

铁型及覆砂层厚度对铸件凝固的影响

黄列群^{1,2}, 董凌云¹, 潘东杰^{1,2}, 夏小江²

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 为解决球墨铸铁铸件冷却凝固的影响因素问题,将数值模拟技术应用到铸造过程分析中,讨论了铁型覆砂铸造工艺中 40 mm、20 mm 两种不同铁型,6 mm、8 mm、10 mm、13 mm 四种覆砂层厚度对球墨铸铁铸件冷却凝固的影响,建立了铸造过程中铁型厚度、覆砂层厚度、铸件厚度三者之间的关系。进一步测量了实际球墨铸铁铸件的冷却凝固曲线,验证了模拟数据,得出了铁型覆砂工艺适合球墨铸铁铸件的工艺参数。研究表明,该研究对球墨铸铁铸造实际应用具有较为可靠的工艺参考价值。

关键词: 铁型覆砂;球墨铸铁;数值模拟;凝固

中图分类号: TG242;TH161

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0163-04

Effect of thickness of iron mould and coated sand on solidification

HUANG Lie-qun^{1,2}, DONG Ling-yun¹, PAN Dong-jie^{1,2}, XIA Xiao-jiang²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310009, China)

Abstract: In order to solve the problems of the solidification of ductile iron in iron mould coated sand, computer simulation was investigated. The thickness of iron mould was 40 mm and 20 mm, and the thickness of coated sand was 6 mm, 8 mm, 10 mm and 13 mm. After the analysis of solidification, the relationship of iron mould, coated sand and casting was established. Also thermocouple was used to measure the solidification curve of practical casting, the reliability of the computer simulation was verified. The experimental results show that the process parameters of ductile iron in iron mould coated sand could provide a reference for practical application.

Key words: iron mould coated sand; ductile iron; computer simulation; solidification

0 引言

铁型覆砂铸造是铸造业比较新的一门工艺,它是指浇注时在铁型和铸件之间加上一层覆膜砂,经反复多次的研究,确定铸件、覆砂层以及铁型的厚度关系,继而使得铸件在一个比较理想的环境下完成充型、凝固、冷却过程,从而达到改变铸件冷却速度的目的,以得到预期质量的铸件。目前,全国约有百家企业应用这种工艺进行铸造生产,产品涉及曲轴、缸套、阀体、齿盘等30多个铸件品种,年产量超过100 000 t^[1]。铁型覆砂工艺大大减少了用砂量,改善了工作环境;在铁型和铸件之间又加上一层覆膜砂,避免了铁型和铸件

的直接接触,从而提高了铸件的使用寿命,加之计算机模拟技术的应用,降低了废品率,是一项节能环保的绿色铸造工艺。

本研究主要探讨铁型覆砂铸造工艺铁型及覆砂层厚度对铸件凝固的影响。

1 铁型覆砂工艺

随着铁型覆砂铸造工艺应用越来越广泛,对其的研究也越来越深入。在铁型覆砂铸造工艺中,铸件、覆膜砂、铁型之间传热过程对铸件的质量影响非常大。

铁型覆砂铸造就是在金属型铸造的基础上,在金属型型腔和铸件外壁之间覆上一层覆膜砂,铸件的热

量经由覆砂层、铁型传向大气。金属型铸造得到的铸件冷却速度非常快,容易形成白口。运用铁型覆砂铸造可以降低铸件的冷却速度,消除白口,但铸件的冷却速度仍大于砂型铸造。由上可知,铁型覆砂铸造兼具了砂型铸造和金属型铸造的优点。铁型覆砂铸造的覆砂造型和生产流程如图1、图2所示。

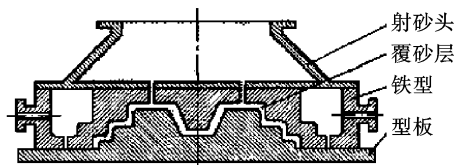


图1 铁型覆砂造型

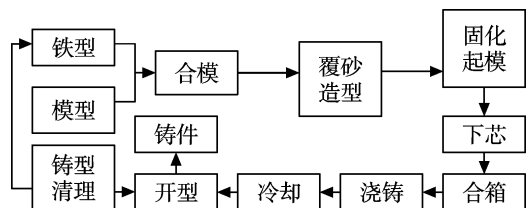


图2 铁型覆砂生产流程

由传热学二维常物性无内热源的非稳态导热问题的微分方程为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

显示差分格式(内节点):

$$t_{i,j}^{k+1} = Fo_{\Delta} (t_{i+1,j}^k + t_{i-1,j}^k + t_{i,j+1}^k + t_{i,j-1}^k) + (1 - 4Fo_{\Delta}) t_{i,j}^k \quad (2)$$

式中: Fo_{Δ} —网格傅里叶数, $Fo_{\Delta} = a\Delta\tau/(\Delta x)^2$ 。

温度的上角码表示计算时间域中时层的编号,下角码为空间位置节点的编号。

二维平直边界节点:

$$t_{i,j}^{k+1} = Fo_{\Delta} (2t_{i-1,j}^k + t_{i,j+1}^k + t_{i,j-1}^k + 2Bi_{\Delta} t_f) + (1 - 4Fo_{\Delta} - 2Bi_{\Delta} Fo_{\Delta}) t_{i,j}^k \quad (3)$$

式中: t_f —外界温度。

通过上述方法即可得出在不同时刻的温度场分布。缺点是人工计算量非常大,所以运用相应的模拟软件进行模拟比较合适。

2 计算机模拟的实现

2.1 铸造工艺计算机模拟现状

铸造计算机模拟分为铸件凝固模拟和铸件充型模拟。

铸件的凝固过程数值模拟技术主要包括三维传热数值计算技术、铸件及其工艺的几何造型和缺陷判断这3部分^[2-3],并可对凝固过程中出现的缺陷进行预测,评判铸造工艺设计的合理性,以减少工艺实验的次数,降低工艺设计成本,提高工艺出品率和合格率。

铸件凝固过程数值模拟始于20世纪60年代的丹麦^[4],FORSUND第一次把有限差分法用于铸件凝固过程的传热计算,之后美国HENZEL和KEUERIAN应用瞬态传热通用程序对汽轮机内缸体铸件进行数值计算,得出了温度场,计算结果与实测结果相当接近。至此,研究者认识到计算机模拟对铸造的凝固模拟有着巨大的应用前景。到目前,无论在数学模型还是数值方法上都已经趋于成熟。到目前为止,凝固模拟技术在以下3个方面取得了重要的进步^[5],即:①能处理三维复杂形状;②软硬件费用工厂能够承受;③用户界面友好。

业界已相继成功开发一系列专用的铸造凝固模拟软件^[6],如德国Magma公司的MAGMASOFT软件、英国的Solstar、法国的SIMULOR、美国的FLOW 3D和Procast、清华大学研究开发的“铸造之星FT-STAR”三维铸件充型凝固过程数值模拟分析系统等。模拟技术已经大量应用于铸件的日常生产之中,在分析铸造缺陷、预测铸件质量、优化铸造工艺方面发挥着重要的作用。

铸件的充型模拟由于其计算涉及的控制方程多,需要对连续性方程、动量方程联立求解,难度非常大,所以其发展速度并没有凝固模拟快,目前铸造充型过程数值模拟主要有压力连接方程半隐式方法SIMPLE,简化标示粒子法SMAC,解法及体积函数法SOLA-VOF。国内外现已经开发了以流场模拟的实用化为相应目标的商品软件,如美国的PROCAST、FLOW 3D、德国的MAGMASOFT等。

2.2 数学模型

铸件的冷却过程是一个非稳态的导热过程,其热传导控制微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

式中: λ —导热率, ρ —密度, c —比热, q —内部热生成。其中,左边前3项为导热项,第4项为潜热项。右边为热积蓄项。

且:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

式中: V_x, V_y, V_z —媒介传到速度。

金属凝固过程释放结晶潜热是其显著特点。对于结晶潜热 H (J/m^3) 的处理,常用的方法有温度回升法、等价比热容法、热焓法等。本研究中ANSYS软件采用热焓法处理铸件凝固时的结晶潜热,在计算固液两相区比热容 $c(T)$ 时把结晶潜热一并加入:

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (6)$$

2.3 数值模拟应用

对于覆砂层、铁型和铸件的厚度关系,以前一般用经验公式或者图表推导,然后进行计算机模拟后投入实际生产。本研究则用实验参数讨论三者间的关系。根据实际产品的规格,所用铸件为阶梯型铸件,壁厚分6 mm,15 mm,30 mm,60 mm,模拟铸件的不同壁厚,材料为QT800,采用铁型覆砂工艺。根据文献[7]中得出的经验公式对比铸件的壁厚,本研究确定大致的铁型和覆砂层厚度范围,再选择铁型壁厚20 mm、40 mm,覆砂层厚度为6 mm,8 mm,10 mm,13 mm进行数值模拟。再根据铸件的对称性,沿中间对称面剖开,采用铸件的一半进行数值模拟,对称面为绝热面。数值模拟模型为阶梯型铸件外表面包覆一层树脂砂,再由铁型包覆。网格划分采用自由网格划分。先前很多研究表明铸件的温度降主要发生在覆砂层上^[8-12],所以网格划分时,铸件和覆砂层的网格划分得比铁型细,这样使得模拟数据在具备准确性的基础上又缩短了计算时间。利用ANSYS软件对铁型覆砂铸造工艺进行温度场模拟。网格划分以后的模型如图3所示。

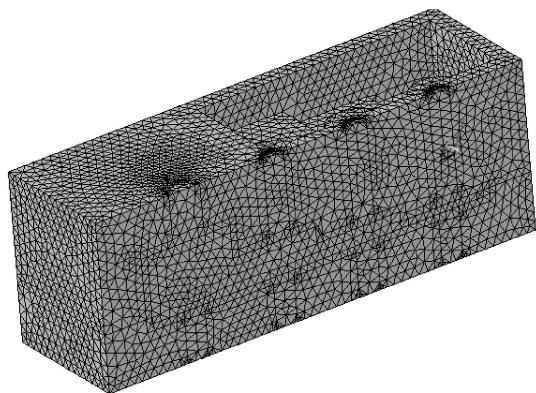


图3 ANSYS网格划分示意图

不同铁型厚度对同一覆砂层厚度,同一铸件厚度的冷却曲线如图4所示。从图4中可以看出,铁型越厚的铸件,其冷却速度越快。其中也观察到铸件的冷却

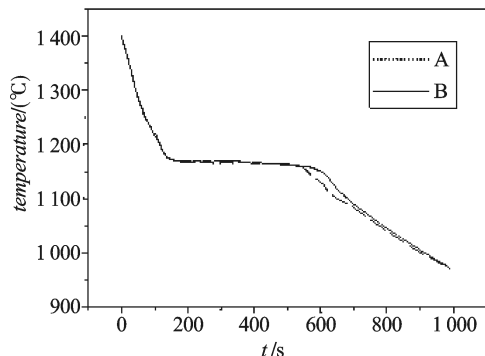


图4 不同铁型厚度的冷却曲线

A—铁型厚度40 mm; B—铁型厚度20 mm

曲线差异不大,较明显的差异存在于1 150 ℃~1 100 ℃的冷却范围内,由于铁型厚度的不同,造成热量由覆砂层向外传递的速度不同,导致了曲线的差异性,但是总体来说,两条冷却曲线还是比较接近的。从图4中也可以看出,大约在500 s后,热量开始大量的从覆砂层传向铁型。可以得出结论,铁型对铸件的冷却有一定的影响,但是影响并不是非常大。

同一铸件厚度,同一铁型厚度在不同覆砂层的厚度下的冷却曲线如图5所示,可以看出,曲线的差异性还是比较大的。从图5中可以看出,经过500 s左右时,热量开始由覆砂层大量传向铁型,这个时候,D曲线明显较其他3条曲线下落得更快。而且,A,B,C 3条曲线在大约500 s时开始第2次明显的温度降,而D曲线D则在400 s时就开始了。说明薄的覆砂层,加快了铸件的冷却速度。图中A,B,C 3条曲线冷却速度相差不大,是因为对不同壁厚的铸件,覆砂层对其保温效果是有限的,覆砂层厚度再增加,对其冷却速度也不会有很大

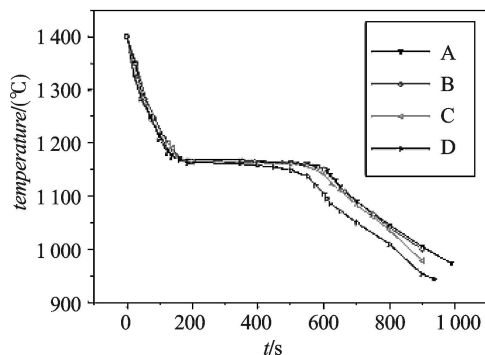


图5 不同覆砂层厚度的冷却曲线

A—砂型厚度13 mm; B—砂型厚度10 mm;

C—砂型厚度8 mm; D—砂型厚度6 mm

的改变,这就类似于砂型铸造。

由以上对2种铁型,4种覆砂层厚度的凝固模拟可以看出,覆砂层的厚度对铸件的冷却影响比铁型厚度要大,覆砂层达到一定厚度以后,便不会对铸件的冷却造成太大的影响。实际生产中必须要根据铸件的厚度,合理确定三者的厚度关系,以达到铸件的要求。

3 实验方法

为了检验ANSYS数值模拟的准确性,本研究采用了热电偶对上述铸件进行了实际冷却曲线测量。实验装置如图6所示,图中分别为覆完砂的上下铁型,温度测量装置。铁型厚度40 mm的实际数据和模拟数据的对比图如图7所示。由图7看出,实际数据和模拟数据相对吻合,对数据误差进行分析,误差不超过5%。故本研究认为采用ANSYS模拟的数据是值得信任的。这就为应用于实际产品铸件的模拟提供了很好的帮助。

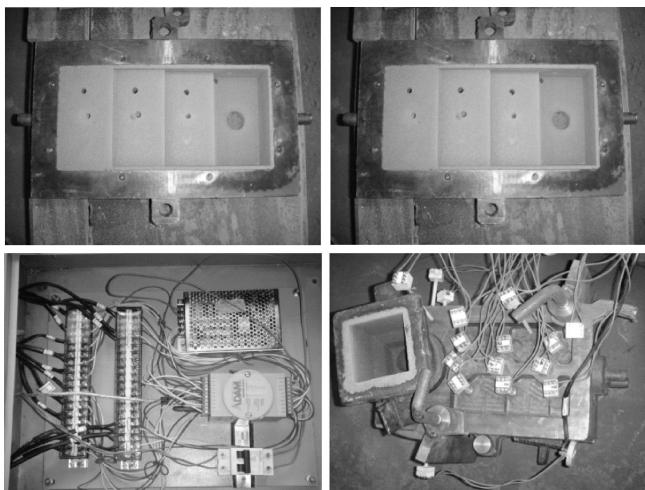


图6 实验装置

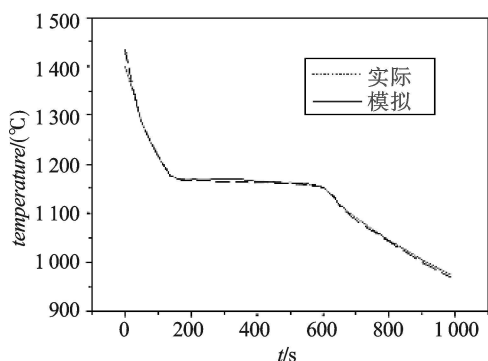


图7 实验与模拟数据对比

球铁铸件试块的球化效果金相照片如图8所示。从图8中可以看出, 石墨的球化效果还是比较理想的。

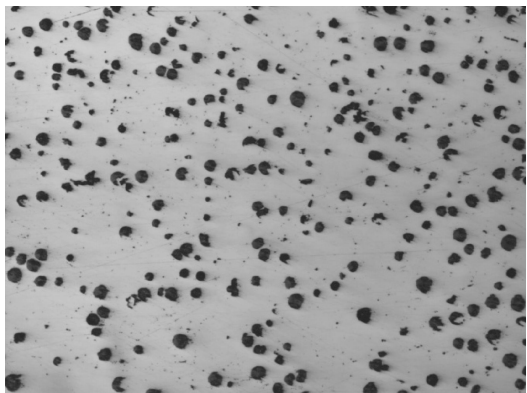


图8 球化效果图

5 结束语

本研究采用ANSYS对球墨铸铁铸件铁型覆砂铸

造工艺进行了数值模拟, 讨论了铁型厚度, 覆砂层厚度对球墨铸铁铸件冷却凝固的影响。相对于铁型来说, 覆砂层厚度对球铁铸件的冷却具有更大得影响, 覆砂层越厚, 铸件的冷却越慢。当覆砂层厚度达到某一值后, 冷却速度基本不变。而铁型越厚, 其冷却速度越快。同样, 当达到一定厚度时, 冷却速度也不会随之有很大的变化。本研究还用实验验证模拟数据, 验证模拟数据的可信性。得出比较可靠的材料热物性参数。为数值模拟应用于实际生产提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 黄列群, 潘东杰. 铁型覆砂铸造工艺及其应用[J]. 铸造, 1992, 41(2): 38-40.
- [2] 柳百成, 荆涛. 铸造过程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 荆涛. 凝固过程数值模拟[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] 林国荣. 铸件形成过程计算机数值模拟的发展及应用[J]. 现代铸铁, 2001(2): 8-13.
- [5] 熊守美, 柳百成, 许庆彦, 等. 铸件充型凝固过程数值模拟研究[J]. 现代铸铁, 2002(1): 16-21.
- [6] 刘瑞祥, 陈立亮, 魏华胜, 等. 铸件凝固过程数值模拟的生产应用[J]. 现代铸铁, 2003(4): 34-36.
- [7] 黄列群. 铁型覆砂铸造及其应用[J]. 机电工程, 1999, 16(3): 55-58.
- [8] VIJAYARAM T R, SULAIMAN S, HAMOUDA A M S, et al. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006, 178(1-3): 29-33.
- [9] 龚萍, 章建国, 梅俊, 等. 铁型覆砂铸造 4JB1 球铁曲轴[J]. 现代铸铁, 2001(4): 42-43.
- [10] BARRAL P, QUINTELA P. A numerical method for simulation of thermal stresses during casting of aluminium slabs[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1998, 178(1-2): 69-88.
- [11] SHEPEL S V, PAOLUCCI S. Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2002, 22(2): 229-248.
- [12] KEMANPUR A, MAHMOUDI S, HAJIPOUR A. Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008, 206(1-3): 62-68.

[编辑: 张翔]