

· 应用与服役 ·



Mn 含量对 Inconel718 板材焊接接头组织性能的影响

杨亚倩^{1,2}, 马 帅³, 王惠生³, 杨晓东³, 梁 田^{1,2}, 马颖澈^{1,2}

(1 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016; 2 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳 110016; 3 中广核铀业发展有限公司中广核先进燃料研制中心, 阳江 529500)

摘 要: 采用 $w[\text{Mn}] < 0.01\%$ 、 0.24% 、 0.34% 三种不同合金的固溶态 Inconel718 热轧板材进行直流脉冲电弧焊接, 经双级时效处理后进行室温拉伸实验, 研究 Mn 含量的变化对焊接接头微观组织及时效态力学性能影响规律。结果表明, 三种不同 Mn 含量焊接接头组织中只存在 Laves 相, 没有 δ 相析出, 随着 $w[\text{Mn}]$ 由 $< 0.01\%$ 提高至 0.34% , 焊接接头中 Laves 相析出体积分数略有增多。经过双级时效处理后, γ' 开始析出, 焊接接头组织中 Laves 相含量略有减少。与时效态母材拉伸性能相比, 焊接接头拉伸强度和伸长率有所降低。且随着 Mn 含量的增加, 时效态焊接接头拉伸性能略有降低, 抗拉强度由 $1\ 250\ \text{MPa}$ 小幅降低至 $1\ 178\ \text{MPa}$ 和 $1\ 213\ \text{MPa}$, 三种不同 Mn 含量的焊接接头时效态拉伸样品断裂位置皆为焊缝区域, 且均为韧性断裂。

关键词: Inconel718 合金; Mn 含量; Laves 相; 焊接性能; 板材

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2023-00176 **中图分类号:** TG406

Effect of Mn Content on Microstructure and Properties of Inconel718 Plate Welded Joint

Yang Yaqian^{1,2}, Ma Shuai³, Wang Huisheng³, Yang Xiaodong³, Liang Tian^{1,2}, Ma Yingche^{1,2}

(1 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shichang Xu Advanced Material Innovation Center, Shenyang 110016, China; 2 Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Evaluation, Shenyang 110016, China; 3 CGN Uranium Development Co., LTD., CGN Advanced Fuel Development Center, Yangjiang 529500, China)

Abstract: The service performance of welded parts is directly impacted by the microstructure of the Inconel718 welded joint; however, there is a lack of comprehensive research on the impact of the Mn element on the microstructure and performance of the welded junction. In this study, the solid-solution Inconel718 hot-rolled plates with varied Mn concentrations of $< 0.01\%$, 0.24% , and 0.34% were joined by using DC pulse arc welding before two stages of thermal aging. The tensile test of these plates was performed at room temperature to determine the impact of Mn content on the microstructure and aging mechanical properties of welded joints. The results demonstrate that there are only the Laves phase and no δ phase in the welded joints with three different Mn concentrations. The volume proportion of Laves phase precipitates in the welded joints significantly increases as the Mn content rises from $< 0.01\%$ to 0.34% . However, the content of Laves phases decreases slightly, and γ' begins to precipitate after a two-stage thermal aging treatment. In addition, the tensile strength and elongation of the welded joint are inferior to those of the aged base metal. The tensile properties of the aged welded joints are worsened by the increase in Mn content, causing a decrease in tensile strength from $1\ 250\ \text{MPa}$ to $1\ 178\ \text{MPa}$ and $1\ 213\ \text{MPa}$, respectively. The three welded joints are broken at the welded areas in the tensile test, all of which are ductile fractures.

Key Words: Inconel718 Alloy; Mn Content; Laves Phase; Welding Performance; Plate

Inconel718 作为产量最大的沉淀强化镍基变形高温合金, 对应国内牌号 GH4169 合金^[1]。Inconel718 合金固溶后基体为面心立方结构的 γ 相, 晶界存在少许碳氮化物, 时效过程在基体析出 γ' 及 γ'' 强化相。其服役温度上限为 $650\ ^\circ\text{C}$, 被广泛应用于航空航天、核能及石油化工领域^[1-3]。

在核电领域, 采用的 Inconel718 合金成分及其

性能与航空航天、石油化工领域要求有所不同^[4]。与航空航天相比, 核用 Inconel718 合金的微量元素需要控制的更低, 要求 $w[\text{C}] < 0.02\%$, $w[\text{S}] < 0.008\%$, $w[\text{Co}] < 0.04\%$ 。在组织特征方面, 核电用 Inconel718 合金要求晶界上无 δ 相及二次碳化物。在性能方面, 除强度、持久性能和良好的加工性能外, 核用 Inconel718 还需具备良好的抗高温高压一

作者简介: 杨亚倩(1991—), 女, 硕士, 工程师; **E-mail:** yangyq@imr.ac.cn; **收稿日期:** 2023-08-17

通信作者: 梁 田(1983—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师; **E-mail:** tliang@imr.ac.cn

回路水化学介质的应力腐蚀性能和抗辐照性能^[5-8]。Inconel718合金在核电领域的应用场景很多,例如,核反应堆燃料定位格架用的是厚度为0.3 mm的带材,直径0.3~10 mm丝和圆棒用作核设备焊材或驱动棒弹簧丝材,反应堆压力容器的“O”型密封环,抗辐照压紧弹簧等^[4]。值得关注的是,Inconel718合金用于核电领域的部件很多情况下需要经过焊接加工,对合金的焊接性能要求较高。因此,探究元素对合金焊接性能影响因素至关重要。

Sivaprasad等^[9]对Inconel718合金进行气体钨极电弧焊(GTA)和电子束焊(EB)实验,来比较冷却速度及热处理制度对焊接接头组织性能影响,随冷却速度降低,焊接接头枝晶组织变粗,Laves相粗化,恶化焊接接头的力学性能;而焊后固溶加热时效处理后的焊缝组织中存在 δ 相,这是由于固溶处理使得焊缝处Laves相发生了部分溶解,在其附近析出针状 δ 相。郭占英等^[10]对焊后热处理工艺对接头组织性能影响进行了研究,发现焊后热处理可以细化接头枝晶组织,减轻偏析,同时析出大量 δ 相及强化相,阻碍位错运动,起到综合强化作用。盛钟琦等^[11]对Inconel718合金焊接后产生的条状组织进行了计算,发现相比于调控焊后热处理制度,在焊接工艺上采取相应措施更容易控制条状组织的产生。可见,目前关于Inconel718合金焊接性能的研究主要集中在焊接工艺及热处理上,关于元素对焊接接头性能的影响研究较少。

Mn作为Inconel718合金中的重要微量元素,有研究认为Mn可以改善合金的焊接性能。如Richards等^[12]认为Mn和Si的添加可降低合金焊缝微裂纹倾向,改善Inconel718合金的焊接性能;R. T. Holt等^[13]发现Mn易偏聚于焊接熔化区,在Inconel718中加入0.93%的Mn可以降低焊接接头的热裂倾向。然而,目前Mn的作用机制还不明确,特别是其含量的变化对组织性能的影响还缺乏系统的研究。

本研究以核反应堆燃料定位格架用Inconel718合金为对象,设计三种不同Mn含量,采用单面开坡口的直流脉冲电弧焊形式焊接板材。对焊后及时效态焊缝处元素偏析行为、Laves相析出行为及热处理后焊接接头的室温拉伸性能进行分析,研究Mn含量变化对Inconel718合金焊接接头微观组织及性能的影响,为国产核用Inconel718合金带材成分设计提供数据支持。

1 实验材料及方法

采用实验室25 kg级真空感应炉熔炼三种不同Mn含量Inconel718合金锭, $w[\text{Mn}]$ 分别<0.01%、0.24%、0.34%,合金成分见表1。铸锭脱模后,采用实验室150 kW电阻炉,对铸锭进行高温均匀化处理,以 $(100\pm 10)^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温至 $1\ 160^\circ\text{C}$,保温24 h,然后,以 $(100\pm 10)^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温至 $1\ 200^\circ\text{C}$,保温48 h,保温结束后空冷。

表1 实验三种不同锰含量的Inconel718合金成分(质量分数)

合金	Ti	Al	Nb	Mn	Ni	Fe	Cr	Mo
0%Mn	0.97	0.51	5.01	<0.01	53.80	18.19	18.37	2.91
0.24%Mn	1.00	0.51	5.05	0.24	53.28	18.17	18.37	2.92
0.34%Mn	0.99	0.50	5.06	0.34	53.18	18.21	18.40	2.93

将均匀化处理后的Inconel718合金铸锭进行锻造,初锻温度为 $1\ 100\sim 1\ 150^\circ\text{C}$,终锻温度 $>900^\circ\text{C}$,锻造成50 mm厚度板材。将锻板进一步热轧,初轧温度为 $1\ 100^\circ\text{C}$,终轧温度 $>900^\circ\text{C}$,轧后空冷至室温,制备成5 mm厚热轧板。将热轧板进行固溶处理,固溶温度 $1\ 020^\circ\text{C}$ 保温30 min,水冷至室温;固溶态板材厚度打磨到3 mm后进行焊接,单边开 60° 坡口。采用直流脉冲电弧焊进行焊接,焊接方式如图1所示。焊接过程中,峰值电流为183 A,基值为95 A,占空比为40%,频率为8 Hz,焊枪角度 25° ,焊接速度为100 mm/min,钨极高度1 mm。焊接完成后将焊接试板进行双级热时效处理,双级热时效处理制度为 720°C 保温8 h后,然后以 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 的冷速炉冷至 620°C 保温8 h,空冷至室温。热处理结束后,沿轧制方向,以焊缝作为平行段中心,切取时效态拉伸试样,采用TSE504D万能试验机对试样进行室温拉伸实验。

使用线切割分别在原始态焊接接头和时效态焊接接头处切取金相样品,经砂纸打磨、抛光布抛

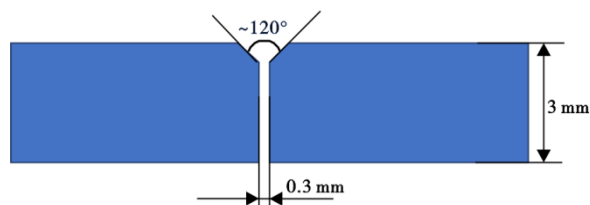


图1 Inconel718合金板材焊接示意图

Fig. 1 Welding schematic diagram of Inconel718 alloy sheet

光,采用 5 g CuCl₂+100 ml HCl+100 ml C₂H₅OH 溶液化学蚀刻金相样品,擦拭蚀刻 30 s。腐蚀后在光学显微镜及扫描电镜下对枝晶形貌、Laves 相形貌、数量进行观察。在焊接接头处切割并磨制 50 μm 厚直径 3 mm 薄片试样,使用电解双喷仪进行化学减薄,双喷液采用 5% HClO₄ + 95% C₂H₅OH (体积分数) 混合溶液,然后使用 Talos F200 透射电镜对枝晶间 Laves 相及 γ 相进行观察。

2 实验结果与分析

2.1 Mn 含量对母材组织的影响

三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金铸态组织形貌如图 2 所示,金相截取位置均为铸锭头部 1/2 半径处,截取样品尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm。观察整个视场发现三种成分合金铸态均为枝晶组织,光学显微镜下枝晶干为白色,枝晶间呈黑色。在枝晶间可观察到灰色块状的 Laves 相及细针状的 δ 相,扫描电镜图片如图 3 所示。块状 Laves 相富含 Nb、Ni 元素,见表 2,细针状的 δ 相由于尺寸较小,未能成功采集成分。0% Mn 成分及 0.24% Mn 成分合金铸态枝晶组织的形貌无明显差别,但 0.34% Mn 成分合金枝晶组织与前两者相比更加细小,平均二次枝晶臂间距由 83 μm 减小到 63 μm。这应是由于随 Mn 含量上升,熔炼过程中液态合金流动性增强所导致的。

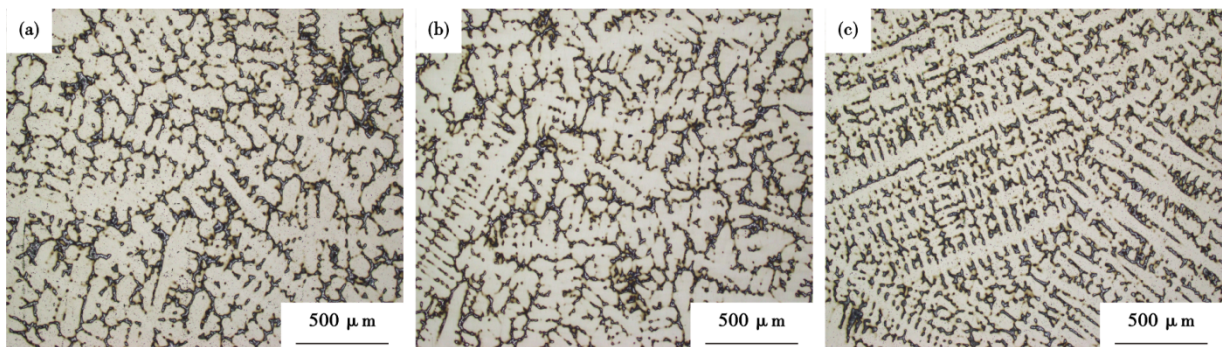


图 2 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金未高温均匀化铸态组织:(a)0% Mn, (b)0.24% Mn, (c)0.34% Mn

Fig. 2 The as-cast microstructure of three Mn contents Inconel718 alloys without homogenization at high temperature : (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金铸锭经高温均匀化处理、锻造、热轧后,切取板材横向中心处金相,板材横截面组织如图 4 所示。轧态组织均为细小均匀等轴晶组织,晶粒度约为 7 级。组织中未发现 Laves 相及 δ 相,只在等轴晶粒内存在少量块状的碳氮化物。热轧态 Inconel718 合金板材经 1 020 °C

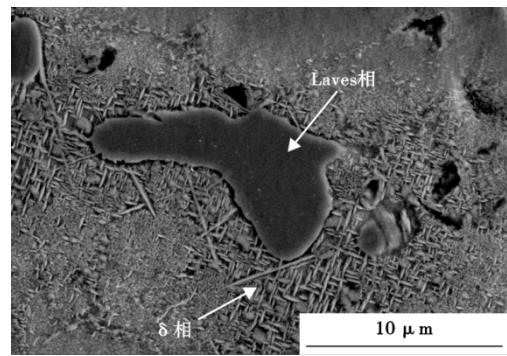


图 3 0.34%Mn 样品 SEM 下铸态组织 Laves 相和 δ 相
Fig. 3 Laves and δ phases in as-cast microstructure of 0.34%Mn sample under SEM

表 2 Laves 相合金成分

Table 2 The composition of Laves phase

元素	质量分数/%	原子分数/%
NbL	32.68	23.68
TiK	0.88	1.24
CrK	11.78	15.25
FeK	11.73	14.14
NiK	34.95	40.08

固溶处理后组织如图 5 所示。经高温固溶处理后晶粒长大明显,但三种不同 Mn 含量晶粒度级别接近,保持在 5.5 级左右。

综上所述,随着 Mn 含量的提高,Inconel718 合

金铸锭组织变得更为细小,但组织中的 Laves 相和 δ 相体积总数并未改变,由于 Laves 相和 δ 相组成共晶相析出,在金相下很难单独分辨 Laves 相和 δ 相,故未能统计各自的体积分数。而随着 Mn 含量的增加,在相同的高温均匀化处理、锻造、热轧及固溶处理之后,合金的晶粒度、组织均匀性未见明显差异。

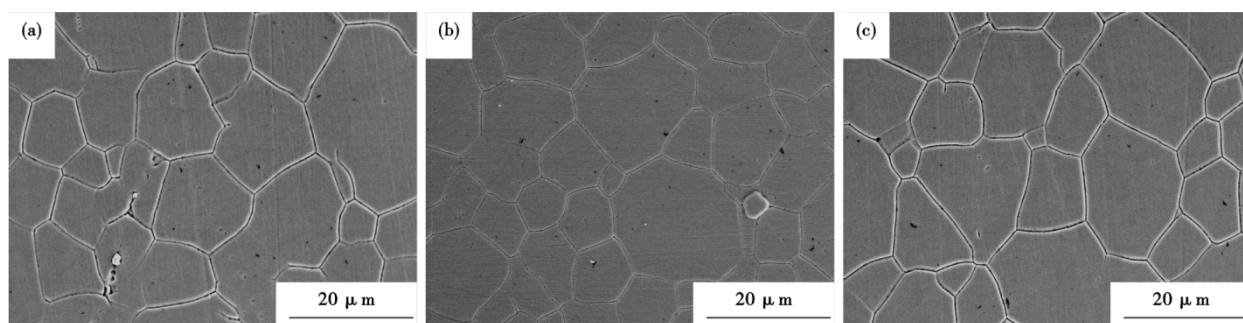


图4 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金热轧态组织: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 4 Hot rolled microstructure of three Mn contents Inconel718 alloys : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

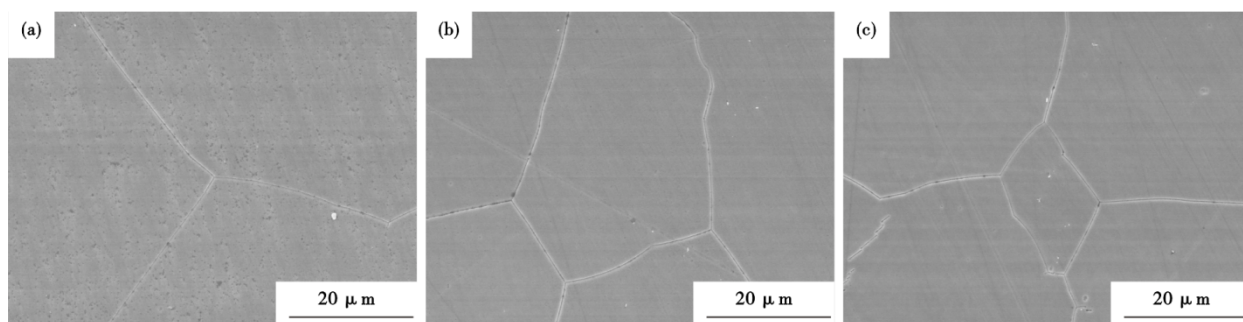


图5 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金固溶态组织: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 5 Solid solution microstructure of three Mn contents Inconel718 alloys : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

2.2 Mn 含量对合金焊接接头组织的影响

三种不同 Mn 含量的 Inconel718 合金焊后板材, 没有观察到肉眼可见的表面裂纹。对焊接接头进行渗透探伤处理, 未发现焊接接头存在裂纹、夹渣等缺陷。图6为三种不同 Mn 含量的 Inconel718 合金焊接接头微观组织。可见, 焊接接头为细小的枝晶组织, 这是由于焊接接头冷却速度快, 焊接接头组织与合金铸锭组织相比要细化很多。通过低倍金相观察, 没有发现 Mn 含量对焊缝宏观形貌产生影响。焊缝中心区都呈定向生长的树枝晶, 树枝晶的生长方向与焊缝中心的温度梯度垂直, 一直生长到焊缝中心处相交。熔合线附近晶体为短小的胞状枝晶, 熔合区晶粒未发生明显长大, 熔合区处与焊缝中心处存在细小点状黑色组织。

图7为不同 Mn 含量 Inconel718 合金焊接接头 SEM 像, 可见, 焊接接头组织形貌与熔炼过程的铸态枝晶组织相近。在枝晶间存在块状析出相, 通过 TEM 衍射分析, 如图8所示, 块状析出相为 Laves 相, Laves 相为 AB_2 型化合物, 密排六方结构。与合金铸锭组织相比, 焊接接头组织出现块状 Laves 相, 但未见针状 δ 相。这是由于 Inconel718 合金在凝固过程中枝晶间存在严重的 Nb 偏析现象, 并在 1 150 ~

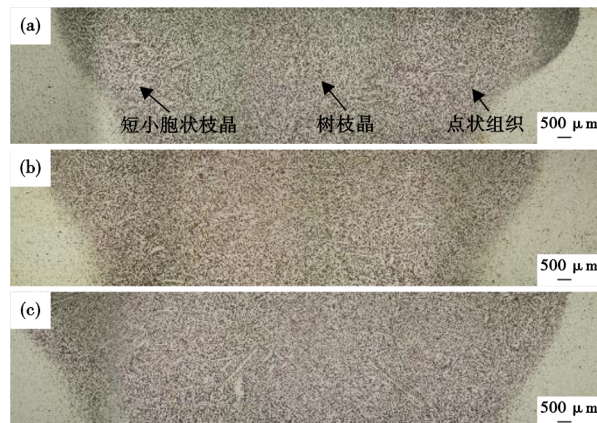


图6 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金焊接接头微观组织: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 6 Microstructure of welded joints of three Mn contents Inconel718 alloys: (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

1 204 °C 温度下形成富 Nb 的块状 Laves 相^[14-15]。Laves 相析出后, 消耗掉大量的 Nb 元素, 而与熔炼过程相比, 焊接过程冷速过快, 在 δ 相的析出温度区间停留时间过短, 没有为 δ 相析出提供足够的 Nb 元素扩散时间^[16]。因此, 在急冷情况下, 焊接接头组织很难析出 δ 相。

在 1000 倍下选取 10 张 SEM 相, 通过 Image Pro 软件对焊接接头组织中 Laves 相的体积分数进行统

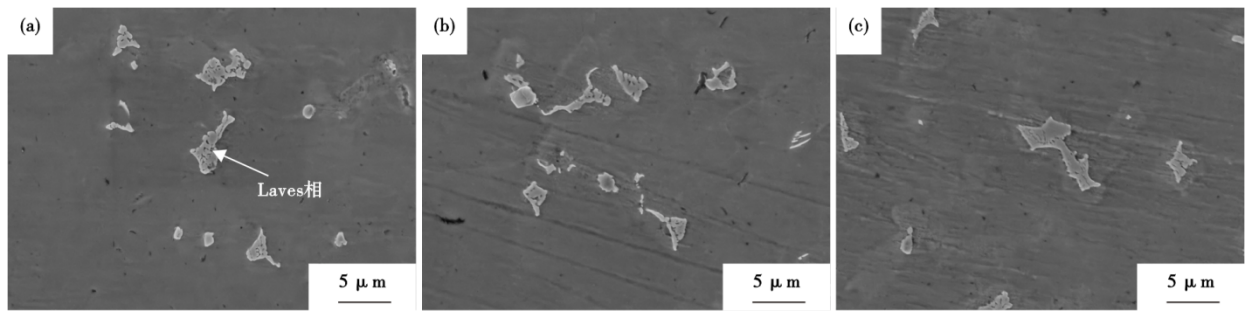


图7 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金焊接接头组织 SEM 观察: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 7 SEM observation of welded joints of three Mn contents Inconel718 alloys : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

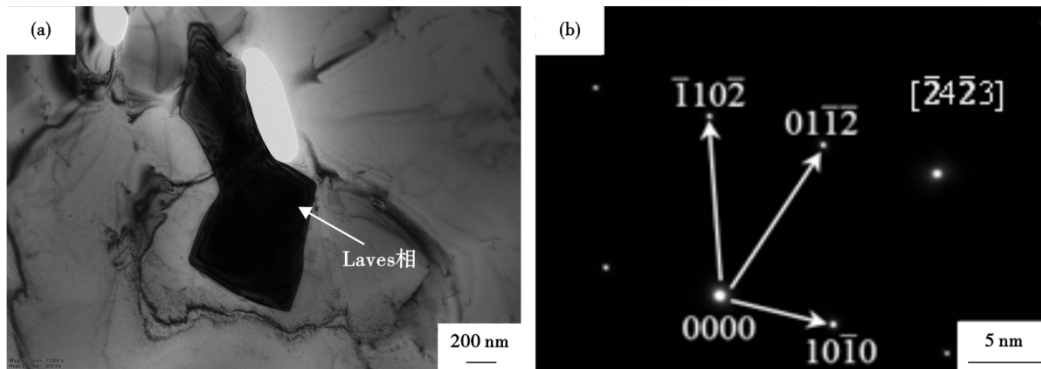


图8 TEM下焊后接头(a)Laves相形貌及(b)衍射斑点

Fig. 8 Morphology (a) and diffraction spots (b) of Laves phase of welded joint under TEM

计,发现0%Mn成分 Inconel718 合金焊接接头 Laves 相体积分数为3.42%,0.24%Mn成分 Inconel718 合金焊接接头 Laves 相的体积分数为3.70%,0.34%Mn成分 Inconel718 合金焊接接头 Laves 相的体积分数为3.86%。可见,随着 Mn 含量提升,Laves 相体积分数小幅增加。虽然 Sullivan. C. P 等^[17]发现, Mn 也是 Laves 相组成元素,但 Mn 的加入并未对合金中的 Laves 相体积分数有明显影响。

Inconel718 合金接头经 720 °C 和 620 °C 双级热时效处理后 SEM 下的焊缝组织形貌如图9所示。可见, Inconel718 合金焊接接头组织中块状析出相依旧为 Laves 相,并未见针状 δ 相析出。在 1000 倍下选取 10 张 SEM 相,利用 Image Pro 软件对视场内 Laves 相体积分数进行统计,发现 0%Mn 成分 Inconel718 合金接头 Laves 相的体积分数为 1.75%, 0.24%Mn 成分 Inconel718 合金接头 Laves 相的体积分数为 2.29%, 0.34%Mn 成分 Inconel718 合金接头 Laves 相的体积分数为 2.48%。在 SEM 下观察,焊接接头组织中只存在 Laves 相,时效过程析出的强化相 γ' 无法在 SEM 下观察到。采用 TEM 对时效态接头焊缝处 γ' 相进行观察和确认,如图 10 所示。可以

发现,接头经双级热时效处理后的析出相,点阵常数 $a=0.3624\text{ nm}$, $c=0.7406\text{ nm}$,符合 γ' 结构特征^[18-21]。在 Inconel718 合金焊接接头的析出相 γ' 较为细小,在基体上呈盘状析出。

随 Mn 含量提升,Laves 相体积分数依旧为缓慢增加的趋势。与原始态焊接接头组织相比,双级热时效处理后,Laves 相体积分数下降。这应该是在双级热时效过程中,γ' 相在组织中析出时会消耗部分 Laves 相所导致的。在 Inconel718 合金中,Laves 相富含 Ni、Nb、Fe、Cr 等元素。为了消除 Laves 相,需要 1170 °C 以下进行长时间保温,保证 Laves 相的全部回溶^[22-23]。但文献表明,当铁基或钴基高温合金中 Cr、Ti、Mo、W 和 Nb 等合金元素的含量超过其在基体中的溶解度时,Laves 相还会有析出倾向,如 GH2135 合金(Al+Ti)总量≥5%时,在 800 °C 时效 500 h 后,合金中可析出 laves 相^[24-25]。GH2901 合金经 700 °C 长期时效沿晶界析出 laves 相,这说明 laves 相并不稳定,只要存在元素偏析或扩散情况下,会出现析出或溶解现象^[1]。

γ' 为 Inconel718 合金的主要强化相^[20-21],成分可用式 Ni_3Nb 表达,析出温度区间为 595 ~ 870 °C,析出

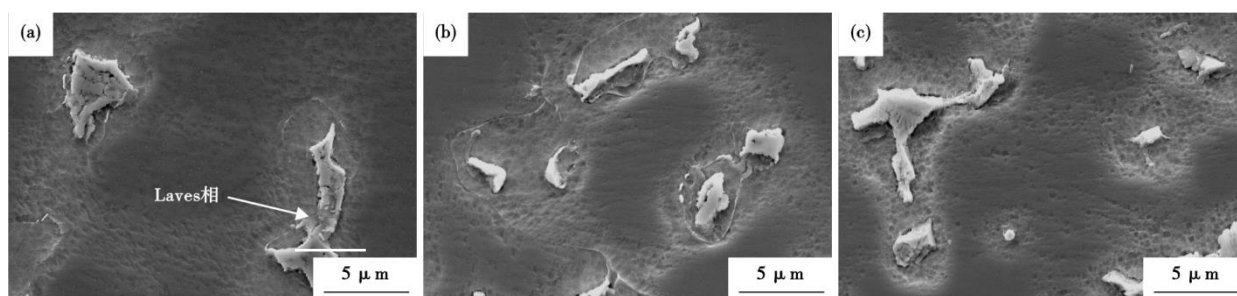


图9 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金时效态焊接接头 SEM 形貌: (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

Fig. 9 SEM morphology of aging welded joints of three Mn contents Inconel718 alloys : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

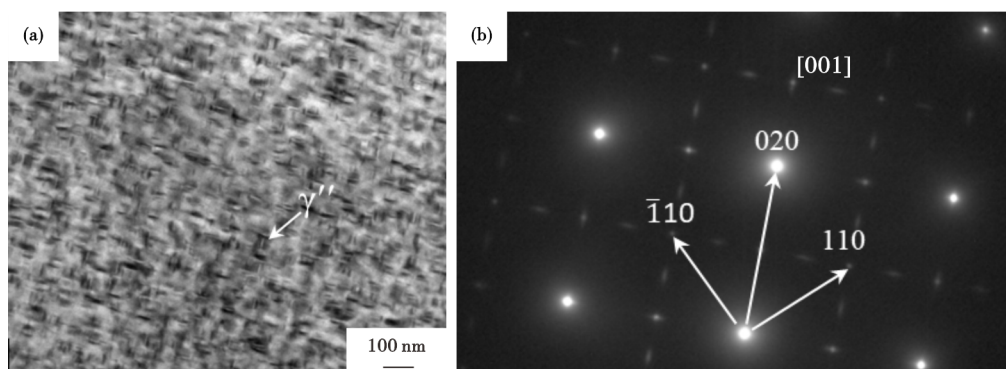


图10 TEM下时效态接头(a) γ'' 相形貌及(b)衍射斑点

Fig. 10 Morphology (a) and diffraction spots (b) of γ'' phase of welded joint under TEM

峰位于 732 ~ 760 °C。 γ'' 时效析出过程十分缓慢, 在 γ'' 析出过程中, 不断消耗枝晶间的 Ni、Nb 元素, 改变了 Laves 相附近区域的元素偏析行为, 导致 Laves 相不稳定, 出现部分溶解, 进一步促进 γ'' 析出^[25]。这也正是在焊接接头经过双级热时效处理后, 组织中的 Laves 相略有减少的主要原因。此外, 黄文普^[26]在研究激光选区熔化成形态 GH4169 合金相变温度时, 也发现了 Laves 相在 825 °C 即发生溶解, 并且证明了这种低温溶解现象主要与选区熔化形态密切相关, 激光选区熔化组织中枝晶间距十分细小, 故扩散距离较短, 有利于 Laves 相的快速溶解。而本实验中氩弧焊焊接接头组织中, 虽然没有激光选区熔化成形态组织狭小, 但与铸锭铸态组织相比, 焊接接头组织更为细小。随着 Mn 含量的提升, 枝晶间距离较小, 更有利于 Laves 相的溶解, γ'' 相的析出。

综上所述, 三种不同 Mn 含量 Inconel718 合金焊接接头组织中只存在 Laves 相, 没有 δ 相析出。经过双级热时效处理后, γ'' 相开始析出, 焊接接头组织中 Laves 相含量略有减少。随着 Mn 含量的增加, 两种状态焊接接头组织中的 Laves 相数量略有增加。

2.3 Mn 含量对合金焊接接头拉伸性能的影响

Inconel718 合金时效态母材和接头室温拉伸性能见表 3, 母材与接头双级热时效处理制度相同。三种不同 Mn 成分合金母材抗拉强度最高为 1 316 MPa, 最低为 1 302 MPa, 伸长率最高为 27.5%, 最低为 23.0%。Mn 含量对固溶态合金室温拉伸性能无明显影响。这主要是因为随着 Mn 含量的增加, 固溶态合金板材的晶粒度、组织均匀性未见明显差异。

表3 时效态母材和接头室温拉伸性能

Table 3 Tensile properties of aged base metal and joints at room temperature

合金	母材		接头		
	R_m /MPa	A/%	R_m /MPa	A/%	K/%
0%Mn	1 316	23.0	1 250	15.0	95%
0.24%Mn	1 302	27.5	1 178	13.5	90%
0.34%Mn	1 308	27.0	1 213	11.5	93%

表 3 中 K 为焊接接头与母材抗拉强度的比值 (强度系数), 用以反映焊接接头强度被削弱的程度。经过双级热时效处理后, 与母材拉伸性能相比, 焊接接头的抗拉强度和伸长率均有所下降。三

种不同 Mn 含量的 Inconel718 合金焊接接头中 0%Mn 含量的强度系数最高,同时具有最高的抗拉强度与伸长率。

导致这种现象的原因是因为母材与焊接接头的组织不同,焊接接头组织为粗大的枝晶组织,而母材为等轴的再结晶组织。因此,焊接接头的力学性能有所降低。但双级热时效处理后,焊接接头的 Laves 相数量降低,且 γ'' 相更容易析出,起到了一定的强化作用,因此焊接接头强度系数 K 可达到 90% 以上。

随着 Mn 的增加,三种合金的焊接接头经过双级热时效处理后拉伸性能略有降低,这是 γ'' 相和 Laves 相共同作用的结果。 γ'' 相的成分为 Ni_3Nb , 不含 Mn, 因此, Mn 变化对 γ'' 相的析出数量直接影响较小。由此可知, Mn 对接头组织性能的作用是由于其对 Laves 相形成的影响。文献表明, Mn 也是 Inconel718 合金中 Laves 相的组成元素, 随其含量提升, 会促进 Laves 相的析出^[16, 27]。而作为一种脆性相, 随着 Laves 相数量的增加, 接头处更多 Laves 相析出的位置可能成为裂纹源, 使合金的塑性降低。Laves 相作为一种富 Nb 相, 消耗的 Nb 也随之增加而上升, 从而减少 γ'' 相析出数量, 导致接头强度的变化^[22, 28], 所以在三种不同 Mn 含量合金焊接接头组织中,

Laves 相析出数量较少的 0%Mn 成分合金不论是抗拉强度, 还是断后伸长率都要比其他两种成分的合金要高, 0.34%Mn 含量的伸长率最低。有研究表明, Inconel 718 合金中加入小于 0.93% 的 Mn 时, Mn 偏聚于焊接熔化区降低热裂倾向, 改善焊接性能^[29]。此研究只是针对 Mn 含量对焊接裂纹敏感性的影响, 并未进行等强性实验, 不能证明小于 0.93%Mn 的添加是有益的。而实验中 $w[Mn]$ 在 0.01% ~ 0.34% 内变化时, 既检测了焊接裂纹敏感性, 又测试了接头的等强性。综合认为 Mn 的添加恶化了焊接性能。

三种合金成分焊接接头时效态拉伸样品断裂位置皆为焊缝区域。合金时效态焊接接头室温拉伸宏观断口形貌如图 11 所示, 可见, 三种合金断口的断裂面均高低不齐, 断口均呈灰色无光泽的纤维状, 为典型杯锥状断口, 属于韧性断裂。合金时效态焊接接头室温拉伸微观断口形貌如图 12 所示, 断口截面存在许多大小不一的韧窝, 属于微孔聚集剪切断裂, 随着 Mn 的增加, 焊接接头组织中 Laves 相略有增加, 但微观断口未见不同。三种不同 Mn 含量合金时效态焊接接头室温拉伸断口纵剖面组织如图 13 所示, 可见, 在三种焊接接头断口附近存在较多的 Laves 相以及孔洞。Laves 相作为一种具有

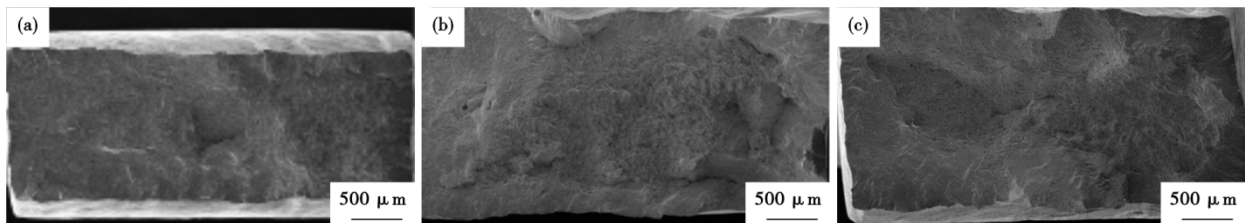


图 11 三种不同 Mn 含量合金时效态焊接接头室温拉伸断口宏观观察: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 11 Macroscopic observation of tensile fracture of aging welded joints of three Mn contents alloys at room temperature : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

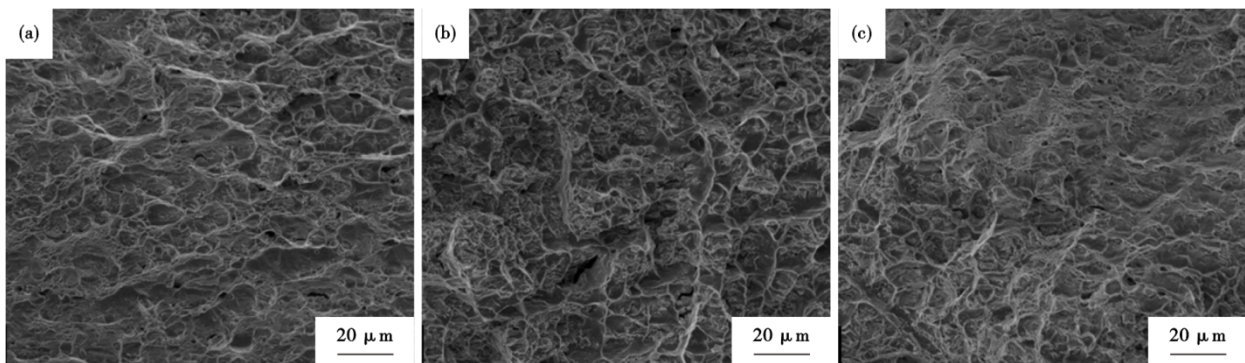


图 12 三种不同 Mn 含量合金时效态焊接接头室温拉伸断口: (a)0%Mn, (b)0.24%Mn, (c)0.34%Mn

Fig. 12 Temperature tensile fracture of aged welded joints of three Mn contents alloys : (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

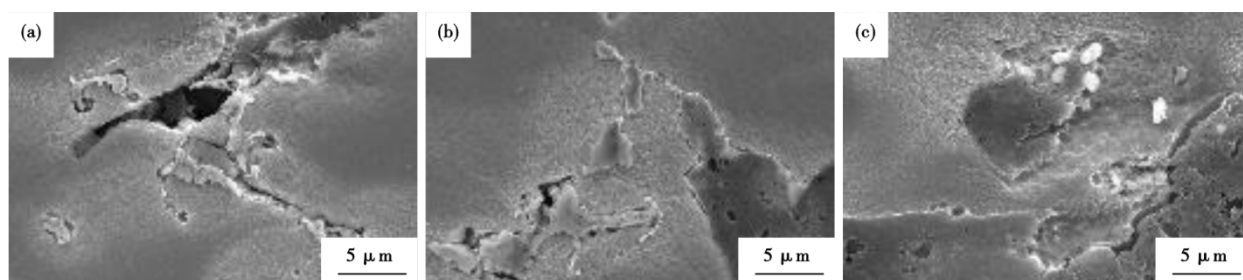


图13 三种不同Mn含量合金时效态焊接接头室温拉伸断口纵剖面:(a)0% Mn,(b)0.24% Mn,(c)0.34% Mn

Fig. 13 Longitudinal section of tensile fracture at room temperature of aged welded joints of three Mn contents alloys: (a) 0% Mn, (b) 0.24% Mn, (c) 0.34% Mn

TCP结构的脆性金属间化合物,是裂纹形核与扩展的有利通道^[30]。室温拉伸时,在纵向应力作用下,裂纹在枝晶间的Laves相和基体界面处萌生、扩大并形成孔洞。但由于 γ' 相的阻碍作用,裂纹并未沿着枝晶间扩展形成沿晶断裂,反而向枝晶内扩展形成穿晶断裂特征,如图12所示。

综上所述,随着Mn的增加,三种合金的焊接接头经过双级热时效处理后,拉伸性能略有降低,但焊接接头强度系数K均可达到90%以上。三种不同Mn含量合金的焊接接头时效态拉伸样品断裂位置皆为焊缝区域,且均为韧性断裂特征。

3 结论

通过对 $w[\text{Mn}] < 0.01\%$ 、0.24%、0.34%三种不同合金的固溶态Inconel718合金热轧板材焊接、双级热时效处理后进行室温拉伸实验,得出以下结论。

(1)Inconel718铸锭组织中析出相主要为Laves

相和 δ 相。随着 $w[\text{Mn}]$ 由 $< 0.01\%$ 提升至0.34%,铸锭组织变得更为细小,组织中的Laves相和 δ 相数量未明显改变。经过高温均匀化处理、锻造、热轧及固溶处理后,三种合金热轧组织中均未发现Laves相及 δ 相,只在等轴晶粒内发现少量块状的碳氮化合物。

(2)三种不同Mn含量合金焊接接头原始组织中只有Laves相析出,未发现 δ 相析出。经过双级热时效处理后, γ' 相开始在焊接接头组织中析出,Laves相含量略有减少。随着Mn含量的增加,焊接接头原始组织和时效组织中的Laves相数量略有增加。

(3)随 $w[\text{Mn}]$ 由 $< 0.01\%$ 提升至0.34%,时效态母材和焊接接头室温抗拉强度降低。与母材力学性能相比,双级热时效处理后焊接接头拉伸强度和伸长率降低。三种不同Mn含量合金的焊接接头时效态拉伸样品断裂位置皆为焊缝区域,且均为韧性断裂。

参考文献

- [1] 郭建亭. 高温合金材料学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 711.
- [2] Loria E. Superalloy 718: Metallurgy and Applications: Proceedings of the International Symposium [C]. Pittsburgh, PA, 1989.
- [3] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 439-456.
- [4] 田洪志, 郭昌华. 核电用GH4169合金冷加工成型工艺研究[J]. 发电设备, 2011, 25(6): 419-420+436.
- [5] Sencer B H, Bond G M, Garner F A, et al. Correlation of radiation-induced changes in mechanical properties and microstructural development of Alloy 718 irradiated with mixed spectra of high-energy protons and spallation neutrons[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 296(1-3): 145-154.
- [6] Leonard K J, Gussev M N, Stevens J N, et al. Analysis of stress corrosion cracking in alloy 718 following commercial reactor exposure[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 466: 443-459.
- [7] 李 晴, 李成龙, 钟裕国, 等. 固溶温度对UNS N07718合金组织及冲击性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 78-82.
- [8] Deleume J, Cloué J M, Andrieu E. Influence of δ phase precipitation on the stress corrosion cracking resistance of alloy 718 in PWR primary water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 382(1): 70-75.
- [9] Sivaprasad K, Ganesh Sundara Raman S. Influence of weld cooling rate on microstructure and mechanical properties of alloy 718 weldments[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(9): 2115-2127.
- [10] 郭占英, 刘拥军, 方海鹏. 热处理对GH4169激光焊接头组织性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(2): 60-66.
- [11] 盛钟琦, 李卫军, 王丛林, 等. 固溶处理时Inconel 718焊接试样中铌的扩散[J]. 核动力工程, 2003, 24(3): 241-244.
- [12] Richards N L, Chaturvedi M C. Effect of minor elements on weldability of nickel base superalloys[J]. International Materials Re-

views, 2000, 45(3): 109-129.

[13] Holt R T. Trace elements and residual elements in superalloys, Report LTR-ST-1471 for AGARD Structures and Materials Panel Fall 1983 Meeting in Lisbon, Portugal, 1983.

[14] Chen C, Thompson R G, Davis D W. A study of effects on phosphorus, sulfur, boron and carbon on laves and carbide formation in alloy 718 [C]. Superalloys 718, 625 and Various Derivatives (1991). 1991TMS.

[15] 莫燕, 王东哲, 蒋斌, 等. 钒微合金化对 718 合金中铌元素偏析行为的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(4): 37-41.

[16] 白亚冠, 李红梅, 韩秀栋, 等. GH4169 合金 δ 相析出与溶解行为研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 21-25.

[17] Sullivan C P, DONACHIE JR M J. Microstructures and mechanical properties of iron-base (-containing) superalloys [J]. Metals Eng. Quart., 1971, 11(4): 1-11.

[18] Yao X Y, Liu F, Yang S L, et al. Effect of cobalt on the precipitation of Laves, γ' and γ'' phases in a 718 base alloy with 1.2wt. % Al [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4427-4436.

[19] Dubiel B, Kruk A, Stepniowska E, et al. TEM, HRTEM, electron holography and electron tomography studies of gamma' and gamma'' nanoparticles in Inconel 718 superalloy [J]. Journal of Microscopy, 2009, 236(2): 149-157.

[20] Sundararaman M, Mukhopadhyay P, Banerjee S. Deformation behaviour of γ'' strengthened inconel 718 [J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(4): 847-864.

[21] 吴艳阳, 程世长, 刘正东, 等. 固溶温度对改型 Inconel 718 合金组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2007, 28(3): 19-21.

[22] Manikandan S G K, Sivakumar D, Kamaraj M, et al. Laves phase control in inconel 718 weldments [J]. Materials Science Forum, 2012, 710: 614-619.

[23] Woo I, Nishimoto K, Tanaka K, et al. Effect of homogenisation heat treatment on heat affected zone cracking susceptibility. Study of weldability of Inconel 718 cast alloy (3rd Report) [J]. Welding International, 2000, 14(7): 523-532.

[24] 杨彦莉. 镍基高温合金 K418 和 K4169 组织与夹杂物的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.

[25] 郭建亭. 铝和钛对一种 35 镍 15 铬型铁基高温合金组织结构和力学性能的影响[J]. 金属学报, 1978, 14(3): 227-238+323-324.

[26] Huang W P, Yang J J, Yang H H, et al. Heat treatment of Inconel 718 produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 750: 98-107.

[27] 魏翔云, 杨奇斌. Mn 和 Si 对一种 Fe-Ni 基高温合金持久缺口敏感性的影响 [J]. 金属学报, 1984, 20(4): 261-265+386-387.

[28] Muralidharan B G, Shankar V, Gill T. Weldability of Inconel 718-a review [J]. India, 1996.

[29] 郭建亭. 高温合金材料学-中册-制备工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 184.

[30] Mei Y P, Liu Y C, Liu C X, et al. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718 [J]. Materials & Design, 2016, 89: 964-977.

版权声明

根据《中华人民共和国著作权法》，作者向《特殊钢》编辑部投稿（或接受约稿），全体作者同意，上述提交本刊发表的作品一经本刊录用，作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权，在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬，若编辑部再以其他形式在任何地点出版该论文，将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品，未曾发表；不涉及侵权和泄密问题；保证论文没有一稿多投；保证论文的署名权无争议，若发生问题，一切责任由作者承担，文责自负。

如有异议，请在投稿前说明，本刊即时处理。