

165 mm × 165 mm 方坯连铸结晶器安全性的数值模拟分析

陈艳霞¹ 周雄²

(1 太原科技大学工程力学系, 太原 030024; 2 湘潭大学研究生院, 湘潭 411105)

摘要 运用有限元软件 ANSYS 热分析模块对浇铸 0.2% C 钢水的 10 mm 铜结晶器壁面的温度场、应力场及位移场的分布状况进行数值模拟, 比较得出在不同换热系数工况下结晶器壁面的恶劣服役部位的安全性。结果表明, 结晶器热面峰值温度为 525 K, 冷面的峰值温度为 475 K; 结晶器外壁圆角变形值为 0.789 mm, 较内壁变形大; 结晶器最大等效应力和最大应变均出现在钢液与空气接触的内壁圆角处, 分别为 218 MPa 和 0.002 079。结晶器温度、变形和应力均满足连铸安全性要求。

关键词 结晶器 有限元分析 温度场 应力场

A Numerical Simulation Analysis on Safety of Mould for 165 mm × 165 mm Billet Concasting

Chen Yanxia¹ and Zhou Xiong²

(1 Department of Engineering Mechanics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024; 2 Graduate School, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract The numerical simulation on distribution of temperature field, stress field and displacement field of copper mould wall with 10 mm thickness for casting liquid of 0.2% C steel has been carried out by using finite element analysis software ANSYS/thermal, with comparison to get the safety of serious service part of mould wall at conditions with various heat exchange coefficient. Results show that the peak temperature of mould hot surface is 525 K and the peak temperature of mould cold surface is 475 K; the deformation of outside wall round corner of mould is 0.789 mm it is larger than that of inside wall; the max equivalent stress and max strain occur at inside wall round corner at which liquid contacting air, and are respectively 218 MPa and 0.002 079. The temperature, deformation and stress of mould all meet the requirement of concasting safety.

Material Index Mould, Finite Element Analysis, Temperature Field, Stress Field

结晶器是连铸机十分重要的部件, 是一个强制水冷的无底钢锭模, 称之为连铸设备的“心脏”。结晶器工作时内壁是在钢液的逐步冷凝状态下进行热量传入, 外壁是在冷却水的环流中进行热量传出, 进而实现热量传导。这就要求铜制结晶器具有较好的高温强度, 即在持续承受剧烈热交换的环境下, 仍要保持在实现热量传导的同时, 既不能出现再结晶软化, 又不能出现明显的塑性变形, 这就要求结晶器铜壁保持良好的力学性能。

方坯连铸结晶器是一种典型的主要受热应力作用的换热构件, 保证其安全性是非常重要的。利用 ANSYS 软件的热分析功能, 采用热力耦合数值模拟方法得出了结晶器在稳定工作状态下的温度场、应力场及变形场分布状况。通过分析可知结晶器在连铸过程中不仅可以安全可靠的工作, 而且具有良好的使用效果^[1]。

1 计算模型的建立

1.1 模型尺寸及参数

结晶器的截面尺寸为 165 mm × 165 mm, 长度 800 mm, 壁厚 10 mm, 内圆角柱半径 5 mm, 外圆角柱半径 7.5 mm, 浇铸 0.2% 碳钢的钢水深度 700 mm, 如图 1 (a) 所示。结晶器材质为紫铜, 密度 8 930 kg/m³, 导热系数 383 W/(m · K), 比热容 390 J/(kg · K), 弹性模量 105 GPa, 泊松比 0.3, 热膨胀系数

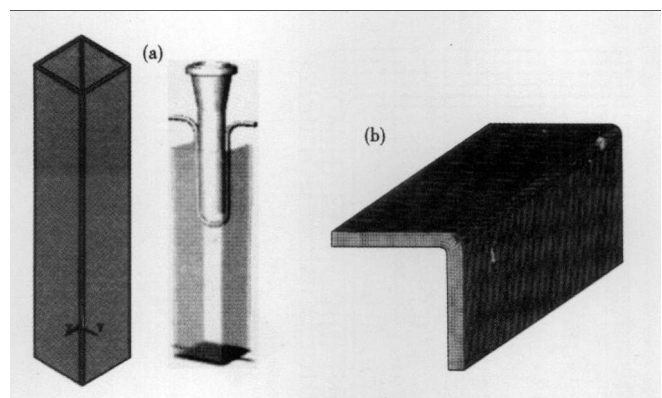


图 1 (a) 结晶器模型; (b) 有限元分析模型
Fig. 1 (a) model of mould; (b) model of finite element analysis

$1.75 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1[2-6]}$ 。

1.2 边界条件及载荷

结晶器温度场分析采用 20 节点热单元 SOLID90, 其边界条件为方坯连铸结晶器距离顶端 100 mm 处视为与大气自然对流和热辐射并存, 对整体传热的影响不能忽略; 结晶器外壁与冷却水视为强制对流换热; 内壁与高温钢水视为对流换热。由于研究过程中问题边界条件和计算几何模型形状的对称性, 取结晶器模型的 1/4 进行计算(图 1b)。

方坯连铸结晶器在工作时将会同时受到几种载荷的作用: (1) 结晶器内壁距顶端部分大气温度为 300 K, 传热系数取为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; (2) 结晶器外壁冷却水温度为 300 K, 传热系数分别取 6 000、6 250、5 750 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[7]; (3) 结晶器内壁钢水温度为 1 800 K, 综合传热系数为 $900 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; (4) 结晶器外壁冷却水的压力作用, 其值为 1.0 MPa。

2 热力耦合有限元分析

选择建立的有限元模型进行热分析, 一方面克服了模型计算缺乏准确性的缺点, 另一方面又克服了实验受时间、技术所限只能在几种工况的不足^[8,9]。

2.1 温度分析

图 2 为结晶器外壁环流冷却水与铜壁强制对流传热系数在 $6 000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时结晶器内、外壁温度分布状况。通过分析可知, 最高温度出现在结晶

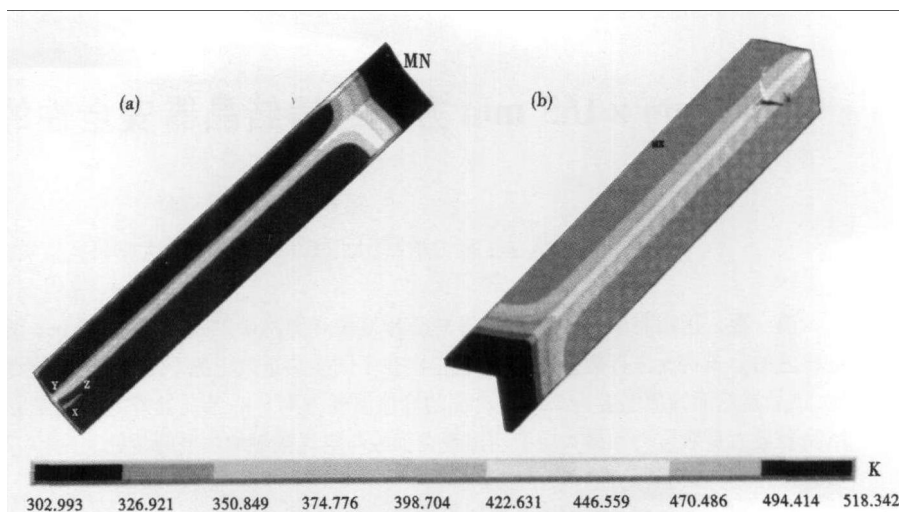


图 2 结晶器内壁(a)和外壁(b)温度分布图
Fig. 2 Contours of temperature at inside wall (a) and outside wall (b) of mould

器内壁与钢水接触处, 其值为 518. 342 K, 最低温度出现在结晶器近上端 100 mm 处, 因为里面是大气, 整个有限元模型温度梯度相对比较小, 在大气与钢液接触处温度梯度出现了最大值 $6 931 \text{ K}/\text{m}$ 。同理, 可以得到传热系数为 $5 750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $5 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时温度图。温度和温度梯度的最大值分别为 525. 135、512. 018 K 和 $6 921$ 、 $6 939 \text{ K}/\text{m}$ 。

设计中应把结晶器管壁最高温度当作分析的重要参数, 认为它的大小比较能够反映结晶器的材料力学性能, 下面对热应力的分析将集中在最高温度这一参数。同时从计算结果可以知道结晶器在工作过程中, 3 种传热系数工况下结晶器的热面温度峰值为 525 K, 低于铜的软化温度。

2.2 变形分析

图 3(a) 为变形后的几何形状和未变形轮廓图, 图 3(b) 为合位移图, 图 3(c, d) 分别为结晶器内外壁沿 X 方向的位移图。由图 3(b) 可知, 最大合位

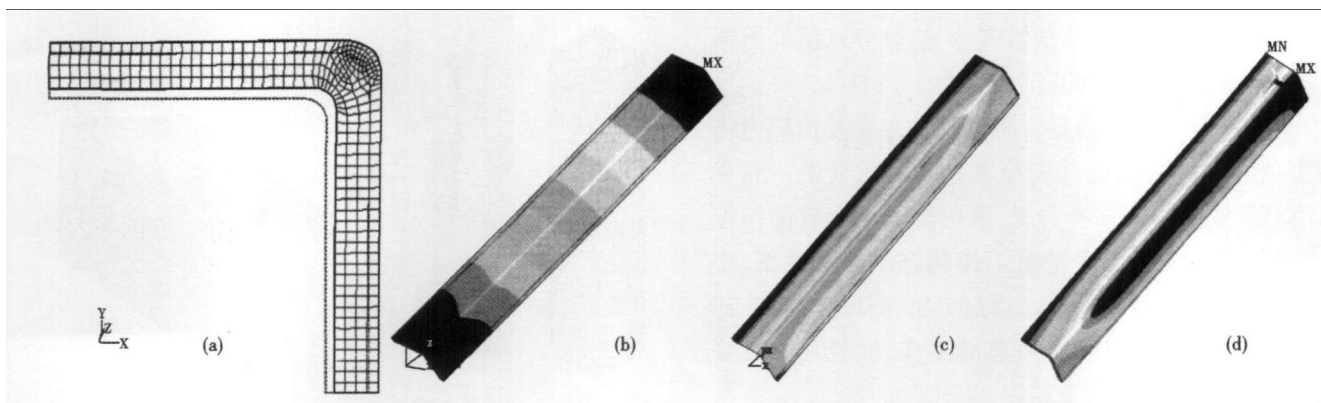


图 3 连铸时结晶器位移图: (a) 结晶器位线; (b) 综合位移; (c) 内壁沿 X 方向位移; (d) 外壁沿 X 方向位移

Fig. 3 Contours of displacement of mould in casting: (a) mould displacement line; (b) comprehensive displacement; (c) displacement of inside wall along X direction; (d) displacement of outside wall along X direction

移在结晶器入口端,这是由于在分析过程中没有对其施加位移约束,热膨胀引起了沿 Z 方向的位移,其值为 6.585 mm。由图 3(c, d) 知,结晶器外壁圆角处较内壁变形大,其值为 0.789 mm。同理可以得到结晶器沿其它方向的位移,但数值均不会超过上述位移值。这说明结晶器铜管工作时不会产生太大的变形,能够满足刚度要求。

2.3 应力分析

在结晶器壁面热分析的基础上,利用有限元软件 ANSYS 的热-结构耦合功能,把热单元 SOLID90 转化为结构单元 SOLID95。再将已计算好的节点温度作为体载荷加载到结构有限单元上,再将模型左端(UX)、右端(UY)及下端出口地方(UZ)施加零位移约束^[10,11]。应力结果以温度梯度、应力和热膨胀应力的合成形式 Von Mises 等效热应力表示。

图 4 为结晶器外壁和内壁的等效应力分布图。结晶器考虑热膨胀、空气对流传热及热辐射时,等效应力、应变的最大值均出现在钢液与空气接触的内壁圆角处,最大应力为 218 MPa,最大应变为 0.002 079;其次,在沿内壁圆角处的应力、应变也比较大,应力为 194 MPa,应变为 0.001 848。同理得到对流传热系数为 5 750 W/(m² · K) 和 6 250 W/

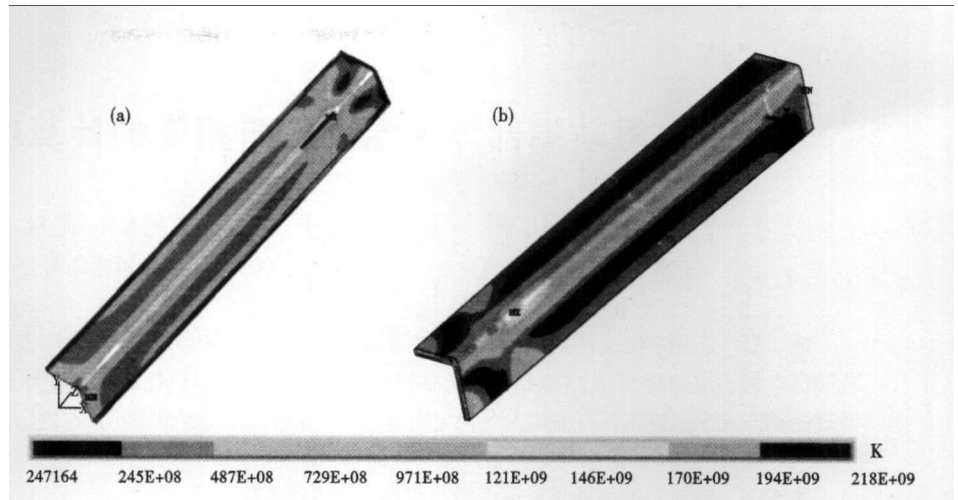


图 4 结晶器外壁(a)和内壁(b)等效应力图

Fig. 4 Contours of equivalent stress of outside wall (a) and inside wall (b) of mould

(m² · K)时的应力、应变最大值分别为 219 MPa、0.002 087 和 217 MPa、0.002 071。而铜在温度 200 °C 时屈服强度为 850 MPa,在 400 °C 时屈服强度为 750 MPa,从等效应力来看,整个应力值都在结晶器应力屈服强度之内,不会造成结晶器太大的残余变形。

3 结论

结晶器在连铸中的基本作用是完成液态金属结晶冷凝为固态金属过程的热量传递和交换,以及铸坯基本形状的确立。采用有限元分析方法对结晶器铜壁进行热-力耦合数值模拟,给出了结晶器壁面温度、应力和变形的分布状况,比较找到了稳定工况下结晶器的薄弱环节,分析得到方坯结晶器在连铸过程中可以安全高效地工作。

参考文献

- 1 晋艳娟,崔小朝. 内冷却器-U形管对板坯连铸结晶器内钢水流动的影响. 特殊钢, 2006, 27(3): 29
- 2 刘人达. 冶金炉热工基础. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 3 杨世铭,陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 4 李维特,黄保海,毕仲波. 热应力理论分析及应用. 北京: 中国电力出版社, 2004
- 5 俞昌铭. 热传导及其数值解法. 北京: 清华大学出版社, 1982
- 6 俞昌铭. 热传导. 北京: 高等教育出版社, 1984
- 7 石琳. 高炉铜冷却壁的热变形问题. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 2040
- 8 杜平安,甘娥忠,于亚婷. 有限元法-原理、建模及应用. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 9 张朝晖. Ansys 8.0 热分析教程与实例解析. 北京: 中国铁道出版社, 2005
- 10 邹华生,钟理,伍钦. 流体力学与传热. 广州: 华南理工大学出版社, 2004
- 11 崔海亭,彭培英. 强化传热新技术及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2006

陈艳霞(1977-),女,讲师,太原科技大学毕业,工程力学研究。

收稿日期:2010-05-05