

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170396

方坯连铸结晶器铜管温度场分析

王泽鹏^{1,2}, 肖鹏程^{1,2}, 朱立光^{1,2}, 刘增勋^{1,2}, 张仕骏^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063000; 2. 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心, 河北 唐山 063000)

摘 要: 基于结晶器传热特点建立方坯连铸结晶器三维瞬态传热模型, 利用节点温度传递模拟铸坯运行, 采用 ANSYS 软件进行模型分析, 经过充分迭代得到结晶器三维稳态温度场, 并与传统二维铸坯传热模型进行对比。通过动态边界条件加载技术实现铜壁冷面水垢厚度的连续变化, 分析了水垢对结晶器铜壁温度分布的影响。结果表明, 在结晶器顶部区域, 三维传热模型分析结果与铜壁温度分布规律基本吻合, 弯月面下 50 mm 附近铜壁温度达到高峰, 弯月面处水垢厚度由 0.1 增加到 0.5 mm 时, 铜壁最高温度由 187 升高至 318 °C, 铜壁高温区域扩大, 铜壁变形程度增加。

关键词: 三维传热; 结晶器; 有限元分析; 水垢; 方坯

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)03-0038-06

Temperature analysis for mold copper tube of billet continuous casting

WANG Ze-peng^{1,2}, XIAO Peng-cheng^{1,2}, ZHU Li-guang^{1,2},
LIU Zeng-xun^{1,2}, ZHANG Shi-jun^{1,2}

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China; 2. Hebei Engineering Research Center of High Quality Steel Continuous Casting, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: Based on the characteristics of mold heat transfer, a three-dimensional transient heat transfer model of billet continuous casting mold is established. Casting process of the billet is simulated by a node temperature transfer method. The ANSYS finite element software is used to analyze the model. The three-dimensional steady-state temperature field of the billet mold is obtained by sufficient iteration and compared with the traditional two-dimensional model. The influence of scale on mold temperature distribution has been analyzed through the continuous change of the scale loading technique of dynamic boundary conditions. The result is detailed as follows. The analyzed result obtained by three-dimensional heat transfer model in the top zone of the mold is basically coincident with copper wall temperature distribution rule. The copper wall temperature reached its peak at 50 mm near the meniscus. The highest temperature of copper wall would be increased from 187 to 318 °C when meniscus scale thickness added from 0.1 to 0.5 mm. In this case, high temperature region of copper wall would be expanded so that copper wall deformation degree could be increased.

Key words: 3-D heat transfer; continuous casting mold; finite element analysis; scale; billet

经典二维结晶器传热模型^[1-2]采用铸坯与铜壁切片同时运行的方法模拟拉坯过程, 未考虑在生产中结晶器铜壁温度场已经处于稳态, 传统三维模型中, 铜壁热面采用人为设定的热流分布为边界条件^[3-4], 无法体现出铜壁不同区域热流差异对铜壁温度的影响。目前, 有关铜壁冷面水垢对结晶器传热影响

的研究较少, 即使考虑了水垢^[4]的影响, 也往往忽略了水垢厚度的变化。综合考虑结晶器内铸坯运动与结晶器铜壁的传热条件, 建立方坯连铸结晶器三维瞬态传热模型^[5-6], 利用 ANSYS 软件实现边界条件的动态加载, 以体现铜壁冷面水垢分布变化对结晶器传热的影响。

基金项目: 河北省教育厅科研资助项目(ZD2014012); 河北省自然科学基金资助项目(E2015209207)

作者简介: 王泽鹏(1991—), 男, 硕士生; **E-mail:** wangzepeng91@163.com; **收稿日期:** 2017-08-01

通讯作者: 刘增勋(1966—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** liuzengxun@ncst.edu.cn

1 模型建立

1.1 模型的简化与假设

根据连铸结晶器内钢水凝固和结晶器铜管传热特点,结合前人研究经验^[7-10],对模型进行简化:(1)连铸浇注过程处于稳定状态;(2)忽略结晶器振动对传热的影响;(3)采用有效导热系数模拟两相区和液芯对流影响,铸坯传热简化为导热过程;(4)铜管冷面与冷却水换热系数保持恒定;(5)水垢厚度沿拉坯方向均匀减薄。

1.2 数学模型

根据傅里叶定律建立结晶器三维非稳态导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + G \quad (1)$$

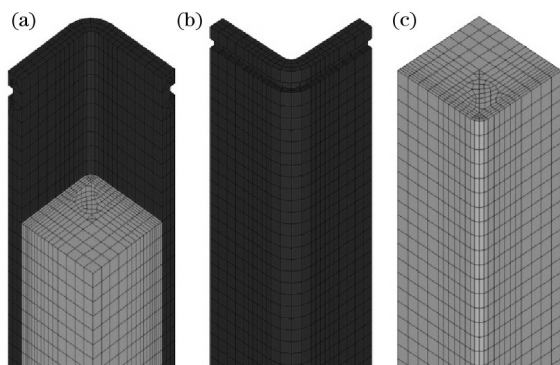
为了与本次研究建立的三维模型进行比较,忽略结晶器纵向导热,建立结晶器二维非稳态导热方程为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) \right] + G \quad (2)$$

式中: t 为温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; τ 为时间, s ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; G 为内热源, W/m^3 。

1.3 有限元模型

以 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 方坯连铸结晶器为研究对象,根据铸坯和结晶器铜管导热的对称性,同时取 1/4 铸坯与结晶器铜管建立模型。以实际管式结晶器结构为模型参数:铜管长度 900 mm ,厚度 14 mm ,圆角半径 8 mm ,密封槽距铜管上口 10 mm ,宽 8 mm ,深 4 mm 。利用 ANSYS 软件中的 SOLID70 三维 8 节点单元,根据结晶器内铸坯与结晶器铜管的传热特点对模型进行网格划分。三维有限元模型示意图如图 1 所示。



(a) 整体; (b) 结晶器铜管; (c) 铸坯。

图 1 三维有限元模型

Fig. 1 3-D finite element model

利用传统方法建立结晶器二维瞬态传热模型,与研究中所用三维传热模型进行对比。二维传热模型忽略了结晶器纵向传热,利用铸坯与结晶器同时运行的方法模拟拉坯过程。根据结晶器传热的对称性,为了方便与三维传热分析结果进行对比,同样各取 1/4 横截面建立二维传热模型。利用 ANSYS 软件中 PLANE55 二维 4 节点单元划分网格,设定二维传热模型网格与三维传热模型横截面网格相同。二维有限元模型示意图如图 2 所示。

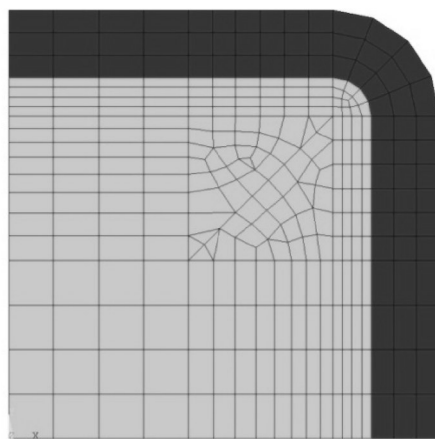


图 2 二维有限元模型

Fig. 2 2-D finite element model

2 初始条件和边界条件

结晶器内钢液初始温度为浇注温度,结晶器铜管温度场处于稳态。分析过程中,钢液面采用第一类边界条件,温度为浇注温度。铸坯及结晶器铜管对称面采用第二类边界条件,热流密度为 0。铜管冷面与冷却水界面的对流传热系数 h_w 通过式(3)^[11]进行计算。

$$h_w = \frac{0.023\lambda}{D} \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c\mu}{\lambda} \right)^{0.4} \quad (3)$$

式中: h_w 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; λ 为冷却水导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; D 为冷却水缝的当量直径, m ; ρ 为冷却水密度, kg/m^3 ; v 为水缝内冷却水流速, m/s ; μ 为冷却水动力学黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在结晶器与坯壳接触面上施加界面热阻,描述凝固坯壳与结晶器铜管间传热状况。假设结晶器与坯壳之间气隙内充满保护渣,坯壳与铜壁之间的热阻由 3 部分组成,即渣膜热阻、渣膜与坯壳接触热阻、渣膜与铜壁接触热阻。渣膜与铜壁及坯壳的接触热阻值取决于接触状态,渣膜热阻与结构及厚度有关,目前均无法得到准确数值。在模型分析中采用结晶器热流密度逐渐趋近的方法,确定结晶器与

坯壳之间的界面热阻。根据模型分析经验初步选定界面热阻值进行传热分析,通过结晶器平均热流密度的分析值与实际情况对比,反复修正界面热阻值,使数值分析结果与连铸实际情况趋于吻合。

图3所示为某钢厂150 mm×150 mm结晶器浇注4 350 t铸坯后铜管冷面结垢形貌,铜管冷面上部结垢,水垢厚度自上向下逐渐减薄。铜管冷面与水垢结合牢固,忽略水垢与铜壁之间的接触热阻,铜壁结垢处与冷却水之间的综合传热系数 h_w^* 采用式(4)进行描述。

$$h_w^* = \frac{1}{R_w + R_{scale}} \quad (4)$$

式中: h_w^* 为综合传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; R_w 为冷却水与水垢表面之间的接触热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; R_{scale} 为水垢热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ 。



图3 结晶器铜管结垢

Fig. 3 Mold copper tube scale

3 计算方法及结果分析

根据钢液凝固传热与连铸生产的特点,采用铸坯节点温度传递方法^[12]模拟拉坯过程,利用铜管节点温度自传递实现铜管固定,应用两种单元之间的接触热阻来描述结晶器与坯壳间界面热阻。钢液面固定为浇注温度,在一时间步长内同时分析钢液凝固传热、坯壳与结晶器铜管之间的换热和结晶器铜管导热。采用给定边界条件进行传热迭代运算,当分析达到足够时间步数后整体模型温度场达到稳态。从稳态温度场得到结晶器热面的平均热流密度,与结晶器实际平均热流进行对比,反复修正模型界面热阻边界条件,使数值分析结果与连铸实际情况逐渐吻合。

针对实际生产中不同工艺参数,对方坯连铸结晶器内钢液与结晶器铜管的传热规律进行分析,连

铸工艺参数见表1。

表1 连铸结晶器的工艺参数

Table 1 Process parameters of continuous casting mold

项目	数值
结晶器铜管材质	磷脱氧铜(TP2)
结晶器铜管长度/mm	900
圆角半径/mm	8
结晶器铜管厚度/mm	14
水缝宽度/mm	4
冷却水流速/($m \cdot s^{-1}$)	10
浇注钢种	Q235
冷却水温度/ $^\circ C$	35
浇注温度/ $^\circ C$	1 540
拉速/($m \cdot min^{-1}$)	2.5
钢液面距铜管上缘距离/mm	70
弯月面处水垢厚度/mm	0.1~0.5

3.1 三维模型与二维模型的对比

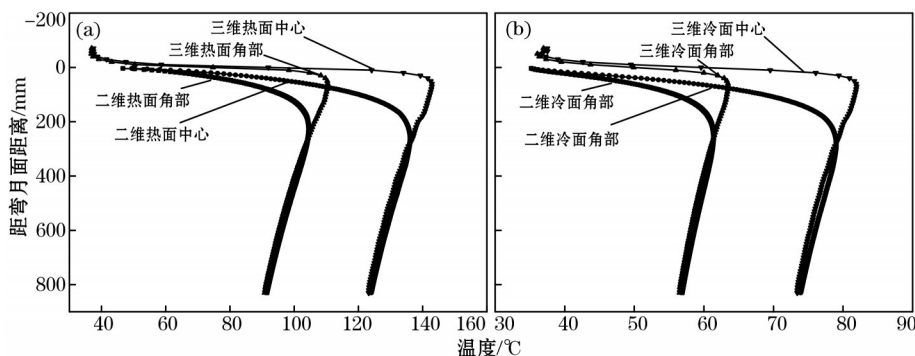
在冷却水流速为10 m/s、拉速为2.5 m/min及结晶器表面无水垢的工艺条件下,利用建立的两种传热模型对结晶器和铸坯温度场进行分析。铜管热面和冷面典型位置处的温度变化规律如图4所示(其中纵坐标0表示弯月面位置)。由图可知,在弯月面处,利用三维传热模型和二维传热模型分析得到的铜壁冷面温度分别为37和35 $^\circ C$ 。在三维传热模型中,弯月面以上铜管同样受到冷却水冷却,但未与钢液接触,铜壁温度接近冷却水温度。弯月面区域铜壁热量向上部传递,导致该区域铜管温度保持较低。在二维传热模型中,弯月面处铜壁温度以冷却水温度为初始温度(35 $^\circ C$),因此,该位置处铜壁温度为冷却水温度。

由于模型自身限制,二维传热模型无法得到弯月面以上区域铜管温度。从三维传热模型分析结果中可以看出,铜管厚度方向温度梯度大,传热以铜壁厚度方向为主,弯月面以上铜管未与钢液接触,铜管顶部区域温度接近冷却水温度。铜壁最低温度为36 $^\circ C$,出现在铜管上部密封槽处。密封槽区域铜壁温度低,确保了密封圈安全工作,有效防止了结晶器渗水。

二维传热模型分析结果显示,铜管温度最高点出现在弯月面下250 mm区域,与结晶器变形和铜壁冷面结垢位置存在较大差异。在连铸浇注过程达到稳定时,如果不考虑结晶器振动影响,结晶器铜管温度场已经处于稳定状态。从二维传热模型的分析原理来看,在弯月面处铜壁常温为初始温

度,铜壁最高温度值是模型传热分析到一定时间后的变化结果,这与实际铜壁处于稳态的事实不一致。在三维传热模型中,铜管温度最高点出现在弯

月面下 50 mm 处,这与蔡开科教授^[13]阐述的分布规律基本一致。可以看出,三维传热模型能够更准确地描述结晶器实际生产状态。



(a) 铜管热面温度; (b) 铜管冷面温度。

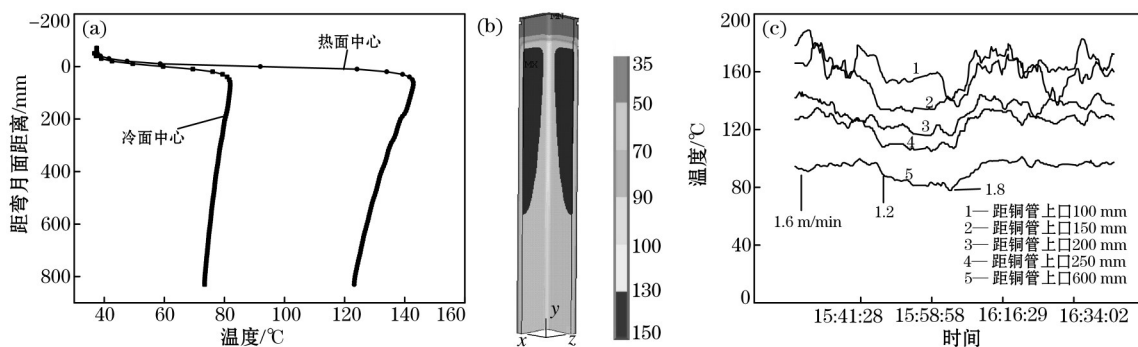
图 4 不同模型中结晶器铜管纵向温度分布

Fig. 4 Variation of longitudinal temperature of mold tube in different models

在结晶器中下部,两种传热模型得到的铜壁温度分析结果基本一致。铜壁下部经过一段时间传热后,上部铜壁温度场的影响不断减弱,同时,铜的导热能力强,结晶器传热以垂直拉坯方向为主,铜壁传热逐渐接近二维传热状态。

利用三维传热模型分析,在冷却水流速为 10 m/s、拉速为 2.5 m/min 和结晶器表面无水垢的条件下,得到铜管热面典型位置温度变化规律如图 5(a)和 (b)所示。由图可知,由三维传热模型分析得到的

铜管温度最高点位于弯月面下 50 mm,弯月面下 50~100 mm 区域铜管温度较高。图 5(c)所示为淮钢 150 mm×150 mm 方坯连铸结晶器铜管温度分布的实测结果^[14]。测试试验中,浸入水口下端距结晶器上口 100 mm,通常小方坯水口插入深度约为 50 mm,即浇钢时结晶器液面距离结晶器上口约为 50 mm。试验结果表明,铜壁温度最高点出现在距结晶器上口 100 mm 区域,即弯月面下 50 mm 附近。



(a) 铜管热面中心温度变化; (b) 结晶器铜管热面温度分布; (c) 结晶器实测温度。

图 5 结晶器铜管温度变化

Fig. 5 Temperature change of mold copper tube

由于连铸工艺参数及浇注钢种不同,因此数值分析结果与实测数值存在一定差异,但两者得到的铜管温度分布规律基本一致。Q235 冶炼内控标准要求碳质量分数为 0.13%~0.18%,钢种凝固特性与典型包晶钢相似。60Si2Mn 等中高碳钢种两相区宽、枝晶间偏析大,有效坯壳厚度薄,坯壳表面与结晶器壁接触更为均匀和紧密,与 Q235 相比,该钢种结晶器热流密度和铜管温度明显较高。同时,建立

模型时进行了一些假设,模拟结果无法体现出液面波动和结晶器振动影响。

3.2 水垢厚度对结晶器铜管温度场的影响

图 3 所示为某厂铜管冷面结垢的状态。铜管冷面上部结垢厚度最大,随着离弯月面距离的增加,水垢厚度逐渐减薄,角部区域结垢较少。在模型分析中,按照水垢分布实际情况进行简化。水垢主要分布在结晶器铜管上部面部中心区域,模型忽略了角部和

距弯月面 300 mm 以后面部中心区域水垢的影响。从弯月面位置至 300 mm 处,水垢厚度均匀减薄。

水垢导热系数取 $2.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ [15], 根据式(3)和式(4)计算得到水速为 10 m/s 时结晶器与冷却水之间的等效传热系数,如图 6 所示。铜管上部结垢

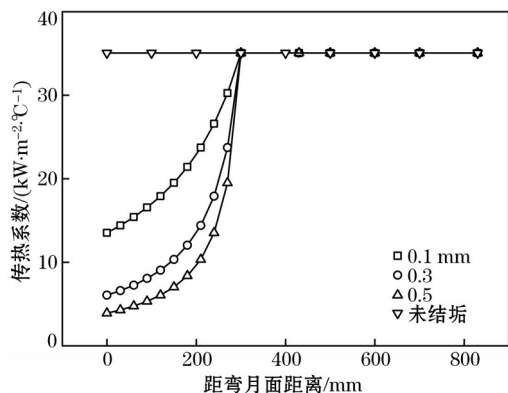
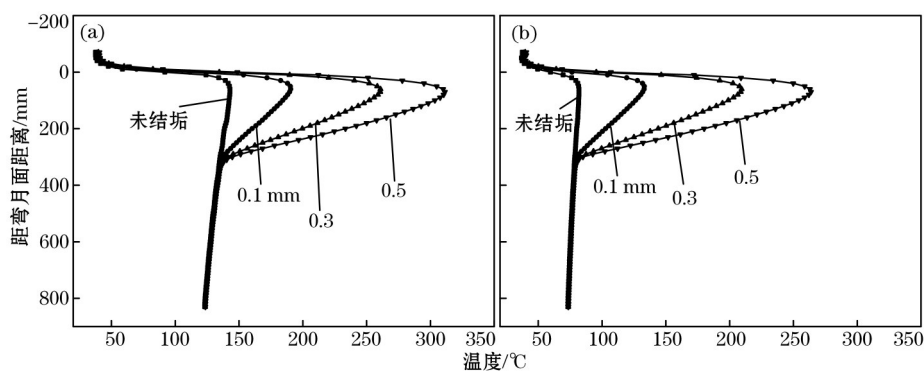


图 6 不同水垢分布条件下铜管冷面与冷却水间传热系数

Fig. 6 Heat transfer coefficient between copper surface and cooling water under different scale distribution conditions



(a) 铜管热面中心温度变化; (b) 铜管冷面中心温度变化; (c) 水垢厚度 0.5 mm 时铜管冷面; (d) 水垢厚度 0.5 mm 时铜管热面。

图 7 不同水垢分布条件下结晶器铜管纵向温度变化

Fig. 7 Longitudinal temperature variation of mold copper tube under different scale distribution

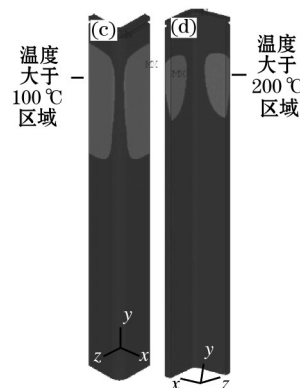
在结晶器冷面出现结垢后,弯月面区域的铜壁温度将大幅度上升。在弯月面处水垢厚度为 0.1 mm 时,冷面最高温度已经达到 127°C ,水缝内冷却水将产生沸腾。与高温铜壁接触区水沸腾加剧了水垢在铜壁析出及附着,使传热热阻增加,铜管温度将进一步上升。当弯月面处水垢厚度增加到 0.3 和 0.5 mm,铜管最高温度出现的位置无明显变化,而最高温度上升到 261 和 312°C ,超过了磷脱氧铜再结晶温度。

同时,随着结垢厚度的增加,高温区域也逐渐扩大。当弯月面处水垢厚度达到 0.5 mm 时,由图 7(c)可以看出,铜管冷面高于 100°C 的区域与铜管实际结垢区域形状基本相符,由图 7(d)可知,弯月面

区,随着离开弯月面距离的增加,水垢厚度逐渐减薄,传热系数不断升高。在铜管冷面无水垢时,铜管冷面与冷却水之间的对流传热系数保持恒定值 $3.5 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

利用建立的三维传热模型,分析弯月面处水垢厚度变化对结晶器温度场的影响。在拉速为 2.5 m/min、弯月面处水垢厚度为 0~0.5 mm 时,铜管表面典型区域温度变化规律如图 7 所示。由图 7(a)和(b)可以看出,在结晶器结垢前后,铜管温度最高点均在弯月面下 50 mm 热面处。

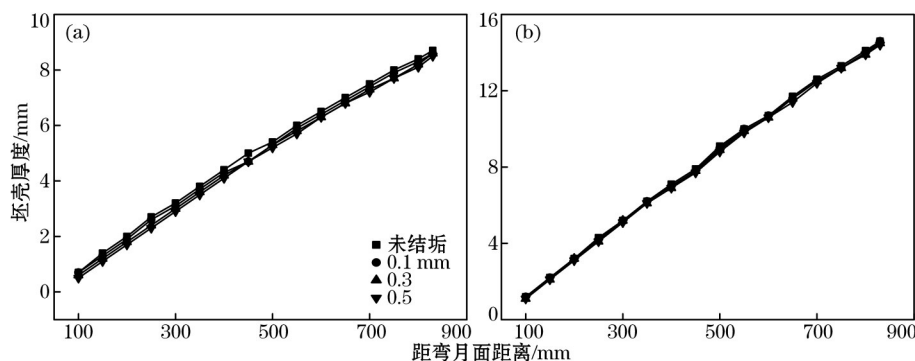
通常采用再结晶温度描述材料抵抗高温变形的能力,而测试时间对材料再结晶温度测定值存在较大的影响。在生产过程中,结晶器铜壁处于持续长时间工作状态,铜管再结晶温度将有所降低,不含银合金时磷脱氧铜再结晶温度约为 200°C [16]。结晶器未结垢时,铜壁最高温度为 143°C ,铜壁整体温度低于磷脱氧铜(TP2)的再结晶温度,铜管不会产生热塑性变形,结晶器可以长时间稳定工作。



以下 20~200 mm 区域,铜壁面部中心区域温度均高于 200°C ,这将导致铜管产生塑性变形。

在拉速为 2.5 m/min 时,利用建立的三维传热模型分析弯月面处水垢厚度为 0~0.5 mm 时结晶器内铸坯的凝固规律,结果如图 8 所示。由图可知,结晶器冷面无水垢时,铸坯在结晶器下口处,面部中心坯壳厚度为 8.7 mm,水垢厚度增加到 0.5 mm,出结晶器时面部中心坯壳厚度减薄至 8.5 mm,即水垢厚度对钢液凝固影响不显著。无水垢时从冷却水至坯壳表面的系统热阻为 $8.4 \times 10^{-4} (\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{W}$,结垢 0.5 mm 后平均热阻上升至 $9.5 \times 10^{-4} (\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})/\text{W}$ 。这是因为铜壁与坯壳间的渣膜热阻所占比例最高,而铜管冷面的水垢对铸坯导热影响并不显著。同

时,水垢主要集中在结晶器上部,对下部坯壳厚度的生长影响较小。



(a) 铸坯表面中心坯壳厚度; (b) 铸坯角部坯壳厚度。

图 8 不同水垢分布条件下铸坯凝固规律

Fig. 8 Solidification law of billet in mold copper tube under different scale distribution

4 结论

(1) 三维模型能够更准确地描述结晶器铜壁温度分布状态。铜壁顶部区域温度接近冷却水温度,最高温度出现在铜壁热面弯月面下 50 mm 处,在铜壁中下部,两种传热模型分析结果基本一致。二维模型无法模拟铜壁顶部区域温度场,且分析所得铜管最高温度点位置明显过低。

(2) 结晶器铜管冷面结垢导致铜壁温度迅速上升。弯月面处水垢厚度为 0.1 mm 时,铜壁冷面最高温度达到 127 ℃,可能会使其附近冷却水沸腾,影响结晶器传热效果。

(3) 随着铜管结垢厚度的增加,铜壁高温区域逐渐扩大。结垢厚度为 0.5 mm 时,铜管最高温度上升至 318 ℃,将导致铜壁在弯月面区域产生塑性变形。同时,铜壁结垢延缓了钢液凝固,减少坯壳生长 0.2 mm。

参考文献:

- [1] 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[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 1862. (SUN Li-gen, CUI Li-xin, ZHANG Jia-quan. Numerical simulation for temperature distribution of initial solidifying shell with mold tube during bloom casting of U71Mn steel[J]. Journal of system simulation, 2009, 21(7): 1862.)
- [2] 钟晓丹,宋满堂,刘军,等. 350 mm×470 mm 矩形坯连铸生产轴承钢的凝固末端[J]. 中国冶金, 2015, 25(2): 10. (ZHONG Xiao-dan, SONG Man-tang, LIU Jun, et al. Solidification end of manufacturing bearing steel on 350 mm×470 mm bloom casting[J]. China Metallurgy, 2015, 25(2): 10.)
- [3] 朱立光,李琨,李曜光,等. 板坯连铸结晶器铜板传热行为[J]. 铸造技术, 2016(4): 706. (ZHU Li-guang, LI Kun, LI Yao-guang, et al. Heat transfer behavior of crystallizer copper plate

for slab continuous casting[J]. Foundry Technology, 2016(4): 706.)

- [4] 郭佳,蔡开科. 板坯连铸结晶器铜板温度场研究[J]. 炼钢, 1994(3): 27. (GUO Jia, CAI Kai-ke. Numerical study on temperature field of mold of slab concaster[J]. Steelmaking, 1994(3): 27.)
- [5] 胡硕,王鹏飞,朱立光,等. 漏斗形薄板坯结晶器内铸坯传热分析[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 33. (HU Shuo, WANG Peng-fei, ZHU Li-guang, et al. Analysis of heat transfer in thin slab funnel shape mold[J]. Iron and Steel, 2017, 52(2): 33.)
- [6] 江中块,蔡兆镇,牛振宇,等. 1 650 板坯压下过程热/力学行为及压下工艺优化[J]. 中国冶金, 2017, 27(7): 22. (JIANG Zhong-kuai, CAI Zhao-zhen, NIU Zhen-yu, et al. Thermo-mechanical behavior of 1 650 slab during soft reduction and optimization of soft reduction process[J]. China Metallurgy, 2017, 27(7): 22.)
- [7] 孙开明,付继成,李京社,等. 圆坯连铸凝固传热数学模型及应用[J]. 钢管, 2009, 38(3): 23. (SUN Kai-ming, FU Ji-cheng, LI Jing-she, et al. Math model for solidification heat-transfer in continuous casting of round bloom and application[J]. Steel Pipe, 2009, 38(3): 23.)
- [8] 张炯明,张立,杨会涛,等. 板坯结晶器钢水凝固的数值模拟[J]. 北京科技大学报, 2004, 26(2): 130. (ZHANG Jiong-ming, ZHANG Li, YANG Hui-tao, et al. Numerical simulation of molten steel solidification in slab mold[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(2): 130.)
- [9] Kelly J E, Michael K P, Thomas B G. Initial development of thermal and stress fields in continuously casting billets[J]. Metallurgical and Material Transactions: A, 1998, 19(10): 2589.
- [10] 邹达基,邹宗树. 关于连铸凝固传热数值模拟中钢液有效导热系数的探讨[J]. 连铸, 2009(6): 5. (ZOU Da-ji, ZOU Zong-shu. Discussion on effective thermal conductivity of molten steel in numerical simulation of solidification in continuous casting[J]. Continuous Casting, 2009(6): 5.)

(下转第 49 页)