

# 2026中国太阳能热发电大会

——· 光热大师课 ·——

## 太阳能吸热器高效光热转化及安全可靠性研究

魏进家

西安交通大学

2026年8月12日



# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

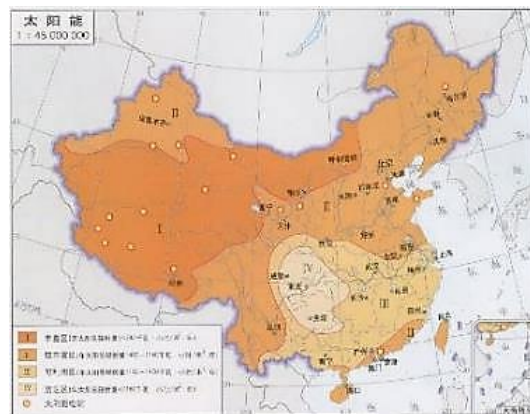
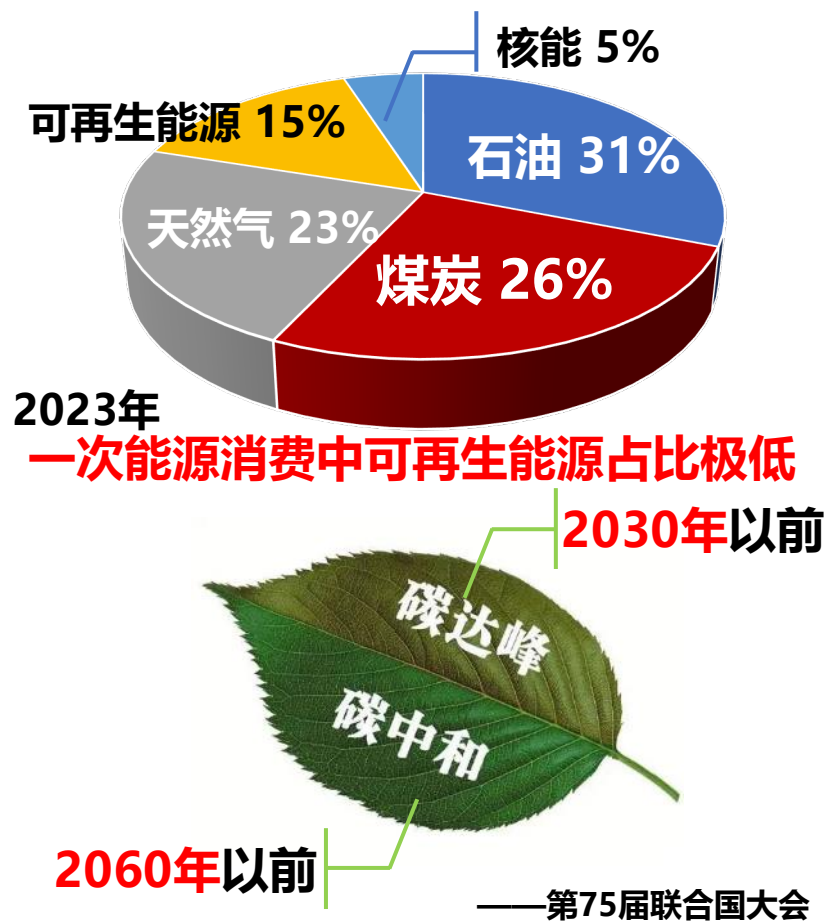
2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

## ■ 技术背景介绍

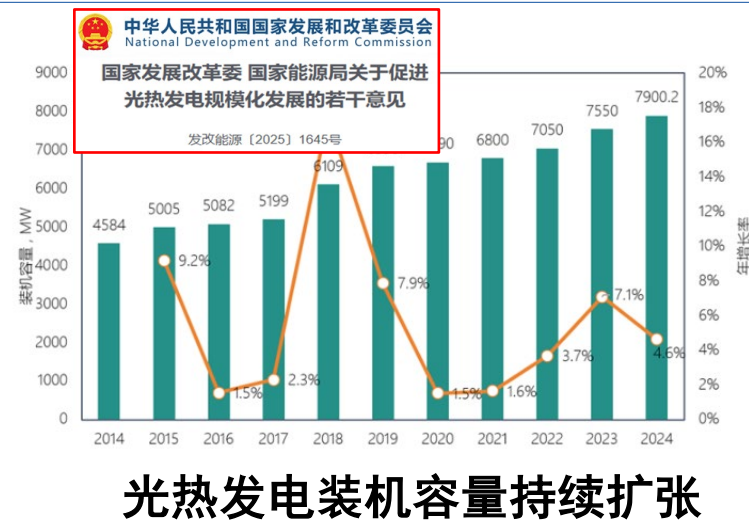
- 在“双碳”目标及新型能源体系建设背景下，高比例新能源接入对电力系统灵活调节能力提出更高要求
- 光热发电（CSP）结合储热技术具备长时间调节能力，是未来新能源系统的重要支撑技术



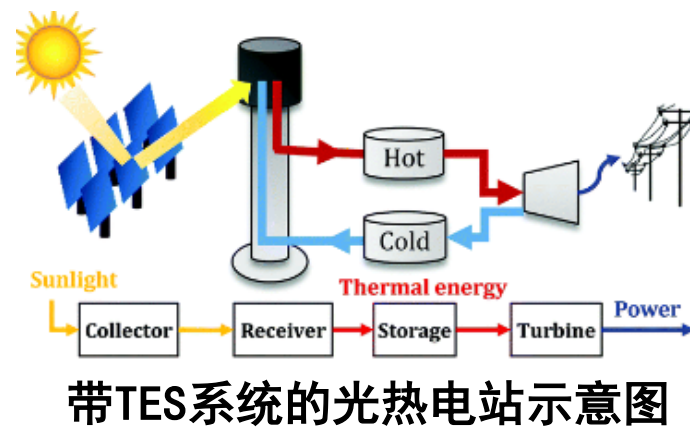
太阳能辐射资源丰富



亚洲第一商业光热发电站



光热发电装机容量持续扩张

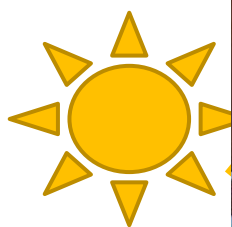


## ■ 技术背景介绍

➤ 塔式太阳能热发电系统包括**聚光子系统**、**集热及储热子系统**和**发电子系统**。

➤ 吸热的核

首航高科敦煌100MW塔式熔盐光热电站



跟踪太阳位  
光聚焦于吸

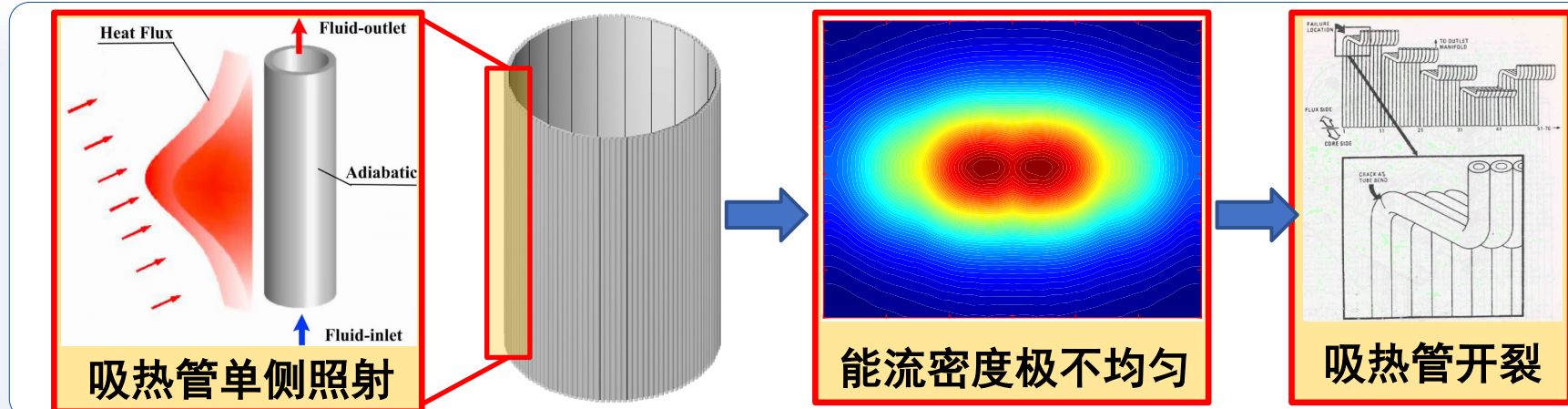
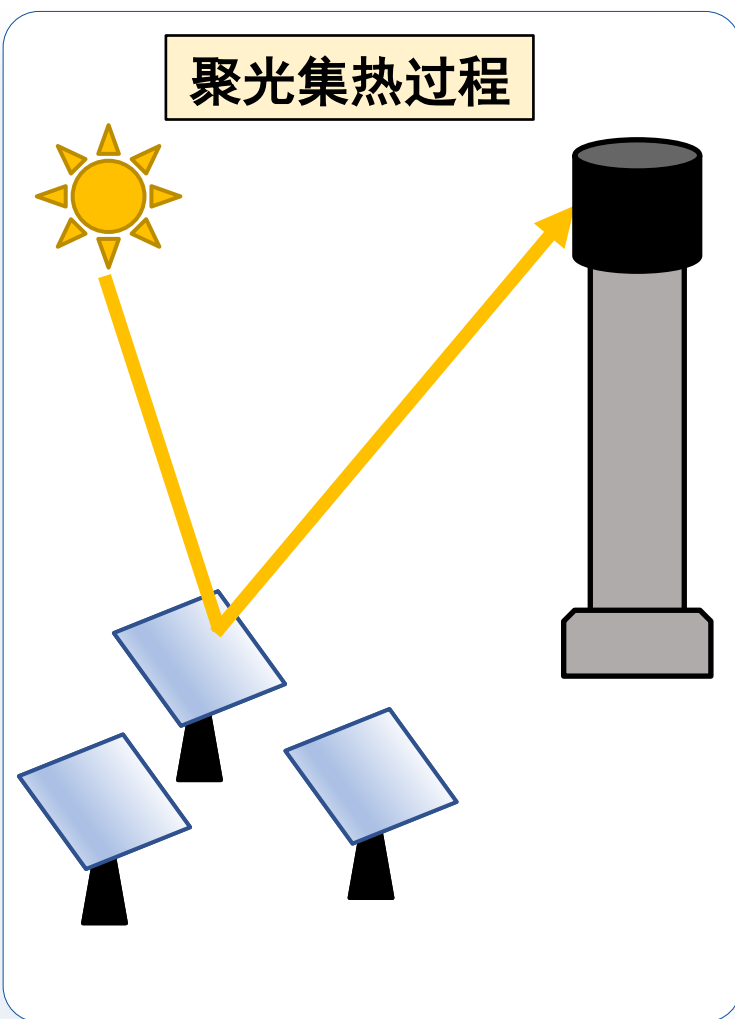


可靠性

并网

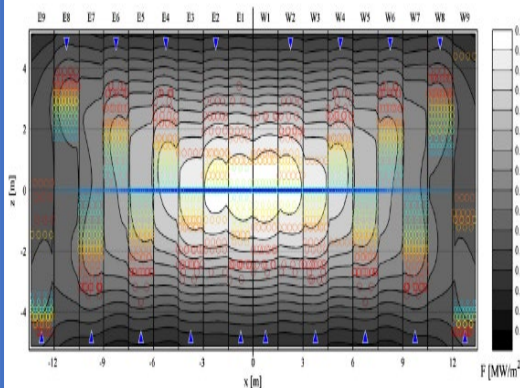
## ■ 吸热子系统

- 吸热器起到**光能转化为热能**的作用，是塔式光热电站中影响其**发电量和运行安全性**的重要装备
- 目前商业应用最广泛的吸热器为**外置式吸热器**

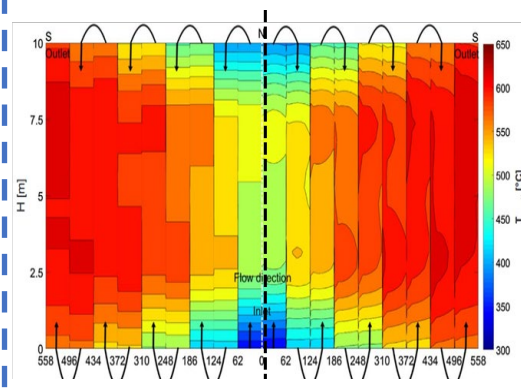


### 研究热点

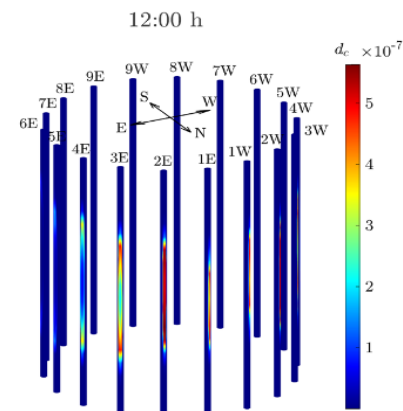
#### 入射能流分布优化



#### 热-力性能研究



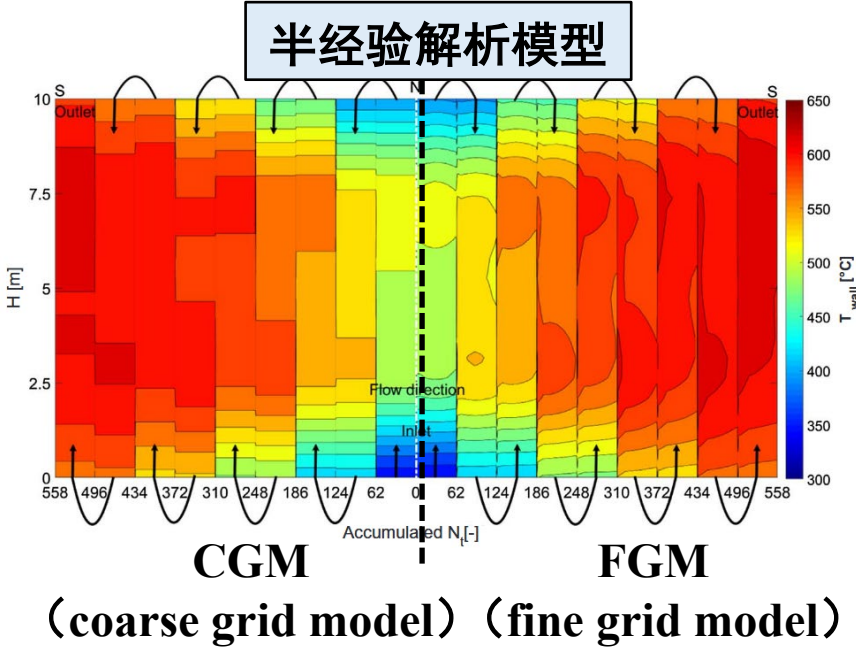
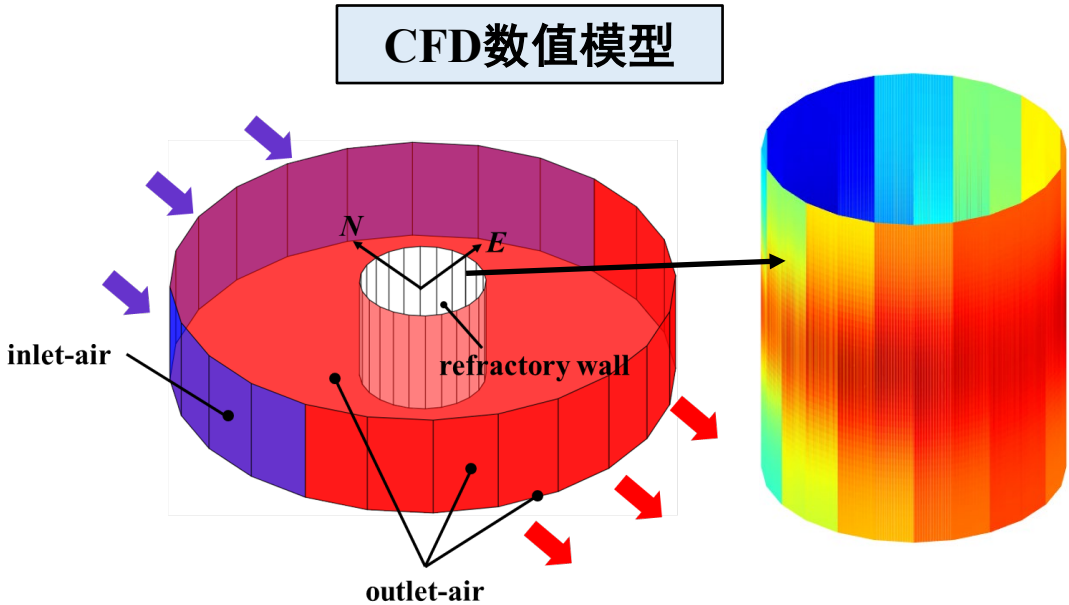
#### 安全可靠性能研究



■ 吸热器热性能研究

- 受限于吸热器尺寸及大型定日镜场，热性能研究主要基于**CFD数值模型**和**半经验解析模型**开展
- CFD模型通过求解耦合控制方程，具有**较高精度**，但**计算成本较高**；半经验解析模型虽计算效率较高，但难以在**保证精度的同时获得吸热器全场热性能分布**

现有吸热器研究方法



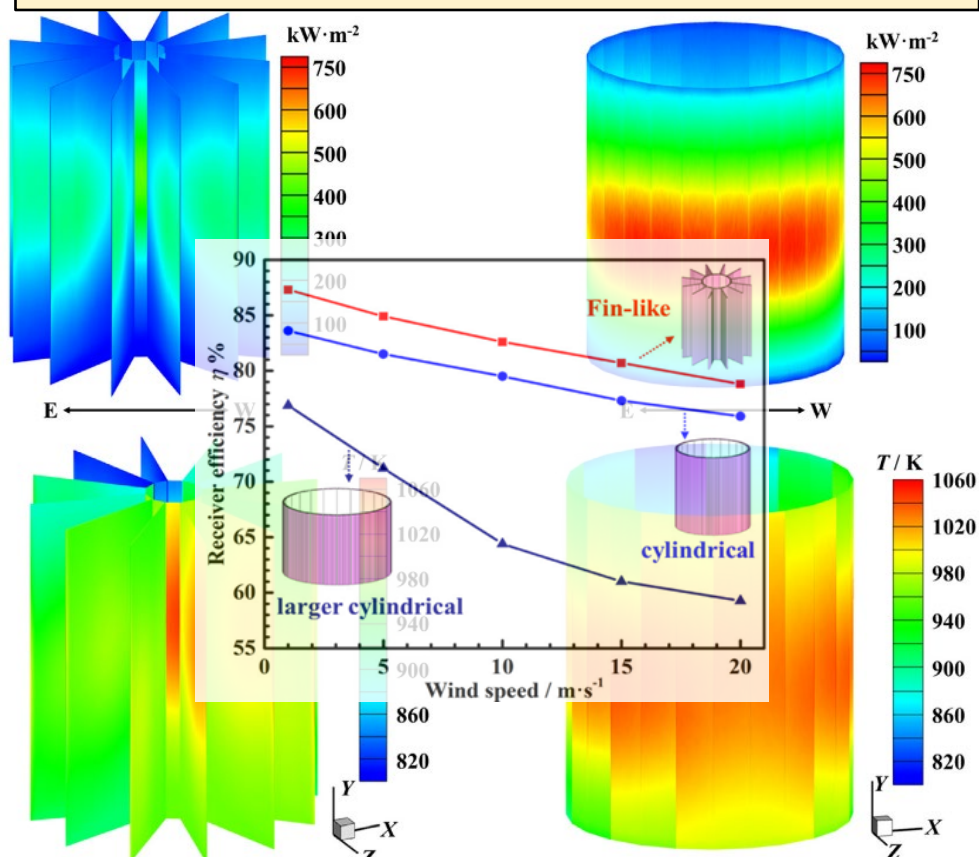
模型对比

| 模型名称                                                              | 计算成本    | 计算精度                    |
|-------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------|
| CFD模型                                                             | 32 h    | 提供 <b>全吸热器</b> 的温度、能量信息 |
| CGM[Rodríguez-Sánchez et al. (2014), Applied Thermal Engineering] | 15 s    | 只提供吸热器 <b>数根吸热管</b> 的信息 |
| FGM[Rodríguez-Sánchez et al. (2018), Solar Energy]                | 15000 s | 提供 <b>全吸热器</b> 的温度、能量信息 |

## ■ 吸热器热性能研究

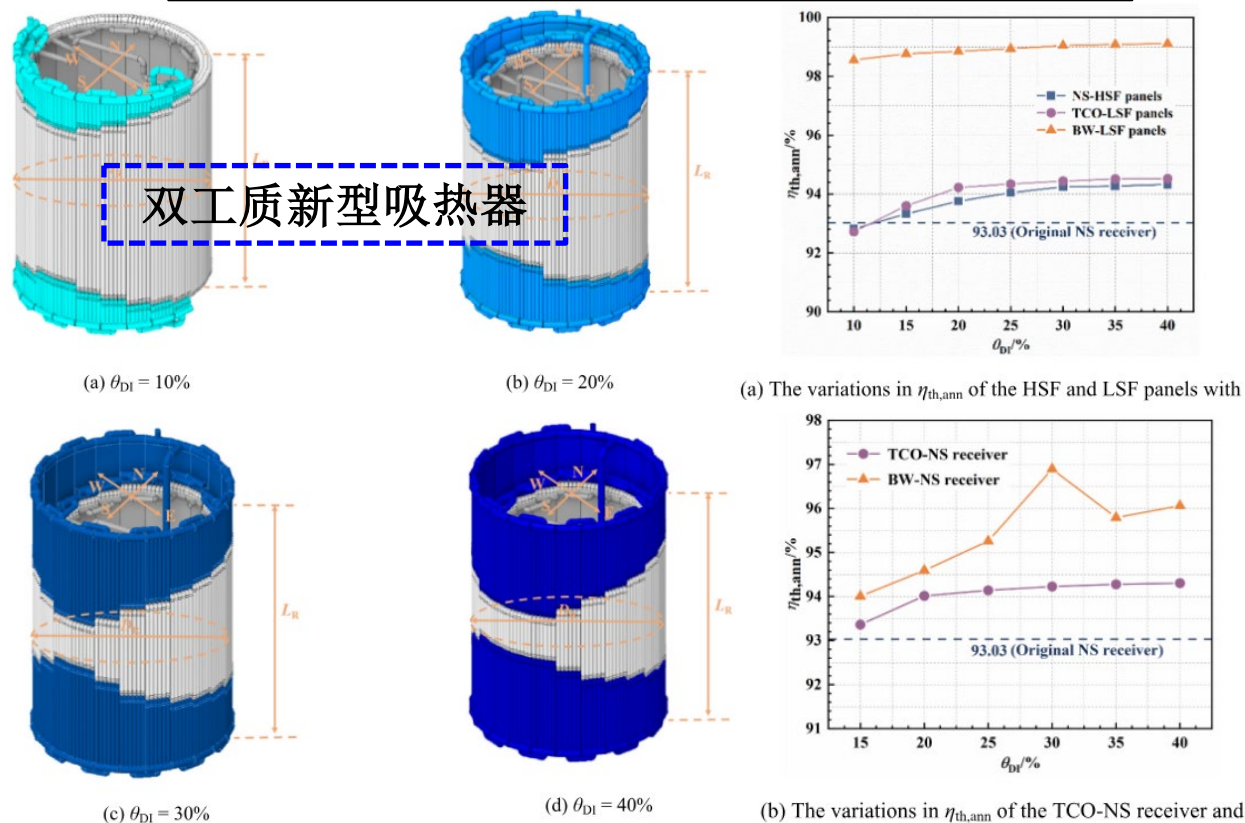
- CFD模型具有**高精度和强适应性**，能够实现**复杂结构及多物理场耦合条件**下吸热器热性能的详细预测
- 已有研究表明，通过结构优化可**有效降低峰值热流密度**并提升吸热效率，但CFD高精度计算仍难以满足**大规模、多工况快速预测需求**

### 鳍片式吸热器结构优化



Wang et al. (2020), *Applied Energy*

### 新型吸热器概念设计

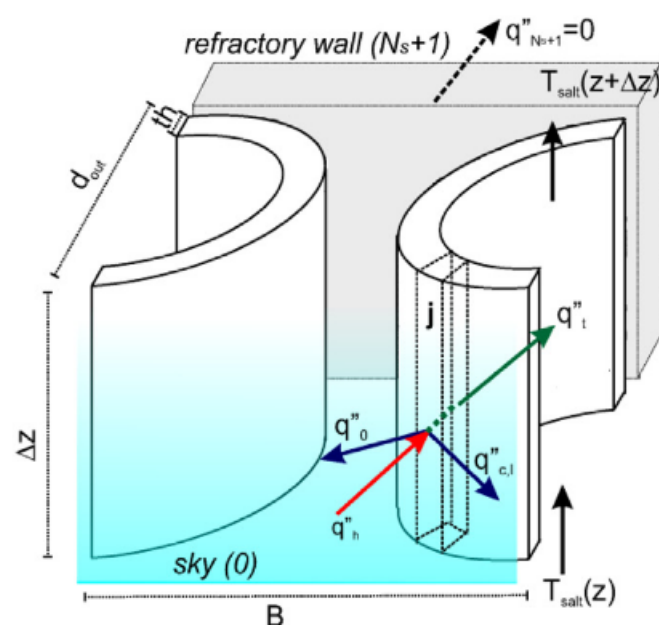


Yang et al. (2025), *Applied Thermal Engineering*

## ■ 吸热器热性能研究

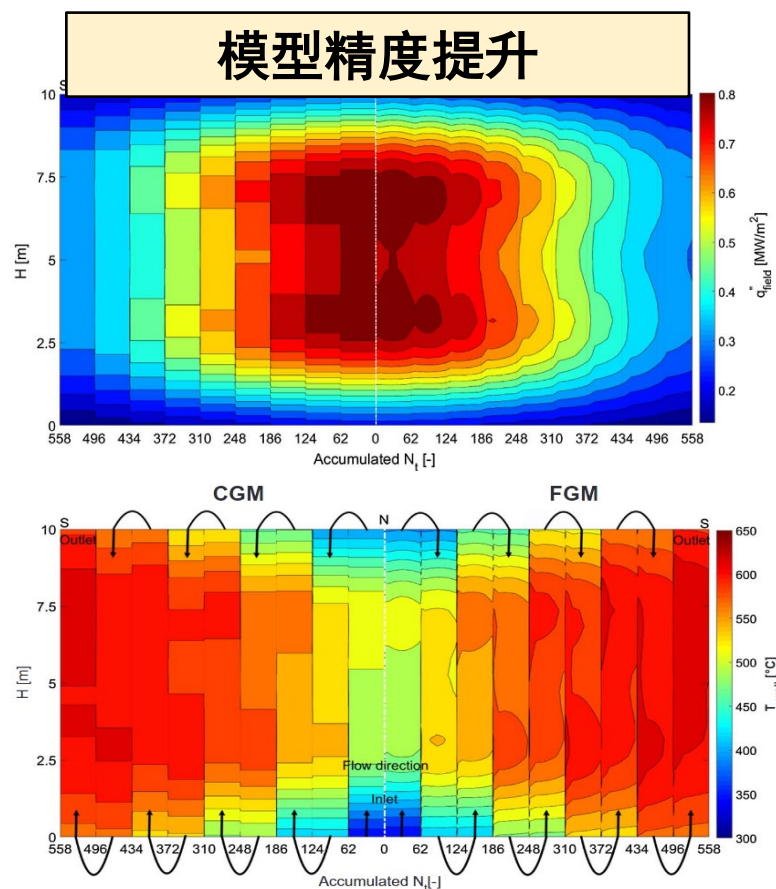
- 半经验解析模型通过**简化计算单元和经验换热关联式**，实现吸热器温度场快速预测
- 该类模型**计算效率高**，广泛用于**安全可靠**性分析，然而现有模型仍**难以兼顾**大尺寸吸热器全场预测精度与计算效率

### 计算单元简化



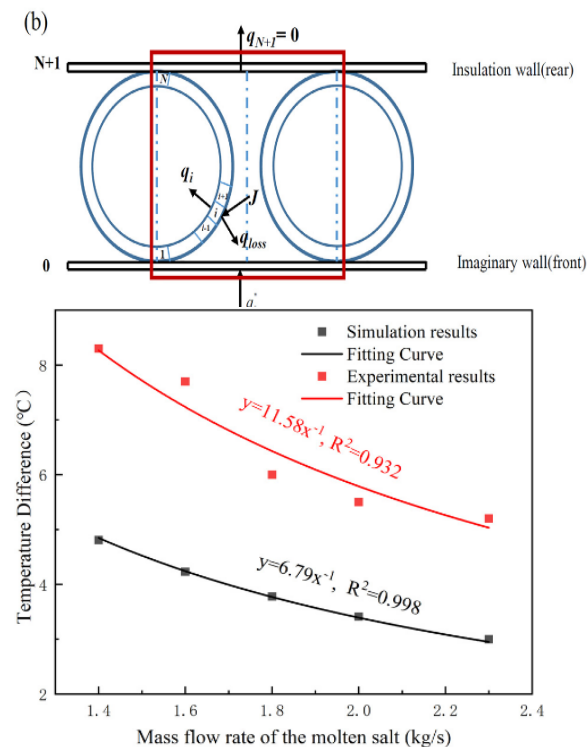
Rodríguez-Sánchez et al. (2014),  
*Applied Thermal Engineering*

### 模型精度提升



Rodríguez-Sánchez et al. (2018), *Solar Energy*

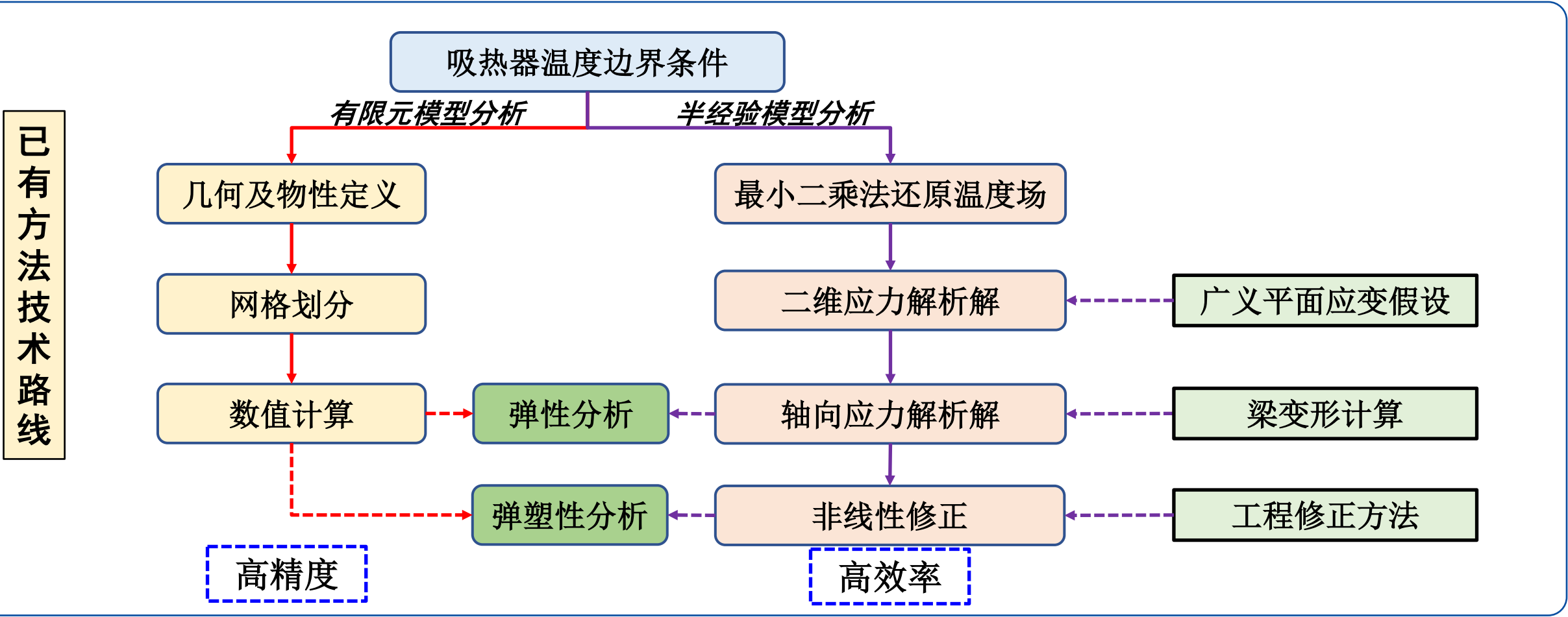
### 瞬态模型应用



Huang et al. (2022), *Journal of Renewable and Sustainable Energy*

## ■ 吸热器力学性能研究

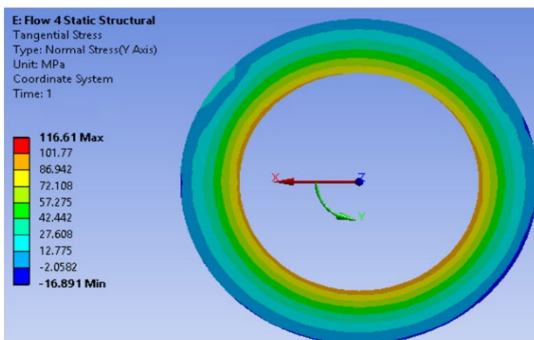
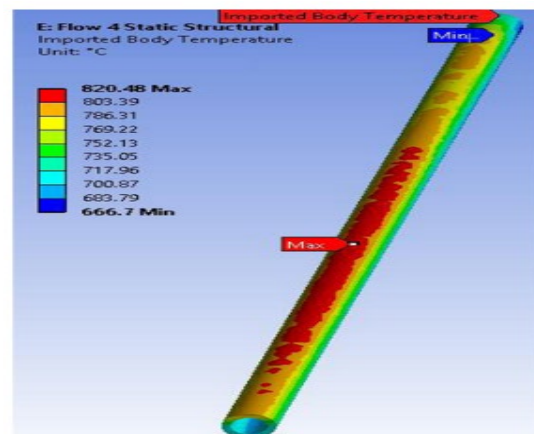
- 吸热器热应力分析主要采用有限元模型和半经验模型两类方法
- 有限元模型能够精细考虑复杂几何、材料非线性及边界约束，具有较高计算精度，但计算成本较高
- 半经验解析模型通过力学简化和假设降低计算成本，可用于快速评估吸热器热应力响应



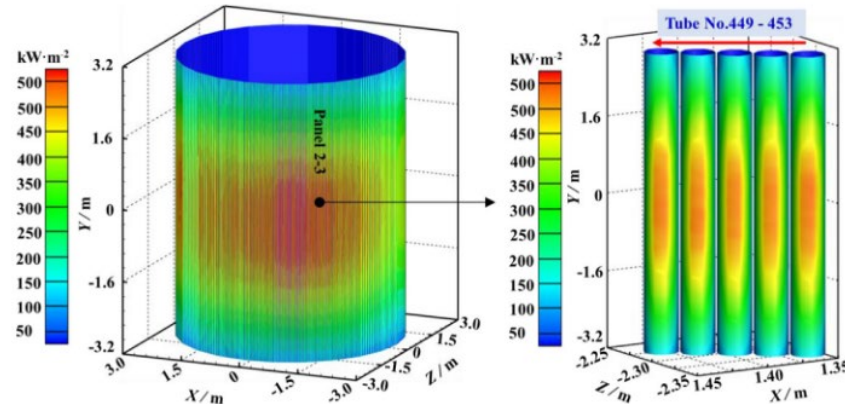
## ■ 吸热器力学性能研究

- 吸热器力学有限元模型经历了由单管分析向全尺寸吸热器热-力耦合分析的发展
- FEM能够获得吸热器温度、变形及应力的全场分布，但现有研究多采用自由膨胀假设，对支撑约束引起的热应力及弹塑性分析考虑较少

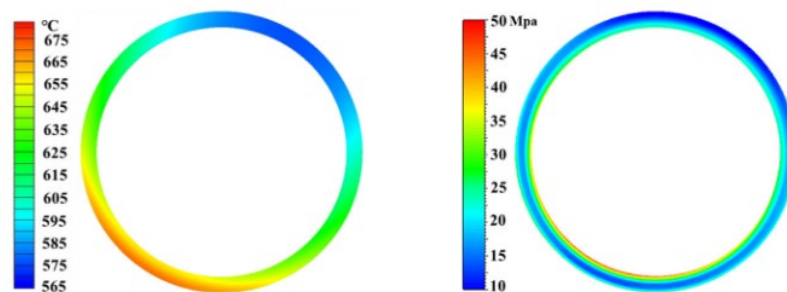
### 吸热器力学性能研究



Ortega et al. (2016),  
*Applied Thermal Engineering*

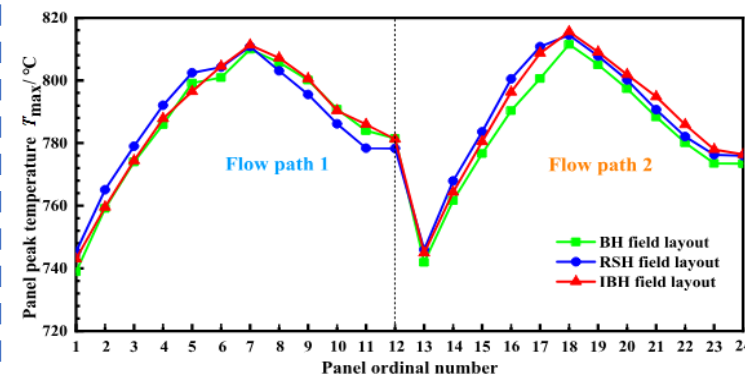


(a) Heat flux distribution

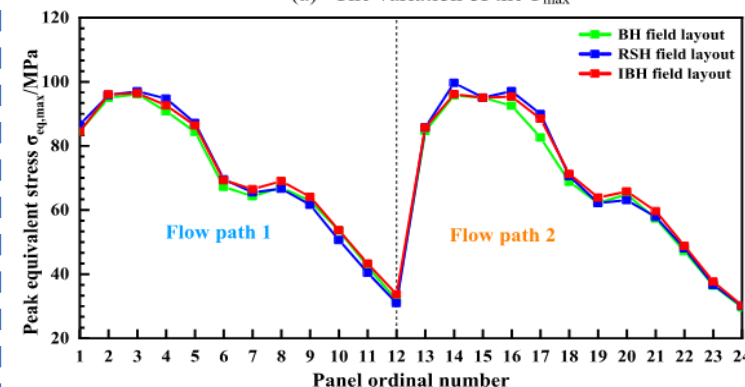


b) Temperature distribution at  $y=0.5m$ , tube No.449 c) equivalent stress distribution at  $y=0.5m$ , tube No.449

Wang et al. (2021), *Energy*



(a) The variation of the  $T_{max}$



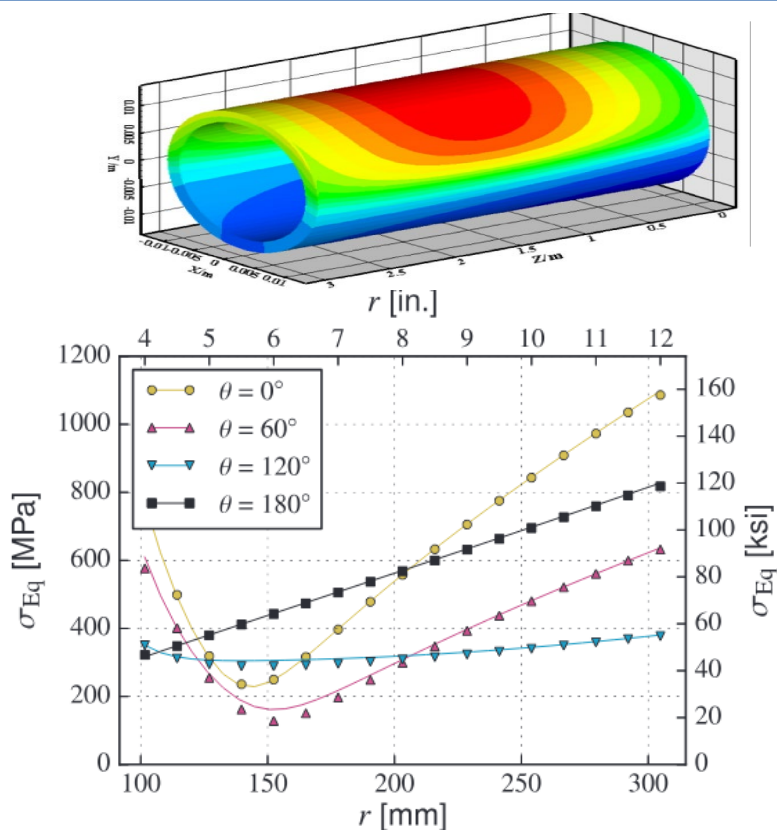
(b) The variation of the  $\sigma_{eq,max}$

Yang et al. (2024), *Solar Energy*

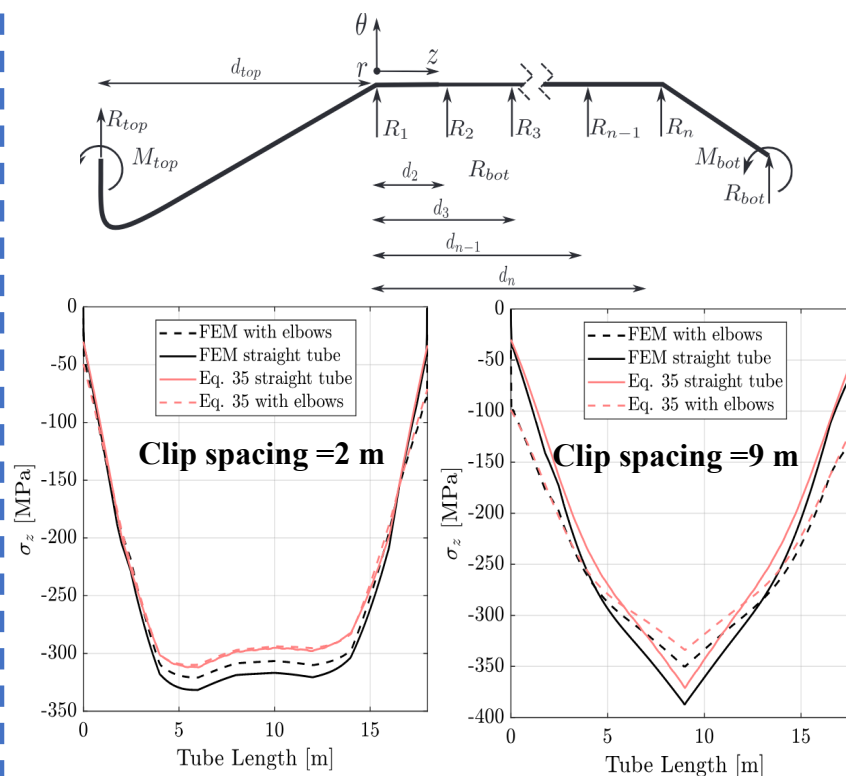
## ■ 吸热器力学性能研究

- 早期热应力解析模型主要基于**热弹性假设**，可获得**接近FEM的应力预测结果**，并显著降低计算成本
- 随着对实际运行条件的考虑，利用梁变形法进一步**引入机械支撑约束**对吸热管变形及应力的影响
- 针对高温循环运行过程中的**材料非线性行为**，进一步考虑**弹塑性变形及蠕变松弛效应**，实现更真实工况下的热-力响应预测

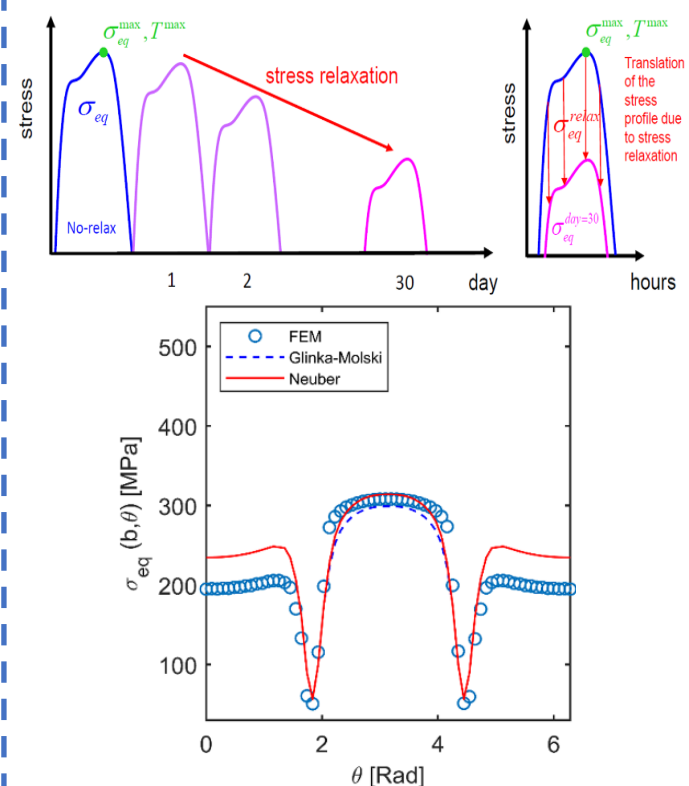
### 吸热器力学性能研究



Logie et al. (2018), *Solar Energy*



Montoya et al. (2020), *Solar Energy*



González-Gómez et al. (2021), *Solar Energy*

■ 吸热器安全可靠研究

- 吸热器安全可靠研究通常基于半解析热性能耦合力学模型，通过蠕变和疲劳损伤模型预测长期运行寿命
- 然而现有方法受限于热性能模型的空间分辨能力，通常仅选取少量代表性吸热管开展损伤分析，难以实现全尺寸吸热器损伤分布及危险区域的快速识别

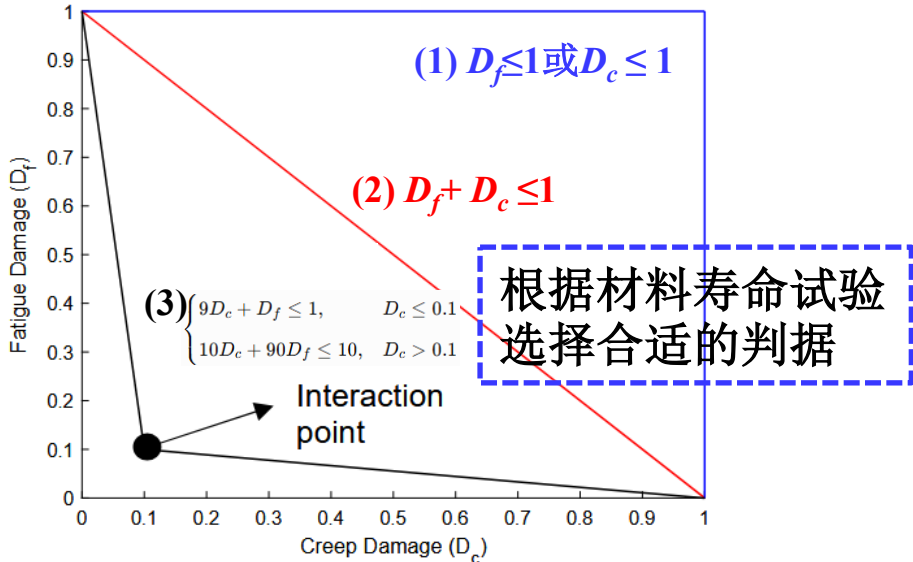
安全可靠分析

应力幅计算疲劳损伤 $D_f$       应力及温度计算蠕变损伤 $D_c$

$$D_f = \sum_{j=1}^p \left( \frac{n}{N_f} \right)_j$$

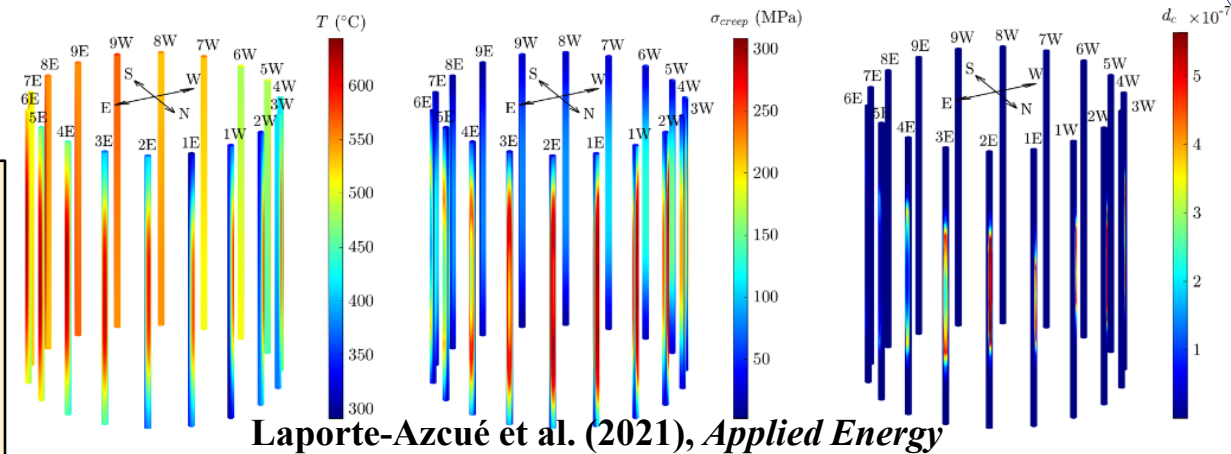
$$D_c = \sum_{k=1}^q \left( \frac{t}{T_d} \right)_k$$

常用的三种蠕变-疲劳交互失效判据

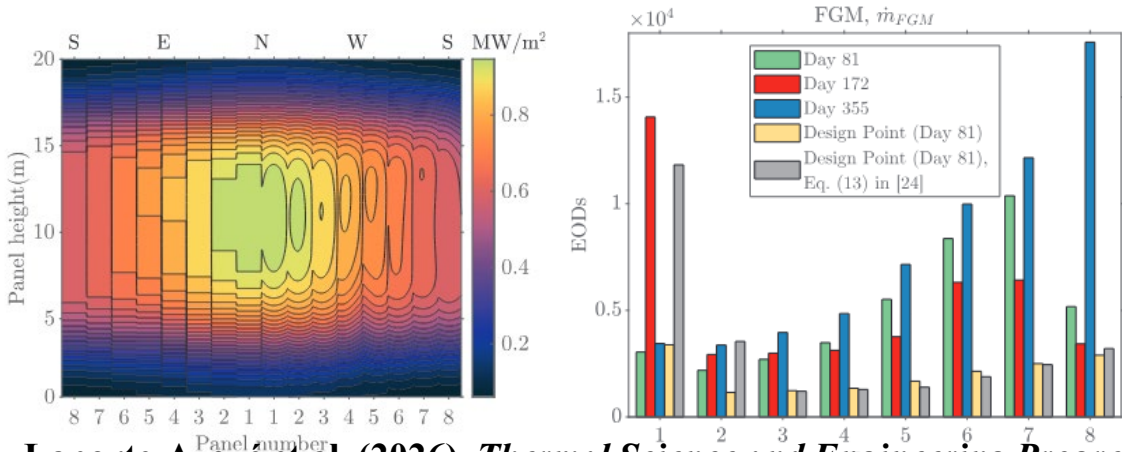


Gentile et al. (2022), *Solar Energy*

吸热器损伤及寿命分布



Laporte-Azcué et al. (2021), *Applied Energy*

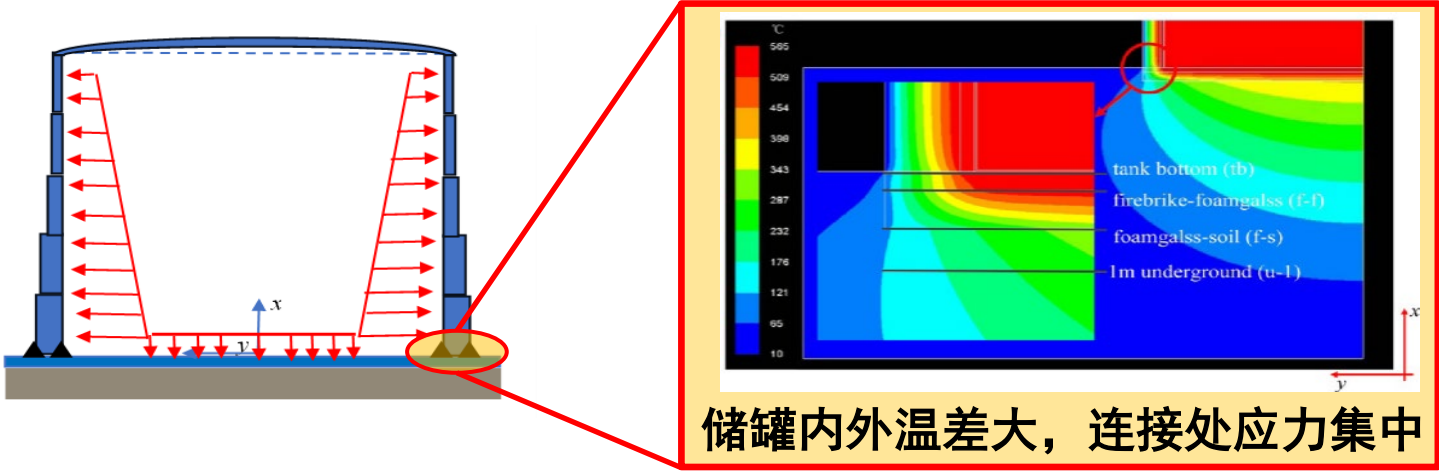
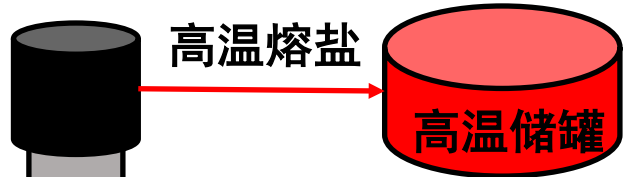


Laporte-Azcué et al. (2026), *Thermal Science and Engineering Progress*

■ 储热子系统

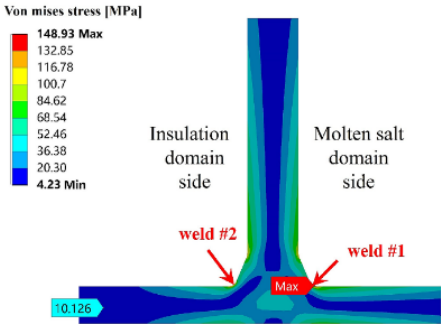
- 熔盐储罐承担热能的**储存与释放**，是塔式光热电站实现**连续稳定发电**和**灵活调峰**的核心装备
- 高温熔盐与环境温差显著，易在储罐局部形成**较大温度梯度**，引发**热变形与应力集中**

储热过程

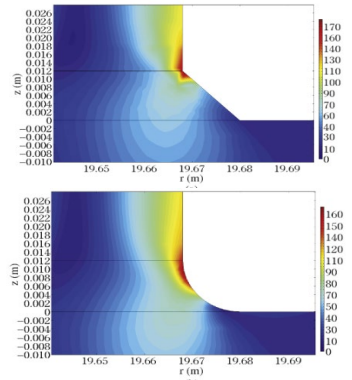


研究热点

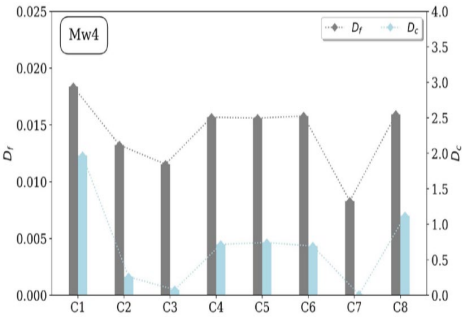
热-力性能研究



结构优化



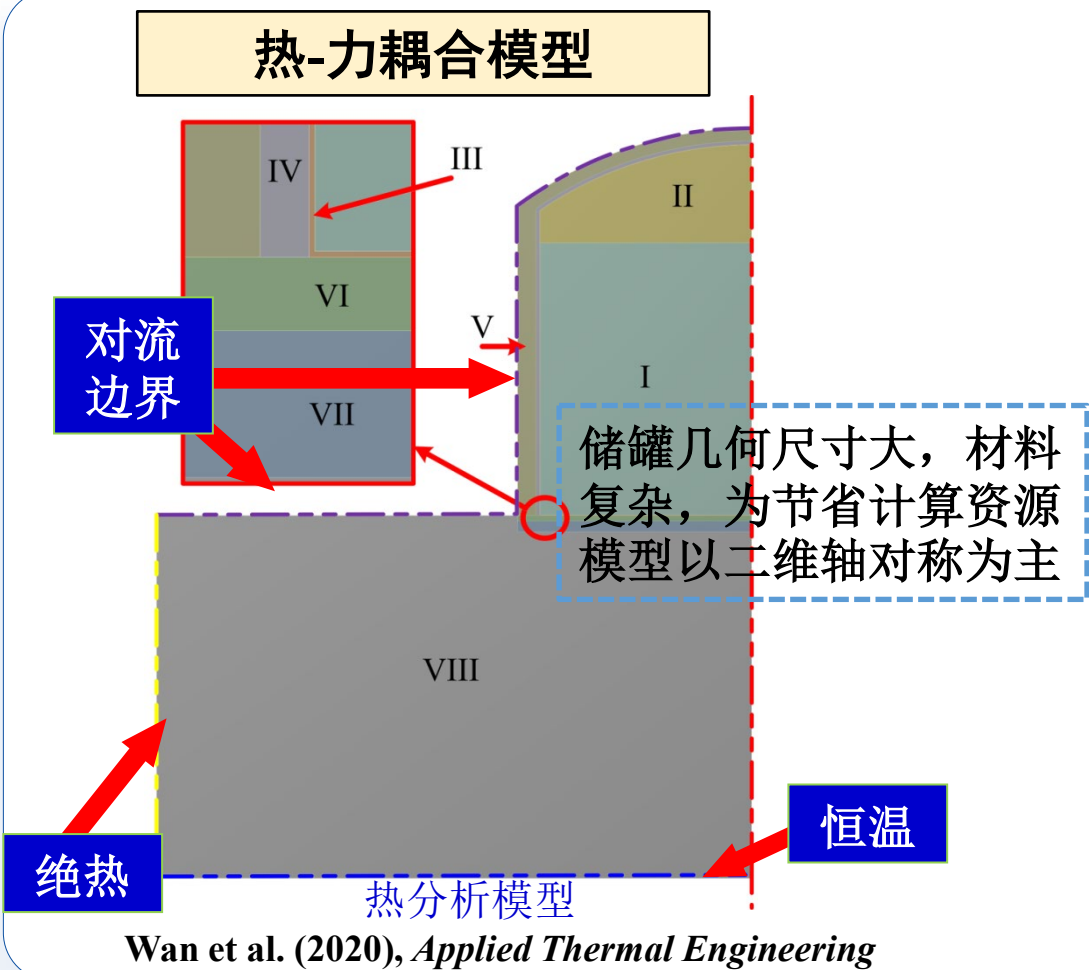
安全可靠性能研究



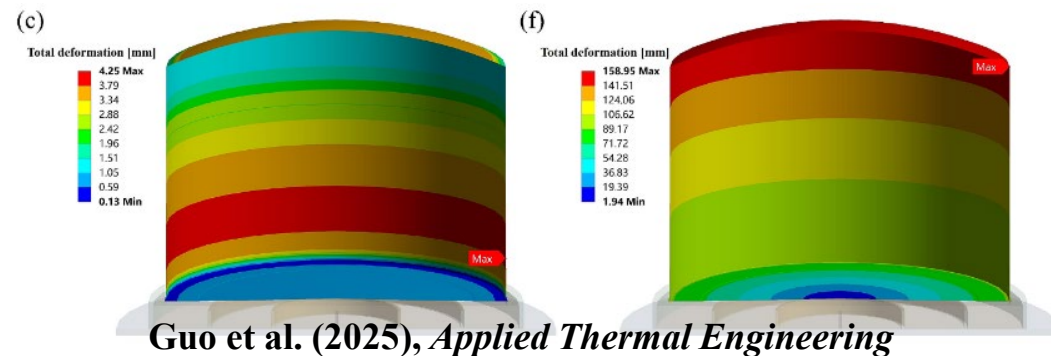
## ■ 高温储罐热-力分析

- 目前储罐的热-力分析主要基于**CFD-FEM耦合分析**，建立熔盐、罐体、保温层等模型
- 研究重点集中于**液位高度、基础刚度、热边界条件**对储罐温度场、热变形和应力分布的影响

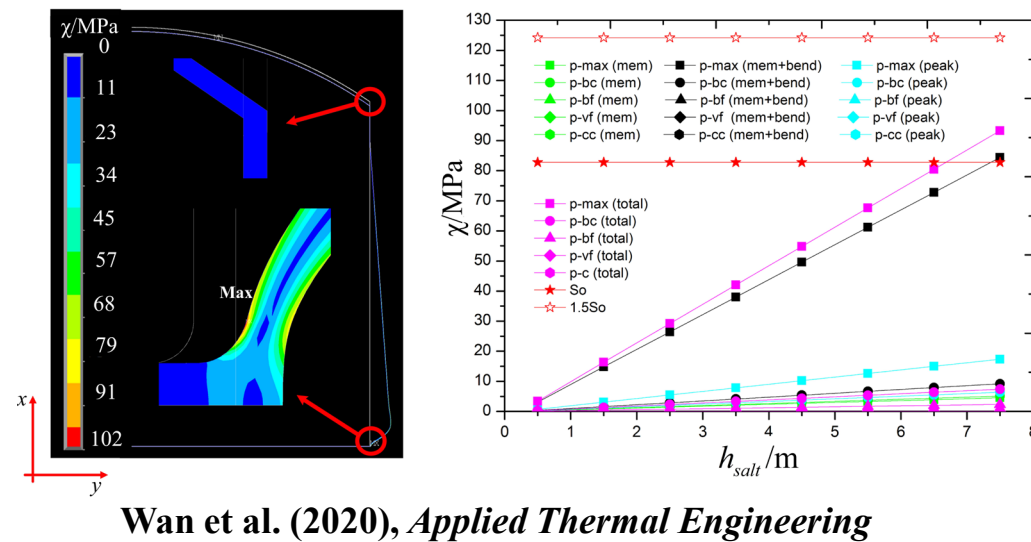
### 热-力耦合模型



### 热变形分析



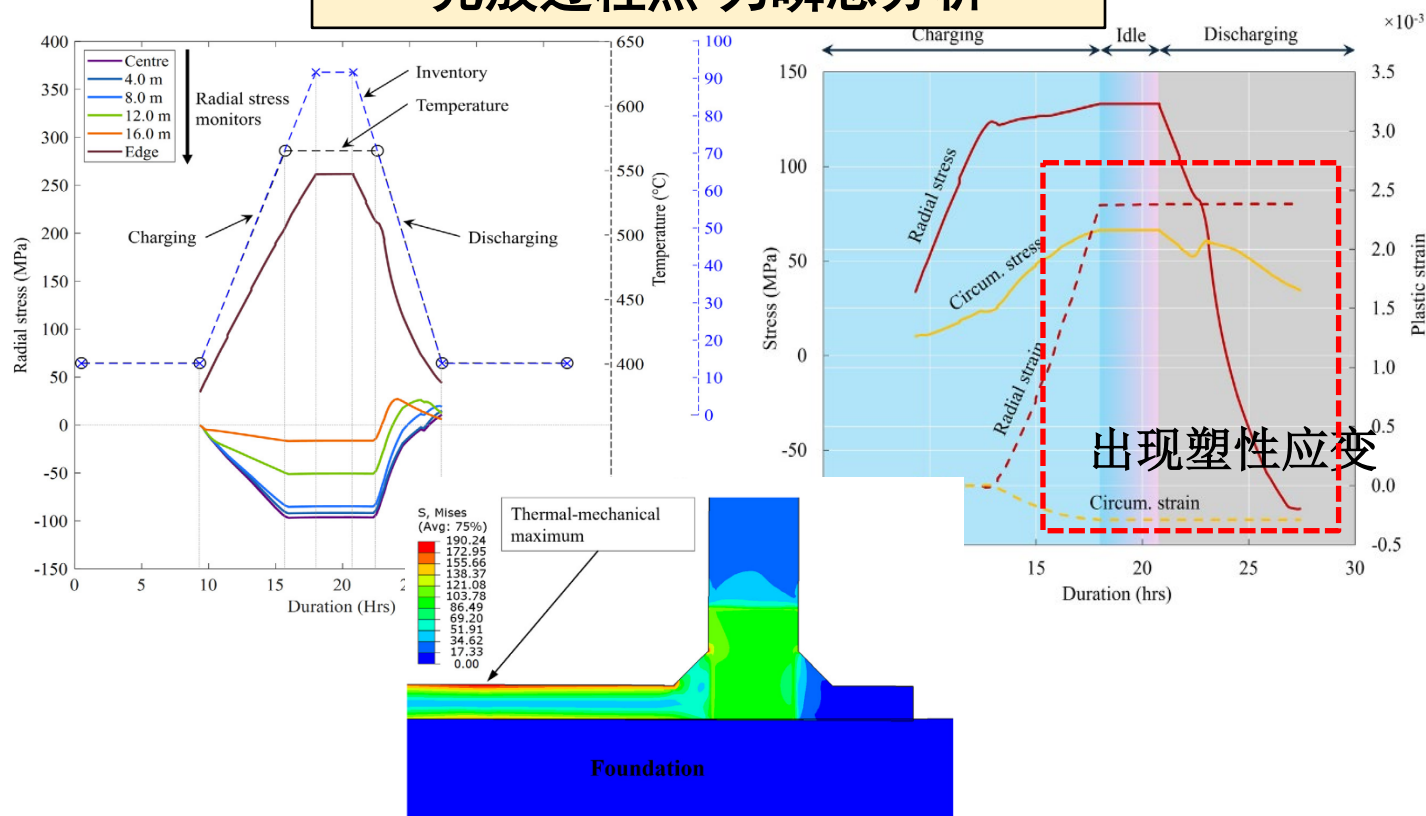
### 应力集中分析



## ■ 高温储罐充放过程与安全可靠分析

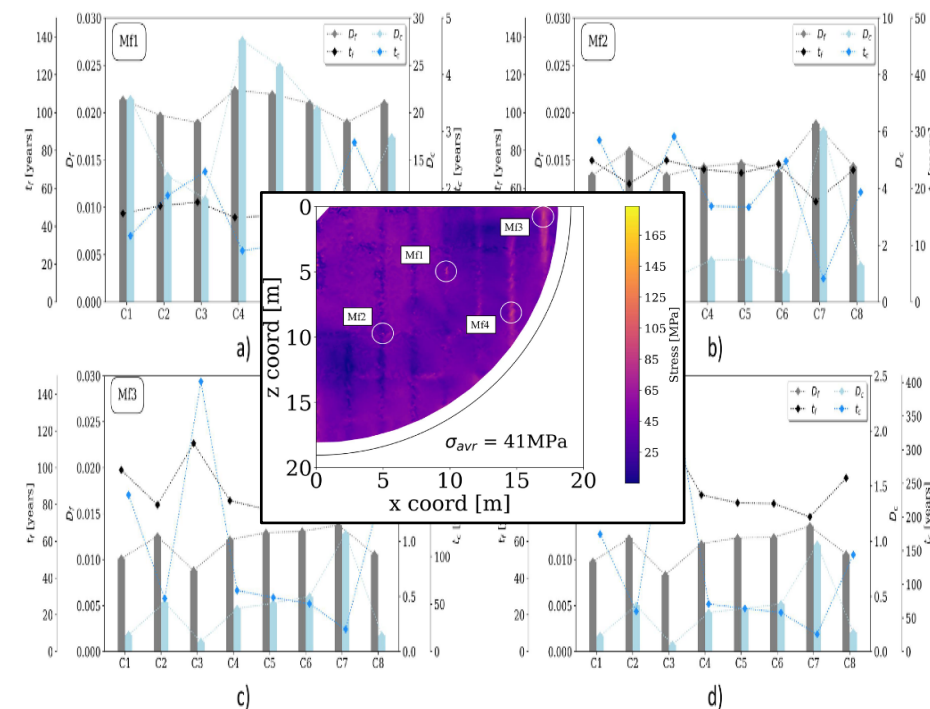
- 准稳态研究逐渐转向熔盐充放过程应力响应及可靠性分析
- 受储罐尺度大、结构复杂及多物理场耦合计算成本限制，目前仍难以开展多工况充放循环下应力幅、残余应力演化及长期安全可靠研究

### 充放过程热-力瞬态分析



Mishra et al. (2026), *Applied Thermal Engineering*

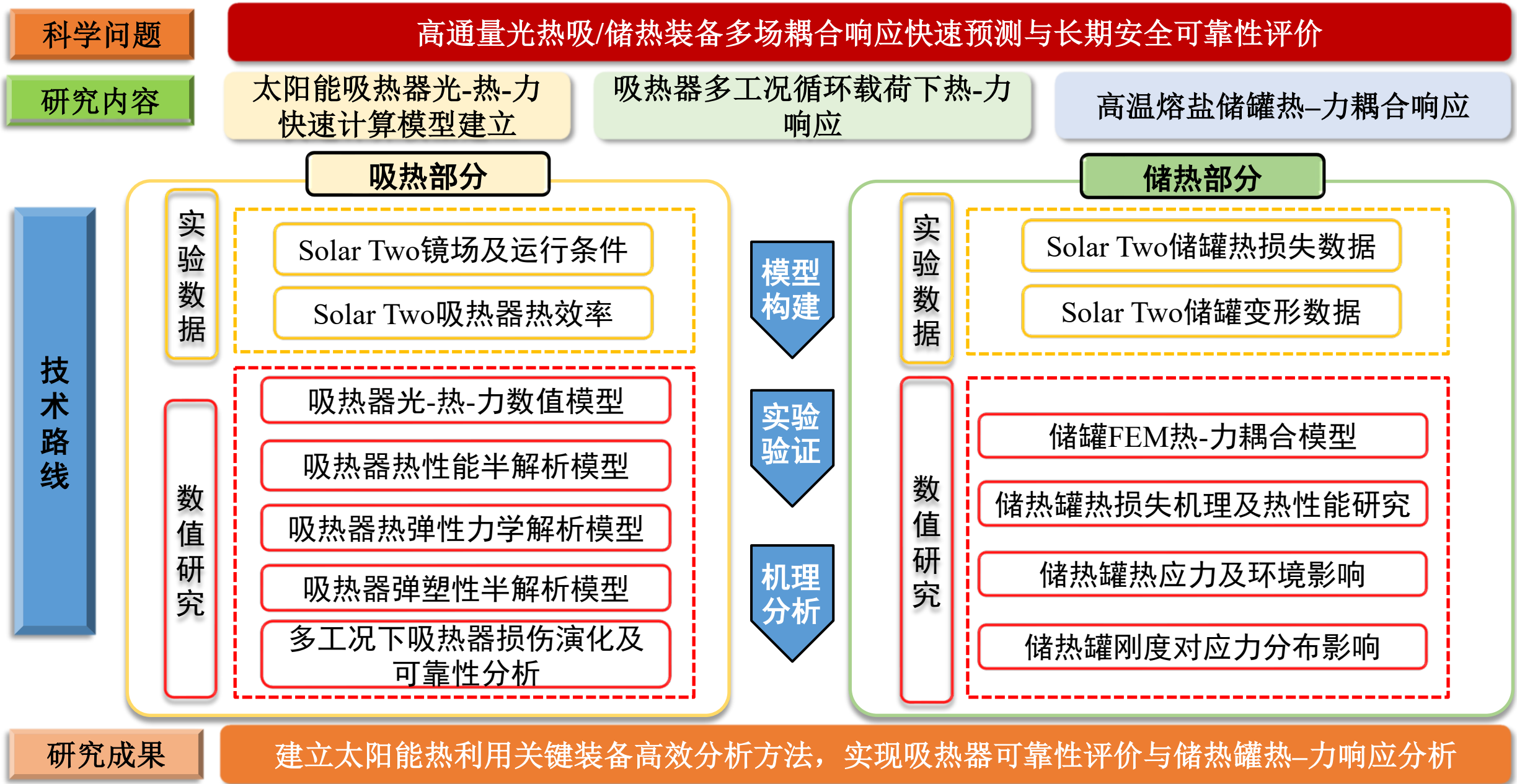
### 安全可靠分析



Torres-Madroño et al. (2026), *International Journal of Thermofluids*

## ■ 吸/储热关键装备研究总结与发展需求

- 1.吸热器热性能研究已形成**CFD高精度分析与半解析快速预测**两类技术路线，当前发展重点是**兼顾全场温度**预测精度与多工况**计算效率**
- 2.吸热器力学研究已由**热弹性分析逐步发展**至考虑支撑约束、材料非线性及循环载荷影响的热力响应预测，**快速力学响应分析**成为重要发展方向
- 3.吸热器可靠性研究逐渐由**局部关键管**损伤评价向**全尺寸危险区域**识别与寿命预测方向发展
- 4.熔盐储热罐研究已覆盖**热性能与结构响应分析**，长期循环运行条件下热-力耦合行为及结构安全评价仍是重要研究方向



# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

### 2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

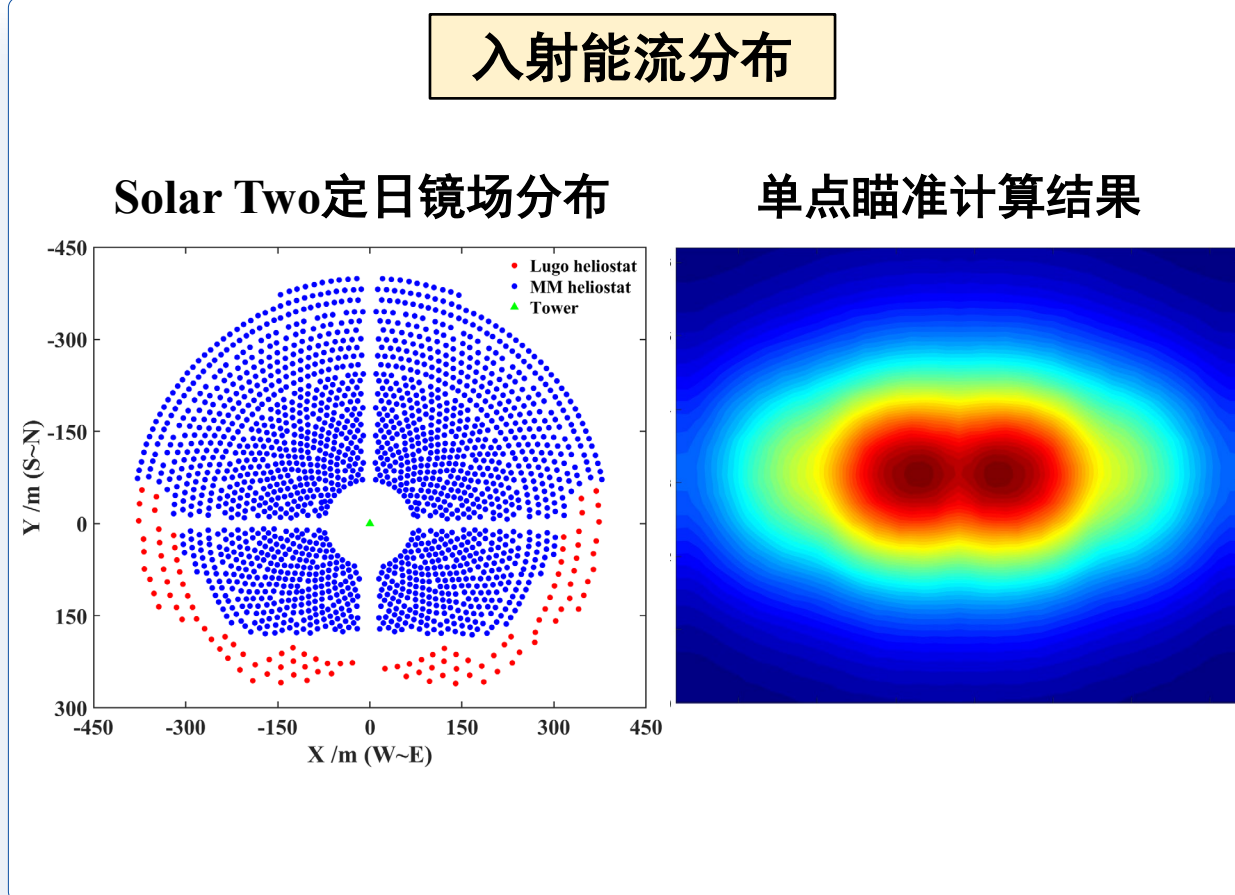
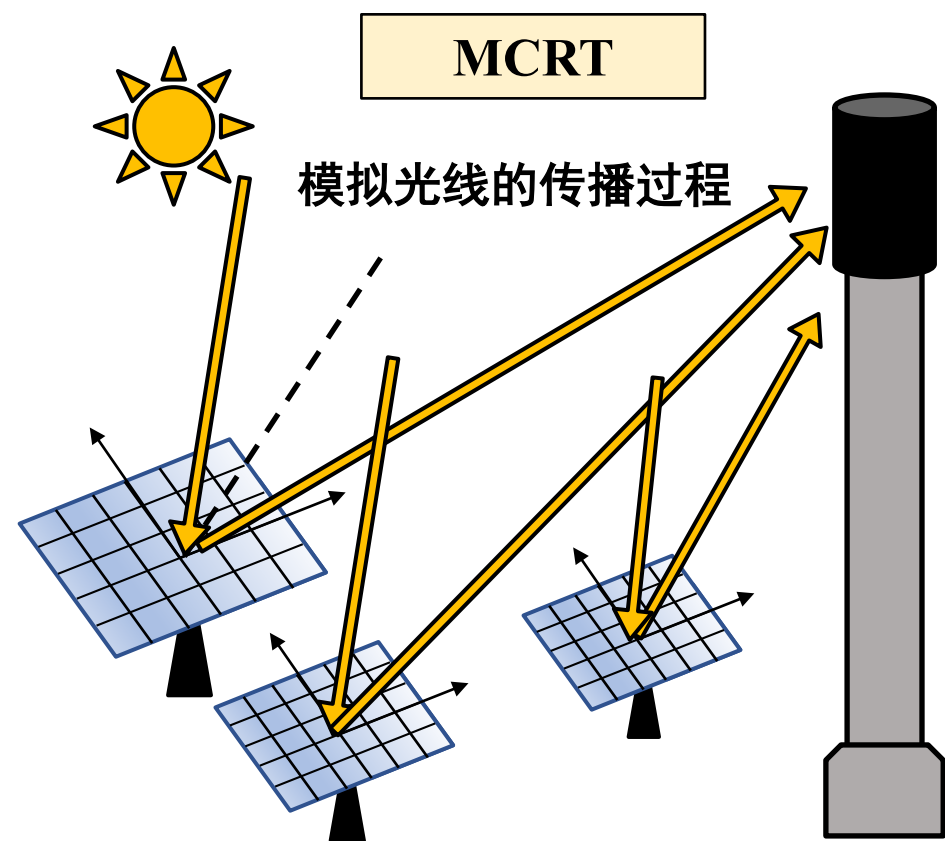
### 2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

### 2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

### ■ 吸热器光学模型构建

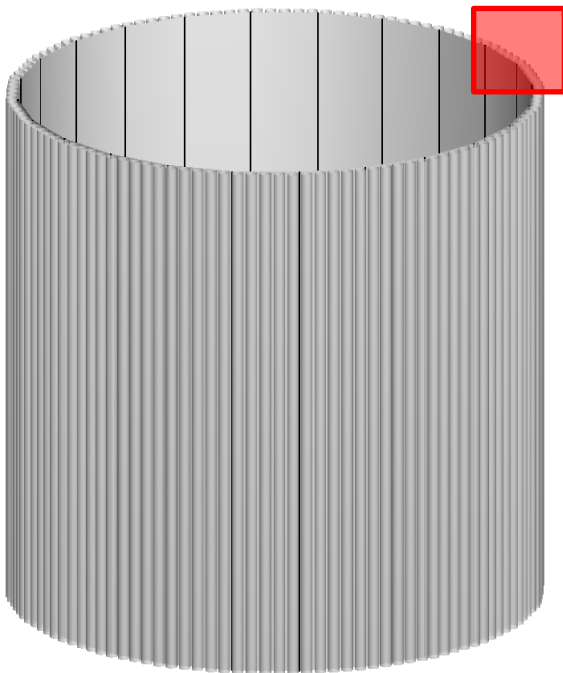
- 基于蒙特卡洛光线追迹法（**MCRT**），**随机发射大量光线**，模拟太阳辐射在定日镜场的**反射、遮挡与吸收过程**，从而得到吸热器的**入射能流分布**



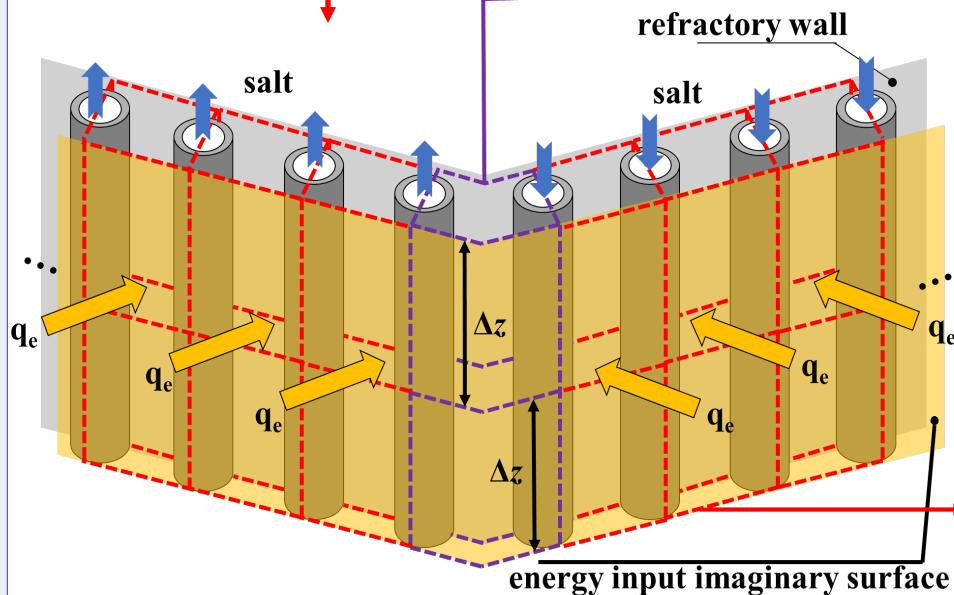
### ■ 吸热器热性能模型构建

- 基于MATLAB自主开发了吸热器简化热性能模型SRHTM
- 针对吸热器中吸热管数量多、难以进行全场计算的问题，将大量吸热管归纳为两类典型管道
- 同类管道具有相同计算方法，仅边界条件不同，从而显著提高计算效率

吸热器几何结构

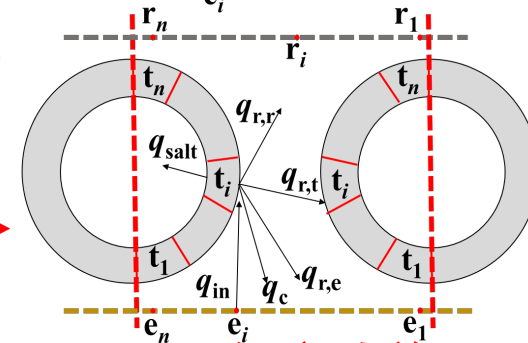
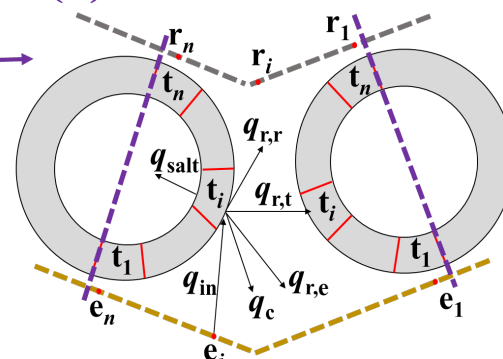


离散化策略



*Simplified Receiver Heat Transfer Model, SRHTM*

(1) 相向流动单元



(2) 同向流动单元

关键离散变量

轴向离散量:  $z_n$

入射面离散量:  $e_n$

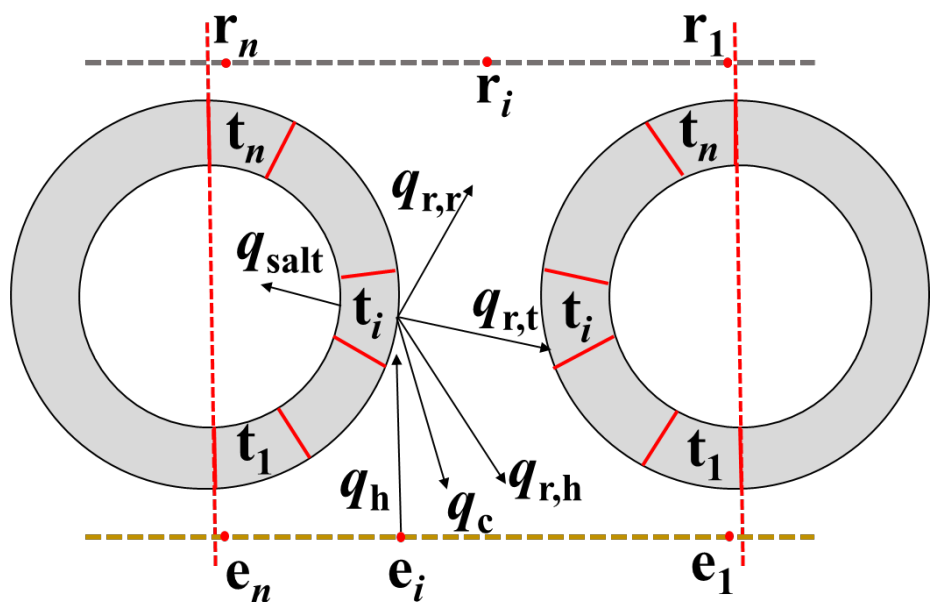
管壁离散量:  $t_n$

耐火墙离散量:  $r_n$

### ■ 吸热器热性能模型构建

- 通过细化所有面的离散程度，提高了辐射和对流的计算精度
- 采用耦合求解策略，计算辐射换热、对流换热及熔盐吸热过程

计算单元截面



单管段微元热性能计算

初始化壁温

#### 辐射计算

- 交叉弦法计算面单元间角系数
- 净辐射法计算面单元间的净辐射热流

#### 对流及熔盐吸热量计算

- 管外经验关联式计算自然及强制对流
- Gnielinski关联式计算熔盐吸热量

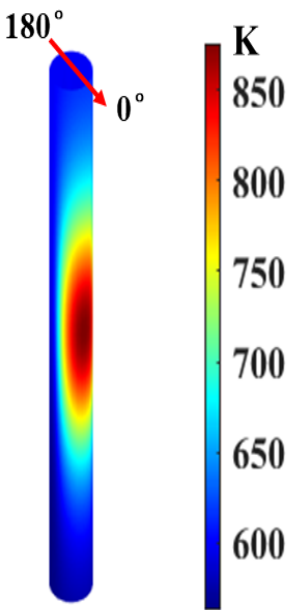
#### 管壁温度更新

- 利用熔盐吸热量更新熔盐温度
- 牛顿冷却公式更新壁面温度

■ 吸热器热弹性力学模型构建

- 最小二乘法还原吸热管整体温度，根据应力解析解求出径向、周向应力
- 利用传递矩阵法，可求出带支撑和不带支撑的轴向应力

SRHTM获得  
内外壁面温度



还原温度场

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0 \quad \text{稳态热传导方程}$$

调和方程解

$$T_\theta(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \underbrace{A_n r^n + B_n r^{-n}}_{\text{最小二乘法求解}} \cos n\theta + \underbrace{(C_n r^n + D_n r^{-n})}_{\text{最小二乘法求解}} \sin n\theta \right)$$

最小二乘法求解

二维应力解析解

$$\sigma_r = K \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[ -\ln \frac{r_o}{r} - \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left( 1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_{oi}}{r_i} \right] + K_\theta \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left( 1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \left( 1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right)$$
$$\sigma_\theta = K \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[ 1 - \ln \frac{r_o}{r} - \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left( 1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_o}{r_i} \right] + K_\theta \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left( 3 - \frac{r_i^2}{r^2} + \frac{r_o^2}{r^2} - \frac{r_i^2 r_o^2}{r^4} \right)$$

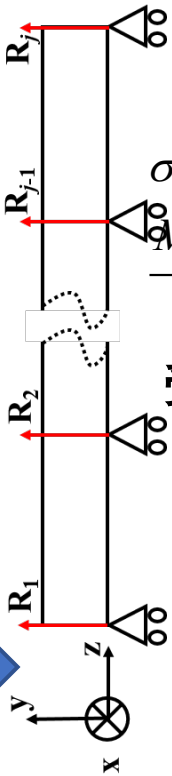
轴向应力

受温度、材料影响

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) + \alpha E [T_r(r) - T] + \frac{M_x \sin r + M_y \cos r}{I}$$

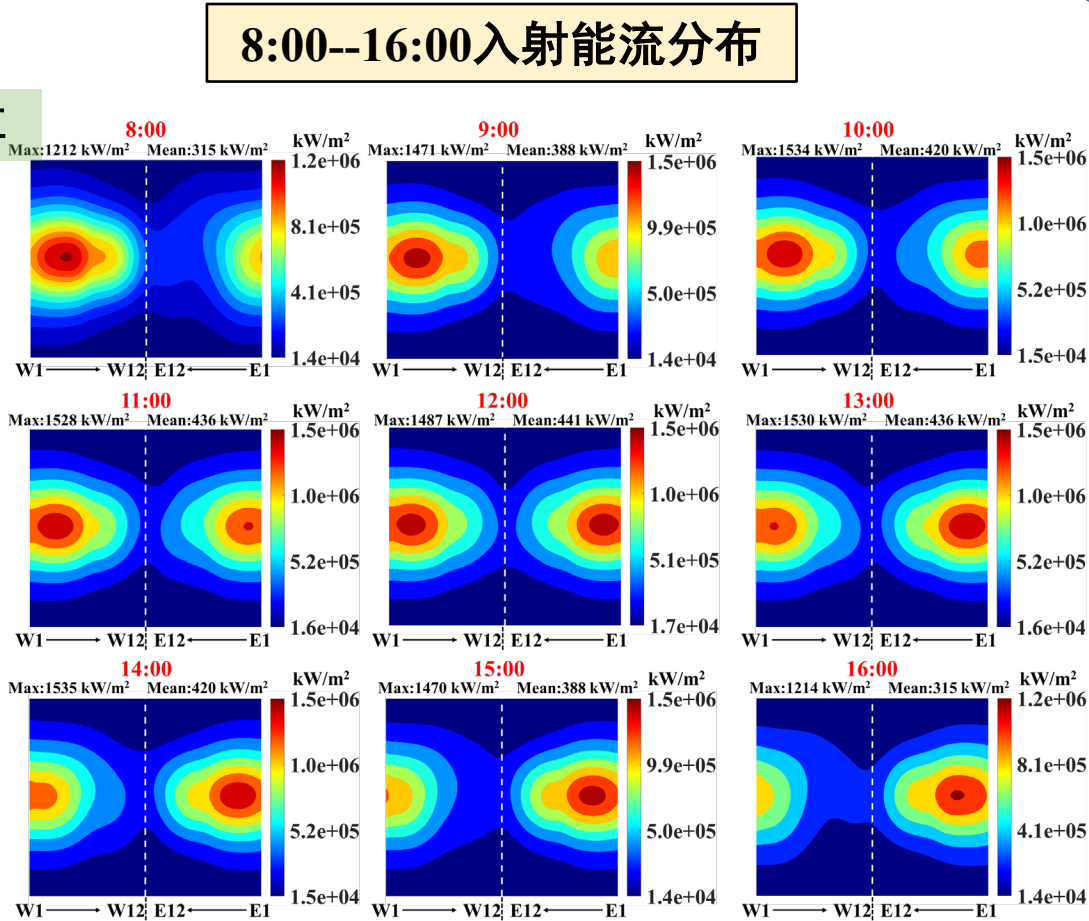
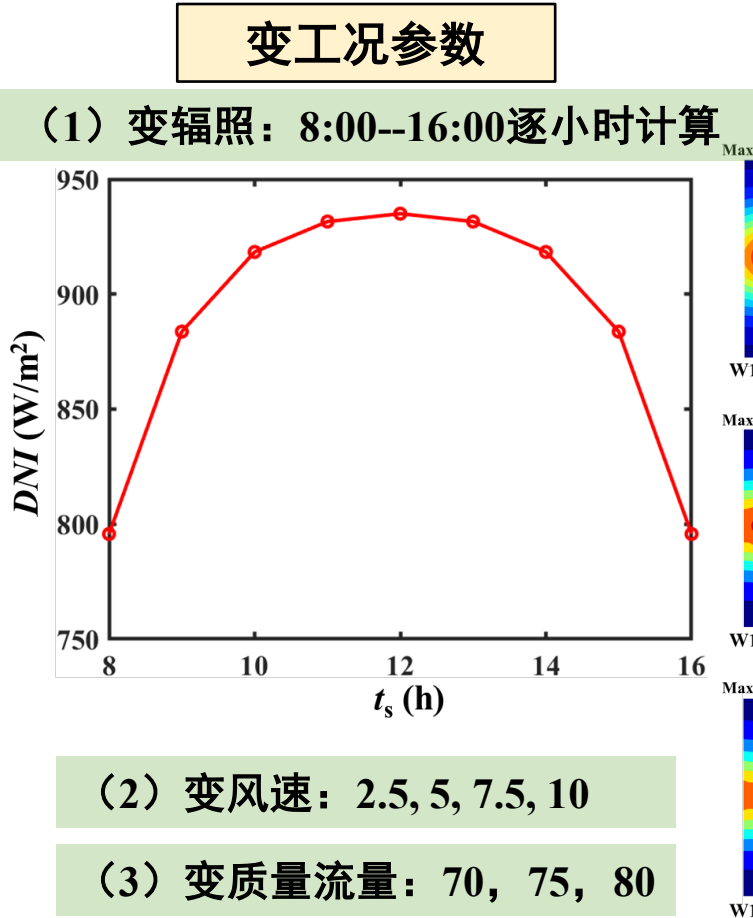
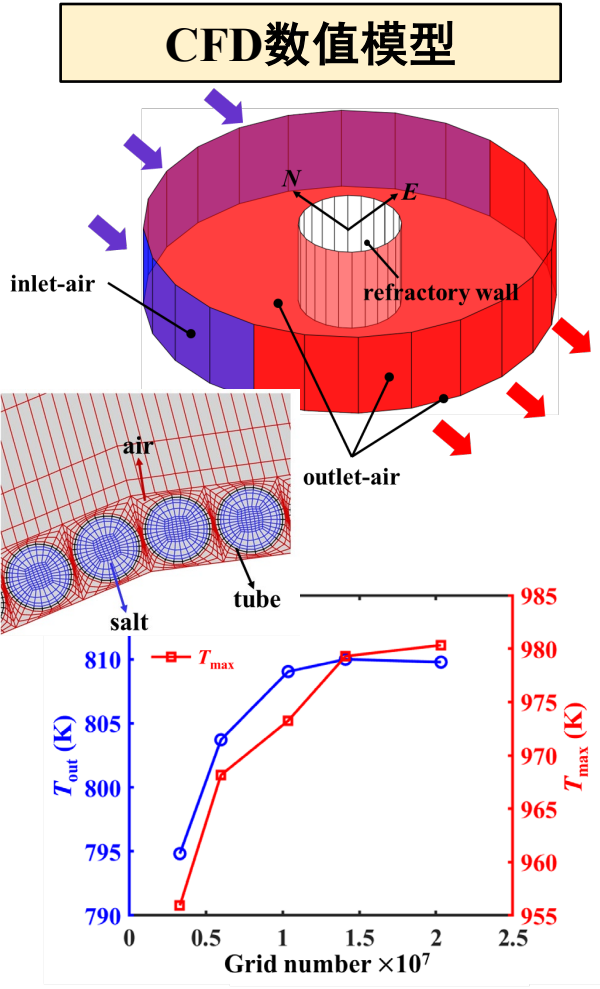
受温度、外部机械约束影响

传递矩阵法计算轴向应力



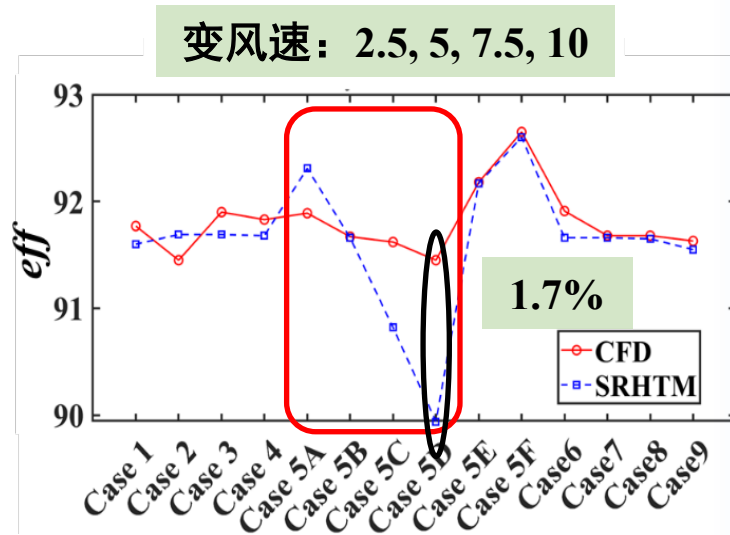
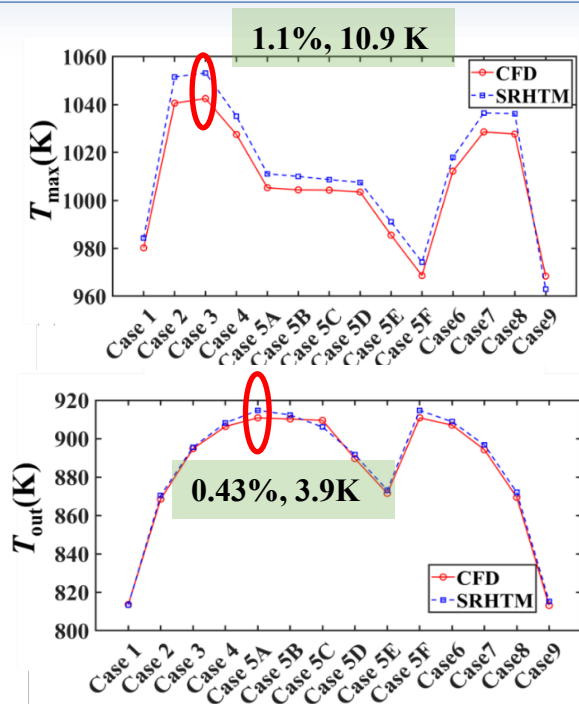
■ 太阳能吸热器光-热-力耦合数值模型

- 基于Solar Two吸热器结构及运行参数建立CFD参考模型，用于验证SRHTM的计算精度与适用性
- 通过**辐照强度**、**环境风速**及**熔盐质量流量**变化，开展多工况条件下模型预测能力验证

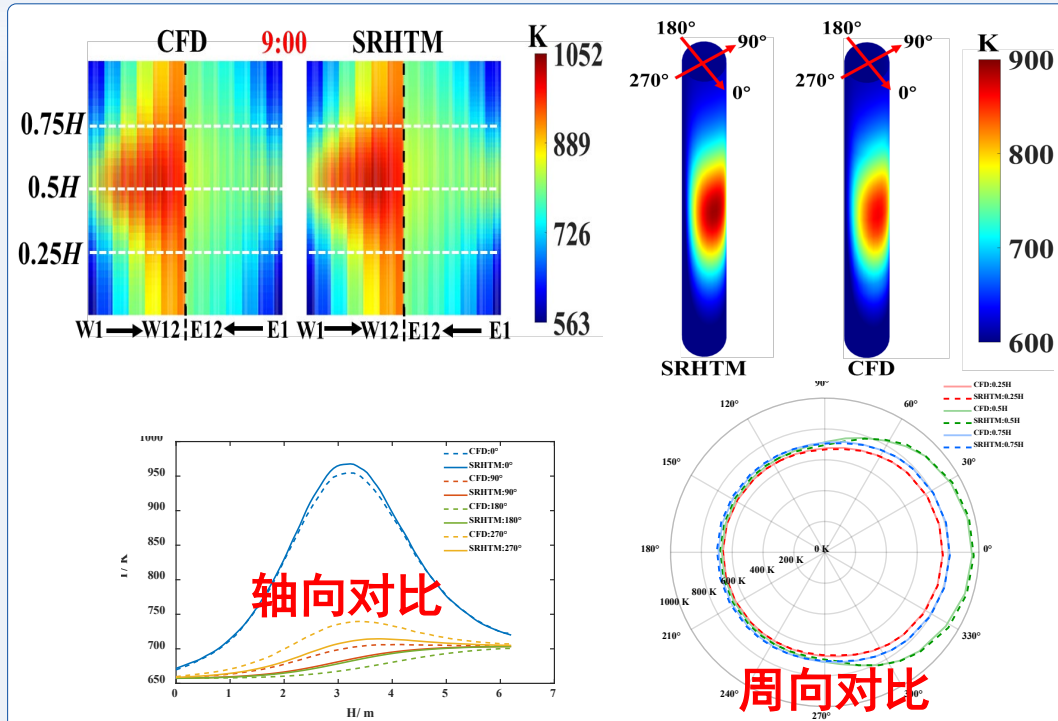


### ■ SRHTM计算精度验证

- 从**峰值温度和熔盐出口温度**来看，SRHTM与CFD情况**符合较好**，误差保持在较低水平
- 从**热效率**来看，SRHTM对**风速变化**较敏感，主要由于其对流换热采用**经验关联式**计算。但由于模型**耦合了辐射、对流和熔盐吸热**等多个过程，误差在各环节间有所分散，整体热效率预测误差仍较小
- 从吸热管局部分析可以看出，SRHTM温度预测偏高，但误差占比仅为**3.84%**
- 高估现象主要体现在靠近吸热器入口区域和中间高温区域，更**有利于应力的保守计算**



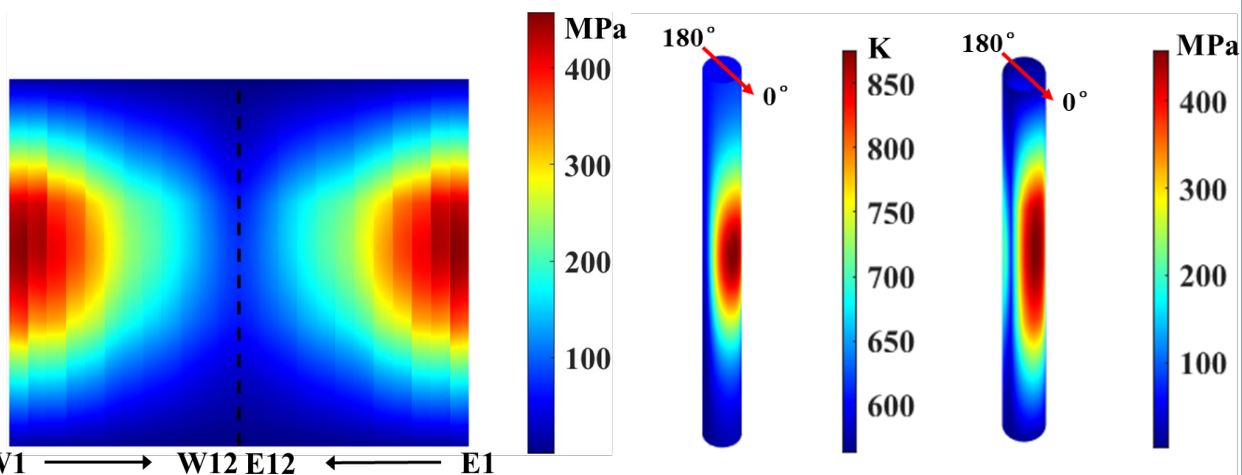
Li et al. (2026), *Applied Thermal Engineering*



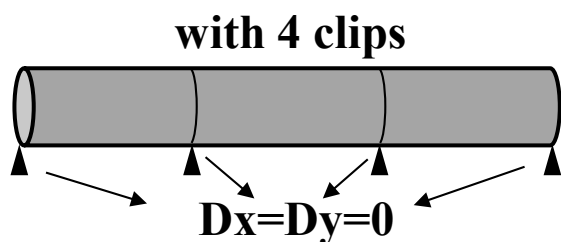
### ■ 吸热器热弹性应力分布及典型管验证

- 基于SRHTM获得吸热器温度场，建立热弹性力学模型分析吸热器应力响应
- 针对最大应力的典型吸热管，进一步分析考虑材料温变属性下的等效应力和变形分布，并与FEM结果进行对比验证
- 等效应力沿轴向、周向分布和挠度沿轴向分布的最大误差分别为1.4%、3.0%和6.1%，验证热弹性模型的可靠性

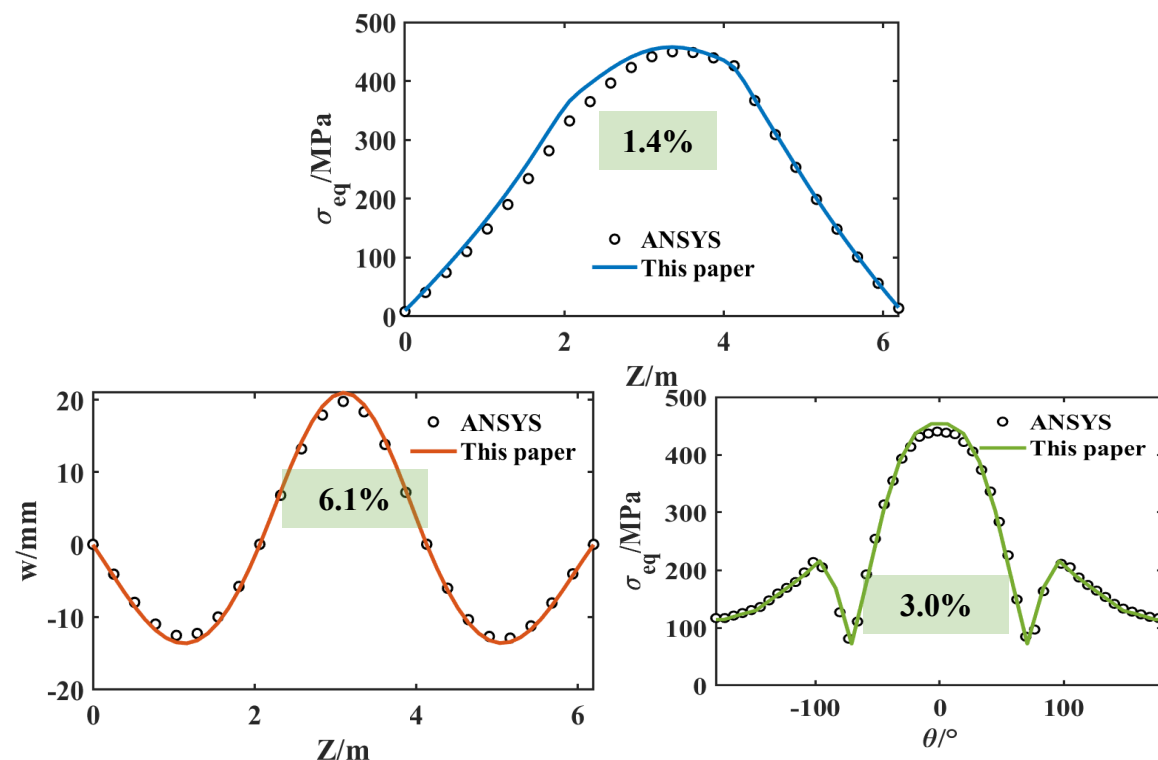
春分日下吸热器及峰值吸热管热力分布



FEM模型边界条件



考虑材料变温属性下的应力及挠度对比

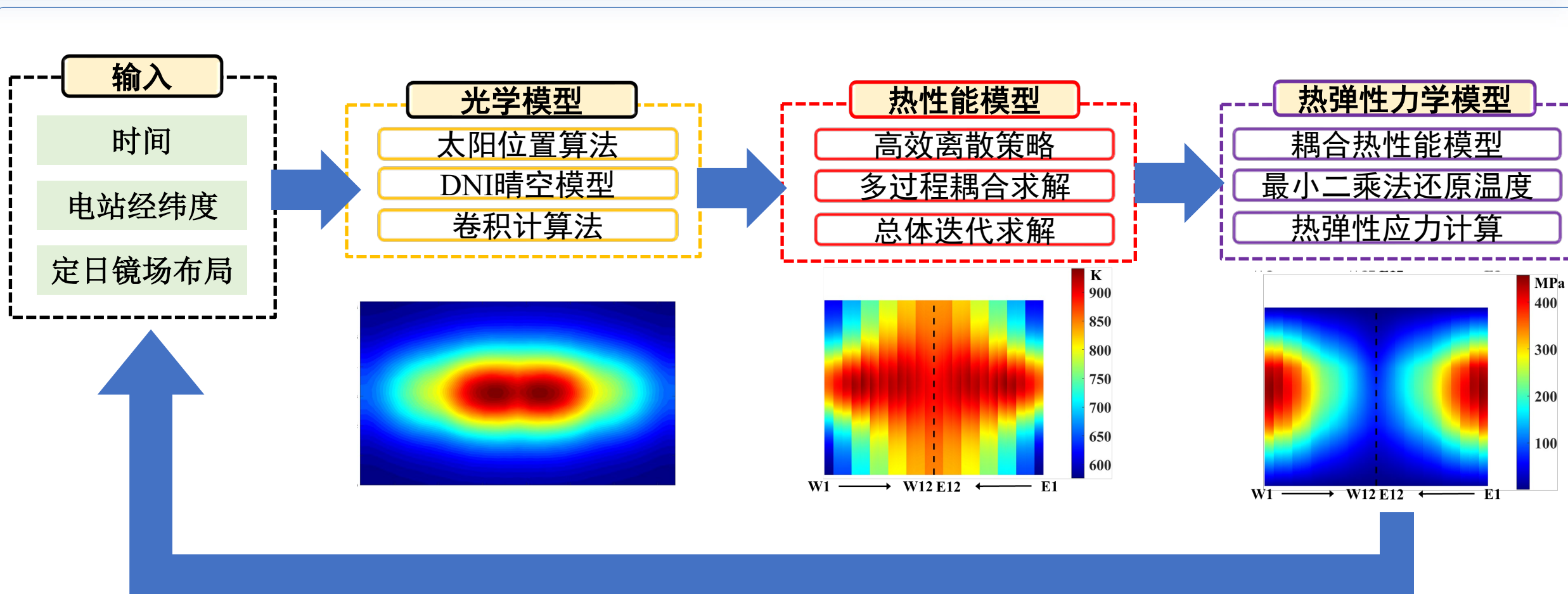


## 2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

27 / 53

### ■ 太阳能吸热器光-热-力快速计算流程

➤ 吸热器光-热-力快速计算模型的建立，为后续多工况热-力性能分析与安全可靠性能评估提供了方法基础



# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

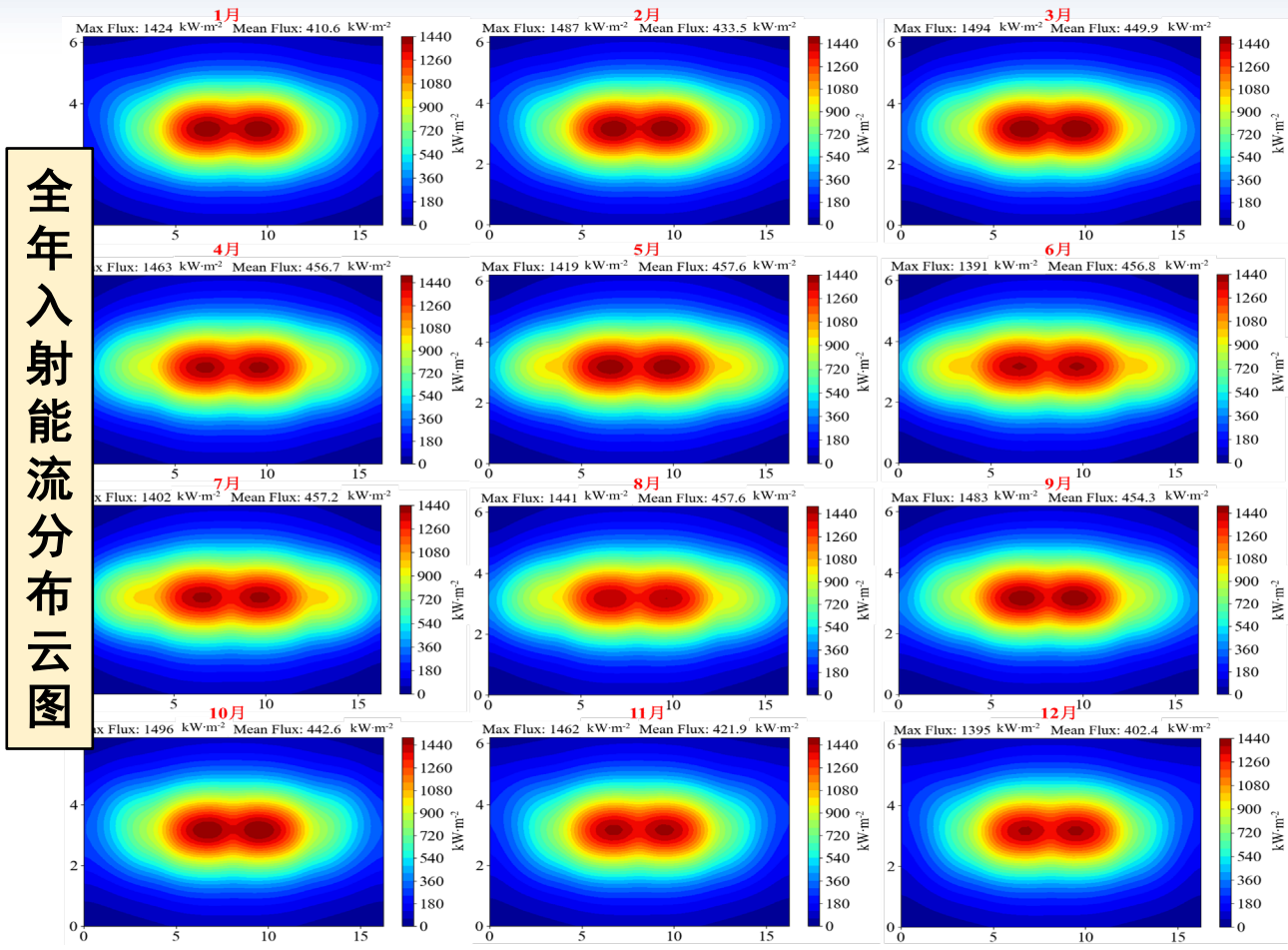
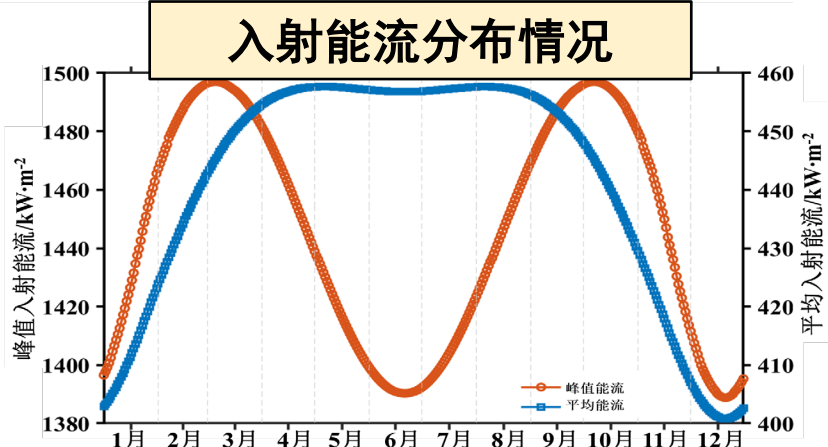
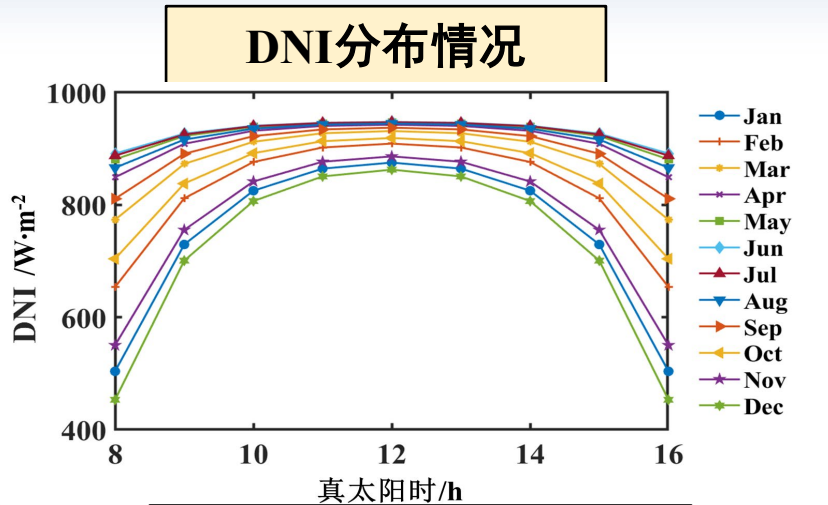
2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

■ 全年典型日下吸热器入射能流分布

- 峰值入射能流呈双峰分布，平均入射能流呈单峰分布
- 3月-10月入射均匀性较好，11月-次年2月均匀性较差
- 各月份正午能流分布形态相近，仅入射总能量水平不同，峰值能流主要出现在3月和10月

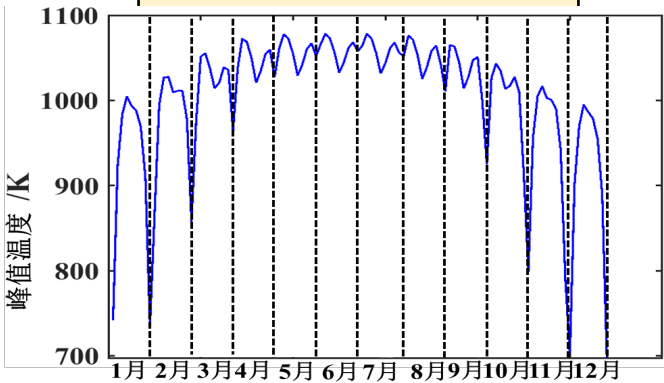


后续选择每月中进行分析

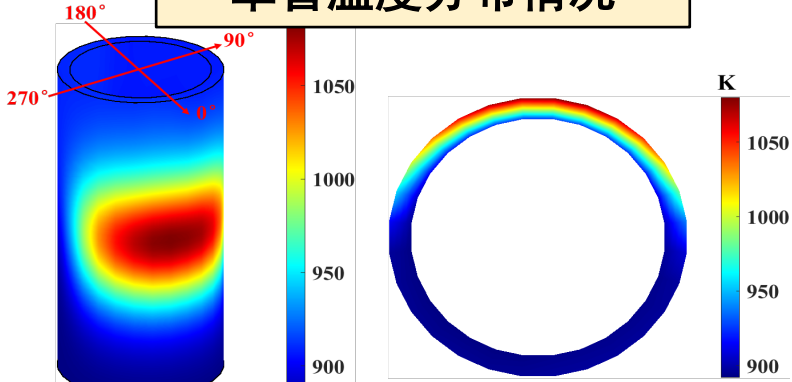
■ 全年典型日下吸热器温度分布

- 峰值温度**夏季整体较高且稳定**，其余月份波动较大；同时高温吸热管**并非固定位置**
- 各月温度分布形态基本一致，但**4-8月温度水平和范围更大**
- 受光面高温、背光面低温影响，单管温度**周向、径向和轴向都呈非均匀分布**

峰值温度分布情况



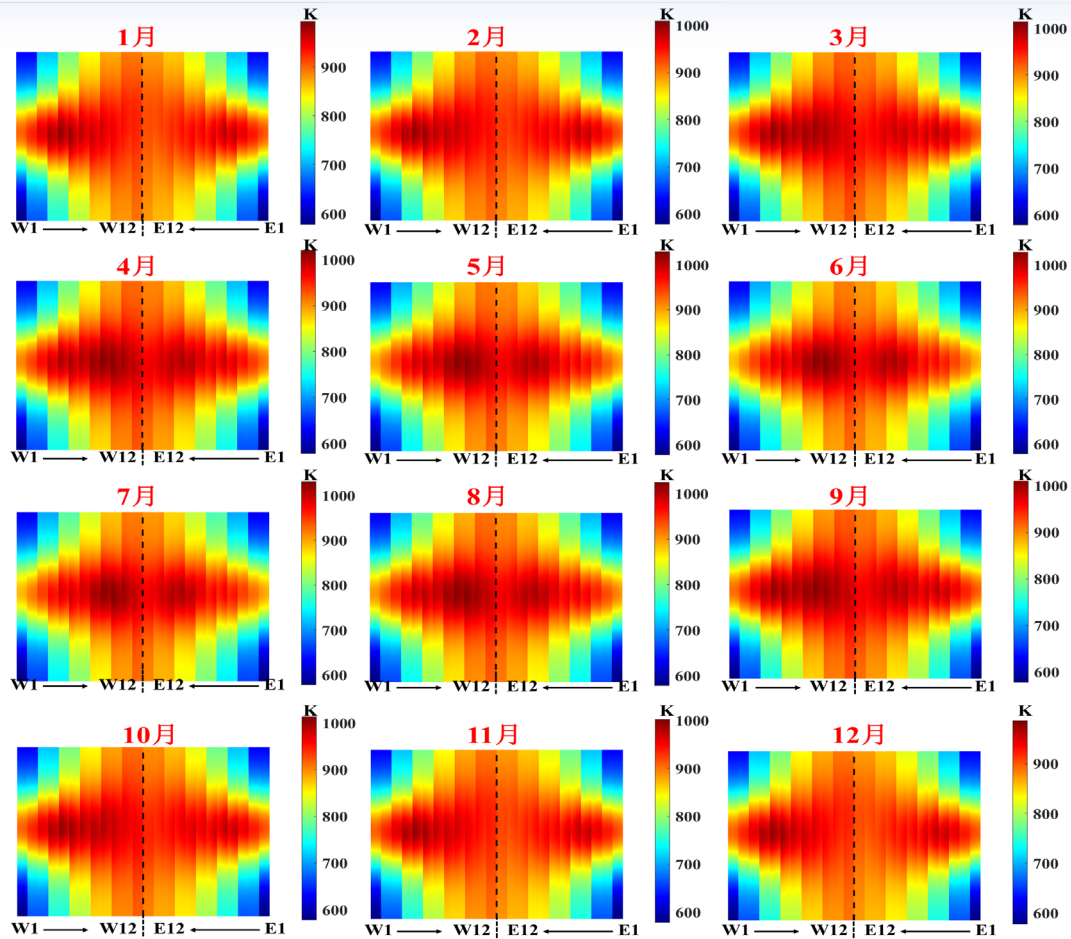
单管温度分布情况



(a) 整体温度分布

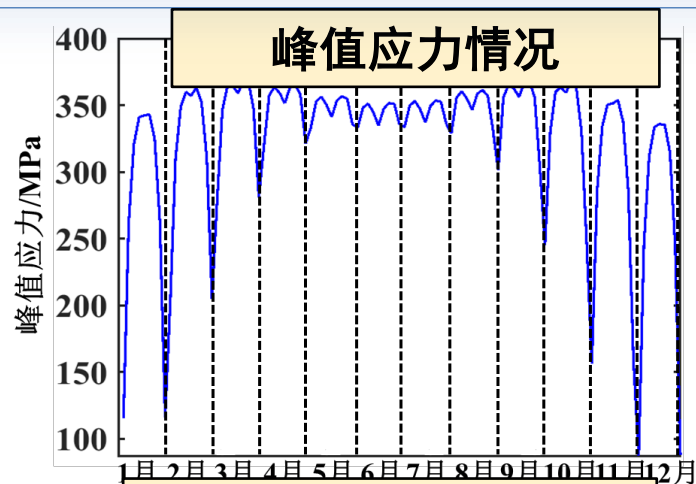
(b) 中间高度截面温度分布

全年吸热器温度云图

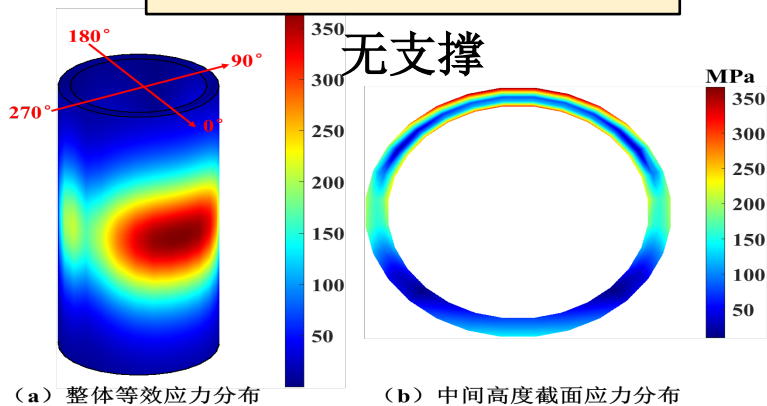


■ 全年典型日下吸热器热弹性应力分布

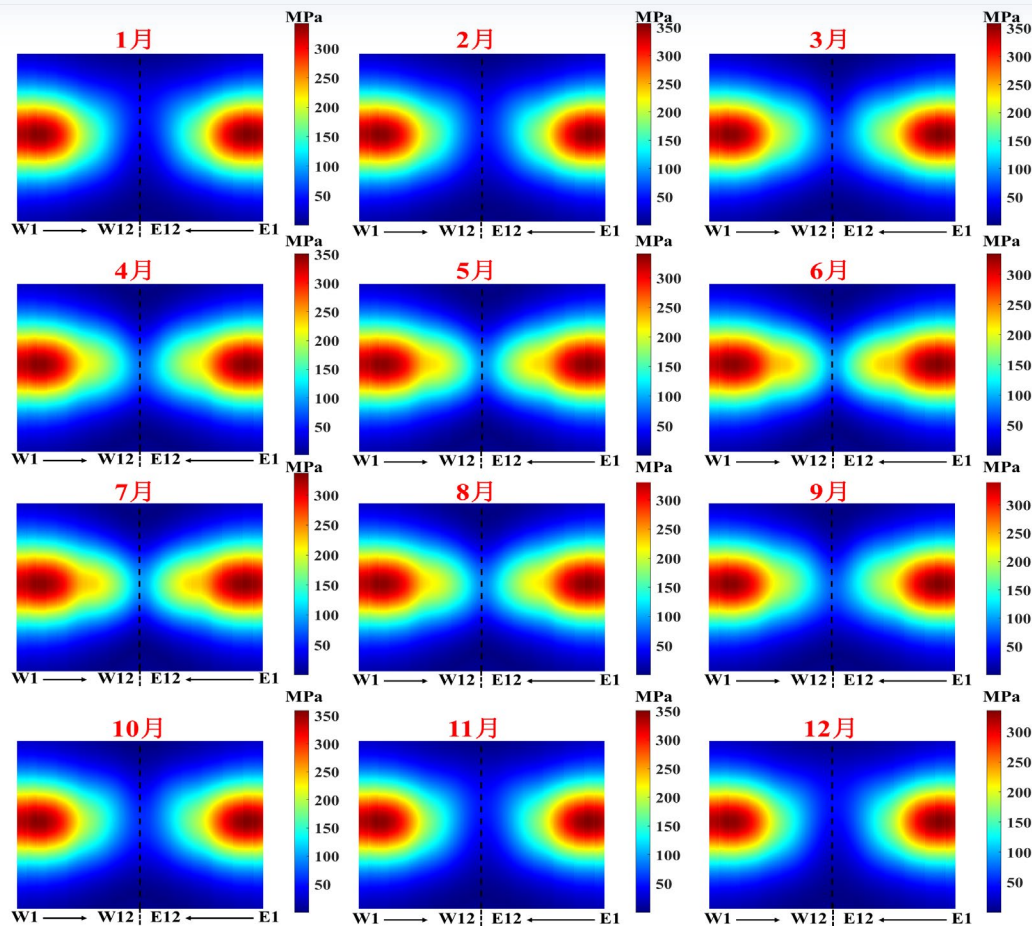
- 峰值应力在日内呈周期性变化，与峰值温度变化趋势相近，全年最大应力为368 MPa（3月13:00）
- 高应力区域主要集中于入口管屏及高入射能流区域，出口管屏区域温度虽高但应力较低
- 热应力主要由温度梯度决定，而不能认为高温管即为高应力管



单管应力分布情况



全年峰值应力分布云图



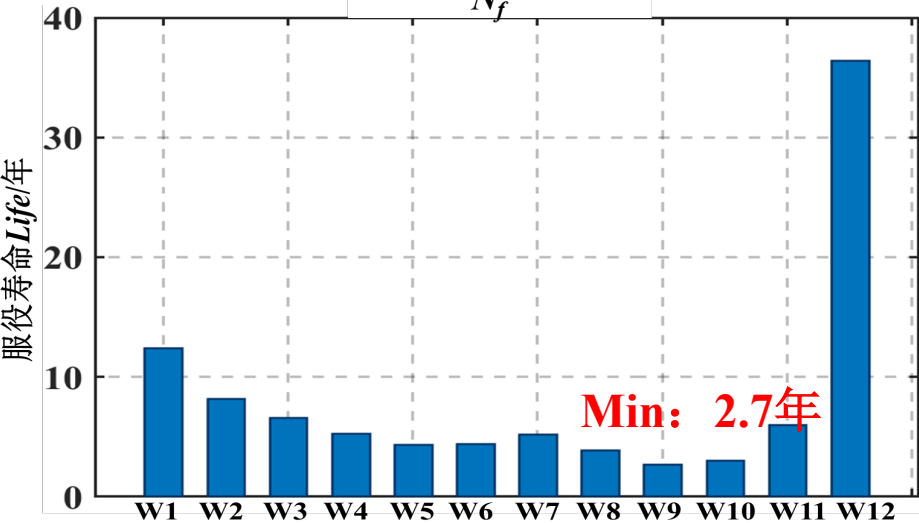
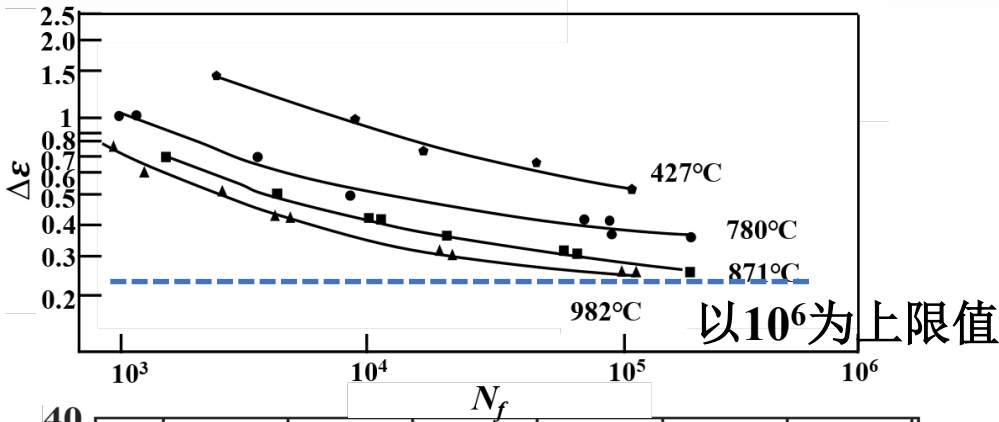
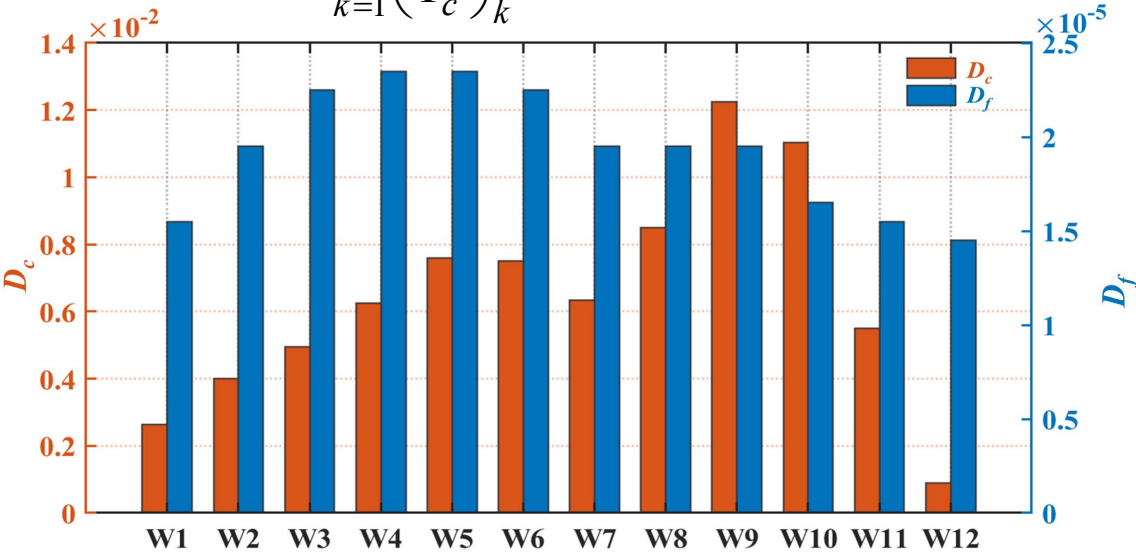
■ 吸热器安全可靠研究

- 总损伤以蠕变为主导 ( $D_c:10^{-2}$ ,  $D_f:10^{-5}$ ) , 蠕变损伤在**中后部管屏**较高, 疲劳损伤在W3-W6较高
- 当未引入镜场控制时, 寿命**呈两端高、中间低分布**, **W9最短约2.7年, W12最长36.4年**, 具备**分区优化潜力**

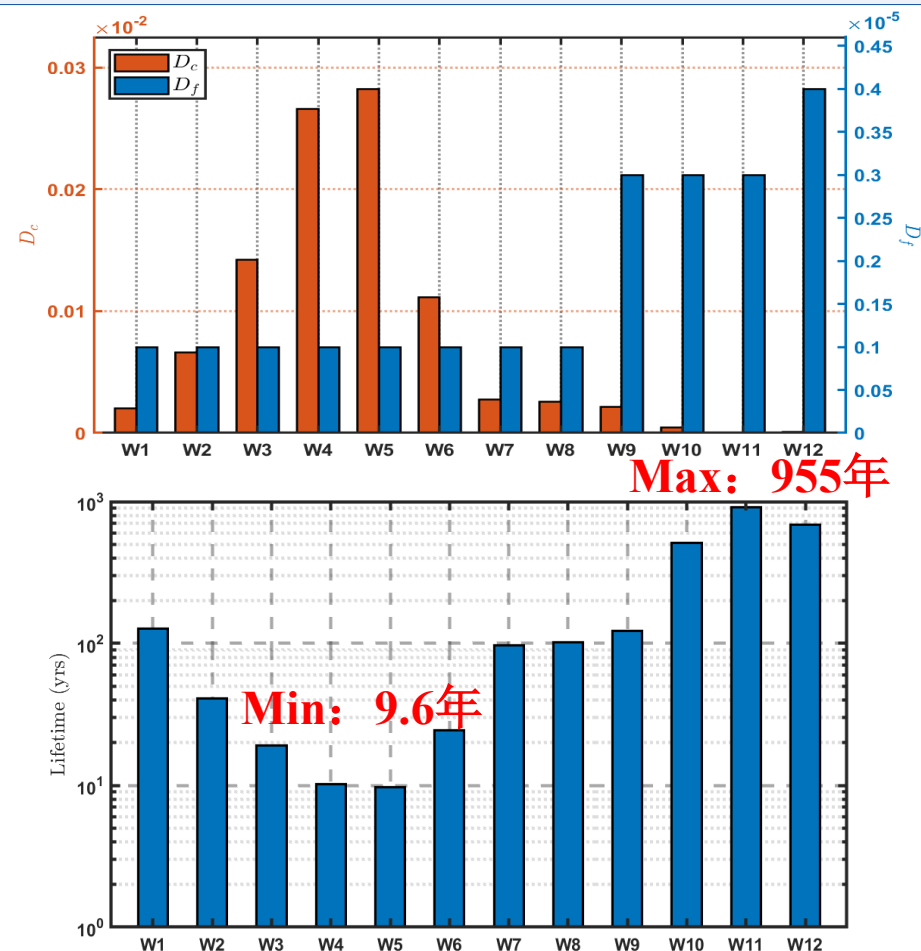
总损伤:  $D_f + D_c, D_s$

疲劳损伤:  $D_f = \sum_{j=1}^p \left( \frac{n}{N_f} \right)_j \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^{-b} + \varepsilon'_f N_f^{-c}$

蠕变损伤:  $D_c = \sum_{k=1}^q \left( \frac{t_d}{T_c} \right)_k \frac{d\varepsilon^{\text{in}}}{dt} = A \sigma^n t^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$



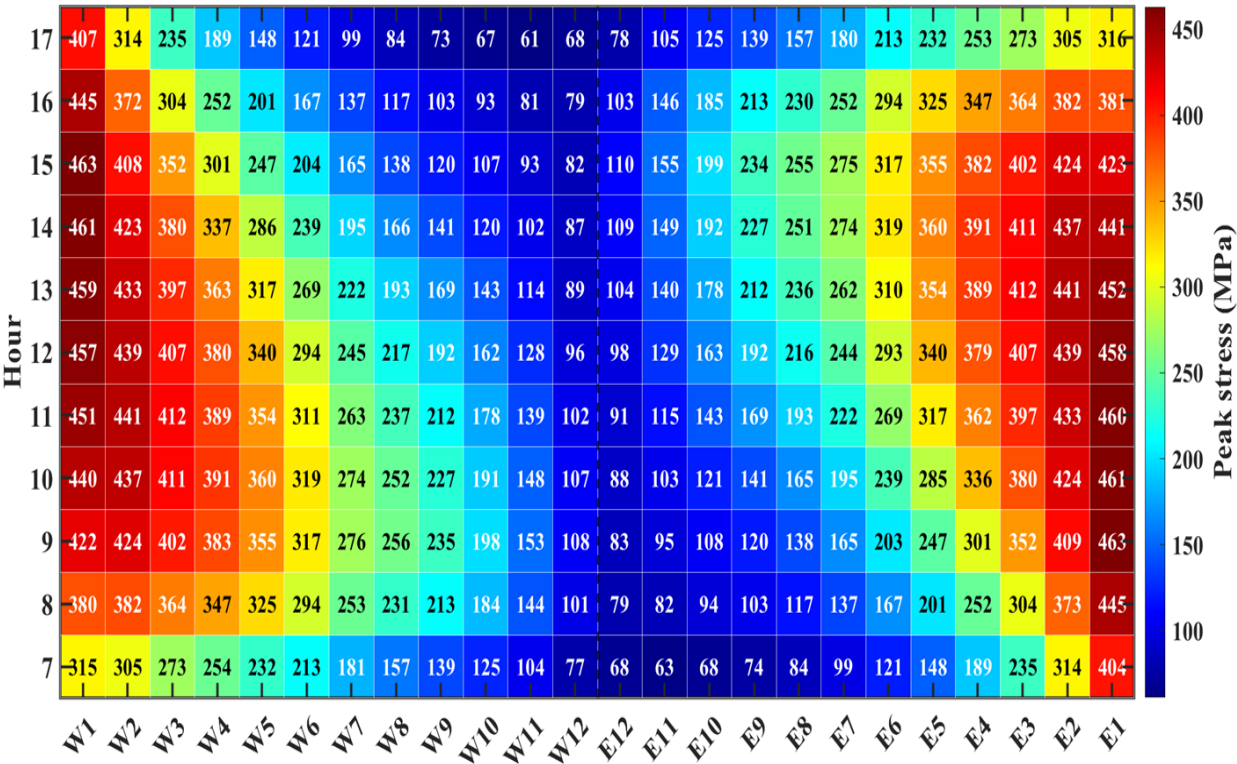
- 引入动态瞄准控制策略后，损伤仍以蠕变为主导 ( $D_c:10^{-4}$ ,  $D_f:10^{-6}$ )，但损伤水平相较于中心瞄准**大幅降低**；寿命仍**呈两端高、中间低分布**，(W5最短约9.6年，W11最长超900年)
- 除材料与结构参数外，**运行策略的选择**也是影响吸热器寿命的重要因素



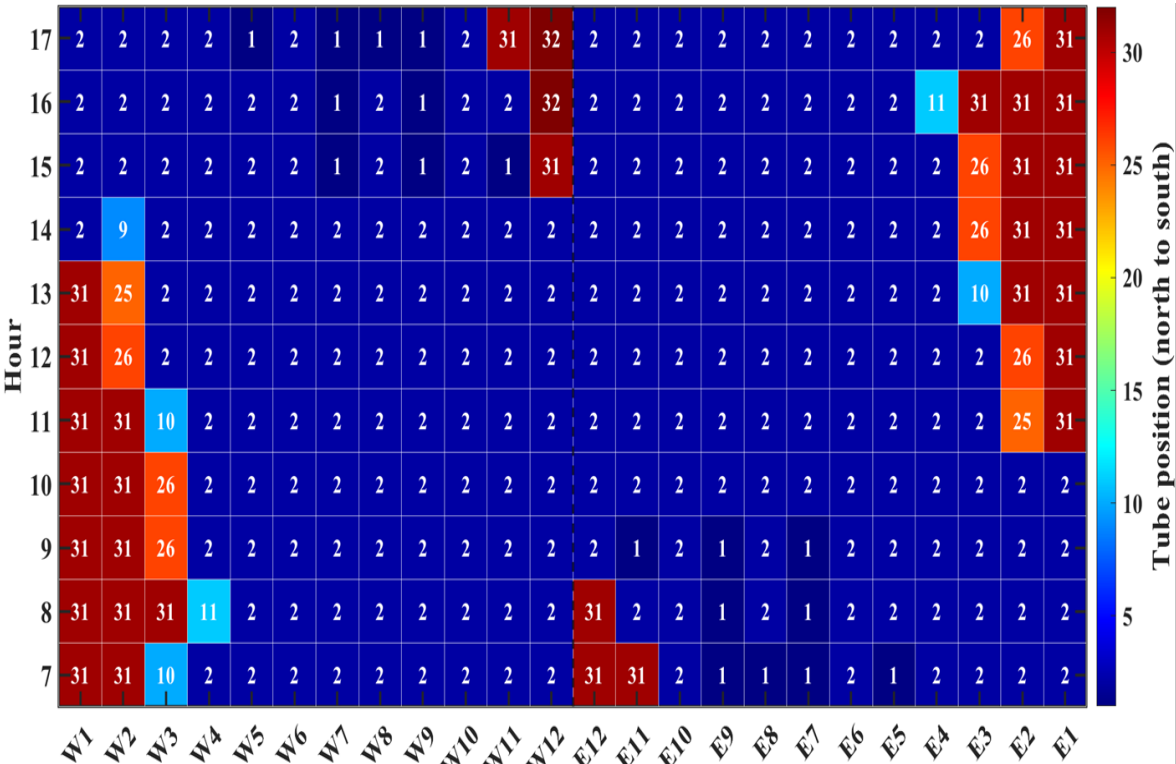
春分日下吸热器危险吸热管分布

- 春分日热载荷及机械支撑作用下，高应力区域主要集中于西侧W1~W5和东侧E1~E5管屏，最大应力出现在9时的E1管屏上，达到463 MPa，已超过屈服强度
- 危险吸热管主要分布于相邻管屏交界区域，管屏间温度相差较大导致热应力集中，少数区域受局部高能流影响出现峰值应力

春分日下吸热器及峰值吸热管热力分布



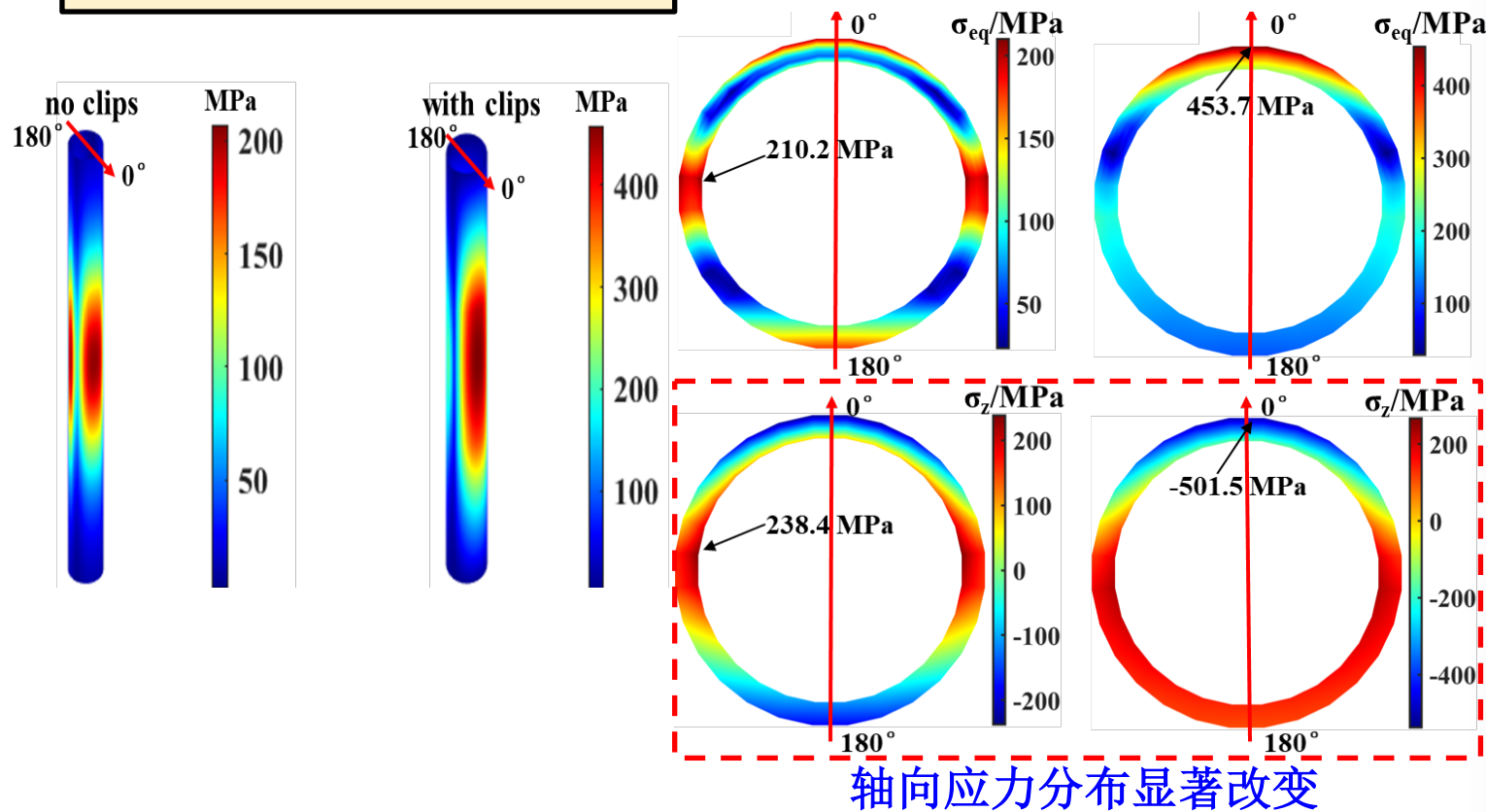
春分日下吸热器及峰值吸热管热力分布



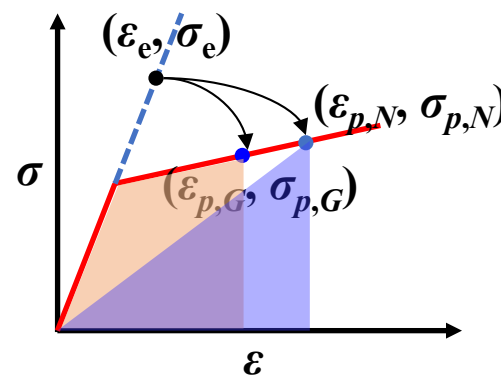
### ■ 吸热器弹塑性力学模型

- 支撑结构限制吸热管热膨胀变形，使**轴向约束增强**并导致局部**热应力显著增加**，改变原有应力分布特征
- 当局部应力超过材料屈服水平后，**弹性计算无法准确反映真实响应**，引入**Neuber/Glinka方法**进行弹塑性修正

支撑对应力分布影响



弹塑性应力修正模型



根据材料**应力应变曲线**对弹性应力进行塑性修正

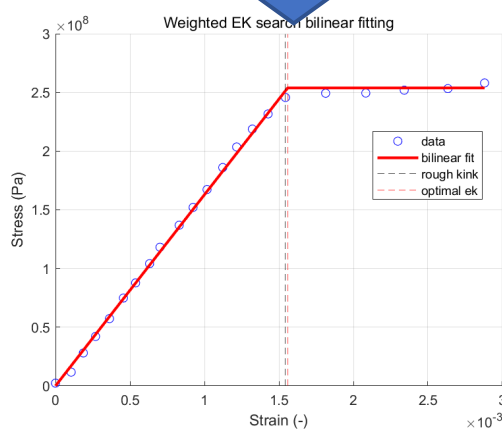
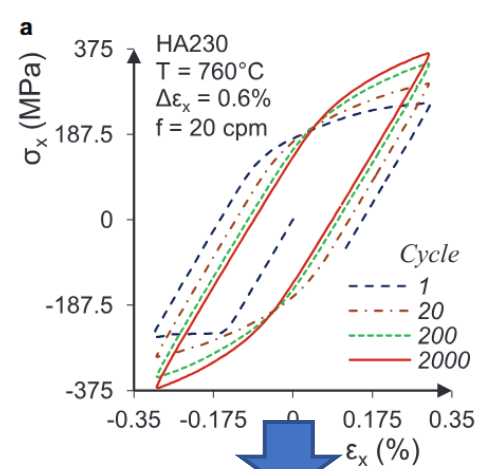
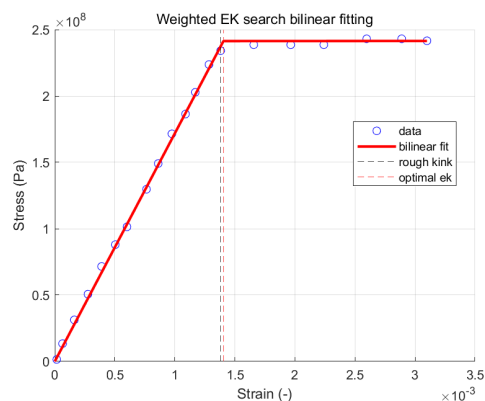
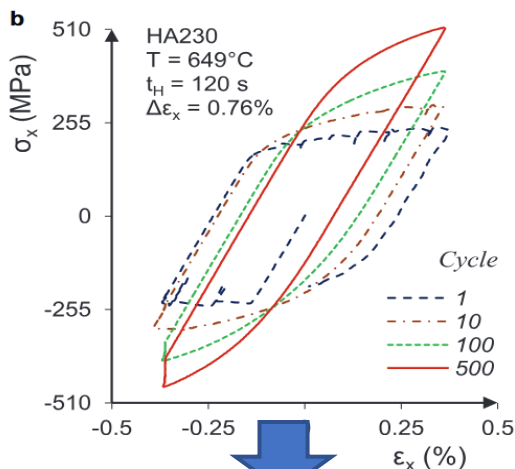
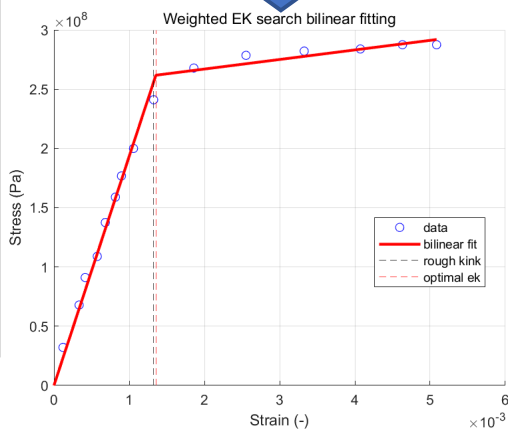
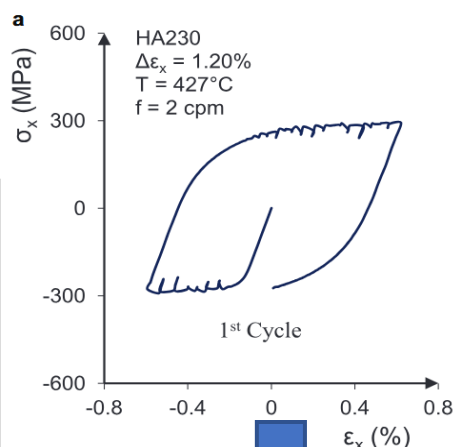
**Neuber方法**  $\sigma_{p,N} \cdot \epsilon_{p,N} = \sigma_e \cdot \epsilon_e = \frac{(\sigma^e)^2}{E}$

**Glinka方法**  $\int_0^{\epsilon_{p,G}} \sigma d\epsilon = \sigma_e \cdot \epsilon_e = \frac{(\sigma^e)^2}{2E}$

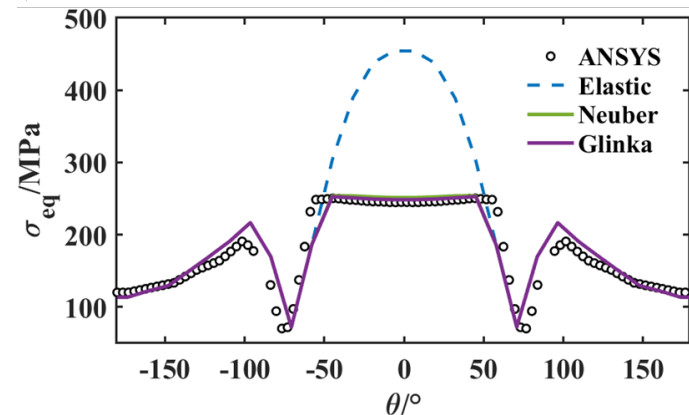
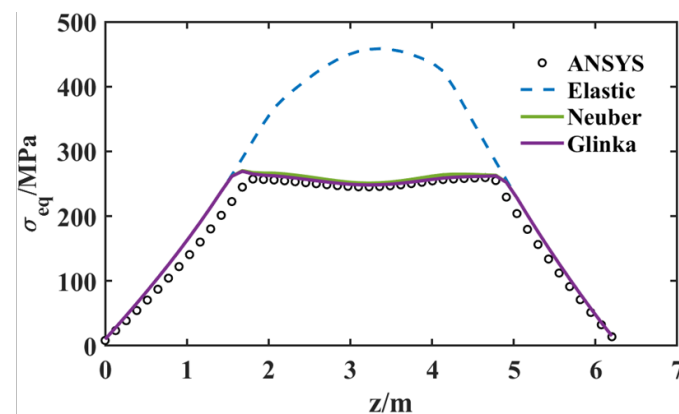
### ■ 吸热器弹塑性修正模型验证

- 基于材料循环实验数据拟合材料**弹塑性本构模型**，并建立峰值吸热管**弹塑性FEM模型**
- 修正结果与ANSYS弹塑性结果对比表明，Neuber方法的轴向/周向等效应力最大误差分别为1.6%/1.4%，Glinka方法分别为0.8%/0.9%。两种方法均能有效预测弹塑性响应，Glinka方法精度更高，后续采用**Glinka方法进行修正**

材料双线性硬化模型构建



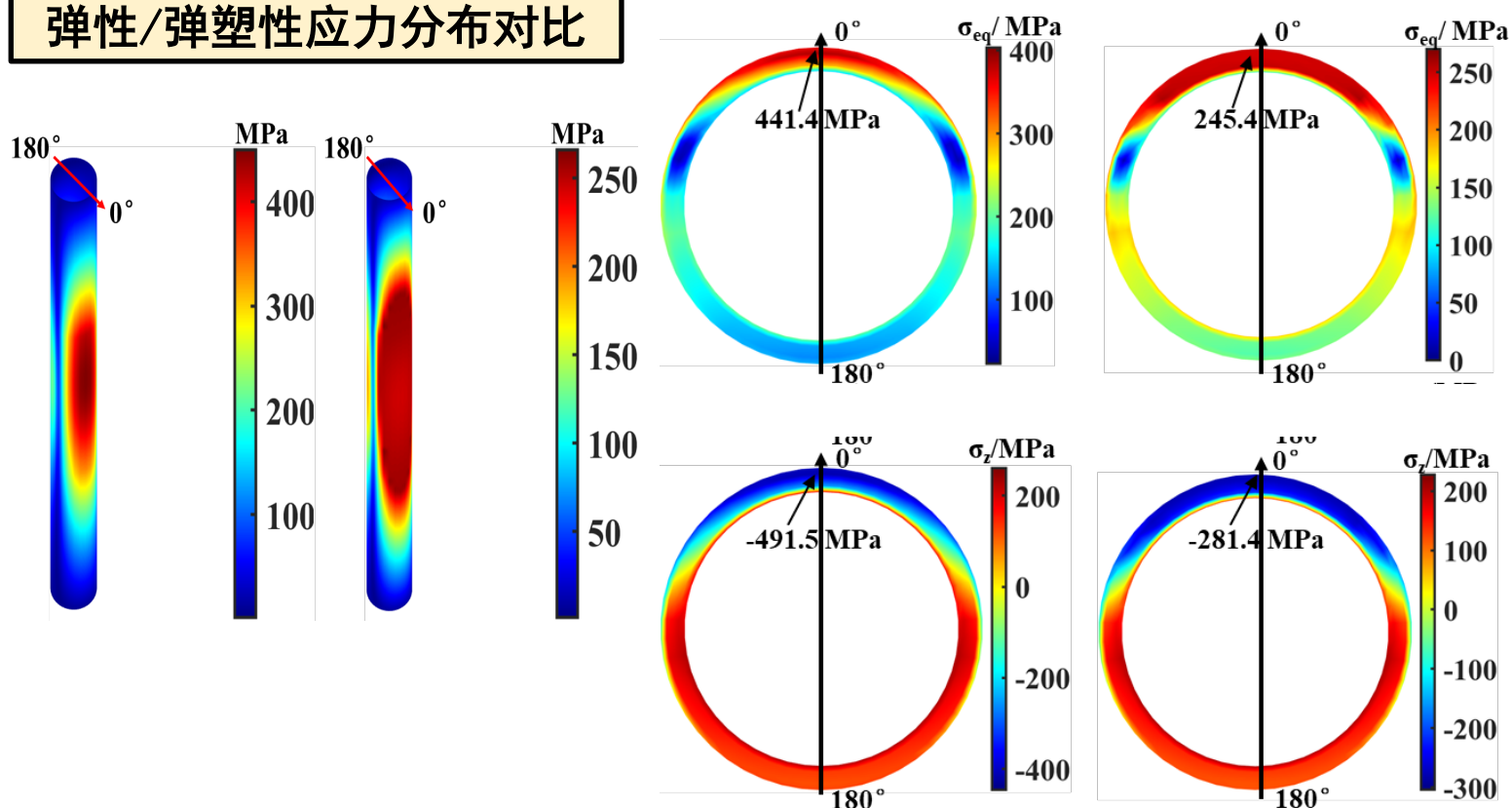
### 峰值应力管弹塑性应力验证



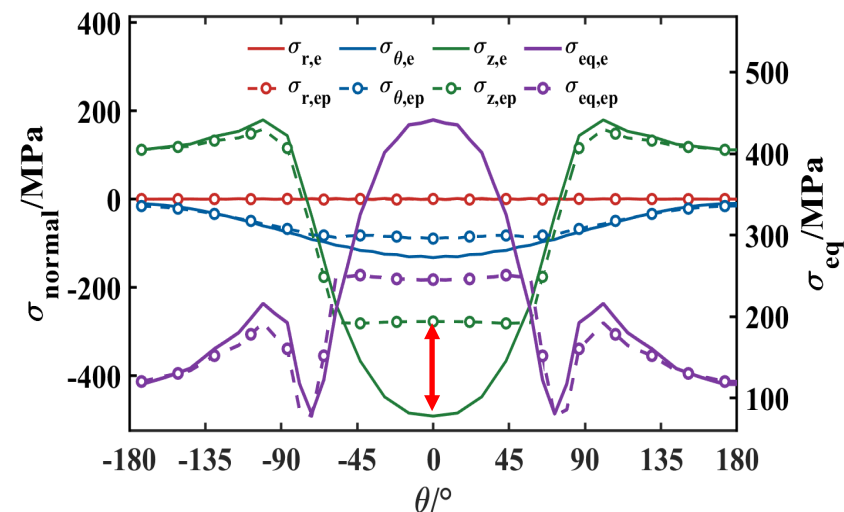
### ■ 吸热器弹塑性应力分布

- 弹塑性修正后，吸热器局部应力水平整体降低，高应力区域范围扩大，峰值应力得到释放
- 轴向应力受塑性变形影响最明显，峰值显著降低；环向应力变化较小，仍保持主要分布特征

弹性/弹塑性应力分布对比



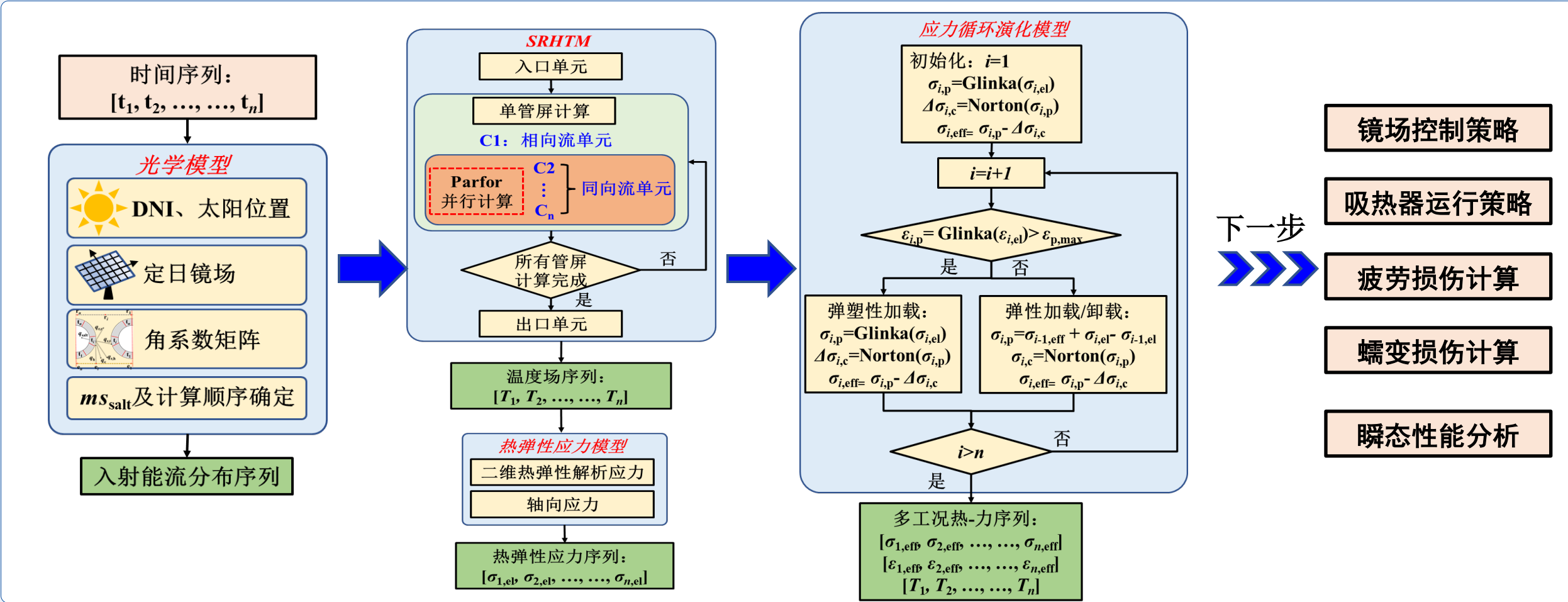
中间高度应力变化



轴向应力显著降低，二维应力变化不明显

■ 吸热器多工况热-力演化模型

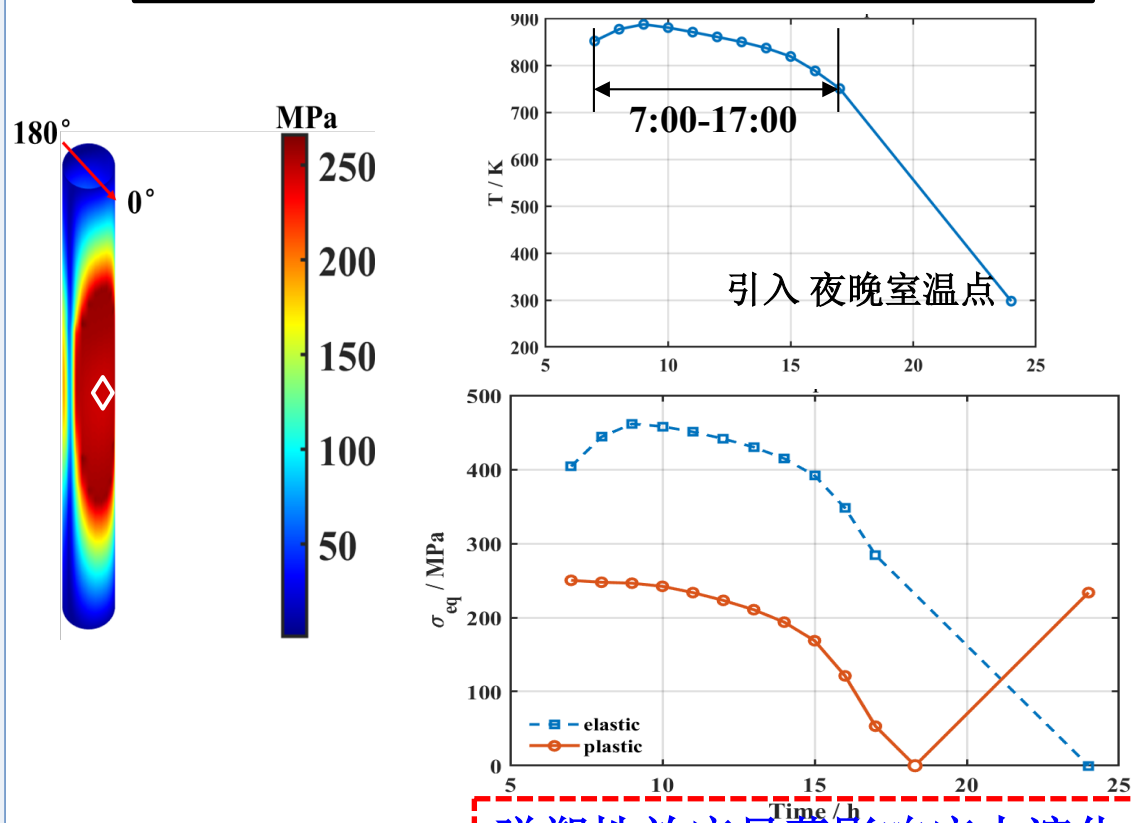
- 根据**时间序列**，完成光学能流计算、SRHTM 热响应计算和热弹性应力分析，形成**多工况热弹性应力序列**
- 以**热弹性应力序列**作为**驱动**，结合**历史塑性水平**判断加载/卸载路径，并引入 **Norton 蠕变松弛**，递推计算吸热器多工况热-力响应



### ■ 吸热器多工况热-力演化模型单天验证

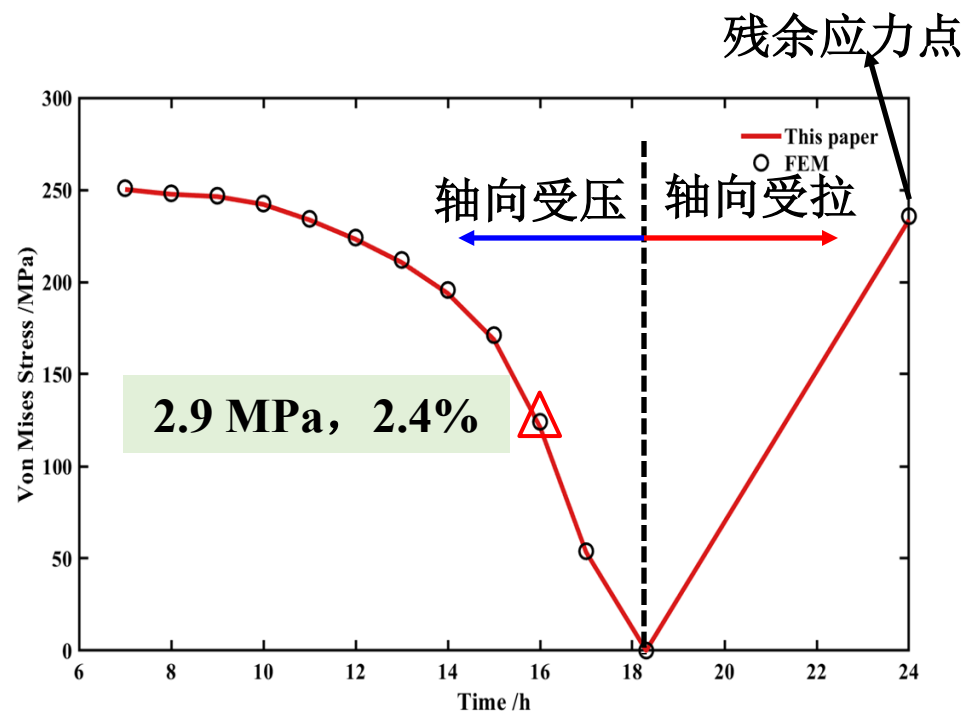
- 选取春分日峰值应力吸热管进行单日循环验证，引入夜间室温边界模拟停机，实现完整昼夜热-力循环
- 对比关键节点应力演化结果，与FEM计算最大误差为**2.9 MPa (2.4%)**，表明演化模型能较准确预测单日演化

春分日峰值应力吸热管昼夜循环热-力响应



弹塑性效应显著影响应力演化

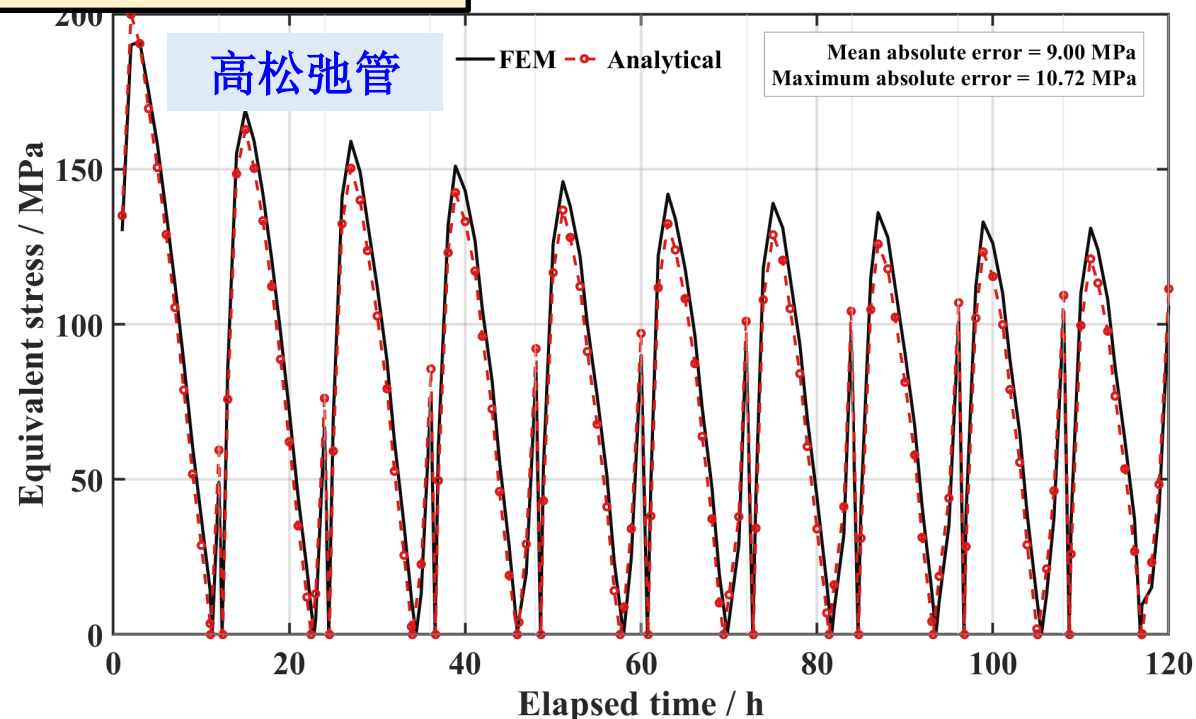
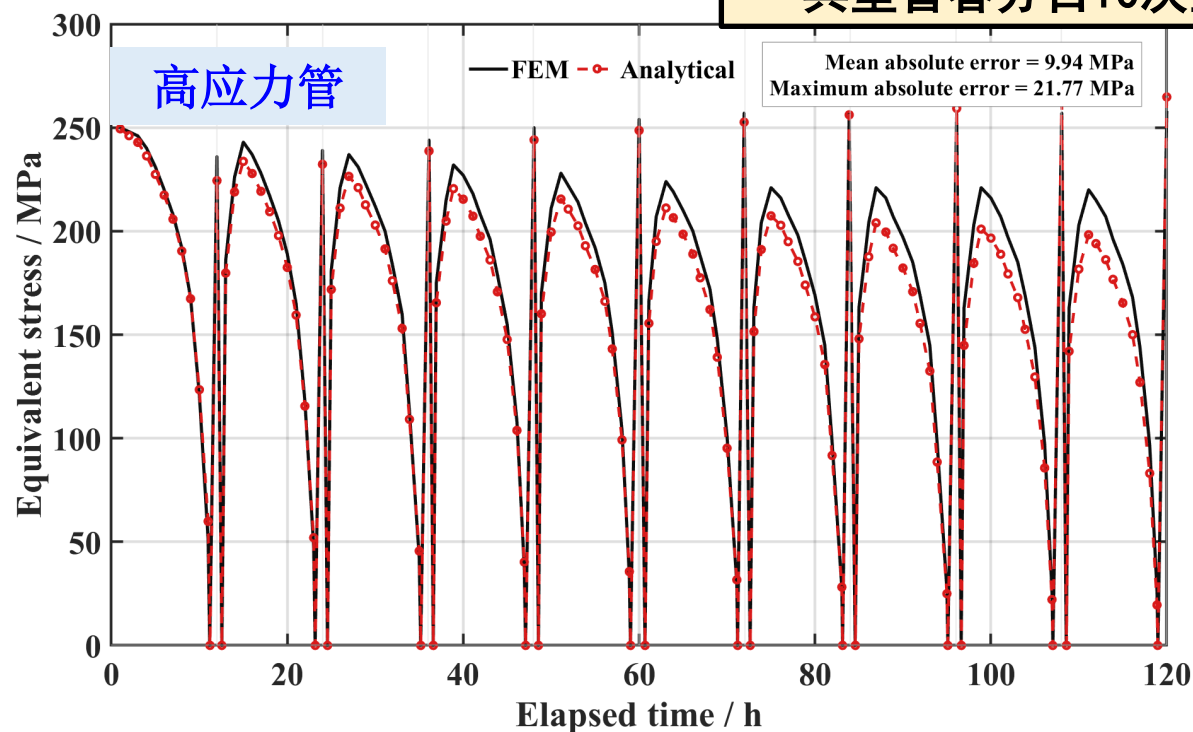
与FEM弹塑性结果对比验证



### ■ 吸热器多工况热-力演化模型多天验证

- 针对高应力管和高松弛管开展**10次春分日循环热-力响应计算**，考虑**蠕变应力松弛效应**，验证模型对长期循环载荷下应力演化的预测能力；与FEM结果相比，最大误差分别为21.8 MPa（**9.9%**）和10.7 MPa（**8.6%**）
- 针对吸热管三向应力状态下**缺少快速松弛模型**的问题，本文基于**轴向应力占主导特征**，将单向松弛模型推广至三向应力场。虽然会引入一定误差，但能够在**低计算成本下有效预测循环应力响应**

典型管春分日10次昼夜循环热-力响应

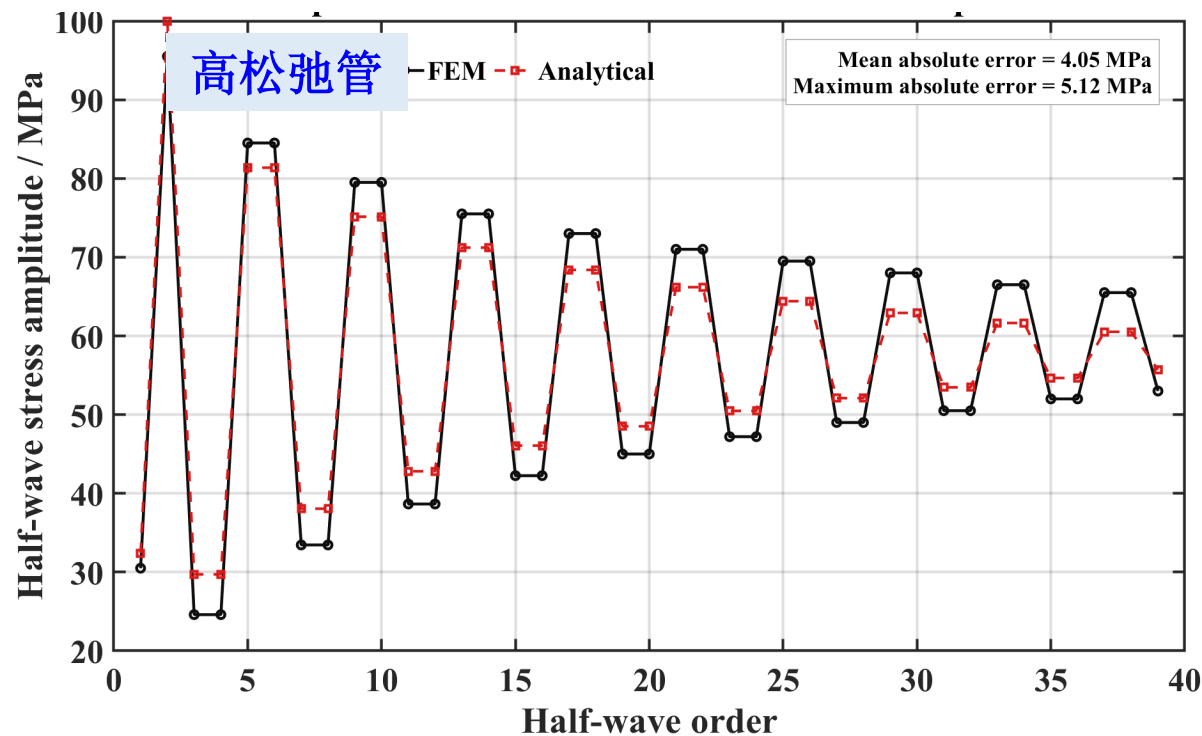
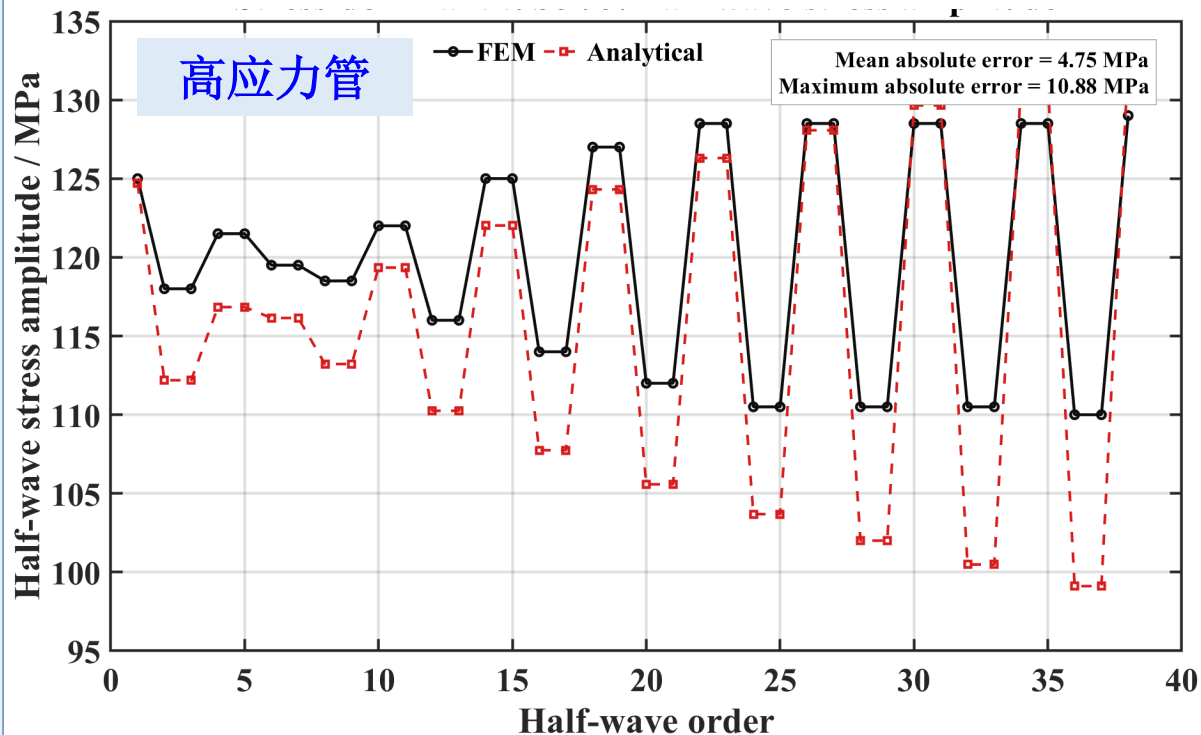


经过十次循环后，应力演化逐渐趋于**稳定**，高温应力松弛效应逐步达到**稳定状态**

### ■ 吸热器多工况热-力演化模型多天验证

- **循环应力幅**是疲劳损伤计算的重要输入参数，与FEM结果对比表明，两类典型管半波应力幅最大误差分别为**10.88 MPa**和**5.12 MPa**，验证了模型计算精度
- 该模型能够以**较低计算成本**获得全周期热-力响应参数，为吸热器**寿命预测及运行工况优化**提供快速分析手段

典型管春分日10次昼夜热-力循环应力幅分布



# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

■ 高温熔盐储热罐热-力模型构建

- 选取Solar Two高温熔盐储罐作为研究对象，建立包含罐体、保温层及基础结构的热-力分析模型
- 结合运行温度和边界换热条件，研究储罐热响应及结构安全特性

物理模型：Solar two 高温罐



Solar two 实验电站储热罐

Solar two电站熔融盐罐参数

| 项目 | 储热量/MWh | 工作温度/℃ | 罐体尺寸/m      | 材料             |
|----|---------|--------|-------------|----------------|
| 冷罐 | 110     | 290    | 直径11.6，高7.8 | ASTM A516-70碳钢 |
| 热罐 |         | 565    | 直径11.6，高8.4 | 304不锈钢         |

- ✓ 罐体侧壁及拱顶由内向外构成  
罐壁  
空气夹层(0.03m)  
矿物棉（0.46m、0.3m）  
泡沫玻璃（0.05m、0.05m）  
铝板保护壳

- ✓ 罐底基础由上到下构成  
罐底板  
耐火砖（0.15m）  
绝热耐火砖（0.3m）

■ 高温熔盐储热罐热-力模型构建

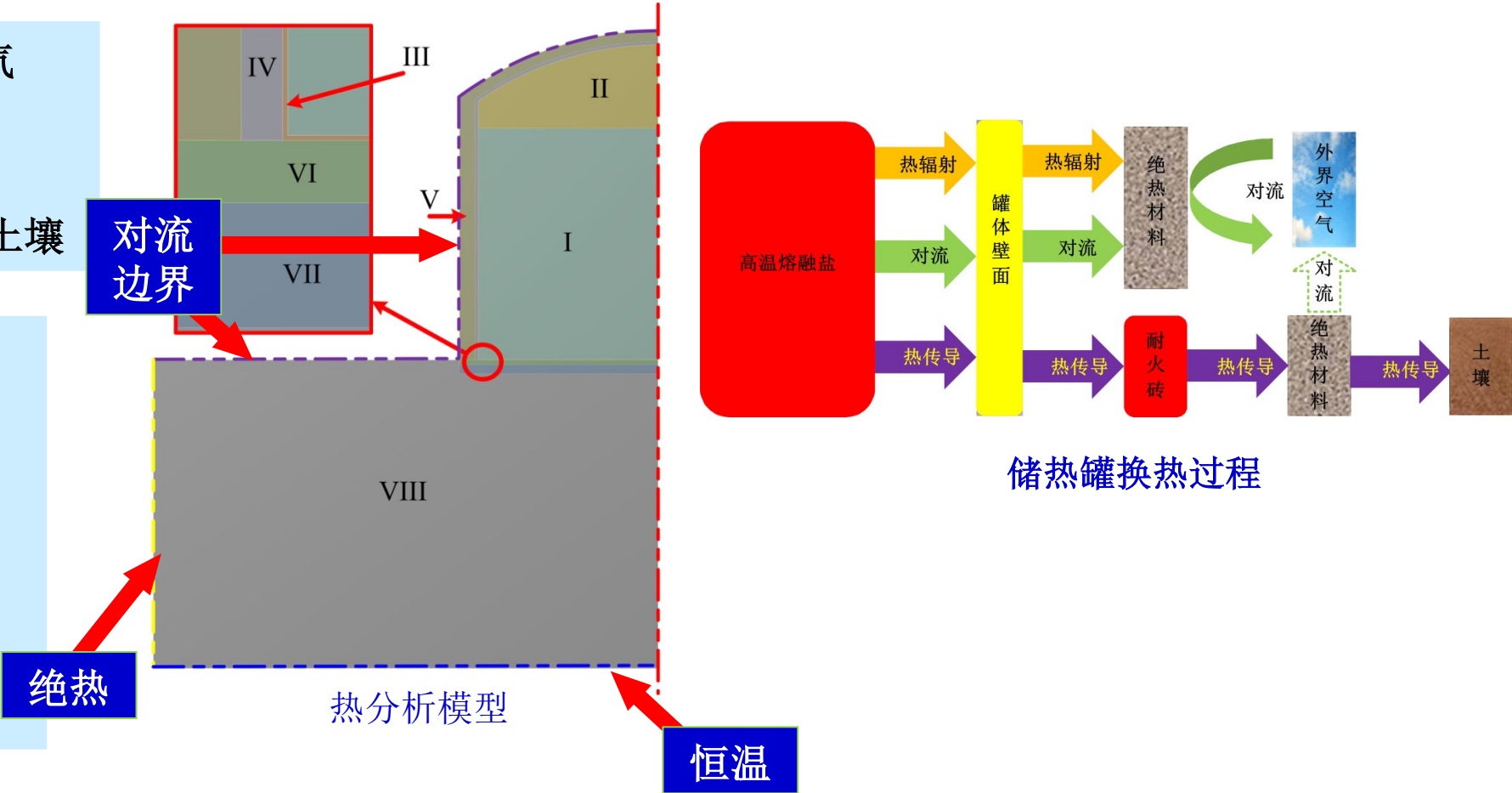
- 基于储罐多层结构特征，建立包含熔盐、罐壁、保温层及基础结构的**二维轴对称热分析模型**
- 考虑**熔盐内部对流、辐射换热及外部散热过程**，设置运行温度与边界换热条件，获得储罐热响应特征

- |           |            |
|-----------|------------|
| I: 高温熔融盐  | II: 顶部空气   |
| III: 罐壁   | IV: 空气夹层   |
| V: 矿物棉    | VI: 耐火砖    |
| VII: 泡沫玻璃 | VIII: 基础土壤 |

二维轴对称分析

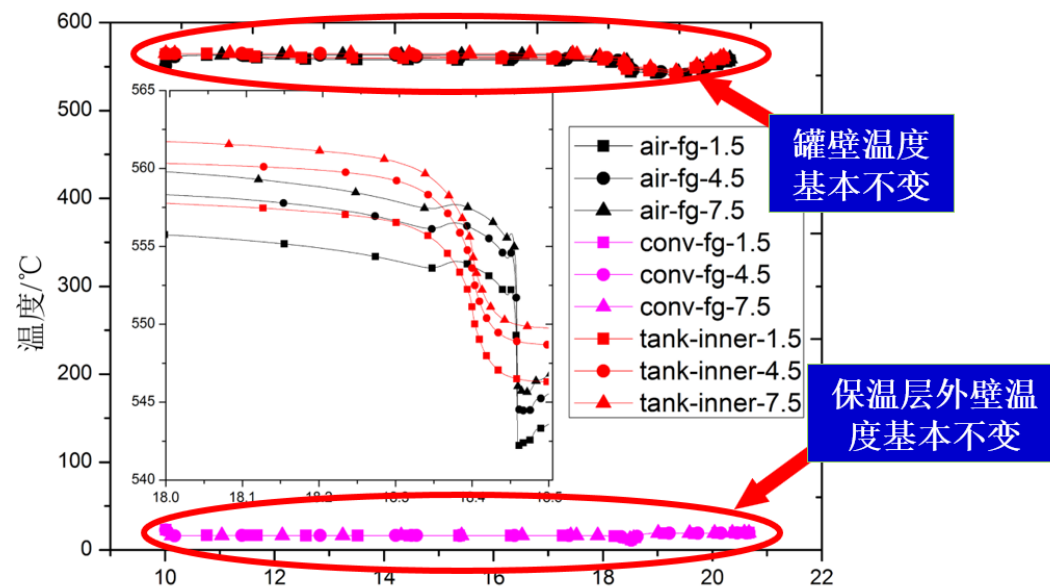
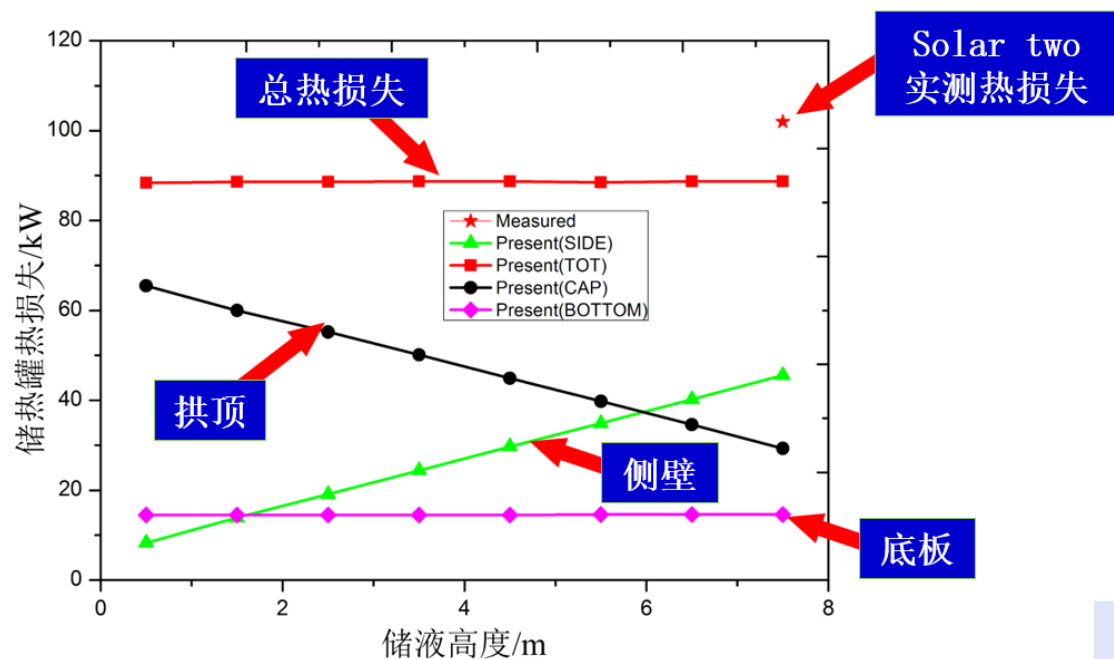
边界条件:

- 熔融盐温度:  $565^{\circ}\text{C}$
- 熔融盐界面发射率: 0.95
- 罐体壁面发射率: 0.7
- 矿物棉发射率: 0.9



### ■ 高温熔盐储罐热-力模型验证

- 基于Solar Two高温储热罐热损失测试数据，对建立的储罐热分析模型进行验证
- 模拟热损失为88.5 kW，与实测值102 kW误差为**13.24%**，误差主要来源于实际罐底冷却措施及外部换热边界条件差异，验证模型能够较好预测储罐热损失



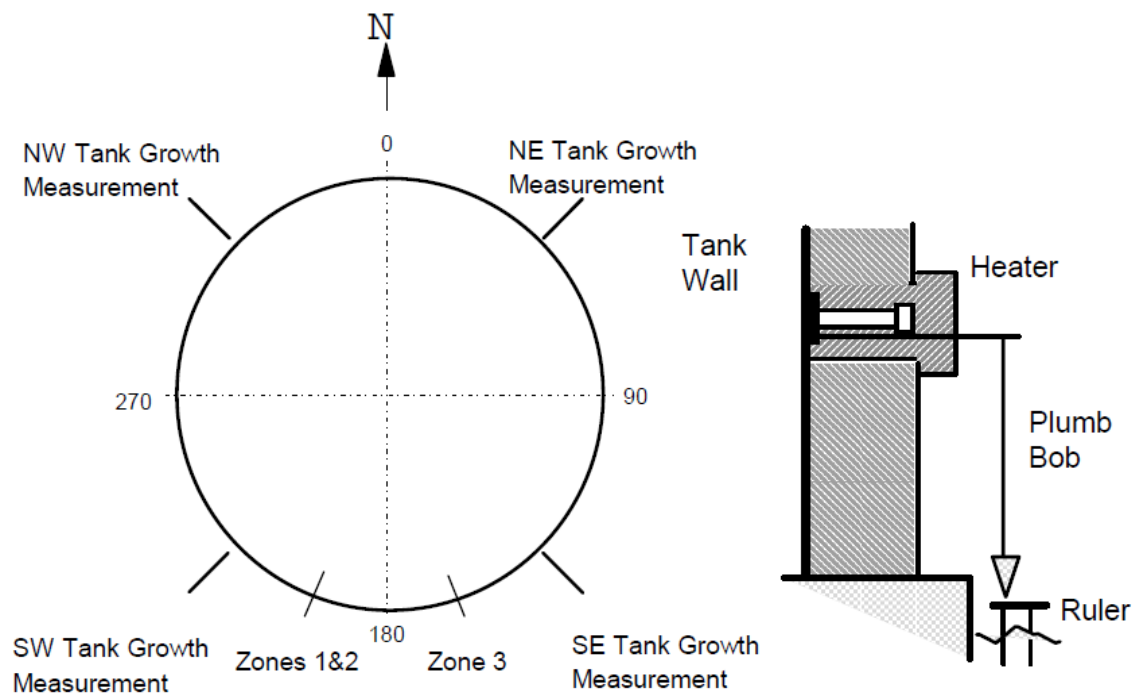
✓ 热损失模拟结果与Solar two实测结果误差为**13.24%**

✓ 不同储液高度时，罐体内部壁面温度和总热损失基本不变

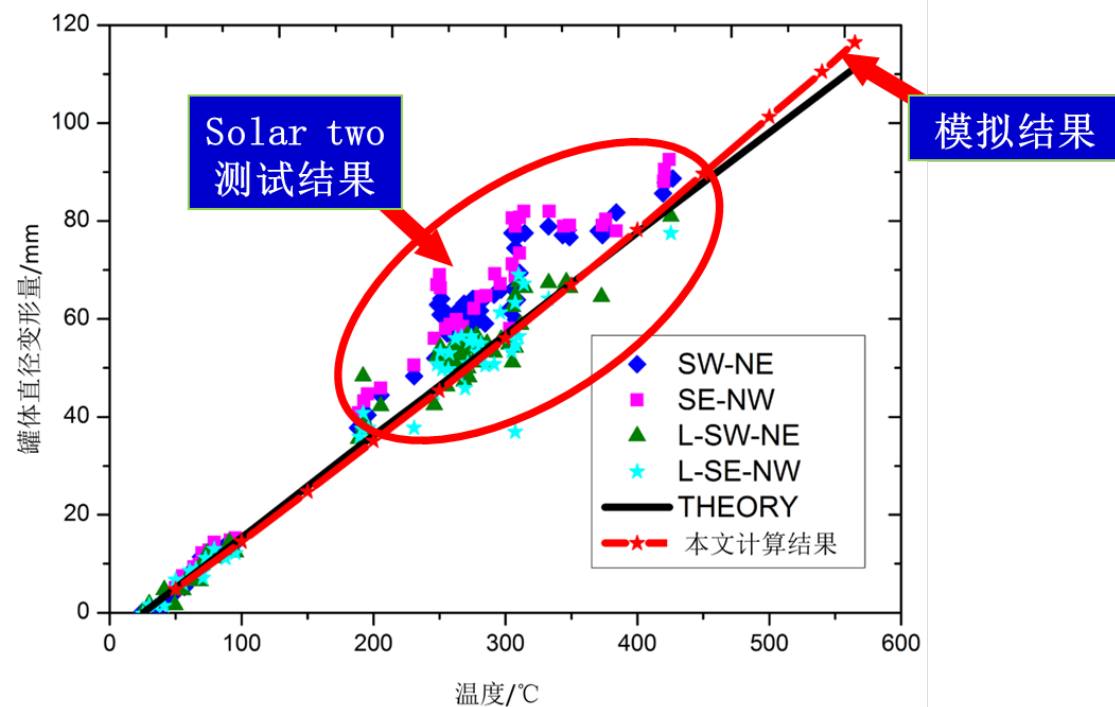
### ■ 高温熔盐储罐热-力模型验证

- 基于Solar Two高温储热罐径向变形测试数据，模拟径向变形结果与测试值及理论计算结果**吻合良好**，验证模型能够**准确预测储罐热膨胀响应**；高温区域的差异主要来源于热膨胀参数选取及理论模型简化
- 储热罐由于工作温度高，热变形大，可高达**113.6mm**

Solar two高温储热罐的热变形测量方法示意



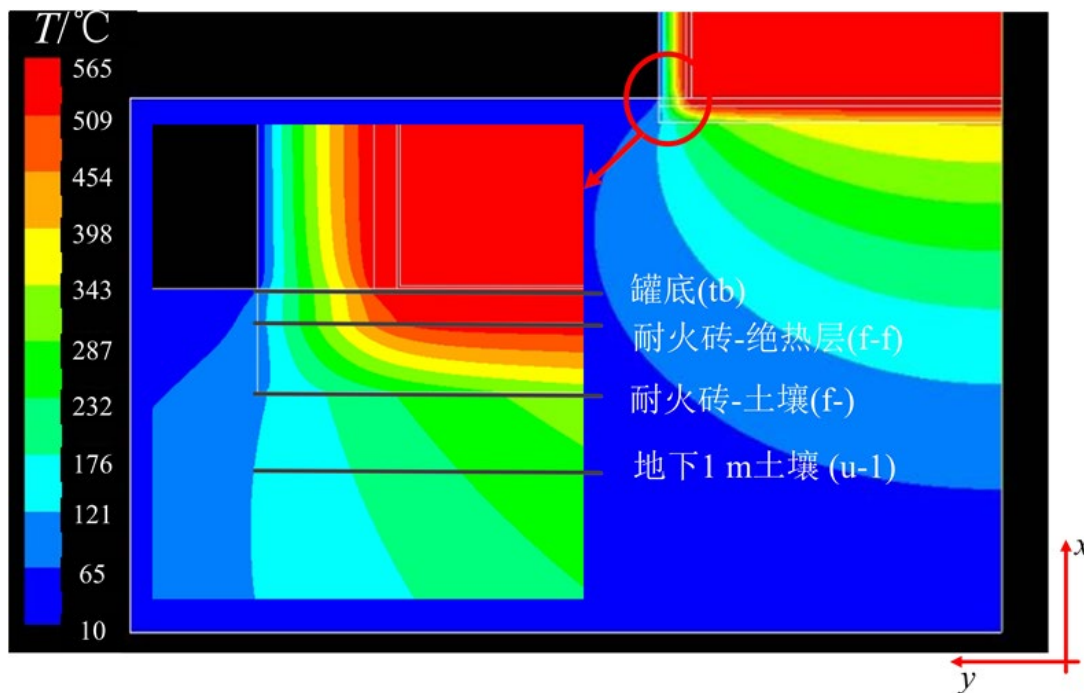
储热罐径向直径变形量对比验证



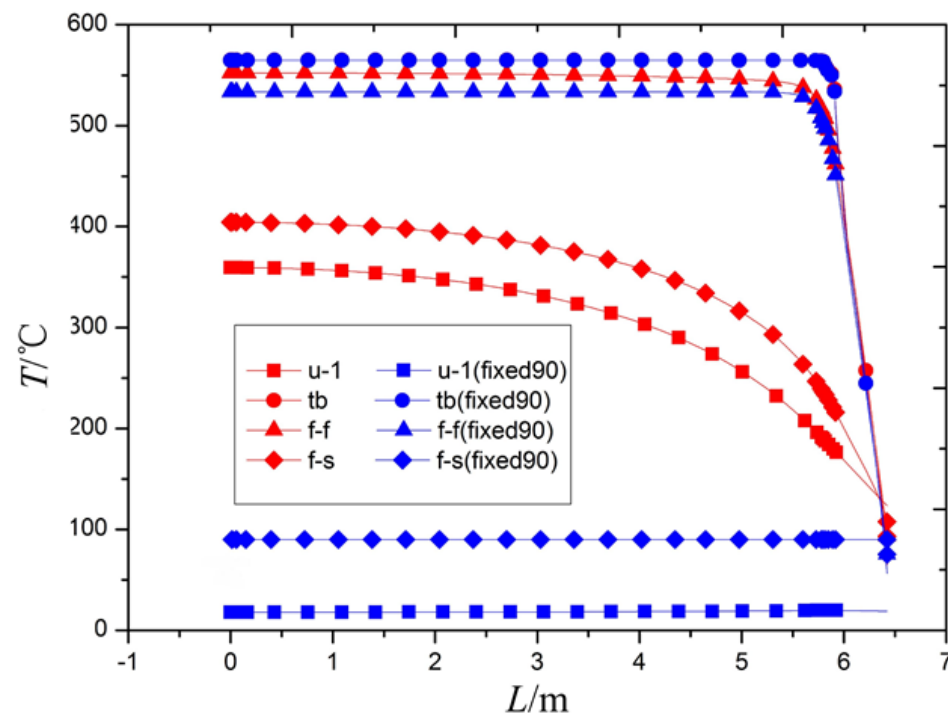
### ■ 储罐罐底冷却系统影响分析

- 针对罐底基础长期高温运行问题，分析**有无冷却条件下**储罐对基础区域的热影响范围
- 结果表明，储罐运行会导致**基础温度显著升高**；引入冷却边界后，可**降低绝热层外侧温度**，但会**增加内部温度梯度**

无冷却条件下罐底基础温度分布



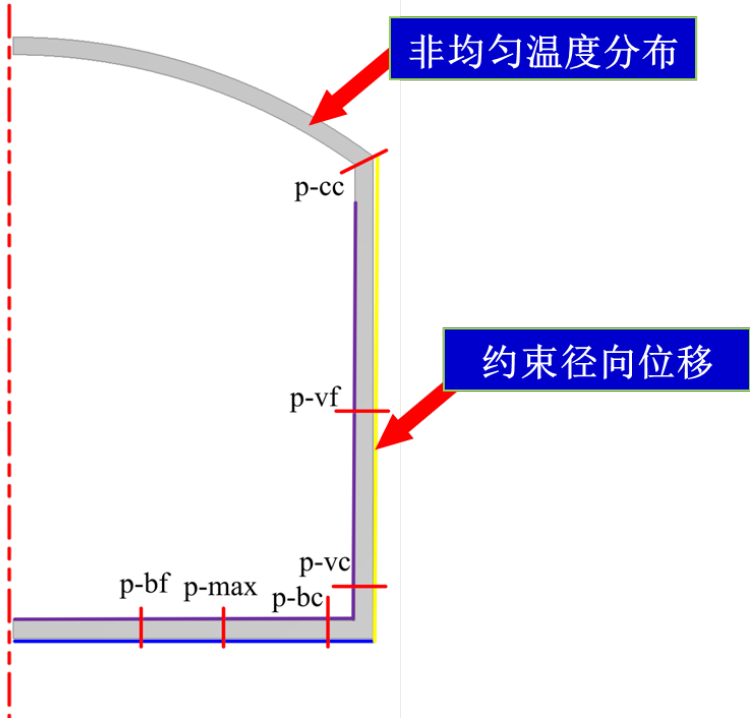
冷却系统对罐底温度分布影响



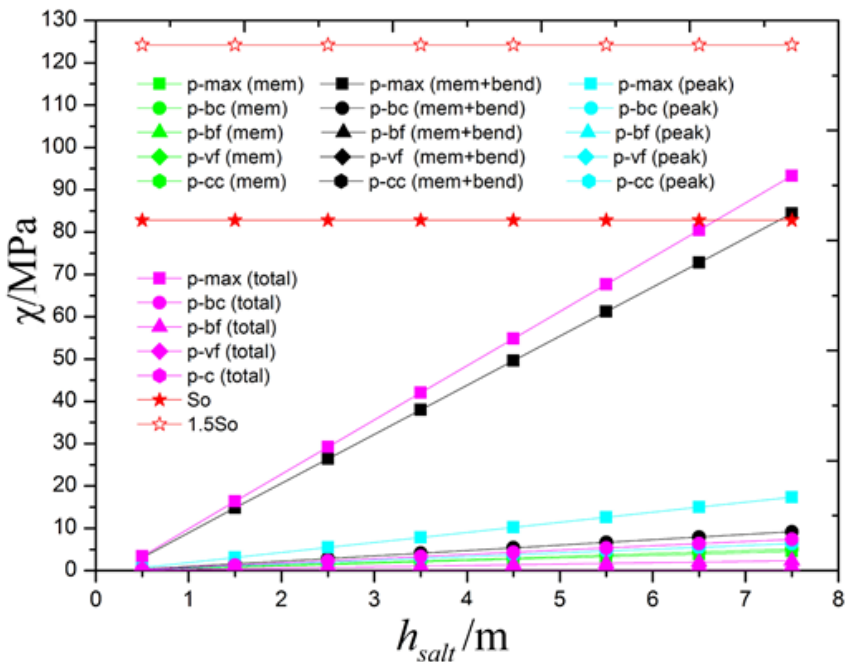
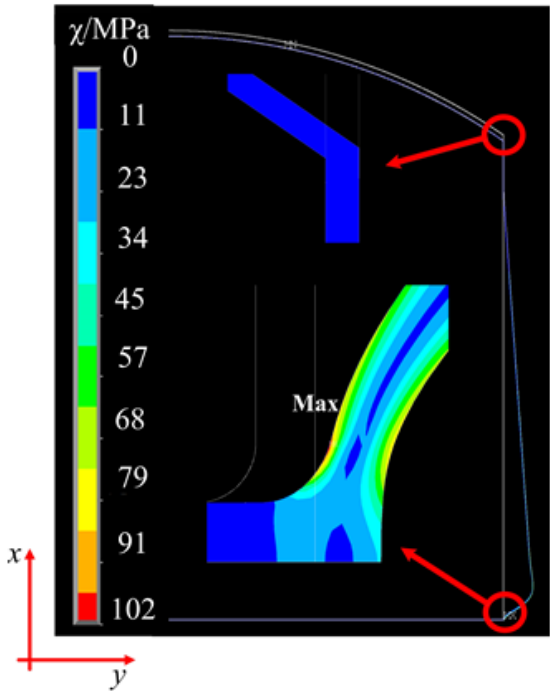
■ 储液高度对储罐应力分布影响

- 不同储液高度下罐体应力分布规律基本一致，最大应力集中于罐底-侧壁连接区域，且随液位升高呈线性增加
- 最高液位工况下，最大应力由**弯曲应力主导**，线性化应力低于许用限值；但液位循环引起**约100 MPa应力波动**，需要关注高温环境下的**疲劳损伤**

罐体关键应力评定路径



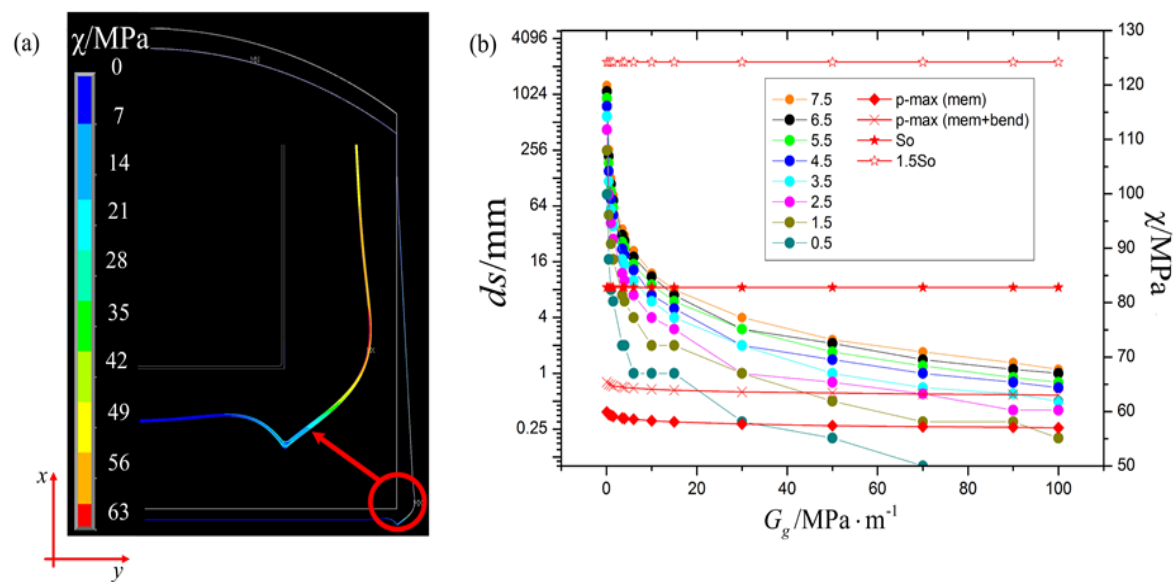
不同液位下罐壁应力演化规律



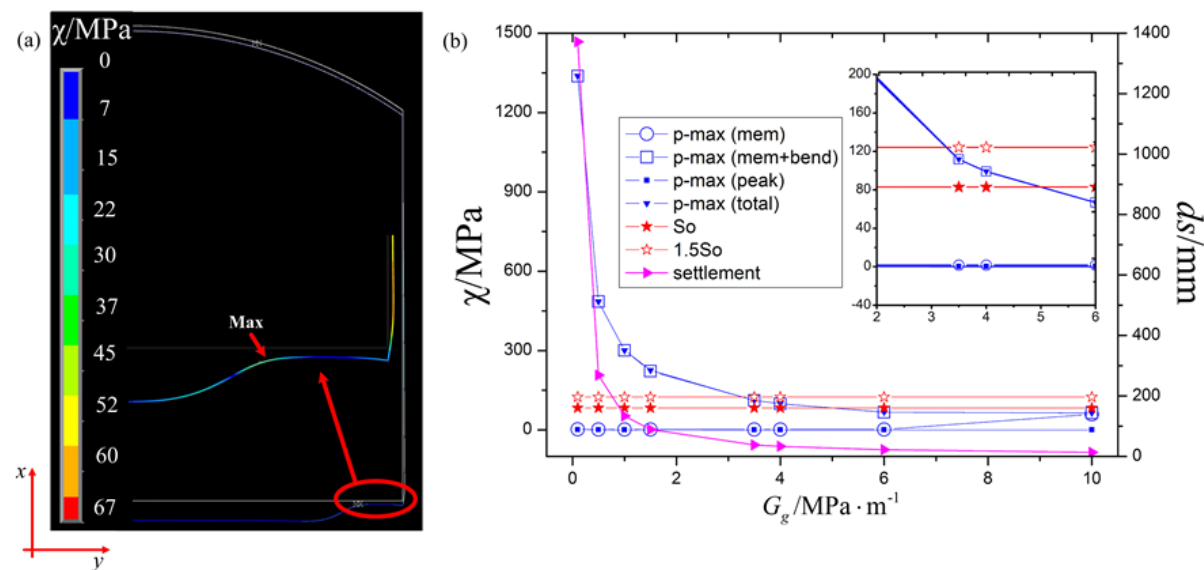
### 罐底支撑刚度对储热罐影响

- 基础刚度变化对罐体应力分布影响较小，但显著影响整体沉降量；当基础刚度大于 $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时，最大沉降量可控制在 $4.0 \text{ mm}$ 以内
- 填料刚度主要影响罐底局部约束及弯曲应力，当刚度低于 $3.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时可能导致底板高应力，因此需保证填料刚度满足要求

基础刚度对储罐沉降及应力影响



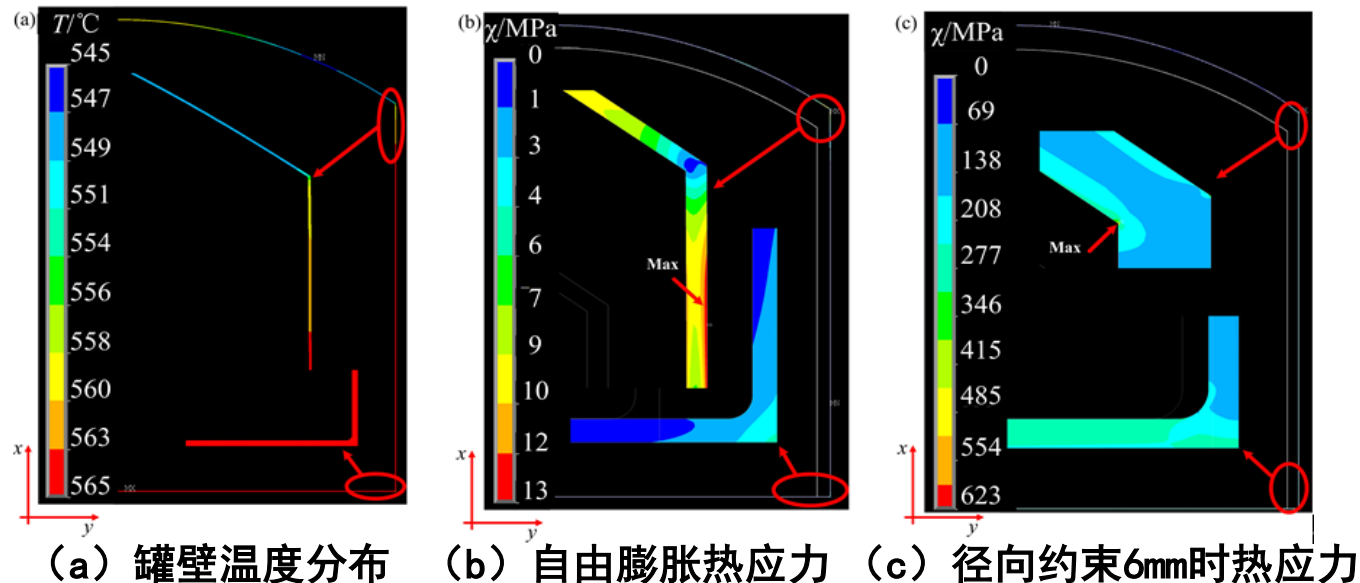
填料刚度对罐底局部应力影响



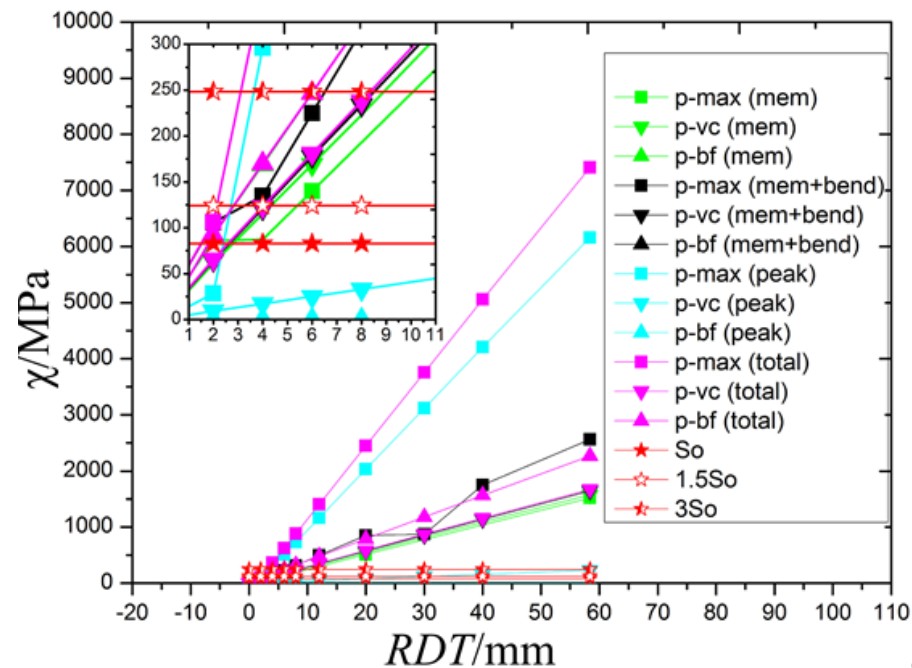
### ■ 热膨胀约束对储热罐热应力影响

- 最高工作温度下，储罐自由膨胀产生的热应力较低，最大**仅为13.0 MPa**；但**径向约束会显著放大热应力**，且与约束量呈近似线性关系
- 当罐体**热膨胀空间不足时**，**局部峰值应力显著增加**，因此储罐设计需充分考虑高温工况下实际热变形，保证**足够膨胀间隙**

罐壁温度及不同约束下的热应力分布



径向约束对罐壁热应力影响



# 汇报目录

CONTENTS

## 01 国内外研究现状

## 02 本团队研究工作

2.1 太阳能吸热器光-热-力快速计算模型建立

2.2 吸热器多工况循环载荷下热-力响应

2.3 高温熔盐储罐热-力分析

## 03 总结与展望

#### 吸热部分

- 构建了太阳能吸热器热性能快速预测模型 (SRHTM) , 实现出口温度、热效率及全场温度分布高精度预测, 最高温度误差为3.84%, 显著降低计算成本
- 建立了考虑材料高温非线性行为的热力响应修正方法, 引入Glinka弹塑性修正模型, 实现热弹性结果向弹塑性响应的快速转换, 修正误差控制在0.9%
- 提出了考虑支撑约束和蠕变松弛效应的循环热应力预测方法, 实现吸热器应力演化快速分析, 与FEM结果相比最大误差分别为21.8 MPa (9.9%) 和10.7 MPa (8.6%)
- 未来将面向动态瞄准策略和复杂运行工况, 开展热流分布优化与寿命协同调控研究, 实现吸热器效率与安全性的综合优化

#### 储热部分

- 建立并验证了高温熔盐储罐热-力耦合分析模型。基于Solar Two测试数据, 模型热损失误差为13.24%, 径向变形预测结果与实验及理论结果吻合良好
- 揭示了高温运行下储罐热影响及结构响应规律。储罐运行会显著提高基础温度, 底部冷却可降低外侧温度但增加内部温度梯度; 液位升高导致罐底-侧壁区域应力近似线性增加
- 未来将面向储罐长期循环运行过程, 开展热-力-寿命多场耦合分析, 研究动态充放热条件下的疲劳损伤演化与结构优化方法



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 2026中国太阳能热发电大会

——· 光热大师课 ·——

## 谢谢!

项目支持:

- 国家重点研发项目 (2021YFF0500400)
- 陕西省重点研发计划 (2022GXLH-01-08)
- 青豫直流项目 (63034202,QYHXGR-FW-001-2024)
- 首航高科项目 (20250796)