

其他电子II行业深度报告

国之重器风口已至，超导磁体多领域开花迈向千亿蓝海市场

增持（首次）

关键词：#新产品、新技术、新客户

投资要点

- **超导磁体具有重量体积小、节能、场强高等核心突出优势：**超导磁体属于多部件集成系统，一般是指用超导导线绕制的、利用超导材料零电阻与小截面导体却可以承载超大电流的特殊性质产生强磁场的装置。超导磁体由于其运行时内部导体呈超导态，使其相比于常规磁体可以在基本不产生电能损耗的情况下产生很高的运行电流，进而在大空间内产生高场强、高稳定性、高均匀性的磁场。按照内部超导材料分类，超导磁体可分为低温超导磁体和高温超导磁体，低温超导磁体需在-269℃下运行，高温超导磁体在-196℃下运行，低温超导磁体由于发展时间久，生产技术较为成熟，目前已经在医疗 MRI 设备中广泛应用，高温超导磁体虽然起步较晚，但由于其高场强、稳定性较高等特质，正在可控核聚变装置、新一代光伏晶硅生长炉中展开规模化应用。
- **超导磁体下游应用多领域开花，迎来规模放量期：**超导磁体节能提效的同时突破传统磁体的磁场上限，当前在多个下游应用进入放量阶段：1) **磁控光伏晶硅生长炉：**晶硅生长炉加装超导磁体解决硅片含氧量过高问题，该方案一经推出预计今年即开始交付数百台超导磁体。2) **高温超导感应加热设备：**在下游大型金属加工领域节能优势显著，2020 年交付首台，今年进入批量化交付阶段。3) **紧凑型核聚变装置：**多个基于高温超导磁体的可控核聚变项目近两年落地，进入加速建设阶段。超导磁体在磁储能、熔炼炉、磁选矿等领域的应用研发也正加速推进中，有望进一步打开超导磁体应用空间，超导磁体市场规模近千亿元。
- **高温超导磁体技术优势显著，产业链上下游发力迎来加速向上拐点：**高温超导磁体相较于常导磁体更节能，相较于低温超导磁体磁场强度更高、失超风险低且制冷成本低，后续应用空间更广。当前产业链上下游正加速发力，推动高温超导磁体产业链加速成熟。1) 上游高温超导带材厂商加速产能扩张，推进上游超导带材技术成熟、成本下降。2) 中下游超导磁体企业加速针对下游各应用领域研发及相关产能扩张，同时不断有新的企业涌入高温超导磁体行业中，加速技术迭代行业成熟。
- **投资建议：**超导磁体目前在下游多个应用领域进入规模化放量期，行业迎来向上加速拐点。首先建议关注具备超导磁体生产能力的企业以及对应的超导带材生产公司。重点推荐国内高温超导磁体技术领先企业联创光电，建议关注高温超导带材供应商永鼎股份和上海超导（未上市），以及低温超导线材厂商西部超导。
- **风险提示：**高温超导带材厂商扩产速度不及预期；超导磁体商业化应用拓展不及预期；超导磁体新应用技术研发进展不及预期

表 1：重点公司估值（截至 2023 年 9 月 1 日）

代码	公司	总市值 (亿元)	收盘价 (元)	EPS			PE			投资评级
				2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E	
600363	联创光电	155.51	34.16	0.60	1.00	1.37	56.93	34.16	24.93	买入

数据来源：wind，东吴证券研究所

注：联创光电盈利预测来自东吴证券研究所

2023 年 09 月 03 日

证券分析师 马天翼

执业证书：S0600522090001

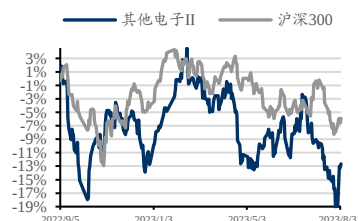
maty@dwzq.com.cn

研究助理 王润芝

执业证书：S0600122080026

wangrz@dwzq.com.cn

行业走势



相关研究

《联创光电(600363)：2023 年中报点评：激光业务稳定增长，超导业务多领域布局打开长期成长空间》

2023-07-26

《行业深度报告：颠覆性创新黑科技-高温超导：行业迎来规模商业化》

2023-04-09

《联创光电(600363)：2022 年业绩快报点评：22 年全年业绩符合预期，激光+超导驱动长期成长》

2023-03-30

《联创光电(600363)：传统光电龙头转型蓄力，激光+超导开启成长第二曲线》

2022-12-13

内容目录

1. 超导磁体性能优异商业化进程加速，下游应用多点开花	7
2. 超导磁体节能提效优势显著，商业化设备应用空间广阔	11
2.1. 高温超导感应加热设备进入放量阶段	11
2.2. 光伏级晶硅生长炉打开超导磁体新应用空间	12
2.3. 半导体级晶硅生长炉中超导磁体国产替代加速	15
3. 高温超导磁体突破磁场强度上限，加速可控核聚变装置建设	17
3.1. 磁约束可控核聚变是聚变发电最佳路径	17
3.2. 核聚变能研发进入工程可行性阶段，装置建设进入加速期	19
4. 超导磁体技术壁垒高，抢先布局企业有望充分受益	22
4.1. 低温超导磁体技术更成熟，高温超导磁体性能更优	22
4.2. 高温超导磁体生产工艺复杂，技术壁垒较高	29
4.3. 终端应用加速发展，高温超导磁体产业正加速成熟	31
5. 投资建议	35
5.1. 联创光电：国内光电器件领军企业，高温超导技术领跑全球	35
5.2. 永鼎股份：深耕光电领域数十年，高温超导发展加速	37
5.3. 西部超导：高端钛合金行业领军人，低温超导线材商业化生产企业	38
6. 风险提示	40

图表目录

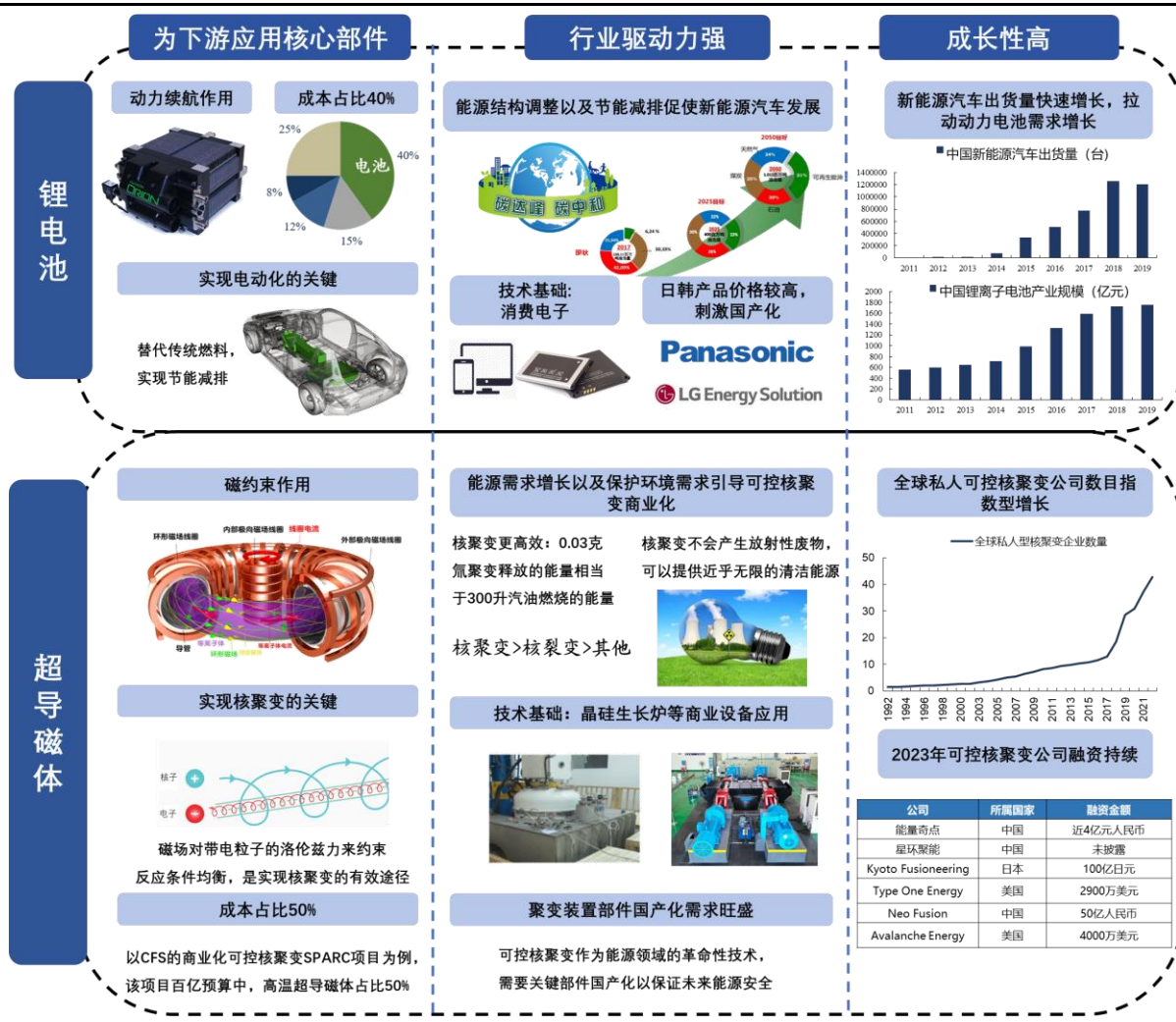
图 1: 锂电池与超导磁体行业对比.....	5
图 2: 高温超导磁体市场空间示意图.....	6
图 3: 超导磁体系统整体结构图.....	7
图 4: 超导磁体外加磁场装置简图.....	7
图 5: 高场超导磁体发展时间线（蓝色底为低温超导，灰色底为高温超导技术）.....	9
图 6: 超导磁体下游应用领域商业化进程加快.....	10
图 7: 超导感应加热设备优势显著.....	11
图 8: 联创光电高温超导铝感应加热设备商业化进程.....	12
图 9: 磁场可有效降低热对流（b，旋涡变小且变少），增加热均匀性（d，固液界面氧浓度降低且均匀）.....	13
图 10: 光伏级超导磁控直拉单晶硅生长炉产品优势.....	14
图 11: 部分国内低温超导磁体以及高温超导磁体厂商布局情况.....	15
图 12: CZ 与 MCZ 法示意图.....	15
图 13: 磁控直拉单晶硅用超导磁体（MCZ）.....	15
图 14: 磁控拉单晶超导磁体及设备示意图.....	16
图 15: 部分半导体晶硅生长炉超导磁体厂商.....	16
图 16: 聚变三乘积公式.....	17
图 17: 磁约束可控核聚变装置示意图.....	17
图 18: 高温超导磁体强磁场大幅减小装置体积，提升聚变功率密度.....	18
图 19: 实用超导材料临界电流性能对比.....	19
图 20: 采用高温超导磁体的核聚变装置 SPARC.....	19
图 21: 全球可控核聚变项目技术突破.....	19
图 22: 全球商业化可控核聚变企业数量高速增长.....	20
图 23: 近三十年成立的相关能源公司.....	20
图 24: 中国承担的 ITER 18 个采购包示意图.....	20
图 25: 中国可控核聚变项目.....	20
图 26: 紧凑型可控核聚变商业化进程.....	21
图 27: 各超导材料带材在不同磁场场强下的临界电流参数.....	24
图 28: 高温超导带材临界值曲面范围大大扩展.....	24
图 29: 典型失超波形.....	25
图 30: 超导磁体失超保护用加热器.....	25
图 31: 低温超导失超保护技术：浸渍绝缘.....	27
图 32: 无绝缘高温超导线圈在失超后 0.3s 开始恢复.....	28
图 33: 无绝缘高温超导磁体是“自稳”的，失超后可自主恢复.....	28
图 34: 高温超导临界电流与单轴应变的关系.....	29
图 35: 高温超导磁体大电流集束缆线示意图.....	29
图 36: 高接头电阻和损耗增大制冷负荷与潜在高电压事故.....	30
图 37: 等离子体所高温超导磁体接头电阻值远小于其他同类型装置中的超导接头.....	30
图 38: 上海超导先进低阻接头技术.....	30
图 39: 中国科学院合肥物质科学研究院分布式光纤传感设备示意图.....	31
图 40: 翌曦科技内封光纤 CORC [®] 缆线示意图.....	31
图 41: 全球氦气资源分布（亿立方米，占比%）.....	33

图 42:	全球高温超导带材厂商现有产能与扩产计划.....	33
图 43:	超导磁体国内产业链.....	34
图 44:	联创光电重点业务布局情况.....	35
图 45:	高温超导感应加热设备 2023 年成功投运.....	36
图 46:	联创光电高温超导合作客户与科研院所.....	36
图 47:	联创光电高温超导技术应用领域规划.....	37
图 48:	超导带材可替代传统铜材的应用产品.....	38
图 49:	西部超导产品概况.....	39
图 50:	西部超导超导线材营收及同比增速（百万元，%）.....	39
图 51:	西部超导超导线材毛利率（%）.....	39
图 52:	低温超导产业链相关的企业业务布局.....	40
图 53:	西部超导磁控拉单晶设备的整体结构示意图.....	40
表 1:	永磁体、常导磁体与超导磁体性能对比.....	8
表 2:	超导磁体下游应用领域磁场场强要求.....	10
表 3:	超导感应加热与传统工频感应加热性能对比.....	11
表 4:	高温超导铝感应加热设备市场容量.....	12
表 5:	P 型与 N 型电池片性能对比.....	13
表 6:	2021-2026 年全球硅片类型市场份额预测（%）.....	13
表 7:	氧浓度小于 7ppm 电池效率验证（磁场技术使电池转换效率提高 0.1%，并有望提高 0.5%）.....	13
表 8:	几种可控核聚变技术路径.....	17
表 9:	紧凑型托卡马克装置 ARC 性能优势：磁场高、尺寸小、成本低、周期短.....	18
表 10:	实用化超导材料性能对比.....	23
表 11:	超导磁体冷却系统的主要类型及优缺点.....	26
表 12:	18 T 制冷机冷却的超导磁体系统(18 T-CSM)与传统液冷却磁体(18 T-SM)运行费用对比.....	26
表 13:	高温超导与低温超导失超性能对比.....	27
表 14:	低温超导磁体与高温超导磁体各性能总结对比.....	28
表 15:	高温超导紧凑型可控核聚变加速成熟，带材需求大幅增长.....	32
表 16:	联创光电不同工位超导加热装置布局规划.....	37
表 17:	永鼎股份产品布局情况.....	37
表 18:	高温超导产业化应用进程.....	38

超导磁体作为能源终局可控核聚变装置的核心，当前正通过商业化设备应用放量加速产品技术成熟。我们在报告正文最前面，通过复盘对比锂电池与超导磁体的产业链地位与成长驱动，分析国之重器的“心脏”——超导磁体未来的市场空间与成长逻辑。

类比新能源汽车中的锂电池，超导磁体与锂电池同为下游设备核心部件，且终端设备新能源汽车/可控核聚变装置在需求与政策推动下具备强放量机遇，作为上游核心部件有望充分受益。从部件重要性来看，锂电池是汽车电动化的关键，超导磁体是可控核聚变装置实现磁约束的核心，且二者都占下游应用的近一半成本。从下游行业驱动力来看，汽车电动化以及可控核聚变都是实现能源结构升级以及达成“碳中和”的解决方案，是必然趋势，也关系国家能源命脉，且核心部件国产化需求高。超导磁体与锂电池通过在其他设备中的应用放量奠定坚实的技术基础，可以大大减少可控核聚变/新能源汽车领域应用时的技术难题。从成长性来看，2023 年的超导磁体可以类比 2014-2015 年锂电池起量情况，锂电池受益下游新能源汽车需求增长同步快速放量。超导磁体有望复制该成长路径，随着下游可控核聚变装置加速迭代建设实现市场规模快速增长。

图1：锂电池与超导磁体行业对比



数据来源：FIA，Statista，东吴证券研究所整理

高温超导磁体具备超导磁体节能增效优势的同时具备更高磁场强度，推动其在商业设备及可控核聚变装置中应用，市场空间达千亿级。超导磁体相较传统磁场方案节能增效优势显著，推动其在商业领域如感应加热设备、晶硅生长炉等设备中展开应用放量。高温超导磁体相较低温超导磁体磁场强度上限更高，在磁场强度要求较高的领域如大科学装置可控核聚变装置中可大幅提升核聚变实现可能性，因此在可控核聚变装置中，尤其紧凑型装置，成为磁体方案首选。随着可控核聚变商业化进展加速，高温超导磁体千亿市场空间将加速放量。

图2：高温超导磁体市场空间示意图



数据来源：前瞻产业研究院，中国科学院，东吴证券研究所整理

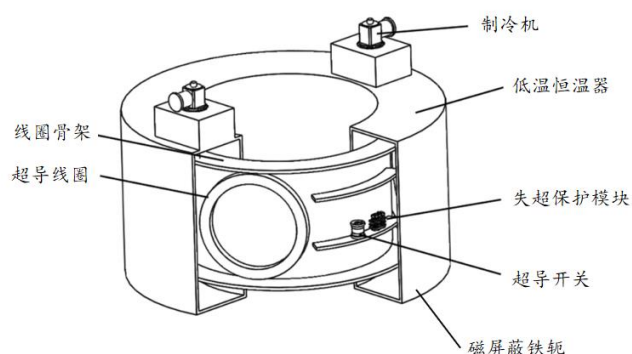
1. 超导磁体性能优异商业化进程加速，下游应用多点开花

超导磁体属于多部件集成系统，一般是指用超导导线绕制的、利用超导材料零电阻与小截面导体却可以承载超大电流的特殊性质产生强磁场的装置，包括超导线圈和其运行所必要的低温恒温容器。

超导磁体主要由以下几部分构成：（1）超导线圈和铝合金骨架（缠绕固定超导导线）：超导线圈为磁体系统核心部件，根据对于磁场场强和均匀度的需求，由 2 或 4 个线圈呈对称布置，超导线圈数量越多，产生的磁场场强和均匀度越高。（2）励磁电源：为超导磁体提供电流，分为超导磁体内部电流独立于电源运行的闭环运行模式和持续由电源供电的开环运行模式。（3）低温控制系统：干式制冷机、导冷板（将制冷机冷量传导给线圈）、真空杜瓦（保证系统密闭性，维持低温条件）、冷屏（降低外部辐射漏热）。（4）失超保护系统：一旦磁体失超，将破坏磁体结构，重新降温励磁使运行时间增加，因此需要对线圈进行浸渍、绝缘处理。（5）漏磁屏蔽系统等：超导磁体产生的磁场与设备的其他电磁系统会互相干扰，影响设备正常运行，因此需要铁轭进行磁场屏蔽。

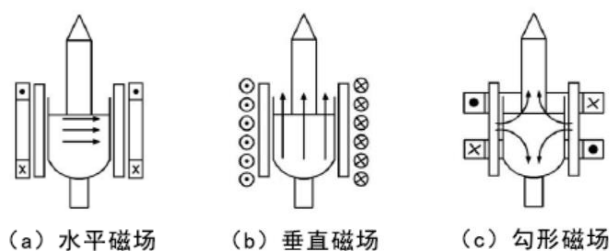
超导线圈产生的磁场分布可以分为水平、垂直和勾形（Cusp）。以超导磁体在晶硅生长炉中的应用为例，垂直磁场由于结构原因无法消除单晶炉内主要热对流，很少被采用；水平磁场的磁场分量方向垂直于坩埚壁主要热对流与部分强迫对流，可有效抑制运动，且有利于保持生长界面平整性，降低生长条纹；CUSP 磁场因其对称性，熔体的流动和传热性更为均匀，因此垂直与 CUSP 磁场为晶硅生长炉中的主流应用。

图3：超导磁体系统整体结构图



数据来源：《一种超导磁体和磁控直拉单晶设备》，东吴证券研究所

图4：超导磁体外加磁场装置简图



数据来源：《直拉式单晶硅生长炉超导磁体研究》，东吴证券研究所

超导磁体具有磁场强度高、重量体积小、节省电耗等核心突出优势。通常电磁铁是利用在导体中通过电流产生磁场，由于超导材料在低于某一极低温度下具有零电阻特性，因此相比于常规磁体，超导磁体可以在不损耗焦耳热的情况下，产生很高的运行电流，进而在大空间内产生高场强、高稳定性、高均匀性的磁场。

表1: 永磁体、常导磁体与超导磁体性能对比

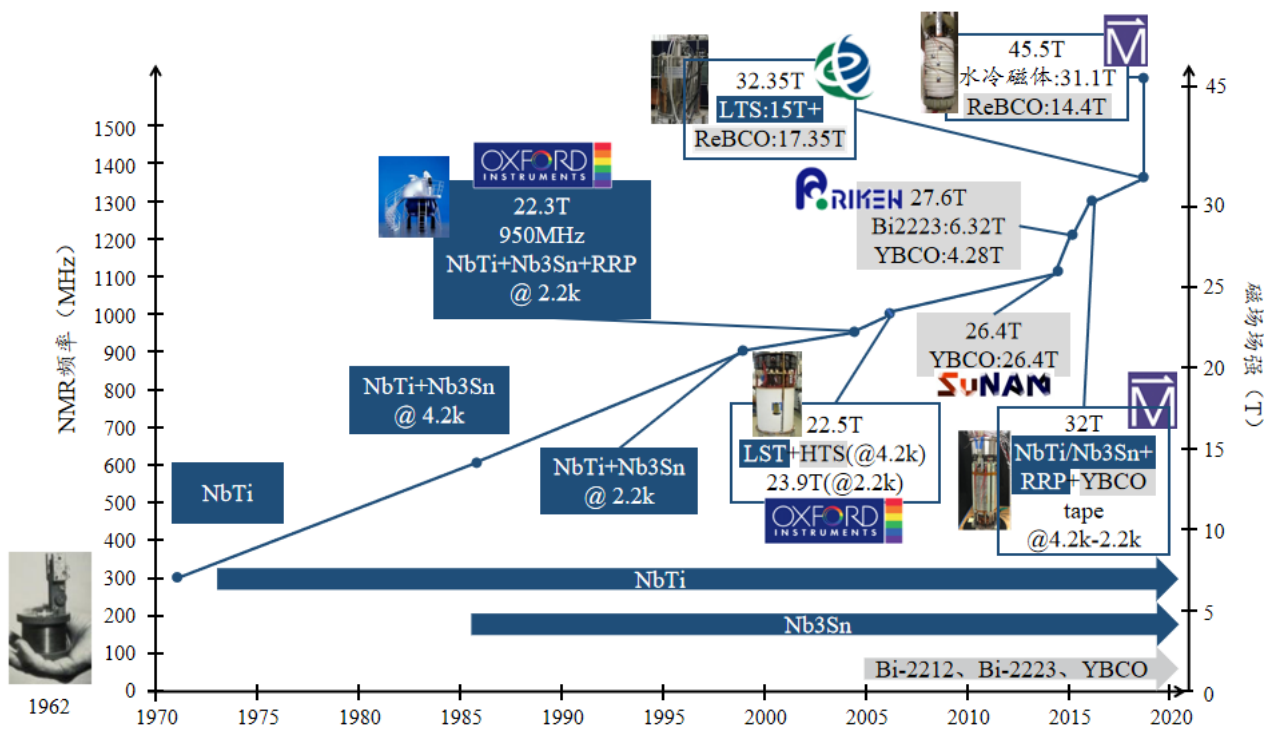
磁体类型	永磁体	常导磁体	低温超导磁体	高温超导磁体
运行温度	室温300K左右, 对温度敏感, 要求机房室温波动 $<1^{\circ}\text{C}$	室温300K左右	25K以下	25K以上
制冷方式		大量冷却水	液氮浸泡或者制冷机传导冷却	液氮浸泡或者制冷机传导冷却
材料	铁镍钴、铁氧体、稀土钴	铜线或铝线	NbTi 和 Nb3Sn 等低温超导材料	MgB2, BiSrCaCuO, YBCO 高温超导材料
重量体积	很大	很大	需要大量制冷系统维持低温, 磁体体积及重量较大	需要的制冷系统相对较小, 磁体体积及重量较小
运行电流		比超导磁体低2个数量级	10^6A/cm^2 (甚至更高)	10^7A/cm^2 (甚至更高)
磁场场强	常用0.35特斯拉, 最高0.7特斯拉	常用0.2-0.4特斯拉, 最高不超过2特斯拉	稳定运行最高磁场强度在15特斯拉左右	稳定运行最高磁场强度目前最高可达45.5特斯拉
磁场均匀与稳定性	较差	较差	较高	较高
能量损耗 (产生1特斯拉的稳态强磁场)		3.5MW电能	比常导磁体低1-2个数量级	比常导磁体低1-2个数量级
材料价格	硬铁氧体5\$/kg	高电导率铍铜200元/kg	价格已经稳定在较为便宜的区间, NbTi带材5/米, Nb3Sn带材50元/米	高温超导带材价格是低温超导带材价格的10倍左右, 但是目前正在加速下降
维护费用	低	高	高	较高
优点	(1) 结构简单, 无须磁场电源, 杂散场较弱; (2) 价格便宜, 维护方便;	结构简单造价低, 工艺不复杂, 可以通过减小半径或加大线圈电流的方法来提高常导型磁体的场强	(1) 很高的运行电流, 可满足大空间内高场强、高均匀度磁场要求; (2) 工作在持续电流状态下, 可以得到极其稳定的磁场, 且原理上可以不需要再追加电能, 仅需要部分电能维持低温系统即可; (3) 节能, 没有焦耳热损耗, 不需要常规磁体庞大的供水和净化设备; (4) 具有很高的电流密度, 且绕成的磁体不需要铁芯, 重量轻、体积小;	
缺点	(1) 磁场强度有限, 均匀性和稳定性较差, 易受温度影响; (2) 重量体积大	(1) 只能在小范围内达到高场要求, 磁场稳定性和磁场均匀性差, 受环境影响大; (2) 重量体积大 (3) 功耗大, 需有完善的循环水冷装置, 运行费用高	(1) 材料价格高; (2) 制冷、维护成本高	

数据来源:《中国超导材料及应用发展战略研究》,《医学影像设备学》,《实用医学影像技术》,东吴证券研究所整理

低温超导磁体技术发展时间较早,技术成熟,高温超导磁体由于材料特性,磁体磁

场强度可以做到更高，更满足高场强需求场景。低温超导材料 NbTi 超导线圈主要用于低场超导磁体，经过发展，为了满足高场需求，外层 NbTi+内层 Nb₃Sn 复合线圈成为了较高场超导磁体主流产业化技术路线。1980s 以来，第一代高温超导材料 Bi-2212、Bi-2223 和第二代高温超导材料 YBCO 陆续被发现，相较于低温超导磁体，高温超导磁体仅需液氮制冷，有着更高的临界磁场、临界温度、临界电流，可以运用在超高场大型设备中，更小的体积也使得大型设备成本大幅降低。经过 30 多年的研究，高温超导磁体的磁场上限已经探索至 45.5T，同时超导磁体的生产技术也正逐步成熟。

图5：高场超导磁体发展时间线（蓝色底为低温超导，灰色底为高温超导技术）



数据来源：MagLab, Nature, 中国科学院电工所, 中国科学院强磁场科学中心, 东吴证券研究所整理

超导磁体商业化进程加快，高品质节能提效工业领域+紧凑型可控核聚变装置等商业化下游应用场景不断打开。低温超导磁体最初开始在下流设备中应用时由于其制冷维护成本较高，起初仅应用于成本不敏感的领域，如**医疗**：MRI（磁共振成像仪），**科研**：NMR（核磁共振波谱仪）、高能粒子加速器，**能源**：受控核聚变装置等高场强、高均匀度磁场需求领域。随着高温超导技术发展，超导磁体能够产生超高场场强，叠加超导材料价格的逐步下降因素，凭借场强高、体积小、节能等优势，超导磁体可以利用其节能提效优势对民用化、高品质需求、节能化领域做到原有产品的替代升级，例如在**工业**：铝感应加热、MCZ（磁控直拉单晶硅生长炉）、磁选矿，污水分离设备，**交通**：磁悬浮列车等，将带动超导磁体大规模产业化应用。与此同时，在**能源**：紧凑型可控核聚变（托卡马克装置），特别是民营化领域，高温超导磁体可以满足因设备紧凑体积小，而产生的超强磁场需求，同时带来成本更低，研发周期更短的卓越优势。随着未来超导磁体商业化应用进程加快，长期内超导磁体在更多下游应用领域的渗透将不断加深。

表2：超导磁体下游应用领域磁场场强要求

	领域	磁场强度
低磁场强度要求	MCZ(超导磁控直拉单晶硅生长炉)	0.4-0.7T
	高温超导铝感应加热	0.5-1.0T
高磁场强度要求	MRI（磁共振成像仪）	1.5T 和 3.0T 为主流，最高 11.7T
	超导磁选矿机	5.5T
	高温超导磁悬浮列车	5-6T
	高能粒子加速器	8-9T
	可控核聚变装置	ITER 等离子体中心 B0 = 5.3T，线圈高场侧达到 13T
超高磁场强度要求	紧凑型可控核聚变装置	SPARC B0=12T，最高达 20T
	NMR（核磁共振波谱仪）	20-30T

数据来源：西部超导，晶盛机电新品发布会，金属矿山，东吴证券研究所整理

图6：超导磁体下游应用领域商业化进程加快



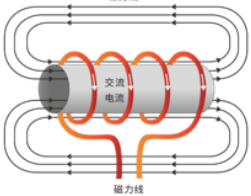
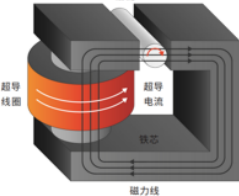
数据来源：Oxford，星环聚能，联创光电，晶盛机电，新华社，《超导磁体技术与磁约束核聚变》，东吴证券研究所整理

2. 超导磁体节能提效优势显著，商业化设备应用空间广阔

2.1. 高温超导感应加热设备进入放量阶段

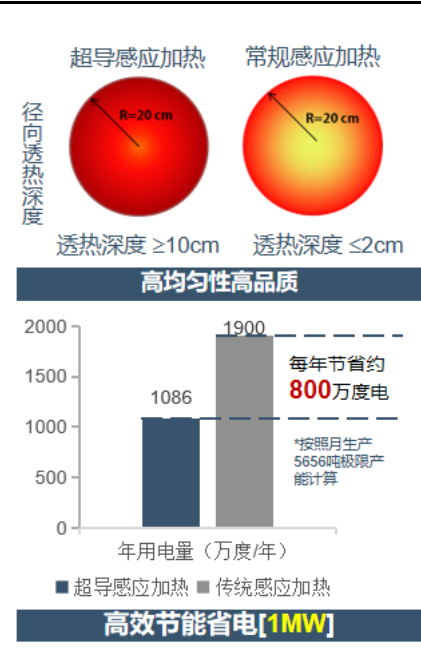
金属挤压成型之前需要预热，传统方式是采用工频炉或者燃气炉进行预热，高温超导感应加热设备由于其超导特性产生磁场无损耗，相较于传统加热方式具备损耗低、透热性好等优点，未来有望大规模替代传统加热设备。超导直流感应加热采用的接近零电阻的带材，超导线圈中功率损耗可忽略，超导感应技术可以通过调整锭料的速度和增大磁场的强度，增大涡流效应的透入深度以实现更均匀的幅向温度，相对于传统加热炉可以得到更深入、更均匀的轴向温度分布，使得加热更有效率，同时可以通过改变磁场的密度来进行加热温度的分布，进行梯度加热，实现不同部位的加热需求，从而实现高穿透性、高能效性、温度均匀性和梯度性灵活可控的全新高品质加热。

表3: 超导感应加热与传统工频感应加热性能对比

项目	常规交流感应加热	超导直流感应加热
示意图	传统交流工频感应加热	超导极低频感应加热
		
加热频率	≥50Hz (≥3000rpm)	4-10Hz (240-600rpm)
穿透深度	≤2cm	≥10cm
加热效率	40%-45% 铜线圈损耗约50% 电气损耗约10%	80%-85% 电机损耗约为10% 制冷损耗约为5%

数据来源：《高温超导技术产业化》，东吴证券研究所

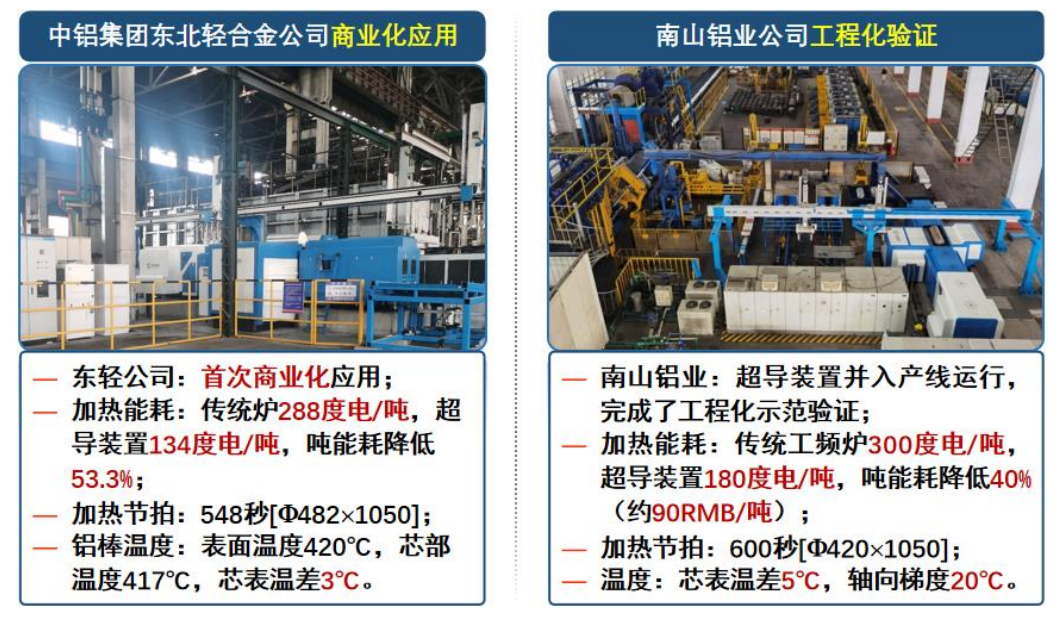
图7: 超导感应加热设备优势显著



数据来源：《高温超导技术产业化》，
东吴证券研究所

联创光电全球首台兆瓦级高温超导感应加热设备，2023 年顺利开启批量化交付进程。联创光电高温超导感应加热设备加热速度快、效率高、节能省电、产品均匀性高，加热铝棒由 20℃至 403℃，用时 617 秒，仅为原加热时间的 1/54，总耗电量 68.95 千瓦时，能效 85.88%，表芯温差仅 3℃，加热均匀性良好。设备折合成每吨铝耗电量仅为 131.8 千瓦时，较之传统工频炉省电达 150 千瓦时，耗电量不及传统工频炉 50%。设备 2022 年投入生产、完成验收，并与广亚铝业等客户签订合作协议，标志着高温超导感应加热设备顺利实现市场 0-1 突破；2023 年 4 月 20 日成功投运，顺利开启批量化交付，目前在手订单超 60 台，本年度将交付十余台套设备。

图8：联创光电高温超导铝感应加热设备商业化进程



数据来源：《高温超导技术产业化》，东吴证券研究所

高温超导铝感应加热设备具千亿级广阔市场。谨慎预计，全球范围现有直径 300mm 以上铝型材挤压机的加热炉替换及新增约 1400 台，航空铝合金、镁铝合金、钛合金等其他军工、航天领域金属压延成型设备约 200 台，将已有成熟超导熔炼加工、金属回收技术嫁接于上述行业，将孕育出不同系列产品，市场容量或达千亿级，应用前景极其广阔。

表4：高温超导铝感应加热设备市场容量

未来市场	超导感应加热技术亮点	市场容量	谨慎预期
大型铝挤压设备系列产品： 全球范围现有直径300mm以上铝型材挤压机的加热炉替换及新增	高效节能，高均匀性，节省大量成本	约4300台	约1400台
军工和航空航天金属挤压设备系列产品： 航空铝合金、镁铝合金、钛合金等其他金属压延成型行业	透热深度高，加热效果好，产出工件品质高	约600台	约200台
超导熔炼加工和金属回收设备系列产品： 金属熔炼、深度加工和高端金属综合回收利用等产业领域	将已有成熟技术嫁接于上述行业，将孕育出不同系列产品，市场规模和前景极其广阔	千亿级	/

数据来源：《高温超导技术产业化》，东吴证券研究所

2.2. 光伏级晶硅生长炉打开超导磁体新应用空间

N 型电池片产能大幅扩张，高品质要求带动超导磁体导入光伏级磁拉单晶硅领域。根据 SMM，2022 年 Topcon 电池产能快速扩张，目前已投产 49.4GW，在建中的产能有 60.5GW，预计 2023 年新增产能将达到 228.5GW，带动上游 N 型硅片需求扩大。P 型电池光电转换效率理论极限为 24.5%，而 N 型电池片的理论极限高达 28.7%。但 N 型电池

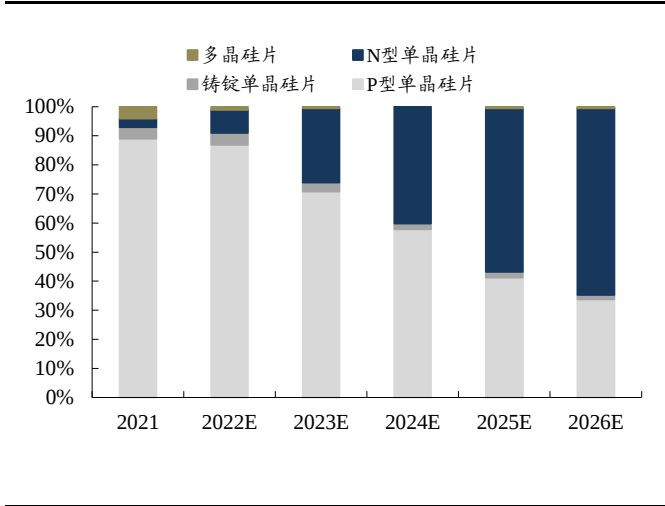
对硅片的质量要求更高、对硅片氧含量更敏感。TOPCon 高温过程较多，易激发硅片内的氧原子形成同心圆，使电池片效率下降。常规降氧方式只能到 10ppm，需要引入超导磁场才能降至 7ppm 以下。

表5: P 型与 N 型电池片性能对比

导电类型	P 型	N 型
电池转化效率 (%)	21.5-23.5	> 25
氧含量 (ppma)	≤ 13.5	≤ 12.5
少子寿命 (μs)	≥ 80	≥ 1000
电阻率 (Ω.cm)	0.4-1.1	0.65-1.25
碳含量 (ppma)	0.3	0.2
施主杂质含量 (ppta)	200	100
受主杂质含量 (ppta)	100	50
体金属/表金属 (ppb)	1	0.5

数据来源：晶盛机电新品发布会，东吴证券研究所

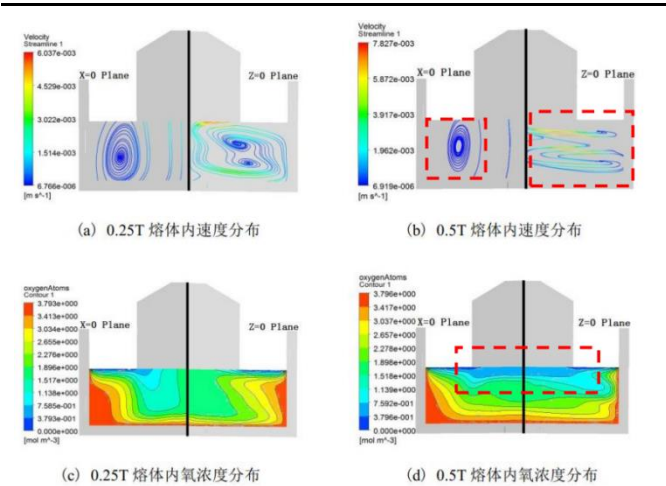
表6: 2021-2026 年全球硅片类型市场份额预测 (%)



数据来源：集邦咨询，东吴证券研究所

在硅棒生产环节增加超导磁场可以减少晶体材料里面的氧含量、提升生晶体生长的稳定性，最终提升电池片光电转换效率至少 0.1%。在高温过程中，硅溶液内部容易出现热流动，冲刷坩埚壁，造成晶体里含有较多的氧，后续加工过程中氧会沉淀形成杂质，产生同心圆和黑芯片问题，使 N 型电池片转换效率下降，对于 N 型硅片，杂质含量超过 7ppm 之后，缺陷会急速上升，如果使用传统降氧方法，只能做到 10ppm，超导磁体产生的强磁场可以有效抑制热对流，降低氧含量，使材料凝固液面更稳定，缓解同心圆和黑芯片问题，提高材料纯度，增加产品产能，增加电池片转换效率。同时，引入超导磁场提升拉晶良率和成晶率，提升 10%单产以及延长石英坩埚寿命。

图9: 磁场可有效降低热对流 (b, 旋涡变小且变少), 增加加热均匀性 (d, 固液界面氧浓度降低且均匀)



数据来源：《水平超导磁场下 CZ 硅单晶固液界面氧分布数值模拟研究》，东吴证券研究所

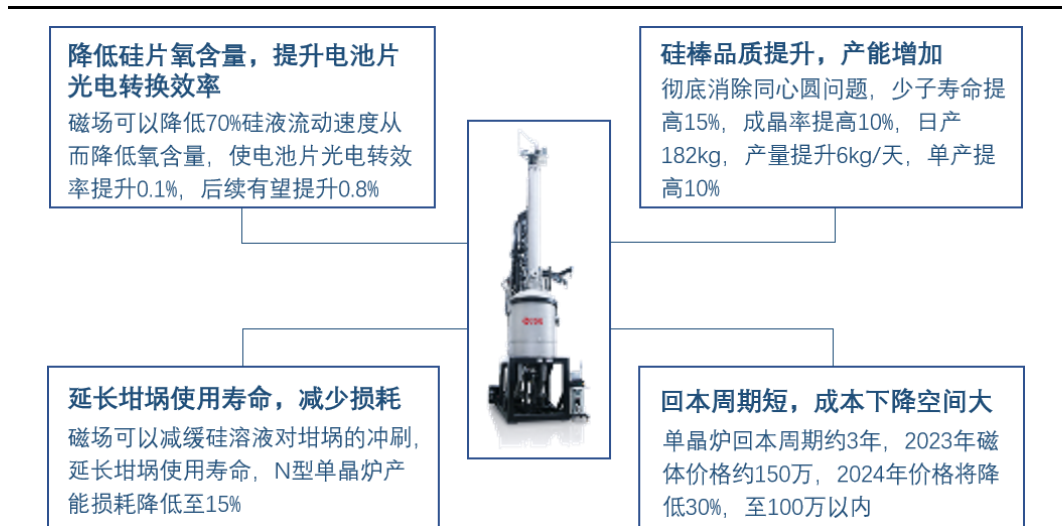
表7: 氧浓度小于 7ppm 电池效率验证 (磁场技术使电池转换效率提高 0.1%，并有望提高 0.5%)

分组	电阻率 (Ω.cm)		氧含量 (ppm)	电池效率同比提升 (%)
	头	尾		
BSL	1.2	0.65	10-11	
Test 1	1.55	1.24	< 7	> 0.1%
Test 2	1.24	0.74		
Test 3	1.12	0.61		

数据来源：晶盛机电新品发布会，东吴证券研究所

超导磁控晶硅生长炉优势明显，随着国内企业加速技术迭代、产品降本，有望助力**超导磁体规模化放量**。当前光伏晶硅生长炉加装超导磁体主要有三重优势：1)降低硅片含氧量，提升最终生产电池片光电转换效率 0.1%-0.8%；2)提升硅棒品质，增加产出；3)延长晶硅生长炉坩埚寿命，由于加装超导磁场可以控制硅液对坩埚冲刷，可有效延长坩埚寿命。随着晶盛机电、联创光电、连城数控等公司均积极展开超导磁体布局，“国产化”叠加“规模化”趋势，设备价格将有望下降，推进超导磁体在单晶硅生长炉领域应用规模化放量。

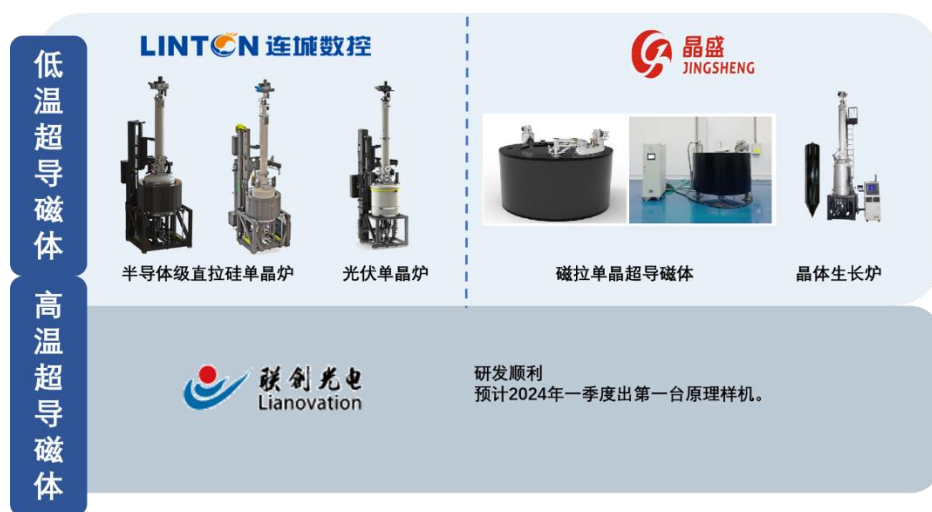
图10：光伏级超导磁控直拉单晶硅生长炉产品优势



数据来源：晶盛机电新品发布会，东吴证券研究所

目前国内低温超导磁体与高温超导磁体生产企业，均针对光伏晶硅生长炉应用加速展开应用布局。**低温超导磁体领域**，连城数控推出 KX420PV N 型低氧单晶炉产品，深度掌握磁场模块（永磁场、勾型磁场及水平磁场、超导磁场）用于光伏单晶生长的一系列方案。晶盛机电于23年5月发布的第五代单晶炉，通过低温超导磁体方案解决TOPCon硅片的同心圆问题。截至2023年6月，晶盛机电第五代光伏低氧单晶炉的单晶炉已签订约3500台设备订单，预计今年出货近300台超导磁场。**高温超导领域**，联创光电晶硅生长炉用高温超导磁体研发顺利，预计2024年交付第一批高温超导磁体不少于50台，预计2024年到2025年，合作客户硅单晶生长炉升级改造对高温超导磁体的需求约300台。

图11：部分国内低温超导磁体以及高温超导磁体厂商布局情况



数据来源：晶盛机电，连城数控，联创光电，东吴证券研究所

2.3. 半导体级晶硅生长炉中超导磁体国产替代加速

半导体级晶硅生长炉需要磁场抑制热对流、提升晶体品质。高集成度芯片发展使半导体行业对硅单晶材料提出尺寸与质量的要求。直拉法（CZ）可生成大尺寸硅单晶，但生长中产生热对流，边界层不稳定，晶体易生杂质。晶圆尺寸越大，芯片成本越低，随着生成单晶尺寸的加大，热对流、温度梯度均匀性越发难以控制。太空微重力和磁场可以有效抑制熔体对流，但微重力下晶体生成费用高，工艺复杂且周期长，所以采用引入磁场的方式，即磁控直拉单晶硅技术（MCZ）。熔体硅具有导电性，在磁场作用下，熔体流动必然引起感生电流从而产生洛伦兹力（ $F=qv \times B$ ）。在洛伦兹力的作用下，熔体内热对流得到抑制，熔体液面处的氧、点缺陷及其他杂质得到抑制。目前超导磁体广泛应用于 12 英寸半导体级晶硅生长炉以及少部分 8 寸晶硅生长炉。

图12：CZ 与 MCZ 法示意图

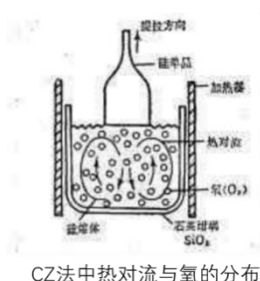
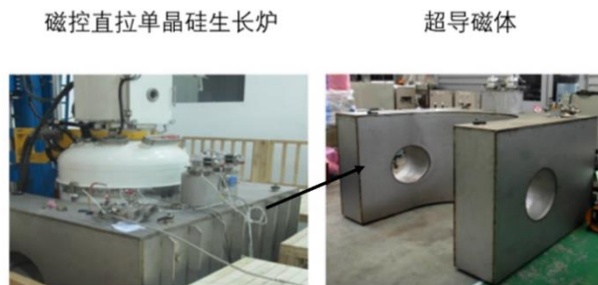


图13：磁控直拉单晶硅用超导磁体（MCZ）

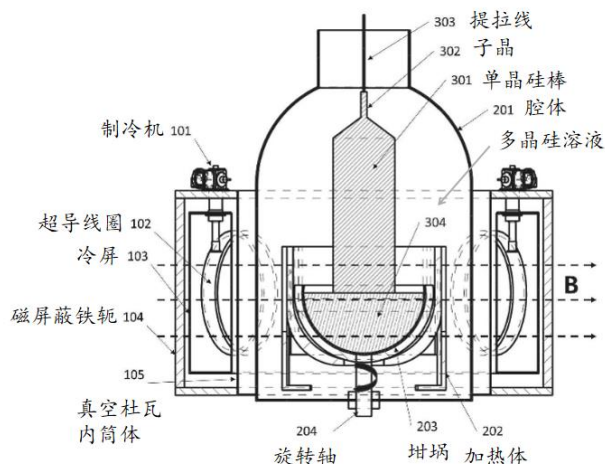


数据来源：《磁场中直拉硅单晶的生长》，东吴证券研究所

数据来源：西安聚能，东吴证券研究所

12 英寸半导体硅片需求不断增长，半导体级超导单晶硅生长炉国产化进程加速，高磁场要求促进高温超导开启规模化应用。在 5G、物联网、汽车电子、服务器等需求的带动下，国内 12 英寸半导体硅片市场持续向好，12 英寸单晶硅晶体生长设备需求不断扩大，集微咨询预计中国大陆 2022-2026 年将新增 25 座 12 英寸晶圆厂，新增 12 英寸硅片产能 2064 万片/年。2020 年国内半导体级超导单晶硅炉设备国产化率仅为 30%，主要由国外供应商日本住友、东芝、三菱等提供。目前西部超导实现 12 英寸直拉单晶硅超导磁体批量供应，晶盛机电子公司慧翔电液自产超导磁体，12 尺寸 4000 高斯半导体单晶炉累计卖出 200 台。随着当前对大尺寸高品质单晶的需求不断增长，单晶硅炉对磁场强度的要求更高，高温超导可突破低温超导磁场强度上限，并且配套更小的制冷系统。当前高温超导带材价格正加速下降，随着国内联创光电为首的高温超导设备厂商加速相关应用研发，预计几年后高温超导磁体将在超导磁控单晶硅生长炉中开启规模化应用。

图14：磁控拉单晶超导磁体及设备示意图



数据来源：《一种磁控拉单晶超导磁体及设备》，东吴证券研究所

图15：部分半导体晶硅生长炉超导磁体厂商



数据来源：各公司官网，东吴证券研究所整理

3. 高温超导磁体突破磁场强度上限，加速可控核聚变装置建设

3.1. 磁约束可控核聚变是聚变发电最佳路径

磁约束可控核聚变是目前实现可控核聚变的主流方式。可控核聚变，即一定条件下，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、磁约束核聚变等形式。具有原料充足、经济性能优异、使用安全、无环境污染等优势。实现可控核聚变反应点火，主要考察三个参数：1）燃烧等离子体的温度，2）等离子体的密度，3）能量约束时间。当这三重参数乘积大于某一数值时，就意味着聚变反应可以维持进行，不需要外部能量输入实现自持燃烧，也称为聚变反应点火。可控核聚变实现路径有3种：引力约束、惯性约束和磁约束，目前主流商业发电核聚变方式是磁约束可控核聚变，主要利用氢的同位素氘—氚作为聚变燃料。

图16：聚变三乘积公式

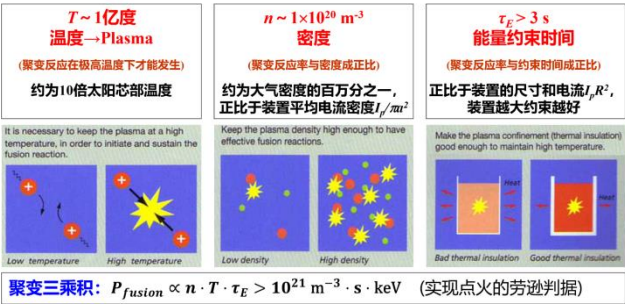
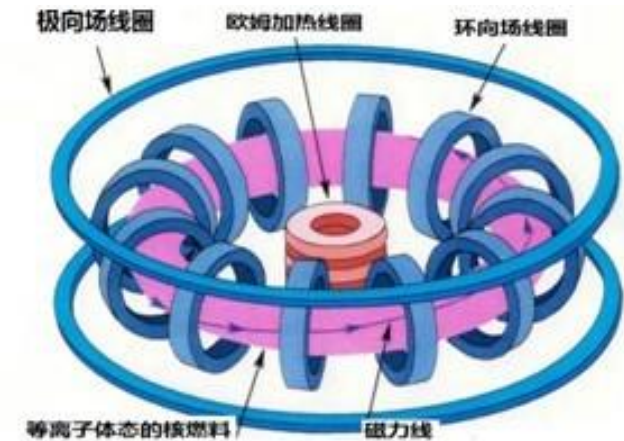


图17：磁约束可控核聚变装置示意图



数据来源：科普中国，东吴证券研究所

数据来源：等离子体物理研究所，东吴证券研究所

表8：几种可控核聚变技术路径

技术路径	原理	主流实现装置	典型代表
惯性约束	在极短时间内，以多束高能脉冲激光，同时照射在一个固态球状核燃料（通常是混合了氘与氚）上。当激光照射在燃料层的外层时，将燃料球外层加热至等离子体化，并产生爆裂。根据牛顿第三运动定律，外层爆裂所出现的反作用力，形成震波向内传播，造成内爆，压迫内部的氘与氚，形成高压高温，造成自发性的燃烧，产生链式反应，最终诱发核聚变反应	高功率激光作为驱动器的惯性约束核聚变	美国国家点火装置
磁约束	先加热燃料，使它成为等离子体形态，再利用磁场，拘束住高热等离子体中的带电粒子，使它进行螺旋运动，进一步加热等离子体，直到产生核聚变反应	托卡马克装置	法国国际热核聚变实验堆（ITER）
重力约束	依靠自身引力（约为3000亿个大气压）将核聚变束缚在核心	无	只能在太阳这种巨大的恒星上依靠自身引力实现，地球上无法实现

数据来源：维基百科，科普中国，东吴证券研究所

传统铜导体磁体约束核聚变很难产生正能量增益，低温超导磁体装置体积庞大、成

本昂贵，商业化应用受限。运用铜导体线圈进行磁场约束，消耗的大量能量将超过核聚变产生的能量，同时需要过于庞大的冷却系统将产生的热量及时带走，因此铜线圈装置只能在较短时间内运行。超导线圈超导态下电阻几乎为零，消耗能量低，只有超导装置才能产生核聚变的正能量增益，实现稳态运行。起初装置运用传统铜导体，由于磁场强度低，只能通过提高装置体积来获得所需的聚变功率，聚变装置往往体积庞大，导致装置成本较为昂贵，限制其商业化推广与应用。

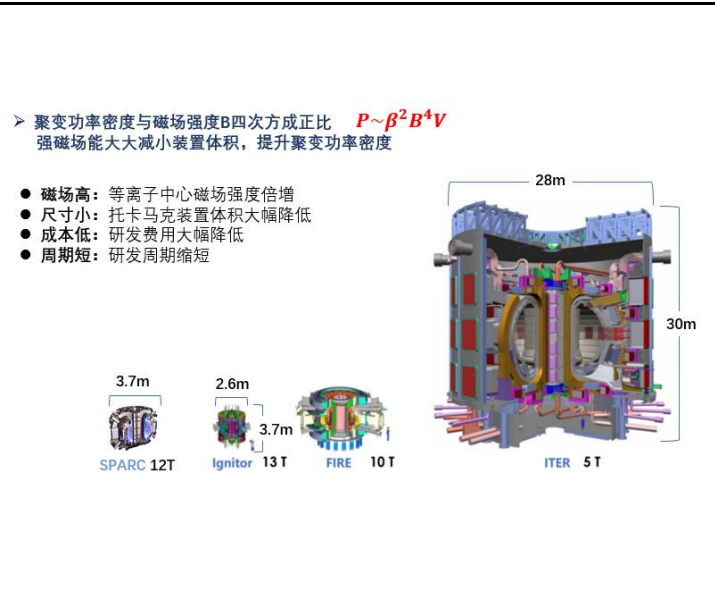
随着高温超导技术逐渐成熟，高温超导磁体相较于同体积下低温超导产生的磁场更强，可以实现更高的聚变功率密度，在同聚变功率下，高温超导托卡马克装置体积、重量更小，成本更加低廉，大幅缩短聚变装置研发周期，增加迭代速度，开启紧凑型可控核聚变商业化进程，美国 CFS 公司 SPARC 项目设计磁场 $B_0=12T$ ，等离子体大半径只有 $R=1.65$ 米，体积 11 立方米，是 ITER 的 1/80，实验堆规划 2025 年完成，ARC 设计磁场 $B_0=9.2T$ ，等离子体大半径 $R=3.3$ 米，体积 140 立方米，工程堆 2030 年实现聚变发电，研发周期大大缩短。可控核聚变项目从 30 年预期国际合作推动的巨额投资项目演变成了 10 年预期的风投热点项目。

表9：紧凑型托卡马克装置 ARC 性能优势：磁场高、尺寸小、成本低、周期短

	ITER	ARC
示意图		
R [m]	6.2	3.2
Magnet	低温超导	高温超导
B [T]	5.3	9.2
P _{fusion} [MW]	500	500
P _{electric} [MW]	0	200
磁场高：	等离子中心磁场强度倍增	
尺寸小：	托卡马克装置体积大幅降低	
成本低：	研发费用大幅降低	
周期短：	研发周期大大缩短	

数据来源：《高温超导在可控核聚变中的发展和应用》，东吴证券研究所

图18：高温超导磁体强磁场大幅减小装置体积，提升聚变功率密度

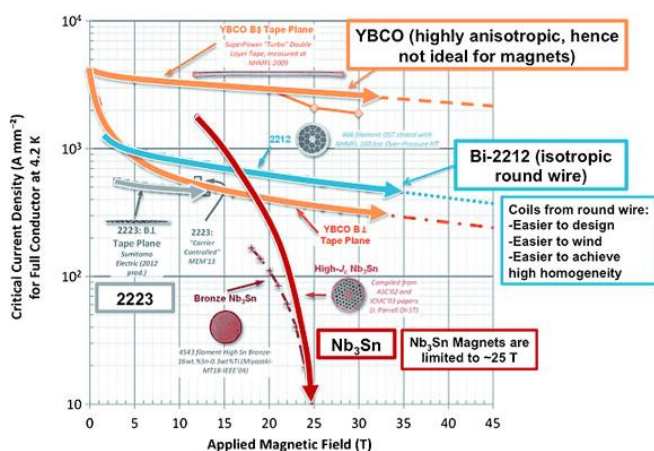


数据来源：等离子体物理研究所，东吴证券研究所

高温超导磁体突破低温超导与常导磁体磁场强度上限，高场强高温超导磁体是未来紧凑型核聚变装置的最优选择。使用托卡马克装置建立核聚变反应堆，需要在一定空间内产生 10T 以上的两级磁场。高温超导在 15T 以上市场占据主导地位，相较于同体积下的低温超导产生的磁场更强，突破低温超导材料磁体磁场上限，推动了可控核聚变装置小型化与成本降低，成本的大幅降低点燃了市场对可控核聚变商业化的热情，越来越多的创业公司入局可控核聚变领域。2015 年托卡马克能源公司就推出了世界首台完全高温超导磁体的托卡马克装置 ST25，首次实现连续 29 小时输出等离子体，创下世界纪录。

近几年新增的紧凑型、小型化托卡马克可控核聚变装置均采用高温超导磁体。

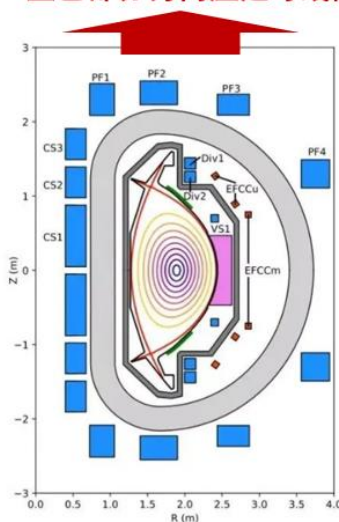
图19：实用超导材料临界电流性能对比



数据来源：Peter Lee，东吴证券研究所

图20：采用高温超导磁体的核聚变装置 SPARC

蓝色部分为高温超导线圈

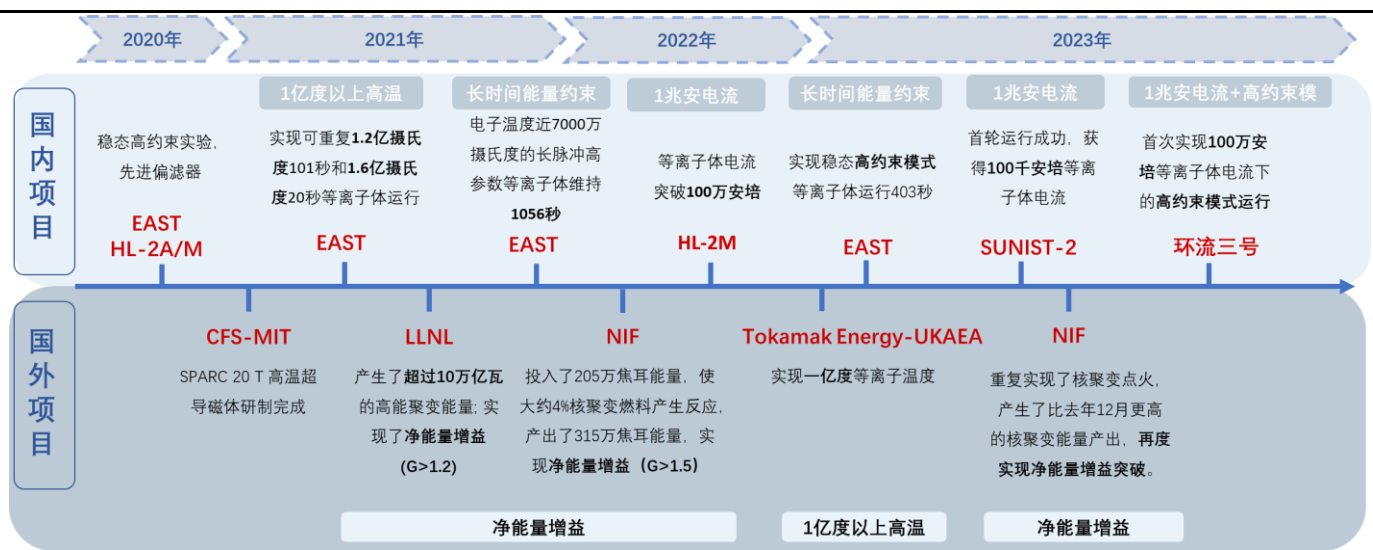


数据来源：LUSTER，东吴证券研究所

3.2. 核聚变能研发进入工程可行性阶段，装置建设进入加速期

各国政策大力支持，全球可控核聚变不断取得技术突破，更接近聚变发电。美国“聚变能研究”项目计划在 2023-2027 年每年拨款金额约 10.26 亿、10.43 亿、10.53 亿、10.48 亿和 11.14 亿美元研发可控核聚变。日本也制定核聚变产业化的国家战略，并制定相应的行动计划，包括产业培育、技术开发、配套体制等，同时积极推动政企联合、中小企业参与。中国 EAST 装置运行 15 年来，先后实现了 1 兆安、1.6 亿度、1056 秒的等离子体运行，美国 LLNL 以及 NIF 也曾实现净能量增益，离核聚变发电更进一步。

图21：全球可控核聚变项目技术突破

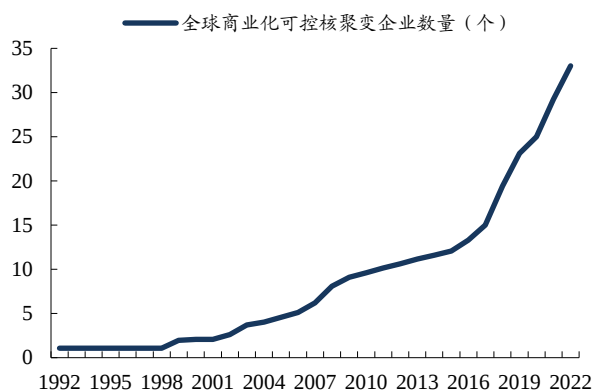


数据来源：中科院，核工业西南物理研究院，东吴证券研究所整理

可控核聚变商业化进程加速，项目频出受到资本强烈追捧。据核聚变工业协会 (FIA)

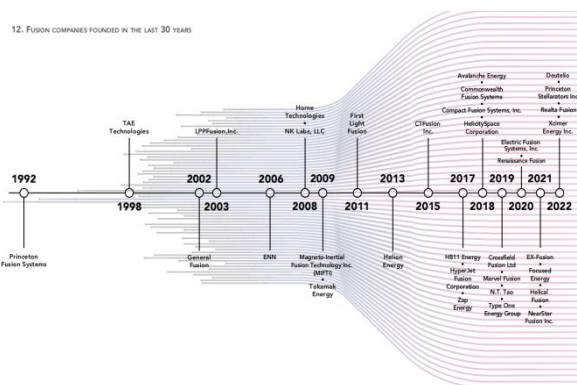
统计，以 CFS 为代表的全球有超过 30 家公司正在致力于实现核聚变的商业化，目前这些公司已共计获得了超过 50 亿美元的融资。其中，2022 年核聚变领域的私人投资额已经接近 30 亿美元，一年的投资额超过了此前的投资总和。2022 年我国也有两个商业公司先后布局商业化可控核聚变，获得国内知名机构红杉种子、蔚来资本、米哈游等投资，分别获得数亿元投资。

图22: 全球商业化可控核聚变企业数量高速增长



数据来源：FIA，东吴证券研究所

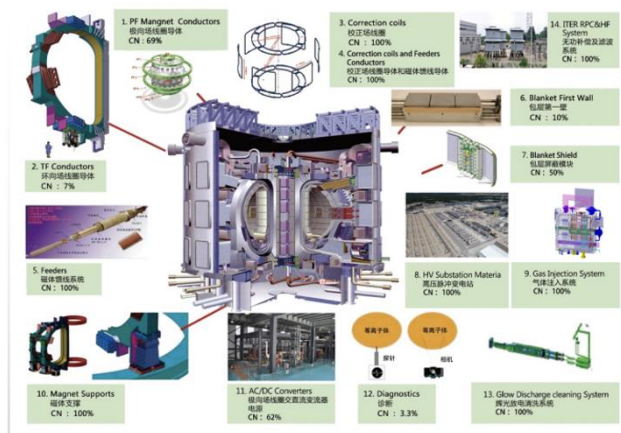
图23: 近三十年成立的相关能源公司



数据来源：FIA，东吴证券研究所

在建设本国聚变示范堆目标下，通过 ITER 计划获得实验堆设计、建造经验，并利用大型托卡马克装置获得高性能聚变等离子体控制和运行经验。国际热核聚变实验堆 ITER 计划由中国、欧盟、俄罗斯、美国、日本、韩国和印度等七方 30 多个国家共同合作。整个项目预计耗资超 200 亿欧元，其中约一半由欧盟承担，余下的部分将由参与合作的六方（中国、美国、日本、韩国、印度及俄罗斯）各方承担 9%。预计将在 2025 年启动实验实现第一束等离子体，2035 年开始进行氘-氚聚变反应。中国未来十年，重点将在（EAST、HL-2M）两个主力装置上开展高水平的实验研究。

图24: 中国承担的 ITER 18 个采购包示意图



数据来源：中国核电网，东吴证券研究所

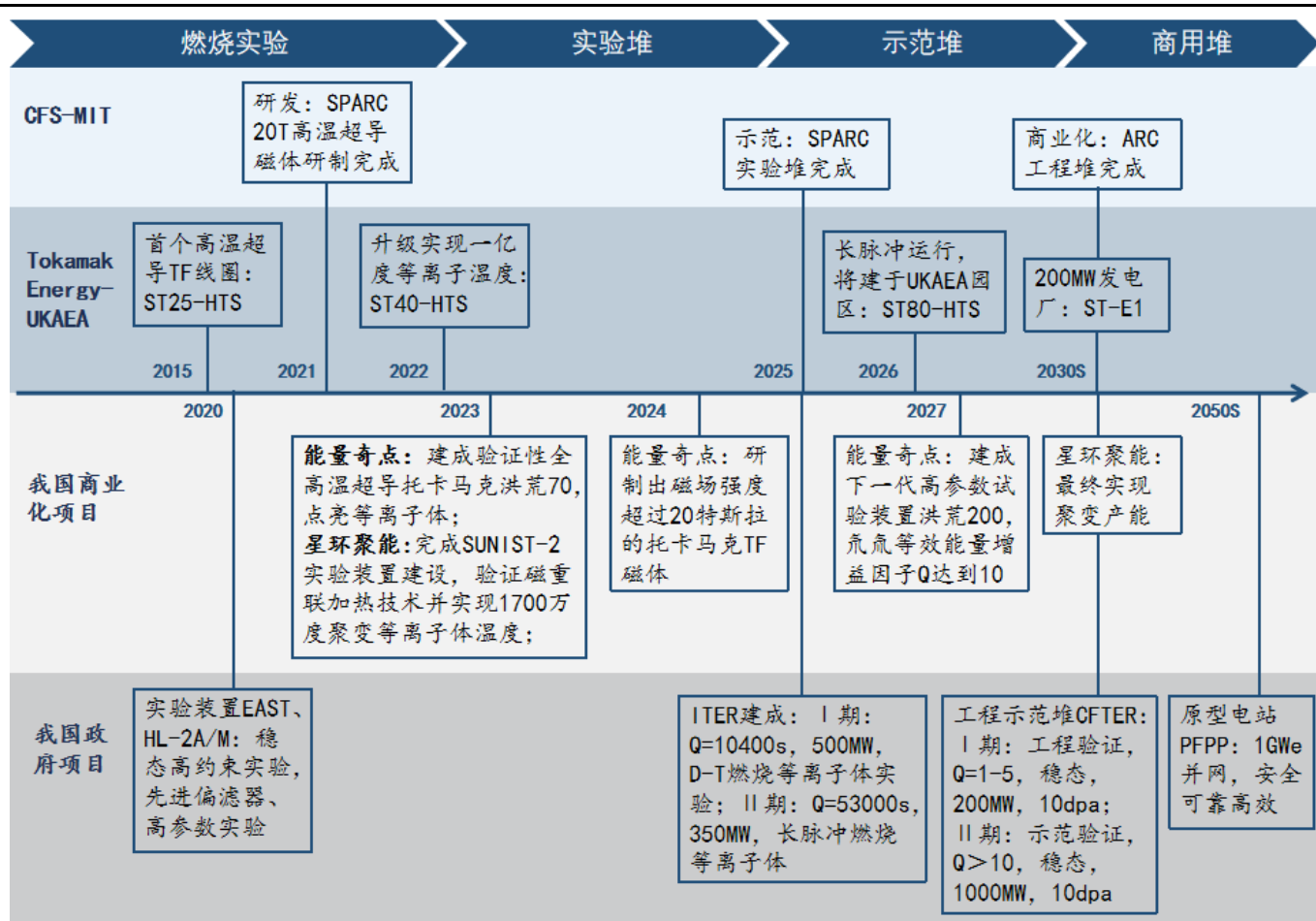
图25: 中国可控核聚变项目



数据来源：投中网，能量奇点，星环聚能，东吴证券研究所

随着高温超导技术与小型化可控核聚变装置技术的突破,紧凑型可控核聚变商业化进程进入加速期,据核聚变工业协会(FIA)统计,全球有超30家公司正致力于实现核聚变的商业化,随着商业化企业的增多,相关资本不断加码,上述公司已共计获得了超50亿美元的融资。目前可控核聚变装置处于实验堆的工程可行性阶段,巨量融资用于进行高温超导磁体等技术研发、扩大团队,加快助力实验堆向工程堆、商业堆发展,据各公司规划,CFS计划2030s完成可用于商业的ARC装置,能量奇点于2027年,将设计、建造一个稳态、强磁场高温超导先进托卡马克,星环聚能计划2030s最终实现聚变产能,我国政府CFTR工程堆将于2030s建造完成,2050s建设原型电站。

图26: 紧凑型可控核聚变商业化进程



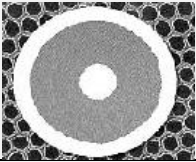
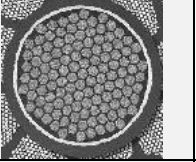
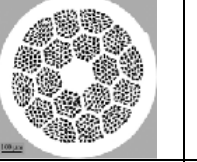
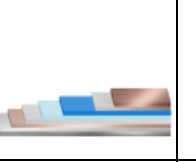
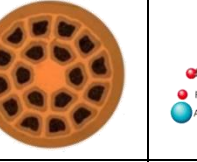
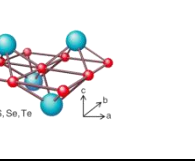
数据来源: 能量奇点, 星环聚能, 《超导磁体技术与磁约束核聚变》, 《高温超导在可控核聚变中的发展和应用》, 东吴证券研究所整理

4. 超导磁体技术壁垒高，抢先布局企业有望充分受益

4.1. 低温超导磁体技术更成熟，高温超导磁体性能更优

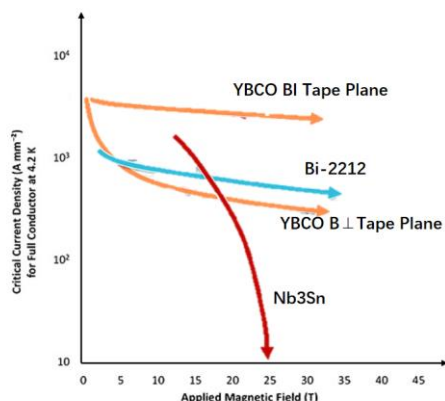
目前实现规模商业化的超导材料主要有三类，即低温超导材料（超导临界温度低于 25k）、第一代高温超导材料（Bi 系）、第二代高温超导材料（Y 系）。低温超导材料商业化程度非常成熟，带材价格较为低廉，在 15T 及以下的磁场低场为主流应用。高温超导材料临界磁场上限高、载流能力强，可以缩小超导设备体积，大规模应用潜力更高。其中，第一代高温超导材料 BSCCO 大部分带材的制造很大一部分的原材料为银，成本难以下降，商业化运用受到限制，而第二代高温超导 YBCO 带材基带和缓冲保护层的原材料主要为不锈钢+铜，成本下降空间较大，随着多层薄膜制备技术进步、公里级长带材大规模制造带来规模效应，第二代高温超导带材价格持续下降、产品良率提升，推动高温超导技术产业化应用进一步加速。

表10：实用化超导材料性能对比

超导类型	低温超导(低于 25k)			高温超导(高于 25k)		
典型超导材料	NbTi	Nb3Sn	第一代高温超导材料 BSCCO	第二代高温超导材料 YBCO	MgB2	铁基超导体
示意图						
临界温度(Tc)	9.8k	18.1k	90-110k	92-135k	39k	16-55k
临界磁场(Hc2)	12T	25T	> 100T	> 100T	18T	100~250 T
超导磁体 磁场场强	9.5T @4.2k 11T @1.8k	20T @4.2k	40T @4.2k 8T @20k 4T @65k	45T @4.2k 12T @20k 8T @65k	5-10T @4.2k 1-3T @10k	
临界电流 密度 (Je, 4.2k)	4×10 ⁵ A/cm ² (5 T)	~10 ⁶ A/cm ²	~10 ⁶ A/cm ²	~10 ⁷ A/cm ²	~10 ⁶ A/cm ²	10 ⁵ ~10 ⁶ A/cm ²
生产工艺	熔炼加工成合金，多芯复合加工法加工成多芯复合超导线，时效热处理及冷加工工艺转变为强钉扎中心的两相合金	因其脆性不能使用 NbTi 线同样工艺制备，可采用气相沉积法、扩散法、内锡法、粉末装管法，商品化实用 Nb3Sn 一般采用 青铜法	材料为陶瓷结构，无法直接加工成带材，通常采用 粉末装管法(PIT) ，将脆性超导粉包裹在金属套管里制备成超导线	物理法： 脉冲激光沉积(PLD) 、 电子束共蒸发(CE) 技术 化学法： 金属有机化学气相沉积(MOCVD) 、 金属有机沉积(MOD)	粉末装管法(PIT)、连续粉末装管成型法(CTFF)、中心镁扩散工艺(IMD)	粉末装管法(PIT)
商业化程度	1968 年完全产业化，商业化程度非常成熟	1970 年代初实现商业化生产，现已非常成熟	技术比较成熟，已达到商业化生产水平	商业化生产逐渐成熟，超导磁体商业化应用放量在即	因 MgB2 长线均匀性差、性能低，商业化程度较低	技术研发阶段，已迈入实用化门槛，开始超导磁体制备研究
价格	5 元/米	50 元/米	200 元/米	100-150 元/米		

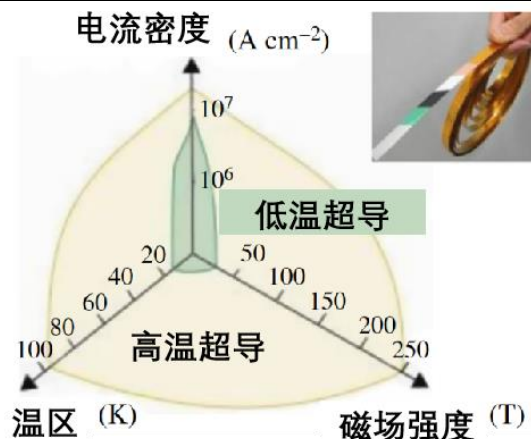
数据来源：《Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications》，《High magnetic fields for fundamental physics》，《实用化超导材料研究进展与展望》，东吴证券研究所整理

图27: 各超导材料带材在不同磁场场强下的临界电流参数



数据来源：MagLab，东吴证券研究所

图28: 高温超导带材临界值曲面范围大大扩展



数据来源：《Small, modular and economically attractive fusion enabled by high temperature superconductors》，东吴证券研究所

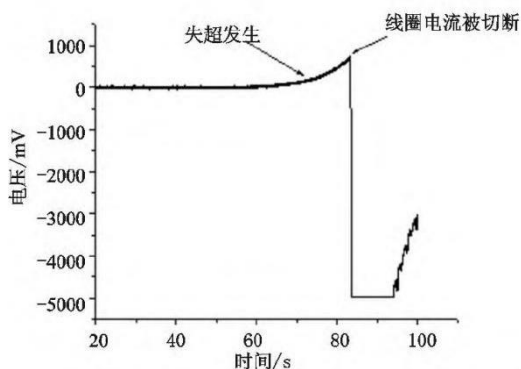
超导磁体生产过程主要由线圈绕制、浸渍固化、绝缘、接线焊接、检测和组装等环节组成，核心工艺在于磁体绕制技术和失超检测、保护技术。

超导磁体失超检测与保护技术：超导磁体在运行过程中可能由于存在接触电阻、局部导体退化、某点的温度过高等因素而导致超导带材从超导态逐渐转变为常导态，失超从局部某一点开始，会扩散至整个超导磁体，伴随引发过电压、超高温、低温介质蒸发等问题，对磁体的稳定性造成严重影响，甚至造成磁体的损坏，因此对于超导磁体的失超检测与保护非常关键。

（1）超导磁体失超检测：超导体失超检测一般使用通过直接测定匝间电压的电压检测法，除此之外还有温度监测、光纤检测、超声波检测及低温介质流速检测等方法。

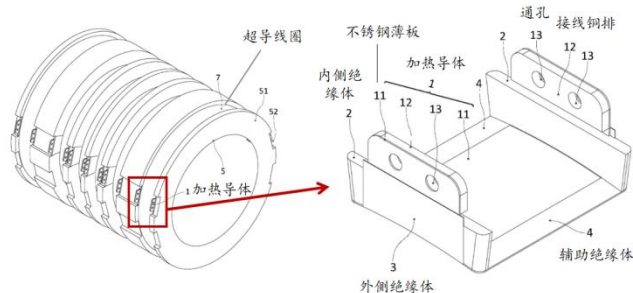
（2）超导磁体失超保护：在磁体绕制过程中，需要对超导体进行浸渍固化、绝缘处理。在超导线圈励磁过程中，超导线圈在自场下会受到很强的洛伦兹力，会使每匝产生位移，匝间出现摩擦生热，最终导致导体失超，因此在绕制中需要运用环氧树脂等材料对超导体进行浸渍固化。由于超导状态下线圈电流在超导芯内传输，但若超导材之间没有绝缘，一旦失超，电流将选择电阻最小路径使线圈失稳，因此要对带材表面包裹聚酰亚胺等绝缘材料，进行绝缘处理。当检测到失超后，需要运用加热器分散热能，进行主动失超保护。当线圈某个局部被触发失超时，引入外部电流，或分流超导线圈内部电流，输入到加热器中的高电阻率金属薄片内，金属薄片通电后产生焦耳热，从而对超导线圈进行加热，触发更多超导线圈区域失超，加快整个线圈的失超过程，使产生的热能能够在线圈中比较均匀地释放，避免局部点区域失超而引发的线圈烧毁事故发生。

图29：典型失超波形



数据来源：《EAST 全超导托卡马克装置失超保护检测技术的现状及发展》，东吴证券研究所

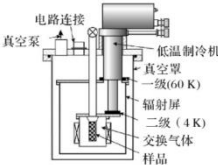
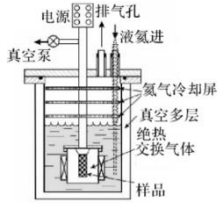
图30：超导磁体失超保护用加热器



数据来源：江苏旌凯中科超导专利，申请公布号：CN115985617A，东吴证券研究所

低温超导磁体发展时间较长，绕制工艺成熟，带材价格低廉，随着小型化制冷机的发展，已形成替代传统使用昂贵液氦浸泡冷却的趋势，有望解决低温超导液氦依赖与制冷成本高的问题。超导带材受到应力产生应变，临界电流会有所衰减，所以对于带材机械性能更加良好的低温超导磁体，其绕制工艺更为简便，因技术发展开始时间较早，低温超导带材价格更低，绕制工艺更为成熟，缺陷之一需要稀缺而昂贵的液氦进行制冷，制冷成本较高，限制了其对传统产品的替代。然而随着 4K 制冷技术的逐渐成熟和可靠运行，小型化 G-M 制冷机技术的发展使得工作在 64k 以下温区制冷机直接冷却的超导磁体系统成为现实，制冷机冷却方式节省液氦费用，无需频繁补充液氦，系统可以长时间稳定运行，失超维护简单，装置质量和体积减小，因而超导磁体制冷方式由依赖液氦浸泡冷却的湿式制冷逐渐转向利用无需液氦的氦气循环制冷机（无需补充氦气的封闭系统）冷却的干式制冷，从而有望解决低温超导磁体液氦依赖与制冷成本高的问题。2022 年，西部超导子公司西安聚能成功研发 10T 125mm 超长均匀区无液氦超导磁体，并成功实现出口美国，标志着我国在高场大孔径、超长均匀区类型无液氦磁体领域达到国际领先水平。

表11：超导磁体冷却系统的主要类型及优缺点

制冷方式	典型结构	优点	缺点
干式制冷 (制冷机 传导冷 却)		(1) 摆脱液氦依赖、节省液氦费用 (2) 无需频繁充氦气，补充周期>20 天； (3) 系统降到最低温后可以长时间稳定； (4) 无需担心磁体失超情况下液氦快速蒸发带来的爆炸危险，失超后维护操作较为简单； (5) 结构简单，质量和体积大幅减小； (6) 任意方向获得所需场强；	(1) 制冷机功率低，冷却均匀性差，对于环境温度较为敏感，磁体稳定性较弱，安全性较差； (2) 预冷时间较长； (3) 制冷机振动影响； (4) 尚不适用于大型超导装置；
湿式制冷 (低温液 体浸泡冷 却)		(1) 制冷效果好、速度快，系统简单； (2) 适用于需要快速冷却和再加热的应用场合； (3) 湿式超导磁体具有较高的温度稳定性和可靠性，失超风险低； (4) 无机械振动影响	(1) 液氦消耗较大，制冷成本高； (2) 液体补充操作不便； (3) 使用寿命有限； (4) 受磁体方向影响； (5) 低温容器须耐压设计

数据来源：《制冷机传导冷却的超导磁体冷却系统研究进展》，Oxford，东吴证券研究所

表12：18 T 制冷机冷却的超导磁体系统(18 T-CSM)与传统液冷却磁体(18 T-SM)运行费用对比

冷却类型	液氦消耗量	耗电量			总运行费用
	(运行 200d)	GM-JT (运行 200d)	GM-JT (待机 165d)	GM-JT (运行 365d)	
18T-CSM	0	8.8kW×200d	5.1kW×165d	(2×6.1kW)×365d	135 万日元
18T-SM	10000 L	0	0	0	300 万日元

注：1)液氦价格：300 日元/升；2)不考虑供电电源耗电量；电价：8 日元/kWh.

数据来源：《制冷机传导冷却的超导磁体冷却系统研究进展》，东吴证券研究所

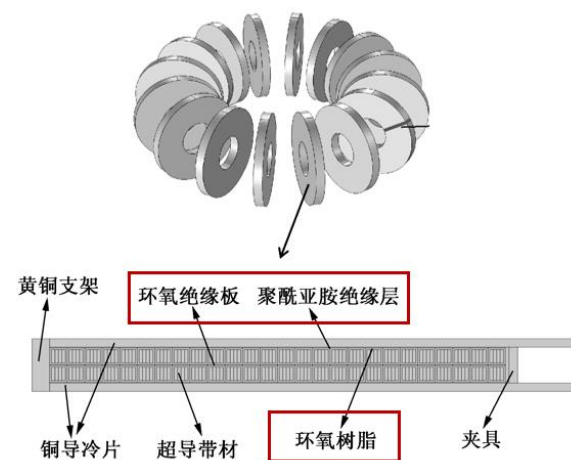
低温超导磁体对环境温度较为敏感，失超风险较大，需要复杂的失超保护措施，来保证低温超导磁体安全、可靠地运行。低温超导磁体在低磁场要求场景下更具价格优势，但由于低温超导体转变温度很窄、n 值较高、工作温区较小、其最小失超能较小，失超后传播速度较快，使得普通的低温超导磁体在受到很小的机械或温度扰动时，更容易会迅速从超导态转变为正常态，同时，干式制冷的制冷机直接冷却方式缺少冷却介质传热，导冷系统的超导磁体处于近似绝热状态，对于环境温度较为敏感，使得比湿式制冷的低温超导磁体失超稳定性差，安全性有所降低。因此干式制冷低温超导磁体需要采用良好的安全稳定措施，来保证低温超导磁体安全、可靠地运行。低温超导骨架之间要进行绝缘处理，且为了固定处于磁场中的超导体，防止机械扰动产生热量导致失超，在绕制过程中或者绕制完成后需要用环氧树脂固化，且需要加热器进行主动失超保护。

表13: 高温超导与低温超导失超性能对比

指标说明		低温超导材料	高温超导材料
工作温区	工作温区越高,越不易失超	25K 以下	25K 以上
n 值	n 值越大,超导态向正常态临界转变区变化越剧烈,越容易失超	> 25	12-18
最小失超能	使超导体失超的最小扰动能量,最小失超能越小,越容易失超	0.024mJ-0.35mJ	756mJ-2331mJ
失超后传播速度	超导体失超区的传播速度,速度太快会烧毁磁体,太慢会使失超过程难以检测	4m/s-171m/s	0.005m/s-0.09m/s

数据来源:《低温/高温复合超导体的热稳定性的数值模拟研究》,东吴证券研究所

图31: 低温超导失超保护技术: 浸渍绝缘



数据来源:《经复合树脂浸渍的超导磁体应力应变分析》,东吴证券研究所

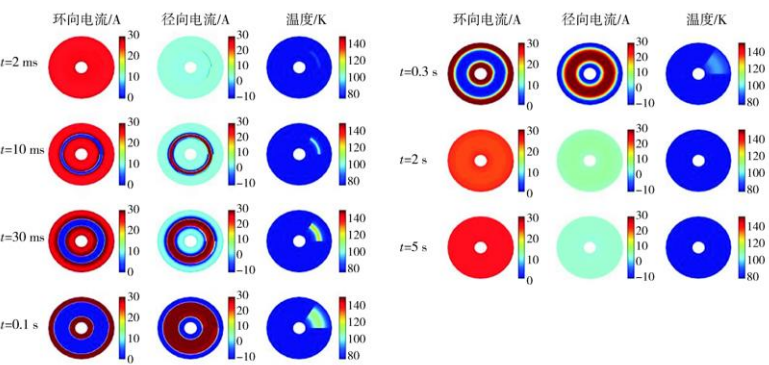
高温超导磁体具有产生磁场强度高、运行稳定性强、失超风险和制冷成本低、体积小的性能优势,商业化应用潜力较强,应用范围更广。

(1) 高温超导磁体临界磁场上限高,目前最高可产生 45T 场强,可以运用在 15T 以上 NMR (核磁共振波谱仪)、紧凑型可控核聚变等高场磁场需求领域。

(2) 高温超导磁体运行稳定性强、失超风险较低,可以运用无绝缘方式进行处理,大幅提高超导磁体鲁棒性。通常高温超导材料临界温度在液氮温区 77K 以上,与低温超导材料相比,高温超导材料具有转变温区宽、工作温区相对较大、失超传播速度较慢、最小失超能较大的特点;从承受热量的角度考虑,液氮的气化潜热为 2.6kJ/L,液氮的气化潜热为 160kJ/L,高温超导体能够承受比低温超导体大得多的热量累积;同时,高温超导带材的合金基带材料可以阻止磁通运动,降低释放的热量,失超现象发生的风险更低。高温超导磁体的稳定性更强,机械扰动产生的摩擦热量不足以使高温超导磁体失超,因此绕制时可选择无需环氧树脂进行固化,同时也可以运用非绝缘方式进行处理,无绝缘高温超导磁体,带材的基带和保护层相当于超导层的匝间“电绝缘”材料,一旦发生失超,超导层电阻会迅速攀升至和这些金属材料相当的量级,部分电流可以通过匝间的接触自动分流绕过失超点,有效抑制失超进一步发展,相比传统绝缘线圈,大幅提高超导磁体的鲁棒性和整体工程电流密度,由于非绝缘线圈是自稳的,一般不需要加热器等主动保护系统。

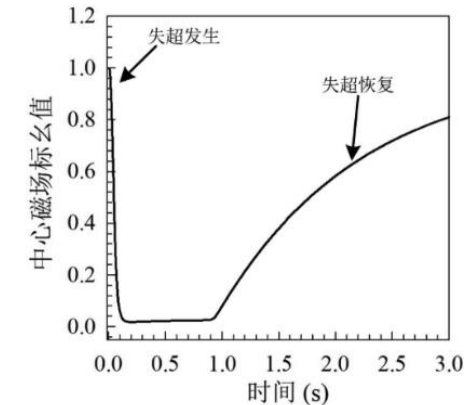
(3) 高温超导磁体的制冷成本较低,相比需要多台二级制冷机制冷的干式低温超导磁体,高温超导磁体只需单级制冷机进行磁体冷却,磁体系统的体积相对较小。

图32：无绝缘高温超导线圈在失超后 0.3s 开始恢复



数据来源：《无绝缘高温超导线圈失超特性数值模拟研究》，东吴证券研究所

图33：无绝缘高温超导磁体是“自稳”的，失超后可自主恢复



数据来源：上海交通大学专利，申请公布号：CN112904248A，东吴证券研究所

表14：低温超导磁体与高温超导磁体各性能总结对比

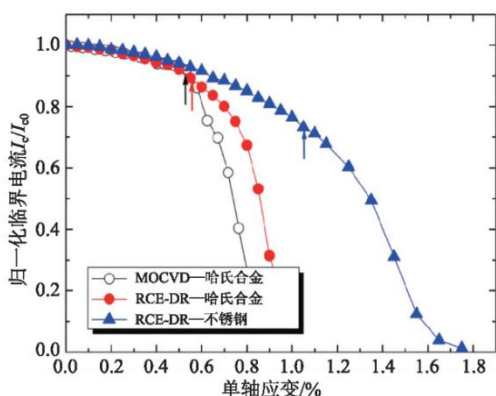
超导磁体类型	低温超导磁体	高温超导磁体
临界温度	25K 以下	25K 以上
磁场强度	稳定运行最高磁场强度在 15 特斯拉左右	稳定运行最高磁场强度目前最高可达 45.5 特斯拉
制冷方式	液氮浸泡的湿式制冷，逐渐发展为运用多台二级制冷机的干式制冷	液氮浸泡的湿式制冷，或运用单级制冷机的干式制冷
绕制技术	螺线管式、饼式、层式等	单/双饼式绕制，紧凑型可控核聚变用高场磁体需要采用技术难度大的大电流集束线缆绕制
失超风险	较高	较低
失超检测技术	电压检测	光纤、声波检测
失超保护技术	主动保护使用加热器，骨架之间增加聚酰亚胺绝缘层，刷环氧树脂固定	主动保护使用加热器，无需刷环氧树脂，可以采用非绝缘方式进行处理，以提高磁体鲁棒性，此时可以不使用主动保护系统
磁体价格	价格已经稳定在较为便宜的区间，NbTi 带材 8 元/米，Nb3Sn 带材 50 元/米	YBCO 高温超导带材价格约 100 元/米，但是目前正在加速下降

数据来源：《基于第二代高温超导带材的磁体研究进展与挑战》，翌曦科技，东吴证券研究所

4.2. 高温超导磁体生产工艺复杂，技术壁垒较高

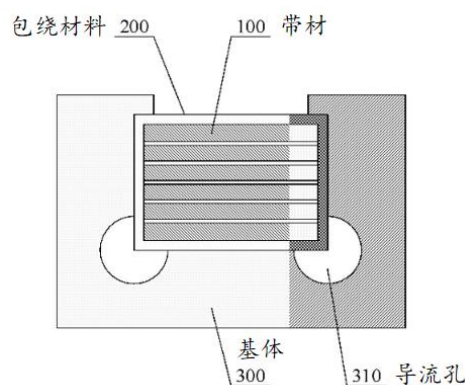
(1) 高温超导带材质地较脆，受应力应变影响大，绕制技术存在较大挑战。由于高温超导材料 YBCO 超导层为氧化物陶瓷质地，其拉伸和弯曲等机械特性比传统低温超导带材差，且高温超导带材为层状结构，不仅受轴向张应力，还受横向张应力，因此在带材受到应力应变时，临界电流衰减速度更快。高温超导磁体可应用于高场强，需要面对大电流、强磁场、高应力、极低温等考验，这便给高温超导磁体的绕制带来挑战，首先，用于高温超导磁体的单/双饼式绕制，容易产生工艺细节控制不当或使用中带材受力超标的问题，极易导致超导带材损伤；其次，而对于紧凑型可控核聚变用超高场磁体的绕制，其难度远大于一般中低场，考虑到快速控制等离子体位形的需要，超导体的载流能力必须不断提高，这就要求聚变强场磁体需要采用大电流集束缆线绕制，设计目标参数高达 100kA/20T，需将上百根超导带材堆叠绞制成缆，过程中添加增强介质，提高超导体的机械强度和载流能力，从而减少线圈绕制的匝数，减小电感。2022 年，翌曦科技团队已研发完成了国内首条可定制化参数的超导磁体集束缆线产线，在缆线接头与磁体绕制等方面也完成了工程样机研发，后续将着力进一步提高设计参数。

图34：高温超导临界电流与单轴应变的关系



数据来源：《基于第二代高温超导带材的磁体研究进展与挑战》，东吴证券研究所

图35：高温超导磁体大电流集束缆线示意图



数据来源：西安聚能专利，申请公布号：CN116190096A，东吴证券研究所

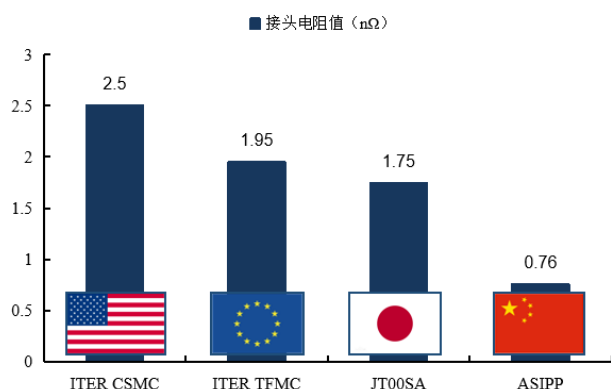
(2) 高温超导磁体接头需做到低电阻，高接头电阻将加大磁体失超风险。高温超导带材由于工艺限制，制造长度较短，在磁体绕制时，需进行带材焊接，焊接接头需做到低电阻，如果电阻过高，通电产生的焦耳热容易使线圈失超，同时也会增大制冷负荷。目前高温超导产业界能工业化实现的接头电阻已经可以满足高温超导磁体的多数应用需求。目前，国内高温超导磁体接头技术不断进步，等离子体所研制的高温超导接头电阻只有 0.76 纳欧，远小于其他同类型装置中的超导接头，上海超导自主研发的带材接头电阻可低至 2.3 纳欧，为全球工业接头最低电阻，阻值均匀分布、过流稳定性好。

图36: 高接头电阻和损耗增大制冷负荷与潜在高电压事故



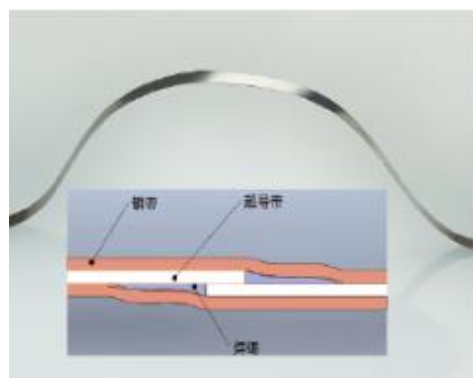
数据来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 东吴证券研究所

图37: 等离子体所高温超导磁体接头电阻值远小于其他同类型装置中的超导接头



数据来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 东吴证券研究所

图38: 上海超导先进低阻接头技术

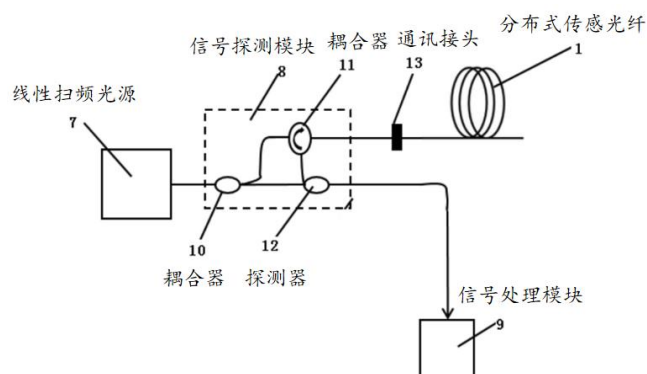


数据来源: 上海超导, 东吴证券研究所

(3) 高温超导磁体失超传播速度慢, 失超检测难度较大。由于高温超导材料失超传播速度较慢, 电压上升速度较慢, 当电压变化量达到预设失超阈值时, 所需时间较长, 而磁体失超后 2 秒内局部温度可超过 1000 摄氏度, 如果仅靠电压检测装置对磁体进行监测, 将无法在磁体严重发热前监测到磁体的失超临界电压, 到监测到电压时, 超导带材已烧坏, 因而需要光纤或声波技术来检测失超, 失超检测技术存在挑战。

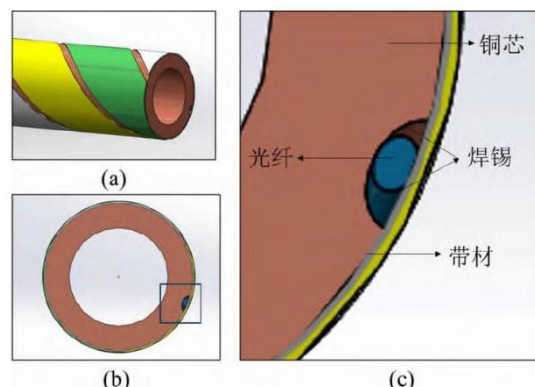
随着国内上海超导、联创光电、西部超导 (西安聚能)、翌曦科技、上创超导等一众企业与科研院所高温超导磁体技术得到逐步突破, 高温超导磁体商业化进程将不断加快。

图39: 中国科学院合肥物质科学研究院分布式光纤传感设备示意图



数据来源: 中国科学院合肥物质科学研究院专利, 申请公布号: CN110261799A, 东吴证券研究所

图40: 翌曦科技内封光纤 CORC® 缆线示意图



数据来源: 《内封光纤高温超导 CORC® 缆线电磁特性仿真研究》, 东吴证券研究所

4.3. 终端应用加速发展，高温超导磁体产业正加速成熟

强磁场高温超导磁体技术不断突破，解决下游高场强应用领域发展瓶颈，终端领域应用加速成熟，带动上游高温超导带材需求大幅增长，推动高温超导产业链快速发展。在紧凑型可控核聚变领域，对托卡马克等离子体的控制技术已经非常成熟，高温超导磁体强场技术成为核聚变装置的发展瓶颈，近年来，强磁场高温超导磁体技术得到突破，2021年9月，MIT联合CFS成功研发20T高温超导强场聚变磁体，打破聚变磁场记录，磁体将在2025年用于第一个能够实现能量增益的核聚变装置SPARC项目，11月获得18亿美元融资。2023年Tokamak Energy公司联合英国原子能管理局UKAEA使用38公里高温超导带材制造新Demo4设施，磁场强度将超过18T。高场强超导磁体技术不断突破，紧凑型可控核聚变领域加速成熟，带动上游高温超导带材需求持续扩张，英国原子能管理局UKAEA 2026-2028年带材需求预计将达数十万km，需求量远高于全球现有总产能，美国CFS的SPARC项目高温超导带材应用需要1万公里，2050年预计制造10000个ARC，带材需求量将达每年80平方公里。

表15: 高温超导紧凑型可控核聚变加速成熟, 带材需求大幅增长

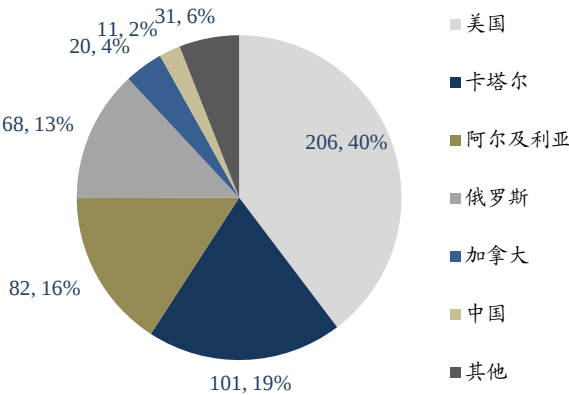
国外进展		国内进展	
项目名称	项目计划进度	主体名称	计划进度
英国 TE 项目	到 21 世纪 30 年代初, 其“达芬奇 (Da Vinci)”核电站将投入运行, 与电网相连并提供电力	核工业西南物理研究院	已开始使用数十公里等级高温超导带材
	2020 年已采用中国产超导带材百公里, 2022 年新一期供货已完成数十公里, 总需求约 200 公里		
英国 UKAEA STEP 项目	于 2019 年启动, 最初 5 年投入 2.22 亿英镑用于设计开发, 最早可能在 2032 年开始建设核聚变能源工厂、2040 年开始商业运营, 预计总投资约 100 亿英镑	中科院等离子体所	聚变堆用 CICC 导体和磁体研制: 设计和研制适用于未来工程聚变堆中心螺线管磁体应用的高温超导 CICC 导体以及基于该导体的高场超导磁体
美国 CFS 项目	将建设 SPARC、ARC 超导核聚变, 第一阶段磁体已经与 2021 年 9 月测试成功, 计划于 2030 年实现商业化核聚变		46T 高场磁体研制: 设计和研制 46T 超高场超导磁体
	2021 年研发的 20T 高温超导强场聚变磁体, 带材三分之一由中国供货, 已采用中国产超导带材数百公里	星环聚能	已开始使用超百公里等级高温超导带材
	2023 年 1 万公里高温超导带材订单, 供货目前已选择 SuperOx		2022/6 完成近数亿天使轮融资, 将用于可控聚变实验装置的建设与运行、组建并扩大研发团队, 2023/7 SUNIST-2 球形托卡马克建成并开展了首轮运行, 获得第一等离子体
CERN 项目	拟建全二代高温超导核聚变工程, 前 3-4 年设计研发, 预计于 2040 年建成		计划使用百公里等级高温超导带材
Helion Energy	开发了一台核聚变发电机, 计划于 2028 年在华盛顿州的一个电网上投入运行, 目标是产生至少 50 兆瓦的功率。	能量奇点	2023/4 完成近 4 亿 Pre-A 融资, 将主要用于磁体和系统研发, 已累计融资近 8 亿元人民币, 2023/7 洪荒 70 托卡马克首个环向场线圈 (TF) 磁体和中心螺线管 (CS) 线圈研制完成
Type One Energy	预计 2035 年建设试验堆, 首个商业运行装置预计的兆瓦电力输出为 500 兆瓦		已开始使用数百公里等级高温超导带材
Kyoto Fusion Engineering	已经完成核聚变发电试验工厂 UNITY 的基本设计, 计划在 2023 年 3 月前完成工厂核心的液态金属回路的总体建设, 在 2024 年末开始全球首个发电实证试验	翌曦科技	2022/9 完成 5000 万种子轮融资, 将用于扩充团队规模、增加研发投入
Avalanche Energy	计划 2025 年第四季度将首个原型交付给 DIU/DoD 进行资格测试, 在 2027 年底之前将 Orbitron 聚变装置 (小型 5kWe 核聚变电源组) 用于飞行演示	新奥能源	中国首座中等规模球形托卡马克聚变实验装置, 2019 年 8 月建成, 目前正在对装置进行升级研究
			已开始使用数十公里等级高温超导带材

数据来源:《高温超导材料全球产业化进展及中国企业的应对思考》, 东吴证券研究所

高温超导带材需求大幅增长, 带动全球高温超导带材产能持续扩张, 价格加速下降,

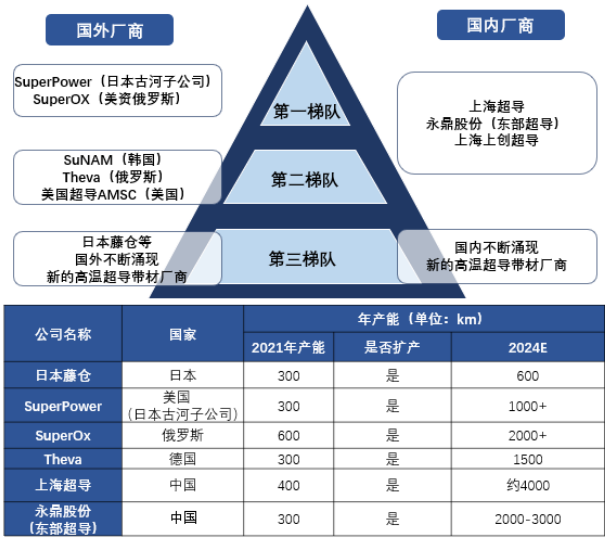
高温超导产业链高速成熟，驱动高温超导磁体在终端领域的进一步探索与渗透，长期内高温超导磁体或将成应用终局。低温超导需要液氦制冷，而我国液氦资源有限需要进口，为了保证产业链安全，转向高温超导技术以液氮替代液氦成为趋势。随着高温超导强磁体技术的不断突破，高温超导磁体终端领域应用不断成熟，带动上游高温超导带材需求持续扩张，同时，欧美日等技术发达国家先后突破第二代高温超导带材长线制备技术，公里级带材生产工艺日渐成熟，为应对高温超导终端领域带材需求，全球多家带材企业加速扩产，随着产业链的高速成熟，高温超导带材价格将持续下降，具有高场强、高稳定性、低维护成本优势的高温超导磁体在终端领域渗透将不断加速。

图41：全球氦气资源分布（亿立方米，占比%）



数据来源：美国地质调查局，东吴证券研究所

图42：全球高温超导带材厂商现有产能与扩产计划



数据来源：《高温超导材料全球产业化进展及中国企业的应对思考》，东吴证券研究所

超导磁体位于产业链中游，为下游应用装置的核心部件，国内厂商布局全面，同时布局低温超导与高温超导。上游原材料与带材制作覆盖低温超导、一代高温超导以及二代高温超导带材，其中低温超导材料主要有 NbTi 和 Nb3Sn，NbTi 超导线性能良好，制备更简易，带材价格不到 10 元/米。第一代高温超导材料 Bi 系带材生产技术较为成熟，但原材料成本高昂难以进一步下降，商业化运用受到限制。第二代高温超导带材 YBCO 价格持续下降、产品良率持续提升，且国内高温超导带材核心供应商规划五年内实现高温超导带材实现十倍以上产能扩张，推动超导磁体在下游各领域应用。

图43：超导磁体国内产业链



数据来源：各公司官网，前瞻产业研究院，东吴证券研究所整理

5. 投资建议

5.1. 联创光电：国内光电器件领军企业，高温超导技术领跑全球

国内高温超导技术领军企业，聚焦三大主业推进产业优化升级。近年来，公司将业务重心放在智能控制器、激光产品和高温超导三大业务板块。公司的智能控制器产品从高端家电智能控制器拓展至新能源汽车、工业控制领域的智能控制器、高端光耦等。激光产品系列由公司与我国中物院十所合作成立中久激光经营，公司将中物院十所的先进激光技术科研成果产业化，现已具备国内功率最高的泵浦源和高质量光纤激光器生产能力，目前激光武器“光刃 I”已通过验收，等待列装，“光刃 II”也已临近验收。公司是全球唯一的高温超导感应设备供应商，在该领域构建了极高的技术壁垒，产品目前主要应用于铝、铜等非磁金属热加工领域，正布局将高温超导技术向晶硅生长炉、可控核聚变等领域拓展，且光伏用单晶硅生长炉用超导磁体研发顺利，已收到客户提前采购订单。

图44：联创光电重点业务布局情况

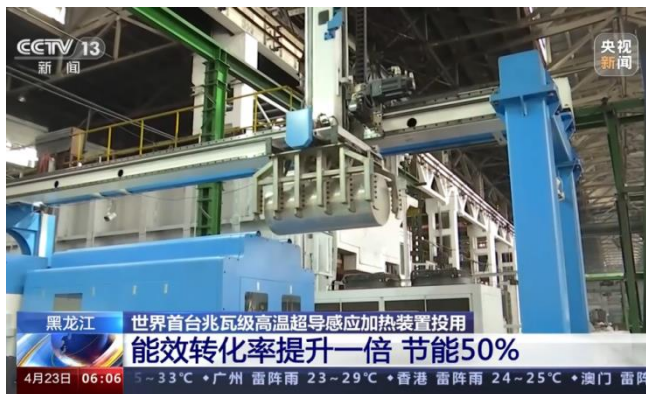


数据来源：联创光电，东吴证券研究所

全球首台兆瓦级感应加热设备投产，高温超导磁体技术全球领先。目前全球仅有德国和韩国各有一台工业级超导感应加热装置，分别为 720kW 和 300kW。这些设备的工业生产效率高落后于公司的产品。公司的设备功率是其他产品的 1.5 倍以上；可加热铝

锭的最大直径是韩国设备 1.9 倍，是德国设备的 2.5 倍；可加热锭坯的长度为韩国设备的 2.14 倍，为德国设备的 2.17 倍；产能是韩国设备的 3.9 倍，是德国设备的 2.6 倍。工业生产效率上的差异，保障了公司产品的竞争优势。23 年有望快速放量，目前在手订单突破 70 台。

图45：高温超导感应加热设备 2023 年成功投运



数据来源：联创光电，东吴证券研究所

图46：联创光电高温超导合作客户与科研院所



数据来源：联创光电，东吴证券研究所

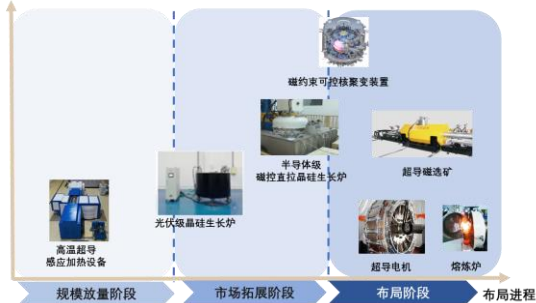
产品矩阵加速完善，提前布局产能扩张蓄力长期成长，布局新领域应用研发打开长期成长空间。1) **高温超导感应加热设备**：公司该产品主要应用于下游大型金属加工领域，公司规划布局单工位、双工位、四工位、八工位的超导加热装置。公司目前销售产品以单工位和双工位产品为主，正重点打磨多工位产品以及推进感应加热设备产品标准化，提升公司盈利能力。公司目前超导设备产能在 50 台左右。后期公司计划在铝产业集中的区域附近布局超导产业园，进一步扩大超导板块产品相关产能。2) **晶硅生长炉领域**：公司当前正加速研发光伏级与半导体级晶硅生长炉用高温超导磁体，当前产品研发顺利，且光伏晶硅生长炉用超导磁体已收到下游客户提前采购订单，预计明年开始量产出货。3) **可控核聚变、熔炼炉、磁选矿等领域**：公司正基于自身高温超导磁体国内领先技术能力，展开进一步布局。

表16：联创光电不同工位超导加热装置布局规划

参数	额定功率	工件尺寸 (长度)	工件尺寸 (直径)	示例
单工位	500-800kW	600-1500mm	400-680mm	
双工位	800-1500kW	600-1500mm	300-680mm	
四工位	800-1500kW	800-1200mm	300mm	
八工位	800-1500kW	200mm	400-800mm	

数据来源：联创光电，东吴证券研究所

图47：联创光电高温超导技术应用领域规划



数据来源：联创光电，东吴证券研究所

5.2. 永鼎股份：深耕光电领域数十年，高温超导发展加速

国内老牌光通信重点企业，业务拓展聚焦光电产业。公司历经数十年发展，产业链不断拓展，目前已形成“光电交融、协同发展”的战略布局。1) 光通信产业：聚焦“新基建”，提供 5G/固网宽带“双千兆”网络、DCI(数据中心互联)综合解决方案，以及数据收集与信息服务解决方案，未来将持续加大对“光模块、光器件和光芯片”的研发投入，顺应“双千兆”提速与数据中心扩容的发展趋势。2) 电力传输产业：聚焦“新能源”，重点发展汽车高压线束、海底电缆与超导电力等新能源相关业务，并保持海外工程稳中有进、可持续发展。

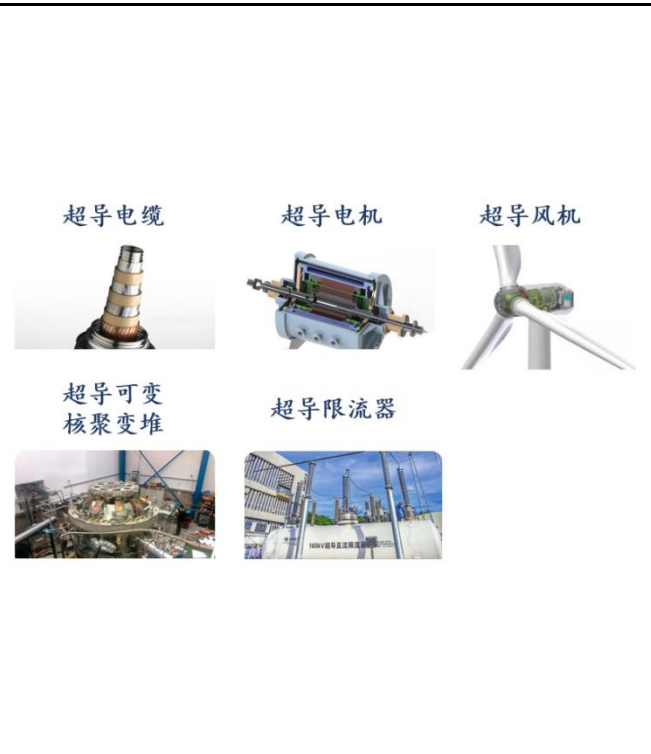
表17：永鼎股份产品布局情况

产品分类		应用场景
光通信产业	棒纤缆	主要应用于国家重点工程如：中国电信、中国移动、中国联通、中国广电等投资的通信网络建设，通信设备公司的通信设备，专网市场和海外市场的公路交通、地铁、轻轨、航空等工程项目等
	光芯片、光器件、光模块	骨干网、城域网、接入网、数据网络、广电网、光纤传感等领域
	大数据与网络安全	政务、汽车、航空、物流、教育等行业
电力运输产业	电线电缆	工业控制、汽车及军工领域
	海外电力工程	海外国家电力工程项目
	超导产业	风电、核电、电网、交通、医疗、军事、重大科学工程等领域
	汽车线束	涵盖整车应用，主要包括：车身总成线束、仪表板线束、门控系统线束、安全气囊线束、车顶线束、车前线束、电喷发动机线束、新能源高压线束等多个产品类型。

数据来源：永鼎股份，东吴证券研究所

高温超导发展进入加速期，关键应用领域取得重要进展，公司发展进入新的台阶。公司主营第二代超温带材及其应用设备，以及超导（通用）电气产品。相对于低温超导来说，公司所用的第二代高温超导带材——REBCO 涂层导体带材优势明显，可以在液氮温度下使用，由于液氮制造产业化成熟，造价低廉，使高温超导材料可以长距离使用，同时相比于常规导体（铜、铝）来说，因为超导没有电阻引起的能耗，传输效率高，工程电流密度大幅度提升。公司积极布局高温超导市场，以业内独有的磁通钉扎技术，不断研制应用于高强磁场工况下的高载流超导带材，积极推进高温超导材料在超导感应加热和可控核聚变堆的应用，产业化发展进入加速期。目前公司已和众多科研院所如中核集团、中科院合肥等离子体所，以及众多企业如联创光电建立联系，随着产业化应用逐渐落地，公司发展有望再上新台阶。

图48：超导带材可替代传统铜材的应用产品



数据来源：永鼎股份，东吴证券研究所

表18：高温超导产业化应用进程

应用领域	进展情况
超导金属感应加热设备	二代高温超导带材在磁感应加热设备中实现产业化供货
可控核聚变反应堆	研发的可控核聚变用二代高温超导带材实现技术性突破，20K10T 垂直场达到 270A/2cm，达到国际先进水平
超导电力	与国网合作落地实施的“高温超导直流电缆示范工程”，已完成厂区内收放卷、运输、铺设模拟试验工作。
超导电缆	高温超导直流电缆示范工程的国内首条±375V/4500A 百米级正负极同轴冷绝缘高温超导直流电缆，顺利通过了权威第三方检测机构型式试验

数据来源：永鼎股份，东吴证券研究所

5.3. 西部超导：高端钛合金行业领军人，低温超导线材商业化生产企业

高端钛合金行业领军人，产品谱系全面。公司主要从事高端钛合金材料、高性能高温合金材料和超导材料及其应用的研发、生产和销售，是目前国内唯一实现超导线材商业化生产的企业，也是国际上唯一的铌钛铸锭、棒材、超导线材生产及超导磁体制造全流程企业。其中高端钛合金材料包括棒材、丝材等，超导材料包括铌钛锭棒、铌钛超导线材、铌三锡超导线材和超导磁体等，高性能高温合金材料，包括变形高温合金和高温合金母合金等。公司产品以“国际先进、国内空白、解决急需”为定位，始终服务国家战略，补上了我国新型战机、大飞机、直升机、航空发动机、舰船制造所需关键材料的“短板”。

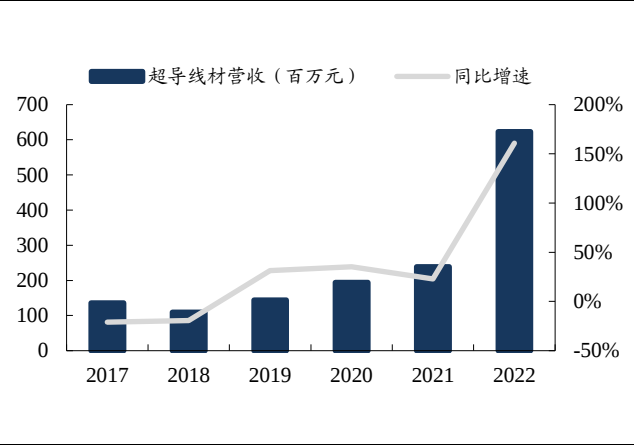
图49：西部超导产品概况

主要业务	主要产品	主要用途	代表客户
高端钛合金材料	- 棒材 - 丝材 - 锻坯	飞机结构件、航空发动机和燃气轮机部件、舰船、兵器、航空航天紧固件、航空用焊丝	CSIC, AVIC
超导产品	- NbTi 锭棒 - NbTi、Nb3Sn 超导线 - 超导磁体	磁共振成像仪、核磁共振谱仪、磁控直拉单晶硅、加速器、磁悬浮、核聚变、核聚变、国防军工、磁控直拉单晶硅等	GE, SIEMENS
高性能高温合金材料	变形高温合金、铸造和粉末高温合金母合金等	航空发动机和燃气轮机部件、核电设备	军工相关客户

数据来源：西部超导，东吴证券研究所

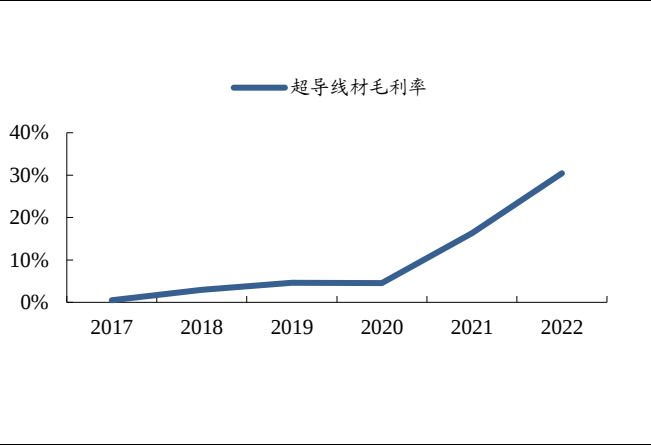
低温超导线材商业化生产企业，研究成果丰富，构筑核心竞争力。公司自主开发全套低温超导产品的生产技术，业务涉及 NbTi 锭棒和线材、Nb3Sn 线材（包括“青铜法”和“内锡法”）和超导磁体的生产，是全球唯一的铌钛（NbTi）锭棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。在高温超导材料方面，专注 Bi 系和 MgB2 的研发和产业化，已掌握核心制备技术；重点发展 20T 以上全超导磁体、高性能核磁共振 MRI/NMR 用超导线材、低成本千米级高温超导涂层导体织构化基带及功能层沉积技术、高性能 Bi 系和铁基超导线材制备技术。公司的超导线材目前主要应用于磁约束核聚变、人体核磁共振成像仪（MRI）、核磁共振谱仪（NMR）、磁控直拉单晶硅（MCZ）磁体等领域，未来有望拓展至核聚变工程堆、大科学工程、半导体、高速磁悬浮列车、新概念武器装备等领域，发展前景广阔。

图50：西部超导超导线材营收及同比增速（百万元，%）



数据来源：wind，东吴证券研究所

图51：西部超导超导线材毛利率（%）



数据来源：wind，东吴证券研究所

超导磁体布局完善，客户广布国内与海外。公司超导磁体产品丰富，包括直拉单晶硅 CUSP 磁体、MCZ 直拉单晶硅磁体、超导四级磁体等，覆盖单晶硅制造、高速超导电

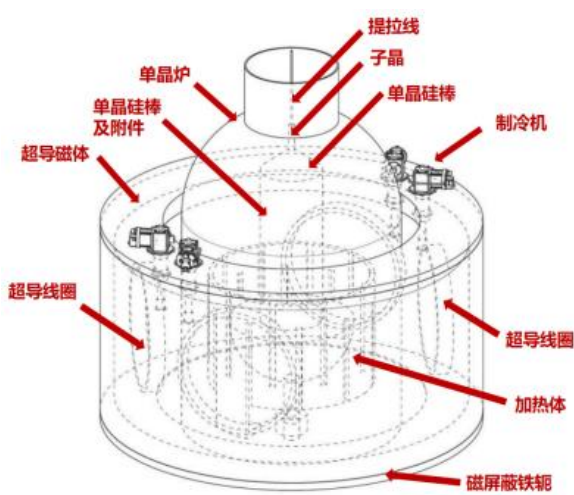
动磁悬浮、高温超导感应加热系统等多个领域，为兰州重离子加速器、上海光源、广东电网提供了核心的超导磁体，保障了国家重点工程建设，填补了国内部分超导磁体领域空白。西部超导也在积极扩大外贸市场影响力，量产的多类加速器超导磁体和传导冷却类型 MCZ 磁体，在满足国内大科学装置需求的同时批量出口美国和欧洲，实现中国首次向美国能源部稀有同位素加速器项目批量出口超导磁体，公司超导磁体市场前景广阔，客户优势已建立。

图52：低温超导产业链相关的企业业务布局

公司名称	NbTi		Nb ₃ Sn		超导磁体	超导设备	
	锭棒	线材	青铜法	内锡法		MRI	NMR
国内	西部超导	●	●	●	●		
	宁波健信				●	●	
	潍坊新力				●		
	成都奥泰				●	●	
	苏州安科					●	
	东软医疗					●	
	上海联影					●	
	鑫高益					●	
国外	美国 ATI	●					
	英国 Oxford		●	●	●		
	德国 Bruker		●	●	●		●
	英国 Luvata		●	●	●		
	日本 JASTEC		●	●	●		
	美国 GE				●	●	
	德国 Siemens				●	●	
	荷兰 Philips				●	●	
	日本 JEOL						●
	美国 Varian						●

数据来源：西部超导，东吴证券研究所

图53：西部超导磁控拉单晶设备的整体结构示意图



数据来源：西部超导，东吴证券研究所

6. 风险提示

- 1) 高温超导带材厂商扩产速度不及预期：高温超导磁体下游应用依赖于对超导带材的采买，带材的产能及价格很大程度上影响下游设备的价格和出货量，如果国内高温超导带材厂商产能扩产速度较慢，将在一定程度上影响高温超导磁体技术的产业化落地。
- 2) 超导磁体技术商业化应用拓展不及预期：当前商业化应用落地的超导磁控直拉单晶硅生长炉设备仍处于市场拓展阶段，若产品交付量及客户反馈不及预期，可能会对后续超导磁体技术的其他产品市场拓展造成一定阻力。
- 3) 超导磁体新应用技术研发进展不及预期：当前超导磁体技术在很多新领域的应用正处于研发阶段，如果研发进展不及预期，将影响超导技术的进一步商业化落地及后续的市场空间。

免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。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。

在法律许可的情况下，东吴证券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并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

东吴证券投资评级标准

投资评级基于分析师对报告发布日后 6 至 12 个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）），具体如下：

公司投资评级：

买入：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在 15%以上；

增持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 5%与 15%之间；

中性：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与 5%之间；

减持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来 6 个月内，行业指数相对强于基准 5%以上；

中性：预期未来 6 个月内，行业指数相对基准-5%与 5%；

减持：预期未来 6 个月内，行业指数相对弱于基准 5%以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所
苏州工业园区星阳街 5 号

邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>