

SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管激光 - CMT 复合焊 + 埋弧焊接头组织及性能

席敏敏^{1,2}, 李中祥^{1,3}, 黄胜¹, 田磊^{1,2}, 王强强⁴, 姜帆^{1,3}, 赵西岐^{1,2}

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008; 2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;
3. 上海宝世威石油钢管制造有限公司, 上海 200941; 4. 长庆油田公司第一采油厂, 陕西 延安 716099)

摘要: 采用激光 - CMT 复合焊 + 埋弧焊的焊接工艺对 SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管进行了生产试制, 利用 OM, EDS 研究了复合管焊缝微观组织特征及合金元素分布, 同时检验了焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能。结果表明, 焊缝合金成分合理, 合金元素稀释率低。内焊焊缝 (CMT 区域) 微观组织为奥氏体 + 铁素体 + 碳化物析出相, 内焊焊缝 (LBW 区域) 微观组织为奥氏体 + 铁素体 + 马氏体, Q235B 基层焊缝微观组织为铁素体 + 珠光体; 焊接接头抗拉强度平均值为 451 MPa, -10 °C 下焊缝及热影响区的冲击吸收能量平均值分别为 167 J 和 236 J, 焊接接头面弯、背弯 180° 拉伸面无裂纹 (弯轴直径 45 mm), 焊缝硬度最高值为 285 HV10; 晶间腐蚀试验后, 管体与焊缝弯曲 180° 拉伸面无裂纹 (弯轴直径 4 mm)。SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管激光 - CMT 复合焊 + 埋弧焊接头的各项性能均符合相关标准的要求, 能够满足饮用水输送工程的应用需求。

创新点: 区别于传统螺旋焊管的双面埋弧焊, 采用了激光 - CMT 复合焊 (内焊) + 埋弧焊 (外焊) 的工艺对 SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管进行焊接, 形成了“Y + V”形的焊接接头形貌, 减小了内、外焊缝的重合量, 有效地控制了不锈钢复层一侧焊缝合金元素的稀释及碳钢基层一侧焊缝合金元素的过量裹入, 避免了内、外焊缝高硬相的产生, 提升了焊接接头的综合性能。

关键词: 激光 - CMT 复合焊; SUS304/Q235B; 双金属冶金复合螺旋管; 微观组织; 晶间腐蚀

中图分类号: TG456 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220408002

Microstructure and properties of welded joint of SUS304/Q235B bimetal metallurgical clad spiral pipe by laser - CMT hybrid welding and submerged arc welding

Xi Minmin^{1,2}, Li Zhongxiang^{1,3}, Huang Sheng¹, Tian Lei^{1,2}, Wang Qiangqiang⁴, Jiang Fan^{1,3}, Zhao Xiqi^{1,2}

(1. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China;
2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China;
3. Shanghai BSW Petroleum Steel Pipe Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200941, China;
4. No. 1 Oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, Yan'an 716009, Shaanxi, China)

Abstract: Trial production of SUS304/Q235B bimetal metallurgical clad spiral pipe were carried out by welding process of laser-CMT hybrid welding and submerged arc welding. Characteristics of microstructure and alloy element distribution of welded joints of the clad pipe were studied by OM and EDS, and mechanical properties and corrosion resistance of welded joints were also tested. The results showed that alloy composition of weld was reasonable and dilution rate of alloy element was low. Microstructure of the internal weld (CMT area) was austenite, ferrite and carbide precipitates, that of the internal weld (LBW area) was austenite, ferrite and martensite, and that of Q235B base weld was ferrite and pearlite. Average tensile strength of welded joints was 451 MPa, and average impact absorbed energy of weld and heat affected zone at -10 °C was 167 J and 236 J, respectively. There was no crack on the tensile surface of 180° forward and back bending of welded joints (bending shaft diameter was 45 mm). The maximum hardness of weld was 285 HV10. After intergranular corrosion test, there was no crack on the

收稿日期: 2022 - 04 - 08 修改日期: 2022 - 05 - 19 录用日期: 2022 - 05 - 25

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划课题 (2014KTDZ01-03-02)

tensile surface of 180° bending of pipe body and weld (bending shaft diameter was 4 mm). Weld joints of SUS304/Q235B bimetal metallurgical clad spiral pipe by laser-CMT hybrid welding and submerged arc welding met requirements of relevant standards and application requirements of drinking water delivery engineering.

Highlights: Different from double-sided submerged arc welding method of traditional spiral welded pipe, welding process of laser-CMT hybrid welding (internal welding) + submerged arc welding (external welding) was adopted to weld SUS304/Q235B bimetal metallurgical clad spiral pipe, and “Y + V” shape welded joint was formed, which reduced overlap between the inner and outer welds, effectively controlled dilution of alloy elements on the side of stainless steel cladding weld and excessive encapsulation of alloy elements on the side of carbon steel base weld, avoided generating high hard phases in the inner and outer welds, and improved comprehensive performance of welded joints.

Key words: laser-CMT hybrid welding, SUS304/Q235B, bimetal metallurgical clad spiral pipe, microstructure, intergranular corrosion

0 前言

近年来,随着中国城市建设的飞速发展,市政供水的水质安全问题与相应的管网建设工作也得到了广泛关注^[1]。市政供水管道工程应用中发现,PCCP管易出现水泥砂浆内衬开裂、脱落,普通防腐钢管内涂层的耐久性能不佳,这些问题均会对水质安全产生不利影响^[2],造成水质污染或爆管等严重危害。目前,某些发达国家饮用水输送管材大多采用不锈钢管,材质一般为304/304L,316/316L不锈钢^[3]。国内部分地区也已在饮用水输送管道工程建设中采用不锈钢复合管,如云南地区已在国内首先推广不锈钢冶金复合管用于饮用水输送^[4];绍兴市自来水有限公司自2000年起就开始了内衬不锈钢机械复合管材的应用,并于2003年得到全面普及应用,2008年绍兴市二次供水管理办法出台,该办法规定建筑给水全部采用内衬不锈钢复合管^[5]。

相比于不锈钢管,不锈钢复合管在保证水质安全的同时,经济性更高^[4-5];而相较于机械复合的内衬不锈钢复合管,不锈钢冶金复合管不锈钢复层与碳钢基层界面结合强度更高,可有效避免管壁内侧不锈钢复层在使用过程中出现分层及塌陷的问题^[6-7]。但是,由于不锈钢冶金复合管的基层与复层为成分差异较大的不同材质,在焊接制管过程中不可避免会存在不锈钢复层一侧焊缝合金元素稀释、碳钢基层一侧焊缝裹入过量合金元素的情况,进而导致内、外焊缝产生高硬相,焊接接头力学性能及耐腐蚀性能也会相应降低^[8-11]。因此,对不锈钢冶金复合钢管的焊接方法进行探索、创新,对复合管焊接接头的组织及性能进行研究,对于提升冶金复合螺旋管的产品质量、保证市政供水水质清洁以及管道的安全运行十分重要。

该研究立足于工艺装备相对成熟、生产效率较高的螺旋焊管生产线,创新性地引入激光-CMT复合焊用于钢管内焊,同时保留了埋弧焊外焊工艺,焊接接头关键性能得到了有效提升,开发的激光-CMT复合焊+埋弧焊螺旋冶金复合钢管在满足高品质输水管线要求的同时兼具较高的性价比,对于国内清洁供水钢管产品的结构拓展具有较强的现实意义。

1 焊接方法

双金属冶金复合管一般采用分层施焊,包括对基层、过渡层及复层的焊接。其中,基层多采用MAG、埋弧焊、高频电阻焊等焊接方法,过渡层及复层多采用TIG、激光焊、带极电渣堆焊及等离子焊等焊接方法。对于SUS304/Q235B双金属冶金复合管,由于复层SUS304不锈钢与基层Q235B碳钢在合金成分上存在较大差异,焊接时在过渡界面附近容易产生淬硬的马氏体组织,增大焊缝冷裂纹倾向和硬度超标风险;同时,受熔合比的影响,焊缝局部区域合金成分被过渡稀释而导致相比比例失衡,从而降低焊缝抗腐蚀性能及综合力学性能。无论采用何种焊接方法,以上问题均不可避免,只能通过选择合理的焊接方法与焊接工艺匹配来降低影响。

对于采用螺旋成形的焊接钢管,相比于其他焊接方法,双面埋弧焊无疑是一种兼具可行性、效率及成本优势的焊接方法。但是,对于SUS304/Q235B双金属冶金复合材料,Q235B基层可采用埋弧焊,而SUS304复层厚度仅为1~2 mm,若复层采用埋弧焊,则会受到埋弧焊大热输入特点的影响而卷入较多基层母材,造成复层焊缝合金元素稀释,致使焊接接头力学性能及耐腐蚀性能下降。故而,对于SUS304复层的焊接,可考虑选用焊接热输入较小的焊接方法。

激光-电弧复合焊接技术是一种将物理属性和热量空间分布均不相同的两种(激光和电弧)热源复合在一起,通过其优缺点的互补,进行焊接的一种新型焊接技术,其兼具了激光焊能量密度高、穿透能力强和电弧焊接头成形好,装配要求低的优点,其原理如图 1 所示^[12]。激光和电弧的相互作用机理为:电弧的加热提高了激光的利用率,激光的引入对电弧起到一定的稳定和诱导增强作用,激光等离子体和电弧等离子体的相互吸引使电弧得到压缩增强^[13]。激光-电弧复合焊按照热源类型可以分为:激光-GTAW 复合焊、激光-GMAW 复合焊、激光-CMT 复合焊、激光-多电弧复合焊等。其中,冷金属过渡技术(Coldmetal

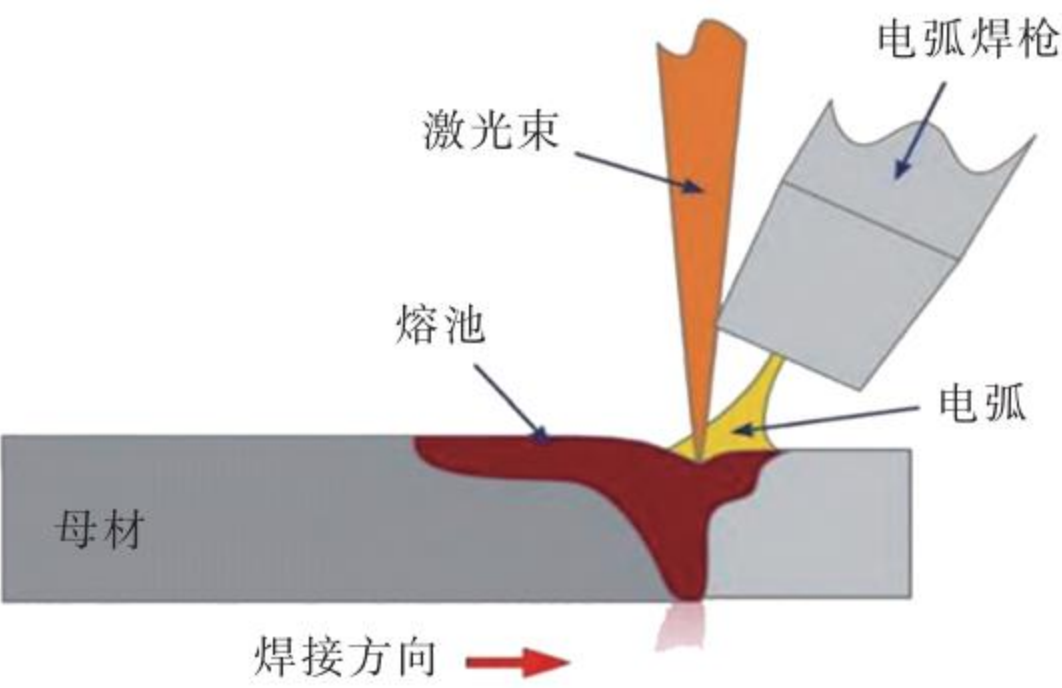


图 1 激光-电弧复合焊接原理图

transfer,CMT)在焊接过程中熔滴发生短路过渡,可降低热输入、避免熔滴穿透,能够实现无飞溅和良好的冶金连接^[14]。激光-CMT 复合焊综合了激光焊和 CMT 的优势,已在机械、化工及汽车制造等领域得到推广应用^[15]。

将激光-CMT 复合焊应用于 SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管内焊(复层的焊接),充分发挥了激光-CMT 复合焊的优势;同时在外焊(基层的焊接)时采用埋弧焊,并使用普通 Q235B 匹配的埋弧焊丝+烧结焊剂,在保证焊接效率与焊接质量的同时,节约了生产成本。

2 试验材料与方案

2.1 试验材料

试验母材为 SUS304/Q235B 热轧复合卷板,SUS304 复层厚度 1.3 mm,Q235B 基层厚度 6.7 mm。SUS304 复层填充金属选用规格为 $\phi 1.2$ mm 的 ER310 不锈钢焊丝,保护气体为纯 Ar。Q235B 基层焊接材料选用规格为 $\phi 4.0$ mm 的 H08Mn2SiA 低合金钢焊丝,匹配 SJ101G 氟碱型烧结焊剂。卷板及焊丝化学成分见表 1。

表 1 试验用卷板及焊丝化学成分(质量分数,%)

类别	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SUS304	0.04	0.46	1.00	0.026	0.001	8.27	18.3	0.001	0.02
Q235B	0.04	0.21	1.75	0.014	0.001	0.18	0.21	0.190	0.13
ER310	0.08	0.42	1.82	0.020	0.001	21.5	26.5	0.080	0.12
H08Mn2SiA	0.08	0.89	1.91	0.015	0.013	0.03	0.02	0.050	0.06
标准要求(复层 SUS304)	≤ 0.08	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	8.00~11.00	18.00~20.00	—	—

2.2 试验方案

采用“一步法”的生产工艺试制规格为 $\phi 810$ mm $\times$ (1.3+6.7) mm 的冶金复合螺旋管,先内焊后外焊,内焊(复层的焊接)采用激光-CMT 复合焊,外焊(基层

的焊接)采用埋弧焊(Submerged arc welding, SAW),焊接工艺参数见表 2。焊接坡口如图 2 所示。研究通过实施多组焊接工艺参数匹配试验,完成焊接工艺参数的优选。

表 2 焊接工艺参数

激光-CMT 复合焊						埋弧焊			
激光	焊接	电弧	焊接	送丝	保护气体	焊接	电弧	焊接	送丝
功率	电流	电压	速度	速度	流量	电流	电压	速度	速度
P/kW	I_c/A	U_c/A	$v_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	I_s/A	U_s/A	$v_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
2.2~2.6	120~130	23~24	1.5~1.7	2.5~3.5	15	750~850	31~33	1.5~1.7	2.0~2.1

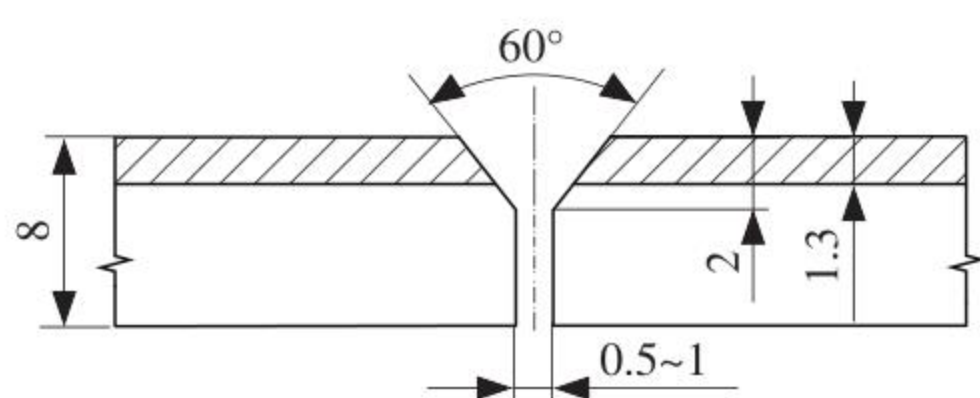
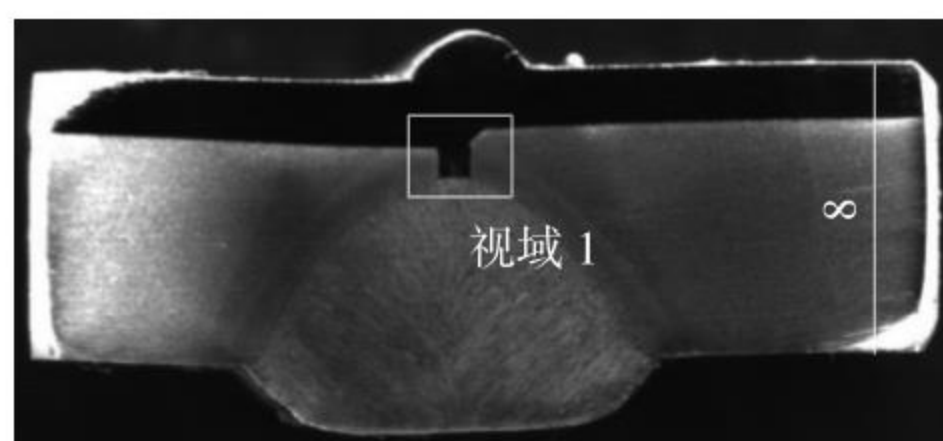


图2 焊接坡口示意图

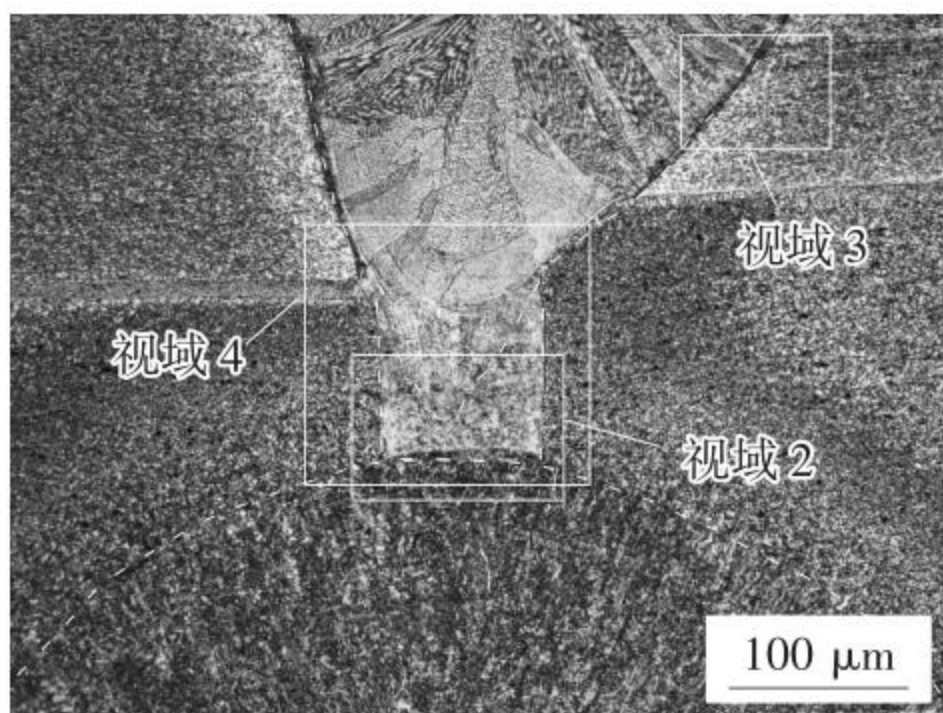
3 试验结果与分析

3.1 焊接接头宏观形貌

SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管激光-CMT复合焊+埋弧焊接头宏观形貌如图3所示。在激光-CMT复合焊的内焊与埋弧焊的外焊条件下,形成了特殊的接头形貌。内焊焊缝形貌整体类似Y形,上部V形区域主要由CMT焊接而成,下部I形区域主要由激光焊(Laser beam welding, LBW)焊接而成,类似于传统的过渡层焊缝;外焊单丝SAW焊缝形貌呈V形。内、外焊道成形良好,未见裂纹、未熔合及咬边等缺陷。由图3可见,激光-CMT复合焊时,CMT热源主要作用于复层一侧,且焊道仅裹入极少量的基层母材;LBW热源主要作用于靠近复层一侧的部分基层,存留焊道区域高度约0.6 mm、宽度仅0.5 mm左右,远小于内焊为埋弧焊时焊道的高度及宽度。外焊时,部分LBW焊道熔化于SAW焊道中,外焊埋弧焊道整体位于碳钢基层一侧。



(a) 宏观形貌



(b) 视域1

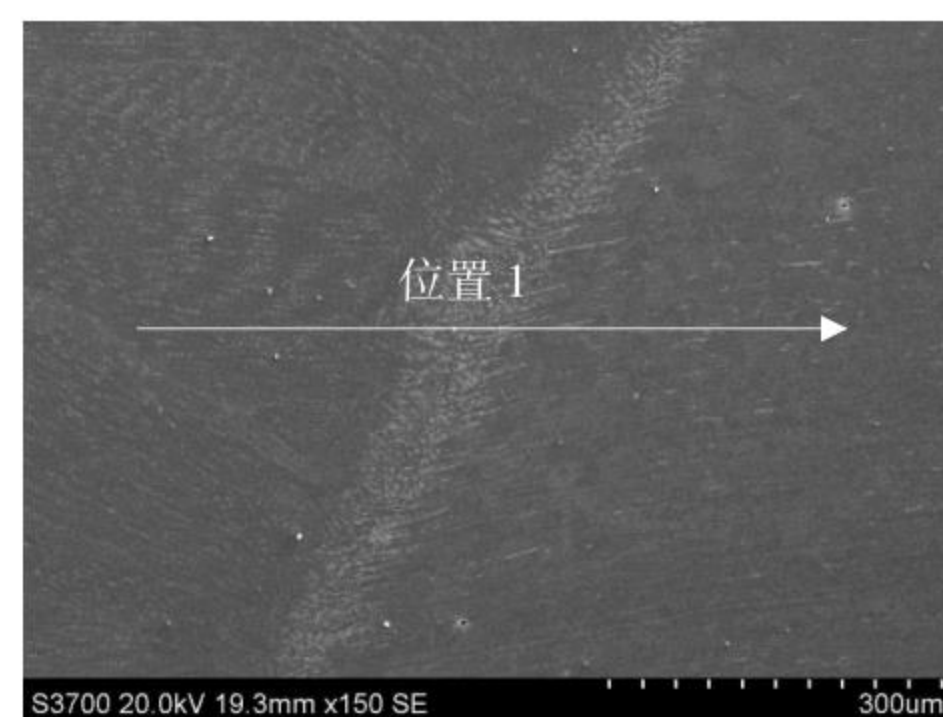
图3 焊接接头形貌

在试验研究过程中发现,对于螺旋成形焊管来说,由于成形过程受力较为复杂,合口稳定性控制难度较大,但在冶金复合螺旋管复层一侧激光-CMT复合焊

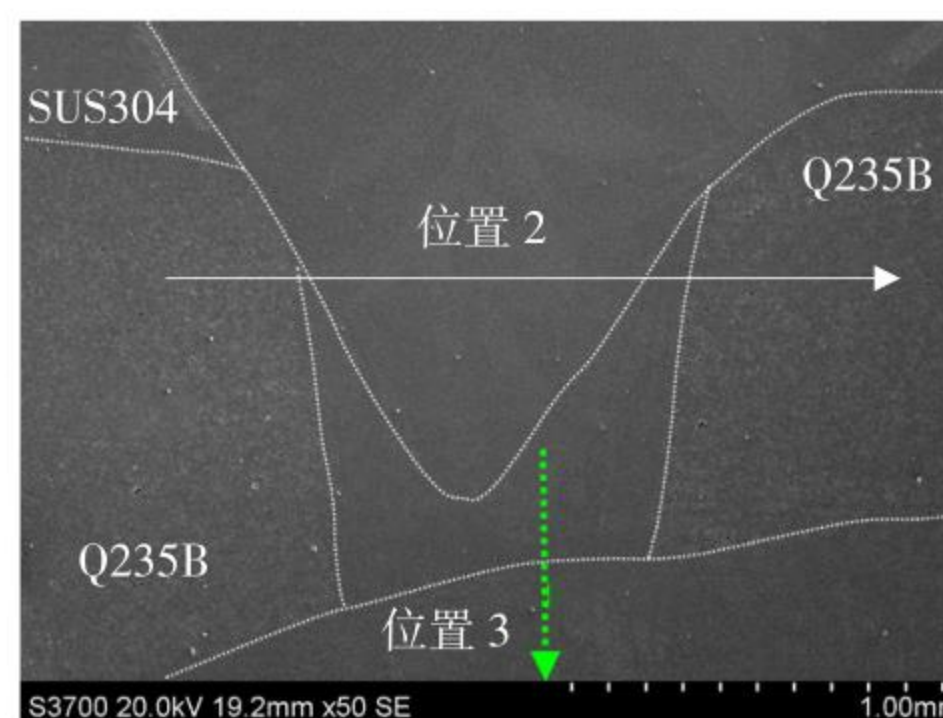
时,激光热源能量密度集中,合口稳定性已成为影响焊接稳定性与焊缝形貌的主要因素,故而在实际生产过程中必须严格控制。

3.2 焊接接头合金元素分布

对图3b中的视域3及视域4,分别按照图4a的位置1、图4b的位置2与位置3进行EDS线扫描,结果如图5所示。EDS线扫描位置1由SUS304不锈钢复层一侧内焊焊缝(CMT区域)至复层母材,由图5a扫描结果可见,复层一侧内焊焊缝(CMT区域)与复层母材Cr,Ni含量基本相当。EDS线扫描位置2由Q235B基层母材至复层一侧内焊焊缝(CMT区域+LBW区域)再至基层母材,由图5b扫描结果可见,复层一侧内焊焊缝(CMT区域+LBW区域)中的Cr,Ni合金元素远高于基层母材。EDS线扫描位置3由复层一侧内焊焊缝(LBW区域)至基层一侧外焊焊缝,由图5c扫描结果可见,复层一侧内焊焊缝(LBW区域)中的Cr,Ni合金元素远高于基层一侧外焊焊缝,但整体Cr,Ni含量低于CMT区域焊缝。对图3b中的视域4进行EDS面扫描,而扫描结果如图6所示。Cr,Ni元素集中分布于SUS304不锈钢复层母材及焊缝。SUS304复层母材与CMT焊缝中的Cr,Ni元素含量未见较大差异,LBW焊缝中的Cr,Ni含量稍低于CMT焊缝,LBW与SAW熔合区Cr,Ni元素含量明显降低,SAW焊缝中Cr,Ni合金



(a) 位置1



(b) 位置2与位置3

图4 EDS线扫描位置

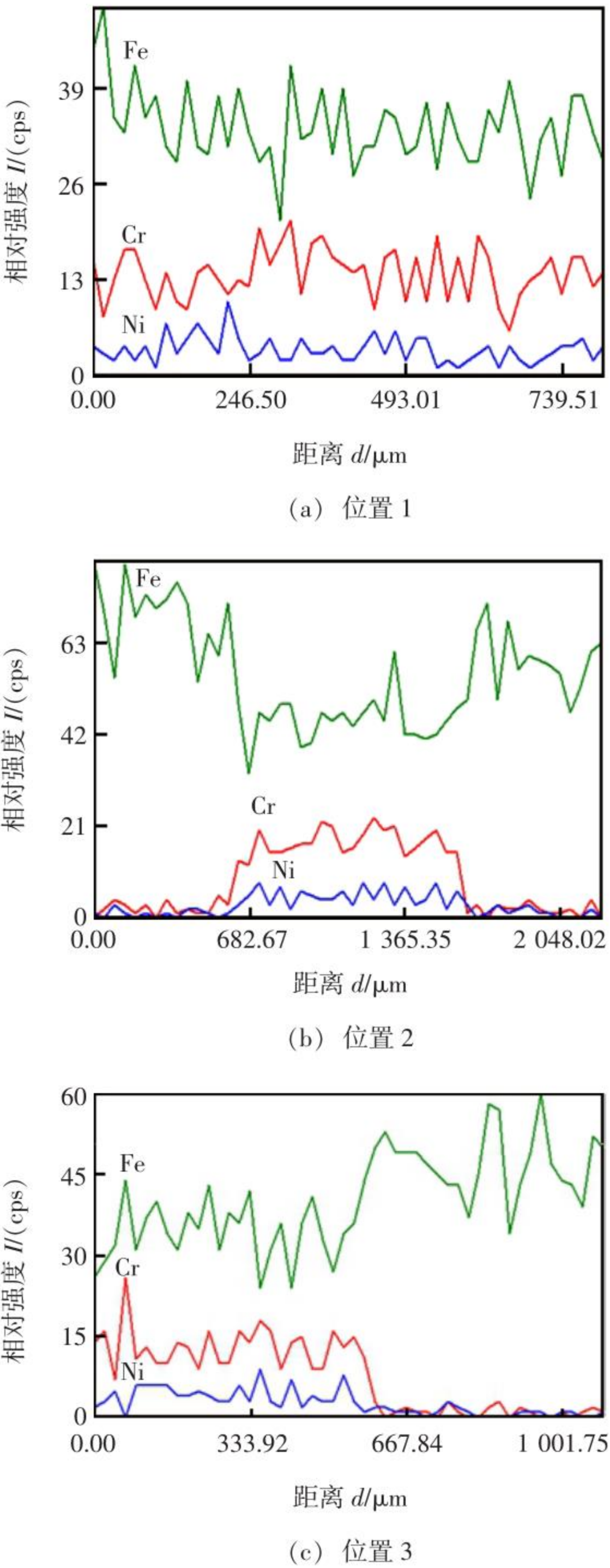


图5 EDS 线扫描结果

元素含量与 Q235B 基层母材未见较大差异。

通过对焊接接头进行 EDS 线扫描与面扫描结果可见,在激光 - CMT 复合焊 + 埋弧焊工艺下,形成了特殊的接头形貌,SUS304 复层一侧仅 LBW 焊缝中的 Cr, Ni 元素有所稀释,且 Q235B 基层一侧 SAW 焊缝中也未卷入大量 Cr, Ni 合金元素。由于 LBW 焊缝在整体焊缝中所占比例极小,合金元素稀释造成的不利影响也可得到有效的控制。

3.3 焊接接头微观组织

SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管焊接接头

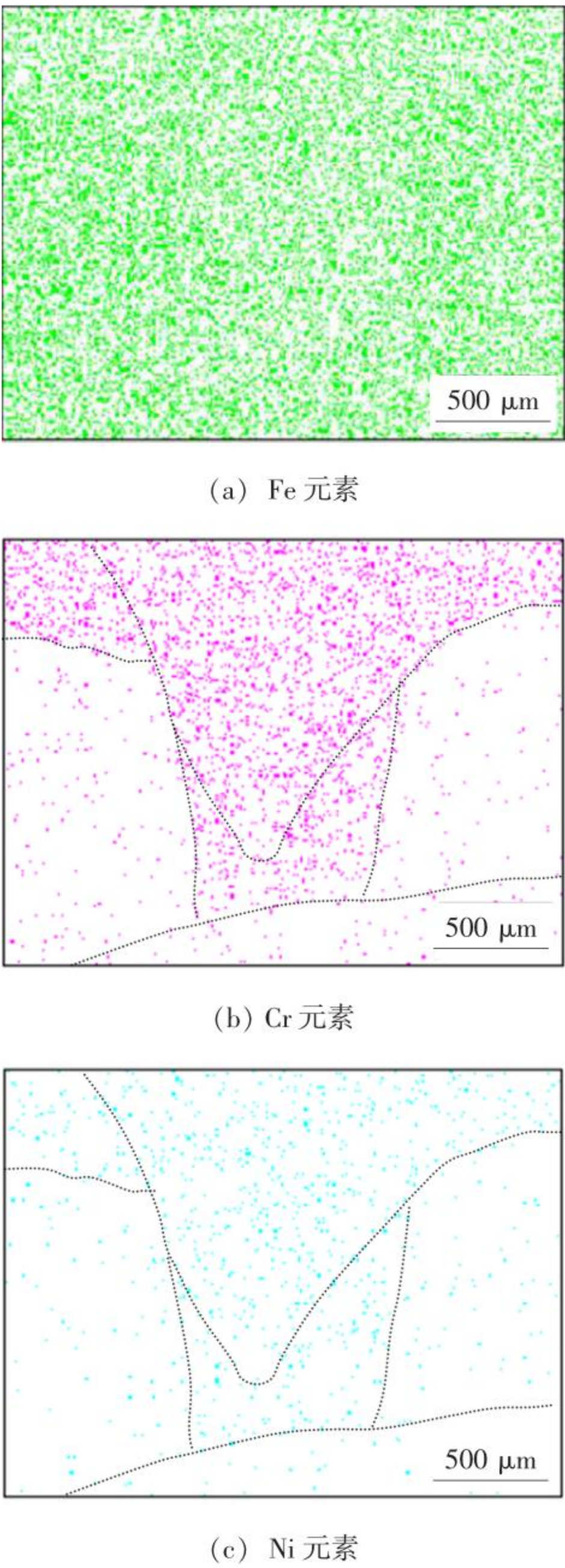


图6 EDS 面扫描结果

微观组织如图 7 所示。图 7a 为内焊、外焊交界区。在激光 - CMT 复合焊区域中,CMT 热源与 LBW 热源作用下的焊道熔合线分界清晰;外焊 (SAW) 焊道仅熔化部分 LBW 焊道,未涉及 CMT 焊道。图 7b 为内焊 CMT 热源作用下的焊缝组织,为奥氏体 (γ) + δ 铁素体 + 碳化物析出相。其中,奥氏体为主要组织,沿熔池凝固方向生长; δ 铁素体及碳化物析出相为次要组织, δ 铁素体以网格状或条状分布于奥氏体周边,碳化物析出相以点状断续分布于奥氏体晶界。该焊缝组织在形成过程,以 δ 铁素体为初始析出相,当冷却温度进入到 $\gamma + \delta$ 双相区后,发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变,奥氏体通过消耗部分 δ 铁素体不断长大,形成针片状形态,残余富 Cr、贫 Ni 的 δ 铁素体以网格或条带形态分布于奥氏体晶界和柱状晶

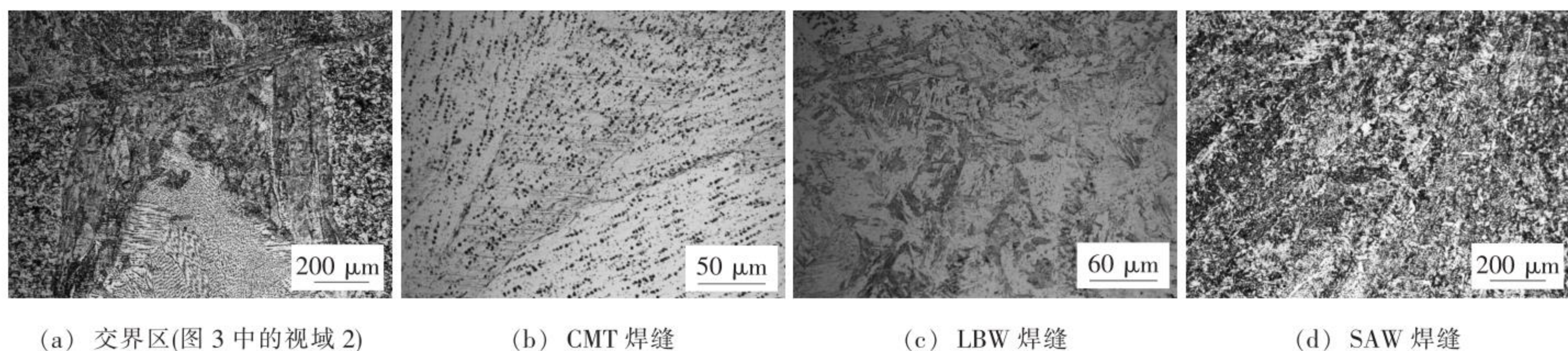


图7 焊接接头微观组织

晶界,最后在奥氏体晶界析出碳化物,最终形成以奥氏体为主、 δ 铁素体与碳化物析出相为辅的焊缝组织。多项研究表明,该种以奥氏体为主,同时含有少量 δ 铁素体的奥氏体不锈钢焊缝组织,有利于提高焊缝抗热裂纹及晶间腐蚀的能力^[16-17]。图 7c 为内焊 LBW 热源作用下的焊缝组织,主要为奥氏体 + δ 铁素体 + 马氏体。在 LBW 热源作用下,熔化的 Q235B 碳钢基层与填充金属 ER310 共同形成该处焊道,Cr,Ni 元素被稀释,在熔池凝固过程中,以 δ 铁素体为初始析出相,随着温度的降低,发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变,由于奥氏体稳定化元素 Ni 的大量稀释,从而发生马氏体相变,最终形成奥氏体 + δ 铁素体 + 马氏体的焊缝组织。图 7d 为外焊(SAW)焊缝组织,判断主要为针状铁素体 + 先共析铁素体 + 侧板条铁素体 + 珠光体。在熔池凝固过程中,以奥氏体为初始析出相,随着温度的降低,发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变,在冷却

到较高温度下时,由奥氏体晶界析出先共析铁素体;继续冷却下,由奥氏体晶界先共析铁素体侧面以板条状向晶内生长形成侧板条铁素体;继续冷却至较低温度时,在奥氏体晶界内析出针状铁素体;凝固过程同时发生共析转变所形成的铁素体与渗碳体的共析组织 - 珠光体;最终形成了针状铁素体 + 先共析铁素体 + 侧板条铁素体 + 珠光体的焊缝组织。该焊缝组织以交织分布的针状铁素体为主,具有较好的力学性能。

3.4 焊接接头力学性能

对 SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管焊接接头进行拉伸、弯曲及冲击性能检验,试验结果见表 3。焊接接头拉伸、冲击及弯曲性能均符合 GB/T 32958—2016《流体输送用不锈钢复合钢管》及 GB/T 31940—2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》的要求。

表 3 焊接接头拉伸、冲击及弯曲试验结果

类别	抗拉强度 R_m /MPa	-10℃ 冲击吸收能量 A_{KV} /J		导向弯曲(180°, $d=45$ mm)	
		焊缝中心	热影响区	面弯	背弯
实测值	460,421,473	164,170,167	231,242,234	表面无缺陷	表面无缺陷
标准要求	≥ 370	0℃,平均值 ≥ 24		弯曲 180°拉伸面无裂纹	

焊接接头硬度取点测量位置如 8 所示,试验结果如图 9 所示。Q235B 基层一侧热影响区硬度为 145 ~ 171 HV10,焊缝硬度为 193 ~ 285 HV10;由于基层一侧内焊(LBW)焊缝中高硬相马氏体组织的存在,硬度达到 285 HV10。SUS304 复层一侧母材硬度为 250 ~ 263

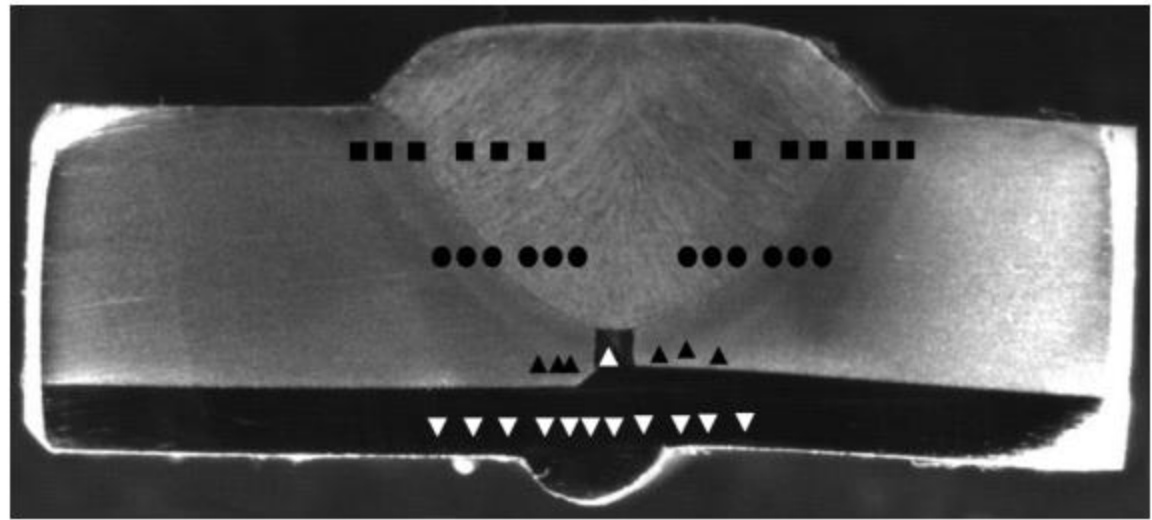


图8 焊接接头硬度取点测量位置

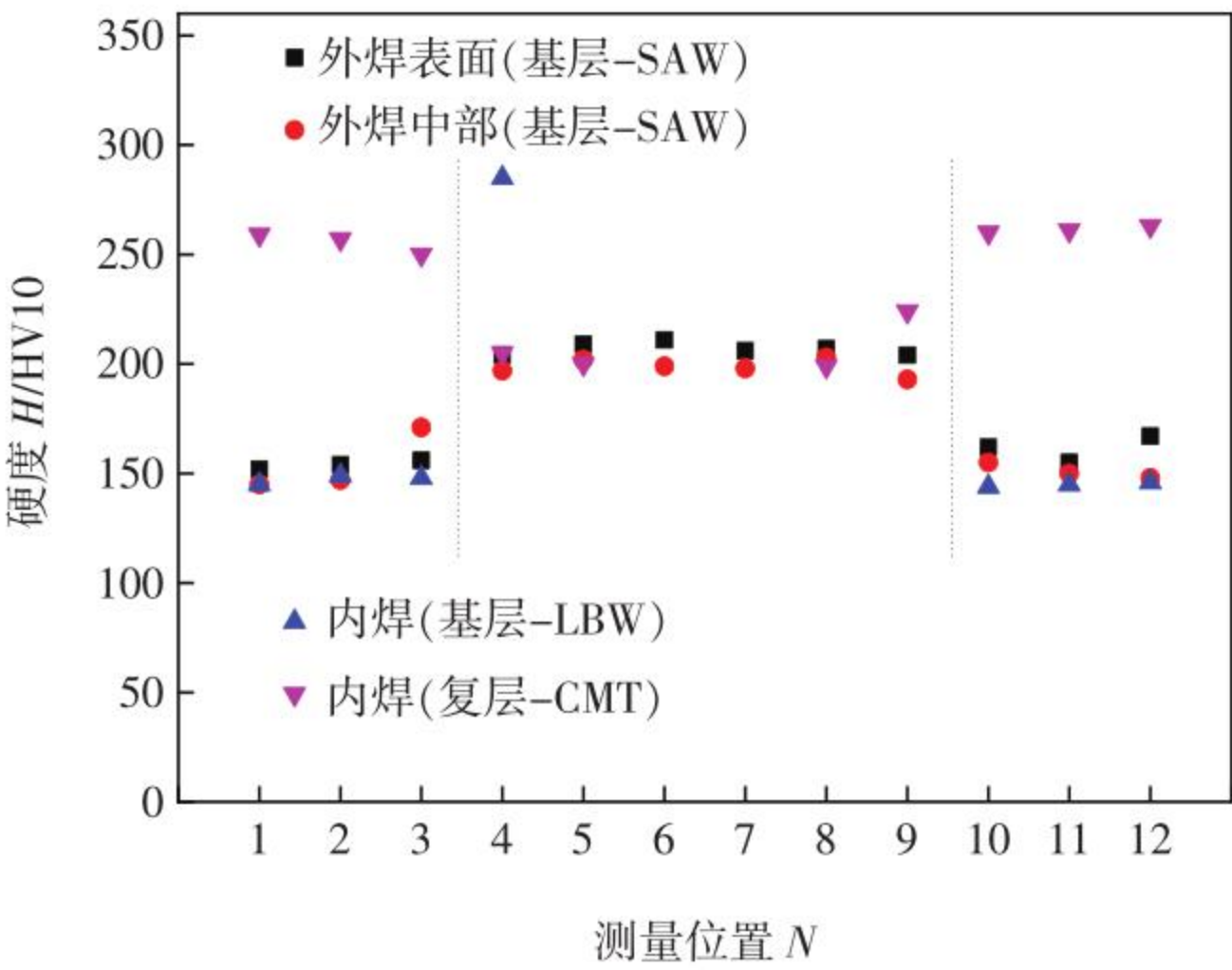


图9 焊接接头硬度取点测量位置与结果

HV10,焊缝硬度为 199 ~ 224 HV10。整体满足 GB/T 31940—2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》中规定的基层硬度不大于 248 HV10、复层硬度不大于 300 HV10 的要求。GB/T 32958—2016《流体输送用不锈钢复合钢管》对焊接接头硬度的规定为双方协议。

3.5 焊接接头抗腐蚀性能

从管体及焊缝各取 1 个试样,按照 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀不锈钢晶间腐蚀试验方法》E 法进行晶间腐蚀性能检测,试样尺寸 15 mm × 2 mm × 50 mm,弯心直径 4 mm,2 个试样均未发生腐蚀,如图 10 所示,且弯曲后无裂纹,满足 GB/T 31940—2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》的规定。



图 10 晶间腐蚀试验结果

4 结论

(1) 采用激光 - CMT 复合焊 + 埋弧焊的工艺,成功实现了 SUS304/Q235B 双金属冶金复合螺旋管的生产试制,焊接接头综合力学性能与耐晶间腐蚀性能均达到相关标准要求,为该焊接工艺方案下不锈钢双金属冶金复合螺旋管的批量化生产提供了技术支撑。

(2) 焊接接头内焊(CMT 区域)焊缝微观组织为奥氏体 + 铁素体 + 碳化物析出相,内焊(LBW 区域)焊缝微观组织为奥氏体 + 铁素体 + 马氏体,Q235B 基层焊缝微观组织为铁素体 + 珠光体,焊缝微观组织设计合理。

(3) 焊接接头抗拉强度平均值为 451 MPa,焊缝及热影响区 - 10 °C 冲击吸收能量平均值分别为 167 J 和 236 J,焊接接头正弯、背弯 180°拉伸面无裂纹(弯轴直径 45 mm),焊缝硬度最高值为 285 HV10;管体及焊缝晶间腐蚀试验后弯曲 180°拉伸面无裂纹(弯轴直径 4 mm)。研究开发的复合管抗晶间腐蚀性能优良,试验结果满足相关标准要求。

参考文献

- [1] 黄东龙,董玉莲,朱争亮. 强化水源及终端水质防护保障广州城市供水安全的实践与探索[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 155 - 159.
- [2] 张玉先,陈欣,张硕,等. 常州市大口径输水钢管爆管

原因与对策研究[J]. 给水排水, 2006, 32(7): 89 - 93.

- [3] 李相宜,赵蓓,游晓旭,等. 供水管道管材的特性及应用综述[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 52 - 59.
- [4] 鲁流金,段智宏. 不锈钢复合管输送生活水应用实践[J]. 昆钢科技, 2013(3): 14 - 20.
- [5] 李强. 内衬不锈钢复合管在建筑给水系统的应用前景[J]. 海河水利, 2017(S1): 135 - 136, 145.
- [6] 李循迹,王福善,李发根,等. 机械复合管衬层塌陷失效分析及对策研究[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 545 - 548.
- [7] 杨专钊,李安强,魏亚秋. 双金属复合管标准发展现状及存在的问题[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 395 - 399.
- [8] 刘云,杨军. Q235B/SUS304 螺旋冶金复合管埋弧焊接头的组织和性能[J]. 焊接, 2019(10): 38 - 46, 51.
- [9] Sarkari Khorrami M, Mostafaei M A, Pouraliakbar H, et al. Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 608: 35 - 45.
- [10] Mas F, Martin G, Lhuissier P, et al. Heterogeneities in local plastic flow behavior in a dissimilar weld between low - alloy steel and stainless steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 667: 156 - 170.
- [11] 杨延华. X60/625 镍基合金复合管环缝焊接工艺及应用[J]. 焊接, 2022(1): 48 - 54.
- [12] 符成学,马照伟,雷小伟,等. 激光 - 电弧复合焊接技术现状及其在钛合金领域的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(4): 82 - 88.
- [13] 王威,李丽群,王旭友,等. 激光与电弧复合焊接技术[J]. 焊接, 2004(3): 6 - 9.
- [14] 张恒铭,石玟,李春凯,等. 极性对细直径自保护药芯焊丝 CMT 下熔滴过渡及焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 75 - 81.
- [15] 苗玉刚,王清龙,李春旺,等. 中厚板钛合金激光 - CMT 复合焊接工艺特性分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(8): 42 - 47.
- [16] 周媛,蔡艳,衡昊坤,等. 侧吹气体对奥氏体不锈钢激光焊缝组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 113 - 120.
- [17] 王小朋. 不锈钢纯 Ar 保护激光扫描 - CMT 复合焊接研究[D]. 北京: 机械科学研究总院硕士学位论文, 2012.

第一作者: 席敏敏,硕士,工程师;主要从事油气输送焊接钢管产品与焊接材料的开发;bsgxmm@cnpc.com.cn。

(编辑:王龙权)