



沉淀强化钴基单晶高温合金凝固行为的研究进展

艾 诚¹, 王国鑫¹, 郭 敏², 孙志平¹, 张凤英¹, 刘 林²

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064;

2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 沉淀强化钴基单晶高温合金具有成本低、初熔点高和抗热腐蚀性能优异等特征, 是制备在热腐蚀环境下长期服役的单晶涡轮叶片的重要候选材料。本文总结了沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固特征温度、显微偏析、凝固路径和枝晶组织等凝固行为, 并与典型镍基单晶高温合金的凝固行为进行了对比。Ta、Ti和Nb元素的添加显著地降低了固相线温度和液相线温度, 并扩大了结晶温度区间, 而Cr、V、Mo和Ni元素对凝固特征温度的影响较小。凝固时Al、Ta和Ti元素偏析于枝晶间区域, W元素偏析于枝晶干区域, Cr和Ni元素的显微偏析倾向较弱。同时, 含Ta/Ti的钴基单晶高温合金在凝固末期形成了多种枝晶间析出相, 导致合金具有较复杂的凝固路径。此外, 与镍基单晶高温合金类似, 定向凝固时冷却速率和合金成分特征均影响了钴基单晶高温合金的一次枝晶间距。

关键词: 钴基单晶高温合金; 沉淀强化; 凝固特征温度; 显微偏析; 凝固路径; 枝晶组织

文章编号: 1004-0609(2022)-03-0645-13

中图分类号: TG132.3

文献标志码: A

引文格式: 艾诚, 王国鑫, 郭敏, 等. 沉淀强化钴基单晶高温合金凝固行为的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 645–657. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42177

AI Cheng, WANG Guo-xin, GUO Min, et al. Research progress on solidification behaviors of γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 645–657. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42177

钴基高温合金具有低成本、高初熔点、优异的抗热腐蚀性能和焊接性能, 因此有望成为制备航空发动机和燃气轮机中的高温热端部件材料^[1-3]。传统钴基高温合金的强化方式主要是固溶强化和碳化物强化, 其承温性能远低于由 γ' -Ni₃(Al, Ta, Ti)沉淀强化的镍基高温合金^[4-6], 因此在20世纪50~70年代, 传统钴基高温合金在工业领域逐渐被镍基高温合金所代替。然而2006年SATO等^[7]报道在Co-Al-W基三元合金中存在从 γ 基体相中脱溶析出L₁₂结

构的 γ' -Co₃(Al, W)相, 且该沉淀强化相在900℃时仍可稳定地存在。有序沉淀相的存在可有效地提高钴基高温合金的高温力学性能, 同时由于消除了晶界, 单晶高温合金的承温能力得到了进一步的提高。近年来, 沉淀强化钴基单晶高温合金已成为高温结构材料领域的研究热点之一。

值得指出的是, 尽管目前Co-Al-W三元合金中存在大量的有序 γ' 相, 但仍然存在 γ' 相回溶温度低、高温强度不足、 γ/γ' 双相区狭窄和抗氧化性能较差

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0702902); 国家自然科学基金资助项目(51701020); 陕西省自然科学基金资助项目(2019JQ-309, 2020JM-239)

收稿日期: 2021-08-09; **修订日期:** 2021-09-17

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

等问题^[7-10]。合金化是一种提高钴基单晶高温合金高温蠕变性能和抗氧化性能等服役性能的有效方式。因此,钴基单晶高温合金近年来已由Co-Al-W三元合金逐渐向多元合金发展^[11-16],其中最为典型的是添加Ta和Ti的Co-Al-W-Ta-Ti基单晶高温合金及添加Ni、Cr元素的CoNi基单晶高温合金(Ni含量约为20%~35%,摩尔分数)。这是因为Ta和Ti是典型的 γ' 相形成元素,可有效地提高 γ' 相的热稳定性;Ni的添加在提高 γ' 相回溶温度的同时,显著地扩大了 γ/γ' 双相区,进而提升了钴基单晶高温合金的成分设计空间^[17-19];Cr的添加可有效地改善钴基单晶高温合金的抗氧化性能^[20]。

但值得注意的是,合金元素在提升钴基单晶高温合金服役性能的同时,可能显著地影响其凝固行为,例如Ta和Ti元素不仅显著地改变了凝固特征温度,还导致铸态组织中存在大量的枝晶间析出相。因此,本文在已有的研究基础上,综述了沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固行为(包括凝固特征温度、显微偏析、凝固路径和铸态枝晶组织等),为该合金的工程应用提供参考依据。

1 凝固特征温度

单晶高温合金凝固特征温度主要包括液相线温度 T_L 、固相线温度 T_S 及结晶温度区间 ΔT ($\Delta T=T_L-T_S$)。在沉淀强化钴基单晶高温合金的合金化进程中,大多数合金元素均不同程度地降低了其固相线温度和液相线温度;但是五元以下的Co-Al-W基单晶高温合金的固相线温度和液相线温度仍然比典型的镍基单晶高温合金高50~150℃,且纯钴的熔点较纯镍高约40℃,因此沉淀强化钴基单晶高温合金有望获得更高的初熔温度^[21-25]。随着合金化程度的提高,多元复杂Co-Al-W基单晶高温合金具有较大的结晶温度区间(例如Co-Al-W-1Ta-4Ti及CoNi基单晶高温合金^[21,26-27]);其原因是添加合金元素后,相比液相线温度,合金元素对固相线温度的降低作用更加显著。较大的固-液两相共存区(糊状区)将增大雀斑等铸态缺陷的形成倾向^[28-29],因此在不断提高合金化程度的同时,有必要关注沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固特征温度。

1.1 Co-X二元体系

结合MASSALSKI等^[30]所研究的Co-X二元合金相图,薛飞^[21]和BAUER等^[9]认为:合金化元素对沉淀强化钴基单晶高温合金凝固特征温度的影响与Co-X二元体系相关。图1所示为Co-X二元体系的液、固相线温度。由图1可见,Ta、Ti和Nb显著地降低了固相线温度和液相线温度,而Mo和V的影响较弱。同样Ta、Ti和Nb显著地扩大了结晶温度区间,而Mo和V的影响较弱。

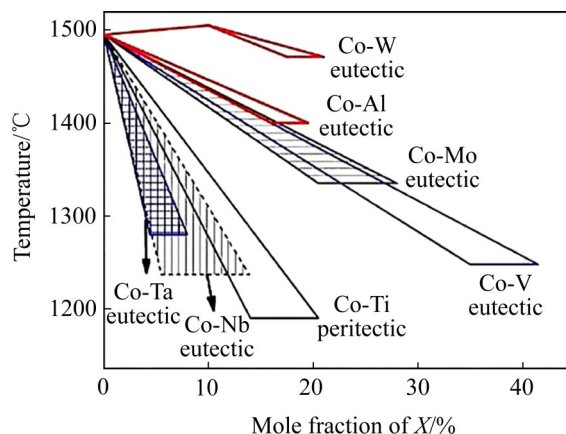


图1 Co-X(X=Ta, Nb, Ti, W, Al, Mo, V)二元合金体系的液、固相线^[30]

Fig. 1 Liquidus and solidus lines in Co-X(X=Ta, Nb, Ti, W, Al, Mo, V) binary systems^[30]

1.2 Co-Al-W三元体系

表1所示为沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固特征温度。如表1所示,三元Co-Al-W体系具有较高的固相线温度和液相线温度以及较小的结晶温度区间。例如Co-7Al-8W三元合金的固相线温度为1471℃,液相线温度为1484℃。与纯钴相比,同时添加Al和W元素使得该合金的初熔温度仅降低了11℃,且三元Co-Al-W体系的结晶温度区间 ΔT 一般不大于30℃。

1.3 Co-Al-W-X四元体系

相比三元Co-Al-W体系,添加Ti、Ta、Nb、V和Mo均可不同程度地降低该合金的液、固相线温度,并扩大结晶温度区间,其中Ta、Ti和Nb对凝固特征温度的作用最为明显。如表1所示,对于Co-9Al-10W合金,添加2%(摩尔分数)的Ti、Ta、Nb、V和Mo使液相线温度分别降低了24℃、23℃、30℃、12℃和8℃,使固相线温度分别降

表 1 合金元素对沉淀强化钴基单晶高温合金凝固特征温度的影响

Table 1 Effects of alloying elements on solidification characteristic temperature of γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys

Alloy	Alloy composition (Mole fraction, %)	Transformation temperature/°C		Solidification temperature region/°C	Ref.
		Liquidus	Solidus		
Co-Al-W	Co-9Al-10W	1476	1459	17	[21]
	Co-9.4Al-10.7W	1477	1447	30	[22-23]
	Co-9Al-9W	1470	1446	24	[9]
	Co-7Al-8W	1484	1471	13	[24]
Co-Al-W-X	Co-9Al-10W-2Ta	1455	1412	43	[21]
	Co-9Al-10W-2Ta	1417	1380	37	[9]
	Co-8.8Al-9.8W-2Ta	1451	1407	44	[11, 22-23]
	Co-9Al-8W-2Ta	1440	1415	25	[9]
	Co-7Al-8W-1Ta	1469	1446	23	[24]
	Co-9Al-10W-2Ti	1468	1408	60	[21]
	Co-9Al-10W-2Ti	1436	1400	36	[9]
	Co-7Al-8W-4Ti	1425	1368	57	[24]
	Co-9Al-10W-2Nb	1464	1405	59	[21]
	Co-9Al-10W-2Nb	1427	1378	49	[9]
	Co-9Al-10W-2V	1472	1443	29	[21]
	Co-9Al-10W-2V	1455	1424	31	[9]
	Co-9Al-3W-6V	1452	1427	25	[11]
	Co-9Al-10W-2Mo	1468	1440	28	[21]
	Co-9Al-6W-3Mo	1457	1432	25	[11]
	Co-9Al-7.5W-1.5Mo	1464	1445	21	[11]
	Co-9Al-9W-10Ni	1473	1450	23	[11]
	Co-9Al-9W-20Ni	1472	1452	20	[11]
	Co-7Al-8W-1Ta-4Ti	1406	1334	72	[21]
	Co-20Ni-8Al-5W-6Cr-1.5Ta-2.5Ti-0.1Hf-0.4Si (ERBOCo-0)	1398	1296	102	[27]
Multi-component Co-Al-W-based superalloy	Co-30Ni-7Al-8W-5Cr-1Ta-4Ti	1398	1323	75	[26]
	Co-30Ni-9Al-6W-5Cr-1Ta-4Ti	1384	1311	73	[26]
	Co-30Ni-11Al-4W-5Cr-1Ta-4Ti	1378	1304	74	[26]

低了 49 °C、44 °C、61 °C、19 °C 和 13 °C；但相比镍基单晶高温合金，Co-Al-W-X 四元单晶高温合金仍然具有较高的固相线温度与液相线温度。同时相对于液相线温度，这五种元素对固相线温度的降低作用更加明显，进而增大了结晶温度区间，其中 Ta、Ti 和 Nb 对结晶温度区间的扩大作用最为显著。由此可见，合金元素 Ti、Ta、Nb、V 和 Mo 对 Co-Al-W 合金系凝固特征温度的影响规律基本遵循 Co-

X 二元合金相图。

1.4 典型多元 Co-Al-W 基单晶体系

与三元和四元 Co-Al-W 合金系相比，多元复杂 Co-Al-W 基单晶合金体系具有更低的固相线温度和液相线温度以及更大的结晶温度区间。以典型的 Co-7Al-8W-1Ta-4Ti 单晶高温合金为例，相比 Co-7Al-8W 单晶高温合金，同时添加 Ti、Ta 使得 Co-

7Al-8W-1Ta-4Ti合金的液相线和固相线温度分别降低了78℃和137℃,且结晶温度区间扩大了59℃。

值得注意的是,Ni对Co-Al-W合金凝固特征温度的影响较小。例如对于Co-9Al-9W合金,添加10%和20%的Ni后,合金的液相线和固相线温度略有升高,结晶温度区间基本保持不变。同时,Ni提高了 γ' 相的回溶温度,并显著扩大了 γ/γ' 双相区^[31],这将有利于该合金在服役温度下保持长时组织稳定性。因此,近年来国内外的研究者们开发出了复杂的多元CoNi基单晶高温合金^[12,26-27]。

以Co-30Ni-7Al-8W-5Cr-1Ta-4Ti单晶高温合金为例,该合金的固相线温度和液相线温度略低于Co-7Al-8W-1Ta-4Ti单晶高温合金的固相线温度和液相线温度,结晶温度区间与Co-7Al-8W-1Ta-4Ti单晶高温合金相当,上述规律进一步证实了Ni对凝固特征温度的影响较小。此外,通常CoNi基单晶高温合金的液、固相线温度随着合金化程度提高而降低,结晶温度区间却显著增大,例如ERBOCo-0单晶高温合金^[12]。

2 元素的显微偏析行为

在枝晶生长条件下,可用分凝系数 k_e 来表征合金元素在定向凝固时的显微偏析行为。由于一次枝晶间距一般与溶质扩散长度相当,而溶质在枝晶间液相中的扩散系数远大于其在枝晶干固相中的扩散系数,因此可以近似假定固相溶质无扩散,液相溶质完全均匀混合,即用忽略固相反扩散作用的Scheil-Gulliver方程来表征元素的显微偏析行为^[32]:

$$C_s = k_e C_0 (1 - f_s)^{k_e - 1} \quad (1)$$

式中: C_0 为合金的原始成分含量; C_s 为溶质在固-液界面处固相中的含量; f_s 为固相体积分数。

对于 $k_e < 1$ 的正偏析元素(凝固时偏析于枝晶间区域/未凝固的液相),随着 f_s 的增大(凝固的进行),这类元素不断在固-液界面前沿的液相中富集。这将会使后凝固的固相中这类元素的含量(C_s)不断升高,进而在凝固末期,残余液相中会形成各种二次相(枝晶间析出相),例如沉淀强化钴基单晶高温合金和镍基单晶高温合金中的正偏析元素Ta和Ti。同理,对于 $k_e > 1$ 的负偏析元素(凝固时偏析于枝晶干区域/已凝固的固相),随着 f_s 的增大, C_s 的值会

相应减小,在凝固过程中这种元素对枝晶间析出相的影响较小,但可能会出现“密度反转”现象,进而导致雀斑等铸态缺陷的产生^[29],例如镍基单晶高温合金中的负偏析元素Re和W。

目前,针对沉淀强化钴基单晶高温合金中合金元素的分布行为已有较多的研究(研究主要集中在合金元素自身的偏析及合金元素交互作用下的偏析行为),表2所示为一些典型的合金元素的显微偏析行为。凝固过程中,合金元素自身的显微偏析行为基本遵循Co-X二元相图,即合金元素的显微偏析倾向与其在 γ -Co中固-液分凝系数(C_s/C_L , C_s 为元素在已凝固固相中的含量, C_L 为元素在未凝固液相中的含量)密切相关^[30,33]。在合金化程度较高时,合金元素的偏析行为受到合金元素交互作用的影响,此时除了与Co-X二元相图有关,还可能与不同原子之间d电子层交互作用有关^[34]。

2.1 合金元素自身的显微偏析行为

在钴基单晶高温合金的凝固过程中,W元素偏析于枝晶干区域,Cr和Ni元素的偏析倾向较弱,Al、Ta和Ti等元素偏析于枝晶间区域(图2所示为Co、Ni、Al、W、Ta、Ti和Cr元素在铸态多元CoNi基单晶高温合金ERBOCo-0中的分布图),这与合金元素在Co-X二元合金相图中的固-液分凝系数相吻合。表3给出了合金元素W(5%)、Ta(1.5%)和Ti元素(2.5%)在Co-X及Ni-X(X=W, Ta, Ti)二元相图中的固-液分凝系数(基于ERBOCo-0单晶高温合金的成分特征)。例如,难熔元素W在 γ -Co中的固-液分凝系数接近1.1,在凝固过程中会偏析于枝晶干区域;相比Ni、Cr、Al和Ti元素,Ta在 γ -Co中具有最小的固-液分凝系数(约0.35),因此在凝固过程中Ta向枝晶间的显微偏析倾向也最为显著。

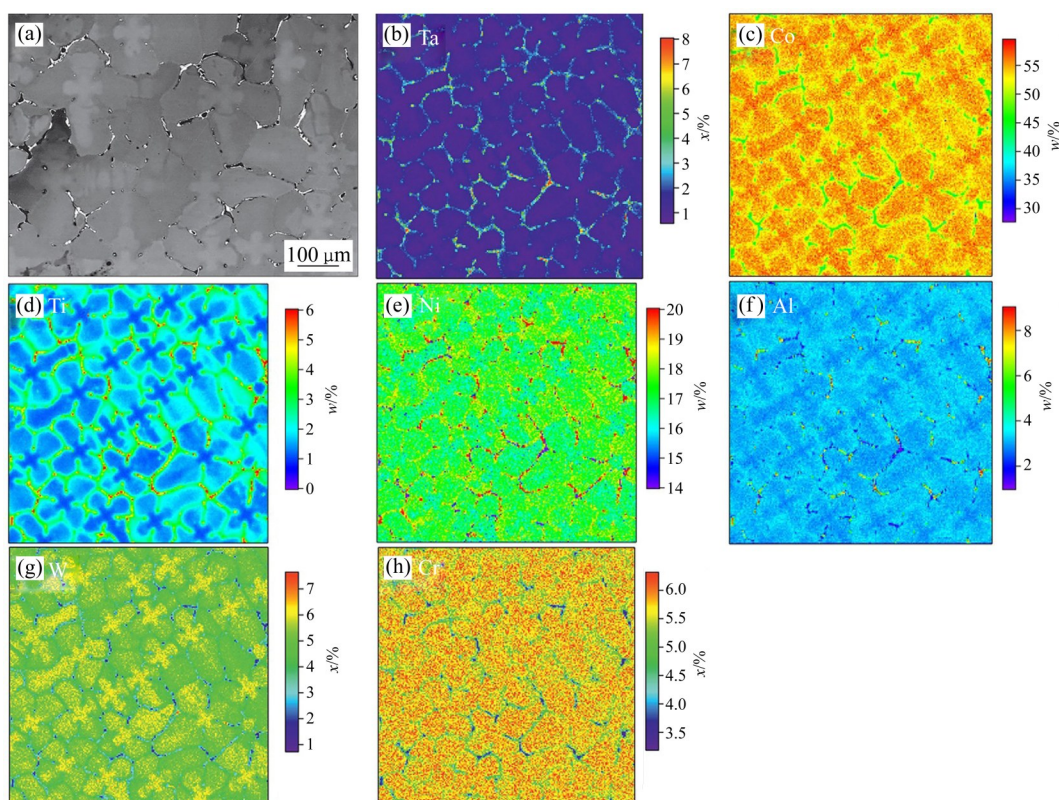
2.2 合金元素的交互作用对显微偏析行为的影响

随着合金化程度的提高,在沉淀强化钴基单晶高温合金中元素之间存在着显著的交互作用。如图3所示,例如随着Ni含量的增加,负偏析元素W在钴基、CoNi基和镍基单晶高温合金中的偏析倾向逐渐增大,强正偏析元素Ta和Ti的偏析倾向逐渐减小,即W的偏析倾向为钴基<CoNi基<镍基,Ta和Ti的偏析倾向为钴基>CoNi基>镍基。这种现象可用元素在Co-X及Ni-X二元相图中的分凝系

表 2 典型钴基与镍基单晶高温合金中各元素的分凝系数

Table 2 Microsegregation coefficients of each constituent element in typical cobalt-based and Ni-based single crystal superalloys

Classification	Alloy composition (Mole fraction, %)	Distribution coefficient (k_i)							Ref.
		k_{Co}	k_{W}	k_{Al}	k_{Ni}	k_{Cr}	k_{Ta}	k_{Ti}	
Co-based superalloys	Co-9.4Al-10.7W	1.01	0.99	0.94	—	—	—	—	[22]
	Co-7Al-8W	1.01	1.04	0.92	—	—	—	—	[24]
	Co-9Al-9W (ERBOCo-9)	1.04	1.04	0.94	—	—	—	—	[12]
	Co-7Al-8W-1Ta	1.02	1.04	0.93	—	—	0.38	—	[24]
	Co-7Al-8W-4Ti	1.02	1.08	0.87	—	—	—	0.58	[24]
	Co-7Al-8W-1Ta-4Ti	1.01	1.11	0.9	—	—	0.44	0.65	[24]
	Co-8.8Al-9.8W-2Ta	1.01	1.02	0.95	—	—	0.63	—	[22]
CoNi-based superalloys	Co-7.8Al-7.8W-4.5Cr-2Ta	1.01	1.01	0.96	—	0.99	0.61	—	[22]
	Co-30Ni-7Al-8W-5Cr-1Ta-4Ti	1.03	1.13	0.94	0.98	1.04	0.67	0.68	[26]
	Co-30Ni-9Al-6W-5Cr-1Ta-4Ti	1.03	1.15	0.94	0.98	1.05	0.69	0.69	[26]
	Co-30Ni-11Al-4W-5Cr-1Ta-4Ti	1.03	1.19	0.95	0.98	1.04	0.71	0.71	[26]
	Co-20Ni-8Al-5W-6Cr-1.5Ta-2.5Ti-0.1Hf-0.4Si	1.04	1.17	0.88	0.96	1.08	0.75	0.76	[12]
Ni-based superalloys	ERBO-1	1.06	1.16	0.96	0.97	1.06	0.88	0.87	[12]
	Astra-2W	1.05	1.19	0.94	0.99	1.00	0.84	—	[12]
	SRR99	1.06	1.27	0.92	0.98	1.04	0.81	0.72	[35]
	CMSX-4	1.06	1.27	0.91	0.97	1.05	0.78	0.71	[35]
	PWA1484	1.05	1.22	0.92	0.98	1.05	0.79	—	[35]

图 2 铸态多元 CoNi 基单晶高温合金 ERBOCo-0 中典型元素的分布图^[12, 27]**Fig. 2** EPMA concentration maps of typical elements in as-cast single crystal ERBOCo-0^[12, 27]: (a) SEM image; (b) Ta; (c) Co; (d) Ti; (e) Ni; (f) Al; (g) W; (h) Cr

数来解释。如表3所示, W、Ta和Ti在 γ -Ni中的固-液分凝系数均大于其在 γ -Co中的固-液分凝系数, 但由于W为负偏析元素, 随着Ni含量的增加, W的显微偏析倾向逐渐增强。与此相反, Ta和Ti为强正偏析元素, 因此随着Ni含量的增加, Ta和Ti的显微偏析倾向有所减弱。

表3 基于Co-X与Ni-X(X=W, Ta和Ti)二元相图获得的合金元素W(5%)、Ta(1.5%)和Ti(2.5%)的固-液分凝系数^[30]

Table 3 Solid-liquid partitioning coefficients of W(5%), Ta(1.5%), and Ti(2.5%) elements in binary Co-X and Ni-X (X=W, Ta, Ti) phase diagrams^[30]

Binary system	Solid-liquid partitioning coefficient		
	W	Ta	Ti
Co-X	1.10	0.35	0.49
Ni-X	1.22	0.59	0.79

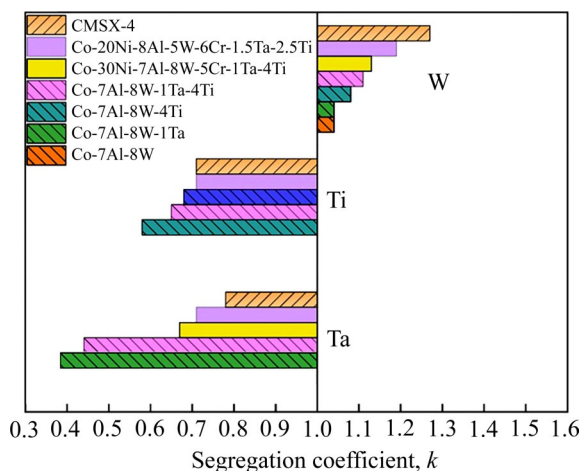


图3 W、Ti和Ta元素在钴基、CoNi基和镍基单晶高温合金中的显微偏析行为比较^[12, 24, 26, 35]

Fig. 3 Comparison of microsegregation behavior of W, Ti and Ta elements in Co-, CoNi-, and Ni-based single crystal superalloys^[12, 24, 26, 35]

3 凝固路径

凝固路径是合金凝固行为的重要组成部分, 与合金元素在凝固过程中的显微偏析行为密切相关。镍基单晶高温合金的凝固路径相对较为简单^[36-37], 而多元钴基单晶高温合金在凝固过程中可能形成多种枝晶间析出相, 导致多元钴基单晶高温合金的凝固路径较复杂, 这主要与沉淀强化钴基单晶高温合金的 γ/γ' 双相区相对狭窄以及Ta和Ti等正偏析元素强烈地偏析于枝晶间未凝固的液相中有关^[7, 24, 26]。

表4列出了一些典型的沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固路径。

3.1 钴基单晶高温合金的凝固路径

如表4和图4所示, 随着合金化程度的提高, 钴基单晶高温合金的凝固路径逐渐复杂化, 但在凝固时Co-7Al-8W和Co-7Al-8W-1Ta合金具有较为简单且相同的凝固路径: $L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow \gamma$ 。这主要与三元和四元钴基单晶高温合金中成分的显微偏析较弱有关, 且Co-7Al-8W-1Ta合金中正偏析元素Ta的含量较低(1%), 因此在凝固过程中枝晶间并未析出初生 γ' 相。

相比Co-7Al-8W和Co-7Al-8W-1Ta合金, Co-7Al-8W-4Ti合金中存在大量的析出相, 如图4(b)所示, 该合金的凝固路径也较为复杂。图5(a)~(c)所示为铸态Co-7Al-8W-4Ti合金枝晶间的显微组织, 在凝固过程中, 由于Al和Ti不断向枝晶间富集, 在Co-7Al-8W-4Ti合金枝晶间形成了富Al和Ti的深灰色 β 相及浅灰色的 γ' 相, 且由图5(b)可知, β 和 γ' 相基本呈片层状的共晶组织。此外, 在凝固末期, 枝晶间中心区域还形成了少量浅灰色的 γ' 相, 由此得出Co-7Al-8W-4Ti的凝固路径: $L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_3 + \gamma + (\beta + \gamma')_e + \gamma' \rightarrow \gamma + (\beta + \gamma')_e + \gamma'$ 。

相比Co-7Al-8W-4Ti合金, Co-7Al-8W-1Ta-4Ti合金的枝晶间析出相和凝固路径更加复杂化, 如图4(c)所示, 在凝固过程中, 枝晶间不仅出现了 β , 还形成了大量块状的Laves相。图5(d)~(f)所示为铸态Co-7Al-8W-1Ta-4Ti合金枝晶间的显微组织。在凝固过程中Ta和Ti强烈偏析于枝晶间区域, 由图5(e)可知, 在枝晶间区域形成了靠近枝晶干的片状、白色的Laves相、 $\beta + \gamma'$ 的共晶组织及枝晶间中心区域的 γ' 单相组织, 这种合金的凝固路径为 $L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + \text{Laves} \rightarrow L_3 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_4 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + \gamma' \rightarrow \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + \gamma'$ 。

3.2 CoNi基单晶高温合金的凝固路径

ZHOU等^[26]研究了不同的Al/W比对铸态7Al8W、9Al6W和11Al4W(具体成分见表4)合金枝晶间凝固组织的影响。如图6所示, 7Al8W合金枝晶间存在Laves相、 $(\beta + \gamma')_e$ 相和 $(\gamma + \gamma')_e$ 相, Laves相先于 $(\beta + \gamma')_e$ 相析出, 富Ti的 $(\gamma + \gamma')_e$ 相在凝固末期形成。相比7Al8W合金, 9Al6W合金中增加了Al含

表 4 典型的沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固路径

Table 4 Solidification paths of typical γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys

Classification	Alloy composition (Mole fraction, %)	Solidification path	Ref.
Co-based superalloys	Co-7Al-8W	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow \gamma$	[21, 38]
	Co-7Al-8W-1Ta	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow \gamma$	[21, 24]
	Co-7Al-8W-4Ti	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_3 + \gamma + (\beta + \gamma')_e + \gamma' \rightarrow \gamma + (\beta + \gamma')_e + \gamma'$	[24]
	Co-7Al-8W-1Ta-4Ti	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + \text{Laves} \rightarrow L_3 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_4 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + \gamma' \rightarrow \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + \gamma'$	[24]
CoNi-based superalloys	Co-30Ni-7Al-8W-5Cr-1Ta-4Ti(7Al8W)	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + \text{Laves} \rightarrow L_3 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_4 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e \rightarrow \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e$	[26]
	Co-30Ni-9Al-6W-5Cr-1Ta-4Ti(9Al6W)	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + \text{Laves} \rightarrow L_3 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_4 + \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e \rightarrow \gamma + \text{Laves} + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e$	[26]
	Co-30Ni-11Al-4W-5Cr-1Ta-4Ti(11Al4W)	$L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + (\beta + \gamma')_e \rightarrow L_3 + \gamma + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e \rightarrow \gamma + (\beta + \gamma')_e + (\gamma + \gamma')_e$	[26]

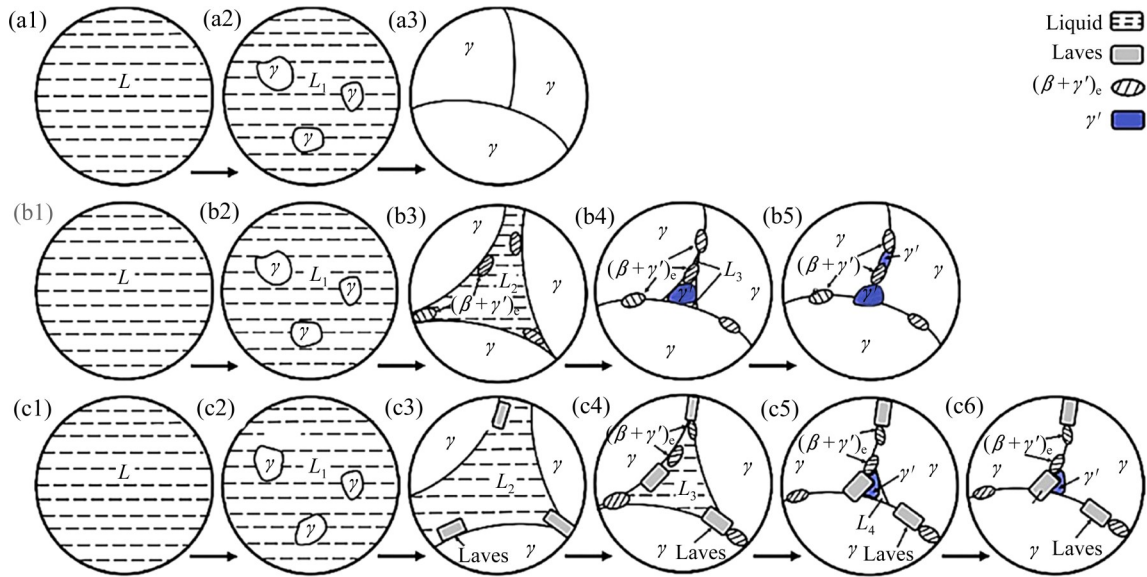


图 4 钴基单晶高温合金的凝固路径示意图^[24]

Fig. 4 Schematic diagrams of solidification paths of cobalt-based single crystal superalloys^[24]: (a) Alloy Co-7Al-8W and alloy Co-7Al-8W-1Ta; (b) Alloy Co-7Al-8W-4Ti; (c) Alloy Co-7Al-8W-1Ta-4Ti

量并降低了 W 含量, 铸态合金枝晶间区域 Laves 相体积分数相应降低, $(\beta + \gamma')_e$ 相体积分数相应增加, 但是枝晶间析出相与 7Al8W 合金相同, 因此凝固路径与 7Al8W 合金一致。值得注意的是, 高的 $x(\text{Al})/x(\text{W})$ 使得 11Al4W 合金枝晶间不存在 Laves 相, 但 $(\beta + \gamma')_e$ 相和 $(\gamma + \gamma')_e$ 相的体积分数显著增大。三种多元合金的凝固路径如表 4 所示。

LOPEZ-GALILEA 等^[27]研究了多元复杂 CoNi 基单晶高温合金的凝固行为。以 ERBOCo-0 合金为例, 如图 7 所示, 在凝固过程中枝晶间不仅会析出 Laves、 γ' 和 β 相, 还存在着少量的针状 η 相以及小

体积的 R 相。由图 7(b) 可以清晰地看到大量针状的 η 相, 由图 7(c) 和 7(d) 可以清晰地观察到, 在枝晶间的 γ' 、 β 和 Laves 相交界面还形成了小体积的 R 相。此外, 由此可知, 尽管 Ni 的添加降低了部分枝晶间有害相的体积分数, 但随着合金化程度的持续提高, 枝晶间又出现了更多的析出相, 因此多元 CoNi 基单晶高温合金的凝固路径更为复杂。

3.3 沉淀强化钴基单晶高温合金和镍基单晶高温合金凝固路径的异同

尽管与镍基单晶高温合金相比, 沉淀强化钴基

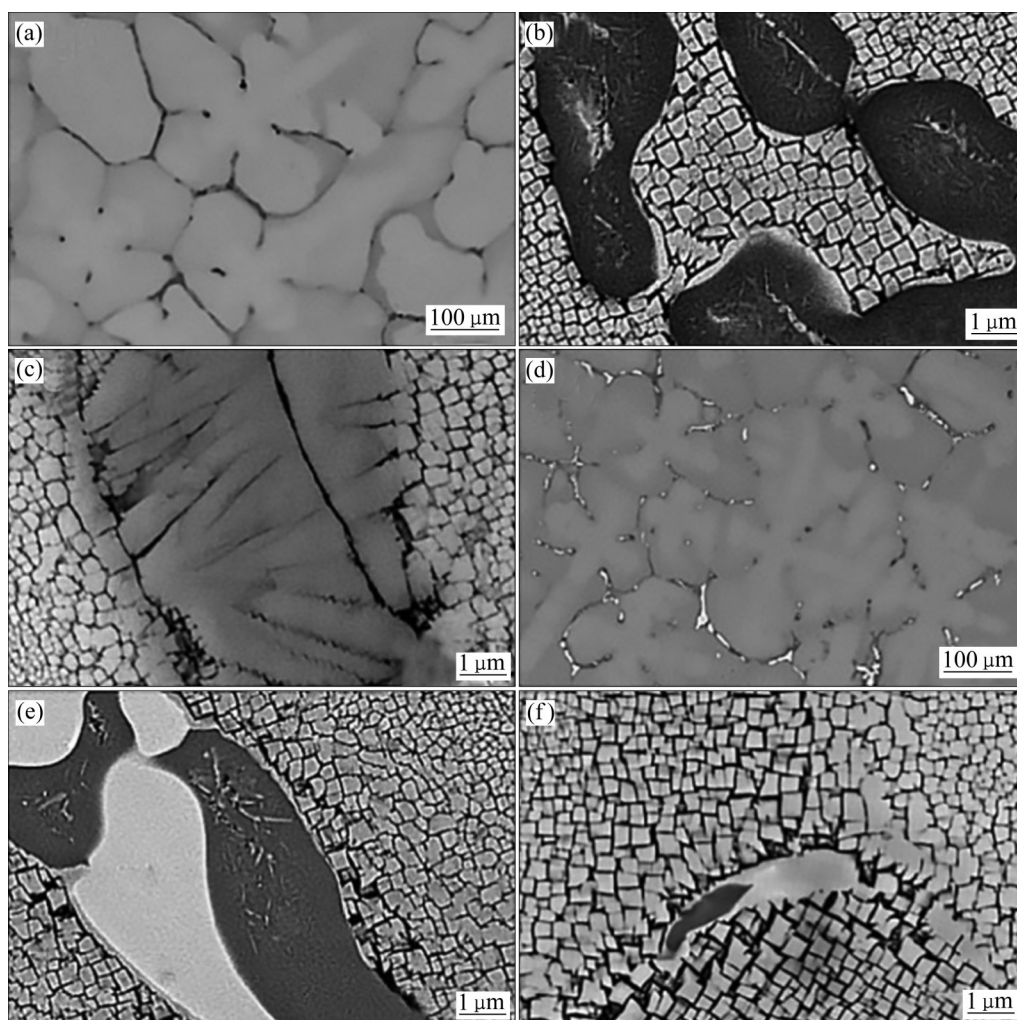


图5 钴基单晶高温合金铸态枝晶间的典型显微组织^[24]

Fig. 5 Typical microstructures of as-cast interdendritic region in cobalt-based single crystal superalloys^[24]: (a)–(c) Alloy Co-7Al-8W-4Ti; (d)–(f) Alloy Co-7Al-8W-1Ta-4Ti

单晶高温合金具有高的初熔温度、优异的抗腐蚀性及焊接性，且在 1000 °C、低应力作用下，添加 Ta 和 Ti 的钴基单晶高温合金的蠕变寿命与一代镍基单晶高温合金相当^[39]，但是随着合金化程度的提高，在非平衡凝固过程中沉淀强化钴基单晶高温合金形成了较多的有害相。例如在添加 Ta 和 Ti 这类 γ' 相固溶强化元素的钴基单晶高温合金中，其枝晶间区域形成了富 Ta、Ti 和 W 的 Laves 和富 Al 和 Ti 的 β 相^[12, 21, 24, 26–27, 40]。此外，在多元复杂 CoNi 基单晶高温合金的枝晶间还析出了少量的 χ 相^[27, 38]、 μ 相^[12, 27, 38] 和 η 相^[12, 27]，因此在合金化不断提高的同时，沉淀强化钴基单晶高温合金凝固路径也更为复杂，进而增大了后期固溶热处理的难度。例如在 LIU 等^[41]最近研究的一种多元 CoNi 基单晶高温合

金中，即使经过固溶+时效热处理，显微组织中仍然存在着(Laves+ μ)的共生相。与钴基单晶高温合金相比，镍基单晶高温合金的凝固路径则相对较为单一，以难熔元素含量较高的三代镍基单晶高温合金 CMSX-10K 为例，如图 8 所示，在枝晶干区域首先形成了 γ 相，之后会在枝晶间液相中发生包晶转变生成 γ' -Ni₃Al 相，最后在凝固末期，枝晶间残余液相发生共晶反应生成细小的网状共晶相(γ + γ')^[37]。

4 枝晶组织

在非平衡凝固条件下，沉淀强化钴基单晶高温合金和镍基单晶高温合金的铸态组织高度类似(包

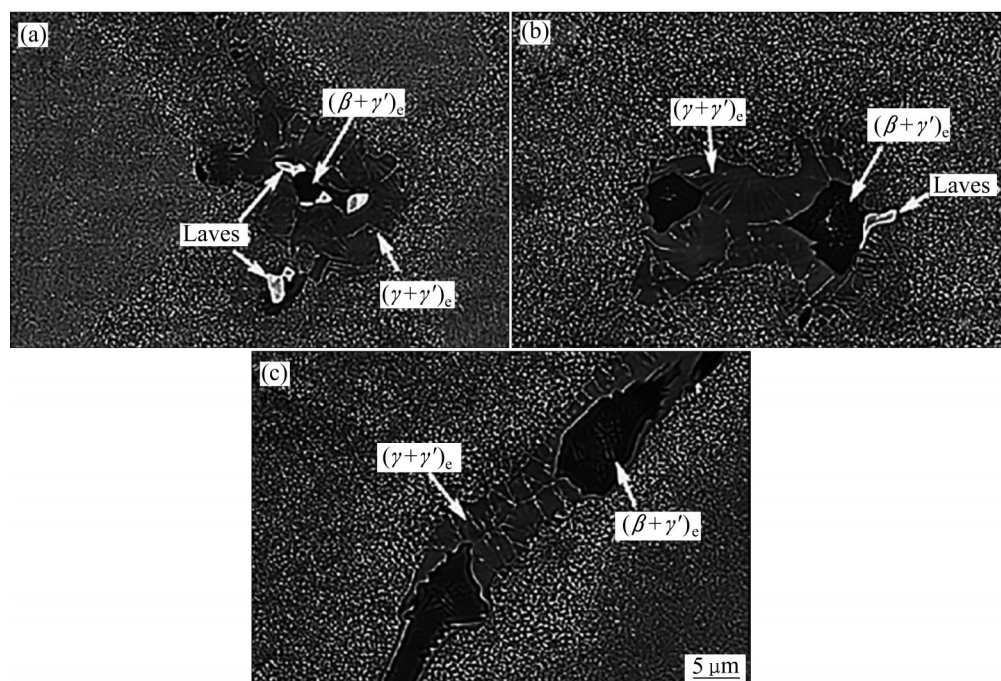


图6 CoNi基单晶高温合金铸态枝晶间的显微组织^[26]

Fig. 6 Microstructures of as-cast interdendritic region in CoNi-based single crystal superalloys^[26]: (a) Alloy 7Al8W; (b) Alloy 9Al6W; (c) Alloy 11Al4W

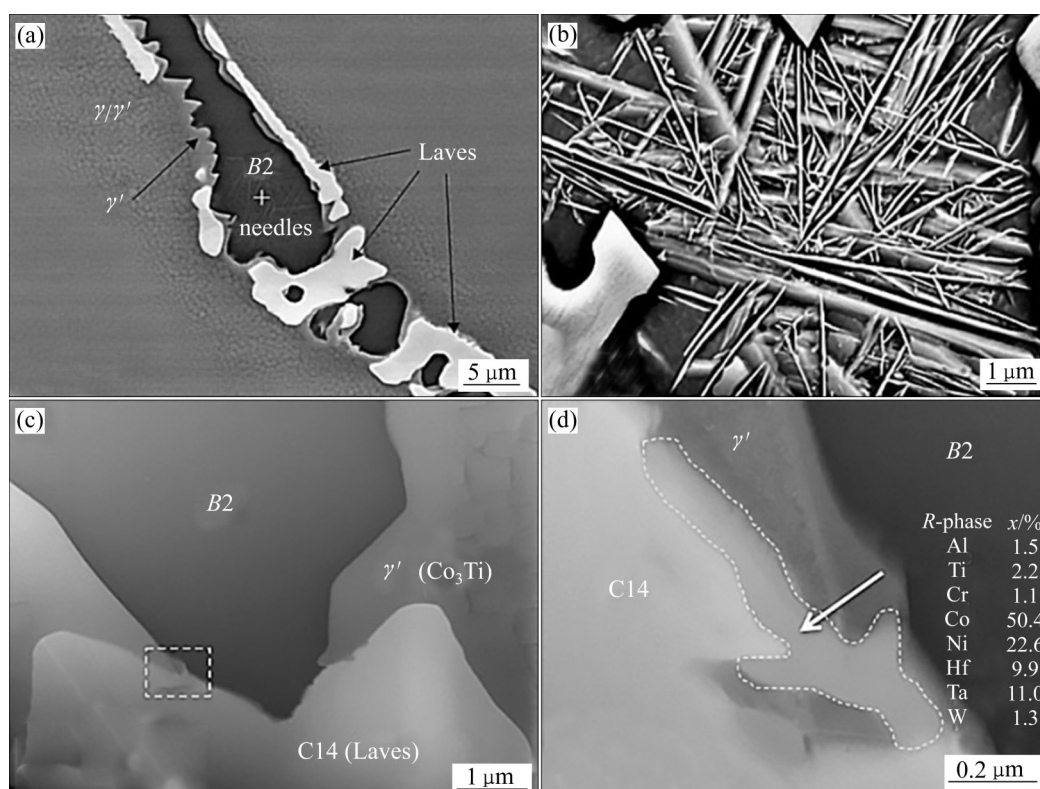


图7 铸态多元CoNi基单晶高温合金ERBOCo-0的枝晶间组织^[12, 27]

Fig. 7 Interdendritic structures of as-cast multi-component CoNi-based single crystal ERBOCo-0^[12, 27]: (a) SE image of intermetallic γ' -, Laves-, B2-, and needle-shaped η precipitate phases in interdendritic area; (b) Higher magnification BSE image of needle-shaped precipitate phase in (a) after etching samples; (c) STEM HAADF micrograph of interfacial region between γ' -, B2-, and Laves phase; (d) Micrograph showing area marked by white rectangle in (c) at higher magnification

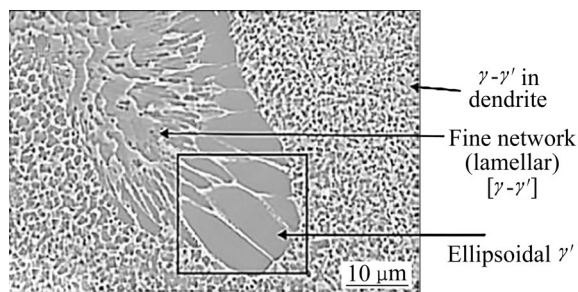


图8 典型铸态镍基单晶高温合金枝晶间区域的显微组织^[37]

Fig. 8 Typical microstructure of as-cast interdendritic region in Ni-based single crystal superalloys^[37]

括晶体择优取向), 两者的铸态横截面均呈现典型的枝晶结构^[42-43], 目前常用一次枝晶间距(λ_1)来描述合金的枝晶组织。

单晶高温合金的一次枝晶间距可用典型的Hunt模型^[44]和Kurz-Fisher模型^[45]来表征。

Hunt模型:

$$\lambda_1 = 2.83(k_e \Delta T_0 D \Gamma)^{0.25} G^{-0.5} V^{-0.25} \quad (2)$$

Kurz-Fisher模型:

$$\lambda_1 = 4.3(\Gamma D \Delta T_0 / k_e)^{0.25} G^{-0.5} V^{-0.25} \quad (3)$$

式中: Γ 为Gibbs-Thomson系数; D 为溶质扩散系数; G 为温度梯度; V 为抽拉速率。

尽管上述两种模型的出发点不尽相同, 但都一致认为 G 和 v 与 λ_1 呈反比关系。这种现象主要与合金的冷却速率 R ($R=GV$)有关, 定向凝固时的冷却速率越大, 枝晶组织没有充分的时间进行粗化, 枝晶组织就越细小。卫娜^[38]和DING等^[40]研究了沉淀强化钴基单晶高温合金在定向凝固过程中抽拉速率与一次枝晶间距的关系, 如表5所示, 在温度梯度

表5 沉淀强化钴基单晶高温合金的一次枝晶间距与抽拉速率的关系^[38, 40]

Table 5 Relationship between dendrite arm spacing and withdrawal rates in γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys^[38, 40]

Withdrawal rate/ ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\lambda_1/\mu\text{m}$	
	Co-7Al-8W-1Ta-4Ti	Co-6.7Al-8.9W-4.1Ti©
20	153±5	230±5
50	105±7	—
56	—	180±5
100	97±8	160±5

保持不变的前提下, 一次枝晶间距随着抽拉速率的增大而显著细化。

此外, 沉淀强化钴基单晶高温合金的成分特征在一定程度上影响了合金的枝晶组织, 例如由成分差异引起的溶质扩散系数 D_L 及偏析系数 k 的变化会影响一次枝晶间距 λ_1 。TSUNEKANE等^[22]研究了Ta对Co-Al-W单晶高温合金一次枝晶间距的影响, 结果表明, 添加Ta使得Co-Al-W三元合金的一次枝晶间距由364 μm 细化至259 μm 。由此得出, 在枝晶生长条件下, 定向凝固时的工艺参数和合金成分特征影响了沉淀强化钴基单晶高温合金的枝晶组织。

5 结束语

沉淀强化钴基单晶高温合金具有低成本、可焊性和抗热腐蚀性能优异等特点, 有望用于先进燃气涡轮发动机中单晶涡轮叶片的制备。但较低的 γ' 回溶温度及较窄 γ/γ' 两相区是制约沉淀强化钴基单晶高温合金发展的关键因素之一。目前国内外学者的研究表明, Ta和Ti元素可显著地提高 γ' 回溶温度, Ni元素有助于扩大 γ/γ' 两相区, Cr元素可有效地提升抗氧化性能, 因此通过合金化手段可显著地提高钴基单晶高温合金的服役性能。本文基于对已有研究工作的归纳和总结, 综述了沉淀强化钴基单晶高温合金的凝固特征温度、显微偏析、凝固路径与枝晶组织等凝固行为。

随着合金化程度的提高, 沉淀强化钴基单晶高温合金的固相线温度与液相线温度逐渐降低, 而结晶温度区间逐渐增大。相比Co-Al-W三元合金, 添加Ta、Ti和Nb元素显著降低了合金的固相线温度和液相线温度并扩大了结晶温度区间, 而Cr、V、Mo和Ni元素对凝固特征温度的影响较小, 这与Co-X二元合金相图的研究结果一致。同时, Co-Al-W-Ta-Ti单晶高温合金和CoNi基单晶高温合金等多元复杂钴基单晶高温合金具有更低的固相线温度和液相线温度及更大的结晶温度区间。

凝固时W元素偏析于枝晶干区域, Cr和Ni元素的偏析倾向较弱, Al、Ta和Ti元素偏析于枝晶间区域。同时, 合金元素之间存在着明显的交互作用, 例如随着Ni含量的增加, W元素的偏析倾向显著增大, 但Ta和Ti元素的偏析倾向显著降低,

其原因与合金元素在Ni-X和Co-X二元相图中的固-液分凝系数有关。

Ta和Ti等强正偏析元素显著增大了钴基单晶高温合金枝晶间析出相的形成倾向,例如Laves相和 β 相等。此外,在部分多元复杂CoNi基单晶高温合金中也存在枝晶间析出相,如针状的 η 相和小体积分数的 R 相,因此与典型的镍基单晶高温合金相比,多元钴基单晶高温合金具有较复杂的凝固路径,进而增大了后续固溶热处理的难度。同时,新型钴基单晶高温合金的铸态枝晶组织却与镍基单晶高温合金类似,且随着冷却速率和难熔元素含量的提高,合金的枝晶组织得以细化。

REFERENCES

- [1] COUTSOURADIS D, DAVIN A, LAMBERIGTS M. Cobalt-based superalloys for applications in gas turbines[J]. *Materials Science & Engineering*, 1987, 88: 11–19.
- [2] 刘 林, 孙德建, 黄太文, 等. 高梯度定向凝固技术及其在高温合金制备中的应用[J]. *金属学报*, 2018, 54(5): 615–626.
LIU Lin, SUN De-jian, HUANG Tai-wen, et al. Directional solidification under high thermal gradient and its application in superalloys processing[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(5): 615–626.
- [3] 郑 启, 侯桂臣, 田为民, 等. 单晶高温合金的选晶行为[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(2): 176–178.
ZHENG Qi, HOU Gui-chen, TIAN Wei-min, et al. Grain selection behavior of single crystal superalloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(2): 176–178.
- [4] 郭士锐, 姚建华. 半导体激光熔覆钴基合金的组织与性能研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(16): 103–106.
GUO Shi-rui, YAO Jian-hua, Research on microstructure and properties of Co-based alloy by diode laser cladding[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(16): 103–106.
- [5] WANG F, MA D, ZHANG J, et al. Effect of solidification parameters on the microstructures of superalloy CMSX-6 formed during the downward directional solidification process[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 389: 47–54.
- [6] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
CHENG Guo-liang. *Superalloy science*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [7] SATO J, OMORI T, OIKAWA K, et al. Cobalt-base high-temperature alloys[J]. *Science*, 2006, 312(5770): 90–91.
- [8] SUZUKI A, DENOLF G C, POLLOCK T M. Flow stress anomalies in γ/γ' two-phase Co-Al-W-base alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(5): 385–388.
- [9] BAUER A, NEUMEIER S, PYCZAK F, et al. Microstructure and creep strength of different γ/γ' -strengthened Co-base superalloy variants[J]. *Scripta Material*, 2010, 63(12): 1197–1200.
- [10] STEWART C A, MURRAY S P, SUZUKI A, et al. Accelerated discovery of oxidation resistant CoNi-base γ/γ' alloys with high L_{12} solvus and low density[J]. *Materials & Design*, 2020, 189: 108445.
- [11] POLLOCK T M, DIBBERN J, TSUNEKANE M, et al. New Co-based γ - γ' high-temperature alloys[J]. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2010, 62(1): 58–63.
- [12] KOBMANN J, ZENK C H, LOPEZ-GALILEA I, et al. Microsegregation and precipitates of an as-cast Co-based superalloy: Microstructural characterization and phase stability modelling[J]. *Journal of Materials Science*, 2015, 50(19): 6329–6338.
- [13] 周海晶. 钽和钛对 γ' 相强化钴基单晶高温合金900℃蠕变行为的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
ZHOU Hai-jing. Effects of Ta and Ti on creep behavior of γ' strengthened Co-based single crystal superalloys at 900℃ [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [14] 徐仰涛, 沙岐振, 夏天东. 钽含量对Co-Al-W合金强化相和高温氧化行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(2): 302–309.
XU Yang-tao, SHA Qi-zhen, XIA Tian-dong. Effects of tantalum content on strengthening phase and high temperature oxidation behavior of Co-Al-W superalloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(2): 302–309.
- [15] XUE Fei, ZHOU Hai-jing, FENG Qiang. Improved high-temperature microstructural stability and creep property of novel Co-base single-crystal alloys containing Ta and Ti[J]. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2014, 66(12): 2486–2494.
- [16] GUI Wei-min, ZHANG Hong-yu, YANG Min, et al. The intrinsic relationship between microstructure evolution and thermal fatigue behavior of a single-crystal cobalt-base superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(12): 1192–1200.
- [17] LU Song, ANTONOV S, LI Long-fei, et al. Atomic structure and elemental segregation behavior of creep defects in a Co-Al-W-based single crystal superalloys under high temperature and low stress[J]. *Acta Materialia*, 2020, 190: 16–28.
- [18] ZHAI Ya-di, YANG Lu-yan, XUE Fei, et al. Defects and

- their elemental distributions in a crept Co-Al-W-Ti-Ta single crystal superalloy[J]. *Crystals*, 2020, 10(10): 908.
- [19] HE Jin-shan, ZOU Min, LI Long-fei, et al. Creep behaviour of a novel CoNi-base single-crystal superalloy at high temperature and low stress[J]. *Materials Letters*, 2020, 262: 127042.
- [20] LI Wen-dao, LI Long-fei, ANTONOV S, et al. Effects of Cr and Al/W ratio on the microstructural stability, oxidation property and γ' phase nano-hardness of multi-component Co-Ni-base superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 826: 154182.
- [21] 薛飞. 钽和钛对新型钴基单晶高温合金组织稳定性与高温蠕变行为的影响研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- XUE Fei. Effect of Ta and Ti on microstructural stability and creep behavior of novel γ' strengthened Co-base single crystal superalloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [22] TSUNEKANE M, SUZUKI A, POLLOCK T M. Single-crystal solidification of new Co-Al-W-base alloys[J]. *Intermetallics*, 2011, 19: 636–643.
- [23] SUZUKI A, POLLOCK T M. High-temperature strength and deformation of γ/γ' two-phase Co-Al-W-base alloys[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(6): 1288–1297.
- [24] ZHOU Xiao-zhou, FU Hua-dong, ZHANG Yi, et al. Effect of Ta and Ti on the solidification characteristics of novel γ' -strengthened Co-base superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 768: 464–475.
- [25] 艾诚, 李树索, 周健, 等. 一种高Mo强化Ni₃Al基单晶高温合金凝固特性的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(11): 3556–3563.
- AI Cheng, LI Shu-suo, ZHOU Jian, et al. Research development of solidification characteristics of a Mo-rich Ni₃Al based single crystal superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(11): 3556–3563.
- [26] ZHOU Xiao-zhou, FU Hua-dong, ZHANG Yi, et al. Effect of Al and W contents on the solidification and solution microstructure of novel γ/γ' cobalt-base superalloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(12): 1900641.
- [27] LOPEZ-GALILEA I, ZENK C, NEUMEIER S, et al. The thermal stability of intermetallic compounds in an as-cast SX Co-base superalloy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(6): 741–747.
- [28] 孙阳辉, 艾诚, 张晓峰, 等. 镍基单晶高温合金固溶处理制度的研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(11): 3630–3636.
- SUN Yang-hui, AI Cheng, ZHANG Xiao-feng, et al. Research progress on solution treatment regimes of Ni based single crystal superalloy[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(11): 3630–3636.
- [29] 包超君, 李振锋, 刘锋, 等. 一种基于镍基高温合金成分的雀斑预测模型[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(5): 998–1007.
- BAO Chao-jun, LI Zhen-feng, LIUFeng, et al. Modeling of constituent-based freckle predictor for nickel-base superalloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(5): 998–1007.
- [30] MASSALSKI T B, OKAMOTO H, SUBRAMANIAN P R, et al. Binary alloy phase diagrams[M]. Ohio, US: ASM International, 1990.
- [31] SHINAGAWA K, OMORI T, SATO J, et al. Phase equilibria and microstructure on γ' phase in Co-Ni-Al-W system[J]. *Materials Transactions*, 2008, 49(6): 1474–1479.
- [32] POLLOCK T M, MURPHY W H, GOLDMAN E H, et al. Grain defect formation during directional solidification of nickel base single crystals[C]//*Superalloys 1992 (Seventh International Symposium)*. Warrendale, PA: TMS, 1992: 125–144.
- [33] OKAMOTO H. Section III: Supplemental literature review [J]. *Journal of Phase Equilibria*, 1998, 19(5): 486.
- [34] AI Cheng, LIU Lin, ZHANG Jun, et al. Influence of substituting Mo for W on solidification characteristics of Re-containing Ni based single crystal superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 754: 85–92.
- [35] HOBBS R A, TIN S, RAE C M F. A castability model based on elemental solid-liquid partitioning in advanced nickel-base single-crystal superalloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(10): 2761–2773.
- [36] FENG Q, NANDY T K, TIN S, et al. Solidification of high-refractory ruthenium-containing superalloys[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(1): 269–284.
- [37] D'SOUZA N, DONG H B. An analysis of solidification path in the Ni-base superalloy, CMSX10K[C]//*Superalloys 2008 (Eleventh International Symposium)*. Warrendale, PA: TMS, 2008: 261–269.
- [38] 卫娜. Co-7Al-8W-1Ta-4Ti合金凝固特性及组织研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- WEI Na. Study on the solidification characteristics and microstructure of Co-7Al-8W-1Ta-4Ti superalloy[D]. Xi'an: Northwestern University of Technology, 2018.
- [39] XUE F, ZHOU H J, SHI Q Y, et al. Creep behavior in a γ' strengthened Co-Al-W-Ta-Ti single-crystal alloy at 1000 °C [J]. *Scripta Materialia*, 2015, 97: 37–40.
- [40] DING X F, MI T, XUE F, et al. Microstructure formation in γ' Co-Al-W-Ti alloys during directional solidification[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 599: 159–163.
- [41] LIU L R, ZHOU B X, WANG Q F, et al. Intergrowth

- structure of Laves within μ phases in Co-Al-W base superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 844: 155822.
- [42] SHI L, YU J J, CUI C Y, et al. Effect of Ta additions on microstructure and mechanical properties of a single-crystal Co-Al-W-base alloy[J]. *Materials Letters*, 2015, 149: 58–61.
- [43] 刘丽荣, 孙新涛, 金 涛, 等. 碳对一种单晶镍基高温合金铸态组织的影响[J]. *铸造*, 2007, 56(6): 635–638.
- LIU Li-rong, SUN Xin-tao, JIN Tao, et al. Effect of carbon content on the as-cast microstructures in a nickel base single crystal superalloy[J]. *Foundry*, 2007, 56(6): 635–638.
- [44] HUNT J D. Cellular and primary dendrite spacings[C]// *International Conference on Solidification and Casting of Metals*. London: The Metals Society, 1979: 3–9.
- [45] KURZ W, FISHER D J. *Fundamentals of solidification: Fourth revised edition*[M]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 1998: 71–92.

Research progress on solidification behaviors of γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys

AI Cheng¹, WANG Guo-xin¹, GUO Min², SUN Zhi-ping¹, ZHANG Feng-ying¹, LIU Lin²

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

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

Abstract: As an important candidate material for the preparation of single crystal turbine blades in long-term service under thermal corrosion environment, the γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys occupy the characteristics of low cost, high initial melting point, excellent thermal corrosion resistance, et al. This paper summarized the solidification behaviors of γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys, such as the solidification characteristics temperatures, microsegregation behavior of alloying elements, solidification path and dendritic microstructure, and compared with those of typical Ni-based single crystal superalloys. The additions of Ta, Ti and Nb significantly decrease the solidus and liquidus temperatures and expand the solidification range of cobalt-based single crystal superalloys. However, Cr, V, Mo and Ni elements have less effect on the solidification characteristics temperatures. During solidification, Al, Ta and Ti elements segregate to interdendritic region, W element segregates to dendritic core, and the microsegregation degrees of Cr and Ni elements are relatively weak. Due to the severe microsegregation of Ta and Ti elements, various interdendritic precipitations with relatively high Ta/Ti contents form at the last stage of solidification, which complicates the solidification paths of cobalt-based single-crystal superalloys. Finally, similar to Ni-based single crystal superalloys, the as-cast dendritic microstructure of γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloys is refined with increasing cooling rate and content of high refractory elements.

Key words: γ' strengthened cobalt-based single crystal superalloy; solidification characteristics temperature; microsegregation behavior; solidification path; dendritic microstructure

Foundation item: Project(2017YFB0702902) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51701020) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects(2019JQ-309, 2020JM-239) supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China

Received date: 2021-08-09; **Accepted date:** 2021-09-17

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

(编辑 何学锋)