

大方坯结晶器圆角半径大小对铸坯角部热-机械状态影响

李 景 曾 智 张家泉

(北京科技大学生态与循环冶金教育部重点实验室,北京 100083)

摘 要 通过采用 Marc 软件建立包括结晶器与大方坯凝固坯壳之间动态热交换的热-力耦合模型,分析了结晶器圆角大小对铸坯和结晶器热-力学状态温度、应力和应变分布的影响。结果表明,对于 280 mm × 380 mm 断面铸坯,结晶器圆角半径应选 17.5 ~ 20 mm 为宜,结晶器圆角半径过小,铸坯偏离角部 10 ~ 20 mm 区域表面温度波动较大,不利于坯壳均匀生长;结晶器角部半径过大,结晶器与坯壳之间在角部摩擦严重,易导致坯壳龟裂。

关键词 大方坯连铸 结晶器圆角 数值模拟

Effect of Mold Corner Radius for Bloom Casting on Thermo-Mechanical Behavior of Local Shell

Li Jing, Zeng Zhi and Zhang Jiaquan

(Key Laboratory of Ecological and Recycle Metallurgy of Ministry of Education, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract A coupled thermal-mechanical model including dynamic heat exchange between mold and bloom solidified shell is established by using Marc software, and the effect of radius of mold corner on thermo-mechanical behavior of bloom local shell and mold including temperature, stress and strain distribution has been analyzed. Results show that for bloom with cross section 280 mm × 380 mm the available radius of mold corner is 17.5 ~ 20 mm, as the radius of mold corner is lower than that value the temperature gradient in local zone with 10 ~ 20 mm distance from bloom corner is larger that is unfavorable to homogeneously develop bloom shell; as the radius of mold corner is larger than that value, the greater contact normal force between mold and bloom shell leads to starlike cracks on strand.

Material Index Bloom Casting, Mold Corner, Numerical Simulation

方坯连铸过程中,结晶器角部因二维冷却,导出热量大于面部,使得角部与面部初始凝固区域周向冷却不均,极易导致铸坯产生偏离角部纵向凹陷、角部纵裂等缺陷。

方坯角部及偏离角部裂纹与结晶器圆角半径大小不合适及铜管磨损变形有关^[1]。相关研究表明:(1)结晶器圆角半径大小取1/10断面边长时能有效减少方坯角部纵裂的产生^[2];(2)3 ~ 4 mm 的较小结晶器圆角半径大小能有效减少角部纵裂,但是随之将产生更多偏离角部纵裂^[3];(3)当结晶器圆角半径从 4 mm 增加到 15 mm 时,气隙从角部向中心扩展并增大,导致更大的温度不均匀性^[3];(4)在 185 mm × 185 mm 规格方坯连铸中,结晶器角部采用 40 mm 圆角半径有利于消除偏离角部纵裂^[4];(5)结晶器角部采用适当大的圆角半径,可改善铸坯初始凝固区域周向热流密度的均匀性^[5]。

本文采用大型商业有限元软件 Marc 建立了包括结晶器与凝固坯壳之间动态热交换的综合热状态分析的热-力耦合模型,通过调整结晶器圆角半径大小,研究其变化对铸坯温度场与应力场的影响。取

规格为 280 mm × 380 mm 的方坯1/4对称面作为研究对象,考察结晶器圆角内弧半径 r 从 7.5 mm 以等差 2.5 mm 变化到 25 mm 时铸坯角部温度场与热变形状态。

1 结晶器及其内部钢水凝固传热模型的建立

1.1 模型基本假设

本模型采用运动坐标系的二维切片法,即沿铸坯横断面方向,截取同时包括铸坯和结晶器铜管在内的二维薄片,建立非稳态模型,研究该薄片自弯月面开始,以拉速向下移动过程中所经历的热过程。模型假设如下:

(1)浇铸温度为中间包内钢水温度且保持不变,拉速和钢水液面高度视为定值;(2)针对所取切片,近似认为大方坯结晶器内温度场具有几何上的对称性,可取1/4截面作为计算域;(3)假设保护渣能填充坯壳与铜管之间的气隙,且液面保护渣能保持一定的绝热厚度;(4)与拉速相比,忽略拉坯方向的纵向传热;(5)由于结晶器内部铸坯变形量很小,仅考虑材料非线性,不考虑几何非线性;(6)坯壳采用弹塑性本构模型,结晶器铜管采用刚性体传热

模型。

1.2 模型计算域及基本控制方程

依据对称性所取的 1/4 截面作为计算域, 见图 1, 其中同时包括铸坯和结晶器铜管, 二者构成一个接触对。

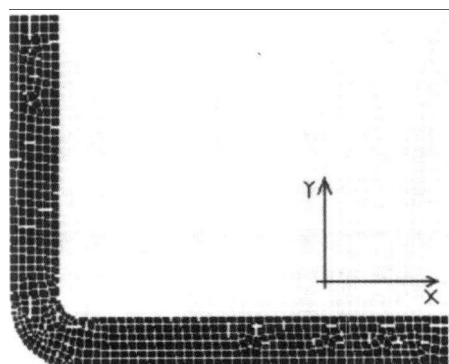


图 1 结晶器横截面示意图
Fig. 1 Schematic of mold cross section

模型采用带热源的二维热传导微分方程, 其具体形式如下^[6,7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: 内部热源生成的热量 $q = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$, L - 钢的凝固潜热; k - 钢的导热系数, 与钢水温度有关, 模型中铸坯导热系数^[8]采用 $k(T) = 18.4 + 9.6 \times 10^{-3} \cdot T$ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 结晶器区域铸坯液相穴内, 由于注流动能或电磁搅拌引起的钢水强制对流运动对传热的贡献, 在液相线温度以上引用等效导热系数, 其值比静止钢液导热系数放大 m 倍, 即 $k_{eff} = m \cdot k(T)$, 其中 m 为经验常数, 取 $m = 5$; 对于固液两相区, 树枝晶削弱了钢水的对流运动, 所以两相区的等效导热系数应介于固相和液相之间, $k_{eff} = k(T) \cdot [1 + (m - 1)(1 - f_s)^2]$; ρ - 铸坯密度, 取常数 7200 kg/m^3 ; 铸坯固相区比热容 $C_s = 550 + 9.52 \times 10^{-2} \cdot T$ $J/(kg \cdot ^\circ C)$, 液相区比热容取常值 $842 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ C)$, 两相区等效比热容 $C_{eff} = f_s \cdot C_s + (1 - f_s) \cdot C_l - L_f \frac{\partial f_s}{\partial T}$ 。固相分率 f_s 的选取依据两相区溶质微观偏析模型的计算结果^[9,10]。

1.3 热力学边界条件

(1) 对称边界。根据对称性, 垂直于对称轴方向上热流为 0。

(2) 结晶器铜管外表面。结晶器铜管冷面与冷

却水进行对流传热, 其热流密度可表示为:

$$Q = h_w \cdot (T_{M-out} - T_w) \quad (2)$$

式中: Q - 热流量 $[kJ \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}]$; T_w - 结晶器冷却水温度/ $^\circ C$; T_{M-out} - 铜管外表面温度/ $^\circ C$; h_w - 铜管与冷却水界面的对流传热系数, 可根据下面无量纲方程来确定^[11]:

$$\frac{h_w \cdot D_H}{k_w} = 0.023 \cdot \left(\frac{\rho_w u_w D_H}{\mu_w} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{p_w} u_w}{K_w} \right)^{0.4} \quad (3)$$

式中: D_H , k_w , ρ_w , u_w , μ_w , C_{p_w} - 分别是水缝宽度、冷却水的导热系数、密度、流速、粘度系数和比热容。

(3) 铸坯与结晶器铜管接触界面。模型中铸坯为弹塑性本构模型, 结晶器铜管为刚性传热模型, 冷却过程在铸坯的凝固收缩、钢水静压力和结晶器锥度的共同作用下(其中钢水静压力和结晶器锥度分别通过 Marc 子程序 FORCEM 和 Motion 来施加), 结晶器铜管与铸坯之间存在接触和分离的过程。在这一过程中, 假设保护渣完全填充气隙。一般认为只有当铸坯与结晶器壁间的气隙宽度达到 10^{-2} mm 数量级时才会对界面热阻产生显著影响, 因此本模型接触容限取为 0.01 mm ^[2]。

结晶器内坯壳与铜管界面热流可用下式来表示:

$$q = h_f \cdot (T_b - T_{M-in}) \quad (4)$$

式中: q - 铸坯和结晶器铜管界面热流 $(W \cdot m^{-2})$; T_b - 铸坯表面温度/ $^\circ C$; T_{M-in} - 铜管内表面温度/ $^\circ C$; h_f - 界面传热系数 $[W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}]$ 。

对于界面传热系数 h_f , 通过用 Fortran 语言编制模型子程序来确定每一个增量步铸坯与结晶器铜管的接触状态, 并最终确定界面热阻, 包括铜板与保护渣的界面热阻、保护渣的导热热阻、坯壳与渣膜间的界面热阻以及可穿透渣层的辐射热阻。

界面传热系数 h_f 与界面总热阻互成倒数关系:

$$h_f = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} + h_{rad} \quad (5)$$

式中: h_{rad} - 坯壳和铜管之间的可穿透保护渣的辐射传热系数, 由式(6)确定^[5]; R_1 - 铜管热面与保护渣间的接触热阻, 式(7); R_2 - 保护渣热阻, 式(8); R_3 - 坯壳表面与保护渣间的接触热阻, 式(9)。

$$h_{rad} = \sigma_{SB} \cdot \varepsilon \cdot (T_b + T_{M-in})(T_b^2 + T_{M-in}^2) \quad (6)$$

式中: σ_{SB} - 斯蒂芬-波尔兹曼常数, 取 5.67×10^{-8}

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ε - 辐射系数。

$$R_1 = \frac{1}{h_{mf}} \quad (7)$$

式中: h_{mf} - 铜管热面的对流传热系数, 本模型中取 $3\,000\ W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

$$R_2 = \frac{d_{flux}}{K_{flux}} \quad (8)$$

式中: K_{flux} - 保护渣导热系数, 本模型中 $1.0\ W/(m \cdot ^\circ C)$; d_{flux} - 保护渣厚度。

$$R_3 = \frac{1}{h_{bf}} \quad (9)$$

式中: h_{bf} - 坯壳表面处的对流传热系数, 所选保护渣界面传热系数在不同温度下取值如表 1 所示。

2 分析与讨论

本文选用铜管的材质为铬锆铜, 当前生产中

表 1 温度对铸坯-保护渣界面传热系数的影响
Table 1 Effect of temperature on heat transfer coefficient at strand-fluxes interface

温度/ $^\circ C$	传热系数/ $[W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}]$
液相线温度 T_L	20 000
固相线温度 T_S	6 000
保护渣软化温度 1 150	2 000
保护渣结晶温度 1 030	1 000

280 mm × 380 mm 断面大方坯连铸结晶器角部内弧半径大小为 10 mm, 假设铜管等厚为 22.5 mm, 计算钢种以 Q235 为例, 主要工艺和设备参数见表 2。

表 2 浇铸工艺和结晶器结构参数
Table 2 Casting and mold structure parameters

浇铸工艺	结晶器铜管
铸坯断面 280 mm × 380 mm	长度 850 mm
拉坯速度 0.75 m/min	壁厚 22.5 mm
浇铸温度 1 537 $^\circ C$	上口尺寸 (291.6 ± 0.1) mm × (391.6 ± 0.1) mm
冷却水进出水平均温度 28 $^\circ C$	下口尺寸 (288.6 ± 0.1) mm × (387.6 ± 0.1) mm

图 2 中 (a) ~ (h) 分别为结晶器圆角半径从 7.5 mm 变化到 25 mm 时, 结晶器内 $t = 10 \sim 60\ s$ 六个不同时刻坯壳表面角部附近的温度分布图, 距离为正值表示以角部为中心, 沿 x 轴分布的点, 距离为负值表示沿 y 轴分布的点。从图 2 可见, 当结晶器圆角半径小于 17.5 mm 时, 铸坯角部附近表面温度波动较大, 尤其偏离角部 10 ~ 20 mm 较为严重, 不利于坯壳均匀生长, 此处正是大方坯偏离角裂纹易发生区域。而结晶器圆角半径大于 17.5 mm 时, 铸坯表面温度从角部向铸坯中部过渡平缓, 不会出现较大温度梯度。

但通过比较铜管与铸坯角部之间接触应力可

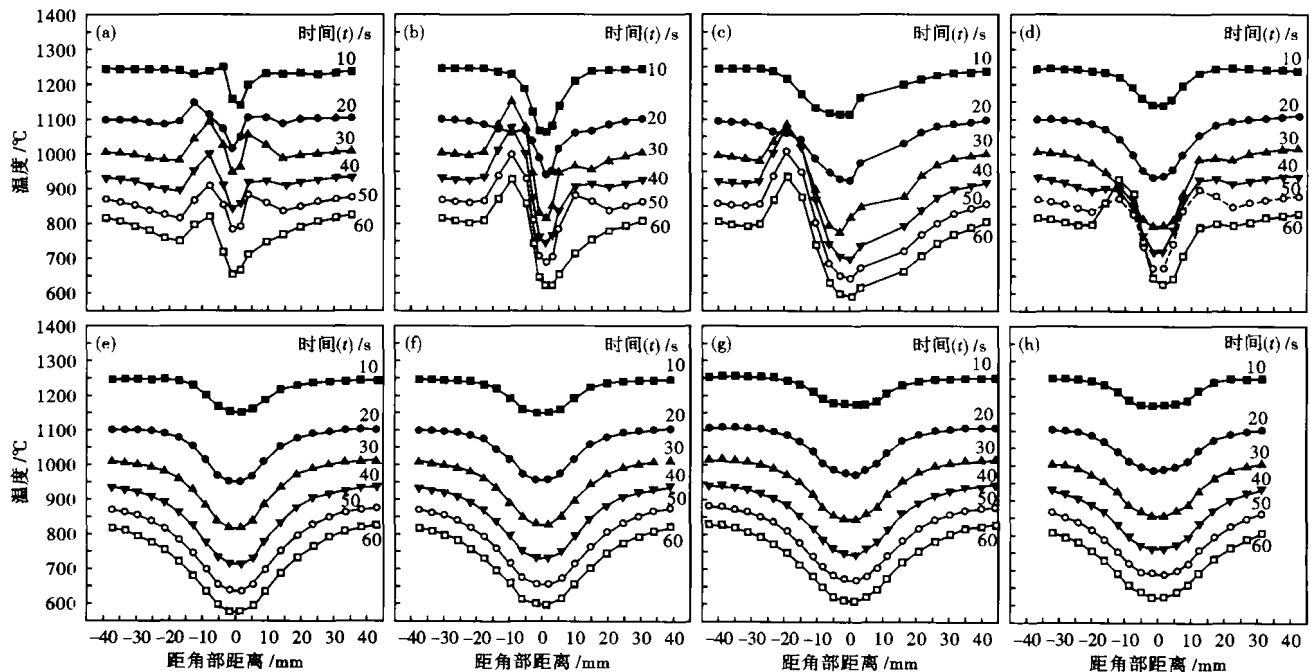


图 2 不同圆角半径结晶器内坯壳角部表面温度分布图: 半径/mm- (a) 7.5; (b) 10; (c) 12.5; (d) 15; (e) 17.5; (f) 20; (g) 22.5; (h) 25
Fig. 2 Surface temperature profiles of bloom corner shell in mold with different corner radius /mm- (a) 7.5; (b) 10; (c) 12.5; (d) 15; (e) 17.5; (f) 20; (g) 22.5 and (h) 25

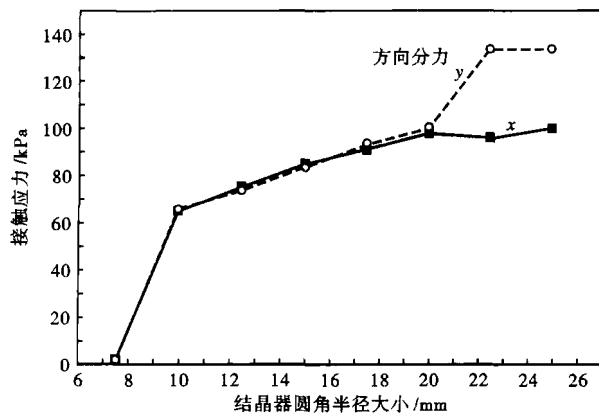


图 3 结晶器圆角半径对结晶器出口处铜管与铸坯角部最大接触力的影响

Fig. 3 Effect of mold corner radius on maximum contact normal force between bloom corner and copper tube at mold exit

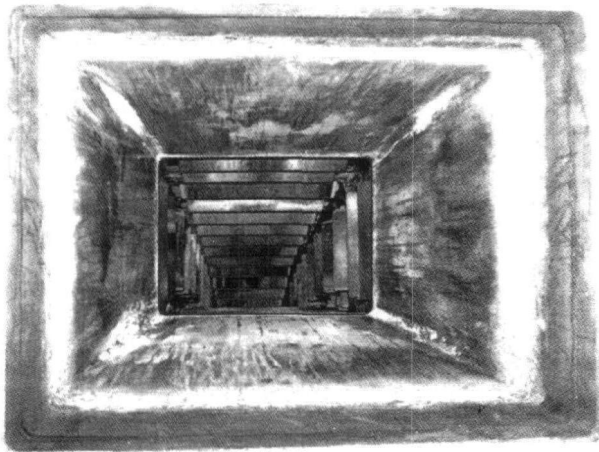


图 4 结晶器铜管角部磨损图

Fig. 4 Photo of corner wearing of mold copper tube

得, 结晶器角部半径并非越大越好。图 3 为结晶器圆角半径从 7.5 mm 变化到 25 mm 时, 结晶器出口处铜管角部与坯壳之间最大接触力在 X 和 Y 方向上分力大小, 可看出随着结晶器角部半径增大, 铜管与坯壳之间在角部的接触力呈上升趋势, 而铜管与坯壳之间接触力应越小越好, 否则造成结晶器铜管角部的摩擦。

结晶器铜管角部的摩擦严重时可磨损掉镀层, 图 4 为实拍钢厂结晶器角部磨损状况。结晶器内凝壳与铜管内壁摩擦较大时, 易使铜磨削下来渗入铸坯表层, 尤其沿晶界优先扩散渗入, 导致铸坯表层的热态强度恶化而出现龟裂。

3 结论

(1) 对于 280 mm × 380 mm 铸坯结晶器, 当结晶器圆角半径小于 17.5 mm 时, 铸坯角部附近表面温度波动较大, 尤其偏离角部 10 ~ 20 mm 较严重, 是大方坯偏离角裂纹易发生区域; 而结晶器圆角半径大于 17.5 mm 时, 铸坯表面温度从角部向铸坯中部过渡平缓, 无明显波动。

(2) 随着结晶器角部半径增大, 铜管与坯壳之间在角部的接触力呈上升趋势, 结晶器圆角半径过大时, 结晶器内的凝壳与铜管内壁的摩擦可磨掉结晶器镀层, 铜渗入铸坯表层, 尤其沿晶界优先扩散渗入, 使铸坯表层的热态强度恶化而导致龟裂。

(3) 对于 280 mm × 380 mm 断面铸坯, 在所选的连铸工况条件下, 结晶器圆角内弧半径大小选 17.5 ~ 20 mm 有利于避免角部及偏离角部裂纹。

参考文献

- 1 Samarasekera I V, Brimacombe J K. Influence of Mold Behavior on the Production of Continuously Cast Steel Billets. *Metallurgical Transactions B, Process Metallurgy*, 1982, 13B(1): 105
- 2 Aketa Y, Ushijima K. Study on the Mechanism of the Occurrence and the Prevention of Cracks in Continuously Cast Billets of Steel. *Testuto-Hagane Overseas*, 1962, 2(4): 334
- 3 Park J K, Thomas B G, Samarasekera I V. Analysis of Thermomechanical Behaviour in Billet Casting with Different Mould Corner Radii. *Ironmaking and Steelmaking*, 2002, 29(5): 359
- 4 Ridolfi M R, Gotti A, Laraudogoitia J J, et al. Optimisation of Geometry of 185mm × 185mm Square Billet Mould of Sidenor Continuous Casting Machine. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004, 31(5): 371
- 5 程常桂, 帅静, 廖广府, 等. 方坯结晶器角部弧形区热流密度测定. *过程工程学报*, 2009, 9(S1): 107
- 6 孙立根, 崔立新, 张家泉. U71Mn 大方坯凝固坯壳与结晶器铜管温度场的数值模拟. *系统仿真学报*, 2009, 21(7): 1862
- 7 张家泉, 崔立新, 陈志平, 等. 板坯连铸结晶器内温度/应力场耦合模型. *北京科技大学学报*, 2004, 26(4): 373
- 8 Kyung-hyun Kim, Kyu Hwan oh, Dong Nyung Lee. Mechanical Behavior of Carbon Steels during Continuous Casting. *Scripta Materialia*, 1996, 34(2): 301
- 9 Tooru Matsumiya, Hiroyuki Kajioka, Shozo Mizoguchi, Yoshiyuki Ueshima and Hisao Esaka; Mathematical Analysis of Segregations in Continuously-cast Slabs. *Transactions ISIJ*, 1984, 24: 873
- 10 Yoshiyuki Ueshima, Shozo Mizoguchi, Tooru Matsumiya, et al. Analysis of Solute Distribution in Dendrites of Carbon Steel with δ/γ Transformation during Solidification. *Metallurgical Transactions B*, 1986, 17B(12): 845
- 11 Acadams W H. *Heat Transmission*. New York, USA: Mc Graw-Hill, 1954

李景(1986-), 女, 硕士, 2007年北京科技大学毕业, 冶金工程设计。

收稿日期: 2011-06-01