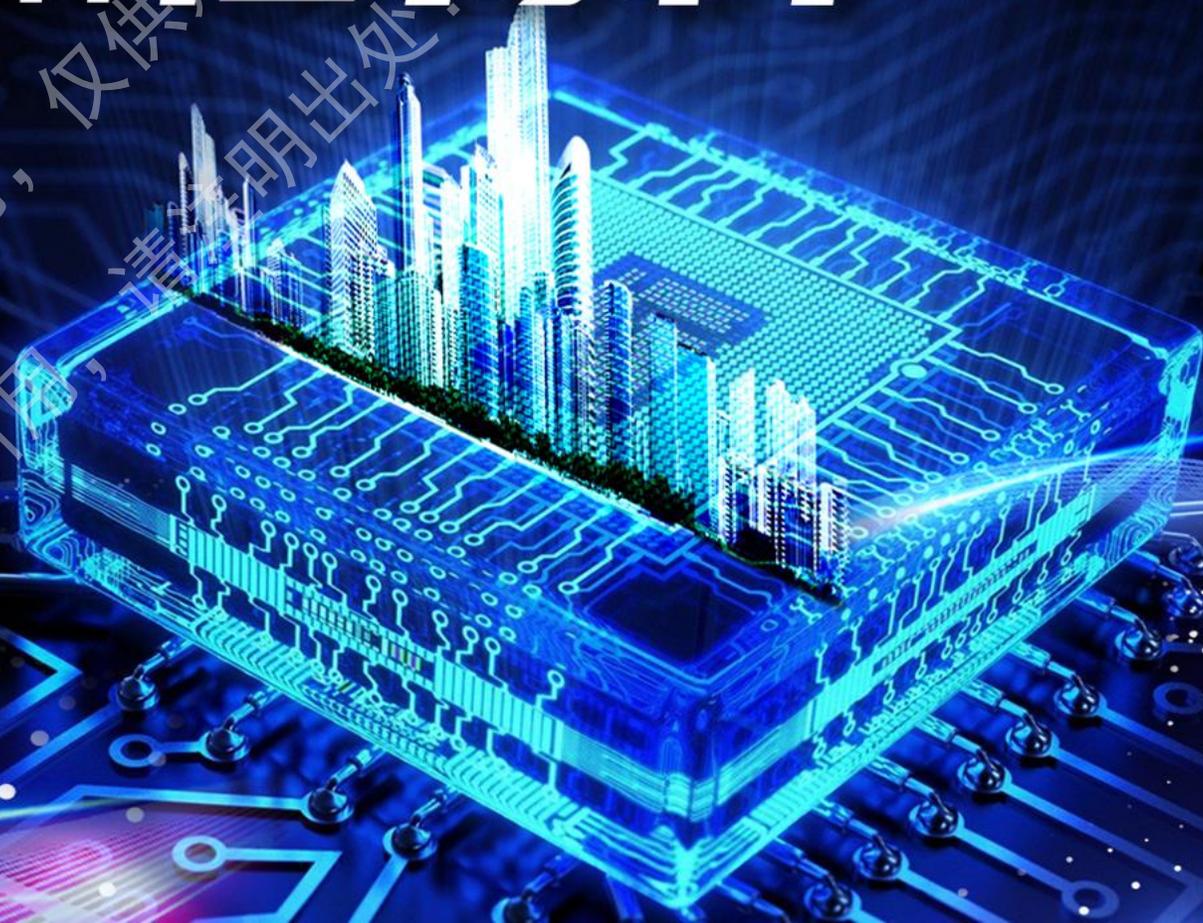


稀土与磁性材料

沈保根

—— 中国科学院院士



版权归沈保根院士所有，仅供学术传播使用，如有引用，请注明出处。

目 录

- 一、稀土是重要的战略性资源
- 二、稀土磁性（永磁）材料与应用
- 三、稀土高频磁性材料与应用
- 四、稀土磁制冷材料与磁制冷技术

致 谢

中科院物理研究所永磁与磁制冷材料研究团队

中科院理化研究所磁制冷技术研究团队

中科院宁波材料所高频磁性材料研究团队

博士生毕业生：王利晨、郑新奇、商荣祥、熊杰夫、赵鑫、张博、李锐、刘丹、左淑兰、张艳、刘艳丽、郝嘉政。。。

一、稀土是重要的战略性资源

版权归沈保根院士所有，未经许可，禁止用于商业用途。如有引用，请注明出处。

学术传播使用

任何物质都具有磁性，任何空间都存在磁场

从基本粒子到宏观宇宙天体，磁场与磁现象无处不在



内容丰富



多学科交叉

磁性材料和磁技术的广泛应用

磁应用

电子
电力

工业
生产

家用
电器

新能
源

交通
运输

生物
医学

信息

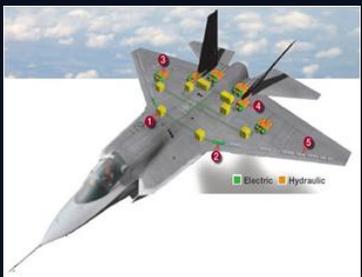
军事
国防

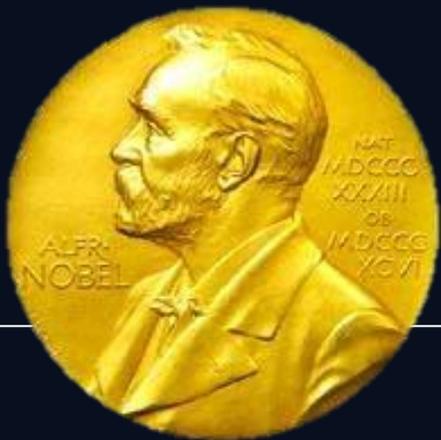
通讯

地质
探测

科学
研究

环境





◆ 在迄今为止的206位诺贝尔物理学奖获得者中，有32位获奖者的获奖工作与磁学研究有关。

◆ **磁学是现代物理学中的重要基础学科。**

年代	获奖者	与磁学有关工作
1902	P. Zeeman	塞曼能
1902	H. A. Lorentz	洛伦茨力
1903	P. Curie and M. Curie	居里温度
1920	Charles E. Guillaume	镍钢合金
1922	N.H.D. Bohr	玻尔磁子
1932	W.K.Heisenberg	海森堡交换作用
1935	James Chadwick	发现中子
1939	Ernest O. Lawrence	回旋加速器
1943	O.Stern	测量质子磁矩
1944	I.I.Rabi	拉比进动，磁共振
1945	W.Pauli	泡利不相容原理
1952	F.Bloch & E.M.Purcell	核磁共振
1955	Polykarp Kusch	电子磁矩的精确测量
1961	R.L. Mössbauer	穆斯堡尔谱
1962	L.D.Landau	朗道磁相变理论
1970	H.O.G.Alfven & L.E.F.Neel	磁流体动力学，反铁磁性
1977	J.H.Van Vleck	磁性基础研究
1977	N.F.Mott	磁性基础研究
1977	P.W.Anderson	磁性基础研究
1985	Klaus von Klitzing	量子霍尔效应
1994	B.N.Brouhous & C.G.Shull	中子衍射测量磁结构
1998	D. Tsui, R. Lauclin & H. Sternou	分数量子霍尔效应
2007	A. Fert & P. Grunberg	巨磁电阻效应
2016	D. J. Thouless, F. D. M. Haldane, J. M. Kosterlitz	拓扑相变

稀土金属：镧系元素及同族的前两个元素钪和钇共17种元素

元素周期表 (由中国化学会根据IUPAC的元素周期表译制)

Periodic Table of the Elements

1 1 氢 H hydrogen 1.008 [1.0078, 1.0082]	2 4 铍 Be beryllium 9.0122																	18 2 氦 He helium 4.0026																	
3 3 锂 Li lithium 6.94 [6.938, 6.997]	4 12 镁 Mg magnesium 24.305 [24.304, 24.307]	原子序数	1 氢 H hydrogen 1.008 [1.0078, 1.0082]	元素符号	元素中文名称	元素英文名称	相对原子量	标准原子量	5 5 硼 B boron 10.81 [10.806, 10.821]	6 6 碳 C carbon 12.011 [12.009, 12.012]	7 7 氮 N nitrogen 14.007 [14.006, 14.008]	8 8 氧 O oxygen 15.999 [15.999, 16.000]	9 9 氟 F fluorine 18.998	10 10 氖 Ne neon 20.180	13 13 铝 Al aluminium 26.982	14 14 硅 Si silicon 28.085 [28.084, 28.086]	15 15 磷 P phosphorus 30.974	16 16 硫 S sulfur 32.06 [32.059, 32.076]	17 17 氯 Cl chlorine 35.45 [35.448, 35.457]	18 18 氩 Ar argon 39.948															
19 19 钾 K potassium 39.098	20 20 钙 Ca calcium 40.078(4)	21 21 钪 Sc scandium 44.956	22 22 钛 Ti titanium 47.867	23 23 钒 V vanadium 50.942	24 24 铬 Cr chromium 51.996	25 25 锰 Mn manganese 54.938	26 26 铁 Fe iron 55.845(2)	27 27 钴 Co cobalt 58.933	28 28 镍 Ni nickel 58.693	29 29 铜 Cu copper 63.546(3)	30 30 锌 Zn zinc 65.38(2)	31 31 镓 Ga gallium 69.723	32 32 锗 Ge germanium 72.630(8)	33 33 砷 As arsenic 74.902	34 34 硒 Se selenium 78.971(8)	35 35 溴 Br bromine 79.904 [79.901, 79.907]	36 36 氪 Kr krypton 83.798(2)	37 37 铷 Rb rubidium 85.468	38 38 锶 Sr strontium 87.62	39 39 钇 Y yttrium 88.906	40 40 锆 Zr zirconium 91.224(2)	41 41 铌 Nb niobium 92.906	42 42 钼 Mo molybdenum 95.95	43 43 锝 Tc technetium 101.07(2)	44 44 钌 Ru ruthenium 101.07(2)	45 45 铑 Rh rhodium 102.91	46 46 钯 Pd palladium 106.42	47 47 银 Ag silver 107.87	48 48 镉 Cd cadmium 112.41	49 49 铟 In indium 114.82	50 50 锡 Sn tin 118.71	51 51 锑 Sb antimony 121.76	52 52 碲 Te tellurium 127.60(3)	53 53 碘 I iodine 126.90	54 54 氙 Xe xenon 131.29
55 55 铯 Cs caesium 132.91	56 56 钡 Ba barium 137.33	57-71 57-71 镧系 lanthanoids	72 72 铪 Hf hafnium 178.49(2)	73 73 钽 Ta tantalum 180.95	74 74 钨 W tungsten 183.84	75 75 铼 Re rhenium 186.21	76 76 锇 Os osmium 190.23(3)	77 77 铱 Ir iridium 192.22	78 78 铂 Pt platinum 195.08	79 79 金 Au gold 196.97	80 80 汞 Hg mercury 200.59	81 81 铊 Tl thallium 204.38 [204.38, 204.39]	82 82 铅 Pb lead 207.2	83 83 铋 Bi bismuth 208.98	84 84 钋 Po polonium	85 85 砹 At astatine	86 86 氡 Rn radon	87 87 钫 Fr francium	88 88 镭 Ra radium	89-103 89-103 锕系 actinoids	104 104 钅 Lr rutherfordium	105 105 𬬻 Bh dubnium	106 106 𬬿 Sg seaborgium	107 107 𬬾 Bh bohrium	108 108 𬬽 Hs hassium	109 109 𬬼 Mt meitnerium	110 110 𬬾 Ds darmstadtium	111 111 𬬽 Rg roentgenium	112 112 𬬻 Cn copernicium	113 113 𬬾 Nh nihonium	114 114 𬬽 Fl flerovium	115 115 𬬼 Mc moscovium	116 116 𬬿 Lv livermorium	117 117 𬬾 Ts tennessine	118 118 𬬽 Og oganesson
		21 21 钪 Sc scandium 44.956	39 39 钇 Y yttrium 88.906	57 57 镧 La lanthanoids 138.91	58 58 铈 Ce cerium 140.12	59 59 镨 Pr praseodymium 140.91	60 60 钕 Nd neodymium 144.24	61 61 钷 Pm promethium	62 62 钐 Sm samarium 150.36(2)	63 63 铕 Eu europium 151.96	64 64 钆 Gd gadolinium 157.25(3)	65 65 铽 Tb terbium 158.93	66 66 镱 Dy dysprosium 162.50	67 67 铥 Ho holmium 164.93	68 68 铒 Er erbium 167.26	69 69 铥 Tm thulium 168.93	70 70 镱 Yb ytterbium 173.05	71 71 镱 Lu lutetium 174.97	89 89 锕 Ac actinoids	90 90 钍 Th thorium 232.04	91 91 镤 Pa protactinium 231.04	92 92 铀 U uranium 238.03	93 93 镎 Np neptunium	94 94 钚 Pu plutonium	95 95 镅 Am americium	96 96 锔 Cm curium	97 97 锫 Bk berkelium	98 98 锎 Cf californium	99 99 锇 Es einsteinium	100 100 镆 Fm fermium	101 101 镗 Md mendelevium	102 102 镎 No nobelium	103 103 镗 Lr lawrencium		

稀土元素

永磁铁氧体

铁族元素

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

2

15

稀土具有重大经济和战略意义

- 稀土是不可再生的战略资源，被誉为“现代工业维生素”、“21 世纪新材料宝库”
- 稀土元素具有异常丰富而且独特的磁、光、电学等物理和催化、敏化、活化等化学特性
- 稀土广泛应用于航空航天、新能源汽车、轨道交通、信息传输、激光照明、智能制造等13 个领域、40 多个行业
- 稀土是制造导弹、雷达、潜艇、卫星、战斗机等高科技武器不可替代的核心材料，高端产品被美、日、欧严重“卡脖子”



“中东有石油，中国有稀土”

——小平同志1992年南巡时的讲话



稀土是重要的战略资源，也是不可再生资源。要加大科技创新工作力度，不断提高开发利用的技术水平，延伸产业链，提高附加值，加强项目环境保护，实现绿色发展、可持续发展。

习近平总书记2019年5月视察赣州时的讲话

稀土是世界强国资源争夺的核心

美国：关键材料战略

5种稀土元素镝、钕、铽、铈和钇被列入清洁能源技术和供应风险最关键材料

美国防部呈国会报告(2016)，美国总统令(2017)，美国商务部报告(2019)

欧盟：关键原材料清单

将重稀土和轻稀土等27种关键原材料纳入稀缺名单

日本：元素战略计划

在稀土资源储备、技术进步、资源获取、替代材料寻求等方面持续采取措施

澳大利亚：关键项目

计划出资57亿澳元（约合人民币277.55亿元），为15个稀土和关键矿业新项目提供开发支持



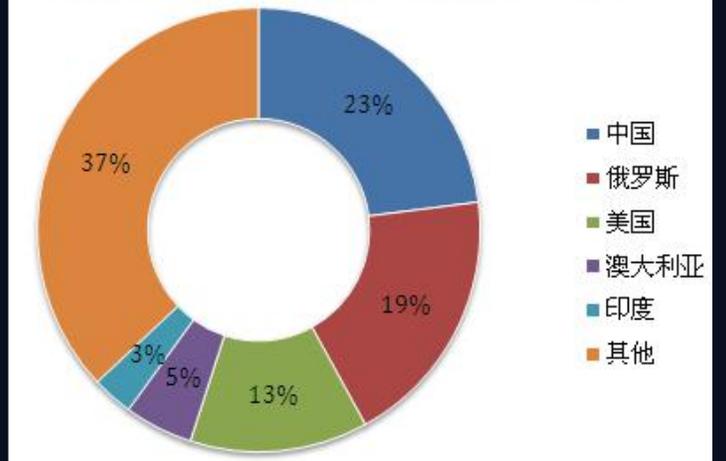
稀土被各国视为争夺未来高科技领域战略制高点的关键性原材料

稀土是我国特色优势资源，在全球举足轻重

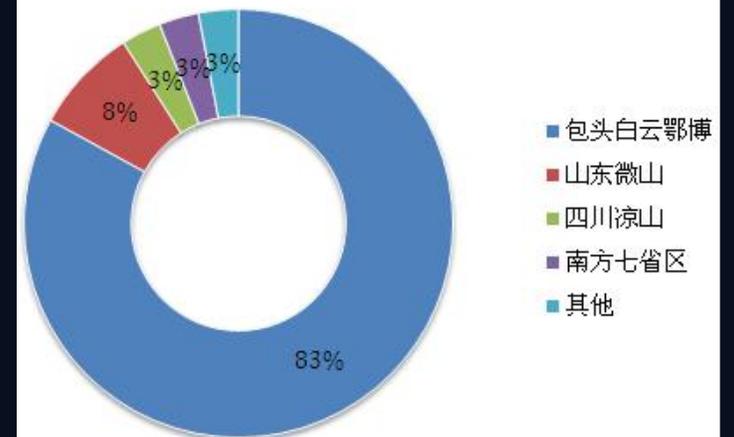
- 据2012年6月《中国稀土状况与政策》白皮书数据，2009年我国稀土储量1859万吨，约占世界总储量的23%（与美国地调局数据有差异）
 - 我国储量丰富、矿种和稀土元素齐全、稀土品位高、矿床类型单一、分布面广而又相对集中，在全国2/3省（区）均有发现
 - 呈现北轻南重的分布特点，离子型中重稀土则主要分布在江西赣州、福建龙岩等南方地区
- 经过60多年努力，我国稀土还占据产量、出口量和消费量的世界第一：以23%的储量供应了全球90%以上的市场需求
- 我国在稀土采掘、冶炼、分离提纯方面占据绝对领先地位，具备话语权。以2018年为例：全球稀土矿产品产量约19.5万吨，我国约12万吨占62%；全球稀土冶炼分离产量约14.6万吨，我国产量12.5万吨约占86%

注：以稀土氧化物计。数据来自2012年6月发布的《中国稀土状况与政策》白皮书。

全球各大稀土矿储量国储量占全球比率



中国稀土资源分布情况



全球稀土矿的分布

所在国家	矿床数	矿床类型	矿床数		
美国	107	PLACER, Shoreline	264		
澳大利亚	98	ALKALIC IGNEOUS	122		
中国	97 ^{注2}	CARBONATITE	107		
加拿大	51	PLACER, Alluvial	78		
巴西	48	CARBONATITE WITH RESIDUAL ENRICHMENT	42		
俄罗斯	40	OTHER-- Uncertain	42		
越南	25	OTHER IGNEOUS-AFFILIATED (including pegmatites and veins)	38		
印度、斯里兰卡	各20	PHOSPHORITE	21		
泰国	18	ION ADSORPTION	19		
孟加拉	16	METAMORPHIC	16		
新西兰、南非	各14	PLACER, Uncertain origin	14		
莫桑比克	13	PLACER, Paleoplacer	13		
马来西亚	12	OTHER - Uranium Deposits	8		
安哥拉	11	OTHER- F Deposits	7		
印度尼西亚、缅甸、纳米比亚、沙特阿拉伯	各10	HYDROTHERMAL FE-OXIDE	4		
马达加斯加、蒙古	各9	OTHER - Pb Deposits	2		
马拉维、韩国、乌克兰	各8	OTHER- Bauxite- or laterite-hosted	2		
刚果、挪威	各7	合计17种矿床	799个		
格陵兰、坦桑尼亚	各6	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>美国地质调查局 (USGS, Open-File Report 02-189, 2002)</p> </div>			
吉尔吉斯斯坦、毛里塔尼亚、赞比亚	各5				
亚美尼亚、肯尼亚、墨西哥、委内瑞拉	各4				
阿根廷、埃及、芬兰、哈萨克斯坦、瑞典、乌干达	各3				
玻利维亚、布隆迪、马里、尼日利亚、索马里、乌拉圭	各2				
阿富汗、贝宁、喀麦隆、哥伦比亚、丹麦、加蓬、德国、加纳、几内亚、圭亚那、利比里亚、利比亚、摩洛哥、朝鲜、巴拉圭、菲律宾、波兰、罗马尼亚、卢旺达、塞拉利昂、苏里南、塔吉克斯坦、土耳其、阿拉伯联合酋长国、乌兹别克斯坦、津巴布韦	各1				
合计74个国家				全球合计：799个稀土矿床	

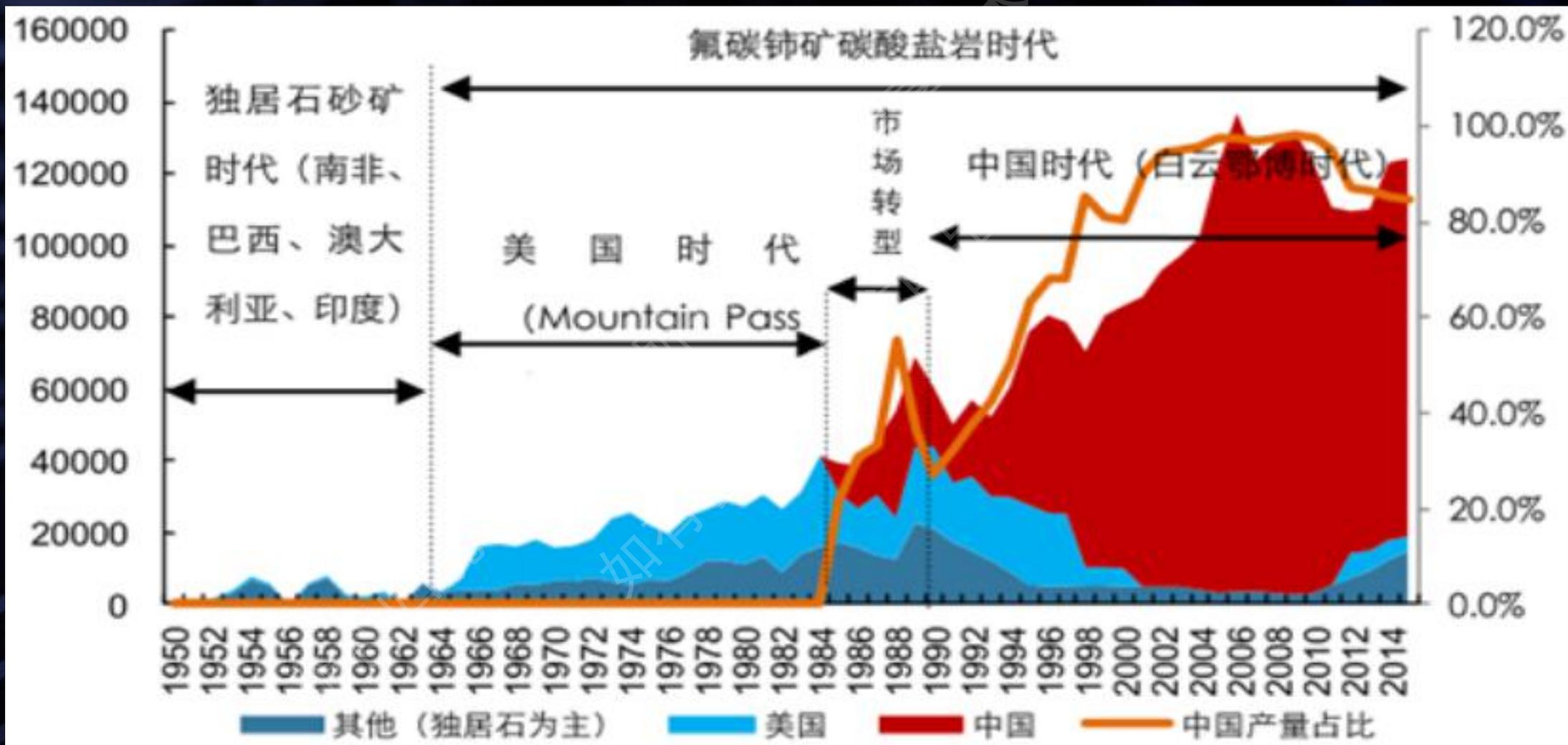
白云鄂博稀土矿的发现

- ◆ 丁道衡先生1927年发现铁矿石（中瑞西北科考团）
- ◆ 何作霖先生1936年发现含稀土矿物 - 独居石
- ◆ 张培善先生1957年发现铌矿 - 易解石
- ◆ 新中国成立后建立的第一座铁矿山
- ◆ 1950 ~ 1978年开展详细的勘探和相应研究工作

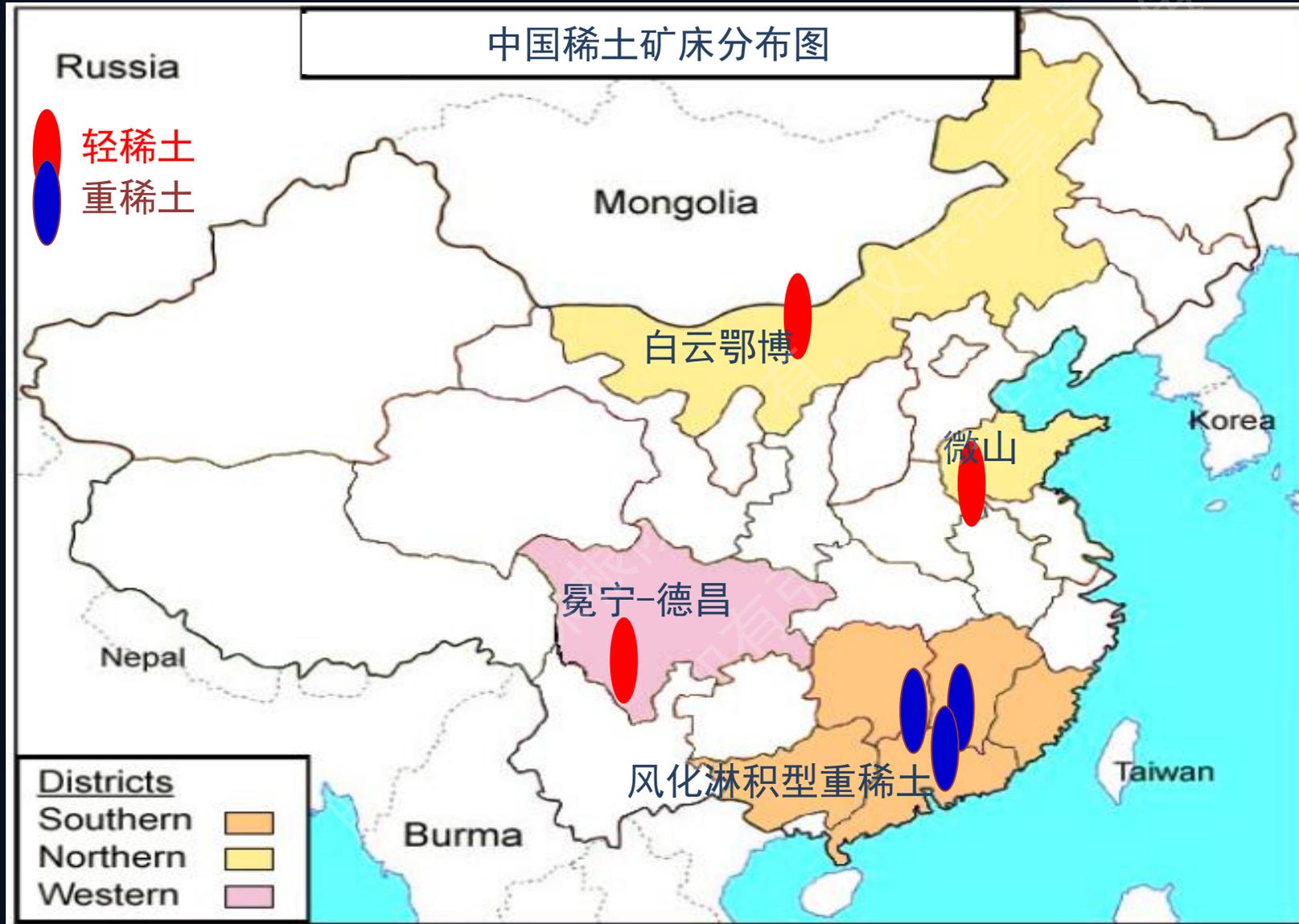


白云鄂博矿区丁道衡塑像

稀土矿与稀土原材料



我国稀土矿产分布：南重北轻

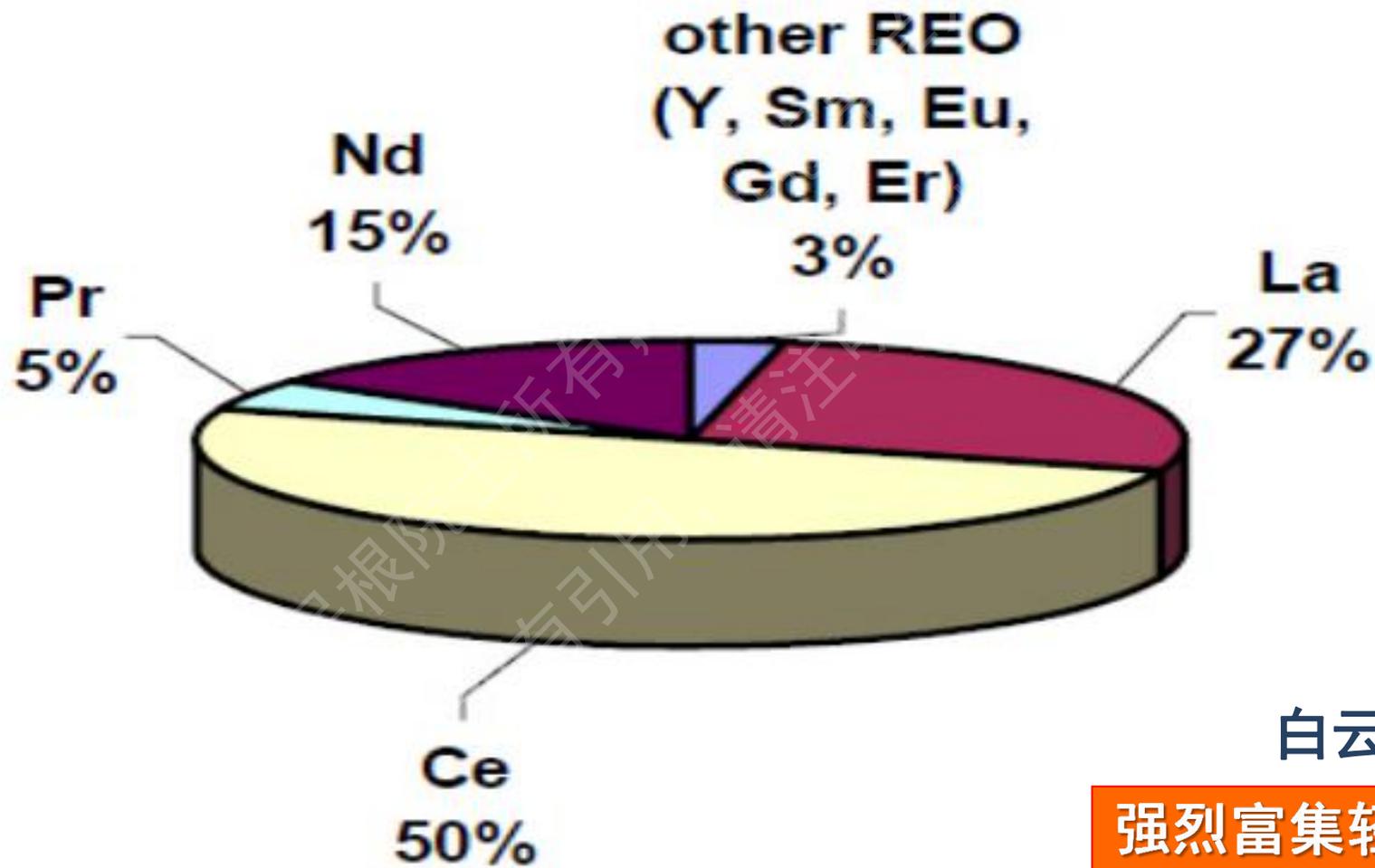


美国地调局称，2010年我国可开采稀土储量为**3600万吨**，约占世界总储量9900万吨的**36%**（2012年国务院新闻办发布占世界总储量23%），是目前**世界稀土资源的第一大国**。

我国稀土资源分布情况

- ◆ 我国稀土资源世界第一，分布在全国22个省区，矿种齐全，北方以轻稀土为主，南方以中重稀土为主。
- ◆ 内蒙古白云鄂博稀土共生矿占我国稀土工业储量的83.65%，是世界第一大稀土矿。（铁、稀土、铌、钛、锆及钽的矿物共70多种，约占总数的35%。其中主矿段平均品位：Fe 35.97%、 RE_2O_3 6.19%、 Nb_2O_5 0.141%，铌储量660万吨，占全国72%，仅次于巴西）。
- ◆ 主要分布在四川凉山（2.88%）、山东微山（7.69%）等的氟碳铈稀土矿占我国稀土工业储量的10.57%。
- ◆ 全球少见的离子型中重稀土矿，主要分布在江西、广东、福建、湖南、广西等南方7省区（2.88%）。其他稀土矿占全国的2.9%。

稀土氟碳酸盐矿物中稀土元素所占比例



白云鄂博

强烈富集轻稀土元素

白云鄂博矿资源有效利用

铁、稀土、铌、钽、钍及钷的矿物共70多种元素



我国稀土产业可持续发展面临的挑战

■ 稀土矿总收率和萃取分离效率低

总收率：南方离子矿10%~20%；白云鄂稀土矿约10%，四川稀土矿30%~40%

萃取率：>1000个分离级获得单一稀土化合物，酸碱试剂耗量大，废弃物排放量大

■ 现有技术生态破坏严重，污染治理难度大

废水排放：盐分大，氨氮含量高，有机物COD高

废气排放：氟化物、酸雾、粉尘等

■ 资源综合利用水平低

以白云鄂博稀土矿为例，多种金属储量世界第一，但综合利用率不到10%

废旧材料中稀土资源回收利用低于10%

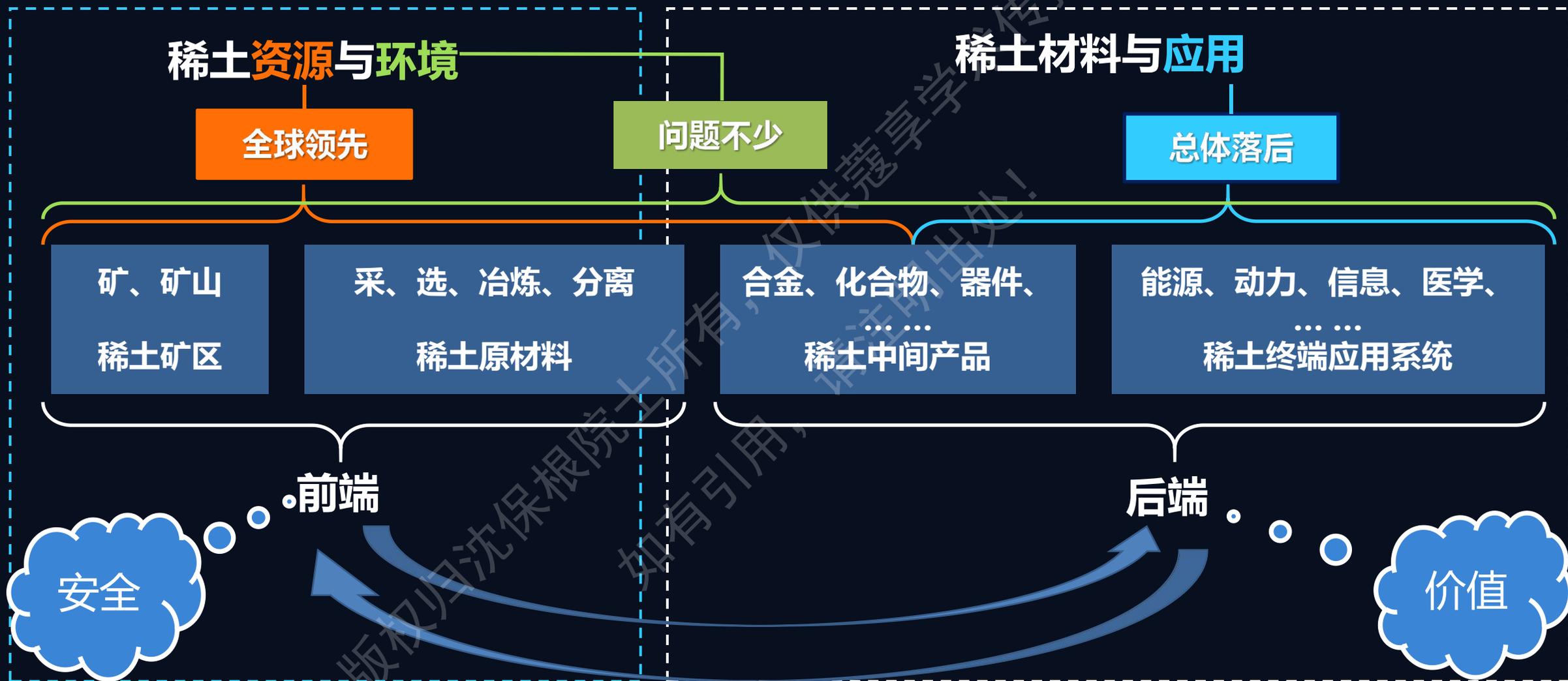
■ 高端产品不足，产品附加值低

产品纯度低，无法满足高端产品需求

大量产品粗加工后，出口海外，产品附加值低



1. 稀土产业链：



对中国资源从来都不是问题，生态环境安全是关键问题，后端应用是核心问题。

稀土材料与应用

2. 性能用途:



3. 行业领域:



(9/20) 门类

(66/97) 大类

A

B

C

D

E

F

G

M

N

1~5

6~12

13~43

44~46

47~50

51~52

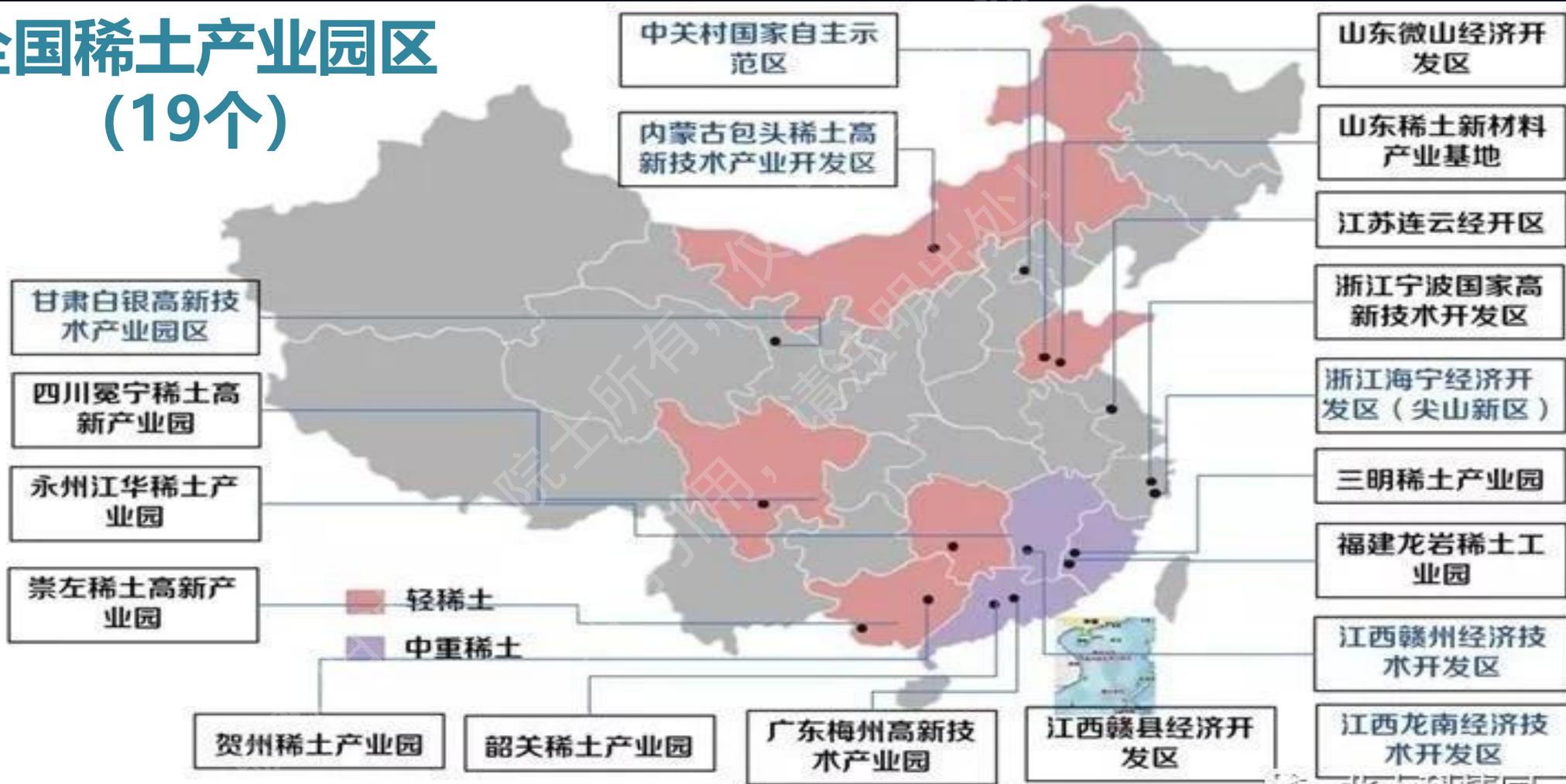
53~60

73~75

76~78

稀土矿与稀土原材料

全国稀土产业园区 (19个)



资料来源：北大科技园整理，2018

稀土行业产业链



终端

稀土终端应用（定向能、通讯、动力、能源等）

元器件

稀土元器件（行波管、镜头、硬盘、电极等）

新材料

稀土新材料（磁性、光学、催化剂、储氢等）

原材料

稀土原材料（采矿、选矿、冶炼分离）

中国科学院稀土研究院

总规划1132亩

总建筑面积约50万 m^2

科研、中试、教学、办公、生活一体化



园区主入口效果图



慢行景观步道



生活区

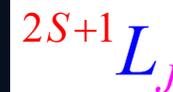


二、稀土磁性（永磁）材料与应用

版权归沈保根院士所有，仅供学术传播使用，如有引用，请注明出处。



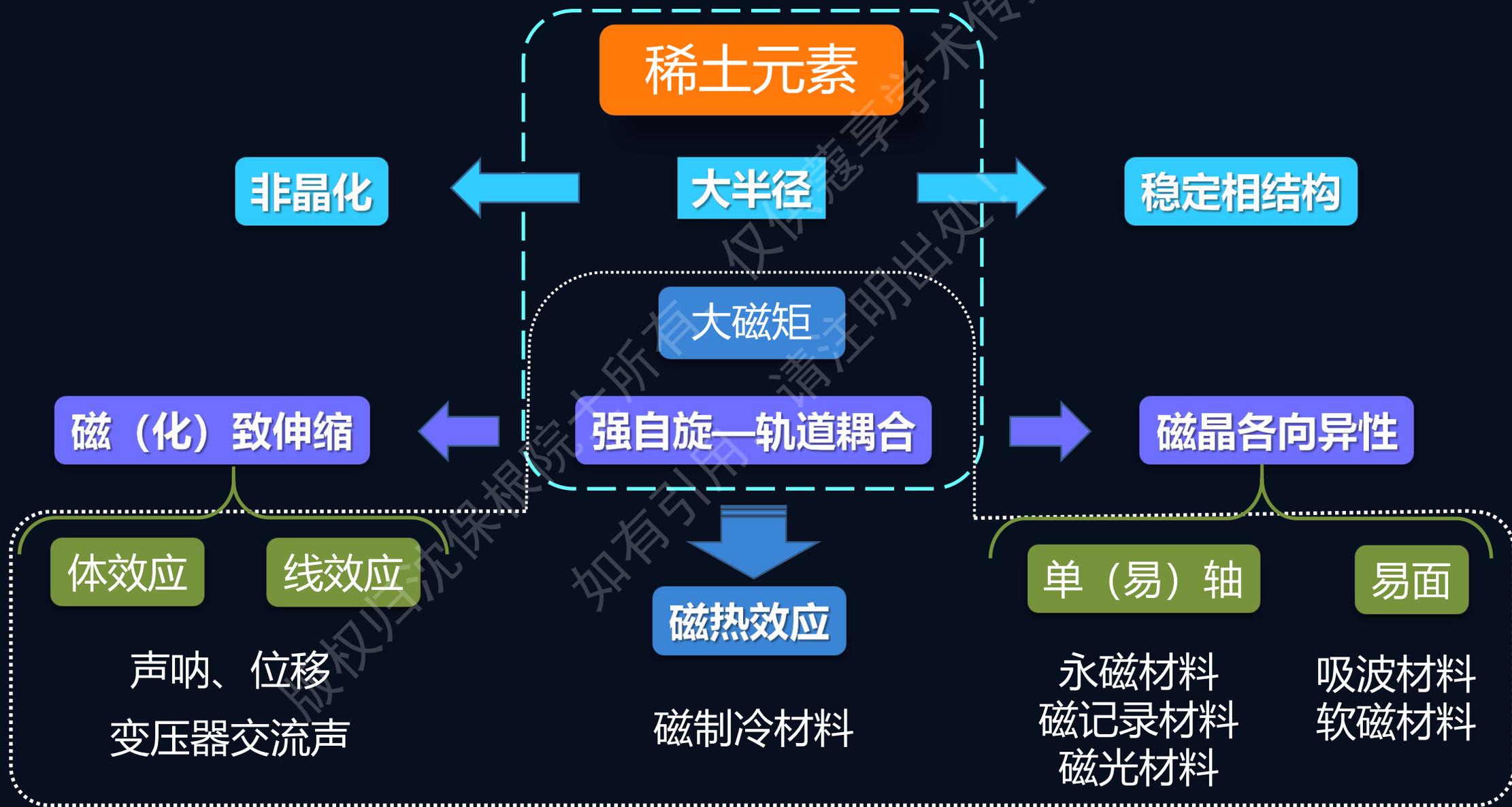
稀土元素的独特性



在自然界稳定存在的独一无二的一族化学元素

电子组态	$n: 1\sim 14$ La、Ce、Gd: $[\text{Xe}]4f^{n-1}5d^16s^2$; Lu: $[\text{Xe}]4f^{14}5d^16s^2$; 其余: $[\text{Xe}]4f^n6s^2$;	价态: +2、+3、+4、+5(Pr) 催化、裂化、敏化
电子能级	除 La^{3+} 和 Lu^{3+} 外的13个 RE^{3+} , 共有1639个能级, 199177条谱线。	激光、长余辉荧光 (已用 48 个跃迁)
自旋轨道耦合	强耦合 $\frac{\hbar}{4m^2c^2} \vec{\sigma} \cdot (\nabla V \times \hat{p})$	磁晶各向异性
磁矩	在所有的元素中, Dy、Ho具有最高的原子磁矩 $\sim 11 \mu_B$	Fe、Co、Ni、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm
金属半径	Eu: 0.2042 nm \sim Sc: 0.1641 nm	Y更像Sm、Gd
离子半径	La^{3+} : 0.1061 nm \sim Sc^{3+} : 0.068 nm	Y^{3+} 更像 Er^{3+}

稀土磁性材料



稀土磁性材料

稀土磁性材料的功能性



稀土磁性材料与应用技术

稀土磁性材料是稀土消费量最大的功能材料，是稀土行业的航向标。高端稀土磁性材料是**清洁能源、高效动力、卫星通信、无人机械、磁成像、医疗健康、固态制冷**等领域中不可或缺的关键换能材料，对国民经济和社会发展以及尖端技术装备具有极其重要的影响。



卫星通信



工业4.0



可再生能源



轨道交通



生态环境安全



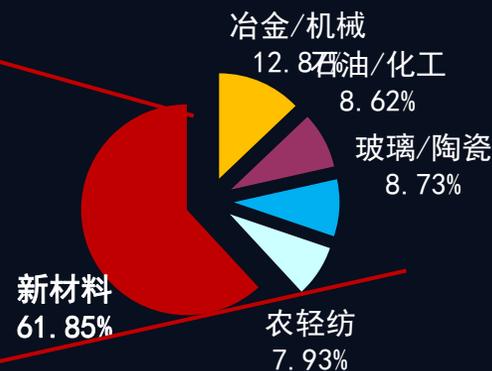
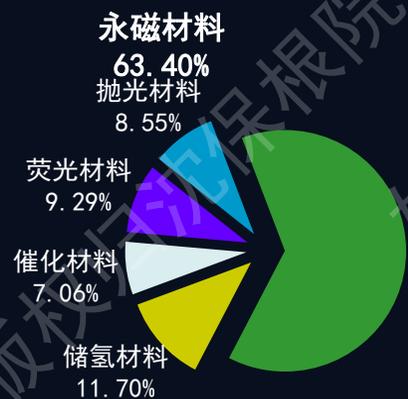
医疗健康

稀土基永磁材料
稀土磁致伸缩材料
稀土磁制冷材料
稀土高频磁性材料

新型高端稀土磁性材料
新型制造工艺技术
近终端一体化器部件
新型高效应用装备与系统

稀土永磁材料

- ◆ 在我国稀土应用中，新材料领域占62%；而在新材料领域应用中，稀土永磁材料占63%。
- ◆ 我国稀土永磁产量超过全球80%，成为全球最大的稀土永磁生产基地，也是重要的稀土永磁应用市场。
- ◆ 随着时代的进步，稀土永磁需求量逐年上升，应用日益广泛，中国稀土永磁产业在全球的地位举足轻重，既面临新机遇，也迎接新挑战。

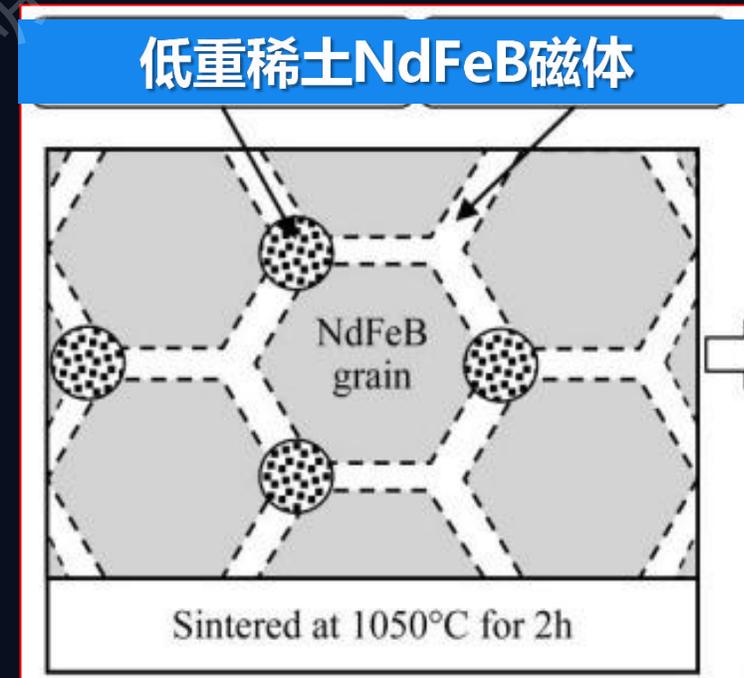
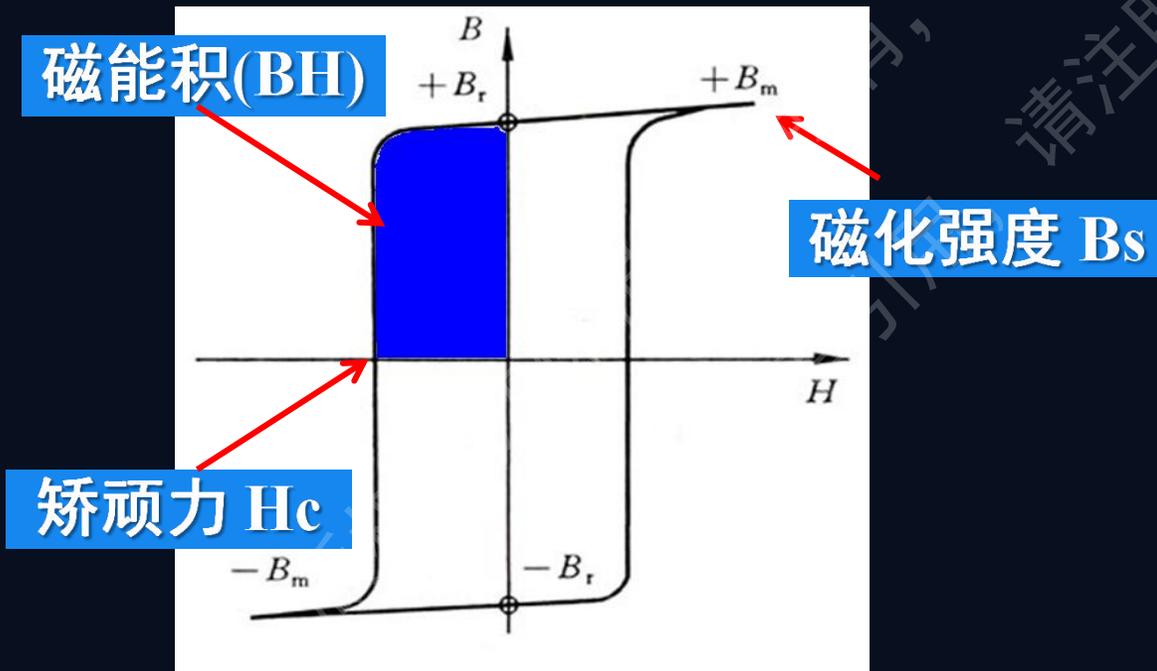


我国已实现稀土资源大国到稀土永磁生产大国的跨越

- 我国稀土永磁产业取得了长足发展，国内稀土在永磁材料中的应用量30年增长了70多倍，稀土永磁产业成为稀土应用领域发展最快、规模最大的产业，也是我国为数不多的在国际上具有重要地位和较大影响力的产业之一。
- 2019年产量超过15万吨，已超过世界总产量的85%，成为全球最大的稀土永磁材料生产基地。
- 产品已进入高档汽车、音圈电机、电子动力转向和核磁共振成像等高端领域，突破了发达国家长期的技术封锁和市场垄断。
- 我国已成为世界稀土永磁材料生产、加工及出口大国，实现了从稀土资源大国到稀土永磁产品生产大国的跨越。

高端稀土NdFeB永磁材料

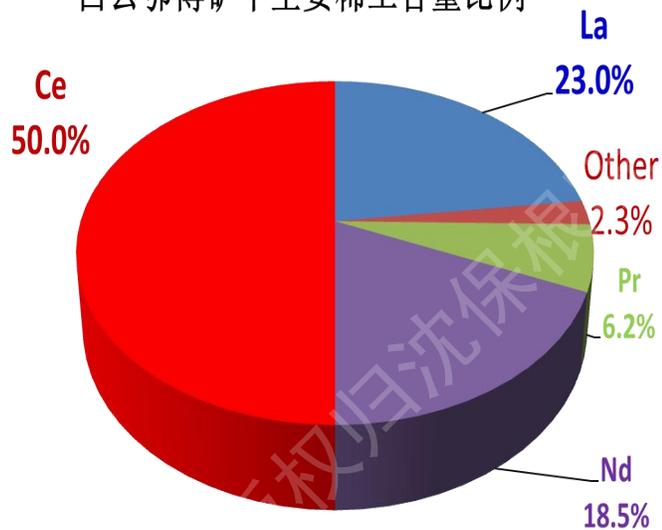
Nd-Fe-B磁体实验值已达到 60 MGOe (479 kJm^{-3})，是理论极限值的 93.8% (理论64 MGOe)，而 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的剩磁 B_r 的实验值为 1.55 T，达到理论值的 97%，进一步提高常规永磁材料的剩磁和磁能积的空间有限。



资源与消耗

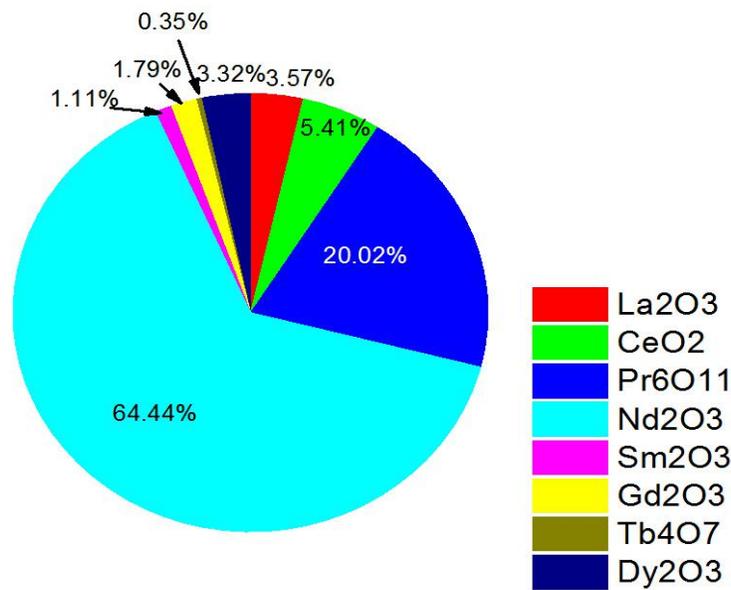
- 稀土元素丰度差异巨大，轻稀土元素丰度高，中重稀土资源匮乏。
- 稀土永磁产业消耗大量Nd、Pr元素，是稀土使用极度不均衡的主要原因，进一步加剧了资源储量差异。

白云鄂博矿中主要稀土含量比例



资源不均衡

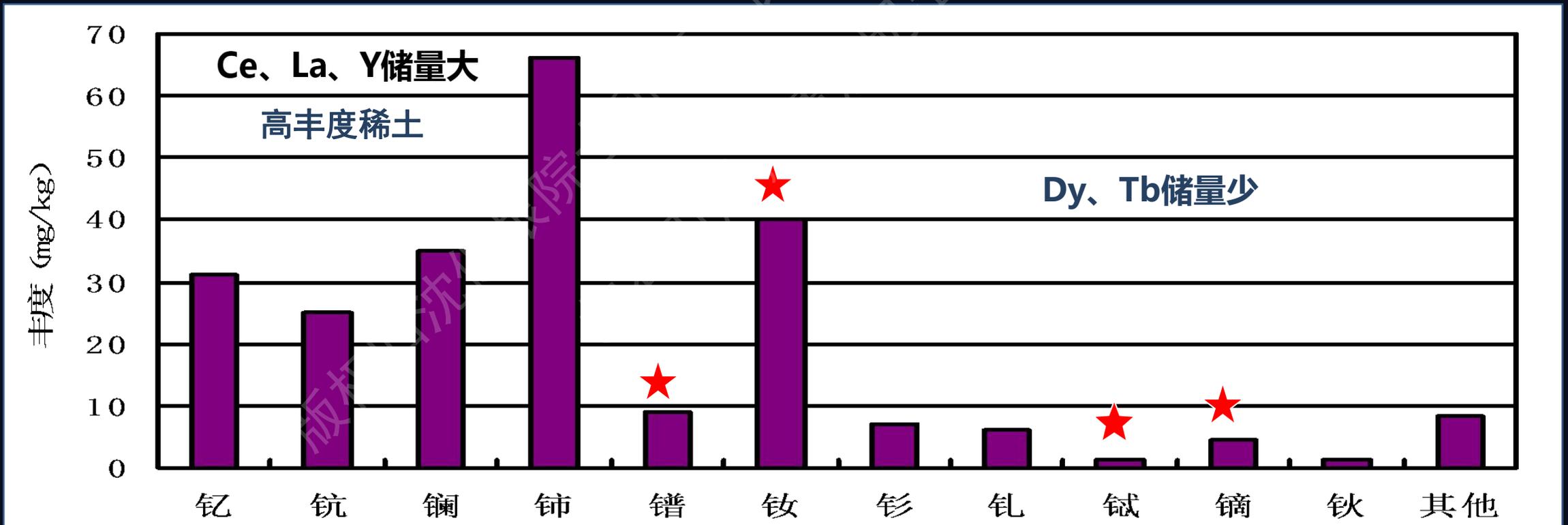
资源节约?



应用不均衡

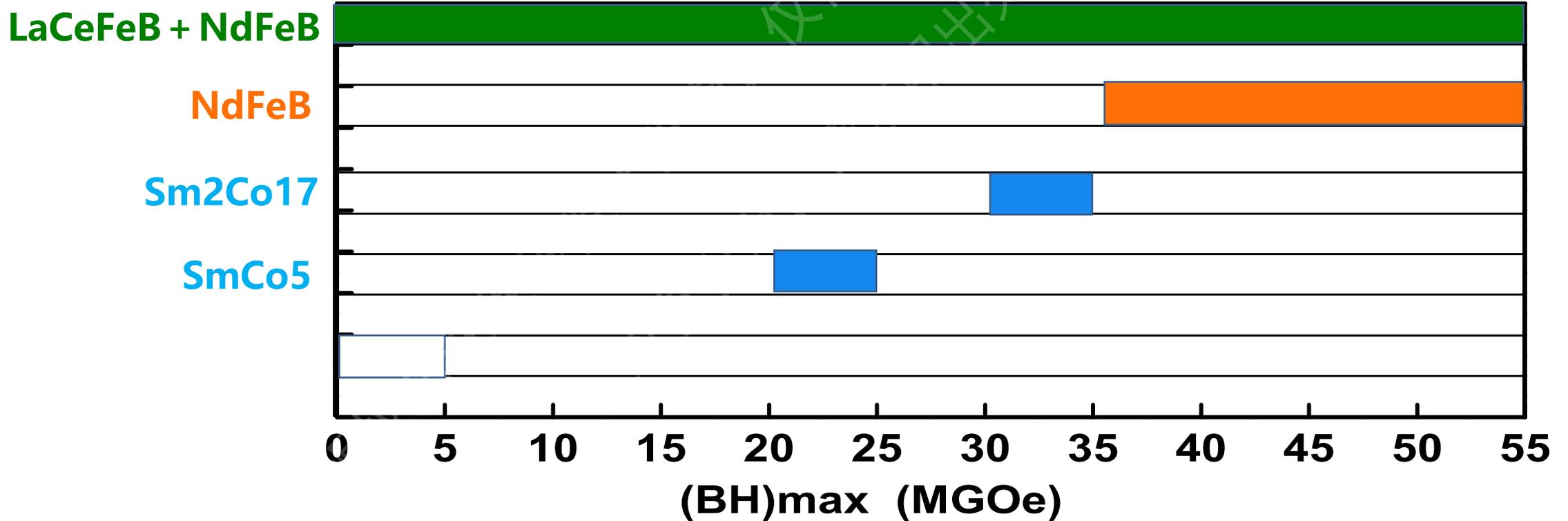
稀土资源的高效均衡利用

- ◆ 节约、高效、均衡利用稀土资源已成为全球性的问题；
- ◆ 高丰度的La、Ce等能够被利用作为有用的永磁材料，相当于稀土资源的利用效率又可以大幅提升。



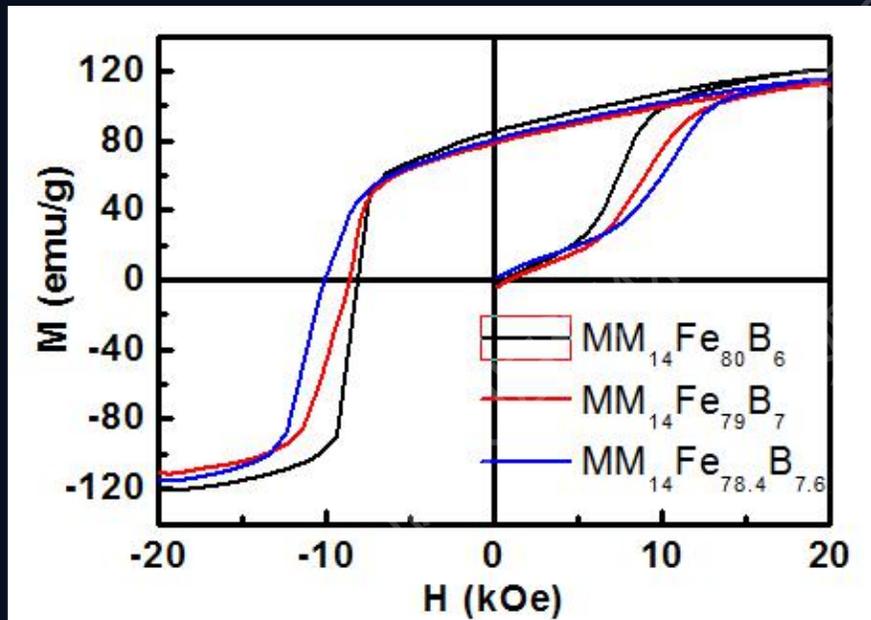
填补材料性能应用范围空白

CeFeB/NdFeB永磁双主相Ce磁体研制成功，十分容易调节磁体性能并具有低的本，填补了稀土永磁性能应用需求的空白，极大拓展了稀土永磁体的应用范围。



MM₁₄Fe_{78.4}B_{7.6} (LaCe/RE=78%) 磁体的永磁性

成分	H _c (kOe)	M(emu/g) (2T)	Mr(T)/M(2T)	BH _{max} (MGoe)	H _c +BH
MM ₁₄ Fe ₈₀ B ₆	8.16	118	0.71	12.5	20.6
MM ₁₄ Fe ₇₉ B ₇	8.7	115	0.7	11.2	19.9
MM ₁₄ Fe _{78.4} B _{7.6}	10.1	112	0.7	10.7	20.8

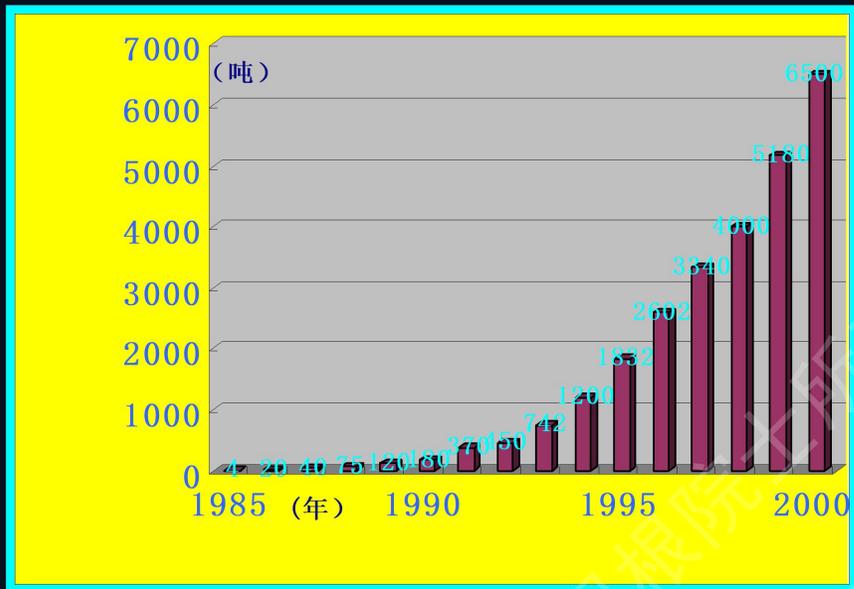


通常高轻稀土永磁材料磁性能较低。在La、Ce占稀土总量78%时，快淬带的矫顽力和磁能积都可以超过10，从实验上证明高轻稀土含量Ce永磁材料可获得实际应用。

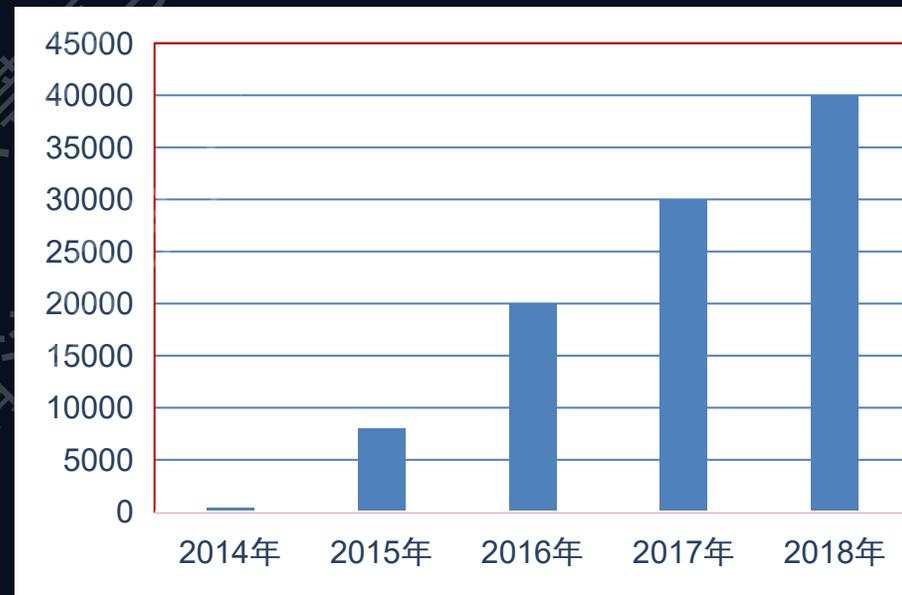


镧钕磁体超过4万多吨，占稀土永磁总量的1/4

1984年-2000年烧结钕铁硼磁体年产量



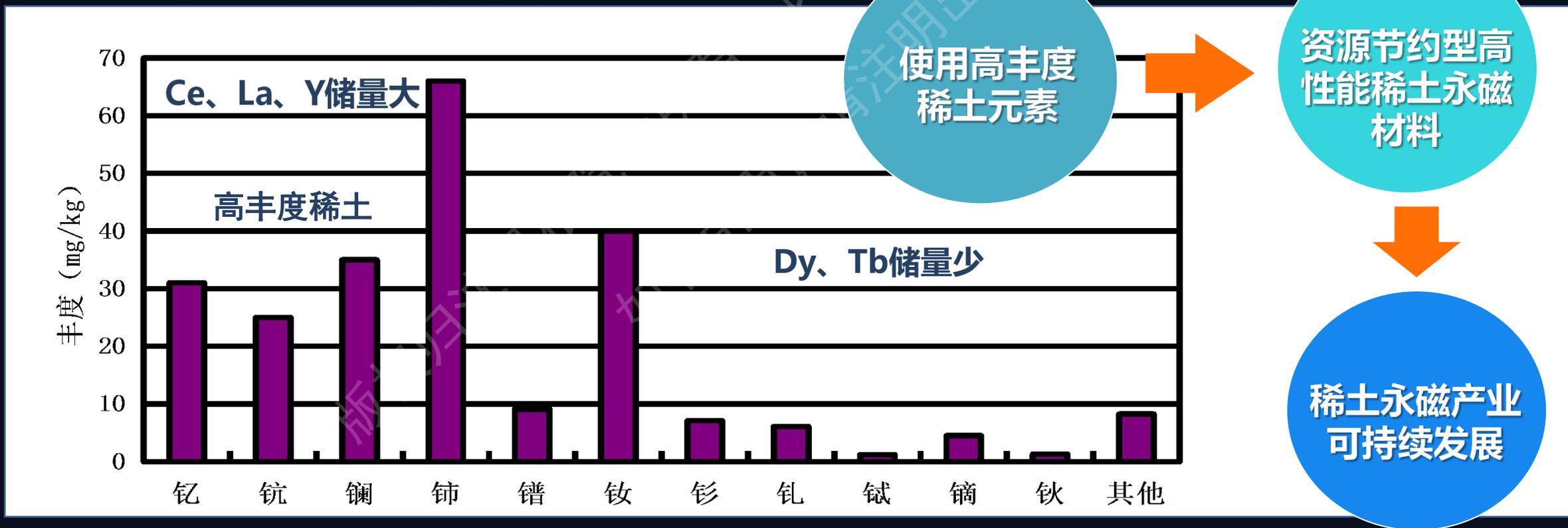
2014年-2018年钕磁体年产量 (吨)



- ◆ **特别重要的是：**一个项目周期内实现了从基础研究到产业化，获得了我国自主知识产权，4年多时间全国Ce磁体产量发展到4万多吨，占稀土永磁总产量（14万吨 2018）的1/4。
- ◆ 钕铁硼磁体用了16年时间发展到0.65万吨。

稀土永磁产业的可持续发展

- ◆ 低成本高丰度的La、Ce等稀土能够被利用作为有用的永磁材料，相当于稀土资源的利用又可以增加3-4倍。
- ◆ 高性能Ce磁体的研制成功，极大促进铈、镧等稀土元素资源的均衡高效利用，有利我国稀土资源和稀土永磁产业的可持续发展。



向中共中央、国务院、全国政协提出咨询建议

中国科学院文件

科发学部字〔2018〕46号

签发人：白春礼

中国科学院关于呈送《我国稀土资源保护与高效利用的对策与建议》的报告

中共中央、国务院：

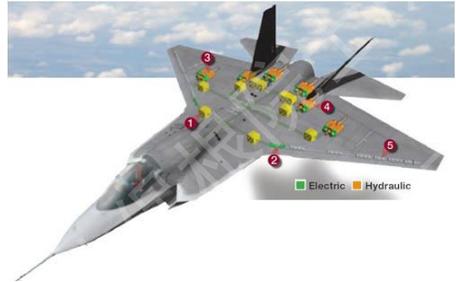
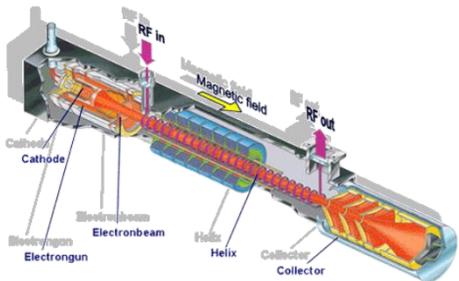
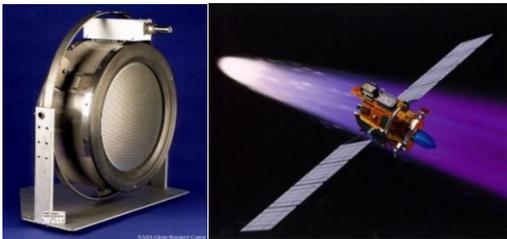
稀土是我国重要战略资源，是培育发展新兴产业、改造提升传统产业的关键材料之一，被广泛应用于智能制造、电子信息、新能源、国防军工等领域。为有效保护和高效利用稀土资源、保障我国稀土行业持续健康发展，中国科学院学部于2014年12月设立了“我国稀土矿产资源保护与稀土高效、平衡利用的对策与建议”咨询项目。项目由沈保根院士牵头，30余位院士专家参加，经深入调研和多次研讨，形成了《我国稀土资源保护与高效利用的对策与建议》咨询报告。

— 1 —

- ◆ 2018年6月，向中共中央、国务院呈送“我国稀土资源保护与高效利用的对策与建议”的报告。
- ◆ 推进国家战略资源立法，实施稀土资源地战略储备制度；
- ◆ 建立完整的国家稀土研发体系，调整国家财政对稀土行业研发的支持模式，设立国家稀土研发基地，加强基础研究与应用技术产品开发。

稀土磁性材料在军事领域的应用

- 没有磁性材料就没有现代国防，包括现代雷达、精确制导导弹、微波通讯、声纳阵列、电子战系统、自动火炮、电驱动舰船、高静音无人机等。



军种	磁性材料在国防中的应用
陆军	自控火炮高速电机、制导炮弹、隐身材料、坦克自动导航和通讯系统、机器人战士控制系统、战场数据云存储
海军	舰船用各种控制电机、潜艇和战舰驱动电机、导航系统、扫雷器、通讯系统、水下声纳、雷达
空军	飞机导航系统的陀螺电机、航空用各种控制电机、空空导弹、空地导弹、隐身材料、雷达系统、战场数据云存储
第二炮兵 (天军)	雷达系统部件、巡航导弹制导系统、核弹点火系统、隐身材料、战场数据云存储
电子对抗	电磁炸弹、磁控管、全电无人机、云存储、隐身材料、声纳传感器、用于电子干扰的行波管

美国M1A2艾布拉姆斯主战坦克



(SmCo永磁体)

美国阿利伯克宙斯盾导弹驱逐舰



(SmCo永磁体)

美国DDG-1000濒海战斗舰



(钕铁硼永磁体)

(各种永磁体)



(各类稀土磁性材料)



版权归沈保根院士所有，未经许可，禁止传播使用
如有引用，请注明出处

HQT服役先进稀土材料与若干应用

艇体结构:

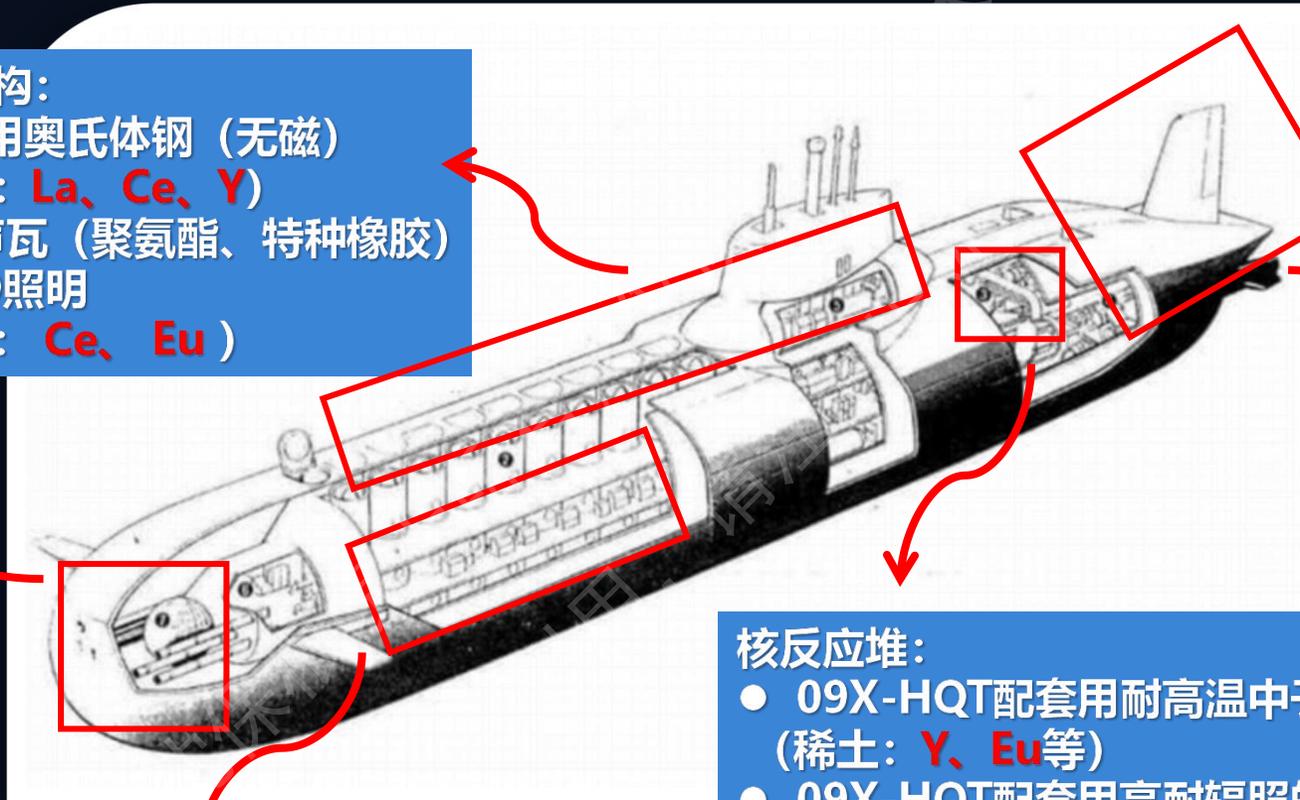
- QT用奥氏体钢 (无磁)
(稀土: **La**、**Ce**、**Y**)
- 消声瓦 (聚氨酯、特种橡胶)
- LED照明
(稀土: **Ce**、**Eu**)

声纳系统:

- 压电材料
(稀土: **Yb**、**Lu**)
- 磁制伸缩探测传感器
(稀土: **Tb**、**Dy**)

各种伺服电机:

(稀土: **Pr**、**Nd**、**Tb**、**Dy**、**Sm**)



推进装置及方向舵:

- 低频吸声降噪材料
(稀土: **Ho**、**Yb**等)

核反应堆:

- 09X-HQT配套用耐高温中子慢化/吸收材
(稀土: **Y**、**Eu**等)
- 09X-HQT配套用高耐辐照的保温材料
(稀土: **La**、**Ce**、**Gd**等)
- 09X-HQT配套用高性能 (n, γ) 辐射屏蔽材料
(稀土: **Sm**、**Eu**、**Gd**等)
- LBE快堆中²¹⁰Po气溶胶过滤净化材料
(稀土: **Yb**、**Tm**等)

(各类稀土磁性材料)



版权归沈保根院士所有，仅供学术传播使用
如有引用，请注明出处！

(SmCo、钕铁硼永磁体)



稀土永磁材料与永磁电机



高端稀土磁材类型单一



稀土永磁电机更为节能



航天航空、军工装备、工业自动控制、化工装备、医疗器械、新能源汽车等，年产值逾千亿

先进节能稀土永磁电机系统
特种稀土永磁电机系统
新能源稀土电机系统
医用稀土永磁设备



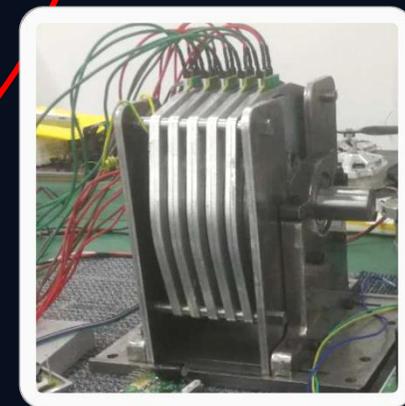
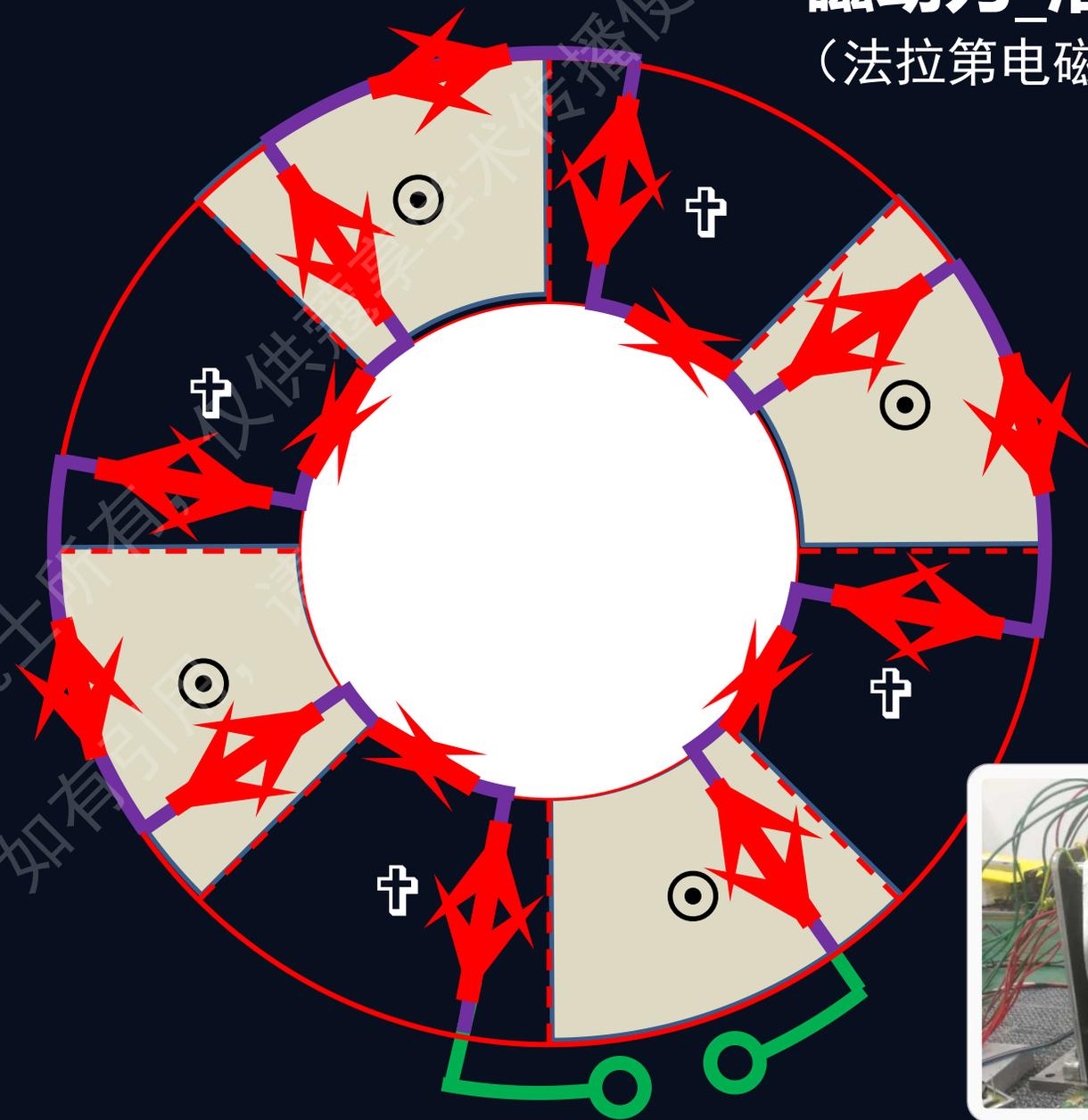
发展以稀土永磁材料为基础的
永磁电机与装备技术，实现核
心设备产业化

稀土永磁材料与永磁电机

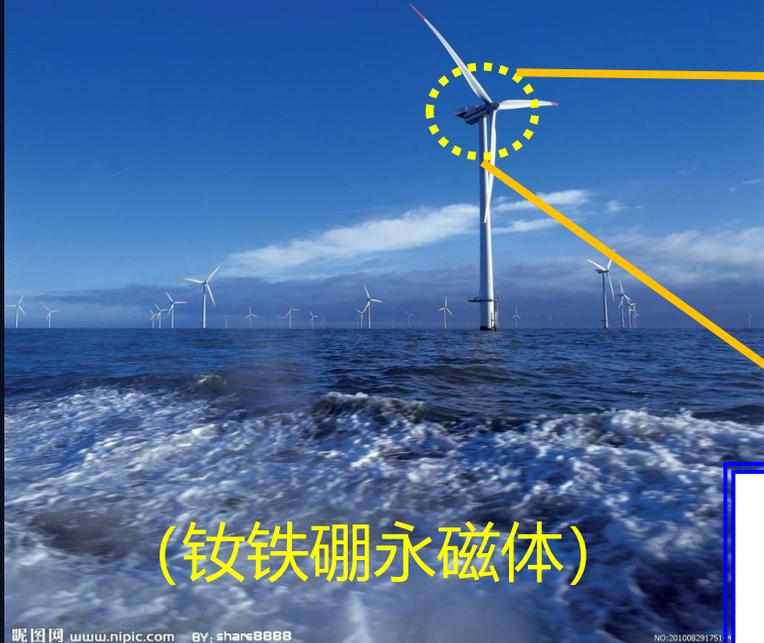
磁动力_洛伦兹力 (法拉第电磁感应定律)



- 制造成本可降低20%以上
- 重量可降低50%~80%
- 体积可降低80%
- 能源转换效率可提高10%~15%

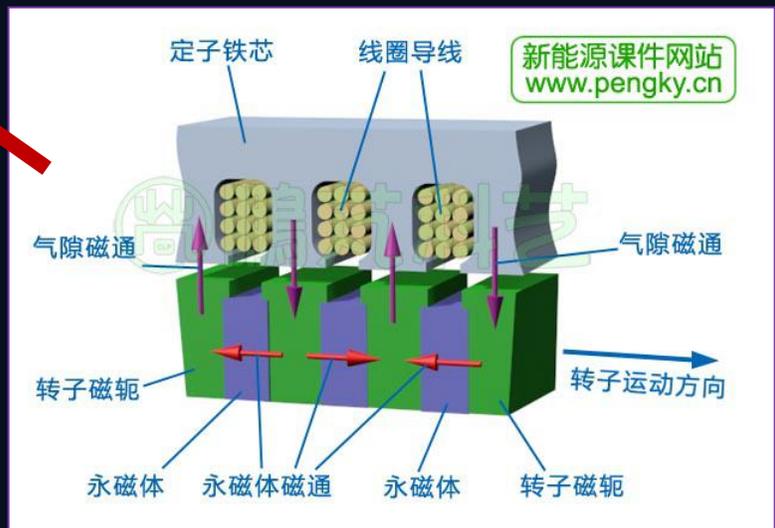
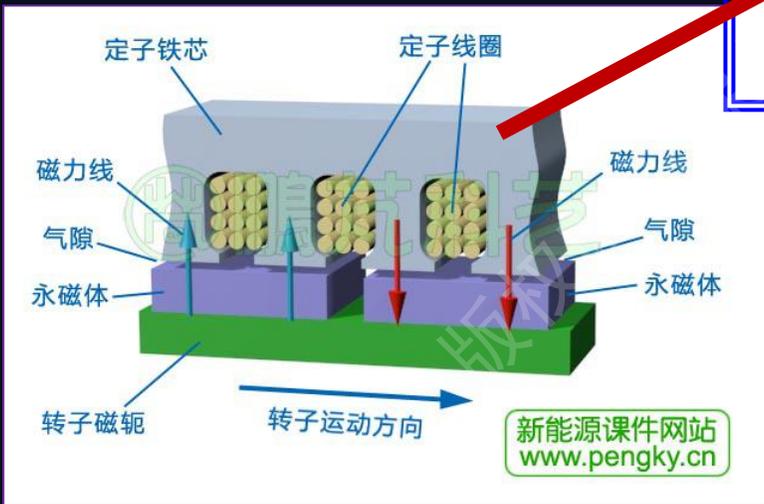
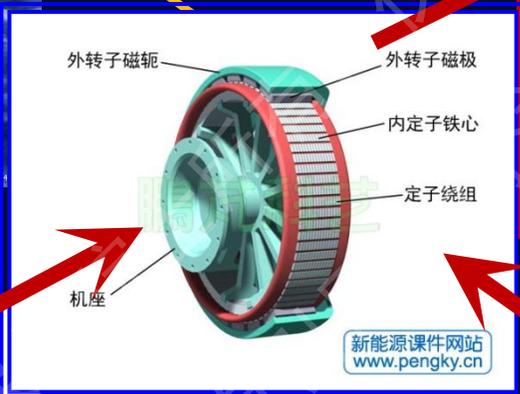
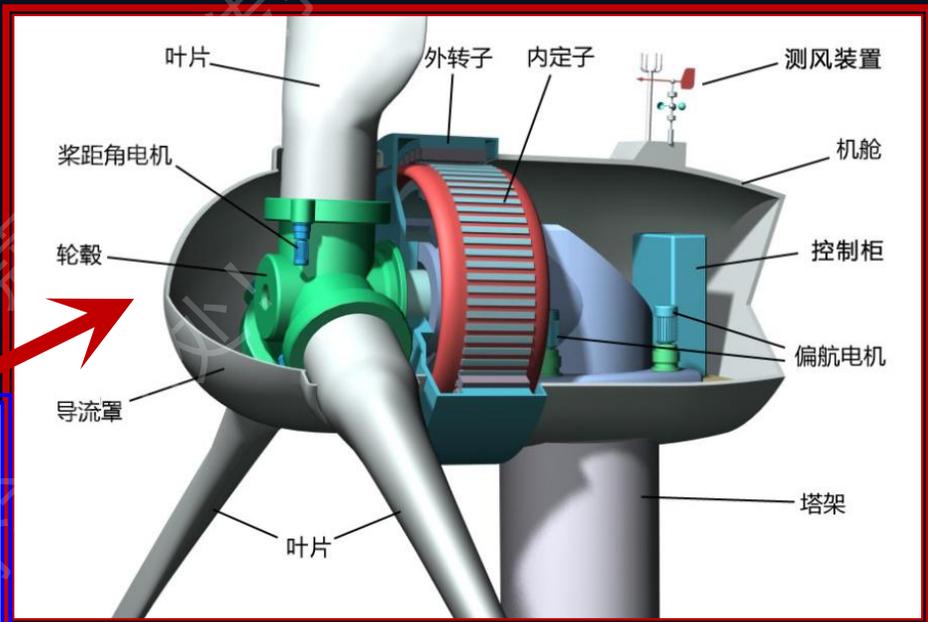


海上风力发电机组



(钕铁硼永磁体)

稀土永磁体：风力、水力发电永磁电机

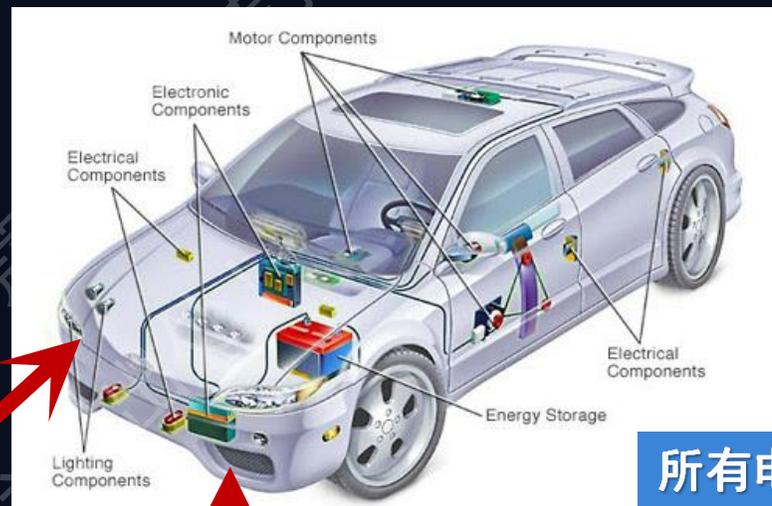


国家重大需求 — 能源动力

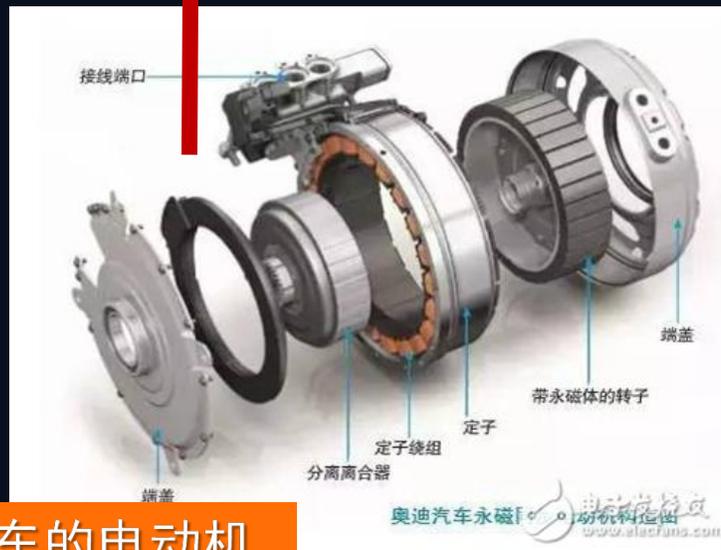
新能源电动汽车

续航400公里

北汽将推电动SUV等18款新车



所有电动部件



稀土永磁体：新能源电动车的电动机

奥迪汽车永磁电机 研析科技图 www.electrims.com



(SmCo、钕铁硼永磁体)

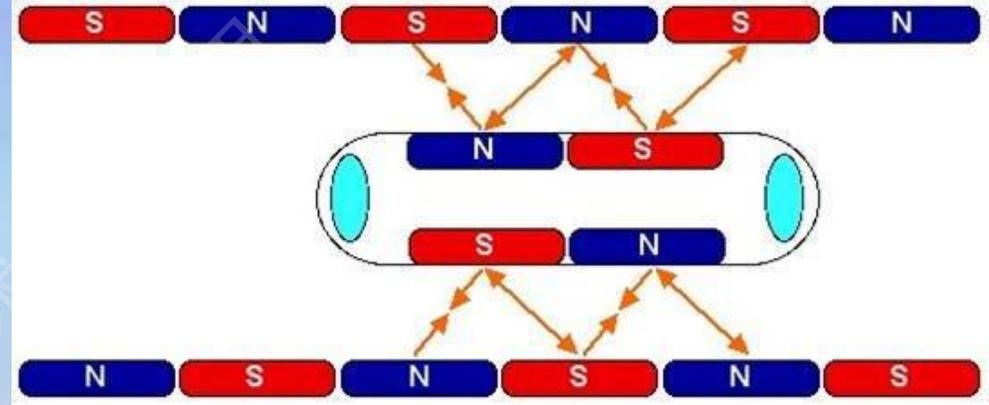
国家重大需求 — 轨道交通

(SmCo、钕铁硼永磁体)

中国高铁 • 和谐号



磁悬浮列车



稀土永磁在大科学装置的应用

中国散裂中子源



稀土永磁在医疗方面的应用

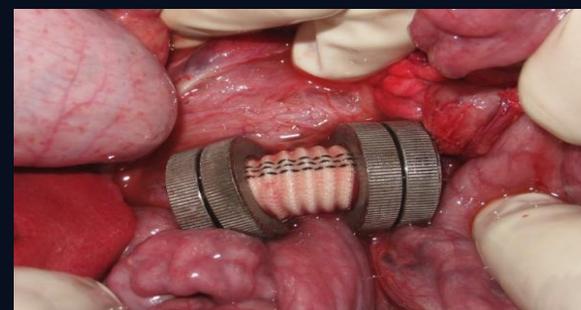
磁外科



临床肝移植供肝快速植入



磁性人工血管复合体



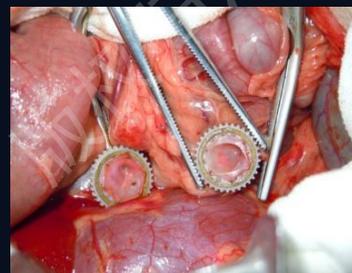
人工血管置换术



系列规格磁自吻合器
更安全、更便捷、更实用



开腹下磁压榨胆肠吻合术 (50例)



磁吻合技术：以磁吻合替代传统手工缝线吻合，可显著降低吻合难度、明显缩短吻合时间、减小器官缺血损害，提高手术安全性，促进患者快速康复。

三、稀土高频磁性材料与应用

版权归沈保根院士所著《稀土永磁材料》一书提供，仅供学术传播使用，如有引用，请注明出处。



稀土高频磁性材料

稀土资源的综合、平衡、高效、节约利用

- 稀土永磁材料：强单轴磁各向异性（稀土元素：Pr, Nd, Tb, Dy）
- 稀土高频材料：易平面磁各向异性（稀土元素：Y, La, Ce, Sm, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu）

37 ^{5s} ₁ Rb Rubidium 85.4678 [Rb]s 4.1771	38 ^{1s} ₀ Sr Strontium 87.62 [Kr]s 5.6949	39 ^{4d} ₁ Y Yttrium 88.90585 [Kr]4d ¹ 5.2173	40 ^{4f} ₀ Zr Zirconium 91.224 [Kr]4d ² 5.6339	41 ^{4d} ₁ Nb Niobium 92.90638 [Kr]4d ⁴ 5.7589	42 ^{1s} ₀ Mo Molybdenum 95.94 [Kr]4d ⁵ 7.3804	43 ^{1s} ₀ Tc Technetium (98) [Kr]4d ⁵ 7.25	44 ^{4f} ₀ Ru Ruthenium 101.07 [Kr]4d ⁷ 7.3808	45 ^{4f} ₀ Rh Rhodium 103.90550 [Kr]4d ⁸ 7.4559	46 ^{1s} ₀ Pd Palladium 106.42 [Kr]4d ¹⁰ 5.3369	47 ^{1s} ₀ Ag Silver 107.8662 [Kr]4d ¹⁰ 7.5752	48 ^{1s} ₀ Cd Cadmium 112.411 [Kr]4d ¹⁰ 5.9908	49 ^{5p} ₁ In Indium 114.818 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ 5.7854	50 ^{5p} ₂ Sn Tin 118.710 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ² 7.3439	51 ^{5p} ₃ Sb Antimony 121.760 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ 5.9084	52 ^{5p} ₄ Te Tellurium 127.60 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ 5.0089	53 ^{5p} ₅ I Iodine 126.90447 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ 10.4513	54 ^{1s} ₀ Xe Xenon 131.290 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ 12.1299	
55 ^{5s} ₁ Cs Cesium 132.90545 [Xe]s 3.6939	56 ^{1s} ₀ Ba Barium 137.327 [Xe]s 5.2117		72 ^{4f} ₀ Hf Hafnium 178.49 [Xe]4f ¹⁴ 5d ² 5.9251	73 ^{4f} ₀ Ta Tantalum 180.9479 [Xe]4f ¹⁴ 5d ³ 7.5498	74 ^{4d} ₁ W Tungsten 183.84 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 7.9640	75 ^{1s} ₀ Re Rhenium 186.207 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵ 7.8335	76 ^{4d} ₂ Os Osmium 190.23 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶ 8.4382	77 ^{4d} ₃ Ir Iridium 192.222 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷ 8.9670	78 ^{4d} ₄ Pt Platinum 195.078 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁸ 8.9688	79 ^{1s} ₀ Au Gold 196.96655 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 9.2255	80 ^{1s} ₀ Hg Mercury 200.59 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 10.4375	81 ^{5p} ₁ Tl Thallium 204.3833 [Hg]5p ¹ 8.1062	82 ^{5p} ₂ Pb Lead 207.2 [Hg]5p ² 7.4157	83 ^{1s} ₀ Bi Bismuth 208.98038 [Hg]5p ³ 7.2855	84 ^{5p} ₃ Po Polonium (209) [Hg]5p ⁴ 8.414	85 ^{5p} ₄ At Astatine (210) [Hg]5p ⁵	86 ^{1s} ₀ Rn Radon (222) [Hg]5p ⁶ 10.7485	
87 ^{1s} ₀ Fr Francium (223) [Rn]7s ¹ 4.0727	88 ^{1s} ₀ Ra Radium (226) [Rn]7s ² 5.2784		104 ^{5f} ₇ Rf Rutherfordium (261) [Rn]5f ¹⁴ 6d ² 5.07	105 ^{5f} ₈ Db Dubnium (262)	106 ^{5f} ₉ Sg Seaborgium (266)	107 ^{5f} ₁₀ Bh Bohrium (264)	108 ^{5f} ₁₁ Hs Hassium (277)	109 ^{5f} ₁₂ Mt Meitnerium (268)	110 ^{5f} ₁₃ Uun Ununillium (281)	111 ^{5f} ₁₄ Uuu Ununium (272)	112 ^{5f} ₁₄ Uub Unubium (269)		114 ^{5f} ₁₄ Uuq Ununquadium (289)		116 ^{5f} ₁₄ Uuh Ununhexium (288)			
			57 ^{4f} ₀ La Lanthanum 138.9055 [Xe]5d ¹ 5.5789	58 ^{1s} ₀ Ce Cerium 140.116 [Xe]4f ¹ 5.5387	59 ^{1s} ₀ Pr Praseodymium 140.90768 [Xe]4f ³ 5.473	60 ^{1s} ₀ Nd Neodymium 144.24 [Xe]4f ⁴ 5.5250	61 ^{1s} ₀ Pm Promethium (145) [Xe]4f ⁵ 5.582	62 ^{1s} ₀ Sm Samarium 150.36 [Xe]4f ⁶ 5.6437	63 ^{1s} ₀ Eu Europium 151.964 [Xe]4f ⁷ 5.6704	64 ^{1s} ₀ Gd Gadolinium 157.25 [Xe]4f ⁷ 5.1486	65 ^{1s} ₀ Tb Terbium 158.92534 [Xe]4f ⁹ 5.8838	66 ^{1s} ₀ Dy Dysprosium 162.500 [Xe]4f ¹⁰ 5.9389	67 ^{1s} ₀ Ho Holmium 164.93032 [Xe]4f ¹¹ 5.9215	68 ^{1s} ₀ Er Erbium 167.259 [Xe]4f ¹² 5.1077	69 ^{1s} ₀ Tm Thulium 168.93421 [Xe]4f ¹³ 5.1843	70 ^{1s} ₀ Yb Ytterbium 173.04 [Xe]4f ¹⁴ 5.2542	71 ^{4d} ₁ Lu Lutetium 174.967 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 5.4259	

电子通讯技术发展需求高性能GHz高频磁性材料

- 5G+、物联网等领域需求大量**工作频率~6 GHz**高端磁电子器件，大部分依赖进口。
高频磁材是磁电转换和调制的关键材料，是磁电子器件发展核心
- 预计至2021年，天线器件市场规模2200 亿元、电磁兼容材料462 亿元、电感器件220.2 亿元

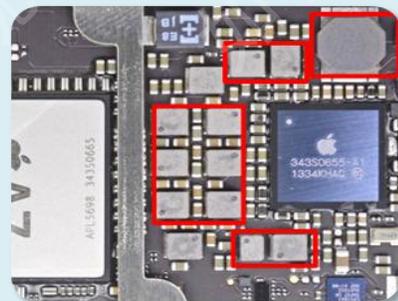
BCC Research. Soft Magnetic Materials: Applications and Markets. January 2020

高频磁材：电磁波传输/吸收、能量转换/调制

通讯天线



电感器件



电磁兼容



吸波隐身



5G+高频器件/材料发展趋势

- 目前天线、电磁兼容及模压电感等高频器件朝着**小型、集成和高效化**发展
- 亟需开发具有**高截止频率 (GHz)、高磁导率、低损耗**特性的高频磁性材料



手机天线

小型化
宽频带

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$



电磁兼容

轻薄化
多功能

$$t_m = \frac{nc}{4f_m \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$



模压电感

高频
低损耗

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l}$$

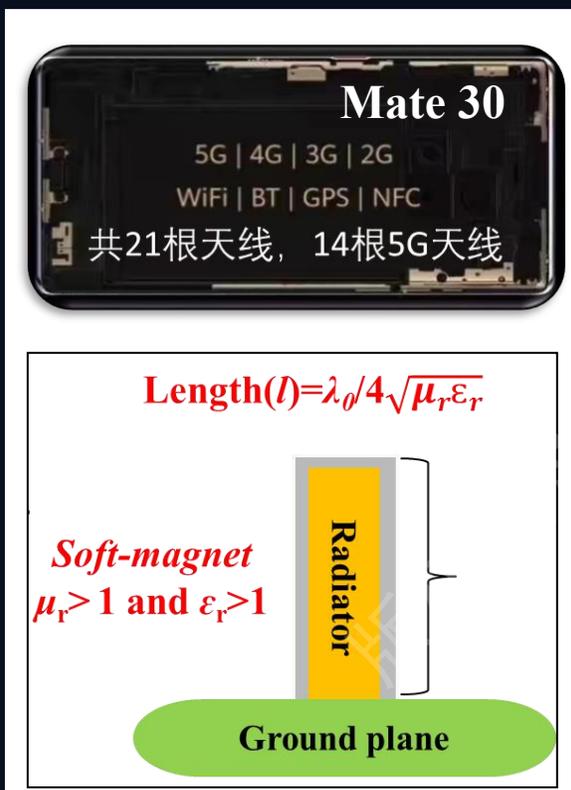


大功率低损耗软
磁复合材料

GHz以上工作
频率软磁材料

5G+高频器件主要瓶颈问题分析

- Mate 30使用21个天线（1-5GHz），采用介电基天线（LCP）。5G后时代需降低天线系统集成难度，天线体积减小、数量减少、带宽增加
- 采用磁电复合基天线可减小体积至20%，数量降低3~5倍（华为仿真结果）



□ 器件大幅增多，设计空间减小

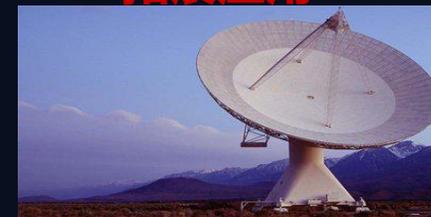
□ 电磁兼容问题凸显，设计难度大

□ 磁、电复合贡献提高小型化因子

□ 磁性材料改善阻抗匹配增加带宽

□ 问题：缺乏6 GHz以上工作频率低损耗高频磁性材料

拓展应用



电磁兼容/吸波材料瓶颈问题分析

- 5G+时代移动终端和基站广泛使用，薄层宽频（0.1mm, 1-6GHz）/导热吸波材料（10 W/K·m）是解决电磁兼容问题关键材料
- 在国防领域，飞行器发热部位（500 °C度以上）电磁波隐身和雷达全频段隐身（1-40GHz）亟待解决
- 美国莱尔德、3M公司把控民用高端产品，国防领域吸波材料已被禁运

5G+
应用



- 移动终端内空间有限
- 应用频率为1-6 GHz
- 器件发热量大幅增加

国防
应用



- 1-40 GHz 宽频覆盖
- 500°C以上温区覆盖



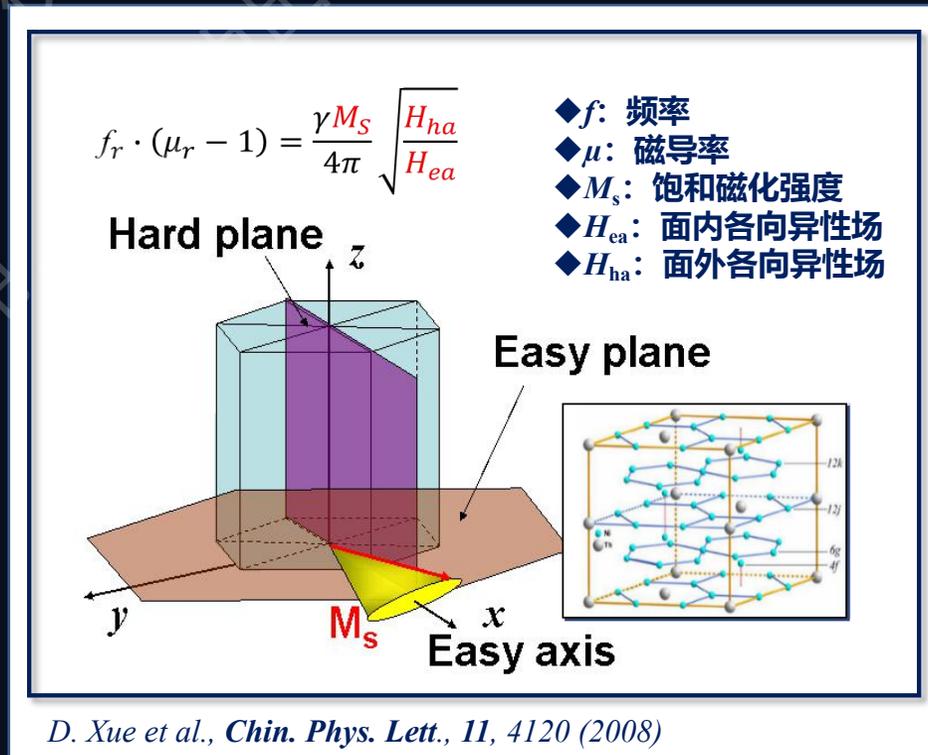
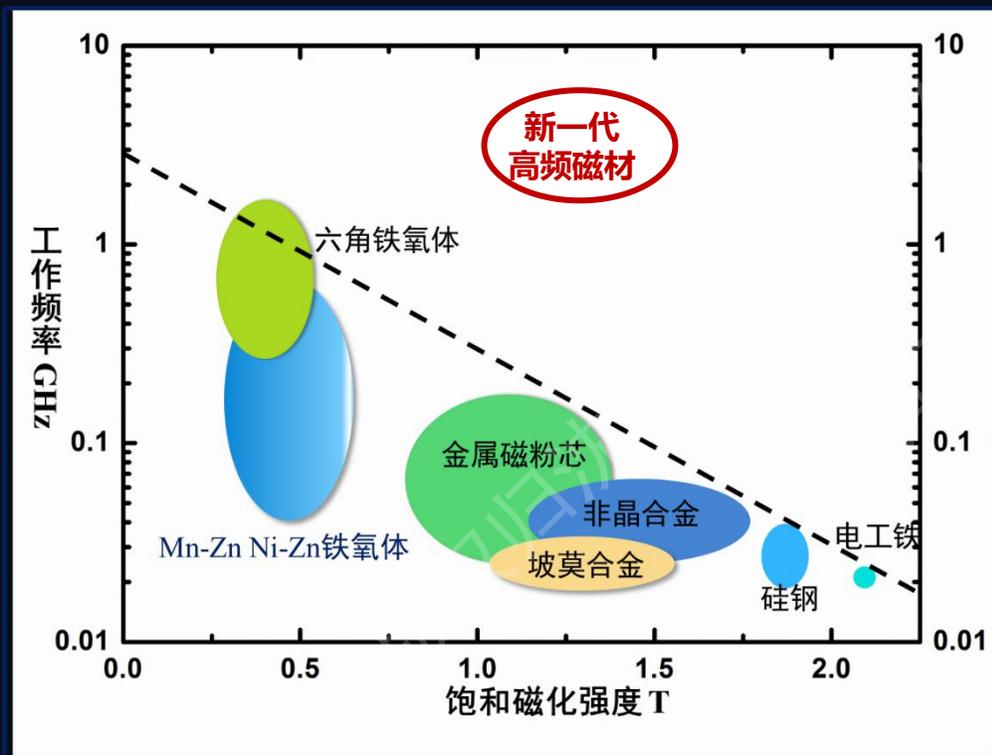
高效电磁波吸收剂

- GHz稀土高频磁材
- 高磁导率、截止频率
- 耐高温磁性材料

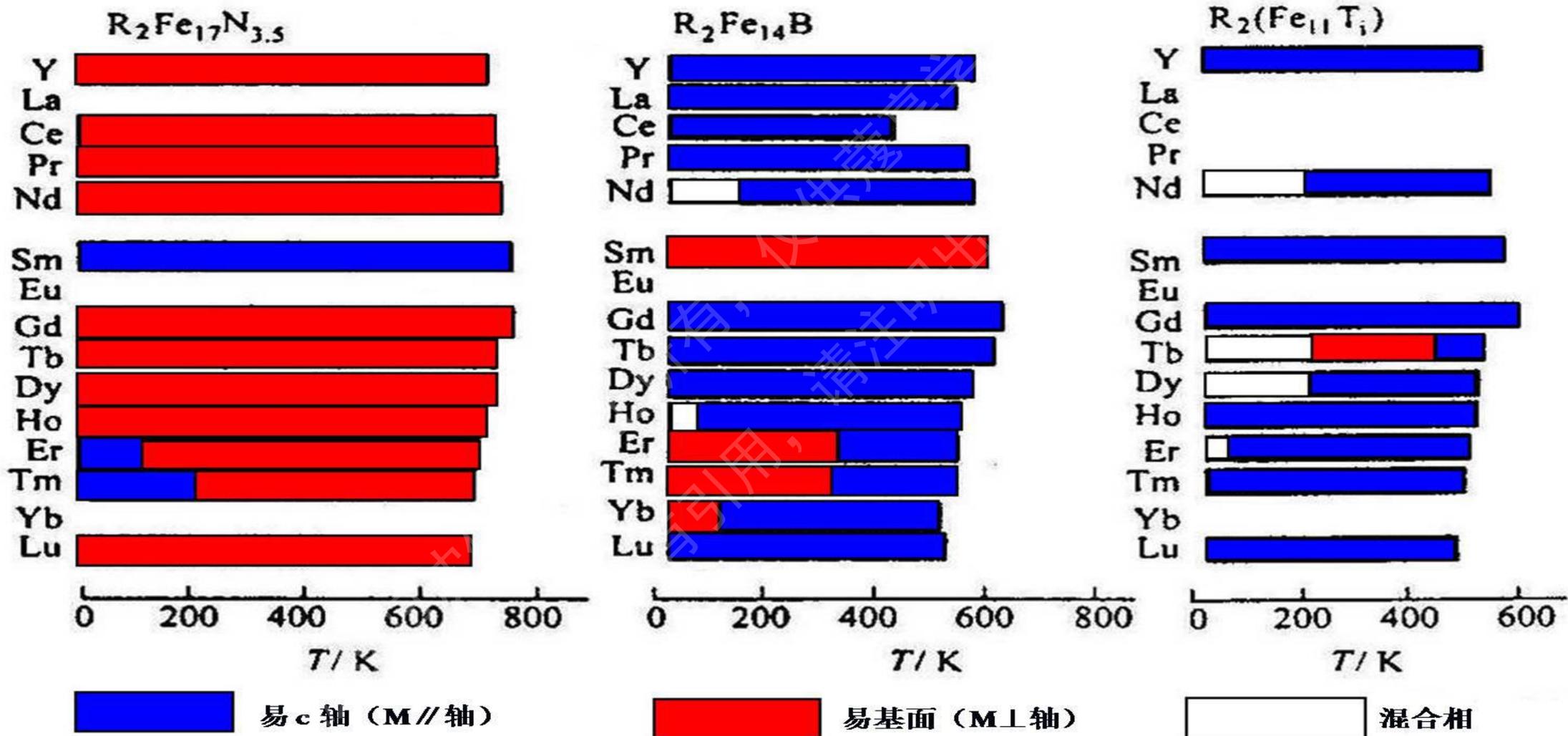
$$t_m = \frac{nc}{4f_m\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

新型稀土高频磁材满足5G+应用发展需求

- 传统磁性材料（如 Co_2Z 铁氧体、Fe基合金）本征工作频率不超过3 GHz
- 具有面各向异性稀土金属间化合物，因其高饱和磁化强度和磁各向异性，理论工作频率20 GHz，可解决5G+高频器件关键“痛点”难题



易面型稀土磁性材料



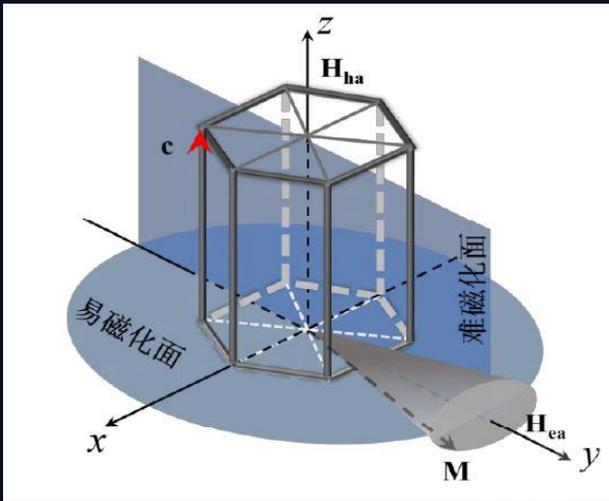
几种材料的高频磁性参数比较 (括号内为理论值)

	M_s (T)	H_{ea} (Oe)	H_{ha} (Oe)	f_r 实验值 (GHz)	$f_r(\mu_r-1)$ 实验值 (GHz)	ε (2 GHz) ($V_c=0.35$ 复 合物)	T_c (K)
$(Ni_{0.5}Zn_{0.5})Fe_2O_4$	0.45			0.015	3.6		560
$Co_2Ba_3Fe_{24}O_{41}$ (Co_2Z)	0.33	120	12000	1.5	16	5.5	680
$Mg_2Ba_2Fe_{12}O_{22}$	0.15	32	15000	1.0	9		550
羰基铁	2.1			3.2	43(40)	13	1047
$Ce_2Fe_{17}N_{3-6}$	1.6	约 80	约 100000	7	94(943)	37	700

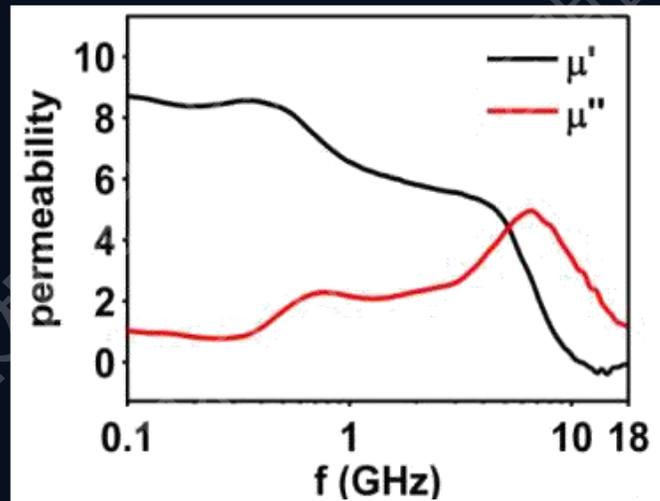
易面型稀土磁性材料的snoek乘积 $f_r(\mu_r-1)$ 比已有的高频磁性材料都大, 这可使磁性电子器件的高频性能大跨度提高。

机理研究和成分开发 (宁波材料所)

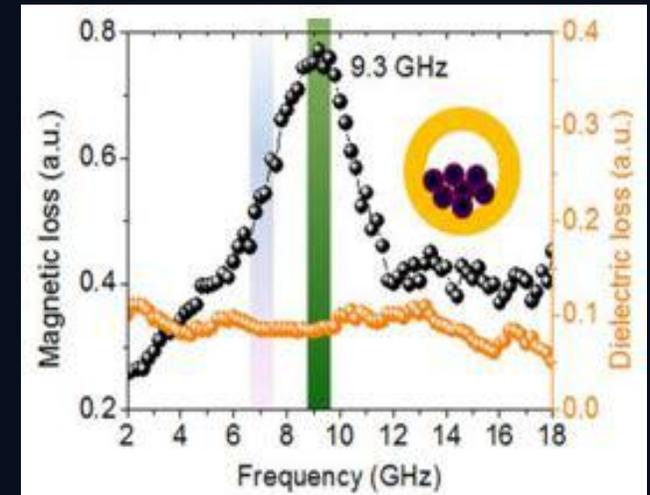
- 提出双各向异性模型，奠定稀土磁材高频应用基础，指导材料成分设计开发
- 开发公斤级 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 等系列高频磁性材料，磁导率达8.3，截止频段达8GHz
- 构建核壳结构型 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ，共振频率达9.3GHz，发现新的高频磁化机制



双各向异性模型
突破Snoek极限



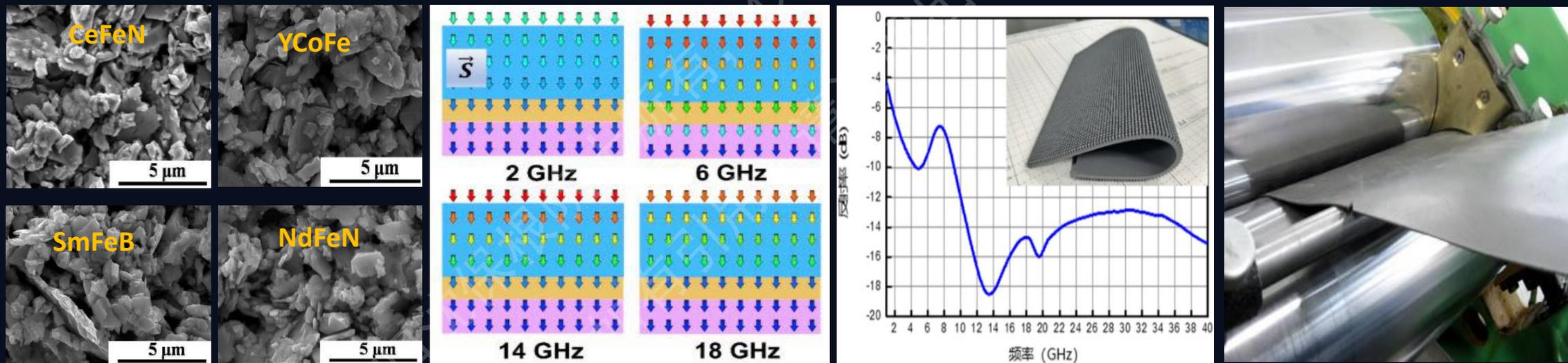
工作频率8GHz
高频磁性能优异



核壳结构型材料，丰富
高磁化机制

电磁兼容材料制备与应用 (宁波材料所)

- 开发系列**新型面各向异性**稀土金属间化合物，高频吸波性能优异
- 开展**1~40GHz宽频段**电磁兼容材料研究，提升相关企业核心竞争力



系列双各向异性高频磁材

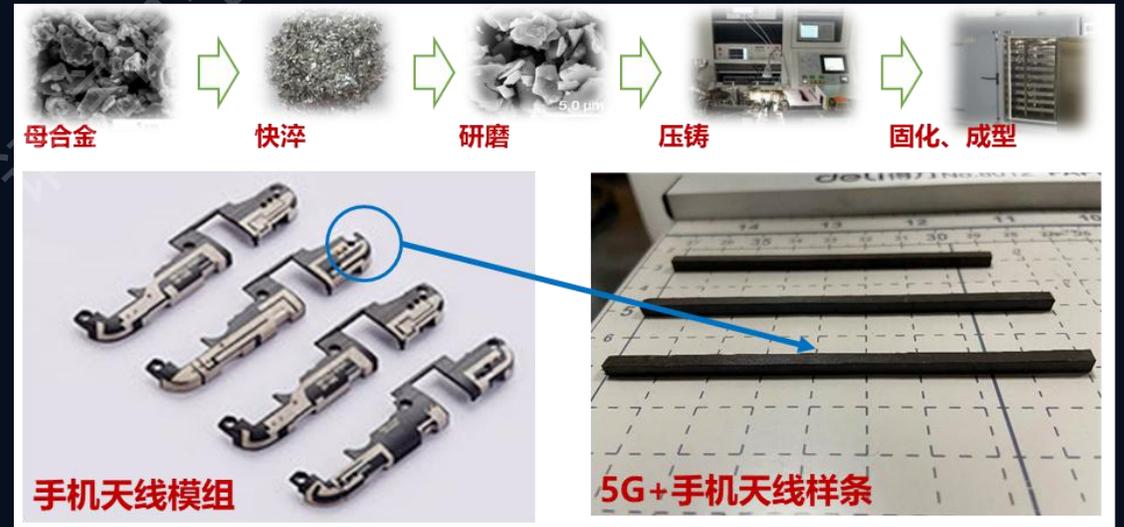
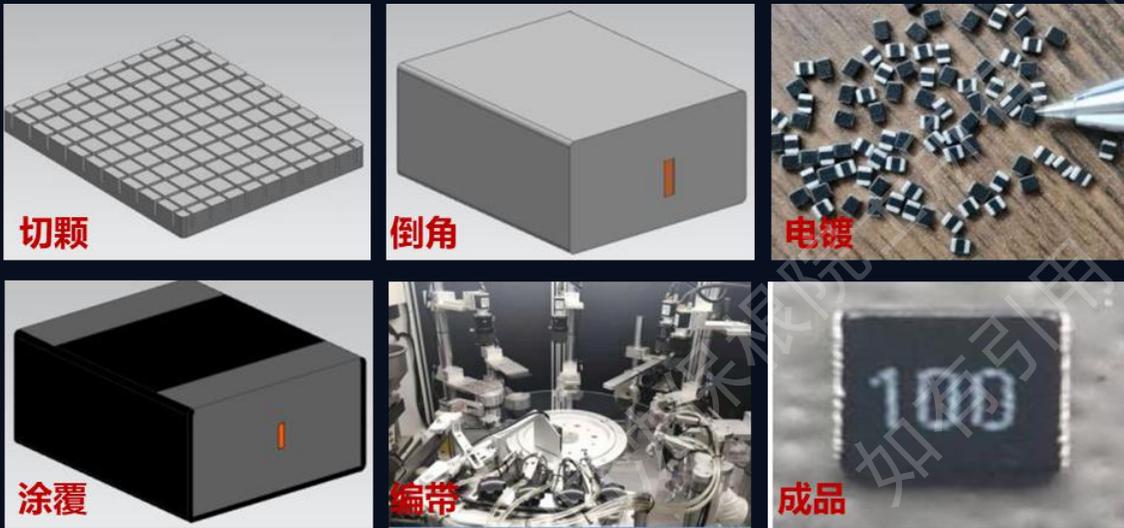
CST模拟磁场分布

1-40 GHz宽频吸波试样

中试生产线

器件研发、制备与应用（宁波材料所）

- 开发全新切割制程工艺及制造装备，试制成功新型微型模压电感
- 联合华为开发5G+天线，布局高频磁电基材天线技术领域，研发水平处国际前沿



CN106424705A; CN108172358A; CN107967976A
CN109273185A; CN107474618A; CN107311637A



一种电磁材料及制备和应用，CN202010436331.5（联合华为）
填充磁性金属的复合型微波吸收体及制备方法，CN109121375A

- ◆ 稀土高频磁性材料研究，不仅对实现稀土资源综合利用提供一条极具价值的有效途径，而且对**我国的信息通讯、国防安全、航空航天等领域具有十分重要的战略意义。**
- ◆ Snoek极限表明，不可能在同一块体材料中实现共振频率和磁导率的同时提高。
- ◆ 突破Snoek极限的思路：**双各向异性系统**，与传统块体材料相比，**通过改变材料的各向异性场**，使包括金属和铁氧化物薄膜、片状颗粒在内的很多低维系统实现了工作频率和磁导率的再提高。
- ◆ 新的高频软磁体系：**平面型稀土化合物**，需要易平面磁各向异性的稀土元素：**Y、La、Ce、Sm、Gd、Ho、Er、Tm、Yb、Lu。**

四、磁制冷材料与磁制冷技术

版权归沈保根院士所有，仅供学术传播使用，如有引用，请注明出处。

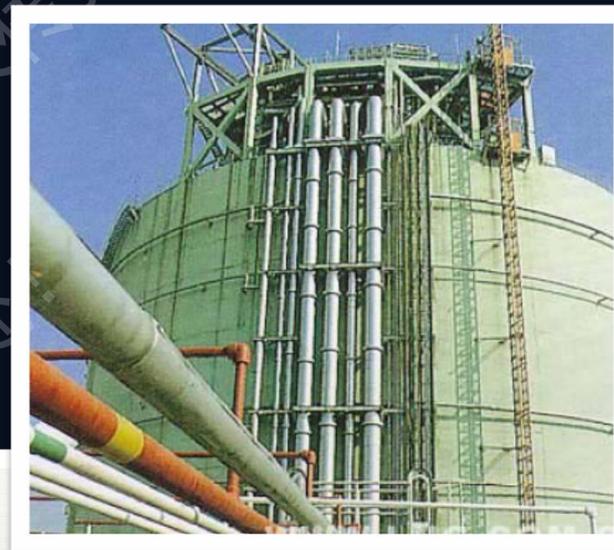
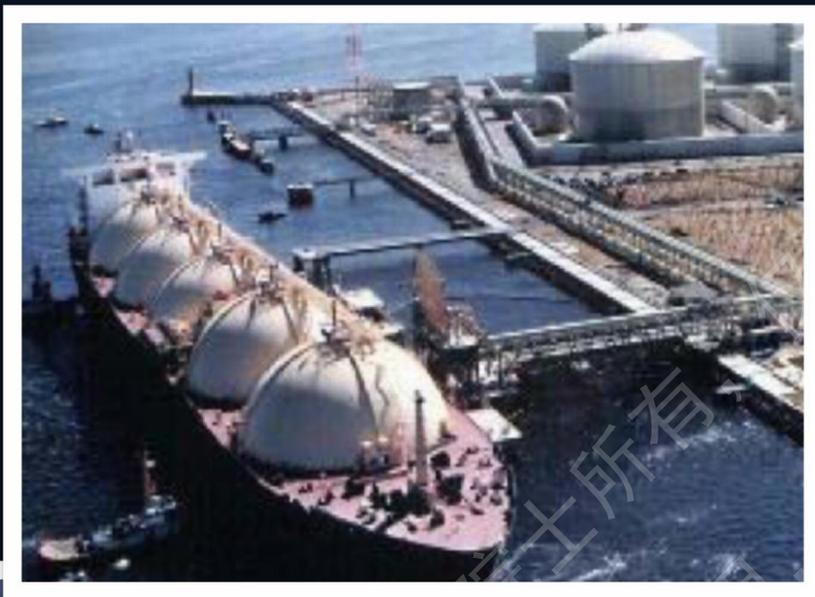


磁制冷材料与应用

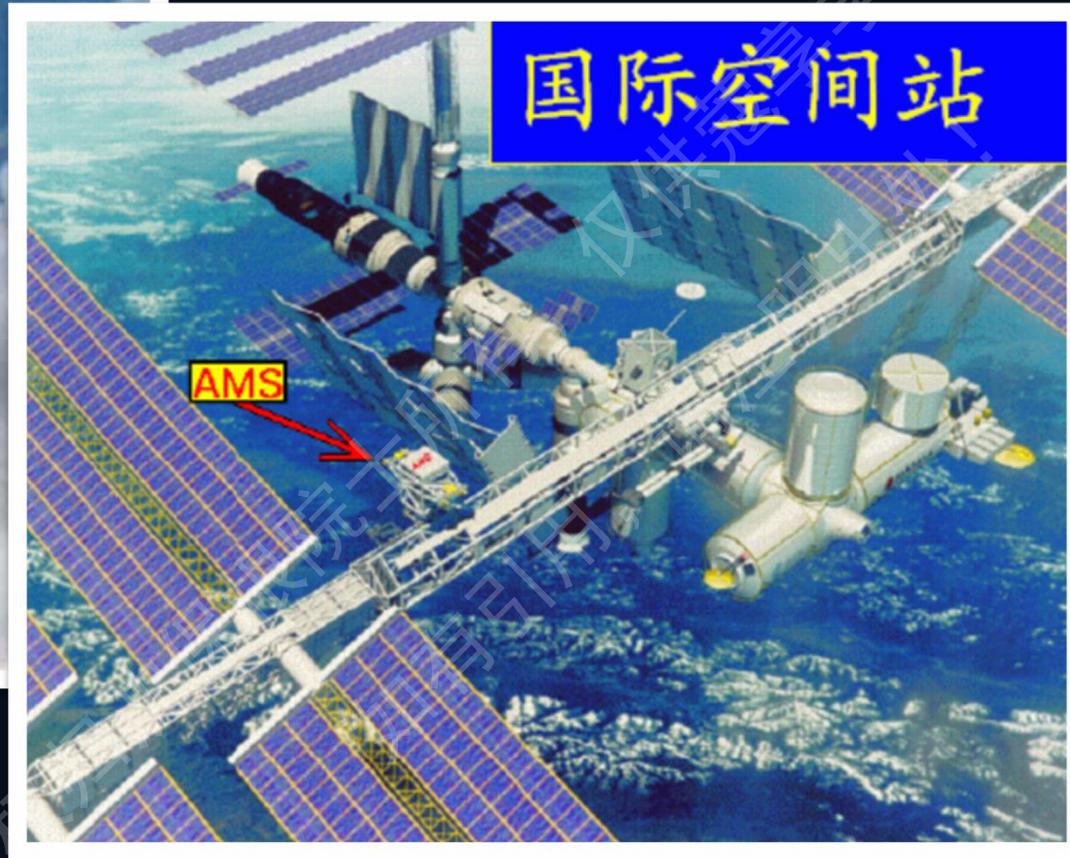
- ◆ 制冷技术产业占国内生产总值 (GDP) 的 5% 左右。
- ◆ 磁制冷的应用将产生巨大的经济效益，更重要的意义在于它将直接影响人们的工作、生存环境，甚至改变人们的生活方式。



天然气液化

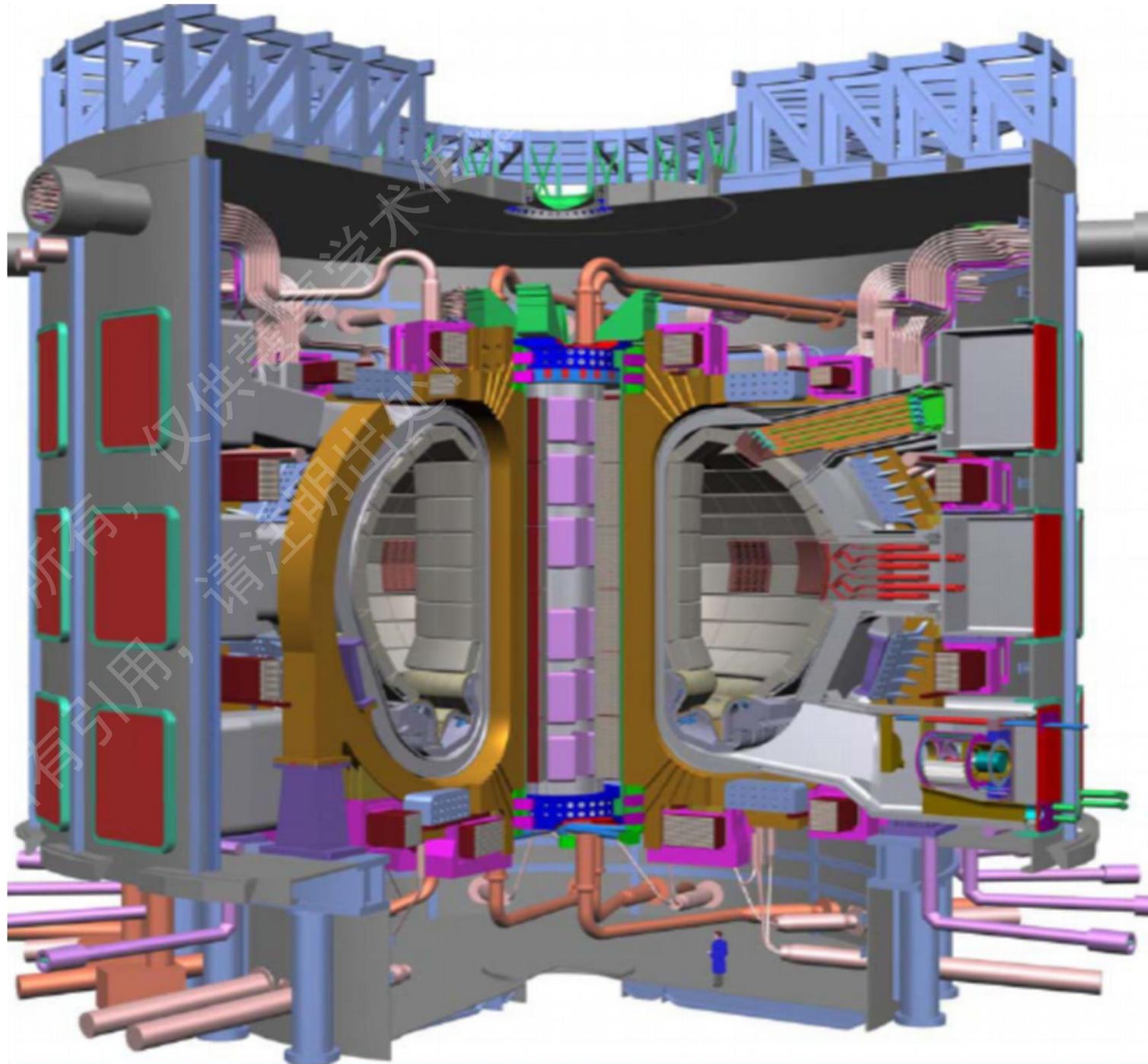
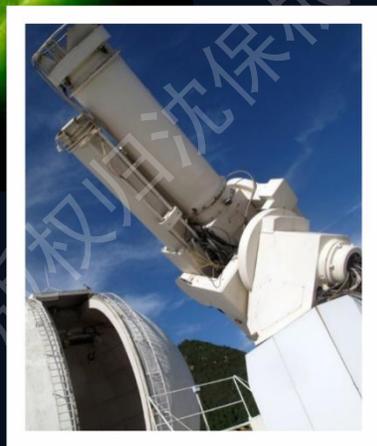
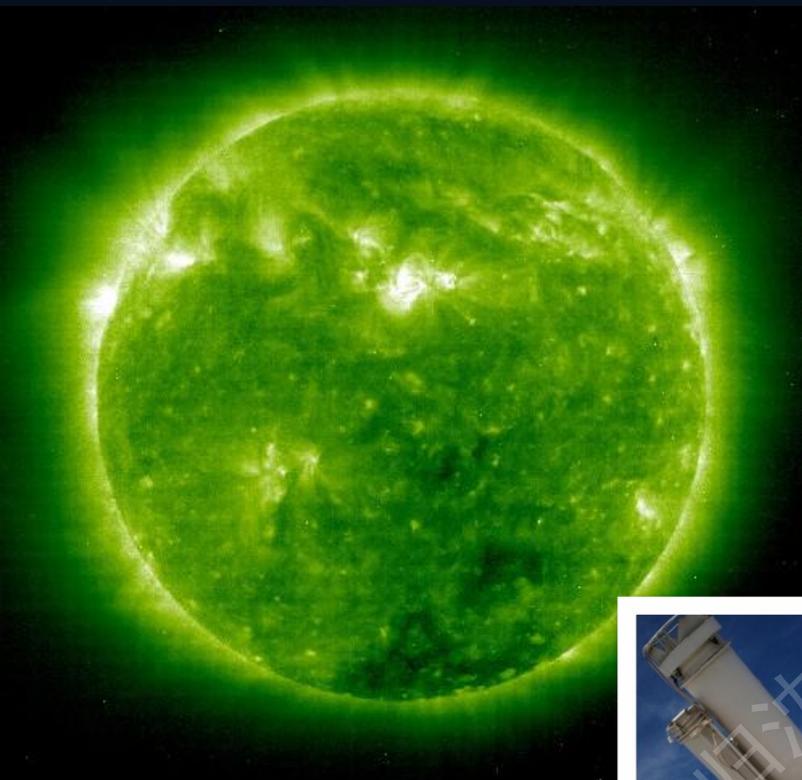


航天、军事 低温系统

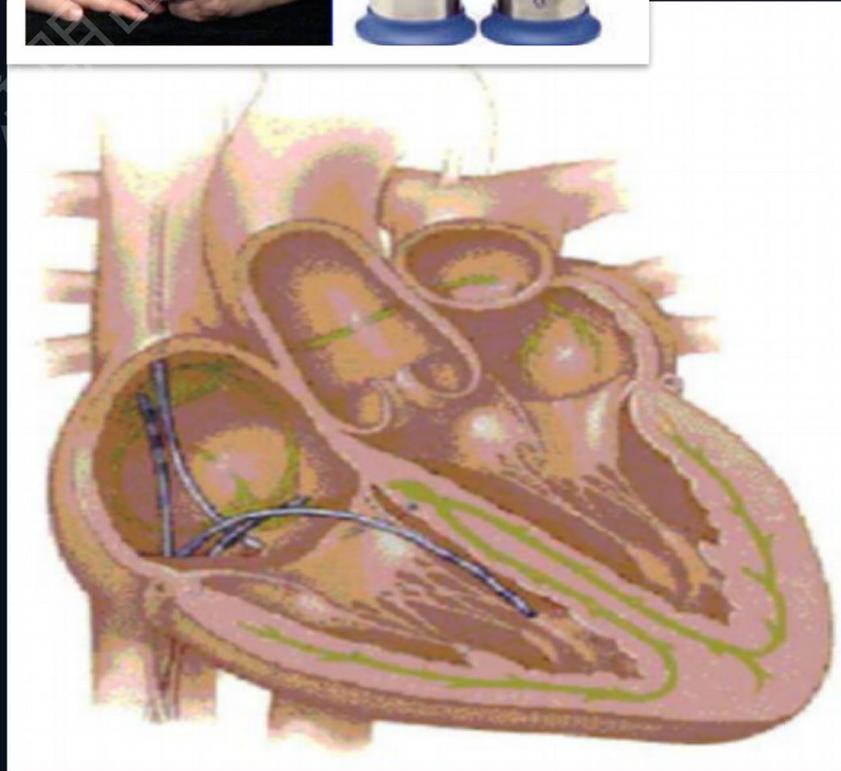
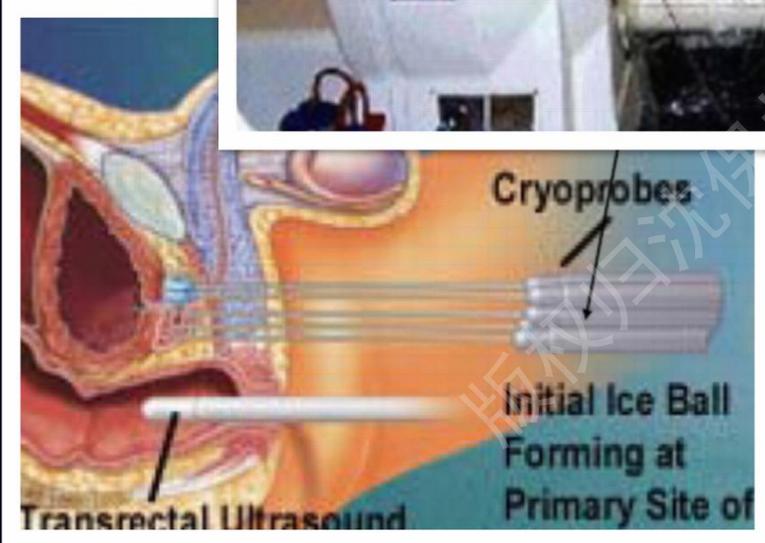


人类未来的能源：ITER 人造太阳

国际热核聚变实验堆



低温医疗



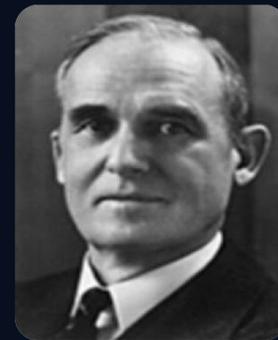
低温磁制冷技术的应用



深紫外激光光发射电子显微镜



VSM-SQUID



William Francis Giauque

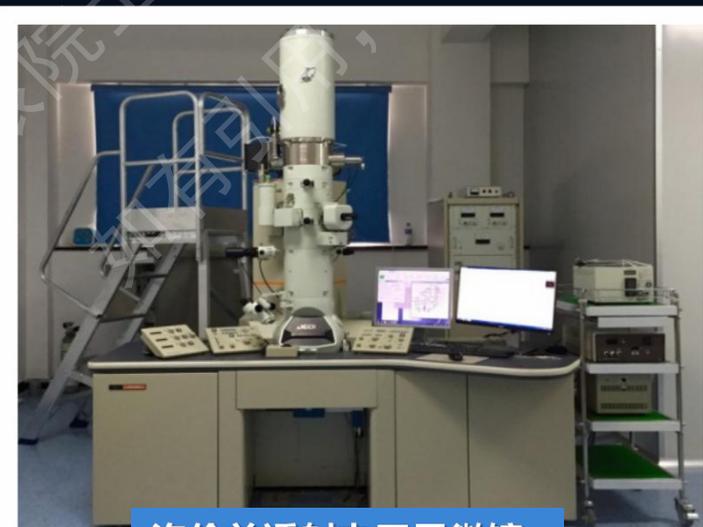
1949诺贝尔化学奖：超低温磁制冷

61g: $Gd_2(SO_4)_2 \cdot 8H_2O$

0.8 T: 1.5 K \rightarrow 0.25 K



低温穆斯堡尔谱仪



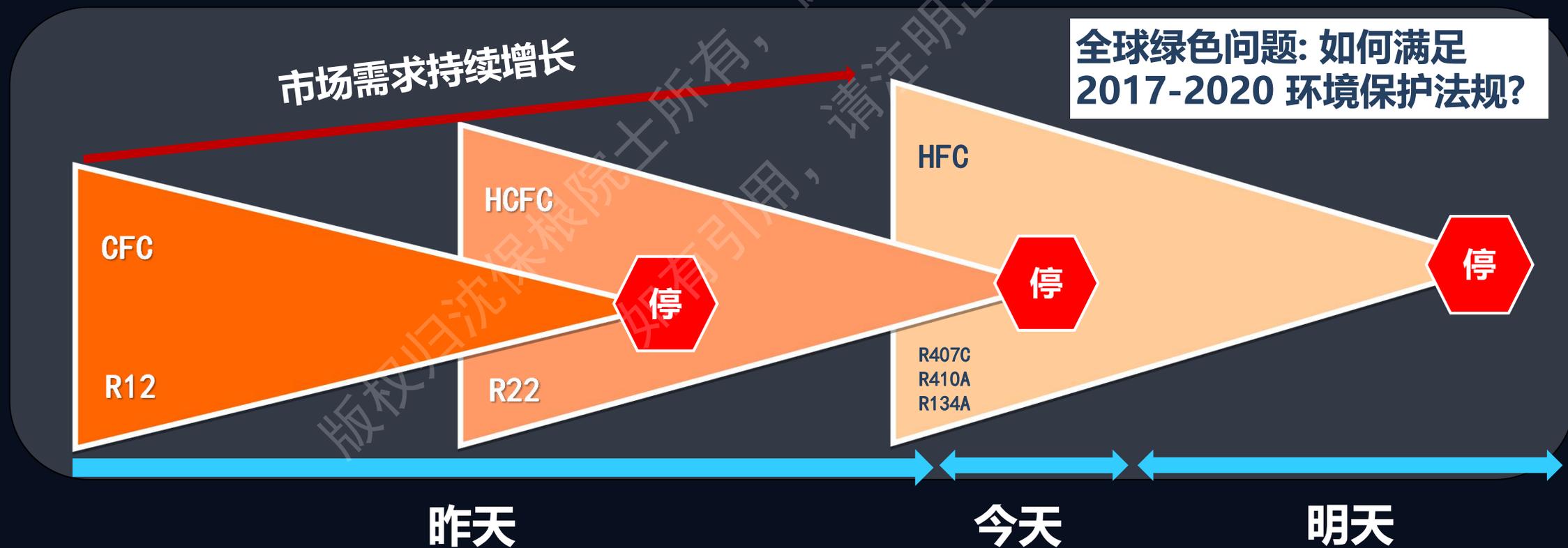
洛伦兹透射电子显微镜



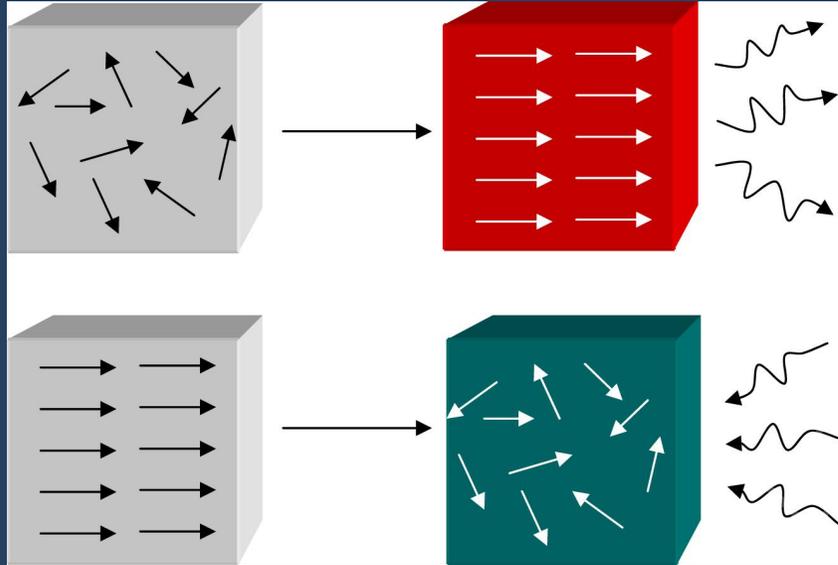
核磁共振医用检测设备

传统气压缩制冷有两个致命弱点

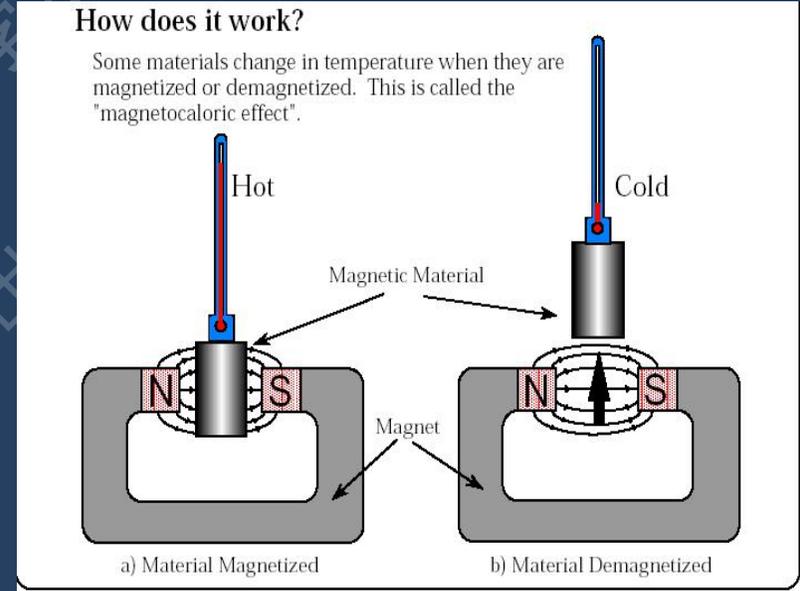
- ◆ 氟利昂破坏大气臭氧层，替代工质也有强温室效应。《京都议定书》、《蒙特利尔协议》宣布到2025年全球将禁止使用氟利昂；
- ◆ 制冷耗能大：接近社会总能耗的15%左右。



磁热效应和磁制冷工作原理



磁热效应：磁性材料在磁场增强/减弱时放/吸热的物理现象



基本原理：利用磁性材料的磁化放热和退磁吸热实现制冷

磁制冷的优点

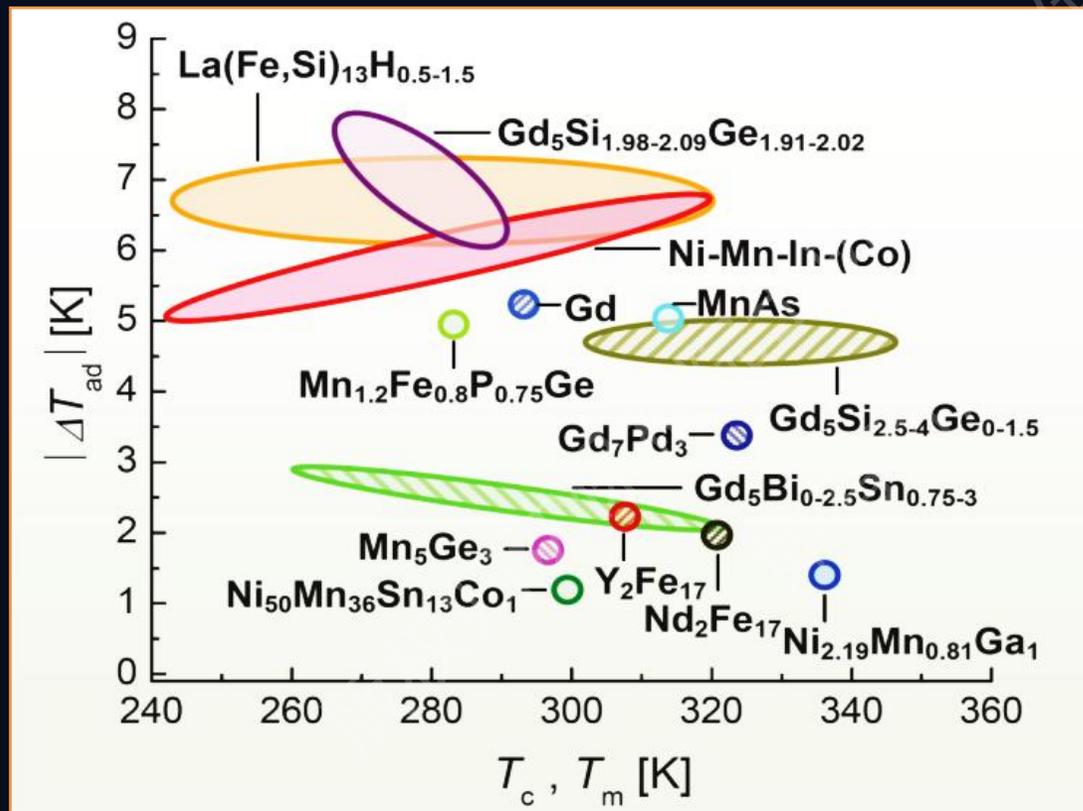
- ◆ **绿色环保**：磁制冷采用的制冷工质为固体材料，传热介质用水，消除了CFCs、HCFC及其替代品带来的破坏臭氧层、有毒、易泄漏、易燃、温室效应等缺陷；
- ◆ **高效节能**：磁制冷的理论效率可达卡诺循环效率的60~70%，而气体压缩制冷一般为20~40%，相对气体制冷节电可达30%；
- ◆ **稳定可靠**：磁制冷无需气体压缩机，运动部件少，转速缓慢，振动与噪声小，体积小，寿命长，可靠性高。

高性能的磁热效应材料

- ◆ 1881年, Warburg 发现 Fe 在加磁场过程中放热, 从而发现了磁热效应 (magnetocaloric effect, MCE)
- ◆ 1921年, 顺磁盐 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (低温磁制冷)
- ◆ 1949年, 吉奥克(Giauque)利用顺磁盐绝热退磁技术获得了低于1K的温度。
- ◆ 由于磁制冷材料的原因, 室温磁制冷技术还不能商业应用。
- ◆ 1970年代以前磁制冷主要集中在低温, 尤其是极低温区。低温磁制冷技术在科学研究领域等获得重要应用。
- ◆ 1976年, Gd磁热性能的发现开始了室温磁制冷研究。
- ◆ 1997年, 一级相变磁热效应材料的发现极大推动了室温磁制冷的发展。

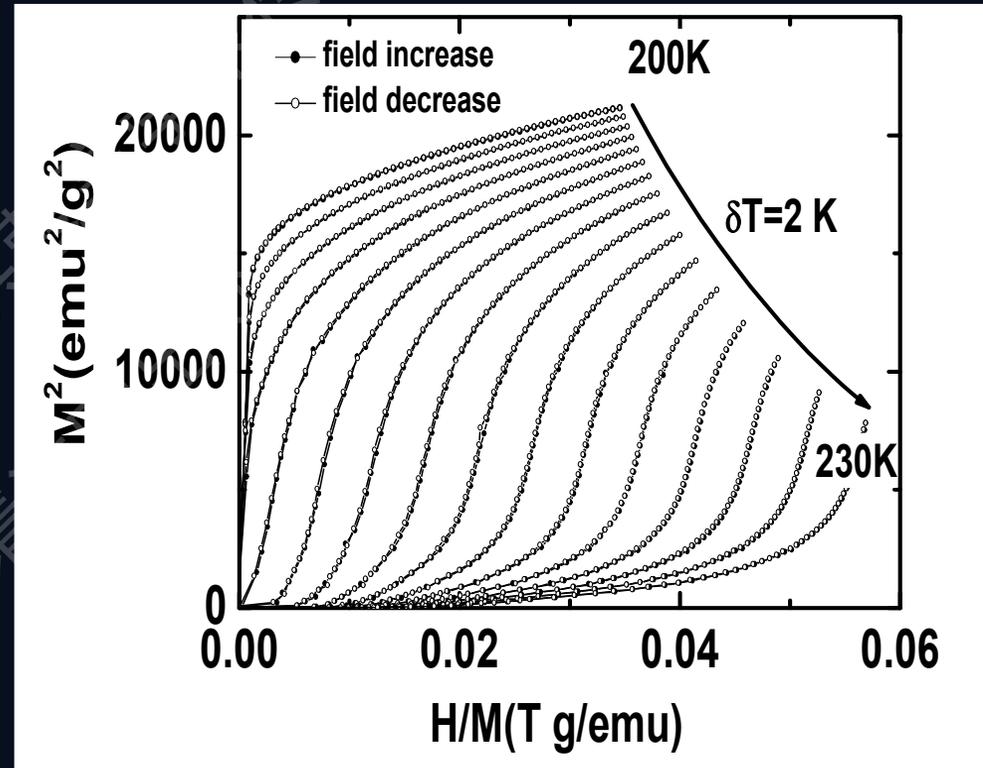
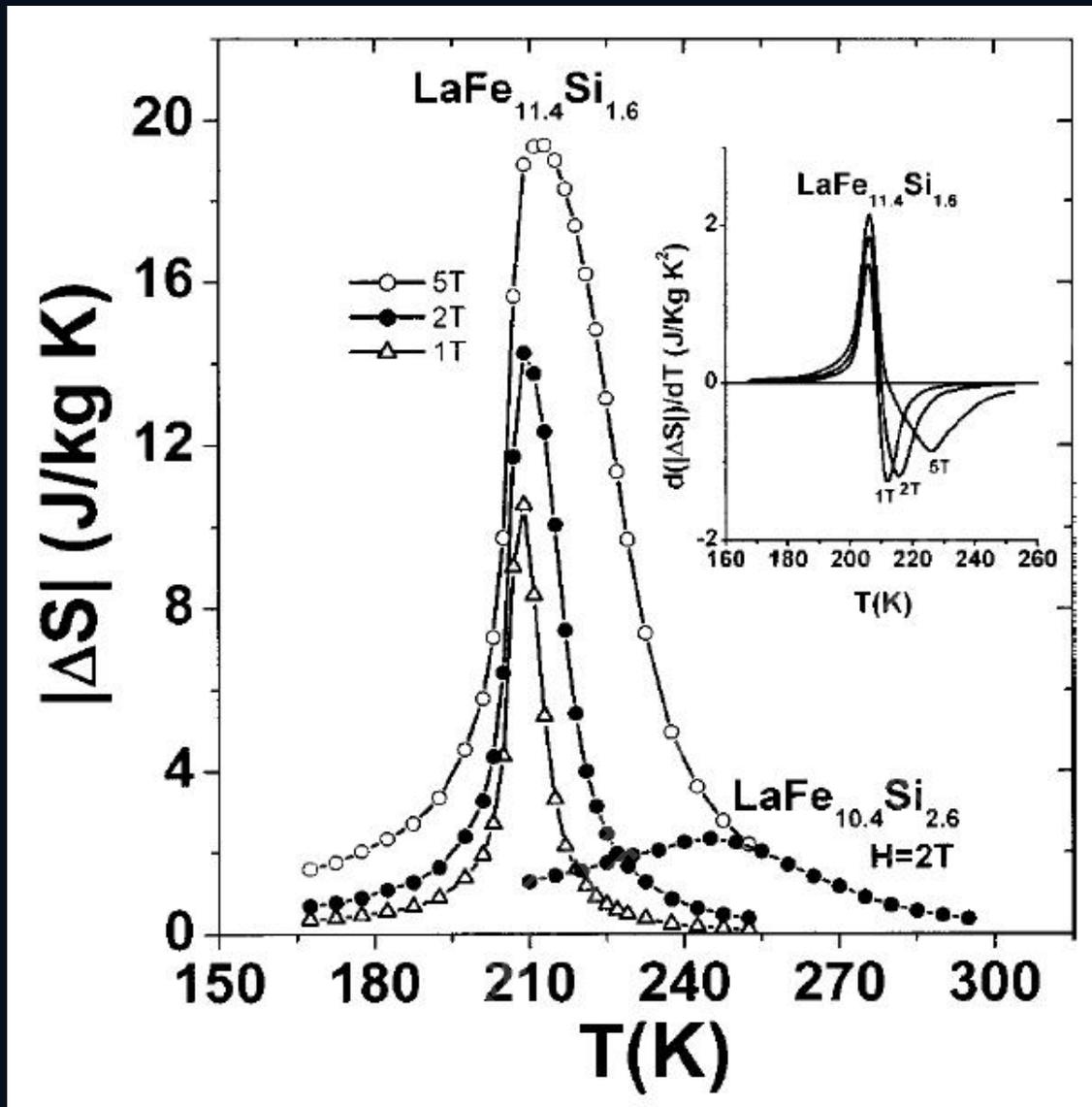
高性能的磁热效应材料

- ◆ 磁制冷材料是核心：中科院物理所发现的**稀土磁性材料LaFeSi**是目前上最有优势的室温磁制冷材料，美、日、欧等国的 120 多个实验室相继开展研究。



- 2011年,《环球科学》(科学美国人)第7期:磁制冷是破解人类能源危机的7大颠覆性技术之一。
- 2014年,美国能源局将磁制冷和弹热制冷列为17种未来可替代压缩制冷技术的首选技术。

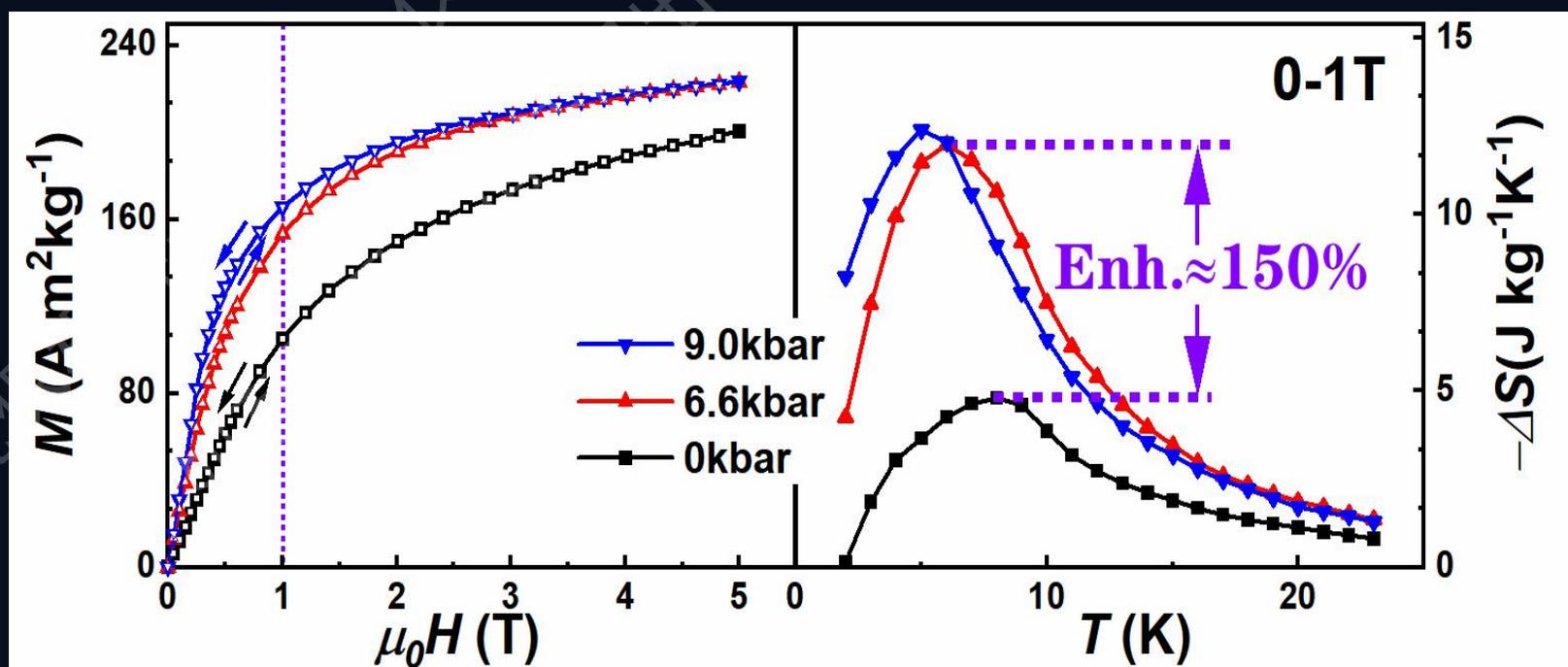
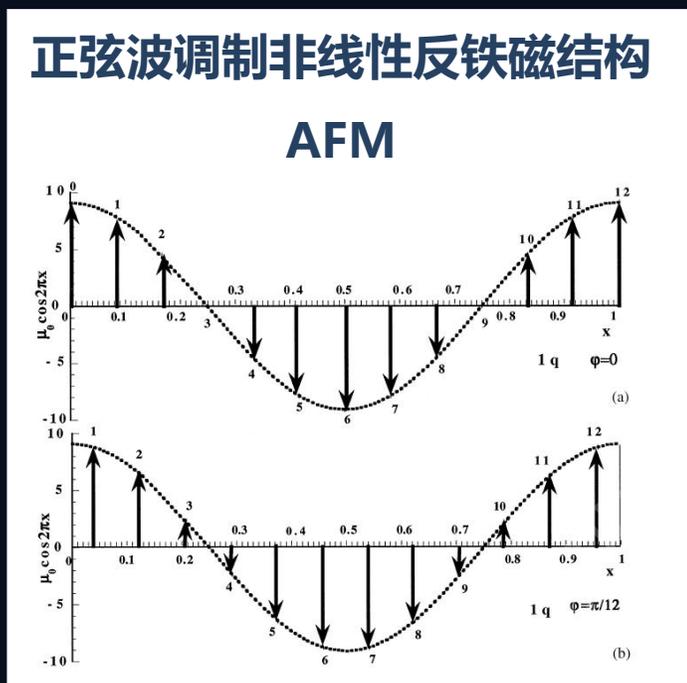
一级相变磁热效应材料：LaFeSi



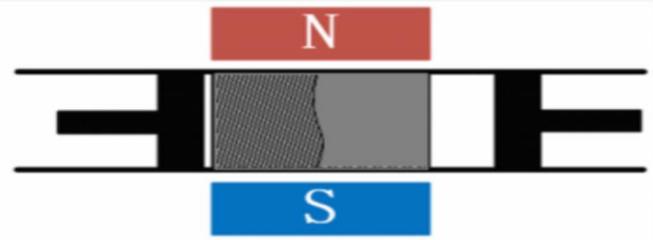
中科院物理所：LaFe_{11.4}Si_{1.6} $\Delta S = 19.4$ J/kg K (5T), Gd的2倍。相变温度附近晶体结构不变，晶胞体积不连续变化。

HoCuSi化合物静水压调控的磁性和磁热效应

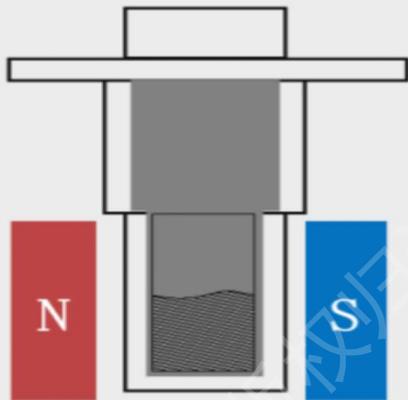
- 引入物理压力调控HoCuSi化合物的非线性磁结构，增强铁磁耦合作用，在未引入滞后的情况下，实现低磁场下HoCuSi磁热效应的大幅增强。
- 6.6kbar压力下，0-1T磁场下的磁熵变峰值增加了150%



磁制冷机



复合Stirling制冷机（室温）



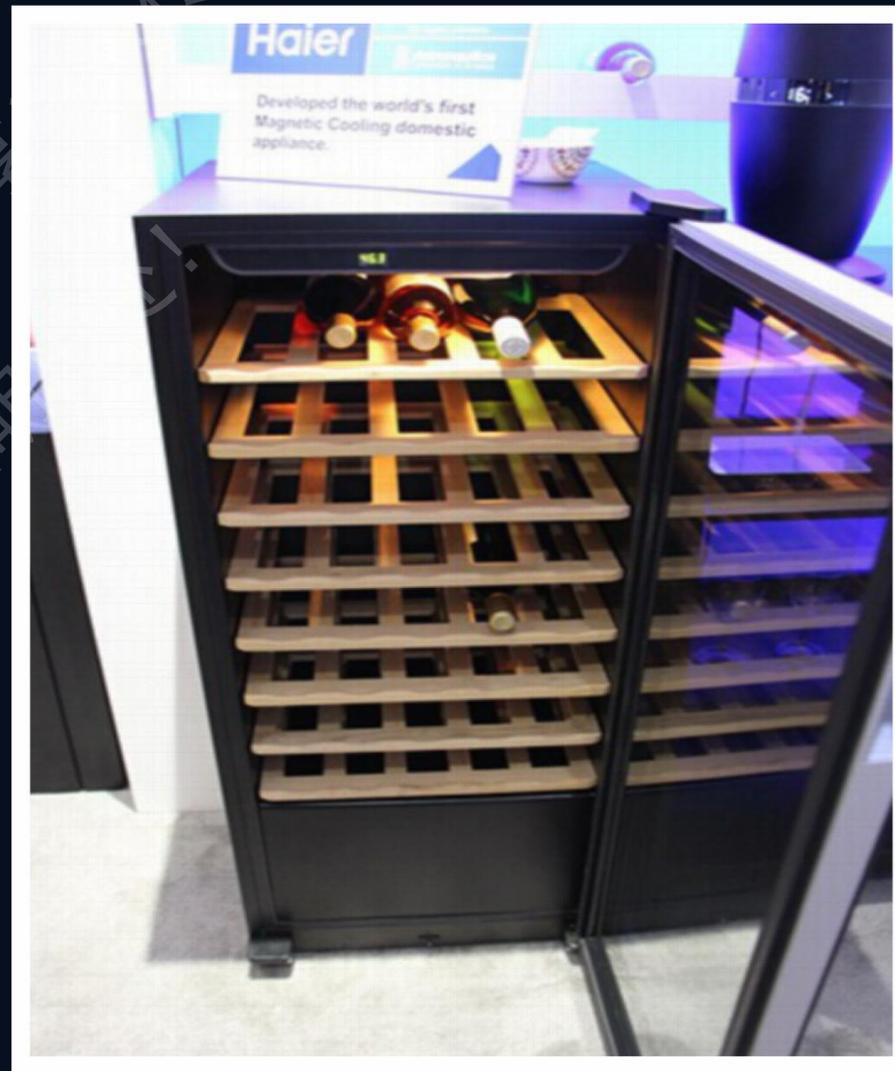
复合GM制冷机（低温）



- 复合Stirling制冷的室温区磁制冷系统在国际上尚属首次, 系统制冷量提高了30%
- 低温区复合磁制冷系统最低制冷温度达到了液氦温度(3.8 K)

磁制冷酒柜

- ◆ 2015年，全球首台无压缩机、零噪声、零震动磁制冷酒柜的展出，标志磁制冷技术民用化的可能。
- ◆ 红酒爱好者：磁制冷机一启动，酒柜就会随之振动，影响酒的品质，“这款磁制冷酒柜工作起来就像没在工作一样，震动和噪音完全消失了，它安静地让我心动”。



耦合GM制冷的复合磁制冷机



代表GM制冷时序



磁体相位采集系统

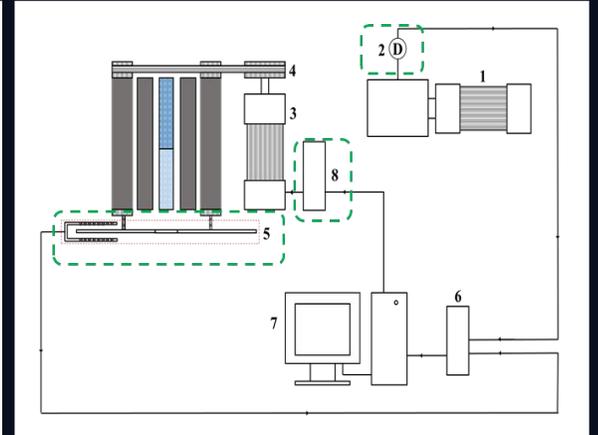


排出器位移采集系统
代表GM制冷时序



两级GM制冷机

一级40 W@45 K
二级1.0 W@4.2 K



GM制冷机排出器及磁体的驱动、测量及控制系统

1-冷头电机；2-排出器位移传感器；3-磁体伺服电机；4-同步带轮；5-磁体角位移传感器；6-数据采集卡；7-计算机；8-磁体电机控制器

外磁体



内磁体

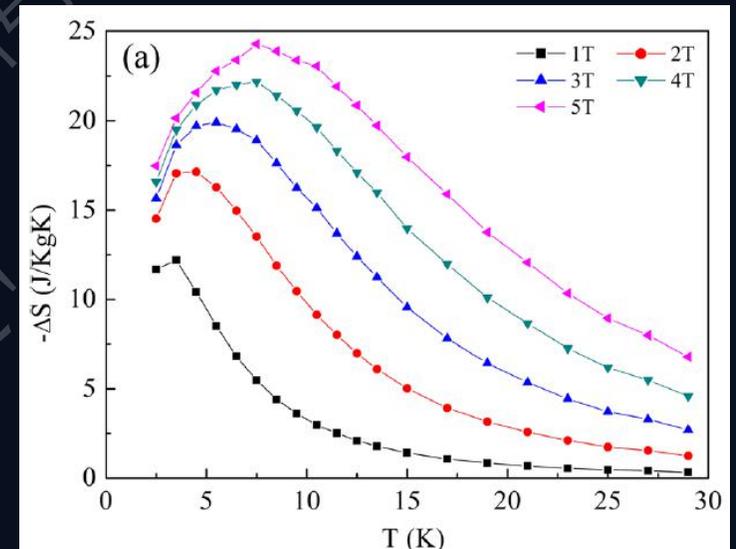
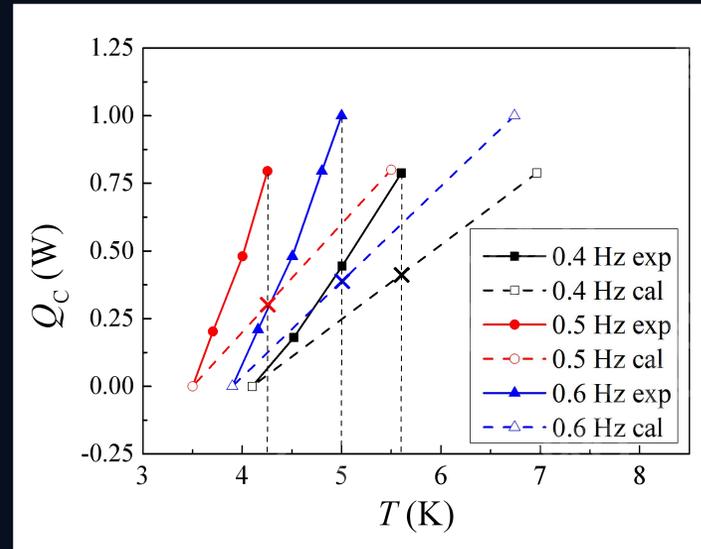
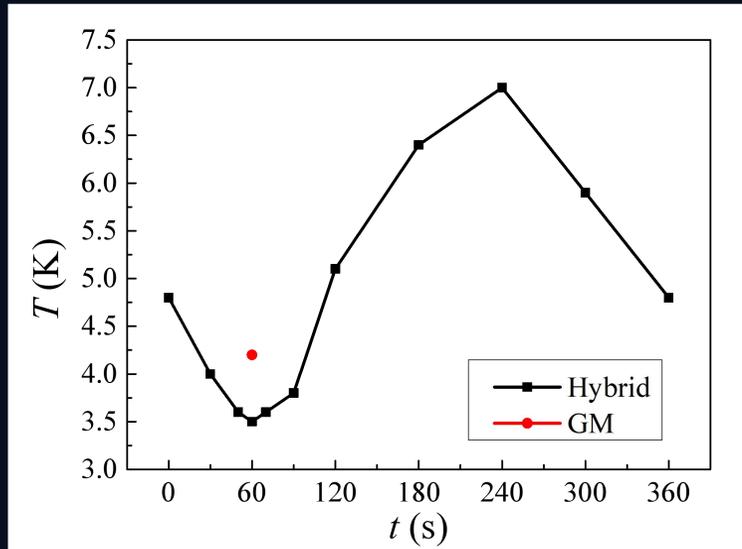


Halbach磁体组实物图

- 耦合GM制冷的复合磁制冷机由**两级GM制冷机、同轴Halbach磁体组、相位采集及控制系统**组成。

X.H. Guo, J. Shen, et al. Applied Thermal Engineering. 152 (2019) 468.

回热器填充Pb(325 g)、ErNi(130 g)和TmCuAl(66 g)



0.5 Hz频率下制冷机的无负荷温度

不同频率下实验及模拟的制冷量与温度的关系

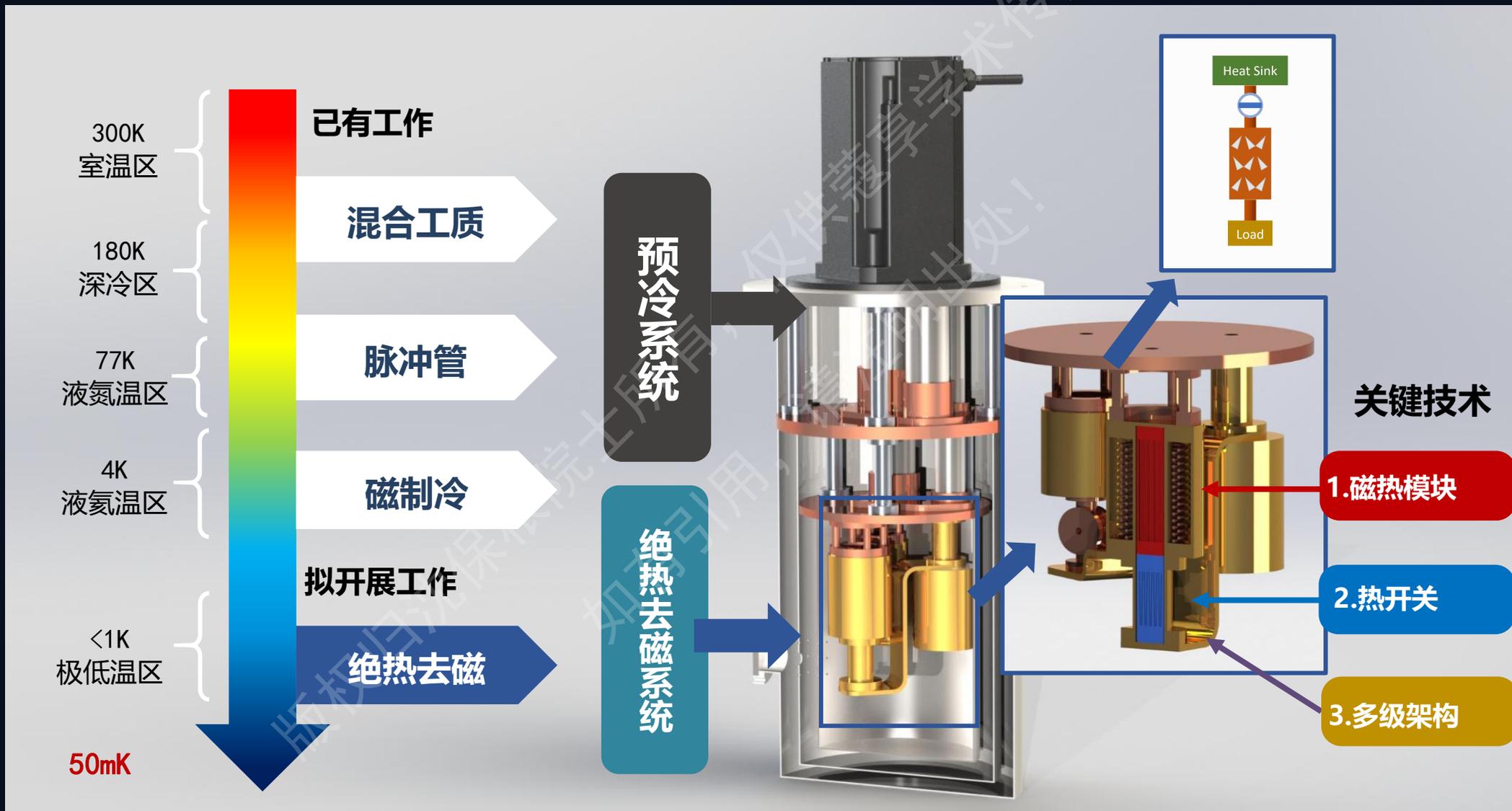
不同频率下GM和复合磁制冷机的无负荷温度

频率 (Hz)	1	0.8	0.6	0.5	0.4
GM制冷机 (K)	6.9	6.2	4.9	4.2	4.5
TmCuAl复合磁制冷机 (K)	7.3	6.6	3.9	3.5	4.1

发现目前国际上温度最低 (2.4K) 的大磁熵变 (12.2 J/kgK (1T)) 铁磁磁制冷材料TmCuAl (Z. J. Mo, J. Shen et al. APL 102 (2013) 192407)

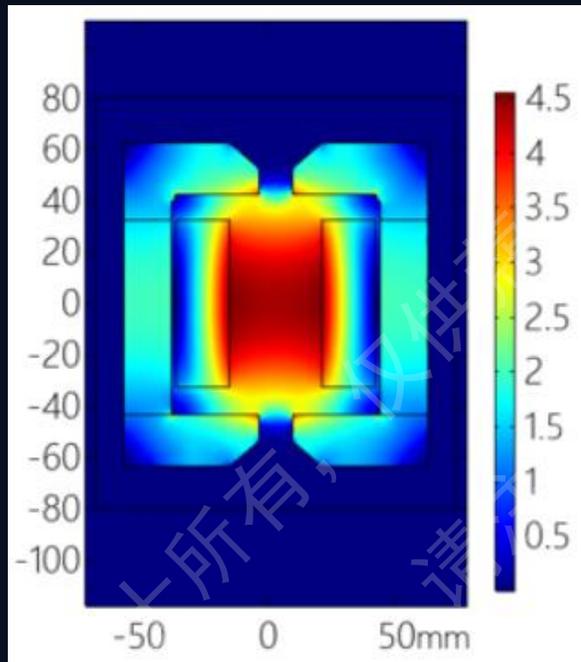
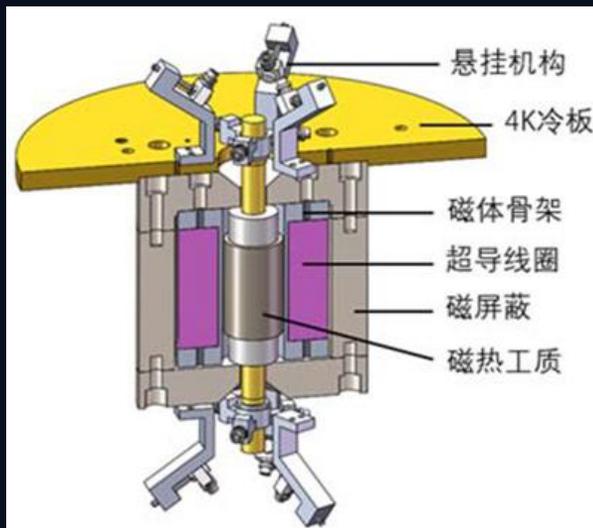
- 复合磁制冷机**最优相位角为60°**, 0.5 Hz, 无负荷温度**3.5 K**, GM制冷机无负荷温度**4.2 K**;
- 频率**0.5 Hz**, **4.2 K**下复合磁制冷机的制冷量为**0.3 W**

中科院理化所磁制冷团队：mK级绝热去磁制冷系统

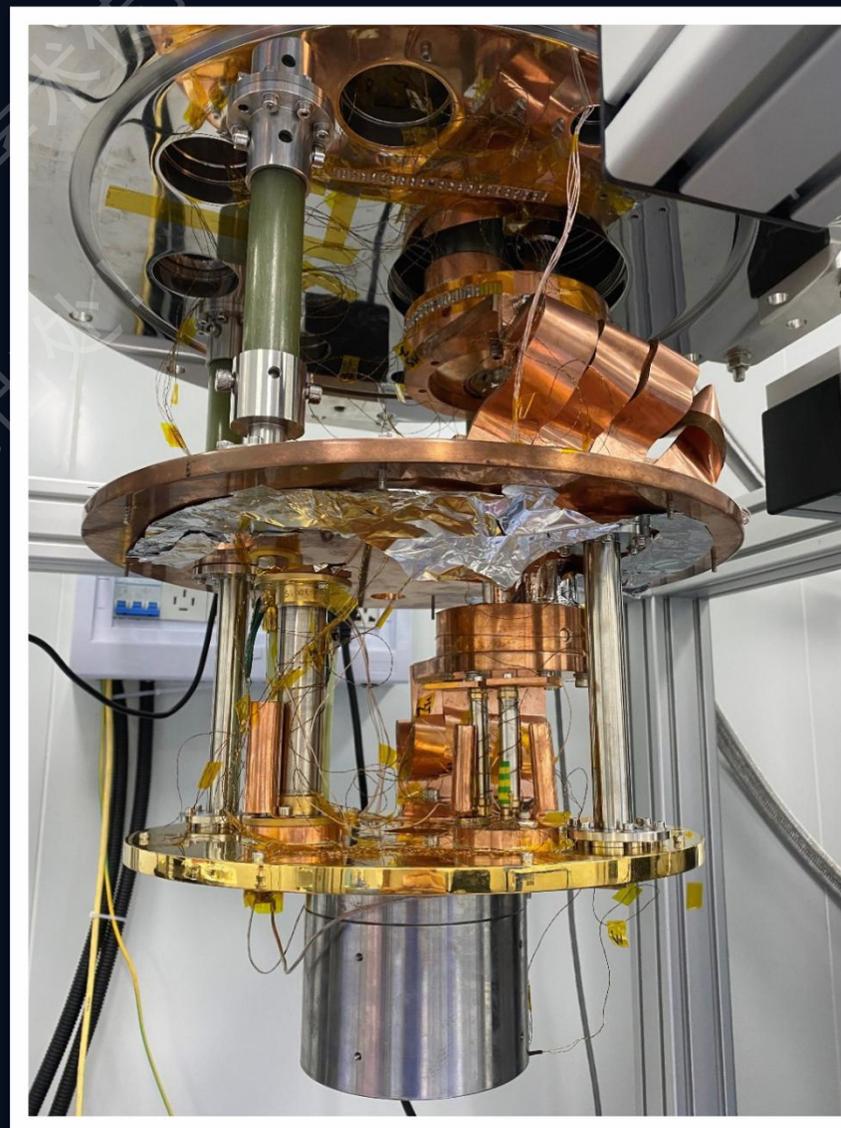
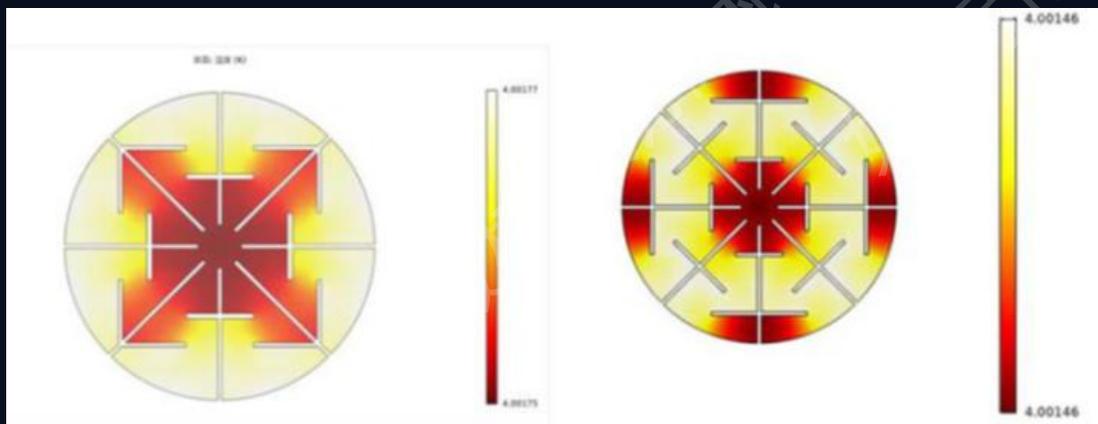


mK级绝热去磁制冷系统设计及搭建 (目前400mK)

■ 超导磁体设计和磁路模拟



■ 热总线模拟

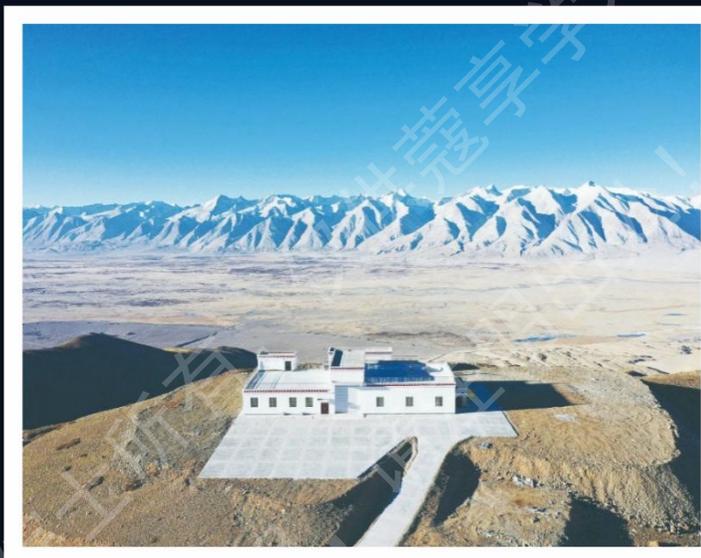


极低温磁制冷应用：原初引力波探测

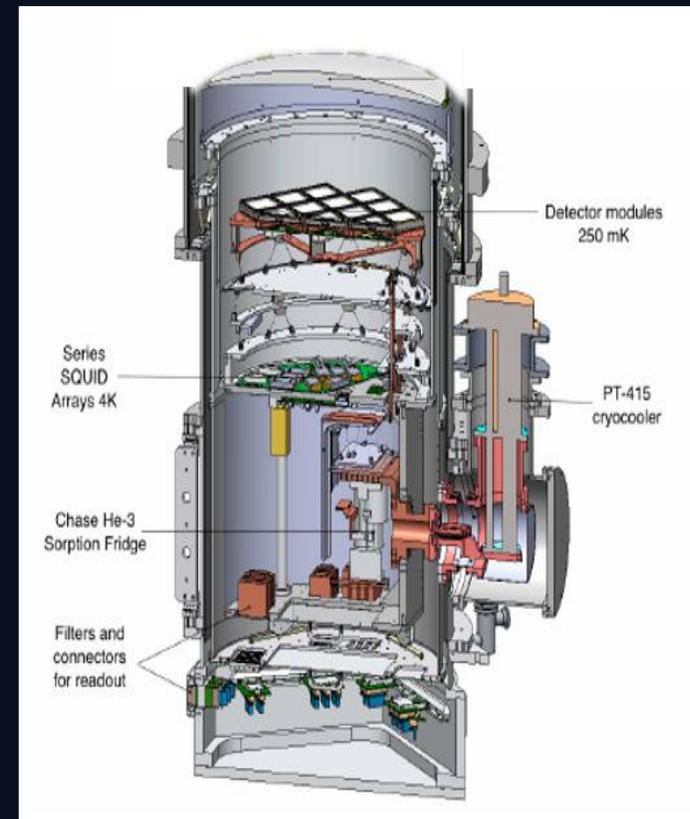
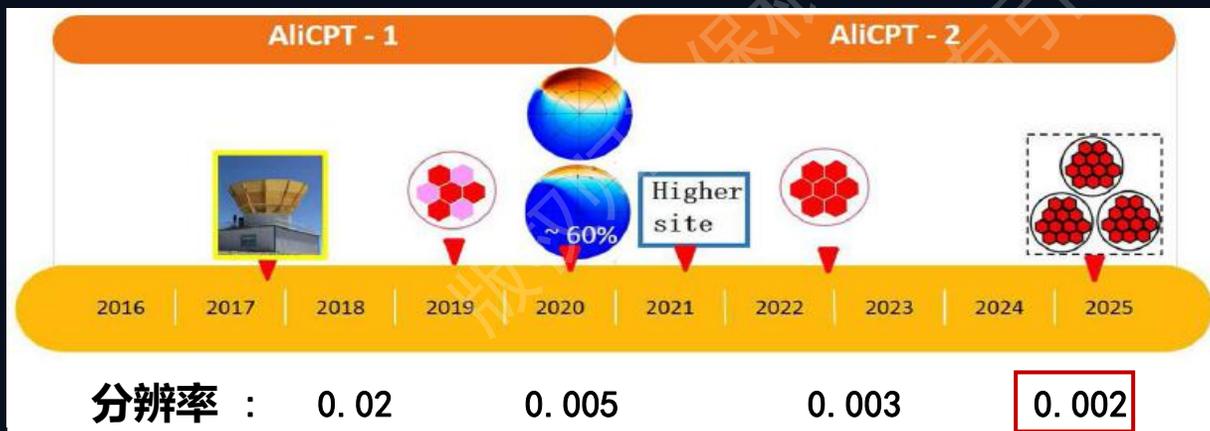
中科院先导专项“引力波探测”项目：阿里原初引力波探测计划

■ 阿里一号 (中国/2016)

探测仪器	TES阵列
工作温度	250mK
分辨率	0.02
极低温设备	吸附制冷机 (美国)



■ 阿里二号 (中国/拟建)



地基引力波探测设备 (阿里)

分辨率提高十倍，亟需更低温度 ~50mK

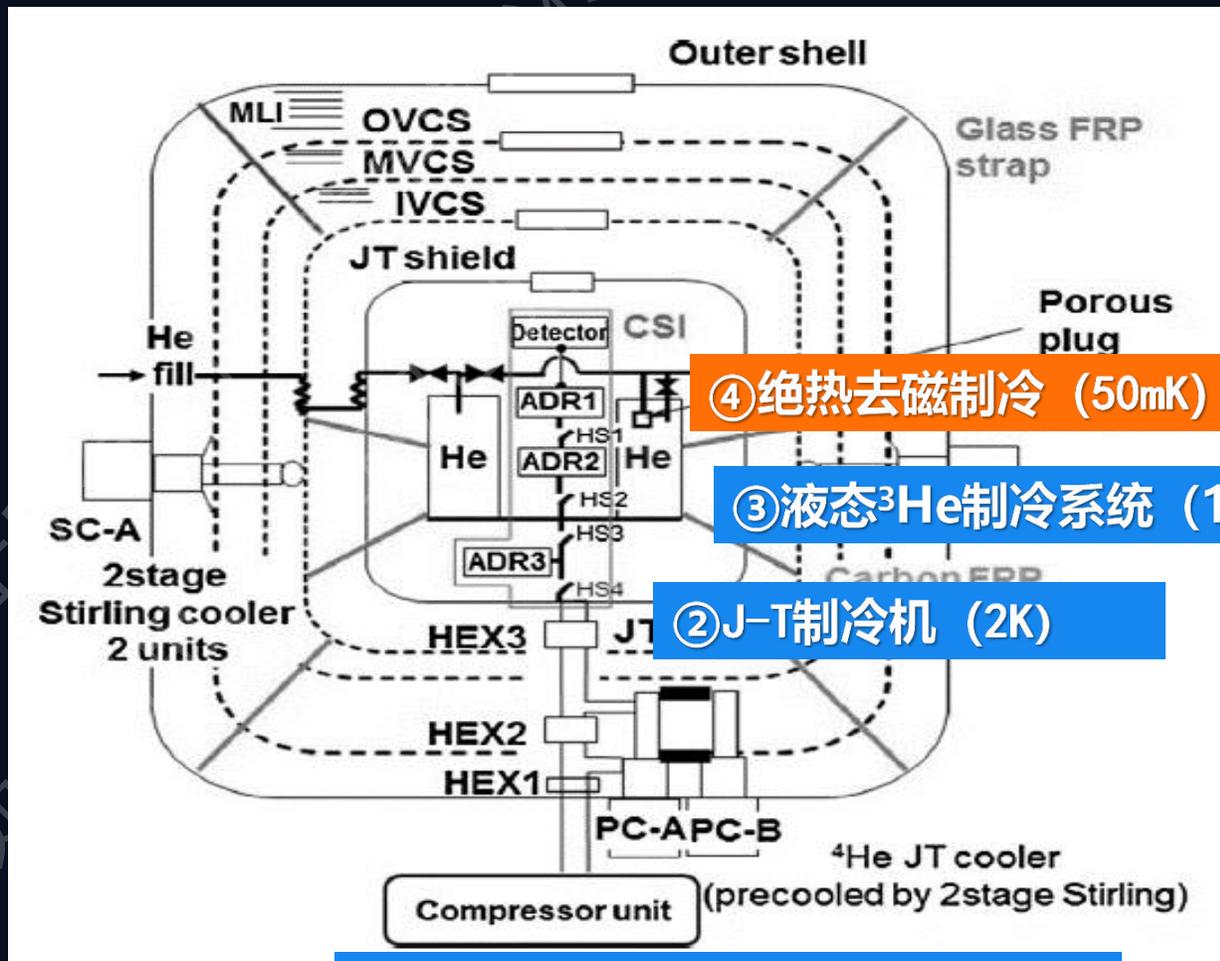
极低温磁制冷应用：空间软X射线探测

■ Astro-H卫星 (日美/2016)

■ HUBS卫星 (中国/拟建)



探测仪器	微卡量热仪
工作温度	50 mK
分辨率	5 eV
制冷量	0.67 μ W



④绝热去磁制冷 (50mK)

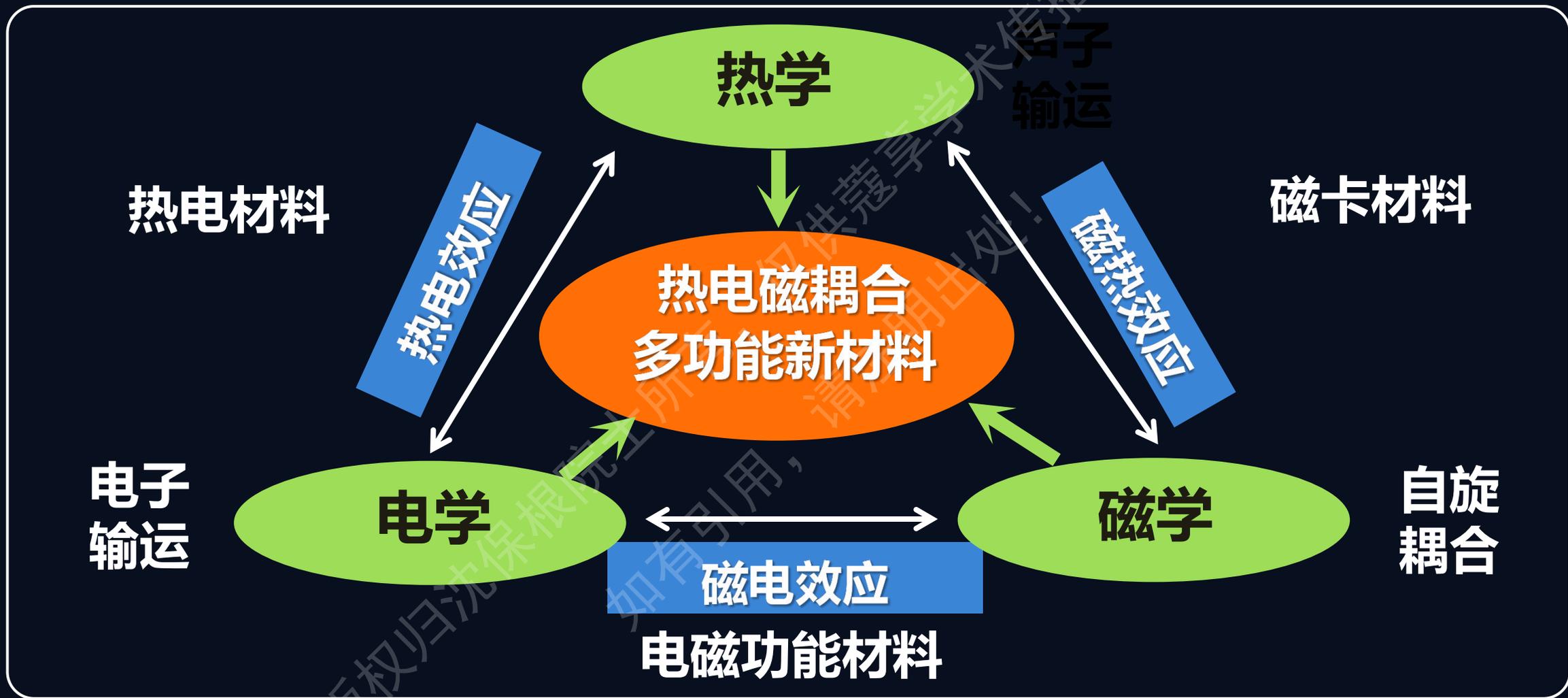
③液态³He制冷系统 (1.3K)

②J-T制冷机 (2K)

①两级斯特林制冷机 (100K/20K)

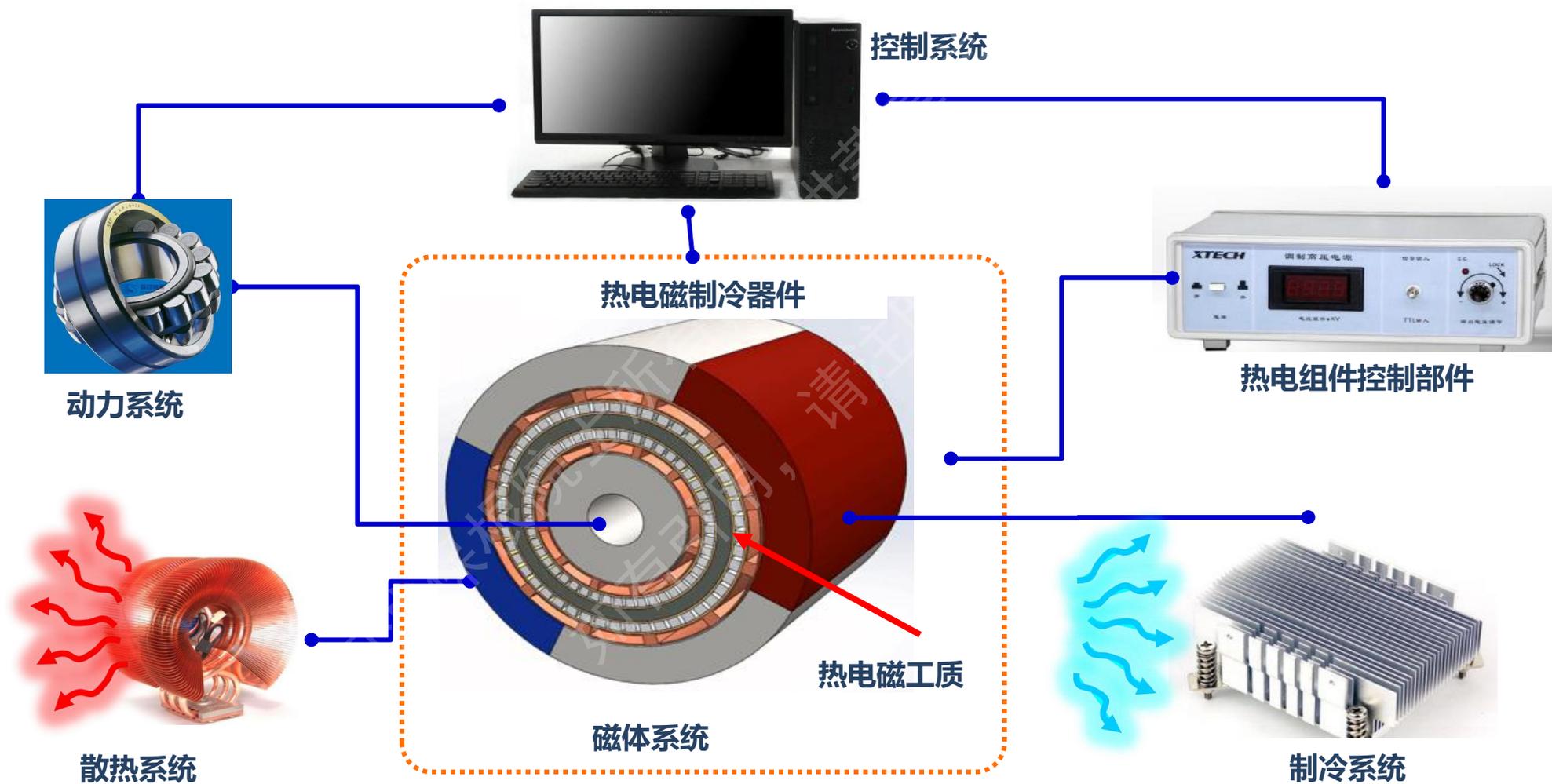
中科院理化所磁制冷团队：Astro-H卫星制冷系统构成 (环环相扣的低温链)

武汉理工：提出设计热电磁多功能新材料原创思想



从电子-声子-自旋耦合相互作用出发，设计热电磁耦合多功能新材料，实现从热电功能、磁电功能、磁热功能到热电磁多功能的变革，支撑高效绿色热电磁全固态制冷变革性技术的发展

热电/磁卡复合制冷系统



稀土固态制冷技术与工程新模式



可实现模块化

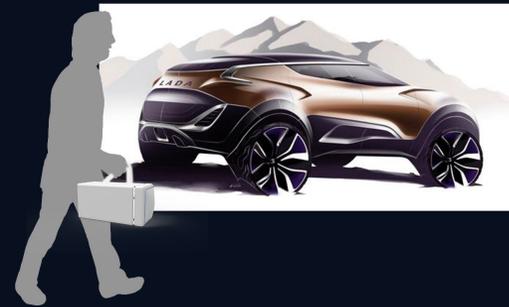
制冷模块采用
标准化滑块连
接，与系统之
间可自由安插



家用制冷设备



商超物流领域



车载制冷系统



医疗、美容制冷领域

一款磁制冷冰箱设计图

传统冰箱所存在问题

1、物品摆放纵深长、叠放挤压，拿取不便且影响食物品质

2、整开门翻找食物，耗电量大

3、不同食物混合摆放，容易串味

4、冰箱内温度固定，有些物品并不在其适宜温区



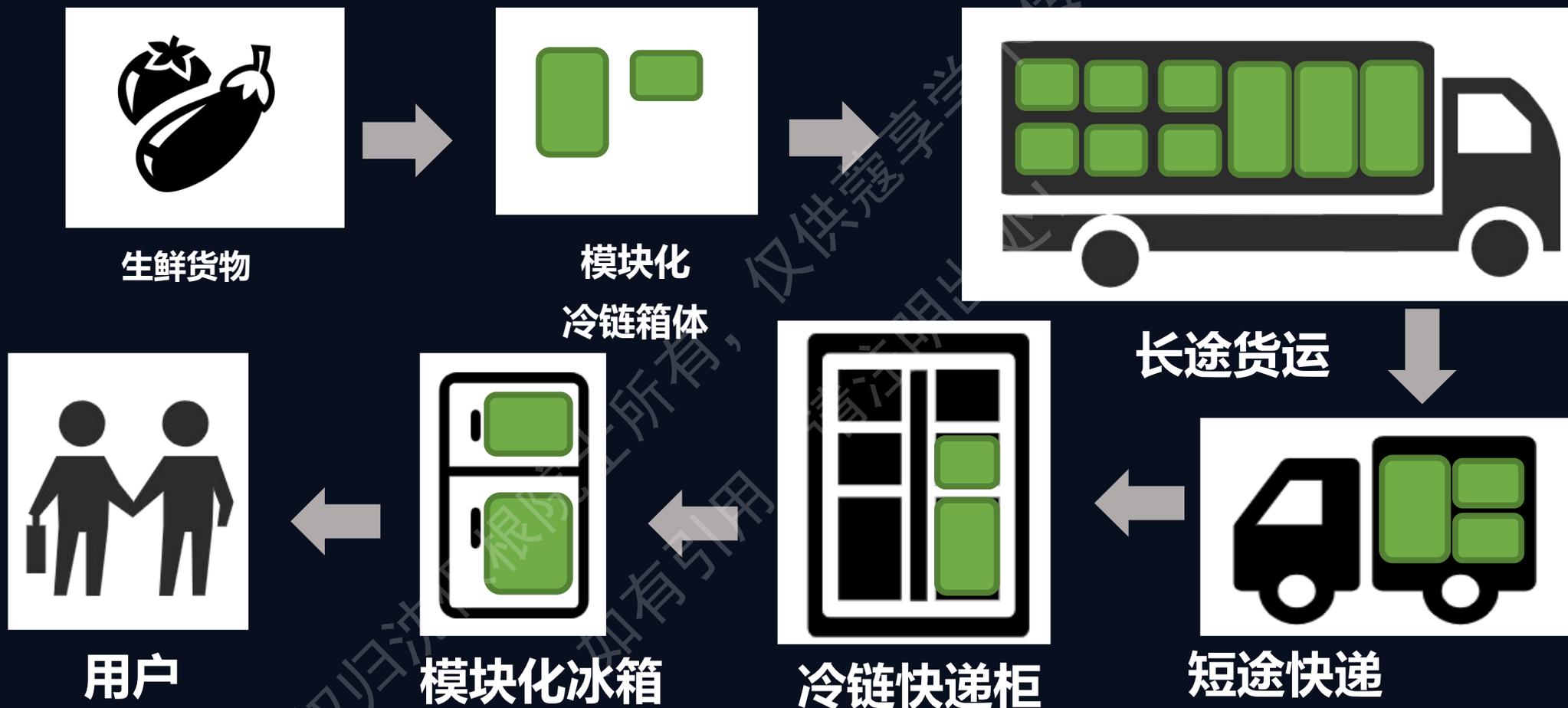
采用智能化控制界面，与物联网相结合支持远程操作。

采用多模块设计，可根据实际需要设置不同模块温度。

针对客户对不同物品放置需求，冰箱门采用单开式、翻斗式、抽拉式相结合的开合方式。

采用部分模块可拆卸设计，当部分模块不需要使用时可单独分离。

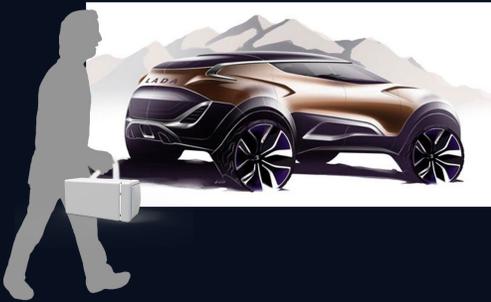
稀土固态制冷技术与工程新模式



通过**磁制冷模块设计**，实现货物从源头到客户家中全程高质量冷环境运输

稀土固态制冷技术与工程

模块化 冷链物流



采用统一标准的
模块化设计实现全程冷链

发挥磁制冷技术模块化优势与其他制冷技术相结合
实现从源头到客户全程冷链

谢谢!



中国科学院稀土研究院