

基于 ProCAST 的 40CrNiMo 金属型铸造微观组织分析

王伟¹, 周研², 屈晓阳³, 马瑞³, 马世博¹

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北省航空轻质复合材料与加工技术工程实验室, 河北石家庄 050018; 2. 贺利氏信越石英(中国)有限公司, 辽宁沈阳 110141; 3. 燕山大学机械工程学院, 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 以40CrNiMo多元合金的金属型铸造为研究对象, 计算获得了40CrNiMo的形核和生长参数。基于ProCAST软件及CAFE模块, 建立了40CrNiMo圆柱型棒料铸造充型和凝固组织演变有限元模型。对比分析了铸造工艺、浇注温度、浇注时间、换热系数和冷却介质等工艺条件对凝固缺陷和微观组织的影响。结果表明, 金属型铸件相对砂型铸件的整体组织更致密、晶粒更细小。金属型铸造时, 采取较低的浇注温度、较大的换热系数和激冷能力较强的冷却介质, 铸件的缩松和缩孔缺陷相对较少且微观组织相对致密。

关键词: 40CrNiMo; 金属型铸造; ProCAST; CAFE; 微观组织

作者简介:

王伟(1986-), 男, 博士, 主要研究方向为金属铸锻成形技术。电话: 18631175658, E-mail: 18631175658@163.com
通讯作者:
周研, 女, 硕士。电话: 18360423305, E-mail: wangweicajia@ysu.edu.cn

中图分类号: TG441.8
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2019)05-0449-07

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51475139); 河北省自然科学基金资助项目(E2015208105); 河北省科技计划高新技术产业倍增工程(15215325)。

收稿日期:

2018-10-22 收到初稿,
2019-01-04 收到修订稿。

随着工业生产的发展, 对铸件的尺寸精度、力学性能、成本控制等方面都提出了更高的要求。为适应这些需求, 科研人员对铸型材料、造型方法、液态金属充型方式、冷凝条件等方面进行优化和改进, 提出诸多相比传统砂型铸造更具优势的铸造方法^[1]。其中, 金属型铸造也称硬模铸造或永久铸造, 是采用金属材料为铸型的一种铸造工艺方法, 其铸型可以重复使用数百至数千次, 因此对于批量生产具有良好的经济效益, 且金属型铸件的力学性能通常优于砂型铸件^[2]。

自20世纪60年代计算机数值模拟技术首次被应用于模拟铸件的温度场以来^[3], 历经数十年的探索, 铸造凝固过程的数值模拟技术得到了长足发展, 尤其是传热、应力、流体和缺陷等宏观模拟已得到了广泛应用^[4-5]。近几年, 随着计算机技术的高速发展, 铸造凝固过程的微观模拟, 如形核与生长过程、晶粒尺寸和组织形态等也取得了诸多突破^[6-7]。

目前, 对于金属型铸造的数值模拟研究集中在对充型和凝固过程的宏观模拟^[8-9]。本研究以40CrNiMo多元合金的金属型铸造为研究对象, 基于ProCAST有限元软件, 建立40CrNiMo多元合金的铸造充型有限元模型和凝固组织演变CAFE模型, 分析主要铸造工艺参数对凝固缺陷和微观组织的影响, 为金属型铸造工艺参数的选择提供参考。

1 铸造微观组织演化数学模型

近年来, 随着数值模拟技术和数学算法的发展, 铸造工艺微观组织模拟所采用的数学模型由最初的确定性模型过渡为概率模型和宏微观耦合模型。其中, 宏微观耦合模型也叫CAFE法, 它是将元胞自动机与有限元相结合的一种数学模型, 其思想是先在凝固区域用大网格(FE)划分并在网格内部得到均匀节点, 后在节点处采用CA模型计算晶粒形核与生长, 主要包括非均匀形核模型和枝晶尖端生长动力学模型, 如式(1)和式(2)所示^[10]。

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_{\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta \bar{T}}{\Delta T_{\sigma}}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T)} d(\Delta T) \quad (2)$$

式中： $\frac{dn}{d(\Delta T)}$ 表示非均匀形核时晶粒密度随过冷度的变化； $d(\Delta T)$ 为单位过冷度； $\Delta \bar{T}$ 为平均形核过冷度； ΔT_{σ} 为过冷度标准方差； n 为晶粒密度； n_{\max} 为最大形核密度。

液态金属凝固过程中，铸件内部与表面的形核方式不同，常使用面形核参数和体形核参数区分。 $\Delta T_{s, \max}$ 、 $\Delta T_{s, \sigma}$ 、 n_s 分别代表表面形核过冷度、面形核过冷度标准方差及面形核初始密度； $\Delta T_{v, \max}$ 、 $\Delta T_{v, \sigma}$ 、 n_v 分别代表体形核过冷度、体形核过冷度标准方差及体形核初始密度。过冷度是晶粒形核和生长的驱动力，由多种形式组成，表达式为：

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_t + \Delta T_k + \Delta T_r \quad (3)$$

式中： ΔT 为枝晶尖端总过冷度； ΔT_c 为成分过冷度； ΔT_t 为热变化过冷度； ΔT_k 为物理运动过冷度； ΔT_r 为固-液界面曲率变化过冷度。

液态金属凝固时，固液界面前沿溶质成分变化引起的成分过冷 ΔT_c 占主导地位， ΔT_t 、 ΔT_k 、 ΔT_r 对总过冷度的影响可忽略不计。因此，工程应用时通常令总过冷度 $\Delta T = \Delta T_c$ 。

液态金属凝固时枝晶生长过程，可采用Kurz等出的KGT模型^[11]计算，表达式如下：

$$\Omega = \frac{C_i^* - C_0}{C_i^*(1-k)} = Iv(P_c) = P_c \cdot \exp(P_c) \cdot \int_{r_c}^{\infty} \frac{\exp(-Z)}{Z} dZ \quad (4)$$

$$R = 2\pi \sqrt{\left(\frac{\Gamma}{mG_c \xi_c - G}\right)} \quad (5)$$

$$P_c = \frac{Rv}{2D} \quad (6)$$

$$\xi_c = 1 - \frac{2k}{(1+P_c^2)^{1/2} - 1 + 2k} \quad (7)$$

$$G_c = \frac{vC_0(1-k)}{D_l[1-(1-k)\Omega]} \quad (8)$$

$$\Delta T = \Delta T_c = mC_0 \left[1 - \frac{1}{\Omega(1-k)}\right] \quad (9)$$

式中： Ω 为枝晶尖端溶质过饱和度； k 为溶质分配系数； R 为枝晶尖端半径； Γ 为Gibbs-Thompson系数； G_c 为枝晶前沿液相中溶质过饱和度； G 为温度梯度； $Iv(P_c)$ 为Gibbs-Thompson系数的Ivantsov函数； ξ_c 为Peclet数的函数； D 为液相中溶质扩散系数； C_0 为溶质元素初始浓度； m 为液相率； C_i^* 为固-液界面处液相浓

度。

联立式(4)、式(5)和式(9)可得，枝晶尖端的生长速度 v 和枝晶尖端总过冷度 ΔT ，满足下列关系。

$$v = \alpha_2 \Delta T^2 + \alpha_3 \Delta T^3 \quad (10)$$

式中： α_2 、 α_3 为合金成分相关系数。

由于KGT模型主要计算二元合金的微观组织，当求解多元合金时，应将多元合金分解为多个二元Fe-X合金，可采取当量法扩展KGT模型求解。扩展后模型表示为：

$$C_0 = \sum C_i \quad (11)$$

$$m = \sum (m_i C_i) / C_0 \quad (12)$$

$$k = \sum (m_i C_i k_i) / (m C_0) \quad (13)$$

式中： C_i 为*i*元素在合金中所占质量分数； m_i 为*i*元素在合金中液相斜率； k_i 为*i*元素在合金中溶质分配系数。

根据相图计算或试验方法可获得 m 和 k 。本研究采用软件自带的模块计算40CrNiMo的各项参数。

2 金属型铸造有限元模型

以40CrNiMo合金钢圆柱型棒料的金属型铸造过程为研究对象，铸件尺寸为 $\phi 42 \text{ mm} \times 235 \text{ mm}$ ，化学成分见表1。利用ProCAST的Meshing模块进行网格划分，单元类型为四面体单元，单元数为52 560，节点数为11 390。将各元素的质量分数导入ProCAST，基于Scheil模型，通过软件的热力学数据库，确定40CrNiMo合金钢的固、液相线温度分别为1 121 ℃和1 492 ℃。通常浇注温度需高于液相线50~80 ℃。因此，本有限元模型选取的浇注温度为1 550 ℃和1 580 ℃。为便于金属流动，减小铸件内应力，根据工程经验，设定金属型的预热温度为300 ℃。铸造凝固过程中界面换热系数对铸件的组织性能影响较大。一般情况下，砂型的换热系数为300~1 000 W/(m²·K)，金属型的换热系数为1 000~5 000 W/(m²·K)。金属型铸造由于工艺要求，必须在铸型内壁或金属芯表面涂刷涂料。涂料的种类和厚度能够控制凝固过程的导热情况，改变金属型的热物理性能。因此，本研究通过设置不同的换热系数来代表不同的涂料选择。以浇注时间表征浇注速度，根据工程经验，设置浇注时间分别为2 s和5 s。此外，为研究不同冷却条件对液态金属凝固过程的影响，分别模拟空冷和水冷过程。综上所述，有限元模型的初始条件及边界条件列于表2。

表1 40CrNiMo合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of 40CrNiMo alloy w_B /%

| C | Mn | Mo | Cr | Ni | Si | Cu | S | P |
|-----|-----|------|------|------|-----|-------|-------|-------|
| 0.4 | 0.8 | 0.26 | 0.92 | 1.25 | 0.3 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |

根据二元相图法简化处理模拟钢种的成分，将40CrNiMo划分为不同二元合金：Fe-C、Fe-Cr、Fe-Ni、Fe-Mo、Fe-Mn、Fe-Si，确定材料参数 m 、 k 、 D_1 、 Γ ，带入ProCAST软件计算动力学参数 α_2 和 α_3 。根据文献[12-16]，确定面形核和体形核高斯分布参数： $n_{s, \max}$ 、 $\Delta T_{s, \max}$ 、 $\Delta T_{s, \sigma}$ 、 $n_{v, \max}$ 、 $\Delta T_{v, \max}$ 、 $\Delta T_{v, \sigma}$ 。40CrNiMo的生长和形核参量分别列于表3和表4。

3 结果及讨论

3.1 凝固缺陷分析

缩松和缩孔是液态金属凝固后在铸件内部形成的孔洞缺陷，严重降低铸件的力学性能，甚至使铸件成为废品。有限元模型建立后，首先分析浇注温度、浇注时间和换热系数对40CrNiMo金属型铸造充型过程的影响，重点关注缩松和缩孔的分布情况。

图1~3所示分别为不同浇注温度、浇注时间和换热系数时铸件的缩松和缩孔情况，其中圆柱部分为铸件，其余部分为浇注冒口。图中孔洞代表缩松和缩孔缺陷，孔洞体积占铸件比例的大小与缺陷的严重程度成正比。由图可知，铸件均存在缩松和缩孔缺陷，且在铸件中央区域沿轴线排布。这是由于铸件轴向尺寸较大，液态金属在轴向的冷却速度和温度接近，不断向铸件中央同时凝固，中央区域由等液相线组成较宽的凝固区域，此区域受临近等固相线内液态金属凝固收缩的作用，产生时断时续的孔隙。合金中缩松、缩孔的总体积构成收缩容积，两者数量可相互转化，可用下式表达：

$$V_{\text{缩孔}} = V_{\text{液}} \left[\alpha_{V_{\text{液}}} (T_{\text{液}} - T_s) + \varepsilon_{V_{\text{凝}}} - \frac{1}{2} \alpha_{V_{\text{固}}} (T_s - T_F) \right] \left(1 - \frac{K\sqrt{\tau}}{2R} \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{V_{\text{液}}} = \alpha_{V_{\text{液}}} (T_{\text{浇}} - T_L) \times 100\% \quad (15)$$

式中： $V_{\text{液}}$ 为液态金属体积； $\alpha_{V_{\text{液}}}$ 为液态收缩系数； $\varepsilon_{V_{\text{凝}}}$

表2 初始条件及边界条件
Table 2 Initial and boundary conditions

| 初始条件与边界条件 | 数值或处理方法 |
|--|-----------------|
| 钢液浇注温度/℃ | 1 550、1 580 |
| 模具预热温度/℃ | 300 |
| 浇注时间/s | 2、5 |
| 铸型-铸件换热系数/(W·m ² ·K ⁻¹) | 800、1 000、2 000 |
| 冷却介质 | 空气、水 |

表3 40CrNiMo合金的动力学生长参数
Table 3 Dynamics growth parameters of 40CrNiMo alloy

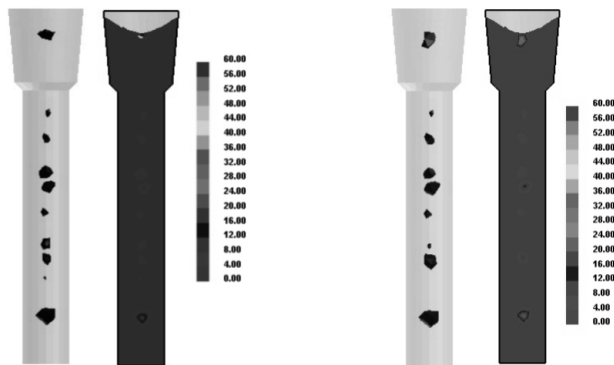
| 元素 | 质量分数/% | m | k | $\Gamma / (\text{K} \cdot \text{m})$ | $D_1 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|--------|-------------------------------------|-------|--------------------------------------|--|
| C | 0.4 | -76.92 | 0.317 | 3×10^{-7} | 11×10^{-9} |
| Mn | 0.8 | -111.11 | 0.728 | 3×10^{-7} | 2.4×10^{-9} |
| Mo | 0.26 | -166.67 | 0.538 | 3×10^{-7} | 0.5×10^{-9} |
| Cr | 0.92 | -200 | 0.891 | 3×10^{-7} | 3.3×10^{-9} |
| Ni | 1.25 | -250 | 0.928 | 3×10^{-7} | 4.3×10^{-9} |
| Si | 0.3 | -250 | 0.733 | 3×10^{-7} | 8.5×10^{-9} |
| | | $\alpha_2 = 1.342 6 \times 10^{-7}$ | | $\alpha_3 = 5.858 94 \times 10^{-8}$ | |

表4 40CrNiMo合金的形核高斯分布参数
Table 4 Nucleation gaussian distribution parameters of 40CrNiMo alloy

| 面形核 | $n_{s, \max} = 1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ | $\Delta T_{s, \max} = 10 \text{ K}$ | $\Delta T_{s, \sigma} = 2 \text{ K}$ |
|-----|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 体形核 | $n_{v, \max} = 1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ | $\Delta T_{v, \max} = 10 \text{ K}$ | $\Delta T_{v, \sigma} = 2 \text{ K}$ |

为凝固收缩率； $\alpha_{V_{\text{固}}}$ 为固态收缩系数； $T_{\text{液}}$ 为液相温度； $\varepsilon_{V_{\text{液}}}$ 为液态收缩率； $T_{\text{浇}}$ 为浇注温度； τ 为浇注时间； T_s 为凝固温度； T_F 为界面温度； T_L 为合金液相线温度； K 为铸件凝固系数； R 为铸件厚度。

由式(14)和式(15)可知，增大合金的液态收缩均会增加缩孔的体积。随着浇注温度的升高，液态收缩率增加，促进液态收缩，缩孔体积增大。因此，浇注温度为1 580℃时比浇注温度为1 550℃时缩松、缩孔严重(如图1所示)。提高浇注温度，将增加产生



(a) 1 580℃-5 s-1 000 W/(m²·K) (b) 1 550℃-5 s-1 000 W/(m²·K)

图1 不同浇注温度对缩松和缩孔的影响

Fig. 1 Effect of different pouring temperatures on shrinkage porosity and cavity

疏松缩孔的几率。浇注速度越快,液态金属流动的时间越短,若补缩不及时,易产生疏松缩孔。此外,由式(14)可知,浇注时间 τ 增大,则缩孔体积 $V_{\text{缩孔}}$ 减小。因此,浇注时间为2 s时疏松缩孔的体积比浇注时间为5 s时大(如图2所示)。换热系数不仅影响体系对流传热速度,还决定着液态金属保持流动的时间。此外,通常换热系数同铸型的蓄热系数呈线性关系,其数值越大表示铸型的激冷能力越强,铸件凝固区域越窄,产生的疏松缩孔体积越小。因此,当换热系数 h 为2 000 W/(m²·K)时,疏松和缩孔率较小(如图3所示)。

3.2 微观组织分析

铸件微观组织是评价铸件质量的重要指标之一,合金化学成分、铸型性质、浇注及冷却条件对微观组织有重要的影响。利用ProCAST软件的CAFE模块分析浇注温度、换热系数、冷却介质对40CrNiMo合金金属型铸造微观组织的影响,并与传统砂型铸造进行对比分析。

圆棒料具有对称性质,定义铸件端面圆心为坐标原点,以铸件切面坐标值进行分区,A区坐标值-21~-15 mm为表面细晶区;B区坐标值-15~-4 mm为中间柱状晶区;C区坐标值-4~0 mm为中心等轴晶区。本研究选用的铸造材料40CrNiMo合金元素较多且铸件尺寸较小,获得的铸件不同于大型铸件具有非常明显的三晶区分布。模拟结果表明铸件的柱状晶区晶粒的轴向尺寸和径向尺寸十分接近,并未呈现出典型柱状晶的形貌,其与表面细晶和中心等轴晶的主要区别在于晶粒尺寸的差别。图4和图5所示分别为传统砂型铸造和金属型铸造的凝固微观组织,(a)为铸件内部分布的各向同性的内部等轴晶区的径向截面;(b)为铸件内垂直于铸型内壁,沿热流方向分布的中间柱状晶区的径向截面;(c)为铸件内部紧靠铸型内壁的表面细晶区的径向截面,是无方向性的细小等轴晶组成的激冷组织。

铸型的激冷能力对凝固组织具有较大影响,激冷能力大,液态金属就能获得较大的过冷度。过冷度是液态金属凝固的驱动力,过冷度越大,凝固驱动力越

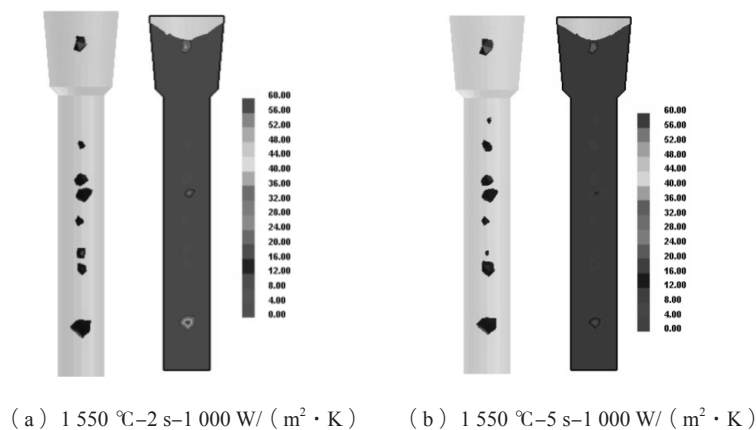


图2 不同浇注时间对疏松和缩孔的影响

Fig. 2 Effect of different pouring times on shrinkage porosity and cavity

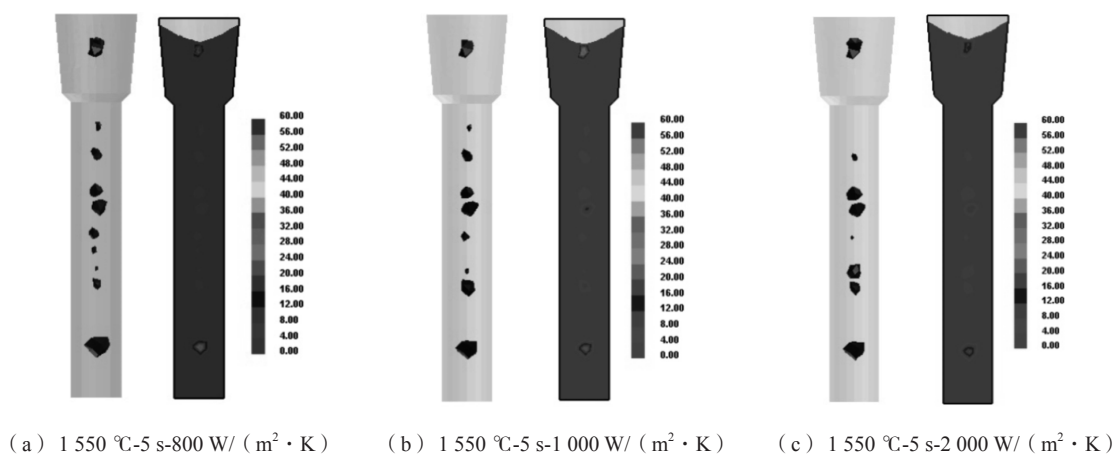


图3 不同换热系数对疏松和缩孔的影响

Fig. 3 Effect of different heat transfer coefficients on shrinkage porosity and cavity

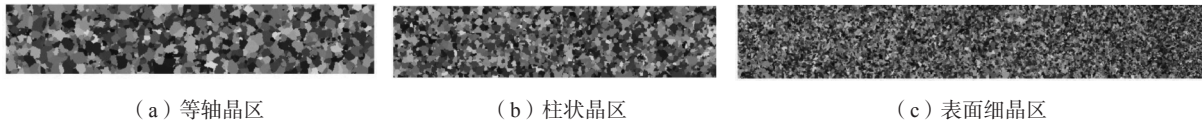


图4 砂型铸造三晶区微观组织

Fig. 4 Microstructures of three crystalline regions in sand mould casting

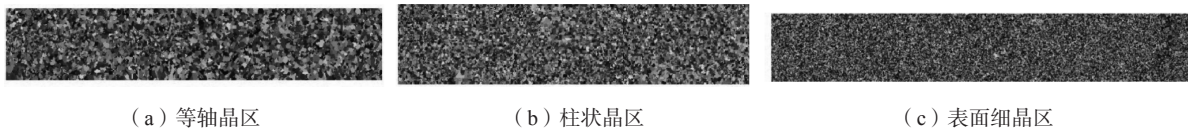


图5 金属型铸造三晶区微观组织

Fig. 5 Microstructures of three crystalline regions in metal mold casting

大，形核能力越强，有利于促进细小等轴晶组织的形成。对比铸件相同位置的微观组织，由于金属型相对砂型具有较大的激冷能力，能使液态金属获得更大的过冷度，形核能力增强，使整体组织较致密，晶粒更细小，整体晶粒尺寸处于 $90 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间，而砂型铸造铸件整体晶粒尺寸处于 $160 \sim 480 \mu\text{m}$ 之间，明显比金属型铸造粗大，如图6所示。

图7和图8分别为浇注温度 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ 、换热系数 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、浇注时间 5 s 时的凝固微观组织。图9所示为铸件晶粒尺寸曲线图。由图9中C区域可知，等轴晶晶粒尺寸在浇注温度为 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时比 $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ 时小。这是由于铸件内部等轴晶一部分来自于铸型内

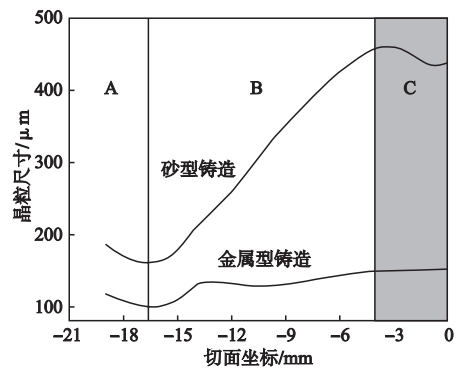


图6 不同铸造工艺对晶粒尺寸的影响

Fig. 6 Grain size of samples cast by different processes

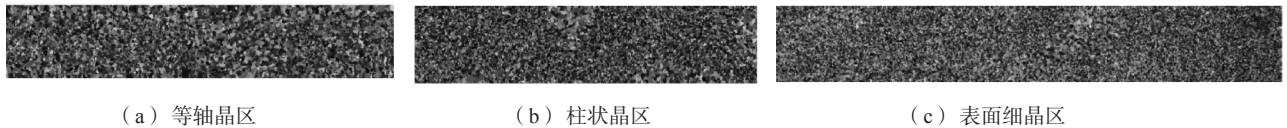


图7 $1550 \text{ }^\circ\text{C}-1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})-5\text{s}$ 三晶区微观组织

Fig. 7 Microstructures of three crystalline regions at $1550 \text{ }^\circ\text{C}-1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})-5\text{s}$

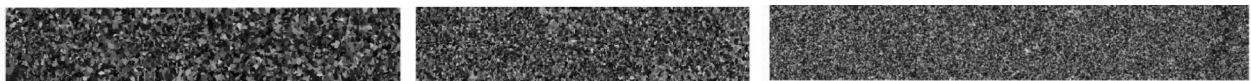


图8 $1580 \text{ }^\circ\text{C}-1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})-5\text{s}$ 三晶区微观组织

Fig. 8 Microstructures of three crystalline regions at $1580 \text{ }^\circ\text{C}-1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})-5\text{s}$

壁处脱落的晶粒，一部分来自于液面过冷产生的游离晶粒，还有一部分来自于柱状晶枝晶的熔断晶粒。当浇注温度高时，从铸型内壁脱落的等轴晶粒和漂浮于液面和柱状晶前沿的游离晶粒会在高温作用下重熔，内部等轴晶的数量减少，致使等轴晶晶粒尺寸增加。若表层细晶区前沿界面出现较多的等轴晶组织或部分游离晶粒发生沉积，则柱状晶的轴向生长将会受到抑制。较低的浇注温度可以获得更多的细等轴晶，减少柱状晶的数量，柱状晶的径向尺寸增大。因此，在柱状晶区域内，当温度为 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，其晶粒径向尺寸较大，如图9中B区域所示。

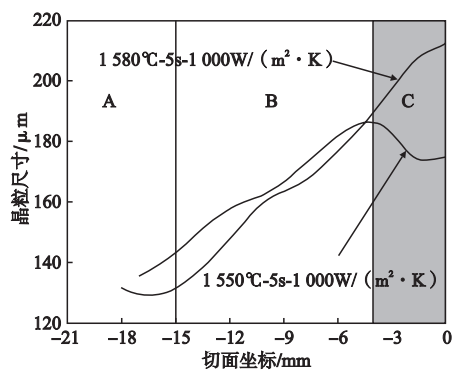


图9 不同浇注温度对晶粒尺寸的影响

Fig. 9 Grain size of samples poured at different temperatures

图10所示为浇注温度1 550 ℃、换热系数800 W/(m²·K)、浇注时间5 s时的微观组织。图11所示为浇注温度1 550 ℃、换热系数1 000 W/(m²·K)、浇注时间5 s、水冷条件下铸件的微观组织。图12所示为换热系数分别为800 W/(m²·K)和1 000 W/(m²·K)，其他浇注条件相同时铸件晶粒尺寸曲线图。图13所示为冷却介质分别为空气和水，其他浇注条件相同时铸件晶粒尺寸曲线图。液态金属凝固初期，高导热能力铸型使前沿液体获得较大的过冷度，提高形核能力，促进型壁表面生成较多的激冷组织。同时，导热能力较强的铸型具备出色的同液态金属相互对流的热交换能力，增加表面游离晶粒数量，提高液态金属对铸型侧壁的冲刷作用，进一步提高表面激冷组织的游离，为内部等轴晶形成提供来源，减小等轴晶晶粒尺寸，铸件整体组织细化。因此，当换热系数为1 000

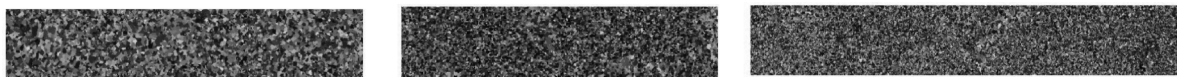
W/(m²·K)时，铸件整体晶粒尺寸小于换热系数为800 W/(m²·K)的情况。相似地，水冷相对于空冷而言，冷却速度增加，增强铸型的激冷能力，型壁附近液态金属过冷度增大，促进表面细晶区和等轴晶区形成，铸件整体晶粒尺寸较小。

4 结论

(1) 采取较高的浇注温度、较快的浇注速度和较小的换热系数，铸件的缩松、缩孔缺陷相对较多。

(2) 金属型铸件相对砂型铸件的整体组织更致密，晶粒更细小。

(3) 金属型铸造时，采取较低的浇注温度，较大的换热系数和激冷能力较强的冷却介质，铸件的微观组织较致密。



(a) 等轴晶区

(b) 柱状晶区

(c) 表面细晶区

图10 1 550 ℃-800 W/(m²·K)-5s三晶区微观组织

Fig. 10 Microstructures of three crystalline regions at 1 550 ℃-800 W/(m²·K)-5s



图11 1 550 ℃-1 000 W/(m²·K)-5s-水冷三晶区微观组织

Fig. 11 Microstructures of three crystalline regions at 1 550 ℃-1 000 W/(m²·K)-5s and water-cooled

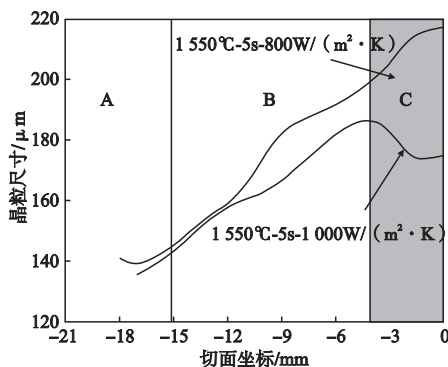


图12 不同换热系数对晶粒尺寸的影响

Fig. 12 Grain size of samples with different heat transfer coefficients

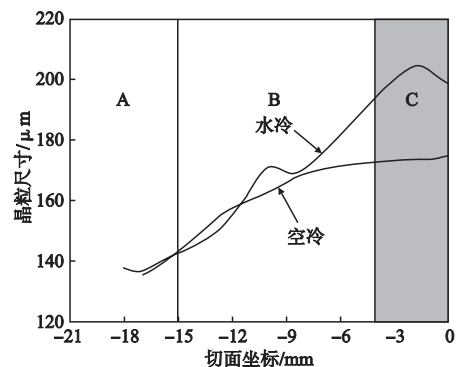


图13 不同冷却介质对晶粒尺寸的影响

Fig. 13 Grain size of samples cooled in different media

参考文献:

- [1] BUTLER WA, TIMELLI G, BATTAGLIA E, et al. Die Casting (Permanent Mold) [M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2016.
- [2] MANG T. Encyclopedia of lubricants and lubrication [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [3] FORSUND V K. Das eindringen von stahl in form sand einflub der oberflächen reaction under temperatur [J]. Giesserei Techn. Wiss. Beih, 1962, 14 (2): 51-61.
- [4] 刘东戎, 杨智鹏, 王丽萍, 等. 铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21 (3): 96-100.
- [5] 廖敦明, 曹流, 孙飞, 等. 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 161-173.
- [6] 陈瑞, 许庆彦, 郭会廷, 等. Al-7Si-Mg铸造铝合金凝固和热处理过程微观组织模拟和屈服强度预测 [J]. 稀有金属, 2017, 41 (8): 837-849.
- [7] 邵珩, 李岩, 南海, 等. Ti-6Al-4V合金熔模铸造过程中的固态相变微观组织演变的数值模拟 [J]. 金属学报, 2017, 53 (9): 1140-1152.
- [8] SHEPEL S V, PAOLUCCI S. Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22 (2): 229-248.
- [9] CHANG Q M, YANG Y K, YUAN J, et al. Numerical simulation of mold filling and solidification behavior in permanente casting process [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 313-314: 179-183.
- [10] 王同敏, 魏晶晶, 王旭东, 等. 合金凝固组织微观模拟研究进展与应用 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 193-203.
- [11] JING C L, XU Z G, WANG Y, et al. Simulation on solidification structure of 72A tire cord steel billet using CAFE method [J]. China Foundry, 2012, 9 (1): 53-59.
- [12] 闵义, 刘承军, 王德永, 等. 37Mn5连铸圆坯中心等轴晶率预测 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (10): 38-43.
- [13] 王金龙, 赖朝彬, 王福明, 等. CAEF模型机理及应用 [J]. 钢铁研究学报, 2009, 21 (10): 60-63.
- [14] 王金龙. 基于CAFE法模拟自然对流对微观组织的影响 [J]. 材料导报, 2017, 31: 474-478.
- [15] 王金龙, 王福明, 李长荣, 等. 易切削钢9SMn28凝固过程的CAFE法模拟 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 34 (3): 325-330.
- [16] 庞瑞朋, 王福明, 王金龙, 等. 3D-CAFE法凝固参数对430不锈钢凝固组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (12): 188-195.

Microstructure Analysis of Metal Mold Casting 40CrNiMo Alloy Based on ProCAST

WANG Wei¹, ZHOU Yan², QU Xiao-yang³, MA Rui³, MA Shi-bo¹

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Hebei Engineering Laboratory of Aviation Lightweight Composite Materials and Processing Technology, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. Hereaus ShinEtsu Quartz (China), Inc., Shenyang 110141, Liaoning, China; 3. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract:

The research object of this paper is metal mold casting of 40CrNiMo multi-component alloy. The nucleation and growth parameters of 40CrNiMo alloy were calculated. The finite element models of casting filling and solidification microstructure evolution of 40CrNiMo cylindrical bar were established basing on the ProCAST software and CAFE module. The influence of casting process, pouring temperature, pouring time, heat transfer coefficient and cooling medium on solidification defect and microstructure were comparatively analyzed. The results indicate that the metal mold has greater chilling ability than sand mold, so the overall structure of the casting is more compact and the grain is smaller. When the casting was produced using a metal mold, low pouring temperature, higher heat transfer coefficient and cooling medium with stronger chilling ability, the shrinkage cavity and porosity of casting is less and microstructure is compact relatively.

Key words:

40CrNiMo; metal mold casting; ProCAST; CAFE; microstructure