

# DD5镍基单晶高温合金凝固过程 元素偏析的相场模拟

张强<sup>1</sup>, 杨泽南<sup>1</sup>, 王祯<sup>1</sup>, 杨志刚<sup>2</sup>

(1. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095;  
2. 清华大学材料学院, 北京 100084)

**[摘要]** 作为航空发动机涡轮工作叶片的主要材料, 镍基单晶高温合金凝固过程中的元素偏析易造成组织的不均匀性, 进而影响其高温力学性能。选取国产二代单晶高温合金 DD5 作为研究对象, 以 3mm/min 的抽拉速率制备单晶试棒, 通过组织观察与热力学计算确定其铸态组织的相组成, 包括  $\gamma$  相,  $\gamma'$  相与碳化物。采用电子探针显微分析对合金元素在枝晶干与枝晶间的偏析行为进行了线扫描, 确定 Re、W 的正偏析及 Al、Ta 负偏析特性, 且枝晶间的碳化物中 Ta 含量较高, 推测其为 MC 型碳化物。在此基础上借助 Micress 相场软件, 对凝固过程的组织形貌演化与元素偏析行为进行了模拟, 其形貌特征与光镜组织观察结果相一致, 元素分布与 EPMA 结果相符。

**关键词:** 单晶高温合金; 合金元素; 偏析; 相场模拟

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.048



张强  
高级工程师, 研究方向为铸造高温合金。

单晶高温合金随定向凝固技术的出现而得到发展, 相比于传统的多晶铸造合金, 单晶高温合金消除了萌

生于晶界处裂纹产生的可能性, 极大地提升了合金的服役温度。根据基体元素种类的不同, 高温合金被分为铁基、钴基和镍基, 其中镍基单晶高温合金由于其优异的高温强度<sup>[1]</sup>、疲劳抗力<sup>[2]</sup>、蠕变性能<sup>[3]</sup>、抗氧化及腐蚀性能<sup>[4]</sup>, 被广泛用于制造航空发动机的热端部件。通常高温合金的显微组织由 FCC 结构的  $\gamma$  相基体、金属间化合物  $\gamma'$  相以及碳化物组成,  $\gamma$  相与  $\gamma'$  相组成的筏排结构使得应力状态下的位错难以运动, 是其高温强度的基础。

镍基单晶高温合金的合金化程度较高, 在凝固过程中高熔点元素倾向富集于枝晶干, 而低熔点元素则向枝晶间偏析。合金元素分布的不均匀性易导致粗大共晶组织的产生<sup>[5]</sup>, 即使通过多级热处理仍难以消除<sup>[6]</sup>, 在服役状态下的共晶组织与基体间

界面常诱发裂纹萌生, 进而导致蠕变断裂<sup>[7]</sup>。电子探针显微分析 (EMPA) 是最常用的测量元素偏析的试验方法<sup>[8-12]</sup>, 其分辨率通常可达到  $1\mu\text{m}$  以下, 可定量描述元素在枝晶干与枝晶间的分布情况。前人大量的试验研究也为热动力学数据库的建立提供了必要的基础, 并加快了合金设计体系的构建与组织演化模拟工作的开展。

相场法适用于研究多组元复杂变量的相变过程, 针对高温合金的凝固过程国外学者已开展大量研究工作。Mottura 等建立了一维相场模拟方法, 并在仅考虑液相与  $\gamma$  相的前提下模拟了各元素的偏析行为<sup>[13]</sup>。Galilea 与 Warnken 等对镍基单晶高温合金 LEK94 的铸态偏析进行了二维相场模拟, 可以定量描述单个枝晶生长过程中的元素分布情况, 但与实

际组织演化过程有较大差距<sup>[14-16]</sup>。本文以第二代单晶高温合金 DD5 的铸态组织为研究对象,结合显微组织观察对其复杂的二维形貌进行相场模拟,进一步揭示合金元素在凝固过程中的偏析行为。

## 试验及方法

试验所用 DD5 镍基高温合金的化学成分如表 1 所示。在真空感应定向凝固炉内制备 [001] 取向的单晶试棒,控制其抽拉速率为 3mm/min。用劳埃 X 射线法测定单晶试棒的结晶取向,其后在其中心位置附近切取  $\phi 15\text{mm} \times 10\text{mm}$  的试样进行显微组织观察。通过 LEICA-DM4000M 光学显微镜及 ZEISS-GeminiSEM50 扫描电子显微镜(加速电压 15kV)观察凝固的铸态组织,并借助 JXA-8230 型电子探针显微分析仪(加速电压 20kV,电流 30nA,步长  $0.6\mu\text{m}$ )对 Re、W 等合金元素的偏析行为进行分析表征。

通过 ThermoCalc 热力学软件 TTN18 数据库计算合金的液相线及固相线,并结合 Micress 相场模拟软件对凝固过程的组织演化及元素偏析行为进行模拟。

## 结果与讨论

### 1 显微组织观察与热力学计算

光学显微镜下 DD5 单晶高温合金的铸态组织照片如图 1 所示,其中先凝固的枝晶干区域衬度较后凝固的枝晶间衬度稍浅,而白亮区域则为共晶组织。枝晶干的生长方向相互垂直,且一次枝晶干均匀分布,二次枝晶干近平行排列,这与常见的单晶高温合金铸态组织相一致<sup>[10-11]</sup>。在扫描电子显微镜下观察到铸态组织中枝晶干与枝晶间区域的形貌相似, $\gamma'$ 相呈立方状,如图 2 所示。

借助镍基合金的 TTN18 数据库计算平衡态下 DD5 合金中各相的摩尔分数随温度变化关系,结果如图 3

表1 DD5合金化学成分(质量分数)

%

| C     | Al   | Cr   | Co   | Mo   | Hf   | Ta   | W    | Re   | Ni |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 0.051 | 6.02 | 6.80 | 7.36 | 1.48 | 0.16 | 6.32 | 4.90 | 2.98 | 余量 |

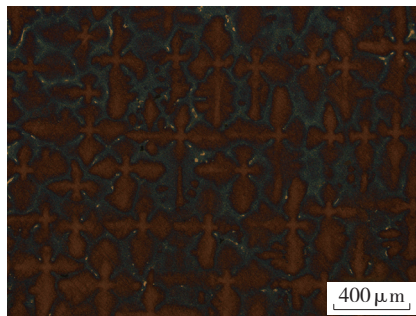


图1 DD5单晶高温合金铸态枝晶组织光镜照片

Fig.1 Dendrite morphologies of as-cast microstructure of DD5 superalloy by OM observation

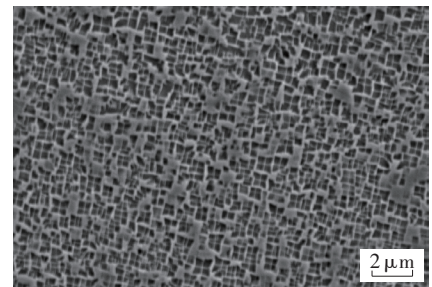


图2 DD5单晶高温合金铸态组织SEM照片  
Fig.2 SEM graph showing as-cast microstructure of DD5 superalloy

所示,当温度降至  $1384\text{ }^{\circ}\text{C}$  时开始析出  $\gamma$  相,而温度进一步降至  $1361\text{ }^{\circ}\text{C}$  时开始析出 MC 相。合金的固相线温度约为  $1346\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此对于该合金凝固的窗口温度范围为  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这些与文献报道通过 DSC 测得的典型高温合金特征温度相一致<sup>[12]</sup>。当温度低于  $1258\text{ }^{\circ}\text{C}$  时析出  $\gamma'$  相,但后期冷却速度较快,所形成的组织显著偏离平衡态计算结果。

### 2 铸态组织中合金元素分布

元素偏析通常随凝固过程的进行在枝晶干与枝晶间呈现差异,因此随机选取现场由枝晶干向枝晶间

进行线扫描,路径如图 4 (a) 所示,与之对应的各元素分布情况如图 4 (b) 所示。显然,Re、W 倾向于在枝晶干富集,而 Al 则稍向枝晶间富集, Ta 强烈地富集于枝晶间组织中最后凝固的区域,这些试验结果与文献报道结果相符<sup>[10-12,17]</sup>。另一方面,针对 Mo 的偏析行为学界存有一定的分歧,有学者指出枝晶间的 Mo 含量更高<sup>[11-12]</sup>,另有学者认为 Mo 易于向枝晶干偏析<sup>[10]</sup>,在本试验中, Mo 元素在枝晶间的含量稍高,为负偏析元素。而 Co、Cr 则均匀地分布于枝晶干与枝晶间,未呈现明显的偏析特性,这可能与凝固过程的抽拉速率(即冷速)有关,当抽拉速率较低时,

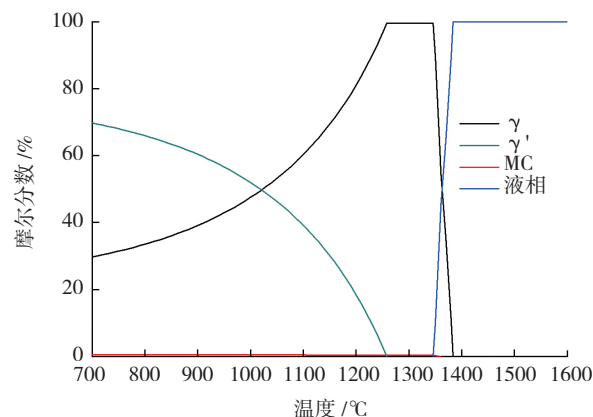


图3 DD5高温合金各相摩尔分数随温度变化关系

Fig.3 Mole fraction of respective phases vs temperature for DD5 superalloy

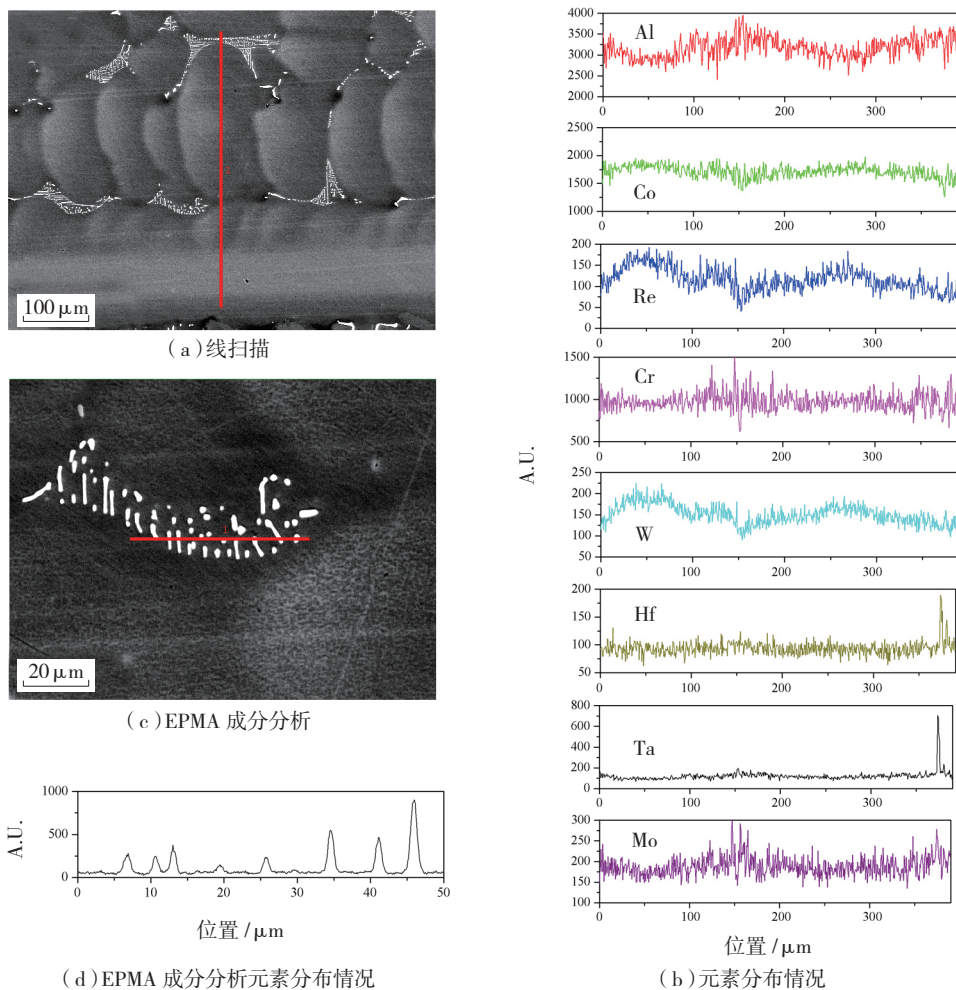


图4 电子探针所测DD5单晶高温合金铸态组织中各合金元素分布情况  
Fig.4 EPMA measurement of alloying element distribution of as-cast microstructure of DD5 superalloy

元素有充分的时间扩散,进而在先后凝固的组织中呈现出浓度差异;当抽拉速率较高时,元素来不及长程扩散即发生凝固,故无法观察到偏析现象。有趣的是,在图4(a)中枝晶间观察到亮度较高的白色颗粒,在图4(c)进一步对该区域开展EPMA成分分析,结果表明其中Ta含量极高,结合热力学计算推测其为富Ta的MC型碳化物(图4(d))。Hf的线扫描结果显示其在枝晶间的含量显著高于枝晶干,这可能与Ni<sub>3</sub>Hf相在枝晶间区域的析出有关。

### 3 DD5高温合金凝固过程的相场模拟

借助Micress软件在1000 μm × 520 μm的区域内对DD5合金凝固

过程的组织演化过程进行了二维模拟,模拟中所涉及的热力学数据由TTNI8数据库读取。图5为不同时刻的组织演化模拟结果,其中蓝色、红色、白色分别对应液相、γ相及γ'相。在初始时刻,γ相晶核在液相中形成,并生长为“十”字形的一次枝晶。当时间延长至25s,二次枝晶逐渐在一次枝晶干上析出,并随着时间的延长而进一步生长,相应的液相区面积减少。当凝固至200s时,γ'相开始在枝晶间析出,并随相变过程的进行而长大。由于相场模拟中设定每个格点的尺寸为1 μm,对于图2中SEM观察到的筏排结构无法进行模拟,因此相场中的γ'相无法从过饱和γ相析出,仅存在于枝晶间。

图5的模拟结果与图1的显微组织形貌相似度较高,证实了相场法对于宏观组织演化的适用性。相比于Galica与Warnken针对单个枝晶在矩形区域内的生长的相场模拟,本文实现了对多个枝晶间竞争生长过程的模拟,且进一步揭示了二次、三次枝晶的动态生长过程<sup>[14-16]</sup>。

事实上,凝固过程的进行受液固界面迁移速率的控制,而这与界面两侧元素的浓度及化学状态密不可分。与传统相场模拟不同的是,DD5高温合金体系中存在近10种合金元素,它们之间的相互作用及其对相变热力学的影响为数值模拟方法提出了挑战<sup>[18]</sup>,因此在实际中采用了相应的近似假设<sup>[19]</sup>。图6为相场模

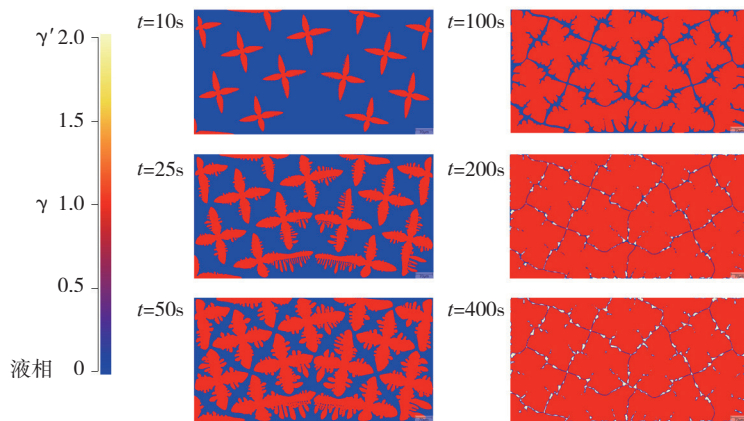


图5 DD5高温合金凝固过程组织演化的相场模拟

Fig.5 Phase field simulation of microstructure evolution of DD5 superalloy during its solidification process

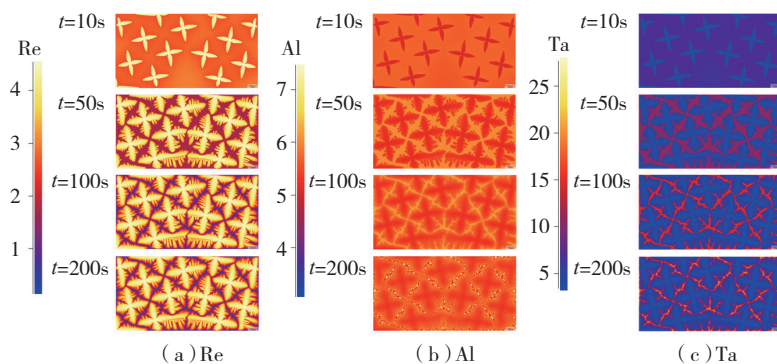


图6 相场模拟DD5高温合金中合金元素在凝固过程中的偏析行为

Fig.6 Phase field simulation of alloying element segregation of DD5 superalloy during the solidification process

拟的 DD5 高温合金在凝固过程中不同时刻合金元素的分布情况,显然, Re 在枝晶干的浓度高于其在枝晶间的浓度,符合其正偏析元素的特性,而 Al、Ta 则倾向于向枝晶间富集,与图 4 中 EPMA 的测量结果相一致。值得注意的是,凝固初期 Al 在液相与  $\gamma$  相间的偏析程度较低,而在相变后期,随着  $\gamma'$  相(成分为  $\text{Ni}_3\text{Al}$ )的析出, Al 元素被大量消耗,造成枝晶间 Al 含量较高。在实际凝固过程中,  $\gamma'$  相与  $\gamma$  相的筏排结构仅需 Al 的短程扩散,因此宏观偏析被进一步削弱。Ta 随相变的进行强烈的向液相偏析,并富集于最后凝固的组织中。作为强碳化物形成元素,通过热力学计算确定 Ta 以 MC 相的形式析出。但由于 DD5 合金中 C 含量较低,

且在模拟中引入过多 FCC 结构的相易引发数值错误( $\gamma$  相在数据库中标注为 FCC\_A1,  $\gamma'$  相为 FCC\_L12, MC 相为 FCC\_A1#2),因此并未在模拟中考虑后期 MC 相的析出动力学。

针对其他的合金元素,模拟结果显示 W、Co 为正偏析元素,而 Cr、Mo、Hf 则为负偏析元素(注:模拟中未考虑 HfC 相的析出,因此元素的偏析特性决定于其在液相与  $\gamma$  相间的配分)。W 与 Re 的偏析行为相似,均强烈地富集于枝晶干,在此不再附图赘述。其余元素的偏析较为微弱,在实际凝固过程中受到抽拉速率的影响,并受限于试验设备精度可能无法明确地加以表征。有趣的是, Hf 作为负偏析元素可能对其他元素的偏析行为造成影响,此前有学者指出

随 Hf 含量的增加, Al、Cr、Ta、Re 元素的偏析情况得到减缓,而 Mo 的偏析则加深<sup>[20]</sup>。因此,相场模拟在探究多组元单一变量下的合金元素间相互作用及其对其他元素偏析行为的影响具有深远的意义,结合热动力学的分析手段可为合金成分设计及热处理工艺的制定提供指导。

## 结论

(1) 通过热力学计算得到 DD5 单晶高温合金冷却的平衡组织由  $\gamma$  相、 $\gamma'$  相及 MC 型碳化物构成,试验观察到的铸态组织由筏排结构的  $\gamma$  相及  $\gamma'$  相、粗大共晶相以及碳化物构成,与热力学计算结果相符。

(2) EMPA 及相场模拟结果均表明 Re、W 向枝晶干偏析,而 Al、Ta 向枝晶间偏析。尽管 Co、Cr、Mo 元素在相场模拟中存在少量的偏析,但未在试验中观察到,可能与试验方法的精度有关。Hf 元素在相场中存在一定程度的负偏析,但试验中可能以  $\text{Ni}_3\text{Hf}$  相的形式在枝晶间的局部位置析出。

(3) 相场法对单晶高温合金凝固过程中组织形貌演化的模拟与试验观察一致。

## 参考文献

- [1] 孙晓峰,金涛,周亦胄,等. 镍基单晶高温合金研究进展 [J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 1-11.  
SUN Xiaofeng, JIN Tao, ZHOU Yizhou, et al. Research progress of nickel-base single crystal superalloys[J]. Materials China, 2012, 31(12): 1-11.
- [2] 丁智平. 复杂应力状态镍基单晶高温合金低周疲劳损伤研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
DING Zhiping. Study on multiaxial low cycle fatigue damage of single crystal nickel-based superalloy [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [3] 李楠,金涛,刘金来,等. 热处理对一种镍基单晶高温合金高温蠕变性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(5): 789-793.

LI Nan, JIN Tao, LIU Jinlai, et al. Effect of heat treatment on the creeping strength of nickel-base single crystal superalloy at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(5): 789-793.

[4] 张泽海, 孟杰. 一种镍基单晶高温合金的恒温氧化行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(4): 337-340.

ZHANG Zehai, MENG Jie. Isothermal oxidation behavior of a single crystal nickel-based superalloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(4): 337-340.

[5] 张晓越, 刘林, 黄太文, 等. 凝固参数对 DD6 偏析和  $\gamma/\gamma'$  共晶组织演化的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(12): 2547-2552.

ZHANG Xiaoyue, LIU Lin, HUANG Taiwen, et al. Effect of solidification parameters on the segregation and  $\gamma/\gamma'$  eutectic evolution in Ni-based single crystal superalloy DD6[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(12): 2547-2552.

[6] WILSON B C, HICKMAN J A, FUCHS G E. The effect of solution heat treatment on a single-crystal Ni-based superalloy[J]. Journal of Minerals, Metals and Materials Society, 2003, 55(3): 35-40.

[7] YAN B C, ZHANG J, LOU L H. Effect of boron additions on the microstructure and transverse properties of a directionally solidified superalloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 474(1-2): 39-47.

[8] 庄晓黎, 吴红宇, 方姣, 等. 无铼镍基单晶高温合金的显微组织表征 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(6): 1246-1254.

ZHUANG Xiaoli, WU Hongyu, FANG Jiao, et al. Characterization on microstructure of non-rhenium single crystal nickel-base superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(6): 1246-1254.

[9] 王震, 李金国, 赵乃仁, 等. 熔体处理温度对镍基单晶高温合金熔体结构和凝固组织的影响 [J]. 金属学报, 2002, 38(9): 920-924.

WANG Zhen, LI Jinguo, ZHAO Nairen, et al. Effect of the melt treatment temperature on the melt structure and microstructure of a nickel based single crystal superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(9): 920-924.

[10] 骆宇时, 赵云松, 杨帅, 等. Ru 对 DD22 镍基单晶高温合金组织和持久性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 132-140.

LUO Yushi, ZHAO Yunsong, YANG Shuai, et al. Effects of Ru on microstructure and stress rupture property of Ni-based single crystal superalloy DD22[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 132-140.

[11] 刘世忠, 史振学, 李嘉荣. C 含量对第二代单晶高温合金组织的影响 [J]. 航空材料学报, 2017, 37(3): 9-15.

LIU Shizhong, SHI Zhenxue, LI Jiarong. Effect of C content on microstructure of second generation single crystal superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(3): 9-15.

[12] HU Qin, LIU Lin, ZHAO Xinbao, et al. Effect of carbon and boron additions on segregation behavior of directionally solidified nickel-base superalloys with rhenium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3257-3264.

[13] MOTTURA A, WARNKEN N, MILLER M K, et al. Atom probe tomography analysis of the distribution of rhenium in nickel alloys[J]. Acta Materialia, 2010, 58(3): 931-942.

[14] LOPEZ-GALILEA I, HUTH S, FRIES S G, et al. Microsegregation and secondary phase formation during directional solidification of the single-crystal Ni-based superalloy LEK94[J]. Metallurgical & Materials Transactions Part A, 2012, 43(13): 5153-5164.

[15] WARNKEN N, LARSSON H, REED R C. Coupled modelling of solidification and solution heat treatment of advanced single crystal nickel base superalloy [J]. Materials Science & Technology, 2013, 25(2): 179-185.

[16] WARNKEN N, MAD, DREVERMANN A, et al. Phase-field modelling of as-cast microstructure evolution in nickel-based superalloys [J]. Acta Materialia, 2009, 57(19): 5862-5875.

[17] 艾诚, 刘刚, 刘林, 等. Re 和 Ru 对镍基单晶高温合金凝固分配系数和相变温度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(8): 1336-1340.

AI Cheng, LIU Gang, LIU Lin, et al. Effects of Re and Ru additions on solidification partition coefficients and solidification characteristic temperature of nickel base single crystal superalloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(8): 1336-1340.

[18] FRANKE M M, SINGER R F, STEINBACH I. Tertiary dendritic instability in late stage solidification of Ni-based superalloys [J]. Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering, 2014, 22(22): 025026.

[19] BÖTTGER B, EIKEN J, APEL M. Multi-ternary extrapolation scheme for efficient coupling of thermodynamic data to a multi-phase-field model[J]. Computational Materials Science, 2015, 108: 283-292.

[20] 史振学, 李嘉荣, 刘世忠, 等. Hf 含量对 DD6 单晶高温合金铸态组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(3): 490-493.

SHI Zhenxue, LI Jiarong, LIU Shizhong, et al. Effect of Hf content on the microstructure and stress rupture properties of DD6 single crystal superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 490-493.

通讯作者: 张强, E-mail: ZQ2038@163.com。

## Phase Field Simulation of Alloying Element Segregation During Solidification of DD5 Nickel-Base Single Crystal Superalloy

ZHANG Qiang<sup>1</sup>, YANG Ze'nan<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, YANG Zhigang<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced High Temperature Structure Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. School of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[ABSTRACT]** Nickel-base single crystal superalloy is frequently used for the turbine blades of aero-engine. The alloying element segregation during its solidification process leads to the heterogeneity in microstructure, which could be fatal to the high temperature mechanical property. DD5 is one of the second generation of domestic single crystal superalloy. A cylinder specimen was withdrawn by a rate of 3mm/min. Microstructure observation and thermodynamic calculation reveals the cast microstructure includes  $\gamma$ ,  $\gamma'$  and carbide. Electron probe microanalysis was employed for the measurement of alloying element segregation across the dendrites and interdendrites, indicating that Re and W tends to segregate into dendrites while Al and Ta concentration is higher in interdendritic regions. In particular, the carbide precipitation in in-terdendritic region is proven to be Ta enriched, which is supposed to be MC type carbide. On this basis, phase field simulation on the microstructure evolution and alloying element segregation during solidification is performed via Mi-cress software. The simulated microstructure is quite similar to the experimental observation, and the alloying element distribution is in accordance with EPMA measurement.

**Keywords:** Single crystal superalloy; Alloying element; Segregation; Phase field simulation

(责编 大漠)

(上接第 47 页)

[22] 苗德忠, 李青春. 外场在材料加工中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2009(14): 195-196.

MIAO Dezhong, LI Qingchun. Field in the application of materials processing[J]. China High-Tech Enterprises, 2009(14): 195-196.

[23] XU Y, ZHAN L, XU L, et al. Experimental research on creep aging behavior

of Al-Cu-Mg alloy with tensile and compressive stresses[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 682: 54-62.

[24] 康煜平. 金属固态相变及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

KANG Yuping. Study on solid state transformation and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[25] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.

ZHENG Ziqiao. Materials science foundation[M]. Changsha: Central South University Press, 2013.

通讯作者: 湛利华, 教授、博士, 从事铝合金蠕变时效技术研究, E-mail: yjs-cast@csu.edu.cn。

## Study on Electric Pulse Assisted Aging Process of High-Strength Aluminum Alloy Plates

MA Yunlong<sup>1</sup>, ZHAN Lihua<sup>2,3</sup>, XU Yongqian<sup>2</sup>, TONG Canyu<sup>2</sup>, TAN Jingsheng<sup>3</sup>

(1. Beijing Aerospace Systems Engineering Research Institute, Beijing 100076, China;

2. Light Alloy Research Institute of Central South University, Changsha 410083, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

**[ABSTRACT]** The electric pulse assisted aging process of 2219 aluminum alloy plates is simulated and studied by experiments. The effect of electric pulse on the current density distribution, Joule heat effect, mechanical properties and precipitates microstructure is investigated by simulation analysis, electric pulse assisted aging test, tensile test and transmission electron microscopy observation. The results show that the peak current density of the electric pulse assisted aged plate is symmetrically distributed. Under the current density of 80A/cm<sup>2</sup>, the peak current density in most areas of the sheet is between 40 and 120A/cm<sup>2</sup>. Meanwhile, the temperature rise of the plate is less than 1°C. Compared with the conventional aging process, the aging precipitation process is accelerated and the distribution of precipitates is homogenized after the electric pulse assisted aging process. The peak aging time was shortened from 15h to 10h, peak aging yield strength also increased from 283MPa to 303MPa. Furthermore, it indicated that the electric pulse assisted aging process can shorten the production time and improve the mechanical properties of the studied alloy.

**Keywords:** Aging treatment; Electrical pulse; 2219 aluminum alloy; Current density; Joule heat effect; Mechanical property; Microstructure

(责编 海山)