

离心铸造碳钢-高铬铸铁复合管有限元模拟研究

刘靖[✉] 韩静涛 吴伟

北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: liujing@mater.ustb.edu.cn

摘要 采用离心铸造的碳钢-高铬铸铁复合管界面达到了冶金结合. 利用 ANSYS 有限元软件对复合管凝固过程外层及内外层温度场进行了模拟与分析. 模拟结果表明: 离心浇注外层 20 钢大约 9 s 后, 铸件最低温度为 1430 °C, 已经低于 20 钢固相线温度 1490 °C, 由此可见, 浇注间隔时间为 9 s 时, 可形成规则稳定的过渡层. 当外层 20 钢的温度降至 1350 °C 时, 浇注高铬铸铁, 大约 30 s 后, 内层的温度已降至 1257 °C, 低于高铬铸铁固相线温度, 此时, 内层熔体已经完全凝固.

关键词 离心浇铸; 碳钢; 铸铁; 金属复合; 管; 有限元法; 计算机模拟

分类号 TG249.4

Finite element simulation for clad pipes of carbon steel and high chromium cast iron by centrifugal casting

LIU Jing[✉], HAN Jing-tao, WU Wei

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: liujing@mater.ustb.edu.cn

ABSTRACT The interface of carbon steel and high chromium cast iron clad pipes achieved metallurgical bonding by centrifugal casting. Finite element simulation was used to study the temperature fields of the outer layer and inner/outer layer. The results showed that the minimum temperature of outer layer casting (20 steel) reached 1430 °C after centrifugal casting for 9 s, which is lower than the solidus temperature (1490 °C). A steady-regular transition layer can be formed when the interval of casting was 9 s. When the temperature of 20 steel reduced to 1350 °C, the high chromium cast iron was cast. After 30 s, the inner temperature reduced to 1257 °C which is below the solidus temperature of high chromium cast iron, then the solidification finished completely.

KEY WORDS centrifugal casting; carbon steel; cast iron; metal cladding; pipe; finite element method; computer simulation

高铬铸铁是一种性能优良的抗磨材料,既具有极佳的耐磨性能,又有一定的强度和韧性^[1],在冶金、建材、电力、煤炭等行业得到广泛的应用. 对高铬铸铁耐磨性能起主要作用的合金元素是铬和碳,一般碳含量(质量分数)在 2.0%~3.5%之间,铬含量(质量分数)在 13%~36%之间^[2-3]. 高铬铸铁的成分范围较宽,目前用的最多的是亚共晶成分高铬铸铁,铬含量大多在 13%~18%,只有在特殊情况下(耐热、耐蚀铸件),才达到 25%以上^[4]. 高铬白口铸铁由于抗磨性能优良,并且具有相当的韧性和耐蚀性而日益受到人们的重视. 国外已成功地将高铬白口铸铁应用于矿山大直径(3.7 m)球磨机衬板、大型粉磨机锤头(10.7 m)、大型泥浆泵内衬、高压

(3.5 MPa) 输煤泵内衬及水泥工业用大型粉碎机组组合板中. 高铬白口铸铁的韧性虽然优于其他白口铸铁,但在实际应用中仍易于破碎,而且材料成本较高,限制了它的应用推广^[5]. 20 钢的抗冲击性好,可以有效地保证管件的外形完整^[6]. 碳钢-高铬铸铁复合管的开发既能兼顾高铬铸铁的耐磨性和 20 钢的良好塑性,又能节省材料,所以对碳钢-高铬铸铁复合管进行研究在工业生产上具有重要意义.

1 复合管浇铸工艺

采用卧式离心铸造的方法,先将 20 钢金属液浇入旋转的型筒中,待其刚刚凝固后,将高铬铸铁金属液浇入旋转的型筒中,在离心力作用下形成空心金

属管坯,待凝固冷却后脱模,形成了内层是高铬铸铁,外层是 20 钢的双金属复合管。

参照中华人民共和国建筑工业行业标准 JG/T 95—1999,并根据水泥泵车的要求^[7],水泥泵车用管的长度设计为 3 000 mm,壁厚为 8 mm。为保证耐磨性,内层(耐磨层)壁厚为 3 mm;为保证输送管具有一定的强度和韧性,外层(基层)壁厚为 5 mm。

2 离心凝固过程温度场的模拟分析

2.1 温度场控制方程的建立

(1) 温度场凝固模拟的简化处理。

影响铸件凝固过程温度场分布的因素很多,在模拟求解时需进行必要的简化。在建模中,基于以下假设:

①不考虑金属熔体混合物沿铸型轴向的流动和传热,简化为二维问题处理;

②不考虑金属熔体混合物凝固时的界面移动,金属熔体混合物为不可压缩的牛顿流体,且流动为

层流;

③将液相、液固相之间及固相的热物性参数视为常数;

④铸型外表面为单纯的空气对流冷却,不考虑辐射散热,假设铸型外空气保持在恒温 25℃;同时忽略铸件内表面对型腔热空气的传热;

⑤金属液瞬时充填铸型并与铸型达到同一转速,即金属液与铸型相对静止;

⑥不考虑液、固相因热造成的对流流动,在铸件凝固传热过程中只考虑热传导;

⑦不考虑合金的过冷,凝固从液相线温度开始,固相线温度结束。

(2) 实验材料。

在利用 ANSYS 软件建模进行数值求解时,考虑到问题的对称性和求解的精确性,在沿垂直于铸件旋转轴线的圆环状横截面上,取中心角为 10°范围内所包含的铸件和铸型作为研究对象,如图 1 所示。

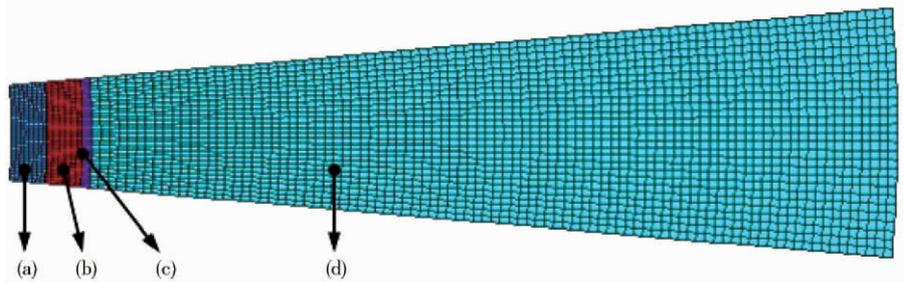


图 1 温度场模拟有限元模型。(a) 内层高铬铸铁;(b) 外层 20 钢;(c) 涂层;(d) 铸型

Fig.1 Finite element model (FEM) of the temperature field: (a) inner layer of high chromium cast iron; (b) outer layer of 20 steel; (c) coat; (d) casting mold

产品主要尺寸:复合管内径 125 mm,壁厚 8 mm,内层壁厚 3 mm,外层壁厚 5 mm,长 3 000 mm,金属铸型的壁厚为 90 mm,涂料厚 1 mm。

设备材料:铸型 45 钢,复合管内层为高铬铸铁,外层为 20 钢。各层材料的热物理参数如表 1 所示,实验分析所用节点位置如图 2 所示。

表 1 各层材料的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of each layer material

材料	密度 $\rho /$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数 $\lambda /$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	比热容 $c /$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)
高铬铸铁(内层)	7 570	74	724
20 钢(外层)	7 830	112	703
氧化锆(涂层)	6 100	0.2	460
45 钢(铸型)	7 833	130	603

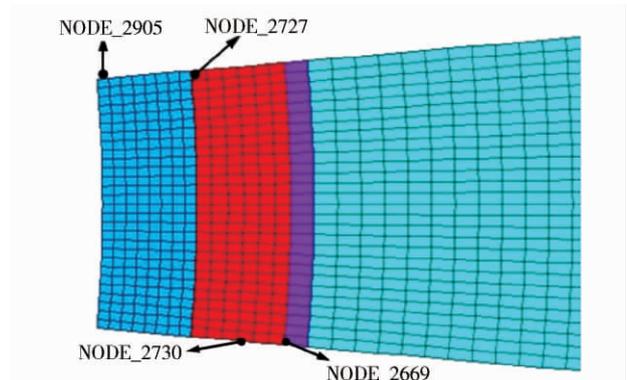


图 2 节点位置示意图

Fig.2 Sketch of node position

(3) 温度场初始条件及边界条件。

①初始条件。

基于瞬时充型假设可知,当浇注开始时,铸型温度等于预热温度,铸件温度等于浇注温度,其中预热

温度、浇注温度取决于工艺要求,模拟计算时可在 ANSYS 程序中设定.

②热边界条件.

离心铸造的换热边界条件十分复杂,主要包括铸件-铸型、铸型-环境空气及铸件内孔-空气之间的换热三部分.在 ANSYS 有限元程序中,铸件-铸型之间由于气隙而存在热阻,计算时通过给定传热系数来加以考虑.而铸型-环境之间的对流换热 (q) 可用下式表示:

$$q = \alpha_0 (T - T_w). \quad (1)$$

式中: α_0 为铸型与环境空气之间的传热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C$, 由程序给定; T_w 为铸型周围环境的平均温度, $^\circ C$, 由程序给定.

③结晶潜热的处理.

铸件在凝固过程中会释放出大量的潜热.据有关文献报道,铸件向铸型传递的热量中,金属过热的热量仅占 20% 左右,凝固潜热占 80% [8].潜热释放会明显降低铸件的冷却和凝固速度,非稳态热传导方程由于潜热的释放,实际变成了具有内热源的溫度场,潜热释放对于铸件过程的溫度场分布具有重大影响.因此,在铸件凝固传热计算中,对于固液两相区必须考虑凝固潜热的问题.本文采用等效比热

容法处理结晶潜热,当铸件某单元 (i, j) 温度处于液固相线之间时,控制方程可以写成

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (2)$$

式中: c 为等效比热容,计算时由程序给定; r 为管径径向; z 为管径轴向.这样使得不论是在固相区、液相区、还是在固-液两相区,选用不同的比热表达式所列出的传热方程都成立.

基于以上分析,就可以采用有限元法,对在固相区、液相区及固-液两相区的非稳态溫度场控制方程进行离散,利用 ANSYS 程序求解并获得各种条件下的溫度场分布.

2.2 复合管外层凝固过程溫度场的模拟与分析

图 3、图 4 为离心凝固过程中,不同时刻外层铸件 (20 钢) 溫度场分布云图.凝固开始阶段 (t < 10 s),铸件的冷却速度很大 (约为 11 $^\circ C/s$),铸件溫度从 1540 $^\circ C$ 很快下降到 1393 $^\circ C$ 左右.而铸型中的涂层溫度也从 200 $^\circ C$ 很快上升到 1300 $^\circ C$ 左右,与铸件溫度基本一致;由于涂层的传热系数非常小,阻断了热流向铸型的传递,故铸型溫度上升并不大,约为 50 $^\circ C$.经大约 9 s 后,铸件最低溫度为 1430 $^\circ C$,已经低于 20 钢固相线溫度 1490 $^\circ C$,金属熔体全部凝固完毕.

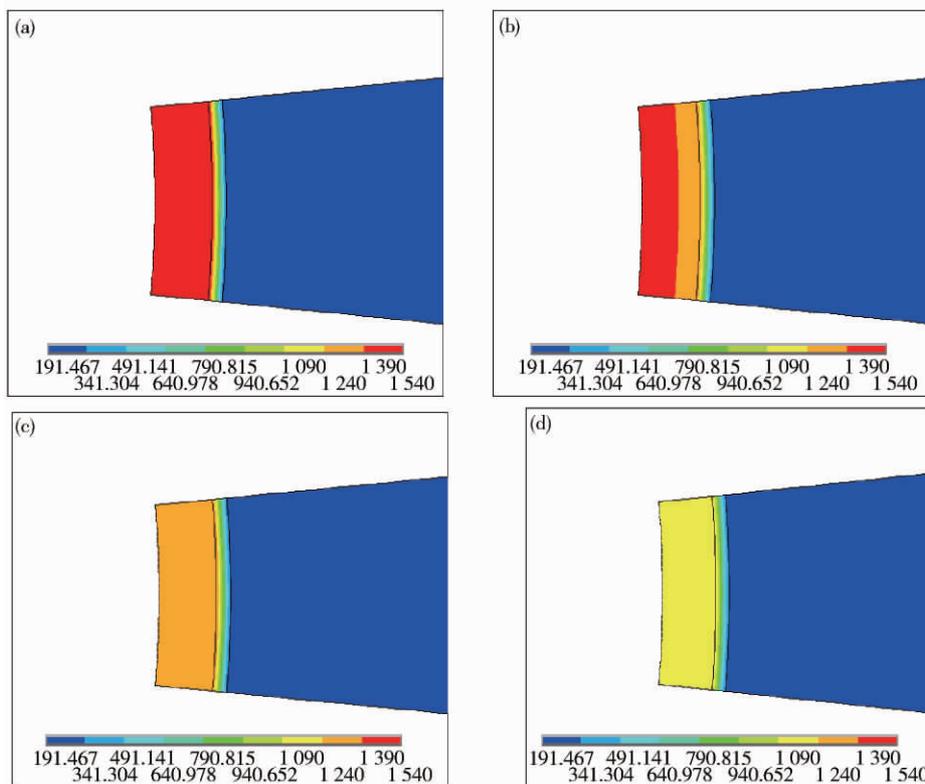


图 3 外层铸件和铸型凝固过程各时刻溫度场分布云图 (单位: $^\circ C$). (a) $t = 0.001$ s; (b) $t = 13.673$ s; (c) $t = 14.673$ s; (d) $t = 30$ s
Fig.3 Maps of the temperature field of outer casting and casting mould during solidification (unit: $^\circ C$): (a) $t = 0.001$ s; (b) $t = 13.673$ s; (c) $t = 14.673$ s; (d) $t = 30$ s

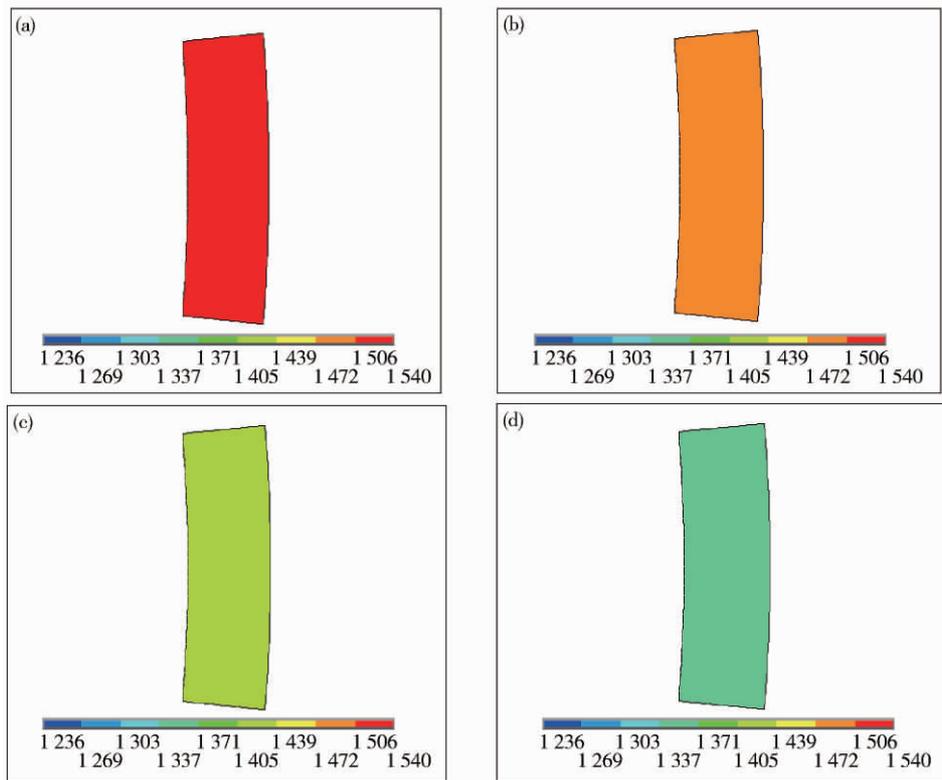


图 4 外层 20 钢凝固过程各时刻温度场分布云图(单位: °C)。(a) $t=1.673\text{ s}$; (b) $t=4.673\text{ s}$; (c) $t=9.673\text{ s}$; (d) $t=17.673\text{ s}$

Fig. 4 Maps of the temperature field of outer 20 steel during solidification (unit: °C): (a) $t=1.673\text{ s}$; (b) $t=4.673\text{ s}$; (c) $t=9.673\text{ s}$; (d) $t=17.673\text{ s}$

2.3 复合管内外层凝固过程温度场的模拟与分析

金属复合离心铸造时,由于内外层材料不同,熔点不同,双金属管温度场有其自身的特点。分别取 NODE_2905、NODE_2727、NODE_2669、和 NODE_2730 进行温度场曲线绘制,如图 5 和 6 所示。图 7 和 8 为离心凝固过程中,不同时刻双层复合管铸件及铸型温度场分布云图。

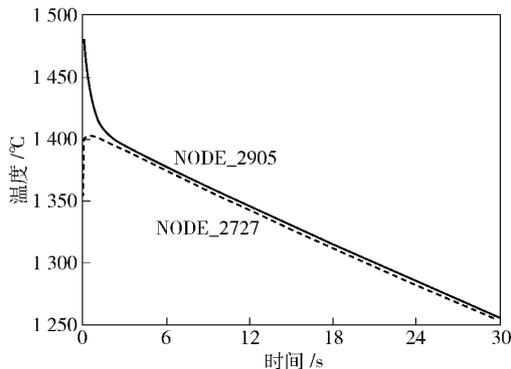


图 5 节点 NODE_2727 和 NODE_2905 的温度场比较

Fig. 5 Comparison of the temperature field for NODE_2727 and NODE_2905

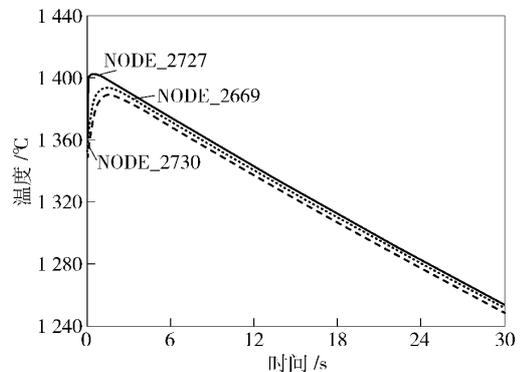


图 6 节点 NODE_2727、NODE_2730 及 NODE_2669 的温度场比较

Fig. 6 Comparison of the temperature field for NODE_2727, NODE_2730, and NODE_2669

当外层 20 钢的温度降至 1350 °C 时,浇注内层高铬铸铁,其浇注温度为 1480 °C,外层温度瞬间上

升,靠近内层的升温速度要大于远离内层的升温速度,如图 5 所示。当 $t=1.6\text{ s}$ 时,外层温度达到最大值 1389 °C,内层温度降至 1405 °C,见图 8(c),显然内层的降温速度大于外层的升温速度。随后,热量继续由内层向外层传递,此时内层继续降温,外层已不再升温。从图 6 可以看出,当 $t>3\text{ s}$ 后,内外层以相同的降温速度降温,其中内外层温差在 10 ~ 15 °C;大约 12 s 后,内层的温度降至 1345 °C,已低于高铬铸铁熔点。由 7(d) 可以看出,30 s 后,内层的温度

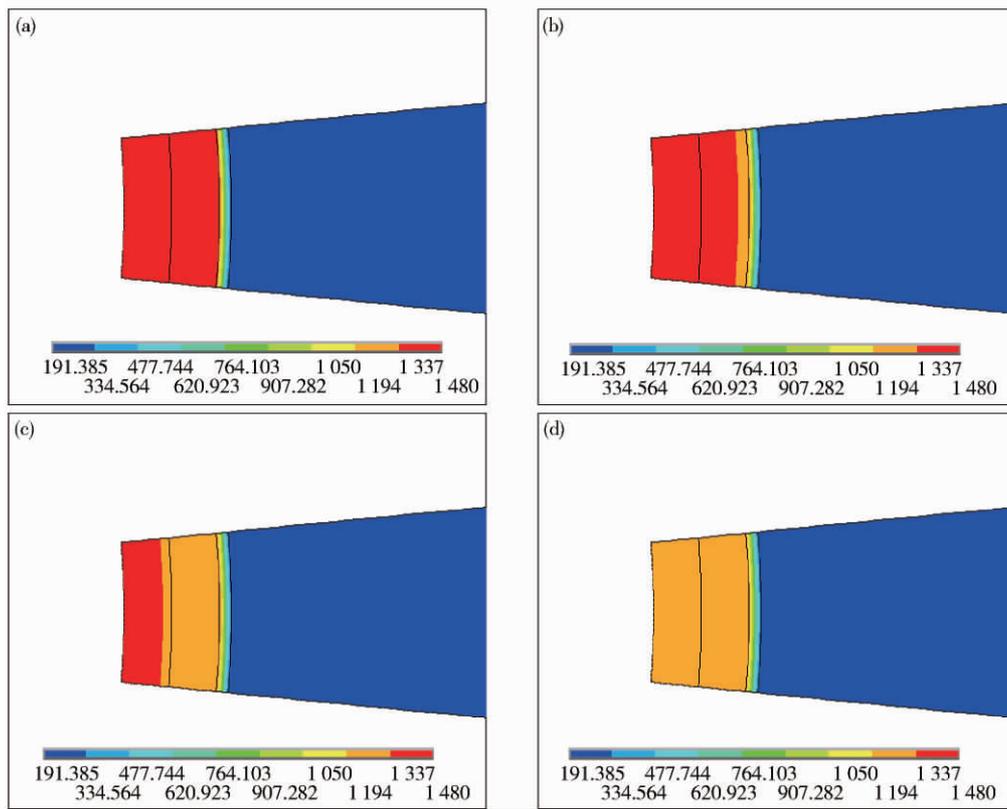


图7 双层管铸件和铸型凝固过程各时刻温度场分布云图(单位: °C). (a) $t=0.041$ s; (b) $t=12.189$ s; (c) $t=13.189$ s; (d) $t=30$ s

Fig.7 Maps of the temperature field of the bilayer tube casting and casting mould during solidification (unit: °C): (a) $t=0.041$ s; (b) $t=12.189$ s; (c) $t=13.189$ s; (d) $t=30$ s

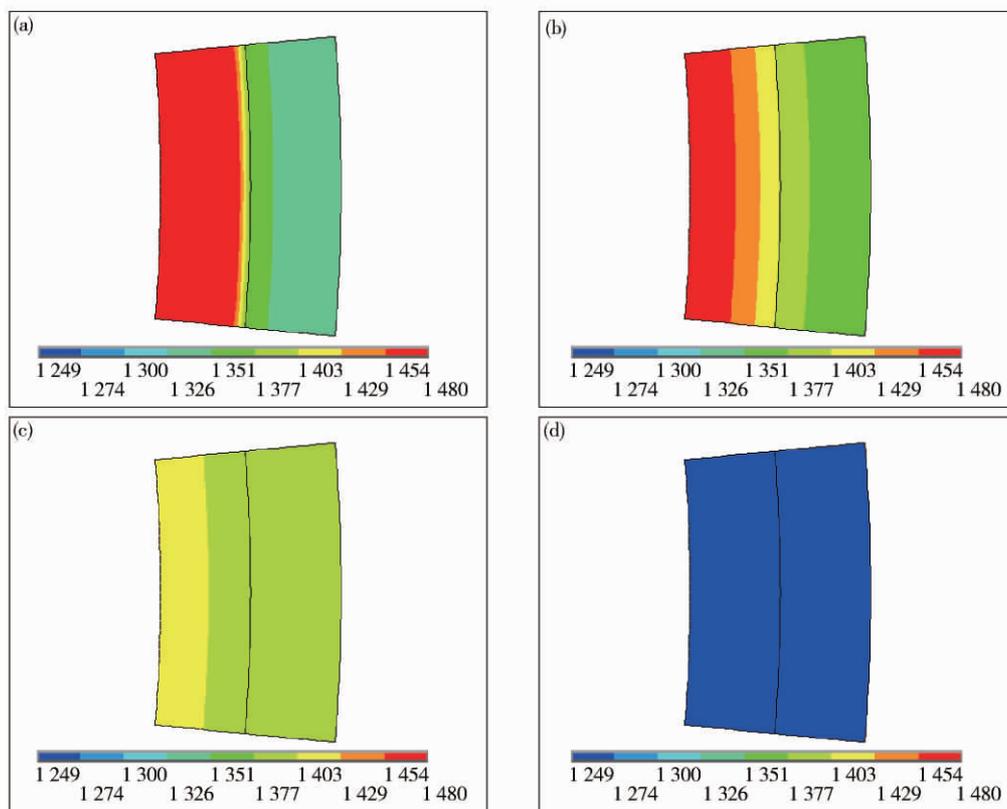


图8 复合管内外层凝固过程各时刻温度场分布云图(单位: °C). (a) $t=0.005$ s; (b) $t=0.144$ s; (c) $t=1.663$ s; (d) $t=30$ s

Fig.8 Maps of the temperature field of the inner layer and the outer layer of bilayer tube during solidification (unit: °C): (a) $t=0.005$ s; (b) $t=0.144$ s; (c) $t=1.663$ s; (d) $t=30$ s

已低于高铬铸铁固相线温度,为 1257℃,此时,内层熔体已经完全凝固.

3 结论

对外层铸件凝固过程温度场的数值模拟结果表明:离心浇注外层 20 钢大约 9 s 后,铸件最低温度为 1430℃,已经低于 20 钢固相线温度 1490℃,20 钢金属熔体已完全凝固,由此可见,浇注间隔时间为 9 s 时,可形成规则稳定的过渡层,为实际生产提供了理论依据.

对复合管内外层凝固过程温度场的模拟研究结果表明,当外层 20 钢的温度降至 1350℃时,浇注高铬铸铁,大约 30 s 后,内层的温度已降至 1257℃,低于高铬铸铁固相线温度,此时,内层熔体已经完全凝固.

参 考 文 献

- [1] Rao Q C, Zhou Q D, Xing J D, et al. A Study of abrasive resistance and fracture toughness of high-Cr white cast iron. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 1986, 20(1): 83
(饶启昌,周庆德,邢建东,等.高铬白口铸铁抗磨粒磨损耐磨性与断裂韧性的研究.西安交通大学学报,1986,20(1):83)
- [2] Gan Z P. Study on microstructure and distribution of elements in high chromium cast iron. *Res Iron Steel*, 2003 (4): 41
(甘宅平.高铬铸铁组织及元素分布的研究.钢铁研究,2003(4):41)
- [3] Ci T J. *Influence of Chrome to the Texture Property of High Chrome White Cast Iron and Research of the Theory of Impact Material Abrasion* [Dissertation]. Beijing: North China Electric Power University, 2000
(慈铁军.铬对高铬铸铁组织、性能的影响及冲击磨料磨损机理研究[学位论文].北京:华北电力大学,2000)
- [4] Peng X C, Zhang C J. Microstructure and properties of 27% Cr high chromium cast irons. *Mater Mech Eng*, 2005, 29(11): 35
(彭晓春,张长军.27% Cr 高铬铸铁组织及性能研究.机械工程材料,2005,29(11):35)
- [5] Chen Z M, Luan Z T, Ye Y F. Application and development of modern chromium wear-resistant white cast iron. *J. Shandong Inst Technol*, 2000, 14(3): 43
(陈宗民,栾振涛,叶以富.现代铬系抗磨白口铸铁的应用与发展.山东工程学院学报,2000,14(3):43)
- [6] Qi J Y. Research and application of wear-resistant materials at home and abroad. *Inf Electr Power*, 1996(3): 29
(齐纪渝.国内外耐磨材料的研究与应用.电力情报,1996(3):29)
- [7] Li W, Wang H F, Zhou P A, et al. Recent development of wear resistant materials and wear technology: Review on the 21th century China wear resistant materials conference. *Foundry*, 2001, 50(1): 7
(李卫,王洪发,周平安,等.耐磨材料与磨损技术新进展:21世纪全国耐磨材料大会述评.铸造,2001,50(1):7)
- [8] Wang G Q. *Practical Engineering Numerical Simulation Technology and its Application in the Practice of the ANSYS*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000
(王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践.西安:西北工业大学出版社,2000)