文章编号: 1004-0609(2011)07-1675-06

微尺度铸件充型过程的数值模拟

任明星1, 李邦盛1,2, 傅恒志2

(1. 哈尔滨工业大学 微纳米技术研究中心,哈尔滨 150001;2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:修正了传统 Navier-Stoke 方程,并利用该方程和 Fluent 软件对 Zn-4Al 合金充填微齿轮铸件的充型过程进行数值模拟。结果表明:在运动惯性的作用下,Zn-4Al 合金在进入微齿轮型腔后途径齿轮盘部位时,合金并未横向扩展,而是保持入射状态首先填充对面的齿轮轴,撞击型腔壁后,产生二次压头,然后再向齿轮外围的各齿部位反充;型腔内气体被高速运动的金属液搅拌和切割,形成许多微气泡,然后被带入主流区,从排气道排除。
 关键词: ZnAl 合金;微齿轮铸件;数值模拟;充型过程
 中图分类号: TG21

Numerical simulation of filling process on casting in micro scale

REN Ming-xing¹, LI Bang-sheng^{1, 2}, FU Heng-zhi²

(1. Research Center of Micro/nano Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The filling process of micro-gear casting with Zn-4Al alloy was simulated by applying the modified traditional Navier-Stoke equation and the Fluent software. The results show that the alloy is not horizontal expansion and keeps the initial state when the liquid metal is flowed into the cavity of micro-gear and passes through parts of gear plate by the effect of inertia. Liquid metal is anti-filled into the tooth parts outside gear by impacting posterior of cavity, resulting in the second pressure head. Many micro-bubbles are created after the gas in the cavity is mixed and cut by high-speed movement of the metal liquid, and then brought into the mainstream areas and excluded from the exhaust ports. **Key words**: ZnAl alloy; micro gear casting; numerical simulation; filling process

随着微机械研究的深入和应用领域的扩展,三维 复杂形状金属微构件的制备受到越来越广泛的重 视^[1]。2002年前后,借助于传统铸造工艺在成形三维 复杂构件方面的优势,BAUMEISTER等^[2-5]提出了微 熔模精密铸造工艺,并制备了轮廓尺寸在亚毫米级的 微齿轮和微涡轮。随后,CHUNG等^[6]、NOGUCHI 和 ABE^[7]及 HIROYUKI和 MASAO^[8]也相继提出了具 有不同特点的微熔模精铸工艺。任明星等^[9–11]则提出 了生产效率更高的金属型微精密铸造工艺,也制备了 整体尺寸在微米级的微齿轮铸件。上述研究多侧重于 工艺开发与产品试制,对于微铸件成形过程的理论研 究稍显滞后。由于微铸件型腔尺寸微小,一些研究液 态金属充型流动过程的(如水模拟、示踪粒子及铺设热 电偶等)传统方法不再适应。而近年来的研究^[12-14]表 明,用计算机数值模拟充型流动过程的流场和温度场 分布,其方法可行,数值模拟结果准确可靠。

在微铸造成形工艺中,诸多在传统铸造过程中可 忽略的因素,如表面张力和气体反压力等,影响非常

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475028);黑龙江省自然科学基金资助项目(ZJG04-01); 微系统与微结构制造教育部重点实验室开放基金资助项目(HIT.KLOF.2009012)

收稿日期: 2010-07-08; 修订日期: 2010-10-28

通信作者:任明星,讲师,博士;电话:0451-86403268; E-mail: hitrmx@163.com

显著,对液态金属的充型流动过程产生较大影响。任 明星等^[15]曾对微尺度管道内高温液态金属的微流动 规律进行了数值模拟研究,结果表明,微流动过程中 出现 3 个显著微尺度效应——附面层相对厚度的增 大、"凸进效应"的形成和负压力梯度区的产生。由此 可见,微尺度条件下微铸件的充型流动过程与宏观尺 度铸件的充型流动过程不同,本文作者利用流体力学 模拟软件 Flunet,以微齿轮铸件为模型,对液态金属 (Zn-4Al 合金)在微齿轮铸件型腔内的充型流动过程进 行数值模拟,为进一步改进微铸件的微铸造工艺奠定 理论基础。

1 数学模型

1.1 传统流动数学模型

在微铸造成形过程中,可认为液态金属的流动行 为是非等温及牛顿流体的非稳态流动。因此,本文作 者在传统宏观流动模型的基础上,考虑微尺度空间对 熔体黏度的影响,并考虑表面张力及气体反压力对微 流体流动行为的作用,建立能描述微尺度空间内液态 金属微流动行为的物理和数学模型。

根据实际情况,物理模型需进行以下假设和简化: 1) 液态金属在整个流动过程中为连续的不可压缩流 体; 2) 流体为纯黏性的牛顿流体; 3) 忽略重力的影 响; 4) 表面张力系数不随温度变化。

一般地,描述宏观尺度下液态金属充型流动的质量守恒方程、Navier-Stokes (N-S)动量守恒和能量方程 分别为

$$\nabla u = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \rho \varphi_{\mathrm{m}} - \nabla p + \mu \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\rho c_p \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = k \nabla^2 T + \dot{q} \tag{3}$$

为了确定自由表面的形状,采用 VOF(Volume of fluid model)模型,得到体积函数方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$
(4)

式(1)~(4)中: u、v和w为流体流速(m/s); $\rho \varphi_M$ 为作用 在单位体积流体上的质量力(N); μ 为流体动力学黏度 (Pa·s); p为流场中(x, y, z)点的压力(Pa); c_p 为流体 的定压比热容(J/kg·K); T为流体的热力学温度(K); \dot{q} 为热源能量(J); φ 为体积分数。

1.2 微尺度下微流动的附加项

由于微构件尺寸微小,一些宏观流动中忽略的表面力(气体反压力和表面张力)在微尺度下的权重增加,不能忽略。此外,微尺度下黏性耗散的非线性影响增加,不能简单视为常数^[15]。

1.3 微流体微流动数学模型

综上所述,在液态金属微尺度充型流动条件下, N-S 方程应修正为

$$\rho \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \rho \varphi_{\mathrm{M}} - \nabla p + \nabla^2 \mu u - \Delta p_{\mathrm{f}} + p_{\sigma}$$
⁽⁵⁾

式中: p_f 为气体反压力(Pa); p_σ 为表面张力引起的反压力(Pa)。

1.4 微流体流动模型的边界条件

边界条件是在流体运动边界上控制方程应该满足 的条件,边界条件的设定将对数值计算产生重要的 影响。

运动边界条件如下: 1) 流动前沿 p=0; 2) 入口处 $p=p_{in}$, $v_y=0$, $\frac{\partial v_x}{\partial z} = 0$; 3) 壁面处 $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$, $v_x=v_y=0$ 。 能量边界条件如下: 1) 入口处 $T=T_{in}$; 2) 几何中心(z=0) $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$; 3) 壁面边界(z=h) $T=T_{wall}$ 。

2 物理模型

2.1 微齿轮构件的物理模型

应用 Pro/ENGINEER Wildfire2.0 软件绘出微齿轮的三维实体模型,如图 1 所示。其基本数据如下:齿



图1 微齿轮实体模型

Fig.1 Solid model of micro-gear

轮轴直径 300 μm、轴长 400 μm、齿轮盘直径 580 μm、 齿轮盘厚度 300 μm。初始状态为入口端充满金属液, 型腔内充满少量空气,排气孔处连通大气。

2.2 微构件实体网格剖分

将三维实体模型导入 Gambit2.2.30,并对流动计 算区域进行有限元网格划分。如图 2 所示,网格单元 为 8 节点的六面体单元网格,应用截面扫描法对微齿 轮三维实体进行几何离散,共获得节点 109 413 个、 六面体 100 350 个。

将微齿轮物理模型的节点与网格划分信息导入 Fluent 软件,进行数值求解。选择分离解算器,采用 一阶隐式算法,压力-速度耦合采取 PISO 方法,动量 方程采用 QUICK 格式离散。连续性方程和动量方程 收敛残差标准均为 1×10⁻³;采用压力入口边界条件,



- 图 2 微齿轮网格剖分示意图
- Fig.2 Schematic diagram of mesh generation of micro-gear

以质量流入口为计算起始点进行计算。材料选择常用的工业 Zn-4Al 合金,其物性参数见表 1。初始条件如下:充型压力为 25 MPa,出口压力为大气压,型腔温度为 373 K,浇注温度为 703 K。

表1 ZnAl 合金模拟的物性参数

Table 1	Physical	parameters of ZnAl alloy for simulation

T _S / K	T _L / K	ho/ (kg·m ⁻³)	c/ $(J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1})$	$\lambda/$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	h/ (J·kg ⁻¹)
660	654	6 600	418.7	113	120 000

3 结果及讨论

3.1 三维数值模拟结果分析

图 3 所示为微齿轮在不同时刻充型流动的三维 模拟结果,以密度场表征。由图 3(a)和(b)可见,金属 液首先充填齿轮轴,然后反冲齿轮盘;由图 3(c)和(d) 可见,金属液在回填过程中,型腔内气体被高速金属 液搅动、割裂,并随着金属液的运动而运动。三维模 拟的优点在于具有立体效果、直观、可视性好,缺点 是计算量大、耗时、且只能看到三维实体表面的流动 情况,看不到内部金属液的具体运动过程。为分析液 态金属的充型形态,采用二维剖面的方式进行分析, 即在 z 方向上选取一个截面,考察微齿轮铸件内部金 属液的微流动过程。



图 3 不同时刻微铸件充型流动过程的三维密度场模拟结果

Fig.3 3D simulation results (density ρ) of filling process of micro-casting mould at different times: (a) 6 µs; (b) 15 µs; (c) 22 µs; (d) 27 µs

3.2 微铸型内液态金属充型流动数值模拟

图 4~8 所示为结合密度分布图及速度矢量图给出 的液态金属充填微齿轮铸型的全过程。从微铸件结构 看,液态金属熔体经过左侧的齿轮轴、齿轮盘体以及 右侧的齿轮轴 3 个部位。由图 4(a)与 5(a)可见,液态 金属由入口处进入微型腔后,耗时 8 µs 左右充填左侧 齿轮轴;在充填齿轮盘时,虽然没有铸型管壁的约束, 但并不向齿轮盘外围的轮齿处横向充填,而是保持初 始入射状态的运动方向,继续充填右侧的齿轮轴,直 至充填到铸型的后壁出口处,才开始反向充填齿轮盘 空间。由图 4(b)与 5(b)所示的速度矢量图可知,液态 金属的流动速度很大,因此,液态金属流动惯性很大, 使液态金属能够保持原有的流向,越过齿轮盘继续向 前充填。此外,从速度矢量图中可以看出,齿轮盘中 的空气在高速金属熔体带动下,产生了速度较低的 旋流。

图 6 显示流动前沿的液态金属撞击微铸型后壁, 由于壁面的反作用力,压力升高,形成二次压头,金 属熔体开始向齿轮外围的各齿部位回流充填。由图 6(c)的压力分布图可以看到,在出口处的金属液压力 最高。由图 6(b)和图 7(b)所示的速度矢量图可以看出, 在反向填充的金属液前沿,气体的速度非常快,说明 此处液态金属对气体的压迫最强,在压力的作用下, 各轮齿内部气体漩涡流动加剧,当旋转的气团与新流 进的液态金属相遇时,在碰撞阻碍及壁面阻碍的作用 下,轮齿内的气团被碎裂成很多的微气孔。同时,部 分气体在液态金属的携带下不断由排气道排出。

随着充填流动过程的进行,旋流金属不断压迫、 割裂气团。如图 8 所示,在微铸型中心部位液态金属 的流动速度最快,不断旋转的气团次之,与壁面接触 部位的液态金属,由于壁面无滑移及温度下降造成黏 性力增加的影响,其流动速度显著降低。由伯努力方 程可知,流速增加,压强降低,所以,快速流动的液 态金属带动微气孔向压力较低的中心区域运动,在金 属液的压迫下被拉长,被主流区的高速流体带动,向 出口端排气口流动,并随着溢出排气口的金属液排出 型腔,这一点在速度矢量图中表现得更为明显(见图 8(b)),图中深色的箭头代表高速流体,而齿根附近部



图 4 7 µs 时刻微铸件充型流动过程的模拟结果

Fig.4 Simulation results of filling process of micro-casting mould at 7 µs: (a) Distribution of density; (b) Distribution of velocity vector



图 5 10 µs 时刻微铸件充型流动过程的模拟结果

Fig.5 Simulation results of filling process of micro-casting mould at 10 µs: (a) Distribution of density; (b) Distribution of velocity vector





分向出口方向的流线正好对应密度图中的空气部分, 表明这部分气体由漩涡流动逐渐被带进主流方向。

通过以上分析可知,在微铸件的充型过程中,液 态金属由入口进入后,途经齿轮盘部位时不横向扩散 填充,而是直接射向后面的型腔壁,撞击后产生二次 压头,压迫金属液回流填充齿轮盘;液态金属带动型 腔内的气体旋转,不断割裂气孔,并由气孔向中心主 流区域施压,最后随高速流体经排气孔排出。如不考 虑金属液的凝固,则上述过程不断进行,直至气体完 全排除,但实际铸造过程,金属液不但凝固,而且凝 固非常迅速,所以,必然对充型过程及气体的排出造 成影响,这些问题有待进一步研究。



Fig.7 Simulation results of filling process of micro-casting mould at 30 μ s: (a) Distribution of density; (b) Distribution of velocity vector



图 8 80 µs 时刻微铸件充型流动过程的模拟结果 Fig.8 Simulation results of filling process of micro-casting mould at 80 µs: (a) Distribution of density; (b) Distribution of velocity vector

4 结论

1) 通过增加气体反压力和毛细管力等微流动时

中国有色金属学报

必须考虑的附加项,对描述流体宏观流动的 N-S 方程 进行修正,建立适合微尺度下液态金属微流动的 N-S 方程以及物理和数学模型,并利用 Fluent 软件实现微 尺度铸件充型过程的计算机数值模拟。

2)金属液保持入射状态首先填充对面的齿轮轴, 撞击型腔壁后,产生二次压头,然后再向齿轮外围的 各齿部位反充,形成回流现象。

3) 型腔内气体被高速运动的金属液搅拌、切割, 形成许多微气泡,然后被带入主流区,从排气道 排除。

REFERENCES

- RUPRECHT R, BENZLER T, HANEMANN T, MÜLLER K, KONYS J, PIOTTER V, SCHANZ G, SCHMIDT L, THIES A, WOLLMER H, HAUBELT J. Various replication techniques for manufacturing three-dimensional metal microstructures[J]. Microsystem Technology, 1997, 4: 28–31.
- [2] BAUMEISTER G, MUELLER K, RUPRECHT R, HAUSSELT J. Production of metallic high aspect ratio microstructures by microcasting[J]. Microsystem Technology, 2002, 8: 105–108.
- [3] BAUMEISTER G, RUPRECHT R, HAUSSELT J. Microcasting of parts made of metal alloys[J]. Microsystem Technology, 2004, 10: 261–264.
- [4] BAUMEISTER G, RUPRECHT R, HAUSSELT J. Replication of LIGA structures using microcasting[J]. Microsystem Technology, 2004, 10: 484–488.
- [5] BAUMEISTER G, HAUSSELT J, ROTH S, RUPRECHT R. Microcasting[C]//Advanced micro and nanosystems: Micro-engineering in metals and ceramics. Weinheim: Wiley-VCH, 2005: 357–393.
- [6] CHUNG S, PARK S, LEE L, JEONG H. Replication techniques for a metal microcomponent having real 3D shape[J]. Microsystem Technology, 2005, 11: 424–428.
- [7] NOGUCHI H, ABE S. Study on microcasting[J]. International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2003, 69: 125–129.
- [8] HIROYUKI N, MASAO M. Three-dimensional microcasting[C]//Proc of the 10th ICPE. New York, 2001: 349–353.
- [9] 任明星,李邦盛,杨 闯,傅恒志.纳米压痕法测定微铸件硬

度及弹性模量[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 231-236. REN Ming-xing, LI Bang-sheng, YANG Chuang, FU Heng-zhi. Hardness and elastic modulus of microcastings by nanoindentation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(1): 231-236.

- [10] LI Bang-sheng, REN Ming-xing, YANG Chuang, FU Heng-zhi. Microstructure of Zn-Al4 alloy microcastings by micro precision casting based on metal mold[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(2): 327–332.
- [11] 任明星, 李邦盛, 杨 闯, 傅恒志. 纳米压痕法测定微铸件室 温蠕变速率敏感指数[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 272-276. REN Ming-xing, LI Bang-sheng, YANG Chuang, FU Heng-zhi. Measurement of creep rate sensitivity of microcastings at room temperature by using nanoindentation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(3): 272-276.
- [12] 周彼德,薛祥,糜忠兰,孙小波,张春晖,马建. 铸件三维充型过程耦合数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 230-233.
 ZHOU Bi-de, XUE Xiang, MI Zhong-lan, SUN Xiaobo, ZHANG Chun-hui, MA Jian. 3D coupling numerical simulation of mold filling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 230-233.
- [13] WU Shi-ping, LI Chang-yun, GUO Jing-jie, SU Yan-qing, LEI Xiu-qiao, FU Heng-zhi. Numerical simulation and experimental investigation of two filling methods in vertical centrifugal casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(5): 1035–1040.
- [14] 陈兴润,张志峰,徐 骏,石力开.电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场、流场和温度场的数值模拟[J].中国有色金属学报,2010,20(5):937-945.
 CHEN Xing-run, ZHANG Zhi-feng, XU Jun, SHI Li-kai. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry preparation by electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 937-945.
- [15] 任明星,李邦盛,杨 闯,傅恒志. 微尺度型腔内液态金属流动规律模拟研究[J]. 物理学报,2008,57(8):5063-5071.
 REN Ming-xing, LI Bang-sheng, YANG Chuang, FU Heng-zhi. Simulation research on the law of flow of liquid metal in micro-channels[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5063-5071.

(编辑 陈卫萍)