

偏析对 DZ483 镍基高温合金糊状区内液相密度的影响*

封少波 张楠楠 罗兴宏

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要 为研究 DZ483 合金在凝固过程中的元素偏析行为对糊状区内液相密度的影响, 采用等温凝固结合水淬法对合金进行不同温度下的凝固实验. 利用 OM 和 SEM 观察试样的凝固组织, 利用 EDS 测量固相和剩余液相的元素含量, 并根据剩余液相的成分计算其密度. 结果表明, DZ483 合金的开始凝固温度略低于 1335 °C, 在 1325 °C 液相中开始析出富含 Ta 和 Ti 的 MC; W 和 Co 为负偏析元素, Mo, Ta 和 Ti 为正偏析元素, 而 Al 和 Cr 几乎不发生偏析; 剩余液相的密度随温度降低基本呈下降趋势, 但在 1325 至 1315 °C 之间有所回升. 计算结果表明, 温度对液相密度的影响很小, 合金元素的偏析对液相密度的影响占主要地位. 其中, Mo 和 Ta 的偏析导致液相密度增加, 而 Ti 和 W 的偏析导致液相密度明显降低. 各合金元素的偏析对密度变化的贡献由大到小顺序为: Ti>Ta>W>Cr>Mo>Al>Co. MC 的形成消耗了大量的 Ti 和 Ta, 对合金元素的偏析造成一定的影响, 从而导致液相密度在 1325 至 1315 °C 之间有所增加.

关键词 镍基高温合金, 雀斑, 偏析, 密度

中图分类号 TG146.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2012)05-0541-06

INFLUENCE OF SEGREGATION ON LIQUID DENSITY IN THE MUSHY ZONE OF DZ483 Ni-BASED SUPERALLOY

FENG Shaobo, ZHANG Nannan, LUO Xinghong

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: LUO Xinghong, professor, Tel: (024)23971968, E-mail: xhluo@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51171196)

Manuscript received 2012-01-16, in revised form 2012-04-01

ABSTRACT Ni-based superalloys have been widely applied in advanced aeroengine as gas turbine blades and vanes. The freckles in superalloys formed during directional solidification have deleterious influence on the properties of the alloys. The generation of freckles is associated with the local liquid density gradient in the mushy zone, which is obviously influenced by microsegregation of alloy elements. However, the individual contributions of the various elements to the total density variation are still not well known. Therefore, the effect of microsegregation on the liquid density variation in DZ483 Ni-based superalloy was investigated by isothermal solidification together with liquid quench method. Solidification microstructures were observed by optical microscope and SEM, and the compositions of the solids and the residual liquid were determined by EDS. Based on the compositions of residual liquids, the densities of liquids at different temperatures were calculated. The results show that the onset solidification temperature of DZ483 alloy is a little bit below 1335 °C, and MC, which is enriched with Ta and Ti, formed at about 1325 °C. The segregation coefficients of different elements show that W and Co are negative segregation elements, Ta and Ti positive segregation elements, while Al and Cr show little segregation. The density of the residual liquid generally decreases as the decrease of temperature, with the exception that it increases somewhat from 1325 to 1315 °C. Calculation results show that temperature has insignificant influence on liquid density, and variation of density is mainly due to microsegregation. Segregations of Mo and Ta lead to the increase of density, but segregations of Ti and W present opposite effect. Contribution of each element to the variation of the liquid density

* 国家自然科学基金资助项目 51171196

收到初稿日期: 2012-01-16, 收到修改稿日期: 2012-04-01

作者简介: 封少波, 男, 1984 年生, 博士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2012.00037

is analyzed. The sequence of contributions of alloy elements to the variation of total liquid density is $Ti > Ta > W > Cr > Mo > Al > Co$. The formation of MC consumes an abundant of Ti and Ta , resulting in the increase of liquid density from 1325 to 1315 °C.

KEY WORDS Ni-based superalloy, freckle, segregation, density

镍基高温合金是制造先进航空发动机和燃气轮机叶片的关键材料^[1-5]. 随着锭型的增大以及 W 和 Ta 等含量的增多, 定向凝固高温合金铸件中出现雀斑的几率增加^[6-11]. 雀斑是一种通道宏观偏析, 它不仅可导致合金蠕变性能变差, 还会降低铸件的合格率. 雀斑的产生与凝固过程中糊状区内热溶质对流有重要联系^[12-15]. 当枝晶间液相的密度梯度方向与重力方向相反时, 液相处于不稳定状态, 在重力作用下将产生热溶质对流并最终导致雀斑的出现. 研究高温合金凝固过程中糊状区内的液相密度变化, 有助于加深对热溶质对流形成过程的理解, 对预防雀斑的出现具有重要意义.

合金的液相密度是温度和溶质浓度的函数. 合金凝固时, 凝固前沿及糊状区内存在温度梯度和溶质浓度梯度, 从而导致液相中出现密度梯度. 研究表明, 合金成分变化对液相密度的影响更为显著. 因此, 合金元素在凝固过程中的偏析会对液相密度产生重要影响. 镍基高温合金中通常含有 7 种以上的合金元素, 且各合金元素在凝固过程中的偏析行为不同^[16-19]. 目前, 尽管对高温合金的合金元素偏析规律进行了大量研究, 但对合金元素的偏析对糊状区内液相密度的影响却关注较少^[20,21]. Tin 和 Pollock^[22,23] 研究发现 W 偏析于枝晶干并导致枝晶间的液相密度减少, 从而促进高温合金中雀斑的出现, Ta 和 Mo 偏析于糊状区内的液相中, 增加了液相的密度, 从而有利于抑制雀斑的产生. 然而, 上述研究仅限于定性判断元素的偏析对液相密度的影响, 并没有对这种影响进行定量表征. Wang 等^[24,25] 研究了 Ni-Cr-Fe 基高温合金糊状区内液相密度的变化, 并说明了主要合金元素的偏析对液相密度产生的影响, 但未明确各合金元素的偏析在液相密度变化中起到的作用大小. 鉴于不同合金元素的物理性质各异, 且其在凝固过程中的偏析规律也不一样, 因此在高温合金凝固时合金元素对糊状区内液相密度的贡献大小也会存在差别. 因此, 有必要确定各合金元素的偏析对液相密度的贡献, 这对合理设计合金成分和选择适当的凝固参数来避免雀斑的出现, 乃至建立完备的雀斑预测机制都具有重要意义.

等温凝固方法是指将合金加热到其熔点以上某一温度后保温一段时间, 然后将其冷却至某一温度保温一段时间后迅速水淬. 该方法可实现合金在其凝固区间的任意温度凝固, 剩余液相在随后的水淬过程将快速凝固, 从而有利于研究合金在固液两相区的凝固组织及液固两相的成分^[26].

DZ483 合金为国内较先进的定向凝固镍基高温合金

之一, 其成分中含有 Ti , W 和 Ta 这些密度与基体元素差别大、偏析严重且偏析行为各不相同的元素. 本文以 DZ483 合金为研究对象, 采用等温凝固结合水淬的方法制备不同温度下的凝固试样, 研究凝固过程中合金元素的偏析行为以及元素偏析对糊状区内液相密度的影响, 重点分析各合金元素的偏析对密度变化的贡献大小.

1 实验方法

实验所用材料为 DZ483 镍基高温合金, 其名义成分(质量分数, %) 为 Cr 11.88, Co 9.06, Ta 4.94, Ti 3.92, W 3.72, Al 3.48, Mo 2.06, C 0.074, Ni 余量. 采用真空感应炉熔炼 DZ483 母合金, 并加工成直径 16 mm, 长 10 mm 的圆柱形试样. 将试样置于刚玉坩埚内并用 Al_2O_3 粉末覆盖后放入 KBF1700 箱式电阻炉内进行等温凝固实验, 控温精度为 ± 1 °C. 等温凝固实验过程为: 首先将试样加热至 1380 °C, 保温 10 min, 使试样全部熔化; 然后以 10 °C/min 的冷却速率将试样冷至 1300—1335 °C 间的不同预设温度, 保温 15 min 后迅速水淬. 凝固试样经预磨、抛光和化学侵蚀后, 在 Olympus 金相显微镜 (OM) 下观察凝固组织, 利用 S-3400N 扫描电镜 (SEM) 观察各相的形貌, 用 SEM 附带的能谱仪 (EDS) 测量等温凝固组织和剩余液相的成分, 腐蚀试剂组成为 4 g $CuSO_4$ + 20 mL HCl + 20 mL H_2O . 剩余液相的成分测量面积约为 $100 \mu m \times 100 \mu m$, 每个试样至少测量 5 个区域的成分, 取平均值, 以避免液相淬火组织中成分偏析对液相成分测量的影响, 保证液相成分测量结果的可靠性. 固相成分测量的区域约为 $20 \mu m \times 20 \mu m$, 每个试样也至少测量 5 个区域的成分, 再取平均值.

2 实验结果

2.1 合金的等温凝固组织

DZ483 合金在不同温度下等温凝固后, 其凝固组织如图 1 所示. 可见, DZ483 合金在 1335 °C 下保温 15 min 后水淬的组织完全为细小的树枝晶 (图 1a), 说明 DZ483 合金在 1335 °C 时为单一的液相; 当温度降至 1330 °C 时, 试样中出现粗大的枝晶组织 (图 1b), 图中白色的大块椭圆状相为从液相中首先凝固的 γ 相, γ 相四周为剩余液相在水淬过程中形成的细小枝晶, 说明 DZ483 合金的初凝温度应在 1335—1330 °C 之间; 随着凝固温度的降低, 初生 γ 相不断增多并呈枝晶状, 而液相不断减少, 到 1300 °C 时剩余液相变成断续分布 (图 1c 和 d).

当凝固温度降至 1325 °C 时, DZ483 合金的等温凝固组织中还出现少量的碳化物 MC , 如图 2 所示. 图 2a 所

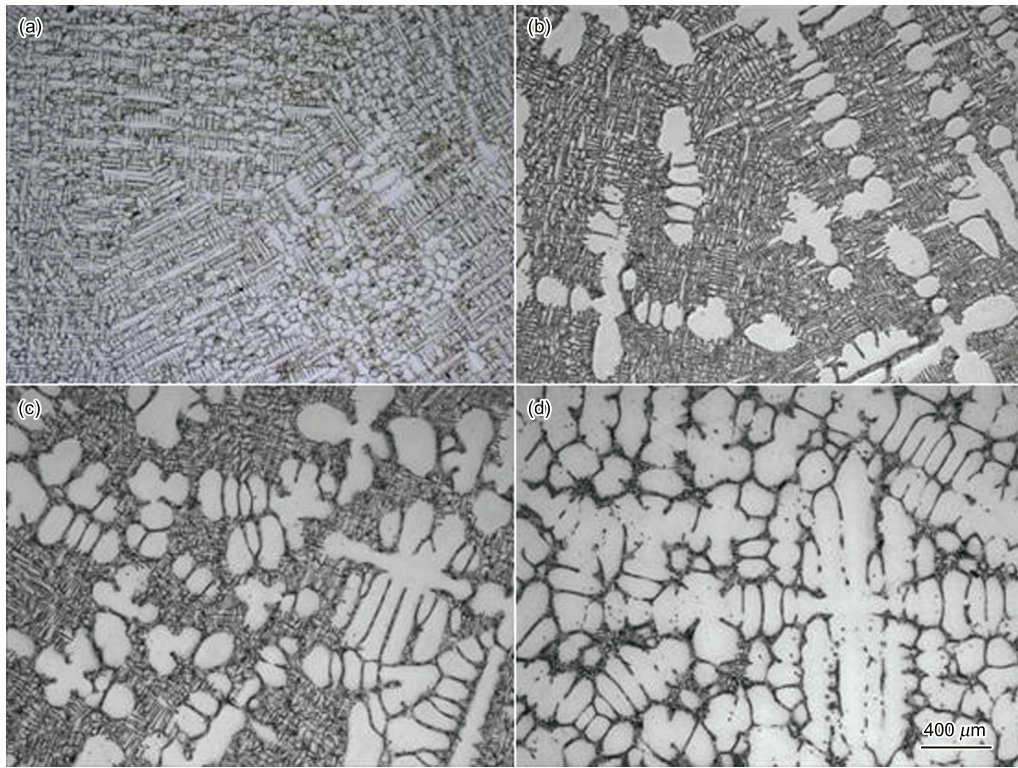


图 1 DZ483 合金在不同温度下的等温凝固组织

Fig.1 Isothermal solidification microstructures of DZ483 alloy at 1335 °C (a), 1330 °C (b), 1320 °C (c) and 1300 °C (d)

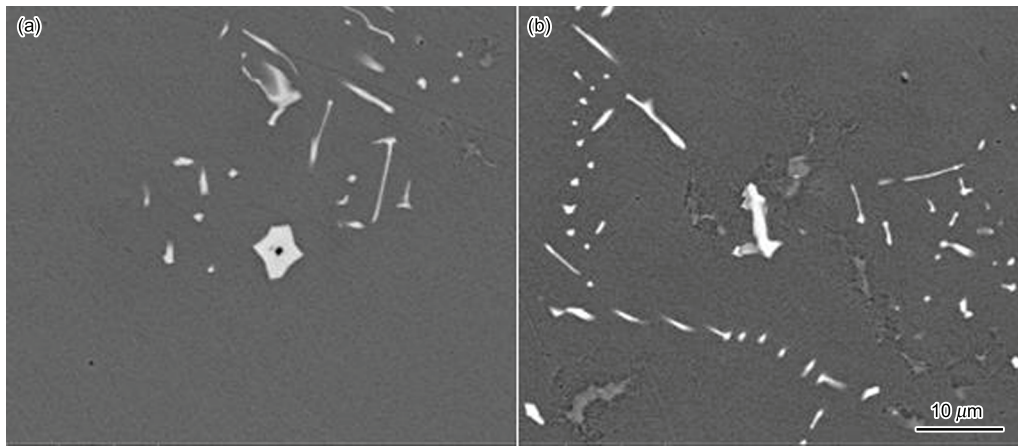


图 2 1325 °C 等温凝固过程及快淬过程中析出的 MC

Fig.2 MC precipitated during isothermal solidification at 1325 °C (a) and subsequent quenching (b)

示的块状及骨架状 MC 分布在粗大枝晶干内. 剩余液相在随后的水淬过程中主要析出骨架状的 MC, 分布在水淬中形成的细小枝晶干中, 如图 2b 所示. EDS 结果表明 MC 为富含 Ta 和 Ti 相, 可见, MC 从液相中直接析出会大量消耗了凝固前沿液相中富集的 Ta 和 Ti.

2.2 合金元素的偏析

利用 EDS 测量了 DZ483 合金等温凝固后固相和剩余液相的成分, 其结果如图 3 所示. 由图 3a 可见, 从

1330 °C 到 1315 °C, 固相中各合金元素的含量变化较小, 但当温度达到 1310 °C 时, 固相中 Ta 和 Ti 的含量有所增加. 由图 3b 可见, 随着等温凝固温度的降低, 剩余液相中 Ta 的含量先增加, 在 1320 °C 至 1310 °C 之间维持不变, 温度进一步降低时又迅速增加; Ti 与 Ta 的变化规律基本类似, 从 1330 °C 到 1325 °C 之间剩余液相中 Ti 含量增加, 而在 1325 至 1315 °C 之间基本不变, 温度降至 1310 °C 时其又大幅增加; 液相中的 Cr 含量除在 1315 °C

时有所降低外,基本随着温度的降低而略有增加;Mo 含量随着温度的降低逐渐增加,但增加幅度不大;W 含量大致随着温度的降低不断减少,但减少的趋势逐渐变缓,在 1320 °C 之后变得平缓;Co 含量随温度降低而逐渐减少,而 Al 含量则基本保持不变. 剩余液相中 Ti 和 Ta 含量的变化规律与凝固前沿析出富含 Ta 和 Ti 的 MC 有关:当温度降至 1320 °C 时,MC 析出量增多,大量 MC 相形成消耗了凝固前沿富集的 Ta 和 Ti,部分或完全抵消了由于偏析引起的 Ta 和 Ti 含量的增加,使得剩余液相中 Ta 和 Ti 的含量在 1320 到 1315 °C 基本不变;随着凝固温度的进一步降低,由于合金中 C 含量较少,MC 的析出不足以完全消耗从固相中排出的 Ta 和 Ti,液相中 Ta 和 Ti 的含量继续增加.

2.3 液相密度计算

根据 Mukai 等 [27] 提出的方法计算剩余液相的密度,具体计算公式如下:

$$\rho = \frac{\sum X_i M_i}{\sum X_i V_i} \quad (1)$$

式中, ρ 为液相密度, X_i 为液相中组元 i 的摩尔分数, M_i 为组元 i 的原子量, V_i 为组元 i 的偏摩尔体积. EDS 测量的不同温度下剩余液相中各合金元素摩尔分数如表 1 所示.

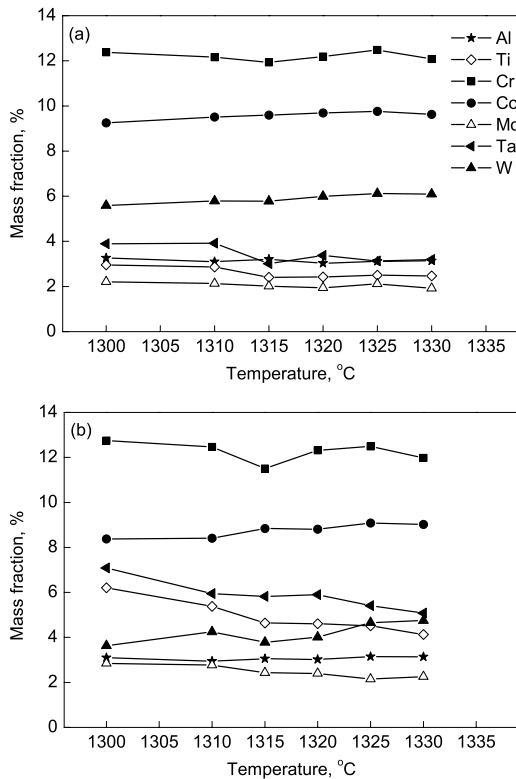


图 3 固相及残余液相中合金元素含量与等温凝固温度的关系
Fig.3 Changes of alloy elements contents in solid phase (a) and residual liquid phase (b) with isothermal solidification temperature

各元素不同温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 下的偏摩尔体积 V ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$) 计算公式如下,其中 Ni 和 Ti 元素的偏摩尔体积以摩尔体积代替 [27]:

$$V_{\text{Cr}} = 8.1686 + 7.7257 \times 10^{-4}T \quad (2)$$

$$V_{\text{Co}} = 4.5795 + 2.0501 \times 10^{-3}T + (15.0911 - 8.8179 \times 10^{-3}T)X_{\text{Co}} \quad (3)$$

$$V_{\text{W}} = 45.1768 - 1.92 \times 10^{-2}T - (605.8481 - 0.321T)X_{\text{W}} \quad (4)$$

$$V_{\text{Ta}} = 97.6917 - 4.6711 \times 10^{-2}T - (2223.0992 - 1.1553T)X_{\text{Ta}} \quad (5)$$

$$V_{\text{Al}} = 9.3859 - 2.3468 \times 10^{-4}T \quad (6)$$

$$V_{\text{Mo}} = 11.8445 - 1.3703 \times 10^{-3}T \quad (7)$$

$$V_{\text{Ni}} = 7.4287 + 1.4091 \times 10^{-3}(T - 1728) \quad (8)$$

$$V_{\text{Ti}} = 7.8304 + 1.9697 \times 10^{-3}T \quad (9)$$

将表 1 中数据和根据式 (2)–(9) 计算所得不同温度下合金元素的偏摩尔体积及各合金元素的原子量 [28] ($M_{\text{Al}}=26.98$, $M_{\text{Ti}}=47.87$, $M_{\text{Cr}}=51.99$, $M_{\text{Co}}=58.93$, $M_{\text{Ni}}=58.69$, $M_{\text{Mo}}=95.94$, $M_{\text{Ta}}=180.95$, $M_{\text{W}}=183.84$)

表 1 不同温度下剩余液相中元素的摩尔分数

Table 1 Mole fraction of elements in the residual liquid at different temperatures

$T, ^{\circ}\text{C}$	Mole fraction (%)							
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W
1335	6.73	4.63	13.37	8.98	61.91	1.34	1.58	1.46
1330	6.92	5.13	13.72	9.11	60.50	1.40	1.67	1.54
1325	6.94	5.61	14.30	9.18	59.36	1.33	1.78	1.51
1320	6.68	5.73	14.12	8.91	59.82	1.49	1.94	1.30
1315	6.73	5.77	13.18	8.93	60.74	1.51	1.92	1.22
1310	6.52	6.71	14.33	8.53	58.86	1.73	1.97	1.38
1300	6.85	7.74	14.65	8.48	56.97	1.78	2.34	1.18

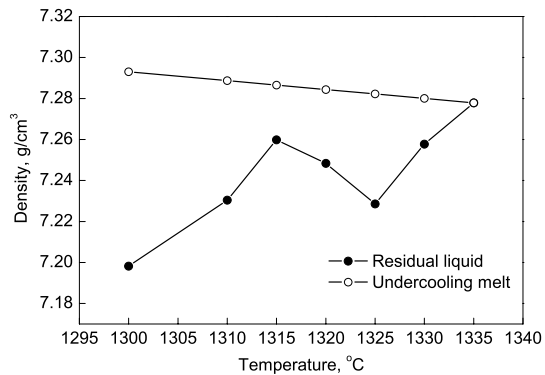


图 4 等温凝固过程中残余液相的密度及过冷 DZ483 合金熔体的密度与温度的关系
Fig.4 Changes of densities of residual liquid phase during isothermal solidification and undercooling DZ483 alloy melt with temperature

183.84) 分别代入式 (1), 计算得出不同温度下的剩余液相的密度如图 4 所示. 由图可见, 剩余液相密度随凝固温度的降低基本呈下降趋势, 只是在 1325 至 1315 °C 之间有所回升; 液相密度在 1335 °C 时最大, 为 7.28 g/cm³, 在 1300 °C 时剩余液相的密度降至最低, 为 7.20 g/cm³. 由于液相密度是温度和成分的函数, 为单独考察温度对液相的密度影响, 假设液相在冷却过程中始终处于过冷状态而不凝固, 其成分为 1335 °C 时的液相成分, 利用式 (1) 计算了过冷液相密度随温度的变化, 结果亦示于图 4 中. 可见, 当液相成分不变时, 其密度随着温度的降低而线性增加, 但是, 在整个温度区间内液相的密度变化很小, 远小于凝固过程中剩余液相密度的变化.

3 分析讨论

3.1 合金元素的偏析行为

DZ483 合金在等温凝固过程中, 合金元素的溶质再分配导致剩余液相的成分发生变化. 分配系数 k 可以更具体地表征凝固过程中合金元素的偏析行为. 本文中定义 k 为合金元素在固相中的含量与其在液相中的含量之比. 对于正偏析元素, $k < 1$, 且 k 值越小, 则其在液相中富集程度越高, 偏析也愈严重; 对于负偏析元素, $k > 1$, 且 k 值越大, 其在液相中贫化也越严重. 图 5 示出了合金元素在不同温度下的分配系数. 可见, W 的分配系数远大于 1, 为强烈负偏析元素; Co 的分配系数略大于 1, 为程度较轻的负偏析元素; Ta 和 Ti 的分配系数远小于 1, 为强烈的正偏析元素; Mo 的分配系数小于 1, 为中等的正偏析元素; Al 和 Cr 的分配系数接近 1, 表明 Al 和 Cr 在固液两相中偏析很小. 以 $|k - 1|$ 的大小为判断标准, 这些合金元素偏析程度由重到轻的顺序为: Ti > Ta > W > Mo > Co > Al > Cr. 此外, 由图 5 还可以看出, 随着等温凝固温度的下降, W 的分配系数大致呈增加趋势, 而 Mo, Ta 和 Ti 的分配系数有所降低, 其它元素的分配系数则变化较小.

3.2 元素偏析对剩余液相密度的影响

凝固温度、合金元素的偏析以及 MC 的形成都会对

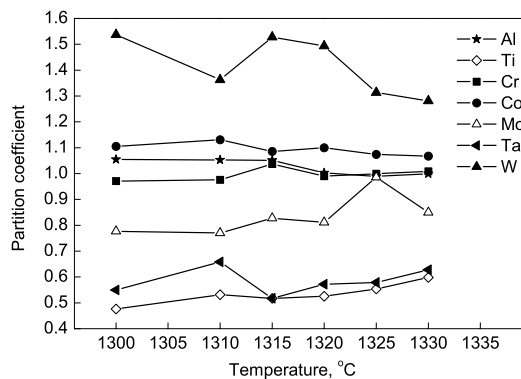


图 5 不同元素分配系数随温度的变化

Fig.5 Changes of elements partition coefficient change with temperature

剩余液相的密度产生影响. 由图 4 可知, DZ483 合金凝固时剩余液相的密度随凝固过程的进行而不断变化, 而由于高温合金液相体膨胀系数为正但很小, 温度对液相的密度影响很小 [29]. 因此, 合金在凝固过程中糊状区内的液相密度变化主要是合金元素的偏析造成的.

合金元素的偏析对剩余液相密度的影响, 与合金元素的种类、偏析行为和偏析程度有关, 为确定组元的偏析与剩余液相密度变化之间的关联, 对式 (1) 进行微分可得

$$d\rho = \frac{\sum X_i V_i \sum d(X_i M_i) - \sum X_i M_i \sum d(X_i V_i)}{(\sum X_i V_i)^2} \quad (10)$$

当只考虑某一组元 j 偏析对液相密度的作用时

$$d\rho_j^* = \frac{\sum X_i V_i d(X_j M_j) - \sum X_i M_i d(X_j V_j)}{(\sum X_i V_i)^2} \quad (11)$$

式中, $d\rho_j^*$ 可反映组元 j 在凝固过程中的偏析对液相密度变化的贡献大小, 其绝对值越大, 表明组元 j 的偏析对密度的影响也越大. $d\rho_j^* < 0$ 代表组元 j 的偏析将导致液相密度降低, 反之, 则组元 j 的偏析使得液相密度增加.

为简单起见, 选取在 1335 和 1300 °C 分别作为微分 $d\rho^*$ 的初态和终态, 式 (11) 中 $\sum X_i M_i$ 和 $\sum X_i V_i$ 为 1335 °C 和 1300 °C 的平均值, 计算各合金元素对应的 $d\rho^*$, 结果如图 6 所示. 由图 6 可知, Mo 和 Ta 对应的 $d\rho^* > 0$, 即 Mo 和 Ta 偏析于液相中导致剩余液相的密度增加, 其中 Ta 的偏析对液相密度的增加效果更为明显; Ti 和 W 对应的 $d\rho^* < 0$, 即它们的偏析造成剩余液相的密度减小, 其中, Ti 的偏析对液相密度的降低作用最明显; Cr 和 Al 的偏析也导致液相密度的降低, 但对液相密度的作用较轻; Co 的偏析对液相密度无明显影响. 这些合金元素的偏析对密度的影响由大到小的顺序为: Ti > Ta > W > Cr > Mo > Al > Co.

图 6 所示结果说明, 合金元素的偏析对剩余液相密度的影响并非一致, 与基体 Ni 的原子量差别很大、偏析

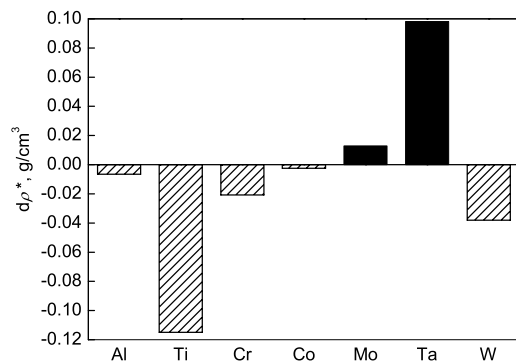


图 6 不同元素偏析对剩余液相密度变化的影响

Fig.6 Influence of elements segregation on residual liquid density ($d\rho^* < 0$ means element segregation decrease the density, $d\rho^* > 0$ means element segregation increase the density)

很严重的 Ti, Ta 和 W 对剩余液相密度的影响显著. 其中, 由于 Ti 在合金中的含量较高, 其偏析程度又最为严重, 故其对液相密度的影响最为明显; Al 尽管与 Ni 的原子量差别很大, 但因其偏析程度很轻, 故对剩余液相密度的影响很小. 因此, 合金元素的偏析对液相密度的影响大小, 不仅与合金元素本身的原子量有关, 还取决于合金元素的含量、合金元素的偏析行为及偏析程度.

MC 的析出将改变合金元素的偏析程度, 也会对液相密度产生一定影响^[23]. 剩余液相密度在 1325 至 1315 °C 之间出现小幅上升与 MC 的析出相关. MC 析出过程中大量消耗从固相中排出的 Ti 和 Ta, 使得 Ti 和 Ta 的偏析对剩余液相密度的影响变弱, 因而液相密度出现小幅增加. 在 1315 °C 以下, 由于 C 基本消耗殆尽, 剩余液相中的 Ti 和 Ta 含量又迅速增加, 从而导致液相密度下降.

综上所述, DZ483 合金凝固时, 由于合金元素在凝固过程中的偏析规律不同并伴随 MC 的析出, 尤其是 Ta 和 Ti 强烈偏析于枝晶间而 W 偏析于枝晶干, 糊状区内的液相存在一个密度反转, 即 DZ483 合金具有雀斑形成趋势. 合金元素由于具有不同的密度和初始含量, 以及其在凝固过程的偏析行为不同, 因此对密度变化的贡献大小也有差异.

4 结论

(1) DZ483 合金在不同温度下等温凝固后水淬, 其等温组织主要为富含 W 和 Co 的初生 γ 相以及富含 Ta 和 Ti 的碳化物 MC, 它们析出温度分别约为 1330 和 1325 °C.

(2) 在 DZ483 合金中, W 和 Co 是负偏析元素, Mo, Ta 和 Ti 是正偏析的合金元素, 而 Al 和 Cr 几乎没有偏析, 合金元素偏析程度由重到轻的顺序为: Ti>Ta>W>Mo>Co>Al>Cr.

(3) Mo 和 Ta 的偏析导致液相密度增大, 而 Ti 和 W 的偏析是导致液相密度减少的主要因素, 合金元素的偏析对密度的影响由大到小的顺序为: Ti>Ta>W>Cr>Mo>Al>Co. 合金元素偏析导致液相密度随凝固温度的降低而减小, 但由于 MC 的析出大量消耗了 Ta 和 Ti, 从而使得液相密度在 1325 至 1315 °C 之间随温度的降低而有所增加.

参考文献

- [1] Pan Q Y, Huang W D, Li Y M, Lin X, Zhou Y H. *J Mater Sci Lett*, 1996; 15: 2112
- [2] Zhang T, Ren W L, Dong J W, Li X, Ren Z M, Cao G H, Zhong Y B, Deng K, Lei Z S, Guo J T. *J Alloys Compd*, 2009; 487: 612
- [3] Liu G, Liu L, Zhao X B, Zhang W G, Jin T, Zhang J, Fu H Z. *Acta Metall Sin*, 2010; 46: 77
(刘刚, 刘林, 赵新宝, 张卫国, 金涛, 张军, 傅恒志. 金属学

- 报, 2010; 46: 77)
- [4] Shi C X, Zhong Z Y. *Acta Metall Sin*, 2010; 46: 1281
(师昌绪, 仲增埔. 金属学报, 2010; 46: 1281)
- [5] Zhang S, Tian S G, Yu H C, Su Y, Yu X F, Yu L L. *Acta Metall Sin*, 2011; 47: 61
(张姝, 田素贵, 于慧臣, 苏勇, 于兴福, 于莉丽. 金属学报, 2011; 47: 61)
- [6] Gu J P, Beckermann C, Giamei A F. *Metall Mater Trans*, 1997; 28A: 1533
- [7] Schneider M C, Gu J P, Beckermann C, Boettinger W J, Kattner U R. *Metall Mater Trans*, 1997; 28A: 1517
- [8] Auburtin P, Wang T, Cockcroft S L, Mitchell A. *Metall Mater Trans*, 2000; 31B: 801
- [9] Beckermann C, Gu J P, Boettinger W J. *Metall Mater Trans*, 2000; 31A: 2545
- [10] Valdes J, King P, Liu X B. *Metall Mater Trans*, 2010; 41A: 2408
- [11] Amouyal Y, Seidman D N. *Acta Mater*, 2011; 59: 6729
- [12] Madison J, Spowart J E, Rowenhorst D J, Aagesen L K, Thornton K, Pollock T M. *Metall Mater Trans*, 2012; 43A: 369
- [13] Lu J W, Chen F L. *J Cryst Growth*, 1996; 165: 137
- [14] Pollock T M, Murphy W H. *Metall Mater Trans*, 1996; 27A: 1081
- [15] Neilson D G, Incropera F P. *Warme Stoffubertrag*, 1991; 27: 1
- [16] Du W, Li J G, Fu H Z. *Trans Nonferrous Met Soc*, 1998; 8: 83
- [17] Hobbs R A, Tin S, Rae C M F. *Metall Mater Trans*, 2005; 36A: 2761
- [18] Huang T W, Liu L, Zhang W G, Zhang J, Fu H Z. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 1225
(黄太文, 刘林, 张卫国, 张军, 傅恒志. 金属学报, 2009; 45: 1225)
- [19] Long F, Yoo Y S, Seo S M, Jin T, Hu Z Q, Jo C Y. *J Mater Sci Technol*, 2011; 27: 101
- [20] Cutler E R, Wasson A J, Fuchs G E. *J Cryst Growth*, 2009; 311: 3753
- [21] D'Souza N, Lekstrom M, Dong H B. *Mater Sci Eng*, 2008; A490: 258
- [22] Tin S, Pollock T M. *J Mater Sci*, 2004; 39: 7199
- [23] Tin S, Pollock T M. *Metall Mater Trans*, 2003; 34A: 1953
- [24] Wang L, Li C Q, Dong J X, Zhang M C. *Chem Eng Commun*, 2009; 196: 754
- [25] Wang L, Yao Y J, Dong J X, Zhang M C. *Chem Eng Commun*, 2010; 197: 1571
- [26] Guan X R, Zheng Z, Tong J, Liu E Z, Yu Y S, Zhu Y X, Zhai Y C. *Chin J Nonferrous Met*, 2009; 19: 272
(管秀荣, 郑志, 佟健, 刘恩泽, 于永泗, 朱耀宵, 翟玉春. 中国有色金属学报, 2009; 19: 272)
- [27] Mukai K, Li Z S, Mills K C. *Metall Mater Trans*, 2005; 36B: 255
- [28] De Laeter J R, Bohlke J K, De Bievre P, Hidaka H, Peiser H S, Rosman K J R, Taylor P D P. *Pure Appl Chem*, 2003; 75: 683
- [29] Li Z S, Mills K C, McLean M, Mukai K. *Metall Mater Trans*, 2005; 36B: 247