

➤ **超导材料具有常规材料不具备的零电阻、完全抗磁性等宏观量子现象，是典型的量子材料。**超导体因为具有绝对的零电阻和完全的抗磁性两大特性，在所有涉及电和磁的领域都有超导体的用武之地，应用领域广泛，包括电子学、生物医学、科学工程、交通运输、电力等领域。

➤ **低温超导应用场景拓展。**NbTi 超导线材用量占整个超导材料市场的 90% 以上。目前已实现商业化的包括 NbTi (铌钛,  $T_c=9.5K$ ) 和 Nb<sub>3</sub>Sn (铌三锡,  $T_c=18k$ )，NbTi 超导线材由于具有优异的中低磁场超导性能、良好的机械性能和加工性能、价格优势，其用量占整个超导材料市场的 90% 以上。

➤ **高温超导技术突破，产业化蓄势待发。**高温超导临界温度较高，制冷成本更低，具有更加广阔的应用前景。高温超导广泛运用在超导电缆、超导感应加热等领域。2022 年，永鼎股份二代高温超导带材在磁感应加热设备中实现产业化供货，2023 年 4 月 20 日，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置在黑龙江中铝集团东北轻合金公司成功投运，高温超导材料产业化开始加速。

➤ **下游应用场景持续突破，超导产业星辰大海**

- MRI 带动超导材料需求释放。**超导磁体是 MRI 设备中产生主磁场的核心部件，1.5T 磁共振超导磁体成本占比在 30%~40%，3.0T 磁共振超导磁体成本占比在 50%~60%。我国 MRI 设备市场保有量持续增长，未来 3.0T MRI 设备的占比将进一步提高，带动低温超导线材需求释放。
- 大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近 20000 吨。**新一代环形正负电子对撞机及超级质子对撞机 (CEPC/SPPC) 磁场水平达到国际最高水平 20T、中国聚变工程试验堆 (CFETR) 磁场水平达到 15T、欧洲环形对撞机 (FCC) 磁场水平达到 15T，大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近 20000 吨。
- 高温超导感应加热技术产业化前景广阔。**高温超导感应加热装置是以超导体为核心的新型电磁感应加热设备，相较传统加热方式，吨料耗电可节约 120kWh。2023 年 4 月，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置于黑龙江投用，标志我国超导热加工技术在全球实现重大突破。联创超导预计 2024 年兆瓦级超导感应加热器达到年产能达 100 台。
- 二硼化镁 (MgB<sub>2</sub>) 超导材料有望逐步迈入商业化。**MgB<sub>2</sub> 可用于核磁共振成像 (MRI) 系统、特殊电缆、风力发电电机及空间系统驱动电机等领域。基于 MgB<sub>2</sub> 高温超导带材制备的开放式医用核磁共振成像系统有望投入使用，并逐步向商业化发展。

➤ **投资建议：**低温超导应用场景拓展，高温超导技术突破，产业化蓄势待发。建议重点关注**西部超导、东方钨业**。

➤ **风险提示：**低温超导原材料波动风险，高温超导商业化进程不及预期。

#### 重点公司盈利预测、估值与评级

代码	简称	股价 (元)	EPS (元)			PE (倍)			评级
			2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E	
688122.SH	西部超导	48.83	1.66	2.06	2.49	29	24	20	推荐
000962.SZ	东方钨业	13.41	0.38	0.45	0.52	35	30	26	推荐

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；(注：股价为 2023 年 8 月 9 日收盘价)

## 推荐

维持评级



**分析师 邱祖学**

执业证书：S0100521120001

邮箱：qiuзuxue@mszq.com

**研究助理 孙二春**

执业证书：S0100121120036

邮箱：sunerchun@mszq.com

**研究助理 李挺**

执业证书：S0100122090040

邮箱：liting@mszq.com

#### 相关研究

- 有色金属周报 20230806：政策利好持续释放，工业金属价格仍处上行趋势-2023/08/06
- 有色金属周报 20230730：美联储加息或进入尾声，中央政治局会议释放政策利好-2023/07/30
- 有色 2023Q2 基金持仓分析：持仓环比下滑，加息尾声商品价格迎转机-2023/07/26
- 有色金属周报 20230722：议息前夕金属价格承压，国内政策预期强烈-2023/07/22
- 有色金属周报 20230716：加息预期边际放松，金属价格整体上行-2023/07/16

# 目录

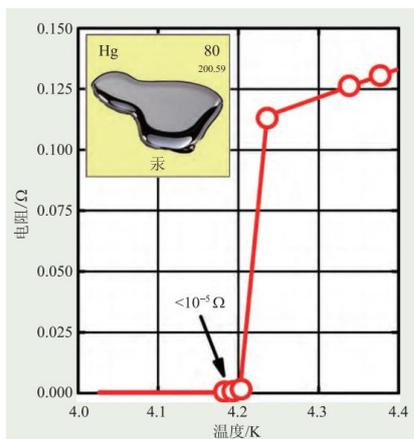
<b>1 超导材料是典型的量子材料</b>	<b>3</b>
1.1 超导介绍：基本特性，理论发展与应用领域	3
1.2 我国超导行业发展现状	8
<b>2 低温超导应用场景拓展，高温超导产业化蓄势待发</b>	<b>11</b>
2.1 低温超导应用场景拓展	12
2.2 高温超导技术突破，产业化蓄势待发	14
<b>3 下游应用场景持续突破，超导产业星辰大海</b>	<b>19</b>
3.1 MRI 带动超导材料需求释放	19
3.2 超导在核聚变领域发挥重要作用	24
3.3 射频超导腔是粒子加速器关键部件	32
3.4 超导在 MCZ 应用逐步放量	39
3.5 高温超导感应加热技术产业化前景广阔	42
3.6 超导在电力领域产业化应用曙光初现	46
3.7 超导在高速电动悬浮领域应用前景可期	50
3.8 二硼化镁 (MgB <sub>2</sub> ) 超导材料有望逐步迈入商业化	54
<b>4 投资建议</b>	<b>57</b>
4.1 行业投资建议	57
4.2 重点公司	58
<b>5 风险提示</b>	<b>61</b>
<b>插图目录</b>	<b>62</b>
<b>表格目录</b>	<b>63</b>

# 1 超导材料是典型的量子材料

## 1.1 超导介绍：基本特性，理论发展与应用领域

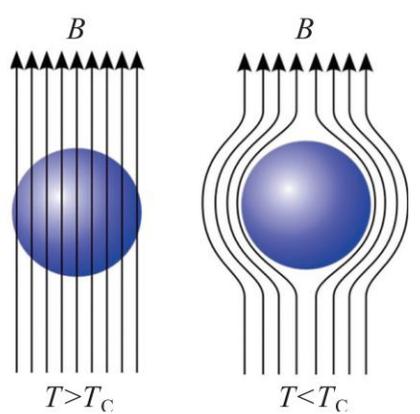
**超导体的三大基本特性：零电阻，完全抗磁性，量子隧穿效应。**超导，全称超导电性，指导体在某一温度下，电阻为零的状态。1911年荷兰物理学家 H·卡茂林·昂内斯发现汞在温度降至 4.2K 附近时突然进入一种新状态，其电阻小到实际上测不出来，他把汞的这一新状态称为超导态。1933年，荷兰的迈斯纳和奥森菲尔德共同发现了超导体的另一个重要的性质——完全抗磁性。完全抗磁性是指将超导体把原来处于体内的磁场排挤出去，使其内部的磁感应强度为零。1962年，约瑟夫森 (Brian D. Josephson) 预言，在薄绝缘层隔开的两种超导体之间有电流通过，即有“电子对”能“穿过”薄绝缘层 (量子隧穿)，而超导结上并不出现电压，这个预言随后被证实，这一现象被称为量子隧穿效应。

图1：超导体的零电阻现象



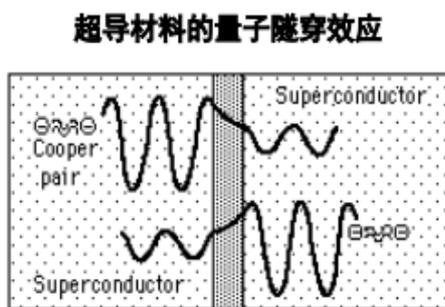
资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

图2：超导体的完全抗磁性



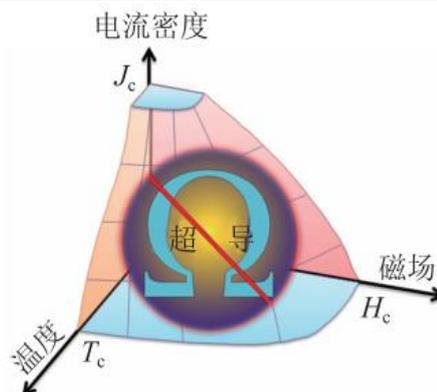
资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

图3：超导体的量子隧穿效应



资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

图4：超导的临界参数和临界界面



资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

超导材料具有常规材料不具备的零电阻、完全抗磁性等宏观量子现象，是典型的量子材料。超导材料的探索主要经历了几个阶段：1911~1986年，是低温超导材料发展阶段，1986年发现铜氧化物高温超导体，2021年发现临界转变温度为39K的金属化合物MgB<sub>2</sub>超导体，2008年发现铁基超导体。此外，自从超导材料被发现以来，人们就没有停止过对“室温超导”的向往与探索。

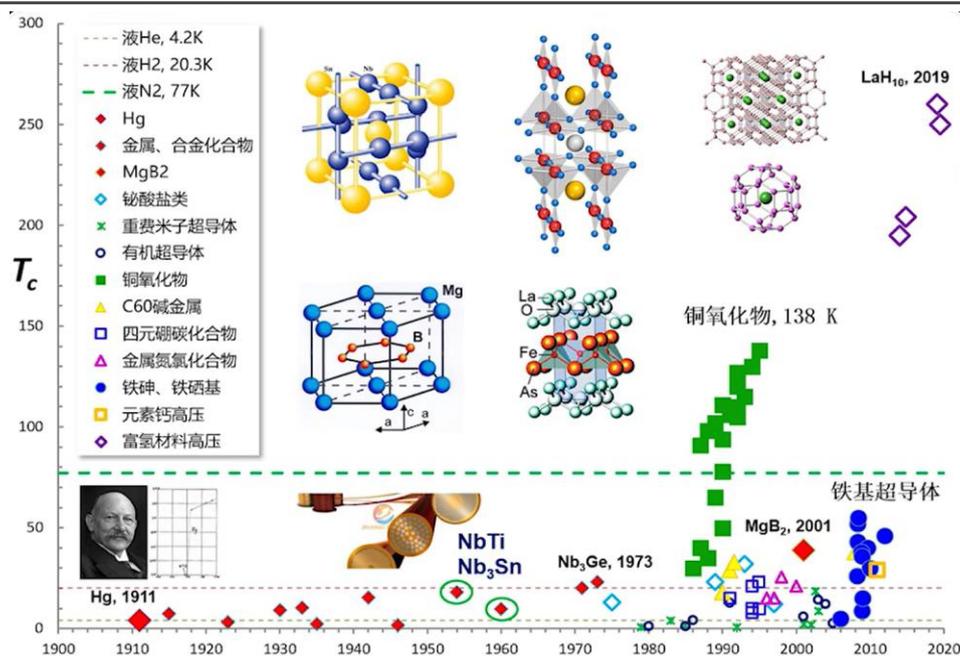
图5：周期表中具有超导性的化学元素及其转变温度 T<sub>c</sub>

H ?	s-d																s-p						He
Li 20 48 GPa	Be 0.026	元素 T <sub>c</sub> [K] 高压																B 11 250 GPa	C 4 8 GPa	N 0.6	O 120 GPa	F	Ne
Na	Mg																	Al 1.19	Si 8.5 12 GPa	P 6 17 GPa	S 17 160 GPa	Cl	Ar
K	Ca 25 161 GPa	Sc 0.3 21 GPa	Ti 0.4	V 5.3	Cr	Mn	Fe 2 21 GPa	Co	Ni	Cu	Zn 0.9	Ga 1.1	Ge 5.4 11.5 GPa	As 2.7 24 GPa	Se 7 13 GPa	Br 1.4 150 GPa	Kr						
Rb	Sr 4 50 GPa	Y 2.8 15 GPa	Zr 0.6	Nb 9.2	Mo 0.92	Tc 7.8	Ru 0.5	Rh 0.0003	Pd	Ag	Cd 0.55	In 3.4	Sn 3.72	Sb 3.9 25 GPa	Te 7.5 35 GPa	I 1.2 25 GPa	Xe						
Cs	Ba 1.5 5 GPa	La 5 15 GPa	Hf 5.9	Ta 0.13	W 4.4	Re 0.01	Os 1.7	Ir 0.65	Pt 0.14	Au	Hg 4.15	Tl 2.39	Pb 7.2	Bi 8.5 9 GPa	Po	At	Rn						
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn												
s-f		Ce 1.7 5 GPa	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu 1.1 18 GPa								
		Th 1.4	Pa 1.4	U 1.8	Np 0.075	Pu	Am 0.8	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

蓝色部分：常压下的超导元素；青色部分：在高压状态呈现超导性质。

资料来源：马行伟《超导材料科学与技术》，民生证券研究院

图6：超导材料的探索历程



资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

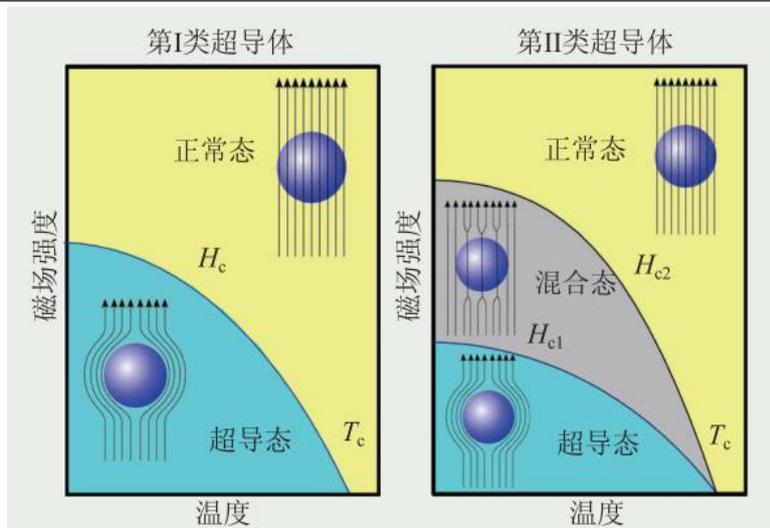
超导最常见被分类为超温超导，高温超导。超导体的分类没有统一的标准，最常见的分类方法是按临界温度划分为低温超导，高温超导。超导物理中将临界温度在液氮温区(4.2K)的超导体称为低温超导体，也称为常规超导体，譬如目前商业化的 NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn；将临界温度在液氮温区(77K)的超导体称为高温超导体，譬如 Y-Ba-Cu-O 超导体。

表1：超导材料分类

分类依据	具体分类	描述
临界温度	低温超导	临界温度在液氮温区(4.2K)
	高温超导	临界温度在液氮温区(77K)
化学成分	金属超导	元素、合金、化合物等
	超导陶瓷	铜基氧化物、铁基化合物
	有机超导	ClO <sub>4</sub> 、PF <sub>6</sub> 、AsF <sub>6</sub> 等
	绝缘超导	SiC、金刚石、石墨烯等
迈斯纳效应	第 I 类超导体	一个临界磁场：在常温下具有良好导电性的纯金属，如 Al、Zn、Ga、Ge、Sn、In 等
	第 II 类超导体	两个临界磁场：下临界场 H <sub>c1</sub> 和上临界场 H <sub>c2</sub> 。除金属元素 V 和 Nb 外，第 II 类超导体主要包括金属化合物及其合金，以及陶瓷超导体

资料来源：邹芹等《超导材料的研究进展及应用》，民生证券研究院

图7：超导体的分类：第 I 类超导体和第 II 类超导体

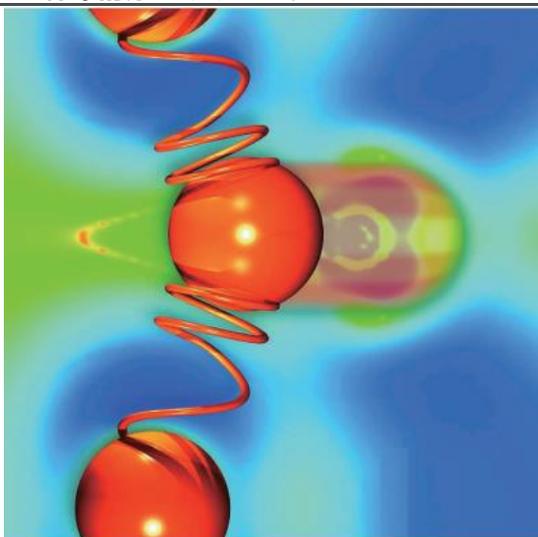


资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

超导现象是宏观量子效应。20 世纪初期，许多顶级的理论物理学家都试图从量子力学基础上理解超导电性，但最终并没有获得成功，直到超导发现近 50 年后，超导微观理论才被建立。在最初对超导电性的认识过程中，唯象理论起到了非常重

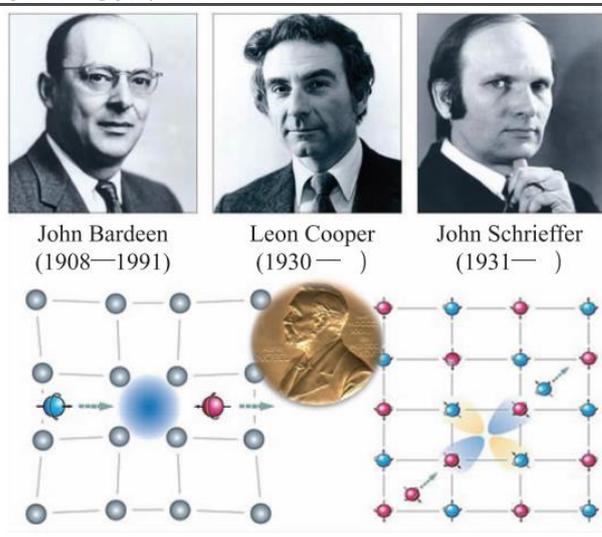
要的作用。其中最著名的是前苏联物理学家金茨堡 (Ginzburg) 和朗道 (Landau) 于 1950 年建立的金茨堡-朗道理论 (简称 G-L 理论)。随后, 1957 年美国科学家巴丁 (J.Bardeen)、库珀 (L.N.Cooper) 和施里弗 (J.R.Schrieffer) 成功建立了常规金属超导体的微观理论, 简称 BCS 理论, 它把超导现象看作是**宏观量子效应**, 成功地解释了金属或合金超导体的超导电性微观机理。**BCS 理论的核心思想在于: 两个动量相反、自旋相反的电子, 可以通过交换原子晶格振动量子——声子而产生间接吸引相互作用, 从而组成具有能隙的低能稳定态——超导态。**但时至今日, 非常规超导微观机理, 仍然几乎是一片混乱和未知。

图8: 固体中的原子振动——声子



资料来源: 罗会仟《超导“小时代”》, 民生证券研究院

图9: 超导微观理论“BCS理论”



资料来源: 罗会仟《超导“小时代”》, 民生证券研究院

**在应用领域方面**, 超导体因为具有绝对的零电阻和完全的抗磁性两大特性, 在所有涉及电和磁的领域都有超导体的用武之地, 应用领域广泛, 包括电子学、生物医学、科学工程、交通运输、电力等领域。

表2: 超导体的应用领域

应用领域	介绍
电子学	超导量子干涉器 (SQUID)、超导混频器、超导数字电路、超导粒子探测器
生物医学	超导核磁共振成像装置 (MRI) 和核磁共振谱仪 (NMR)
科学工程和实验室	高能加速器、核聚变装置
交通运输	磁悬浮列车
电力	超导电缆、超导限流器、超导储能装置和超导电机等

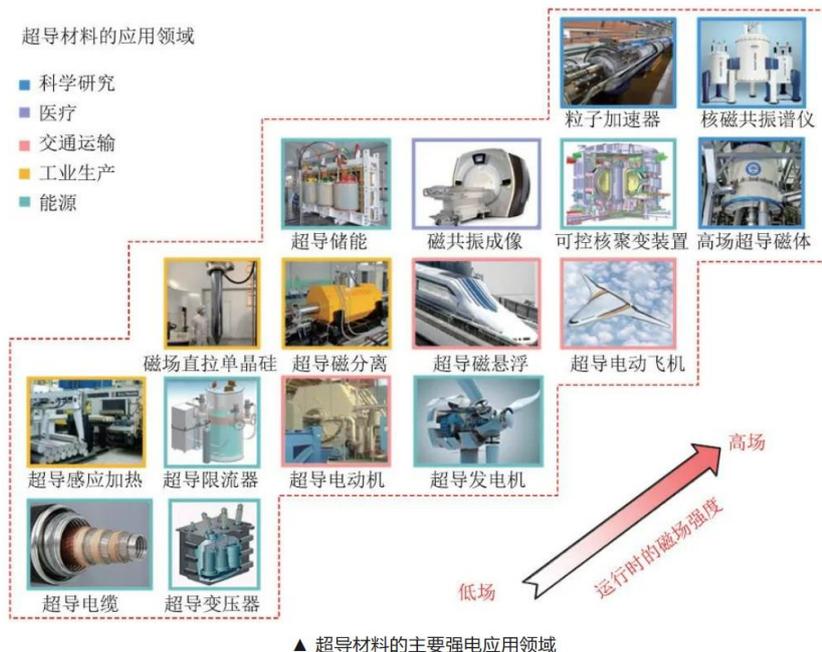
资料来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 民生证券研究院

图10：超导材料及其应用领域

	研究方向	应用领域	说明	
电工学应用	超导电力技术	超导电力电缆	高效大容量电力输送	基于零电阻、高密度载流特性、正常态-超导态转变特性及完全抗磁性的电工学应用
		超导限流器	输电网的安全性稳定性	
		超导储能系统	电力质量调节和电网稳定性	
		超导变压器	高效大容量电力变压器	
		超导电动机	船舶电力推进	
	超导发电机	大型发电机和同步调相机		
	超导磁体技术	强磁场磁体	粒子物理和核物理类的大科学工程、核磁共振、磁分离技术、磁性扫雷技术、高性能的材料制备、作物育种等	
磁悬浮技术		磁悬浮列车和磁悬浮推进、飞轮、轴承和高精度陀螺仪等		
电子学应用	微波应用与单光子探测	滤波器	微波通信	基于零电阻特性的电子学应用
		谐振器	微波通信	
		延迟线	微波通信	
		单光子探测器	精密测量	
	结型器件应用	量子干涉仪	用于微弱信号检测，如脑磁、心磁、大地探测、无损检测等	基于约瑟夫森效应的电子学应用
		超导芯片	低能耗超级计算机	
		超导Qubit	超导量子计算机	
		高频应用	THz高频电磁波的发射与接收	

资料来源：肖立业等《超导材料及其应用现状与发展前景》，民生证券研究院

图11：超导材料主要强电运用领域



资料来源：马行伟《超导材料科学与技术》，民生证券研究院

**超导材料大规模应用受到多重限制。**纵然超导应用潜力巨大，但超导材料的实现有严格的条件。限制超导应用有三个临界参数：临界温度、临界磁场和临界电流密度，这意味着超导电性必须在足够低的温度、不太高的磁场和不特别大的电流密度下才能实现。一旦突破某个临界参数，材料有可能瞬间从零电阻变成有电阻的状态，从而失去超导性能。三个临界参数中后两者决定了它的应用场景范围，而临界温度则是应用的最大瓶颈。因为低温就意味着在应用超导体的同时，还面临着高昂的制冷成本。因此，科学家们在研究超导的过程中，一直在努力提高超导材料的临界温度，其中“三重天花板”是重点突破的目标。

**表3：三重天花板介绍**

分类	超导温度	介绍
第一重天花板	40K	40K 又称“麦克米兰极限”，1987 年因在 Y-Ba-Cu-O 体系发现 93 K 的超导电性，第一重天花板被突破
第二重天花板	77K	77K 又被称为“液氮沸点”，1987 年因在 Y-Ba-Cu-O 体系发现 93 K 的超导电性，第二重天花板被突破
第三重天花板	300K	300K 在凝聚态物理学中又被定义为室温，目前仍未被突破

资料来源：中国科学院物理研究所，民生证券研究院

## 1.2 我国超导行业发展现状

**在国际合作方面**，中国于 2003 年 2 月 18 日宣布作为全权独立成员加入 ITER 计划。ITER 计划是目前全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一，其原理是利用磁场对等离子体进行约束，模拟太阳的核聚变反应产生能量并实现可控利用，俗称“人造太阳”。ITER 计划需要采用 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材制造超导磁体，线材制造任务由各参与国承担。2003 年我国政府决定参加 ITER 计划时，国内尚无企业具备 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材生产能力，迫切需要开展超导线材产业化。到目前，我国已经能生产 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材和 NbTi 超导线材并交付 ITER 计划，产品性能获得业界高度肯定。

**在鼓励产业发展方面**，我国超导行业的发展趋势将朝提高性能、降低成本，功能集成化的方向发展。为了鼓励和规范着行业健康有序发展，我国政府先后出台了一系列政策对超导产业予以支持。

**表4：超导材料行业相关政策**

文件名称	时间	相关内容
《“十四五”原材料工业发展规划》	2021 年	实施前沿材料前瞻布局行动，支持科研单位联合企业，把握新材料技术与信息技术、纳米技术、智能技术等融合发展趋势，发展超导材料、智能仿生、增材制造材料等，推动新的主干材料体系化发展，强化应用领域的支持和引导
《推动首都高质量发展标准体系建设实施方案》	2020 年	鼓励制定石墨烯等低维材料、高性能纳米材料、光电子材料、量子材料、新型超导材料、超材料、增材制造材料等前沿技术标准。突破石墨烯产业化应用技术，拓展纳米材料在光电子、新能源、生物医药等领域应用范围

《“十三五”材料领域科技创新专项规划》	2017年	以超导材料、智能/仿生/超材料、极端环境材料等前沿新材料为突破口，抢占材料前沿制高点
《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》	2017年	开展前沿性创新研究，加快研发氢能、石墨烯、超导材料等技术
《新材料产业发展指南》	2016年	加强超导材料基础研究、工程技术和产业化应用研究，积极开发新型低温超导材料，铌铜氧等高温超导材料，强磁场用高性能超导线材、低成本高温超导千米长线等，在电力输送、医疗器械等领域实现应用
《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》	2016年	开发智能材料、仿生材料、超材料、低成本增材制造材料和新型超导材料，积极参与国际热核聚变实验堆计划，不断完善全超导托卡马克核聚变实验装置等国家重大科技基础设施，开展实验堆概念设计、关键技术和重要部件研发

资料来源：共研网，民生证券研究院

**在超导标准化方面**，超导技术委员会（简称 IEC/TC90）于 1989 年 7 月正式成立，负责建立与超导材料和器件相关的国际标准。IEC/TC90 现有日、中、韩、美、俄、德、法、意等 10 个参加成员国，截止到目前，IEC/TC90 共颁布了 25 项超导国际标准，近来 IEC/TC90 推出国际标准的步伐明显加快，超导国际标准已经从术语和定义、超导特性测量方法，逐渐过渡到实用超导线和超导器件的一般性规范。我国主持的标准化项目包括铌钛和铌三锡复合超导导线扭距测量--国际标准和超导单光子探测器—暗记数率--国际标准。在国家标准方面，我国目前发布了 25 个超导国家标准。

**表5：超导领域中国国家标准清单**

序号	标准号	标准名称	实施日期
1	GB/T 17711-1999	铌钽铜氧（123 相）超导薄膜临界温度 $T_c$ 的直流电阻试验方法	1999-10-01
2	GB/T 18502-2018 (第二版)	临界电流测量 银和/或银合金包套 Bi-2212 和 Bi-2223 氧化物超导体的直流临界电流	2018-07-01
3	GB/T 21115-2007	块状氧化物超导体磁浮力的测量	2007-12-01
4	GB/T 21227-2021 (第二版)	交流损耗测量 多丝复合超导材料磁滞损耗的磁强计测量法	2021-12-01
5	GB/T 21546-2008	铌钛复合超导体的直流临界电流测量	2008-11-01
6	GB/T 22586-2018 (第二版)	电子学特性测量 超导体在微波频率下的表面电阻	2018-10-01
7	GB/T 22587-2017 (第二版)	基体与超导体体积比测量 铜-铌钛（Cu-NbTi）复合超导导线铜-超[体积]比的测量	2018-04-01
8	GB/T 25080-2022 (第二版)	超导用铌-钛（NbTi）合金棒坯和棒材规范	2023-05-01
9	GB/T 25897-2020 (第二版)	剩余电阻比测量 铌-钛（NbTi）和铌三锡（Nb <sub>3</sub> Sn）复合超导体剩余电阻比测量	2021-07-01
10	GB/T 28871-2012	铌三锡（Nb <sub>3</sub> Sn）复合超导体的直流临界电流测量	2013-02-15
11	GB/T 30109-2013	交流损耗测量 液氮温度下横向交变磁场中圆形截面超导导线总交流损耗的探测线圈测量	2014-05-15

## 法

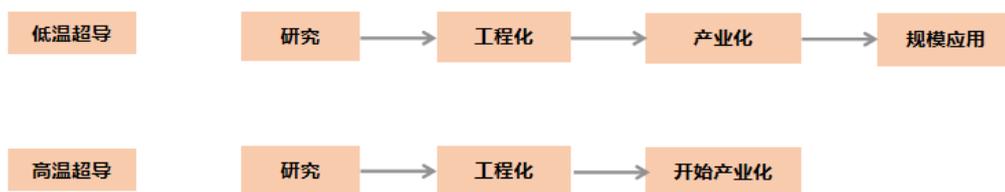
12	GB/T 30537-2014	块状高温超导体的测量 大晶粒氧化物超导体的俘获磁通密度	2014-11-01
13	GB/T 31522-2015	基体与超导体体积比测试 Nb <sub>3</sub> Sn 复合超导导线铜与非铜体积比	2015-12-01
14	GB/T 31527-2015	力学性能测量 NbTi/Cu 复合超导导线室温拉伸试验方法	2015-12-01
15	GB/T 31780-2015	临界温度测量 电阻法测复合超导体临界温度	2015-02-01
16	GB/T 33655-2017	超导供电装置 超导装置供电电流引线特性测试的一般要求	2015-02-01
17	GB/T 2900.100-2017 (第二版)	电工术语 超导电性	2018-05-01
18	GB/T 36611-2018	力学性能测量 Ag 和/或 Ag 合金包套 Bi-2223 和 Bi-2212 复合超导体室温拉伸试验方法	2019-01-01
19	GB/T 38841-2020	力学性能测量 反应后的 Nb <sub>3</sub> Sn 复合超导导线室温拉伸试验方法	2020-12-01
20	GB/T 38842-2020	实用超导线的分类和检测方法 一般特性和指南	2020-12-01
21	GB/T 39722-2020	超导电子器件 传感器和探测器通用规范	2021-07-01
22	GB/T 39843-2021	电子学特性测量 大面积超导膜的局域临界电流密度及其分布	2021-10-01
23	GB/T 39843-2021	实用超导导线 铌-钛 (NbTi) 与铌三锡 (Nb <sub>3</sub> Sn) 复合超导体的扭距测量方法	2021-10-01
24	GB/T 41640-2022	临界电流测量 第二代高温超导体长带临界电流及其沿长度方向均匀性测量	2023-05-01
25	GB/T 41641-2022	力学性能测量 REBCO 带材室温拉伸试验方法	2023-05-01

资料来源：全国超导标准化技术委员会，民生证券研究院

## 2 低温超导应用场景拓展，高温超导产业化蓄势待发

低温超导已经规模商业化，高温超导正逐步开始产业化。虽然已发现了上千种超导材料，但具有实用化前景的材料并不多。低温超导材料自 1965 年开始研究，目前低温超导材料 NbTi 与 Nb<sub>3</sub>Sn 已实现商业化。而高温超导材料自 1986 年进行研究，目前刚开始进行产业化。

图12：超导材料进展概况



资料来源：张平祥等《强电用超导材料的发展现状与展望》，民生证券研究院

图13：国内超导产业链



资料来源：西部超导公告，联创光电公告，永鼎股份公告，辰光医疗公告，张平祥等《强电用超导材料的发展现状与展望》，民生证券研究院

## 2.1 低温超导应用场景拓展

**NbTi 超导线材用量占整个超导材料市场的 90%以上。**低温超导根据成分分为金属低温超导材料、合金低温超导材料和化合物低温超导材料。低温超导材料在批量化加工技术、成本、使用稳定性方面的优势无可替代。目前已实现商业化的包括 NbTi (铌钛,  $T_c=9.5K$ ) 和  $Nb_3Sn$  (铌三锡,  $T_c=18k$ ) , NbTi 超导线材由于具有优异的中低磁场超导性能、良好的机械性能和加工性能、价格优势, 在实践中获得了大规模应用, 其用量占整个超导材料市场的 90%以上; 而  $Nb_3Sn$  的临界温度相对较高, 在 18K 左右, 该材料本身具有脆性, 力学加工性能较差, 临界电流对应变比较敏感, 且制造困难、造价相对较高。

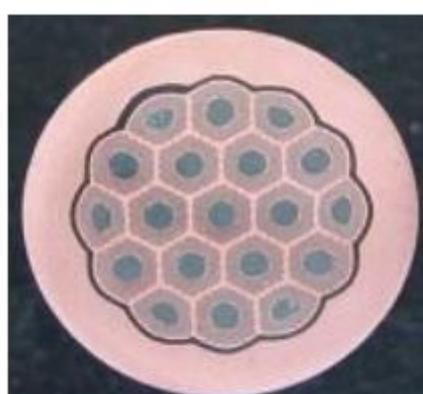
图14: NbTi 超导导线



NbTi 超导导线

资料来源: 西部超导招股说明书, 民生证券研究院

图15:  $Nb_3Sn$  超导导线



$Nb_3Sn$  超导导线

资料来源: 西部超导招股说明书, 民生证券研究院

表6: NbTi 超导合金棒材化学成分的质量分数要求

元素	质量分数
Al	$\leq 1 \times 10^{-4}$
C	$\leq 2 \times 10^{-4}$
Cr	$\leq 1 \times 10^{-4}$
Cu	$\leq 1 \times 10^{-4}$
H	$\leq 4.5 \times 10^{-5}$
Fe	$\leq 2 \times 10^{-4}$
Ni	$\leq 1 \times 10^{-4}$
N	$\leq 1.5 \times 10^{-4}$
O	$\leq 1 \times 10^{-3}$
Si	$\leq 1 \times 10^{-4}$
Ta	$\leq 2.5 \times 10^{-3}$
Ti	46%-48%

资料来源: 全国超导标准化技术委员会 (GB-T/25080-2022) , 民生证券研究院

**表7: NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线在各个领域的应用**

应用领域	介绍	所用材料
MRI	MRI 是生物磁自旋成像技术, 利用原子核自旋运动的特点, 经射频脉冲激发后产生信号, 最后获得图像	NbTi
MCZ	MCZ 技术的物理基础是通过磁场对导电硅流体的热对流形成抑制作用, 抑制单晶硅生长过程中杂质和缺陷的产生, 可实现高质量大尺寸单晶硅快速生长	NbTi
NMR	NMR 是利用不同元素原子核核磁共振效应的差异分析物质的磁学式分析仪器, 其广泛用于化合物的结构测定、定量分析和生物学研究等方面	主要是 Nb <sub>3</sub> Sn, 部分 NbTi
ITER 加速器	ITER 要把由氘、氚组成的上亿度高温等离子体约束在一个有限的空间里, 实现聚变反应 利用超导磁体可以在很小的激磁功率下产生强大的约束磁场, 可大大缩减加速器的尺寸	Nb <sub>3</sub> Sn, NbTi NbTi

资料来源: 前瞻产业研究院, 民生证券研究院

**图16: 低温超导产业链**


资料来源: 西部超导招股说明书, 民生证券研究院

**西部超导是全球唯一的铌钛锭棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。**低温超导产业链相关的行业包括超导锭棒、超导线材、超导磁体和超导设备。从全球来看, 有的公司专注某一领域, 有的公司横跨多个领域。西部超导是目前国内唯一低温超导线材商业化生产的企业, 也是目前全球唯一的铌钛锭棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。

图17：全球低温超导主要企业

公司名称	NbTi		Nb <sub>3</sub> 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						●

资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

## 2.2 高温超导技术突破，产业化蓄势待发

**高温超导材料产业化加速。**在高温超导材料中，由于铜氧化物超导材料的临界温度相比其他材料较高，制冷成本更低，因而具有更加广阔的应用前景。高温铜氧化物超导材料主要有 Bi-Sr-Ca-Cu-O 系、Y-Ba-Cu-O 系、Hg-Ba-Ca-Cu-O 系、Tl-Ba-Ca-Cu-O 系，但是 Hg 和 Tl 元素有毒，因此 Bi-Sr-Ca-Cu-O 系和 Y-Ba-Cu-O 系在实用化上更具有优势。以 Bi-Sr-Ca-Cu-O 为代表的第二代高温超导材料，和以 Y-Ba-Cu-O 为代表的第二代高温超导材料受到广泛关注。同时，MgB<sub>2</sub> (T<sub>c</sub>=40K) 材料，铁基超导材料等应用价值也在不断开拓。2022 年，永鼎股份二代高温超导带材在磁感应加热设备中实现产业化供货，2023 年 4 月 20 日，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置在黑龙江中铝集团东北轻合金公司成功投运，高温超导材料产业化开始加速。

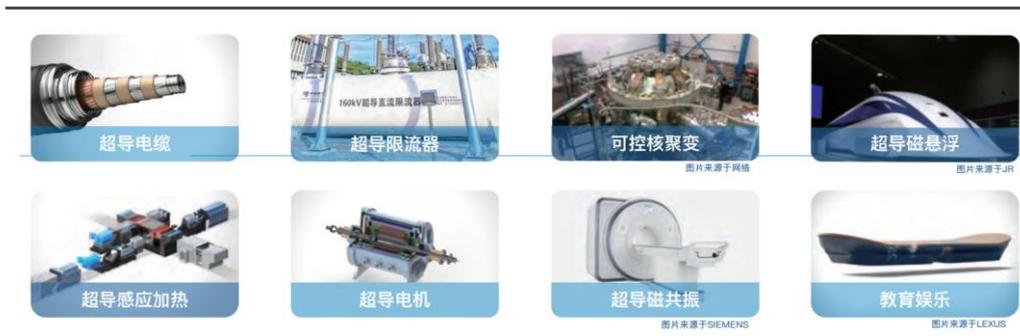
表8：高温超导与低温超导的比较

	临界温度	所用材料	下游应用
低温超导	NbTi:9.5K Nb <sub>3</sub> Sn:18K	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn	加速器磁体、核聚变工程用超导磁体、核磁共振，(MRI 和 NMR) 磁体、通用超导磁体

90K-110K	BSCCO (第一代高温超导材料)	电力电缆、磁悬浮、超导变压器、直流感应加热、大型加速器、可控核聚变用超导磁体等
高温超导 90K	YBCO (第二代高温超导材料)	
55K	铁基超导体	

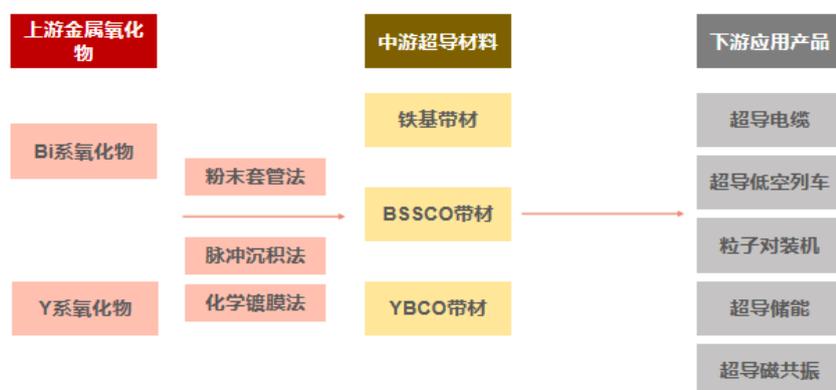
资料来源：肖立业等《超导材料及其应用现状与发展前景》，民生证券研究院

图18：二代高温超导应用领域



资料来源：上海超导官网，民生证券研究院

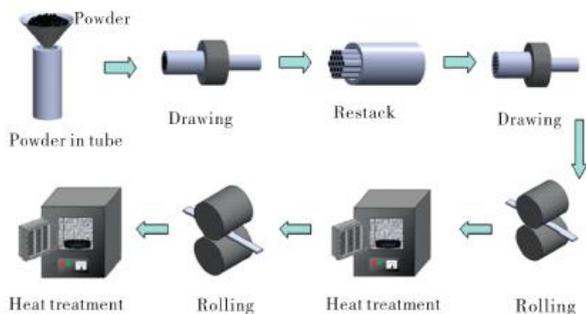
图19：高温超导行业产业链



资料来源：上海超导官网，新材料智库等公开资料，民生证券研究院

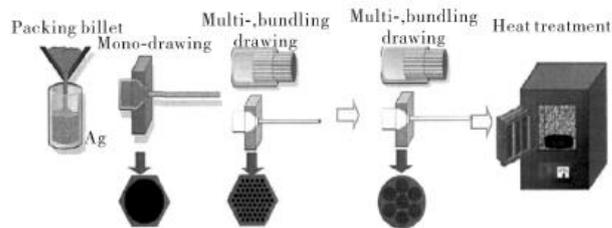
**第一代高温超导材料主要通过挤压力获得超导电性。** Bi 系超导材料主要的应用材料有 Bi-2212 线材、Bi-2212 薄膜、Bi-2223 带材。在制备 Bi-2223 带材的轧制工艺过程中，轧制压力的作用迫使 Bi-2223 晶粒发生转向，从而获得良好的超导电性，而在制备 Bi-2212 线材的挤压工艺中，也是通过挤压力的作用使 Bi-2212 晶粒发生转向，获得超导电性。目前常用于制备 Bi-2212/Bi-2223 原料粉末的工艺方法主要有喷雾热分解法、共沉淀法、固相反应法。

图20: Bi-2223 带材制备工艺示意图



资料来源: 郑贝贝等《国内 Bi 系高温超导材料制备工艺研究进展》, 民生证券研究院

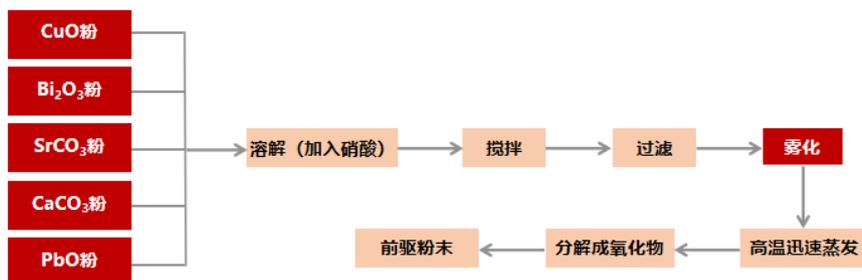
图21: Bi-2212 带材制备工艺示意图



资料来源: 郑贝贝等《国内 Bi 系高温超导材料制备工艺研究进展》, 民生证券研究院

**喷雾分解法**是通过将硝酸和原料粉末充分混合并进行溶解, 在过滤不溶物后将溶液雾化成液滴, 将液滴置于 600--900℃ 高温环境下, 使之迅速蒸发并分解形成氧化物, 最后制备成前驱粉末。

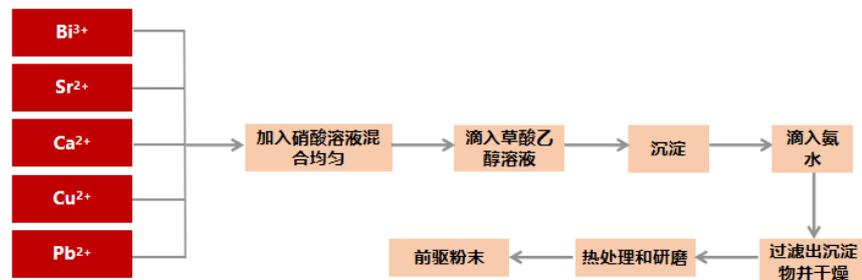
图22: 喷雾分解法



资料来源: 郑贝贝等《国内 Bi 系高温超导材料制备工艺研究进展》, 民生证券研究院

**共沉淀法**是按比例配置硝酸溶液, 并将金属离子滴入草酸乙醇溶液后进行沉淀, 接着滴入氨水调节 pH 值。最后, 过滤出沉淀物并干燥处理后得到草酸盐粉末, 对粉末进行多次热处理和研磨制备成前驱粉末。

图23: 共沉淀法



资料来源: 郑贝贝等《国内 Bi 系高温超导材料制备工艺研究进展》, 民生证券研究院

**固相反应法**是将各种原料按照所需的比例配制后,进行机械球磨混合,再热处理锻烧,然后重复研磨和锻烧。

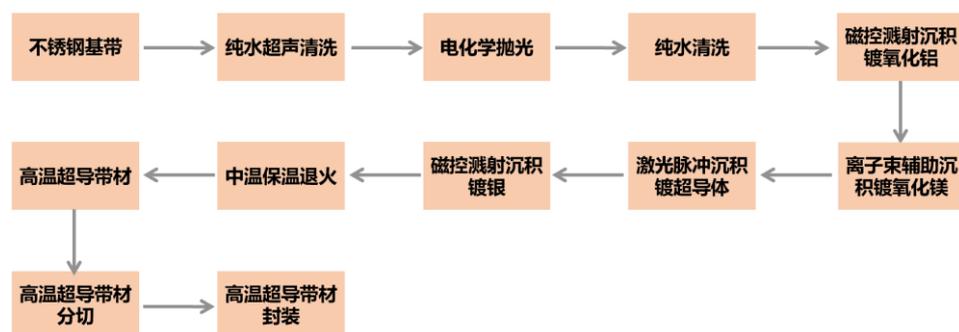
**表9: 第一代高温超导带材原料的生产工艺比较**

制备方法	优点	缺点
喷雾分解法	粉末混合均匀性高, 颗粒度较细, 适合大批量制备	不能用于制备表面光滑的薄膜材料
共沉淀法	所需设备简单, 适合小批量制备	粉末的混合均匀性一般, 颗粒度较大, 制备过程受研磨的影响较大, 工艺流程也较为复杂
固相反应法	工艺简单, 成本低廉, 适合大批量生产	颗粒大小不均匀, 影响成品的性能

资料来源: 郑贝贝等《国内 Bi 系高温超导材料制备工艺研究进展》, 民生证券研究院

**第二代高温超导带材生产工艺方面**, 一些发达国家先后突破了第二代高温超导带材的长线制备技术, 公里级带材的生产工艺已日渐成熟。

**图24: 第二代高温超导带材生产工艺**



资料来源: 上海超导环评报告, 民生证券研究院

**第二代高温超导带材 YBCO 成为行业重点发展方向。**第二代高温超导带材及应用产品将在许多重要领域, 如绿色能源、智能电网、军事工业、医疗器械、交通及科学研究等领域被大力推广应用, 目前我国高温超导材料大规模应用的瓶颈问题是材料价格过高, 需要进一步提高技术成熟度, 提升产业化能力, 并改善材料综合性能, 从而提高材料性价比。

**表10: 高温超导材料及其应用**

超导材料	应用
YBCO	超导薄膜/涂层导体
Bi-2212	圆线
Bi-2223	高温低场
MgB <sub>2</sub>	低温中低场

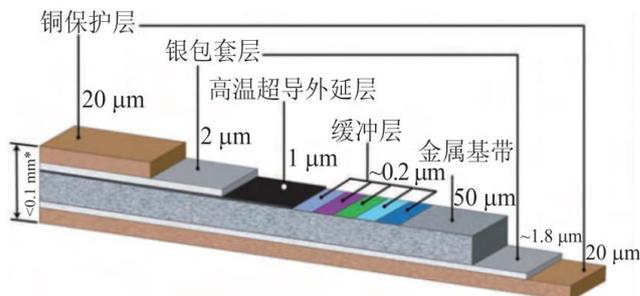
资料来源: 张平祥等《强电用超导材料的发展现状与展望》, 民生证券研究院

图25：二代高温超导带材



资料来源：永鼎股份公告，民生证券研究院

图26：二代高温超导带材结构



资料来源：罗会仟《超导“小时代”》，民生证券研究院

图27：二代高温超导带材参数

应用领域	强电应用	3mm	超导带宽度	等级	Ic(77K,s.f.)	
			常规	93-130 A		
			高性能	130-155 A		
		4mm	常规	114-160 A		
			高性能	160-190 A		
			超高性能	190-210 A		
	高场应用	3.3mm	超导带宽度	等级	Ic(4.2K,10T)	
			常规	217-260 A		
			高性能	260-303 A		
		4mm	常规	266-320 A		
			高性能	320-372 A		
			超高性能	372-425 A		
10mm	常规	700-840 A				
	高性能	840-980 A				
	超高性能	980-1120 A				
可选配参数	基带厚度/材料	30μm 哈氏合金				
		50μm 哈氏合金				
	单根长度	100m ~ 1000m 可选				
	后处理	镀铜	镀铜可选厚度	带材总厚度	带材总宽度	
			5μm*2	65μm±10%	3mm、4mm、10mm	
			10μm*2	75μm±10%		
		20μm*2	95μm±10%			
		紫铜封装	紫铜可选厚度	带材总厚度	带材总宽度	
			75μm*2	205μm±10%	4.8mm、6mm、12mm	
	100μm*2		255μm±10%			
不锈钢封装	不锈钢可选厚度	带材总厚度	带材总宽度			
80μm*2	215μm±10%	4.8mm、6mm、12mm				
基本性能		镀铜	紫铜封装	不锈钢封装		
	接头电阻率	30nΩ·cm <sup>2</sup>				
	抗拉形变	0.40%				
	临界拉应力强度 (77 K/Mpa)	>100Mpa	>400Mpa	>800Mpa		
	最小转弯直径 (mm)	11-15	15-20			

资料来源：上海超导官网，民生证券研究院

## 3 下游应用场景持续突破，超导产业星辰大海

### 3.1 MRI 带动超导材料需求释放

磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, 简称 MRI) 通过对静磁场中的人体施加某种特定频率的射频脉冲, 使人体中的原子核 (主要是氢质子) 受到激励而发生磁共振现象, 在停止脉冲后, 原子核在弛豫过程中产生 MR 信号, 通过对 MR 信号的接收、空间编码和图像重建等处理过程, 最终处理成图像信息。

图28: MRI (磁共振成像仪)



注: 左图为 MRI 用超导材料, 中图为 MRI 扫描仪, 右图为头部成像

资料来源: 西部超导公告, 民生证券研究院

MRI 产业链括上游 MRI 设备原材料供应商, 中游 MRI 设备制造经销商和下游的 MRI 诊断及衍生服务机构。上游主要提供核磁共振设备基础的技术与材料, 上游行业的进步对核磁共振行业的发展至关重要。行业中游为核磁共振设备的生产与销售, 以 GE、飞利浦、西门子(合称"GPS")为首的外商品牌占据高场强的超导产品市场, 而国产品牌则以低场强的永磁系列产品的市场为主。行业下游则由需求方构成, 包括医疗机构、体检中心及独立影像中心。

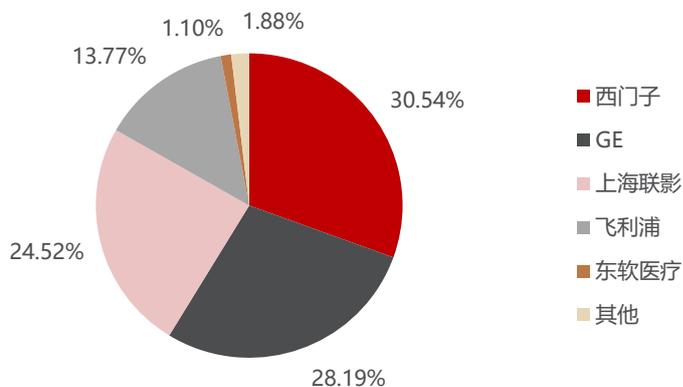
图29: MRI 行业产业链



资料来源: 辰光医疗招股说明书, 沙利文, 民生证券研究院

在竞争格局方面, 第一梯队主要以跨国医疗器械企业为主, 这些企业市场占有率高, 研发能力较强, 高端超导 MRI 市场基本上被 GE、飞利浦、西门子三家国际巨头垄断。第二梯队为我国本土企业, 包括成都上海联影、东软医疗等企业, 目前已实现 1.5T 和 3T 超导 MRI 的商业化生产。

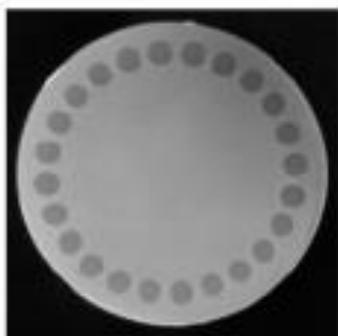
图30: 2022 年 MRI 设备各厂商销售份额



资料来源: 器械之家, 医招采, 民生证券研究院

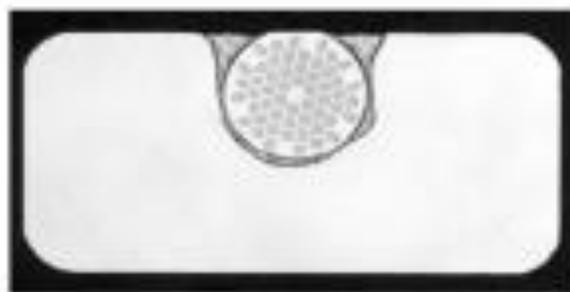
磁体是 MRI 设备中产生主磁场的核心部件，可保持在目标区域中的高磁场和高均匀度，核磁共振设备按磁体类型可分为永磁型 MRI 设备，常导型 MRI 设备和超导型 MRI 设备。按磁体产生静磁场的磁场强度大小可分为低场 (0.1T-0.5T) MRI 设备，中场 (0.6T-1T) MRI 设备，高场 (1.5T-2T) MRI 设备，以及超高场 (3T 及以上) MRI 设备，当前临床上所用的磁场强度为 1.5T。超导磁体通过超导线圈运行，磁场强度更强，稳定性更高，是当前市场主流技术。

图31: MRI 用超导材料 1



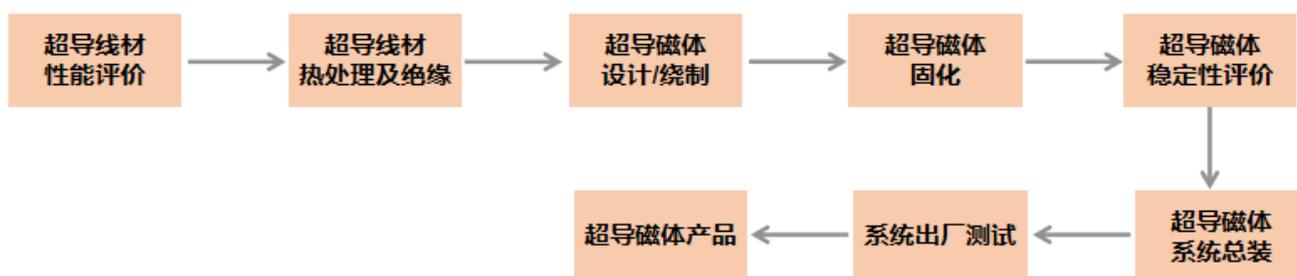
资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

图32: MRI 用超导材料 2



资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

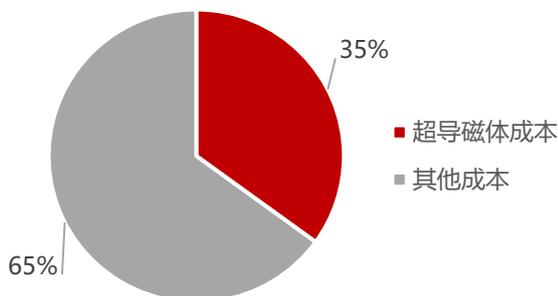
图33: 超导磁体生产流程图



资料来源：头豹研究院，沙利文，民生证券研究院

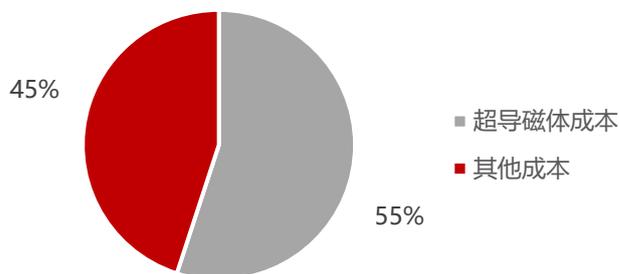
超导磁体作为磁共振的核心，其成本占总成本的很大一部分。根据曦合超导资料，1.5T 磁共振超导磁体成本占比在 30%~40%，3.0T 磁共振超导磁体的成本占比在 50%~60%，占总成本的一半以上。

图34: 1.5T 磁共振设备成本分布



资料来源: 曦合超导, 民生证券研究院

图35: 3.0T 磁共振设备成本分布



资料来源: 曦合超导, 民生证券研究院

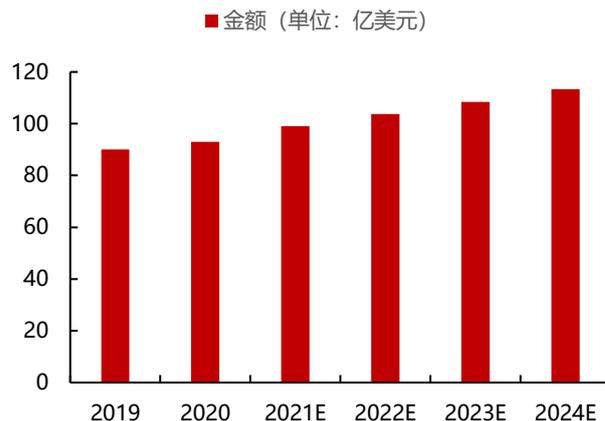
**MRI 设备需求快速增长。**根据联影医疗招股说明书, 中国 MRI 设备市场保有量近年来一直保持快速增长态势。2018 年, 日本、美国每百万人 MRI 人均保有量分别约为 55.2 台和 40.4 台, 同期中国每百万人 MRI 人均保有量约为 9.7 台, 我国当前人均 MRI 拥有量与发达国家的差距较大, 随着临床需求的持续增加, 中国成为全球增长速度最快的市场。2020 年, 中国 MRI 市场规模达 89.2 亿元, 预计 2030 年将增长至 244.2 亿元, 年复合增长率为 10.6%。

图36: 我国 MRI 设备市场规模 (单位: 亿元)



资料来源: 联影医疗招股说明书, 民生证券研究院

图37: 全球 MRI 设备市场规模 (单位: 亿美元)

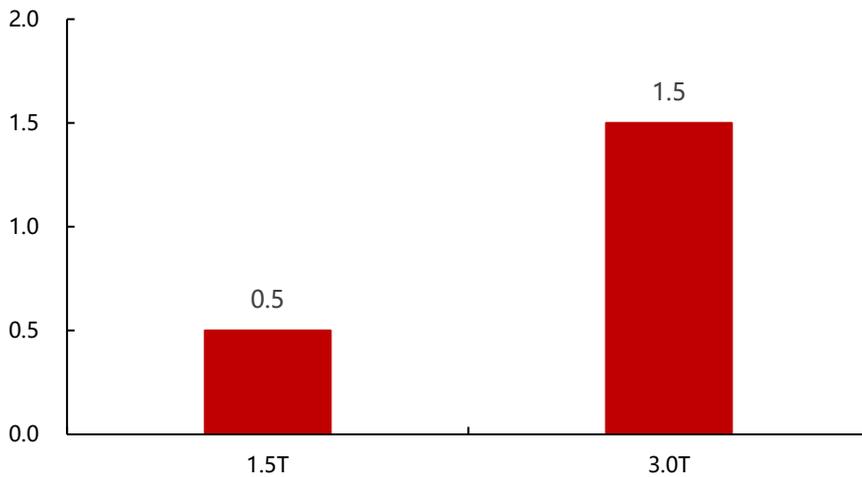


资料来源: 联影医疗招股说明书, 民生证券研究院

**MRI 用超导线材需求量不断增加。**目前, 国内 MRI 存量市场主要以 1.5T 和 3.0T 两种型号为主。其中, 1.5T MRI 因能够满足基本临床需求, 市场占比远高于 3.0T MRI。2020 年, 中国 1.5T MRI 设备保有量占比为 75.3%; 3.0T MRI 设备因产品价格高且采购需经政府批准, 保有量占比为 24.7%。根据西部超导的测算,

1.5T MRI 设备所需线材为 0.5 吨，3.0T MRI 设备所需线材为 1.5 吨。由于 1.5T MRI 仅满足基本临床需求，3.0T MRI 分辨率更高、检查更精细，因此，未来 3.0T MRI 设备的占比有望进一步提高，对超导线材的需求量亦会进一步增加。

图38：每台 MRI 设备所需超导线材（单位：吨）



资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

表11：超导线材需求测算（单位：吨）

项目	2020	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
MRI 新增台数	2346	2698	3103	3568	4103	4719
3.0T MRI	579	666	766	881	1013	1166
1.5T MRI	1767	2032	2336	2687	3090	3553
超导线材需求量 (吨)	1752.46	2015.33	2317.63	2665.28	3065.07	3524.83
3.0T MRI	869.19	999.57	1149.51	1321.93	1520.22	1748.26
1.5T MRI	883.27	1015.76	1168.12	1343.34	1544.84	1776.57

资料来源：西部超导公告，民生证券研究院

表12：行业内主要公司

	超导磁体	MRI
国内	西部超导、宁波建信、潍坊新力、成都奥泰	宁波健信、成都奥泰、苏州安科、东软医疗、上海联影、鑫高益
国外	英国 Oxford、德国 Bruker、日本 JASTEC、美国 GE、德国 Siemens、荷兰 Philips	美国 GE、德国 Siemens、荷兰 Philips

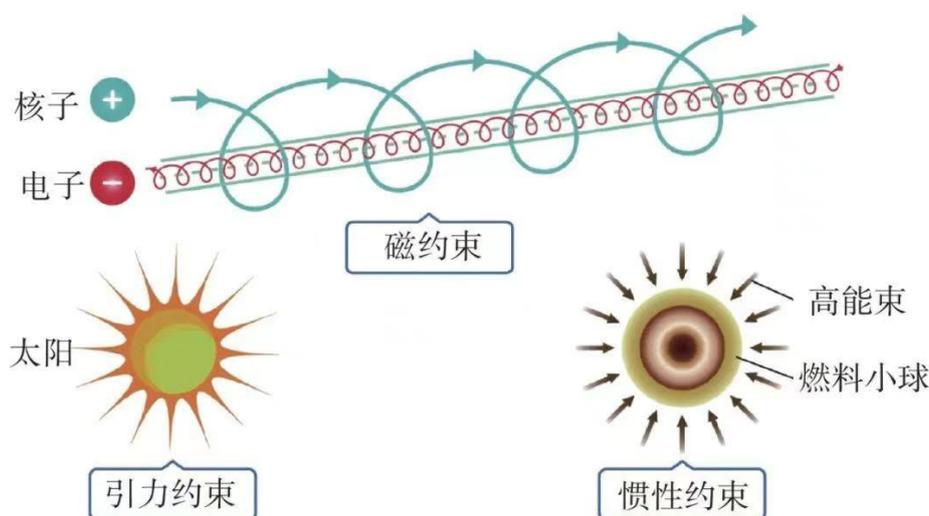
资料来源：西部超导招股说明书，民生证券研究院

## 3.2 超导在核聚变领域发挥重要作用

### 3.2.1 核聚变能产生方式

核能具有能量密度高、稳定可靠、清洁无污染等优点，是化石能源的最佳替代项。核能的利用分为核裂变能和核聚变能。尽管核裂变和核聚变都使用原子能，但这两个过程之间有关键的差别。相比核裂变能，核聚变能是具有清洁、安全、可持续等优点的终极能源。因此，许多国家的科研机构和技术公司为之持续研究，希望早日实现聚变能发电，但其挑战巨大，尚需解决众多科学和技术难题。目前实现可控聚变约束有三种途径，包括引力（重力）约束、惯性约束和磁约束。在三类约束方式中，引力约束无法在地球上实现，惯性约束也难以实现持续的聚变功率输出，因此磁约束核聚变是实现聚变能开发的有效途径。

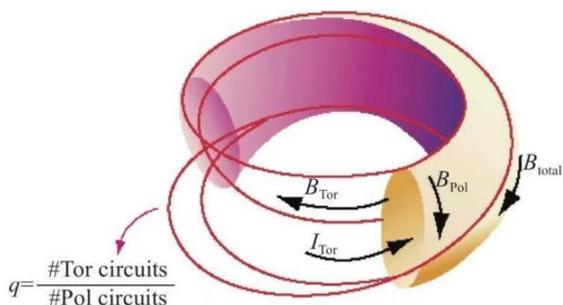
图39：核聚变的约束方式



资料来源：南方能源建设编辑部，民生证券研究院

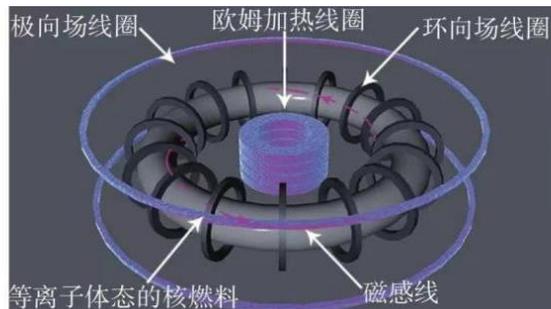
托卡马克是最有可能首先实现聚变能商业化的途径。磁约束是实现聚变能开发的有效途径，而在各种类型的磁约束聚变装置中，托卡马克以其优异的等离子体约束品质而备受重视。托卡马克，是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容容器。托卡马克的中央是一个环形的真空室，外面缠绕着线圈。在通电的时候托卡马克的内部会产生巨大的螺旋型磁场，将其中的等离子体加热到很高的温度，以达到核聚变的目的。

图40：托卡马克约束磁场示意图



资料来源：南方能源建设编辑部，民生证券研究院

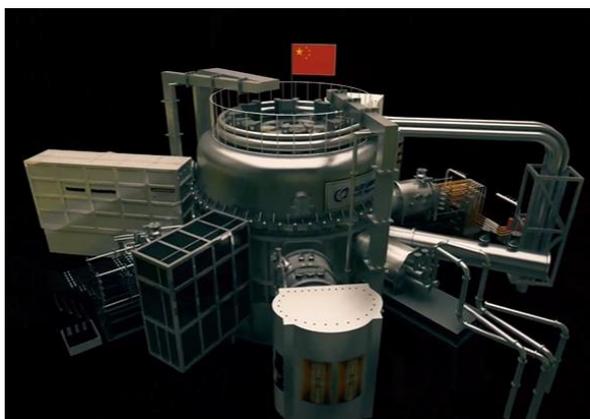
图41：托卡马克基本结构



资料来源：南方能源建设编辑部，民生证券研究院

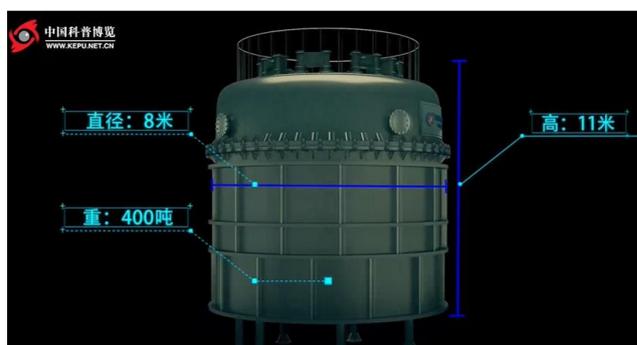
**中科院等离子体所自主研制并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST（东方超环），标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代。**由于常规超导托卡马克装置在长脉冲稳态运行方面有所缺陷，而全超导托卡马克装置具备开展长脉冲稳态实验运行能力，所以从常规装置向全超导装置发展势在必行。由中国科学院等离子体物理研究所(以下简称“中科院等离子体所”)承担建设的国家“九五”重大科学工程项目“EAST(原名 HT-7U)”超导托卡马克核聚变实验装置”，是一个拥有超导纵场磁体和超导极向场磁体系统的全超导大型非圆截面托卡马克装置。EAST 是由 Experimental (实验)、Advanced (先进)、Superconducting (超导)、Tokamak (托卡马克) 四个单词首字母拼写而成。2006 年，中科院等离子体所自主研制并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST（东方超环），标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代，向着实现稳态核聚变能源方向发展。

图42：EAST 装置



资料来源：中国科学院等离子体物理研究所，民生证券研究院

图43：EAST 装置主机部分



资料来源：中国科学院等离子体物理研究所，民生证券研究院

**表13: EAST 装置主要工程物理设计参数**

参数名称	性能指标
大半径	1.88m
小半径	0.45m
纵场	1.5-3.0T
等离子电流	1 MA
拉长比	$\kappa \leq 2$
三角形变	$\delta \leq 0.7$
可用磁通	$\Delta\Phi \approx 6.5 \text{ V}\cdot\text{s}$
低杂波	10 MW
中性束注入	8 MW
离子回旋	12 MW
电子回旋	4 MW

资料来源: 万宝年等《EAST 全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展》, 民生证券研究院

**EAST 超导磁体采用 CICC 超导体, 选用 NbTi 为超导材料。**CICC 超导体的稳定性受其股线的铜超比、超导缆的空隙率、各级子缆扭距、股线及子缆表面状态等因素的影响很大。从节约项目经费及 NbTi 超导体线的性价比等因素考虑, EAST 采用了原准备用于超导加速器的低铜超比超导体线。

**表14: EAST 超导体采用的超导体线主要性能参数**

参数名称	性能指标
股线直径	$\Phi 0.85\text{mm}$
股线临界电流 $I_c$	500A(在 4.5K,5T 条件下) 426A(在 4.5K,5.8T 条件下)
股线中 NbTi 超导丝数	8910
NbTi 超导丝径	6 $\mu\text{m}$
超导丝扭距	10mm
股线铜超比	1.38 : 1
RRR	>70

资料来源: 武松涛等《EAST 超导托卡马克装置中的大型超导体技术》, 民生证券研究院

### 3.2.2 超导材料在 CFETR 中的应用

**超导材料在中国聚变工程试验堆 (CFETR) 的线圈中发挥了重要的作用。**中国聚变工程实验堆 (CFETR), 是中国自主设计和研制并联合国际合作的重大科学工程, 也是我国聚变实用化研究的关键一步。虽然我国自 20 世纪 90 年代开始托卡马克研究, 并先后建成运行合肥超环(HT-7)、中国环流器二号(HL-2A)及东方超环(EAST)等装置。然而目前来看, 要填补未来商用聚变示范堆 (DEMO) 之间的技术

空白还有很大的差距,很多的工程技术难题也还没有解决。CFETR 将着力解决 ITER 与 DEMO 之间存在的物理与工程技术难题,为我国 2050 年前后独立自主建设聚变电站奠定坚实的基础。

图44: CFETR 效果图 1



资料来源:中国科学院等离子体物理研究所,民生证券研究院

图45: CFETR 效果图 2



资料来源:中国科学院等离子体物理研究所,民生证券研究院

图46: 中国磁约束聚变能发展技术路线图



资料来源:高翔等《CFETR 物理与工程研究进展》,民生证券研究院

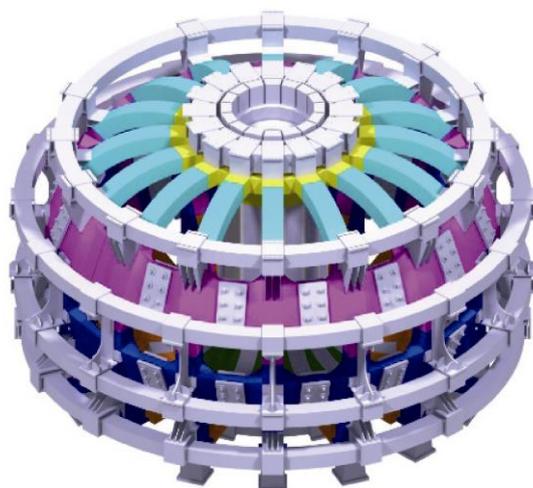
在物理设计方面,CFETR 同样采用全超导磁体集成方案,因此超导磁体系统是 CFETR 的核心部件之一,CFETR 的超导磁体系统主要由 16 组纵场 (Toroidal Field,TF) 磁体、8 组中心螺管 (Central Solenoid,CS) 磁体以及 6 组平衡场 (Poloidal Field,PF) 磁体等组成。其中,中心螺线管(CS)线圈是 CFETR 的重要组成部分之一。

表15: CFETR 中心螺线圈模型线圈主要参数

	Nb <sub>3</sub> Sn 线圈		NbTi 线圈		
	内	外	线圈 1	线圈 2	线圈 3
导体尺寸/mm×mm	49×49(Φ32.6)		51.9×51.9(Φ35.3)		
线圈匝间绝缘/mm	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
线圈对地绝缘/mm	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
径向匝数	4	4	10	10	10
轴向匝数	32	32	8	8	8
总匝数	120	120	80	80	80
线圈内半径/mm	740.6	971.3	1230.0	1230.0	1230.0
线圈外半径/mm	953.2	1179.5	1772.4	1772.4	1772.4
线圈高度/mm	1657.4	1657.4	433.4	433.4	433.4
电流/kA	47.65	47.65	47.65	47.65	47.65
最高磁场/T	12.00	8.42	6.10	6.10	6.10

资料来源: 尹大鹏等《CFETR 中心螺线圈超导模型线圈预紧机构的优化设计及分析》, 民生证券研究院

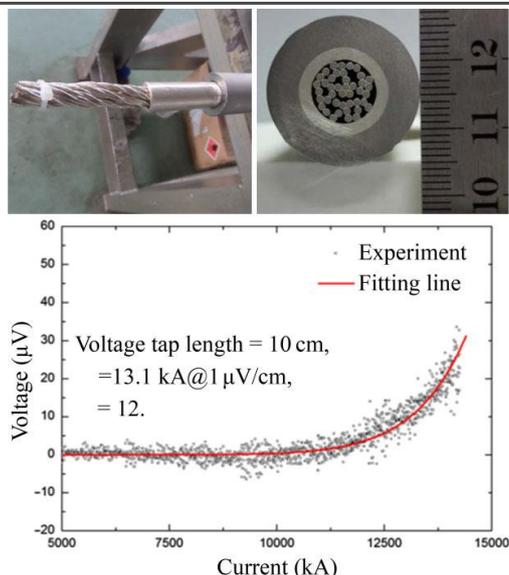
图47: CFETR 超导磁体系统


 资料来源: 张正硕等《中国聚变工程实验堆纵场超导磁体高性能 Nb<sub>3</sub>Sn CICC 导体稳定性分析》, 民生证券研究院

**未来线圈更有可能在高场区采用高温超导体, 在低场区采用低温超导体。**这是因为磁体系统在 CS 和 TF 线圈导体上产生的最高磁场可能达到 15T 以上, 此时使用 Nb<sub>3</sub>Sn 导体无法满足要求, 而随着高温超导材料技术的发展, 未来 CS 线圈可能在高场区采用 Bi-2212 高温超导体(工作在 10-30K 温度, 25-30T 磁场强度), 而在低场区采用 Nb<sub>3</sub>Sn 低温超导体。**在高场区的高温超导体进展方面**, 目前, 中国科学院等离子体物理研究所已设计制造了由 42 根 Bi-2212 超导绞制的高温超导圆形 CICC 导体, 并完成了临界电流测试, 该临界电流值比较低,

下一步需要发展高压 O<sub>2</sub> 氛围下的热处理技术，以提高 Bi-2212 高温超导导体的性能。

图48：Bi-2212 高温超导圆形导体实物图及其临界电流测试结果



资料来源：高翔等《CFETR 物理与工程研究进展》，民生证券研究院

### 3.2.3 超导材料在 ITER 中的应用

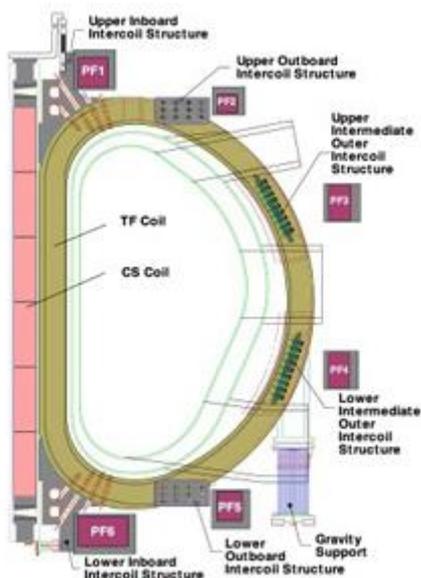
除了发展 EAST 和 CFETR，我国还积极参与国际大工程科学计划--ITER 计划。ITER 计划全称“国际热核实验堆”，于 1985 年确立。在上个世纪五十年代氢弹爆炸成功之后，人们就开始了聚变核电站的研制研究工作。最初的聚变研究是作为国家机密，每个国家各自进行研究。但是由于受控聚变的实现难度超乎寻常，超越了任何一个国家的承受能力。于是从 60 年代开始，世界各国开始谋求合作以进行人类聚变能的开发。在这种背景下，ITER 计划最终确立，并以建造一个可持续燃烧的托卡马克聚变实验堆为目标。目前合作承担 ITER 计划的七个成员是欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国，这七方包括了全世界主要的核国家和主要的亚洲国家。ITER 计划共需要超导线材 802 吨，其中我国西部超导承担了 208 吨的超导线材供应工作，于 2017 年全部交付，得到国际同行的高度评价。

表16：西部超导供应 ITER 中 208 吨超导线材（单位：吨）

分类	产量（单位：吨）
NbTi	173
Nb <sub>3</sub> Sn	35

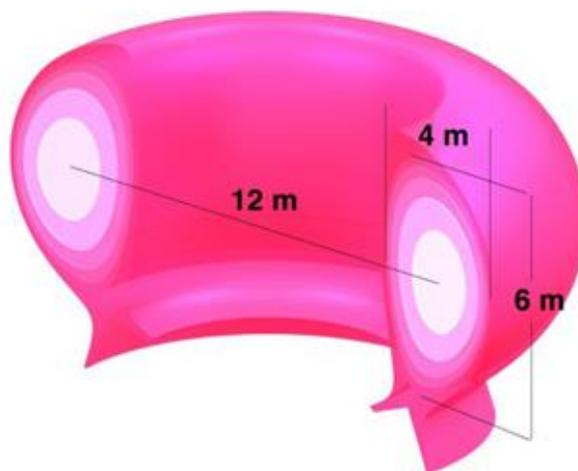
资料来源：张平祥等《强电用超导材料的发展现状与展望》，西部超导招股说明书，民生证券研究院

图49: ITER 结构图



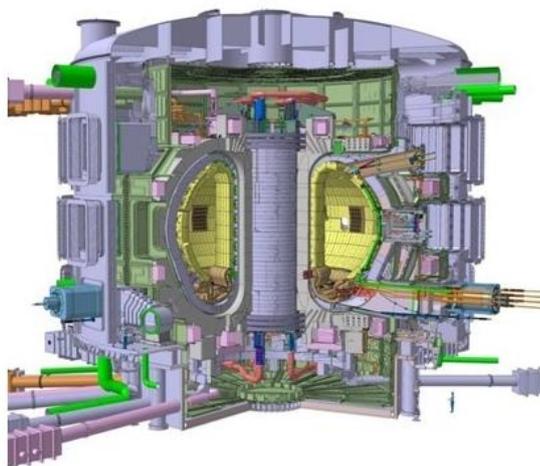
资料来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 民生证券研究院

图50: ITER 堆芯



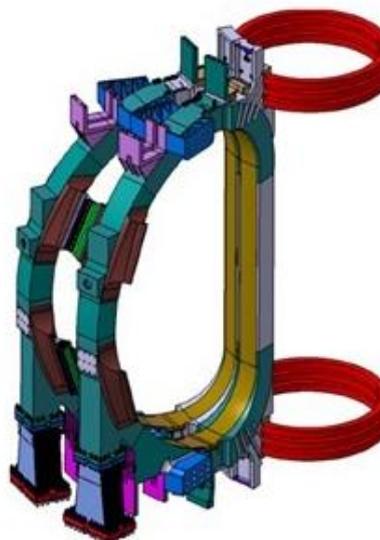
资料来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 民生证券研究院

图51: ITER 聚变实验堆



资料来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 民生证券研究院

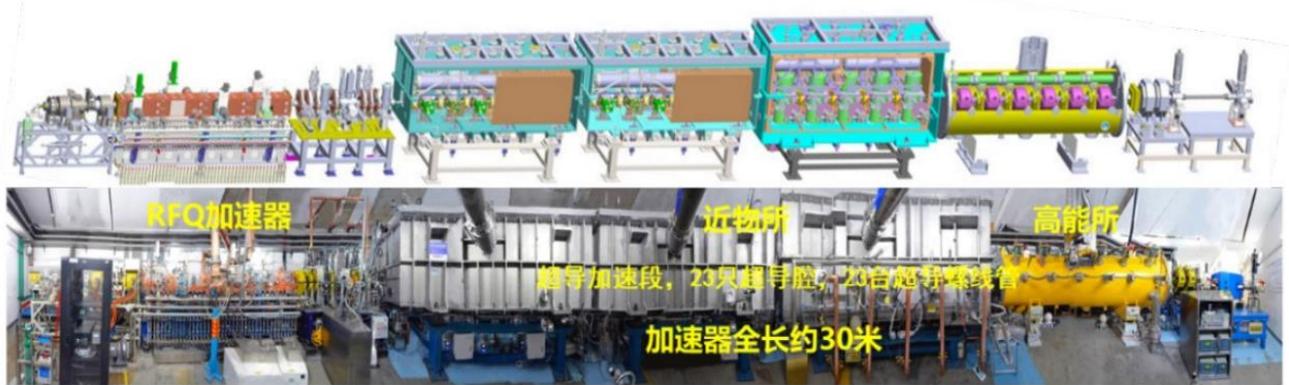
图52: ITER 纵场超导线圈



资料来源: 中国科学院等离子体物理研究所, 民生证券研究院

**大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近 20000 吨。**随着科技的进步, 国际上前沿技术领域对超导材料和应用技术提出了更高、更全面的要求。新一代环形正负电子对撞机及超级质子对撞机 (CEPC/SPPC) 磁场水平达到国际最高水平 20T、中国聚变工程试验堆 (CFETR) 磁场水平达到 15T、欧洲环形对撞机 (FCC) 磁场水平达到 15T, 这些大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近 20000 吨。

图53：近物所与高能所联合研制的世界首台 25 MeV 连续波质子超导直线加速器



资料来源：中国科学院近代物理研究所，民生证券研究院

### 3.3 射频超导腔是粒子加速器关键部件

射频超导腔是新一代粒子加速器中的关键部件，采用铌超导腔的粒子加速器具有运行稳定好、平均流强高、加速梯度高、低损耗、运行成本低的特点。加速器是重要的科学装置，在材料物理、高能物理、核物理、放射性核素研究等领域发挥着重要作用，在能源、医疗、军事等方面也有着重要的应用价值。射频超导腔是加速器中给粒子束流提供能量的核心部件，相当于加速器的发动机。它的工作原理是：输入耦合器馈入腔体的微波在超导腔内部建立特定谐振模式的电磁场；当带电粒子以合适的相位通过射频腔时，会正好受到正向加速场的作用，从而被加速。根据谐振腔的材料特性和工作温度，可以分为常温加速腔和超导加速腔。常温加速腔的材料主要是无氧铜，腔的表面电阻在  $m\Omega$  量级，对应的本征品质因数  $Q_0$  在  $10^4$  量级。而超导加速腔的材料目前主要是高纯铌，高纯铌是具有较高临界温度 ( $T_c=9.2\text{ K}$ ) 的 II 类超导材料，由于其高临界温度、高临界磁场以及低表面电阻的特点逐步被用来代替铜作为高能粒子加速器的内腔材料。超导加速腔工作在超导状态，腔的表面电阻一般为  $n\Omega$  量级，对应的本征品质因数  $Q_0$  在  $10^9$  量级，高于铜腔 5 个数量级，并且功率损耗小、加速场梯度高、阻抗小，可以达到很好的能量分辨率和稳定度。

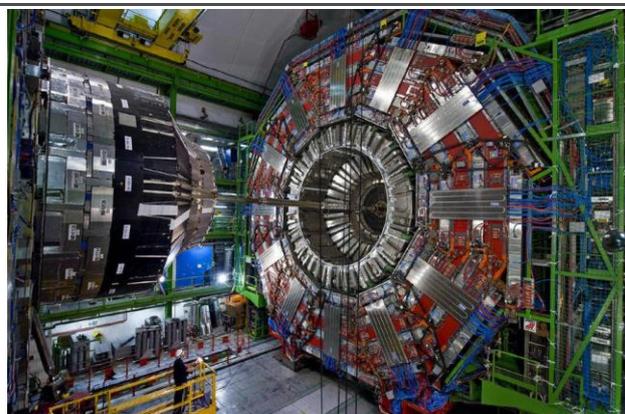
射频超导腔的关键参数包括加速梯度  $E_{acc}$ ，品质因数  $Q_0$ ，RRR 等。加速梯度  $E_{acc}$  是超导腔的加速电压与有效加速长度的比值，反映了带电粒子通过超导腔时的能量增益，加速梯度越高，意味着加速到同样的能量所需的加速腔更少，束线长度更低，加速器的建造和运行成本都会更低。品质因数是超导腔储能与腔体损耗的比值，表征了加速腔在一定储能的情况下，超导腔腔壁的功率损耗。RRR 值定义为材料在室温下 (300 K) 和在 4.2 K (液氦) 时的电阻率之比。

图54：射频超导腔



资料来源：东方铝业官网，民生证券研究院

图55：粒子加速器



资料来源：新华网，民生证券研究院

国际上最早开始研究射频超导的应用试验是 1965 年斯坦福大学的汉森物理

实验室首次采用铜表面镀铅的超导腔进行载束实验，但是加速梯度非常低。随后，1968年 J.Turneaure 和 N.Viet 采用的纯铌超导腔载束实验获得突破，加速梯度超过 10 MV/m，从此之后纯铌被广泛应用于制造超导加速腔。目前应用纯铌超导腔的在运行电子加速器有：美国 JLab 实验室的连续电子束加速装置 CEBAF，美国直线加速器相干光源升级项目 LCLS-II，德国的欧洲 X 射线自由电子激光装置 XFEL，我国北京环形正负电子对撞机 BEPC-II 和上海硬 X 射线自由电子激光装置 SHINE 等。质子或者重离子加速器有：美国橡树岭国家实验室的散裂中子源项目 SNS，密歇根州立大学的稀有同位素束流装置 FRIB，欧洲散裂中子源项目 ESS，以及我国近代物理研究所的加速器驱动嬗变研究装置 CiADS 和先进重离子加速器装置 HIAF 等。

图56：北京环形正负电子对撞机 (BEPC-II) 直线加速器



资料来源：中国科学院高能物理研究所，民生证券研究院

图57：德国的欧洲 X 射线自由电子激光装置加速器



资料来源：普发真空，民生证券研究院

**射频超导腔制作流程可分为高纯铌锭熔炼、超导铌材加工、射频超导腔制造三大部分，每个部分都有很严格的技术要求。**

**(1) 高纯铌锭熔炼：高纯铌锭的制备是制造射频超导腔用铌板最为关键的环节，必须将高纯铌锭的 RRR 值提高到一定的水平。**铌超导腔壁既是超导电流的导体，又是腔内高能粒子运动和碰撞时辐射出的热能向外传导给液氦的途径，因此，超导腔必须具备很好的热传导性能和超导性能。铌的超导和热传导性能与自身纯度有着紧密的关系，因此加速器用铌材必须满足特殊的纯度，要使其残余电阻率 (RRR) 大于 300，并且冶金缺陷尺寸要小于 50 $\mu$ m。从高纯铌锭到超导铌板的加工过程中不可避免的会受到的污染，主要为铌材在加工变形时升温过高导致的气体杂质元素的污染，这种污染降低了后期铌板材的 RRR 值。影响铌材 RRR 值的杂质主要来源于晶界间隙的残留物 (主要是 H、C、O 和 N) 以及金属杂质 (主要是 Ta)，要获得 RRR 值大于 300 的铌锭，C、N、O 质量分数需小于 20 $\times 10^{-6}$ ，H 质量分数需小于 2 $\times 10^{-6}$ ，Ta 质量分数需小于 500 $\times 10^{-6}$ 。目前，工业生产中主要以铝热还原法还原 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 制备高纯铌锭的精炼原料铌坯 (一般纯度为 99.0%~

99.9%，铌坯含有大量的 N、H、O 等间隙杂质和金属 Al 杂质，RRR 值则在 30 左右，远远低于射频超导腔用铌的要求)，后对高纯铌坯经过多次的高真空、高功率、高挥发损失的真空电子束熔炼（EBM）进行真空精炼，使得铌锭 RRR 值达到 300 以上。目前，世界上可以生产 RRR 值大于 300 高纯铌锭的公司主要有德国 W. C. Heraeus 公司、日本 Denkai 公司、美国 Wahchang 公司、巴西 CBMM 公司、中国东方钽业等。

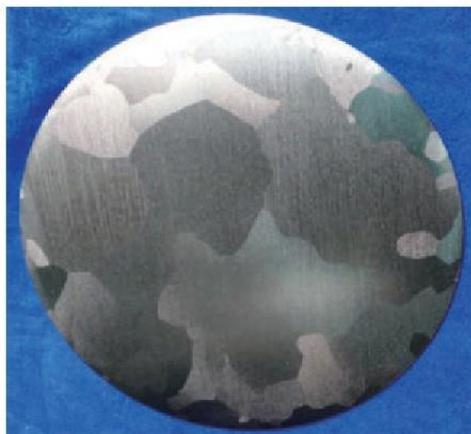
图58：高纯铌铸锭



资料来源：任军帅等《射频超导腔用高纯铌材制备》，民生证券研究院

**(2) 超导铌材加工：国际上射频超导腔用铌板的制备工艺路线为高纯铌锭（RRR 值大于 300）→开坯→初轧→酸洗→退火→精轧→酸洗→退火→抛光→酸洗→超导铌板。**铸锭的 RRR 值和化学成分一定的情况下，在加工过程中主要考虑过程中气体杂质元素对铌材的污染，铌材加工变形升温过高时将会吸附气体杂质。铌板的加工过程是一个洁净化加工过程，在加工中铌板的污染是不可避免的，既要控制铌板在加工过程中的污染又要清除污染，只有这样才能保证铌板的 RRR 值达到技术要求。为了解决细晶材料在加工成超导铌板的过程受到污染影响铌材使用性能的问题，国际上也在积极开发新的超导腔用铌材，大晶粒铌材应运而生。细晶铌材是大晶粒铌锭经过锻打、碾压、去油、酸洗、高真空条件下退火重结晶得到的，细晶晶粒大约 50 $\mu\text{m}$ ，细晶铌材在加工的过程中可能引入新的杂质或者缺陷，而大晶粒铌材是制备好铌锭后直接通过切割的方式加工成圆板，再进行酸洗检验，省去了细晶粒铌板的锻造、轧制、退火、表面处理等工艺，具有低成本、低 RRR 值损耗的优点。目前，工业化生产的大晶粒铌片已经可以满足制造超导腔的要求，而且采用大晶粒铌材可以简化超导铌板的生产过程，消除了原先细晶材料制备过程中开坯轧制等对材料的污染；同时采用大晶粒铌材制造的超导腔还可能可以省去昂贵的电化学抛光工序，并且超导腔的加速梯度也能满足要求。

图59：大晶粒 RRR300 高纯超导铌板



资料来源：邵杰等《超导腔用大晶粒 RRR300 高纯超导铌板的 RRR 值分布》，民生证券研究院

**(3) 射频超导腔制造：从超导铌材到最终的射频超导腔的成型过程需要经过超导腔半腔冲压与精加工、电子束焊接、超导腔射频频率与场平坦化调整、超导腔后处理工艺、超导腔性能测试等生产流程**，其中每一过程的完成质量都会影响到超导腔的性能，因此在生产流程每一步骤完成后，都要对各种元件(半碗、哑铃、高阶模耦合器和端腔)进行微波测量和调谐以保证整腔的均匀性和确定精密加工的加工量，特别是所有哑铃的谐振频率、耦合系数和尺寸都应该尽可能保持一致。

**首先是对超导铌板材用冲压成形出谐振腔的主要部件，再用精密加工方法对其进行机械加工使其满足精度要求，最后用电子束焊接连接成整体。**元件和整腔的焊接采用真空电子束焊接以保证焊缝处铌材的纯度(RRR 大于 250)，每一步焊接前都要对元件表面进行适当的缓冲化学抛光(Buffered Chemical Polishing, BCP)和 18MΩ-cm 以上的超纯水冲洗。

**然后是对电磁场进行平整度调整。**射频超导腔各个 cell 中场分布的均匀性对腔的性能十分重要，如果各 cell 中场分布不均匀，会限制整腔的加速梯度，因此需要通过超导腔射频频率与场平坦化调整使得每个 cell 中的场分布尽可能一致以保证整腔达到最大加速电压。

**最后是表面处理和垂直测试。**在超导腔安装到低温恒温器之前一般需要进行垂直测试，即在一个垂直放置的通用恒温器中测量没有束流情况下的超导腔加速梯度和品质因数，检验合格后的超导腔才可装入加速器中。垂直测试前要对超导腔进行整腔表面处理，主要过程包括：超声波清洗、缓冲化学抛光 (BCP)、电抛光 (Electropolishing, EP)、高温退火、高压超纯水冲洗和低温烘烤。BCP 和 EP 均可用于去除超导腔表面沾污和使腔表面更为光洁，EP 的抛光速度比 BCP 慢，但可获得更小的表面粗糙度。超声波清洗可以有效去除 BCP 或 EP 后存留在超导腔表面

的杂质，如油脂、酸液等。如果铌材中含较多氢元素，则超导腔的品质因数会有大幅度下降，通常称为 Q-disease，对超导腔进行 600°C–800°C 的高温退火可以消除铌材中的氢，从而避免 Q-disease。高压超纯水冲洗可以有效去除附着在超导腔表面的微小颗粒，这些颗粒往往会引起腔内的场致发射，限制加速梯度的进一步提高。

**图60：超导腔部件哑铃(a)和高阶模耦合器(b)**



资料来源：郝建奎等《国际直线对撞机(ILC)高梯度射频超导加速腔研制》，民生证券研究院

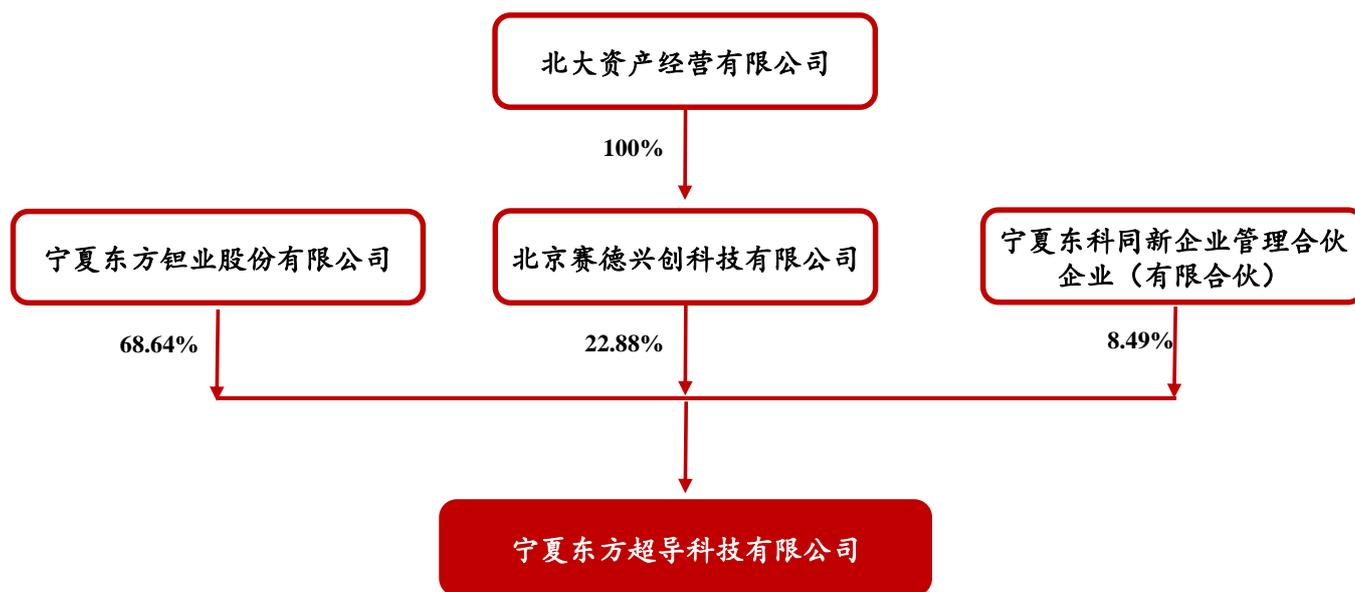
**德国研究仪器公司(Research Instruments)在射频超导腔制造环节全球领先，市占率超 5 成。**德国研究仪器公司是从德国 ACCEL 公司分离出来的，是全球超导腔制造龙头，业务布局覆盖超导腔部件、加速器模块以及加速器系统，目前射频超导腔产能约 200 只/年，近些年已经累计交付超 2000 只，全球市占率超 5 成。国内北京大学射频超导实验室自 20 世纪 80 年代末开始射频超导加速腔研究。1993 年，北京大学采用国产铌材研制国内第一只超导腔（频率 1.5GHz，1cell 椭圆腔），当时国产铌材的残余电阻比（RRR）仅约 60。2005 年开始，北京大学与宁夏东方钽业集团合作研究满足超导腔要求的大晶粒铌材。早期像电子束焊接、表面处理、垂直测试等环节都需要送往海外实验室进行，伴随着国内射频超导腔研究不断推进，射频超导腔产业国产化进程持续向前。2011 年东方钽业集团和北京大学联合的宁夏东方超导科技有限公司成立，开始建立国内集超导腔冲压成型、机加工、高真空电子束焊接、表面处理、常温微波测量等一体化的基地。**目前，东方超导已形成一套完整的射频超导腔的生产线，成为国内唯一具有超导腔生产及后续处理的产业链。**

**超导加速器主要用于高能物理、散裂中子源、洁净核能源、同步辐射光源、自由电子激光等，具有广泛的应用前景和现实应用价值，国内相关科学项目预计将带来超 800 只需求。**国内正在建设的粒子加速器有上海硬 X 射线自由电子激光 (SHINE) 项目，项目共需 1.3GHz-9Cell 超导腔 600 只和 3.9GHz-9Cell 超导腔 16 只；加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)项目，项目共需 Spoke、HWR 等不同型号的超导腔 137 只；强流重离子加速装置(HIAF)项目，项目共需 QWR、HWR 等不同型号的超导腔 106 只；高能同步辐射光源项目，项目共需轮辐超导腔 500MHz 超导

腔 7 只，需求空间可观。

东方钽业是全球少数能够生产超导铌材和铌钛材的公司之一以及唯一兼具材料生产和超导体制造能力的公司，东方超导为射频超导体业务主体。东方超导于 2011 年由东方钽业与北京大学合资成立，通过产学研相结合的方式，将北京大学在超导体领域已进行了数十年的研究成果实现产业化。北京大学目前持有东方超导 22.88% 的股份，东方钽业持有东方超导 68.64% 的股份。东方超导在东方钽业高纯铌材生产加工基础上，根据现有技术基础和研发成果，完善了包括超导体高纯铌板材料的制备与检验、超导体半腔冲压与精加工、电子束焊接、超导体射频频率与场平坦化调整、超导体后处理工艺、超导体性能测试等在内的高加速梯度要求的生产流程。目前东方超导已形成一套完整的射频超导体的生产线，是国内唯一具有超导体生产及后续处理产业链的公司。

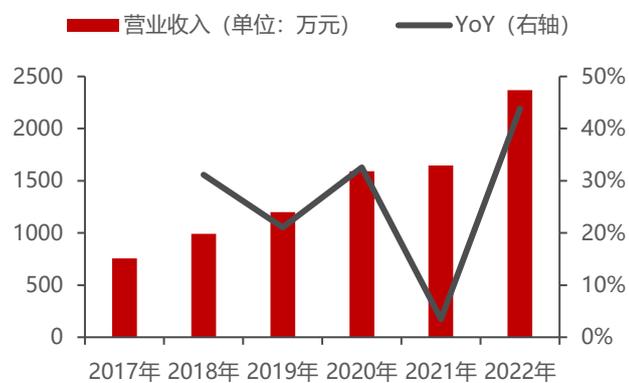
图61：东方超导股权结构



资料来源：企查查，民生证券研究院

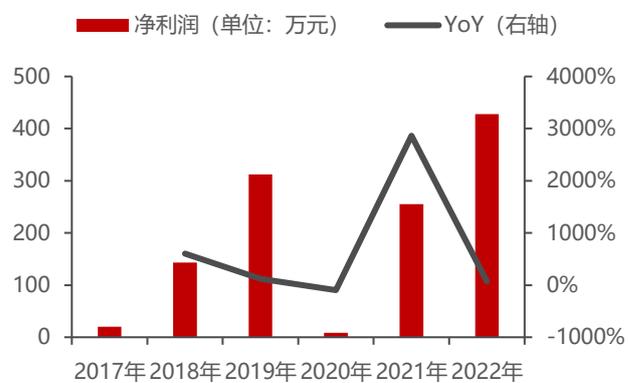
东方超导营业收入稳步提高，利润增长未来可期。2017-2022 年，东方超导营收从 756 万元增长到 2367.5 万元；2017-2022 年，东方超导净利润从 20.3 万元增长到 428.1 万元。东方超导目前射频超导体产能为 30 支/年，远不能满足下游需求。东方钽业 2022 年也发布定增项目预案，拟新增铌超导体产能 70 支/年，项目建设期 24 个月，达产后合计产能将达到 100 支/年。2022 年，东方超导通过增发注册资本、向员工出售股权的方式对核心骨干员工进行股权激励，有效提升了员工的积极性，公司未来成长可期。

图62：东方超导营收及同比增速



资料来源：东方铝业公司公告，民生证券研究院

图63：东方超导净利润及同比增速

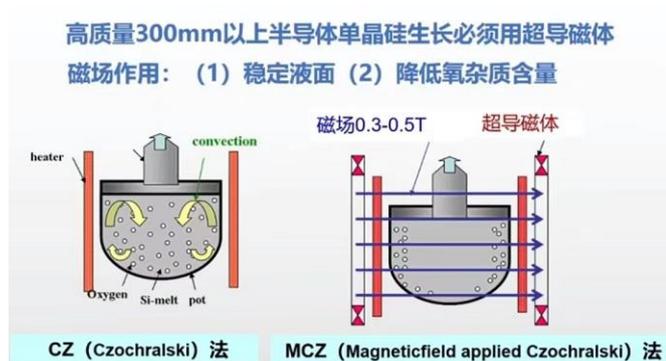


资料来源：东方铝业公司公告，民生证券研究院

### 3.4 超导在 MCZ 应用逐步放量

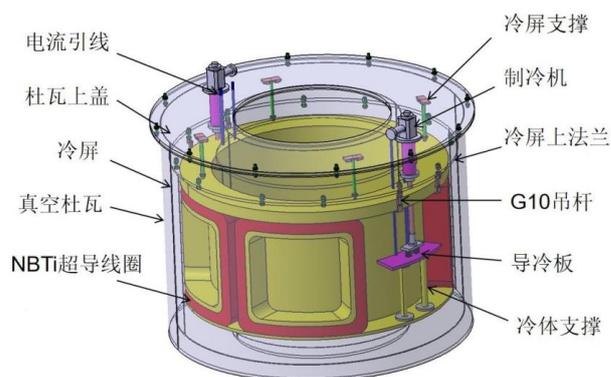
**MCZ(磁控直拉单晶硅技术)配置超导磁体。**磁控直拉单晶硅技术 (Magnetic Applied Czochralski Method)，简称 MCZ，是目前国际上生产 300mm 以上大尺寸半导体级单晶硅的最主要方法。MCZ 法制备硅单晶的原理与 CZ 法基本相同，只是在生产过程中对硅熔液施加了一个横向的电磁场，其目的是为了抑制硅溶液中的对流现象，从而控制晶体中的氧含量。单晶硅中氧的来源主要是石英坩埚的溶解，而通过磁场对导电硅流体的热对流形成抑制作用，抑制单晶硅生长过程中杂质和缺陷的产生，可以使晶体完整性、均匀性得到很大改善，从而实现高质量大尺寸单晶硅快速生长。

图64: MCZ 与 CZ 法单晶硅制备



资料来源: 中国工程科学, 民生证券研究院

图65: 超导磁体系统整体结构图



资料来源: 吴小四《直拉式单晶硅生长炉超导磁体研究》，民生证券研究院

表17: NbTi 超导体性能参数

Item	Parameters	Unit
超导线线	NBTi	Oxford
超导芯线直径	0.63	mm
导体尺寸	1.93x1.17	mm
绝缘后导体尺寸	2.24x1.43	mm
丝径	64	um
股线中超导丝个数	54	
扭矩	13	mm
股线铜超比	1.3	
导体铜超比	14	
运行温度 Top	4.2	K
临界电流	560	@4.2K&4T

资料来源: 吴小四《直拉式单晶硅生长炉超导磁体研究》，民生证券研究院

**晶盛机电与西部超导强强联合，助力超导材料需求放量。**2023 年 5 月，晶盛机电推出了第五代光伏低氧单晶炉配置了超导磁场，截至 2023 年 6 月，第五代单

晶炉已签订约 3500 台设备订单，预计 2023 年配置近 300 台超导磁场。2023 年 6 月，晶盛机电与西部超导签订战略合作协议，将进一步加强和巩固双方在各自领域的技术优势和竞争力，加快超导磁场产能供给，持续推动光伏技术革新，助力全球新能源产业发展。

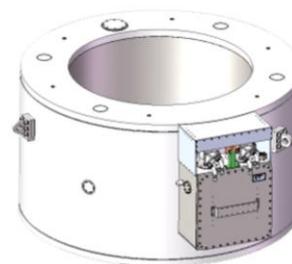
图66：晶盛机电第五代单晶炉



资料来源：晶盛机电官网，民生证券研究院

图67：西部超导 MCZ 用超导磁体

### 8英寸MCZ直拉单晶硅磁体

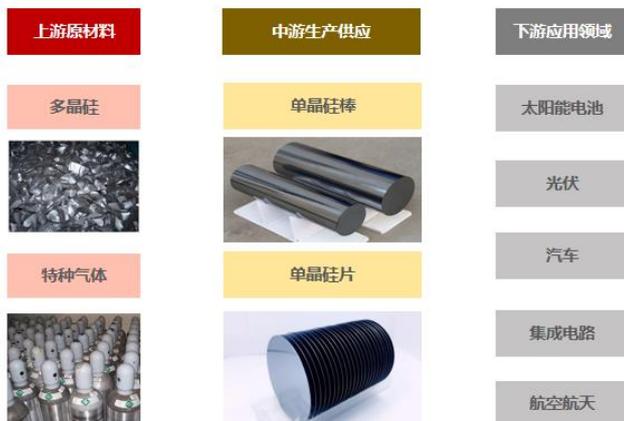


名称：8英寸MCZ直拉单晶硅磁体  
 型号：XSMT-0.3T1420MCZ  
 制冷机数量：2台  
 磁场方向：水平  
 中心磁场强度：0.3T  
 励退磁时间：< 30分钟

资料来源：西部超导官网，民生证券研究院

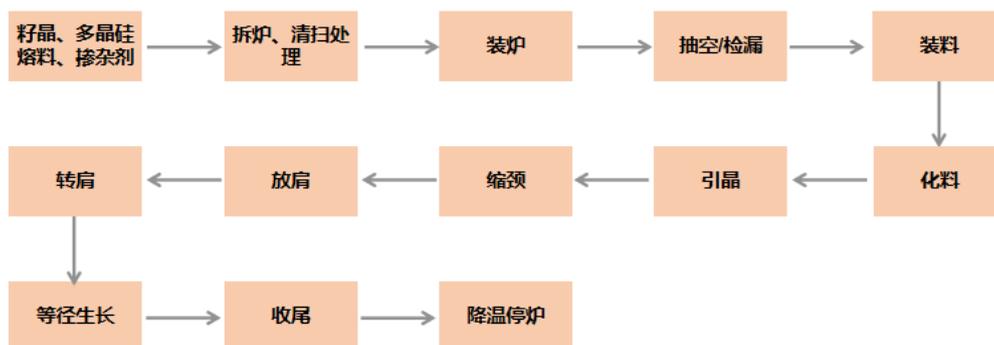
**单晶硅市场规模不断扩大，拉动超导磁体需求释放。**单晶硅行业产业链上游为多晶硅及各类特种气体；中游为单晶硅的生产供应环节；下游主要应用于太阳能电池、光伏、半导体、航空航天、汽车等领域。从我国单晶硅产出情况来看，得益于下游需求的不断增长以及各企业产能布局进程加快，近年来我国单晶硅产能及产量均快速增长。随着未来硅片不断向大尺寸方向发展，叠加半导体产业与光伏产业对于硅片的需求，对于用 MCZ 法制备单晶硅所用的超导磁体需求量也会增加。根据辰光医疗招股说明书，按照 67 台/GW 的行业标准计算，未来伴随着 N 型单晶硅逐步替代 P 型单晶硅，对磁拉单晶超导磁体的需求将达到近万台。

图68：单晶硅产业链



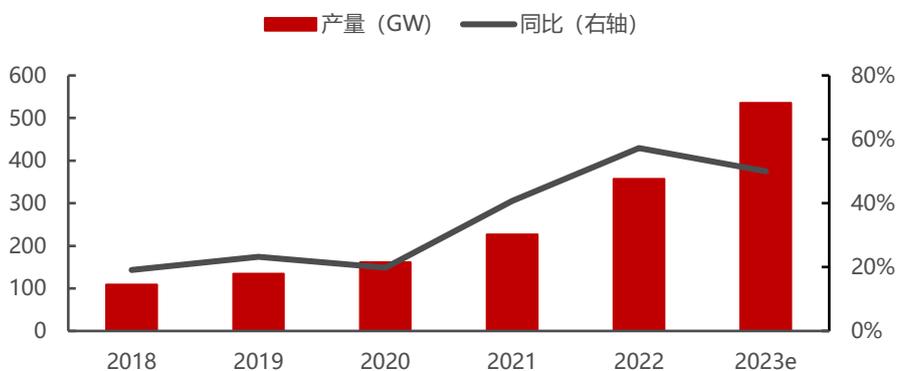
资料来源：华经产业研究院，民生证券研究院

图69：直拉单晶硅的工艺流程



资料来源：粉体网，民生证券研究院

图70：中国光伏硅片产量

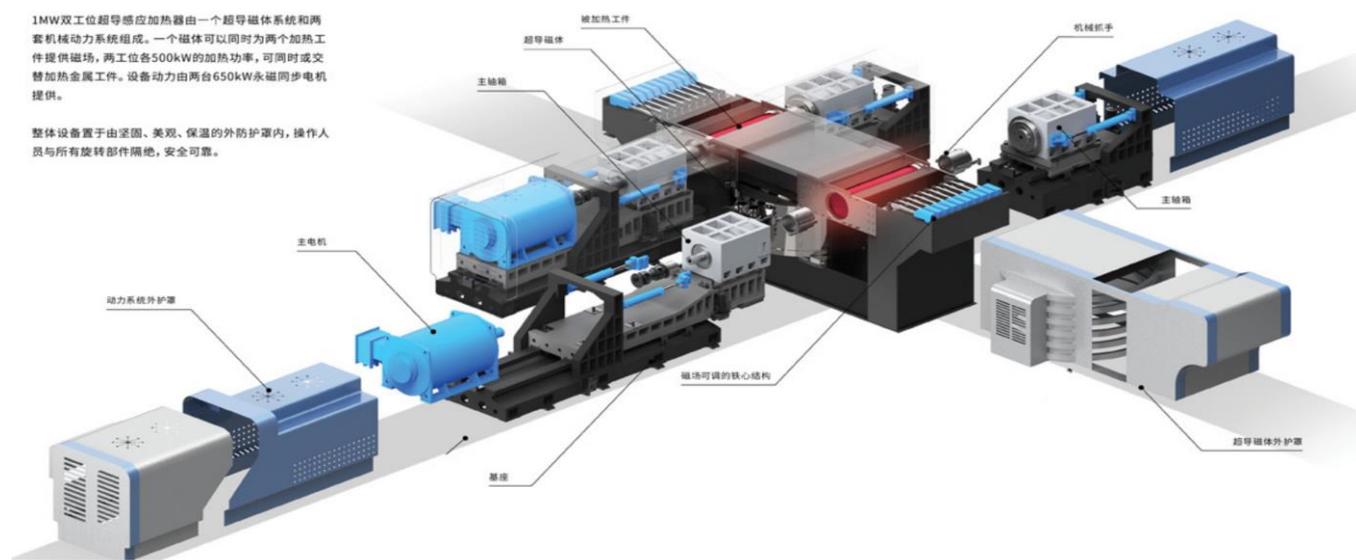


资料来源：中国光伏行业协会《中国光伏产业发展路线图》，民生证券研究院

### 3.5 高温超导感应加热技术产业化前景广阔

高温超导感应加热器是一种以超导体为核心的新型的电磁感应加热设备。利用超导体在低温下可实现稳定零电阻超导态的特性，在金属热加工、热处理等领域展现出优良特性，广泛应用于包括铝、铜、钛等金属的加工成型领域（包括挤压、锻造、轧制等）。新型超导感应加热设备主要包括直流励磁电源、超导主磁体系统和机械旋转系统等。

图71：联创超导双工位超导感应加热装置



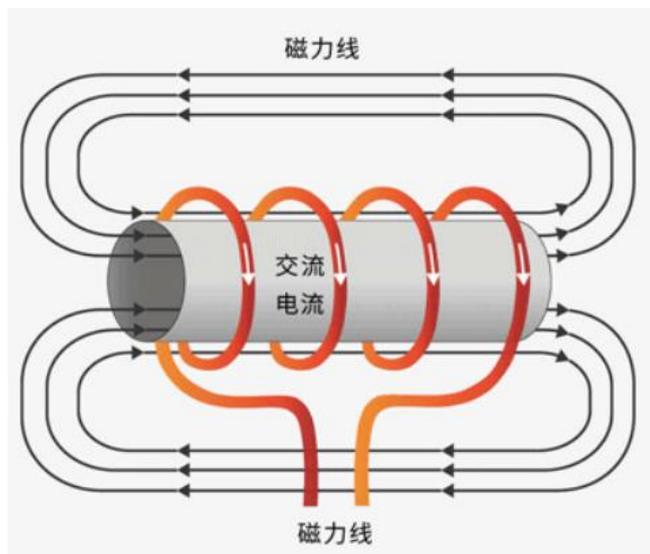
1MW双工位超导感应加热器由一个超导磁体系统和两套机械动力系统组成。一个磁体可以同时为两个加热工件提供磁场，两工位各500kW的加热功率，可同时或交替加热金属工件。设备动力由两台650kW永磁同步电机提供。

整体设备置于由坚固、美观、保温的外防护罩内，操作人员与所有旋转部件隔绝，安全可靠。

资料来源：联创超导官网，民生证券研究院

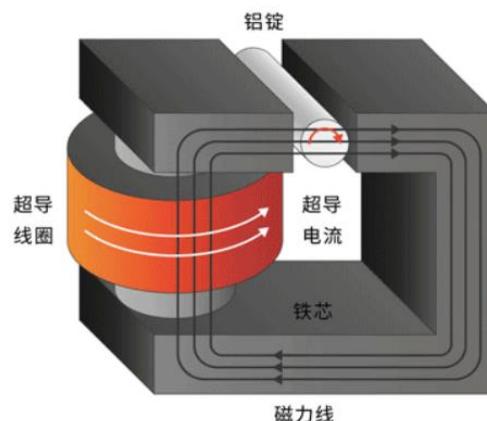
**超导感应加热技术加热原理和传统感应加热相同，都是法拉第电磁感应定律、涡流效应与焦耳定律。**高温超导感应加热技术利用超导材料在临界低温下呈现零电阻的特性，产生强直流磁场，由机械传动系统带动如铝锭等金属工件在磁场中旋转，产生相对运动，工件切割磁力线形成涡流并产生焦耳热，实现对工件的热处理。

图72：传统交流工频感应加热



资料来源：联创超导官网，民生证券研究院

图73：超导极低频感应加热



资料来源：联创超导官网，民生证券研究院

**高温超导感应加热技术节能效果明显。**目前成熟的电机技术可以让超导感应加热效率达 90%以上，约为传统方式的两倍，节能效果明显；高温超导感应加热可以得到更深入、更均匀的轴向温度分布，提高加热质量，从而适用于如镁合金、钛合金等传统方式不能加热的合金。

表18：传统交流感应加热与超导感应加热性能对比

性能参数	高温超导感应加热	传统交流感应加热	高温超导设备优点
加热频率/Hz	4~12 (240~720rpm)	大于 50	加热质量高， 轴向温度分布更深入、更均匀
电流穿透深度	50	15	
加热效率/%	80~85	40~45	加热效率高，节能效果好。 每年节省约 800 万度电，节省电费约 450 万元/年
能耗/ (kWh/t)	140	280 (含冷却)	
芯表温度/°C	±5	±20	芯表温差小，不会因为内外受热不均而裂开
加热工艺	可双根加热	可双根加热	安装维护简单 环境友好
无功补偿	不需要	需要	
电力谐波污染	无	严重	
适合铝锭挤压场景	大于 36MN 热挤压机	大于 36MN 热挤压机	

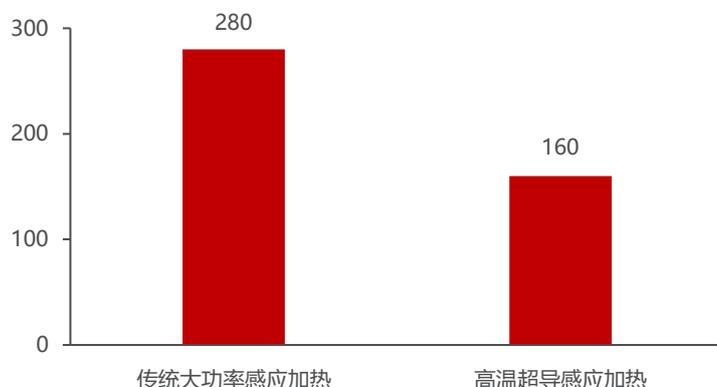
资料来源：新材料产业，民生证券研究院

**高温超导感应加热经济性体现在综合经营成本低、投资回收期短、能效高等方面。**高温超导感应加热设备生产利用率越高，产生的经济效益越显著，超导线圈基本无能耗，大大节约了外围辅助设备的电力成本。以 1MW 超导感应装置为例，按电费 0.6 元/kWh 计算，每年约能节约电费 547 万元，静态设备投资回收期仅 2-3 年。

**表19：传统交流感应加热与超导感应加热经济分析（以铝锭坯加热为例）**

参数	传统大功率感应加热	超导感应加热	备注
加热频率	60Hz	(4~8) Hz	
功率	1.25MW×2	1.0MW	同样生产能力
能效（典型值）	45%	80%	
加热性能（锭坯心表温差）	±15°C	±2°C	
设备费用	600万元（国产） 1500万元（进口）	1200万元	
设备占地	100 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	包含物料传送
加热温度	450°C	450°C	
生产率	5656t/月	5656t/月	每月工作30日
吨料耗电	280kWh	160kWh	
年外围设备电费	100万元	18万元	按0.6元/度
年总电费	1239万元	692万元	年总电费=（生产率×12/t耗电×0.6）/10000+年外围设备电费
年运营维护费用	5万元	26万元	
每吨料生产成本	194万元	106万元	每吨生产成本（元/t）=（总电费+运营维护费用）×10000/（生产率×12）
每年节约电费		547万元	
设备年折旧成本	30万元（国产）	60万元	假设折旧年限20a，无残值
投资回收期（静态）		2.05a	按净利润=传统感应加热总电费及运营维护费用-超导感应加热总电费及运营维护费用 固定资产=设备费用 不考虑折现
投资回收期（动态）		2.50a	按折现率12%

资料来源：张强等《推广应用铝圆锭坯超导感应加热技术》，民生证券研究院

**图74：传统加热装置与超导感应加热装置吨料耗电（单位：kWh/t）**


资料来源：张强等《推广应用铝圆锭坯超导感应加热技术》，民生证券研究院

2023年4月20日，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置于黑龙江中铝集团东北轻合金公司投用，标志我国超导热加工技术在全球实现重大突破。该设备具有磁场强度高、透热深度大、能效转化率高、显著优势，并对超导磁体、旋转加热等核心关键技术的稳定性和可靠性进行了验证，在金属热加工行业实现了颠覆性替代应用。联创光电预计2024年兆瓦级超导感应加热器年产能达100台，超导产业园达产后，可实现年产500台的目标。此外，高温超导感应加热设备可用于铜、铝、镁、钛等材料的热加工及单晶硅生长炉、选矿和污水处理等方面，国内超导感应加热技术持续发展，应用范围广，设备市场空间巨大。

图75：世界首台 MW 级高温超导感应加热装置投用



资料来源：联创超导官网，民生证券研究院

### 3.6 超导在电力领域产业化应用曙光初现

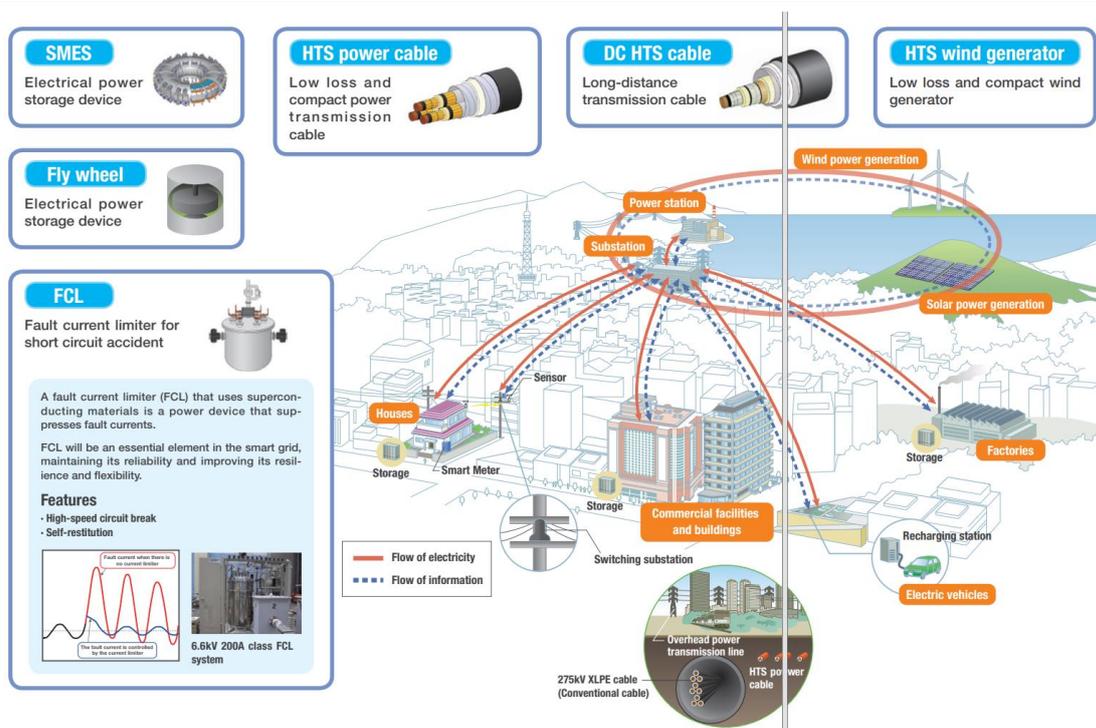
高温超导技术在电力工业具有广阔的应用前景和巨大的市场潜力。超导电力的结合包括高温超导限流器、高温超导电缆、高温超导变压器等一系列产品，且均已在实际生活中得到使用，其中高温超导输电电缆在超导体实现规模化的商业应用过程中，率先迈向产业化，目前已有多个长距离高温超导电缆挂网运行。

图76：超导电力技术应用场景



资料来源：中天科技公告，民生证券研究院

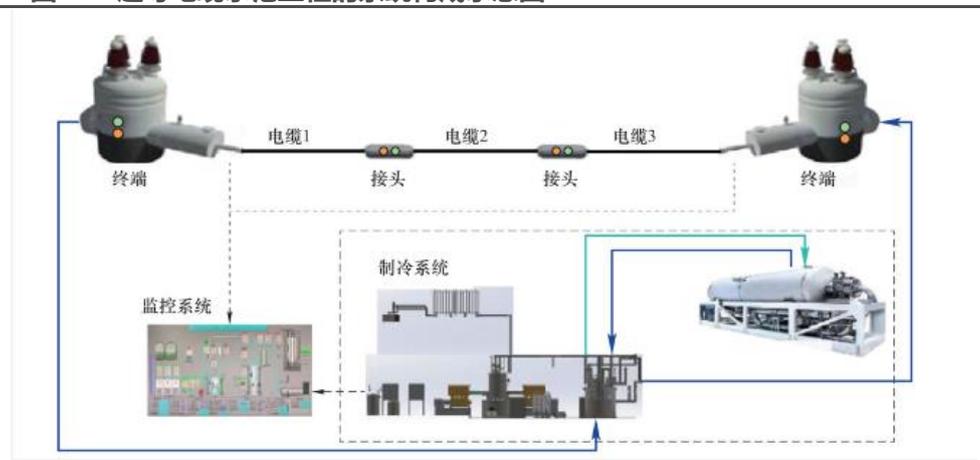
图77：高温超导材料在电力系统应用前景



资料来源：古河电气工业株式会社官网，民生证券研究院

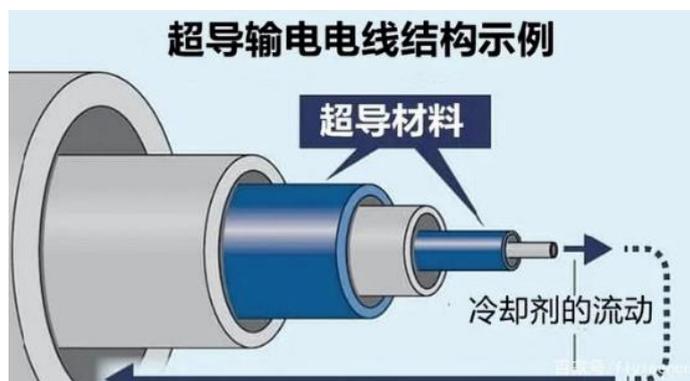
超导输电技术是一种利用高密度载流能力的超导材料发展而成的新型输电技术。超导输电系统的主要组成部分由超导电缆本体、超导电缆终端、循环低温制冷装置和配套的超导电缆及线路监控保护设施。超导输电电缆主要由超导材料、绝缘材料和维持超导状态的低温容器构成。目前高温超导电缆按绝缘方式可分为常温绝缘 (Warm-Dielectric, WD) 电缆和低温绝缘 (Cold-Dielectric, CD) 电缆两种；按电缆结构可分为单相型、三相同轴型和三相统包型电缆，分别适用于高电压等级 (110kV)、额定电压 10kV 商业化超导电缆系统和 66kV 以下的电压等级。

图78：超导电缆示范工程的系统构成示意图



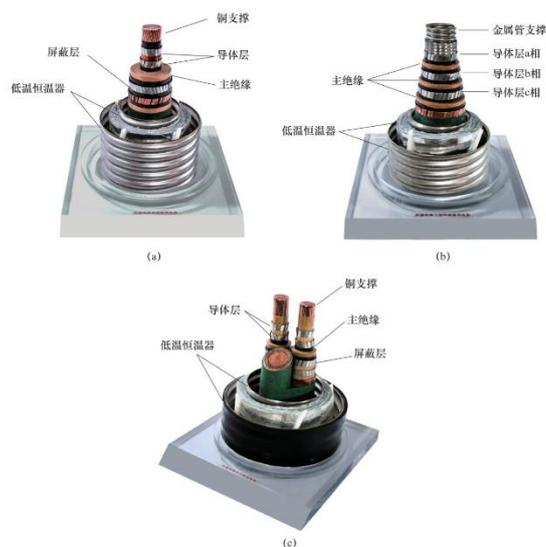
资料来源：国网上海市电力公司《超导电缆在城市电网中的应用》，民生证券研究院

图79：超导电缆结构



资料来源：科 way 公众号，民生证券研究院

图80：三种高温超导电缆结构

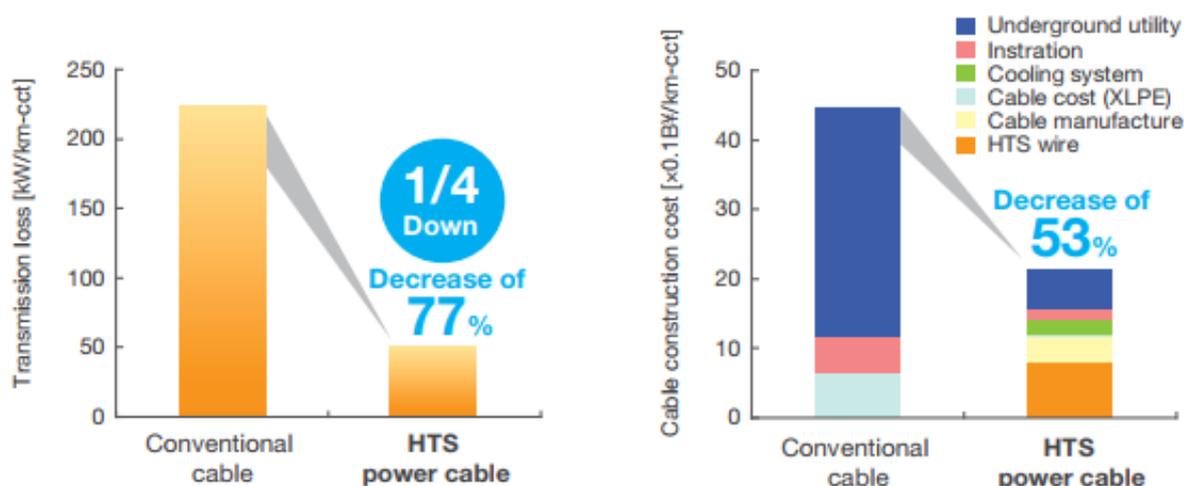


(a) 单相型；(b) 三相同轴型；(c) 三相统包型

资料来源：国网上海市电力公司《超导电缆在城市电网中的应用》，民生证券研究院

**高温超导电缆可能会替代传统电缆成为输电电缆的主流。**常规电缆输电时，由于电阻生热都会有所损耗，如输送 1000 万千瓦电力的损失可能达到一座 100 万千瓦发电站的发电量，如果能通过给输电线降温使其达到超导状态，就能将电阻几乎变为零，从而实现无损输电，大大提升输电效率。和传统的铜、铝制成的电缆相比，高温超导电缆可以将发电厂与用户之间传输的电力损耗减少至 1/4。考虑到高载流密度的特性让超导输电系统的安装占地空间变小，土地开挖和占用量也得以减少，利用现有的基础设施铺设超导电缆的可行性较高。同时，超导导线截面积较普通电缆大大减少，可以减轻输电系统的总重量。在城市密集区域、跨越性输电工程等场景下，高温超导线路将成为更具优势的选择。

图81：高温超导电缆和普通电缆对比



资料来源：古河电气工业株式会社官网，民生证券研究院

表20：各种输电技术的技术优势比较

	超高压交流	高压直流	直流电缆	高温超导直流输电
大功率传输容量	√	√	×	√
相较于超高压交流的成本优势	×	√	×	√
交流多点互联能力	√	×	×	√
地下直流电缆的隐蔽性和高可靠性	×	×	√	√
直流系统的系统控制特征	×	√	√	√
地下电缆的最小占地	×	×	√	√

资料来源：肖立业等《超导输电技术发展现状与趋势》，民生证券研究院

随着示范工程推进，超导电缆产业化大幕有望逐步拉开。超导输电逐步从示范性工程向商业 20 世纪 90 年代以来，美国、日本、韩国、德国等相继开展了高温超导电缆及其输电技术的研究工作，并有多项工程投运。虽然关于超导电缆工程的研究起步较晚，但我国已经成为国际超导领域的中坚力量。随着示范工程推进，超导电缆产业化大幕有望逐步拉开。

**表21：世界主要高温超导电缆示范工程项目**

国家	年份	项目选址	关键参数
韩国	2004	高敞郡	100m (22.9kV/1.25kA)
日本	2004	横须贺市	500m (77kV/1kA)
美国	2006	奥尔巴尼市	350m (34.5kV/0.8kA)
美国	2006	哥伦布市	200m (13kV/3kA)
日本	2007	横滨市	240m (66kV/2kA)
美国	2008	长岛市	600m (138kV/3kA)
韩国	2008	利川市	400m (22.9kV/1.25kA)
韩国	2014	济州岛	500m (80kV/6.25kA)
德国	2014	埃森市	1000m (10kV/2.4kA)
中国	2021	深圳市	400m (10kV/2.5kA)
中国	2021	上海市	1200m (35kV/2.2kA)

资料来源：电力与能源，民生证券研究院

### 3.7 超导在高速电动悬浮领域应用前景可期

**超导电动悬浮列车最具实用化前景。**根据磁悬浮列车的悬浮方式不同,可以将磁悬浮列车划分为:电磁悬浮 (electromagnetic suspension, EMS) 列车、电动悬浮列车 (electrodynamic suspension, EDS)、超导钉扎悬浮 (superconducting pinning levitation, SPL) 列车。电动悬浮按照场源形式可以划分为超导电动悬浮和永磁电动悬浮, 超导电动悬浮按照磁体的工作温度又可以划分为高温超导电动悬浮和低温超导电动悬浮。在上述的几种电动悬浮方式中, 日本研发的线圈式超导电动悬浮列车最具实用化前景。电动悬浮、超导磁悬浮列车具有运行速度高、车辆轻、悬浮间隙大等优点, 是目前超高速磁悬浮列车发展的主流趋势。

表22: 不同悬浮方式的磁悬浮列车对比

悬浮类型	悬浮原理	悬浮高度/mm	最高试验速度/(km/h)	最高应用速度/(km/h)	悬浮、导向控制	车载磁体	路轨铺设	车辆重量(单节车厢)	研究进展
EMS	车载磁与铁磁轨道间的相互吸引产生悬浮力	8~10	550 (德国 TR09)	430 (上海磁浮线 TR08)	需要闭环控制, 有静态悬浮	电磁铁	硅钢片	重, 56.5 t (德国 TR09)	商业运营
EDS	车载磁体与“8”字线圈、导电板之间相对运动产生悬浮力	80~150 (超导电动悬浮), 20~30 (永磁电动悬浮)	603 (JR 东海 L0)	505 (日本山梨试验线 L0)	自稳定, 无需控制, 无静态悬浮	超导磁体, 永磁体	“8”字线圈, 金属导电板	轻, 25 t (JR 东海 L0)	准商业运营
SPL	非理想第二类超导体抗磁特性产生悬浮力	10~30	300 (西南交通大学模型车)		自稳定, 无需控制, 无静态悬浮	超导块材	永磁导轨	轻, 12 t (西南交通大学工程化样车)	准商业运营

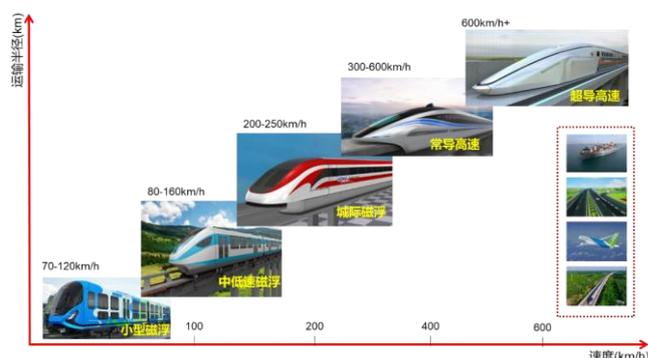
资料来源: 刘士宽等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》, 民生证券研究院

图82：磁浮悬浮原理分类



资料来源：轨道世界公众号、民生证券研究院

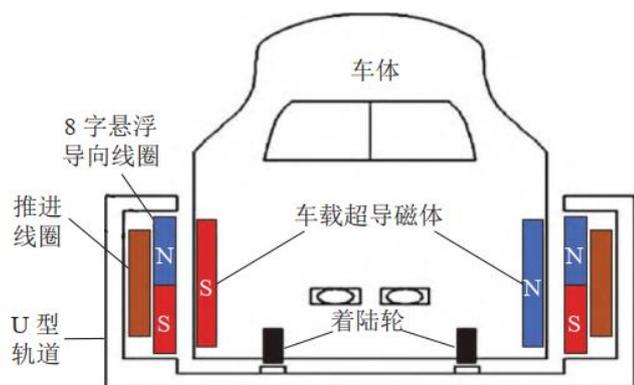
图83：磁浮速度等级分类



资料来源：轨道世界公众号、民生证券研究院

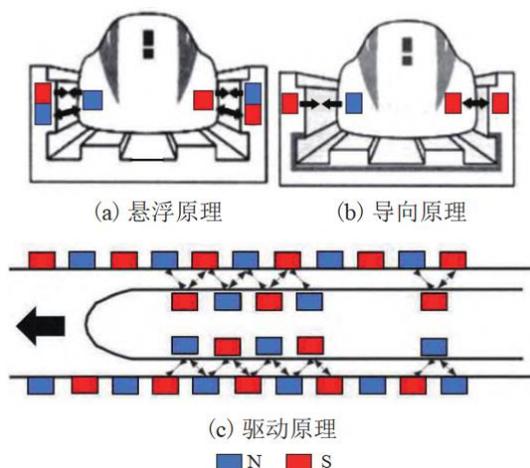
车载超导磁体是核心部件，承担着与地面线圈（驱动、悬浮、导向线圈）相互作用，实现列车驱动、悬浮、导向的任务。根据超导线圈的绕制线材不同，超导磁体可以分为基于 NbTi 低温超导线绕制的低温超导（low temperature superconducting,LTS）磁体、基于 Bi 系一代高温超导带材绕制的高温超导（high temperature superconducting,HTS）磁体和基于 ReBCO 二代高温超导带材绕制的高温超导磁体，基于高温超导带材绕制的超导线圈可以大幅降低超导磁体的运行成本。日本磁悬浮列车的车载超导磁体采用低温超导线 NbTi 绕制超导线圈。磁体系统主要由超导线圈、内杜瓦、支撑系统、冷屏、外杜瓦、液氮罐、液氦罐等设备组成。

图84：超导电动悬浮系统



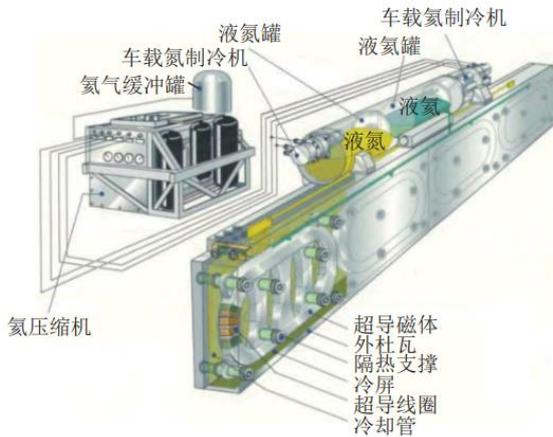
资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

图85：超导电动悬浮原理



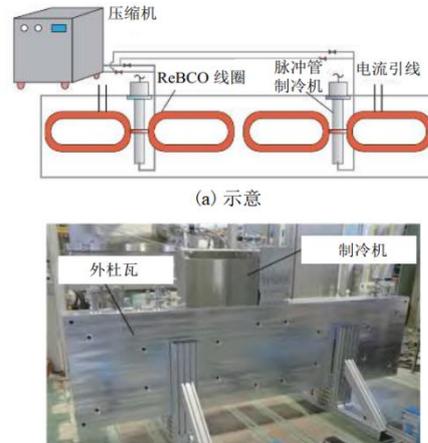
资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

图86：日本研制的车载低温超导磁体



资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

图87：日本研制的 ReBCO 带材车载高温超导磁体



资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

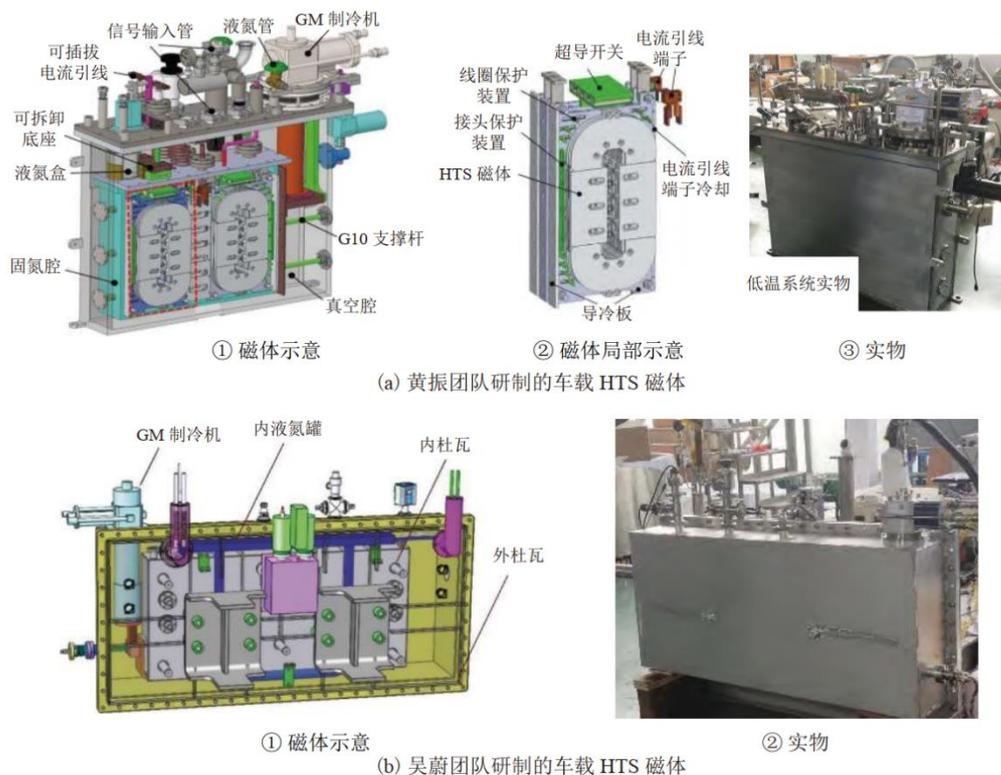
国内车载高温超导磁体投入实验运行,在高速电动悬浮领域应用前景可期。国内车载超导磁体研究包括中国合肥物质研究院 LTS 磁体、中国上海交通大学 HTS 磁体、中国西南交通大学 HTS 磁体等，其中上海交通大学设计的闭环车载 HTS 磁体的电流衰减率是最低的，设计的非浸渍、固氮低温系统也是目前低温维持时间最长的，部分磁体已经投入实验运行。高温超导带材具有临界电流高、温度裕度大、机械强度高优点，采用二代 HTS 带材绕制超导磁体具有结构紧凑、磁场强度高的优点，在高速电动悬浮领域应用前景可期。

表23：中国上海交通大学车载 HTS 磁体主要技术参数

团队名称	磁体尺寸/m	磁动势/kA	导线材料	匝数/匝	匝间绝缘	运行方式	电流衰减率/(%/d)	线圈工作温度/K	冷却方式	研究进展
黄振团队	长 0.83, 宽 0.24, 高 0.93	360	ReBCO	2400	无绝缘	闭环	2.0	30.0~40.0	可插拔制冷机冷却, 固氮辅助冷却	降温、励磁、振动, 地面试验
吴蔚团队	长 1.6, 宽 0.3, 高 0.8	360	ReBCO	1800	无绝缘	闭环	<1.1	<35.6	可插拔制冷机冷却, 固氮辅助冷却	已研制 5 台磁体, 并投入试验运行

资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

图88：中国上海交通大学研制的车载高温超导磁体

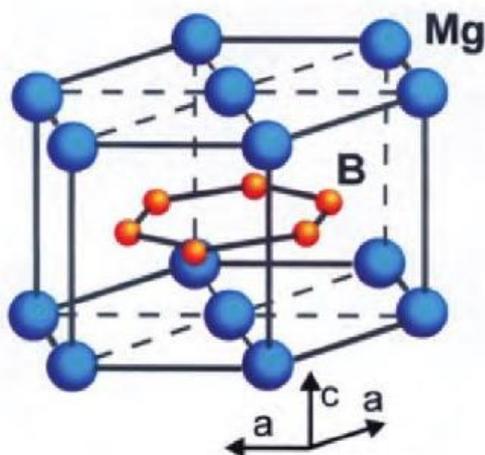


资料来源：刘士苒等《电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述》，民生证券研究院

### 3.8 二硼化镁 ( $MgB_2$ ) 超导材料有望逐步迈入商业化

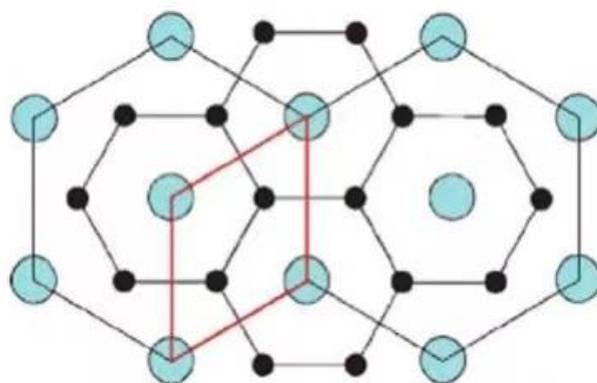
**$MgB_2$  超导转变温度达 39K。**二硼化镁 ( $MgB_2$ ) 是日本科学家在 2001 年偶然发现的金属间化合物超导体，结构由镁所构成的三角格子和硼所构成的蜂窝六角结构平面交错堆砌而成。它的超导转变温度达 39K，几乎高达其他同类型超导体的两倍，属于典型的 BCS 超导体。它是结构非常简单的二元中间金属化合物。

图89:  $MgB_2$  超导体的结构图



资料来源: 闻海虎《新型高温超导材料研究进展》, 民生证券研究院

图90:  $MgB_2$  超导体的顶视图

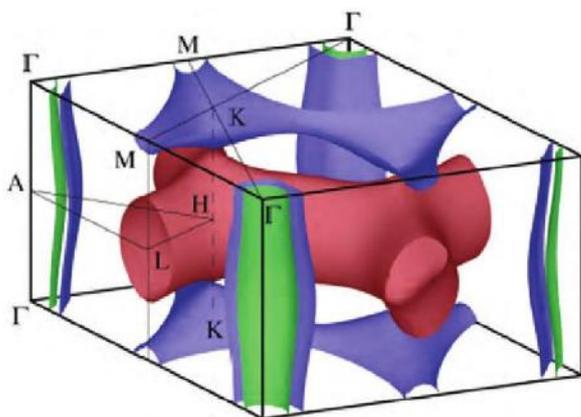


资料来源: 闻海虎《新型高温超导材料研究进展》, 民生证券研究院

**$MgB_2$  具有相干长度大、晶界不存在弱连接、材料成本低、加工性能好的优点。**

$MgB_2$  相干长度为 6~7 纳米，具有六方型晶体结构，因此有较高的不可逆场，可以在无液氮的制冷机条件下 (10~20K) 使用。其可承载电流高，各向异性也比 Bi 系和 Y 系小，原料来源丰富，可采用低成本的 PIT 工艺制备。

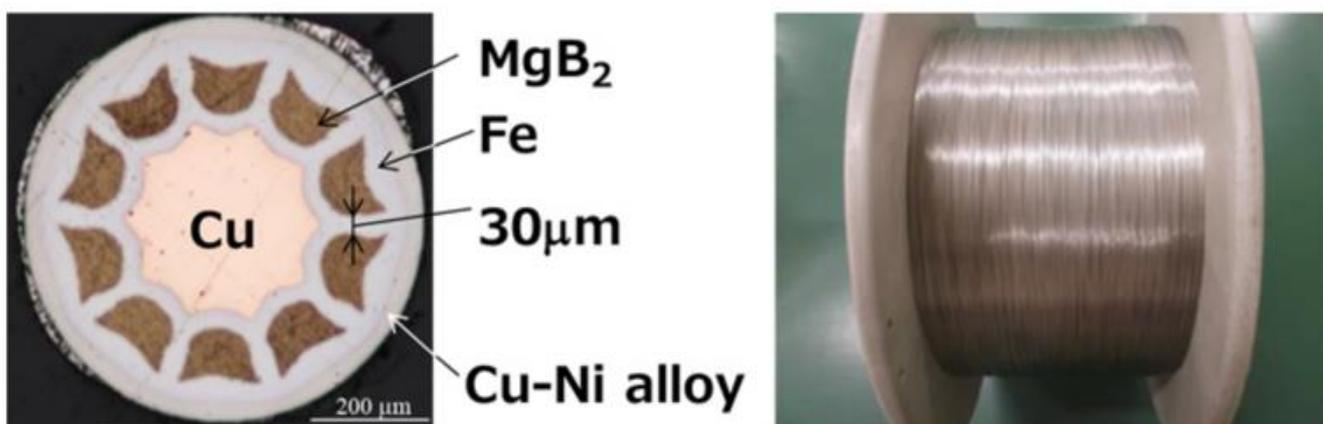
图91:  $MgB_2$  超导体的费米面



资料来源: 闻海虎《新型高温超导材料研究进展》, 民生证券研究院

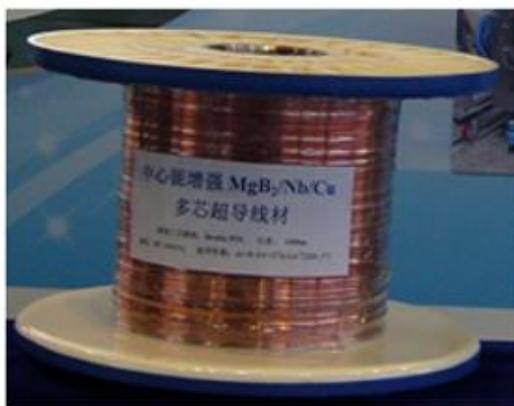
**MgB<sub>2</sub> 超导体有一定应用潜力,可用于核磁共振成像 (MRI) 系统、特殊电缆、风力发电电机及空间系统驱动电机等领域。**利用粉末套管轧制技术 (PIT) 和原位反应技术可以轻松制备出千米级的导线。美国 Hyper Tech.公司已制备出单根长度大于 3km、Jc 值 25K 的 Monel/Cu/Nb 基多芯 MgB<sub>2</sub> 线材; 日本日立 (Hitachi) 公司已具备制出千米级 MgB<sub>2</sub> 线材的生产能力; 我国西部超导材料科技股份有限公司和西北有色金属研究院可制备千米级长度 19 芯及 37 芯结构的 MgB<sub>2</sub> 长线。

图92: 日本日立公司 MgB<sub>2</sub> 超导线材截面照片及外观图 (线径: 0.67mm)



资料来源: 日立官网, 民生证券研究院

图93: 我国西北有色金属研究院制备的 MgB<sub>2</sub> 长线



资料来源: 西北有色金属研究院官网, 民生证券研究院

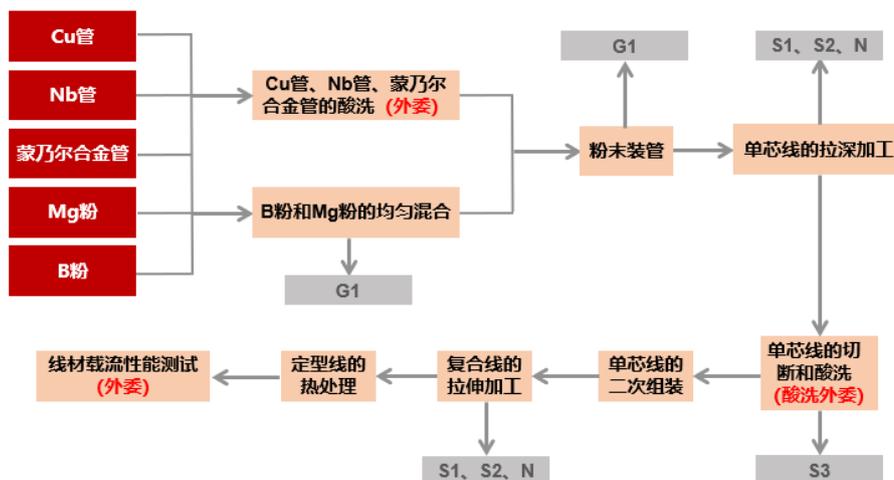
图94: 意大利 ASG 超导公司利用 MgB<sub>2</sub> 制成的核磁共振成像仪



资料来源: ASG 超导公司, 民生证券研究院

**在 MgB<sub>2</sub> 高温超导线材生产工艺方面, 各国不断进行研究和突破, 目前二硼化镁高温超导线材的生产流程已较为成熟。**较为主流的是粉末套管法 (PIT)、中心镁扩散法 (IMD) 和连续管线成型法 (CTFF)。

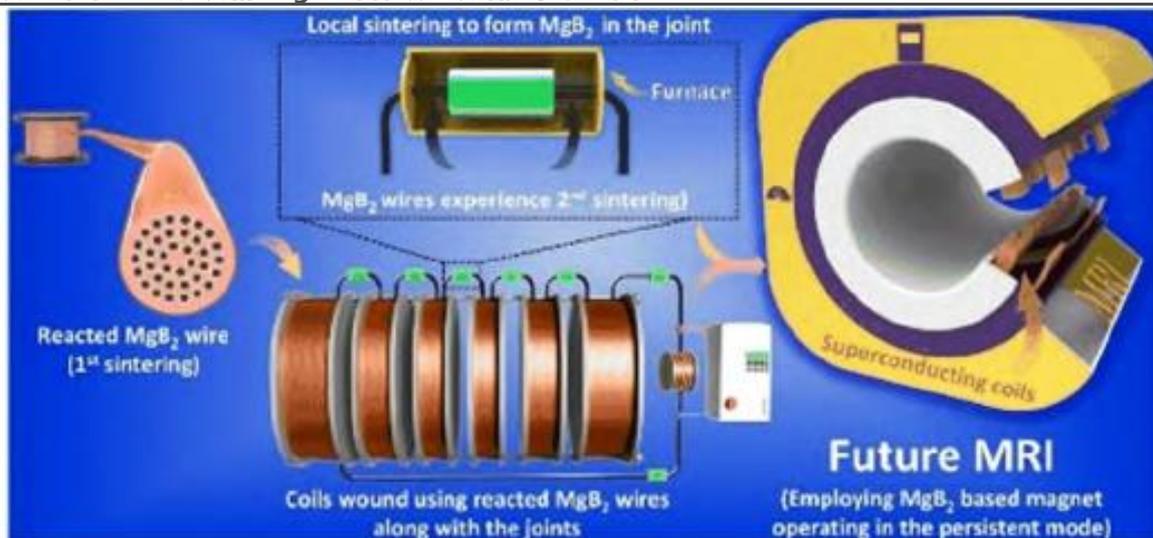
图95: MgB<sub>2</sub> 高温超导线材工艺流程



资料来源: 西安聚能超导线材环评书, 民生证券研究院

提高 MgB<sub>2</sub> 超导带材的 J<sub>c</sub> 和稳定性是未来研究的突破方向, 制备工艺在取得突破后, MgB<sub>2</sub> 超导带材及其应用将迈向商业化模式。西北有色金属研究院正用自己生产的 MgB<sub>2</sub> 超导线材, 制备开放式 0.6T 医用核磁成像系统。基于 MgB<sub>2</sub> 高温超导带材制备的开放式医用核磁共振成像系统有望投入使用, 并逐步向商业化发展。

图96: 用于未来 MRI 应用的 MgB<sub>2</sub> 导体双重烧结要求示意图



资料来源: 何龙军等《IMD-MgB<sub>2</sub> 超导线材的研究进展》, 民生证券研究院

## 4 投资建议

### 4.1 行业投资建议

**超导材料具有常规材料不具备的零电阻、完全抗磁性等宏观量子现象，是典型的量子材料。**超导体因为具有绝对的零电阻和完全的抗磁性两大神奇特性，在所有涉及电和磁的领域都有超导体的用武之地，应用领域广泛，包括电子学、生物医学、科学工程、交通运输、电力等领域。

**低温超导应用场景拓展。**NbTi超导线材用量占整个超导材料市场的90%以上。目前已实现商业化的包括NbTi（铌钛， $T_c=9.5K$ ）和Nb<sub>3</sub>Sn（铌三锡， $T_c=18k$ ），NbTi超导线材由于具有优异的中低磁场超导性能、良好的机械性能和加工性能、价格优势，其用量占整个超导材料市场的90%以上。

**高温超导技术突破，产业化蓄势待发。**高温超导临界温度较高，制冷成本更低，具有更加广阔的应用前景。高温超导广泛运用在超导电缆、超导感应加热等领域。2022年，永鼎股份二代高温超导带材在磁感应加热设备中实现产业化供货，2023年4月20日，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置在黑龙江中铝集团东北轻合金公司成功投运，高温超导材料产业化开始加速。

#### 下游应用场景持续突破，超导产业星辰大海

**1. MRI带动超导材料需求释放。**超导磁体是MRI设备中产生主磁场的核心部件，1.5T磁共振超导磁体成本占比在30%~40%，3.0T磁共振超导磁体成本占比在50%~60%。我国MRI设备市场保有量持续增长，未来3.0T MRI设备的占比进一步提高，带动低温超导线材需求释放。

**2. 大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近20000吨。**新一代环形正负电子对撞机及超级质子对撞机（CEPC/SPPC）磁场水平达到国际最高水平20T、中国聚变工程试验堆（CFETR）磁场水平达到15T、欧洲环形对撞机（FCC）磁场水平达到15T，大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近20000吨。

**3. 粒子加速器项目建设拉动射频超导腔需求。**粒子加速器主要应用于高能物理、散裂中子源、洁净核能源、同步辐射光源、自由电子激光等科研领域，具有广泛的应用前景和现实应用价值，射频超导腔是粒子加速器关键部件，国内正在建设的粒子加速器有上海硬X射线自由电子激光（SHINE）项目，项目共需1.3GHz-9Cell超导腔600只和3.9GHz-9Cell超导腔16只；加速器驱动嬗变研究装置（CIADS）项目，项目共需Spoke、HWR等不同型号的超导腔137只；强流重离子加速装置（HIAF）项目，项目共需QWR、HWR等不同型号的超导腔106只；高能同步辐射光源项目，项目共需轮辐超导腔500MHz超导腔7只，累计有望带来超800只需求。

**4. 高温超导感应加热技术产业化前景广阔。**高温超导感应加热装置是以超导体为核心的新型电磁感应加热设备，相较传统加热方式，吨料耗电可节约120kWh。2023年4月，联创超导自主研发的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置于黑龙江投用，标志我国超导热加工技术在全球实现重大突破。联创超导预计2024年兆瓦级超导感应加热器达到年产能达100台。

**5. 二硼化镁 (MgB<sub>2</sub>) 超导材料有望逐步迈入商业化。**MgB<sub>2</sub>可用于核磁共振成像 (MRI) 系统、特殊电缆、风力发电电机及空间系统驱动电机等领域。基于MgB<sub>2</sub>高温超导带材制备的开放式医用核磁共振成像系统有望投入使用，并逐步向商业化发展。

**投资建议：**低温超导应用场景拓展，高温超导技术突破，产业化蓄势待发。建议重点关注**西部超导、东方钽业**。

## 4.2 重点公司

### 4.2.1 东方钽业：国内钽铌龙头，国企改革标杆

东方钽业深耕钽铌行业近60年，是国内唯一的从钽铌矿石的湿法冶金、火法冶金、粉末制备、成型烧结、3D打印、压力加工、机械加工、高真空热处理的全流程生产企业，是世界钽铌行业三强之一。

**市场化改革焕发老国企新生。**公司近年积极推行各项市场化改革措施，加快现代企业制度体系建设，包括灵活开展各类中长期激励政策激发员工发展潜能，实施“三个不低于”薪酬激励与专项奖励机制强化薪酬与业绩紧密挂钩。正向激励改革措施成效也十分显著，员工“主人翁”意识大大增强，企业发展动能得到提升，公司盈利显著向好创10年来最好水平，母公司中色东方经营业绩更是创57年来最好水平。

**自主创新突破高端应用增添成长新动力。**公司围绕钽铌铍业务不断做精做强，公司在核工程、航空航天、集成电路等高端领域实现创新突破，包括高压高比容钽粉、12英寸钽靶材、高端医疗用钽材料、钨射频超导体、高温涂层、钽铝合金、ITER钽材、钽窗口材料等，解决了众多制约我国发展的“卡脖子”问题，公司未来成长有望多点开花。

**定增项目有望实现产能扩充支撑长期成长。**公司发布定增预案拟对火法冶炼产能、制品加工产能进行扩充，包括火法冶金项目拟新增熔炼产品产能180t/年、熔铸产品产能140t/年、锻造通过量6018t/年，制品项目达产后钽铌板带制品产能预计将达到70t/年；超导体项目拟新增钽超导体70支/年达到年产100只钽超导体产能。公司定增项目聚焦钽铌主业高端化路线，预计定增项目达产后公司产能将得到有力补充，未来成长得到有力支撑。

**西材院为国内唯一铍材研究加工基地，稳步增长增厚公司利润。**持股 28%的西材院为国内唯一铍材研究加工基地，铍金属业务主要对接国防军工领域，主要产品应用于航天航空、核工业等领域，其子公司中色新材料承接铍金属非军工业务，覆盖铍铜业务、电子浆料以及靶材等。西材院业绩成长迅速，2022 年西材院实现营收 17.20 亿元，同比增加 255.32%，净利润 2.49 亿元，同比增加 44.79%。

**投资建议：**公司通过积极实施正向激励市场化改革和持续进行自主创新双轮驱动，国企改革成效显著；公司作为国内钽铌铍行业龙头，凭借过硬的技术实力，在高端应用领域不断取得突破，伴随定增项目有望扩充产能支持长期成长，公司业绩未来可期。预计公司 2023-2025 年归母净利润分别为 1.99/2.30/2.63 亿元，对应现价，2023-2025 年 PE 分别为 30/26/23 倍，维持公司“推荐”评级。

**风险提示：**原材料价格波动风险、新品研发不及预期、下游需求不及预期。

#### **4.2.2 西部超导：超导产品销量翻倍，高温合金+钛合金项目稳步推进**

**高温合金业绩贡献逐步显现。**公司作为国内高性能高温合金材料的新兴供应商之一，众多产品广泛应用于国家军工重大装备、大型科学工程等，GH4169、GH738 等典型高温合金在多个型号发动机、燃机和商发长江系列发动机进入批量供货阶段。2022 年公司高温合金销量 732.41 吨，同比+45.67%，随着未来逐步释放产能，叠加原料端镍、钴等价格趋弱，高温合金业绩贡献有望逐步抬升。

**定增项目加码高温合金+钛合金材料，成长性再上台阶。**2022 年 1 月公司完成定增，共募集资金净额 19.81 亿元，其中 9.91 亿元规划建设航空航天用高性能金属材料产业化项目，新增钛合金材料 5050 吨，高温合金 1500 吨的生产能力。定增项目 2024 年投产后，钛合金总产能将达到 1 万吨。高温合金方面，随着 2019 年公司首发募投的 2500 吨在 2023 年投产，定增募投的 1500 吨在 2024 年投产，公司高温合金产能将达到 6000 吨，届时高温合金生产能力将处于国内第一梯队，未来将充分受益下游军工等领域发展。

**超导产品放量。**超导产品市场开拓顺利，公司持续开发超导材料和磁体技术在半导体、光伏、医疗及电力领域的应用，其中 MRI 用超导线 22 年产销量再创新高，1.5T-5T 高场超导磁共振成像仪（MRI）用 NbTi 线材产品国际国内市场份额持续扩大。此外公司相继中标国家重大项目超导线采购项目，核聚变用高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线打破国外垄断，形成批量供应。2022 年公司超导产品销量同比+99.36%至 1110 吨，随着公司超导产品产能提升，超导产品业绩贡献可期。

**表24：西部超导主要项目投资建设情况**

在建项目	主要产品产能	项目进度	预计投产时间
发动机用高性能高温合金材料及粉末盘项目	高温合金 2500 吨	106.23%	2023 年 1 月
航空航天用高性能金属材料产业化项目	高温合金 1500 吨 钛合金材料 5050 吨	23.36%	2024 年 12 月
高性能超导线材产业化项目	MRI 用超导线材 2000 吨	13.45%	2024 年 12 月

资料来源：公司公告，民生证券研究院（注：项目进度截止时间为 2022 年末）

**投资建议：**受益于航天航空等下游领域发展，公司产品需求空间广阔，随着高端产品项目投产，公司盈利能力有望持续攀升。我们预计公司 2023-2025 年归母净利润分别为 13.4/16.2/19.8 亿，对应现价，PE 为 24/20/16 倍，维持公司“推荐”评级。

**风险提示：**下游需求不及预期；原材料涨价超预期；项目进展不及预期。

**表25：超导行业重点关注个股**

证券代码	证券简称	股价 (元)	EPS			PE			评级
			2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E	
688122.SH	西部超导	48.83	1.66	2.06	2.49	29	24	20	推荐
000962.SZ	东方钨业	13.41	0.38	0.45	0.52	35	30	26	推荐

资料来源：Wind，民生证券研究院（注：股价日期为 2023 年 8 月 9 日）

## 5 风险提示

1) **低温超导原材料波动风险。**低温超导原材料主要是海绵钛、铌等，价格波动加大，一旦原材料价格出现超预期波动，或将影响低温超导产品毛利率。

2) **高温超导商业化进程不及预期。**目前高温超导带材的制备成本仍然较高，商业化可能较预期迟滞，有可能对相关公司确认收入带来负面影响。

## 插图目录

图 1: 超导体的零电阻现象	3
图 2: 超导体的完全抗磁性	3
图 3: 超导体的量子隧穿效应	3
图 4: 超导的临界参数和临界界面	3
图 5: 周期表中具有超导电性的化学元素及其转变温度 $T_c$	4
图 6: 超导材料的探索历程	4
图 7: 超导体的分类: 第 I 类超导体和第 II 类超导体	5
图 8: 固体中的原子振动——声子	6
图 9: 超导微观理论“BCS 理论”	6
图 10: 超导材料及其应用领域	7
图 11: 超导材料主要强电运用领域	7
图 12: 超导材料进展概况	11
图 13: 国内超导产业链	11
图 14: NbTi 超导线	12
图 15: Nb <sub>3</sub> Sn 超导线	12
图 16: 低温超导产业链	13
图 17: 全球低温超导主要企业	14
图 18: 二代高温超导应用领域	15
图 19: 高温超导行业产业链	15
图 20: Bi-2223 带材制备工艺示意图	16
图 21: Bi-2212 带材制备工艺示意图	16
图 22: 喷雾分解法	16
图 23: 共沉淀法	16
图 24: 第二代高温超导带材生产工艺	17
图 25: 二代高温超导带材	18
图 26: 二代高温超导带材结构	18
图 27: 二代高温超导带材参数	18
图 28: MRI (磁共振成像仪)	19
图 29: MRI 行业产业链	20
图 30: 2022 年 MRI 设备各厂商销售份额	20
图 31: MRI 用超导材料 1	21
图 32: MRI 用超导材料 2	21
图 33: 超导磁体生产流程图	21
图 34: 1.5T 磁共振设备成本分布	22
图 35: 3.0T 磁共振设备成本分布	22
图 36: 我国 MRI 设备市场规模 (单位: 亿元)	22
图 37: 全球 MRI 设备市场规模 (单位: 亿美元)	22
图 38: 每台 MRI 设备所需超导线材 (单位: 吨)	23
图 39: 核聚变的约束方式	24
图 40: 托卡马克约束磁场示意图	25
图 41: 托卡马克基本结构	25
图 42: EAST 装置	25
图 43: EAST 装置主机部分	25
图 44: CFETR 效果图 1	27
图 45: CFETR 效果图 2	27
图 46: 中国磁约束聚变能发展技术路线图	27
图 47: CFETR 超导磁体系统	28
图 48: Bi-2212 高温超导圆形导体实物图及其临界电流测试结果	29
图 49: ITER 结构图	30
图 50: ITER 堆芯	30
图 51: ITER 聚变实验堆	30
图 52: ITER 纵场超导线圈	30
图 53: 近物所与高能所联合研制的世界上首台 25 MeV 连续波质子超导直线加速器	31
图 54: 射频超导腔	32

图 55: 粒子加速器.....	32
图 56: 北京环形正负电子对撞机 (BEPC-II) 直线加速器.....	33
图 57: 德国的欧洲 X 射线自由电子激光装置加速器.....	33
图 58: 高纯铌铸锭.....	34
图 59: 大晶粒 RRR300 高纯超导铌板.....	35
图 60: 超导腔部件哑铃(a)和高阶模耦合器(b).....	36
图 61: 东方超导股权结构.....	37
图 62: 东方超导营收及同比增速.....	38
图 63: 东方超导净利润及同比增速.....	38
图 64: MCZ 与 CZ 法单晶硅制备.....	39
图 65: 超导磁体系统整体结构图.....	39
图 66: 晶盛机电第五代单晶炉.....	40
图 67: 西部超导 MCZ 用超导磁体.....	40
图 68: 单晶硅产业链.....	41
图 69: 直拉单晶硅的工艺流程.....	41
图 70: 中国光伏硅片产量.....	41
图 71: 联创超导双工位超导感应加热装置.....	42
图 72: 传统交流工频感应加热.....	43
图 73: 超导极低频感应加热.....	43
图 74: 传统加热装置与超导感应加热装置吨料耗电 (单位: kWh/t).....	44
图 75: 世界首台 MW 级高温超导感应加热装置投用.....	45
图 76: 超导电力技术应用场景.....	46
图 77: 高温超导材料在电力系统应用场景.....	46
图 78: 超导电缆示范工程的系统构成示意图.....	47
图 79: 超导电缆结构.....	47
图 80: 三种高温超导电缆结构.....	47
图 81: 高温超导电缆和普通电缆对比.....	48
图 82: 磁浮悬浮原理分类.....	51
图 83: 磁浮速度等级分类.....	51
图 84: 超导电动悬浮系统.....	51
图 85: 超导电动悬浮原理.....	51
图 86: 日本研制的车载低温超导磁体.....	52
图 87: 日本研制的 ReBCO 带材车载高温超导磁体.....	52
图 88: 中国上海交通大学研制的车载高温超导磁体.....	53
图 89: MgB <sub>2</sub> 超导体的结构图.....	54
图 90: MgB <sub>2</sub> 超导体的顶视图.....	54
图 91: MgB <sub>2</sub> 超导体的费米面.....	54
图 92: 日本日立公司 MgB <sub>2</sub> 超导线材截面照片及外观图 (线径: 0.67mm).....	55
图 93: 我国西北有色金属研究院制备的 MgB <sub>2</sub> 长线.....	55
图 94: 意大利 ASG 超导公司利用 MgB <sub>2</sub> 制成的核磁共振成像仪.....	55
图 95: MgB <sub>2</sub> 高温超导线材工艺流程.....	56
图 96: 用于未来 MRI 应用的 MgB <sub>2</sub> 导体双重烧结要求示意图.....	56

## 表格目录

重点公司盈利预测、估值与评级.....	1
表 1: 超导材料分类.....	5
表 2: 超导体的应用领域.....	6
表 3: 三重天花板介绍.....	8
表 4: 超导材料行业相关政策.....	8
表 5: 超导领域中国国家标准清单.....	9
表 6: NbTi 超导合金棒材化学成分的质量分数要求.....	12
表 7: NbTi 和 Nb <sub>3</sub> Sn 超导线在各个领域的应用.....	13

表 8: 高温超导与低温超导的比较 .....	14
表 9: 第一代高温超导带材原料的生产工艺比较 .....	17
表 10: 高温超导材料及其应用 .....	17
表 11: 超导线材需求测算 (单位: 吨) .....	23
表 12: 行业内主要公司 .....	23
表 13: EAST 装置主要工程物理设计参数 .....	26
表 14: EAST 超导体采用的超导体线主要性能参数 .....	26
表 15: CFETR 中心螺线圈模型线圈主要参数 .....	28
表 16: 西部超导供应 ITER 中 208 吨超导线材 (单位: 吨) .....	29
表 17: NbTi 超导体性能参数 .....	39
表 18: 传统交流感应加热与超导感应加热性能对比 .....	43
表 19: 传统交流感应加热与超导感应加热经济分析 (以铝锭坯加热为例) .....	44
表 20: 各种输电技术的技术优势比较 .....	48
表 21: 世界主要高温超导电缆示范工程项目 .....	49
表 22: 不同悬浮方式的磁悬浮列车对比 .....	50
表 23: 中国上海交通大学车载 HTS 磁体主要技术参数 .....	52
表 24: 西部超导主要项目投资建设情况 .....	60
表 25: 超导行业重点关注个股 .....	60

## 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收到任何形式的补偿。

## 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。	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
	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的投资建议。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