G115钢窄间隙自动氩弧焊焊接接头的组织与性能研究

张宇清[1]，蒋涛[1]，杨文佳[1]，陈正宗[2]，姜海峰[3]，赵海平[4]，马志宝[5]

1.中国能源建设集团江苏电力装备有限公司　江苏常州　213012
2.钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院　北京　100081
3.大唐郓城发电有限公司　山东菏泽　274700
4.宝武特种冶金有限公司　上海　200940
5. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院　北京　100040

摘要：采用窄间隙自动氩弧焊机焊接G115大口径厚壁管，借助金相显微镜对焊接接头的显微组织进行观察，应用拉伸、弯曲、冲击、硬度和残余应力测试等方法对接头的力学性能进行试验分析。结果表明：窄间隙氩弧焊接头显微组织均为回火马氏体，热影响区未发现显微裂纹缺陷，热影响区宽度仅为1.7mm。焊接接头强度性能良好，弯曲试验满足标准要求，冲击试验结果优良，最高硬度值249HV满足标准要求，焊接接头中残余应力的最大值位于焊缝中心，拉应力为278MPa，是母材屈服强度的52%。本研究的全位置窄间隙自动氩弧焊工艺，为G115钢的工程化应用奠定了坚实的技术基础。

关键词：G115钢；窄间隙氩弧焊；接头性能；残余应力

Research on microstructure and properties of narrow gap automatic argon arc welding joint of G115 steel

ZHANG Yuqing[1], JIANG Tao[1], YANG Wenjia[1], CHEN Zhengzong[2], JIANG Haifeng[3], ZHAO Haiping[4], MA Zhibao[5]

1.Jiangsu Power Equipment Co., Ltd., of China Energy Engineering Group, Changzhou 213012, Jiangsu, China
2. Research Institute of special Steels, China Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China
3. Datang Yuncheng Power Generation Co., Ltd., Heze 274700, Shandong, China
4. Baowu Special Metallurgical Co., Ltd., Shanghai 200940, China
5. North China Electric Power Test and Research Institute of China Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100040, China

Abstract: Narrow gap automatic argon arc welding machine is used to weld a large-diameter thick-walled G115 steel pipe. The microstructures of the welded joint is observed by optical microscope. The mechanical properties of the joint are tested and analyzed by tensile, bending, impact, hardness, and residual stress tests. The results show: The microstructure of the narrow gap argon arc welded joint is tempered martensite. There is no micro cracks in the heat-affected zone which width is only 1.7mm. The joint has good strength, with the bending test satisfied the standard requirements, excellent impact test results. Maximum hardness value is 249HV. Which satisfied the standard requirements. The maximum residual stress in the welded joint is located at the center of the weld, with a tensile stress of 278MPa, which was 52% of the yield strength of the base metal. The research of full-position narrow gap automatic argon arc welding process laid a solid technical foundation for the engineering application of G115.

Keywords: G115 steel; narrow gap argon arc welding; joint property; residual stress

1 序言

G115钢是由钢铁研究总院和宝钢共同研发的具有自主知识产权的650℃马氏体耐热钢（专利号CNl03045962B）。G115钢通过选择强韧化匹配和优化控制，添加了适量的Cu元素，促进析出强化并提高了抗蒸汽腐蚀性能，控制B-N配比，有效阻止了M23C6的快速粗化[1]，在650℃下的持久强度是P92钢的1.5倍以上[2]。高合金含量意味着更差的焊接性，对焊接热输入更为敏感，尤其是热影响区，高熔点物相形成的条带状偏析带，极易引起显微缺陷，是目前G115钢焊接棘手的技术难点[3]。

目前，国内电力行业管道焊接主要以手工方式为主，焊接质量不稳定，劳动强度大，施工环境差，效率低。伴随自动化、智能化焊接技术的转型升级，稳定焊接质量、提高焊接效率、改善劳动环境是大势所趋。窄间隙焊接因具有质量高、填充量少、接头应力小和劳动强度低等诸多优点，已被广泛用于火电管道制造及核电安装焊接中。吴闯等[4]研究了热处理对P91窄间隙TIG焊接头残余应力的改善效果；郭新芳等[5]分析了不锈钢窄间隙焊的接头组织及性能，并为三代核电机组制备了主蒸汽管道焊缝；章雅林等[6]完成了P92钢窄间隙全位置氩弧焊的国内首次工程化应用。

2019年，G115钢锅炉管已被设计选用为世界第一台630℃超超临界燃煤示范电站支撑性主体材料。本文将窄间隙自动氩弧焊技术应用于G115钢，通过力学性能、金相组织和残余应力测试等方法，为G115钢工程化焊接应用提供了可靠的技术支撑。

2 试验材料和方法

采用G115钢作为试验母材，规格为ϕ530mm×120mm，用光谱分析仪检测了G115钢管道化学成分，结果见表1。母材的抗拉强度为695MPa、屈服强度为535MPa，冲击吸收能量为98J，均满足T/CISA 003—2017《电站用马氏体耐热钢08Cr9W3Co3VNbCuBN（G115）无缝钢管》的要求。G115钢母材金相组织如图1所示。由图1可知，母材金相组织主要为回火马氏体。母材坡口形式如图2所示。

表1 G115钢管道化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.064	0.16	0.50	0.009	0.005	8.50	0.07	0.03
Al	Cu	Co	Nb	V	W	Fe	—
0.002	0.65	3.12	0.08	0.18	2.61	83.7	—

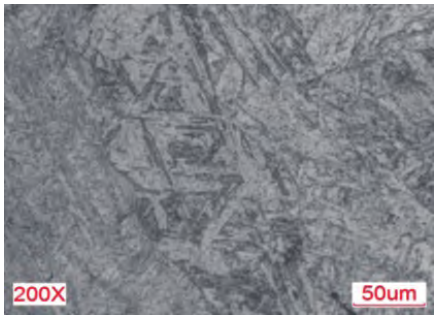


图1 G115钢母材金相组织（200×）

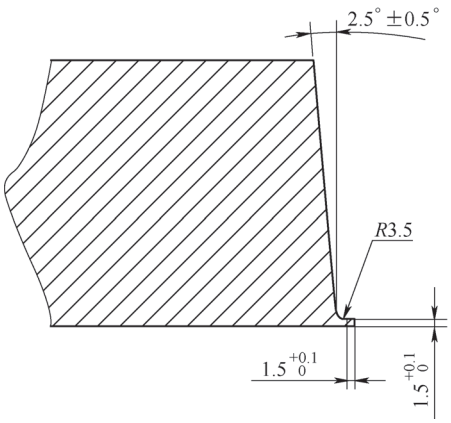


图2 G115钢母材坡口形式

氩弧焊使用直径为1.2mm的实心焊丝，其牌号为XY-TG93。采用光谱分析仪检测焊丝化学成分，结果见表2。

表2 XY-TG93焊丝化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.07	0.35	0.9	0.006	0.005	8.88	0.08	0.03
Al	Cu	Co	Nb	V	W	Fe	—
0.002	0.01	2.80	0.05	0.20	2.83	83.7	—

采用国产的自动窄间隙氩弧焊机，5G位置焊接，钨极型号为CW-20，直径2.4mm。焊接预热温度≥150℃，采用氩气保护，氩气纯度≥99.99%，保护气体流量为15～25L/min，根部保护气体流量为20～30L/min。焊接层间温度保持在200～250℃，焊接参数见表3。G115钢窄间隙自动焊接现场如图3所示。使用石棉保温布包裹在焊缝两侧，维持层间温度。图4所示为焊接过程中填充焊道的表面形貌。

焊接完成后，进行马氏体稳定化，在80～100℃保温1h后，立即进行后热，温度为350℃，保温时间2～4h。消氢完成后进行焊后热处理，保温

温度为765～775℃，保温时间8h，升温速率和降温速率均按照60℃/h控制，300℃以下不控制升温和降温速率。焊后热处理完成后，依据NB/T 47013.3—2023《承压设备无损检测 第3部分：超声检测》进行检测，结果为I级焊缝。

表3 窄间隙自动氩弧焊焊接参数

焊层	焊接基值电流/A	焊接峰值电流/A	电弧电压/V	送丝速度/（cm/min）	焊接速度/（mm/min）
打底	100～150	170～190	8.5～10.5	60～70	85～100
填充	150～230	230～280	9.0～12.5	60～110	60～85
盖面	200～230	250～260	10.5～12.5	90～100	60～70

图3 焊接现场

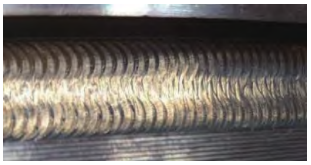


图4 填充焊道表面形貌

3 试验结果及分析

3.1 拉伸试验

依据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分：室温试验方法》进行拉伸试验。采用万能试验机对接头的横向板状拉伸试样进行试验，ST1、ZT1和XT1试样分别为第1组的上、中、下3层，ST2、ZT2和XT2试样分别为第2组的上、中、下3层。拉伸试验结果见表4。

表4 拉伸试验结果

试样编号	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	断裂位置
ST1	23	716	母材
ST2		709	母材
ZT1		706	母材
ZT2		701	母材
XT1		697	母材
XT2		690	母材

进行拉伸试验时，母材位置出现明显的塑性变形，最终断裂于母材，观察发现断口截面缩小，出现颈缩现象，呈现典型的韧性断裂特征。通过表4可知，接头的抗拉强度均大于母材抗拉强度下限660MPa，说明焊缝强度高于母材，焊接接头强度性能良好。

3.2 弯曲试验

按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行弯曲试验，采用180°的全壁厚侧弯来测定焊接接头的完好性和塑性，试验结果见表5。图5所示为侧弯试样拉伸面形貌，发现焊缝区域有裂纹，这是由于焊道狭窄，存在氩气对熔池出现保护不良的情况，导致焊缝位置出现气孔。经过测量，最大裂纹长度为2mm，不超过3mm，满足NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》的要求。熔合线区域未发现裂纹、未熔合等内部缺欠，说明坡口角度合理，熔敷金属与母材熔合良好。

表5 侧弯试验结果

试样编号	试验温度/℃	弯曲压头直径/mm	弯曲角/（°）	结果评定
S_1	23	40	180	2mm裂纹1个 0.5mm裂纹2个
S_2		40	180	完好
S_3		40	180	完好
S_4		40	180	完好

图5 全壁厚侧弯试样S_1

3.3 冲击试验

按照GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》进行冲击试验，冲击V型缺口位置分别位于外表面、1/2壁厚位置和内表面的各自焊缝中心、熔合线外1mm和熔合线外4mm。冲击试验结果见表6。由表6可知，焊缝中心冲击吸收能量为78～163J，熔合线外1mm冲击吸收能量为142～224J，熔合线外4mm冲击吸收能量为153～204J，所有试验结果均远高于T/CISA 003—2017要求的最低纵向冲击吸收能量40J。

表6　冲击试验结果

V型缺口位置	试样规格/mm	试验温度/℃	冲击吸收能量KV_2/J	
			实测值	平均值
外表面焊缝中心	55×10×10	23	118、163、136	139
外表面熔合线外1mm			171、175、213	186.3
外表面熔合线外4mm			182、161、153	165.3
1/2壁厚焊缝中心			160、130、123	137.6
1/2壁厚熔合线外1mm			142、147、173	154
1/2壁厚熔合线外4mm			155、204、160	173
内表面焊缝中心			154、131、78	121
内表面熔合线外1mm			196、224、191	203.6
内表面熔合线外4mm			202、191、154	182.3

3.4　硬度试验

按照GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》进行硬度试验，采用维氏硬度计，施加98N的载荷，加载时间10s。对焊接接头截面的外表面以下2mm、1/2壁厚处和内表面以上2mm处进行标线测定，依次检测两侧母材、焊缝、两侧热影响区的硬度，每个区域测试3个点，结果取平均值，焊接接头不同位置的硬度分布如图6所示。由图6可知，焊接接头不同位置的硬度值均满足195～265HV的标准要求，最高硬度值为249HV，位于内表面根部焊缝位置。

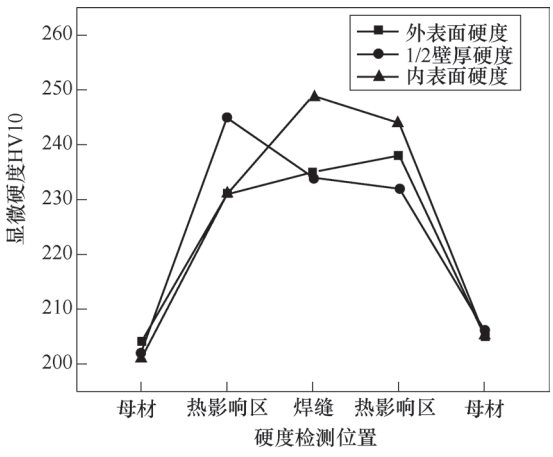


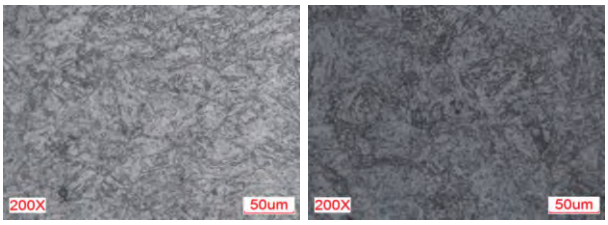
图6　接头硬度分布

3.5　宏观金相和显微组织

图7所示为焊接接头的宏观金相。由图7可发现，焊道间排布分明，焊缝和母材熔合良好，焊接接头成形良好。焊缝中心存在个别气孔，为个别层道位置窄间隙坡口氩气保护不良所致。

图8所示为焊缝与热影响区显微组织。由图8可知，焊缝、热影响区均有明显的马氏体板条形态特征，热影响区未发现显微裂纹缺陷。图9所示为焊接接头的显微组织，因为窄间隙氩弧焊的焊接热输入小，所以热影响区狭窄，测量后宽度约为1.7mm，极大地减少了G115钢接头在此区域塑韧性的降低，防止G115钢焊接热影响区出现显微裂纹，避免热影响区成为焊接接头的薄弱地带。

图7　焊接接头宏观金相



a）焊缝　　b）热影响区

图8　焊缝与热影响区显微组织

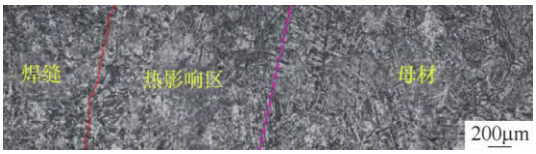
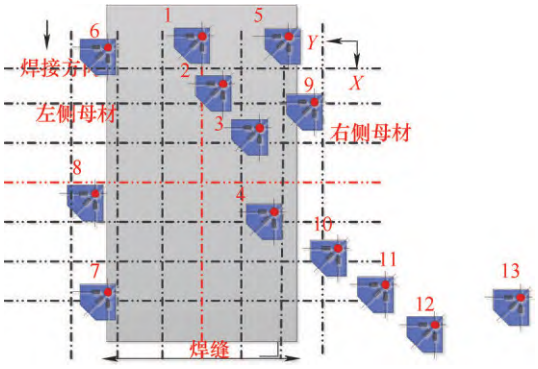


图9　接头显微组织

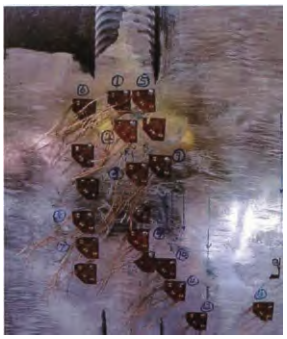
3.6　残余应力试验

按照GB/T 31310—2014《金属材料　残余应力测定　钻孔应变法》对焊态接头进行残余应力测试。图10a、b所示分别为焊接接头的应力测试点位置及应变花固定位置，采用手电钻将型号为BE120-2CA-K的专用应变花固定于测点位置，选用JM3818A无线型静态电阻应变仪测量测试点应变，最后通过应变值计算得到残余应力分布。

焊接接头的残余应力计算结果见表7，图11所示为依据表7绘制的接头最大主应力分布，其中最大主应力为正时代表拉应力，为负时代表压应力。由图11可知，焊缝区为拉应力，焊缝中心的拉应力最高，约278MPa，在距熔合线约2mm以外的位置转变为压应力，最大压应力约69MPa。试验用G115钢母



a）应力测试点位置



b）应变花固定位置

图10　接头残余应力试验测试位置分布

材的屈服强度为535MPa，因此整体接头的最大残余应力约为母材强度的52%。

表7　接头残余应力计算结果　(MPa)

位置编号	位置描述	最大主应力
1	距右侧熔合线13mm（焊缝中心）	277.86
2	距右侧熔合线10mm	260.43
3	距右侧熔合线 5mm	232.12
4	距右侧熔合线3mm	223.78
5	距右侧熔合线 1mm	247.70
6	左侧熔合线	242.83
7	左侧熔合线	252.18
8	距左侧熔合线1mm	59.32
9	距右侧熔合线3mm	－68.56
10	距右侧熔合线5mm	－64.25
11	距右侧熔合线10mm	－61.30
12	距右侧熔合线20mm	－50.93
13	距右侧熔合线50mm	－24.61

4　结束语

采用窄间隙自动氩弧焊对G115钢进行焊接试验，从力学性能、金相组织、残余应力等方面测试分析，得出如下结论。

1）窄间自动隙氩弧焊接头组织均为回火马氏体，热影响区未发现显微裂纹缺陷，最大影响区宽

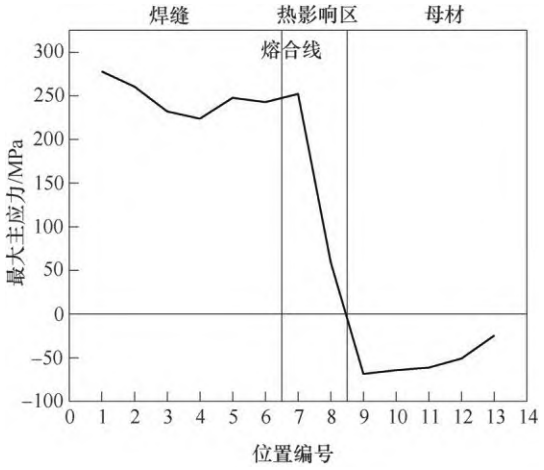


图11　最大主应力分布

度约为1.7mm。

2）焊接接头强度性能良好，弯曲试验满足标准要求，冲击试验结果优良，最高硬度值249HV出现于根部焊缝位置，焊接接头中残余应力的最大值位于焊缝中心，拉应力为278MPa，是母材屈服强度的52%。

3）本文研究的G115钢全位置窄间隙自动氩弧焊工艺，填补了该项技术在G115钢焊接应用的空白，为G115钢的工程化应用奠定了坚实的技术基础，为实现电站建设焊接自动化创造了更可靠、更具操作性的条件。

参考文献：

[1] 刘正东，陈正宗，何西扣，等. 630～700℃超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报，2020，56（4）：539-548.

[2] 白银，陈正宗，刘正东，等. 蒸汽温度对G115钢氧化行为的影响[J]. 钢铁研究学报，2020，32（1）：52-59.

[3] 孙晓翔. G115马氏体耐热钢焊接热影响区微观组织及Ⅳ型蠕变裂纹敏感性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.

[4] 吴闯，贺海波，席晋辉，等. 热处理对P91钢管道窄间隙全位置TIG自动焊接头残余应力的影响[J]. 金属加工（热加工），2021（6）：64-67.

[5] 郭新芳，孙斌，张汝潺，等. 核电机组不锈钢锻管窄间隙焊接头组织与性能研究[J]. 热加工工艺，2019，48（23）：147-150.

[6] 章雅林，李再金，高超，等. P92钢管道安装焊接接头的窄间隙全位置自动焊[J]. 金属加工（热加工），2023（4）：21-24.

MW 20240614