



Ni 含量对 Co-8.8Al-9.8W 合金相影响的热力学

徐仰涛^{1,2}, 马宏利^{1,2}

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为了研究 Ni 元素对新型钴基高温合金析出相的影响, 基于 JMatPro 热力学模拟计算软件对不同 Ni 含量下 Co-8.8Al-9.8W 合金(摩尔分数, %)中平衡相析出的热力学行为进行研究。结果表明: 随着 Ni 含量的增加, 合金中 γ 相的析出温度有降低趋势, 析出量减少; 与 0Ni 合金相比, 25Ni 合金 γ 相析出温度降低了 11.63 °C, 600 °C 时 35Ni 合金 γ 相的析出量较 0Ni 合金的减少了 20.63%。 μ -Co₇W₆ 相的析出温度升高; 与 0Ni 合金相比, 35Ni 合金析出温度升高 303.73 °C, η -Co₃Al 相则会消失, 而 γ' 相的析出温度升高, 析出量增加; 与 5Ni 合金相比, 35Ni 合金 γ' 相析出温度升高 392.85 °C, 600 °C 时 35Ni 合金析出量较 0Ni 合金的增加 40.9%。从 Ni 对平衡相中各元素的影响以及各物相的析出角度来看, 随着 Ni 含量的增加, 当 γ 相析出时固相和液相中各元素的含量相差越来越多, 要满足 γ 相的析出和长大, 只有通过降低温度或增加过冷度来实现。从而导致 γ 相的含量越来越少, 析出温度也越来越低。合金中加入的 Ni 元素以形成 γ' 相的形式抑制 η -Co₃Al 相的形成与生长, 从而导致 η 相最后消失。从 γ 相中析出的 W 和 Al 元素分别为 μ -Co₇W₆ 和 η -Co₃Al 提供形核及生长的条件, 但 η -Co₃Al 相消失以后, 从 γ 相中析出的 Al 和 Ni 元素却为 γ' 相的生成提供了条件, γ' 相开始形成并增加。

关键词: JMatPro 软件; Co-8.8Al-9.8W 合金; γ 相; 二次相

文章编号: 1004-0609(2019)-11-2533-07

中图分类号: TG146.1⁺⁶

文献标志码: A

2006 年, 日本学者 SATO 等^[1]在研究 Co-Al-W 合金时发现, 经固溶和时效处理后, 在 γ -Co 基体上会均匀析出具有 $L1_2$ 结构的强化相 Co₃(Al,W), 它与镍基高温合金中的强化相形态十分相似。这一发现为钴基高温合金的强化提供了另一条理论, 即可以用 γ' 相沉淀强化的理论来强化钴基高温合金。随后, SUZUKI 等^[2]在 γ -Co 基体的微观组织上发现了有规则密排的 γ' -Co₃(Al,W)相, 合金中 γ' -Co₃(Al,W)相对 γ -Co 基体起到了很好的固溶和沉淀强化作用^[3]。添加微合金化元素后, Co-Al-W 合金的液相线温度和 γ' 相的固溶温度、以及合金的屈服强度均高于传统的镍基高温合金^[1-2]。而且, 该合金具有传统钴基高温合金所具有的抗热疲劳、抗腐蚀等优异性能^[4-6]。在钴基高温合金中加入 Ni 元素, 不仅可以提高合金中 γ' 相的溶解温度, 还可以扩大 γ/γ' 两相区域, 从而抑制有害相的析出, 最终达到提高合金组织稳定性和高温性能的目的^[7-8]。因此, 新型 Co-Al-W 合金有望成为热腐蚀、高温、强氧化性等极端环境中不可或缺的应用材料^[9-10]。合金成分和

制备工艺是决定合金性能的关键因素, 通过增加合金元素或者调整其添加量及平衡比, 就可以改变合金中相的含量、组成结构, 进而改变合金性能^[11]。

在合金中加入 Ni 元素可以有效提高 γ' 相的溶解温度, 并作为 γ' 相的形成元素使合金中 γ' 相的体积分数增加^[12-15], 而 Ni 基和 Co 基合金有着相似的高温性能。基于此, 本文利用 JMatPro 软件对不同 Ni 含量下 Co-8.8Al-9.8W 合金的热力学平衡相、 γ 相以及 γ' 相等的析出热力学行为进行对比研究, 为 Co 基高温合金中 γ' 强化相及其他相的转变提供理论依据。

1 实验

试验原料为 Co 块(99.9%, 5~10 mm)、Al 粉(99.9%, <48 μ m)、W 粉(99.9%, <48 μ m)、Ni 粉(99.9%, <48 μ m)。根据 Co-8.8Al-9.8W-xNi(x=0, 5, 15, 25, 35, 摩尔分数, %), 5 种合金的成分配比,

使用电子天平称取所需的金属粉末(块体), 放置在球型混料机中混料 2 h, 使其混合均匀, 然后用压片机将粉末压成块状。随后使用真空电弧熔炼炉制备合金, 为了确保合金成分均匀, 反复熔炼 5~6 次, 得到合金铸锭。制备合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 Co-8.8Al-9.8W-xNi(x=0, 5, 15, 25, 35, 摩尔分数, %) 合金系成分

Table 1 Composition of Co-8.8Al-9.8W alloys with different mole fraction of Ni

Alloy	Mass fraction/%				
	Co	Al	W	Ni	C
0Ni	70.17	3.47	26.35	—	—
5Ni	65.81	3.58	26.30	4.30	0.0029
15Ni	57.10	3.70	26.31	12.88	0.0023
25Ni	48.30	3.87	26.32	21.50	0.0030
35Ni	39.94	3.75	26.27	30.03	0.0024

JMatPro 是金属材料相图与性能计算的软件, 尤其以热力学模型、热力学数据为计算基础, 可以准确地计算材料的性能。已有的研究表明^[16-22]: 通过该软件可以比较准确地计算出不同成分镍基、钴基等高温合金的平衡相含量。本研究调用 JMatPro 软件中的 Thermodynamic properties 模块对给定成分的合金(见表 1) 进行热力学计算, 选用温度区间设定为 600~1600 °C, 步长为 10 °C。

2 结果与讨论

2.1 热力学平衡相

5 种不同 Ni 含量合金各平衡相析出量与温度之间的关系如图 1 所示。其中, L 是液相, γ 、 γ' 、 η 、 μ 以及 M_6C 等均为合金凝固过程中的析出相。由图 1 可知,

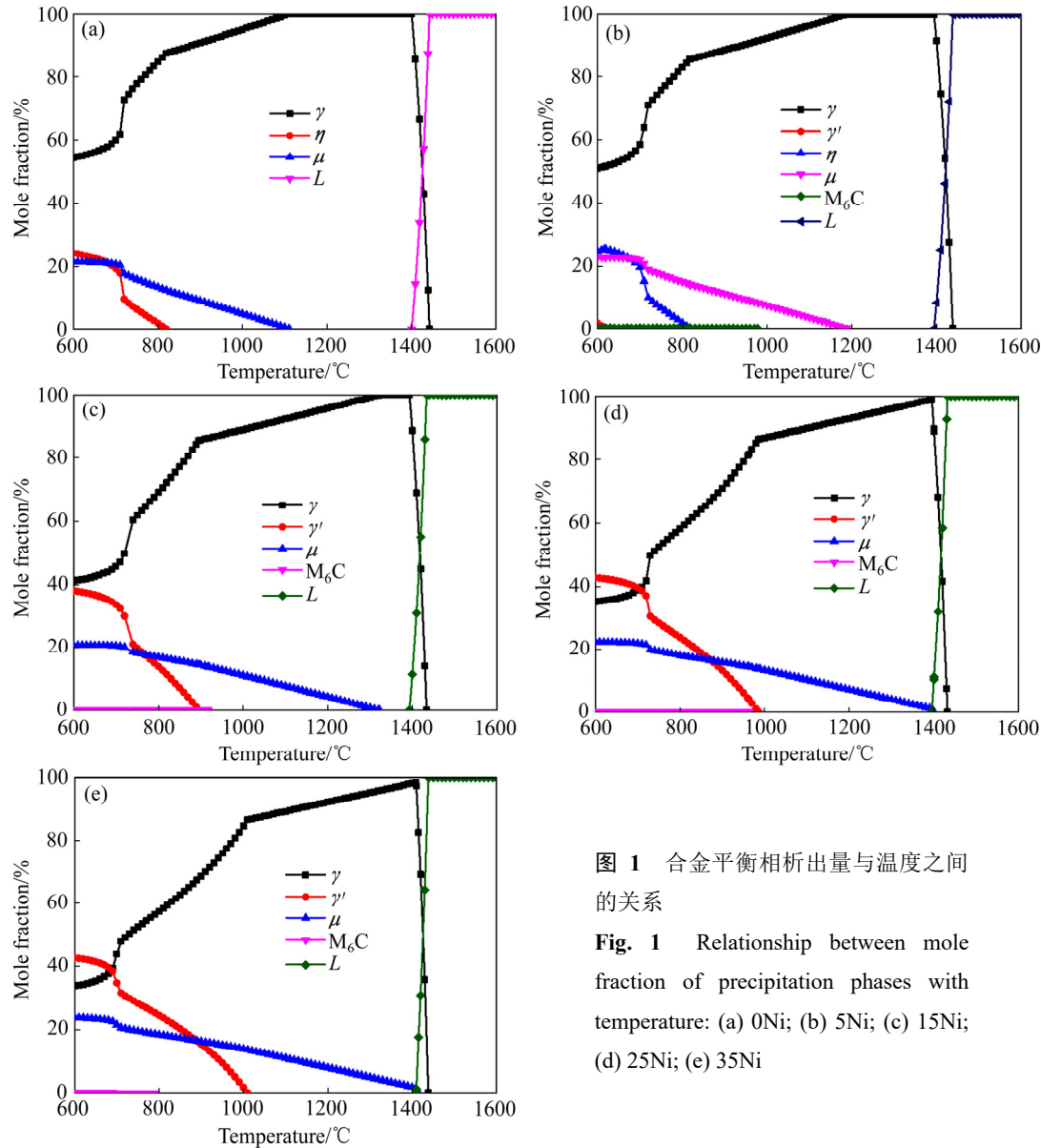


图 1 合金平衡相析出量与温度之间的关系
Fig. 1 Relationship between mole fraction of precipitation phases with temperature: (a) 0Ni; (b) 5Ni; (c) 15Ni; (d) 25Ni; (e) 35Ni

Co-8.8Al-9.8W 合金中含有 γ 相、 γ' 相、 μ 相以及 η 相, 其他 4 种合金中都含有基体 γ 相、 γ' 相、 μ 相以及 M_6C 相, 其中 5Ni 合金中还存在 η 相。5 种合金中 γ 相的析出量随温度的升高呈现出增加的趋势, η 相随 Ni 含量的增加逐渐消失。 M_6C 相的析出量随温度的升高变化不大, 但呈现微小下降趋势。而且, 各平衡相的析出量、初始析出温度等也有差异。表 2 所列为 5 种合金的熔化温度区间以及各平衡相的析出温度。

2.2 γ 相析出行为

γ 相是高温合金的基体相, 高温合金的固溶强化和 γ' 强化相的析出都需要通过 γ 相来实现。所以 γ 相的尺寸和数量在一定程度上决定了合金的高温性能。

图 2 给出了 5 种合金 γ 相的析出量与温度之间的关系。由图 2 可知, 35Ni 合金中 γ 相的相析出量最少, 0Ni 合金 γ 相的析出量最多。表 3 所列为 600 °C 几种合金平衡相的相对含量, 结合表 3 可知, 在 600 °C 时, 合金中 γ 相的析出量由大到小的顺序为 0Ni, 5Ni, 15Ni, 25Ni, 35Ni。35Ni 合金 γ 相析出量最少为 33.72%

(摩尔分数), 0Ni 合金 γ 相的析出量最多为 54.35%, 随着 Ni 含量的增加, 合金中 γ 相的含量减少。由图 2 可知, 0Ni 合金的 γ 相在 1111.36 °C 时析出量达到 100%, 5Ni 合金的 γ 相在 1188.17 °C 时析出量达到 100%, 15Ni 合金的 γ 相在 1322.36 °C 时析出量达到 100%, 而 25Ni 合金的 γ 相在 1395.36 °C 时析出量达到最大为 98.99%, 35Ni 合金的 γ 相在 1409.55 °C 时析出量达到最大为 98.48%。相对 0Ni 合金, 其它几种合金中存在 γ' 相和 M_6C 相, 这些相中都含有一定量的 Co、W 等元素, 而且随着 Ni 含量的增加, γ' 相和 M_6C 相的含量增加, 因此明显降低了合金中 γ 相的含量。由表 2 可知, Ni 含量增加, 合金中 γ 相的析出温度有降低趋势, 析出温度由高到低的顺序为 0Ni, 5Ni, 15Ni, 25Ni, 与 0Ni 合金相比, 25Ni 合金析出温度降低了 11.63 °C。表 4 所列为 γ 相开始析出时的 γ 相和 L 相的元素含量, 结合表 4 可知, Ni 含量增加, γ 相析出时固相和液相中 Co、Al、W 以及 Ni 元素的含量相差越来越大, 要满足 γ 相的析出和长大, 只有降低温度增加过冷度来实现。从而导致 γ 相的析出温度越来越低。

表 2 合金的熔化温度区间以及主要析出相的析出温度

Alloys	Molten temperature region/°C	Initial precipitation temperature/°C				
		γ	γ'	η	μ	M_6C
0Ni	1401.03–1443.47	1443.47	–	819.38	1111.36	–
5Ni	1394.02–1438.35	1438.35	616.94	817.30	1188.17	978.13
15Ni	1392.99–1433.83	1433.83	895.69	–	1322.39	917.42
25Ni	1395.35–1431.84	1431.84	985.51	–	1400.34	963.07
35Ni	1409.55–1438.12	1438.12	1009.79	–	1415.09	790.64

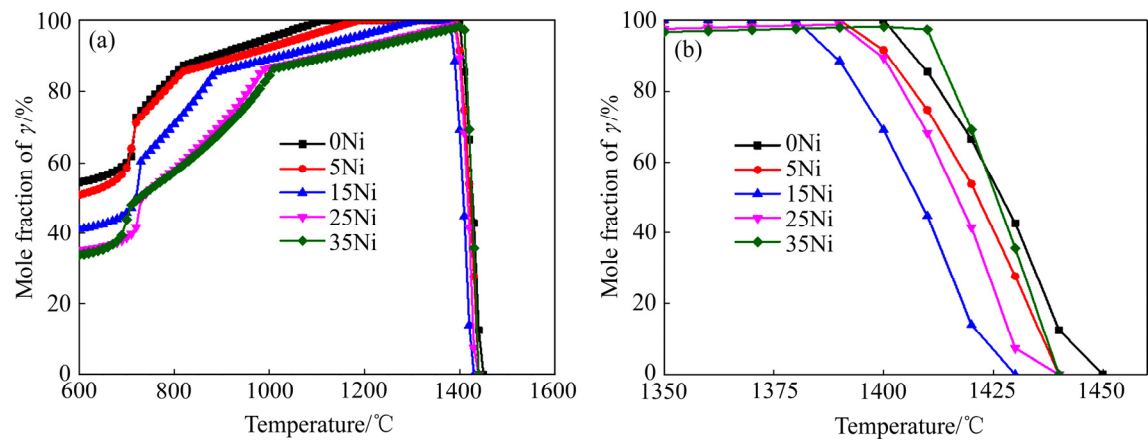


图 2 γ 相的析出量与温度之间的关系

Fig. 2 Relationship between mole fraction of γ phases and temperature: (a) 600–1600 °C; (b) 1350–1450 °C

表 3 600 ℃时几种合金平衡相的相对含量

Table 3 Relative contents of equilibrium precipitation phases in alloys at 600 ℃

Alloy	Mole fraction/%				
	γ	γ'	η	μ	M_6C
0Ni	54.35	—	24.27	21.38	—
5Ni	50.75	1.70	24.74	22.69	0.11
15Ni	41.11	38.06	—	20.74	0.08
25Ni	34.97	42.62	—	22.30	0.10
35Ni	33.72	42.60	—	23.64	0.06

表 4 γ 相开始析出时的 γ 相和 L 相的元素含量

Table 4 Calculated chemical compositions of γ phase and L phase

Alloy	Element mass fraction of γ phase/%				Element mass fraction of L phase/%			
	Co	Al	W	Ni	Co	Al	W	Ni
0Ni	73.41	2.62	23.97	—	70.17	3.47	26.35	—
5Ni	69.43	2.73	23.72	4.12	65.82	3.58	26.30	4.30
15Ni	60.85	2.90	23.47	12.78	57.11	3.70	26.31	12.88
25Ni	51.65	3.12	23.33	21.90	48.31	3.87	26.32	21.50
35Ni	42.50	3.11	23.32	31.09	39.95	3.75	26.27	30.03

2.3 γ' 相的析出行为

γ' 相是高温合金的主要强化相, γ' 相在基体相中的体积分数和数量是影响镍基高温合金力学性能的主要因素, 也是高温合金强化效果的根本保证, γ' 相数量越多, 强化程度越高, 合金强度也显著增加。

图 3 所示为 γ' 相的析出量与温度之间的关系。由图 3 可以看出, 随着温度增加 γ' 相析出量呈现出逐步减少的趋势, 结合表 2 与表 3 可知, 在 600 ℃时, 5Ni 合金 γ' 相初始析出温度为 616.94℃, γ' 相的析出量仅为 1.70%, 15Ni 合金 γ' 相初始析出温度为 895.69 ℃, γ'

相的析出量为 38.06%, 25Ni 合金 γ' 相初始析出温度为 985.51 ℃, γ' 相的析出量为 42.62%, 35Ni 合金 γ' 相初始析出温度为 1009.79 ℃, γ' 相的析出量为 42.60%, 25Ni 和 35Ni 合金 γ' 相的析出量基本相等。合金中 γ' 相的析出温度由低到高的顺序为 5Ni, 15Ni, 25Ni, 35Ni, 析出量由小到大的顺序为 5Ni, 15Ni, 25Ni, 5Ni 合金中 γ' 相的析出温度最低, 析出量最少, 35Ni 合金中 γ' 相的析出温度最高, 析出量最多, 二者相比, 析出温度升高了 392.85 ℃。由此可知, 随着 Ni 含量的增加, 合金中 γ' 相的析出量随之增加, γ' 相初始析出温度也随之升高, 所以, 钴基高温合金中 Ni 元素的加入能提高 γ' 相的初始析出温度, 也能促使 γ' 相析出。

2.4 μ 相和 η 相的析出行为

μ 相和 η 相是结构不相同的密排相, μ 相是拓扑密排相(TCP), η 相是几何密排相(GCP)。 μ 相的析出会降低合金室温塑性。出现 η 相合金的强度会有所下降。所以 μ 相和 η 相都是高温合金的有害相。对 μ 相以及 η 相中各元素含量随温度变化的热力学计算结果分析发现: μ 相主要由 Co 和 W 元素组成, 且 Co/W 的值近似为 1.2。由此可推断出 μ 相化学式为 Co_7W_6 。而 η 相主要由 Co 和 Al 元素组成, 且 Co/Al 的值近似为 3, 由此可推断出 η 相化学式为 Co_3Al 。根据相关研究^[23-24]可知, 在 Co-Al 二元系合金中没有出现稳定的 Co_3Al 相。而后, 文献[1]曾报道在通过热处理后的 Co-14Al

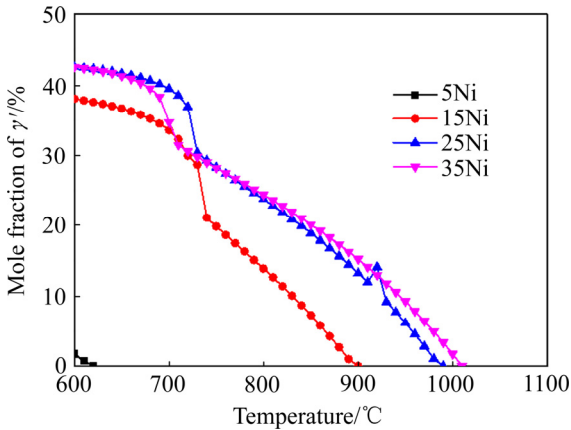


图 3 γ' 相的析出量与温度之间的关系

Fig. 3 Relationship between mole fraction of γ' phases and temperature

合金中找到了 $L1_2$ 结构的亚稳相 Co_3Al 。本研究与已有研究结果有一些差异, 主要是本次研究结果是完全建立在热力学基础上的, 而实际合金凝固过程是动力学与热力学共同作用的结果。在实际过程中可能更多的取决于动力学因素, 从而导致这些相并未形成^[21]。

图 4 所示为 μ 相和 η 相的析出量与温度之间的关系。由图 4 可以看出, 随着温度的升高, 几种合金中 μ 相和 η 相的量逐渐降低, 结合表 2 可知, 随着 Ni 含量增加, μ 相的初始析出温度逐渐升高, 而 η 相逐渐消失。 μ 相的析出温度由低到高的顺序为 5Ni, 15Ni, 25Ni, 35Ni, 0Ni 合金的析出温度最低, 35Ni 合金最高, 二者相比, 析出温度升高了 303.73°C , 而 η 相消失是因为从 γ 相中析出的 Al 和 Ni, 促进了 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相和 γ' 相的形成和长大, 而随着 Ni 含量的逐渐增加, 为 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相的形成和长大提供的 Al 和 Ni 元素越来越少, 而为 γ' 相的形成和长大提供的 Al 和 Ni 元素越来越多, 最终从 γ 相中析出的 Al 和 Ni 元素会全部提供给 γ' 相的形成和长大, 因此 γ' 相含量增加, 而 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相则会消失, 所以合金中加入的 Ni 元素以形成 γ' 相的形式抑制了 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相的形成和生长。

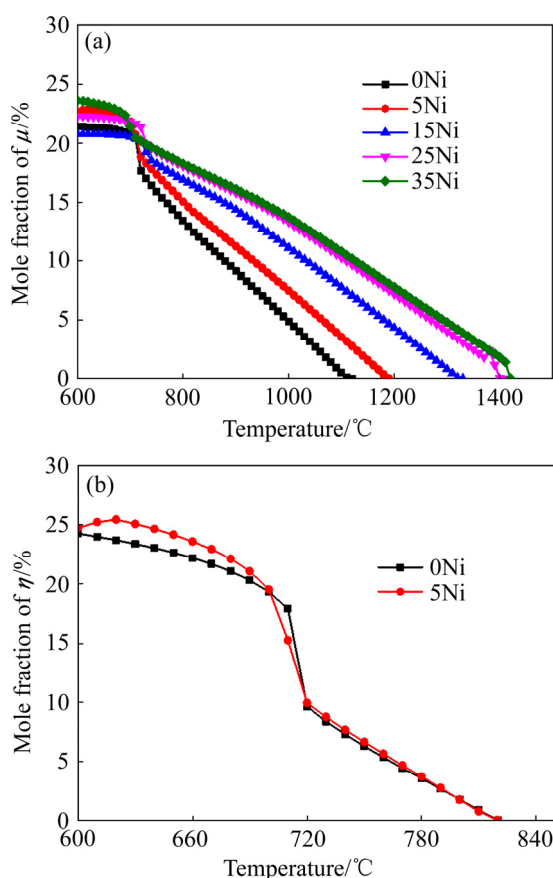


图 4 μ 相和 η 相的析出量与温度之间的关系

Fig. 4 Relationship between mole fraction of μ phases(a) and η phases(b) and temperature

2.5 Ni 元素的作用

合金中未添加 Ni 元素时, 对 W、Al 在 γ 相中溶解度进行热力学计算发现, 随着温度的降低, W 在 1110°C 左右溶解度开始减小, 而 Al 的溶解度变化不大。即在 1110°C 左右时, 从 γ 相中析出的 W 为 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 形核提供了条件并长大。而后在 820°C 左右, Al 的溶解度减少, 从 γ 相中开始析出 Al, 促进了 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 的形核和长大。

合金中添加 5% 的 Ni 元素时, 对 Ni、W、Al 在 γ 相中溶解度进行热力学计算发现, 随着温度的降低, W 在 1180°C 左右溶解度开始减小, 在 1180°C 左右时, 从 γ 相中析出的 W 为 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 形核提供了条件, 促进 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 相开始形核并长大, 而后在 820°C 左右, Al 的溶解度减少, γ 相中开始析出 Al 元素, 促进了 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 的形核和长大, 而 Ni 在 820°C 左右时溶解度也开始减少, 从 γ 相中析出的 Ni 元素同样也促进了 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 的形核和长大。

当合金中添加的 Ni 元素含量增加时, 合金元素在 γ 相中溶解度热力学计算结果相似。对 Ni、W、Al 在 γ 相中溶解度进行热力学计算发现, 随着温度的降低, W 会在某一温度下溶解度开始减小, 从 γ 相中析出的 W 元素为 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 形核提供了条件并促进 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 相开始形核、长大, 随着温度的继续降低, 几乎在同一温度下 Al 和 Ni 溶解度都开始减小, 从 γ 相中析出的 Al 和 Ni 为 γ' 相的生成提供了条件, γ' 相开始形成并增加。

3 结论

1) 加入不同含量 Ni 元素的 Co-8.8Al-9.8W 合金中都含有 γ 相、 μ 相以及 γ' 相, Ni 元素含量增加会促使 γ' 相的形成并抑制 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相的产生, 从而导致 η 相减少直至消失。

2) Ni 含量增加, γ 相析出时固相和液相中各元素的含量相差越来越大, 不利于 γ 相的析出和长大, 故 γ 相的含量越来越少, 析出温度也越来越低。

3) Ni 元素会促使合金生成 γ' 相。其含量增加, γ' 相的析出温度升高, 析出量增加, 既能提高 γ' 相的初始析出温度, 又能促使其析出。

4) 随着 Ni 元素的增加, 从 γ 相中析出的 W 和 Al 元素分别为 $\mu\text{-Co}_7\text{W}_6$ 和 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 提供了形核及生长条件, 但 $\eta\text{-Co}_3\text{Al}$ 相消失后, Al 和 Ni 元素为 γ' 相的生成提供了条件, γ' 相开始形成并增加。

REFERENCES

- [1] SATO J, OMORI T. Cobalt-base high-temperature alloys[J]. Science, 2006, 312: 90–91.
- [2] 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.
- [3] SHIN J C, DOH J M, YOON J K. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys[J]. Surface and Coating Technology, 2003, 166: 117–126.
- [4] ISHIDA K. Intermetallic compounds in Co-base alloys-phase stability and application to superalloys[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2009, 1128: 357–368.
- [5] OOSHIMA M, TANAKA K, OKAMOTO N L. Effects of quaternary alloying elements on the γ' solvus temperature of Co-Al-W based alloys with FCC/ $L1_2$ two-phase microstructures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 508(1): 71–78.
- [6] OMORI T, OIKAWA K, SATO J, OHNUMA I, KATTNER U R, KAINUMA P, ISHIDA K. Partition behavior of alloying elements and phase transformation temperatures in Co-Al-W-base quaternary systems[J]. Intermetallics, 2013, 32(2): 274–283.
- [7] SHINAGAWA K, OMORI T, SATO J, OIKAWA K, OHNUMA I, KAINUMA R. Phase equilibria and microstructure on γ' phase in Co-Ni-Al-W system[J]. Materials Transactions, 2008, 49(6): 1474–1479.
- [8] 薛飞, 米涛, 王美玲, 丁贤飞, 李相辉, 冯强. Ni对Co-Al-W基合金时效组织演变和 γ' 相溶解行为的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(7): 845–853.
- XUE Fei, MI Tao, WANG Mei-ling, DING Xian-fei, LI Xiang-hui, FENG Qiang. Effects of Ni on microstructural evolution and γ' dissolution of novel Co-Al-W base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(7): 845–853.
- [9] PING D H, CUI C Y, GU Y F. Microstructure of a newly developed γ' strengthened Co-base superalloy[J]. Ultramicroscopy, 2007, 107(9): 791–795.
- [10] 徐仰涛, 夏天东, 赵文军, 王晓军, 闫健强. 新型Co-Al-W合金高温氧化激活能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4): 701–704.
- XU Yang-tao, XIA Tian-dong, ZHAO Wen-jun, WANG Xiao-jun, YAN Jian-qiang. Activation energy of oxidation of novel Co-Al-W superalloys at high temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(4): 701–704.
- [11] 田高峰, 汪煜, 杨杰. Ni基粉末冶金高温合金平衡析出相的热力学研究[J]. 粉末冶金技术, 2012, 30(4): 243–249.
- TIAN Gao-feng, WANG Yu, YANG Jie. Thermodynamic calculation on equilibrium precipitated phases in P/M nickel-base superalloy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2012, 30(4): 243–249.
- [12] YAN H Y, VORONTSOV V A, DYE D. Alloying effects in polycrystalline γ' strengthened Co-Al-W base alloys[J]. Intermetallics, 2014, 48(10): 44–53.
- [13] TANAKA K, INUI H. Effects of alloying elements on physical and mechanical properties of Co-Al-W based $L1_2$ /FCC two-phase alloys[J]. Trans Tech Publications, 2014, 783: 1195–1200.
- [14] ZHAO W J, XU Y T. Alloying element Ta effect on microstructure of Co-Al-W superalloy by vacuum arc melting[J]. Advanced Materials Research, 2013, 718/720: 10–13.
- [15] XUE F, ZHOU H J, DING X F, WANG M L, FENG Q. Improved high temperature γ' stability of Co-Al-W-base alloys containing Ti and Ta[J]. Materials Letters, 2013: 215–218.
- [16] 王衣, 孙峰, 董显平, 张澜庭, 单爱党. 新型Ni-Co基高温合金中平衡析出相的热力学研究[J]. 金属学报, 2010, 46(4): 334–339.
- WANG Yi, SUN Feng, DONG Xian-ping, ZHANG Lan-ting, SHAN Ai-dang. Thermodynamic study on equilibrium precipitation phases in a novel Ni-Co base superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(4): 334–339.
- [17] 乔海滨, 刘林, 赵新宝, 汤鑫, 张军, 傅恒志, 李相辉, 曹腊梅. DD6单晶高温合金氧化物夹杂形成的热力学计算及分析[J]. 材料工程, 2013, 46(7): 78–82.
- QIAO Hai-bin, LIU Lin, ZHAO Xin-bao, TANG Xin, ZHANG Jun, FU Heng-zhi, LI Xiang-hui, CAO La-mei. Thermodynamics calculation and analysis of oxide inclusion formation in single crystal superalloy DD6[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 46(7): 78–82.
- [18] 张义文, 王福明, 胡本美. 铪对FGH97合金平衡相影响的评估[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(8): 978–985.
- ZHANG Yi-wen, WANG Fu-ming, HU Ben-fu. Estimation of the effect of hafnium on equilibrium phases in FGH97 PM superalloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(8): 978–985.
- [19] SAUNDERS N, MIODOWNIK A P, SCHILLÉ J P. Modelling of the thermo-physical and physical properties for solidification of Ni-based superalloys[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 7237–7243.
- [20] SAUNDERS N, GUO Z, LI X. Using JMatPro to model materials properties and behavior[J]. JOM, 2003,

- 55(12): 60–65.
- [21] 徐仰涛, 沙岐振. 基于 JMatPro 软件不同 B 含量下 Co-8.8Al-9.8W 合金析出相的热力学模拟计算[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2332–2336.
- XU Yang-tao, SHA Qi-zhen. Thermodynamic simulation calculation of Co-8.8Al-9.8W alloy with different B content based on JMatPro software[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2332–2336.
- [22] 徐仰涛, 夏荣里, 沙岐振, 夏天东. 基于 JMatPro 软件 TIG 堆焊层 Co-8.8Al-9.8W-0.2B 合金的相组成及开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2459–2464.
- XU Yang-tao, XIA Rong-li, SHA Qi-zhen, XIA Tian-dong. Phase composition and cracking behavior on TIG cladding layer of Co-8.8Al-9.8W-0.2B superalloy based on JMatPro software[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2459–2464.
- [23] ZHOU L, WANG C P, YU Y, LIU X J. Experimental investigation and thermodynamic calculation of the phase equilibria in the Co-Nb-Ta ternary system[J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 509(5): 1554–1562.
- [24] MAKINENI S K, NITHIN B, CHATTOPADHYAY K. A new tungsten-free γ - γ' Co-Al-Mo-Nb-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2015, 98: 36–39.

Effect of nickel content on equilibrium phases in Co-8.8Al-9.8W superalloy with thermodynamic calculation

XU Yang-tao^{1,2}, MA Hong-li^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the effect of Ni element on the precipitation of new Co-based superalloy, a research about the thermodynamic behavior of equilibrium phase precipitation of the Co-8.8Al-9.8W alloy with different Ni content was conducted based on JMatPro thermodynamic simulation software. The results show that with the increase of Ni content, the precipitation temperature of γ phase decreases, and the amount of precipitation decreases. Compared with 0Ni alloy, the precipitation temperature of γ phase in 25Ni alloy decreases by 11.63 °C, and the precipitation amount of γ phase in 35Ni alloy decreases by 20.63% at 600 °C. The precipitation temperature of μ -Co₇W₆ phase increases, and the precipitation temperature of 35Ni alloy increases by 303.73 °C compared with that of 0Ni alloy. While the η -Co₃Al phase will disappear. The precipitation temperature of γ' phase increases and the amount of precipitation increases. Compared with 5Ni alloy, the precipitation temperature at 35Ni increases by 392.85 °C and the precipitation amount at 600 °C increases by 40.9%. From the view of the precipitation of each phases the and the influence of Ni on the elements in equilibrium phase, we can see that as the increasing of Ni content, the contents of elements in solid phase and liquid phase become more and more different when the γ phase precipitates. Only by decreasing the temperature or increasing the supercooling degree the precipitation and growth of γ phase can be satisfied. As a result, the content of γ phase became less and less, and the precipitation temperature is also lower and lower. The Ni element added in the alloy inhibits the formation and growth of η -Co₃Al phase in a form of generating γ' phase, which eventually leads to the disappearance of η phase. W and Al precipitated from γ phase provide nucleation and growth conditions for μ -Co₇W₆ and η -Co₃Al, respectively. However, after the disappearance of η -Co₃Al phase, Al and Ni precipitated from γ phase provide conditions for the formation of γ' phase, and then the γ' phase begins to generate and increase.

Key words: JMatPro software; Co-8.8Al-9.8W alloy; γ phase; secondary phase

Foundation item: Project(51561019) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2018-11-12; **Accepted date:** 2019-03-11

Corresponding author: XU Yang-tao; Tel: +86-931-2973905; E-mail: lanzhouxuyt@163.com

(编辑 王 超)