引用格式：曲维春，李伟，姜澎，等. 高性能S31603/Q420qENH复合钢板焊接工艺及过渡层焊缝铁素体含量对焊接接头性能影响研究[J]. 工业建筑，2025，55(9)：8-20. QU Weichun，LI Wei，JIANG Peng，et al. Welding Process of High-Performance S31603/Q420qENH Composite Steel Plate and Effect of Ferrite Content on Welding Joint Performance [J]. Industrial Construction，2025，55 (9)：8-20 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25061104

高性能S31603/Q420qENH复合钢板焊接工艺及过渡层焊缝铁素体含量对焊接接头性能影响研究*

曲维春[1,2]　李　伟[1,2]　姜　澎[1,2]　王立志[1,2]　眭向荣[1,2]　张丽美[1,2]

（1. 中冶建筑研究总院有限公司，北京　100088；2. 北京金威焊材有限公司，北京　102299）

摘　要　随着高性能耐候/不锈钢复合板在高原复杂环境桥梁建设工程中的应用日益广泛，高性能复合板的焊接成为高原复杂环境桥梁建设中的关键一环。研究了高性能S31603/Q420qENH复合钢板的焊接工艺，分别采用自主研制的基层耐候药芯焊丝JWT60NHQ、过渡层JWE309LMoT1-1药芯焊丝、覆层JWE316LT1-1药芯焊丝对复合试板进行焊接，制定最优的焊接工艺控制方案，为获得性能稳定的焊接接头作保障。通过设计调整配方，得到不同铁素体含量的过渡层焊材，分析过渡层焊材铁素体含量对复合板接头各项性能的影响，检验测试焊接接头各区域元素分布、接头硬度、-40 ℃冲击性能、耐腐蚀性能等。综合分析获得最优的焊接工艺制度，并得出过渡层焊材熔敷金属中铁素体数FN为10~13(铁素体含量为10.8%~14.3%)时，能为复合板接头各项性能稳定提供保障。

关键词　S31603/Q420qENH复合钢板；过渡层；铁素体含量；力学性能

Welding Process of High-Performance S31603/Q420qENH Composite Steel Plate and Effect of Ferrite Content on Welding Joint Performance

QU Weichun[1,2]　LI Wei[1,2]　JIANG Peng[1,2]　WANG Lizhi[1,2]　SUI Xiangrong[1,2]　ZHANG Limei[1,2]

(1. *China Metallurgical Construction Research Institute Co.，Ltd.，MCC Group，Beijing* 100088，*China*；2. *Beijing Jinwei Welding Material Co.，Ltd.，Beijing* 102299，*China*)

Abstract：With the increasing application of high-performance weather-resistant/stainless steel composite panels in the construction of bridges on plateaus with complex environment，welding of high-performance composite panels has become a key link. The welding process of high-performance S31603/Q420qENH composite steel plates was studied，and the composite test plates were welded using the independently developed base-layer weathering flux core welding wire JWT60NHQ，transition layer JWE309LMoT1-1 flux core welding wire，and cladding JWE316LT1-1 flux core welding wire，and the optimal welding process control plan was formulated to ensure the acquisition of stable welding joints. This study obtained transition layer welding materials with different ferrite contents through design and adjustment of the formula，analyzed the impact of the ferrite content of the transition layer welding material on various properties of the composite board joints，and tested the element distribution in each area of the welded joint，joint hardness，impact performance of －40 ℃，corrosion resistance，etc. Comprehensive analysis obtained the optimal welding process system，and it was concluded that when the ferrite number FN in the welded metal of the transition layer welding material was 10~13 (ferrite

*“十四五”国家重点研发计划(2022YFB3706400)。

第一作者：曲维春，工程师，主要从事焊接材料研发工作。

电子信箱：857396396@qq.com

收稿日期：2025-06-11

content was 10.8%~14.3%), it can provide guarantee for the performance's stability of the composite panel joints.

Keywords: S31603/Q420qENH composite steel plate; transition layer; ferrite content; mechanical properties

0 引 言

在我国双碳政策的快速推进以及桥梁钢绿色发展的大环境下,高原复杂环境桥梁建设工程中高性能、轻量化、长寿命钢材的需求量不断增加[1],其中高性能耐候桥梁钢、耐候/不锈钢复合板在高原复杂环境地区应用广泛。耐候/不锈钢复合钢板的焊接为桥梁建设工程中至关重要的一环,焊接工艺把控以及焊接材料品质直接影响到桥梁焊接工程的质量。对于高原复杂环境下应用的高性能S31603/Q420qENH复合钢板(3+16 mm),由于面对高原环境下高寒、大温差的服役特点,其对焊接接头综合性能要求更为严格。目前需解决焊接接头力学性能稳定性差,尤其是低温韧性差、耐腐蚀性能低于母材等问题。本文对高性能S31603/Q420qENH复合钢板的焊接工艺进行研究,采用不同铁素体含量的焊材进行过渡层焊接,并保证过渡层有效厚度一致,分析基层、过渡层、覆层各区域的化学成分、微观组织组成、显微硬度的变化等,以得到力学性能优异的复合板焊接接头,最终实现高性能S31603/Q420qENH复合钢板的可靠焊接。

1 研究目标及思路

高性能S31603/Q420qENH复合钢板在制备过程中,须严格控制复合坯组坯原料表面质量、总压缩比,采用差异化加热制度、差速轧制等关键技术,通过真空电子束焊接复合坯制备成,使钢板各项性能指标均满足要求。该复合钢板的熔化焊接需经历加热、熔化、化学冶金、凝固和固态相变等一系列冶金过程,焊缝形成的过程远比钢板冶炼复杂得多,因此焊接接头的各项性能比较难达到钢板母材同等的技术水平。同时,耐候/不锈钢复合板基层与覆层在理化性能上有较大差异,基层耐候钢热导率高,但其热膨胀系数及电阻率远小于覆层不锈钢,在焊接过程中易出现内部应力增加、合金元素稀释、形成增碳层等问题,导致焊接接头性能下降[2]。复合板焊接过程中的各类问题主要出现在过渡层焊缝,故过渡层焊缝的焊接工艺控制及性能稳定性将成为影响复合板整体焊接质量的关键因素。

本文主要研究合理正确的焊接工艺制度,并设计研制不同铁素含量过渡层焊材,对高性能S31603/Q420qENH复合钢板进行焊接,完成焊接接头各项性能测试分析。冯玉兰等[3]研究发现:针对Q245R/0Cr18Ni9复合板过渡层的焊接,应严格控制层温,采用小电流快速焊,同时严格控制过渡层分别在基层(1.5~2.5 mm)和覆层(0.5~1.5 mm)的厚度,可得到性能优良的复合板焊接接头。为进一步提高焊接接头性能的稳定性,在控制过渡层焊接工艺、厚度一致的前提下,采用不同铁素体含量的过渡层焊材进行焊接,通过分析不同过渡层的成分分布、组织变化,使其在保证复合板焊接接头性能符合"高原复杂环境高性能桥梁钢板制造关键技术及应用"项目中各指标要求的前提下,确定出最优的过渡层焊材铁素体含量。高性能S31603/Q420qENH复合钢板焊接接头的性能要求见表1。

表1 高性能S31603/Q420qENH复合钢板焊接接头性能指标

Table 1 Performance indicators of welded joints of high-performance S31603/Q420qENH composite steel plates

焊缝拉伸			接头拉伸R_m/MPa	侧弯 t<20D/mm	-40 ℃冲击功/J	接头硬度	腐蚀试验
R_m/MPa	R_{el}/MPa	A/%					
≥540	≥420	≥20	≥540	单裂纹长度≤3	平均值≥60	≤350 HV10	GB/T4334.E方法,覆层焊缝无晶间腐蚀裂纹

2 试验材料及方法

2.1 试验母材

采用南京钢铁提供的S31603/Q420qENH耐候复合钢板,钢板轧制状态为TMCP+T(控轧控冷+热轧),其化学成分和性能见表2~4。微观组织如图1所示。S31603/Q420qENH耐候复合钢板其覆层为S31603材质,为典型的奥氏体组织。基层为Q420qENH材质,组织为铁素体+珠光体。

表2 S31603/Q420qENH耐候复合板耐候钢基层化学成分

Table 2 Chemical composition of weather-resistant steel substrate for weather-resistant composite plate

板厚/mm	数据来源	化学元素含量/%												耐候指数I
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Cu	Ti	Mo	Al	
16	TB/T3556	≤0.11	0.15~0.55	1.10~1.50	≤0.02	≤0.01	0.40~0.70	0.30~0.40	0.01~0.08	0.20~0.50	0.006~0.030	≤0.20	0.02~0.05	≥6.5
	实测	0.06	0.28	1.40	0.010	0.002	0.50	0.36	0.005	0.30	0.014	0.07	0.037	6.6

注：指标要求参见TB/T 3556—2020《铁路桥梁用结构钢》。

表3 S31603/Q420qENH耐候复合板中不锈钢层化学成分

Table 3 Chemical composition of stainless steel layer of S31603/Q420qENH weather-resistant composite plate

材质	板厚/mm	数据来源	化学元素含量/%							
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
不锈钢层S31603	3	标准要求	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00
		实测	0.02	0.57	1.47	0.027	0.001	16.24	10.23	2.11

注：指标要求参见GB/T 20878—2024《不锈钢 牌号及化学成分》。

表4 S31603/Q420qENH耐候复合板力学性能

Table 4 Mechanical properties of S31603/Q420qENH weather-resistant composite board

材质	板厚	数据来源	R_m/MPa	R_{el}/MPa	A/%	-40 ℃ 冲击功/J
S31603+Q420qENH	3+16 mm	标准要求	540~660	≥420	≥19	≥120
		实测	643	548	24	268、298、290

注：指标要求参见TB/T 3556—2020《铁路桥梁用结构钢》、GB/T 8165—2025《不锈钢复合钢板和钢带》。

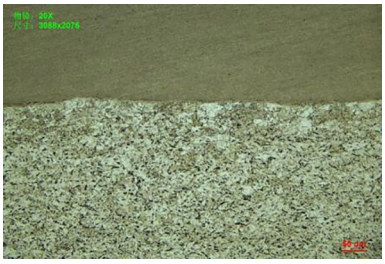


图1 S31603/Q420qENH耐候复合板微观组织形貌

Fig. 1 Microstructure of S31603/Q420qENH weather-resistant composite board

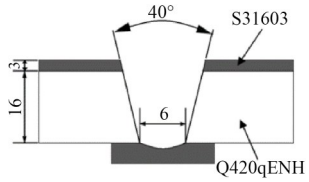


图2 S31603/Q420qENH耐候复合板焊接坡口形式 mm

Fig. 2 Bevel form of S31603/Q420qENH weathering composite plate welding

2.2 焊接方法及设备

2.2.1 焊接方法

药芯焊丝通过CO_2气体和熔渣联合保护进行焊接，具备成本低、焊接效率高、焊道成型好、保护效果好等优点，该焊接方法在高原复杂恶劣环境下具备较大的工艺优势。本研究中S31603/Q420qENH耐候复合钢板基层、过渡层以及覆层均采用药芯焊丝CO_2气体保护焊接。

2.2.2 坡口形式

S31603/Q420qENH耐候复合钢板基层为Q420qENH，厚度为16 mm，覆层为S31603，厚度为3 mm。复合板焊接采用V型坡口，坡口角度40°。坡口形式如图2所示。

2.2.3 焊接材料选择

S31603/Q420qENH耐候复合板基层焊接采用金威耐候钢药芯焊丝JWT60NHQ，过渡层焊材依托金威E309LMoT1-1不锈钢药芯焊丝开发及试验基础，设计不同铁素体含量的E309LMoT1-1药芯焊丝对耐候/不锈钢复合板进行焊接。309L系焊材为复合板过渡层及碳钢/低合金钢-不锈钢异种钢接头焊接常用焊材类别，具备优异的异种钢焊接性，且抗裂性优异[4]，同时，JWE309LMoT1-1药芯焊丝熔敷金属中含有一定量的Mo元素，以提高过渡层中Mo元素含量，降低过渡层对覆层焊缝金属中的Mo元素稀释，避免覆层的耐腐蚀性能降低。覆层焊接遵循成分匹配原则，采用金威JWE316LT1-1不锈钢药芯焊丝。以上试验焊材规格均为ϕ1.2。

为研究过渡层焊缝铁素体含量对复合板焊接接头各项性能的影响，保持过渡层焊接工艺相同，

控制过渡层焊缝具有相同厚度，设计 4 种不同铁素体含量的 E309LMoT1-1 药芯焊丝用于过渡层的焊接。其中，基层、过渡层、覆层焊材化学成分及性能见表 5~10。

表 5　金威耐候钢药芯焊丝 JWT60NHQ 熔敷金属化学成分

Table 5　Chemical composition of Jinwei weathering steel flux core welding wire JWT60NHQ welded metal　%

数据来源	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	I
指标要求	≤0.12	0.20~0.80	0.80~1.60	≤0.030	≤0.030	0.10~0.40	0.30~0.80	0.20~0.50	≥6.5
实测值	0.056	0.32	1.14	0.009	0.004	0.30	0.66	0.35	6.9

注：指标要求参见 GB/T 36233—2018《高强钢药芯焊丝》。

表 6　金威耐候钢药芯焊丝 JWT60NHQ 熔敷金属力学性能

Table 6　Mechanical properties of Jinwei weathering steel flux core welding wire JWT60NHQ deposited metal

数据来源	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	A/%	-40 ℃冲击功/J
指标要求	620~820	≥530	≥15	≥60
实测值	685	630	22	136、121、122

注：指标要求参见 GB/T 17853—2018《不锈钢药芯焊丝》

表 7　金威过渡层药芯焊丝 JWE309LMoT1-1 熔敷金属化学成分

Table 7　Jinwei transition layer flux cored welding wire JWE309LMoT1-1 deposited metal chemical composition

编号	化学元素含量/%								FN(磁性法)	铁素体含量(磁性法)/%
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo		
指标要求	≤0.040	≤1.00	0.5~2.5	≤0.030	≤0.020	21.00~25.00	12.00~16.00	2.00~3.00	—	—
1	0.023	0.45	1.60	0.020	0.001	21.50	15.02	2.66	10	10.8
2	0.020	0.85	1.40	0.019	0.004	21.67	14.90	2.69	13	14.3
3	0.017	0.89	1.43	0.020	0.005	22.26	14.47	2.68	17	16.8
4	0.019	0.83	1.35	0.018	0.004	22.72	13.48	2.72	22	21.4

注：指标要求参见 GB/T 17853—2018。

表 8　金威过渡层药芯焊丝 JWE309LMoT1-1 熔敷金属力学性能

Table 8　Mechanical properties of Jinwei transition layer flux cored welding wire JWE309LMoT1-1 deposited metal

编号	R_m/MPa	A/%
指标要求	≥520	≥25
1	680	36
2	695	39
3	700	35
4	735	33

注：指标要求参见 GB/T 17853—2018。

2.3　焊接工艺控制

2.3.1　焊前准备

对 S31603/Q420qENH 耐候复合板坡口内水分、油污、杂质等进行全面清理，以避免焊接时产生气孔或影响焊缝纯净度。

2.3.2　层温控制

耐候复合板焊接前无需预热。为避免耐候基层焊缝组织晶粒过大，以及不锈钢过渡层覆层焊缝在敏化温度区间内停留时间过长导致的耐腐蚀性能下降[5]等问题，耐候复合板焊接过程中需严格控制层间温度，基层焊接过程中控制最高层间温度不大于 150 ℃，过渡层覆层焊接过程中，控制最高层间温度不大于 100 ℃。

2.3.3　焊接参数控制原则

基层焊接过程中，要求焊缝与母材根部完全熔合、焊缝成型美观，须严格控制焊接参数，要求焊接电流 220~230 A，焊接电压 27~30 V，焊接速度 28~

表 9　金威覆层药芯焊丝 JWE316LT1-1 熔敷金属化学成分及力学性能

Table 9　Chemical composition and mechanical properties of Jinwei clad flux-core welding wire JWE316LT1-1 deposited metal　%

数据来源	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	铁素体数 FN(磁性法)	铁素体含量(磁性法)/%
GB/T 17853—2018要求	≤0.040	≤1.00	0.5~2.5	≤0.030	≤0.020	17.00~20.00	11.00~14.00	2.00~3.00	—	—
实测	0.028	0.59	1.63	0.016	0.003	18.98	11.94	2.46	8	8.6

表10 金威过渡层药芯焊丝JWE316LT1-1熔敷金属力学性能

Table 10 Mechanical properties of Jinwei transition layer flux cored welding wire JWE316LT1-1 deposited metal

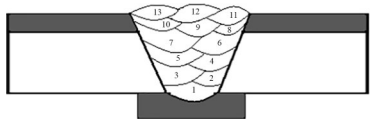
数据来源	R_m/MPa	A/%
GB/T 17853—2018要求	≥485	≥25
实测	574	36

32 cm/min。

不锈钢过渡层、覆层焊接作为复合板焊接过程中的关键，应尽量减少基层焊缝对过渡层合金元素的稀释以及碳元素向不锈钢层的扩散，故不锈钢过渡层、覆层焊接应遵循小参数焊接原则，控制不锈钢药芯焊丝焊接电流180~210 A，焊接电压26~29 V，焊接速度30~33 cm/min，在保证焊接熔合完全、成型优良的前提下，宜选用小电流快速焊，避免过高线能量输入。本研究复合板焊接工艺参数见表11。

表11 复合板焊接参数

Table 11 Composite plate welding parameters

熔敷简图	位置	焊接电流/A	焊接电压/V	层间温度/℃	焊接速度/(cm·min^{-1})
	基层	220~230	28	≤150	28~32
	过渡层	195	28	≤100	30~33
	覆层	205	28	≤100	30~33

2.3.4 焊接过程

基层底部垫板应采用JWT60NHQ焊丝进行堆焊，避免基层底部焊缝耐蚀元素稀释以及增碳的情况出现；控制最后一层基层焊缝表面距复合板交界面在1.5~2.5 mm，保证过渡层焊缝与基层母材、焊缝有足够的焊接结合量。过渡层与耐候基层、基层焊缝、不锈钢覆层均熔合良好，控制焊缝厚度及熔深，可确保具有足够的覆层焊缝焊接余量，同时避免过渡层的合金元素稀释率过高，过渡层焊缝采用小电流快速焊，厚度控制在2.5~3.0 mm，与基层焊缝熔合厚度控制在1.0~1.5 mm。焊后覆层焊缝表面平整，焊道边缘与不锈钢覆层平滑熔合过渡，余高不大于2 mm。

2.4 焊接试样制取

S31603/Q420qENH耐候复合板焊接接头试验项目及取样形式见表12。

表12 S31603/Q420qENH耐候复合板焊接接头试验项目及取样形式

Table 12 Test contents and sampling plan of S31603/Q420qENH weather-resistant composite plate welding joint

试验项目	试样数量	取样	试样尺寸	说明
拉伸(接头拉板)	2	垂直于焊缝	见图3	试板长度可根据母材宽度进行调整
冲击试验(-40 ℃)	3	见图4	标准试样	取复合面2 mm以内，尽可能远离复合面
腐蚀试验	2	见图5	(70~90) mm×20 mm×3 mm	GB/T 4334—2020 方法E(铜-硫酸铜-16%硫酸20 h)
侧弯	2	垂直于焊缝	10 mm×试板全厚度	D=2a=20 mm弯曲角度180 ℃

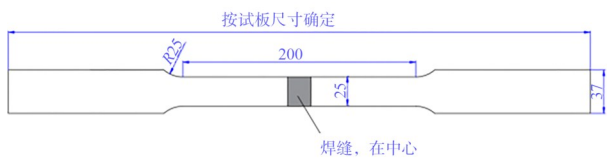


图3 接头拉伸示意及尺寸 mm

Fig. 3 Schematic diagram and dimensions of joint stretching

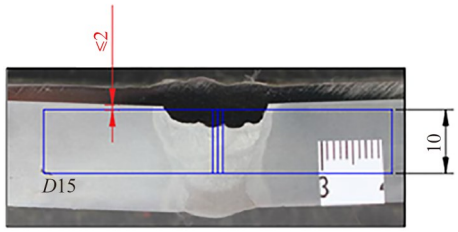


图4 冲击试样取样位置示意 mm

Fig. 4 Schematic diagram of the sampling position of the impact sample

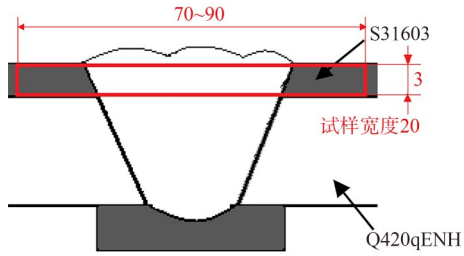


图5 覆层焊缝耐腐蚀试样取样位置 mm

Fig. 5 Corrosion-resistant sample sampling position of cladding weld

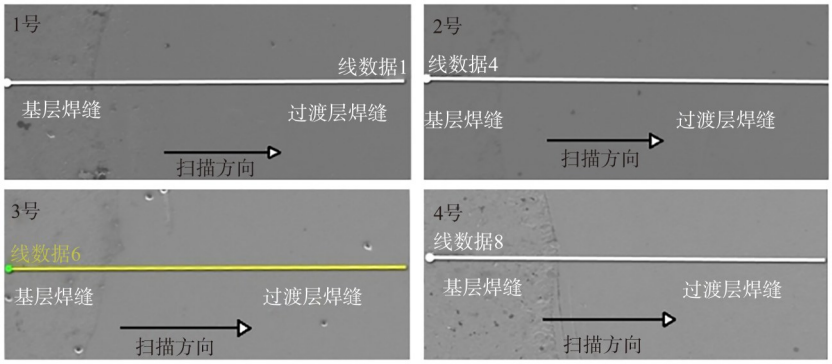
3 试验结果及分析

设计不同铁素体含量的过渡层焊材(编号1~4)，制备复合板焊接接头，分别对应试板编号为1~4号。对4块试板焊接接头进行表征分析，主要包括化学元素成分分布、力学性能、微观组织、耐腐蚀性能等。

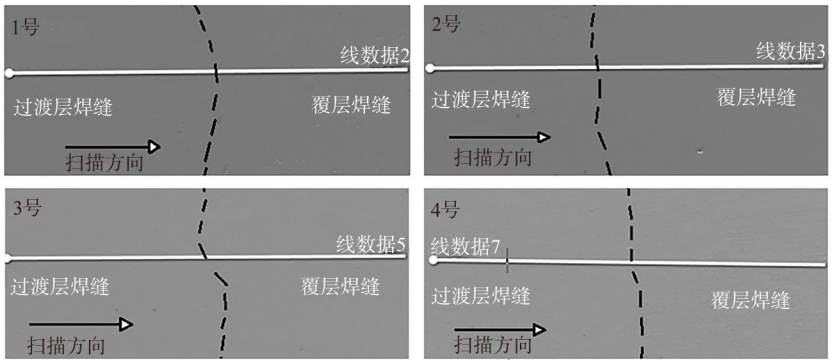
3.1　焊接接头化学成分分析

采用扫描电镜线扫描方式对 S31603/Q420qENH 耐候复合板焊接接头的化学成分进行扫描分析，主要分析焊接接头基层焊缝到过渡层焊缝、过渡层焊缝到覆层焊缝的元素分布。由于焊接材料中 C 含量均为低水平，且基层焊材和过渡层焊材熔敷金属 C 含量水平相近，在合理正确的焊接工况下并不会造成增碳层或碳迁移，故本研究对接头的 Cr、Ni、Fe 元素分布变化进行分析。线扫描位置及方向见图 6，线扫描结果见图 7~8。

由图 7 可知：1~4 号试板焊接接头基层焊缝至过渡层焊缝中 Cr、Ni 元素含量均呈突变式增长，Fe 元素含量出现明显下降趋势，证明 4 种过渡层焊材均能稳定控制基层焊缝对不锈钢焊缝合金元素的稀释，复合板焊接接头基层/覆层界面处合金元素过渡稳定，为后续覆层焊接提供了保障。由图 8 可知：1~4 号试板焊接接头过渡层焊缝至覆层焊缝中 Cr、Ni、Fe 含量均呈缓慢下降趋势，逐步向 316L 不锈钢主成分要求靠近，确保覆层焊接后焊缝具备稳定的耐蚀性能。综合分析，采用不同铁素体含量的



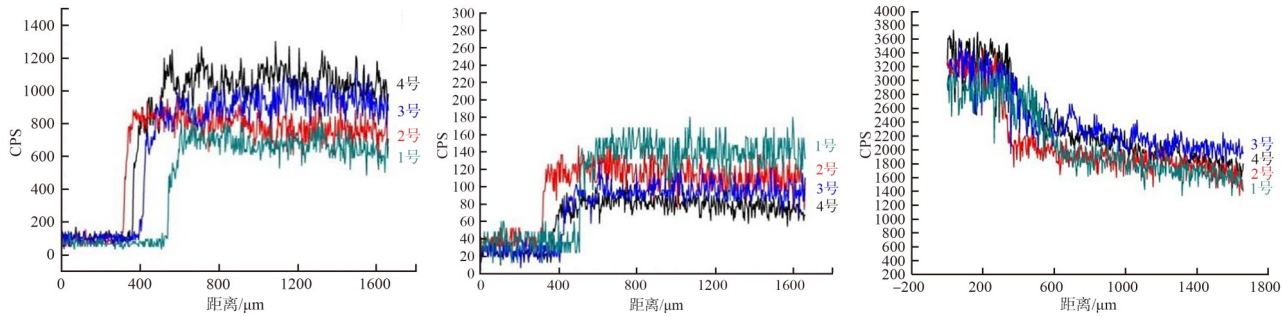
（a）基层焊缝至过渡层焊缝线扫描位置及方向



（b）过渡层焊缝至覆层焊缝扫描位置及方向

图 6　复合板焊接接头线扫描位置及方向示意

Fig. 6　Schematic diagram of scanning position and direction of composite plate welding joint line

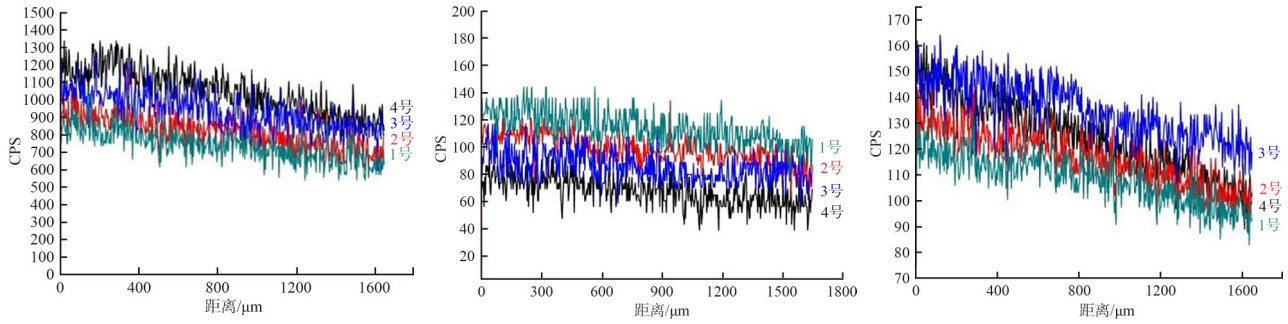


（a）Cr元素分布　（b）Ni元素分布　（c）Fe元素分布

图 7　基层焊缝至过渡层焊缝元素分布

Fig. 7　Weld element distribution of base weld to transition layer

过渡层焊材进行焊接，均可有效控制不锈钢层（过渡层+覆层）合金元素的稀释率，从而确保了复合板焊接后的不锈钢层焊缝组织和耐腐蚀性能稳定。



（a）Cr元素分布　（b）Ni元素分布　（c）Fe元素分布

图8　过渡层焊缝至覆层焊缝元素分布

Fig. 8　Transition weld to cladding weld element distribution

3.2　过渡层焊缝铁素体测定

由于过渡层焊缝厚度控制在2.5~3 mm，无法采用磁性法准确测定其过渡层焊缝的铁素体含量，故采用金相法对4块试板过渡层焊缝进行铁素体含量测定。4块试板过渡层焊缝的铁素体含量见表13。可见，过渡层焊缝中铁素体含量达到预期控制范围。

表13　过渡层焊缝铁素体含量

Table 13　Ferrite content of transition layer weld

试板编号	测试方法	过渡层焊材熔敷金属/FN	过渡层焊缝平均铁素体含量/%
1号	金相法	10	8.6
2号		13	11.7
3号		17	16.3
4号		22	21.7

3.3　冲击性能

复合板的基层作为结构中主要支撑部分，S31603的覆层主要起耐蚀作用，过渡层焊缝性能为复合板焊接接头冲击韧性的主要影响因素，故对力学性能的考量着重分析焊接接头的基层+过渡层位置。冲击试样上表面为复合板覆层/基层界面以下≤2 mm位置，以确保4块焊接试板的冲击试样具有同样厚度的过渡层焊缝，余下部分为基层焊缝。冲击试样V型坡口位置选取焊缝中心，冲击试样温度-40 ℃，冲击试验数据见表14。冲击数据与过渡层焊材铁素体含量变化关系见图9。可知：4块试板冲击性能均随过渡层焊材铁素体含量的增加呈下降趋势，过渡层焊材铁素体数FN为22（4号试板）时接头冲击性能无法满足复合板焊接接头性能要求，FN为10时接头冲击性能最优。

表14　S31603/Q420qENH耐候复合板接头冲击性能

Table 14　S31603/Q420qENH weather-resistant composite board joint impact performance

试板编号	-40 ℃冲击功/J
1号	120、116、106（均值114）
2号	80、80、76（均值79）
3号	70、64、62（均值65）
4号	62、50、50（均值54）
GB/T 17853—2018标准	≥60

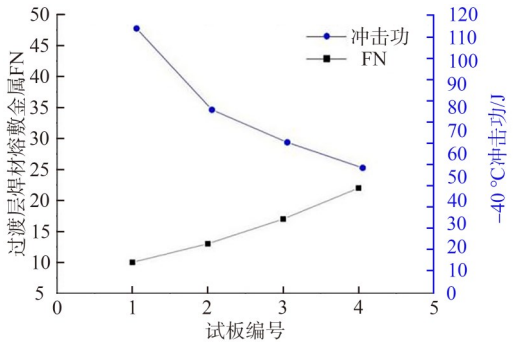


图9　冲击性能与过渡层焊材铁素体含量变化曲线

Fig. 9　Impact performance and change curve of ferrite content of transition layer welding material

3.4　焊接接头不同位置的显微硬度分布

对焊接接头各区域进行维氏硬度测定，图10为4块试板焊接接头维氏硬度测量位置，图11为接头不同区域的维氏硬度值。可见：试板接头各区域维氏硬度均小于350 HV，满足技术要求。其中，基层焊缝热影响区到过渡层焊缝底部硬度呈下降趋势，这是由于基层焊缝中主要为铁素体组织，整体硬度高于奥氏体型不锈钢部分，基层/过渡层交界处受合金元素影响，过渡层焊缝底部铁素体含量增多，硬度呈下降趋势。由过渡层焊缝至

覆层焊缝 Cr、Ni 合金元素稀释降低，奥氏体为主要组织，其硬度呈上升趋势，整体硬度趋于稳定；覆层焊缝接近顶部位置的化学成分达到 316L 标准，硬度下降。

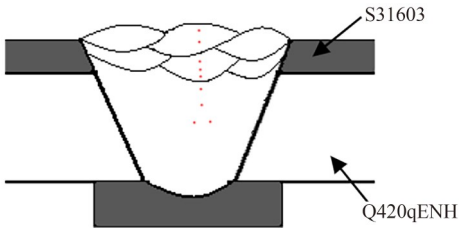


图 10　复合板焊接接头维氏硬度测试位置示意

Fig. 10　Schematic diagram of the Vickers hardness test position of the welded joints of composite plates

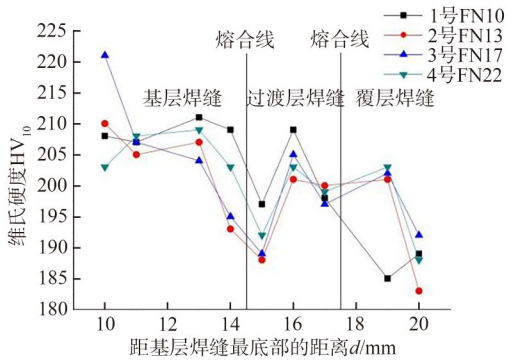


图 11　复合板焊接接头维氏硬度

Fig. 11　Vickers hardness of welded joints of composite plates

3.5　弯曲试验

复合板焊接接头弯曲试验按照 ISO5173-2000 Destructive Tests on Welds in Metallic Materials- Bend Tests 要求进行，采用万能试验机进行接头弯曲试验。S31603/Q420qENH 耐候复合板的 4 块试板取焊接接头横向弯曲，试样弯曲 180°后均无裂纹出现，满足标准要求，弯曲试样如图 12 所示。

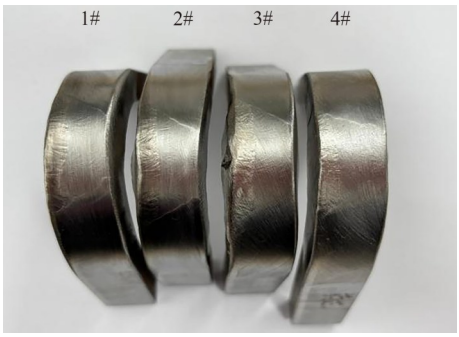


图 12　复合板焊接接头弯曲试样

Fig. 12　Compound plate welded joint bending samples

3.6　显微组织分析

3.6.1　焊缝金相组织

1）基层焊缝。

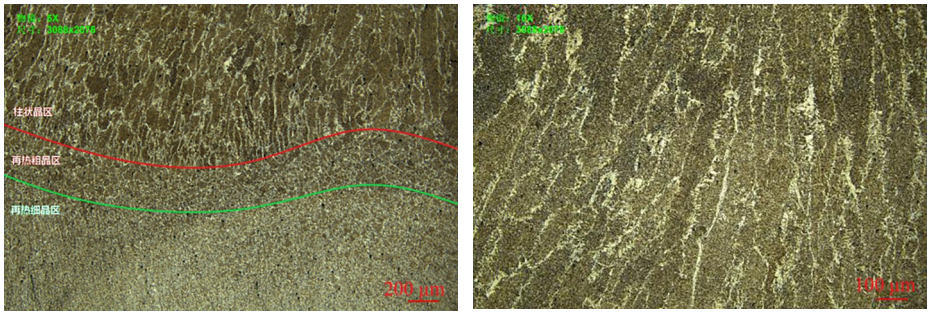
图 13 为基层焊缝组织。本研究中，4 个接头基层焊接材料、焊接工艺参数完全相同，因此基层焊缝组织分布无明显区别。焊接接头由多层多道焊缝组成，每道焊缝对前一道焊缝产生再热影响，改变其组织尺寸及分布，多层焊接后，基层焊缝主要具有柱状晶区、再热粗晶区和再热细晶区，见图 13(a)。

图 13(b)为柱状晶区焊缝组织，主要由针状铁素体(AF)、先共析铁素体(PF)以及少量板条铁素体(FSP)组成。柱状晶区主要为针状铁素体，其中先共析铁素体在柱状晶界呈长条状分布，板条铁素体形成温度低于先共析铁素体，依附与先共析铁素体端部向晶内生长，呈镐牙状，其中细小针状铁素体整体含量较高，是保障基层焊缝性能优异稳定的重要组织[6]。再热晶区主要分为再热粗晶区和再热细晶区，其中，再热粗晶区主要组成为 PF、AF、FSP[图 13(c)]，再热细晶区主要组成为少量 AF、多为块状铁素体，以及少量贝氏体[图 13(d)]。

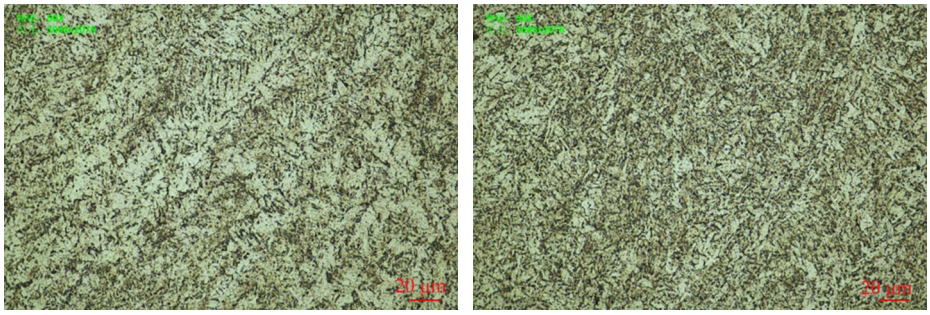
图 13(e)、13(f)为不锈钢过渡层焊缝对基层焊缝的热影响组织分布。不锈钢过渡层对基层焊缝存在再热影响，形成粗晶区。在不锈钢过渡层焊缝的影响下，交接处的基层焊缝中形成了较多先共析铁素体，且呈区域链状排列分布。

2）过渡层焊缝。

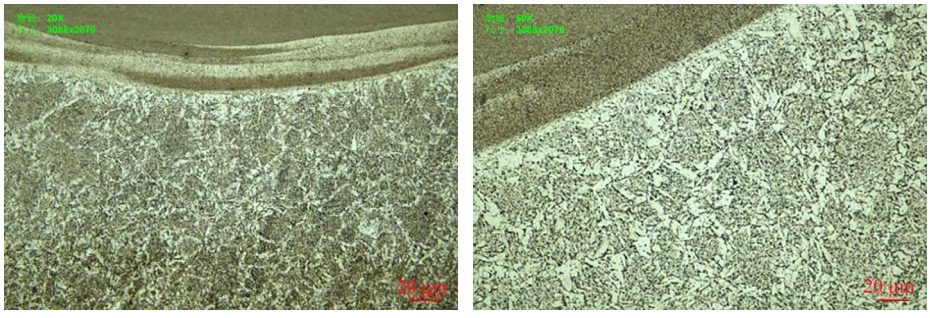
图 14 为采用不同铁素体含量的 E309LMoT1-1 药芯焊丝进行过渡层焊接的焊缝组织，FN 为 10、13、17、22 的焊丝分别对应 1~4 号复合板试板。可以看出：4 块试样过渡层焊缝均以奥氏体为主，加上不同形态分布的铁素体组成。其中，1 号试样过渡层焊缝中为线状铁素体，呈弥散分布，少量铁素体相互联结。铁素体在低温环境下韧性会降低，但少量的铁素体呈不连续弥散分布时，在低温环境下焊缝接头受到的载荷由奥氏体组织承担，接头整体韧性、塑性不会受到过多影响。弥散分布的铁素体能有效组织奥氏体生长，打断奥氏体柱状晶的连续分布，不致形成连续贫铬区，降低形成碳化物的趋势，提高焊缝的抗晶间腐蚀能力[7]。2 号试样中，铁素体呈不完全连续网状，部分呈枝状分布，随着铁素体含量的增加，连续分布的铁素体增多，其过渡层的低温韧性受到不利影响，复合板接头的低温冲击功出现下降趋势。3 号试样中，铁素体呈连续网状分



（a）基层焊缝区组织　（b）柱状晶区焊缝组织



（c）再热粗晶区组织　（d）再热细晶区组织



（e）过渡层对基层焊缝热影响区组织　（f）过渡层对基层焊缝热影响区组织

图13　基层焊缝金相组织分布

Fig. 13　Metallographic structure distribution of base welds

布。当4号试样中的铁素体数FN达到最高值22时，铁素体呈更密集的网状分布，将全部奥氏体晶界填充满铁素体，对其复合板接头的低温韧性影响较大。结合过渡层微观组织以及相关研究分析，随着过渡层焊缝中铁素体的增加以及分布形式的改变，其低温韧性受到不利影响，进而影响复合板接头的低温韧性。过渡层焊缝中须含有少量的铁素体组织，呈弥散分布，确保其耐腐蚀性能。

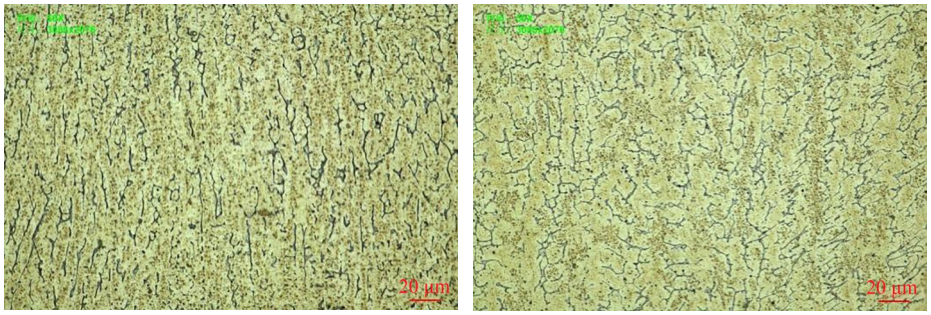
3）覆层焊缝。

图15为采用4块复合板接头覆层焊缝的金相组织，覆层焊缝受不同铁素体数的过渡层焊缝影响，其铁素体数也发生改变。随着过渡层焊缝中铁素体数的增加，覆层焊缝中铁素体数明显增加，其中1号试样覆层焊缝中含有少量线状铁素体，呈弥散分布；2~4号中铁素体均以网状分布，铁素体数增加的同时，其直径也随之增大，由蠕虫状转变为骨骼状。

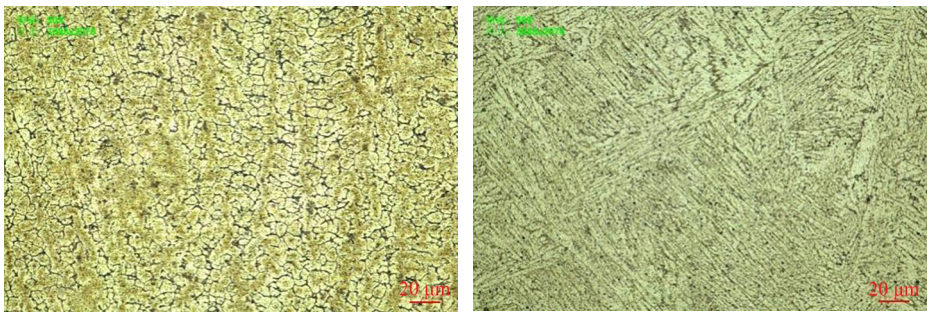
基层焊缝整体具备较高含量的针状细小铁素体以及大角度晶界的块状铁素体，为接头焊缝整体性能稳定提供基础保障；过渡层焊缝中铁素体组织呈线状弥散分布时，更有利于提高复合板接头焊缝整体的低温冲击韧性及耐腐蚀性能，连续分布的网状铁素体占比越高，对焊缝性能造成的不利影响越大；受不同铁素体数的过渡层焊缝影响，覆层焊缝中铁素体形态分布发生变化，其中铁素体呈线状弥散分布对覆层耐腐蚀性能最为有利。

3.6.2　冲击断口扫描形貌

采用扫描电镜观察1~4号复合板焊接接头冲击试样断口形貌，其中，图16为基层焊缝断口形貌，图17为过渡层焊缝断口形貌。冲击试样的典型断口



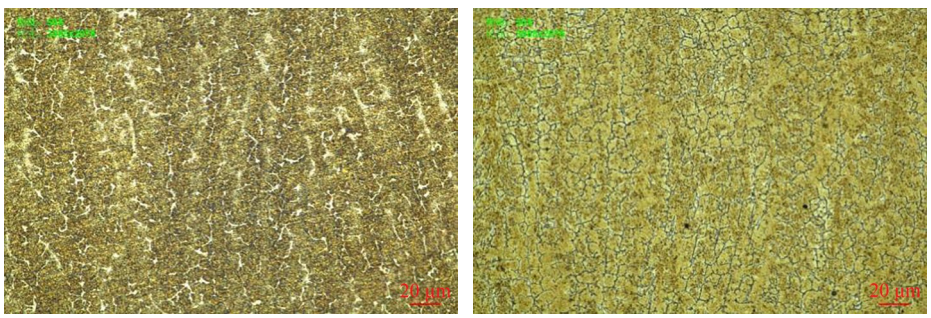
（a）FN 为 10　　（b）FN 为 13



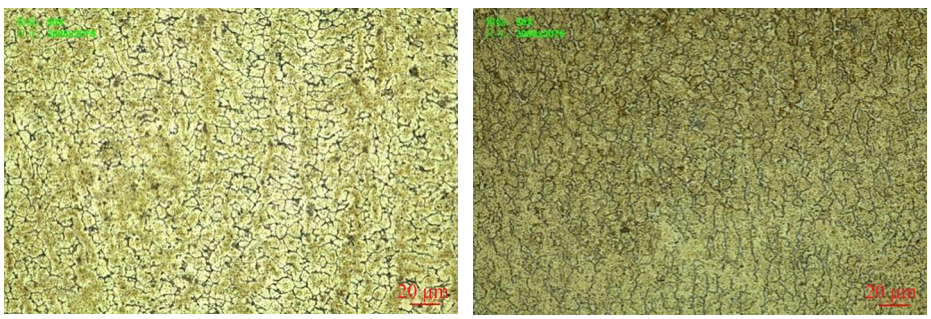
（c）FN 为 17　　（d）FN 为 22

图 14　过渡层焊缝金相组织分布

Fig. 14　Metallographic structure distribution of transition layer weld



（a）1 号试样　　（b）2 号试样



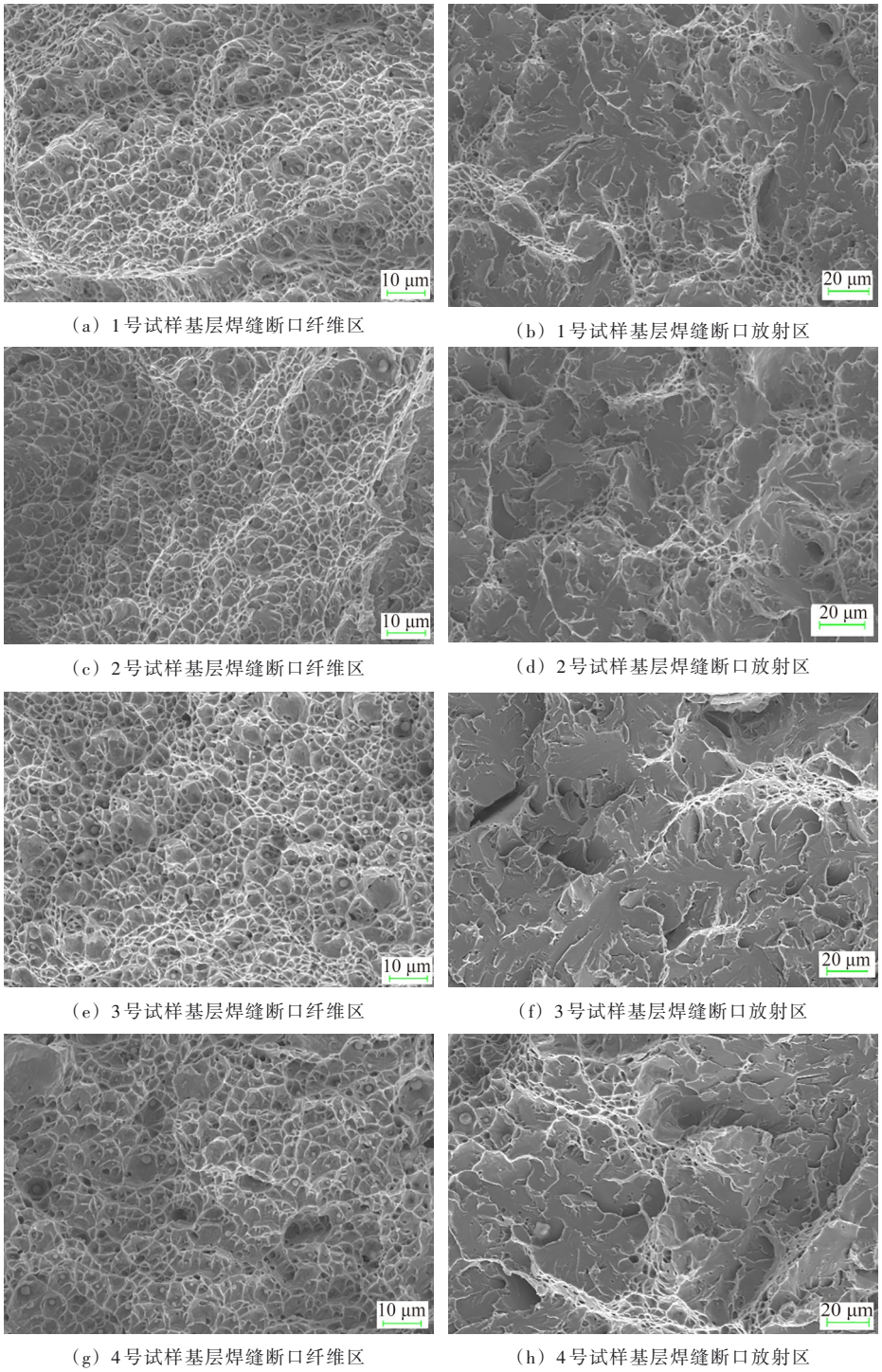
（c）3 号试样　　（d）4 号试样

图 15　覆层焊缝金相组织分布

Fig. 15　Metallographic structure distribution of cladding weld

中主要包含纤维区、放射区、剪切唇 3 个区域，其中断口纤维区和剪切区大部分为韧窝形貌，表现为韧性断裂。放射区形貌类型主要为解理台阶、河流状花样和舌状花样，表现为穿晶或者沿晶的脆性断裂，其中还包括准解理断裂，是一种介于解理断裂和韧窝断裂之间的断裂方式，以塑性方式撕裂，微观形貌主要以河流花样、舌状花样及韧窝与撕裂棱混合构成。冲击断口中基层焊缝面积占比接近 80%，在稳定控制基层焊缝的焊接工艺的前提下，1~4 号复合板接头冲击断口中基层焊缝断口形貌表现

一致，如图16所示，断口纤维区均表现为形状规整的等轴韧窝，放射区多为准解理的河流花样和韧窝。过渡层焊缝虽然位于冲击断口的剪切区域，表现为含韧窝形貌的韧性断裂，但由于过渡层焊缝的铁素体数、组织分布不同，过渡层焊缝断口的韧窝大小、分布均有区别。如图17所示，1号试板过渡层焊缝断口具有大而深的等轴韧窝形貌，焊缝冲击韧性最优；随着过渡层焊缝中铁素体数的增多，2~4号试板过渡层断口的韧窝尺寸、深度逐渐变小，韧性呈下降趋势，最终导致焊接接头冲击性能降低。



（a）1号试样基层焊缝断口纤维区　（b）1号试样基层焊缝断口放射区

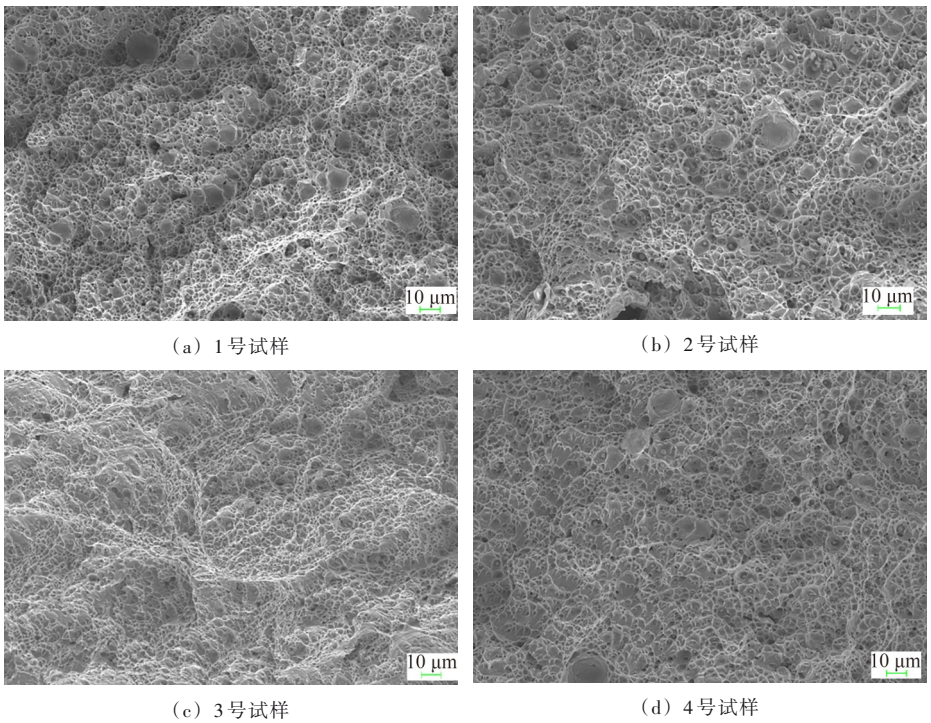
（c）2号试样基层焊缝断口纤维区　（d）2号试样基层焊缝断口放射区

（e）3号试样基层焊缝断口纤维区　（f）3号试样基层焊缝断口放射区

（g）4号试样基层焊缝断口纤维区　（h）4号试样基层焊缝断口放射区

图16　基层焊缝冲击断口形貌

Fig. 16　Graphics of impact fracture of base weld



（a）1 号试样　（b）2 号试样

（c）3 号试样　（d）4 号试样

图 17　过渡层焊缝冲击断口形貌

Fig. 17　Transition layer weld impact fracture morphology

3.7　耐腐蚀性能

对于典型的奥氏体-铁素体不锈钢焊缝金属，为平衡其焊接抗裂性及耐晶间腐蚀性能，过渡层焊材铁素体 FN 应为 10~13（对应铁素体含量为 10.8%~14.3%）时，能将覆层焊缝中铁素体 FN 控制在 5.6~7.5（对应铁素体含量为 5.9%~8.0%）范围内，可以满足奥氏体不锈钢耐蚀性能最优的 3%~8% 铁素体含量范围，为覆层焊缝耐蚀性能稳定提供了保障。考虑其耐蚀性能，由于单相奥氏体组织具有方向性强的柱状晶特征，如出现贫铬层则可以贯穿于晶粒之间从而构成腐蚀介质的集中通道，有较大的晶间腐蚀倾向，当焊缝中具有一定含量的铁素体，树枝晶被打散，对腐蚀介质不能构成集中的腐蚀通道，可以降低晶间腐蚀倾向；另外，铁素体相的铬、碳化铬含量高，可优先在铁素体相内部边缘沉淀，而不致在奥氏体晶粒的晶界形成贫铬层，因此奥氏体-铁素体焊缝金属中，铁素体含量为 3%~8% 为宜。实践证明，5% 左右的铁素体相可获得较为满意的抗晶间腐蚀能力。

作为复合板耐蚀层的不锈钢覆层，本研究主要考量其耐晶间腐蚀能力。对 4 块复合板焊接接头试样进行耐晶间腐蚀试验，按 GB/T 4334—2020 方法 E（铜-硫酸铜-16% 硫酸，20 h）进行。4 块试样进行晶间腐蚀后，弯曲 180°均无晶间腐蚀裂纹，表明试验结果合格。同时，对覆层焊缝表面的铁素体含量进行测定，采用磁性法测定，结果见表 15。过渡层焊材铁素体 FN 为 9~12 时，能将覆层焊缝中铁素体 FN 控制在 5.6~7.5 范围内，满足奥氏体不锈钢耐蚀性能最优的 3%~8% 铁素体含量范围，为覆层焊缝耐蚀性能稳定提供保障[8]。

表 15　覆层焊缝 FN 含量

Table 15　Cladding weld FN content

试板编号	测试方法	过渡层焊材 FN	过渡层焊材铁素体含量%	覆层焊缝表面 FN	覆层焊缝表面铁素体含量%
1 号	磁性法	10	10.8	5.6	5.9
2 号		13	14.3	7.5	8.0
3 号		17	16.8	9.8	10.8
4 号		22	21.4	12.5	13.6

4　结　论

1）本研究中，高性能 S31603/Q420qENH 复合钢板采用金威公司自主研制的配套焊材进行焊接，复合板焊接接头各项性能均满足项目技术需求。

2）采用 4 种不同铁素体含量的过渡层焊材焊接，均能有效控制基层焊缝对过渡层焊缝的 Cr、Ni 合金元素的稀释，确保复合板接头界面处合金元素的稳定过渡。

3）不同铁素体含量的过渡层焊材影响焊接接头性能。过渡层焊材熔敷金属中铁素体数FN控制在10~22（铁素体含量10.8%~21.4%）范围内，随着复合板过渡层焊缝中铁素体含量的增加和形态分布的改变，-40 ℃低温冲击韧性逐渐降低。其中当过渡层焊材FN为9时，过渡层焊缝中铁素体呈线状弥散分布，接头冲击性能最优。

4）兼顾焊接接头整体性能及覆层焊缝的耐腐蚀性能，当过渡层焊材铁素体FN为10~13（铁素体含量为10.8%~14.3%）时，覆层焊缝中铁素体FN可控制在5.6~7.5（铁素体含量为5.9%~8.0%）范围内，满足奥氏体不锈钢耐蚀性能最优时3%~8%的铁素体含量范围，为覆层焊缝耐蚀性能稳定提供保障。

参 考 文 献

[1] 李博文，高彩茹，李旺，等. 终冷温度对Q500耐候桥梁钢的低温冲击断裂行为影响[J]. 工业建筑，2024，54(12)：10-17.

[2] 黄彦博，刘智慧. Q235B+TP316L不锈钢复合板焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工)，2020(9)：19-21.

[3] 冯玉兰，蔡积虎. Q245R/0Cr18Ni9不锈钢复合板焊接工艺及接头力学性能[J]. 电焊机，2016，46(9)：68-72.

[4] 王伟，黄绍泉. 铁路钢桥用不锈钢复合钢板焊接技术[J]. 钢结构，2015，30(7)：76-78.

[5] 戴伟. 巢马铁路大桥不锈钢复合板焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工)，2024(6)：101-105.

[6] 白建斌，李佳恒，李伟，等. 耐候桥梁钢用焊条的研制及性能研究[J]. 工业建筑，2024，54(12)：26-34.

[7] 朱玮，吴建祥，沈圣华. 奥氏体不锈钢中铁素体含量对低温冲击性能和焊接性能的影响[J]. 冶金与材料，2020，40(2)：63-64.

[8] 吉章红. 奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量对性能的影响[J]. 中国特种设备安全，2012，28(12)：39-41.