



## 镍基单晶高温合金中 $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为的研究进展

艾 诚<sup>1</sup>, 李 青<sup>1</sup>, 陈 曦<sup>2</sup>, 郭 敏<sup>3</sup>, 黄太文<sup>3</sup>, 刘 林<sup>3</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064;

2. 西安赛特思迈钛业有限公司, 西安 710018;

3. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

**摘 要:** 本文总结了镍基单晶高温合金中 $\gamma/\gamma'$ 元素的分配行为, 单晶高温合金中Re、Cr、Co、Mo、Ru和W元素主要分布于 $\gamma$ 相中, Al、Ta和Ti元素主要分布于 $\gamma'$ 相中。同时, 单晶高温合金中 $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为受到合金元素交互作用的影响, 如Re、Cr和Mo元素的分配比随单晶高温合金中Re+Cr+Mo含量以及Ta+Ti含量的提高而增大, W元素的分配比随着单晶高温合金中Ta+Ti含量的提高而增大; Ru的添加使部分合金中出现了元素“逆分配”的现象, 但Ru元素产生“逆分配”作用并非普遍现象; Ta元素的分配比随单晶高温合金中Ta-Al质量比的提高而显著降低。

**关键词:** 镍基单晶高温合金; 合金元素;  $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为; 交互作用

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3694-12

中图分类号: TG132.3

文献标志码: A

**引文格式:** 艾 诚, 李 青, 陈 曦, 等. 镍基单晶高温合金中 $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3694–3705. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42906

AI Cheng, LI Qing, CHEN Xi, et al. Research progress on  $\gamma/\gamma'$  partitioning behavior of alloying elements in nickel-based single crystal superalloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3694–3705. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42906

由于镍基单晶高温合金具有优良的高温强度、抗氧化及抗热腐蚀能力<sup>[1-2]</sup>, 使其在高温环境下仍能保持优异的服役性能, 目前已广泛应用于制备航空发动机的单晶涡轮叶片<sup>[3-5]</sup>。镍基单晶高温合金的合金化程度较高, 包含Al、Co、Cr、Mo、Re、Ru、Ta、Ti、W等十余种合金元素<sup>[6]</sup>, 合金元素按其作用可分为沉淀强化元素(Al、Ta和Ti元素)<sup>[7-8]</sup>、 $\gamma$ 相固溶强化元素(Re、W和Mo元素)<sup>[4, 9-11]</sup>以及抗氧化和抗热腐蚀元素(Cr和Ta元素)<sup>[7-8, 12-13]</sup>。同时, 单晶高温合金是典型的 $\gamma/\gamma'$ 双相合金<sup>[3-4]</sup>,  $\gamma$ 相和 $\gamma'$ 相具有不同的成分特征, 即Re、Cr、Co、Mo、Ru

和W元素主要富集于 $\gamma$ 相中, 而Al、Ta和Ti元素主要富集于 $\gamma'$ 相中<sup>[7, 10, 14-18]</sup>。

已有研究表明,  $\gamma$ 相和 $\gamma'$ 相的成分、 $\gamma/\gamma'$ 错配度与单晶高温合金的高温蠕变性能密切相关<sup>[19-22]</sup>。一方面,  $\gamma$ 相和 $\gamma'$ 相的成分决定了 $\gamma$ 相和 $\gamma'$ 相的固溶强化程度, 进而影响合金的蠕变性能<sup>[23]</sup>。另一方面,  $\gamma$ 相和 $\gamma'$ 相的成分将决定 $\gamma$ 相晶格常数、 $\gamma'$ 相晶格常数与 $\gamma/\gamma'$ 错配度<sup>[19-22]</sup>。ZHANG等<sup>[21]</sup>的研究表明,  $\gamma$ 相强化元素的添加可有效地降低 $\gamma/\gamma'$ 错配度, 使得单晶高温合金在高温蠕变过程中获得了更致密、更规则的 $\gamma/\gamma'$ 界面位错网, 最终显著地提高了

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51701020, 51971174, 52071267); 中央高校基本科研业务费(300102311401)

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-03-30

通信作者: 艾 诚, 副教授, 博士; 电话: 029-82337345; E-mail: aicheng@chd.edu.cn

合金的高温蠕变性能。同时值得注意的是, 单晶高温合金是一种典型的多元合金, 其  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为与合金元素的交互作用密切相关<sup>[24]</sup>, 如 Re 元素提高了 W 和 Mo 元素在  $\gamma$  相中的分配倾向<sup>[7, 14, 18]</sup>, Mo 元素提高了 Re 和 W 元素在  $\gamma$  相中的分配倾向<sup>[16-17, 25]</sup>, Ta 元素提高了 W 在  $\gamma$  相中的分配倾向<sup>[26-28]</sup>等。

目前, 本领域研究热点与关键问题之一在于通过合理的成分设计, 实现对合金元素  $\gamma/\gamma'$  分配行为与  $\gamma/\gamma'$  错配度的调控, 最终设计出蠕变性能更优异、成本更低的单晶高温合金。RETTIG 等<sup>[29]</sup>的研究结果表明, Ti 元素的添加显著地增大了 W 和 Mo 元素在  $\gamma$  相中的分配倾向, 有效地降低了  $\gamma/\gamma'$  错配度, 基于上述思想设计了无 Re 低成本二代单晶高温合金 ERBO/15, 该合金具有优异的高温蠕变性能。

综上所述, 在明确单晶高温合金中合金元素自身  $\gamma/\gamma'$  分配行为的基础上, 阐明合金元素的交互作用对  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响规律, 可进一步揭示合金元素在单晶高温合金中的作用机制。因此, 本文在已有的研究基础上, 综述了镍基单晶高温合金的  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为, 并归纳了合金元素的交互作用对  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响规律, 为单晶高温合金的成分设计提供一定的参考。

## 1 合金元素自身的 $\gamma/\gamma'$ 分配行为

图1所示为一种多元镍基单晶高温合金中合金元素在  $\gamma$  相和  $\gamma'$  相中的分布情况<sup>[8]</sup>。由图1可知,

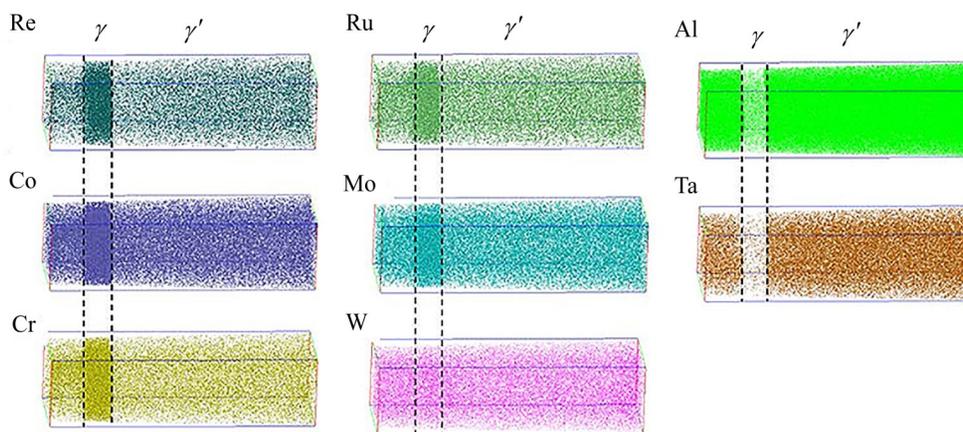


图1 合金元素在一种多元镍基单晶高温合金中  $\gamma$  相和  $\gamma'$  相中的分布图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Partitioning behavior of alloying elements in  $\gamma$  and  $\gamma'$  phases of multi-component Ni-based single crystal superalloy<sup>[8]</sup>

Re、Ru、Co、Mo 和 Cr 元素主要分布在  $\gamma$  相中, Al 和 Ta 元素主要分布于  $\gamma'$  相中, 而 W 元素在  $\gamma$  和  $\gamma'$  相中的浓度差较小。

单晶高温合金中元素的  $\gamma/\gamma'$  分配行为可用分配比  $k$  来表征<sup>[18]</sup>:

$$k_i = \frac{c_i^\gamma}{c_i^{\gamma'}} \quad (1)$$

式中:  $c_i^\gamma$  是  $\gamma$  相中合金元素  $i$  的含量(摩尔分数, %);  $c_i^{\gamma'}$  是  $\gamma'$  相中合金元素  $i$  的含量(摩尔分数, %)。  $k_i > 1$  表示合金元素富集在  $\gamma$  相中,  $k_i < 1$  则表示合金元素富集在  $\gamma'$  相中<sup>[18]</sup>。图2所示为多元镍基单晶高温合金中合金元素  $\gamma/\gamma'$  分配行为的示意图。由图2可知, Re、Cr、Co、Mo、Ru 和 W 元素富集在  $\gamma$  相中, Ni、Al、Ta 和 Ti 元素富集在  $\gamma'$  相中富集。

## 2 合金元素的交互作用对 $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为的影响

### 2.1 Re+Cr+Mo 含量对 Re、Cr、Mo 和 W 元素分配比的影响

表1所示为镍基单晶高温合金的成分<sup>[7-8, 14-15, 26-27, 30-37]</sup>。已有的研究表明, 单晶高温合金的  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为与温度密切相关<sup>[38]</sup>。因此, 为排除温度对  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响, 本文中归纳的  $\gamma/\gamma'$  分配比均来源于热处理态单晶高温合金的数据。同时, 所列举的单晶高温合金均具有相近的热处理工艺, 即均为固溶、一次时效和二次时效处理, 且二次时效处理的温度均在 850~870 °C 范

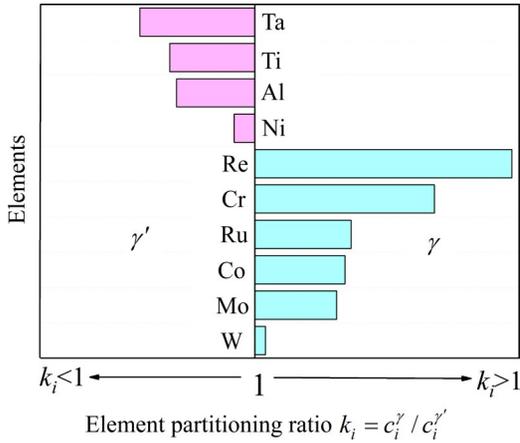


图2 多元镍基单晶高温合金中元素分配比的示意图  
 Fig. 2 Schematic diagram of partitioning behavior of elements in multi-component Ni-based single crystal superalloy

围内<sup>[7-8, 14-15, 26-27, 30-37]</sup>。

Re、Cr、Mo 和 W 元素为典型的  $\gamma$  相强化元

素<sup>[4, 9-11]</sup>，因此，理论上 Re、Cr、Mo 和 W 元素的  $\gamma/\gamma'$  分配行为与单晶高温合金中 Re、Cr、Mo 和 W 元素的含量密切相关。但值得注意的是，与其他  $\gamma$  相富集元素相比，W 元素在  $\gamma$  相中的分配倾向最低(见图1和图2)，因此，理论上 W 元素对其他  $\gamma$  相富集元素  $\gamma/\gamma'$  分配行为的影响较小。

综上所述，本节归纳了单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 含量对 Re、Cr、Mo 和 W 元素分配比的影响<sup>[7-8, 14, 32, 36-37]</sup>，即如图3所示，Re、Cr 和 Mo 元素的分配比随着单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 含量的提高呈增大趋势，而 W 元素的分配比与单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 的含量基本无关。

单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 含量增大了 Re、Cr 和 Mo 元素分配比的原因，除 Re<sup>[7, 14, 18]</sup>、Cr<sup>[7, 14]</sup> 和 Mo<sup>[7, 16]</sup> 含量的提高将增大自身的分配比以外，其他原因分析如下：

表2所示为合金元素的电子构型和原子半

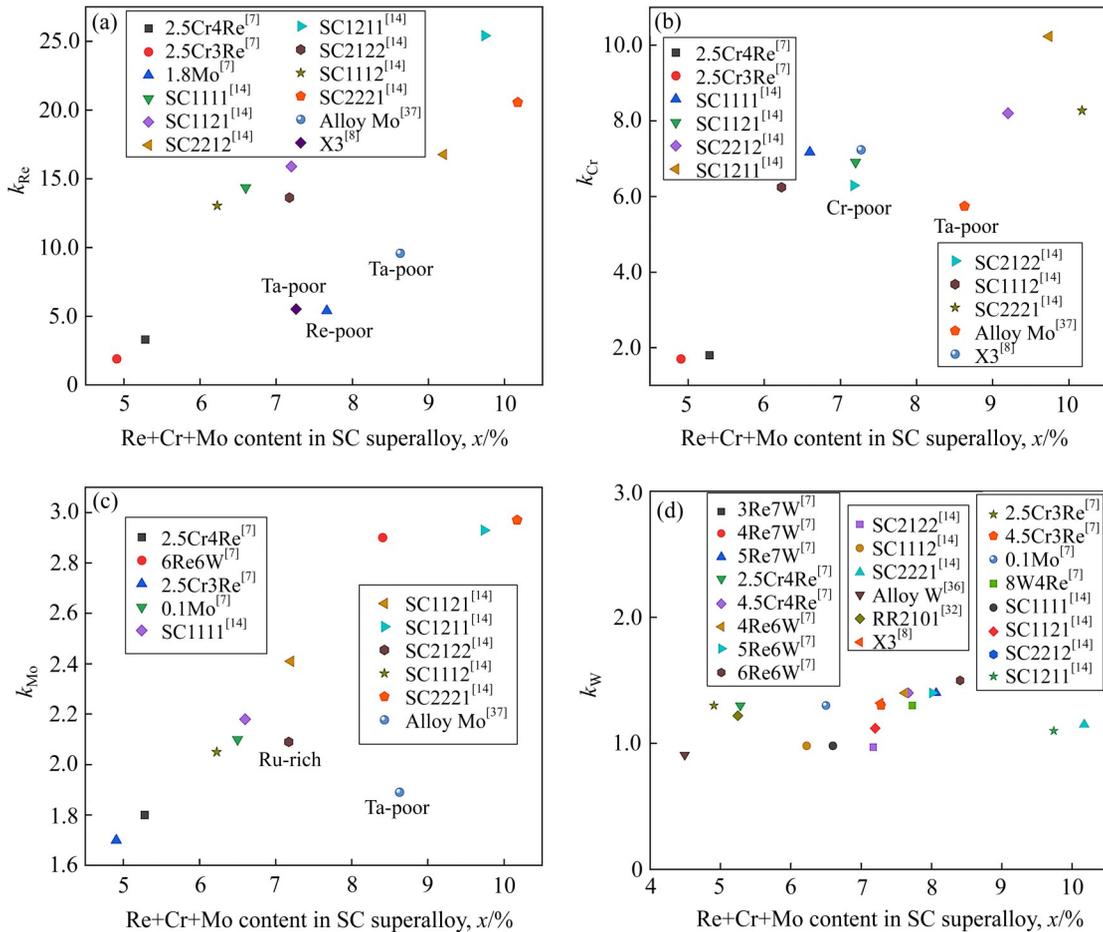


图3 单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 含量对 Re、Cr、Mo 和 W 元素分配比的影响<sup>[7-8, 14, 32, 36-37]</sup>

Fig. 3 Effects of Re+Cr+Mo contents in single crystal (SC) superalloy on partitioning ratios of Re, Cr, Mo and W elements<sup>[7-8, 14, 32, 36-37]</sup>

表 1 镍基单晶高温合金的成分<sup>[7-8, 14-15, 26-27, 30-37]</sup>Table 1 Composition of Ni-based single crystal superalloy<sup>[7-8, 14-15, 26-27, 30-37]</sup>

Alloy	Mass fraction/%										Ref.
	Al	Co	Cr	Mo	W	Re	Ta	Ru	Ti	Ni	
SC1111	6.0	7.1	3.6	1.0	5.4	4.4	7.9	2.6	-	Bal.	[14]
SC1211	6.0	6.9	6.5	1.0	5.4	4.0	7.9	2.6	-	Bal.	[14]
SC1121	6.0	6.9	3.5	2.4	5.5	4.1	8.0	2.7	-	Bal.	[14]
SC1112	6.0	6.9	3.5	1.0	5.4	4.0	8.0	4.0	-	Bal.	[14]
SC2221	6.0	14.4	6.2	2.2	5.3	3.9	8.0	2.6	-	Bal.	[14]
SC2212	6.0	14.4	6.1	1.0	5.3	3.9	7.9	3.7	-	Bal.	[14]
SC2122	6.1	14.5	3.5	2.4	5.4	4.0	8.0	3.9	-	Bal.	[14]
4Re6W	5.7	8.5	4.5	1.4	6.0	4.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
5Re6W	5.7	8.5	4.5	1.4	6.0	5.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
6Re6W	5.7	8.5	4.5	1.4	6.0	6.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
2.5Cr3Re	5.7	8.5	2.5	1.4	7.0	3.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
4.5Cr3Re	5.7	8.5	4.5	1.4	7.0	3.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
0.1Mo	5.7	8.5	4.5	0.1	9.0	3.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
1.8Mo	5.7	8.5	4.5	1.8	9.0	3.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
8W4Re	5.7	8.5	4.5	1.4	8.0	4.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
3Re7W	5.7	8.5	4.5	1.4	7.0	3.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
4Re7W	5.7	8.5	4.5	1.4	7.0	4.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
5Re7W	5.7	8.5	4.5	1.4	7.0	5.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
2.5Cr4Re	5.7	8.5	2.5	1.4	7.0	4.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
4.5Cr4Re	5.7	8.5	4.5	1.4	7.0	4.0	8.0	-	-	Bal.	[7]
Alloy A	6.2	8.0	7.0	2.0	5.0	3.0	7.0	-	-	Bal.	[15]
Alloy B	6.2	8.0	7.0	2.0	5.0	3.0	7.0	-	0.5	Bal.	[15]
Alloy C	6.2	8.0	7.0	2.0	5.0	3.0	7.0	-	1.0	Bal.	[15]
0Ru alloy	6.0	12.0	5.0	1.0	6.0	5.0	8.0	-	-	Bal.	[30]
1.5Ru alloy	6.0	12.0	5.0	1.0	6.0	5.0	8.0	1.5	-	Bal.	[30]
3Ru alloy	6.0	12.0	5.0	1.0	6.0	5.0	8.0	3.0	-	Bal.	[30]
DD3	5.8	5.0	9.5	4.2	5.5	-	-	-	2.3	Bal.	[31]
RR2100	6.0	12.0	2.5	-	9.0	6.4	5.5	-	-	Bal.	[32]
RR2101	6.0	12.0	2.5	-	9.0	6.4	5.5	2.0	-	Bal.	[32]
ERBO/1	5.6	9.6	6.4	0.6	6.5	2.9	6.5	-	1.0	Bal.	[33]
ERBO/15	5.2	3.1	6.8	4.2	7.9	-	-	-	3.3	Bal.	[33]
ERBO/17	5.4	9.4	4.2	-	11.8	-	7.2	-	-	Bal.	[26]
ERBO/18	5.7	10.0	4.4	-	12.4	-	-	-	2.0	Bal.	[26]
ERBO/19	4.3	9.4	4.1	-	11.7	-	7.2	-	1.9	Bal.	[26]
X3	5.8	5.8	3.0	3.0	6.0	5.0	5.6	3.0	-	Bal.	[8]
CMSX-4	5.2	11.0	5.7	0.4	5.2	3.0	5.6	-	0.7	Bal.	[34]
PWA1484	5.6	10.0	5.0	2.0	6.0	3.0	8.7	-	-	Bal.	[35]
ME-15	7.1	7.5	7.0	1.5	2.4	1.5	6.2	-	-	Bal.	[27]
Alloy W	6.5	10.0	3.0	-	9.0	3.0	5.0	-	-	Bal.	[36]
Alloy Mo	6.5	10.0	3.0	7.0	/	3.0	5.0	-	-	Bal.	[37]
M8	7.6	-	-	-	-	-	5.6	-	-	Bal	[8]

径<sup>[39-40]</sup>。由表2可知, Re、Cr、Mo和W原子的次外层和最外层电子构型分别为 $5d^56s^2$ 、 $3d^54s^1$ 、 $4d^55s^1$ 、 $5d^46s^2$ 。原子的d电子层最多可容纳10个电子,且Re、Cr、Mo和W原子的d电子层(次外层电子)均未填满。因此,理论上Cr-Re、Mo-Re和Cr-Mo原子之间均存在较强的结合力,该推论可通过Cr-Re和Mo-Re二元相图得到证实<sup>[41]</sup>: Cr-Re和Mo-Re二元体系中均存在 $\sigma$ 相(一种拓扑密排相)。众所周知,拓扑密排相(TCP相)由金属键和共价键组成<sup>[42]</sup>,且共价键的结合力高于金属键,进一步证实了Cr-Re和Mo-Re原子之间具有较强的交互作用。综上所述,由于Cr-Re、Mo-Re和Cr-Mo原子之间存在较强的结合力,因此,单晶高温合金中Re+Cr+Mo含量的提高将增大 $\gamma$ 相中Re、Cr和Mo元素的含量,进而增大了Re、Cr和Mo元素的分配比。

大量研究表明,随着Re、Cr和Mo元素含量的增大, $\gamma$ 相的固溶强化程度与晶格常数随之增大,进而增大了 $\gamma/\gamma'$ 错配度的绝对值,并有利于合金高温蠕变性能的提高<sup>[22-23,43]</sup>。然而,过高的 $\gamma$ 相过饱和度和度将导致单晶高温合金在长时服役过程中析出硬脆的TCP相,并削弱了Re、Cr和Mo等元素对 $\gamma$ 相的固溶强化效果,进而显著地劣化了合金的服役性能<sup>[18,44]</sup>。已有的研究表明,Re、Cr和Mo元素均为强烈的TCP相形成元素<sup>[16,45-47]</sup>。综上所述,其原因是Re、Cr和Mo元素自身倾向于形成TCP相的同时,Re、Cr和Mo元素的添加将增大 $\gamma$ 相中Re、Cr和Mo元素的过饱和度(见图3(a)~(c)),从而进一步增大了TCP相的形成倾向。

值得注意的是,如图3(a)~3(c)所示,Re、Cr和Mo元素的分配比除受到Re+Cr+Mo含量的影响

表2 合金元素的电子构型和原子半径<sup>[39-40]</sup>

Table 2 Electron configurations and atomic radius of alloying elements<sup>[39-40]</sup>

Element	Electron configuration	Atomic radius/nm
Re	$5d^56s^2$	0.1373 <sup>[39]</sup>
Cr	$3d^54s^1$	0.1249 <sup>[40]</sup>
Mo	$4d^55s^1$	0.1402 <sup>[39]</sup>
W	$5d^46s^2$	0.1412 <sup>[39]</sup>
Ta	$5d^36s^2$	0.1430 <sup>[40]</sup>
Ti	$3d^24s^2$	0.1462 <sup>[40]</sup>
Al	$3s^23p^1$	0.1432 <sup>[40]</sup>

以外,还受到其他合金元素的影响:如图3(a)所示,X3与SC2122合金具有相近的Re+Cr+Mo含量,但两种合金Re元素的分配比差距较大(见表1),其可能的原因是两种合金Ta含量的差距较大,分别为5.6%(X3合金)和8%(SC2122合金)。这表明除Re、Cr和Mo元素以外,Ta含量同样显著地影响Re元素的分配比(见2.2节)。类似的现象也存在于Cr和Mo元素的分配比中(见图3(b)和(c)),合金Mo具有较高的Re+Cr+Mo含量,但Cr和Mo元素的分配比较低,其原因与该合金具有较低的Ta含量(5%)密切相关,表明Ta含量同样影响了Cr和Mo元素的分配比(见2.2节)。此外,如图3(c)所示,SC2122合金中Re+Cr+Mo含量居中,但Mo元素的分配比较低,其原因为SC2122合金中较高的Ru含量(3.9%)降低了Mo元素的分配比,即Ru元素产生的“逆分配”作用(见2.3节)。

如图3(d)所示,单晶高温合金中Re+Cr+Mo含量对W元素的分配比基本无影响。其可能的原因如下:W在单晶高温合金中的分配比低,即W元素在 $\gamma'$ 相中的分配倾向远高于Re、Cr和Mo元素(见图1和图2),因此理论上W元素的 $\gamma/\gamma'$ 分配行为与 $\gamma'$ 相富集元素如Ta和Ti元素的含量密切相关(见2.2节)。

## 2.2 Ta+Ti含量对Re、Cr、Mo和W元素分配比的影响

图4所示为单晶高温合金中Ta+Ti含量对Re、Cr、Mo和W元素分配比的影响<sup>[8,14-15,26,31,33,36-37]</sup>,由图4可知,Re、Cr、Mo和W元素的分配比随着单晶高温合金中Ta+Ti含量的提高呈增大趋势。其原因为:1) Ta和Ti元素均为典型的 $\gamma'$ 相形成元素<sup>[7,14-15,26-27]</sup>;2) 第一性原理的计算结果表明,Re、Cr、Mo、W、Ti和Ta元素均占据了 $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al相中的Al位<sup>[48-50]</sup>;3) 如表2所示,各元素的原子半径排序为 $R_{Ti} > R_{Ta} > R_{Al} > R_W > R_{Mo} > R_{Re} > R_{Cr}$ ,即Ta和Ti原子均具有较大的原子半径(分别为0.1430 nm、0.1462 nm),且与Al原子的半径接近(0.1432 nm)<sup>[40]</sup>,因此,Ta和Ti元素占据 $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al相中Al位的倾向高于其他合金元素<sup>[51]</sup>;4) Ta和Ti元素在 $\gamma'$ 相中具有较高的固溶度<sup>[52-53]</sup>。

综上所述,较高的Ta、Ti含量降低了 $\gamma'$ 相中

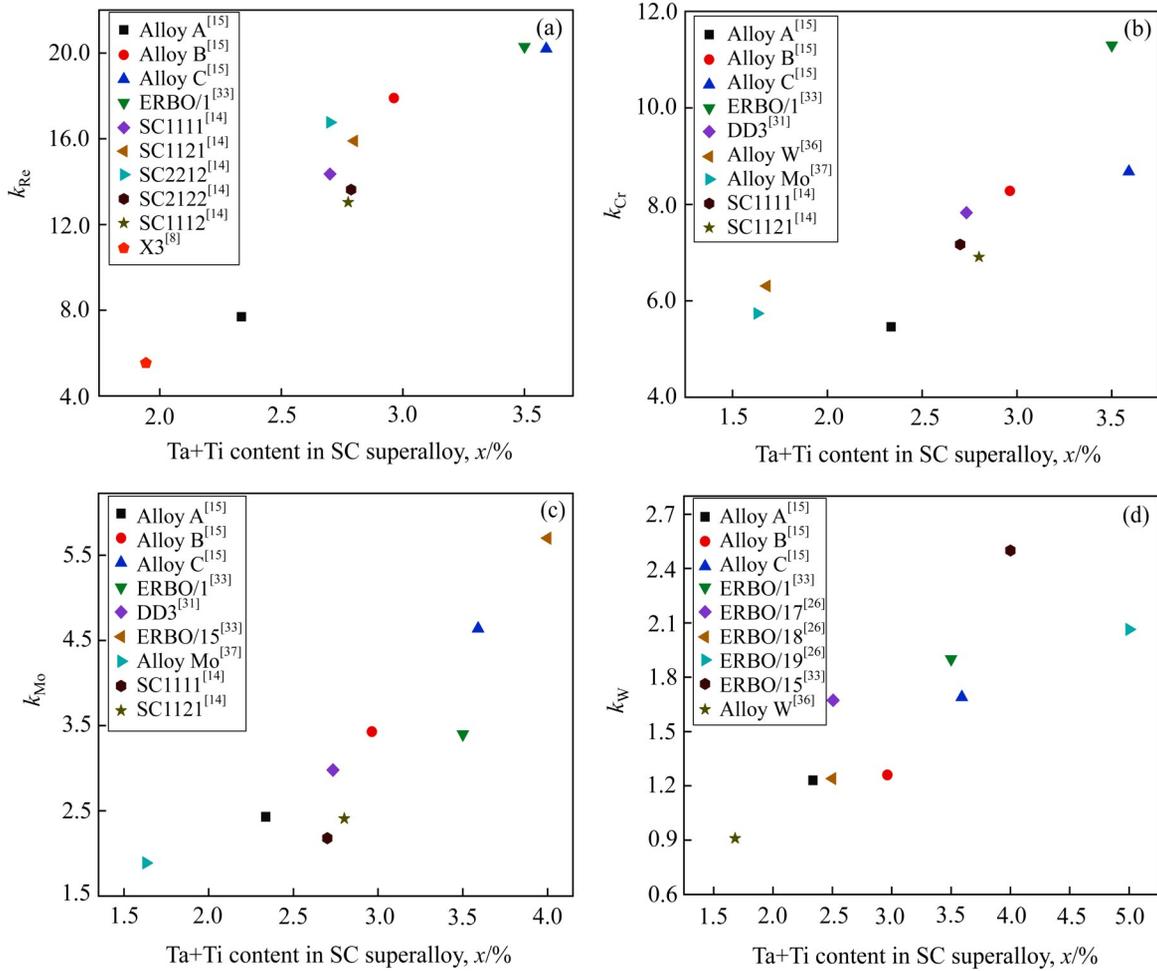


图 4 单晶高温合金中 Ta+Ti 含量对 Re、Cr、Mo 和 W 元素分配比的影响<sup>[8, 14-15, 26, 31, 33, 36-37]</sup>

Fig. 4 Effect of Ta+Ti contents in SC superalloy on partitioning ratios of Re, Cr, Mo and W elements<sup>[8, 14-15, 26, 31, 33, 36-37]</sup>

Re、Cr、Mo 和 W 元素的固溶度和含量，进而增大了 Re、Cr、Mo 和 W 元素的分配比。同时，如图 3 (d)和 4(d)所示，与 Re、Cr 和 Mo 元素相比，Ta 和 Ti 元素对 W 元素  $\gamma/\gamma'$  分配行为的影响更显著，即 Ta 和 Ti 的合金化可有效地调控单晶高温合金中 W 元素的  $\gamma/\gamma'$  分配比。

值得注意的是，典型的  $\gamma/\gamma'$  双相单晶高温合金均具有相近的  $\gamma'$  相体积分数(约为 70%)<sup>[4]</sup>，根据质量守恒定律可知，单晶高温合金中  $\gamma'$  相的 Re、Cr、Mo 和 W 含量与  $\gamma$  相的 Re、Cr、Mo 和 W 含量呈反相关。因此，Ta 和 Ti 的添加在固溶强化  $\gamma'$  相的同时，增大了  $\gamma$  相中 Re、Cr、Mo 和 W 元素的含量与  $\gamma$  相的固溶强化程度。PRÖBSTLE 等<sup>[23]</sup>针对 ERBO 系单晶高温合金的研究表明，Ti 的添加增大了 W 和 Mo 元素的分配比，进而增大了  $\gamma$  相的固溶强化程度，最终提高了合金的高温蠕变性能。

### 2.3 Ru 元素对合金元素分配比的影响

图 5(a)所示为 Ru 含量对 0Ru 合金、1.5Ru 合金和 3Ru 合金中 Re、Mo 和 W 元素分配比的影响<sup>[30]</sup>。由图 5(a)可知，Ru 的添加降低了 Re、Mo 和 W 元素的分配比，即在上述合金体系中存在 Ru 元素产生的合金元素“逆分配”的现象<sup>[54]</sup>。KEARSEY 等<sup>[55]</sup>和骆宇时等<sup>[56]</sup>的研究也表明，Ru 元素的添加降低了 Re 元素的分配比，岳晓岱等<sup>[47]</sup>研究的 D1 和 D2 合金中以及 WALSTON 等<sup>[57]</sup>研发的四代单晶高温合金中同样存在类似的现象。WANG 等<sup>[58]</sup>的第一性原理计算结果表明，Ru 的添加降低了 Re、Co 和 Cr 元素的分配比，并认为 Ru-Re-Ni 通过 d-d 轨道杂化形成了较强的交互作用，因此 Ru 的添加降低了 Re、Co 和 Cr 元素在  $\gamma$  相中的分配倾向。SHU 等<sup>[59]</sup>和梁爽等<sup>[60]</sup>的研究结果表明，Ru 的添加降低了 W 和 Mo 元素的分配比，其可能的原因为 Ru-W 和 Ru-Mo 原

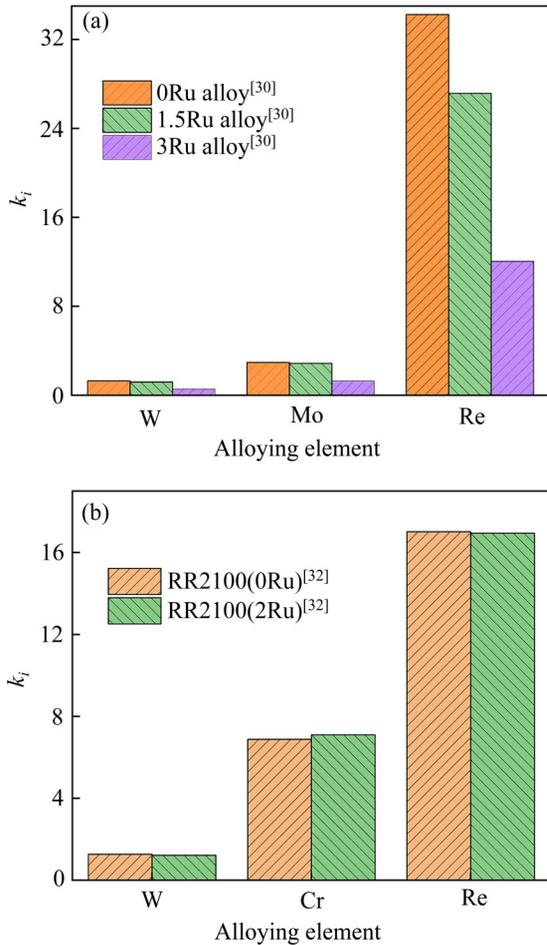


图5 Ru含量对0Ru合金、1.5Ru合金和3Ru合金中Re、Mo和W元素分配比的影响<sup>[30]</sup>以及Ru含量对RR2100和RR2101合金中W、Cr和Re元素分配比的影响<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Effect of Ru content on partition ratios of Re, Mo and W elements in 0Ru alloy, 1.5Ru alloy and 3Ru alloy(a)<sup>[30]</sup> and partition ratios of W, Cr and Re elements in RR2100 and RR2101 alloys(b)<sup>[32]</sup>

子之间的结合能大于Ni-W和Ni-Mo原子之间的结合能，所以Ru原子溶入 $\gamma'$ 相时将携带部分W和Mo原子，进而增大了 $\gamma'$ 相中W和Mo元素的含量。

图5(b)所示为Ru含量对RR2100和RR2101合金中W、Cr和Re元素分配比的影响<sup>[32]</sup>。由图5(b)可知，Ru元素对W、Cr和Re元素的分配行为基本无影响。与之类似，陈晶阳等<sup>[61]</sup>针对USTB-F7和USTB-F8合金的研究结果表明，Ru的添加增大了Re元素的分配比，且Ru的添加对其他合金元素的分配比影响较小。同时，Ru的添加对SRR300D+3Ru<sup>[62]</sup>、合金D<sup>[63]</sup>和合金Astra1-21<sup>[64]</sup>中 $\gamma/\gamma'$ 元素分配

行为的影响均较小。

综上所述，Ru对单晶高温合金中 $\gamma/\gamma'$ 元素分配行为的影响具有复杂性，即Ru元素的“逆分配”效应并非普遍现象。

#### 2.4 Ta-Al质量比对Ta元素分配比的影响

一方面，Ta元素富集于 $\gamma'$ 相中<sup>[7, 10, 14-18]</sup>，且Ta元素可显著地固溶强化 $\gamma'$ 相<sup>[7-8]</sup>。另一方面， $\gamma'$ 相的固溶强化程度同样与单晶高温合金的蠕变性能密切相关<sup>[65]</sup>，因此，有必要重点关注Ta元素的 $\gamma/\gamma'$ 分配行为。同时，第一性原理的计算结果表明，Ta元素占据 $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al中的Al位<sup>[48-50]</sup>，因此理论上单晶高温合金的Ta-Al质量比值将显著地影响Ta元素的 $\gamma/\gamma'$ 分配行为。

图6所示为单晶高温合金中Ta-Al质量比对Ta元素分配比的影响<sup>[8, 15, 27, 30, 32, 34-37]</sup>。由图6可看出，Ta元素的分配比随着Ta-Al质量比的提高而显著降低，其原因为：Ta元素在 $\gamma'$ 相中具有较高的固溶度<sup>[52-53]</sup>，且Ta和Al元素均占据 $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al相中的Al位<sup>[48-50]</sup>，因此，单晶高温合金中较高的Ta-Al质量比(即较高的Ta含量和/或较低的Al含量)将增大 $\gamma'$ 相中的Ta含量，进而降低了Ta元素的分配比<sup>[42]</sup>。

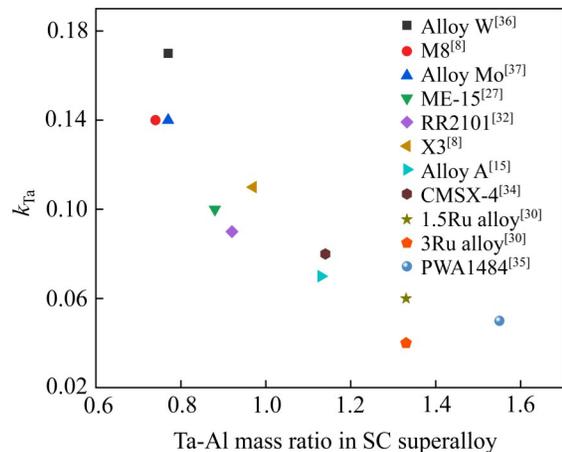


图6 单晶高温合金中Ta-Al质量比对Ta元素分配比的影响<sup>[8, 15, 27, 30, 32, 34-37]</sup>

Fig. 6 Effect of Ta-Al mass ratio in SC superalloy on partitioning ratio of Ta element<sup>[8, 15, 27, 30, 32, 34-37]</sup>

### 3 结论与展望

1) 单晶高温合金中Re、Cr、Co、Mo、Ru和W元素主要分布在 $\gamma$ 相中，Al、Ta和Ti元素主要分

布于  $\gamma'$  相中。

2) Re、Cr 和 Mo 元素的分配比随着单晶高温合金中 Re+Cr+Mo 含量的增大呈增大趋势, 其原因为 Re、Cr 和 Mo 元素的增大在提高自身分配比的同时, Re、Cr 和 Mo 原子的 d 电子层(次外电子层)均未填满, 使得 Cr-Re、Mo-Re 和 Cr-Mo 原子之间存在较强的结合力。

3) Re、Cr、Mo 和 W 元素的分配比随着单晶高温合金中 Ta+Ti 含量的提高而增大, 其原因为 Re、Cr、Mo、W、Ta 和 Ti 原子均占据  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 中的 Al 位, 且 Ta 和 Ti 元素具有更大的原子半径并在  $\gamma'$  相中具有更高的固溶度, 因此, Ta 和 Ti 的添加降低了 Re、Cr、Mo 和 W 元素在  $\gamma'$  相中的含量。

4) Ru 的添加降低了部分单晶高温合金中合金元素的分配比, 即存在“逆分配”效应, 但“逆分配”效应不具有普遍性, 即 Ru 元素对部分单晶高温合金体系中元素分配比的影响较小。

5) Ta 元素的分配比随着单晶高温合金中 Ta-Al 质量比的提高而显著降低, 其原因为 Ta 和 Al 元素均占据  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相中的 Al 位, 因此单晶高温合金的 Ta-Al 质量比与  $\gamma'$  相的 Ta 含量呈正相关。

镍基单晶高温合金是典型的多元双相合金, 因此明确合金元素的交互作用对  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响规律, 有望进一步揭示合金元素在单晶高温合金中的作用机制。本文归纳总结的规律表明, 合金元素的交互作用将显著地影响  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为, 但仍存在以下问题有待进一步研究。

1) 以合金元素的交互作用对  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响规律为研究基础, 进一步优化合金成分, 充分挖掘单晶高温合金的性能潜力, 从而推动组织稳定性良好、高温蠕变性能优异的新型镍基单晶高温合金的研发工作。

2) 结合实验研究与理论计算, 明确 Ru 元素的添加对镍基单晶高温合金中  $\gamma/\gamma'$  元素分配行为的影响机制, 探明 Ru 元素是否存在“逆分配”效应的关键影响因素, 为含 Ru 镍基单晶高温合金的成分设计提供理论依据。

## REFERENCES

[1] 赵运兴, 王 薪, 刘 军, 等. 新型镍基单晶高温合金的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(10):

2695-2706.

ZHAO Yun-xing, WANG Xin, LIU Jun, et al. Microstructure and mechanical properties of new nickel-based single crystal superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(10): 2695-2706.

[2] 金 涛, 周亦胄, 王新广, 等. 先进镍基单晶高温合金组织稳定性及力学行为的研究进展[J]. 金属学报, 2015, 51(10): 1153-1162.

JIN Tao, ZHOU Yi-zhou, WANG Xin-guang, et al. Research progress on microstructure stability and mechanical behavior of advanced Ni-based single crystal superalloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(10): 1153-1162.

[3] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of propulsion and power, 2006, 22(2): 361-374.

[4] REED R. The superalloys: Fundamentals and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

[5] CHEN J Y, FENG Q, SUN Z Q. Topologically close-packed phase promotion in a Ru-containing single crystal superalloy[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(8): 795-798.

[6] 徐仰涛, 娄德超, 夏荣里. 合金元素对 Co-8.8Al-9.8W 合金显微组织及  $\gamma'$  相转变温度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2518-2526.

XU Yang-tao, LOU De-chao, XIA Rong-li. Effect of alloy element on microstructure and  $\gamma'$  phase transition temperature of Co-8.8Al-9.8W alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(12): 2518-2526.

[7] 王 博. 第三代镍基单晶高温合金成分设计及组织稳定性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.

WANG Bo. Alloy design and microstructure stability of third generation Ni-based single crystal superalloys[D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2018.

[8] 刘少华. 镍基单晶高温合金多元素协同效应与合金成分优化[D]. 北京: 清华大学, 2017.

LIU Shao-hua. Synergistic effect of elements and optimization of composition for Ni-based superalloys[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

[9] HECKL A, NEUMEIER S, GÖKEN M, et al. The effect of Re and Ru on  $\gamma/\gamma'$  microstructure,  $\gamma$ -solid solution strengthening and creep strength in nickel-base superalloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(9): 3435-3444.

[10] YOKOKAWA T, OSAWA M, NISHIDA K, et al. Partitioning behavior of platinum group metals on the  $\gamma$  and  $\gamma'$  phases of Ni-base superalloys at high temperatures[J]. Scripta

- Materialia, 2003, 49(10): 1041–1046.
- [11] FLEISCHMANN E, MILLER M K, AFFELDT E, et al. Quantitative experimental determination of the solid solution hardening potential of rhenium, tungsten and molybdenum in single-crystal nickel-based superalloys[J]. Acta Materialia, 2015, 87: 350–356.
- [12] XIAO GUANG W, JIARONG L, SHIZHONG L, et al. Microstructural evolution of an experimental third generation single crystal superalloy after long-term thermal exposure at 1100 °C [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(3): 646–650.
- [13] SIMS C T, STOLOFF N S, HAGEL W C. Super alloys II[M]. New York: Wiley, 1987.
- [14] 石倩颖. 多组元作用对第四代镍基单晶高温合金组织和高温低应力蠕变行为的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- SHI Qian-ying. Effect of multicomponent on microstructure and high temperature and low stress creep behavior of the fourth generation nickel-based single crystal superalloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [15] LIU L R, ZU G Q, JIN T. Effect of titanium on the partition behavior of alloying elements in single crystal superalloys containing rhenium[J]. Advanced Materials Research, 2013, 634/638: 1724–1728.
- [16] LIU X G, WANG L, LOU L H, et al. Effect of Mo addition on microstructural characteristics in a Re-containing single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(2): 143–147.
- [17] SHU D, TIAN S, LIU L, et al. Elements distribution and deformation features of a 4.5% Re nickel-based single crystal superalloy during creep at high temperature[J]. Materials Characterization, 2018, 141: 433–441.
- [18] 黄太文, 卢晶, 许瑶, 等. Re和Ta对抗热腐蚀单晶高温合金900 °C长期时效组织稳定性的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(11): 1427–1436.
- HUANG Tai-wen, LU Jing, XU Yao, et al. Effects of rhenium and tantalum on microstructural stability of hot-corrosion resistant single crystal superalloys aged at 900 °C [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(11): 1427–1436.
- [19] RAWLINGS R D, STATON-BEVAN A E. The alloying behaviour and mechanical properties of polycrystalline Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma'$  phase) with ternary additions[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(3): 505–514.
- [20] MUGHRABI H, TETZLAFF U. Microstructure and high-temperature strength of monocrystalline nickel-based superalloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2000, 2(6): 319–326.
- [21] ZHANG J X, MURAKUMO T, HARADA H, et al. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(3): 287–293.
- [22] KOIZUMI Y, KOBAYASHI T, YOKOKAWA T, et al. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys[C]//Superalloys 2004. Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys. Warrendale, PA: TMS, 2004: 35–43.
- [23] PRÖBSTLE M, NEUMEIER S, FELDNER P, et al. Improved creep strength of nickel-based superalloys by optimized  $\gamma/\gamma'$  partitioning behavior of solid solution strengthening elements[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 676: 411–420.
- [24] PYCZAK F, DEVRIENT B, MUGHRABI H. The effects of different alloying elements on the thermal expansion coefficients, lattice constants and misfit of nickel-based superalloys investigated by X-ray diffraction[C]//Superalloys 2004. Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys. Warrendale, PA: TMS, 2004: 827–836.
- [25] 杨林, 程印, 王新广, 等. Mo对含Ru单晶高温合金显微组织和蠕变性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(3): 284–289.
- YANG Lin, CHENG Yin, WANG Xin-guang, et al. Effect of Mo addition on microstructure and creep properties of Ru-containing single crystal superalloys[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(3): 284–289.
- [26] RITTER N C, SCHESLER E, MÜLLER A, et al. On the influence of Ta and Ti on heat-treatability and  $\gamma/\gamma'$ -partitioning of high W containing Re-free nickel-based superalloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(8): 1700150.
- [27] AMOYAL Y, MAO Z, SEIDMAN D N. Effects of tantalum on the partitioning of tungsten between the  $\gamma$ - and  $\gamma'$ -phases in nickel-based superalloys: Linking experimental and computational approaches[J]. Acta Materialia, 2010, 58(18): 5898–5911.
- [28] ZHANG J C, HUANG T W, CAO K L, et al. A correlative multidimensional study of  $\gamma'$  precipitates with Ta addition in Re-containing Ni-based single crystal superalloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 75(16): 68–77.
- [29] RETTIG R, MATUSZEWSKI K, MÜLLER A, et al. Development of a low-density rhenium-free single crystal nickel-based superalloy by application of numerical multi-

- criteria optimization using thermodynamic calculations[C]// *Superalloys 2016*. Warrendale, PA: TMS, 2016, 21: 35–44.
- [30] 蒯 亮. Ru 对单晶高温合金微观组织和力学性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- MAO Liang. Effect of Ru on microstructures and mechanical properties of single crystal superalloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [31] 韩 梅, 骆宇时. 单晶高温合金 DD3 的相特征[J]. 航空材料学报, 2008, 28(4): 22–26.
- HAN Mei, LUO Yu-shi. Phase characteristics of single crystal superalloy DD3[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2008, 28(4): 22–26.
- [32] 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.
- [33] HORST O M, ADLER D, GIT P, et al. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure[J]. *Materials & design*, 2020, 195: 108976.
- [34] MOTTURA A. Analysis of atomic-scale phenomena and the rhenium effect in nickel based superalloys[D]. London: Imperial College London, 2010.
- [35] MILLER M K, LIN L S, CETEL A D, et al. Partitioning behavior of alloying elements in PWA 1484[R]. Tennessee: Oak Ridge National Lab, 1996.
- [36] AI C, LIU L, ZHANG J, et al. Influence of substituting Mo for W on solidification characteristics of Re-containing Ni based single crystal superalloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2018, 754: 85–92.
- [37] AI C, XI L, WANG B, et al. Investigation on solution heat treatment response and  $\gamma'$  solvus temperature of a Mo-rich second generation Ni based single crystal superalloy[J]. *Intermetallics*, 2020, 125: 106896.
- [38] HEMMERSMEIER U, FELLER-KNIEPMEIER M. Element distribution in the macro-and microstructure of nickel base superalloy CMSX-4[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 248(1/2): 87–97.
- [39] JANOTTI A, KRČMAR M, FU C L, et al. Solute diffusion in metals: Larger atoms can move faster[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(8): 085901.1–085901.4.
- [40] SENKOV O N, MIRACLE D B. Effect of the atomic size distribution on glass forming ability of amorphous metallic alloys[J]. *Materials Research Bulletin*, 2001, 36(12): 2183–2198.
- [41] MASSALSKI T B, OKAMOTO H, SUBRAMANIAN P R, et al. *Binary alloy phase diagrams second edition*[M]. Ohio: ASM International, 1990.
- [42] AI C, LI Q, ZHANG J, et al. Effect of substituting Mo for W on  $\gamma/\gamma'$  partitioning behaviors of alloying elements in heat-treated second generation Ni based single crystal superalloys: An atom probe tomography study[J]. *Intermetallics*, 2021, 134: 107198.
- [43] 徐静辉, 李龙飞, 刘心刚, 等. 热力耦合对一种第四代镍基单晶高温合金 1100 °C 蠕变组织演变的影响[J]. 金属学报, 2021, 57(2): 205–214.
- XU Jing-hui, LI Long-fei, LIU Xin-gang, et al. Thermal-stress coupling effect on microstructure evolution of a fourth-generation nickel-based single-crystal superalloy at 1100 °C[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(2): 205–214.
- [44] WANG X D, YANG Z, GAO Q, et al. Effect of long-term thermal exposure on microstructure and creep properties of DD5 single crystal superalloy[J]. *China Foundry*, 2021, 18(3): 185–191.
- [45] CHEN J Y, FENG Q, CAO L M, et al. Improvement of stress-rupture property by Cr addition in Ni-based single crystal superalloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(10): 3791–3798.
- [46] SHI Z X, LIU S Z, WANG X G, et al. Effects of Cr content on microstructure and mechanical properties of single crystal superalloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3): 776–782.
- [47] 岳晓岱, 李嘉荣, 刘世忠, 等. 钌和铼对先进单晶高温合金组织稳定性的协同影响[J]. 材料工程, 2021, 49(4): 63–70.
- YUE Xiao-dai, LI Jia-rong, LIU Shi-zhong, et al. Synergistic effect of ruthenium and rhenium on microstructure stability of advanced single crystal superalloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(4): 63–70.
- [48] HAO L, GUO J, LEI X, et al. Co-alloying effects on the site preference and the elastic properties of  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al from first-principles calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(18): 185105.
- [49] CHAO J, GLEESON B. Site preference of transition metal elements in Ni<sub>3</sub>Al[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(5): 433–436.
- [50] OCHIALI S, OYA Y, SUZUKI T. Alloying behaviour of Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Ga, Ni<sub>3</sub>Si and Ni<sub>3</sub>Ge[J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(2): 289–298.
- [51] ERIŞ, RASIM, AKDENİZ M V, et al. Atomic size effect of alloying elements on the formation, evolution and

- strengthening of  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al precipitates in Ni-based superalloys [J]. *Intermetallics*, 2019, 109: 37–47.
- [52] MISHIMA Y, OCHIAI S, YODOGAWA M, et al. Mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al with ternary addition of transition metal elements[J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1986, 27(1): 41–50.
- [53] MISHIMA Y, OCHIAI S, HAMA O N, et al. Solid solution hardening of Ni<sub>3</sub>Al with ternary additions[J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 2007, 27(9): 648–655.
- [54] O'HARA K S, WALSTON W S, ROSS E W, et al. Nickel base superalloy and article: US Pat, 5482789-A[P]. 1996–01–09.
- [55] KEARSEY R M, BEDDOES J C, JAANSALU K M, et al. The effects of Re, W and Ru on microsegregation behaviour in singlecrystal superalloy systems[C]//*Superalloys 2004. Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys*. Warrendale, PA: TMS, 2004: 801–810.
- [56] 骆宇时, 赵云松, 杨 帅, 等. Ru对一种高Re单晶高温合金 $\gamma/\gamma'$ 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, 45(7): 1719–1725.
- LUO Yu-shi, ZHAO Yun-song, YANG Shuai, et al. Effect of Ru on partitioning of elements in  $\gamma/\gamma'$  phase and high temperature creep properties of a high Re single crystal superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1719–1725.
- [57] WALSTON S, CETEL A, MACKAY R, et al. Joint development of a fourth generation single crystal superalloy[C]//*Superalloys 2004. Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys*. Warrendale, PA: TMS, 2004: 15–24.
- [58] WANG Y J, WANG C Y. A first-principles survey of the partitioning behaviors of alloying elements on  $\gamma/\gamma'$  interface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(1): 013109.
- [59] SHU D L, TIAN G, TIAN N, et al. Influence of Re/Ru on concentration distribution in the  $\gamma/\gamma'$  phases of nickel-based single crystal superalloys[J]. *Materials & Design*, 2017, 132: 198–207.
- [60] 梁 爽, 赵凤芹, 刘智鑫. 高温条件下Ru对镍基单晶合金元素浓度分布及蠕变性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2116–2126.
- LIANG Shuang, ZHAO Feng-qin, LIU Zhi-xin. Effect of Ru on element concentration distribution and creep performance of nickel-based single crystal alloys under high temperature[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(9): 2116–2126.
- [61] 陈晶阳, 胡聘聘, 冯 强, 等. Ru对镍基单晶热暴露组织演变及持久性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(12): 2111–2116.
- CHEN Jing-yang, HU Pin-pin, FENG Qiang, et al. Effects of Ru on microstructural evolution during thermal exposure and stress-rupture property of Ni-based single crystal superalloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(12): 2111–2116.
- [62] HOBBS R A, ZHANG L, RAE C M F, et al. Mechanisms of topologically close-packed phase suppression in an experimental ruthenium-bearing single-crystal nickel-based superalloy at 1100 °C [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(5): 1014–1025.
- [63] CUI C Y, OSAWA M, SATO A, et al. Effects of Ru additions on the microstructure and phase stability of Ni-base superalloy, UDIMET 720LI[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(2): 355–360.
- [64] PENG Z, POVSTUGAR I, MATUSZEWSKI K, et al. Effects of Ru on elemental partitioning and precipitation of topologically close-packed phases in Ni-based superalloys[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 101: 44–47.
- [65] DILOGENT F, CARON P. On the creep behavior at 1033 K of new generation single-crystal superalloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 385(1/2): 245–257.

## Research progress on $\gamma/\gamma'$ partitioning behavior of alloying elements in nickel-based single crystal superalloys

AI Cheng<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>, GUO Min<sup>3</sup>, HUANG Tai-wen<sup>3</sup>, LIU Lin<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Saite Simai Titanium Industry Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** This paper summarized  $\gamma/\gamma'$  partitioning behaviors of alloying elements in Nickel-based single crystal superalloys. The existing research results indicated that Re, Cr, Co, Mo, Ru and W elements mainly distributed in  $\gamma$  phase, while Al, Ta and Ti elements mainly distributed in  $\gamma'$  phase. Meanwhile,  $\gamma/\gamma'$  partitioning behaviors of alloying elements was found to be affected by the interaction of alloying elements. For example, the partitioning ratios of Re, Cr and Mo elements increased with increasing the Re+Cr+Mo content and Ta+Ti content in single crystal superalloy, and the partition ratio of W element increased with increasing the Ta+Ti content in single crystal superalloy. Meanwhile, Ru addition resulted in "reverse distribution" of alloying elements in some alloys, but "reverse distribution" caused by Ru element was not a common phenomenon. Moreover, the partitioning ratio of Ta element significantly decreased with increasing the Ta-Al mass ratio in single crystal superalloy.

**Key words:** nickel-based single crystal superalloy; alloying element;  $\gamma/\gamma'$  element partitioning behavior; interaction

---

**Foundation item:** Projects(51701020, 51971174, 52071267) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(300102311401) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China

**Received date:** 2022-01-19; **Accepted date:** 2022-03-30

**Corresponding author:** AI Cheng; Tel: +86-29-82337345; E-Mail: aicheng@chd.edu.cn

(编辑 龙怀中)