

23-29

# 高速板坯连铸结晶器 内流场、温度场的数值模拟

TF 777.1

Numerical Simulation on Fluid Flow and  
Heat Transfer in Mold for High Speed Slab Continuous Caster

文 光 华                      李 刚                      张 建 春  
Wen Guanghua                Li Gang                      Zhang Jianchun

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 400044; 第一作者 34 岁, 男, 博士, 副教授)

**摘 要** 本文利用商业软件 PHOENICS, 建立了一个三维有限差分模型, 用来描述在高速板坯连铸结晶器内的钢液流动和热量传输过程。通过计算机模拟, 分析了拉速、水口出口角度、插入深度、水口出口面积比等参数对结晶器内的流场和温度场的影响。在此基础上提出了适应高速浇铸的合理伸入式水口结构尺寸。

**关键词** 高拉速; 板坯连铸; 结晶器; 流场; 温度场; 数值模拟  
中国图书资料分类法分类号 TF 777.7

连续铸钢

**ABSTRACT** A three-dimensional finite-difference model has been formulated, using the commercial code PHOENICS, to describe the fluid flow and heat transfer in the mold of a continuous slab caster. Through simulation and computation with the established simulation model, influences of such as casting speed, tilt angle of the nozzle port, immersion depth of the nozzle tube, size of nozzle port on flow field and temperature field in the mold were analyzed. On the basis above, a reasonable structure and size of nozzle was put forward for high speed continuous caster.

**KEYWORDS** high speed; slab CC; mold; flow field; temperature field; numerical simulation

## 0 引 言

连续铸钢作为近 40 年来发展起来的新技术, 对钢铁生产的发展和优化起到了关键的推动作用。在连铸技术不断完善的过程中, 高效连铸技术必然成为优化当代连铸生产的重要发展方向。高效连铸的核心是高速连铸技术。但高拉速又给连铸工艺带来新的问题: 一方面使钢液在结晶器内的流动加剧, 钢中夹杂物上浮困难, 同时还易造成卷渣和钢液面裸露, 产生新的夹杂物, 从而降低钢水的洁净度, 使铸坯中的夹杂物增加; 另一方面随着拉速的提高, 结晶器内原有的热平衡被打破, 结晶器内温度升高, 热流对凝固坯壳的冲刷加剧, 出结晶器的

坯壳减薄,易造成铸坯鼓肚和漏钢。因此,要实现高速连铸,就必须改变原有的钢液流动方式和温度分布,使之适合于高速连铸工艺的需要。目前,解决此问题的主要措施是结晶器伸入式水口结构的优化和电磁制动技术的采用。

用计算机对物理过程进行数值模拟是近年发展起来的新兴研究手段,在连铸过程模拟中得到了广泛的应用。利用计算机快速、准确地对连铸结晶器内钢液流动和传热进行解析,定量地分析水口结构尺寸和工艺参数对连铸过程的影响,从而成为优化结晶器伸入式水口的重要手段。本文针对南京钢铁厂高速板坯连铸机的特点,利用英国 CHAM 公司的商业软件 PHOENICS 对结晶器内流场和温度场进行了数值计算,重点研究了伸入式水口结构尺寸和拉坯速度对结晶器内流动和传热的影响,在此基础上优选出适合南钢高拉速浇铸的合理伸入式水口结构。

## 1 板坯连铸结晶器内流体流动和传热数学模型

### 1.1 基本假设

为了便于研究连铸结晶器内的流动和传热现象,作以下假设,即:1)结晶器为矩形,忽略结晶器内凝固壳对流动的影响;2)不考虑结晶器表面渣对流动的影响;3)钢液流动为不可压缩稳态流动;4)忽略密度变化而引起的自然对流。

### 1.2 基本方程

连铸时,结晶器内同时进行着两个过程:在水冷结晶器壁上凝成坯壳和注入钢液在铸坯未凝固部分引起的钢液运动,即结晶器内钢液流体的运动与传热,描述该过程的三维稳态不可压缩问题的数学表达式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] \quad (2)$$

其中  $\mu_{eff}$  为有效粘度系数,有 Launder 和 Spalding 提出的  $k - \epsilon$  双方程确定<sup>[1]</sup>。

能量方程:

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

### 1.3 初始条件及边界条件

#### 1) 水口入口处

在伸入式水口出口截面,出口速度根据计算给出;浇铸温度为  $T_0$ ,出口处壁为绝热边界条件。

#### 2) 计算模型出口处和对称面上

在下游流出截面上,各物理量如  $T, U, V, W, K, P, \epsilon$  的法向微商都等于零。法向速度、切向

速度的法向微商及  $K, \epsilon, T$  的微商都等于零。

### 3) 结晶器钢液面

液面除温度外可用与对称面相同的方法来处理, 温度可用下式来描述:

表面散热流

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad \text{w/m}^2 \quad (4)$$

其中:  $T_s$  表面温度,  $T_\infty$  环境温度,  $h$  为综合传热系数。

### 4) 结晶器壁

假定在结晶器水口壁面包括浸入式水口壁面, 垂直于壁面的速度分量设为零; 平行于壁面的速度、压力及  $k, \epsilon$  采用滑移边界, 与壁面相邻的节点上, 平行于壁面的速度分量、 $k, \epsilon$  由壁面函数确定。壁面温度边界条件根据文献<sup>[2]</sup>确定。

## 1.4 数学模型的建立及其计算

应用前述的微分方程及其边界条件, 建立了比较精确的流动及传热数学模型, 用 PHOENICS 系统的输入语言 (PIL) 编制了结晶器内流体流动及传热数学模型的计算程序\*, 考虑结晶器形状的对称性, 取结晶器的 1/4 作为计算区域, 如图 1 所示。在奔腾 586-133 微机进行了模拟计算。每一方案外部循环需 400 次、速度内迭代需 40 次、温度内迭代需 10 次达到收敛精度。收敛判断标准是各变量的源项  $S_n < 10^{-6}$ 。速度场和温度场进行耦合求解。

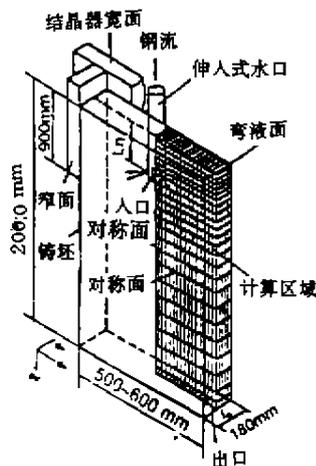
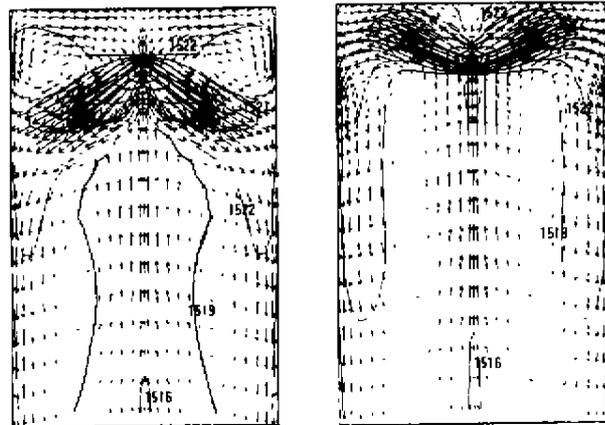


图1 板坯结晶器示意图



(a) 向下 30° 扩张型水口 (b) 向上 15°

图2 结晶器内流场、温度场的基本特征

## 2 计算结果及分析

### 2.1 结晶器内流场、温度场的基本特征

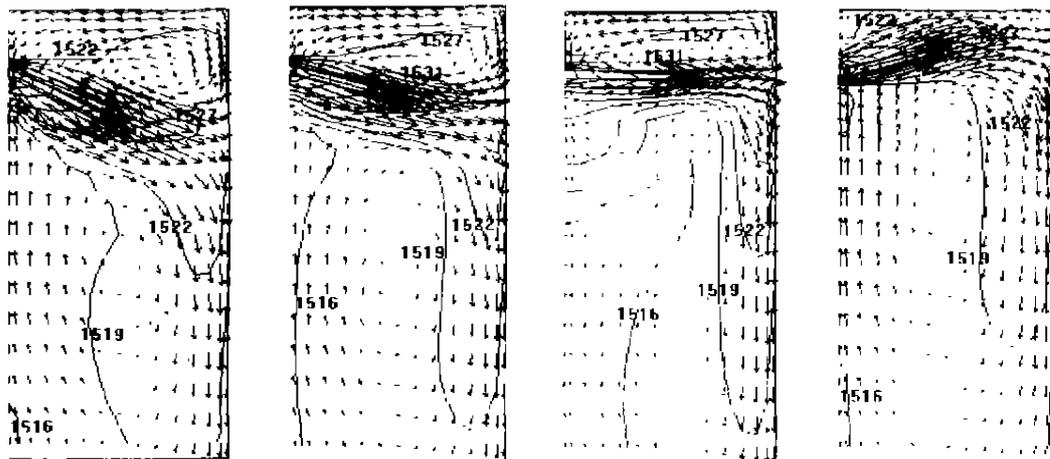
图2分别表示水口出口角度向下 18~30°(水口出口上部向下 18°, 出口下部向下 30°, 简

\* CHAM Manual of PHOENICS, 1993

称向下  $30^\circ$  扩张型水口)和向上  $15^\circ$  时铸坯宽面对称面上的计算流场和温度场。由图可看出,当水口出口角度向上时,结晶器上部循环流基本消失,从水口流出的钢水首先占据结晶器的上部,然后碰击结晶器的窄面而改变流动方向,在水口下面形成两个大回流,高温区集中于结晶器的上部,这有利于保护渣的熔化,但容易出现钢水裸露、保护渣不均匀铺展的现象。当水口出口角度向下时,出口射流直至接触结晶器窄面才改变方向,分成向上向下的两个股流。向上的流体在自由表面附近形成两个对称回流区,这两个回流对夹杂物的上浮和自由表面的扰动产生直接影响,其强弱很明显取决于水口出口角度、插入深度和拉速的大小,向下的流体也形成了与上部循环方向相反、范围较大的两个对称回流区,其强度随着向下距离的延伸而减弱。温度场与倾角向上时对比,高温区下移,热量分散,温度均匀。

## 2.2 水口出口角度对结晶器流场、温度场的影响

图3表示的是水口出口角度分别为向下  $30^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $0^\circ$ , 向上  $15^\circ$  时,结晶器宽面对称面上的计算流场、温度场。由图可看出,水口出口角度对结晶器内的流动和传热影响很大,当出口角度从向下到水平变化时,钢流沿结晶器窄边向下部流动的趋势加强,水口下方的上流变弱,下部回流区变大,位置下移,钢流对结晶器窄面的冲击点上移,随之高温区上移,且热量集中、分布不均,使结晶器出口处的坯壳厚度不均,易引起鼓肚和漏钢,上部回流区变小,钢流对熔池表面冲击的强度增强,加剧表面的扰动和不稳定,易造成卷渣和钢液面裸露。当水口出口角度从水平到向上变化时,上部回流区逐渐变小,直至消失,下部回流中心上移,随之整个高温区上移。另外,出口角度为水平时,射流到结晶器窄面的位移最短,冲击速度最大,此时冲击点附近因赋给凝固壳的热量最大而变得最薄。因此,出口角度向上或向下的水口均优于出口角度水平的水口;从适应高拉速和液面稳定角度出发,出口角度向下的水口又优于出口角度向上的水口。

(a) 向下  $30^\circ$  扩张水口(b) 向下  $15^\circ$ 

(c) 水平

(d) 向上  $15^\circ$ 

图3 水口出口角度对流场、温度场的影响

## 2.3 出口面积比对结晶器流场、温度场的影响

图4表示的是水口出口面积比分别为 1.69、2.08、2.45 时结晶器内的计算流场和温度场。水口出口面积比是指水口两侧孔的面积与中孔面积之比。由图可以看出,随着水口出口面积比的增大,结晶器内的流动强度变弱,流速减小,熔池表面变得稳定,卷渣的趋势减小,

射流对结晶器窄面的冲击减弱, 结晶器窄面的高温区范围变小, 温度值降低, 均有利于初生凝固壳的生长; 同时冲击深度也在减小, 也有利于钢液中已有夹杂物的上浮。水口出口面积比对结晶器内流场和温度场的影响实际上是水口速度变化引起的, 因此, 通过计算可以看出: 合理的水口面积比是受拉速的大小来确定的, 高拉速要求有较大的面积比, 低拉速水口面积比选较小值。

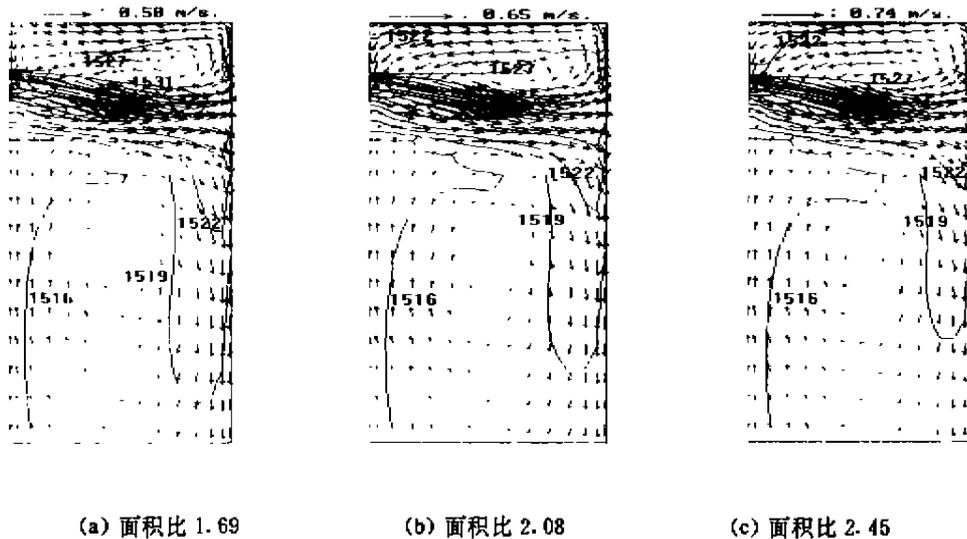


图 4 出口面积比对流场、温度场的影响

#### 2.4 浇铸速度对结晶器内流场、温度场的影响

图 5 分别表示的是浇铸速度 1.1 m/min、1.3 m/min、1.5 m/min、1.7 m/min 时结晶器宽面对称面上的计算流场和温度场。由图可以看出, 不同浇铸速度下, 结晶器内的流动很相似, 这说明结晶器内一旦形成了湍流流动, 铸速对结晶器内流动规律的影响不是主要的。但从液面稳定、夹杂物行为和凝固传热的角度考虑, 则其影响是不可低估的, 随着浇铸速度的增加, 结晶器内的流速随之增大, 冲击深度变深, 这将造成夹杂物的穿透深度增加, 不利于夹杂物的上浮, 同时熔池表面变得更加不稳定, 易于造成保护渣的卷入和钢液面裸露, 使钢液中夹杂物增加, 降低了铸坯质量, 高温射流对结晶器窄面的冲击力增强, 冲击范围变大, 对初生坯壳的冲刷和再熔加剧, 从而减慢了凝固壳的生长速度, 高温区也随着冲击深度的增加而向下移动, 使结晶器出口的坯壳厚度变薄, 这就易引起漏钢和鼓肚而使铸坯的裂纹缺陷增加。因此, 高拉速要求结晶器长度适当长一些, 同时在水口设计上选取较大的出口向下角度和面积比, 以保证结晶器液面稳定和较均匀的凝固坯壳形成, 如拉速为 1.3 m/min, 选水口出口面积比 2.08、角度向下 15°较为合理; 而拉速为 1.7 m/min, 则应选水口出口面积比 2.45、角度向下 30°的扩张型水口。

#### 2.5 插入深度对结晶器流场、温度场的影响

图 6 表示的是相同浇铸速度和出口角度条件下, 插入深度分别为 200 mm、250 mm、300 mm、350 mm 时的计算流场和温度场。插入深度是指从自由钢液面到水口底部的距离。由图可以看出, 随着水口插入深度的增加, 熔池表面附近向上运动的回流区变得越来越大, 熔池表面的扰动减弱, 这有利于降低保护渣卷入的可能性, 阻止产生新的夹杂。但熔池表面的温度也在降低, 这就不利于保护渣的熔化, 影响保护渣作用的发挥, 降低了铸坯质量。同时向下

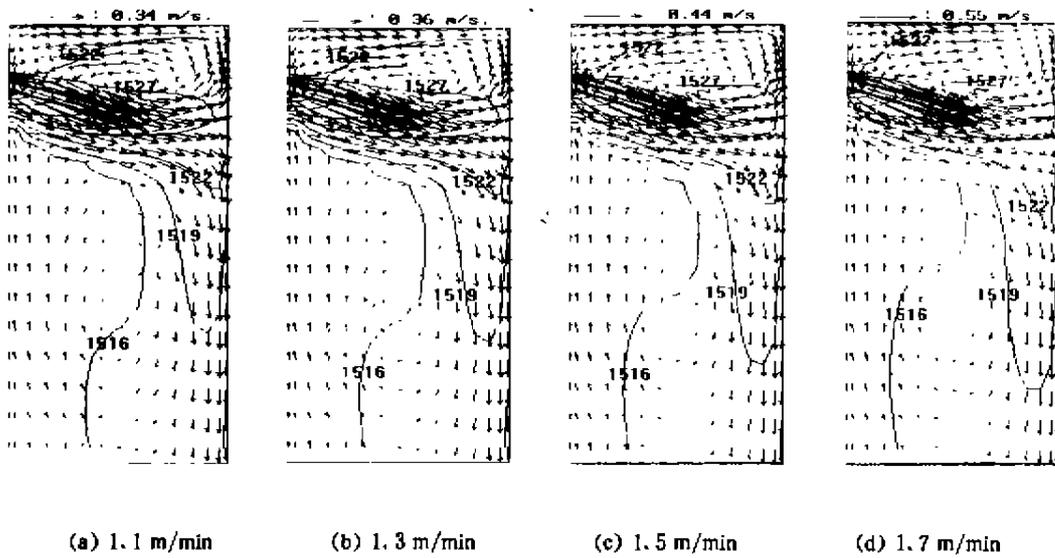


图5 浇铸速度对结晶器内流场、温度场的影响

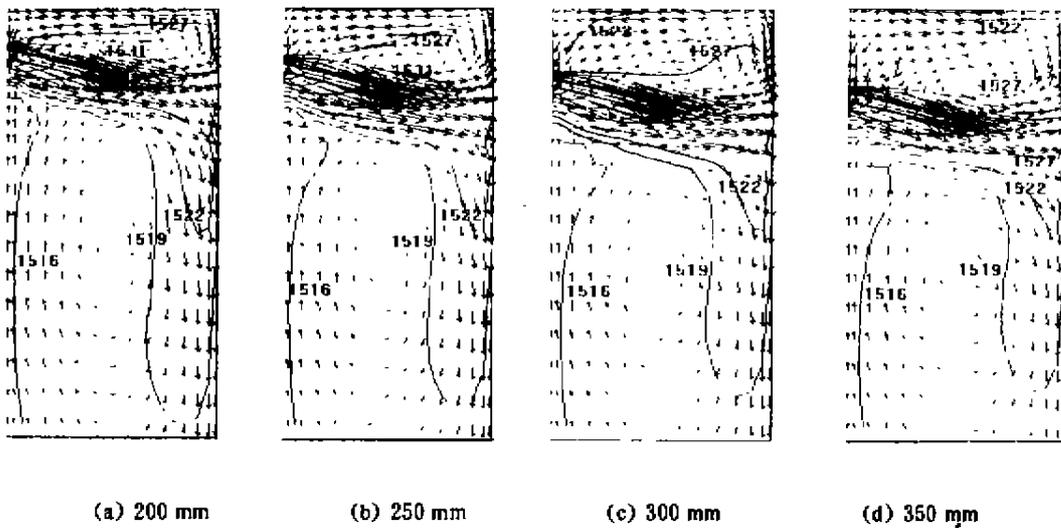


图6 插入深度对结晶器内流场、温度场的影响

回流的涡心位置在下移,这将减少从中间包进入结晶器中夹杂物的上浮机会,高温射流对结晶器窄面的冲击位置也在下移,影响凝固壳的生长速度,使出结晶器的坯壳厚度不均匀,易引起鼓肚和漏钢。另外,随着水口插入深度的增加,参加上部回流的钢液量也在增加,使得它对水口出口处的高温射流的冷却作用加强,结果使结晶器窄面处的高温区范围变小,造成此处的热量集中,使铸坯产生裂纹的可能性增大。在水口结构一定条件下,水口插入深度应随拉速的增加而适当增加,如拉速为 1.7 m/min,水口插入深度为 300 mm 时比较合适。

## 2.6 铸坯尺寸对结晶器流场、温度场的影响

图7表示的是相同拉速条件下,铸坯断面分别为 180 mm×1000 mm 至 180 mm×1200 mm 时结晶器内的计算流场和温度场。由图可以看出,结晶器的宽度变小后,对其流场的形式影响不是很大;但在相同的拉速下由于水口出口流速降低,使整个流场的湍动能减弱,流速减小,结晶器液面趋于平稳。冲击点位置稍有上移,窄面处的高温区范围变小。因此,在其

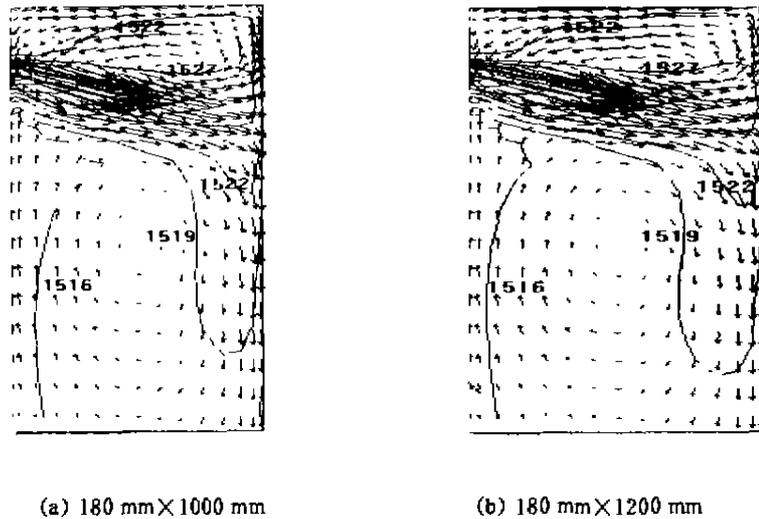


图7 铸坯尺寸对流场、温度场的影响

它条件相同的情况下,小断面结晶器的最大拉速可适当高于大断面。

### 3 结 语

本文通过商业软件 PHOENICS,数值模拟了结晶器内三维流场和温度场,分析了拉速、水口出口角度、插入深度、水口出口面积比、铸坯断面尺寸等参数对结晶器内流场和温度场的影响。针对南钢板坯连铸机特点,综合考虑各参数对连铸工艺顺行和铸坯质量的影响,可以得出,拉速为 1.3 m/min 时,选水口出口面积比 2.08、角度向下 15°,水口插入深度 250 mm 较为合理;而拉速为 1.7 m/min 时,应选水口出口面积比 2.45、角度向下 30°的扩张型水口,其合理水口插入深度为 300 mm。在水口结构相同的情况下,浇铸小断面的拉速可适当大于大断面的拉速。

### 参 考 文 献

- 1 Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Eng. , 1974, (3), 269
- 2 Huang X, Thomas B G. Modeling Superheat Removal during Continuous Casting of Steel Slabs. Metall. Trans. , 1992, 23B, 339