

熔模铸造 ZM5 合金界面换热系数研究

孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 邢昌勇, 李 波, 许龙欢

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 通过试验测得ZM5合金在空冷条件下的温度曲线, 利用数值模拟的反分析优化方法计算并求解了ZM5合金铸件在冷却凝固过程中型壳与金属液的界面换热系数, 得到了界面换热系数随金属液温度的变化规律, 并对反求得到的界面换热系数进行了验证, 数值模拟得到的温度曲线与另一组试验测得的温度曲线吻合较好。

关键词: 熔模铸造; 数值模拟; 反分析优化方法; 界面换热系数

近年来随着计算机技术的飞速发展, 数值模拟技术已在铸造领域发挥着举足轻重的作用^[1-2]。铸造过程中的数值模拟技术能够辅助工艺人员对铸件进行设计, 经过少量的试验完成工艺的优化, 提高产品的合格率, 缩短产品设计和试制周期, 降低工程技术成本^[3]。然而, 铸造过程中数值模拟的准确性受边界条件的影响较大, 边界条件细微的变化可能造成计算结果本质的差异, 尤其是在以界面换热系数为边界条件时, 直接影响分析和研究结果^[4-5]。热传导反算法被普遍应用在界面换热系数的求解中, 得到了较好的效果。解锦婷等研究了铸造凝固过程中铸件与铸型界面的传热系数, 得到模拟的界面传热系数结果更接近实测值, 该结论可用于压力铸造、砂型铸造等凝固过程的模拟^[6]。Wang等利用反算的方法研究了挤压铸造过程中铝合金的界面换热系数, 得到界面换热系数在金属模具界面呈现出一些特点^[7]。李高峰等研究了在镍铝青铜水玻璃砂型铸造中铸件—砂型界面传热系数的反求计算方法, 该方法可应用于其他合金界面传热系数的求解^[8]。GUO等利用编写的计算机反算程序对AZ91D镁合金高压压铸条件下界面换热系数进行了研究, 得到界面换热系数在不同铸件壁厚下呈现出不同特点, 并随凝固行为变化而变化的结论^[9]。张立强等研究了金属型铸造条件下A356铝合金与铸型之间的界面换热系数随铸件温度变化的情况, 得到界面换热系数随铸件凝固时间变化而变化的规律, 其范围在1 200~6 200 W/(m²·K)之间, 且因结晶潜热的释放存在两个峰值^[10]。邵珩等研究了熔模铸造条件下纯铝铸件—铸型界面的换热系数, 得到铸件在凝固的不同阶段铸件—铸型的界面换热系数不断变化的结论^[11]。卜昆等研究了定向凝固条件下高温合金铸件—铸型间界面的换热系数, 得到较为精确的涡轮叶片铸造过程中界面换热系数, 使数值模拟精度得到了较大的提升^[12]。从以上研究可以发现, 对压铸和金属型铸造过程中的界面换热系数研究较多, 而对熔模铸造过程中的界面换热系数研究甚少, 随着熔模铸造技术的发展, 对以往利用计算机数值模拟使用常数为界面换热系数已经无法满足现有数值模拟精度的需要, 十分迫切需要对其进行深入探讨和研究。

作者以ZM5合金为研究对象, 通过热电偶测得熔模铸造过程金属液内不同高度处的温度, 采用热成像仪测得空冷条件下型壳的温度曲线, 利用ProCAST软件中的反优化分析方法计算得到铸件与型壳间的界面换热系数, 并对反算得到的界面换热系数进行了验证, 以期同类合金在铸造过程的数值模拟提供参考。

作者简介:

孟晓东(1990-), 男, 学士, 研究方向为轻质合金铸造模拟边界条件。E-mail: 1204620661@qq.com

通讯作者:

张荣强, 男, 硕士。电话: 13483413135, E-mail: 905014177@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)09-1154-04

收稿日期:

2022-01-06 收到初稿,
2022-01-26 收到修订稿。

1 反求法求解界面换热系数的原理

热传导反算法求解界面换热系数实际上是通过已知的测温数据，结合Beck反算法和优化算法，使得数值模拟结果不断接近实际的测温数据，从而得到铸件与铸型间的热流，通过热流除以铸件与型壳温度差得到界面换热系数，该反算方法求解原理与ProCAST软件反求原理一致。Beck等^[13]提出的非线性估算法原理是：在 τ' 时刻之前的铸件表面温度、型壳温度场和界面换热系数都已经完成求解，假设自 τ' 时刻起 N 个时间步长 $N\Delta\tau$ 内界面换热系数 h 保持不变，其值为 h' ，则可以根据 τ' 时刻的温度场和边界条件计算未来 N 个时间步长内温度场的变化，即：

$$h_{\tau'} = h_{\tau'+\Delta\tau} = \dots = h_{\tau'+N\Delta\tau} = h' \quad (1)$$

$$T = T(x, \tau + \Delta\tau, q_1, q_2) \quad (2)$$

$$q_1 = h(T_s - T|_{x=0^+}) \quad (3)$$

$$q_2 = \sigma \varepsilon (T|_{x=d_2} - T_c) \quad (4)$$

式中： x 为铸件与型壳之间的距离； τ 为时间； q_1 为铸件与型壳之间的热流密度； q_2 为型壳表面的热流密度； T 为温度； T_s 为铸件表面温度； σ 为有效辐射率； ε 为黑体辐射常数； T_c 为真空炉内壁温度。

定义 $f(h')$ 为：

$$f(h') = [T(x_k, \tau' + n\Delta\tau, q_1, q_2) - T^m(x_k, \tau' + n\Delta\tau)]^2 \quad (5)$$

其中： $T^m(x_k, \tau' + n\Delta\tau)$ 为 $\tau' + n\Delta\tau$ 时 x_k 点测得的温度。

$f(h')$ 代表在 τ' 时刻后按照 $h = h'$ 计算得到的温度场与实测温度场之间的差异。计算时以 $f(h')$ 的最小值为优化目标，当 $f(h')$ 达到极小值时得到最优的界面换热系数。图1为求解界面换热系数简化模型示意图。

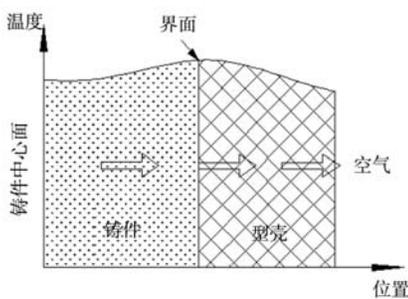


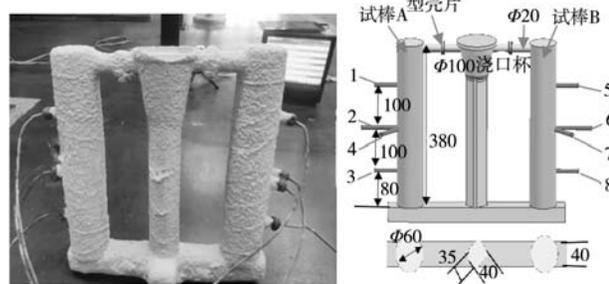
图1 界面换热系数简化模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simplified model of interface heat transfer coefficient

2 试验材料与试验方法

选用 $\Phi 60$ mm圆棒作为试验数据采集的基体，采集铸件在空冷条件下的散热数据。铸型为熔模铸造型壳，严格按照面层厚度为1 mm、过渡层厚度为1 mm、

加固层厚度为3 mm，最后封浆的方式制备型壳，面层砂材料为锆英粉，过渡层材料为莫来石，背层材料为高岭土。采用底注方式进行浇注，热电偶采用K型热电偶，响应时间为0.5 s，分别布置于距离底浇道80 mm、180 mm和280 mm中心处，顶端位置采用型壳片与主浇道隔开，其布置如图2所示；试验材料采用ZM5合金，合金成分如表1所示。试验设备包括巡检仪和热成像仪。



(a) 实物模型 (b) 三维模型

图2 模组组焊示意图

Fig. 2 Schematic diagram of module assembly welding

表1 ZM5合金成分

Table 1 Composition of ZM5 alloy $w_B/\%$

主要元素		杂质元素 (不大于)							
Mg	Zn	Al	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Be	其他单个
其余	0.61	8.67	0.25	0.017	0.002	0.001	0.001	0.005	0.1

3 结果与讨论

3.1 试验测得的结果

将各测量点测得的数据绘制成温度与时间的关系曲线，如图3所示。

由图3可以得到，在空冷条件下，同一时刻各测量

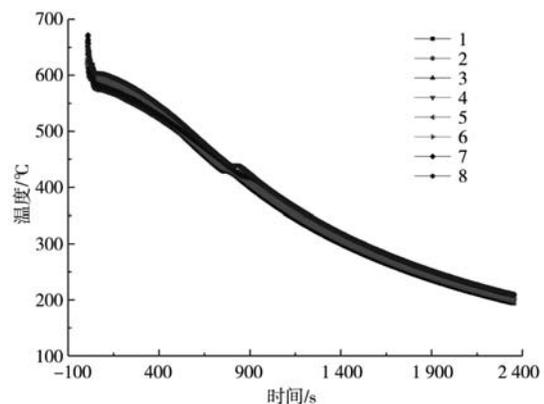


图3 不同测量点温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of temperature at different measurement points with time

点的温度基本无差异,在浇注50 s左右时,温度从676 °C降低到580 °C;在50~710 s时,温度与时间基本呈线性关系;在800~850 s时,温度基本稳定在438 °C左右,造成此现象的原因可能是固体结晶潜热的释放;在850 s后,温度与时间基本呈线性关系。

3.2 反算得到的界面换热系数

采用三维软件UG和ProCAST数值模拟软件分别对铸件进行建模和有限元网格划分,面网格大小为4 mm,型壳厚度为6 mm,面网格总数为75 216,体网格总数为774 382,有限元网格划分结果如图4所示。铸件和型壳在凝固过程中的界面换热系数可以看作是金属液温度的函数^[14-15],因此可以将金属液温度作为自变量反算界面换热系数。求解得到的结果如图5所示。



图4 有限元网格划分

Fig. 4 Finite element mesh generation

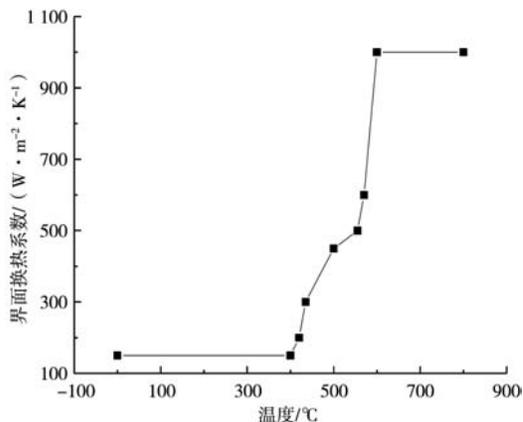


图5 随金属液温度变化的界面换热系数

Fig. 5 Interfacial heat transfer coefficient as a function of alloy temperature

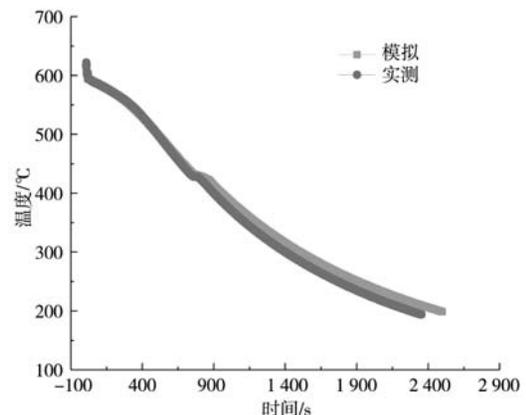
从图5可以看出,在整个铸件凝固过程中,界面换热系数可以分为三个阶段,即:液相线以上界面换热系数达到最大值的平稳阶段;液相线和固相线之间随着温度降低,界面换热系数逐步减小的阶段,以及固相线以后,界面换热系数达到最小值的平稳阶段。

在浇注的初始阶段,金属液与型壳之间能够紧密地接触,使得界面换热系数达到最大值。在液相线与固相线之间时,界面换热达到最大值后先急剧降低后

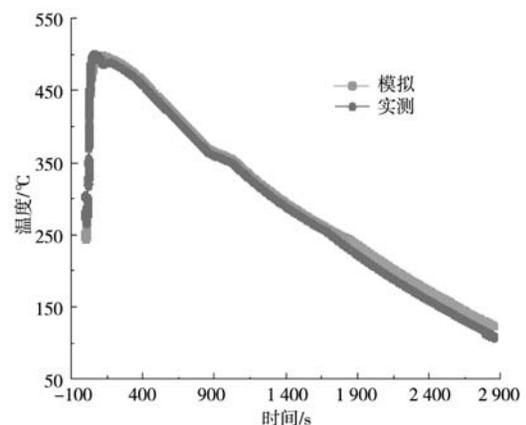
缓慢降低,当达到固相线时,界面换热系数达到最小值。其原因是金属液在充型和凝固过程中,由于金属液补缩和凝固收缩,导致铸件与型壳的界面由原先紧密接触状态变为部分接触或不接触的状态,从而使得界面换热系数由最大值急剧降低。在凝固过程中,铸件与型壳之间的间隙逐渐增大,从而导致界面换热系数缓慢降低。在铸件温度达到固相线温度时,铸件凝固收缩形成气体间隙,此时铸件与型壳之间的换热主要靠气体的辐射、对流和热传导,将会导致界面换热系数下降达到最小值。在固相线以下时,铸件与型壳之间的间隙不再发生变化,处于一种稳定的状态,使得界面换热系数的数值保持稳定。

4 验证反算得到的界面换热系数

将采用有限元软件反求计算得到的界面换热系数存储到ProCAST软件的数据库中,利用该换热系数求得另外一组铸件凝固过程的温度曲线,并与实测得到的温度曲线进行比较来验证换热系数的准确性。如图6所示为在空冷条件下数值模拟与实测得到的温度曲线比较结果。



(a) 空冷条件下数值模拟与实测铸件特征点温度曲线



(b) 空冷条件下数值模拟与实测型壳特征点温度曲线

图6 数值模拟与实测温度对比结果

Fig. 6 Comparison of numerical simulation and measured temperatures

由图6可得,数值模拟与实测的温度曲线吻合良好,空冷条件下铸件内特征点最大温差为4℃,最小温差为0,型壳内特征点最大温差为15℃,最小温差为0。结果表明:在铸件凝固过程中以实测的温度为基础,利用数值模拟中的反算优化方法计算求解铸件与型壳间换热系数的有效和正确性。

参考文献:

- [1] 曹永友,熊守美,郭志鹏.压铸压室内部界面传热反算模型的建立和应用[J].金属学报,2015,51(6):745-752.
- [2] JALURIA Y. Challenges in the accurate numerical simulation of practical thermal processes and systems [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2013, 23: 158-175.
- [3] 吴士平,张军,徐琴,等.钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究[J].中国体视学与图像分析,2010(2):134-140.
- [4] 郭志鹏,熊守美,曹尚铉,等.热传导反算模型的建立及其在求解界面热流过程中的应用[J].金属学报,2007,43(6):607-611.
- [5] DOUR G, DARGUSCH M, DAVIDSON C. Recommendations and guidelines for the performance of accurate heat transfer measurements in rapid forming processes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(11): 1773-1789.
- [6] 解锦婷,陈玲.金属铸造界面传热系数的试验研究及其确定[J].机械设计,2007,24(10):38-40.
- [7] WANG Feifan, WU Keyan, WANG Xuyang, et al. Measurement of temperature inside die and estimation of interfacial heat transfer coefficient in squeeze casting [J]. China Foundry, 2017, 14(5): 327-332.
- [8] 李高峰,黄引平,马敏团,等.界面传热系数的反求计算[J].热加工工艺,2014,43(23):92-94.
- [9] CAO Yongyou, GUO Zhipeng, XIONG Shoumei. Determination of interfacial heat transfer coefficient and its application in high pressure die casting process [J]. China Foundry, 2014, 11(4): 314-321.
- [10] 张立强,李落星,朱必武,等.基于反分析法的凝固过程中界面换热系数研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2010,37(6):22-26.
- [11] 邵珩,罗志辉,李岩,等.铝合金熔模精密铸造界面换热系数测量[J].铸造,2014,63(10):1010-1013.
- [12] 卜昆,李永毅,董一巍,等.单晶叶片铸造过程中界面换热系数的确定[J].铸造,2009,58(3):225-228.
- [13] BECK J V, BLACKWELL B, CLAIR C R. Inverse heat conduction: ill-posed problems [M]. New York: Wiley, 1985: 145.
- [14] FERREIRA I L, SPINELLI J E, PIRES J C, et al. The effect of melt temperature profile on the transient metal/mold heat transfer coefficient during solidification [J]. Master Sci Eng, 2005, 408A(1): 317.
- [15] GRIFFITHS W D. A model of the interfacial heat-transfer coefficient during unidirectional solidification of aluminum alloy [J]. Metall Master Trans, 2000, 31B(2): 285.

Research on Interface Heat Transfer Coefficient of ZM5 Alloy Under the Condition of Investment Casting

MENG Xiao-dong, ZHANG Rong-qiang, JI Xiao-lei, XING Chang-yong, LI Bo, XU Long-huan
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd, Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract:

Through experiments, the temperature curves of ZM5 alloy under air-cooled conditions were measured, and the inverse analysis optimization method of numerical simulation was used to calculate and solve the interface heat transfer coefficient between the shell and the molten metal during the cooling and solidification process of ZM5 alloy castings. The change law of the interface heat transfer coefficient with alloy temperature was obtained, and the interface heat transfer coefficient obtained from the reverse calculation was verified. The temperature curves acquired in another set of experiments are in good agreement with that got by numerical simulation.

Key words:

investment casting; numerical simulation; inverse analysis and optimization method; interfacial heat transfer coefficient