

H13 钢喷雾冷却过程中的喷雾压力对界面传热的影响

王子超 赵海东 王 果 雷月琴
(华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心)

摘 要 为了准确计算压铸喷雾过程中模具温度场,模具与喷雾介质之间的界面传热系数(IHTC)是极其重要的热物性参数。进行了不同喷雾压力下的喷雾试验,记录了 H13 钢板整个喷雾冷却过程的温度变化。基于非线性估算法求解了不同喷雾参数下的 IHTC。研究了喷雾冷却过程中的界面形貌及传热特性,并讨论了喷雾压力对 IHTC 的影响。结果表明,界面可分为湿区和干区,其中前者会显著影响界面传热行为。研究发现,高喷雾压力对提高 IHTC 的峰值有积极作用,但阻碍了湿区的扩展并延长了 IHTC 达到峰值的时间。

关键词 H13 钢;喷雾冷却;界面传热系数;反算法;喷雾压力

中图分类号 TP311;TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.013 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Spray Pressure on Interfacial Heat Transfer of H13 Steel during Spray Cooling

Wang Zichao, Zhao Haidong, Wang Guo, Lei Yueqin
(National Engineering Research Centre of Near-net Shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology)

Abstract: To accurately calculate the mould temperature field during the spray process of die casting process, the interfacial heat transfer coefficient (IHTC) between the mould and the spray medium is an extremely important thermo-physical parameter. A spray experiment was conducted with different spray pressures, in which the temperature history throughout the spray cooling process of H13 steel plate was recorded. The IHTC at the different spray pressures was calculated by utilizing the nonlinear estimation method. The interface morphology and heat transfer characteristics within the spray cooling process were investigated, and the influence of spray pressures on the IHTC was expounded. The results show that the interface can be divided into wet and dry zone, where the former significantly affects the heat transfer behavior on the interface. It is found that high spray pressure has a positive effect on improving peak IHTC, whereas it impedes the expansion of wet zone and delays the peak of IHTC.

Key Words: H13 Steel, Spray Cooling, Interfacial Heat Transfer Coefficient, Inverse Method, Spray Pressure

压铸工艺具有生产效率高、近净成形和表面质量良好的特点,被广泛应用于汽车、电子、通信和其他行业的零部件制造中,近年来国内压铸生产及其模具需求快速增长^[1,2]。准确的模具温度场模拟有助于压铸工艺设计,提高铸件尺寸精度,延长模具寿命,缩短开发周期并降低制造成本。在快速的压铸生产中,必须进行喷涂来冷却和润滑模具表面^[3,4],对铸造的模具温度场具有重要的影响。在现有的模拟中,通常将喷雾过程的界面传热系数(IHTC)设置为常数。但是,对气淬和电子设备

冷却^[5~11]等领域中的喷雾冷却的研究表明,IHTC 随时间和空间的变化而变化^[12~15]。因此,在喷雾过程中模具的 IHTC 是提高压铸过程全周期温度场模拟精度的必要参数之一,而关于该研究未见报道。

本课题设计了一个喷雾试验平台,以模拟压铸模具的喷雾过程。选择 H13 热作模具钢作为试验材料,采用适应实际生产的喷雾设备及喷雾参数。通过记录 H13 钢板喷雾冷却界面附近的温度变化,并结合基于 Beck 非线性估算法^[16]的自行开发的程序,反向求解在

收稿日期:2021-04-26;修改稿收到日期:2021-06-12
基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010184002);佛山市核心技术攻关资助项目(1920001001040)
第一作者简介:王子超,男,1996 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:53386523@qq.com
通信作者:赵海东,男,1970 年出生,教授,广州(510640),E-mail:hdzhao@scut.edu.cn
引用格式:王子超,赵海东,王果,等. H13 钢喷雾冷却过程中的喷雾压力对界面传热的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 387-1 393.
WANG Z C, ZHAO H D, WANG G, et al. Effects of spray pressure on interfacial heat transfer of H13 steel during spray cooling[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 387-1 393.

不同喷雾压力下的 IHTC。此外,还研究了喷雾冷却过程的界面形貌和传热特性,并讨论了喷雾压力与 IHTC 之间的关系,旨在为其应用提供参考。

1 喷雾冷却测温试验

1.1 试验材料

试验材料为 H13 热作模具钢,经过锻造和退火后加工成 200 mm×140 mm×20 mm 的平板。其化学成分见表 1,符合 ANSI 标准。

表 1 H13 钢的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the experimental H13 steel %						
w _B						
C	Cr	Mn	Si	Mo	V	Fe
0.39	5.2	0.4	1.1	1.2	0.95	余量

1.2 试验设置

喷雾冷却测温试验的示意图见图 1,试验装置由空气-水混合喷嘴、气管、空气压缩机、水管、PLC 控制柜、加热装置和高压管路等组成。H13 钢平板放置在绝热的工作台上,以避免沿向下方向的不必要的热损失。喷射角为 30°的喷头固定在可调节的铝框架上,其喷射轴垂直于工作台。水气管道连接到喷头,供给由空气压缩机提供的高压水和空气,经流量阀控制,压力为 0.1~0.5 MPa。整个喷雾过程由 PLC 机柜通过喷头上的电磁阀控制。

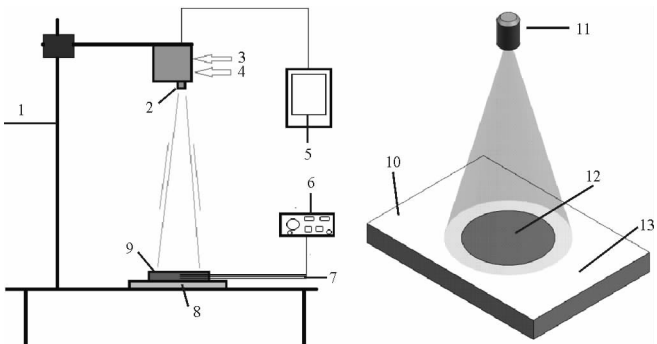


图 1 喷雾冷却测温试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of spray cooling experiment
1.调节架 2、11.喷嘴 3.水管 4.气管 5.PLC 柜 6.数据收集系统
7.热电偶 8.绝热台 9.加热器 10.试验板 12.湿区 13.干区

试验采用瑞士 Kistler 高精度数据采集系统 CoM-oMIS 2869B301,测量响应时间为 25 ms,频率为 10 Hz。8 个直径为 0.5 mm 的 K 型热电偶(TC1-TC8)与采集系统相连以收集温度数据。从平板一侧开设 8 个直径为 1 mm,深为 70 mm 的热电偶插孔,见图 2。沿平板长度方向布置的 TC1~TC6 测得的温度数据用于计算 6 个划分的喷雾区域(Z1~Z6)的 IHTC,而沿厚度方向布置的 TC7 和 TC8 的数据则分别用于控制平

板的预热温度 IHTC 和验证反算结果。

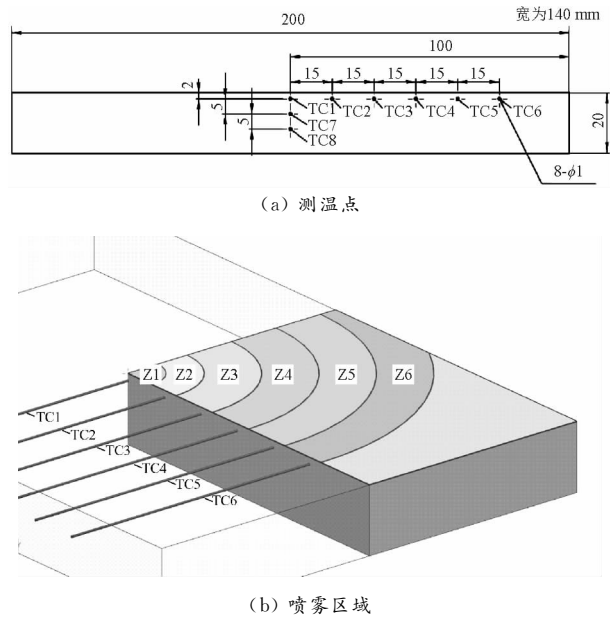


图 2 测温点及喷雾区域分布示意图
Fig.2 Schematic diagram of layout of temperature measurement points and spray zones

1.3 试验流程

在实际的压铸过程中,喷雾压力通常调节为 0.3~0.4 MPa。因此,试验喷雾压力设定为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 MPa,而喷雾高度设定为 200、300 和 400 mm。总共进行了 12 次独立的喷雾试验,测量 H13 平板在不同喷雾压力和高度下各点的温度变化。喷雾冷却工艺参数见表 2。

表 2 喷雾冷却试验参数

Tab.2 Parameters of the spray cooling experiment				
序号	喷射压力/ MPa	喷射高度/ mm	序号	喷射压力/ MPa
1	0.2	200	7	0.4
2	0.3	200	8	0.5
3	0.4	200	9	0.2
4	0.5	200	10	0.3
5	0.2	300	11	0.4
6	0.3	300	12	0.5

试验过程如下:预设喷雾冷却参数;在 H13 钢平板上安装热电偶,并将其固定在工作台上(钢板的中心在喷头的正下方);用接触式加热装置将板加热到 300 ℃,并持续一定时间,以确保平板温度均匀分布;开启喷雾装置,开始记录温度变化(喷雾持续 10s);关闭喷雾并保存温度数据。

2 IHTC 反算法

2.1 数学模型

本课题中 IHTC 的求解是基于 Beck 非线性估算

法。为了获得准确的 IHTC,应确定实际的温度场和传热边界条件,然后通过最小化计算温度和测量温度之间的差值来求解 IHTC。整个喷雾过程可分为若干个时间步,每一段可细分为 r 个未来时间步^[17,18]。假定在某一时间段 L 内, r 个未来时间步的 IHTC 相同,则:

$$h_L = h_{L+i} (i = 1, 2, \dots, r-1) \quad (1)$$

对第 L 个时间步,构造目标函数:

$$F(h_L) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{r-1} (T_{i,L+j}^m - T_{i,L+j}^c)^2 \quad (2)$$

式中, N 为热电偶数量; h_L 为当前时间步的 IHTC, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $T_{i,L+j}^m$ 为测量点 i 和未来时间步 $L+j$ 的试验测量温度; $T_{i,L+j}^c$ 为给定 h_L 值的模拟计算温度, $^\circ C$ 。

目标函数取得极小值的必要条件为:

$$\frac{\partial F(h_L)}{\partial h_L} = 0 \quad (3)$$

即

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{r-1} [T_{i,L+j}^m - T_{i,L+j}^c(h_L)] \frac{\partial T_{i,L+j}^c}{\partial h_L} = 0 \quad (4)$$

对计算温度场 $T_{i,L+j}^c(h_L)$ 进行泰勒展开,得

$$T_{i,L+j}^c(h_L) = T_{i,L+j}^c(h_L^*) + \frac{\partial T_{i,L+j}^c}{\partial h_L} \Delta h_L \quad (5)$$

其中

$$\Delta h_L = h_L - h_L^* \quad (6)$$

式中, Δh_L 为 IHTC 增量, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; h_L^* 上一次计算得到的 IHTC, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

可以求解出计算温度场,得到敏感系数 $\varphi_{i,L+j}$ ^[19,20]:

$$\varphi_{i,L+j} = \frac{\partial T_{i,L+j}^c}{\partial h_L} = \frac{T_{i,L+j}^c[(1+\epsilon)h_L] - T_{i,L+j}^c(h_L)}{\epsilon h_L} \quad (7)$$

其中,极小值 ϵ 在本研究中设置为 0.001。将式(5)~式(7)代入式(3)得

$$\Delta h_L = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{r-1} (T_{i,L+j}^m - T_{i,L+j}^c) \times \varphi_{i,L+j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{r-1} (\varphi_{i,L+j})^2} \quad (8)$$

每个时间步内,当前传热系数 h_L 可以由 h_L^* 与 Δh_L 相加得到。IHTC 被反复修正直至满足收敛条件 $\left| \frac{\Delta h_L}{h_L} \right| \leq E$,判断因子 E 设置为 0.01。

2.2 计算过程

通过基于上述模型的自行开发的程序可以求解出喷雾过程的 IHTC。该程序是通过 Mechanical APDL 软件的用户开发功能(UDF)实现的。通过反复调用 ANSYS 来求解温度场,再将模拟和试验结果代入到式(8),计算得到 Time-IHTC 曲线。求解过程如下:读取

试验过程中测温点上随时间变化的温度数据;建立有限元模型并设定初始界面传热系数 h_0 及其他边界条件;调用 ANSYS 计算得到平板温度场;计算敏感系数 φ_i 及 IHTC 增量 Δh ;不断修正界面传热系数 h 直至满足收敛条件;输出界面传热系数 h ,直到计算结束。流程图见图 3。

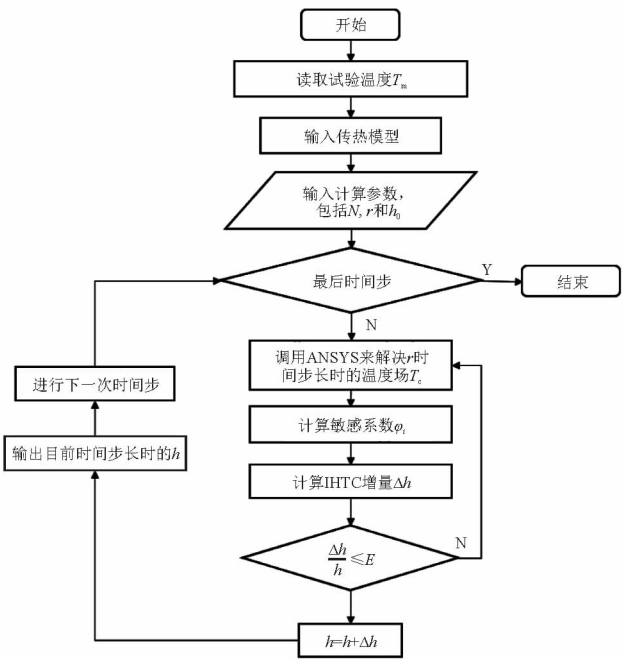


图 3 基于 ANSYS 的反算法流程图

Fig.3 Flow chart of inverse calculation based on ANSYS

计算过程中 H13 钢平板的热物理性质被设置为随温度变化的变量,见表 3。平板的预热温度为 300 $^\circ C$,环境温度为 25 $^\circ C$ 。因为预热后板中心和边缘之间存在 2~3 $^\circ C$ 的差异。为了提高模拟精度,计算中将热电偶实际测得的平板温度设置为初始温度。总计算时间为 10 s,时间步长为 1 s,未来时间步长设为 0.05 s。即每个测温点计算 10 步 IHTC,且每步 IHTC 由 20 个温度值计算得到。

表 3 H13 钢的热物性参数

Tab.3 Thermo-physical properties of H13 steel			
温度/ $^\circ C$	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$
25	25	460	7 810
300	27.4	512	7 640
500	28.9	548	7 627

根据热电偶的位置,喷雾界面被同心圆划分为 6 个喷雾区域,见图 2。为了描述每个区域的复杂传热行为,引入综合传热系数 $h_{综}$ 。假设 IHTC 在一个时间步内为常数,各个喷雾区域中的 IHTC 仅随时间变化并且彼此独立,喷雾区域和对应热电偶的位置关系见表 4。模型的底部设置为绝热界面,其他界面设置为空气对流界面,对流传热系数取 20 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ^[21]。

表 4 喷雾区域分布

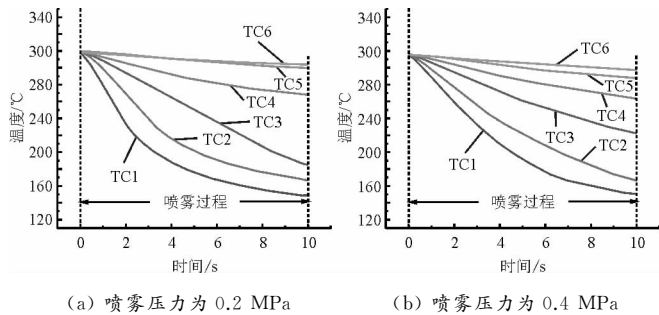
Tab.4 Distribution of sprayzones

热电偶	坐标 X/mm	喷射区	区域半径/mm
TC1	0	Z1	[0,10)
TC2	15	Z2	[10,20)
TC3	30	Z3	[20,35)
TC4	45	Z4	[35,50)
TC5	60	Z5	[50,65)
TC6	75	Z6	[65,80)

3 试验结果分析

3.1 温度结果

沿 H13 钢板水平布置的 6 根热电偶(TC1~TC6)记录了喷雾冷却过程中界面处的温度变化,在 0.2 和 0.4 MPa 压力下的时间-温度曲线见图 4。可以看出,喷雾开始后各点温度均开始下降,其中靠近中心的 TC1 和 TC2 的温度下降较快,明显低于其他点,说明喷雾中心先冷却。另外,TC3 在 0.4 MPa 压力下的最低温度显著高于在 0.2 MPa 压力下的最低温度。



(a) 喷雾压力为 0.2 MPa (b) 喷雾压力为 0.4 MPa

图 4 喷雾高度为 300 mm 下 H13 平板的测量温度

Fig.4 Measured temperature of the H13 plate under spray height of 300 mm

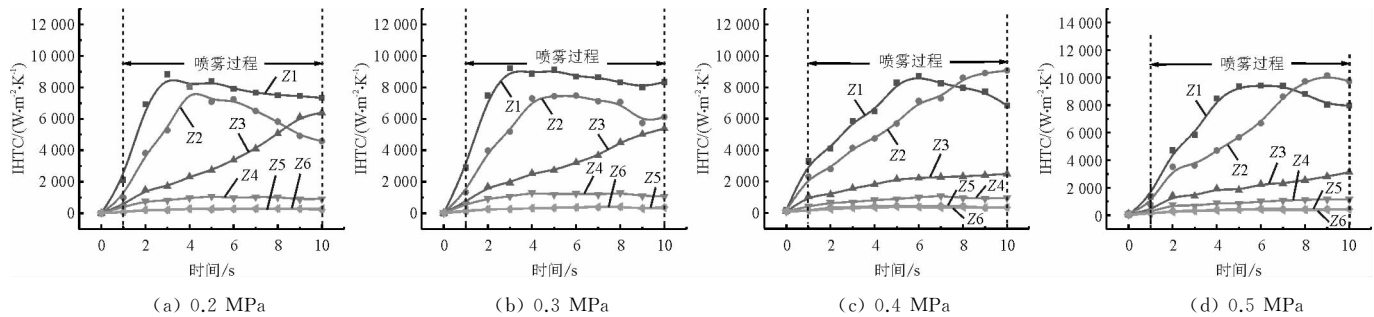


图 6 喷雾高度为 300 mm 下不同喷雾压力的时间-IHTC 曲线

Fig.6 Time-IHTC curves with different spray pressures under height of 300 mm

达到峰值的时间被延后,但峰值变化不大。

3.3 喷雾界面形貌

图 7 为在 0.4 MPa 压力和 300 mm 高度下的喷雾界面特征。可以看出,当喷雾开始时,液滴逐渐沉积在界面中心,形成近圆形的放射状区域,被液膜覆盖并润湿的区域被称为湿区,剩余区域被称为干区。由图 7 可知,湿区随喷雾时间而扩大。平板和喷雾介质之间的传

3.2 IHTC 结果

3.2.1 反算法验证

将计算得到的 IHTC 作为边界条件模拟喷雾冷却过程中的平板温度场,并将 TC7 处的测量温度与模拟温度进行比较,以验证反算结果。0.5 MPa 压力和 300 mm 高度下的比较结果见图 5。可以看出,两个结果显示很好的一致性,最大误差仅为 1.6%,远低于有关研究报道^[5,22,23]。这证实了基于 Beck 反算法的求解程序的有效性。

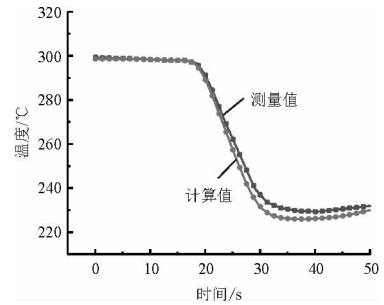


图 5 TC7 测量温度与计算温度的对比

Fig.5 Comparison curves between measured and calculated temperature (TC7)

3.2.2 时间-IHTC 曲线

图 6 为不同喷雾压力下的时间-IHTC 曲线。可以看出,喷雾开始后,各区域 IHTC 上升,平板中心附近的 IHTC 上升尤为显著。随后位于中心的 IHTC 达到峰值之后下降,而远离中心的 IHTC 则继续上升。在喷雾压力较高的情况下,可以发现 Z2 上的 IHTC 超过 Z1 上的 IHTC,见图 6c 和图 6d。这种现象与湿区的演变密切相关。随着喷雾压力增加,界面中心的 IHTC

热主要依靠气化及水和空气的对流。由于喷雾初期喷雾介质和平板之间的巨大温差,液滴在与高温平板接触时迅速蒸发,从而从平板上吸收了很多热量。因此,界面中心最先开始冷却(见图 4),而中心温度的下降阻碍了液滴的气化,然后界面中心开始形成湿区(见图 7a)。这进一步降低了中心附近区域的温度,促进了更多液滴的沉积以及湿区的扩展,见图 7b 和图 7c。

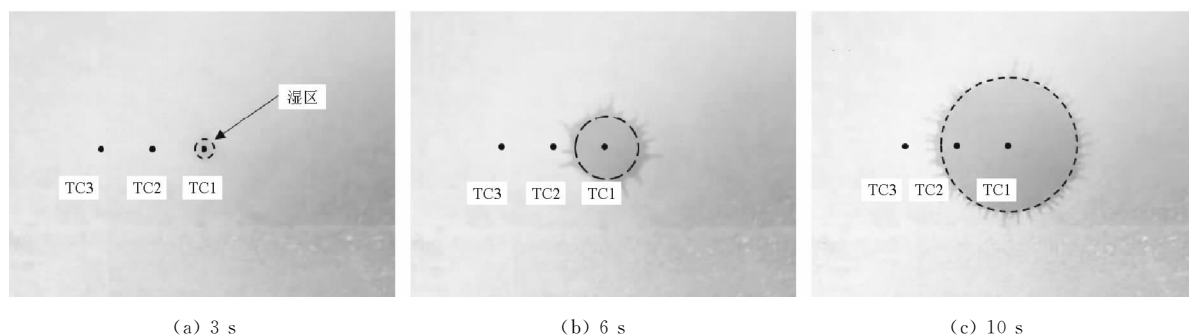


图7 喷雾压力为 0.4 MPa 和喷雾高度为 300 mm 下不同喷雾界面特征

Fig.7 Characteristics of spray interface under spray pressure of 0.4 MPa and height of 300 mm

通过分析界面处的热流密度有助于更好地了解喷雾冷却过程中的传热机理^[24,25],因此另外进行了一个喷雾冷却试验以获得冷却过程的沸腾曲线。试验中喷雾时间延长到 100 s。平板的初始温度设为 300 °C,喷雾压力和高度分别设为 0.4 MPa 和 300 mm。求解界面中心 IHTC 之后,热流密度计算如下:

$$q = h \cdot \Delta T \quad (9)$$

式中, q 为界面中心的热流密度, W/m^2 ; ΔT 为平板与喷雾间的温度差,即过热度, °C。喷雾冷却过程的热流变化符合 Leidenfrost 点^[26] 以下的典型沸腾曲线。根据计算的沸腾曲线,冷却过程可大致分为以下 3 个阶段,即过渡沸腾阶段(阶段 I),形核沸腾阶段(阶段 II)和单相阶段(阶段 III),见图 8。

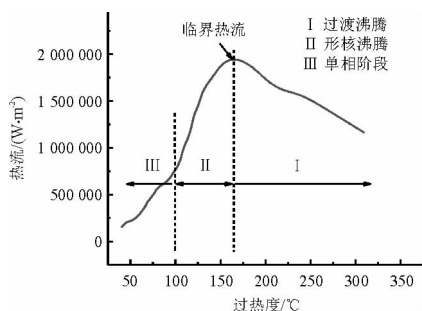


图8 喷雾冷却过程中 H13 平板的沸腾曲线

(喷雾时间为 100 s, 压力为 0.4 MPa, 高度为 300 mm)

Fig.8 Boiling curve of H13 plate in spray cooling process

(spray time of 100 s, pressure of 0.4 MPa, height of 300 mm)

根据图 7 中喷雾界面上湿区的演变以及图 6c 中对应的时间-IHTC 曲线可知,在喷雾初期界面处于过渡沸腾阶段。在此阶段,受到高过热度的影响,液滴与热平板接触时会迅速蒸发。界面上仅能形成局部蒸气膜,界面中心的 IHTC 持续上升(见图 6c)。随着过热度降低,气化作用减弱,中心开始被喷雾润湿(见图 7a)。随后越来越多的液滴在中心沉积并形成液膜,在 6s 时湿区完全覆盖了 Z1。因为液膜的强烈对流作用促进了传热,局部 IHTC 达到了峰值(见图 7b)。从图 7a 开始,界面处于形核沸腾阶段,并且因为中心温度始终高于水的沸腾温度,所以冷却过程不存在单相阶段。随着喷雾

进行,湿区在 10 s 处扩大至完全覆盖 Z2,导致该处冷却进入形核沸腾阶段并达到 IHTC 峰值(见图 7c)。此时界面中心的过热度进一步降低,这也是导致随着喷雾进行 Z2 上的 IHTC 超过 Z1 的原因,见图 6c。

4 机理讨论

4.1 喷雾压力对湿区的影响

由图 6c 和 7c 中可知,与 Z1 上的 IHTC 相比,位于湿区边缘附近的 Z2 上的 IHTC 具有更高的峰值。这是因为落点原理中心的液滴具有更高的水平速度分量,促进了湿区边缘的水对流,从而提高了局部 IHTC。因此,任意时刻的 IHTC 分布可以反映出湿区的边缘位置或尺寸大小。从图 6 可以看出,在 0.2 和 0.3 MPa 下,Z3 上的 IHTC 在第 9 s 内超过或接近了 Z2 上的 IHTC;在 0.4 和 0.5 MPa 压力下,Z2 上的 IHTC 分别在 8 s 内超过 Z1 上的 IHTC,而 Z3 上的 IHTC 始终低于 Z2 上的 IHTC,这表明随着喷雾压力的增加,湿区范围减小。因此,TC3 在 0.4 MPa 压力下的最低温度明显高于 0.2 MPa 压力下的最低温度。

在低喷雾压力下,喷头对喷雾介质的雾化效果较差,液滴的尺寸较大,且更容易聚集在界面中心部位,因此平板温度下降得更快,见图 4。在较低的喷雾压力下,中心的冷却速率更高。较高的冷却速率导致界面上较低的过热度,这削弱了液滴的气化,从而使液滴更易于沉积,有助于液膜的形成。形成后的液膜可能向外流动,使得湿区扩展到 Z3,引起其上 IHTC 的增加,见图 6a 和图 6b。相反,当使用高喷雾压力时,强雾化效果会减小液滴尺寸,更难以在界面上沉积,阻碍了湿区的形成和扩展。因此与低喷雾压力相比,高压下的湿区最终尺寸更小。

4.2 喷雾压力对 IHTC 峰值的影响

喷雾高度为 300 mm 下 Z1 和 Z2 上不同压力 (0.2~0.5 MPa) 的时间-IHTC 曲线见图 9。由图 9a 中可知,随着压力的增加,Z1 上的 IHTC 峰值分别为

8 470、9 159、8 712 和 9 634 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，达到峰值的时间分别为 3、3、6 和 6 s。而 Z2 的峰值为 7 599、7 460、8 930 和 10 028 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，达到峰值的时间为 4、6、9 和 9 s，见图 9b。由此可知，随着喷雾压力增加，界面中心 IHTC 的峰值提高，而到达峰值的时间延后。

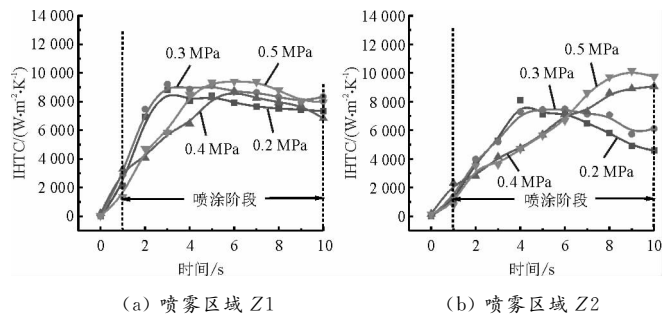


图9 喷雾高度 300 mm 下不同压力的时间-IHTC 曲线
Fig.9 Time-IHTC curve under different spray pressure with height of 300 mm

一方面，较高的喷雾压力会增加通过喷头的气流和液滴的速度，这会提高湿区的水对流和干区的空气对流。另一方面，高压可以增强雾化效果，导致液滴尺寸减小和液滴分散度增加。在喷雾初期，平板的表面温度相对较高，由于小尺寸液滴的快速气化，界面上会形成局部蒸气膜，因而水与板之间的直接传热受到阻碍。所以，当使用较高的喷雾压力时，相比于较低压力，喷雾初期的 IHTC 较低，而且 IHTC 达到峰值的时间较晚。然而，较高的压力会促进在湿区形成后其上的对流作用。因此，对于 Z1(图 9a)，较高压力(0.4 和 0.5 MPa)下的 IHTC 峰值略高于较低压力(0.2 和 0.3 MPa)下的 IHTC 峰值。对于 Z2(图 9b)，在较高压力下的峰值远大于在较低压力下的值。以上结果表明，在实际压铸生产中，采用高喷雾压力时，要保证充足的喷雾时间才能获得所需的冷却强度。

5 结 论

(1)在低喷雾压力下，界面中心迅速冷却，液膜更容易在中心形成。因此中心部位界面传热系数最早达到峰值但峰值较低。液膜的早期形成还进而导致较大的湿区尺寸。

(2)在高喷雾压力下，喷头的强烈雾化作用减小了液滴尺寸，从而促进了界面上的气化。湿区的形成和扩展也受到阻碍，中心界面传热系数缓慢上升。但与低喷雾压力相比，由于液膜对流更强烈，高压下的界面传热系数具有更高的峰值。

参 考 文 献

[1] 林林, 张小岩, 钱楚楚, 等. 中国压铸模具发展的现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 48-51.

[2] 中国模具工业协会. 模具行业“十二五”发展规划[J]. 模具工业, 2011, 37(1): 1-9.

[3] 袁静, 邹定超, 赵炳华. 压铸模具内喷涂技术的开发与应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(8): 829-830.

[4] 安肇勇, 万里, 黄志垣, 等. 压铸模内喷涂技术的开发与应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(2): 140-142.

[5] YING L, GAO T H, DAI M H, et al. Experimental investigation of temperature-dependent interfacial heat transfer mechanism with spray quenching for 22MnB5 steel[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 48-66.

[6] JIANG L J, JIANG S L, CHENG W L, et al. Experimental study on heat transfer performance of a novel compact spray cooling module[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 154: 150-156.

[7] SCHWEIGERT D, DAMSON B, LUEDERS H, et al. Heat transfer during spray/wall interaction with urea water solution: An experimental parameter study[J]. Int. J. Heat and Fluid Flow, 2019, 78:108 432.

[8] CEBO-RUDNICKA A, MALINOWSKI Z. Identification of heat flux and heat transfer coefficient during water spray cooling of horizontal copper plate[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 106 038.

[9] LIANG G T, MUDAWAR. Review of spray cooling-Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux[J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2017, 115: 1 174-1 205.

[10] LIANG G T, MUDAWAR I. Review of spray cooling-Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications[J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2017, 115: 1 206-1 222.

[11] BROUCARET S, MICHRAFY A, DOUR G. Heat transfer and thermo-mechanical stresses in a gravity casting die: Influence of process parameters[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2001, 110(2): 211-217.

[12] KORU M, SERCE O. Experimental and numerical determination of casting-mold interfacial heat transfer coefficient in the high pressure die casting of A360 aluminum alloy[J]. Acta Physica Polonica, 2016, 130(1): 453-458.

[13] HORACEK B, KIGERK T, KIM J. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms[J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2005, 48(8): 1 425-1 438.

[14] KIM J. Spray cooling heat transfer: The state of the art[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2007, 28(4): 753-767.

[15] LIU P, KANDASAMY R, FENG H, et al. Influence of air on heat transfer of a closed-loop spray cooling system[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 111: 109 903.

[16] BECK J, BLECKWELL B, CLAIR C. Inverse Heatconduction [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 1985.

[17] BECK J, BLACKWELL B, HAJI-SHEIKH A. Comparison of some inverse heat conduction methods using experimental data [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 1996, 39(17): 3 649-3 657.

[18] FERREIRA I L, JOSE E S, JOSE C, et al. The effect of melt temperature profile on the transient metal/mold heat transfer coefficient during solidification[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A408(1-2): 317-325.

[19] KUMAR T S P, KAMATH H C. Estimation of multiple heat-flux components at the metal/mold interface in bar and plate aluminum alloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, B35: 575-585.

电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响

洪鑫 刘政 张课微 唐景洪
(江西理工大学机电工程学院)

摘 要 基于 ANSYS 17.0 软件研究了搅拌电流突变为以及不同的电磁频率下电流突变对磁感应强度、洛伦兹力和半固态铝合金熔体初生相的影响。结果表明,相同的突变电流下,洛伦兹力和磁感应强度随着电磁频率的增大先增大后减小,在 25 Hz 时达到最大值;相同的电磁频率下,洛伦兹力和磁感应强度随着搅拌电流突变幅值的增大而增大,在 2 A 突变至 6 A 时达到最大值。当电磁频率为 25 Hz 和突变电流从 2 A 到 6 A 的情况下,初生相的形状因子和平均等积圆直径分别为 0.71、118 μm ,达到最佳。

关键词 电磁搅拌;数值模拟;A356 铝合金;半固态组织

中图分类号 TG249.2⁺6;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Current Mutation on Electromagnetic Field and Solidified Microstructure in Semi-solid A356 Aluminum Alloy under Electromagnetic Stirring

Hong Xin, Liu Zheng, Zhang Kewei, Tang Jinghong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology)

Abstract: Based on numerical simulation methods, a two-dimensional electromagnetic field finite element model of aluminum alloy melt was established, and the effects of current mutation and different electromagnetic frequency on the magnetic induction intensity, electromagnetic force and primary phase of semi-solid aluminum alloy melt were investigated. The results reveal that under the same current mutation, the electromagnetic force and magnetic induction intensity are firstly increased and then decreased with the increase of the electromagnetic stirring frequency, reaching the maximum value at 25 Hz. Under the same electromagnetic frequency, the electromagnetic force and magnetic induction intensity are increased with the increase of the amplitude of current mutation, and the maximum value appears when current mutates from 2 A to 6 A. In the case of the optimal stirring frequency (25 Hz) and the mutation current (2~6 A), the shape factor and average equal-area circle diameter of the primary phase are 0.71 and 118 μm , respectively.

Key Words: Electromagnetic Stirring, Numerical Simulation, A356 Aluminum Alloy, Semi-solid Microstructure

收稿日期:2021-03-11;**修改稿收到日期:**2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51361012,51864020);江西省自然科学基金资助项目(2014bab206012)

第一作者简介:洪鑫,男,1996 年出生,硕士研究生,江西赣州(341000),E-mail:2953685045@qq.com

通信作者:刘政,男,1958 年出生,教授,江西赣州(341000),E-mail:liukk66@163.com

引用格式:洪鑫,刘政,张课微,等. 电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 393-1 399.
HONG X, LIU Z, ZHANG K W, et al. Effects of current mutation on electromagnetic field and solidified microstructure in semi-solid A356 aluminum alloy under electromagnetic stirring[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 393-1 399.

[20] SPINELLI J E, CHEUNG N, GOULART P R, et al. Design of mechanical properties of Al-alloys chillcastings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient[J]. International Journal of Thermal Science, 2012, 51: 145-154.

[21] ZHU W, HAN Z, LIU B C. Thermomechanical modeling of solidification process of squeeze casting II: Numerical simulation and experimental validation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45 (3): 363-368.

[22] LIN J H, ZHAO H D, HUANG J M. Spatial interfacial heat transfer and surface characteristics during gravity casting of A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 43-50.

[23] HAMASAIID A, DARGUSCH M S, DAVIDSON C J, et al. Effect of mold coating materials and thickness on heat transfer in permanent mold casting of aluminum alloys[J]. Metallurgical and materials Transactions, 2007, A38(6): 1 303-1 316.

[24] RICHARD O, JOHNP K. Experimental investigation of heat transfer characteristics and performance of smooth and wicking surfaces in spray cooling for high heat flux applications[J]. Results in Engineering, 2020(6): 100 119-100 125.

[25] SARMARDIAN A, DUNNE J F, LONG C A, et al. Heat flux correlation models for spray evaporative cooling of vibrating surfaces in the nucleate boiling region[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120 159.

[26] MASCARENHAS N, MUDAWARI. Analytical and computational methodology for modeling spray quenching of solid alloy cylinders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(25): 5 871-5 883.

(编辑:张正贺)