

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0298-06

对接焊缝连接高温后力学性能试验研究

程 亮¹, 朱美春², 李国强¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海师范大学建筑工程学院, 上海 201418)

摘 要: 对 39 个对接焊缝连接接头试件进行了高温冷却后的拉伸试验, 研究了高温过火对其强度和变形性能的影响规律。试验的主要参数为过火温度和冷却方式, 其中过火温度介于 200℃~800℃, 冷却方式包括自然冷却和泼水冷却。试验结果表明, 常温下发生母材塑性破坏的对接焊缝试件, 在过火温度较高时全部发生焊缝断裂, 试样无明显颈缩, 破坏突然; 过火温度超过 400℃后, 冷却方式对对接焊缝连接试件的高温后力学性能有较大影响, 自然冷却情况下试件从 500℃开始发生焊缝断裂, 试件极限强度和极限变形最大降低幅度分别为 20%和 50%, 泼水冷却情况下试件从 600℃开始发生焊缝断裂, 试件极限强度和极限变形最大降低幅度分别为 10%和 35%。

关键词: 对接焊缝; 高温后; 试验研究; 力学性能; 鉴定修复

中图分类号: TU391; TG407 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.S043

EXPERIMENTAL STUDY ON POST-ELEVATED TEMPERATURE MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT-WELDED CONNECTIONS

CHENG Liang¹, ZHU Mei-chun², LI Guo-qiang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: Post-elevated temperature mechanical properties of butt-welded connections were investigated in this study. 39 specimens were heated to different maximum temperature from 200 to 800℃ and held for 60 minutes. They were subsequently cooled to ambient temperature naturally or by water, and finally stretched to failure. Results show that for butt-welded connections that fail in basic metal at room temperature, fracture failure happens, and the failure position changes to the butt weld when the exposed temperature is high. Cooling methods have a great effect on mechanical properties of butt-welded connections after fire when the exposed temperature is above 400℃. For natural cooling, specimens begin to fail in butt weld at a temperature of 500℃, and the maximum decreases in the ultimate strength and the corresponding deformation are 20% and 50%, respectively. For water cooling, specimens begin to fail in butt weld from 600℃, and the maximum decreases in the ultimate strength and deformation are about 10% and 35%, respectively.

Key words: butt-welded connections; post-elevated temperature; experimental investigation; mechanical properties; identification and repair restoration

钢结构在火灾中很容易受到损坏, 但是随着主动和被动防火技术的进步, 绝大多数火灾并未造成钢结构根本性破坏, 因此开展钢结构火灾后安全性鉴定, 及时进行加固修复意义重大。焊缝连接是现

代钢结构最主要的连接方法, 作为钢结构的基本组成部分和火灾下的薄弱环节^[1-3], 其火灾后受力性能对整个结构灾后承载安全至关重要。

目前, 国内外关于高强度螺栓连接火灾后受力

收稿日期: 2014-04-26; 修改日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108265); 上海市教委科研创新项目(12YZ080)

通讯作者: 朱美春(1979—), 女, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构及组合结构抗火研究(E-mail: meichunzhu@163.com)。

作者简介: 程 亮(1989—), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事钢结构抗火研究(E-mail: 1404715669@qq.com);

李国强(1963—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 主要从事多高层钢结构及钢结构抗火研究(E-mail: gqli@tongji.edu.cn)。

性能的研究较多^[4-7], 关于焊缝连接火灾后受力性能的研究非常有限。陈建锋等^[8]在 2009 年对 26 个正面角焊缝连接(钢材选用 Q235B)进行了高温后受力性能试验研究, 试验结果表明常温下发生钢板母材拉断破坏的正面角焊缝接头试件, 当过火温度超过 500℃后再冷却, 则试件全部发生角焊缝脆性断裂。根据试验结果, 文中提出了高温后正面角焊缝抗拉剪切强度计算公式。Hanus 等^[7]在 2011 年进行了对接焊缝连接(钢材选用 S355JR)在高温及高温冷却阶段受力性能的试验研究, 试验结果表明当过火温度不超过 600℃时, 冷却后焊缝强度与常温下强度相同; 当过火温度等于 800℃或 900℃时, 冷却后焊缝的强度较常温下强度下降约 20%。基于以上分析, 本文开展了 Q345B 钢材对接焊缝连接高温冷却后力学性能试验研究, 研究成果可为钢结构火灾后安全性鉴定和修复加固提供依据。

1 试验方案

1.1 试件设计

根据《焊接接头拉伸试验方法》GB/T 2651-2008^[9]中的相关规定, 本次试验中采用的试件尺寸如图 1(a)所示。试件采用线切割方法, 从样坯中取样加工, 取样位置如图 1(b)所示。试件的钢板采用 Q345B 钢, 板厚 14mm; 对接焊缝为 V 型坡口全熔透焊缝, 焊接方法为 CO₂ 气体保护焊, 焊丝采用 ER50-6。

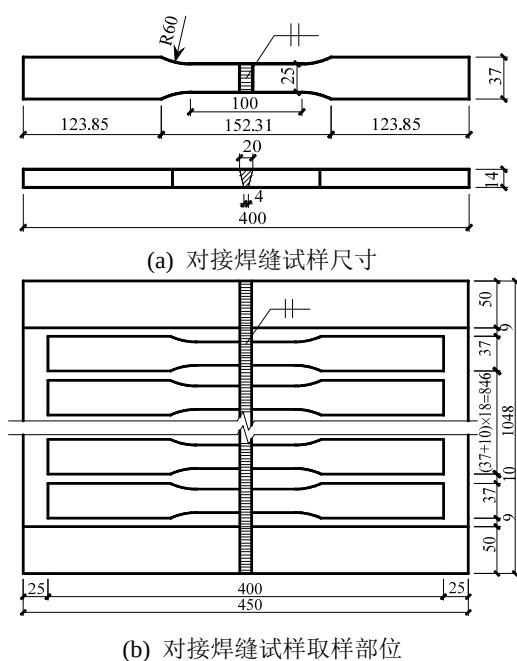


图 1 试件尺寸及取样方式示意图

Fig.1 Specimen dimensions and processing method

1.2 试验装置及加载制度

试验在同济大学抗火试验室进行, 包括高温过火模拟、冷却和冷却后拉伸试验三个部分, 采用的试验设备有电炉和万能试验机。试验用电炉(见图 2(a))最大功率 15kW, 炉内净空尺寸为 0.45m×0.45m×0.6m(长×宽×高), 最高温度可达 1000℃, 整个升温过程由温度控制器进行控制(见图 2(b))。试验所用万能试验机(见图 2(c))最大加载能 1000kN, 试验方法及具体步骤如下:

1) 高温过火模拟。在距试件两端 110mm 处各布置一个 K 型热电偶以监测试件温度。将整个试件放入电炉内, 试验时炉温升温速率约 5℃/min, 待达到指定温度后恒定炉温 60min, 以使试件充分、均匀受热。

2) 冷却。对于自然冷却试件, 直接置于电炉内冷却至室温; 对于泼水冷却试件, 从电炉中取出后在试件表面淋水直至冷却至室温, 模拟消防灭火降温过程。冷却后的试件在室温条件下放置三天。

3) 冷却后拉伸试验。使用 0.01mm 电子游标卡尺测量试样实际尺寸, 然后将试件安装到万能试验机上进行抗拉试验, 直至试件破坏, 测量拉力-变形关系曲线。抗拉试验初期采用力控制加载, 加载速率为 150kN/min; 试验后期采用位移控制加载, 加载速率为 1.5mm/min。试件变形采用两个对称布置在试件两侧的位移计进行测量。



(a) 小型坑火试验炉



(b) 温度控制箱



(c) 液压万能材料试验机
图 2 试验设备示意图
Fig.2 Test Set-up

2 实验结果及分析

2.1 破坏特征

所有试件拉伸至断裂后结束试验，试件断裂分为两类：第 1 类为母材拉断，断口横截面有明显颈缩，为塑性破坏，过火温度不超过 400℃的自然冷却试件和过火温度不超过 500℃的泼水冷却试件全部发生此类破坏；第 2 类为对接焊缝断裂，试样无明显颈缩，破坏突然，为脆性破坏，过火温度大于 400℃(自然冷却)或 500℃(泼水冷却)的试件全部发生此类破坏。试样破坏形态如图 3 所示，所有试件的断口位置在表 1 和表 2 中列出。



图 3 试件破坏模式图
Fig.3 Failure mode of the specimen

表 1 对接焊缝连接自然冷却试件试验结果一览表
Table 1 Experimental results of post-elevated temperature butt welds (natural cooling)

试件编号	过火温度 $T_y(^{\circ}\text{C})$	断口位置	断口实测尺寸		屈服荷载 F_y/kN	最大荷载 F_u/kN	f_y/MPa	f_y 平均值/ MPa	f_y 变化系数	f_u/MPa	f_u 平均值/ MPa	f_u 变化系数
			厚度 b/mm	宽度 t/mm								
NC-20-1	20 (常温)	母材	13.88	24.98	122.2	188.4	352.5	350.0	1.00	543.4	539.9	1.00
NC-20-2		母材	13.98	25.04	126.0	194.2	360.0			554.8		
NC-20-3		母材	13.68	24.85	114.7	178.7	337.5			521.6		
NC-200-1	200	母材	13.85	25.00	120.7	177.9	348.7	350.3	1.00	513.9	525.7	0.97
NC-200-2		母材	13.88	24.92	124.9	186.3	361.2			538.6		
NC-200-3		母材	13.8	24.92	117.2	180.4	340.9			524.5		
NC-400-1	400	母材	13.83	25.09	125.8	181.2	362.4	343.9	0.98	522.3	513.7	0.95
NC-400-2		母材	13.85	24.95	111.0	171.8	321.2			497.3		
NC-400-3		母材	13.89	24.92	120.4	180.4	348.0			521.5		
NC-500-1	500	焊缝	13.59	24.96	122.7	178.0	361.6	352.0	1.01	524.9	538.8	1.00
NC-500-2		焊缝	13.20	24.94	124.1	181.3	377.0			550.7		
NC-500-3		焊缝	13.12	25.06	112.6	177.9	342.5			541.0		
NC-600-1	600	焊缝	13.44	24.97	113.3	166.5	337.7	352.3	1.01	496.0	511.7	0.95
NC-600-2		焊缝	13.28	25.07	118.7	177.1	356.8			532.1		
NC-600-3		焊缝	13.69	25.00	124.1	173.5	362.5			507.0		
NC-700-1	700	焊缝	14.11	24.90	108.4	156.7	308.5	304.6	0.87	446.0	430.8	0.80
NC-700-2		焊缝	14.48	24.95	109.4	158.6	302.9			438.9		
NC-700-3		焊缝	13.78	25.12	104.6	141.1	302.3			407.5		
NC-800-1	800	焊缝	12.72	25.12	93.6	150.3	292.9	298.3	0.85	472.2	458.7	0.85
NC-800-2		焊缝	13.36	25.04	101.6	153.5	303.7			458.9		
NC-800-3		焊缝	13.12	24.98	97.8	145.8	298.4			444.9		

表 2 对接焊缝连接泼水冷却试件试验结果一览表
Table 2 Experimental results of post-elevated temperature butt welds (water cooling)

试件编号	过火温度 $T_f(^{\circ}\text{C})$	断口位置	断口实测尺寸		屈服荷载 F_y/kN	最大荷载 F_u/kN	f_y/MPa	f_y 平均值/ MPa	f_y 变化系数	f_u/MPa	f_u 平均值/MPa	f_u 变化系数
			厚度 b/mm	宽度 t/mm								
WC-20-1	20 (常温)	母材	13.88	24.98	122.2	188.4	352.5			543.4		
WC-20-2		母材	13.98	25.04	126.0	194.2	360.0	350.0	1.00	554.8	539.9	1.00
WC-20-3		母材	13.68	24.85	114.7	178.7	337.5			521.6		
WC-200-1	200	母材	13.72	25.02	119.8	182.0	348.9			530.1		
WC-200-2		母材	13.77	24.90	118.9	181.5	346.7	337.8	0.96	529.4	520.7	0.96
WC-200-3		母材	13.88	25.03	110.4	174.6	317.7			502.7		
WC-400-1	400	母材	13.74	24.98	121.2	180.0	349.8			519.5		
WC-400-2		母材	13.66	24.95	119.9	183.1	351.8	349.5	1.00	537.4	528.5	0.98
WC-400-3		母材	13.76	25.08	119.7	182.5	346.8			528.7		
WC-500-1	500	母材	13.87	25.05	119.9	184.4	345.1			530.7		
WC-500-2		母材	13.94	25.05	113.5	175.8	325.0	350.1	1.00	503.3	519.2	0.96
WC-500-3		母材	13.55	24.94	122.2	180.3	355.0			523.5		
WC-600-1	600	焊缝	13.66	25.06	119.0	180.4	347.6			526.8		
WC-600-2		焊缝	13.90	24.97	124.1	163.4	357.4	346.3	0.99	470.7	504.0	0.93
WC-600-3		焊缝	14.15	25.09	122.5	182.6	345.1			514.3		
WC-700-1	700	焊缝	14.66	24.96	118.5	174.3	323.9			476.3		
WC-700-2		焊缝	13.25	25.01	123.5	170.3	372.7	348.5	1.00	514.0	498.6	0.92
WC-700-3		焊缝	13.07	24.83	113.2	164.0	348.8			505.4		
WC-800-1	800	焊缝	13.51	24.90	106.4	180.9	316.2			537.8		
WC-800-2		焊缝	14.31	24.87	104.6	188.4	293.8	306.2	0.88	529.2	531.9	0.98
WC-800-3		焊缝	13.43	24.76	102.6	175.7	308.5			528.5		

2.2 变形性能对比

试样的荷载-位移曲线如图 4 所示。为了便于对比，图 5 给出了对应于最大荷载的极限变形变化系数随过火温度的变化曲线。总体而言，高温过火导致试件变形能力降低。对于自然冷却方式，试样达到极限荷载时变形随过火温度升高明显减小，过火温度为 800℃时极限变形只有常温时的 50%；对于泼水冷却方式，过火温度不超过 600℃时，试样的极限变形变化系数保持在 0.75 左右，当过火温度超过 600℃以后，试样的极限变形能力继续减小，过火温度为 800℃极限变形只有常温时的 65%。因此无论采用哪种冷却方式，高温过火后对接焊缝连接试件的变形能力都会显著下降，这一点在火灾后钢结构受损鉴定评估中要引起足够重视。

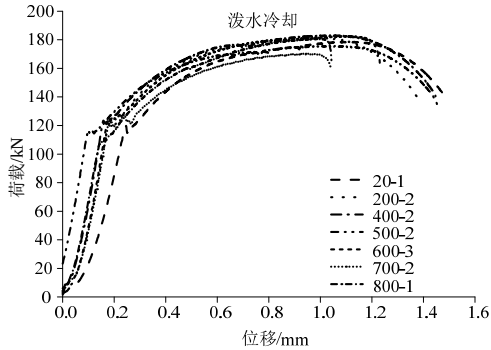
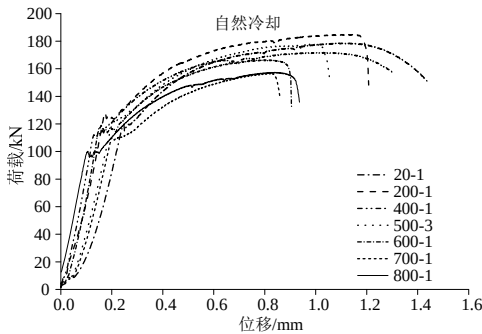


图 4 对接焊缝高温过火后荷载-位移曲线
Fig.4 Load-deformation curve of butt-welds after fire

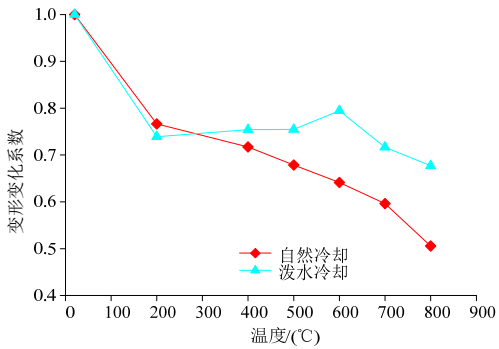


图 5 对接焊缝极限变形变化系数-过火温度曲线
Fig.5 Ultimate deformation factor of butt welds after fire

2.3 屈服强度和抗拉强度对比

根据 2.1 节提供的试验结果, 高温过火后对接焊缝连接试件的破坏分别母材拉断和焊缝断裂两大类, 本文统一采用屈服荷载/最大荷载与断口尺寸的比值来计算对接焊缝连接试件的屈服强度/极限强度, 即:

$$f_{y(u)} = \frac{F_{y(u)}}{bt} \quad (1)$$

式中: f_y 和 f_u 分别为对接焊缝连接试件的屈服强度和极限强度; F_y 和 F_u 分别为实测的屈服荷载和最大荷载; b 、 t 分别为断口截面实测宽度和厚度。

定义对接焊缝连接不同最高温度点过火后的平均强度与室温下平均强度之比为强度变化系数, 即:

$$\lambda_{y(u),T} = \frac{\bar{f}_{y(u),T}}{\bar{f}_{y(u),0}} \quad (2)$$

不同过火温度后对接焊缝连接试件的屈服强度和极限强度见表 1 和表 2, 表中同时给出了高温过火后对接焊缝连接试件强度变化系数。为了便于对比, 图 6 给出了强度变化系数随过火温度的变化曲线。冷却方式对试件的强度有较大的影响, 自然冷却条件下, 试件极限强度的最大降低幅度约为 20%, 屈服强度的最大降低幅度约为 15%; 泼水冷却条件下, 试件极限强度的最大降低幅度约为 8%, 屈服强度的最大降低幅度约为 12%。我国《钢结构设计规范》^[10]规定质量等级为一级、二级的对接焊缝抗拉强度与母材相同, 根据本文试验结果, 当过火温度较高时对接焊缝的高温后抗拉强度明显低于母材。因此, 在火灾后钢结构进行鉴定评估时, 对其中的对接焊缝连接应考虑强度的折减, 建议折减幅度不小于 20%。

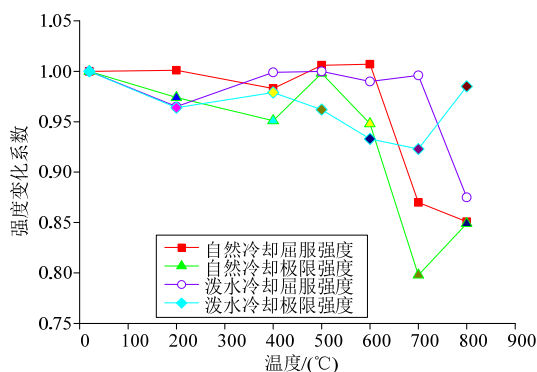


图 6 对接焊缝强度变化系数-过火温度曲线

Fig.6 Strength factor of butt welds after fire

3 结论

(1) 高温过火后的对接焊缝连接试件存在两种破坏方式: 母材拉断和焊缝断裂。当最高过火温度不超过 500°C 时, 焊缝强度损失较小, 经质量检查不存在裂缝等缺陷时, 可以认为与母材等强; 最高过火温度超过 500°C 时, 对接焊缝强度明显减小, 进行火灾后安全性评估时需对其强度进行折减, 折减系数可取为 0.8。

(2) 高温过火对对接焊缝连接试件的变形性能影响显著, 和未过火试件相比, 自然冷却和泼水冷却条件下试件极限变形的最大降低幅度分别为 50% 和 35%, 这一点应该引起火灾后钢结构鉴定评估的重视。

参考文献:

- [1] 蒋首超, 李国强, 韩兵康, 彭航. 某钢结构梯架火灾后性能分析与鉴定[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 124—127.
Jiang Shouchao, Li Guoqiang, Han Bingkang, Peng Hang. Appraisal on structural safety of a steel frame after fire [J]. Structural Engineers, 2009, 25(1): 124—127. (in Chinese)
- [2] 王卫永, 董毓利, 隋炳强. 焊接钢框架边节点抗火性能试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 240—244.
Wang Weiyong, Dong Yuli, Sui Bingqiang. Fire-resistant experiment of welded single-sided joint of steel frame [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 240—244. (in Chinese)
- [3] 余红霞, 刘涛. 美国世贸中 WTC7 次梁-柱节点高温下的破坏行为分析[J]. 钢结构, 2010, 8(25): 76—82.
Yu Hongxia, Liu Tao. Analysis of behavior of secondary beam-column connections of WTC7 at high temperature [J]. Steel Structure, 2010, 8(25): 76—82. (in Chinese)
- [4] Yu L. Behavior of bolted connections during and after a fire [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2006.
- [5] 楼国彪, 俞珊, 王锐. 高强度螺栓过火冷却后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 33—40.
Lou Guobiao, Yu Shan, Wang Rui. Mechanical properties of high-strength bolts after fire [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 33—40. (in Chinese)
- [6] Lou Guobiao, Zhu Meichun, Li Ming, Zhang Chao, Li Guoqiang. Experimental research on slip-resistant bolted connections after fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104(1): 1—8.
- [7] Hanus F, Zilli G, Franssen J M. Experimental tests and analytical models for welds and Grade 8.8 bolts under heating and subsequent cooling [J] Journal of Structural Fire Engineering, 2011, 2(3): 181—194.

- [8] 陈建锋, 曹平周, 董先锋. 高温后正面角焊缝抗拉剪切强度的试验[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 81—84.
Chen Jianfeng, Cao Zhouping, Dong Xianfeng. Experiment on tensile-shear strength of post-elevated temperature transverse fillet weld [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 81—84. (in Chinese)
- [9] GB/T 2651-2008, 《焊接接头拉伸试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 2651-2008, Tensile test method on welded joints [S]. Beijing: China Standards Press, 2008. (in Chinese)
- [10] GB 50017-2003, 《钢结构设计规范》[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
GB 50017-2003, Code for design of steel structure [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)

(上接第 297 页)

- [8] 王长龙. 近断层地震动作用下钢框架结构的地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 1—10.
Wang Changlong. Seismic responses analysis of steel framed structures subjected to near-fault ground motions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008: 1—10. (in Chinese)
- [9] 李爽, 谢礼立. 近场脉冲型地震动对钢筋混凝土框架结构影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(3): 406—410.
Li Shuang, Xie Lili. Effects of near-field pulse-like ground motions on reinforced concrete frame Structures [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006, 22(3): 406—410. (in Chinese)
- [10] 吴大群, 李明, 杨永强. 近断层脉冲地震动对框剪结构的破坏作用分析[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 679—683.
Wu Daqun, Li Ming, Yang Yongqiang. Analysis of the damage effect of near-fault pulse ground motion on frame-shear structure [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(4): 679—683. (in Chinese)
- [11] 孙国华, 顾强, 何若全, 方有珍. 钢框架-钢板剪力墙结构弹塑性状态的层剪力分布研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 133—121.
Sun Guohua, Gu Qiang, He Ruquan, Fang Youzhen. Distribution of horizontal seismic shear based on inelastic state of steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 133—121. (in Chinese)