

K439B 高温合金变截面铸件缩孔缩松数值模拟与试验

鄯宇¹, 隋大山¹, 麻晋源¹, 李金锋², 董安平³, 孙宝德³

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030; 2. 济南圣泉集团股份有限公司, 山东济南 250204; 3. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料与精密成形重点实验室, 上海 200240)

摘要: 具有变截面结构特征的铸件极易产生缩孔缩松缺陷, 而准确预测并抑制缩孔缩松是制定合理铸造工艺的关键技术之一。采用有限元方法对K439B高温合金变截面铸件精密铸造过程进行了数值模拟, 对比分析了Porosity判据、Niyama无量纲判据和APM (Advanced Porosity Model) 判据的缩孔缩松数值模拟结果, 结合铸造试验结果, 确定了APM判据具有更高的数值模拟精度。在此基础上, 采用APM判据数值模拟了不同截面铸件的缩孔缩松演化特点。数值模拟结果表明: 随着截面比值由2:1增加到12:1, 特征区域的孔隙率由2.31%增大到4.56%, 孔隙总体积由0.44 cm³增加到3.65 cm³, 并且大体积分数的宏观缩孔逐渐增多, 而锥形孔隙的长宽比则不断减小。

关键词: 镍基高温合金; 精密铸造; 数值模拟; 变截面; 缩孔缩松

作者简介:

鄯宇 (1997-), 男, 硕士生, 主要研究方向为高温合金精密铸造数值模拟与工艺优化。E-mail: sjtushanyu@sjtu.edu.cn

通讯作者:

隋大山, 男, 博士, 副教授。E-mail: dasui@sjtu.edu.cn; 董安平, 男, 博士, 研究员。E-mail: apdong@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG132.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1560-08

基金项目:

国家科技重大专项 (J2019-VI-0004-0117) 资助项目。

收稿日期:

2023-04-17 收到初稿,

2023-10-16 收到修订稿。

铸造镍基高温合金以其优良的高温综合性能而广泛用于制造航空航天装备中的热端零部件^[1-2]。随着装备结构向着一体化和轻量化方向发展, 零部件结构越来越表现出大型化和复杂化特征, 具有明显的“变截面效应”, 表现为铸件不同部位壁厚差异较大, 凝固过程中厚壁位置冷却速度慢, 易出现孤立液相区, 难以得到足够金属液补缩, 导致缩孔缩松缺陷, 严重影响铸件质量^[3-4]。

科技工作者围绕铸件缩孔缩松缺陷的演化规律和抑制方法展开了研究^[5-7]。严志等^[8]研究了工艺参数对大尺寸K465镍基母合金锭中心缩孔的影响, 通过正交试验设计和数值模拟确定了合理的工艺参数。KONG D等^[9]研究了铝合金轮毂不同位置的孔隙率分布状态, 采用Porosity判据预测了缩孔缺陷, 预测结果与试验结果基本吻合。姜巨福等^[10]采用Porosity判据研究了不同压力条件对轮毂缩孔缩松缺陷的影响, 分析了工艺条件对缺陷的作用规律。胡海涛等^[11]采用数值模拟方法研究了工艺参数对离心铸造TiAl合金杆形件缩孔缺陷的影响规律, 确定了每个工艺参数的合理范围。杨瑶等^[12]利用APM (Advanced Porosity Module) 判据预测了Silafont-36合金高压铸造过程的缩孔缩松缺陷, 与金相结果对比发现, APM判据对于不同类型的缩孔缩松均有良好精度。

本文以K439B高温合金变截面结构铸件为例, 对其精密铸造过程的缩孔缩松缺陷进行了数值模拟和试验验证。首先通过数值模拟分析比较了不同的缩孔缩松缺陷判据, 并通过铸造试验确定出合理的缺陷判据。在此基础上, 数值模拟了不同截面尺寸对缩孔缩松缺陷演化的作用规律, 有望为提高数值模拟精度、设计和改进铸造工艺提供理论参考。

1 有限元建模

1.1 变截面铸件模型

为研究不同变截面尺寸铸件的缩孔缩松缺陷演化规律, 分别设计了两种具有变

截面结构特征的铸件，变截面处的截面积比值分别为6:1（直径31 mm粗杆与直径12.5 mm细杆的截面积比值）和12:1（直径44 mm粗杆与直径12.5 mm细杆的截面积比值），如图1所示。为了量化分析变截面位置处的缩孔缩松缺陷，分别选取垂直高度方向80 mm的两个区域进行分析，分别记为A区与B区，如图1a所示。

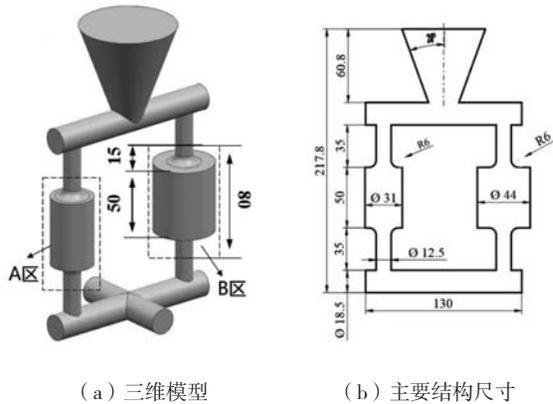


图1 变截面铸件
Fig. 1 Variable cross-sectional casting

1.2 有限元建模

根据图1所示的铸件模型，采用铸造数值模拟软件ProCAST进行K439B高温合金重力精密铸造过程有限元建模，实现充型凝固过程数值模拟，研究变截面铸件缩孔缩松缺陷的演化特征。

1.2.1 缩孔缩松缺陷判据

(1) 缩孔判据。Porosity判据是ProCAST软件中主要的缩孔缺陷预测模型，该判据预测铸件宏观缩孔缺陷方面，具有良好的预测精度^[13-15]。

(2) 缩松判据。Niyama无量纲判据是Niyama提出的预测铸件缩松缺陷的经验公式，该判据已得到广泛应用^[16-17]，表达式为：

$$N_y = \frac{G}{\sqrt{R}} < K \quad (1)$$

式中： G 为温度梯度， R 为冷却速率， K 为一临界值，当 G/\sqrt{R} 的比值小于临界值 K 时（对于铸钢件， $K=1 \text{ } ^\circ\text{C}^{1/2} \cdot \text{min}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）缩松倾向增大。

Niyama无量纲判据实质上是一种基于枝晶间显微缩松的预测判据，判据值大小主要体现显微缩松的倾向性^[18]。K.D.Carlson在此基础上提出了一种采用Niyama准则无量纲形式（NY*）预测缩松体积分数的方法，且已验证对于多种合金材料和铸造条件均适用，模型表达式为^[19]：

$$N_y^* = C_\lambda R^{1/3} N_y \sqrt{\frac{\Delta P_{cr}}{\mu_1 \beta \Delta t_f}} = \sqrt{I(f_{l, cr})} \quad (2)$$

$$I(f_{l, cr}) = \int_{f_{l, cr}}^1 180 \frac{(1-f_l)^2}{f_l^2} \frac{d\theta}{df_l} df_l \quad (3)$$

$$f_p = \beta' f_{l, cr} = \frac{(\rho_s - \rho_l)}{\rho_s} f_{l, cr} \quad (4)$$

式中： C_λ 为二次枝晶臂间距粗化常数， ΔP_{cr} 为微孔形核的临界压降， $f_{l, cr}$ 为微孔形核的临界液相分数， $\theta = \frac{T - T_{sol}}{\Delta T_f}$ ， f_l 为当前液相率，显微缩松的体积分数通过式(4)计算。

(3) 改进的缩孔缩松判据。APM判据是基于Pequet、Gremaud和Rappaz的研究成果开发的缩孔缩松率计算模型^[20]，该判据基于达西方程和气体偏析理论，采用网格动态细化技术，在有限元网格的基础上叠加结构化的有限体积网格，对糊状区的每个单元进行计算。该判据在铸铝合金的缩孔缩松预测方面已取得良好效果^[7, 12, 21]。与前述判据相比，APM判据能综合考虑环境压力、金属静压力和流体流动的动态压力，糊状区的压降是气孔形成的主要因素，液态金属在糊状区的运动可认为只受压力场的控制，液体中的局部压力 P_l 可表示为^[20]：

$$P_l = P_a + P_m + P_d \quad (5)$$

式中： P_a 为环境压力（或外部压力）， P_m 是金属静压力， P_d 是糊状区液体流动的动态压力。

糊状区枝晶间液体表面的流速可根据达西定律的流量方程表示^[22]：

$$g_l v_l = -\frac{K}{\mu} \text{grad} P_d = -\frac{K}{\mu} [\text{grad} P_l - \rho_l g] \quad (6)$$

式中： g_l 为液相的体积分数， K 为枝晶骨架间液相的渗透率， μ 是液体动力粘度， ρ_l 是液体密度， g 是重力加速度，渗透率 K 可从Kozeny-Carman方程得出^[20]：

$$K(f_s, \lambda_2) = \frac{(1-f_s)^3 \lambda_2^2}{f_s^2 180} \quad (7)$$

式中： λ_2 是二次枝晶臂间距， f_s 为固体体积分数。

铸件中的孔隙来自两部分，一是金属液中气体析出引起的气孔，二是金属凝固时的收缩得不到补缩而产生的缩孔缩松，金属凝固过程中的孔隙形核条件为^[20]：

$$P_{nuc} = P_g - \Delta P_r \quad (8)$$

式中： P_{nuc} 为临界孔隙形核压力， P_g 为溶解在液相中的气体分压之和， ΔP_r 为毛细效应引起的拉普拉斯超压，数值由拉普拉斯定律给出^[20]：

$$\Delta P_r = \frac{2\sigma_g}{r} \quad (9)$$

式中： σ_g 是液体和孔隙界面处的表面能， r 是孔隙的曲率半径。

本文铸造工艺为真空状态下的重力精密铸造，

因此,仅考虑金属自身收缩作用,忽略气体分压 P_g 的作用,而气体分压 P_g 与缩孔缩松的关系详见参考文献[23]。此时,孔隙形核条件为^[20]:

$$P_1 = P_{unc} = -\Delta P_r = -\frac{2\sigma_{lg}}{r} \quad (10)$$

孔隙形核后,APM判据针对糊状区网格采用网格细分的数值解法求得每一增量步内孔隙体积的增量,最终得到整体铸件的孔隙缺陷分布与尺寸。

1.2.2 有限元模型

根据图1所示的铸件和型壳,采用有限元方法,建立了有限元模型。其中,铸件网格尺寸为2 mm,划分了404 279个四面体网格,型壳网格尺寸为3.5 mm,划分了196 035个四面体网格。

铸件材质为K439B镍基高温合金,浇注温度为1 500 °C,充型时间为4 s。型壳材料为熔融石英,型壳壁厚为12 mm。铸件与型壳的界面换热系数随温度变化^[2],如图2所示,型壳与环境之间为空冷边界条件,换热系数为10 W/(m²·K),辐射系数为0.8,环境温度为20 °C。

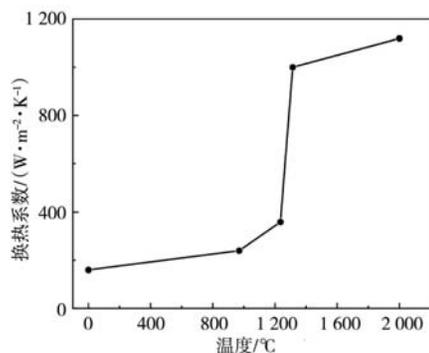


图2 铸件与型壳的界面换热系数

Fig. 2 Heat transfer coefficient between casting and mold shell

2 数值模拟结果与分析

2.1 凝固数值模拟结果

铸件凝固过程中不同时刻的固相率与对应的温度场数值模拟结果如图3所示。由图3可知,凝固时间为56.1 s时,A区与B区的温度均降至液相线温度以下,此时两粗杆位置冷却速率快而率先凝固。凝固时间为106.2 s时,A区与B区的最低温度(细杆位置)降至固相线温度以下,两区粗杆部位开始由外侧向中心凝固。凝固时间为175.7 s时,A区粗杆整体温度接近固相线温度,仅在心部存在椭圆状糊状区。凝固时间为285.6 s时,B区粗杆整体温度接近固相线温度,其心部存在椭圆状糊状区。铸件整体的凝固顺序为由外向内,由细杆向粗杆,粗杆与细杆连接处,细杆先凝固,粗杆后凝固且心部凝固更慢,而浇口杯处最后凝

固。铸件在A和B两区的粗杆心部形成热节。并且,由于B区粗杆直径更大,其心部凝固时间较A区粗杆心部滞后约109.9 s;而凝固后期由于缺少金属液补缩,A区和B区粗杆心部均易产生缩孔缩松缺陷,并且B区粗杆心部的缺陷倾向更大。

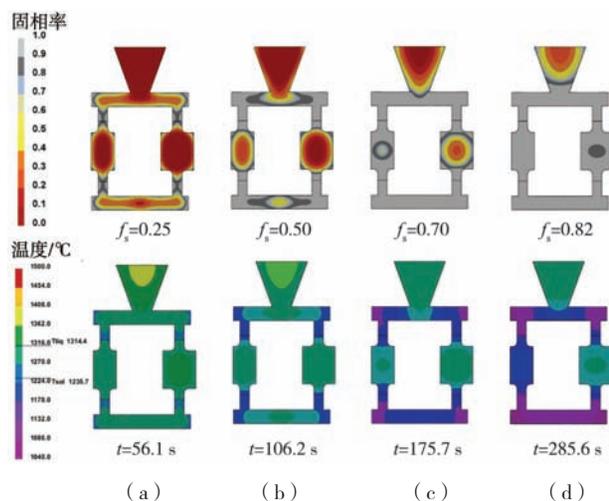


图3 凝固过程中不同时刻的固相率与对应的温度场分布

Fig. 3 Distribution of fraction solid and corresponding temperature field at different time during solidification

2.2 缩孔缩松缺陷数值模拟结果

图4分别为Porosity判据+Niyama无量纲判据(NY*)、APM判据对铸件宏观缩孔(孔隙体积分数>1%)的数值模拟结果。由图4a和图4b可知,A和B两区粗杆的中上部均出现了明显的大体积缩孔,并且缩孔周围分布着聚集性缩松,A区的孔隙率与数量均小于B区。由图4a可知,Porosity+NY*判据预测的宏观缩孔,呈狭长锥形分布,体积分数大于90%的孔隙集中于粗杆上端,粗杆中部主要为体积分数70%~90%的孔隙。由图4b可知,APM判据预测的孔隙结果,集中大体积分数的孔隙位于粗杆顶部,下端为椭圆形孔隙,并且孔隙体积分数小于10%。

图5为Porosity+NY*判据、APM判据对铸件显微

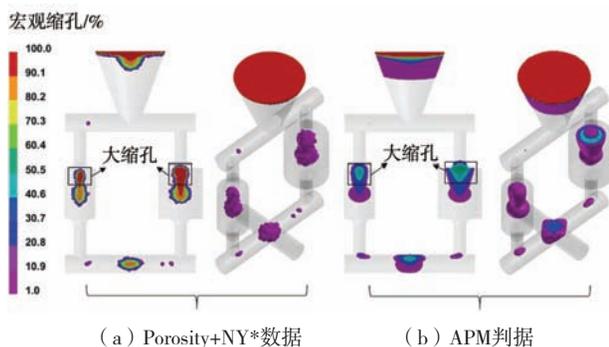


图4 不同判据的宏观缩孔数值模拟结果

Fig. 4 Simulation results of macroporosity by different criterions

缩松（孔隙体积分数 $<1\%$ ）的预测结果。由图5可知，Porosity+NY*判据预测的微观缩松主要分布于宏观缩孔周围，且体积分数接近1%。APM判据预测显微缩松主要分布于宏观缩孔周围，微观缩松数量多且分布更分散。

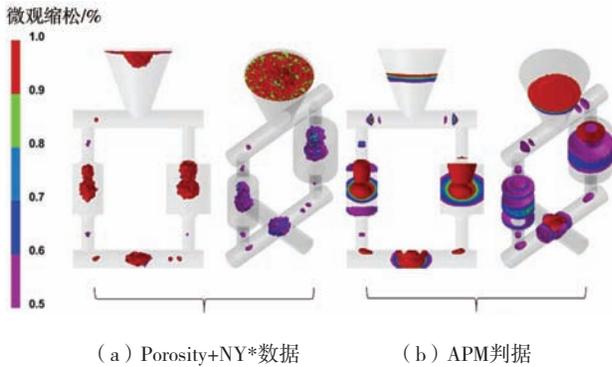


图5 不同判据的微观缩松数值模拟结果
Fig. 5 Simulation results of microporosity by different criterions

根据数值模拟结果，不同判据的缩孔缩松体积分数统计结果如表1所示。由表1可知，A区的缩孔缩松数量与体积分数均小于B区，NY*判据能较好的量化统计微观缩松的体积分数。并且，对比分析表1不同判据的数值模拟结果可知，采用APM判据预测的孔隙率小于Porosity+NY*判据。

表1 不同孔隙预测模型的数值模拟结果
Table 1 Simulation results of different porosity prediction models

区域	Porosity+NY*	NY*	APM
A	4.36%	0.15%	3.28%
B	5.43%	0.11%	4.56%

3 试验验证

3.1 浇注试验

采用电阻加热炉预热型壳，预热温度为 $900\text{ }^\circ\text{C}$ ，保温3 h。采用真空感应炉熔化K439B镍基高温合金。型壳预热保温后转移至真空室中进行真空浇注，浇注温度为 $1\ 500\text{ }^\circ\text{C}$ ，浇注时间4 s。浇注完成后将型壳与铸件取出冷却，对铸件进行切样分析。

3.2 缩孔缩松缺陷分析

3.2.1 试样观察与分析

浇注得到的铸件如图6a所示，对铸件进行试样切割分析，具体方法如图6b所示。各试样的缩孔缩松缺陷形貌和分布如图6c所示。由图6c可知，A区和B区的宏观缩孔主要分布在粗杆和细杆连接附近，即变截面处。A区的宏观缩孔表现为分散的密集性缩孔，缩孔下端分布着微观缩松。B区宏观缩孔表现为大尺寸宏观缩孔，最大的两个宏观缩孔轮廓尺寸分别约为 $4\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}$ 和 $9\text{ mm}\times 7.8\text{ mm}$ ，宏观缩孔下端分布少量微观缩松。

利用光学显微镜分别观察了A区和B区的微观缩松缺陷形貌。其中，A区的微观缩松形貌如图7所示。由图7a可知，A区截面3有两处宏观缩孔，缩孔尺寸分别约为 $2.3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 和 $1.8\text{ mm}\times 3.7\text{ mm}$ ，缩孔周围为密集性缩松，由图7a-7c可知，A区的缩松分布为密集的狭长条形，到粗杆底部 7.2 mm 时，缩松分布逐渐稀疏，截面6（远浇口端的细杆）表现为呈点状弥散分布的显微缩松。

B区的微观缩松形貌如图8所示。由图8a和图8b可知，B区的缩松集中分布于大尺寸缩孔（图6c）底部，且缩松分布为扁长的锥形。由图8c与图8d可知，缩松的集中分布区截止于距离粗杆底部 14.7 mm 处，截面5孔隙少且表现为少数集中的显微缩松，截面6几乎无明显缩松。

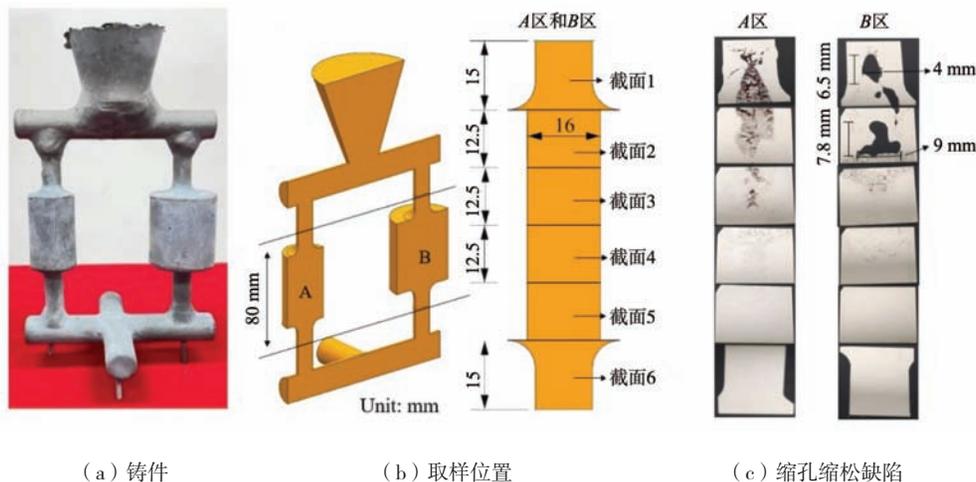


图6 铸件取样位置和缩孔缩松分布
Fig. 6 Sample position and shrinkage and porosity distribution

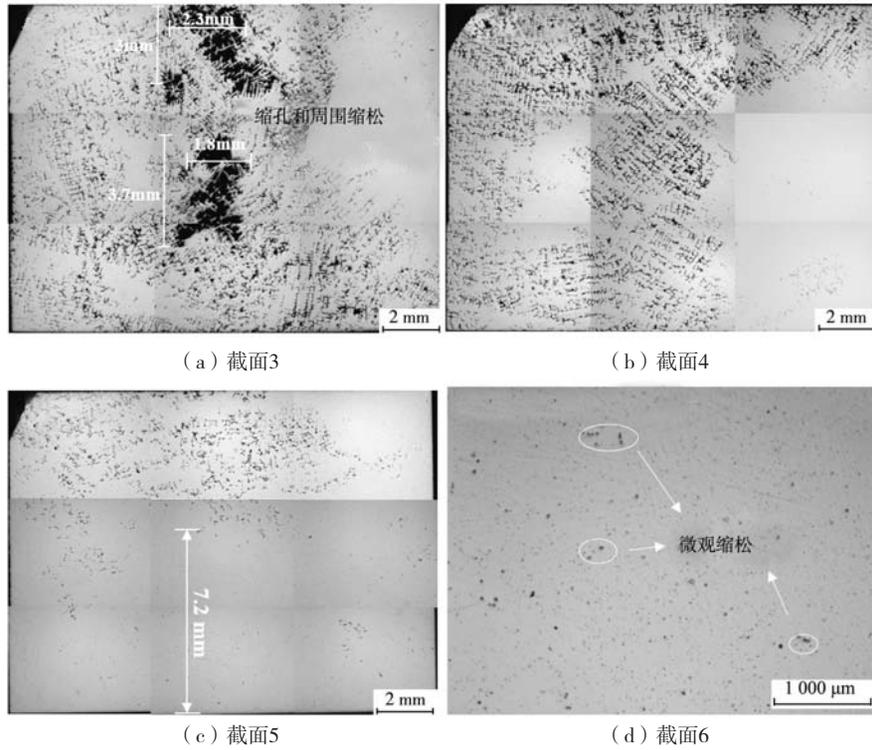


图7 A区的微观缩松形貌

Fig. 7 Micro porosity distribution of region A

显微观孔隙，仅有少数点状弥散分布的显微缩松。

综合分析图7和图8，对比A区与B区的微观缩松形貌，缩松均分布于粗杆中上部，从截面1到截面6，缩松面积和尺寸逐渐减小。两者区别在于，A区的孔隙分

布表现为上端小尺寸缩孔周围分布密集的缩松，下端为密集的缩松呈狭长带状分布；B区的孔隙分布表现为上端大尺寸缩孔，下端为扁长锥形缩松集中分布区，缩松分布带长度小于A区。

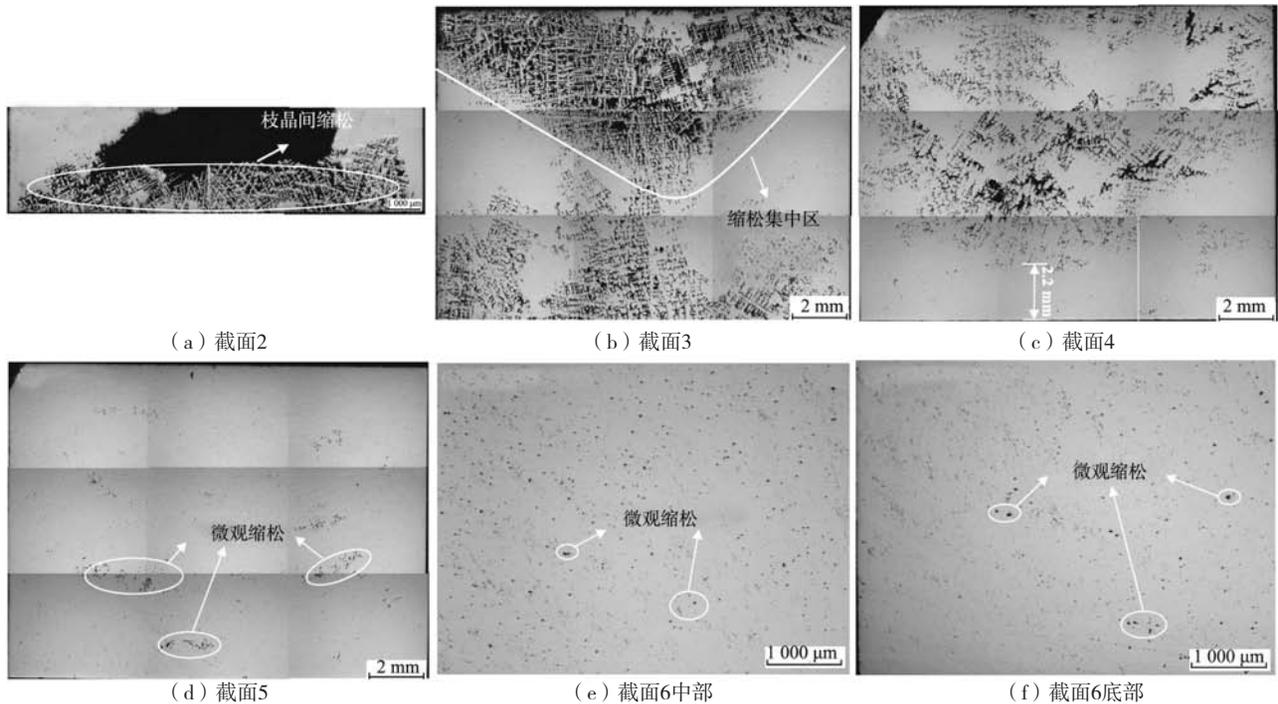


图8 B区的微观孔隙分布

Fig. 8 Micro porosity distribution of region B

3.2.2 试验与数值模拟对比

图9为两种变截面铸件的APM判据数值模拟结果与试验结果对比。由图9可知，与Porosity+NY*判据数值模拟结果相比，APM判据的缩孔缩松缺陷形态和位置等数值模拟结果，与试验结果更吻合。孔隙体积分数大于40%以上时表现为明显的大尺寸宏观缩孔；孔隙体积分数为10%~40%时，孔隙表现为分散的宏观缩孔与周围的微观缩松；孔隙体积分数小于1%时，孔隙呈现为弥散分布的显微缩松。因此，APM判据更适于K439B合金重力精密铸造过程的缩孔缩松缺陷预测，精度更高。

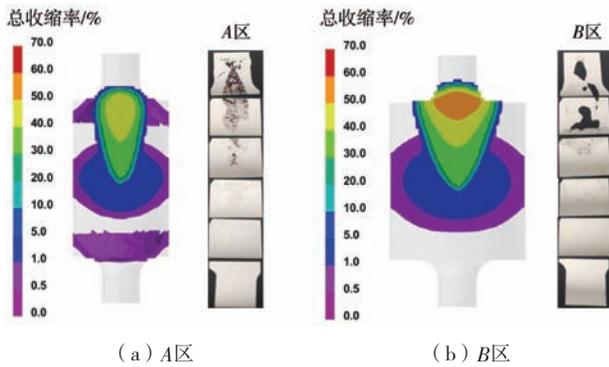


图9 APM判据的数值模拟结果与实验结果对比
Fig. 9 Comparison between simulation results and experimental results of APM criterion

4 不同截面比的缩孔缩松缺陷特征

在上述有限元模型基础上，采用APM判据，分别数值模拟了截面比为2:1（粗杆直径18.5 mm）和4:1（粗杆直径25.4 mm）时铸件缩孔缩松缺陷的演化特征。结合截面比为6:1和12:1的数值模拟结果，得到了特征区域的孔隙率与孔隙体积随变截面比值的变

化曲线，如图10所示。由图10可知，随着截面比值逐渐增大，特征区域的孔隙率与孔隙率均呈现增大趋势，其中，孔隙率由2.31%增大到4.56%；孔隙体积由0.44 cm³增大到3.65 cm³。

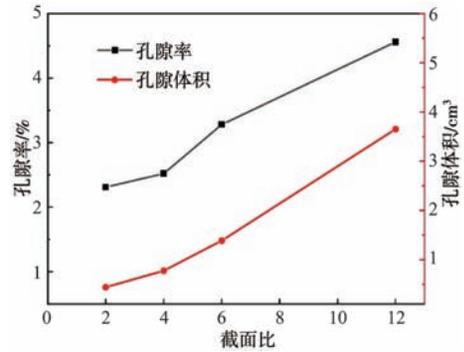


图10 特征区域孔隙率随变截面尺寸的变化曲线
Fig. 10 The curves of shrinkage porosity and porosity volume varied with cross-sectional area ratio in regions A and B

特征区域不同截面比的缩孔缩松缺陷数值模拟结果如图11所示，由图11a-d可知，缩孔缩松分布的形貌特点是：体积分数小于1%的微观缩松位于最外侧，体积分数为1%~5%的孔隙呈椭圆形分布，体积分数为5%~10%的孔隙位于锥形外侧，体积分数大于10%的孔隙则位于锥形心部。随着截面比增大，缩孔缩松缺陷开始出现的时间从50 s推迟到80 s，缩孔缩松缺陷最终形成用时也从110 s增加到385 s，而孔隙分布形态基本保持不变，但大体积分数孔隙增多且长条形孔隙分布区的长宽比减小。当截面比小于6:1时，缩孔缩松缺陷心部的体积分数均小于50%；当截面比达到12:1时，缩孔缩松缺陷心部的体积分数超过50%，根据图9b可知，此时心部产生宏观缩孔。

当截面比值为2:1时，特征区域的孔隙缺陷在凝

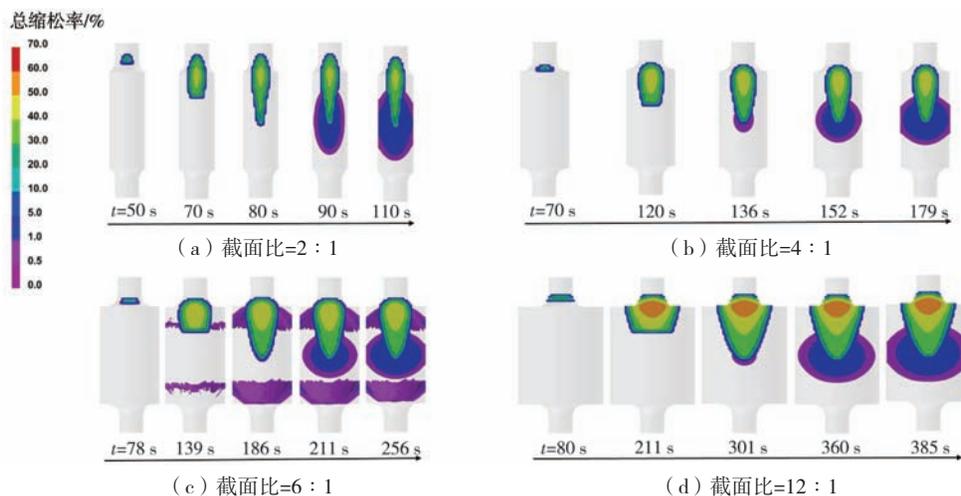


图11 不同变截面的孔隙数值模拟结果
Fig. 11 Simulation results of shrinkage porosity for different cross-sectional ratio

固时间为50 s时开始出现, 截面比值为12:1时, 孔隙缺陷在80 s开始出现, 此时为凝固初期, 粗杆部位糊状区熔体随温度降低引起的液态收缩和凝固收缩需要顶端的固液相排空来进行补偿, 该位置通常为大体积分数宏观缩孔聚集区, 如图11粗杆上端的体积分数大于40%的孔隙。随着凝固的进行, 粗杆中部糊状区固相率逐渐增加, 此时固相已经难以流动进行补缩, 糊状区的液态收缩和凝固收缩需通过上部固相率更低的液体流动进行补缩, 如图11粗杆上端体积分数介于1%~40%的孔隙区域, 当截面比值2:1时, 该区域在凝固时间为80 s时完全形成; 截面比值为12:1时, 该区域在301 s时完全形成。随糊状区固相率继续增加, 此时枝晶骨架基本形成, 液态和凝固收缩表现为枝晶间的显微收缩, 如图11粗杆中部体积分数小于1%的外侧微观缩孔。

5 结论

(1) 采用不同的缩孔缩松判据, 通过对K439B高温合金重力精密铸造过程的缩孔缩松缺陷数值模拟与

试验对比发现, 与Porosity判据和NY*判据相比, APM判据更适于重力精密铸造缩孔缩松缺陷数值模拟, 具有更高地预测精度。

(2) 铸件切样结果表明, 特征区域的缩孔缩松缺陷主要分布在变截面处, 缺陷位置呈现上端为宏观缩孔、下端为密集性缩松的特点。截面比为6:1的A区截面尺寸小, 孔隙分布特征是上端小尺寸宏观缩孔周围分布密集的缩松, 下端为狭长带状缩松, 其他位置为弥散分布的点状缩松。截面比为12:1的B区截面尺寸大, 孔隙分布为上端大尺寸宏观缩孔, 下端为紧邻宏观缩孔底端的扁长锥形缩松分布区, 缩松分布带长度小于A区。

(3) 分析不同截面铸件的缩孔缩松演化规律发现, 随着截面比从2:1增加到12:1, 特征区域的孔隙总体积由0.44 cm³增加到3.65 cm³, 孔隙率由2.31%增加到4.56%, 缩孔缩松开始出现的时间从50 s推迟到80 s, 缩孔缩松最终形成用时也从110 s增加到385 s, 而大体积分数宏观缩孔增多且长锥形孔隙分布区的长宽比不断减小。

参考文献:

- [1] 鄯宇, 隋大山, 麻晋源, 等. K439B镍基合金精密铸造微观组织模拟与实验验证 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (7): 923-933.
- [2] SUI D S, SHAN Y, WANG D X, et al. Elastic-viscoplastic constitutive equations of K439B superalloy and thermal stress simulation during casting process [J]. China Foundry, 2023, 20 (5): 403-413.
- [3] YAN X, XU Q, TIAN G, et al. Multi-scale modeling of liquid-metal cooling directional solidification and solidification behavior of nickel-based superalloy casting [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 67 (8): 36-49.
- [4] 陈晶阳, 任晓冬, 张明军, 等. 铸造镍基高温合金K439B的组织及典型性能 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (1): 100-104.
- [5] 鄯宇, 王业基, 王峰, 等. 低压铸铝件缩孔缺陷数值模拟与工艺改进 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (4): 139-145.
- [6] KARTHIK A, KARUNANITHI R, SRINIVASAN S A, et al. The optimization of squeeze casting process parameter for AA2219 alloy by using the Taguchi method [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27 (3): 2556-2561.
- [7] 王忠, 牛晓峰, 侯华, 等. 低压铸造下凝固过程缩孔缩松的预测方法研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (10): 983-987.
- [8] 严志, 王树森, 邹伟, 等. 工艺参数对大尺寸K465镍基母合金锭中心缩孔的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (3): 410-414.
- [9] KONG D C, SUN D Z, YANG B C, et al. Characterization and modeling of damage behavior of a casting aluminum wheel considering inhomogeneity of microstructure and microdefects [J]. Engineering Failure Analysis, 2023 (145): 107018.
- [10] 姜巨福, 匡君, 张颖, 等. A356.2铝合金轮毂局部增压铸造过程数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (2): 313-321.
- [11] 胡海涛, 张熹雯, 朱春雷, 等. 工艺参数对离心铸造TiAl合金杆形件缩孔缺陷影响的数值模拟 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 799-804.
- [12] 杨瑶, 刘斌, 刘李梅. 一类硅铝合金HPDC工艺过程的研究分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (7): 56-59.
- [13] 刘金虎, 纪志军, 李峰, 等. 基于ProCAST的高Nb-TiAl合金叶轮熔模铸造 [J]. 航空材料学报, 2021, 41 (2): 61-71.
- [14] 杨行, 郭莹, 林相, 等. 机床底座ProCAST数值模拟及铸造工艺优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (6): 6-9.
- [15] 宗学文, 刘文杰, 熊聪. 钛合金叶轮精铸成型数值模拟及实验验证 [J]. 航空材料学报, 2019, 39 (5): 103-112.
- [16] 康茂东, 王俊, 高海燕, 等. 应用无量纲Niyama判据优化大型薄壁铸件浇冒系统 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (7): 1635-1639.
- [17] 李荣德, 张子慧, 向青春, 等. Niyama判据预测大型铸钢件旋回破碎机构梁缩孔缩松缺陷 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (5): 1196-1200.
- [18] 潘利文, 郑立静, 张虎, 等. Niyama判据对铸件缩孔缩松预测的适用性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (12): 1534-1540.
- [19] CARLSON K D, BECKERMAN C. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless niyama criterion [J]. Metallurgical

- and Materials Transactions A, 2009, 40 (13) : 3054–3055.
- [20] COUTURIER G, RAPPAZ M. Effect of volatile elements on porosity formation in solidifying alloys [J]. Modelling Simulation in Materials Science Engineering, 2006, 14 (2) : 253–271.
- [21] 吴士平, 王晔, 吴光然, 等. ZL205A合金壳体铸件低压铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (9) : 811–813.
- [22] 徐鹏, 邱淑霞, 姜舟婷, 等. 各向同性多孔介质中Kozeny-Carman常数的分形分析 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34 (4) : 78–82.
- [23] COUTURIER G, DESBIOLLES J L, RAPPAZ M. A porosity model for multi-gas systems in multi-component alloys [M]. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Modeling of Casting Welding and Advanced Solidification Processes, 2006.

Simulation and Experimental Investigation of Shrinkage and Porosity for K439B Superalloy Castings with Variable Cross-Sections

SHAN Yu¹, SUI Da-shan¹, MA Jin-yuan¹, LI Jin-feng², DONG An-ping³, SUN Bao-de³

(1. Institute of Forming Technology & Equipment, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Jinan Shengquan Group Share Holding Co. Ltd., Shandong Jinan 250204, China; 3. Shanghai Key Lab of Advance High-Temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract:

Castings with variable cross-sections are prone to shrinkage and porosity defects, and it is one of key technologies to accurately predict and eliminate these defects in developing rational casting processes. The numerical simulation was established for the gravity investment casting process of K439B alloy casting with variable cross-sections by employing the finite element method. The numerical simulation results of shrinkage and porosity by using porosity criterion, Niyama dimensionless criterion, and APM (Advanced Porosity Model) criterion, respectively were compared and analyzed, and it demonstrated that the APM criterion had higher numerical simulation accuracy through casting experiments. On this basis, the APM criterion was used to simulate and analyze the evolution characteristics of shrinkage and porosity in castings with different cross-sectional ratios. The numerical simulation results indicate that the porosity in the characteristic region increases from 2.31% to 4.56%, the total porosity volume increase from 0.44 cm³ to 3.65 cm³, and the macro shrinkage with large volume fractions gradually increases, while the aspect ratio of the conical pore distribution region decreases continuously as the cross-sectional ratio increases from 2 : 1 to 12 : 1.

Key words:

nickel base superalloy; investment casting; numerical simulation; variable cross-sections; shrinkage and porosity