

超低温容器焊接用MAG焊丝工艺评定

富泉¹, 王梗蕊¹, 毕沿苹², 王国佛², 刘满雨², 李丹晖², 徐亦楠²

1. 武汉重型机床集团有限公司 湖北武汉 430000

2. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司 黑龙江哈尔滨 150060

摘要: 针对某大型低温容器焊接接头去应力热处理后 -196°C 冲击吸收能量 $\geq 60\text{J}$ 的要求, 对国产ER316LMnG焊丝和进口ER317Lmod焊丝进行焊接工艺评定试验。结果表明: 焊接接头拉伸性能、 -196°C 低温冲击性能、弯曲性能和晶间腐蚀性能均符合技术要求, 其中 -196°C 冲击吸收能量能够稳定在90J以上。由此可知, 以上2种焊丝均可用于304LN奥氏体不锈钢材质超低温容器的焊接。

关键词: 304LN; 低温冲击; 低温容器; 焊丝; 熔化极气体保护焊

Procedure qualification of MAG welding wires for ultra-low temperature vessel welding

FU Quan¹, WANG Gengrui¹, BI Yanping², WANG Guofu², LIU Manyu², LI Danhui², XU Yinan²

1. Wuhan Heavy Duty Machine Tool Group Corporation, Wuhan 430000, Hubei, China

2. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150060, Heilongjiang, China

Abstract: According to the design requirements of a large cryogenic vessel, the impact absorption energy of welded joints at -196°C after stress relief heat treatment is $\geq 60\text{J}$. Through the welding process evaluation test of domestic ER316LMnG welding wire and imported ER317Lmod welding wire, the results show that the tensile properties, impact absorption energy at -196°C , bending properties and intergranular corrosion properties of the welded joints all meet the technical requirements. In particular, the impact absorption energy at -196°C can remain stable above 90J. It can be seen that, the two welding materials can be used for 304LN austenitic stainless ultra low temperature vessel welding.

Keywords: 304LN; low temperature impact; cryogenic vessel; welding wire; MAG welding

1 序言

奥氏体不锈钢在深冷低温下具有高强度和优良的低温韧性, 是制造液氮、液氢、液氮及液氧等低温液化气体用容器的主要材料。随着“双碳”目标的逐步推进, 液氢及液化天然气等清洁能源需求迅速增加, 超低温深冷容器的制造也开始备受关注。

目前, 我国设计低温压力容器时, 依据GB/T 150—2011《压力容器》规定, 要求铬镍奥氏体不锈钢焊缝金属的 -196°C 冲击吸收能量 $\geq 31\text{J}^{[1]}$, 但国

内外一些特殊用途容器或项目设计要求的焊缝金属 -196°C 冲击吸收能量远大于该数值。例如, 国内某大型低温容器设计要求焊接接头在消应力热处理后 -196°C 冲击吸收能量 $\geq 60\text{J}$, 超导聚变堆设计要求焊接接头 -196°C 冲击吸收能量 $\geq 85\text{J}$ 。通常轧制态或固溶态奥氏体不锈钢母材的低温韧性都较高, 可达200J以上, 而焊缝金属由于成分及焊接热循环等因素影响, 低温韧性远不如母材, 因此是焊接接头的薄弱环节。这就对配套焊接材料提出了更为严苛

的要求，尤其是超低温韧性。

影响低温韧性的因素有很多，如焊缝中非金属夹杂物、焊接方法、热处理状态及焊缝中铁素体含量等。其中，铁素体含量对于低温韧性的影响是最重要、也是最显著的。具有面心立方晶格结构的奥氏体不会发生低温脆性，而体心立方晶格的铁素体会发生低温脆性，通常焊缝中铁素体含量越低，焊缝低温韧性越好^[2-5]。

本文对比了ER316LMnG和ER317Lmod两种焊丝熔敷金属力学性能并进行了接头工艺评定。结果表明，以上2种焊丝与304LN奥氏体不锈钢（以下简称304LN钢）匹配的MAG焊焊缝金属满足深冷-196℃冲击吸收能量≥60J的要求。

2 焊接工艺评定试验过程

2.1 试验母材

评定试验母材为304LN钢，厚度为40mm，母材化学成分和力学性能分别见表1、表2。

表1 304LN钢母材主要化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0.017	0.37	1.7	0.003	0.025	19.2	11.1

表2 304LN钢母材力学性能

室温拉伸			-196℃ 冲击吸收能量/J
屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率（%）	
278	579	57.5	320、310、305

2.2 试验焊丝熔敷金属性能

试验焊接材料为哈尔滨威尔焊接有限责任公司推荐的国产ER316LMnG焊丝和某国外焊接材料公司推荐的ER317Lmod焊丝。采用上述2种焊接材料分别测试了熔敷金属成分和力学性能，采用Ar+（2%~3%）CO₂混合气体焊接。焊丝熔敷金属化学成分见表3，熔敷金属力学性能见表4。

两种焊丝熔敷金属主要成分为Cr19-Ni17-Mn6，属于奥氏体不锈钢，与304LN钢母材较接近。熔敷金属-196℃及3次深冷处理后低温冲击性能均>90J，满足项目指标≥60J的要求^[6]。

表3 试验焊丝熔敷金属化学成分（质量分数）（%）

焊接材料牌号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
ER316LMnG	0.039	0.53	6.23	0.002	0.016	19.55	17.62	0.023
ER317Lmod	0.037	0.46	5.63	0.008	0.011	19.53	17.9	0.06

表4 试验焊丝热处理态熔敷金属力学性能（570℃×1h）

焊接材料 牌号	室温拉伸			冲击吸收能量/J	
	屈服 强度 /MPa	抗拉 强度 /MPa	伸长率 （%）	-196℃ （深冷3次）	-196℃
ER316LMnG	401	624	44.5	105、97、95	111、99、103
ER317Lmod	421	614	45.5	107、113、111	112、116、109

2.3 304LN钢接头试验

采用熔化极气体保护焊分别焊接1块试板，试板规格为500mm×150mm×40mm，坡口形式为X形，坡口根部间隙为2mm，钝边为1.5mm，试板采用多层多道焊接，坡口形式如图1所示。主要焊接参数见表5。焊接位置为立焊，试板焊后经过UT、PT、RT无损检测合格后，统一进行570℃×1h的热处理，模拟产品消应力处理。

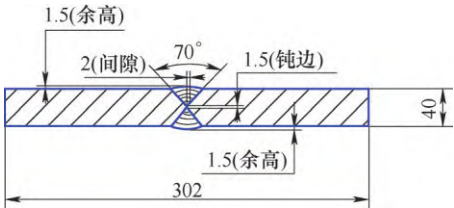


图1 对接焊坡口示意

表5 试板焊接参数

焊丝 规格 φ/mm	焊接 电流 /A	电弧 电压 /V	道间 温度 /℃	焊接 速度 /（cm/min）	保护气体
1.2	180~220	22~25	80~150	20~30	Ar+（2%~3%）CO ₂

3 试验结果及讨论

3.1 力学性能及微观组织试验结果

2块试板焊后分别依据NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分：渗透检测》、NB/T 47013.3—2023《承压设备无损检测 第3部分：超声检测》和NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第2部分：射线检测》进行了PT、UT和RT无损检测，检测结果均为I级。试板经570℃×1h热处理后按照NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》进行工艺评定。试样取样位置如图2所示。

按照GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》进行了拉伸试验、按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行了侧弯试验、按照GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行了冲击试验，按照GB/

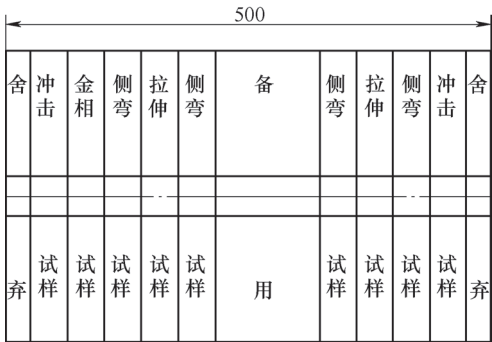


图2 试样取样位置示意

T 4334—2020《金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体-奥氏体（双相）不锈钢晶间腐蚀试验方法》E法进行晶间腐蚀性能试验。试验结果分别见表6～表8。

表6 室温拉伸和-196℃冲击试验结果

项目	室温拉伸		-196℃冲击吸收能量/J	
	抗拉强度/MPa	断裂位置	焊缝区	热影响区
国产	643、637	母材、母材	98、99、97	154、143、183
进口	627、629	母材、母材	121、119、122	165、214、216

表7 无损检测、金相及腐蚀试验结果

项目	无损检测	宏观金相	晶间腐蚀
国产	RT（1级） UT（1级）	无缺陷	1件正弯180°，1件背弯180°，均无裂纹，无晶间腐蚀倾向
进口	PT（1级）	无缺陷	

表8 横向侧弯试验结果

项目	试样厚度/mm	试样宽度/mm	弯心直径/mm	弯曲角度/（°）	结果
国产	10	40	40	180	4件完好
进口	10	40	40	180	4件完好

3.2 结果分析

2种材料焊接接头拉伸试样均断裂在母材上，拉伸试验结果满足要求。分别进行了焊缝区和热影响区-196℃低温冲击试验，国产焊丝MAG焊缝的-196℃冲击吸收能量接近100J，进口焊丝MAG焊缝的-196℃冲击吸收能量达120J左右。2种材料焊接接头热影响区-196℃低温冲击吸收能量均达150J以上，满足技术要求且裕量较大。

2种材料焊接接头分别进行了横向侧弯试验，每块试板取样4件，弯心直径为40mm，弯曲角度为180°，2组试样均无裂纹，满足技术要求。两组横向侧弯试样如图3所示。

2种材料焊接接头宏观金相分析，均未发现缺陷，且焊缝金属微观组织为γ固溶体，呈柱状晶，如图4所示。



a) 国产焊丝横向侧弯试样

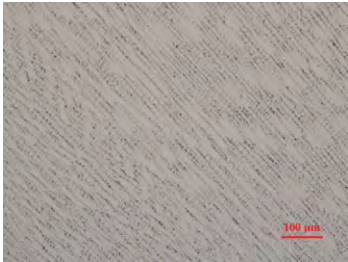


b) 进口焊丝横向侧弯试样

图3 两组横向侧弯试样



a) 国产焊丝焊缝微观组织



b) 进口焊丝焊缝微观组织

图4 两组焊缝金属微观组织

在2种材料焊接接头焊缝位置取样进行晶间腐蚀试验，经过腐蚀后1件试样正弯，1件试样背弯，均无裂纹，无晶间腐蚀倾向，如图5、图6所示

3.3 讨论

在奥氏体不锈钢中，铁素体含量过高会降低低温韧性。研究表明，增加铁素体含量可明显地降低316L熔敷金属的低温韧性^[7, 8]。当铁素体数由FN=0增加至FN=10，断裂韧度降低了50%。本文推荐的316LMnG及317Lmod焊丝熔敷金属无铁素体，因而具有较优异的深冷低温冲击韧性。



a) 正弯



b) 背弯

图5 国产焊丝焊缝晶腐试样



a) 正弯



b) 背弯

图6 进口焊丝焊缝晶腐试样

同时,此焊丝中Mn的加入有利于提高抗结晶开裂性能,从而减小了无铁素体带来的焊接热裂纹风险。一方面,Mn优先与S结合形成MnS(熔点1610℃),减小S形成低熔点共晶物的倾向,使得奥氏体-硫化物共晶温度提高;另一方面,增加固液相表面能,减小晶界低熔点共晶液膜形成的可能性,抑制了S、P的不利作用,从而降低熔敷金属结晶裂纹形成倾向。同时,Mn又是脱氧剂,可降低焊缝金属中的氧含量,减少了形成硅酸盐的条件,一般认为,在焊缝金属中加入1%的Mn就可以达到脱S的目的。有研究表明^[9, 10],炼钢过程中MnS倾向于以氧化物夹杂为核心在氧化物表面镶嵌或包裹析出。MnS具有较高的塑性,包裹在Al₂O₃等脆性夹杂物表面,降低了脆性氧化物的危害,提高了焊缝金属的低温韧性。

采用推荐的国产ER316LMnG焊丝和进口ER317Lmod焊丝分别进行了焊接工艺评定。在消应力热处理状态下进行了无损检测、拉伸性能测试、-196℃低温冲击试验、侧弯试验、金相检测和晶间腐蚀试验,试验结果均满足项目要求。国产

ER316LMnG焊丝综合性能水平达到了进口同类产品水平,且国产焊丝具有较大的成本优势。因此,国产焊丝最终成功用于此项目的制造,并替代进口焊丝。

4 结束语

1) 国产ER316LMnG和进口ER317Lmod焊丝熔敷金属均满足超低温容器低温韧性的要求。

2) 采用国产ER316LMnG和进口ER317Lmod不同品牌的焊丝,利用40mm厚304LN钢母材进行工艺评定,焊接接头拉伸性能、-196℃低温冲击性能、侧弯性能、晶间腐蚀性能均满足项目要求。

3) 国产ER316LMnG焊丝综合性能达到了进口同类产品水平,成功替代进口应用于某项目超低温容器的制造。

参考文献:

- [1] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 压力容器: GB/T 150—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [2] 孙威. 焊材冶金特性对不锈钢焊缝金属超低温韧性的影响(上) [J]. 金属加工(热加工), 2011(20): 30-31.
- [3] 孙威. 焊材冶金特性对不锈钢焊缝金属超低温韧性的影响(下) [J]. 金属加工(热加工), 2011(22): 31-35.
- [4] 张子强. 奥氏体不锈钢焊缝金属-196℃低温冲击韧性工艺性试验[J]. 真空与低温, 2000, 6(4): 241-244.
- [5] 徐立新. 奥氏体不锈钢焊缝金属深冷低温环境下的韧性试验[J]. 焊接, 2007(11): 58-60.
- [6] 李多, 任国柱, 富泉, 等. 304LN不锈钢焊件控温深冷处理工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(10): 31-35.
- [7] 孙振超, 李鹏远, 侯炳林, 等. 焊接方法对316LN奥氏体不锈钢焊缝金属低温韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 25-29.
- [8] 杨建国, 陈双建, 黄楠, 等. 304 不锈钢形变诱导马氏体相变的影响因素分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 89-92.
- [9] 郑万, 齐盼盼, 沈星, 等. 低碳低硫钢中MnS析出行为分析[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(4): 241-247.
- [10] 潘宁, 成国光. 特殊钢中硫化锰夹杂物析出行为的研究: “第六届冶金工程科学论坛”论文集[C]. 北京: 北京科技大学, 2007.