



# 等径双辊倾斜铸轧及其 自适应模糊控制研究

# Contents

- 1 研究背景
- 2 双辊倾斜铸轧系统
- 3 双辊倾斜铸轧过程建模
- 4 双辊倾斜铸轧过程数值模拟研究
- 5 双辊倾斜铸轧自适应模糊控制与实验

# 1 研究背景

## 1.1 双辊铸轧技术的发展概况及优点

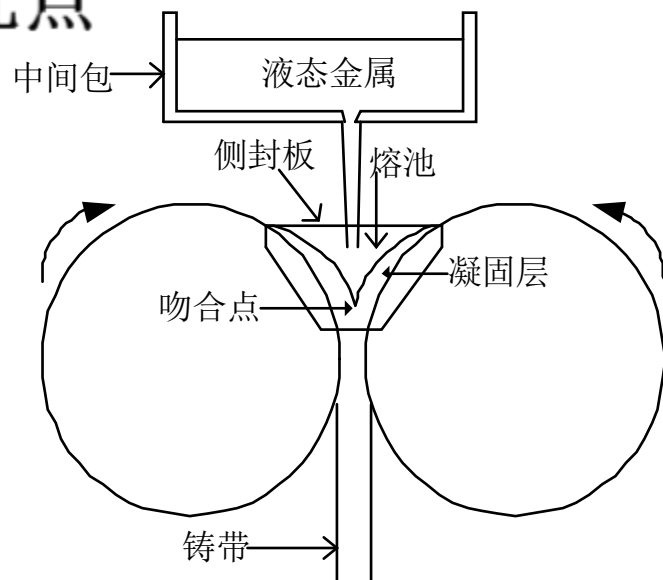
### 概况:

1846年，英国学者Henry Bessemer首次提出设想。

美、日、德、韩及中国等都投入了大量人力物力开展双辊铸轧理论、技术和实验等方面的研究，建成了可以生产不锈钢、碳钢、硅钢、镁、铝等多种产品的生产线。

### 目前比较成熟的薄带铸轧技术:

- (1) 美国纽柯钢铁公司的Castrip
- (2) 欧洲的Eurostrip
- (3) 浦项的PoStrip
- (4) 宝钢的Baostrip
- (5) 东北大学的E2Strip

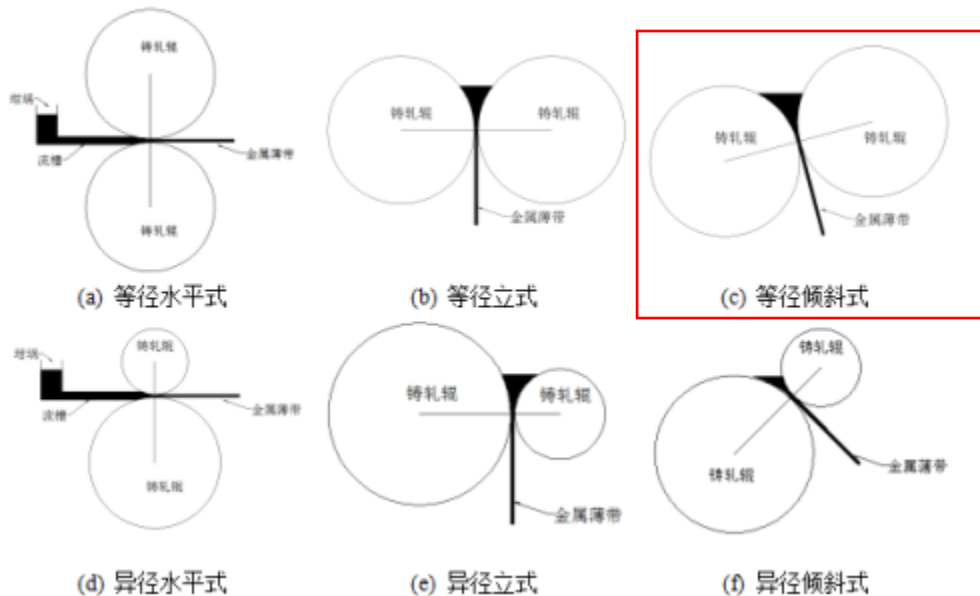


### 优点（与传统连铸工艺相比）:

- (1) 缩短了生产流程
- (2) 减少了设备投资
- (3) 降低了能源消耗
- (4) 提高了板材性能
- (5) 减少了环境污染

# 1.2 双辊不对称铸轧技术的发展概况

## 不同铸轧类型示意图



## 等径双辊倾斜铸轧优点:

- (1) 与水平式双辊铸轧相比，能减轻比重偏析，提高铸轧速度，降低能源消耗；
- (2) 与立式双辊铸轧相比，能减少弯曲应力，降低卷曲难度；
- (3) 与异径双辊铸轧相比，能降低控制难度。

## 不对称铸轧技术概况:

- (1) 二十世纪50年代，日本学者草川隆次在双辊倾斜轧机上获得轧制成功。
- (2) 1970年，Hunter研制出倾斜15°的水平双辊铸轧机。
- (3) 1987年，日本NMI公司和德国的Krupp Stahl AG公司合作研制出异径双辊铸轧机。
- (4) 1983年，东北大学研制出国内第一台异径双辊铸轧机；1990年，又建

立了第二台异径双辊铸轧机。



## 1.3 双辊铸轧过程控制技术的研究状况

### 双辊铸轧过程控制特征:

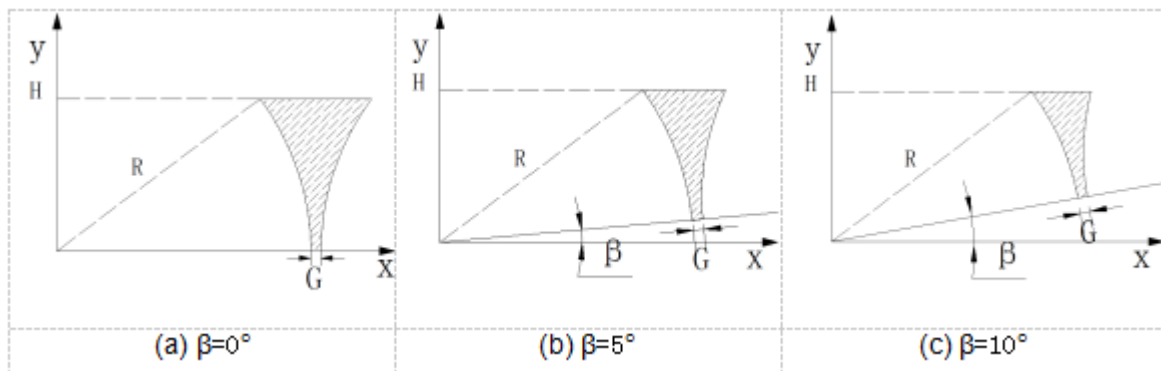
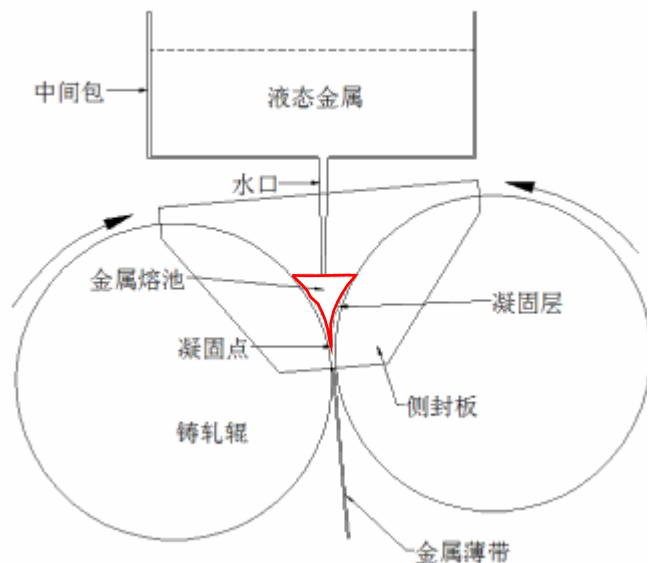
- (1) 非线性
- (2) 大时滞
- (3) 强干扰
- (4) 强耦合

由于倾斜铸轧带来的熔池流动和凝固不对称，进一步增大了铸轧过程控制的复杂性，那么

- (1) 以往的自适应控制模型能否适用于倾斜铸轧？
- (2) 如果不适用，需要进行哪些修正？

目前对于倾斜铸轧带来影响，尚没有系统分析的报道，对其自适应控制模型的研究，还是一个空白的领域。

# 1.4 双辊倾斜铸轧系统的设计要求



熔池形状发生  
明显改变

金属熔液在熔  
池内流动和  
凝固的变化

工艺控制发  
生了很大  
的变化

全面分析其特点，建立理论模型，研究双辊倾斜铸轧系统的工艺控制理论

## 1.5 本课题的意义及主要研究内容

### 意义:

#### (1) 工艺意义

双辊倾斜铸轧熔池内流体冲击对凝固影响更强，倾斜出板有利于减少板材内裂；倾斜出板能有效降低卷曲难度。尤其是脆性材料，如含有较高合金元素比例的镁合金AE44，更容易断带。

#### (2) 理论意义

引入倾角函数描述铸轧过程，丰富了铸轧理论，使其具有更广泛的适用性。

#### (3) 控制模型

建立合适的控制模型，更好地实现单一目标甚至是多目标控制。

## 1.5 本课题的意义及主要研究内容

### 主要研究内

容:

机械实现

以辽宁科技大学镁合金铸轧中心自主研发的立式双辊铸轧机为基础，增加倾斜铸轧子系统，设计实现等径双辊倾斜铸轧功能。

理论模型

建立双辊倾斜铸轧熔池液位数学模型和铸轧力计算模型，将常规铸轧的数学模型外推至考虑不同倾斜角度的铸轧。

数值模拟

研究工艺参数对熔池内温度场和流场的影响，建立不对称性分析模型进行分析，探讨适合的工艺参数匹配范围。

工艺控制

实现对液面高度进行合理控制的目标。设计自适应模糊输出反馈控制器，保证辊缝和熔池液位高度的输出跟踪误差能够收敛到理想控制范围。进行实验验证。





## 2 双辊倾斜铸轧系统

### 2.1 原双辊铸轧系统

### 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现

### 2.3 实验与分析

## 2.1 原双辊铸轧系统

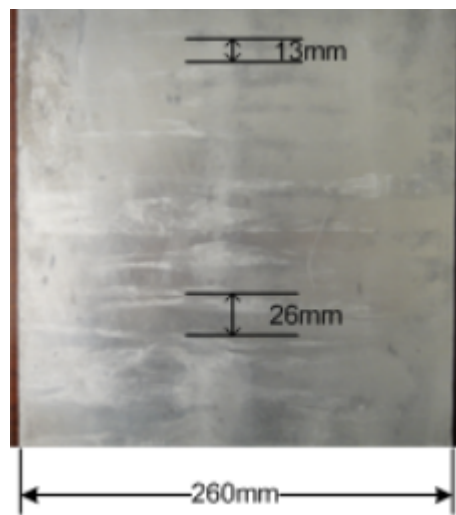


### 系统组成:

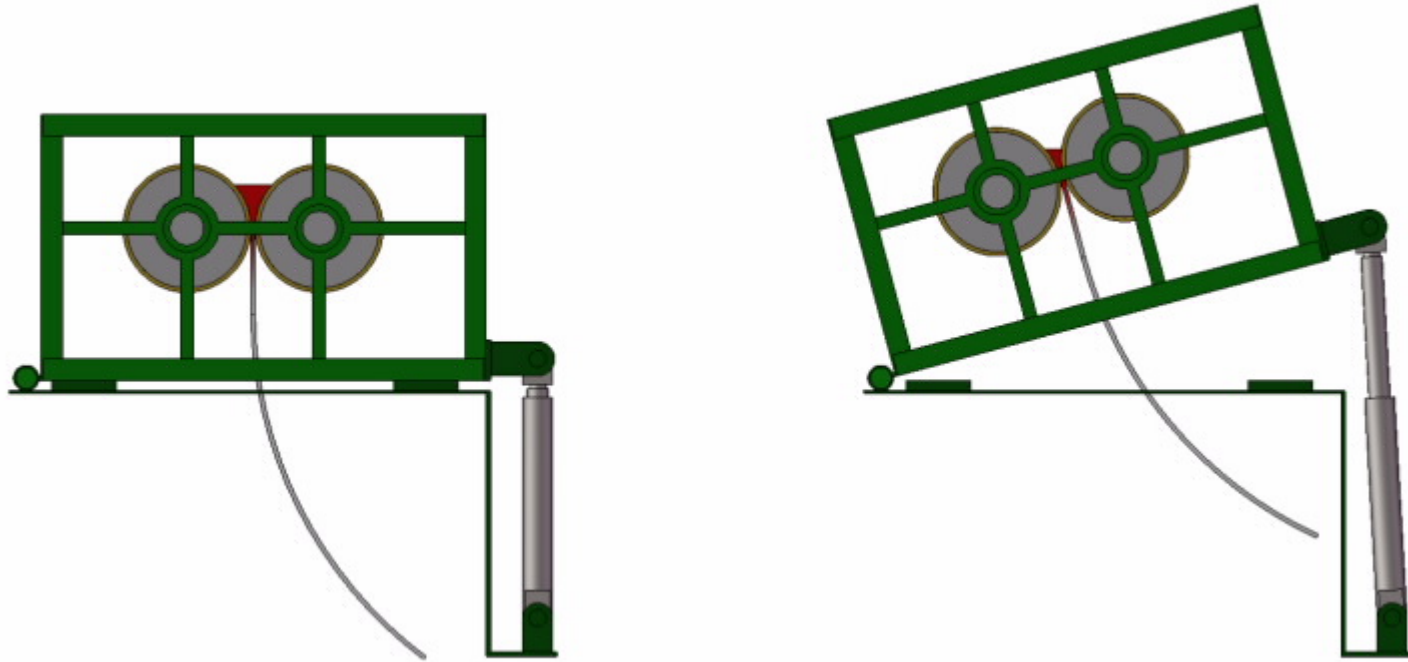
- (1) 水冷辊子系统
- (2) 冷却水循环子系统
- (3) 熔化及浇铸子系统
- (4) 中间包子系统
- (5) AGC液压子系统
- (6) 主传动子系统
- (7) 在线监控子系统。

### 控制策略:

应用熔池液位的遗传优化模糊控制器、铸轧力与辊缝解耦的PI自适应控制器，进行镁合金AZ31铸轧实验，其结果表明铸轧过程稳定，生产出的薄带表面无明显缺陷，厚度一致，微观组织分布均匀。

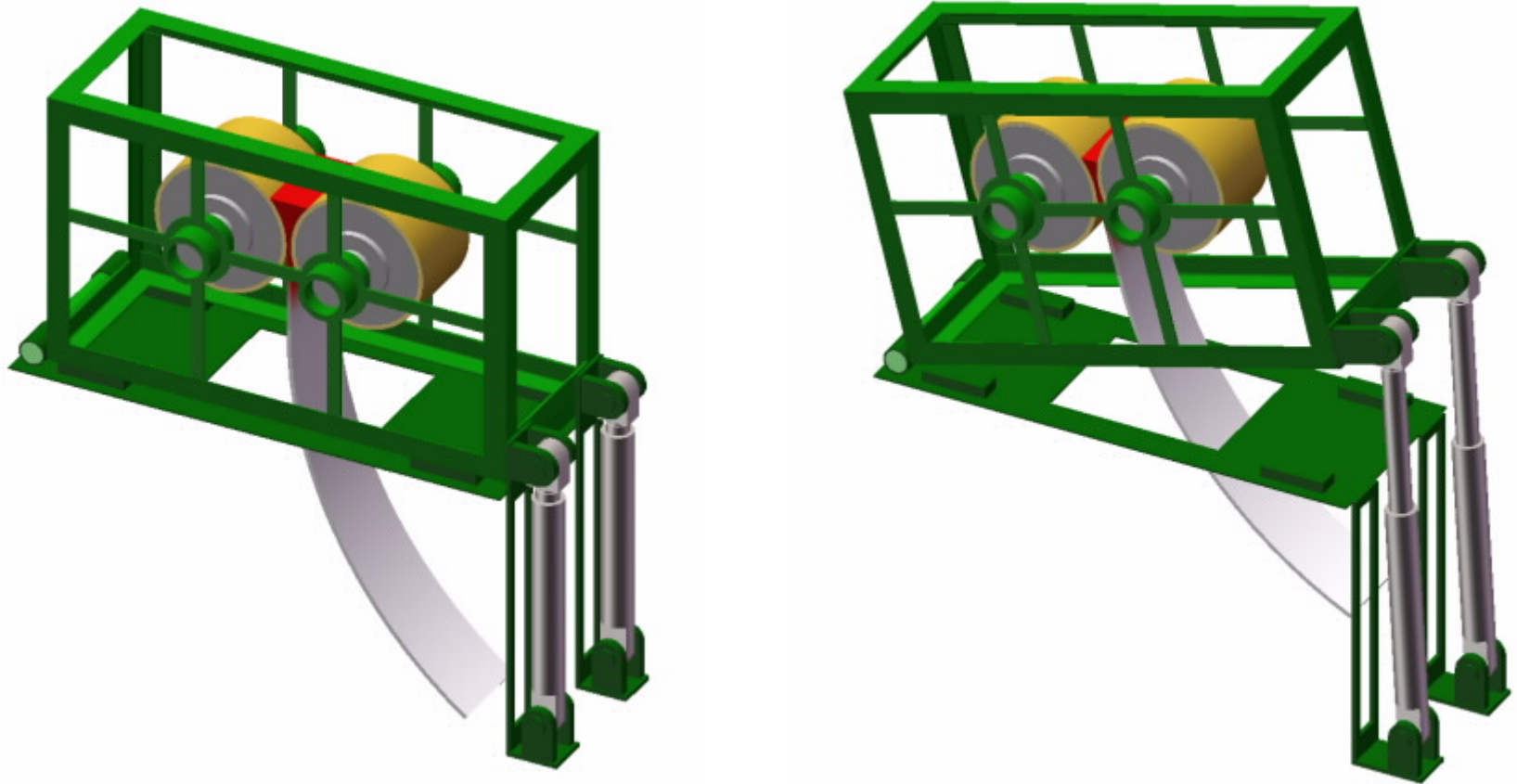


## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现



双辊倾斜铸轧倾斜方式示意图

## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现



双辊倾斜铸轧倾斜方式示意图

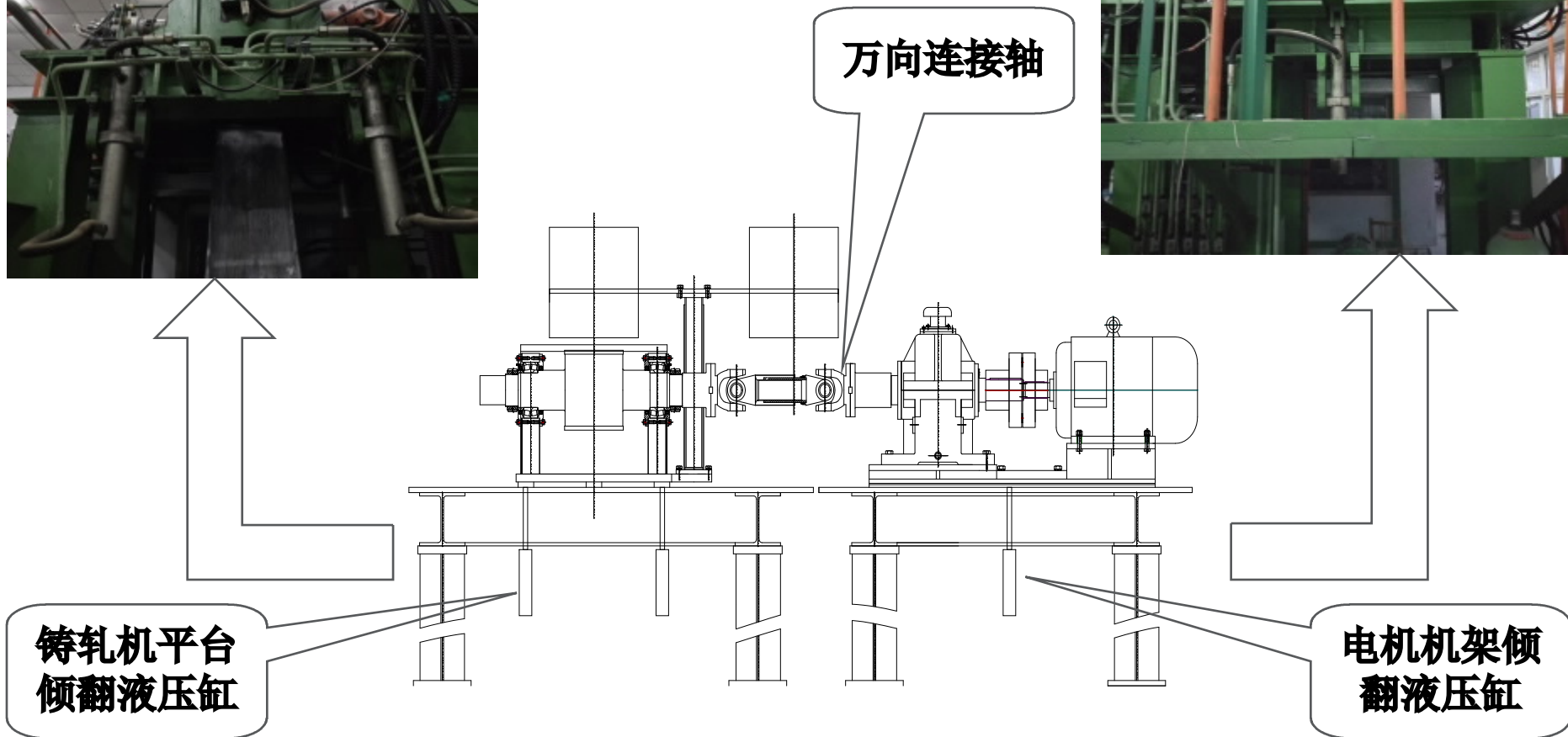
## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现



行程开关

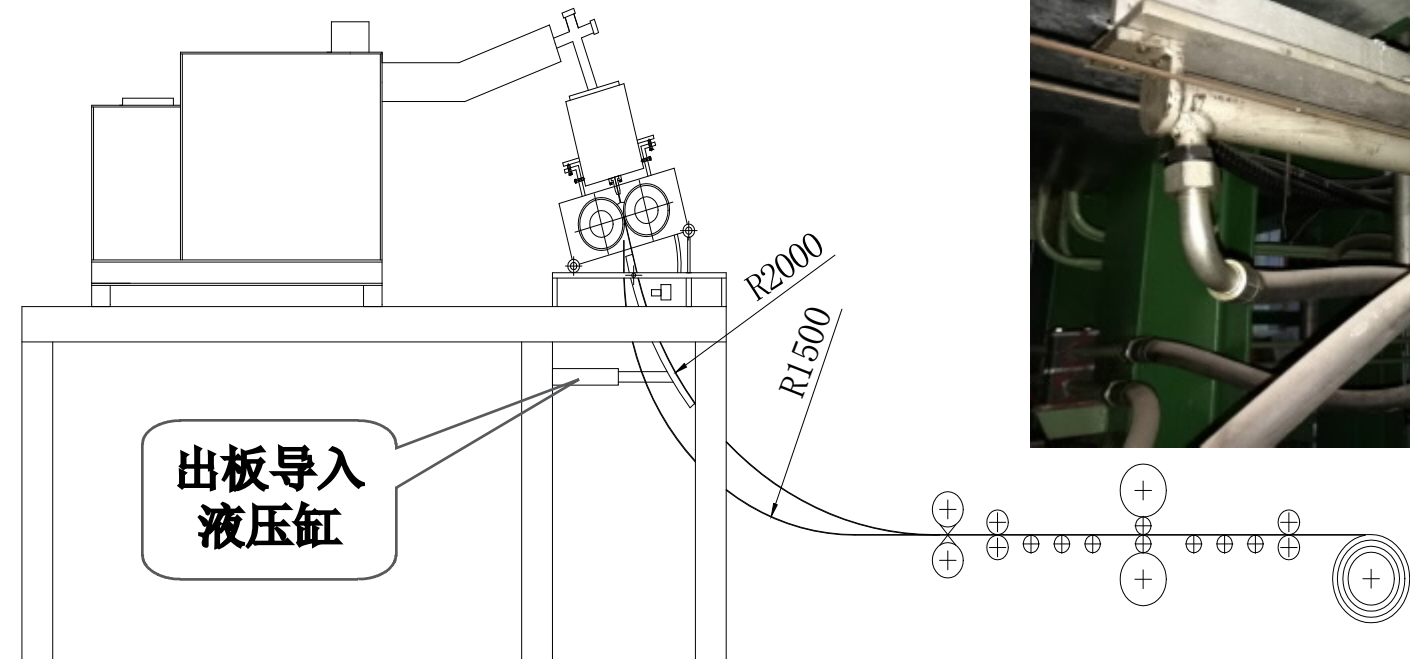
为确保铸轧过程控制的安全性，控制系统另行增加三个行程开关控制定位，作为铸轧的保护系统。一旦液压位置过渡偏离，有可能导致设备倾翻失控，触发三个行程开关，PLC控制可切换到逻辑开关控制，自动停止倾翻动作，防止意外发生。控制定位开关可以实现 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 三个不同角度倾斜。倾斜后放水平，或水平再调倾斜，动作平顺，铸轧平稳。

## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现



调整倾斜角度的液压缸示意图

## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现



双辊倾斜铸轧示意图

## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现

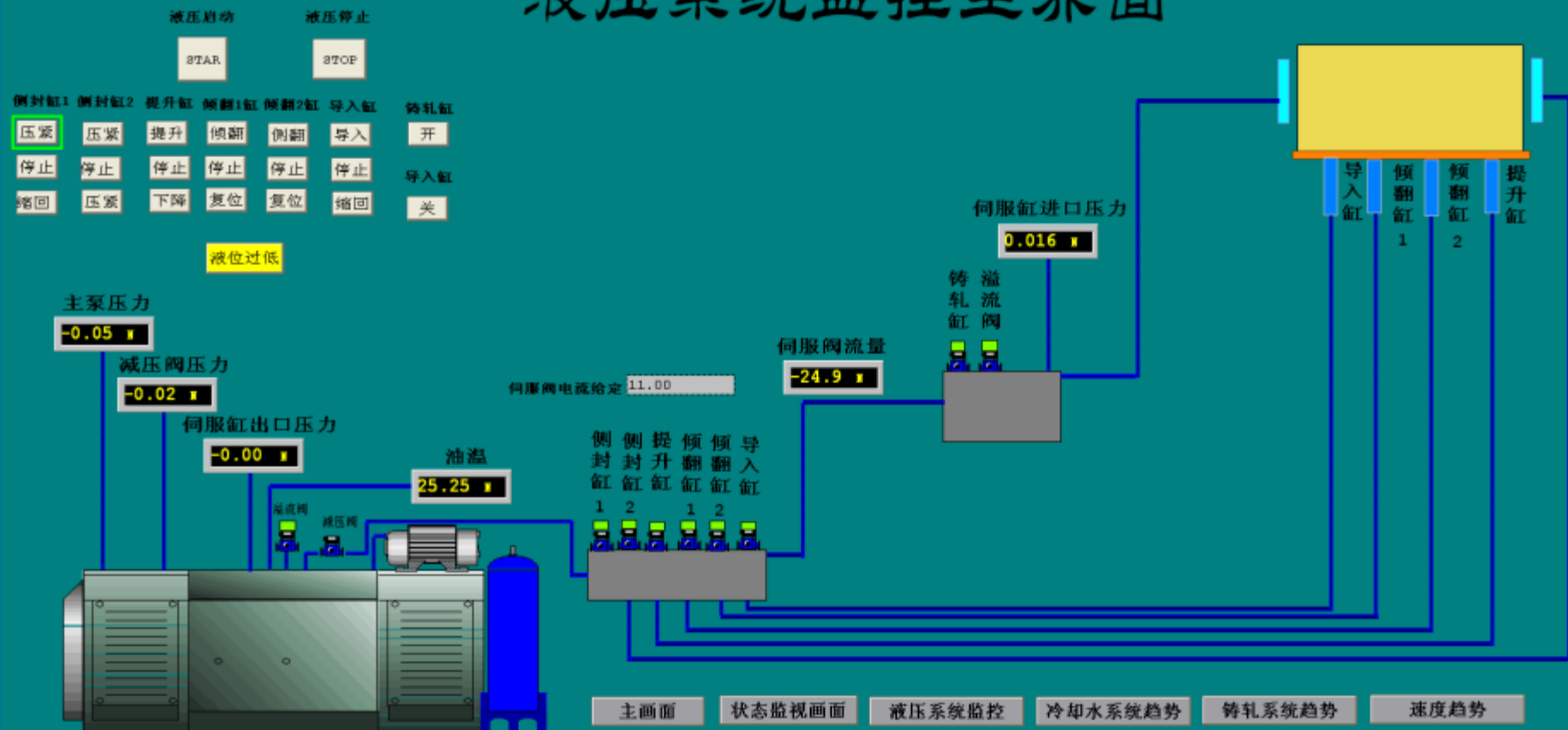






## 2.2 双辊倾斜铸轧子系统的实现

### 液压系统监控主界面



双辊倾斜铸轧液压系统监控主界面

## 2.3 实验与分析



## 2.3 实验与分析



## 2.3 实验与分析



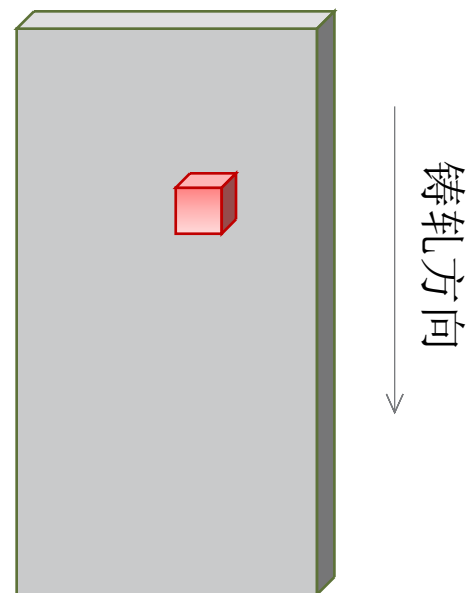
双辊倾斜铸轧实验

## 2.3 实验与分析

元素	Al	Cu	Mg	其他
含量%	95	2.7	1.1	1.2
浇铸温度/K	辊缝/mm	铸轧速度/m/min	液面高度/mm	倾斜角度
930	2	6	90	10°



厚度为2.4mm，宽度为200mm的7075薄带



## 2.3 实验与分析

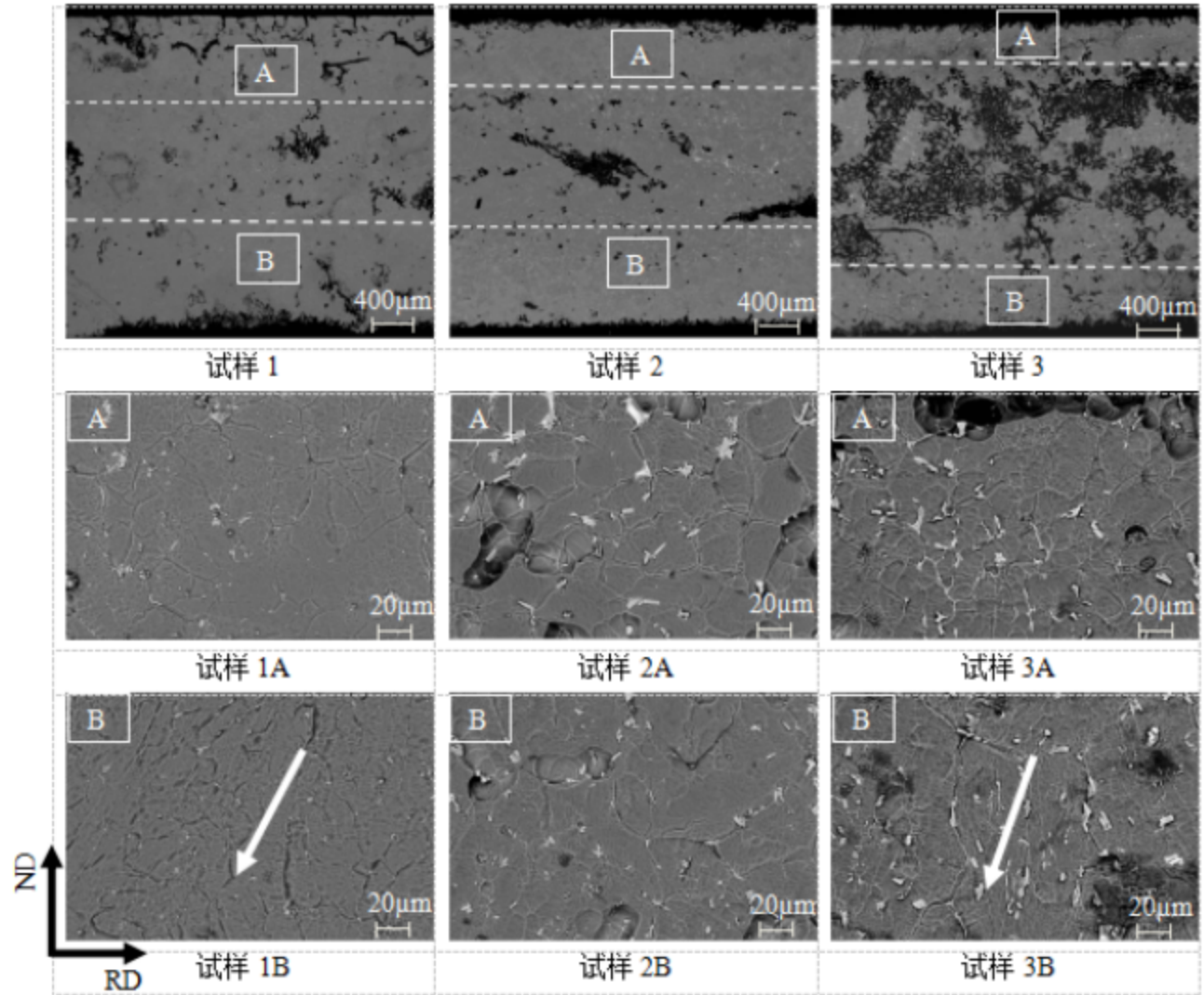
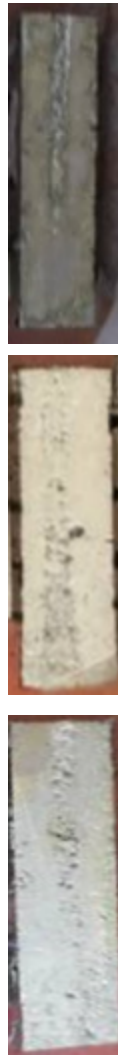


## 2.3 实验与分析

3组实验

凝固壳偏移

右侧晶粒生长有方向性





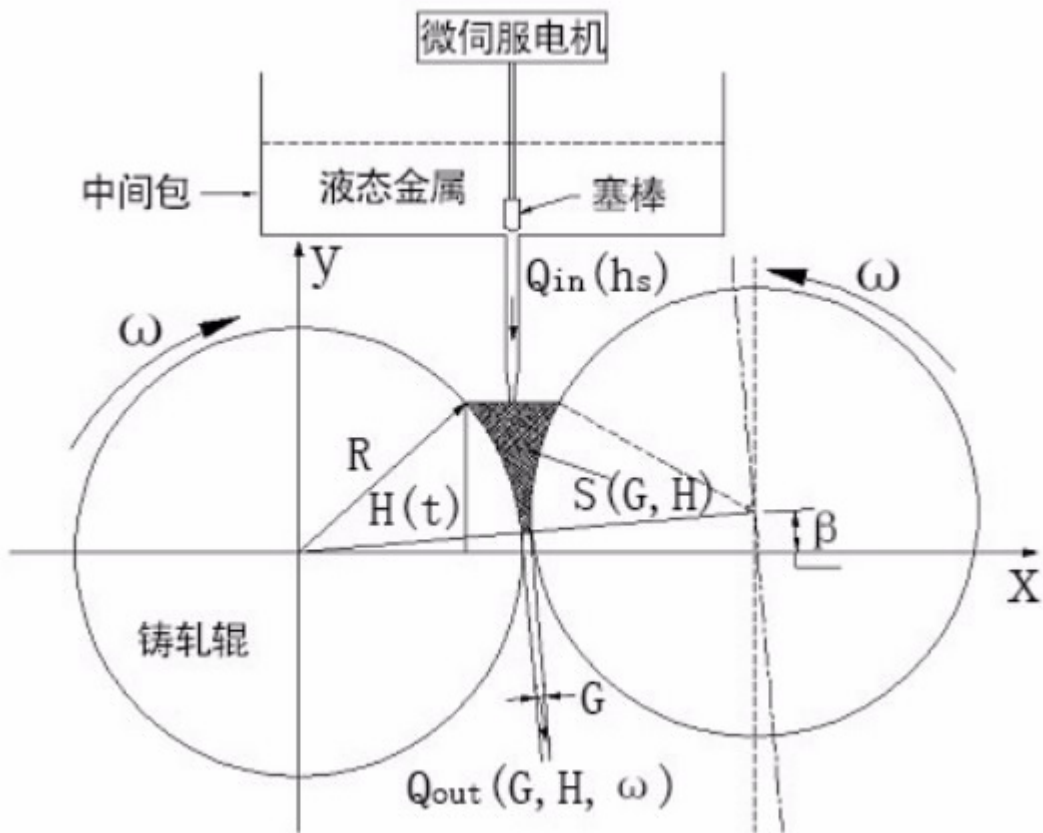


## 3 双辊倾斜铸轧过程建模

### 3.1 双辊倾斜铸轧熔池液位模型

### 3.2 双辊倾斜铸轧铸轧力计算模型

### 3.1 双辊倾斜铸轧熔池液位模型



双辊倾斜铸轧系统示意图

$H(t)$ 表示熔池液位高度

$G$ 表示辊缝

$R$ 表示辊半径

$S$ 表示熔池侧面积

$\omega$ 表示铸轧辊旋转的角速度

$Q_{in}$ 表示金属流入熔池量

$Q_{out}$ 表示金属流出熔池量

物质连续方程



$$\dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (3.1)$$



$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.2)$$

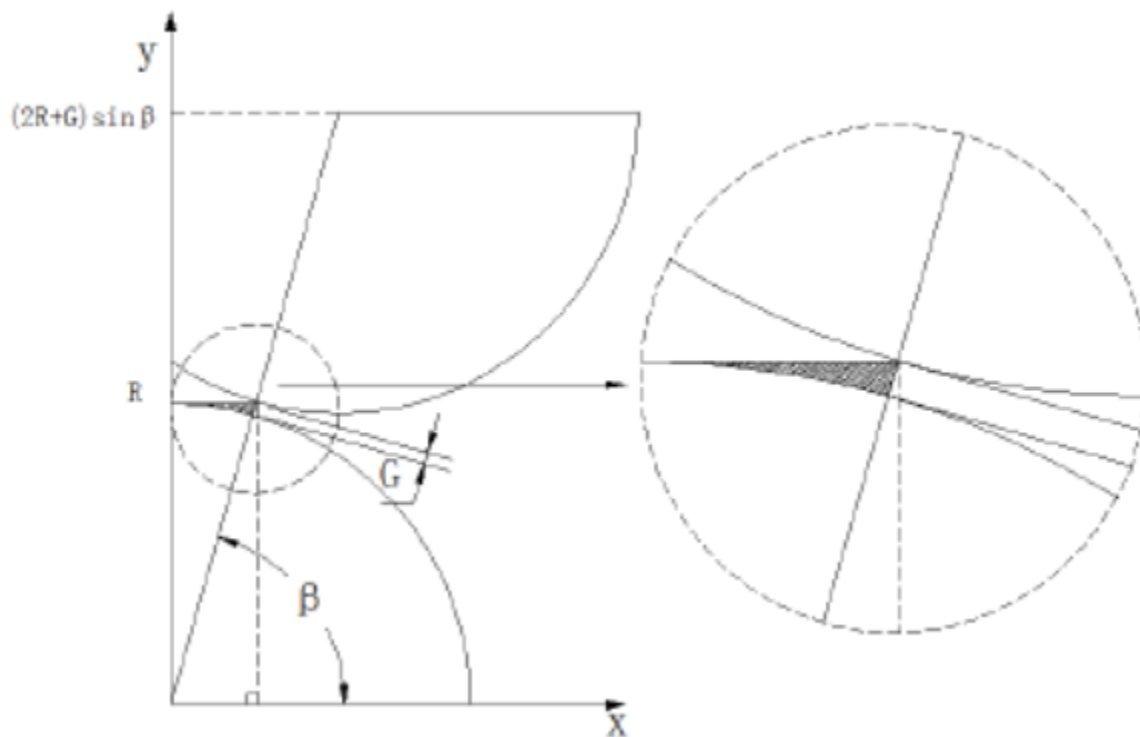
## 3.1 双辊倾斜铸轧熔池液位模型

### 3.1.1 模型边值条件分析

(1) 最大倾斜角度分析

要形成熔池液面，最大倾斜角度必须满足

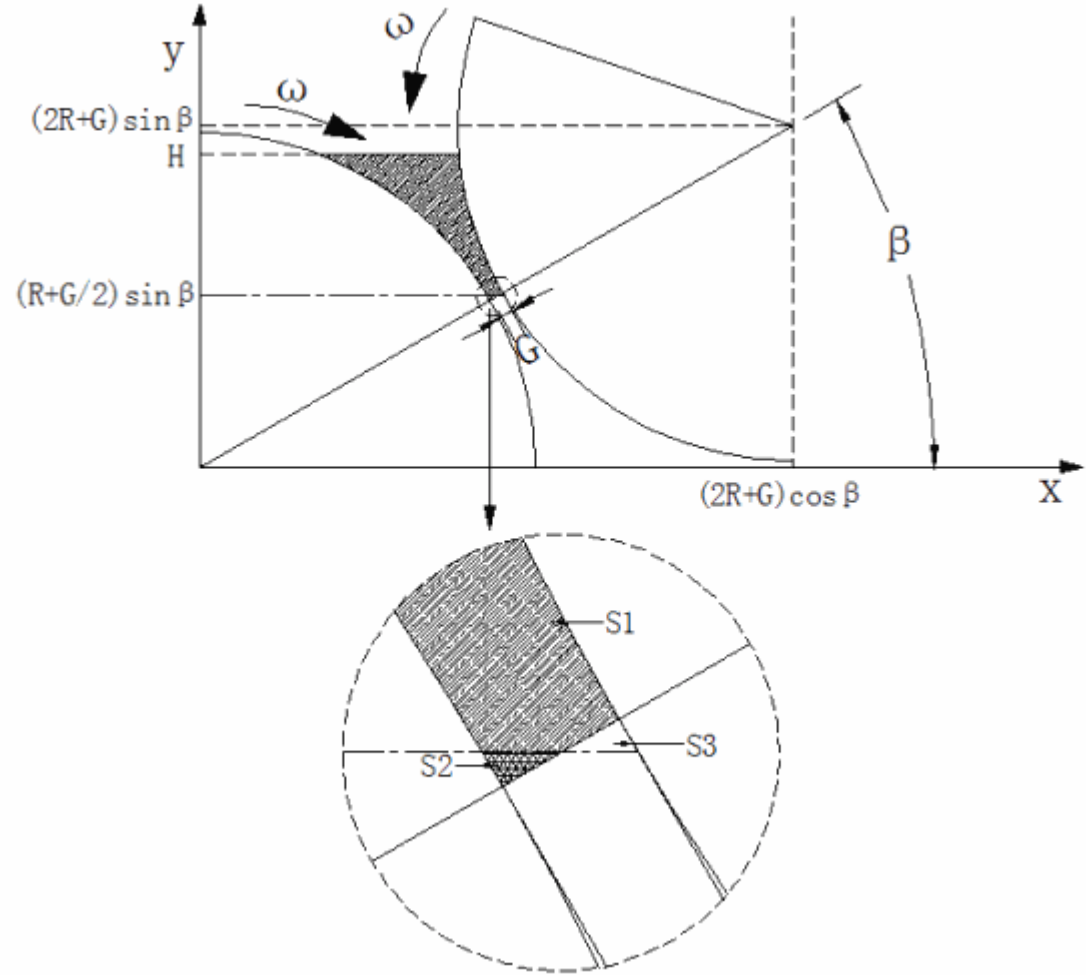
$$\arcsin \frac{R}{R+G}$$



(2) 熔池断面积计算积分上下限分析

积分上限为  $y=H$

积分下限为  $y = (R - \frac{G}{2}) \sin \beta$

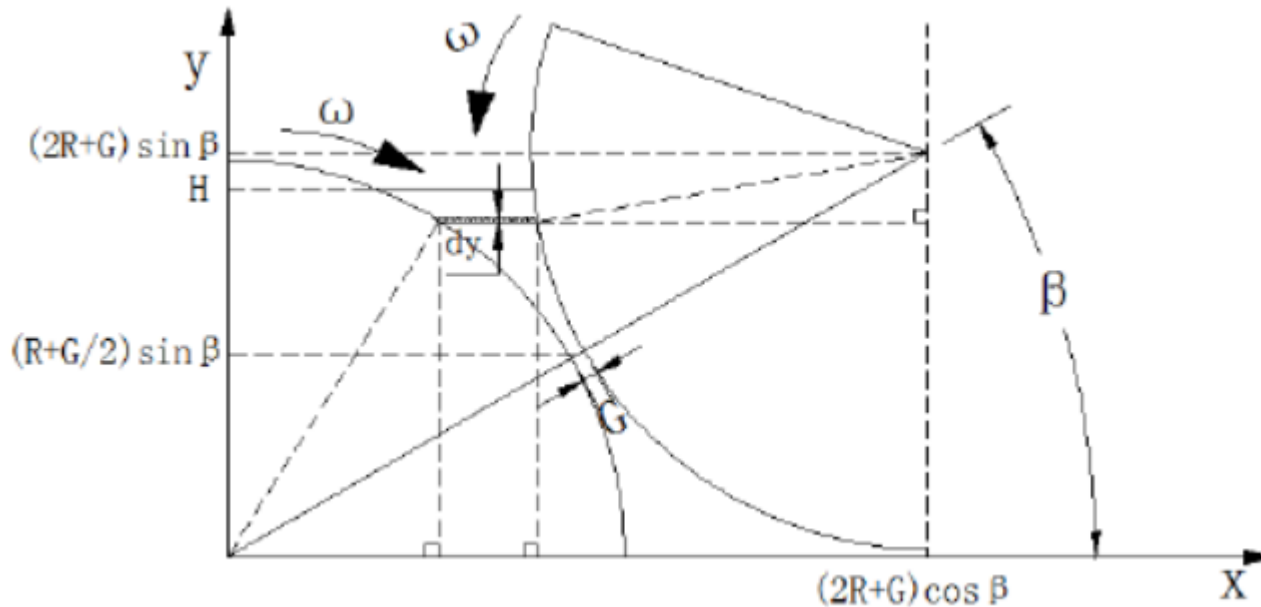


熔池侧面积计算积分下限分析示意图

### 3.1 双辊倾斜铸轧熔池液位模型

#### 3.1.2 熔池断面积求解

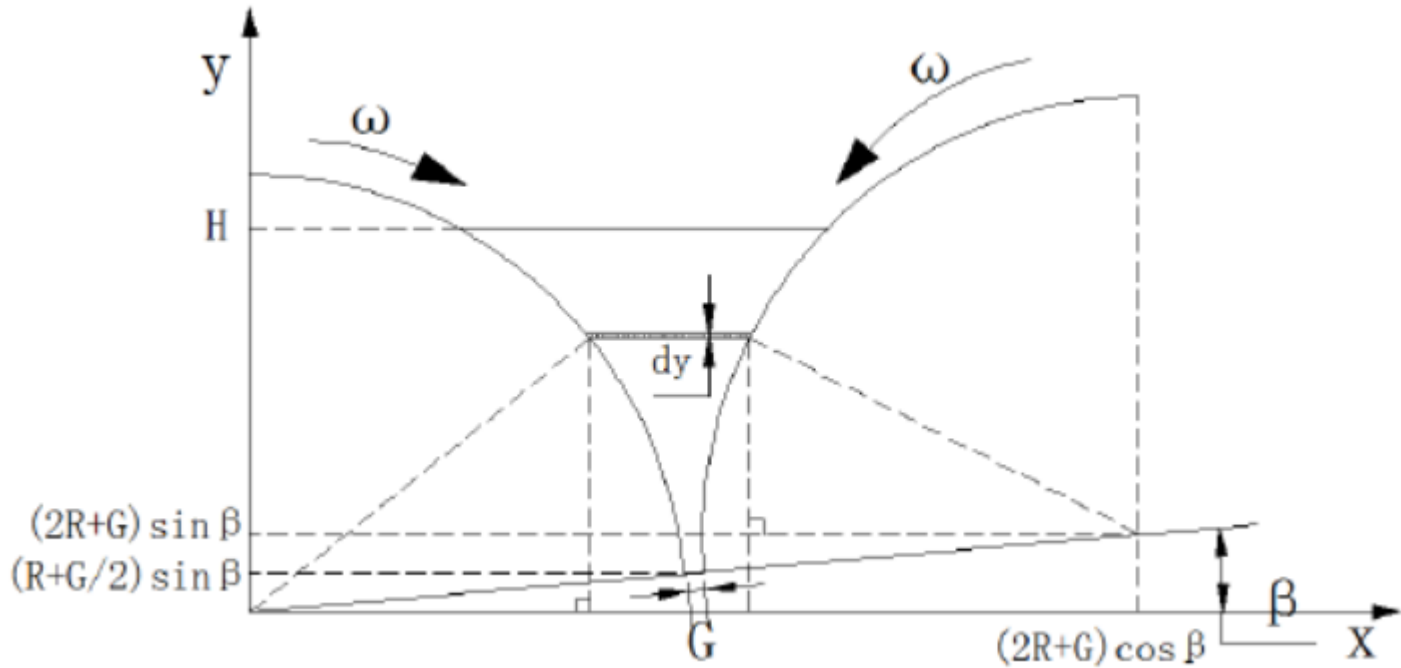
(1) 倾斜角度较大，熔池液位高度小于等于右辊圆心高度



倾斜角度较大时熔池侧面积计算示意图

$$S = \int_0^H \left[ (2R - G) \cos \beta - \sqrt{R^2 - ((2R - G) \sin \beta - y)^2} - \sqrt{R^2 - y^2} \right] dy \quad (3.3)$$

(2) 傾斜角度較小，熔池液面高度大於等於右輥圓心高度



傾斜角度較小時熔池側面積計算示意圖

$$S = \int_{(R - \frac{G}{2}) \sin \beta}^{(2R + G) \sin \beta} \left[ (2R + G) \cos \beta \sqrt{R^2 - (y - (2R + G) \sin \beta)^2} + \sqrt{R^2 - y^2} \right] dy \quad (3.4)$$



(3) 综合求解

因为  $\sqrt{R^2 - ((2R + G) \sin \beta - y)^2} = \sqrt{R^2 - (y - (2R + G) \sin \beta)^2}$

$$S = \int_{(R - \frac{G}{2}) \sin \beta}^{(2R + G) \cos \beta} \sqrt{R^2 - (y - (2R + G) \sin \beta)^2} \sqrt{R^2 - y^2} dy$$

$$\int_{(R - \frac{G}{2}) \sin \beta}^{(2R + G) \cos \beta} \sqrt{R^2 - (y - (2R + G) \sin \beta)^2} \sqrt{R^2 - y^2} dy \quad (3.5)$$



### 3.1.2 熔池液位模型求解

$$Q_{in} - Q_{out} = L \frac{dS}{dt} \quad (3.6)$$

$$\frac{dS}{dt} = ((2R - G) \cos \alpha - \sqrt{R^2 - (H - (2R - G) \sin \alpha)^2} - \sqrt{R^2 - H^2}) \frac{dH}{dt} + (H \cos \alpha - (2R - G) \cos \alpha \sin \alpha - \sin \alpha \sqrt{R^2 - (R - \frac{G}{2})^2 \sin^2 \alpha}) \frac{dG}{dt} \quad (3.7)$$

金属流入量  $Q_{in} = ah_s(b - ch_s)$

金属流出量  $Q_{out} = LG - R$

将 (3.7) 带入 (3.6) 可到熔池液位的数学模型如下：

$$\frac{dH}{dt} = \frac{ah_s b - ch_s LG - R - L(H \cos \alpha - (2R - G) \cos \alpha \sin \alpha - \sin \alpha \sqrt{R^2 - (R - \frac{G}{2})^2 \sin^2 \alpha}) \frac{dG}{dt}}{L((2R - G) \cos \alpha - \sqrt{R^2 - (H - (2R - G) \sin \alpha)^2} - \sqrt{R^2 - H^2})} \quad (3.8)$$

由式 (3.8) 可知，塞棒高度  $h_s$ ，辊速  $\omega$ ，辊缝  $G$ ，倾斜角度  $\alpha$  等四个参数耦合在一起，均直接影响熔池液位的稳定。



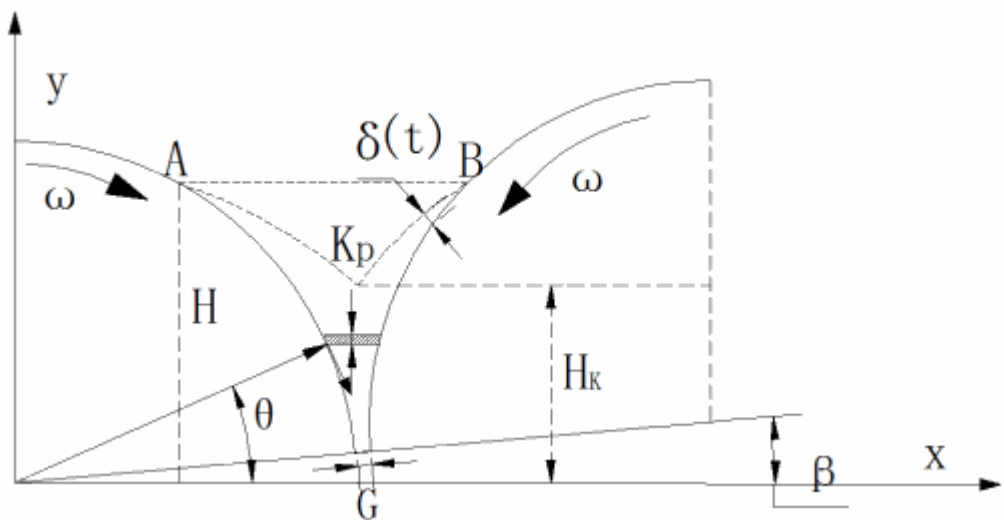


当倾斜角度  $\alpha=0^\circ$  时，(3.8) 可以简化为立式铸轧形式，即

$$\frac{dH}{dt} = \frac{ah_s b + ch_s + LG + R + LH \frac{dG}{dt}}{L(G + 2R + 2\sqrt{R^2 + H^2})} \quad (3.9)$$

由此可见，常规等径铸轧的熔池液位模型只是熔池液位模型3.8的一个特例，新建立的熔池液位模型考虑了不同倾斜角度对铸轧的影响，从而具有更广泛的适用性。

### 3.2 双辊倾斜铸轧铸轧力计算模型



#### 双辊倾斜铸轧铸轧力特征分析:

##### (1) 移动辊重力分析

铸轧力等于重力分量F1、液压力和摩擦力的合力，相对于立式铸轧，增加了重力分量F1的影响，改变了摩擦力的影响，而且影响程度与倾斜角度直接相关。

$$F1 = mg \sin \theta$$

##### (2) 倾斜铸轧变形区分析

铸轧变形区形状不对称，面积减少，必然直接影响铸轧力结果。计算铸轧力时，积分上限为 $y=H$ ，积分下限为 $y = (R - \frac{G}{2}) \sin \theta$

#### 铸轧力计算模型求解:

$$F = \frac{LK}{2G} H_k \left( R - \frac{G}{2} \right) \sin^2 \theta + F_0 \quad (3.18)$$

由公式 (3.18) 可知，要在铸轧过程中保持稳定的铸轧力，则辊缝、凝固结合点位置、倾斜角度需要相应保持稳定。新建立的等径双辊倾斜铸轧的铸轧力计算模型3.18引入了补偿项，考虑了倾斜角度对铸轧力的影响。



## 4 双辊倾斜铸轧过程数值模拟研究

4.1 双辊倾斜铸轧工艺过程

4.2 基本假设与控制方程

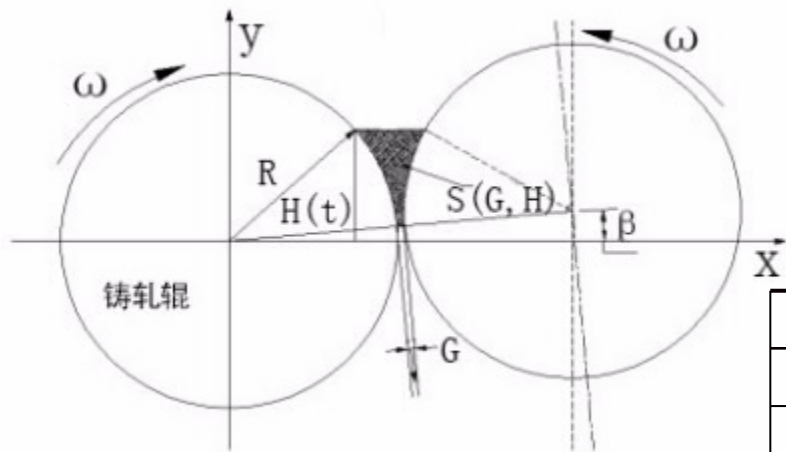
4.3 模拟过程中几个重要问题的处理

4.4 工艺参数对熔池内流场和温度场的影响

4.5 熔池内流场和温度场不对称性分析

4.6 工艺参数调整对熔池内流场和温度场不对称性影响

# 4.1 双辊倾斜铸轧工艺过程



计算材料为商用镁合金AZ31

模拟参数	符号	数值
铸轧辊半径/mm	R	150
铸轧辊面宽/mm	L	200
铸轧线速度/ $\text{ms}^{-1}$	$V_c$	8/60、10/60、12/60
入口速度/ $\text{ms}^{-1}$	$V_{in}$	8/60、10/60、12/60
出口速度/ $\text{ms}^{-1}$	$V_{out}$	8/60、10/60、12/60
入口水口狭缝厚度/mm	$H_{in}$	2
出口厚度/mm	$H_{out}$	2
熔池液位高度/mm	$H_{pool}$	70、80、90
倾斜角度/ $^{\circ}$		5、10、15
浇注温度/K	$T_p$	973
液相线温度/K	$T_m$	903
固相线温度/K	$T_s$	848
密度/ $\text{kg/m}^3$	$\rho$	1630



## 4.3 基本假设与控制方程

### 基本假设:

- (1) 采用广义流体的概念统一处理液相区、固相区和固液两相区，这样不必处理复杂的固液界面，既简化了模型，也比较符合实际；
- (2) 不考虑初始和结束时的过渡期，考虑倾斜铸轧过程为稳态，且熔池液位保持稳定；
- (3) 熔液视为不可压缩的牛顿流体；
- (4) 比热和粘度与温度有关，其它材料特性与温度无关；
- (5) 轧辊与凝固壳之间无相对滑动且接触良好；
- (6) 轧辊为刚性体且转速均匀；
- (7) 侧封板为绝热体；
- (8) 水口位置选定熔池液面中心且竖直；
- (9) 出口板材方向与两轧辊中心连线垂直；
- (10) 出口速度与轧辊切速度相同。



## 4.2 基本假设与控制方程

控制方程:

(1) 连续性方程	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$
(2) 动量守恒方程	<p>稳态三维湍流流动的Navier-Stokes方程</p>
(3) 能量方程	$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}$
(4) 湍流模型	<p>Launder和Spalding提出的 双方程模型</p>
(5) 其他问题的处理	<p>凝固潜热、有效粘度</p>

## 4.3 模拟过程中几个重要问题的处理

**固相率与温度关系模型:**

$$(T) \begin{matrix} 0 & T & T_l \\ \frac{T_l}{T_l} & \frac{T}{T_s} & T & T_l \\ 1 & T & T_s \end{matrix}$$

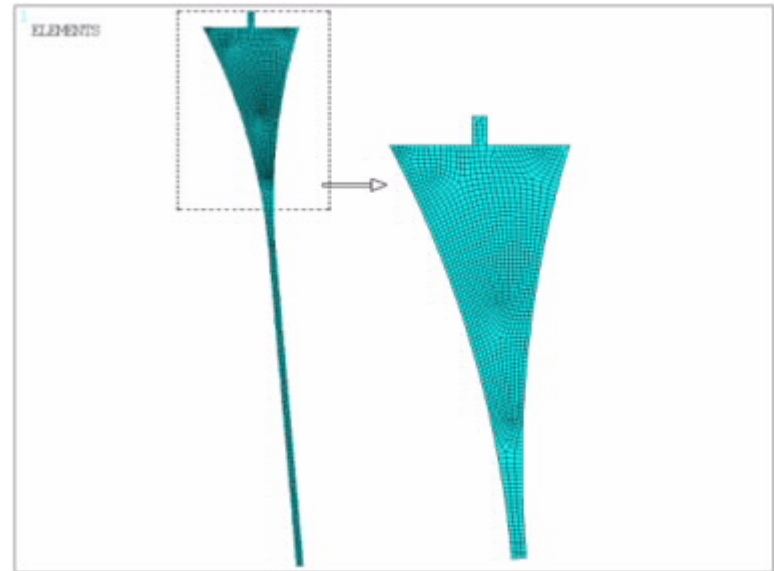
**凝固潜热的处理:**

$$C_r \begin{matrix} C_l & T & T_l \\ C_l & \frac{L}{T_l} & \frac{L}{T_s} & T_s & T & T_l \\ C_s & T & T_s \end{matrix}$$

**有效粘度的处理:**

$$\begin{matrix} m & 1 & \frac{2C_l(T - T_l)}{RT} & f_l & 1 \\ m f_l^{\frac{\lg M_l}{\lg 0.33}} & 0.33 & f_l & 1 \\ M_s & m f_l^{\frac{\lg(M_l - M_s)}{\lg 0.67}} & 0 & f_l & 0.33 \\ M_s & & f_l & 0 \end{matrix}$$

**网格划分:**





## 4.4 工艺参数对熔池内流场和温度场的影响

(1) 倾斜角度、液面高度和铸轧速度对流场和温度场的影响：27组工况

		倾斜角度		
		5	10	15
液面高度	铸轧速度	27组工况		
	70			
10				
12				
80	8			
	10			
	12			
90	8			
	10			
	12			

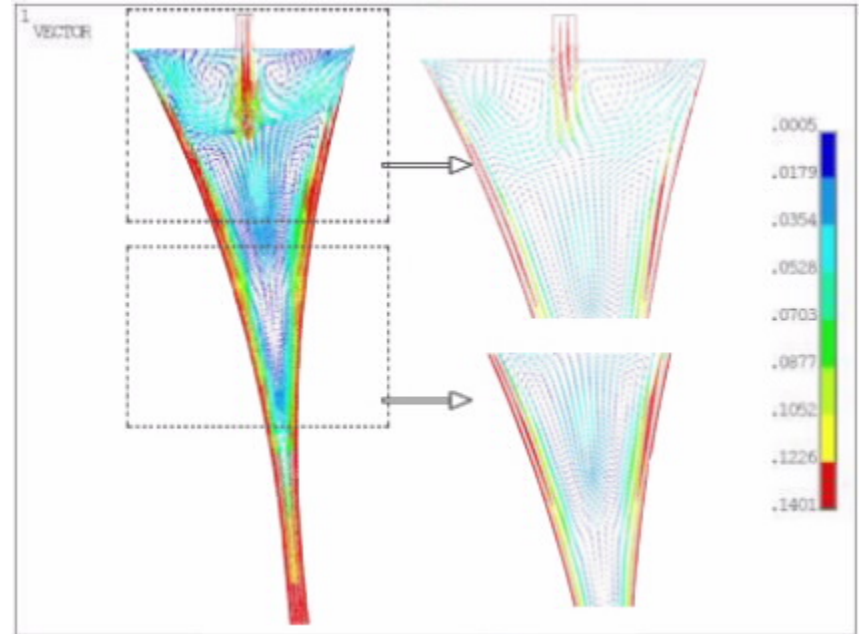
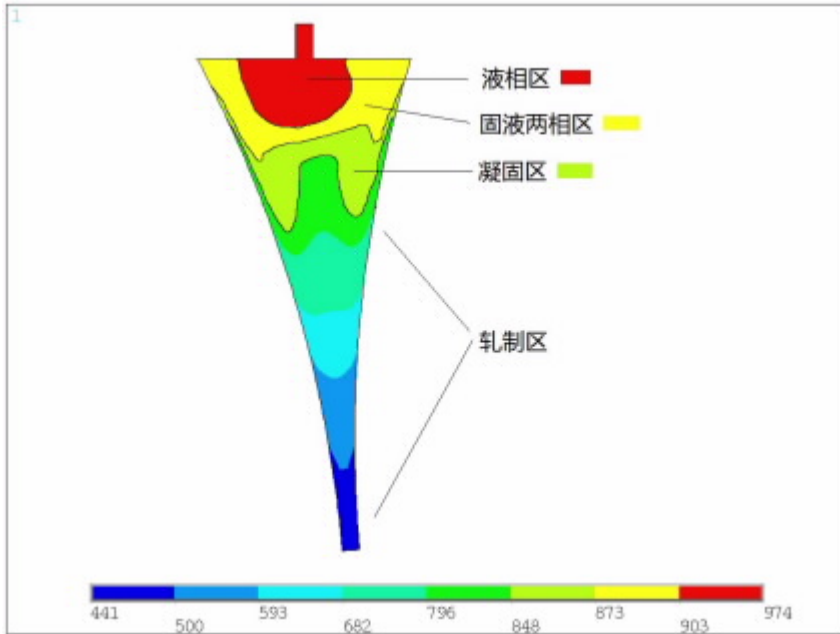
(2) 倾斜角度为0° 液面高度70mm时：3组工况

(3) 水口位置对流场和温度场的影响：3组工况

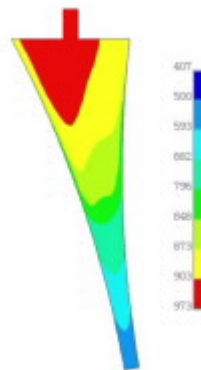
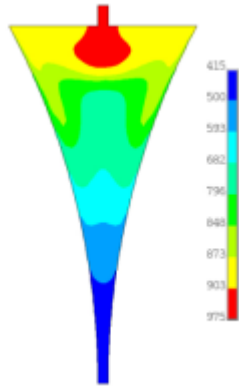
(4) 冷却水供给方式对流场和温度场的影响：1组工况



# 4.5 工艺参数对熔池内流场和温度场的影响

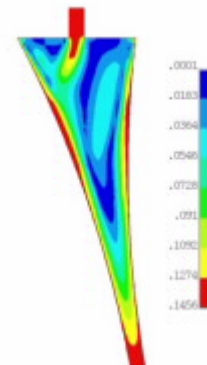
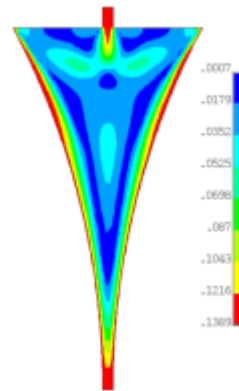


H<sub>pool</sub>=70mm 水平铸轧&倾斜铸轧



$V_c=8\text{m/min}, \alpha=0^\circ$

$V_c=8\text{m/min}, \alpha=10^\circ$



$V_c=8\text{m/min}, \alpha=0^\circ$

$V_c=8\text{m/min}, \alpha=10^\circ$

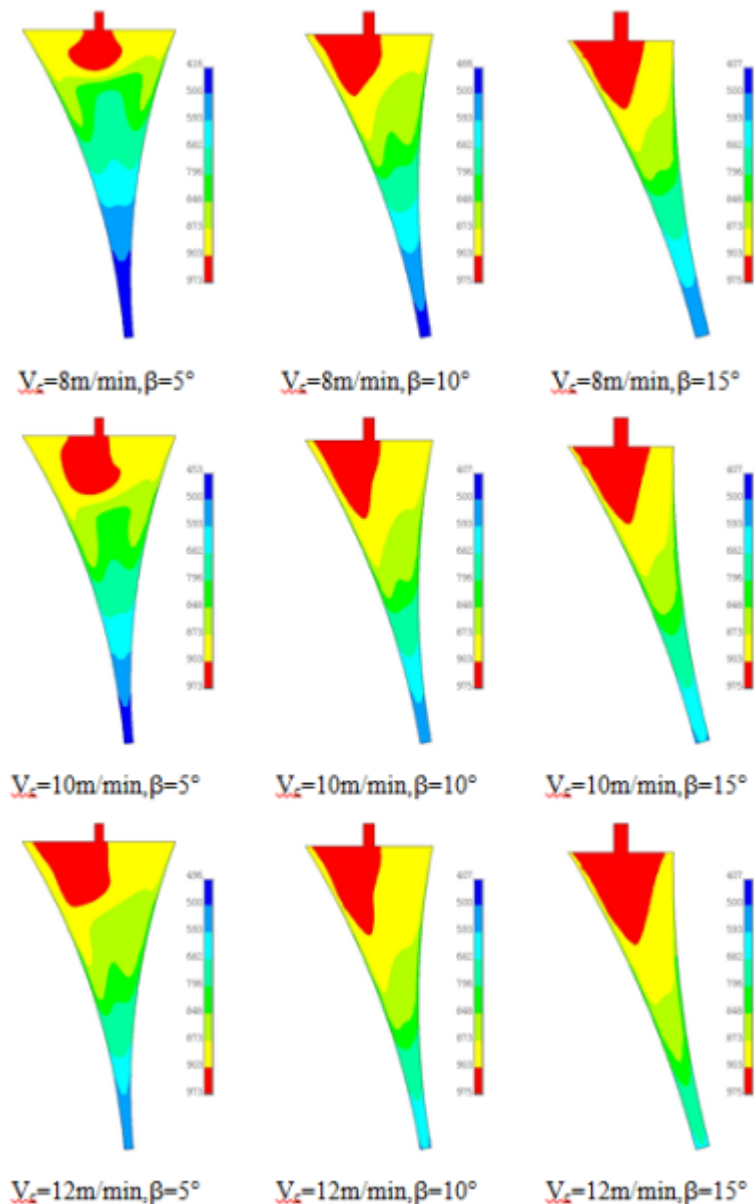
# 模拟结果分析

液面高度80mm时:

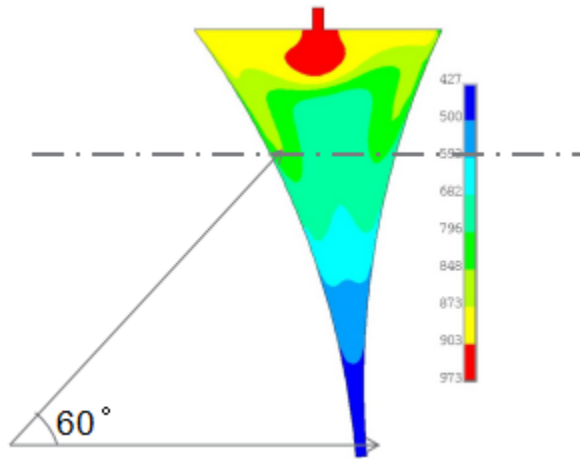
- (1) 倾斜角度增加, 左右两侧的不对称性增强。
- (2) 铸轧速度改变改变了熔池内部凝固情况。

针对等径双辊倾斜铸轧, 通过模拟解决两个问题:

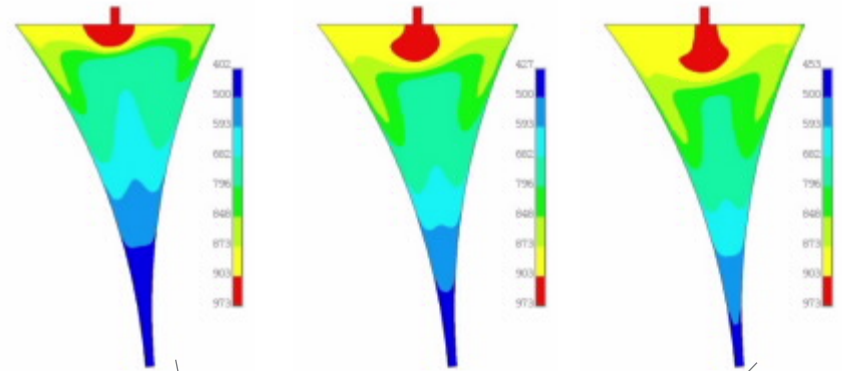
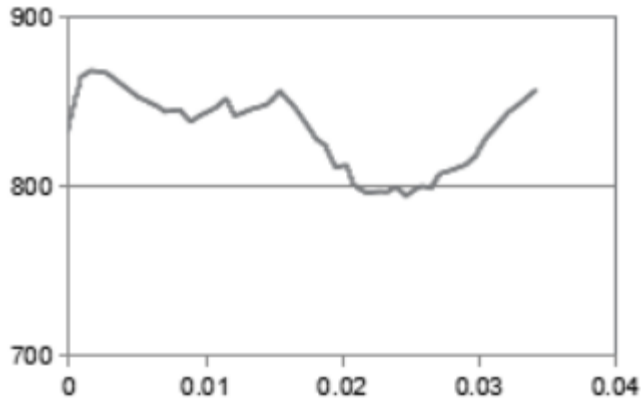
- (1) 熔池左右的不对称性
- (2) 固相区的位置随着三种参数的变化规律



# 模拟结果分析参照



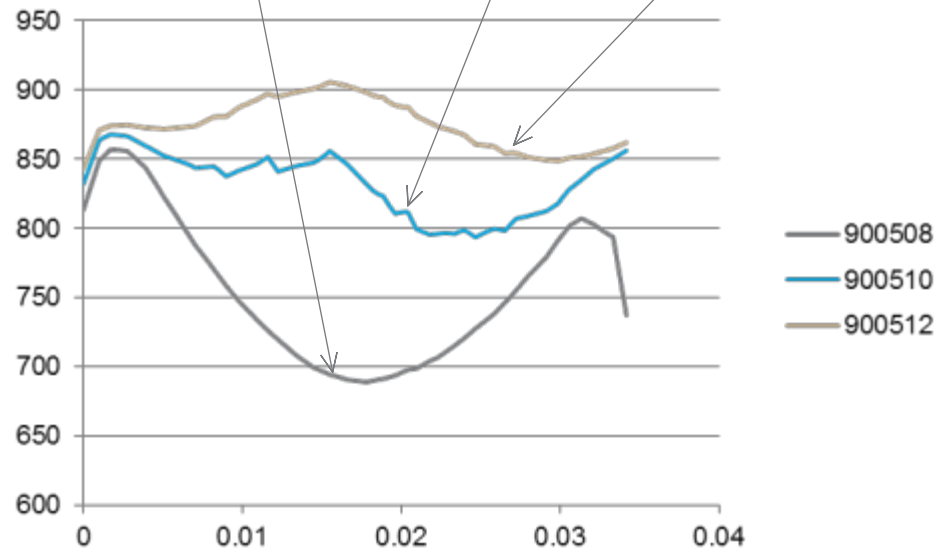
900510



900508

900510

900512

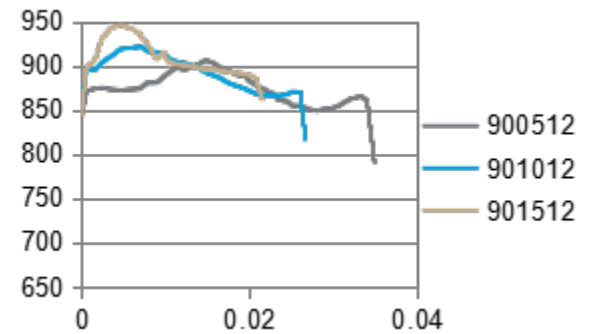
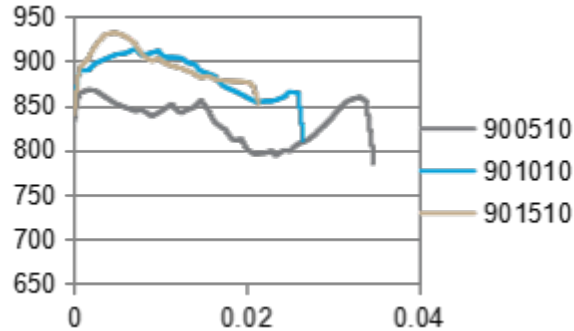
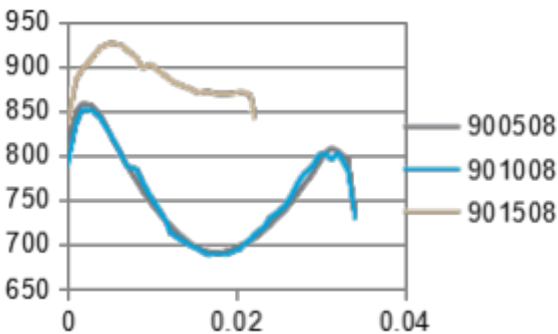
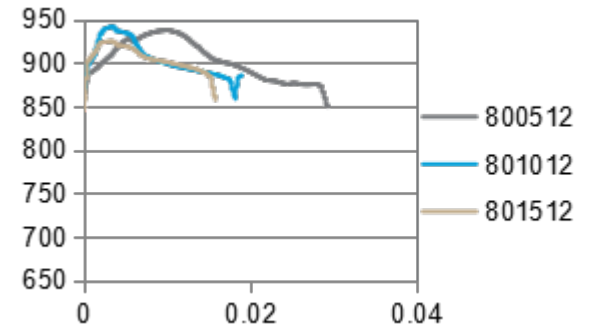
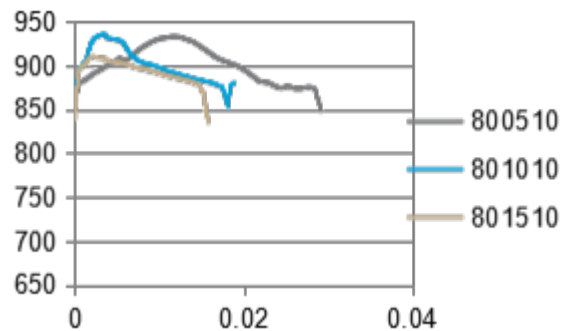
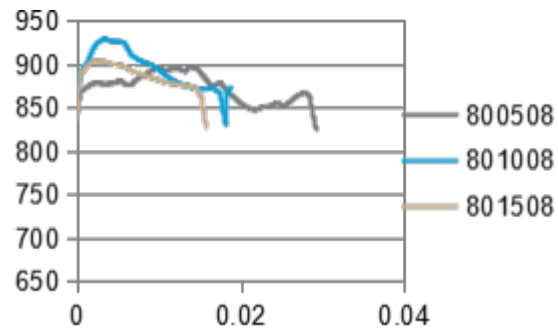
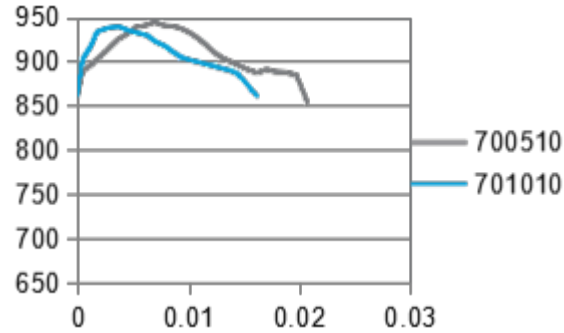
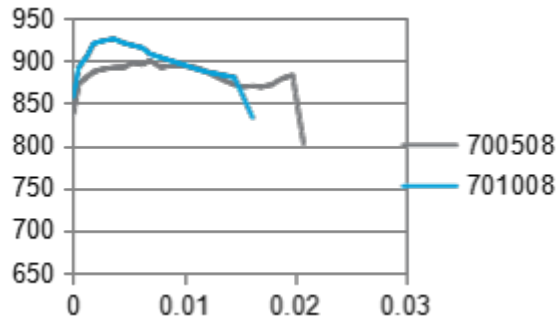


温度越低说明凝固越早



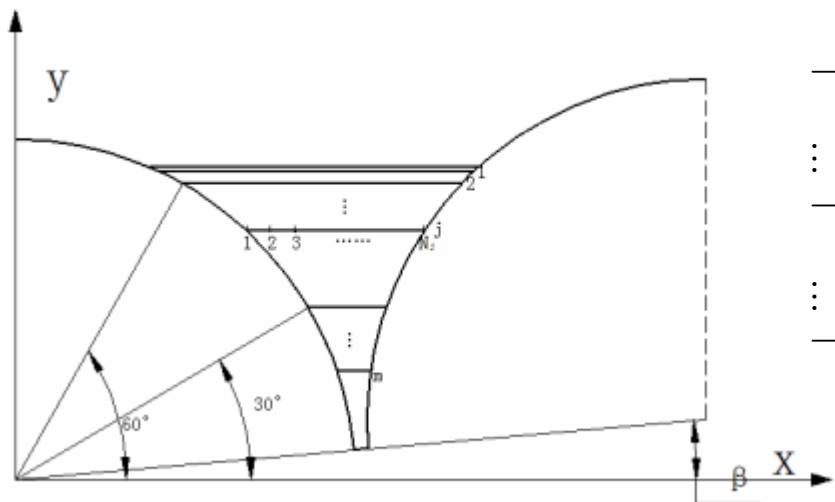
# 倾斜角度的影响结果

倾斜角度增加，  
不对称性增强



# 4.5 熔池内流场和温度场不对称性分析

可以将线段从中点分成两段，对应对称的点进行比较，然后求平均误差



不对称分析示意图

$$\begin{aligned} \overline{T}^{(1)} &= \frac{1}{N_{1 \ i \ 1}} \sum_{i=1}^{N_1} T_i^{(1)} = \frac{1}{N_{1 \ i \ 1}} \left| T_i^{(1)} - T_{0i}^{(1)} \right| = \frac{1}{2N_{1 \ i \ 1}} \left| T_{N_{1 \ i \ 1} - i}^{(1)} - T_i^{(1)} \right| \\ &\vdots \\ \overline{T}^{(j)} &= \frac{1}{N_{j \ i \ 1}} \sum_{i=1}^{N_j} T_i^{(j)} = \frac{1}{N_{j \ i \ 1}} \left| T_i^{(j)} - T_{0i}^{(j)} \right| = \frac{1}{2N_{j \ i \ 1}} \left| T_{N_{j \ i \ 1} - i}^{(j)} - T_i^{(j)} \right| \\ &\vdots \\ \overline{T}^{(m)} &= \frac{1}{N_{m \ i \ 1}} \sum_{i=1}^{N_m} T_i^{(m)} = \frac{1}{N_{m \ i \ 1}} \left| T_i^{(m)} - T_{0i}^{(m)} \right| = \frac{1}{2N_{m \ i \ 1}} \left| T_{N_{m \ i \ 1} - i}^{(m)} - T_i^{(m)} \right| \end{aligned}$$

温度场的不对称性可以用m条线的平均误差来表示，即

$$\overline{T} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \overline{T}^{(k)}$$



## 4.5 熔池内流场和温度场不对称性分析

“0”表示绝对对称，数值增加，说明不对称性增强。

60°线 归一化		T			V			0.5T+0.5V		
		70mm	80mm	90mm	70mm	80mm	90mm	70mm	80mm	90mm
5°	8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.2	0.1	0.6	0.3	0.3
	10	0.5	0.4	0.8	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.5
	12	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	0.7	0.6
10°	8	0.6	1.0	0.5	0.4	0.7	0.2	0.5	0.8	0.4
	10	0.7	0.8	1.0	0.3	0.8	0.3	0.5	0.8	0.6
	12	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.3	0.9	0.9	0.6
15°	8		0.5	0.9		0.3	0.5		0.4	0.7
	10		0.5	0.7		0.6	0.5		0.5	0.6
	12		0.5	0.7		0.7	0.5		0.6	0.6

算出的参数结果与模拟出熔池的不对称性一致

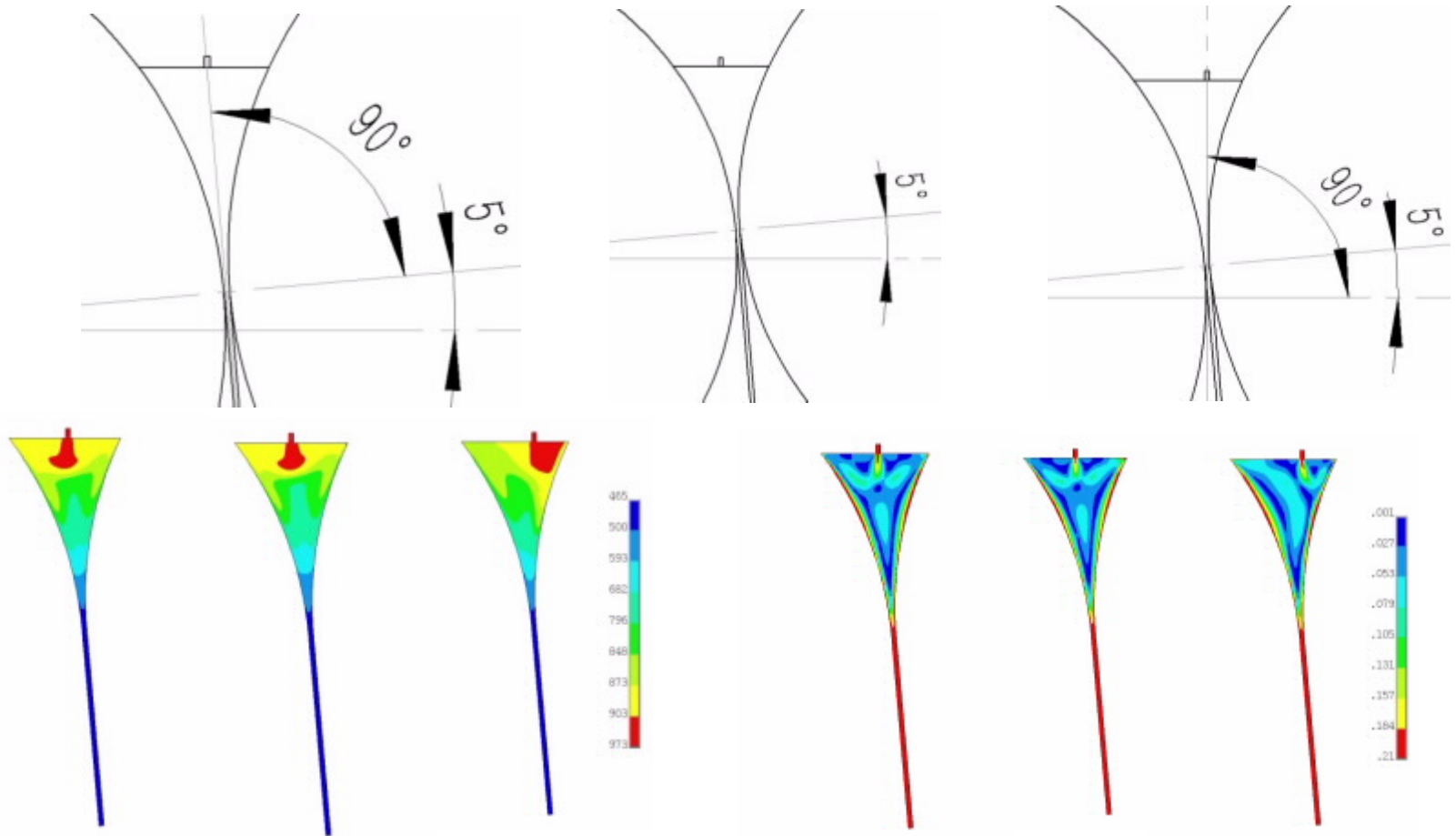
# 4.6 工艺参数调整对熔池内流场和温度场不对称性影响

薄板出口对应的轴线

熔池液面的中线

薄板出口对应的垂线

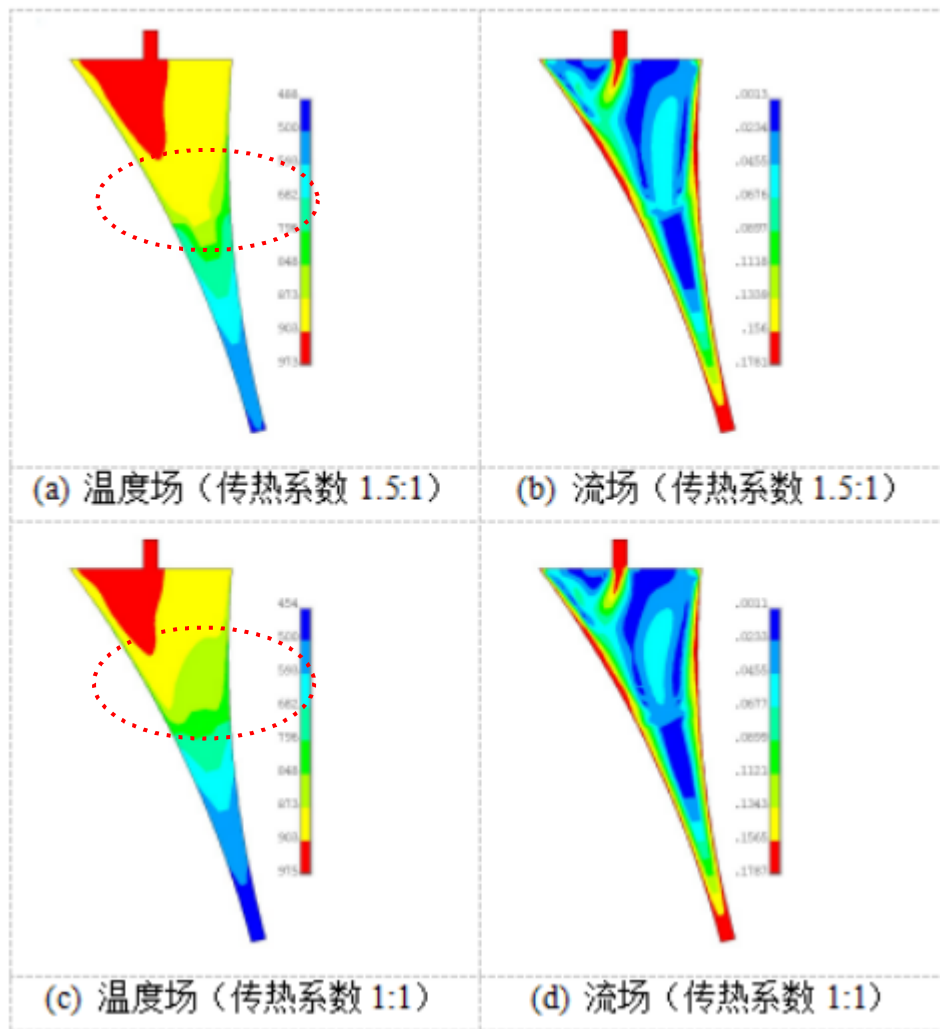
水口位置的影响结果



$H_{\text{pool}}=90$ ,  $\beta=5^\circ$ ,  $V_c=12\text{m/min}$

# 4.6 工艺参数调整对熔池内流场和温度场不对称性影响

冷却水的影响结果



当倾斜角度  $\theta = 15^\circ$  , 熔池液面  $H_{pool} = 90\text{mm}$  时不同冷却条件





## 5 双辊倾斜铸轧自适应模糊控制与实验

### 5.1 双辊倾斜铸轧熔池液位自适应模糊控制

### 5.2 双辊倾斜铸轧系统鲁棒自适应模糊控制

### 5.3 实验与分析



## 5.1 双辊倾斜铸轧熔池液位自适应模糊控制

双辊倾斜铸轧熔池液位的数学模型如下：

$$\frac{dH}{dt} = \frac{ah_s b \sin \sqrt{R^2 - (R - \frac{G}{2})^2 \sin^2} \frac{dG}{dt} + LG R L(H \cos \theta - (2R - G) \cos \theta) \sin \theta}{L((2R - G) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (H - (2R - G) \sin \theta)^2} \sqrt{R^2 - H^2})} \quad (5.1)$$

由式 (5.1) 可知，塞棒高度 $h_s$ ，辊速  $\omega$ ，辊缝 $G$ ，倾斜角度  $\theta$  等四个参数耦合在一起，均直接影响熔池液位的稳定。

针对模型 (5.1)，熔池液位高度变化的动态模型可描述如下。

$$\frac{dH}{dt} = K^{-1}(G, H, \theta) L^{-1}(ah_s b \sin \sqrt{R^2 - (R - \frac{G}{2})^2 \sin^2} \frac{dG}{dt} + LG R L(H \cos \theta - (2R - G) \cos \theta) \sin \theta) \quad (5.2)$$

式中： $K(G, H, \theta) = (2R - G) \cos \theta - \sqrt{R^2 - (H - (2R - G) \sin \theta)^2} \sqrt{R^2 - H^2}$



## 5.1 双辊倾斜铸轧熔池液位自适应模糊控制

通过引入坐标变换

$$x_1 = H, x_2 = \frac{dH}{dt}, u = h_s$$

应用牛顿第二定律，(5.2) 可以转化为下面的单入单出非仿射非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x, G, \dot{G}, \ddot{G}, u) \end{aligned} \quad (5.3)$$

式

中： $x = [x_1, x_2]^T$  代表状态变量

$f(x, G, \dot{G}, \ddot{G}, u)$  是未知的光滑的非仿射非线性函数

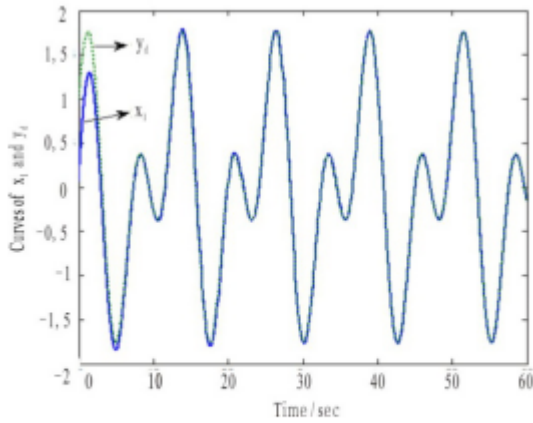


图 5.2 系统状态  $x_1$  (熔池液面高度) 和期望液面高度  $y_d$

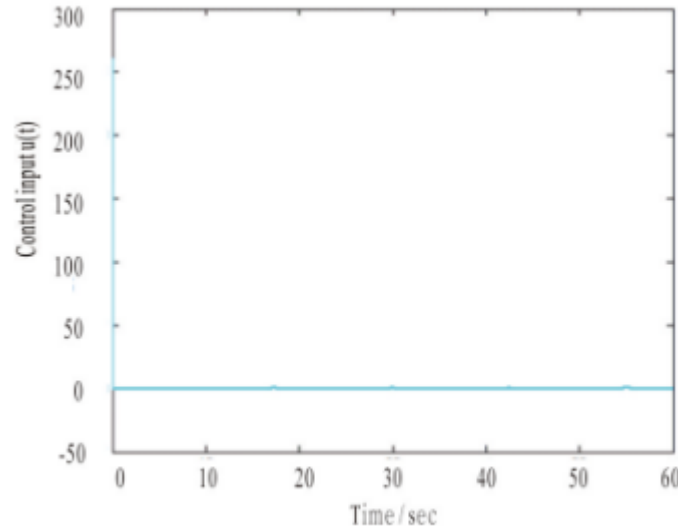


图 5.6 控制信号  $u$  (塞棒高度) 的响应曲线

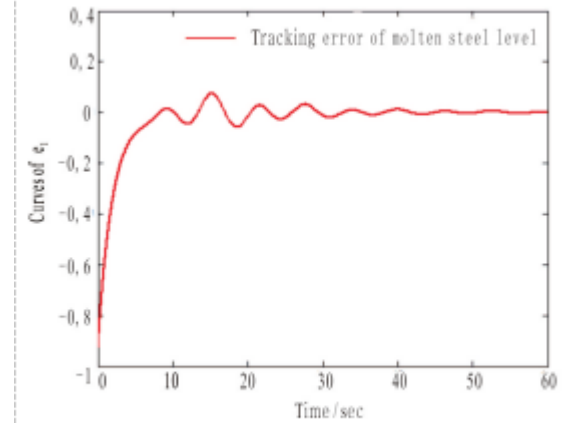


图 5.3 状态跟踪误差  $e_1$  轨迹

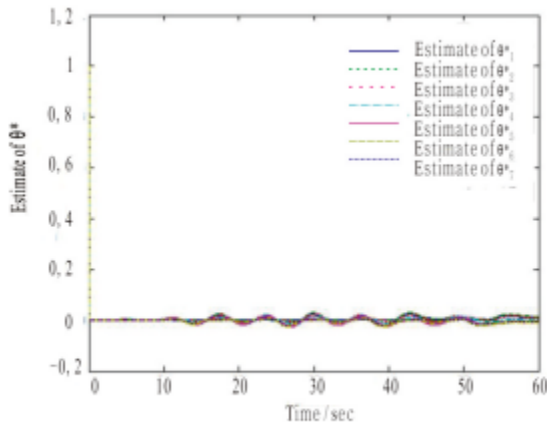


图 5.4  $\hat{\theta}$  响应曲线

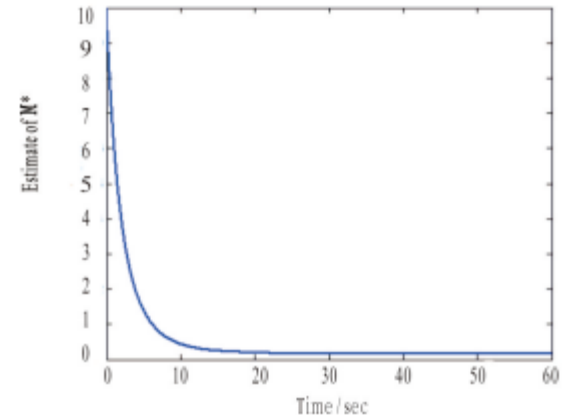


图 5.5  $\hat{M}$  响应曲线



## 5.2 双辊倾斜铸轧系统鲁棒自适应模糊控制

通过引入坐标变换,  $x_{11} = G$ ,  $x_{12} = \frac{dG}{dt}$ ,  $x_{21} = H$ ,  $x_{22} = \frac{dH}{dt}$ ,  $u_2 = h_2$ , 由 (6.2)

可得多输入多输出非仿射非线性系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= f_1(x, u_1) + d_1 \\ y_1 &= x_{11}, i = 1, 2,\end{aligned}\tag{6.3}$$

式中:  $x = [x_1, x_2]^T$ ,  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$  为状态变量,  $d_i$  为未知干扰,  $y_i$  和  $u_i$  分别表示第  $i$  个子系统的系统输出和控制输入,  $f_i(x, u_i)$  为未知光滑带有电动伺服电动机控制的  $u_i$  的非仿射非线性函数。

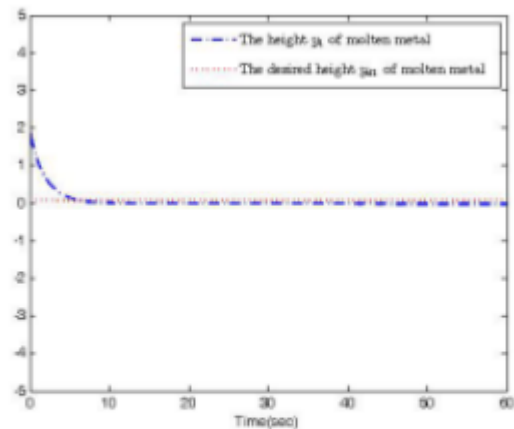


图 6.11 系统输出  $y_1$  (辊缝) 和期望的辊缝开度  $y_{d1}$

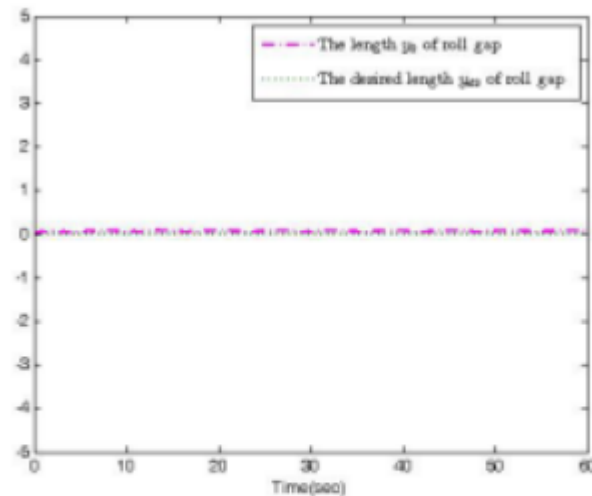


图 6.12 系统输出  $y_2$  (熔池液面) 和期望的液面高度  $y_{d2}$

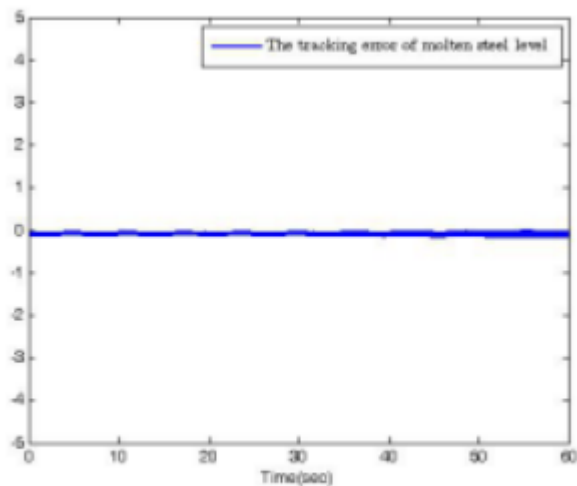


图 6.13 熔池液位的系统跟踪误差轨迹

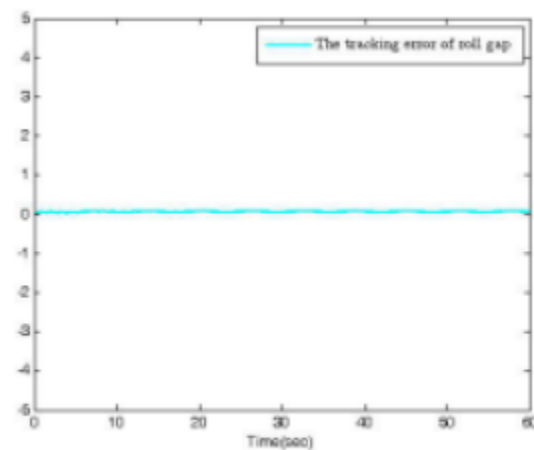


图 6.14 辊缝的系统跟踪误差轨迹

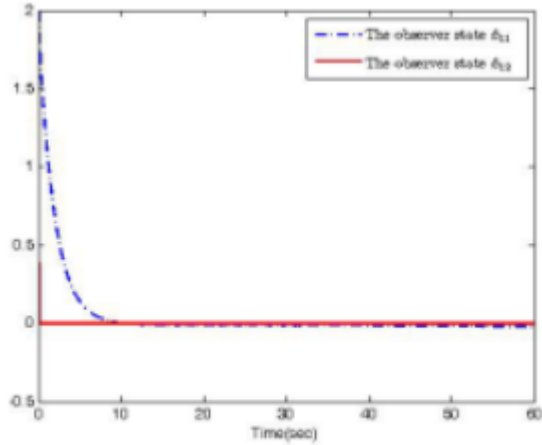


图 6.15  $\hat{x}_{11}$ 和 $\hat{x}_{12}$ 的观测状态

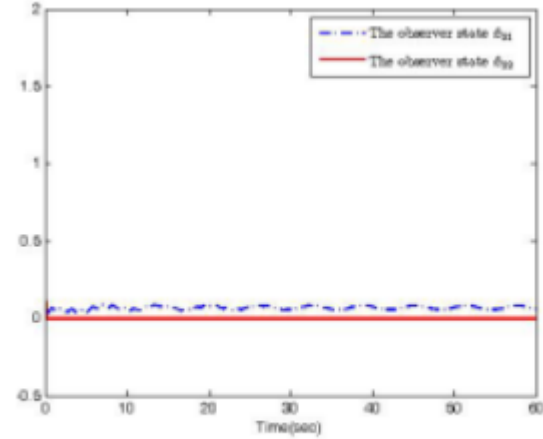


图 6.16  $\hat{x}_{21}$ 和 $\hat{x}_{22}$ 的观测状态

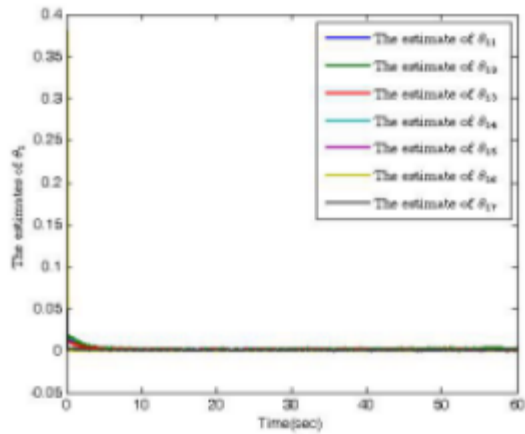


图 6.17  $\hat{\theta}_1$ 的响应曲线

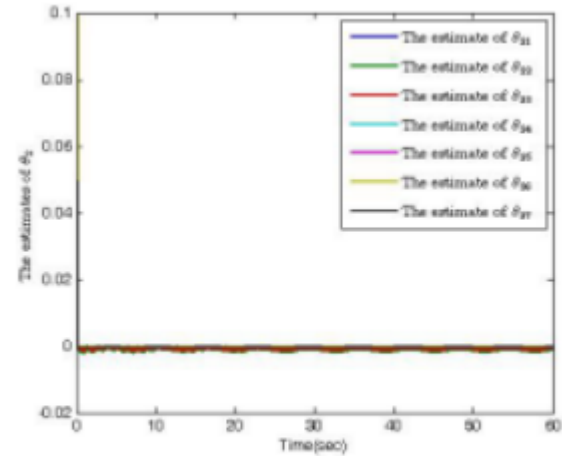


图 6.18  $\hat{\theta}_2$ 的响应曲线

## 5.3 实验与分析

在倾斜铸轧机上铸轧出7050铝合金薄板、AZ31镁合金薄板，并成功铸轧出容易断带的AE44镁合金薄板。

熔池液面高度为90mm，铸轧速度为8m/min，倾斜角度为10°条件下，通过改变浇注温度分别为943、933、923K，进行了三组倾斜铸轧实验。

表 6.1 实验用 AE44 镁合金化学成分（质量分数，w%）

元素	Al	RE(La Ce)	Zn	Mn	Fe	Mg
含量%	3.99	4.34	0.02	0.36	0.002	Bal.

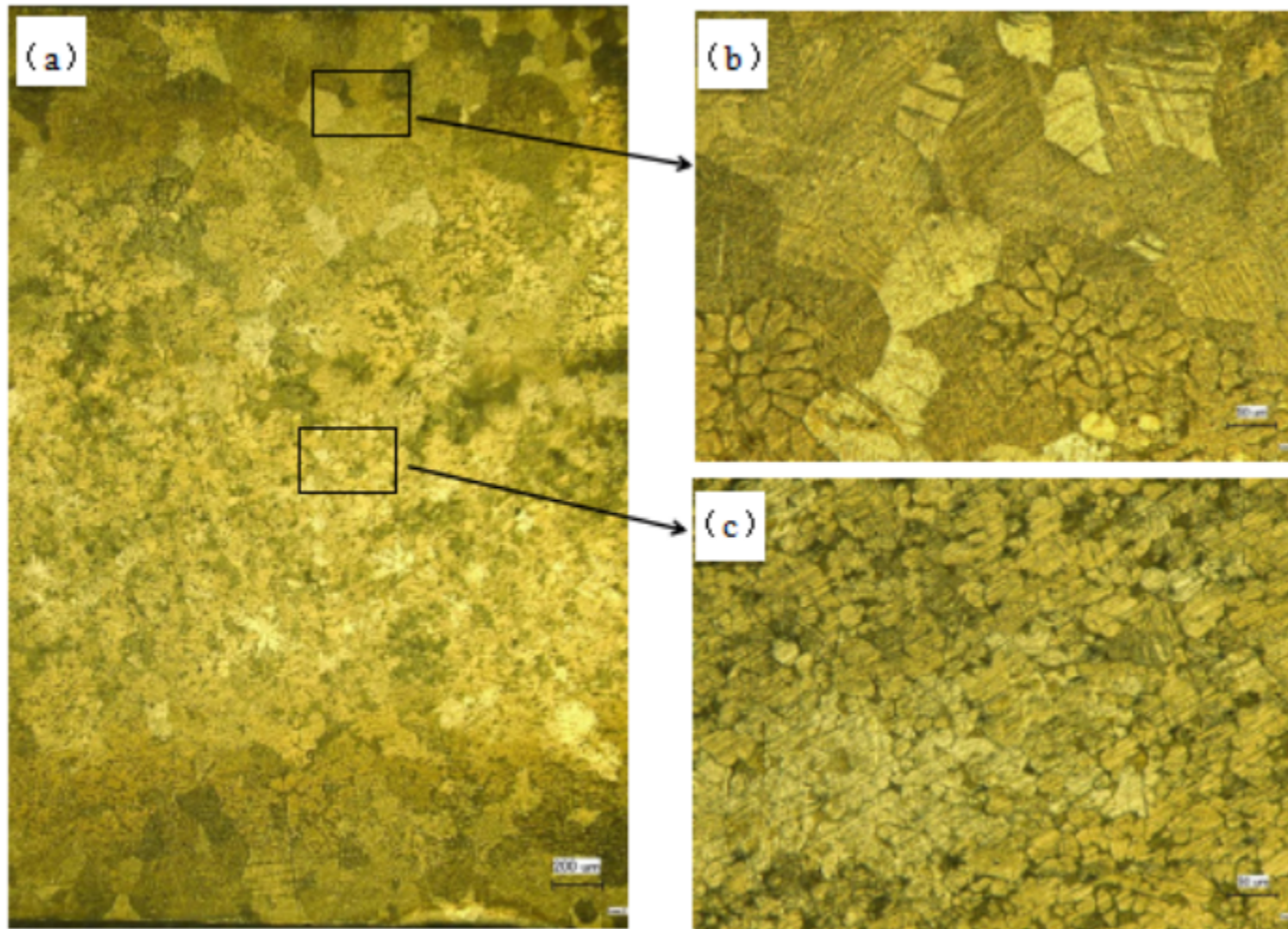


## 5.3 实验与分析



## 6.4 实验与分析

### 第一组实验

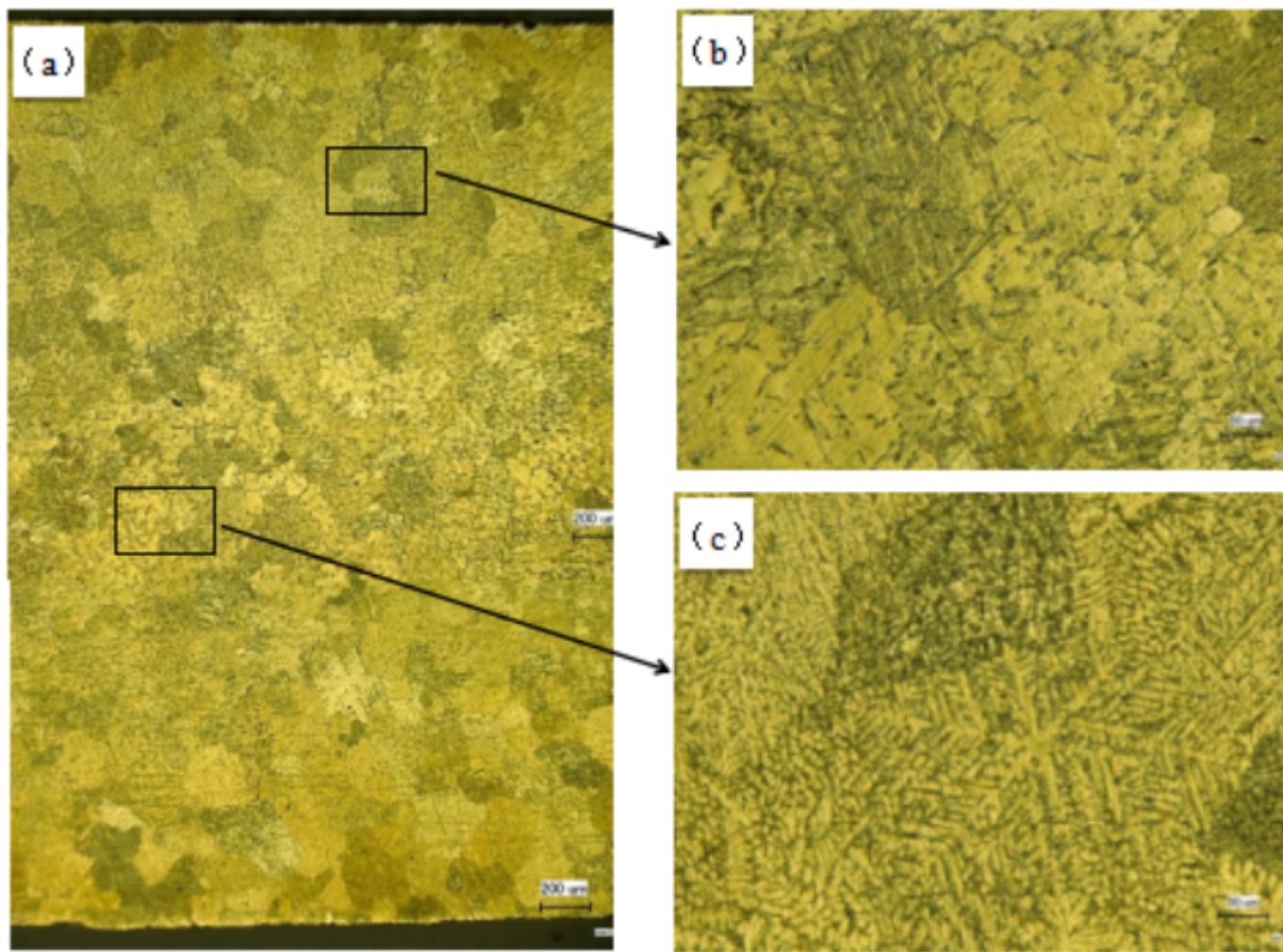


薄板表面：  
冷却程度高，形  
成典型的铸态枝  
晶。

薄板内部：  
芯部过冷强度  
低，形成粗大枝  
晶，在熔池内部  
液态镁合金流动  
性低，枝晶结构  
保持完整，继而  
枝晶长大粗化。

图 6.22 第一组  $T=943\text{k}$  薄板两端位置 RD 组织，(a) $\times 100$ ，(b)(c) $\times 500$

## 6.4 实验与分析



薄板表面：  
主要是凝固组织的  
等轴粗大晶粒。

薄板内部：  
枝晶形成高度分支  
的雪花状，为标准  
基面结构组织，内  
部流动性低，在枝  
晶的主干上的一次  
枝晶肩臂间距足够  
大。

图 6.23 第一组  $T=943\text{K}$  薄板中间位置 RD 组织，(a) $\times 100$ ，(b)(c) $\times 500$

## 6.4 实验与分析

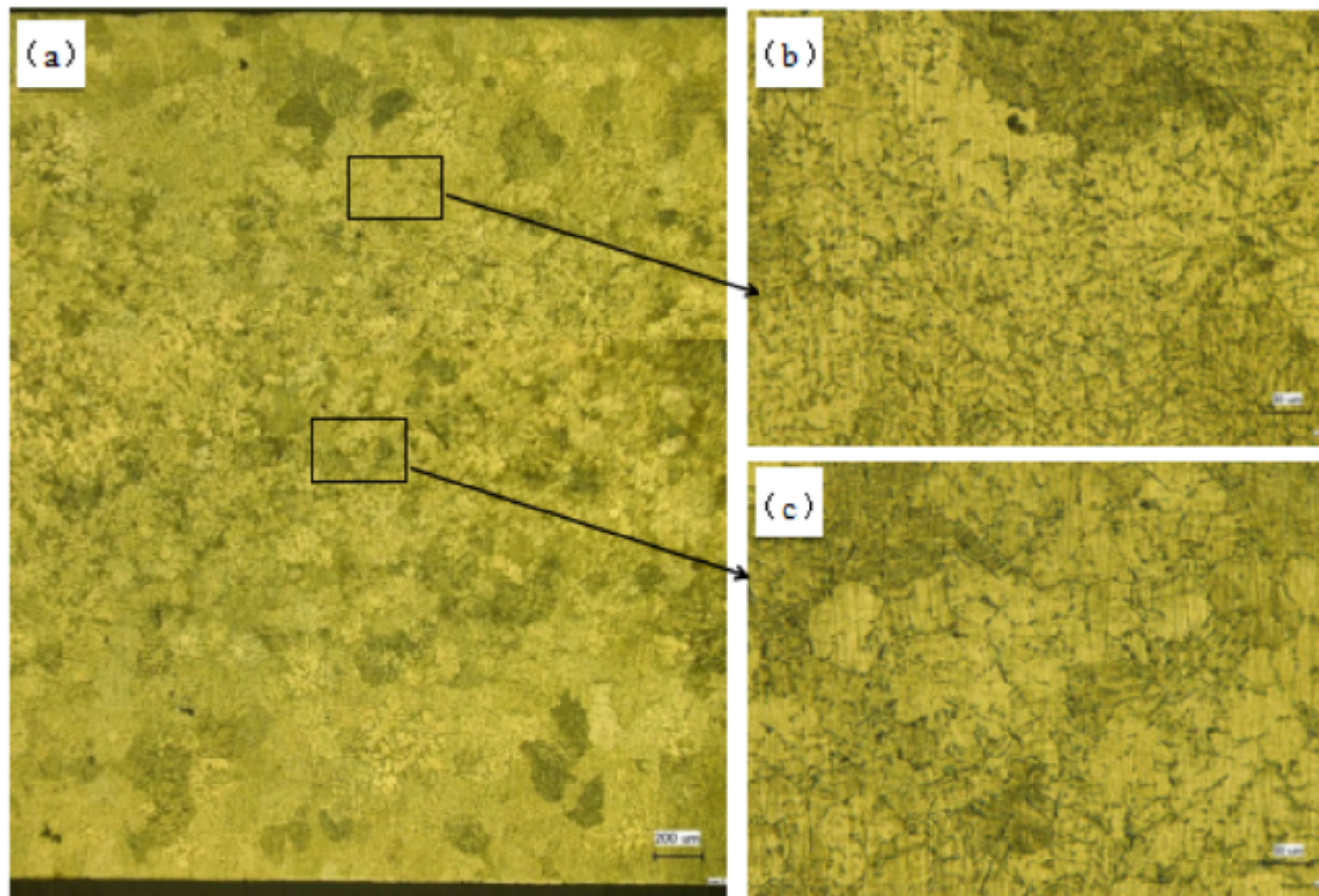


图 6.24 第一组 T=943k 薄板 TD 组织, (a)×100, (b)(c)×500

断面组织以混合组织为主，晶粒形态分布均匀。

在铸轧辊的作用下晶粒破碎重新长大为粗大片状晶粒。

# 6.4 实验与分析

## 第二组实验

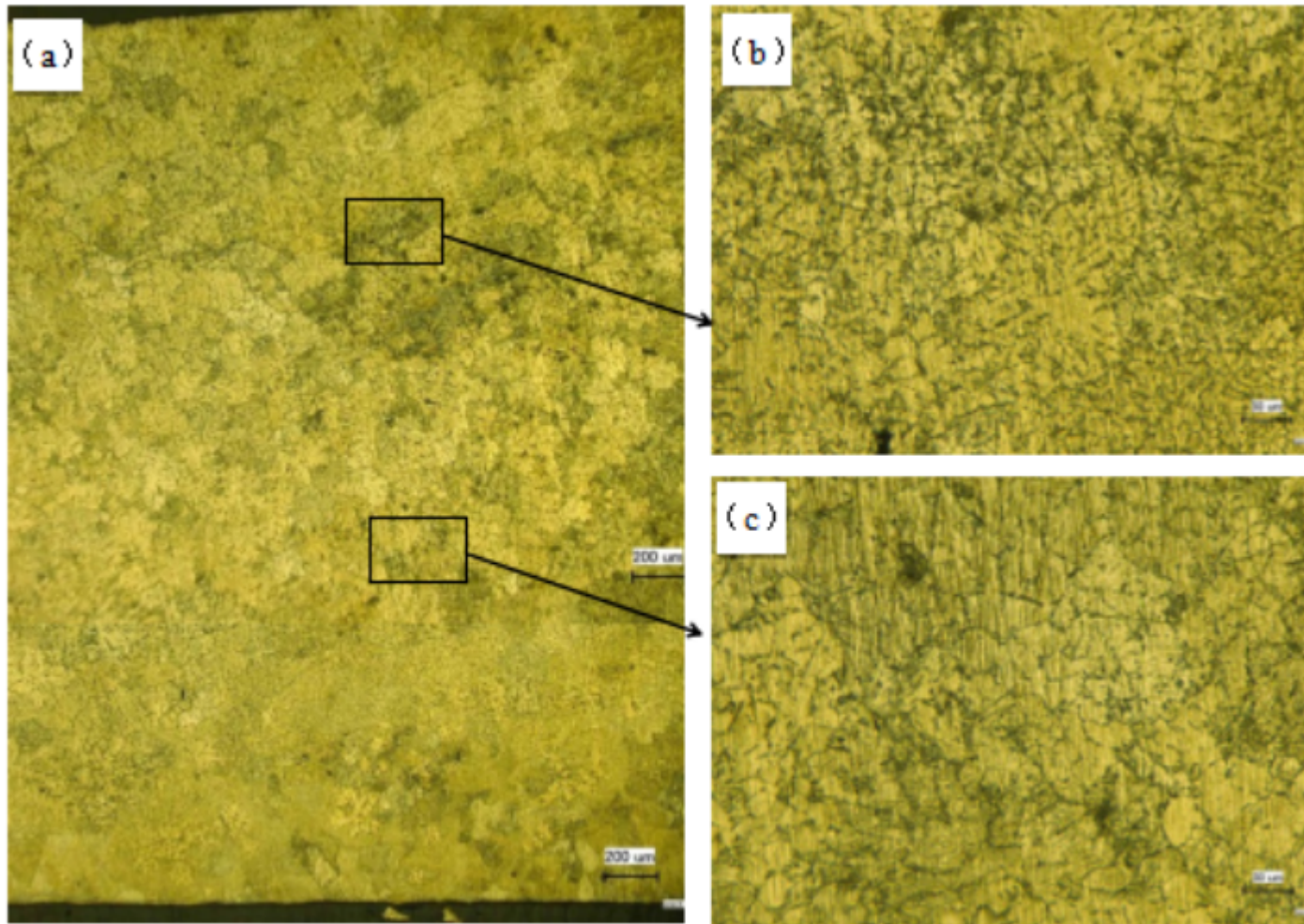


图 6.25 第二组  $T=933\text{k}$  薄板两端位置 RD 组织, (a) $\times 100$ , (b)(c) $\times 500$

## 6.4 实验与分析

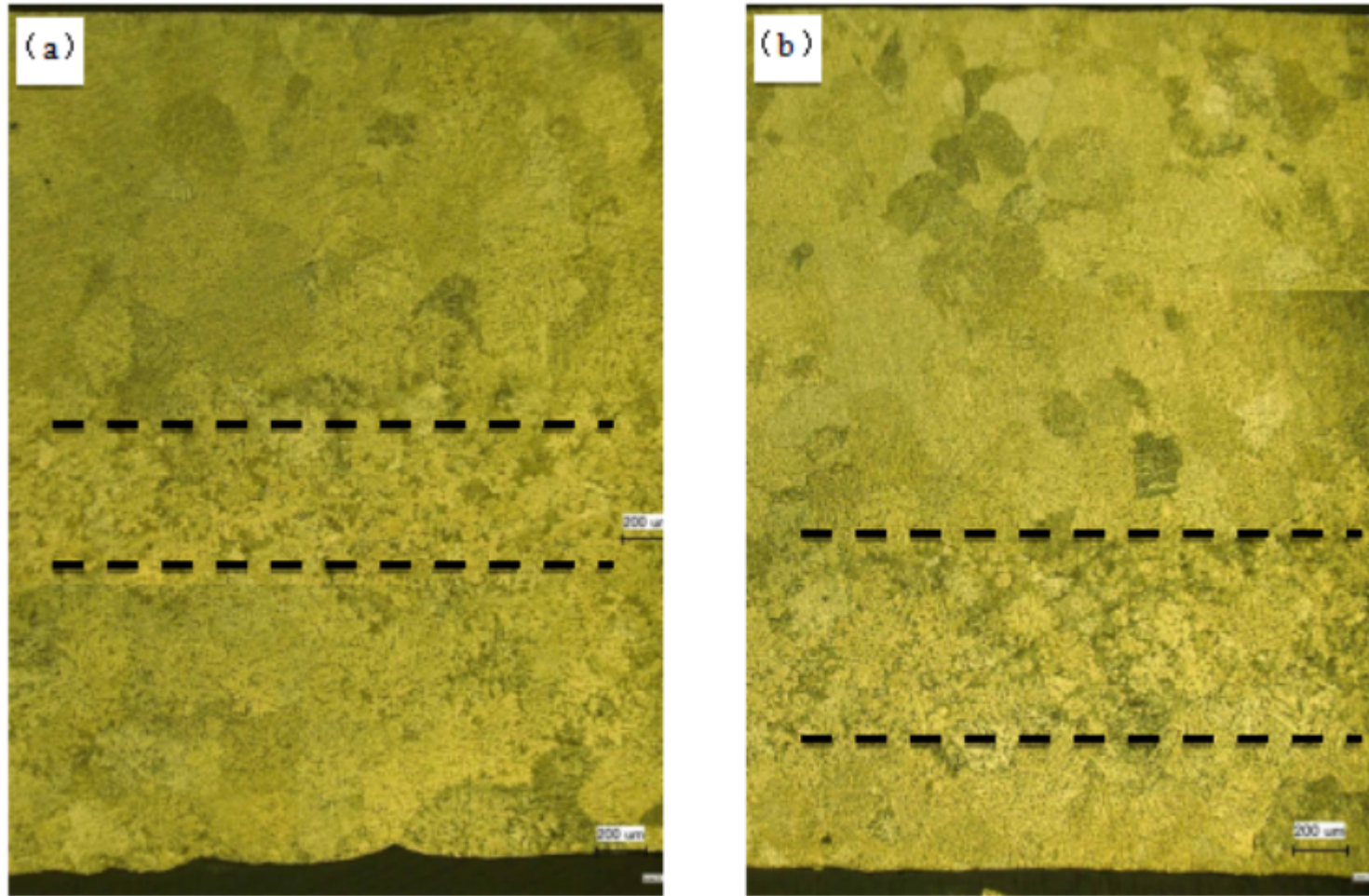
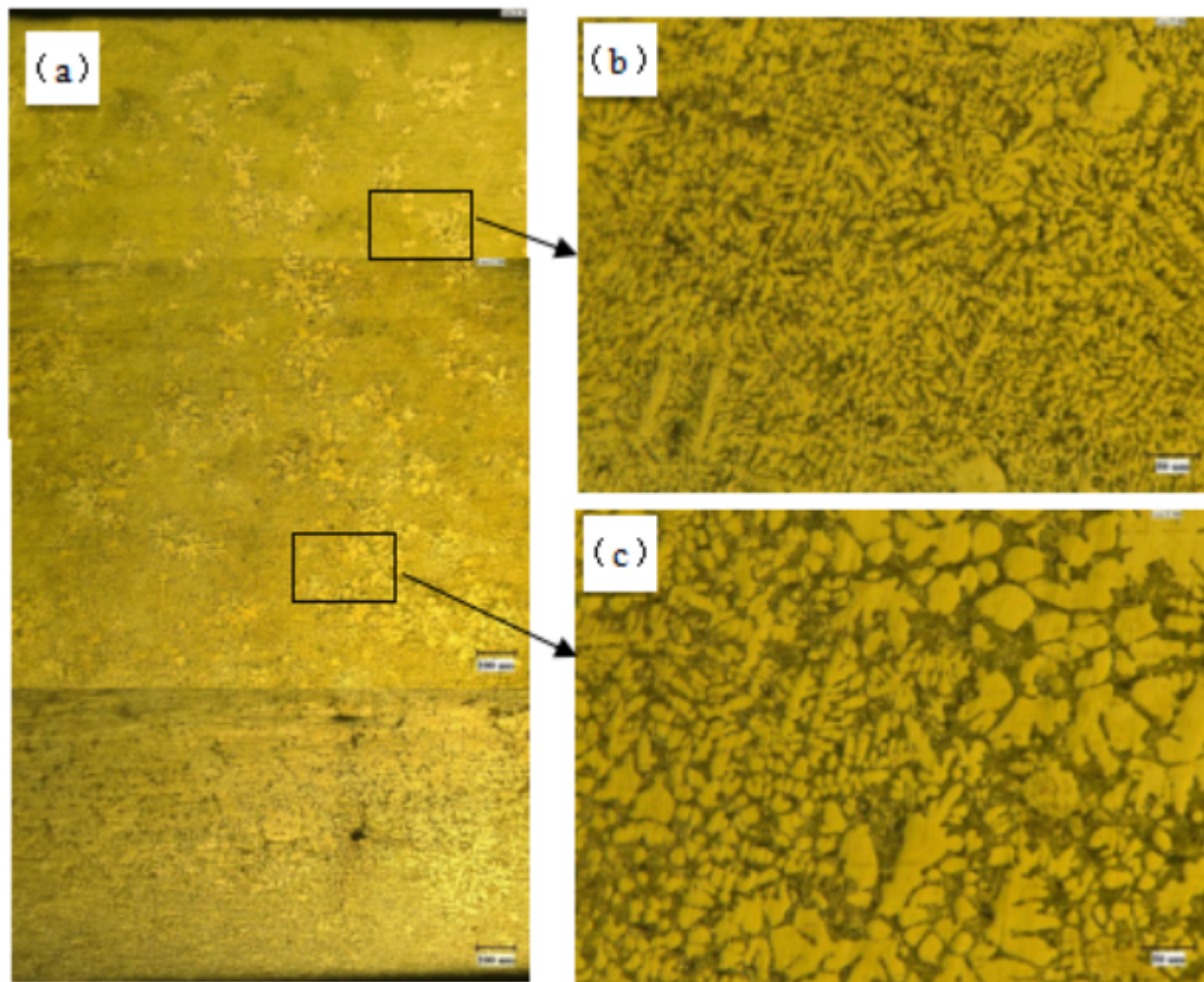


图 6.26 第二组  $T=933\text{k}$  薄板中间位置 (a) 和 TD (b) 组织

# 6.4 实验与分析

## 第三组实验



合金组织是由  $\alpha$ -Mg 基体和树枝状的稀土化合物组成，铸轧方向上的组织间没有发生分层现象，整体以粗大枝晶均匀分布在细小枝晶间的形式存在

图 6.27 第三组 T=923k 薄板两端位置 RD 组织，(a)×100，(b)(c)×500

## 6.4 实验与分析

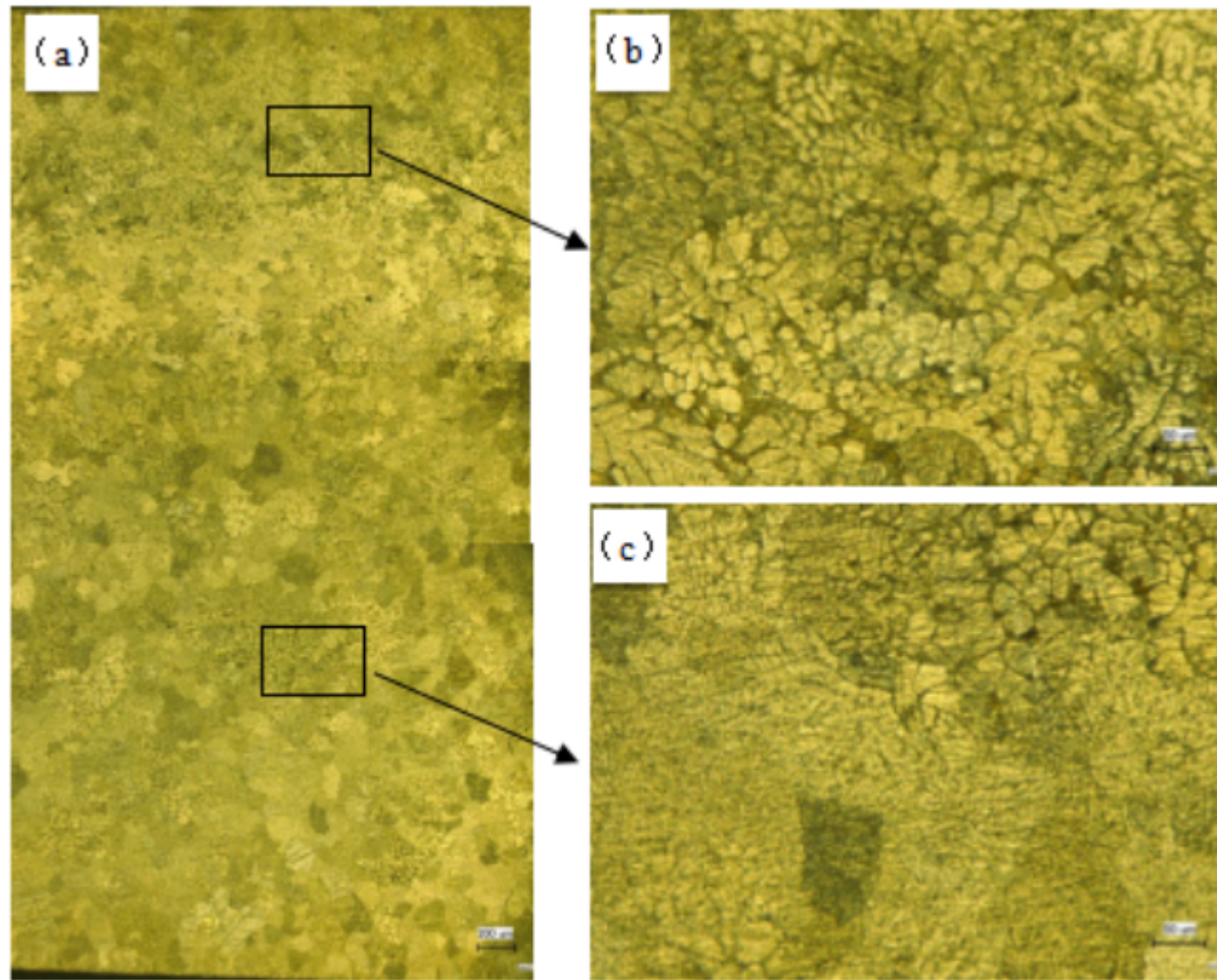


图 6.28 第三组  $T=923\text{k}$  薄板中间位置 RD 组织, (a) $\times 100$ , (b)(c) $\times 500$



## 6.4 实验与分析

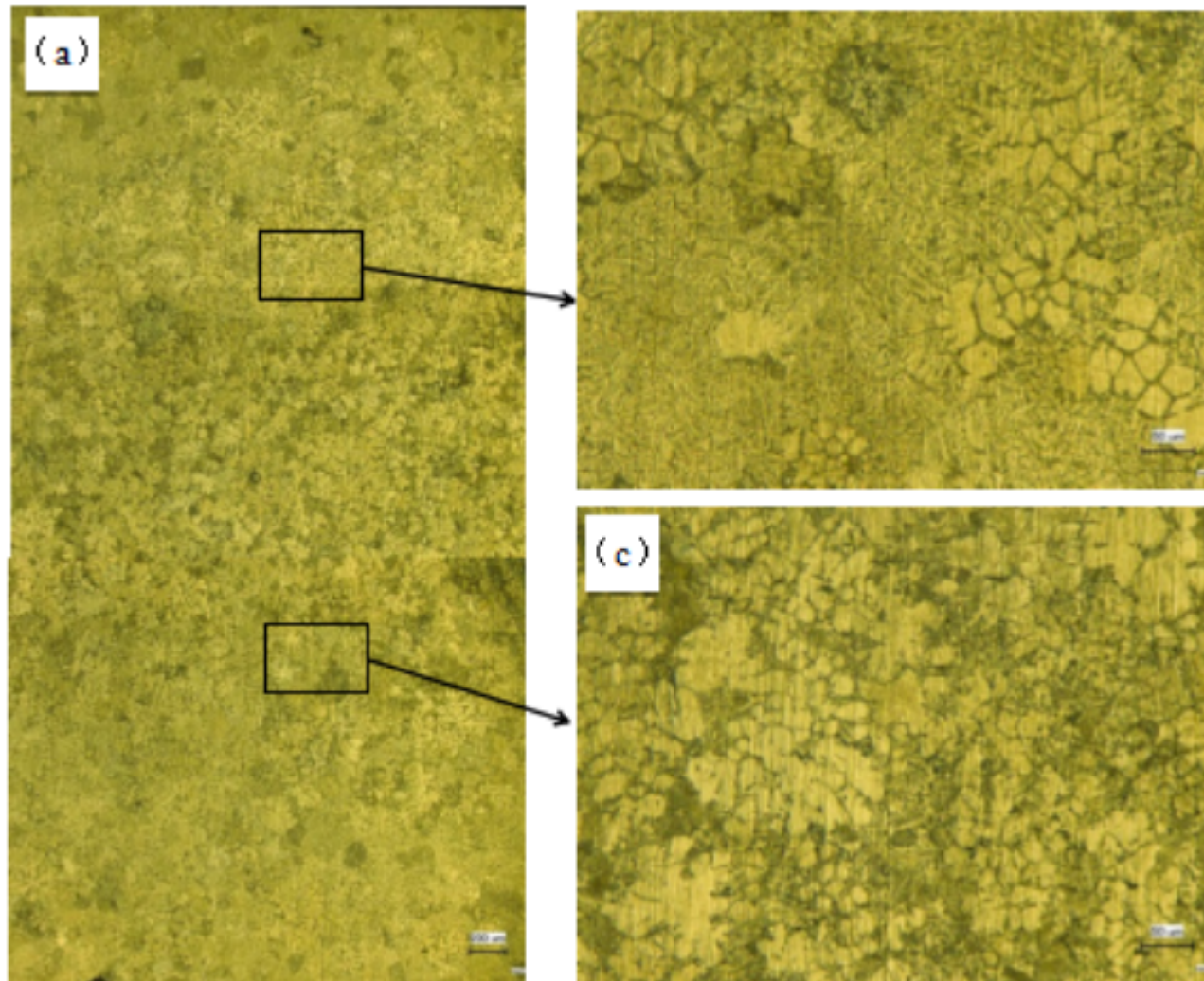


图 6.29 第三组  $T=923\text{k}$  薄板两端位置 TD 组织, (a) $\times 100$ , (b)(c) $\times 500$



# 研究计划

- 1 双辊倾斜铸轧过程建模
- 2 双辊倾斜铸轧过程数值模拟研究
- 3 双辊倾斜铸轧系统自适应模糊控制研究



谢谢各位老师  
敬请指正