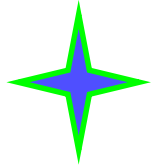




COMSOL  
CONFERENCE  
2015 北京

SCU



# 基于COMSOL的微波能工业 应用优化

朱铎丞

四川大学电子信息学院

Email: [zhuhuacheng@126.com](mailto:zhuhuacheng@126.com)

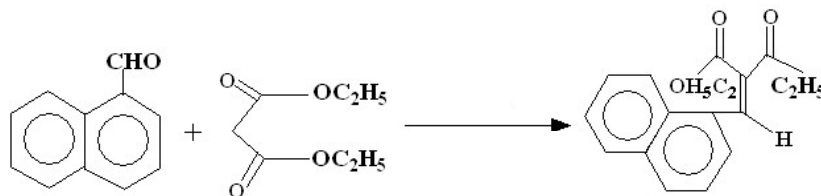
# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论

# 微波对化学反应的高效作用

- 有机反应中重要的一类反应：缩合反应过程使用微波后节能效果非常明显，见下表。

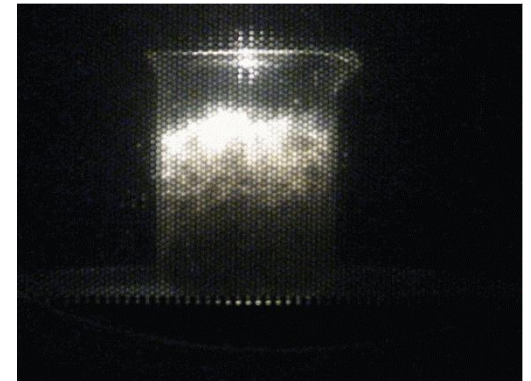
## $\alpha$ 甲醛与丙二酸二乙酯的缩合反应



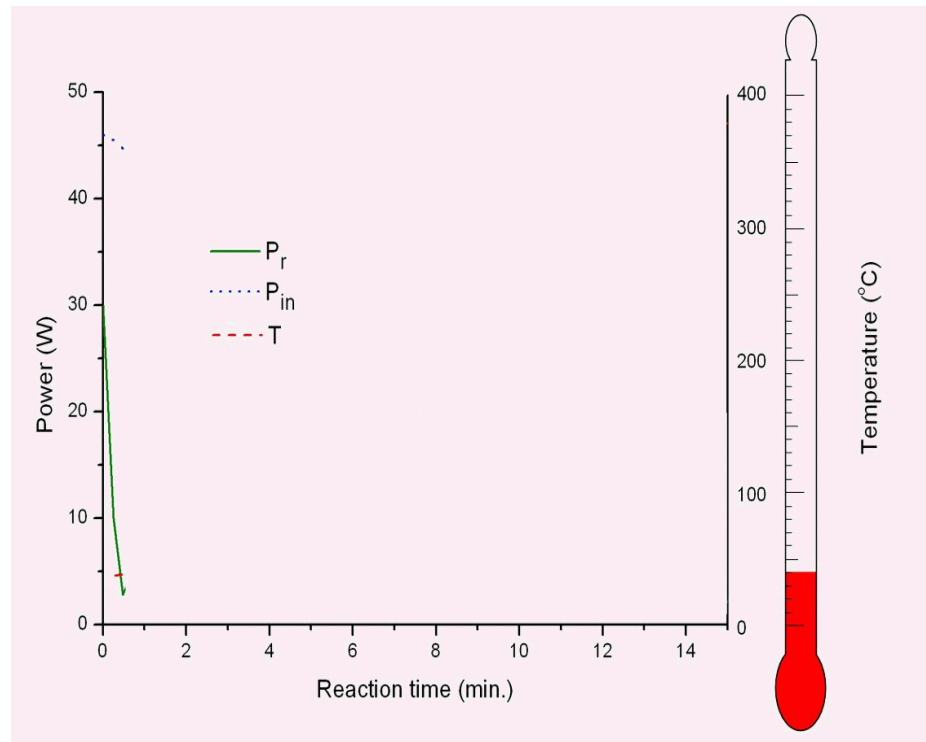
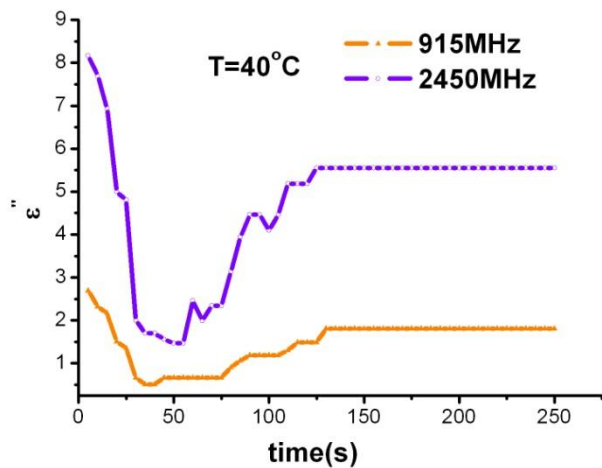
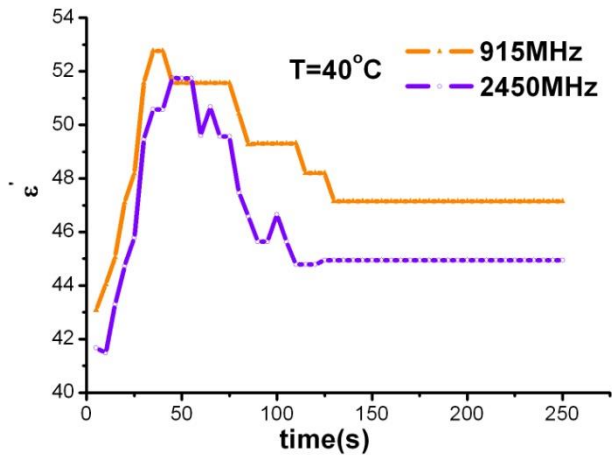
加热方式	耗时 (min)	收率 (%)	耗能 (KJ/mol)
传统加热	1440	44.7	4.9
微波加热	5	78	0.24

# 微波能工业应用的挑战

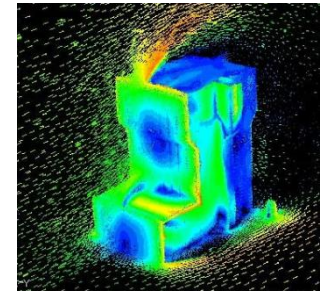
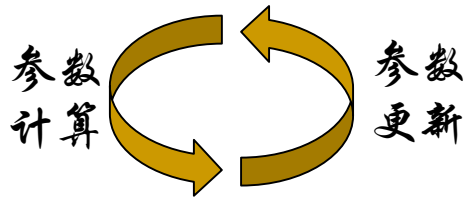
- 反应体系温度突变，导致反应物被烧毁或者爆炸。
- 反应体系对微波能量反射突变，损坏微波源。



# 化学反应复介电系数的非线性特征



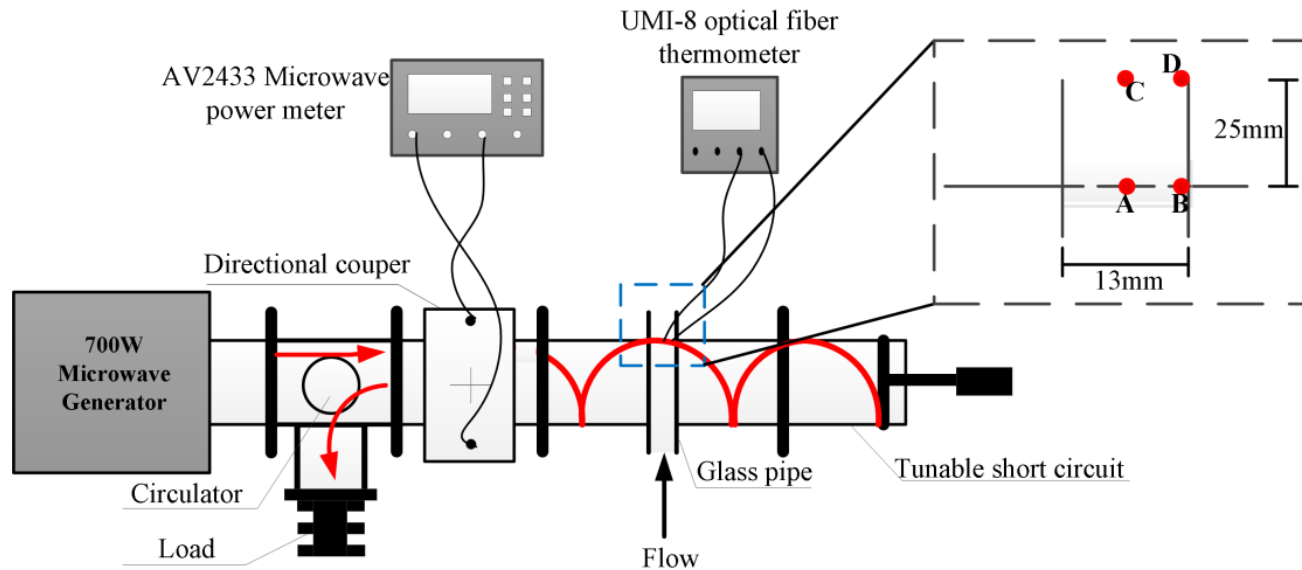
# 基于多物理场的优化与预测



# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论

# 生物柴油流动体系微波处理



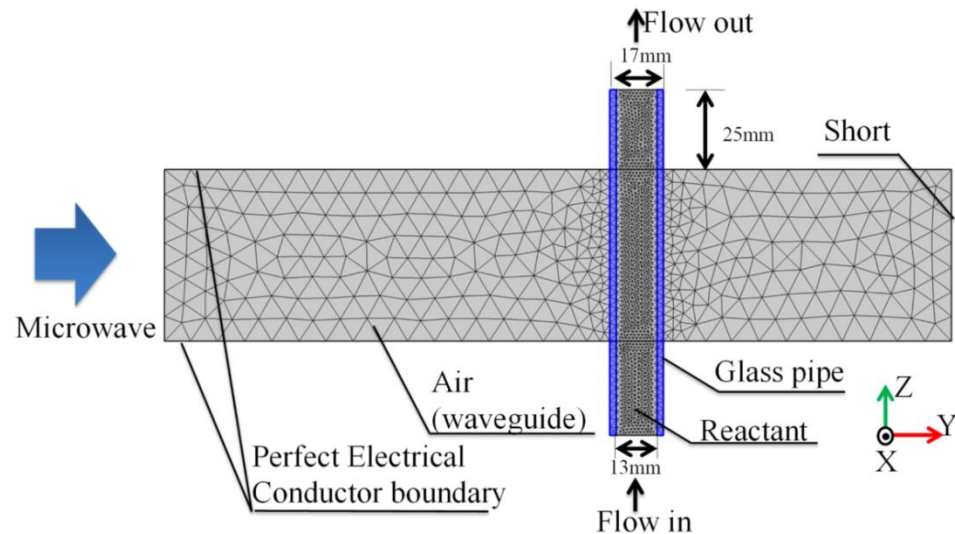


# 生物柴油流动体系微波处理

$$\rho_m C_p \left( \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T(\vec{r}, t) \right) = K_t \nabla^2 T(\vec{r}, t) + P_d(\vec{r}, t)$$

$$\rho_m \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \cdot \vec{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

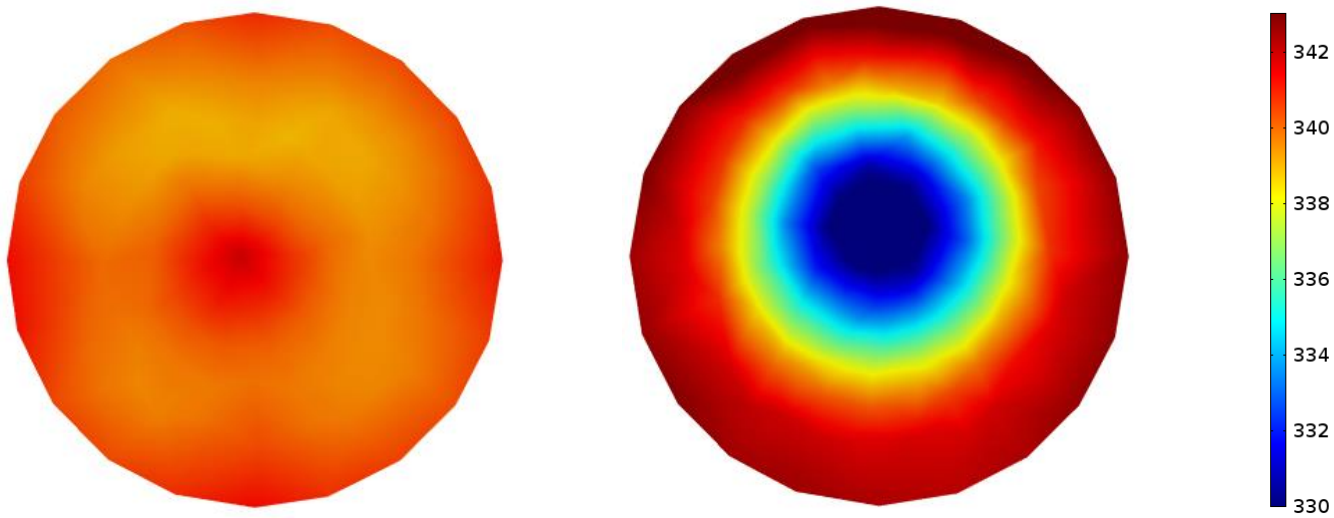


# 生物柴油流动体系微波处理

实验与计算的不同流量条件下的A点和B点的温度值及其相对误差

Initial velocity (cm/s)	Point	Computational Temperature (K)	Measurement Temperature (K)	Error (%)
4	A	340.86	338.35	0.7%
	B	340.40	340.20	0.1%
6	A	330.96	329.80	0.4%
	B	339.17	338.35	0.2%
8	A	324.14	325.25	0.3%
	B	337.99	336.90	0.3%
10	A	320.06	320.80	0.2%
	B	338.17	337.15	0.3%

# 生物柴油流动体系微波处理



•带有十字螺旋结构(a)与无十字螺旋结构(b)的上表面温度计算结果对比 (单位:  $K$ )

# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论

# 工业用管道加热装置优化及快速算法

## 大尺寸管道加热设备快速计算

- 假设时间  $t = mt'$ ,  $m \geq 1$  为时间缩比尺度变换因子
  - 热传导方程可以变换为:

$$\rho_m C_\rho \frac{\partial T}{\partial t'} - \nabla \cdot (mk \nabla T) = mQ(mt')$$

- 微波加热一般是周期性的热源，功率损耗密度平均值  $Q(mt') = Q(t')$ ，则:

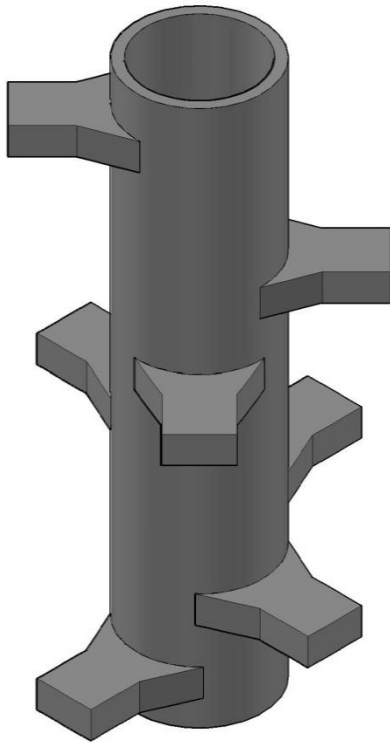
$$\rho_m C_\rho \frac{\partial T}{\partial t'} - \nabla \cdot (mk \nabla T) = mQ(t')$$

**结论：**变换等效热传导系数 ( $mk$ )，功率损耗密度 ( $mQ$ )，实现时间的压缩。

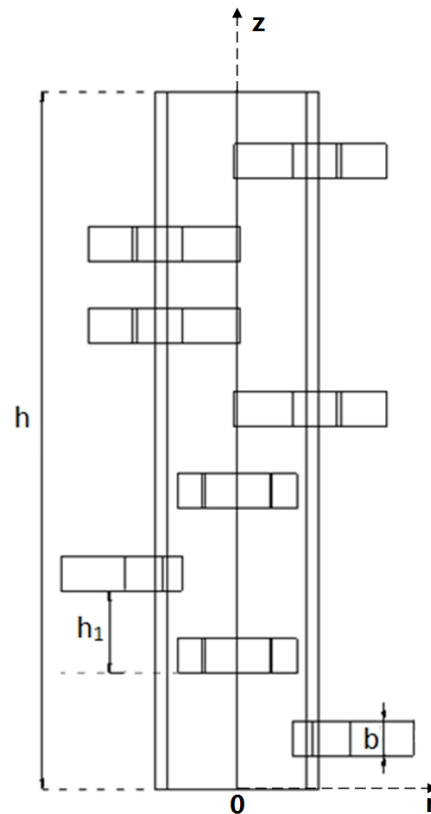
# 工业用管道加热装置优化及快速算法

## 大尺寸管道加热设备快速计算

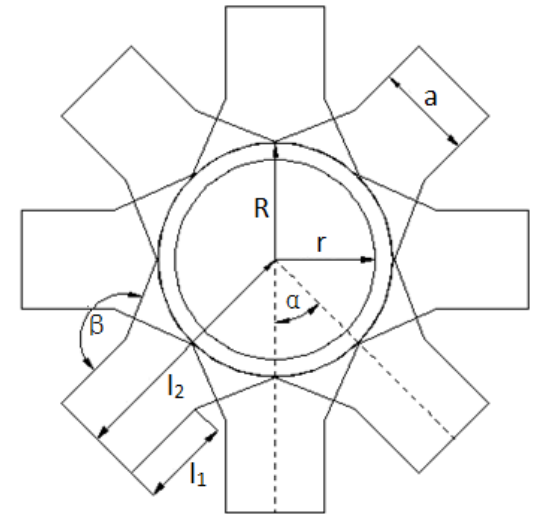
### “管道式”固体材料微波加热装置结构



(a) 立体结构图



(b) 侧视图



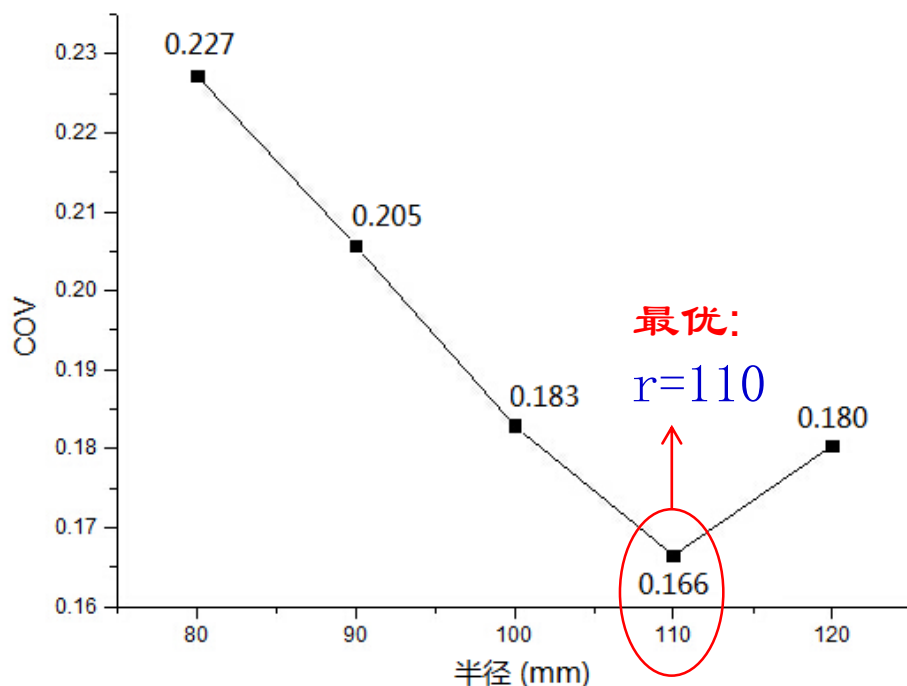
(c) 俯视图

# 工业用管道加热装置优化及快速算法

## 大尺寸管道加热设备快速计算

### ■ 量化均匀性——褐煤温度场 $COV$ 值曲线

- $r < 110$ , 管道半径的增加,  $COV$ 值递减
- $r > 110$ , 管道半径的增加,  $COV$ 值变大
- $r = 110$ ,  $COV$ 值最小, 均匀性最好



# 工业用管道加热装置优化及快速算法

## 大尺寸管道加热设备优化

### ■ 褐煤干燥提质目标温度

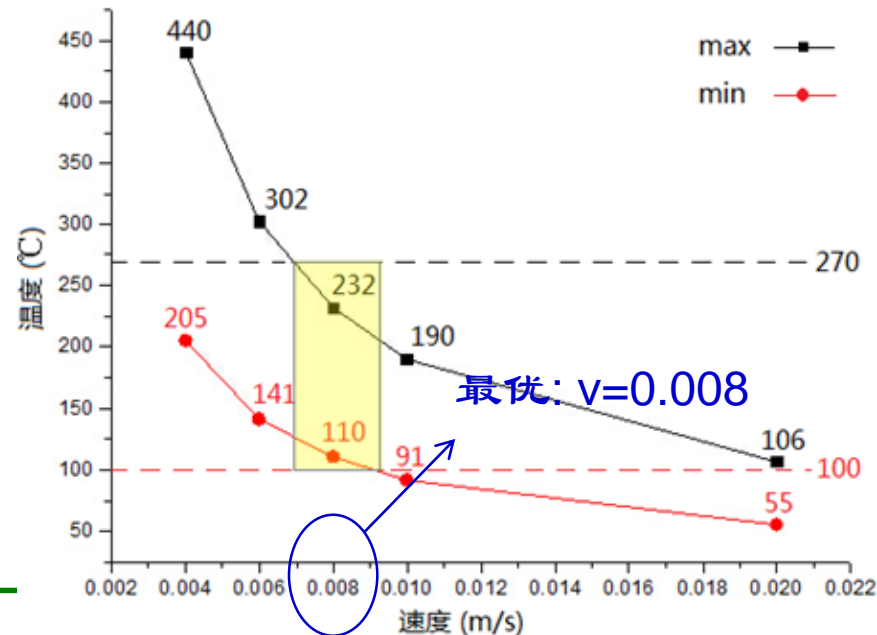
- $T > 100^{\circ}\text{C}$  → 褐煤脱除自由水
- $T > 150^{\circ}\text{C}$  → 褐煤脱除结合水
- 褐煤燃点  $270^{\circ}\text{C}$

目标温度:

$$100^{\circ}\text{C} < T < 270^{\circ}\text{C}$$

### ■ 不同平移速度对应褐煤温度最值

- $v < 0.008$ ,  $T_{max} > 270^{\circ}\text{C}$
- $v > 0.008$ ,  $T_{min} < 100^{\circ}\text{C}$
- $v = 0.008$   
 $110^{\circ}\text{C} < T < 232^{\circ}\text{C}$   
 满足目标温度范围

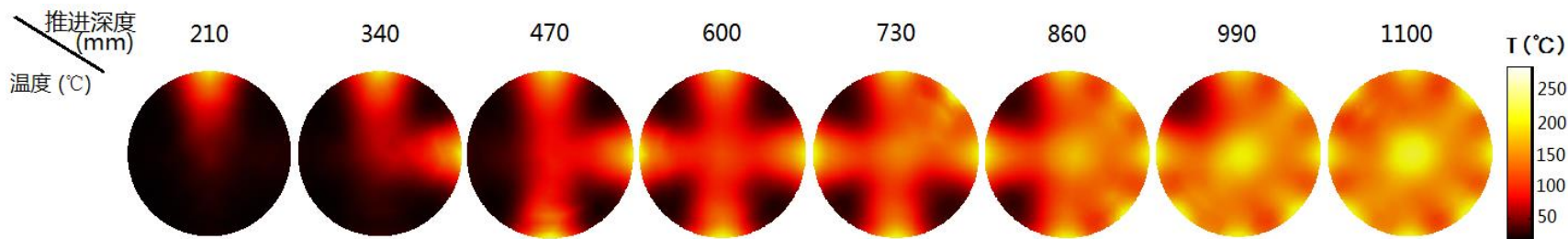




# 工业用管道加热装置优化及快速算法

## 大尺寸管道加热设备优化

- 最终结构:  $n=8$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $r=110$ ,  $v=0.008$
- 管道横截面温度随褐煤进入管道深度的变化情况

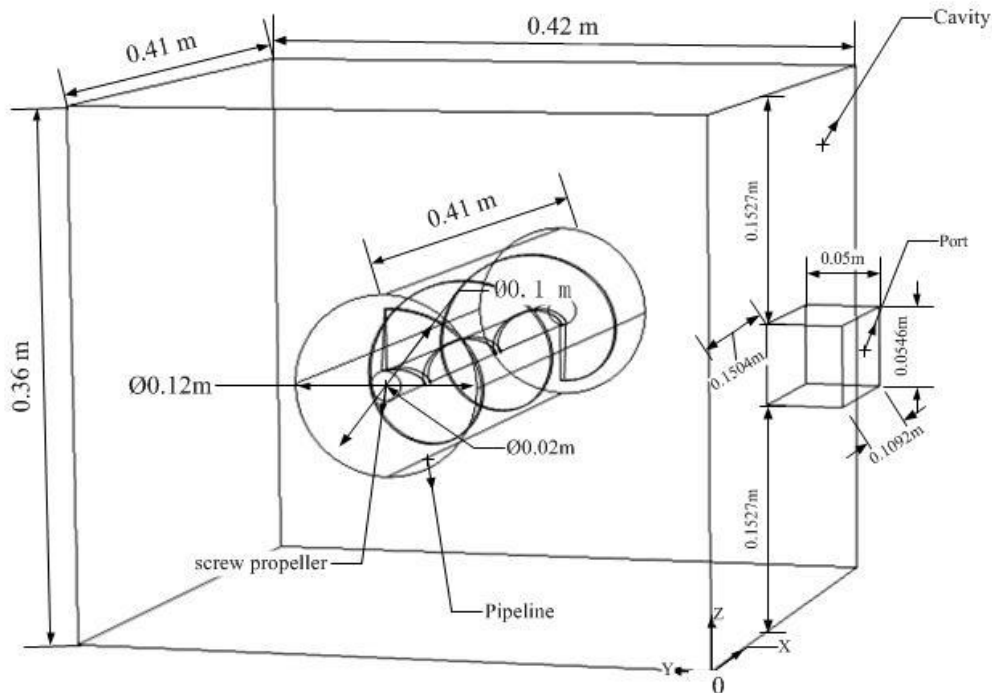


- 褐煤以恒定的速度通过管道，在各个方向依次受到微波作用获得温升，最终完成加热，均匀性良好，微波吸收效率 **96.75%**，处理量 **2.5t/h**。

# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论

# 微波螺旋推进器加热计算与优化



- 如图所示,一个螺旋推进器位于中心的管道。当管道工作,螺旋推进器会绕中心轴旋转。螺旋推进器的旋转会使材料同时旋转和前进。因此材料的位置在轴向和径向的变化。这将提高管道内的微波加热的均匀性。

# 微波螺旋推进器加热计算与优化

## 微波螺旋推进器加热设备及仿真

将电磁场耗散功率作为热源导入流体热传导方程，并以全耦合的方式联合计算 Navier-Stokes 方程、质量守恒方程和旋转变换方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} =$$

$$\nabla \cdot \left[ -p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0$$

$$d\mathbf{x} = d\mathbf{x}(\mathbf{r}_{bp}, \omega, t)$$

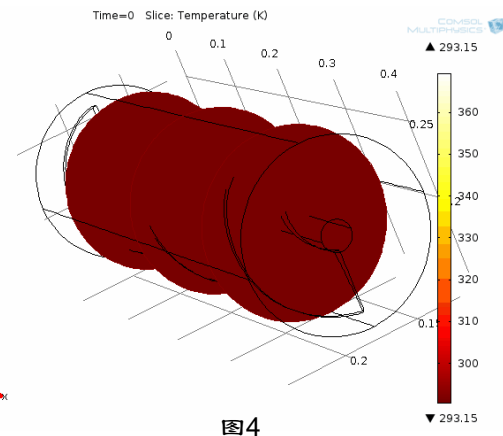
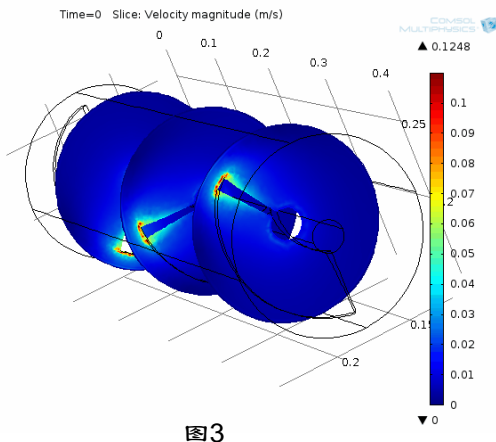
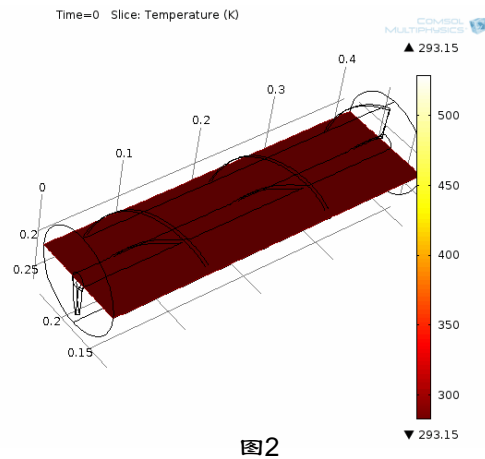
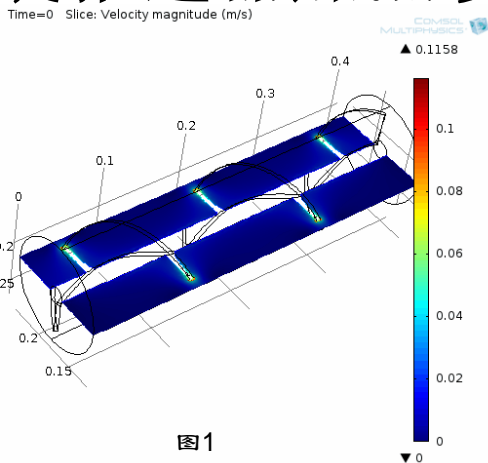
$$\frac{d\omega}{dt} = w$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q$$

求得流体的速度、压力场分布和温度场的分布。

# 微波螺旋推进器加热计算与优化

## 微波螺旋推进器加热设备及仿真



螺旋推进器转速为  $0.2r/s$  时，加热时间为  $10s$  时，管道水平截面的流速分布和温度分布、垂直截面流速分布和温度分别如图 1-4 所示

# 微波螺旋推进器加热计算与优化

## 微波螺旋推进器加热设备及仿真

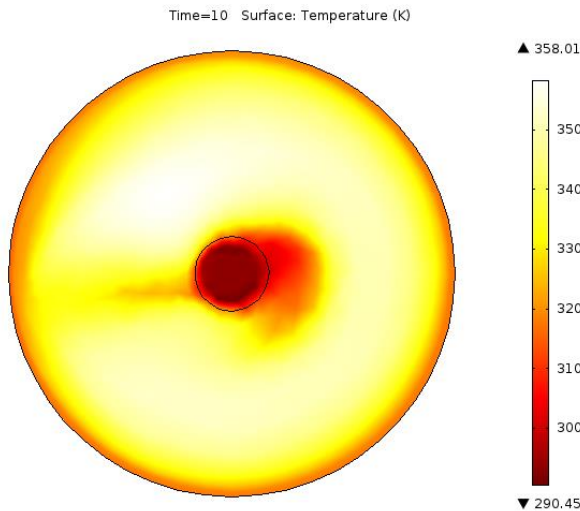


图4

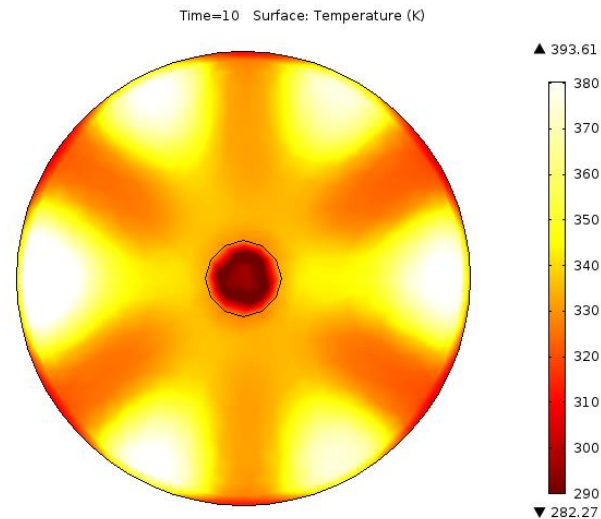


图5

由上图可见，管道出口处温度的均匀性得到了明显的提高。

此外通过计算得转速为  $1/5(r/s)$ ，螺旋叶片半径为  $0.05m$ ，加热  $10s$  时，整个管道的温度 COV 系数为  $0.0952$ ，而当没有螺旋推进器，管道内液体处于静止状态时，整个管道的温度 COV 系数为  $0.1572$ ，也就是说在管道内加入螺旋推进器后管道内温度的均匀性提高了  $39.5\%$ 。由此可见，螺旋推进器的引入，对提高管道内加热的均匀性有极大的效果。

# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论

# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

◎ Maxwell's equations:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad \mathbf{E} = \text{Electric field intensity}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E} \quad \mathbf{H} = \text{Magnetic field intensity}$$

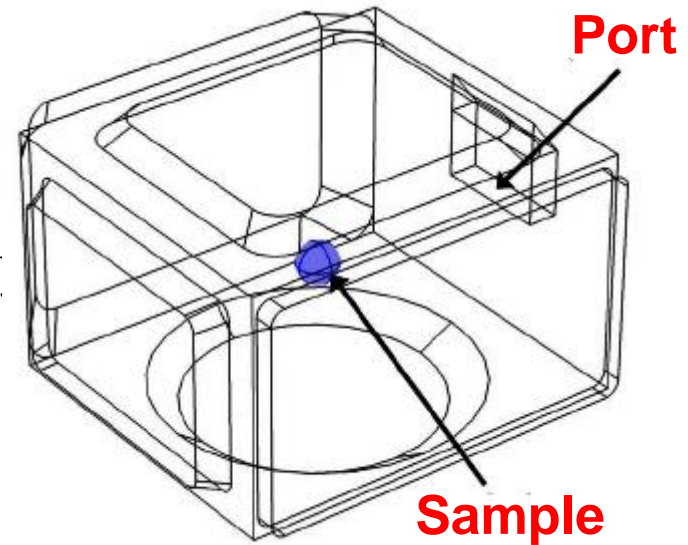
$$\nabla \cdot (\varepsilon\mathbf{E}) = 0 \quad \omega = \text{Angular Frequency}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

Relative permittivity:

$$\varepsilon = \underbrace{\varepsilon'(M,T)}_{\text{dielectric constant}} - j \overbrace{\varepsilon''(M,T)}^{\text{dielectric loss}}$$

◎ Power absorbed (by the sample): 
$$Q_{mic} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |\mathbf{E}|^2$$



Microwave oven geometry



# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

多孔介质中的传输过程

## Momentum Conservation

### Darcy Law

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{n}_{g,G}) = I$$

$$\mathbf{n}_{g,s} = -\rho_g \frac{k_g k_{r,g}}{\mu_g} \nabla P$$

$$\mathbf{v}_i = - \underbrace{\frac{k_i k_{r,i}}{\mu_i}}_{\text{Darcy Velocity}} \nabla P$$

$i = \text{water, gas}$

## Mass Conservation

### Liquid Water

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot \underbrace{(\rho_w \mathbf{v}_w)}_{\text{bulk flow}} = \nabla \cdot \underbrace{(D_w \nabla c_w)}_{\text{capillary flow}} - \overbrace{I}^{\text{phase change}}$$

### Water Vapor

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot \underbrace{(\rho_g \omega_v \mathbf{v}_g)}_{\text{bulk flow}} = \nabla \cdot \underbrace{\left( \phi S_g \frac{C^2}{\rho_g} M_a M_v D_{\text{eff},g} \nabla x_v \right)}_{\text{binary diffusion}} + \overbrace{I}^{\text{phase change}}$$

## Energy Conservation

### Thermal Balance for Mixture

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \sum_{i=s,w,v,a} (c_i c_{p,i} T) \right] + \nabla \cdot \underbrace{\left[ \sum_{i=w,v,a} (c_{p,i} \mathbf{n}_i T) \right]}_{\text{convection}} = \underbrace{\nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T)}_{\text{conduction}} - \underbrace{\lambda I}_{\text{microwave source}} + Q_{\text{mic}}$$

## Phase Change

### Evaporation-Condensation

$$I = K \frac{M_v}{RT} (p_{v,eq} - p_v)$$

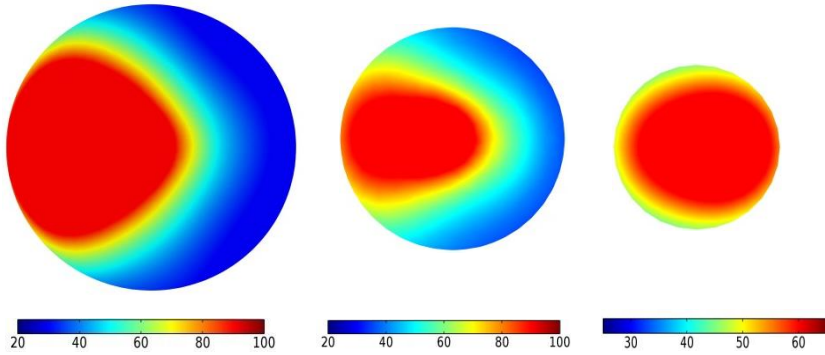
Non-Equilibrium Formulation



# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

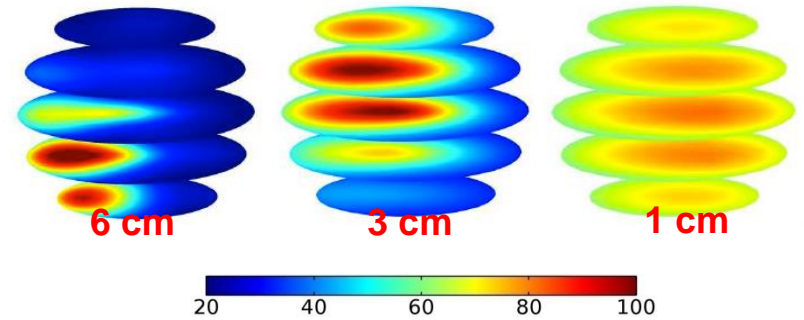
## SIMULATED

6 cm sample    3 cm sample    1 cm sample

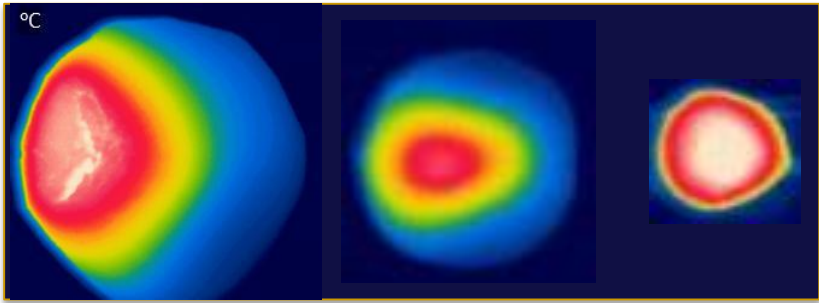


## Simulated Temperature Distribution

(after 8 cycles)



## ACTUAL



10 min.

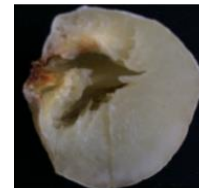
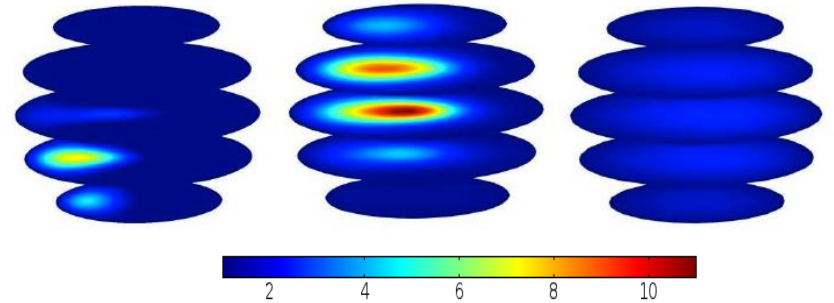
2 min.

10 min.

Regions of high temperatures shift away from the center with increasing size

## Simulated Pressure Distribution

(after 8 cycles)



3 cm

Stress inside (1.35 MPa) > Failure Stress (1.1 MPa)

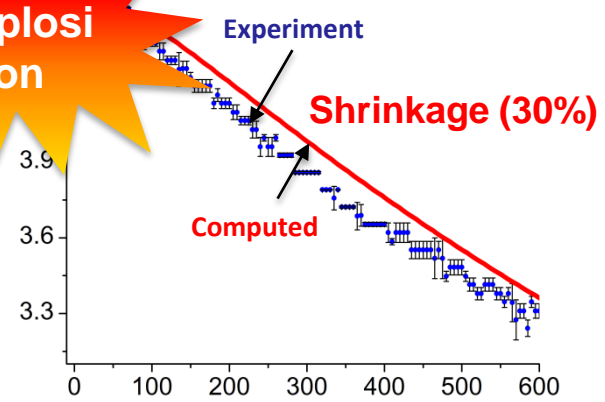
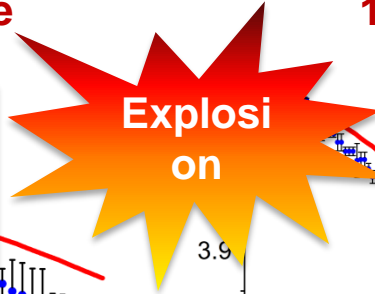
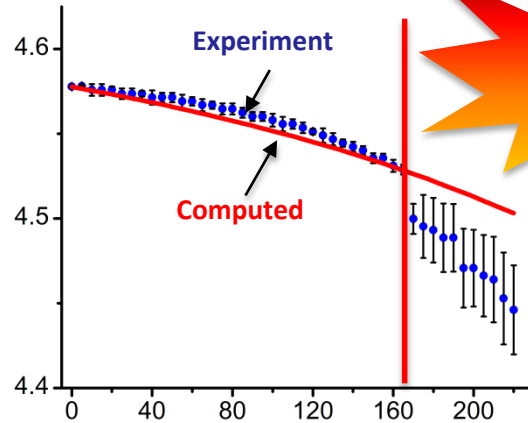
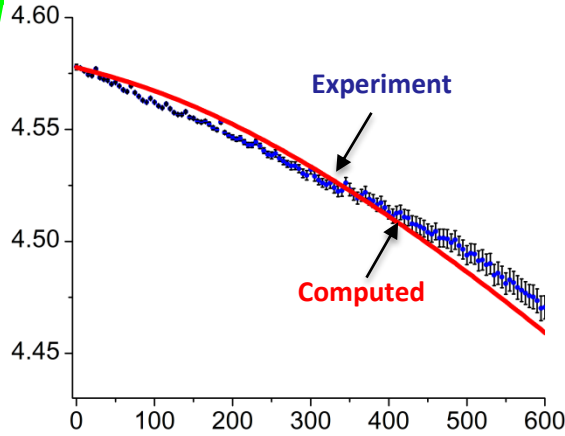
# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

6 cm sample

3 cm sample

1 cm sample

Moisture



Time

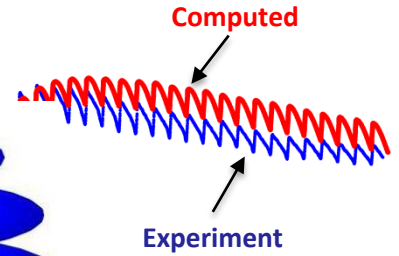
Simulated Moisture Distribution (after 8 cycles)



6 cm

3 cm

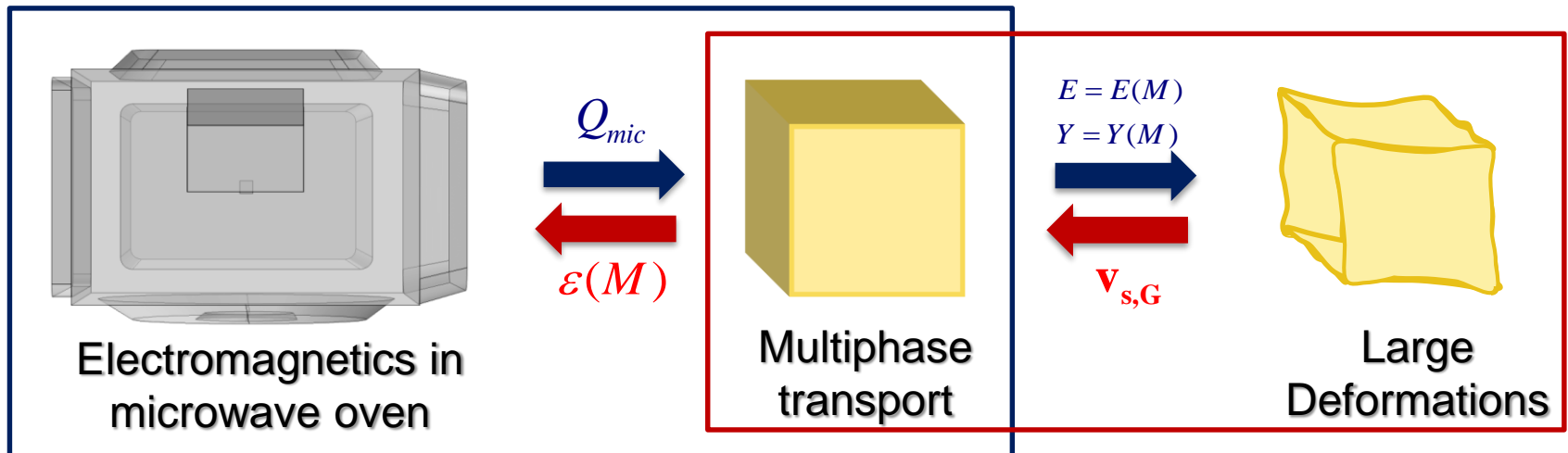
1 cm



# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

## 3D coupled electromagnetics-transport – poromechanics model

- Microwave drying of potatoes carried out at 10% Power Level for 10 min.



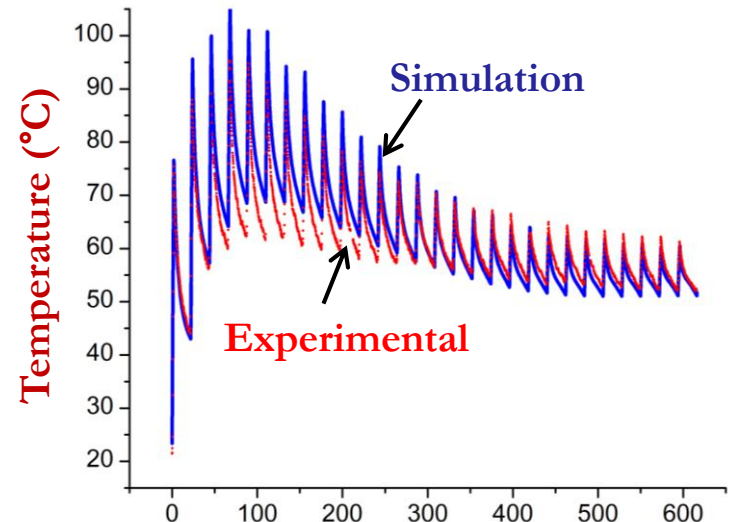
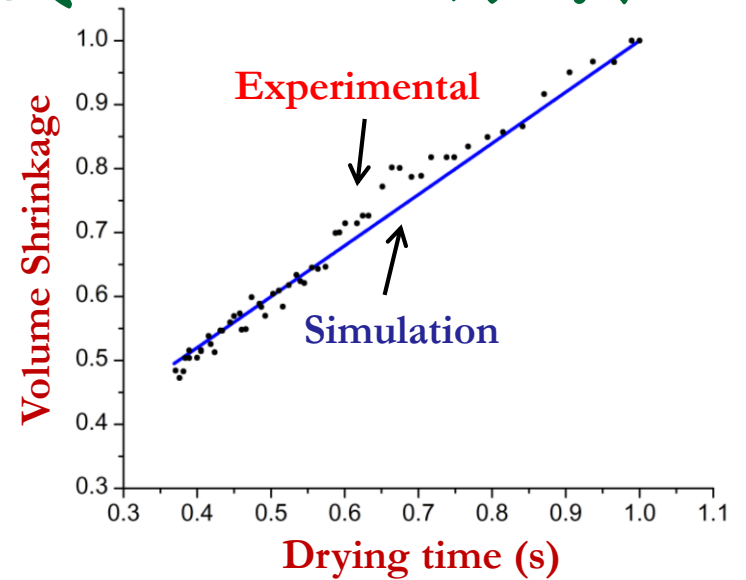
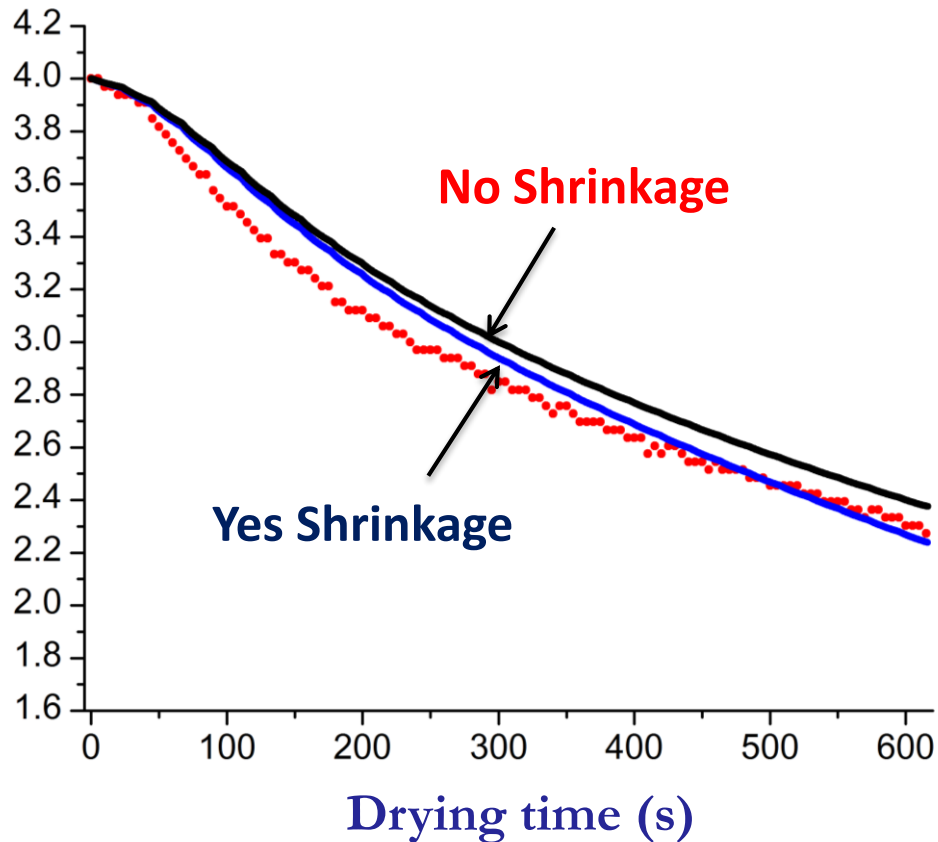
### Prediction of Key Quality Attributes

**Porosity**      **Bulk Density**      **Volume changes**      **Crust Formation**      **Stress cracking conditions**

- Deformation is driven by both **moisture loss** and **gas pressure generation**

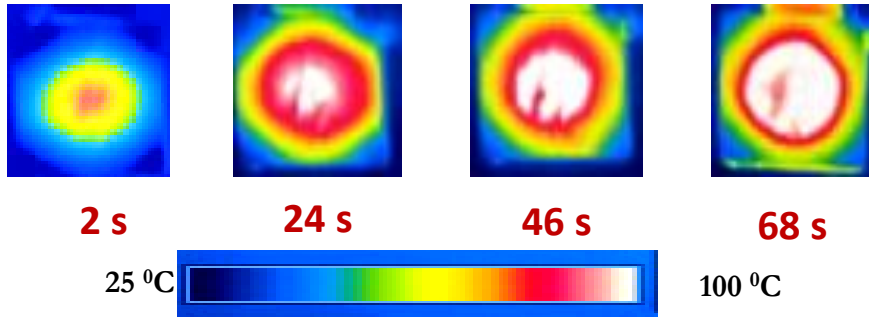
# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

## Moisture Content

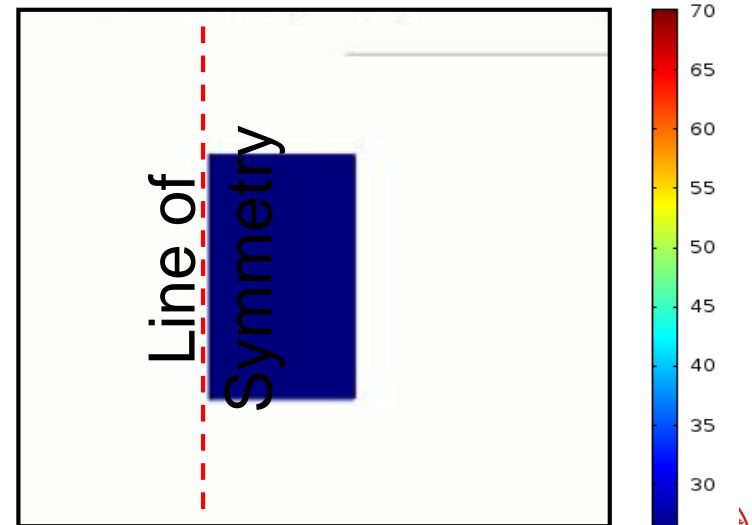
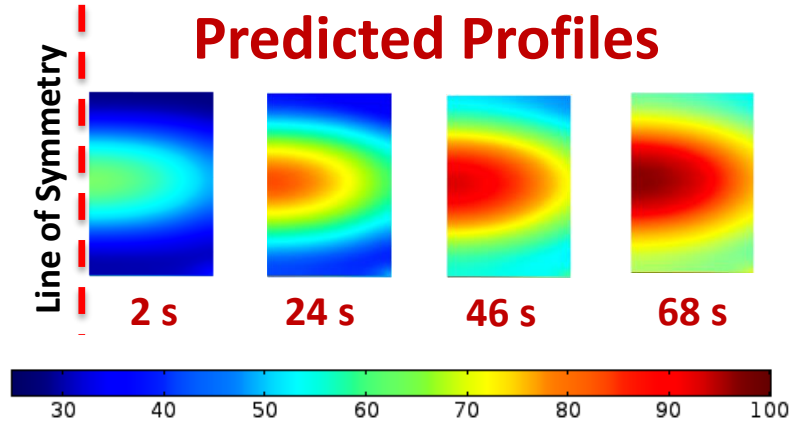


# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

## Experimental Profiles



## Predicted Profiles

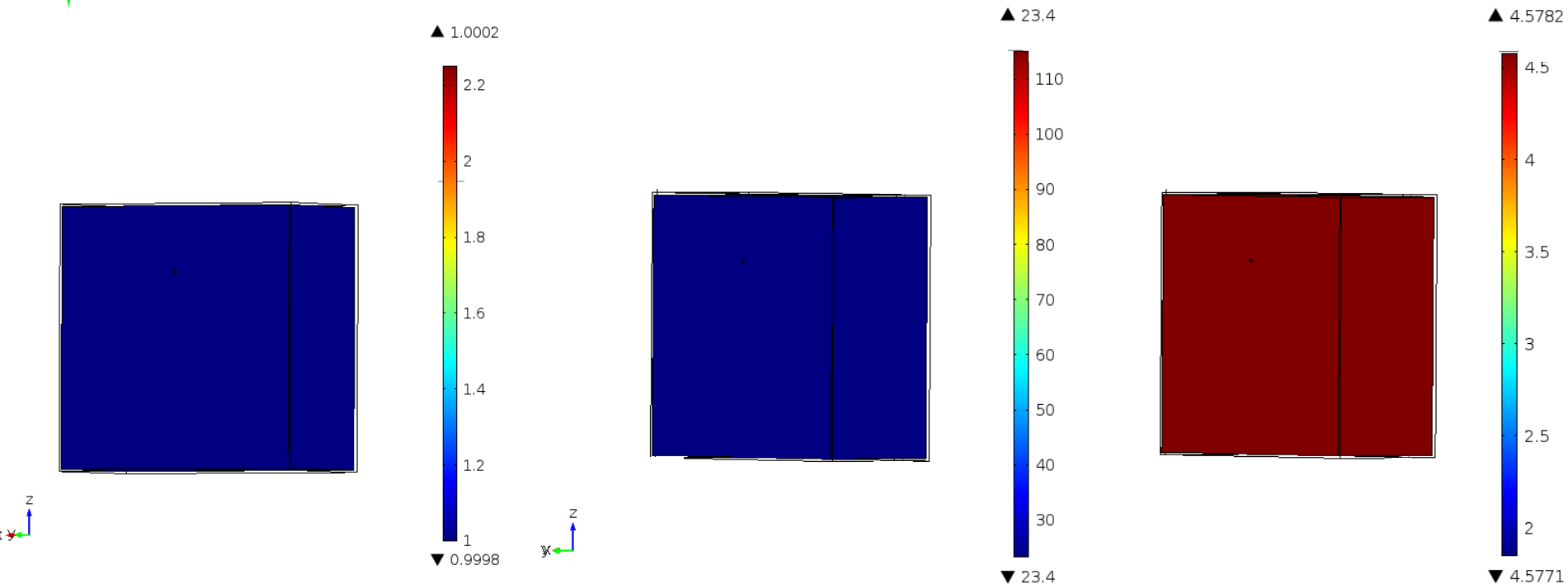


# 微波-多孔介质-机械变形联合仿真

Pressure

Temperature

Moisture



**Microwave drying at 10% power level**



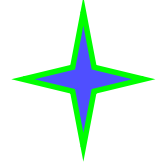
# Outline

1. 微波能工业应用的机遇与挑战
2. 微波辅助生物柴油生产优化
3. 工业用管道加热装置优化及快速算法
4. 微波螺旋推进装置仿真优化
5. 微波-多孔介质-变形媒质的联合仿真
6. 结论



# 总结

- 利用 **COMSOL** 多物理场仿真软件实现微波能应用中优化案例，利用 **COMSOL** 这一多物理场协同计算程序实现微波、热场、流体场、传质场、压力场、反应场等尽可能完善的物理场模型的耦合计算，无限逼近真实情况。
- 实验结果表明计算结果准确，并进一步将经验证的模型用于优化设计中，获得良好的效果。



Thank you for your  
attention

