

GH3230 合金热控凝固试板补缩距离与缩松判据研究

廖佳立, 孙 逊, 关 洋, 刘孝福, 税国彦, 马岚波, 郭新力, 金 磊

(中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 针对GH3230合金热控凝固试板补缩距离与缩松判据开展研究, 获得了真空水冷热控凝固工艺下不同厚度试板的补缩距离, 是真空重力铸造各厚度试板补缩距离的10~14倍以上。通过数值模拟计算得到GH3230合金凝固成形产生缩松的临界判据值为 $10.0 \text{ K}^{0.5} \cdot \text{s}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1}$, 并完成反推验证, 准确度达到96%。为提高试样凝固时的温度梯度, 进行了锡冷热控凝固试验, 发现锡冷热控凝固工艺可以消除300 mm × 3 mm试板的缩松缺陷。

关键词: GH3230; 热控凝固; 补缩距离; 数值模拟; 临界缩松判据

作者简介:

廖佳立(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为高温合金热控凝固技术。E-mail: 825510451@qq.com

通讯作者:

孙逊, 男, 正高级工程师。电话: 13694136407, E-mail: sx@foundrynations.com

中图分类号: TG146.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

05-0503-05

基金项目:

机械科学研究总院集团有限公司技术发展基金(230220ZS01)。

收稿日期:

2023-02-16 收到初稿,

2023-03-21 收到修订稿。

高温合金具有优异的高温性能和抗腐蚀性能, 在航空航天发动机热端部件中应用广泛^[1-2]。GH3230合金是一种Ni-Cr基固溶强化型变形高温合金, 使用温度范围700~1 050 ℃。具有较高的强度和抗冷热疲劳性能, 组织稳定。某型宇航飞行器进气道采用GH3230合金, 通过锻压与组焊工艺成形, 但3 mm薄壁结构件大面积焊接变形难以避免, 部件内表面无法打磨, 产品的质量与合格率无法得到保证。

热控凝固技术可以创造出强顺序凝固条件, 对改善具有逐层凝固和中间凝固方式的复杂结构铸件致密度有明显效果。热控凝固技术由定向凝固技术发展而来, 目的是为了生产具有等轴晶组织的结构件。20世纪90年代美国精密铸件公司(PCC)提出并采用TCS工艺铸造出1 500 mm、最小壁厚0.8~1.2 mm、晶粒尺寸1~5 mm的航发机匣, 工艺出品率提高50%^[3-4]。2000年左右, 621所采用TCS技术铸造出外廓1 000 mm、最小壁厚1.5 mm的K4169涡轮机匣, 工艺出品率约50%; 后续又提出并发展了可编程G/R控制技术和枝晶间熔体凝固控制(IMSC)技术, 解决了用于燃机的IN792合金等轴晶密封环热裂和缩松问题^[5-6]; 近年来国内学者针对机匣、壳体等热控凝固技术均有研究并取得进展^[7-10]。

热控凝固技术在提高铸件质量和工艺出品率方面具有技术优势, 但目前国内对此项技术研究仍不够系统, 缺少工艺性基础数据。为此, 开展工艺性试验研究, 并通过数值模拟获得缩松形成判据值, 为GH3230合金热控凝固技术的生产应用打下基础。

1 试验材料及方法

1.1 试验试样设计

由于典型进气道精密合金件的尺寸主要分布在3~15 mm之间, 为实现对铸件缩松的控制, 得到不同工艺条件下的补缩距离, 设计壁厚分别为3 mm、5 mm、7 mm、10 mm、12 mm、15 mm, 长300 mm, 宽50 mm板型试样, 如图1所示。下方圆盘为定向凝固炉水冷铜盘。

1.2 试验材料及设备

根据典型进气道铸件的技术要求, 选用GH3230合金开展试验。合金化学成分

如表1所示。热控凝固试验型壳使用涂挂8层的刚玉型壳,浆料种类为EC95,骨料种类为白刚玉。

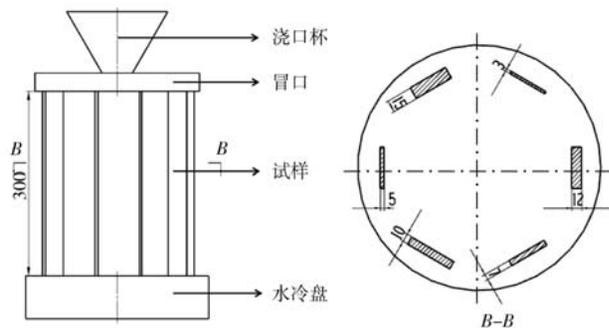


图1 试样三维模型

Fig. 1 3D model of test sample

表1 GH3230合金化学成分

Table 1 Chemical composition of GH3230 alloy $w_B/\%$

C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti
0.1	21.84	余量	2.96	13.84	1.97	0.46	0.061
Fe	La	B	Si	Mn	S	P	Cu
2.10	0.03	0.005	0.55	0.76	0.001	0.005	0.05

热控凝固试验在25 kg液态金属冷却定向凝固炉(ZGD-25BYF)中进行。该设备熔炼和保温炉最高使用温度1 700 °C,结晶器抽拉速度0.3~30 mm/min,试验用定向凝固炉及原理示意图如图2所示。为获得热控凝固试样凝固过程中冷却速率、温度梯度等工艺参数,采用MV2000型多通道温度记录仪采集试件温度数据。

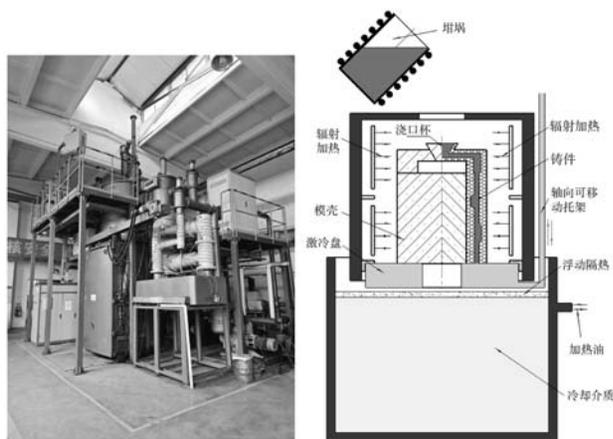


图2 试验用定向凝固炉及原理示意图

Fig. 2 Directional solidification furnace for test

1.3 试验方法

使用STA 499 F3同步热分析仪对GH3230合金进行了DSC检测,升温范围为30~1 600 °C,升温速率为5 K/min。由检测结果可以得到合金液相线为1 377.2 °C,如图3所示。为取得枝晶间补缩通道存在的温度,结合

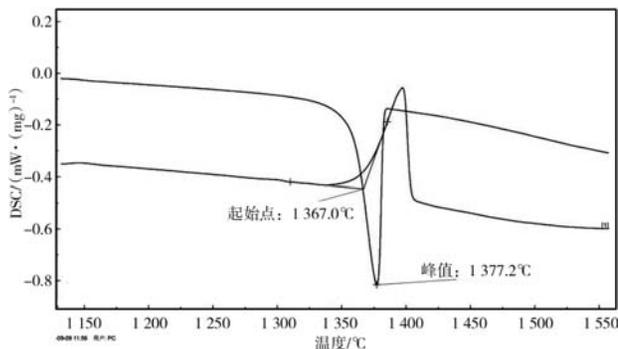


图3 GH3230合金DSC检测图

Fig. 3 DSC detection diagram of GH3230 alloy

超高温共聚焦显微镜对合金的固液两相区进行观测。最终确定型壳保温温度为1 350 °C。

采用真空感应熔炼技术进行母合金锭重熔,铸造成形壁厚分别为3 mm、5 mm、7 mm、10 mm、12 mm、15 mm的50 mm × 300 mm板状试样,并进行热控凝固铸造工艺与传统重力铸造工艺的对比试验,具体工艺参数如表2所示。

表2 试验工艺参数设计

Table 2 Design of experimental process parameters

铸造方法	熔体处理温度/°C	浇注温度/°C	型壳预热温度/°C	抽拉速率/(mm·min ⁻¹)
水冷热控凝固	1 550	1 400	1 350	30
重力铸造	1 550	1 450	900	0

2 试验结果及分析

2.1 补缩能力

对热控凝固试样和重力铸造试样按照HB/Z 60进行了x射线照相检查,按照标准HB 5430—1989进行评定。缩松情况如图4、图5所示,从图中可以看出,常规重力铸造试样均有缩松产生,且随壁厚减小,缩松情况逐渐严重,3 mm试样的缩松等级在2~8级之间,15 mm试样的缩松等级在2~6级之间。采用热控凝固工艺成形的10 mm、12 mm、15 mm的试样缩松等级均在1~2级,3 mm试样的缩松等级在1~5级间,5 mm试样的缩松等级在1~4级间,7 mm试样的缩松等级1~3级间。缩松等级2级及以上视为成功补缩,获得了符合要求的致密组织,发现随着试样壁厚的增大补缩距离逐渐增大。

冒口补缩距离(H)由冒口补缩区(h_1)与末端区(h_2)两个部分组成,是铸造工艺中浇注补缩系统设计的重要依据,提高补缩距离可以有效提高铸件的工艺出品率,降低生产成本。试验结果表明热控凝固铸造试样的补缩距离远高于重力铸造试样,是重力铸造试样补缩距离的10~14倍以上。如图6所示。

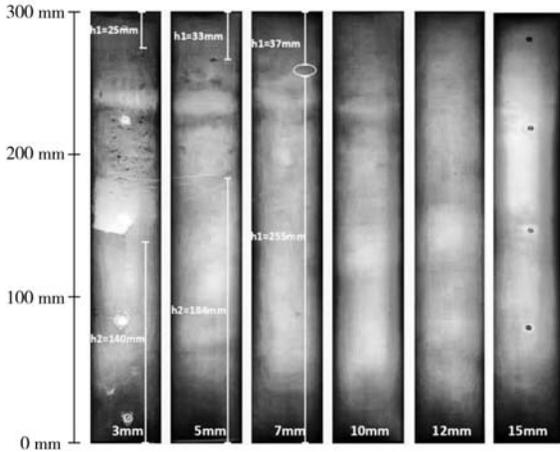


图4 采用热控凝固工艺成形的不同厚度试样的缩松分布及补缩距离
Fig. 4 Shrinkage porosity distribution and feeding distances of samples with different thicknesses formed by TCS process

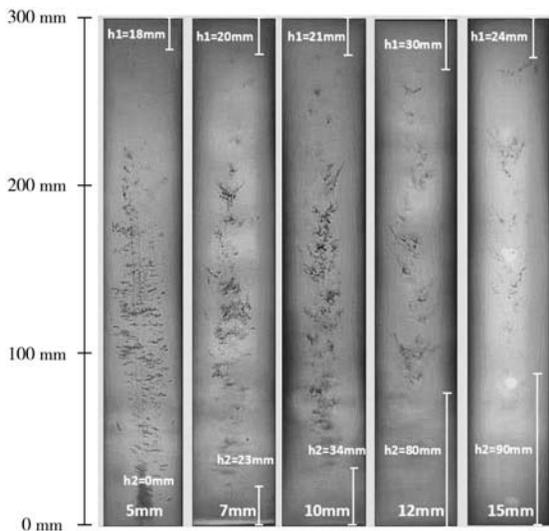


图5 采用重力铸造工艺成形的不同厚度试样的缩松分布及补缩距离
Fig. 5 Shrinkage porosity distribution and feeding distances of samples with different thicknesses formed by gravity casting process

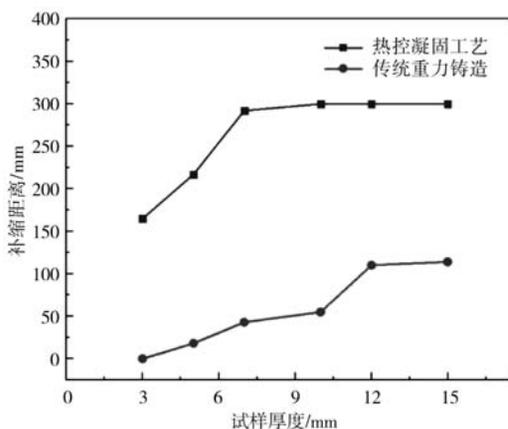


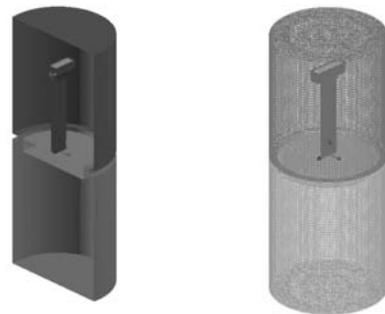
图6 热控凝固与重力铸造试样补缩距离对比
Fig. 6 Comparison of feeding distances between TCS process and gravity casting test plate

值得注意的是，热控凝固试验是在型壳保温温度 1 350 ℃，抽拉速率30 mm/min以及水冷铜盘冷却条件下实施的，改变工艺或凝固参数，可能得到不同的热控凝固试样补缩距离，但热控凝固显著增加凝固补缩距离的规律是不变的。

2.2 GH3230 合金凝固过程形成缩松临界判据值

Niyama判据通过比较 $G/R^{1/2}$ 的值与一个固定临界值的大小，判断铸件是否产生缩松缺陷， G 代表合金凝固过程中的温度梯度， R 代表凝固速度。以此对铸件的缩松进行预测，不同成分的合金有不同判据值。目前ProCAST等铸造数值模拟软件采用Niyama判据法来预测铸件缩松缺陷。本研究采用ProCAST软件计算试样热控凝固过程，获得试样凝固过程的温度场变化，然后通过缩松缺陷预测结果与试验结果反复比对，获得GH3230合金试样临界缩松判据值。为提高数值模拟的计算速度，将不同厚度试样差分分开进行模拟。

(1) 网格划分：为同时考虑模拟精度和运算速度的需求，3 mm板和5 mm板的面网格边长取1 mm，7 mm板、10 mm板和12 mm板的面网格边长取2 mm，15 mm板的面网格边长取3 mm，冒口面网格边长取5 mm，保温炉、炉体和铜盘的面网格边长取10 mm。所有部位网格均在三层以上，能满足预测精度要求，没有失真现象，划分较为合理，计算域内三维几何实体图形及网格划分情况如图7所示。



(a) 三维几何实体 (b) 网格划分
图7 计算域内的三维几何实体图形及网格划分情况

(2) 材料热物性参数设置：依据实际测量、文献查阅以及ProCAST数据库，分别设定GH3230合金、陶瓷型壳的热物性参数，如表3^[13]所示。

(3) 初始和边界条件设置。根据实际工艺参数，设置合金液浇注温度为1 400 ℃，陶瓷型壳初始温度为1 350 ℃，抽拉速率为30 mm/min，铜盘温度50 ℃。在模拟过程中，型壳外壁与保温炉和炉膛的换热主要依靠辐射散热，保温炉和炉膛的辐射率均取0.8，型壳的辐射率取0.5，冒口顶面辐射率取0.5。型壳与试样的

表3 GH3230合金及氧化铝型壳主要热物性参数
Table 3 Main thermophysical parameters of GH3230 alloy and alumina shell

热物性参数	GH3230合金	型壳
固相线温度 $T_s/^\circ\text{C}$	1 371.1	
液相线温度 $T_l/^\circ\text{C}$	1 254.8	
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8.934	2.69
导热率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	12.3~25.4	2.30~5.91
比热容 $C_p/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.496~0.594	0.795~1.21
结晶潜热 $L/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	201	

换热主要以热传导为主，通过插入B型热电偶到型壳中，获得合金凝固过程的温度曲线，并将实测曲线导入ProCAST软件的反算模块，即可获得较为准确的界面换热系数，经过测算，试样与铜盘的界面换热系数 $h_{C1}=4\ 569\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，试样与型壳的界面换热系数 $h_{C2}=325\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(4) 数值模拟结果及验证。3 mm板凝固过程不同时间的温度场如图8所示。从图中可以看出，在抽拉完成时3 mm板并未完全凝固，3 mm板在600 s时其中部位置出现了孤立的热节，凝固完成时的 $G/R1/2$ 值分布情况如图9所示，结合实际热控凝固实验中的3 mm板的补缩距离情况，暂定GH3230合金缩松临界判据值为 $10.0\ \text{K}^{0.5}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

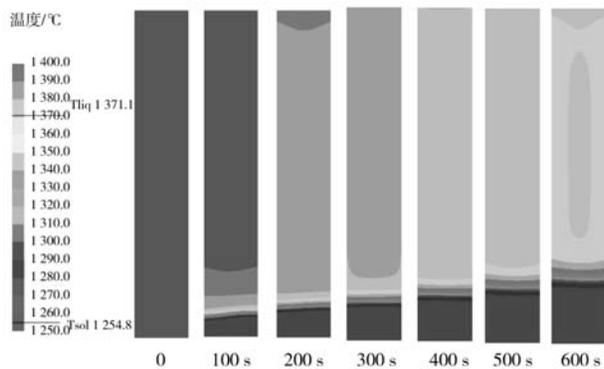


图8 3 mm板凝固过程中不同时刻的温度场

Fig. 8 Temperature fields at different time during solidification process of 3 mm plate

采用相同的初始条件和边界条件进行5 mm、7 mm、10 mm、12 mm、15 mm板的凝固过程数值模拟，凝固完成时的 $G/R1/2$ 值分布情况如图9所示。结合此前得到的GH3230合金缩松临界判据值，得到缩松情况与补缩距离的预测值，如图10所示。与实际实验的补缩距离变化曲线基本一致，准确度在96%以上。

上述计算和试验结果表明，本研究得到的GH3230合金试件凝固过程形成缩松的临界判据值是合理的，具有通用性。

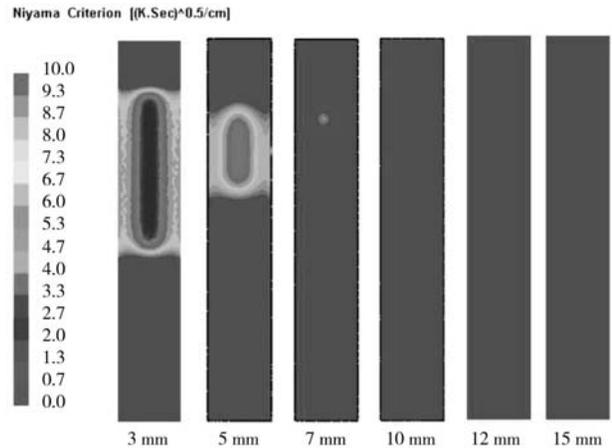


图9 各个厚度试板 $G/R1/2$ 值分布

Fig. 9 The $G/R1/2$ distribution of each test plate

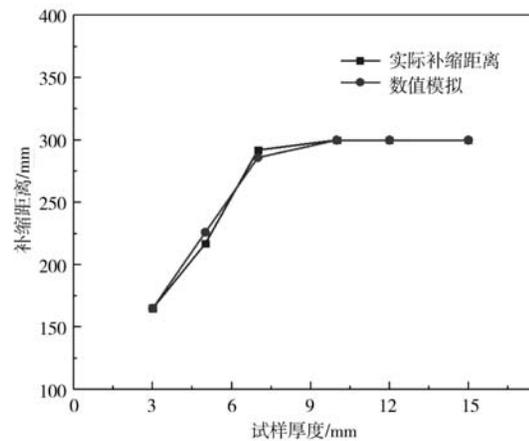


图10 实测与数值模拟补缩距离对比

Fig. 10 Comparison of feeding distance between numerical simulation and actual test

3 锡冷热控凝固试验

从前述结果可见，热控凝固试样产生缩松的主要原因是纵向的冷却强度不足，导致了孤立液相区的形成，与此同时，温度梯度不足， $G/R1/2$ 值小于GH3230合金的临界缩松判据值，从而试样中产生了缩松。所以，只要合理调整试样凝固过程中的冷却强度和温度梯度，就可能避免试样缩松内的产生。因此，在其他工艺参数保持不变的情况下，采用液态金属冷却的方式进行热控凝固试验，本工作选用锡液冷却方式进行热控凝固试验，锡液温度 $260\ ^\circ\text{C}$ ，3 mm试样缩松情况如图11所示。从图中可以看出，在锡冷条件下，3 mm试样缩松等级均在2级以上。

4 结论

为获得GH3230合金的热控凝固工艺条件，针对GH3230合金开展试验和数值模拟研究，得到结论如下：

表4 锡冷热控制凝固试验工艺参数
Table 4 Technological parameters of tin cooling TCS test

铸造方法	熔体处理温度/℃	浇注温度/℃	型壳预热温度/℃	抽拉速率/(mm·min ⁻¹)
锡冷热控制凝固	1 550	1 400	1 350	30



图11 锡冷热控制凝固3 mm试样x射线图

Fig. 11 X-ray diagram of 3 mm plate manufactured by using tin cooling TCS

参考文献:

- [1] 郭建亭. 高温合金材料学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] OUTLAW R A, REZAIE-SEREJ S, ALLEN W P, et al. Desulfurization of Ni-based super alloys by combined heating and glow discharge [J]. Scripta Materialia, 1996, 34 (8): 1315-1321.
- [3] WOULD S M, BENSON H. Development of a conventional fine grain casting process [C]// Superalloys. 1984.
- [4] FERRO P D, SHENDYE S B. Analyses from thermally-controlled solidification (TCS) trials on large investment castings [C]// Superalloys. 1996.
- [5] 盖其东, 谷怀鹏, 李爱兰, 等. 高温合金大型薄壁精密铸件热控制凝固试验的热分析研究 [C]//中国材料研究学会, 北京, 2011.
- [6] ZHENG L, ZHANG G, XIAO C, et al. The interdendritic-melt solidification control (IMSC) and its effects on the porosity and phase change of a Ni-based superalloy [J]. Scripta Materialia, 2014, 74: 84-87.
- [7] 戚翔, 张勇, 谷怀鹏, 等. K4169高温合金机匣热控制凝固工艺的数值模拟及优化 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 22-26.
- [8] 彭艳锋, 王甲贺, 国建花, 等. K4169高温合金壳体热控制凝固工艺的数值模拟及优化 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (4): 893-897.
- [9] 介子奇. 微量元素及熔体处理对K4169高温合金组织和性能的影响 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [10] 陈光, 郑功, 祁志祥, 等. 受控凝固及其应用研究进展 [J]. 金属学报, 2018, 54 (5): 669-681.
- [11] 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.
- [12] 贾宝仟, 柳百成. 铸件缩孔缩松判据 G/\sqrt{R} 的理论基础及应用 [J]. 铸造, 1996, 45 (4): 13-15.
- [13] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

Investigation of the Technological Properties of Feeding for Thermally Controlled Solidifying GH3230 Alloy

LIAO Jia-li, SUN Xun, GUAN Yang, LIU Xiao-fu, SHUI Guo-yan, MA Lan-bo, GUO Xin-li, JIN Lei
(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The feeding distance and shrinkage porosity criterion of GH3230 alloy test plates during thermally controlled solidification (CS) have been investigated. The feeding distances of test plates with different thicknesses under the condition of vacuum water cooling TCS process were obtained, which were more than 10-14 times of that of vacuum gravity casting test plates with different thicknesses. Through numerical simulation, it was obtained that critical value of shrinkage porosity of GH3230 alloy was $10.0 \text{ K}^{0.5} \cdot \text{s}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1}$, being confirmed by inverse test, and the accuracy reached 96%. In order to improve the temperature gradient of the samples during solidification processes, a tin cooling TCS test was carried out, and it was found that the shrinkage porosities of the 300 mm×3 mm test plate could be eliminated by the tin cooling TCS process.

Key words:

GH3230; thermally controlled solidification; feeding distance; numerical simulation; critical shrinkage porosity criterion