真空辅助高压铸造界面换热系数与界面接触演变的关系研究①

林健[1], 秦甘霖[1], 杨琴[2], 王志白[2], 徐小敏[2], 胡铁刚[2], 向多[2], 徐从昌[1], 李落星[1]
(1.湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400023)

摘 要: 为了探究真空辅助高压铸造过程中界面换热系数与界面接触演变的关系,通过神经网络和数值模拟相结合的方式获得了界面换热系数和高精度温度场。通过计算凝固过程中铸件-模具的实际接触面积,研究了真空辅助高压铸造界面接触的演变过程。发现界面换热系数的变化趋势与实际接触面积的变化趋势一致。根据实际接触面积的变化情况,将界面接触的演变划分为 5 个阶段。在不同阶段,压力以不同作用延缓实际接触面积的减小,提高界面换热系数。在阶段 C(第 3 个阶段),压力直接影响实际接触面积,实际接触面积降幅为 8.5%~15.0%;在阶段 D(第 4 个阶段),实际接触面积降幅达 49%。

关键词: 高压铸造; 增压压力; 有限元仿真; 神经网络; 界面换热系数; 界面接触; 接触面积
中图分类号: TG27 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.031
文章编号: 0253-6099(2026)01-0186-06

Relationship Between Interfacial Heat Transfer Coefficient and Interfacial Contact Evolution in Vacuum-Assisted High Pressure Die Casting

LIN Jian[1], QIN Ganlin[1], YANG Qin[2], WANG Zhibai[2], XU Xiaomin[2], HU Tiegang[2], XIANG Duo[2], XU Congchang[1], LI Luoxing[1]
(1.*College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha* 410082, *Hunan, China*; 2.*Chongqing Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing* 400023, *China*)

Abstract: To investigate the relationship between interfacial heat transfer coefficient and evolution of interfacial contact during vacuum-assisted high pressure die casting, a combined approach of neural network and numerical simulation was adopted to obtain interfacial heat transfer coefficient and high-precision temperature field. By calculating the actual contact area between casting and mold during solidification, the evolution process of interfacial contact in vacuum-assisted high pressure die casting was studied. It is found that the variation trend of interfacial heat transfer coefficient is consistent with that of the actual contact area. Based on the variation of the actual contact area, the evolution of interfacial contact is divided into five stages. At different stages, pressure retards the decrease in the actual contact area by different actions and enhances the interfacial heat transfer coefficient. At the third stage (C), pressure has a direct impact on the actual contact area, resulting in a reduction of 8.5%-15.0%; at the fourth stage (D), the actual contact area is reduced by 49%.

Key words: high pressure die casting; boost pressure; finite element simulation; neural network; interfacial heat transfer coefficient; interfacial contact; contact area

近年来,轻质部件在运输领域的应用显著增加。轻质金属部件的广泛使用有效降低了运载体重,从而减少了能耗[1]。这些部件的材料主要是铝合金和镁合金,通常采用高压铸造(HPDC)工艺制造。铸造的凝固过程与界面传热密切相关。高效的界面传热能够加速凝固,而凝固本身会改变界面的接触,进而影响界面换热行为[2-8]。

真空辅助高压铸造过程中,界面接触演变时压力会对界面接触造成影响,目前鲜有这方面的研究。本文通过神经网络与数值模拟相结合的方式获得不同冲

① **收稿日期**: 2025-08-28
基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-DEX0011);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2024NSCQ-LZX0151);湖南省自然科学基金(2023JJ50020)
作者简介: 林健(1996—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事高压铸造换热系数研究。E-mail:jianlin@hnu.edu.cn
通信作者: 李落星(1968—),男,湖南汨罗人,博士,教授,主要从事汽车轻量化先进设计研究。E-mail:luoxing_li@hnu.edu.cn

头增压压力下的界面换热系数和高精度仿真温度场,根据 Scheil 模型计算铸件凝固过程中的固相率变化,建立真空辅助高压铸造条件下铸件-模具实际接触面积计算模型,利用固相率变化结果和模具表面粗糙度等信息计算铸件凝固过程中实际接触面积的变化情况。综合这些数据,将界面接触的演变划分为 5 个阶段,分析了压力和粗糙度对每个阶段的影响。

1　实验方法

采用力劲 IMPRESS-III 系列 DCC280 压铸机进行实验。压铸机锁模力为 2 800 kN,最大增压压力 40 MPa。模具材料为 H13 钢。铸件材料为 AlSi9 免热处理铝合金,其化学成分如表 1 所示。

表 1　铝合金化学成分(质量分数)

Table 1　Main elemental composition of Al alloy　%

Si	Mg	Mn	Ti	V	Cu	Fe	Zn	Al
8.5	0.14	0.45	0.13	0.1	0.01	0.11	0.036	余量

合金在电阻炉中熔化到 720 ℃进行除气精炼,浇铸温度 680 ℃。通过多轮压射的方式对模具进行预热,预热压射 15 次、正式压射 5 次。实验工艺参数见表 2。

表 2　实验工艺参数

Table 2　Experimental process parameters

实验编号	压力/MPa	慢射速度/(m·s^{-1})	快射速度/(m·s^{-1})	真空度/%
1	13	0.2	4	97
2	25	0.2	4	97
3	36	0.2	4	97

为了测量模具温度变化,在模具中打了多个直径 2 mm 的盲孔,嵌入 K 型热电偶。热电偶顶端距离模具表面 2 mm。使用 NI 9213 温度采集仪收集热电偶所测温度,采样频率为 20 Hz。为了测量型腔内的压力分布,在顶针的后方连接了微型拉压力传感器。用配套的数据变送器和软件对压力数据进行收集。使用 CONTOUR X-100 白光干涉仪对模具不同位置进行粗糙度扫描。选取压力传感器所在位置中心面积为 800 μm×690 μm 的样本进行扫描。模具动模及传感器安装位置示意图如图 1 所示。

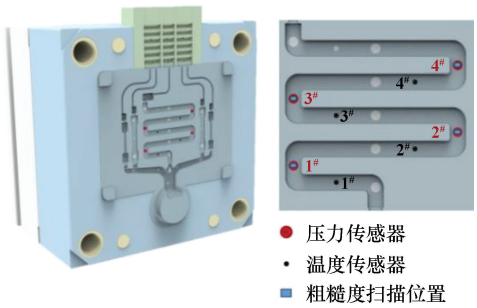


图 1　模具动模及传感器安装位置示意图

Fig. 1　Schematic program of mounting locations of moving mold and sensor

2　数学模型

2.1　界面换热系数求解

在铸造仿真软件 ProCAST[9] 中建立了与模具尺寸相同的有限元模型。根据压力传感器的分布,对型腔进行区域划分。每个区域单独划分网格并求解对应的界面换热系数。有限元分区方案及网格划分见图 2。

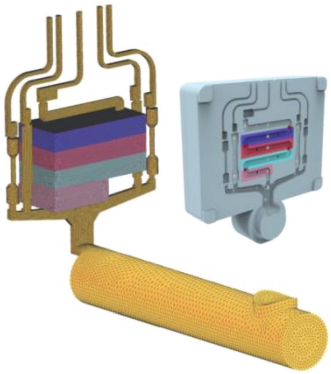


图 2　有限元分区方案及网格划分

Fig. 2　Finite element partitioning scheme and mesh generation

采用神经网络与有限元仿真相结合的方法来求解界面换热系数。使用 ProCAST 软件进行仿真计算,将计算得到的温度曲线及其对应的界面换热系数作为神经网络的训练数据集,对神经网络进行训练。神经网络求解界面换热系数流程如图 3 所示。神经网络采用长短期记忆网络(LSTM)算法。结构包括三层:输入层、隐含层和输出层。输入层和隐含层均包含 256 个神经元,输出层设有 200 个神经元。优化器采用 Adam。训练参数设置为 5 000 个 epoch,批量大小为 32。

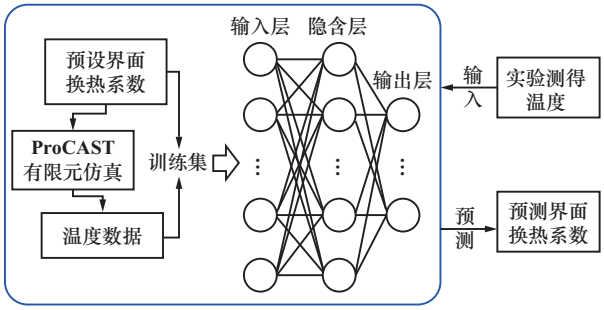


图 3　神经网络求解界面换热系数流程

Fig. 3　Flowchart of neural network-based solution for interfacial heat transfer coefficient

2.2 实际接触面积求解

在高压压铸中,由于冷却速度极快,液态金属中的成分迅速达到均匀分布,而固态金属中的成分尚无足够时间扩散。因此,这一过程非常适合采用 Scheil 模型[10]进行分析。

根据冷却过程中的温度变化,在液相线温度和固相线温度之间进行线性插值,确定每一时刻的液相浓度为:

$$C_l = C_0 \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \tag{1}$$

使用 Scheil 公式计算固相分数 f_s:

$$f_s = 1 - \left(\frac{T - T_S}{T_L - T_S}\right)^{1/(k-1)} \tag{2}$$

式中:C_l 为液相中的元素浓度(质量分数),%;C_0 为合金的初始成分(质量分数),%;T 为金属温度,℃;T_L 为合金液相线温度,℃;T_S 为合金固相线温度,℃;k 为分配系数,用来描述在凝固过程中固液两相之间元素成分的分配特性,它定义为固相中某元素的浓度 C_s 与液相中该元素的浓度 C_l 的比值。

基于微观接触力学模型,并结合金属液的润湿行为,建立一个完整的数学模型以计算实际接触面积。铝液与基板的接触受压力、润湿角 θ 和表面张力 γ 影响[11],当润湿角 θ 较小时,铝液倾向于铺展,接触面积增加。真实接触面积还会受到粗糙度形状的限制[12],可以通过赫兹接触理论或粗糙表面接触模型修正。在真空或低空气条件下,空气填充粗糙度谷的效应减弱,铝液更容易流入谷底,提高接触面积。最终,结合润湿角修正和粗糙度谷的贡献,初始接触面积为:

$$A_I = \frac{2\pi\gamma_{lv}\rho\cos\theta}{P(\rho + \delta)} \tag{3}$$

式中:A_I 为初始接触面积,μm^2;θ 为真空条件下铝液的润湿角,(°);γ_{lv} 为真空条件下铝液的液面张力,mN/m;P 为接触压力,MPa;ρ 为粗糙度谷的半径,μm;δ 为粗糙度峰的变形量,μm。

凝固过程中,铝液的接触面积与固相分数 f_s 及压力下的表面变形和凝固收缩直接相关,凝固接触面积计算公式为:

$$A_S = A_I(1 - \beta f_s)(1 - \alpha) \tag{4}$$

式中:A_S 为凝固接触面积,μm^2;α 为凝固体积收缩率,%;β 为固相对面积减少的贡献系数。

铝液凝固后,需要切换数学模型计算实际接触面积。考虑了弹性变形阶段,中间的弹塑性阶段和完全塑性变形阶段,计算得到接触传递载荷的实际面积[8]为:

$$A_{elast} = 1.2\frac{A_0}{b^2}\int_{z=d}^{z_{max}}\int_{\rho_e}^{\rho_{max}}\pi(z-d)\rho f(z)F(\rho)\,dz\,d\rho \tag{5}$$

$$A_{elastoplast} = 1.2\frac{A_0}{b^2}\int_{z=d}^{z_{max}}\int_{\rho_{ep}}^{\rho_e}\pi[2(z-d)-\delta_e]\rho f(z)F(\rho)\,dz\,d\rho \tag{6}$$

$$A_{plast} = 1.2\frac{A_0}{b^2}\int_{z=d}^{z_{max}}\int_{0}^{\rho_{ep}}\pi[2(z-d)-\delta_e]\rho f(z)F(\rho)\,dz\,d\rho \tag{7}$$

$$A_r = A_{elast} + A_{elastoplast} + A_{plast} \tag{8}$$

式中:A_{elast} 为弹性变形接触面积,μm^2;$A_{elastoplast}$ 为弹塑性变形接触面积,μm^2;A_{plast} 为塑性变形面积,μm^2;A_r 为变形过程中的实际接触面积,μm^2;A_0 为表观接触面积,μm^2;b 为粗糙度峰之间的平均宽度,μm;z 为基于平均峰高度线的峰高度,μm;d 为较硬表面与较软表面平均峰高度线的间距,μm;δ_e 为弹性接触与弹塑性变形接触之间的过渡变形,μm;z_{max} 为粗糙度峰最大高度,μm;ρ_{max} 为粗糙度峰最大半径,μm;ρ_e 为由纯弹性变形向弹塑性变形过渡时的临界半径,μm;ρ_{ep} 为从弹塑性变形到全塑性变形过渡的临界半径,μm;$f(z)$ 为峰顶高度分布;$F(\rho)$ 为半径分布。以上数据可从粗糙度扫描结果中获得。更加详细的公式详解请参考文献[13]。

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

模具温度测量结果如图 4 所示,型腔压力测量结果如图 5 所示,粗糙度测量结果如图 6 所示。从图 4 可见,模具温度随着压射循环的进行不断升高,并最终趋于稳定。相同的测温点,冲头增压压力越大,模具温

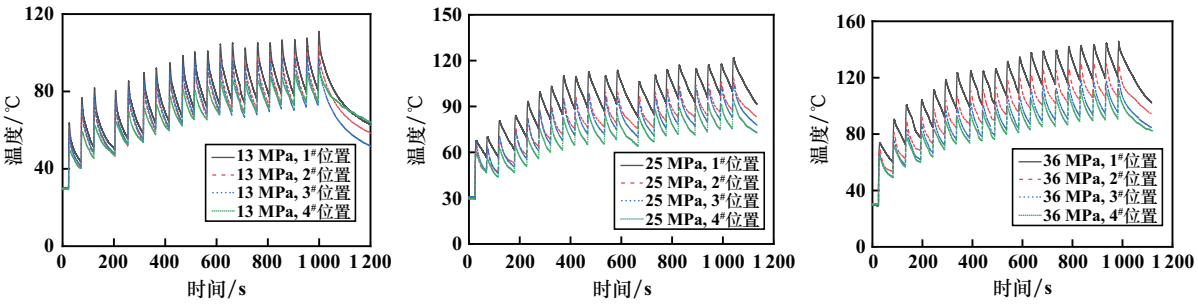


图 4 模具温度测量结果

Fig. 4 Mold temperature measurement results

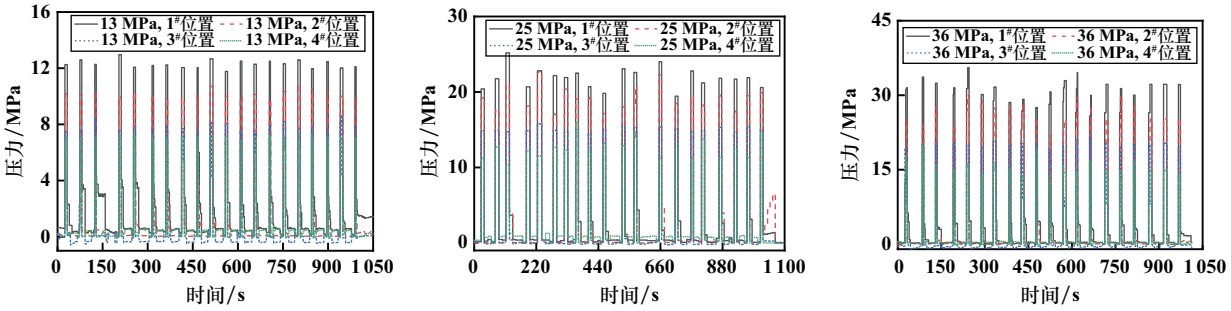
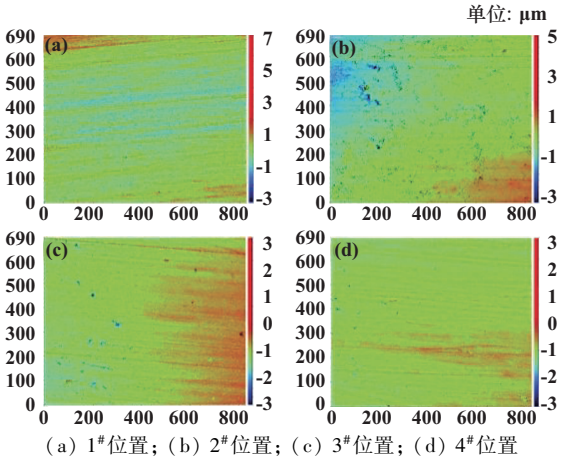


图 5　型腔压力测量结果

Fig. 5　Cavity pressure measurement results



(a) 1#位置; (b) 2#位置; (c) 3#位置; (d) 4#位置

图 6　粗糙度测量结果

Fig. 6　Surface roughness measurement results

度峰值越高;相同冲头增压压力下,距离料饼越近,模具温度峰值越高。从图 5 可见,型腔内的实际压力比设定的冲头增压压力有所衰减;随着充型距离增加,压力衰减幅度增加。从图 6 可见,距离料饼越近,模具表面粗糙度越差,这是金属液的冲刷导致模具表面粗糙度恶化。

3.2　计算结果

使用最后一轮温度数据得到的界面换热系数的预测曲线如图 7 所示。从图 7 可以观察到,换热系数在压射后迅速上升至峰值,随后逐渐下降,并最终趋于稳定。随着冲头增压压力增加,相同位置的换热系数峰值升高。这一趋势在 1#位置最明显,在 4#位置相对不显著。在相同的冲头增压压力下,1#位置界面换热系数峰值最大,4#位置换热系数峰值最小。这是增压压力衰减幅度不同引起的。在相同的冲头增压压力下,4#位置压力衰减幅度最大,此处实际压力最小,因此压力对界面换热系数的影响较小。

将预测结果输入有限元模型中进行计算,仿真温度与实测温度对比如图 8 所示。可以发现,仿真值与实测值最大误差为 3.0 ℃,平均误差 1.7 ℃,说明求解的界面换热系数有效。

以 1#位置为例,根据换热系数变化速率,将不同冲头增压压力下的换热过程划分为 A、B、C、D、E 共 5 个阶段,用虚线分隔,换热流程分段如图 9 所示。计算得到 1#位置在不同冲压压力下铸件-模具的实际接触面积与理论接触面积之比的变化情况,如图 10 所示,同样用虚线进行分隔。尽管图 9 中有些阶段 A 和 B 之间的斜率变化看起来并不明显,但根据数据拟合结果可知,曲线存在明显的斜率拐点。

3.3　讨论

对图 9 与图 10 进行对比分析,发现界面换热系数曲线不同阶段转换的时间点与接触面积变化之比变化曲线不同阶段转换的时间吻合。这既验证了实际接触面积计算模型的准确性,又可以定量地分析界面接触的演变。

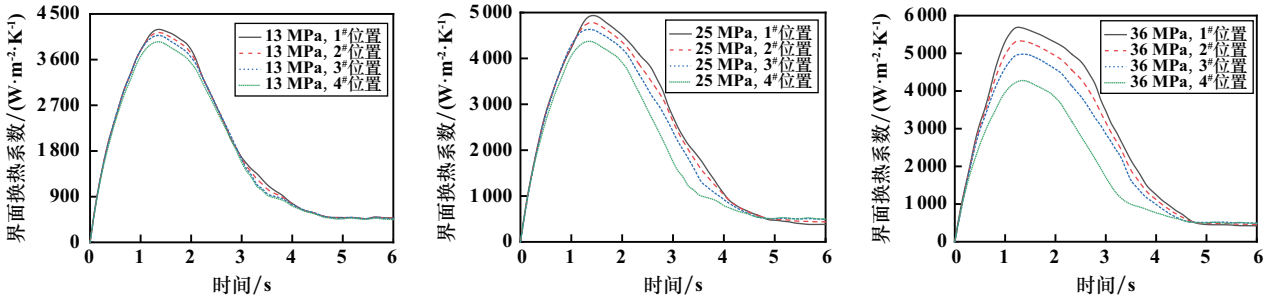


图 7　界面换热系数预测曲线

Fig. 7　Prediction curve of interfacial heat transfer coefficient

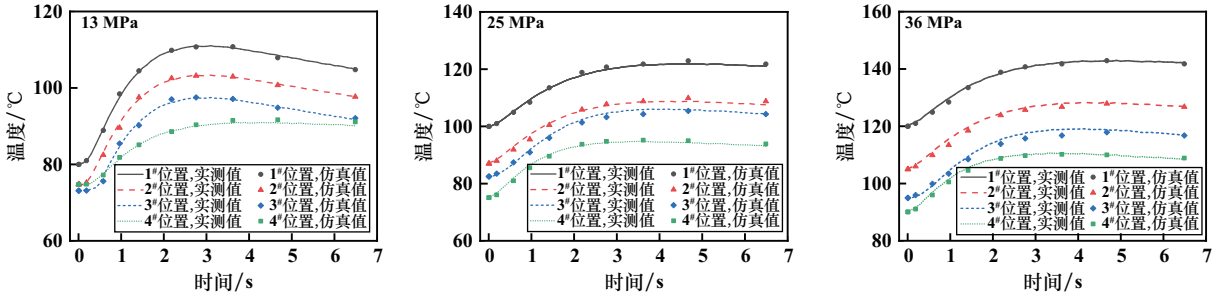


图 8 仿真温度与实测温度对比结果

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results

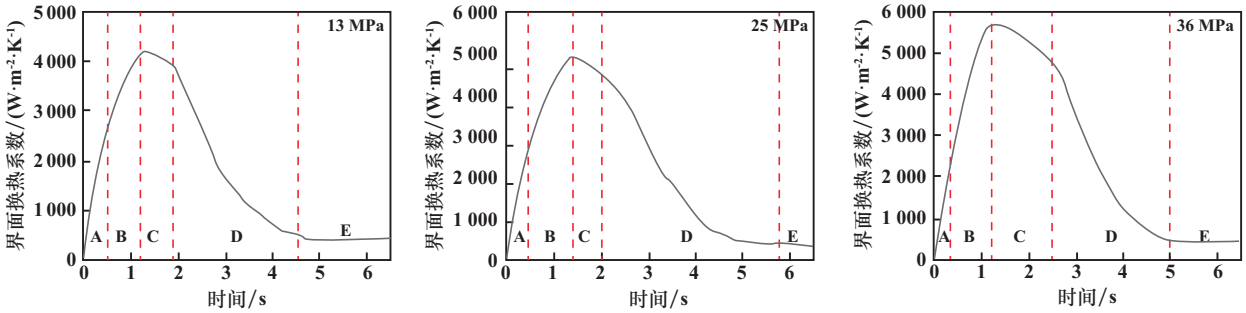


图 9 换热流程分段

Fig. 9 Segmentation of heat transfer process

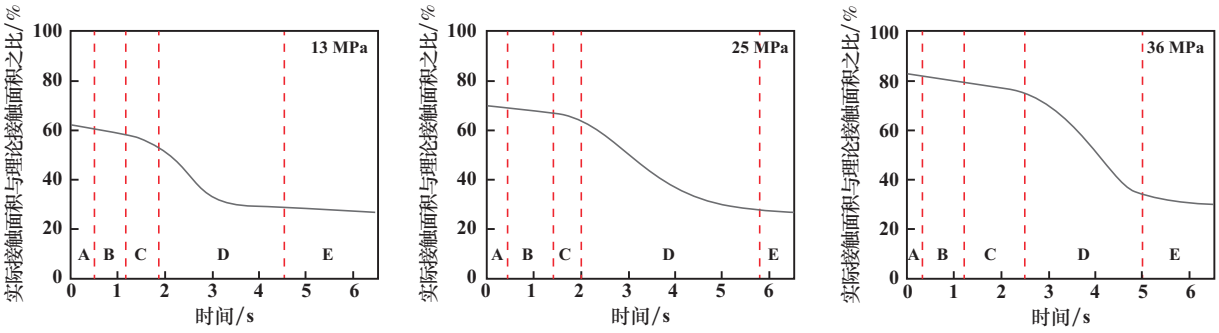


图 10 实际接触面积与理论接触面积之比的变化情况

Fig. 10 Variation curve of actual-to-theoretical contact area ratio

凝固过程中界面接触状态的演变如图 11 所示。

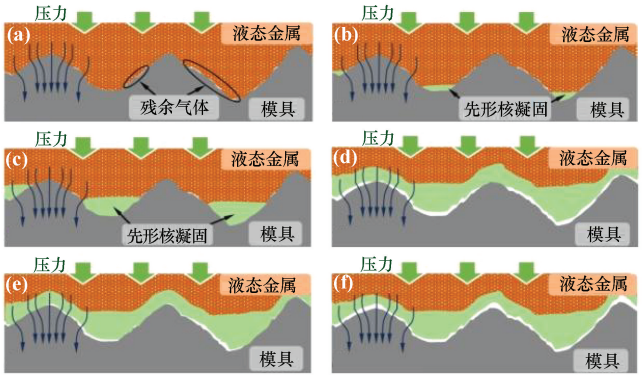


图 11 凝固过程中界面接触状态的演变

Fig. 11 Evolution of interfacial contact states during solidification

阶段 A:界面换热系数迅速上升,铸件表面固相分数为 0 或接近 0。此阶段实际接触面积最大,并基本保持不变或缓慢降低,降低幅度不超过 4.4%。此阶段紧接着充型结束,因为熔体为液态,熔体和模具接触较好。此阶段金属液与模具表面接近完美接触的状态,对应图 11(a)。

阶段 B:界面换热系数继续上升并达到峰值,但上升速率放缓。铸件表面固相分数由 0 变为 1。此阶段实际接触面积有小幅减小,降幅最小为 3.2%、最大为 5.0%。由于粗糙度谷与模具直接接触,热传导更加有效,使得熔融金属在这些区域更快冷却。所以,粗糙度谷的温度在整个接触区域中更低,更有利于凝固形核。在众多局部粗糙度谷处,成核继续发展,并在粗糙度谷

内形成固化锥,如图 11(b)所示。固化锥逐渐长大,趋向于填满粗糙度谷,如图 11(c)所示。随着凝固进一步发展,凝固锥逐渐连成一体,如图 11(d)所示。此时铸件表面的固相分数已经达到 1。此阶段与重力铸造的区别在于,重力铸造的接触状态不如高压铸造,凝固形核先发生在粗糙度峰处,后续凝固继续形成凝固环,并发展成凝固帽[9]。

阶段 C:界面换热系数短暂稳定在峰值附近,或略微降低。此阶段实际接触面积相比上一阶段降幅更大,降幅最大为 15.0%、最小为 8.5%。此阶段紧接着阶段 B 的终了时刻,此时铸件表面固相分数已经为 1。在凝固过程中,由于体积的变化,金属从粗糙度谷处收缩。同时粗糙度谷膨胀,但其膨胀程度通常小于铝硅合金的收缩程度,可能会在两者之间形成间隙。但是在压力作用下,收缩了的凝固锥受压与粗糙度谷接触在一起,如图 11(e)所示。此时接触状态是间隙较小的固-固接触。重力铸造不存在这一阶段。重力铸造由于没有外加压力的作用来减慢实际接触面积的减小、延缓接触状态的恶化,界面换热系数会直接迅速下降。

阶段 D:界面换热系数迅速降低。此阶段实际接触面积以远大于阶段 C 的速度迅速减小,最大降幅可达 49%。固化金属薄壳逐渐变厚,此时接触热阻会规律性增加。铸件从模具表面收缩,即使有外加压力的作用,铸件和模具之间间隙也会缓慢变大,如图 11(f)所示。此时的接触状态变为间隙变大的固-固接触。

阶段 E:界面换热系数稳定在低值附近。实际接触面积趋于稳定,界面接触间隙的宽度趋于稳定,接触热阻稳定在最大值,此时压力已经对界面接触、界面热阻和界面换热系数的影响很微弱。

4　结论

1) 根据压力分布分区设置有限元仿真中的界面换热系数,获得了高精度的仿真温度场。经过实验验证,仿真结果与实验结果误差最大值为 3.0 ℃、平均值为 1.7 ℃。

2) 建立了真空辅助高压铸造铸件-模具实际接触面积计算数学模型,计算了金属液凝固全过程中实际接触面积的变化情况,为分析界面换热系数和界面接触的变化提供了依据。根据铸造过程中铸件-模具界面实际接触面积的变化将界面接触的演化分为 5 个阶段。与非真空重力铸造相比,真空辅助高压铸造增加了一个实际接触面积缓慢下降的阶段。压力对不同阶段的影响不同,1#位置在阶段 C 的实际接触面积降幅为 8.5%~15.0%,而在阶段 D 的实际接触面积降幅高达 49%。

3) 压力和真空的共同作用会改变金属液最初结晶形核的位置。在非真空重力铸造中,结晶形核通常发生在模具表面粗糙度峰处,而在高压真空铸造中,结晶形核则发生在粗糙度谷处,这是由于压力和真空条件下界面接触状态得到了改善。

参考文献(References):

[1] TAUB A I, LUO A A. Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications[J]. MRS Bulletin, 2015, 40(12):1045-1054.

[2] CANTOR B, O′REILLY K. Solidification and casting[M]. CRC press, 2016.

[3] SANNES S, GJESTLAND H, WESTENGEN H, et al. Die casting of magnesium alloys: The importance of controlling die filling and solidification[J]. SAE Technical Paper Series, 2003,1:2003-1-0183.

[4] BONOLLO F, GRAMEGNA N, TIMELLI G. High-pressure die-casting: Contradictions and challenges[J]. JOM, 2015,67:901-908.

[5] 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(1/2/3):29-33.

[6] STEFANESCU D M. Science and engineering of casting solidification[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.

[7] MOLNÁR D, DÚL J, SZABÓ R. Simulation of high pressure die casting solidification[J]. Materials Science Forum, 2006,508:555-560.

[8] WANG F F, ZHAO X T, LIU J H, et al. Study on the relationship between interfacial heat transfer coefficient and interface pressure in squeeze casting by using microscopic contact model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020,152:106300.

[9] SHARIFI P, JAMALI J, SADAYAPPAN K, et al. Grain size distribution and interfacial heat transfer coefficient during solidification of magnesium alloys using high pressure die casting process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018,34(2):324-334.

[10] SANTOS J, KALLIEN L H, JARFORS A E W, et al. Influence of grain refinement on slurry formation and surface segregation in semi-solid Al-7Si-0.3Mg castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018,49(10):4871-4883.

[11] MURUGADOSS K, DHAR P, DAS S K. Role and significance of wetting pressures during droplet impact on structured superhydrophobic surfaces[J]. The European Physical Journal E, 2017,40:1.

[12] HITCHCOCK S J, CARROLL N T, NICHOLAS M G. Some effects of substrate roughness on wettability[J]. Journal of Materials Science, 1981,16(3):714-732.

[13] ROBBE-VALLOIRE F, PAFFONI B, PROGRI R. Load transmission by elastic, elasto-plastic or fully plastic deformation of rough interface asperities[J]. Mechanics of Materials, 2001,33(11):617-633.

引用本文:林健,秦甘霖,杨琴,等. 真空辅助高压铸造界面换热系数与界面接触演变的关系研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):186-191.

LIN Jian, QIN Ganlin, YANG Qin, et al. Relationship between interfacial heat transfer coefficient and interfacial contact evolution in vacuum-assisted high pressure die casting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026, 46(1):186-191.