

一周解一惑系列：

商业可控核聚变及先行受益产业链

2022年12月18日

- **本周本周关注：**瑞晨环保、奥莱德、苏试试验、华测检测
- **本周核心观点：**本周中央经济工作会议释放稳经济信号，扩大内需促进消费，关注相关复苏板块。
- **实现可控核聚变的主要有两种方式：**1) 激光惯性约束：惯性约束聚变(ICF)是实现受控核聚变的途径之一，它是通过内爆对热核燃料进行压缩，使其达到高温高密度，在内爆运动过程中惯性约束下实验热核点火和燃烧，从而获取聚变能的方法。激光聚变是用激光作为驱动源的，因而也成为激光约束聚变。2) 磁约束：核聚变的另一个技术路线是磁约束聚变，也称为“托卡马克核聚变”。磁约束核聚变，就是用特殊形态的磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的、处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使它受控制地发生大量的原子核聚变反应，释放出能量。
- **核聚变目前距离商业化还有一定距离。**增益 $Q = \text{靶丸发生的核反应释放的能量}/\text{使核反应发生消耗的总能量}$ ， >1 时可实现商业化。此次 12 月 14 日 NIF 公布的仅是靶丸发生的核反应释放的能量/入射靶丸表面的激光能量 >1 ，实际的增益 Q 仍远小于 1，距离商业化还有一定距离。
- **近两年国内外的融资集中在小型商用托卡马克。**目前全球范围内磁约束的应用更广，根据 Tokamak info 统计，全球共有常规托卡马克 185 个，球形 36 个。最近 2 年，私人投资者的融资则集中在更易商用的小型托卡马克。其中 2021 年美国的 Commonwealth Fusion Systems (CFS) 融资额达到了 18 亿美元。国内的大型托卡马克主要是等离子所（合肥）和西南物理研究院（核 585 所），商用小型则为能量齐点、星环聚能。
- **高温超导材料的突破也让小型托卡马克商业化成为可行。**业界通常以液氮温度 77K (零下 196 摄氏度) 为分界线，把超导材料分为低温和高温。高温超导在液氮温区下使用，低温超导在液氦温区下使用，我国氦气资源十分稀缺。而液氮成本远低于液氦，因此**高温超导材料更具大规模商用价值**。同时托卡马克装置要想产生极强的磁场，导线中必须通以极大的电流，这个时候，电阻使得线圈的效率降低，产生能耗，使用超导材料才可以解决电阻的问题。
- **可控核聚变领域材料先行，同时高温超导也有其他丰富的应用场景。**虽然托卡马克商业化还需要一段时间，但是无论是大型还是小型托卡马克，前期实验过程中都需要先行采购消耗高温超导材料。此外高温超导材料也有其他可落地的商业场景，包括超导电缆、高温超导加热装置等。具体项目上，上海超导提供材料的国内首条 35 千伏公里级高温超导电缆示范工程于 2021 年 12 月投运；联创光电在接受机构调研时表示公司的大型超导感应设备在金属热加工领域，预计替换及新增约 7000 台，市场规模在千亿级别以上，2022 年 3 月客户中铝集团完成超导加热设备验收，产品较传统工频炉节能超过 50%。
- **投资建议：**建议关注与二代高温材料相关标的：**精达股份、永鼎股份、联创光电**。
- **风险提示：**1) 可控核聚变突破不及预期。2) 下游需求不及预期。3) 国内外政策推动不及预期

推荐
维持评级

分析师 李哲

执业证书：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

分析师 占豪

执业证书：S0100522090007

电话：15216676817

邮箱：zhanhao@mszq.com

相关研究

- 1.一周解一惑：压缩空气储能及产业链梳理-2022/12/10
- 2.一周解一惑系列：电镀铜技术及产业梳理-2022/12/04
- 3.一周解一惑系列：检测企业的通用属性-2022/11/27
- 4.一周解一惑系列：光伏石英坩埚的量价弹性及传导机制-2022/11/21
- 5.一周解一惑系列：集流体及复合集流体生产工艺-2022/11/13

目录

1 什么是商业可控核聚变	3
1.1 核聚变和核裂变的区别	3
1.2 实现可控核聚变的主要两种方式	5
1.3 目前的商业化进度	9
2 可控核聚变受益产业链	10
2.1 近两年国内外的融资集中在小型商用托卡马克	10
2.2 高温超导材料先行	11
2.3 高温超导材料产业链	12
3 相关标的	18
3.1 精达股份	18
3.2 永鼎股份	18
3.3 联创光电	19
4 风险提示	20
插图目录	21
表格目录	21

1 什么是商业可控核聚变

1.1 核聚变和核裂变的区别

1) 核裂变：

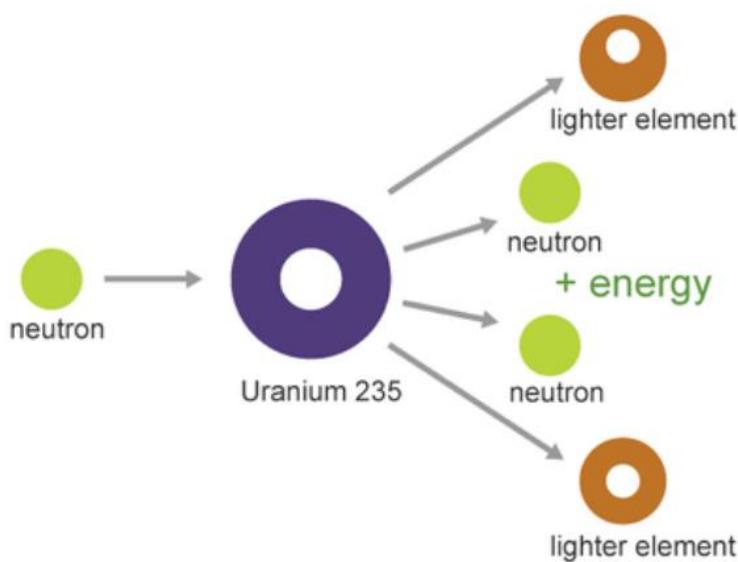
核裂变类似于细胞分裂，在核裂变中，一个原子会分裂成更小的粒子，并放出原子核的结合能。这种能量将会以热能和辐射的形式释放，其中热能被用来将水加热成蒸汽，进而使涡轮机转动并驱动发电机发电。

在实际操作中，核电站首先会将铀置于钢制反应堆容器内的密封金属圆筒中，然后向铀原子发射中子，使其分裂并释放出更多的中子。这些中子击中其他原子，形成链式反应，分裂出更多的原子，以热和辐射的形式释放能量。

作为靶核的铀 235 原子会分裂成氪和钡原子核，同时还有额外的中子，通过撞击其他铀 235 原子产生裂变链式反应。当一个重原子（如铀或钚）的原子核经过裂变，它会分裂成两个较轻的原子核。这种裂变过程中会释放出 2 到 3 个中子，这些中子又会继续激发其他的重原子裂变，裂变过程伴随大量能量被释放出来，而核电站就是用裂变过程中的能量来发电。

首次裂变的产物常常处于高度不稳定状态，很快就会再次衰变多次（通常是 β 衰变），直到衰变成为半衰期较长的相对稳定的原子。因此核裂变过程中会有许多放射性的废物产物。

图1：核裂变示意图



资料来源：新智元，民生证券研究院

2) 核聚变:

核聚变是结合原子核以产生能量的过程，其释放的能量是裂变的数倍，并且不会产生长期的放射性废物。

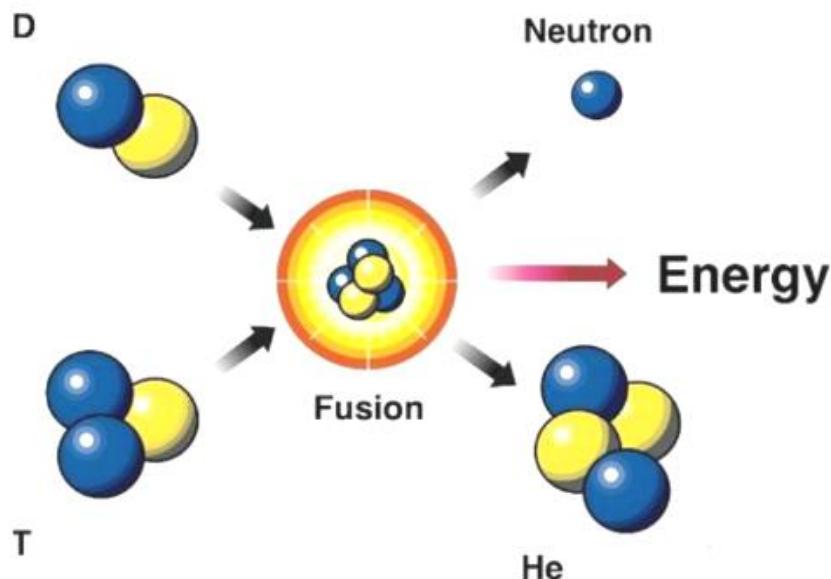
聚变核电站的运行方式与裂变核电站类似，利用原子反应产生的热量来加热水、产生蒸汽、驱动涡轮机和发电，但要在聚变反应堆中创造发电条件，同时满足能量消耗低于能量生成，一直是个难以克服的挑战。

核聚变反应堆通常使用一种可从海水中提取的氢同位素，称为氘（氢-2）。当受到高热和高压时，电子被迫离开氘原子，产生等离子体。

这种等离子体是一种过热的电离气体，需要用强磁场来控制，因为它的温度可以达到1亿摄氏度以上，是太阳核心温度的十倍。

辅助加热系统将温度提高到核聚变所需的水平（1.5-3亿摄氏度），通电的等离子体粒子发生碰撞并加热。这些条件允许高能粒子在碰撞时克服其自然电磁排斥力，将它们融合在一起并释放出巨大的能量。

图2：核聚变示意图



资料来源：新智元，民生证券研究院

3) 核裂变与核聚变的核心区别：

核聚变反应释放的能量比核裂变更多，核聚变的完成需要更多的能量，核聚变不会像核裂变那样产生有害的长期放射性废物。

1.2 实现可控核聚变的主要两种方式

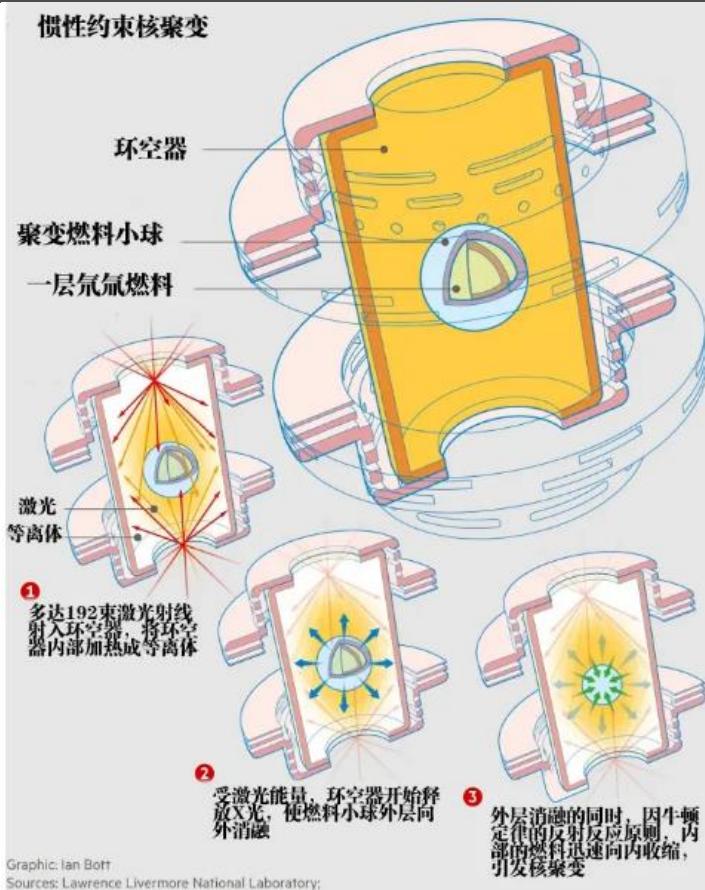
可控核聚变，一定条件下，控制核聚变的速度和规模，以实现安全、持续、平稳的能量输出的核聚变反应。有激光约束核聚变（也成为惯性约束）、磁约束核聚变两种主要形式形式。

1) 激光惯性约束：

惯性约束聚变(ICF)是实现受控核聚变的途径之一，它是通过内爆对热核燃料进行压缩，使其达到高温高密度，在内爆运动过程中惯性约束下实验热核点火和燃烧，从而获取聚变能的方法。激光聚变是用激光作为驱动源的，因而也成为激光约束聚变。

ICF 的基本思想是：利用激光或离子束作驱动源，脉冲式地提供高强度能量，均匀地作用于装填氘氚(DT)燃料的微型球状靶丸外壳表面，形成高温高压等离子体，利用反冲压力，使靶外壳极快地向心运动，压缩氘氚主燃料层到每立方厘米的几百克质量的极高密度，并使局部氘氚区域形成高温高密度热斑，达到点火条件(离子温度 $T_i > 5 \text{ keV}$ ，燃料的面密度 $\rho_{RHS} > 0.3 \text{ g/cm}^2$)，驱动脉冲宽度为纳秒级，在高温高密度热核燃料来不及飞散之前，进行充分热核燃烧，放出大量聚变能。采用激光产生的惯性约束聚变称为激光聚变。利用激光产生驱动惯性约束聚变内爆需要的能量和压强可采用两种途径。在直接驱动中，多束激光束直接均匀辐照含有热核燃料的聚变靶丸，激光能量被靶丸外层低密度的冕区中的电子吸收，电子热传导将能量运输到靶壳的高密度区，驱动烧蚀并产生内爆。在间接驱动中，激光能量被围绕靶丸的黑腔壁高 Z 物质吸收并部分转换成 X 光能量，并被约束在黑腔内，然后 X 光被燃料的靶丸吸收，产生烧蚀压力，驱动内爆。

此次 LLNL 宣布取得突破的 NIF (国家点火装置) 就是其采用“惯性约束路线”制造的，总共耗费 35 亿美元。为了至少短时间内实现核聚变，NIF 使用全世界最强的激光，通过 192 个射线，在几纳秒内输送 5 万亿瓦功率的光能。激光的“靶子”，是一个名叫“环空器”的空腔，中间包含氘氚燃料。激光输入的能量，使燃料温度达 1 亿度，核聚变反应“点火”，从而产生能量，激光在进入环空器后，会击中内壁并使其发出 X 射线，然后这些 X 射线可以将其加热到 1 亿摄氏度——比太阳中心还热，并将其压缩到地球大气层的 1000 亿倍以上。高能激光会使小球表面等离子体化，其余中心材料受到牛顿第三定律驱使，最终会向中央坍缩发生内爆。在内爆时，只要对燃料球给予正确的高温高压就能发生链式反应——也就是「点火」，随之便会放出大量能量。故名“国家点火装置”。

图3：NIF 的惯性约束装置示意图


资料来源：《金融时报》，民生证券研究院

2) 磁约束：

核聚变的另一个技术路线是磁约束聚变，也称为“托卡马克核聚变”。磁约束核聚变，就是用特殊形态的磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的、处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使它受控制地发生大量的原子核聚变反应，释放出能量。

该路线的主攻方向之一是采用是托卡马克(Tokamak)装置。这是一种环形容器，用磁场形成一个“磁笼”将等离子体束缚住，创造氘、氚实现聚变的环境和超高温，实现受控核聚变。这种装置又称环磁机，名字来源于其的关键词——环形(toroidal)、真空室(kamera)、磁(magnet)、线圈(kotushka)。

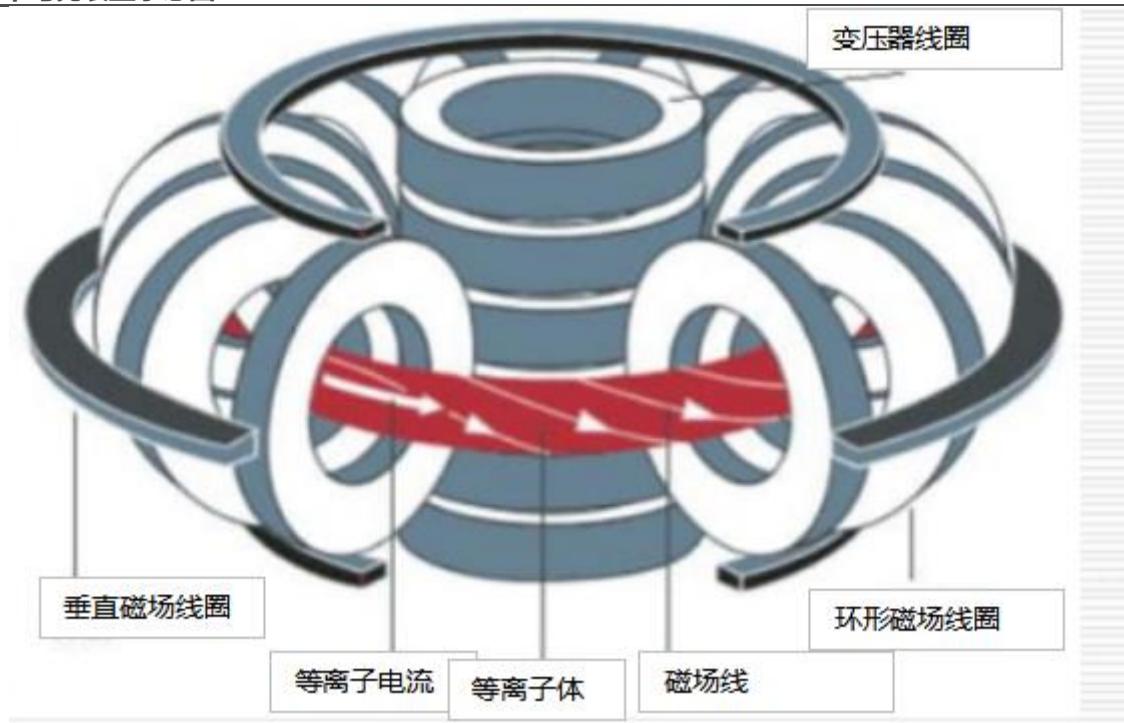
1950 年代，苏联科学家开始托卡马克技术的相关研究。“托卡马克”是俄语中“环形”、“真空室”、“磁”和“线圈”的缩写。这个名称起的极其恰当：在托卡马克的真空中，核聚变燃料等离子体在线圈电流产生的极强磁场作用下，迅速环形运转。

此前，采用托卡马克装置的磁约束技术路线，通常被认为主流的核聚变技术

路线，是最有可能率先成功的方式。全球最大“人造太阳”国际热核聚变实验堆(ITER)，即采用了托卡马克装置。ITER是全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一，同时是中国以平等身份参加的最大国际科技合作项目。2006年，中国、欧盟、美国、俄罗斯、日本、韩国和印度共同签署了国际热核聚变实验堆(ITER)项目启动协定。2008年，中国全面开展ITER计划工作，承担了其中约10%的研发制造任务。

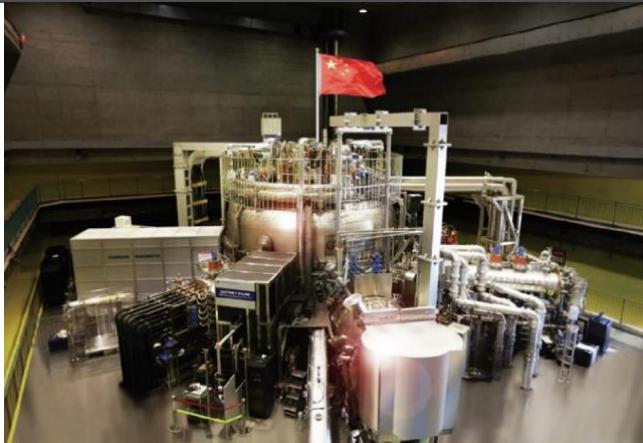
托卡马克技术比“惯性约束聚变”的技术应用更加广泛。法国、澳大利亚、日本等少数西方国家在“惯性约束聚变”技术方面进行一些尝试，不过只有美国的NIF在此实现显著的成果。而托卡马克技术，除了多国独自运行的反应堆实验装置，还有35国共同参与的“国际热核聚变实验反应堆”(ITER)。

图4：托卡马克装置示意图



资料来源：《托卡马克装置原理》，民生证券研究院

国内主要是等离子体所（合肥）和中核的西南物理研究院（585，成都）在做大型托卡马克装置。等离子体所（合肥）一代先进装置HT-7，前身是苏联在七十年代投入使用的超导托卡马克T-7，在升级改造数年后于1995年投入使用。二代先进装置EAST，在HT-7的基础之上设计建造而成。西南物理研究院（成都）早期装置HL-1M一代先进装置HL-2A，前身是德国的装置ASDEX，2002年投入使用，二代先进装置HL-2M。

图5：等离子所 EAST 东方超环托卡马克


资料来源：《东方超环托卡马克》，民生证券研究院

图6：西南物理研究院托卡马克


资料来源：科技日报，民生证券研究院

而根据 tokamak info 统计的 table of Conventional tokamak/table of Spherical tokamak , 目前全球范围内普通托卡马克装置共 185 个, 球形 36 个。

图7：部分托卡马克装置统计

Name	Country	Location	Operating	Config.	Major radius (m)	Minor radius (m)	TF (T)	IP (MA)	ECH (MW)	ICH (MW)	NBI (MW)	LH (MW)	Notes and special features
ADITYA	India	Gandhinagar	1989	Circular Limiter	0.75	0.25	1.6	0.25	0.2	0.2	-	-	Gradually upgraded heating systems as a testbed for SISI-L, 0.25s pulses.
ALCATOR A (Alto Campo TORus)	USA	MIT, Cambridge, MA	1969 - 1982	Circular Limiter	0.54	0.10	10	0.8	-	0.1	-	0.1	First of the Alcator series of tokamaks at MIT. (Note that Alcator-B was designed but never built.) Some evidence that it might have had as few as four TF coils leading to an unusually large TF ripple, see Jacobi et al, Nuclear Fusion 18 6 (1978) p625.
ALCATOR C (Alto Campo TORus)	USA	MIT, Cambridge, MA	1978 - 1987	Circular Limiter	0.64	0.16	12	0.9	-	-	-	4	Used extensively to study plasma confinement under strong ohmic heating, and achieved record confinement in 1983. Also studied high-density plasmas and used frozen fuel pellet injection. Probably the first tokamak to produce the density and confinement necessary for a useful fusion reactor. Was donated or sold to Livermore (LLNL) in 1987 for use as the Microwave Tokamak eXperiment (MTX), now shut down.
ALCATOR C-Mod (Alto Campo TORus)	USA	MIT, Cambridge, MA	1993 - 2016	D-shape Divertor (single or double null)	0.67	0.22	8	2	-	6	DNB only	2.5	Not an upgrade of Alcator C but a completely new machine. All-metal walls - molybdenum. Highest operating toroidal field on a divertor tokamak, using liquid nitrogen cooled field coils. Unique baffle divertor configuration. New upper divertor in-vessel cryostopump installed 2007 (10,000kW). Generally ran single null into the one closed divertor, but could run near-balanced double null discharges. During its last day of operation, the Alcator C-Mod tokamak reached a record plasma pressure of roughly 2 atmospheres, breaking its own previous world record of 1.77 atmospheres, which dated from 2006.
Alvand	Iran	Tehran	1981	Circular Limiter	0.46	0.13	0.8	0.03	-	-	-	-	The first Alvand Tokamak was constructed in 1979 with a rectangular cross section inspired by the Spherical Tokamak. It started operating in 1981. In 1990, it was converted to a circular cross section. ALVAND-IIIC was upgraded to ALVAND-IV in 2004. Plasma diameter is about 10 ms and typical values of electron and ion temperature are, respectively, Te=200 eV and Ti=80 eV. Alvand and Damavand are names of two mountains which symbolize of greatness and pride in Iranian history. Thanks to Dr A. Sedighzadeh, Director of Plasma Physics and Fusion Research school, for this information.
ASDEX (Axially Symmetric Divertor Experiment)	Germany	Garching	1980 - 1990	Circular Divertor (double null)	1.54	0.40	2.6	0.5	-	3	4.5	2	H-mode discovered in 1982 and ELMs observed. Stabilization of sawteeth by modifying the q profile with LH current drive. Initially open geometry divertor, but best H-modes observed with closed divertor configuration. Now HL-2a in China.
ASDEX upgrade	Germany	Garching	1991	D-shape Divertor	1.66	0.5-0.8	3.9	1.4	4	6	20	-	Walls completely converted from CFC to tungsten. Pellets successfully used for ELM pacing. High field side pellet trap available. Large amount of heating power is available (> 25 MW), which makes it possible to achieve heat fluxes (normalized to the plasma surface) in the same range as are projected for a fusion reactor. No boronization used for wall conditioning after completion of the tungsten first wall. 10 sec pulses.
ATC	USA	Princeton	1972 - 1976		0.88	0.11	2	0.05		0.15			Compression to R=0.38m, z=0.17m, Ipsi=118MA, at Bt=4.7T.
Caltech Tokamak (sometimes known as ENCORE)	USA	Caltech	Late 1970s - early 1990s	Circular (No limiters)	0.45	0.16	0.35	0.02	-	?	-	-	Spheromak injection, edge turbulence studies, and ICRF coupling experiments. The machine was routinely operated without any localized limiters. Taylor Discharge cleaning routinely used.
CASTOR	Czech Rep.	Prague	1985 - 2007	Circular Limiter	0.40	0.09	1.5	0.025	-	-	-	0.02	Circular section with molybdenum limiters. Hydrogen only. Pulses up to 50 ms, reach Te max of 200eV. This machine was the former Russian TM-1-VCh (sometimes known as TM-1MH) with a considerably refurbished vacuum vessel. TM-1MH was an upgrade of TM-1 from 1980 (see Braams, 1st page 132), so Castor is from the first generation of tokamaks with a metal vacuum vessel. Castor has now been moved to the Czech Technical University where it will be reinstalled, as a tokamak called GOLEM. (Thanks to Jan Myner for this update.)
CCT (Continuous Current Tokamak)	USA	Los Angeles (UCLA)	Late 80s to mid 90s	Circular Limiter	1.60	0.40	>0.2	0.05			y		Pre-ionization of a tokamak discharge using an emissive LaB6 cathode compared to initiation of discharges with a 15 kHz breakdown oscillator. Full toroidal and poloidal liner which acted as a limiter.
CLEO (Closed Line Electron Orbit)	UK	Culham	1972 - 1987	Limiter tokamak and stellarator	0.90	0.13	2	0.12	0.2	-	0.04		Originally designed to be run as either a stellarator (with 1=3 windings) or a tokamak, but after the success of T3 it was built as an iron cored tokamak. First NBI experiments on a tokamak. Early demonstration of vertical plasma position control in 1973-4. (See TO-1 for comparison.)
COMPASS-D	UK	Culham	1989 - 2001	D-shape Divertor	0.56	0.21	2.1	0.32	1.5	-	DNB only	0.2	Originally circular section but converted to D shaped. Saddle coils used to simulate error fields for the first time. 1.1 sec pulses sent to Prague to replace CASTOR in 2007.

资料来源：tokamak info, 民生证券研究院

1.3 目前的商业化进度

目前的实验结果离商用还有很远的距离，真实增益远小于 1。靶丸增益，此时增益 Q 的定义为 $Q = \text{靶丸发生的核反应释放的能量} / \text{入射靶丸表面的激光能量}$ $= 3.15\text{MJ} / 2.05\text{MJ}$ ，从这个角度来看，如果数据属实，声称第一次实现增益大于 1，是合理的。但是，这个和我们普遍意义上讲的增益是有一定区别的。我们朴素意义上认知的增益大于 1，其增益 Q 的定义应为 $Q = \text{靶丸发生的核反应释放的能量} / \text{使核反应发生消耗的总能量}$ 。总能量除了激光到靶的能量外，还包括：激光产生需要的能量、维持实验环境需要的能量制作靶丸需要的能量等。而这些能量比起到靶的能量可大多了，即使仅考虑激光产生需要的能量发布会上多次提到，总共需要消耗约 300MJ 的能量，才能使得到靶能量为 2.05MJ。

2 可控核聚变受益产业链

2.1 近两年国内外的融资集中在小型商用托卡马克

托卡马克上世纪五十年代苏联莫斯科的库尔恰托夫研究所的阿齐莫维齐等人提出了一种可控聚变方式----装置（磁约束热核聚变实验装置）。运用超导技术可以解决电阻、损耗和磁场强度的问题，超导技术成为可控核聚变的必然选择。

近年来，私人投资者已向聚变初创企业投入大量资金，且集中在小型的商用托卡马克，因为应对气候变化的紧迫性日益增加，这使得清洁能源解决方案特别具有吸引力。

表1：聚变初创企业的融资轮次及融资金额

年份	公司	所属国家	融资轮次	融资金额
2020 年	TAE (Tri Alpha Energy)	美国	战略投资	1.3 亿美元
2020 年	Tokamak Energy	英国	B 轮	6700 万英镑
2021 年	CFS (Commonwealth Fusion Systems)	美国	B 轮	18 亿美元
2021 年	General Fusion	美国/加拿大	E 轮	1.3 亿美元
2021 年	Helion Energy	美国	E 轮	5 亿美元
2021 年	Zap Energy	美国	B 轮	2750 万美元
2022 年	First Light Fusion	英国	C 轮	4500 万美元
2022 年	EX-Fusion Inc	日本	种子轮	1.3 亿日元
2022 年	Kyoto Fusioneering	日本	B 轮	1860 万美元
2022 年	HB11 Energy	澳大利亚	战略投资	1580 万美元
2022 年	能量奇点	中国	天使轮	4 亿元人民币
2022 年	星环聚能	中国	天使轮	数亿元人民币

资料来源：骡子科技，民生证券研究院

获得投资额最大的当属美国的 Commonwealth Fusion Systems (CFS) , CFS 在美国马萨诸塞州建造了一个商业聚变能源园区，实现紧凑型核聚变设备 SPARC 的制造，并且有望在 2025 年实现组网发电。该公司突破了高温超导技术，并创造出高达 20 特斯拉的强磁场约束（注：特斯拉为国际单位制中的磁感应强度单位）。2021 年 12 月，CFS 宣布完成了大额融资，这也是到目前为止在可控核聚变领域最大的单笔融资。CFS 的投资人明星云集，包括比尔盖茨、索罗斯、老虎环球基金、谷歌的母公司 Alphabet、Marc Benioff、DFJ Growth 等一众金融巨头。

仅在国内，2019 年新奥集团作为一家民营企业，设计建造的国内首座中等规模球形托卡马克聚变实验装置在河北廊坊建成，并实现了第一次等离子体放电，正式启动物理实验。

成立于 2021 年的能量奇点，也在今年完成首轮融资，融资金额近 4 亿元人民币，资方来自米哈游蔚来资本、红杉中国、蓝驰创投，资金将主要用于研发和建设全球首台基于全高温超导材料的小型托卡马克实验装置，以及研发可用于下一代高性能聚变装置的先进磁体系统。该公司由多名理论物理、等离子体物理和高温超导领域的海外归国专家联合创办，是可控核聚变商业化探索的新兴参与者。

从可控核聚变项目的突破来看，2020 年 12 月，中核集团核工业西南物理研究院自主设计建造的新一代先进磁约束核聚变实验研究装置中国环流器二号 M 装置 (HL-2M) 建成并成功放电。

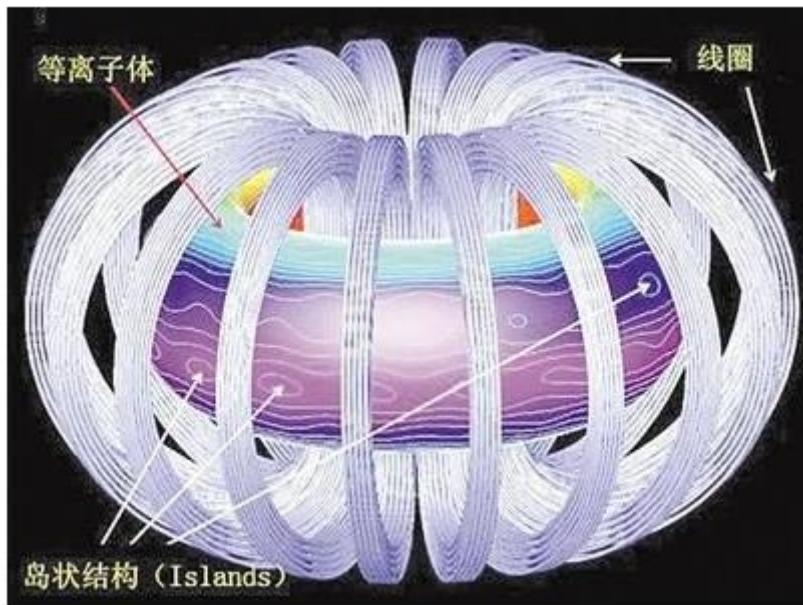
2021 年 12 月 30 日，中科院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所宣布其全超导托卡马克核聚变实验装置 (EAST) 创造了世界之最，在 7000 万°C 的高温下，实现 1056 秒的长脉冲高参数等离子体运行。2022 年 10 月，EAST 装置的等离子体电流突破 100 万安培。

2.2 高温超导材料先行

材料的突破也让托卡马克商业化成为可行。超导是指在一定温度条件下物质电阻突然消失的现象，超导体是指能够产生超导现象的物质。超导体同时具有零电阻、完全抗磁两个独特的性质。它可以无电阻地传输电流的特性，使人们在发现超导现象后立即想到利用超导体来传输电流。超导态是某些材料在温度降低到特定临界温度时电阻突然消失的现象。业界通常以液氮温度 77K (零下 196 摄氏度) 为分界线，把超导材料分为低温和高温。高温超导材料在液氮温区下使用，低温超导材料在液氦温区下使用，我国氦气的资源量十分稀缺。而液氮成本远低于液氦，因此高温超导材料更具大规模应用价值。高温超导能在零下 196 摄氏度 (77K) 实现零电阻，可广泛应用于智能电网、发电机组、磁浮列车、高能物理等多个领域。在电力传输中，高温超导材料可提高传输电流容量，降低远距离传输线损和能耗。

虽然托卡马克商业化还需要一段时间，但是无论是大型还是小型托卡马克，前期实验过程中都需要先消耗高温超导材料。托卡马克装置的核心就是产生强磁场，要产生磁场，仅仅依靠磁铁、永磁体必然是不可能达到要求的，那么就要用线圈，通电产生磁场。而线圈由导线缠绕组成，无论哪种材料，只要在超导温度以上，电阻是必然存在的。托卡马克装置要想产生极强的磁场，导线中必须通以极大的电流。这个时候，电阻使得线圈的效率降低，产生能耗，得不偿失。超导技术的发展给这一问题带来转机。只要借助超导技术，理论上就可以解决电阻和损耗的问题。

图8：托卡马克装置中的线圈需要高温超导材料



资料来源：网易号，民生证券研究院

2.3 高温超导材料产业链

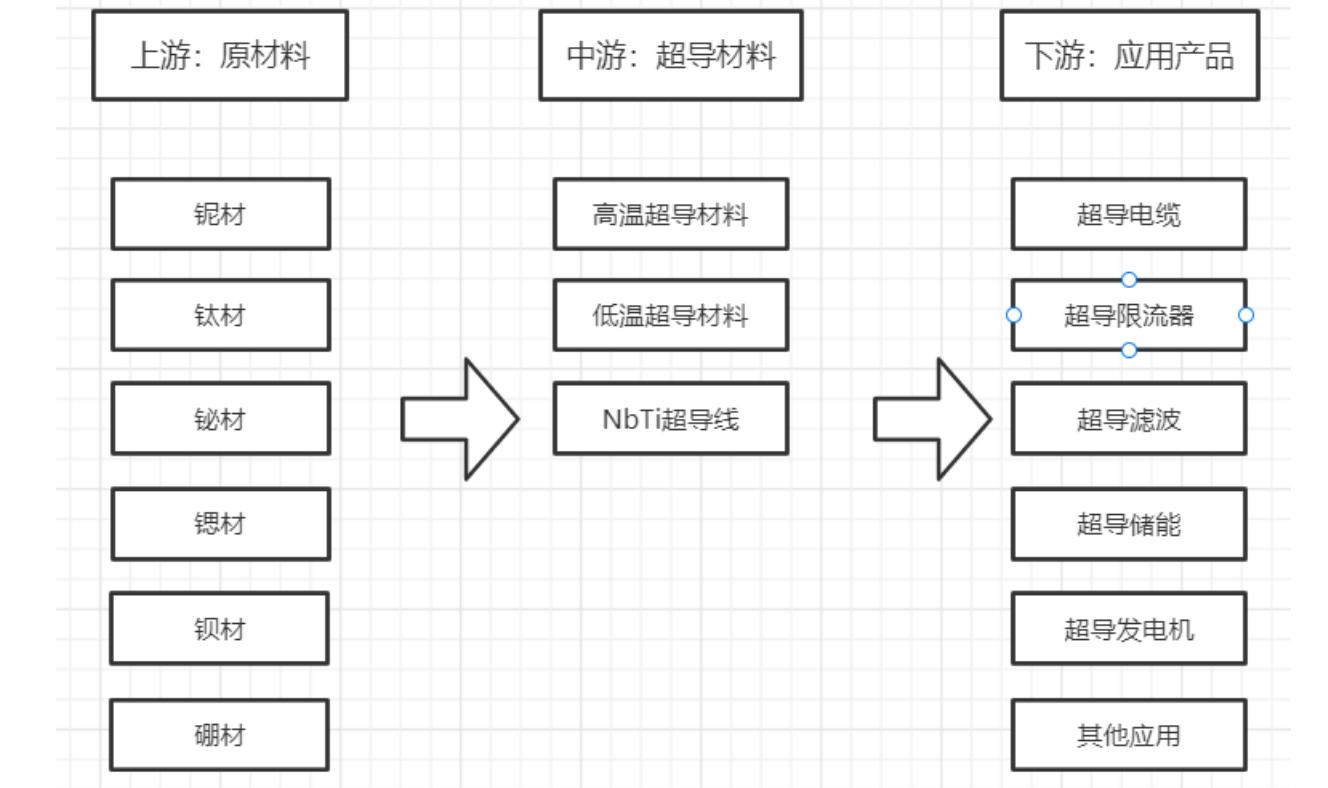
全球加速对于超导材料的研发。美国能源部从 20 世纪 90 年代初开始实施超导项目启动计划，2003 年 7 月，美国能源部在公布的《电网 2030/国家关于电力第 2 个 100 年的设想》报告中，把超导电力技术作为美国电网未来 30 年发展的关键技术之一。欧洲各国政府和各大公司也一直对超导技术的应用研发进行投资，日本一直积极开展在超导电缆、变压器、飞轮储能、发电机、限流器等方面的研究开发工作，特别是东京电力公司(TEPCO)和超导线材制造商联合开发高温超导电缆。我国在“十五”期间，国家“863”计划设立“超导材料与技术专项”，加强了对超导应用技术的研究，在电力应用、强磁体应用以及弱电应用等方面全面开展研发。

从产业链来看，超导产业主要由三部分组成：上游是矿产资源，如铌、钛、钡、铋、锶等金属，是超导行业的基础；中游是超导材料如 YBCO 和 BSCCO 等带材，是超导行业的核心；下游是超导应用产品，如超导电缆、超导限流器、超导储能器、超导发电机、超导滤波器和超导变压器等，是超导行业的应用载体。

从上游来看，原材料成本占超导材料比重较低。其中，基带主要依赖于美国进口，有国产化降价空间。中游的超导材料是超导产业链中毛利率最高的环节。下游产品如超导风机、超导限流器、超导电缆的毛利率相对超导材料较低，而超导材料占超导应用产品一半以上的成本。这部分业务是目前国内公司涉及最多、

距离产业化最近的业务。

图9：超导材料产业链



资料来源：中商产业研究院，民生证券研究院

由于超导技术的先进性和在特定领域的不可替代性、其未来前景相当广阔。

虽然目前国内从事超导材料制备和超导应用的企业都处于持续亏损的处境，但各家超导企业仍保持着对超导研发技术的持续投入。业内认为超导更有着光明的应用前景，电力设备是超导技术应用的一个重要领域，主要利用超导体可以无电阻传输大电流的特点。目前世界各国开发的主要超导电力设备包括超导电缆、超导限流器、超导风机和超导储能装置等。

1) 高温超导电缆：传统电缆输电损耗主要为导体损耗、介质损耗和屏蔽损耗。其中，对于一般陆地电缆，导体损耗约占传输损耗的绝大多数。高温超导电缆与常规电缆相比，具有明显的优势：一是损耗低。高温超导电缆的导体损耗不足常规电缆的 1/10，加上制冷的能量损耗，其运行总损耗也仅为常规电缆的 50%~60%；二是容量大。同样截面的高温超导电缆的电流输送能力是常规电缆的 3~5 倍。

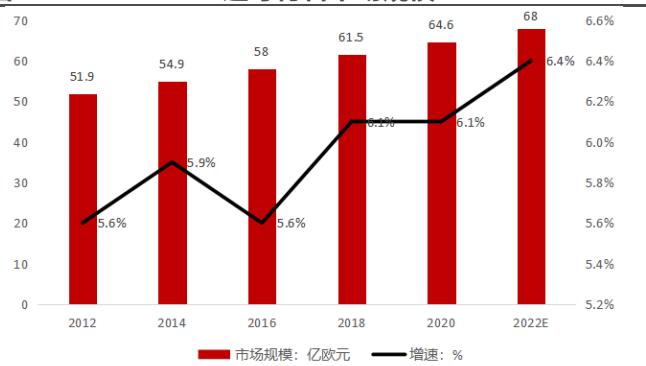
2) 高温超导限流器：高温超导限流器是最有效的短路电流限流装置，高温超导限流器系统具有正常运行时，阻抗尽可能小；系统发生故障短路时，立即呈现出较大的阻抗；系统故障消除后，立即恢复正常运行并能长期和重复使用的优点。高温超导限流器主要用于输变电系统，能有效地抑制事故扩散，解决由于短路电流过大而无法联网的问题，为降低高压电网的脆弱性提供新的技术保障。

3) 高温超导风力发电机：高温超导电机中用高温超导线圈取代常规铜线圈，低温下具有零电阻特性，载流能力远大于铜导线，在给定空间内能产生很强的磁场，通过先进的设计可以使大容量高温超导电机体积和质量为常规电机的约 1/2 和 1/3，具有高功率密度、高效率、低振动噪声、过载能力强、无周期热负载等优点。在船舶电力推进、直驱风力发电、大功率电气传动、工业发电、航天发射等许多大中型电机应用领域，特别是对电机体积、质量有严格要求的船舶电力推进和直驱风力发电领域有着十分诱人的应用前景。

4) 高温超导储能：高温超导储能利用超导体的零电阻特性，超导体的载流密度比常规铜导线的载流密度大 4 个数量级，利用超导线圈将电磁能直接储存起来，需要时将电磁能返回电网或其它负载。高温超导储能具有以下主要优势：无需能量形式转换，响应速度极快；功率密度极高，快速以大功率与系统进行能量交换；提高电能质量、不间断电源、限制短路电流等优势。

高温超导带材未来百亿市场空间，应用场景广泛。根据 Conectus 公布的数据，2012 年全球超导产品市场规模达 51.9 亿欧元，2020 年达到 64.6 亿欧元，预测 2022 年将达到 68 亿欧元，增速预测达到 6.4%。**在超导材料应用领域，根据 GMI 预测高温超导材料的市场份额将会逐步扩大**，高温超导材料整体的占比稳定提升，特别的某些新应用场景高速增长，如超导电缆根据 Marketwatch 数据，未来 5 年 CAGR 有望达到 115.7%。而伴随着上文我们统计的近两年全球可控核聚变托卡马克的融资，我们预计实验用高温超导材料未来也有可能高速增长。

图10：2012-2022 超导材料市场规模

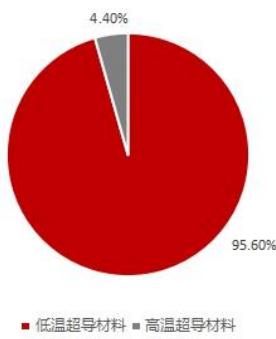


资料来源：Conectus、中商产业研究院整理，民生证券研究院

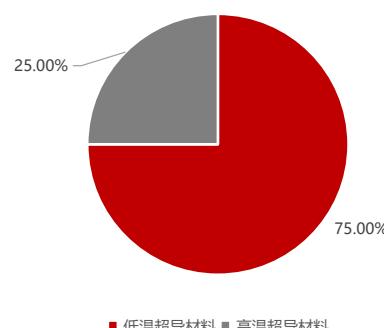
图11：2023E-2028E 高温超导电缆市场规模



资料来源：Marketwatch，民生证券研究院

图12：2018年全球超导行业细分市场占比


资料来源：Conectus、中商产业研究院，民生证券研究院

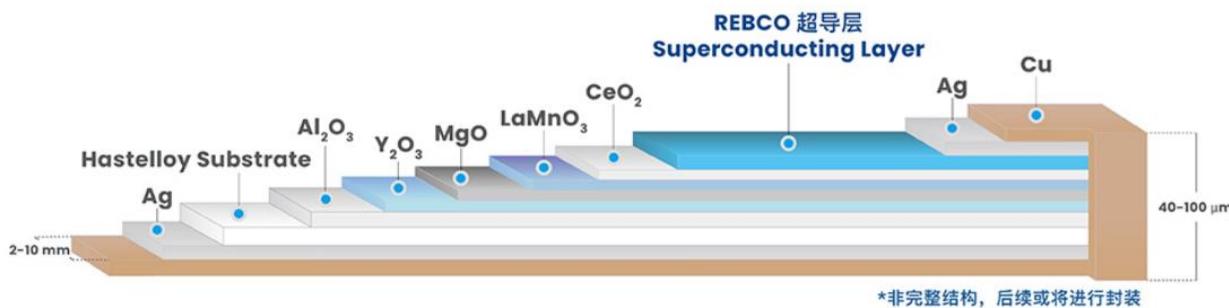
图13：2030年预测全球超导行业细分市场占比


资料来源：GMI，民生证券研究院

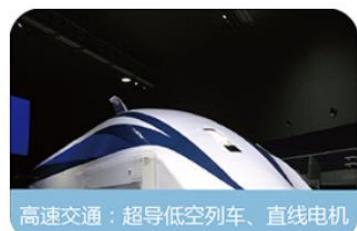
第一代高温超导材料虽然近年来得到了发展，但在性能和造价上仍有较大缺点。

高温超导材料可以工作在较高的温度，包括 30K-77K 的低功耗制冷温区；其应用将对氦资源战略问题给出很好的应对。在大电流应用中，超导线或带是应用器件和系统的构材。过去的三十多年里，世界一些国家对发展高温超导线材予以很大投入。首先发展起来的是基于 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (BSCCO2212) 和 $(\text{Bi},\text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (BSCCO2223) 的线材和带材，即所谓的第一类高温超导体(1G-HTS)。然而，人们很快发现，1G-HTS 的性能上和造价限制了其应用范围。第一，BSCCO 的不可逆磁场很小 (77K 只有约 0.2T)，因而它在强磁场下难以得到高的临界电流密度；第二，由于大量使用了银 (线材的 3/4 是银)，1G-HTS 的材料成本高。因此，研发的力量转向了第二代高温超导线材(2G-HTS)，即基于 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, RE = Y 或某些稀土元素)超导薄膜的导电带材。

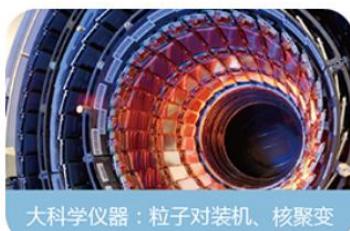
相比于第一代铋系高温超导带材，**第二代高温超导材料与第一代有显著不同和巨大优势**。稀土钡铜氧化物 (REBCO) 超导带材具有**较好的磁场特性和较高的机械强度**，因而适合于磁分离器磁体，磁能存储器，电动机，发电机，磁共振成像，核磁共振，粒子加速器等电磁线圈类应用。此外，第二代高温超导带材相比第一代高温超导带材有**低成本潜力**的优势，这使前者的产业化前景更被看好。第二代高温超导材料的市场目前在电流传输、核聚变、医疗、大科学装置、交通、风电、储能、感应加热、军事领域等均有应用，并且已建成多个应用示范工程。

图14：第二代高温超导材料


资料来源：上海超导，民生证券研究院

图15：第二代高温超导材料应用领域


高速交通：超导低空列车、直线电机



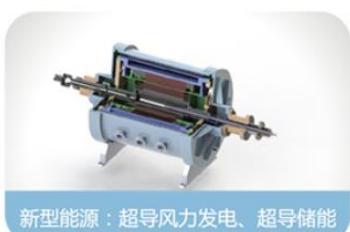
大科学仪器：粒子对装机、核聚变



电力应用：超导电缆



电力应用：超导储能



新型能源：超导风力发电、超导储能



高端医疗：超导磁共振、癌症治疗

资料来源：上海超导，民生证券研究院

目前行业处在培育阶段，二代高温超导带材的行业和市场占有率并无权威机构排名。

市场的二代高温超导带材的使用量并不大，随着市场上的超导带材项目应用或哪家制造产业化的工艺突破，市场排名都会随即发生改变。

在对二代高温超导应用的开发和研究上，目前美国处于全球领先地位。美国已完成了多个高温超导初步工业应用的项目，自行设计和制造了超导电机，超导限流器，以及上百公里的高温超导电缆。我国在二代高温超导研究方面，主要有中国科学院电工研究所、北京交通大学、华北电力大学、国家电网公司、上海电缆所、南方电网等研发单位。

我国在高温超导材料的研发和产业化上处于世界先进水平，产业化前景巨大。

目前，在电力、通信、国防和医疗等领域均有超导需求。机构研究报告指出，超导技术是具有战略意义且有巨大商业价值和广阔应用前景的高新技术，目前已经进入产业化初期阶段。

3 相关标的

3.1 精达股份

公司为国家重点高新技术企业，是特种电磁线行业的龙头企业、位列全球前三位的特种电磁线制造商。公司在质量、品牌、技术、规模、战略布局等方面具有明显的优势。主要生产设备、检测仪器从意大利、德国、奥地利、美国、丹麦等国家和中国台湾地区引进，自动化程度高，具有当代国际先进水平。公司主要产品广泛适用于家用电器、电子材料、电力设备、通讯仪器、汽车电机、电动工具等行业产品配套。形成了安徽、广东、天津、江苏四大生产基地，产品覆盖长三角、珠三角和环渤海地区，并有部分产品销往欧美、南亚地区。公司是电磁线行业国家标准起草单位，并参与了电线电缆行业“十二五”规划的编制工作。公司通过了 ISO9001 标准认证、TS16949、ISO14001 环境管理体系认证、OHSAS18001 职业健康安全管理体系等管理认证。

超导布局方面，公司在 2021 年年报及 2022 年半年报中分别披露参与了对上海超导股权投资，占比 15%。上海超导成立于 2011 年，主要产品包括第二代高温超导带材、二代高温超导“交钥匙产线”以及二代高温超导应用产品，是行业内唯一能同时在产业链上、中、下游提供优质产品的公司，是国际上能够批量产出并销售百公里/年以上高温超导带材的六家生产商之一，也是国际上唯一一家能够实现高温超导全套生产装备和工艺交钥匙工程的公司。其“第二代高温超导带材整体达到国际同类产品的先进水平，其中低温强场特性、超导低阻接头、光纤内嵌超导带材及监测技术达到了国际领先水平”；多家国际权威机构评估，公司带材产品性能指标均排名全球前 20%。

3.2 永鼎股份

公司是国内老牌光通信重点企业，围绕通信业务，持续拓展海外工程、汽车线束、超导等产业布局。公司是中国光缆行业首家民营上市公司，在通信领域深耕二十余载，产业链不断拓展，已从最初的单一通信线缆制造，发展成为如今涵盖光通信（光纤光缆光棒、光模块/器件/芯片、通信设备等）、电力线缆（电线电缆、超导材料、汽车线束等）以及工程和系统集成方案提供等的业界领先企业之一。公司光棒-光纤-光缆产能全面布局，运营商最新招投标结果明确行业量价齐升拐点，公司有望重点受益。围绕通信板块，公司重点拓展光模块/光芯片，以及 5G 消息等新业务板块，业务协同性强，受益于 5G 规模建设、5G 应用逐步展开，有望打开更大成长空间。

超导布局方面，公司旗下东部超导（前身为苏州新材料研发所）从事第二代高温超导材料研发，2022 年 12 月公司公告永鼎股份旗下东部超导公司与江西联创光电超导应用有限公司签订 70km 高温超导带材框架协议，将应用于具有卓越

节能减排性能的高温超导感应加热炉的制造中。在可控核聚变堆应用方面，永鼎股份顺利通过核工业可控核聚变反应堆所用的高温超导带材评估工作，获得核工业高温超导带材合同。当前永鼎股份正加速推动强磁场应用的高温超导材料产业化，公司研制的高强磁场带材的市场覆盖率位居国内同业前列。

3.3 联创光电

传统光电器件国内领军企业，聚焦三大主业开展转型升级：联创光电成立于1999年，起家于光电器件，于2019年开始逐步转型升级，收缩盈利能力较差的非核心业务，聚焦智能控制器、激光武器和高温超导三大主业。公司已陆续剥离毛利率较低的光缆、铜丝加工、传统电力缆等业务，并已签订意向协议商洽剥离主营背光源产品的联创致光。非核心业务陆续剥离后，公司整体业务布局将更加明晰，盈利能力迎来显著提升。

超导布局方面，联创光电在接受机构调研时表示公司的大型超导感应设备在金属热加工领域，预计替换及新增约7000台，市场规模在千亿级别以上，2022年3月客户中铝集团完成超导加热设备验收，产品较传统工频炉节能超过50%。公司表示目前相关产品在国内暂无直接竞争对手。

2022年12月，上海超导、东部超导领导拜访联创光电超导应用有限公司，并表示将为江西联创超导公司日后发展做好上游材料供应的保障工作。联创超导的兆瓦级高温超导感应加热设备在中铝东轻公司航空锻压铝生产线的成功投产使用，实现了高温超导在大工业领域商业化应用的实质性突破。高温超导感应加热设备卓越的省电节能、碳排放减半的性能及优越的铝加工品质，得到了市场充分验证，并再次吸引了铝加工的企业高度关注，随着广亚铝业等广东企业量产化订单合作协议的签订及实施，目前累计排产订单已经超过50台，并有多个订单在洽谈中，江西联创超导公司未来两年内单高温超导感应加热设备一个产品类型就将达到200台以上的年产水平。同时，公司利用自有的大口径传导式高温超导磁体技术正在积极布局在磁控硅单晶生长、磁选矿、城市污水处理、超导储能、金属熔炼、特种钢热处理、可控核聚变等市场领域的应用。

4 风险提示

- 1) **可控核聚变突破不及预期。** 建造可控核聚变发电厂任务艰巨，而且目前技术还不够成熟，只是向商业化运用迈进一步，未来是否能够继续技术突破还未可知。
- 2) **下游需求波动风险。** 目前产业还处于孵化阶段，对于下游的应用场景仍存在不确定性。
- 3) **国内外政策推动不及预期。** 核聚变各方面的政策尚不清晰，目前需要政策端的推进，若政策落地力度不及预期，可能对行业需求造成影响。

插图目录

图 1：核裂变示意图.....	3
图 2：核聚变示意图.....	4
图 3：NIF 的惯性约束装置示意图.....	6
图 4：托卡马克装置示意图.....	7
图 5：等离子所 EAST 东方超环托卡马克.....	8
图 6：西南物理研究院托卡马克.....	8
图 7：部分托卡马克装置统计.....	8
图 8：托卡马克装置中的线圈需要高温超导材料.....	12
图 9：超导材料产业链.....	13
图 10：2012-2022 超导材料市场规模.....	14
图 11：2023E-2028E 高温超导电缆市场规模.....	14
图 12：2018 年全球超导行业细分市场占比	15
图 13：2030 年预测全球超导行业细分市场占比	15
图 14：第二代高温超导材料.....	16
图 15：第二代高温超导材料应用领域	16

表格目录

表 1：聚变初创企业的融资轮次及融资金额	10
----------------------------	----

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接受到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5%~15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026