



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

2021中国太阳能热发电大会  
9月26日-29日 | 浙江湖州

# 太阳能水工质吸热器热弹性应力研究

魏进家 方嘉宾

西安交通大学

2021年9月28日



1

研究背景

2

沸腾管和过热管热应力特性

3

吸热面和膜式壁热应力特性

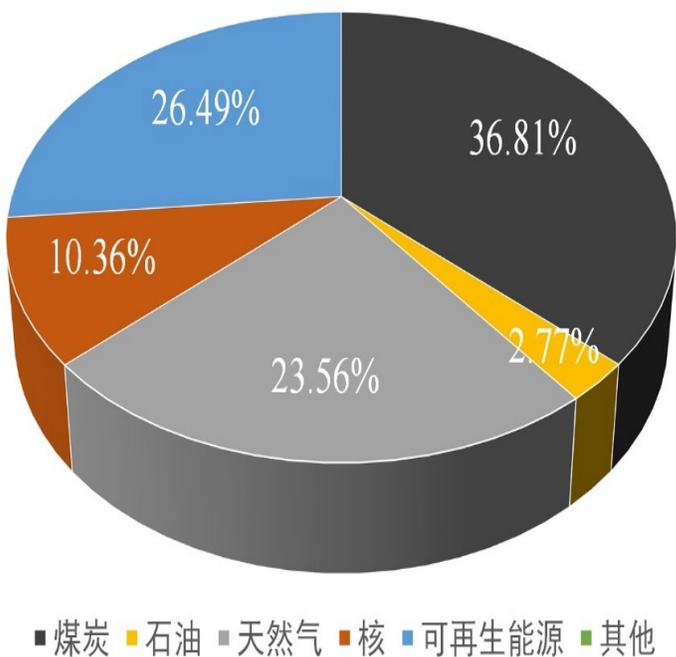
4

结论



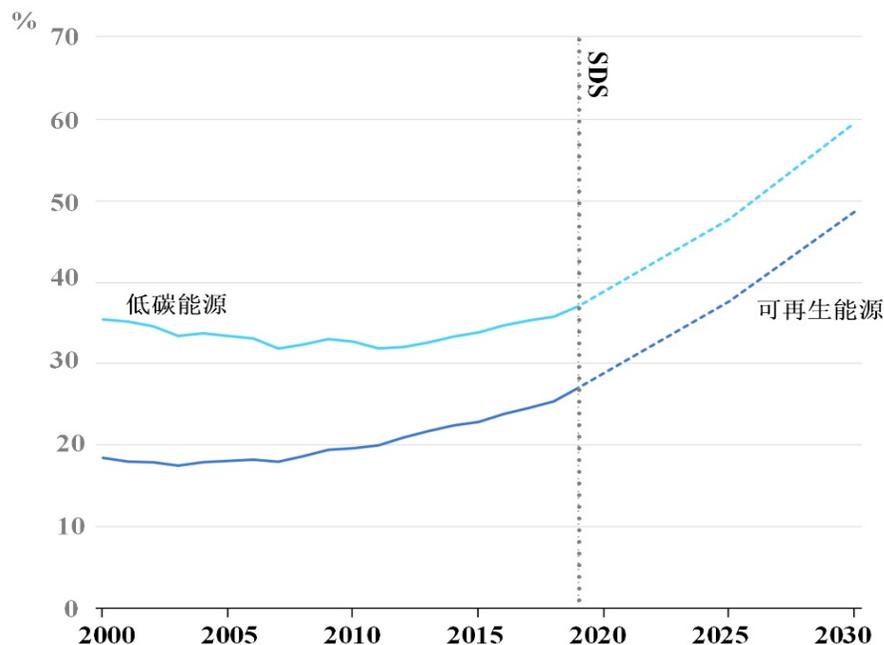
# 1.1 世界电力能源现状

2019年世界电力能源结构



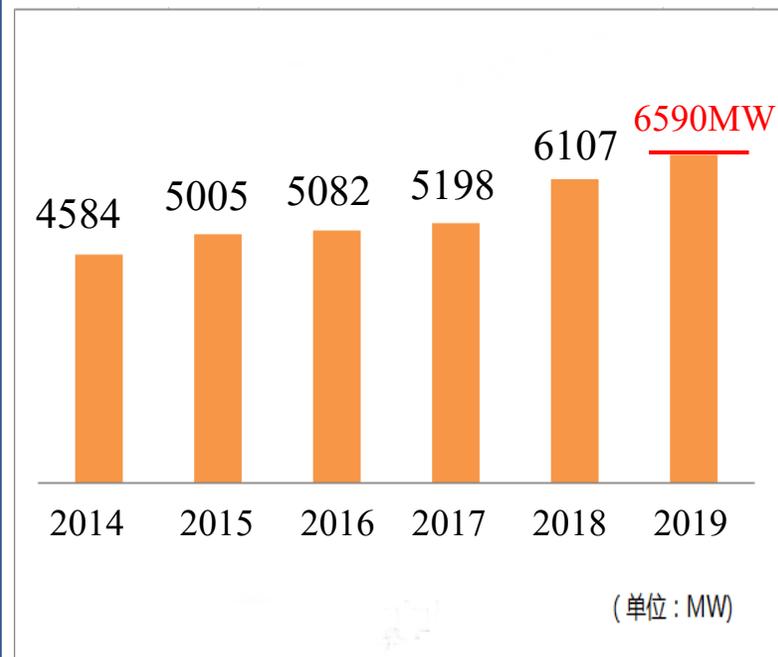
以煤为主、多样化发展

2000-2030年可再生能源在发电中的份额



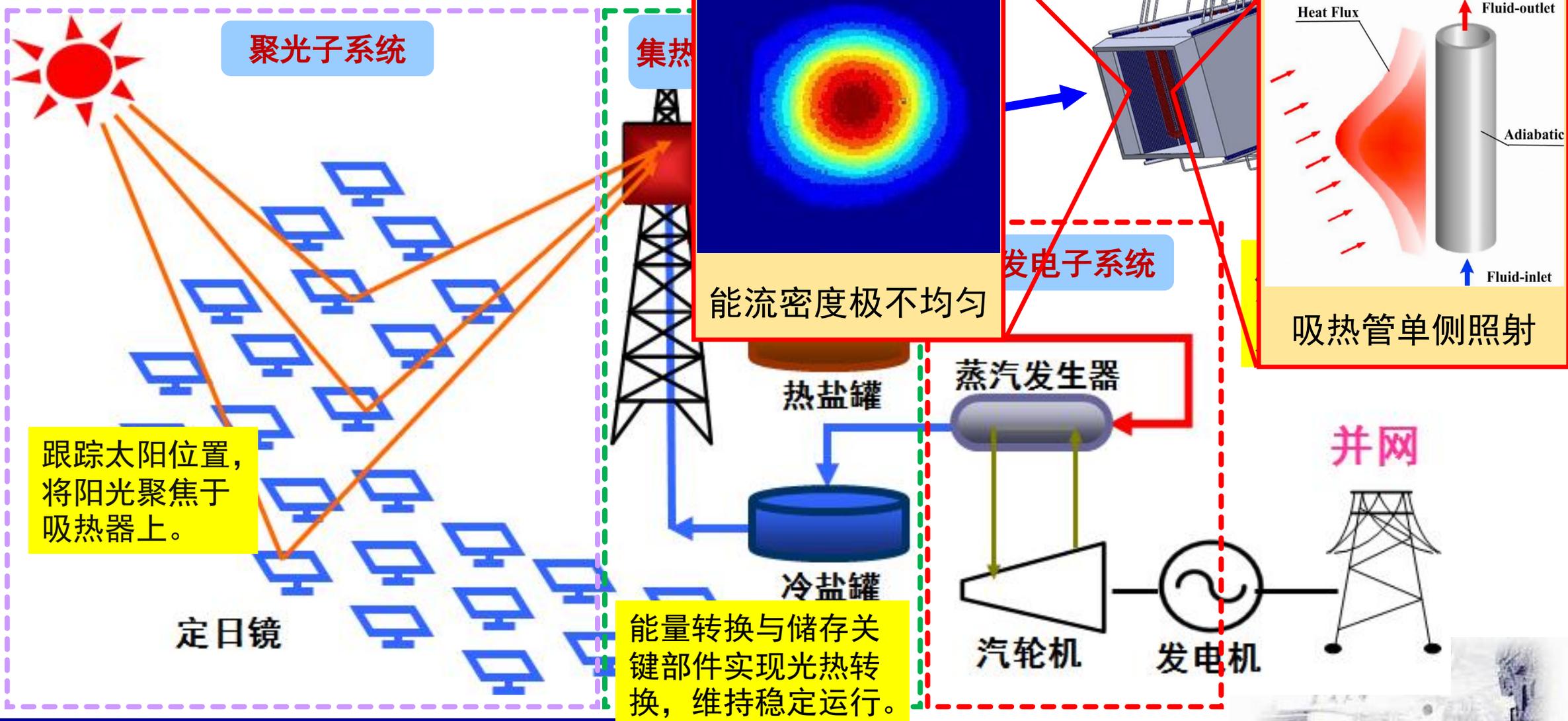
未来可再生能源发电占比持续提升

全球太阳能热发电装机容量



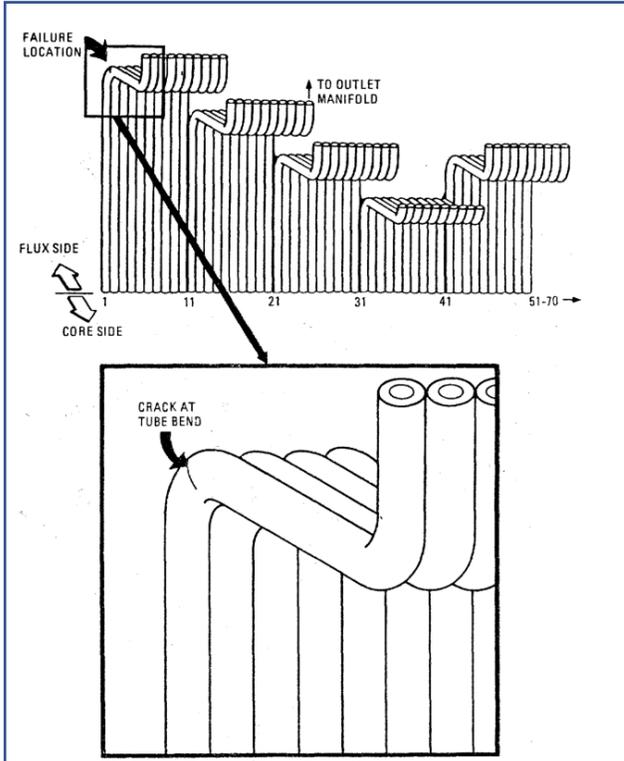
我国累计装机容量占比6%

# 1.2 塔式太阳能热发电技术

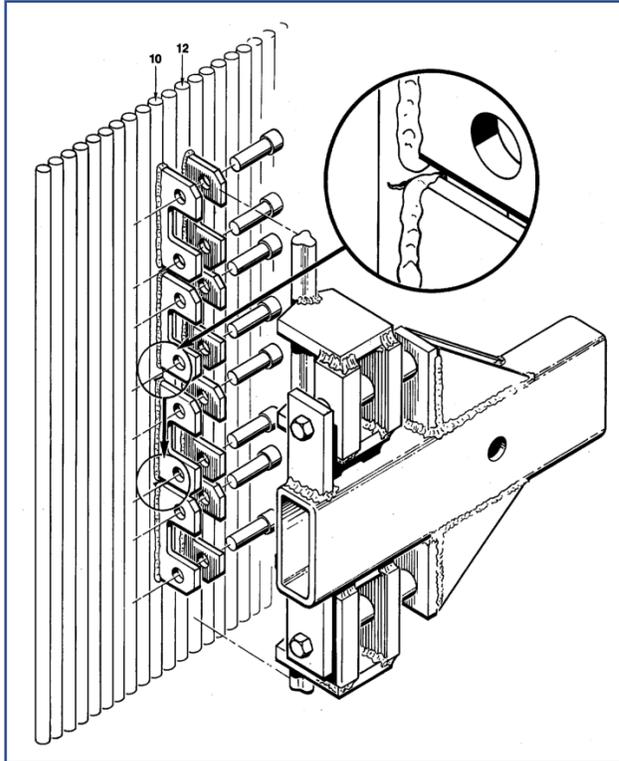


### 1.3 吸热管热应力问题

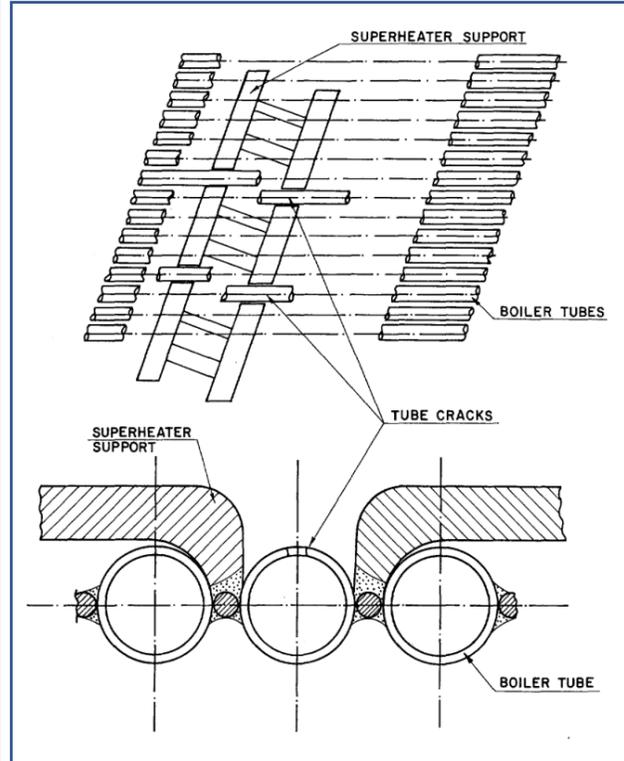
➢ 由于聚焦平面阳光热流密度呈高斯分布，吸热管表面单侧照射，导致吸热管温度分布极度不均匀，进而产生不可忽略的热应力。在管道的弯管处、夹子边缘处等敏感位置容易出现裂纹。



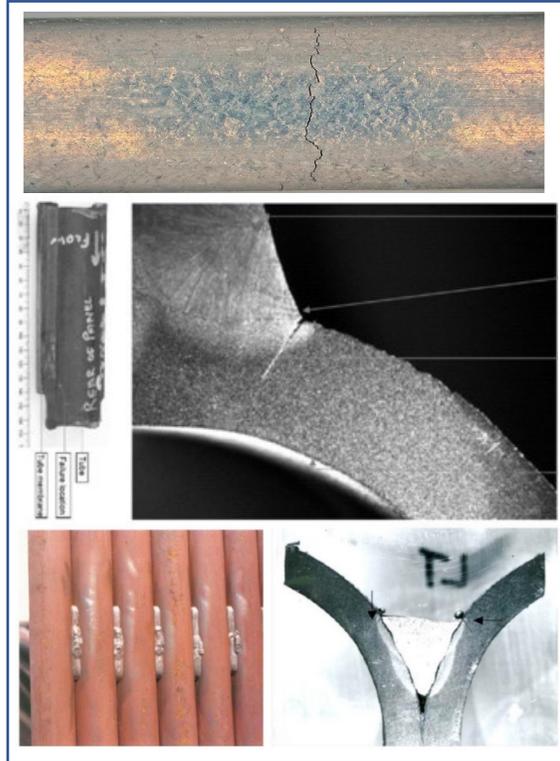
弯管处



夹子边缘处



过热器支架间的沸腾管



实物图

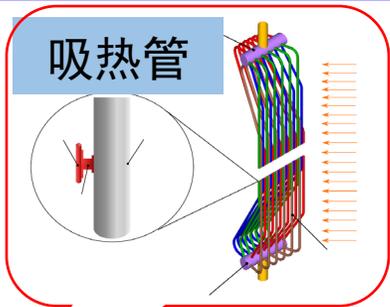
# 1.4 吸热管热应力问题

高度不均匀高热流密度下，吸热器光-热-流-力耦合规律

腔体内非稳态工况下(辐照强度非连续)，耦合输出参数多变，汽水系统运行不稳定



塔式系统中央吸热器



腔体内管壁具有**受热不均、温度梯度大、局部过热**等缺点，受低周疲劳与高温蠕变的影响

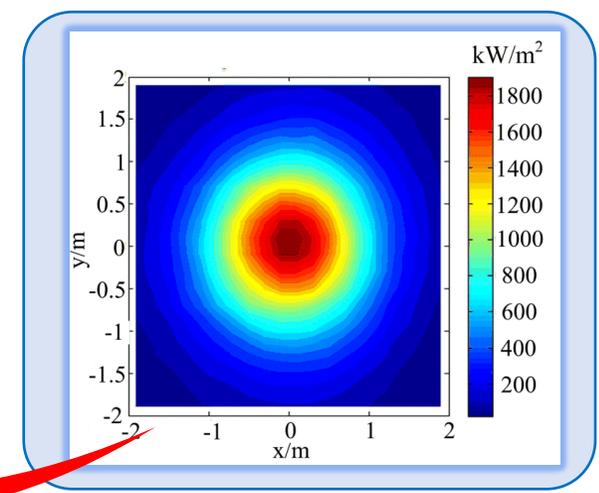
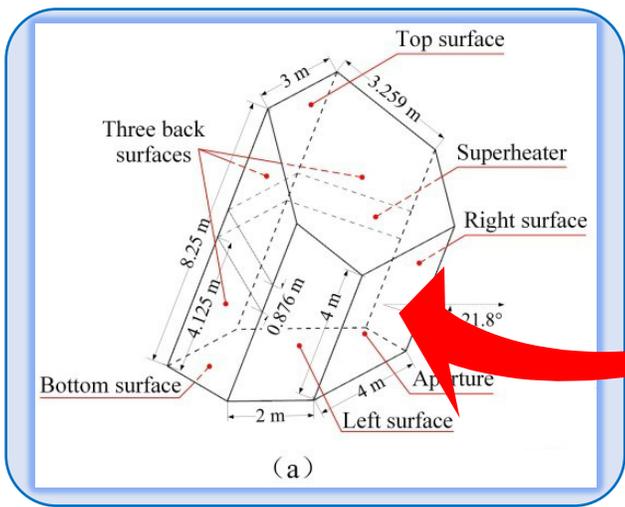
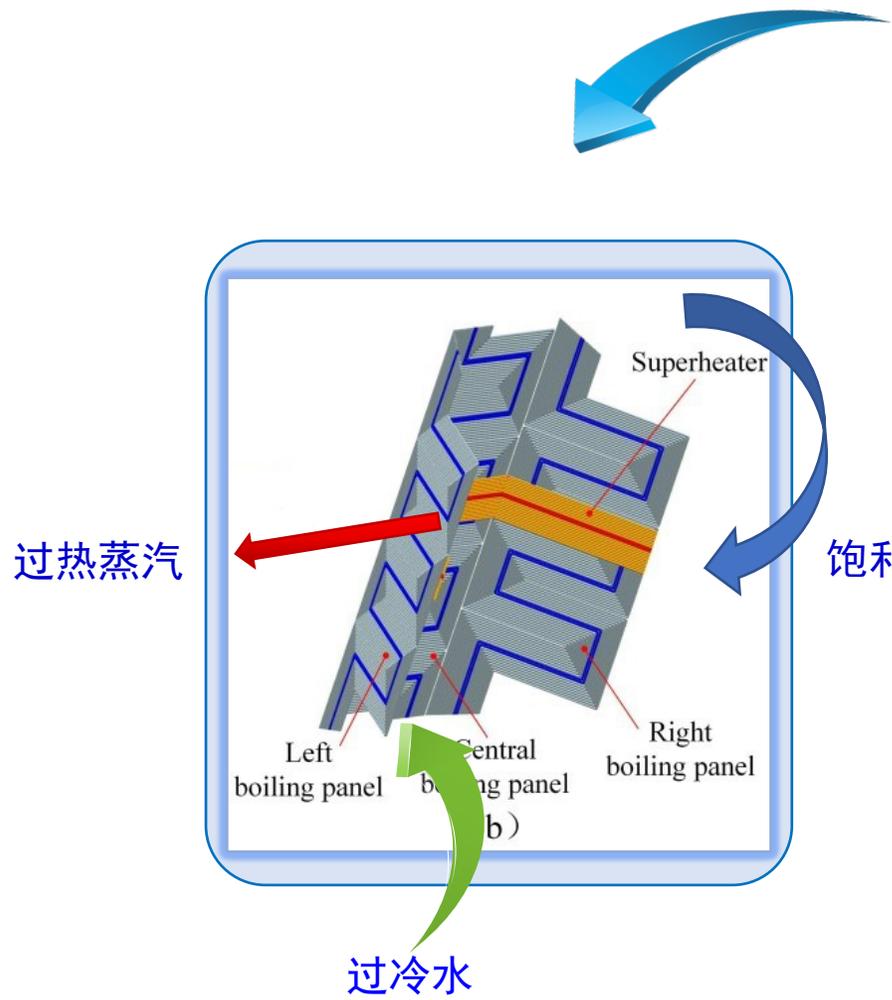
基于光热耦合的高温腔式吸热器中不同部件的**热应力机理及优化措施**



- 1 研究背景与意义
- 2 沸腾管和过热管热应力特性
- 3 吸热面和膜式壁热应力特性
- 4 结论



# 2.1 计算模型—太阳能腔式吸热器光-热-流-力计算模型



吸热管内的相变沸腾换热

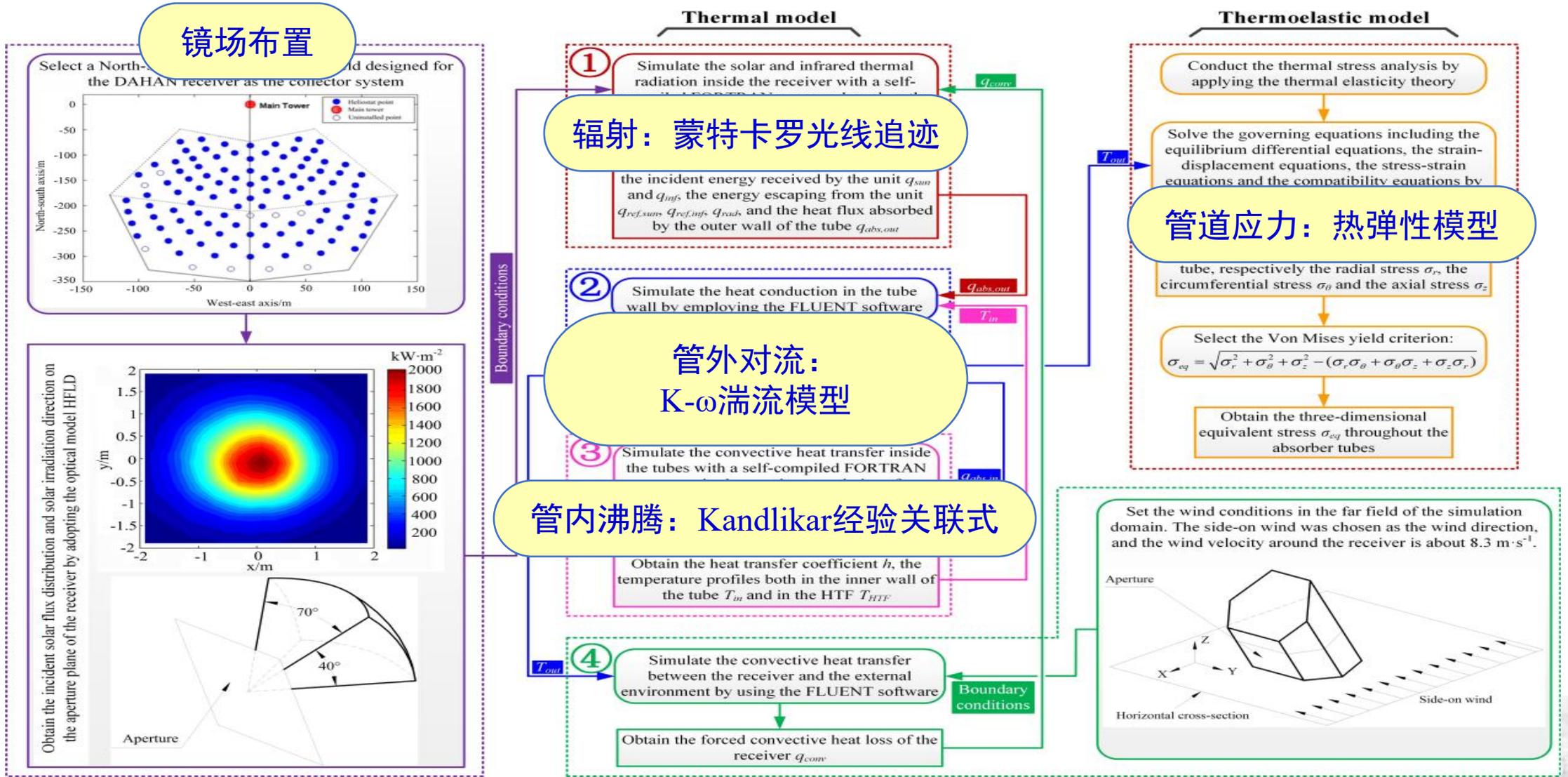
吸热管热弹性应力

腔体内部的太阳辐射及壁面红外辐射

吸热器与周围空气的对流换热



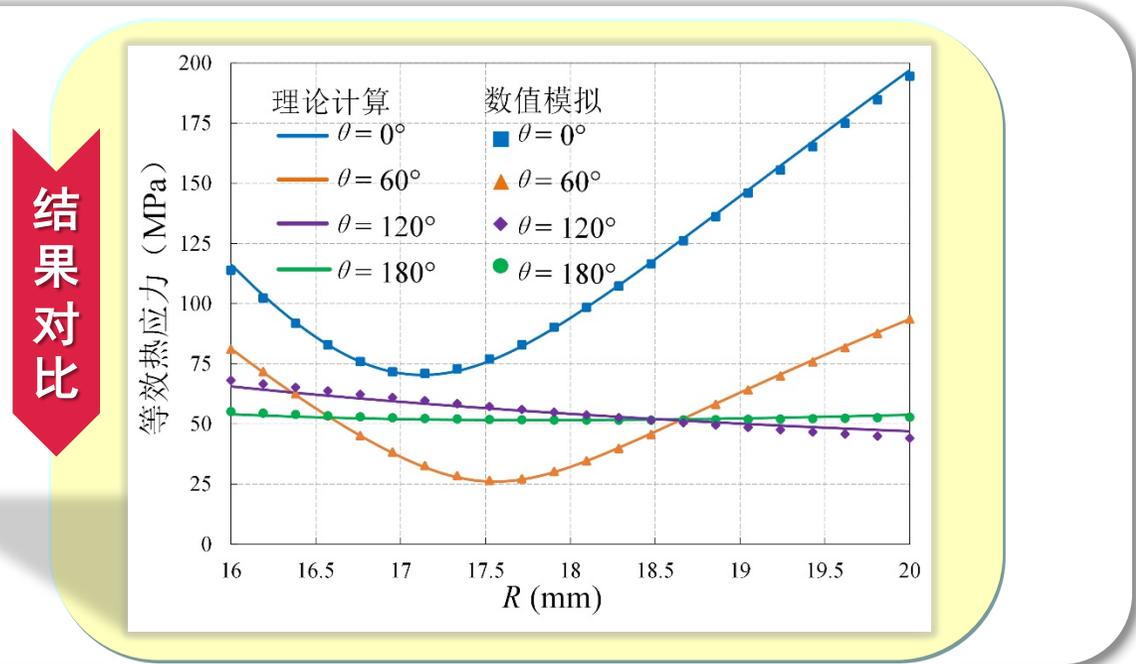
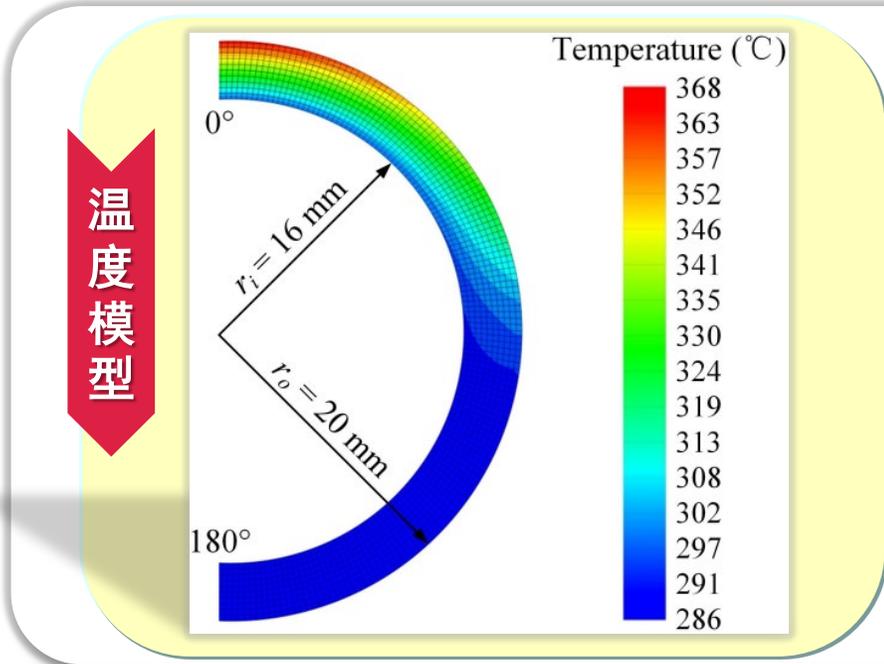
# 2.1 计算模型—太阳能腔式吸热器光-热-流-力计算流程图







## 2.1 计算模型— 弹性力学理论验证



解析法理论

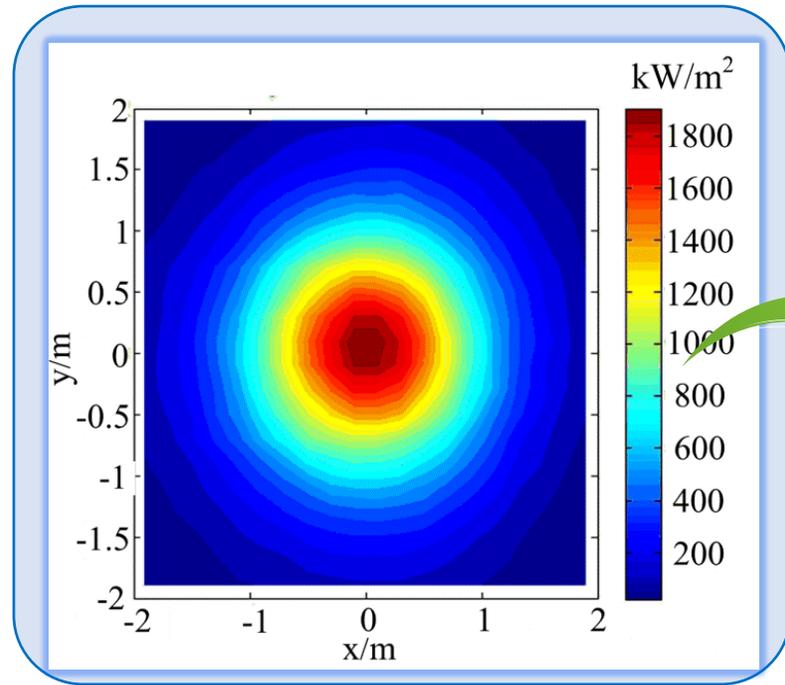
[1] W.R. Logie, J.D. Pye, J. Coventry, Sol. Energy. 160 (2018) 368–379.

[2] R.B. Hetnarski, M.R. Eslami, SMIA, 158 (2019).

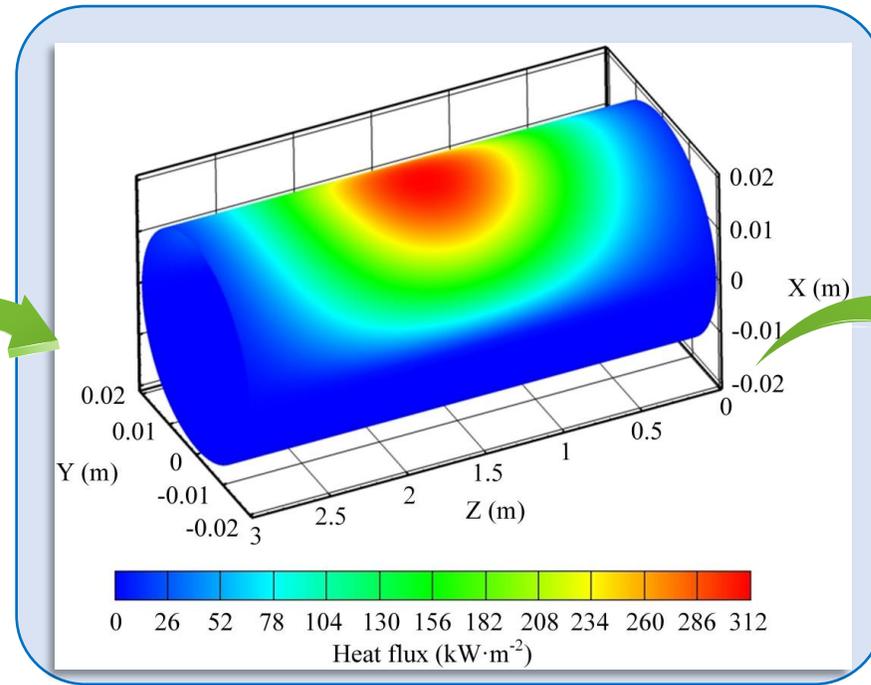
采用解析法获得的等效应力与数值模拟结果对比，数值解与解析解基本一致，最大偏差在5.5%以内

## 2.2 吸热管热性能—入射热流与壁温

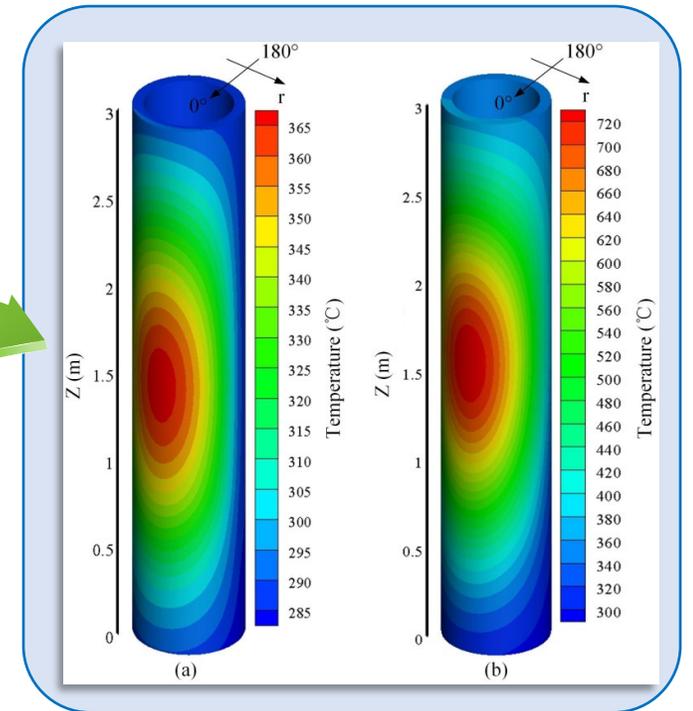
- 相同位置的沸腾管与过热管，入射阳光能流密度分布相同。
- 外壁温度的分布与入射能流的分布是一致的，沿管长和管周向表现出高度的不均匀性。



吸热器开口处能流密度



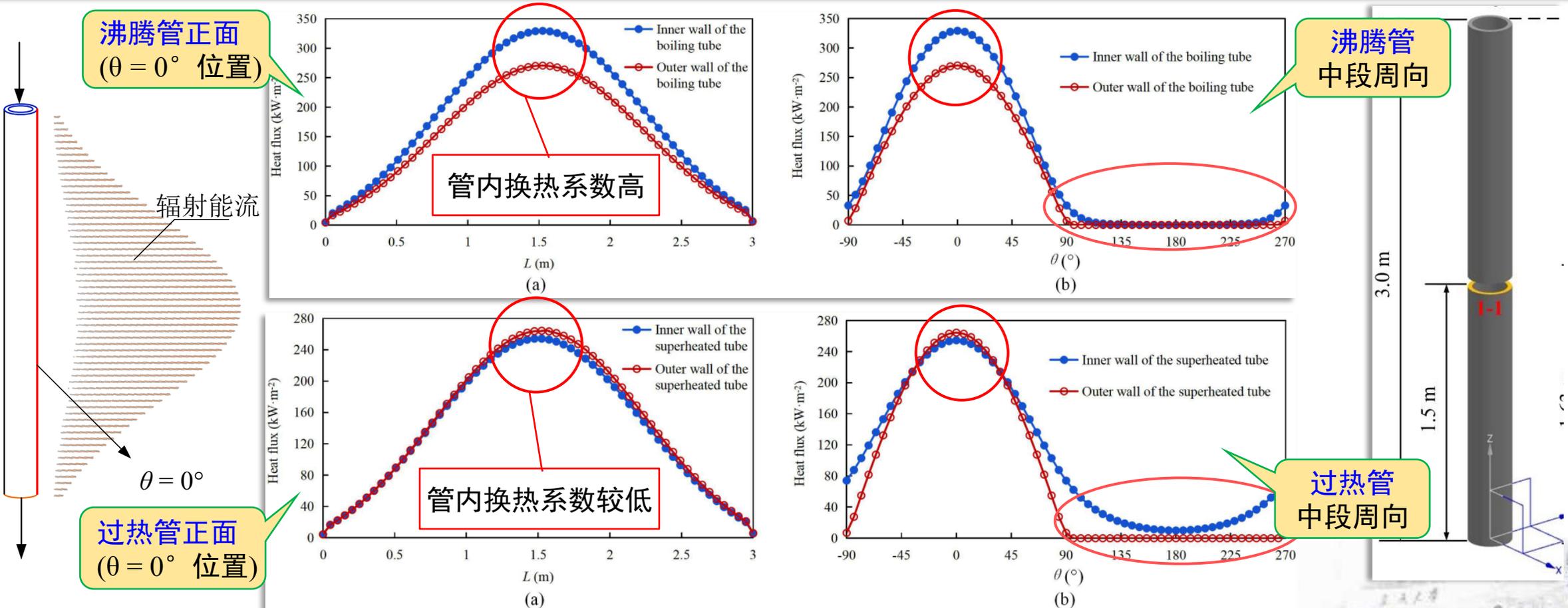
管外壁上入射能流的分布



沸腾管(左)和过热管(右)壁面温度

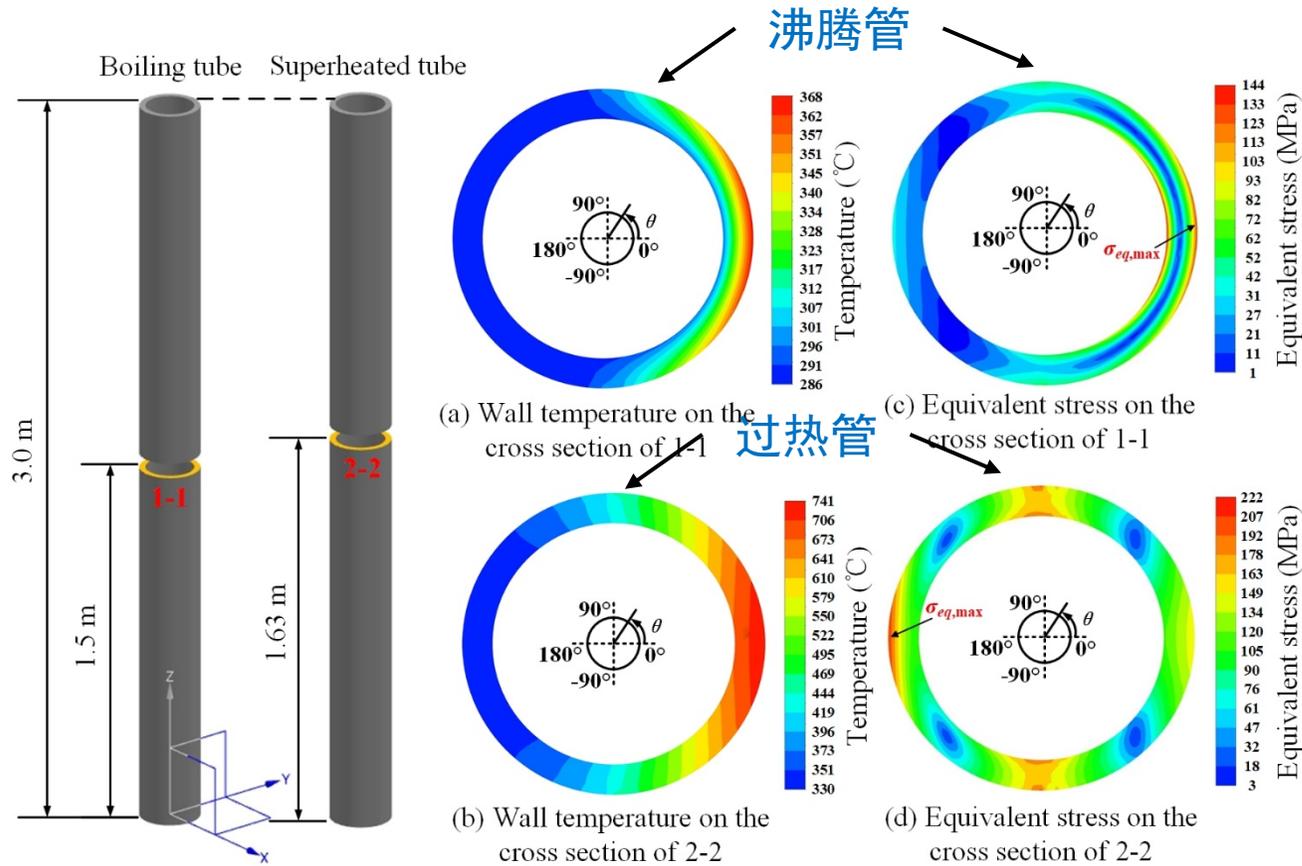
## 2.2 吸热管热性能—吸热管内外壁面热流

- 沸腾管正面内壁热流密度约为外壁的 $d_o/d_i$ 倍，背面内外壁热流密度均为零，径向传热占主导地位
- 过热管正面内外壁热流密度相差不大，背面内壁热流密度明显高于外壁，周向传热现象明显



## 2.2 吸热管热性能—关键截面的温度及热应力分布

➤ 沸腾管和过热管的最高壁温位置存在略微偏差，沸腾管的在最大热流密度处(L = 1.5 m)，过热管的稍有滞后(1.63m)



沸腾管和过热管

温度分布

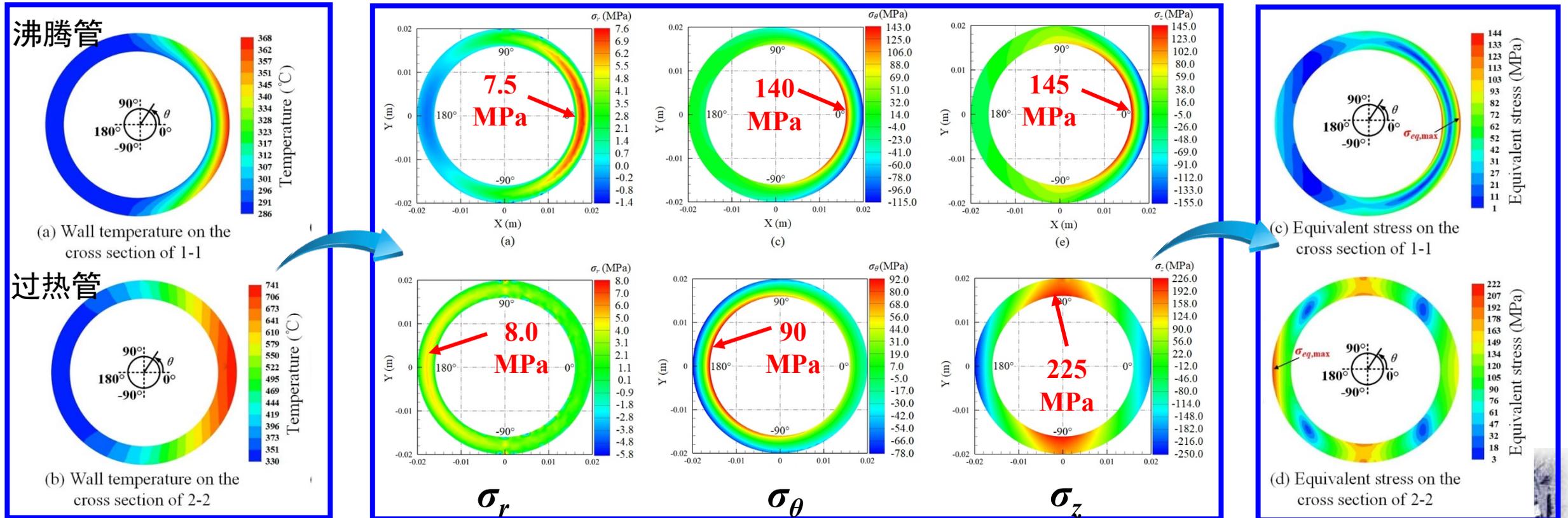
热应力分布

- ✓ 沸腾管温度主要呈径向梯度分布，过热管在径向和周向均存在显著的温度梯度
- ✓ 沸腾管热应力主要集中在正面，过热管热应力沿周向变化较大，在正面（0°）、背面（180°）和两侧（90°和°270°）应力较高。
- ✓ 过热管的峰值等效应力比沸腾管大43%。



## 2.2 吸热管热性能—关键截面的应力分量和等效应力

- 吸热管最大的应力分量是**轴向应力**，其次是周向应力，均比径向应力大一个数量级以上
- 沸腾管正面受**径向温度梯度**影响，外壁面被压缩，内壁面在周向和轴向均被拉伸
- 过热管**周向温度梯度**较大，容易发生弯曲，管的**背面和侧面**均出现较大的轴向应力



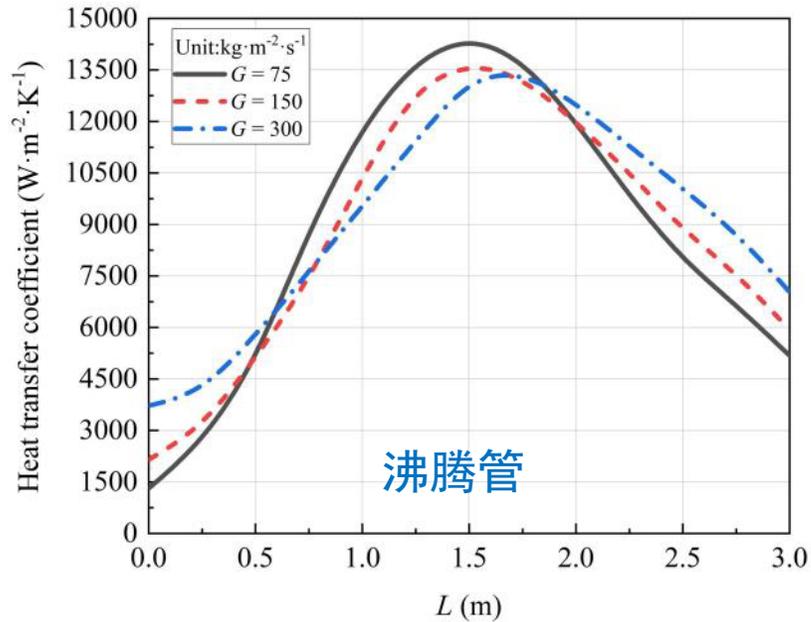
温度

应力分量

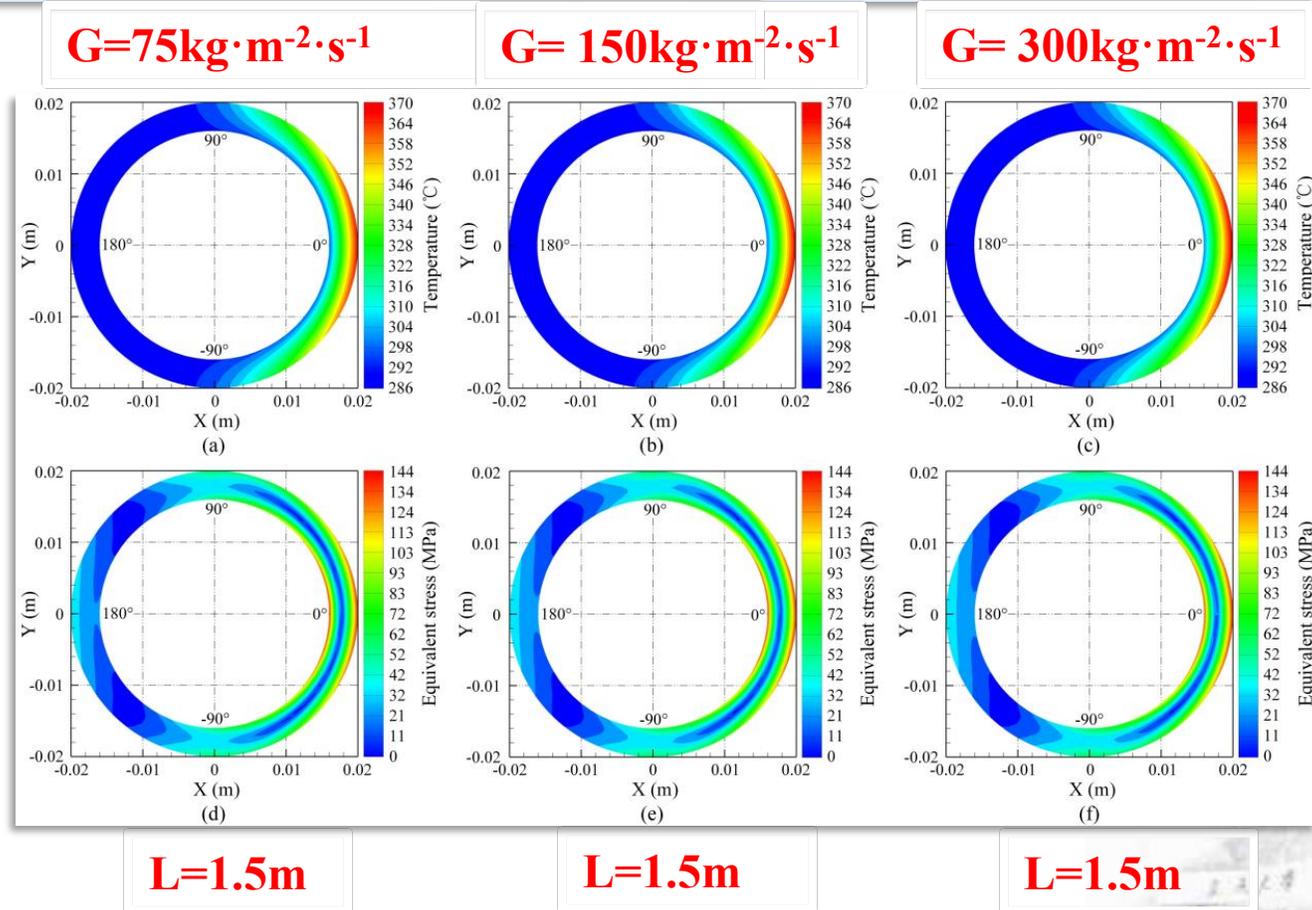
等效应力

## 2.3 流速对吸热管热性能的影响—沸腾管

- 水/蒸汽的流速对沸腾管内沸腾换热系数影响较小，沸腾管换热系数由热流密度决定
- 沸腾管中间截面 (L=1.5m) 管壁温度和应力分布基本保持不变



沿轴向换热系数



L=1.5m

L=1.5m

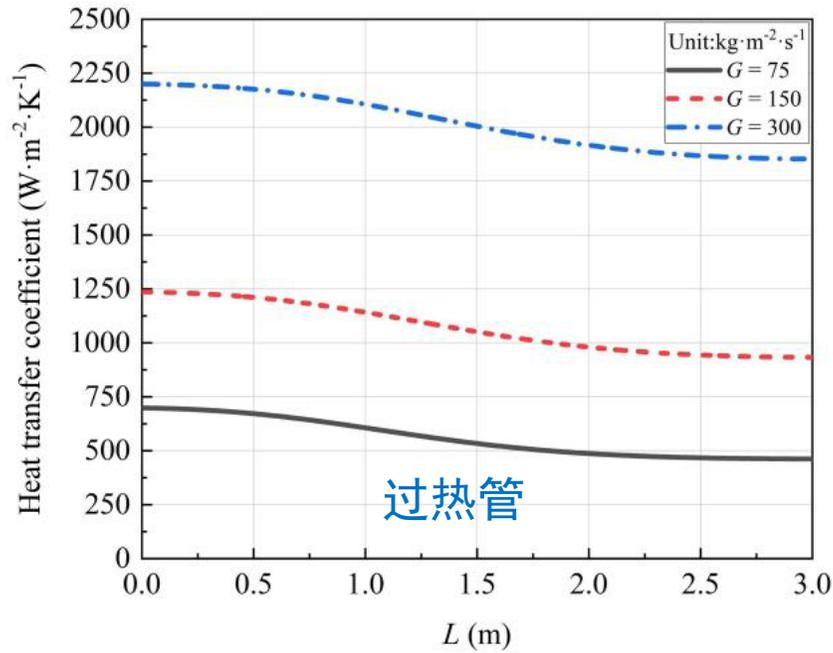
L=1.5m

温度

等效应力

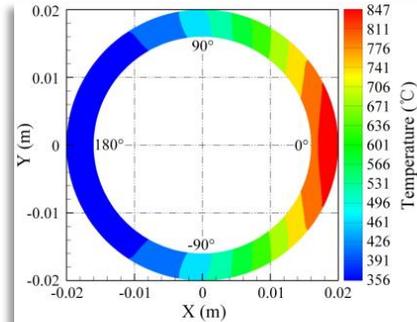
## 2.3 流速对吸热管性能的影响—过热管

- 水/蒸汽的流速对过热管内单相换热系数影响较大，过热管换热系数由蒸汽流速决定
- 过热管壁温随着流速的增加而减小，最大应力位置和大小与流速密切相关，流速增加4倍，应力峰值降低约44%。



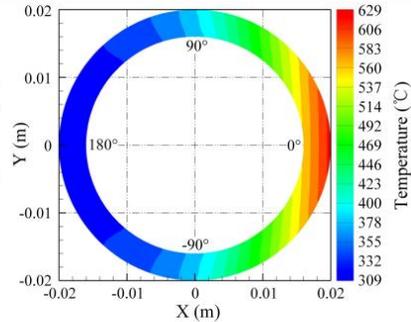
沿轴向换热系数

$G=75\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$



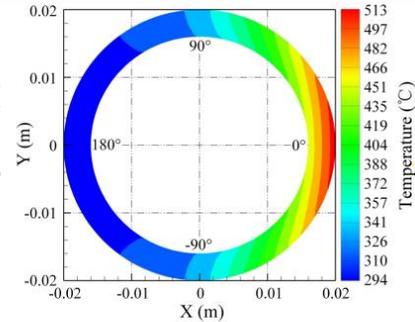
(a)

$G=150\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$



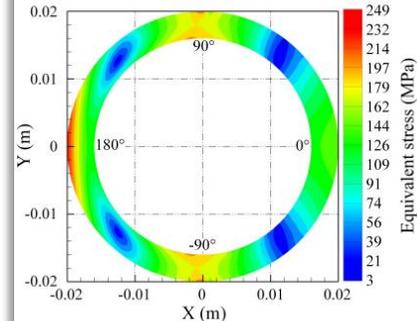
(b)

$G=300\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

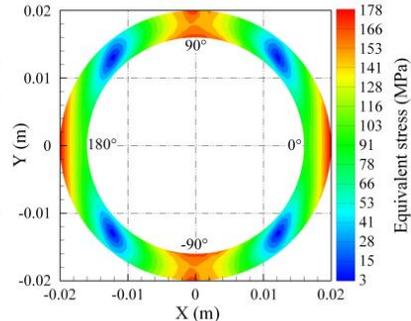


(c)

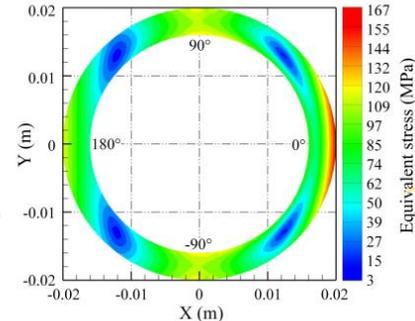
温度



(d)



(e)



(f)

等效应力

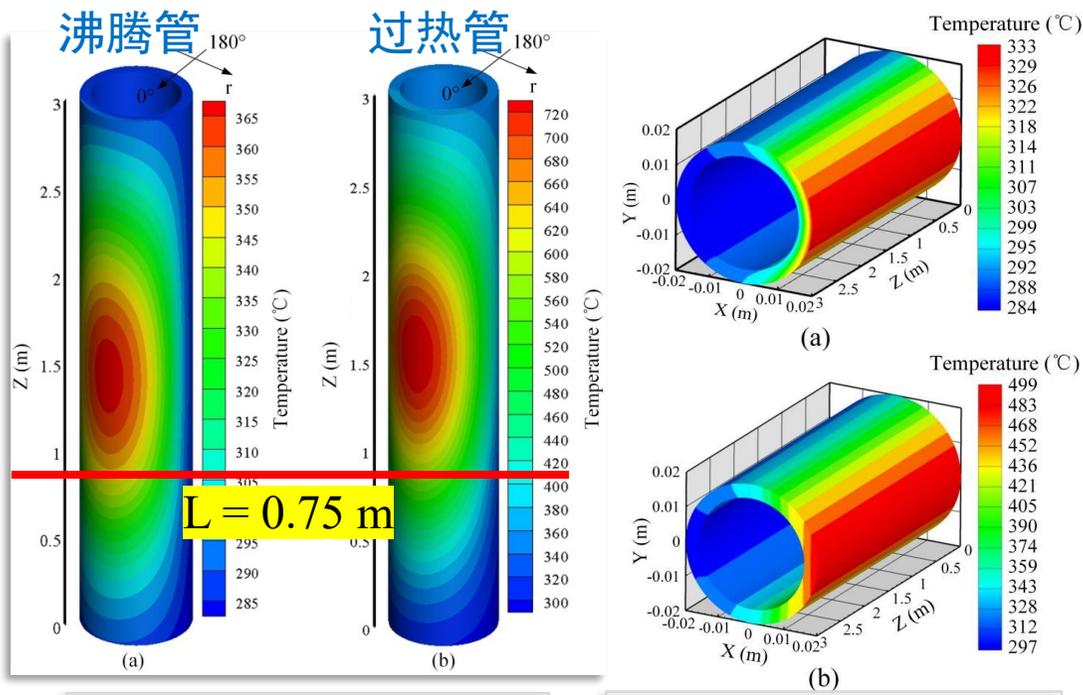
$L=1.64\text{m}$

$L=1.61\text{m}$

$L=1.57\text{m}$

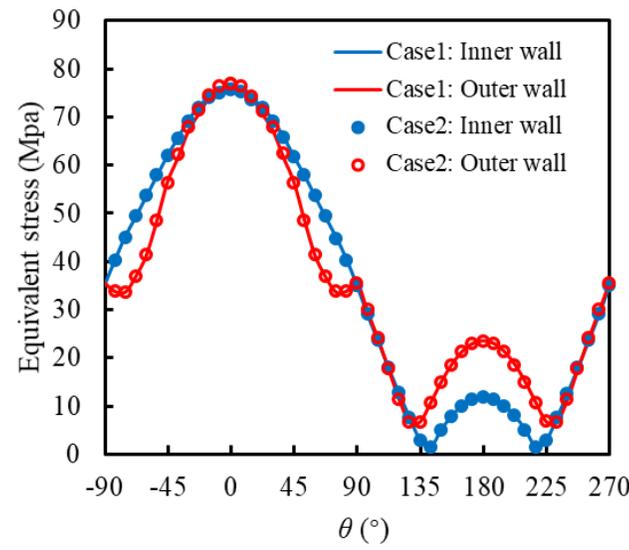
## 2.4 轴向温度梯度对吸热管的影响—辐射能流密度

- 选取实际情况下轴向温度梯度较大处 ( $L = 0.75\text{ m}$ ) 截面温度分布, 对整个管道进行均匀赋值
- 两种情况下,  $L=0.75\text{m}$ 处等效应力最大偏差均在0.6%以内, 表明不均匀的辐射能流密度引起的轴向温度梯度较小, 等效应力主要取决于周向和径向温度梯度。

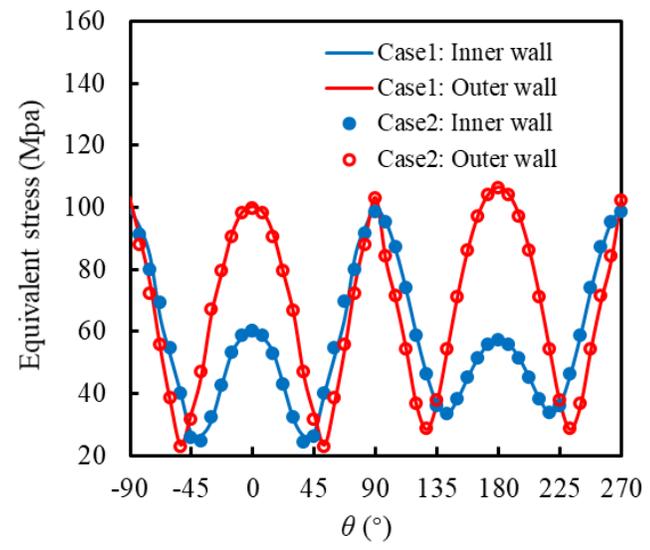


CASE1—实际情况

CASE2—轴向均匀



沸腾管

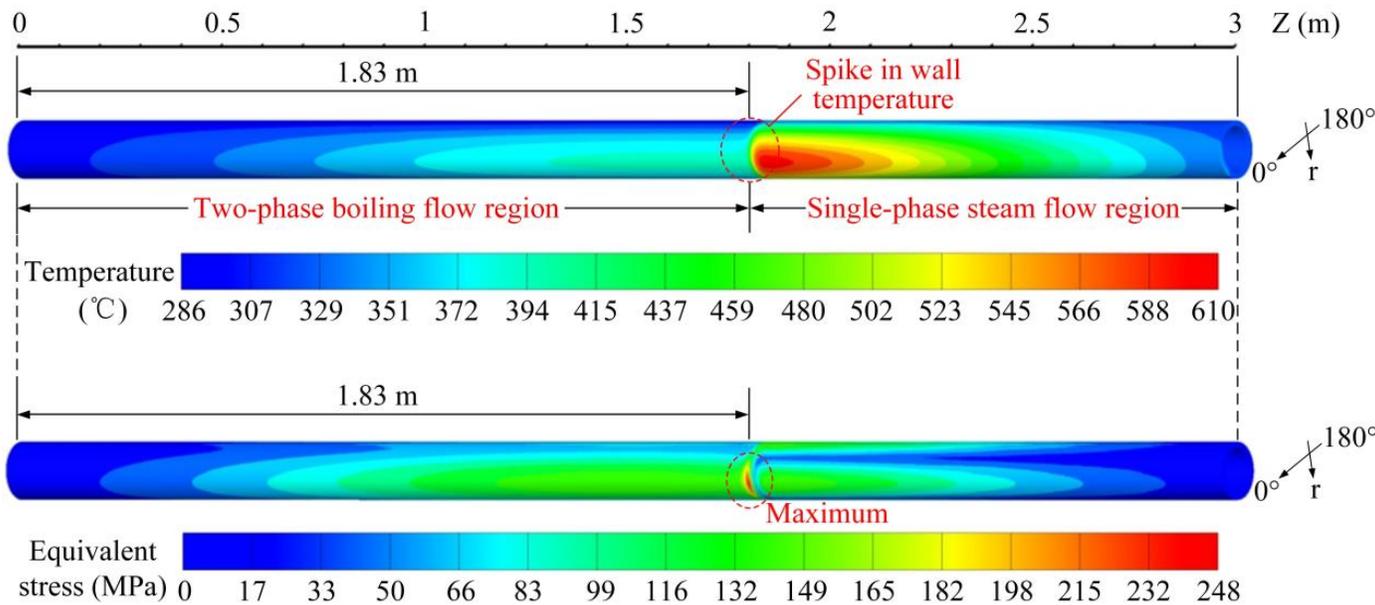


过热管

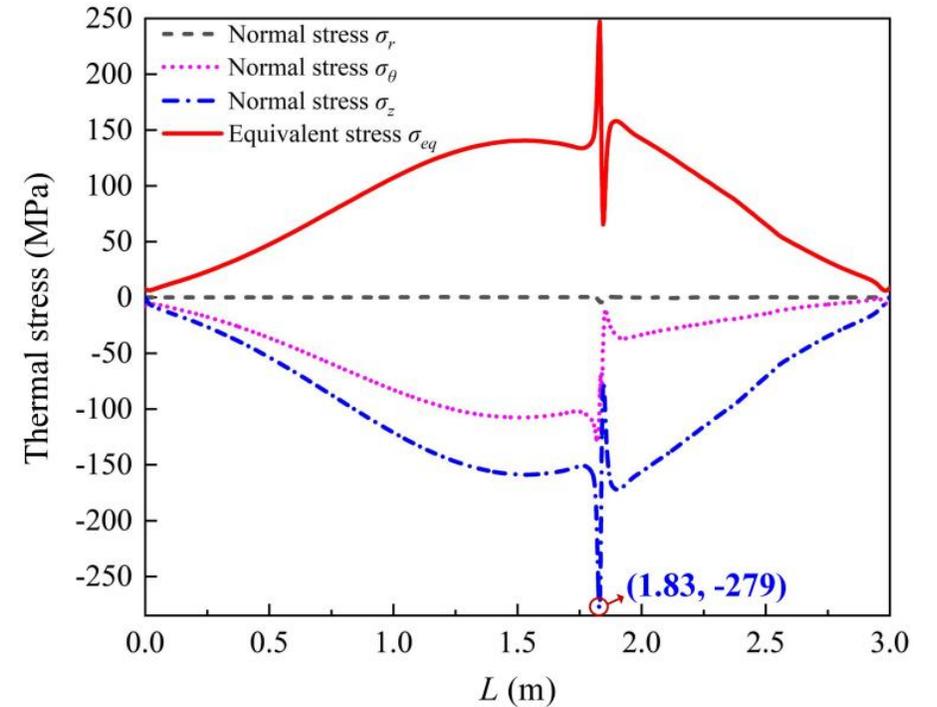
CASE1与CASE2吸热管等效应力沿周向分布

## 2.4 轴向温度梯度对吸热管的影响—干涸处

- 若管中同时存在沸腾区和过热区，则干涸处附近**传热系数急剧下降**，引起管道壁温急剧上升，产生很大的温度梯度
- 吸热管正面**应力分量**和**等效应力**在干涸处发生**突变**。



管壁非线性轴向温度和应力



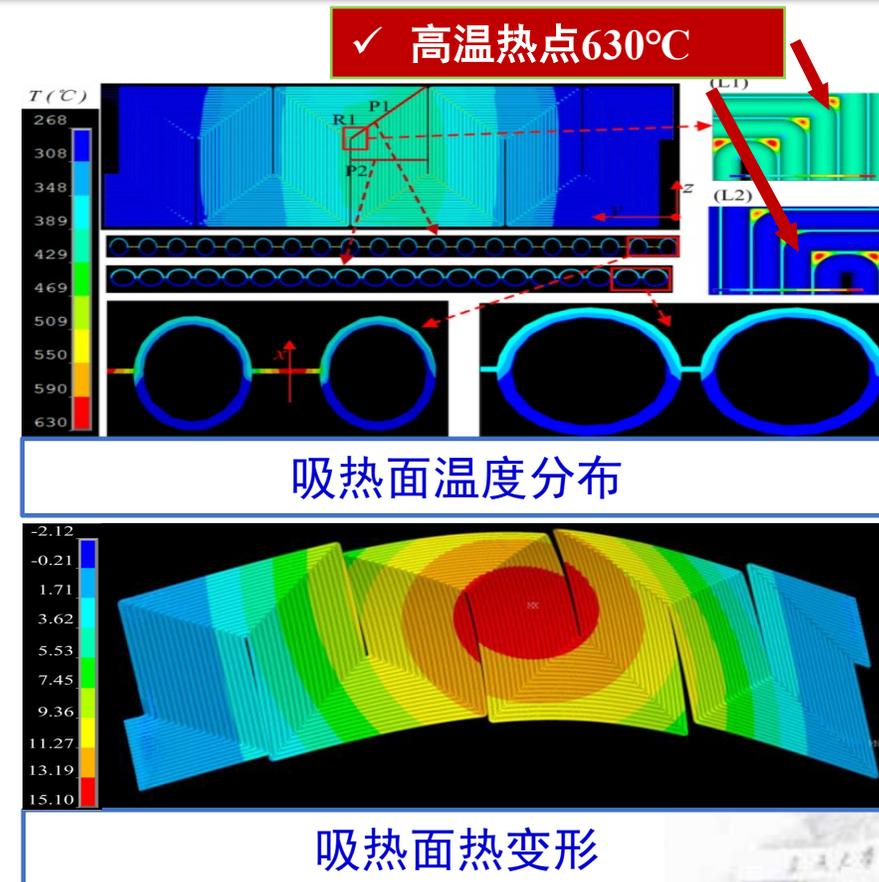
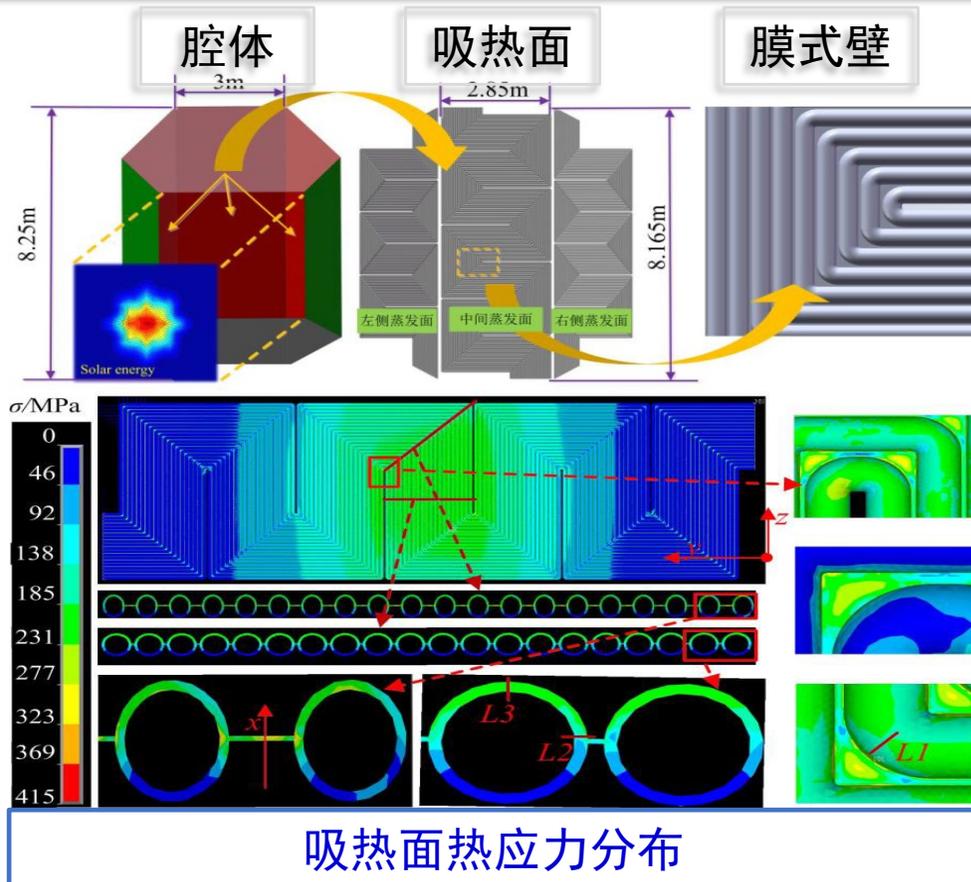
吸热管正面应力分量和等效应力

- 1 研究背景与意义
- 2 沸腾管和过热管热应力特性
- 3 吸热面和膜式壁热应力特性
- 4 结论



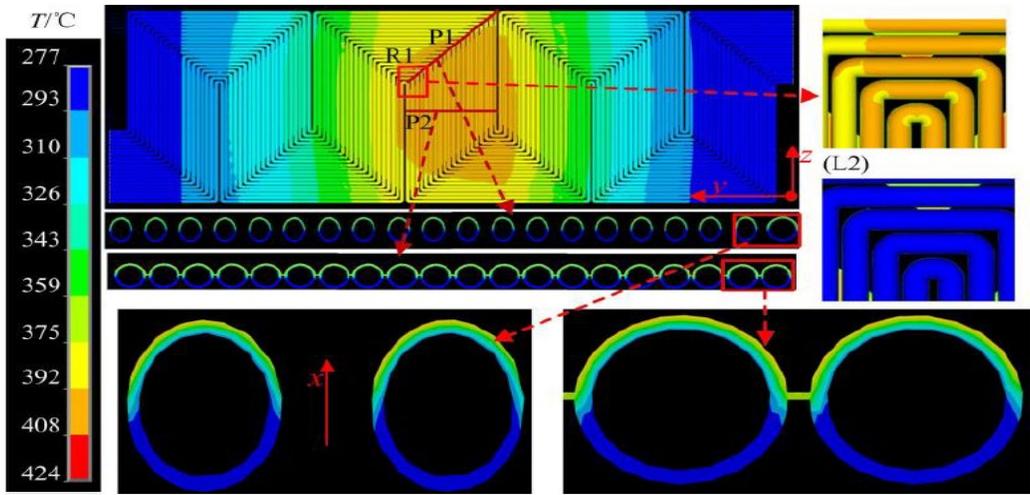
### 3.1 吸热器膜式壁的温度和应力分布特性

- 吸热面弯头处膜式壁易产生**高温热点**，造成附近**应力集中**，最大应力可达415MPa
- 吸热面整体出现较大变形，最大位移为17cm

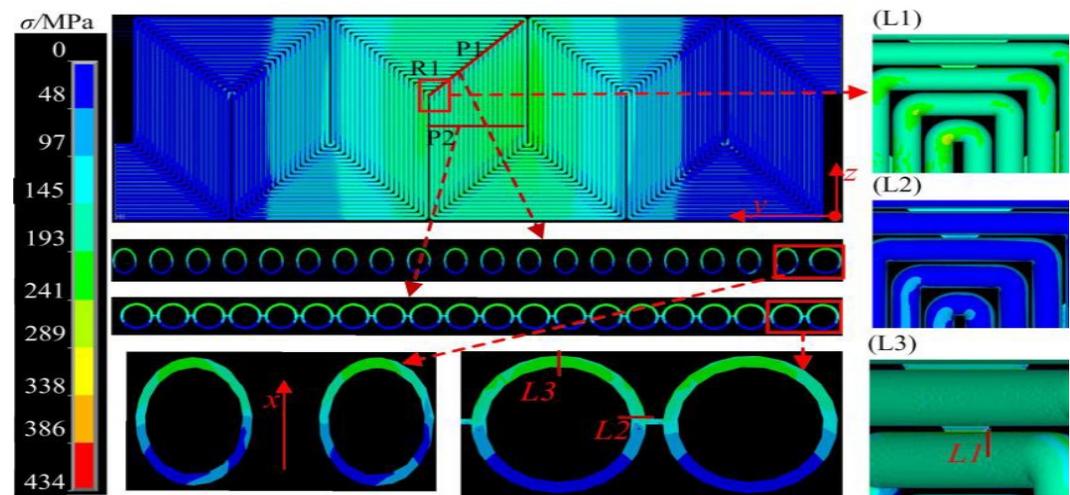


### 3.2 吸热器膜式壁的结构改进

- 通过剪除弯头处的翅片，可以消除高温热点、翅片温度大幅下降，从630°C下降至420°C
- 翅片最大应力略有增加(增大19MPa)，但因温度下降明显，故吸热器的安全性更高



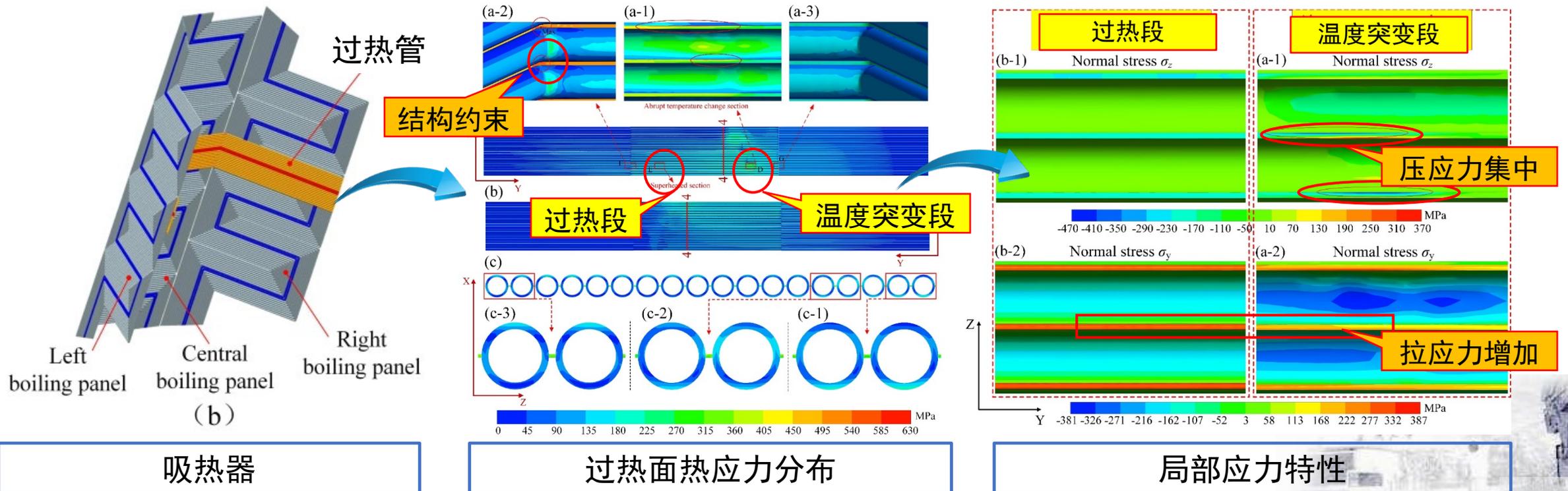
剪切膜式壁面温度分布



剪切膜式壁面应力分布

### 3.3 过热器的应力分布特性

- 为保证过热器出口为所需温度，在过热器进口处掺混一定过冷水来调节，因而过热管会存在干涸点，在该处轴向温度发生突增，管急剧扩张抑制了膜式壁膨胀，翅片与管道连接处产生了较大的压应力集中
- 沿流动方向膜式壁上平行于管道的应力分量（拉应力）增加
- 高温管壁的膨胀更易受到弯曲结构的强烈约束，导致管壁与膜式壁上出现应力集中



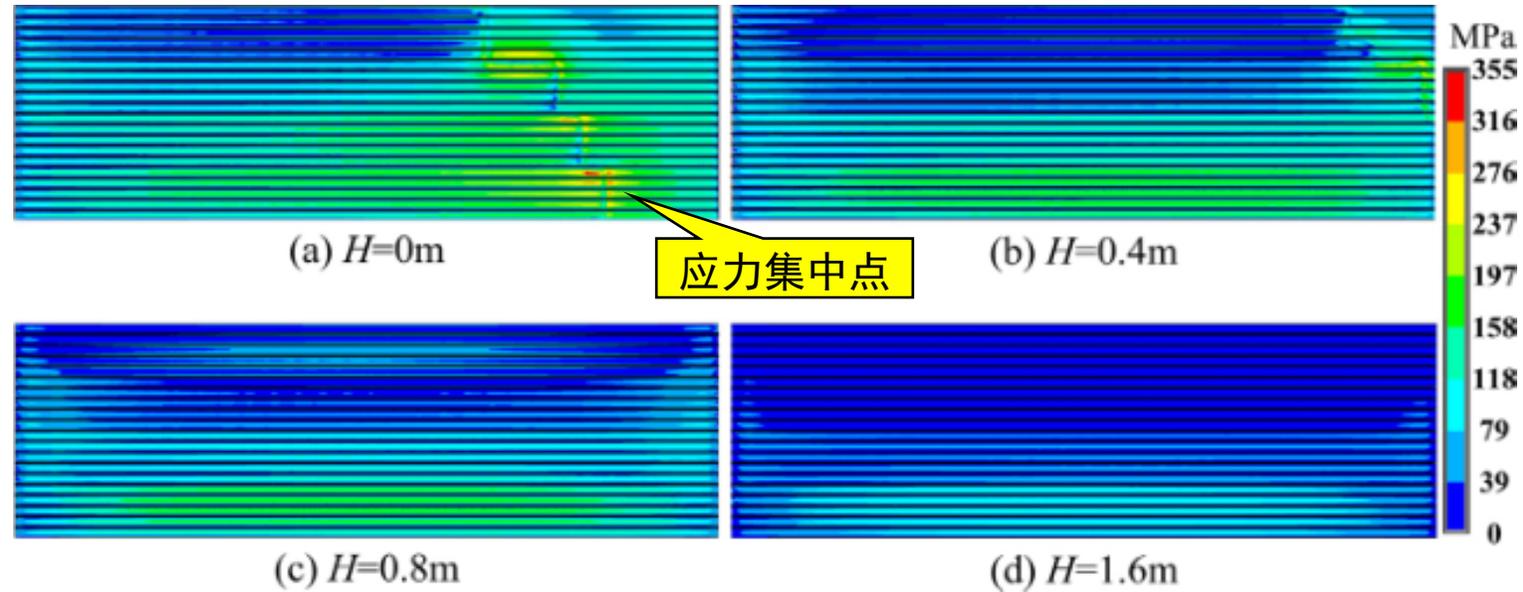
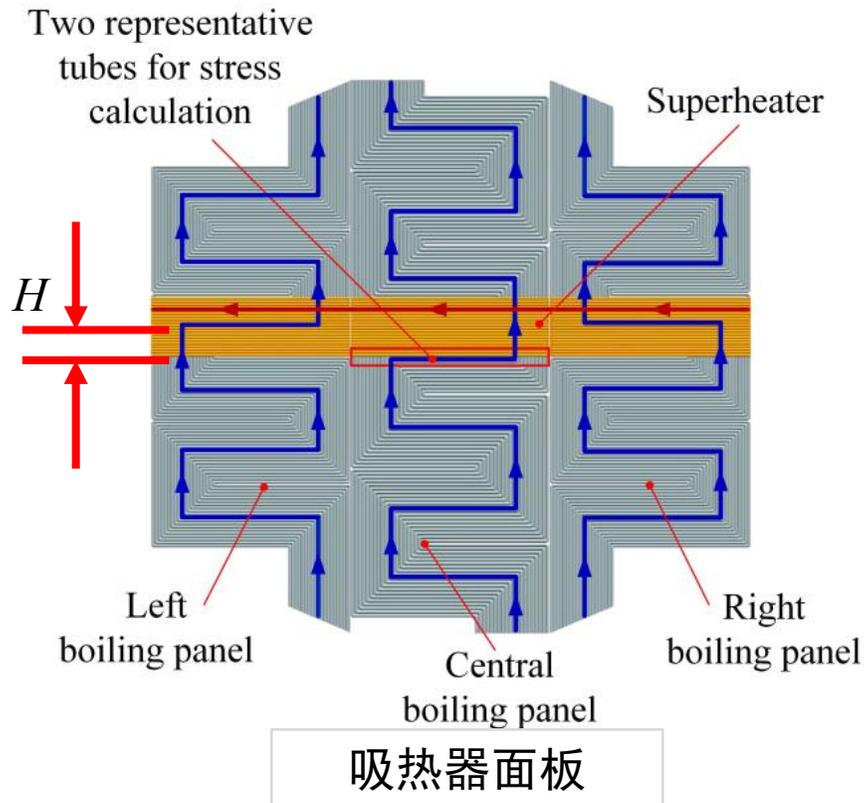
吸热器

过热面热应力分布

局部应力特性

### 3.4 不同安装高度对过热器热应力的影响

- 当过热器从中心移动 ( $H=0\text{m}$ ) 到 $H=1.6\text{m}$ 高度时, 热应力显著减小
- 过热器置于中心位置, 会产生**应力集中点** (350MPa), 随着安装高度的增加, 应力集中点消失



过热管置于不同高度处的热应力分布

只要流体能吸收足够的热量进行过热, 过热器应安装在远离高辐射热流的位置

1

研究背景与意义

2

沸腾管和过热管热应力特性

3

吸热面和膜式壁热应力特性

4

结论



## 4 结论

- 沸腾管截面管壁温度主要呈**径向梯度分布**，而过热管截面在**径向和周向**均存在显著的温度梯度，热应力沿周向变化较大，过热管的峰值等效应力比沸腾管大43%
- 流量对沸腾管的应力影响比较小，对过热管的应力影响比较显著，流速增加4倍，过热管应力峰值降低约44%；由辐射能流引起的轴向温度梯度对热应力的影响比较小，而**干涸点对吸热管热应力有很大影响**
- 吸热器沸腾面弯管处膜式壁存在**高温热点**（630°C以上），致使附近区域热应力很大，通过剪除翅片的措施，可以有效消除热点，提高安全可靠性能
- 过热器干涸点发生轴向温度突变，致使翅片与管道连接处产生**压应力集中**
- 安装高度对过热器壁面热应力有较大影响，随着安装高度的增加，热应力大幅降低，因此过热器应安装在远离高辐射热流的位置



THANKS FOR YOUR ATTENTION!

感谢：

国家自然科学基金国际合作与交流项目 (No. 51961135102)

陕西省科技厅重点项目 (No. 2017ZDXM-GY-017)

国家自然科学基金青年项目 (No. 51706168)

