

复合添加 Ni 和 Hf 元素对沉淀强化 Co-Al-W 高温合金组织和力学性能的影响

刘启龙¹, 夏宏彬², 罗坤杰³, 周鹏杰¹

(1. 江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212003; 2. 江苏远方动力科技镇江长江焊材分公司, 江苏镇江 212021; 3. 苏州热工研究院有限公司, 江苏苏州 215004)

摘要: 研究了Ni和Hf元素对Co-Al-W合金的组织结构的影响, 并进行900 °C高温压缩试验, 测量屈服强度和极限强度。试验结果证明: Hf元素含量为0.5%时, 合金主要为 γ 相和 γ' 相的两相结构; 当Hf元素为1%时, 10Ni1Hf合金中出现了 Co_3Hf_6 相、20Ni1Hf和30Ni1Hf, 40Ni1Hf合金中出现了 Co_3Hf_6 相和 Co_2Hf 相。900 °C的压缩试验表明, 随着Ni元素的增加, 合金的屈服强度和极限强度都呈现为先增大后减小的趋势。随着Hf元素增加到1%, 10Ni、20Ni合金极限强度和屈服强度均增大, 40Ni合金的极限强度和屈服强度均最小, 20Ni1Hf合金的屈服强度和抗拉强度均为最大值。因此合金中添加少量的Hf对力学性能是有利的, 当Hf含量为1%时导致富Hf有害相的产生。添加一定量的Ni可以提高合金的力学性能, 但不能超过20%, 过多反而降低其高温强度。

关键词: 钴基高温合金; γ' 相形貌; 钨; 镍

作者简介:

刘启龙(1998-), 男, 硕士, 主要研究方向为高温合金。电话: 18653053897, E-mail: 609167168@qq.com

通讯作者:

周鹏杰, 男, 博士, 副教授。E-mail: zhoupengjie@just.edu.cn

中图分类号: TG113;

TG146.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

03-0349-08

基金项目:

国家自然科学基金 51471079 和 52275339。

收稿日期:

2023-04-17 收到初稿,

2023-12-25 收到修订稿。

高温合金是以面心立方结构的Fe、Co、Ni作为基体, 加入合金化元素或少量的C, 利用固溶强化、第二相强化以及碳化物强化等不同的强化方式来提高合金强度的一类金属材料^[1], 在高温下仍能保持较高的强度以及优异的抗氧化、抗腐蚀、抗蠕变性能, 在我国的航空以及工业发展中发挥着巨大作用^[2]。

目前镍基高温合金的应用领域最为广泛, 强化相为 Ni_3Al ^[3], 具有优异的抗氧化腐蚀能力^[4], 但是承温能力已经接近极限, 因此需要开发一种新型的高温合金^[5]。镍基高温合金在高温下具有优异的力学性能, 是因为镍基高温合金的强化机制为具有 L_{12} 结构的 γ' 强化, 而传统的钴基高温合金的强化机制为碳化物强化^[6], 不具有 L_{12} 结构的 γ' 强化相, 因而其性能较差, 没有得到广泛的应用。但Co的熔点比Ni的熔点高约40 °C, 且传统的钴基高温合金焊接性能、耐腐蚀性能及耐高温氧化性能都很优异^[7-9], 因此这类合金应用前景广阔。

2006年, 日本学者Sato^[10]等人在Co-Al-W合金中发现了能够在900 °C时稳定存在的具有 L_{12} 结构的金属间化合物 $\gamma'-\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$, Yao^[7]等人经过一系列的计算得到 $\gamma'-\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ 的结构十分稳定, 且当Al和W原子的数量比为1:1时, 其稳定性达到最佳。Tanaka^[9]等人也通过一系列的试验测得了 $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ 相的弹性常数, 表明 $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ 是韧性金属间化合物, 且能让 γ/γ' 两相共格。

在镍基高温合金中, Hf元素会增大 γ 和 γ' 两相的共晶区, 增进 γ' 相的强化作用, 且能提高合金的强度和塑性^[11]。日本学者Satoru^[12]发现, 在高温合金中微量的Hf元素即可以使合金的强度得到大幅提升。J.Sato^[10]研究发现Ni元素的分配系数接近于1, 既能强化基体相也能强化 γ' 相, 同时Ni元素能扩大 γ/γ' 两相区, 并且能使 γ' 相的溶解温度小幅度的提升, 提高合金的高温性能^[13-16]。目前已有研究发现, 900 °C下Hf元素在 γ 相中的固溶度为0.8%, 1 300 °C下Hf元素的固溶度为1%, 而Ni元素在900 °C和1 300 °C下的固溶度为100%, 能完全固溶到 γ 相中^[17], 且Hf元素在Ni元素中

的溶解度较高,因此本文中复合添加Ni、Hf元素是希望既能提高Hf元素在 γ 相中的固溶度和合金强度,又能提高 γ' 相的溶解温度。

关于单一添加Ni和Hf元素对高温合金组织及性能的影响已经非常透彻,但复合添加Ni和Hf元素对钴基高温合金组织及性能的影响鲜有研究,因此本工作以Co-9Al-9.5W为基体合金,加入不同含量的Ni、Hf元素,通过XRD、SEM、TEM来研究对合金组织的影响,通过高温压缩试验来研究对合金强度的影响。

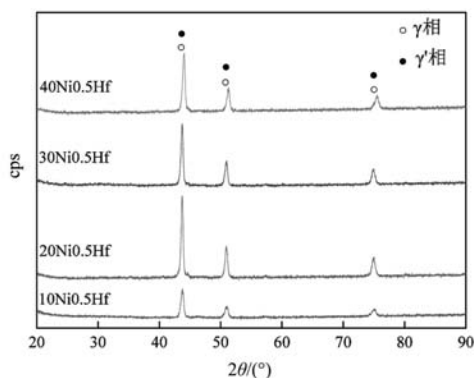
1 试验材料与方法

采用均为高纯度的Co、Al、W、Ni、Hf金属原材料来制备所需合金,这些金属材料的纯度为99.9wt.%,本文所用合金成分及其简写如表1所示。使用WK-II型非自耗真空电弧熔炼炉制备高温合金,每个铸锭的重量约为70 g,呈现为纽扣状。熔炼前先将炉内压强抽至0.1 bar,然后通入高纯氩气,反复清洗气体两次后,在氩气氛围内进行合金的熔炼。为了确保一些难熔元素完全熔化,在每一次熔炼结束后,利用熔炼炉自带的机械手对合金进行翻转熔炼5次以上。将熔炼好的合金

表1 不同Ni和Hf含量合金的成分

Table 1 Composition of alloys with varied Ni and Hf contents at. %

合金	缩写	Co	Al	W	Ni	Hf
Co-9Al-9.5W-10Ni0.5Hf	10Ni0.5Hf	余量	9	9.5	10	0.5
Co-9Al-9.5W-20Ni0.5Hf	20Ni0.5Hf	余量	9	9.5	10	0.5
Co-9Al-9.5W-30Ni0.5Hf	30Ni0.5Hf	余量	9	9.5	10	0.5
Co-9Al-9.5W-40Ni0.5Hf	40Ni0.5Hf	余量	9	9.5	10	0.5
Co-9Al-9.5W-10Ni1Hf	10Ni1Hf	余量	9	9.5	20	1
Co-9Al-9.5W-20Ni1Hf	20Ni1Hf	余量	9	9.5	20	1
Co-9Al-9.5W-30Ni1Hf	30Ni1Hf	余量	9	9.5	20	1
Co-9Al-9.5W-40Ni1Hf	40Ni1Hf	余量	9	9.5	20	1



(a) Hf含量为0.5%,不同Ni含量合金

进行封管处理,放入箱式电阻炉中进行1 210 °C/8 h +900 °C/72 h的热处理。热处理完毕后利用线切割制备 $\Phi 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 及 $\Phi 8 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的分析试样,分别用于SEM和TEM分析,并用锉刀制备粉末20 g用于XRD测试。

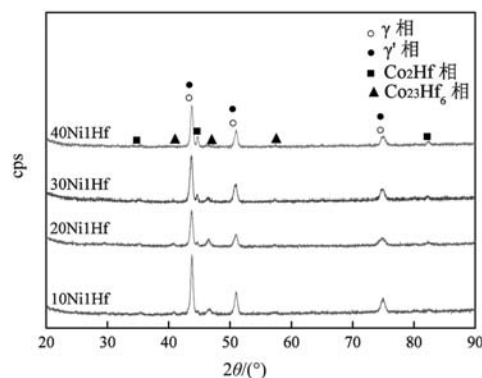
采用ZEISS Merlin Compact场发射扫描电镜进行观察微观形貌,在观察之前对合金进行电解蚀刻处理,腐蚀液为5% HNO_3 +10% CH_3COOH +85% H_2O (体积分数)的混合液体,电解电压为9 V,蚀刻时间为6 s。通过JEM-2100型的透射电子显微镜自带INCA T80型能谱仪探头来定量分析各合金化元素在 γ 和 γ' 相中的含量及计算各元素在 γ/γ' 两相中的分配系数,分析各杂相的元素组成,并通过电子衍射斑点图进行标定加以证明。用双喷电解离子减薄仪制备透射样品,电解双喷液为5%高氯酸+95%酒精(体积分数)的混合液体,电压为25 V,温度稳定在-30~-20 °C范围内。利用Bruker D8 Advance型号的X射线衍射分析仪进行物相分析,该仪器的工作电流为40 mA;工作电压为40 kV;入射线为 $\text{CuK}\alpha$;扫描速度为5°/min。

2 试验结果

2.1 Ni和Hf含量对合金相组成的影响

如图1a所示,当Hf元素含量为0.5%时,无论怎么改变Ni元素的含量,合金中只有三个比较明显的衍射峰,该衍射峰为 γ 相、 γ' 相的叠加峰,并没有其他新相析出;当Hf元素含量为1%时,合金的衍射曲线如图1b所示,随着Ni元素的增加,合金的衍射曲线中出现了别的峰,说明出现了杂相,与PDF卡片对照可以看出,10Ni1Hf合金中出现了 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相,20Ni1Hf和30Ni1Hf及40Ni1Hf合金中出现了 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相和 Co_2Hf 相。

为了准确的判断出各杂相的成分,利用场发射扫描电镜对合金进行观察,各合金中出现的杂相形貌如图2所示。根据图2a-d可以看出,当Hf元素的含



(b) Hf含量为1%,不同Ni含量合金

图1 不同成分合金的XRD曲线

Fig. 1 XRD curves of alloys of different compositions

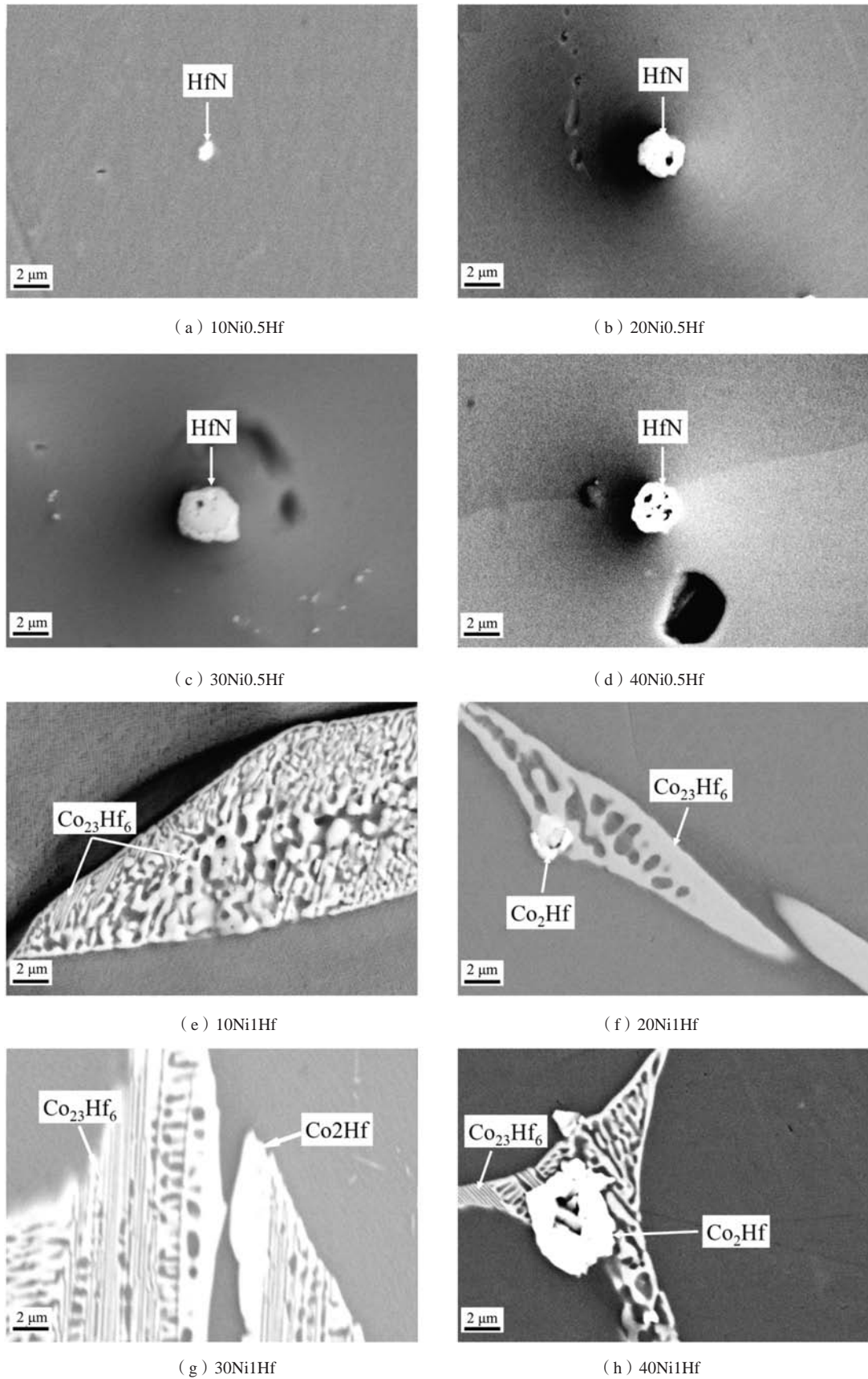


图2 不同成分合金的晶界杂相形貌

Fig. 2 Heterogeneous phase morphology of alloys of different compositions

量为0.5%时,无论Ni元素含量为多少,合金中均出现了白色近圆状的HfN相,这可能是在合金熔炼的过程中或原材料带入,导致该相的形成,但由于该相数量较少,在XRD图谱中并没有相应的衍射峰。根据图2e-h可以看出,10Ni1Hf合金中析出了白色片层状的 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相;在20Ni1Hf和30Ni1Hf及40Ni1Hf合金中析出了白色

片层状的 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相和较亮的 Co_2Hf 相,三种含Hf相的EDS能谱图以及电子衍射斑点图如图3所示,三种含Hf相中的各元素含量如表2所示。由于扫描电镜观察时采用的背散射信号,因此Hf含量高的 Co_2Hf 相亮度较高,而Hf含量较低的 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相亮度较低,因此可以初步区分。

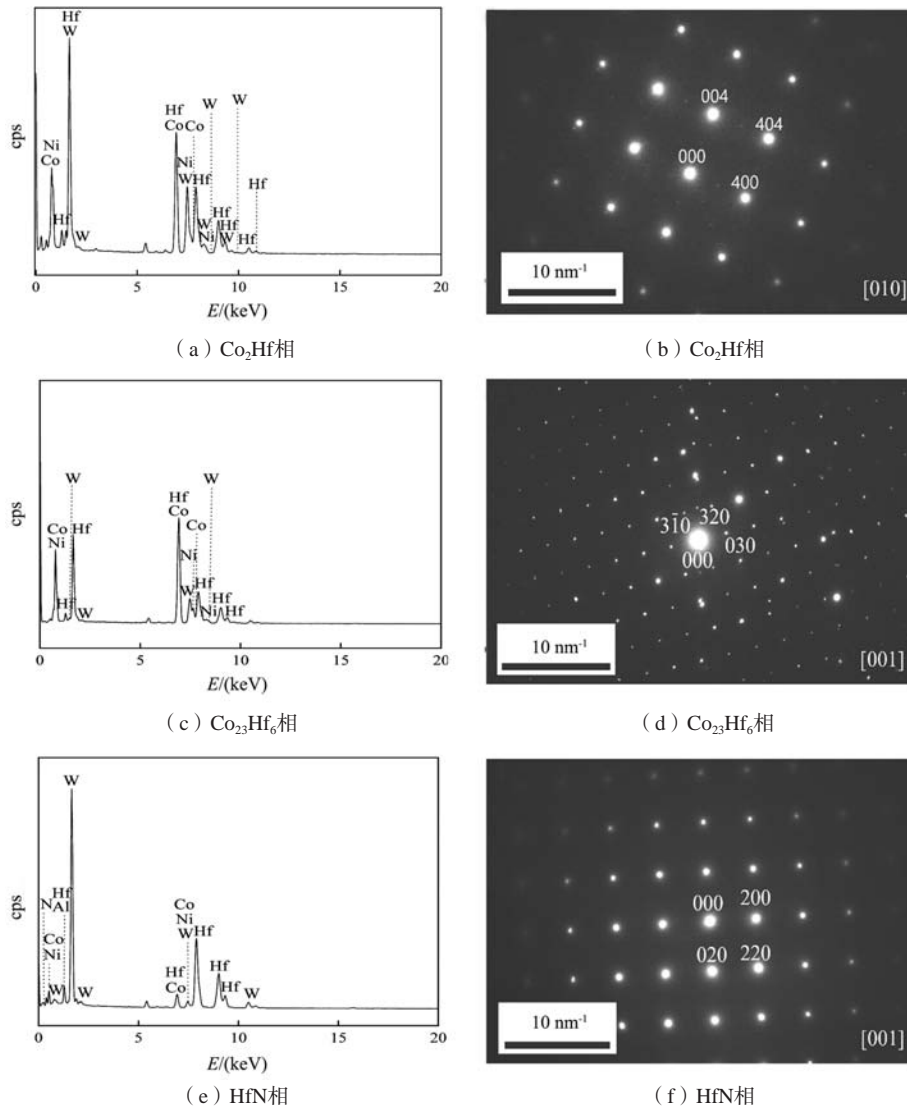


图3 富Hf相能谱图和电子衍射斑点图

Fig. 3 Energy dispersive spectrum pattern, selected area diffraction pattern for Hf-riched phases

表2 三种富Hf相的元素组成
Table 2 Elemental composition of the three Hf-rich phases

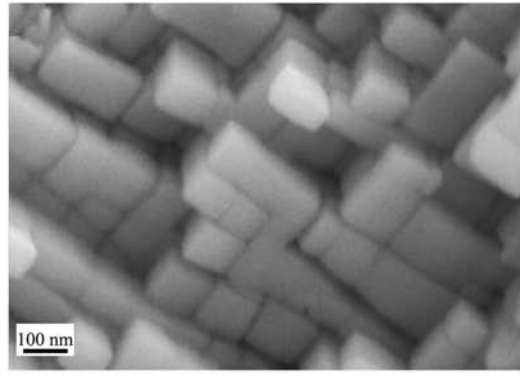
相	百分比/%	Co	Al	W	Ni	Hf	N
Co ₂ Hf	原子	42.04	5.98	3	23.6	25.37	-
	质量	27.21	1.77	6.06	15.22	49.73	-
Co ₂₃ Hf ₆	原子	61.84	1.4	2.19	14.1	20.17	-
	质量	42.77	0.54	4.72	9.71	42.26	-
HfN	原子	4.43	-	-	2.1	31.38	62.09
	质量	3.87	-	-	1.83	83.22	11.08

2.2 Ni 和 Hf 含量对合金强化相形貌的影响

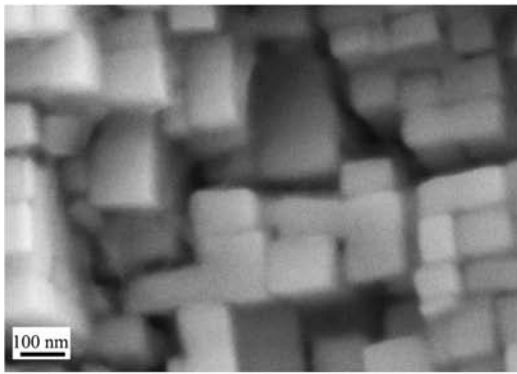
由图4可以看出,30Ni1Hf合金和40Ni1Hf合金的 γ' 相的立方度较低,其中30Ni1Hf合金虽仍呈现为立方状,但其棱角比较圆润,40Ni1Hf合金的 γ' 相接近于球状,而剩余合金的 γ' 相均呈现为规整的立方状。根据Image-Pro Plus软件计算出各合金 γ' 相的体积分数及平均尺寸如表3所示。当Hf元素的含量为0.5%时,随着Ni元素的增加,合金中 γ' 相的体积分数呈现为先增大再减小最后再增大的趋势, γ' 相的尺寸呈现为先增大



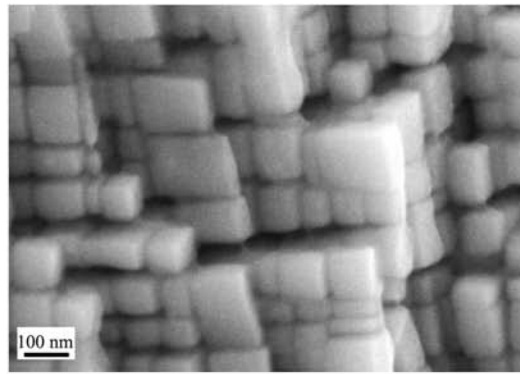
(a) 10Ni0.5Hf



(b) 20Ni0.5Hf



(c) 30Ni0.5Hf



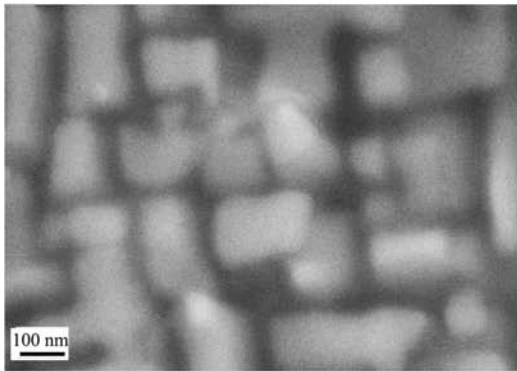
(d) 40Ni0.5Hf



(e) 10Ni1Hf



(f) 20Ni1Hf



(g) 30Ni1Hf



(h) 40Ni1Hf

图4 不同成分合金的 γ' 相形貌

Fig. 4 γ' phase morphology of alloys with different compositions

表3 不同成分合金 γ' 相的体积分数和平均尺寸
Table 3 Volume fraction and average size of γ' phase of alloys with different compositions

合金	体积分数/%	平均尺寸/nm
10Ni0.5Hf	77.6	80
20Ni0.5Hf	79.7	105.7
30Ni0.5Hf	77.2	96
40Ni0.5Hf	82.3	86.5
10Ni1Hf	75.6	98.7
20Ni1Hf	74.2	84
30Ni1Hf	61.7	95.3
40Ni1Hf	77.3	44.5

再减小的趋势；当Hf元素的含量为1%时，随着Ni元素的增加，合金中 γ' 相的体积分数呈现为先减小再增大的趋势， γ' 相的尺寸呈现为先减小再增大最后再减小的趋势。除了10Ni合金，其他Ni含量的合金，随着Hf含量的增加 γ' 相的体积分数均会减小。而当Ni含量为10%时， γ' 相的平均尺寸将会由10Ni0.5Hf合金的80 nm增加至10Ni1Hf合金的98.7 nm。

2.3 Ni 和 Hf 含量对合金化元素分配行为的影响

不同成分合金中各元素在 γ 相和 γ' 相中的含量可以通过透射电子显微镜中的EDS能谱测出，根据公式1计算出各元素的分配系数，公式如下：

$$K_x = C_{\gamma'} - x / C_{\gamma} \quad (1)$$

式中： K_x 为 x 元素的分配系数， $C_{\gamma'}$ 为 x 元素在 γ' 相中的含量， C_{γ} 为 x 元素在 γ 相中的含量，分配系数的数值如表4所示。由于Hf元素在两相中的固溶度很低，均在误差范围以内含量较少，无法准确测出其在 γ 相和 γ' 相中的含量，故暂不考虑Hf元素的分配系数。

从表4中可以看出，Co元素在八种合金中的分配系数均小于1，说明Co元素在 γ 相中的含量高于 γ' 相中

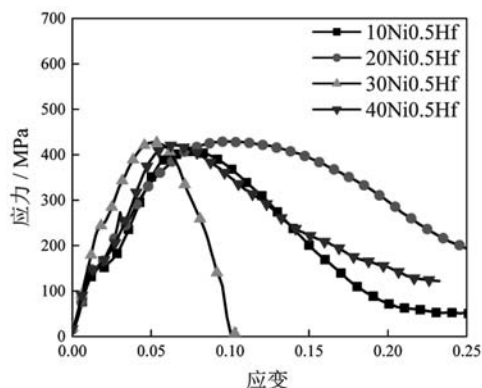
表4 不同成分合金中各元素分配系数
Table 4 Partitioning coefficients for each element of the different composition alloys

合金	Co	Al	W	Ni
10Ni0.5Hf	0.93	1.15	1.34	1.04
20Ni0.5Hf	0.93	1.23	1.07	1.06
30Ni0.5Hf	0.86	1.47	1.14	1.1
40Ni0.5Hf	0.82	1.51	1.04	1.1
10Ni1Hf	0.91	1.12	1.61	1.09
20Ni1Hf	0.91	1.33	1.26	1.11
30Ni1Hf	0.84	1.26	1.28	1.18
40Ni1Hf	0.93	1.15	0.93	1.05

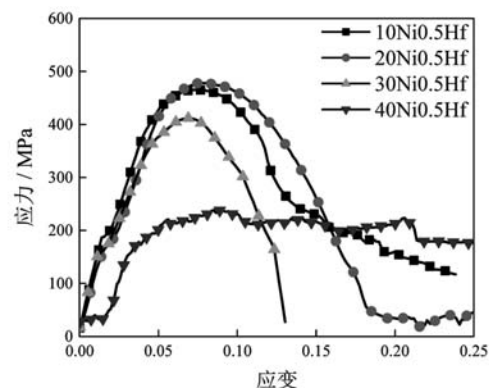
的含量，即Co元素倾向在 γ 相中富集；Al元素的分配系数在这些合金中均大于1，说明Al元素倾向分布在 γ' 相中，为 γ' 相形成元素；W元素在除40Ni1Hf合金中的分配系数均大于1，说明W元素在 γ' 相中的含量高于 γ 相，即此元素为 γ' 相形成元素，起到稳定 γ' 相的作用，而在40Ni1Hf合金中，W元素的分配系数小于1，说明随着Ni、Hf元素的增加，让W元素的分配行为发生了改变，由富 γ' 相向富 γ 相改变；Ni元素在上述合金中的分配系数都大于1，说明Ni元素为稳定的 γ' 相形成元素，不受Ni、Hf元素含量的影响。

2.4 Ni 和 Hf 含量对合金高温强度的影响

不同成分合金经过900 °C热压缩后的应力-应变曲线如图5所示。根据图5a可以看出，Hf元素含量为0.5%时，当Ni元素含量从10%增至30%时，合金的屈服强度与极限强度都会有小幅增加；当Ni含量继续增加时，40Ni0.5Hf合金屈服强度明显降低，但极限强度与30Ni0.5Hf合金相当。根据图4b可以看出，Hf元素含量为1%时，Ni元素含量在30%以内时，其变化趋势与Hf元素含量为0.5%的合金完全相同，均呈现出先增大后



(a) Hf含量为0.5%，不同Ni含量合金



(b) Hf含量为1%，不同Ni含量合金

图5 不同成分合金900 °C压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Compressive stress-strain curves at 900 °C for alloys of different compositions

减小的趋势；而当Ni含量增加至40%时，合金的屈服强度和极限强度急剧下降。

3 分析讨论

在镍基高温合金中，为了析出更多的 γ' 强化相，需要对合金进行高温热处理，而在较高的温度下，合金中会析出一些有害相，这些相会分布在晶内或晶界处，对合金的性能产生不利的影响^[18]。钴基高温合金进行热处理时，也会析出一些有害相。Ishida和Nishizana^[19]研究Co-Hf二元合金体系时发现，该体系中稳定存在 Co_2Hf 、 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 、 CoHf_2 、 Co_7Hf_2 、 CoHf 和 Co_7Hf 六种金属间化合物。在本文的合金体系中，出现了 Co_2Hf 和 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 两种金属间化合物， $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相在950℃以上才为稳定结构，而 Co_2Hf 相在室温下就很稳定^[20]。Hf元素为 γ' 相形成元素，Hf以富Hf化合物形式富集会降低合金元素对 γ 和 γ' 相的强化作用，降低合金的高温强度。Katherine.C Chen^[21]研究发现 Co_2Hf 相为Laves相，而后深入的研究了杨氏模量和体积模量与Co-Hf含量之间的关系，发现两种模量的最大值均出现在Laves相成分附近，这表明该相不易发生形变，强度较高；同时也研究了断裂韧性值与Co-Hf含量之间的关系，发现Laves相成分附近的断裂韧性值较小，而随着Co元素含量的增加，断裂韧性值将会变大，这说明 Co_2Hf 为脆性相，所以该相会提高合金的硬度，但是会降低合金的塑韧性^[21]。

Kazuya^[13]研究发现，随着Ni元素增加，强化相的形貌将会由立方状变为球状，在本文合金中，当Hf元素含量不变时，随着Ni元素的增加，合金中 γ' 相的立方度逐步减小，形貌也由立方状逐渐变为圆球状。在本文合金中，Hf元素含量为0.5%时，合金中 γ' 相的体积分数随着Ni元素含量的增加而呈现出先增大后减小再增大的趋势，Hf元素含量为1%时，合金中 γ' 相的体积分数随着Ni元素含量的增加而呈现出先减小再增大的趋势，而随着Hf元素的增加， γ' 相的体积分数随之减小，而在20Ni0.5Hf、40Ni0.5Hf和40Ni1Hf合金中， γ' 相体积分数出现了增大的趋势，这可能是由于Al等

γ' 相形成元素的分配系数较大，促进其向 γ' 相中分布，造成体积分数变大。 γ' 相的平均尺寸与 γ' 相中的原子个数和原子半径有关，以及当合金中 γ' 相体积分数较大时，会导致 γ' 相粗化^[22]。

900℃的热压缩测试表明，合金的屈服强度和极限强度随着Ni元素含量的增多先增大后减小，其中20Ni0.5Hf和20Ni1Hf合金屈服强度和极限强度为不同Hf元素含量中的最大值，40Ni1Hf合金的屈服强度和极限强度为8种合金中的最小值，合金的强度受 γ' 相的体积分数和平均尺寸以及晶格错配度的影响，20Ni0.5Hf合金的 γ' 相的平均尺寸及体积分数都较大，因此其强度较高，20Ni1Hf是因为合金中析出的杂相数量较少，导致其强度较高。因为Hf是 γ' 形成元素，而且原子半径较大，因此会有比较明显的固溶强化作用。同时，由 γ'/γ 两相间错配度也会随着Hf固溶入 γ' 相增大，这对强度也是有利的。而在40Ni1Hf合金中， γ' 相的平均尺寸仅有44.5 nm，这可能是40Ni1Hf合金高温强度较低的原因。在0.5 Hf系列合金中，随Ni含量的增加，10Ni、20Ni、30Ni合金屈服强度和极限强度都呈现为增加的趋势。而1Hf系列合金中，强度的变化比较复杂，10Ni和20Ni变化较小，40Ni合金的屈服和极限强度急剧降低，这可能和它很小的强化相尺寸有关。

4 结论

(1) Hf元素含量为0.5%的合金中均为 γ 相和 γ' 相的两相组织；当Hf元素含量为1%时，合金中出现了两种有害相，即 Co_2Hf 和 $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ 相。

(2) 经过900℃压缩后，随着Ni元素的增加，合金的屈服强度和极限强度都呈现为先增大后减小的趋势；随着Hf元素的增加，10Ni、20Ni合金极限强度和屈服强度均增大，40Ni合金的极限强度和屈服强度均减小，30Ni合金的极限强度减小，屈服强度增大。

(3) 合金中添加少量的Hf对性能是有利的，超过1%则会产生富Hf相而影响力学性能。添加一定量的Ni可以提高合金的性能，但不能超过20%，过多反而降低其高温强度。

参考文献:

- [1] REED.R.C. The superalloys: fundamentals and applications [M]. Cambridge: Cambridge University, 2008.
- [2] 曲怀璞, 徐巧至, 王栋, 等. 小角度晶界对单晶高温合金N5持久性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (2): 115-119.
- [3] 孙长波, 吴保平, 冯秋水, 等. B元素对某Ni₃Al基高温合金的微观组织和力学性能的影响研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (1): 7-10.
- [4] 赵鑫圻, 肖旋, 刘梓童. 镍基高温合金Inconel 600高温氧化行为 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 827-832.
- [5] 徐仰涛, 夏天东, 闫健强. 合金元素钨对新型Co-Al-W合金热腐蚀行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (1): 110-117.
- [6] 周海晶. 钽和铪对 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.
- [7] YAO Q, XING H, SUN J. Structural stability and elastic property of the L12 ordered $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ precipitate [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89 (16): 97-131.
- [8] MIURA S, OHKUBO K, MOHRI T. Mechanical properties of Co-based L12 intermetallic compound $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ [J]. Materials

- Transactions, 2007, 48 (9) : 2403–2408.
- [9] TANAKA, KATSUSHI, OHASHI, et al. Single-crystal elastic constants of $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ with the L12 structure [J]. Applied Physics Letters, 2007, DOI: 10.1063.1.2805020.
- [10] SATO J, OMORI T, OIKAWA K, et al. Cobalt-base high-temperature alloys [J]. Science, 2006, 312 (5770) : 90–91.
- [11] 北京621所DZ22课题组, 王玉屏. Hf对定向凝固镍基高温合金DZ22组织和性能的影响 [J]. 机械工程材料, 1982 (6) : 20–23.
- [12] KOBAYASHI S, TSUKAMOTO Y, TAKASUG T. The effects of alloying elements (Ta, Hf) on the thermodynamic stability of γ' - $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ phase [J]. Intermetallics, 2012, 31: 94–98.
- [13] 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.
- [14] BOCCHINI P J, SUDBRACK C K, NOEBE R D, et al. Effects of titanium substitutions for aluminum and tungsten in Co-10Ni-9Al-9W (at%) superalloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 705: 122–132.
- [15] MAKINENI S K, NITHIN B, CHATTOPADHYAY K. Synthesis of a new tungsten-free γ - γ' cobalt-based superalloy by tuning alloying additions [J]. Acta Materialia, 2015, 85: 85–94.
- [16] LASS E A, SAUZA D J, DUNAND D C, et al. Multicomponent γ' -strengthened Co-based superalloys with increased solvus temperatures and reduced mass densities [J]. Acta Materialia, 2018, 147: 284–295.
- [17] MASSALSKI T B, MURRAY J L, BENNETT L H, et al. Binary alloy phase diagrams [M]. American Society for Metals, 1990.
- [18] ABDEL AZIZ K, EL SHENNAWY M, OMAR A A. Microstructural characteristics and mechanical properties of heat treated high-Cr white cast iron alloys [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12 (14) : 4675–4686.
- [19] ISHIDA K, NISHIZAWA T. The Co-Hf (Cobalt-Hafnium) system [J]. Journal of Phase Equilibria, 1991, 12 (4) : 424–427
- [20] LU X, CHENG K, LIU S, et al. Experimental investigation of phase equilibria in the Co-Hf system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 627: 251–260.
- [21] CHEN K C, CHU F, KOTULA P G. Hf Co_2 Laves phase intermetallics [J]. Intermetallics, 2001, 9 (9) : 785–798.
- [22] BAUER A, NEUMEIER S, PYCZAK F, et al. Microstructure and creep strength of different γ/γ' -strengthened Co-base superalloy variants [J]. Scripta Materialia, 2010, 63 (12) : 1197–1200.

Effect of Composite Addition of Ni and Hf Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Precipitation Strengthened Co-Al-W Superalloy

LIU Qi-long¹, XIA Hong-bin², LUO Kun-jie³, ZHOU Peng-jie¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Yuanfang Power Technology Zhenjiang Changjiang Welding Material Branch, Zhenjiang 2120213, Jiangsu, China; 3. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, Jiangsu, China)

Abstract:

In this paper, the effects of Ni and Hf on the microstructures of a Co-Al-W alloy were investigated, and the yield strength and ultimate strength of the alloys were measured by compression test at 900 °C. The experimental results proved that when the content of Hf was 0.5%, the alloy exhibited a dual- γ and γ' phases structure. When the Hf element was 1%, $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ phase presented in 10Ni1Hf alloy, $\text{Co}_{23}\text{Hf}_6$ phase and Co_2Hf phase phases formed in 20Ni1Hf, 30Ni1Hf and 40Ni1Hf alloys. The yield strength and ultimate strength increased with the increment of Ni firstly, then decreased, which peaked at 20Ni. As the Hf content increased to 1%, the ultimate and yield strengths of the 10Ni and 20Ni alloys raised, the ultimate and yield strengths of the 40Ni alloy were the smallest, while the yield and ultimate strengths of the 20Ni1Hf alloy were the maximum. The alloying with minor Hf was preferable. It led to the formation of deleterious Hf-rich phases in the alloys, when the Hf contents was 1%. The addition of Ni within 20% was beneficial to the alloys and the over addition of Ni degrade the strength of the alloys at elevated temperature.

Key words:

Co-based superalloy; γ' phase morphology; hafnium; nickel