

DOI: 10.19666/j.rlfid.202607017

先进超超临界机组用 Inconel 617 合金 焊接研究进展

刘春骏^{1,2}, 陈波², 陈燕²

(1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028;
2. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

[摘要] 【背景】Inconel 617 合金兼具优异的高温强度、耐腐蚀性与抗氧化性, 在核能压力容器、工业燃气轮机及 A-USC 燃煤蒸汽机组等领域具有广阔的应用前景。焊接材料与工艺参数是制约其广泛应用的关键技术瓶颈之一。【目的】本文系统阐述了 Inconel 617 的焊接特性, 综述了其焊接方法、焊材及焊后热处理的研究进展, 为深入研究与工程应用提供参考。【分析】Inconel 617 热裂纹敏感性较高, 热输入与冷却速率等工艺参数影响较大。在电弧焊方法中, TIG 焊接接头力学性能最佳, 多脉冲 TIG 焊与窄间隙 TIG 焊进一步拓展了不同板厚的适用性; MIG 焊因热输入偏大, 接头性能略差于 TIG 焊, 但冷金属过渡焊性能优良; SMAW 接头夹杂物较多, 冲击韧性在电弧焊中最低。相比之下, 激光焊与激光-电弧复合焊热输入低, 接头整体性能优于 TIG 焊; 扩散焊因氧化物与碳化物夹杂问题尚未解决, 接头脆性最高。焊材方面, Inconel 617 焊丝发展已较为成熟, 而焊条及扩散焊中间层的氧化物夹杂问题仍待突破。焊后热处理上, 通常认为 Inconel 617 接头无需热处理, 必要时可采用稳定化处理或全固溶处理。【结论】综合来看, 窄间隙 TIG 焊、冷金属过渡焊与激光-电弧复合焊接头性能均衡优异, 是 Inconel 617 最具应用潜力的焊接工艺。

[关键词] 先进超超临界; Inconel 617; 焊接性; 焊接工艺

Research progress on welding of Inconel 617 alloy for advanced ultra-supercritical power plants

Liu Chunjun^{1,2}, Chen Bo², Chen Yan²

(1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China;
2. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: [Background] Inconel 617 alloy exhibits a superior combination of high-temperature strength, corrosion resistance, and oxidation resistance, showing broad application prospects in nuclear pressure vessels, industrial gas turbines, and A-USC coal-fired steam units. The lack of systematic development of welding consumables with excellent applicability, combined with ill-defined processing windows for various welding methods, constitutes one of the critical technical bottlenecks restricting its widespread industrial application. [Objective] This paper systematically addresses the weldability characteristics of Inconel 617, reviewing the research progress on its primary welding processes, welding consumables, and PWHT, with the aim of providing reference for future in-depth research and engineering applications. [Analysis] Due to its high alloying element content, Inconel 617 tends to form a high volume fraction of liquid films during the welding thermal cycle, rendering it highly susceptible to solidification cracking and liquation cracking. Consequently, processing parameters such as welding heat input and cooling rate exert a profound influence on the mechanical properties of the joints. Among arc welding processes, TIG welding produces joint properties superior to other arc processes owing to its low heat input and effective metallurgical shielding; furthermore, multi-pulse NG-TIG welding have expanded its applicability across varying plate thicknesses. MIG welding provides high efficiency and degree of automation, but its joint performance is

收稿日期: 2026-07-09 修回日期: 2026-08-26 接受日期: 2026-08-31 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重大专项项目 (2025ZD0610200, 2025ZD0610202)

Supported by: National Science and Technology Major Project (2025ZD0610200, 2025ZD0610202)

第一作者简介: 刘春骏 (2002 年), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为镍基合金焊接及其焊接材料, 2979523745@qq.com。

通信作者简介: 陈波 (1975 年), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为焊接材料、焊接工艺及工程化应用, 包括军工、核电、石化等清洁能源装备用特种焊接材料, wellchb@sina.com。

slightly inferior to TIG due to higher heat input—though CMT welding achieves excellent joint quality. SMAW suffers the most severe loss in impact toughness among arc processes, as insufficient metallurgical shielding by the electrode flux coating leads to high inclusion densities in the weld metal. Compared to conventional arc welding, LBW and LHW offer higher power densities and superior heat input control, generally yielding superior overall joint performance relative to TIG. In diffusion bonding, the core issue of oxide and carbide inclusions remains unresolved, resulting in poor metallurgical bonding and severe degradation of ductility and toughness. Regarding welding consumables, solid wires for Inconel 617 have reached industrial maturity, whereas flux-coated electrodes and diffusion bonding interlayers still require compositional optimization to mitigate oxide inclusion formation during processing. Regarding PWHT, Inconel 617 exhibits an excellent solid-solution strengthening response; thus, its welded joints are generally considered suitable for service in the as-welded condition, though stabilization treatment or full solution annealing may be applied when necessary. [Conclusion] Taken together, heat input and metallurgical shielding performance represent the central issues influencing the properties of Inconel 617 joints. NG-TIG welding, CMT welding, and laser-arc hybrid welding yield superior joint performance, serving as the most promising joining processes for Inconel 617 applications.

Keywords: advanced ultra-supercritical; Inconel 617; weldability; welding process

2025 年 11 月, 世界首台设计功率达 100 万千瓦级的 650 °C 超超临界燃煤发电机组在华能玉环电厂全面开工建设, 相比此前在运营机组, 每年可减少 CO₂ 排放 45 万吨。发展更高参数的燃煤机组是助力我国实现“2030 碳达峰”和“2060 碳中和”目标, 推动煤炭清洁高效发电的最有效途径^[1]。随着设计的蒸汽温度不断提高, 高温部件的材料研发及其加工生产技术成为制约先进超超临界 (advanced ultra-supercritical, A-USC) 机组发展的关键瓶颈。

镍基高温合金因具有优异的高温强度、耐腐蚀及抗氧化性能, 被广泛应用于核能压力容器、工业燃气轮机、燃煤机组以及航空发动机等高温部件。Inconel 617 的发展已逾 50 年, 其设计初衷是面向 800 °C~1200 °C 的高温应用, 先后被欧洲 AD 700 项目以及美国、日本、中国各自的 A-USC 项目选为 A-USC 机组过热器、再热器、汽轮机转子及主蒸汽管道等关键高温部件的候选材料^[2]。德国最早开展了相关试验研究, 在锅炉挂片试验中发现 Inconel 617 的 700 °C × 10⁵ h 蠕变强度不足 95 MPa。为进一步提高合金的蠕变强度和延展性, 在 Inconel 617 基础上更严格控制合金成分的含量并加入 B 元素, 开发了 Inconel 617B (亦称 617MOD、CCA617)^[3]。此外, 印度的 Inconel 617M 与 Inconel 617OCC、德国的 Inconel 617BOCC、我国 C-HRA-3 与 C-HRA-2 等均为具代表性的 617 系列合金, 拓展了 617 合金体系的适用范围, 其化学成分如表 1 所示^[3-6]。

Inconel 617 为 Ni-Cr-Co-Mo 合金, 主要通过 Cr、Co、Mo 等元素产生的固溶强化与 M₂₃C₆、M₆C、TiC、Ni₃(Al、Ti) (即 γ' 相) 产生的析出强化两种方式共同维持其高温强度^[7]。热导率较低 (50 °C 时为 13.4 W·(m·K)⁻¹) 与线膨胀系数较大 (12.6×10⁻⁶ K⁻¹) 等特

性导致 Inconel 617 热裂纹敏感性较高, 缺乏匹配的焊接材料与稳定的焊接工艺是限制其广泛应用的主要原因^[8]。国内外诸多学者对 Inconel 617 的焊接开展了大量相关研究, 在接头组织及其演变机理、异质接头焊接等方面取得了重要进展, 但目前尚缺乏关于 Inconel 617 焊接研究进展的系统性评述。本文从焊接冶金特性、焊接方法、焊接材料以及焊后热处理 (post-weld heat treatment, PWHT) 等方面对 Inconel 617 的焊接研究现状进行综述。

1 Inconel 617 焊接性

1.1 焊接性概述

Inconel 617 属于固溶强化型镍基合金, 通常被认为具有较为良好的焊接性。Inconel 617 组织基体为单一奥氏体, 凝固过程中不发生相变, 焊接参数选择不当易导致焊缝晶粒粗大与较高的残余应力, 提高接头脆化和焊接热裂纹倾向^[8]。Inconel 617 中 Cr、Mo 含量高, 易形成大颗粒脆硬碳化物, 在焊缝中诱发微孔与微裂纹; S、P 等元素在凝固时偏析倾向高, 所形成的低熔共晶化合物显著降低晶界结合力, 提高裂纹敏感性^[9-11]。

因部分合金元素含量的调整, 代表性的几种改进型 Inconel 617 合金的焊接性具有一定差异。表 1 列出了典型 617 系列合金的关键化学成分。Inconel 617B 通过降低 Fe、C、Si、P 等元素含量上限, 弱化了液化裂纹与脆性相析出倾向^[12]。C-HRA-2 去除了 Al 和 Ti, 可避免焊缝中 γ' 相析出与 Al、Ti 氧化物夹杂, 焊接性更优良^[13]。C-HRA-3、Inconel 617M 与 617OCC 的焊接性仍有待系统研究, 但因其所含 B、Zr、W 或 Nb、V 等元素含量提高, 理论上焊缝凝固偏析倾向与热裂纹敏感性更高^[14-15]。

表 1 典型 617 系列合金的关键化学成分 (质量分数 %)

Tab.1 Key chemical compositions of typical 617 series alloys (w/%)

Alloy	Cr	Co	Mo	Ti	Al	C	B	Mn	Nb	V	W	Zr	参考文献
Inconel 617	20~24	10~15	8~10	0.6	0.8~1.5	0.05~0.15	0.006	1.0	—	—	—	—	ASTM ^[5]
Inconel 617B	21~23	11~13	8~10	0.25~0.50	0.8~1.3	0.05~0.08	0.001~0.005	0.5	0.6	0.6	—	—	Klöwer ^[3]
Inconel 617M	21~23	11~13	8~10	0.3~0.5	0.8~1.3	0.05~0.08	0.002~0.005	0.3	0.6	0.6	—	—	Blhe ^[4]
C-HRA-3	21~23	11~13	8.5~9.0	0.3~0.5	0.8~1.3	0.05~0.08	0.002~0.005	—	0.1	0.1	1.0	0.1	刘正东等 ^[6]
C-HRA-2	21~23	11~13	8.5~9.0	—	—	0.05~0.08	0.002~0.005	—	0.1	—	1.0	0.1	刘正东等 ^[6]

注：除注明范围外，所有单位均为最大值。

1.2 凝固裂纹

Inconel 617 焊缝凝固末期形成固-液两相共存的混合区，体积小、表面张力较低的残余液相持续润湿凝固晶界，在焊接应力的共同作用下易诱发凝固裂纹^[16]。Divya 等^[14]对 Inconel 617M 锅炉管 TIG 焊接头进行了横向可调拘束试验，结果表明残余液相相对 Inconel 617M 凝固裂纹敏感性的影响与所处约束状态密切相关。在低约束条件下残余液相可回填微裂纹，表现出良好的抗裂性，而高约束条件下液相则不足以回填尺寸较大的裂纹，表现出较高的凝固裂纹敏感性。

残余液相体积与状态受冶金因素影响较大，在 Inconel 617 系列合金中主要体现在 Si、B、S、P、Nb、C 等元素的含量上。S、P、B 易在晶界处偏析并形成低熔共晶化合物，提高凝固裂纹敏感性。Si 的影响具有两面性：一方面促进 S、P 的偏析且参与形成低熔共晶相，降低晶界结合强度，增加裂纹敏感性；另一方面，Si 含量提高增加了残余液相的体积分数与流动性，促进液相回填微裂纹^[17]。Nb 对凝固裂纹敏感性的影响与合金中的 C 含量密切相关：当 Nb/C 较低时，倾向于形成 γ/NbC 相，凝固裂纹敏感性降低；Nb/C 较高时，倾向于形成 γ/Laves 相，凝固裂纹敏感性较高^[18]。Yamashita 等^[19]使用 4 种成分的 Inconel 617 焊丝进行了多层多道焊可变拘束试验。结果同样表明，C 含量（0.062%）固定时，高 Nb（0.29%）、Ti（1.95%）焊缝金属（welding metal, WM）中形成的（Ti、Nb）C 相提高了凝固终了温度，脆性温度区间（brittle temperature range, BTR）从低 Nb（0.005%）、Ti（0.39%）的 273 K 降低至 96 K，接头凝固裂纹敏感性最低。

1.3 液化裂纹

液化裂纹通常出现在热影响区（heat affected zone, HAZ）中，位于熔合线附近，并可在一定程度上越过熔合线扩展至 WM 中^[20]。多层多道焊时，WM 在后续焊道的再热作用影响下也可能出现液化裂纹。液化裂纹的形成包含两个关键阶段：加热

过程中液态薄膜的形成与凝固过程中液态薄膜的破裂^[21]。液化裂纹的产生与晶界残余液相密切相关，主要有两种机制：一是由偏析元素诱发 γ/γ' 共晶反应引起的组元液化；二是低熔点析出相的重熔，其示意图如图 1^[22]所示。

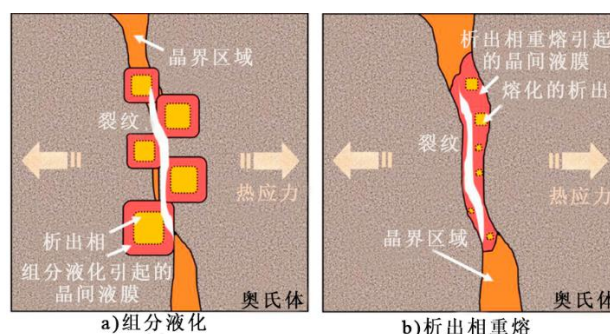


图 1 液化裂纹形成机理

Fig.1 Formation mechanism of the liquation cracking

Inconel 617 中 Cr 元素易在晶界处偏析形成 M_{23}C_6 碳化物，对液化裂纹敏感性具有显著影响。Divya 等^[23]的研究表明，在 Inconel 617M 晶界处析出的 Cr_{23}C_6 碳化物增强了合金液化裂纹的敏感性，在临近 Cr_{23}C_6 熔点的 1 220 °C 进行固溶退火后，裂纹总长度减少达 62 %。Li 等人^[12]研究了 Inconel 617B 多层多道窄间隙 TIG 焊（narrow gap tungsten arc welding, NG-TIG）过程中 M_{23}C_6 的演变行为对液化裂纹的影响，发现微米级 M_{23}C_6 颗粒的熔化提高了熔合线附近热影响区的液化裂纹敏感性。 M_{23}C_6 颗粒在多层多道焊热循环中的演变路径可表示为： $\text{M}_{23}\text{C}_6 + (\gamma\text{-Ni}) \rightarrow \text{液体} \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6 + (\gamma\text{-Ni}) \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6 + (\gamma\text{-Ni}) + \text{二次 M}_{23}\text{C}_6$ 相，示意图如图 2^[12]所示。

凝固裂纹与液化裂纹均源于晶界或枝晶间的低熔点液膜在焊接拉应力下的开裂，但两者所处温度变化趋势不同使其发生位置与微观演变机制有所差别，因此 Inconel 617 中的合金元素对两种裂纹的影响也存在异同。S、P、B 元素均易形成低熔共晶相，促进晶界处产生连续液膜，提高凝固裂纹与液化裂纹倾向^[24-25]。Nb、Ti 元素通过消耗残余液相中的 C 元素缩短了 BTR，可降低凝固裂纹倾向，但

焊接热循环中易诱发组分液化, 增加液化裂纹敏感性^[19]。Cr、Mo 元素在凝固末期易在晶界或枝晶间偏析, 延长液膜存在时间, 且形成的 $M_{23}C_6$ 、 M_6C

相历经焊接热循环时易产生组分液化, 对液化裂纹的促进作用强于凝固裂纹^[26]。

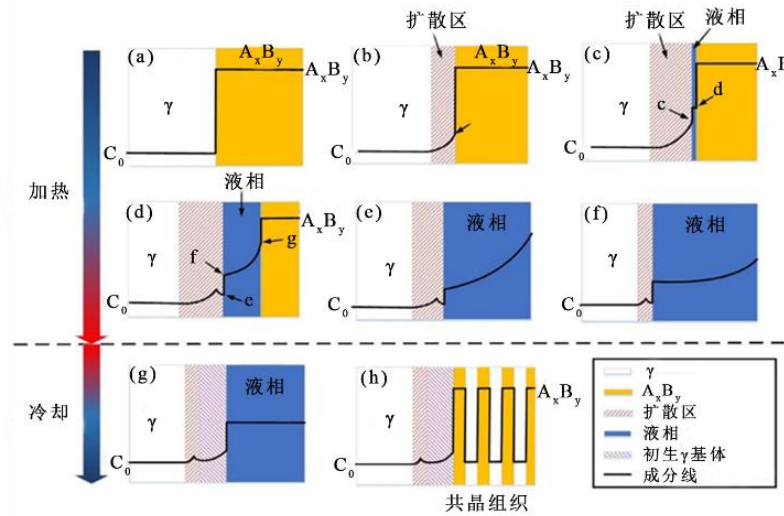


图 2 热循环中组分液化机理示意

Fig.2 Schematic illustration of constitutional liquation mechanism during the thermal cycle

2 主要焊接方法

Inconel 617 因具有良好的焊接性, 适用于多种焊接方法。然而, 由于其高合金化的单一奥氏体基体组织, 热导率低、焊缝晶粒易粗化、合金元素易偏析形成大尺寸析出相, 对焊接工艺参数要求严苛。TIG 焊是目前 A-USC 机组中主要采用的焊接方法, 冷金属过渡焊 (cold metal transfer welding, CMT)、激光-电弧复合焊等方法展现出良好的发展潜力。

2.1 电弧焊

2.1.1 TIG 焊

TIG 焊是 Inconel 617 发展最为成熟、应用最广泛的焊接方式之一, 尤其适用于质量要求较高且厚度不大的结构件焊接。Inconel 617 TIG 焊通常使用 DCEN 脉冲电源, 焊材为 ERNiCrCoMo-1 同质焊丝, 并以纯 Ar 气作为保护气体。

Zhang 等人^[27]研究发现, Inconel 617 与高 Cr 耐热钢 TIG 焊接头组织以柱状晶与胞状晶为主, 钢侧出现部分混合区 (partially mixed zone, PMZ) 与半岛结构, 如图 3^[27]所示。半岛结构的产生源于 PMZ

的特殊凝固顺序, 其贯穿柱状晶根部但未明显影响柱状晶生长形态。类似的结构在 Inconel 617 与其他铁基材料的异质 TIG 接头中常被观察到, 表明接头存在熔合不充分的缺陷。但力学性能测试中失效处并不位于该位置而是如 P91、P92、S304H 等母材中, 表明 Inconel 617 TIG 焊接头性能优良, 可用于 A-USC 机组设备连接^[28-29]。

Inconel 617 TIG 焊接头优良的力学性能主要源于其优良的冶金保护效果与可控的热输入。Chu 等人^[30]研究中, 接头经 TIG 焊后观察到 Ti (C、N) 相, 750 °C 长时间时效后大量析出 γ' (Ni_3Al) 相, 表明焊接时 Al、Ti 元素并未被氧化。Zhao 等人^[31]试验中 TIG 焊热输入仅为 0.78 kJ/mm, 接头热影响区极窄, 焊缝中形成细小枝晶与弥散分布的 MC 、 $M_{23}C_6$ 析出相, 如图 4^[31]所示。室温下, 焊接接头的抗拉强度达 920 MPa, 屈服强度为 459 MPa; 在 750 °C 下, 抗拉强度为 605.5 MPa, 屈服强度为 364 MPa, 接头效率均超过 100 %。Kumar 等^[32]研究表明, TIG 焊 Inconel 617 接头高温拉伸时, 接头以韧性断裂为主并伴随混合断裂特征, 微孔、韧窝、撕裂岭、少量解理面同时存在, 550 °C 与 650 °C 断裂处均位于 P92 的 HAZ。

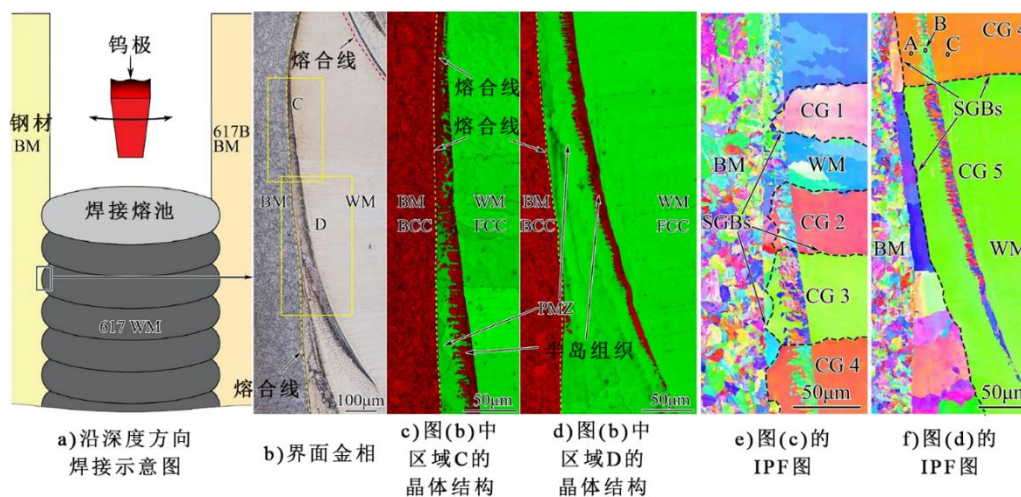


图 3 Inconel 617 与高 Cr 耐热钢 TIG 焊接头熔合区组织

Fig.3 Microstructure of fusion zone of the Inconel 617/high-Cr heat-resistant steel TIG welded joint

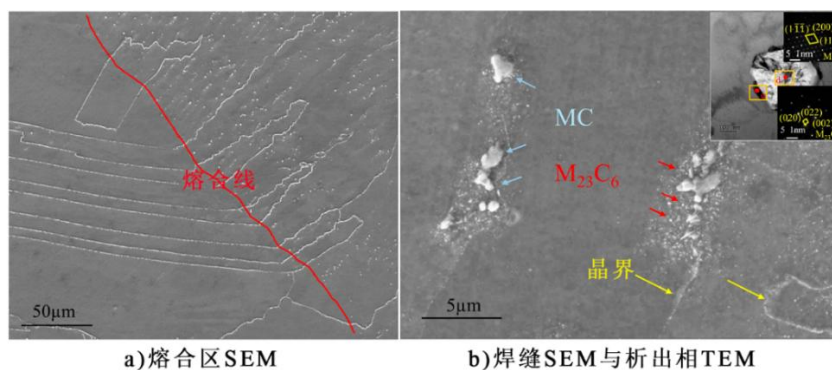


图 4 Inconel 617 TIG 焊接头微观组织形貌

Fig.4 Microstructure of the Inconel 617 TIG welded joint

NG-TIG 焊对焊枪摆动和熔池行为的控制更为精确、焊接热输入与填充金属用量显著减少,拓宽了 TIG 焊厚板焊接的适用范围,被视为目前 A-USC 机组厚壁构件最具发展潜力的焊接方法。Li 等^[33]研究了厚度 160 mm 的 Inconel 617B NG-TIG 焊环对接接头,焊缝柱状树枝晶尺寸仍低于 100 μm ,析出相尺寸保持弥散或断续分布状态,700 $^{\circ}\text{C}$ 下的 WM 的 $J_{0.2}$ 值为 138.09 kJ/m^2 。Xu 等人^[34]开展的 Inconel 617B 多层多道 NG-TIG 焊试验中 HAZ 观察到出现了 M_{23}C_6 引起的液膜与共晶型组织,但因 NG-TIG 焊焊接热输入低,液膜在产生足够大的拉应力前已经重凝固,HAZ 中并未形成液化裂纹,表明 NG-TIG 在 Inconel 617 焊接上具有优良适用性。

2.1.2 MIG 焊

普通 MIG 焊焊接效率高且自动化程度优良,但热输入难以控制的核心问题限制了其在 Inconel 617 中广泛使用。A-USC 机组核心部件对接头质量和缺陷控制的要求尤为严格,普通 MIG 焊通常不单独使用,多作为一种辅助焊接手段。通过发展脉

冲 MIG 焊、CMT 焊等方式降低焊接热输入是 MIG 焊最具应用潜力的改进方向。

Thayumanavan 等人^[35]研究表明,热输入为 620 J/mm 时,单脉冲 MIG 焊 Inconel 617 接头抗拉强度和冲击功分别较母材高 13.10 %和 16.41 %;而当热输入提高至 660 J/mm 时,则分别降低 56.66 %和 30.35 %。与单脉冲 MIG 焊相比,双脉冲 MIG 焊工艺参数调节更灵活。Arivarasan 等^[36]使用 452 J/mm 、412 J/mm^2 种热输入进行双脉冲 MIG 焊 Inconel 617/SS 304H 焊接试验。412 J/mm 时接头侧壁出现未熔合缺陷与 PMZ,冲击韧性仅为 26 J,相比于 Thayumanavan 等所获得的 137 J、78 J 严重下降,表明过度降低 MIG 焊输入并不能提高接头性能。

CMT 焊采用焊丝机械回抽技术促进熔滴强制脱离,实现短路过渡,热输入小,热影响区宽度与稀释率低,适用于薄板焊接与表面堆焊。Varghese 等人^[37]研究表明,CMT 极低的热输入使 Inconel 617 堆焊层金属中仍保留了孪晶组织,SS 316L 界面处晶粒呈现垂直熔合线的外延生长,如图 5^[37]所示,

其中 C1-C3 组热输入分别为 0.184、0.162、0.125 kJ/mm。此外,与 CMT 堆焊层相比,TIG 焊热输入更高,晶粒明显粗化且堆焊层中孪晶组织消失,稀释率相较于 CMT 最低的 6.3 % 大幅增加至 50.1 %。冷金属过渡-脉冲多参数控制技术(cold metal transfer - pulse multi control, CMT-PMC)是 Fronius 公司于 2018 年推出的第三代 CMT 焊,在 CMT 焊基础上结合了脉冲电流的特点。脉冲电流的引入提升了 CMT 焊熔透能力,使其能应用于中厚板焊接。Pramod Kumar 等人^[38]的研究结果表明,CMT-PMC 焊接头中常以粗大不规则块状形态出现的 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 碳化物均以细小球状粒子形式分布于枝晶间或晶界处,拉伸断口呈现韧性断裂形式,如图 6^[38]所示。接头抗拉强度达 795 MPa (室温)、591 MPa (650 °C)、578 MPa (700 °C)、517 MPa (750 °C),室温冲击功达 182 J,接头力学性能优于普通 TIG 焊

所获得的 Inconel 617 接头。

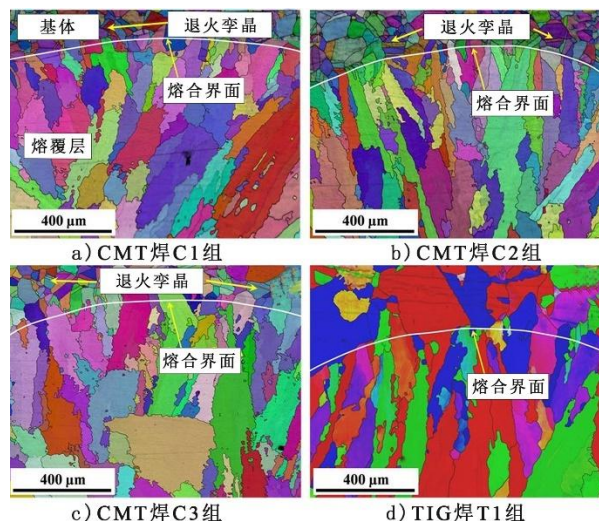


图 5 接头横截面处 EBSD 取向图
Fig.5 EBSD crystal orientation map of the transverse sections across the interface

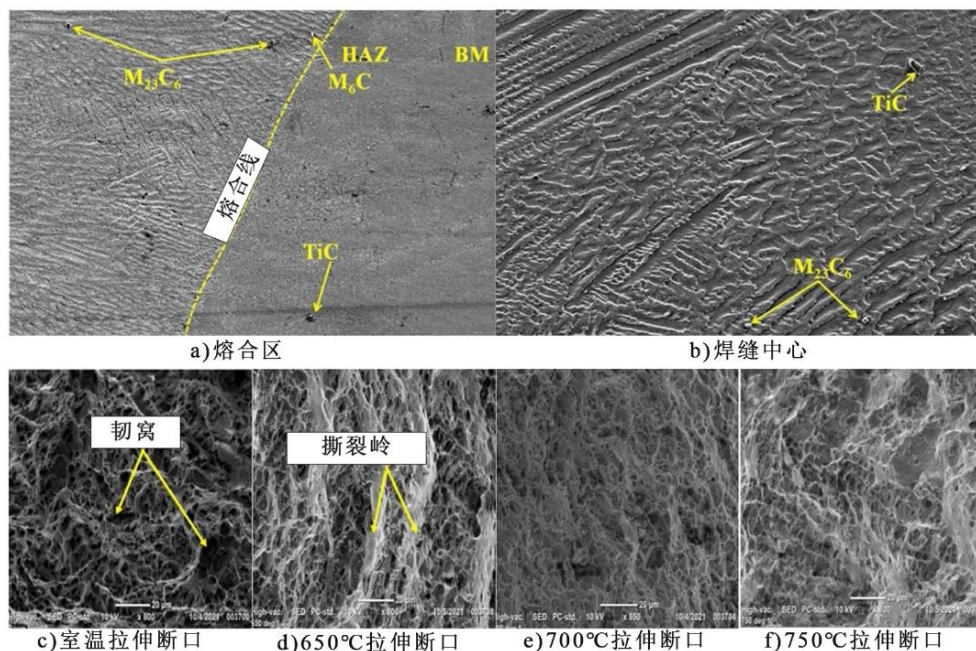


图 6 CMT-PMC 焊接接头与拉伸断口 SEM 组织形貌
Fig.6 SEM morphologies of the CMT-PMC welded joint and tensile fracture surface

2.1.3 SMAW

SMAW 设备简单、焊接成本低、施焊位置灵活,但仅依靠药皮的保护并不能防止 Inconel 617 中合金元素尤其是 Al、Ti 等在焊接过程中的氧化烧损,造成氧化物夹杂,损害接头力学性能。此外,SMAW 较高的热输入易导致焊缝晶粒粗大及碳化物沿晶界连续析出,提高热裂纹倾向并降低冲击韧性。基于上述原因,SMAW 多用于现场应急抢修、非核心部件焊接或难以实施 TIG 焊的场景中。

在笔者课题组的研究中,采用目前认可度较高的 Böhler 某焊条所获得的 WM 中仍检测到 Al_2O_3 氧化夹杂,如图 7 所示。如前文所述,Inconel 617 高温时效时析出的 γ' (Ni_3Al) 对保持良好的高温持久强度具有重要作用。而 Al、Ti 元素被氧化烧损将导致高温持久时无法析出 γ' (Ni_3Al) 相,且 Al_2O_3 夹杂与 Inconel 617 基体结合强度低,易造成孔隙或成为裂纹源,严重损害接头的高温持久性能^[39-41]。

Sirohi 等人^[42]对比了 Inconel 617 TIG 焊与

SMAW 焊缝的组织与力学性能, WM 组织形貌如图 8^[42]所示。结果表明, TIG 焊 WM 二次枝晶臂间距更小、析出相分布更均匀, 而 SMAW WM 中析出相密度更高, Mo、Cr 元素在枝晶间偏析形成连续碳化物。两种接头室温与 550 °C 抗拉强度相近, 但 TIG 接头的冲击功 (84 ± 2 J) 显著高于 SMAW 接头 (48 ± 4 J)。

Amit Kumar、Abhinav Garga、Ravinder Kumar 等^[43-45]均探究了 ENiCrCoMo-1 的接头组织形貌及力学性能, 焊接热输入及其主要力学性能如表 2 所示, WM 与拉伸断口组织形貌如图 9^[43-45]所示。3 项研究均指出焊缝析出相主要为富 Mo、Cr 的 $M_{23}C_6$ 、 M_6C ; SMAW 焊接过程中引入的夹杂物及热循环形成的粗大晶粒对接头冲击韧性具有显著的负面影响。Amit Kumar 与 Abhinav Garga 均指出, 异质钢材与 Inconel 617 热膨胀系数的差异是导致裂纹扩展的主要原因之一。Abhinav Garga 等的焊缝冲击韧性优于 Ravinder Kumar 等, 比较图 9 (c)、(f) 可知, Ravinder Kumar 等的焊缝接头中晶粒呈柱状树枝晶形貌, 析出相出现纤维状排列, 而 Abhinav Garga 等的组织则更显均匀。三份研究的室温与 650 °C 拉伸测试断裂位置均位于钢侧母材中, 母材

的不同导致了拉伸数据的较大差异, 具体如表 2 所示。断裂处位于钢侧母材表明 Inconel 617 SMAW 用于连接 P91、P92 等耐热钢具备可行性。

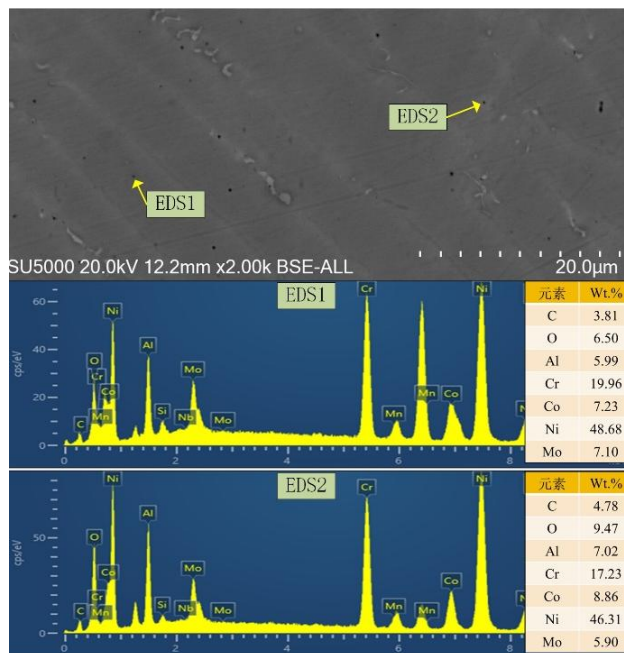


图 7 SMAW WM 中 Al_2O_3 夹杂的 EDS
Fig.7 EDS analysis of Al_2O_3 inclusions in the SMAW WM

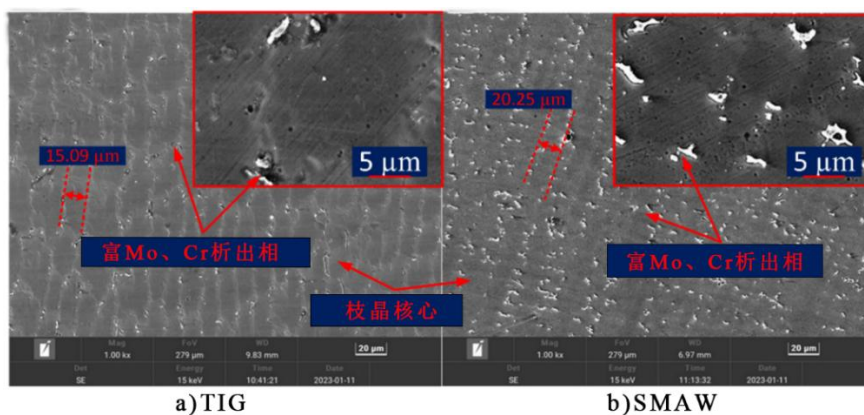


图 8 WM SEM 图像
Fig.8 SEM image for WM

表 2 SMAW 热输入与接头力学性能
Tab.2 Heat input and mechanical properties of SMAW joints

第一作者	母材	热输入 ($J \cdot mm^{-1}$)	室温抗拉强度/MPa	650 °C 抗拉强度/MPa	室温屈服强度/MPa	室温延伸率/%	冲击功/J	断裂位置
Amit Kumar ^[45]	Inconel 617 /P92	227	664 ± 11	-	335 ± 6	29 ± 1	-	P92 BM
Abhinav Garga ^[44]	Inconel 617 /AISI 304H	373	651 ± 2	318	206 ± 4	60 ± 1	91 ± 4	AISI 304H
Ravinder Kumar ^[43]	P91 /AISI 310	247	580 ± 3	275	235 ± 4	42 ± 3	80 ± 10	AISI 310

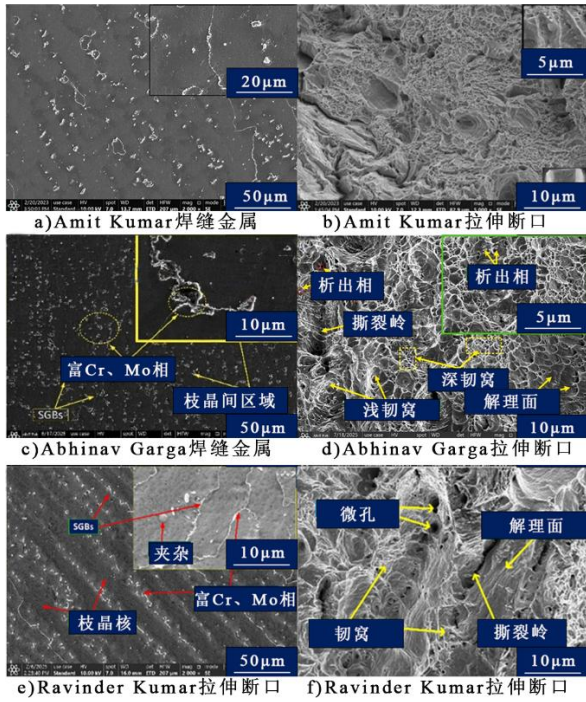


图9 ENiCrCoMo-1 WM与拉伸断口SEM形貌
Fig.9 SEM morphologies of the ENiCrCoMo-1 WM and tensile fracture surface

2.2 激光焊

激光焊 (laser beam welding, LBW) 能量密度极高, 可显著降低 Inconel 617 接头的热输入、减小热影响区宽度与残余应力, 改善其热裂纹敏感性。焊接过程中匙孔稳定性差, 厚板焊接时匙孔根部易出现驼峰与下塌, 气孔敏感性高等问题, 限制了 Inconel 617 激光焊的广泛应用。近年研究表明, 采用高功率光纤激光器与高速智能摆动激光头, 实施窄间隙填丝激光焊或激光-电弧复合焊, 显著改善了匙孔稳定性, 拓宽了对不同厚度接头的适应性。

激光焊可调工艺参数较多, 工艺窗口相对较窄, 激光功率与扫描速率对接头成型与组织性能具有显著影响^[46]。Cheng 等^[47]研究结果表明, 热输入为 200 J/mm 时, 横焊和立向下焊焊缝均出现了由

匙孔失稳引起的严重气孔缺陷; 当热输入降至 100 J/mm 时, 熔池体积减小, 匙孔稳定性得以改善, 焊接位置对焊缝质量的影响随之减弱, 200 J/mm 时的接头断面形貌如图 10^[46]所示。

Aqeel 等^[48]使用 10 mm 厚 Inconel 617 板材, 对比研究了单道自熔半导体激光焊 (diode laser welding, DLW)、激光-MIG 复合焊 (laser hybrid welding, LHW) 以及 TIG 焊的接头组织与性能。如图 11^[48]所示, DLW 与 LHW 焊缝中枝晶更具有垂直于焊缝中心线的取向性特征, 而 TIG 更呈现随机取向性, 晶粒尺寸随热输入高低变化, 依次为 DLW (540 μm)、LHW (620 μm)、TIG (850 μm)。抗拉强度 LHW (780 MPa) > DLW (768 MPa) > BM > TIG (753 MPa), 冲击功 TIG (150 J) > DLW (144 J) > LHW (138 J)。综合接头成型形貌、焊接效率与力学性能考虑, Aqeel 等人认为 LHW 与 DLW 比 TIG 更适合厚壁 Inconel 617 构件的焊接。Aqeel 等人^[49]进一步对比研究了 LBW 与 LHW 接头 PMZ 区域的液化裂纹, 发现虽 LHW 热输入高于 LBW, 晶界低熔共晶相更多, 但相比 LBW 裂纹总长度降低了约 50%, 进一步表明了 LHW 焊接 Inconel 617 的良好适用性。Sun 等人^[50]使用窄间隙填丝激光焊制造的 Inconel 617 中厚板接头力学测试表明, 室温抗拉强度 (840±3 MPa)、冲击韧性 (198±2.01 J), 优于 TIG 焊接头。

2.3 扩散焊

固相焊因不经历熔化与凝固过程, 原理上避免了合金元素的偏析和低熔共晶相的形成, 可避免 Inconel 617 熔化焊中的热裂纹缺陷^[51]。扩散焊 (diffusion welding, DW) 和瞬时液相扩散焊 (transient liquid phase welding, TLPW) 在 Inconel 617 焊接中已有较多研究。

Inconel 617 中较高的 Cr、Al 含量对 DW 接头冶金相容性和力学性能具有较大挑战。Sah 等^[52]的

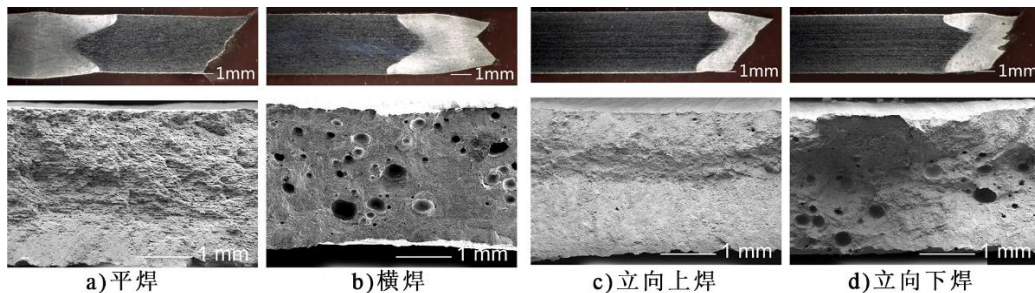


图 10 200 J/mm 热输入时激光焊接头断裂位置及断口形貌
Fig.10 Tensile-fracture locations and fracture surfaces of laser welds produced with 200 J/mm input parameters

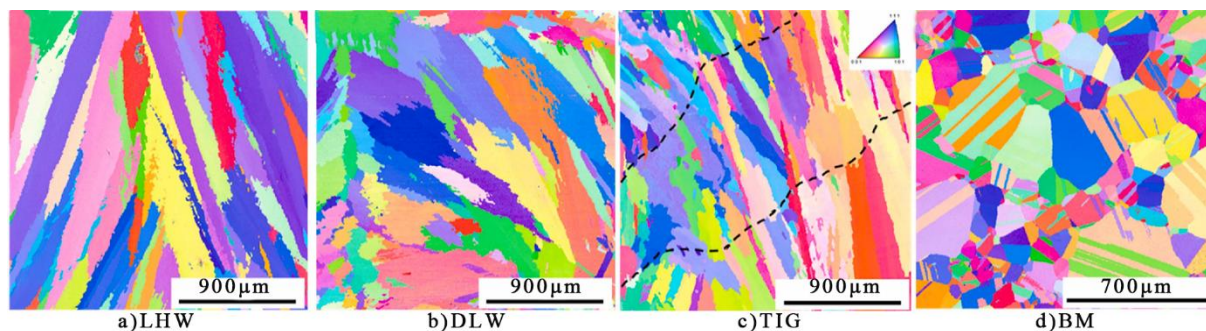


图 11 焊缝 EBSD 微观组织形貌

Fig.11 EBSD microstructure morphologies of the WM

研究表明, Inconel 617 DW 接头界面生成了大量 Al_2O_3 , 严重抑制了晶界迁移, 导致接头脆化。蠕变试验中接头发生脆性断裂, 总蠕变应变不足 9%。Li 等^[53]研究表明采用合适的参数下可获得致密的接头, 但结合界面并非消失而是形成了“熔合线”, Cr、C、Al、O 等元素在界面扩散并形成稳定的 M_{23}C_6 与 Al_2O_3 钉扎界面, 阻碍界面的充分冶金结合, 具体如图 12^[53]所示。接头虽具有较高的室温抗拉强度 (758 MPa), 但冲击韧性仅为 10.21 J/cm², 与 SMAW 相比也存在显著差距。在扩散焊过程中引入电场辅助烧结 (electric field-assisted sintering, EFAS) 可改善界面冶金相容性。Zhang 等^[54]的对比研究表明, 施加 EFAS 的 DW 接头晶界迁移由普通热压接头的 3.1%~53.2% 提高至 52.7%~90.1%。EFAS 减少了界面析出相的形成, 尽管仍存在纳米级氧化铝颗粒, 但实现了良好的晶界迁移。

TLPW 在 DW 的基础上, 引入熔点较低的中间层, 焊接过程中形成液态薄膜, 通过润湿机制填充界面孔隙^[55]。此外, 中间层中的 B、Si 等活性元素在焊接过程中能清除界面氧化物夹杂, 改善界面结合性^[56]。然而, B、Si 等也向 Inconel 617 母材扩散, 损害接头强度, 开发新型低 B、Si 的中间层是主要的研究方向之一^[57-58]。Mobarakeh 等人^[59-61]系统研

究了工艺参数对 Inconel 617/AISI 310 钢 TLPW 接头的影响。结果表明: 提高焊接温度或延长保温时间虽使等温凝固区冶金结合更充分, 但也导致金属间化合物数量增加, 所获得最佳接头剪切强度为 618 MPa, 硬度为 308HV。

3 焊材发展

焊接材料是决定 Inconel 617 焊缝组织成分与性能的核心因素, 也是制约 Inconel 617 广泛应用的关键问题之一。Inconel 617 焊接材料主要为实心焊丝和焊条两类, 常用的焊丝直径为 1.2 mm、1.6 mm 和 2.0 mm, 焊条直径为 3.2 mm 和 4.0 mm。焊条药皮主要采用 $\text{SrO-CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$ 、 $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等碱性低氢型渣系。SMAW 时, Inconel 617 较高的 Al 元素及药皮中添加的改性 Al 或 Al 合金粉末易被氧化, 产生的 Al_2O_3 显著增加熔渣黏度并降低脱渣性。如何确保 Al、Ti 等元素的有效合金过渡并保持良好的焊接工艺性, 是 Inconel 617 焊条开发面临的主要难点之一。Böhler 公司开发的 Thermanit 617D 焊条采用双层药皮结构设计, 其焊接工艺性与焊缝力学性能优良, 表明药皮组分与结构的协同设计具有良好发展潜力。

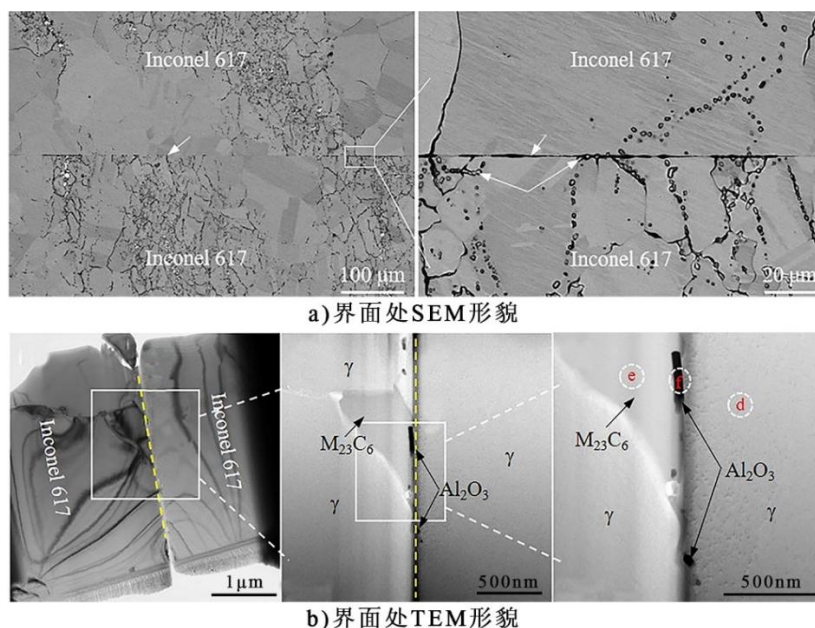


图 12 DW Inconel 617 接头界面组织形貌

Fig.12 Interfacial microstructure of DW Inconel 617 welded joint

Inconel 617 焊丝与焊条已有完善的国家标准与 AWS 标准, 其中焊丝熔敷金属成分与 Inconel 617 母材大致相同, 而焊条允许的 Mn、Fe 等元素含量上限更高^[62-65]。4 项标准所规定最低抗拉强度均为 620 MPa, 其中 GB/T 13814-2025 和 AWS A5.11/A5.11M:2025 对断后伸长率的要求分别为 22 %和 25 %。Inconel 617 系列焊材目前仍主要依靠进口, 国内威尔焊接、大西洋等特种焊材制造企业虽已有开发的牌号但尚未被广泛使用。国外代表性焊条如 Voestalpine Thermanit 617D 与 UTP 6170 Co、Lincoln TECH-ROD 117、Daiko 117、Wel 117 等, 熔敷金属室温抗拉强度普遍高于 700MPa, 延伸率高于 30 %, 冲击功高于 80 J。代表性焊丝如 ESAB Exaton NiCrCoMo-1、Voestalpine UTP 6170 Co、Sandvik Sanicro 53、Exocor Executive 617 等, 其熔敷金属拉伸性能与焊条相近, 但冲击功普遍高于 130 J。

4 焊后热处理

Inconel 617 多服役于 650 °C 以上的高温环境, 接头碳化物的形貌、尺寸与分布特点以及合金元素偏析程度对后续服役持久性能具有显著影响。ASME Section VIII、Division 1、Table UNF-56.1 标准中规定, 一般不对 Inconel 617 接头进行 PWHT, 若焊后产生严重应变则在 1 150 °C 进行全固溶处理, 针对工作温度正好处于 Inconel 617 中高温敏化区间的接头则进行 980 °C×3 h 的稳定化处理^[66]。

Zhou、Kim 等人^[67-68]研究表明, Inconel 617B 接头经 980 °C×3 h PWHT 后, 冲击功显著下降, 抗拉强度提高, 在 750 °C 时效 1000h 及更长时间时, PWHT 试样冲击功与抗拉强度均不如焊态试样。Zhou 等指出, PWHT 促使 $M_{23}C_6$ 碳化物在晶界呈现网状、晶内呈棒状析出, 损害了焊缝冲击韧性。Zhao 等^[31]研究进一步表明了 980 °C×3 h PWHT 后 γ' 相数量减少, $M_{23}C_6$ 碳化物转变为沿晶界连续分布的演变机理, 如图 13^[31]所示。

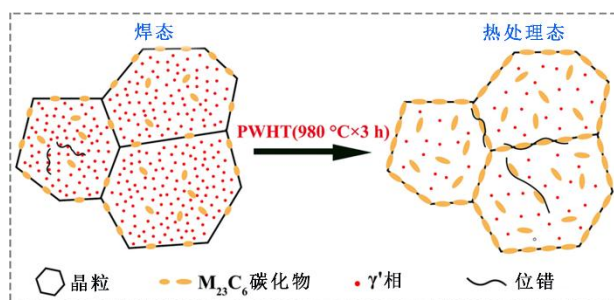


图 13 Inconel 617 HAZ PWHT 组织演变示意

Fig.13 Schematic diagram of the microstructural evolution in the HAZ of alloy 617 in the as weld and PWHT state

Huang 等^[69]对比 650 °C 时效处理与 1 000 °C 固溶处理的 Inconel 617 接头在 700 °C 拉伸测试的结果与上述规律相同, 但其发现经固溶处理后的接头延伸率 (24 %) 显著高于时效处理的接头 (9.0 %)。Huang 等认为, 固溶处理后晶界处的 M_6C 、 $M_{23}C_6$ 碳化物抑制了晶内 γ' 相析出引起的晶界应力集中并阻碍晶界滑移, 降低应力松弛裂纹 (stress relaxation

cracking, SRC) 敏感性, 如图 14^[69] 示。Inconel 617 接头热处理目前理论尚不统一, 在稳定化处理与固溶处理的影响机理方面存在多种解释, 但对中高温

时效处理的阐述基本相同, 实际应用中, 研究者应更多从接头应用工况与母材特性出发选择合适的 PWHT 制度。

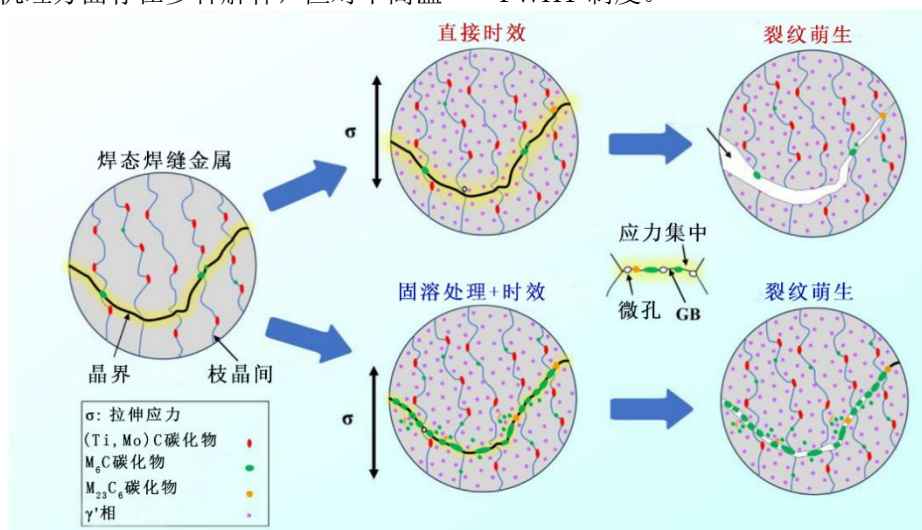


图 14 WM 不同 PWHT 时 SRC 形成机理示意

Fig.14 Schematic diagram of SRC formation in the WM after different PWHT

5 结论与展望

Inconel 617 作为 A-USC 机组核心高温部件的主要候选材料, 焊接技术与焊接材料是制约其广泛应用的瓶颈之一。Inconel 617 通常被认为具有良好的焊接性, 但合金元素多、热导率低, 具有较高的热裂纹敏感性。NG-TIG、脉冲 TIG、CMT、LHW 等热输入较低的熔化焊方法在已有研究中展现出优良的接头综合力学性能, 是 Inconel 617 最具应用潜力的工艺方法。SMAW 与 DW 目前接头的氧化物夹杂导致韧性较低的问题仍有待解决。焊材上, 焊丝的发展相对成熟, 组织稳定且力学性能优良, 焊条中 Al、Ti 等元素的有效过渡问题仍未完全解决。Inconel 617 WM 通常无需进行焊后热处理, 必要时可选用稳定化处理调整析出相形貌与分布。

目前, Inconel 617 主要的焊接技术困难为大厚度关键构件焊接时效率与质量的平衡。为适应先进 A-USC 机组关键高温部件的制造需求, 可从 3 方面深入研究: 1) 分析 Al、Ti、Nb、V、B、Ta、Zr、Y、Ce、La 等元素的影响, 提高 Inconel 617 的焊接性; 2) 推进焊条、DW 中间夹层等焊接材料的研发, 减少 Al、Ti 等元素焊接过程中的氧化烧损; 3) 扩展 NG-TIG、CMT-PMC、LHW 等的焊接工艺参数调整与稳定性研究, 推进其广泛应用。

【参考文献】

[1] 樊启祥, 蒋敏华, 许世森, 等. 碳中和目标下新一代超高温参数煤电机组技术体系[J]. 中国电机工程学报,

2024, 44 (18): 7167.

Fan Q X, Jiang M H, Xu S S, et al. Technical systems of advanced ultra-supercritical coal-fired power units under the carbon neutralization target[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (18): 7167.

[2] 黄靖, 严靖博, 易大伟, 等. 高参数燃煤机组用高温材料焊接研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37 (增刊 2): 367. Huang J, Yan J B, Yi D W, et al. Progress of welding research on high temperature materials for high parameter coal-fired units[J]. Materials Reports, 2023, 37 (S2): 367.

[3] Klöwer J. Alloy 617 and derivatives[M]//Di Gianfrancesco A. Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants. Duxford: Woodhead Publishing, 2017: 547.

[4] Tdg-117-rev-00-1499073679[EB/OL]. (2017)[2026-07-17]. tdg-117-rev-00-1499073679.pdf.

[5] ASTM B166—2019 Standard specification for nickel-chromium-aluminum alloy, nickel-chromium-iron alloy, nickel-chromium-cobalt-molybdenum alloy, nickel-iron-chromium-tungsten alloy, and nickel-chromium-molybdenum-copper alloy rod, bar, and wire[S].

[6] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700℃超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539.

Liu Z D, Chen Z Z, He X K, et al. Systematical innovation of heat resistant materials used for 630~700 °C advanced ultra-supercritical (A-USC) fossil fired boilers[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 539.

[7] 董陈, 徐远超, 厉欣欣, 等. 先进超超临界机组用 Inconel 617 合金的研究进展[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 177.

Dong C, Xu Y C, Li X X, et al. Research progress on Inconel 617 alloy for advanced ultra-supercritical units[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(8): 177.

[8] Rylski A, Siczek K. Issues relative to the welding of nickel and its alloys[J]. Materials, 2025, 18(15): 3433.

[9] Xiang X M, Yao Z H, Dong J X, et al. Dissolution behavior of intragranular M₂₃C₆ carbide in 617B Ni-base superalloy during long-term aging[J]. Journal of Alloys and

- Compounds, 2019, 787: 216.
- [10] Li S L, Liu Q, Rui S S, et al. Fatigue crack initiation behaviors around defects induced by welding thermal cycle in superalloy IN617B[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 158: 106745.
- [11] Zhang Z Y, Ding R, Liu C X, et al. The precipitates evolution with related element interaction and redistribution during long-term high-temperature aging of alloy 617[J]. Materials Characterization, 2023, 199: 112783.
- [12] Li S L, Li K J, Cai Z P, et al. Behavior of $M_{23}C_6$ phase in Inconel 617B superalloy during welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 38.
- [13] Dong C, Liu Z D, Wang X T, et al. Formation behavior of long needle-like $M_{23}C_6$ carbides in a nickel-based alloy without γ' phase during long time aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821: 153259.
- [14] Divya M, Dey H C, Das C R, et al. Study on hot cracking susceptibility of alloy 617M and an analysis on parameters used for its evaluation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68(Part A): 1714.
- [15] Chen K, He X K, Liu Z D, et al. Solidification path and precipitation mechanism of a Ni-Cr-co-Mo based heat-resistant alloy[J]. Materials Characterization, 2024, 215: 114099.
- [16] Yamashita S, Kamimura K, Niki T, et al. Mechanism of influence of carbide formation on solidification cracking susceptibility of alloy 617 and its optimization: -Study of hot cracking of alloy 617 in multipass welds[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2024, 42(4): 143.
- [17] Kong W C, Liu K, Li W, et al. Review: hot cracking during welding nickel-based superalloys[J]. Journal of Materials Science, 2025, 60(42): 20216.
- [18] Yu L, Cao R. Welding crack of Ni-based alloys: a review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(1): 16.
- [19] Yamashita S, Kamimura K, Takahiro N, et al. Hot cracking susceptibility of commercial filler metals for alloy 617 by vareststraint test. Study of hot cracking of alloy 617 in multipass welds[J]. Welding International, 2019, 33(4/5/6): 166.
- [20] Ren W J, Lu F G, Yang R J, et al. Liquation cracking in fiber laser welded joints of Inconel 617[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 214.
- [21] Fink C, Zinke M, Keil D. Evaluation of hot cracking susceptibility of nickel-based alloys by the Pvr test[J]. Welding in the World, 2012, 56(7): 37.
- [22] Yi Z L, Shan J G, Zhao Y, et al. Recent research progress in the mechanism and suppression of fusion welding-induced liquation cracking of nickel based superalloys[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2024, 31(5): 1072.
- [23] Divya M, Mahata C, Pradeep K G, et al. Effect of solution annealing temperature on liquation cracking susceptibility of alloy 617M[J]. Metals and Materials International, 2024, 30(8): 2215.
- [24] 杜邦, 李波特, 凯瑟. 镍基合金焊接冶金和焊接性[M]. 吴祖乾, 张晨, 虞茂林, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2014.
- Dupont J N, Lippold J C, Kiser S D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys[M]. Wu Z Q, Zhang C, Yu M L, translated. Shanghai: Shanghai Scientific Technological Literature Publishing House, 2014.
- [25] Adamiec J, Konieczna N. Assessment of the hot cracking susceptibility of the Inconel 617 nickel-based alloy[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2021, 66(1): 241.
- [26] Johansson M M, Stenvall P, Valiente Bermejo M A, et al. Hot cracking susceptibility of alloy 617 and modified alloy 617 weld metals[J/OL]. Welding International, 2026: 1. <https://doi.org/10.1080/09507116.2026.2644270>.
- [27] Zhang Y, Cai Z P, Li X G, et al. Investigation on solidification and phase transformation of heterogenous interface structure in dissimilar metal weld between high Cr heat-resistant steel and nickel-based alloy 617[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 257.
- [28] Kumar A, Pandey C. Development and evaluation of dissimilar gas tungsten arc-welded joint of P92 steel/Inconel 617 alloy for advanced ultra-supercritical boiler applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022, 53(9): 3245.
- [29] Kumar A, Pandey C. Structural integrity assessment of Inconel 617/P92 steel dissimilar welds for different groove geometry[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 8061.
- [30] Chu T J, Xu H L, Li Z G, et al. Investigation of intrinsic correlation between microstructure evolution and mechanical properties for nickel-based weld metal[J]. Materials & Design, 2019, 165: 107595.
- [31] Zhao M Y, Wang L, Ren W H, et al. Investigation of microstructural characterization and tensile deformation mechanisms in Inconel 617 welded joints produced by GTAW[J]. Materials, 2026, 19(6): 1251.
- [32] Kumar A, Sirohi S, Pandey S M, et al. High-temperature tensile behaviour of GTAW joints of P92 steel and alloy 617 for two different fillers[J]. Materials, 2023, 16(17): 5880.
- [33] Li X G, Li K J, Li S L, et al. Microstructure and high temperature fracture toughness of NG-TIG welded Inconel 617B superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 39: 173.
- [34] Xu H L, Liu W, Lu F G, et al. Evolution of carbides and its characterization in HAZ during NG-TIG welding of alloy 617B[J]. Materials Characterization, 2017, 130: 270.
- [35] Thayumanavan S, Santhanakrishnan R, Kannan T D B. Experimental investigation on single pulse MIG welding of Inconel 617[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024, 77(1): 105.
- [36] Arivarasan J, Kannan T D B. Mechanical and metallurgical characterisation of double pulse MIG welded in 617-SS 304 H[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2024, 10(2): 1182.
- [37] Varghese P, Vetrivendan E, Dash M K, et al. Weld overlay coating of Inconel 617 M on type 316 L stainless steel by cold metal transfer process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 357: 1004.
- [38] Pramod Kumar G, Balasubramanian K R. Experimental investigation on high-temperature tensile behavior of cold metal transfer pulse multi-control welding of Inconel 617 alloy[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2023, 10: 100100.
- [39] Wang J, Wang L Z, Li J Q, et al. Effects of aluminum and titanium additions on the formation of nonmetallic inclusions in nickel-based superalloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 906: 164281.
- [40] Zhang W J, Liu F G, Liu F C, et al. Effect of Al content on microstructure and microhardness of Inconel 718 superalloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1832.
- [41] Zhang L H, Liu E K, Xing W J, et al. The formation mechanism of oxide inclusions in a high-aluminum Ni-based superalloy during the vacuum induction remelting process[J]. Metals, 2024, 14(6): 654.

- [42] Sirohi S, Kumar N, Kumar A, et al. Metallurgical characterization and high-temperature tensile failure of Inconel 617 alloy welded by GTAW and SMAW: a comparative study[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2023, 237(9): 2046.
- [43] Kumar R, Sirohi S. Comparative evaluation of Ni-based electrodes for shielded metal arc dissimilar welding of P91 and AISI 310 steels: microstructure and mechanical performance[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35(3): 2390.
- [44] Garga A, Kumar S, Hirshikesh, et al. Comparative assessment of Ni-based electrodes on the integrity of Inconel 617-AISI 304 H dissimilar welds for advanced ultra-supercritical boilers[J]. Materials Today Communications, 2026, 50: 114254.
- [45] Kumar A, Bhattacharyya A, Pandey C. Structural integrity assessment of Inconel 617/P92 steel dissimilar welds produced using the shielded metal arc welding process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(23): 13030.
- [46] Kumar U, Chattopadhyaya S, Das A K, et al. Influence of laser power and welding speed on dendrite structure growth of low power pulsed laser welded super alloy[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1104: 012019.
- [47] Cheng H, Kang L, Pang J C, et al. Effect of the welding position on weld quality when laser welding Inconel 617 Ni-based superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106962.
- [48] Aqeel M, Gautam J P, Shariff S M. Comparative study on autogenous diode laser, CO₂ laser-MIG hybrid and multi-pass TIG welding of 10-mm thick Inconel 617 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 856: 143967.
- [49] Aqeel M, Shariff S M, Gautam J P, et al. Liquation cracking in Inconel 617 alloy by laser and laser-arc hybrid welding[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(8): 904.
- [50] Sun J H, Ren W J, Nie P L, et al. Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method[J]. Materials & Design, 2019, 175: 107823.
- [51] Yang X W, Meng T X, Chu Q, et al. A review of linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(6): 1382.
- [52] Sah I, Hwang J B, Kim E S. Creep behavior of diffusion-welded alloy 617[J]. Metals, 2021, 11(5): 830.
- [53] Li S W, Zu Y D, Du Y J, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of micro-deformation diffusion bonding Inconel 617 superalloy[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112359.
- [54] Zhang X C, McMurtrey M D, Bass R E, et al. Enhanced diffusion bonding of alloy 617 using electric field-assisted sintering[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 7033.
- [55] Alhazaa A, Haneklaus N. Diffusion bonding and transient liquid phase (TLP) bonding of type 304 and 316 austenitic stainless steel—a review of similar and dissimilar material joints[J]. Metals, 2020, 10(5): 613.
- [56] Zhao P, Zhu M M, Xia Y H, et al. A critical review of ultrasound-assisted transient liquid phase bonding: from process mechanisms to material systems[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 172: 610.
- [57] Chen S Q, Liu G Y, Li H B, et al. Effect of bonding time, composition of interlayer, and postbond heat treatment on transient liquid phase joints of Inconel 718 superalloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(15): 2302241.
- [58] Zhang L X, Chang Q, Sun Z, et al. Effects of boron and silicon on microstructural evolution and mechanical properties of transient liquid phase bonded GH3039/IC10 joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 167.
- [59] Mobarakeh V S, Atapour M, Niroumand B, et al. Effect of bonding temperature on microstructure and mechanical properties of dissimilar joint between Inconel 617 and stainless steel 310[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2021, 10(4): 419.
- [60] Mobarakeh V S, Niroumand B, Atapour M, et al. Effects of transient liquid phase bonding time on microstructure, mechanical and corrosion properties during bonding of Inconel 617/AISI 310 stainless steel[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2023, 12(4): 714.
- [61] Mobarakeh V S, Niroumand B. Effects of homogenization heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of transient liquid phase (TLP)-bonded Inconel 617/AISI 310 stainless steel[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2024, 13(1): 29.
- [62] AWS A5. 11/A5. 11M: 2025 Specification for nickel and nickel-alloy welding electrodes for shielded metal arc welding[S].
- [63] GB/T 13814—2025 镍及镍合金焊条[S].
GB/T 13814—2025 Covered electrodes for manual arc welding of nickel and nickel alloys[S].
- [64] GB/T 15620—2025 镍及镍合金实心焊丝和焊带[S].
GB/T 15620—2025 Solid wire electrodes, solid strip electrodes, solid wires and solid rods for fusion welding of Nickel and nickel alloys[S].
- [65] AWS A5. 14/A5. 14M: 2026 Specification for nickel and nickel-alloy bare welding electrodes and rods[S].
- [66] ASME BPVC. VIII. 1—2025 Rules for construction of pressure vessels division 1[S].
- [67] Zhou R Y, Wang Y H, Wang L J, et al. The effect of high-temperature post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 617B welded joint after aging at 750°C[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2026, 57(4): 1408.
- [68] Kim J K, Park H J, Shim D N. Effects of PWHT on microstructure and mechanical properties of weld metals of Ni-based superalloy 617 and 263 for hyper-supercritical power plants[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2016, 29(12): 1107.
- [69] Huang Y S, Zhang R, Wang F Q, et al. Effect of PWHT on microstructure and mechanical properties of welded joint of a new Fe-Ni-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 906: 146699.

(责任编辑 李园)