

核电用316L不锈钢中厚板焊接工艺研究

熊操¹, 吴智¹, 黄上甫¹, 周鹏¹, 钟亚奇², 童立里¹

1. 武汉重型机床集团有限公司 湖北武汉 430205

2. 中国科学技术大学 安徽合肥 230026

摘要: 某核电真空室项目主要采用316L不锈钢材料制造, 根据零件结构特点, 制造过程存在大量要求单面焊双面成形的焊缝, 且所有焊缝均要求全熔透, 同时焊缝磁导率 $\leq 1.03\text{H/m}$, 整体轮廓度 $\pm 3\text{mm}$, 制造难度非常大。基于上述情况, 决定进行专项科研立项攻关和研究, 最终决定采用激光焊(打底)+TIG焊(填充)的焊接方法, 采取理论分析与试验相结合的方式。通过对厚度为40mm中厚板进行相应的焊接工艺研究, 确保焊接方法和工艺完全满足实际工程设备的需要, 为项目的推进做好充分准备。

关键词: 核电; 316L; 中厚板; 激光焊; TIG焊; 焊接工艺

Research on the welding process of 316L stainless steel medium thick plate for nuclear power

XIONG Cao¹, WU Zhi¹, HUANG Shangfu¹, ZHOU Peng¹, ZHONG Yaqi², TONG Lili¹

1. Wuhan Heavy Duty Machine Tool Group Corporation, Wuhan 430205, Hubei, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract: A nuclear power vacuum chamber project is mainly made of 316L stainless steel material. According to the structural characteristics of the project parts. The manufacturing process of the project involves a large number of welds that require single-sided welding and double-sided formation, and all welds require full penetration and the weld permeability is less than or equal to 1.03H/m , and the overall contour is $\pm 3\text{mm}$, so the manufacturing is very difficult. Based on the above situation, decided to carry out special scientific research projects and research, and finally decided to adopt the laser welding (base)+TIG welding (filling) welding method, adopt the combination of theoretical analysis and test. By conducting the corresponding welding process research on the 40mm medium thick plate, ensure that the welding method and process fully meet the needs of the actual engineering equipment, and make full preparations for the promotion of the project.

Keywords: nuclear power; 316L; medium and thick plate; laser welding; TIG welding; welding process

1 序言

武汉重型机床集团有限公司承接的某核电真空室项目(见图1), 承载着包层、偏滤器等

内部部件, 主要功能是为等离子体提供高质量的真空环境, 同时也是装置重要的安全屏障, 属于装置的核心部件。其中PS2段总体尺寸为

第一作者: 熊操, 高级工程师, 硕士, 主要从事焊接、加工工艺研究, E-mail: Xiongcao2005@126.com。

通信作者: 吴智, 焊接工程师, 主要从事焊接工艺研究, E-mail: 490361633@qq.com。

4.0m×3.9m×1.9m，整体轮廓度要求±3mm以内，主要采用核电316L不锈钢材料制造，该材料在常规316L不锈钢的基础上增加了项目的特定技术要求。根据零件结构特点，项目制造过程存在大量的单面坡口焊缝，需单面焊双面成形并控制焊接变形，且所有焊缝均要求全熔透，同时焊缝磁导率≤1.03H/m，制



图1 真空室示意

造要求非常高，难度非常大。

2 核电316L不锈钢性能指标

2.1 化学成分和力学性能

核电316L不锈钢钢板化学成分、力学性能分别见表1、表2。

2.2 其他性能要求

(1) 微观组织

1) 铁素体含量。铁素体含量检测参考标准 RCC-MR—2007《核装置机械部件设计和建造规则》中 RMC1340章节进行，要求最终固溶态板材铁素体含量（体积分数）<0.5%

2) 晶粒度。参考标准 ASTM E112—2024《平均晶粒度的测试方法》评定晶粒度，晶粒尺寸应在±1等效晶粒数的范围内，均匀分布在真实平均值附近，晶粒度验收标准见表3。

表1 核电316L不锈钢钢板化学成分（质量分数） (%)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	N	P	S	B	Cu	Co	Nb	Ta	Ti
≤0.03	≤2.00	≤0.75	16.00～18.00	2.00～3.00	10.00～14.00	≤0.10	≤0.025	≤0.010	≤0.0010	≤0.30	≤0.05	≤0.02	≤0.01	≤0.10

表2 核电316L不锈钢钢板力学性能测试项目和指标

测试项目		指标	测试项目		指标
室温拉伸试验	R_m /MPa	>525	250℃拉伸试验	R_m /MPa	>415
	$R_{p0.2}$ /MPa	>220		$R_{p0.2}$ /MPa	>135
	A (%)	>45		A (%)	—
150℃拉伸试验	R_m /MPa	>437	固溶态室温冲击吸收能量/J		>112
	$R_{p0.2}$ /MPa	>156	时效（750℃保温100h，空冷）后室温冲击吸收能量/J		>80
	A (%)	—	—		—

表3 晶粒度验收标准

板材厚度T/mm	$T \leq 40$	$40 < T < 60$	$T \geq 60$
晶粒度等级	≥4	≥3	>2

3) 夹杂物。夹杂物评定参考标准 ASTM E45—2023《钢中夹杂物含量的测定—标准检验法》。对于 A、B、C 和D 类型的夹杂，严重等级数最多应为2。在计算区域总面积的2%范围内，可以接受公差比设定的极限高出半级。

(2) 全厚度低倍组织 参考标准 ASTM E340—2015《金属和合金宏观浸蚀的试验方法》

制备全厚度低倍组织观察样品。如果发现任何可疑的宏观夹杂物、宏观偏析、不完全再结晶或铸造组织，则应放大至更高的倍数，以观察和确认缺陷。验收标准为在标准放大倍率下，无明显缺陷痕迹。

(3) 磁导率 磁导率测试参考标准 ASTM A342/A342M—2021《弱磁材料渗透性的标准试验方法》进行，要求固溶态板材相对磁导率<1.03H/m。

3 焊接性分析

316L不锈钢属于奥氏体不锈钢材料，这类钢焊接的主要问题是热裂纹、晶间腐蚀，此外基于其

导热系数较小、线膨胀系数较大，会导致焊接过程中在焊缝区域产生较大的焊接应力^[1]，但其碳含量非常低，属于超低碳不锈钢，这有助于提高焊接接头的抗晶间腐蚀能力，且相较于普通的304不锈钢，316L不锈钢中添加的Mo元素使其具有更好的抗腐蚀性能。综合来看，316L不锈钢具有良好的塑性和焊接性。

核电用316L不锈钢相较于普通316L不锈钢，在化学成分、力学性能、铁素体含量、磁导率等方面均有所区别，因此额外增加了一些真空室项目特定的技术要求。为确保在焊接过程中获得符合项目要求的焊缝接头，同时控制焊接变形，需要采取适当的焊接方式和工艺措施，如合适的焊接材料、焊接参数及焊接方法等，以满足实际工程设备的需要，为项目的推进做好充分准备，确保其在实际应用中的可靠性。

4 焊接工艺的确定

(1) 焊接方法 目前，武汉重型机床集团有限公司用到的焊接方法主要有氩弧焊、气体保护焊、焊条电弧焊和激光焊等^[2]。奥氏体不锈钢焊接过程中防止晶间腐蚀的有效措施是采用热量集中的焊接方式，焊接过程中使接头快速冷却，保证其在450~850℃温度区间的时间缩短^[3]。而且本项目的产品结构存在如下特征：焊件几何形状和尺寸均较大，整体轮廓度±3mm；焊件厚度较为集中，主要以40mm为主，存在大量的单面坡口焊缝，焊缝均要求满足各项性能要求，因此选用的焊接方法必须能够达到上述项目要求。综合考虑后决定采用激光焊打底、TIG焊填充盖面的复合焊接方式。

(2) 焊接材料 焊接材料的选择应根据母材的化学成分、力学性能、焊接性能要求并结合产品的结构特点、使用条件、焊接方法及生产成本等因素，综合考虑焊接材料的选用，使其与钢板的要求相适应，并通过焊接工艺评定试验的测试结果进行对比后确定。根据以往类似不锈钢项目焊接经验，并结合项目周期进度等相关因素，采用伯乐ER317L.mod焊丝进行焊接工艺试验研究^[4]，焊丝化学成分见表4。其中，标准采用AWS A5.9/A5.9M—2017《焊接材料—不锈钢和耐热钢电弧焊丝、焊带、焊丝和填充丝-分类》。

表4 伯乐ER317L.mod焊丝化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
标准值	≤0.03	0.3~0.65	1.0~2.5	≤0.03	≤0.03	18.5~20.5	3.0~4.0
材质证明书	<0.01	0.5	5.1	0.008	0.011	18.7	4.1
元素	Ni	Cu	N	Co	Nb	Ti	Ta
标准值	13~15	≤0.075	—	—	—	—	—
材质证明书	16.8	0.1	0.16	—	—	—	—

(3) 焊后热处理 本项目工件对清洁度要求很高，零件属于双层壳体结构，夹层尺寸仅30mm，热处理后零件表面会存在氧化等情况，夹层无法清理，因此焊接完成后无法进行去应力退火处理。

根据项目质量控制要求，首先进行了焊丝选型验证，对焊丝性能进行检测，确保焊丝各项性能指标满足项目技术要求，然后依据相关标准要求分别进行激光焊和TIG焊焊接工艺评定。

5 焊态TIG焊丝的焊接试验

(1) 带垫板单面对接焊 采用核电316L不锈钢板，按尺寸采用水刀切割下料，准备2组试板（试板长度500mm）和垫板，试板和垫板材质保持一致，使用伯乐ER317L.mod的φ2.4mm直条TIG焊焊丝，选择标准规定的坡口接头形式进行熔覆金属试验，试板尺寸及接头形式如图2所示，焊接参数见表5。焊后取样进行化学成分复验，以及常温拉伸、高温拉伸、冲击、铁素体、磁导率、晶间腐蚀的相关试验^[5]。

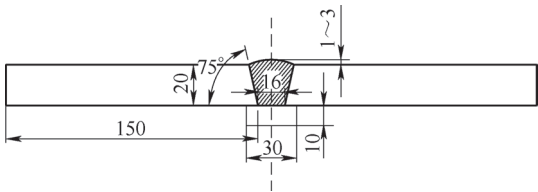


图2 带垫板单面对接焊试板尺寸及接头形式

表5 带垫板单面对接焊焊接参数

焊道	焊接电流 /A	电弧电压 /V	保护气体	气体流量 / (L/min)	层间温度 /℃
打底	130~150	14~19	99.99%Ar	12~16	—
填充	140~180	14~19	99.99%Ar	12~16	≤100
盖面	130~150	14~19	99.99%Ar	12~16	≤100

5) 熔覆金属化学成分复验试样取自常温拉伸试验延伸部分或断裂部分, 同样除了复验材质证明书中10项元素外, 另外还需复验微量元素 (B、Co、Nb、Ti、Ta) 的成分。

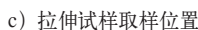


表7 焊丝焊接试验检测结果

焊丝批号	焊丝型号	化学元素	冲击吸收能量/J	全焊缝常温拉伸性能	晶间腐蚀	铁素体	360℃高温拉伸性能	磁导率H/m
104805	ER317L.mod φ 2.4mm × 1000mm	S、P、Co、Nb、Ta、Ti含量均不超过钢板要求	161 162 157	$R_m = 639\text{MPa}$ $R_{p0.2} = 482\text{MPa}$ $A = 39\%$	无晶间腐蚀迹象	0	$R_m = 547\text{MPa}$ $R_{p0.2} = 379\text{MPa}$ $A = 33.5\%$ $Z = 66\%$	1.005 1.004 1.004 1.004

接工艺评定试验—第1部分：钢的弧焊和气焊、镍及镍合金的弧焊》要求，可采用激光自熔焊和TIG焊分别进行焊接工艺试验，选用316L不锈钢板，每组焊接工艺评定的试验要求见表8。

表8 焊接工艺评定的试验要求

序号	试板编号	焊接方法	母材厚度/mm	坡口	焊接位置	焊评标准
1	pWPS-PS2-1	激光自熔焊	20	I形对接单面焊	PA	RCC-MR—2007 ISO 15614-1：2017
2	pWPS-PS2-2	TIG	40	单J形对接单面焊双面成形，背面保护	PF	

按照预焊接工艺规程（pWPS）采用316L不锈钢板，水刀切割下料，准备2组试板（试板尺寸600mm × 150mm）。

第一组：采用20mm厚不锈钢板下料，采用激光自熔焊、不填丝的方式焊接，采用专用铆装平台，铆装间隙<0.5mm；第二组：采用TIG焊，全部采用TIG焊方式焊接，使用伯乐ER317L.mod的φ 2.4mm直条TIG焊焊丝，按要求分别制作2组焊接工艺评定试板（见图4）。

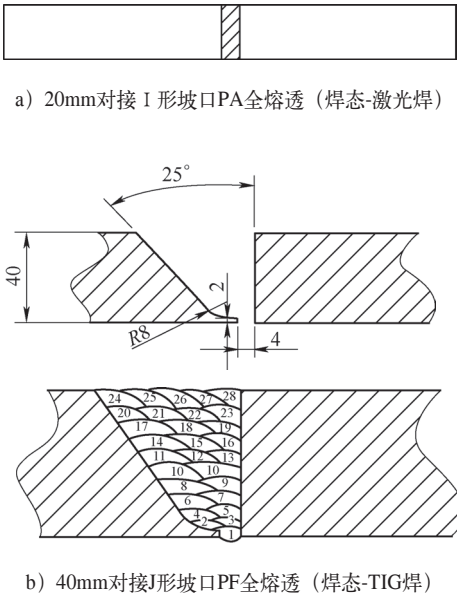


图4 激光焊和TIG焊试板

2组试板焊接全部邀请第三方SGS进行全过程见

证，其中TIG焊由厂内焊工根据pWPS完成焊接，1组激光焊焊接工艺评定由外委厂家完成焊接。具体焊接过程如图5所示。



图5 焊接过程

试板焊接完成后，委托第三方SGS对焊缝进行无损检测、性能检测，主要检测的内容和合格指标如下。

1) VT：检测标准为ISO 17637：2016《焊缝无损检测-熔化焊接头目视检测》，验收标准为ISO 5817：2014《焊接-钢、镍、钛及其合金的熔化焊接

头-缺欠的质量等级》（B级）。

2) RT：检测标准为ISO 17636-1：2013《焊缝无损检测-射线检测 第1部分 带胶片的 X 射线和 γ 射线技术》，验收标准为ISO 10675-1：2021《焊缝的无损检验-射线检测验收等级 第1部分 钢、镍、钛及其合金》（1级）。

3) PT：检测标准为ISO 3452-1：2021《无损检测-渗透检测 第1部分：通则》，验收标准为ISO 23277：2015（2级）《焊缝的无损检测-渗透检测验收等级》。

4) 拉伸：检测标准按照RCC-MR 2007中RS3230章节要求执行，合格指标：常温下的抗拉强度>525MPa、屈服强度>220MPa、伸长率>45%、断后收缩率如实记录。

5) 侧弯：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：不存在>3mm的缺陷。

6) 冲击：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：常温冲击吸收能量≥60J。

7) 低倍晶相：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：无缺陷。

8) 焊缝磁导率：检测标准为ASTM A342/A342M—2021，合格指标：≤1.05H/m。

9) 焊缝铁素体：检测标准按照RCC-MR—2007

中RMC1342章节要求执行，具体有2种检测方法：根据化学成分，结合修正后的舍弗勒相图，评估铁素体含量，要求<0.5%；同时按照ASTM A800/A800M—2010《奥氏体合金钢铸件中铁素体含量的估算》要求进行磁性法测量铁素体含量，要求<0.5%。

10) 焊缝化学成分：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：其中S、P、Co、Nb、Ta、Ti需严格满足钢板技术要求，其余成分尽量靠近。

11) 晶间腐蚀：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：无晶间腐蚀迹象。

12) 高温横向拉伸：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：360℃拉伸时屈服强度>130MPa，抗拉强度、伸长率和断后收缩率等如实记录。

13) 高温纵向拉伸：检测标准按照RCC-MR—2007中RS3230章节要求执行，合格指标：350℃拉伸时屈服强度>130MPa，抗拉强度、伸长率和断后收缩率等如实记录。

6.2 焊接工艺试验结果

委托第三方进行检测，各项无损检测和性能检测结果全部合格，焊接工艺评定试样性能检测结果见表9。

表9 焊接工艺评定试样性能检测结果

编号	常温冲击吸收能量		抗拉强度 /MPa	180° 侧弯	宏观金相	晶间 腐蚀	铁素 体	350℃纵向拉伸	360℃横向拉伸	磁导率 / (H/m)							
	位置	数值/J															
pWPS- PS2-01	焊缝	257、253、 299	602、601 断在母材	4件合格	合格	—	0	—	—	1.006							
	热影响区	3件均>300								1.006							
										1.005							
										1.005							
pWPS- PS2-02	焊缝表面	185、175、 217	650、650 断在母材	4件合格	合格	合格	0	$R_m=476\text{MPa}$ $R_{p0.2}=365\text{MPa}$ $A=27\%$ $Z=60\%$	$R_m=503\text{MPa}$ $R_{p0.2}=371\text{MPa}$ $A=22\%$ $Z=61\%$	1.005							
	热影响区 表面	218、240、 209								1.006							
	焊缝1/2深度	179、192、 173								1.006							
	热影响区表面1/2深度	199、211、 218								1.007							

7 研究成果

通过以上一系列焊接工艺试验，可得出以下结论。

伯乐ER317L.mod的 ϕ 2.4mm直条TIG焊焊丝完全能满足项目要求，可以应用在后期真空室项目生产制作过程中。

TIG焊接工艺评定和激光焊焊接工艺评定全部符合项目要求，可以应用在真空室项目的生产制作过程中。

根据上述焊接工艺试验结果，针对该真空室项目制定了焊接工艺规程，具体焊接参数见表10、表11。

表10 TIG焊焊接参数

焊层 焊道	焊接 方法	填充材料		保护 气体	焊接电流		电弧电压 /V	焊接速度 / (mm/s)
		型号	直径/mm		极性	大小/VA		
打底	TIG焊	伯乐ER317L.mod	2.4	99.99%Ar	DCEN	100~130	10~15	1~3
填充						140~180	15~20	2~4
盖面						100~130	10~15	1~3

表11 激光自熔焊焊接参数

焊道	激光功率 /W	焊接速度 / (mm/s)	光束入射角 / (°)	保护气嘴位置	正面保护气体		背面保护气体	
					种类	流量 / (L/min)	种类	压力 / bar
定位焊道	5000	40	3 (与焊接面法向所呈夹角)	旁轴保护 (45° 保护焊接熔池)	99.99%Ar	25	99.99%Ar	0.25
焊接焊道	21500	25						

注：1bar = 10⁵Pa。

8 结束语

316L不锈钢虽然具有较好的焊接性能，但基于其自身的材料特性，焊接过程中的变形控制难度很大，这给大型不锈钢结构件的生产造成了一定的困难。尽管激光焊对于接头尺寸精度要求很高，难以适应多样化的焊接位置，且可焊接厚度受到功率限制，但激光焊能量集中，焊接过程中变形小。因此，在特定情况下，采用激光焊与其他方式配合，可以在变形控制方面起到很好的作用。本项目焊接工艺研究采用激光焊+TIG焊的方式，通过工艺控制措施，可确保焊缝性能满足相关工程产品的要求。

参考文献：

[1] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
[2] 田金华，刘伟，吴智，等. 316LN奥氏体不锈钢超

低温结构件热丝TIG焊工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2020（3）：49-51.
[3] 傅积和，孙玉林. 焊接数据资料手册[M]. 北京：机械工业出版社，1994.
[4] 徐祥久，孙伟，黄超. 316L奥氏体不锈钢厚板焊接工艺及接头性能研究[J]. 锅炉制造，2015（3）：45-47，57.
[5] 闫国华，李东，俞照辉，等. 核级316LN不锈钢激光填丝堆焊技术研究[J]. 焊接技术，2015，44（8）：33-37.
[6] 法国核岛设备设计建造规则协会会员. 压水堆核岛机械设备设计和建造规则：RCC-MR 2007[S]. 法国：法国标准化协会（AFNOR），2007.

MW 20240927