

“科创中国”第二届先进制冷技术产学研融合会议

固态制冷与极低温制冷技术进展

沈俊

¹北京理工大学

²中国科学院理化技术研究所

³中国科学院赣江创新研究院

2023年01月13-14日 山东-青岛



研究背景

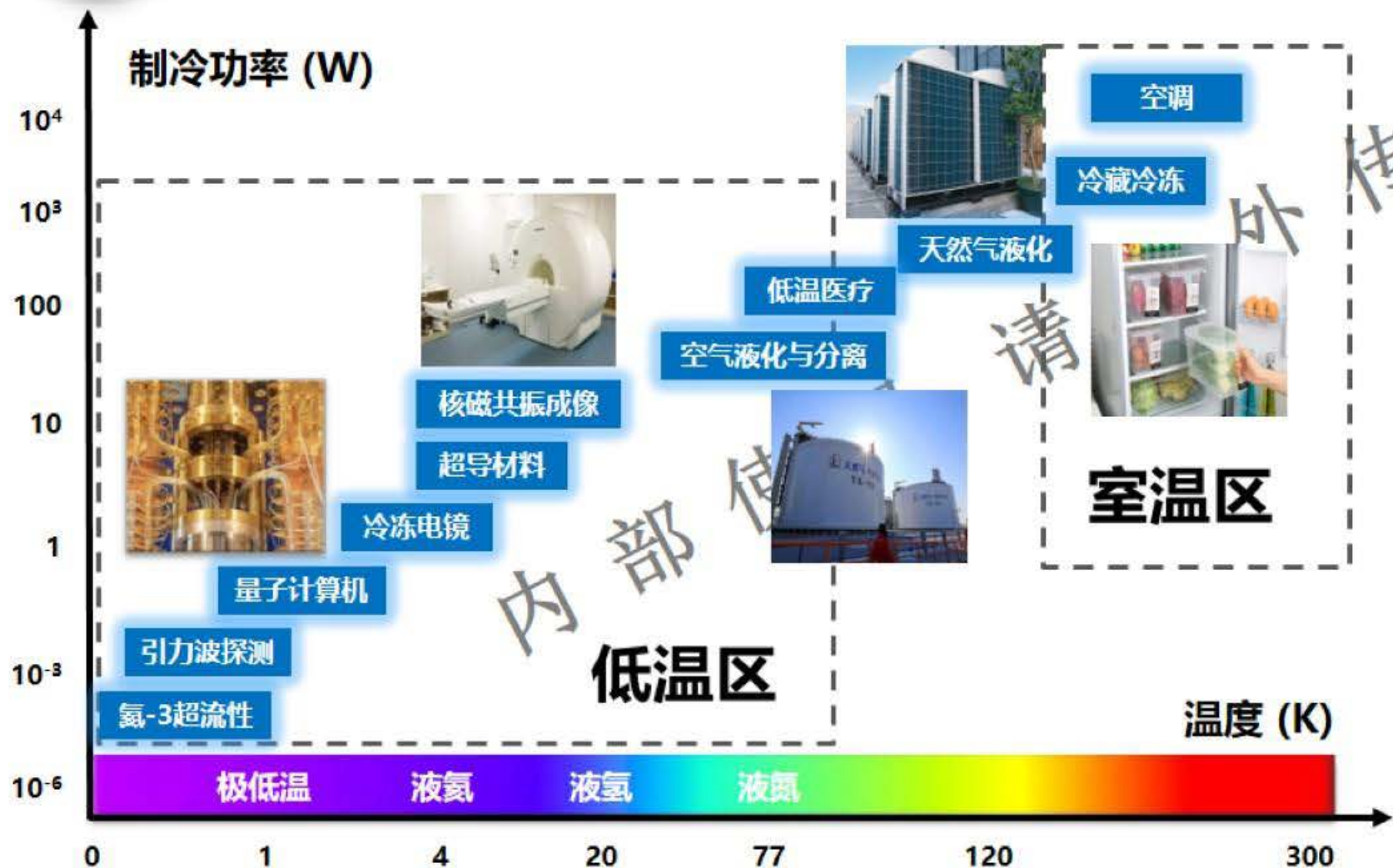
固态制冷技术进展

极低温制冷技术进展

总结和展望



1. 研究背景



制冷：通过人工方法营造低温环境

制冷与低温技术的出现，深刻地改变了人类生活方式，也极大地推动了科学发展

- 国家重大需求：

航空航天、节能环保、低碳高效

- 尖端前沿科学依赖于低温技术：

提供极端物理环境、提高仪器分辨率



1. 研究背景

低温区

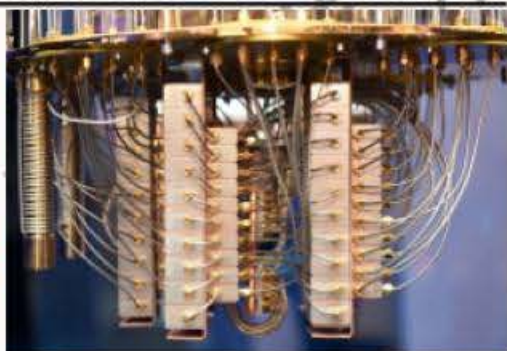
制冷方式

- 气体膨胀制冷
- 稀释制冷
- 吸附制冷
-

发展瓶颈

主流技术:

- 气体膨胀制冷的温度下限无法突破
- 稀释制冷依赖进口氦3



打破国外资源垄断与技术封锁

室温区

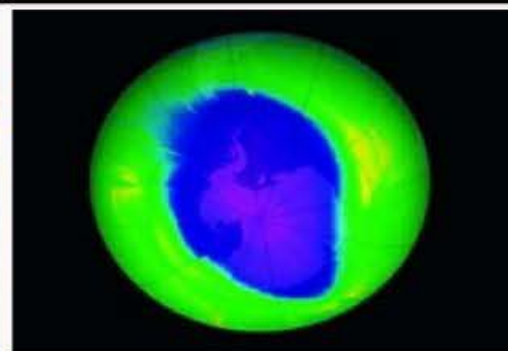
制冷方式

- 蒸气压缩制冷
- 吸收式制冷
- 气体膨胀制冷
-

发展瓶颈

主流的蒸气压缩制冷技术:

- 氟利昂等工质破坏臭氧层、产生温室效应
- 制冷能耗大, 接近社会总能耗15%



开发新型制冷技术, 解决环保问题

亟待开发节能环保、自主可控的新型替代性制冷技术 (固态制冷)

研究背景



固态制冷技术进展

极低温制冷技术进展

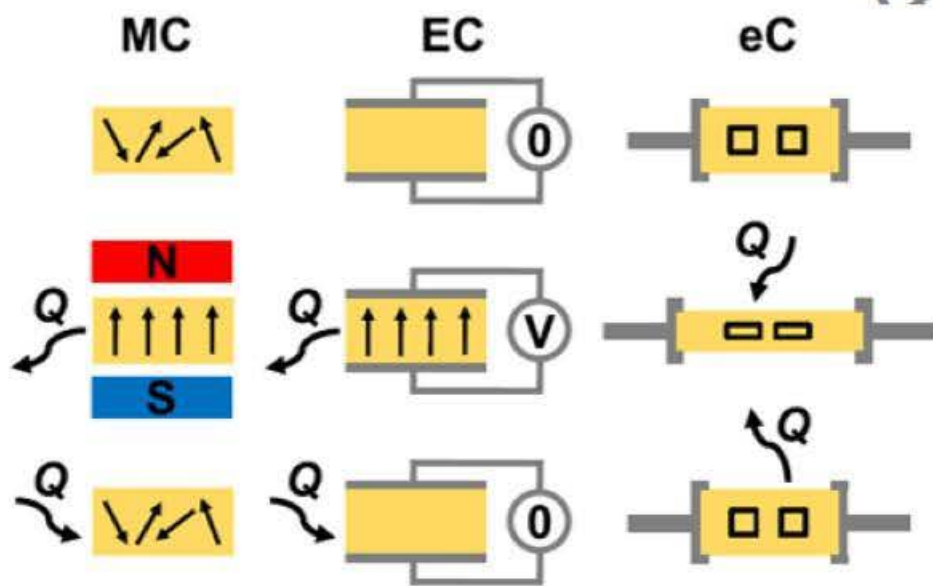
总结和展望



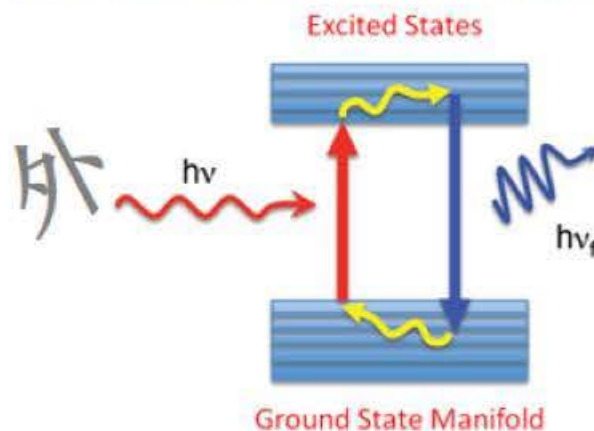
2. 固态制冷技术进展：概述

常见固态制冷技术

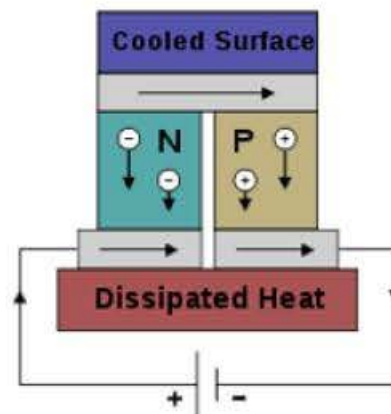
- 磁制冷，电卡制冷、弹卡制冷均基于外场（磁场，电场和应力场）作用下的热效应（caloric effect），通过系统流程设计，可以实现基于卡诺循环或其他基于回热的高效循环



- 光学制冷主要基于激光光子诱发的荧光

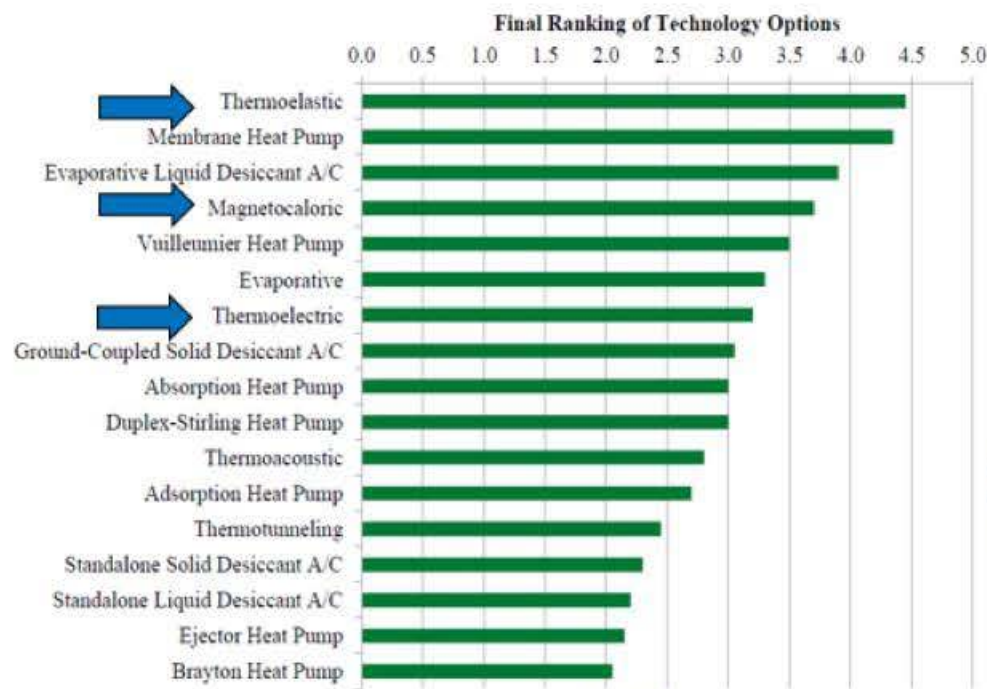


- 热电制冷：外加电场作用下，半导体中载流子运动引起温度梯度，Peltier效应





2. 固态制冷技术进展：概述



美国能源部报告：17种潜力制冷技术



美国低温学会

Science

Science期刊

The potential gains in energy efficiency are too significant to ignore. (October 20, 2015)

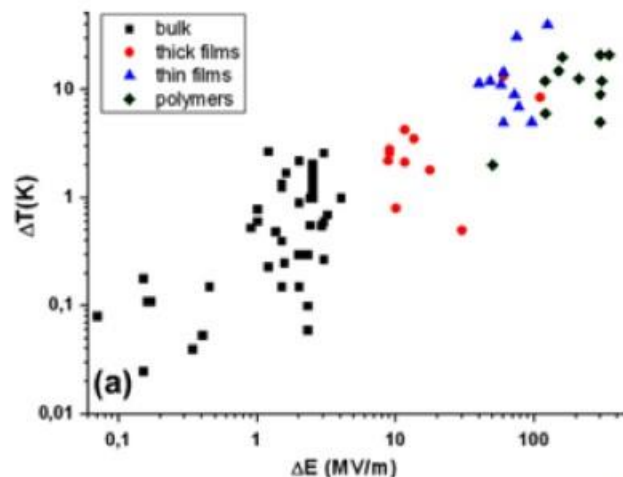
Magnetic refrigeration techniques based on the magnetocaloric effect (MCE) have recently been demonstrated as a promising alternative to conventional vapour-cycle refrigeration (279, 2045 (1998))

固态制冷技术作为学科发展的前沿和热点，涉及诸多重要学科和领域，如低温与制冷工程学、光学、磁学、电学、电子学、材料学和凝聚态物理等，将有望成为重要的学科生长点和新一代低温与制冷技术的主力之一



2. 固态制冷技术进展：电卡制冷

电卡制冷基本原理：



电场下铁电材料的温变

$$\Delta T = \frac{\epsilon_0 C T}{2 \rho C_E (T - T_C)^2} \Delta E^2$$

1943年：Rochelle Salt 首次实验测试了材料的电卡效应 (~0.003K)

1977年：Radebaugh发明应用于低温 (10K) 的电卡效应制冷机

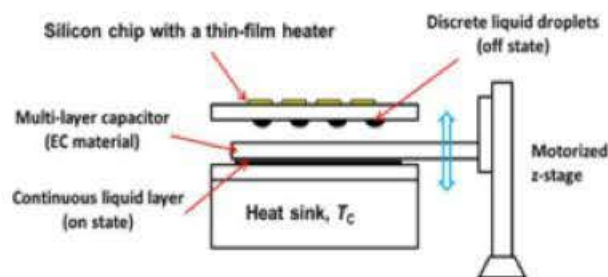
2006年至今：Scott, J.F和Zhang, Q.M分别研制“巨电卡效应”材料实现12K温跨 (Science)

铁电材料施加电场时发生极化，有序度增加，熵减，材料温度升高；去除电场时有序度减小，熵增，材料温度降低

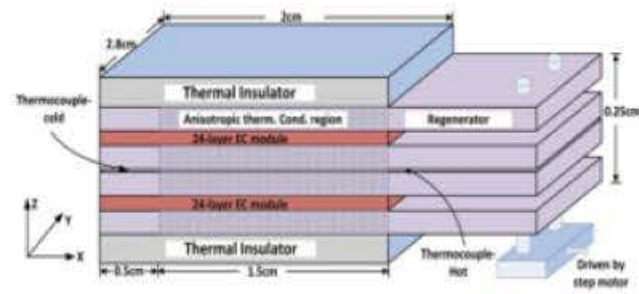


2. 固态制冷技术进展：电卡制冷

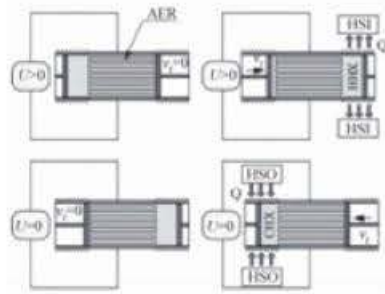
电卡制冷进展：正在开发铁电聚合物基的材料，处于整机系统研究的初级阶段



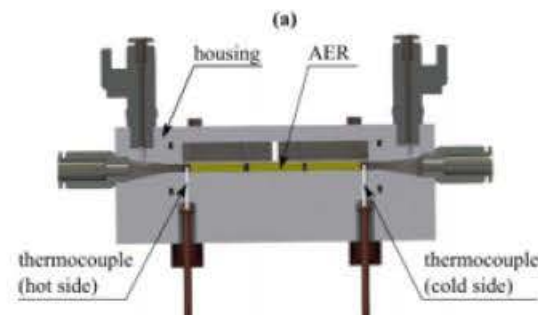
2004年 美国
加州大学
 ΔT 2.3K



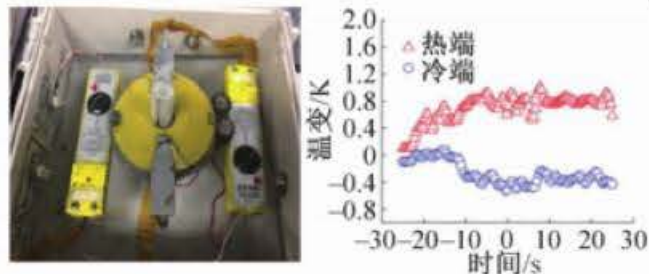
2014年 美国
宾州州立大学
 ΔT 6.6K



2015年 斯洛文尼亚斯洛
文尼亚卢布尔雅那大学
 ΔT 3.4K



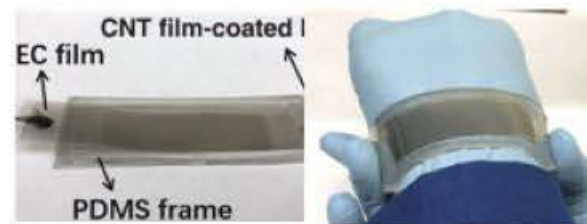
2015年 斯洛文尼亚
Stefan研究院
 ΔT 14K



2017年 宾夕法尼亚州立大学
制冷功率达到9 W/cm³，热力
完善度达到50%。



2017年 美国联合技术公司研
究中心
 ΔT 6.6 K

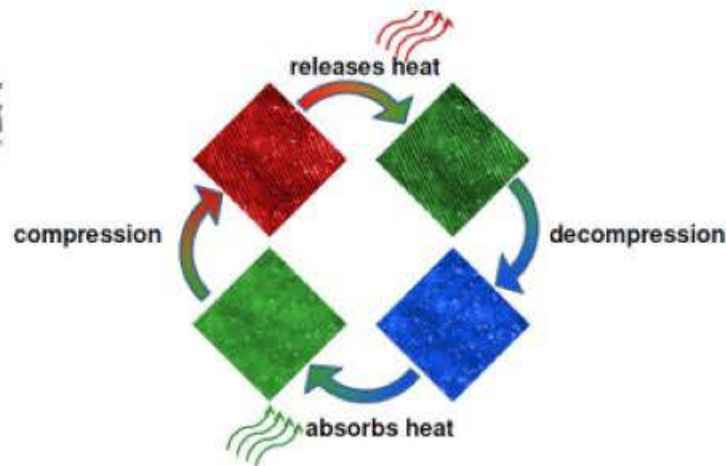
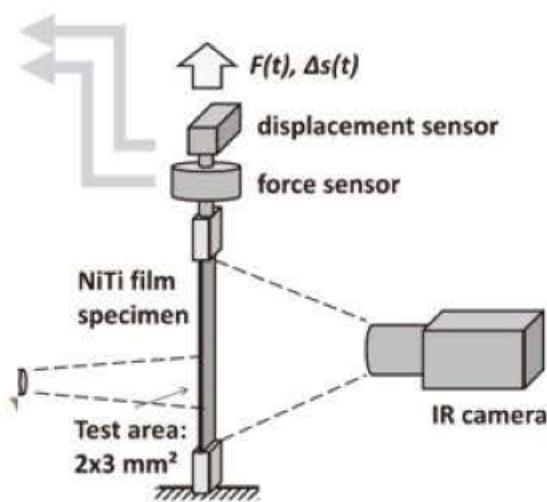
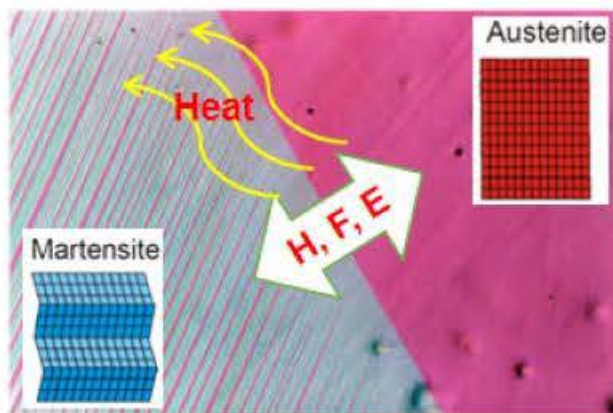


2017 美国加州大学
柔性制冷装置
比制冷功率密度2.8 W/g



2. 固态制冷技术进展：弹卡制冷

弹卡制冷基本原理：



- 形状记忆合金 (TiNi等) 奥氏体与马氏体相互转变带来的热效应
- 弹热制冷技术是由应力场驱动弹热材料相变而产生制冷效应的固态制冷技术

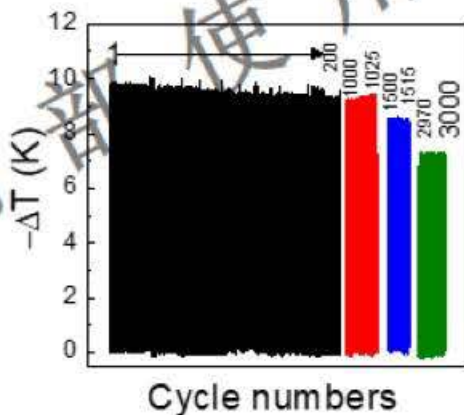
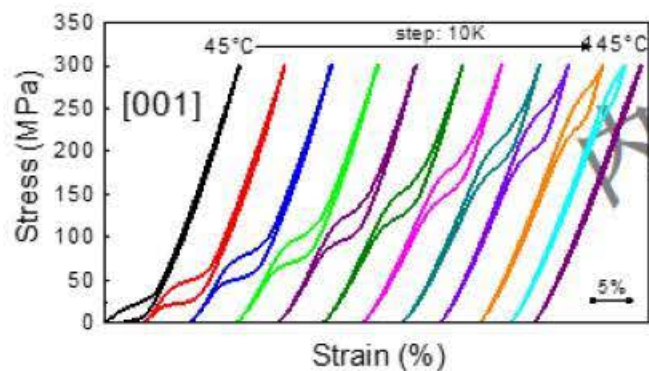
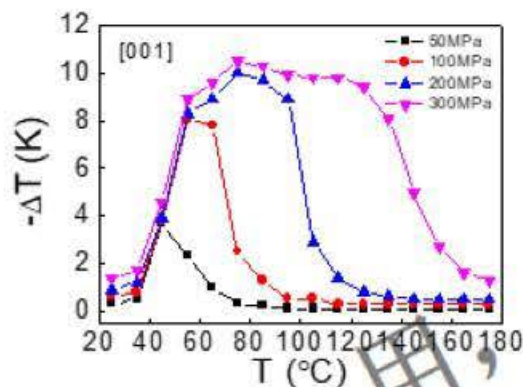
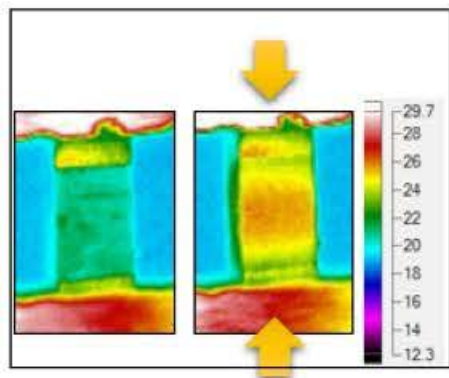
- 被美国能源部认可为最具潜力的新型制冷技术

施加轴向载荷，材料在应力作用下由奥氏体转变为马氏体，熵减小并且对外放热；去除载荷时，逆向的相变导致熵增大，从外界吸热，产生制冷效应，

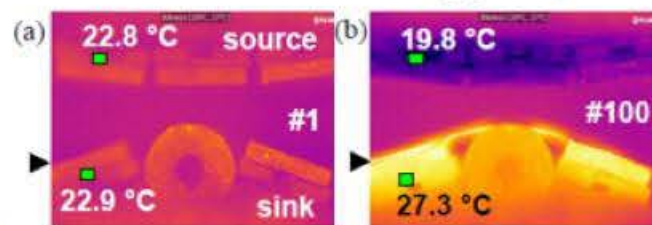


2. 固态制冷技术进展：弹卡制冷

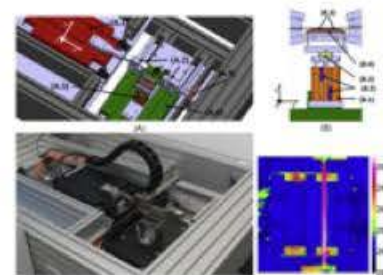
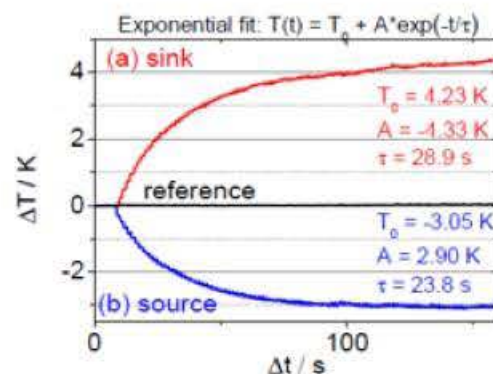
弹卡制冷进展：正开发TiNi基、NiFeGaCo基等工质，有少量的整机系统研究



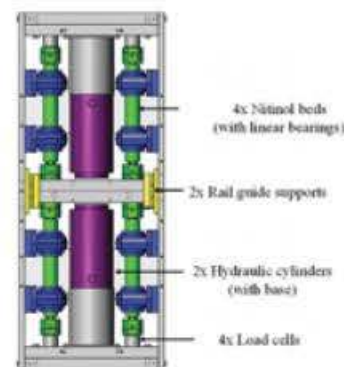
中国科学院 宁波材料所
单晶NiFeGaCo 磁性材料弹热研究



2015 德国
卡尔斯鲁尔理工学院 (KIT)
TiNi合金制冷原型器件



2015年 萨尔兰德大学拉伸
Ni-Ti薄板的原型机

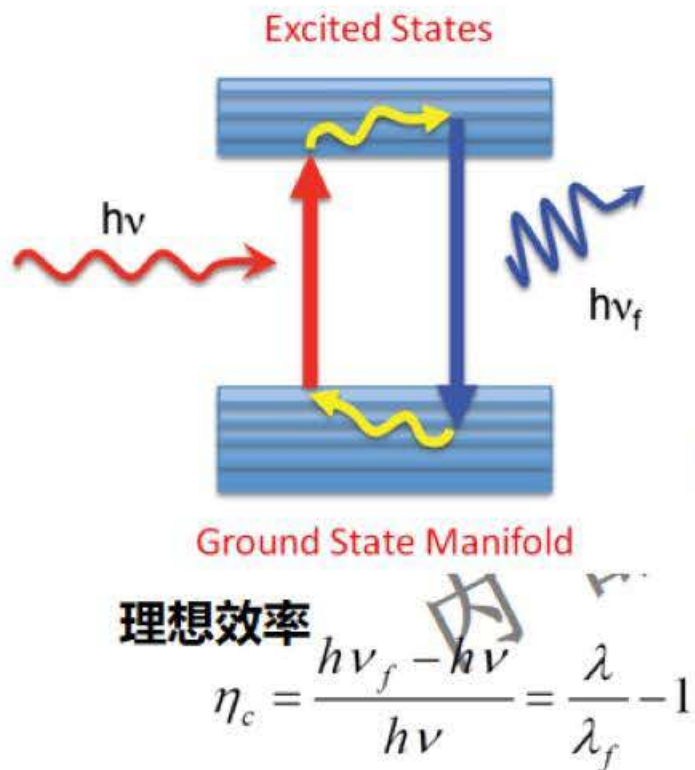


2016年 马里兰大学压缩
驱动Ni-Ti管原型机
 ΔT 24.6K

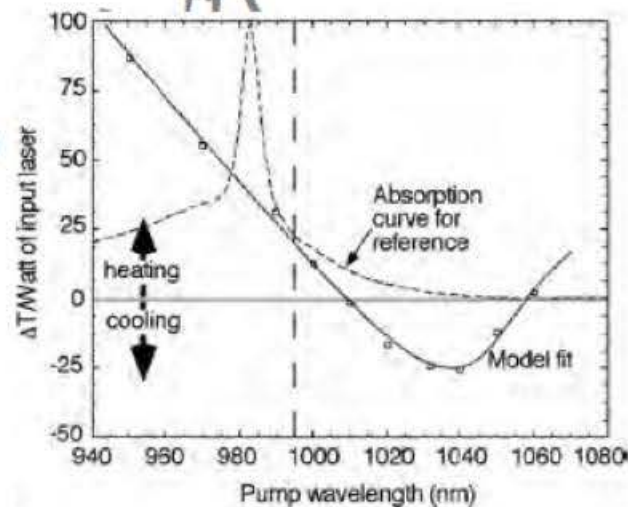


2. 固态制冷技术进展：激光制冷

激光制冷基本原理：



1929 德国
物理学家Peter Pringsheim

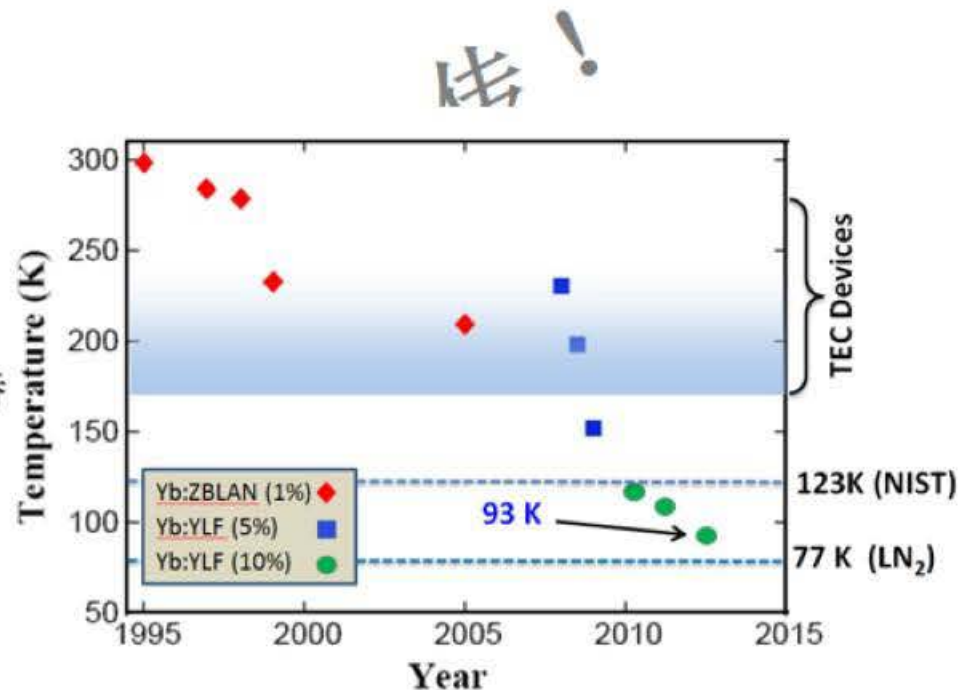
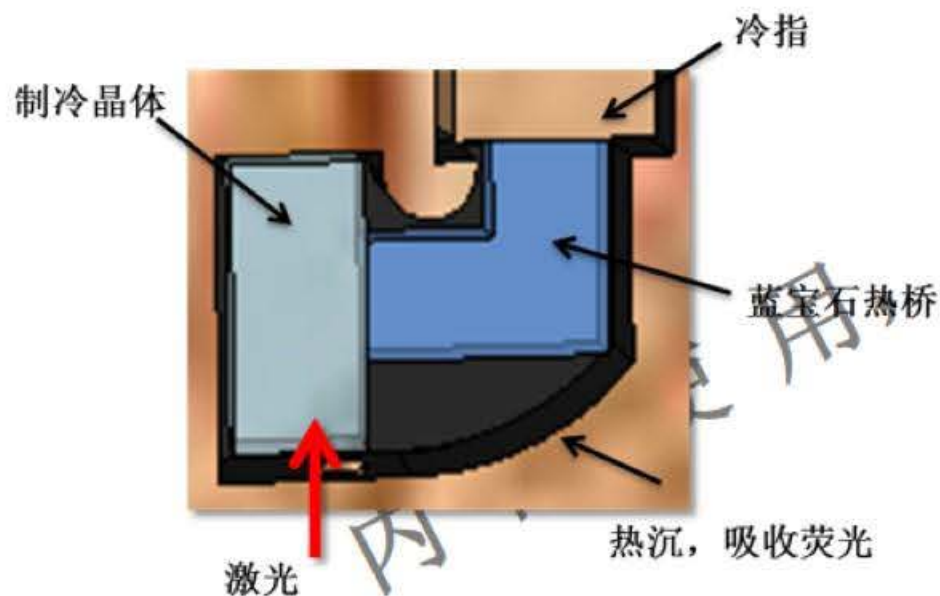


高纯晶体内掺杂物原子（通常稀土元素）受激光光子激发，释放更高能量的光子（Anti-Stokes Fluorescence）



2. 固态制冷技术进展：激光制冷

激光制冷进展： 正在开展Yb³⁺掺杂YLiF₄ (YLF: Yb) 晶体等材料的研究，鲜有整机研究

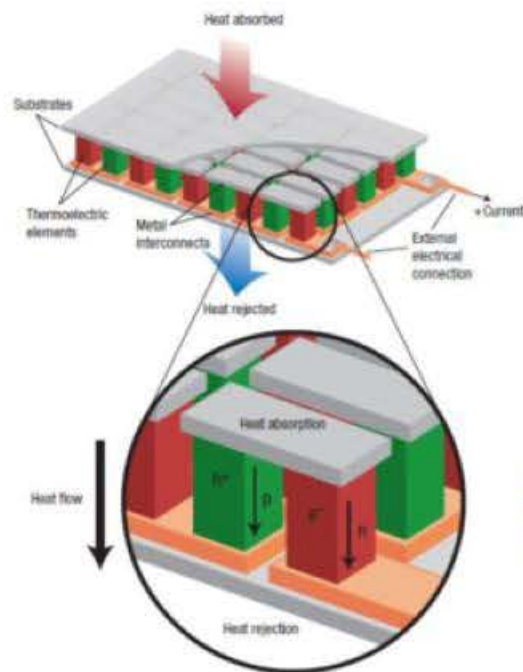


近二十年迅速进展，最低温接近液氮温度



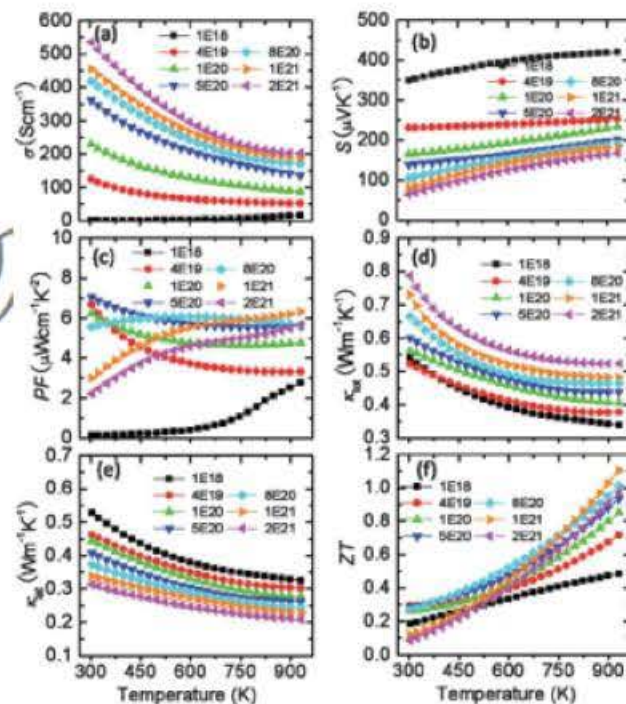
2. 固态制冷技术进展：热电制冷

热电制冷基本原理：



$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \lambda}$$

请



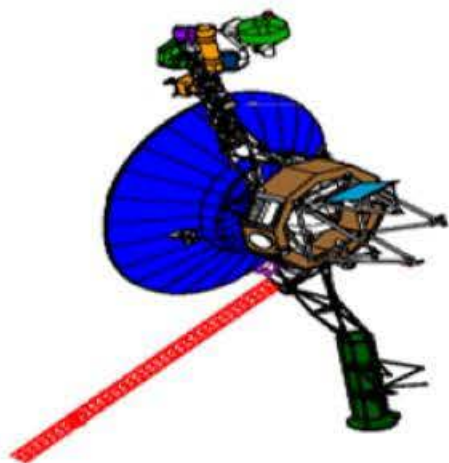
BiCuSeO

外加电场作用下，半导体中载流子运动引起温度梯度，Peltier效应（1834）



2. 固态制冷技术进展：热电制冷

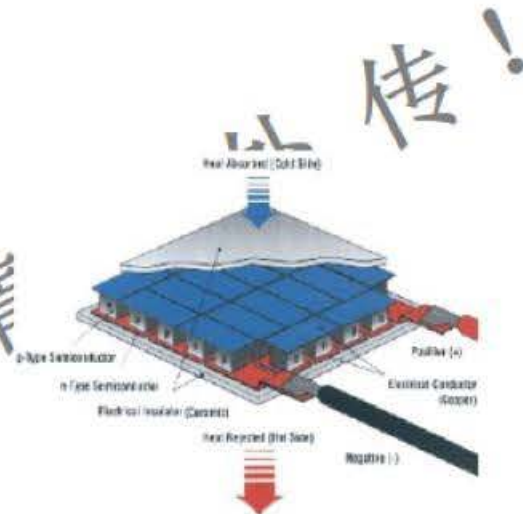
热电制冷进展： 正在开展BiTe基等材料的研究，整机系统研究相对成熟，部分商业化



航空器-热电转化



AA11导弹-高精度温控



制冷片-热电制冷



小型冰箱-热电制冷

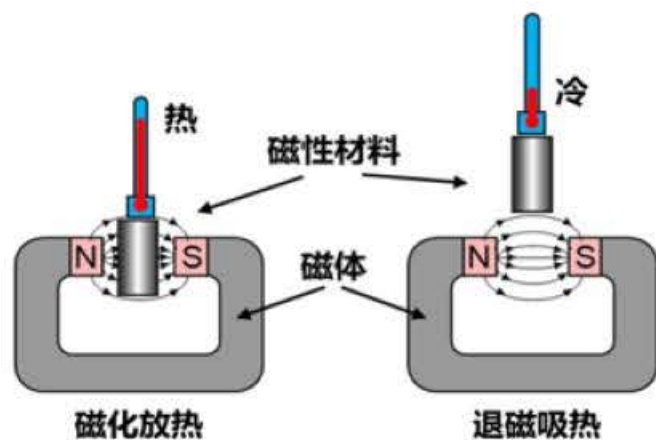
寿命长，无振动，但效率比较低 ($<10\%$)

用于空间技术、便携冰箱、电子器件局部冷却、小型医疗器械等

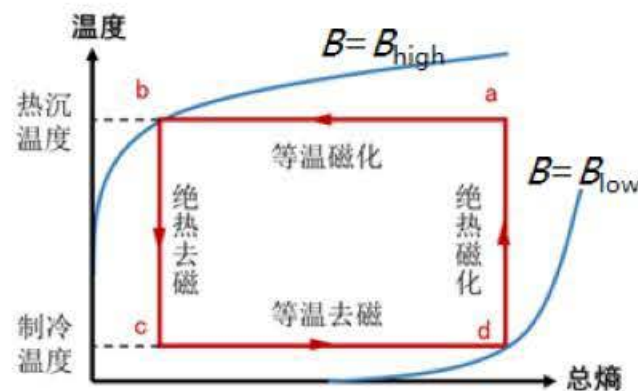


2. 固态制冷技术进展：磁制冷

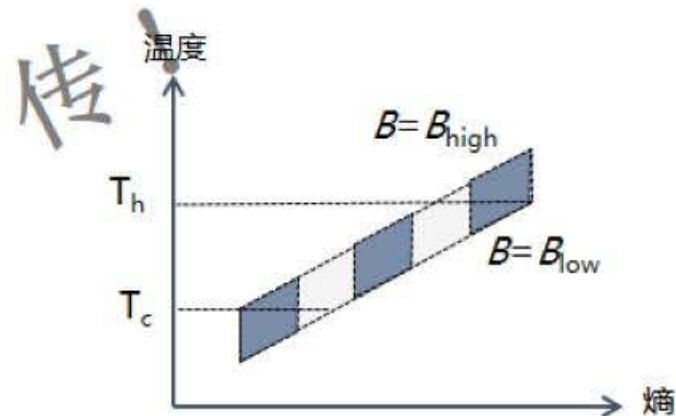
■ 基本原理



■ 热力学循环



极低温：卡诺循环



低温/室温：主动式磁回热循环

- 利用磁性材料的**磁化放热**、**退磁吸热**效应实现制冷
- 磁制冷机主要由**磁热模块/磁回热器**、**磁体**等构成
- 通过**时序控制**构建**热力学循环**过程，实现高效制冷

相对
卡诺
效率

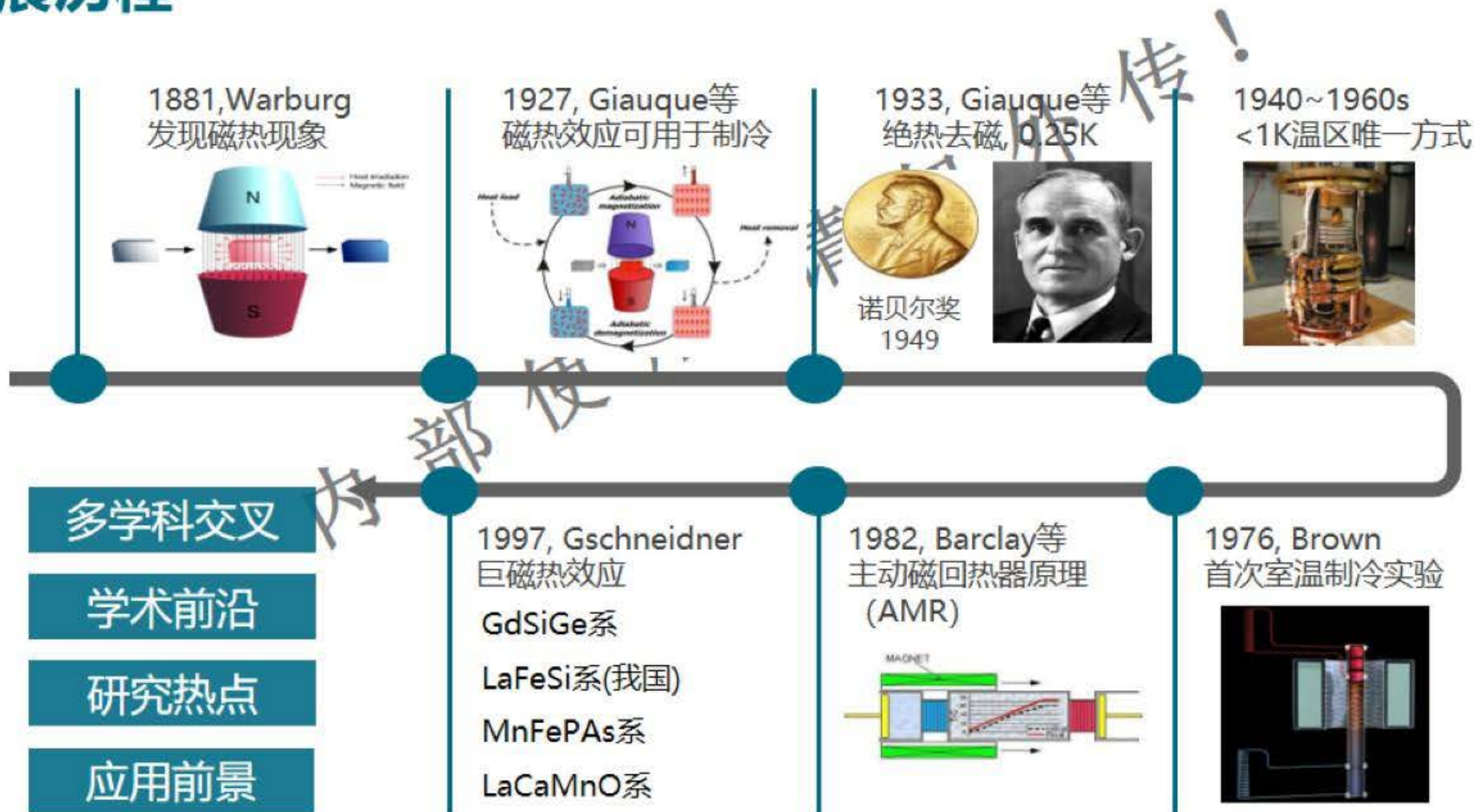
$$\eta = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{ideal}}} = \frac{\frac{Q_{\text{cold}}}{Q_{\text{hot}} - Q_{\text{cold}}}}{\frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}}$$

磁制冷：利用磁性材料的磁化放热、退磁吸热效应的一种新型固态制冷技术



2. 固态制冷技术进展：磁制冷

发展历程

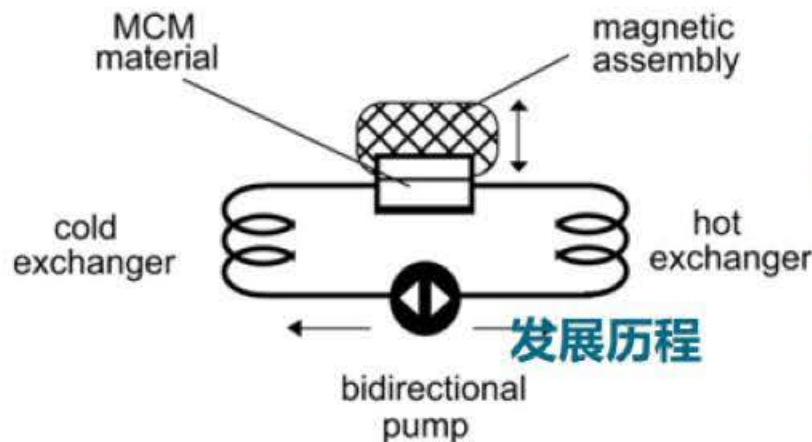




2. 固态制冷技术进展：磁制冷

发展趋势

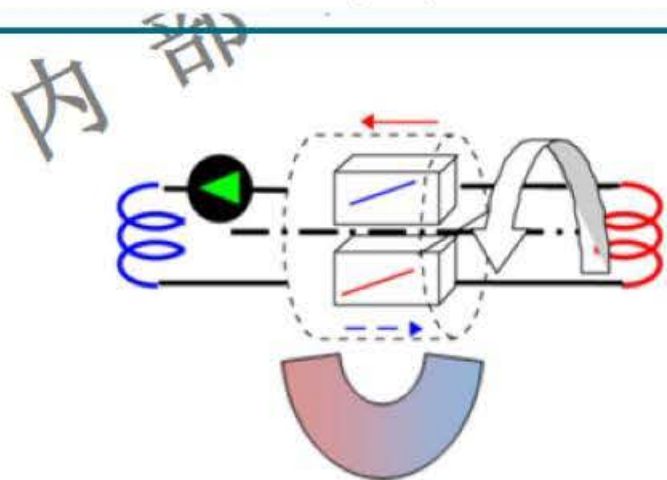
前期
磁制冷机



技术特征

1. 单个回热器，磁热材料少
2. 磁体利用率低(空间\时间)
3. 磁体转动力矩大, 变力矩
4. 水力活塞双向驱动,效率低

主流
磁制冷机



技术特征

1. 多个回热器，更多磁热材料
2. 旋转磁体，磁场利用率高
3. 磁体转动力矩小且恒定
4. 单向泵+单向阀

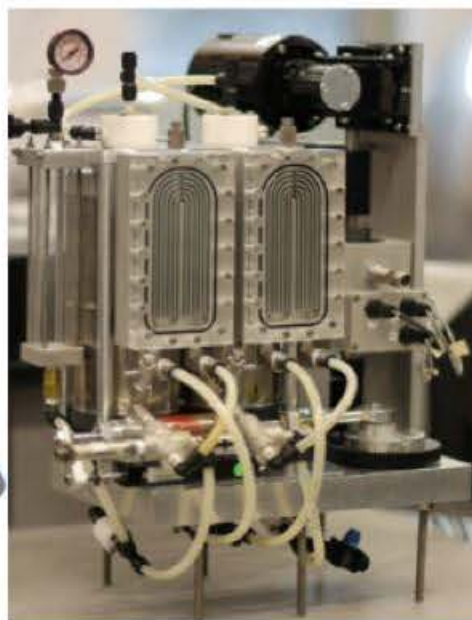


2. 固态制冷技术进展：磁制冷

典型样机



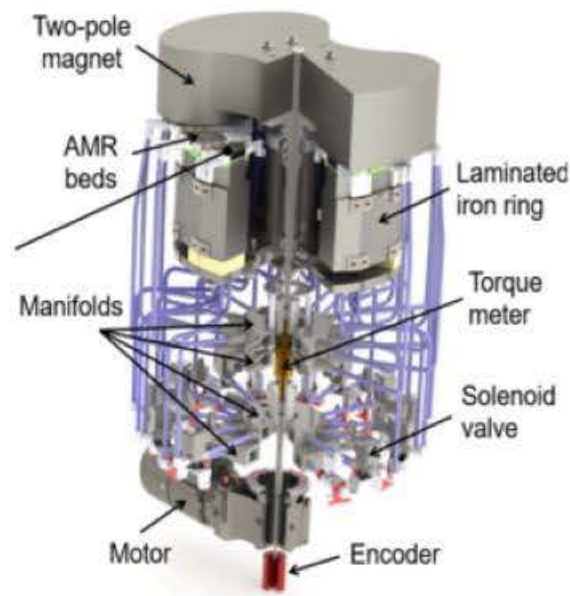
2013, Astronautics
2520W @11K, COP1.9



2013, Victoria Uni
50W @15K, 0W@33K



2015, DTU
103W@10.2K, COP3.1
11.3% of Carnot



2022, DTU
818W@10K, COP4.0
14.5% of Carnot

外传！



2. 固态制冷技术进展：磁制冷

典型工程样机



- Cold power : 200W to 700W
- Positive temperature in the cabinet : +2-5 °C
- Positive R.O.I for end users (3 years)
- Designed firstly for the **Commercial Refrigeration**

冰箱(法国Cooltech-2014)



酒柜 (中国海尔集团-2015)



2. 固态制冷技术进展：我们团队工作1

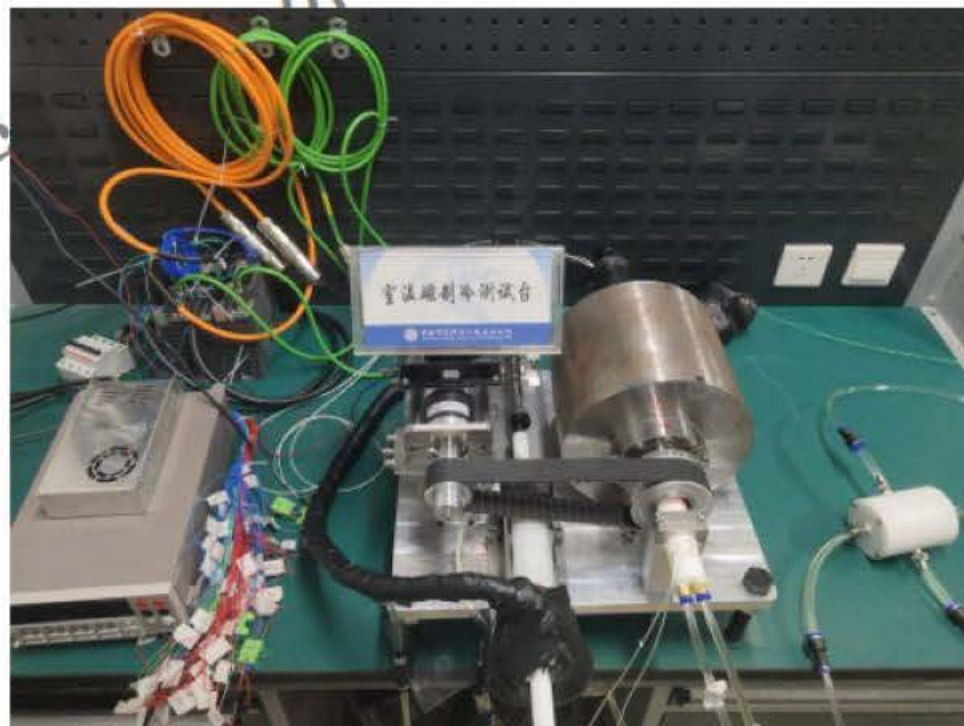
单AMR式室温磁制冷机

系统基本参数

磁场	0.04~1.7T
频率	0~1.5 Hz
磁热材料	0.46 kg Gd~

制冷性能

冷量	100 W @10.5 K温跨
最大温跨	35 K

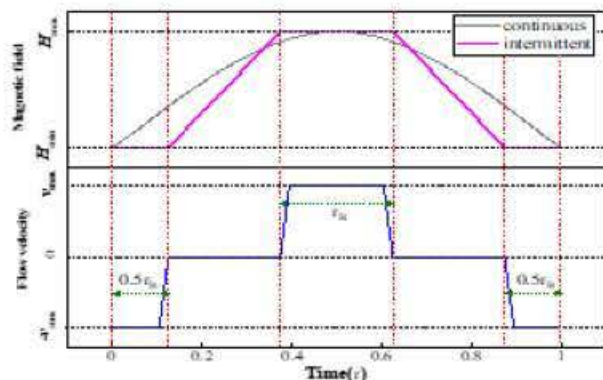


室温温区单主动磁回热器式磁制冷整机



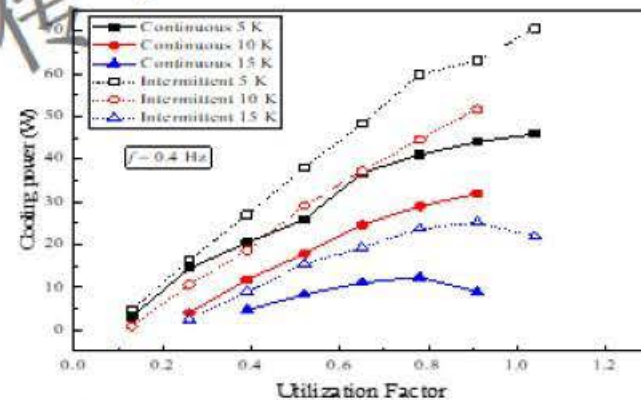
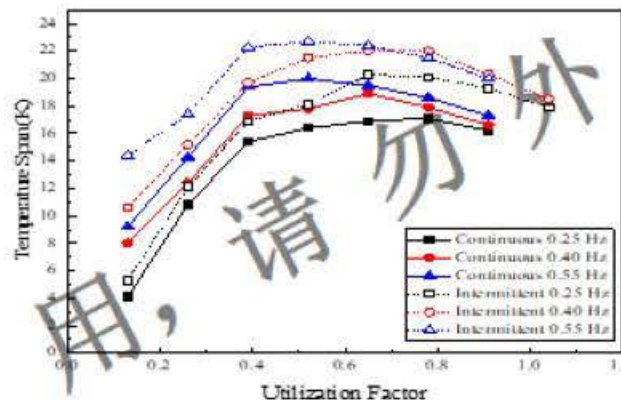
2. 固态制冷技术进展：我们团队工作1

单AMR式室温磁制冷机：磁场波形影响评测



- 连续和间歇两种磁场波形，通过**改变流动时间按占比** (F_B) 改变波形形状

$$F_B = \frac{2\tau_B}{\tau}$$



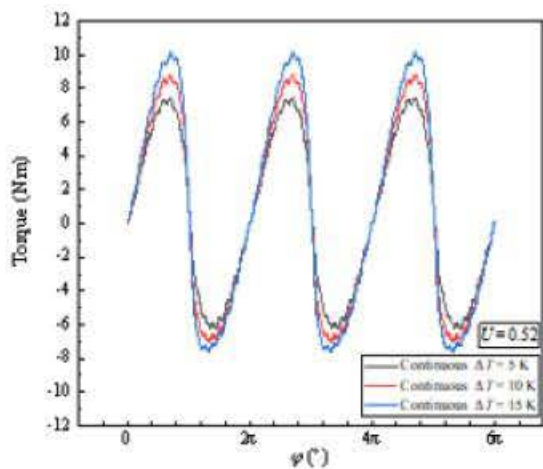
- 在所有频率下，间歇波形的无负荷温跨均大于连续波形
- 同连续波形相比，间歇波形下的回热器经过磁化/退磁过程后，与换热流体产生更大的**换热温差**，换热速率更高
- 两种波形下的**平均磁场变化**也是造成性能差距的原因，连续型和间歇型的平均磁场变化分别为1.18 T和1.46 T

间歇式磁场波形在**制冷温跨与制冷量**等方面均优于连续式磁场波形

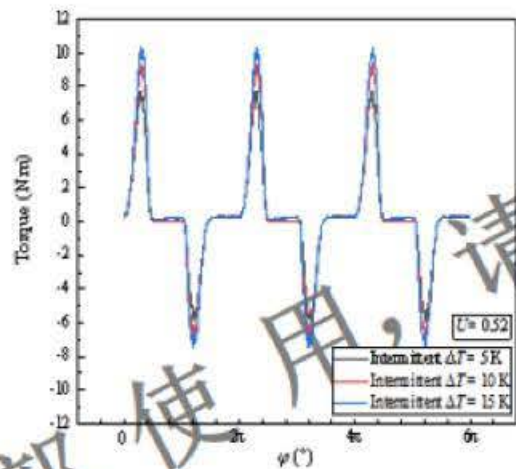


2. 固态制冷技术进展：我们团队工作1

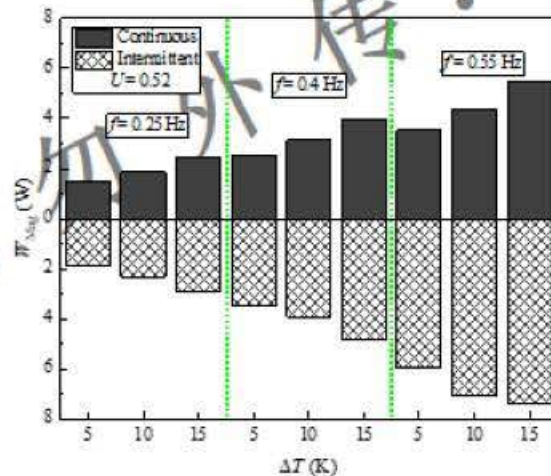
单AMR式室温磁制冷机：磁场波形影响评测



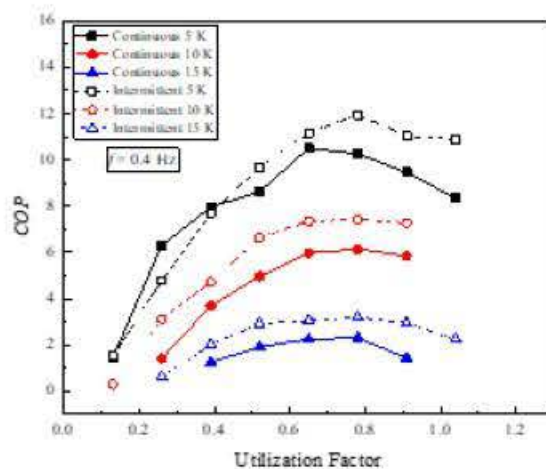
连续式波形扭矩图



间歇式波形扭矩图



两种波形功耗对比



两种波形COP对比

- 回热器磁化时转矩为正，退磁时转矩为负。
- 回热器的温度跨度越大，电机驱动磁体对回热器磁化所需的转矩也越大

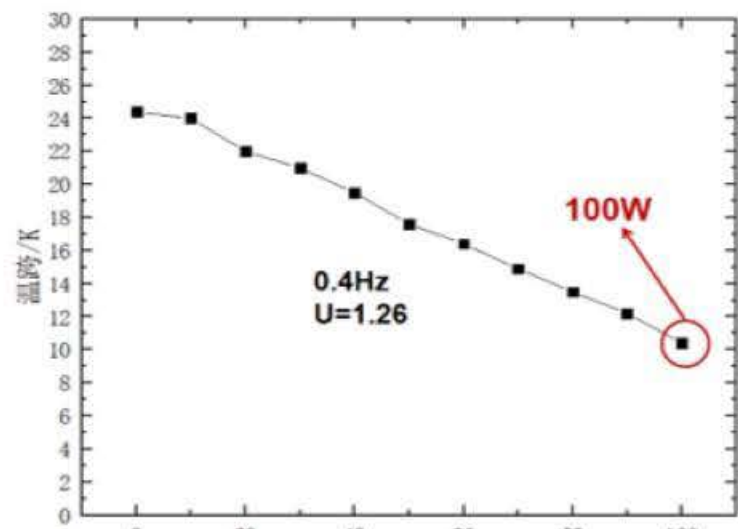
- 间歇波形下的磁化功始终大于连续波形
- 随着温跨的增大，磁化功也相应增加

对比波形下的磁体电机的转矩，**间歇式磁场波形的磁化功更大，但在大多数工况下，具有更高的性能系数**



2. 固态制冷技术进展：我们团队工作1

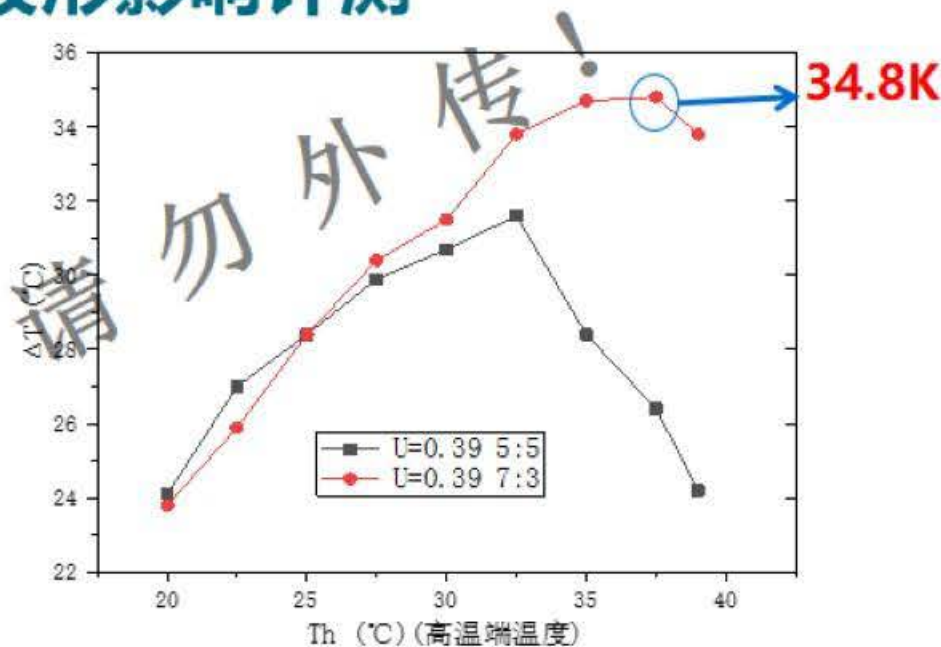
单AMR式室温磁制冷机：磁场波形影响评测



用, 请 勿 外 传!

$$\text{COP} = \frac{\text{制冷量}}{\text{泵功} + \text{磁化功}} = 3.85$$

100W (冷量/W)
3.36W (泵功)
22.6W (磁化功)



双层Gd基回热器：

- 当 $T_h = 37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，制冷温跨值为34.8 K

单AMR式室温磁制冷机样机最大温跨34.8 K，
10.3 K温跨下制冷量达到100 W，对应制冷系数大于3.85



2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

多磁极、多AMR式高效磁制冷机

系统基本参数

磁场	0.04~1.1T
频率	0~1.0 Hz
磁热材料	~1.5 kg Gd合金

制冷性能

冷量	100 W @ 20 K 温跨
最大温跨	30 K
相对效率	$\geq 15\%$

基本结构



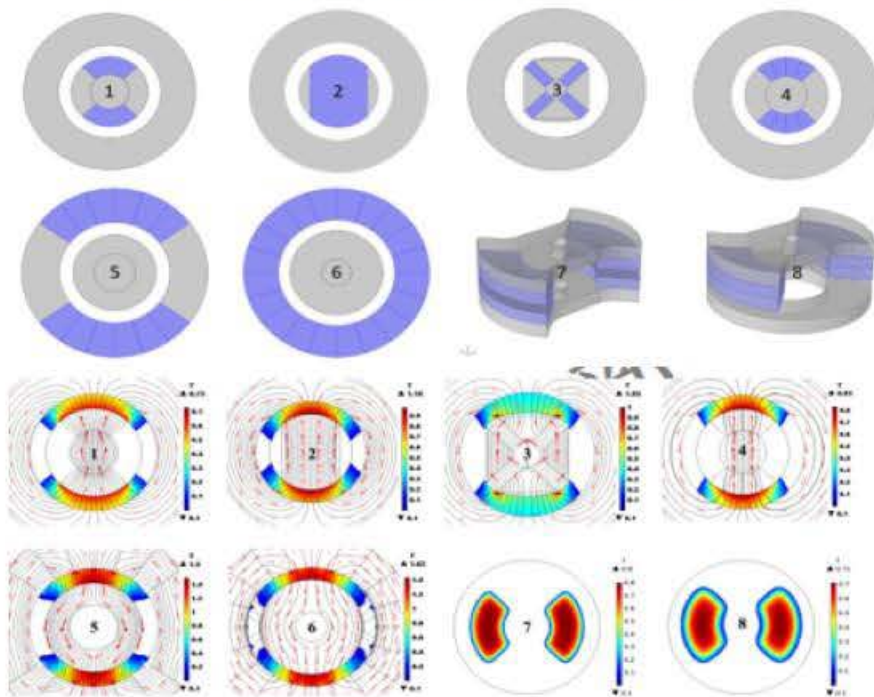
室温温区多磁极磁制冷整机



2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

多磁极、多AMR式高效磁制冷机：系统设计

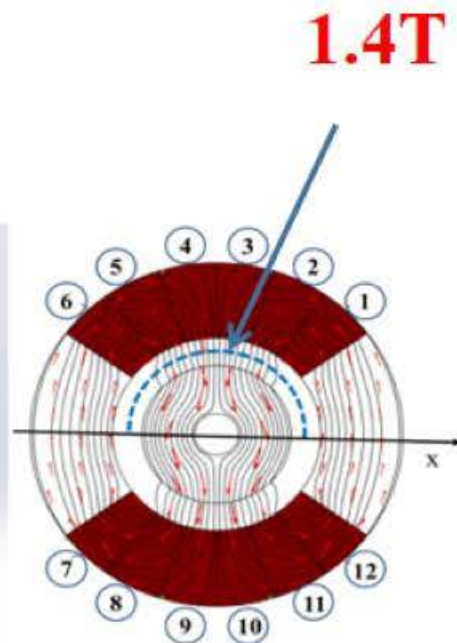
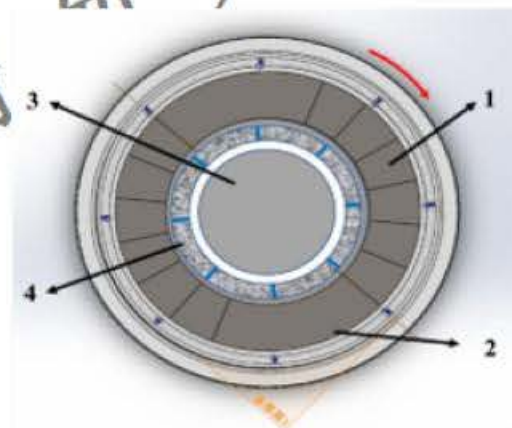
➤ 多磁极系统磁体优化



8种磁体结构的仿真结果图

选定方案5

请

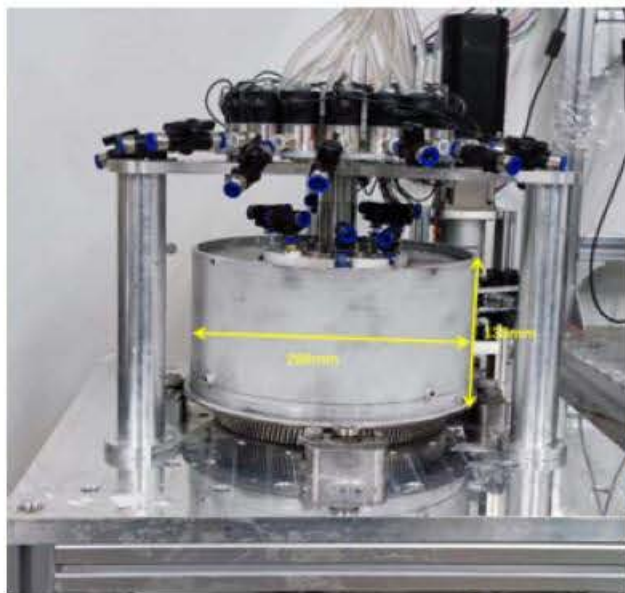


- 多磁极磁路结构中存在两个强磁区和两个弱磁区
- 当外磁体旋转一周时，每个回热器将经历2个完整的磁制冷循环，因此回热器的等效运行频率是单AMR式测试平台的16倍。

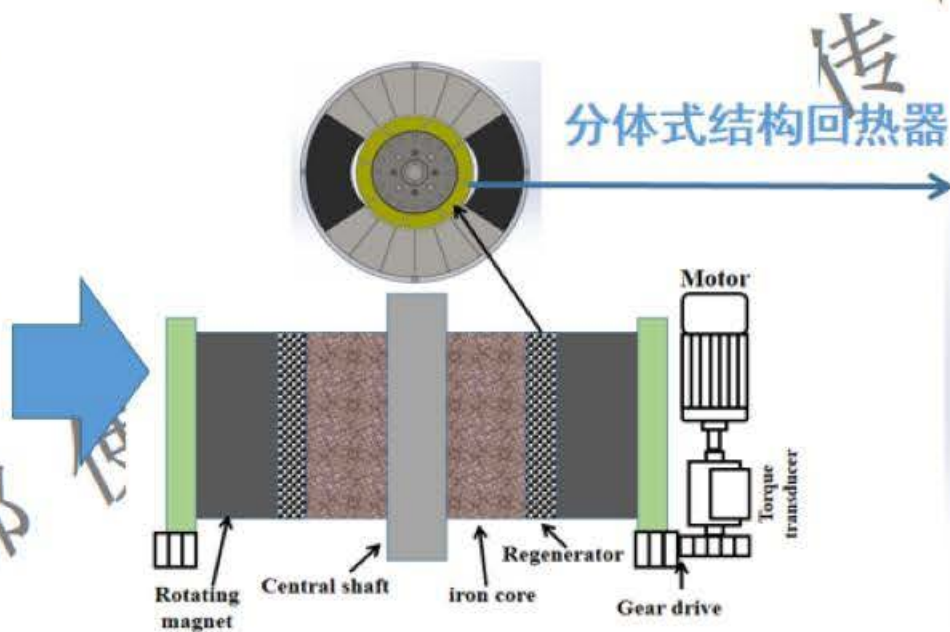


2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

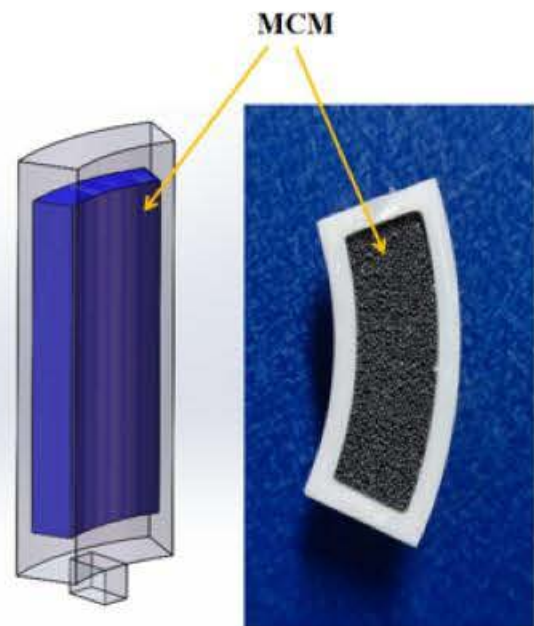
多磁极、多AMR式高效磁制冷机：系统研制



多磁极制冷机



原理图

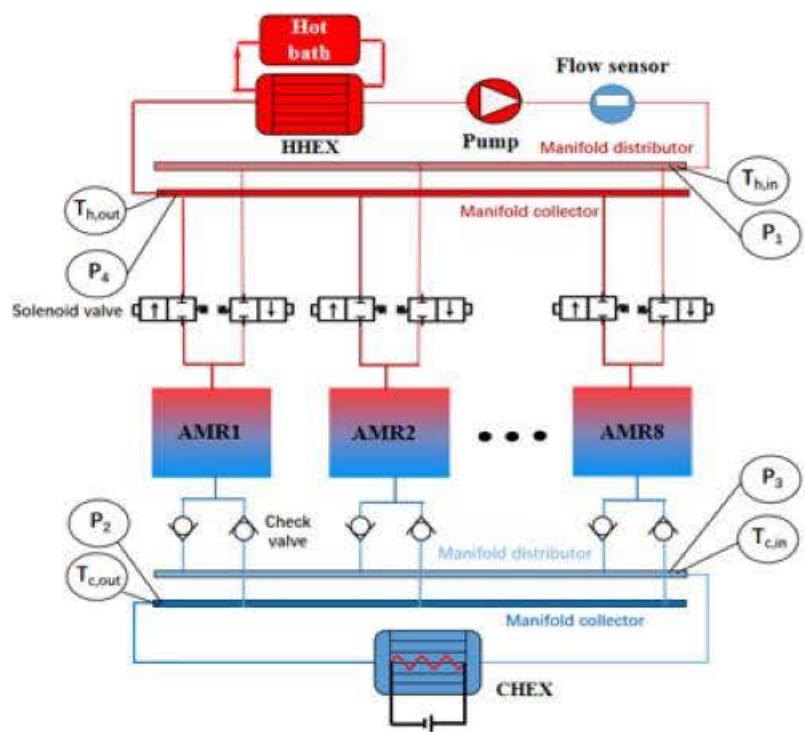


- 外磁体由电机驱动，通过张紧器上的偏心轮的调整保证磁场气隙宽度的均匀性。
- 为了便于回热器的更换和流道的调整，选择了分体式回热器方案，使每个回热器都可以单独更换。
- 磁热材料为钆颗粒，粒径范围为0.45-0.6 mm。单个回热器中磁热材料的重量范围为168.2 g - 169.5 g，磁热材料的总重量为1.35 kg。



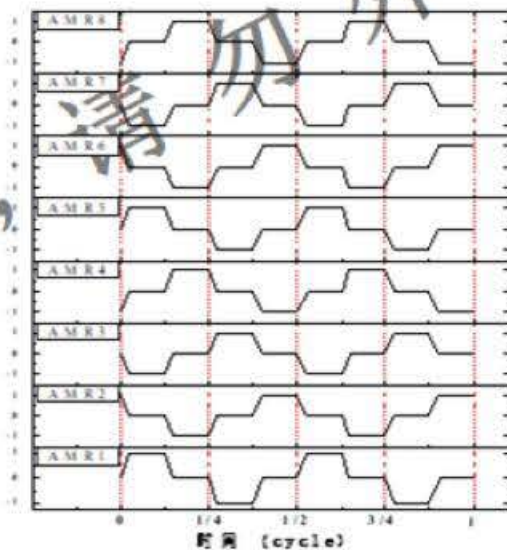
2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

多磁极、多AMR式高效磁制冷机：系统调试



实际流路的原理图

每个回热器的流型设计与流路参数



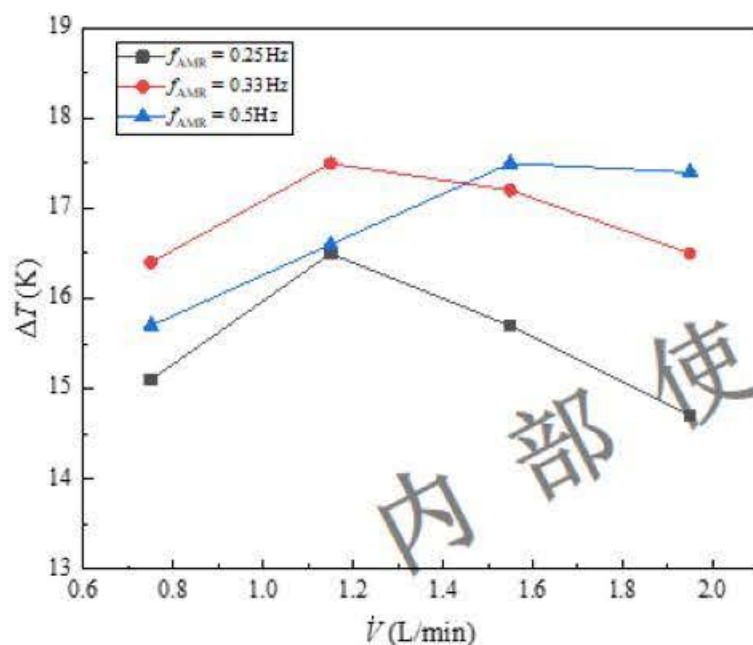
运行参数	
高温端温度	299.7K
环境温度	297.2K
运行频率	0.25,0.33,0.5
流量	0.75-1.95 L/min
F _B	0.5

- 通过电磁阀的开闭调整每个回热器的流型，满足主动式磁布雷顿循环
- 由于磁体有两极，总有两个回热器同时经历热吹过程，两个回热器同时经历冷吹过程。其余4个回热器处于中间磁场。磁力离心泵驱动流体在系统中不断流动。

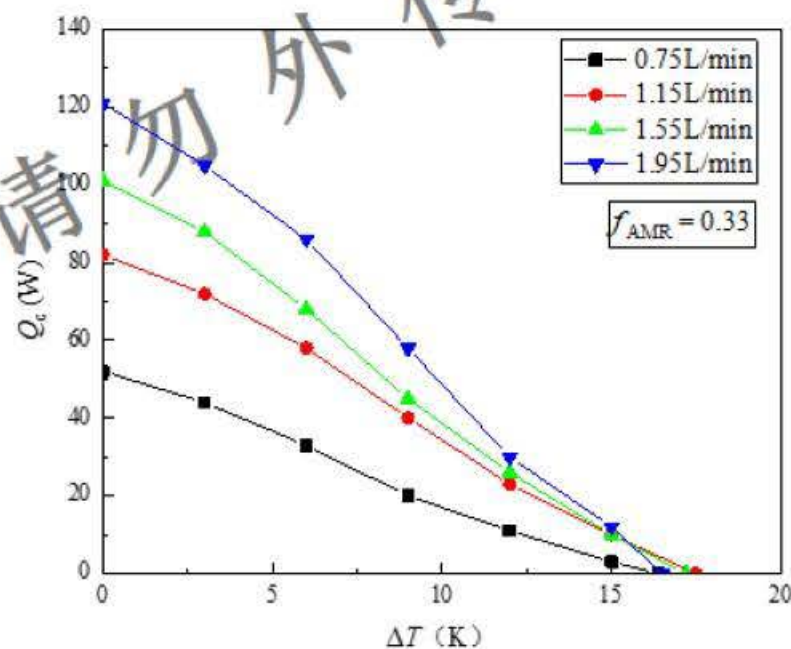


2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

多磁极、多AMR式高效磁制冷机：系统性能评测



不同频率下无负荷制冷温跨关系



0.33Hz频率下冷量和温跨的关系

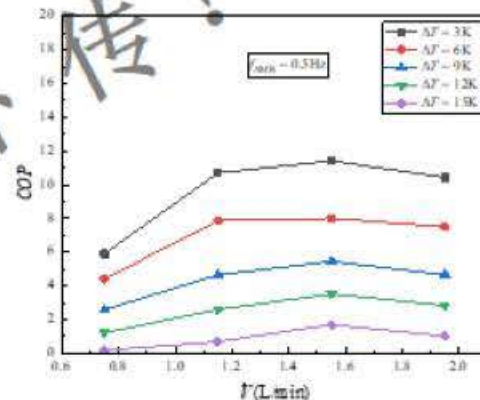
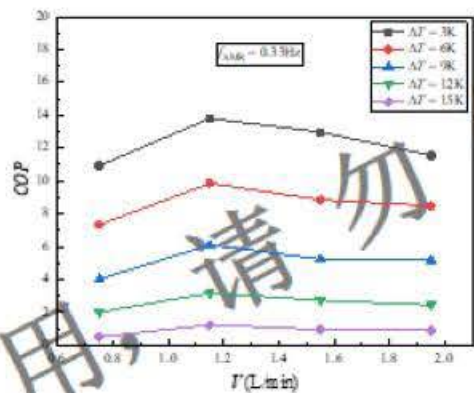
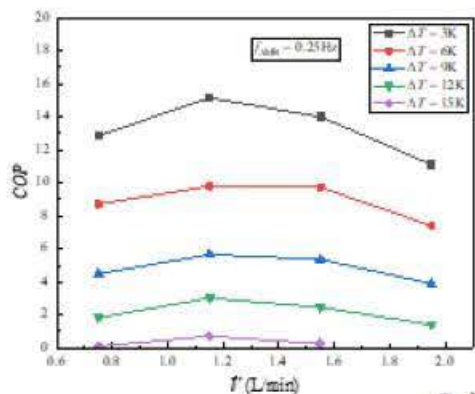
构建更优的制冷温跨和制冷量需要**匹配合适流量大小**，如17.6K@0.9L/min
此外，制冷量与温跨基本成反比关系，系统最大制冷量约126W



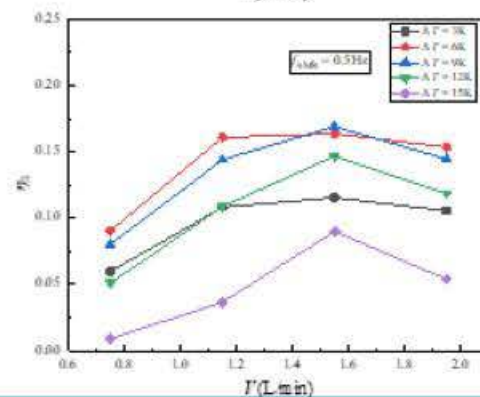
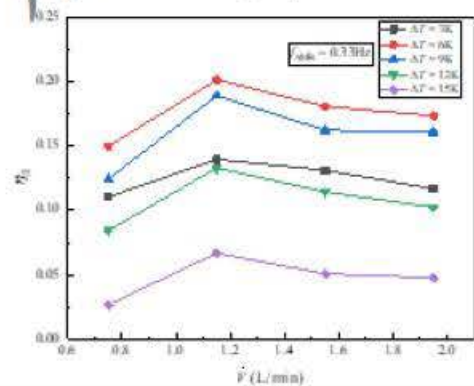
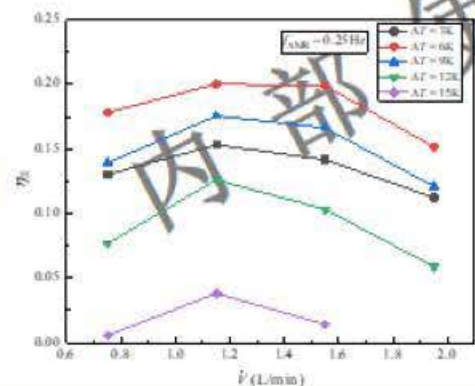
2. 固态制冷技术进展：我们团队工作2

多磁极、多AMR式高效磁制冷机：系统性能评测

COP



热力学第二效率



当运行频率为0.33 Hz，流量为1.15 L/min时，
获得20.2%的最大第二热力学效率



2. 固态制冷技术进展：我们团队工作3

千万级冷量旋转盘式高效磁制冷机：处于设计阶段

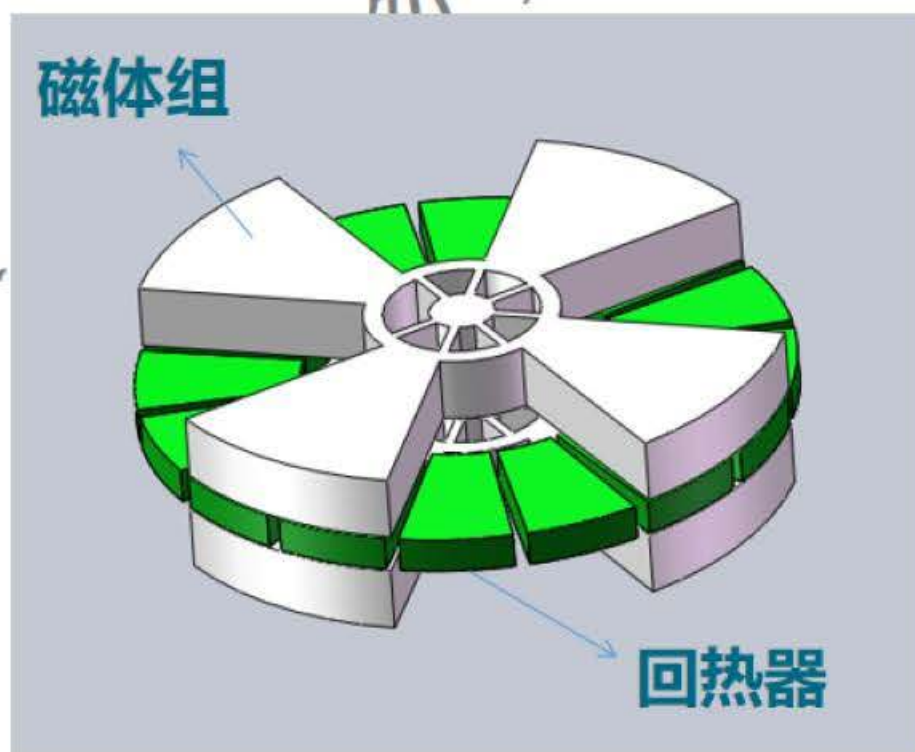
系统基本参数

磁场	0.04~1.1T
频率	0~1.0 Hz
磁热材料	~100 kg Gd合金

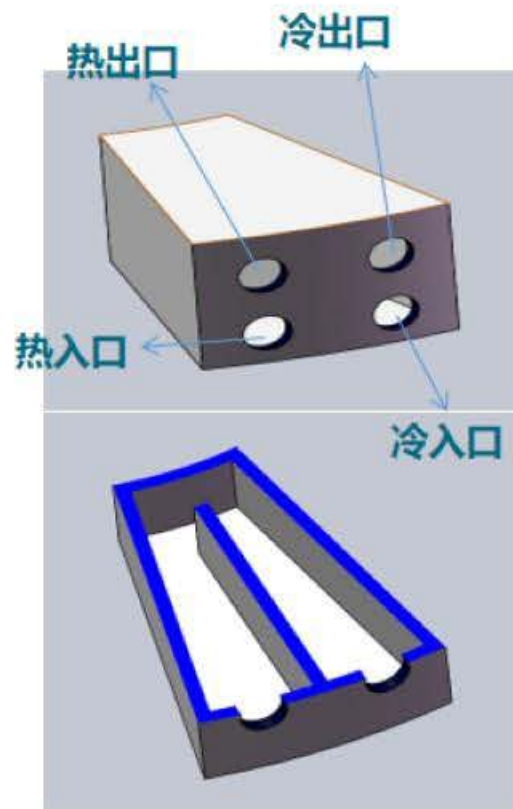
制冷性能

冷量	单组4kW @ 20 K 温跨
最大温跨	30 K
相对效率	$\geq 15\%$

基本结构



磁体-回热器架构



回热器结构

研究背景

固态制冷技术进展

极低温制冷技术进展

总结和展望

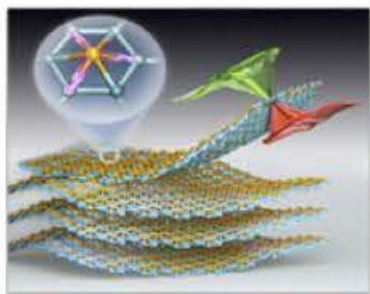




3. 极低温制冷技术进展

极低温制冷的意义

- 用于获得**亚开温度** (sub-kelvin) 并提供一定冷量的制冷技术
- 是众多基础和前沿科学研究（凝聚态物理、空间探测、量子计算）的**关键支撑技术**



波色-爱因斯坦凝聚 2mK
宇称不守恒验证 10mK
量子反常霍尔效应 30mK
.....

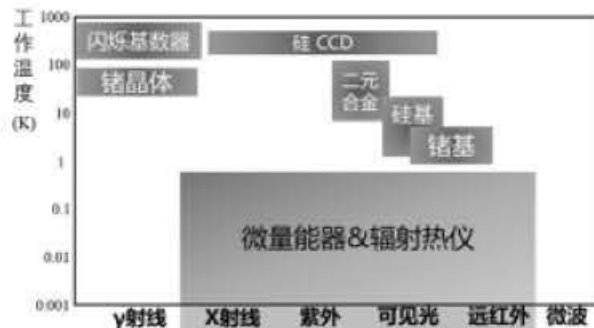


软X射线探测 50mK
红外波段探测 50mK
引力波探测 250mK

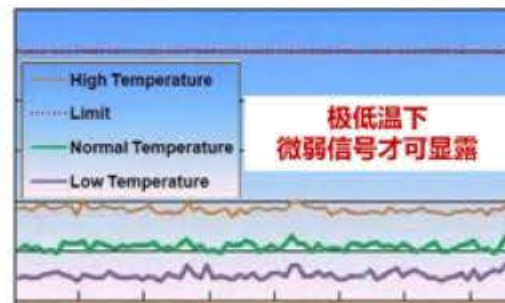


量子计算机 30mK
--谷歌“悬铃木”
--祖冲之号

- 利用极小比热，构成**极高分辨率/灵敏度的仪器**
- 降低系统热噪声，提高**测量的信噪比**
- 为特殊物理效应提供**环境条件**

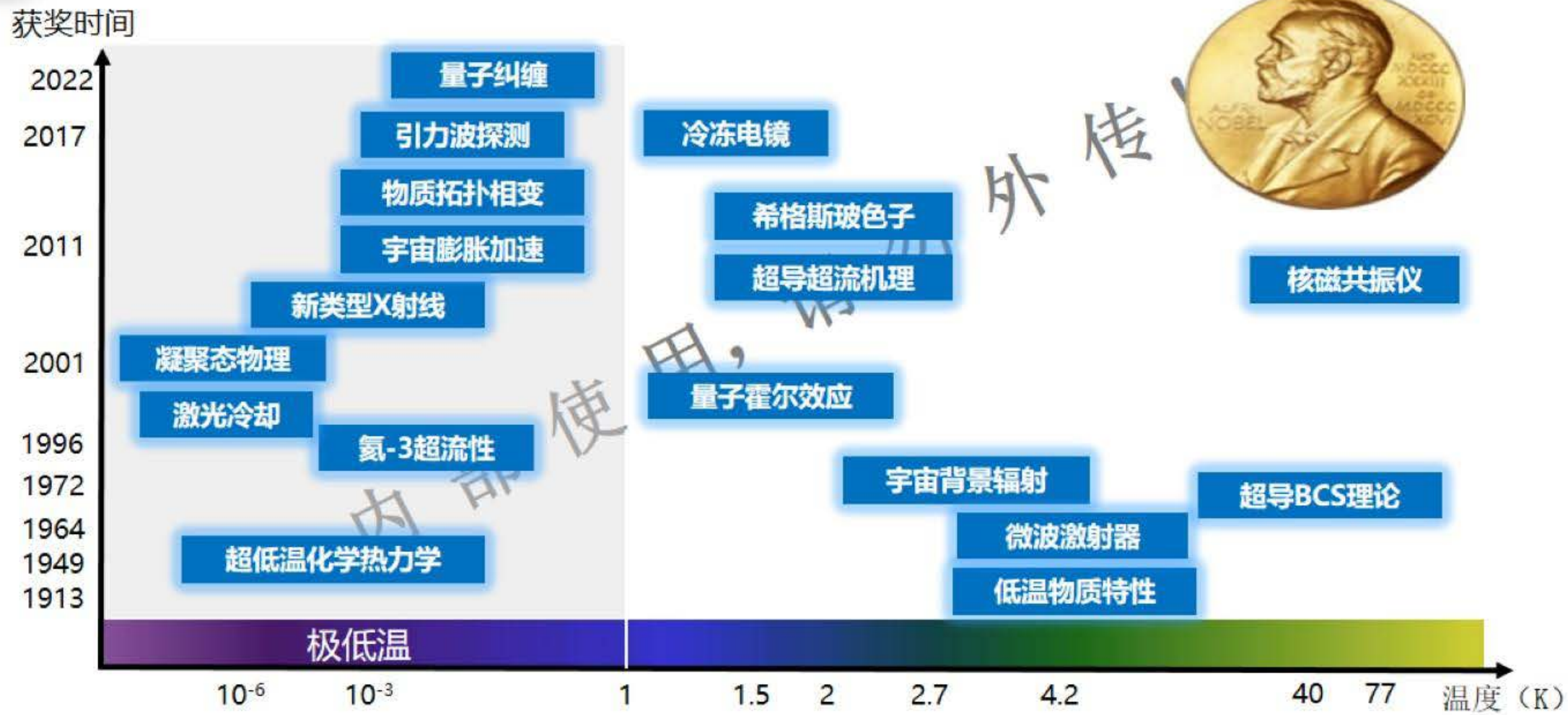


高分辨率探测器的工作温度





3. 极低温制冷技术进展



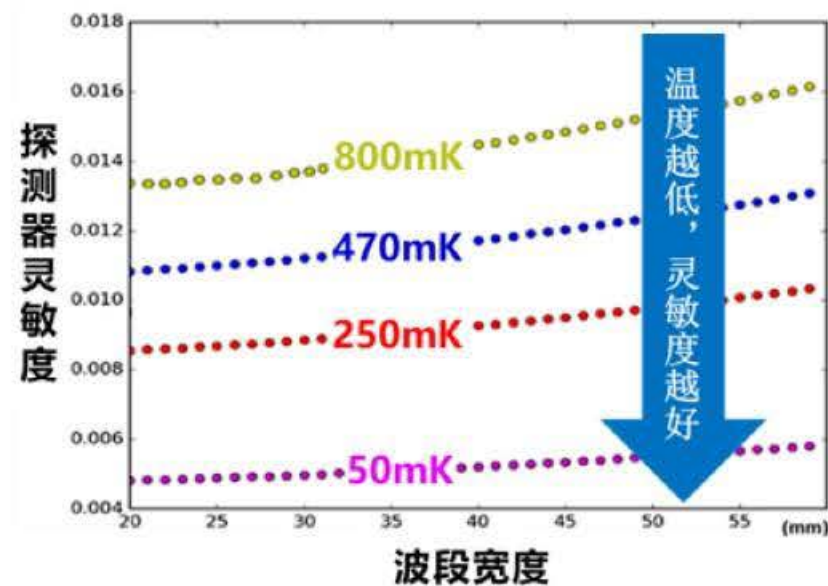
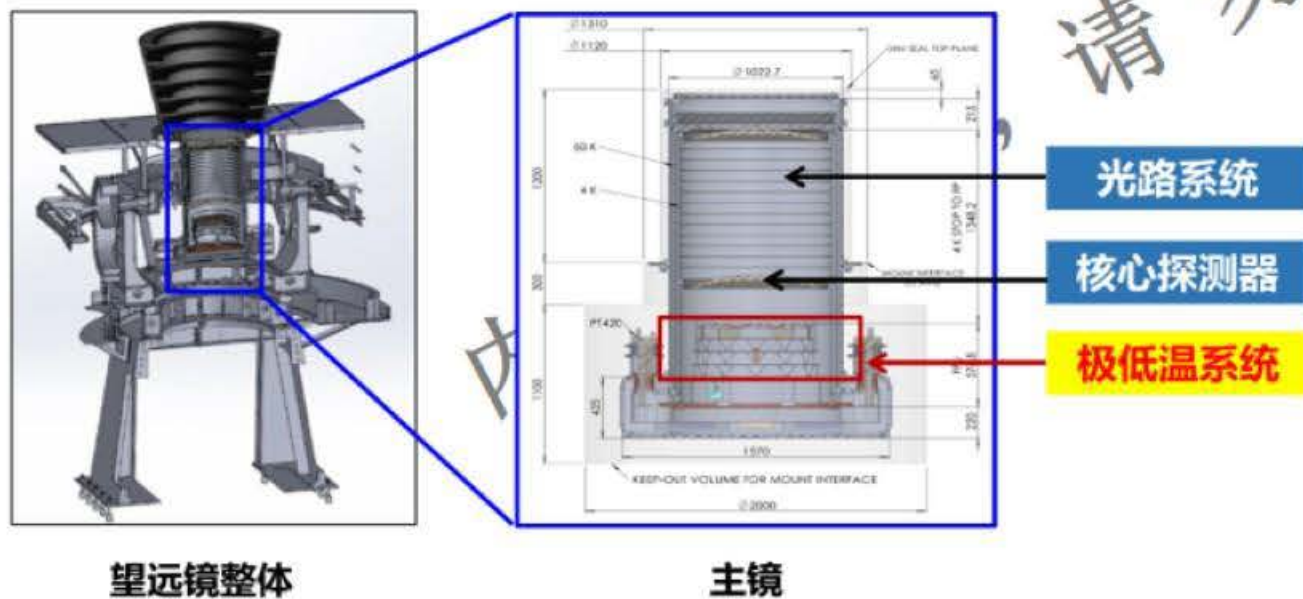
超过二十项诺贝尔奖，涵盖物理、化学、医学领域



3. 极低温制冷技术进展

应用举例1——原初引力波的探测

- 科学意义：验证宇宙极早期暴涨理论，对**揭示宇宙起源**意义重大！
- 我国西藏阿里原初引力波望远镜**Ali-CPTI**（在建）：核心探测器工作温度约为**250 mK**



- 未来的**Ali-CPTII**：更低温度 (**50 mK**)、应用于空间



3. 极低温制冷技术进展

应用举例2——量子计算

- **量子计算机**：基于量子效应，计算速度（对某些特定算法）远高于传统计算机，在国防、经济、科研等领域具有广阔的应用前景
- 基于**超导量子比特**的量子计算机：需要**30 mK**温度维持量子的相干性



- 传统计算机的基本单元--PN节



- 超导量子计算机的基本单元--约瑟夫森结
(需要极低温环境)



IBM 量子计算机 Q System

Google



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

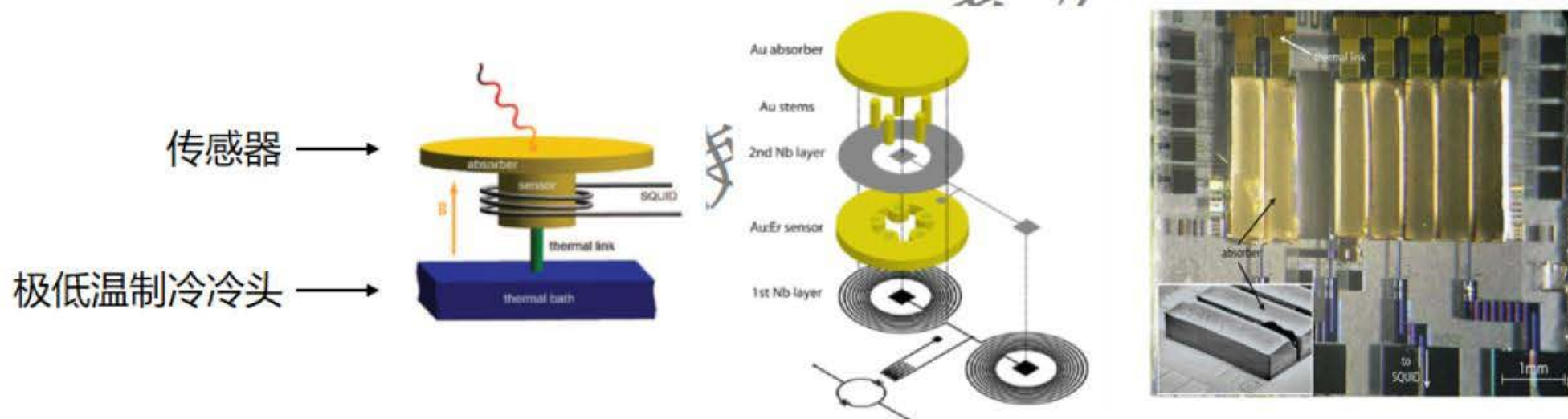
.....



3. 极低温制冷技术进展

应用举例3——核素探测

- **核素探测**：对U、Pu等核素的同位素进行探测和分辨，涉及国防、安全、勘测等诸多领域
- **金属磁量热计（Metallic Magnetic Calorimeter）**：极高精度的核素探测器

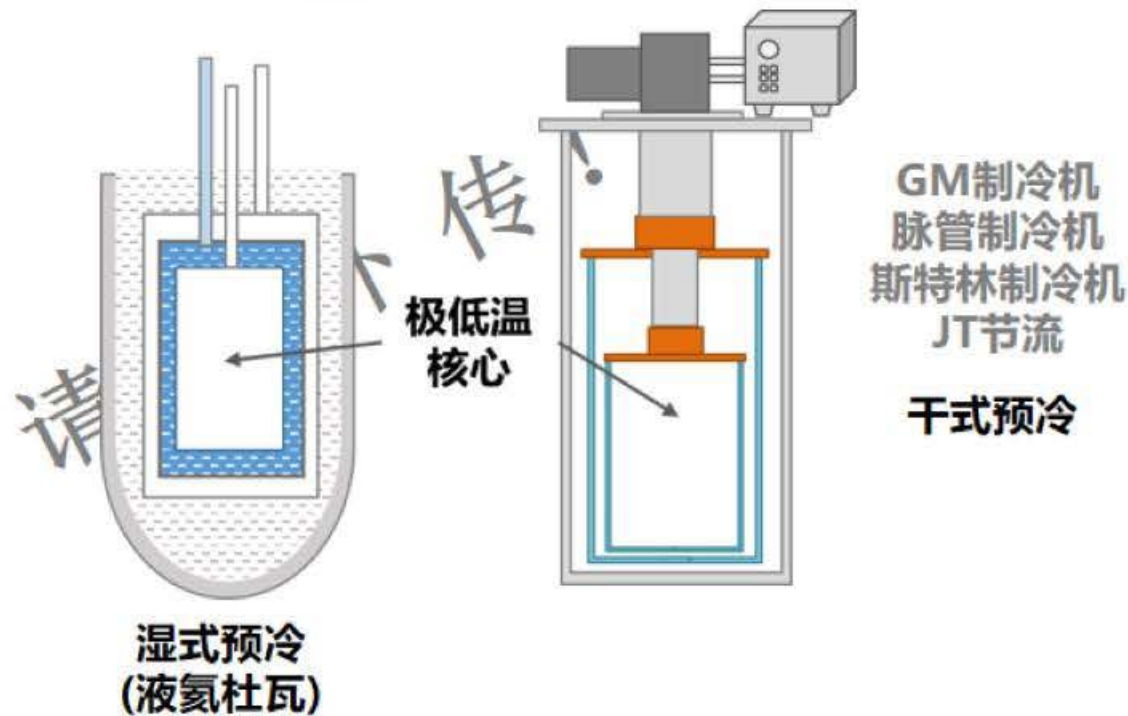
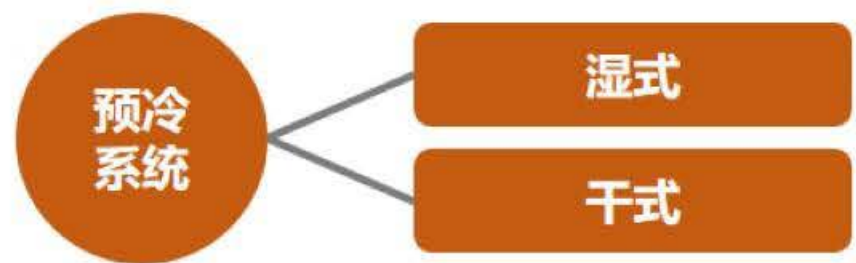


传感器材料（Au:Er）的磁化与温度成反比变化
工作温度低于 **100 mK**



3. 极低温制冷技术进展

主流极低温制冷方式

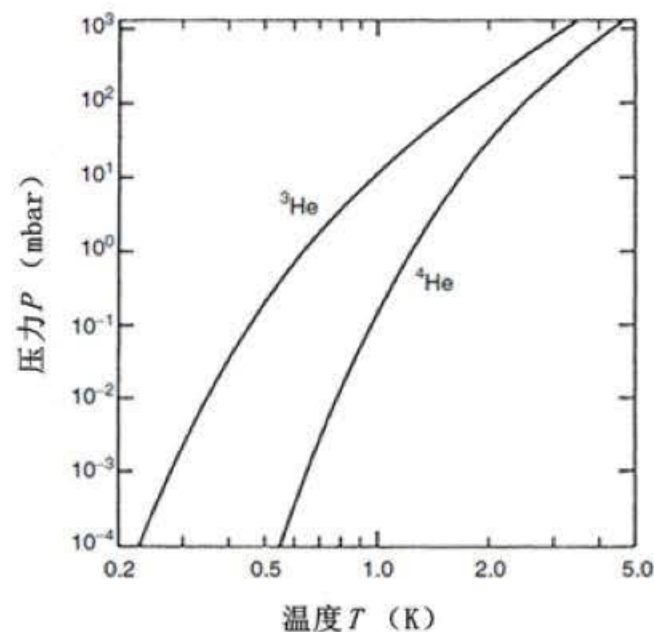


- 预冷系统：室温-液氮温区
- 极低温制冷系统：液氮--mK温区

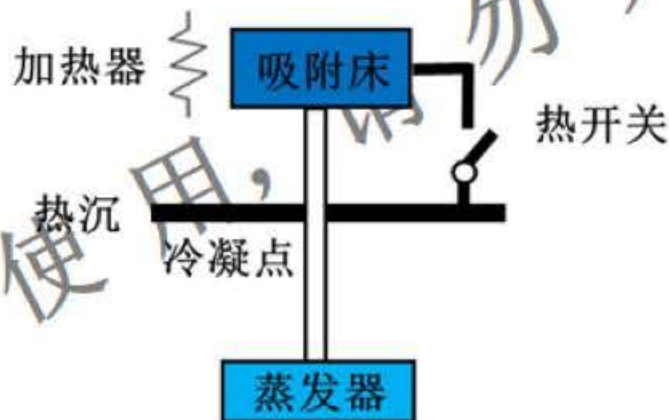


3. 极低温制冷技术进展

主流极低温制冷方式: 吸附制冷



液态 ^3He 和 ^4He 的蒸汽压



吸附制冷机的基本结构

- 加热吸附床，气体脱附并冷凝
- 冷却吸附床，液体减压蒸发制冷

^4He : ~800 mK

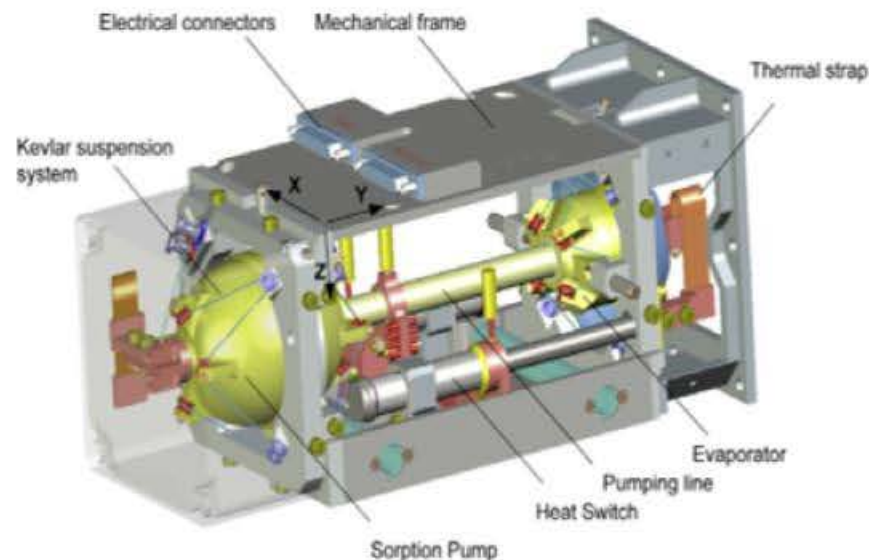
^3He : ~250 mK

- 利用吸附床产生的低压，对液态 ^3He 或 ^4He 的减压蒸发制冷

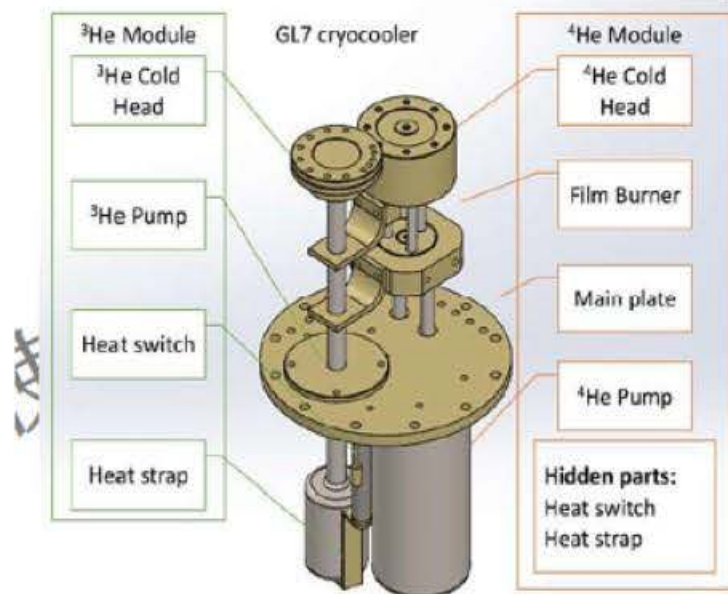


3. 极低温制冷技术进展

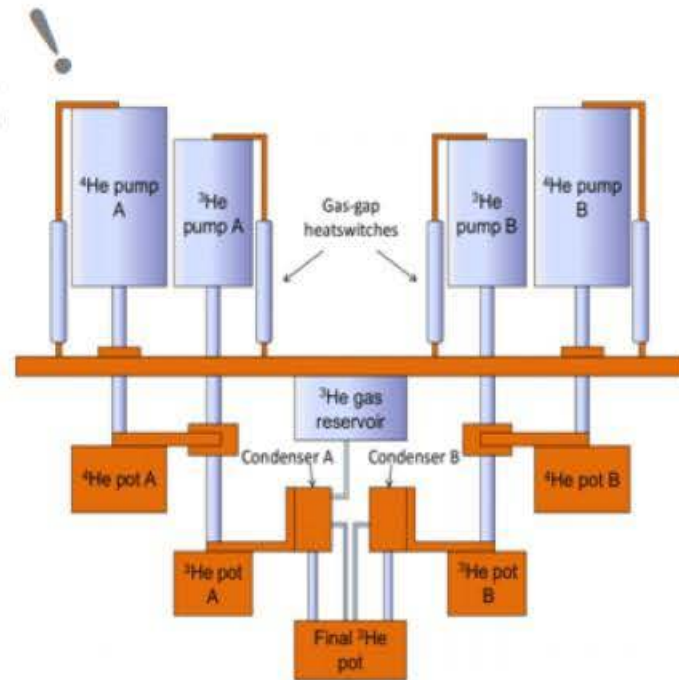
主流极低温制冷方式: 吸附制冷



单级: $10\mu\text{W}@290\text{mK}$, 70h



多级: $30\mu\text{W}@295\text{mK}$, 17h



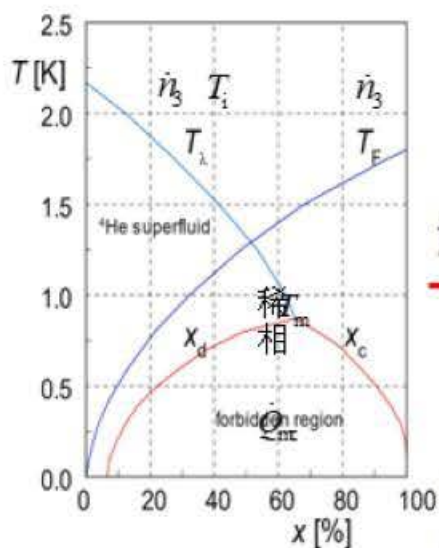
连续级: $20\mu\text{W}@365\text{mK}$

- 发展特点: 湿式预冷→干式预冷; 单级结构→多级结构; 间歇制冷→连续制冷

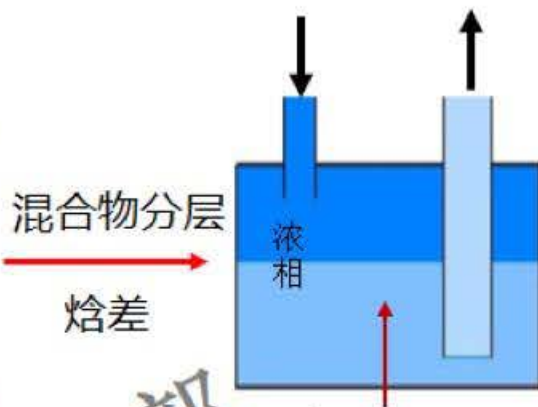


3. 极低温制冷技术进展

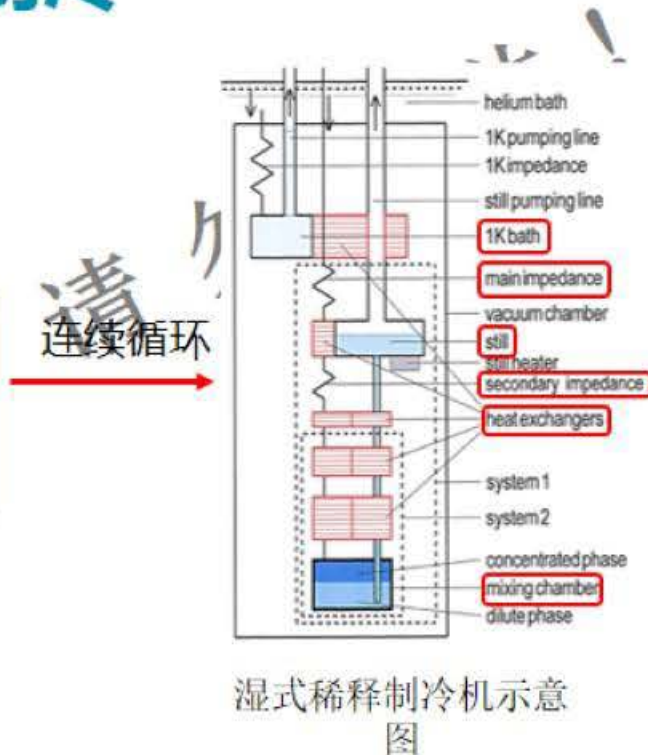
主流极低温制冷方式: 稀释制冷



3He-4He混合物相图



混合室示意图



- **优点:** 制冷温度低 ($<10\text{mK}$) ; 连续制冷循环; 冷量大
- **缺点:** 相分离过程依赖重力; 需要稀缺工质 ^3He ($\sim \text{¥} 20\text{万/g}$)

- ^3He - ^4He 混合物在重力下分为两相, ^3He 从其浓相进入稀相时熵增, 产生制冷效应



3. 极低温制冷技术进展

主流极低温制冷方式: 吸附制冷

- 1951年H. London等提出该方法
- 1965年P. Das 等建造首台, 220mK
- 1966年Hall 等改进换热器, 50mK
- 1978年Frossatti等改进, 2mK
- 1999年Cousins等改进, 1.75mK

公司	国家	型号	最低温度	制冷量 @20mK	制冷量 @100mK
Leiden Cryogenics	荷兰	CF-3000-CUORE	5.26 mK	30 μ W	2000 μ W
Oxford Instruments	英国	Proteox 5mK	5 mK	>25 μ W	>850 μ W
Bluefors	芬兰	XLD 1000	10 mK	30 μ W	1000 μ W
JanisULT	美国	JDry-500-QPro	≤ 10 mK	≥ 14 μ W	≥ 450 μ W



已有成熟的商业化产品
(Leiden Cryogenics)

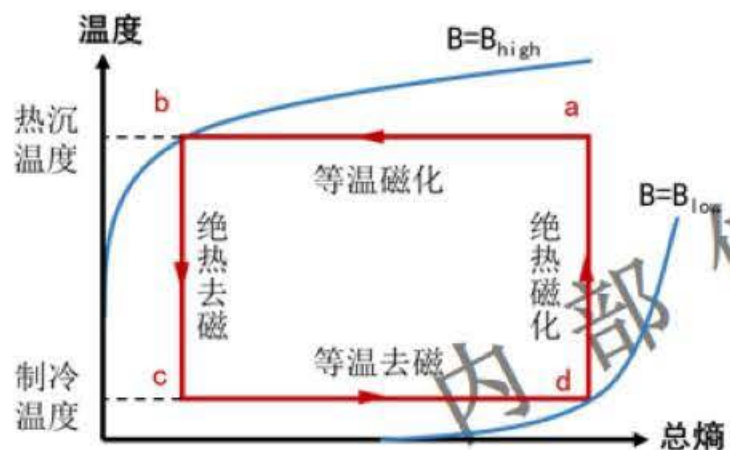


3. 极低温制冷技术进展

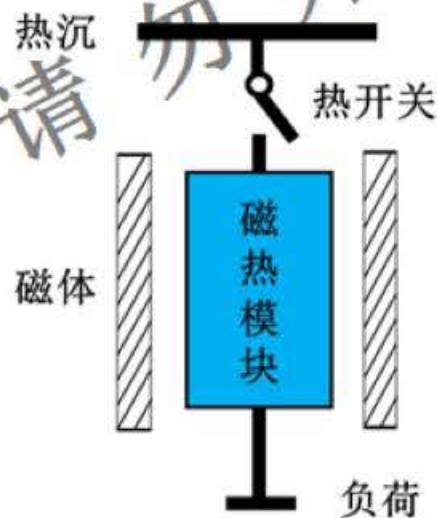
14/32

主流极低温制冷方式: 绝热去磁制冷 (ADR)

■ 热力学循环



■ 基本构成: 三大部件



- 热开关: 控制热量传递
- 磁热模块: 冷量来源
- 超导磁体: 驱动源

通过磁场和热开关控制材料绝热升/降温和等温吸/放热
理论上构成逆卡诺循环



3. 极低温制冷技术进展

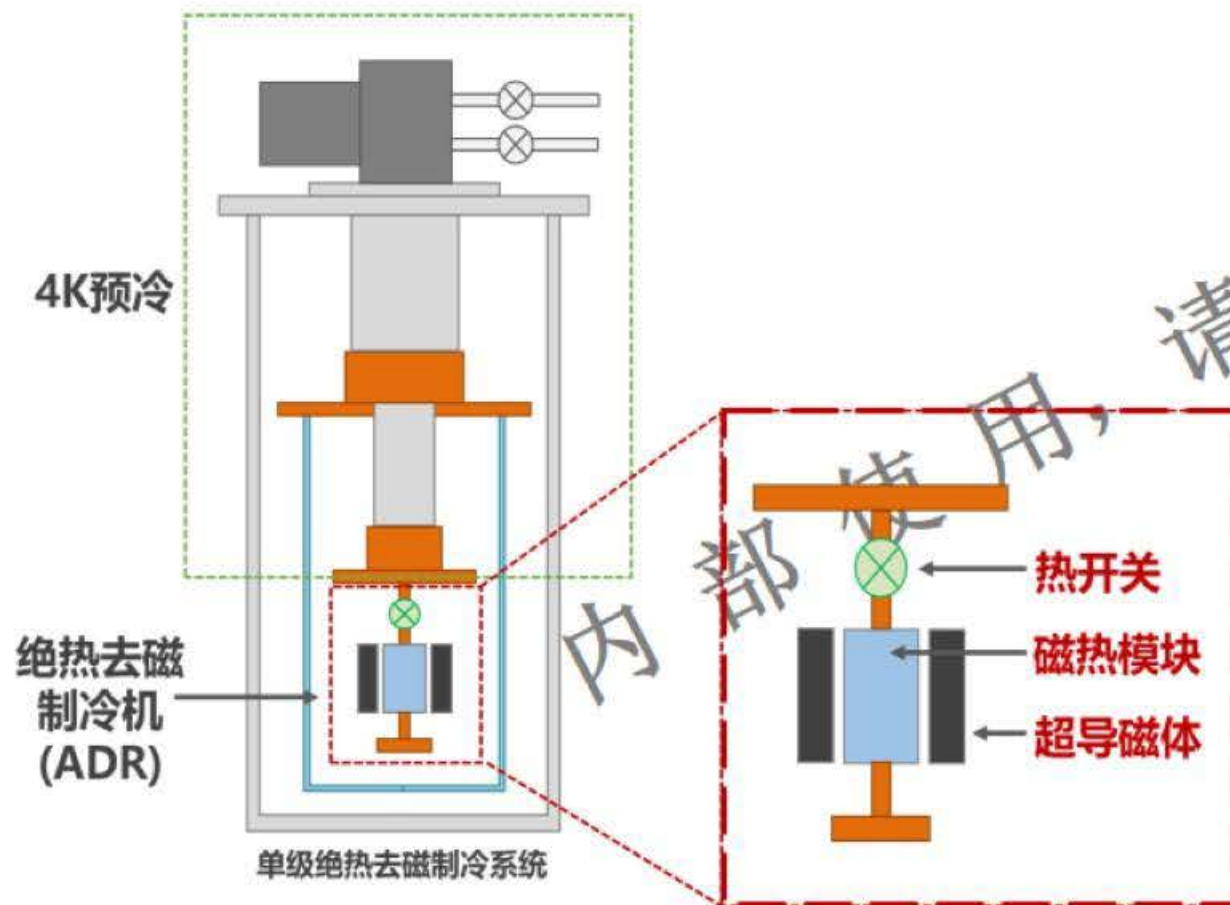
6/32

制冷方式	吸附制冷	稀释制冷	绝热去磁制冷（固态制冷）
制冷原理			
制冷材料	^3He	$^3\text{He}/^4\text{He}$	磁热材料
主要制冷温区	200mK~1K	10~100mK	10~100mK
特点	<ul style="list-style-type: none">➤ 不连续制冷➤ 极限温度高➤ 依赖稀缺材料^3He	<ul style="list-style-type: none">➤ 连续制冷➤ 依赖重力分离➤ 依赖稀缺材料^3He	<ul style="list-style-type: none">➤ 不连续制冷➤ 不依赖重力➤ 不依赖稀缺材料^3He

绝热去磁制冷技术具有**不依赖重力、不依赖稀缺 ^3He** 等突出优势
已成为**空间探测的主流极低温制冷技术**，在地面系统中也愈加受到青睐



3. 极低温制冷技术进展



极低温绝热去磁制冷系统结构

主要研究与成果

高性能磁热材料:

- ✓ 极低温区大熵变密度、高热导率磁热材料设计及制备

高效热开关:

- ✓ 极低温区热开关的自适应通断机制及传热强化

高效整机架构:

- ✓ mK温区多级连续磁制冷的高效热力学循环



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的基础——材料

- 材料的熵变是制冷的本质：外界磁场变化引发的磁熵 S_m 变化

$$\frac{S_m}{nR} = x \coth(x) - (2J+1) \coth(x(2J+1)) + \ln \left(\frac{\sinh(x(2J+1))}{\sinh(x)} \right)$$

- 评价磁制冷材料的主要参数



常见材料

材料	化学式	总角动量 J	相变温度 T_c (mK)	磁离子密度 N (cm ⁻³)
CPA	$\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	3/2	9	2.21×10^{21}
FAA	$\text{Fe}(\text{SO}_4)_2\text{NH}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	5/2	26	2.14×10^{21}
GGG	$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	7/2	380	1.26×10^{22}

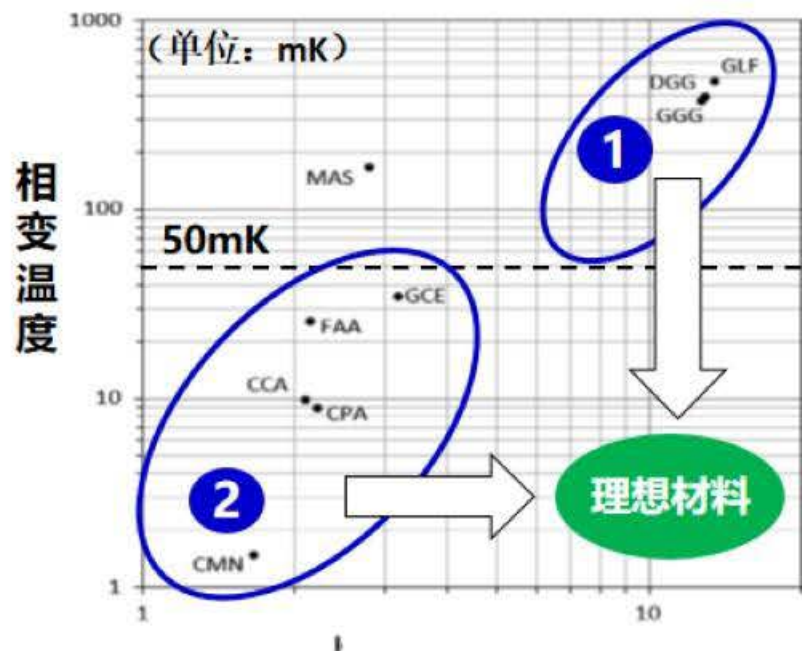


3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的基础——材料

➤ 现有材料的瓶颈：

1. 大熵变磁热材料相变温度高
2. 相变温度低的材料熵变密度较小



➤ 尝试获取更理想的新型磁制冷材料：

1. 利用理论模型预测新材料
2. 利用原子替代和填充等调控方法，进行材料改性

新体系预测

- 蒙特卡洛模拟
- 机器学习

原子替代\填充

- 相变温度
- 磁性原子
- 晶胞尺寸



3. 极低温制冷技术进展

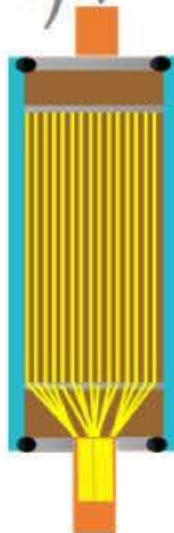
极低温绝热去磁制冷的关键部件——磁热模块

➤ 第一类磁热模块：



- **形式：**将导热结构直接与磁热材料粘接。适用于热导率较高磁热材料，如GGG。
- **难点：**不同材料之间的收缩率差异导致的断裂失效。

➤ 第二类磁热模块（热总线）：



- **形式：**磁热材料在高导热金属线进行生长。适用于热导率较低的水合盐，如CPA、FAA。
- **难点：**传热性能评估和优化；骨架制作和容器封装工艺；水和盐晶体在金线上的生长。

仅依靠材料自身热导，无法满足制冷功率的需求，将**磁热材料**与**传热结构**结合，**制备高效传热的磁热模块**



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的关键部件——热开关

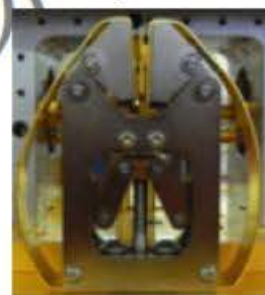
用于控制传热的通/断，配合磁体完成制冷循环



➤ 关键参数

- 寄生热：因开关切换而引入的热量
- 开关比：导通热导与切断热导之比
- 响应速率：通断切换的响应时间

➤ 主要类型：



机械式
切断完全
耐用性差



气隙式
开关比大
寄生热大
响应慢



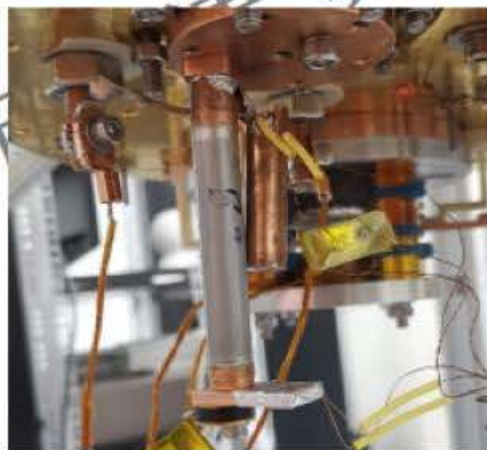
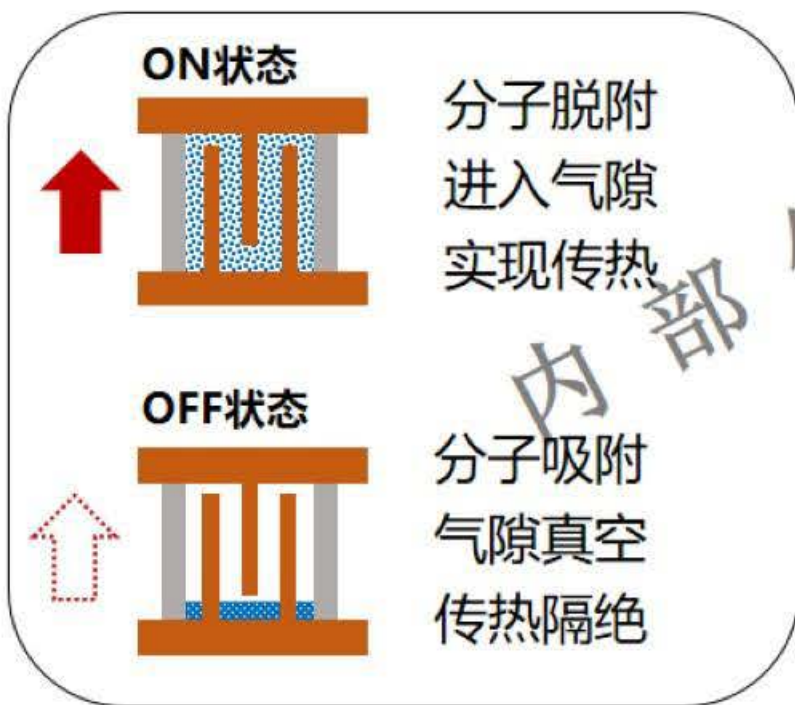
超导式
较低温区
开关比小
结构复杂



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的关键部件——热开关

➤ 气隙式热开关原理



热导为 $22\text{mW/K}@4\text{K}$ 开关比: 440

主动式



被动式

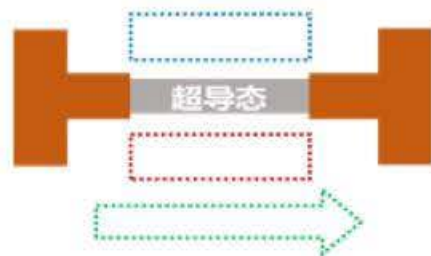
最新研制的气隙式热开关



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的关键部件——热开关

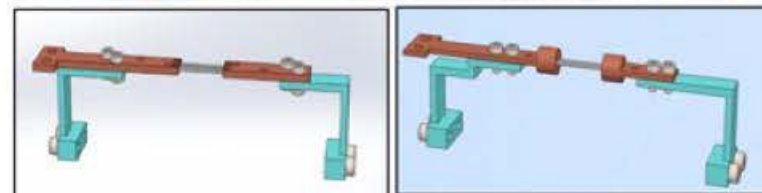
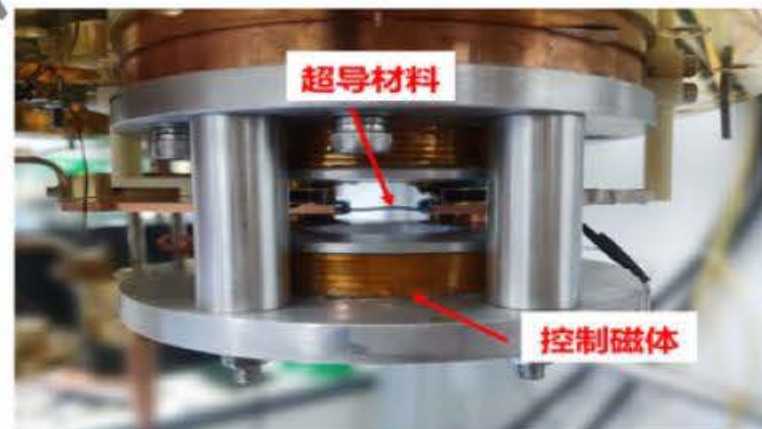
➤ 超导式热开关原理



超导态下
材料热导率低
传热断开

施加外部磁场
转成正常态
传热导通

超导态和正常态的热导率差异



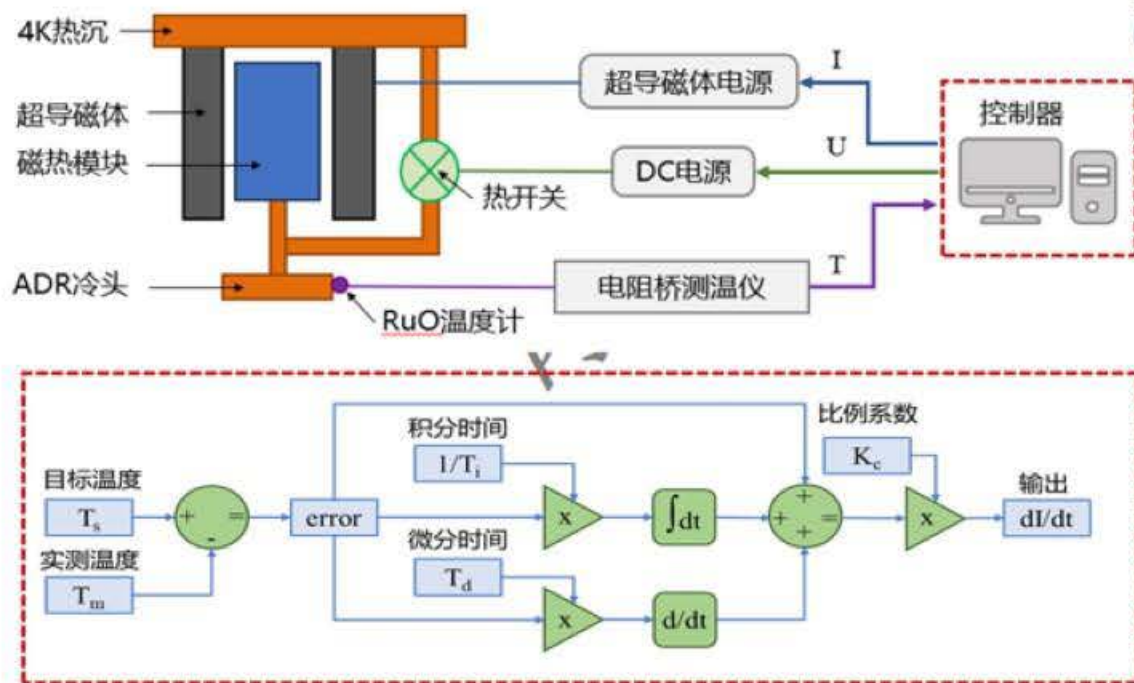
最新研制的超导式热开关



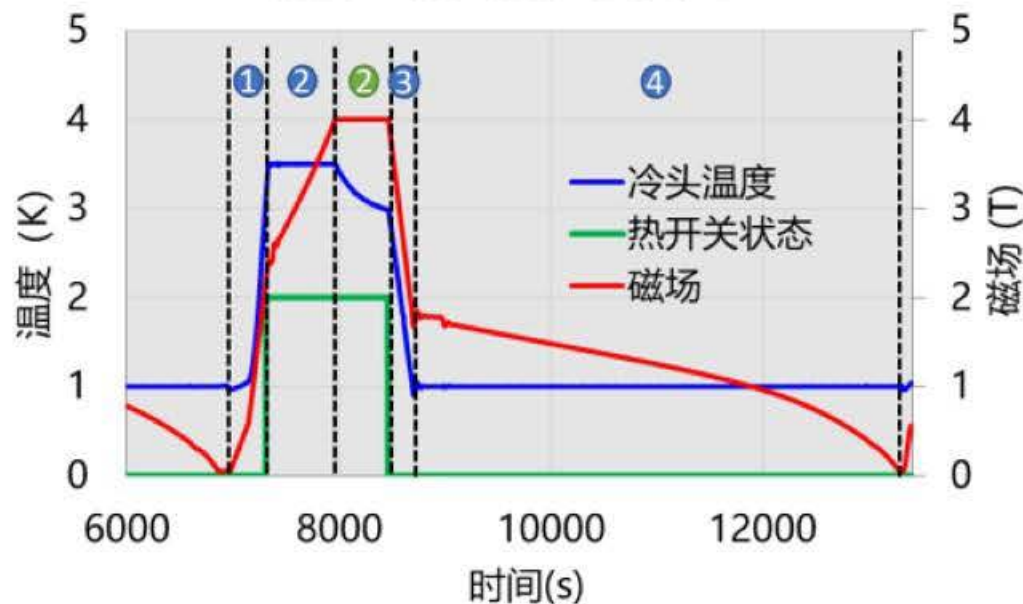
3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的软件——运行和温控系统

- 根据制冷循环需要，控制磁体电流变化和热开关动作的时序相位
- 等温过程时，通过PID控制器调节磁体电流以控制温度波动



时序控制图及温度曲线



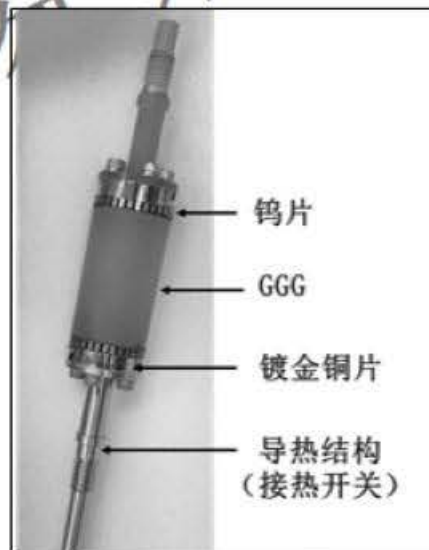


3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——单级ADR



绝热去磁制冷系统



GGG磁热模块



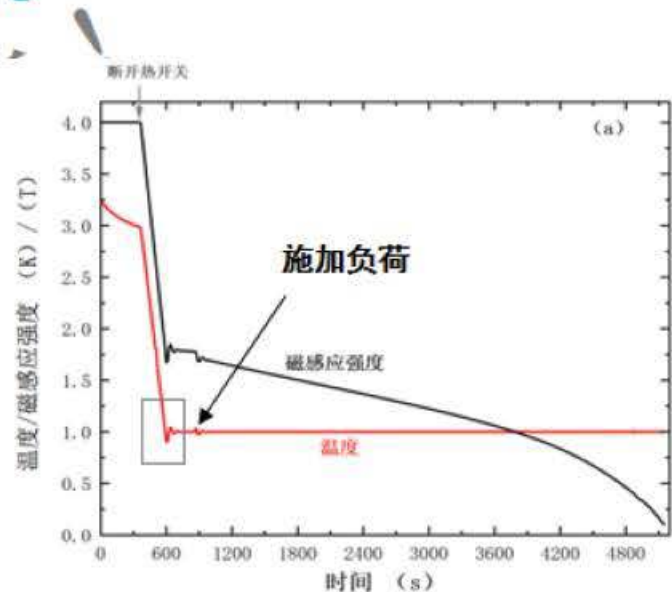
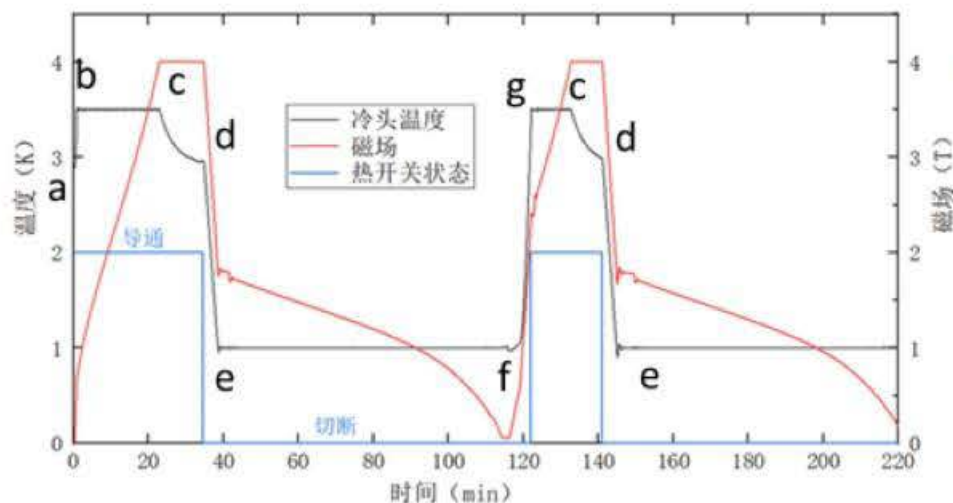
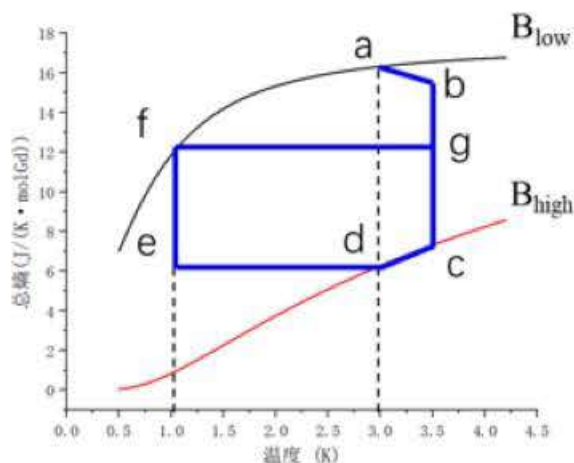
气体式热开关

王昌, 李珂, 沈俊, 等. 用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机[J]. 物理学报, 2021, 70(9):7.



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——单级ADR



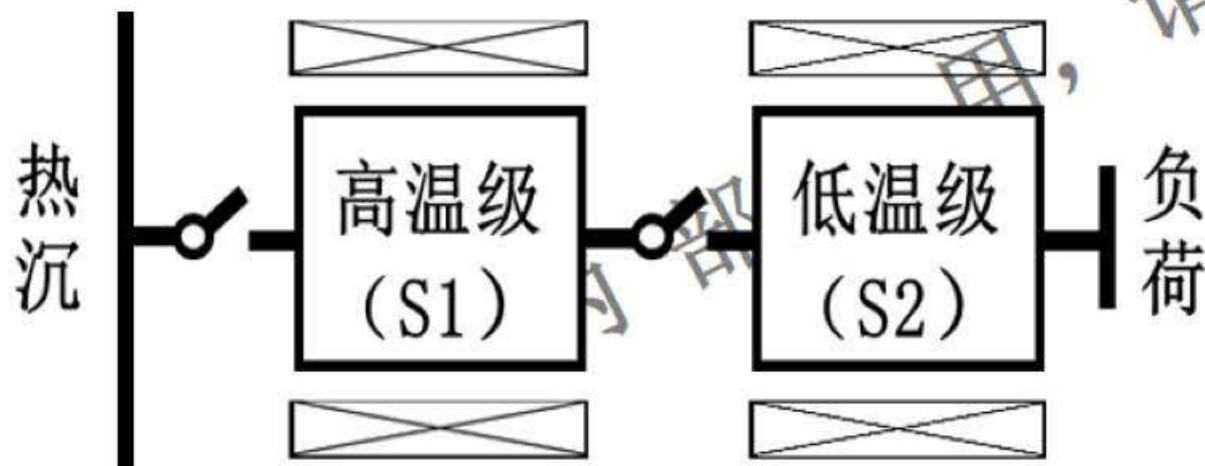
以GGG为工质，最低制冷温度达 **470 mK**；**1 K 恒温制冷**，制冷功率最大为 **0.7 mW**，温度波动 $\text{RMS} < 20 \mu\text{K}$ ，绝热去磁制冷的热力学第二效率为 **57 %**



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——双级ADR

- 单级ADR制冷温跨、功率和效率受限，采用双级复叠结构，拓宽制冷温跨



双级复叠式ADR的基本结构

复叠后的增益

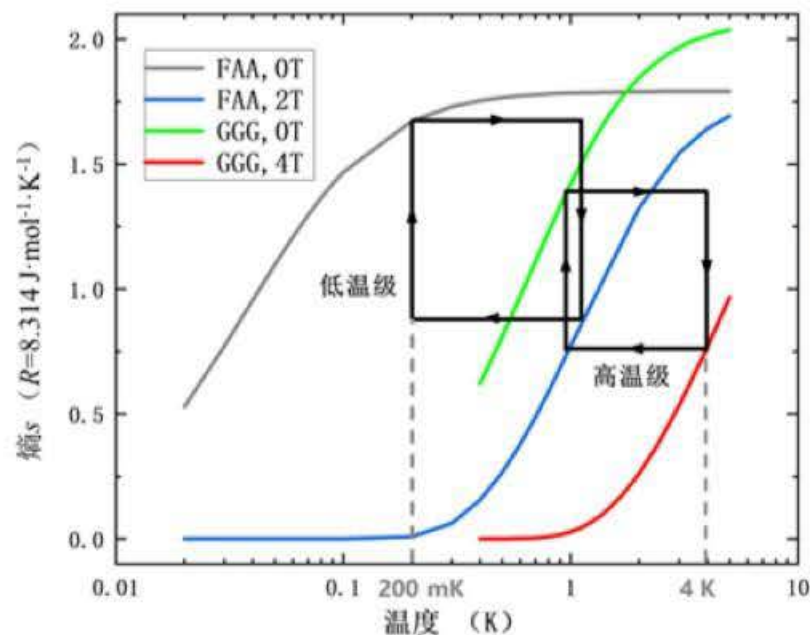
1. 充分发挥材料的性能
2. 避免使用过大磁场
3. 前级可作为低温级的保护
4. 降低对热开关的要求



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——双级ADR

- 单级ADR制冷温跨、功率和效率受限，采用双级复叠结构，拓宽制冷温跨



双级复叠热力循环

- 各级ADR进行逆卡诺循环

$$\frac{Q_{low}}{T_{low}} = \frac{Q_{high}}{T_{high}} = \Delta S$$

- 高温级的制冷量即为低温级的放热量

$$\frac{\Delta S_1}{\Delta S_2} = \frac{T_{high2}}{T_{low1}}$$

- 换热温差导致熵变逐级增加

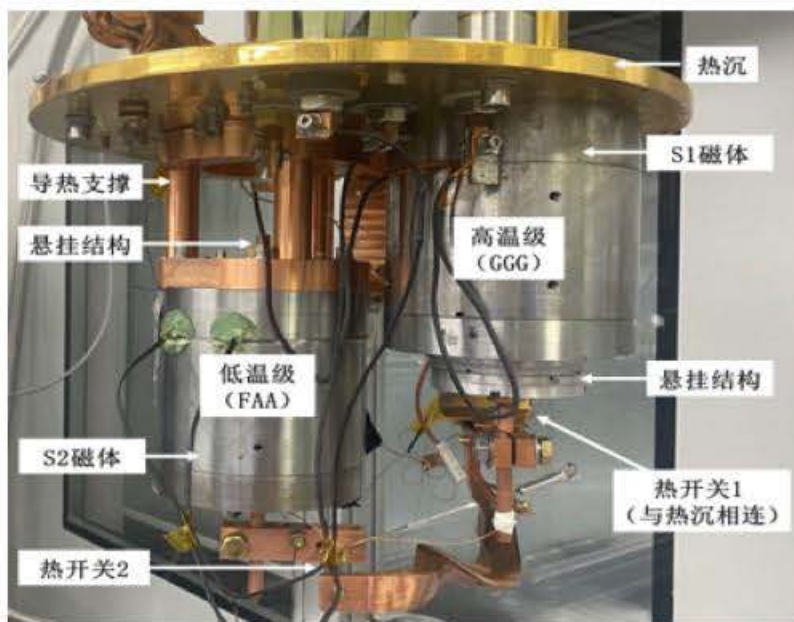
$$T_{high2} > T_{low1}$$



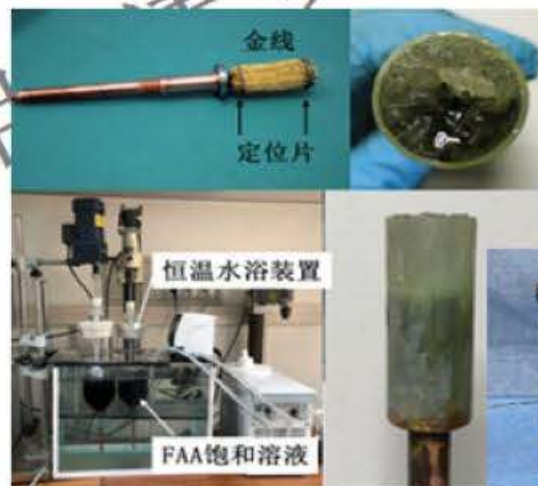
3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——双级ADR

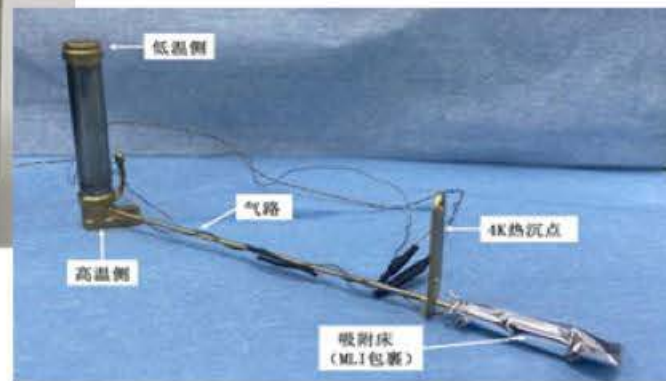
- 单级ADR制冷温跨、功率和效率受限，采用双级复叠结构，拓宽制冷温跨



两级复叠式ADR的实验台



第二级磁热模块：
FAA磁热模块



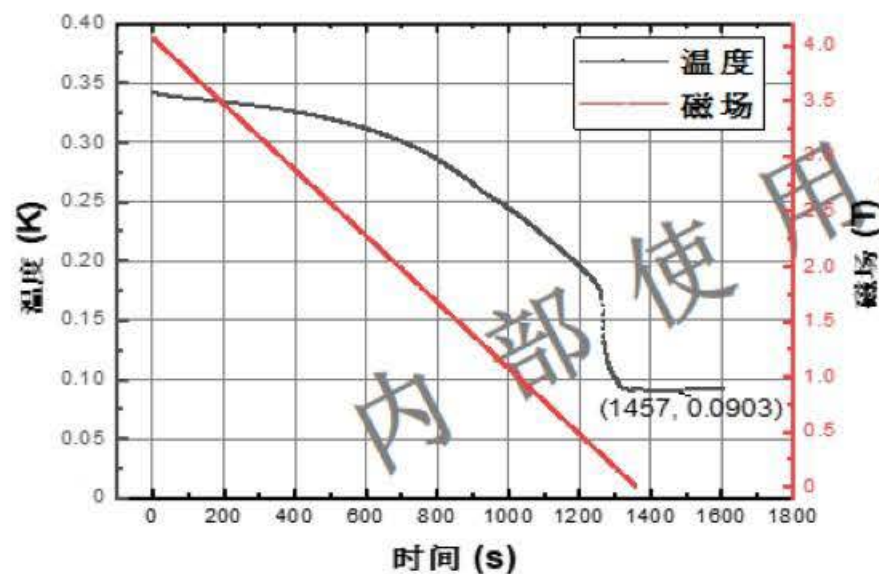
1 K温区气隙式热开关



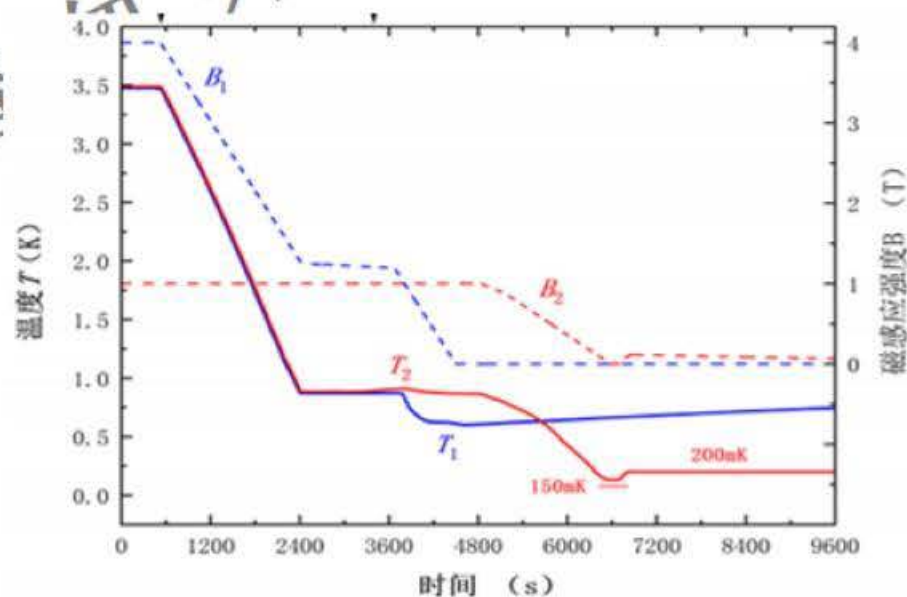
3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——双级ADR

- 单级ADR制冷温跨、功率和效率受限，采用双级复叠结构，拓宽制冷温跨



二级复叠ADR降温过程



二级复叠ADR再生过程

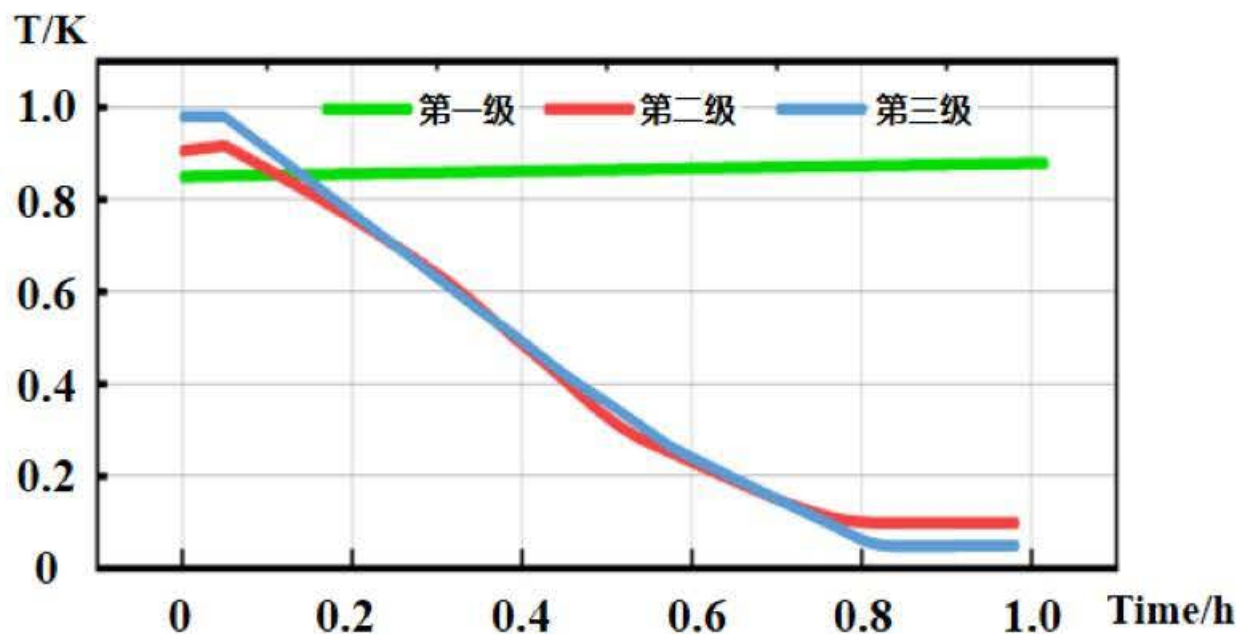
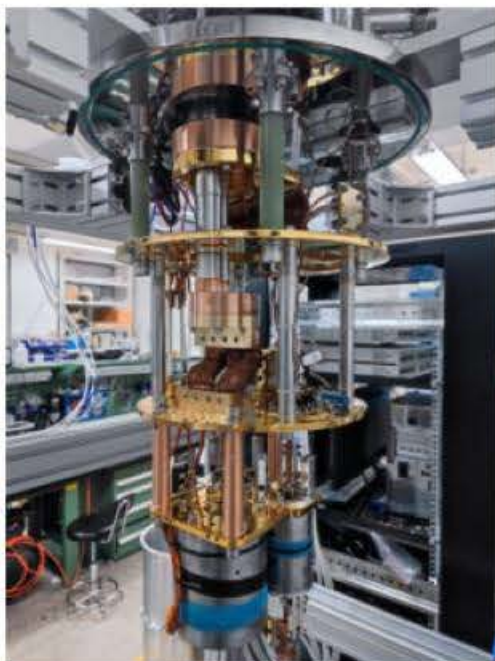
目前通过两级ADR复叠，到达90 mK温区，可在200 mK维持1200 s



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——三级ADR

- 构建三级复叠结构，实现更低温度的突破



通过三级ADR复叠到达**48.6 mK**温度，对于提升我国极低温自主研发能力有重要意义

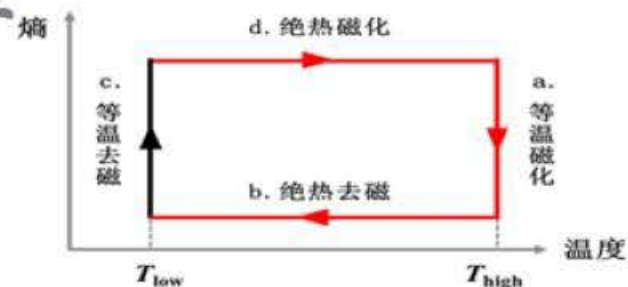


3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——连续制冷的cADR系统

基本的ADR制冷不连续，无法长时间制冷

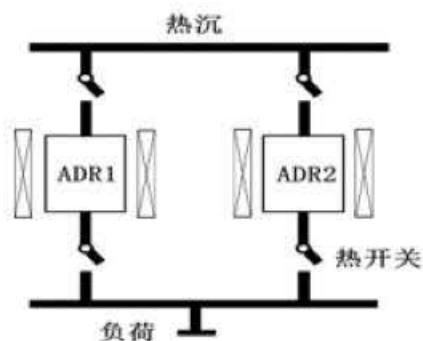
- 体量增大、制冷功率难以大幅提高
- 要求较高的热沉制冷功率、热开关导热导



cADR结构可连续制冷

运行周期缩短
单级体量减小
制冷功率可大幅提高

不足：级间切换对负荷温度造成较大扰动（10%）



并联结构



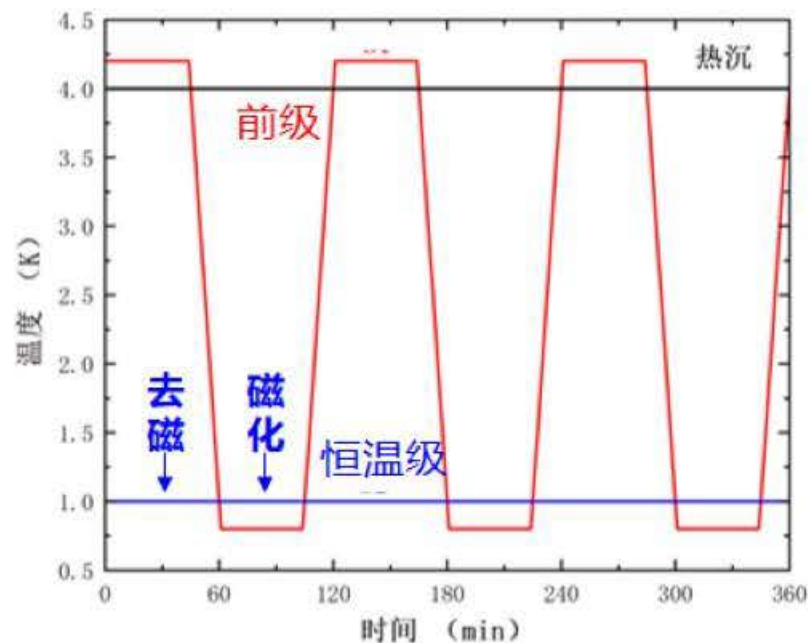
串联结构



3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——连续制冷的cADR系统

- 采用基于恒温级的**串联结构**，构建**连续制冷的cADR**



串联结构cADR热力学分析

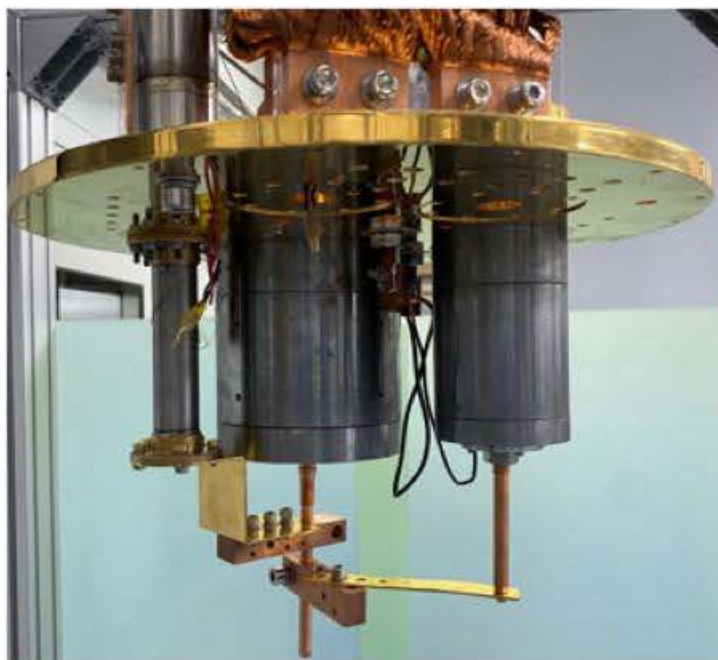
- 恒温级作为蓄冷器，周期内无净功
- 恒温级无绝热过程，无需较大场强
- 最终制冷温度下降，损失部分效率



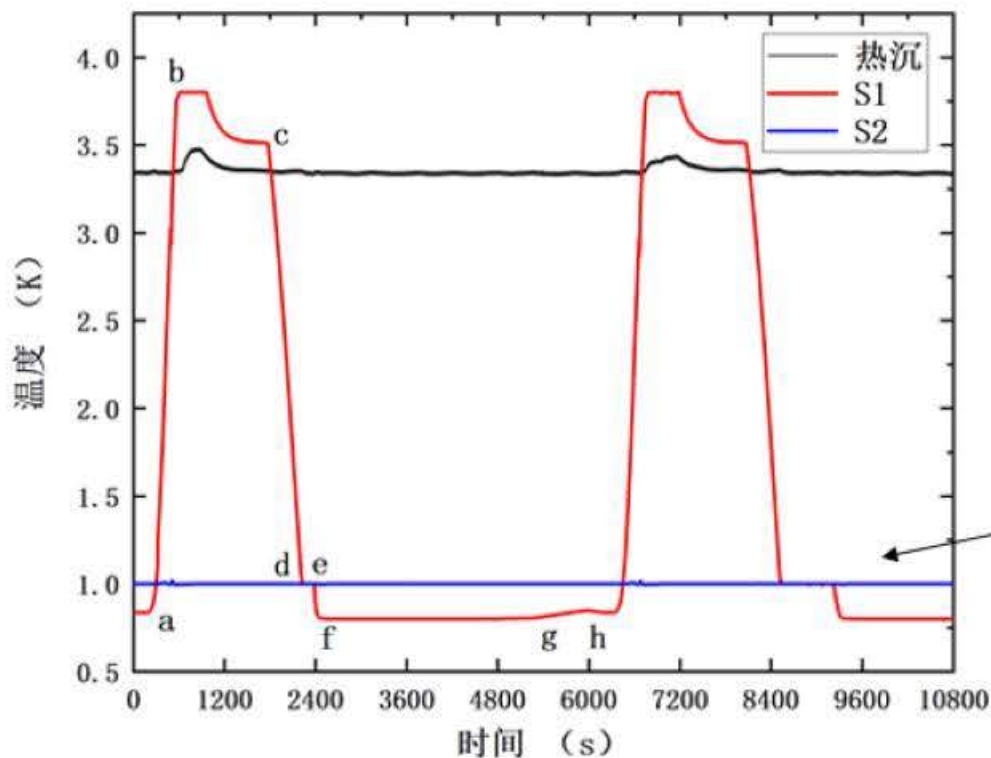
3. 极低温制冷技术进展

极低温绝热去磁制冷的集成——连续制冷的cADR系统

- 采用基于恒温级的**串联结构**，构建**连续制冷的cADR**



两级cADR系统实物



研究背景

固态制冷技术进展

极低温制冷技术进展

总结和展望





5. 总结与展望

固态制冷

- 作为制冷学科发展的前沿和热点，固态制冷整体尚处于起步阶段，研究状态也各不相同，但潜力巨大，**有望成为新一代制冷技术主力之一**
- **技术进展：开展了不同冷量需求的室温磁制冷样机研制工作**，其中样机最大温跨34.8K，10.3 K温跨下制冷量达到100 W，对应制冷系数大于3.85

极低温制冷

- 作为固态制冷，绝热去磁制冷技术具备制冷效率高、不受重力影响、不依赖稀缺工质 ^3He 等优势，**正成为宇宙探测、量子计算和凝聚态物理等前沿科学不可或缺的关键技术之一**
- **技术进展：开展了不同类型的磁热模块与热开关设计与研制工作，构建了4类ADR系统**，其中三级非连续ADR获得48.6mK低温。



5. 总结与展望

- 2012年以来，团队完成了从室温到极低温的全温区固态制冷机的研制

2012年低压复合样机



9K的温跨下获得
17W的制冷量

2015年旋转式样机



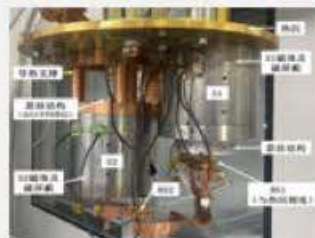
10.8K的温跨下获得
10W的制冷量

2019年百瓦冷量样机



11K的温跨下获得
100W的制冷量

2022年极低温样机



两级非连续磁制冷
最低温度**90mK**

2013年高压复合样机



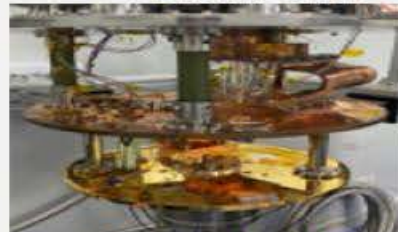
7K的温跨下获得
56.4W的制冷量

2018年低温复合样机



液氦温区4.2K时获得
0.47W的制冷量

2020年极低温样机

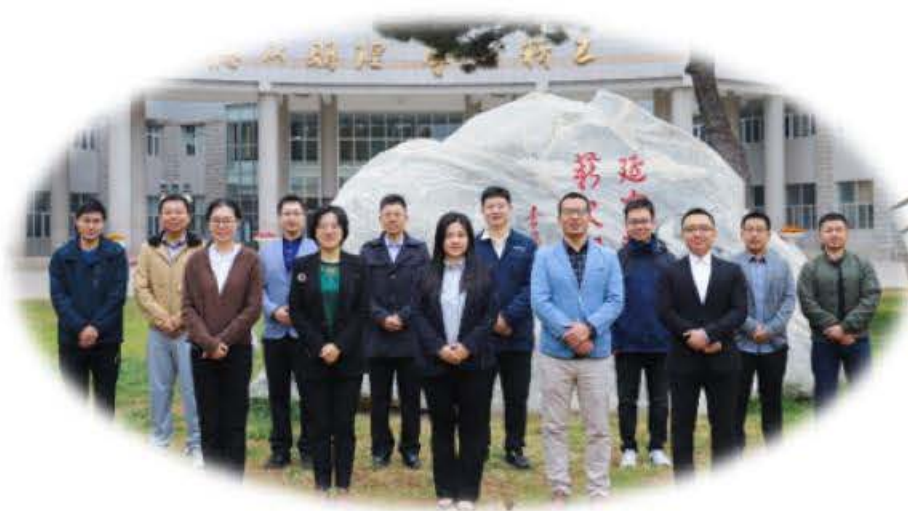


单级非连续磁制冷
最低温度470mK

部分样机达到了**工程化实用标准**，正开展商用合作研究，
有望对国民经济主战场、前沿科学等领域提供**系统级低温方案**



磁制冷研究团队



□ 北京理工大学！

赵雅楠副研究员、李振兴助研、
陈卓博士、郑文帅博士等

□ 中国科学院理化技术研究所

戴巍研究员、李珂助研、禹芳秋博士、
刘萍博士、潘腾博士等

□ 中国科学院赣江创新研究院

莫兆军副研究员、高新强副研究员等



磁制冷技术研究进展

汇报完毕，谢谢！

沈俊



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY
