铸造超级双相不锈钢5A焊接性能研究

栾天红[1]，宁尚锋[1]，张磊磊[2]，任振伟[2]，寇成[2]，韩亚斌[2]

1.大连苏尔寿泵及压缩机有限公司　辽宁大连　116000

2.中船双瑞（洛阳）特种装备股份有限公司　河南洛阳　471000

摘要：结合母材与焊接材料化学成分、焊接参数控制，通过对Cr25系列铸造超级双相不锈钢5A（UNS J93404）焊接接头的微观组织、相比例、力学性能及腐蚀性能等进行研究。结果表明：想控制母材相比例，获得优异的焊接接头，不仅需要控制母材的Si含量、选择匹配的焊接材料，而且还要严格控制焊接过程的热输入。

关键词：铸造超级双相不锈钢5A；焊接接头；热输入

Research on the welding performance of casting super duplex stainless steel 5A

LUAN Tianhong[1], NING Shangfeng[1], ZHANG Leilei[2], REN Zhenwei[2], KOU Cheng[2], HAN Yabin[2]

1. Sulzer (Dalian) Pumps & Compressors Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China

2. CSSC Sunrui (Luoyang) Special Equipment Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China

Abstract: Combining with the chemical composition of the base material, welding material and welding parameters control, through the micro organization, phase ratio, mechanical properties, and corrosion performance of Cr25 series casting super duplex stainless steel 5A（UNS J93404） welding joint, the result shows that in order to control the proportion of the parent material, obtain excellent welding joint, not only need to control the Si content of the base material, choose the matching welding material, but also strictly control the heatinput of the welding process.

Keywords: casting super duplex stainless steel 5A; welding joint; heat input

1　序言

铸造超级双相不锈钢5A（UNS J93404，以下简称5A钢）为Cr25系列，耐点蚀当量（PREN值）＞40，强度及耐蚀性都优于常规双相不锈钢，在腐蚀介质中具有很好的抗缝隙腐蚀、耐氯化物局部腐蚀和应力腐蚀性能。主要用在石油化工、肥料工业、电站烟道气脱硫装置，以及海水和热海水等苛刻环境[1]。

某出口挪威项目，客户要求制造商通过Norsok认证，故需要以Norsok M630为依据开展关于铸造超级双相不锈钢焊接工艺评定系列试验。

国内围绕不同热输入、层间温度、焊接方法等因素开展对2507钢（5A钢的锻件和板材牌号）焊接接头性能的研究较多，但结论不一[2-5]，对铸造超级双相不锈钢的焊接研究较少。本文以5A钢为例开展对Cr25系列铸造超级双相不锈钢的焊接性能研究。

2　试验过程

母材采用中频感应电炉熔炼＋AOD炉精炼，经（1130±10）℃固溶处理的5A钢，性能满足ASTM A995/A995M：2018《承压原件用奥氏体-铁素体（双相）不锈钢铸件》的要求。焊接材料为ER2594，规格为ϕ3.2mm、ϕ2.4mm两种，满足AWS A5.9/A5.9M：2017《焊接材料-用于不锈钢和耐热钢的弧焊丝、带状焊条、焊丝和焊条的分类》要求，母材及焊接材料化学成分与PREN值见表1。

表1　母材及焊接材料化学成分与PREN值

材料	编号	规格/方法	化学成分（质量分数，%）											PREN值
			C	Si	Mn	S	P	N	Cr	Ni	Mo	Cu	W	
母材	171112AD2	ICP	0.018	0.732	0.712	0.013	0.027	0.142	24.99	7.42	4.43	—	—	41.8
	ASTM A995/A995M：2018		≤0.030	≤1.00	≤1.50	≤0.020	≤0.040	0.10～0.30	24.0～26.0	6.0～8.0	4.0～5.0	—	—	—
焊接材料	HS2017269	ϕ3.2mm	0.013	0.47	0.7	0.002	0.015	0.27	24.92	9.49	3.99	0.014	0.0082	42.4
	HS2013056	ϕ2.4mm	0.018	0.09	1.72	0.005	0.005	0.244	25.55	9.94	3.77	0.03	0.81	41.9
	AWS A5.9/A5.9M：2017		≤0.03	≤1.0	≤2.50	≤0.020	≤0.030	0.20～0.30	24.0～27.0	8.0～10.5	2.4～4.5	≤1.5	≤1.0	—

采用手工氩弧焊，焊接设备型号：WS-500；焊接参数：焊接电流140～180A，层间温度≤150℃，焊接速度6.7～20cm/min。焊后未进行热处理，焊接接头经VT、RT、PT等检测均合格。焊接接头剖面如图1所示。焊后焊接工艺试验内容见表2。焊接参数记录见表3。

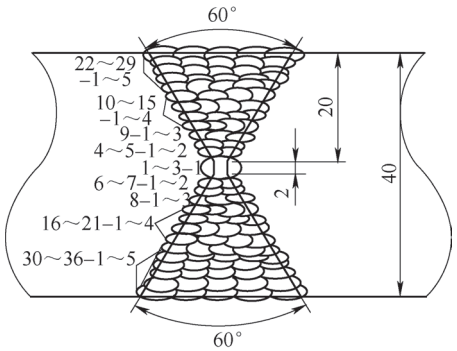


图1　焊接接头剖面示意

注：1~36为焊接层道数。

3　结果与分析

3.1　拉伸与弯曲试验

拉伸与弯曲试验结果见表4、表5。由表4、表5

表2　焊接工艺试验内容

试验类型	ISO 11970：2016《铸钢件焊接工艺评定》	ISO 15614-1：2017《金属材料焊接工艺规程和评定-焊接工艺评定试验》	Norsok M630 MDS D56《挪威石油材料标准-管道材料数据表和元件数据表-25Ce型双相不锈钢材料数据表》	综合	试验标准
VT	100%	100%	—	100%	ISO 17637：2016《焊缝无损检测-熔化焊焊接接头外观检测》
RT或UT	100%	100%	—	100%RT	ISO 17636-1：2022《焊缝的无损检测-射线照相检测-第1部分：X射线和伽马射线技术与胶片》
PT	100%	100%	—	100%	ISO 3452-1：2021《无损检测-渗透检测-第一部分：一般原则》
横向拉伸试验	1件	2件	R_m≥700MPa	2件，R_m≥700MPa	ISO 4136：2022《金属材料焊缝的破坏性试验-横向拉伸试验》
弯曲试验	有要求时	4件	—	4件	ISO 5173：2023《金属材料焊缝的破坏性试验-弯曲试验》
冲击试验	2组：焊缝、热影响区（母材有冲击要求）	至少4组：焊缝、热影响区、高热输入区、低热输入区，不低于母材最低要求	2组：焊缝、熔合线 −46℃KV_8平均值≥45J，单个≥35J	8组：焊缝、熔合线、熔合线＋2mm、熔合线＋5mm、高热输入区、低热输入区 −46℃KV_8，平均≥45J，单个≥35J	ISO 9016：2022《金属材料的破坏性试验-冲击试验-试样位置、缺口方向和检验方法》
硬度试验	客户要求或其他规范要求	客户要求时，GE要求≤301HBW（NACE）	—	≤301HV	EN ISO 9015-1：2001《金属材料焊缝的破坏性试验-硬度试验-第一部分：弧焊接头的硬度试验》
宏观检测		1件	—	1件	EN 1321：1997《金属材料焊缝的破坏性试验-焊缝宏观和微观检验》
微观检测		—	相比例：焊缝35%～65%；母材35%～55%	焊缝及母材相比例	ASTM E562：2019《用系统人工点计数法测定体积分数的标准试验方法》
腐蚀试验		—	点腐蚀：20倍下无点蚀，失重≤4.0g/m^2（含钝化）	点蚀	ASTM G48：2011（R2020）《使用三氯化铁溶液做不锈钢及其合金的耐麻点腐蚀和抗裂口腐蚀性试验的标准方法》方法A-三氯化铁麻点腐蚀试验

表3　焊接参数记录

层-道	焊接材料		焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（cm/min）	热输入/（J/cm）
	型号	规格ϕ/mm				
1-1	ER2594	3.2	150	14	10	7560
2-1	ER2594	3.2	180	15	6.7	14507
3-1	ER2594	3.2	180	15	6.75	14400
4～5-1～2	ER2594	2.4	150	14	15	5040
6～7-1～2	ER2594	3.2	180	14	10	9072
8-1～3	ER2594	2.4	150	14	13	5815
9-1～3	ER2594	3.2	180	15	20	4860
10～15-1～4	ER2594	2.4	150	14	14	5400
16～21-1～4	ER2594	2.4	180	15	18	5400
22～28-1～5	ER2594	2.4	140	13	14	4680
29～35-1～5	ER2594	2.4	180	15	18	5400

注：热输入依据标准EN 1011-1：2009《焊接-金属材料的建议》计算，$Q=kUI/v$，式中，k为各焊接方法的热效率，氩弧焊取值0.6，焊条电弧焊取值0.8；U为电弧电压（V），I为焊接电流（A），v为焊接速度（cm/min）。

表4　拉伸试验结果　（MPa）

编号	R_m	断裂位置	合格标准值
NSK-5A-01-1	882	母材	≥700
NSK-5A-01-2	876	母材	

表5　弯曲试验结果

编号	规格/mm	检测项目	试验条件	结果
NSK-5A-01-4	40×10	侧弯试验	$\alpha=180°$ $d=4t$	合格
NSK-5A-01-5				合格
NSK-5A-01-6				合格
NSK-5A-01-7				合格

可知，试验结果均合格。

3.2　硬度试验

共取2个硬度试样，1个进行热处理，1个不进行热处理。硬度试验取点位置如图2所示，结果见表6。由表6可知，焊缝根部硬度值较高（与热输入高有关），经热处理后，焊缝区域的硬度均有不同程度的降低，母材区域的硬度有不同程度的升高，热影响区的硬度升降趋势不同，有的区域升高，有的区域降低。未经热处理的热影响区硬度值最高相差近70HV10，热处理后硬度值趋于均匀。

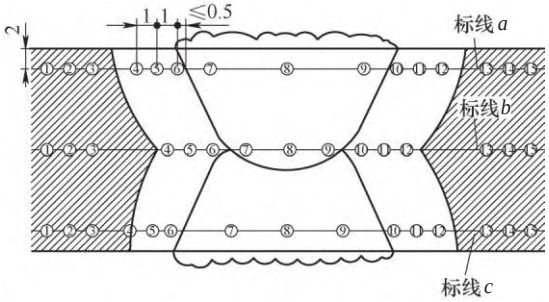
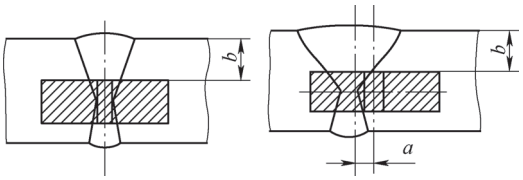


图2　硬度试验取点示意

3.3　冲击试验

低温冲击试验取样如图3所示。接头各区域低温冲击试验结果见表7（合格指标：平均≥45J，单个≥35J）。由表7可知，焊缝中心区域冲击吸收能量明显低于热影响区和母材，其中焊缝根部冲击吸收



a）焊缝　　b）热影响区

图3　低温冲击试验取样示意

注：a为是指冲击试样中心相对焊缝中心的距离，b为指冲击试样表面到试件表面的距离。

表6　接头各区域硬度分布　（HBW）

位置	状态	母材			热影响区			焊缝			热影响区			母材		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
标线a	未热处理	241	247	255	280	265	277	259	263	270	274	235	257	262	265	258
	热处理	267	265	261	262	267	271	259	254	256	263	261	264	256	260	257
标线b	未热处理	249	260	253	313	332	338	331	343	335	336	315	319	254	250	243
	热处理	275	266	256	270	269	259	264	264	271	268	268	264	264	272	265
标线c	未热处理	252	243	249	258	263	263	260	260	266	274	271	251	256	249	257
	热处理	267	271	271	261	272	266	257	265	261	270	290	267	267	259	258

表7　接头各区域低温冲击试验结果　（J）

状态	位置	编号VW（H）T *a/b*	KV_8（−46℃）
未热处理	焊缝	VWT 0/2	75、75、69
		VWT 0/14	22、40、30
		VWT 0/26	89、86、86
	热影响区	VHT 2/2	73、74、71
		VHT 2/26	76、75、97
		VHT 2/14	100、74、100
热处理	焊缝	VWT 0/14	138、140、134

注：VWT及VHT均表示冲击试样的缺口面垂直于试件的表面，其中W表示焊缝，H表示热影响区。

能量过低，不合格。对该区域进行重新取样，经热处理后的冲击吸收能量有较大幅度提高。

3.4　金相组织

焊接接头宏观形貌如图4所示。焊后未固溶的焊缝、热影响区、母材的金相组织如图5～图7所示，焊后固溶的焊缝金相组织如图8所示。接头各区域相比例见表8。由图5～图8可知，焊接接头各区域均为双相组织，在400倍显微镜下没有发现第二相或沉淀相。焊缝区γ相呈细长针状，此形态不利于塑韧性。热影响区及母材相比例偏高，经固溶处理后，焊缝区、热影响区相比例（即铁素体含量）下降。各相形态更趋圆润。

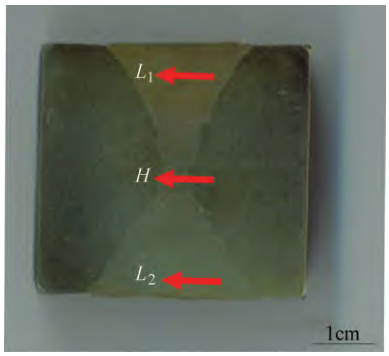
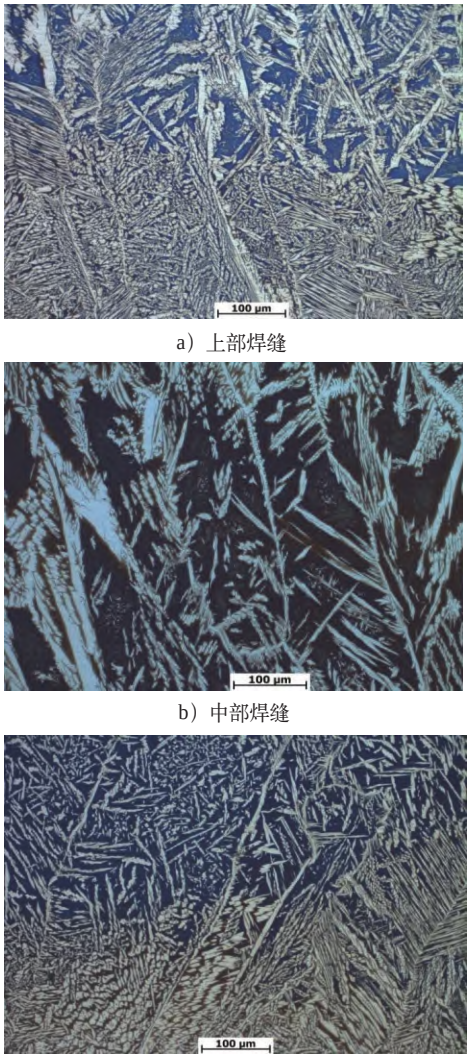


图4　焊接接头宏观形貌

注：L_1、L_2分别为距母材上下表面2mm位置，H为焊缝中心位置。

吴玖等[1]以双相不锈钢的化学成分和热处理温度作为奥氏体数量的基础，根据欧洲热力学数据库（SGTE）进行热力学计算，得出奥氏体线解方程式，即

$$f^{\gamma}=2.20-(1.39\times10^{-3})T+[(1.35\times10^{-3})T-0.78]w_{C}+[(1.30\times10^{-5})T-0.037]w_{Cr}+[(-2.44\times10^{-6})T+0.099]w_{Cu}+[(-5.00\times10^{-5})T+0.061]w_{Mn}+[(-3.08\times10^{-6})T-0.0081]w_{Mo}+[(1.56\times10^{-3})T-1.40]w_{N}+[(-3.97\times10^{-5})T+0.11]w_{Ni}+[(3.32\times10^{-4})T-0.61]w_{Si}+[(2.11\times10^{-5})T-0.038]w_{W}$$



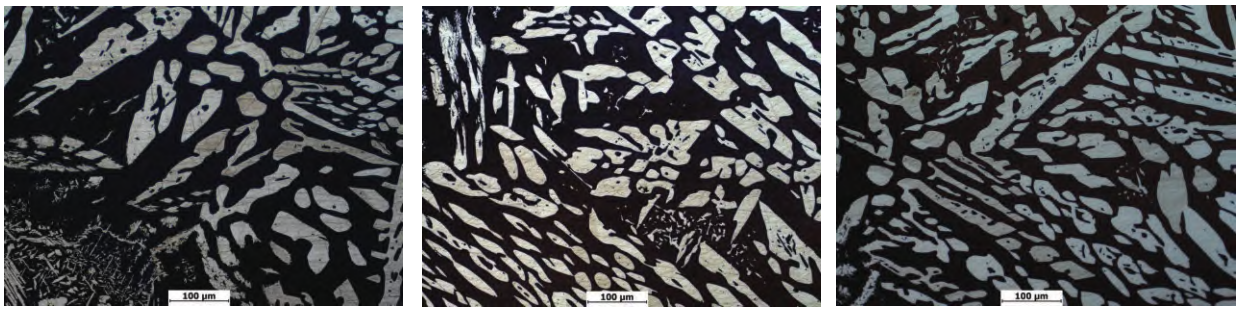
a）上部焊缝

b）中部焊缝

c）下部焊缝

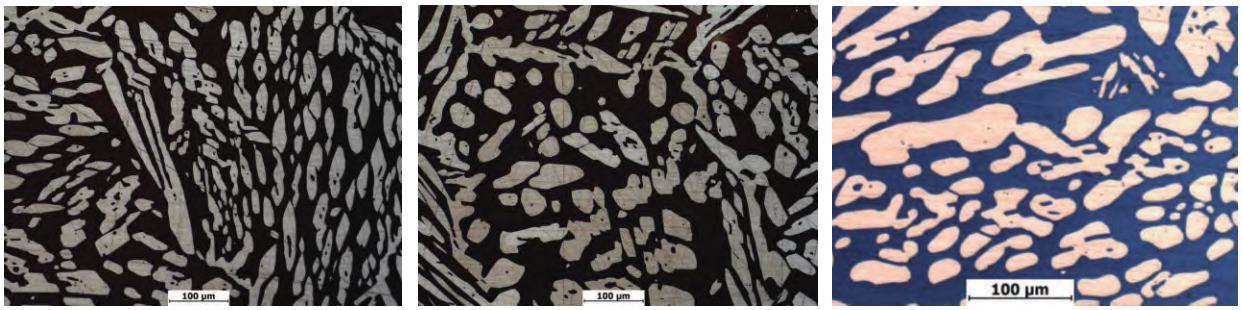
图5　焊后未固溶的焊缝金相组织

由上述方程式可知，影响相比例较大的因素是固溶温度、C含量、N含量和Si含量。一般C含量和N含量的范围控制比较窄，调控较难；Si含量就比较容易控制。5A钢规定$w_{Si}\leqslant1\%$，根据奥氏体线解方程，要获得合适的35%～55%相比例，Si含量也应在一定的范围，故对双相钢的成分进行调整，即选择不同化学成分的焊丝及更改相关的熔炼工艺。Si含量对相比例的影响见表9、表10，由表9、表10可看出，Si含量经过调控后，相比例可控制在理想范围内。



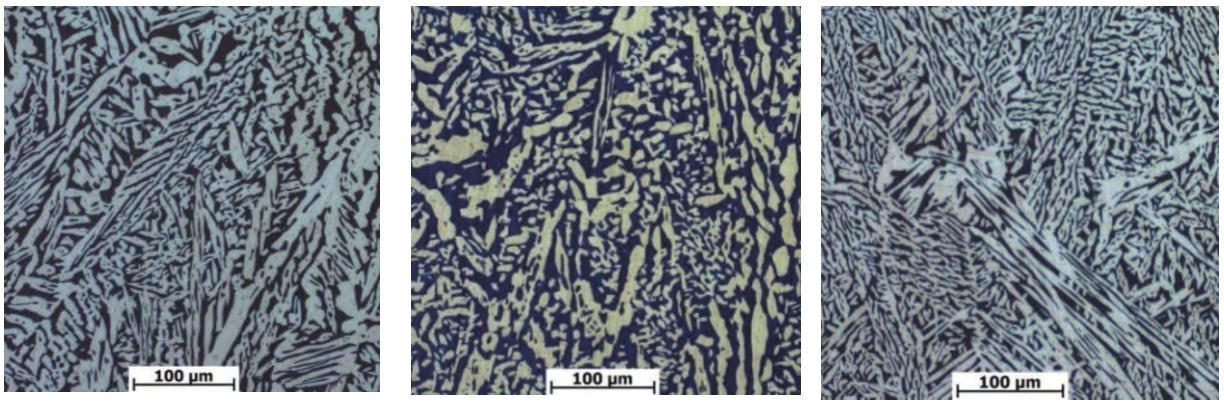
a）上部热影响区　　b）中部热影响区　　c）下部热影响区

图6　焊后未固溶的热影响区金相组织



a）上部母材　　b）中部母材　　c）下部母材

图7　焊后未固溶的母材金相组织



a）上部焊缝　　b）中部焊缝　　c）下部焊缝

图8　焊后固溶的焊缝金相组织

表8　接头各区域相比例（体积分数）　（%）

编号	未热处理			热处理		
	焊缝	热影响区	母材	焊缝	热影响区	母材
L_1	49	66	64	38	60	59
H	59	67	61	52	58	58
L_2	48	60	60	39	58	60

表9　Si含量对ER2594焊丝熔敷金属相比例的影响

焊丝规格 ϕ/mm	Si含量（质量分数，%）	铁素体含量（体积分数，%）	
		焊态	热处理态
3.2	0.47	59	52
2.4	0.09	49	39

表10　Si含量对5A钢相比例的影响

熔炼炉号	Si含量（质量分数，%）	固溶态铁素体含量（体积分数，%）	熔炼工艺
181014AD2	0.425	55	升级版5A钢熔炼工艺
181013A5	0.502	52.5	
181015AD2	0.578	53	
180522A6	0.685	60.1	原有5A钢熔炼工艺
180306AD2	0.76	60.76	
180312AD2	0.701	68.61	

采用JMatPro软件模拟5A钢相比例转变，如图9所示。由图9可看出，5A钢平衡态在1020℃左右成为双相组织。焊接时热输入的大小会影响焊态组织

的相比例，焊缝根部热输入在14400J/cm以上，因热输入高而导致该位置铁素体相增多，且造成热影响区相比例升高。而焊态组织为非稳态组织，经固溶处理后变为稳态组织，此组织的相比例主要由化学成分决定。

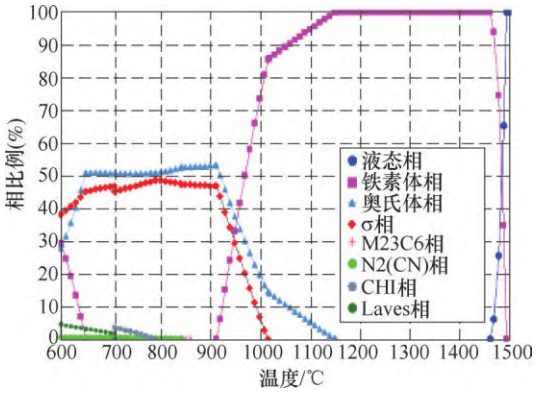


图9　采用JMatPro软件模拟5A钢相比例转变

3.5　腐蚀试验

试样在温度为60℃、20%HNO_3+5%HF溶液中浸蚀5min钝化，在温度为（50±2）℃、6%的$FeCl_3$溶液中试验24h，图10～图12所示为各区域腐蚀试样形貌。由图10～图12可知，各区域均发现明显大面积蚀孔并穿透试样，说明焊接接头耐蚀性较差。经固溶处理后试样耐蚀性没有得到改善，仍然出现明显的点蚀，如图13所示。而在焊缝区，母材单独取样，没有发现明显的点蚀，腐蚀速率较小，如图

a）上表面

b）下表面

图10　焊接接头腐蚀试样形貌（焊态，距焊缝顶部纵面2mm处）

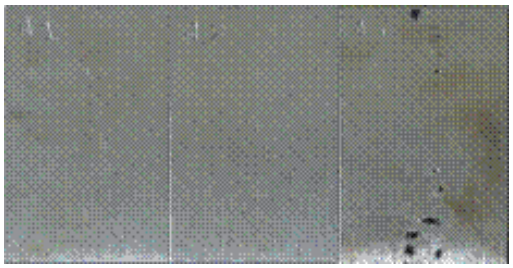
14、图15所示。这说明焊缝试样发生了选择性腐蚀。各试样的腐蚀速率见表11。

从微观组织和耐点蚀机理来看，焊缝区相比例为38%，而母材、热影响区的相比例为60%，整个焊接接头的相比例不均匀，组织不均匀，打破了接头的相平衡，使得表面钝化膜不同区域具有较大的电位差，导致腐蚀速率增加。热处理后并没有改变这种局面，耐蚀性没有得到改善。组织差别导致了焊接接头上电位差发生改变[6，7]。因此，从双相钢耐点蚀原理来说，50%的相比例耐蚀性最佳，而且要求各个区域的相比例都应在50%左右。

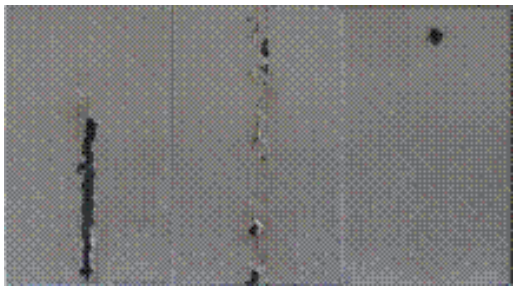
a）上表面

b）下表面

图11　焊接接头腐蚀试样形貌（焊态，焊缝顶部纵面26mm）



a）上表面



b）下表面

图12　焊接接头腐蚀试样形貌（焊态，焊缝中心纵向试样）

重新焊接一副试板，选择成分匹配的ER2594焊丝，焊丝化学成分见表12。通过控制焊接电流、

a）上表面

b）下表面

图13　焊接接头腐蚀试样形貌（焊后固溶态，接头横截面）

a）上表面

b）下表面

图14　母材腐蚀试样形貌

a）上表面

b）下表面

图15　纯焊缝腐蚀试样形貌

焊接速度等工艺措施，减小焊接热输入，试板焊接后进行固溶处理，然后取样，试样的硬度、低温冲击等性能均合格，焊接接头的相比例控制在

表11　不同试样的腐蚀速率　（g/m^2）

试样描述	焊态，焊缝顶部纵面2mm	焊态，焊缝顶部纵面26mm	焊缝中心纵面	焊后固溶态，接头横截面	纯母材	焊后固溶态，纯焊缝
腐蚀速率	104.181	251.930	146.718	147.092	0.457	0.411

表12　新焊接试板所用的ER2594焊丝化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	Si	Mn	S	P	N	Cr	Ni	Mo	Cu	W
标准值	≤0.03	≤1.0	≤2.50	≤0.020	≤0.030	0.20～0.30	24.0～27.0	8.0～10.5	2.4～4.5	≤1.5	≤1.0
实测值	0.017	0.46	1.27	0.008	0.014	0.23	26.15	9.82	3.43	0.07	＜0.01

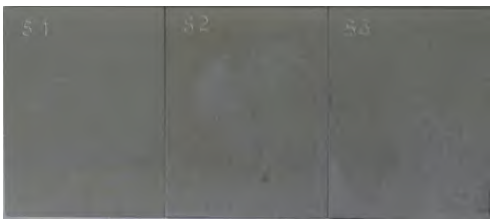
表13　新焊试板接头各区域硬度分布　（HBW）

位置	状态	母材			热影响区			焊缝区			热影响区			母材		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
标线*a*	热处理	241	243	249	253	256	252	241	233	237	241	247	248	248	249	250
标线*b*	热处理	253	249	247	242	251	251	235	234	231	237	240	250	234	238	244
标线*c*	热处理	257	259	253	264	266	270	235	241	240	248	245	252	242	251	248

50%±10%。新焊试板接头各区域硬度分布见表13，低温冲击试验结果见表14，其焊接接头横截面试样的腐蚀速率为0.056g/m^2，未发生点蚀现象，如图16所示。新焊接试板接头宏观形貌如图17所示，新焊接试板焊接参数与焊接接头的相比例关系见表15。

表14　新焊试板接头各区域低温冲击试验结果（J）

位置	编号VW（H）T *a*/*b*	KV_8（−46℃）
焊缝	VWT 0/2	180、176、181
	VWT 0/14	134、164、161
	VWT 0/26	180、169、161
热影响区	VHT 2/2	150、116、142
	VHT 2/26	130、132、133
	VHT 2/14	134、151、149



a）上表面

b）下表面

图16　新焊接试板接头各区域点腐蚀形貌

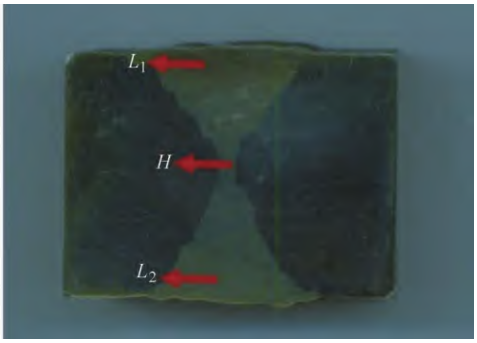


图17　新焊接试板接头宏观形貌

表15　新焊接试板焊接参数与焊接接头的相比例的关系

编号	相比例（体积分数，%）			焊接电流/A	热输入/（J/cm）
	焊缝	热影响区	母材		
L_1	43	60	60	160	4608
H	46	60	61	180	5245
L_2	52	61	56	200	6120

4　结束语

1）Cr25系列铸造超级双相不锈钢具有良好的焊接性。

2）Cr25系列双相不锈钢焊前需选择成分、组织匹配的焊接材料。

3）制定焊接工艺时，应严格控制焊接过程的热输入量，保证焊接工艺控制的有效性。

4）合理有效的焊接过程控制使焊接接头具有优异的耐蚀性。

参考文献：

[1] 吴玖，等. 双相不锈钢[M]. 北京：冶金工业出版社，1996.

[2] 赵轶磊，艾三山，雷炳育，等. 2507超级双相不锈钢的高熔合比PAW焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2022（11）：21-25，57.

[3] 王治宇，张伟，宋红梅，等. 宝钢双相不锈钢焊接技术[J]. 宝钢技术，2013（4）：23-29.

[4] 吴玮巍，洪巨锋，李劲. 不同热输入对双相钢SAF2507耐点蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护，2015，36（S2）：73-76.

[5] 王新，刘洁，范光伟，等. 层间温度对超级双相不锈钢SAF2507模拟热影响区组织转变规律及力学性能的影响[J]. 中国科技论文，2016，11（4）：378-394.

[6] 韩东. 双相不锈钢局部电化学失效行为与机理的研究[D]. 上海：复旦大学，2012.

[7] 李港志. 2507超级双相不锈钢的激光焊接及耐蚀性研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2016.

MW 20240609