

# Inconel601 镍基高温合金焊接工艺研究

程 龙, 孟庆海, 白晓琳, 邱 宇

(沈阳东方钛业股份有限公司, 沈阳 110168)

**摘 要:** 为了研究 Inconel601 镍基高温合金焊接工艺, 基于材料的化学成分、力学性能、冶金性能等特性, 选用 ERNiCrCoMo-1 焊材作为填充金属, 通过控制热输入调整焊接参数, 对 Inconel601 进行了焊接试验, 并对焊接接头开展力学性能检测、腐蚀试验及金相分析。结果表明, 通过控制热输入获得较大的冷却速度, 并且在合金元素冶金作用下, 熔敷金属获得良好的抗裂性, 焊缝无结晶裂纹的产生, 且焊缝成型美观; 焊接接头具备优异的力学性能及良好的耐蚀性能。

**关键词:** 镍基合金; Inconel601; 焊接工艺; ERNiCrCoMo-1

**中图分类号:** TG444.74

**文献标识码:** B

**DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.07.007

## Study of Welding Process on Inconel601 Nickel-based Superalloys

CHENG Long, MENG Qinghai, BAI Xiaolin, QIU Yu

(Shenyang Dongfang Titanium Industry Co., Ltd., Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In order to study the welding process of nickel-based superalloy Inconel601, ERNiCrCoMo-1 welding material was selected as the filler metal based on the chemical composition, mechanical properties, metallurgical properties and other properties of the material. Adjust welding parameters by controlling heat input, the welding test of Inconel601 was conducted. The mechanical properties, corrosion test and metallographic analysis of welded joints were carried out. The results show that greater cooling speed is achieved by controlling the heat input, and the deposited metal has good crack resistance under the action of alloying element metallurgy, and the weld has no crystal crack, and the weld has good formation. The welded joint has excellent mechanical properties and good corrosion resistance.

**Key words:** nickel-based alloys; Inconel601; welding process; ERNiCrCoMo-1

## 0 前 言

Inconel601 作为 Huntington Alloy 公司于 20 世纪 70 年代开发的固溶强化镍基高温合金, 具有较强的抗强氧化介质腐蚀及优良的高温强度, 被广泛的应用于石油化工, 航空航天, 环保发电等领域<sup>[1-2]</sup>。优良的抗高温氧化性、高温力学性能等使得 Inconel601 在石化行业备受青睐, 在脂肪酸加工领域的蒸馏器、冷凝器、加热器等上得到了有效的应用<sup>[3]</sup>。但由于镍基合金存在导热性及流动性差等缺点, 且 Inconel601 合金中加入了

各种固溶强化元素<sup>[4]</sup>, 使得其焊接过程中容易出现焊接裂纹、组织偏析等缺陷。又因 Ni 与 S、P、N、O 等极易形成低熔点共晶物, 焊缝极易产生热裂纹, 且 Inconel601 合金中含有 Ti、Nb、Al 等变质剂作用的元素, 这些元素使焊接难度进一步增大。焊接接头作为高温耐蚀合金最薄弱的环节, 在高温服役过程中, 如受到腐蚀破坏, 导致设备失效, 会造成不可估量的损失<sup>[5]</sup>。因此研究 Inconel601 合金的焊接工艺, 保证焊接接头的各项性能指标, 对耐热、耐蚀设备的制造及使用具有重要意义。

## 1 焊接工艺与方法

### 1.1 焊材材料的选择

Inconel601 高温合金的化学成分见表 1, 固溶

退火状态下的力学性能见表 2。基于 Inconel601 合金的化学成分、力学性能及材料本身的焊接特性, 应选择含碳量低、杂质元素低、Fe 元素含量稍低且固溶强化元素稍高的焊接材料进行焊接。

表 1 Inconel601 高温合金材料的化学成分

项目	化学成分/%								
	w(Ni)	w(Cr)	w(S)	w(Mn)	w(Al)	w(C)	w(Cu)	w(Si)	w(Fe)
实测值	60.4	23.0	0.002	0.5	1.4	0.05	0.01	0.3	13.6
标准值	58.0~63.0	21.0~25.0	≤0.015	≤1.5	1.0~1.7	≤0.10	≤1.0	≤0.5	余量

表 2 Inconel601 高温合金材料的力学性能

项目	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
实测值	644	261	57
标准值	≥550	≥205	≥30

此前选择 ERNiCrFe-11 作为填充焊丝, 易产生结晶裂纹。焊丝 ERNiCrFe-11 与 ERNiCrCoMo-1 的化学成分对比见表 3。以图 1<sup>[6]</sup>作为参考指南评估结晶裂纹的敏感性, 随着  $Cr_{eq}$  的增加, 材料对结晶裂纹变得不敏感,  $Cr_{eq}$  的增加能够有效阻止结晶裂纹的产生。由于结晶时 Cr、Mo 等元素不断向晶间聚集, 会使焊缝的耐腐蚀能力下降。ERNiCrCoMo-1 中不仅因 Mo 的增加, 提高了铬当量 ( $Cr_{eq}$ ), 而且因添加了更

多的 Co、Mo、Al、Ti 等固溶强化元素, 在抑制低熔点共晶物形成、提高共晶温度的同时, 形成  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相及  $\gamma'$  相来改善强度<sup>[7]</sup>。ERNiCrCoMo-1 中 Mo 元素的低扩散性, 对提高焊缝的蠕变强度有一定得作用, 同时镍基合金中加入 Mo 元素, 能够有效的改善其塑性, 镍铬合金中加入 6%~12% 的 Mo 元素, 会使合金具有优异的高温力学性能和耐蚀性能<sup>[8]</sup>。ERNiCrCoMo-1 作为填充金属, 具有更高的抗裂性<sup>[9]</sup>。查阅焊材材质单, ERNiCrCoMo-1 熔敷金属的力学性能见表 4, 综合考量, Inconel601 合金选用强度高于母材的 ERNiCrCoMo-1 焊材作为焊接的填充金属。

表 3 ERNiCrFe-11 与 ERNiCrCoMo-1 焊材的化学成分

焊材	化学成分/%												
	w(C)	w(Mn)	w(Fe)	w(P)	w(S)	w(Si)	w(Cu)	w(Ni)	w(Co)	w(Al)	w(Ti)	w(Cr)	w(Mo)
ERNiCrFe-11	0.1	1.0	余量	0.03	0.015	0.5	1.0	58.0~63.0	-	1.0~1.7	-	21.0~25.0	-
ERNiCrCoMo-1	0.05~0.15	1.0	3.0	0.03	0.015	1.0	0.50	余量	10.0~15.0	0.8~1.5	0.06	20.0~24.0	8.0~10.0

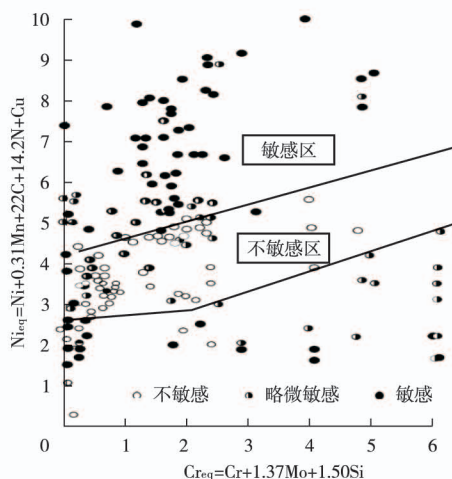


图 1 基于材料成分的凝固裂纹敏感性

表 4 ERNiCrCoMo-1 熔敷金属的力学性能

$R_m$ /MPa(ksi)	$R_{p0.2}$ /MPa(ksi)	A/%
737(107)	517(75)	40

### 1.2 焊接试件的制备

由于镍基合金热导率比较低, 因此熔敷金属的流动性和润湿性均较差。在此条件下, 焊缝熔深较浅, 焊缝根部不易焊透, 故可以通过增大坡口角度和减小钝边的方式实现焊缝的熔透。将 300 mm×150 mm×8 mm 的 Inconel601 合金试件, 加工成 70°坡口, 并按图 2 所示形式组对焊接。



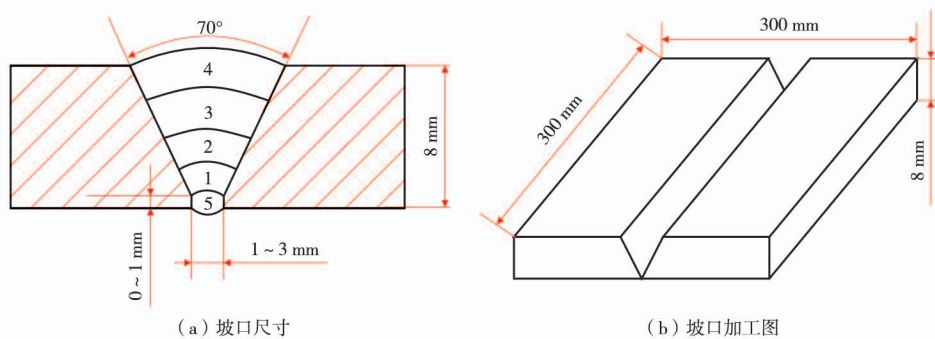


图 2 焊接坡口尺寸及加工示意图

1.3 焊接工艺的选择

Inconel601 合金中合金元素较多，不合适的焊接工艺及焊接参数会导致焊缝形成结晶裂纹。虽然其熔敷金属流动性较差，但绝不能通过增大热输入的方式来增加熔深，如盲目增大热输入，不仅不能够增加熔深，反而会在焊缝处产生微裂纹，降低设备的使用寿命<sup>[10]</sup>。根据公式  $L=\frac{\Delta T\eta VI}{2\pi K(T_L-T_0)}$  可知，同一块试件，相

同焊接条件下凝固温度范围  $\Delta T$ 、热源传递效率  $\eta$ 、热传导系数  $K$ 、初始温度  $T_0$ 、液相线温度  $T_L$  均是一定的，而糊状区的长度  $L$  仅与电压  $V$ 、电流  $I$  有关。减少热输入可以减小结晶时糊状区的长度，进而避免结晶裂纹的产生。因此，应在保证焊缝成形的条件下，尽量采用小的热输入进行焊接。通过试验，选择最优焊接参数，见表 5。根据焊接参数可计算出焊接最大热输入  $Q_{\max}=0.957\text{ kJ/mm}$ 。

表 5 焊接工艺参数

焊接层数	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	保护气体	气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )	
					正面	背面
1	115	11	100~120	99.99%Ar	13	20
2	130	12	100~120	99.99%Ar	13	20
3	130	12	100~120	99.99%Ar	13	20
4	135	13	110~130	99.99%Ar	13	20
5	100	10	100~120	99.99%Ar	13	20

Inconel601 合金的焊接极易产生凝固裂纹，因此需要严格对坡口边缘与焊材进行清理，清除焊材及坡口边缘至少 50 mm 范围内的污染物，避免污染物中的有害元素进入焊缝熔池，形成低熔点共晶物，产生热裂纹。同时还需要清除坡口边缘及焊材上的氧化膜，因氧化膜的熔点高于焊缝金属的熔点，未熔化的氧化膜进入熔池，极易产生焊缝内部缺陷。焊接采用摆动的方式，增加熔池的流动性和润湿性，可以有效的解决熔敷金属流动性差造成的坡口边缘未熔合缺陷<sup>[11]</sup>。

裂纹、气孔等缺陷。

2.2 力学性能试验

制备两组横向拉伸试样，如图 3 所示。按照 GB/T 228.1—2010 进行拉伸试验，拉伸试验结果见表 6。通过数据，可以看出焊缝部位有高于母材的抗拉强度，且试样有良好的室温延性。试件断后伸长率略低于母材，从试件的外观也可以



图 3 Inconel601 镍基高温合金拉伸试样

表 6 Inconel601 镍基高温合金焊接接头拉伸试验结果

试样编号	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	断裂位置
1	656	274	51	46.5	母材
2	644	268	48	41.7	母材

2 性能检测与讨论

2.1 无损检测

使用 XXG-3005 充气式 X 射线探伤仪对焊接试板进行 100%射线检测，检测结果焊缝中无

看出,母材的缩颈明显大于焊缝处,故焊缝处的塑性略低于母材。

制备 Inconel601 镍基高温合金弯曲试样,通过对焊缝正面及背面按照 GB/T 2653—2008 进行弯曲,验证焊缝及热影响区的塑性指标、接头的致密性及连续性,试验结果如图 4 所示,对试样进行 180°弯曲试验,弯心直径为 4 倍试样厚度。弯曲后,试样焊缝及热影响区表面光滑,未出现裂纹、开口等缺陷,说明焊缝的强度虽略高于母材,但焊缝及热影响区仍能保持优异的塑性指标。



图4 Inconel601 镍基高温合金弯曲试样

对力学性能试验结果进行分析,抗拉强度略有上升,塑性指标略有下降,是因为焊材中添加了 Co, Mo 等元素,增加了焊缝金属的强度,同时对其热强性也有所提升,正是因为两种元素的增加,降低了有色金属的塑性和延性,宏观表现为拉伸试验使焊缝处的收缩率低于母材。但通过弯曲试验发现,降低的塑性,对材料的使用并没有产生较大的影响,仍然能在要求的弯曲条件下,保持材料的完整性,从而保证了焊缝在弯曲或成型的过程中,依旧保持优异的性能。

### 2.3 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀是镍基合金在服役过程中出现失效的一个重要因素<sup>[2]</sup>。晶间腐蚀是基于晶界与晶粒耐腐蚀性的差异,依据贫铬理论,晶间因  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  的析出而产生“贫铬区”,腐蚀从“贫铬区”开始逐步向金属内部扩展,破坏晶体结构,使材料的力学性能大大下降,并最终使设备失效。根据晶间腐蚀

机理,可以通过测量试样在腐蚀条件下的失重来判断其耐晶间腐蚀能力。

按照 GB/T 15260—2016 A 法制作腐蚀试样,使用硫酸-硫酸铁试剂对 30 mm×20 mm×2 mm 试样进行微沸 24 h 为 1 周期的晶间腐蚀敏感性试验,共进行 5 个周期。腐蚀后宏观试样如图 5 所示,试验结果见表 7。



图5 Inconel601 镍基高温合金腐蚀后宏观试样

表7 Inconel601 镍基高温合金晶间腐蚀试验结果

试样编号	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )					均值
	周期 1	周期 2	周期 3	周期 4	周期 5	
1	0.298	0.286	0.258	0.263	0.274	0.275 8
2	0.287	0.288	0.264	0.255	0.267	0.272 2

根据试验结果,可以看出焊接接头保持着非常好的耐晶间腐蚀性能,这是由于焊接过程使用了较小的热输入,焊缝结晶时冷却速度较快,过冷度增大。焊缝结晶时形核速度增加,使焊缝金属形成细小的晶粒。同时在经历材料敏化区的过程中,由于焊材中增加的 Ti 的稳定化作用,可以优先与碳结合,形成  $\text{TiC}$ ,从而阻止了 Cr、Mo 等元素形成碳化物,所以焊缝中很少析出铬、钼的碳化物,又因焊材中增加了 Mo 的含量,提高了铬当量,弥补了因形成  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型碳化物损失的 Cr 元素,避免产生贫铬区,提高耐晶间腐蚀能力。

### 2.4 金相分析

使用金相显微镜观察 Inconel601 镍基高温合金焊接试件的微观组织如图 7 所示。焊缝为柱状

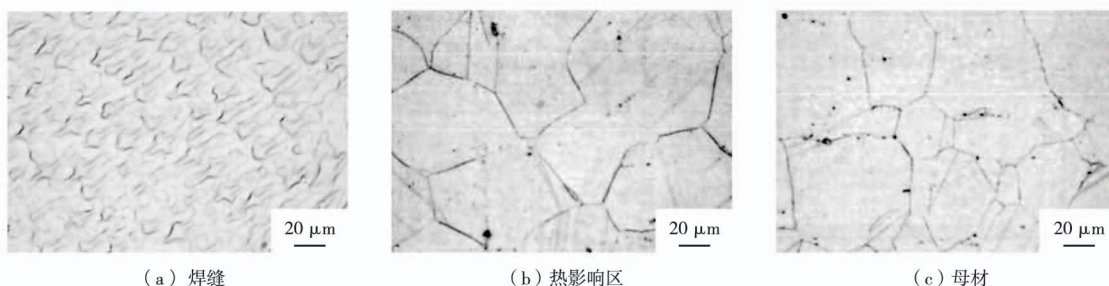


图7 Inconel601 镍基高温合金焊接接头微观组织



晶的单相奥氏体组织,与热影响区、母材相比,焊缝晶粒较为细小,且没有连续的沉淀物,无明显碳化物、中间相等组织。通过对焊缝的观察,未发现气孔、夹渣、裂纹等缺陷。

### 3 结 论

(1) 使用 ERNiCrCoMo -1 焊材焊接 Inconel601 高温镍基合金,焊缝及热影响区的抗拉强度及塑性均能得到良好的保证,且有优异的抗结晶裂纹能力,能够有效的避免结晶裂纹的产生。

(2) 使用较小的热输入焊接 Inconel601 合金,同时因焊材中固溶强化元素的加入,提高了焊缝的耐晶间腐蚀能力。

### 参考文献:

- [1] DAS N. Advances in nickel-based cast superalloys [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63 (2/3): 265-274.
- [2] KWIECIEN M, MAJTAJ, DZIEDZIC D. Shear deformation and failure of explosive welded Inconel-microalloyed steels bimetal [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(1): 22-39.
- [3] 乐精华, 盖广平, 裴耀贵. 英康乃尔和英康洛依合金及

其应用[J]. 阀门, 2008(4): 21-24.

- [4] BUSCAL H, PERRIER S, JOSSE C. Oxidation mechanism of the Inconel 601 alloy at high temperature [J]. Foundry Technology, 2010, 31(7): 906-909.
- [5] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [6] KARJALAINEN L P, KUJANPAV P, SUUTALA N. Hot cracking in iron base alloys: effect of solidification mode [J]. Advances in Welding Science and Technology, 1986: 145-149.
- [7] 张勇. 镍基材料焊接技术研究及应用[J]. 炼油与化工, 2015(5): 51-54.
- [8] 陆世英, 康喜范. 镍基及铁镍基耐蚀合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [9] LIPPOLD J C, SOWARD J, ALEXANDROW B T, et al. Hot cracking phenomena in welds II [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [10] HENDERON M B, ARRELL D, LARSSON R, et al. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine application [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(1): 12-21.
- [11] 裴德年. 进口 Ni200 纯镍管道的焊接及质量控制[J]. 化工管理, 2014(12): 190-193.
- [12] 于晓飞. 304、316 不锈钢晶间腐蚀的试验与理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

作者简介: 程 龙 (1992—), 工程师, 大学本科, 主要从事有色金属焊接工艺与研究。

收稿日期: 2022-01-12

修改返回日期: 2022-03-20

编辑: 罗 刚

(上接第 36 页)

- [6] 王芳层, 贾吉冉, 杨成永, 等. 水力振荡器的研制与应用[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(7): 83-85.
- [7] 黄崇君, 谢意, 刘伟, 等. 水力振荡器在川渝地区水平井的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(2): 101-102, 116.
- [8] 赵润琦. 射流式脉冲短节设计及测试研究[J]. 钻采工艺, 2021, 44(6): 97-101.
- [9] 聂云飞, 朱渊, 范萧, 等. 自激式涡流控制水力振荡器研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 74-79.
- [10] 李博, 王羽曦, 孙则鑫, 等.  $\Phi 178$  型水力振荡器研制与应用[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(8): 55-57.
- [11] 田家林, 李友, 杨志, 等. 水力振荡器振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(5): 690-696.
- [12] 冯超, 徐华静, 黄剑, 等. 涡轮式水力振荡器结构参数优化及流体仿真[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9):

3525-3531.

- [13] 王建龙, 叶顺友, 张洪虎, 等. 水力振荡器损坏形式与判断方法研究[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(11): 73-74, 78.
- [14] 叶枫, 陈旺湘, 胡志豪, 等. 发动机连杆螺栓断裂失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2021(4): 77-80.
- [15] 宋张康. 科威特油田钻具失效原因分析及预防[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(12): 16-19.

作者简介: 乔凌云 (1970—), 女, 高级工程师, 长期从事金属材料微观组织研究和石油管材失效分析工作。

收稿日期: 2022-02-15

修改返回日期: 2022-03-24

编辑: 黄蔚莉