DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.01.005

基于 ProCast 的熔模铸造安装座的应力模拟及裂纹分析

魏家强,程和法,程　文
(合肥工业大学 材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009)

摘　要:采用 ProCAST 模拟软件对高铁转向架构件在不同的浇注温度、浇注速度和模壳预热温度下应力场分布进行了模拟,并对铸态组织进行分析。结果表明,铸件最大应力主要集中在铸件和冒口连接处,模壳预热温度对有效应力影响最大,模壳预热温度越高铸件有效应力越小,浇注温度次之,随着浇注温度升高,铸件有效应力升高,浇注速度影响最小,随着浇注速度升高,铸件有效应力变小。浇注温度为 1 560 ℃,浇注速度为 5.30 kg/s,模壳预热温度 600 ℃时,铸件有效应力为 652.2 MPa,小于铸件的抗拉强度,不产生裂纹。

关键词:ProCAST;有效应力;熔模铸造;铸态组织

中图分类号: TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)01-0019-06

Stress Simulation and Crack Analysis of Mounting Seat by Investment Casting Based on Procast

WEI Jiaqiang, CHENG Hefa, CHENG Wen
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: ProCAST simulation software was used to simulate the stress field distribution of high-speed iron bogie components at different pouring temperatures, pouring speeds and shell preheating temperatures, and the as-cast microstructure was analyzed. The results show that the maximum stress of castings mainly concentrated in the casting and riser joints, mould preheating temperature, the most profound effect on the effective stress shell mould preheating temperature, the smaller the effective stress, the higher the casting pouring temperature, with increasing pouring temperature, casting effective stress increase, affect the minimum casting speed, with increasing casting speed, casting effective stress decreases. When the casting temperature is 1 560 ℃, the casting speed is 5.30 kg/s, and the preheating temperature of the mold shell is 600 ℃, the effective stress of the casting is 652.2 MPa, which is less than the tensile strength of the casting, and no crack occurs.

Key words: ProCAST; effective force; melting mold casting; as-casting microstructure

高铁转向架构件作为高速列车的重要连接件,既要承受来自车身的重力载荷,又要承受来自轨道不平顺等影响的外部载荷,受力十分复杂[1-2]。高铁转向架构件外形复杂,在铸造过程中往往存在着铸造裂纹和应力集中情况。这些缺陷极大降低了材料的力学性能,在残余应力和外部环境作用下容易产生断裂。因此对高铁转向架构件残余应力进行分析十分重要。

铸造数值模拟技术可以对生产工艺的设计过程进行分析,并结合技术工人的经验,完善铸造工艺设计[3-4]。近年来,越来越多的国内外学者开始采用数值模拟方法对铸造残余应力进行模拟分析。如德国的 Funk 等人采用 FDM、FEM 模型模拟连铸过程的温度场、应力场,采用 ADINA 进行热应力分析[5]。中南大学的马维策采用 prcast 对大圆镜半连铸凝固过程中进行模拟,模拟铸造过程中温度场、应力场分布, 对铸锭裂纹产生的条件和控制做了分析研究[6]。时建松利用 ProCAST 软件模拟浇铸温度和落砂温度对应力场分布影响[7]。

本文作者利用 ProCAST 软件,采用单因素法分析浇注温度、浇注速度和模壳预热温度对应力场的影响。研究铸造工艺参数,为改进铸造工艺参数提供依据。并通过对铸态组织分析来研究裂纹产生的原因。

1　安装座铸态组织试验及分析

1.1　试验方法

安装座合金牌号 ZG25MnCrNiMo,化学成分见表 1,合金浇注温度 1 560 ℃,模壳在室温下进行浇

收稿日期: 2021-11-16
作者简介: 魏家强(1995—),硕士. 研究方向:熔模铸造成型工艺. 电话:18438620323,Email:18438620323@163.com
通讯作者: 程和法(1962—),教授. 研究方向:金属液态成形技术. 电话:18255169273,Email:chf796@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 安装座化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of mounting seat

元素	Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Cu	RE
含量	96.70	0.21	0.32	1.38	0.02	0.01	0.47	0.27	0.47	0.04	0.11

注，拉伸试棒按照 GB/T13239-2006 标准制成拉伸试样，采用拉伸机型号 Instron5500 型万能实验拉伸机，行程速度为 2 mm/min，拉断试验样取断口处 3 mm 处组织进行观察。采用 SU8020 冷场发射扫描电镜组织进行观察和元素分析。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 力学性能分析

由表 2 可知，ZG25MnCrNiMo 铸态组织抗拉强度 737.72 MPa，屈服强度 648.34 MPa，断裂时几乎没发生塑性变形。在熔模铸造过程中当应力值超过 737.72 MPa 时将发生断裂。

表2 ZG25MnCrNiMo力学性能
Tab.2 Mechanical properties of ZG25MnCrNiMo alloy

材质	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /mm	断面收缩率(%)
ZG25MnCrNiMo	737.72	648.34	≤0.1	≤0.1

1.2.2 微观组织分析

图 1 是 ZG25MnCrNiMo 铸态组织，在熔模铸造过程中由于在室温下浇注，金属冷却速度较快，同时合金元素 Mo、Mn、Ni 等合金元素增大奥氏体稳定性，使 C 曲线右移，奥氏体不能向珠光体转变。因此，铸态组织为粗大的针状铁素体的魏氏组织以及不规则的块状铁素体，在粗大针状的铁素体上分布着众多岛状的复相组织，在扫描电镜下放大 5 000 倍发现，小岛区域存在无贝氏体转变特征的粒状组织以及下贝氏体板条束[8-9]。组织中同时存在黑色夹杂物。对小岛区域进行能谱分析，结果见图2。

由图 2 可知，在小岛内部 Mn 和 Mo 发生了严重偏聚现象，按照物理学原理[10]，任何固态相变均有相对应的 C–曲线，在亚共析钢中 Mn 和 Mo 元素都增大过冷奥氏体的稳定性，使 C 曲线右移，并使 Ms 点降低，其中 Mo 的影响更为强烈，无贝氏体转变的

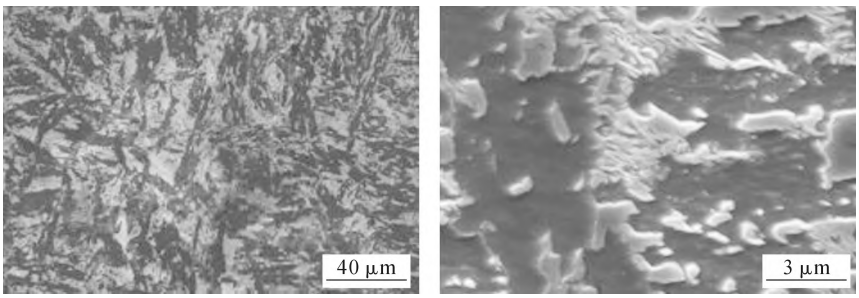
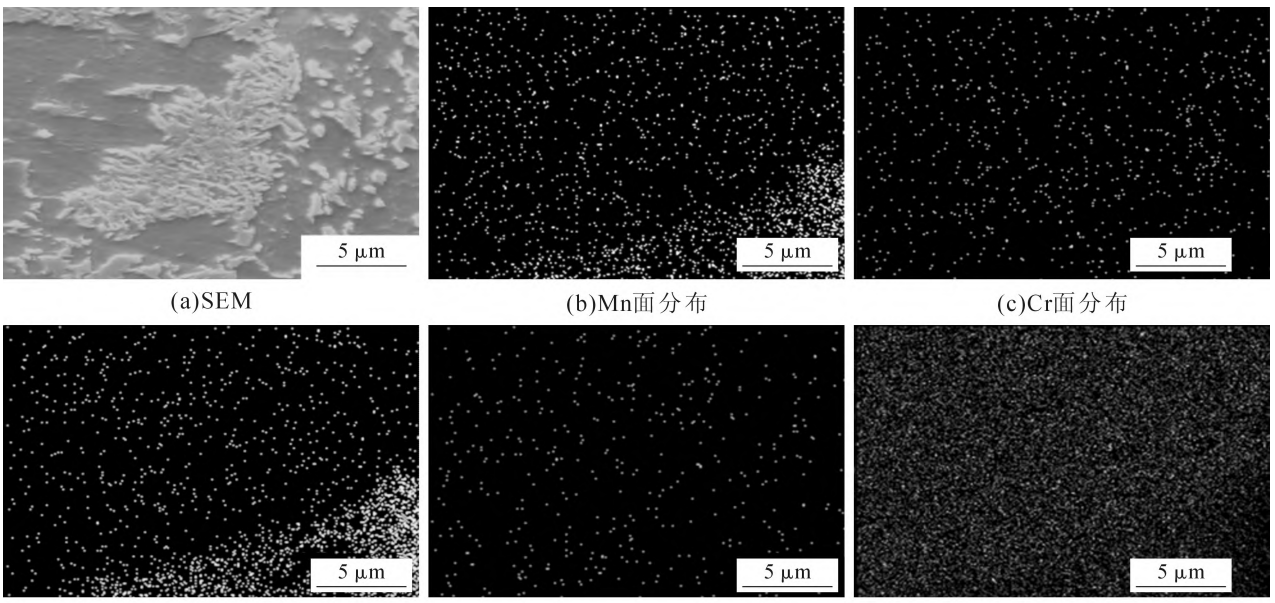


图 1 ZG25MnCrNiMo 铸态组织
Fig.1 Microstructure of as-cast ZG25MnCrNiMo



(a)SEM (b)Mn面分布 (c)Cr面分布
(d)Mo面分布 (e)Ni面分布 (f)Fe面分布

图 2 ZG25MnCrNiMo 的扫描电镜图像和元素的面分布
Fig.2 SEM image and element distribution maps of ZG25MnCrNiMo steel by EDS

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

粒状组织比复合下贝氏体板条束的激活能更高[11-13]，因此小岛区域产生了两种不同形状的复相组织。

在模壳温度为室温时浇注，由于冷却速度较快，产生了复杂的组织形态，使 ZG25MnCrNiMo 铸态组织在断裂时，几乎不产生塑性变形。

2　数值模拟前处理

2.1　几何模型建立

铸造低合金钢高铁转向架构件属于薄厚不均的大型复杂铸件，整体结构左右对称。整体轮廓尺寸为 410 mm×296 mm×330 mm，最小壁厚为 8 mm，最大壁厚为 45 mm，最小过度圆弧半径为 5 mm。壁厚不均，内部型腔较大且结构复杂。

利用 Solid works 三维建模软件进行三维建模，根据安装座的结构特点，设计熔模铸造工艺方案，如图 3 所示。该铸件上厚下薄，为实现顺序凝固采用顶注式浇注系统设计。侧面采用两个冒口进行补缩，侧浇道尺寸为 60 mm×70 mm×190 mm，上部采用专用三角形补贴。

图 3　安装座三维模型
Fig.3　3D model of the mounting support

2.2　网格划分

在 ProCAST 模拟软件中，网格划分选择为常用的四面体网格模型。网格的质量会影响最终方程解和仿真分析的准确性。利用 Solid works 软件生成的三维模型保存 step 格式，将生成的 step 格式导入 Visual-Mesh 模块，对三维模型进行修复后生成网格。铸件和浇注系统网格大小设为 4 mm，面网格数目为 190 788，体网格数目为 2 562 008，网格节点为 338 548，见图 4。

2.3　边界条件设置

铸件牌号为 ZG25MnCrNiMo 钢，模壳采用 Shell Molding Sannd-Mold，模壳预热温度为 500 ℃，模壳采用刚性模型，铸件和模壳之间换热系数 500 W/(m^2·k)；浇注温度为 1 550 ℃，浇注时间为 21 s；采用空冷，采用 Shell Casting 方式，计算停止温度为 500 ℃。所选材料不是 ProCAST 软件中材料库中所给材料，采用 JMat Pro 软件对材料热物性能

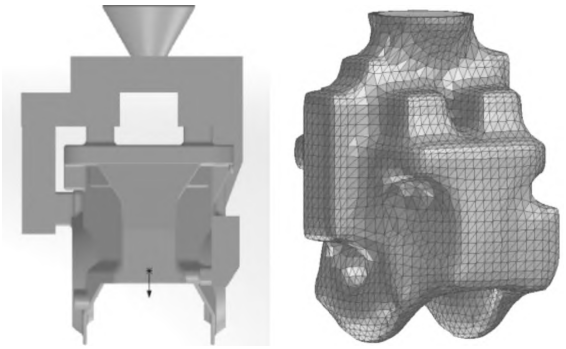


图 4　铸件和浇注系统的三维模型和网格划分
Fig.4　3D model and meshing of the mounting support casting and gating system

进行修改，如图 5 所示。材料的热物性能反映每一个温度节点上对应着不同的热物性质，准确的热物性参数是保证模拟过程中准确的关键。

3　模拟结果及分析

3.1　凝固缺陷分析

金属凝固过程中，形成缩松主要原因是金属凝固过程中有较宽的结晶温度范围，当液固界面前沿的温度达到实际结晶温度，首先形成金属骨架，凝固收缩需要金属液在枝晶间进行流动补缩，随着固相率增大，补缩通道逐渐变窄一直到凝固，导致在内部形成孤立液相区，金属液不能补充进去，形成缩松[14]。

由图 6 可知，当浇注温度为 1 560 ℃时，在铸件内部没有存在缩松和缩孔现象；当浇注温度为 1 580 ℃时，利用 ProCAST 软件计算缩孔总体积为 2.76 cm^3，孔隙率约为 0.04%；当浇注温度从 1 580 ℃提高到 1 600℃时，缩孔总体积为 5.32 cm^3，孔隙率约为0.07%。

可以看出，浇注温度对铸件的孔隙率有一定的影响，随着浇注温度升高，铸件的孔隙率增大。对铸件的力学性能有一定的影响，降低铸件的使用寿命。当浇注温度为 1 560 ℃时，铸件没有出现缩孔、缩松现象。

3.2　浇注温度对铸件有效应力的影响

模壳初始温度为 500 ℃，浇注速度为 5.10 kg/s，分别计算浇注温度为 1 560、1 580 、1 600 ℃时铸件有效应力分布情况，见图 7。

图 7 表明，浇注温度对铸件的有效应力有一定的影响，当浇注温度为 1 560、1 580、1 600 ℃时，有效应力最大值分别为 734.30、756.31、763.19 MPa，可知浇注温度对铸件有效应力有一定的影响，随着浇注温度提高铸件有效应力增大。

铸件在冷却过程中，各部分冷却速度不同，导

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

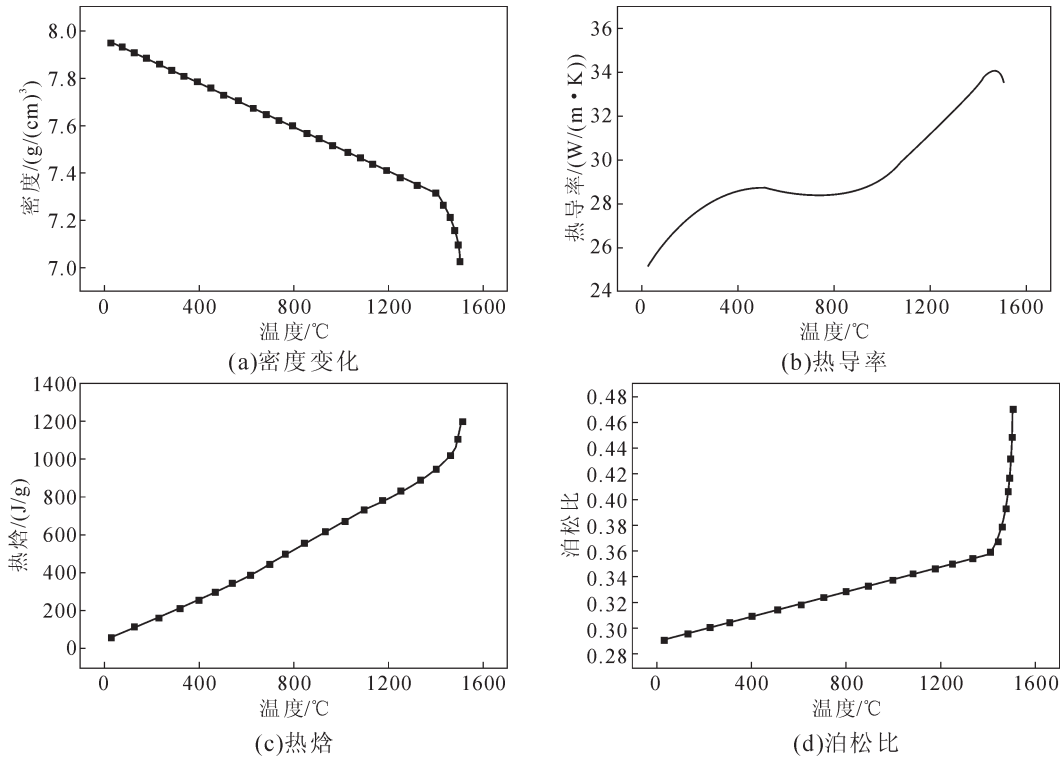


图 5 ZG25MnCrNiMo 钢热物性参数

Fig.5 Thermal parameters of ZG25MnCrNiMo steel

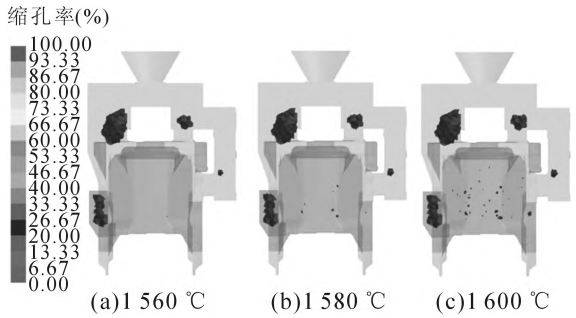


图 6 不同浇注温度下模拟的缩孔缩松分布

Fig.6 Simulated shrinkage cavity and porosity distribution at different pouring temperature

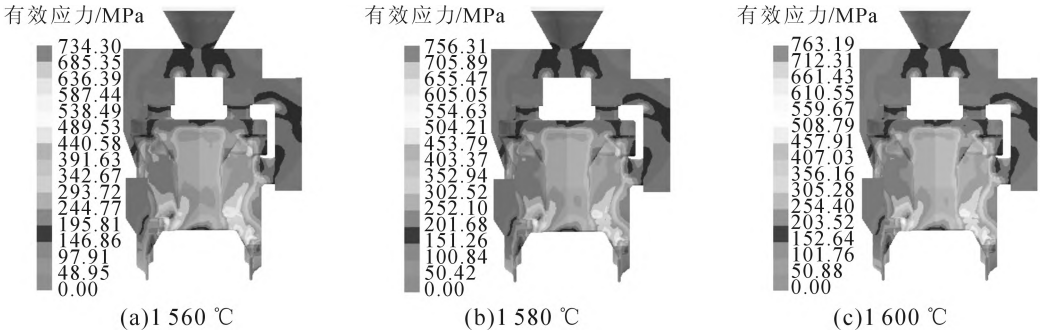


图 7 不同浇注温度下模拟的有效应力分布

Fig.7 Simulated effective stress distribution at different pouring temperature

即铸件温度由浇注温度（T_P）降低至固相线温度（T_s）时，各方向应变均为：

$$\varepsilon=\alpha(T_p-T_s) \tag{5}$$

式中，α 为材料的线膨胀系数，其值随温度变化而变化[15]。

当浇注温度从 1 560 ℃提高到 1 600 ℃时，各方致各部分收缩量不同，同时由于浇注温度、散热条件以及冷却速度不同，各部分达到固相线的时间也有差别。在自由膨胀时，长度和宽度伸长量分别为：

$$\Delta l=\alpha(T_p-T_s)l \tag{1}$$

$$\Delta d=\alpha(T_p-T_s)d \tag{2}$$

在长度和宽度方向应变为：

$$\varepsilon l=\frac{\Delta l}{l}=\alpha(T_p-T_s) \tag{3}$$

$$\varepsilon d=\frac{\Delta d}{d}=\alpha(T_p-T_s) \tag{4}$$

3.3 浇注速度对铸件有效应力影响

模壳预热温度 500 ℃，浇注温度为 1 560 ℃，分别计算浇注速度为 4.90、5.10、5.30 kg/s 条件下铸件向应变也随之增加，收缩过程中受到来自模壳、浇注系统以及冒口的阻碍时间也相应增加。产生的铸造应力也随着增加。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

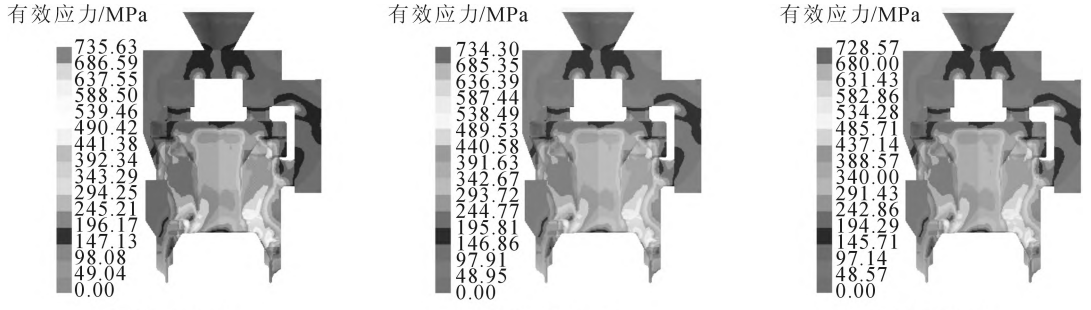
有效应力分布情况，见图 8。

图 8 所示为浇注速度在 4.90、5.10、5.30 kg/s 条件下，铸件有效应力为 735.63、734.30、728.57 MPa，随着浇注速度增加，铸件有效应力降低。

3.4　模壳预热温度对铸件有效应力影响

浇注温度为 1 560 ℃，浇注速度为 5.30 kg/s，分别模拟模壳预热温度为 400、500、600 ℃下有效应力分布情况，结果如图 9 所示。

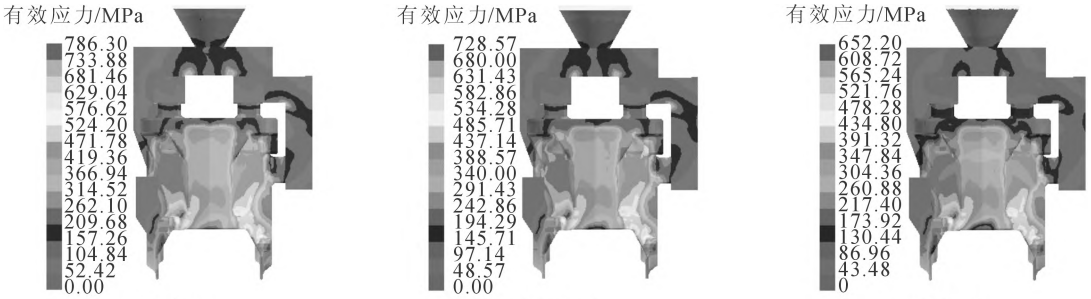
由图 9 可知，模壳预热温度为 400、500、600 ℃时，铸件有效应力分别是 786.30、728.57、652.20 MPa，随着模壳预热温度增加，有效应力值下降。



(a)4.90 kg/s　(b)5.10 kg/s　(c)5.30 kg/s

图 8 不同浇注速度下模拟的有效应力分布

Fig.8 Simulated effective stress distribution at different pouring speeds



(a)400 ℃　(b)500 ℃　(c)600 ℃

图 9 不同模壳预热温度下模拟的有效应力分布

Fig.9 Simulated effective stress distribution at different mold preheating temperature

4　结语

安装座在室温下浇注时，由于铸件冷却速度较快以及合金元素的影响，铸件铸态组织由魏氏组织、粒状贝氏体以及块状铁素体组成。其抗拉强度为 727. 72 MPa，屈服强度为 648.34 MPa，具有较高的强度，但塑性很差，在断裂时几乎不发生塑性变形，这是裂纹产生的重要因素之一。

对安装座熔模铸造中模壳预热温度、浇注温度和浇注速度进行模拟分析。模壳预热温度对残余应力影响最大，模壳预热温度越高铸件残余应力越小；浇注温度次之，随着浇注温度升高，铸件残余应力升高，浇注速度影响最小；随着浇注速度升高，铸件残余应力变小。

安装座熔模铸造随着浇注温度下降，铸件的缩孔、缩松降低，但温度过低金属流动性变差，造成模壳内某些区域得不到补缩，形成浇不足、冷隔等缺陷。安装座浇注温度为 1 560 ℃时，铸件不产生缩孔、缩松缺陷。

参考文献：

[1] 李辉，蔡建伟，王超会. 新型铁路货车车钩用钢的磨损性能研究[J]. 热加工工艺，2020，51(2)：86-89.

[2] 刘鑫贵，项彬，秦晓锋，等. 大秦线 C63A 货车 16 号车钩尾销孔裂纹原因分析[J]. 金属热处理，2008(4)：20.

[3] 郭红星，杨志强. 数值模拟技术在充型凝固过程中的应用[J]. 铸造技术，2016，37(12): 2676-2680.

[4] 樊超，王光明，张挨元，等. ProCAST 模拟仿真技术在铸钢件缺陷预测中的应用[J]. 铸造技术，2019，40(7) : 705-711.

[5] FUNK G, BOEHMER J R, NFETT F. Coupled FDM/FEM model for the continuous casting process [J]. International Journal of Computer Application in Technology, 1997, 7(3-6):214-228.

[6] 马维策. 7050 铝合金大圆锭半连铸凝固过程数值模拟及裂纹倾向性分析[D]. 中南大学, 2008.

[7] 时建松. 发动机缸体残余应力的数值模拟[D]. 合肥：合肥工业大学，2010.

[8] 林昌，柳得橹，付杰，等. 微合金钢中变形奥氏体等温转变产物的组织与强度[J]. 材料研究学报，2001，2：230-238.

[9] SAWLEY K, KRISTAN J. Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003, 26 (10): 1019-1029.

（下转第 27 页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

该区域，发生布拉格衍射的电子数量太少，菊池花样质量不好；此外，过薄区域在减薄时容易产生非晶层，影响菊池花样的质量。随着样品厚度的增加，能穿透样品的电子束减少，发生布拉格衍射的电子数量也减少，菊池花样质量下降。所以，要得到较好的 T-EBSD 衍射结果，过薄或者过厚的样品都会严重影响菊池花样质量，需要挑选合适的样品厚度。

当磷屏探头进入 155 mm 时，在距离冲击孔 4.1、2.5 和 5.5 μm 处均获得菊池花样，MAD 分别为 0.911、1.187 和 1.233，如图 6(b)所示。可见，含铜钢薄膜距离冲击孔越近，MAD 值越低，菊池花样质量越高。

当磷屏探头进入 160 mm 时，检测结果如图 6(c)所示。在距离冲击孔 1.5 μm 和 2.2 μm 处均获得菊池花样，MAD 分别是 1.621 和 5.08。在距离冲击孔 4.1 μm 处没有出现菊池花样。显然，如果磷屏的工作距离不合适，会导致磷屏无法收集透射电子；薄膜样品与扫描电镜极靴距离不合适，导致入射电子的强度不够，没有足够的能量透射电子无法穿透样品激发。

3　结论

通过自主绘制、加工的透射模式电子背散射衍射技术的样品台，调整 EBSD 磷屏探头进入距离、含铜钢薄膜与水平面的夹角、含铜钢薄膜与扫描电子显微镜中极靴距离等参数，得到以下结论：

(1)检测含铜钢薄膜时，越靠近冲击孔洞、样品厚度越薄，透射电子可以穿透样品表面，激发出透射电子信号，接收的透射电子信号越多，从而参与的衍射信号越强。

(2)含铜钢薄膜越靠近扫描电镜的极靴，也就是 WD 值越小，则入射到样品表面的入射电子信号越强，参与衍射的信号越强，菊池花样越清晰。

(3)EBSD 磷屏探头离检测含铜钢薄膜越近，接收的透射电子信号越多，从而参与衍射的信号越强。

（图片数据结果来自于内蒙古科技大学分析测试中心）

参考文献：

[1] 詹美燕，李春明. 电子背散射衍射的制样方法和影响花样质量的因素[J]. 物理测试, 2021, 39: 31-36.

[2] 崔桂彬，鞠新华，尹立新，等. 基于电子背散射衍射技术的低碳钢原奥氏体晶界的显示技术探讨[J]. 冶金分析, 2019, 39(7): 1-7.

[3] 郭宇航，金云学，张丽华. 金属电子背散射衍射试样的制备技术[J]. 理化检验–物理分册, 2007, 43(8): 399-403.

[4] 孟利，杨平，李志超，等. 电子背散射衍射分析中的伪对称性误标及其克服[J]. 中国体视学与图像分析, 2007, 12(4): 282-285.

[5] 杨平. EBSD 技术在微织构分析中的应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2005, 10(4): 211-214.

[6] 王振敏，方圆，齐俊杰，等. AISI304 连铸薄带组织与取向的 EBSD 分析[J]. 铸造技术, 2008, 29(2): 205-208.

[7] TRIMBY P W. Orientation Mapping of Nanostructured Materials using Transmission Kikuchi Diffraction in the Scanning Electron Microscope[J]. Ultramicroscopy, 2012, 120: 16-24.

[8] 金传伟，张珂，吴园园. 透射－电子背散射衍射技术表征双相钢中马氏体－奥氏体岛的相结构及晶粒取[J]. 冶金分析, 2019, 39(12): 1-7.

[9] 杜金红，蔡亚明，单玉桥，等. 透射式电子背散射衍射技术(t-EBSD) 在材料学中的应用研究进展 [J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(2): 134-138.

[10] 刘紫微，华佳捷，林初城，等. 透射模式电子背散射衍射技术在纳米材料研究中的应用[J]. 无机材料学报, 2015, 30(8):833-837.

[11] WONG D C, YEOH W K, TRIMBY P W. et al. Characterisation of Nano-grains in Mg B2Superconductors by Transmission Kikuchi Dif-fraction[J]. Scripta Materialia, 2015, 101: 36-39.

[12] 陈旭，宋红梅. 不锈钢 316LN 中厚板超低温冲击功偏低原因分析及优化建议[J]. 宝钢技术, 2021, 1: 60-65.

[13] 孙刚，吴桢，陆政，等. 亚共晶 Al-Si 合金共晶硅变质的研究方法进展[J]. 热加工工艺, 2021(50): 1-4.

[14] 何翼. 压铸镁合金表面晶粒不均匀性的模拟研究 [J]. 铸造技术, 2014, 35(2): 346-348.

(上接第 23 页)

[10] 费豪文著，卢光熙，赵子伟译. 钢中贝氏体[M]. 上海：上海科学技术出版社，1980.

[11] 康沫狂. 钢中贝氏体形貌学探究 [J]. 兵器材料科学与工程，1991，121(10)：1-3.

[12] 崔忠圻，覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[13] 康沫狂，朱明. 贝氏体形核和台阶化制的讨论[J]. 材料热处理学报，2005，26(2)：1-5.

[14] 梁作俭，许庆彦，李俊涛，等. γ-Ti Al 增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程，2003, 32(3): 164-169.

[15] 刘成柱. ANSYS Workbench 17. 0 热力学分析实例[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net