

可控核聚变系列报告（一）：未来能源的奇点

可控核聚变专题报告

► **核聚变释放能量高，氘氚为当前主流反应。**可控聚变能源的效率极高，燃料需求量和物理废物量也更少：1克氘氚聚变燃料释放的能量相当于11.2吨标准煤，是1克铀-235裂变所释放能量约4倍。可控核聚变的氘氚反应因三大核心优势：①燃料获取可行，储备丰富：氘在自然界中分布极其丰富，来自于普通的水；②技术可行性最高：过去半个多世纪的聚变研究，绝大部分都集中在氘-氚反应上；③能量增益较高：氘-氚反应一次释放17.6MeV的能量，是目前实现能量净增益（ $Q>1$ ）乃至商业化发电（ $Q>10$ ）较为现实的途径等优势，且外加最低的点火温度、燃料获取相对容易以及最成熟的研发基础，目前仍是被理论和实验广泛验证、并具备工程可行性的主流聚变路径。磁约束被认为是目前最有希望实现大规模受控核聚变反应的一种约束方式；根据采用的超导材料和工作温区，主要分为低温超导和高温超导两条技术路线；高温超导技术是未来实现装置小型化、低成本化和商业化的关键。

► **全球算力拉动电力需求，可控核聚变进展加速，商业化征途可期。**当前全球数据中心用电量约为415 TWh，过去5年保持约12%的年增速；到2030年，在基准情形下将翻倍至约945 TWh，年增速约15%，是其他用电部门的4倍以上。在电力需求持续攀升与“双碳”目标约束的背景下，可控核聚变是理想能源的解决方案。当前可控核聚变已由“能否点燃”迈向“能否长期、稳定、经济运行”，EAST等装置在磁约束路径上验证了等离子体物理可行，JET装置实现接近能量平衡，为实现 $Q>1$ 奠定基础，ITER、CFETR等大科学装置以长稳态运行和 $Q\geq 10$ 为目标推进工程可行。国内方面BEST装置有望2027年进行发电演示；海外方面科技巨头已在布局核聚变发电：核聚变公司Helion Energy预计在2028年为微软供电，CFS与谷歌达成2030年代购电协议，可控核聚变商业化征途可期。

► **托卡马克装置中游设备制造价值量高，潜力大。**从全产业链视角可控核聚变可划分为 **1) 上游原材料**：主要围绕第一壁和偏滤器所需的高纯钨、铜及其合金，高温/低温超导磁体用 Nb_3Sn 、REBCO等超导材料；**2) 中游设备制造**：既包含托卡马克主机真空室、第一壁、偏滤器、高温/低温超导磁体等关键部件，也包括加热、冷却、燃料循环、控制系统等工程系统；**3) 下游应用**：目前还处于试验科研与示范工程阶段，尚未进入商业化。按价值量拆分，以ITER为例（低温超导技术）：磁体系统占比最高（28%），真空室内部件（17%）、加热与电流驱动（7%）等，中游设备合计占比超过50%。DEMO示范堆项目（高温超导技术）：磁体（15%）+真空室内部件（12%）、新增的电厂辅助设施（25%）成为新的价值核心，中游环节的整体价值量依然占据主导地位。

► 投资建议

国内未来5年核聚变资本开支超920亿元，本土企业受益。国内本开支视角，EAST、BEST等国家级装置总投资额均已超过百

分析师

分析师：金兵

邮箱：jinbing@hx168.com.cn

SAC NO: S1120524050001

联系电话：

相关研究

亿，里程碑项目 CFETR 工程投入业界估算约 1000 亿元；星火一号、先觉聚能等重大项目将持续投入和落地，相关企业在重点项目上将显著受益。根据测算，2026-2030 年我国可控核聚变领域仍将维持约 920 亿元级资本开支，对应每年的投资体量将超过百亿元。本土企业无论是在上游原材料端，还是中游设备制造端均已实现国产化，能够在本轮可控核聚变中充分受益。结合产业链与价值链拆分，我们认为本土企业受益有：**1) 上游材料：**西部超导（低温超导）、精达股份（参股上海超导）、永鼎股份（控股股东超导）、等等；**2) 中游设备制造：**安泰科技（偏滤器与第一壁）、国光电气（偏滤器、氦工厂等）、联创光电（磁体系统）、雪人股份（冷却系统）、合锻智能（真空室），其他等等；**3) 下游应用：**中国核电（控股股东中核集团主导核聚变研发）、中国核建（工程建设），等等。

风险提示

政策支持不及预期、技术路线稳定程度不及预期、技术发展成熟度不及预期等。

正文目录

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. 可控核聚变：未来重要的理想能源 | 5 |
| 1.1. 核聚变：能量产出比核裂变更高 | 5 |
| 1.2. 氘-氚反应：当下核聚变主流应用 | 5 |
| 1.3. 核聚变实现路径：磁约束和惯性约束为主流 | 7 |
| 2. 新增电力需求旺盛，可控核聚变有望成为最佳方案 | 13 |
| 2.1. 数据中心：成为新的电力消耗主力 | 13 |
| 2.2. 传统供给受限，可控核聚变有望成为最优方案 | 15 |
| 2.3. 技术上实现渐行渐近，商业化征途可期 | 16 |
| 3. 未来 5 年核聚变资本开支超 920 亿元，本土企业受益 | 20 |
| 3.1. 中游设备制造占比超 50%，产业链需求拉动大 | 20 |
| 3.2. 国内未来 5 年核聚变资本开支超 920 亿元 | 24 |
| 3.3. 本土企业受益产业链带动 | 26 |
| 4. 风险提示 | 27 |

图表目录

| | |
|---------------------------------|----|
| 图 1 聚变反应实现点火的劳逊判据 | 7 |
| 图 2 实现可控核聚变的三大约束形式 | 8 |
| 图 3 三大约束形式的示意图 | 8 |
| 图 4 低温超导托卡马克装置：ITER | 10 |
| 图 5 典型低温超导托卡马克主要性能参数 | 10 |
| 图 6 高温超导托卡马克装置“洪荒 70”总装 | 11 |
| 图 7 部分商业化高温超导托卡马克主要信息 | 11 |
| 图 8 激光驱动惯性约束原理示意图 | 11 |
| 图 9 直线箍缩装置（Z 箍缩）原理示意图 | 11 |
| 图 10 激光惯性约束装置-美国国家点火装置(NIF)为例 | 12 |
| 图 11 NIF 结构图 | 12 |
| 图 12 Z 箍缩惯性约束装置-聚龙一号为例 | 12 |
| 图 13 Z 箍缩惯性约束装置-聚龙一号结构图 | 12 |
| 图 14 现有运行的 PI3 等离子注入器 | 13 |
| 图 15 2020-2030 年全球数据中心分设备类型电力消耗 | 14 |
| 图 16 2020-2030 年全球数据中心分地区电力消耗 | 14 |
| 图 17 可控核聚变发展历史重大节点 | 17 |
| 图 18 BEST 项目建设现场 | 18 |
| 图 19 BEST 项目杜瓦底座安装 | 18 |
| 图 20 ITER 发展路线 | 19 |
| 图 21 CFETR 发展路线 | 20 |
| 图 22 可控核聚变产业链 | 20 |
| 图 23 基于主流的托卡马克（磁约束）装置成本分布 | 21 |
| 图 24 二代高温超导结构图 | 22 |
| 图 25 环向场线圈示意图 | 23 |
| 图 26 极向场线圈示意图 | 23 |
| 图 27 ITER 装置结构图 | 23 |
| 表 1 核裂变与核聚变对比 | 5 |
| 表 2 核聚变各类反应对比 | 5 |
| 表 3 核聚变研究关键评判参数与装置目标 | 7 |
| 表 4 当前磁约束主流装置对比 | 9 |
| 表 5 全球科技巨头近期电力合约情况梳理 | 14 |
| 表 6 核能及传统能源储量情况 | 15 |

表 7 核聚变与核裂变、传统能源对比.....16

表 8 国际可控核聚变重大项目.....17

表 9 ITER 核心任务.....19

表 10 常规导体、低温超导和高温超导对比.....21

表 11 历史上使用过的第一壁材料对比.....22

表 12 中国核聚变项目投资与运作情况.....24

表 13 近几个月 BEST 项目招标情况梳理.....25

表 14 中国核聚变企业融资情况.....25

表 15 核聚变产业链相关公司及布局.....26

1.可控核聚变：未来重要的理想能源

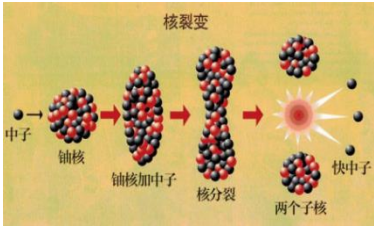
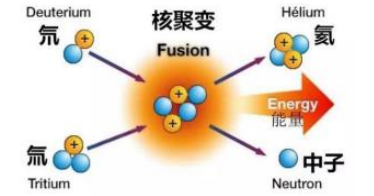
1.1.核聚变：能量产出比核裂变更高

全球能源短缺与环境污染是人类面临的共同挑战，推动能源结构向低碳化转型已经成为国际社会的普遍共识。核能作为一种安全、清洁、稳定且能量密度高的能源形式，被视为未来理想的能源选择之一。

核能的释放主要有两种形式：核裂变与核聚变。目前核能应用主要基于裂变技术，该技术已相当成熟，为多国提供了稳定的电力供应。然而，核裂变也面临两大挑战：一是长效放射性废料处理难度大，二是铀矿资源有限。

核聚变与裂变相反，理论上能量产出更高。根据《核裂变与核聚变发电综述》，1克氘氚聚变燃料释放的能量相当于 11.2 吨标准煤，是 1 克铀-235 裂变所释放能量（相当于 2.6 吨标准煤）的约 4 倍。这意味着聚变能源的效率极高，燃料需求量和物理废物量也更少。放射性危害远低于裂变，燃料来源也更为丰富。因此，核聚变被视为下一代能源的重要方向，已成为全球研发焦点。

表 1 核裂变与核聚变对比

| 类别 | 原理 | 能量 | 清洁程度 | 原理示意图 |
|-----|--|----------------------------------|---|---|
| 核裂变 | 用中子轰击重原子核（如铀-235），使其分裂并释放出更多中子与巨大能量，从而引发持续链式反应的过程。 | 1g 铀-235 完全裂变≈2.6 吨标准煤。 | 较低：核裂变会产生难以处理的长寿命放射性废物，如 ¹³⁷ Cs（半衰期 30 年），处理不当会造成长期污染。 |  |
| 核聚变 | 在极高温（如 1 亿℃）和高压下，使两个轻原子核（如氘和氚）聚合成一个较重的原子核，并释放巨大能量。 | 1g 氘氚混合物聚变≈11.2 吨标准煤，是核裂变的约 4 倍。 | 核聚变本身非常清洁，其有限的放射性主要来自中子活化的堆壁材料以及半衰期较短的氚（12.43 年），危害远小于核裂变。 |  |

资料来源：孔宪文《核裂变与核聚变发电综述》，华西证券研究所

1.2.氘-氚反应：当下核聚变主流应用

1.2.1.氘储量丰富，氚生产条件严苛

氘-氚反应难度更高，其他反应仍处研究阶段。在各类核聚变反应中，氘-氚反应燃料来源最为理想，但技术难度更高；氘-氦 3 反应受限于地球上氦 3 的极端稀缺，短期内难以实现；质子-硼 11 反应反应虽燃料丰富且清洁，但所需反应条件极高，目前仍处于基础研究阶段。

表 2 核聚变各类反应对比

| 反应类型 | 反应方程式 | 燃料获取来源 | 特点 | 点火温度 |
|-------|---|---|--|--------|
| 氘-氚反应 | $D + T \rightarrow \alpha(3.5 \text{ MeV}) + n(14.1 \text{ MeV})$ | 氘 (D): 储量极其丰富，可从海水中提取，成本较低。 氚 (T): 自然界几乎不存在，具有放射性（β 衰变，半衰期约为 12.43 年）。需在 | 较不清洁。反应释放的 14.1 MeV 高能中子会使反应堆结构材料活化，产生放射性废物，带来屏蔽、辐照损伤和核废料处理问题。 | ~20KeV |

反应堆中通过中子与锂反应滋生： ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + 4\text{He}$ 。燃料自持是工程关键挑战之一。

| | | | | |
|------------|---|--|---|---------|
| 氘-氘反应 | $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{p}$ (4.0MeV) | 燃料单一，极其丰富。只需氘，可从海水中获取。是真正意义上的“取之不尽”的燃料。 | 较不清洁。虽然中子能量（2.48MeV）低于氘-氘反应的 n（14.1 MeV），但仍然产生中子，因此同样存在材料活化和辐照损伤问题。 | ~100KeV |
| | $\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He}$ (0.82MeV) + n (2.48MeV) | | | |
| 氘-氦 3 反应 | $\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$ (18.7 MeV) | 氘 (D)：易获取。 氦 3 (${}^3\text{He}$)：地球上的储量极稀缺。目前获取极为困难且成本高昂。 | 相对清洁。主要反应产物为带电粒子（p 和 α），不直接释放中子。但存在副反应会产生少量中子。 | ~100KeV |
| 质子-硼 11 反应 | $\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ (8.7 MeV) | 燃料丰富、稳定、无毒。硼-11 在天然硼中占比约 80%，储量丰富，易于获取。质子（氢核）来源无限。 | 理论上最清洁。反应产物仅为三个 α 粒子（α），完全不产生中子（理想情况下）。因此几乎不产生放射性废物，设备退役难度和成本低。 | ~250KeV |

资料来源：李建刚《可控核聚变研究现状及未来展望》，华西证券研究所

相比之下，氘-氘反应具有如下突出优势：

1) 燃料获取相对可行：氘在自然界中分布较广，储量极其丰富。只需把普通水中的重水富集、电解，即可获得氘气，相对技术简单且成本较低；氘在自然界中几乎不存在，半衰期约 12.43 年。无法像氘一样直接从自然界中大量获取，但氘-氘反应堆本身可以自力更生。而实现高效的“氘自持”正是当前聚变能源走向商业化的核心挑战。

2) 技术可行性最高：过去半个多世纪的聚变研究，绝大部分都集中在氘-氘反应上。从托卡马克、仿星器的物理设计，到氘循环、中子屏蔽等工程技术，都是围绕氘-氘反应建立的。国际热核实验堆（ITER）和中国的 CFETR 等下一代装置，其核心目标就是验证氘-氘反应堆的工程可行性。

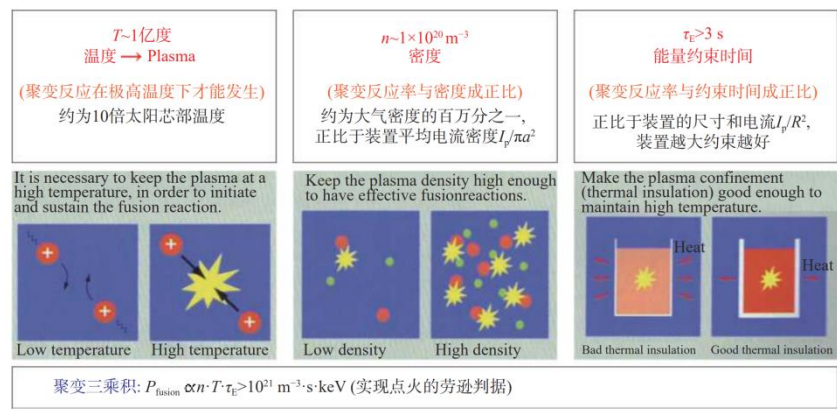
3) 能量增益相对最高：氘-氘反应一次释放 17.6MeV 的能量，其中 80% 的能量由高能中子携带，可通过热能高效转化为电能，是实现能量净增益（Q>1）乃至商业化发电（Q>10）最现实的途径。

因此，尽管氘-氘反应存在中子辐照与放射性废物等问题，但其凭借最低的点火温度、燃料获取相对容易以及最成熟的研发基础，目前仍是唯一被理论和实验广泛验证、并具备工程可行性的主流聚变路径。

1.2.2.核聚变的核心评判：劳逊判据

核聚变研究能否实现净能量增益的核心评判依据是劳逊判据。该判据指出等离子体的密度 n、温度 T 和能量约束时间 τ_e 三者的乘积（即聚变三乘积 $nT\tau_e$ ）必须超过特定阈值（对于氘氘聚变，约为 $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ ）。只有满足此条件，聚变反应释放的功率才能超过等离子体因辐射和传导损失的能量，从而实现“点火”。

图 1 聚变反应实现点火的劳逊判据



资料来源：王腾《超导磁体技术与磁约束核聚变》，华西证券研究所

能量增益因子 $Q > 1$ 是核聚变经济价值的起点。在满足此科学可行性基础上，能量增益因子（ Q 值，即聚变输出功率与外部输入功率之比）成为衡量装置能量输出效率、评估工程可行性的关键指标。当 $Q > 1$ 时，意味着实现能量净增益；而当 Q 远大于 1（如 $Q \geq 10$ ）时，聚变能才初步具备建造实用化反应堆的科学可行性。

表 3 核聚变研究关键评判参数与装置目标

| 评判参数 | 物理意义 | 关键阈值/目标 | 代表性进展与目标 |
|---------------------|-------------------------|---|---|
| 聚变三乘积($nT\tau_E$) | 科学可行性核心判据衡量等离子体是否达到点火条件 | 劳逊判据阈值 $\approx 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ | HL-2M: 三乘积达 10^{21} 量级，接近点火条件。 |
| 能量增益因子(Q 值) | 能量输出与输入功率之比 | $Q > 1$: 能量净增益 $Q \geq 10$: 反应堆级性能 | JET: 最高纪录 $Q \approx 0.65$ (1997)，2022 年实现 59 MJ 聚变能输出。 ITER: 目标 $Q \geq 10$ (400 秒)。 CFETR: 阶段 1 目标 $Q=1-5$; 阶段 2 目标 $Q > 10$ 。 |
| 等离子体温度(T) | 决定聚变反应速率 | $\sim 10 - 20 \text{ keV}$ (约 1–2 亿摄氏度) | EAST: 多次实现 1 亿摄氏度 (约 8.6 keV) 以上等离子体运行。 |
| 能量约束时间(τ_E) | 等离子体维持能量的能力 | 越长越好，是实现稳态运行的关键。 | EAST: 创造 1056 秒长脉冲高参数等离子体世界纪录。 |
| 等离子体密度(n) | 单位体积内的燃料粒子数，影响反应率 | 受 Greenwald 密度极限限制 $n_{\text{GW}} \propto I_p / \pi a^2$ | 适宜的粒子数密度在 $10^{20} \sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$ |

资料来源：刘永《磁约束核聚变能研究进展、挑战与展望》，王腾《超导磁体技术与磁约束核聚变》，高翔《磁约束聚变能源的发展机遇与挑战》，孙有文《磁约束燃烧等离子体物理的现状与展望》，华西证券研究所整理

当前全球核聚变研究在关键评判参数上已取得显著进展。我国的 EAST 和 HL-2M 等装置在等离子体温度、能量约束时间及聚变三乘积等参数上不断突破，为科学可行性提供了有力支撑；国际上的 JET 装置则通过实验验证了 Q 值接近 1 的能量平衡。未来，ITER 和 CFETR 等下一代装置的目标是将这些关键参数全面提升至反应堆级别（如 ITER 目标 $Q \geq 10$ ，CFETR 阶段 II 目标 $Q > 10$ ），并实现长时间的稳态燃烧等离子体运行，从而最终打通迈向聚变能源商业化应用的科学与工程路径。

1.3.核聚变实现路径：磁约束和惯性约束为主流

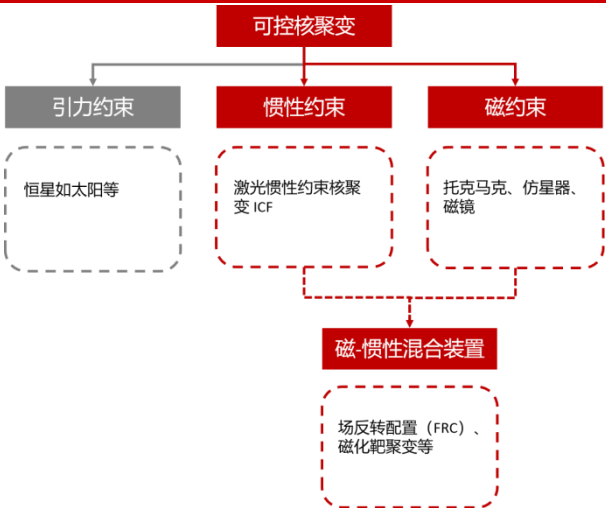
实现可控聚变约束通常可根据粒子约束形式分为引力约束、惯性约束和磁约束 3 种类型：

1) 引力约束：引力约束是自然界中（如太阳）实现持续聚变反应的机制，其依靠巨大的万有引力将燃料约束在核心。然而，人类目前的技术手段完全无法在地球上创造实现引力约束所需的条件，因此该途径并非可行的能源开发方向。这使得惯性约束与磁约束成为实验室研究的重点。

2) 惯性约束：惯性约束核聚变是另一条主要的聚变技术路径。其原理是利用多束极高精度的激光或粒子束，瞬间向微型燃料靶丸注入巨大能量，产生极高的温度和压力，使燃料在自身惯性作用下被压缩至极高密度并引发聚变。典型的装置如美国的国家点火装置（NIF），其 2022 年的实验实现了聚变能量大于激光输出能量的里程碑（能量增益 1.53 倍），但总过程仍消耗了巨大的电能（322 MJ），凸显了该路径对巨大能量输入和极端精密控制技术的依赖。其约束时间极短（纳秒量级），等离子体温度和密度极高的特点。我国在该领域也建有“神光”系列等世界先进的高功率激光装置。”

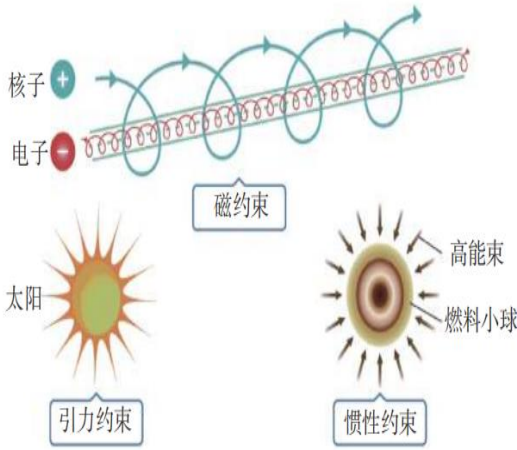
3) 磁约束：磁约束被普遍认为是目前最有希望实现大规模受控核聚变的途径。与其他方式相比，引力约束无法在地球实现，惯性约束难以持续输出功率，因此磁约束是实现聚变能开发的有效途径。其物理基础是利用磁场产生的洛伦兹力，使带电粒子沿磁力线回旋运动，从而被有效约束。经过数十年的发展，以托卡马克为代表的磁约束途径已成为研究最广泛、技术积累最深厚的方向，被国际学界视为最有可能率先实现聚变能源和平利用与商业发电的路线。

图 2 实现可控核聚变的三大约束形式



资料来源：《南方能源建设》2024 年 5 月，《磁约束核聚变能研究进展、挑战与展望》刘永，华西证券研究所

图 3 三大约束形式的示意图



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，华西证券研究所

1.3.1. 当前实现可控核聚变的核心路径：磁约束

磁约束是目前最有希望实现受控核聚变的技术路径。当前磁约束主流装置主要包括托卡马克、仿星器和磁镜三类，三者在原理、磁场产生、运行特性等方面差异显著。托卡马克是目前性能最高、研究最成熟的技术路线，托卡马克被 ITER 选中，在聚变参数上表现最优，但受限于等离子体电流驱动的内在不稳定性和只能脉冲式运行等问题；仿星器以无需等离子体大电流、可稳态连续运行的优势，成为托卡马克最强潜在竞争对手，却面临工程制造难度高、粒子逃逸的问题；传统磁镜因终端损失问题已非聚变研究主流，其改进型“场反转构型”正作为紧凑型聚变装置的一条路径被探索。

表 4 当前磁约束主流装置对比

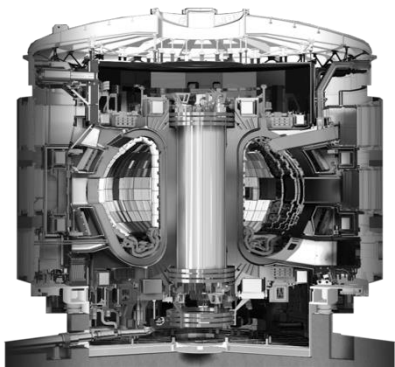
| 主流装置 | 托卡马克 | 仿星器 | 磁镜 |
|--------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 原理示意图 | | | |
| 核心原理 | 利用等离子体自身感生的大电流与外部线圈共同产生螺旋磁场。 | 完全通过外部复杂扭曲的线圈直接“雕刻”出所需的螺旋磁场，无需或仅需很小的等离子体电流。 | 利用两端强、中间弱的“磁镜场”（瓶颈效应）约束直线型磁场中的等离子体。 |
| 磁场产生 | 内外结合：环向场由外部线圈产生；极向场由等离子体电流和外部线圈共同产生。 | 完全外部：由特殊设计的复杂三维螺旋线圈产生。 | 简单对称：通过电流强度不同的环形线圈在直管上排列，形成轴对称磁场。 |
| 等离子体电流 | 必需且巨大（如 ITER 达 15 兆安培）。 | 不需要或很小。 | 不需要。 |
| 最大优势 | 性能最高，研究最成熟，是 ITER 选择的路线，聚变参数最优。 | 无大电流导致的破裂风险，原则上可实现稳态连续运行。 | 结构概念简单，易于维护。 |
| 主要挑战 | 大电流导致不稳定性与脉冲式运行；控制系统复杂。 | 工程制造难度极高，线圈加工精度要求苛刻；粒子逃逸。 | 存在终端损失，粒子从两端逃逸，难以达到聚变条件。 |
| 代表装置 | ITER（国际）、EAST（中国）、KSTAR（韩国） | Wendelstein 7-X（德国）、LHD（日本） | WHAM（美国）；传统磁镜已非主流，其改进型由商业公司继续研究。 |

资料来源：张家龙《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，华西证券研究所

磁体系统正沿着超导技术方向演进。磁体系统（尤其是超导磁体）决定了装置的磁场强度，而磁场强度直接决定等离子体约束能力和聚变功率密度。根据采用的超导材料和工作温区，主要分为低温超导和高温超导两条技术路线；托卡马克的技术演进分为铜基 -> 低温超导 -> 高温超导 三个阶段，高温超导技术是未来实现装置小型化、低成本化和商业化的关键。

目前，大型磁体聚变装置如 ITER、EAST 等广泛使用的低温超导磁体，通常采用 NbTi 或 Nb₃Sn 等材料，其工作于液氦温区（约 4.5 K）。这类磁体能够产生强磁场并支持长脉冲稳态运行，是当前大型托卡马克装置的主流选择。国际热核聚变实验堆（ITER）作为低温超导技术的集大成者，其磁体系统采用 Nb₃Sn 和 NbTi 超导体，通过管内电缆导体（CICC）结构和超临界氦强制冷却，为实现高性能等离子体约束奠定了坚实基础。

图 4 低温超导托卡马克装置：ITER



资料来源：ITER 官网，华西证券研究所

图 5 典型低温超导托卡马克主要性能参数

| 参数 | 系统名称 | | | |
|------------|------|-------|----------|----------|
| | EAST | KSTAR | CFETR | ITER |
| 首次运行年份 | 2006 | 2008 | 2035(预计) | 2033(预计) |
| 主半径/m | 1.85 | 1.8 | 7.2 | 6.2 |
| TF 线圈数量/个 | 16 | 16 | 16 | 18 |
| TF 线圈电流/kA | 14.5 | 35.2 | 84.6 | 68 |
| 中心磁场/T | 3.5 | 3.5 | 6.5 | 5.3 |
| 等离子体电流/MA | 1.0 | 2.0 | 13.78 | 15 |
| 国家或地区 | 中国 | 韩国 | 中国 | 国际 |

资料来源：张家龙《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，华西证券研究所

低温超导装置正朝着更大规模和更高参数方向发展。尽管低温超导磁体技术成熟，但仍面临高应力下的机械稳定性、低温冷却系统能耗大以及失超保护等挑战。例如，ITER 的 Nb_3Sn 导体在强电磁载荷下易发生性能退化，需通过优化结构设计来缓解应力集中。通过开发高导热结构材料和混合磁体等方案，低温超导磁体有望在 CFETR 等示范堆中实现 6.5 T 中心磁场和 13.78 MA 等离子体电流的既定目标，从而为聚变能源的工程验证提供关键支撑。

高温超导和低温超导区别在于超导材料和工作温度。低温超导必须依赖接近绝对零度的液氮冷却，系统复杂、成本高；高温超导则可在更“温暖”的液氮温区运行，制冷要求大幅降低，运维更经济。高温超导磁体允许产生更强磁场，使托卡马克设计更紧凑、效率更高，代表了聚变装置向小型化、商业化发展的新方向。高温超导技术为紧凑型、高效率的聚变装置开辟了新的技术路径；而低温超导技术成熟，仍是当前 ITER 等大型项目的首选，但面临冷却能耗与应力控制等工程挑战。

高温超导磁体以 REBCO（稀土钡铜氧，第二代高温超导带材）等材料为代表。根据 Mitchell 等人 (2021) 的综述，以 REBCO（稀土钡铜氧）带材为代表的高温超导体，其工作温度可提升至 20 K 甚至更高，能提供比低温超导体更大的温度裕度和热力学稳定性。这类磁体支持更紧凑的托卡马克设计，能显著提升磁场强度并降低运行能耗。同时，REBCO 在极高磁场下仍能保持高临界电流密度，是实现紧凑高场聚变装置的关键使能技术。商业公司正积极推动高温超导磁体的应用，如中国聚变工程实验堆（CFETR-1）项目也在探索高温超导技术的应用潜力，其创新设计为未来聚变堆提供了重要参考。

图 6 高温超导托卡马克装置“洪荒 70”总装



资料来源：张家龙《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，
华西证券研究所

图 7 部分商业化高温超导托卡马克主要信息

| 信息 | 公司名称 | | | |
|---------|--------------------------------|-------------------|----------|----------------|
| | Commonwealth Fusion Systems | Tokamak Energy | 能量 奇点 | 星环 聚能 |
| 托卡马克名称 | SPARC | Demo4 | 洪荒 70 | CTRFR-1 |
| 建成时间 | 2025 年 (预计) | 2024 年 (预计) | 2024 年 | 2025 年 (预计) |
| 环向磁场/T | 12.2 | 18 | 0.6 | 3~5 |
| TF 数量/个 | 18 | 14 | 12 | 16 |
| 国家 | 美国 | 英国 | 中国 | 中国 |

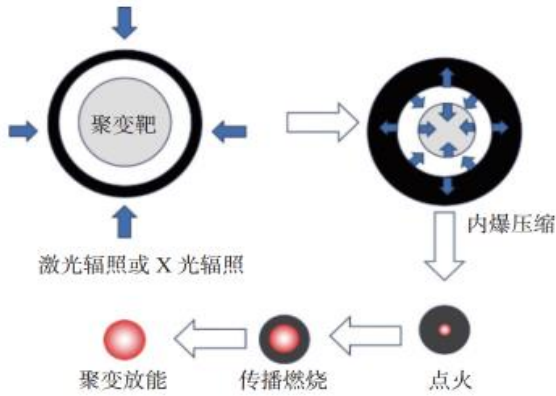
资料来源：张家龙《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》，
华西证券研究所

随着材料成本下降和工艺优化，高温超导磁体有望在装置中实现 $Q>10$ 的能量增益，加速聚变能源的商业化应用。例如，国内能量奇点公司开发的“洪荒 70”全高温超导托卡马克已于 2024 年完成总装并成功放电，其下一代“经天”磁体计划突破 25 T 场强。但高温超导磁体的发展仍受限于材料成本高、制造工艺复杂以及失超保护难度大等问题。如 REBCO 带材的产能目前难以满足大型磁体需求，且无绝缘线圈设计在失超时易导致热失控。业界正通过激光刻蚀、混合磁体方案和先进冷却技术来应对这些挑战。

1.3.2. 实现可控核聚变的其它路径一：惯性约束

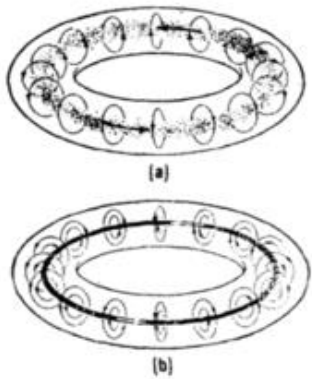
惯性约束是另一种核聚变常用的约束方式。惯性约束核聚变（简称 ICF）是一种通过激光或 X 射线照射含有氘氚燃料的靶丸，利用靶丸电离时产生的高速运动反向作用力来压缩氘和氚，从而触发聚变反应的技术。约束时间极短，等离子体温度和密度高，依赖巨大能量输入和精密控制技术。这项技术不仅对于理解核爆炸的基本原理至关重要，还能模拟和研究天体物理环境中的极端状态。

图 8 激光驱动惯性约束原理示意图



资料来源：《南方能源建设》2024 年 5 月，华西证券研究所

图 9 直线箍缩装置（Z 箍缩）原理示意图



资料来源：国家核安全局，华西证券研究所

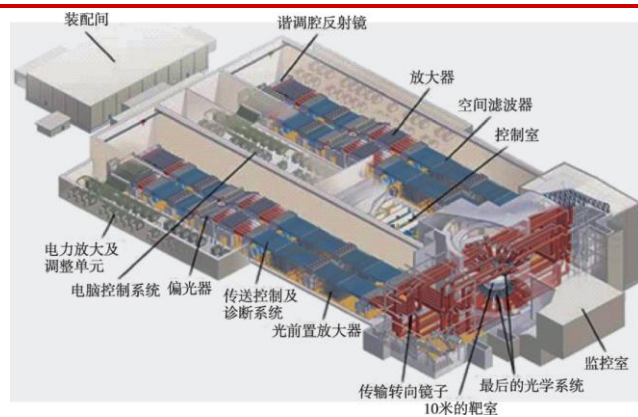
在惯性约束核聚变领域，相关实验装置主要分为两大类：激光驱动的核聚变装置和 Z 箍缩核聚变装置。这些装置的设计和建设，主要由美欧等国家和地区的科研机构负责，其中代表装置包括美国的国家点火装置 NIF 和国内聚龙一号实验装置等。

图 10 激光惯性约束装置-美国国家点火装置(NIF)为例



资料来源：高端装备产业研究中心，华西证券研究所

图 11 NIF 结构图



资料来源：高端装备产业研究中心，华西证券研究所

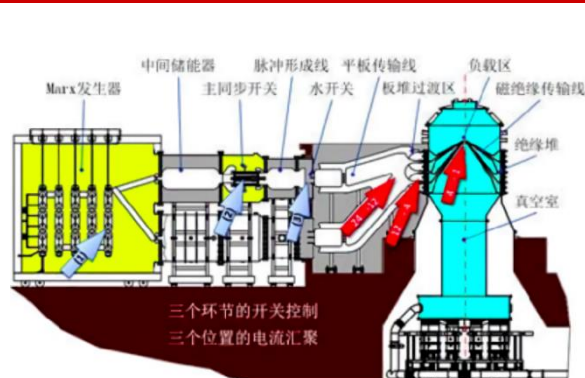
NIF 由两大核心组成部分构成：高能紫外线激光系统和靶室。激光系统本身由多个精密子系统组成，包括光脉冲发生器、激光放大器、脉冲驱动系统、光学开关、光学聚能器以及激光束的精确控制系统。这一系统的设计旨在将主振荡器产生的初始低功率激光脉冲进行校正和显著放大，最终实现对微型氘氚靶丸的精确聚焦。通过这一过程，NIF 能够产生强大的激光能量，以实现靶丸的高效压缩和聚变反应的触发。

图 12 Z 箍缩惯性约束装置-聚龙一号为例



资料来源：高端装备产业研究中心，华西证券研究所

图 13 Z 箍缩惯性约束装置-聚龙一号结构图



资料来源：高端装备产业研究中心，华西证券研究所

"聚龙一号"是中国自主研发的关键的 Z 箍缩惯性约束核聚变实验装置，它在"闪光 1 号"、"闪光 2 号"等类似设备的研制经验上进一步发展而来。它采用“电容储能+脉冲压缩”的技术路径，其核心设计在于通过 24 路独立的太瓦级脉冲功率源，并利用精密的开关与传输线技术，将所有能量在极短时间内进行同步汇流与叠加，从而瞬间产生驱动核聚变研究所需的极端强电流。

1.3.3. 实现可控核聚变的其他路径二：磁-惯性混合方案

磁化靶聚变 (MTF) 是一种融合了磁约束聚变 (MCF) 和惯性约束聚变 (ICF) 特点的聚变能概念。与磁约束方法类似，聚变燃料在被加热成等离子体时，由磁场以较低密度进行限制。而借鉴惯性约束的方法，通过快速挤压目标物质，可以显著提高燃料的密度和温度，从而触发聚变反应。虽然 MTF 产生的密度远低于 ICF，但人们相信，结合较长的约束时间和更优的热保持能力，MTF 能够运行且更易于构建。

图 14 现有运行的 PI3 等离子注入器



资料来源：中国核技术网，General Fusion，华西证券研究所

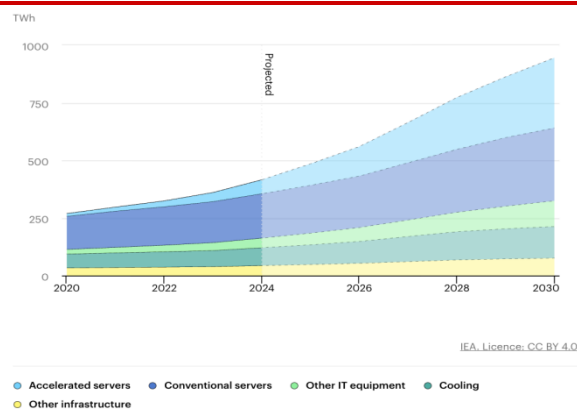
磁惯性约束聚变（MTF）是在磁约束聚变（MCF）和惯性约束聚变（ICF）之间开辟的一条折中路径。MTF 的目标是实现 10^{19} 个离子/立方厘米的等离子体密度，介于 MCF（ 10^{14} 个离子/立方厘米）和 ICF（ 10^{25} 个离子/立方厘米）之间。在这个密度下，约束时间需要达到 1 微秒左右，约束时间同样介于两者之间。MTF 利用磁场减缓等离子体损失，同时使用惯性压缩来加热等离子体。这种“适中”的技术路径，降低了对激光器（如 ICF 所需）和超导磁体长时间约束（如 MCF 所需）的极端要求，被洛斯阿拉莫斯国家实验室誉为“通往聚变的低成本路径”。

2. 新增电力需求旺盛，可控核聚变有望成为最佳方案

2.1. 数据中心：成为新的电力消耗主力

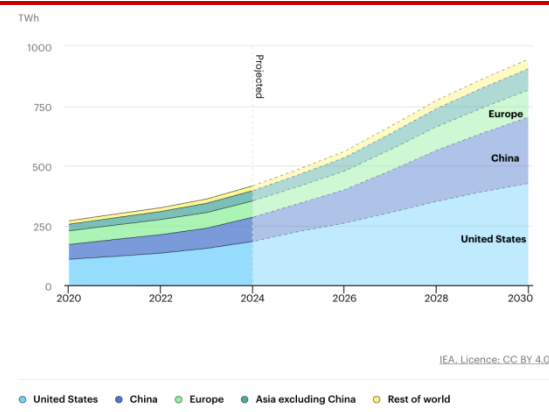
全球 AI 与数据中心用电正以远超其他行业的速度扩张。IEA 在 2025 年《Energy and AI》中测算，当前全球数据中心用电量约为 415 TWh，占全球用电的 1.5%，但过去 5 年保持约 12% 的年增速；到 2030 年，在基准情形下将翻倍至约 945 TWh，占比升至接近 3%，年增速约 15%，是其他用电部门的 4 倍以上。IEA 同时指出，美国和中国将贡献到 2030 年前后约 80% 的数据中心用电增量。

图 15 2020-2030 年全球数据中心分设备类型电力消



资料来源：IEA《Energy and AI》，华西证券研究所

图 16 2020-2030 年全球数据中心分地区电力消耗



资料来源：IEA《Energy and AI》，华西证券研究所

科技巨头与电力和能源企业签署中长期清洁电力合约，以应对快速增长的算力用电需求。近年来，全球大型科技企业不再仅作为传统电力消费者，而是通过中长期电力采购协议（PPA）直接对接发电企业，以锁定稳定的清洁电力资源支撑云计算和人工智能基础设施。Google、Microsoft、Amazon、Meta 等科技巨头已在北美和欧洲与能源企业签署多笔涵盖风电、光伏、水电及核电的长期合约，将数据中心扩张与新增零碳电源紧密捆绑。根据可控核聚变官网，Commonwealth Fusion Systems（CFS）与 Google 达成协议，将在 2030 年代初从首座商业聚变电厂 ARC 向谷歌供应 200MW 电力；根据界面新闻，Helion Energy 计划在建造世界首座核聚变发电厂，预计在 2028 年开始为 Microsoft 供电。在中国，腾讯、阿里巴巴等企业则通过大规模绿电中长期合同及“嵌套式”长期购电协议锁定风电、光伏发电量覆盖数据中心用电。科技公司正以长期合约为纽带深度参与电力市场与清洁能源投资布局，以应对持续攀升的算力负荷与减排压力。

表 5 全球科技巨头近期电力合约情况梳理

| 公司 | | 时间 | 签署合约 |
|-----------|-----------|--|---|
| 海外 | Google | 2025.11 | TotalEnergies 与 Google 签署 15 年期 PPA，从其位于俄亥俄州的 Montpelier 太阳能电站向 Google 提供 1.5 TWh 认证可再生电力，用于支撑 Google 在当地的数据中心运营。 |
| | | 2025.6 | Commonwealth Fusion Systems（CFS）与 Google 达成协议，将在 2030 年代初从首座商业聚变电厂 ARC 向谷歌供应 200MW 电力。 |
| | | 2024 | 根据 Google 官网披露，仅 2024 年一年就签了约 8 GW 清洁能源发电能力的合同，是公司历史新高，这些合同主要用于在其数据中心所在电网内匹配电力消费。 |
| | Microsoft | 2024.9 | Constellation 与 Microsoft 签署公司史上最大规模 PPA，期限约 20 年，由三里岛 1 号机组提供约 835 MW 无碳电力，用于支撑 Microsoft 在美国中大西洋地区的数据中心。 |
| | | 2023.5 | Helion Energy 计划在建造世界首座核聚变发电厂，预计在 2028 年开始为 Microsoft 供电。 |
| | Amazon | 2025.6 | 德国公用事业 RWE 公告：已与 Amazon 成功执行 7 份 PPA，总容量约 1.1 GW，由其在美国的风电和光伏电站供电，帮助 Amazon 以无碳电力支撑运营。 |
| 2024 | | Amazon 2024 年可持续发展报告中写明：截至 2024 年底，Amazon 已宣布 302 份 PPA，通过这些项目将数据中心等设施的用电与可再生能源发电“逐个项目匹配”。 | |
| 2022-2025 | | Amazon 通过多份 PPA 与西班牙电力公司 Iberdrola 建立可再生能源与云服务战略合作，合同约定的可再生电 | |

请仔细阅读在本报告尾部的重要法律声明

| | | | |
|----|---------|--------|--|
| 国内 | Meta | | 力累计超过 66,000 GWh。 |
| | | 2025.6 | 2025 年 6 月，清洁能源开发商 Invenenergy 与 Meta 新签 4 份清洁能源协议，新增风电与光伏装机容量共 791 MW，为 Meta 数据中心扩张和清洁能源目标提供中短期供电。 |
| | | 2025.6 | Meta 与 Constellation 签署 20 年期协议，自 2027 年起采购伊利诺伊州 Clinton 核电站约 1.1 GW 电力，用于支撑其区域运营和 AI 基础设施相关的清洁电力目标。 |
| | | 2025.6 | Meta 与地热公司 XGS Energy 达成新协议，在新墨西哥州开发 150 MW 高温干热岩地热项目，为数据中心提供近零碳电力。 |
| | Equinix | 2024.2 | 全球数据中心巨头 Equinix 近日宣布，已签署一份购电协议（PPA），将在澳大利亚购买 151MW 的风力发电。 |
| | DayOne | 2025.7 | 新加坡数据中心公司 DayOne，与 Sembcorp Industries 签署 10 年 PPA，由后者提供附带可再生能源证书的电力，为 20 MW 数据中心负荷配套绿电。 |
| | 腾讯 | 2024 | 《腾讯 ESG 报告》披露，2024 年采购绿色电力 13.6 亿千瓦时，较 2023 年增长 125.8%。 |
| | | 2022 | 《腾讯碳中和目标及行动路线报告》披露，腾讯在 2022 年度电力市场中集中签订绿电交易合同，总量约 5.04 亿千瓦时 |
| | 阿里巴巴 | 2023 | 阿里巴巴集团全年签署了超过 16 亿度的绿电交易量。 |
| | 世纪互联 | 2023 | 世纪互联与中广核太阳能签订 2023 年绿电购买协议（约 400 万千瓦时），其中包含未来五年约 5 亿千瓦时的绿电供给保障条款 |
| | 万国数据 | 2021 | 万国数据与中广核新能源签署绿色电力合作框架协议，计划在未来 10 年内向中广核新能源采购合计不低于 20 亿千瓦时的绿色电力 |

资料来源：各大公司官网，路透社，纽约邮报，The Verge、Baxtel、W.Media 等数据中心资讯网站，绿色和平，界面新闻，可控核聚变官网，华西证券研究所

2.2.传统供给受限，可控核聚变有望成为最优方案

传统电力供应受限。化石能源储量有限，铀能又受国内资源不足和高对外依存度制约，难以作为长期单一支撑。在当前消费水平下，石油、天然气和煤炭等传统化石能源的可采储量分别仅能支撑数十年至百年左右，整体供给安全具有明确的时间边界，难以长期承担经济与用电需求持续增长的压力。相比之下，铀基核电在单位能量密度和发电稳定性方面具有明显优势，但根据中科院研究，我国铀矿禀赋并不优越，储量总体不高、品位偏低、矿体分散且埋藏条件差，近年来虽在新疆伊犁、内蒙古东胜等盆地取得找矿进展，新增资源仍难以匹配核电装机扩张的速度，铀资源对外依存度已由约 51% 升至约 80%，总体上仍存在较突出的上游资源约束。

表 6 核能及传统能源储量情况

| 能源类型 | 储能 (10 ⁹ J) | 预计可用时间 (年) |
|-------------------|------------------------|---------------------|
| 石油 | 1.2 × 10 ¹³ | 40 |
| 天然气 | 1.4 × 10 ¹³ | 50 |
| 煤炭 | 1.0 × 10 ¹⁴ | 300 |
| 铀 235 (裂变堆) | 10 ¹³ | 30 |
| 铀 238、钍 232 (增殖堆) | 10 ¹⁶ | 3 × 10 ⁴ |
| 锂 (DT 聚变堆) | 10 ¹⁹ | 3 × 10 ⁷ |

资料来源：王龙《磁约束等离子体实验物理》，华西证券研究所

与传统能源以及铀基核裂变相比，核聚变能源的原料充足且获取成本低。IAEA 在文章《What is Nuclear Fusion?》中给出了非常明确的论证：大多数正在开发的聚变方案采用氘-氚燃料组合，其中氘可从海水中低成本提取，氚可通过聚变中子与锂反应在装置内增殖获得。ITER 官网以及学术期刊也指出，陆地锂储量足以支撑聚变

请仔细阅读在本报告尾部的重要法律声明

电站运行两千多年，而若利用海水中的锂-6 同位素，则可满足数百万年甚至上千万年的需求。意味着只要聚变装置本身的氚增殖和回收技术能够工程化，燃料链就可以在地球上依靠极其广泛、价格低且来源分散的资源来闭合，相较于煤炭石油天然气，聚变所需氘氚燃料可依托海水和锂资源长期、低成本获取；相较于传统核电，聚变燃料链不受稀缺铀资源约束，可在地球上支撑超长时间的能源供给。

表 7 核聚变与核裂变、传统能源对比

| 类型 | 原料 | 优点 | 缺点 | 应用场景 |
|------|---------------------|--|---|---|
| 核聚变 | 轻原子核（氘和氚） | 原材料非常丰富（如海水中的氘），反应放能效率极高，反应产物无污染，不具有放射性。 | 反应条件极其苛刻，技术难度极大，目前还没有实现可控的持续性聚变反应 | 目前还未实现商业应用，但在国际合作下取得了长足的进展，显示出了巨大的发展潜力。核聚变被认为是未来最理想的清洁能源之一。 |
| 核裂变 | 铀-235，钚-239 和 铀-233 | 原材料相对容易获取，技术相对成熟，已经实现了商业化的核电站。 | 反应产物具有强烈放射性，需要妥善处理和存储，反应失控会引发严重安全事故。 | 已经在商业上得到广泛应用，许多国家都拥有核电站并利用核裂变技术发电。核裂变技术在航空航天、医学、军事等领域也有应用。 |
| 传统能源 | 煤炭、石油和天然气 | 具有稳定、可靠、丰富的特点，在短期内难以替代。 | 产生大量的污染物和温室气体，对环境产生负面影响；储量极度有限，资源短缺的问题日益突出。 | 化石燃料是目前电力系统的主要能源来源。 |

资料来源：可控核聚变官网，天津理工大学访谈，华西证券研究所

核聚变能源本身还具备高能、环保、安全三大优势：

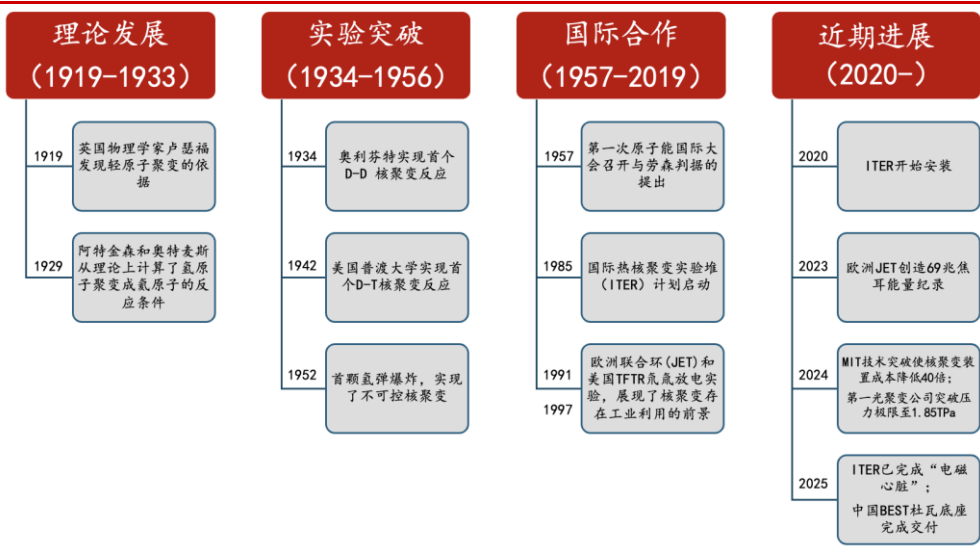
- 1) **高能**：ITER 官网明确指出，受控条件下的聚变反应单位质量释放的能量约为化学反应（煤、油、气燃烧）的近四百万倍、约为核裂变的 4 倍。
- 2) **环保**：聚变反应过程中不排放二氧化碳或其他温室气体，主要副产物为惰性、无毒的氦气；装置结构中被中子活化的材料预计在百年左右即可回收或再利用，不会形成类似裂变堆那样的大量、高活度、长寿命放射性废物，减少了末端处置的制度和成本压力。
- 3) **安全**：聚变装置不存在连续链式反应、燃料在堆内一次只保有“几秒钟量级”的特性，这为其在高负荷、城市化、数据中心密集地区的部署提供了安全性背书。
- 这使得核聚变天然符合“高能量密度+零碳/低碳+安全性可控”的下一代电力供给方向。

2.3.技术上实现渐行渐近，商业化征途可期

2.3.1.历经百年沉淀，核聚变发展进入快车道

核聚变发展进入快速通道。1919-1933 年间，随着对轻核聚变能量来源、库仑势垒穿透以及氘、氚等轻核反应可能性的相继提出与论证，聚变研究的科学基础被奠定，为后续装置路线和约束方式指明了方向。1938 年以后，伴随“氘氚循环”反应模式的提出和 D-T 反应的首次实现，人们在实验上证明了核聚变反应的可达性。进入 20 世纪下半叶，托卡马克技术的成熟与 ITER 计划的启动，把聚变推入国际协同的新阶段；1990 年代欧洲 JET 和美国 TFTR 先后完成高性能等离子体放电实验，表明磁约束聚变具备迈向工业应用的前景。21 世纪以来，全球各大装置开始规划建设并逐渐落成，ITER 在 2020 年后进入大部件安装阶段，2025 年完成“电磁心脏”等一系列节点意味着国际聚变事业正从“物理可行”持续向“工程可行、长期稳定运行可行”过渡，为后续的聚变堆示范与商业化验证奠定技术与组织基础。

图 17 可控核聚变发展历史重大节点



资料来源：福建省生态环境厅官网，中科院合肥研究院等离子体所公众号，华西证券研究所

全球各国核聚变投入加码。多国参与的 ITER 仍是磁约束聚变领域的核心工程，自 2006 年联合签署协议以来，已于 2020 年转入托卡马克装置的实质性组装阶段，在 2025 年 4 月完成关键超导磁体系统的集成，为后续放电运行奠定物理和工程条件。

EAST 奠定基础，BEST 有望 2027 年发电。EAST 长期承担高参数稳态等离子体运行的物理攻关，为未来聚变堆提供成套运行经验；CFETR 面向 2030 年前后建成工程示范堆、2035—2040 年开展长脉冲高参数实验的目标，正通过 CRAFT 分系统的陆续验收，把超导磁体、加热与电流驱动、高热流部件、真空与远程维护等关键环节在地面先做“实物级”打样；BEST 则依托合肥大科学城的工程条件，以紧凑高场托卡马克路线快速推进主机装配，力争在 2027 年实现能量净增益并开展小功率发电演示，为我国在高约束、小型化聚变装置上的可行性提供更短路径的证明。

表 8 国际可控核聚变重大项目

| 国家 | 装置名称 | 技术路线 | 项目进展 |
|-----------------------|-----------|-------|---|
| 中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国 | ITER | 托卡马克 | 2006 年 11 月，中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国七方在法国巴黎共同签署了《联合实施国际热核聚变实验堆计划建立国际聚变能组织的协定》。 2020 年 7 月，ITER 计划托卡马克装置安装工程启动。 2025 年 4 月，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。 |
| | NIF | 激光聚变 | 2022 年，首次实现输出能量超过输入能量（Q 值达 1.5 倍）。 2023 年 12 月，点火次数增至 4 次，输入能量首次达到 2.2 兆焦。 |
| 美国 | SPARC/ARC | 托卡马克 | 2018 年，CFS 正式成立，同年启动 SPARC 项目。 2024 年 11 月，SPARC 装置步入组装早期阶段。 预计：2025 年，完成 SPARC 主体装置建设；2026 年，首次产生等离子体；2027 年，达成 Q>1 的净能量增益目标；在 2030 年代，聚变电厂 ARC 实现向电网供电。 |
| | DIII-D | 托卡马克 | 1978 年开始运营，是当时世界上最大的磁约束聚变装置，并很快创造了达到 2.2MA 的最高等离子体电流纪录。 2024 年，突破 20 万次等离子体脉冲。 |
| 加拿大 | LM-26 | 磁化靶聚变 | 2023 年通用聚变公司启动 LM-26 项目。 2025 年 3 月 11 日成功点火，在真空腔内首次生成高温等离子体。 |
| 英国 | STEP | 托卡马克 | 目标 2040 年前后建成一座球形托卡马克示范电厂，实现净电输出并验证商用可行性。 |
| 欧盟 | JET | 托卡马克 | 1983 年 (JT-60SA 之前 40 年) 实现了第一个等离子体试验。 2022 年初，JET 在 5 秒内产生了 59 兆焦耳的持续能量。 2024 年 2 月，CCFE 宣布在 JET 最后一次实验中，使用 0.21 毫克 D-T 燃料在 6 秒内产生 69MJ 的聚变功率，再次打破历史记录。 |

| | | | |
|----|---------|------|---|
| | WEST | 托卡马克 | 2025 年 2 月 12 日，法国 WEST 装置在 5000 万摄氏度的高温条件下成功将等离子体维持了 1337 秒，刷新稳定时间纪录。 |
| | LMJ | 激光聚变 | 2014 年，LMJ 顺利建成。 2019 年，LMJ 进行了首次核聚变实验。 2020 年，靶定位和束靶耦合技术取得重大进展，确保了高精度的实验条件。 |
| 日本 | FAST | 托卡马克 | 2024 年 11 月 12 日，日本正式启动聚变能示范电厂项目 FAST，预计将在 2025 年完成初步设计，2030 年代末进行发电示范。 |
| | JT-60SA | 托卡马克 | 2020 年，完成组装。 2023 年，首次产生等离子体并成功点火，是 ITER 建成前全球最大的托卡马克研究装置。 2025 年 2 月，日本宣布用新部件升级 JT-60SA。 |
| 韩国 | KSTAR | 托卡马克 | 2018 年，首次在 1 亿摄氏度的高温下，将等离子体持续运行 1.5 秒，同年启动钨偏滤器研发。 2021 年，KSTAR 在 1 亿摄氏度下，持续运行等离子体 30 秒。 2024 年，KSTAR 在 1 亿摄氏度下，持续运行等离子体 48 秒，同时实现高约束模式（H 模式）运行超过 100 秒。 |
| 中国 | EAST | 托卡马克 | 2025 年 1 月 20 日，EAST 在安徽合肥创造新世界纪录，首次完成 1 亿摄氏度 1000 秒“高质量燃烧”，标志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。 |
| | CFETR | 托卡马克 | 2024 年底，CRAFT（CFETR 提供测试平台）子系统“聚变工程堆中心螺管系统”已完成首轮测试。 2030 年前建成工程示范堆，实现首次等离子体放电。 2035-2040 年，开展长脉冲高参数运行实验，目标发电并网。 |
| | BEST | 托卡马克 | 2025 年 3 月 5 日，BEST 项目首块顶板顺利浇筑。 2025 年 4 月，超低温高强韧无磁不锈钢材料在 BEST 实现应用。 2025 年 5 月，BEST 项目提前两个月启动总装，计划 2027 年实现能量净增益（Q>1）验证，首次演示聚变能发电。 2025 年 10 月，杜瓦底座研制成功并顺利完成交付，标志着主体工程建设步入新阶段。 |

资料来源：可控核聚变媒体，新浪科技，中国核技术网，聚变汇公众号，双碳情报公众号，中科院合肥研究院等离子体所公众号，华西证券研究所

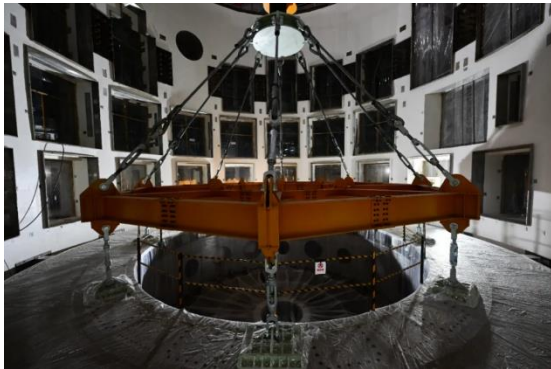
BEST 项目整体项目进展加速。2025 年 5 月，BEST 项目提前两个月启动总装，计划 2027 年实现能量净增益（Q>1）验证，首次演示聚变能发电。2025 年 10 月，杜瓦底座研制成功并顺利完成交付，标志着主体工程建设步入新阶段。

图 18 BEST 项目建设现场



资料来源：科创中国，华西证券研究所

图 19 BEST 项目杜瓦底座安装

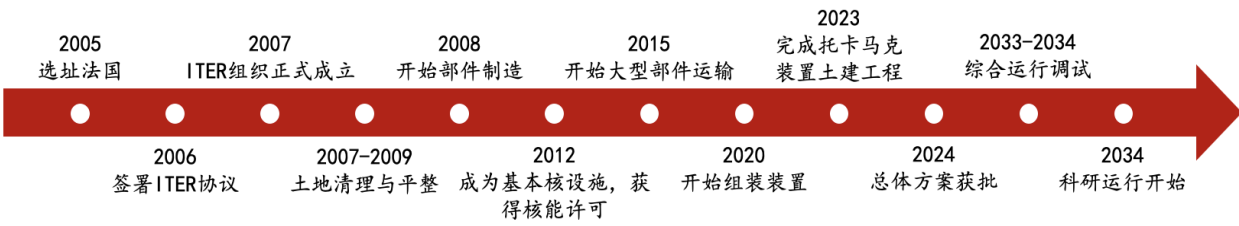


资料来源：科创中国，华西证券研究所

海外重大项目：ITER 项目全球规模最大，全球协同

ITER 项目是当今规模最大、参与方最广的聚变能国际合作计划。目标是在接近未来商用聚变电站的工况下，验证聚变能的科学与工程可行性。根据 ITER 官网公开的时间表，项目自 2005 年确定法国圣保罗-莱杜朗斯为建址地后，2006 年七方正式签署 ITER 协定，2007 年 ITER 组织成立并开始场地清理与基础设施建设，2008 年起陆续启动超导磁体、真空容器、低温系统等关键部件的制造；2020 年装置进入机组装配阶段，2023 年完成托卡马克综合体土木工程，2024 年理事会通过更新后的基准方案，为后续系统联调奠定依据，计划在 2033—2034 年开展整机综合调试，最终在 2039 年前后进入氦氦燃烧阶段，实现工程化条件下的聚变能量输出。

图 20 ITER 发展路线



资料来源: ITER 官网, 华西证券研究所

ITER 在任务层面被设计为五个核心目标。

表 9 ITER 核心任务

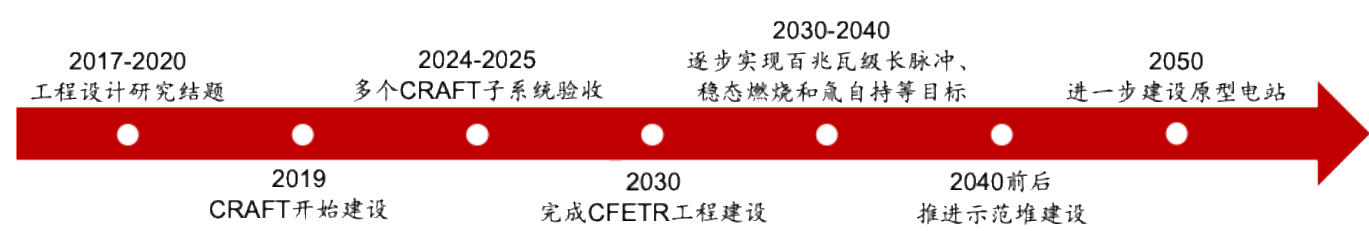
| | 任务 | 具体描述 |
|---------|-----------------------------|--|
| ITER 项目 | 实现氦氘等离子体, 其中聚变条件主要由内部聚变加热维持 | 探索“燃烧等离子体”的门槛——在这种等离子体中, 聚变反应产生的热量被有效地约束在等离子体内部, 以至于自加热效应能够主导任何其他形式的加热。 |
| | 在其等离子体中产生 500 兆瓦的聚变功率 | 作为历史上第一个在等离子体中实现净能量增益的聚变实验装置, 为未来能够实现将产生的加热功率转化为电能的装置铺平道路。 |
| | 为聚变电站技术的集成运行提供示范 | 弥合当今小型实验性聚变装置与未来示范性聚变电站之间的差距, 让科学家们将能够在与未来核电站预期条件相似的环境下研究等离子体, 并测试加热、控制、诊断、低温技术和远程维护等技术。 |
| | 测试氦增殖 | 验证在真空容器内利用锂生产氦的可行性。 |
| | 验证聚变装置的安全特性 | 验证对等离子体和聚变反应的控制能力, 同时将对环境的影响降至最低。 |

资料来源: ITER 官网, 华西证券研究所

国内重大项目: CFETR 项目预计 2030 年实现发电

中国聚变工程试验堆 (CFETR) 是我国在 ITER 之后面向自主聚变堆路线部署的关键装置。按现有规划, CFETR 依据 $R \approx 7.2\text{ m}$ 、 $a \approx 2.2\text{ m}$ 的尺度设计成两阶段运行: 第一阶段聚变功率约 50–200 MW、 $Q=1\text{--}5$ 、 $TBR>1.0$, 并获取约 10 dpa 中子辐照数据; 第二阶段面向接近反应堆工况, 将功率提升至 1 GW 以上、 $Q>10$, 在约 50 dpa 条件下开展 DEMO 验证。为支撑这一目标, 2019 年, 服务于 CFETR 的聚变堆主机关键系统综合研究设施 (CRAFT) 在合肥正式开工, 目前已进入建造的最后阶段, 为超导磁体、高功率加热、电流驱动等关键子系统提供工程验证平台。根据中国磁约束聚变发展路线及公开报道, 我国拟在 2030 年完成 CFETR 的工程建设, 在 2030 年代逐步实现百兆瓦级长脉冲、稳态燃烧和氦自持等目标, 并在 2040 年前后推进千兆瓦级升级运行和示范堆, 为本世纪中叶聚变电站示范与商业化奠定基础。依托 EAST 运行经验、ITER 采购积累以及高温超导与国产化部件的突破, CFETR 成为我国掌握聚变堆全链条能力的核心平台, 仍需在持续参与国际合作的同时加快主机关键部件研发和装置建设, 实现从物理可行到能源可行的跨越。

图 21 CFETR 发展路线



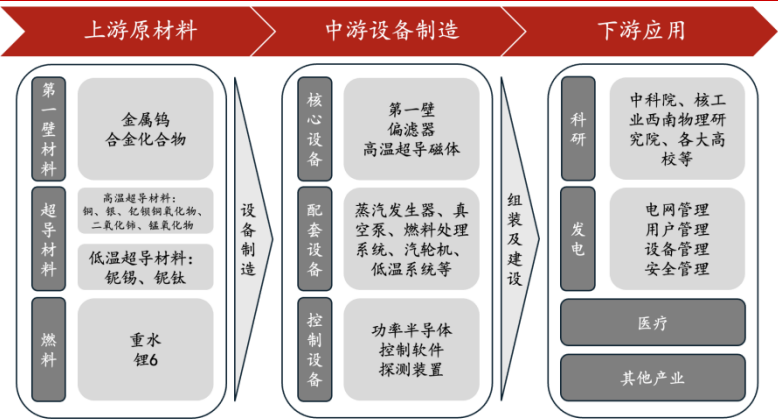
资料来源：《磁约束聚变能源的发展机遇与挑战》，《可控核聚变科学技术前沿问题和进展》，Fusion Power Associates，中科院官网，IAEA，光明日报，华西证券研究所

3.未来 5 年核聚变资本开支超 920 亿元，本土企业受益

3.1.中游设备制造占比超 50%，产业链需求拉动大

- 1) 上游原材料：主要围绕第一壁和偏滤器所需的高纯钨、铜及其合金化产品，高温/低温超导磁体用 Nb₃Sn、REBCO 等超导材料，以及重水、锂同位素 (Li₆) 等燃料与增殖介质展开。
- 2) 中游设备制造：是当前产业链的技术与价值核心，既包含托卡马克主机本体的关键部件，例如反应器第一壁、偏滤器、高温超导磁体等，也包含支撑其长期稳定运行的一整套工程系统，例如加热、冷却、燃料循环、控制系统等。
- 3) 下游应用：目前仍以试验科研和示范工程为主，尚未进入商业化发电阶段，其功能更多体现在“验证路线、固化标准、带动前两端配套”上。

图 22 可控核聚变产业链



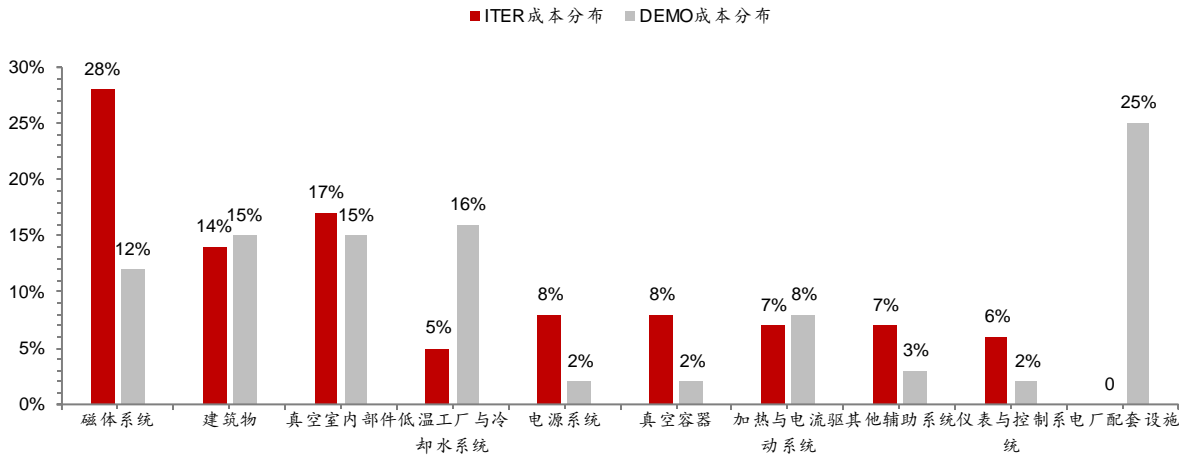
资料来源：华经产业研究院，前瞻产业研究院，智研咨询，华西证券研究所

在目前最成熟的 ITER 项目中，磁体系统是成本最高的，占比 28%。

ITER 项目（低温超导技术）：磁体系统占比最高（28%），加上真空室内部件（17%）、加热与电流驱动（7%）等，中游设备合计占比超过 50%。

DEMO 示范堆项目（高温超导技术）：虽然磁体成本占比因技术进步降至 12%，但真空室内部件（15%）和代表系统集成的“电厂辅助设施”（25%）成为新的价值核心，中游环节的整体价值量依然占据主导地位。

图 23 基于主流的托卡马克（磁约束）装置成本分布



资料来源：Neil Mitchell et al 《Superconductors for fusion: a roadmap》，华西证券研究所

3.1.1.上游原材料：高温超导材料、钨金属需求旺盛

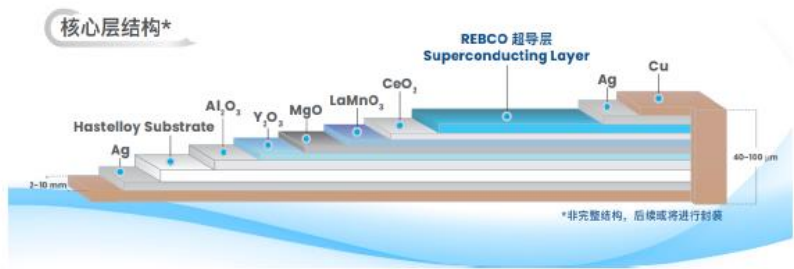
高温超导材料因其物理特性优异，有望成为主流。磁体系统通常由多个线圈组成，其早期材料多为铜导体，随着超导技术的发展和运用，超导磁体开始成为主流。低温超导磁体（例如 NbTi、Nb3Sn 等）是目前的主流，需要在零下 269 度的极低温环境下才能实现零电阻，其稳定运行最高磁场强度在 15T 左右。高温超导材料（临界温度≥25K，例如 REBCO（二代高温超导），BSCCO 材料、YBCO 涂层导体等）的出现，让聚变商业化出现曙光，它能够在更高的温度下保持超导状态，还能够提供更高的磁场强度，其稳定运行最高磁场强度可达到 45T，这种提升能大幅缩减磁体尺寸，降低装置研发成本与技术难度。

表 10 常规导体、低温超导和高温超导对比

| | 常规导体 | 低温超导 | 高温超导 |
|----|-----------------------|--------------|--|
| 材料 | 铜等 | NbTi、Nb3Sn 等 | REBCO（二代高温超导）、BSCCO 材料，高性能 YBCO 涂层导体，铁基 MgB2 带材等 |
| 条件 | 冷却水，最高温度限制在 65.56℃ 以内 | 液氮，温度 25K 以下 | 液氮，温度 25K 以上 |
| 价格 | 极为便宜 | 已经稳定在较为便宜的区间 | 是低温超导价格的十倍左右，但在急速下降 |

资料来源：华经情报网，华西证券研究所

图 24 二代高温超导结构图



钨材料是第一壁和偏滤器的核心原材料。在真空室内，直接面对等离子体的固体部分称为第一壁，第一壁和偏滤器靶板材料合称面对等离子体的材料。为了热量的传输，材料的导热性能、熔点及抗热负荷性能要强；为了降低杂质对聚变反应的干扰以及确保反应原料和产物情况，材料应具有低的溅射产额，也就是说应尽量减少聚变反应进行时材料的物理溅射、化学溅射及辐射增强引发升华等现象所造成的杂质数量；为了保证聚变反应正向进行，材料对于氢同位素的滞留应较低，如果滞留能力过高，氢同位素会在材料内部积累，可能导致材料性能退化，甚至引发氢气泡的形成，这可能对材料的结构完整性造成损害。基于放射性考量，材料应具有低的放射性，也就是材料应是低活性材料。

表 11 历史上使用过的第一壁材料对比

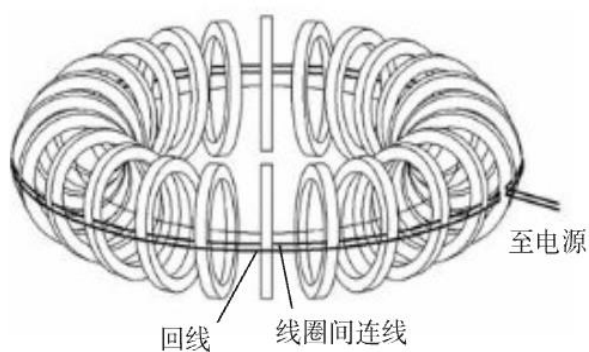
| 材料 | 使用情况 | 优点 | 缺点 |
|--------|-------|----------------------|---------------------------|
| 不锈钢 | 最初使用 | / | / |
| 碳（石墨瓦） | 曾广泛使用 | 低核电荷数、轻污染、高热导率 | 化学腐蚀率高，特别是氢同位素滞留高，不适用于反应堆 |
| 铍 | 曾经使用 | 低核电荷数、轻污染、高热导率、无化学溅射 | 物理溅射率高、有剧毒 |
| 钨 | 当前看好 | 热导率高、溅射率低、氢滞留低 | 制造工艺复杂 |

资料来源：王龙《磁约束等离子体实验物理》，华西证券研究所

3.1.2. 中游设备制造：磁体系统、真空系统等为核心

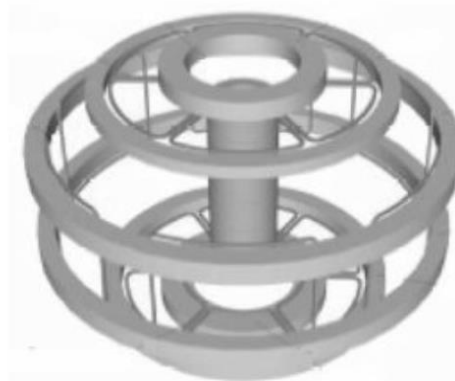
磁体系统是整个磁约束聚变装置的核心。在产生和维持等离子体稳定状态中起着关键作用，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响。当前主流装置托卡马克的磁体系统主要由环向场和极向场两部分组成。环向场磁体都是由分立的线圈组成的，这些线圈的中心位于一个圆环轴上，线圈与环轴垂直，其电流走向在极向，产生环向磁场约束等离子体。而极向场磁体的电流走向在环向，构成欧姆加热变压器，产生和维持环向等离子体电流，加热等离子体,并保持等离子体的平衡和截面形状。一些矫正整体误差磁场的线圈也处于极向。两组磁体在空间是正交关系。在有些装置上还安装了一些产生局部磁场的磁体，可称为多极场。

图 25 环向场线圈示意图



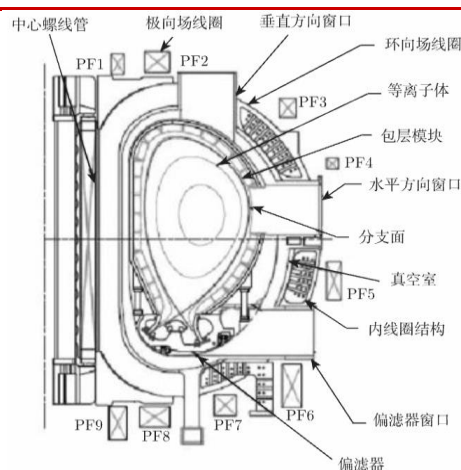
资料来源：王龙《磁约束等离子体实验物理》，华西证券研究所

图 26 极向场系线圈示意图



资料来源：王龙《磁约束等离子体实验物理》，华西证券研究所

图 27 ITER 装置结构图



资料来源：王龙《磁约束等离子体实验物理》，华西证券研究所

真空系统技术复杂，包含构件多。真空系统是磁约束聚变装置主体的另一重要组成部分，负责提供必要的真空条件，避免等离子体与空气或其他物质发生反应。真空系统包括真空室、包层、偏滤器、第一壁等结构：

真空室：是聚变堆中用于维持等离子体的容器，需要保持极高的真空度；

包层：是聚变堆中置于真空室内面对等离子体的屏蔽层，功能是吸收中子、传输能量、氦增殖；

偏滤器：可以控制燃料中聚变产物的堆积，并从等离子体中除去掺入的杂质，避免外壳层内的高能粒子轰击主放电室壁而释放出能够冷却放电的次级粒子；

第一壁：是真空室内直接面对等离子体的固体部分，因为要与等离子体直接接触并接受强的粒子和辐射的照射和能量沉积，其表面还可能发生溅射等过程以释放杂质污染等离子体，所以对其性能有很严格的特殊要求。

3.1.3. 下游应用：未来主要方向为发电、科研以及医疗

当前可控核聚变的真正产业化重心仍然位于上游与中游，但随着关键技术攻关和工程装置的逐步落地，下游预期中的发电、科研支撑和高端医疗应用将成为拉长链条、做厚配套的主要方向。国内在建和规划的 CFETR、BEST 等装置，将在未来几

年持续释放对高端材料、超导磁体、真空与燃料循环系统的需求，并在装置建设过程中把一部分高端真空、超导、电源、加速器和医疗装备技术“沿途转化”到医疗器械、科研实验平台以及核电站运维等相关领域。

3.2.国内未来 5 年核聚变资本开支超 920 亿元

从资本开支的角度看，国内可控核聚变正呈现出“国家级大科学装置拉动+地方/民营资本分层跟进”的格局。以中科院等离子体所和中核体系的装置单体投资额已经站上百亿量级：合肥东方超环（EAST）累计投资达 128 亿元；紧凑型聚变能实现装置（BEST）在建投资约 85 亿元；上海方向的“环流四号”规划注册资本 150 亿元；而被视作我国聚变发展里程碑的 CFETR，业界估算其工程投入将在 1000 亿元左右，明显高于现阶段其他装置，体现出其“连接 ITER 与未来聚变示范堆（DEMO）的关键工程试验堆”的战略定位。与此并行的还有 CRAFT 等关键系统综合研究设施，以及星火一号、EXL-50U/和龙 2、洪荒 70/170、CTRFR-1、KMAX-U 等项目，构成了“多装置、不同物理/工程侧重、总体资金池共享”的饱和式研发态势。根据我们测算，2026-2030 年我国可控核聚变领域仍将维持 920 亿元级资本开支，有望持续带动高温超导、真空与低温工程、功率电子及精密制造等上下游产业链形成较强的投资机会与放大效应。

表 12 中国核聚变项目投资与运作情况

| 项目 | 企业/机构 | 位置 | 投资金额 (元) | 建设周期* | 预估 2026-2030 资本开支** | 运作情况 |
|------------------------|---------------|----|-------------|---------------|------------------------|---------|
| 东方超环 EAST | 中科院等离子体所 | 合肥 | 128 亿 | / | / | 已建运行 |
| 中国环流三号（HL-3） | 核工业西南物理研究所 | 成都 | / | / | 未知 | 改造 |
| BEST（紧凑型聚变实现装置） | 聚变新能/中科院等离子体所 | 合肥 | 85 亿 | 2025-2027 | 65 亿左右 | 在建 |
| CRAFT（聚变堆主机关键系统综合研究设施） | 中科院等离子体所 | 合肥 | / | / | / | 在建 |
| CFETR（中国聚变工程实验堆） | 中科院等离子体所 | 合肥 | 预估 1000 亿左右 | 2035 年左右建成 | 500 亿左右 | 已规划并预研究 |
| 环流四号 | 中国聚变能源 | 上海 | 注册资本 150 亿 | 预计 2030 年建成 | 预估 150 亿 | 已规划 |
| 星火一号 | 江西聚变新能 | 南昌 | 计划投资 200 亿 | 预计 2029 年年底建成 | 预估 200 亿 | 在建 |
| Z 箍缩裂变聚变混合堆 | 先觉聚能 | 成都 | 50 亿 | 2035-2040 | / | 已规划 |
| 玄龙-50U/和龙 2 | 新奥集团 | 廊坊 | 40 亿 | / | / | 已建运作 |
| 洪荒 70/170 | 能量奇点 | 上海 | 8 亿 | / | / | 已建运作 |
| CTRFR-1 | 星环聚能 | 西安 | 10 亿 | 2024-2027 | 5 亿左右 | 在建 |
| KMAX-U/Xeonova-1 | 星能玄光 | 合肥 | 计划成本 10 亿 | / | / | 已规划 |
| HHMAX-901 | 瀚海聚能 | 成都 | / | / | / | 在建 |

资料来源：各大公司官网，FIA，IAEA，《基于系统程序的 CFETR 工程预估造价评估》，证券时报，新浪财经，未来智库，微核聚变公众号，华西证券研究所

*注：此建设周期仅包含在 2026-2030 期间有明确规划的项目，部分时间为预估时间，用于计算预估资本开支。

**注：根据各项目公开的建设周期，将总投资金额折算到 2026-2030 得出。

表 13 近几个月 BEST 项目招标情况梳理

| 项目名称 | 金额（万元） | 日期 |
|---|---------|------------|
| BEST 被动版本体部件采购项目 | 1300 | 2025/10/10 |
| BEST 偏滤器靶板及集成采购项目 | 13610 | 2025/10/10 |
| 钢构设备平台采购 | 4500 | 2025/10/13 |
| COOL TBM 超临界二氧化碳冷却剂系统采购 | 1800 | 2025/10/13 |
| 低温氮系统采购项目 | 3280 | 2025/9/29 |
| COOL TBM 锂铝主传热系统采购 | 1900 | 2025/9/30 |
| BEST 环布系统总装工程采购 | 18000 | 2025/10/14 |
| BEST 下被动板第一壁采购及集成项目 | 1700 | 2025/10/10 |
| BEST 偏滤器支撑盒体部件采购项目 | 2590 | 2025/10/10 |
| BEST 离子回旋共振加热高压电源系统-多绕组高压 I | 1723 | 2025/9/30 |
| BEST 离子回旋共振加热高压电源系统-电源模块、绝缘支架及高低压测控单元采购项目 | 4096 | 2025/9/30 |
| BEST 离子回旋共振加热高压电源系统 10kV 断路器柜及接触器柜采购项目 | 441 | 2025/9/30 |
| 低温传输线采购项目 | 6944 | 2025/10/27 |
| BEST 磁体电源假负载采购项目 | 220 | 2025/10/30 |
| 低温分配阀箱采购项目 | 4500 | 2025/11/6 |
| 低温系统关键部件采购项目 | 72824.1 | 2025/11/13 |
| BEST 辐射安全联锁系统采购 | 960 | 2025/11/14 |
| BEST 系统内真空室快控电源采购及安装项目 | 1200 | 2025/11/14 |
| BEST 磁体电源系统交流金属封闭开关柜采购项目 | 380 | 2025/11/14 |
| BEST 离子回旋波源系统采购项目 | 17000 | 2025/11/14 |
| BEST 系统 CC、CS、PF 磁体电源采购项目 | 18900 | 2025/11/14 |
| BEST 系统 TF 直流传输系统制造及测试采购项目 | 2030.4 | 2025/11/14 |
| BEST 屏蔽包层系统高硼钢屏蔽块采购项目 | 6000 | 2025/11/14 |
| BEST 屏蔽包层系统不锈钢屏蔽块采购项目 | 13900 | 2025/11/14 |
| BEST 磁体电源系统 35kV 电力电缆采购项目 | 118 | 2025/11/14 |

资料来源：Wind，全国公共资源交易平台，安徽公共资源交易集团，华西证券研究所整理

新新兴力量正在崛起，产业链配套持续完善。2023 年以来能量奇点（近 4 亿元 Pre-A）、聚变新能（50 亿与 2024 年再融 95 亿的国资主导资金）、零点聚能、盟臻科技、星能玄光、曦融兆波等公司连续完成天使轮至 Pre-A 轮融资，单笔规模多在数千万元至数亿元之间，资金主要投向高温超导磁体、场反位形、紧凑型装置设计、射频/真空关键部件国产化等“可快速形成样机或验证平台”的方向；2025 年 2 月中国聚变能源有限公司获中国核电、浙能电力 17.5 亿元注资，更显示出央企开始把聚变视作中长期能源布局的一部分。

表 14 中国核聚变企业融资情况

| 时间 | 企业 | 融资金额 | 融资轮 | 投资方 | 资金用途 |
|---------|------|--------|---------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 2023.1 | 星环聚能 | / | Pre-A 轮 | 水木清华校友基金 | / |
| 2023.3 | 聚变新能 | 50 亿元 | / | 蔚来资本、皖能资本等 | 主要用于建设紧凑型聚变能实验装置 BEST |
| 2023.4 | 能量奇点 | 近 4 亿元 | Pre-A 轮 | ENLIGHTENMENT、米哈游、云和方圆、黑门股权基金等 | / |
| 2024.7 | 复鑫力 | 数千万元 | 天使轮 | 星纳赫资本、汇石置柏、瑞奕资本和新港高投、拉尔夫创投、欧拉韦伯投资等 | / |
| 2024.7 | 聚变新能 | 95 亿元 | / | 中国石油等 | 聚变新能是中科院等离子体物理研究做磁约束核聚变领域的成果转化平台 |
| 2024.10 | 盟曦科技 | 近亿元 | 天使轮 | 上海道华、华控基金联合领投、锡创投、成都空港等 | 将集中力量突破高温超导聚变强场磁体技术的瓶颈；另一方面积极拓展行业级应用 |

请仔细阅读在本报告尾部的重要法律声明

| | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|--|---|
| 2024.11 | 星能玄光 | 1 亿元 | 天使轮 | 招商局创投和中科创星领投、民银国际、博将资本、银杏谷资本等跟投 | 公司目前正在设计和建造的新一代 KMAX-U 直线型先进场反磁镜装置 |
| 2024.12 | 曦融兆波 | 数千万元 | 天使轮 | 中科创星领投、捷创资本、合肥市种子基金以及合肥市天使投资基金参与跟投 | 主要用于提升公司在可控核聚变和半导体领域的产品实力，加速射频电源产品的开发和市场推广，以及构建面向半导体市场的智能化射频装备解决方案 |
| 2025.2 | 中国聚变能源 | 17.5 亿元 | / | 中国核电、浙能电力 | 为响应国家未来产业战略发展要求，落实核能“三步走”战略，推动核聚变产业发展 |
| 2025.3 | 零点聚能 | 数千万元 | 种子轮 | 溪山天使汇 | 加速核聚变能源技术的研发，特别是磁零点约束位形聚变路线的可行性探索 |
| 2025.4 | 翌曦科技 | 近亿元 | 天使+轮 | 复容投资领投，昆山高投、福道乐呈、闵行金投等机构跟投 | 主要用于研发和测试投入 |
| 2025.8 | 诺瓦聚变 | 5 亿元 | 天使轮 | 社保基金中关村自主创新专项基金（君联资本担任管理人）、君联资本、光速光合、高榕创投、华控基金、明势创投及临港科创投等 | 重点投入研发国内首台小型模块化核聚变反应堆，精准应对 AI 供电需求 |
| 2025.11 | 星能玄光 | 数亿元 | Pre-A 轮 | 蚂蚁集团领投，隐山资本、紫金矿业、彼岸时代、心资本、元禾璞华、联美控股、鼎和高达跟投 | 用于提升在建装置性能、部署关键技术及扩充团队，以全力推进公司独有的“场反位形”（FRC）聚变能源技术研发，为可控核聚变的商业化进程提速 |

资料来源：各大公司官网，36 氪，可控核聚变媒体，合肥高投，凤凰网财经，第一财经，腾讯新闻，中国核电网，华西证券研究所

3.3.本土企业受益产业链带动

本土企业无论是在上游原材料端，还是中游设备制造端均已实现国产化，能够在本轮可控核聚变中充分受益。结合产业链与价值链拆分，我们认为本土企业受益有：
1) 上游材料：西部超导（低温超导）、精达股份（参股上海超导）、永鼎股份（东部超导）、等等；2) 中游设备制造：安泰科技（偏滤器与第一壁）、国光电气（偏滤器、氟工厂等）、联创光电（磁体系统）、雪人股份（冷却系统）、合锻智能（真空室），其他等等；3) 下游应用：中国核电（控股股东中核集团主导核聚变研发）、中国核建（工程建设），等等。

表 15 核聚变产业链相关公司及布局

| 环节 | 公司名称 | 核聚变相关业务与进展 | 已参与或有望参与项目（部分） |
|--------------|------|--|------------------|
| 上游： 技术与材料 | 精达股份 | 为可控核聚变装置研发的卢瑟福缆，全球仅公司能连续生产 3 公里以上。参股上海超导，其主营第二代高温超导带材。 | 洪荒 70 |
| | 西部超导 | 为 CRAFT、BEST 等项目批量供货核聚变用 NbTi 超导线材，性能达 ITER 要求。 | CRAFT、BEST |
| | 永鼎股份 | 子公司东部超导主营产品为第二代高温超导带材，主要应用于超导感应加热、可控核聚变等领域。 | / |
| | 广大特材 | 核聚变超导线圈铠甲材料已批量供应（已交付 24 吨）；中标 BEST 线圈盒机加工项目。 | BEST |
| 中游： 部件与装备 | 国光电气 | 为 ITER 提供偏滤器、包层系统等关键部件；正跟踪国内多个聚变项目；氟燃料制作核心供应商。 | ITER、先觉聚能 |
| | 安泰科技 | 为 EAST、WEST、ITER 等装置提供钨铜偏滤器、第一壁等全系列涉钨产品。 | EAST、WEST、ITER 等 |
| | 联创光电 | 和中核集团建设可控聚变项目“星火一号”；高温超导技术已应用于高场磁体研制。 | 星火一号 |
| | 雪人股份 | 为大型低温制冷系统提供核心氦气压缩机，用于创造聚变装置所需的超低温环境。 | 低温超导聚变装置 |
| | 合锻智能 | 承接 BEST 项目真空室扇区、重力支撑等核心部件制造任务。 | BEST |
| | 东方精工 | 参股贵州航天新力，其为 ITER 和 BEST 项目磁体支撑系统的核心供应商。 | ITER、BEST |
| | 常辅股份 | 为 ITER 提供阀门电动执行机构等产品。 | ITER 装置阀门电动执行机构 |
| | 航天晨光 | 承制了目前国内最大的核聚变试验装置 BEST 关键部件杜瓦系统。 | BEST 装置杜瓦底座 |
| | 四创电子 | 子公司华耀电子在前期中标 PSM 电源的基础上，重点积极跟进合 | 间接为合肥 EAST 改造项目和 |

请仔细阅读在本报告尾部的重要法律声明

| | | | |
|--------------|------|--|-------------|
| 下游： 建设与运营 | | 肥 EAST 改造项目和 BEST 项目中的相关产品，同时跟进上海、成都等其他区域的重点项目。 | BEST 项目提供电源 |
| | 英杰电气 | 磁场约束、等离子加热、控制系统、辅助系统。为环流一号、二号项目提供过加热电源、控制系统电源、辅助类电源以及部分的磁场电源 | 环流一号、二号项目 |
| | 中国核电 | 控股股东中核集团主导核聚变研发；公司贯彻“压水堆-快堆-聚变堆”三步走战略。 | / |
| | 中国核建 | 具备全堆型核电建造能力，为核能项目提供工程建设服务，参与 ITER、环流三号聚变装置改造工程项目。 | ITER、环流三号 |

资料来源：各公司公告，各公司投资者关系记录表，华西证券研究所整理

4.风险提示

- 政策支持不及预期：当前核聚变尚处于试验阶段，商业化仍需长期巨额投入，且大型项目均为国家主导，高度依赖国家政策支持，若政策支持不及预期，项目易陷入停滞，对整体产业发展不利。
- 技术路线稳定程度不及预期：当前核聚变存在多条技术路线，若个别路线发展较快可能会出现技术路径迭代，从而影响相关企业。
- 技术发展成熟度不及预期：当前核聚变发展仍处于初期阶段，还有很多问题需要解决（例如燃料自持、核心部件制造难度高、原材料性能要求高等），若长时间无法突破难题限制会对产业发展造成不利影响。

分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

评级说明

| 公司评级标准 | 投资评级 | 说明 |
|----------------------------------|------|---------------------------------|
| 以报告发布日后的 6 个月内公司股价相对上证指数的涨跌幅为基准。 | 买入 | 分析师预测在此期间股价相对强于上证指数达到或超过 15% |
| | 增持 | 分析师预测在此期间股价相对强于上证指数在 5%—15%之间 |
| | 中性 | 分析师预测在此期间股价相对上证指数在 -5%—5%之间 |
| | 减持 | 分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数 5%—15%之间 |
| | 卖出 | 分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数达到或超过 15% |
| 行业评级标准 | | |
| 以报告发布日后的 6 个月内行业指数的涨跌幅为基准。 | 推荐 | 分析师预测在此期间行业指数相对强于上证指数达到或超过 10% |
| | 中性 | 分析师预测在此期间行业指数相对上证指数在 -10%—10%之间 |
| | 回避 | 分析师预测在此期间行业指数相对弱于上证指数达到或超过 10% |

华西证券研究所：

地址：北京市西城区太平桥大街丰汇园 11 号丰汇时代大厦南座 5 层

网址：<http://www.hx168.com.cn/hxzq/hxindex.html>

华西证券免责声明

华西证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具备证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司签约客户使用。本公司不会因接收人收到或者经由其他渠道转发收到本报告而直接视其为本公司客户。

本报告基于本公司研究所及其研究人员认为的已经公开的资料或者研究人员的实地调研资料，但本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载资料、意见以及推测仅于本报告发布当日的判断，且这种判断受到研究方法、研究依据等多方面的制约。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及预测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息始终保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者需自行关注相应更新或修改。

在任何情况下，本报告仅提供给签约客户参考使用，任何信息或所表述的意见绝不构成对任何人的投资建议。市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告视为做出投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在任何情况下，本报告均未考虑到个别客户的特殊投资目标、财务状况或需求，不能作为客户进行客户买卖、认购证券或者其他金融工具的保证或邀请。在任何情况下，本公司、本公司员工或者其他关联方均不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告而导致的任何可能损失负有任何责任。投资者因使用本公司研究报告做出的任何投资决策均是独立行为，与本公司、本公司员工及其他关联方无关。

本公司建立起信息隔离墙制度、跨墙制度来规范管理部门、跨关联机构之间的信息流动。务请投资者注意，在法律许可的前提下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的前提下，本公司的董事、高级职员或员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为华西证券研究所，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。