



铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 凝固与析出热力学模拟

苏学虎

(江苏万恒铸业有限公司, 盐城 224000)

摘要: 利用 FactSage 8.2 热力学计算软件对铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的平衡凝固及冷却过程相变以及非平衡凝固偏析和相变规律分别进行研究。计算表明: 平衡凝固及冷却过程的相变路径为: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \delta + \gamma + N_2 \rightarrow \delta + \gamma + N_2 \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha + \pi \rightarrow \gamma + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha + \pi$ 。平衡转变过程中析出的金属间相为 σ 相与 Laves 相, 其中 σ 相富含 Cr、Mo, 贫 Ni、W 且不含 N, 而 Laves 相富含 Cr、Mo 及 W, 贫 Ni、Cu; 基于 Scheil-Gulliver cooling 模式的非平衡凝固相变路径为: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \delta + \gamma + Cr_2N \rightarrow L + \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow L + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow L + M_6C + \sigma$ 。非平衡凝固过程: 高温液相中主要的析出相为 Cr_2N , 元素 Fe 为负偏析, Cr、Ni、Mo、W、Cu、N 及 C 为正偏析, 其中元素 Cr、Mo 及 W 在凝固末期的残余液相内偏析严重。

关键词: 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN; 热力学计算; 凝固与相变; 偏析; 析出相

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00018 **中图分类号:** TG142. 71

Thermodynamic Simulation of Solidification and Precipitation of Cast Duplex Stainless Steel CD3MWCuN

Su Xuehu

(Jiangsu Wanheng Casting Industry Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: The phase transition during equilibrium solidification and cooling process, non-equilibrium solidification segregation and the raw of phase transition of cast duplex stainless steel CD3MWCuN are investigated by FactSage 8.2 thermodynamic calculation software. The calculation results indicates that the phase transition path of equilibrium solidification and cooling are as follows: $Liquid \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite + Austenite \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite + Austenite + Nitrogen \rightarrow \delta - Ferrite + Austenite + Nitrogen \rightarrow \delta - Ferrite + Austenite \rightarrow \delta - Ferrite + Austenite + Cr_2N \rightarrow \delta - Ferrite + Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow \delta - Ferrite + Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma \rightarrow Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma \rightarrow Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma + Laves \rightarrow Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma + Laves + \varepsilon - Cu \rightarrow Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha - Ferrite \rightarrow Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha - Ferrite + Pi \rightarrow Austenite + M_{23}C_6 + Sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha - Ferrite + Pi$. The intermetallic phases precipitated during the equilibrium transition are Sigma phase and Laves phase, in which the Sigma phase is rich in Cr and Mo, but poor in Ni and W without N, while the Laves phase is rich in Cr, Mo and W, and poor in Ni and Cu. The non-equilibrium solidification phase transition path based on the Scheil-Gulliver cooling model are as follows: $Liquid + \delta - Ferrite \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite + Austenite \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite + Austenite + Cr_2N \rightarrow Liquid + \delta - Ferrite + Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow Liquid + Austenite + Cr_2N + M_{23}C_6 + Sigma \rightarrow Liquid + M_6C + Sigma$. The main precipitated phase is Cr_2N during the non-equilibrium solidification process, the alloy element Fe is negative segregation, Cr, Ni, Mo, W, Cu, N and C are positive segregation, among which the elements Cr, Mo and W are very serious in the residual liquid phase at the end of solidification.

Key Words: Cast Duplex Stainless Steel CD3MWCuN; Thermodynamic Calculation; Solidification and Phase Transition; Segregation; Precipitated Phase

ASTM A995-20、A890-18 美标铸造双相不锈钢 CD3MWCuN, UNS 牌号 J93380、材料等级 6A, 锻轧件双相不锈钢的牌号 UNS S32760, 对应国内双相不锈钢牌号为 GB/T 2100-2017、JB/T 6405-2018 中的 ZG03Cr22Ni6Mo3N, 是一种超低 C、高 Cr、Mo 及 N, 6.5%~8.5%Ni, 含 Cu、W, 且耐点蚀当量值 $PREN = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N \geq 40$ 的第三代双相不

锈钢。因其具有较高的强度和优异的耐腐蚀性能而被广泛应用于油气田与海洋工程、石化工业的泵阀管道与压力容器等系统部件^[1-3]。胡学文等^[4]采用中频炉+AOD 炉精炼的双联法冶炼 CD3MWCuN 有效地改善了其冶金质量; 于建平^[5]通过开展焊接工艺评定试验确定了 CD3MWCuN 钢合适的焊接工艺; 徐继坤等^[6]优化了 6A 铸造双相不锈钢离心泵体

的铸造、热处理及焊接工艺生产出合格的铸钢件;王哨兵等^[7]利用 Thermo-Calc 热力学计算软件,系统地论述了 UNS S32760 钢的平衡转变过程以及各合金元素对钢的热加工性、 Cr_2N 与 σ 析出相的影响。迄今为止,国内外对 CD3MWCuN 钢的凝固及冷却过程相变与析出相方面的相关报道很少,因此,本文借助 FactSage 8.2 热力学计算软件对 CD3MWCuN 双相不锈钢的平衡凝固及冷却过程的相变以及基于 Scheil-Gulliver 模式的非平衡凝固过程的偏析与相变规律分别进行了研究,为掌握此类含 W 型铸造双相不锈钢合理的生产工艺提供理论依据。

1 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的平衡凝固及冷却过程相变

利用 FactSage 8.2 热力学计算软件中 Equilib 模块和 FSstel 钢铁数据库,设置压力为 1 个标准大气压 (101.325 kPa),初始钢液值 100.713 g,温度步长为 20 °C,并且对数据库中存在的热力学平衡相不加以任何条件的限制。针对 CD3MWCuN 钢典型成分的合金体系的平衡凝固及冷却过程相变进行理论计算。标准化学成分上,相对于 ASTM A959-19 中的 UNSS32760, CD3MWCuN 钢中的 S 元素含量放宽了 0.015%、Ni 元素含量提高了 0.5%,其他合金元素范围均保持一致,其化学成分见表 1。

虽然铸锻件的化学成分相近,但是其成型方法、材料性能及应用范围不同,研究双相不锈钢在

热变形过程中两相组织的演变规律与高温力学行为对其热加工工艺的制定具有一定的指导意义^[8-11]。铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 因具有合适的两相(α/γ)比例,使其综合力学性能及耐腐蚀性能相对于普通奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢更加的优异^[12-13],固溶组织如图 1 所示,黑色铁素体基体上均匀分布着白色的奥氏体相且两相比比例接近 1:1。

CD3MWCuN 钢的平衡性质图如图 2 所示,高温液相在 1 435.0 °C 开始凝固析出 δ 铁素体,在 1 375.3 °C 析出奥氏体,1 360.7 °C 开始析出 N_2 ;液相凝固终点温度为 1 342.7 °C,此时 δ 铁素体与奥氏体的两相比比例约为 1.7:1,该平衡体系逸出 N_2 的含量约为 0.045%。合金在 1 342.7~1 157.0 °C 的冷却过程中, δ 铁素体逐步分解并向奥氏体转变,在 1 157.0~926.3 °C 温度内 δ 铁素体与奥氏体的两相比比例约为 2:3,在 1 157.0 °C 与 985.2 °C 分别析出 Cr_2N 与 M_{23}C_6 碳化物;合金在 926.3~885.2 °C 的冷却过程中, δ 铁素体发生共析分解($\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$)而导致脆性金属间化合物 σ 相在 926.3 °C 开始快速的析出,直至温度降至 885.2 °C, δ 铁素体将完全溶解,与此同时, σ 相的含量为 25.0%、奥氏体含量从 57.4% 增至 73.6%,增加了 16.2%;合金在 885.2~657.1 °C 的冷却过程中奥氏体将不断地分解,并逐渐向 σ 相转变,其中 Laves 相与 ε -Cu 相分别在 804.8 °C、683.0 °C 从奥氏体内析出;当冷却温度下降到 657.1 °C,体系发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 与 $\sigma \rightarrow \alpha$ 转变,使得 α 铁素体形成并快速增加;

表 1 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of cast duplex stainless steel CD3MWCuN

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	Fe
标准	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.025	≤0.030	24.0~26.0	6.5~8.5	3.0~4.0	0.20~0.30	0.50~1.00	0.50~1.00	Bal.
典型	0.027	0.694	0.725	0.002	0.024	24.75	7.209	3.785	0.232	0.749	0.713	Bal.

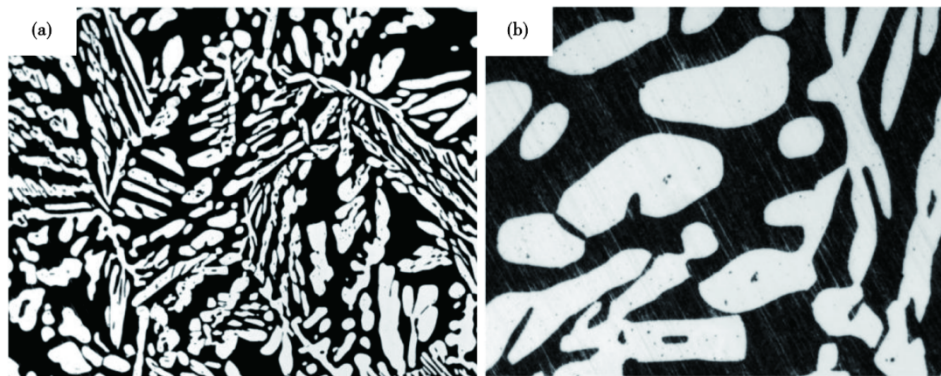


图 1 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的固态组织:(a)100×,(b)500×

Fig. 1 Solid solution microstructure of cast duplex stainless steel CD3MWCuN : (a)100× , (b)500×

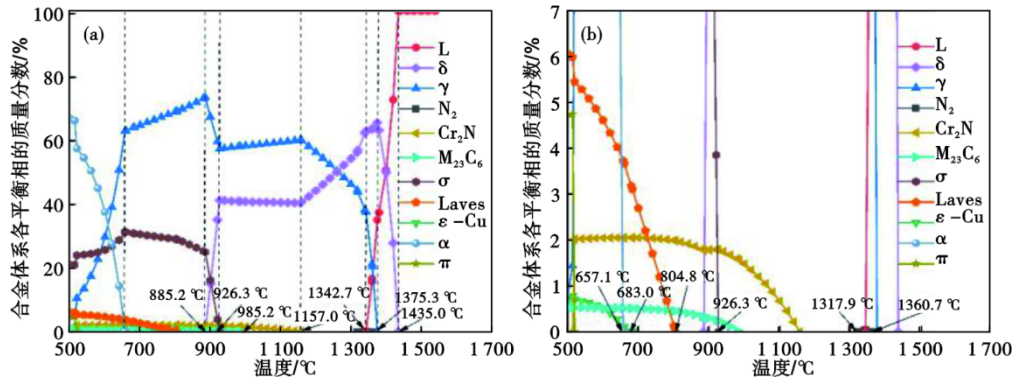


图2 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的平衡相图:(a)性质图,(b)局部放大图

Fig. 2 Equilibrium phase diagram of cast duplex stainless steel CD3MWCuN : (a) property diagram , (b) drawing of partial enlargement

Fe-0.027C-24.750Cr-3.785Mo-7.209Ni-0.749Cu-0.232N-0.713W体系铸造双相不锈钢的平衡凝固以及冷却过程相变路径图

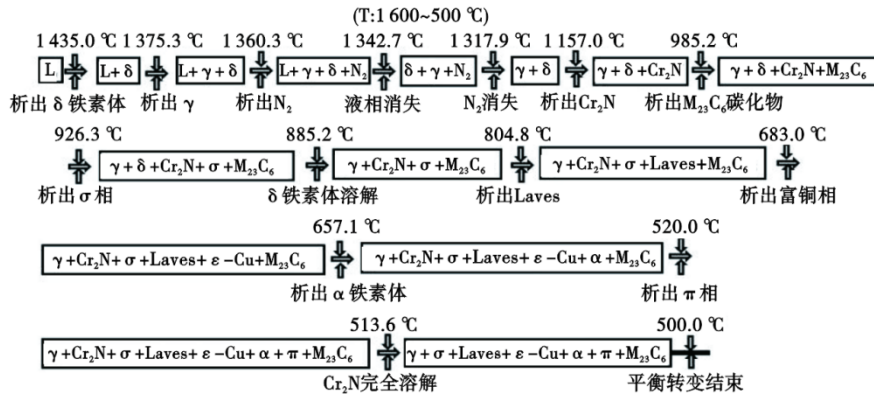


图3 CD3MWCuN 钢的平衡凝固及冷却过程相变路径图

Fig. 3 Phase transition path diagram during equilibrium solidification and cooling of CD3MWCuN steel

当冷却温度继续下降至 520 °C, Cr₂N 相开始溶解并逐渐向富 Cr、Ni 的氮化物 π 相转变, 直至 500 °C 平衡转变过程结束时, π 相的最大析出含量约为 4.7%。

铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 体系平衡凝固及冷却过程的相变路径如图 3 所示, 其相变析出路径为: L→L+δ→L+δ+γ→L+δ+γ+N₂→δ+γ+N₂→δ+γ→δ+γ+Cr₂N→δ+γ+Cr₂N+M₂₃C₆→δ+γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ→γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ→γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ+Laves→γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ+Laves+ε-Cu+Laves+σ→γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ+Laves+ε-Cu+α→γ+Cr₂N+M₂₃C₆+σ+Laves+ε-Cu+α+π→γ+M₂₃C₆+σ+Laves+ε-Cu+α+π。

平衡凝固过程(L→δ)体系中各合金元素的平衡溶质分配系数随温度变化的趋势如图 4 所示, 其中 C、N、Cu、Cr、Mo、W 及 Ni 元素易于液相内富集, Fe 元素易偏聚于 δ 铁素体, 其中 C、N 及 Cu 负偏析严重。随着凝固过程的继续进行, Cr 和 Fe 偏析逐渐增强, Ni 偏析逐渐减弱。

CD3MWCuN 钢的平衡转变过程中析出主要的

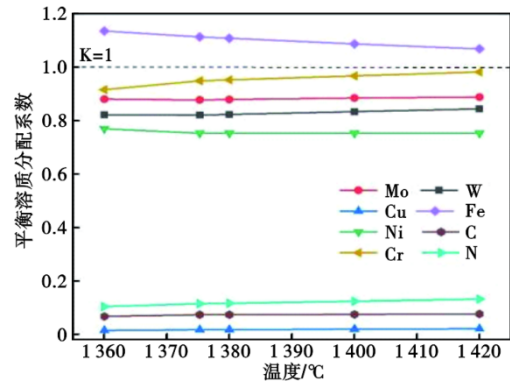


图4 平衡溶质分配系数随温度的变化趋势图

Fig. 4 Trend diagram of equilibrium solute partition coefficient with temperature

脆性金属间相为 σ 相与 Laves 相, 其相组成随温度的变化关系如图 5 所示。由图 5(a) 可知, σ 相富 Cr、Mo, 贫 Ni、W 且不含 N, 在 926.3~500 °C 温度内 σ 相中 Cr、Ni 含量逐渐增加而 Mo、W 含量逐渐减少; 由图 5(b) 可知, Laves 相中富 Cr、Mo 及 W, 贫 Ni、Cu, 在

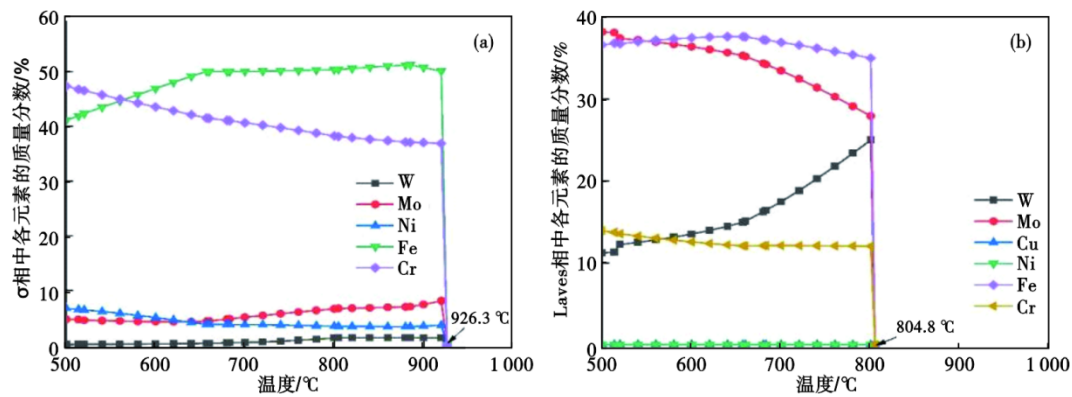


图 5 CD3MWCuN 钢在平衡凝固及冷却过程中析出主要的金属间相的元素组成: (a) σ 相, (b) Laves 相

Fig. 5 Elemental compositions of main intermetallic phases precipitated from CD3MWCuN steel during equilibrium solidification and cooling : (a) Sigma phase , (b) Laves phase

804.8~500 °C 温度内 Laves 相中 Cr、Mo 含量逐渐增加, 而 W 含量逐渐减少。

平衡相图是研究合金体系平衡相变的重要理论基础, 由于复杂多元多相体系相图无法直观地表达, 但是通过垂直截面相图可以分析体系平衡凝固及冷却过程相变历程及析出行为。利用 FactSage 8.2 热力学计算软件中 Phase Diagram 模块和 FSstel 钢铁数据库, 分别计算元素 N、C、Mo、Ni、W 及 Cu 在表 1 所示的 ASTM 标准范围内变化, 同时其它元素

含量依照典型成分值保持不变的垂直截面相图, 结果如图 6 所示。N 是强奥氏体形成与稳定化元素, 其形成奥氏体的能力是 Ni 的 30 倍, 能够显著增强双相不锈钢的强度以及耐局部腐蚀的能力^[14], 实践经验表明: 熔炼该钢种时合理地控制 N 含量对防止铸件出现大量氮气孔至关重要, 图 6(a) 中 N 含量在 0.2%~0.3% 之间变化, 析出 N_2 的温度区间逐渐加宽、开始形成温度上移, 故氮元素宜控制在中下限; Cr_2N 的开始形成温度从 1 138.8 °C 增至 1 204.5 °C,

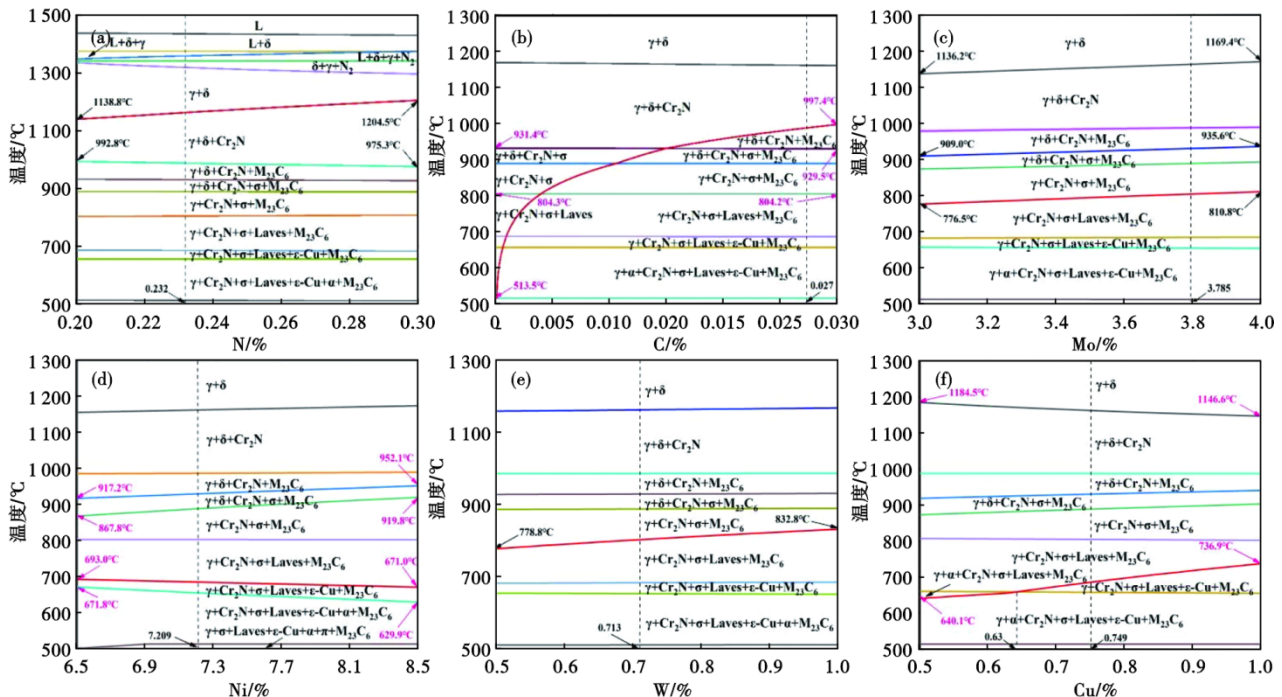


图 6 合金元素在标准范围内变化对平衡体系垂直截面相图的影响: (a) $\omega(N) - T$, (b) $\omega(C) - T$, (c) $\omega(Mo) - T$, (d) $\omega(Ni) - T$, (e) $\omega(W) - T$, (f) $\omega(Cu) - T$

Fig. 6 Effect of alloying element composition variation in standard range on vertical section phase diagram of equilibrium system : (a) $\omega(N) - T$, (b) $\omega(C) - T$, (c) $\omega(Mo) - T$, (d) $\omega(Ni) - T$, (e) $\omega(W) - T$, (f) $\omega(Cu) - T$

增加了 65.7 °C, 明显提高了 Cr_2N 的高温稳定性; 由于 Cr 与 N 元素亲和能力较强而造成 M_{23}C_6 碳化物的析出温度下降了 17.5 °C, 然而 N 元素几乎不影响 σ 相与 Laves 相的析出温度范围。图 6(b) 中随着 C 含量在 0~0.03% 范围变化, M_{23}C_6 碳化物的开始形成温度升高了 483.9 °C, 而且呈抛物线规律上升, σ 相及 Laves 相的开始析出温度分别保持在 930.0 °C 与 804.0 °C 左右; 众所周知, 双相不锈钢中添加一定含量的 Mo 元素能够显著地提高钢的抵抗点蚀及缝隙腐蚀等局部腐蚀的能力, 图 6(c) 显示出随着 Mo 含量由 3.0% 变化到 4.0%, Cr_2N 、 σ 相及 Laves 相的开始析出温度分别增加了 33.2、26.6、34.3 °C, 因此, Mo 元素会在凝固与中高温时效过程中形成脆性金属间相, 既增加了材料的裂纹风险, 又降低其耐蚀抗力; Ni 作为强奥氏体形成与稳定化元素, 当 Ni 含量在 6.5%~8.5% 变化, 平衡转变过程中奥氏体含量会大于 50%, 从而促进铁素体形成元素如 Cr、Mo 及 W 等在凝固过程的剩余液相中不断地富集, 导致由 δ 铁素体直接分解出的 σ 相的析出热力学驱动力明显增强而促进 σ 相的形成与稳定^[15], 图 6(d) 中 σ 相的开始析出温度与 δ 铁素体的开始溶解温度分别增加了 34.9 °C 和 52.0 °C, ϵ -Cu 相与 α 铁素体的开始形成温度分别降低了 22.0 °C 和 41.9 °C, 因此, Ni 元素能够促进 σ 相的析出并抑制铁素体及富铜相的形成, 然而对 Laves 相几乎没有影响; CD3MWCuN 钢中添加 0.5%~1.0% 含量 W, 主要为了提高钢的抵抗局部腐蚀的能力, 图 6(e) 中 W 元素对 σ 相的开始析出温度没有影响, 但是使得 Laves 相的析出温度上移了 54.0 °C; 双相不锈钢中添加一定含量的铜是为了提高钢的抵抗非氧化性酸、海洋微生物腐蚀的能力^[16], 图 6(f) 中 Cu 含量从 0.5% 增至 1.0%, 降低了

Cr_2N 的开始析出温度, 然而 Cu 元素主要影响 ϵ -Cu 相在奥氏体内的平衡脱溶析出过程^[17], ϵ -Cu 相的开始形成温度明显提高了 96.8 °C。

2 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的非平衡凝固偏析与相变路径

利用 FactSage 8.2 热力学计算软件 Equilib 模块的 Scheil-Gulliver cooling 模式和 FSstel 钢铁数据库, 设置初始钢液 100 g, 温度步长为 5 °C, 规定液相分数为 0 作为计算终点, 针对 CD3MWCuN 钢非平衡凝固过程中的产物分布与微观组成、元素偏析与相变路径分别进行计算。非平衡凝固反应过程中, 产物分布随温度的变化关系及微观组成图分别如图 7、图 8 所示。由图 7 可知: 在非平衡凝固过程主要的产物有: δ 、 γ 、 Cr_2N 、 M_{23}C_6 、 M_6C 及 σ 相, 其中 σ 相的最大析出含量约为 0.006%, M_6C 碳化物非常少, 以致于图上无法直观地显示; 液相在 1 226.1 °C 将完全凝固, 奥氏体与 δ 铁素体两相比比例约为 1:9。由图 8 可知: 高温液相在 1 443.5、1 344.5、1 317.0、1 240.4、1 234.3 °C 将分别析出初次 δ 铁素体、奥氏体、 Cr_2N 、 M_{23}C_6 碳化物以及 σ 相, 液相在 1 234.3 °C 的反应中, $\text{L} \rightarrow \delta$ 转变结束同时 $\text{L} \rightarrow \sigma$ 转变开始, 在凝固末期的残余液相中形成 σ 相, 极少量的 M_6C 碳化物则在 1 227.8 °C 出现。基于 Scheil-Gulliver 方程的体系非平衡凝固过程的相变路径如图 9 所示, 由图 9 可以看出: $\text{L} \rightarrow \text{L} + \delta \rightarrow \text{L} + \delta + \gamma \rightarrow \text{L} + \delta + \gamma + \text{Cr}_2\text{N} \rightarrow \text{L} + \delta + \gamma + \text{Cr}_2\text{N} + \text{M}_{23}\text{C}_6 \rightarrow \text{L} + \gamma + \text{Cr}_2\text{N} + \text{M}_{23}\text{C}_6 + \sigma \rightarrow \text{L} + \text{M}_6\text{C} + \sigma$ 。

CD3MWCuN 钢非平衡凝固过程液相中各合金元素含量与固相率之间的关系曲线如图 10 所示, Fe 元素倾向于固相中偏聚为负偏析, Cr、Ni、Mo、W、Cu、N 及 C 元素则倾向于液相中富集为正偏析, 并且

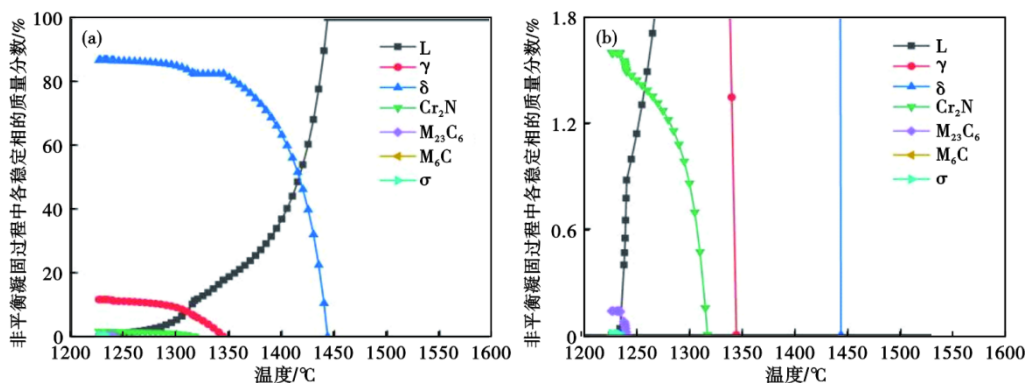


图 7 CD3MWCuN 钢非平衡凝固过程各阶段的产物分布图: (a) 性质图, (b) 局部放大图

Fig. 7 Product distribution at various stages of non-equilibrium solidification process for CD3MWCuN steel: (a) property diagram, (b) drawing of partial enlargement

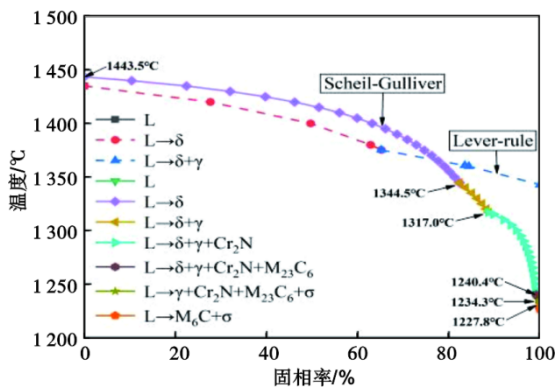


图 8 CD3MWCuN 钢非平衡凝固反应的物相及微观组成图
Fig. 8 Phases and constituents of non-equilibrium solidification reactions for CD3MWCuN steel

Cr、Mo 及 W 元素的偏析会随着固相率的增加而逐渐地加重。由图 10(b)可知:固相率达到 88.7%,此时液相温度为 1 317.0 °C,由于 Cr₂N 的析出导致液相中 N 元素含量的急剧下降;结合图 10(a)、(b)分析,固相率进一步达到 99.1%,液相温度为 1 240.4 °C,由于液相内 M₂₃C₆ 碳化物的析出会消耗一定的 Cr 及 C 元素而造成在凝固末期的残余液相内元素含量明

显降低。

有研究表明^[18],铸造双相不锈钢中添加 W 元素能够提高脆性 σ 相的高温析出敏感性。由图 10(b)可知,在非平衡凝固末期的残余液相中, W 含量将急剧上升并高达 6.5%,枝晶偏析会非常严重,结合 Cr、Ni 及 Mo 元素分布的不均匀,故增加了此钢种厚大型砂铸件在铸型中自然冷却过程从 δ/γ 相界、δ/δ 晶界和晶内析出脆性金属间相而出现裂纹的风险。因此,生产 CD3MWCuN 钢材质的铸件在进行热处理阶段需要遵循“厚大砂铸件热开箱热装炉快升温、精砂铸小件冷开箱冷装炉慢升温”的原则,鉴于工业高温热处理电阻炉的炉温均衡性较差、滞后等特点以及该材质中 Cr、Mo、W 等元素的高温易氧化性,于是固溶化处理之前的铸件需要刷涂高温抗氧化涂料以保证铸件表面质量^[19],固溶温度宜采用 (1 140±14) °C、保温时间以铸件的最大壁厚每 20 mm 增加 1 h 进行计算,以保证消除铸造偏析以及金属间相与碳氮化物等的充分溶解使成分均匀化,铸件保温结束后应立即淬入循环水中冷却,依照此工艺可以生产出金相组织合格、机械性能满足标准

Fe-0.027C-24.750Cr-3.785Mo-7.209Ni-0.749Cu-0.232N-0.713W 铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 非平衡凝固以及冷却过程相变路径图 (T:1 600~1 226.1 °C)

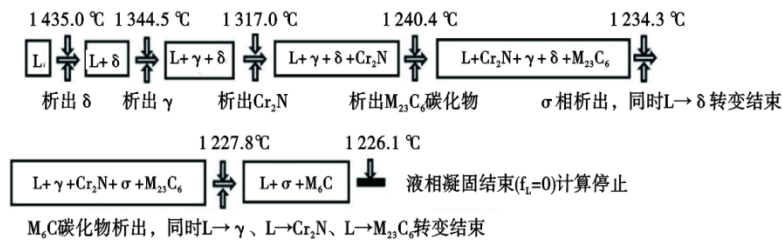


图 9 CD3MWCuN 钢非平衡凝固的相变路径图

Fig. 9 Phase transition path diagram of CD3MWCuN steel during non-equilibrium solidification process

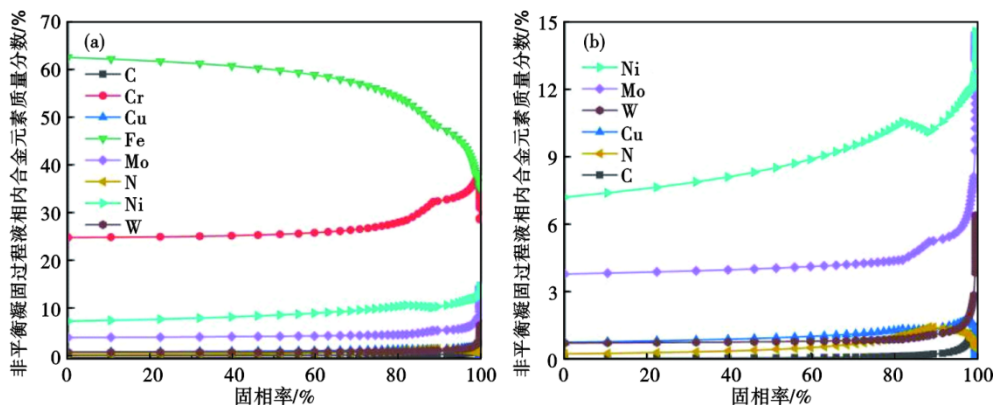


图 10 CD3MWCuN 钢非平衡凝固过程液相中合金元素含量与固相率关系曲线图: (a) 性质图; (b) 局部放大图

Fig. 10 Curves of elemental content and solid fraction in the liquid phase of CD3MWCuN steel during non-equilibrium solidification process : (a) property diagram; (b) drawing of partial enlargement

要求和客户需求的优质双相不锈钢铸件。

3 结论

(1) 美标铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 的平衡凝固及冷却过程的相变及析出路径为: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \delta + \gamma + N_2 \rightarrow \delta + \gamma + N_2 \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha \rightarrow \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha + \pi \rightarrow \gamma + M_{23}C_6 + \sigma + Laves + \varepsilon - Cu + \alpha + \pi$;

(2) CD3MWCuN 钢在 Scheil-Gulliver cooling 模

式下的非平衡凝固过程的相变路径为: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \delta + \gamma + Cr_2N \rightarrow L + \delta + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 \rightarrow L + \gamma + Cr_2N + M_{23}C_6 + \sigma \rightarrow L + M_6C + \sigma$;

(3) 平衡凝固过程 ($L \rightarrow \delta$) 中 C、N、Cu、Cr、Mo、W 及 Ni 易于液相内富集, Fe 易于 δ 铁素体内偏聚, 其中 Cr、Fe 偏析逐渐增强, Ni 偏析逐渐减弱。非平衡凝固过程中 Fe 为负偏析, Cr、Ni、Mo、W、Cu、N 及 C 为正偏析, 且 Cr、Mo 及 W 的偏析会随着固相率的增加而逐渐地加重;

(4) 平衡转变过程中析出的金属间相为 σ 相与 Laves 相, 其中 σ 相富 Cr、Mo, 贫 Ni、W 且不含 N, 而 Laves 相富 Cr、Mo 及 W, 贫 Ni、Cu。

参考文献

- [1] 李树林, 周思柱. 水下阀门的材料要求及选择[J]. 石油机械, 2013, 41(5): 54-58.
- [2] 陆世英. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [3] 丰 涵, 周晓玉, 刘 虎, 等. 特超级双相不锈钢的发展现状及趋势[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(4): 1-5.
- [4] 胡学文, 窦文哲, 张 涛, 等. CD3MWCuN 超级双相不锈钢精炼工艺及应用[J]. 铸造, 2018, 67(9): 846-848.
- [5] 于建平. CD3MWCuN 超级双相不锈钢补焊接头性能与组织分析[J]. 电焊机, 2013, 43(6): 67-71.
- [6] 徐继坤, 张磊磊, 郭 凯. 6A 超级双相不锈钢离心泵体铸造及焊接工艺分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51(13): 75-77.
- [7] 王哨兵, 周 珠, 孙文强, 等. 超级双相不锈钢 S32760 凝固过程 Thermo-Calc 热力学软件的应用[J]. 特殊钢, 2020, 41(3): 15-19.
- [8] 武 敏, 李建春, 李国平, 等. 铸态超级双相不锈钢 S32750 热变形行为及组织演变[J]. 特殊钢, 2019, 40(5): 12-16.
- [9] 梁丽霞, 赵宏伟, 康喜英, 等. 变形温度对超级双相不锈钢 S32750 性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 191-194.
- [10] 康喜英, 赵宏伟, 高东升, 等. 高温塑性变形对超级双相不锈钢 S32750 的性能影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 159-161.
- [11] 王佳夫, 刘丽丽, 花福安, 等. 2507 超级双相不锈钢的热变形行为[J]. 特殊钢, 2011, 32(6): 50-52.
- [12] 李 欣, 吴华杰, 刘颖辉, 等. 固溶处理对铸态 2101 双相钢腐蚀性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 86-91.
- [13] 李 俊. 固溶处理对超级双相不锈钢 S32750 组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 64-66.
- [14] 戴起勋. 金属材料学[M]. (第二版) 北京: 化学工业出版社, 2012: 85. ISBN: 9787122125378
- [15] 王静茹. Ni、Mo 含量对双相不锈钢耐腐蚀性和力学性能的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
- [16] 夏 进. 2205 含铜双相不锈钢的耐海洋微生物腐蚀行为研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.
- [17] 刘 东, 王永霞, 向红亮, 等. 时效温度对含 Cu 抗菌双相不锈钢力学及耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(10): 127-131.
- [18] 罗照银, 李静媛. S32760 超级双相不锈钢中 σ 相的析出规律[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(4): 110-115.
- [19] 马保斌, 路 琛, 苏国宝. 双相不锈钢铸件热处理凹坑与氧化皮产生原因及改善措施[J]. 铸造, 2021, 70(1): 99-103.