

铁路钢桥用高强度不锈钢复合钢板力学性能 及焊接工艺研究

曾周燊¹, 黄晨阳², 徐向军³, 班慧勇^{2*}

(1. 南京钢铁股份有限公司, 南京 210035; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;
3. 中铁山桥集团有限公司, 河北 秦皇岛 066205)

摘要: 为研究铁路钢桥用高强度不锈钢复合钢板的基本力学性能和焊接工艺, 对 S31603+Q500qE 复合钢板及其两类焊接接头开展了拉伸、冲击、冷弯及维氏硬度试验研究, 并对复合界面进行了剪切与粘结性能试验。基于试验结果, 得到了高强度不锈钢复合钢材的拉伸力学指标、复合界面强度及冲击韧性指标, 并对其冷弯成型性能进行了试验验证; 同时获得了两类焊接接头的拉伸力学指标、冲击韧性指标及硬度分布规律。结果表明: 高强度不锈钢复合钢材的基本力学性能均满足规范要求, 复合界面强度远超规范限值, 并随基层强度提高而增大; 两类焊接接头的力学性能差异较小, 接头 WI 低温冲击韧性表现更优, 接头 WII 在低温下的冲击韧性及硬度分布略有降低, 但两类焊接接头的冲击韧性均满足规范要求, 可为不锈钢复合钢材简化焊接工艺的应用提供参考。

关键词: 铁路钢桥; 高强度不锈钢复合钢; 焊接工艺; 对接接头; 力学性能; 复合界面; 冲击韧性

中图分类号: TG457.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)05-0071-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20241107002

Research on Mechanical Properties and Welding Procedures of High-Strength Stainless-Clad Bimetallic Steel Plates for Railway Steel Bridges

ZENG Zhouyu¹, HUANG Chenyang², XU Xiangjun³, BAN Huiyong^{2*}

(1. Nanjing Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, China)

*Corresponding author: banhy@tsinghua.edu.cn

Abstract: To study the basic mechanical properties and welding procedures of high-strength stainless-clad bimetallic steel for railway steel bridges, a series of tests were conducted on the S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel plates and two types of butt joints. These tests included tensile, Charpy impact, cold bending and Vickers hardness tests. Additionally, shear and combine tests were performed on the bonding interface. Based on the test results, the tensile properties, interface bonding strength, and impact toughness for the high-strength stainless-clad bimetallic steel plate were determined, and their cold bending performance was verified. Furthermore, the tensile properties, impact toughness and Vickers hardness distribution patterns of the butt joints were obtained. The results

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3706403), 国家自然科学基金(52061160485)

作者简介:

曾周燊(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事热轧高耐蚀金属复合材料的研制与开发。E-mail: zengzhouyu@njsteel.com.cn。

通信作者:

班慧勇(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进金属结构与高性能钢结构方面的研究。E-mail: banhy@tsinghua.edu.cn。

demonstrate that the basic mechanical properties of the high-strength stainless-clad bimetallic steel meet the specification requirements. Meanwhile, the interfacial bonding strength significantly exceeds these requirements and increases with the strength of base material. The mechanical properties of the two butt joints show minimal differences, with both meeting the impact toughness specifications. However, the impact toughness and hardness distribution of joint WII are slightly lower at low temperatures, while joint WI shows relatively better impact toughness at low temperatures. These findings provide a reliable reference for simplifying the welding procedures for high-strength stainless-clad bimetallic steel.

Keywords: railway steel bridge; high-strength stainless-clad bimetallic steel; welding procedure; butt joint; mechanical property; bonding interface; impact toughness

钢桥面板的传统防腐措施主要包括涂层防护、阴极保护和提升钢材耐蚀性能^[1]。然而,涂层防护和阴极保护耐久性有限、维护成本高,且存在一定环境污染风险,不利于铁路桥梁结构的全生命周期建设^[2-3]。因此,提高钢材耐蚀性能、推广新型耐腐蚀高性能钢材应用,成为构建新型铁路桥梁结构的重要技术途径。以不锈钢复合钢板为代表的新型双金属复合钢材可有效解决桥面的防腐和耐久性问题^[4]。

不锈钢复合钢板通过轧制、爆炸等工艺实现了不锈钢复层与结构钢基层的冶金结合^[5]。该工艺不仅保留了高性能材料(不锈钢)的优异性能,还大幅减少了贵金属的用量、降低生产成本,因此具有更高的性价比和更优的综合社会经济效益。目前,不锈钢复合钢板已在桥梁工程及建筑结构幕墙中得到应用;五峰山长江大桥、南淝河大桥及经开区大桥采用了316L+Q370q、321+Q345q不锈钢复合钢板作为铁路钢桥与道砟直接接触的钢面板^[6-7];马来西亚进出口银行大厦、广州富力盈凯大厦的幕墙采用了不锈钢复合钢板作为幕墙支撑构件^[8]。除此之外,该类钢材在各类对耐蚀性有较高要求的工程、桥梁结构、工业建筑及海洋工程中均具有广阔应用前景。

目前,国内外学者对不锈钢复合钢板的力学性能开展了充分研究^[4]。拉伸性能方面,试验研究表明304L+A516Gr60^[9]、316+A283^[10]、316+Q235B^[11]等不同牌号复合钢的材料力学性能指标均可采用混合法则加权简化计算;作者团队^[12]测定了高温下316L+Q235B不锈钢复合钢板的力学指标。针对双金属复合板的拉伸断裂理论,有学者结合界面强度与两层金属协同工作机理,提出不锈钢复合板的三类拉伸断裂模式^[13-16],并分析了微观力学性能与断裂模式的关系^[17]。复合界面性能方面,研究聚焦于力学性能与焊接工艺的关系,从强度特征、微观组织、工艺参数等角度开展系统分析^[18-21],验证了复合界面可满足工程正常使用要求。焊接工艺层面,多数研究遵循基层与复层分别焊接的原则进行焊缝构造与质量的研究^[22-24];作者团队^[25]针对不锈钢复合钢板三种不同构造的对接接头,开展了力学试验、微观组织分析及耐腐蚀试验研究,对宏观力学性能进行微观机理分析。结构构

件层面,ZHAO等^[26-27]对不锈钢复合钢圆管构件开展了残余应力试验研究,首次建立双金属复合钢构件残余应力模型;MEI等^[28-29]开展双金属复合板弹塑性理论分析与公式推导,给出了无缺陷与有缺陷板件的承载力修正公式;BAN等^[30]基于箱形截面短柱试验建立有限元模型,提出了适用于不锈钢复合钢材箱形焊接短柱的宽厚比限值与局部稳定承载力设计方法。

现有研究从基本力学性能、焊接工艺评定及构件力学性能等角度对不锈钢复合钢材钢结构进行了充分研究,建立了完整的研究方法。但已研究的不锈钢复合钢板多为不锈钢与普通结构钢的组合,尚未见针对高强度不锈钢复合钢板的研究。随着我国现代钢结构对高强度钢材需求持续提升、相关研究不断深入^[31-33],高强度化成为不锈钢复合钢材的重要发展方向。结合不锈钢复合钢材在桥梁领域的广阔应用前景,亟需开展桥梁用高强度复合钢材的专项研究。

基于此,本文以铁路钢桥用S31603+Q500qE高强度不锈钢复合钢板为研究对象,开展母材及两种对接接头的基本力学性能试验研究,包括拉伸、冲击性能测试、复合界面剪切与粘结性能试验、母材冷弯试验以及两种对接接头的维氏硬度试验。试验结果可为铁路钢桥用高强度不锈钢复合钢材的焊接工艺优化与工程应用提供依据。

1 试验方案

试件采用不锈钢复合钢板加工,复层为3 mm厚的S31603不锈钢,基层为16 mm厚Q500qE的高强桥梁钢。母材及两类焊缝对接接头的静态拉伸试验、复合界面的剪切和粘结性能试验在清华大学土木工程系结构实验室完成;母材及两类对接接头的夏比冲击试验、母材冷弯试验、两类对接接头的维氏硬度试验在中铁山桥集团有限公司完成。试件均采用线切割加工,各试验类别及编号如表1所示。其中,各试件组编号由试件名称缩写与对应材料名称缩写或代号组成,例如,静态拉伸试验母材的试验组中,“TC”代表静态拉伸试件,“BM”代表母材;对于界面剪切和粘结试验,由于只能对母材

开展试验,因此省略材料名称缩写,直接将试验组命名为“S”和“C”。

表1 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢板试验汇总
Table 1 Summary of tests conducted on S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel plate

试验类别	材料	试件组编号	试件数量/个
静态拉伸试验	母材	TC-BM	3
	对接接头1	TC-WI	3
	对接接头2	TC-WII	3
界面剪切试验	母材	S	4
界面粘结试验	母材	C	4
冷弯试验	母材	B-BM	6
夏比冲击试验	母材	Cha-BM	9
	对接接头1	Cha-WI	12
	对接接头2	Cha-WII	12
维氏硬度试验	对接接头1	M-WI	1
	对接接头2	M-WII	1

1.1 母材试验

静态拉伸试件尺寸与加载方案根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[34]确定,试件实物及尺寸如图1所示,共设计3个平行试件。加载时应变率控制为 $0.000\ 25\ s^{-1}$,满足规范应力-应变全曲线测量要求。试件两侧粘贴应变片并架设引伸计,应变片用于测量弹性阶段的应变数值以计算弹性模量,引伸计用于获取试验全程应变数值。

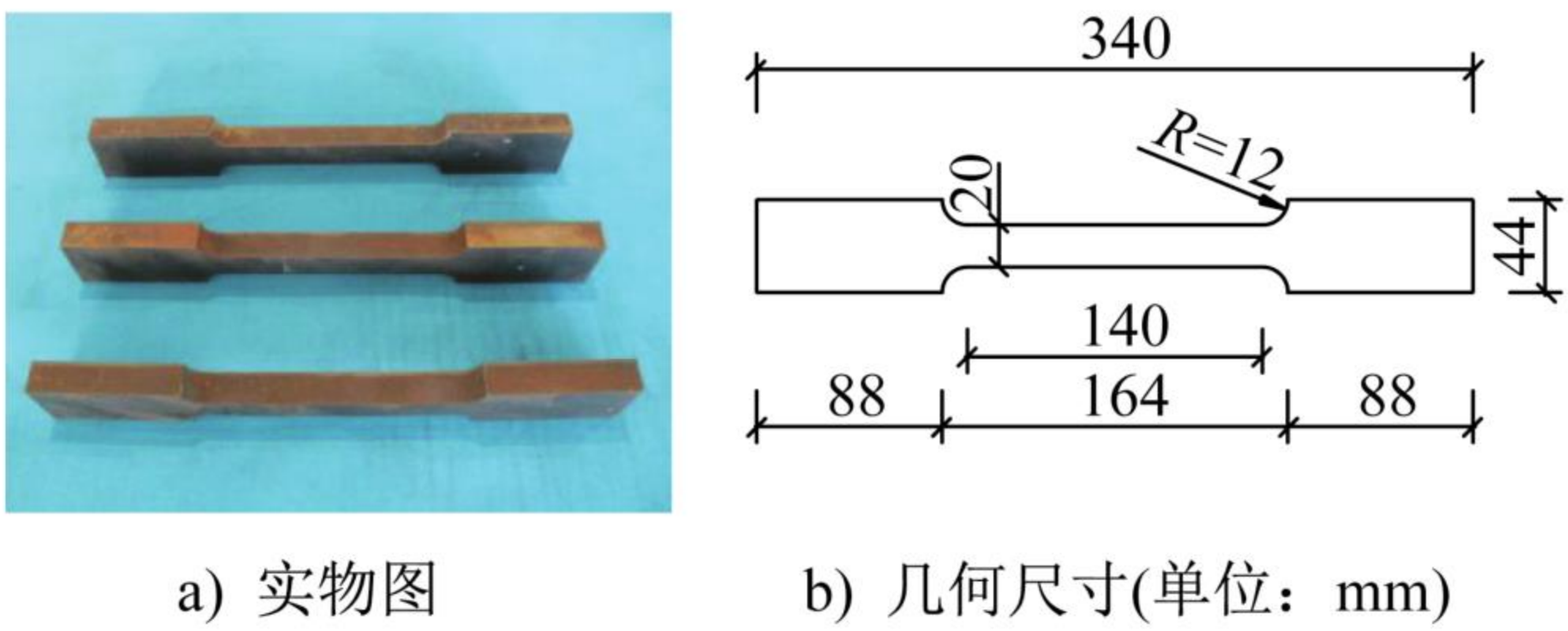


图1 标准拉伸试件

Fig. 1 Standard tensile specimens

界面剪切试验用于测定不锈钢复合钢板界面的抗剪强度,试件尺寸与加载方案根据《复合钢板力学及工艺性能试验方法》(GB/T 6396—2008)^[35]确定,如图2所示,共设计4个平行试件。采用应力控制加载,速率为 $1\sim 3\ N\cdot(mm^2\cdot s)^{-1}$ 。

界面粘结试验用于测定不锈钢复合钢板界面法向粘结强度,试件尺寸与加载方案根据《复合钢板力学及工艺性能试验方法》(GB/T 6396—2008)^[35]确定,如图3所

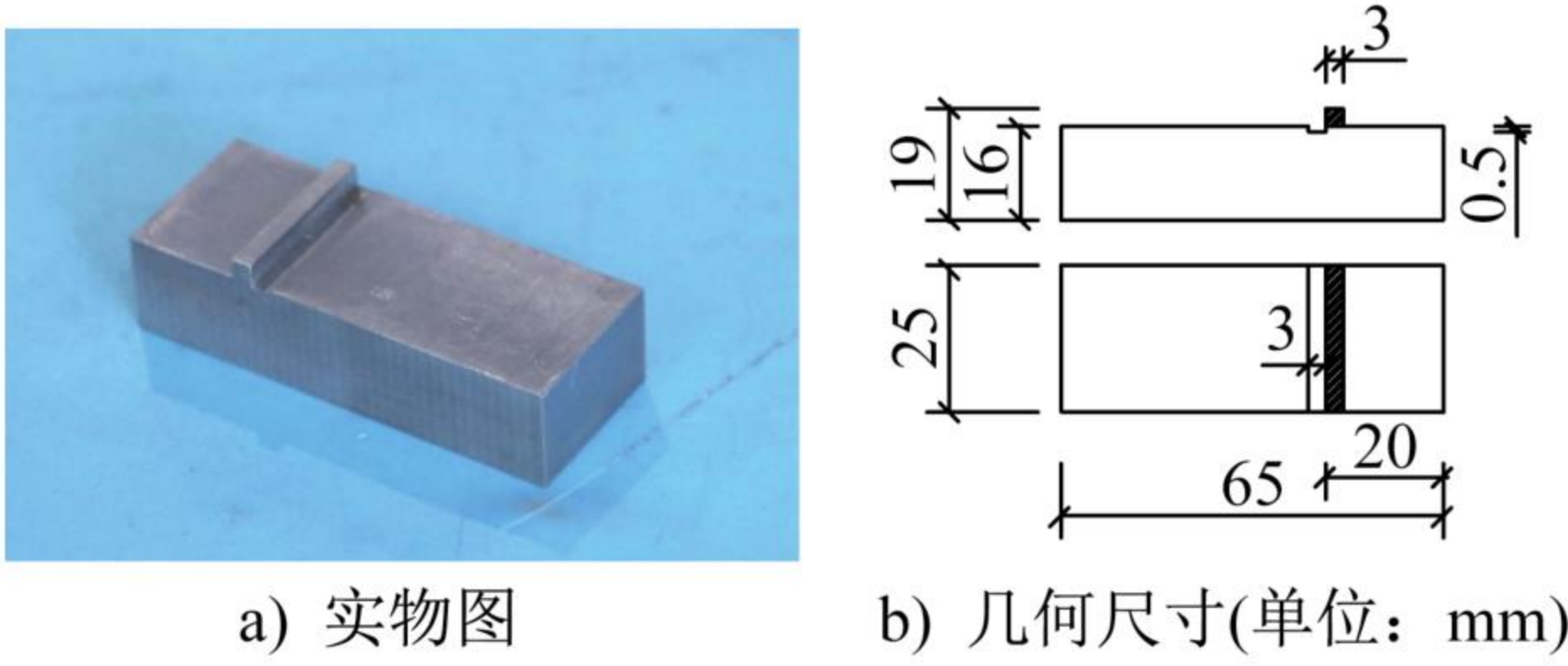


图2 复合界面剪切试验试件

Fig. 2 Specimen of bonding interface shear test

示,共设计4个平行试件,加载方式与加载速率与剪切试验相同。

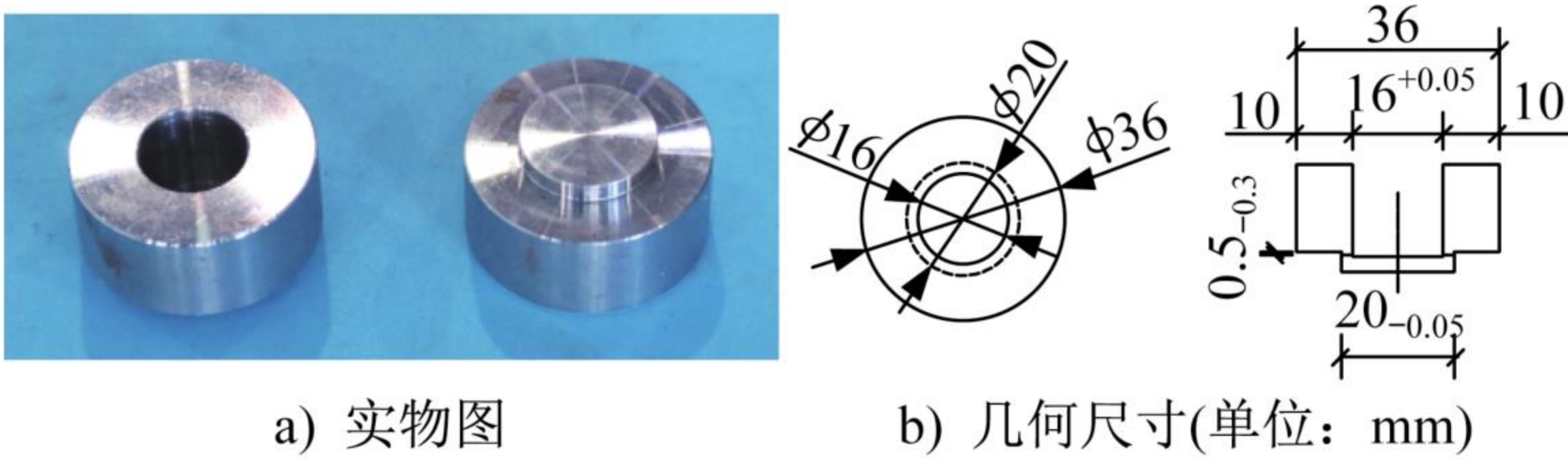


图3 复合界面粘结试验试件

Fig. 3 Specimen of bonding interface combine test

1.2 焊缝对接接头试验

两类焊缝对接接头的几何构造符合《不锈钢复合钢板焊接技术要求》(GB/T 13148—2008)^[36],二者构造分区如图4所示,各分区焊接方式、焊材种类、焊道数量及焊接热输入数据如表2所示。两类接头核心区别为:是否在不锈钢复层和结构钢材基层之间增加一层过渡焊接构造,WI接头按规范设置过渡层并采用不同的焊材;WII接头采用简化焊接工艺,过渡层焊材与复层一致。两类对接接头均采用钨极惰性气体保护焊(TIG),基层与复层保护气体均为氩气(Ar)。

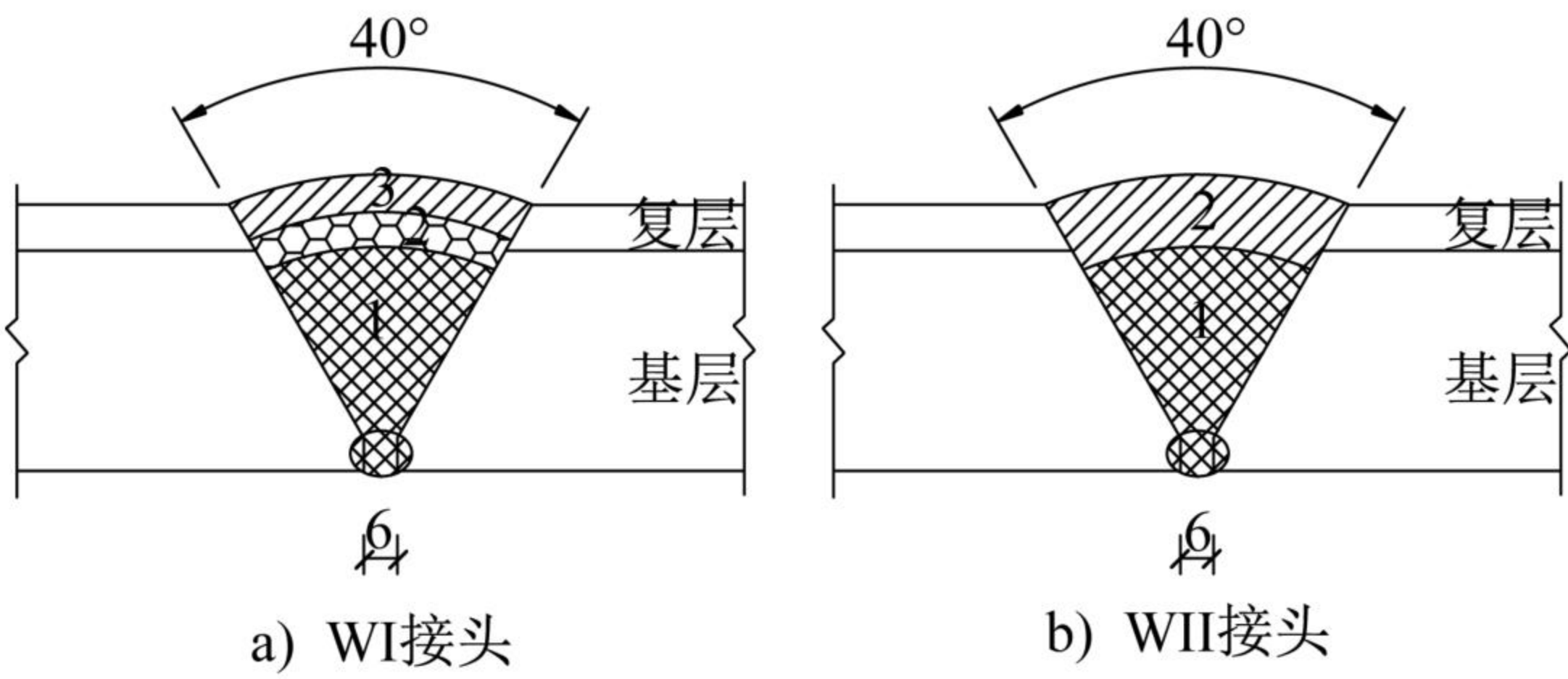


图4 两类焊缝对接接头构造及分区(单位:mm)

Fig. 4 Construction and partitioning of two types of butt weld joints (unit:mm)

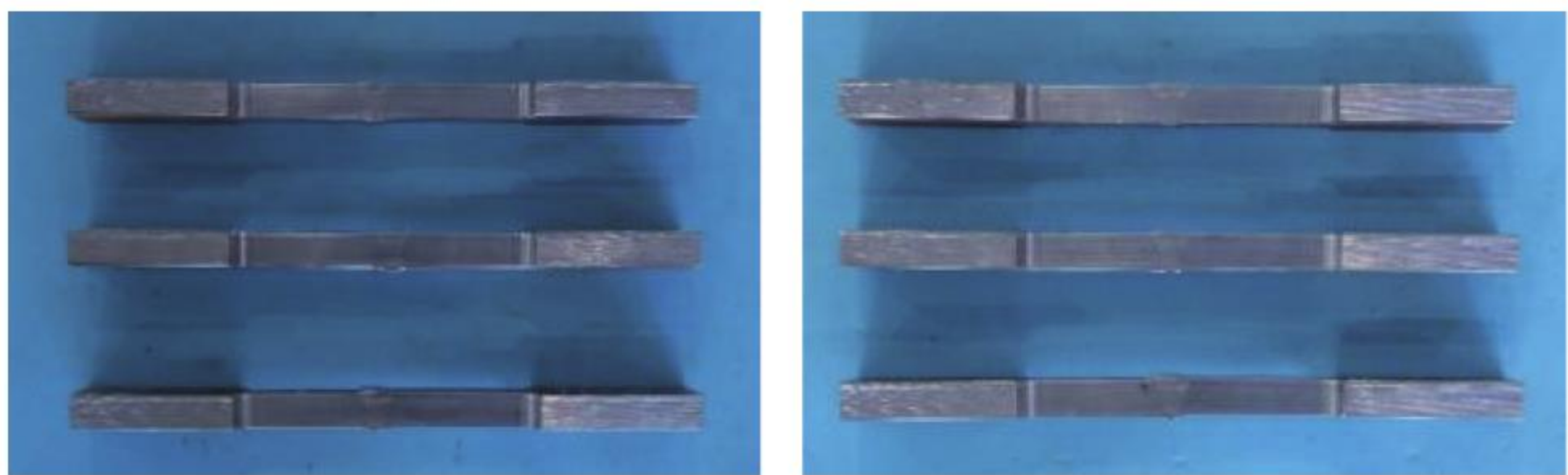
对接接头的静态拉伸试验方案与母材相同,试件尺寸和加载方案根据《复合钢板 焊接接头力学性能试验方法》(GB/T 16957—2012)^[37]及《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[34]确定,试件实物如图5所示。

表2 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢两类焊缝接头焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of two types of butt weld joints for S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel

接头类型	焊缝区域	焊道	焊材	焊接电流 I/A	焊接电 压 U/V	焊接速度 v/(cm·min ⁻¹)	焊接热输入 E/(J·mm ⁻¹)	焊接方式	备注
WI	区域1	1	HTW-58	200~220		10	2 557.8	气保护 半自动焊	平位焊接 马板定位 背面衬陶质衬垫
		2	GFR-91K2	240~260		19	1 602.6		
		3~6	GFR-91K2	240~260		28~30	761.3		
	区域2	7~9	TGB-309MoL	200~220		40~42	623.9		
	区域3	10~12	TGB-316L	200~220		42~43	601.8		
WII	区域1	1	HTW-58	200~220		9	2 842.0	气保护 半自动焊	平位焊接 马板定位 背面衬陶质衬垫
		2	GFR-91K2	240~260		20	1 522.5		
		3~6	GFR-91K2	240~260		28~30	733.7		
	区域2	7~9	TGB-316L	200~220		40~50	568.4		
		10~12	TGB-316L	200~220		42~43	601.8		

注:焊接热输入公式为 $E=IU\eta/v$,其中电压、电流和速度分别取中间值,热效率系数(η)取0.7。



a) WI接头拉伸试件 b) WII接头拉伸试件

图5 焊缝拉伸试件

Fig. 5 Weld tensile specimens

1.3 其他试验

冷弯试验用于验证金属材料承受弯曲塑性变形的能力,对于复合钢板而言,三个方向冷弯效果不同,分为内弯(受拉面为基层)、侧弯(受拉面为复合钢板横截面)、外弯(受拉面为复材)三种方案,其中内弯试验也称为结合度试验。试件设计与试验过程依据《复合钢板力学及工艺性能试验方法》(GB/T 6396—2008)^[35]及《复合钢板 焊接接头力学性能试验方法》(GB/T 16957—2012)^[37]执行。

夏比冲击试验用于测定复合钢材冲击韧性,试件尺寸根据《复合钢板力学及工艺性能试验方法》(GB/T 6396—

2008)^[35]、《复合钢板 焊接接头力学性能试验方法》(GB/T 16957—2012)^[37]及《焊接接头冲击试验方法》(GB/T 2650—2008)^[38]设计,试验过程根据《金属材料 夏比摆锤冲击试验方案》(GB/T 229—2020)^[39]进行。

维氏硬度试验用于测定两类对接接头焊缝区、热影响区及母材区的硬度,试验过程根据《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》(GB/T 4340.1—2024)^[40]进行。

本研究中所用的不锈钢复合钢材基层材料属于桥梁用结构钢,其设计要求高于普通结构钢设计要求,除铁路钢桥外,也可运用于其他结构工程。考虑到铁路钢桥使用过程中易受疲劳荷载作用,后续需开展专项疲劳力学性能研究。

2 母材试验结果及分析

表3为S31603+Q500qE不锈钢复合钢板的化学成分标准值,试验检测依据为《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》(GB/T 4336—2016)^[41]。

表3 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢化学成分

Table 3 Chemical composition of S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel

项目	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	B	碳当量	焊接裂纹敏感指数
基层			1.00			0.01	0.01	0.006	0.015							
标准	≤0.110	≤0.55	~	≤0.020	≤0.015	~	~	~	~	≤0.80	≤0.70	≤0.30	≤0.30	≤0.000 5	≤0.50	≤0.25
值			1.70			0.08	0.09	0.030	0.050							
复层										16.00	10.00	2.00				
标准	≤0.030	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	—	—	—	—	~	~	~	—	—	—	—
值										18.00	14.00	3.00				

2.1 拉伸性能试验结果与分析

母材拉伸试件断裂形态如图6所示,应力-应变曲线见图7。应变较小时试件处于弹性阶段,无明显塑性变形;达到屈服点后应力上升变缓,变形迅速增大,应变较大时出现荷载峰值,随后进入颈缩阶段直至断裂。试件TC-BM3应变发展整体小于其他两个试件应变发展,这是由于拉伸试验中测量应变的引伸计标距较小,该试件的颈缩位置偏离中心,引伸计未覆盖颈缩变形区,导致试件TC-BM3的应变发展显著低于其他两个试件的应变发展。断裂过程中两层金属几乎同时断裂,没有观察到明显的分阶段断裂现象,表明两层金属拉伸协同工作性能良好;断口可见界面轻微分离,主要原因在于基层与复层金属的延性存在差异,在颈缩阶段,两层金属产生明显的横向应变不协调,进而导致界面出现轻微分离。

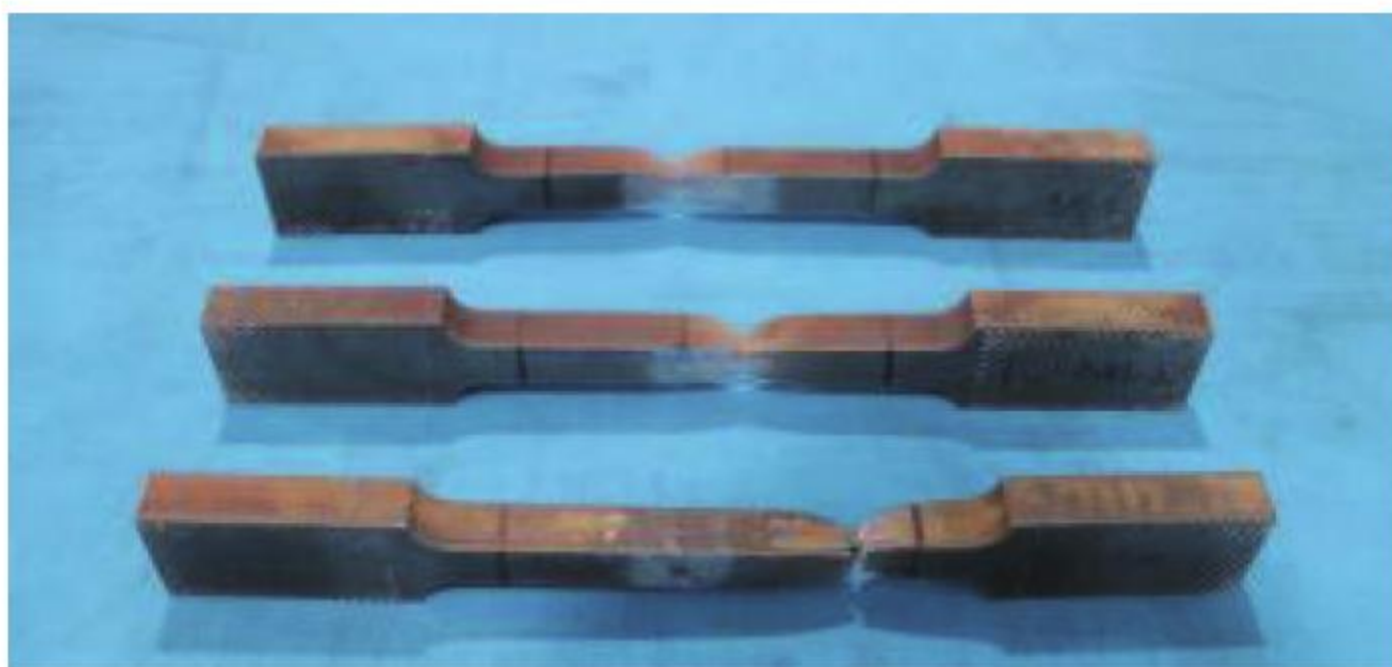


图6 母材拉伸试件断裂模式
Fig. 6 Failure modes of tensile specimens for base metal

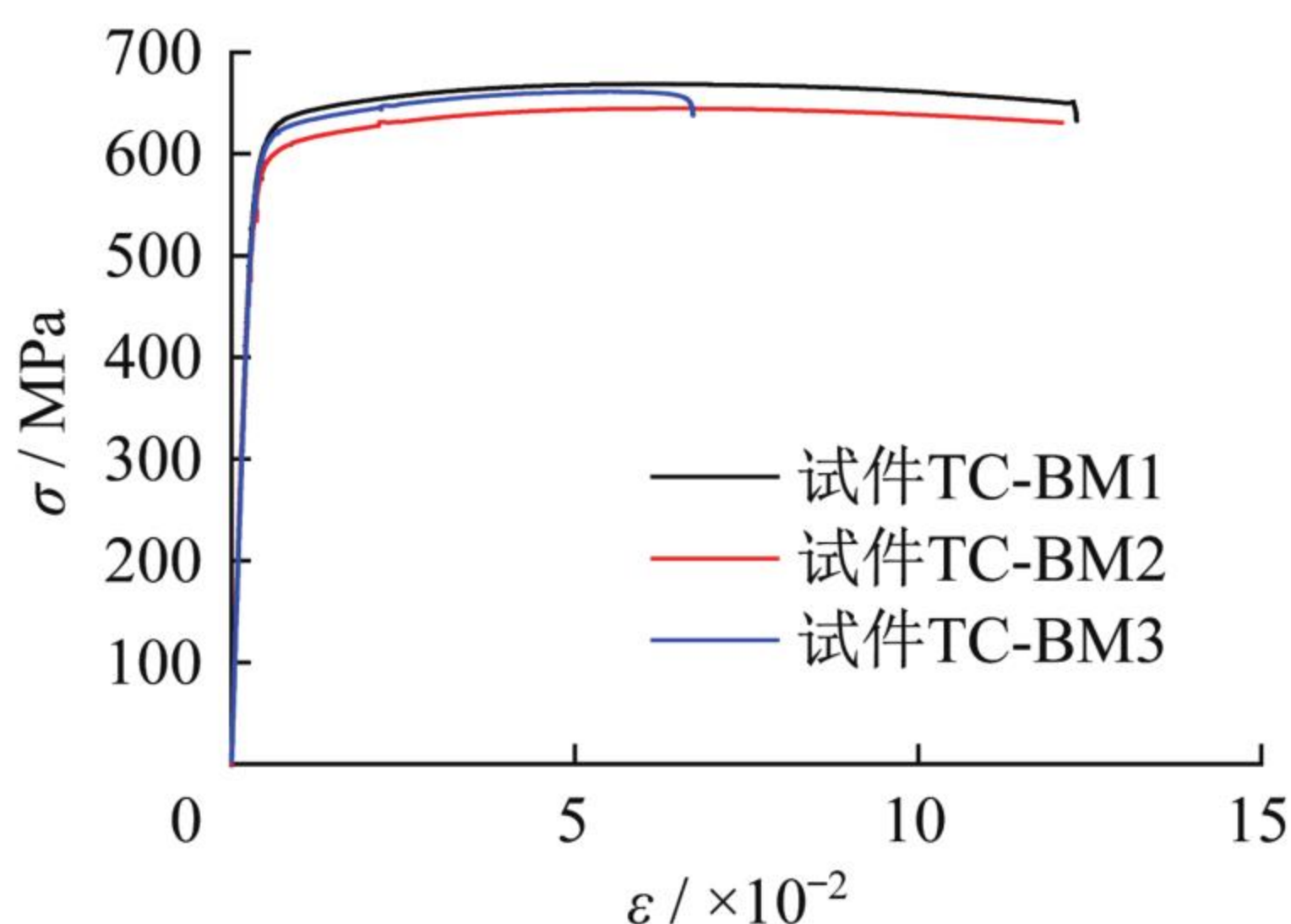


图7 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢母材应力-应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of base metal for S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel

表4为母材力学性能参数,包括名义屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、极限抗拉强度 σ_u 、弹性模量 E_0 和断后伸长率 A ,取塑性应变为0.2%时对应的名义强度作为屈服强度,断后伸长率 A 为试件四面测量平均值。根据《不锈钢复合钢板和钢带》(GB/T 8165—2025)^[5],复合钢板屈服强度、抗拉强度不低于基层对应厚度钢板标准下限,断后伸长率不低于基层标准值。由表4可知,该批次高强度复合钢板拉伸力学指标均满足规范要求。此外,图7中应力-应变曲线的末端并非试件的实际断裂点,该现象主要是由于试件发生明显颈缩、应力水平出现显著下降后,为保护试验仪器而撤除引伸计、停止应变测量导致的,因此曲线末端对应的应变值与表4中测定的断后伸长率无直接对应关系。

表4 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢母材力学性能参数
Table 4 Mechanical property parameters of S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel

试件编号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	E_0 /GPa	σ_u /MPa	A /%
TC-BM1	611.6	199.8	668.6	20.5
TC-BM2	585.5	199.7	644.7	23.8
TC-BM3	606.3	198.5	661.1	22.8
平均值	601.1	199.3	658.1	22.3
标准值	≥ 500.0	—	≥ 630.0	≥ 18.0

2.2 冷弯及夏比冲击试验结果与分析

对不锈钢复合钢板进行冷弯试验,分别沿着复层、基层和侧面进行面弯、背弯和侧弯试验,测试三向冷弯性能与复合界面的结合度,弯曲后的部分试件如图8所示。可以看出,试件弯曲后无明显的开裂、界面分离等现象,表明试件的冷弯性能满足要求,且复合界面结合状态良好,可满足冷弯构件的加工制作需求。



图8 冷弯试件破坏模式
Fig. 8 Failure modes of bending specimens

夏比冲击试验共9个试件,分为3类:分别为基层取样试件、复层取样侧面开槽试件、复层取样钢侧开槽试件(复层厚度为3 mm,标准夏比冲击试件厚度为10 mm,复层取样试件含复合界面与部分基层),每类3个试件,在-40℃环境下进行冲击试验。不同缺口位置呈现两类断裂形态(图9):(1)复层取样侧面开槽试件折断,不锈钢复层与高强钢基层均沿冲击方向断裂,复合界面几乎没有分离;(2)复层取样钢侧开槽试件出现界面分离,这主要是由于基层大塑性应变与断裂引发界面破坏,基层完全断裂、复层大曲率弯曲但无明显断口。三类试件的试验结果如表5所示。根据《不锈钢复合钢板和钢带》(GB/T 8165—2025)^[5],复合钢板冲击吸收能量应符合基层对应厚度钢板的要求,即不低于120 J^[42]。三类试件依据《复合钢板力学及工艺性能试验方法》(GB/T 6396—2008)^[35]规定取样时应靠近基层表面取样,即仅采用表5中“基层取样”试件即可)的平均值均超过标准值,表明不锈钢复合钢板冲击性能优异,不同部位均能满足规范要求。两类复层取样试件的冲击吸收能量均小于基层取样试件的冲击吸收能量,说明相同条件下,复合界面的存在及异种金属协同工作会一定程度降低整体冲击韧性。



图9 夏比冲击试件破坏模式

Fig. 9 Failure modes of Charpy impact specimens

表5 夏比冲击试验结果

Table 5 Results of Charpy impact tests

试件组 编号	试件类型	冲击功/J	平均值/J
Cha-BM	基层取样,侧面开槽	287、300、276	287.7
	复层取样,侧面开槽	193、178、65	145.3
	复层取样,钢侧开槽	78、259、267	201.3
标准值		≥120	

2.3 复合界面剪切及粘结试验结果与分析

界面剪切试验共4个试件,试件整体断裂形态基本一致(图10)。界面抗剪强度为最大荷载除以剪切面面积,结果如表6所示;可以看出本批高强度不锈钢复合钢板的界面剪切强度均较高,超过标准规定限值210 MPa。



图10 剪切试件破坏模式

Fig. 10 Failure modes of shear specimens

表8 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢对接接头化学成分分析

Table 8 Chemical composition analysis of S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel butt joints

对接接头类型	位置	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	B	碳当量	焊接裂纹敏感指数
WI	基层	0.060	0.28	1.23	0.009	0.002	0.011	—	—	—	0.103	1.10	0.14	0.090	—	—	—
	复层	0.023	0.58	0.97	0.025		—	—	—	—	17.060	10.34	2.52	—	—	—	—
WII	基层	0.050	0.33	1.36	0.008	0.002	0.013	—	—	—	0.093	1.20	0.14	0.074	—	—	—
	复层	0.024	0.60	0.93	0.029		—	—	—	—	16.900	10.40	2.71	—	—	—	—

3.1 拉伸性能试验结果与分析

两类对接接头各3个平行试件,断裂形态见图12。

表6 复合界面剪切试验及粘结试验结果

Table 6 Results of bonding interface shear tests and bonding tests

试件编号	剪切强度/MPa	试件编号	粘结强度/MPa
S1	339.8	C1	511.0
S2	337.5	C2	516.8
S3	284.7	C3	550.4
S4	330.3	C4	520.7
平均值	323.1	平均值	524.7

界面粘结试验共4个试件,各试件断裂形态一致(图11)。界面粘结强度为最大荷载除以粘结截面面积,试验结果如表6所示,现行国标未规定界面粘结强度限值。结合复合界面剪切与拉伸试验结果可知,桥梁用高强度不锈钢复合钢板的复合界面性能优异,可保证两层金属在受力过程中能较好地协同工作。



图11 粘结试件破坏模式

Fig. 11 Failure modes of bonding specimens

3 对接接头试验结果及分析

对两类焊缝对接接头进行化学成分分析,结果如表8所示,现行规范未对对接接头化学成分作出规定。对比两类对接接头的化学成分可以看出,基层、复层化学成分差异较小,原因为两类对接接头的基层与复层的焊接材料相同、检测区域一致;表明过渡区焊材类型改变对基层和复层主体区域的化学成分影响微弱。

可以看出,试件的断裂位置均位于焊缝外区域,表明对接接头本身的破坏要晚于母材破坏,两类焊接工艺均满

足静力承载质量要求。表9给出了两类对接接头的关键力学性能参数,可以看到,两类接头的各项力学性能指标差值较小,说明两种焊接工艺对拉伸力学性能无显著影响,且均满足规范规定的不低于母材强度标准下限的要求。

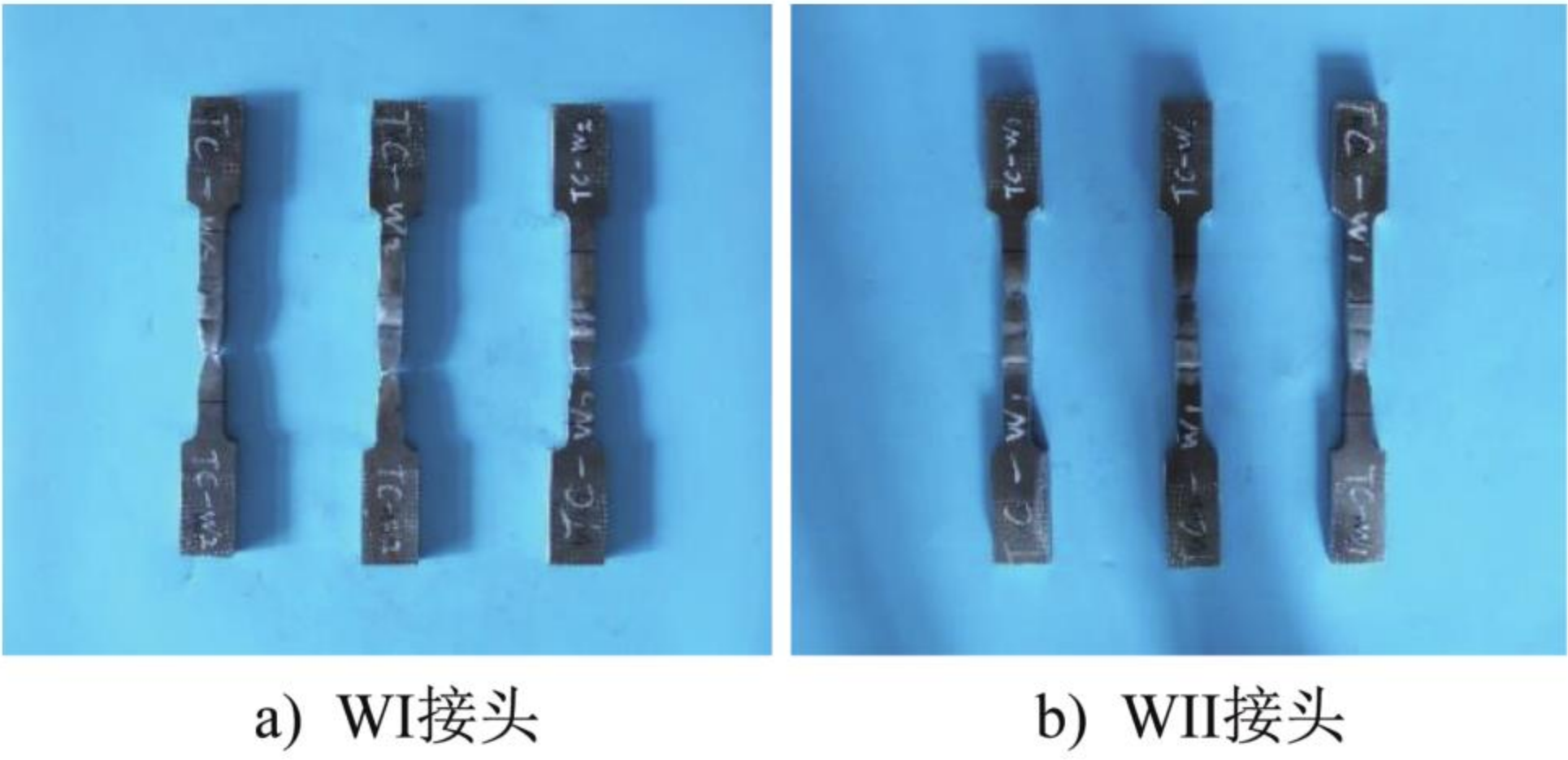


图12 对接接头拉伸试件断裂模式

Fig. 12 Failure modes of tensile specimens for butt joints

图13为两类对接接头试件的应力-应变曲线。可以看出,同类试件峰值前曲线相近,峰值后差异明显,原因在于引伸计标距较小,部分试件的颈缩超出引伸计测量范围,导致应变测量存在差异(特别是颈缩后)。《不锈钢复合钢板焊接技术要求》(GB/T 13148—2008)^[36]给出了复合钢板对接接头的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率标准值计算方法,结果见表9,两类对接接头拉伸性能均满足规范要求。对比两类对接接头与母材的拉伸试验数据,二者的极限强度相近;结合接头断裂位置可知,两类对接接头强度均不低于母材强度,满足设计使用要求。

3.2 夏比冲击试验结果与分析

对两类对接接头分别开展4类夏比冲击试验,对每类试件在2种温度(−40℃和−25℃)下各进行3次重复试验。试件分基层取样、复层取样两类(由于复层厚度为3mm,而标准夏比冲击试件厚度为10mm,复层取样试件含复合界面与部分基层),开槽方向均在试件侧面,缺口位置分别位于焊缝区与热影响区,根据《复合钢板焊接接头力学性能试验方法》(GB/T 16957—2012)^[37]通过焊缝周围熔合线位置判断焊缝区与热影响区的缺口开口位置,试验结果如表10所示(括号内为重复试验的平均值)。规范要求复合板焊接接头冲击试验靠近基层一侧取样(即表10中“基层取样”试件)。基层取样试件的冲击吸收能量均高于《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)^[43]中限值54J;此外,复层取样试件的冲击吸收能量略有降低,但高于公路标准《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》(JTG/T 3651—2022)^[44]中薄板对接接头限值27J,两类对接接头的冲击性能均满足相关规定。试验结果表明,两类焊接工艺对接头冲击性能影响

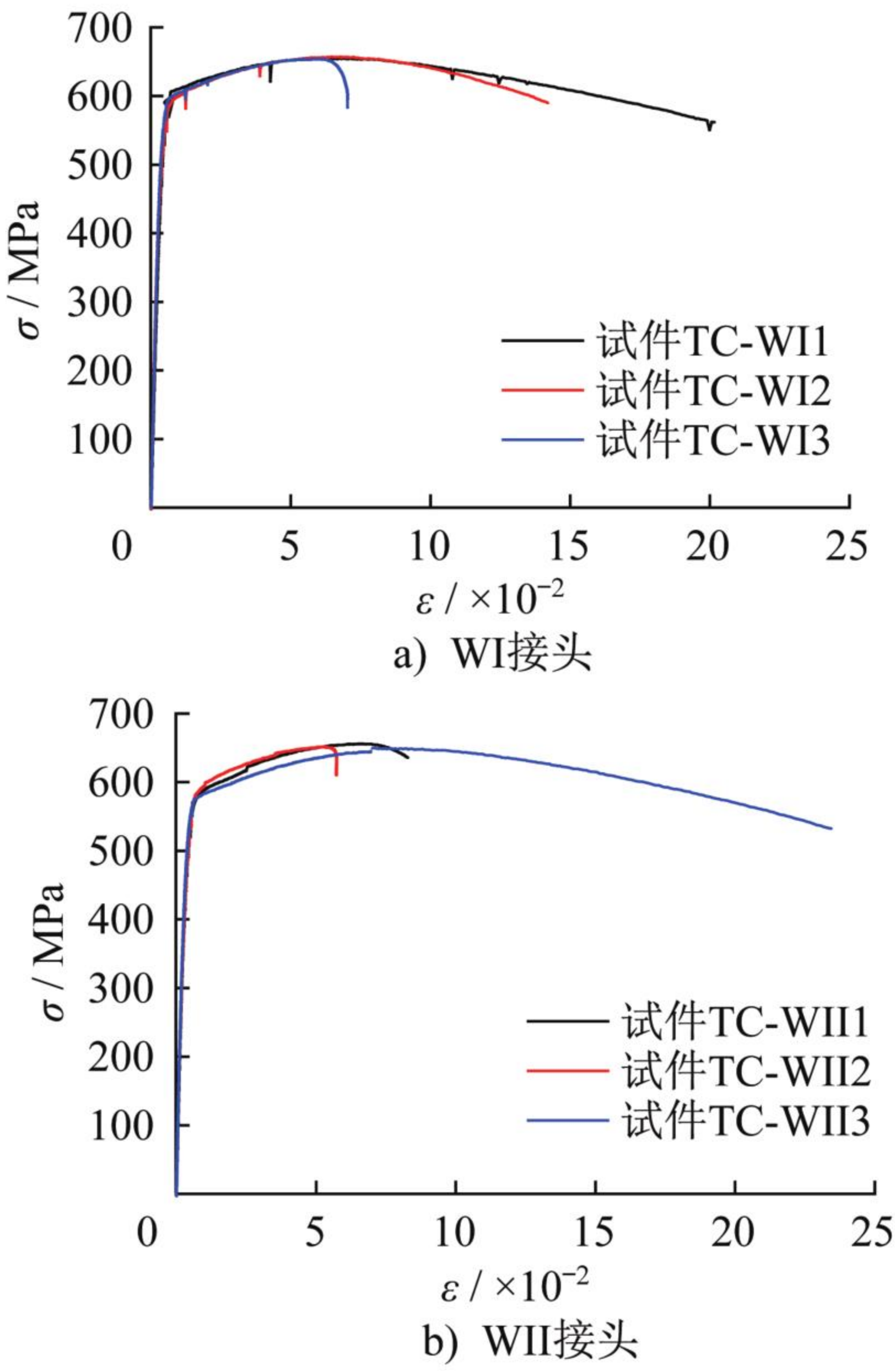


图13 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢对接接头应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves of S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel butt joints

表9 S31603+Q500qE 不锈钢复合钢对接接头力学性能参数

Table 9 Mechanical property parameters of S31603+Q500qE stainless-clad bimetallic steel butt joints

试件编号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_u /MPa	A /%
TC-WI1	554.4	656.3	21.6
TC-WI2	560.3	651.8	23.3
TC-WI3	555.0	650.0	23.6
平均值	556.6	652.7	22.8
TC-WII1	584.2	654.9	24.0
TC-WII2	561.6	657.4	23.1
TC-WII3	577.0	654.3	21.0
平均值	574.3	655.5	22.7
标准值	≥ 500.0	≥ 630.0	≥ 18.0

较小,简化焊接工艺后其冲击性能仍满足规范要求;复层取样试件的冲击吸收能量整体低于基层取样试件的冲击吸收能量,表明复层存在会影响对接接头的冲击性能。−40℃时,WI接头各区域的冲击吸收能量略高于WII接头的冲击吸收能量;−25℃时,两类对接接头各区域的冲击吸收能量差异不明显,表明简化焊接工艺虽会在一定程度上降低接头低温冲击性能,但整体性能仍满足相关要求。

表 10 夏比冲击试验结果

Table 10 Results of Charpy impact tests

试件组编号	试件类型	-25℃ 冲击功/J		-40℃ 冲击功/J	
		焊缝区	热影响区	焊缝区	热影响区
Cha-WI	基层取样,侧面开槽	107、110、91(102.7)	192、92、132(138.7)	95、111、91(99.0)	193、96、49(112.7)
	复层取样,侧面开槽	59、58、58(58.3)	56、112、66(78.0)	61、61、54(58.7)	77、108、52(79.0)
Cha-WII	基层取样,侧面开槽	109、109、113(110.3)	65、213、104(127.3)	113、76、78(89.0)	70、49、198(105.7)
	复层取样,侧面开槽	50、51、53(51.3)	118、144、133(131.7)	41、52、45(46.0)	53、63、55(57.0)
标准限值		≥54 ^[43] 或≥27 ^[44]			

3.3 维氏硬度试验结果

硬度反映金属材料在局部范围内抵抗外物压入的能力,与强度存在一定联系,一般强度越高塑性变形抗力越大,硬度值越高。研究不锈钢复合钢板对接接头焊缝及周边各区域的硬度,可判断焊缝熔合状态与焊接缺陷。两类对接接头断面如图 14 所示,表 11 给出了两类对接接头沿截面的硬度分布数值,测点位置与图 15a)对应,其中 L1 为复层硬度分布,L2、L3 分别为基层在靠近复合界面、远离复合界面的硬度分布。

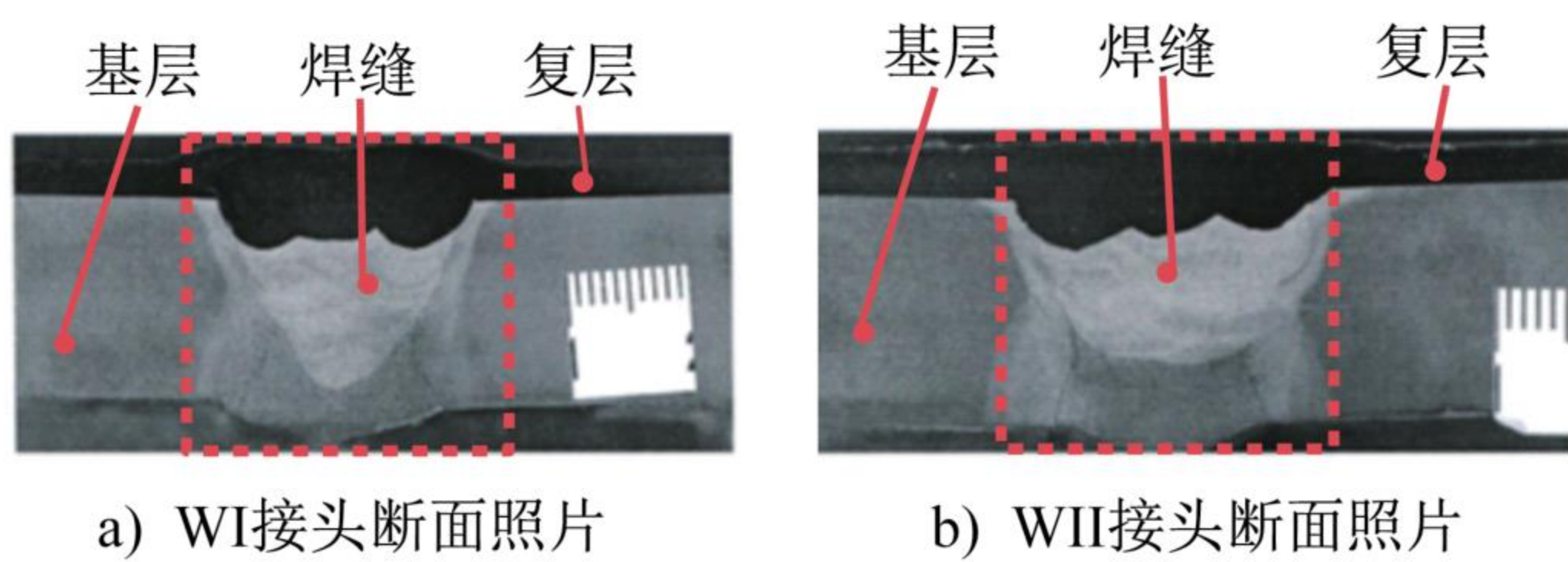


图 14 对接接头断面照片

Fig. 14 Photo of the butt joint section

图 15b)、c)分别给出了两类对接接头截面硬度分布曲线。可以看出,焊缝区与热影响区的硬度略高于母材的硬度,其中热影响区硬度更高。对比 L1、L2、L3 分布曲线可以看出,L2 与 L3 曲线较为接近,表明同材质区域硬度分布均匀,接头质量稳定,基本不存在局部缺陷导致

的硬度下降。L1、L2、L3 曲线中测点 6~8、12~14 的硬度为沿对接接头边界的硬度分布,可以看到,同类曲线中三个位置的硬度分布相近,说明接头边界熔合程度较好、无局部焊接缺陷。对比两类对接接头的硬度分布特征,可以看出 WI 接头硬度分布更为均匀,WII 接头明显存在一个焊缝区硬度呈下降趋势,说明简化焊接工艺会使焊缝附近硬度降低更明显。

以往关于不锈钢复合钢焊缝周边硬度分布的研究表明,异种金属界面易发生元素扩散与碳析出,从而导致该区域的硬度升高、强度下降^[25,45]。WII 接头基层热影响区受复层焊缝影响,硬度显著提升;WI 接头硬度分布整体较为均匀。本文研究进一步验证了过渡层的存在能在一定程度抑制硬度下降,WII 接头硬度突变位置可作为基层母材进入热影响区的判定依据。受样本数量限制,未开展不同种类不锈钢复合钢焊缝硬度对比研究,后续需进一步分析焊缝附近金相组织与硬度分布的关联。

对比两类对接接头的拉伸、冲击、维氏硬度试验结果可以看出,两类对接接头的各项力学性能均满足规范要求,数值差异小,仅在低温下冲击韧性与硬度分布略有削弱,且均满足规范要求;此外,两类焊接接头的晶间腐蚀弯曲试验也满足相关要求。因此,该桥梁用高强度不锈钢复合钢板可考虑采用简化后的焊接工艺,以提高

表 11 断面硬度分布

Table 11 Hardness distribution of cross sections

试件组 编号	位置	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	16	17	18	19
M-WI	L1	281	279	280	283	283	285	279	285	271	275	274	278	273	280	278	265	265	269	265
	L2	240	235	236	241	244	252	248	256	256	252	257	272	269	277	239	234	226	227	225
	L3	239	239	238	242	242	252	248	255	253	249	255	272	267	274	233	235	231	232	232
M-WII	L1	190	195	192	219	232	266	262	271	223	221	229	267	264	270	245	229	218	219	216
	L2	220	217	222	243	268	241	237	241	242	248	240	246	242	249	268	242	234	234	236
	L3	217	220	221	244	268	241	239	243	242	235	248	246	244	250	262	248	234	232	236

注:表中位置 L1~L3 与图 15a)左侧标注位置对应,编号与标注点顶部位置对应。

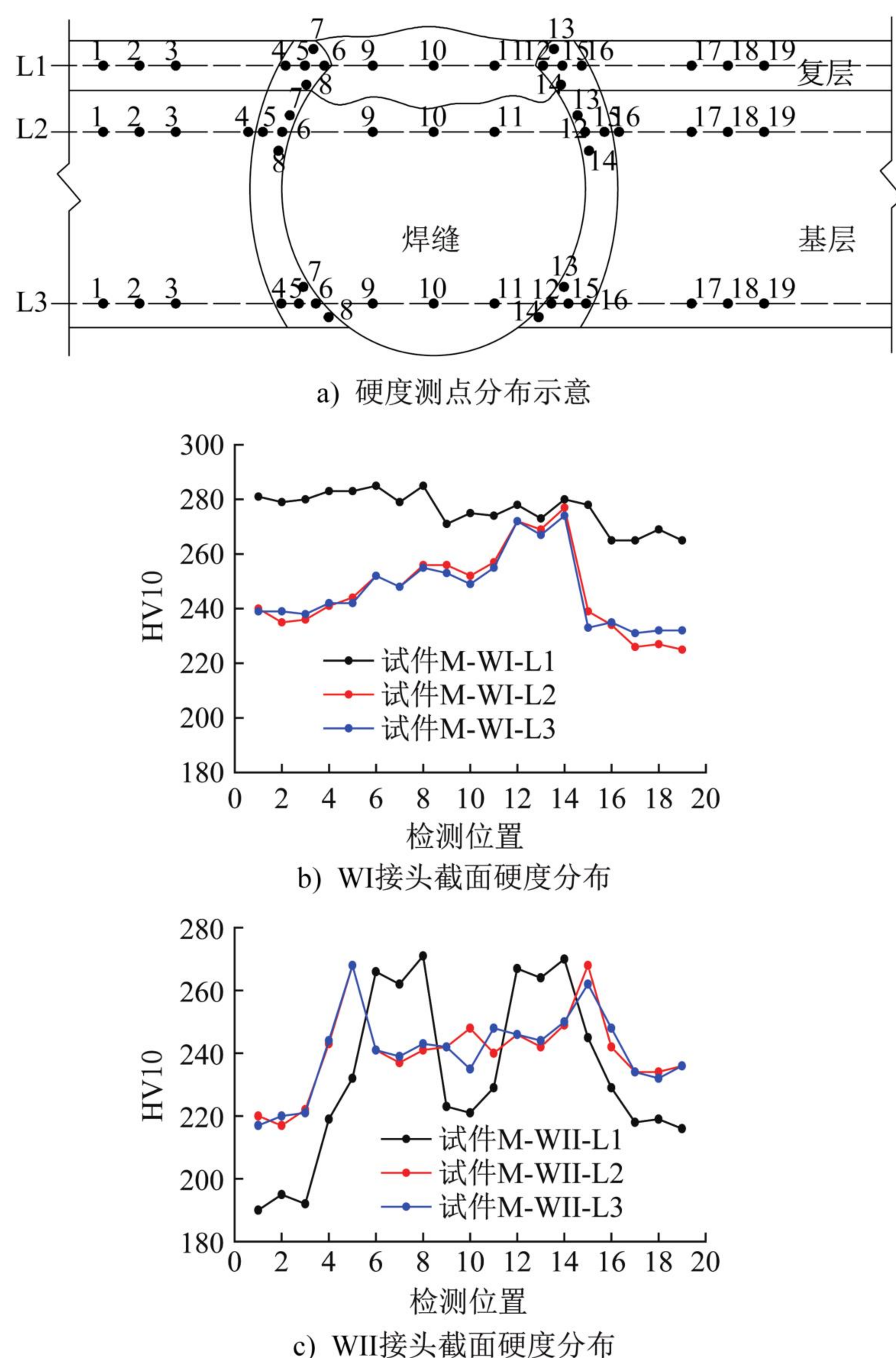


图15 对接接头截面硬度分布示意图及曲线

Fig. 15 Schematic diagram and curves of hardness distribution for butt joint sections

焊接效率;后续需进一步研究接头的疲劳性能及复层耐蚀性。

4 结论

本文对桥梁用高强度不锈钢复合钢板 S31603+Q500qE 的母材及两类对接接头开展力学性能试验,完成其拉伸、冲击、冷弯、复合界面性能及维氏硬度测试,主要结论如下:

(1) S31603+Q500qE 高强度不锈钢复合钢板母材及两类接头的拉伸性能满足规范要求,且该复合钢板的复合界面结合强度较高,保证了两层金属能够协同工作,可作为结构材料应用于桥梁工程。

(2) 该复合钢板的母材及两类焊缝接头的冲击性能均满足规范要求,两类对接接头的冲击韧性低于母材的冲击韧性,WI接头在低温下的冲击韧性表现相对更优。

(3) 该复合钢板的冷弯性能满足规范要求,可适应结构构件的加工制造需求。

(4) 两类对接接头的基本力学性能相当,表明在静

力承载工况下,可采用取消过渡层的简化焊接工艺进行施工。该简化工艺不仅能有效提升焊接施工效率,还可降低焊接材料消耗及施工成本,具备良好的工程应用价值;后续需进一步研究接头疲劳性能、复层耐蚀性能及焊接碳化物析出的影响。

参考文献:

- [1] 马健,王猛,孙学军. 钢结构的腐蚀现状和防护发展[J]. 建筑结构, 2009, 39(增刊2): 344-345. DOI: 10.19701/j.jzjg.2009.s2.105.
MA Jian, WANG Meng, SUN Xuejun. Steel structure corrosion present situation and Protection development [J]. Building Structure, 2009, 39 (Suppl. 2): 344-345. DOI: 10.19701/j.jzjg.2009.s2.105. (in Chinese)
- [2] 梁秦红. 钢桥的防腐涂装[J]. 硅谷, 2009(8): 80-81. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7597.2009.08.061.
LIANG Qinrong. Anticorrosive coating of steel bridge [J]. Silicon Valley, 2009 (8): 80-81. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7597.2009.08.061. (in Chinese)
- [3] 林浩. 浅谈钢桥防腐的研究概况[J]. 山西交通科技, 2016(4): 83-84, 100.
LIN Hao. The research survey of anti-corrosion for steel bridge [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2016(4): 83-84, 100. (in Chinese)
- [4] 班慧勇,梅懿潇,石永久. 不锈钢复合钢材钢结构研究进展[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 1-23. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.ST01.
BAN Huiyong, MEI Yixiao, SHI Yongjiu. Research advances of stainless-clad bimetallic steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (6): 1-23. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.ST01. (in Chinese)
- [5] GB/T 8165—2025 不锈钢复合钢板和钢带[S].
GB/T 8165—2025 Stainless steel clad plates, sheets and strips[S]. (in Chinese)
- [6] 李迎九. 千米跨度高速铁路悬索桥建造技术现状与展望[J]. 中国铁路, 2019(9): 1-8. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2019.09.001.
LI Yingjiu. Current situation and expectation of construction technology for HSR suspension bridge with kilometers span [J]. China Railway, 2019(9): 1-8. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2019.09.001. (in Chinese)
- [7] 杨峰,齐金朋. 合肥铁路枢纽南环线(114.75+229.50+114.75) m 钢桁柔性拱焊接工艺试验研究[J]. 铁道标准设计, 2011, 55(7): 58-65. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2011.07.027.
YANG Feng, JI Jinpeng. Experiments on welding technological Crafts for steel truss flexible arch on south loop line in Hefei railway hub [J]. Railway Standard Design, 2011, 55(7): 58-65. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2011.07.027. (in Chinese)

- [8] BAN Huiyong, SHI Yongjiu. An innovative high-performance steel product for structural engineering. Bi-metallic steel[C]// Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Practice for Steel Construction 2018, 2018: 424-430.
- [9] KHODADAD MOTARJEMI A, KOÇAK M, VENTZKE V. Mechanical and fracture characterization of a bi-material steel plate[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(3): 181-191. DOI: 10.1016/S0308-0161(02)00012-1.
- [10] DHIB Z, GUERMAZI N, KTARI A, et al. Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 696: 374-386. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.080.
- [11] BAN H Y, BAI R S, CHUNG K F, et al. Research progress on material properties of clad steel[C]// Proceedings of 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018). València: Universitat Politècnica València, 2018: 653-658.
- [12] BAN H Y, BAI R S, YANG L, et al. Mechanical properties of stainless-clad bimetallic steel at elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105704. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105704.
- [13] NAMBU S, MICHIUCHI M, INOUE J, et al. Effect of interfacial bonding strength on tensile ductility of multilayered steel composites [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69 (11-12) : 1936-1941. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.04.013.
- [14] HUANG Q X, YANG X R, MA L F, et al. Interface-correlated characteristics of stainless steel/carbon steel plate fabricated by AAWIV and hot rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21 (10) : 931-937. DOI: 10.1016/S1006-706X(14)60164-3.
- [15] LI H, ZHANG L Y, ZHANG B Y, et al. Interfacial fracture behavior of a stainless/carbon steel bimetal plate in a uniaxial tension test [J]. Results in Physics, 2019, 14: 102470. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102470.
- [16] LI H, ZHANG L Y, ZHANG B Y. Interfacial fracture morphologies of stainless steel clad plates after uniaxial tension [C]// IOP Conference Series Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing Ltd., 2019: 042075.
- [17] LIU B X, AN Q, YIN F X, et al. Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54 (17) : 11357-11377. DOI: 10.1007/s10853-019-03581-x.
- [18] LIU B X, WANG S, FANG W, et al. Meso and microscale clad interface characteristics of hot-rolled stainless steel clad plate[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 17-25. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.008.
- [19] 丁海民, 范孝良, 王进峰, 等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(11): 18-22. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2011.11.004.
- [20] 于涛, 井玉安, 张亚樵, 等. 不锈钢复合板界面组织形貌[J]. 钢铁, 2018, 53(11): 63-69, 79. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180135.
- [21] 李龙, 张心金, 祝志超, 等. 真空热轧不锈钢复合板界面结合行为的研究[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(1): 46-50. DOI: 10.14186/j.cnki.1671-6620.2014.01.006.
- [22] LI Long, ZHANG Xinjin, ZHU Zhichao, et al. Investigation on bonding of stainless steel clad plate by vacuum hot rolling[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014, 13(1): 46-50. DOI: 10.14186/j.cnki.1671-6620.2014.01.006. (in Chinese)
- [23] GANESH P, MOITRA A, TIWARI P, et al. Fracture behavior of laser-clad joint of Stellite 21 on AISI 316L stainless steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (16-17) : 3748-3756. DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.017.
- [24] MARQUES M J, RAMASAMY A, BATISTA A C, et al. Effect of heat treatment on microstructure and residual stress fields of a weld multilayer austenitic steel clad [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 52-60. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.004.
- [25] LI C A, QIN G L, TANG Y S, et al. Microstructures and mechanical properties of stainless steel clad plate joint with diverse filler metals [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (2) : 2522-2534. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.12.083.
- [26] BAN H Y, YANG X F, SHI Y J, et al. Micro-macro properties of stainless-clad bimetallic steel welded connections with different configurations [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 217: 108637. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108637.
- [27] ZHAO P Y, BAN H Y, HU Y F, et al. Residual stress within stainless-clad bimetallic steel welded box sections [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 177: 109395. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109395.
- [28] ZHAO P Y, BAN H Y, TAO Xiaoyan, et al. Numerical analyses on overall buckling behaviour of stainless-clad steel columns[C]// Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Practice for Steel Construction 2018, 2018.
- [29] MEI Y X, BAN H Y, SHI Y J. Elastic buckling of simply

- supported bimetallic steel plates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 198: 107581. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107581.
- [29] MEI Y X, BAN H Y. Elastic buckling of outstand stainless-clad bimetallic steel plates[J]. Advanced Steel Construction, 2023, 19(1): 31-37. DOI: 10.18057/IJASC.2023.19.1.5.
- [30] BAN H Y, MEI Y X. Local buckling behaviour of stainless-clad bimetallic steel built-up square hollow section stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 182: 110207. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110207.
- [31] 施刚, 班慧勇, 石永久, 等. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 1-13. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.ST10.
- SHI Gang, BAN Huiyong, SHI Yongjiu, et al. Overview of research progress for high strength steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 1-13. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.ST10. (in Chinese)
- [32] 邱林波, 刘毅, 侯兆新, 等. 高强结构钢在建筑中的应用研究现状[J]. 工业建筑, 2014, 44(3): 1-5, 47. DOI: 10.13204/j.gyjz201403001.
- QIU Linbo, LIU Yi, HOU Zhaoxin, et al. State application research of high strength steel in steel structures [J]. Industrial Construction, 2014, 44(3): 1-5, 47. DOI: 10.13204/j.gyjz201403001. (in Chinese)
- [33] 罗永峰, 王熹宇, 强旭红, 等. 高强钢在工程结构中的应用进展[J]. 天津大学学报, 2015(增刊1): 134-141. DOI: 10.11784/tdxbz201505015.
- LUO Yongfeng, WANG Xiyu, QIANG Xuhong, et al. Progress in application of high strength steel to engineering structures[J]. Journal of Tianjin University, 2015(Suppl.1): 134-141. DOI: 10.11784/tdxbz201505015. (in Chinese)
- [34] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2021 Metallic materials - Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [35] GB/T 6396—2008 复合钢板力学及工艺性能试验方法[S].
- GB/T 6396—2008 Clad steel plates-Mechanical and technological test[S]. (in Chinese)
- [36] GB/T 13148—2008 不锈钢复合钢板焊接技术要求[S].
- GB/T 13148—2008 Specification for welding of stainless steel clad plate[S]. (in Chinese)
- [37] GB/T 16957—2012 复合钢板 焊接接头力学性能试验方法[S].
- GB/T 16957—2012 Clad steel plates—Mechanical technical tests on welded joints[S]. (in Chinese)
- [38] GB/T 2650—2008 焊接接头冲击试验方法[S].
- GB/T 2650—2008 Impact test methods on welded joints[S]. (in Chinese)
- [39] GB/T 229—2020 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法[S].
- GB/T 229—2020 Metallic materials—Charpy pendulum impact test method[S]. (in Chinese)
- [40] GB/T 4340.1—2024 金属材料 维氏硬度试验 第1部分: 试验方法[S].
- GB/T 4340.1—2024 Metallic materials—Vickers hardness test: Part 1: Test method[S]. (in Chinese)
- [41] GB/T 4336—2016 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)[S].
- GB/T 4336—2016 Carbon and low-alloy steel—Determination of multi-element contents—Spark discharge atomic emission spectrometric method (routine method)[S]. (in Chinese)
- [42] GB/T 714—2015 桥梁用结构钢[S].
- GB/T 714—2015 Structural steel for bridge[S]. (in Chinese)
- [43] TB 10091—2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- TB 10091—2017 Code for design on steel structure of railway bridge[S]. (in Chinese)
- [44] JTG/T 3651—2022 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范[S].
- JTG/T 3651—2022 Specification for manufacture and installation of highway steel bridge[S]. (in Chinese)
- [45] 陈忱. 不锈钢/碳钢复合板的焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- CHEN Chen. Research on welding technology and microstructure and properties of welded joint of stainless steel/carbon steel composite plate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)