

空心环形件电渣熔铸内结晶器铜板变形 有限元瞬态分析

王安国^{1,2}, 姜周华¹, 唐 骥², 董艳伍¹

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819 ; 2. 沈阳铸造研究所, 辽宁 沈阳 110022)

摘 要 : 借助有限元方法, 建立含结晶器、自耗电极、渣池、金属熔池、铸锭、底垫、渣壳和气隙区的物理模型, 模拟“空心环形件电渣熔铸”金属熔池形成、发展、结束过程中内结晶器铜板的径向变形。模拟与试验结果表明, 当结晶器、自耗电极、渣料渣深、炉口电压相同时, 一般金属熔池越浅, 越容易获得良好组织, 金属熔池越深且温度越高, 内结晶器铜板炉后径向位移量越大, 熔铸过程内结晶器铜板中部最易变形, 该位置增加筋板可有效控制内结晶器铜板的炉后径向变形。

关 键 词 : 有限元法; 空心环形件电渣熔铸; 金属熔池; 瞬态; 内结晶器; 径向变形

中图分类号 : TF 748. 6 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1005 - 3026(2016) 09 - 1332 - 06

FEM Transient Analysis of Copper Plate Deformation of Inner Mold for ESR Hollow Cylindrical Castings

WANG An-guo¹, JIANG Zhou-hua¹, TANG Ji², DONG Yan-wu¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China ; 2. Shenyang Research Institute of Foundry, Shenyang 110022, China. Corresponding author : WANG An-guo, E-mail : 315097641@qq.com)

Abstract : A physical model that includes mold, electrode, slag pool, metal basin, ingot, pad, slag shell and air gap was established by using finite element method (FEM) to simulate the radial deformation of copper plate during the formation and development of the metal basin for ESR (electro-slag remelting) hollow cylindrical castings. The results showed that if the voltage of the mold, the consumable electrode, the slag and the oven is equal, generally, the shallower the metal basin is, the easier it is to obtain good organization; the deeper the metal basin is and the higher temperature the metal basin is, the bigger the final radial displacement of copper plate is. The copper plate will easily change shape in the mid height of the inner mold, where add the rib plate can control the final radial deformation availably.

Key words : FEM(finite element method); ESR (electro-slag remelting) hollow cylindrical casting ; metal basin ; transient ; inner mold ; radial deformation

近年“空心环形件电渣熔铸”技术在国内外越来越被重视,其内结晶器铜板严重变形导致的脱模失败制约该技术的实现,掌握该变形规律尤显迫切。内结晶器铜板变形与金属熔池状态息息相关,目前金属熔池状态的研究^[1-2]主要针对稳态而对瞬态展示不足;内结晶器铜板的变形规律未见报道,只能借鉴连铸结晶器铜板变形规律^[3-5]的研究成果。

“空心环形件电渣熔铸”内结晶器铜板有径向(轴对称中心的法向)、轴向(轴对称中心的平行方向)两种变形,轴向变形一般不影响脱模。本文探索性研究不同金属熔池状态下其内结晶器铜板的瞬态径向变形,借鉴模拟实验结果和连铸过程研究成果,为控制该变形和设计合理内结晶器提供方法。“空心环形件电渣熔铸”内结晶器铜板经历电生热的传递、热引起变形两过程,期间电、

热、位移场等多场共存 ;因其熔渣“ 电阻热 ”热源不断上移等特性 ,目前未见其电、热、位移场瞬态分析的报道. 本文通过 ANSYS 有限元分析软件 ,对 1/16“ 空心环形件电渣熔铸 ”综合体系模型、金属熔池模型进行物理建模 ,给出一种其“ 电、热、位移场瞬态分析 ”的多次求解方法. 热电耦合单元 ANSYS – SOLID69(简称 Solid69) 模拟其电生热传递过程 ,三维实体热单元 ANSYS – SOLID70(简称 Solid70)顺序耦合模拟其热引起变形过程. 本文采用工作面为纯铜板的内外结晶器 ,随型自耗电极 ;采用有效导热系数预估渣池、金属熔池对流影响 ;令渣金界面为水平面 ,初始温度为 298 K.

1 模拟设计

1) 设计如图 1 所示的物理模型 ,给出常规工况和大电流工况 ,每次试验前结晶器内腔铜板先维修至无变形状态.

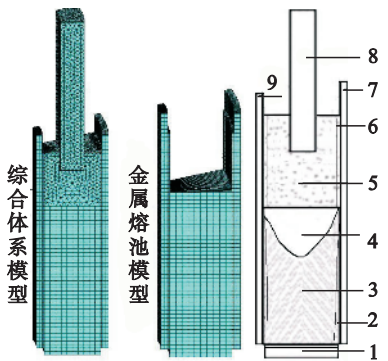


图 1 空心环形件电渣熔铸示意图
Fig. 1 ESR hollow cylindrical castings model
1—底水箱 2—气隙 3—铸锭 4—金属熔池 5—渣池 ;
6—自耗电极 7—渣壳 8—外结晶器铜板 ;
9—内结晶器铜板.

常规工况 :内结晶器外径 $\phi 220\text{ mm}$ 、外结晶器内径 $\phi 550\text{ mm}$,高 600 mm ;CA – 6NM 随型自耗电极 ,长 2 000 mm ,与结晶器间隙 50 mm ;ANF – 6渣料 ,渣深 150 mm ;炉口电压 60 V ;电流 10 kA.

大电流工况 结晶器、自耗电极、渣料渣深、炉口电压同“ 常规工况 ”,电流 11 kA.

A a a' a'' 分别表示常规工况综合体系稳态温度场、金属熔池模型稳态温度场、金属熔池模型瞬态温度场和金属熔池模型瞬态径向位移场. B , b b' b'' 分别表示大电流工况综合体系稳态温度场、金属熔池模型稳态温度场、金属熔池模型瞬态温度场和金属熔池模型瞬态径向位移场.

2) 按下述① – ② – ③ – ④ – ⑤ – ⑥流程 ,求“ 空心环形件电渣熔铸 ”两工况金属熔池瞬态温度场及其内结晶器铜板水冷面中部加筋前后瞬态径向位移场.

- ①Solid69 加载电流电位及温度边界条件求得特定时刻的 A ,B ;
- ②Solid69 加载渣池和熔滴过热带入渣金界面的热流密度 ,其他边界条件同① 求得该时刻的 a ,b ;
- ③Solid70 求解该时刻的 a' , b' 以确认加载参数 ,满足该时刻的 a' , b' 与该时刻的 a ,b 结果吻合 ;
- ④Solid70 以确认的加载参数求各时刻的 a' , b' ;
- ⑤利用 Solid70 ,分析类型转换至位移量分析 ,以④求解结果文件为源文件 ,附加法兰约束求得 a'' , b'' ,亦求得内结晶器铜板瞬态径向位移场 ;
- ⑥利用 Solid70 ,转换至位移量分析 ;读取④的结果文件为源文件 ,附加法兰和加强筋约束求得 a'' , b'' ,亦求得内结晶器铜板瞬态径向位移场.

3) 按上述① – ② – ③ – ④ – ⑤流程 ,求得多工况下其内结晶器铜板水冷面中部不加筋时多个参数值.

1. 1 Solid69 综合体系稳态温度场建模求解^[6]

1) 物理模型包括结晶器、自耗电极、渣池、金属熔池、铸锭、底水箱、渣壳和气隙.

2) 体系满足热平衡(1)、电流(2)、电位方程(3)^[6] :

$$q = q_{se} + q_{sw} + q_d + q_{mw} + q_{mb} + q_r , \quad (1)$$
$$J = \sigma E , \quad (2)$$
$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 . \quad (3)$$

式中 q q_{se} q_{sw} q_d q_{mw} q_{mb} q_r 分别为热源、渣池电极交换、渣池结晶器交换、熔滴吸收、铸锭结晶器交换、铸锭底水箱交换、渣池径向损失的热功率 ,W ; J 为电流密度 ,A/m² ; σ 为电导率 , $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为电场强度 ,V/m ; ∇ 为哈密顿无量纲算子 φ 为电位 ,V.

3) 温度边界条件^[6] :电极熔化端头熔点 ,渣池表面热辐射 ,结晶器及底水箱铜板水冷面对流换热 ,对称面绝热. 电流电位边界条件 :电极末端表面等电位 ,底水箱铜板水冷面等电位约束及电流载荷.

4) 加载电流电位及温度边界条件直接求解.

1. 2 Solid69 金属熔池模型稳态温度场建模求解

1) 物理模型为 1. 1 节模型去掉自耗电极、渣池.

2) 满足热平衡方程^[6](4) :

$$q_{se} + q_d + q_{sm} = q_i + q_{mw} + q_{mb} . \quad (4)$$

式中 q_{sm} q_i 分别为渣池铸锭交换热、铸锭放热的热功率, W.

3) 边界条件 :除渣金界面外 ,其余对应区同 1.1 节. 渣金界面 热流密度载荷.

4) 加载热流密度及温度边界条件直接求解.

1.3 Solid70 金属熔池模型瞬态温度场建模求解

1) 物理模型同 1.2 节.

2) 满足热平衡方程(4).

3) 边界条件 :除渣金界面外 ,其余对应区同 1.1 节. 渣金界面 :热生成率载荷(值为有效电功率).

4) 求解过程 :渣金界面逐层激活含有效电功率热生成率载荷的金属熔池微元层.

1.4 利用 Solid70 分析内结晶器铜板瞬态位移场

1) 物理模型同 1.2 节 ,分析类型转换至位移量.

2) 采用热、弹、塑性增量有限元模型分析“ 空心环形件电渣熔铸”金属熔池模型(含内结晶器铜板)瞬态径向位移场 ,满足方程^[7](5):

$$d\{\sigma\} = \{D\}_{ep} (d\{\varepsilon_{ep}\} - d\{\varepsilon_0\}). \quad (5)$$

其中 σ 为应力 ,N/m² ; $\{D\}_{ep}$ 为弹塑性矩阵 ; ε_{ep} , ε_0 分别为弹塑性应变、初应变 ,无量纲.

3) 边界条件 :因电渣熔铸快速凝壳 ,渣池及钢水通过渣壳传递给结晶器的静压力忽略 ,因结晶器环状对称 ,加筋前设置结晶器上、下法兰零位移约束 ,加筋后设置上、下法兰及筋板处零位移约束.

4) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

1.5 相关参数

熔炼设备为 2 500 kW 电渣炉.

结晶器、底水箱工作面为轧制纯铜板 ,其弹性模量取 1.1×10^{11} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,其塑性变形时切线模量取 4.8×10^{10} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,弹性、塑性阶段泊松比分别取 0.337 ,0.5 ,线膨胀系数取 1.8×10^{-5} K⁻¹ [8] ;其 Procast 计算求得的比热容、热导率、密度曲线见图 2 ;其电阻率取 1.7×10^{-8} Ω·m ,结晶器、底水箱铜板水冷面的对流换热系数分别取 1 380 ,600 W/(m²·K).

5) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

1.5 相关参数

熔炼设备为 2 500 kW 电渣炉.

结晶器、底水箱工作面为轧制纯铜板 ,其弹性模量取 1.1×10^{11} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,其塑性变形时切线模量取 4.8×10^{10} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,弹性、塑性阶段泊松比分别取 0.337 ,0.5 ,线膨胀系数取 1.8×10^{-5} K⁻¹ [8] ;其 Procast 计算求得的比热容、热导率、密度曲线见图 2 ;其电阻率取 1.7×10^{-8} Ω·m ,结晶器、底水箱铜板水冷面的对流换热系数分别取 1 380 ,600 W/(m²·K).

6) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

7) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

8) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

9) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

10) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

其中 σ 为应力 ,N/m² ; $\{D\}_{ep}$ 为弹塑性矩阵 ; ε_{ep} , ε_0 分别为弹塑性应变、初应变 ,无量纲.

3) 边界条件 :因电渣熔铸快速凝壳 ,渣池及钢水通过渣壳传递给结晶器的静压力忽略 ,因结晶器环状对称 ,加筋前设置结晶器上、下法兰零位移约束 ,加筋后设置上、下法兰及筋板处零位移约束.

4) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

5) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

6) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

7) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

8) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

9) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

10) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

11) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

12) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

13) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

14) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

15) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

16) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

17) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

18) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

19) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

20) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

21) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

22) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

23) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

24) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

25) 求解过程 :以 1.3 节求解结果文件为源文件 ,基于边界条件 ,渣金界面逐层加载源文件中热应力值 ,求得金属熔池模型(含内结晶器铜板)的瞬态径向位移场.

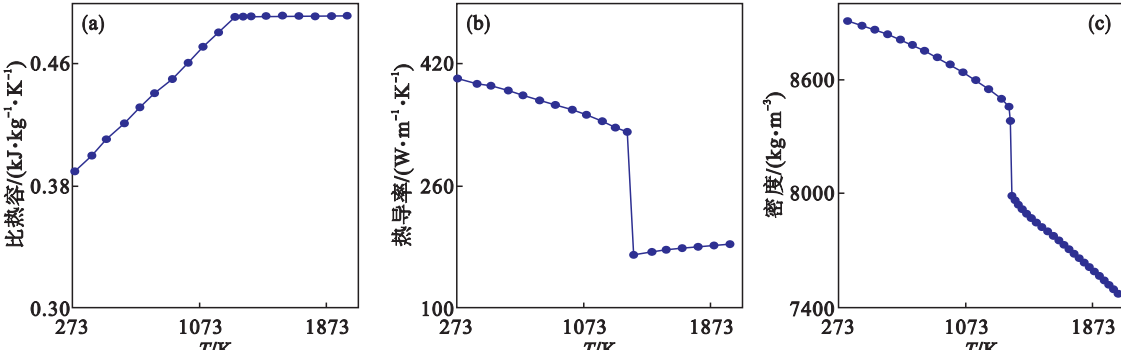


图 2 铜的比热容、热导率、密度曲线
Fig. 2 Specific heat , heat conductivity and density curves of Cu
(a)—比热容 ;(b)—热导率 ;(c)—密度.

自耗电极材质为 ASTM A743 的 CA - 6NM ,弹性模量取 1.2×10^{11} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,其塑性变形时切线模量取 6×10^{10} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,弹性、塑性阶段泊松比分别取 0.3 ,0.5 ,线膨胀系数取 1.2×10^{-5} K⁻¹ ;其 Procast 计算的比焓、热导率、密度曲线见图 3 ,可知 $t_s = 1\,370$ ℃(1 643 K) , $t_l = 1\,453$ ℃(1 726 K) ;电阻率取 5×10^{-5} Ω·m.

渣料为 ANF - 6 (70% CaF₂ ,30% Al₂O₃) ,其渣壳弹性模量取 7.7×10^{10} N·m⁻² 为极大值的温度减函数 ,其塑性变形时切线模量取 3.2×10^9 N·m⁻²

为极大值的温度减函数 ,弹性、塑性阶段泊松比分别取 0.32 ,0.5 ,线膨胀系数取 2×10^{-7} K⁻¹ ;渣壳、熔渣比热容均取 1.7 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ ,密度均取 $2\,700$ kg/m³ ,分子热导率分别取 2.09 , 2.93 W·m⁻¹·K⁻¹ ;渣壳、熔渣电阻率分别取 3.34×10^{-3} , 4×10^{-1} Ω·m^[6].

2 结果与讨论

通过有限元分析 ,探讨“ 空心环形件电渣熔铸 ”两工况各阶段金属熔池温度场及其内结晶器

铜板的瞬态径向位移场。

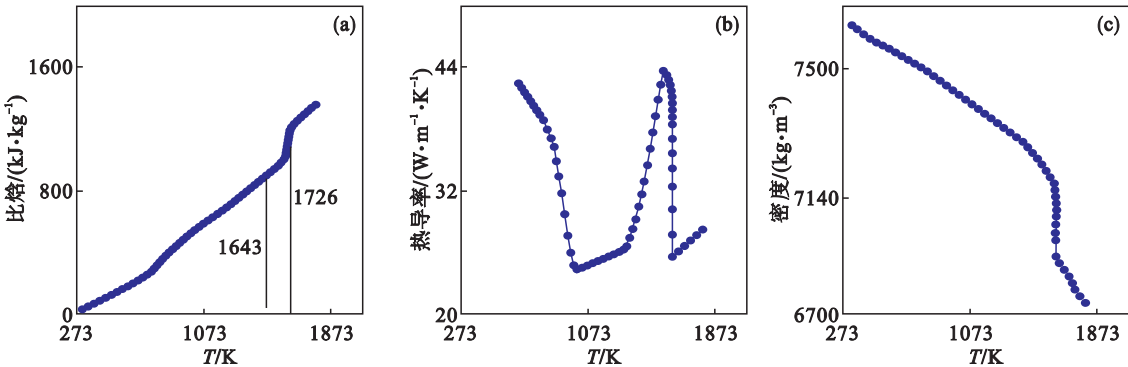


图 3 CA-6NM 的比焓、热导率、密度曲线
Fig. 3 Specific enthalpy , heat conductivity and density curves of CA-6NM
(a)—比焓 ; (b)—热导率 ; (c)—密度。

2.1 两工况金属熔池温度场情况

图 4 为两工况 2 340 s 综合体系稳态、金属熔池稳态、金属熔池瞬态温度场。可见常规工况金属熔池温度、深度均小于大电流工况。两工况最高温度(℃)为 1 658(A) , 1 698(B) , 1 500(a) , 1 510(b) , 金属熔池深(mm)为 119(a) , 146(b) , 118(a') , 145(b')。

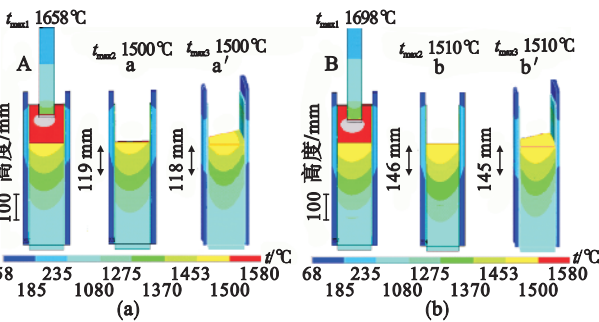


图 4 2 340 s 时两工况综合体系和金属熔池温度场
Fig. 4 Thermal field of system and metal basin in 2 340 s for 2 cases
(a)—常规工况 ; (b)—大电流工况。

图 5 为两工况 2 340 s 断电时金属熔池硫印法^[9]低倍实测照与金属熔池固相线瞬态模拟曲线对比图。实测深度为 118 mm(常规工况)和 145 mm(大电流工况) , 与模拟深度 118 mm(a') 和 145 mm(b') 误差小于 5% , 形状吻合。

图 6 为 Solid70 用确定的加载参数(渣金界面金属微元层逐层激活时 , 其电功率加载率为 28% ~ 36%)求得的两工况在 420 , 840 , 1 440 , 2 340 2 700 3 000 s 时刻的金属熔池温度场。可见 , 熔铸过程金属熔池及结晶器高温区逐渐上移 , 直至 2 340 s 左右的填充时刻。“大电流工况”在填充不久的 2 700 s 时刻 , 金属熔池最高温出现在渣

金界面下方(b' 箭头指示的团状区) ; 而“常规工况”金属熔池最高温全程处于渣金界面(a') , 因而更易获得良好组织。

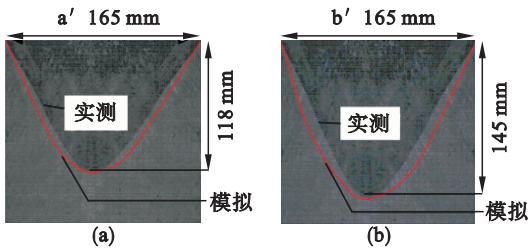


图 5 硫印法实测和模拟的两工况金属熔池形状及深度图
Fig. 5 Picture of shape and depth for metal basin tested by sulfur print method compared with simulation for 2 cases
(a)—常规工况 ; (b)—大电流工况。

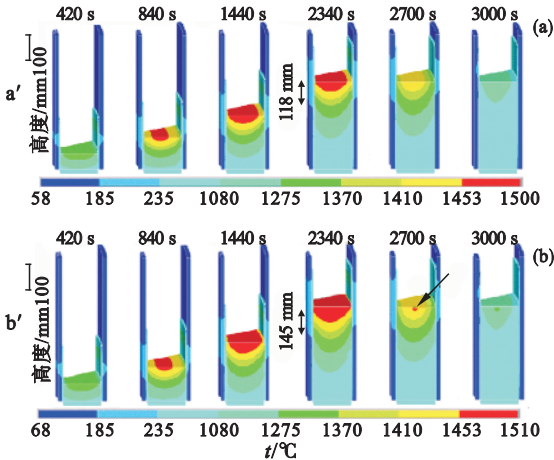


图 6 两工况不同时刻金属熔池温度场
Fig. 6 Thermal field of metal basin at different time for 2 cases
(a)—常规工况 ; (b)—大电流工况。

图 4 和图 6 显示 ,两工况金属熔池高温区均位于自耗电极下方 ,温度变化最大区域均在结晶器及底水箱附近 ,规律与文献 [10] 相符.

2.2 两工况内结晶器铜板瞬态径向位移场情况

影响“ 空心环形件电渣熔铸 ”内结晶器铜板径向位移量的主要因素有铜板温度持续剧烈变化造成的凸凹及铸件凝固收缩造成的挤压. 外径 $\phi 550\text{ mm}$ 、内径 $\phi 220\text{ mm}$ 铸件的最后凝固区域在 $\phi 335\text{ mm}$ 圆周附近 ,该区域对贴近内结晶器侧的铸件先凝固部位有拉力 ,使凝固挤压影响弱化 ,因而铜板温度持续剧变造成凸凹的影响更突出. 从热膨胀原理知道 ,内结晶器铜板承受温度不均导致不同区域温度上升不同. 当铜板上部温度高于下部时 ,上部膨胀量大于下部而发生热变形 ,导致铜板高温区外凸 ,高温区轴向宽度越宽 ,影响时间越长 ,则外凸越明显.

图 7 为常规结构内结晶器铜板增筋前两工况内结晶器铜板瞬态径向位移场. 结果显示 ,内结晶器铜板最大径向位移量出现在两工况熔铸中后期 ,该位置在结晶器铜板中部高温工作区附近 ,和连铸结晶器铜板最大径向位移量^[3 8]出现在结晶器铜板高温工作区附近相符.“ 空心环形件电渣熔铸 ”内结晶器铜板相对连铸结晶器铜板承受“ 更长时间的大温差 ” ,其最大径向位移量为连铸^[3 8]的 3 ~ 10 倍.

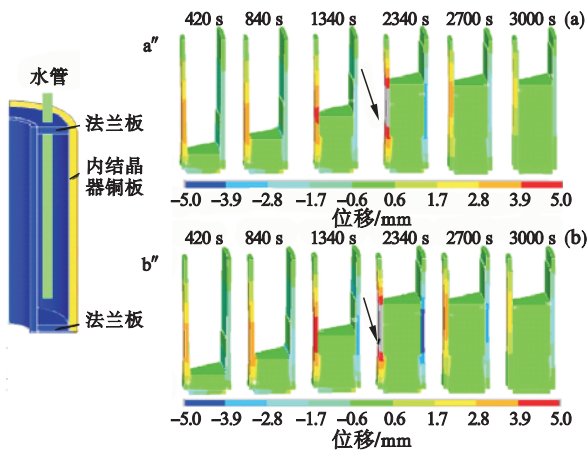


图 7 增筋前两工况不同时刻内结晶器铜板径向变形量分析
Fig. 7 Radial deformation analysis for ESR inner mold at different time for 2 cases
(a)—常规工况 ; (b)—大电流工况.

图 7 中内结晶器铜板径向位移量在填充末端有缩减现象.“ 空心环形件电渣熔铸 ”内结晶器铜板任一位置沿轴向均先升温后降温 ,降温使铜板凹进 ,凹进可缩减先前因升温而凸出的位移量. a” 中其径向最大位移量大于 5.0 mm(直箭头)区域

较小 ,填充末端缩减至 2.0 mm ;b” 中其径向最大位移量大于 5.0 mm(直箭头)区域较大 ,填充末端缩减至 2.4 mm.

“ 空心环形件电渣熔铸 ”过程 ,常规结构内结晶器铜板径向位移量最大值超 5 mm ,结构上应改进. 改进可从两方面着手 :约束铜板熔铸过程的位移量或降低铜板高温区轴向宽度. 对应方法为增加具有控制铜板变形作用的加强筋以及增加具有增强铜板换热效果的水道引流隔板. 水道引流隔板对铜板对流换热的有限改善可通过增加冷却水速或控制电功率达到同等效果 ,本文采用增加加强筋板进行改进.

图 8 为内结晶器铜板水冷面中部增加 25 mm 厚加强筋后 ,其两工况瞬态径向位移场. 结果显示 ,增筋后 ,两工况内结晶器铜板径向位移量极大值均在加强筋与法兰板中间. 熔铸前期 ,其极大值在加强筋与下法兰板中间 ;当渣金界面越过加强筋时 ,其极大值在加强筋与上法兰板中间. 其 a” 中最大径向位移量为 1.8 mm ,填充末端缩减至 0.9 mm ;其 b” 中最大径向位移量为 1.9 mm ,填充末端缩减至 1.0 mm.

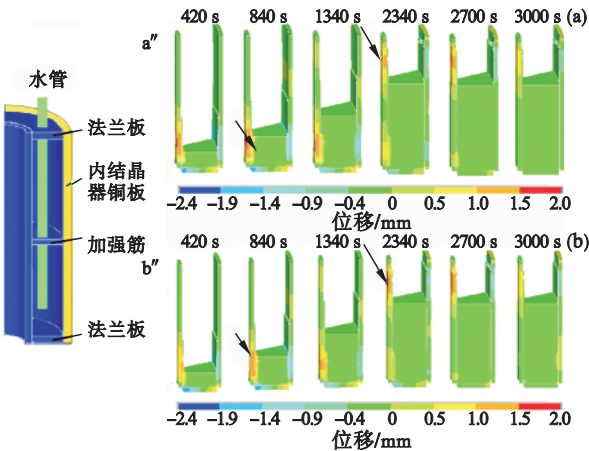


图 8 增筋后两工况不同时刻内结晶器铜板径向变形量分析
Fig. 8 Radial deformation analysis for ESR inner mold in 2 cases when increase the stiffened plate in the middle
(a)—常规工况 ; (b)—大电流工况.

“ 空心环形件电渣熔铸 ”内结晶器铜板中部既在结构上极易变形 ,又受高温区长时间影响 ,在此位置增加加强筋效果显著. 内结晶器铜板中部增筋后(与增筋前比) ,其熔铸过程径向位移量受到加强筋约束因而其最大值变小 ,并且其区域转移至加强筋与上法兰板中部、加强筋与下法兰板中部.

图 9 为内结晶器铜板水冷面中部增加 25 mm

厚加强筋前后,两工况炉后结晶器铜板径向变形及其对应三坐标测量结果图.三坐标测量采用精度 0.1 mm 的天远三维摄像测量系统,选定两工况炉后结晶器铜板表面的轴向直线区域,每 60 mm 放一标志点,测出标志点处与开炉前无变形结晶器实体模型的差值.增筋前,a",b"内结晶器铜板炉后最大径向位移量为 2.0 2.4 mm,增筋后,a",b"结晶器铜板炉后最大径向位移量为 1.0,1.1 mm,比增筋前减少 50% 以上.实测结果表明增筋可降低内结晶器铜板变形对脱模的阻碍,符合图 8 的模拟结果.

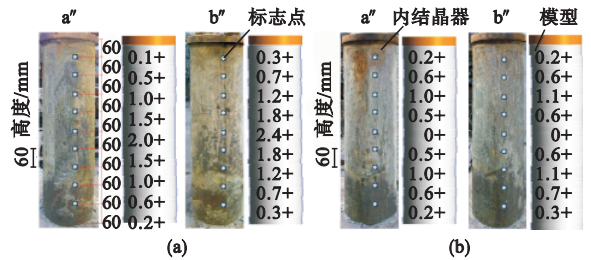


图 9 增筋前后内结晶器铜板径向变形及三坐标测量结果
Fig. 9 ESR inner mold radial deformation and CMM data before and after increase the stiffed plate
(a)—增筋前;(b)—增筋后.

表 1 列举了“空心环形件电渣熔铸”内结晶器铜板不加筋时多工况多参数模拟结果.

表 1 内结晶器铜板不加筋时多工况多参数模拟结果 Table 1 Simulation results of many cases and many parameters for mold copper plate without stiffened plate					
金属熔池深/mm	95	101	119	146	156
金属熔池最高温度/℃	1 490	1 495	1 500	1 510	1 518
铜板炉后径向位移量/mm	1.5	1.7	2.0	2.4	2.7

图 7~图 9 及表 1 表明,结晶器、自耗电极、渣料渣深、炉口电压相同时,一般金属熔池越深且温度越高,内结晶器铜板炉后径向位移量越大.

3 结 论

- 1) 利用 Solid69、Solid70 建立了常规工况、大电流工况“空心环形件电渣熔铸”物理模型,模拟的金属熔池深度及形状与硫印法实测结果吻合,模拟的内结晶器铜板炉后径向位移量与实测结果吻合.
- 2) 结晶器、自耗电极、渣料渣深、炉口电压相同时,一般金属熔池越浅,越容易获得良好组织;金属熔池越深且最高温度越高,内结晶器铜板炉后径向位移量越大.

3) “空心环形件电渣熔铸”过程内结晶器铜板中部最易变形,在该位置增加 25 mm 厚加强筋后,铜板炉后最大径向位移量可减小 50% 以上,易于脱模.

参考文献：

[1] Dong Y W ,Zheng L C ,Jiang Z H. Mathematical modeling of producing hollow ingot by electroslag casting with liquid metal[J]. *Ironmaking and Steelmaking* ,2013 ,40 (2) : 153 – 158.

[2] 陈旭,刘福斌,姜周华,等. T 型导电结晶器电渣重熔空心钢锭过程的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015 36 (6) 805 – 810.

(Chen Xu ,Liu Fu-bin ,Jiang Zhou-hua ,et al. Numerical simulation of electroslag remelting process of hollow ingot with T-shape current supplying mold [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* ,2015 ,36 (6) : 805 – 810.)

[3] Park J K ,Thomas B G ,Samarasekera I V ,et al. Thermal and mechanical behavior of copper moulds during thin slab casting (II) :mould crack formation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2002 ,33 (3) :437 – 449.

[4] Meug X ,Zhu M Y. Mechanism of explaining liquid friction and flux consumption during non-sinusoidal oscillation in slab continuous casting mould [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2011 ,50 (1) :45 – 53.

[5] Park J K ,Thomas B G ,Samarasekera I V ,et al. Thermal and mechanical behavior of copper moulds during thin slab casting (I) :plant trial and mathematical modelling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* ,2002 ,33 (3) : 425 – 436.

[6] 王安国,张廷安,豆志河. 电渣熔铸过程渣池电场温度场的 ANSYS 有限元分析[J]. 过程工程学报,2006 ,6 (suppl) : 105 – 109.

(Wang An-guo ,Zhang Ting-an ,Dou Zhi-he. ANSYS finite element analysis of the thermoelectric field of the slag pool for ESRC course [J]. *Chinese Journal of Process Engineering* 2006 6 (suppl) :105 – 109.)

[7] Shevtsov V L ,Zhadkevich M L ,Puzrin L G ,et al. Electroslag casting instead of forging in the rod [J]. *Advances in Special Electrometallurgy* 2003 (3) 2 – 6.

[8] Park J K ,Samarasekera I V ,Thomas B G ,et al. Analysis of thermal and mechanical behavior of copper mould during thin slab casting[C].//83rd Steelmaking Conference Proceedings. Warrendale P A :Iron and Steel Society 2000 9 – 21.

[9] 刘福斌,陈旭,姜周华,等. 电渣重熔过程的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2014 ,35 (4) :539 – 542.

(Liu Fu-bin ,Chen Xu ,Jiang Zhou-hua ,et al. Mathematical modeling of electroslag remelting process[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* ,2014 ,35 (4) : 539 – 542.)

[10] Krane M ,Fahrman J ,Yanke E ,et al. A comparison of predictions of transport phenomena in electroslag remelting to industrial data[C].//Proceedings of the 2011 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Nancy , 2011 65 – 72.