

Re、Ru 对镍基单晶合金元素偏析行为的影响

刘岩岩¹, 李福宝¹, 徐 飞¹, 舒德龙^{1, 2}, 田素贵²

(1. 沈阳工业大学化工装备学院, 辽宁沈阳 111003; 2. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

摘要: 通过设计并制备出四种Re、Ru含量不同的镍基单晶合金, 通过组织形貌观察及浓度测量, 研究了元素Re、Ru对铸态镍基单晶合金成分偏析行为的影响。结果表明, Ru主要富集于枝晶间区域, 并提高Al、Ta等 γ' 相形成元素在枝晶干区域的偏析程度, 使其他元素在枝晶间区域的偏析程度增加。Re强烈偏析于枝晶干区域, 可促进枝晶形核并增加枝晶数量。凝固期间, 高熔点的Re、W等元素与基体Ni优先凝固, 发生液固转变, 形成枝晶组织。由于Re阻碍Ni、Al、Ta等原子发生有序化排列, 导致Al、Ta等 γ' 相构成元素在枝晶干区域的浓度降低, 致使枝晶间区域Ni、Al、Ta等元素的浓度增加, 最终形成大量共晶组织, 是铸态含Re合金共晶组织数量较多、尺寸较大, 及含Re合金中Al元素主要偏析于枝晶间区域的主要原因。

关键词: 镍基单晶合金; 铼; 钌; 元素偏析; 电子探针

作者简介:

刘岩岩(1985-), 女, 硕士生, 主要研究方向为机械工程及材料加工。E-mail: 675046538@qq.com

通讯作者:

李福宝, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。电话: 0419-5319268, E-mail: prf_fubaoli@126.com

中图分类号: TG146.15

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

03-0237-07

收稿日期:

2018-10-25 收到初稿,

2018-12-18 收到修订稿。

镍基单晶合金消除了晶界, 避免高温服役期间晶界弱化, 被广泛应用于制造先进航空发动机叶片部件^[1-2]。随着对发动机性能要求的不断提高, 对于制造热端叶片的性能提出了更高的要求。添加元素Re可提高合金的承温能力和高温强度^[3-4]。但高含量的Re元素会降低合金的组织稳定性, 使合金在服役期间析出密排拓扑相(TCP), 极大降低合金的高温强度^[5]。由于Ru可降低TCP相的形核、长大速率^[6], 提高合金的组织稳定性, 显著提高合金的高温蠕变抗力^[7], 因此, 在6%Re合金中分别加入3%Ru和5%Ru是第四代和第五代合金的重要成分特征^[5]。

由于镍基高温合金中合金元素种类较多, 各元素的熔点不同导致其在合金凝固期间的凝固顺序具有一定差异, 产生宏观偏析^[8], 导致对合金进行热处理时需采用较高温度、较长时间的固溶处理^[9-11], 因此, 合金的铸态组织及成分偏析程度在一定程度上决定了后续热处理工艺的复杂程度。目前, 对于含Re、Ru镍基单晶合金的研究主要集中在Re、Ru对元素在 γ/γ' 两相间的分配行为、合金变形机制的影响等方面^[12-15], 但对Re、Ru对铸态合金成分偏析影响的研究较少。

含Re合金在凝固期间较容易产生共晶、雀斑等晶体缺陷^[3]。对于Ru的作用目前尚存在一定的争论。Kearsey等人认为^[16], 元素Ru可降低合金中其他元素的偏析程度, 使铸态合金成分更加均匀; 而Feng等人则认为^[17], Ru提高了铸态合金中W、Re等元素的偏析程度。关于Ru对铸态镍基单晶合金中各元素偏析行为的影响尚不清楚。

据此, 本研究通过设计并制备有/无Re、Ru的四种镍基单晶合金, 并对铸态合金进行形貌观察, 结合电子探针浓度分布测量, 研究了元素Re、Ru对铸态镍基单晶合金元素偏析行为的影响, 试图为先进镍基单晶合金的设计及应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

将设计成分为无Re和Ru、3.0%Ru、4.5%Re和4.5%Re+3.0%Ru的四种镍基母合金, 通过定向凝固技术, 以螺旋选晶方式制备出晶体取向为[001]的镍基单晶合金试棒, 经化学分析测定出合金的实际化学成分如表1。定向凝固期间, 恒温温度为1 550 ℃,

表1 不同合金的实际化学成分
Table 1 Chemical composition of superalloys

合金	Al	Ta	Cr	Co	Mo	W	Re	Ru	Ni	$w_B/\%$
无Re、Ru	5.98	7.49	5.82	5.97	3.00	4.07	0	0	余量	
3.0%Ru	6.15	7.45	5.15	5.91	2.96	5.88	0	2.87	余量	
4.5%Re	6.08	7.52	5.38	5.83	2.84	5.00	4.42	0	余量	
4.5%Re+3.0%Ru	5.93	7.44	4.78	6.05	3.08	4.90	4.38	2.85	余量	

抽拉速率为3.0 mm/min。

为了考察元素Re、Ru对铸态镍基单晶合金枝晶尺寸及分布的影响，采用扫描电子显微镜（SEM）对铸态合金的（001）、（100）截面进行组织形貌观察，并通过面积测算法估算一次、二次枝晶间距 λ ，如式（1）所示：

$$\lambda = \frac{1}{M} \left(\frac{A}{N} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中： M 为SEM下的放大倍数， A 为测量区域的面积， N 为该区域中一次、二次枝晶的数量。

采用EPMA-1720型电子探针测量四种铸态合金中各元素在枝晶间/干区域的浓度分布，将测定的各元素在枝晶间、干区域的浓度代入公式（2），可计算出该元素的偏析系数：

$$K = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中： C_1 、 C_2 分别为元素在枝晶干和枝晶间区域的浓度（wt.%），当 $K > 0$ 时，表明该元素富集于枝晶间区域，发生正偏析；而当 $K < 0$ 时，则表明该元素富集于枝晶干区域，发生负偏析。

2 试验结果及讨论

2.1 元素 Re、Ru 对铸态合金组织的影响

无Re、Ru和4.5%Re+3.0%Ru铸态合金在（001）和（100）面的枝晶形貌如图1所示。观察发现，与Ru相比，Re对铸态合金的枝晶形貌和尺寸影响较大，因此仅给出无Re、Ru和4.5%Re+3.0%Ru合金的枝晶形貌，其他两合金的枝晶形貌略去。4.5%Re+3.0%Ru合金的枝晶间区域存在大量尺寸较大的共晶组织，如图1c中箭头所示，其放大形貌示于左下角。

根据式（1）计算出四种铸态合金中一次、二次枝晶间距见表2。由表2可知，Re可明显降低铸态镍基单晶合金的枝晶间距，增加铸态合金中的枝晶数量，降低枝晶尺寸，而Ru对枝晶数量、间距及尺寸的影响较小。

2.2 Ru 对铸态合金元素偏析行为的影响

采用EPMA观察到不同元素在铸态合金枝晶间、干

区域的浓度分布，如图2-5所示。在进行元素浓度分布观察时，观察区域的尺寸均为 $1\ 200\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$ 。根据四种铸态合金中各元素在枝晶区、干域的浓度 C ，采用式（2）计算出该元素的偏析系数 K ，并将测量及计算结果示于表3中。

铸态无Re、Ru合金中各元素的浓度分布如图2所示，可以看出，元素Ni、Al和W主要富集于枝晶干区域。其中，Al的偏析系数为-20.4%，W的偏析系数为-22.3%。Co、Cr、Mo和Ta等元素主要富集于枝晶间区域，其偏析系数分别为11.3%、15.1%、50.1%和21.6%，如表3所示，铸态合金中，Mo强烈偏析于枝晶间区域。另一方面，合金存在少量的共晶组织，其中Ni、Al、Ta的浓度较高，如图2中箭头所示。

根据镍基合金凝固期间的枝晶生长理论^[8]，当凝固期间发生液-固转变时，首先发生 $L \rightarrow \gamma$ 的液-固相变反应。凝固期间，基体元素Ni及具有较高熔点的元素W和Re可首先发生 $L \rightarrow \gamma$ 转变， γ 基体相首先析出，并形成枝晶组织。随着凝固进行，在浓度梯度及过冷度的驱动力下，大量细小的 γ' 相自基体中脱溶析出^[18]。由于定向凝固期间的温度梯度较高，凝固速率较快，因此可认为发生 $L \rightarrow \gamma$ 液固反应与 $\gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$ 固态相变同时进行。在随后的凝固过程中，大量低熔点及与Ni固溶能力较差的元素进入枝晶间区域，重复上述过程，随着温度进一步降低，枝晶间区域的残余液相最终形成（ $\gamma + \gamma'$ ）共晶组织，如图1c所示。

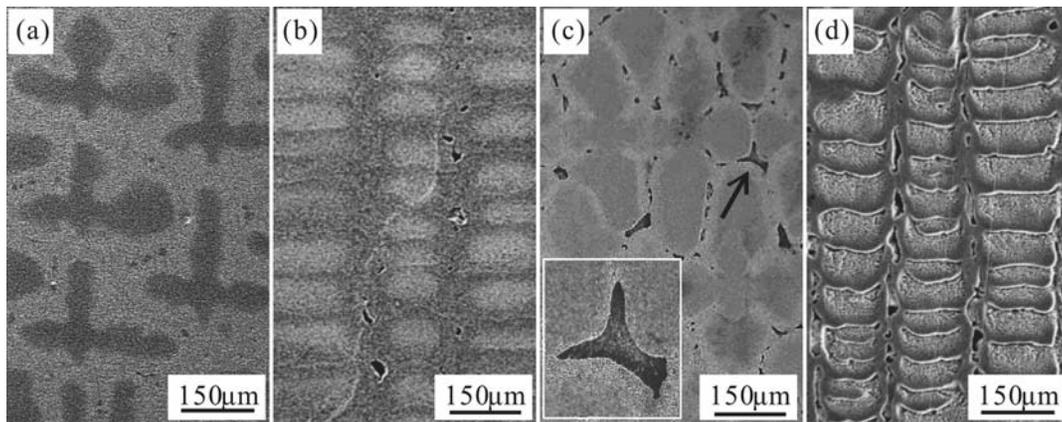
铸态3.0%Ru合金中各元素的浓度分布示意图如图3所示，其中，Ru主要富集于枝晶间区域，并且在近共晶区域具有明显的偏聚现象，如图3i中箭头所示。其中，Ta的偏析系数有所降低，其他元素的偏析系数有所提高，如表3所示。另一方面，铸态3.0%Ru合金枝晶间区域的共晶组织数量略有增加，如图3中箭头所示。

研究表明，Ru可降低 γ' 相的析出温度^[19]，因此，在 $1\ 550\ ^\circ\text{C}$ 下熔体凝固及冷却期间，含Ru合金中 γ' 相脱溶析出时具有更高的驱动力，导致枝晶干区域 γ' 相的数量和体积分数增加，Ni、Al和Ta等 γ' 相形成元素的浓度随之增加^[20]，其他非 γ' 相构成元素则被排斥进入枝晶间区域，是元素Ru使铸态合金中各元素的偏析程度有所增加的主要原因。由于W的熔点较高，因此，在凝固期间仍主要富集于枝晶干区域。

另一方面,合金凝固期间,随枝晶干区域大量 γ' 相不断析出,导致枝晶间区域残余液相中 γ' 相形成元素的浓度不断增加,最终形成($\gamma+\gamma'$)共晶组织,是3.0%Ru合金中共晶组织数量增加的主要原因。

2.3 Re对铸态合金元素偏析行为的影响

铸态4.5%Re合金枝晶间、干区域的元素浓度分布,如图4所示。Re主要富集于枝晶干区域,其偏析系数约为-42.9%,为较强的负偏析元素。与无Re、Ru合金相比,铸态4.5%Re合金中Al的偏析系数由-20.4%变为15.6%,由负偏析转变为正偏析,并且Al主要富集于枝晶间区域的共晶组织中;Co、Cr、Mo等元素的偏析系数均有所提高,Ta的偏析系数略有降低,而W的偏析系数无明显变化,如表3所示。另一方面,与无Re合金相比,铸态4.5%Re合金的一次枝晶数量较多,尺寸较小,且枝晶间区域的共晶数量及尺寸较大,如图4所示。



(a)、(b)无Re、Ru合金(001)和(100)面;(c)、(d)4.5%Re+3.0%Ru合金(001)和(100)面

图1 铸态无Re、Ru和4.5%Re+3.0%Ru合金在不同晶面的枝晶形貌

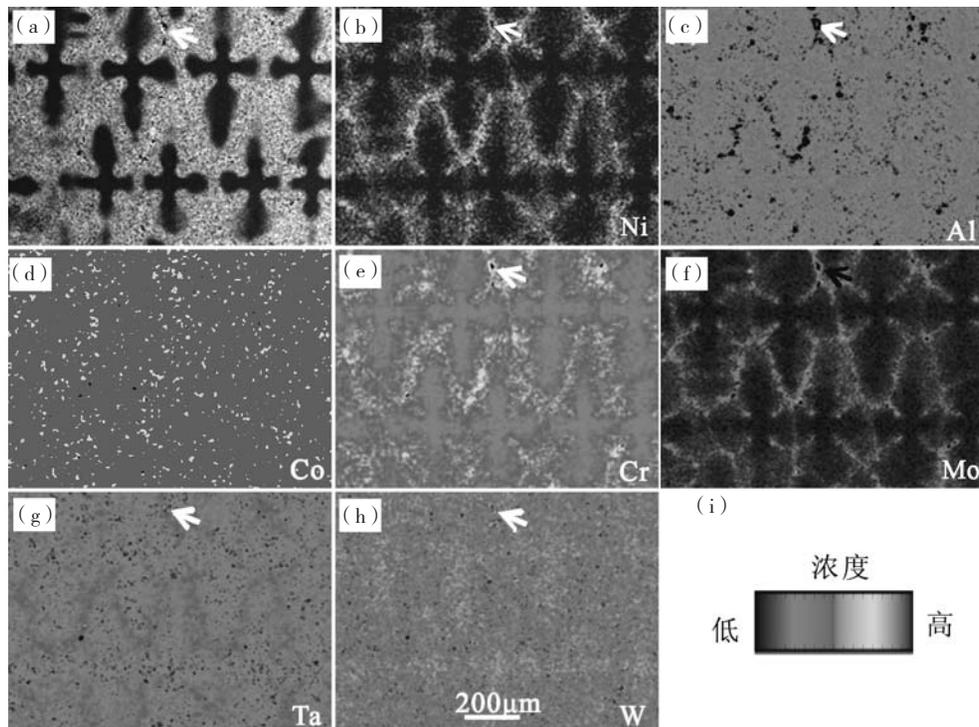
Fig. 1 Dendrites morphologies on various planes of as-cast Re, Ru-free and 4.5%Re+3.0%Ru-containing alloys

表2 不同成分铸态合金的枝晶间距
Table 2 Dendrite arm spacing of different as-cast alloys

	无Re、Ru	3.0%Ru	4.5%Re	4.5%Re+3.0%Ru	/ μm
一次枝晶间距	278	261	207	215	
二次枝晶间距	93	88	85	79	

表3 不同铸态合金中各元素在枝晶间、干的含量(质量分数)及偏析系数
Table 3 Concentrations and segregation coefficients of elements in inter-dendrite, dendrite regions in different as-cast alloys

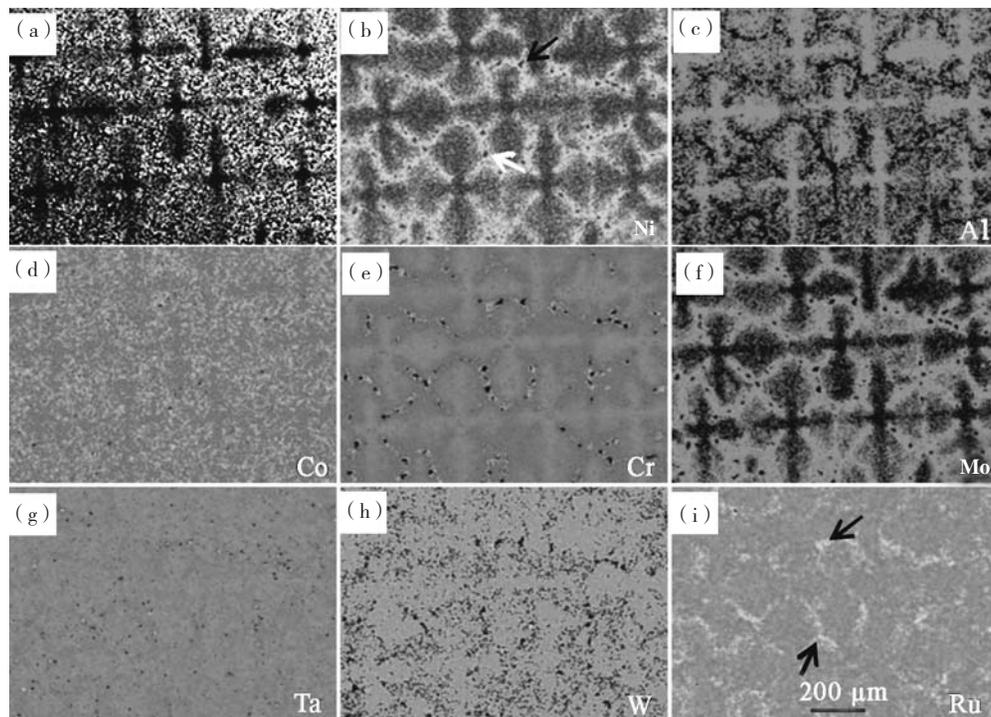
合金	项目	Al	Co	Cr	Mo	Ta	W	Re	Ru	
无Re、Ru	含量/%	枝晶干	6.42	5.58	5.55	2.44	6.28	4.49	0	0
		枝晶间	5.11	6.21	6.39	3.68	7.64	3.49	0	0
	偏析系数	-20.4	11.3	15.1	50.1	21.6	-22.3	0	0	
3.0%Ru	含量/%	枝晶干	6.67	5.33	4.48	2.32	6.81	6.91	0	2.62
		枝晶间	4.86	6.32	5.67	3.84	7.59	5.19	0	3.39
	偏析系数	-27.1	18.8	26.6	66.0	11.4	-24.9	0	29.4	
4.5%Re	含量/%	枝晶干	5.44	5.52	4.37	2.17	7.18	5.82	4.97	0
		枝晶间	6.29	6.87	5.91	3.53	8.54	4.77	3.88	0
	偏析系数	15.6	24.4	35.2	62.6	18.9	-22.0	-28.1	0	
4.5%Re+3.0%Ru	含量/%	枝晶干	5.59	5.62	4.54	2.36	7.11	4.48	5.04	2.52
		枝晶间	6.31	6.69	5.46	3.25	8.36	2.85	3.62	2.76
	偏析系数	12.9	19.0	20.3	37.8	17.5	-36.4	-39.2	9.5	



(a) 铸态枝晶形貌；(b) - (h) 不同元素在枝晶间、干区域的浓度分布

图2 铸态无Re、Ru合金中各元素的浓度分布示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of element concentration distributions in as-cast Re and Ru-free alloy



(a) 铸态枝晶形貌；(b) - (i) 不同元素在枝晶间、干区域的浓度分布

图3 铸态3.0%Ru合金中各元素的浓度分布示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of element concentration distributions in as-cast 3.0%Ru-containing alloy

分析认为, 由于Re的熔点较高(约3 180 ℃), 因此, 4.5%Re合金凝固期间, 含Re质点优先析出, 并且Re可降低合金的固相线温度^[21], 导致合金在凝固期间形成枝晶的质点数量增加。随枝晶逐渐长大, 直至形成完整的枝晶, 导致合金中一次枝晶间距较小。此外, Re原子可降低其周围原子在Ni固溶体中的扩散速率^[22], 使 γ 基体中Al、Ni、Ta等原子在凝固期间发生有序化转变, 置换Ni周围的原子时受到的阻力较大, 导致 γ' 相的长大速率降低^[23]。随凝固进行, 液相中Al、Ni和Ta等 γ' 相形成元素的浓度不断增加, 最终在枝晶间区域发生共晶反应, 形成共晶组织, 是含Re合金枝晶间区域共晶组织数量较多、尺寸较大, 及Al元素主要偏析于枝晶间区域的主要原因。

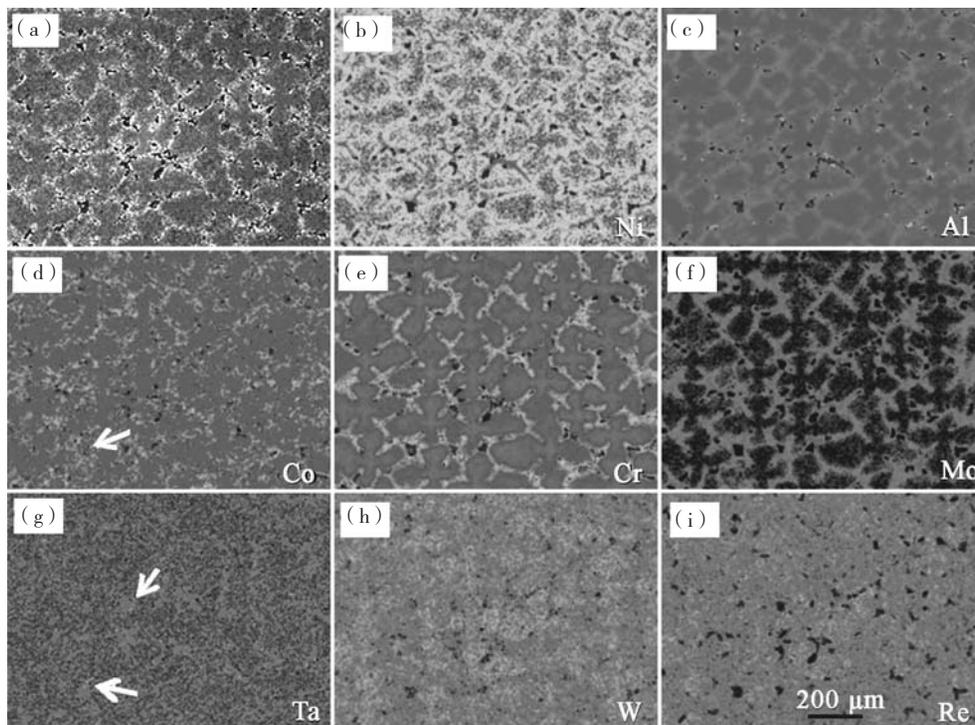
铸态4.5%Re+3.0%Ru合金中, 元素在枝晶间/干区域的浓度分布示意图如图5所示(此处略去Ni元素分布示意图)。可以看出, 与4.5%Re合金相比, 铸态4.5%Re+3.0%Ru合金中枝晶尺寸略大, 形态及分布较为均匀, 但枝晶间区域的共晶数量和尺寸有所增加。

与无Re、Ru合金相比, 4.5%Re+3.0%Ru合金中Al元素具有正偏析系数, 并且主要富集于枝晶间区域的共晶组织中, 说明Al的偏析行为主要受元素Re影响;

合金中Mo、Ta、W等难熔元素的偏析系数有所降低, 如表3所示。其中, 单独加入Re或Ru时, Mo的偏析系数均有所增加, W的偏析系数变化较小; 但同时加入Re、Ru后, Mo的偏析系数明显降低, 而W的偏析系数明显增加, 说明Re、Ru之间存在交互作用。

图3至图5中Re、Ru的浓度分布特征表明, Ru可提高Re在枝晶芯部的浓度, 并使其在枝晶间与枝晶干区域的浓度梯度增加; 而Re可明显降低Ru的偏析程度, 使Ru元素在枝晶间与枝晶干区域的浓度趋于均匀, 仅在共晶区域存在尺寸较小的Ru富集区。

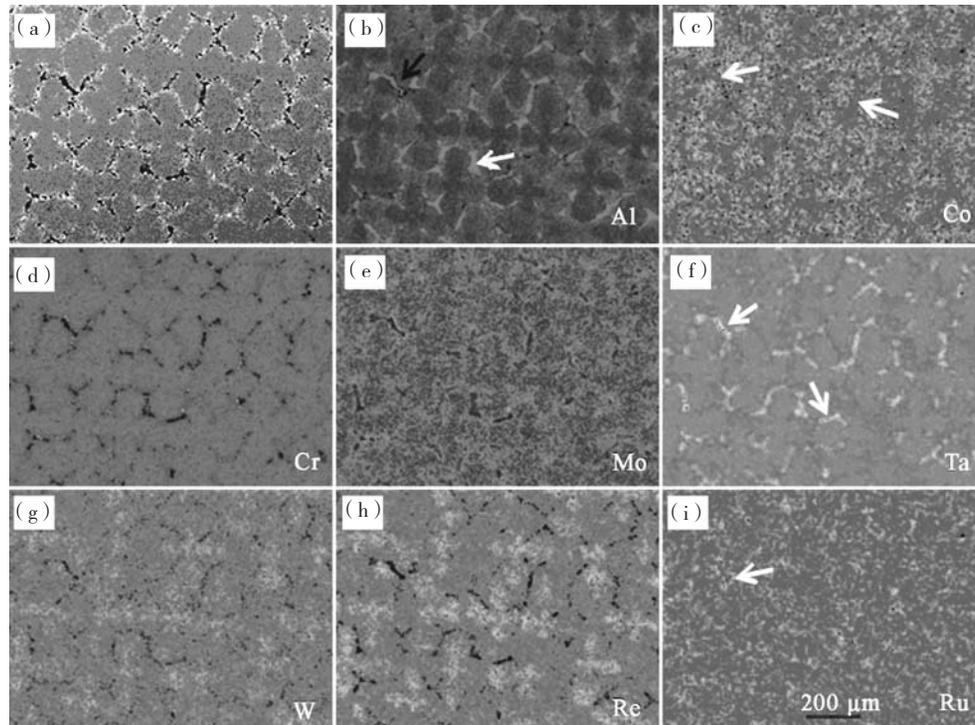
综上所述, 元素Re、Ru可提高除Ta以外的其他元素的偏析程度, 但Re、Ru对铸态合金枝晶间距及枝晶间区域共晶组织的尺寸和数量的影响不同。根据表3中不同合金中各元素的偏析系数可以推断出, 元素的偏析行为不仅取决于该元素的熔点, 也与该元素与Ni形成 γ' 有序固溶体的能力有关。分析认为, 由于Al是 γ' -Ni₃Al相的主要构成元素, 并且铸态合金中 γ' 相在枝晶干区域的数量较多^[20], 因此, Al的偏析行为主要取决于凝固期间 γ' 相在枝晶干和枝晶间区域的析出与长大速率, 导致Al在不同铸态合金中的偏析行为具有较大差别。



(a) 铸态枝晶形貌; (b) - (i) 不同元素在枝晶间、干区域的浓度分布

图4 铸态4.5%Re合金中各元素的浓度分布示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of element concentration distributions in as-cast 4.5%Re-containing alloy



(a) 铸态枝晶形貌；(b) - (i) 不同元素在枝晶间、干区域的浓度分布

图5 铸态4.5%Re+3.0%Ru合金中各元素的浓度分布示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of element concentration distributions in as-cast 4.5%Re+3.0%Ru-containing alloy

3 结论

(1) 铸态镍基单晶合金在(001)晶面的枝晶呈现整齐的“+”字形态，在枝晶间区域存在共晶组织，随合金中加入Re，合金中一次枝晶间距减小，共晶组织的尺寸及数量增加。

(2) 元素Ru主要富集于枝晶间区域，并可提高铸态合金的偏析程度。其中，Ru增加Al、Ta等元素在枝晶干区域偏析程度，是合金中其他元素在枝晶间区域偏析程度有所提高的主要原因。

(3) 元素Re富集于枝晶干区域，并可增加凝固期间的枝晶形核数量，大量枝晶同时生长是4.5%Re合金中枝晶数量较多、尺寸较小的主要原因。元素Re具有较小的扩散系数，并可降低周围原子的扩散速率，使 γ 相脱溶析出受阻，导致Al元素在枝晶干区域的浓度降低，并使枝晶间区域及残余液体中Ni、Al、Ta等元素浓度增加，是铸态4.5%Re合金共晶组织数量较多、尺寸较大的主要原因。

参考文献：

- [1] TIAN S G, ZHU X J, WU J, et al. Influence of temperature on stacking fault energy and creep mechanism of a single crystal nickel-based superalloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32 (8) : 790-798.
- [2] 刘丽玉, 高翔宇, 杨宪锋, 等. DD6单晶高温合金振动疲劳性能及断裂机理 [J]. 材料工程, 2018, 46 (2) : 128-133.
- [3] SCHULZE C, FELLERKNIEPMEIER M. Transmission electron microscopy of phase composition and lattice misfit in the Re-containing nickel-base superalloy CMSX-10 [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 281 (1) : 204-212.
- [4] 舒德龙, 田素贵, 梁爽, 等. 一种4.5%Re镍基单晶合金在980 °C蠕变期间的变形与损伤机制 [J]. 材料工程, 2017, 45 (1) : 93-100.
- [5] REHMAN H, DURST K, NEUMEIER S, et al. Nanoindentation studies of the mechanical properties of the μ phase in a creep deformed Re containing nickel-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 634 (Supplement C) : 202-208.
- [6] REED R C, YEH A C, TIN S, et al. Identification of the partitioning characteristics of ruthenium in single crystal superalloys using atom probe tomography [J]. Scripta Materialia, 2004, 51 (4) : 327-331.
- [7] MATUSZEWSKI K, RETTIG R, MATYSIAK H, et al. Effect of ruthenium on the precipitation of topologically close packed phases in Ni-based superalloys of 3rd and 4th generation [J]. Acta Materialia, 2015, 95 (Supplement C) : 274-283.
- [8] GIZAN X, LIU E, ZHENG Z, et al. Solidification behavior and segregation of Re-containing cast Ni-base superalloy with different Cr

- content [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27 (2): 113-117.
- [9] 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.
- [10] 王志辉, 赵乃仁, 李金国, 等. 热处理工艺对SRR99镍基单晶高温合金组织和性能的影响 [J]. 材料工程, 2008, 2008 (12): 46-50.
- [11] 舒德龙, 田素贵, 吴静, 等. 热处理对4.5%Re单晶镍基合金高温蠕变行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, (6): 1480-1489.
- [12] SHU D L, TIAN S G, TIAN N, et al. Influence of Re/Ru on concentration distribution in the γ/γ' phases of nickel-based single crystal superalloys [J]. Materials & Design, 2017, 132 (15): 198-207.
- [13] 骆宇时, 赵云松, 杨帅, 等. Ru对一种高Re单晶高温合金 γ/γ' 相中元素分布及高温蠕变性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016 (7): 1719-1725.
- [14] CHATTERJEE D, HAZARI N, DAS N. Influence of Ru addition on microstructure, creep and rupture properties of nickel based DS superalloy [J]. Procedia Engineering, 2013, 55 (12): 51-57.
- [15] 骆宇时, 李嘉荣, 刘世忠, 等. Re对单晶高温合金蠕变过程中 γ' 相定向粗化的影响 [J]. 材料工程, 2006 (7): 43-46.
- [16] KEARSEY R M, BEDDOES J C, JONES P, et al. Compositional design considerations for microsegregation in single crystal superalloy systems [J]. Intermetallics, 2004, 12 (7-9): 903-910.
- [17] FENG Q, NANDY T K, TIN S, et al. Solidification of high-refractory ruthenium-containing superalloys [J]. Acta Materialia, 2003, 51 (1): 269-284.
- [18] 张卫国, 刘林, 黄太文, 等. 高温度梯度定向凝固冷却速率对DZ4125合金 γ' 相的影响 [J]. 金属学报, 2009, 45 (5): 592-596.
- [19] 林惠文, 周亦胄, 张炫, 等. 一种含Pt镍基单晶高温合金的凝固行为 [J]. 金属学报, 2013 (12): 1567-1572.
- [20] 刘刚, 刘林, 赵新宝, 等. 一种镍基单晶高温合金的高温度梯度定向凝固组织及枝晶偏析 [J]. 金属学报, 2010, 46 (1): 77-83.
- [21] LIU L R, JIN T, LIANG J J, et al. Calculation and experiments on the solidification behavior of single crystal superalloy containing Ru [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2013, 33 (4): 305-310.
- [22] AI C, LIU G, LIU L, et al. Effects of Re and Ru additions on solidification partition coefficients and solidification characteristic temperatures of nickel base single crystal superalloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41 (8): 1336-1340.
- [23] YEY A C, TI S. Effects of Ru and Re additions on the high temperature flow stresses of Ni-base single crystal superalloys [J]. Scripta Materialia, 2005, 52 (6): 519-524.

Influences of Re and Ru on Element Segregation Behavior of Nickel-Based Single Crystal Superalloy

LIU Yan-yan¹, LI Fu-bao¹, XU Fei¹, SHU De-long^{1,2}, TIAN Su-gui²

(1. School of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, Liaoning, China; 2. School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract:

In the present work, four nickel-based single crystal superalloys with different Re and Ru contents were designed and prepared, microstructure observations and concentration measurements were performed, and the influences of Re and Ru on the segregation behaviors of as-cast nickel-based single crystal superalloy were investigated. The results show that Ru mainly enriches in the inter-dendrite region and increases the segregation degrees of the γ' phase formation elements, such as Al and Ta, in the area of dendrite, while increases the segregation degrees of other elements in the inter-dendrite region. Re mainly enriches in the area of dendrite and promotes the nucleation of dendrite and increases the amount of eutectic structure. During solidification, the element as Re and W with high melting points firstly solidify with the matrix element Ni, and the reaction from liquid to solid phase transformation occurs to form the dendrite structure. Due to the inhibition effect of Re on the ordering arrangement of Ni, Al and Ta, the concentrations of these γ' phase formation elements are reduced in the dendrite region, which causes the concentrations of these elements to be increased in the inter-dendrite region, and finally forms large amounts of eutectic structure. This is thought to be the main reason why eutectic structure become larger or greater in size and amount, and Al mainly segregating in the inter-dendrite region in the as-cast Re-containing alloy.

Key words:

nickel-based single crystal superalloy; rhenium; ruthenium; element segregation; EPMA