

铝合金石膏型精密铸件 凝固过程数值模拟与实验验证^①

孙小波 张春晖 王喜军 安阁英

(哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

赵国琪 刘新中 卢明 宁汝意

(中国航天工业总公司第二研究院, 北京 100039)

摘 要 应用自行开发的铸件充型及凝固模拟系统, 对铝合金石膏型精密铸件的凝固过程进行了数值模拟。采用自行设计制备的多通道自动测温装置, 对所模拟的铸件进行现场测温。为了提高模拟精度, 对铸件-铸型热物性参数进行了实测, 并采用最小二乘法进行拟合。通过计算机模拟预测了铸件的缩孔区, 分析了铸件缺陷产生的原因, 提出了合理的工艺方案, 消除了铸件内缩孔的发生。实验验证的结果表明, 数值模拟结果与测试值拟合较好。

关键词 铝合金 精密铸件 凝固过程 数值模拟 实验验证

中图法分类号 TG248

中介机匣是涡喷发动机上的重要铝合金部件, 通常采用石膏型熔模精密铸造工艺生产。由于机匣件本身结构复杂、壁厚不均匀(壁厚处为 20 mm, 而壁薄处只有 4 mm)、工艺设计难度较大等原因, 在实际生产中浇注出的铸件废品率高达 80%。解剖铸件后发现, 产生的铸造缺陷如缩孔均集中在铸件顶部。针对此, 设计者拟改进冒口以增加补缩效果, 但仍不能避免缩孔的发生, 因此迫切需要对中介机匣的温度场分布和缩孔进行模拟和预测, 校核、修正铸造工艺方案和优化工艺参数, 以得到质量完好的铸件。

本文作者应用自行开发的铸件充型及凝固数值模拟软件系统 CASM-3D for Windows 对中介机匣件进行了凝固数值模拟和缺陷预测, 并且根据预测结果进行工艺改进, 消除了铸件内缩孔的发生。另外, 也通过实验研究验证了模拟计算的可靠性。

1 中介机匣件凝固过程数值模拟

1.1 铝合金-石膏型的热物性参数

在铸件凝固过程数值模拟中, 比热容、导热系数等热物性参数是影响数值模拟精度的重要因素^[1-5]。为此, 作者对铸件-铸型的热物性参数进行了测试。中介机匣铸件的材质为 ZL114A, 铸型的材质为石膏 4[#]。图 1 为所测得的 ZL114A 和石膏 4[#] 的热物性参数曲线, 图中(a)~(d)各图的左侧为 ZL114A 的热物性参数坐标, 右侧为石膏 4[#] 的热物性参数坐标。

从图 1 可以看到, 除密度外其它的热物性参数如热扩散系数 α 、比热容 c 、导热系数 λ 随温度变化的趋势都较大。对铸件 ZL114A、铸型石膏 4[#] 的热物性参数数据 α , c 和 λ 进行最小二乘法拟合, 可以得到热物性参数 P 随温度 T 变化的函数表达式为:

$$P(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$$

① 收稿日期: 1997-06-02; 修回日期: 1998-04-27 孙小波, 男, 28岁, 博士

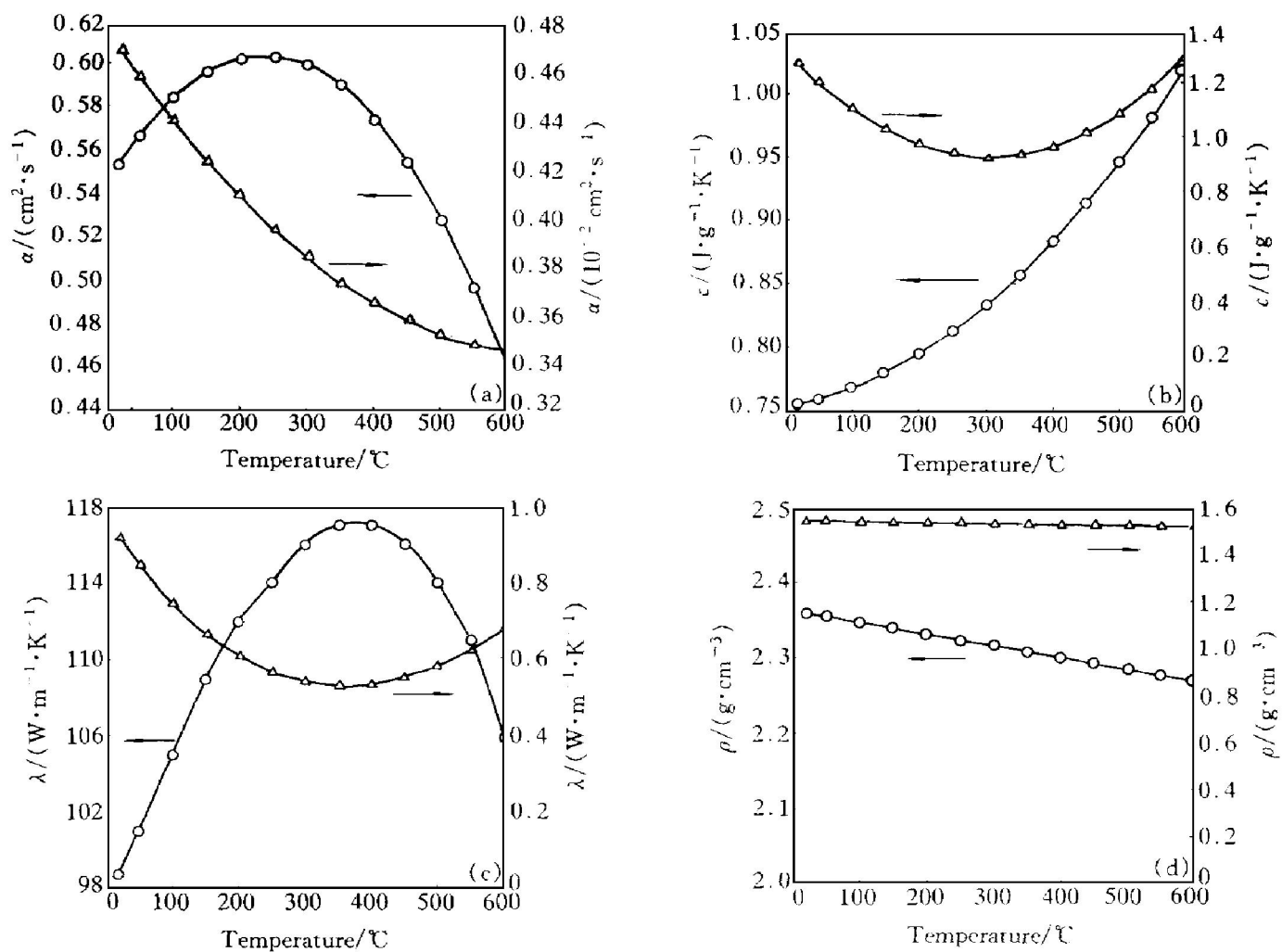


图 1 ZL114A 和石膏 4[#] 的热物性参数

Fig. 1 Thermophysical parameters of ZL114A and gypsum 4[#]

○—ZL114A; △—Gypsum

其中系数因子 a_0 , a_1 和 a_2 见表 1 和表 2。

表 1 石膏热物性参数的系数因子 a_0 , a_1 和 a_2

Table 1 Thermophysical parameters function coefficients of gypsum			
Thermophysical parameter	a_0	a_1	a_2
α	5.98912×10^{-1}	-1.438×10^{-4}	-1.08907×10^{-6}
c	8.34018×10^{-1}	4.38487×10^{-4}	6.26502×10^{-7}
λ	1.16122×10^2	1.89872×10^{-2}	-1.64172×10^{-4}

1.2 中介机匣凝固过程数值模拟及工艺改进

中介机匣的轮廓,高 363.2 mm,最大直径 332 mm,壁厚 8 mm,采用铸型预热和底注的方式进行浇注。考虑到模拟精度和数值计算的需要,本文应用开发的实体造型模块^[6]对机匣

件进行几何造型,并使用有限差分网格剖分器^[6, 7]对机匣/石膏型浇注系统进行了非均匀网格剖分,其中最小网格尺寸为 4 mm × 4 mm × 4 mm,最大的网格尺寸 4 mm × 4 mm × 13 mm,网格模型单元总数为 93 万。图 2 为中介机匣件浇注系统被剖分后的 FDM 网格模型。

表 2 ZL114A 热物性参数的系数因子 a_0 , a_1 和 a_2

Table 2 Thermophysical parameters function coefficients of ZL114A			
Thermophysical parameter	a_0	a_1	a_2
α	3.72229×10^{-3}	1.87440×10^{-6}	3.08242×10^{-9}
c	9.29055×10^{-1}	3.92523×10^{-4}	4.28801×10^{-6}
λ	5.23890×10^{-1}	-1.39998×10^{-4}	2.96289×10^{-6}

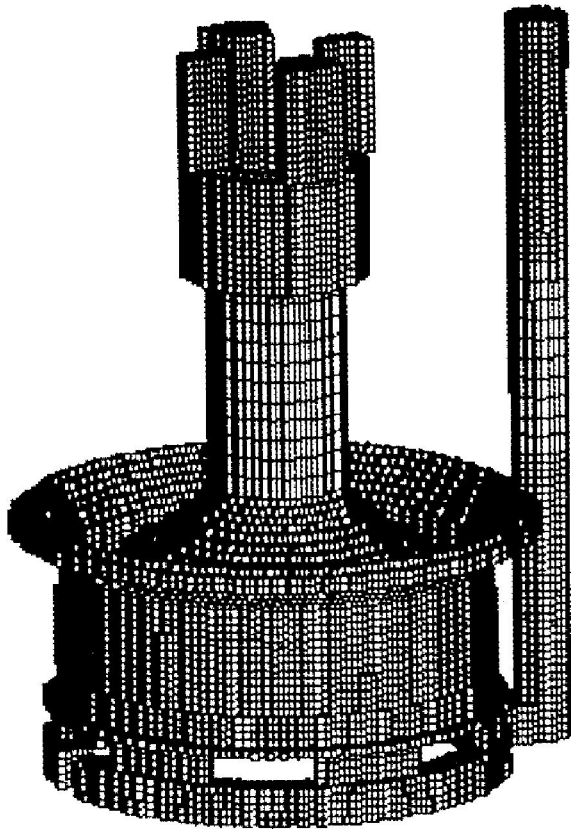


图 2 中介机匣 FDM 网格模型

Fig. 2 FDM model of housing casting

铸件凝固数值模拟计算使用的主要有关工艺参数如下：石膏型预热温度 250~ 300 ℃(夏-冬)；金属液浇注温度 700±10 ℃，浇注时间 13~ 14 s。

计算中所使用的铸件和铸型热物性参数如表 3 所示。

在初始工艺条件下，本文应用 CASM-3D 系统模拟的机匣件凝固中期和后期的三维温度场分布如图 3 所示。从图 3(a) 可以看到，铸件中间部分壁最薄，且为凸形结构，凝固最快，而横浇道和直浇道凝固较慢，这有利于铸件底部的顺序凝固，但是由于凝固机匣件最早凝固的为中间部位，浇注系统对顶部的温度场影响不大。从图 3(b) 可以发现，凝固后期铸件左侧 2[#] 冒口和两个 1[#] 冒口下的铸件部位都呈顺序凝固趋势，冒口起到了很好的补缩作用，而右侧 2[#] 小冒口下的铸件部位在凝固时与冒口连接的补缩通道逐渐被断开，形成缩孔缩松危险区。对实际件的解剖结果表明，该部位正是铸件产生缩孔的区域所在。图 4 是中介机匣件头

表 3 数值模拟使用的铸件和铸型热物性参数

Table 3 Thermophysical parameters of casting and mold for simulation

Material	Conductivity /(W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	Special heat J /(J ⁻¹ ·g·K ⁻¹)	Density /(g·cm ⁻³)	Latent heat /(J·g ⁻¹)	Liquidus /℃	Solidus /℃	Emissivity
ZL114A	$\lambda(T)$	$c(T)$	2.28	554.94	618	571.3	0.7
Gypsum 4 [#]	$\lambda(T)$	$c(T)$	1.52	—	—	—	0.6

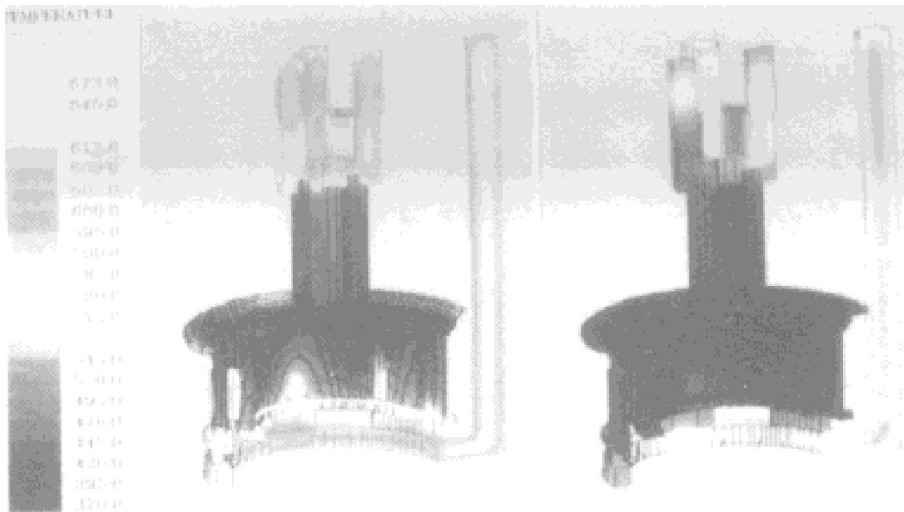


图 3 中介机匣件凝固中期与后期的温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution of housing casting during middle and last moment

部解剖结果的示意图,其中网格阴影区为解剖后发现的缩孔区。

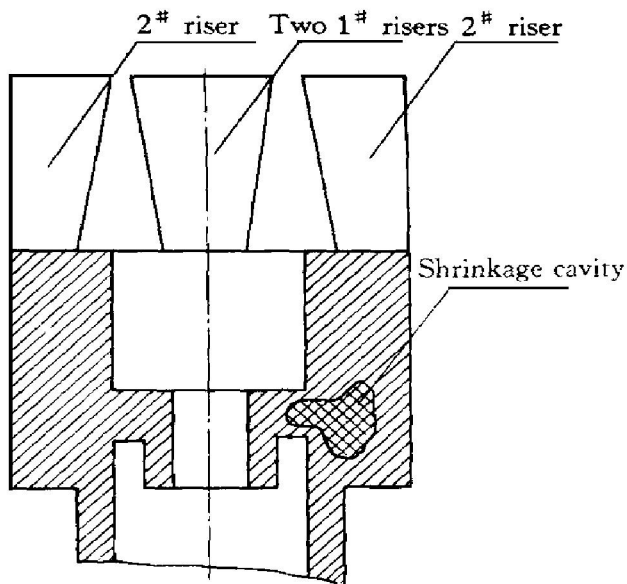


图4 中介机匣件头部解剖示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dissected casting head

经过第一次模拟后,初步认为,右侧2#冒口太小不能达到补缩的作用,因此又对工艺作了修正,在此基础上加大了冒口进行第二次模拟。然而,模拟结果表明,这个部位的缩孔缩松危险区在铸件凝固过程中依然存在。另外,模拟结果还证明,增加补贴的办法可以消除缩孔缩松,但该工艺复杂,后续加工量大。为了便于加工,减少了铸件头部的加工量。从图5

所示的毛坯图上可以看到,铸件头部的凹槽原尺寸为45.5 mm(见图5(a)),修正后被改为50.5 mm(见图5(b)),并同时加工出一直径为35 mm的圆台。之后对修正后的工艺进行了模拟,结果表明,由于铸件头部加工余量减少,缩孔区移到了冒口中,避免了缩孔的发生。从实际应用看,通过减少该部分的加工余量,生产中消除了缩孔的发生。

2 中介机匣件温度场测试与验证

中介机匣是航天领域应用的有色合金精密铸件,是国内数值模拟软件较少涉及的领域。为了验证模拟软件的准确性和通用性,采用对机匣件现场测温的办法与数值模拟计算结果进行了比较。

测温时选用的测温元件为 $d0.5\text{ mm}$ 的镍铬-镍硅热电偶,并配以计算机和驱动软件连续采集测温数据^[8]。为了提高采集数据的精度,补偿环境因素引起的温差,在测温装置上增加了补偿导线,其正、负极分别套在不同的陶瓷管中,且一端与热电偶相连。在实验中,采集了四个部位的测温数据,具体步骤为:

- (1) 石膏型制浆和焙烧一周,并预热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (2) 取出石膏型插入导热偶,并将熔融的

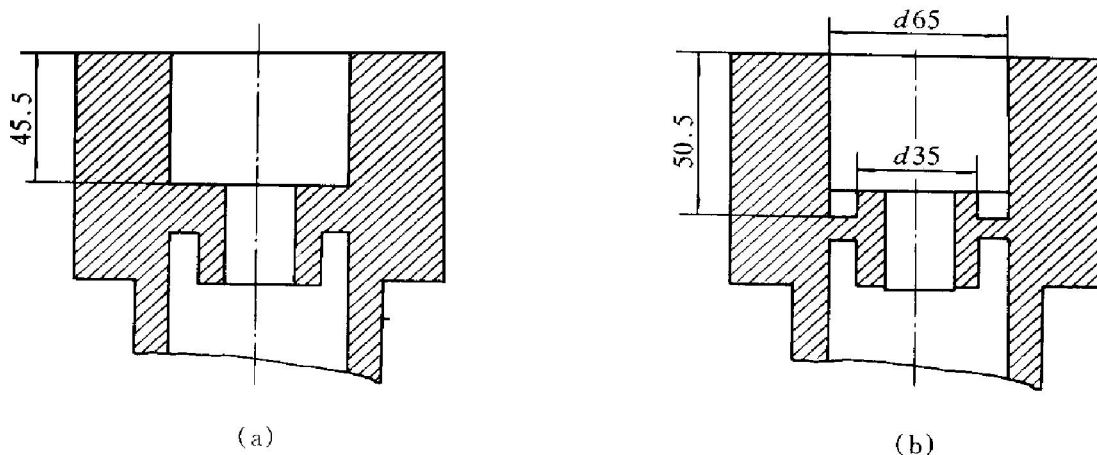


图5 两种设计工艺比较

Fig. 5 Comparison of two technological designs

铝熔液浇入铸型;

(3) 热电偶采集温度;

(4) 曲线绘制与结果分析。

从图6的拟合曲线可以看到, 模拟计算的结果与测温的结果拟合得比较好。在前20 s内, 由于金属液充入型腔时没有立即产生气隙, 因而与铸型的换热强度较大, 金属液冷却较快。由于模拟计算程序较早考虑了气隙的存在, 因而前20 s的计算结果比实际值略高。另外从图中可以看到, 在铸件凝固后期, 计算出的温度通过固相线($t_s = 578\text{ }^{\circ}\text{C}$)时有一个较陡的温度变化, 这可能是部分由于液态金属凝固前有液体对流使实际值偏高, 而在数值计算时未考虑此现象的结果。

从测温结果与实际模拟计算结果的比较来

看, 模拟系统的模拟精度保证了计算结果的可靠性。

3 结论

(1) 采用变热物性参数对铝合金石膏型精密铸件的凝固过程进行了数值模拟, 预测了铸件的缩孔区, 并通过工艺修正消除了铸件内的缩孔发生。

(2) 实验测试了铸件不同部位的凝固过程, 并和数值模拟计算的结果进行了比较和分析, 验证了模拟系统的可靠性。

(3) 由于铸件铸型的热物性参数随温度变化较大, 要保证模拟计算精度需要采用变热物性值。

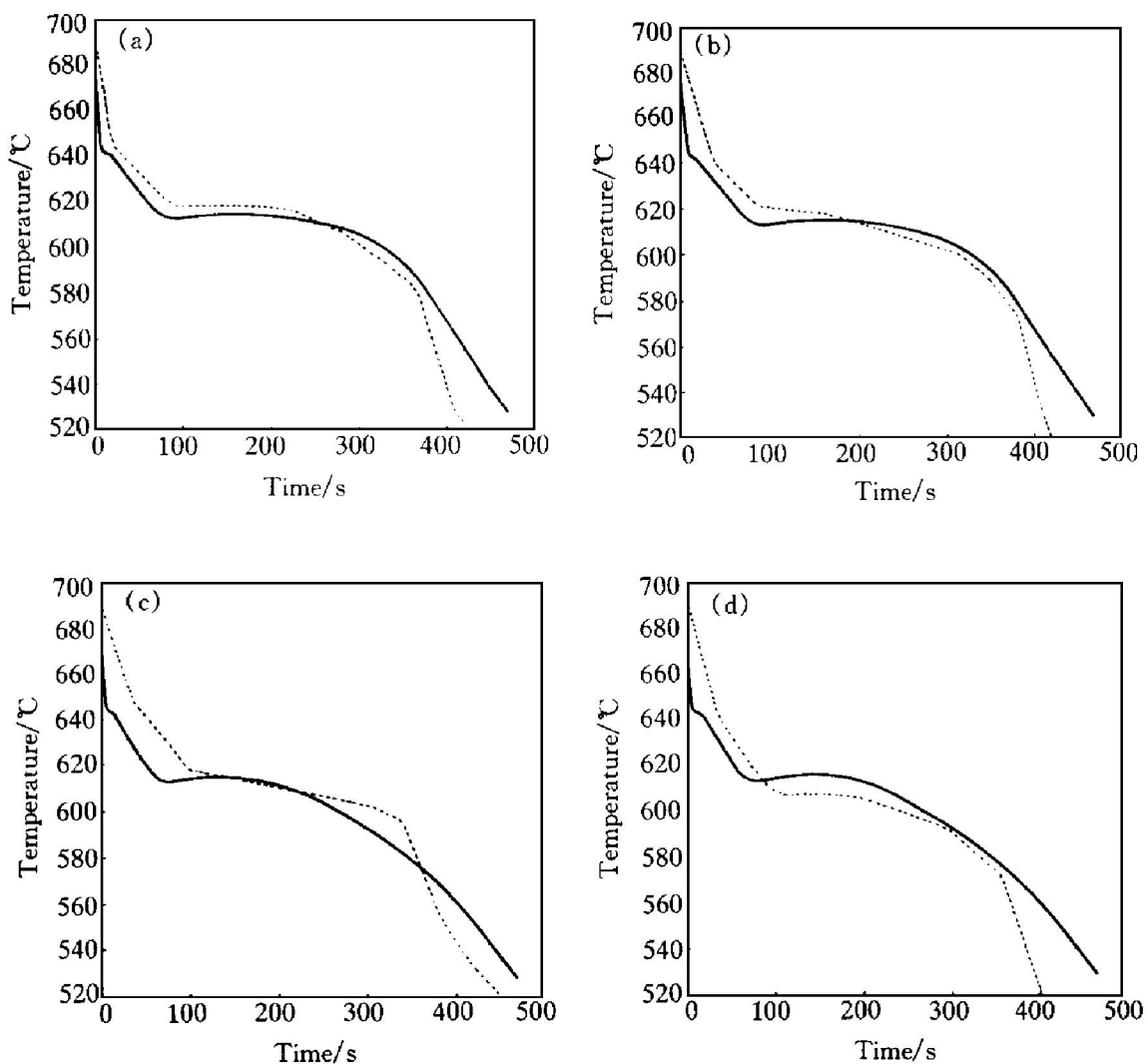


图6 计算数据与试验结果的比较

Fig. 6 Comparison of computed data with experimental results

Solid line—Experimental results; Dotted line—Computed data

REFERENCES

- 1 Hou T X. Computation of Solidification of a Steel Casting in a Sand Mold. AFS 86- 85: 477- 484.
- 2 Kumer T S Prasanna. Interactive Computer Graphics Preprocessing and Two-Dimensional Finite Element Solidification Modeling of Castings. AFS 86- 131: 715- 718.
- 3 Chen J H. Comparison on Different Modes of Latent Heat Release for Modeling Casting Solidification. AFS 90- 133: 539- 545.
- 4 Hornfeldt J. In: Modeling and Control of Casting and Welding Process IV. 1988: 899- 905.
- 5 Lee Y C. J of the Korean Inst of Metals, 1988, 26 (8): 770.
- 6 Wang X J. In: Proceedings of 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes. Dec 1996: 89.
- 7 Sun X B. In: The International Symposium on Materials Science and Technology. Harbin, 1995: 185.
- 8 Hao Qitang (郝启堂). PhD Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1994.

NUMERICAL SIMULATION OF SOLIDIFICATION PROCESS AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF PRECISION CASTING OF Al ALLOY IN GYPSUM MOLD

Sun Xiaobo, Zhang Chunhui, Wang Xijun and An Geying

*National Defense S and T Key Lab of Metal Precision Hot Working,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China*

Zhao Guoqi, Liu Xinzong, Lu Ming and Ning Ruyi

*The 2nd Research Institute of Aerospace Industries Co of China,
Beijing 100039, P. R. China*

ABSTRACT Using independently developed software system for numerical simulation of mold filling and solidification of castings, numerical simulation during solidification process of the precision casting of Al alloy in gypsum mold was completed. Adapting self-designed multi-channel apparatus for examining temperature, the temperature of simulated casting was measured. In order to improve simulation accuracy, casting-mold thermophysical parameters were measured on the spot, and approached by using least squared method. According to the results of computer simulation, the shrinkage in casting was predicted and the reasons of the casting defects were investigated. The shrinkage was eliminated after technological redesign. Besides, the experimental and simulated results were found to be in good agreement.

Key words precision casting of Al alloy solidification process numerical simulation experimental verification

(编辑 彭超群)