

引用本文:黄学伟,张潇舸,魏晨晨,等. Q690D 钢材十字形焊接接头高温后的断裂破坏试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(5):56-65.

HUANG Xue-wei, ZHANG Xiao-ge, WEI Chen-chen, et al. Experimental Research on Post-fire Fracture Failure of Q690D Steel Cross-shaped Welded Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5): 56-65.

DOI:10.19815/j.jace.2021.01051

Q690D 钢材十字形焊接接头高温后的断裂破坏 试验研究

黄学伟,张潇舸,魏晨晨,赵 军,葛建舟

(郑州大学 力学与安全工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:为研究 Q690D 高强度钢材及焊缝连接件在常温 and 高温后的断裂性能,选取代表实际梁柱节点局部焊接构造的十字形焊接节点试样,完成了常温 and 一系列高温后 Q690D 钢材和 ER80-G 焊缝金属的单轴拉伸试验,得到了钢材和焊缝金属在不同高温后的弹性模量、屈服强度、极限强度和延伸率。开展了常温 and 高温后十字形焊接接头的单调拉伸试验和超低周循环试验,研究了 Q690D 高强度焊接接头的断裂机理,探讨了过火温度、加载制度对焊接接头断裂性能的影响。结果表明:当钢材和焊接接头的过火温度高于 600 ℃ 时,钢材和十字形焊接接头的强度降低,其变形能力开始增大;800 ℃ 高温后 Q690D 钢材的强度降低,但 ER80-G 焊缝金属的力学性能无明显变化,导致焊接接头经受 800 ℃ 高温后,在单调荷载作用下,其断裂破坏未发生在焊缝处,而发生在母材位置;循环荷载作用下焊接接头的承载能力和变形能力都低于单调荷载的情况;试验得到钢材、焊缝金属和焊接接头的力学性能指标,为发展考虑火灾后效应的断裂分析模型提供了基础试验数据。

关键词:Q690D 钢材;高温;试验研究;断裂破坏;焊接节点;超低周疲劳

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)05-0056-10

Experimental Research on Post-fire Fracture Failure of Q690D Steel Cross-shaped Welded Joints

HUANG Xue-wei, ZHANG Xiao-ge, WEI Chen-chen, ZHAO Jun, GE Jian-zhou

(School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: In order to study the fracture properties of Q690D high strength steel and welded joints at room temperature and after high temperature, the cross-shaped welded joints representing the actual local welding structure of the beam-to-column joints were selected, and a series of uniaxial tensile tests of Q690D steel and ER80-G weld metal at room temperature and after high temperature were conducted. The elastic modulus, yield strength, ultimate strength and elongation of steel and weld metal after high temperatures were obtained. The cross-shaped welded joints at room temperature and after high temperature were tested under monotonic

收稿日期:2021-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51608487);郑州大学国家级大学生创新创业训练计划项目(202010459072);

河南省科技攻关项目(192102310221)

作者简介:黄学伟(1985-),男,安徽亳州人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:huangxw@zzu.edu.cn。

通信作者:赵 军(1971-),男,河南漯河人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhaoj_zzu@126.com。

loading and ultra low cyclic loading. The fracture mechanism of Q690D high strength welded joints was analyzed while the effect of post-fire temperature and loading condition on the fracture behavior of steel and welded joints was discussed. The results show that when the temperature is higher than 600 °C, the post-fire strength of steel and welded joints decreases and the post-fire deformability increases. The strength of Q690D steel decreases after 800 °C high temperature, but the mechanical properties of ER80-G weld metal do not change obviously, causing the result that fracture failure of welded joint does not occur at the weld but at the base metal under monotonic loading after 800 °C high temperature. The bearing capacity and deformation capacity of welded joints under cyclic loading are lower than those under monotonic loading. The mechanical properties of steel, weld metal as well as the welded joints obtained from the tests are able to provide basic test data to develop fracture analysis models considering the post-fire effect.

Key words: Q690D steel; high temperature; experimental research; fracture failure; welded joint; ultra low cycle fatigue

0 引言

随着大跨度、高层和超高层钢结构的发展,高强钢凭借其轻质高强、耗能小等优点开始被人重视并投入使用,但高强钢结构焊接节点的强度、往复塑性变形和断裂性能等问题相对于普通强度钢结构更为突出^[1-2]。在强震反复作用下,裂纹在钢结构试件或节点内萌生并扩展,在经历较少循环作用下(一般少于 20 周),焊接节点发生的疲劳破坏称之为超低周疲劳破坏^[3-5]。强震作用下钢结构的断裂破坏属于超低周疲劳断裂破坏的范畴^[6-7],其主要关注裂纹的起始和扩展。

中国是一个火灾频发的国家,火灾对生命财产安全造成了很大的威胁,对于火灾后钢结构剩余力学性能的研究尤为重要。建筑物经受火灾后,其结构在经过高温后力学性能可能发生改变,若发生改变是否影响正常使用,是否能抵御地震的作用需要进一步的研究。早期的一些试验研究结果表明,在一定的温度范围内,火灾后的钢结构承载力减少幅度较小,不影响继续使用。楼国彪等^[8]将高强度螺栓高温后进行浸水冷却和自然冷却,探究了高温对螺栓力学性能的影响以及不同冷却方式对强度的影响。近年来,随着高强度钢材在建筑结构上的广泛应用,国内外学者也将研究领域扩展到高强钢高温材性及基本构件抗火性能的研究^[9-10]。Qiang 等^[11-12]对高温处理后的 S460, S690 和 S960 高强钢材进行拉伸试验,并提出高温后高强钢的强度和弹性模量等的实用计算公式。部分学者针对 Q460^[13]和 Q690^[14]高强度钢材,也开展了高温后钢材基本性能的研究,并分析了不同冷却方式^[15]对钢材高温

后力学性能的影响。对于高强度钢材焊接钢结构的断裂行为, Huang 等^[16]研究了高强钢焊接接头在低周往复荷载下的变形能力。刘希月^[17]研究了高强钢焊接构造断裂机理,探讨了焊缝类型、荷载类型及钢材强度对典型构造细节断裂性能的影响。

钢框架梁柱节点中梁下翼缘与柱翼缘的焊缝附近易发生断裂破坏,因此梁柱节点处的焊接构造对节点的断裂性能有较大影响。十字形焊接接头试件是梁下翼缘焊接区域的典型焊接构造形式,它能够较好地反映节点的断裂性能。然而目前高强钢十字形焊接节点高温后超低周疲劳破坏行为的研究还非常有限。本文开展了 Q690D 母材和焊缝高温后的单调拉伸试验,揭示材料的基本力学性能。另外,对 Q690D 十字形焊接构造试样进行了高温后的单调拉伸和超低周循环加载试验,探究了不同温度后十字形焊接件的断裂破坏模式,并对比分析其承载能力和变形能力。

1 试验概况

1.1 试样设计

本文的 Q690D 建筑结构高强度钢板为中国舞阳钢铁有限公司生产,钢板厚度 10 mm,化学成分如表 1 所示,钢材的交货状态为调质,技术条件符合《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)^[18]要求。

试验设计了 6 个 Q690D 钢材十字形焊接接头试样,以模拟梁柱焊接节点下翼缘处局部构造情况。十字形焊接接头试样的几何尺寸如图 1 所示,每个十字形焊接接头试件的两端分别采用单 V 坡口全熔透对接焊缝和角焊缝,角焊缝焊脚尺寸约为 6 mm,细节如图 2 所示。

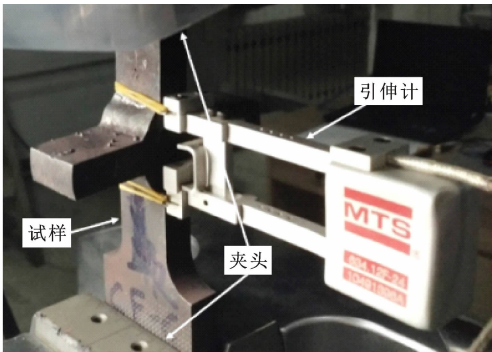


图 5 十字形焊接接头试样单调拉伸和循环加载试验

Fig. 5 Monotonic Tensile and Cyclic Loading Tests of Cross-shaped Welded Joints

表 4 十字形焊接件加载制度

Table 4 Loading System of Cross-shaped Welded Joints

试样编号	CJ-M-R	CJ-C-R	CJ-M-T8	CJ-C-T6	CJ-C-T7	CJ-C-T8
加载制度	单调	循环	单调	循环	循环	循环

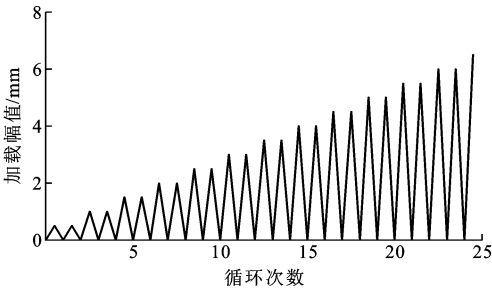


图 6 超低周循环加载制度

Fig. 6 Ultra Low Cycle Loading System

2 母材和焊缝高温后的力学性能

将 4 块 Q690D 钢板分别经受 500, 600, 700, 800 ℃ 高温, 然后空气冷却后加工成如图 7 所示的标准拉伸试样。为研究常温 and 高温后 ER80-G 焊缝金属的基本力学性能, 将 2 块 Q690D 钢板采用对接焊缝焊接, 然后参考文献[19],[20]中的方法, 在焊缝处抽取如图 8 所示的焊缝金属标准拉伸试样。另外, 将同样的 Q690D 焊接板经受 800 ℃ 的高温后, 在焊缝处抽取拉伸试样, 在 MTS 拉伸试验机上开展单调拉伸试验, 如图 9 所示。得到高温后 Q690D 母材和焊缝金属的工程应力-应变曲线如图 10 所示, 进而得到母材和焊缝金属的力学性能参数, 如表 5, 6 所示。Q690D 钢材有明显的屈服平台, 将屈服阶段的下限作为钢材的屈服强度。ER80-G 焊缝金属应力-应变曲线没有明显的屈服平台, 因此采用 0.2% 的塑性应变对应的应力值作为屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 。

对于 Q690D 母材, 高温后钢材的弹性模量、屈

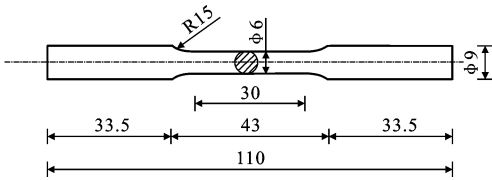


图 7 标准拉伸试样尺寸 (单位: mm)

Fig. 7 Size of Standard Tensile Specimen (Unit: mm)

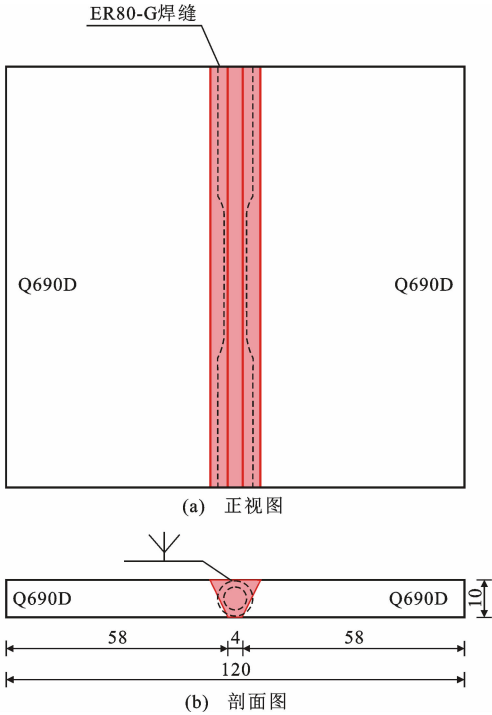


图 8 焊缝取样示意图 (单位: mm)

Fig. 8 Weld Sampling Diagram (Unit: mm)

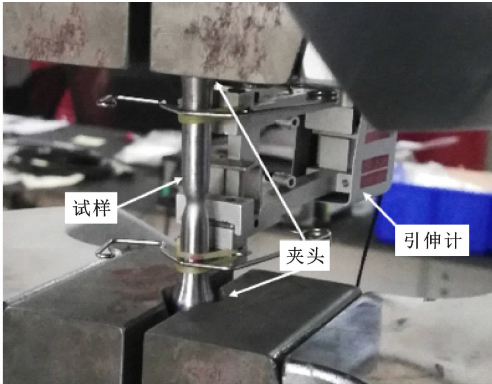


图 9 单调拉伸试验

Fig. 9 Monotonic Tensile Test

服强度、极限强度和延伸率的变化规律如图 11 所示。可见, 弹性模量随温度的增大而减小, 但减小幅度有限。500 ℃ 高温后钢材的屈服强度、极限强度与常温下基本相等。当温度高于 600 ℃ 后, 高温后钢材的屈服强度和极限强度随温度的增大开始明显减小, 800 ℃ 高温后钢材屈服强度和极限强度分别降

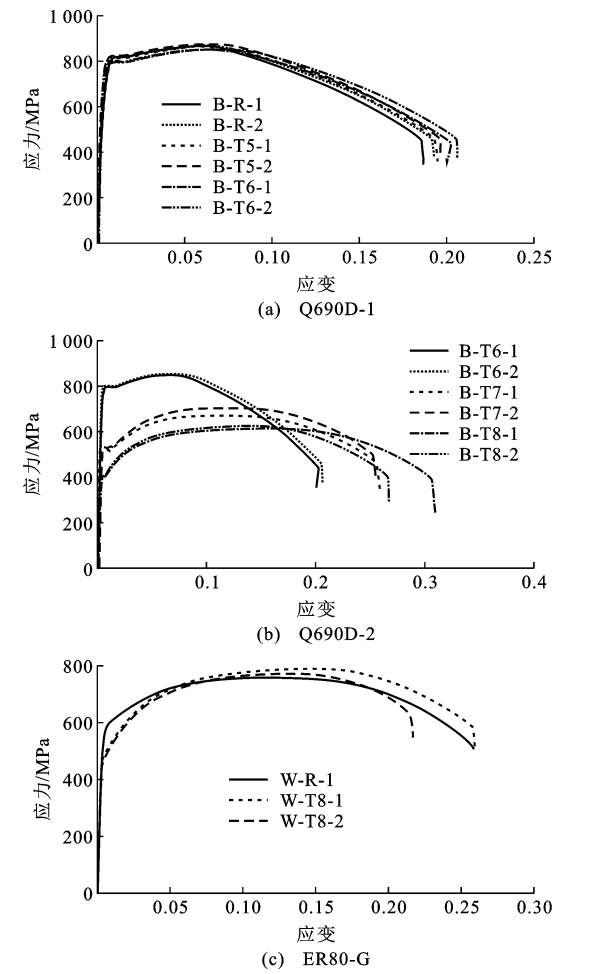


图 10 Q690D 和 ER80-G 的应力-应变曲线
Fig. 10 Stress-strain Curves of Q690D and ER80-G

表 5 Q690D 钢材高温后的力学性能参数 Table 5 Post-fire Mechanical Property Parameters of Q690D Steel					
试样编号		弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/MPa	极限强度 σ_u/MPa	延伸率 $\delta_{2.5}/\%$
R-R 组	B-R-1	222	813.3	863.3	19
	B-R-2	221	822.7	870.2	19
	平均值	222	818.0	866.8	19
R-T5 组	B-T5-1	205	822.6	867.8	19
	B-T5-2	207	822.4	876.0	20
	平均值	206	822.5	871.9	20
B-T6 组	B-T6-1	183	796.1	850.4	20
	B-T6-2	185	797.1	853.3	21
	平均值	184	796.6	851.8	21
B-T7 组	B-T7-1	185	514.7	673.2	26
	B-T7-2	181	531.4	705.6	25
	平均值	183	523.1	689.4	26
B-T8 组	B-T8-1	191	405.4	615.8	31
	B-T8-2	186	407.7	625.3	29
	平均值	189	406.6	620.6	30

注: B 代表母材; R 代表常温; T5 表示 500℃ 高温, 依次类推。

表 6 ER80-G 的力学性能参数 Table 6 Mechanical Property Parameters of ER80-G				
试样编号	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	极限强度 σ_u/MPa	延伸率 $\delta_{2.5}/\%$
W-T8-1	207	479.1	789.7	26
W-T8-2	202	471.2	773.4	22
平均值	205	475.2	781.6	24
W-R-1	215	549.9	758.6	26

注: W 代表 ER80G 焊缝金属。

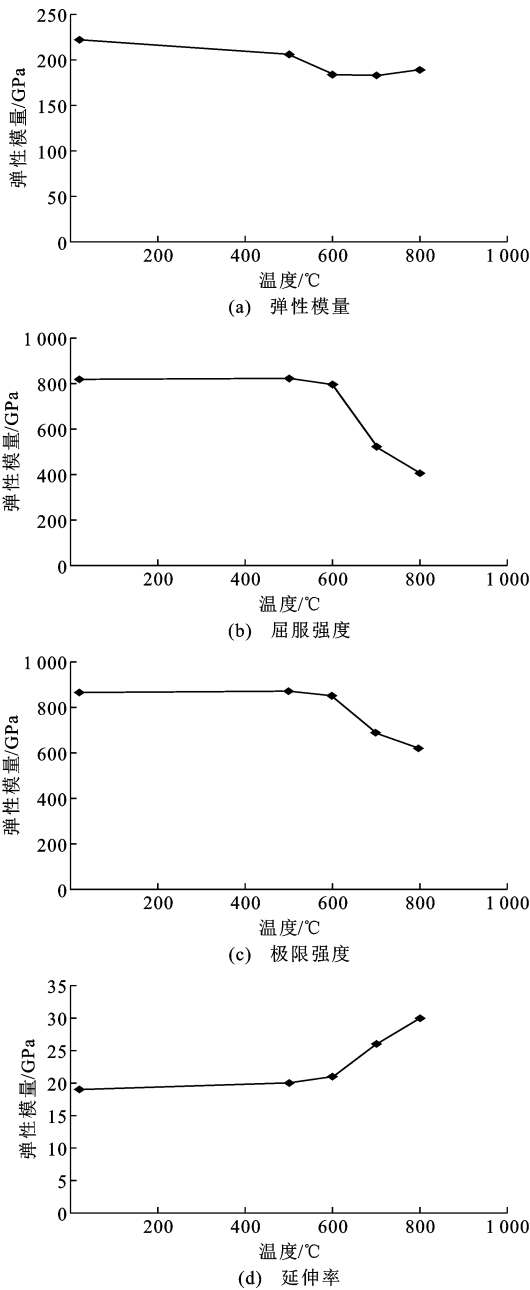


图 11 高温后 Q690D 钢材力学性能变化曲线
Fig. 11 Variation Curves of Fire-post Mechanical Properties of Q690D Steel

低到常温的 49.7%, 71.6%。由图 11(d) 可以看出, 当温度高于 600℃ 后, 高温后钢材的延伸率随温度

的升高而增大。因此,600 ℃ 以上的高温会削弱 Q690D 钢材的强度,但同时会增强钢材的延性。

由表 6 可以看出,相对于常温情况,800 ℃ 高温后,焊缝金属的弹性模量变化有限,屈服强度下降,极限强度略微增大,延伸率变化较小。从图 10(c) 可见,常温和 800 ℃ 高温下,ER80-G 焊缝金属的应力-应变曲线比较接近。综上,800 ℃ 高温对 Q690D 高温后的力学性能影响非常显著,但对焊缝金属的影响很小。

3 十字形焊接接头试样试验结果

3.1 单调加载

在单向拉伸荷载作用下,2 个十字形焊接接头试样的断裂模式如图 12 所示,常温和 800 ℃ 高温后试样的断裂模式明显不同。由于角焊缝处焊缝未熔透,因此在角焊缝处有初始裂缝。常温下,裂纹在这个初始裂缝处起始扩展,并引起试样的断裂破坏。对于 800 ℃ 高温后的试样,断裂破坏未发生在焊接接头处,而是发生在母材处,母材处发生了明显的颈缩现象。主要原因在于,800 ℃ 高温后母材的强度明显降低,但焊缝金属的强度并未明显下降,尽管焊缝处有角焊缝未熔透而产生的裂缝,但由于焊缝连接处焊缝的强度较大,而母材处的强度明显降低,因此断裂破坏发生在母材处。常温下试样的断裂破坏呈现出剪切破坏的特点,而 800 ℃ 高温后试样的断裂破坏是拉伸破坏。

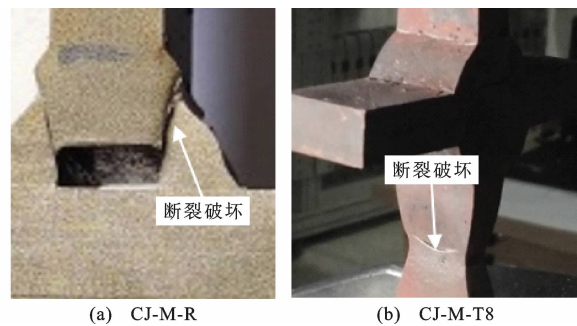


图 12 单调加载下试样的断裂破坏模式
Fig. 12 Fracture Modes Under Monotonic Loading

3.2 超低周循环加载

超低周循环加载下试样的断裂破坏模式如图 13 所示,可以看出常温和不同高温后试样的断裂破坏模式基本相同,裂纹都在角焊缝未熔透处起始,并沿着垂直于初始裂缝的方向扩展,该扩展方向也是沿着角焊缝与母材的熔透线方向,一侧角焊缝的完全断裂引起试样的断裂破坏,这种断裂破坏模式具有明显的剪切破坏特征。

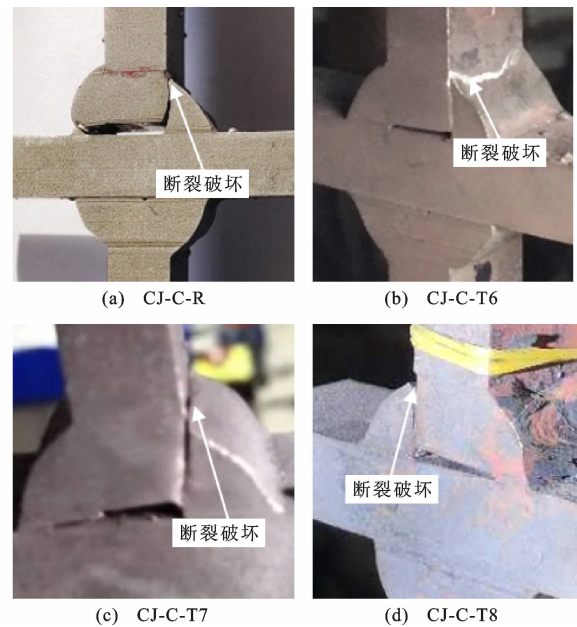


图 13 超低周循环加载下试样的断裂破坏模式
Fig. 13 Fracture Modes of Specimens Under Ultra Low Cycle Loading

4 焊接接头的承载能力和变形能力

4.1 单调加载

十字形焊接接头试样单调加载下的荷载-位移曲线见图 14(a),(b),其中位移为引伸计标距内测得的焊接接头变形,试样的断裂时刻已用星号标记。对于 CJ-M-T8 试样,由于试样断裂发生在母材位置,因此当母材颈缩时,试样达到极限荷载,此后引伸计测量的标距内变形基本保持不变。

表 7 给出了单调荷载下焊接接头试样在常温和高温后的试验结果,包括屈服荷载 P_y 及对应的变形 δ_y 、极限荷载 P_u 和断裂临界荷载 P_t ,其中屈服荷载指残余变形为 0.2% 平均应变(位移为 0.05 mm)时对应的荷载。可以看出试样经历 800 ℃ 的高温后,其承载能力明显减小,屈服荷载和极限荷载分别降低到常温下的 68% 和 81%。对于 CJ-M-T8 试样,引伸计未测量到颈缩部分的变形,因此将 MTS 作动器的位移作为横坐标,对比 2 个试样的荷载-位移曲线[图 14(c)],可以看出,高温后试样的变形能力明显增大。

4.2 超低周循环加载

超低周循环荷载作用下试样的荷载-位移($P-\delta$)曲线如图 15 所示,其试验结果见表 8。由图 15 可以看出,试验曲线较光滑,试验控制较好。将循环荷载-位移曲线中的各加载级别第 1 周的卸载顶点连接,得到试样的骨架曲线,如图 16 所示。通过对比

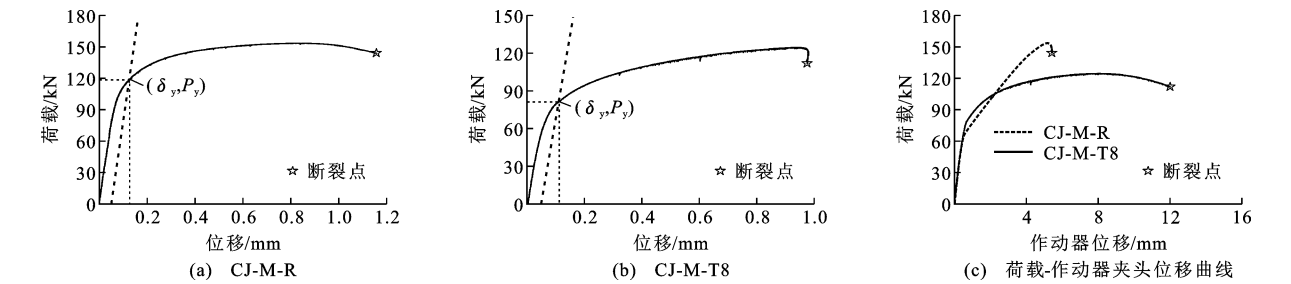


图 14 十字形焊接接头试样单调加载下的荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement Curves of Cross-shaped Welded Joints Under Monotonic Loading

表 7 十字形焊接接头试样单调加载下的试验结果

试样编号	屈服荷载 P_y /kN	$\frac{P_y^{CJ-M-T8}}{P_y^{CJ-M-R}}$	屈服位移 δ_y /mm	$\frac{\delta_y^{CJ-M-T8}}{\delta_y^{CJ-M-R}}$	极限荷载 P_u /kN	$\frac{P_u^{CJ-M-T8}}{P_u^{CJ-M-R}}$	断裂临界荷载 P_t /kN	$\frac{P_t^{CJ-M-T8}}{P_t^{CJ-M-R}}$
CJ-M-R	119.3	0.68	0.125	0.88	153.5	0.81	143.9	0.86
CJ-M-T8	81.3		0.110		124.5		123.1	

注： P_y^{CJ-M-R} ， $P_y^{CJ-M-T8}$ 分别为 CJ-M-R，CJ-M-T8 的屈服荷载，其余依次类推。

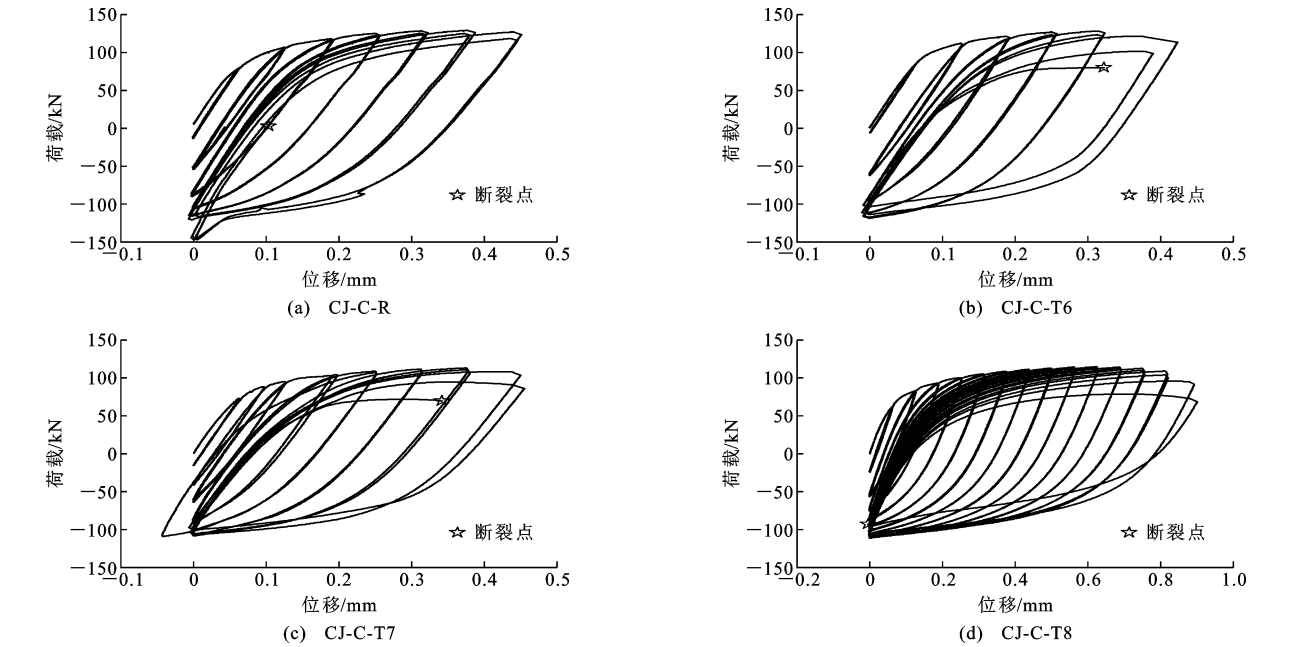


图 15 十字形焊接接头试样的超低周循环荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement Curves of Cross-shaped Welded Joint Specimens Under Ultra Low Cycle Loading

表 8 十字形焊接接头试样循环荷载下的试验结果

试样编号	极限荷载 P_u /kN	$\frac{P_u^{CJ-C-T6\sim8}}{P_u^{CJ-C-R}}$	极限位移 δ_u /mm	$\frac{\delta_u^{CJ-C-T6\sim8}}{\delta_u^{CJ-C-R}}$	疲劳寿命 N_f	$\frac{N_f^{CJ-C-T6\sim8}}{N_f^{CJ-C-R}}$
CJ-C-R	129.21		0.45		15	
CJ-C-T6	128.06	0.99	0.42	0.93	13	0.87
CJ-C-T7	113.04	0.87	0.45	1.00	15	1.00
CJ-C-T8	114.73	0.89	0.89	1.98	28	1.87

不同高温后试样在循环荷载作用下的承载能力和变形能力可知，600 ℃ 高温后试样的极限荷载和极限

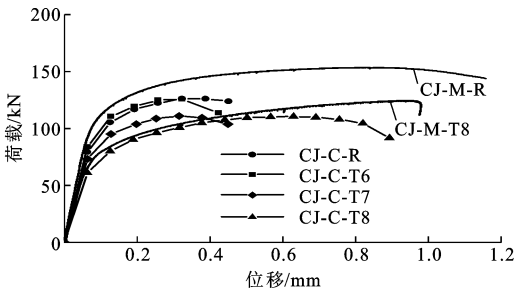


图 16 十字形焊接接头试样骨架曲线

Fig. 16 Skeleton Curves of Cross-shaped Welded Joint Specimens

位移与常温下基本相当,随着温度的继续升高,试样的极限荷载降低,800 ℃ 高温后试样的极限荷载降低到常温下的 89%。800 ℃ 高温后试样的变形能力增大,其极限位移是常温下的 198%。结合高温后 Q690D 钢材的强度变化规律可知,若 Q690D 钢材和焊接接头试样经受的高温低于 600 ℃,则高温后钢材和焊接接头的强度和变形能力基本不变。

5 试验结果分析

5.1 加载方式的影响

常温下焊接接头在单调加载和超低周循环加载下的断裂破坏模式相同,都是在角焊缝未熔透初始裂缝处产生裂纹并扩展引起的断裂破坏。800 ℃ 高温后,单调荷载下焊接接头在母材处断裂,但超低周循环荷载下焊接接头在角焊缝处断裂,主要原因在于超低周循环拉压荷载的作用使得角焊缝初始裂缝处更易产生裂纹并扩展。

将单调加载下的荷载-位移曲线列入焊接接头的骨架曲线中,如图 16 所示,可以看出,常温和 800 ℃ 高温后焊接接头在循环荷载作用下的极限荷载和极限位移都低于单调加载的情况。

5.2 高温后焊接接头循环性能的对比分析

在反复荷载作用下,当焊接接头试样屈服后,试样的刚度不断退化,可以采用割线刚度 $K = (P_i^+ - P_i^-) / \delta_i$ 来描述反复荷载作用下试件的刚度退化现象,其中 δ_i 为第 i 次加载级别第 1 周次的峰值位移, P_i^+ 为 δ_i 对应的峰值荷载, P_i^- 为第 i 次加载级别第 1 周次位移卸载到 0 时的荷载。焊接接头在常温和高温后的刚度退化曲线如图 17 所示,为方便对比,对图 17 中的横纵坐标进行了量纲为 1 化处理,其中 K_0 为试样的弹性刚度。可以看出,焊接接头在常温下和经受高温后的刚度退化曲线规律基本相同,800 ℃ 高温后焊接接头的变形能力增大,因此其刚度退化更严重。

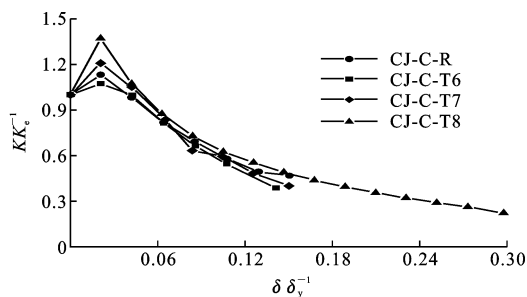


图 17 刚度退化曲线

Fig. 17 Stiffness Degradation Curves

焊接接头的强度退化特性可用强度退化系数 η 来描述,该系数指同级加载级别下,末次循环的峰值位移对应的荷载与首次循环峰值位移对应的荷载的比值。焊接接头在常温和高温后的强度退化曲线如图 18 所示。可见在加载的前期,同一加载级别下 2 周循环的峰值位移对应的荷载基本相同,随着加载的进行,焊接接头出现损伤,强度退化系数开始下降,当裂纹扩展比较明显时,强度退化系数下降非常迅速。

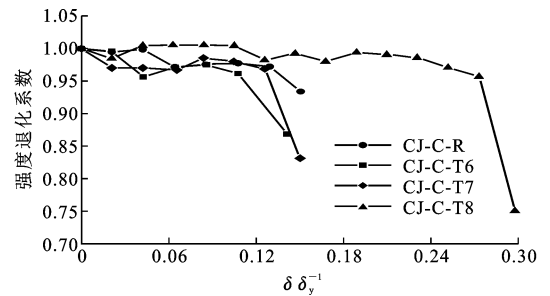


图 18 强度退化曲线

Fig. 18 Strength Degradation Curves

在循环荷载作用下,试件的耗能能力与荷载-位移曲线滞回环的面积成正比,基于循环荷载下焊接接头的荷载-位移曲线,定量计算出焊接接头的耗能能力。图 19 给出了焊接接头在循环荷载下每周的耗能能力,图 20 给出了焊接接头的累积耗能。由图 19,20 可见,焊接接头在常温下和高温后的耗能随循环周次的变化规律基本相同,每级第 2 周的耗能低于第 1 周的耗能,另外,800 ℃ 高温后焊接接头的累积耗能能力明显增强。

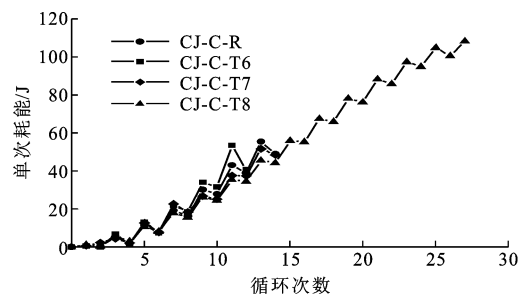


图 19 单次加载耗能曲线

Fig. 19 Energy Consumption Curves of Each Cycle

6 结 语

(1) 当 Q690D 钢材经历的高温低于 600 ℃ 时,钢材高温后的力学性能与常温下相当,当温度高于 600 ℃ 时,钢材的强度降低而延伸率增大。对于 ER80-G 焊缝金属,800 ℃ 高温后焊缝金属的力学性能与常温相比变化不明显。

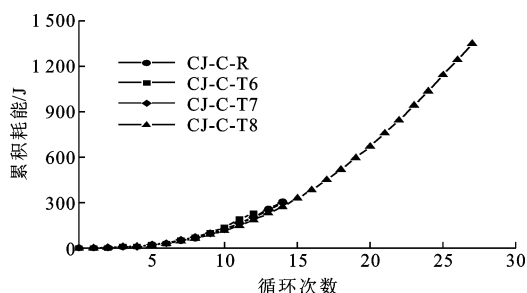


图 20 累积耗能曲线

Fig. 20 Cumulative Energy Consumption Curves

(2)在单调加载工况下,十字形焊接接头试样在常温和 800 ℃ 高温后的断裂模式不同,常温下焊接接头的断裂发生在角焊缝未熔透的裂缝处,而 800 ℃ 高温下焊接接头的断裂是由于母材的颈缩引起。800 ℃ 高温后十字形试样的强度降低,而变形能力增大。

(3)在循环荷载作用下,十字形焊接接头试样在常温和高温后的断裂模式基本相同,裂纹的起始和扩展均发生在角焊缝未熔透的裂缝处。当焊接接头经历的高温温度大于 600 ℃ 时,焊接接头的强度明显降低。另外,常温和 800 ℃ 高温后焊接接头在循环荷载作用下的极限荷载和极限位移都低于单调加载的情况。

(4)十字形焊接接头试样经历不同的高温后,其刚度退化、强度退化和耗能规律类似,800 ℃ 高温后,由于焊接接头的变形能力增加,其耗能能力明显增强。

参考文献:

References:

- [1] 刘希月,王元清,石永久,等. 高强度钢框架梁柱节点焊接构造的断裂性能试验研究[J]. 工程力学,2018,35(5):54-64.
LIU Xi-yue, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, et al. Experimental Study on the Weld Fracture Behavior of High Strength Steel Beam-to-column Connections[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 54-64.
- [2] 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.
SHI Gang, BAN Hui-yong, SHI Yong-jiu, et al. Overview of Research Progress for High Strength Steel Structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 1-13.
- [3] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture Initiation in Structural Steels Due to Ultra Low Cycle Fatigue[J].

Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 701-712.

- [4] BLECK W, DAHL W, NONN A, et al. Numerical and Experimental Analyses of Damage Behaviour of Steel Moment Connection[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(10): 1531-1547.
- [5] 黄学伟,葛建舟,赵 军,等. Q690D 高强钢基于连续损伤模型的断裂破坏预测分析[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 230-240.
HUANG Xue-wei, GE Jian-zhou, ZHAO Jun, et al. Fracture Prediction Analysis of Q690D High Strength Steel Based on Continuum Damage Model[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 230-240.
- [6] HUANG X W, ZHAO J. A Cumulative Damage Model for Extremely Low Cycle Fatigue Cracking in Steel Structure[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 62(2): 225-236.
- [7] 廖芳芳,王 伟,李文超,等. 钢结构节点断裂的研究现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 67-75.
LIAO Fang-fang, WANG Wei, LI Wen-chao, et al. Review on Research Status of Connection Fracture of Steel Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 67-75.
- [8] 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 Guo-biao, YU Shan, WANG Rui. Mechanical Properties of High-strength Bolts After Fire[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 33-40.
- [9] AZHARI F, HEIDARPOUR A, ZHAO X L. On the Use of Bernstein-Bezier Functions for Modelling the Post-fire Stress-strain Relationship of Ultra-high Strength Steel (Grade 1 200)[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 605-616.
- [10] 刘天姿. 高强度 Q460 钢柱受火后力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
LIU Tian-zi. Study on Post-fire Mechanical Behavior of High Strength Q460 Steel Columns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [11] QIANG X, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire Mechanical Properties of High Strength Structural Steels S460 and S690[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 1-10.
- [12] QIANG X, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire Performance of Very High Strength Steel S960 [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 235-242.
- [13] WANG W Y, LIU T Z, LIU J P. Experimental Study

on Post-fire Mechanical Properties of High Strength Q460 Steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 100-109.

[14] 李国强,吕慧宝,张超. Q690 钢材高温后的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 109-116.

LI Guo-qiang, LÜ Hui-bao, ZHANG Chao. Experimental Research on Post-fire Mechanical Properties of Q690 Steel[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 109-116.

[15] ZHANG C T, WANG R H, SONG G B. Post-fire Mechanical Properties of Q460 and Q690 High Strength Steels After Fire-fighting Foam Cooling [J]. Thin-walled Structures, 2020, 156: 106983.

[16] HUANG Y H, ONISHI Y, HAYASHI K. Inelastic Behavior of High Strength Steels with Weld Connections Under Cyclic Gradient Stress[C]//WCEE. Proceeding of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1996: 385-390.

[17] 刘希月. 基于微观机理的高强钢结构材料与节点的断裂性能研究[D]. 北京:清华大学, 2015.

LIU Xi-yue. Investigations on Fracture Behaviours of High Strength Steel Materials and Connections Based on Micromechanical Models [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[18] GB/T 1591—2018, 低合金高强度结构钢[S].

GB/T 1591—2018, High Strength Low Alloy Structural Steels[S].

[19] LIAO F F, WANG M Q, TU L S, et al. Micromechanical Fracture Model Parameter Influencing Factor Study of Structural Steels and Welding Materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 898-917.

[20] KANVINDE A M, FELL B V, GOMEZ I R, et al. Predicting Fracture in Structural Fillet Welds Using Traditional and Micromechanical Fracture Models [J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3325-3335.