



# 焊后热处理对 Inconel 690 超声激励 TIG 接头组织及性能的影响

张星越<sup>1</sup>, 韩柯<sup>1</sup>, 雷玉成<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 马建国<sup>2,3,4</sup>

(1. 江苏大学, 材料科学与工程学院, 镇江, 212013; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 等离子体物理研究所, 合肥, 230031; 3. 合肥综合性国家科学中心, 能源研究院, 合肥, 230001; 4. 淮南新能源研究中心, 特种焊接技术安徽省重点实验室, 淮南, 232063)

**摘要:** 引入 IN718 合金作为中间层可以改善 IN690 镍基合金超声激励 TIG 接头高温失塑裂纹敏感性, 接头需要经热处理调控组织成分. 通过不同的焊后热处理工艺流程, 探究固溶温度对接头显微组织、析出相分布和力学性能的影响规律. 结果表明, 固溶热处理促使焊缝与母材晶粒尺寸增大, 碳化物沿晶界偏聚. 随着固溶 + 双时效热处理工艺中固溶温度的提高, 试样晶界碳化物均发生明显粗化. 固溶温度为 1150 °C 的固溶 + 双时效处理后试样接头显微硬度与焊态试样接近, 固溶温度为 980 °C 与固溶温度为 1050 °C 的固溶 + 双时效处理的试样硬度相比焊态提升 10 ~ 20 HV. 固溶温度为 1050 °C 的固溶 + 双时效处理后的试样断后伸长率与抗拉强度最高, 达到 38.4% 与 630 MPa, 断口中韧窝形态呈等轴化且分布更加均匀, 表现为韧性断裂与穿晶断裂模式. 综合显微组织与力学试验结果分析, 固溶温度为 1050 °C 的固溶 + 双时效的焊后热处理工艺可以使加入 IN718 中间层的 IN690 接头得到良好的性能.

**创新点:** (1) 探究了不同焊后热处理工艺下 IN690 合金超声激励 TIG 接头组织演变规律.

(2) 通过镍基合金 IN690 焊接接头热处理断口特征表征, 揭示了接头力学性能随焊后热处理工艺的演化规律.

**关键词:** 超声激励; 热处理; IN690 镍基合金; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 457.19 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240426002

## Effect of post-weld heat treatment on microstructure and properties of ultrasonically excited TIG joints in Inconel 690

ZHANG Xingyue<sup>1</sup>, HAN Ke<sup>1</sup>, LEI Yucheng<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, MA Jianguo<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences Hefei Institutes of Physical Science, Hefei, 230031, China; 3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei, 230001, China; 4. Huainan New Energy Research Center, Anhui Province Key Laboratory of Special Welding Technology, Huainan, 232063, China)

**Abstract:** The addition of IN718 alloy as an interlayer effectively reduces the high-temperature ductility-dip cracking susceptibility in ultrasonically excited TIG joints of IN690 nickel-based alloy, and the joint needs to undergo heat treatment to regulate its microstructure composition. By implementing different post-weld heat treatment processes, this study investigated the influence of solution temperature on the joint's microstructure, precipitate distribution, and mechanical properties. Results show that solution heat treatment promotes grain coarsening in both the weld and base material while inducing carbide segregation along grain boundaries. Results show that solution heat treatment promotes grain coarsening in both the weld and base metal while inducing carbide segregation along grain boundaries. With increasing solution temperatures during the solution + double-aging heat treatment, significant carbide coarsening at grain boundaries is observed across all specimens. The microhardness of joints

subjected to 1150 °C solution + double-aging heat treatment approximates that of as-welded specimens, while specimens treated at 980 °C and 1050 °C solution + double-aging exhibit 10 ~ 20 HV hardness increments compared to the as-welded condition. Specimens processed with 1050 °C solution + double-aging demonstrate optimal mechanical performance, post-fracture elongation of 38.4% and tensile strength of 630 MPa. Their fracture surfaces exhibit uniformly distributed equiaxed dimples, indicative of ductile fracture and transgranular failure modes. Comprehensive analysis of microstructural evolution and mechanical test results confirms that the 1050 °C solution + double-aging post-weld heat treatment process enables IN690 joints incorporating IN718 interlayers to achieve optimal comprehensive properties.

**Highlights:** (1) The microstructural evolution law of the ultrasonically excited TIG joints of IN690 alloy under different post-weld heat treatment processes was investigated.

(2) The fracture characteristics of the IN690 welded joint after heat treatment of the nickel-based alloy were analyzed, and the evolution rules of its mechanical properties with the heat treatment process were clarified.

**Key words:** ultrasonically excited; heat treatment; IN690 nickel-based alloy; microstructure; mechanical property

## 0 序言

作为一种固溶强化型镍基高温合金, IN690 合金具有良好的高温组织稳定性和高温力学性能, 因而广泛应用于核能设备制造领域<sup>[1]</sup>. 为解决 IN690 合金接头各区域经历不同焊接热循环后组织偏析引起的性能缺陷和高裂纹敏感性等问题, 在 IN690 合金超声激励 TIG 时引入 IN718 合金作为中间层<sup>[2]</sup>. 以富 Nb 的 IN718 合金为源向熔池中补充 Nb 元素, 使焊接与焊后热处理过程中可与 C 元素形成碳化物<sup>[3-4]</sup>. 碳化物可以有效钉扎晶界、阻碍晶界滑移, 从而改善 IN690 合金接头的高温失塑裂纹敏感性. 然而, 直接引入中间层会改变焊缝组织合金元素之间平衡, 干扰焊接过程中复杂的组织转变, 影响焊缝强度<sup>[5]</sup>.

为缓解焊接接头残余应力, 镍基合金通常需要对接头进行焊后热处理. 为调控添加中间层后基体和析出相组织, 文中对添加中间层的 IN690 合金 TIG 接头焊后热处理工序中的固溶处理进行研究. 镍基合金的固溶处理可使各区域晶粒尺寸均匀化, 同时使焊接过程中形成的粗大的  $\gamma'$  相、 $\gamma$ - $\gamma'$  共晶相和 MC 碳化物溶回基体<sup>[6]</sup>. 在保持 IN718 合金中间层带来的低焊缝裂纹敏感性的同时, 提高焊缝强度.

文中通过改变焊后热处理工序中固溶处理温度, 分析 IN690 接头显微组织演化与沉淀相分布特征, 并对不同焊后热处理工艺下接头显微硬度及拉伸性能进行表征, 为 IN690 镍基合金焊接接头焊后热处理工艺优化提供理论和试验依据.

## 1 试验方法

使用尺寸为 60 mm × 40 mm × 2 mm 的 IN690 合金板材作为试验母材, IN718 镍基合金中间层打磨至厚度为 1 mm 的薄片. 材料具体成分, 如表 1 所示. 焊接过程中采用体积分数为 99.99% 的氩气对焊接熔池正面和背面同时进行保护, 保护气体流量为 15 L/min. 焊接电流为 52A, 电弧电压为 12 ~ 12.5 V, 焊接速度为 100 mm/min. 焊前将 IN690 合金板材与 IN718 中间层打磨处理至光亮, 并用无水乙醇擦拭去除残留油污等杂质. 焊接采用对接形式, IN718 合金中间层置于对接位置, 试件整体依靠焊接夹具夹紧. 通过超声频信号调制焊接电流, 可以优化焊接接头形状、显著降低接头孔隙率<sup>[7-8]</sup>. 最终改善接头微观组织、提高材料拉伸性能. 根据超声激励电弧的特性, 采用定制的脉冲方波超声激励电源来调制 TIG 焊接电弧, 装置的频率调节范围为 20 ~ 90 kHz, 输出有效电压值调节范围为 0 ~ 80 V, 占空比调节范围为 0 ~ 50%. 试验中 TIG 焊机采用直流正接法, 超声激励信号频率 60 kHz, 超声激励电压为 18 V, 超声信号占空比为 50%.

WHITMORE 等人<sup>[9]</sup>研究了 IN718 合金的单时效和双时效处理效果. 与单时效相比, 双时效处理使材料的硬度增加, 而且可以观察到 1 ~ 2 nm 的  $\gamma'$  相密集分布. 为研究固溶温度在固溶 + 双时效热处理流程中对材料组织及性能的影响, 通过马弗炉精细控制固溶 + 双时效流程. 在试验温度为 980 °C, 1050 °C 和 1150 °C 下保温 10 min 后水淬得到固溶处理后试样. 将固溶试样在 720 °C 下保温 8 h, 炉冷至 620 °C 后继续保温 8 h 后空冷至室温得到固

溶 + 双时效试样, 将固溶温度分别为 980 °C, 1050 °C 和 1150 °C 的不同焊后热处理试样分别编号为 980SDA, 1050SDA 和 1150SDA. 具体热处理流程, 如图 1 所示.

表 1 IN690 合金与 IN718 镍基合金化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of IN690 alloys and IN718 nickel-based alloys

材料	Cr	Fe	Mo	Nb	Al	Ti	Mn	Ni
IN690	30.39	8.88	—	—	0.20	0.21	0.197	余量
IN718	18.01	17.99	3.07	5.32	0.42	1.02	0.070	余量

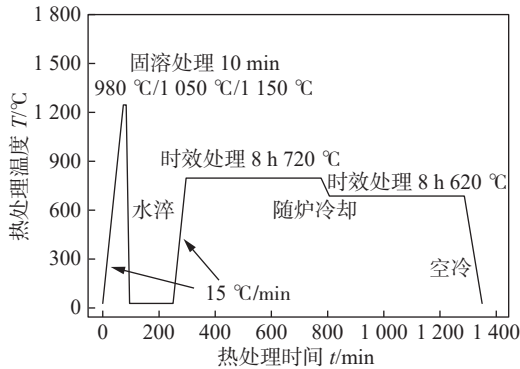


图 1 热处理工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment process

热处理后使用线切割沿焊缝垂直方向截取金相试样和拉伸试样. 金相试样打磨抛光至光洁镜面后, 使用 90% 去离子水和 10% CrO<sub>3</sub> 配置 10% 铬酸溶液, 通过 2 V 直流电进行电解腐蚀 20 s. 接头截面组织微观形貌及拉伸试样的断口形貌采用 FEI NovaNano 450 场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 进行观察, 并对接头截面元素种类、含量及分布进行表征. 试验中使用 FM-ARS900 全自动硬度计沿母材、热影响区和焊缝中心路径, 依次测量焊接接头中心处焊缝方向硬度, 加载载荷为 2.94 N, 加载时间为 15 s, 测试点间距为 0.5 mm. 采用 DDL100 电子万能试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 2 mm/min, 得到试样抗拉强度和断后伸长率.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 热处理后接头组织转变

进行固溶处理后接头组织形貌, 如图 2 所示. 接头热影响区晶粒随固溶温度的提高而发生粗化. 在固溶温度低于 1050 °C 时, 母材晶粒粗化不明显. 当固溶温度达到 1150 °C 时, 母材晶粒急剧长大. 热处理后母材晶界, 如图 3 所示. 图 3(a)、图 3(c) 和图 3(e) 为固溶处理后母材显微组织. 980 °C 固溶处

理试样晶界处仍存在球状碳化物, 1050 °C 固溶处理试样中晶界碳化物大量溶解, 1150 °C 固溶处理试样晶界碳化物消失且晶粒明显粗化. 固溶温度的升高有助于促进镍基合金内偏聚于晶界附近的元素向晶内扩散速度加快<sup>[10]</sup>. 高温环境下原子自扩散率的增加使钉扎晶界的第二相粒子溶解<sup>[11]</sup>. 而晶界迁移速率加快最终促使晶粒在较高的固溶温度下发生粗化. 对母材进行固溶 + 双时效处理后, 各组母材试样平均晶粒尺寸较固溶态粗化不显著. 由图 3(b)、图 3(d) 和图 3(f) 可知, 980SDA 和 1050SDA 母材试样均出现沿晶界分布的连续碳化物, 少部分球状碳化物离散分布于晶界. 1150SDA 母材试样晶界处则析出连续链状碳化物.

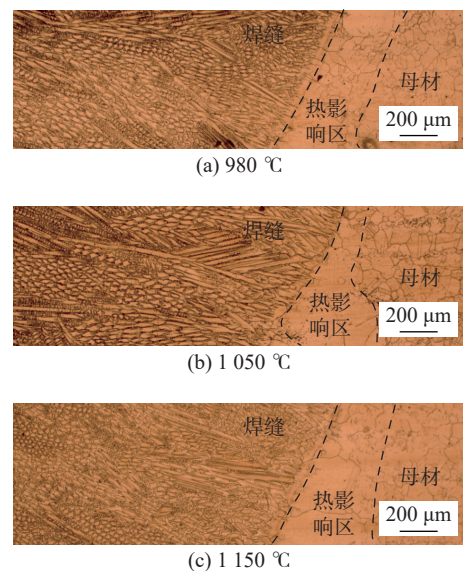


图 2 固溶处理后显微组织形貌

Fig. 2 Microstructure morphology after solution treatment. (a) 980 °C; (b) 1050 °C; (c) 1150 °C

经历固溶处理及固溶 + 双时效处理后的焊缝组织形貌, 如图 4 所示. 随着固溶温度的升高, 焊缝区弥散分布的碳化物逐渐溶解, 含量和尺寸均逐渐降低, 表明固溶温度对焊缝区碳化物的影响与母材类似, 随固溶温度升高晶界处的碳化物溶解程度增大. 图 4(d) ~ 图 4(f) 中经时效处理后焊缝组织晶界

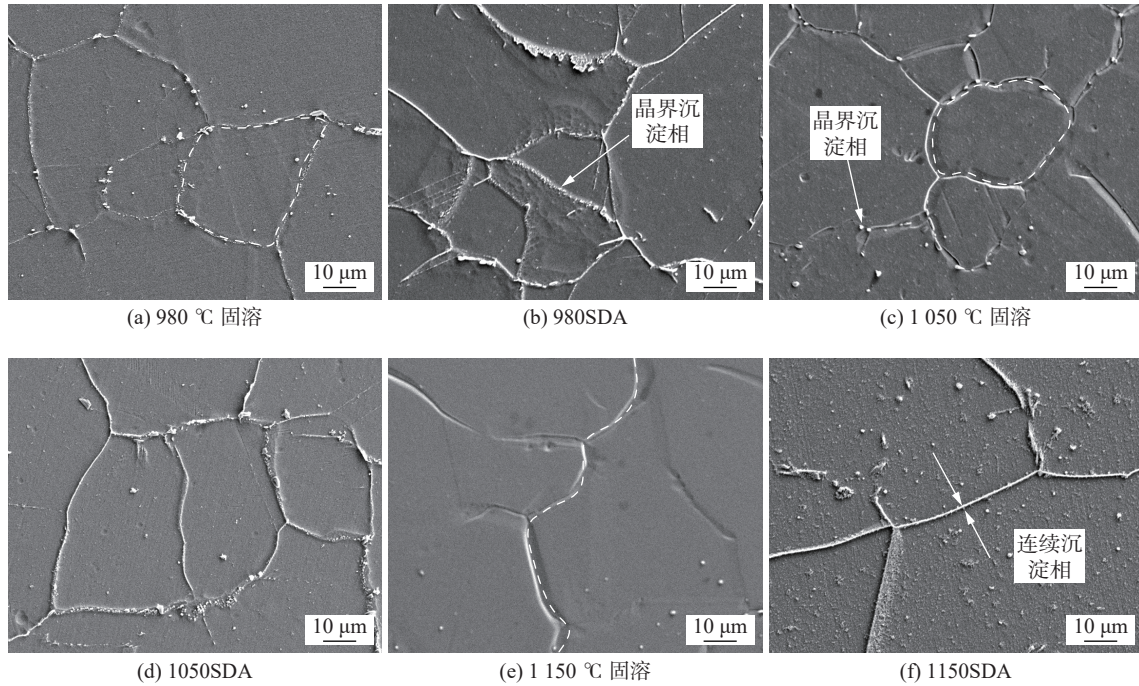


图 3 热处理后母材晶界

Fig. 3 Grain boundaries of base material after heat treatment. (a) 980 °C solution; (b) 980SDA; (c) 1050 °C solution; (d) 1050SDA; (e) 1150 °C solution; (f) 1150SDA

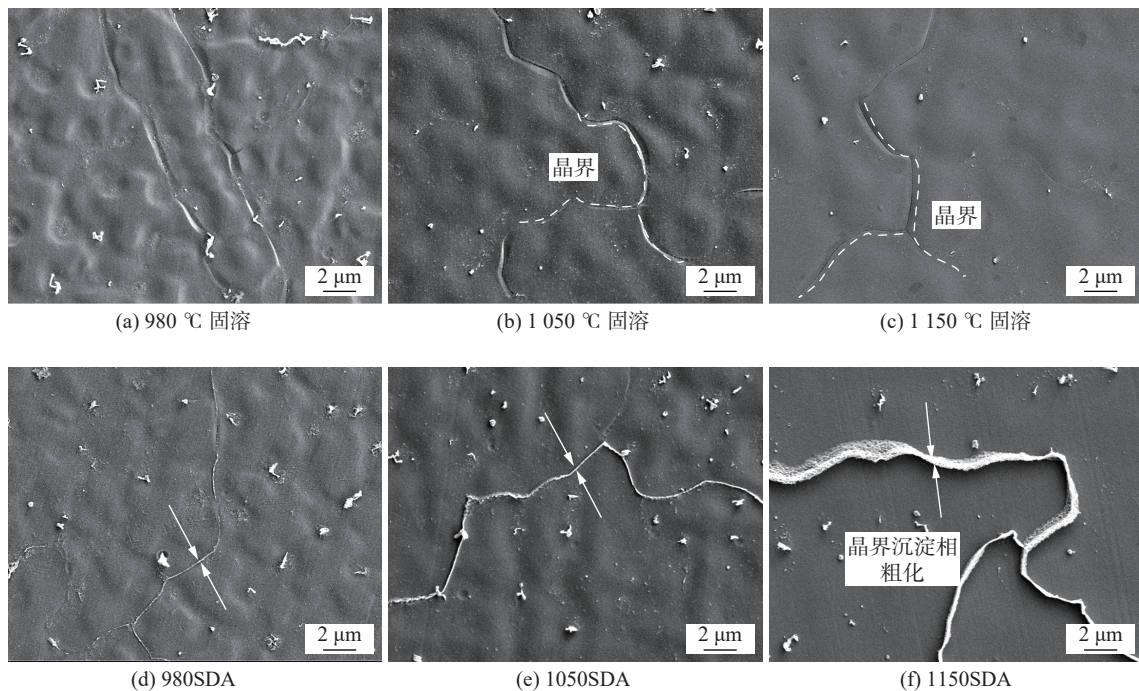


图 4 热处理后的焊缝显微组织

Fig. 4 Weld microstructure morphology after after heat treatment. (a) 980 °C solution; (b) 1050 °C solution; (c) 1150 °C solution; (d) 980SDA; (e) 1050SDA; (f) 1150SDA

处产生不同形貌的析出相。此外,经固溶+双时效处理的试样随着固溶温度的增大,晶界析出相愈发连续且宽度亦随之增加。980SDA 接头焊缝晶界处仅有少量条状、球状碳化物断续分布且间距较大。固溶温度提升至 1050 °C 后晶界析出相呈连续分布,但粗化不明显;而当固溶温度增加至 1150 °C

后晶界处析出明显粗化。

为明确固溶+双时效热处理后焊缝晶界处析出相成分,利用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对 1050SDA 试样焊缝进行分析,如图 5 所示。图 5(c) 的 EDS 点扫描结果,如表 2 所示。晶界处分布的链状析出相出现 C 元素富集,

图 5(b) 的 EDS 线扫描数据显示, 晶界处 Cr 元素含量高于两侧基体, 因此结合文献 [12] 推测晶界处点 P<sub>2</sub> 链状析出相为富 Cr 的 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型碳化物 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

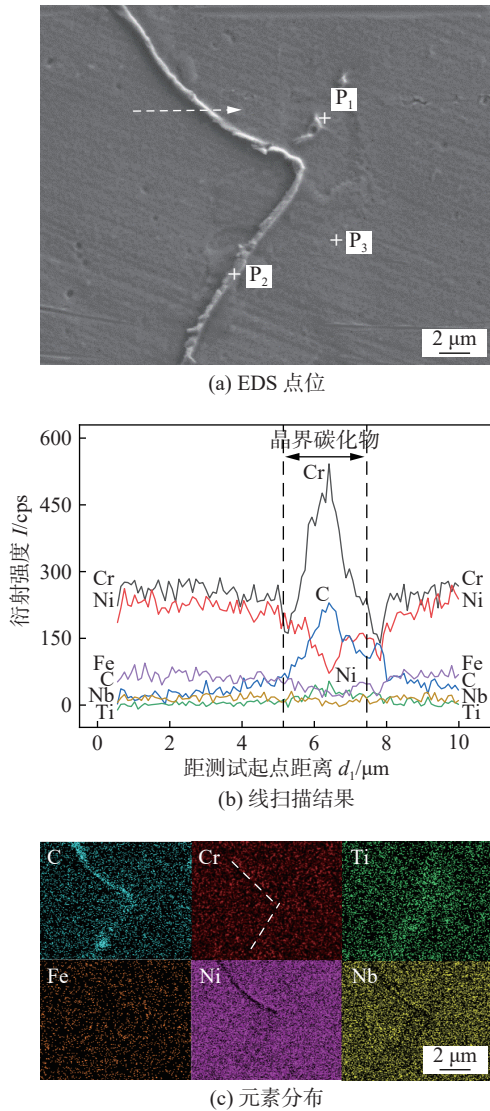


图 5 晶界区域析出相元素分布  
Fig. 5 Element distribution of precipitates formed along grain boundaries. (a) EDS point position; (b) line scan result; (c) element distribution

晶内粒状析出相元素分布, 如图 6 所示. 析出相产生了 C 元素、Nb 元素和 Ti 元素的富集现象. Nb 元素、Ti 元素作为强碳化物形成元素, 可在焊接

热循环的最终凝固阶段促进 MC 型碳化物析出. 同时, 在较大冷却速度下 Nb 元素发生偏析, 结合文献 [13] 分析认为, 富 Nb 析出物为 NbC, 与表 2 中点 P<sub>1</sub> 成分一致. Nb 元素和 Ti 元素的碳化物相晶格常数接近<sup>[14]</sup>. 因此 NbC 析出物可以 TiC 析出物为基础形核长大, 两者之间存在共生关系. 结合 EDS 数据可推测点 P<sub>1</sub> 处富 Nb + Ti 析出物为 (Nb,Ti)C. 结合文献 [15] 分析认为, 焊缝组织中均匀分布的小尺寸 (Nb,Ti)C 颗粒周围的应力集中较小, 能够提高接头组织韧性.

### 2.2 焊接接头力学性能分析

不同热处理工艺参数下的焊接接头显微硬度分布, 如图 7 所示. 焊缝硬度与母材硬度相近, 热影响区的硬度最低. 除 1150SDA 试样外, 其余试样热处理接头不同区域硬度均有不同程度的增加. 双时效过程中不同区域晶粒并未发生明显长大, 焊缝内的 MC 型碳化物分布更为均匀, 同时枝晶区的 Laves 相发生部分溶解使接头硬度提升<sup>[16-17]</sup>. 1150SDA 接头热影响区与焊缝的强度与未进行热处理的接头硬度相当. 一方面高温促使母材晶粒急剧长大, 另一方面高温固溶 + 双时效处理诱发碳化物相均匀分布, 两者综合作用下接头显微硬度有所降低. 对不同热处理工艺下获得的接头进行常温拉伸试验, 接头抗拉强度和断后伸长率, 如表 3 所示. 1150SDA 试样抗拉强度与焊态接头抗拉强度接近, 而 1050SDA 试样抗拉强度较高, 提高至 630 MPa. 随着固溶温度的提高, 接头断后伸长率不断提高, 1150SDA 试样提升至 41.7%.

不同热处理工艺下接头拉伸试样断口形貌, 如图 8 所示. 当固溶温度低于 1050 °C 时, 热处理后断裂产生于热影响区, 断口截面产生显著的塑性变形. 结合文献 [18] 分析认为, 经固溶处理的试样晶内 MC 型碳化物出现了部分溶解现象, 热影响区晶粒明显长大, 同时晶界析出碳化物呈现间断分布, 因而热影响区成为接头中较为薄弱的部分. 经 1150SDA 处理后, 接头断裂于母材区, 在断面中观

表 2 焊缝区域 EDS 数据 (原子分数, %)  
Table 2 Weld zone EDS datas

位置	Ni	Cr	Fe	Nb	Ti	C
P <sub>1</sub>	37.55	17.32	7.37	16.49	0.28	20.99
P <sub>2</sub>	53.52	28.01	7.56	1.39	0.56	8.96
P <sub>3</sub>	55.34	27.68	13.14	1.40	1.42	1.02

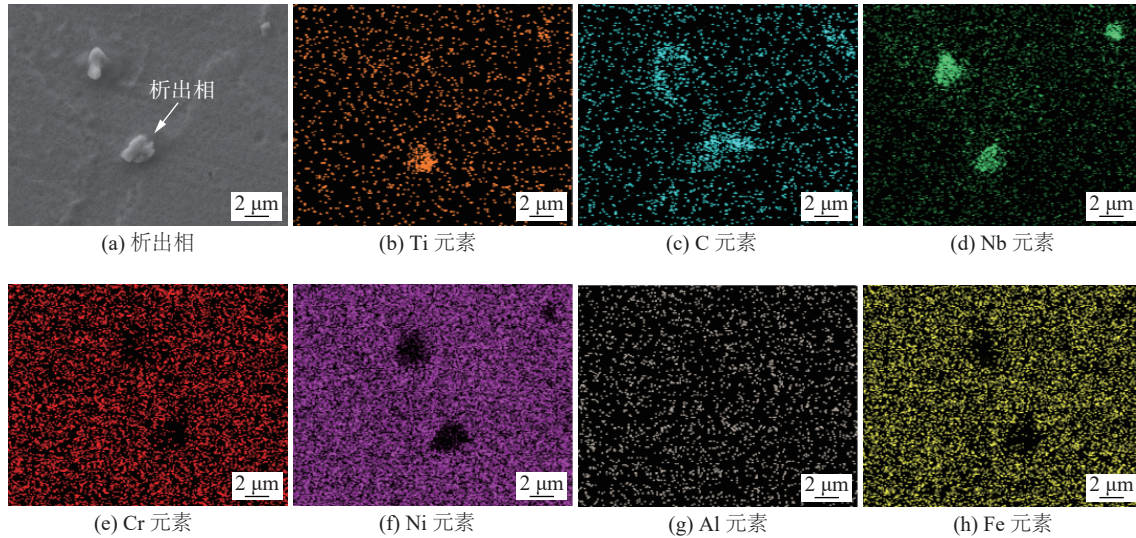


图 6 焊缝晶内区域成分分布

Fig. 6 Composition distribution in weld intragranular region. (a) precipitation phase; (b) Ti element; (c) C element; (d) Nb element; (e) Cr element; (f) Ni element; (g) Al element; (h) Fe element

表 3 热处理后接头拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of welded joints after heat treatment

试样	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
焊态	613	35.4
980SDA	623	37.1
1050SDA	630	38.4
1150SDA	612	41.7

观察到大量二次裂纹沿晶开裂, 表明接头呈现穿晶 + 沿晶的混合断裂形貌. 结合文献 [19] 分析认为, 较高的固溶温度使母材晶粒明显长大, 粗大晶粒削弱母材力学性能, 同时沿晶碳化物大量溶解, 因而在提升断后伸长率的同时削弱了母材抗拉强度.

不同热处理工艺下接头拉伸断口高倍放大形貌, 如图 9 所示. 980SDA 断口存在光滑的解理面, 呈现沿晶断裂特征, 断面上分布大量韧窝结构, 但韧窝尺寸较小, 且分布不均匀. 1050SDA 断口出现材料微区塑性形变, 沿晶断裂特征不显著, 内部韧

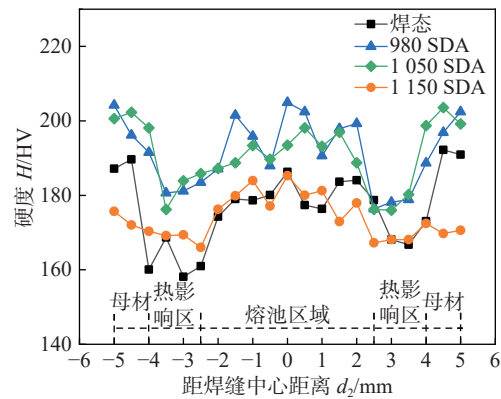


图 7 热处理后接头显微硬度

Fig. 7 Microhardness of joints after heat treatment

窝尺寸较大, 分布均匀. 1150SDA 试样中凸台的边缘分布有较深的沟壑, 呈现出沿晶界拉拔留下的开裂痕迹, 平台尖端分布有尺寸较大的韧窝, 整体呈现撕裂形貌. 相对而言, 1050SDA 试样表现出较好的力学性能, 抗拉强度和断后伸长率均较焊态有所提升.

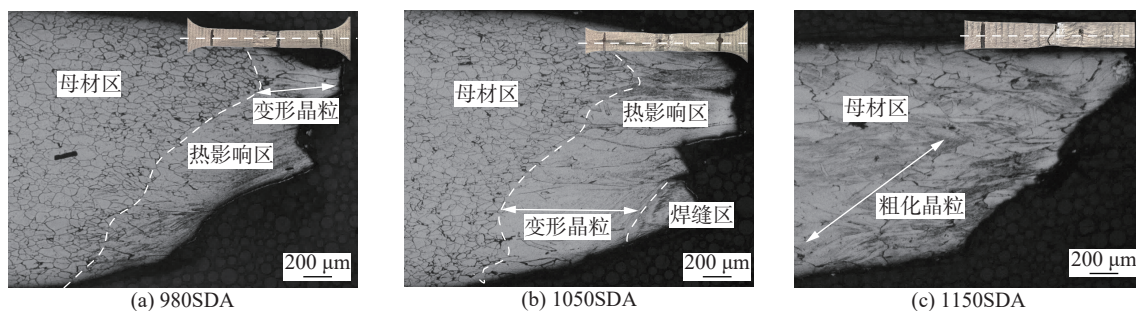


图 8 断口截面形貌

Fig. 8 Fracture section morphology. (a) 980SDA; (b) 1050SDA; (c) 1150SDA

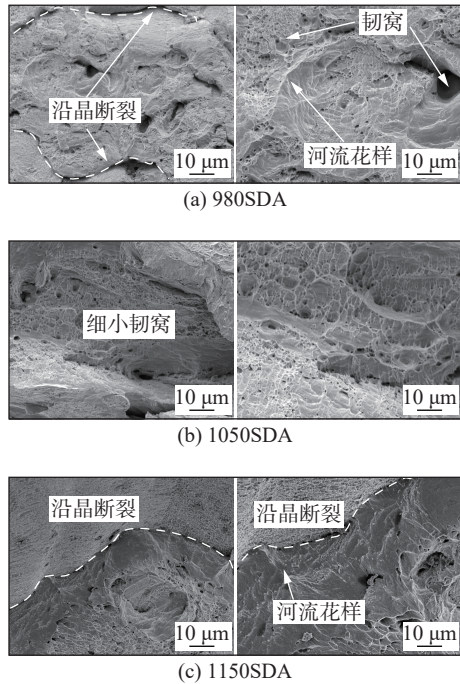


图9 断口高倍形貌

Fig. 9 Fracture high magnification morphology. (a) 980 SDA; (b) 1050SDA; (c) 1150SDA

### 3 结论

(1) 与焊态试样相比, 热处理后试样焊缝与母材晶粒均有一定程度长大. 固溶温度为 980 °C 和 1050 °C 的固溶 + 双时效接头母材处晶界碳化物呈连续链状分布, 部分晶界呈间断分布. 固溶温度为 1150 °C 的固溶 + 双时效接头焊缝晶界处析出的碳化物呈连续分布, 粗化现象极为严重.

(2) 热处理后接头焊缝区存在两种碳化物, 晶界链状碳化物为富 Cr 的  $M_{23}C_6$  型碳化物  $Cr_{23}C_6$ ; 晶内的颗粒状碳化物主要为未完全溶入基体的小尺寸 MC 型碳化物  $(Nb, Ti)C$ , 促使接头韧性提高.

(3) 固溶温度为 1150 °C 的固溶 + 双时效接头抗拉强度提高至 630 MPa, 断后伸长率提高至 38.4%. 热处理参数比焊态试样性能提升较为均衡, 为合适的热处理工艺.

### 参考文献

[1] 黄嘉森, 蔡创, 刘致杰, 等. Inconel690 镍基合金/SUS304 不锈钢激光焊接接头组织与力学性能 [J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1014001.  
HUANG Jiasen, CAI Chuang, LIU Zhijie, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded Inconel690 nickel-based alloy/SUS304 stainless steel joints[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1014001.

[2] HAN K, HU X, ZHANG X Y, *et al.* Effect of inconel 718 filler on the microstructure and mechanical properties of Inconel 690 joint by ultrasonic frequency pulse assisted TIG welding[J]. Materials, 2024, 17(12): 2857.

[3] GHAEMIFAR S, MIRZADEH H. Precipitation kinetics of niobium carbide (NbC) during homogenization heat treatment of additively manufactured Inconel 718 superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 1774 – 1781.

[4] 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. 焊丝成分对镍基高温合金 TIG 焊接性的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 31 – 36,60.  
WANG Shiyang, LIU Shiwei, HOU Xingyu, *et al.* Effect of wire composition on weldability of a Ni-based superalloy welded by TIG method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(3): 31 – 36,60.

[5] 朱兆剑, 韩柯, 李洪亮, 等. Inconel 690 局部干法水下激光焊接接头组织及性能研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602107.  
ZHU Zhaojian, HAN Ke, LI Hongliang, *et al.* Study on microstructure and properties of Inconel 690 local dry underwater laser welded joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602107.

[6] 李京, 李林子, 侯介山, 等. 热处理工艺对一种铸造镍基高温合金组织演化和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 65 – 78.  
LI Jing, LI Linzi, HOU Jieshan, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructure evolution and mechanical properties of a cast nickel based superalloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(6): 65 – 78.

[7] YE M C, WANG Z Y, BUTT H A, *et al.* Enhancing the joint of dissimilar aluminum alloys through MIG welding approach assisted by ultrasonic frequency pulse[J]. Materials Letters, 2022, 330: 133289.

[8] 陈琪昊, 崔山成, 林三宝, 等. 超声频脉冲电信号耦合前后铝合金 TIG 堆焊接头特点 [J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 42 – 46.  
CHEN Qihao, CUI Shancheng, LIN Sanbao, *et al.* Characteristics of TIG overlaying welded joints of aluminum alloy before and after implementing ultrasonic frequency pulse electric signal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(10): 42 – 46.

[9] WHITMORE L, LEITNER H, POVODEN E, *et al.* Transmission electron microscopy of single and double aged 718Plus superalloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 534: 413 – 423.

[10] TANG Z W, LI J S, HU R, *et al.* Effects of solution heat treatment on carbide of Ni-Cr-W superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(7): 1157 – 1161.

[11] LIU L B, TAN Y, WANG Yi L, *et al.* Effect of heat treatment on the formation of serrated grain boundary and secondary  $\gamma'$  phase in a high  $\gamma'$  phase superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1027: 180489.

[12] RAI R K. Slip localization and  $Cr_{23}C_6$  carbide formation during low cycle fatigue of a polycrystalline nickel-base superalloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 291: 126780.

[13] SILVA C C, MIRANDA H C, MOTTA M F, *et al.* New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2013, 2(3): 228 – 237.

[14] POTHS R M, HIGGINSON R L, PALMIERE E J. Complex pre-

- precipitation behaviour in a microalloyed plate steel[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 44(1): 147 – 151.
- [15] LEONARDO S A, ALESSANDRA V G, MAISA C S, *et al.* The influence of the processing route on the fragmentation of (Nb, Ti)C stringers and its role on mechanical properties and hydrogen embrittlement of nickel based alloy 718[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(29): 16164 – 16178.
- [16] GHAEMIFAR S, MIRZADEH H. Dissolution kinetics of Laves phase during homogenization heat treatment of additively manufactured Inconel 718 superalloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 3491 – 3501.
- [17] GAI Y C, ZHANG R, YANG J X, *et al.* Effects of heat treatment on  $\gamma'$  precipitates and tensile properties of a Ni-base superalloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022, 842: 143079.
- [18] 张悦悦, 马佳荣, 苏诚, 等. Inconel 600 合金的晶界工程工艺及晶界处碳化物的析出形貌 [J]. *上海金属*, 2018, 37(6): 46 – 50.  
ZHANG Yueyue, MA Jiarong, SU Cheng, *et al.* Grain boundary engineering process and morphology of carbides precipitated at grain boundaries in Inconel alloy 600[J]. *Shanghai Metals*, 2018, 37(6): 46 – 50.
- [19] 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, 27(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, 27(10): 69 – 72.
- 作者简介:**张星越, 硕士研究生; 主要研究方向为高温合金激光焊接缺陷机制分析及性能调控; Email: ainimei211@126.com.  
韩柯 (通信作者), 博士, 讲师, 硕士研究生导师; Email: hanke@ujs.edu.cn.

(编辑: 汤明日)

[ 上接第 72 页 ]

- [21] 郭晓临, 刘洋, 林娜, 等. 基于扩展状态观测器的量化无模型自适应迭代学习控制 [J/OL]. *控制理论与应用*, 1 – 9[2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20231213.1542.050.html>.  
GUO Xiaolin, LIU Yang, LIN Na, *et al.* Quantitative model free adaptive iterative learning control based on extended state observe[J/OL]. *Control Theory and Application*, 1 – 9[2024-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20231213.1542.050.html>.
- [22] 岑游彬, 齐义文, 李鑫, 等. 高空台空气起动系统的无模型自适应迭代学习控制 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2023, 40(5): 75 – 81.  
CEN Youbin, QI Yiwen, LI Xin, *et al.* Model free adaptive iterative learning control for air starting system of high-altitude platform[J]. *Journal of Shenyang University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 40(5): 75 – 81.
- 作者简介:**白为鸿, 硕士研究生; 主要从事温度控制算法与温度测量方面的研究; Email: 2112306011@e.gzhu.edu.cn.  
陈智华 (通信作者), 博士, 教授; Email: czhgd@gzhu.edu.cn.

(编辑: 汤明日)