

第九届大机组供热改造与优化运行技术2017年会



杜小泽

储热技术在热电联产机组中的应用

华北电力大学和兰州理工大学教授、博导，清华大学博士，教育部长江学者特聘教授。现任电站设备状态监测与控制教育部重点实验室副主任、华北电力大学科学技术研究院院长，兼任教育部高等学校热工基础教学指导委员会委员（2006-2012）、中国工程热物理学会传热传质学委员会委员、中国电机工程学会火力发电专业委员会委员，International Journal of Thermodynamics编委。



EPTCHINA.CN
中国电力科技网

SXEC 苏夏

2017年12月12-13日 中国·徐州



华北电力大学

NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

面向供热机组灵活调峰的储热 技术基础与性能调控

杜小泽

华北电力大学 北京 102206

兰州理工大学 兰州 730050

大机组供热改造与优化运行技术 2017 年会，徐州，2017年12月11-14日



报告提纲

1 研究背景

2 技术进展

3 总结展望

太阳能热利用
(热发电、工业用热)

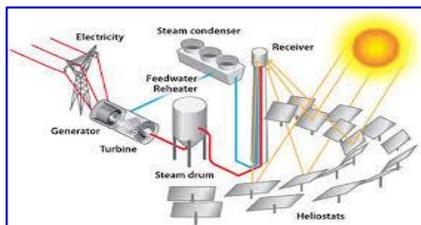
热电联产机组调峰导致的
间歇与波动供热

可再生能源
发电并网

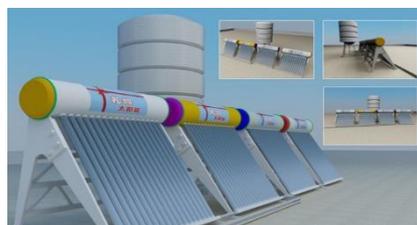
间歇性/波动性; 解决方法
风、光利用困难
热电联产“以热
定电”

储热

储热是克服能源系统**间歇性、波动性**问题的重要解决方式，其研究对于太阳能热利用、**热电联产的热电解耦**、解决“**弃风弃光**”等具有重要意义。



太阳能热发电



太阳能热利用

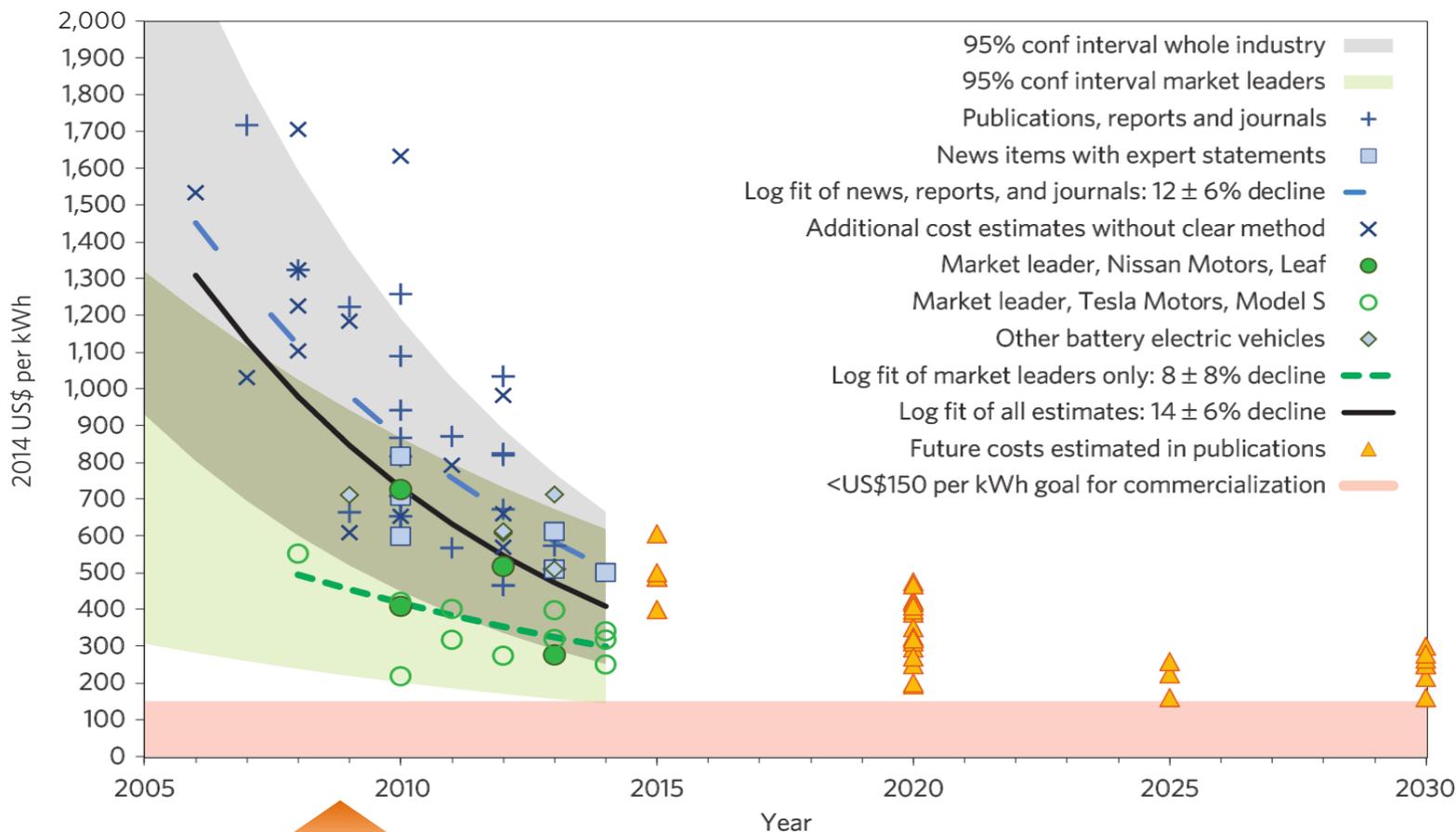


风力发电



冶金

储热较储电具有成本优势



目前锂电：

300-700 US\$/kWh

>>

目前CSP熔融盐双罐储热：

80-200 US\$/kWh

显热蓄热技术

1. 目前最为成熟的蓄热技术，运行稳定，储热材料成本低，已在太阳能热发电、热电联产机组调峰中实际应用。
2. 蓄热密度较低，储热热容约为 $\sim 100\text{MJ}/\text{m}^3$ 。

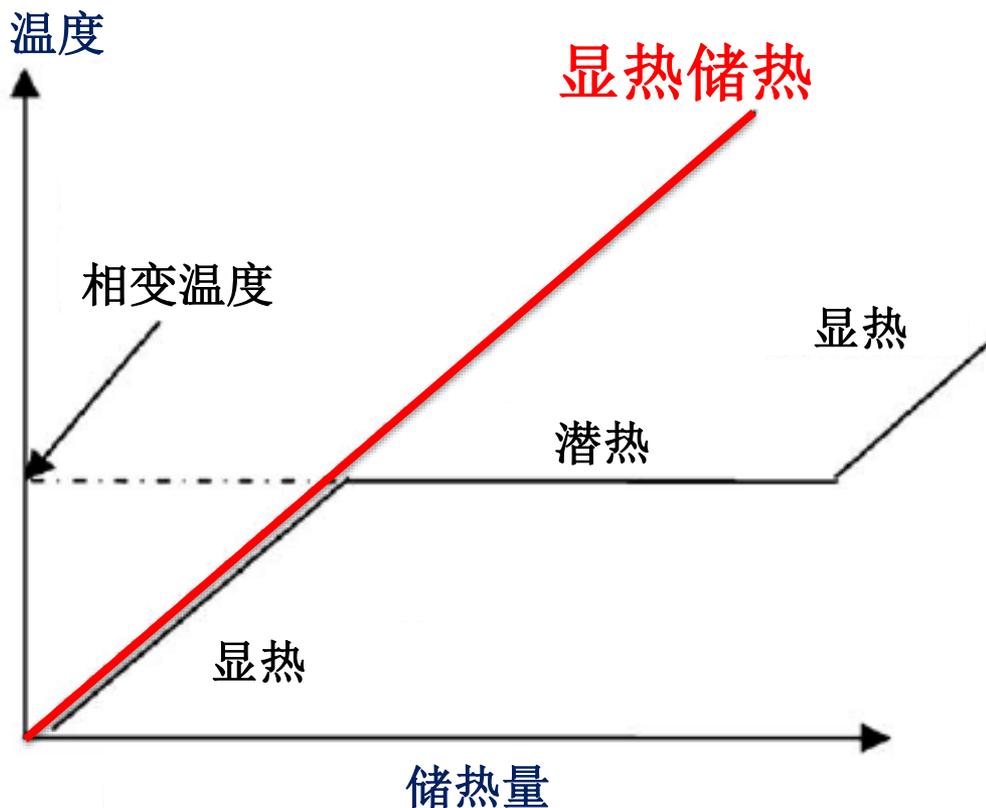
潜热蓄热技术

1. 最具发展潜力的储热方式，储热密度大，热容约为 $300\sim 500\text{MJ}/\text{m}^3$ ，潜热蓄、放热保持恒温，运行温度稳定。
2. 相变材料低导热系数是限制其发展的最重要因素。

化学能蓄热技术

1. 储热热容最高，约为 $\sim 1000\text{MJ}/\text{m}^3$
2. 尚在理论研究阶段，稳定性及安全性不易保证。

技术发展现状-显热储热



290-560 ° C



5.2 m³

290-390 ° C

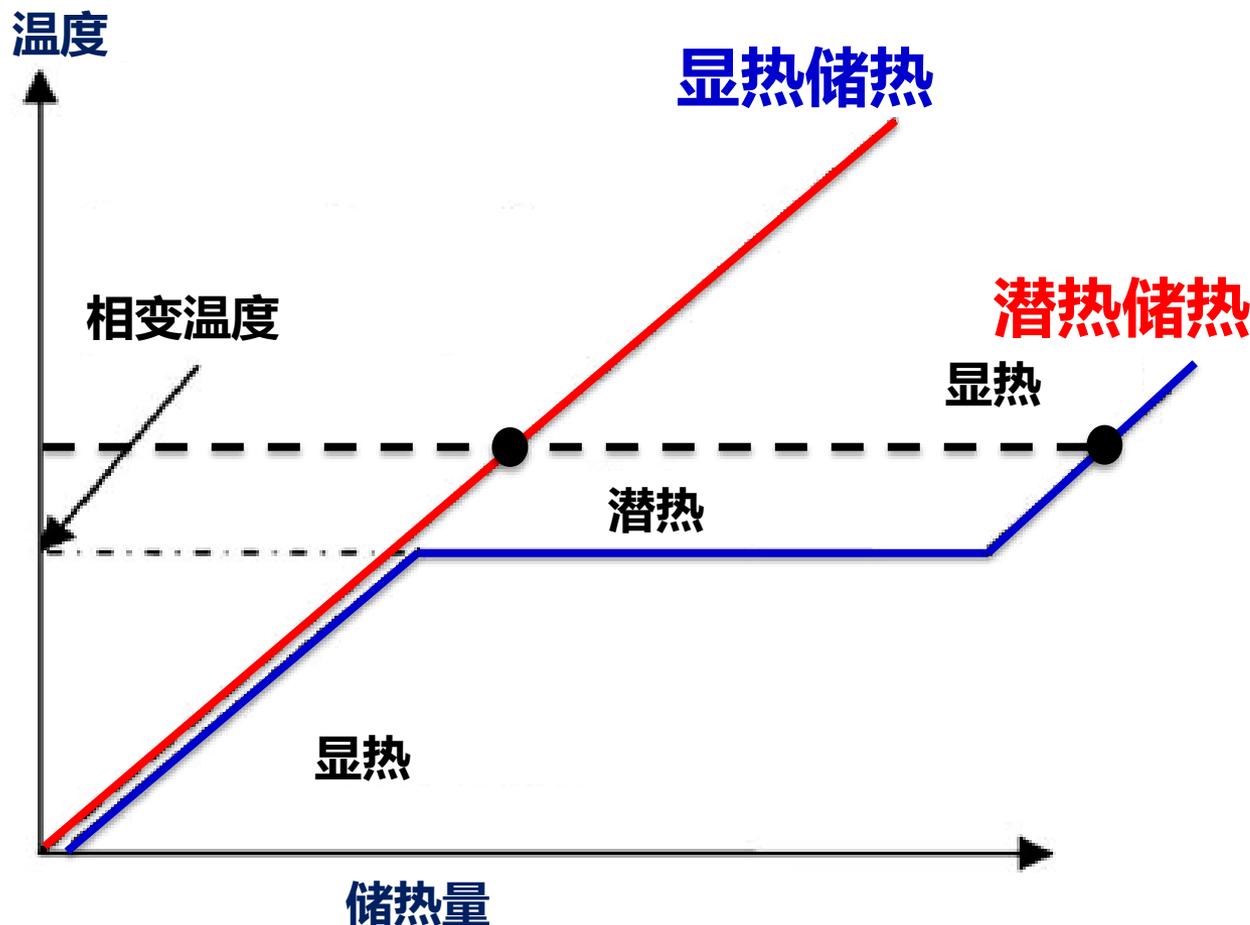


11.8 m³

$$Q = mc_p \Delta T$$

1 MWh储热量

潜热储热特点

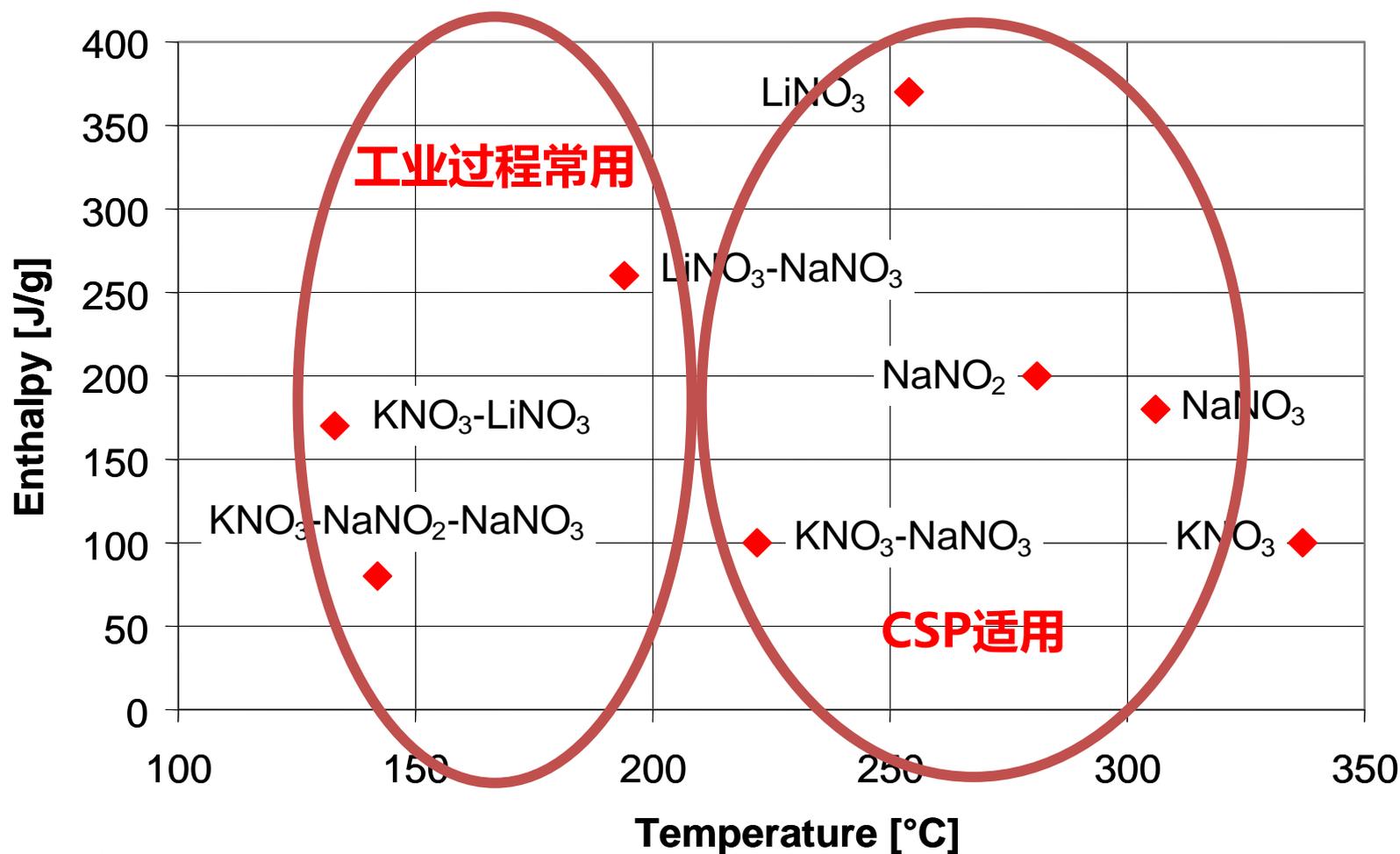


优点：

- 储热密度大，所需储热材料及系统体积减小
- 相变过程温度恒定，尤其适用于高温蒸汽的存储

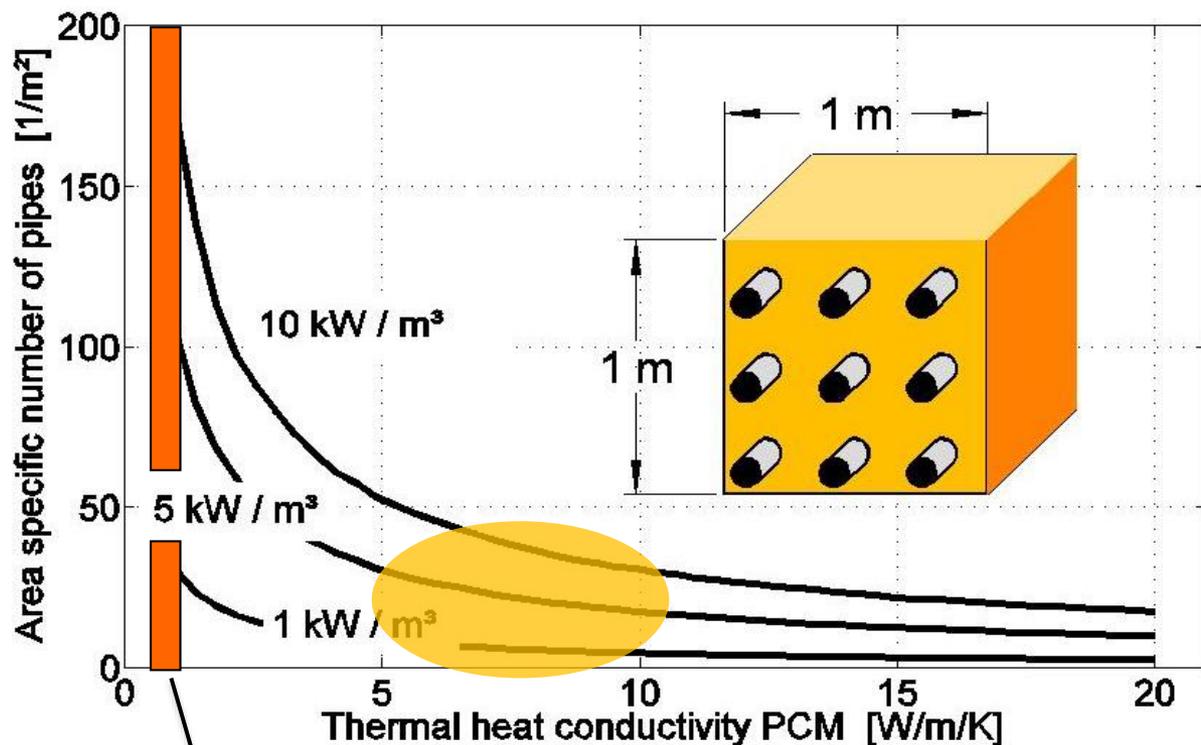
$$Q = mc_{p,s}\Delta T_1 + mh_f + mc_{p,l}\Delta T_2$$

相变储热材料选择



潜热：固液相变储热

- **相变材料的强化传热研究与开发是进一步发展高温储能技术的关键！**



瓶颈：
相变材料**导热系数**
数一般较低

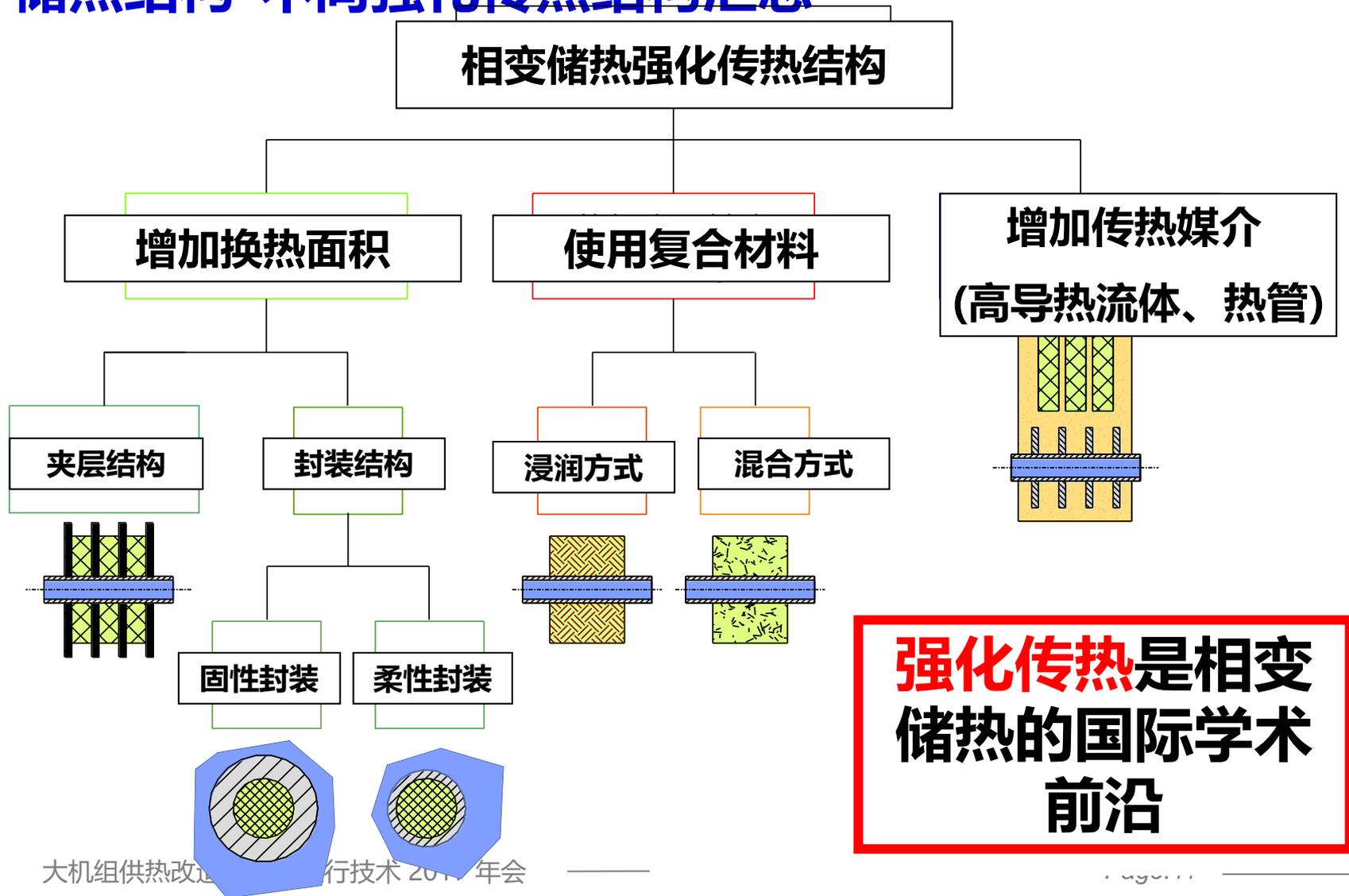
有效导热系数需
要5-10 W/mK

硝酸盐的导热系数一般约0.5 W/mK

储热结构-常用内插管束结构

潜热：固液相变储热

储热结构-不同强化传热结构汇总





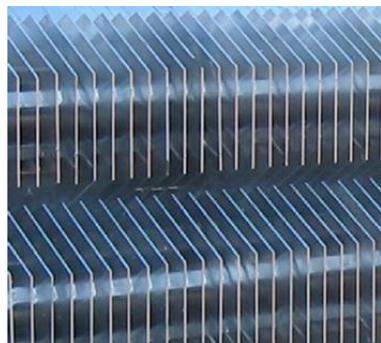
报告提纲

1 研究背景

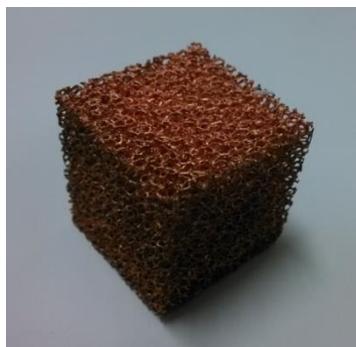
2 技术进展

3 总结展望

1. 结构优化实现强化传热



Fins



Metal foam

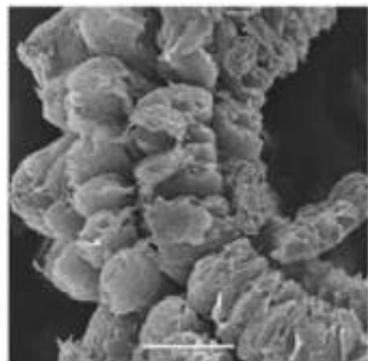


Metal matrix

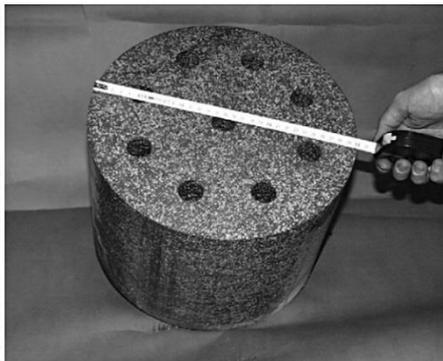


Steel ball capsules

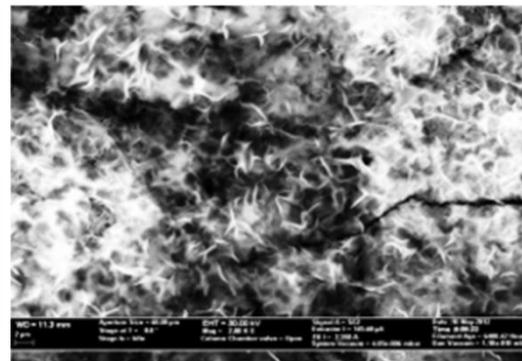
2. 跨尺度复合结构提升材料的热物理性能



Graphite flakes

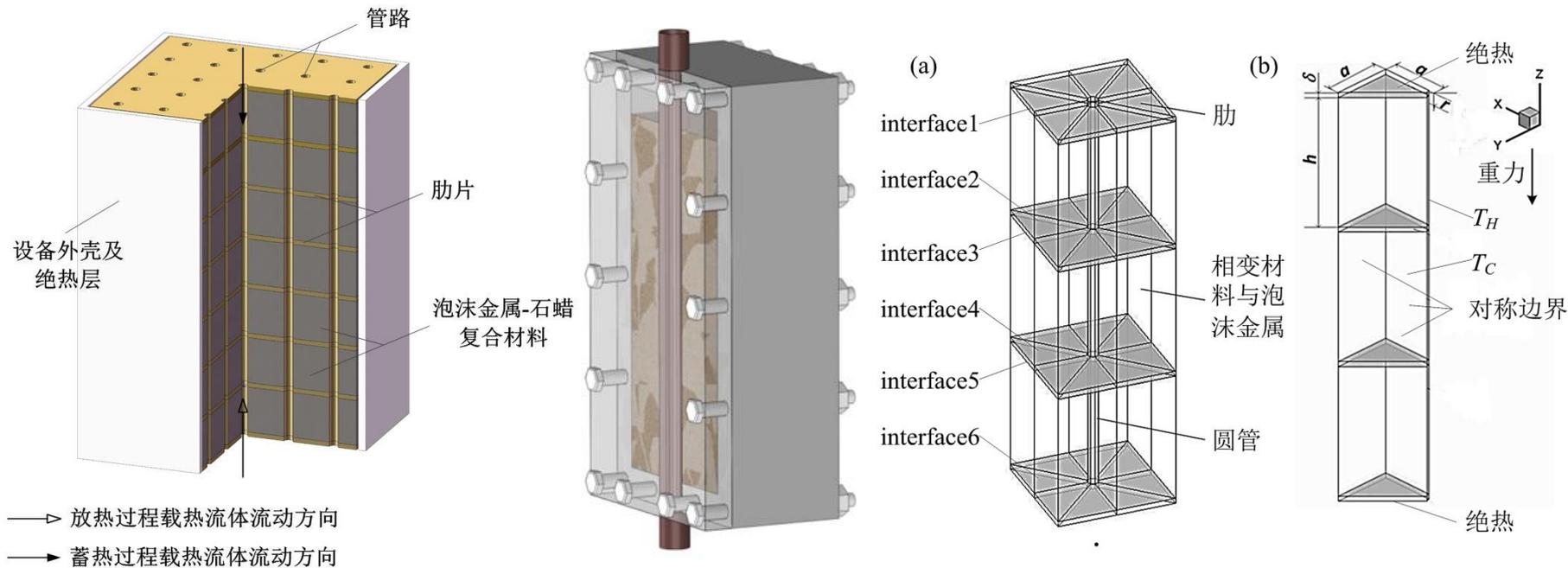


PCM+Graphite



Nano particle +Solar salt

管壳式潜热蓄热设备与物理模型

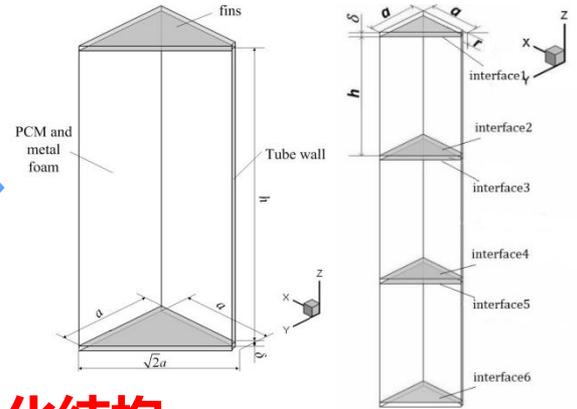
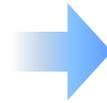
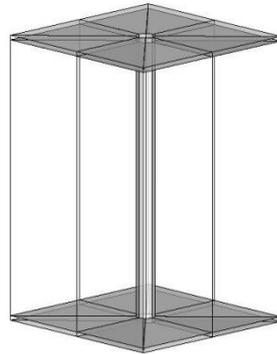
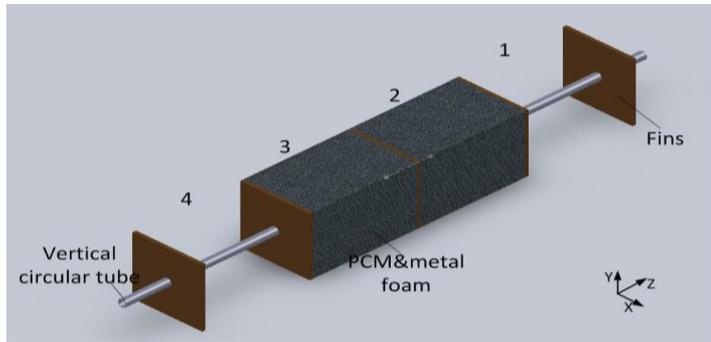


管-壳式潜热蓄热设备结构图

物理模型与计算区域

1. **泡沫金属-相变材料复合结构**作为主要蓄热部分夹在肋板之间构成“三明治”结构；
2. 提取出三个相邻的蓄热单元，顶部和底部的单元等效于为中间单元提供边界条件，以中间单元近似代表整个蓄热系统内部单元分析蓄热过程的换热性能；
3. 取单元结构的1/8作为计算区域以降低网格数缩短计算时间。

研究1：夹心结构相变储热单元强化传热



提出“夹心式”相变储热单元强化结构

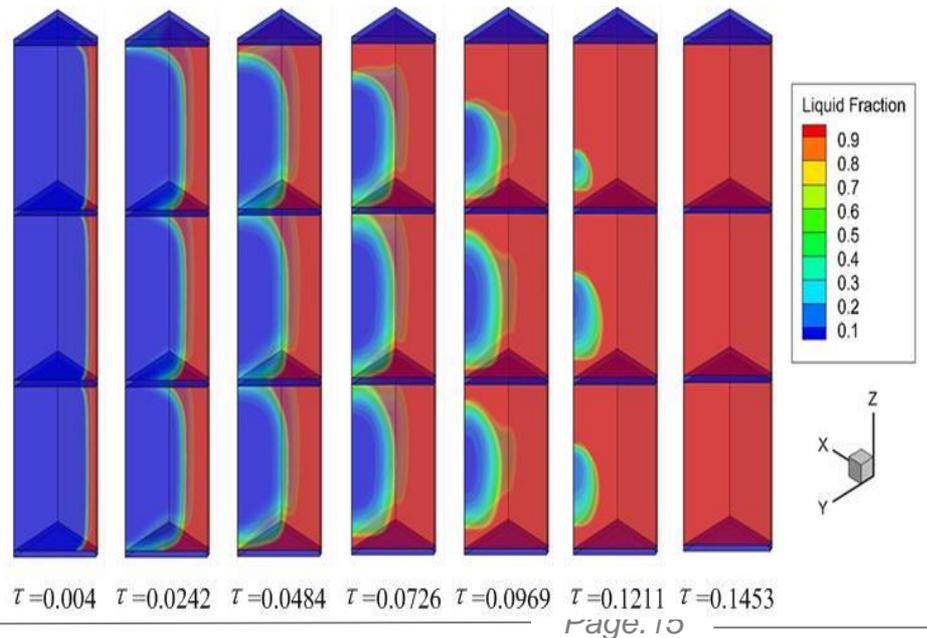
数值方法

- ✓ 基于多孔介质局部热平衡的融化/凝固模型；
- ✓ Boussinesq假设；
- ✓ 泡沫铜/铜肋片/硝酸盐

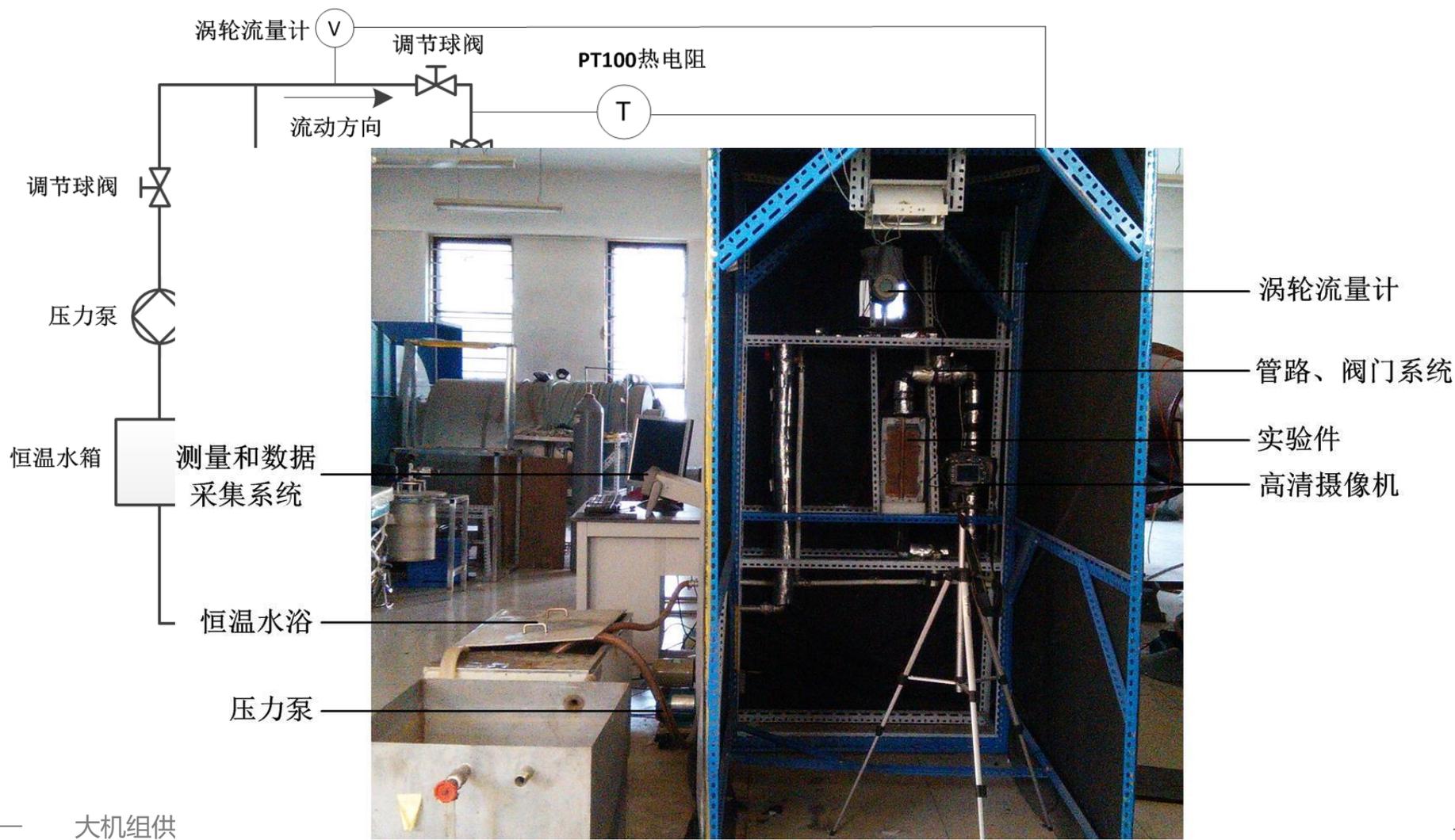


影响规律

- 自然对流；
- 孔密度、孔隙率；
- 肋片间距



协同强化潜热蓄热试验台



复合相变材料的制备



抽气管路

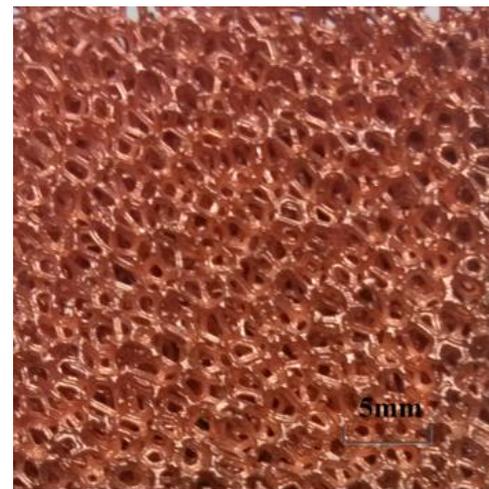
真空泵

真空吸附腔

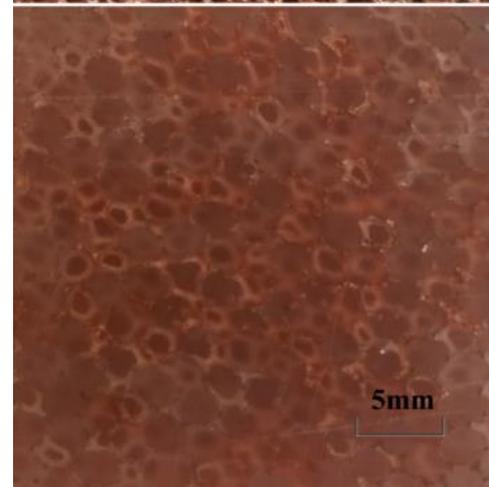
恒温水浴

真空表

手动挡板阀



(a)



(b)

$$\alpha = \frac{V_{PCM}}{V_{pore}} = \frac{m_t - m_{cu}}{\varepsilon \rho_{PCM} V_{total}}$$

真空注入比可达**96.7%**

泡沫金属填充石蜡前后对比图

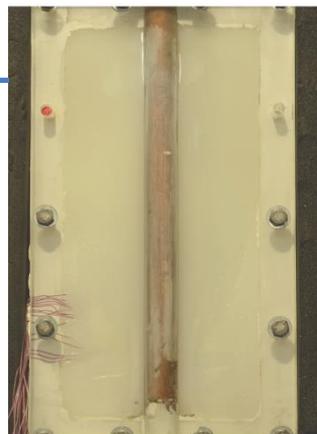
实验件样本及测点布置：

三种测试样本：

(a) 纯石蜡材料

(b) 泡沫铜-石蜡复合材料

(c) 肋片强化的复合材料



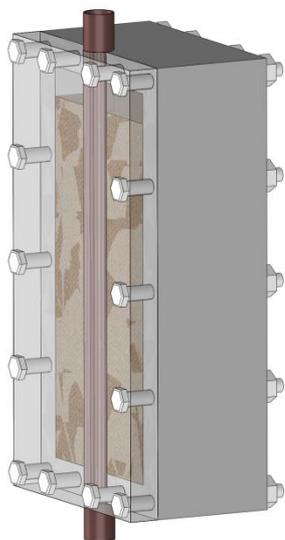
(a)



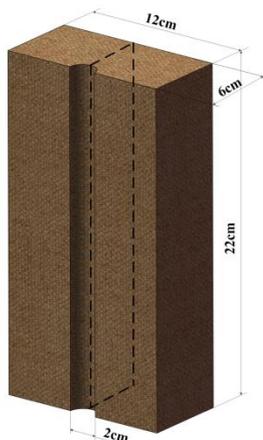
(b)



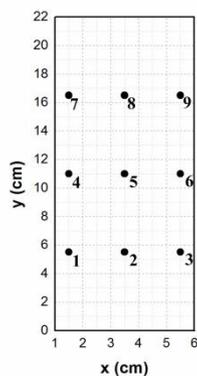
(c)



(a)



(b)



(c)

(a) 实验件三维结构

(b) 实验件尺寸及热电偶测点布置截面

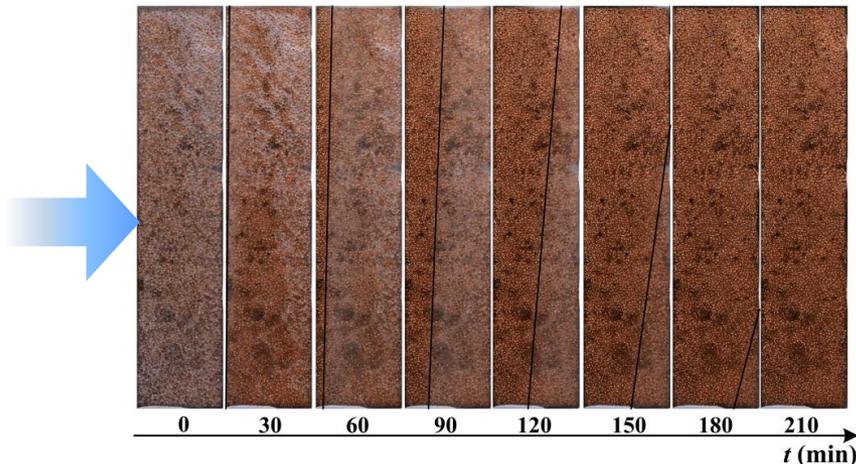
(c) 测量截面热电偶位置分布及标号

研究1：夹心结构相变储热单元强化传热

北 电 力 大 学

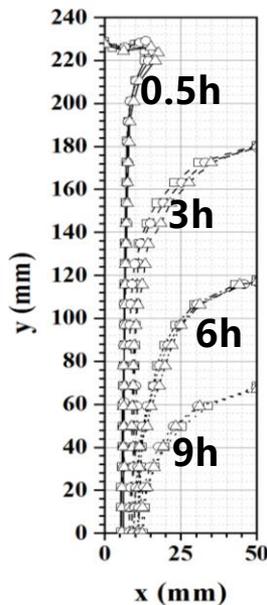
CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

实验
研究

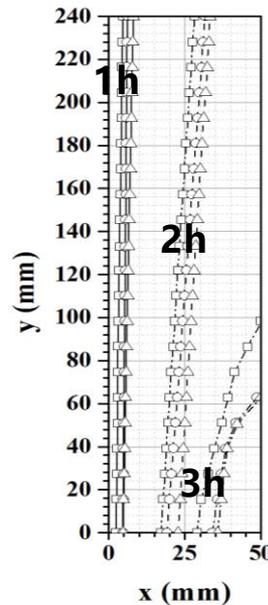


研究发现：

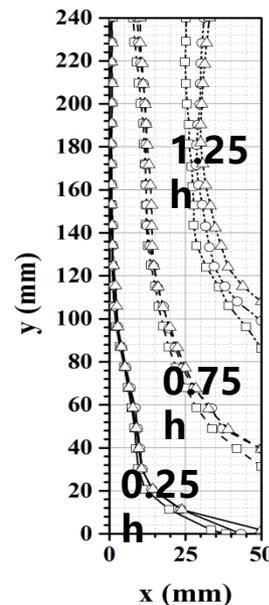
- 1、夹心结构可以显著提高储/释热速率，缩短PCM融化/凝固时间
- 2、孔隙率、肋片厚度、肋间距影响显著
- 3、固-液相界面迁移复杂，受自然对流、局部强化方式等影响



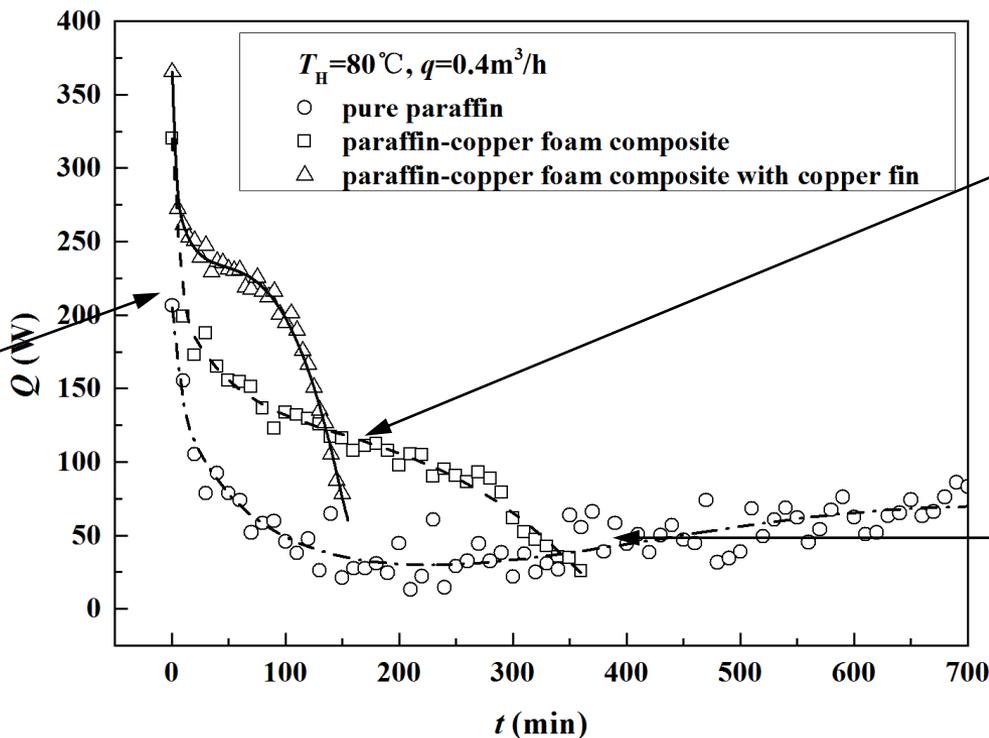
纯PCM



PCM+泡沫铜



夹心式



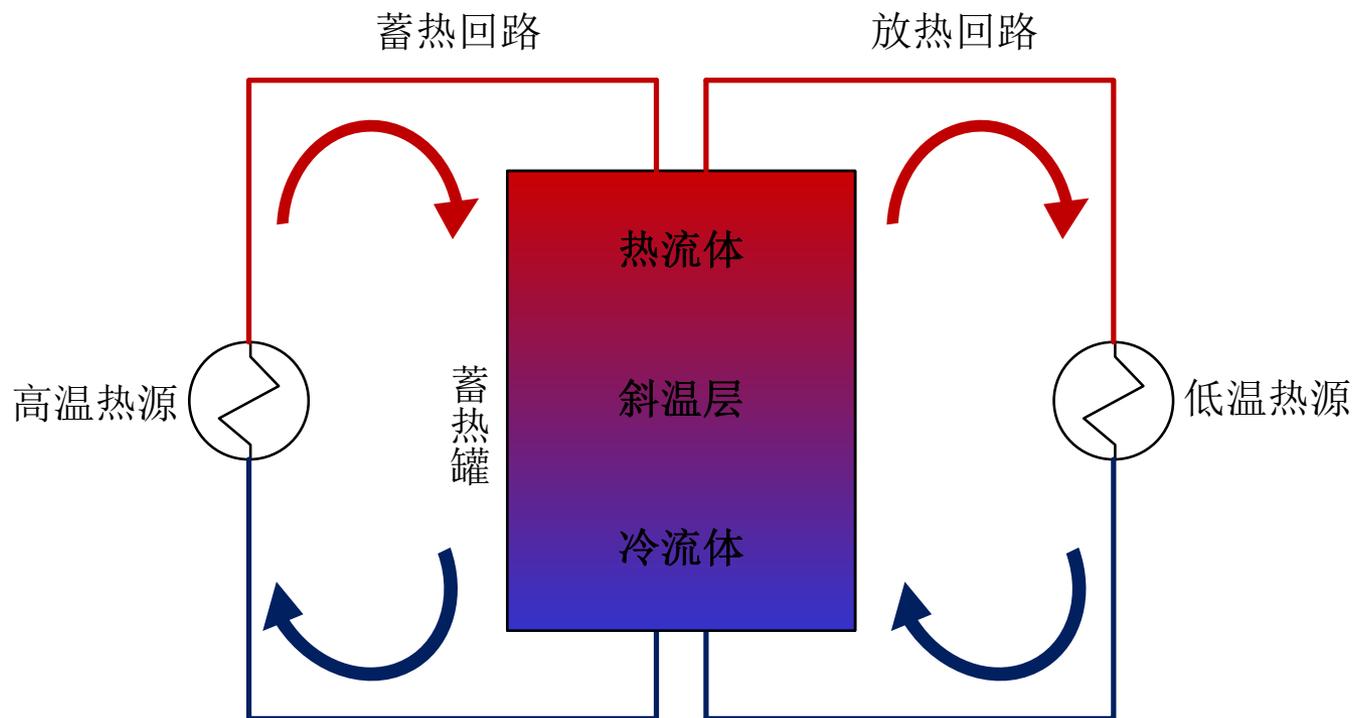
快速充热
(显热)

充热速率
上升 (潜热)

充热速率
上升 (潜热)

储/释热速率受传热机理、强化方式的影响显著，
调控目标是实现快速、稳定的储/释热。

斜温层储能技术测试实验台

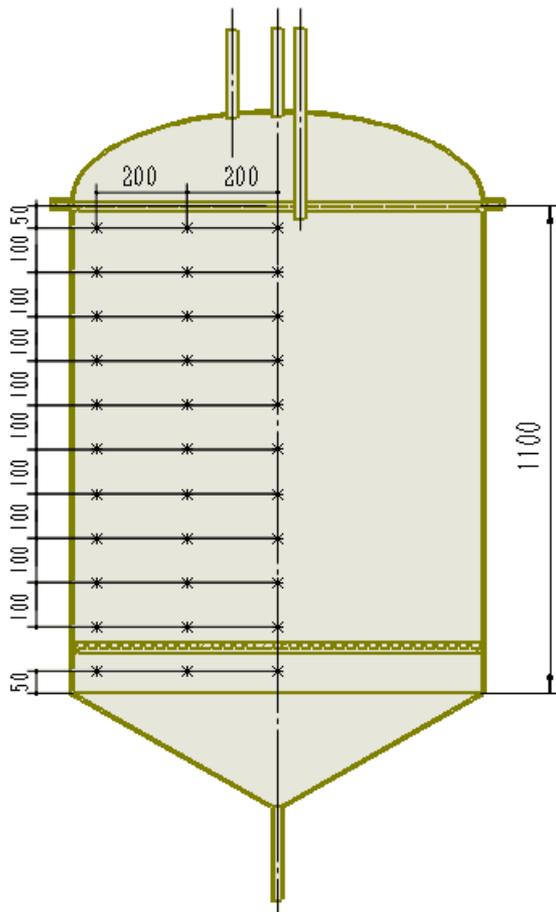


热流体进出口均设置在罐体上部，冷流体进出口均设置在罐体下部，由于冷热流体之间的密度不同，二者之间会形成一个温度跃层，称为**斜温层**。斜温层能够保证热量稳定的存储与释放。在低温范围应用该技术，导热流体基本采用水，在高温范围应用该技术，导热流体多采用导热油。

研究2：斜温层储热系统特性



斜温层储能技术测试实验台

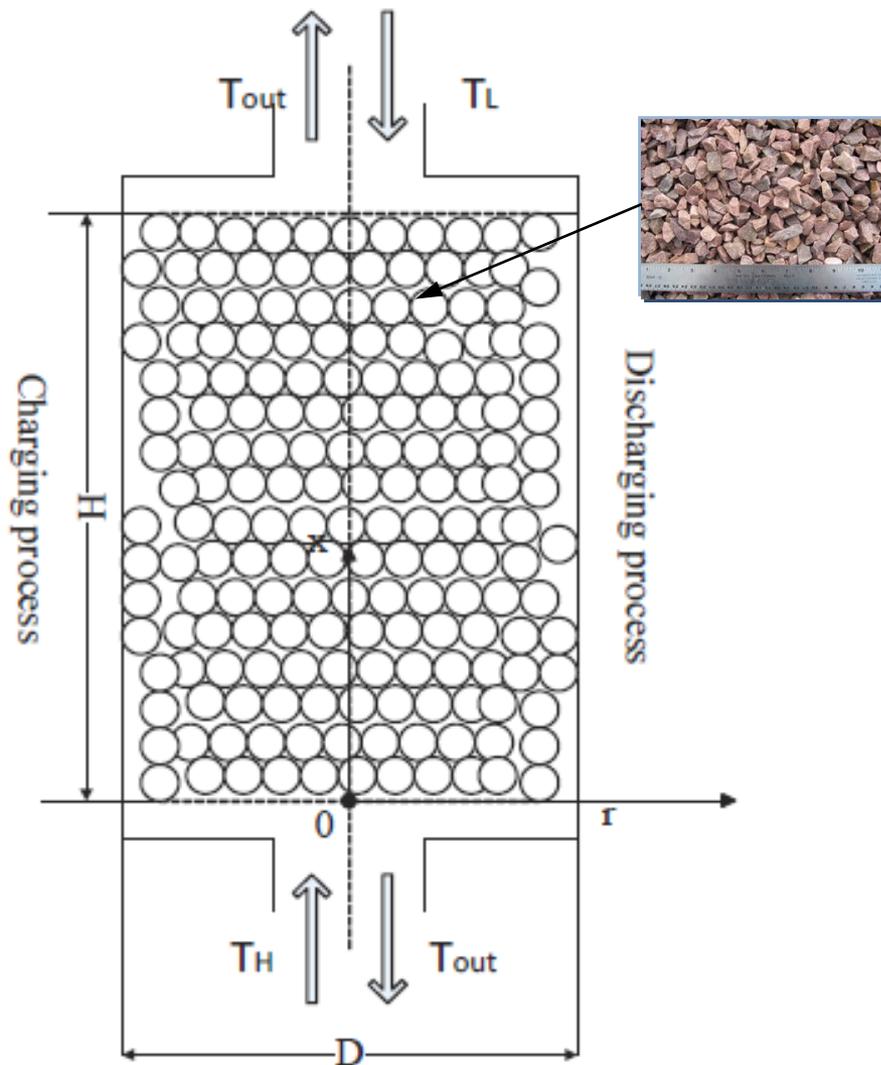


斜温层蓄热罐

斜温层蓄热罐

相变蓄热球

研究2：斜温层储热系统特性



成本优势

- ✓ 使用一个罐体
- ✓ 填充沙石等低成本储热材料替代熔盐

难点

非稳态、大温差、
多尺度耦合

现状

储/释热效率低
缺乏能效提升机制

研究2：斜温层储热系统特性



数值方法

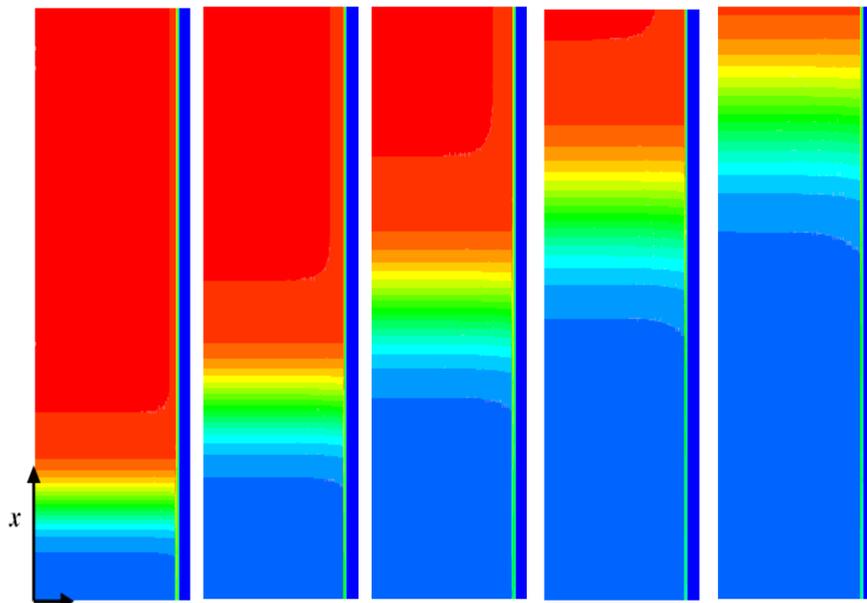
多孔介质两相非平衡模型

液体-颗粒
传热特性

分散-同心模型

使用PCM
颗粒提高储
热密度

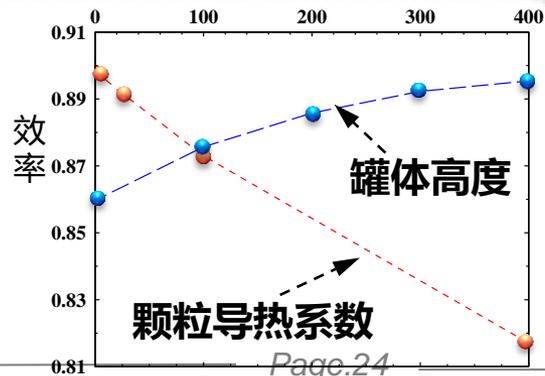
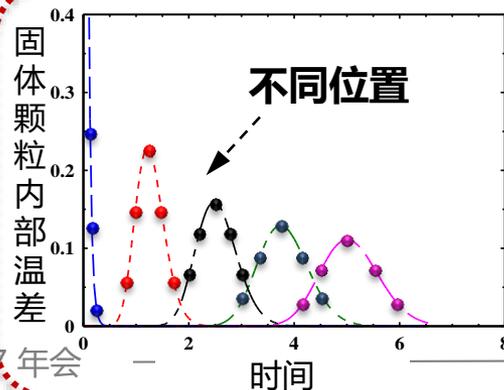
PCM分散-同心模型



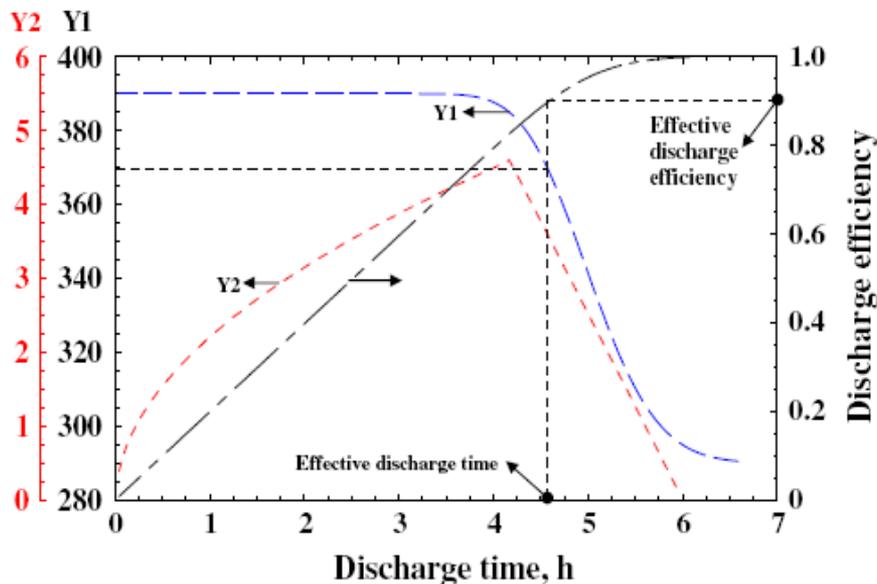
斜温层移动与扩张

参数研究

- 罐体高度；
- 颗粒物性、直径；
- 孔隙率
- 熔盐流速、温度

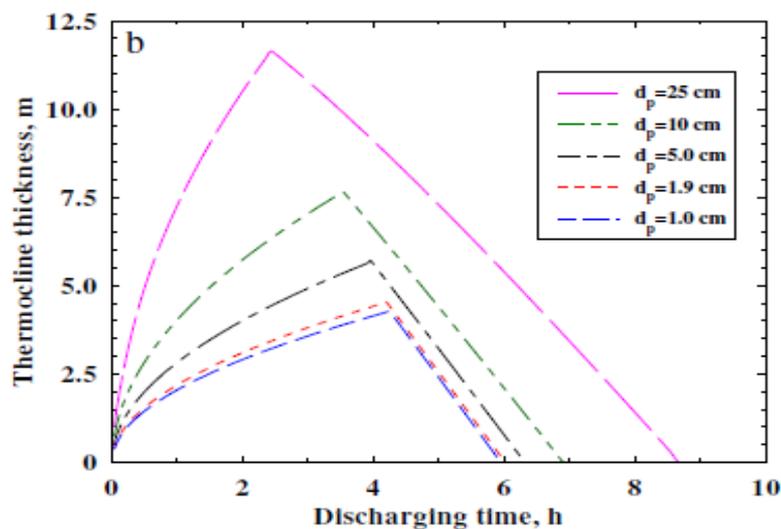


研究2：斜温层储热系统特性



研究发现：

- 1、斜温层不断扩张
- 2、储/释热前期速率稳定
- 3、储/释热后期熔盐出口温度上升/下降，导致储/释热速率及效率下降



提高储/释热效率：

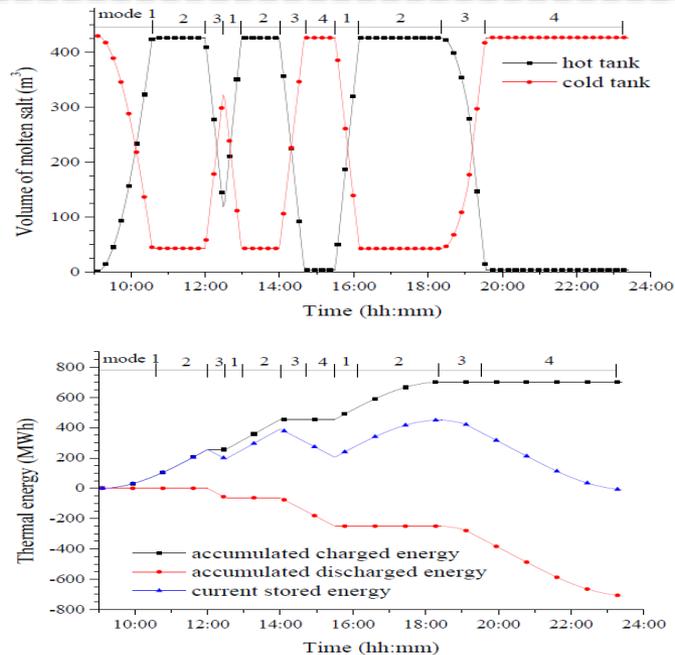
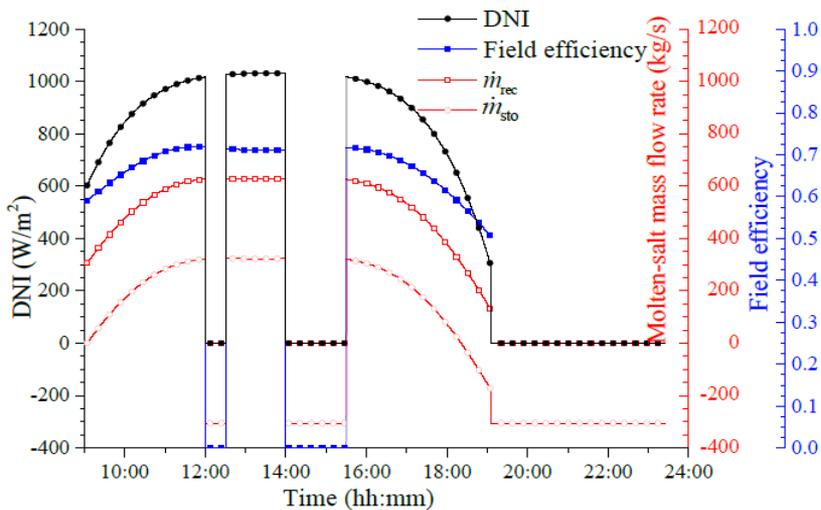
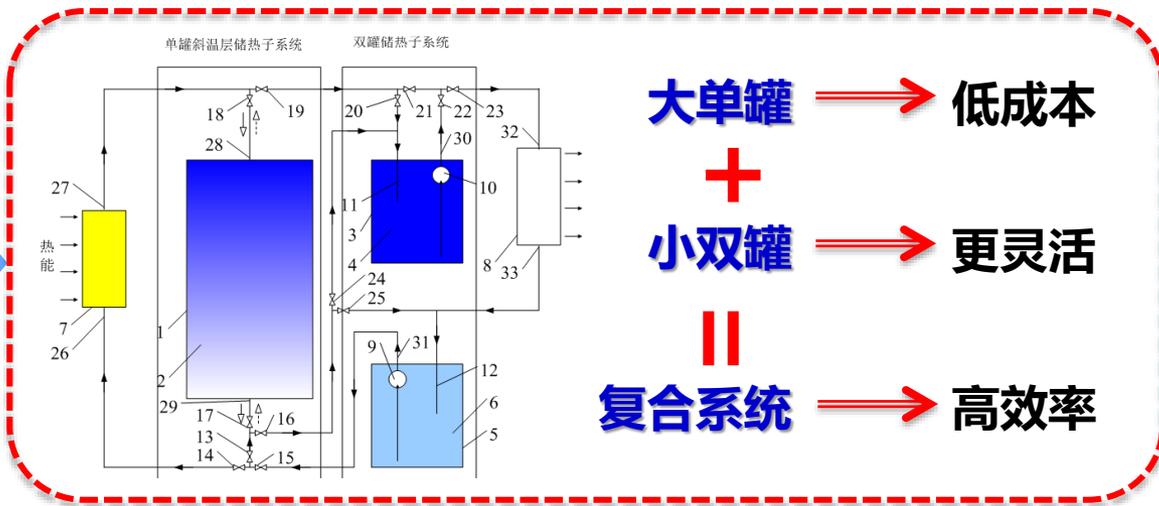
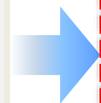
- 1、增加罐体高度
- 2、降低颗粒导热系数
- 3、降低颗粒直径
- 4、罐壁良好保温
- 5、进/出口分流均匀

研究2：斜温层储热系统特性



性能调控

提出低成本、高效率的单罐-双罐复合储热专利技术，克服单罐储热频繁充放热效率下降等固有缺陷

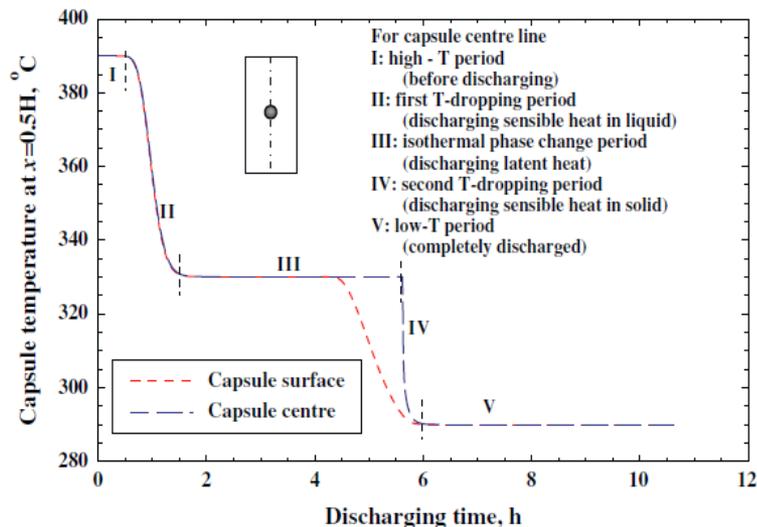


热负荷短期波动时，双罐做缓冲，避免单罐频繁储/释热

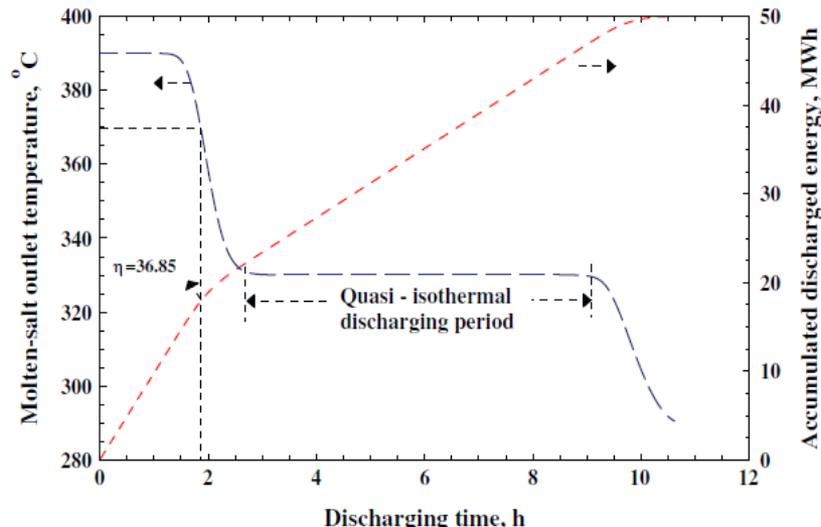
研究2：斜温层储热系统特性



性能调控：相变填充颗粒-均匀相变温度



PCM颗粒内部/表面温度变化



熔盐出口温度变化规律

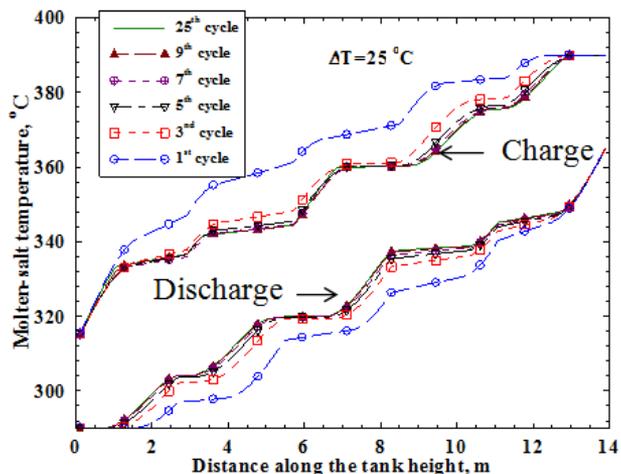
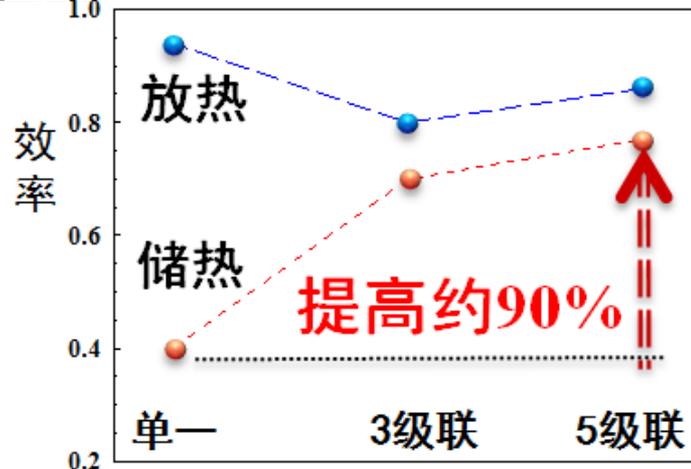
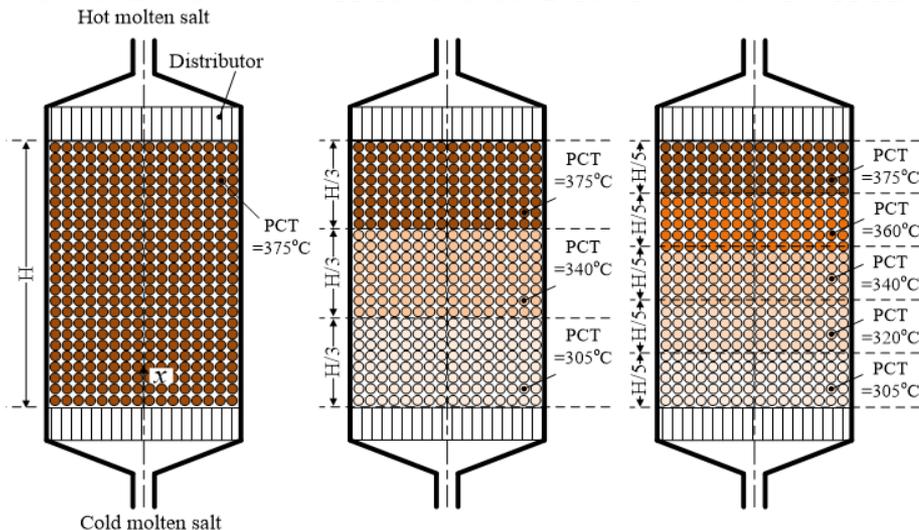
研究发现：

- 1、颗粒内部温度及流体出口温度包括多个变化阶段
- 2、流体出口温度大部分时间保持在接近相变温度的恒定温度
- 3、为保证有效放热，PCM相变温度需高于有效利用温度，导致充热时流-固温差小，充热速度慢（单一相变温度不适合）

研究2：斜温层储热系统特性



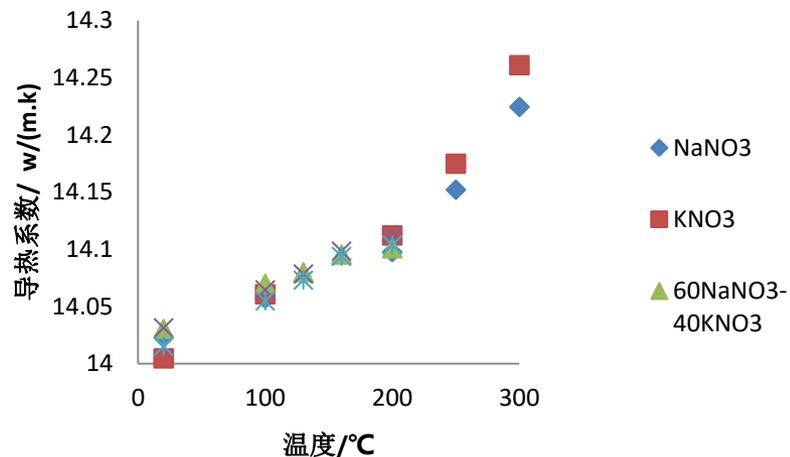
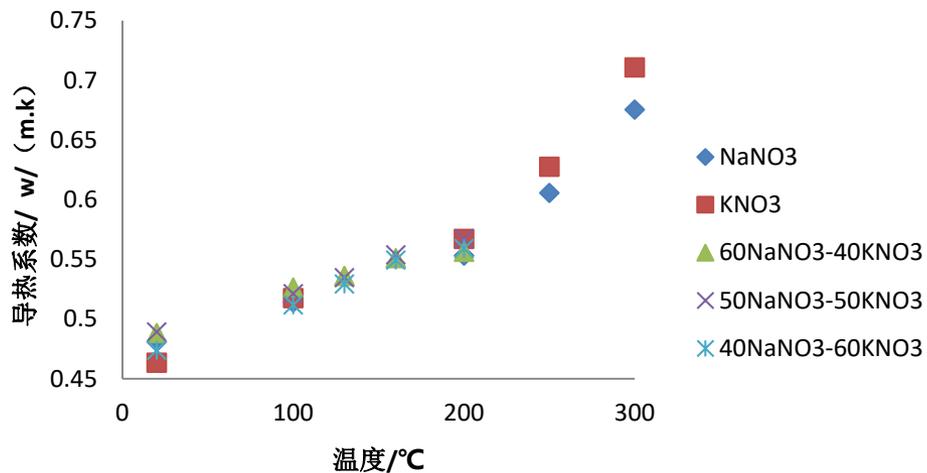
性能调控：相变填充颗粒-级联相变温度



研究发现：

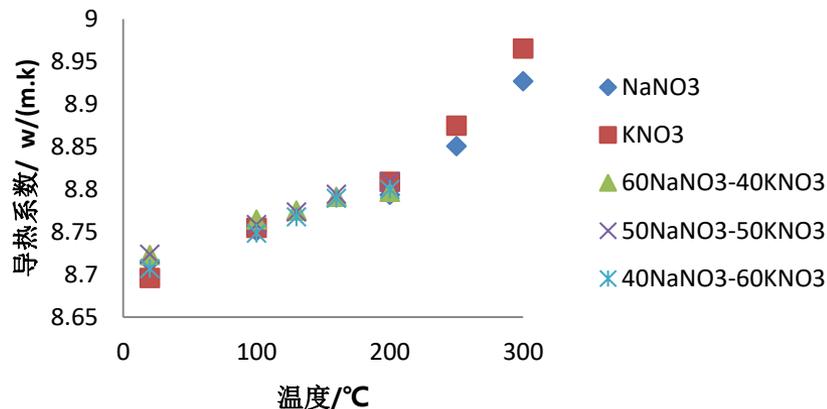
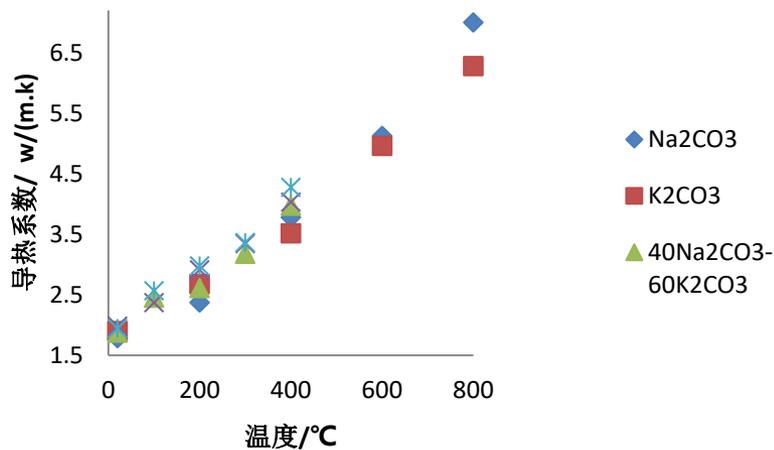
- 1、多级联系统储/释热过程存在多个等温变化区/段，传热更复杂
- 2、相变颗粒单罐系统必须具有级联相变温度才能保证高效储/释热
- 3、储/释热循环n次后，性能趋于稳定

研究3：储热材料性能表征



硝酸盐导热系数随温度变化图

填充金属泡沫铜的硝酸盐复合材料导热系数



碳酸盐导热系数随温度变化图

填充膨胀石墨的硝酸盐导热系数

研究3：储热材料性能表征



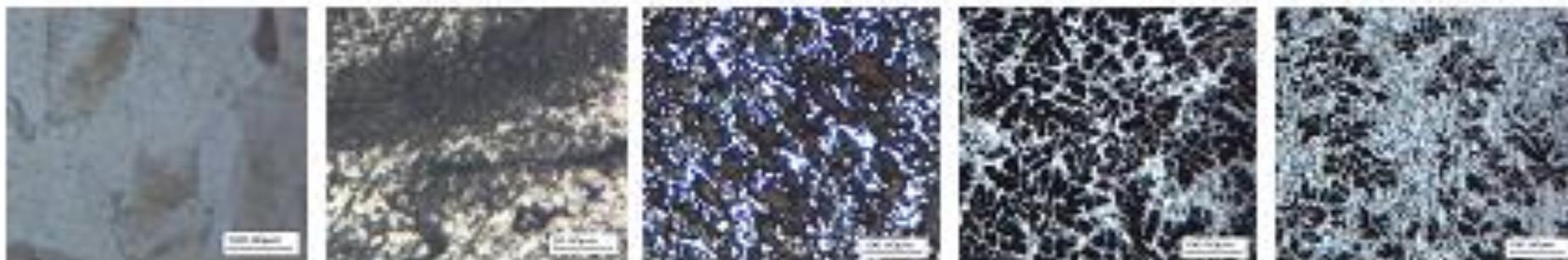
铝基合金材料热物性测试研究

Number	Designed (wt. %)	Measured (wt. %)	Density ρ (g/cm ³)
01	Al-10Cu	Al-10.35Cu	2.8887
02	Al-20Cu	Al-20.39Cu	3.1425
03	Al-30Cu	Al-30.12Cu	3.4298
04	Al-40Cu	Al-40.13Cu	3.7395
05	Al-20Si	Al-19.7Si	2.6341
06	Al-5Mg	Al-3.52Mg	2.6602
07	Al-5Cu-5Zn	Al-4.91Cu-5.04Zn	2.8931
08	Al-10Cu-10Zn	Al-10.30Cu-9.84Zn	3.1105
09	Al-20Cu-10Zn	Al-20.50Cu-10.45Zn	3.3749
10	Al-30Cu-10Zn	Al-26.98Cu-10.10Zn	3.6235

铝基合金材料热物性测试研究



(a) Al-10.35Cu (b) Al-20.39Cu (c) Al-30.12Cu (d) Al-40.13Cu (e) Al-19.7Si



(f) Al-3.52Mg (g) Al-4.91Cu-5.04Zn (h) Al-10.30Cu-9.84Zn (i) Al-20.50Cu-10.45Zn (j) Al-26.98Cu-10.10Zn

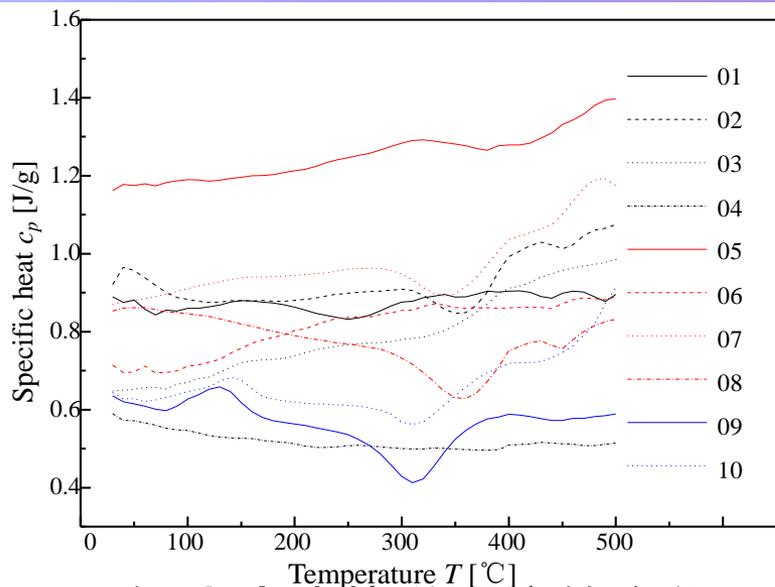
研究3：储热材料性能表征



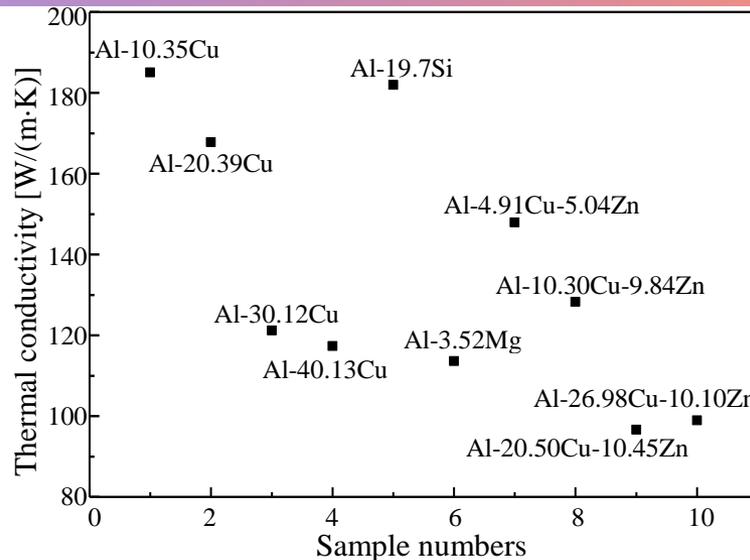
铝基合金材料热物性测试研究

Samples	Phase change temperature range [°C]	Latent heat ΔH		Specific heat at 30 °C		Specific heat at 500 °C	
		in mass [J/g]	in volume [J/cm ³]	in mass [J/(g·K)]	in volume [J/(cm ³ ·K)]	in mass [J/(g·K)]	in volume [J/(cm ³ ·K)]
Al-10.35Cu	548.0-638.9	284.9	823.0	0.8895	2.5694	0.9035	2.6098
Al-20.39Cu	551.7-611.8	291.8	917.0	0.9208	2.8935	1.0828	3.4026
Al-30.12Cu	554.0-568.7	326.2	1118.8	0.6479	2.2223	0.9963	3.4171
Al-40.13Cu	559.0-569.4	305.8	1143.5	0.5900	2.2063	0.5131	1.9189
Al-19.7Si	587.1-597.1	372.1	980.1	0.9621	2.5341	1.4079	3.7084
Al-3.52Mg	637.3-650.8	290.0	771.5	0.7148	1.9016	0.9048	2.4069
Al-4.91Cu-5.04Zn	626.7-646.9	335.3	970.1	0.8702	2.5176	1.1431	3.3070
Al-10.30Cu-9.84Zn	518.4-620.6	267.1	830.8	0.8531	2.6536	0.8356	2.5993
Al-20.50Cu-10.45Zn	527.6-583.3	298.0	1005.7	0.6354	2.1443	0.6483	2.1879
Al-26.98Cu-10.10Zn	528.7-542.7	283.6	1027.6	0.6435	2.3317	0.9503	3.4434

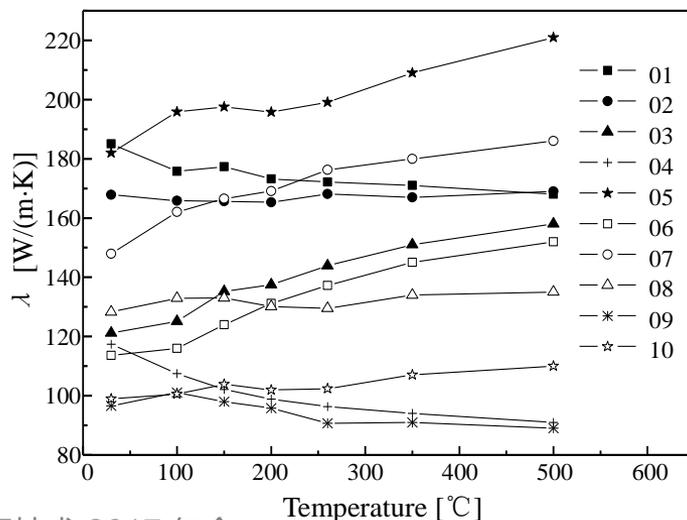
研究3：储热材料性能表征



铝合金比热随温度的变化

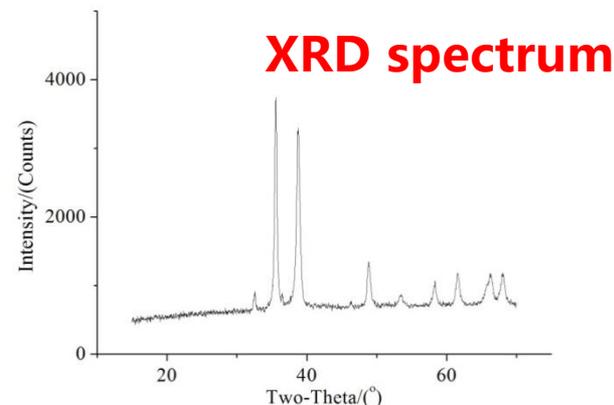
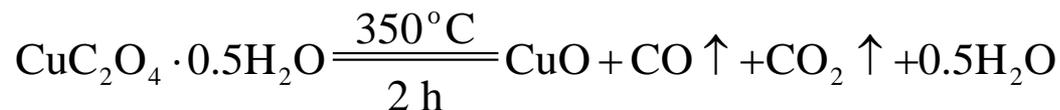


铝合金在室温下的导热系数

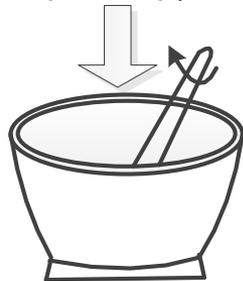


铝合金导热系数随温度的变化

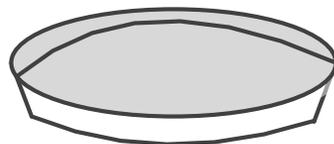
二元熔盐的蓄热性能调控



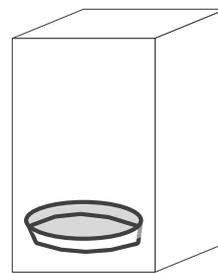
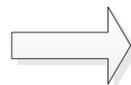
$\text{CuC}_2\text{O}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$
+
 $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$ (60:40)



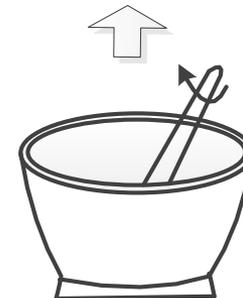
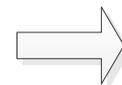
Grind and mix
for 20 minutes



Place mixture in a
aluminum foil plate



Heat mixture in a furnace
for 2 hours at 350 °C

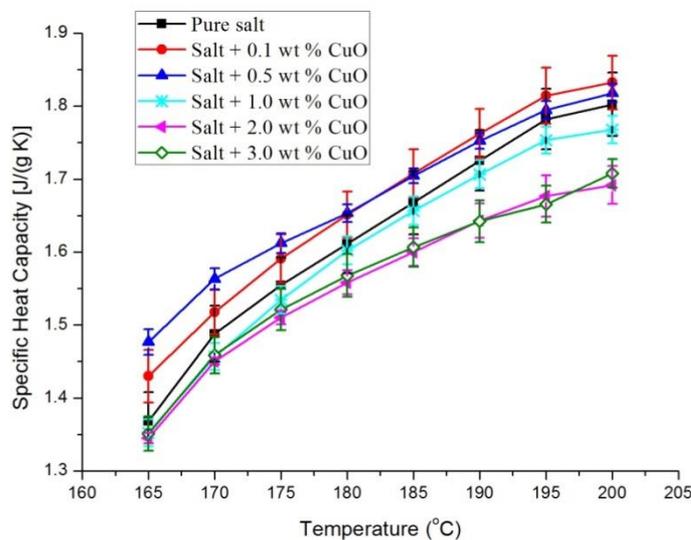


After cooling, grind and
mix for 60 minutes

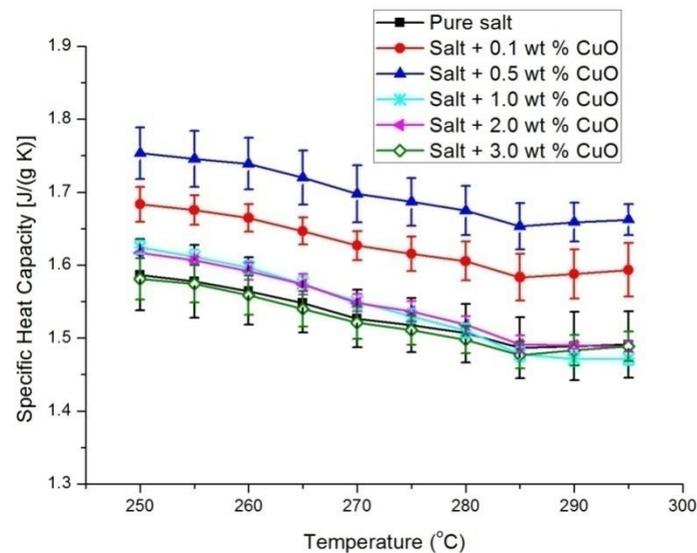
Fine powder

“一步法”制备CuO纳米添加物-熔融盐复合材料

纳米颗粒调控二元熔盐的蓄热性能



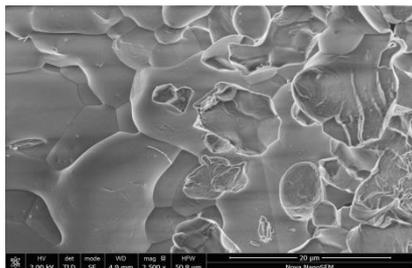
固相



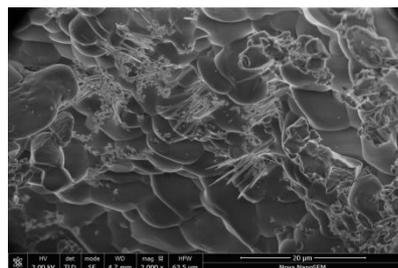
液相

二元熔盐比热容随纳米颗粒质量分数的变化

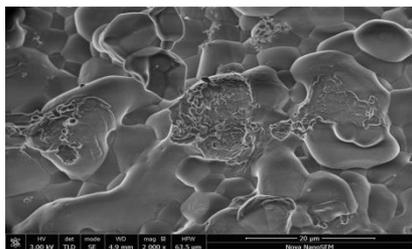
纳米颗粒调控二元熔盐的蓄热性能



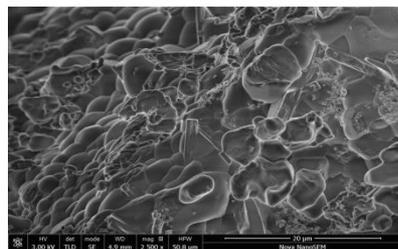
Pure binary salt



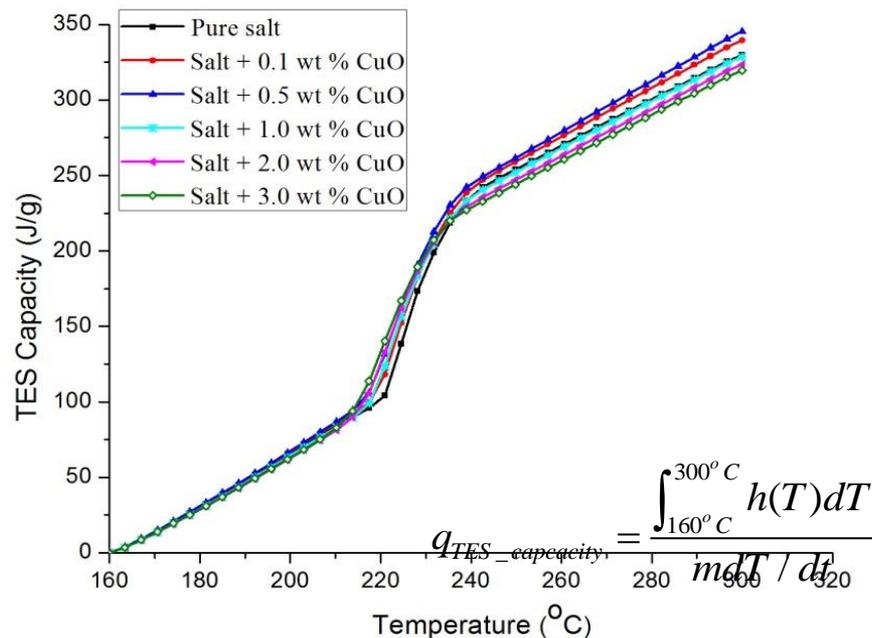
0.5% CuO nanoparticle



1% CuO nanoparticle



2% CuO nanoparticle



不同纳米熔盐界面形貌导致的二元熔盐蓄热能力随质量分数的不同变化



报告提纲

1 研究背景

2 技术进展

3 总结展望

- **储热**将在越来越多的能源生产与应用领域起到关键作用
- 储热技术研发目标：
降低成本；提高储热密度
- 未来研发重点方向：
PCM储热；单罐；热化学储热；……
- 未来研究关键：
 - **材料性能突破**：稳定性、物性调控（如低熔点熔盐、导热系数）、封装材料的相容性
 - **科技创新**：新材料、新结构、新系统

储热技术研究方向

- 低温储热的研发与储能换热器的设计：**水合盐**
- 中温储热的研发与储能换热器的设计：**多元醇**
- 高温储热的研发与储能换热器的设计：**无机盐、铝基合金**

- 针对储能材料的研究：**热物性的测量与改性**
- 针对换热设备的研究：**强化换热、增强材料的兼容性**



跨季节储热！

热化学储热试验台



加热加湿反应部分



试验样品



谢谢！ 敬请批评指正！