

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/286674492>

Low cycle fatigue properties of steel structure materials Q235 and Q345

Article in *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban)/Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)* · March 2012

CITATIONS

29

READS

1,090

4 authors, including:



[Qingyuan Wang](#)

Sichuan University

811 PUBLICATIONS 12,289 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Yongjie Liu](#)

Sichuan University

138 PUBLICATIONS 1,461 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

文章编号:1009-3087(2012)02-0169-07

Q235、Q345 钢结构材料的低周疲劳性能

罗云蓉^{1,2}, 王清远^{1*}, 刘永杰¹, 黄崇湘¹

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 四川理工学院 机械工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要:对 Q235、Q345 钢的低周疲劳性能进行了研究。采用轴向应变控制方法,在岛津电液伺服疲劳试验机上测定了 2 种钢低周疲劳过程中的循环应力响应特征、循环应力与应变的关系,通过拟合 Basquin 公式和 Coffin-Manson 公式得到了 2 种钢的疲劳寿命公式,据此计算了 $N_f = 100$ 周时的循环能量吸收率 $\sigma_a \cdot \Delta \epsilon_1$ 值,并与别的钢筋进行了比较。通过断口扫描发现, Q235 钢裂纹起源于试样表面,由于第二相质点和夹杂物的存在,形成微孔洞和微裂纹,互相连接形成疲劳断裂; Q345 钢裂纹起源于表面,然后通过不断扩展形成微裂纹,再连接成宏观裂纹,最终导致材料断裂。

关键词: Q235 和 Q345 钢; 低周疲劳; 疲劳寿命

中图分类号: TU318.1

文献标志码: A

Low Cycle Fatigue Properties of Steel Structure Materials Q235 and Q345

LUO Yun-rong^{1,2}, WANG Qing-yuan^{1*}, LIU Yong-jie¹, HUANG Chong-xiang¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. College of Mechanical Eng., Sichuan Univ. of Sci. and Eng., Zigong 643000, China)

Abstract: Low cycle fatigue (LCF) properties of Q235 and Q345 steels were investigated. The fatigue tests were conducted on a Shimadzu servo-hydraulic testing machine. The tests were run under uniaxial tension-compression loading with total strain control. Cyclic stress response characteristics and the cyclic stress-strain relationships of the two kinds of test materials were investigated. The Coffin-Manson parameters were derived from the test results. The values of $\sigma_a \cdot \Delta \epsilon_1$ at the fatigue life of 100 cycles were obtained and compared with the results of other steel bars. The SEM micrographs revealed that fatigue crack initiated at the specimen surface. More cavities were observed on the fracture surface of Q235 steel than on that of Q345 steel. Due to the propagation and connection of the micro-cracks, the macro-cracks were formed and fracture occurred eventually.

Key words: Q235 and Q345 steels; low cycle fatigue; fatigue life

中国是世界上大陆强震最多的国家,应作 7 级以上地震设防的区域多达 101 个,遍布全国 26 个省、市及自治区,占总面积的 32.5%^[1-2]。近年来,钢结构因具有施工速度快、抗震有利的特点,在现代建筑中的应用非常广泛,发展迅速。但最近发生的汶川地震及青海玉树地震造成了巨大的人员伤亡和财产损失,促使人们必须重视建筑用钢抗震性能的研究。

地震载荷下,建筑物及桥梁等遭受由往复的地

面运动引起的交变动态载荷。因此,建筑用钢在地震载荷下经历高应变低周疲劳过程^[3]。高应变低周疲劳性能是学者^[4]经过大量的试验和调查研究后提出的一个重要的抗震性能指标。但由于疲劳试验需要投入大量时间和精力,过去在抗震设计中,建筑用钢选材准则一直基于钢的静强度而建立^[4]。这就忽视了钢在动态载荷下与在静载下服役条件其失效模式截然不同的特点,显然是十分危险的。因此,对建筑用钢低周疲劳行为,如循环应力响应特征、寿命预测公式及循环能量吸收率等进行研究,以衡量其抗震性能,对于钢结构设计及应用是十分迫切而且有意义的。

近年来,国内外对其它建筑用钢^[5-10]的低周疲劳性能研究较多,而 Q235、Q345 钢是常用的建筑及工程结构用钢,广泛应用于民用高层建筑、各种工业

收稿日期:2011-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978174; 10925211)

作者简介:罗云蓉(1974—),女,博士生,讲师。研究方向:结构健康监测。

* 通信联系人 E-mail: wangqy@scu.edu.cn

厂房及桥梁等领域,其低周疲劳性能却鲜有报道。蒲玉梅等^[2]对马钢生产的 Q235B、Q345BH 型钢的高应变低周疲劳性能等 5 种抗震性能指标^[4]进行了分析检测。但其高应变低周疲劳实验过程中,应变幅(ε_a)固定在 1.0%,频率固定在 0.3 Hz,仅计算出 2 种试验材料的循环能量吸收率。而对于 Q235、Q345 钢的循环响应特征、寿命预测及断裂机理等其它高应变低周疲劳性能尚缺乏详细而且深入的研究。

作者采用轴向应变控制方法,保持应变速率恒定,选用 7 个不同的应变幅(0.4% ~ 1.0%),对 Q235、Q345 钢的低周疲劳性能进行较为全面的研究。在研究 Q235、Q345 钢低周疲劳的循环响应特征、循环应力-应变关系的基础上,拟合出 2 种试验钢的低周疲劳寿命计算公式,对其断裂机理进行分析,并将其循环能量吸收率和其它建筑用钢进行比较,以便为 Q235、Q345 钢的适用范围及地震区建筑用钢合理选材提供依据。

1 试验过程

试验用钢为从市场购买的安阳钢铁厂生产的 Q235 和济源钢铁厂生产的 Q345 钢棒,规格均为 $\Phi 20$ mm,其化学成分和力学性能分别如表 1、2 所示。

表 1 试验钢的化学成分重量百分比

Tab.1 Chemical constant of test material

试样材料	C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%
Q235	0.16	0.14	0.53	0.031	0.026
Q345	0.16	0.35	1.34	0.160	0.060

表 2 试验钢的常规力学性能

Tab.2 Mechanical properties of test materials

试样材料	屈服强度 σ_s /MPa	极限强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5	面收缩率 ψ
Q235	300	415	0.36	0.617
Q345	385	540	0.255	0.677

低周疲劳试验参照 GB/T15248—2008《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》^[11],在岛津 EHF-EM200k2-040 型电液伺服疲劳试验机上进行,采用光滑圆截面试样如图 1 所示。

所用低周疲劳试样均由数控机床加工,并沿轴向打磨抛光。试验在常温、大气环境下进行,采用跨度为 12.5 mm 的轴向引伸计控制总应变范围 $\Delta\varepsilon_1 (= 2\varepsilon_a)$ 控制轴向应变幅 0.4% ~ 1.0% 不变,

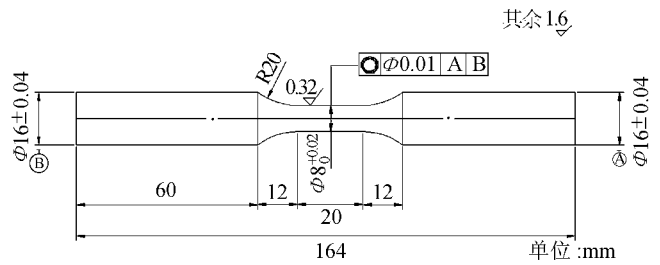


图 1 低周疲劳试样

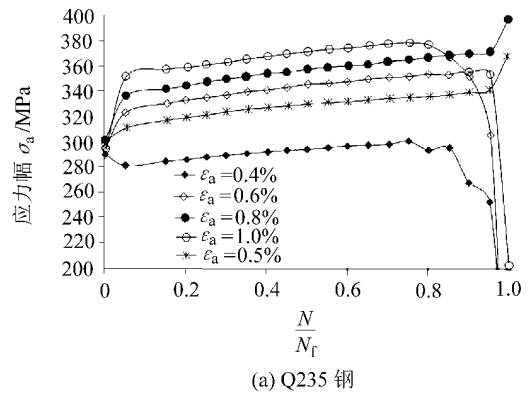
Fig.1 Geometry of the specimen

循环波形为三角波,应变比 $R = -1$,保持应变速率 0.005/s 恒定。疲劳寿命(N_f)以材料的最终断裂作为失效判据。每种试验条件下,至少取 3 根试件进行试验。断口位于标距内方为有效。为分析试验材料的疲劳断裂机理,取循环应变幅为 0.4% 的疲劳试样,在 JSM-5900LV 扫描电镜下,对其疲劳断口进行了分析。

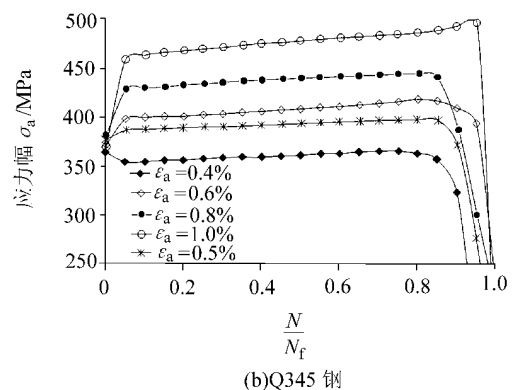
2 结果与讨论

2.1 循环响应特征

图 2(a)、(b)分别为 Q235、Q345 钢在 5 个不同应变幅下的循环特性曲线,图中应力幅 σ_a 为拉应力和压应力峰值的平均值。



(a) Q235 钢



(b) Q345 钢

图 2 Q235 和 Q345 的循环响应特征曲线

Fig.2 Cyclic stress response of test materials Q235 Q345

从图 2 可见 2 种材料的应力幅值均随着应变幅增加而增大。其循环应力响应特征为: 当应变幅 ε_a 为 0.4% 的时候 2 种材料在初始阶段 ($\approx 0.02N_f$ 周) 均先软化, 随后 Q235 钢表现出轻微的循环硬化, Q345 钢表现出循环稳定, 直到断裂; 当应变幅 ε_a 高于 0.5% 时 2 种材料在初始阶段 (大约 $0.02N_f$ 周) 时, 先快速地循环硬化, 随后出现较轻微的循环硬化, 直到断裂。可见, Q235、Q345 钢的循环响应特征主要是循环硬化, 0.5% ε_a 为 2 种材料初始阶段循环硬化 / 软化的临界值。

不同应变幅下, 材料初始循环硬化的程度, 可用式 (1) [12] 来计算比较, 即:

$$H = \frac{\sigma_{a, sat} - \sigma_{a, 1}}{\sigma_{a, 1}} \quad (1)$$

式中, H 为材料的循环硬化率, $\sigma_{a, 1}$ 、 $\sigma_{a, sat}$ 分别为第 1 周、半寿命 ($N_f/2$) 时的应力幅值。应变幅与循环硬化率之间的关系见图 3。

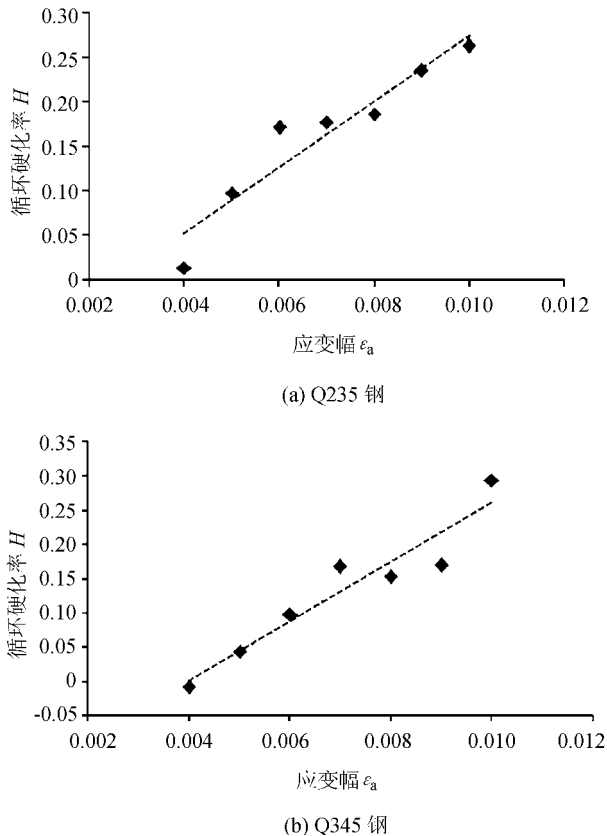


图 3 不同应变幅下材料的循环硬化率

Fig. 3 Cyclic stress response of test materials: Q235, Q345

从图 3 中可见 2 种材料的循环硬化率随着应变幅值的增加而呈线性增加, 这一现象在奥氏体不锈钢上 [12-14] 也有体现。材料的循环硬化可能与循环变形中位错密度增加及原子弥散等因素相关 [15]。

2 种试验材料的循环特征主要是循环硬化, 这有利于提高材料的动态承载能力, 防止因材料软化导致强度降低从而过早发生失效或破坏。

2.2 典型的应力 - 应变滞回曲线

图 4(a)、(b) 分别为 Q235、Q345 钢 1% 应变幅下半寿命时的应力 - 应变滞回曲线, 塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_p$ 如图 4 所示。

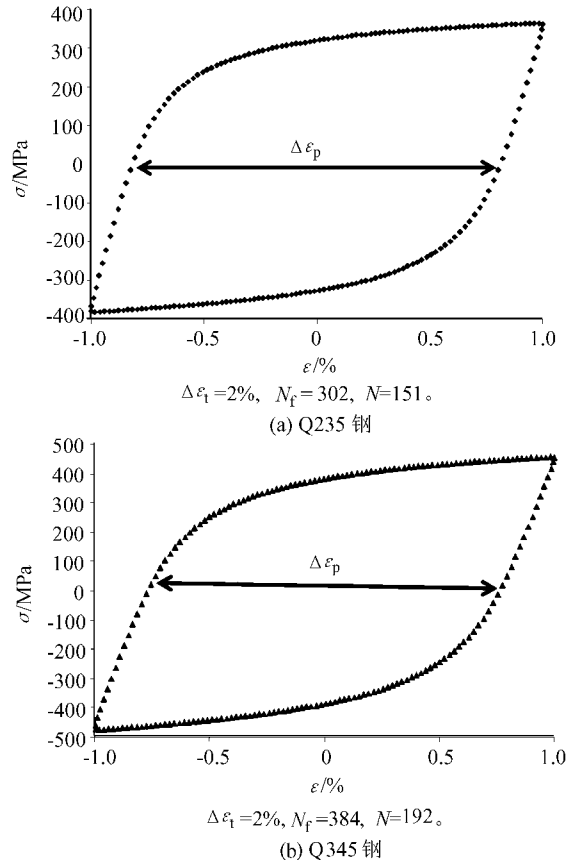


图 4 Q235 和 Q345 钢循环滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis loops of Q235 and Q345

由图 4 可见, 滞回曲线连续、光滑、封闭、对称, 表明试验控制良好。每次循环的能量可由应力 - 应变滞回环围成的面积来表示, 循环过程中所耗散的总能则为所有滞回环面积之和 [16-17]。在 1% 应变幅下, 以塑性应变为主, 滞回曲线包围了较大的面积, 说明大部分能量转化为塑性应变能被材料吸收。

2.3 循环应力 - 应变关系

取半寿命时的弹性应变幅 ε_{ea} ($= \Delta\varepsilon_e/2$), 塑性应变幅 ε_{pa} ($= \Delta\varepsilon_p/2$) 及应力幅 (σ_a) 值作为各应变幅下的稳定值, 试验结果如表 3 所示。表中可见, 随着应变幅的增加, 弹性应变幅 ε_{ea} 在总应变幅 ε_a 中的比例逐渐减小, 塑性应变幅 ε_{pa} 在总应变幅 ε_a 中的比例逐渐增大。这说明高应变幅下, 材料主要发生塑性变形。

表 3 试验结果
Tab.3 Results of tests

试样材料	ε_a	ε_{pa}	ε_{ea}	σ_a /MPa	$2N_f$
Q235	0.004	0.002 483	0.001 513 6	293.755 5	8 802
	0.005	0.003 452	0.001 545 2	330.838 5	3 258
	0.006	0.004 354	0.001 641 8	339.947 5	2 070
	0.007	0.005 288	0.001 706 4	357.757 8	1 478
	0.008	0.006 243	0.001 747 0	371.689 0	1 167
	0.009	0.007 188	0.001 794 0	370.552 5	816
	0.010	0.008 137	0.001 848 4	372.562 0	604
	0.004	0.002 241	0.001 758	362.316 0	11 098
	0.005	0.003 083	0.001 914	388.875 3	3 300
	0.006	0.004 024	0.001 971	410.843 3	2 077
Q345	0.007	0.004 889	0.002 102	422.472 0	1 937
	0.008	0.005 813	0.002 175	443.587 0	1 277
	0.009	0.006 724	0.002 257	450.592 5	932
	0.010	0.007 675	0.002 308	472.177 8	700

根据 Hollomon 公式:

$$\sigma_a = h\varepsilon_a^n \quad (2)$$

或

$$\sigma_a = k\varepsilon_{pa}^{n'} \quad (3)$$

式中, h, k 为循环强度系数, n, n' 为循环应变硬化指数。代入表 3 的结果, 得到材料的循环应力 - 应变关系为:

Q235 钢: $\sigma_a = 1\,235.36\varepsilon_a^{0.253\,6} \quad (4)$

或 $\sigma_a = 999.76\varepsilon_{pa}^{0.199\,2} \quad (5)$

Q345 钢: $\sigma_a = 1\,683\varepsilon_a^{0.277\,3} \quad (6)$

或 $\sigma_a = 1\,281\varepsilon_{pa}^{0.206\,9} \quad (7)$

2.4 寿命预测

根据 Basquin 公式和 Coffin-Manson 公式^[18-20], 应变 - 寿命有如下关系:

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (8)$$

式中, $\sigma_f', b, \varepsilon_f', c$ 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。表 3 中的试验结果代入式 (8), 得到疲劳寿命公式为:

Q235 钢:

$$\varepsilon_a = 0.003 (2N_f)^{-0.08} + 0.155\,9 (2N_f)^{-0.462} \quad (9)$$

Q345 钢:

$$\varepsilon_a = 0.004\,52 (2N_f)^{-0.103\,4} + 0.158\,6 (2N_f)^{-0.467\,4} \quad (10)$$

根据 Coffin-Manson^[20] 关系式拟合所得的曲线如图 5(a)、(b) 所示, 图中坐标均为对数坐标。由图可见, 实验值与拟合曲线吻合良好, 说明 2 种材料的低周疲劳寿命均可较好地由 Coffin-Manson 公式进行预测。图 5(b) 中应变幅为 0.5% 及 0.6% 的试验值与预测值偏差稍大, 这可能与试验数据的分散性有关。

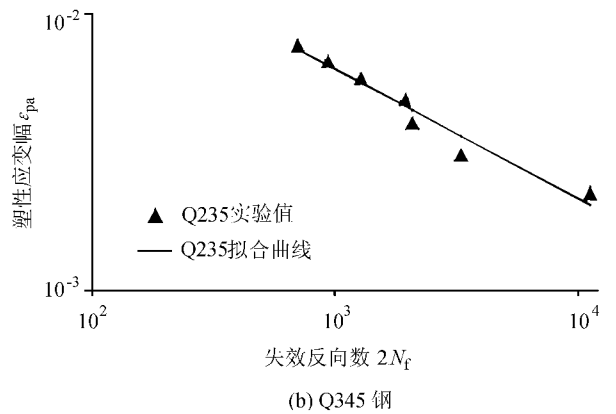
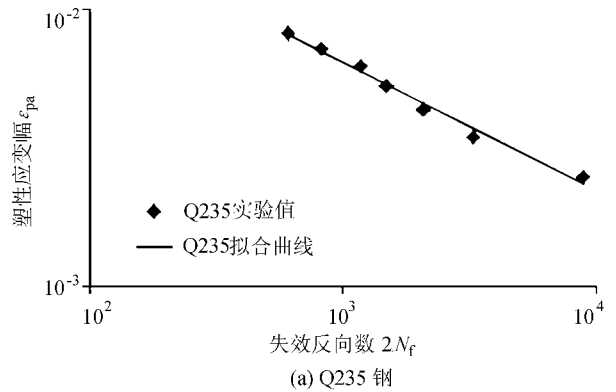


图 5 试验材料的应变 - 寿命关系

Fig. 5 Strain-life relationships of test materials Q235 Q345

2.5 材料的 Masing 特性

具有 Masing 特性的材料是指取不同应变幅稳定的半寿命滞回曲线, 将各个滞回曲线的最低点平移至一点, 如果应变幅值不同的滞回曲线上半段能重合在一起, 则称此种材料具有 Masing 特性, 否则不具有 Masing 特性。在不同幅值的循环加载下, Masing 材料表现出相同的比例极限, 因而其滞回曲线的上半段能重合在一起; 而非 Masing 材料不具备这种特性, 即幅值不同表现出的比例极限也不相同, 故其滞回曲线上半段不能重合。图 6(a)、(b) 分别为 Q235、Q345 钢不同应变幅下, 最低点平移至同一点的半寿命滞回曲线。从图中可见, Q235、Q345 钢都基本具有 Masing 特性。

对于 Masing 材料, 每一循环中的塑性应变能 ΔW_p 可以通过循环应变硬化指数 n' , 应力范围

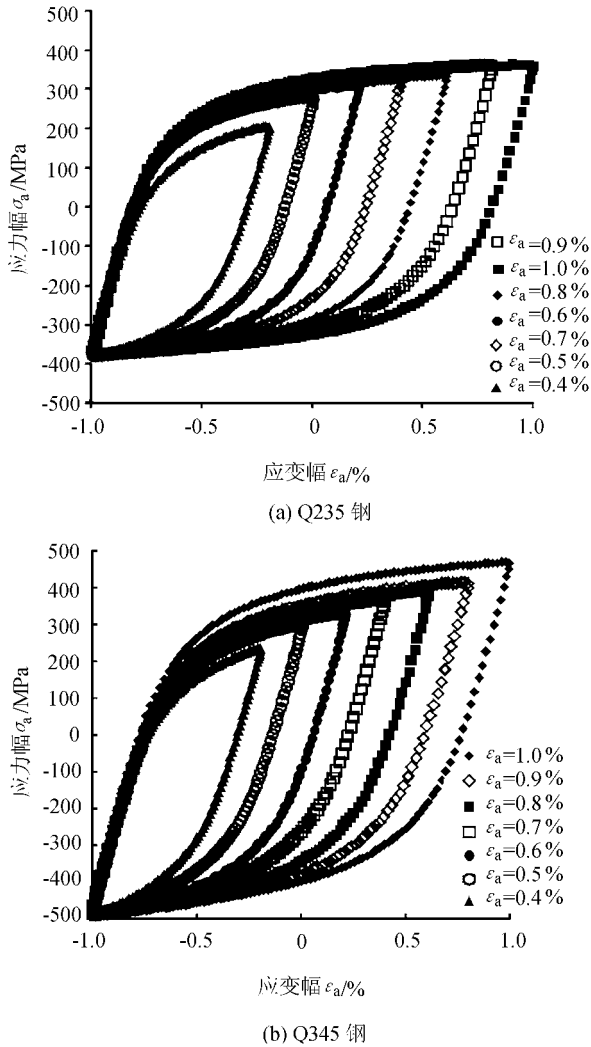


图 6 Q235、Q345 钢最低点平移至一点的半寿命滞回曲线
Fig. 6 Stress-strain hysteresis loops plotted with matched lower tips of Q235 and Q345 steels

$\Delta\sigma (= 2\sigma_a)$ 及塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_p$ 等循环应力 - 应变参数计算获得^[14, 17], 即:

$$\Delta W_{p,c} = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \Delta\sigma \Delta\varepsilon_p \quad (11)$$

实验中的塑性应变能计算值与实验值关系如表 4 所示。表中, $\Delta W_{p,c}$ 为根据式(5)、(7)中的 n' 及表 3 中的数据代入式(11) 计算出的各应变幅下的半寿命塑性应变能, $\Delta W_{p,ave}$ 为半寿命塑性应变能实验值。从表中可见, 2 种材料塑性应变能的计算值均略低于实验值, 误差基本上都在 20% 以内。误差的产生可能一方面缘于表中的塑性应变能计算的仅仅是半寿命塑性应变能, 而非试件的塑性应变能总和; 另一方面也与循环应力 - 应变参数的拟合仅仅是基于半寿命滞回曲线, 而非基于逐次计算出的塑性应变能总和有关^[17]。在缺乏实验的条件下, 也可以用式(11) 来估计塑性应变能并据此估算材料的剩余寿命。

表 4 塑性应变能实测值与计算值比较

Tab. 4 Experimentally derived and analytically predicted values of average plastic strain energy

试件材料	$\varepsilon_a / \%$	$\Delta W_{p,c} / (J \cdot cm^{-3})$	$\Delta W_{p,ave} / (J \cdot cm^{-3})$	误差 / %	
Q235	0.4	1.948 516 610	2.277 956 39	-14.5	
	0.5	3.050 655 986	3.691 198 47	-17.4	
	0.6	3.953 545 422	4.985 468 73	-20.7	
	0.7	5.053 055 293	6.359 923 60	-20.5	
	0.8	6.198 199 294	8.144 007 64	-23.9	
	0.9	7.114 824 996	8.935 779 09	-20.4	
	1.0	8.097 642 581	10.235 190 20	-20.9	
	Q345	0.4	2.134 07	2.487 102	-14.2
		0.5	3.150 98	3.756 107	-16.1
		0.6	4.345 41	5.277 182	-17.7
0.7		5.524 61	6.718 854	-17.8	
0.8		6.778 40	8.324 753	-18.6	
0.9		7.963 50	9.910 900	-19.6	
1.0		9.526 30	11.929 710	-20.1	

2.6 低周疲劳性能评价

地震时, 大部分地震能量被建筑物的钢结构吸收, 地震对结构及其内部设施的破坏取决于地震时输入的能量与结构所能耗散的能量^[21]。研究^[5, 22]指出, 在循环 100 周左右, 建筑物最容易发生破坏, 且该寿命下的循环能量吸收率 $\sigma_a \cdot \Delta\varepsilon_t$ 值越大, 则建筑物耗能越多, 抗震性能就越高。将 $N_f = 100$ 代入式(9)、(10) 得到 $\varepsilon_a (= \Delta\varepsilon_t / 2)$, 再将 ε_a 代入式(4)、(6) 得到 σ_a , 计算出疲劳寿命为 100 周次时的 $\sigma_a \cdot \Delta\varepsilon_t$ 值, 如表 5 所示, 与文献[2]的研究结果基本一致。

表 5 低周疲劳性能

Tab. 5 Low cycle fatigue properties

试样	$N_f /$ 周次	$\Delta\varepsilon_t$	$\sigma_a /$ MPa	$\sigma_a \cdot \Delta\varepsilon_t / (J \cdot cm^3)$
Q235	1 000	0.030 892	429	13.25
Q345	100	0.031 885	534	17.03

表 5 中还可发现, Q345 钢的循环能量吸收率高于 Q235 钢, 但都低于热轧 H 型钢^[5] 的最低值 ($23.5 J \cdot cm^3$)、20MnSiVHRB400 钢筋^[6] 的最低值 ($36.7 J \cdot cm^3$) 及高强 HRB400E^[7] 的最低值 ($28.87 J \cdot cm^3$)。Q235、Q345 钢抗震性能不够理想, 这可能与未采用降碳微合金化及控制轧制工艺有关^[2], 应采用相关工艺技术, 提高钢的抗震性能。

3 断裂机理分析

为了分析试验材料的疲劳断裂机理,选取了 2 种材料在应变幅 $\Delta\varepsilon_t$ 为 0.4% 时的疲劳断口进行 SEM 观察,观察结果如图 7 所示。

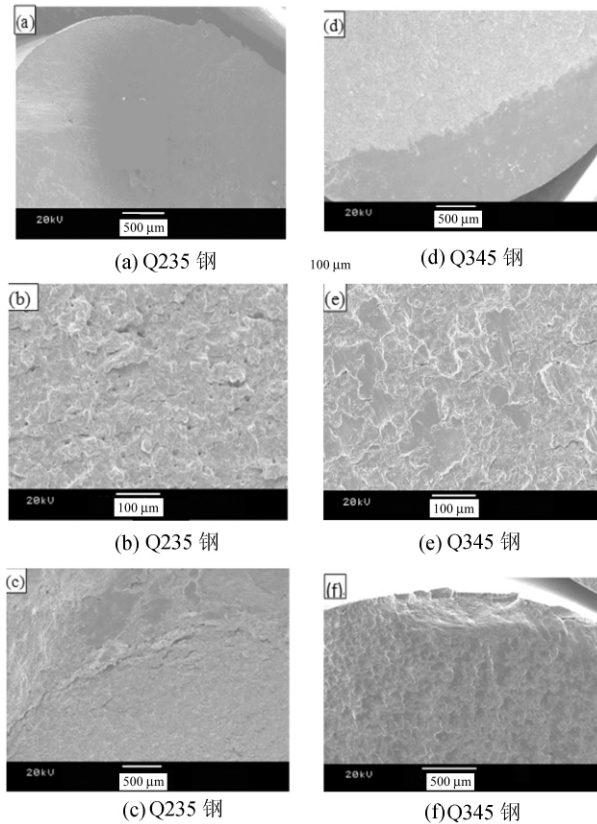


图 7 Q235、Q345 钢的断口扫描电镜 $\Delta\varepsilon_t = 0.4\%$

Fig. 7 SEM micrographs of fracture in the Q235, Q345 specimens tested at $\Delta\varepsilon_t = 0.4\%$

图 7(a)、(d) 分别为 Q235、Q345 钢疲劳断口的裂纹萌生处,疲劳裂纹在试样表面处形核、扩展。但引伸计刀片与试件接触引起较大的应力集中,使得裂纹萌生处较为平滑。图 7(b)、(e) 分别为 Q235、Q345 钢裂纹扩展区。相对于图 7(e),图 7(b) 上可见较多的微孔穴。微孔穴的形成可能与晶界孔穴的合并或第二相质点的存在有关^[23]。图 7(c)、(f) 为瞬断区的微观形貌。从图中可以看出,在 0.4% 应变幅下, Q345 钢低倍下瞬断区的断口存在大量的韧窝,此区域为韧性断裂。

分析可知:疲劳微裂纹在试样表面形核;随着循环的进行,许多微裂纹不断扩展,连接,形成宏观裂纹;随着宏观裂纹的扩展,断口有效承载面积逐渐减小,应力相对增加,当应力达到材料的断裂极限时,试样发生瞬时断裂^[5]。

4 结论

1) Q235、Q345 钢的循环响应特征主要是循环硬化,其循环硬化率随着应变幅值的增加而呈线性增加。2 种试验材料都基本具有 Masing 特性。

2) 2 种试验材料的低周疲劳寿命关系分别为:

Q235 钢:

$$\varepsilon_a = 0.003 (2N_f)^{-0.08} + 0.1559 (2N_f)^{-0.462}$$

Q345 钢:

$$\varepsilon_a = 0.00452 (2N_f)^{-0.1034} + 0.1586 (2N_f)^{-0.4674}$$

3) Q345 钢的循环能量吸收率要高于 Q235 钢,但与热轧 H 型钢及 20MnSiVHRB400 钢筋相比,抗震性能都不够理想。

4) 2 种钢材裂纹起源于试样表面,由于第二相质点和夹杂物的存在,形成微孔洞和微裂纹,互相连接形成宏观裂纹,并引起疲劳断裂。Q235 试件比 Q345 试件疲劳断口具有较多的微孔穴。

参考文献:

- [1] 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. [龚士弘, 盛光敏. 对“钢筋混凝土结构构件抗震设计”材料部分的意见[J]. 工程建设标准化, 1996(1): 6-9.]
- [2] Pu Yumei, Wu Lin, Wu Jiecai. The overall anti-seismic properties of Q235B and Q345BH H-beams [J]. Anhui Metallurgy 2005(4): 1-5. [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.]
- [3] Gong Shihong, Sheng Guangming. Effects of toughness of steel on seismic performance of building structures [J]. Earthquake Resistant Engineering 2004(3): 41-47. [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.]
- [4] Gong Shihong, Sheng Guangming. Studies on steel in anti-seismic design [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1995(3): 37-42. [龚士弘, 盛光敏. 抗震设计用钢探讨[J]. 工程抗震, 1995(3): 37-42.]
- [5] Min Jie, Sheng Guangmin, 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. [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.]
- [6] Qin Bin ,Sheng Guangmin ,Gong Shihong. Analysis on high strain low cycle fatigue properties of 20MnSiVHRB400 reinforced steel bars [J]. Journal of Chongqing University 2003 , 26(7) : 93 - 96. [秦斌 ,盛光敏 ,龚士弘. 20MnSiVHRB400 钢筋的低周疲劳性能分析 [J]. 重庆大学学报 2003 , 26(7) : 93 - 96.]
- [7] Zhan Suyu ,Sheng Guangmin ,Liu Xudong ,et al. Study on high strain low cycle fatigue properties of HRB400E reinforced steel bars [J]. Material Heat Treatment ,2010 ,39(16) : 22 - 26. [詹苏宇 ,盛光敏 ,刘旭东 ,等. 高强 HRB400E 建筑用抗震钢筋高应变低周疲劳性能研究 [J]. 材料热处理技术 2010 ,39(16) : 22 - 26.]
- [8] Abdalla J A ,Hawileh R A ,Oudah F ,et al. Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars [J]. Materials and Design 2009 ,30(10) : 4405 - 4413.
- [9] Luo Yunrong ,Wang Qingyuan ,Yang Bo. Low cycle fatigue tests on low carbon steel [C]//Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information. Guangzhou 2011 4: 741 - 746.
- [10] Luo Yunrong ,Guo Yi ,Wang Qingyuan ,et al. Low cycle fatigue behavior of high-strength structural steel under biased strain control [J]. Journal of Applied Mechanics and Materials 2011 ,71/78: 4020 - 4025.
- [11] 中国航空工业总公司. GB/T15248—2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- [12] Ye D ,Matsuoka S ,Nagashima N ,et al. The low-cycle fatigue , deformation and final fracture behaviour of an austenitic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering: A 2006 ,415(1/2) : 104 - 117.
- [13] Bayerlein M ,Christ H J ,Mughrabi H. Plasticity-induced martensitic transformation during cyclic deformation of AISI 304L stainless steel [J]. Materials Science Engineering: A , 1989 ,114: L11 - L16.
- [14] Botshekan M ,Degallaix S ,Desplanques Y ,et al. Tensile and LCF properties of AISI 316LN SS at 300 and 77 K [J]. Fatigue Fracture of Engineering Material Structures ,1998 ,21(6) : 651 - 660.
- [15] Wu J H ,Lin C K. Effect of strain rate on high-temperature low-cycle fatigue of 17-4 PH stainless steels [J]. Materials Science and Engineering: A 2005 ,390(1/2) : 291 - 298.
- [16] 王栓柱. 金属疲劳 [M]. 福建: 福建科学技术出版社 , 1986.
- [17] Callaghan M D ,Humphries S R ,Law M ,et al. Energy-based approach for the evaluation of low cycle fatigue behaviour of 2. 25Cr-1Mo steel at elevated temperature [J]. Journal of Materials Science and Engineering: A 2010 ,527(21/ 22) : 5619 - 5623.
- [18] Koh S K ,Oh S J ,Li C ,et al. Low-cycle fatigue life of SiC-particulate-reinforced Al-Si cast alloy composites with tensile mean strain effects [J]. International Journal of Fatigue , 1999 ,21(10) : 1019 - 1032.
- [19] Basquin O H. The experimental law of endurance tests [C]//Proceedings of ASTM. 1910 ,10(II) : 625 - 630.
- [20] Coffin L F Jr. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal [J]. Transactions of ASME ,1954 ,76: 931 - 950.
- [21] Cheng Bin ,Xue Weichen. Studies on performance-based seismic design of frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2003 ,23(4) : 50 - 55. [程斌 ,薛伟辰. 基于性能的框架结构抗震设计研究 [J]. 地震工程与工程振动 2003 ,23(4) : 50 - 55.]
- [22] Gong Shihong ,Sheng Guangmin. Application of micro vanadium-titanium high earthquake resistant constructional structural steel in anti-seismic design [J]. Iron Steel Vanadium Titanium ,1995 ,16(4) : 8 - 13. [龚士弘 ,盛光敏. 微钒钛高抗震建筑结构钢在抗震设计中的应用 [J]. 钢铁钒钛 , 1995 ,16(4) : 8 - 13.]
- [23] Goods S H ,Brown L M. The nucleation of cavities by plastic deformation [J]. Journal of Acta Metallurgica ,1979 ,27(1) : 1 - 15.

(编辑 张津徐)