

# 镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属凝固偏析行为

郭 泉<sup>1</sup>, 徐 锴<sup>1</sup>, 霍树斌<sup>2</sup>, 陈佩寅<sup>2</sup>, 陈 波<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150028)

**摘 要:** 采用 OM, SEM, EDS, EPMA 等分析手段对试制的镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属开展了凝固偏析行为研究. 结果表明, 熔敷金属中主要包括  $\gamma$  相、(Nb, Ti)C 碳化物、Laves 相等, 金相组织主要为柱状晶, 在枝晶间存在宽度约为 5~10  $\mu\text{m}$  的偏析区域; 按照 Scheil 公式对 EPMA 分析结果进行了偏析系数计算, 估算的 Nb, Mo, Ni, Cr, Fe 偏析系数分别为  $k_{\text{Nb}} = 0.23$ ,  $k_{\text{Mo}} = 0.68$ ,  $k_{\text{Ni}} = 1.07$ ,  $k_{\text{Cr}} = 1.05$ ,  $k_{\text{Fe}} = 1.23$ , 在结晶过程中 Nb, Mo 更倾向于分配在残余液相, Nb 的偏析倾向最大, Mo 次之, Fe 更倾向于分配在固相中, Ni, Cr 基本为固液平均分配. 文中试验用镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属凝固结晶路径为  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + \text{MC} \rightarrow L + \gamma + \text{MC} + \text{Laves 相} \rightarrow \gamma + \text{MC} + \text{Laves 相}$ .

**关键词:** 镍基合金; 凝固结晶; 偏析

**中图分类号:** TG 434 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400190

## 0 序 言

凭借着优异的抗主回路水应力腐蚀开裂性能, Inconel 690 镍基合金已经取代 Inconel 600 合金应用于反应堆压力容器、蒸汽发生器等核岛主设备的制造, Inconel 690 配套焊丝即被广泛应用于接管安全端、管子-管板等关键位置的焊接. 在实际应用过程中发现, Inconel 690 合金焊缝裂纹敏感性较高, 文献 [1] 研究结果表明, 为有效控制高温失塑裂纹敏感性, 在镍基合金焊接材料中需要加入一定含量的 Nb, 通过形成 MC 型碳化物来增加晶界蜿蜒程度, 有效钉扎晶界, 阻碍晶界滑移, 增加抗高温失塑裂纹能力. 文献 [1-3] 研究结果表明, 随着 Nb 含量的升高, 焊缝凝固温度区间会增大会, 热裂纹敏感性会增加, 热裂纹敏感性与焊缝凝固结晶过程密切相关, 但目前国内外学者主要致力于 Inconel 690 镍基合金焊缝的组织、力学性能、抗裂性等研究, 对于焊缝凝固偏析行为、结晶路径等方面研究较少. 针对 Inconel 625 等其它镍基合金的研究结果<sup>[4-7]</sup> 已经表明, Nb, Mo 等合金元素对镍基合金焊缝凝固结晶具有重要影响. 文中采用 OM, SEM, EDS, EPMA 等分析手段对试制镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属开展了凝固偏析行为研究.

## 1 试验方法

试验用材料为试验室试制的镍基合金气体保护焊丝, 规格为  $\phi 1.2 \text{ mm}$ , 焊丝化学成分见表 1.

表 1 焊丝化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Compositions of welding wire

C	Si	Mn	S	P	Nb
0.011	0.12	0.91	0.001	0.002	2.54
Fe	Mo	Al	Ti	Ni	Cr
4.06	4.12	0.32	0.19	56.77	29.60

试验用母材为 Q235 钢板, 规格为  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ . 采用 GTAW 焊接方法进行堆焊, 堆焊尺寸约为  $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 焊接工艺参数如表 2 所示.

表 2 GTAW 工艺参数  
Table 2 GTAW parameters

电流 $I/\text{A}$	电压 $U/\text{V}$	焊接速度 $v_1/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
220	13.5	120
保护气	层温控制 $T/^\circ\text{C}$	送丝速度 $v_2/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
纯 Ar	$\leq 150$	1 150

采用 JMatPro 软件镍基合金数据库对于试制焊丝化学成分进行平衡相图计算. 在堆焊熔敷金属切取试样, 通过磨制、抛光和腐蚀制成熔敷金属横截面金相试样. 利用 OLYMPUS GX51 型光学显微

镜对于熔敷金属金相组织进行了观察,利用 ZEISS EVO18 型扫描电子显微镜进一步放大观察试样表面微观组织结构,并配合 OX-FORD INCA 能谱仪进行了点、线、区域等成分分析.采用 JXA-8230 型电子探针 EPMA 对枝晶、枝晶间进行了波谱成分分析.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 热力学平衡相计算结果

采用 JMatPro 软件镍基合金数据库,对于试验用焊丝化学成分进行热力学平衡相图计算,结果如图 1 所示.熔敷金属中除基体  $\gamma$  相外,还存在出  $\gamma'$ 相、MC 和  $M_{23}C_6$  型碳化物等相.基体对应的初熔和终熔温度分别为 1 350 和 1 280  $^{\circ}C$ ,凝固温度范围约为 70  $^{\circ}C$ .MC,  $M_{23}C_6$  型碳化物分别在 1 218, 1 132  $^{\circ}C$  开始析出,析出量随着温度的降低增加不明显, $\gamma'$ 相在 729  $^{\circ}C$  时开始析出,且析出量随着温度的降低逐渐增加,在平衡态条件下凝固结晶组织预测中未见 Laves 相.

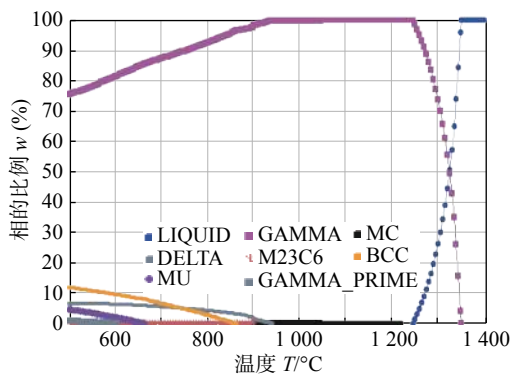
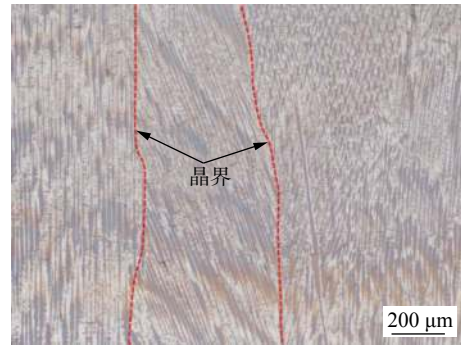


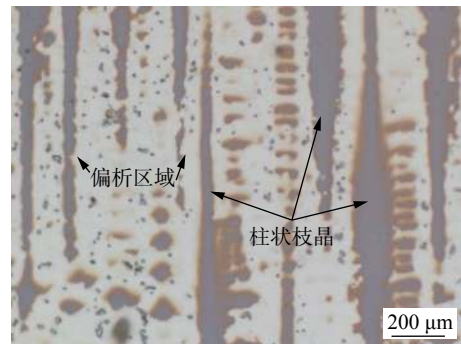
图 1 试验用焊丝化学成分平衡相计算结果  
Fig. 1 Results of equilibrium phases of experimental welding wire

### 2.2 微观组织结构分析

采用光学显微镜对堆焊熔敷金属进行金相组织观察,结果如图 2 所示,50 倍下熔敷金属组织主要为柱状晶,在枝晶间存在较为明显的偏析区域,500 倍下可见在枝晶间存在少量细小的析出物,在偏析区芯部存在不规则的块状析出相.



(a) 低倍金相组织

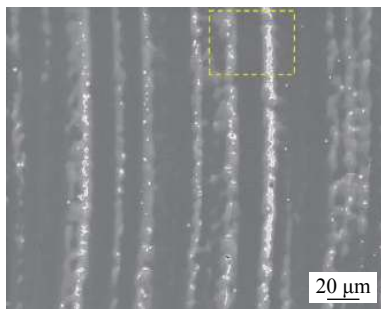


(b) 高倍金相组织

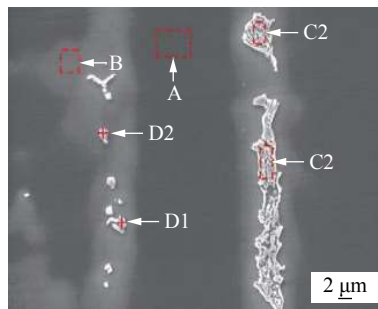
图 2 熔敷金属金相组织

Fig. 2 OM images of deposited metal

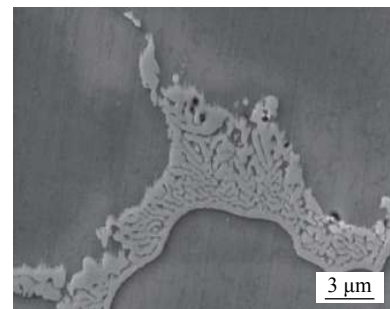
为探究微观组织各相组成以及主要元素在焊缝冷却凝固过程中的分配规律,利用 SEM, EDS 对熔敷金属金相试样进行微观组织及成分分析,结果如图 3 所示.图 3a 为 500 倍形貌,图 3b 为图 3a 中虚线标记区域的 2 000 倍形貌.结合表 3 中 EDS 能谱分析结果可知,图 3b 中的 A 区域为枝晶干  $\gamma$  相,图 3b 的灰色区域 B 为枝晶间  $\gamma$  相,即为偏析区域,



(a) 微观形貌 (500 倍)



(b) 图 3a 局部放大



(c) 典型 Laves 相共晶组织

图 3 熔敷金属 SEM 微观形貌

Fig. 3 Microstructure of deposited metal by SEM

宽度约在 5~10 μm. 在偏析区域 B 芯部存在两类析出物,一类为内部结构类似骨架的 C 类析出相,为金属间化合物 Laves 相,其为 A<sub>2</sub>B 型结构, A: Ni/Cr/Fe, B: Nb, Mo, 高倍下典型形态见图 3c; 一类为较微小的 D 类析出相,为 (Nb, Ti)C 复合碳化物.

表 3 熔敷金属各典型相能谱分析结果(质量分数, %) Table 3 EDS results of typical phases in deposited metal

位置	Nb	Mo	Ti	Ni	Cr	Fe
A	1.2	3.6	0.1	58.5	31.0	4.5
B	4.8	5.3	0.2	54.3	30.4	3.6
C1	20.5	8.8	0.3	43.9	23.0	2.5
C2	20.3	7.8	0.3	44.8	23.4	2.4
D1	35.9	2.5	20.5	21.9	16.9	1.7
D2	54.6	2.1	20.3	11.6	10.0	0.9

2.3 凝固偏析过程分析

图 3b 中白灰色为偏析区域,由表 3 可见相比于枝晶轴 A 区成分,偏析区域 B 中 Nb, Mo 含量较高. 镍基合金熔敷金属的凝固行为、结晶路径受控于溶质再分布行为. 镍基合金中合金元素的溶质再分布规律估算常用 Scheil<sup>[5]</sup> 公式,即

$$C_s = kC_0[1 - f_s]^{k-1}$$

式中: C<sub>s</sub> 是固/液界面上的固体成分; C<sub>0</sub> 为合金名义成分; f<sub>s</sub> 是固体分数; k 是平衡分布系数. 对于熔化焊,焊缝凝固时间短,为简化问题不考虑固

态扩散,各合金元素的偏析系数采用  $k = C_s/C_l$  估算,文中选用成分为 C<sub>s</sub>, C<sub>l</sub> 指凝固后期液相成分,文中即为枝晶间 γ 相.  $k > 1$ , 表明溶质在凝固过程中更易于在固相中分配;若  $k < 1$ , 溶质在凝固过程中更易于残留在液相中, k 值越小,偏析倾向越重. 考虑到 EDS 成分分析结果会直接影响到各元素偏析系数计算的准确性,采用 EPMA 对熔敷金属枝晶 γ 相、枝晶间 γ 相进行了成分分析,结果见表 4.

表 4 熔敷金属 EPMA 分析结果(质量分数, %) Table 4 EPMA results of deposited metal

区域	Nb	Mo	Ni	Cr	Fe
枝晶γ相	1.15	3.29	58.98	31.56	4.42
枝晶间γ相	5.20	4.81	55.04	30.11	3.58

对表 4 中成分进行计算,各元素偏析系数估算结果如下,  $k_{Nb} = 0.23$ ,  $k_{Mo} = 0.68$ ,  $k_{Ni} = 1.07$ ,  $k_{Cr} = 1.05$ ,  $k_{Fe} = 1.23$ , 可见 Nb, Mo 的偏析系数均小于 1, 凝固结晶过程中更易于在残余液相中分配,其中 Nb 的偏析倾向最大, Mo 次之. Fe 的偏析系数为 1.23, 凝固结晶过程中更易于在固相中分配. Ni, Cr 偏析系数在 1 左右,表明凝固时 Ni, Cr 在固液分配不均匀的现象不明显.

穿过枝晶和枝晶间偏析区域的 EDS 线扫描结果见图 4. 可见 Nb, Mo 在偏析区域含量较枝晶更

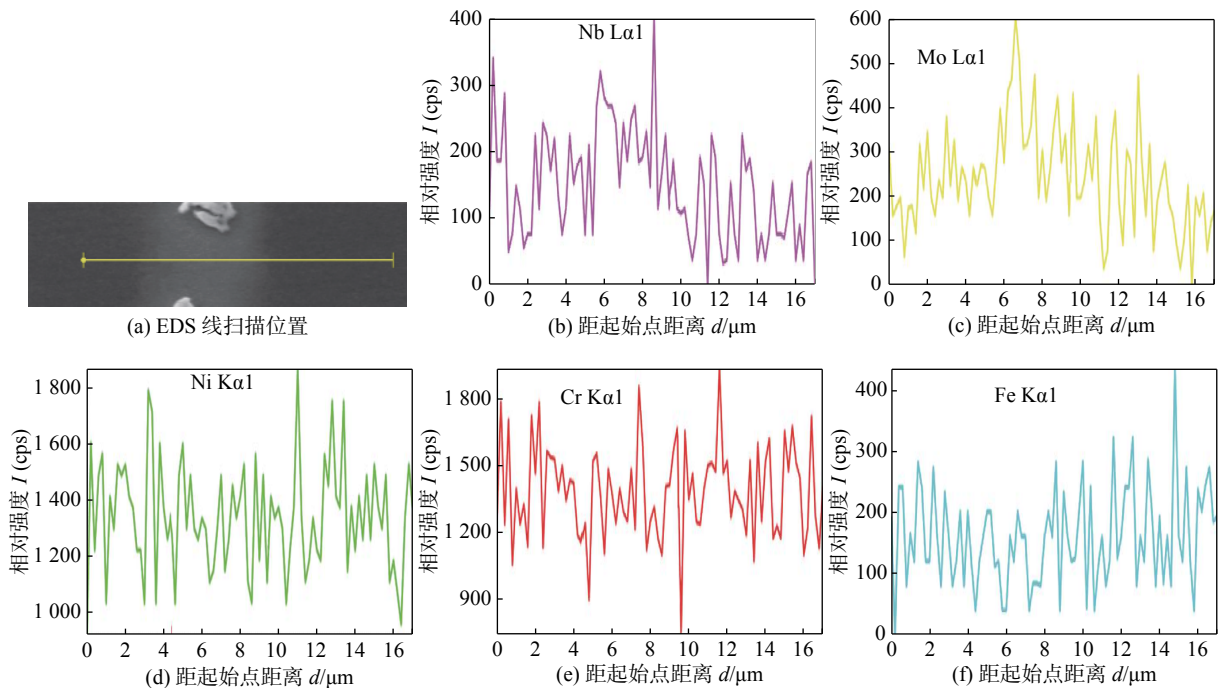


图 4 EDS 线扫描结果

Fig. 4 Line scanning results of EDS

高, Ni, Cr 含量变化趋势不明显, 枝晶部分 Fe 含量略高于偏析区域, 结果与偏析系数计算结果一致。

凝固结晶过程中, 液相首先凝固形成枝晶  $\gamma$  相, 随着结晶的进行, Nb, Mo 逐步在残余液中富集, 富含 Nb, Mo 的枝晶间  $\gamma$  相凝固, 凝固后期, 残余液相中 Nb, Mo 等元素富集到一定程度, 残余液相便会形成 Laves 相、MC 碳化物, 文献 [5] 研究了 625 镍基合金的结晶路径, 结果表明  $L \rightarrow \gamma + MC$  的共晶反应温度要高于  $L \rightarrow \gamma + Laves$  共晶反应。

根据上述微观组织分析结果, 可以推测熔敷金属凝固结晶路径为:  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + Laves$  相  $\rightarrow \gamma + MC + Laves$  相, 先后发生了  $L \rightarrow \gamma + MC$ ,  $L \rightarrow \gamma + Laves$  两个共晶反应。

### 3 结 论

(1) 试验用镍基合金焊丝熔敷金属相组织主要为柱状晶, 在枝晶间存在 5~10  $\mu\text{m}$  宽度的偏析区域, 微观组织包括  $\gamma$  基体、MC 碳化物、Laves 相等。

(2) 估算的 Nb, Mo, Ni, Cr, Fe 偏析系数分别为  $k_{\text{Nb}} = 0.23$ ,  $k_{\text{Mo}} = 0.68$ ,  $k_{\text{Ni}} = 1.07$ ,  $k_{\text{Cr}} = 1.05$ ,  $k_{\text{Fe}} = 1.23$ , 凝固结晶过程中, Nb, Mo 在结晶过程中更倾向于向残余液相分配, Nb 的偏析倾向最大, Mo 次之。Fe 的偏析系数为 1.23, 凝固结晶过程中更易于在固相中分配。

(3) 试验用镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属凝固结晶路径为  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + Laves$  相  $\rightarrow \gamma + MC + Laves$  相。

#### 参考文献:

- [1] 吴 伟, 陈佩寅, 张 锐. 镍基焊接材料高温失塑裂纹的研究现状及研究趋势 [J]. 焊接, 2005(5): 5 - 8.
- Wu Wei, Chen Peiyin, Zhang Rui. Research status and development and ductility dip cracking of nickel-welding material[J]. Welding & Joining, 2005(5): 5 - 8.
- [2] 唐正柱, 陈佩寅, 吴 伟. Nb 对镍基合金高温失塑裂纹敏感性的影响机理 [J]. 焊接学报, 2008, 29(1): 109 - 112.
- Tang Zhengzhu, Chen Peiyin, Wu Wei. Effect of niobium on ductility drop cracking susceptibility of nickel-base alloys[J]. Transactions of the China welding institution, 2008, 29(1): 109 - 112.
- [3] 唐正柱, 陈佩寅, 吴 伟. Nb 和 Ti 对高温失塑裂纹敏感性影响机理研究 [J]. 焊接, 2007(11): 37 - 41.
- Tang Zhengzhu, Chen Peiyin, Wu Wei. Investigation into the mechanism for the affection of Nb and Ti ductility dip cracking susceptibility[J]. Welding & Joining, 2007(11): 37 - 41.
- [4] Dupont J N, Notis M R, Marder A R, *et al.* Solidification of Nb-bearing superalloys: Part I. reaction sequences[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1998, 29(11): 2785 - 2796.
- [5] Dupont J N, Marder A R, Notis M R, *et al.* Solidification of Nb-bearing superalloys: Part II. pseudoternary solidification surfaces[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1998, 29(11): 2797 - 2806.
- [6] 董建新, 张麦仓, 曾燕屏. 含铌高温合金液相中铌偏聚行为 [J]. 工程科学学报, 2005, 27(2): 000197-201.
- Dong Jianxin, Zhang Maicang, Zeng Yanping. Calculation of Nb segregation behavior in liquid phase for Nb-rich superalloys[J]. Chinese Journal of Engineering, 2005, 27(2): 000197-201.
- [7] Dupont J N, Robino C V, Marder A R. Solidification modeling of Nb bearing superalloys[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1997.

第一作者简介: 郭泉, 男, 1988 年出生, 博士研究生, 工程师。主要从事镍基合金焊接材料研究工作。Email: [guoxiaogarden@163.com](mailto:guoxiaogarden@163.com)

通信作者简介: 徐锴, 男, 研究员, Email: [wel1xk@sina.com](mailto:wel1xk@sina.com)

[1] 吴 伟, 陈佩寅, 张 锐. 镍基焊接材料高温失塑裂纹的研究现