

Inconel625 合金 TIG 焊接头组织及力学性能

王泽明, 陶海燕, 唐 彬, 樊宝全, 俞德怀, 王世忠

(中国核动力研究设计院 反应堆燃料及材料重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 采用 TIG 焊, 通过改变焊接工艺参数, 对厚 6 mm 的 Inconel625 合金板材进行施焊。利用光学显微镜观察焊接接头显微组织, 万能试验机测定焊接接头力学性能。结果表明: 焊缝区为典型铸态组织, 中间有少量等轴晶, 在等轴晶的两侧为柱状晶区, 热影响区组织未发生晶粒粗大现象, 焊接接头的抗拉强度与母材的抗拉强度相当。

关键词: Inconel625; TIG; 接头组织; 力学性能

中图分类号: TG407

文献标志码: B

0 前言

Inconel625 合金是一种 Ni-Cr 固溶强化合金, 具有优异的疲劳强度、腐蚀性能以及抗氯离子应力腐蚀开裂和高温起皮、氧化等能力, 主要用于燃气涡轮发动机和管道输送、核动力设备和核反应堆构件以及宇航等部件装置的研制。

目前, 根据我国受控核聚变研究的发展需要, 中国环流器二号 A 装置 (HL-2A) 将改造升级为 HL-2M 装置^[1], 而真空室模块的设计、研制便是其

中最为关键的环节之一。真空室模块主体研制采用 Inconel625 合金 TIG 焊接而成, 因此针对性开展 Inconel625 合金的 TIG 焊研究对于真空室模块的工程化研制具有重要的学术意义和实用价值。

1 试验材料和方法

1.1 焊接材料

试验材料选用厚度 6 mm 的 Inconel625 合金板材, 填充材料选用 $\phi 1.6$ mm 的 ERNiCrMo-3 焊丝。母材及焊丝的化学成分见表 1。

表 1 母材及焊丝的化学成分 (质量分数) (%)

合金类别	C	S	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Ti	Nb	Fe	P	Al
Inconel625	0.02	<0.001	21.5	61.23	0.04	0.20	8.5	0.20	3.32	4.6	0.005	0.16
ERNiCrMo-3	0.03	0.01	22.0	61.60	0.30	0.40	8.70	0.03	3.75	3.0	0.01	0.10

焊前采用机械清理和化学清理相结合的方法对 Inconel625 合金板材和 ERNiCrMo-3 焊丝进行清理。首先选用合适的细砂纸对板材和焊丝进行打磨, 以去除氧化皮。然后采用纯丙酮超声清洗的方法对待焊试件进行清洗 60 min, 经清水和去离子水冲洗干净后放入烘箱中进行烘干待焊。

1.2 焊接方法

工艺试验采用 TIG 焊, 坡口形式如图 1 所示。由于 Inconel625 合金焊接时不得采用较大的热输入, 以

避免焊缝热影响区产生一定程度的退火和晶粒长大, 同时避免产生过度偏析、碳化物沉淀或其他有害的冶金现象^[2]。加上镍基合金焊缝金属流动性稍差, 因此在焊接工艺参数设计时, 初步采取在保持焊缝金属流动性的基础上稍微增大焊接速度的原则, 将热输入有效降低, 从而一定程度上保证镍基合金焊缝的耐腐蚀性。具体施焊的工艺参数见表 2。

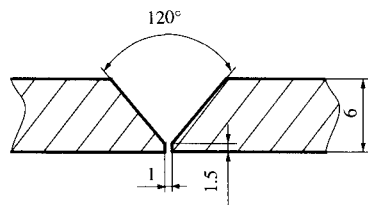


图 1 平板对接示意图

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: 中国核动力研究设计院2011年院青年基金资助项目

(JJXM-QNJ-11-11-04)

表2 焊接工艺参数

焊接方式	焊接顺序	电弧电压/V	焊接电流/A	焊速/(mm·s ⁻¹)
3层焊	盖面焊	11.7~12.5	120~130	2~2.5
	填充焊		120~130	
	打底焊		110~115	

采用 $\varphi(\text{Ar})99.9\%$ 作为 Inconel625 合金 TIG 焊时的保护气体。同时,为保证打底焊时焊缝双面成形,在焊接试板的背面长通 Ar 气。打底焊接前,首先将背面保护气体提前通入 3~5 min,将背面密封腔内的空气全部排出后进行打底焊接。焊接时保护气体的流量为 15 L/min 左右。

另外,为保证焊接试板组装精度,有效减小焊接过程带来的试板变形,采用专用的平板对接焊工装夹具辅助施焊。工装夹具的设计示意图如图 2 所示。

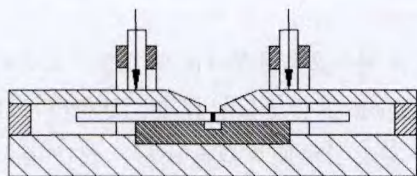


图2 工装夹具设计示意图

焊接试验中采用水冷式氩弧焊焊枪,钨极选用铈钨极,其规格为 $\phi 2.0\text{ mm}$,焊接过程中,保持钨极圆锥角为 $30^\circ\sim 60^\circ$,尖端磨平,直径约 0.4 mm ,电流种类与极性采用直流正接。

1.3 试验设备

试验设备采用国产 YC-400TX 氩弧焊机进行 TIG 焊接试验,其最大输出电流 400 A ,脉冲频率 $0.2\sim 300\text{ Hz}$,占空比 $5\%\sim 90\%$ 。在 MM6 金相显微镜上进行显微组织观察分析,在 DDL300 型万能试验机上对试件进行力学性能测试。

2 试验结果

2.1 外观检查

从焊后试板的焊缝正面成形图(图3)可以看出,焊缝表面成形良好,并未出现明显的表面气孔、裂纹、夹渣以及咬边等现象。同样,通过图4所示的焊缝背面成形可以看出,焊缝背面成形良好,达到了单面焊双面成形的效果。

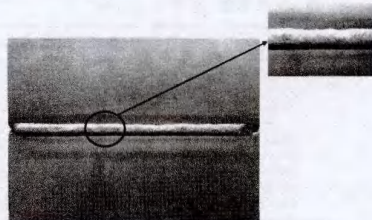


图3 焊缝正面成形

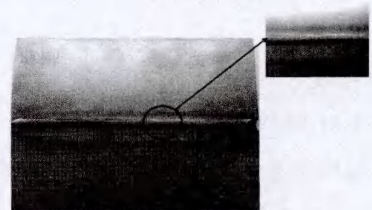


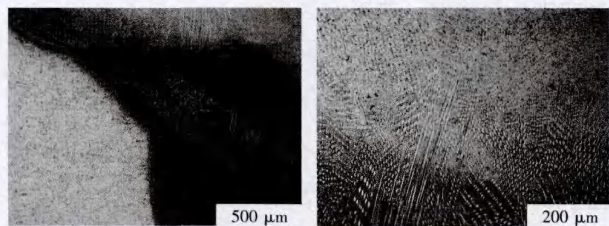
图4 焊缝背面成形

2.2 无损探伤

按照 JB/T 4730.2—2005《承压设备无损探伤检测 第一部分 射线检测》对焊接试板进行 X 射线探伤发现,焊缝中未出现裂纹、气孔以及夹渣等缺陷,X 射线探伤结果合格,符合 I 级焊缝要求。

2.3 金相分析

对焊接接头进行机械抛光和腐蚀成相后进行显微组织观察。经观察,焊缝为多层焊,焊缝质量好,未发现明显的焊接缺陷,如图5所示。



(a) 左侧母材及热影响区

(b) 焊缝

(c) 右侧母材及热影响区

图5 焊接接头金相组织

2.4 拉伸试验

按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》沿垂直于焊缝的方向进行取样,并在 DDL300 型万能试验机上对试件进行室温下的力学性能测试,测试结果见表3。

表3 焊接接头拉伸试验结果

试样编号	R_m /MPa	母材 R_m /MPa	断裂位置
LS-1-1	761	762	焊缝
LS-1-2	767		接近焊缝
LS-1-3	764		焊缝
LS-2-1	767		接近焊缝
LS-2-2	767		接近焊缝
LS-2-3	766		接近焊缝

3 结果分析与讨论

3.1 焊接接头组织分析

从焊缝金相照片可看出,焊缝为多层焊,共3层。母材组织以细小等轴晶为基体,由于Inconel625在进行冶炼时加入了Nb, Mo, Ti等元素进行合金化处理,因此在母材的基体上弥散分布有少量的金属间化合物(图5a, c)。另外,焊缝与母材之间的热影响区存在组织或晶粒增大的趋势,甚至热影响区都不明显。分析认为,这主要是由于镍基合金的导热性差,从焊缝到母材的温度梯度很大,温度下降的速度很快。另外该种材料在真空室模块中的工作温度不高于500℃,但镍基高温合金晶粒长大的下限温度高(>750℃)。基于上述原因,Inconel625合金在进行焊接时,热影响区很小。

从图5b可看出,焊缝区是典型的铸态组织,焊缝中心处为细小等轴晶,向外延伸为胞状晶,随后在等轴晶的两侧形成枝晶生长方向非常显著的柱状晶组织。根据熔池内柱状晶的生长形态可以推断^[3],结晶初始阶段焊缝熔池边缘的温度梯度较大,但由于结晶速度缓慢,导致成分过冷较小,焊接熔池内的晶粒以胞状晶的形式长大。但随着晶粒向焊缝中心的生长,温度梯度逐渐减小,结晶速度逐渐增大,成分过冷区也逐渐增大,枝晶生长的速度加快,结晶的形式将由胞状晶向树枝晶转变。当进入到焊缝熔池的凝固后期时,由于焊缝中心处温度梯度最小,而成分过冷最大,熔池中产生的新核将以等轴晶的形式长大,从而形成了图5b所示的焊缝熔池金属凝固组织形态。

3.2 焊接接头断裂分析

焊接接头拉伸试样室温下的抗拉强度均在

761~767 MPa之间,接头抗拉强度大致与母材一致,断裂位置基本上都在接近焊缝或焊缝处。经分析,可能存在两方面原因:一是由于镍基合金的导热性较差,导致焊缝的冷却速度较慢,加上焊缝冷却时过冷度较小,焊缝的晶粒容易粗大,从图5也可以看出,焊缝区的枝晶与母材的等轴晶相比粗大很多;另一方面,柱状晶的枝晶间分布着第二相质点,同时很多杂质元素也容易在枝晶间聚集,容易导致枝晶与枝晶、枝晶臂与枝晶臂之间残余液相的熔池堆积现象,这将造成焊缝中存在严重的晶界偏析^[4]。因此综合认为,以上这些因素是最终导致焊缝区及近焊缝区成为整个接头最为薄弱的环节。

4 结论

(1) 采用本文叙述的TIG焊焊接工艺参数进行6 mm厚Inconel625合金板材焊接,可获得良好的焊缝成形,并实现了单面焊双面成形,焊接接头室温抗拉强度与母材的保持一致。

(2) 焊接接头焊缝区为典型铸态组织,焊缝中心处为细小等轴晶,向外延伸为胞状晶,随后在等轴晶的两侧形成枝晶生长方向非常显著的柱状晶组织,热影响区组织未发生晶粒粗大现象。

(3) 焊缝区晶粒粗大及晶界偏析是造成拉伸试样断裂于焊缝的主要原因。因此,选取合适的热输入,避免焊缝区晶粒粗大和晶界偏析是获得良好综合性能接头的重要条件。

参考文献:

- [1] 蔡立君,刘德权,冉红,等.等离子体破裂时HL-2M真空室的结构应力分析[J].核聚变与等离子体物理,2011,31(2): 127-132.
- [2] 焊接手册编辑委员会.焊接手册:第2卷 材料的焊接[M].3版.北京:机械工业出版社,2008:900.
- [3] 马瑞,董志波,魏艳红,等.镍基合金焊缝凝固组织演变过程模拟和仿真[J].焊接学报,2010,31(7):43-46.
- [4] 董志波,马瑞,王勇,等.镍基合金焊接熔池凝固组织模拟[J].焊接学报,2010,31(10):27-30.