

建筑钢结构熔透对接焊缝瑕疵对焊缝剪切和拉剪强度影响的研究

杨晓东¹, 杨明潇², 王杨俊³

(1. 西安建筑科技大学 材料与矿资学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西石泉县方源建材检验检测有限公司, 陕西 石泉 725200 ;
3. 陕西省纺织科学研究所, 陕西 西安 710038)

摘要:应用测试原位焊缝剪切和拉剪强度的实验装置, 研究建筑钢结构熔透对接焊缝瑕疵特征值(ϵ)对焊缝剪切强度(τ)和拉剪强度(R)的影响. 研究受剪力作用的焊缝发现: 焊缝存在瑕疵, 其剪切强度低于母材的剪切强度. 当焊接瑕疵位于焊缝核心区域(c 类)时, 对承受拉剪复合力的焊缝研究表明: ϵ 小于 0.150, 随 ϵ 增加, 焊缝拉剪强度几乎不变; ϵ 在 0.150~0.201 间, ϵ 增加, 焊缝拉剪强度降低幅值较大; ϵ 在 0.201~0.453 间, ϵ 增加, 焊缝拉剪强度降低幅值较小. 当焊接瑕疵位于距焊缝受力方向较远的接近表面区域(r 类)时, 对承受拉剪复合力的焊缝研究表明: ϵ 不大于 0.005 时, ϵ 增加, 焊缝拉剪强度降低幅值较小; ϵ 大于 0.005, ϵ 增加, 焊缝拉剪强度下降幅值巨大. H 型对接构件受力变形研究发现: 对接焊缝存在的瑕疵, 不影响焊缝拉剪设计强度时, 焊缝拉剪破坏, 构件挠度大于设计允许值.

关键词:瑕疵焊缝; 剪切; 拉剪; 强度变化特征

中图分类号: TB302.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0134-07

Study on the influence of building steel structure butt weld fusion defects on shear and weld tensile-shear strength

YANG Xiaodong¹, YANG Mingxiao², WANG Yangjun³

(1. College of Materials and Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Shiquan County Fangyuan Building Material Inspection and Experiment Limited Company, Shiquan 725200, China;
3. Shaanxi Textile Science Research Institute, Xi'an 710038, China)

Abstract: In designing the weld shear and tensile-shear device, there are flaws in shear strength (τ) of melting butt weld, tensile-shear strength (R) and component failure state with defective equivalent rate (ϵ) size variation. The shear strength of the weld line decreases to the shear strength of the base metal plate under the action of shearing force and any characteristic flaw. The defect rate of less than 0.150 c equivalent, with increased rates of weld defect equivalent tensile-shear strength is almost level straight. The c class defect equivalent rate, 0.150~0.201, will increase the weld defect equivalent tensile-shear strength reduction sensitivity. As c class defect equivalent rate falls between 0.201~0.453, the rate of defective weld tensile shear strength reduction is not sensitive, but it still showed a downward trend. The defect equivalent rate of r is 0.005, which is the dividing point of the sensitive region of the tensile-shear strength of the weld. When bigger than this point, with the increase of the defect equivalent rate, the tensile-shear strength declines rapidly. The defects in the butt welds of H type components, if the minimum design value of the tensile-shear strength of welded joints is not affected, will be damaged by the tensile-shearing failure of the welded joints, and the deflection of the H component can meet the allowable values of the design.

Key words: flaw welds; Shear; tensile-shear; strength variation characteristics

建筑钢结构安装熔透焊缝是荷载传递的关键部位之一. 现场安装焊缝, 受环境、天气等诸多外界因素影响, 瑕疵的出现不可避免. 国内外一些学者虽然有研究焊接瑕疵与焊缝承载力相关性、焊缝力学性能^[1-14], 如“带焊缝缺陷输电杆塔直缝焊管强度试验研究”、“含缺陷海洋焊接结构的安全评定”、“高速列车转向架

构架中的横梁与侧梁处的环向角焊接缺陷对结构强度的影响”等, 然而对于瑕疵大小、位置与建筑钢结构焊缝抗力的变化特征研究相对较少. 实际的建筑钢结构中, 有些焊缝主要处于单项受剪状态, 有些焊缝受力为复合应力状态, 如 H 型钢梁(受弯构件)上, 在焊缝附近有集中荷载时, 一些焊缝截面上会产生拉应力和剪应力组合的复

收稿日期: 2016-06-06

修改稿日期: 2018-01-15

基金项目: 西安建筑科技大学校校基础研究基金(JC1603); 陕西省教育厅自然科学专项(09JK558)

第一作者: 杨晓东(19681—), 男, 高级工程师, 主要从事钢结构无损探伤的研究工作. E-mail: yxd681125@126.com

合应力. 焊缝中瑕疵大小达到什么程度, 构件在剪应力、拉应力和剪应力组合条件下会失效, 需要研究. 本课题较系统的研究了熔透对接焊缝不同位置中存在的不同的“瑕疵特征值”(瑕疵大小的相对量), 对焊缝剪切和拉剪强度变化特征的影响.

1 试验方案设计

1.1 研究用设备和仪器

(1)测力实验装置

WAW-2000 电液伺服材料试验机, 示值精度不小于 1%. 测力方法以《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》GB/T 228.1-2010 中拉伸方

法为依据.

(2)瑕疵检测

模拟式超声波探伤仪.

探头(换能器): 横波入射角度 70.5°, 晶片面积 6 mm×6 mm.

1.2 研究用材料

1.2.1 实验材料的规格和力学性能指标

电焊条规格 E5003; 钢材为厚度 16 mm 以下的 Q345 钢板. 研究用材料强度、断后伸长率技术指标如表 1 所示.

1.2.2 研究的焊缝类别及强度设计值

研究采用的焊缝类别及现行规范焊缝设计值^[15]如表 2 所示.

表 1 E5003 焊条和 Q345 钢板力学性能

Tab. 1 E5003 welding electrode and Q345 steel strength and break elongation

材料	板厚/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	剪切强度/MPa	断后伸长率/%
E5003	—	425	565	457	25
	16	390	520	443	27
Q345	14	395	523	445	26
	12	388	518	440	28

表 2 Q345 钢材熔透焊缝设计值

Tab. 2 Q345 strength design of butt weld fusion

材质	钢材厚度 t/mm	焊缝类型	抗压强度 f_c^w/MPa	抗拉强度 f_t^w/MPa		抗剪强度 f_v^w/MPa	拉剪强度(折算应力) $1.1f_t^w/\text{MPa}^{[15]}$	
				一级，二级	三级		一级，二级	三级
Q345	≤ 16	全熔透对接焊缝	310	310	265	180	341	291.5

1.3 瑕疵归一化及预设部位

本文研究的焊接瑕疵归一化, 以瑕疵大小与焊缝大小比值, 即“瑕疵特征值(ϵ)”表示^[16-17].

瑕疵在焊缝中位置设置有两种: 一种距受力方向较远的接近表面区域(不开口的瑕疵), 用符号“r”表示——r 类瑕疵, 另一种焊缝内部靠近焊缝核心区域部位, 用符号“c”表示——c 类瑕疵.

1.4 试验设计

1.4.1 焊缝剪切试验设计

焊缝剪切加荷试验设计, 如图 1 所示.

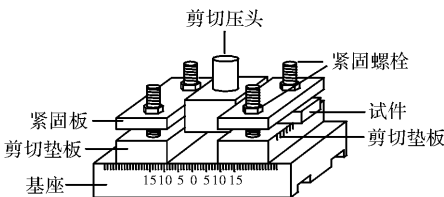


图 1 对接焊缝剪切试验装置

Fig. 1 butt weld shear test devices

1.4.2 焊缝拉剪试验设计

制作 2 个等长 H 型试件, 上下翼板对焊, 腹

板接口不焊接, 焊后试件在万能材料试验机上简支安放; 在上翼板距焊缝 50 mm 处施加集中荷载(构件拼装截面处, 腹板截面应力为零), 下翼板焊缝将产生拉应力和剪应力的复合应力. 试件和试验装置, 如图 2 所示.

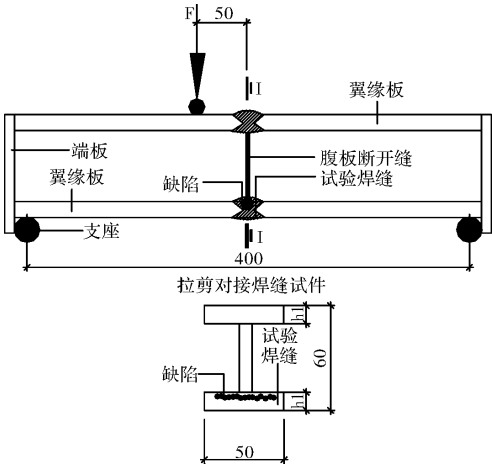


图 2 H 型受弯试件

Fig. 2 tensile and shear complex stress component and test device

瑕疵位置：施工现场安装焊缝结构中，H 型构件翼缘板对接焊接 c 类瑕疵大多数在靠近腹板一侧，所以试验构件的焊接 c 类瑕疵留在靠近腹板一侧(瑕疵埋于下翼缘板焊缝中)；r 类瑕疵，置于下翼缘板焊缝近外表面一侧。

2 试验结果及分析

2.1 剪力作用下焊缝剪切强度变化特征

1)c 类瑕疵特征值 ϵ 变化焊缝剪切强度变化特征试验，如表 3 所示。

表 3 c 类瑕疵焊缝剪切试验

Tab. 3 Test results of class c flaw of butt weld fusion shear

编号	钢板厚度 t/mm	焊缝抗剪强度 τ/MPa	瑕疵特征值 ϵ	试件破坏特点	母材抗剪平均强度 τ/MPa
1	14	340	0.180	焊缝	443
2	14	336	0.034	焊缝	
3	14	319	0.134	焊缝	
4	14	300	0.252	焊缝	
5	14	244	0.391	焊缝	
6	14	150	0.450	焊缝	
7	12	346	0.117	焊缝	
8	12	345	0.027	焊缝	
9	16	305	0.190	焊缝	
10	16	123	0.499	焊缝	

表 3 数据分析，如图 3 所示。

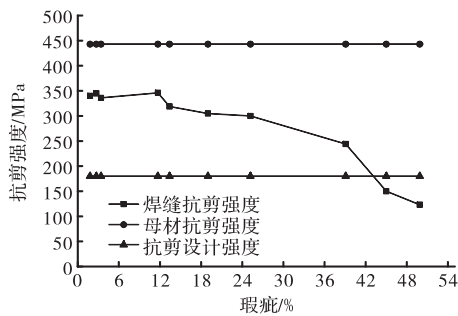


图 3 c 类瑕疵 τ 随 ϵ 变化特征

Fig. 3 Shear strength analysis diagram of class c flaw of butt weld fusion

对图 3 进一步分析，焊缝抗剪强度(τ)随 c 类瑕疵特征值(ϵ)变化特征，如表 4 所示。

表 4 c 类瑕疵焊缝剪切强度变化特征

Tab. 4 Characteristics of Class c flaw of weld shear strength

瑕疵特征值 ϵ	焊缝抗剪强度变化特征($t \leq 16\text{mm}$)
只要存在	低于母材抗剪强度
≤ 0.240	随 ϵ 增加而降低幅值较小，远远大于设计值
> 0.240	随 ϵ 增加而降低幅值较大
≥ 0.430	低于设计值

2)r 类瑕疵特征值 ϵ 变化焊缝剪切强度变化特征实验，结果如表 5 所示。

表 5 r 类瑕疵焊缝剪切实验

Tab. 5 Results of Class r flaw of butt weld fusion shear test

编号	钢板厚度 t/mm	焊缝抗剪强度 τ/MPa	瑕疵特征值 ϵ	试件破坏特点	母材抗剪平均强度 τ/MPa
1	14	371	0.260	焊缝	444
2	14	350	0.053	焊缝	
3	14	306	0.105	焊缝	
4	14	262	0.312	焊缝	
5	14	178	0.562	焊缝	
6	16	310	0.092	焊缝	
7	16	253	0.336	焊缝	
8	16	205	0.490	焊缝	
8	16	175	0.550	焊缝	

表 5 试验数据分析, 如图 4 所示.

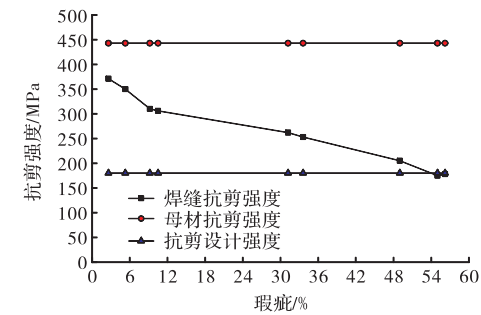


图 4 r 类瑕疵 τ 随 ϵ 变化特征

Fig. 4 Analysis diagram of class r flow of butt weld fusion-shear strength

对图 4 进一步分析, 焊缝抗剪强度(τ)随 r 类瑕疵特征值(ϵ)变化特征规律, 如表 6 所示.

表 6 r 类瑕疵焊缝剪切强度变化特征

Tab. 6 Class r flaw of weld shear strength characteristics

瑕疵特征值 ϵ	焊缝抗剪强度变化特征($t \leq 16$ mm)
只要存在	低于母材抗剪强度
≤ 0.100	随 ϵ 增加而降低幅值较大
> 0.100	随 ϵ 增加而降低幅值较小
≥ 0.540	低于设计值

表 7 H 型构件下翼缘 c 类瑕疵焊缝拉剪

Tab. 7 Tensile-shear test results of H component class c flaw

编号	钢板厚度/mm	焊缝抗剪强度/MPa	焊缝抗拉强度/MPa	焊缝拉剪强度 (折算应力)R/MPa	瑕疵特征值 ϵ	构件破坏特点
1	12	44.3	224.0	237	0.487	焊缝
2	12	56.9	230.0	250	0.201	焊缝
3	12	60.2	333.5	349	0.0019	构件
4	12	56.0	306.5	321	0.249	构件
5	16	51.3	206.5	225	0.453	焊缝
6	16	62.5	251.4	274	0.314	焊缝
7	16	79.3	319.3	348	0.148	构件
8	16	58.1	234.8	256	0.186	构件
9	16	55.5	224.2	244	0.267	焊缝
10	16	60.1	242.7	264	0.356	焊缝
11	16	59.3	239.6	261	0.382	焊缝
12	16	40.6	163.9	178	0.531	焊缝
13	16	42.7	172.4	188	0.500	焊缝
14	16	39.7	160.3	174	0.550	焊缝
15	16	30.6	123.6	134	0.575	焊缝

2.2 焊缝拉剪强度变化特征研究

1)焊接过程形成 c 类瑕疵, 对 H 型构件下翼缘板对接焊缝拉剪复合强度变化特征试验, 结果如表 7 所示.

表 7 中 c 类瑕疵焊缝拉剪数据分析, 如图 5 所示.

对图 5 进一步分析, 焊缝拉剪复合强度(R)随 c 类瑕疵特征值(ϵ)变化特征, 如表 8.

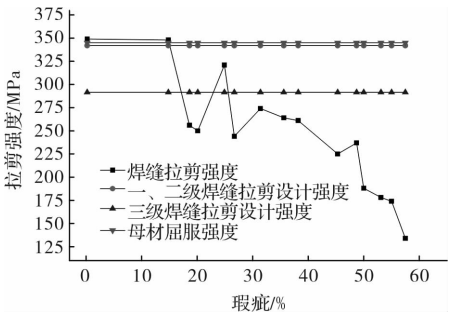


图 5 c 类瑕疵焊缝 R 随 ϵ 变化特征

Fig. 5 Analysis diagram of class c flow of butt weld tensile-shear strength

表 8 c 类瑕疵焊缝拉剪复合强度变化特征

Tab. 8 Characteristics of Class c flaw of weld tensile and shear strength

瑕疵特征值 ϵ	焊缝拉剪强度变化特征 ($t \leq 16 \text{ mm}$)
≤ 0.150	对 ϵ 变化不敏感, 近乎水平直线, 且大于母材屈服强度标准值 (345 MPa) 及 GB50017-2003 一、二级熔透焊设计值 ($1.1f_t^w = 341 \text{ MPa}$)
$0.150 \sim 0.201$	对 ϵ 变化敏感, 随 ϵ 增加而降低幅值较大
≤ 0.170	大于 GB50017-2003 三级熔透焊设计值 ($1.1f_t^w = 291.5 \text{ MPa}$)
$0.201 \sim 0.453$	对 ϵ 变化不敏感, 随 ϵ 增加而降低幅值较小
≥ 0.453	对 ϵ 变化敏感, 随 ϵ 增加而降低幅值较大

2) 焊接过程形成 r 类瑕疵, 对 H 型构件下翼缘板对接焊缝拉剪复合强度变化特征的试验研究发现, 较小的瑕疵特征值会导致焊缝在较小的荷载下破坏, H 型构件焊缝 (下翼缘板) 拉剪强度变化特征试验, 如表 9 所示.

表 9 H 型构件下翼缘 r 类瑕疵焊缝拉剪

Tab. 9 Tensile-shear test results of H component class r flaw

编号	钢板厚度 t/mm	焊缝抗剪 强度/MPa	焊缝抗拉 强度/MPa	焊缝拉剪强度 (折算应力) R/MPa	瑕疵特 征值 ϵ	构件破 坏特点
1	12	55.3	335.4	348.8	0.0012	构件
2	12	52.0	315.0	327.0	0.013	焊缝
3	12	14.1	77.9	81.6	0.054	焊缝
4	12	13.0	71.8	75.2	0.102	焊缝
5	12	11.6	63.5	66.6	0.161	焊缝
6	12	10.7	59.0	61.8	0.190	焊缝
7	12	6.8	37.6	39.4	0.300	焊缝
8	12	5.0	27.5	28.8	0.432	焊缝

表 9 数据分析, 如图 6.

对图 6 进一步分析, 焊缝拉剪复合强度 (R) 随 r 类瑕疵特征值 (ϵ) 变化特征, 如表 10.

比较 r 类瑕疵和 c 类瑕疵对焊缝拉剪变化特征的影响, 可以发现, r 类瑕疵对焊缝拉剪强度降低变化影响较大.

3) 构件焊缝拉剪破坏状态测试

c 类瑕疵和 r 类瑕疵的 H 型构件拉剪破坏形态和跨中挠度实测值分别如表 11 和 12 所示.

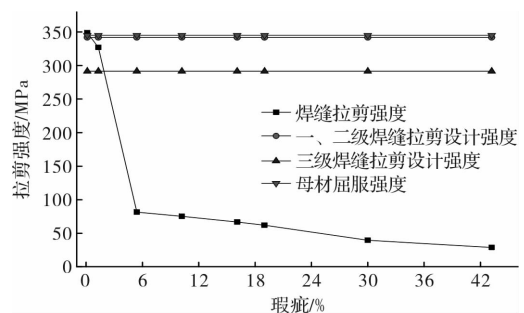


图 6 r 类瑕疵焊缝 R 随 ϵ 变化特征

Fig. 6 Analysis diagram of class r flaw tensile-shear strength

表 10 r 类瑕疵焊缝拉剪复合强度变化特征

Tab. 10 Characteristics of class r flaw of weld tensile-shear strength

瑕疵特征值 ϵ	焊缝拉剪强度变化特征 ($t \leq 16 \text{ mm}$)
≤ 0.005	大于母材屈服强度标准值 (345 MPa) 以及 GB50017-2003 一、二级熔透焊设计值 ($1.1f_t^w = 341 \text{ MPa}$)
≤ 0.020	大于 GB50017-2003 三级熔透焊设计值 ($1.1f_t^w = 291.5 \text{ MPa}$)
$0.005 \sim 0.054$	对 ϵ 变化及敏感, 且随 ϵ 增大迅速下降 (ϵ 达 5.4% 时焊缝拉剪强度仅 81.6 MPa, 只有 GB50017-2003 一、二级熔透焊设计值的 23.9%)
> 0.054	对 ϵ 变化不敏感, 随着 ϵ 的增加, 降低较平缓

表 11 c 类瑕疵焊缝拉剪破坏时构件挠度值

Tab. 11 Mid-span deflection of the measured values of H component with broken tensile-shear (welding class c flaw)

编号	钢板厚度 <i>t</i> /mm	焊缝拉剪强度 (折算应力) <i>R</i> /MPa	瑕疵特征 值 ϵ	破坏位置	焊缝等级 判定	跨中挠度/mm	挠度允许值 [1/400]或 [1/250]/mm
1	12	237	0.487	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
2	12	301	0.167	焊缝	符合三级	18	1 或 1.6
3	12	212	0.532	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
4	12	349	0.0019	构件	符合一、二级	27	1 或 1.6
5	12	321	0.249	构件	符合三级	29	1 或 1.6
6	16	225	0.453	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
7	16	274	0.314	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
8	16	348	0.148	构件	符合一、二级	28	1 或 1.6

表 12 r 类瑕疵焊缝拉剪破坏时构件挠度值

Tab. 12 Mid-span deflection of the measured values of H component with broken tensile shear (class r flaw)

编号	钢板厚度 <i>t</i> /mm	焊缝拉剪强度 (折算应力) <i>R</i> /MPa	瑕疵特征 值 ϵ	破坏位置	焊缝等级 判定	跨中挠度/mm	挠度允许值 [1/400]或 [1/250]/mm
1	12	348.8	0.0012	构件	符合一、二级	28	1 或 1.6
2	12	327.0	0.013	焊缝	符合三级	19	1 或 1.6
3	12	81.6	0.054	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
4	12	75.2	0.102	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
5	12	66.6	0.161	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
6	12	61.8	0.190	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
7	12	39.4	0.300	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6
8	12	28.8	0.432	焊缝	小于三级	焊缝脆断， 挠度不易观察	1 或 1.6

通过表 11、12 中 H 型构件焊缝拉剪复合力作用下破坏状态分析:即使焊缝中存在一定量的瑕疵,但焊缝的拉剪强度仍能够达到规范允许的最低(三级设计值)要求时,最终 H 型构件焊缝破坏,但构件跨中挠度实测值却大于《建筑钢结构设计规范》GB50017-2003 挠度容许值 $[\nu_T]$ ^[15],这说明,构件虽然下翼缘板焊缝破坏,但构件整体的破坏形式符合结构性能检测要求(塑性变形);但如果瑕疵导致焊缝拉剪强度低于规范允许最低值(三级设计值),构件几乎无挠度产生而发生焊缝脆性破坏。

3 结论

(1)受剪力作用焊缝

只要焊缝存在焊接瑕疵,则剪切强度低于母材剪切强度。

(2)H 型受弯构件下翼缘板拉剪焊缝

c 类瑕疵特征值小于 0.150,拉剪强度变化特征接近于不变的水平直线,c 类瑕疵特征值在 0.150~0.201,及大于 0.453,焊缝的拉剪强度随瑕疵特征值增加而降低幅值较大,c 类瑕疵特征值在 0.201~0.453,焊缝的拉剪强度随瑕疵特征值增加而降低幅值较小。

焊缝存在 r 类瑕疵,极小的瑕疵特征值(例如 0.013),也会导致焊缝在拉剪荷载下破坏。

r 类瑕疵特征值大于 0.005,焊缝的拉剪强度对瑕疵特征值变化敏感,且随瑕疵特征值增大而迅速下降。

相同的 r 类和 c 类瑕疵特征值的条件下,r 类瑕疵对焊缝拉剪强度降低的影响较大。

(3)H 型构件焊缝拉剪破坏状态

H 构件焊缝拉剪复合力作用下:焊缝存在的 c、r 类瑕疵特征值不足以改变拉剪强度最低设计值要求(三级),虽然焊缝拉剪破坏,但是 H 构件整体破坏仍有一定的延性。

参考文献 References

[1] 张乐乐,李培,刘晨.焊接缺陷对转向架强度的影响[J].中国铁道科学,2010,31(2):67-72.
ZHANG Lele, LI Pei, LIU Chen. Influence of the weld defect on the structure strength of the bogie frame[J]. China Railway Science, 2010; 31(2): 67-72.

[2] 刘秀丽,王燕,李美红,等.钢结构 T 型连接节点受力性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(6):848-853.
LIU Xiuli, WANG Yan, LI Meihong, et al. Experimental study on the T-stub connections in steel structure[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),

2015, 47(6): 848-853.

[3] 吴艾辉,麦勒 B G,萨恩哲拉克斯 S.焊接缺陷对角焊接 T-型节点承载能力的影响[J].同济大学学报 自然科学版,2008,36(2):155-160.
WU Aihui, MELLOR B G, SYNGELLAKIS S. Effect of defects on load-carrying capability of fillet welded T-Joints[J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2008, 36(2): 155-160.

[4] 殷鹏飞,秦亮,张琳琳.带焊缝缺陷输电杆塔直缝焊管强度试验研究[J].科技展望,2016(5):75-76.
YIN Pengfei, QIN liang, ZHANG Linlin. The bearing capacity of transmission tower straight seam welded pipe with weld defect[J]. Science and Technology, 2016(5): 75-76.

[5] 舒兴平,任森智.钢管相贯节点焊接缺陷类型及对极限强度的影响[J].建筑结构,2006,36(1):24-27.
SHU Xingping, REN Senzhi. Research of welded defect types and influence on ultimate strength of direct-welded tubular joints[J]. Building Structure, 2006, 36(1): 24-27.

[6] 倪真.钢结构焊接缺陷对施工质量的影响[J].钢结构,2013,28(3):66-71.
NI Zhen. The influence of welding defects on construction quality for steel structure[J]. Steel Construction, 2013, (28)3: 66-71.

[7] 朱志彬.公用热力管道缺陷成因分析及安全评定[J].工业安全与环保,2011,37(2):34-36.
ZHU Zhibin. Cause analysis and safety assessment for defect of common thermal pipeline[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(2): 34-36.

[8] 戴为志.建筑钢结构焊接技术发展趋势[J].电焊机,2011,41(8):1-3.
DAI Weizhi. Development trend of the steel structure welding technology in the field of architecture[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(8): 1-3.

[9] 刘洪伟,陶慧琴,朱旻旻.含缺陷海洋焊接结构的安全评定[J].中国海洋平台,2012,27(6):32-35.
LIU Hongwei, TAO Huiqin, ZHU Minmin. Safety assessment of marine welded structure with defects . china offshore platform, 2012, 27(6): 32-35.

[10] OTTERSBOCK M J, LEITNER M, STOSCHKA M, et al. Effect of weld defects on the fatigue strength of ultra high-strength steels[J]. Procedia Engineering, 2016, 160: 214-222.

[11] WANG Xiaopei, ZHANG Yongqiang, JU Jianbin, et al. Characteristics of welding crack defects and failure mode in[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(10): 1104-1110.

[12] LEE JIN KYUNG, BAE DONG SU, LEE SANG PIL, et al. Evaluation on defect in the weld of stainless steel materials using nondestructive technique[J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89(10): 1739-1745.

[13] FU Zhongqiu, JI Bohai, KONG Xiangming, CHEN Xiang. Grinding treatment effect on rib-to-roof weld fatigue performance of steel bridge decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 163-170.

[14] RYAN Stevenson, ATHANASIOS Toupis, ALEXANDER Galloway. Defect tolerance of friction stir welds in DH36 steel[J]. Materials & Design, 2015, 87(12): 701-711.

- Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2015, 30(6): 1172-1178.
- [9] 戴宪起,孙永灿,赵建华,等. 空位和 Si 参杂对 In 在石墨烯上吸附的影响[J]. 新型炭材料, 2011, 26(1): 46-51.
DAI Qixian, SUN Yongcan, ZHAO Jianhua, et al. Space and Si mixed affect In adsorption on graphene [J]. New Carbon Materials, 2011, 26(1): 46-51.
- [10] WU Xin, ZHAO Haiyan, ZHONG Minlin, et al. Molecular dynamics simulation of graphene sheets joining under ion beam irradiation[J]. Carbon, 2014(66): 31-38.
- [11] 丁怀燕,郭江江. 紫外辐照法制备 Ag 纳米颗粒用于石墨烯表面缺陷的标记和修复[J]. 北京工业大学学报, 2015(1): 149-152.
DING Huaiyan, GUO Jiangjiang, Labeling and repairing the defects of chemically reduced graphene oxide using UV-induced Ag nanoparticles[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(1): 149-152.
- [12] 张科举,詹福如. 氧化石墨烯的离子束辐照表面改性[J]. 材料导报, 2013, 27(8): 55-58.
ZHANG Keju, ZHAN Furu. The surface modification of graphene oxide by ion beam irradiation [J]. Materials Review, 2013, 27(8): 55-58.
- [13] 黄凌燕,韩强. 单层石墨烯温度效应的分子动力学模拟[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2012, 42(3): 319-326.
HUANG Lingyan, HAN Qiang. Molecular dynamics simulation of temperature effect on mono-layer graphene sheet[J]. SIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(3): 319-326.
- [14] 黄键彰,韩强. 梯度拉伸下锯齿型石墨烯褶皱的分子动力学模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 122-126.
HUANG Jianzhang, HAN Qiang. Molecular dynamics simulation of wrinkles in zigzag graphene under gradient tension[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2015, 43(6): 122-126.
- [15] 熊立婷,高原文. 温度对石墨烯条带拉伸力学性能影响的模拟研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2012, 42(2): 156-161.
XIONG Liting, GAO Yuanwen. Atomistic simulations of temperature dependences of tensile mechanical for graphene nanoribbons[J]. SIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(2): 156-161.
- [16] STEVEN J, ALAN B. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions [J]. Journal of Chemical Physics, 2000, 112(14): 6472-6486.
- [17] NOSE S. A molecular dynamics method for simulation in the canonical ensemble [J]. Molecular Physics, 1984, 52: 255-268.
- [18] HOOVER W G. Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions [J]. Physical Review A, 1985, 31(3): 1695-1697.
- [19] 韩同伟,贺鹏飞,王健,等. 单层石墨烯薄膜拉伸变形的分子动力学模拟[J]. 新型炭材料, 2010, 25(4): 261-266.
HAN Tongwei, HE Pengfei, WANG Jian, et al. Molecular dynamic simulation of a single graphene sheet under tension [J]. New Carbon Materials, 2010, 25(4): 261-266.
- [20] 胡盛志,谢兆雄,周朝晖. 晶体范德华半径的 70 年[J]. 物理化学学报, 2010, 26(7): 1795-1800.
HU Shengzhi, XIE Zhaoxue, ZHOU Chaohui. 70 Years of crystallographic van der Waals Radii [J]. Acta Phys-Chim. Sin, 2010, 26(7): 1795-1800.
- [21] 梁圣伟. 单层石墨烯辐照损伤后的拉伸特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
LIANG Shengwei. Research of single layer Graphene's mechanics behavior after irradiation damage [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2014.

(编辑 桂智刚)

(上接第 140 页)

- [15] 中华人民共和国建设部, GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
Ministry of construction of the People's Republic of China, GB50017-2003 Design Code for Steel Structure [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [16] 杨晓东,雷艳春,尚建丽,等. 建筑钢结构熔透对接焊缝缺陷对焊缝抗拉强度影响的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然版), 2011, 43(5): 730-734.
YANG Xiaodong, LEI Yanchun, SHANG Jianli, et al. Study on the influence of building steel structure butt weld fusion defects on weld tensile bearing capacity[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural science Edition), 2011, 43(5): 730-734.
- [17] 杨晓东,周鹏,杨芳,等. 钢结构焊缝超声波探伤当量孔径的计算[J]. 无损检测, 2011, 33(9): 68-71.
YANG Xiaodong, ZHOU Peng, YANG Fang, et al. Calculation of defects equivalent aperture in ultrasonic testing of steel structure weld. [J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(9): 68-71.

(编辑 桂智刚)