

文章编号: 1000-4750(2021)02-0179-08

焊接工艺对不锈钢角焊缝连接试件力学性能影响研究

李志林^{1,2}, 杨 璐^{1,2}, 崔 瑶³, 尹 飞^{1,2}, 梁耀华^{1,2}

(1. 北京工业大学, 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京工业大学, 北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124;

3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024)

摘 要: 对 12 个奥氏体型及 12 个双相型不锈钢正面角焊缝和侧面角焊缝连接试件进行了单调拉伸试验, 考察了不同焊接工艺对角焊缝连接力学性能的影响。结果表明: 采用氩弧焊接工艺的不锈钢角焊缝试件破坏面与电弧焊接工艺的试件破坏面形状相差较大, 后者破坏面更加光滑; 同时由于受到复杂应力的作用, 正面角焊缝试件的真正破坏角度并不为相关规范规定的理论值 45°; 对于奥氏体型不锈钢角焊缝, 氩弧焊试件与电弧焊试件的强度比分别为 1.03 (正面角焊缝试件) 及 1.13 (侧面角焊缝试件), 相对变形量之比为 1.46 及 1.11; 而对于双相型不锈钢角焊缝, 两者的强度比分别为 1.12 和 1.04, 相对变形量之比为 1.66 及 1.45; 氩弧焊试件表现出了更好的力学性能。对于两种不锈钢材料, 正面角焊缝强度均远大于侧面角焊缝的强度, 建议在工程设计和相关规范的编制/修订中考虑正面角焊缝强度提高的影响。

关键词: 不锈钢; 角焊缝连接件; 氩弧焊; 电弧焊; 力学性能

中图分类号: TG115.6+2 文献标志码: A doi: [10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.0232](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.0232)

INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF WELDING PROCESSES ON MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL FILLET WELD CONNECTIONS

LI Zhi-lin^{1,2}, YANG Lu^{1,2}, CUI Yao³, YIN Fei^{1,2}, LIANG Yao-hua^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Centre of High-Rise and Large-Span Prestressed Steel Structures, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to study the effect of different welding processes on mechanical properties of stainless steel fillet weld connections, the monotonic tensile tests of 12 austenitic and 12 duplex stainless steel specimens were carried out. The results show that the failure surface of specimens made by TIG (Tungsten Inert Gas Welding) is quite different from that of specimens made by SMAW (Shielded Metal Arc Welding), and the latter is much smoother. Besides, the true failure angle of the transverse fillet weld connections is not the theoretical value of 45° due to the influence of the complex stress. For austenitic stainless steel, the strength ratios of specimens made by TIG to SMAW are 1.03 (for transverse fillet weld connections) and 1.13 (for longitudinal fillet weld connections), and the ratios of relative deformation are 1.46 and 1.11. For duplex stainless steel, the strength ratios

收稿日期: 2020-04-15; 修改日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922001); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)

通讯作者: 杨 璐(1982—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 主要从事钢结构及施工技术研究 (E-mail: lyang@bjut.edu.cn).

作者简介: 李志林(1995—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事钢结构研究 (E-mail: 1129073821@qq.com);

崔 瑶(1983—), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构抗震性能研究 (E-mail: cuiyao@dlut.edu.cn);

尹 飞(1992—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事钢结构研究 (E-mail: yinfei622@email.bjut.edu.cn);

梁耀华(1993—), 男, 广东人, 硕士生, 主要从事钢结构研究 (E-mail: 260671336@qq.com).

are 1.12 and 1.04, meanwhile the relative deformation ratios are 1.66 and 1.45. The connections made by TIG show better mechanical properties. For the two stainless steel, the strengths of transverse fillet weld connections are much better than those of the longitudinal fillet weld connections, so it is suggested that the influence of the increase of the strength of transverse fillet weld connections be taken into account in the compilation or revision of the related specifications.

Key words: stainless steel; fillet weld connection; TIG (tungsten inert gas arc welding); SMAW (shielded metal arc welding); mechanical properties

与传统的建筑材料如混凝土及钢材相比, 不锈钢材料具有超强的耐腐蚀性、优良的力学性能以及突出的高、低温性能等, 是一种理想的绿色建筑材料^[1-3]。近年来随着国内外学者对不锈钢力学性能研究的不断深入, 越来越多的建筑表现形式呈现在大众视野中^[4-6]。

焊接是常用的钢结构连接形式, 根据焊接工艺不同, 焊接可分为电弧焊、气体保护焊、电渣焊及等离子焊等, 不同的焊接工艺对焊缝的力学性能有较大的影响。国内外学者已经较早地针对普通钢材角焊缝连接的力学性能进行了较为系统及深入的研究^[7-11]。

由于具有明显的应力-应变非线性特征, 不锈钢与普通钢在材料的力学性能上存在着明显的差异^[12-13]。对于不锈钢焊缝连接承载力的研究, 国内外也尚处于起步阶段。金晓兰等^[14]对国产奥氏体型不锈钢角焊缝试件的力学性能进行了研究, 指出在进行设计时, 应根据不同的焊接工艺确定角焊缝强度值, 同时建议不考虑正面角焊缝强度提高的影响。笔者研究团队^[15-19]对双相型 S22053 及奥氏体型 S30408 不锈钢正面及侧面角焊缝进行了试验研究及有限元分析, 角焊缝试件采用手工电弧焊焊接而成, 结果显示采用中国《不锈钢结构技术规程》(CECS 410: 2015)^[20]规定计算公式计算所得角焊缝承载力设计值偏于保守。Lee 等^[21]对采用氩弧焊焊接工艺制成的不锈钢角焊缝连接件进行了试验, 重点考察角焊缝的破坏模式, 同时对美国规范 SEI/ASCE 8-02^[22]焊缝计算公式提出了修正意见。Fortan 等^[23]通过考虑各项参数较为准确地预测了不锈钢角焊缝的极限强度, 并针对欧洲规范 EN 1993-1-4^[24]提出了合理的修改意见。

为探究不同焊接工艺对不锈钢角焊缝力学性能的影响, 加工并试验了 12 个奥氏体型 S30408 不锈钢材角焊缝连接件以及 12 个双相型 S22053

不锈钢材角焊缝连接件, 焊接工艺分别为手工电弧焊 (SMAW) 以及氩弧焊 (TIG), 焊缝的类型为工程实际中常见的正面角焊缝及侧面角焊缝。通过单调拉伸试验, 获取不锈钢角焊缝的力学性能, 以期对相关设计方法的完善以及工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

手工电弧焊及氩弧焊是目前工程实际中较常用的焊接方式, 手工电弧焊的原理为通过产生高温电弧将板件及焊条融化, 焊条表面的药皮保护焊缝金属避免有害气体进入, 而氩弧焊与手工电弧焊原理类似, 只是在焊接时采用惰性气体氩气来阻隔有害气体。在实际应用中, 手工电弧焊常用来焊接较大较厚板件, 而氩弧焊则常用来焊接较薄及对外观有较高要求的结构。

本试验共设计 24 个不锈钢角焊缝连接件, 包含 2 种不锈钢材料 (奥氏体型及双相型)、2 种焊接工艺 (手工电弧焊及氩弧焊) 以及 2 种角焊缝类型 (正面角焊缝及侧面角焊缝)。试件命名规则以 AST-1 及 DTL-1 为例, 首字母 A 代表母材为奥氏体型不锈钢材料 (D 代表双相型不锈钢材料); 第二个字母 S 代表手工电弧焊 (T 代表氩弧焊); 末字母 T 代表正面角焊缝 (L 代表侧面角焊缝); 末尾数字代表该试件在本组试验中的编号, 每组试验共包括 3 个试件。

试件中不锈钢母材板厚均为 14 mm, 手工电弧焊焊条分别采用 E308 型焊条 (奥氏体型不锈钢母材) 及 E2209 型焊条 (双相型不锈钢母材), 焊条直径均为 2.5 mm。氩弧焊焊丝分别采用 ER308 型焊丝 (奥氏体型不锈钢母材) 及 ER2209 型焊丝 (双相型不锈钢母材), 焊丝直径均为 1.6 mm。在试件设计时采用一端加强的方法来达到试验过程中控制焊缝破坏位置的目的, 在进行试件焊接前, 将焊接处的油污、水分等杂质彻底清除干净, 为了防止不锈钢焊条受潮影响焊接质量, 提前将焊条

在 300℃ 环境下烘烤 1 h。焊接完成后切除起落弧处焊缝, 避免焊缝起落弧的影响。试件设计如图 1 所示。

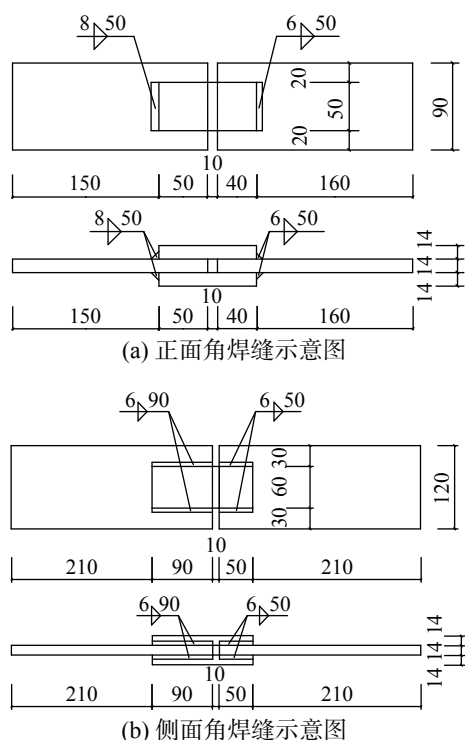


图 1 角焊缝连接件示意图 /mm
Fig. 1 Dimensions of fillet weld connection

试件加工完成后记录各条焊缝的相关参数, 包括: 角焊缝长度 l_w 以及焊脚尺寸 h_f , 在测量焊脚尺寸时, 分别测量焊缝两端及中间位置, 三组数据取平均值, 具体测量值见表 1。

1.2 加载仪器及测点布置

试验采用 100 t 万能试验机进行加载, 并通过 DHDAS 动态信号采集分析系统采集试验过程中各项数据, 加载装置示意图如图 2 所示。通过布置导杆式位移计来监测焊缝的变形情况, 导杆式位移计的初始标距为 120 mm, 同时为了减小由于母材受力过大而影响角焊缝的受力, 通过布置应变片来监测板件自身的变形情况, 夹持端应变片对称布置以避免可能的荷载偏心带来的影响, 测点布置如图 3 所示。

1.3 加载方案

本试验为单调拉伸试验, 采用位移控制加载, 加载速率为 0.1 mm/min。为了避免试验前期仪器夹头与试件之间的滑动以及检查试验仪器是否正常工作, 正式加载前先进行预加载, 荷载加载到 10 kN 后卸载, 再重新加载直至试件破坏。

表 1 试件实测尺寸
Table 1 Measurements of specimens

试件编号	焊缝条数 n	焊缝平均长度 l_w /mm	焊缝平均焊脚尺寸 h_f /mm	焊缝平均断裂面宽度 h_c /mm
AST-1	2	49.83	6.32	2.94
AST-2		49.63	5.80	3.16
AST-3		49.71	5.95	3.31
ATT-1	2	49.78	6.60	2.41
ATT-2		49.71	6.68	2.56
ATT-3		49.53	6.69	2.55
ASL-1	4	52.05	6.46	3.72
ASL-2		51.30	6.24	3.83
ASL-3		51.04	6.26	4.00
ATL-1	4	50.21	5.73	3.04
ATL-2		50.13	5.81	3.24
ATL-3		49.48	5.63	3.23
DST-1	2	49.98	6.06	3.17
DST-2		50.00	5.98	3.17
DST-3		49.76	5.98	2.84
DTT-1	2	49.89	6.04	3.32
DTT-2		50.43	5.94	2.60
DTT-3		50.16	6.03	2.62
DSL-1	4	50.96	5.96	3.53
DSL-2		50.57	6.14	3.57
DSL-3		50.59	5.98	3.56
DTL-1	4	50.76	5.87	3.32
DTL-2		50.14	5.72	3.01
DTL-3		50.69	5.86	3.25

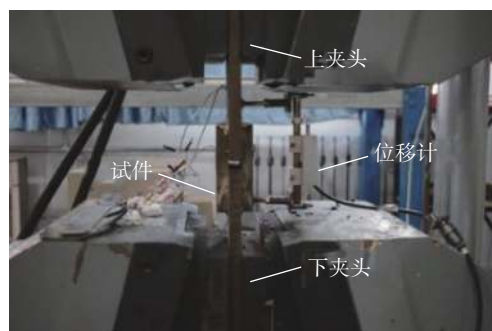


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Test setup

2 试验现象及破坏模式

试件加载前期荷载-位移曲线上升缓慢, 近似呈线性增长, 当试件到达极限荷载后, 承载力迅速下降, 试件随即被拉断, 并伴随巨大响声。所有试件的破坏均为焊缝处拉断, 试件典型破坏面如图 4 所示。整体而言, 电弧焊试件的破坏面较均匀且光滑, 而氩弧焊试件的破坏面则呈现出不规则形状。

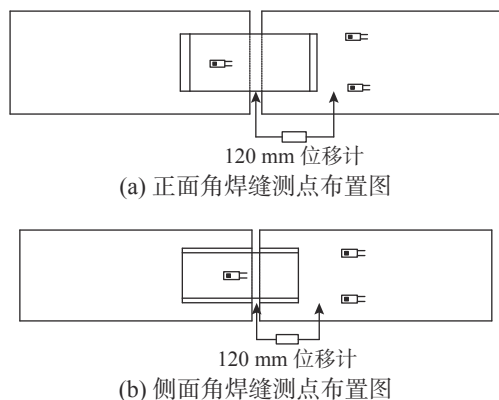


图 3 试件测点布置图

Fig. 3 Location of measuring points

3 试验结果分析

3.1 试件参数

试件的破坏均为焊缝处破坏, 试验结束后, 测量焊缝断裂面的实际宽度 h_e , 测量时分别测量焊缝中间及两端三处位置的宽度, 取三组数据平均值。相关测量结果见表 1。

3.2 试件数据分析

3.2.1 焊缝真实断裂角度

试验结束后, 拍摄焊缝断裂面侧视图, 通过电脑软件 Viso 量测得到焊缝的真实断裂角度 θ 如图 5 所示, 试验结果见表 2。由试验数据可知, 两种不锈钢材料的真实断裂角度基本相似, 对于电弧焊试件, 两种不锈钢材料侧面角焊缝的平均真实断裂角度为 45.4° , 正面角焊缝的平均真实断裂角度为 32.8° ; 而对于氩弧焊试件, 两种不锈钢材料侧面角焊缝的平均真实断裂角度为 45.4° , 正面角焊缝的平均真实断裂角度为 32.6° 。试验结果与相关规范中认为的角焊缝断裂角度为 45° 略有不同, 分析原因在焊缝受力过程中, 侧面角焊缝受纯剪应力作用, 断裂角度理应为 45° 左右, 而正面角焊缝则同时受到拉应力与剪应力的共同作用, 所以真实断裂角度与 45° 有所偏差。

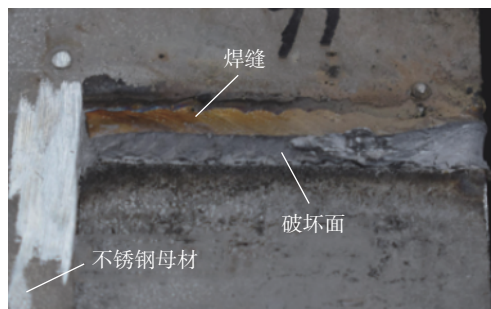
3.2.2 奥氏体型不锈钢角焊缝试件承载性能分析

通过采集系统所得试验数据, 绘制试件的荷载-位移曲线如图 6 所示, 其中荷载为仪器自身所输出荷载值, 位移为导杆式位移计的测量值。由试验曲线可以看出, 受焊接自身因素的影响, 各个试件曲线之间会产生一定的差异, 但各组曲线的发展趋势类似。

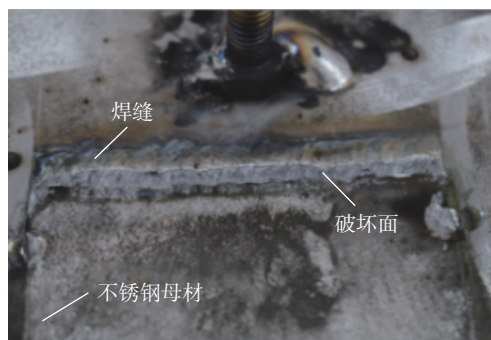
试件的极限强度 τ_u 及相对变形量 δ 分别采用式 (1) 及式 (2)^[25] 来计算。



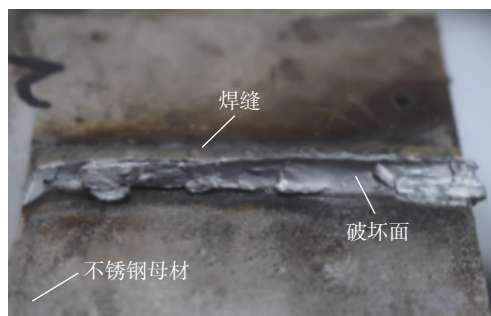
(a) 电弧焊正面角焊缝试件



(b) 电弧焊侧面角焊缝试件



(c) 氩弧焊正面角焊缝试件



(d) 氩弧焊侧面角焊缝试件

图 4 试件破坏面示意图

Fig. 4 Failure surface of specimens

$$\tau_u = \frac{P_u}{A_e} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\delta_u}{120} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_e 为焊缝真实断裂面面积, $A_e = n l_w h_e$; P_u 为对应试件荷载-位移曲线中的最大荷载; δ_u 为试

件的极限位移；120 为位移计的初始标距。

奥氏体型不锈钢角焊缝连接试件的相关试验结果如表 3 所示。其中，对于奥氏体型不锈钢角焊缝连接试件，采用氩弧焊焊接工艺制成的试件极限强度与采用电弧焊焊接工艺制成的试件极限强度之比分别为 1.03 (正面角焊缝试件) 与 1.13 (侧面角焊缝试件)，相对变形量之比则分别为 1.46 与 1.11。

试验结果表明，采用氩弧焊焊接工艺的试件表现出了相对更好的力学性能。同时，对于电弧焊焊接试件，正面角焊缝的极限强度与侧面角焊缝的极限强度之比为 1.79，氩弧焊焊接试件为 1.62。

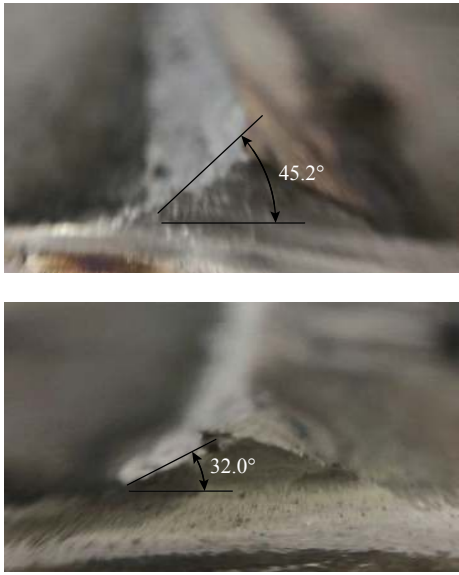
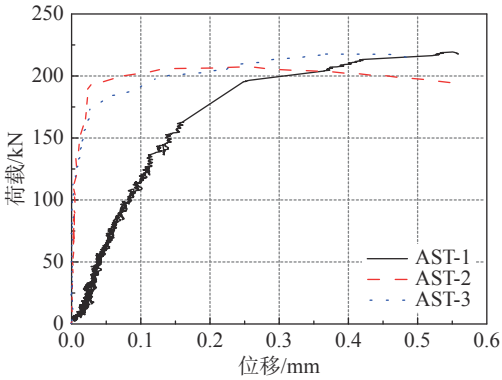


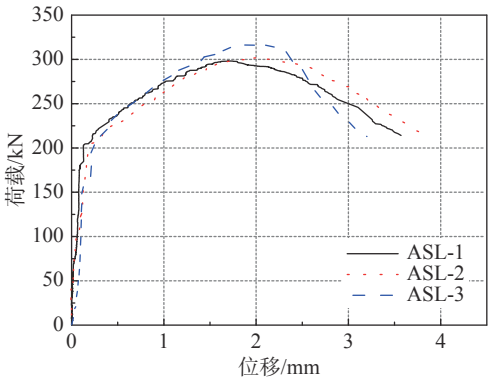
图 5 角焊缝真实断裂角度
Fig. 5 Real fracture angle of fillet weld

表 2 角焊缝真实断裂角度
Table 2 Real fracture angle of fillet weld

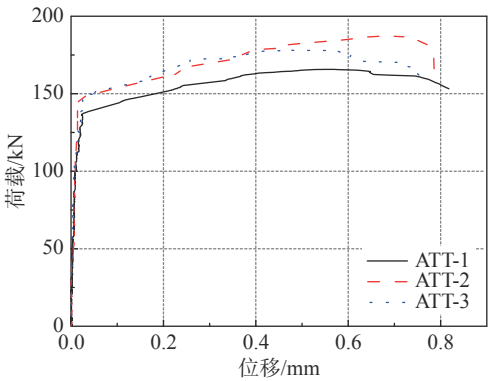
电弧焊 试件	试件破坏角 度平均值 $\theta/(^{\circ})$	每组试件破坏 角度平均值 $\theta_{avg}/(^{\circ})$	氩弧焊 试件	试件破坏角 度平均值 $\theta/(^{\circ})$	每组试件破坏 角度平均值 $\theta_{avg}/(^{\circ})$
AST-1	33.0	33.1	ATT-1	32.3	32.2
AST-2	32.9		ATT-2	31.8	
AST-3	33.5		ATT-3	32.4	
ASL-1	45.7	45.2	ATL-1	44.8	45.0
ASL-2	45.2		ATL-2	45.4	
ASL-3	44.7		ATL-3	44.9	
DST-1	32.0	32.5	DTT-1	32.3	32.9
DST-2	32.8		DTT-2	32.4	
DST-3	32.6		DTT-3	33.9	
DSL-1	45.0	45.6	DTL-1	45.0	45.8
DSL-2	45.2		DTL-2	46.9	
DSL-3	46.6		DTL-3	45.6	



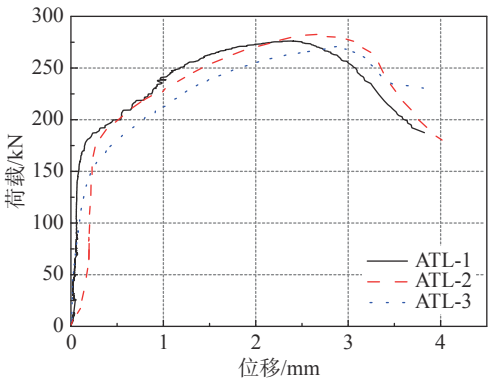
(a) 奥氏体型不锈钢电弧焊正面角焊缝试件



(b) 奥氏体型不锈钢电弧焊侧面角焊缝试件



(c) 奥氏体型不锈钢氩弧焊正面角焊缝试件



(d) 奥氏体型不锈钢氩弧焊侧面角焊缝试件

图 6 奥氏体型不锈钢试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve of austenitic stainless steel specimens

表 3 奥氏体型不锈钢试件试验结果
Table 3 Test results of austenitic stainless steel specimens

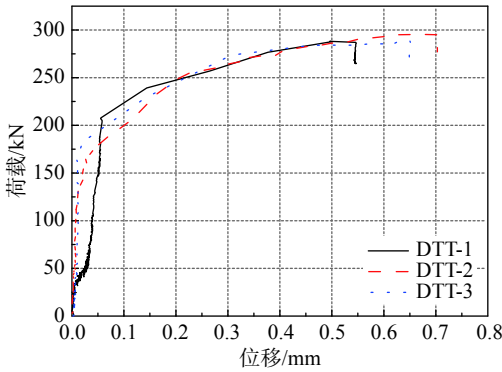
试件编号	极限强度 τ_{u-s}/MPa	平均极限强度 $\tau_{u-s,avg}/\text{MPa}$	相对变形量 δ_s	平均相对 变形量 $\delta_{s,avg}$	试件编号	极限强度 τ_{u-t}/MPa	平均极限强度 $\tau_{u-t,avg}/\text{MPa}$	相对变形量 δ_t	平均相对 变形量 $\delta_{t,avg}$	$\tau_{u-t,avg}/$ $\tau_{u-s,avg}$	$\delta_{t,avg}/$ $\delta_{s,avg}$
AST-1	763.6		0.49		ATT-1	690.7		0.68			
AST-2	660.5	690.40	0.46	0.45	ATT-2	735.0	710.30	0.66	0.66	1.03	1.46
AST-3	661.9		0.41		ATT-3	705.3		0.63			
ASL-1	385.0		2.98		ATL-1	452.3		3.19			
ASL-2	384.0	385.50	3.16	2.92	ATL-2	435.1	437.00	3.35	3.24	1.13	1.11
ASL-3	387.4		2.67		ATL-3	423.5		3.18			
AST/ASL	—	1.79	—	0.15	ATT/ATL	—	1.62	—	0.20	—	—

3.2.3 双相型不锈钢角焊缝试件承载性能分析

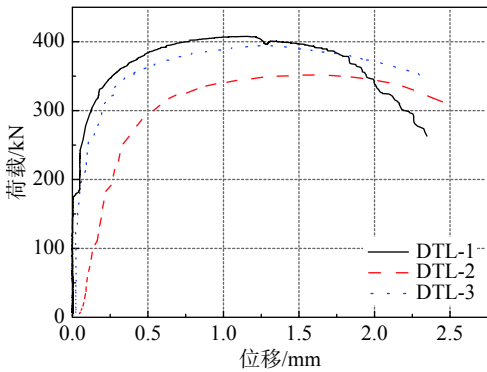
对于双相型不锈钢角焊缝试件，荷载-位移曲线如图 7 所示。相比于奥氏体型试件，双相型试件的荷载-位移曲线离散性偏大，但发展趋势与奥氏体型试件相似。

双相型不锈钢试件的相关试验结果见表 4。由试验结果可以看出，对于双相型不锈钢焊缝连接试件，采用氩弧焊接工艺制成的试件极限强度与采用电弧焊接工艺制成的试件极限强度之比分别为 1.12 (正面角焊缝试件) 与 1.04 (侧面角焊缝试件)，而相对变形量之比则为 1.66 与 1.45。

同奥氏体型不锈钢角焊缝试件所得试验结果一致，对于双相型不锈钢，采用氩弧焊接工艺



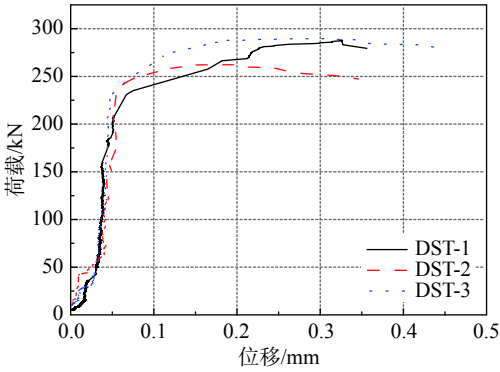
(c) 双相型不锈钢氩弧焊正面角焊缝试件



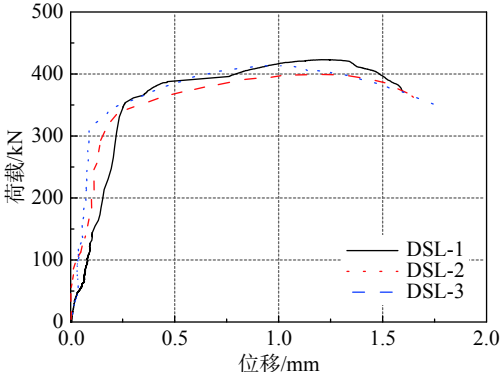
(d) 双相型不锈钢氩弧焊侧面角焊缝试件

图 7 双相型不锈钢试件荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of duplex stainless steel specimens



(a) 双相型不锈钢电弧焊正面角焊缝试件



(b) 双相型不锈钢电弧焊侧面角焊缝试件

制成的试件力学性能也相较于电弧焊接工艺更好。同时采用电弧焊接工艺与氩弧焊接工艺制成的试件正面角焊缝强度与侧面角焊缝强度之比分别为 1.61 及 1.73，正面角焊缝试件的强度远大于侧面角焊缝试件的强度。

3.2.4 设计建议

我国现行《不锈钢结构技术规程》(CECS 410: 2015)^[20]指出：不锈钢角焊缝的焊接工艺宜优先选用氩弧焊。通过对不同焊接工艺试件承载性能的研究，证实了氩弧焊试件的力学性能较好于电弧

表 4 双相型不锈钢试件试验结果
Table 4 Test results of duplex stainless steel specimens

试件编号	极限强度 τ_{u-s}/MPa	平均极限强度 $\tau_{u-s,avg}/\text{MPa}$	相对变形量 δ_s	平均相对 变形量 $\delta_{s,avg}$	试件编号	极限强度 τ_{u-t}/MPa	平均极限强度 $\tau_{u-t,avg}/\text{MPa}$	相对变形量 δ_t	平均相对 变形量 $\delta_{t,avg}$	$\tau_{u-t,avg}/$ $\tau_{u-s,avg}$	$\delta_{t,avg}/$ $\delta_{s,avg}$
DST-1	909.3		0.30		DTT-1	869.8		0.46			
DST-2	828.3	920.70	0.29	0.32	DTT-2	1126.1	1031.50	0.59	0.53	1.12	1.66
DST-3	1024.5		0.38		DTT-3	1098.6		0.54			
DSL-1	587.9		1.33		DTL-1	605.0		1.96			
DSL-2	553.1	571.70	1.37	1.39	DTL-2	582.8	595.30	2.10	2.01	1.04	1.45
DSL-3	574.0		1.47		DTL-3	598.2		1.97			
DST/DSL	—	1.61	—	0.23	DTT/DTL	—	1.73	—	0.26	—	—

焊试件，然而对于不锈钢角焊缝的强度，两者差别并不是很大，同时综合考虑焊接速率、复杂程度以及经济性等因素，建议后续在非重要节点的连接处，可以考虑采用电弧焊焊接工艺。

该规程同时指出：考虑到不锈钢焊缝较小，受复杂应力影响较大，不考虑利用正面角焊缝的强度提高。本文试验研究结果显示，对于奥氏体型不锈钢，采用电弧焊工艺与氩弧焊工艺制成的试件，正面角焊缝试件与侧面角焊缝试件的强度比值分别为 1.79 与 1.62，而双相型不锈钢试件强度比分别为 1.61 与 1.73，正面角焊缝的强度远高于侧面角焊缝，因此建议在后续规范的编制/修订过程中，参考我国《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[26]，引入正面角焊缝强度设计值增大系数 β_F ，同时出于安全考虑建议 β_F 取值为 1.22，以此来考虑正面角焊缝强度提高的影响。

4 结论

本文基于不锈钢角焊缝连接试件的单调拉伸试验，重点考察了不同焊接工艺对不锈钢角焊缝连接力学性能的影响，主要结论如下：

(1) 所有试件均为角焊缝处破坏，电弧焊试件的焊缝破坏面较光滑，而氩弧焊试件的焊缝破坏面则呈现出不规则形状。

(2) 对于电弧焊试件，两种不锈钢材料侧面角焊缝的平均真实断裂角度为 45.4° ，正面角焊缝为 32.8° ；而氩弧焊试件，两种不锈钢材料侧面角焊缝的平均真实断裂角度为 45.4° ，正面角焊缝 32.6° ，这与我国《不锈钢结构技术规程》(CECS 410: 2015)^[20] 中的规定有所不同。

(3) 对于奥氏体型不锈钢，氩弧焊试件与电弧焊试件的强度比分别为 1.03(正面角焊缝试件) 及 1.13(侧面角焊缝试件)，相对变形量之比为 1.46

及 1.11；对于双相型不锈钢，强度比分别为 1.12 和 1.04，相对变形量之比分别为 1.66 及 1.45，采用氩弧焊焊接工艺制成的角焊缝试件表现出了更好的力学性能。

(4) 由于两种焊接工艺对不锈钢角焊缝强度的影响差别不是很大，综合考虑焊接速率、复杂程度以及经济性等因素，建议后续在非重要节点的连接处，可以用电弧焊焊接工艺。

(5) 对于奥氏体型不锈钢，采用电弧焊工艺及氩弧焊工艺制成的试件，正面角焊缝试件与侧面角焊缝试件的强度比值分别为 1.79 及 1.62，而双相型不锈钢的强度之比分别为 1.61 和 1.73，正面角焊缝的强度远高于侧面角焊缝强度，因此建议在后续规范的编制/修订中，参考我国《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[26]，引入正面角焊缝强度设计值增大系数 $\beta_F=1.22$ ，以此来考虑正面角焊缝强度提高的影响。

参考文献：

- [1] Zheng B F, Shu G P, Jiang Q L. Experimental study on residual stresses in cold rolled austenitic stainless steel hollow sections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 152: 94 — 104.
- [2] 杨璐, 卫璇, 张有振, 等. 不锈钢母材及其焊缝金属材料单拉本构关系研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 134 — 139. Yang Lu, Wei Xuan, Zhang Youzhen, et al. Research on the tensile stress-strain relation of stainless steel base material and its weld metal material [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 134 — 139. (in Chinese)
- [3] 常笑, 杨璐, 王萌, 等. 循环荷载下奥氏体型和双相型不锈钢材料本构关系研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(5): 137 — 147. Chang Xiao, Yang Lu, Wang Meng, et al. Study on constitutive model of austenitic stainless steel [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(5): 137 — 147. (in Chinese)

- [4] 杨璐, 宁克洋, 班慧勇, 等. 不锈钢焊接箱形截面压弯构件弯曲屈曲试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 143 — 150.
Yang Lu, Ning Keyang, Ban Huiyong, et al. Experimental research on flexural buckling of stainless steel welded box-section beam-columns [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12): 143 — 150. (in Chinese)
- [5] 李华峰, 朱忠义, 束伟农, 等. 江门中微子实验中心探测器主体不锈钢结构设计研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(20): 92 — 97.
Li Huafeng, Zhu Zhongyi, Shu Weinong, et al. Design and research of the main stainless steel structure of the central detector of Jiangmen Underground Neutrino Observatory [J]. Building Structure, 2018, 48(20): 92 — 97. (in Chinese)
- [6] 董彪, 罗建成, 魏峻峰, 等. “天衣无缝”的技艺设计——青岛胶东国际机场航站楼连续焊接不锈钢屋面应用分析[J]. 建筑技艺, 2019(4): 121 — 123.
Dong Biao, Luo Jiancheng, Wei Junfeng, et al. A seamless heavenly robe of architecture technique: application analysis of continuously welded stainless steel roofing in Qingdao Jiaodong International Airport Terminal [J]. Architecture Technique, 2019(4): 121 — 123. (in Chinese)
- [7] Butler L J, Kulak G L. Strength of fillet welds as a function of direction of load [J]. Welding Journal, 1971, 50(5): 231s — 234s.
- [8] Miazga G S, Kennedy D J L. Behaviour of fillet welds as a function of the angle of loading [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16(4): 583 — 599.
- [9] Ng A K F, Deng K, Grondin G Y, et al. Behavior of transverse fillet welds: Experimental program [J]. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 2004, 41(2): 39 — 54.
- [10] 魏晨熙. Q460高强度钢材焊缝连接受力性能和计算模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
Wei Chenxi. Research on the structural performance and calculation model of Q460 high strength steel weld connection [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [11] 孙铭泽, 张大长, 李布辉, 等. Q420 高强钢角焊缝承载力特性试验及模拟分析[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2014, 36(6): 99 — 103.
Sun Mingze, Zhang Dachang, Li Buhui, et al. Test and simulation analysis on bearing capacity of Q420 high-strength steel fillet weld [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2014, 36(6): 99 — 103. (in Chinese)
- [12] 范圣刚, 郑家理, 孙文隽, 等. S30408奥氏体不锈钢高温力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 172 — 181, 191.
Fan Shenggang, Zheng Jiacheng, Sun Wenjun, et al. Experimental investigation on mechanical properties of S30408 austenitic stainless steel at elevated temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 172 — 181, 191. (in Chinese)
- [13] 袁焕鑫, 王元清, 石永久, 等. 焊接箱形截面不锈钢柱相关稳定性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 84 — 91.
Yuan Huanxin, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu, et al. Behavior of interactive buckling in welded stainless steel box section columns [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 84 — 91. (in Chinese)
- [14] 金晓兰, 邹若梦, 董军. 不锈钢贴角焊缝连接试验及设计建议[J]. 建筑结构, 2013, 43(9): 78 — 82.
Jin Xiaolan, Zou Ruomeng, Dong Jun. Experiments and design suggestions for stainless steel fillet connections [J]. Building Structure, 2013, 43(9): 78 — 82. (in Chinese)
- [15] 杨璐, 张有振, 周晖, 等. 双相型S22053不锈钢角焊缝连接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11): 19 — 25.
Yang Lu, Zhang Youzhen, Zhou Hui, et al. Tensile test study on fillet weld connections of S22053-grade duplex stainless steel [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(11): 19 — 25. (in Chinese)
- [16] 张有振, 杨璐, 周晖, 等. 双相型不锈钢角焊缝连接承载性能有限元分析[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 110 — 118.
Zhang Youzhen, Yang Lu, Zhou Hui, et al. Finite element analyses of loading capacity of fillet-weld connections fabricated from duplex stainless steel [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 110 — 118. (in Chinese)
- [17] 杨璐, 张有振, 周晖, 等. 奥氏体型S30408不锈钢角焊缝连接拉伸试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 48 — 54.
Yang Lu, Zhang Youzhen, Zhou Hui, et al. Tensile test on fillet weld connections of austenitic stainless steel grade S30408 [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 48 — 54. (in Chinese)
- [18] 张有振, 杨璐, 赵梦晗, 等. 奥氏体型S30408不锈钢角焊缝连接承载性能有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(1): 39 — 47, 72.
Zhang Youzhen, Yang Lu, Zhao Menghan, et al. Finite element analysis of loading capacity of fillet weld connections fabricated using austenitic grade S30408 stainless steel [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(1): 39 — 47, 72. (in Chinese)
- [19] Yang L, Cui Y, Wei X, et al. Strength of duplex stainless steel fillet welded connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 152: 246 — 260.
- [20] 中国工程建设标准化协会. CECS 410: 2015, 不锈钢结构技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 410: 2015, Technical specification for stainless steel [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)