



Si 对 K325 铸造高温合金的凝固行为和拉伸性能的影响

肖 旋¹, 刘庆丰^{1,2}, 王常帅², 周兰章²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159;

2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 采用扫描电镜、电子探针和差热分析等方法研究 Si 含量对铸造高温合金 K325 凝固行为、组织特征和拉伸性能的影响。结果表明: Si 添加粗化枝晶、加重 Nb 元素偏析且偏析程度随 Si 含量增加呈增大趋势。不含 Si 合金的凝固路径为 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow \gamma + MC$, 铸态相组成为 $\gamma + MC$ 。含 Si 合金的凝固路径为 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + \gamma/Laves \rightarrow \gamma + MC + \gamma/Laves$, 铸态相组成为 $\gamma + MC + \gamma/Laves$ 。此外, 随着 Si 含量的升高, $\gamma/Laves$ 共晶相的尺寸明显增大且量明显增加, 形貌由半连续状向连续致密筛网状和花瓣状转变。固溶处理后含 Si 合金中的 $\gamma/Laves$ 共晶消失, 相组成为 $\gamma + MC + Laves$ 相, Laves 相为具有尖锐棱角的块状。随 Si 含量增加, 块状 Laves 相含量明显增多, Si 含量为 1.5%(质量分数)时, 形成 Laves 相团簇区。Si 对拉伸强度的影响与 Si 含量密切相关, 小于 1.0% 的 Si 对合金抗拉强度无明显影响, 然而 Si 含量为 1.5%, 抗拉强度明显降低。

关键词: Si; 铸造 K325 合金; 凝固特性; 组织特征; 拉伸性能

文章编号: 1004-0609(2017)-10-2029-08

中图分类号: TG132.3

文献标志码: A

面对能源危机和环境问题, 需要进一步提高燃煤电站的效率以实现节能减排。目前, 超超临界燃煤发电技术的主蒸汽温度已经达到 600 °C 等级, 压力约为 28 MPa, 因此, 为实现节能减排, 世界各国纷纷提出 700 °C 先进超超临界燃煤电站计划^[1]。然而, 随着蒸汽温度和压力的提高, 传统用于 600 °C 超超临界燃煤电站的铁素体和奥氏体钢已不能满足要求, 镍基高温合金因具有优异的高温蠕变强度、疲劳强度和抗氧化腐蚀能力而适于制造 700 °C 先进超超临界燃煤电站部件^[2-3]。K325 合金是一种含有大量 Cr 和 Mo 元素, 并以 Nb 为主要添加元素的固溶强化型镍基高温合金。该合金因具有优异的高温蠕变强度、抗氧化腐蚀能力和焊接性而被选为 700 °C 先进超超临界燃煤电站汽轮机汽缸和阀壳等大型铸件的候选材料。

汽轮机汽缸和阀壳具有尺寸大、结构复杂且需要通过焊接与其他部件进行连接的特点, 要求合金具有优异的铸造工艺性和可焊性, 此外, 由于蒸汽温度的提高, 要求汽缸或阀壳用合金具有更加优异的抗蒸汽

氧化能力。对于铸造镍基高温合金, 微量元素 Si 可以改善合金的铸造性能、提高合金的可焊性、耐磨性、抗氧化和抗腐蚀能力^[4-9]。此外, 在高温合金冶炼过程中, Si 可以作为精炼剂加入^[10-12], 提高合金的冶金质量。因此, K325 合金中含有微量 Si 以提高合金的铸造工艺性、可焊性和抗蒸汽氧化腐蚀能力。然而, 迄今为止, 关于 Si 对高温合金影响规律的研究主要集中在变形高温合金领域。对于铸造高温合金, 仅有少量关于 Si 对枝晶偏析和凝固温度区间影响规律的研究。关于 Si 对铸造高温合金凝固特性、凝固路径、凝固组织和力学性能的系统研究尚未见报道, 影响规律尚不明确。因此, 本文作者通过调整 Si 含量, 采用扫描电镜、电子探针和差热分析技术系统研究了 Si 对 K325 合金凝固特性、凝固路径、凝固组织、热处理组织和拉伸性能的影响规律, 从而为优化 K325 合金中的 Si 含量, 改善铸造和焊接工艺提供实验基础和理论依据, 同时, 进一步揭示 Si 在铸造高温合金中的作用机制。

基金项目: 国家能源局项目(NY20150102); 国家自然科学基金资助项目(51301171)

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2017-04-17

通信作者: 肖 旋, 副教授, 博士; 电话: 024-24681920; E-mail: liuqingfenghao@163.com

1 实验

为保证合金成分的一致性,先用 200 kg 真空感应炉冶炼一炉母合金,其化学成分(质量分数,%)为: C 0.05, Cr 21.5, Mo 9, Nb+Al+Ti 4, Ni 余量。然后采用 25 kg 的真空感应炉重熔浇注成 4 组具有不同 Si 含量的试棒(No.1~4)。No.1 试棒未添加 Si, No.2~4 试棒 Si 含量分别为 0.5%、1.0%和 1.5%。差热分析(DTA)用样品直径 3 mm,厚度 1.5 mm,样品加热到 1400 °C 保温 1 min 后以 10 °C/min 的速度冷却测定 DTA 曲线。铸态试棒经固溶处理(1200 °C, 1 h, 水冷)后,加工成标距尺寸为 d 5 mm×25 mm 标准拉伸试样,在 AG-100KNG 试验机进行室温拉伸实验,在 AG-250KNE 试验机进行 700°C 瞬时拉伸实验。

金相样品的观察采用电解腐蚀,腐蚀液为 10 mL HNO_3 +30 mL HCl +50 mL $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$,在 10 V 电压下腐蚀 30~60 s。腐蚀后的试样在 Olympus GX51 型光学显微镜(OM)、Hitachi S-3400N 扫描电镜(SEM)及 JEOL 6340 型场发射扫描电镜(SEM)观察组织,利用能谱

(EDS)和 Shimadzu 1610 型电子探针(EPMA)分析各相的成分及元素偏析情况。四组合金在光学显微镜(OM)下采用截线法测定二次枝晶间距,取至少 20 次测量结果的平均值。每个合金棒样品在扫描电镜(SEM)下随机拍摄 20 张照片,用 photoshop CS6 和 Image Plus6.0 软件进行枝晶间距析出相的面积分数的统计。

2 结果

2.1 铸态显微组织

图 1 所示为不同 Si 含量 K325 合金的凝固组织特征。可以看出,4 种合金均呈现出明显的枝晶组织特征且存在明显的枝晶偏析。随 Si 含量的增加,二次枝晶明显粗化。枝晶组织的典型表征参数为枝晶间距。枝晶间距与合金的凝固行为和外部凝固条件相关,对铸件和采用铸锭制造的锻件性能有明显影响,而且枝晶间距及其形态还直接影响糊状区的流动、偏析和收缩等。对二次枝晶间距测量统计发现, No.1~4 合金的二次枝晶间距依次为 55、63、66 和 72 μm ,二次枝晶间距随 Si 含量的增加明显增大。

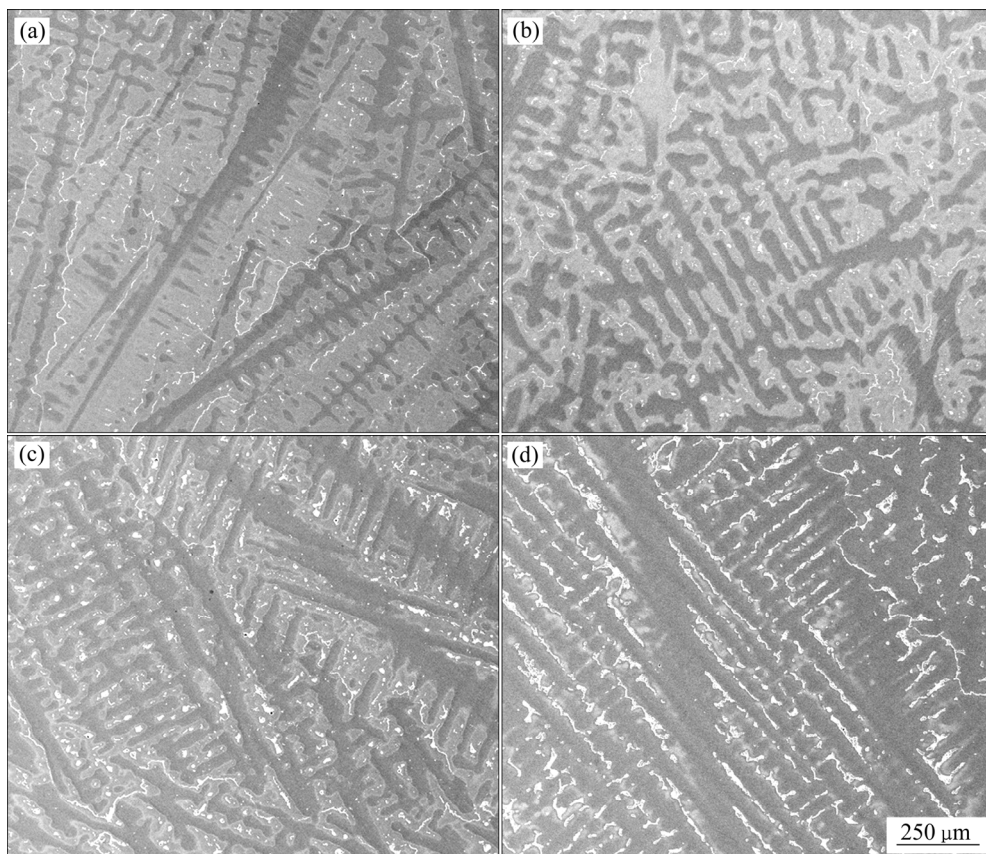


图 1 不同 Si 含量对合金铸态枝晶形貌的影响

Fig. 1 Effect of Si content on microstructures of as-cast alloys: (a) No.1 (virgin); (b) No.2 (0.5%Si); (c) No.3 (1.0%Si); (d) No.4 (1.5%Si)

2.2 Si 含量对合金偏析行为的影响

镍基高温合金作为一种多组元合金, 凝固过程中存在固相中和液相中两个扩散过程, 由于固相中扩散较慢, 导致随着凝固过程的进行, 从液相中先后凝固的固相成分发生变化, 形成枝晶偏析。枝晶偏析的程度可由元素偏析比 S_R 表示, S_R 是枝晶间测得的最大(正偏析)或最小(负偏析)溶质浓度与枝晶干中心测得的最小或最大溶质浓度之比^[13]。无论是正偏析还是负偏析元素, 其偏离 $S_R=1$ 越远, 表示该合金在凝固过程中偏析的程度越严重。

图 2 所示为 Si 元素对枝晶偏析的影响, 可以看出, Mo、Nb 和 Si 元素偏析比大于 1, 为正偏析元素, 偏聚于枝晶间; Ni 和 Cr 元素 S_R 值略小于 1, 为负偏析元素, 偏聚于枝晶干。Si 元素添加对 Ni、Cr 和 Mo 元素的偏析行为影响较小。随着 Si 含量增加, Ni、Cr 和 Mo 偏析比偏离于 1 程度略微增大, 偏析程度略有增加。然而, Si 含量对 Nb 和 Si 元素偏析程度具有明显影响。随着 Si 含量的升高, Nb 和 Si 元素偏析比偏离 1 程度逐渐增大, 偏析程度增加。这表明, Si 的添加主要促进 Nb 和 Si 元素在枝晶间的偏聚, 而对 Ni、Cr 和 Mo 元素的偏析影响较小。GUO 等^[12]的研究结果显示, Si 添加增加合金结晶温度间隔。合金的结晶

温度间隔与合金元素的偏析系数相关, 偏析系数偏离 1 程度的增大, 合金结晶温度间隔增大。由此可知, Si 添加引起合金结晶温度间隔增大与 Si 添加引起的合金偏析程度增大相关。

2.3 Si 含量对相析出行为的影响

图 3 所示为具有不同 Si 含量 K325 合金凝固组织特征。可以看出, 不含 Si 合金除具有明显的枝晶组织

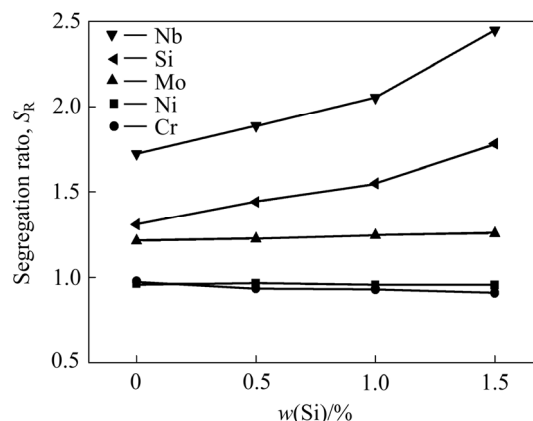


图 2 不同 Si 含量 K325 合金主要元素偏析的情况

Fig. 2 Segregation ratio of major elements in K325 alloy with different Si contents

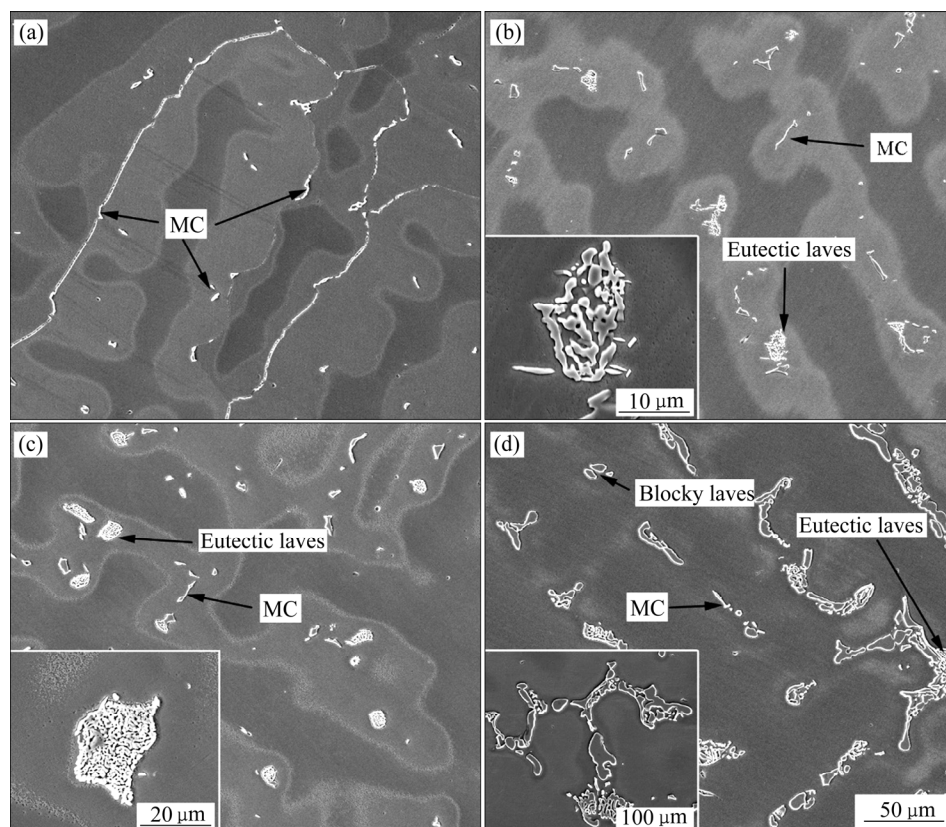


图 3 Si 含量对 K325 合金枝晶间析出相的影响

Fig. 3 Effect of Si content on interdendritic precipitation in as-cast alloys: (a) No.1 (virgin); (a) No.2 (0.5%Si); (c) No.3 (1.0%Si); (d) No.4 (1.5%Si)

特征之外,在枝晶间和晶界还存在白色不规则条状或块状析出相。能谱分析结果(见表1)表明白色析出相为富Nb、Mo和Ti的MC型碳化物。图3(b)所示为含0.5%Si合金的凝固组织特征,可以看出,除在枝晶间和晶界有块状和条状MC碳化物析出之外,枝晶间开始析出共晶相。能谱分析显示共晶相富Mo、Nb、Si和Ni,为 γ /Laves共晶。升高Si含量至1.0%(见图3(c)),MC碳化物含量显著减少, γ /Laves共晶相尺寸增大且量明显增加(见图4)。进一步升高Si含量至1.5%(见图3(d)),合金枝晶间除MC碳化物和 γ /Laves共晶之外,开始有块状Laves相直接析出,同时MC型碳化物的量进一步降低,而 γ /Laves共晶尺寸进一步增大且量进一步增加。此外,不同Si含量合金中 γ /Laves相共晶组织形貌具有明显差别,0.5%Si合金 γ /Laves共晶组织较小,呈半连续的筛网状结构(见图3(b))。1.0%Si合金中共晶组织明显长大, γ 和Laves相排列非常紧密,为连续致密的筛网状形貌(见图3(c))。当Si含量为1.5%时,共晶组织继续长大,形貌发生了较大变化呈花瓣状结构(见图3(d))。图5所示为Si含量为1.0%合金的SEM像和EPMA面扫描结果,可以看出,最先开始凝固的 γ 基体贫Nb、Si和Mo元素,后凝固的枝晶间富Nb、Si和Mo, Ni和Cr元素偏析倾向不明显。Laves相主要富集Nb、Mo和Si元素,MC碳化物主要富集Nb、Ti元素, Nb、Si元素明显偏聚于枝晶间。Si元素作为Laves相重要形成元素,其在枝晶间的富集促进Laves相析出,形成 γ /Laves共晶。同时, Si元素明显增大Nb元素在枝晶间偏析倾向,因此,随着Si含量增加,枝晶间Nb和Si元素含量富集程度增大,导致 γ /Laves共晶相尺寸增大且量明显增多。

表2所列为不同Si含量合金的DTA实验结果。可以看出,不含Si元素的合金只存在 γ 相吸热峰和MC型碳化物吸热峰,而含Si元素的合金出现了 γ /Laves共晶吸热峰。 γ /Laves初熔温度明显低于MC型碳化物初熔温度且随着Si含量增加逐渐降低。此外,随Si含量增加,MC型碳化物初熔温度明显降低,合金固、

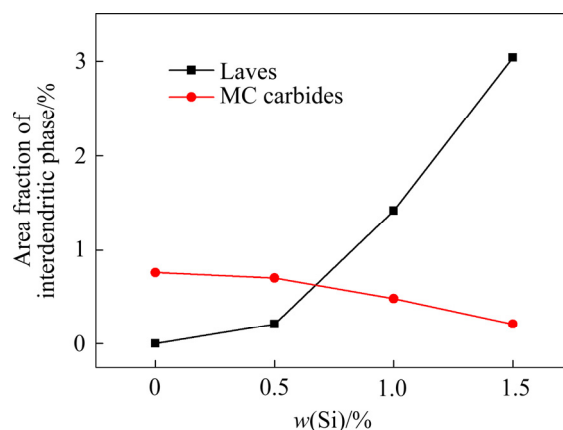


图4 Si含量对K325合金枝晶间析出相面积分数的影响

Fig.4 Effect of Si content on area fraction of interdendritic precipitation in K325 alloy

液相变温度降低,凝固温度区扩大。这与前期相关研究结果一致, Si元素降低合金凝固过程中固、液相线温度,扩大凝固温度区间,促进 γ /Laves共晶形成^[14-15]。

通过上述研究结果可知, Si含量的增加,一方面促进Nb、Mo、Si等Laves相形成元素偏聚于枝晶间,另一方面通过扩大凝固温度区间使得 γ /Laves共晶组织有更多的时间形核和长大,使得 γ /Laves共晶组织不断长大,形貌也由半连续向连续致密筛网状转变,最后形成花瓣状结构和块状Laves相。因此,合金开始凝固时,首先析出 γ 基体并以枝晶方式长大,随着凝固的进行,正偏析元素Nb、Si、Mo等元素不断地向枝晶间富集,当温度降低到MC碳化物、 γ /Laves共晶或Laves相析出温度时,MC碳化物、 γ /Laves共晶或Laves相开始析出,并最终形成 γ +MC+ γ /Laves共晶+块状Laves相组织。因此,不含Si合金的凝固顺序为: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma+MC \rightarrow \gamma+MC$ 。当Si质量分数在0.5%~1.0%之间时,由于偏析增大和强Laves相形成元素Si的加入,开始析出 γ /Laves共晶,此时合金的凝固顺序为: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma+MC \rightarrow L+\gamma+MC+\gamma/Laves \rightarrow \gamma+MC+\gamma/Laves$ 。当进一步升高Si含量至1.5%,开始析出块状Laves相,合金的凝固顺利变为: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma+MC \rightarrow L+\gamma+MC+\gamma/Laves \rightarrow L+\gamma+MC+\gamma/Laves+Laves \rightarrow \gamma+MC+\gamma/Laves+Laves$ 。

对比图2和图4可见,合金中Nb、Si元素的 S_R 变化趋势和枝晶间Laves相面积分数变化趋势一致,故Laves相分数的变化是由于凝固过程中Nb、Si在枝晶间的偏析变化造成的。合金中不含Si时,合金偏析较小,枝晶间Laves相形成元素Nb含量较低且缺乏Laves相形成元素Si,因此,无Laves相析出。当合

表1 实验合金中析出相的成分分析

Table 1 EDS analysis of phases in experiment alloys

Phase	Alloy No.	Mass fraction/%						
		Ni	Cr	Mo	Nb	Si	Al	Ti
MC	1-4	4.03	1.80	5.90	86.03	0.01	0.08	2.11
	2	40.58	11.38	26.47	16.48	4.90	0.05	0.13
Laves	3	39.57	8.95	23.30	21.32	6.59	0.11	0.15
	4	40.23	9.74	26.05	17.94	5.87	0.05	0.13

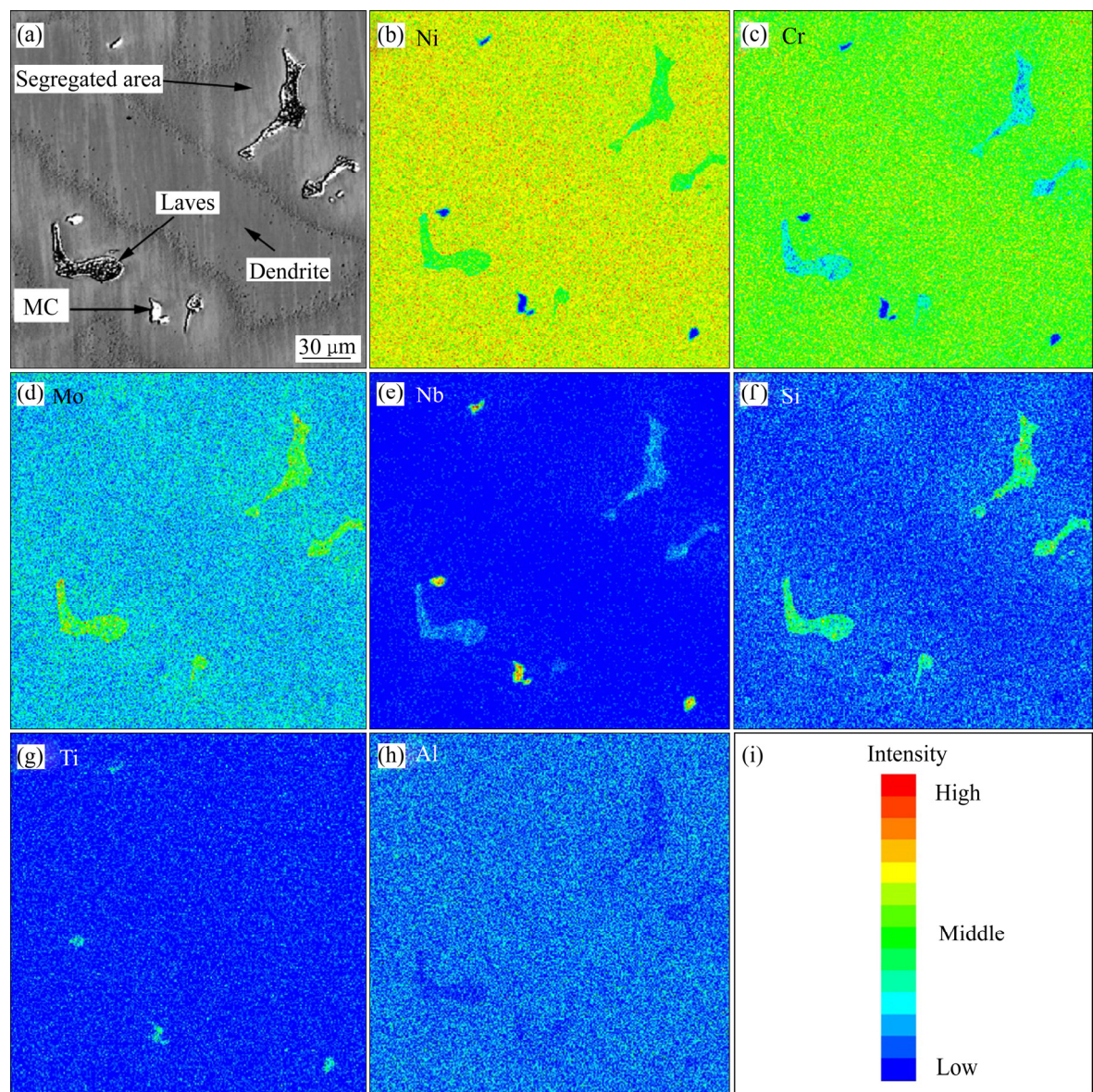


图 5 铸造 No.3 合金成分 EPMA 面扫描图

Fig. 5 Elemental maps from EPMA analysis of cast No.3 alloy: (a) SEM image; (b) Ni; (c) Cr; (d) Mo; (e) Nb; (f) Si; (g) Ti; (h) Al; (i) Color bar

表 2 No.1~3 合金升温条件下相变温度

Table 2 Phase transformation temperatures for No.1~3 alloys at heating process (T_L —Liquidus temperature, T_S —Solidus temperature, T_{MC} —MC carbides precipitation temperature, T_E —Eutectic melting temperature)

Alloy No.	Phase transformation temperature/°C				
	T_E	T_{MC}	T_S	T_L	T_L-T_S
1	—	1283	1319	1365	46
2	1252	1266	1301	1353	52
3	1221	1258	1286	1343	57

金中含有 0.5%Si 时, 合金中 Nb 元素偏析增大, 且 Si 元素富集于枝晶间, Laves 相形核驱动力增大, 枝晶间开始析出少量 γ /Laves 共晶。随着 Si 含量增加到 1.5%, Nb 和 Si 元素在枝晶间浓度急剧增大, 导致 Laves 相形核和长大驱动力进一步增大, 除 γ /Laves 共晶外, 块状 Laves 相也开始析出。因此, 随着 Si 含量增加, γ /Laves 共晶相面积分数不断增多。MC 碳化物与 Laves 相面积分数变化呈相反趋势, 这是由于这两相均为富 Nb 相, 两相对 Nb 元素的吸收为竞争关系, 故其面积分数随 Si 含量增加呈相反变化趋势。

2.4 Si 含量对热处理态组织特征和拉伸性能的影响

图 6 所示为不同 Si 含量的 K325 合金的热处理态组织特征。可以看出, 不含 Si 的合金热处理态相组成为 γ +MC, MC 碳化物为块状和粒状。含 Si 元素合金中的 γ /Laves 共晶相消失, γ /Laves 共晶组织转变为块状, 这表明固溶处理可以有效消除 γ /Laves 共晶。然而, 合金相组成为 γ +MC+Laves, Laves 相与 MC 碳化物均为块状, MC 碳化物边缘更加圆滑, Laves 相边缘棱角比较尖锐, 固溶处理并未消除 Laves 相。同时, 在该固溶条件下未观察到回溶现象, 这表明块状 Laves 相的回溶温度高于 1200 °C。此外, 随 Si 含量增加, 块状 Laves 相明显增多, 特别是当 Si 含量达到 1.5%, 块状 Laves 相大量出现, 形成 Laves 相团簇区。

图 7 所示为 Si 含量对合金室温及 700 °C 拉伸性能的影响。由图 7(a)可以看出, 合金 700 °C 屈服强度基本保持同一水平, 但 Si 元素的添加, 明显降低合金的 700 °C 抗拉强度和室温拉伸强度。当 Si 含量低于 1.0% 时, 随 Si 含量的升高, 抗拉强度略微降低。当 Si 含量达到 1.5% 时, 合金的屈服强度和抗拉强度均显著降低。同时由图 7(b)所示, Si 含量对 K325 合金室温和 700 °C 伸长率影响规律类似: 当 Si 含量低于 1.0% 时伸长率保持较高水平甚至稍有升高; 当 Si 含量达到 1.5% 时, 伸长率降至最小。此外, Si 含量为 1.5% 时, 合金合金室温面缩率最差, 1.5%Si 合金较 No.1 合金室温

面缩率降低 17%。值得注意的是 No.1~4 合金面缩率和伸长率均高于 37 %, 说明各 K325 合金依旧保持较好的塑性。

综上所述, Si 元素对 K325 合金的拉伸强度有明显影响, 然而, 当 Si 含量不超过 1.0% 时, 强度略有降低。当 Si 含量为 1.5% 时, 合金强度急剧降低。Si 对合金瞬时性能的影响, 主要通过对合金二次枝晶间距的影响来实现。由于 Si 元素添加, 使得合金二次枝晶间距显著增大, 导致合金拉伸强度明显降低, 特别是 1.5%Si 合金比基础合金(No.1 合金)二次枝晶间距大 17 μm , 使得 1.5%Si 合金的室温和 700 °C 高温拉伸强度最差。合金中析出相的变化, 也将对合金的力学性能产生影响。由图 2 中数据可以看出, No.1 合金中无 Laves 组织, 但 MC 碳化物含量最高为 0.8%, 因此, 合金具有最高的拉伸强度和塑性。随着 Si 元素的加入, 合金开始析出 Laves 相且其含量随 Si 含量增加不断增多, 而 MC 碳化物含量不断减少。当 Si 含量较低时, MC 碳化物的降低和 Laves 相的升高使合金的强化效果处于平衡态, 因此, 合金的强度变化不大。然而, Si 含量为 1.5% 时, Laves 相含量极高为 3.0%, 而 MC 碳化物含量极低只有 0.2%。Laves 相富含 Nb、Mo 元素, 因此, Laves 相的大量析出消耗了大量的固溶强化元素 Nb、Mo, 使合金的拉伸强度不断降低, 同时, 由于具有尖锐棱角的 Laves 相易于成为裂纹源,

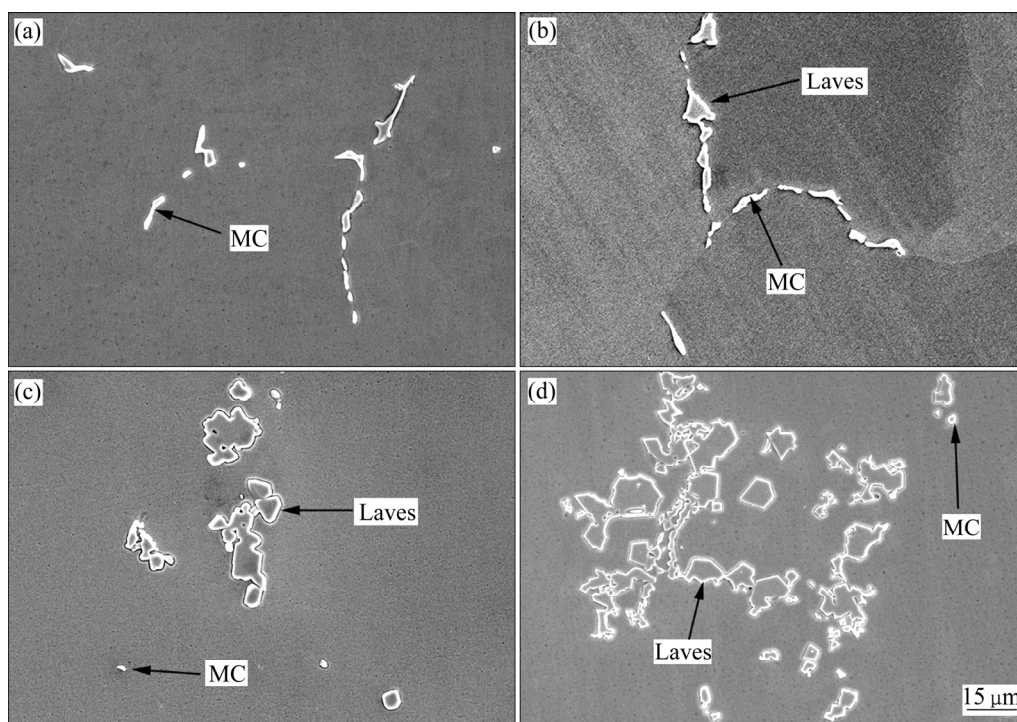


图 6 Si 含量对 K325 合金热处理态组织的影响

Fig. 6 Microstructures of No.1(a), No.2(b), No.3(c) and No.4(d) alloys after solution treatment

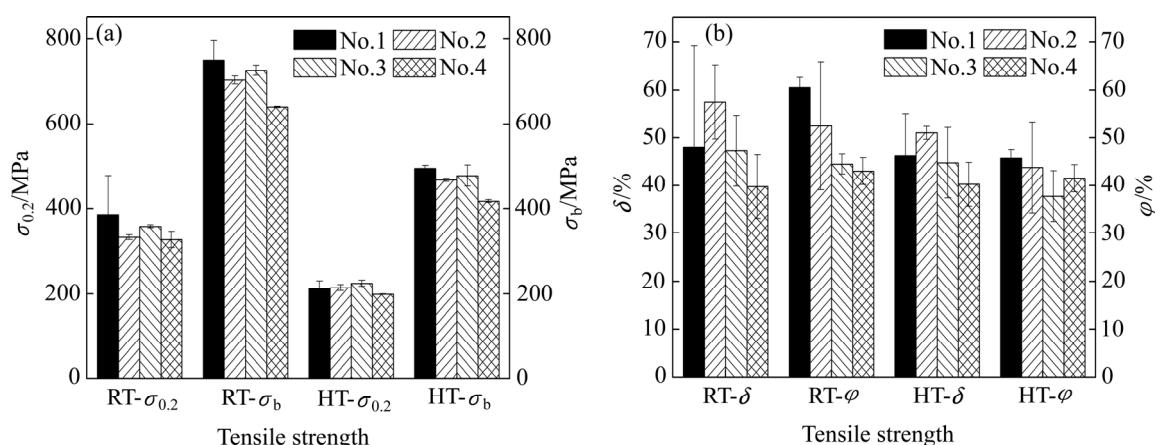


图 7 不同 Si 含量 K325 合金室温和 700 °C 拉伸性能的影响

Fig. 7 Tensile properties of K325 alloy tested at room-temperature and 700 °C with different Si contents: (a) Tensile strength; (b) Tensile plasticity (RT—Room temperature, HT—700 °C)

因此也不利于合金的拉伸强度和塑性, 导致合金的拉伸强度和塑性急剧降低。

3 结论

1) 随着 Si 含量的增加, 铸造 K325 合金中 Nb、Si 的偏析增大, 促进枝晶间和晶界 γ /Laves 共晶相的析出, 降低 MC 碳化物的含量。

2) 未添加 Si 合金, 凝固组织只析出 MC 碳化物; Si 含量为 0.5% 时, K325 合金开始析出半连续筛网状 γ /Laves 共晶组织; Si 含量升高至 1.0% 时, 共晶组织进一步长大, 形貌变为连续致密的筛网状; 进一步升高 Si 含量至 1.5% 时, 共晶组织转变为花瓣状结构, 并开始析出块状 Laves 相。

3) 合金固溶处理后, 铸态组织中的共晶组织转变为块状的 Laves 相, 且块状 Laves 相回溶温度高于 1200 °C。

4) 当 Si 元素明显降低合金的室温和 700 °C 拉伸性能, 特别是 Si 含量为 1.5% 时, 合金的抗拉强度急剧降低, 拉伸塑性相对较差。从 K325 合金铸态组织和拉伸性能考虑, Si 含量应不超过 1.0%。

REFERENCES

- [1] 谭梅林, 王常帅, 郭永安, 郭建亭, 周兰章. Ti/Al 比对 GH984G 合金长期时效过程中 γ' 沉淀相粗化行为及拉伸性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(10): 1260–1268.
TAN Mei-lin, WANG Chang-shuai, GUO Yong-an, GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang. Influence of Ti/Al ratios on γ' coarsening behavior and tensile properties of GH984G alloy during long-term thermal exposure[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(10): 1260–1268.
- [2] WANG C S, GUO Y A, GUO J T, ZHOU L Z. Investigation and improvement on structural stability and stress rupture properties of a Ni-Fe based alloy[J]. Materials and Design, 2015, 88(25): 790–798.
- [3] 王天剑, 范华, 张邦强, 巩秀芳, 张 波. 700 °C 超超临界汽轮机关键部件用镍基高温合金选材[J]. 东方汽轮机, 2012(2): 46–53.
WANG Tian-jian, FAN Hua, ZHANG Bang-qiang, GONG Xiu-fang, ZHANG Bo. Nickel-based superalloy for key components of ultra-supercritical steam turbine operating above 700 °C[J]. Dongfang Turbine, 2012(2): 46–53.
- [4] 郭建亭. 几种微量元素在高温合金中的作用与机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 465–475.
GUO Jian-ting. Effect of Several minor elements on superalloys and their mechanism[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 465–475.
- [5] MINER R V. Effects of silicon on the oxidation, hot-corrosion, and mechanical behavior of two cast nickel-base superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1977, 8(12): 1949–1954.
- [6] YUN D W, SEO S M, JEONG H W, YOO Y S. The effects of the minor alloying elements Al, Si and Mn on the cyclic oxidation of Ni-Cr-W-Mo alloys[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 176–188.
- [7] AMANO T, TAGUCHI T. Spalling of the surface oxide formed on Ni-(20,40,60,80)Cr alloys with small additions of Ce and Si[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1993, 193(1/2): 20–22.
- [8] YE H A C, KAWAGISHI K, HARADA H, YOKOKAWA T,

- KOIZUMI Y, KOBAYASHI T, PING D H, FUJIOKA J, SUZUKI T. Development of Si-bearing 4th generation ni-base single crystal superalloys[C]// *Superalloys 2008*. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2008: 619–628.
- [9] DOUGLASS D L, ARMIJO J S. The effect of silicon and manganese on the oxidation mechanism of Ni-20 Cr[J]. *Oxidation of Metals*, 1970, 2(2): 207–231.
- [10] XU Z F, LI J, DONG J S, LI Z J, ZHOU X T. The effect of silicon on precipitation and decomposition behaviors of M_6C carbide in a Ni-Mo-Cr superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 620: 197–203.
- [11] XIAO C B, HAN Y F. Effect of silicon on microstructure and stress rupture properties at 1100 degrees C of yttrium modified Ni-Al-Mo-B alloy IC6[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36(4): 1027–1030.
- [12] GUO J T, ZHOU L Z. The effect of phosphorus, sulphur and silicon on segregation, solidification and mechanical properties of cast alloy 718[C]// *Superalloys 1996*. New York: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996: 451–455.
- [13] 肖 旋, 高 慈, 秦学智, 郭永安, 郭建亭, 周兰章. 抽拉速率对定向凝固 DZ483 合金的微观组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(10): 2808–2816.
- XIAO Xuan, GAO Ci, QIN Xue-zhi, GUO Yong-an, GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang. Effects of withdrawal rate on microstructures and mechanical properties of directionally solidified DZ483 superalloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(3): 2808–2816.
- [14] 郭建亭, 周兰章, 秦学智. 铁基和镍基高温合金的相变规律与机理[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(3): 476–485.
- GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, QIN Xue-zhi. Phase transformation and their mechanisms in Fe- and Ni-base superalloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(3): 476–485.
- [15] SINGH J B, VERMA A, JAISWAL D M, KUMAR N, PATEL R D, CHAKRAVARTTY J K. Rejuvenation of service exposed ammonia cracker tubes of cast alloy 625 and their re-use[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 644: 254–267.

Influence of Si on solidification behaviors and tensile properties of K325 alloy

XIAO Xuan¹, LIU Qing-feng^{1,2}, WANG Chang-shuai², ZHOU Lan-zhang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The solidification behaviors, microstructure and tensile properties of K325 superalloy were investigated by means of SEM, EPMA, DTA, and so on. The results show that the addition of Si promotes the dendrite coarsening and aggravates the elements segregation of Nb, besides elements segregation increased along with increasing the Si content. The solidification sequence of K325 alloy without Si addition is as follows: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma+MC \rightarrow \gamma+MC$, and the as-cast microstructure is $\gamma+MC$. The solidification sequence of alloys containing silicon is as follows: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma+MC \rightarrow L+\gamma+MC+\gamma/Laves \rightarrow \gamma+MC+\gamma/Laves$, and the as-cast microstructure is $\gamma+MC+\gamma/Laves$. Furthermore, the size and amount of $\gamma/Laves$ eutectic phase significantly increases with increasing Si content, and the eutectic morphology changes from semi-continuous to continuous dense sieve pattern and petal-like. The $\gamma/Laves$ eutectic phase disappears after the solution treatment of silicon-containing alloy. The phase composition is $\gamma+MC+Laves$ phase, and Laves phase is blocky with sharp edges. The amount of Laves phase increases with increasing Si content, and Laves phase comes together into being clusters when Si content is 1.5% (mass fraction). The influence of Si element on tensile strength is closely related to Si content. When Si content is less than 1.0%, Si has no obvious effect on the tensile strength of the alloy, while tensile strength decreases obviously when Si content is 1.5%.

Key words: Si; K325; solidification behavior; microstructure; tensile property

Foundation item: Project(NY20150102) supported by the National Energy Administration Program of China; Project(51301171) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2016-03-11; **Accepted date:** 2017-04-17

Corresponding author: XIAO Xuan; Tel: +86-24-24681920; E-mail: liuqingfenghao@163.com

(编辑 王 超)