

# 基于COMSOL的激光抛光 过程仿真与机理分析

沈洪 副教授

sh\_0320@sjtu.edu.cn, 021-34206660

上海交通大学 机械与动力工程学院

2016年11月3-4日  
上海

# 内容提要

- **研究背景**

- I. 激光抛光技术简介
- II. 国内外研究现状综述

- **研究内容**

- I. 基于多物理场耦合的数值仿真
- II. 钛合金表面激光抛光实验研究

- **研究总结**

# 内容提要

- **研究背景**

- I. 激光抛光技术简介

- II. 国内外研究现状综述

- **研究内容**

- I. 基于多物理场耦合的数值仿真

- II. 钛合金表面激光抛光实验研究

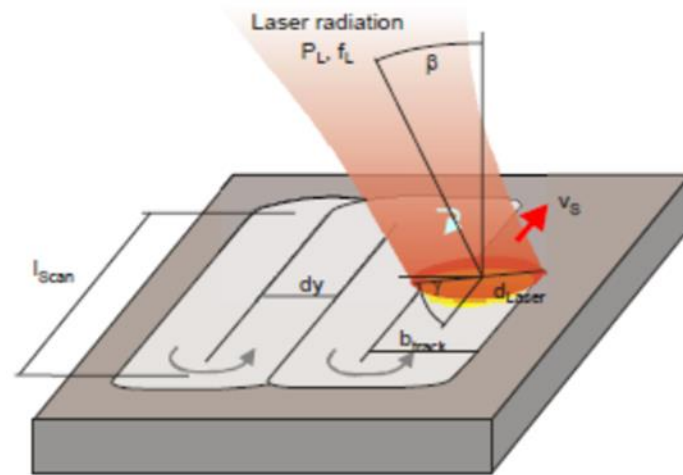
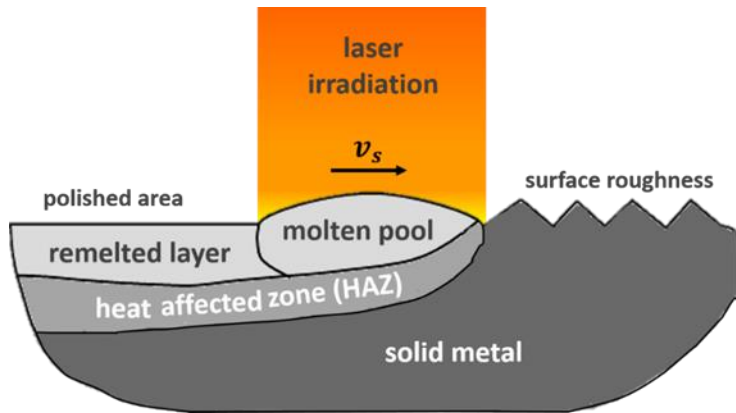
- **研究总结**

# 激光抛光

- **技术原理**

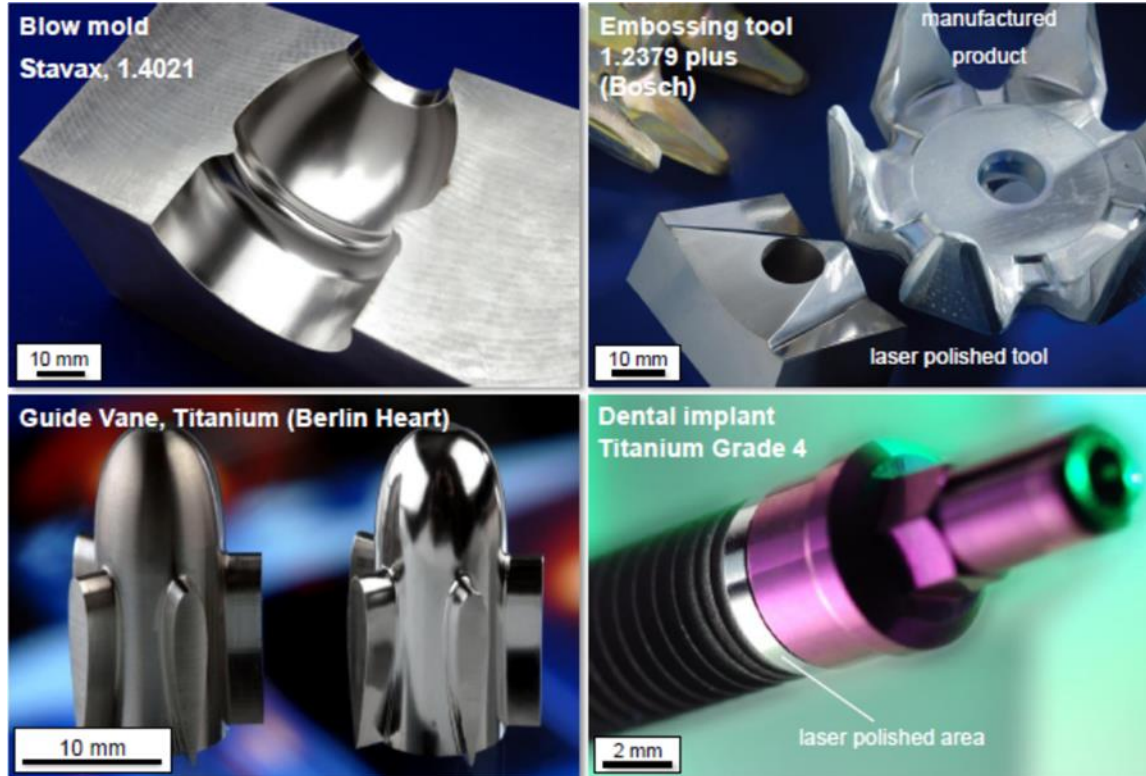
- 一定能量密度和波长的**激光束**以特定的扫描方式**辐照**材料表面
- 表面材料**熔化**，液态材料在**熔池流动**中重新分布
- **表面粗糙度降低**，获得光滑表面

- **技术优势** 非接触式 + 聚焦精准 + 区域可控



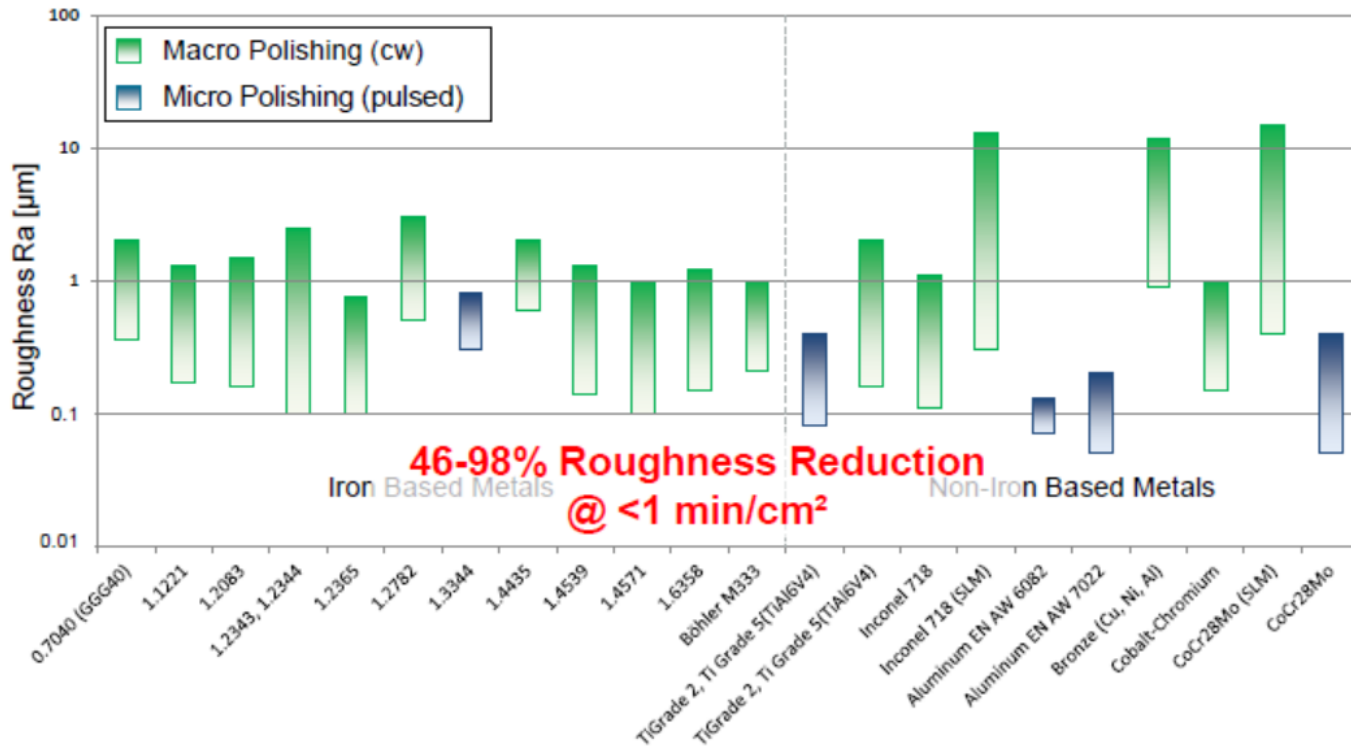
# 激光抛光

- 工程应用



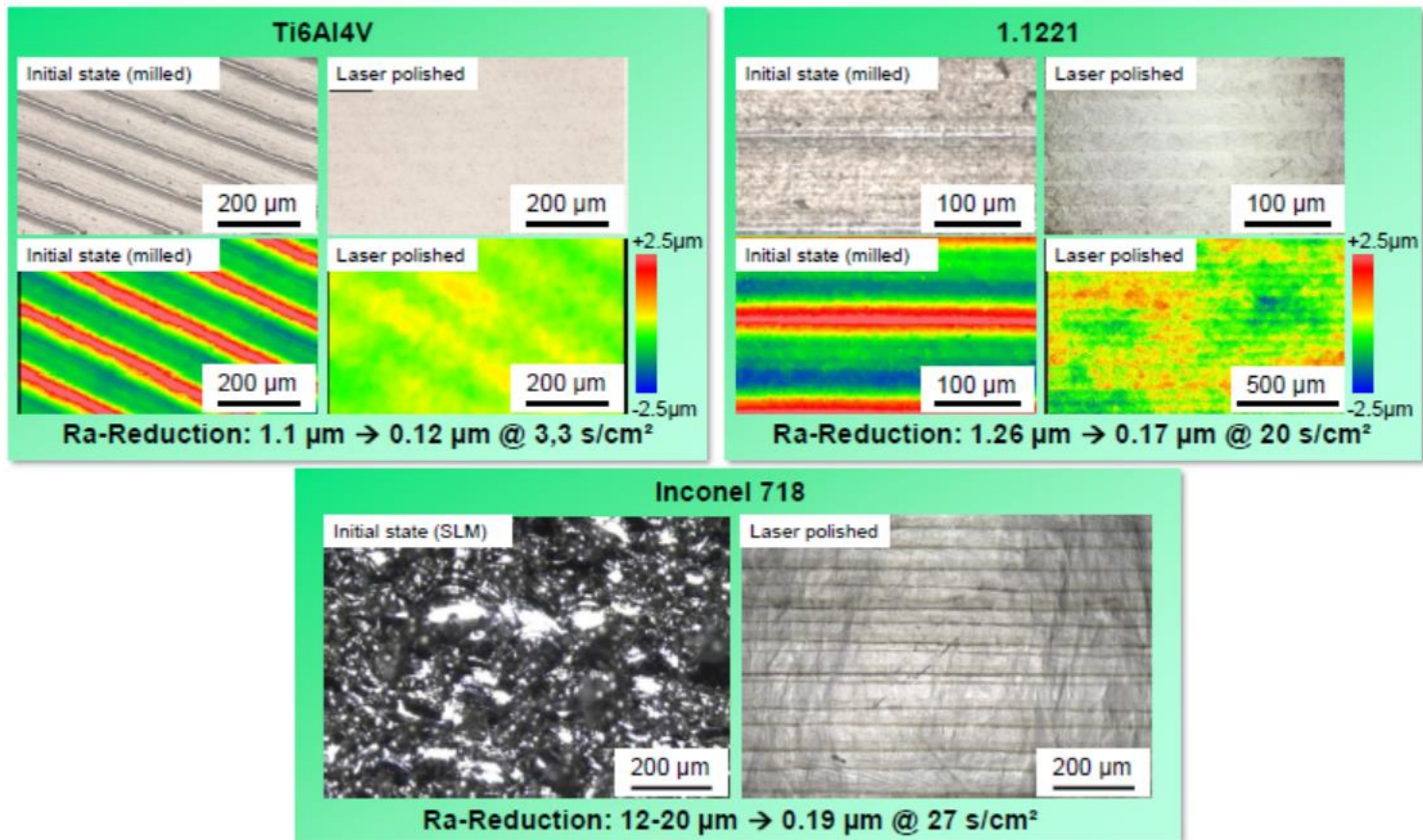
# 激光抛光

- 工程应用



# 激光抛光

- 工程应用

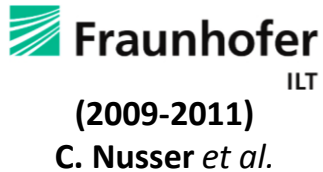


## 研究背景



(2004) T.A. Mai *et al.*

首次提出**微熔化**(micromelting)概念  
纳秒激光抛光304不锈钢 Ra: 195nm→75nm



(2009-2011)  
C. Nusser *et al.*

不同分布形式(近高斯、礼帽形等)的脉冲激光  
抛光工具钢获得接近**镜面**的表面粗糙度



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

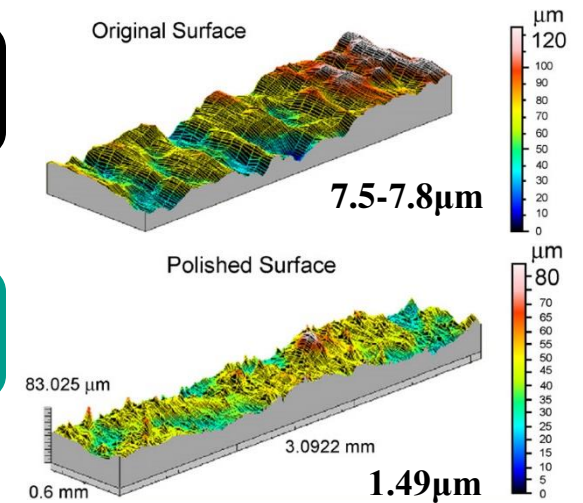
(2007) A. Lamikiz *et al.*

调整**激光参数**(激光能量、扫描速度、光斑重叠率)  
抛光SLS成型样品, 大幅降低表面粗糙度



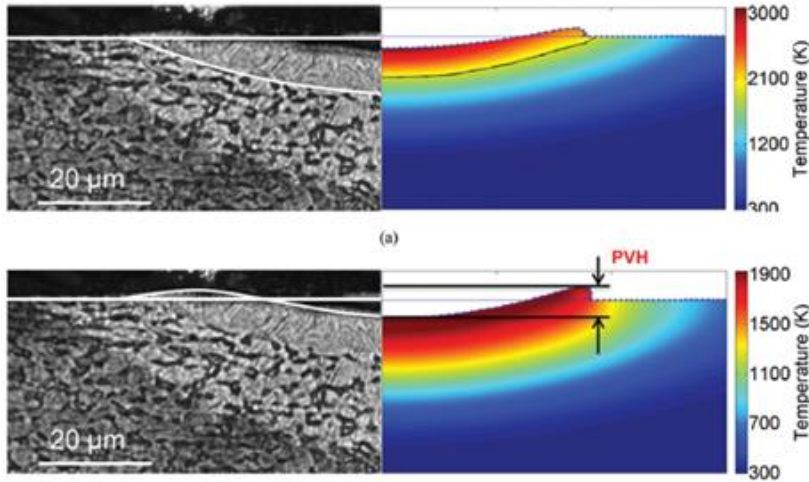
(2015) S. Marimuthu *et al.*

探究**激光参数**对抛光后表面质量的影响  
抛光SLM成型Ti6Al4V样品 Ra: 10.2μm→2.4μm





## 研究背景



(2013) C. Ma *et al.*

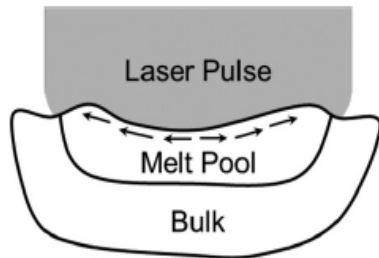
- 提出完整的脉冲激光抛光物理模型
- 建立了基于 COMSOL 的二维轴对称有限元模型
- 温度场和熔融金属流体场耦合
- 仿真钛合金 Ti6Al4V 在抛光过程中表面形貌的发展

(2013) F.E. Pfefferkorn *et al.*

按照熔池中主导流动的机制不同，可将激光抛光方式分为两种：

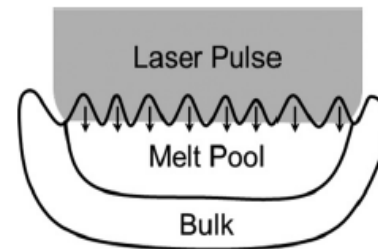
马拉高尼效应 (Marangoni Effect) 主导的**热表面张力流** (thermocapillary flow)

熔池表面张力波振荡 (capillary wave oscillation) 引起的**表面张力流** (capillary flow)



**thermocapillary flow:**

$$\sigma_t = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T \cdot \vec{t}$$



**capillary flow:**

$$\sigma_n = -P_a \vec{n} + \kappa \gamma \vec{n}$$

# 总结

## 现状

- I. 仿真结合实验的研究手段
- II. 抛光参数对表面的影响
- III. 行之有效的工艺方法

- I. 金属流动行为的数值仿真
- II. 两种激光抛光机理的作用比较
- III. 马拉高尼效应的影响机制

## 缺陷

## 重点

激光抛光工艺过程中的金属流动行为  
两种抛光机制对表面形貌的影响规律

激光抛光的主导机制

# 内容提要

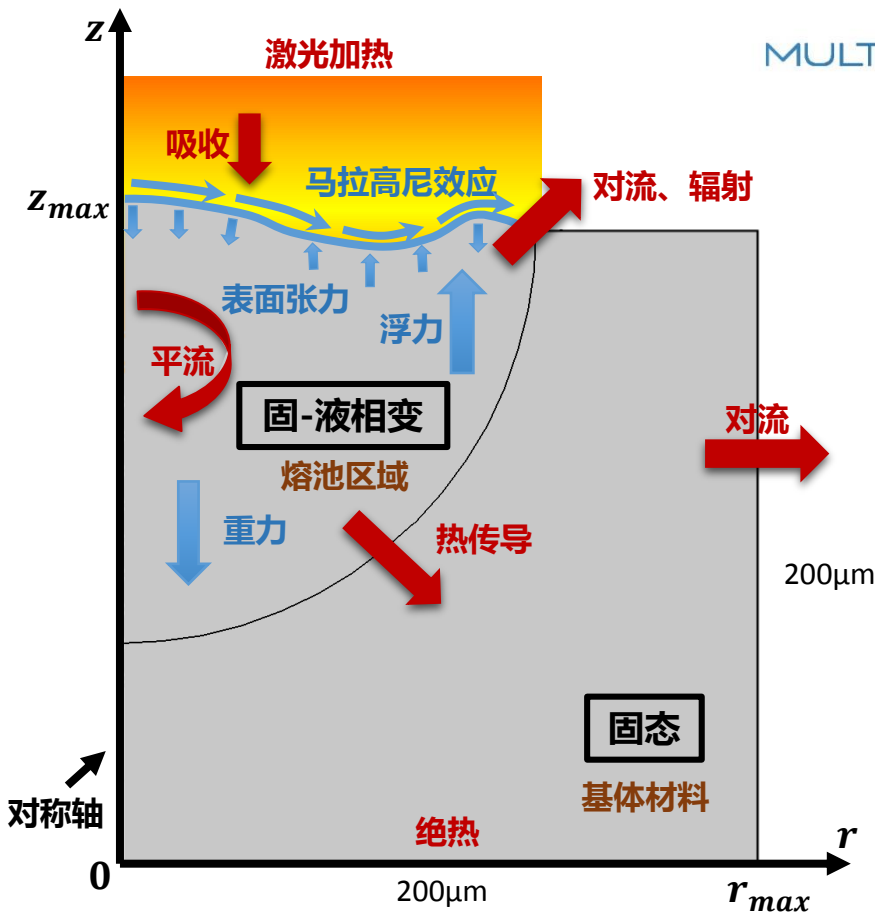
- 研究背景
  - I. 激光抛光技术简介
  - II. 国内外研究现状综述
- 研究内容
  - I. 基于多物理场耦合的数值仿真
  - II. 钛合金表面激光抛光实验研究
- 研究总结

# 基于多物理场耦合的 激光抛光数值仿真

# 研究内容

COMSOL  
MULTIPHYSICS®

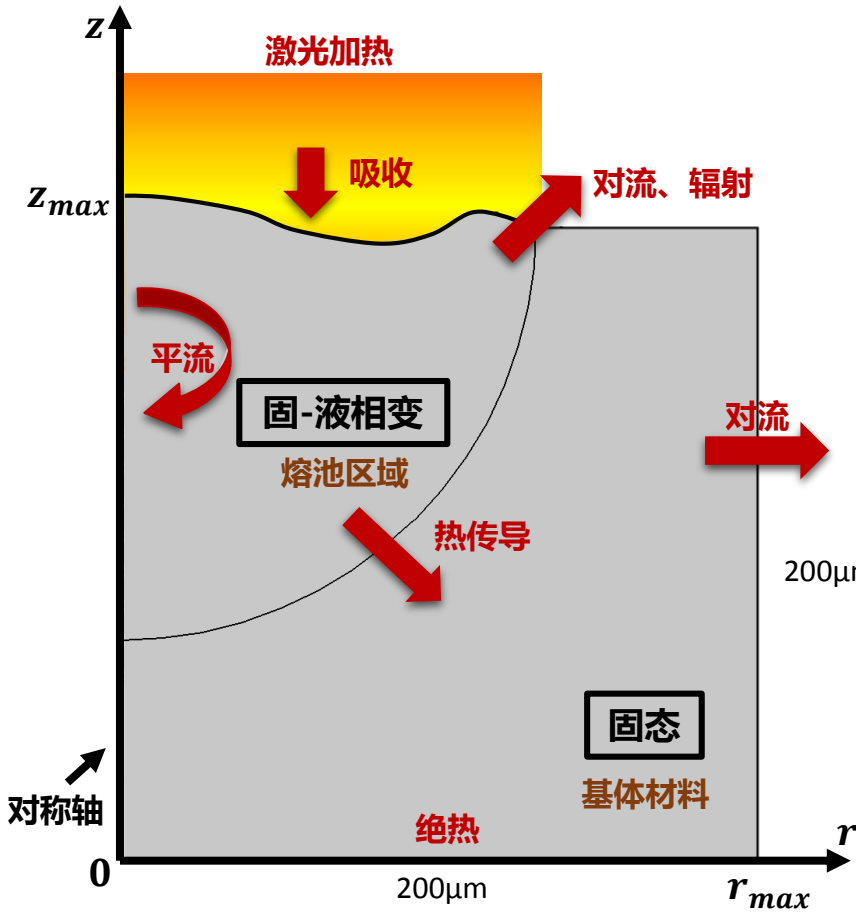
## 多物理场耦合



Multiphysics

- Heat Transfer in Solids (*ht*)
  - Heat Transfer in Solids 1
  - Initial Values 1
  - Axial Symmetry 1
  - Thermal Insulation 1
  - Heat Transfer with Phase Change 1
  - Heat Flux 1
  - Heat Flux 2
  - Diffuse Surface 1
- Laminar Flow (*spf*)
  - Fluid Properties 1
  - Initial Values 1
  - Axial Symmetry 1
  - Wall 1
  - Volume Force 1
  - Open Boundary 1
  - Weak Contribution 1
- Moving Mesh (*ale*)
  - Fixed Mesh 1
  - Prescribed Mesh Displacement 1
  - Prescribed Mesh Displacement 2
  - Free Deformation 1
  - Prescribed Normal Mesh Velocity 1

# 研究内容



## 固体传热 + 相变传热

控制方程： $\rho C_{p(eq)} \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right] - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q$  (Fourier's Law)

$$C_{p(eq)} = L_f \frac{df_L}{dT} + C_p \quad (\text{Modified Specific Heat})$$

边界条件：

[1] 广义热通量：激光热源

$$I = \frac{2P}{\pi r_0^2} e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \xrightarrow{\text{吸收}} -k \nabla T = AI$$

200μm [2] 热传导、对流、辐射、绝热

$$-k \nabla T = h(T - T_0) \quad -k \nabla T = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad \nabla T = 0$$

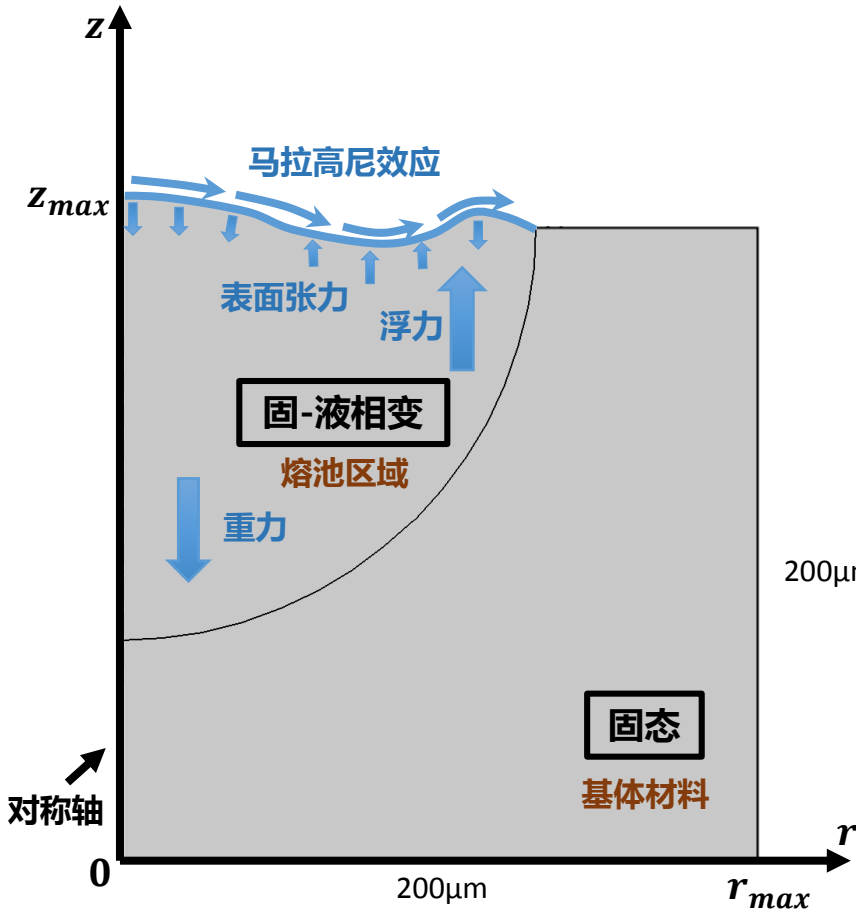
[3] 平流项：熔池区域内因质量流动而产生的热量传递

[4] 相变传热

$$k = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2}$$

$$\rho = \theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}$$

## 研究内容



## 单相流 - 层流

控制方程： $\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + F_v$  (Navier-Stokes Equation)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{Mass Conservation})$$

边界条件：

[1] 体积力 (重力、浮力)

$$F_v = F_g + F_b \begin{cases} F_g = \rho_0 g \quad (\downarrow) \\ F_b = -\rho_0 \beta (T - T_{ref}) g \quad (\uparrow) \end{cases}$$

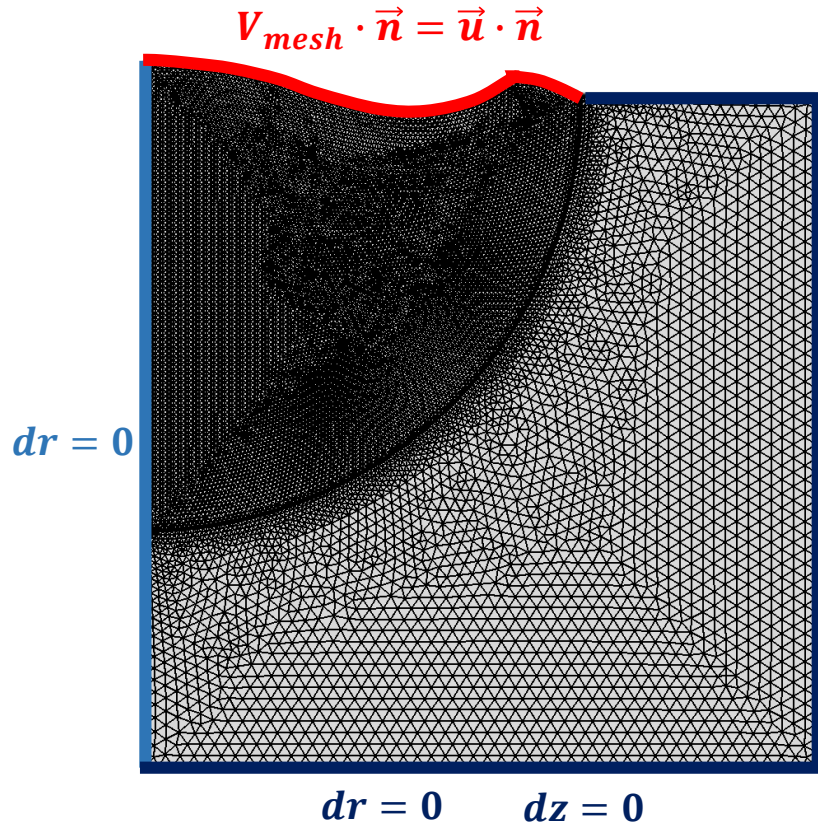
200 $\mu\text{m}$  [2] 表面张力 (Surface Tension)

$$\sigma_n = \kappa \gamma \vec{n} \quad (\kappa: \text{曲率} \quad \gamma: \text{表面张力系数})$$

[3] 马拉高尼效应 (Marangoni Effect)

$$\sigma_t = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \vec{\nabla} T \cdot \vec{t} \quad (\vec{\nabla} T: \text{沿表面的温度梯度})$$

## 研究内容



## 自由变形 – 移动网格

网格平滑方式：Laplace (27916域节点+513边界节点)

初始及边界条件：

[1] 初始网格变形量

$$dr_0 = 0 \quad dz_0 = 0$$

[2] 预设  $r$  方向网格位移

$$dr = 0$$

[3] 预设  $z$  方向网格位移

$$dz = 0$$

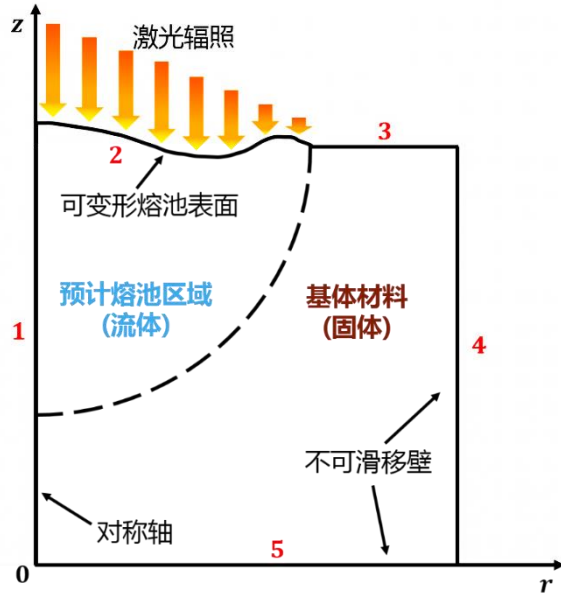
[4] 预设移动界面法向速度

$$\frac{dr}{dt} \cdot \vec{n} = \vec{v}_n \quad (\vec{v}_n = u \cdot \vec{e}_r + w \cdot \vec{e}_z)$$



## 研究内容

### 边界条件总结



物理场	物理意义	边界编号	边界条件
传热场	激光辐照	2	热通量
	自然对流	2, 3, 4	对流
	表面-环境辐射	2, 3, 4	漫射面
	绝热	5	热绝缘
流体场	表面张力	2	弱贡献
	马拉高尼效应	2	<i>Marangoni</i> 效应
	壁	3, 4, 5	不可滑移壁
移动网格	对称轴	1	轴对称
	固定边界	1, 3, 4, 5	预设网格位移
	自由变形	2	预设网格法向速度

### 求解条件及时间

求解器：PARDISO

研究时间：0~12ms

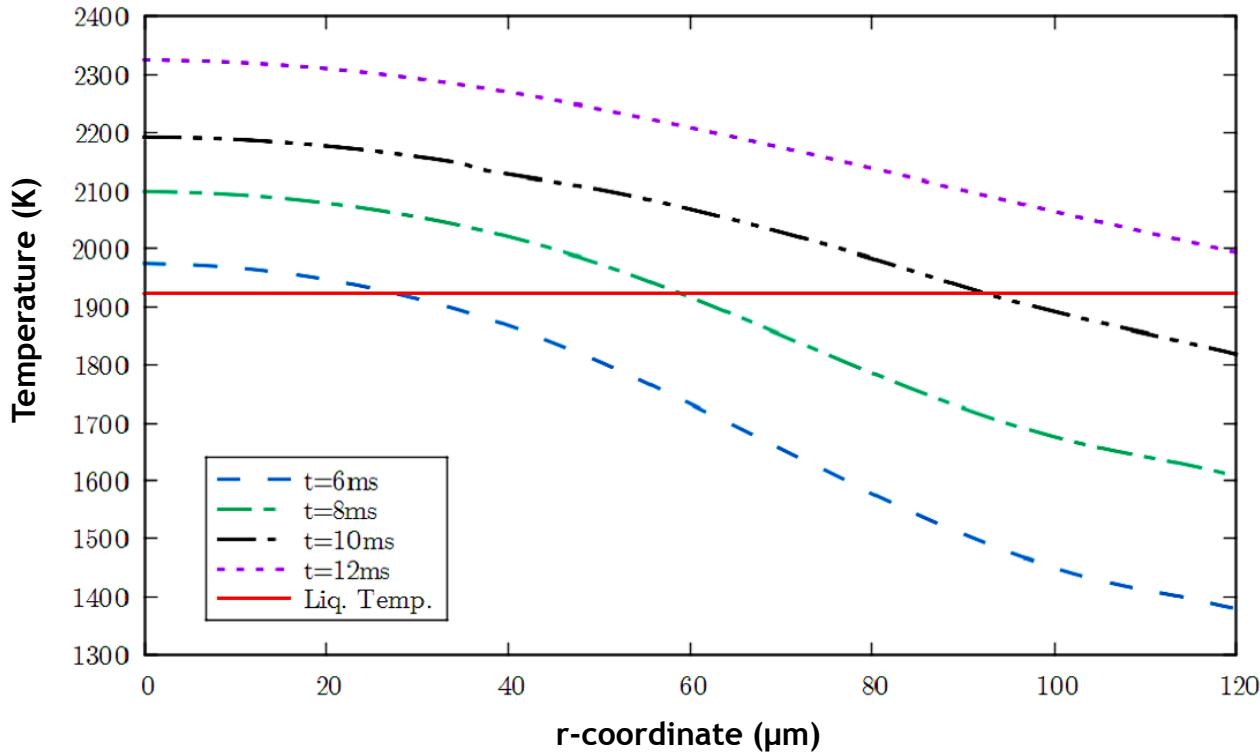
求解步长：0.01ms

工作站配置：Intel Core i7-2600 @3.70GHz (四核八线程)  
12.0 GB RAM

求解时间：~100min

## 研究内容

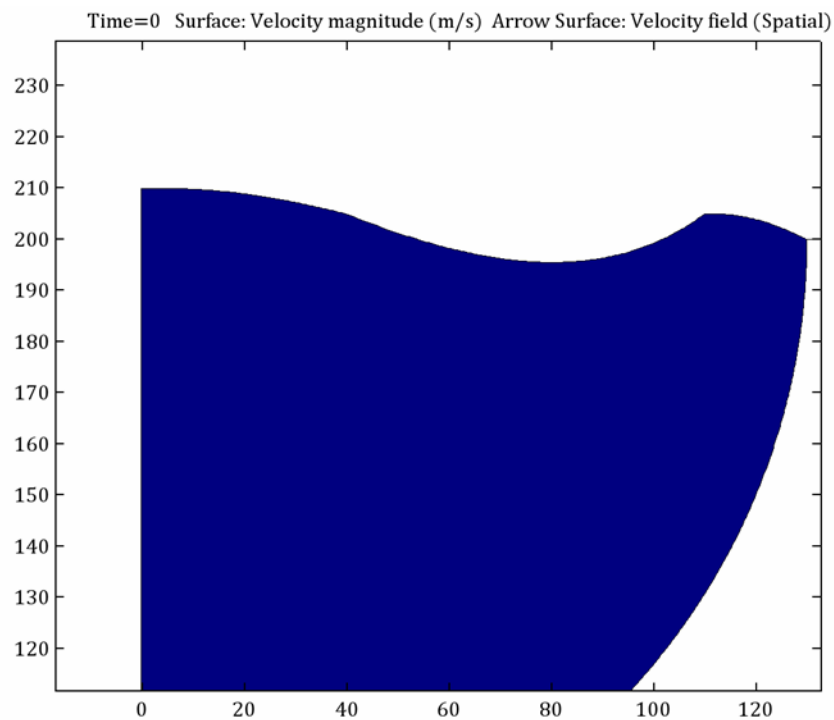
# 温度场分布



研究区域： $r \leq r_c = 120\mu m$

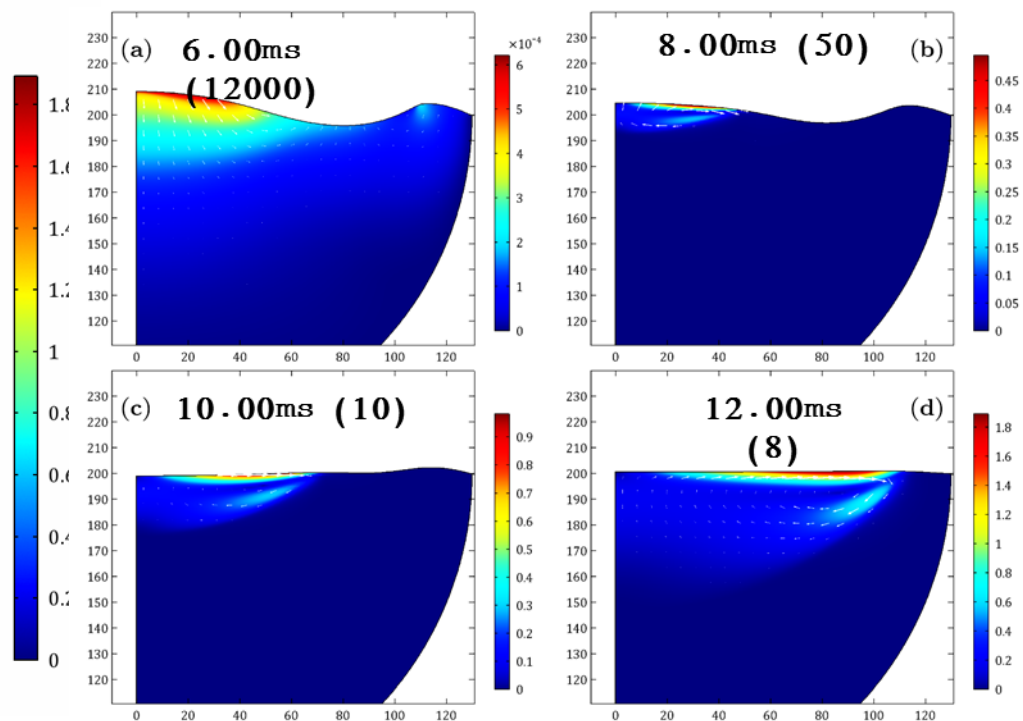
- [1] 激光能量遵循高斯分布  
光斑中心点**温度最高**
- [2]  $t = 5.87ms$  **开始熔融**
- [3] 随着激光加热时间增加  
熔池区域**逐渐扩大**
- [4] 加工末时刻  $t = 12ms$   
区域内材料**完全熔融**

## 研究内容



### [1] 熔融初始阶段

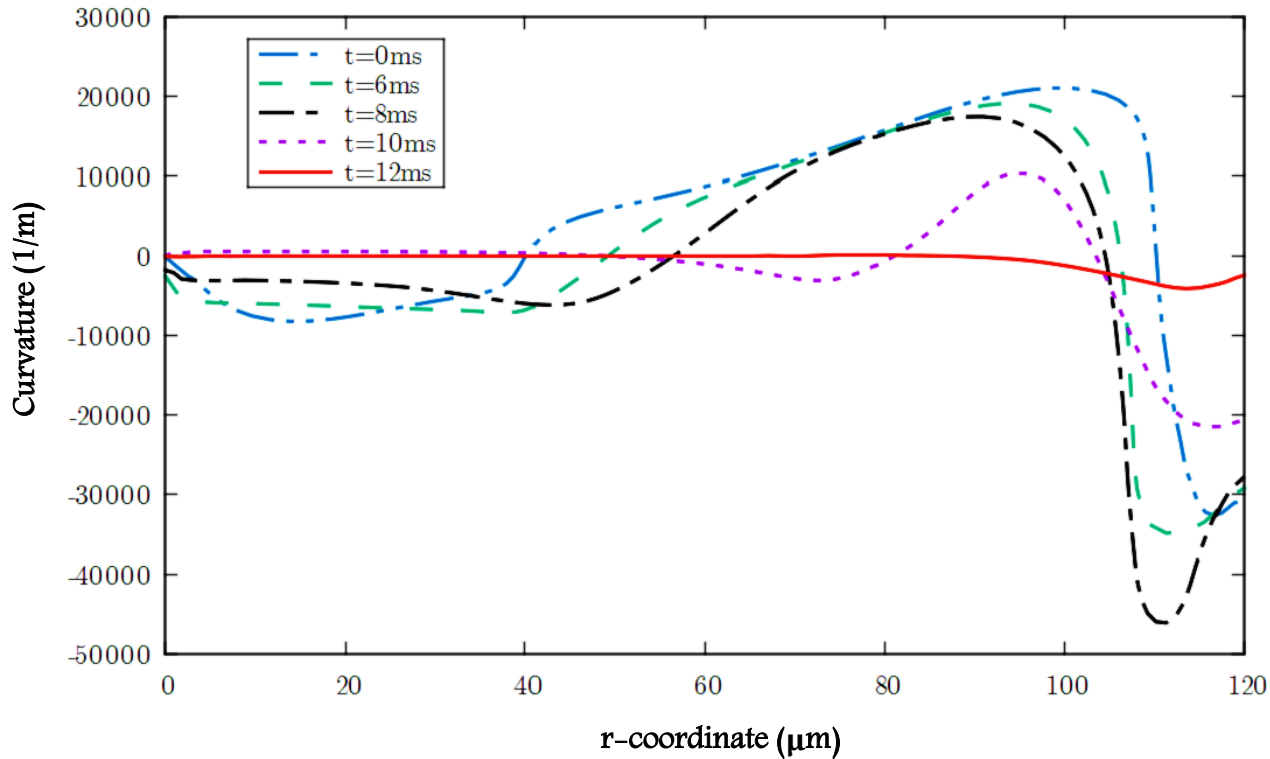
凸曲面（峰）的熔融金属向下流动  
凹曲面（谷）的熔融金属向上流动  
大曲率表面形貌被消除



### [2] 熔池发展阶段

金属流动方向转变为沿  $x$  轴向外  
熔融金属重新分布  
形成光滑平整表面

## 表面形貌空间曲率变化



取熔池表面形貌曲线上某一点：

$$\kappa = -\frac{r\phi_{rr} + \phi_r(1 + \phi_r^2)}{r(1 + \phi_r^2)^{3/2}}$$

$\phi$ —该点沿z轴位移

$r$ —该点沿r轴坐标

$\phi_r$ —一阶导数  $\frac{\partial \phi}{\partial r}$

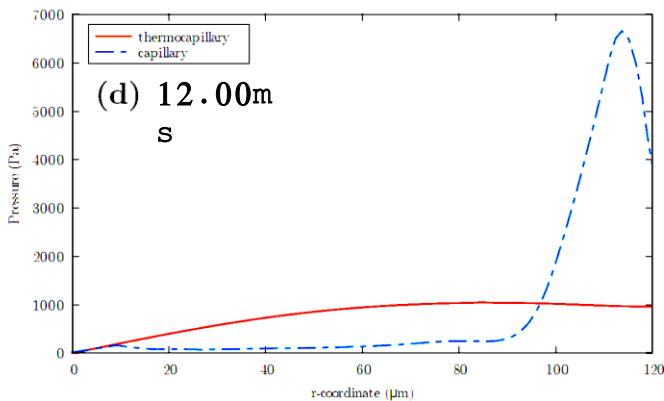
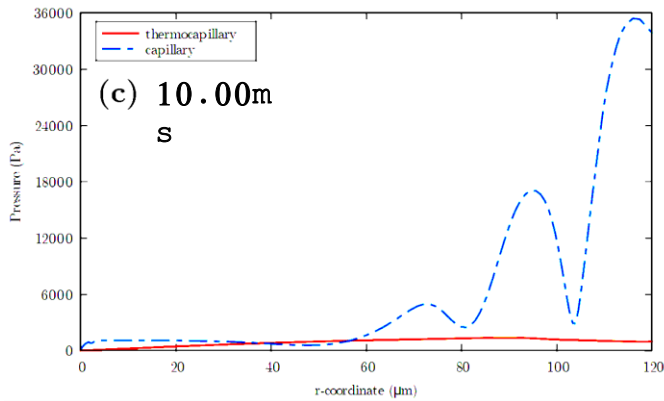
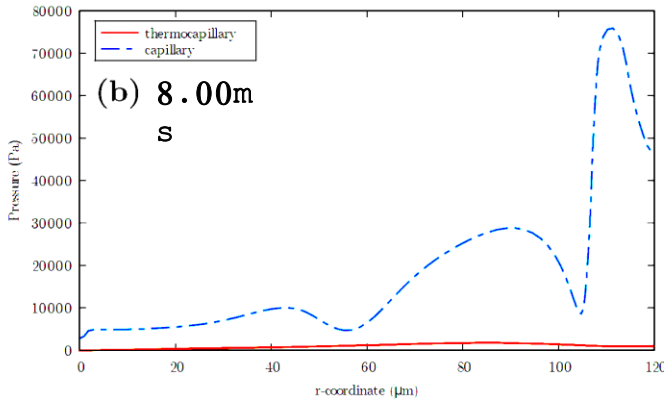
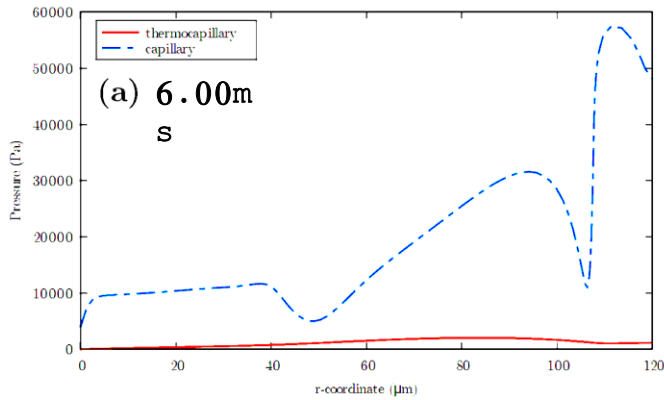
$\phi_{rr}$ —二阶导数  $\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}$

[1]  $r \leq 100\mu\text{m}$ :  $\kappa \approx 0$

[2] 靠近光斑中心的区域  
曲率降低**效率更高**

## 研究内容

# 表面张力与马拉高尼效应的比较



表面张力 (Surface Tension)

$$\sigma_n = \kappa\gamma\vec{n}$$



$$|\kappa\gamma|$$

表面张力压  
(Capillary Pressure)

马拉高尼效应 (Marangoni Effect)

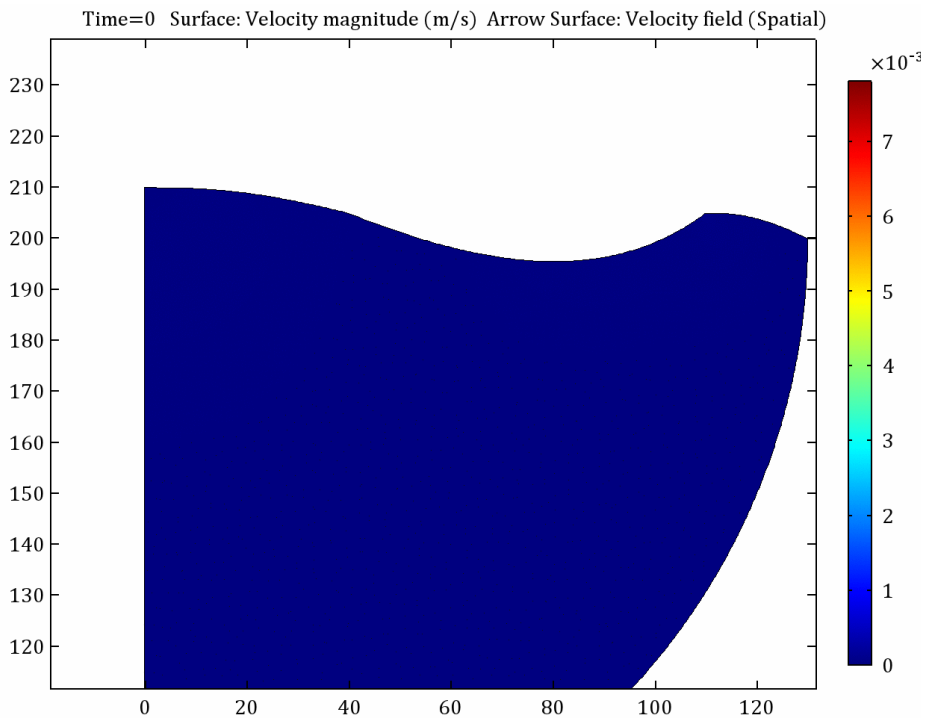
$$\sigma_t = \frac{\partial\gamma}{\partial T}\vec{\nabla}T \cdot \vec{t}$$



$$\left| \frac{\partial\gamma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right|$$

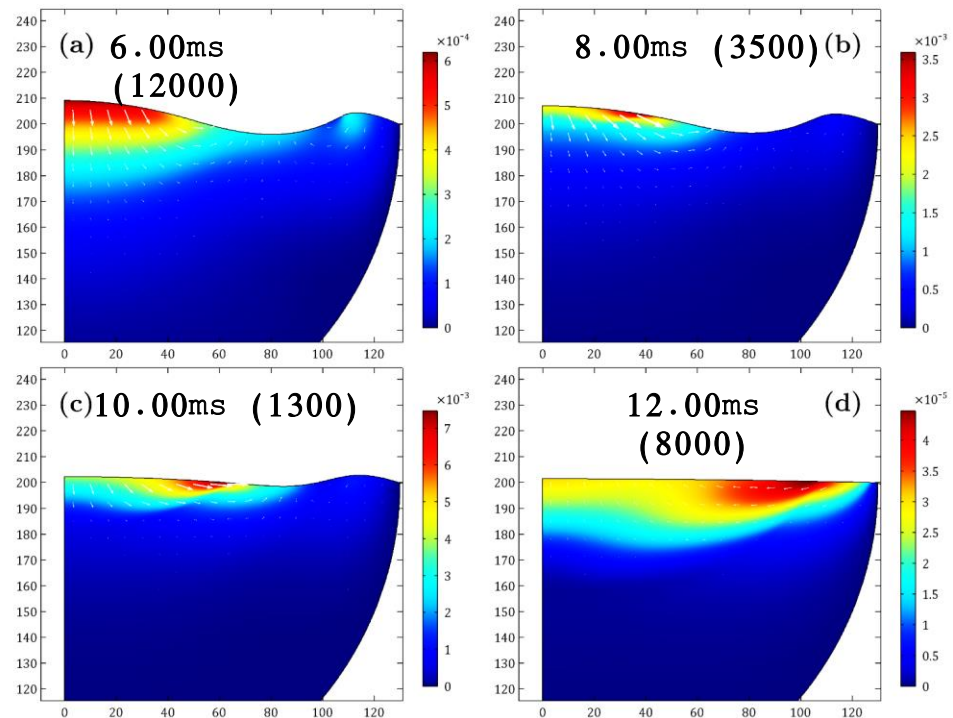
热表面张力压  
(Thermocapillary Pressure)

## 研究内容



### 表面张力的作用

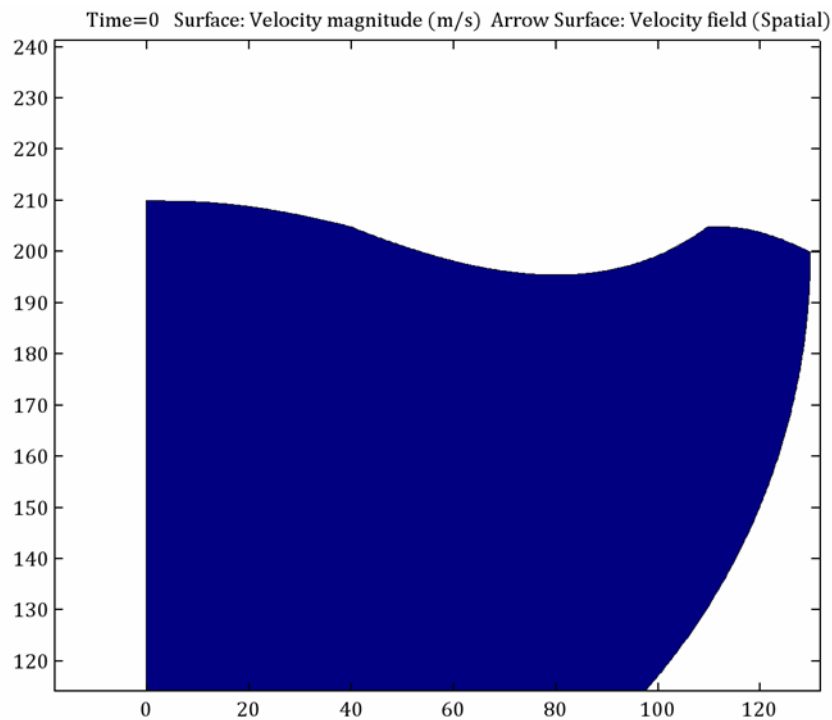
凸曲面（峰）的熔融金属向下流动  
凹曲面（谷）的熔融金属向上流动  
大曲率表面形貌被消除



### 马拉高尼效应的缺失

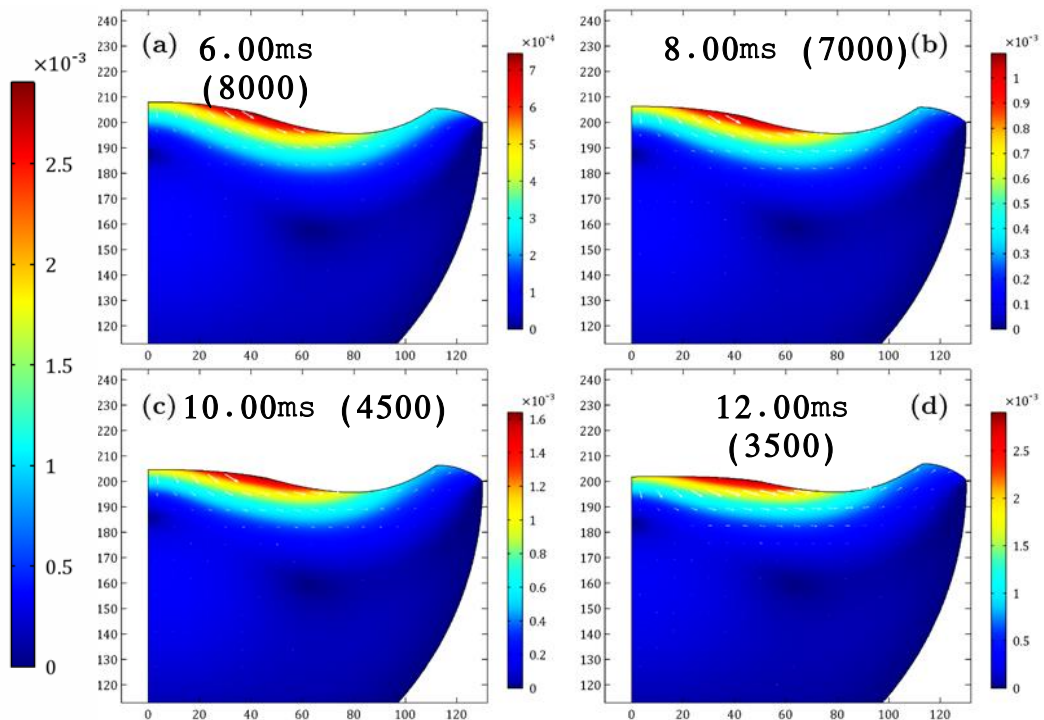
熔融金属无法有效沿  $r$  轴方向重新分布  
形成“中心高、边缘低”的微倾斜表面

## 研究内容



### 表面张力的缺失

熔融金属沿z轴方向位移很小  
大曲率表面形貌无法被消除



### 马拉高尼效应的作用

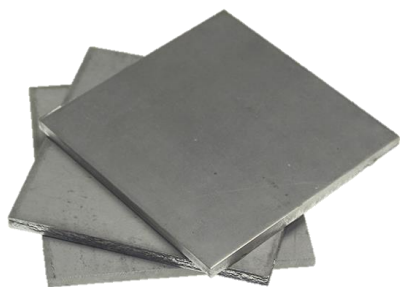
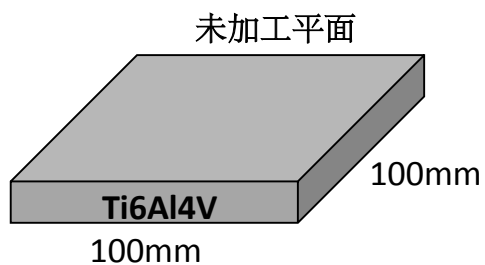
推动中心区域的熔融金属流向边缘  
研究区域边缘凸起由 $5\mu m$ 增长至 $7\mu m$

# 钛合金表面的 激光抛光实验研究

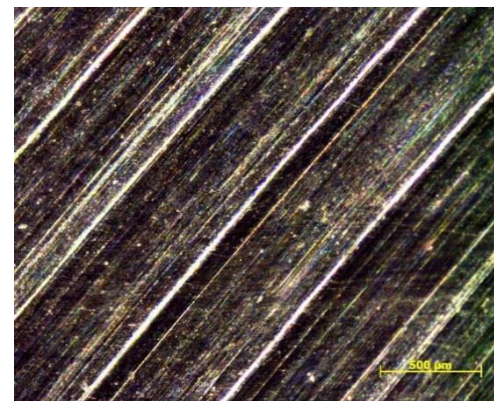
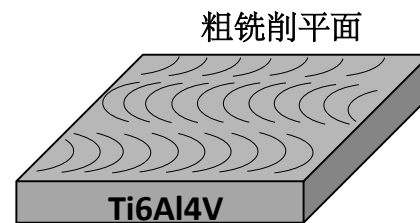


## 研究内容

# 材料预铣削



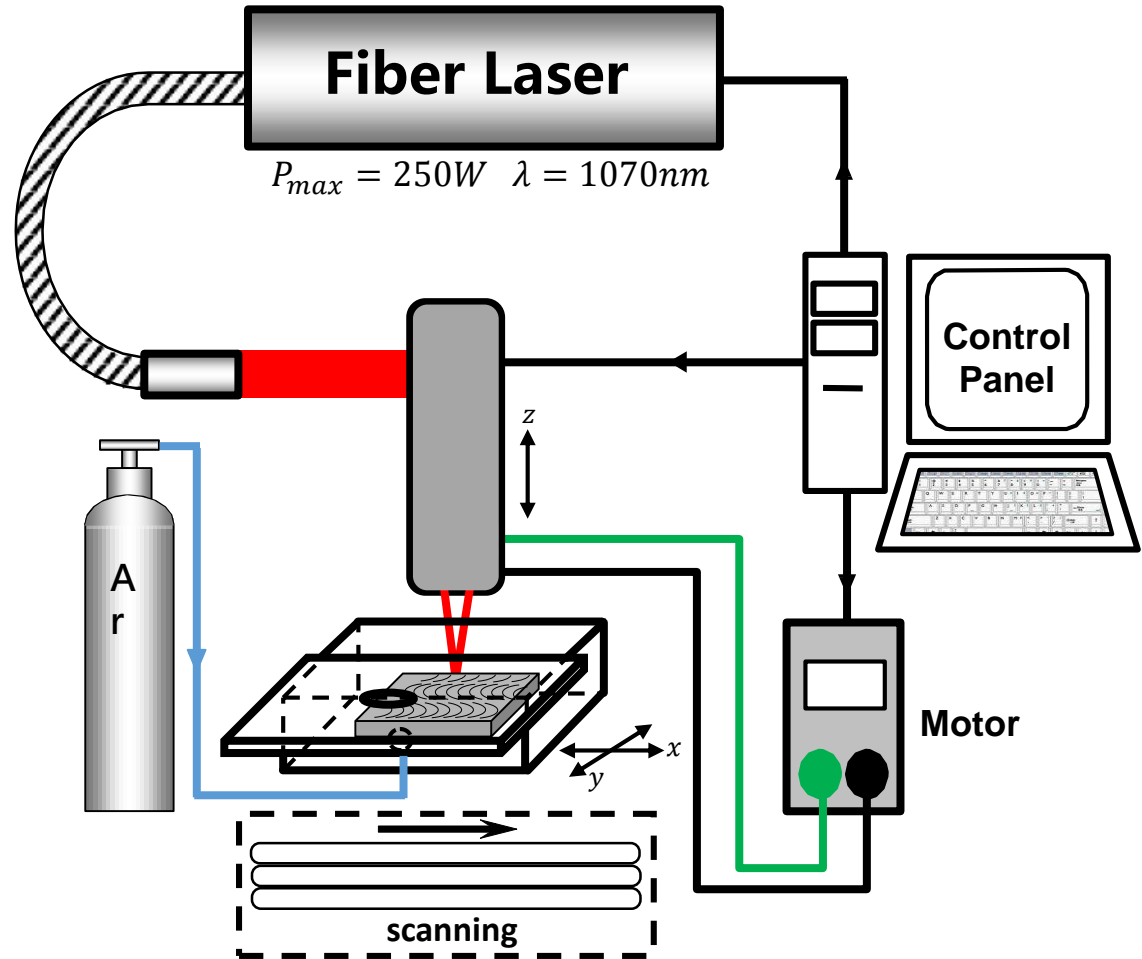
**铣削参数**  
(中捷立加SMTCL VMC 850E)  
进给速度: 120mm/min  
转速: 300r/min  
切削深度: 0.2mm  
铣刀直径: 80mm



## 研究内容

### 实验平台

- 毫秒激光器 (可上下移动)
- 两自由度加工平台
- 气体保护装置

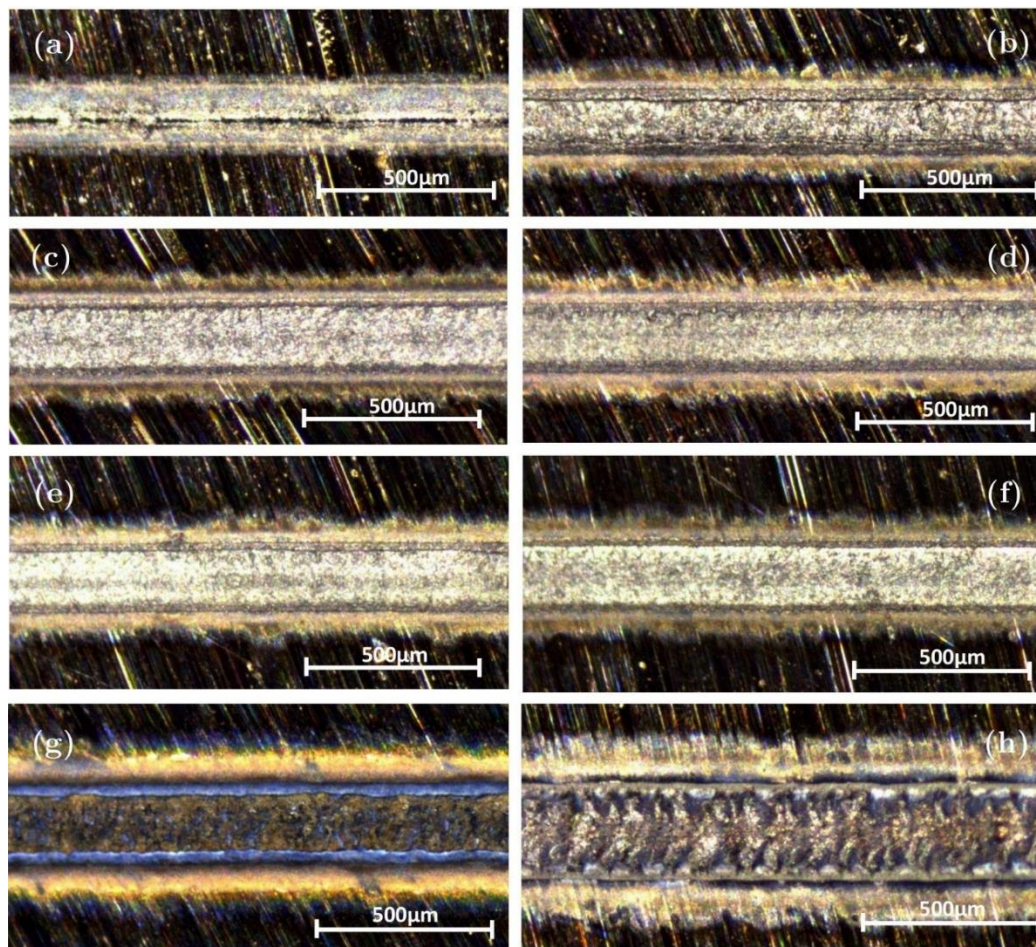


## 研究内容

# 线抛光预实验

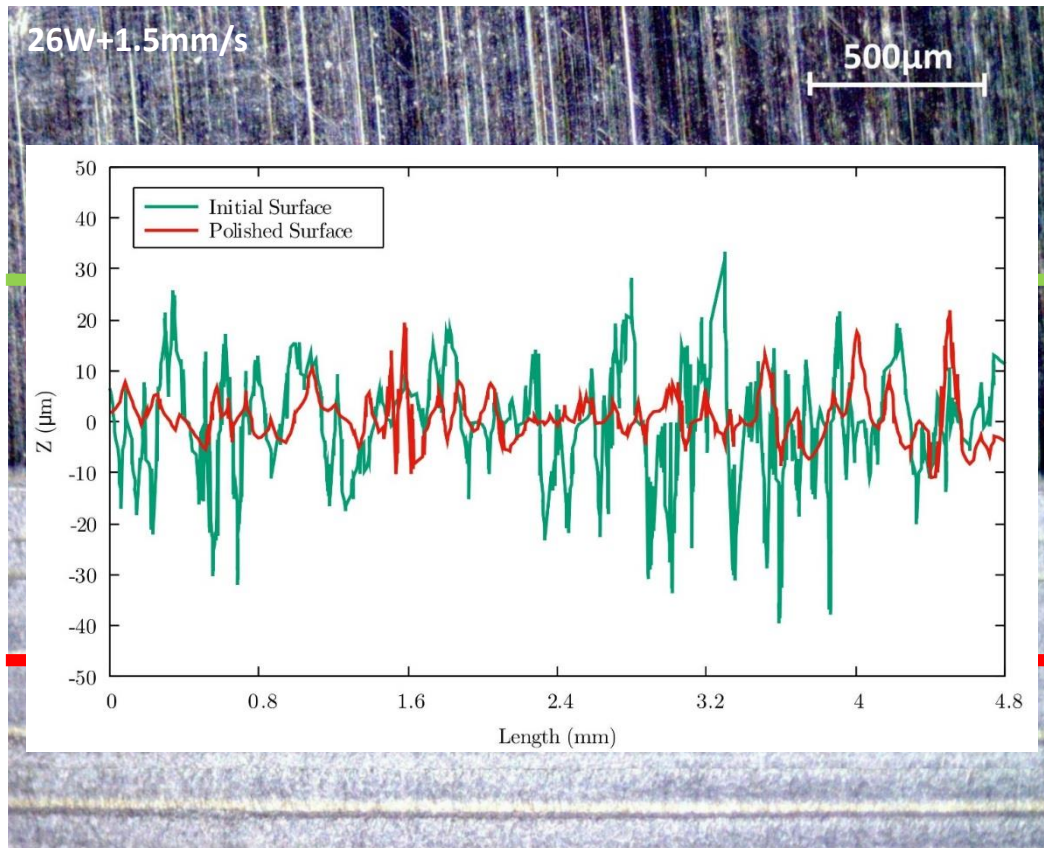
### 加工参数

实验编号	扫描速度 (mm/s)	激光功率 (W)
(a)	1.5	12
(b)	1.2	20
(c)	1.0	26
(d)	1.2	26
(e)	1.5	26
(f)	1.7	26
(g)	1.5	35
(h)	1.7	44



## 研究内容

# 表面抛光实验



- [1] 固定光斑直径  $d = 240\mu\text{m}$   
**焦平面加工**
- [2] 实验前营造**氩气气氛**
- [3] 避免一次加工中热积累效应过大  
**间歇加工**: 加热 - 暂停 - 再加热
- [4] 在激光扫描方向上  
表面明显变得**平整**
- [5] 在垂直于加工方向上  
表面出现了**规律性**分布的**纹路**

**Ra:**  
 $1.441\mu\text{m} \rightarrow 0.686\mu\text{m}$

**降低 52.4%**

# 内容提要

- 研究背景
  - I. 激光抛光技术简介
  - II. 国内外研究现状综述
- 研究内容
  - I. 基于多物理场耦合的数值仿真
  - II. 钛合金表面激光抛光实验研究
- 研究总结



## 研究总结

### 基于多物理场耦合的数值仿真

- [1] **激光抛光机理**：熔融金属受表面张力与马拉高尼效应**同时作用**，在流动中重新分布
- [2] **表面张力与马拉高尼效应的比较**

	表面张力 (Surface Tension)	马拉高尼效应 (Marangoni Effect)
主要作用	消除大曲率表面形貌	熔融金属在熔池中重新分布
作用方向	表面法向	表面切向
主导阶段	熔融初始阶段	熔池发展阶段

### 钛合金表面的激光抛光实验

- [1] **获得较为理想的抛光后表面**：在加工方向上，表面粗糙度**降低52.4%**
- [2] **探索出一种适于本激光加工平台的工艺方法**：“加热 - 暂停 - 再加热” **间歇加工**

**THANKS!**

**Q & A**