

基于数值模拟的高硅钼球墨铸铁排气歧管 基体组织及性能预测

史东丽¹, 潘多龙², 高建国¹, 余 瑾¹

(1. 常州机电职业技术学院 机械工程学院, 江苏常州 213164; 2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 高硅钼球墨铸铁排气歧管需要有稳定一致的本身金相组织和力学性能才能在使用过程中拥有高温稳定性。美国的ProCAST软件已经拥有了球墨铸铁组织中石墨球数及珠光体含量的分析功能, 进而预测本体的力学性能。本文通过对高硅钼球墨铸铁排气歧管铸造工艺的流体场、温度场以及微观组织的耦合模拟运算, 分析出排气歧管在铸态的基体组织, 进而对力学性能进行预测。通过分析得出结论, 采用适当的铸造工艺完全可以使高硅钼球墨铸铁排气歧管在铸态满足本身金相组织和本身力学性能的要求。

关键词: 高硅钼球墨铸铁; 排气歧管; 基体组织; ProCAST

排气歧管位于发动机排出燃烧气体的部位, 最高温度可达1 000 ℃, 是废气温度最高, 对材料腐蚀最严重的部位, 所以要求使用的材料具有耐高温氧化性能。而且汽车发动机始终处于发动和停止的反复运动状态, 因此它又应具有耐高温疲劳性能。

硅钼球墨铸铁具有良好的高温力学性能、高温稳定性和抗氧化性能, 适用于高热负荷(≥600 ℃)柴油发动机排气歧管的制造。硅钼球铁在国外汽车工业发动机耐高温铸件上应用广泛(如排气歧管、涡轮壳等), 尤其以排气歧管最为突出, 美国福特汽车公司70%以上排气歧管采用高硅钼球铁制造, 这主要源于高硅钼球铁具有良好的高温强度、热疲劳性, 优异的耐氧化、生长性和良好的高温抗蠕变性能。欧美等国在20世纪90年代开始大批量应用于汽车发动机排气歧管的铸件生产上。

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, 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。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^[1]。

如果能在设计阶段就对显微组织和力学性能进行预测, 并据此优化工艺, 这对于提高生产效率、降低成本、改善铸件质量具有重要意义。本文以高硅钼球墨铸铁排气歧管为例, 对铸件本体微观组织进行了数值模拟, 对铸态的力学性能进行了预测。

1 ProCAST微观组织模拟的原理

ProCAST的显微组织模块是根据合金成分自动计算显微组织。它通过显微组织模块与热力学数据库的链接来实现。根据化学成分, 显微组织模块自动检测将出现的相和计算显微组织类型。

(1) 初级枝晶的成核。初级枝晶相将以等轴晶粒的形式成核和生长, 这些晶粒的成核强烈依赖于合金处理, 因此应该定义成核参数。使用的模型是基于1987年Rappaze等人提出的“高斯分布”模型, 如图1所示。这个模型定义了原子核数目和

作者简介:

史东丽(1980-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为有限元模拟。电话: 13775114189, E-mail: 601516495@qq.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)12-1362-06

基金项目:

江苏省高等职业教育高水平骨干专业建设项目(苏教高[2017]17号); 本论文得到江苏省高职院校青年教师企业实践培训项目资助。

收稿日期:

2019-06-10 收到初稿,

2019-10-14 收到修订稿。

过冷度之间的关系。过冷原子核的分布呈高斯分布，因此这条曲线的积分是一个“S形”函数。

该“S形”曲线的数学描述如公式1所示：

$$n(\Delta T(t)) = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta T_{\delta}} \int_0^{\Delta T(t)} \exp\left(-\frac{(\Delta T(t) - \Delta T_n)^2}{2\Delta T_{\delta}^2}\right) d(\Delta T(t)) \quad (1)$$

其中， n_{\max} 为最大形核密度， ΔT_{δ} 为标准偏差过冷度， ΔT_n 为平均过冷度。因此，初级枝晶相的成核行为完全由上述三个参数定义。

(2) 共晶晶粒的成核。共晶晶粒的成核是基于Oldfield在1966年提出的模型。晶粒的数目是过冷度的定律（奥德菲尔德提出了二次定律）。该模型由以下等式描述：

$$N_{\text{cut}} = A_c (\Delta T)^n \quad (2)$$

$$\frac{dN_{\text{cut}}}{dt} = -nA_c (\Delta T)^{n-1} \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

式中： A_c 和 n 是成核常数。因此，共晶相的成核行为完全由上述两个参数定义。

(3) 共晶晶粒的生长动力学。共晶以过冷度的二次幂生长：

$$\frac{dR_{\text{cut}}}{dt} = \mu_c (\Delta T)^2 \quad (4)$$

式中： μ_c 是共晶生长系数。

因此，上述常数完全定义了共晶的生长特性。

(4) 力学性能的预测。球铁件的力学性能（硬度、伸长率、拉伸强度），主要由铸件基体中珠光体和铁素体数量、石墨球数量及其圆整度所决定。早期对球铁件力学基础性能预测的研究，是建立在化学成分和铸件特征基础上的。微观组织模拟的发展，使通过组织形成的模拟来预测铸件力学性能成为可能，且预测更为准确^[2]。

2 高硅钼球墨铸铁排气歧管技术要求

排气歧管属于薄壁结构，主要气道壁厚为4.58 mm（0.18"）。内部各气道相通。轮廓尺寸约为500 mm × 250 mm × 80 mm。铸件单件重9.2 kg，产品结构如图2所示，产品截面剖视如图3所示，排气歧管的材质为高硅钼球铁，具体的化学成分要求如表1，产品不允许出现显微缩松及缩孔。本体的基体球化率≥80%，珠光体含量≤20%。本体力学性能要求为：抗拉强度≥550 MPa，伸长率≥5%，布氏硬度HBW 200~250。

2.1 工艺制定

高硅钼球墨铸铁排气歧管采用覆膜砂壳型工艺铸造，一箱1件。在大法兰面设置3个内浇道和补缩冒口，在另外一侧的小法兰面设置一个暗冒口，起补缩、排气和浮渣的作用。顶部设置若干出气，详细的

铸造工艺如图4所示。使用中频炉熔炼，包底冲入法球化，球化剂采用FeSiMg8Re3，加入量1.4%；孕育剂采用75FeSi，孕育量1.2%。铁液出炉温度1 500~1 520 °C，浇注温度1 380~1 400 °C。每型浇注时间7~8 s，每包浇注时间小于3 min。

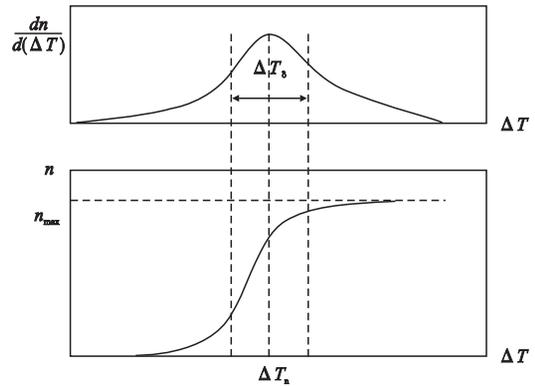


图1 “高斯分布”模型

Fig. 1 Gaussian distribution model

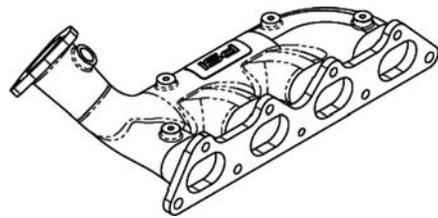


图2 排气歧管产品结构图

Fig. 2 The 3D model of exhaust manifold

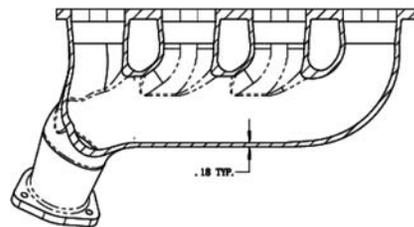


图3 排气歧管剖视图

Fig. 3 Section drawing of exhaust manifold

表1 高硅钼球墨铸铁的化学成分要求
Table 1 Chemical composition requirements of high silicon-molybdenum nodular cast iron $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Mo	Mg
3.2~3.8	4.0~5.0	≤0.70	≤0.1	≤0.02	0.75~1.20	0.03~0.07

2.2 数值计算参数的确定

高硅钼球墨铸铁排气歧管的铸造工艺数值模拟工作流程如图5所示。

在Proe软件根据浇注系统建模后，采用Shell Mesh方法将面网格导入ProCAST软件，在ProCAST中进行体网格划分以及铸件、浇注系统、砂型的装配。装配后的体网格如图6所示。

根据实际生产中铸造工艺参数、浇注系统及材质等条件，确定如下计算参数：

(1) 材料。铸件为高硅钼球墨铸铁，利用软件自带的材料运算工具计算材料的热物性，铸型为覆膜砂壳型。

(2) 边界条件。铸型表面温度即环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，浇注温度 $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，浇注速度采用软件自带运算工具得出 300 mm/s ，界面换热系数从以往修正的数据导入。

(3) 微观组织模拟参数设置。FADING 石墨化膨胀效应衰退设置为1，MGTREAT 孕育时间 10 s ，其余各参数根据系统自带的球铁数据。

3 模拟结果分析

3.1 流场和温度场的模拟结果

因排气歧管主体通道壁厚较薄，通过对浇注过程流场的运算，发现铁液能够平稳充型。在铁液温度到达固相线温度之前顺利充型。无冷隔缺陷，如图7所示。通过对凝固过程温度场的运算，利用ProCAST软件中包含的Niyama判据可以对排气歧管各部位的缩孔缩松进行预判，也可通过直接分析法进行判定。根据图8所示的模拟结果，排气歧管基本不存在缩孔缩松缺陷。

3.2 微观组织的模拟结果

3.2.1 石墨个数和直径的分析结果

(1) 石墨个数分析结果。通过对高硅钼球墨铸铁排气歧管模拟结果整体外表面和X方向的切片发现（如

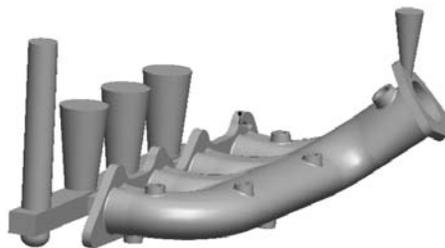


图4 排气歧管浇注系统3D模型

Fig. 4 The 3D gating and riser system of exhaust manifold

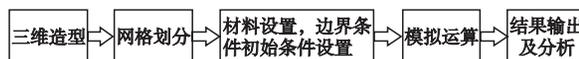


图5 数值模拟工作流程图

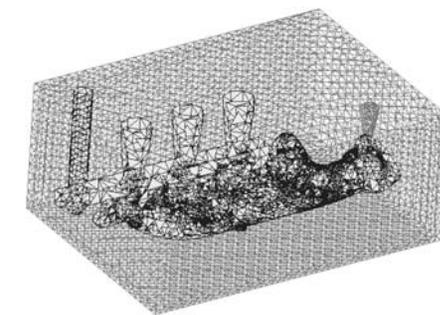


图6 浇注系统体网格

Fig. 6 The V mesh of gating system

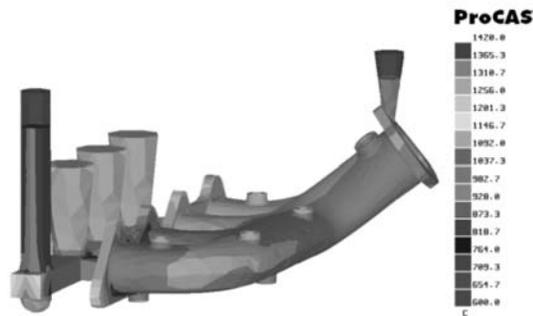


图7 流场的运算结果

Fig. 7 Simulation results of fluid field

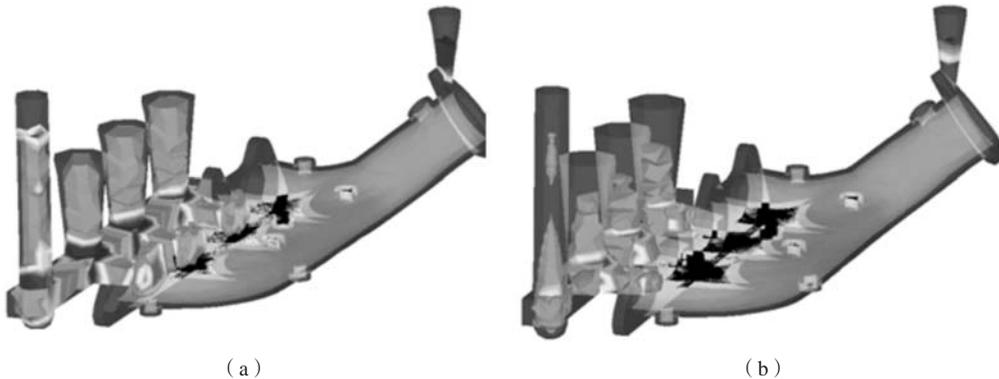


图8 凝固过程温度场的运算结果

Fig. 8 Simulation results of temperature field during solidification process

图9、图10所示)，石墨球的体密度约 $0.8 \times 10^8/\text{cm}^3$ 。根据面密度和体密度的计算公式可以计算出面密度约 $31\ 000\ \text{mm}^2$ 。在金相图放大100倍的情况下，每平方厘米的石墨个数为31个。根据GB/T 9441-2009 球墨铸铁金相检验标准评级，理论球化率约90%，球化率级别为2级。面密度和体密度的计算公式如式(5)：

$$N/S=N_s/S_0 \quad (5)$$

式中： N 表示在金相图中面积 S 区域内的石墨球个数， S 表示面积的大小， N_s 为单位面积上的石墨球数， S_0 为单位面积。

(2) 石墨直径分析结果。在其他冶金条件相同的情况下，球墨形核与生长主要与过冷度有关，冷却速度越快其形核能力越强且个数越多，石墨球直径越细小。通过对模拟结果 X 和 Y 方向的切片发现(图11和图12)，石墨球的直径在通道位置约 $0.015\sim 0.017\ \text{mm}$ ，在法兰位置约 $0.018\sim 0.020\ \text{mm}$ 。根据GB/T 9441-2009 球墨铸铁金相检验标准，石墨大小级别为7级。由于法兰面距离冒口近，过冷度低，这个位置的石墨大小略大于本体其他位置。

3.2.2 基体组织分析结果

本体的基体组织中珠光体的含量模拟结果如图13和图14所示。基体组织为铁素体+珠光体，珠光体的含量约 $10\%\sim 20\%$ ，其中分布大量石墨，所以剩余的组织主要为铁素体，也含有少量碳化物。

3.3 本体力学性能预测

球铁件的力学性能(抗拉强度、屈服强度、硬度、伸长率)，主要由铸件基体中的珠光体和铁素体数量、石墨球数量以及圆整度所决定。早期对球铁件力学性能预测的研究，是建立在化学成分和铸件特征基础上的，随着铸件模拟软件向微观组织模拟的发展，通过微观组织模拟来预测铸件的力学性能成为可能，而且预测更准确。根据上面基体组织的模拟分析，可预测出排气歧管本体的力学性能，抗拉强度约为 $610\sim 640\ \text{MPa}$ ，屈服强度约为 $350\sim 380\ \text{MPa}$ ，伸长

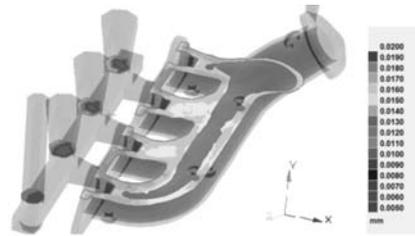


图10 排气歧管本体 X 方向石墨个数模拟结果 ($1/\text{cm}^3$)
Fig. 10 Simulation results of graphite nodule count along X -direction of exhaust manifold ($1/\text{cm}^3$)

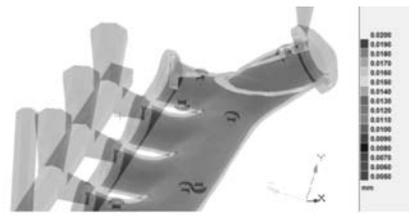


图11 排气歧管本体 X 方向石墨球的直径模拟结果
Fig. 11 Simulation results of graphite nodule diameter along X -direction of exhaust manifold

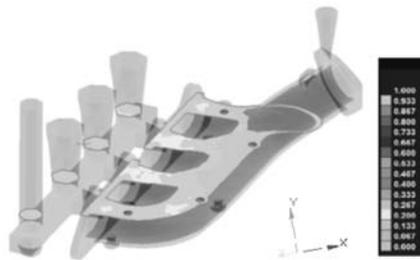


图12 排气歧管本体 Y 方向石墨球的直径模拟结果
Fig. 12 Simulation results of graphite nodule diameter along Y -direction of exhaust manifold



图13 排气歧管本体 X 方向珠光体的含量
Fig. 13 Simulated pearlite content along X -direction of exhaust manifold

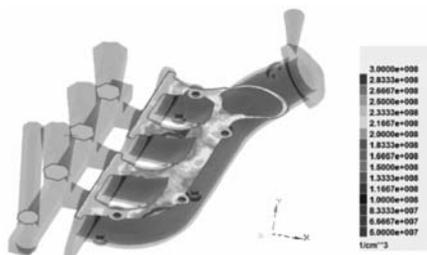


图9 排气歧管本体表面石墨个数模拟结果 ($1/\text{cm}^3$)
Fig. 9 Simulation results of graphite nodule count in exhaust manifold ($1/\text{cm}^3$)



图14 排气歧管本体表面珠光体的含量
Fig. 14 Simulated pearlite content in exhaust manifold

率约为5%~7%，布氏硬度HBW 230~250。排气歧管本体的抗拉强度见图15。排气歧管本体的屈服强度见图16。排气歧管本体的伸长率见图17。排气歧管本体的硬度见图18。

4 结果验证

对实际浇注出的铸件进行了解剖检测，未发现任何疏松缩孔缺陷。铸件产品照片见图19，解剖照片如图20。对本体进行了金相组织和力学性能的检测，结果如表2。

对比实际测量值和数值模拟结果，有如下发现。

(1) 数值模拟的球化率高于实际测量结果。分析其原因，主要由于数值模拟偏于理论。实际生产过程中，原材料的微量元素以及操作过程都会影响到球化率的结果。

(2) 珠光体含量高于实际测量结果，直接导致本体抗拉强度和硬度比实际测量结果高，伸长率比实际测量值低。这主要原因在于设置铸件与砂型的换热系数为一恒定值。而实际过程为曲线。这直接导致铸件表面冷却速度快，珠光体含量高，强度指标高，生产率偏低。

(3) 模拟软件中自带材料数据库有限，也会导致数值模拟结果和实际生产结果有误差。

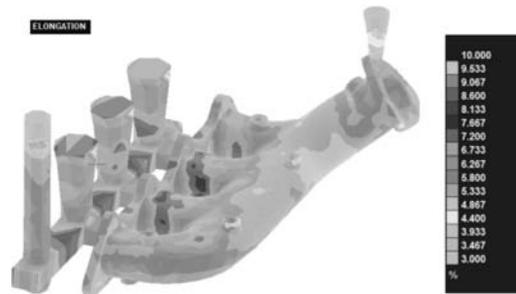


图17 排气歧管本体的伸长率
Fig. 17 Simulation results of elongation of exhaust manifold

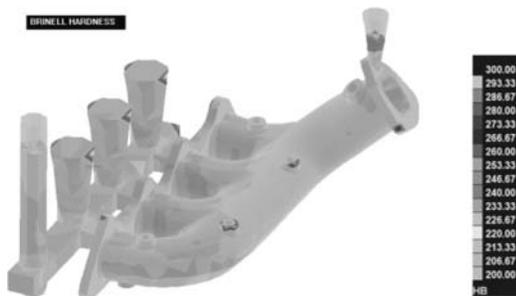


图18 排气歧管本体的硬度
Fig. 18 Simulated hardness of exhaust manifold

表2 排气歧管本体金相和力学性能检测结果
Table 2 Testing results of metallographic structure and mechanical properties of exhaust manifold

检测项目	要求值	测量值	模拟结果
本体球化率/%	≥80	80~85	90
珠光体/%	≤20	20	10~20
抗拉强度/MPa	≥550	605	610~640
伸长率/%	≥5	12.3	5~7
布氏硬度HBW	200~250	205~211	230~250

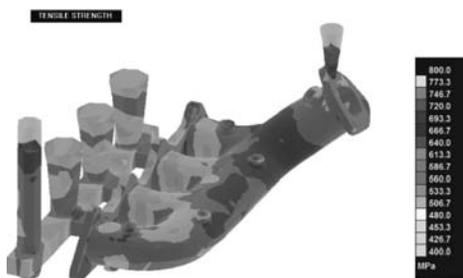


图15 排气歧管本体的抗拉强度
Fig. 15 Simulation results of tensile strength of exhaust manifold

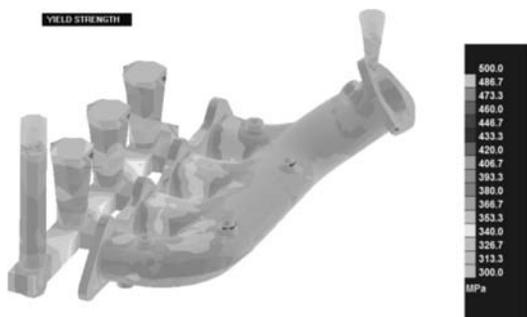


图16 排气歧管本体的屈服强度
Fig. 16 Simulation results of yield strength of exhaust manifold

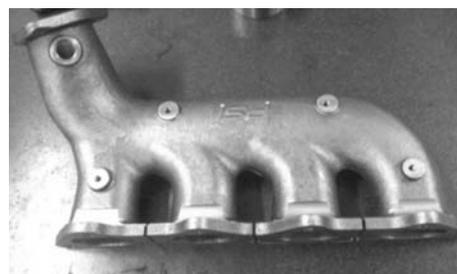


图19 铸件实物照片
Fig. 19 The produced exhaust manifold



图20 解剖检测照片
Fig. 20 The dissectioned exhaust manifold

5 结束语

采用适当的铸造工艺完全可以使高硅钼球墨铸铁排气歧管在铸态满足本体金相组织和本体力学性能的要求。模拟软件中自带材料数据库有限,与实际产品数据有出入,一定程度上影响了模拟结果。

参考文献:

- [1] 王伟,周研,屈晓阳,等.基于ProCAST的40CrNiMo金属型铸造微观组织分析[J].铸造,2019(5):449-455.
- [2] 赵海东,柳百成,房贵如.球墨铸铁微观组织数值模拟及力学性能的研究进展[J].铸造,1991(10):51-55.
- [3] 杨军,苏仕方,齐笑冰,等.球墨铸铁微观组织形成过程数值模拟研究[J].铸造,2001(11):687-691.
- [4] 崔晓鹏,刘海峰,王成,等.汽车用排气歧管材料的应用现状及发展方向[J].铸造,2008(10):1001-1004.
- [5] 崔磊.高硅钼和高镍球铁排气管的组织 and 性能[D].长春:吉林大学,2009.
- [6] 唐瑞春.球墨铸铁微观组织模拟仿真[D].昆明:昆明理工大学,2004.
- [7] 张逸,凌振国.高硅钼球墨铸铁在内燃机排气系统中的设计应用[J].大型铸锻件,2005(2):49-52.
- [8] 王建国.大功率舰船用柴油机SiMo4-1球铁排气管的研制[J].铸造技术,2016(1):156-158.
- [9] 史东丽,潘多龙,姜伟航.一种铸钢件的铸造工艺及热处理工艺数值模拟[J].铸造技术,2018(9):1987-1990.

Microstructure and Properties Prediction for High Silicon-Molybdenum Nodular Cast Iron Exhaust Manifold Based on ProCAST Numerical Simulation

SHI Dong-li¹, PAN Duo-long², GAO Jian-guo¹, YU Jin¹

(1. Institute of Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

The exhaust manifold made of high silicon-molybdenum nodular cast iron needs stable and consistent metallographic structure and mechanical properties in order to have high temperature stability during use. ProCAST software has the analysis function for graphite nodule count and pearlite content in nodular cast iron structure, and prediction function for the mechanical properties of the castings. In this paper, the matrix structure of the exhaust manifold in the as-cast state is analyzed by coupling simulation of the fluid field, temperature field and microstructure of the high-silicon molybdenum ductile iron exhaust manifold during casting process, and then the mechanical properties are predicted. Through analysis, it is concluded that the exhaust manifold made of high silicon-molybdenum nodular cast iron can completely meet the requirements of metallographic structure and mechanical properties in the as-cast state by adopting appropriate casting process.

Key words:

high silicon-molybdenum nodular cast iron; exhaust manifold; matrix microstructure; ProCAST