

⑤ 28-34

# 薄板坯连铸结晶器内 凝固坯壳三维有限元分析

## 3-D Finite Element Analysis of Solidified Shell in Molds for Continuous Casting of Thin Slabs

严波  
Yan Bo

文光华 ✓  
Wen Guanghua

张培源  
Zhang Peiyuan

何俊范  
He Junfan

TF 777.7

(重庆大学工程力学系、冶金及材料工程系, 重庆, 630044; 第一作者 30 岁, 男, 在职博士生)

**A 摘要** 用已获得的薄板坯连铸结晶器内凝固坯壳的几何形状和温度场, 建立凝固壳三维热弹塑性接触有限元分析模型。得到两种拉速下 ISP 和 CSP 型结晶器内凝固壳的应力和变形分布, 以及凝固壳与结晶器壁间的气隙分布, 给出了成裂指数在坯壳中的变化曲线。

**关键词** 薄板坯连铸; 凝固坯壳; 有限元

中国图书资料分类法分类号 TF777.7; O39; TB12

结晶器

**ABSTRACT** A three-dimensional thermal elastoplastic contact FE analysis model of solidified shell in moulds for continuous casting of thin slabs is set up, based on the known geometry of the shell and the temperature distribution in the shell. We in turn obtain the stress and strain distributions of the solidified shells formed in ISP and CSP moulds, the gap distributions between the shells and the mould walls, as well as the curves of cracking index [1] in the shells, which provides a foundation for the design and control of technical parameters for continuous casting of thin slabs.

**KEYWORDS** continous casting for thin slabs; solidified shell; finite element

## 0 引 言

薄板坯连铸自 1987 年获得专利以来, 在世界范围内得到了广泛应用。该项技术改变了传统的由钢水至轧制带材的工艺流程, 具有成本低、投资少、产品收得率高等一系列优点, 被认为是板材生产发展的新方向, 因而其产品质量问题受到人们的高度重视。薄板坯连铸结晶器内凝固壳中产生的裂纹是影响连铸质量的主要原因之一。裂纹的产生是由于坯壳内局部应力高于材料在高温下的抗拉强度所致, 因此, 为保证连铸薄板质量, 避免坯壳中裂纹的形成, 应尽量降低坯壳中的局部应力, 而坯壳中的应力大小及分布则受到坯壳与结晶器间的传热、水口形状、结晶器形状、拉坯速度等诸多复杂因素的影响, 要弄清这些因素对坯壳中应力和变形的影响, 目前还无法用实验方法进行研究, 而数值分析方法则是研究该问题的最重要

的手段之一。

由于薄板连铸的历史很短,对结晶器内应力分布的工作国际上所见不多,而且现有工作几乎都采用二维简化模型<sup>[1~3]</sup>,因而对凝固壳三维应力分布、变形和气隙分布情况还缺乏全面的认识,而这对于连铸工艺参数的设计和控制,确保产品质量无疑是极其重要的。笔者针对目前国际上流行的ISP和CSP型连铸结晶器,根据已知的凝固壳几何形状和温度场,建立了凝固壳三维有限元分析模型,模型中考虑了凝固壳与结晶器壁间的接触,获得了凝固壳内应力分布、变形和气隙分布以及成裂指数曲线,通过对两种拉速( $V=4.5\text{ m/min}$ 和 $V=5.5\text{ m/min}$ )情况的计算,得到了拉速对凝固壳内应力的影响。这些结果对薄板连铸工艺参数的设计和控制具有重要的参考价值 and 指导作用。

## 1 模型建立

采用热弹塑性接触有限元分析方法对凝固壳进行三维有限元分析,建立如下简化模型:

在连铸过程中,凝固坯壳在拉坯力的作用下向下作匀速运动,从整体上它是静力平衡的,故在此假定出口处壳体受到 $z$ 向位移约束,对其进行静力分析,作为一种近似手段,这对于考查坯壳内应力分布规律是可行的,文[4]在处理方坯连铸问题时采用了这种假设。坯壳与结晶器间的热交换以及钢液的复杂流动等,使坯壳内存在温度梯度,这里视其为一稳定场<sup>[1~3]</sup>,凝固壳内表面受到尚未凝固的钢液静压力的作用。此外,坯壳体还受到结晶器壁的约束,模型中考虑了内压和接触问题。

由于ISP和CSP型结晶器的几何形状均接近对称,作为近似,分析中仅取四分之一,见图1。根据对称性,在宽面和窄面的对称面上有水平方向位移为零的边界条件。

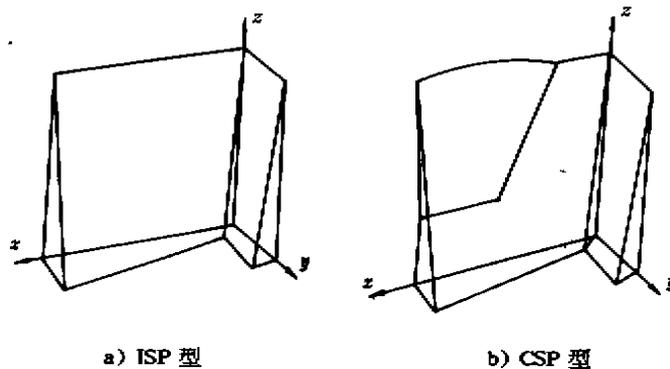


图1 凝固壳三维有限元模型

## 2 热弹塑性接触有限元

关于热弹塑性有限元分析方法的论著较多,可参见[5],而接触问题的有限元方法还在发展中,笔者采用[6]中提出的方法。

### 2.1 热弹塑性有限元基本方程

对于热弹塑性问题,总的应变率 $\dot{\epsilon}$ 为弹性应变率 $\dot{\epsilon}^e$ 、塑性应变率 $\dot{\epsilon}^p$ 和因温度变化引起的

应变率  $\dot{\varepsilon}^T$  之和:

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^T \quad (1)$$

对于材料非线性问题,利用变分原理,可以导出如下形式的有限元基本方程:

$$[K]\{\Delta u^{(i)}\} = \{^{t+\Delta t}R\} - \{^{t-\Delta t}F^{(i-1)}\} \quad (2)$$

其中  $[K]$  是刚度阵,  $\{\Delta u\}$  为位移增量,  $\{R\}$  是结点载荷,  $\{F\}$  是等效于单元应力的结点力矢量。 $t + \Delta t$  表示  $t + \Delta t$  时刻或载荷步(静力问题),  $i$  表示第  $i$  次迭代的量。

## 2.2 三维接触问题的有限元分析<sup>[4]</sup>

如图 2 所示,对于两个接触物体,可分别将其上的接触表面定义为主动接触表面和被动接触表面。在两个物体进入接触后,主动接触表面位移必须与被动接触表面相协调,以使主、被动接触表面间的粘结和滑动接触条件得以满足。因此表面位移的协调条件是通过离散化的主动接触点的约束条件实现的。

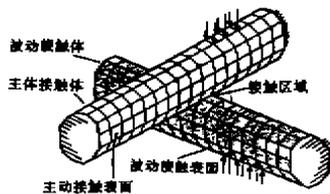


图2 接触表面定义

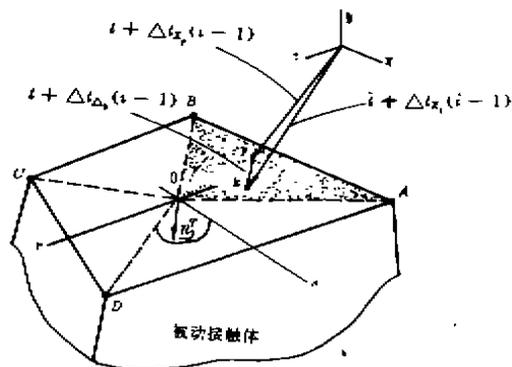


图3 主动接触点与被动接触面的接触

图3示出一主动接触点  $K$  与一被动接触表面上的接触面域  $j$  相接触的情况。图中  $P$  是主动接触点  $K$  在被动面域  $j$  上的物理点,  $P, K$  两点的整体坐标有如下关系:

$$^{t+\Delta t}X_P^{(i-1)} = ^{t+\Delta t}X_K^{(i-1)} + ^{t+\Delta t}\Delta_K^{(i-1)} \quad (3)$$

这里  $^{t+\Delta t}X_K^{(i-1)}$  是  $t + \Delta t$  时刻(载荷步)的第  $i - 1$  次迭代后  $K$  点的整体坐标,  $^{t+\Delta t}\Delta_K^{(i-1)}$  则是节点  $K$  处的材料重迭。如果在第  $(i - 1)$  次迭代后主动接触节点  $K$  与被动接触面域  $j$  处于粘接接触状态,则有粘接接触条件:

$$\Delta u_P^{(i)} = \Delta u_K^{(i)} + ^{t+\Delta t}\Delta_K^{(i-1)} \quad (4)$$

如果  $K$  点与面域  $j$  处于滑动接触,则有滑动接触条件:

$$(n_j^T)^T[\Delta u_P^{(i)}] = (n_j^T)^T[\Delta u_K^{(i)} + ^{t+\Delta t}\Delta_K^{(i-1)}] \quad (5)$$

采用 Lagrange 乘子法将接触表面位移协调条件(4)和(5)作为强制满足的边界条件引入热弹塑性问题的控制方程中,得到  $t + \Delta t$  时刻(载荷步)第  $i$  次迭代的平衡方程:

$$\left\{ \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}K^{(i-1)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & {}^{t+\Delta t}K_c^{(i-1)} \\ {}^{t+\Delta t}K_c^{(i-1)T} & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \Delta u^{(i)} \\ \Delta \lambda^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}R \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^{t-\Delta t}F^{(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^{t-\Delta t}R_c^{(i-1)} \\ {}^{t-\Delta t}\Delta_c^{(i-1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

这里  $K_c$  为包括表面协调位移的约束条件的接触矩阵,  $R_c$  为接触力向量,  $\Delta_c$  为接触点材料重迭列向量,  $\Delta \lambda$  为施加接触约束的 Lagrange 乘子列向量,其它变量意义同式(2).

方程(6)采用完全牛顿法迭代求解,求解中接触收敛准则为:

$$\frac{\| \Delta R^{(i-1)} - \Delta R^{(i-2)} \|_2}{\| \Delta R^{(i-1)} \|_2} \leq \epsilon \quad (7)$$

### 3 凝固坯壳三维有限元分析

根据前述方法编制有限元程序对 ISP 和 CSP 型连续结晶器内凝固坯壳进行有限元分析.计算中所取物理参数为:  $\rho = 6.968 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$ ,  $\alpha = 1.8 \times 10^{-5}$ ,  $E(T) = 3.38 \times (T_s - T)^{1.5} \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\alpha_s = (1.61 \times 10^{-3} - 1.89 \times 10^{-7}T)E(T)$ ,  $H(T) = 0.1E(T)$ , 计算拉速分别为: 4.5 m/min 和 5.5 m/min, 温度场如图 4 所示.

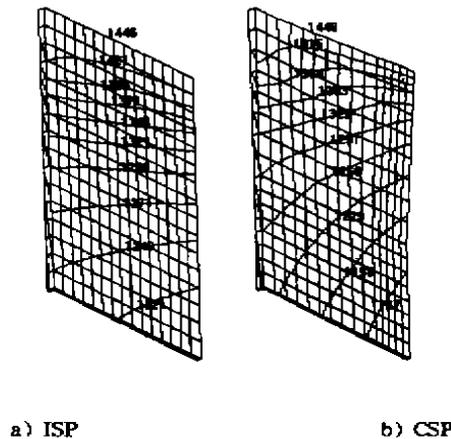


图 4 凝固壳温度场 ( $v = 4.5 \text{ m/min}$ )

#### 3.1 应力分布

用有限元后处理软件绘制的凝固壳内等效应力分布如图 5 所示(只画出  $v = 4.5 \text{ m/min}$  的情况).从图中可以看到,宽面上等效应力沿  $X$  方向逐渐增大,沿  $Y$  和  $Z$  方向逐渐减小,宽面中心出口处应力值最大,此点的温度最低.可以发现应力变化规律与温度分布趋于一致,这说明凝固壳中的应力主要是热应力.表 1 中列出了两种拉速下凝固壳中的典型应力值.从

表中可见,对同一种结晶器,拉速越大,应力越小,这是由于拉速越大,温度变化越平缓,因而占主导地位的热应力较小。CSP 型结晶器内凝固壳中的应力高于 ISP 型,这可能是由于 CSP 型结晶器表面积较大,传热较好,因而在坯壳内形成较大温度梯度所致。

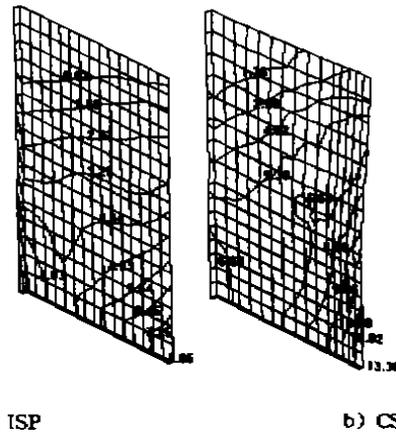


图 5 拉速为 4.5 m/min 时凝固壳的等效应力分布

表 1 ISP 和 CSP 凝固壳在不同拉速下的典型应力值

型 号	拉 速 m/min	最大应力 MPa				内表面最 大应力值 MPa
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	
ISP	4.5	8.05	21.96	16.68	22.28	1.62
	5.5	7.03	18.50	13.69	18.84	1.42
CSP	4.5	13.36	36.53	24.94	39.54	2.69
	5.5	11.98	31.73	21.43	34.53	2.42

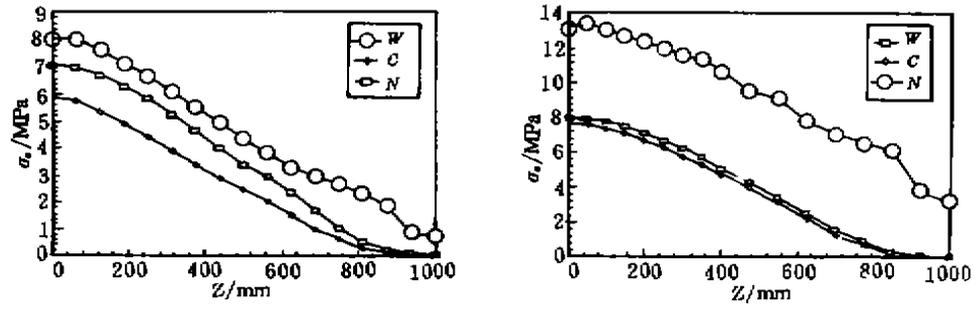
凝固壳内裂纹产生的趋势,可用裂纹形成指数<sup>[1]</sup>,即有效应力  $\sigma_e$  与材料的极限强度  $\sigma_B$  之比值  $\sigma_e/\sigma_B$  判定,  $\sigma_B$  为:

$$\sigma_B = K(T_s - T)^q \text{ MPa} \quad (8)$$

式中  $K = 1.2^{-1} \text{ MPa}^\circ\text{C}$ ,  $q = 0.5$ 。图 6 和图 7 分别为宽面中心、窄面中心和角部的等效应力和成裂指数  $\sigma_e/\sigma_B$  沿 Z 向的变化曲线。从图中可以看到,坯壳宽面中心的应力最大,且  $\sigma_e/\sigma_B$  也最大,对两种结晶器均如此。这表明最容易出现裂纹的部位在宽面中心,这与文[1]所得的结论相吻合。还可以看到,CSP 型凝固壳内最大应力及成裂指数均大于 ISP 型,因而比后者更容易产生裂纹,故从降低应力的角度出发,ISP 型结晶器比 CSP 型好。

### 3.2 变形和气隙分布

凝固壳的变形图如图 8 所示。从图中可以看到,由于凝固坯壳出口处的温度最低,因此收缩变形最大,这种收缩主要表现在 X(即宽面)方向上。在窄面上凝固壳与结晶器壁间的间隙较大,在此即形成气隙,这是由于整个宽面的横向收缩所致。在宽面上靠近窄面附近形成了一小的气隙区域,其它区域却和结晶器壁保持接触状态。这是由于虽然宽面厚度方向上因

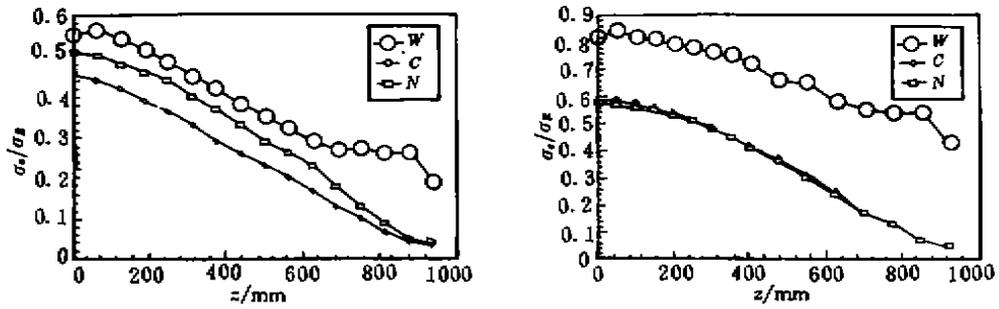


a) ISP 型  $v = 4.5 \text{ m/min}$

b) CSP 型  $v = 4.5 \text{ m/min}$

图 6 凝固壳中等效力变化曲线

W——宽面中心    N——窄面中心    C——角部

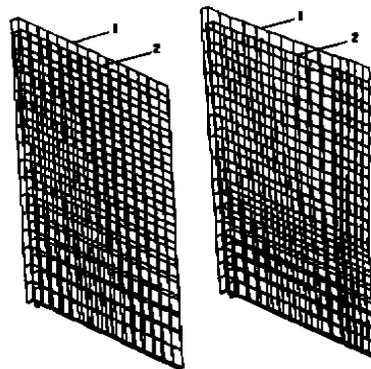


a) ISP 型  $v = 4.5 \text{ m/min}$

b) CSP 型  $v = 4.5 \text{ m/min}$

图 7 凝固壳中  $\sigma_e/\sigma_s$  变化曲线

W——宽面中心    N——窄面中心    C——角部



a) ISP 型

b) CSP 型

图 8 凝固壳变形图 ( $v = 4.5 \text{ m/min}$ )

1——变形前形状

2——变形后形状

温度梯度有收缩变形,但厚度很薄,坯壳内钢液静压力的作用占主导地位,故宽面上仅靠近窄面处有一较小区域的气隙。

## 4 结 论

建立了板薄坯连铸凝固壳三维有限元分析模型,首次采用热弹塑性接触有限元方法得到在两种拉速下,ISP和CSP型结晶器内凝固壳中应力、变形分布和气隙分布,给出了坯壳宽面中心、窄面中心和角部的成裂指数变化曲线。结果表明:

- 1) 凝固壳中应力主要为热应力;
- 2) 坯壳宽面中心应力最大,成裂指数最高,因而最易形成裂纹;
- 3) 拉坯速度越大,应力水平越低,适当增大拉速有利于薄板质量的提高;
- 4) ISP型结晶器内凝固壳的最大应力低于CSP型结晶器,故从降低壳内应力角度出发,ISP型结晶器比CSP型结晶器好。

## 参 考 文 献

- 1 Aldo R. Thermo-mechanical behavior of the solidified shell in a "funnel-shaped" mold for continuous casting of thin slabs. *Steel Research*. 1988, 10: 438~448
- 2 杨秉俭,刘伟涛,苏俊义. 薄板坯连铸结晶器中铸坯凝固壳应力发展的有限元分析. *应用力学学报*. 1993, 2(11): 55~61
- 3 徐烈鹏,张晓兵,汪建农. 连铸结晶器内传热及应力模型. 第五届冶金过程动力学和反应工程学学术会议论文集. 济南. 1991, 286~293
- 4 Gunter F, Bohmer J R, etc. Coupled Thermal and Stress-strain models for the continuous casting of steels, *Steel Research*. 1993, (5): 246~254
- 5 殷有泉. 固体力学非线性有限元引论. 北京: 北京大学出版社. 1987
- 6 Chaudhary A B, Bathe K J, A Solution Method for Static and Dynamic Analysis of Three-Dimensional Contact Problems with Friction. *Computers and Structures*. 1986, 24: 855~873