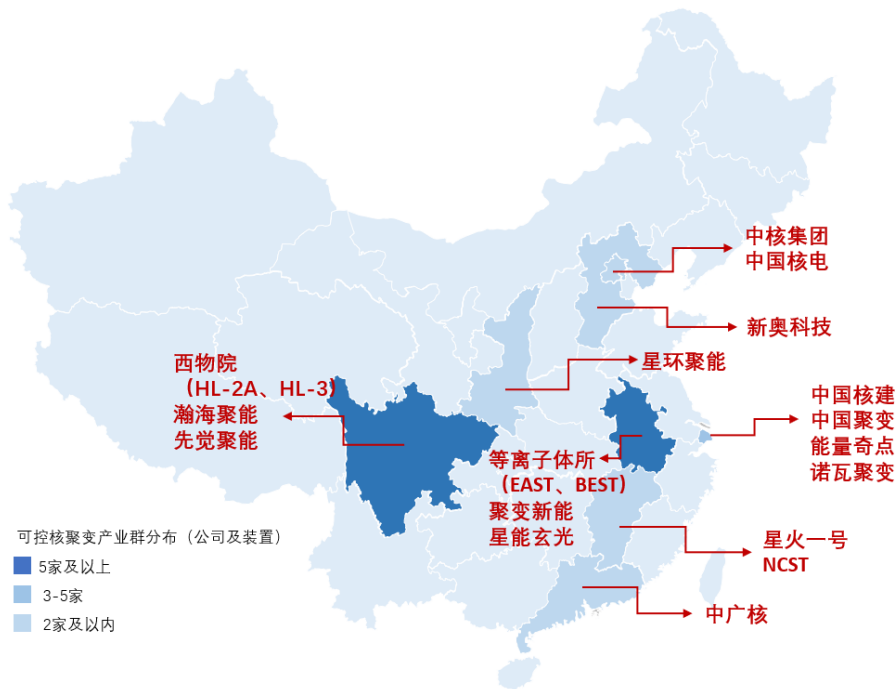
图15 中国磁约束聚变能发展技术路线图



资料来源:《CFETR 物理与工程研究进展》, 中航证券研究所

随着越来越多的民营企业的加入，我国核聚变行业已逐步形成“国家队”带头示范、民营企业协同发展的新格局。当前我国可控核聚变产业集群主要集中在安徽合肥、四川成都、江西南昌、上海等地，多个重点聚变项目的招标和建设提速以及聚变创新联合体的成立已为行业的发展提速奠定了根基。合肥和成都为当前国内具备相对完善的核聚变产业集群的城市：合肥包括以中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所（等离子体所）为代表的科研机构以及聚变新能、星能玄光等民营企业，成都包括以中国核工业西南物理研究院（西物院）为代表的科研机构以及瀚海聚能、先觉聚能等民营企业。

图16 我国聚变行业核心企业分布



资料来源：各公司公告，中航证券研究所

合肥 BEST 项目工程总装于 2025 年 5 月启动，预计于 2027 年建成后将会成为全球首个紧凑型聚变能实验装置以演示聚变发电。BEST 项目由聚变新能（安徽）有限公司负责运营，后者成立于 2023 年 5 月，初始注册资本 50 亿元，并在 2024 年 6 月增至 145 亿元，股东涵盖安徽省与合肥市国有平台、中央企业、中国科学院及社会资本。据新华网消息，2025 年 5 月 1 日，BEST 项目工程总装启动仪式在位于安徽合肥的聚变堆主机关键系统综合研究设施园区举行，整个项目总装较原计划提前两个月启动。总装工作是 BEST 装置建造过程中最关键的环节之一，要将包括超导磁体系统、磁体馈线系统、杜瓦、冷屏、包层以及偏滤器等在内的聚变堆“心脏”部件精确安装至主机基坑内。现场装配的部件数以万计，总重达约 6,000 吨，精度要求高，标准严苛。预计 BEST 项目于 2027 年建成后可开展燃烧等离子体物理前沿科学研究，演示聚变发电，为中国聚变能的发展做出重要贡献。

图17 BEST 工程总装启动仪式



资料来源：人民网，中航证券研究所

图18 BEST 总装正式启动



资料来源：央视新闻，观察者网，中航证券研究所

全球首座聚变-裂变混合发电厂“星火一号”招标及建设持续推进中，计划于 2030 年前建成和并网发电。由中国核工业集团与江西联创光电联合推进建设的“星火一号”采用高温超导聚变-裂变混合堆技术路线，通过聚变中子源驱动裂变反应堆，设计能量增益值（Q 值）目标超过 30，显著高于国际热核实验堆（ITER）的 $Q=10$ ，总投资规模达 200 亿元。联创光电于 2024 年 12 月成功中标《中核二三系统事业部超导线圈研制与测试服务分包项目》，标志着星火一号项目的招标启动和建设推进。2025 年 3 月，项目启动环境影响评价公开招标；2025 年 4 月，南昌实验室完成二次结构施工，并规划于 2028 年完成主机装置组装，2029 年实施全堆联调测试。

中国聚变能源有限公司（中国聚变公司）挂牌成立大会于 2025 年 7 月 22 日在上海举行。启动仪式上，中国聚变公司与上海电气集团、中国电气装备集团、上海交通大学、申能集团等在沪单位签署聚变创新联合体深化合作协议。同时，中国聚变公司还与中核集团、中国核电、昆仑资本、上海聚变、四川聚变等七方签署增资扩股协议。七方拟联合向中国聚变公司投资约 115 亿元。本次交易完成后，中国聚变公司注册资本为 150 亿元，一跃成为国内注册资本最高的商业聚变公司。

图19 七方签署中国聚变公司增资扩股协议


资料来源：聚变产业联合会公众号，中航证券研究所

近年来，越来越多的民营企业争相进入可控核聚变领域，与“国家队”形成优势互补、共同促进聚变商业化落地。与国家队相比，民营企业往往以相对更小的投资额、更短的装置组装周期、更高效的聚变实验为核心竞争力，他们的加入让核聚变装置的路线选择也变得更加丰富：

- 星环聚能和清华大学合作建设的 SUNIST-2 球形托卡马克装置于 2023 年 7 月建成并首次放电，初步验证了磁重联方案的可行性。星环聚能计划在 2027 年前建造新一代装置 CTRFR-1，来彻底验证其工程的可行性，随后便可以开始建设商业示范堆；
- 能量奇点自研建造的高温超导托卡马克装置“洪荒 70”于 2024 年 6 月实现等离子体放电，标志着高温超导托卡马克的工程可行性得到验证。公司计划投入研发下一代强磁场高温超导托卡马克装置“洪荒 170”，该装置以实现 Q 值 > 10 为目标，计划 2027 年建成，2030 年后建成可用于示范性聚变发电站的托卡马克装置；
- 新奥能源自主设计建造的我国首座中等规模球形托卡马克聚变实验装置——“玄龙-50”稳定实验运行 4 年后，于 2024 年升级为“玄龙-50U”，快速跻身大型磁约束实验平台先进行列。公司并行开展整体参数国际领先的球形环氢硼聚变新装置“和龙”的建设，预计于 2027 年建成，旨在探索氢硼聚变中的各项关键技术；
- 先觉聚能于 2025 年 3 月 6 日由国光电气与天府创新能源研究院等股东共同出资成立，其定位为支撑天府创新能源研究院发展的市场化机构，将与天府创新能源研究院共同构建起“研究院+公司”相互支撑的聚变-裂变混合能源事业核心组织架构。先觉聚能将采用我国自主提出的“Z 箍缩聚变裂变混合堆 (Z-FFR) 概念”，聚变功率大幅降低且中子更加富裕，有望综合解决多项关键科学问题和工程挑战；
- 瀚海聚能 HHMAX-901 主机建设完成暨等离子体点亮仪式于 2025 年 7 月成功举

行，实现了国内首台商业化直线型场反位形聚变装置的等离子体点亮，标志着我国在可控核聚变商业化探索上，尤其是直线型场反位形技术路线的商业化应用上，取得了重大突破。

图20 我国可控核聚变装置情况汇总

单位	装置名称	装置类型	项目重要时间点	装置状态	装置地址
等离子体所	EAST (东方超环)	全超导托卡马克	2000年10月，EAST开工建设； 2006年建成。同年底首轮物理放电实验取得成功，标志着该装置正式投入运行； 2022年8月，新一轮升级改造，重点维护和升级改造了装置内部部件以及装置子系统，进一步提升装置整体性能	运行中	安徽省合肥市
等离子体所	CRAFT (聚变堆主机关键系统综合研究设施)	托卡马克	2018年12月，获批开工建设； 2025年底预计全面建成	建设中	安徽省合肥市
等离子体所、中国科学技术大学	CFETR (中国聚变工程示范堆)	托卡马克	三阶段规划： 第一阶段到2021年，开始立项建设； 第二阶段到2035年，计划建成聚变工程实验堆，开始大规模科学实验； 第三阶段到2050年，聚变工程实验堆实验成功，建设聚变商业示范堆	建设中	安徽省合肥市
聚变新能；等离子体所设计	BEST (紧凑型聚变能实验装置)	托卡马克	2025年5月1日，启动总装； 2027年底，BEST计划完成全部建设并投入运行，工程目标为首次实现氘氦燃烧等离子体的稳定运行并演示发电	建设中	安徽省合肥市
星环聚能	SUNIST-2	球形托卡马克	2023年7月，SUNIST-2由星环聚能和清华大学合作建设完成，并获得第一等离子体； 2024年，SUNIST-2 将通过重复磁重联将等离子体加热到 1700 万度（离子温度）； CTRFR-1预计于2026年完成建设	运行中	陕西省西安市
能量奇点	洪荒70	全高温超导托卡马克	2022年3月，开始设计； 2023年8月，启动套装； 2024年2月底，总体安装完工 2024年6月实现等离子体放电，下一代装置为“洪荒170”	运行中	上海市
新奥科技	玄龙-50U	球形托卡马克	2023年由玄龙-50升级； 和龙-2预计于2027年建成	运行中	河北省廊坊市
星能玄光	Kmax-U	直线型先进场反磁镜装置	2024年底完成KMAX-U工程设计； 预计于2025年底至2026年初建成； 预计2035年建成200MW聚变能电站，目标成本10亿元人民币	建设中	安徽省合肥市
瀚海聚能	HHMAX-901	直线型场反位形装置	2025年7月，HHMAX-901作为我国首台商业化直线型场反位形聚变装置成功实现等离子体点亮，代表FRFC技术从实验室正式迈向应用端	运行中	四川省成都市

资料来源：核工业西南物理研究院，中国科学院等离子体物理研究所，国家核安全局，中国日报网，中国化工报，凤凰网，界面新闻，今日头条，网易新闻，澎湃新闻，百度百科，中航证券研究所

*中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所简称“等离子体所”，中国核工业西南物理研究院简称“西物院”

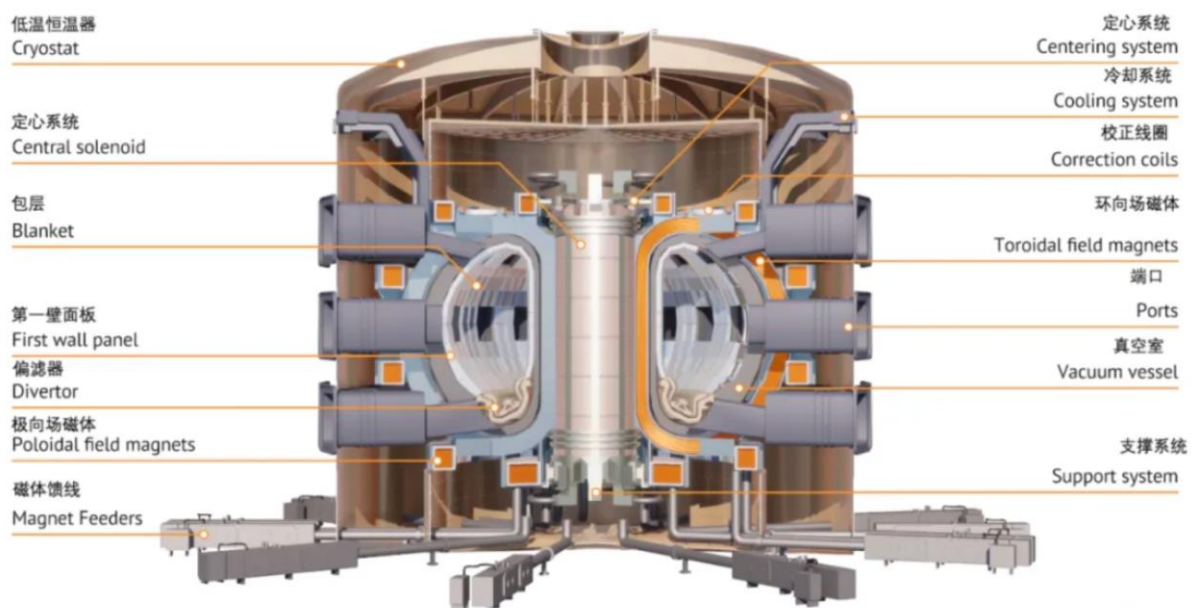
顶层政策引领叠加资本持续加码，核聚变技术商业化奇点已致。可控核聚变是新时代能源生产技术的颠覆性创新，技术突破之后的核心便是推动技术成果向能源产品的转化，而聚变技术的成果转化则需要通过建立完善的商业模式并吸引更多的资本介入来驱动。当前全球磁约束聚变领域头部企业已处于实验堆的建设和验证阶段，并争先瞄准聚变能的商业化落地，海外以 ITER 为代表的大型托卡马克装置路线及以 Helion

Energy、TAE Technologies 等初创企业所采用的 FRC 等技术路线处于齐头并进的态势，且初创企业给出的商业化规划相对更为激进，部分企业力争在 2030 年以前实现商业化供电。国内核聚变行业内国家队与民营企业优势互补的行业生态有望维持，当前产业集群格局大致以“合肥成都引领科研，长三角地区支撑制造”为主。在我国原子能法及顶层行业政策的指引下，核聚变行业已兼具了科研及制造的发展沃土，国有和社会资本的加速涌入也推动了从聚变能从实验室走向商业化的进程，核聚变行业已迎来奇点时刻。

1.4 托卡马克装置产业链全景概览

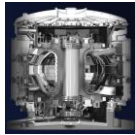
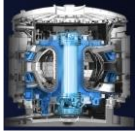
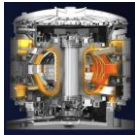
当前磁约束聚变的主流装置——托卡马克，涵盖的部件数量繁多、精度要求极高，因此涉及到的产业链环节众多。目前 ITER 是全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一，ITER 组织官网于 2025 年 4 月 30 日宣布，其已完成全球最大、最强的脉冲超导电磁体系统的所有组件制造，这是聚变能源领域的一项里程碑式成就。以 ITER 为例，装置的等离子体半径达 6.2 米，可容纳的等离子体体积为 840 立方米，整体装置重量达 23,000 吨。根据 ITER 项目官网，ITER 装置的部件数量估计超 100 万个，其中核心部件主要包括超导磁体、真空室、包层、偏滤器、低温恒温器以及其他辅助系统。拆分成本来看，ITER 装置中各部分的成本占比分别为：超导磁体系统占比 28%，堆内构件（包含包层系统）17%，建筑 14%，真空室（包含偏滤器）8%，电源系统 8%，加热与热管理系统 7%，仪表和控制系统 6%，低温及冷却系统 5%，其他辅助系统 7%。

图21 ITER 托卡马克的截面示意图



资料来源：核聚变商业化公众号，中航证券研究所

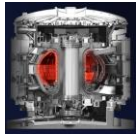
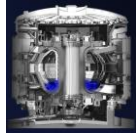

图22 ITER 装置中各部件功能及参数概况 (1)

装置	功能介绍	指标参数	示意图
托卡马克	一种用于利用聚变能的实验装置。ITER将成为世界上最大的托卡马克。	等离子体半径: 6.2米 等离子体体积: 840立方米 机器重量: 23,000吨 等离子体温度: 1.5亿摄氏度 聚变能输出功率: 500兆瓦	
超导磁体	万吨超导磁体将产生磁场来启动、限制、塑造和控制ITER等离子体。	储存磁能: 51吉焦 超导磁铁温度(-269°C): 4K NB3SN超导导线: 10万公里	
真空室	不锈钢真空容器容纳聚变反应并充当第一道安全屏障。	钢制等离子室: 8,000吨 等离子体体积: 840立方米 等离子体主半径: 6.2米	

资料来源: ITER 官网, 中航证券研究所

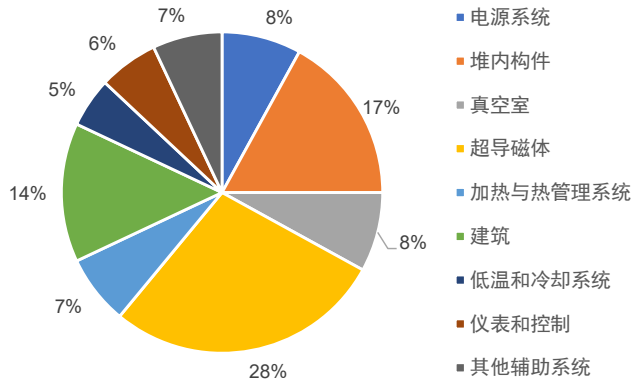
*注: 示意图中彩色部分为相对应的部件

图23 ITER 装置中各部件功能及参数概况 (2)

装置	功能介绍	指标参数	示意图
包层	包层保护真空容器和外部机器部件免受聚变反应中产生的高能中子的侵害。	包层模块: 440个 最大热负荷: 736兆瓦 设计变体: 占地600平方米	
偏滤器	位于真空容器底部的偏滤器控制着来自反应堆的废气和杂质的排出, 并承受着ITER装置表面最高的热负荷。	模块化精度: 54 表面热负荷最高(当其排出氦灰时): 20兆瓦/平方米 钨装甲靶: 300,000块	
低温恒温器	不锈钢低温恒温器(29*29米)环绕真空容器和超导磁体, 确保超低温真空环境。	低温恒温器真空密度比空气小100万倍 钢铁: 3,800吨 总体积: 16,000立方米(全球最大的不锈钢真空室)	

资料来源: ITER 官网, 中航证券研究所

图24 ITER 中各部件成本占比



资料来源: 核聚变商业化公众号, 中航证券研究所

在托卡马克核心部件中, 每类部件的工况和应用需求之别带来了相关构成材料的需求差异, 因此我们可以向各个部件的上游延伸来探究其对应的材料应用需求:

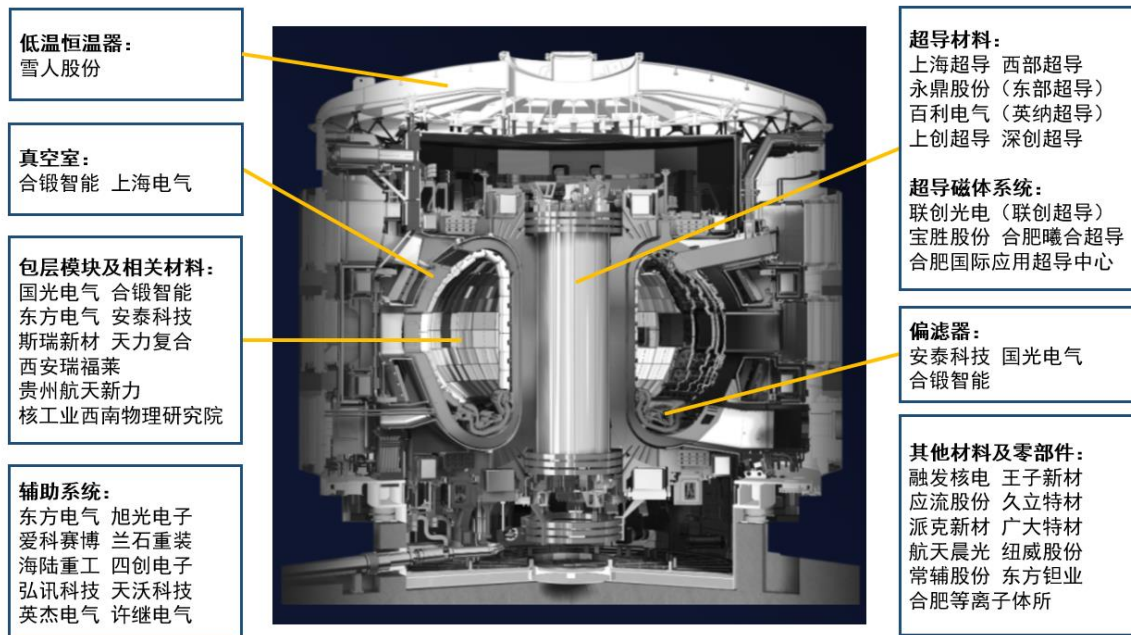
- 1) 超导磁体系统主要包括环向场线圈 (TFC)、极向场线圈 (PFC)、校正线圈 (CC) 以及中心螺线管 (CS)。超导磁体作为产生强磁场的核心部件, 主要由超导带材或线材绕制而成, 上游材料包括高温超导带材 (钇钡铜氧 YBCO、稀土钡铜氧 REBCO 带材、铋系 BSCCO) 和低温超导线材 (NbTi、Nb₃Sn 线材)。
- 2) 包层系统直接面向高温等离子体, 在托卡马克中起到限制聚变等离子体、屏蔽高热负荷, 从而保护外围设备和部件免受热辐射损伤的作用。整个包层系统采用模块化设计, 每个模块由第一壁面板、屏蔽模块以及柔性支撑等组成。其中第一壁板由钨

材料、中间热沉铬锆铜（CuCrZr）合金材料和支撑背板 316L(N)不锈钢三种材料构成；屏蔽块起到屏蔽中子的作用，其主要由 316L(N)不锈钢材料经锻造、焊接、钻孔等工艺处理后成型所得。值得注意的是，包层模块在面对聚变反应产生的高温和高能中子侵害下，材料会受到一定程度的损耗，因此包层模块具备耗材属性。此外，在后期阶段，一些包层模块预计将被替换为专门的模块，以测试“氚增殖”概念。

- 3) 偏滤器靶板经受着高能粒子流辐照和高热负荷冲击，同时承担着磁约束聚变装置最主要的排热和杂质偏滤功能，目前偏滤器靶材的候选材料包括钨基材料、金属铍、碳基材料（包括石墨、碳纤维增强复合材料 CFC）等；
- 4) 真空室是核聚变反应的第一道安全屏障，一般采用超低碳不锈钢材料，其通过抽真空技术，为等离子体提供近乎无杂质的环境，以防止空气分子与上亿度高温的等离子体发生碰撞，避免能量散逸和材料污染；
- 5) 低温恒温器是托卡马克装置的“低温心脏”，一般采用不锈钢材料，它与真空室共同形成双层真空结构（内层为等离子体运行区，外层为隔热层）。由于超导磁体的工作温度需维持在临界温度之下，为了最小化真空室和超导线圈之间的热传递，整个托卡马克被封装在巨大的低温恒温器中，所以低温恒温器的稳定性直接决定了超导磁体的工况及聚变反应的持续性。

由于聚变堆所涉及的上游材料和部件数量众多、任务繁杂，因此产业链分包模式也被认为是最高效、建设周期最短的合作模式。目前托卡马克装置产业链可被划分为上游原材料供应、中游部件生产及技术研发以及下游聚变堆整机建设和运营等环节。根据产业链供应关系，我们在下表中梳理了各个模块的核心加工企业以及相对应的材料供应商，部分企业参与了 ITER 项目的分包供应，部分则参与了国内 EAST、BEST 等聚变堆的供应。

图25 国内托卡马克装置相关材料、部件及系统供应商



资料来源：各公司公告，各公司官网，Wind，中航证券研究所

根据 FIA 统计，22 家参与调查的磁约束聚变企业给出了他们认为在托卡马克装置中较为关键的部件(表格中的数字为投票的企业数)，可以看出高温超导、第一壁材料、低温系统、热交换器、真空室等一系列材料和零部件被多数企业视为装置的关键部分，且不同总装企业对诸如真空室、电力系统、热交换系统等部件有着较高的定制化需求，这也对聚变产业链的定制化和柔性供应能力提出了较高的要求。同时，FIA 也向聚变企业统计了他们对各类材料/部件当下及未来紧缺性的看法，虽然当前产业链中的多数企业能满足聚变实验堆阶段的供应，但下游总装企业对氦和氘燃料、燃料循环系统、第一壁材料、特种金属等环节的未来批量化供应仍有隐忧。

图26 磁约束聚变装置关键材料及零部件

磁体		加热与热管理	
高温超导线材	7	射频加热	9
普通电阻磁体	4	等离子体热管理	9
高温超导磁体	7	回旋管	8
低温超导磁体	1	速调管	2
低温系统	10	束流发生器	5
燃料系统管理		波导	7
燃料循环系统	7	测量仪器	
燃料分析	4	燃料测量	5
氦、氖或其他聚变燃料	8	微波测量	6
锂（浓缩）	4	等离子体测量	8
除污系统	2	光谱仪	7
直接内部回收	5	材料	
分离技术	6	第一壁材料	9
氦兼容泵	7	稀土金属	4
氦存储	7	常见金属，如镍、铜	7
激光		特种金属，如高级钢	8
激光器（已组装）	1	软件	
激光元件，如二极管、激光玻璃	1	控制软件	8
热管理		人工智能建模系统	5
恒温分流量器	3	模拟	9
热交换器	9	其他	
集成包层解决方案	8	安全系统	9
真空		执行器	5
真空容器	10	阀门	7
真空泵	9	特种紧固件	3
真空密封	9	特种电缆连接器	3
电力			
电力系统	9		
功率元件，如半导体、电容器	5		
储能	5		

资料来源：FIA，中航证券研究所

图27 磁约束聚变装置中当下及未来紧缺的材料及零部件

磁体	当下紧缺	将来紧缺	加热与热管理	当下紧缺	将来紧缺
高温超导线材	4	3	射频加热	6	5
普通电阻磁体	1	1	等离子体热管理	1	4
高温超导磁体	1	4	回旋管	6	7
低温超导磁体	0	2	速调管	1	0
低温系统	3	4	束流发生器	3	3
燃料系统管理			波导	3	2
燃料循环系统	3	8	测量仪器		
燃料分析	1	2	燃料测量	1	1
氦、氖或其他聚变燃料	5	13	微波测量	1	0
锂（浓缩）	2	5	等离子体测量	0	1
除污系统	1	0	光谱仪	1	1
直接内部回收	2	1	材料		
分离技术	3	2	第一壁材料	4	8
氦兼容泵	5	7	稀土金属	2	5
氦存储	2	3	常见金属，如镍、铜	1	3
激光			特种金属，如高级钢	2	8
激光器（已组装）	4	1	软件		
激光元件，如二极管、激光玻璃	5	1	控制软件	1	2
热管理			人工智能建模系统	0	1
恒温分流量器	2	3	模拟	1	0
热交换器	2	2	其他		
集成包层解决方案	4	1	安全系统	0	2
真空			执行器	0	1
真空容器	2	3	阀门	1	3
真空泵	2	2	特种紧固件	1	1
真空密封	2	1	特种电缆连接器	3	3
电力					
电力系统	3	2			
功率元件，如半导体、电容器	1	3			
储能	0	2			

资料来源：FIA，中航证券研究所

我们认为，从产业发展角度来看，核聚变链主企业的招标建设将带动上游材料及中游加工企业共享行业初期高增长的红利，在此阶段中行业卖铲人将率先受益，中上游环节也因此具备较高的需求增量确定性。未来可控核聚变行业的进展情况需关注：项目投融资进展、装置路线竞争情况、装置中结构及材料的升级迭代、装置的稳态运行时长和输出 Q 值的大小、聚变堆商业化落地进程等等。可控核聚变装置的可靠性是行业未来发展的核心，由于当前托卡马克装置具备较为成熟的技术路径和较高的资本投入，本文将聚焦于托卡马克装置中的关键部件及其材料应用趋势，并在以下章节中作出进一步拆分解析和展望。

二、聚变堆建设撬动万亿蓝海市场

可控核聚变作为新兴战略产业，目前技术路线处于百花齐放的阶段，产业整体仍处于走向成熟的过程之中，即便单论托卡马克装置路线，其在多类材料的选择和参数要求方面仍存在更新迭代的趋势，包括各类部件当前的加工技术也并不一定具备唯一性，未来新材料和新技术的发展都有可能颠覆行业发展现状，因此我们需要以辩证的思维去观察行业中各个分支模块的发展趋势。

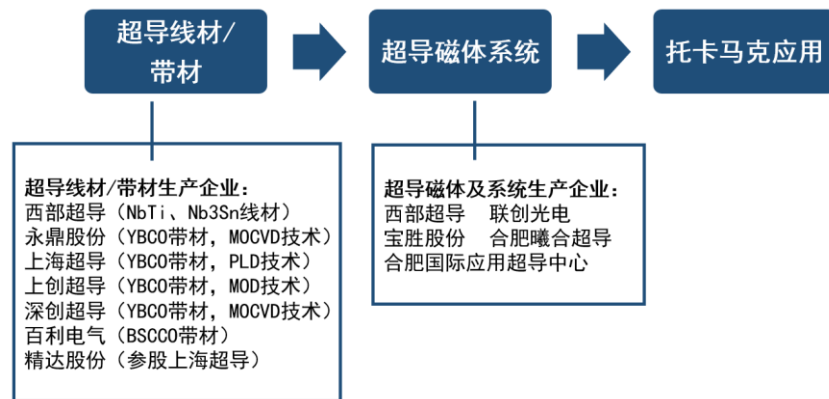
核聚变反应堆市场具备万亿级别的市场容量，而托卡马克则是目前获投融资体量最大的技术路线，因此也是本文讨论的重点。近年来国内外托卡马克装置的建设提速

无疑会牵引上游新材料和相关部件的应用需求，自下而上助推了各个细分环节的产业化发展进程，为诸多企业带来了聚变相关业务从 0 到 1 的增长机遇。我们认为目前托卡马克装置上游材料端的核心关注点主要包括具备高磁场强度的高温超导材料及磁体、后期包层模块将使用的氚增值材料、偏滤器组成材料等；中游部件加工生产环节核心关注点包括但不限于第一壁板的加工、涉氚部件的制造、偏滤器的制造、真空室的生产等。

2.1 高温超导有望迎来增量拐点

超导磁体 (Superconducting Magnet) 是一种利用超导体在低温状态下电阻为 0 的特性，而实现无损耗磁通传输的装置。托卡马克装置中的超导磁体主要利用强磁场位型约束高温等离子体，使其达到并维持聚变反应的点火或自持燃烧条件。由于核聚变反应中上亿摄氏度的高温无法被地球上任何材料所容纳，可以说实现可自持的核聚变反应离不开超导磁体，因此它也是整体装置中最为核心的部件。托卡马克装置用超导磁体产业链主要涵盖了上游高温超导带材 (YBCO、BSCCO 带材) 及低温超导线材 (NbTi、Nb₃Sn 线材) 的生产、中游超导磁体绕制和磁体系统生产以及下游托卡马克装置应用三大环节。

图28 托卡马克装置用超导磁体产业链相关企业



资料来源：各公司公告，中航证券研究所

超导磁体由超导带材/线材绕制而成，上游环节超导材料包括低温超导和高温超导两大类，根据上海超导招股说明书，按照超导体的临界转变温度 (T_c) 不同，可对低温超导和高温超导加以划分：

- T_c<40K 的超导材料称为低温超导材料 (40K 约为-233℃)，目前已实现商业化的包括 NbTi (铌钛, T_c=9.5K) 和 Nb₃Sn (铌三锡, T_c=18k)，技术较为成熟。低温超导材料临界温度较低，一般需要在液氦温度 (约 4.2K) 下工作。由于 NbTi

和 Nb_3Sn 具有优良的机械加工性能和成本优势，其制备技术与工艺已经相当成熟，材料和生产成本相对更低；

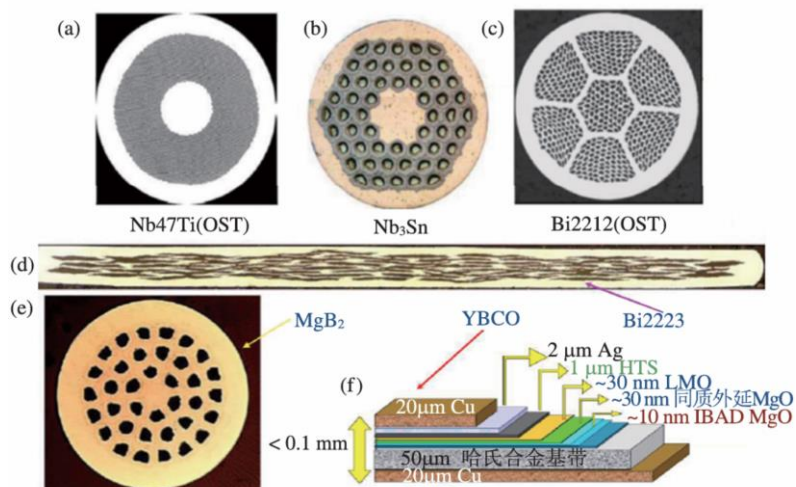
- $T_c \geq 40K$ 的超导材料为高温超导材料，具备实用价值的主要包括铋系（例如 Bi-Sr-Ca-Cu-O, BSCCO, $T_c=110K$ ）、钇系（例如 Y-Ba-Cu-O, YBCO, $T_c=92K$ ）、 MgB_2 超导材料 ($T_c=40K$)、铁基超导材料等。高温超导材料对于工作环境要求较低，一般可在液氮温度（约 77K）下工作。高温超导材料能够提供更高场强的稳定磁场，进一步打开了下游高场应用领域，产业化前景更加广泛。铋系和钇系高温超导材料分别为第一代、第二代高温超导，两者均属于氧化物陶瓷。由于高温超导材料发展起步较晚，在制造工艺上须克服加工脆性、氧含量的精确控制及与基体反应等问题，规模化生产未能充分显现，因此产品价格较低温超导材料更高。

图29 低温超导与高温超导对比

超导类型	临界温度	常见超导材料	冷却方式	磁场强度	优势	劣势	下游应用
低温超导	低于40K (约-233°C)	NbTi和Nb3Sn材料等	液氮 (4.2K)	0-15T	批量化加工、使用稳定性优	需在昂贵的液氦环境下工作，液氮制冷的方法昂贵且不方便，且磁体体积及重量较大	输电、制造大型磁体、可控核聚变
高温超导	高于40K	第一代高温超导材料BSCCO 第二代高温超导材料YBCO	液氮 (4.2K) 至液氮 (77K)	0-30T以上	制冷能耗较低，且磁体体积及重量较小，应用限制少	早期受限于带材的价格过高以及带材质地较脆难以加工等限制，规模化应用推进速度较慢	超导电缆、超导变压、超导感应加热、可控核聚变、超导磁悬浮、电磁探测设备
	可达-218°C	铁基超导材料					超导储能系统(SMES)、核磁共振谱仪(NMR)、下一代高能物理加速器、未来核聚变装置

资料来源：上海超导招股书，可控核聚变，中航证券研究所

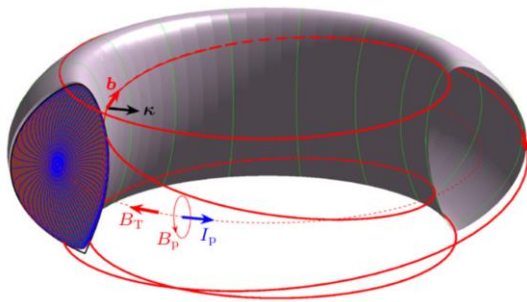
图30 实用化超导导线的截面结构



资料来源：《实用化超导材料研究进展与展望》，中航证券研究所

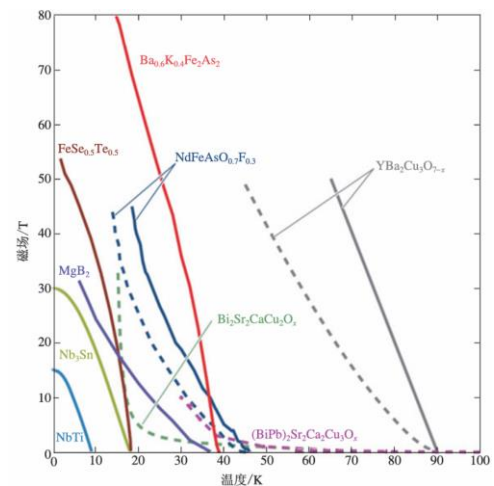
核聚变功率与磁场强度的四次方成正比，高温超导的高磁场强度为核聚变反应提供了更高的功率上限。根据孙有文等人的《磁约束燃烧等离子体物理的现状与展望》，聚变堆中氘氚聚变反应功率计算式为 $P_{fus} \propto \beta_T^2 B_T^4 V$ ，聚变功率 P_{fus} 与等离子体比压 β_T 的平方成正比，与磁场强度 B_T 的四次方成正比，与腔体体积 V 成正比。由此可见，超导磁体的磁场强度 B_T 对核聚变功率的影响举足轻重，更高的磁场强度能指数级提升核聚变功率的大小。通过下图我们可以看到，NbTi 和 Nb₃Sn 低温超导的磁场强度在温度接近 0K 时可分别达到 14.5T 和 30T 左右的极值，而 YBCO、BSCCO 等高温超导在同样的温度下则具备更高的磁场强度，因此采用高温超导有望为核聚变装置的功率输出提供更高的上限。由于高温超导磁体能帮助聚变堆降低运行成本和提高系统效率，目前已有越来越多的企业开始采用全高温超导托卡马克装置方案，预计未来在大型核聚变装置中高温超导路线也会更受青睐。

图31 托卡马克装置磁位型



资料来源：《磁约束燃烧等离子体物理的现状与展望》，中航证券研究所

图32 实用化超导材料的温度和磁场关系



资料来源：《实用化超导材料研究进展与展望》，中航证券研究所

全球超导产品市场有望迎来快速增长，第二代高温超导材料市场份额预计将显著提升。Conectus 预计至 2027 年全球超导产品市场规模有望增至 192 亿欧元，对应 2022-2027 年 CAGR 达到 23%，行业发展显著加速。目前第二代高温超导仍处于产业化初期阶段，其应用渗透率的提升和下游聚变装置需求的增长将带来市场空间的倍增，预计至 2030 年高温超导材料将占据全球超导行业 25% 的市场份额。高温超导带材所具备的强磁场、高临界电流密度等特性有望顺应聚变堆的应用需求，以合肥 BEST 堆、江西“星火一号”等为代表的装置招标建设有望为高温超导带材提供需求增量空间，未来国内外聚变堆的建设提速将为高温超导提供更高的市场天花板。此外，由于未来高温超导需求端增量在很大程度上取决于聚变堆的建设需求，由于 FRC 装置无需庞大的环向磁场线圈，磁体用量较托卡马克减少 80% 以上，并采用铜导线磁体，若 FRC 装置的商业化落地进程先于托卡马克，可控核聚变技术路线的更迭可能会

对高温超导的远期潜在需求造成影响。

可控核聚变对高温超导带材的需求增量推动了头部企业资本开支和产能建设。当前我国高温超导市场的主要参与者包括上海超导、东部超导（永鼎股份子公司）、上创超导、深创超导、英纳超导（百利电气子公司）等，除了英纳超导专注于第一代高温超导带材（BSCCO）外，其余企业均专注于第二代高温超导带材（YBCO/REBCO）的生产。国内上海超导、东部超导等企业已具备 YBCO 带材的小批量供应能力。从各企业现有产能及未来扩产规划来看：

- **上海超导**是国际上唯二已经实现批量年产千公里级以上（12mm 宽）第二代高温超导带材的生产商之一（另一家为日本 FFJ）。根据公司已具备 1333 公里的 12mm 带宽第二代高温超导带材年产能，公司第二代高温超导带材在国内市场占有率已超 80%，2022-2024 年连续三年排名第一。由于下游可控核聚变、高温超导电缆等领域的需求增长较快，公司现有产能已无法满足国内和国际市场需求，**故宣布拟建设“上海超导二代高温超导带材生产及总部基地项目”，主要从事第二代高温超导带材的生产，设计年产能 15,000 公里。**项目计划投资额为 25 亿元，力争在 18 个月内实现新建项目的第一根带材出货，并在 3 年内达到 1.5 万公里的年产能，实现 50 亿元的产值。本项目不仅服务于全球核聚变领域，还将拓展至电力需求等场景，满足多领域对高温超导带材的需求；
- **东部超导**目前具备千公里级的第二代高温超导带材年产能，为永鼎股份控股子公司。2025 年 3 月，东部超导拟增资扩股并引入外部投资者，嘉兴晋财合盛拟以现金人民币 1,000 万元认购东部超导新增注册资本 100 万元，其余 900 万元计入东部超导资本公积；自然人安惊川拟以现金人民币 2,000 万元认购东部超导新增注册资本 200 万元，其余 1,800 万元计入东部超导资本公积。公司就本次增资事项放弃优先认购权。本次增资完成后，永鼎股份直接持有东部超导的股权比例从 64.00% 下降至 60.95%。**目前增资已完成，本次引入外部投资者，推测原因主要系东部超导为带材扩产项目增强资金储备。**高温超导带材扩产的核心原因主要是得益于下游可控核聚变、磁感应加热、磁拉单晶炉、超导电缆等领域的需求增长显著，公司现有产能已无法满足下游需求增长。

图33 上海超导



资料来源：新浪网，中航证券研究所

图34 东部超导



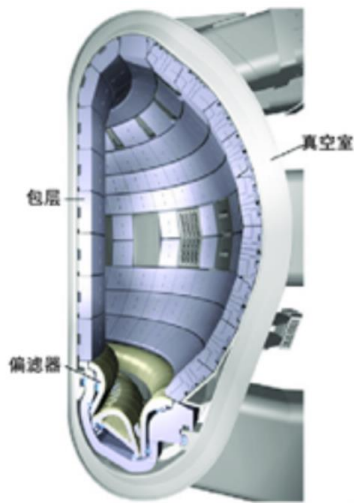
资料来源：东部超导官网，中航证券研究所

当前托卡马克装置的建设提速和订单增量成为了上游核心高温超导带材生产企业扩张产能规模的定心丸。随着未来高温超导材料加工工艺愈发成熟、产品良率的提升以及产销量的攀升，超导材料的单位生产成本有望在规模效应下逐步降低，进而加快其在可控核聚变领域的渗透进程，头部企业有望享受行业初期起量的快速增长红利，高温超导带材生产环节建议关注：永鼎股份、上海超导（未上市）；核聚变用高温超导磁体系统组装环节建议关注：联创光电。

2.2 包层模块对材料服役提出高要求

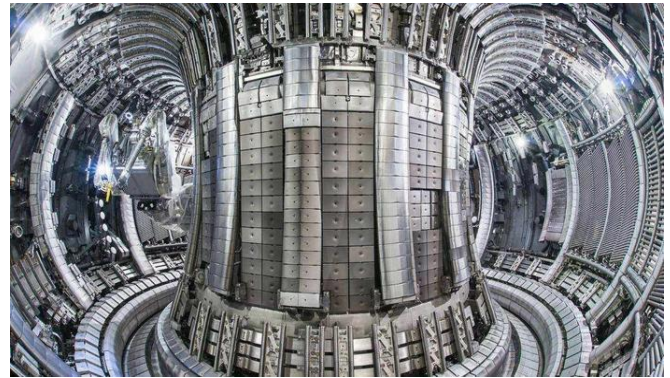
包层系统 (Blanket) 的主要功能是吸收来自等离子体和中性束注入的辐射和粒子热通量、为真空室和外部容器组件提供热屏蔽等，是聚变堆建造所需的核心部件之一。聚变堆的包层被连接固定于真空室中，真空室处于低温恒温器的内部，是一个密封的环形不锈钢容器。

图35 ITER 的包层被固定于真空室中



资料来源：《聚变堆液态金属包层 MHD 流动和传热数值模拟程序开发与验证》，中航证券研究所

图36 包层结构的内部视角

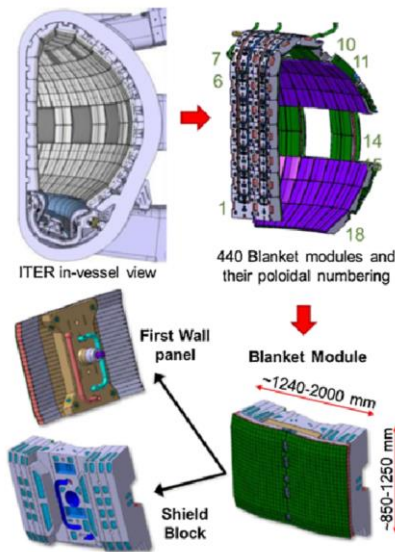


资料来源：新浪网，中航证券研究所

每个包层模块由内而外可以细分为第一壁（First Wall）、氦增殖区（Breeder Unit）和屏蔽块（Shield Module）等，各部分的服役环境及主要用途如下：

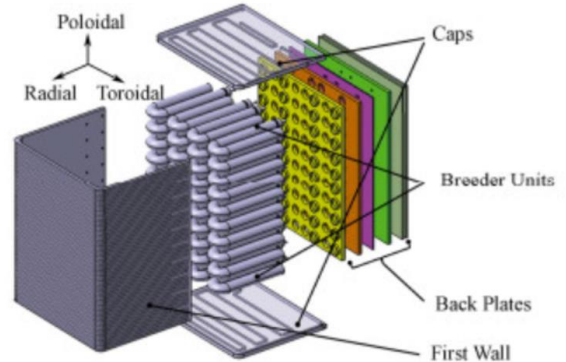
- 第一壁为包层中直接面对高温等离子体的结构，氘氚聚变反应产生的高能中子、氦氦氦等高能粒子以及电磁辐射等会直接轰击第一壁，使得第一壁承受很高的热负荷、电磁负荷等；
- 氦增殖区当中设置氦增殖材料，氦增殖区在聚变反应中会受到高能中子和伽马射线等的辐照，从而产生大量的核热，将这部分热量引出反应堆，便可以与汽轮机相连，实现发电；
- 屏蔽层将未参与反应的高能中子和伽马射线等有害辐射与外界隔绝，保护包层以外的线圈等其他结构。

图37 包层系统模块结构拆分



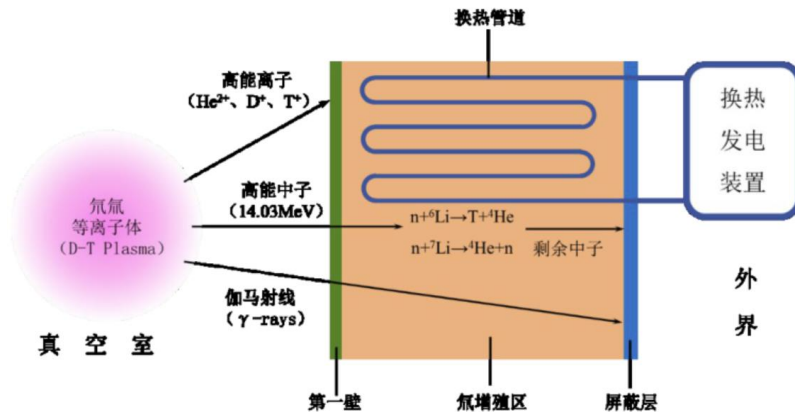
资料来源：《Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor》，中航证券研究所

图38 包层模块示意图



资料来源：《CFETR 氦冷固态包层设计及热工水力学分析》，中航证券研究所

图39 包层模块工作原理



资料来源：《掺杂正硅酸锂陶瓷氦增殖材料的制备与性能研究》，中航证券研究所

金属钨被认为是未来理想的第一壁材料。第一壁材料承受的服役环境十分苛刻复杂，一般要求包括具有较高的热导率、高熔点、优异的机械性能、高物理和化学溅射阈值及低氢同位素滞留等性能。原先第一壁板面向等离子体的材料主要为铍（Be），ITER 组织在《The new ITER baseline, research plan and open R&D issues》中明确了将第一壁材料从铍更换为钨（W）。根据胡建生等人的《磁约束核聚变装置等离子体与壁相互作用研究简述》，铍的主要优点是低的原子序数、热导大、吸氧能力好、低辐射能量损失、低的氦滞留等，但由于铍具有较低的熔化温度（1560K）、潜在的有毒性、相对高的溅射率，一般只用于能流密度不高的等离子体第一壁，且需频繁更换。相比之下，钨因具有高熔点、高热导、低热膨胀系数、低溅射率，以及低燃料粒子滞

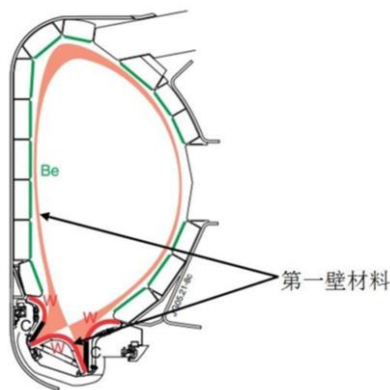
留量等优异性能，其维护需求较铍大大降低，更加适合长期运行，被认为是未来聚变装置中最有前景的面对等离子体材料。虽然钨可能导致辐射增强和杂质积累等问题，但实验与建模表明，这些问题可以通过优化控制（如电子回旋加热 ECH）来缓解。

图40 典型第一壁材料的物理属性及其主要优缺点

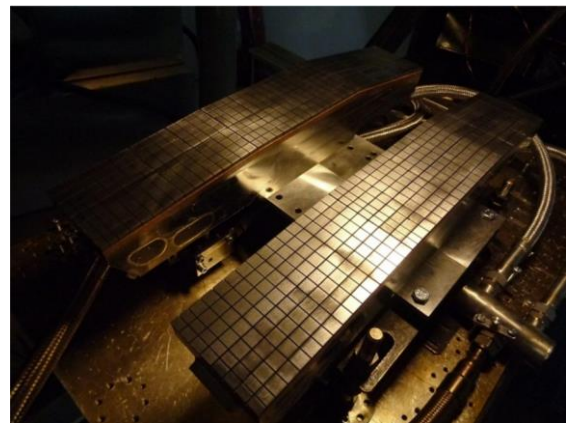
属性	铍(Be)	钨(W)
原子序数	4	74
质量数 (amu)	9.01	183.84
热导率 (W/m·K)	190	140
熔点 (K)	1500	3605
热膨胀系数 ($10^{-6}K^{-1}$)	11.5	4.5
比热容 (J/kg·K)	1825	134
中子辐照行为	脆性增加、肿胀	位错、空洞、嬗变、活化
电离能 (kJ/mol)	1st: 899.5 2nd: 1757.1	1st: 770 2nd: 1700
主要优点	低原子序数、与等离子体兼容性好	低腐蚀、低燃料滞留
主要缺点	易腐蚀	易活化

资料来源：《磁约束核聚变装置等离子体与壁相互作用研究简述》，中航证券研究所

根据国光电气公告，公司已参与最新的钨第一壁研制并进入样件生产阶段，目前生产的 ITER 第一壁板由三种材料构成，分别是面向等离子体的钨材料（原为铍）、中间过渡层热沉铬锆铜（CuZrCr）合金以及后面支撑背板的不锈钢材料（316L(N)不锈钢）。该组合综合考虑了第一壁材料与聚变等离子体的相容性、导热性能和结构强度等。为实现良好的热传导以消耗热负荷，三种材料之间需冶金结合，主要连接工艺为热等静压（HIP），这也是第一壁板制造的核心技术。当未来聚变堆进入常态化运营后，为防止嬗变元素带来的影响，第一壁板需根据服役时间长短而进行定期更换，以确保包层系统和整机装置的平稳运行，第一壁板也因此具备耗材属性。

图41 ITER 真空腔室截面图


资料来源：《聚变堆第一壁钨材料辐照损伤与燃料滞留行为研究》，中航证券研究所

图42 ITER 第一壁板


资料来源：中国国际核聚变能源计划执行中心官网，中航证券研究所

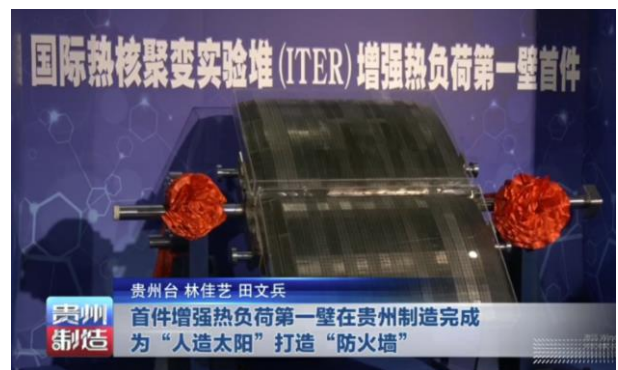
我国于 2004 年开始 ITER 第一壁设计研发工作，2010 年我国第一壁材料连接技术通过 ITER 组织认证，国产高纯度铍于年底通过 ITER 组织认证，结束了我国无高纯度铍的历史，2014 年 7 月完成小模块制作技术的优化，技术优化后所制小模块在高热负荷测试中经受住了 16,000 次热疲劳试验，高于 ITER 第一壁的设计寿命（15,000 次），标志着我国在规模化制作 ITER 第一壁技术上又迈进了一大步，并为我国自主建造聚变堆提供了坚实的技术储备。2016 年 11 月，中国国际核聚变能源计划执行中心主任罗德隆代表中方与 ITER 组织总干事伯纳德·比戈(Bernard Bigot)在 ITER 组织总部法国签署了《ITER 计划中方增强热负荷型第一壁采购安排协议》。2022 年 11 月，由贵州航天新力与核工业西南物理研究院共同研发制造的 ITER 增强热负荷第一壁在遵义完成首件制造并通过验收，后续批量生产交付后，将运往位于法国卡达拉舍的国际聚变能组织总部。这表明我国已经率先在国际上掌握了聚变堆核心部件的 engineered 制造技术，也为未来中国的聚变堆建设打下坚实的工程技术基础。

图43 2016 年 11 月中方与 ITER 组织签署《ITER 计划中方增强热负荷型第一壁采购安排协议》



资料来源：中国国际核聚变能源计划执行中心官网，中航证券研究所

图44 首件 ITER 增强热负荷第一壁在贵州制造完成

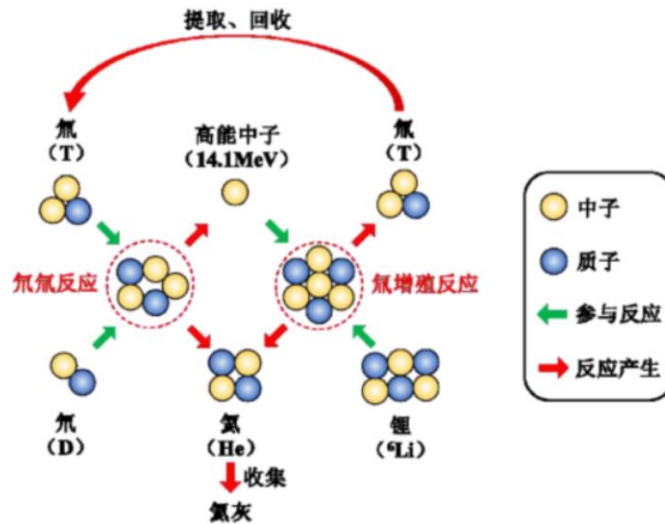


资料来源：动静原创，贵州省工业和信息化厅，中航证券研究所

随着未来托卡马克装置步入氦氦燃料聚变反应阶段，包层模块将升级为氦增殖包层以解决“氦自持”问题。包层模块中除了第一壁的选材及生产制造外，氦增殖区相比之下具备更大的技术研发和材料应用挑战。“氦氦聚变”是目前最主流的聚变路线，其中氦在自然界中储量十分丰富，每 1kg 海水中氦的含量约为 0.03g，且目前的提取技术较为成熟，可以实现氦的大规模提取，不存在氦燃料短缺问题；而氦在自然界中丰度极低，由于氦的半衰期只有 12.43 年，因此地球上天然氦的存量非常有限，所以保证氦的供应成为了实现氦氦燃料聚变的重要挑战之一。目前氦的制备路径即在聚变堆的氦增殖包层中通过中子轰击锂元素来实现，即氦氦聚变产生的高能中子与锂原子核进行氦增殖反应，再将产生的氦进行提取，重新投入新的氦氦聚变反应，从而实现

氦的循环。该反应在包层模块的增殖单元中进行，所以聚变堆需要在其包层中利用含锂的氦增殖剂及中子倍增剂（铍或铅等）来进行“氦增殖”。一般情况下，若实现氦增殖过程产生的氦多于氦氦反应消耗的氦，即可实现氦自持。

图45 氦循环原理



资料来源：《掺杂正硅酸锂陶瓷氦增殖料的制备与性能研究》，中航证券研究所

实现“氦自持”是未来聚变堆所面临的关键难题，也是聚变堆能否实现商业化的核心。2025年3月底，核工业西南物理研究院推动了我国产氦包层功能材料核心技术取得突破性进展，由西物院牵头承担的“产氦包层氦增殖剂与中子倍增剂工程化认证”任务，成功通过由中国工程院彭先觉院士、汪华林院士，以及七位业内专家组成的专家组验收。这一成果标志着我国全面突破产氦包层功能材料核心技术，实现了产氦功能材料工程化生产。氦增殖剂正硅酸锂小球与中子倍增剂铍小球的生产规模及综合性能均达到国际领先水平。

图46 氦增殖剂-正硅酸锂小球（左），中子倍增剂-铍小球（右）



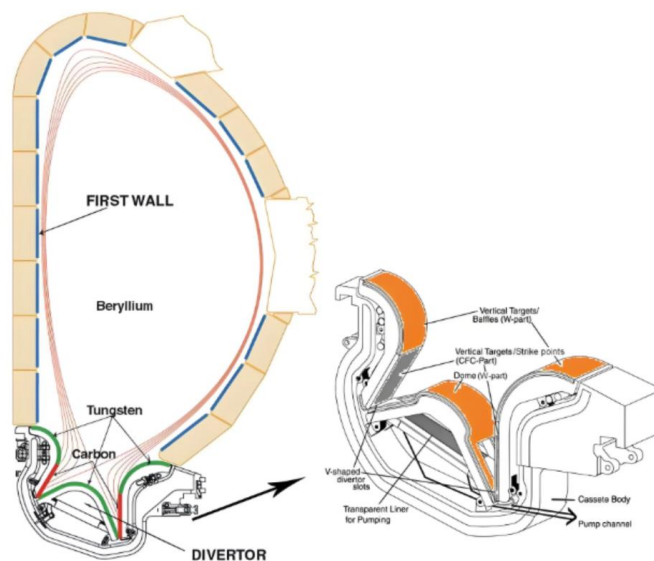
资料来源：中国核工业公众号，中航证券研究所

综上所述，包层模块作为托卡马克聚变堆中直接面向高温等离子体的核心部件，是未来聚变堆建造所需的核心模块之一，其中第一壁和氚增殖区无论在技术研发还是在材料和工艺的迭代上均需要长时间的持续投入和经验积累，是值得倾注大量科研和生产资源的关键部分。从产业进展层面来看，在中国国际核聚变能源执行中心的支持下，核工业西南物理研究院凭借其技术自主性、工程化能力和国际合作经验，稳居国内包层模块研发的核心卡位。目前西物院已带领诸多企业开展了相关技术合作，建立了包层模块设计、制造、检验全流程技术规范，助力推动国产化部件的批量生产，建议关注包层模块第一壁板核心生产企业：国光电气。

2.3 偏滤器材料应用持续迭代中

偏滤器（Divertor）的主要功能包括排出聚变反应产生的等离子体污染和其携带的热量，并保护真空腔体壁面。由于成功的氘氘聚变反应会产生更重的氦离子并且留在燃料中（所谓的“聚变灰烬”），这些杂质会造成能量损失等一系列影响，使聚变反应难以继续进行，因此需要偏滤器来进行排出步骤。偏滤器的原理与质谱仪相似，重离子在穿过偏滤器区域时通过离心力从燃料中被甩出，被偏滤到单独的靶室内，在此带电粒子轰击靶板，变为中性粒子后被抽走，同时排出杂质携带的热能。偏滤器作为聚变堆的关键组成部分，其作用包括：①排出来自聚变等离子体的能流和粒子流；②有效地屏蔽来自器壁的杂质，减少对芯部等离子体的污染；③排出核聚变反应过程中所产生的氦灰等产物，并提取有用的热量用于发电。

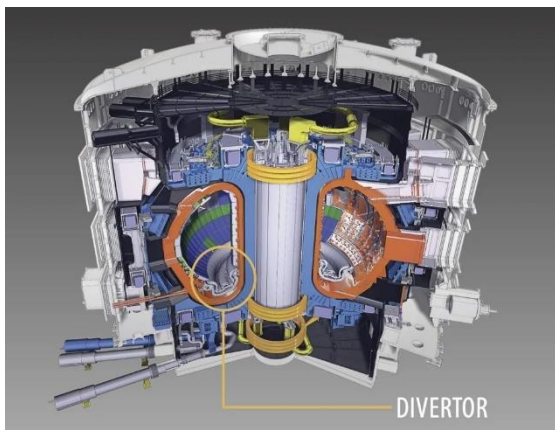
图47 聚变堆偏滤器概述图



资料来源：科普中国，中航证券研究所

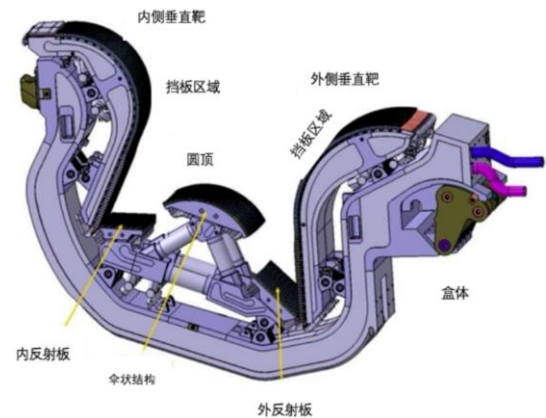
在托卡马克装置的设计中，等离子体截面多为 D 形，因此 D 形的上下两缘是较为理想的偏滤器安装位置。以 ITER 为例，其偏滤器是由 54 个重达十吨的“盒式组件”构成，其位于聚变装置真空容器的底部，等离子体中的离子和电子会沿着托卡马克的超导磁体产生磁力线移动，而氦灰杂质会被驱赶到真空容器的底部，偏滤器就负责排出核聚变反应产生的热量和灰烬。这些盒式组件在装置使用寿命内至少需要更换一次，这就要求在设计时充分考虑到更换的便利性和安全性，以确保整个偏滤器系统能够长期稳定运行。

图48 ITER 偏滤器位于真空室底部环形位置



资料来源：核聚变商业化公众号，中航证券研究所

图49 ITER 偏滤器盒式组件构成

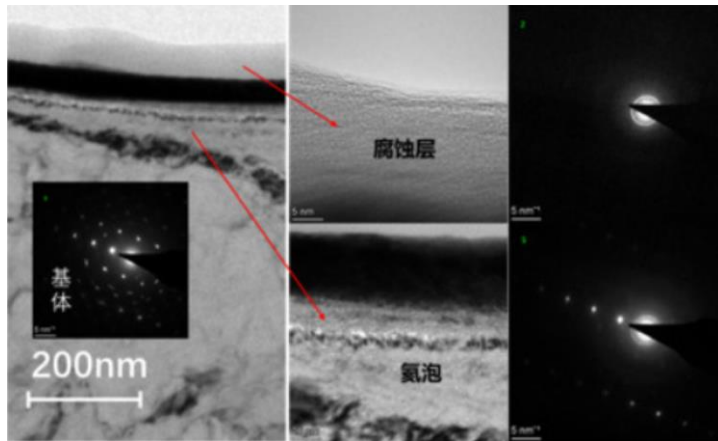


资料来源：核聚变商业化公众号，中航证券研究所

偏滤器和第一壁同属于与高温等离子体及固体材料直接接触的过渡区域：一面是温度高达上亿摄氏度的等离子体，另一面是装置的固体材料。为了及时有效地转移出沉积在面向等离子体材料表面上的热负荷，保证聚变堆的安全运行和使用寿命，偏滤器的设计和制造都起到了至关重要的作用。偏滤器部件的设计和制造技术在很大程度上决定了其物理结构能否维持其功能的正常运作，科研人员一般会根据聚变装置的需求来设计偏滤器的等离子体位型和结构，所以这也导致了偏滤器在聚变堆中的安装步骤往往处于偏后的环节，在装置招标环节中往往也会相对靠后。

由于偏滤器直面高温等离子体，是高能逃逸离子沉淀能量的主要区域，其表面热负荷比第一壁表面平均值高一个量级以上，服役环境十分苛刻，因此对材料具有严苛的要求。聚变堆中面向高温等离子体的材料往往需要具备以下性能要求：①良好的导热性、抗热震性和高熔点；②材料受到等离子体强烈辐照等物理和化学冲蚀所产生的杂质数量尽可能低，以保证聚变堆长期运行；③具有较低的氢（氘、氚）吸附性，以保证氢（氘、氚）的再循环应用；④具备低放射性。综合而言，偏滤器须采用高热流密度材料，常用的高热流密度材料包括铜合金、钨基材料、金属铍、钼合金、铌合金以及碳基材料（包括石墨、碳纤维增强复合材料 CFC）等。

图50 材料腐蚀会影响其力学、热学性能



资料来源：中科院等离子体物理研究所聚变堆材料及部件研究室官网，中航证券研究所

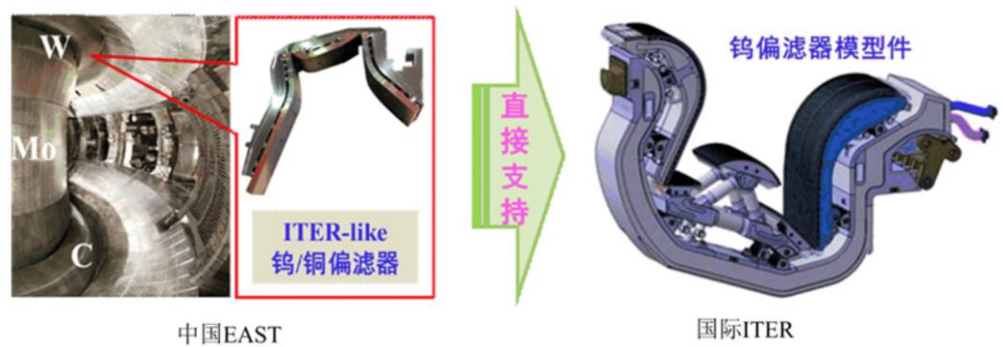
钨基材料是当前偏滤器主体的主流材料。偏滤器面向等离子体的材料所面对的状况与第一壁板相似，所以钨基合金是较为理想的材料选择。根据中国钢研集团官网，EAST 偏滤器最初采用了石墨或钨单体材料，但只能在低功率试验条件下维持数秒，无法满足高功率长脉冲的工程使用要求，钨铜复合组件成为了理想的候选方案，随后采用了安泰科技全资子公司安泰天龙自主研制的钨铜偏滤器。其他项目中，ITER 已经确定纯钨作为偏滤器材料，德国的 ASDEX-Upgrade (AUG)和欧盟的 JET 装置也实现了全钨壁或钨偏滤器的运行。法国的 WEST 装置目前已经完成了 ITER-like 下钨偏滤器面对等离子体单元的测试与实验；下一步将完成全 W/Cu monoblock 结构升级，主要测试具有 ITER 类似的热负载及长脉冲等离子体放电条件下的 W/Cu monoblock 工作状况，以支持 ITER 钨壁的战略目标。

图51 安泰天龙使用“两步热等静压扩散焊接”金属复合技术实现了钨铜复合组件高质量异种材料连接



资料来源：核聚变商业化公众号，中航证券研究所

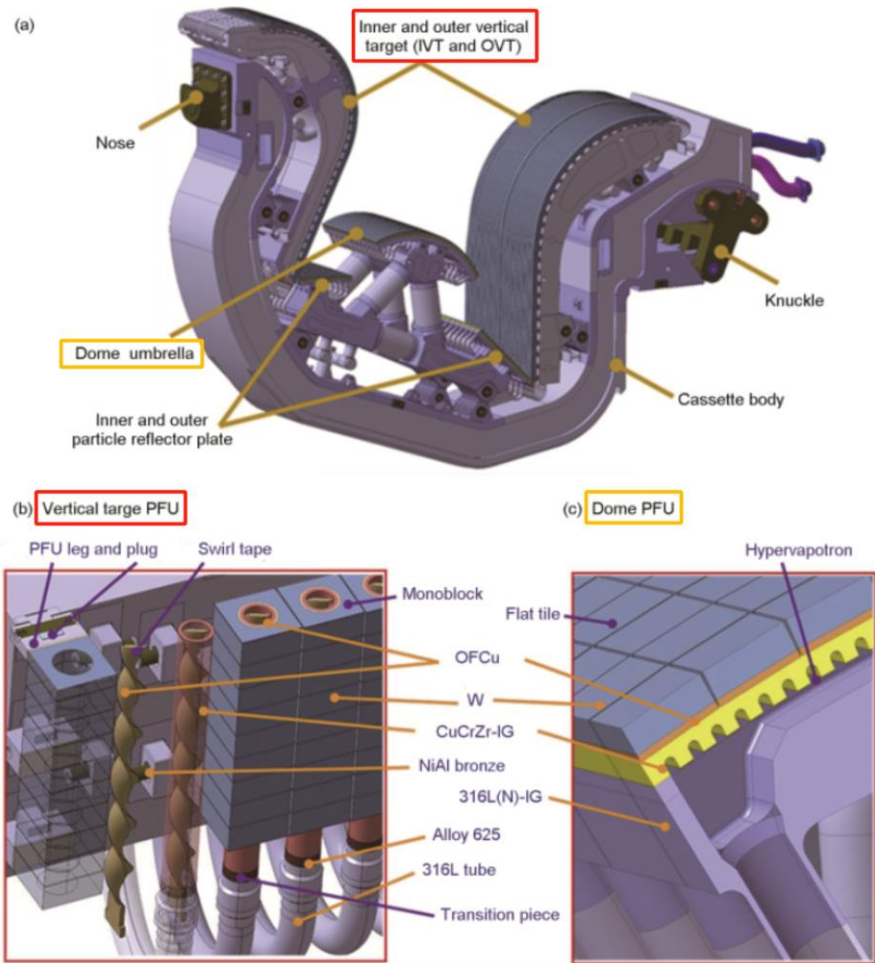
图52 磁约束聚变装置中的钨/铜偏滤器结构



资料来源：《磁约束核聚变装置等离子体与壁相互作用研究简述》，中航证券研究所

热沉材料的性能决定了偏滤器能否承受高热负荷及中子辐照，当前经验表明铜合金是最优解。偏滤器热沉材料主要应用于承受高热负荷的关键部位，其不仅要承受周期性高热负荷造成的损伤，同时还要承受高剂量的中子辐照损伤，因此材料本身需保持良好的热导率和足够的力学性能。根据彭吴擎亮等人的《核聚变堆偏滤器热沉材料研究现状及展望》，铜合金以高热导率、较高的强度、较好的热稳定性和抗中子辐照性能被认为是聚变堆偏滤器用热沉材料的首要候选材料，也可能是水冷偏滤器热沉材料的唯一候选材料。从现有候选热沉材料看，铬锆铜合金（CuCrZr）有希望用于未来聚变堆偏滤器中，尽管其高温性能仍不够理想。所以未来偏滤器热沉材料的重点工作将包括新型铜基材料的研制、结构的设计与优化、材料的中子辐照性能测试、高热负荷测试和新型铜基材料的工业化批量生产。

图53 (a) ITER 全钨偏滤器示意图；(b) 垂直靶板处面向等离子体单元；(c) 穹顶处面向等离子体单元



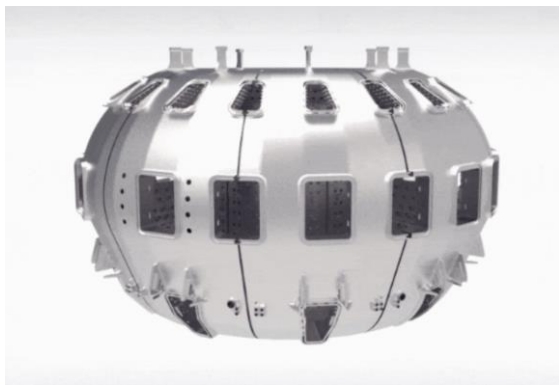
资料来源：《核聚变堆偏滤器热沉材料研究现状及展望》，中航证券研究所

综上所述，偏滤器作为聚变堆的关键组成部分之一，其服役要求与第一壁相似，同样需直面高温等离子体，因此偏滤器的结构设计、高热流密度材料的应用、制造加工技术等多个关键要素缺一不可。偏滤器选材是其中的一大重要课题，最新一代面向等离子体材料包括钨铜合金及纯钨材料，目前已在 EAST、ITER、WEST 等装置中得到采用。热沉材料的性能决定了偏滤器能否承受高热负荷及中子辐照，铜合金的综合性能使其成为了首要候选材料，目前来看铬钼铜合金具备较大的应用空间。建议关注国内钨铜偏滤器核心供应商：安泰科技；上游特种铜合金材料供应商：斯瑞新材。

2.4 真空室高精度加工具备高壁垒

真空室（Vacuum Vessel）是为等离子体提供稳态运行环境的场所，是离堆芯最近的大环体真空密封部件，它不仅要承受自身和内部构件的重力，还会受到多种复

杂电磁力的作用，所以其结构稳定性和使用功能安全性对聚变堆运行尤为重要。真空室在聚变系统中具有的核心功能包括：①为等离子体提供稳态运行环境：通过维持内部超高真空度（通常达 $10^{-5}\sim 10^{-7}$ Pa 量级），有效隔绝大气组分干扰，为氘氚核聚变反应创造洁净的反应界面；②安全屏障：真空室作为离堆芯最近的大环体真空密封部件，它不仅要承受自身和内部构件的重力，还会受到多种复杂电磁力的作用，其结构稳定性和使用功能安全性对聚变堆运行尤为重要。此外，真空室作为等离子体主要约束屏障的同时，也为包层和偏滤器等内部件提供支撑。

图54 ITER 真空室示意图


资料来源：ITER 官网，中航证券研究所

图55 单个真空室扇区示意图


资料来源：ITER 官网，中航证券研究所

ITER 真空室由 9 个 40° 的双层真空室扇区结构拼接而成，其对制造精度要求极高。ITER 的真空室为双层 316L (N) 不锈钢结构 (ITER Grade)，形状为中空“D”字形环形结构。根据合锻智能公告，由于运输限制以及为实现模块化制造，ITER 真空室被均分为 9 个尺寸一样的扇形单元 (Sectors)，每个扇形的跨度为 40°，各扇区制造完成后运输至 ITER 总装现场装配成 360° 环型一体结构，每一个扇区的总高和总宽尺寸公差要求控制在 ±20mm 以内。1/9 真空室扇区设计包含 184 个外壳和长达 160m 的加强筋板，外壳分割多达 60 块，材料利用率仅 30%，焊缝总长达 1000m，平均焊缝密度 10m/m²，远超普通真空容器。聚变装置的结构紧凑性要求真空室（运行温度 ~100°C）、冷屏 (~193°C) 与磁体 (~-269°C) 之间的设计间距必须控制在 50mm 以内。然而，在热胀冷缩效应的影响下，这三者之间的微小间隙可能会面临碰撞风险，因此对制造精度提出了极高要求。由于高密度焊缝与紧凑结构并存的特点，真空室的设计制造面临着设计风险系数高、成型精度低、焊接变形大、无损检测作业空间受限、磁导率控制难等巨大挑战。

图56 ITER 真空室搭建



资料来源：中国核技术网，中航证券研究所

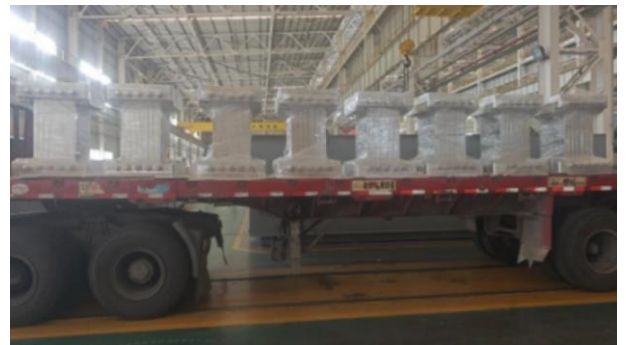
合锻智能自 2021 年开始参与聚变堆真空室制造工艺开发及预研工作，已在聚变堆真空室、重力支撑等核心部件制造领域取得突破性进展。公司已组织开展 50 余项涉及真空室成型、加工、焊接、无损、测量等领域试验工作，主要取得的突破性进展包括：①成型方面，通过冷模压成型工艺，解决了双曲厚板成型精度控制、反弹量大、成型过程中形变引起相变导致铁素体增加等问题；②焊接方面，厚壁奥氏体不锈钢电子束焊接取得突破性进展，对真空室焊接工艺及焊接变形控制做出重大突破；③无损检测领域，开发了粗晶焊缝阵列超声等先进无损检测工艺，设计自动化扫查设备，开展了一系列无损检测工艺验证；④测量方面，引进国内先进三维扫描设备，对焊接过程控制做出指导性意见。公司依托聚变堆真空室项目，为满足复杂三维零件下料及坡口加工，引进五轴水刀切割机床，并采购国内先进三维扫描仪，进一步提升复杂曲面精度测量能力。国内市场布局方面，公司深度参与合肥 BEST 项目，已在成型、焊接及检测工艺取得阶段性成果；同时公司积极拓展核聚变相关领域研究，承担科技部重点研发计划“聚变堆真空室精准成型及高性能焊接关键技术研究”项目。

图57 电子束焊接和相控阵超声检测



资料来源：合锻智能年报，中航证券研究所

图58 重力支撑安装验收



资料来源：合锻智能年报，中航证券研究所

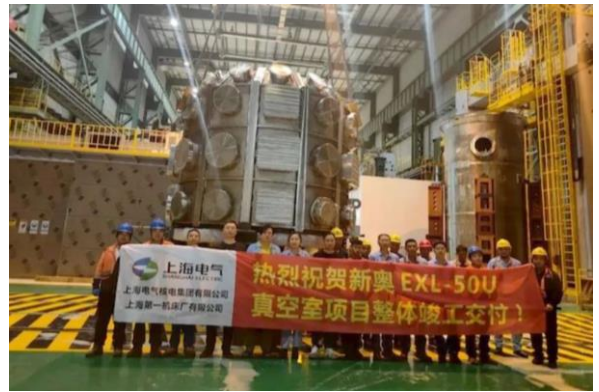
上海电气在聚变堆真空室制造领域也同样具备先发优势，已成功完成能量奇点洪荒 70 装置、新奥 EXL-50U 真空室的交付。上海电气自 2022 年以来，先后承接了上海能量奇点及河北新奥的核聚变试验项目，积累了大量制造经验。上海电气作为核心供应商之一的全球首台全高温超导托卡马克装置——洪荒 70，于 2023 年年底建成运行并实现等离子体放电，顺利完成工程可行性验证，标志着我国在高温超导磁约束聚变领域取得先发优势，公司承担了该装置主机系统的三大核心部件外真空杜瓦、真空室以及内外冷屏的制造工作，为装置的成功运行提供有力保障。2023 年 10 月，上海电气完成了河北新奥 EXL-50U 紧凑型聚变装置真空室的正式交付，标志着 EXL-50U 聚变装置开始系统总装。目前，上海电气在聚变发电领域已经取得可观的成绩，并将以更大的热情投身这场能源变革的时代洪流之中。

图59 全球首台全高温超导托卡马克装置 HH-70 主机系统发运



资料来源：上海市国有资产监督管理委员会，中航证券研究所

图60 全球首台 EXL-50U 紧凑型聚变装置新奥真空室整体交付



资料来源：上海市国有资产监督管理委员会，中航证券研究所

真空室作为容纳等离子体反应的场所，其结构稳定性和使用功能安全性对聚变堆的安全运行有着非凡的意义。由于聚变功率和腔体体积成正比关系，因此大型真空室的应用或为未来商业聚变堆的大势所趋。这也相应地对真空室的大尺寸、高精度成型加工技术提出了更为严格的工差要求。ITER 真空室采用了 9 个扇形单元，而对于不同规格和设计的聚变堆，其扇形单元个数及每个单元的角度和尺寸均会在参数上有差别，这也将考验企业对部件的一体化加工能力，因此掌握相关加工技术、检测技术和一体化解决方案的企业也将具备较强竞争优势，建议关注具备聚变堆真空室制造加工经验并与下游聚变堆链主深度绑定的企业：合锻智能；建议关注上游材料研发及锻件产品供应企业：派克新材、久立特材。

三、投资建议

可控核聚变被认为是人类解决能源问题的重要出路，其商业化落地将主导新一轮科技革命，这也意味着人类能从根本上解决能源危机。当能源不再稀缺，以资源为基础的国际秩序也将被改写，率先掌握可控核聚变技术的国家将成为新一轮科技革命中的领先国，从而在全球能源领域掌握核心话语权。可控核聚变作为新时代能源生产技术的颠覆性创新，从技术成果向能源产品的转化过程需要通过建立完善的商业模式和吸引更多的资本介入来驱动。国内聚变堆的建设提速将带动上游材料及中游加工企业共享行业初期高增长的红利，在此阶段中行业卖铲人将率先受益。

当前托卡马克装置是全球范围内投资额最大、技术发展最为成熟的路线，已处于工程可行性阶段。托卡马克装置产业链涵盖上游材料供应、中游部件生产及技术研发以及下游聚变堆整机建设和运营等环节，从部件价值量及各环节壁垒和竞争情况来看，我们认为上游材料及中游零部件加工环节的核心关注点主要包括但不限于以下方向：

- **高温超导带材生产及磁体系统组装：**随着未来高温超导材料加工工艺愈发成熟、产品良率的提升以及产销量的攀升，超导材料的单位生产成本有望在规模效应下逐步降低，进而加快其在可控核聚变领域的渗透进程，头部企业有望享受行业初期起量的快速增长红利，高温超导带材生产环节建议关注：上海超导、永鼎股份；核聚变用高温超导磁体系统组装环节建议关注：联创光电。
- **包层模块第一壁板制造：**第一壁作为托卡马克聚变堆中直接面向高温等离子体的核心部件，是未来聚变堆建造所需的核心模块之一，建议关注包层模块第一壁板核心生产企业：国光电气。随着未来托卡马克装置步入氦燃料聚变反应阶段，后续包层模块将升级为氦增殖包层以解决“氦自持”问题，这也是聚变堆能否实现商业化的核心，我们认为未来率先掌握高效产氦技术的链主企业将率先推动聚变堆向商业化迈进，行业进展值得持续关注。
- **偏滤器制造及上游材料供应：**偏滤器的服役要求与第一壁相似，同样需直面高温等离子体，因此偏滤器的结构设计、高热流密度材料的应用、制造加工技术等多个关键要素缺一不可。建议关注国内钨铜偏滤器核心供应商：安泰科技。热沉材料的性能决定了偏滤器能否承受高热负荷及中子辐照，铜合金的综合性能使其成为了首要候选材料，目前来看铬钨铜合金具备较大的应用空间，上游特种铜合金材料供应商：斯瑞新材。
- **真空室制造加工：**作为容纳等离子体反应的场所，其结构稳定性和使用功能安全性对聚变堆的安全运行有着非凡的意义。掌握真空室加工技术、检测技术和一体化解决方案的企业将具备较强竞争优势。建议关注具备聚变堆真空室制造加工经验并与下游聚变堆链主深度绑定的企业：合锻智能；建议关注上游材料研发及锻件产品供应企业：派克新材、久立特材。

四、风险提示

- **可控核聚变技术及产业化进程不及预期：**由于可控核聚变行业尚处于发展初期，下游商业模式尚不明朗，因此存在技术及产业化进程不及预期的风险；
- **关键公司融资进度或募投项目进展不及预期：**由于行业仍处于初期投融资阶段，公司融资进展不及预期将导致项目延期风险；
- **可控核聚变行业政策支持不及预期等：**行业初期发展依赖于政策的助推，若政策力度不及预期或影响企业对项目推进的积极性；
- **可控核聚变技术路径迭代风险：**虽然磁约束聚变为当前较为主流的技术路线，但部分企业也在尝试惯性约束聚变等路线，多条技术路径仍处于齐头并进的过程中，未来各路径的商业化能力仍有待评估；
- **资本市场估值波动风险：**资本市场中可控核聚变相关公司股价波动较大，需关注相关公司因宏观经济情况、市场流动性原因以及产业发展节奏而出现估值波动风险。

公司的投资评级如下:

买入: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅 10%以上。
增持: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅 5%~10%之间。
持有: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅-10%~+5%之间。
卖出: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数跌幅 10%以上。

行业的投资评级如下:

增持: 未来六个月行业增长水平高于同期沪深 300 指数。
中性: 未来六个月行业增长水平与同期沪深 300 指数相若。
减持: 未来六个月行业增长水平低于同期沪深 300 指数。

研究团队介绍汇总:

中航证券新材料团队: 擅长新材料和宏观周期研究, 依托中国航空工业集团强大产业背景, 研究体系重点围绕航空新材料, 并逐步拓展至新能源材料、轻量化材料等, 形成赛道型产业链覆盖和跟踪, 注重投研一体, 形成业务层面一二级市场协同。

销售团队:

陈艺丹, 18611188969, chenyd@avicsec.com, S0640125020003
李裕淇, 18674857775, liyuq@avicsec.com, S0640119010012
李友琳, 18665808487, liyoul@avicsec.com, S0640521050001
李若熙, 17611619787, lirx@avicsec.com, S0640123060013

分析师承诺:

负责本研究报告全部或部分内容的每一位证券分析师, 再次申明, 本报告清晰、准确地反映了分析师本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告中的具体推荐或观点直接或间接相关。

风险提示: 投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险, 任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

免责声明:

本报告由中航证券有限公司(已具备中国证券监督管理委员会批准的证券投资咨询业务资格)制作。本报告并非针对意图送发或为任何就送发、发布、可得到或使用本报告而使中航证券有限公司及其关联公司违反当地的法律或法规或可致使中航证券受制于法律或法规的任何地区、国家或其它管辖区域的公民或居民。除非另有显示, 否则此报告中的材料的版权属于中航证券。未经中航证券事先书面授权, 不得更改或以任何方式发送、复印本报告的材料、内容或其复本给予任何其他人。未经授权的转载, 本公司不承担任何转载责任。

本报告所载的资料、工具及材料只提供给阁下作参考之用, 并非作为或被视为出售或购买或认购证券或其他金融票据的邀请或向他人作出邀请。中航证券未有采取行动以确保于本报告中所指的证券适合个别的投资者。本报告的内容并不构成对任何人的投资建议, 而中航证券不会因接受本报告而视他们为客户。

本报告所载资料的来源及观点的出处皆被中航证券认为可靠, 但中航证券并不能担保其准确性或完整性。中航证券不对因使用本报告的材料而引致的损失负任何责任, 除非该等损失因明确的法律或法规而引致。投资者不能仅依靠本报告以取代行使独立判断。在不同时期, 中航证券可发出其它与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告。本报告及该等报告仅反映报告撰写日分析师个人的不同设想、见解及分析方法。为免生疑, 本报告所载的观点并不代表中航证券及关联公司的立场。

中航证券在法律许可的情况下可参与或投资本报告所提及的发行人的金融交易, 向该等发行人提供服务或向他们要求给予生意, 及或持有其证券或进行证券交易。中航证券于法律容许下可于发送材料前使用此报告中所载资料或意见或他们所依据的研究或分析。

联系地址: 北京市朝阳区望京街道望京东园四区 2 号楼中航产融大厦中航证券有限公司

公司网址: www.avicsec.com

联系电话: 010-59219558

传 真: 010-59562637