Mater. Rep. B, 2019, Vol. 33, No. 10
DOI: 10.11896/cldb.18080130
http://www.mater-rep.com http://www.mr-int.net

[补充信息]

添加碳和硼改善第三代镍基定向凝固高温合金的显微组织和偏析行为

王晓娟[1,2]，刘 林[1,✉]，赵新宝[3]，黄太文[1]，杨文超[1]，张军[1]，傅恒志[1]

1 西北工业大学凝固技术国家重点实验，西安 710072
2 西安工程大学理学院，西安 710048
3 浙江大学材料科学与工程学院，杭州 310027

[Supplementary Information]

Improvement of Microstructures and Segregation Behavior of the Third Generation Nickel-based Directionally Solidified Superalloys by Carbon and Boron Additions

WANG Xiaojuan[1,2], LIU Lin[1,✉], ZHAO Xinbao[3], HUANG Taiwen[1], YANG Wenchao[1], ZHANG Jun[1], FU Hengzhi[1]

1 State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072
2 School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048
3 School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

实验材料与测试方法

实验所用的镍基高温合金成分如表 S1 所示，母合金 a 不含碳和硼，合金 b、c 和 d 中分别添加了一定量的碳，e、f 和 g 合金是碳含量基本不变时添加了一定量的硼，碳和硼的添加是通过镍的减少来平衡，其他元素含量保持不变。

表 S1 实验所用七种合金名义成分的质量百分比

Table S1 The weight percentage of nominal compositions of seven alloys used in this experiment

Alloy	Co /%	Cr/%	W/%	Mo/%	Re/%	Al/%	Ta/%	Hf/%	C/%	B/%	Ni/%
a	12.1	4.96	5.81	1.02	5.05	6.08	8.03	0.05	-	-	Bal.
b	11.9	5.04	6.02	1.00	5.11	5.98	8.19	0.09	0.040	-	Bal.
c	12.0	5.05	6.00	1.03	5.08	5.99	8.14	0.09	0.085	-	Bal.
d	11.9	5.08	5.83	1.01	4.95	5.96	7.86	0.08	0.130	-	Bal.
e	11.9	4.95	5.80	1.01	4.96	6.03	7.96	0.08	0.085	0.005	Bal.
f	12.0	5.04	6.03	1.01	5.18	6.05	8.18	0.08	0.085	0.010	Bal.
g	11.8	4.94	5.77	1.01	4.87	5.99	7.85	0.07	0.085	0.014	Bal.

实验设备采用改进的Bridgman双区石墨电阻加热定向凝固装置，主要的实验参数为：保温区加热温度上区1 540 ℃，下区1 550 ℃；抽拉速率200 μm/s；熔体过热温度1 580 ℃；浇注温度1 540 ℃；浇铸样品尺寸为Φ12 mm×160 mm。

✉ linliu@nwpu.edu.cn

选取距离样品底端5 cm的位置，将试样切成Φ12 mm×5 mm的薄片，然后用80#至1500#砂纸依次进行打磨和抛光，随后用体积比为1:2:3的HNO_3、HF、丙三醇进行腐蚀，观察枝晶组织、碳化物和共晶的整体分布；用体积比7:3的HCl和H_2O_2进行腐蚀去除基体，观察碳化物形貌。枝晶组织的观察用Leica DM4000M光学显微镜，共晶、碳化物分布和形貌观察采用ZEISS SUPRA 55场发射扫描电镜，并利用SiSc IAS V8.0图像分析系统计算碳化物和共晶的体积分数。

合金的一次枝晶间距λ_1利用下式计算：

$$\lambda_1 = \left(\frac{A}{n}\right)^{0.5} \tag{S1}$$

式中：A为视场的面积，单位为μm^2；n为该视场中的枝晶数目。

合金元素的偏析行为主要通过 JEOL JAX-8100 型电子探针显微分析仪进行测量，试样经打磨抛光后，在枝晶干和枝晶间区域分别采用线性扫描，取点间隔为 10 μm。实验过程中加速电压为 20 kV，测试电流为 100 nA，束斑直径为 0.5 μm。

温度梯度

改进的 Bridgman 定向凝固装置采用双区石墨电阻加热，将加热体分为主加热体和辅助加热体两部分。主加热体尺寸大，用于提供保温炉内整体的环境温度，即模壳的温度；辅助加热体很小，用来对凝固界面前沿进行局部强化加热，以提高固液界面前沿的温度梯度。辅助加热体温度越高，固液界面温差越大，使得温度梯度越高，具体原理如图 S1 所示。

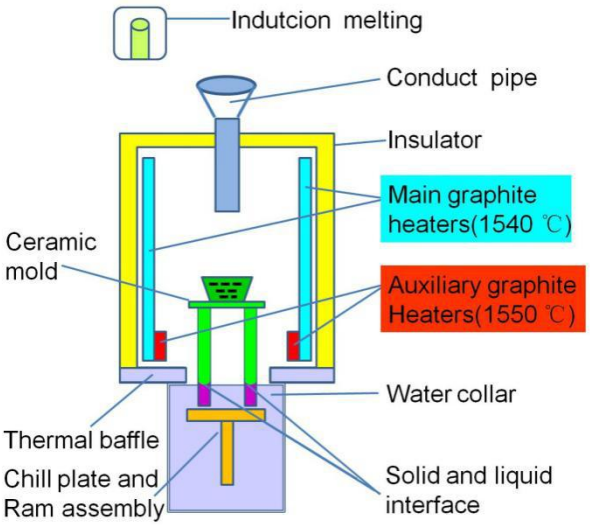

图 S1 高梯度定向凝固双区加热原理示意图

Fig.S1 Directional solidification equipment of high gradient and double-zone heating