

冷却速度对 GH4169 合金凝固过程 微观偏析及糊状区稳定性的影响

张麦仓, 曹国鑫, 董建新

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 通过不同冷却速度下的凝固重熔试验, 结合 SEM 微观分析及电子探针成分分析, 研究 GH4169 合金凝固过程微观偏析的演化规律, 分析凝固前沿液相区的密度变化规律, 并提出基于相对 Rayleigh 数的凝固前沿糊状区的稳定性判据。结果表明: 冷却速度低于 0.05 °C/s 时, 液相中的 Nb 含量随出炉温度的下降很快升高到一个较高值, 在较低温度出炉冷却时, Nb 含量迅速升高到 14% 以上, 可达合金名义成分中 Nb 元素含量的 3 倍; 提高冷却速度至 0.1 °C/s, 高温出炉时, Nb 含量升高很慢, 当出炉温度低于 1 310 °C 时, Nb 含量迅速升高到 10% 以上; 进一步提高冷却速度, 残余液相中 Nb 元素含量变化不大, 与合金的名义成分接近。当冷却速度较高时(大于 0.1 °C/s), GH4169 合金凝固过程凝固前沿糊状区的稳定性较好, 相对 Rayleigh 数较低; 而当冷却速度较低时, 即低于 0.02 °C/s 时, 凝固前沿糊状区稳定性判据 R_v 值比较高, 而且在 1 330 °C 附近出炉冷却时, 存在一个峰值区, 最大峰值接近 7.5×10^{-13} 。说明当凝固过程冷却速度较低时, 元素的微观偏析使得 GH4169 合金凝固前沿糊状区的稳定性降低, 可能导致微观偏析向宏观偏析转变。

关键词: GH4169 合金; 冷却速度; 微观偏析; 糊状区稳定性

中图分类号: TG111.4

文献标志码: A

Effect of cooling rate on microsegregation behaviors and mush zone stability of GH4169 alloy during solidification process

ZHANG Mai-cang, CAO Guo-xin, DONG Jian-xin

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The microsegregation behaviors of GH4169 alloy during its solidification process were investigated by remelting tests, SEM and EMPA analysis. Furthermore, the density variation for the solidification front of this alloy was analyzed and a stability criterion based on relative Rayleigh number model was put forward. The results show that, when the cooling rate is lower than 0.05 °C/s, Nb content in the residual liquid phase increases with decreasing the pouring temperature, it can reach 14%, three times of the designed Nb content for this alloy. When the cooling rate increases to 0.1 °C/s and the pouring temperature is lower than 1 310 °C, Nb content in the residual liquid phase reaches 10% promptly, while when the pouring temperature is higher than 1 310 °C, Nb content in the residual liquid phase varies slowly. With the increase of cooling rate during the solidification process, Nb content in the residual liquid phase can decrease to the designed value gradually. At the same time, a heavier microsegregation of Nb element may occur at lower cooling rate in the mush zone for GH4169 during its solidifying process, resulting in the bigger relative Rayleigh number and the worse stability of mush zone, which may increase the probability of freckle formation.

Key words: GH4169 alloy; cooling rate; microsegregation; mush zone stability

GH4169 合金具有优良的加工性和高温综合性能, 大量用于航空、航天、石油、化工及能源等领域,

是目前应用最广泛的镍基高温合金。近年来, 军工及民用工业对热端部件服役效率要求的不断提高, 急需

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974144)

收稿日期: 2012-07-28; 修订日期: 2013-07-20

通信作者: 张麦仓, 副教授, 博士; 电话: 010-62332884; E-mail: mczhang@ustb.edu.cn

研发大尺寸、高整体性及可靠性的 GH4169 合金铸件,使得发展质量稳定的大尺寸 GH4169 合金钢锭成为大势所趋。但是,制约 GH4169 合金锭型扩大的“瓶颈”及影响大尺寸高温合金钢锭质量稳定性的关键是钢锭冶炼时易产生难以消除的宏观偏析—黑斑(Freckles)缺陷。黑斑缺陷的特性在于无法通过后续均匀化工序消除,存在黑斑的钢锭必须报废。因此,如何避免大尺寸 GH4169 合金及其他合金钢锭冶炼过程的黑斑缺陷是目前国际及国内高温合金界亟待解决的难题。

黑斑又称通道偏析,是高合金化合金中普遍出现的一种宏观偏析,但不同合金中黑斑缺陷的形成机理与合金化元素的种类、冶炼工艺参数等条件密切相关,目前尚未有描述高合金化合金中黑斑形成机理的定量模型。多年来,研究者从理论和实践两方面对黑斑的产生机理进行了研究,提出了一系列与黑斑形成有关的模型及判据,如密度反转理论、晶体下沉理论、由热裂及凝固收缩引起的富集溶质液体向糊状区枝晶间流动理论及对流传质理论等^[1-4]。不同研究者给出的 Rayleigh 判据的表达式大不相同,难以直接用于工程实际。尽管 WHITESELL 等^[5]和 AUBURTIN 等^[6]对 IN718、IN706、IN625 和 MAR-M247 等高温合金的定向凝固过程进行系统分析, YANG 等^[7-9]对二元系的 Rayleigh 判据进行修正,提出了基于 IN718 合金的黑斑形成判据,但结果与工程应用仍有差距。国内有关 GH4169 及其他高温合金凝固过程黑斑形成机理研究相对较少^[10-15],主要是各高温合金生产企业为提高产品稳定性而进行的现场跟踪试验。

本文作者通过真空感应条件下的凝固重熔试验,结合扫描电镜及电子探针微区成分分析,系统研究了 GH4169 合金在连续冷却条件下凝固前沿糊状区的元素偏析规律及相变规律,并在 YANG 等^[7-9]提出的 Rayleigh 判据的基础上,结合试验条件,提出了连续冷却条件下反映 GH4169 合金凝固前沿糊状区稳定性的局部 Rayleigh 判据,旨在为进一步分析 GH4169 合金钢锭凝固过程的宏观偏析形成机理奠定基础。

1 实验

试验材料为经真空感应冶炼、2 000 t 快锻开坯并经多道次连轧的直径 18 mm 的棒材。化学成分如下(质量分数, %): Cr 17.68; Al 0.58; Ti 0.94; Mo 2.89; Nb 5.46; Fe 19.93; C 0.021; B 0.0056; Ni 余量。

原始棒材经粗车后,切割成 $\phi 17 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱体,在真空多功能碳管炉内按图 1 所示规范进行

不同冷却速度下的凝固重熔试验。即样品放入尺寸相当的坩埚后在炉中加热至 $1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 15 min 后以设定的冷却速度冷至凝固温度区间设定的温度(t_q)迅速取出,淬入盐水中。设定的冷却速度有 5 种: 0.01、0.02、0.05、0.1 和 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。淬水温度(t_q)根据 GH4169 合金的凝固温度范围($1\,260\sim 1\,336\text{ }^{\circ}\text{C}$)确定,每个冷却速度下选取 7 个温度点: $1\,340$ 、 $1\,330$ 、 $1\,320$ 、 $1\,310$ 、 $1\,300$ 、 $1\,290$ 和 $1\,280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

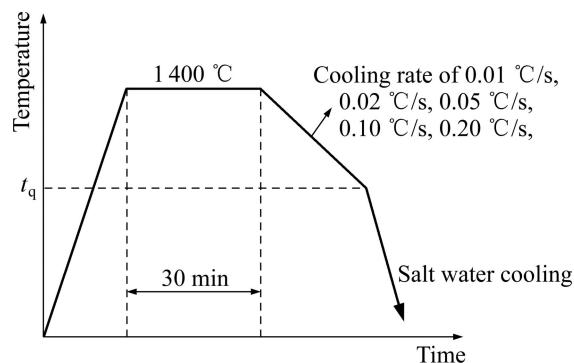


图 1 GH4169 合金凝固重熔试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram for remelting tests of GH4169 alloy

凝固重熔后的样品沿纵截面切开并电解腐蚀后在 Leo-80 扫描电镜及 JEOL JXA-8100X 型电子探针下进行凝固前沿元素偏析规律分析,样品中残余液相及固相的体积分数用 Imagetool 软件定量确定。

2 结果与分析

2.1 不同冷却速度下的凝固组织特征

图 2 所示为冷却速度 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时 GH4169 合金凝固组织的变化情况。由图 2 可以看出, GH4169 合金在 $1\,340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时几乎为全液相组织,冷至 $1\,330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,已有大量的固相生成,残余液相约 20%。这可能是由于在 $1\,330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,少量残余液相的成分已经达到了共晶或伪共晶的成分,只有冷至共晶点或伪共晶点以下残余液相才会全部转变为固相。

当冷却速度在 $0.02\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 之间变化时,随着样品出炉温度的降低,残余液相的变化较复杂。在冷却速度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 、 $1\,330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉盐水冷却时,残余液相的量约为 40%,继续降温时,液相向固相的转变速率变慢,当温度为 $1\,290\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液相的量约为 20%(见图 3(a)和(b))。当冷却速度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, $1\,330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉盐水冷却的组织中残余液相比冷却速度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时的

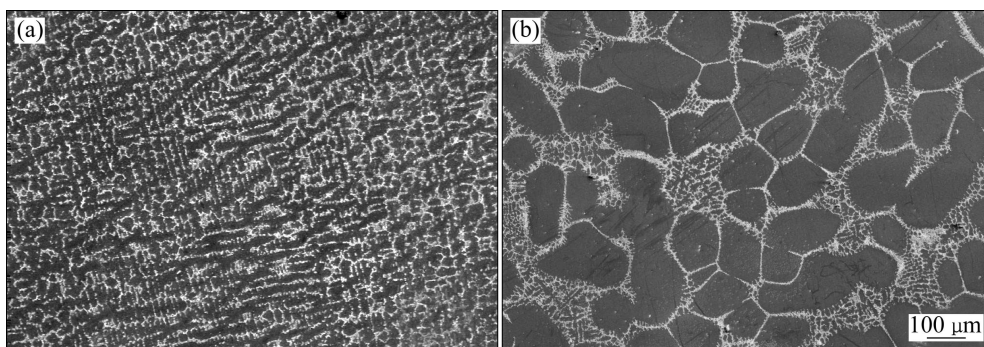


图 2 冷却速度为 0.01 °C/s 时 GH4169 合金的凝固组织

Fig. 2 Solidification microstructures of GH4169 alloy at cooling rate of 0.01 °C/s and different salt water cooling temperatures: (a) 1 340 °C; (b) 1 330 °C

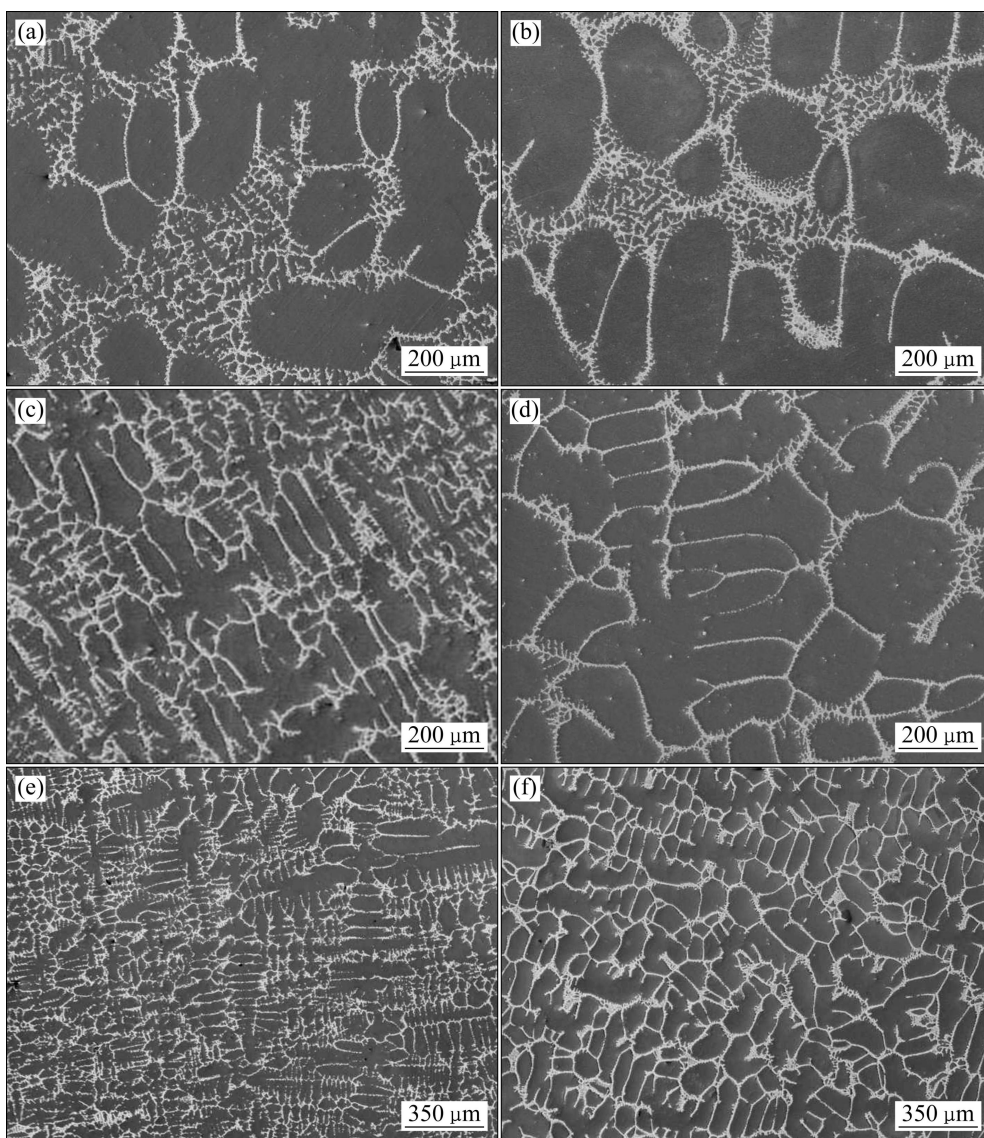


图 3 不同冷却条件下 GH4169 合金的凝固组织

Fig. 3 Solidification microstructures of GH4169 alloy under different cooling conditions: (a) 0.02 °C/s, 1 330 °C; (b) 0.02 °C/s, 1 290 °C; (c) 0.1 °C/s, 1 330 °C; (d) 0.1 °C/s, 1 290 °C; (e) 0.2 °C/s, 1 330 °C; (f) 0.2 °C/s, 1 310 °C

残余液相要多, 接近 60%(见图 3(c)), 但随着重熔锭出炉温度的降低, 液相向固相转变加快, 此时的残余液相含量明显低于冷却速度为 0.02 °C/s 和 0.1 °C/s 时(见图 3(b)和(d))。当冷却速变增至 0.2 °C/s 时, 在 1330 °C 出炉盐淬, 组织中有枝晶状的固相形成, 固相的量较少, 而且和位置有关(见图 3(e))。当出炉温度降至 1 310 °C 时, 大量的液相转变为固相, 残余液相以细的网状存在于枝晶间(见图 3(f))。继续降温, 残余液相成分接近共晶成分, 残余液相量变化不大。主要原因如下: 在较高的冷却速度下, 凝固时固/液相间的溶质再分配平衡只建立在固/液界面附近, 距界面较远的液相中, 低熔点溶质的含量并不高, 在冷却过程中这部分液相很快转变为固相; 而固/液相界面附近的液相由于含有较多的低熔点溶质, 甚至达到共晶或伪共晶的成分, 在快速冷却中保留到较低的温度。

2.2 不同冷却速度下 GH4169 合金 Nb 元素的偏析规律

GH4169 合金中, 凝固过程糊状区 Nb 元素的偏析是大型钢锭产生宏观缺陷—黑斑的主要原因, 因此, 本文作者主要分析这两种主元素的偏析特征。图 4 所示为不同冷却速度下残余液相中 Nb 随出炉温度的变化情况。由图 4 可以看出, 冷却速度较低时, 液相中的 Nb 含量随出炉温度的下降很快升高到一个较高的值, 在较低温度出炉冷却时, Nb 含量迅速升高到 14% 以上, 接近合金名义成分中 Nb 元素含量的 3 倍。提高冷却速度至 0.1 °C/s, 这时在高温出炉时 Nb 含量升高很慢, 当出炉温度低于 1 310 °C 时, Nb 含量迅速升高到 10% 以上。进一步提高冷却速度, 残余液相中

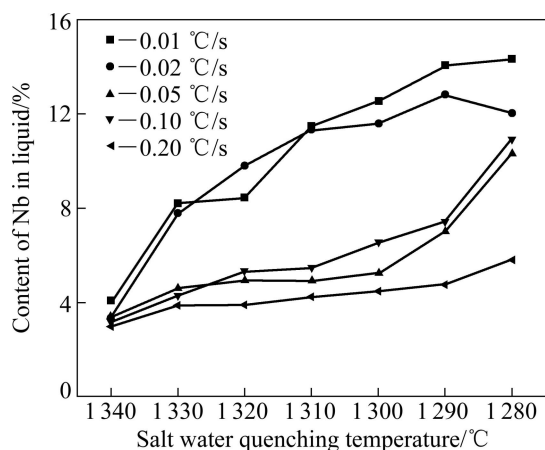


图 4 不同冷却速度下液相中 Nb 元素随出炉盐水冷却温度的变化规律

Fig. 4 Variation of element content for Nb with salt water quenching temperature at different cooling rates

Nb 元素变化不大, 与合金的名义成分接近。

图 5 为不同冷却速度下残余液相分数的变化情况。综合图 4 及 5 可以看出, 在较低的冷却速度下(0.01 °C/s 及 0.02 °C/s), 在 1 330 °C 出炉盐水冷却均有大量的固相生成, 但 0.01 °C/s 冷却速度下固相中的 Nb 扩散更充分, 更接近平衡转变。当冷却速度提高至 0.05 和 0.1 °C/s 时, 液/固两相中的扩散变慢, 残余液相中的 Nb 含量升高较少, 直至 1 280 °C 出炉冷却时, 才明显提高。当冷却速度达到 0.2 °C/s 时, 较高的冷却速度产生较大的过冷, 凝固时固相晶核增多; 在 1 310 °C 以下, 液相向固相充分转变, 此时残余液相量不到 15%, 少量的残余液相中 Nb 含量很高。

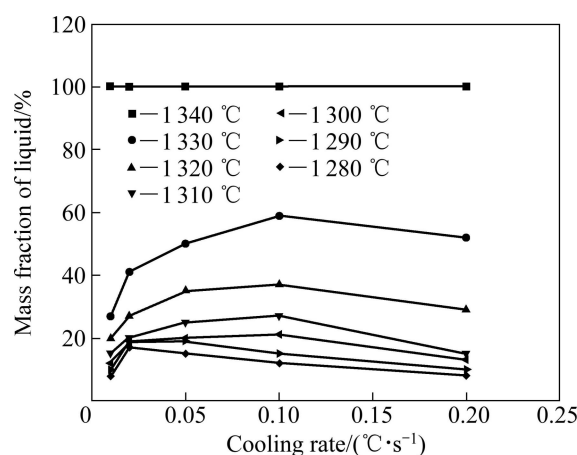


图 5 不同冷却速度下残余液相分数变化

Fig. 5 Changes of fraction of residual liquid under different cooling rates

根据凝固理论, 冷却速度对凝固过程中液相成分的影响主要通过以下因素: 一是固相转变量, 对于正偏析元素, 如 GH4169 中的 Nb 元素, 随着固相转变量增多, 残余液相减少, 液相中的溶质元素含量增加。二是扩散, 当冷却速度极低, 液固相中的扩散都比较充分, 这时先凝固固相中偏析不严重, 残余液相中溶质含量升高不多; 但随着冷却速度在一定范围内升高, 固相中扩散逐渐被抑制, 而液相中仍有较充分的扩散, 此时冷却速度越高, 固相中的溶质含量偏离平衡成分越远, 残余液相中的溶质含量越高; 当冷却速度增加到一定程度, 不但固相中扩散完全被抑制, 液相中的扩散也受到抑制, 液固溶质分配平衡仅限于液固界面附近, 此时冷却速度越高, 残余液相中的溶质含量越低, 偏析越轻。三是元素在固液相间的有效分配系数, 一般来说, 冷却速度越高, 分配系数越趋向于 1, 对正偏析元素来说, 分配系数增加, 液相中溶质含量降低。可以说, 在本试验条件下, 凝固前沿糊状区残余

液相中 Nb 元素的偏析主要受液/固相转变量及扩散因素的影响,图4和5中液相成分及液相分数的变化也是上述因素综合作用的结果。

2.3 元素偏析对液相密度和凝固前沿糊状区稳定性的影响

合金凝固过程中,元素偏析对剩余液相密度及凝固前沿糊状区的稳定性具有重大影响,而凝固前沿糊状区的稳定性将直接影响凝固前沿糊状区微观偏析向宏观偏析缺陷的转变进程。目前,有关凝固前沿糊状区稳定性的半定量描述主要借助于热力学中的无量纲参数即 Rayleigh 数。Rayleigh 数用于描述合金凝固前沿糊状区稳定性时,其物理意义与热力学一致,即 Rayleigh 数越高,系统越不稳定,并且把枝晶间液相失去稳定性时对应的 Rayleigh 数称为临界 Rayleigh 数,但如何确定各种高温合金凝固过程凝固前沿糊状区的临界 Rayleigh 数是目前亟待解决的难题。作为前期工作,本文作者结合上述试验条件,借助 Rayleigh 数的概念分析 GH4169 合金不同冷却速度下凝固前沿糊状区的稳定性变化规律。

YANG 等^[7-9]认为,高温合金凝固过程凝固前沿糊状区的稳定性 R 可用下式判断为

$$R = \frac{\Delta \rho g P}{\nu f_L R} \cdot \sin \alpha \cdot \cos(\phi + \alpha) \quad (1)$$

式中: $\Delta \rho$ 为液相密度差; g 为重力加速度; P 为渗透性,是剩余液相分数 f_L 及一次枝晶间距 λ_1 、二次枝晶间距 λ_2 的函数; ν 为动力学粘度; R 为凝固速率, ϕ 和 α 分别为合金凝固时晶体生长方向与水平方向的夹角及液相流动方向与等温面的夹角。

对于本试验中的小尺寸样品,不同冷却速度下重熔处理条件是相同的,可以近似认为式(1)中 ν 、 g 和角度因素不变,如果忽略小尺寸样品不同冷却速度下的样品截面的温度梯度变化,则可以得到一个简化的考虑冷却速度 ν 影响的凝固前沿糊状区稳定性判据 R_v ,具体表达式如下:

$$R_v = \frac{\Delta \rho P}{f_L V} \quad (2)$$

式中:液相密度差 $\Delta \rho$ 可由式(3)确定:

$$\Delta \rho = |\rho_T - \rho_0| / \rho_0 \quad (3)$$

渗透性 P 根据文献[7-9]如式4所示:

$$P = P(f_L)P(\lambda_1 \lambda_2) = 9.66 \times 10^{-18} f_L^{3.34} \cdot \lambda_1^{0.699} \lambda_2^{2.73} \quad (4)$$

式中: ρ_0 为液固界面处的液相密度,这里用 1 340 °C 的液相密度; ρ_T 为某一温度 T 时的液相密度,可根据

SUNG 等^[16]的模型确定,如下所示:

$$\rho_T = \frac{\sum x_i A_i}{\sum x_i V_i + \Delta V^M} \quad (5)$$

式中: $x_i = \frac{C_i / A_i}{\sum C_i / A_i}$; $\Delta V^M = d_0 + d_1 X_1 + d_2 X_2 + d_3 X_3$ 。其中,

x_i 为各元素的摩尔分数; V_i 为各元素的原子体积; A_i 为各元素的相对原子质量; C_i 为元素 i 的质量分数; d_i 为常数; X_i 为合金中不同元素的摩尔分数之和。对于 GH4169 合金, d_i 及 X_i 如下: $d_0 = -1.498 2$, $d_1 = 4.475 9$, $d_2 = 5.198 8$, $d_3 = 0.434 7$, $X_1 = X_{Al}$, $X_2 = X_{Cr} + X_{Ti}$, $X_3 = X_{Mo} + X_{Nb}$ 。

将式(3)~(5)代入式(2),结合上述 GH4169 合金凝固过程主元素的偏析规律的试验结果,利用 FORTRAN 语言编程处理,即可得到不同冷却速度下元素偏析对残余液相密度及糊状区稳定性的影响规律。图6和7所示为相应的计算结果。

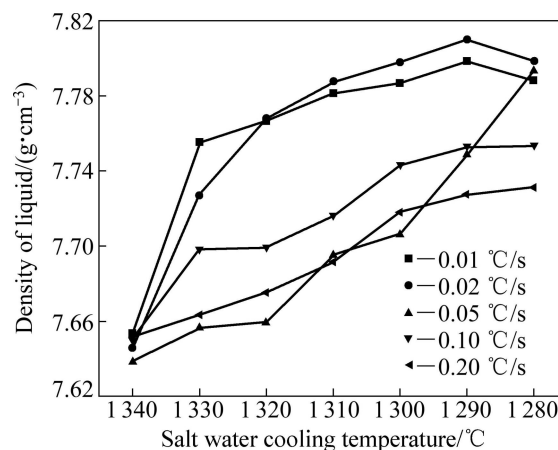


图6 盐水冷却温度对液相密度的影响

Fig. 6 Effect of salt water cooling temperature on density of liquid under different cooling rates

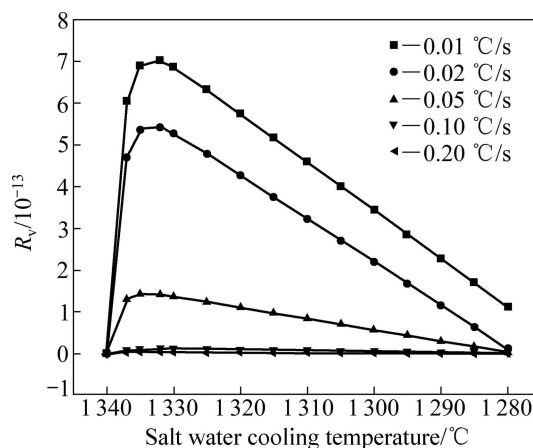


图7 不同冷却速度下稳定性判据 R_v 的变化规律

Fig. 7 Variation of R_v under different cooling rates

从图 6 可以看出,在较低冷却速度下,只要温度降至初凝温度以下,就有大量液相转变为固相,冷却速度越低,转变越充分,残余液相的量越少,但液相中重元素 Nb 等含量越高,残余液相密度很快升高到一个较高的值。提高冷却速度,比如冷却速度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,由于液相来不及转变就已经降到更低的温度,所以在凝固初期残余液相的量较多,液相中的 Nb 等元素含量升高不明显,因此密度变化不明显。当温度低于 $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,大量的液相转变为固相,少量残余液相的 Nb 等元素的含量也会升到共晶成分,这时液相的密度也会升高到一个很高的值。对比分析图 4、5 和 6 可以发现,残余液相的密度变化主要取决于不同冷却速度下的液/固转变量及相应条件下的元素分布。

从图 7 可以看出,冷却速度较高时,即高于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, GH4169 合金凝固过程凝固前沿糊状区的稳定性较好, R_v 值相对较低,均小于 2.0×10^{-13} ;而当冷却速度较低时,即低于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, R_v 值比较高,而且在 $1\ 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近出炉冷却时,存在一个峰值区,最大峰值接近 7.5×10^{-13} 。说明当凝固过程冷却速度较低时, GH4169 合金由于元素的微观偏析使得凝固前沿糊状区的稳定性降低,可能会导致由微观偏析向宏观偏析的转变。图 8 所示为对宝钢实际生产中大尺寸(直径 508 mm)钢锭在 $1/2$ 半径处黑斑缺陷的电镜及电子探针分析结果,由于凝固过程冷却速度较低(平均冷

却速度在 $0.01\sim 0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 之间),产生了富 Nb 的 Laves 相富集引起的宏观偏析缺陷,工程实际结果与上述规律吻合。

3 结论

1) 冷却速度低于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,液相中的 Nb 含量随出炉温度的下降很快升高到一个较高的值,在较低温度出炉冷却时, Nb 含量迅速升高到 14% 以上,可达合金名义成分中 Nb 元素含量的 3 倍。提高冷却速度至 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,在高温出炉时 Nb 含量升高很慢,当出炉温度低于 $1\ 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Nb 含量迅速升高到 10% 以上。进一步提高冷却速度,残余液相中 Nb 元素变化不大,与合金的名义成分接近。

2) 冷却速度较高时(大于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), GH4169 合金凝固过程凝固前沿糊状区的稳定性较好, R_v 值相对较低;而当冷却速度较低时,即低于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, R_v 值比较高;而在 $1\ 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近出炉冷却时,存在一个峰值区,最大峰值接近 7.5×10^{-13} 。说明当凝固过程冷却速度较低时, GH4169 合金由于元素的微观偏析使得凝固前沿糊状区的稳定性降低,可能会导致由微观偏析向宏观偏析的转变,该规律与工程实际比较吻合。

REFERENCES

- [1] FLEMINGS M C, NEREO G E. Macrosegregation: Part I [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1967, 239: 1449–1461.
- [2] FLEMINGS M C, NEREO G E. Macrosegregation: Part II [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1968, 242: 41–49.
- [3] FLEMINGS M C, NEREO G E. Macrosegregation: Part III [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1968, 242: 50–55.
- [4] MOREAU R, BOLCATO R, LEHMANN P. A simple analysis of the effect of convection on the structure of the mushy zone in the case of horizontal Bridgman solidification comparison with experimental results [J]. Crystal Growth, 1998, 183(4): 690–704.
- [5] WHITESELL H S, OVERFELT R A. Influence of solidification variation on the microstructure, macrosegregation, and porosity of directionally solidified Mar-M247 [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 318: 264–276.
- [6] AUBERTIN P, MITHCHELL A. Liquid density inversion during the solidification of superalloys and their relationship to freckle formation in castings [C]// Superalloys 1996. The Minerals, Metals and Materials Society, 1996, 1: 443–450.

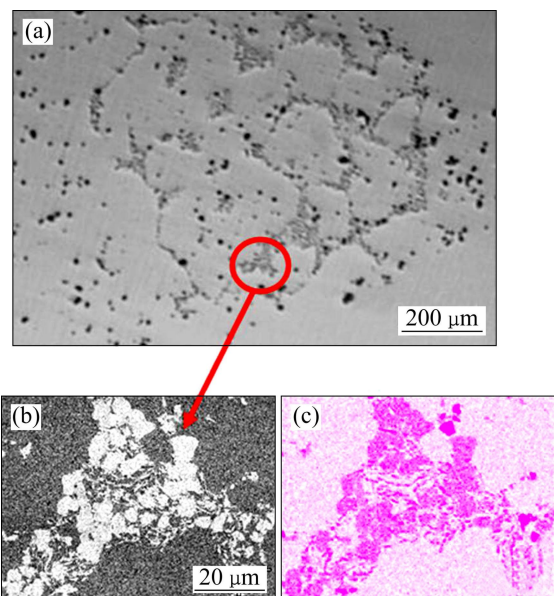


图 8 GH4169 钢锭(直径 508 mm) $1/2$ 半径处的黑斑缺陷形及 Nb 偏析元素面扫描分布

Fig. 8 SEM images ((a), (b)) showing freckle and element scanning distribution (c) showing Nb segregation in GH4169 ingot at about $1/2$ radius (diameter of 508 mm)

- [7] YANG Wan-hong, CHEN Wei, CHANG Keh-min. Freckles in remelted Niobium containing superalloys[C]//LORIA E A. Superalloys 718, 625, 706 and Various derivatives. TMS, 2001: 113-122.
- [8] LONG Z, YANG W, CHANG K M. Freckle formation and thermodynamic assessment for Nb-bearing superalloys[C]//Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives, 2001, 1: 745-754.
- [9] YANG W H, JHON J. A freckle criterion for the solidification of superalloys with a tilted solidification front[C]//Superalloys, 2004, 56(9): 56-61.
- [10] 王 玲, 董建新, 田玉亮, 谢锡善. GH3044 合金宏观偏析行为及凝固过程中元素偏析规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006(9): 1408-1411.
WANG Ling, DONG Jian-xin, TIAN Yu-liang, XIE Xi-shan. The investigation of macrosegregation behavior and microsegregation of alloy elements in GH3044[J]. Rare Metals and Engineering, 2006(9): 1408-1411.
- [11] 田玉亮, 董建新, 王 玲, 张麦仓, 曾燕屏. 均匀化处理过程中 Waspaloy 合金铸锭中元素分配规律的研究[J]. 稀有金属材料科学与工程, 2006(9): 1412-1417.
TIAN Yu-liang, DONG Jian-xin, WANG Ling, ZHANG Mai-cang, ZENG Yan-ping. Investigation on elements distribution in Waspaloy alloy ingot during homogenization[J]. Rare Metals and Engineering, 2006(9): 1412-1417.
- [12] 沈厚发, BECKERMANN C. 糊状区变形及浓度再分布的模拟实验[J]. 金属学报, 2002, 38(4): 352-358.
- SHEN Hou-fa, BECKERMANN C. Experimental study on the mush deformation and solute redistribution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(4): 352-358.
- [13] 黄彦奕. GH4169 合金凝固过程的偏析及与凝固参数的关联性[D]. 北京: 北京科技大学, 2011.
HUANG Yan-yi. Segregation behaviors of GH4169 alloy during its solidification process and the relationship with solidification parameters[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2011.
- [14] 封少波, 张楠楠, 罗兴宏. 偏析对 DZ483 镍基高温合金糊状区内液相密度的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(5): 541-546.
FENG Shao-bo, ZHANG Nan-nan, LUO Xing-hong. Influence of segregation on liquid density in mush zone of DZ483 Ni-based superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(5): 541-546.
- [15] 李肖霞. GH4169 合金凝固过程中的偏析行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2010.
LI Xiao-xia. Segregation behaviors of GH4169 alloy during its solidification process[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.
- [16] SUNG P K, POIRIER D R, MCBRIDE E. Estimating densities of liquid transition-metals and Ni-base superalloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 231: 189-197.

(编辑 龙怀中)