

文章编号: 1001-4888(2014)05-537-06

Q345 低周疲劳性能与疲劳寿命预测分析^{*}

崔仕明, 王睿东, 游翔, 刘永杰, 王清远

(破坏力学与工程防灾减灾四川省重点实验室, 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 本文对结构用钢 Q345 的低周疲劳性能进行了试验研究。试验在常温下岛津电液伺服疲劳试验机上进行, 采用轴向应变控制方法, 恒定应变速率为 0.005s^{-1} , 应变比为 -1 。试验结果表明, 初始阶段, Q345 在高应变幅值 ($>0.6\%$) 循环作用下出现循环硬化效应, 而在低应变幅值 ($<0.6\%$) 作用下出现循环软化效应; 随着加载应变幅的增加, 硬化和软化率呈直线上升趋势。Q345 疲劳裂纹萌生阶段占其整个寿命的 60% 以上, 其裂纹萌生寿命与应变幅存在幂函数关系。根据 Coffin-Manson 公式得到了 Q345 的应变-寿命关系公式; 采用能量预测法得到了材料的塑性应变能与疲劳寿命的关系表达式。上述结果对钢结构的设计、评估具有重要的工程应用参考价值。

关键词: Q345 钢; 低周疲劳; 疲劳寿命; 寿命预测

中图分类号: TU318.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-206

0 引言

近年来, Q345 被广泛应用于桥梁、建筑、车辆、船舶、压力容器等工程结构中。构筑物在使用过程中承受着来自外界的低应变幅或高应变幅的疲劳荷载作用, 桥梁和立交桥的波纹钢腹板梁或箱梁长期承受着来自汽车的动荷载, 建筑物会经受来自地震荷载和风荷载的交变动态荷载作用^[1,2]。我们通常使用的建筑结构规范设计中, 钢结构的设计标准是在材料的静强度指标下建立的^[2], 然而疲劳破坏是钢结构的主要破坏方式, 因此对 Q345 开展疲劳性能研究, 对钢结构的设计及其应用是十分迫切和具有重要应用意义的。

国内外对 Q345 的低周疲劳性能研究较少, 蒲玉梅等^[3]对马钢生产的 Q235B, Q345H 型钢的高应变低周疲劳性能等 5 种抗震性能指标进行了分析测试, 其试验采用固定应变幅值 1% , 固定频率 0.3Hz , 计算了两种材料的循环能量吸收率。本文采用恒定应变率 (0.005s^{-1}) 控制^[4], 改变试验加载应变幅和频率, 从循环应力-应变关系、应变-寿命关系、塑性应变能-寿命关系等方面系统地研究了 Q345 的低周疲劳行为。

1 试验方法

1.1 材料及试样

试验材料为商业 Q345b 低碳钢板, 厚度为 20mm 。材料的化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示。低周疲劳试样按照《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》^[7] (GB/T15248-2008) 进行设计, 其尺寸

^{*} 收稿日期: 2013-12-31; 修订日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(11172188)

通讯作者: 王清远(1965-), 男, 教授。研究领域: 超长寿命疲劳断裂、材料环境强度与结构疲劳耐久性方面的研究工作。

E-mail: wangqy@scu.edu.cn

如图 1 所示。试样采用数控机床加工而成,表面分别采用砂纸和研磨膏进行打磨和抛光处理。

表 1 Q345 的化学成分

Tab.1 Chemical constant of Q345

C(%)	Si(%)	Mn(%)	S(‰)	P(%)
0.16	0.35	1.34	0.11	0.22

表 2 Q345 的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of Q345

E(GPa)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	$\rho(g \cdot cm^{-3})$
210	395	550	7.85

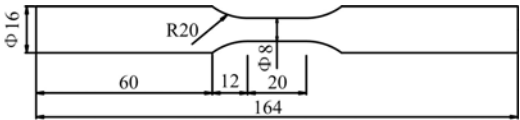


图 1 低周疲劳试样尺寸

Fig.1 Geometrical characteristics of specimens



图 2 低周疲劳试验系统

Fig.2 Low cycle fatigue test system

1.2 试验设备和方法

试验在常温空气环境下,在日本岛津 EHF-EM200k2-040 疲劳试验机上进行(见图 2)。采用跨度为 12.5mm 的轴向引伸计控制应变,循环波形为三角波,应变比 $R = -1$,应变速率恒定为 $0.005s^{-1}$ 。设计 $\Delta\epsilon_a$ 从 0.3% 到 0.8% 共 6 组应变水平,根据应变率计算公式 $\dot{\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta\epsilon_a}{T/4} = 4 \cdot f \cdot \Delta\epsilon_a$ (其中 $\Delta\epsilon_a$ 为单向应变幅值,总应变幅值 $\Delta\epsilon_t = 2\Delta\epsilon_a$, T 为周期, f 为频率),可计算各应变幅值情况下的加载频率。为保证试验数据的准确性,每级应变至少做 3 个数据点,断口在引伸计标距内视为有效数据。由于在高应变幅荷载下,试件夹持时的微小对中误差会导致试件发生扭转变形,试验前期要保证试件与夹头处在一条竖直直线上。

2 试验结果与分析

2.1 应变-寿命曲线

在不同循环应变加载情况下,所得的应变-寿命试验数据如图 3 所示。由图可见,随着循环加载应变幅的提高,疲劳寿命逐渐降低,整个曲线呈幂函数下降趋势。

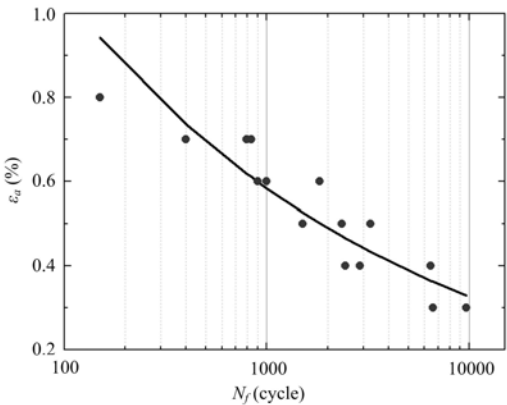


图 3 应变-寿命关系图

Fig.3 Relationship between strain and cycles to failure

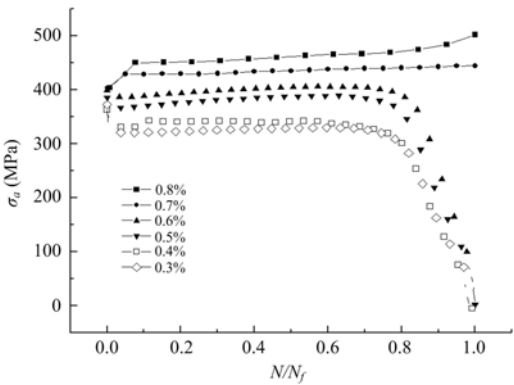


图 4 循环响应特征曲线

Fig.4 Cycle stress response of test material

2.2 循环响应特性

图 4 为 Q345 在不同应变幅度下的循环特征曲线, σ_a 为拉应力和压应力的平均值。从图中可以看

出,在高应变幅作用下(0.8%,0.7%),材料首先发生循环硬化效应,然后进入稳定应力阶段直至破坏。当应变低于 0.7%时,材料出现循环软化现象,然后同样进入稳定应力阶段,最后应力持续下降直到断裂。采用循环硬化率 H 来描述材料初始阶段的硬化程度。 H 的数学表达式为: $H = \frac{\sigma_{a, \text{sat}} - \sigma_{1,1}}{\sigma_{a,1}}$ ($\sigma_{a, \text{sat}}$ 为半寿命的应力幅, $\sigma_{a,1}$ 为第一周的应力幅)。应变幅与硬化率的关系如图 5 所示(硬化率为负值时表示循环软化率),可见循环硬化率随着应变幅的增加呈线性增长。这一现象在奥氏体不锈钢上^[8]也有体现,材料的循环软化与材料的位错密度增加和原子弥散等因素相关^[9]。

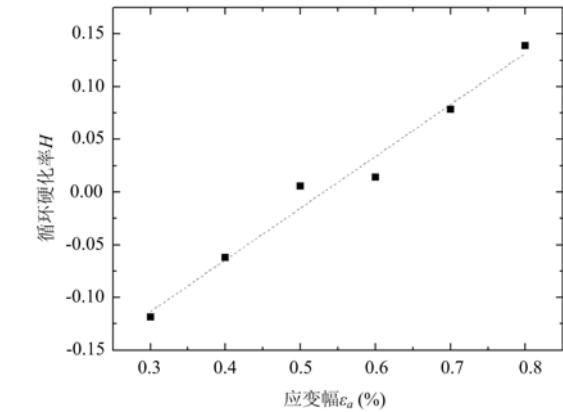


图 5 循环硬化率

Fig. 5 Cyclic hardening rate

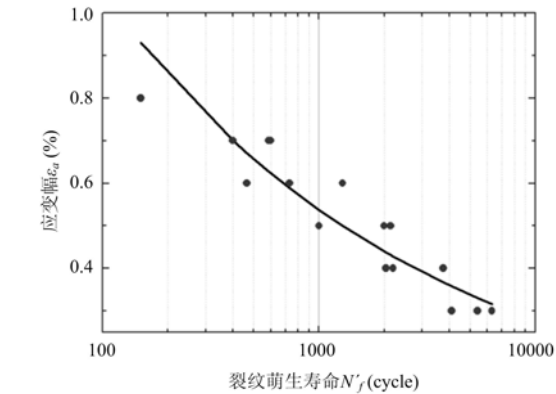


图 6 应变—裂纹萌生寿命的关系

Fig. 6 Strain-crack initiation life

2.3 裂纹萌生寿命预测

根据图 4 给出的循环特征曲线,可以认为应力发生急剧下降的点为疲劳裂纹萌生和裂纹发展的分界点^[10]。本文定义在循环应力幅值连续下降阶段,取应力下降幅值达到恒定应力幅值 5%的点作为裂纹萌生和发展的分界点。各应变幅值下疲劳裂纹萌生寿命 N'_f 和裂纹萌生寿命占总寿命的百分比 N'_f/N_f (以下称寿命比)如表 3 所示,其对应的裂纹萌生寿命、寿命比与应变幅值的关系分别如图 6 和图 7 所示。

表 3 裂纹萌生和寿命比与应变幅的关系

Tab. 3 The relationship between crack initiation and strain

ϵ_a	N'_f (cycle)	N'_f / N_f	ϵ_a	N'_f (cycle)	N'_f / N_f
0.3%	4100	62.12%	0.5%	1000	66.67%
0.3%	5410	55.95%	0.6%	465	51.38%
0.3%	6300	65.22%	0.6%	730	73.00%
0.4%	3750	58.12%	0.6%	1285	70.41%
0.4%	2200	76.36%	0.7%	584	73.37%
0.4%	2040	83.61%	0.7%	597	71.33%
0.5%	2000	85.47%	0.7%	400	100%
0.5%	2140	66.05%	0.8%	150	100%

从图 7 可以看出,疲劳裂纹萌生阶段占据 Q345 整个疲劳寿命的 60%以上,高应变幅值时甚至达到 95%以上。由图 4 的循环特征曲线可知,高应变幅值作用下,试件断裂前没有经过明显的应力骤减阶段,而在应变幅度较低时,裂纹萌生阶段虽然占据 50%~80%,但试件在破坏前经历了一段明显的应力递减阶段,即存在明显的裂纹发展阶段。其原因在于低应变高频率作用下,裂纹萌生后,裂纹发展速度较慢,且高频加载会阻止裂纹的扩展。用幂函数方程对疲劳裂纹萌生寿命进行拟合,可得到 Q345 材料

的裂纹萌生寿命方程:

$$N'_f = 9.3 \times 10^{-6} (\epsilon_a)^{-3.5714} \quad (1)$$

其中, ϵ_a 为单向应变幅值; N'_f 为裂纹萌生寿命。

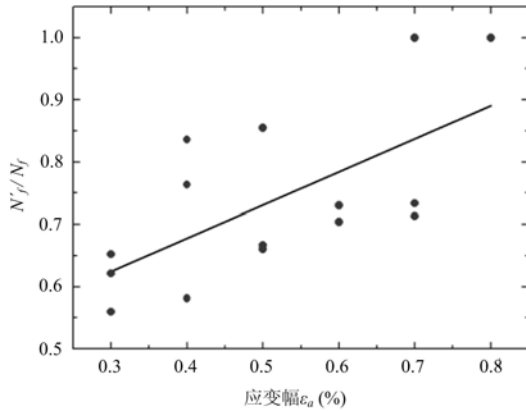


图 7 应变—寿命比关系

Fig. 7 Strain- N'_f/N_f

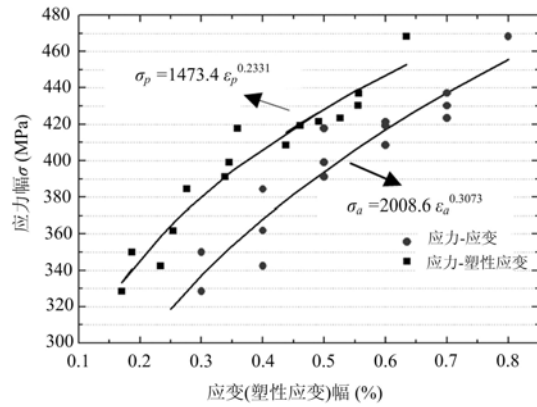


图 8 循环应力应变关系

Fig. 8 Cyclic stress-strain

2.4 循环应力—应变关系

2.4.1 试验结果

取各试件半寿命下单向弹性应变幅 $\Delta\epsilon_{ei}$ ($\Delta\epsilon_{ei} = \Delta\epsilon_e/2$), 塑性应变幅 ($\Delta\epsilon_{pi} = \Delta\epsilon_p/2$) 和应力幅值 σ_a 作为稳定应力应变研究 Q345 的循环应力应变响应, 试验数据如图 8 所示。从图中可以看出, 随着加载应变幅的提高, 塑性应变幅也显著增加, 而弹性应变幅基本稳定, 试件在高应变幅作用下主要发生塑性变形。对所有试验数据进行拟合, 结果如图 8 实线所示(拟合公式已在图中标明)。其趋势符合 Hollomon 公式: $\sigma_a = h\epsilon_a^n$ 或 $\sigma_p = k\epsilon_p^{n'}$, 其中 h, k 为循环强度系数; n, n' 为循环应变硬化指数。

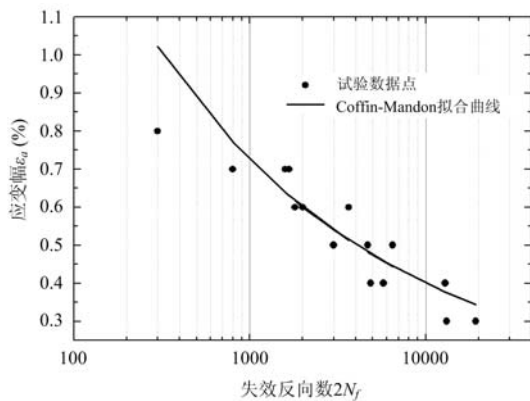


图 9 Coffin-Manson 寿命预测

Fig. 9 Fatigue life prediction used Coffin-Manson

2.4.2 Coffin-Manson 寿命预测

根据 Coffin-Manson 公式^[5], 应力应变和寿命有如下关系。

$$\frac{\Delta\epsilon_a}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (2)$$

式中, $\sigma'_f, b, \epsilon'_f, c$ 分别为疲劳强度系数、疲劳强度指数、疲劳塑性系数及疲劳塑性指数。对试验数据进行拟合, 得到的单向应变幅与疲劳寿命之间的关系为:

$$\epsilon_a = 0.002(2N_f)^{-0.04} + 0.06(2N_f)^{-0.34} \quad (3)$$

所得曲线如图 9 所示, 图中数据点较为均匀地分布在拟合曲线两侧, 试验值与拟合曲线吻合良好。

好。

2.5 塑性应变能预测疲劳寿命

滞回曲线围成的面积表示每循环一次消耗的能量。循环过程中所耗散的总能为滞回环面积之和。利用滞回环围成的面积即耗能的多少可以预测材料的疲劳损伤。塑性应变能可表示^[11]为:

$$\Delta W^p = \Delta U^p / V \quad (4)$$

ΔW^p 表示塑性应变能, MJ/m^3 ; ΔU^p 为单次循环滞回环围成的面积即能量; V 为引伸计加持范围内试件的体积(V 的值为 628mm^3)。取半周期时塑性应变能用 ΔW_{ave}^p 表示, ΔW_{ave}^p 与疲劳寿命 N_f 的关系可以用如下公式表示^[12, 13]:

$$\Delta W_{ave}^p = A(N_f)^\alpha \quad (5)$$

其中, A 为塑性应变能系数; α 塑性应变能指数。

利用数值分析方法计算各滞回曲线围成的面积, 可得到相应的塑形应变能。得到的塑性应变能与对应疲劳寿命的关系如图 10 所示。利用式(5), 采用最小二乘法对试验数据进行拟合, 可得到应变能和疲劳寿命的函数关系: $\Delta W_{ave}^p = 129(N_f)^{-0.448}$, 结果如图 10 实线所示。从图中可以看出, 数据点较均匀地分布在拟合曲线两侧, 拟合效果较好。因而, 此能量预测法可通过滞回环的特征面积来预测试件的疲劳寿命, 在工程实践中具有重要的应用价值。

2.6 低周疲劳性能评价

一般来讲, 建筑物在遭受地震载荷作用时, 大部分能量被其中的钢结构吸收。钢材的耗能好坏直接影响建筑物的抗震性能。研究指出^[6], 当地震荷载达到 100 周次左右, 建筑物最容易发生破坏。假设材料疲劳寿命 $N_f = 100$, 这时候材料循环能量吸收率 $\sigma_a \cdot \Delta \epsilon_t$ 值越大, 材料耗能能力越强。将 $N_f = 100$ 带入(3)式中, 可求得应变值 $\epsilon_a = 1.15\%$ 。根据试验数据可知, 当循环周次达到 100 次, 加载的应力应变基本稳定。因此根据 ϵ_a 值 ($\Delta \epsilon_t = 0.02304$) 可求得 σ_a 的值 ($\sigma_a = 559.65 \text{ MPa}$), 从而得到 $\sigma_a \cdot \Delta \epsilon_t = 12.89 \text{ MJ/m}^3$ 。此能量吸收率低于热轧 H 型钢的最低值 ($23.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^3$) 及高强度 HRB400E 的最低值 ($28.87 \text{ J} \cdot \text{cm}^3$)。

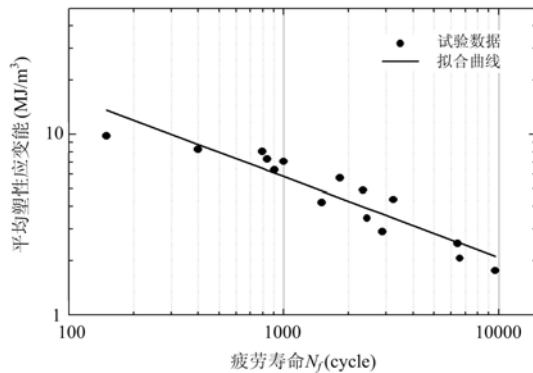


图 10 塑形应变能与疲劳寿命的关系

Fig. 10 Relationship between average plastic strain energy and cycles to fatigue

3 结论

- 1) Q345 应变幅—寿命关系表现为幂函数下降趋势, 其循环硬化率随应变幅值的增加呈线性增加。
- 2) 根据 Coffin-Manson 公式, 得出了 Q345 低周疲劳应变—寿命关系:

$$\epsilon_a = 0.002(2N_f)^{-0.04} + 0.06(2N_f)^{-0.34}$$

- 3) 根据循环响应特征曲线, 假设应力幅值发生急剧下降的点为疲劳裂纹萌生和裂纹发展的分界点, 可得到裂纹萌生阶段基本占据 Q345 整个疲劳寿命的 60% 以上, 高应变幅值时甚至达到 95% 以上。裂纹萌生寿命与加载应变幅存在幂函数关系。

- 4) 塑性应变能反映了材料耗能能力, 也反映了抗震能力, 塑性应变能的大小直接影响材料的疲劳寿命。利用最小二乘法对半周期时材料的平均塑性应变能力与应变进行了拟合, 其结果可表示为: $\Delta W_{ave}^p = 129(N_f)^{-0.448}$ 。Q345 的抗震性能可以用能量吸收率表示, 结果表明 Q345 抗震性能只有热轧 H 型钢和高强度 HRB400E 的一半左右。

参考文献:

- [1] 龚士弘, 盛光敏. 对“钢筋混凝土构件抗震设计”材料部分的意见[J]. 工程建设标准化, 1996(1): 6—9 (Gong Shihong, Sheng Guangmin. The views on materials in “reinforced concrete structure in anti-seismic design” [J]. The Standardization of Engineering Construction, 1996(1): 6—9(in Chinese))
- [2] 龚士弘, 盛光敏. 抗震设计用钢探讨[J]. 工程抗震, 1995(2): 37—42 (Gong Shihong, Sheng Guangming. Studies on steel in antiseismic design[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1995(2): 37—42 (in Chinese))
- [3] 蒲玉梅, 吴林, 吴结才. Q235B、Q345B H 型钢综合抗震性能实验研究[J]. 安徽冶金, 2005(4): 1—5 (Pu Yumei, Wu Lin, Wu Jiecai. The overall anti-seismic properties of Q235B and Q345B H-beams[J]. Anhui Metallurgy, 2005(4): 1—5(in Chinese))
- [4] 罗云荣, 王清远, 刘永杰等. Q235、Q345 钢结构材料低周疲劳性能[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012(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(2):169—175(in Chinese))
- [5] Coffin L F Jr. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal [J]. Transaction of ASME, 1954, 76:931—950.
- [6] 程斌, 薛伟辰. 基于性能的框架结构抗震设计研究[J]. 地震工程与振动工程, 2003, 23(4):50—55 (Cheng Bin, Xue Weichen. Studies on performance-based seismic design of frame structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4):50—55 (in Chinese))
- [7] 中国航空工业总公司. GB/T15248—2008 金属材料轴向等幅低周循环疲劳试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] Bayerlein M, Christ H J, Mughrabi H. Plasticity-induced martensitic transformation and final fracture behavior of an austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 415(1/2):104—117.
- [9] 闵杰, 盛光敏, 吴结才 等. 热轧 H 型钢的高应变低周疲劳性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(11):41—44 (Min Jie, Sheng Guangming, Wu Jiecai, et al. Analysis of high strain low cycle fatigue properties of hot rolled H beam steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(11):41—44(in Chinese))
- [10] 张国栋, 于慧臣, 何玉怀 等. 损伤力学方法在材料低周疲劳实验中的应用研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9):1544—1549 (Zhang Guodong, Yu Huichen, He Yuhuai, et al. Application research of damage dynamics for low cycle fatigue test[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9):1544—1549(in Chinese))
- [11] 陈龙, 蔡力勋. 基于材料低周疲劳的裂纹扩展预测模型[J]. 工程力学, 2012, 29(10):34—36 (Chen Long, Cai Lixun. The low cyclic fatigue crack growth prediction model based on material's low cyclic fatigue properties[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10):34—36 (in Chinese))
- [12] Luo Yunrong, Huang Chongxiang, Guo Yi, et al. Energy-based prediction of low cycle fatigue life of high-strength structural steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(10):47—53.
- [13] Callaghan M D, Humphries S R, Law M, et al. Energy-based approach for the evaluation of low cycle fatigue behaviour of 2.25Cr1Mo steel at elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527A(21/22):5619.

On the Low Cycle Fatigue Behavior and Fatigue Life Prediction of Q345 Steel

CUI Shi-ming, WANG Rui-dong, YOU Xiang, LIU Yong-jie, WANG Qing-yuan

(Failure Mechanics and Engineering Disaster Prevention and Mitigation Key Laboratory of Sichuan Province, Department of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Low cycle fatigue properties of structural steel Q345 were experimentally studied. Experiments were conducted on a Shimadzu hydraulic servo fatigue testing machine at room temperature by using axial strain control method, in which, the constant strain rate is 0.005s^{-1} and the strain ratio is -1 . Results show that in the initial stage of fatigue life, Q345 shows significant cyclic hardening in high strain amplitude regime ($>0.6\%$) and cyclic softening in low strain amplitude regime ($<0.6\%$), respectively. The hardening and softening rates are linearly increased with the increase of loading strain amplitude. More than 60% of the whole fatigue life of Q345 is attributed to the process of crack initiation. Relationship between the fatigue crack initiation lifetime and the strain amplitude may be described as power function. Based on Coffin-Manson formula, the strain-lifetime relation expression of Q345 is obtained. Expression relating the material plastic strain energy and the fatigue life is obtained by using energy prediction method. Above results may provide important reference for design and evaluation of steel structures in engineering application.

Keywords: Q345 Steel; low cycle fatigue; fatigue life; life prediction