

Inconel 625 合金堆焊金属开裂机理研究

郭泉¹, 谷宇², 韩莹¹, 徐锴¹, 王岩², 姜英龙¹

(1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨, 150028; 2. 太原钢铁(集团)有限公司 先进不锈钢材料国家重点实验室, 太原, 030003)

摘要: 针对 Inconel 625 合金焊接热裂纹问题, 文中基于大厚度堆焊裂纹敏感性评价方法对采用 GTAW 工艺、ERNiCrMo-3 焊丝堆焊的金属进行了开裂机理研究. 结果表明, 堆焊金属的微观组织主要由柱状树枝晶组成, 堆焊金属组织中析出相主要有 Laves(Ni,Fe,Cr)₂(Nb,Ti,Mo) 相、MC 型碳化物和针状 δ (Ni₃Nb) 相. 大厚度堆焊金属组织局部存在位于一次枝晶间、沿柱状晶方向的结晶裂纹. 在裂纹附近的组织及断口发现存在大量密集分布的 δ 相, 裂纹的形成主要与结晶终了阶段形成的共晶 δ (Ni₃Nb) 有关. Inconel 625 合金堆焊金属存在以共晶 Laves、共晶 δ 分别为终凝析出相的 (1)、(2) 两种凝固模式. 相比较而言, 结晶终了阶段发生 $L \rightarrow \gamma + \delta$ 共晶反应的模式 (2) 热裂纹敏感性较大, 从而造成 Inconel 625 合金开裂.

创新点: (1) 研究了 625 合金堆焊金属开裂的机理.

(2) 提出了 625 合金堆焊金属存在以共晶 Laves、共晶 δ 分别为终凝析出相的两种凝固模式.

关键词: Inconel 625 合金; 结晶裂纹; 共晶组织; δ 相

中图分类号: TG 40 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230403001

0 序言

由于具有优异的蠕变抗力、高温抗氧化和耐腐蚀等综合性能, Inconel 625(下文简称 625) 合金被广泛应用于石油化工^[1]、航空^[2]、储能^[3] 等领域高端装备制造. 近五年来, 针对 Inconel 625 合金的激光粉末床熔合、电弧增材制造、电子束定向能量沉积、激光热线、激光功率定向能量沉积、电子束熔化和激光线定向能量沉积等增材制造工艺始终是研究热点. 已开展的研究表明 Inconel 625 合金具有一定结晶裂纹敏感性^[2,4], 文献 [2, 5] 认为结晶裂纹的形成主要与 $(\gamma + \text{Laves})$ 共晶组织有关. 此外, 针对 625 堆焊稀释率^[1,6]、625 堆焊组织^[7-8]、625 合金热裂纹^[4] 也开展了大量研究. 但 625 合金堆焊中存在的热裂纹问题始终未得到彻底解决.

文中基于提出的大厚度堆焊裂纹敏感性评价方法, 采用钨极氩弧焊 (gas metal arc welding, GTAW) 工艺方法堆焊了 Inconel 625 合金, 结合渗透探伤、金相显微镜对堆焊金属切片进行了缺陷检

测, 采用扫描电镜、能谱分析和透射电镜对裂纹形态和断口表面进行分析, 并通过凝固计算等手段对 Inconel 625 镍基合金结晶模式进行了分析, 揭示了 GTAW 大厚度堆焊 625 金属开裂机理, 能够为增材制造及堆焊工艺优化、结构设计提供指导.

1 试验方法

试验用焊接材料为试验室试制的 ERNiCrMo-3 焊丝, 规格为焊丝直径 1.2 mm, 其主要化学成分见表 1. 试验用母材为 Q235B 钢板, 规格为 500 mm × 600 mm × 80 mm. 采用 GTAW 工艺进行堆焊, 最终堆焊金属的尺寸约为 400 mm × 600 mm × 40 mm, 堆焊约 30 层 × 30 道, 共计约 900 道, 焊接工艺参数如表 2 所示. 大厚度堆焊试板示意图如图 1 所示.

图 1a 为大厚度焊接母材底板尺寸和堆焊层熔敷金属尺寸. 具体在堆焊熔敷金属中切取试样位置, 如图 1b 和图 1c 所示, 先沿着垂直于焊接方向切取横向切片 3 片, 编号从外到内分别为 1 号、2 号和 3 号; 再沿着焊接方向切取纵向切片 3 片, 编

表 1 ERNiCrMo-3 焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 1 The chemical composition of experimental ERNiCrMo-3 filler metal.

C	Si	Mn	S	P	Nb	Fe	Mo	Al	Ti	Ni	Cr
0.011	0.022	0.004 7	0.000 4	0.001 1	3.82	0.090	8.67	0.067	0.24	64.60	22.06

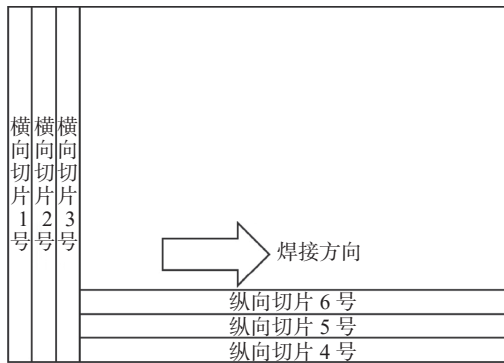
表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of GTAW

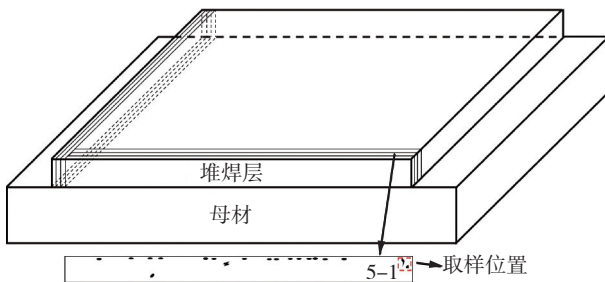
焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v_1/(mm \cdot min^{-1})$	保护气	保护气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_2/(mm \cdot min^{-1})$
200	14	100	Ar	13~15	1 400~1 600



(a) 侧视图



(b) 俯视图



(c) 三维图

图 1 大厚度堆焊试板及切片取样示意图

Fig. 1 Schematic of large thickness surfacing test plate and samplings. (a) side view; (b) top view; (c) 3D view

号从外到内分别为 4 号、5 号和 6 号. 结合渗透探伤、金相显微镜对堆焊金属切片进行了缺陷检测, 分别对每个切片的正反两面 (例: 1-1 为正面, 1-2 为反面) 进行裂纹长短和数量的统计. 利用 OLYMPUS GX51 型光学显微镜对熔敷金属纵向切片 5 号的正面 (5-1) 中存在裂纹的区域, 进行了金相组织及裂纹的观察, 金相试样腐蚀液为浓度为 10% 的硝酸溶液, 腐蚀时间为 5 s. 采用 EVO18 型

扫描电镜对试样表面的微观结构和裂纹进一步放大和观察, 并使用其装备的能谱仪分析了裂纹形貌和断口的成分. 采用 Lift-Out 方式对试样的裂纹区域进行双束聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 微纳加工, 垂直样品表面往下取出一薄片样品后, 通过 FEI Talos F200X 型透射电镜对裂纹的成分进行了分析. 同时, 采用热力学计算软件 JMatPro 中的镍基合金数据库对试制焊丝化学成分进行凝固计算, 对 Inconel 625 镍基合金结晶模式进行了分析, 揭示了 GTAW 大厚度堆焊 625 金属开裂机理, 能够为增材制造及堆焊工艺优化、结构设计提供了指导.

2 试验结果与分析

2.1 裂纹统计

大厚度堆焊试板纵向、横向切片解剖试验结果如图 2 所示, 其中 1 号、2 号、3 号为纵向切片, 4 号、5 号、6 号为横向切片, -1、-2 为同一切片正反面, 随着试样编号的增加, 距离堆焊试件边缘的距离增加. 可见, 图 2 中 4 号切片 4-2 面、5 号切片 5-1 面存在较为明显的裂纹, 从 5-1 中尺寸较大的裂纹可以看出, 裂纹长度方向垂直于母材表面, 主要分布在距离母材表面堆焊金属四分之三厚度处的水平位置.

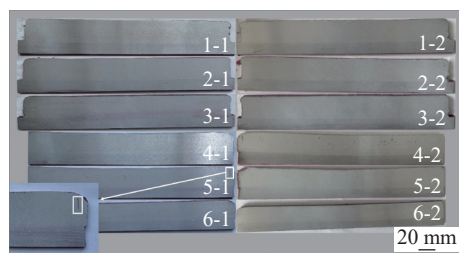


图 2 大厚度试板横、纵向解剖图

Fig. 2 Transverse and longitudinal anatomy of large thickness test plate

为进一步对裂纹进行分析, 对各切片各面渗透探伤显示出的缺陷进行统计, 具体见表 3。从表 3 中可以看出, 4-2 面与 5-1 面裂纹总长度统计值基本

相当, 相比较而言, 5-1 面裂纹数量少, 尺寸大, 最大裂纹长度达到约 7.5 mm。在后续开裂机理研究中主要针对该裂纹进行了分析。

表 3 堆焊金属裂纹统计
Table 3 Crack statistics for deposited metal.

切片编号	裂纹数量 N/个	裂纹长度 l/mm	最大裂纹长度 l_{max}/mm	裂纹总长度 $l_{总}/mm$	距边缘的距离 d/mm	
横向切片	1-1	1	0.5	0.5	10.0	
	1-2	0	—	—	10.5	
	2-1	1	0.5	0.5	10.5	
	2-2	1	0.5	0.5	11.0	
	3-1	1	0.5	0.5	11.0	
	3-2	0	—	—	11.5	
	4-1	0	—	—	10.0	
	4-2	27	0.5; 2.5; 0.5; 0.5; 1.3; 2.5; 0.5; 0.5; 0.5; 0.8; 4.8; 2.5; 2.3; 3.8; 4.0; 0.8; 0.8; 0.5; 0.7; 0.7; 0.9; 0.6; 1.0; 1.2; 2.3; 5.0; 7.0	7.0	49.0	10.5
纵向切片	5-1	22	0.5; 2.8; 0.6; 1.5; 3.0; 0.8; 4.8; 2.5; 2.3; 3.8; 4.0; 0.8; 1.0; 0.5; 1.0; 0.8; 1.0; 0.8; 1.0; 1.3; 2.5; 7.5	7.5	44.8	10.5
	5-2	0	—	—	11.0	
	6-1	0	—	—	11.0	
	6-2	0	—	—	11.5	

2.2 裂纹形貌

对 5-1 面中标记的最大裂纹进行了切取, 裂纹金相见图 3。由图 3a 可见, 裂纹方向沿柱状晶方向。该裂纹总长达 7.5 mm, 贯穿了近三层焊缝。将

裂纹尖端进一步放大表明, 如图 3b、图 3c 所示, 裂纹主要沿一次枝晶间分布, 在裂纹内壁附着有共晶组织, 在无裂纹的一、二次枝晶间区域几乎不存在共晶组织, 这表明裂纹的形成与共晶组织的形成有关。如图 3d、图 3e 所示, 在主裂纹局部存在二次裂纹, 二者长度方向互相垂直, 相比较而言, 二次裂纹的尺寸明显小于主裂纹, 这主要与凝固过程中产生的收缩应力和枝晶方向有关。此外, 从图 3f、图 3g 中可以看出, 在主裂纹附近的堆焊金属组织中同样可以观察到沿一次枝晶间分布的长链条状共晶组织。

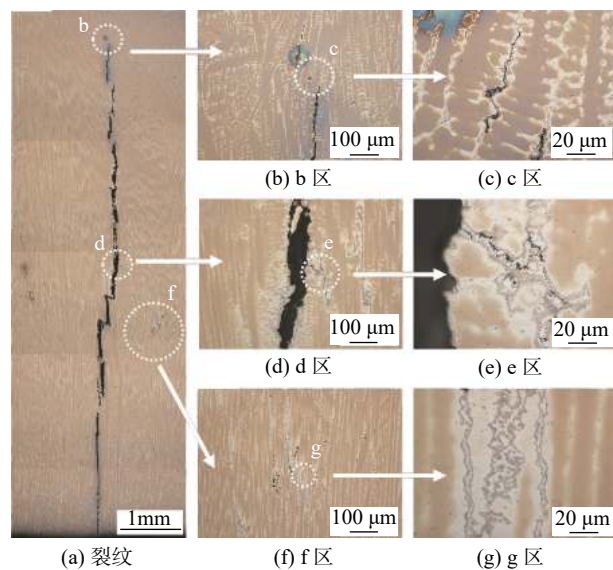


图 3 裂纹的微观金相组织图

Fig. 3 Microstructure diagram of crack. (a) crack; (b) zone b; (c) zone c; (d) zone d; (e) zone e; (f) zone f; (g) zone g

为进一步判断裂纹的性质, 先后对裂纹截面、断口形貌进行了分析, 并配合能谱进行了微区成分分析, 如图 4 所示。由图 4a 所示, 裂纹主要分布于一次枝晶间, 裂纹内壁及附近存在长链状析出相。结合表 4 中能谱分析结果可知, 枝晶间区域的 Nb、Mo 含量比枝晶干更高, 这主要与 Nb 和 Mo 在焊缝凝固过程中偏析有关。在镍基合金焊缝中, Nb 的偏析倾向比 Mo 更大^[9]。图 4a 中位于枝晶间的析出相 Nb、Mo 含量分别达到 16.3%、9.3%, 结

合文献研究与前期基础^[10],初步判断应为共晶 Laves 相.在 625 合金裂纹附近可观察两种不同形态的相,如图 4b 可见,在裂纹内壁及附近同样存在版图状析出相,此外,与版图状析出相共生的还包括一种大量密集分布的针状或杆状析出相,这种析出相在晶粒内以网格状分布.在图 4c 中无裂纹的堆焊金属组织中同样存在类似形态的析出相共生组织.结合表 4 可知,相比而言,版图状析出相 Nb、

Mo 含量较针状或杆状析出相更高.625 合金焊缝及增材制造金属组织中主要存在 MC、Laves、 δ 等多种析出相,其中 δ 相一般为针状或杆状^[11].因此推测版图状、针状或杆状析出相分别为 Laves、 δ 相. δ 相的析出会迅速降低材料的疲劳强度和蠕变强度等力学性能^[8].图 4 中的析出相主要位于枝晶间,且尺寸相对较大,其应为凝固结晶过程中形成的初生析出相,而非固态析出的第二相.

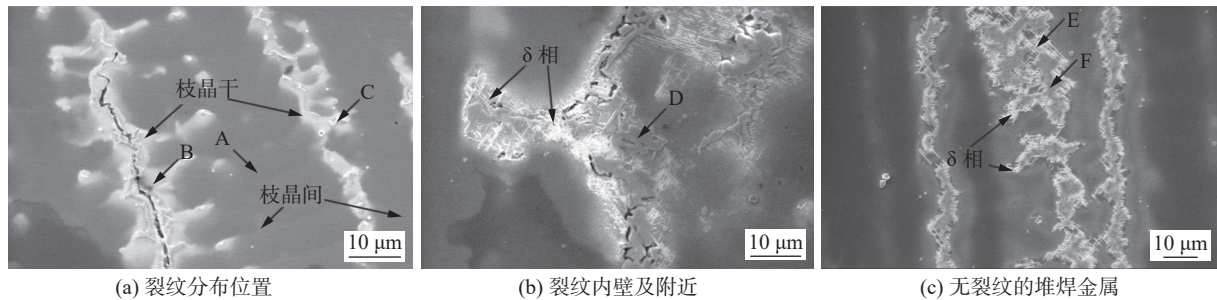


图 4 熔敷金属 SEM 微观形貌

Fig. 4 Microstructure of deposited metal by SEM. (a) crack distribution position; (b) crack inner wall and its vicinity; (c) crack-free surfacing metal

表 4 图 4 中共晶组织的能谱分析表 (质量分数, %)
Table 4 EDS results of eutectic microstructure in Fig.4

位置	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	C
A	0.13	24.00	0.10	63.43	1.83	6.04	2.53
B	0.31	22.63	0.24	61.23	5.27	8.15	1.83
C	0.63	18.83	0.06	51.69	16.28	9.32	2.83
D	0.57	7.24	—	64.97	20.27	4.42	1.57
E	0.36	16.02	—	53.73	16.73	11.17	1.99
F	0.37	20.68	—	59.88	8.13	9.42	1.53

2.3 析出相结构分析

图 5 为堆焊金属组织中析出相的 TEM 结果.结合图 5a、图 5b 所示的透射电子图和选取位置的电子衍射花样标定可知,该析出相为 NbC.有文献表明^[2],初生碳化物是导致基体产生大尺寸韧窝的主要原因.Nb 原子在位错细胞壁、孪晶和晶界处富集,使得 Nb 溶质原子的扩散速率远低于基体原子的扩散速率,晶界的迁移会受到 Nb 溶质原子的阻碍^[12].同时,Nb 的非平衡偏析会导致 δ 相的析出.

对图 5c、图 5d 的透射图和衍射斑点的标定分析表明,析出相为四方 δ 相,其晶格常数分别为 $a = b = 0.362 \text{ nm}$ 和 $c = 0.741 \text{ nm}$.该相呈长直针状或

杆状,尺寸从几百纳米到几微米不等,呈网格状分布, δ 相表现出富含 Ni、Nb 而贫 Cr 的特点,且 $\text{Ni}:\text{Nb} \approx 3:1$,化学式可以表示为 Ni_3Nb .

δ 相本身硬而脆,大量的 δ 相析出长大必然会提高合金的强度, δ 相在晶界和孪晶界处长大,对晶界和孪晶界有钉扎作用,导致应力集中,起到防止晶界迁移的作用^[12],最终使 δ 相两侧出现裂纹的几率大大提高.析出相对 625 合金有较大的影响. δ 相的析出会削弱大量 Nb 和 Mo 原子在 γ 基体中的固溶强化作用,Nb 和 Mo 含量降低会导致合金强度的降低.当 δ 相含量超过 5% 时,合金的塑性会显著降低,同时,合金的强度也会随着 δ 相的析出长大而下降,但屈强比会增大^[13].

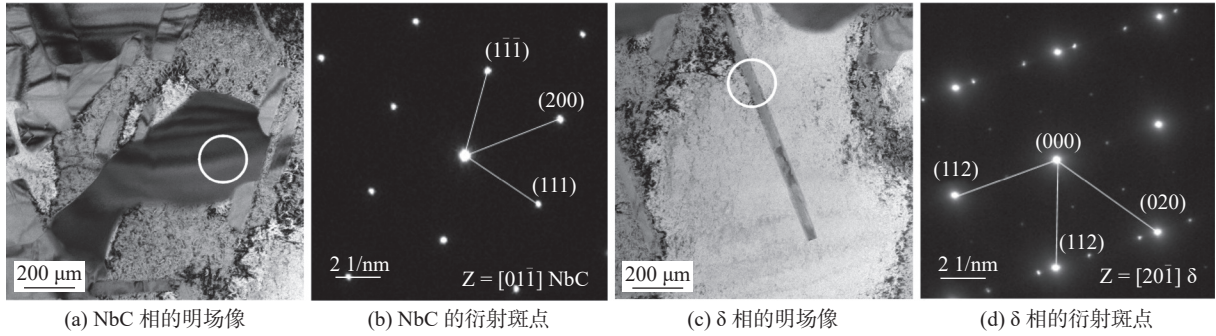


图 5 析出相的 TEM 形貌及选区电子衍射

Fig. 5 TEM image of precipitate phase and SAED results of each phase. (a) the bright field image of NbC; (b) diffraction spots of NbC; (c) bright field image of δ phase; (d) diffraction spots of δ phase

2.4 裂纹断口

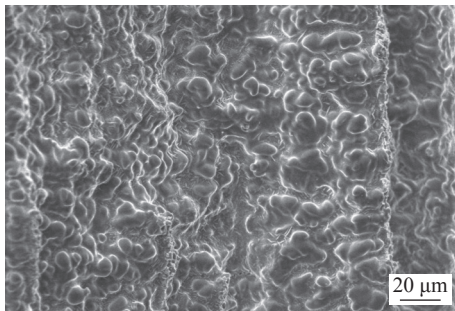
图 6 为主裂纹断口的 SEM 形貌. 如图 6a 微观下该裂纹断口整体呈现典型鹅卵石状花样, 这表明开裂发生在液相比比例相对较高的阶段, 开裂位置的枝晶尚未形成固态桥接. 表现为明显的沿晶开裂特征, 裂纹沿枝晶开裂, 根据该特征, 结合焊接过程中的应力状态, 可以推测出裂纹受到平行于焊接方向的力的作用, 而萌生并逐渐长大. 在凝固过程中的固液共存区, 特别是在凝固阶段末期, 在枝晶间会分布有液态薄膜, 液态薄膜在足够大的拉应力作用下会产生开裂, 当没有新的液相补充到开裂区域的

时候, 就会形成热裂纹.

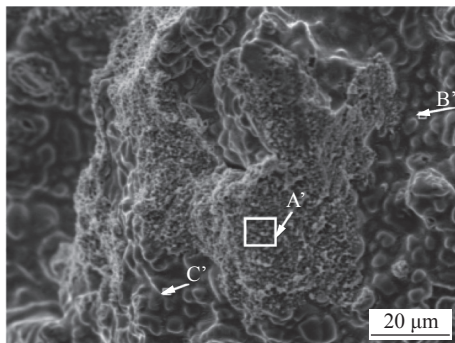
对裂纹断口进行了形貌观察与能谱分析, 如图 6b 和表 5 所示, 断口中未检测到 S 元素、P 元素, 相比焊材中 3.82% 的 Nb 含量而言, 此处的 Nb 含量较高, 分别为 14.29%、7.00% 和 9.02%, 说明断裂位置存在 Nb 元素的偏聚现象. 但结合图 6 与表 5 可以看出, 裂纹应与 S 元素、Ni 元素无关, 而与 Nb 元素密切相关. 可以推测裂纹并不是由于 Nb 与 S、Ni 形成 NbS_2 、Ni-Nb 的此类低熔点共晶相所导致^[14], 而是由于富 Nb 的 δ 相所致.

表 5 图 6 中裂纹断口的能谱分析表 (质量分数, %)
Table 5 EDS results of fracture surface in Fig.6

位置	Ti	Cr	Ni	Nb	Mo
A'	0.39	18.00	54.23	14.29	10.30
B'	0.22	16.70	67.11	7.00	5.75
C'	0.30	20.95	56.34	9.02	10.57



(a) 低倍数下的裂纹断口图



(b) 高倍数下的裂纹断口图

图 6 裂纹断口扫描图

Fig. 6 SEM image of crack fracture. (a) crack fracture diagram at low magnification; (b) crack port diagram at high magnification.

2.5 凝固计算结果

采用 JMatPro 凝固模块和镍基合金数据库, 基于 Scheil 模型对试验焊丝的化学成分进行凝固计算, 结果如图 7 所示. 图 7a 为凝固过程中各相比比例随温度变化的趋势, 可以看出, 合金凝固路径为 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + \delta \rightarrow \gamma + MC + \delta$. 凝固过程中合金除了形成基体 γ 相外, 还会依次析出 MC、 δ 、 σ 三种初生析出相, 其中 δ 、 σ 相发生在凝固结晶的终了阶段 (液相比分数 $f_L \leq 5\%$), 凝固计算结果并未出现组织分析中发现的 Laves 相. 文献 [8] 在采用 GTAW 工艺堆焊的 625 熔敷金属中, 发现经 850 °C 热处理后, δ 相会以固态相变的形式析出, 此外针对 625 合金^[15]、增材制造^[7] 的研究也发现了 δ 相会热处理后析出的现象. 在热处理过程中, γ'' 相通过类贝氏体转变方式形成 δ 相, 此

外 Laves 相的溶解释放了大量的 Nb 原子为 δ 相的长大创造了有力条件. 对于焊态下的 625 合金焊缝金属, 尚未发现存在共晶 δ 相的相关报道. 区别于上述研究成果, 图 7a 结果表明本文的 δ 相由凝固过程中以 $L \rightarrow (\gamma + \delta)$ 共晶反应形式直接从液态中析出, 而非固态析出形成. 结合图 7b 液相成分变化, 可知 Nb、Mo 在凝固过程中逐步在残余液相富集, 在结晶终了阶段 1160 °C 发生的 $L \rightarrow (\gamma + \delta)$ 共晶反应消耗了大量 Nb 原子, 导致液相中 Nb 含量出现下降.

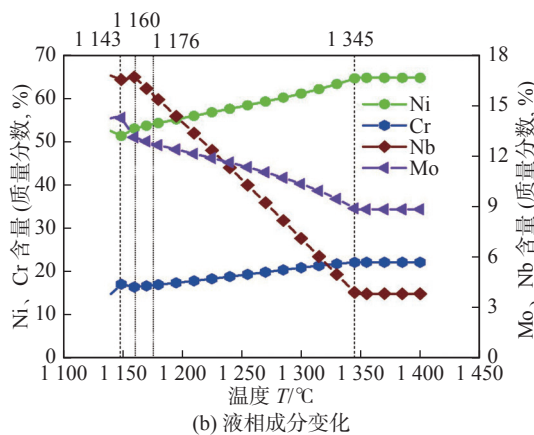
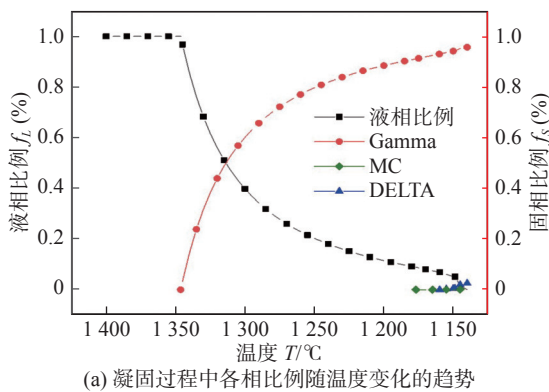


图7 试验用焊丝化学成分凝固计算结果

Fig. 7 Results of equilibrium phases of experimental welding wire. (a) the trend of phase ratio changing with temperature during solidification; (b) the change of liquid phase composition

对于焊态 625 合金焊缝, 一般存在 MC 碳化物、Laves 等相^[7-8], MC、Laves 均是在凝固阶段通过共晶反应析出, 相比较而言, 共晶型 Laves 的析出温度低于共晶型 MC. 热处理过程中焊缝组织会发生 Laves 相的溶解^[16]、 δ 相的析出及长大^[8] 等演变行为. 本文在焊态下的 625 堆焊金属组织中发现了 Laves 和 δ 相的共生组织 (图 4b、4c 和图 5a), 区别于固态相变析出的 δ 相, 文中发现的 δ 相是凝固过程中通过共晶反应析出. 值得注意的是, 在文中凝

固计算结果中并未发现共晶 Laves 相, 这可能与凝固计算采用 Scheil 模型在元素扩散、热循环过程等方面的假设条件与实际堆焊存在差异所致.

综合上述分析, 推测 625 合金堆焊金属存在两种模式, 模式 (1): $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + Laves \rightarrow \gamma + MC + Laves$; 模式 (2): $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + MC \rightarrow L + \gamma + MC + Laves + \delta \rightarrow \gamma + MC + Laves + \delta$. 通过模式 (1) 形成的组织中未发现裂纹, 而通过模式 (2) 形成的组织中发现了较为严重的结晶裂纹. 此外, 在裂纹断口形貌上也发现共晶花样与液膜均具有富 Nb 特点. 综上所述, 在 625 合金堆焊金属中发现的裂纹是由于结晶终了阶段发生的 $L \rightarrow \gamma + \delta$ 低熔点共晶反应所引起的结晶裂纹. 625 合金堆焊金属中的共晶 Laves、 δ 的形成均与凝固过程 Nb 元素在残余液相中逐步富集有关, 但对于二者的具体形成机制尚需在以后开展更为深入的研究.

3 结论

(1) 大厚度堆焊金属组织为柱状树枝晶, 在枝晶间分布有块状 MC 型碳化物、版图状的 Laves(Ni, Fe, Cr)₂(Nb, Ti, Mo) 相和针状 δ 相 (Ni_3Nb) 等析出相.

(2) 大厚度堆焊金属组织发现的裂纹是为结晶裂纹, 主要分布在一次枝晶间, 在裂纹附近的组织及断口发现存在大量密集分布的 δ 相, 裂纹主要与结晶终了阶段形成的共晶 $\delta(Ni_3Nb)$ 有关.

(3) 625 合金堆焊金属存在以共晶 Laves、共晶 δ 分别为终凝析出相的 (1)、(2) 两种凝固模式. 相比较而言, 结晶终了阶段发生 $L \rightarrow \gamma + \delta$ 共晶反应的模式 (2) 热裂纹敏感性更大.

参考文献

- [1] 梁恩宝, 胡绳荪, 王志江. 基于响应面法的 Inconel625 镍基合金 GTAW 堆焊工艺优化 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 85-88.
Liang Enbao, Hu Shengsun, Wang Zhijiang. Optimization of GTAW cladding process of Inconel 625 on carbon steel using response surface methodology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 85-88.
- [2] Tian Z H, Zhang C Q, Wang D Y, et al. A review on laser powder bed fusion of Inconel 625 nickel-based alloy[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 81.

- [3] 苏允海, 杨太森, 戴志勇, 等. Inconel 625 熔敷金属抗 Cl⁻ 腐蚀行为分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(6): 64 – 70.
Sun Yunhai, Yang Taisen, Dai Zhiyong, *et al.* Analysis of Cl⁻ corrosion resistance of Inconel 625 deposited metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(6): 64 – 70.
- [4] 张军磊, 胡强, 魏鹏程, 等. Inconel 625 合金焊接热裂纹倾向研究 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37(S1): 68 – 73.
Zhang Junlei, Hu Qiang, Wei Pengcheng, *et al.* Research on welding thermal cracking tendency of Inconel 625 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(S1): 68 – 73.
- [5] Kocurek R A J. Mechanism of hot cracking welds of nickel alloy Inconel 625[J]. Solid State Phenomena, 2016, 246(25): 25 – 28.
- [6] 何帅, 王立君, 葛可可. 基于 Elman 网络算法的 Inconel625 合金堆焊稀释率的控制 [J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 124 – 128.
He Shuai, Wang Lijun, Ge keke. Control of dilution rate of Inconel 625 alloy surfacing based on Elman network algorithm[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 124 – 128.
- [7] 冯英超, 刘金平, 王世杰, 等. 固溶处理对 Inconel 625 合金电弧增材组织的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 81 – 85.
Feng Yingchao, Liu Jinping, Wang Shijie, *et al.* Effect of solution treatment on the microstructure of Inconel 625 alloy fabricated by arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 81 – 85.
- [8] 邸新杰, 邢希学, 王宝森. Inconel 625 熔敷金属中 δ 相的形核与粗化机理 [J]. 金属学报, 2014, 50(3): 323 – 328.
Di Xinjie, Xing Xixue, Wang Baosen. Nucleation and coarsening mechanism of δ phase in inconel 625 deposited metal[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 50(3): 323 – 328.
- [9] Hao C, Lin Y C, He D G, *et al.* Influences of stress-aging on the precipitation behavior of δ phase (Ni₃Nb) in a nickel-based superalloy[J]. Materials & Design, 2020, 197: 109256.
- [10] 郭泉, 徐镡, 魏超, 等. GH2132 高温合金熔敷金属结晶裂纹敏感性 [J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 30 – 35.
Guo Xiao, Xu Kai, Wei Chao, *et al.* Solidification crack sensitivity of GH2132 superalloy deposited metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 30 – 35.
- [11] Liu X, Fan J, Zhang P, *et al.* Influence of heat treatment on Inconel 625 superalloy sheet: carbides, γ' , δ phase precipitation and tensile deformation behavior[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 930: 167522.
- [12] 高钰璧, 丁雨田, 孟斌, 等. δ 相对 Inconel 625 合金管材组织及性能的影响 (英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1079 – 1086.
Gao Yubi, Ding Yutian, Meng Bin, *et al.* Influence of δ phase on the microstructure and properties of Inconel 625 superalloy tubes[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1079 – 1086.
- [13] 李亚敏, 朱瑞明, 刘洪军, 等. 长时间时效对 GH625 合金析出相和拉伸性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 262 – 269.
Li Yamin, Zhu Ruiming, Liu Hongjun, *et al.* Effect of long-time aging on precipitated phase and tensile properties of GH625 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(2): 262 – 269.
- [14] 薄春雨, 杨玉亭, 丑树国, 等. 690 镍基合金焊接结晶裂纹形成机理分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 69 – 72.
Bo Chunyu, Yang Yuting, Chou Shuguo, *et al.* Solidification cracking mechanism of 690 nickel-based alloy surfacing metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 69 – 72.
- [15] 李季, 詹英杰, 李江, 等. 625 合金在 750 °C 长时热老化时的组织演化及力学行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(6): 2082 – 2090.
Li Ji, Zhan Yingjie, Li Jiang, *et al.* Microstructure evolution and mechanical behavior of 625 alloy during long-term thermal aging process at 750 °C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(6): 2082 – 2090.
- [16] 徐富家, 吕耀辉, 黄瑞生, 等. 沉积路径对等离子弧快速成形 Inconel625 合金组织及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 75 – 78.
Xu Fujia, Lü Yaohui, Huang Ruisheng *et al.* Effect of deposition path on microstructure and mechanical properties of plasma arc rapid prototyping of Inconel 625 alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 75 – 78.

第一作者: 郭泉, 博士, 高级工程师; 主要从事先进金属材料焊接性及焊接冶金等研究, 发表各类论文 30 余篇; Email: guoxiaogarden@163.com.

通信作者: 徐镡, 研究员, 博士生导师; Email: wellxk@sina.com.

(编辑: 张基隆)

larity period is larger than that during the positive polarity period by using Ar 794.8 nm narrow-band filtering combined with a high-speed camera. Moreover, the Al 396.1 nm spectral line in VPPA has higher radiation intensity and wider range during the reverse polarity period. It is proved that the decrease of MIG arc voltage in the base stage of hybrid welding mainly comes from cathode voltage drop rather than arc column voltage drop.

Highlights: (1) It is proved that the average state of VPPA-MIG hybrid arc is in local thermodynamic equilibrium.

(2) The temperatures of different regions of VPPA-MIG hybrid arc are calculated and analyzed, and the mechanism of arc behavior is explained.

Key words: VPPA-MIG hybrid welding; spectroscopic diagnosis; local thermodynamic equilibrium; arc coupling mechanism

Formation mechanism and influencing factors of unstable metal transfer in high current MAG welding YANG Wenyan¹, FAN Ding², ZHANG Junxi¹(1. Lanzhou Institute of Technology, 730050, Lanzhou, China; 2. Lanzhou University of Technology, 730050, Lanzhou, China). pp 110-116

Abstract: The stability of droplet transfer is crucial for the quality of high current MAG welding. A high-speed camera system and electrical signal acquisition system were used to study the unstable droplet transfer process, arc morphology, and electrical signal of high current MAG. The formation mechanism of unstable droplet transfer was revealed, and the factors affecting the critical current value of unstable droplet transfer in high current MAG were analyzed. The results showed that the droplet transfer in high current MAG welding is an unstable transition mode consisting of swing and mixed transfer. The instability of the liquid cone due to strong electromagnetic force and deviation from the welding wire axis are the direct reasons. The arc rotation/swing frequency varies with the droplet transfer mode and arc shape. Dry elongation is the main factor affecting the critical current value of unstable droplet transfer, and the critical current value significantly decreases with the increase of dry elongation.

Highlights: (1) In this paper, the conventional MAG welding machine is modified, the wire feeding speed is increased from 22 m/min to 50 m/min, and the welding current can reach 600 A. The unstable droplet transfer process, arc shape and

electrical signal of high current MAG welding are studied. The formation mechanism of unstable droplet transfer is revealed, and the factors affecting the critical current value of high current unstable droplet transfer are analyzed.

(2) The droplet transfer in high current MAG welding is an unstable transition mode characterized by swing and mixed transfer, and the instability of the liquid cone under the action of strong electromagnetic force deviates from the axis of the welding wire, which is the direct cause of the unstable transition; Dry elongation is the main factor affecting the critical current value of unstable droplet transfer.

Key words: high current MAG; swing transition and mixed transition; formation mechanism; influence factor

Study on cracking mechanism of Inconel 625 alloy surfacing metal GUO Xiao¹, GU Yu², HAN Ying¹, XU Kai¹, WANG Yan², JIANG Yinglong¹(1. Harbin Welding Institute Limited Company & China Academy of Machinery Science and Technology Group, Harbin 150028, China; 2. State Key Laboratory for Advanced Stainless Steel Materials & Taiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, China). pp 117-123

Abstract: In this paper, the large thickness surfacing test was carried out by GTAW process, the welding hot crack of Inconel 625 alloy was studied, and the cracking mechanism of ERNi-CrMo-3 welding wire surfacing metal was explained. It was indicated that the fabricated Inconel 625 sample consists of cellular dendritic which grew epitaxially from the substrate. Laves(Ni,Fe,Cr)₂(Nb,Ti,Mo) phase, MC-type carbide and acicular δ (Ni₃Nb) phases were also observed in the microstructure of as-welded sample. There are local crystal cracks in the microstructure of large thickness surfacing metal. The cracks are located between primary dendrites along the direction of columnar crystals. There is a large amount of δ (Ni₃Nb) phases, near the cracks and on the fracture surfaces. δ phases is related to the formation of cracks. There are two solidification modes for 625 alloy surfacing: (1) and (2). At the end of crystallization, mode (2) with $L \rightarrow \gamma + \delta$ eutectic reaction has greater sensitivity to thermal cracking, resulting in cracking of Alloy 625.

Highlights: (1) The cracking mechanism of 625 alloy surfacing metal was studied.

(2) It is proposed that 625 alloy surfacing metal exists as eu-

tectic Laves, eutectic δ The two solidification modes of the final precipitated phase.

Key words: Inconel 625 alloy; solidification cracking; eutectic structure; δ phase

Structure and properties of friction stir welding joint of aluminum profile

XING Songling^{1,2,3}, LI Chong², ZHOU Haipeng^{1,2,3}, CHEN Gaoqiang³, SHI Qingyu³(1. Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd., Beijing 100101; 2. Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100070; 3. Tsinghua University, Beijing 100084). pp 124-128

Abstract: Welding joints with partial thickened structures are usually adopted in the design of aluminum alloy profiles to offset the thinning of the joint caused by the downward pressure of the shoulder in friction stir welding. However, after welding of such aluminum profiles, it will take a lot of hours to manually polish the thickened structures. In order to reduce the

amount of grinding, a new type of aluminum profile without thickened structure is designed in this paper, ensuring non-thinning-welding by changing the structure of shoulder. In-depth research is carried out from the perspective of weld forming quality, mechanical properties and organizational structure, and key process parameters such as welding downforce are determined. Finally, combined with the characteristics of extrusion tolerance and assembly tolerance in industrial production, the influence of joint misalignment on welding quality is studied, and a reasonable joint tolerance range is determined.

Highlights: (1) A new type of aluminum profile joint based on non-thinning technique is designed, whose welding properties are studied.

(2) Combined with extrusion tolerance and assembly tolerance in industrial production, the influence of tolerance on welding quality is studied.

Key words: Friction stir welding; Aluminum alloy; Profiles; Non-weld-thinning technique