

# 基于反热传导法的镁合金半连铸一冷区 换热系数研究

于晓强<sup>1</sup>, 贾永辉<sup>1</sup>, 乐启炽<sup>1</sup>, 胡文义<sup>2</sup>, 赵大志<sup>1</sup>, 祝亚同<sup>1</sup>, 王 平<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 龙岩学院化学与材料学院, 福建龙岩 364012)

**摘要:** 文中设计了模铸实验并采用喷水冷却方式来模拟AZ31镁合金半连铸一冷区传热过程, 得到了用于反求界面换热系数的温度变化曲线。采用反热传导法求解了不同冷却水量下熔体-模具间的界面换热系数, 并分析了冷却水量对界面换热系数的影响。结果表明, 随着冷却水量的增加, 界面换热系数峰值与冷却水量呈正相关, 冷却水量由20 L/min提高到60 L/min时, 换热系数峰值从1 425.8 W/(m<sup>2</sup>·K)增加到2 727.5 W/(m<sup>2</sup>·K), 且高冷却水量的换热系数峰值出现在低的温度; 随着冷却水量的增加, 从铸坯边部到中心的凝固组织均匀性明显提高。

**关键词:** 镁合金; 界面换热系数; 冷却水量; 反热传导法; 微观组织

## 作者简介:

于晓强(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为镁合金半连铸换热系数的研究。E-mail: 952196991@qq.com

## 通讯作者:

乐启炽, 男, 教授, 电话: 024-83683312, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)02-0167-07

## 基金项目:

国家自然科学基金(51904151); 龙岩市科技计划项目(2021LYF9012)。

## 收稿日期:

2022-05-30 收到初稿,  
2022-08-08 收到修订稿。

半连续铸造是典型的生产变形坯料的铸造工艺之一。早在过去70年内, 半连铸不断发展并且被广泛地应用在铝、镁及其他合金铸锭的工业生产上<sup>[1]</sup>。镁合金的半连续铸造冷却过程主要经历了高温的熔融金属与温度较低的结晶器内壁相接触的一次冷却阶段和铸锭拉出结晶器后的二次水冷阶段。其中一冷阶段是熔体开始凝固的初始阶段, 不仅影响铸锭的表面质量, 而且也影响凝固过程的传热方向产生重要影响。

半连续铸造仿真模拟的应用可以有效预测凝固过程的温度场和应力场等, 有利于优化铸造工艺设计、提高生产率<sup>[2-4]</sup>。界面换热系数作为重要的边界条件, 直接关系到数值模拟结果的准确性<sup>[5]</sup>。Ho<sup>[6]</sup>等人研究表明, 金属液与结晶器内壁接触时的换热系数约为1 000~3 000 W/(m<sup>2</sup>·K), 而气隙形成后的换热系数仅为25 W/(m<sup>2</sup>·K)。郝炜<sup>[7]</sup>等人研究了铸型界面换热系数的测定方法, 发现利用实测温度场反求的界面换热系数是随温度和时间变化的值, 使得数值模拟精度较换热系数为常数时提高了20%以上。张立强<sup>[8]</sup>等人利用反热传导方法求解了A356铝合金在铜铸型中凝固过程的界面换热系数, 结果表明, 换热系数最小值为1 200 W/(m<sup>2</sup>·K), 最大值为6 200 W/(m<sup>2</sup>·K)。然而, 由于实际半连续铸造是一个不断往下移动的动态过程, 若要测得熔体从进入结晶器到最终凝固的温度历程, 则需要热电偶沿铸锭高度方向贯穿整个铸锭, 操作难度较高且使铸锭无法再使用。所以采用模铸和喷水冷却物理实验模拟半连铸一冷区的冷却过程。然而, 熔体和模具壁面间的界面换热系数受到多种因素综合作用的影响, 包括铸造速度、浇注温度、冷却强度、模具材质等<sup>[9]</sup>。此外, 对于半连续铸造, 熔体在凝固过程中铸锭和模具界面存在多种传热方式, 包括热传导、热对流和热辐射, 因为多种复杂的传热方式存在, 界面的换热系数目前还无法通过实验直接测量<sup>[10]</sup>。目前, 求解熔体与模具界面换热系数最常用的是反热传导方法, 即通过实验测得凝固过程熔体与模具的温度场, 把温度场的数据作为已知条件, 然后通过导热微分方程来求解这些边界条件, 求解过程中利用最小二乘法来无限逼近模拟数据与实际数据。

本文设计模铸实验并采用喷水冷却方式模拟镁合金半连铸一次冷却区传热过程, 测量了凝固过程中熔体和模具的温度场, 然后采用反热传导法来求解熔体与模具的界面换热系数, 从而为镁合金半连铸过程的数值模拟提供相对准确的边界条

件, 为半连铸工艺优化提供可靠依据。

## 1 模型和方法

### 1.1 试验材料和方法

为了研究冷却水量对换热系数的影响, 本文开展了3次试验对铸造过程中熔体和模具的温度变化进行实时测温, 试验装置如图1所示。模具外部采用喷水冷却方式对模具降温, 模具底部放置耐热石棉隔热, 金属熔体稳定浇入模具内部后上表面覆盖保温材料, 减少熔体在凝固过程中底部和上表面的散热影响, 尽可能保证熔体热量沿径向通过模具导出, 以模拟实际半连

铸过程中结晶器-冷区的散热特点。实验装置的模具高度与直径比例为21:8, 采用反热传导方法求解界面换热系数过程中只考虑熔体径向传热, 轴向传热可以忽略不计。图1中测温点1、点2和点3分别为熔体内部的测温点, 分别距离模具内壁25 mm、15 mm和5 mm, 测温点4处于模具厚度方向中心位置, 测温点5位于模具外壁, 用于测量冷却水的温度变化, 测温点1-5均处于同一平面, 测温用热电偶为 $\Phi 0.255$  mm的GG-K-30型热电偶, 其采样频率设置为200 ms。试验材料为AZ31B镁合金, 其化学成分如表1所示, 具体的试验条件如表2所示。

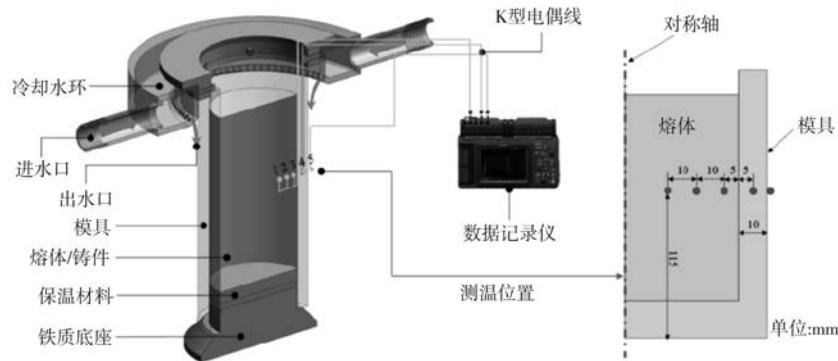


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

表1 AZ31B镁合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the AZ31B magnesium alloy

					$w_B/\%$
Al	Zn	Mn	Si	Ca	Mg
3.10	1.20	0.80	0.08	0.04	余量

表2 试验条件  
Table 2 Experimental condition

模具	模具	模具	模具	浇注	冷却	喷射
材质	高度	内径	外径	温度	水量	角度
紫铜	210 mm	80 mm	100 mm	760 °C	20~60 L/min	60°

### 1.2 反热传导法模型的建立

本研究基于凝固过程中的实测温度数据, 并采用DEFORM有限元模拟软件中的Inverse Heat Transfer模块, 来求解熔体-模具的界面换热系数。所用材料AZ31镁合金的相关模拟参数如图2所示。环境温度采用模具厚度方向的实测温度数据。本文选用随时间变化的界面换热系数变化函数, 选取的控制点为实测温度曲线的拐点, 插值方法采用B-spline三次样条插值。对于非线性导热问题的求解, 本文反求模型采用BFGS算法来优化计算过程, 可有效提高反求界面换热系数的效率以及模拟温度与实验温度的契合度<sup>[11]</sup>。

在实际半连续铸造过程中, 当达到稳态铸造阶段

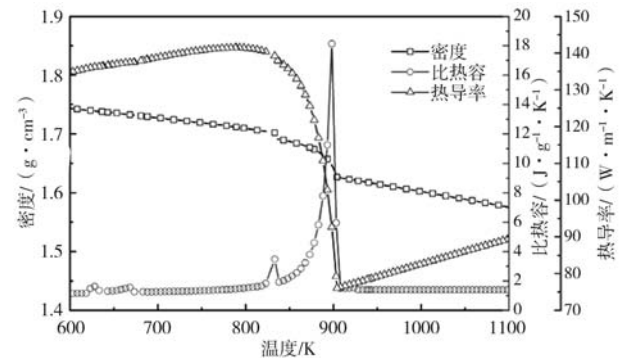


图2 AZ31热物性参数随温度变化曲线

Fig. 2 Thermo-physical parameters of the AZ31 as a function of the temperature

时, 液穴内未凝固熔体的温度分布将维持相对稳定, 一冷区熔体降温主要沿结晶器径向通过模拟壁面导出, 再经冷却水带走, 故熔体内部主要为一维径向传热问题。因此, 在熔体近表面点的温度变化可近似用一维瞬态热传导方程表示:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T^2}{\partial r^2} \quad (1)$$

式中:  $\rho$ 为材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为比热容,  $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda$ 为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为温度,  $\text{K}$ ;  $t$ 为时间,  $\text{s}$ 。在熔体冷却过程的模拟计算中, 界面换热边界条件

为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_s = h(T_c - T_M) \quad (2)$$

式中:  $h$ 为界面换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_c$ 为铸件表面温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_M$ 为冷却介质温度,  $^{\circ}C$ 。将实验测得的熔体近表面温度值 $T_c$ 和冷却介质温度 $T_M$ 作为边界条件导入反热传导计算模型中。并设置反传热模型计算需要初始预设界面换热系数的初始值、最小值和最大值。如果界面换热系数初始值预设过大或过小,将会导致程序优化的求解时间进一步增加。经多次迭代计算发现,界面换热系数初始值选取 $1\ 000\ W/(m^2 \cdot K)$ 以及上下边界值定义为 $1\sim 3\ 000\ W/(m^2 \cdot K)$ 较适宜。然后通过导热微分方程推算内部温度值,根据推算值与实验测定值的差值不断修正设定值,进而使推算值逐渐逼近测定值,最终得到随时间变化的界面换热系数曲线,图3为DEFORM反传热模型计算流程图。

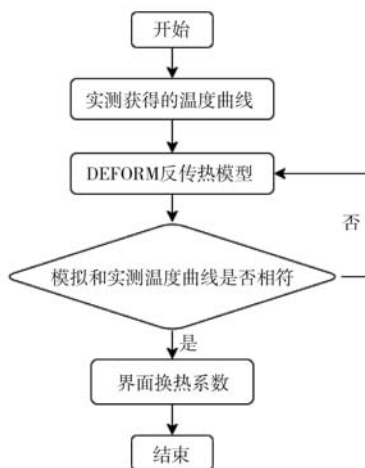


图3 DEFORM反传热模型计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of the inverse heat transfer model based on DEFORM

## 2 结果与讨论

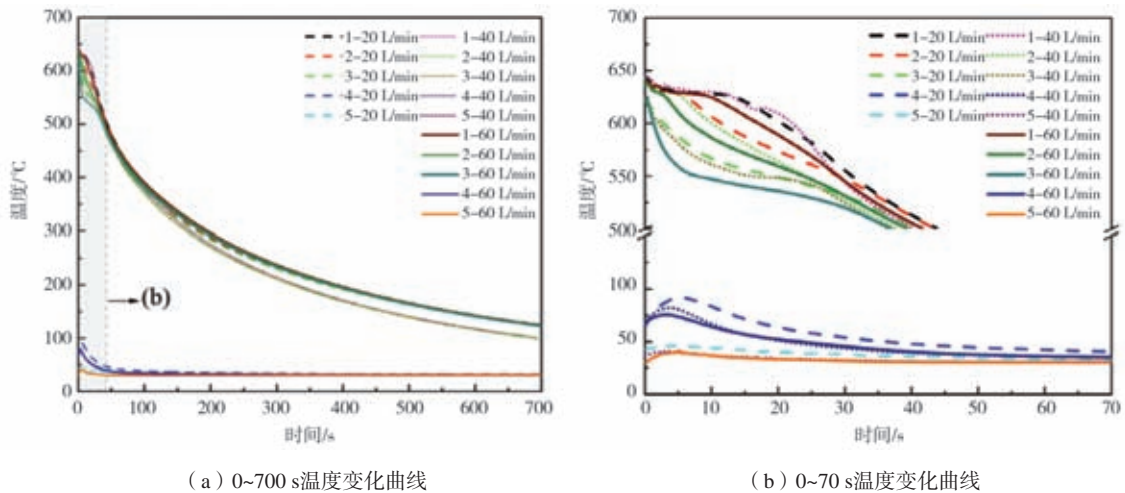
### 2.1 实验测得的温度结果

为了研究冷却水量对AZ31镁合金凝固过程中界面换热系数的影响,分别开展了冷却水量为20 L/min、40 L/min和60 L/min的凝固测温实验。图4展示了紫铜作为模具材料时不同冷却水量下的实测降温曲线,其中点划线、虚线及实线分别为水量20 L/min、40 L/min和60 L/min时的测温数据。结果表明,当高温熔体浇入模具并与其内壁接触后,由于模具的激冷作用,熔体表面温度迅速下降,模具温度迅速增加,在这最初的几秒内,熔体的冷却速率极大。在两相区内,随着冷却水量的增加,熔体的降温速度增加,而模具的升温速度减缓且最高温度逐渐降低。这是因为随着水量的增加,单位时间内冷却水带走的热量增多,提高了熔体的散热效率,减少了模具内部的热量储存。

利用反热传导方法来求解界面换热系数的准确性,主要取决于铸造过程中熔体-模具温度测量的准确性<sup>[12]</sup>。为保证温度测量的准确性,测温点应尽可能布置在界面附近,这样可以减少熔体内部传热的干扰,从而保证测温点尽可能仅受界面传热的影响<sup>[8]</sup>。因此,本研究把实验测得的点3和点4温度变化作为反求过程的温度历史数据,进而提高求解界面换热系数的准确性。

### 2.2 冷却水量对界面换热系数的影响

图5为通入不同水量后熔体和模具间界面换热系数随时间和温度变化的反求结果。结果表明,随着温度的降低,界面换热系数先快速增加后快速下降,最后趋于稳定。当高温金属浇入模具后,熔体尚未凝固,静水压力使其和模具内壁紧密接触,传热热阻非常小,换热系数迅速增加并达到峰值。此后随着铸件的



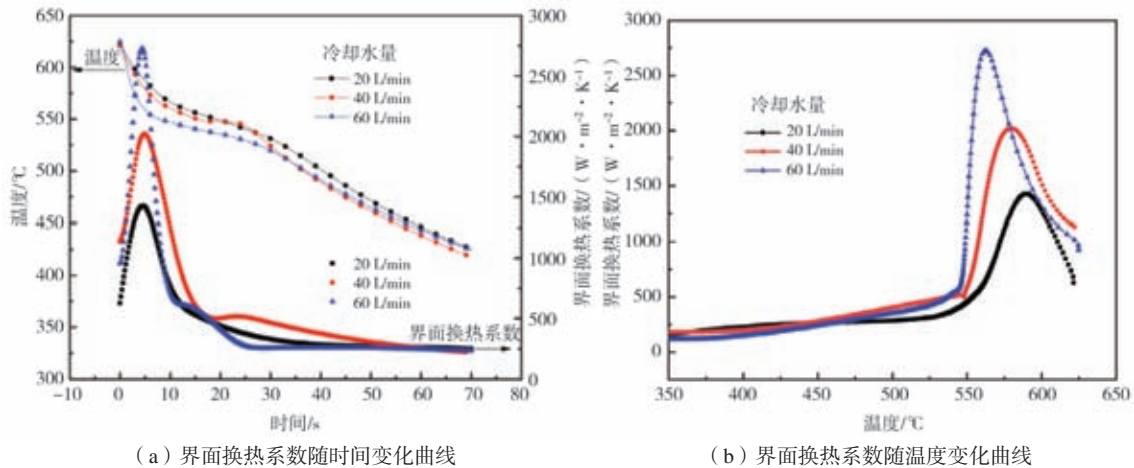
(a) 0~700 s温度变化曲线

(b) 0~70 s温度变化曲线

图4 不同水量下的凝固测温曲线

Fig. 4 Solidification temperature curves under different water flow rates





(a) 界面换热系数随时间变化曲线

(b) 界面换热系数随温度变化曲线

图5 不同冷却水量对界面换热系数的影响

Fig. 5 Effect of different cooling water flow rates on the interfacial heat transfer coefficient

不断冷却，凝固层厚度的增加，铸锭逐渐收缩并与模具内壁的界面中产生了间隙，导致传热热阻增加，界面换热系数迅速下降。最后熔体接近完全凝固时，熔体-模具界面的接触状态和界面间隙尺寸基本稳定，界面换热系数最终趋于稳定。

由图5a和图5b可知，不同冷却水量对熔体-模具的界面换热系数影响显著，主要表现在有以下几点：从图5a看出，在两相区时，界面换热系数随着冷却水量增加而增大的趋势明显，在5 s左右，界面换热系数迅速增加到峰值；冷却水量从20 L/min增加到60 L/min时，界面换热系数的峰值也从1 425.8 W/(m²·K)增加到2 727.5 W/(m²·K)。这是由于低水量时，模具的激冷作用较小，使得高温熔体向低温模具传递的热量较慢，换热效率相对较低，因此熔体-模具界面处的换热系数峰值相对较低，而高水量时情况相反。同时，当熔体温度与模具间的温差降至最小时，在相同热流情况下，根据牛顿冷却定律，此时的界面换热系数最大，因此冷却水量变化时，峰值出现了如图所示的变化规律。在随后十几秒的时间内界面换热系数急剧下降，当时间到达20 s左右，温度降到固相线温度以后，界面换热系数随着时间的推移基本不发生变化。从图5b可知，随着温度的降低，界面换热系数呈现先迅速升高后降低，最后基本不变的趋势；此外，换热系数峰值对应的温度随着冷却水量增大而有所降低，即冷却水量从20 L/min增加到60 L/min，温度从589.6 °C降低到562.6 °C。高冷却水流量的峰值换热系数出现在低的界面温度，在刘志文等人<sup>[13]</sup>的研究中也得到证实。

### 2.3 界面换热系数验证

为了验证反求得到的界面换热系数的准确性，将反求的界面换热系数作为已知边界条件进行温度场求解，得到相应的模拟温度场与实际测量的温度场对

比。本文采用点1和点2的测温数据来验证界面换热系数的准确性。图6为冷却水量为40 L/min时铸件内部数据点模拟温度和实测温度的对比。

从图6可以看出，用来作为反求的点3热电偶的实测温度数据与模拟温度有很好的吻合，模拟温度和实测温度最大相对误差不超过1.91%，最大温差不超过10.83 °C。为了进一步验证求解界面换热系数的准确性，如果点1和点2热电偶的实验温度与模拟温度很好的一致性，那么就能很好地说明求解的界面换热系数的正确性。从图6中还可以看到点2和点3热电偶的模拟温度和实测温度一致性较好，最大相对误差分别不超过2.88%和1.81%，最大温差分别不超过15.96 °C和10.02 °C。研究表明，铸件内实测温度和模拟温度之间的温差不超过20 °C是可以接受的<sup>[14]</sup>。因此，进一步证明了反求界面换热系数的可靠性和准确性。

### 2.4 冷却水量对微观组织的影响

为了研究冷却水量对微观组织的影响，如图7所

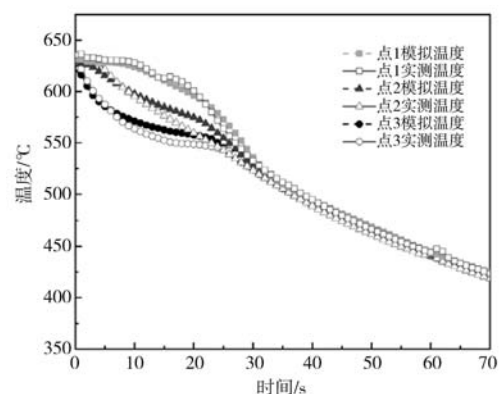


图6 模拟温度与实测温度的比较

Fig. 6 Comparison between simulated temperature and experimental temperature

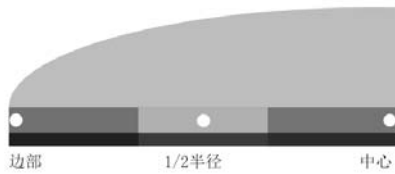


图7 圆锭对称面上微观组织观察示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the microstructure observation on symmetrical surface of the circular ingot

示,取圆锭的1/4部分作为研究对象,观察圆锭边部到中心的横截面组织。本试验采用的腐蚀液成分为:冰乙酸2 mL、苦味酸3 g、蒸馏水5 mL和酒精50 mL。

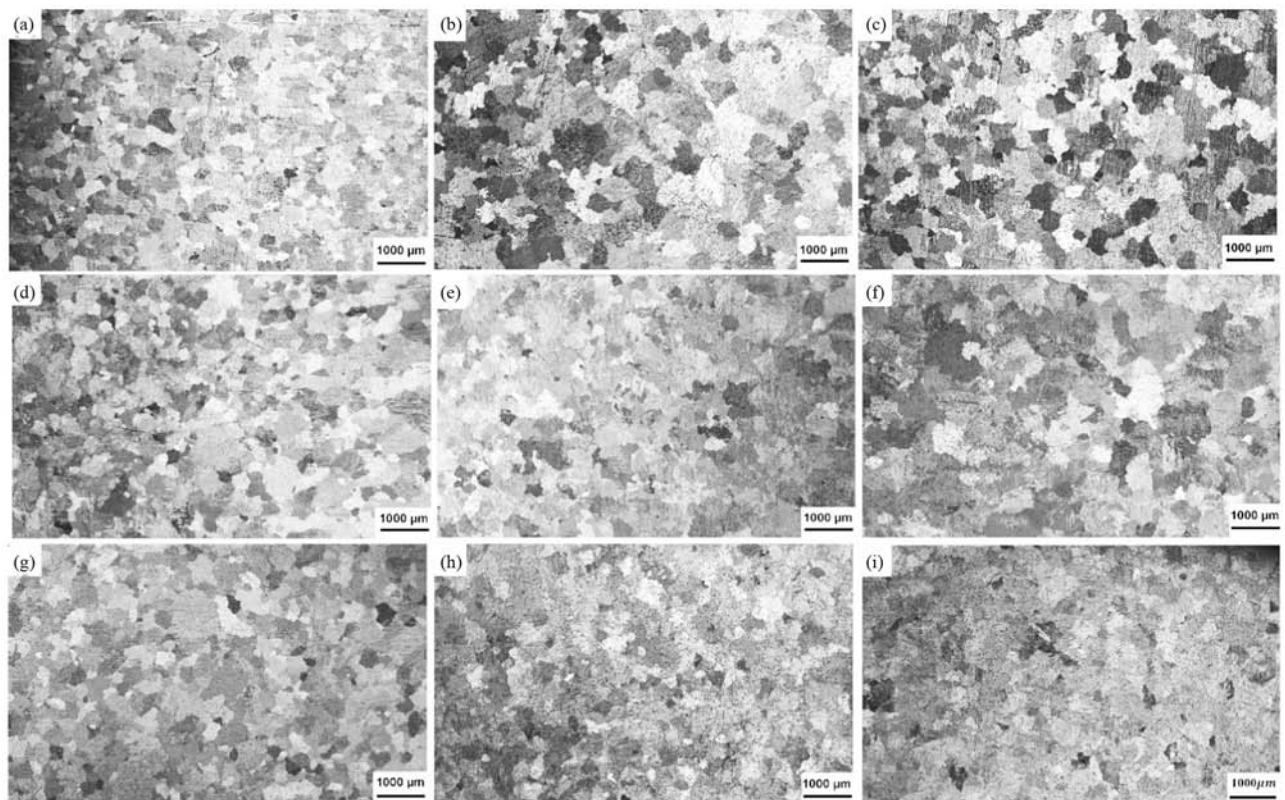
图8为不同冷却水量下沿径向对称面上的微观组织图,其中图8a、d、g、b、e、h和c、f、i分别为圆锭边部、1/2半径位置、心部的微观组织。可以看出,随着水量增加,铸坯从心部到边部的晶粒均被细化。结合图4a和图4b两相区内温度场的变化情况可知,冷却水量提高后,铸坯心部及1/2半径位置附近温度梯度变大,凝固时间缩短,凝固过程中枝晶没有充分的时间长大,因此晶粒变得细小。为进一步研究水量对晶粒尺寸的影响,对晶粒尺寸进行统计,结果如图9和图10所示。图9和图10分别为不同水量下的晶粒尺寸分布

和平均晶粒尺寸图,结果表明,从图9看出,水量由20 L/min提高到60 L/min时,铸锭边部到心部的晶粒尺寸分别由229.5  $\mu\text{m}$ 、547.5  $\mu\text{m}$ 、526.5  $\mu\text{m}$ 减小到220.8  $\mu\text{m}$ 、311.3  $\mu\text{m}$ 、372.9  $\mu\text{m}$ 左右。而图10可以看出,铸坯从边部到心部,冷却水量为20 L/min时,平均晶粒尺寸先增加后减少;冷却水量为40 L/min和60 L/min时,平均晶粒尺寸都不断增加。冷却水量由20 L/min 提高到60 L/min时,平均晶粒尺寸大约从229~547  $\mu\text{m}$ 减小到220~372  $\mu\text{m}$ 。可见,提高冷却强度可明显改善凝固组织均匀性。

### 3 结论

(1) 设计了模铸实验并采用喷水冷却方式来模拟半连铸一冷区传热过程,测量了熔体与模具内的温度变化。采用反热传导法求解了不同冷却水量下熔体-模具间的界面换热系数。结果表明,界面换热系数主要经历了先迅速升高后迅速降低,最后趋于常数三个阶段。

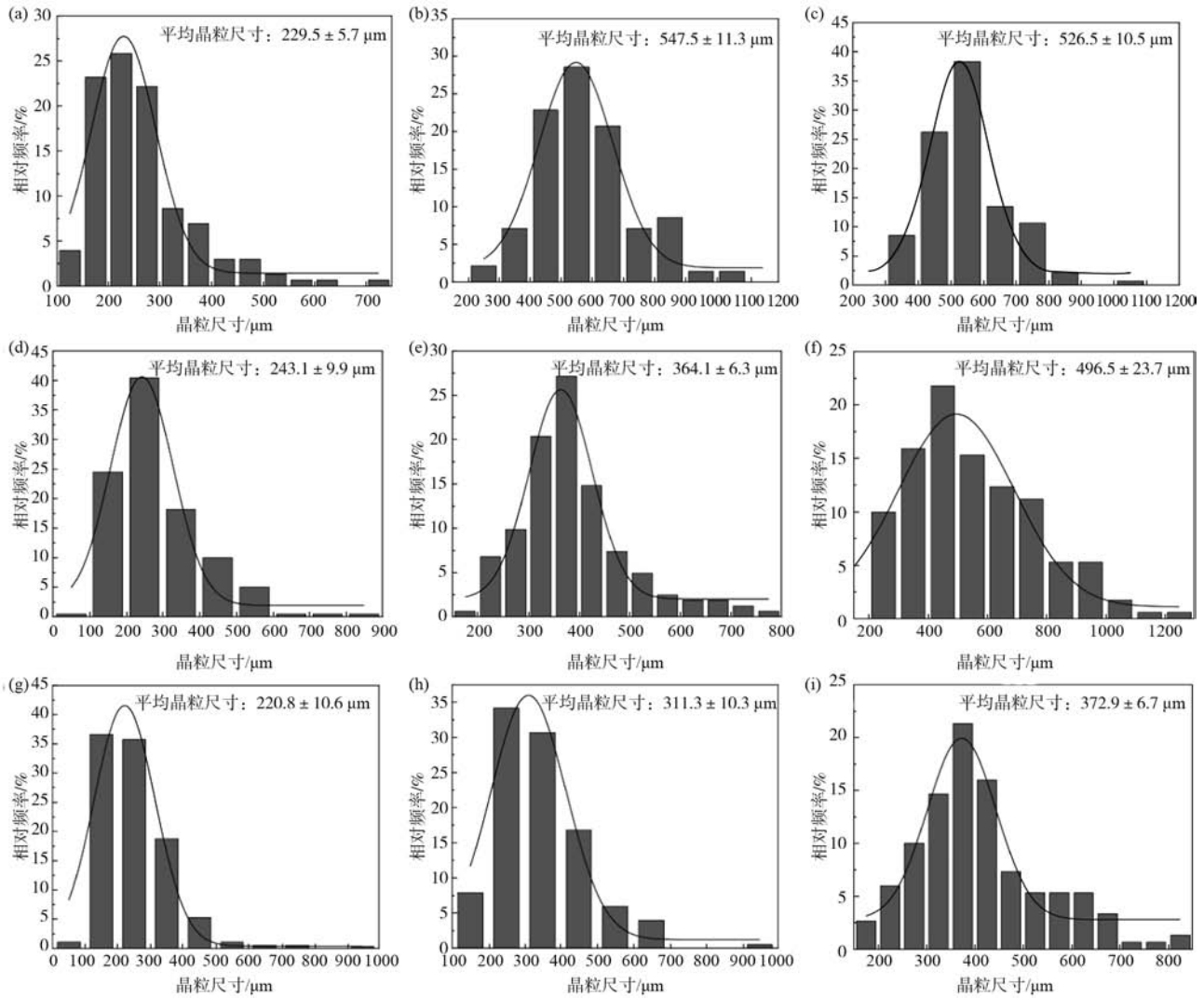
(2) 在两相区内,界面换热系数随着冷却水量的增加而增加。随着冷却水量增加,界面换热系数峰值与冷却水量呈正相关,冷却水量由20 L/min 提高到



(a)、(b)、(c) 水量20 L/min; (d)、(e)、(f) 水量40 L/min; (g)、(h)、(i) 水量60 L/min

图8 冷却水量对圆坯微观组织的影响

Fig. 8 Effect of the cooling water flow rate on the microstructure of the round billet



(a)、(b)、(c) 水量20 L/min; (d)、(e)、(f) 水量40 L/min; (g)、(h)、(i) 水量60 L/min

图9 冷却水量对圆坯晶粒尺寸分布的影响

Fig. 9 Effect of the cooling water flow rate on the distribution of the grain sizes of the round billet

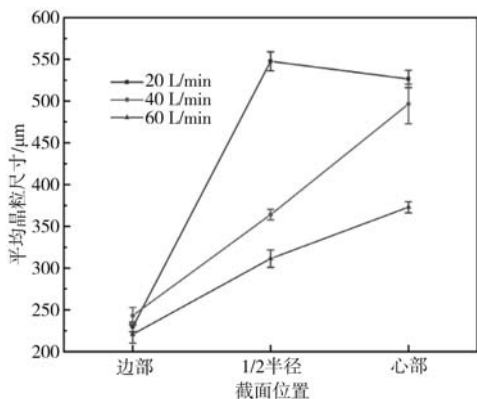


图10 冷却水量对平均晶粒尺寸的影响

Fig. 10 Effect of the cooling water flow rate on the average grain size

60 L/min时, 换热系数峰值从1 425.8 W/(m<sup>2</sup>·K)增加到2 727.5 W/(m<sup>2</sup>·K)。且高冷却水量的换热系数峰值出现在低的温度。

(3) 基于反求界面换热系数的温度场计算结果表明, 模拟温度与实测温度吻合性较好, 最大相对误差不超过2.88%, 表明所建立的反热传导模型是准确的, 这为半连续铸造数值模拟提供了相对准确的边界条件。

(4) 在研究范围内, 提高冷却水量可明显改善凝固组织均匀性。冷却水量由20 L/min提高到60 L/min时, 平均晶粒尺寸由229~547  $\mu\text{m}$ 减小至220~372  $\mu\text{m}$ 。



## 参考文献:

- [1] DREZET J-M. Direct chill and electromagnetic casting of aluminium alloys: thermomechanical effects and solidification aspects [R]. EPFL, 2000.
- [2] VIJAYARAM T R, SULAIMAN S, HAMOUDA A, et al. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds [J]. Journal of Material Processing Technology, 2006, 178 (1-3): 29-33.
- [3] ZHANG B, MAIJER D M, COCKCROFT S L. Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2007, 464 (1-2): 295-305.
- [4] 张立强, 卢远志, 张楚惠, 等. 基于计算机模拟的消失模铸造充型特性 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (2): 116-119, 79.
- [5] 熊守美, 郭志鹏. 压铸过程铸件-铸型界面换热行为的研究进展 [J]. 铸造技术, 2008 (9): 1163-1166.
- [6] NISHIDA Y, DROSTE W, ENGLER S J M T B. The air-gap formation process at the casting-mold interface and the heat transfer mechanism through the gap [J]. Metallurgical Transactions B, 1986, 17 (4): 833-844.
- [7] 郝炜, 康健, 马敏团, 等. 铸型界面换热系数的测定方法研究 [J]. 热加工工艺, 2007 (21): 11-15.
- [8] 张立强. 凝固界面换热系数反求及铝合金薄壁件压铸工艺优化 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [9] 陈国权, 林家骝. 影响铸件/铸型界面热交换因素综述 [J]. 铸造技术, 1992 (5): 36-37.
- [10] ZHANG L, LI L, JU H, et al. Inverse identification of interfacial heat transfer coefficient between the casting and metal mold using neural network [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51 (10): 1898-1904.
- [11] 曹欣, 孙志超, 杨合. 基于DEFORM反传热模型表面换热系数的确定 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 130-135.
- [12] DOUR G, DARGUSCH M, DAVIDSON C, et al. Development of a non-intrusive heat transfer coefficient gauge and its application to high pressure die casting: Effect of the process parameters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169 (2): 223-233.
- [13] LIU Z W, YI J, LI S K, et al. Study on inhomogeneous cooling behavior of extruded profile with unequal and large thicknesses during quenching using thermo-mechanical coupling model [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (5): 1211-1226.
- [14] SULAIMAN S, HAMOUDA A M S. Modeling of the thermal history of the sand casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113 (1-3): 245-250.

---

## Study on Heat Transfer Coefficient of Semi-Continuous Casting of Magnesium Alloy in Primary Cooling Zone Based on Inverse Heat Conduction Method

YU Xiao-qiang<sup>1</sup>, JIA Yong-hui<sup>1</sup>, LE Qi-chi<sup>1</sup>, HU Wen-yi<sup>2</sup>, ZHAO Da-zhi<sup>1</sup>, ZHU Ya-tong<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. College of Chemistry and Materials Science, Longyan University, Longyan 364012, Fujian, China)

**Abstract:**

In this paper, a mold casting experiment was designed and water spray cooling method was used to simulate the heat transfer process in the primary cooling zone of semi-continuous casting of AZ31 magnesium alloy, and the temperature variation curve was obtained for inverse calculation of the interface heat transfer coefficient. The interfacial heat transfer coefficient between melt and mold with different cooling water flow rates was calculated by inverse heat transfer method, and the effect of the cooling water flow rate on the interfacial heat transfer coefficient was analyzed. The results showed that with the increase of cooling water, the peak value of the interfacial heat transfer coefficient was positively correlated with the cooling water flow rate, when the cooling water flow rate increased from 20 L/min to 60 L/min, the peak heat transfer coefficient increased from 1 425.8 W/(m<sup>2</sup>·K) to 2 727.54 W/(m<sup>2</sup>·K) and the peak value of the interfacial heat transfer coefficient of high cooling water flow rate appeared at the low temperature. With the increase of the cooling water, the uniformity of solidification microstructure from edge to center of the billet was improved obviously.

**Key words:**

magnesium alloy; interfacial heat transfer coefficient; cooling water flow rate; inverse heat transfer method; microstructure