

文章编号: 1001-4888(2018)05-0743-08

地震频率对 Q235 钢结构材料 超低周疲劳行为的影响^{*}

罗云蓉^{1,3}, 王清远², 付磊^{1,3}, 张应迁^{1,3}, 陶静¹, 谢文玲¹

(1. 四川理工学院, 自贡 643000; 2. 四川大学建环学院, 成都 610065; 3. 材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 自贡 643000)

摘要: 研究了两种地震极限频率对于 Q235 钢结构材料的超低周疲劳性能的影响。采用横向应变控制方法, 分别保持频率 1Hz、3Hz 恒定, 在岛津电液伺服疲劳试验机上开展了试验钢的超低周疲劳试验。研究发现, 循环应力响应特征, 循环应力—应变关系, 以及疲劳寿命均与频率相关, 且在较高频率下, 试验材料出现了二次循环硬化现象。分别建立了试验钢在两种频率下基于塑性应变幅值及应变速率的疲劳寿命预测公式。两种寿命预测公式均与试验结果吻合良好。通过电镜扫描(SEM), 对比分析了不同频率下试验钢超低周疲劳下的微观断裂机理。

关键词: 钢结构材料; 超低周疲劳; 频率影响; 寿命预测

中图分类号: TG115.5⁺7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-100

0 引言

我国是地震频发的国家, 全国震级在 7~9 级范围的强震区域有 100 多个^[1]。每一次强震, 都会造成大量的人员伤亡和财产损失。地震之所以造成巨大的灾难, 其原因之一在于建筑结构的抗震能力差。研究表明^[2], 强震持续的时间通常在 1 分钟以内, 振幅频率一般不超过 3Hz, 且地震时, 建筑结构承受循环往复的交变载荷, 属于高应变低周、超低周疲劳。所谓超低周疲劳, 是指寿命不超过 100 周次的疲劳, 是低周疲劳的极端行为^[3-5]。

地震时, 建筑用钢的低周、超低周疲劳性能, 或许是决定建筑结构抗震性能强弱的关键因素^[6,7]。因此, 地震区域的建筑用钢必须具备良好的低周、超低周疲劳性能。Q235 钢作为我国建筑结构中常用的结构用钢, 在民用建筑、桥梁、船舶以及工业厂房等领域得到广泛的应用。这些工程结构在服役期间经常承受循环往复的动态载荷, 地震时经历低周(LCF)、超低周疲劳(ELCF)过程。近年来, 对 Q235 钢及其结构的低周疲劳行为进行了一系列研究^[8-15], 这表明 Q235 钢及其结构的低周、超低周疲劳行为研究已经引起了一定程度的重视。

研究表明^[16], 地震频率是不确定的, 一般在 1~3Hz 范围以内。频率变化对低周疲劳行为的影响本质上在于加载应变速率的改变^[17]。目前, 加载频率(应变速率)对金属材料低周疲劳行为影响的研究结果表明^[18-21], 低周、超低周疲劳性能与加载频率(应变速率)的大小密切相关。因此, 研究频率对于 Q235 钢超低周疲劳行为的影响, 对于强震下 Q235 钢的工程应用及建筑物的可靠性评价具有重要意义。

^{*} 收稿日期: 2017-04-24; 修回日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51301115), 材料腐蚀与防护四川省重点实验室基金(2016CL17, 2012CL10), 四川理工学院人才引进项目(2015RC34), 过程装备与控制四川省高等学校重点实验室(GK201708, GK201716), 桥梁无损检测与工程计算四川省高等学校重点实验室项目(2018QYJ03, 2018QZY01)

通讯作者: 付磊(1977—), 男, 硕士, 讲师。主要研究方向: 金属材料疲劳。Email: kunmingfulei@126.com

然而,迄今为止,仍然缺乏地震频率对 Q235 钢超低周疲劳行为及失效机理影响的研究。基于此,本文阐述了两种极限地震频率(1Hz、3Hz)对 Q235 钢超低周疲劳行为的影响;在疲劳失效机理的基础上,研究了超低周疲劳寿命与应变速率两者之间的关系,并据此进行寿命预测。本研究结果能够有效解释地震频率对 Q235 钢超低周疲劳行为的影响。

1 试验材料及试验过程

试验材料化学成分、力学性能、金相图、试验过程及试件几何尺寸详见文献[15]。本文研究了 Q235 钢在频率 1Hz、3Hz 下的超低周疲劳行为。

2 试验结果

由于采用沙漏型变截面试件,危险区域较小,失效位置均较为理想,位于试件最小直径处,因此,每种试验条件下,取两根试件进行试验,再取其平均值作为试验结果。试验表明,相同载荷状况下,材料的超低周疲劳寿命波动范围极小。这可能源于高频率(高应变速率)下,循环载荷作用时间极短(300s 以内),材料寿命主要取决于自身特性以及载荷应变大小。

2.1 循环响应特征曲线

在频率 1Hz、3Hz 下,试验钢的超低周疲劳循环响应特征曲线分别如图 1(a)、(b)所示。图中应力幅总体上随应变幅增大有增加趋势,且从两幅图均可看出,宏观裂纹萌生随应变幅增大有加速趋势。但两种频率下,除了图 1(a)中 15.21% 这一极高应变幅之外,其余应变幅下宏观裂纹基本上都是在 $0.8N_f$ 以上循环周次才萌生的,这一点与试验钢低周疲劳宏观裂纹萌生阶段(见文献[9])是相似的。频率 1Hz 下(图 1(a)中),虽然循环应力-应变曲线因疲劳寿命极短而表现得不太光滑,但图中可明显看出,超低周疲劳下,材料均先快速硬化,随后均逐渐循环软化,几乎不存在循环稳定阶段,且循环软化速率随应变幅的增大而迅速增加。可见,在 1Hz 频率下, Q235 钢的超低周疲劳循环响应特征主要表现出循环软化,这也是与其低周疲劳行为之间的区别所在。高交变荷载下,试验钢会由于发生循环软化现象而导致强度降低,从而会过早的发生失效或破坏,不利于提高其动态承载能力,这一点在工程实际中应该得到重视。

图 1(b)中,频率 3Hz 下,材料先迅速地循环硬化,之后,材料均表现出轻微的循环软化(或循环稳定),然后再次出现或强或弱的循环硬化现象,即此频率下,材料发生明显的二次硬化现象。二次硬化现象在 690 镍基合金的高温(204℃)低周疲劳行为方面也曾有报道^[22,23]。二次硬化现象的发生,可能与位错叠合,位错运动与堆积层错的交互作用,动态应变时效或者纳米孪晶的形成等因素有关^[22,23],有助于提高材料的疲劳抗力。

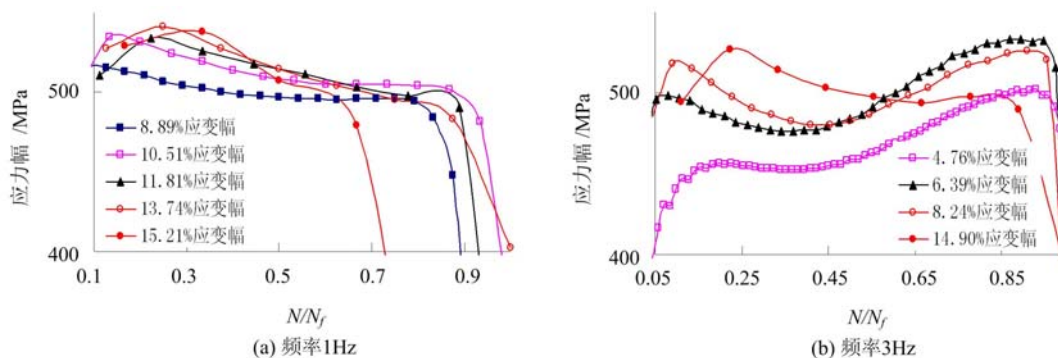


图 1 超低周疲劳循环响应特征曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of test material

2.2 寿命预测

试验钢在 1Hz、3Hz 频率下的超低周疲劳试验结果分别如表 1、表 2 所示。本文试验钢测定的泊松比为 0.29,弹性模量为 208GPa。

为了建立试验钢低周、超低周疲劳寿命预测公式,分别把表 1(频率 1Hz 下)、表 2(频率 3Hz 下)全部数据以及疲劳寿命低于 100 周次的超低周疲劳试验结果代入 Coffin-Manson 关系,得到塑性应变幅与寿命之间的关系(表 3)。各公式的相关系数均在 0.99 左右,表明拟合公式均具有良好的线性相关性。

表 1 试验结果(1Hz)
Tab.1 Test results(1Hz)

应变幅/%	弹性应变幅/%	塑性应变幅/%	应力幅/MPa	$2N_f$	控制应变幅/%	半寿命应变能
1.08	0.18	0.90	379	1750	0.50	2.37
3.09	0.22	2.88	449	362	1.50	9.27
5.08	0.23	4.85	470	100	2.49	16.58
6.95	0.24	6.71	498	60	3.42	24.58
8.89	0.24	8.64	503	48	4.38	32.24
10.51	0.24	10.27	507	30	5.20	39.00
11.81	0.24	11.57	503	18	5.85	43.55
13.74	0.25	13.49	513	16	6.81	51.87
15.21	0.24	14.97	507	12	7.55	57.34

表 2 试验结果(3Hz)
Tab.2 Test results(3Hz)

应变幅/%	弹性应变幅/%	塑性应变幅/%	应力幅/MPa	$2N_f$	控制应变幅/%	半寿命应变能
1.00	0.17	0.83	359	1960	0.50	2.25
2.93	0.21	2.72	430	412	1.46	8.55
4.76	0.22	4.54	457	144	2.38	15.28
6.39	0.23	6.15	485	76	3.19	21.99
8.24	0.23	8.01	480	48	4.12	28.56
8.87	0.23	8.63	487	36	4.43	30.62
12.48	0.25	12.24	515	22	6.24	47.21
14.90	0.24	14.66	503	18	7.45	52.83

表 3 Coffin-Manson 寿命—应变关系
Tab.3 Strain-life relationship according to Coffin-Manson model

频率	数据	寿命预测公式	相关系数
1Hz	全部数据	$\epsilon_{pu}=0.632(2N_f)^{-0.551}$	-0.994
1Hz	ELCF 数据	$\epsilon_{pu}=0.537(2N_f)^{-0.504}$	-0.982
3Hz	全部数据	$\epsilon_{pu}=0.751(2N_f)^{-0.579}$	-0.995
3Hz	ELCF 数据	$\epsilon_{pu}=0.658(2N_f)^{-0.545}$	-0.993

由表 3 中的应变—寿命关系,得到寿命预测曲线分别如图 2(a)~(d)所示。由图可见,试验值与拟合曲线吻合良好,表明 Coffin-Manson 关系能够较好地预测试验钢的低周、超低周疲劳寿命。

失效时间也可能成为金属材料的主要失效机理,且失效时间与应变速率之间符合指数关系^[24]。因

此,本文也建立了基于失效时间的寿命预测公式。虽然两种频率(1 Hz、3 Hz)下的全体数据在失效时间(t_f)与应变速率($\dot{\epsilon}$)之间的线性相关性较差(图 3(a)),但是单独考虑频率 1 Hz、3 Hz 下的试验数据时,其线性相关性均良好(见表 4)。从图 3(a)也可看出,相同的应变速率下,失效时间基本上呈现出随着频率增加而增大的趋势。根据表 4 中的失效时间—应变速率关系,得到双对数坐标系下不同频率的寿命预测曲线如图 3(b)、(c)所示。由图 3(b)、(c)可见,在同种频率下,失效时间随应变速率的增大基本呈线性减小。拟合曲线与试验数据之间吻合良好,表明恒定频率下,应变速率能较好地失效时间(疲劳寿命)进行预测。

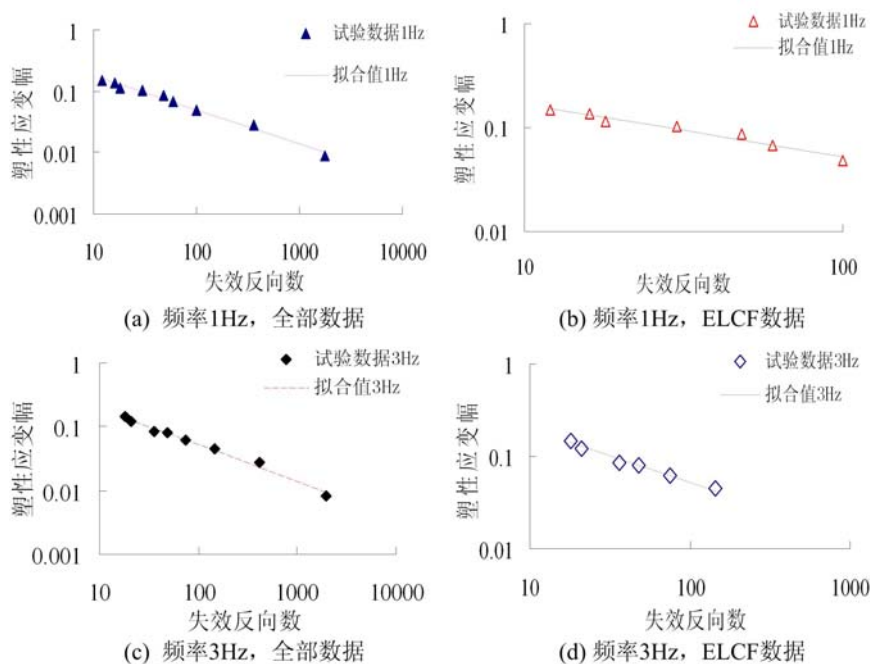


图 2 Q235 钢的低周、超低周疲劳寿命预测曲线

Fig. 2 Strain-life lifetime curve of the extremely low cycle fatigue and low cycle fatigue on Q235 steel

为了研究频率对试验钢低周、超低周疲劳寿命的影响,分别把表 1 和表 2 中不同频率下的全部数据及 100 周次以内的 ELCF 数据代入 Coffin-Manson 关系进行拟合,得到寿命—应变曲线如图 4(a)、(b)所示,由图可以看出,在 1 Hz 及 3 Hz 频率下,从低周、超低周全部数据或者超低周疲劳数据的拟合来看,频率对低周、超低周疲劳寿命影响甚微。然而,在试验过程中,随着频率增加,尤其是 3 Hz 高频率下,试件疲劳破坏伴随较为明显的发热现象,即存在热能的损耗,理论上会降低疲劳寿命,这从之前的试验结果中可以得到证实^[25,26]。因而,其超低周疲劳寿命随着频率增大并无降低的异常现象,也许与该频率下材料发生的二次硬化使得变形更加困难,从而增加了疲劳抗力和疲劳寿命^[22,23]有关。

表 4 失效时间与应变速率之间的关系

Tab. 4 Failure time-strain rate relationship of test material

频率	$t_f - \dot{\epsilon}$ 关系	相关系数
1 Hz	$t_f = 2.64 \dot{\epsilon}^{-1.90}$	-0.995
3 Hz	$t_f = 8.0 \dot{\epsilon}^{-1.81}$	-0.996

2.3 断口扫描

为了研究频率对断口微观失效机理的影响,分别选取了频率 1 Hz、3 Hz 下对应的高应变幅疲劳断口进行电镜扫描(SEM)。图 5(a)~(d)为频率 1 Hz 及 10.5%应变幅下的试件断口扫描照片。图 5(a)可见裂纹源萌生于试件表面;图 5(b)、(c)分别为扩展区的疲劳辉纹及夹杂。图 5(b)中,可见疲劳辉纹;图 5(c)下,可见孔穴及夹杂;图 5(d)为最后断裂区的高倍照片,图中可见许多细小次裂纹。

图 6(a)~(d)为频率 3 Hz、14.9%应变幅下试件断口的扫描图片。图 6(a)、(b)可见裂纹源起裂于

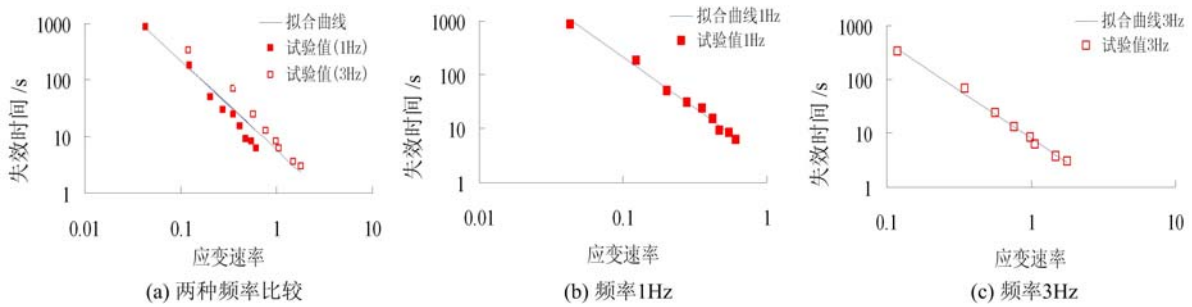


图3 Q235钢的失效时间与应变速率之间的关系

Fig. 3 Failure time-train rate relationship curve of Q234 steel

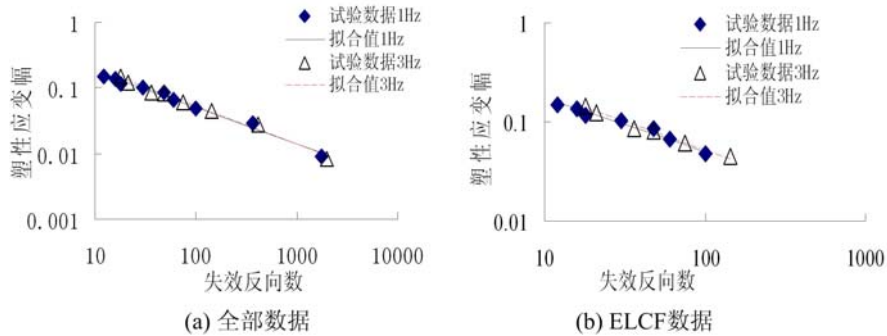
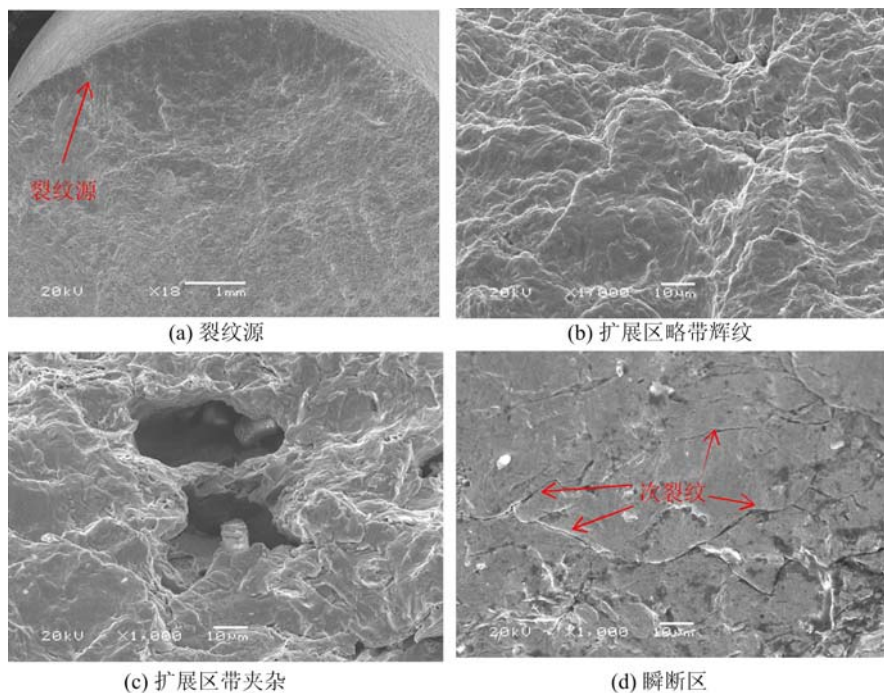


图4 频率对低周、超低周疲劳寿命的影响

Fig. 4 Effect of frequency on the LCF and ELCF life

图5 断口扫描(10.5%应变幅, $N_f=15$, $f=1\text{Hz}$)Fig. 5 Fatigue fracture morphology of test material($\epsilon_a=10.5\%$, $N_f=15$, $f=1\text{Hz}$)

试件表面,随着应变幅的增加,裂纹源区域变得越来越小,扩展区面积大,带韧窝特征,几乎遍布整个断面,图中可见较多细小韧窝分布于裂纹源区;图6(c)为扩展区韧窝;图6(d)为最后断裂区,面积极小,呈台阶状,这可能与高应变幅及较高频率下循环周次少,失效时间短有关。

由图5与图6比较可见,Q235钢的超低周疲劳裂纹仍然萌生于试件表面;孔穴的存在,表明试验钢

有第二相粒子或夹杂存在。在较低频率(1Hz)下,扩展区略带辉纹,最后断裂区比较平整;而在较高频率(3Hz)下,随着应变幅的提高,裂纹源及最后断裂区面积逐渐变小,扩展区域面积越来越大,不见辉纹,而且瞬断区呈台阶状,不再平整,表明相近的应变幅下,裂纹萌生及扩展速率随频率增加而增大。

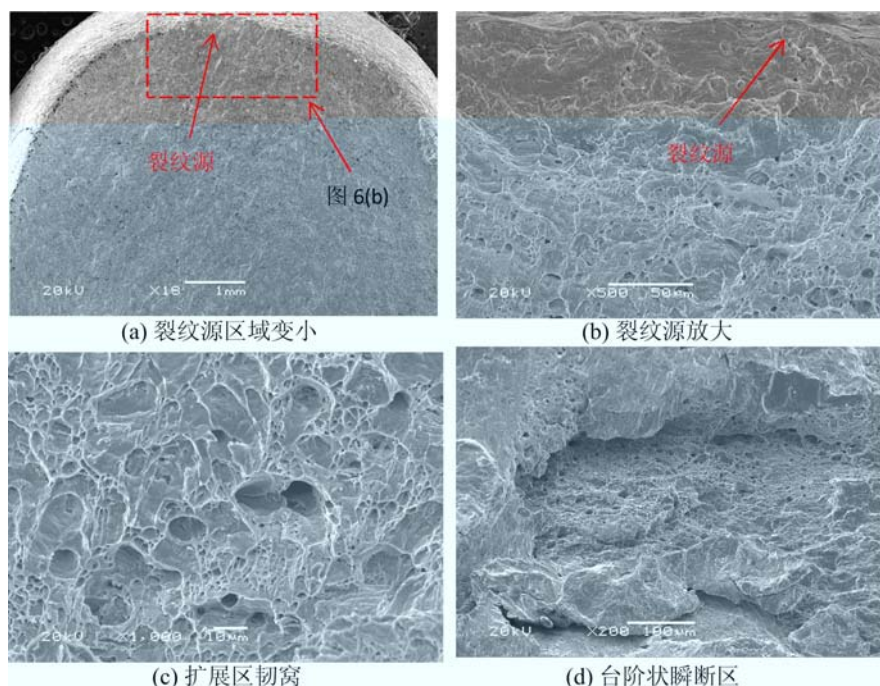


图 6 断口扫描(14.9%应变幅, $N_f=9$, $f=3\text{Hz}$)

Fig. 6 Fatigue fracture morphology of test material($\epsilon_a=14.9\%$, $N_f=9$, $f=3\text{Hz}$)

3 结论

本文对比研究了频率对于 Q235 钢超低周疲劳行为的影响,得出以下结论:

(1) 超低周疲劳下,频率对试验钢的循环响应特征曲线具有明显的影响。不管何种频率下,材料都先快速硬化,但频率 1Hz 下,随后逐渐循环软化,几乎不存在循环稳定阶段,且循环软化的速率随着应变幅的增加而迅速增大;频率 3Hz 下, Q235 钢出现二次硬化现象,有助于提高疲劳抗力。

(2) 分别建立了两种地震极限频率下,试验钢基于 Coffin-Manson 关系的超低周疲劳应变-寿命计算模型。Coffin-Manson 关系能较好地预测试验钢的疲劳寿命,为该钢种超低周疲劳性能分析和寿命预测提供了依据。

(3) 应变速率能较好地对应 Q235 钢低周、超低周疲劳寿命进行预测。分别建立了两种地震极限频率下, Q235 钢基于应变速率的失效时间(疲劳寿命)预测模型,预测值与试验值吻合良好,从而为完善低周、超低周疲劳理论提供了试验基础。

(4) Q235 钢的超低周疲劳裂纹仍然起源于试件表面;扩展区较多韧窝,为韧性断裂。在低频率(1Hz)下,扩展区略带辉纹,最后断裂区比较平整;在高频率(3Hz)下,随着应变幅的提高,裂纹源及最后断裂区面积逐渐变小,扩展区域面积越来越大,不见辉纹,而且最后断裂区呈台阶状,不再平整。这些微观现象的研究,有助于对试验钢微观断裂机理的深入理解,从而对钢结构材料的设计、研发和应用起到良好的促进作用。

参考文献:

- [1] 谢仕桓. 应加速推进我国高强钢筋的发展[J]. 轧钢, 2000, 17(3):9-11 (XIE Shijuan. Accelerate the development of high strength steel in China[J]. Steel Rolling, 2000, 17(3):9-11 (in Chinese))
- [2] 龚士弘, 盛光敏. 地震区建筑用钢的韧性对建筑物抗震性能的影响[J]. 工程抗震, 2004(3):41-47 (GONG

- Shihong, SHENG Guangmin. Effects of toughness of steel on seismic performance of building structures[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2004(3):41—47 (in Chinese))
- [3] Tao C. Extremely low cycle fatigue assessment of thick-walled steel piers[D]. Nagoya University, 2007.
- [4] 韦尧兵, 黄建龙, 靳伍银, 等. 超低周变幅疲劳断裂设计的几个问题[J]. 甘肃工业大学学报, 1998, 24(2):109—112 (WEI Yaobing, HUANG Jianlong, JIN Wuyin, et al. several problems on extra low cycle fatigue fracture design[J]. Journal of Gansu Industrial University, 1998, 24(2):109—112 (in Chinese))
- [5] 赵学才. 超低周条件下 Q235 的断裂特性研究[D]. 兰州理工大学, 2007 (ZHAO Xuecai. Research on fracture properties of Q235 under the extra low cycle conditions[D]. Lanzhou University of Technology, 2007 (in Chinese))
- [6] 龚大弘, 辛义德, 鄢如恢. 地震区建筑结构钢的抗震性能问题[J]. 工程抗震与加固改造, 1987(3):33—37 (GONG Shihong, XIN Yide, YAN Ruhui. Seismic performance of building structural steel in earthquake area[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 1987(3):33—37 (in Chinese))
- [7] 崔仕明, 王睿东, 游翔, 等. Q345 低周疲劳性能与疲劳寿命预测分析[J]. 实验力学, 2014, 29(5):537—542 (CUI Shiming, WANG Ruidong, YOU Xiang, et al. Analysis of low cycle fatigue performance and fatigue life of Q345[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):537—542 (in Chinese))
- [8] 蒲玉梅, 吴林, 吴结才. Q235B、Q345B H 型钢综合抗震性能试验研究[J]. 安徽冶金, 2005(4):1—5 (PU Yumei, WU Lin, WU Jiecai. The overall anti-seismic properties of Q235B and Q345BH H-beams[J]. Anhui Metallurgy, 2005(4):1—5 (in Chinese))
- [9] 罗云蓉, 王清远, 刘永杰, 等. Q235、Q345 钢结构材料的低周疲劳性能[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(2):169—175 (LUO Yunrong, WANG Qingyuan, Liu Yongjie, et al. Low cycle fatigue properties of steel structure materials Q235 and Q345[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012, 44(2):169—175 (in Chinese))
- [10] 田雨, 纪卓尚. 低周疲劳损伤对老化船舶结构剩余极限强度的影响[J]. 中国造船, 2010, 51(1):115—121 (TIAN Yu, JI Zhuoshang. Effect of low cycle fatigue damage on residual limit strength of aging ship structure [J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(1):115—121 (in Chinese))
- [11] 黄波, 陈泉, 李涛, 等. 国标 Q235 钢屈曲约束支撑低周疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2013(6):29—34 (HUANG Bo, CHEN Quan, LI Tao, et al. Experimental study on low cycle fatigue of buckling constrained support of national standard Q235 steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2013(6):29—34 (in Chinese))
- [12] 张小元, 张克实, 黄世鸿, 等. Q235 结构钢低周多轴疲劳寿命评估方法的实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013(4):982—990 (ZHANG Xiaoyuan, ZHANG Keshi, HUANG Shihong, et al. Experimental study on evaluation method of low cycle and multi - axis fatigue life of Q235 structural steel[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2013(4):982—990 (in Chinese))
- [13] 张小元, 黄世鸿, 张克实. Q235 钢拉扭多轴低周疲劳的试验研究[C]//中国力学大会, 2013 (ZHANG Xiaoyuan, HUANG Qiushi, ZHANG Keshi. Experimental study on multiaxial low cycle fatigue of Q235 steel under tension and torsion[C]//China Conference of Mechanics, 2013 (in Chinese))
- [14] 于海丰, 张文元, 张耀春. Q235 焊接工字形钢支撑的低周疲劳性能试验及数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(2):182—190 (YU Haifeng, ZHANG Wenyuan, ZHANG Yaochun. Low-cycle fatigue performance test and numerical simulation of welded I-shaped steel support[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(2):182—190 (in Chinese))
- [15] 罗云蓉, 王清远, 付磊, 等. Q235 钢结构材料的超低周疲劳性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(12):47—51 (LUO Yunrong, WANG Qingyuan, FU Lei, et al. Extremely low cycle fatigue properties of steel structure materials Q235[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(12):47—51 (in Chinese))
- [16] Sheng G M, Gong S H. Investigation of low cycle fatigue behaviour of building structural steels under earthquake loading[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 1997, 10(1):51—55.
- [17] 周承恩, 谢季佳, 洪友士. 超高周疲劳研究现状及展望[J]. 机械强度, 2004, 26(5):526—533 (ZHOU Chengen, XIE Jijia, HONG Youshi. Research status and prospect of ultra high cycle fatigue[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(5):526—533 (in Chinese))
- [18] Shi X Q, Pang H L J, Zhou W, et al. Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic

- solder alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(3):217—228.
- [19] Kanchanomai C, Miyashita Y, Mutoh Y, et al. Influence of frequency on low cycle fatigue behavior of Pb-free solder 96.5 Sn-3.5 Ag[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 345(1):90—98.
- [20] Knop M, Heath J, Sterjovski Z, et al. Effects of cycle frequency on corrosion-fatigue crack growth in cathodically protected high-strength steels[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1):1243—1252.
- [21] Morrissey R J, McDowell D L, Nicholas T. Frequency and stress ratio effects in high cycle fatigue of Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Fatigue, 1997, 21(7):679—685.
- [22] Chai G C, Liu P, Zhou N, et al. Low and high cycle fatigue behavior of nickel-base alloy at high temperatures[J]. Procedia Engineering, 2013, 55:671—676.
- [23] Chai G, Liu P, Frodigh J. Cyclic deformation behaviour of a nickel base alloy at elevated temperature[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(8):2689—2697.
- [24] Kanchanomai C, Miyashita Y, Mutoh Y. Strain-rate effects on low cycle fatigue mechanism of eutectic Sn-Pb solder[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9):987—993.
- [25] Luo Y R, Huang C X, Tian R H, et al. Strain-rate effects on the low cycle fatigue behaviors of high-strength structural steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(7):50—56.
- [26] Luo Y R, Wang Q R, Yang B. Low cycle fatigue tests on low carbon steel[C]//BMEI 2011—Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information, Guangzhou, 2011:741—746.

On the effect of seismic frequency on extremely low cycle fatigue behaviors of Q235 steel structure material

LUO Yun-rong^{1,3}, WANG Qing-yuan², FU Lei^{1,3},
ZHANG Ying-qian^{1,3}, TAO Jing¹, XIE Wen-ling¹

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China; 2. Department of Civil Engineering & Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Key Lab in Sichuan Colleges on Industry Process Equipments and Control Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: In this paper, the effect of two kinds of seismic limit frequencies on the extremely low cycle fatigue (ELCF) performance of Q235 steel structural material are investigated. ELCF experiment for the tested steel was carried out on Shimadzu electro-hydraulic servo fatigue testing machine by using the transverse strain control method and keeping the frequency of 1 Hz and 3 Hz, respectively. It is found that the response characteristics of cyclic stress, the cyclic stress-strain relationship and fatigue life are all related to frequency, and secondary cyclic hardening of tested material occurs at higher frequencies. Based on plastic strain amplitude and strain rate, the fatigue life prediction formulas of tested steel were established respectively, under both frequency condition. The two life prediction formulas are in good agreement with the experimental results. Finally, by using scanning electron microscope (SEM), the microscopic fracture mechanism of tested steel under extremely low cycle fatigue at different frequencies was compared and analyzed.

Keywords: steel structure materials; extremely low cycle fatigue (ELCF); Frequency effect; life prediction