

文章编号: 1001-4888(2019)05-0759-08

对称拉压循环对 HRB400E 钢 弹塑性行为影响的试验研究^{*}

陈建云, 陆大敏, 莫德凯, 匡正, 张克实, 常岩军

(广西大学土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 对 HRB400E 钢在单向拉伸、拉压循环和循环后拉伸载荷作用下的力学行为进行了试验研究, 采用 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9% 和 1% 八种对称应变幅对 HRB400E 薄壁圆管试件施加 100 周次拉压循环载荷, 循环后施加单轴拉伸载荷直至试件断裂。试验数据分析表明, 循环加载过程中 HRB400E 钢前 10 周应力应变曲线曲率明显变小, 峰值应力明显下降, 呈现循环软化特性, 随着应变循环幅值的增大, 循环滞回曲线稳定所需循环周次逐渐减小。HRB400E 钢在不同应变幅循环后的拉伸弹性模量均出现下降, 下降幅度约为 3%~8%, 屈服应力会随着预循环应变幅的增大而增大, 随着预循环应变幅增大材料的硬化效应有所减弱。与单轴拉伸相比, 循环后拉伸的强度极限和断裂应变无明显变化, 塑性变形能力没有明显下降, 破坏为典型的塑性剪切断裂模式, 薄壁圆管试件断口中的断裂纤维区和剪切唇区位于接近管壁处, 断面径向中部的断裂扩展区中, 在大韧窝周围存在多个较小韧窝。

关键词: 预循环; HRB400E 钢; 硬化行为; 滞回曲线; 塑性功; 断口

中图分类号: O344.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-016

0 引言

钢筋混凝土结构在服役过程中经受着不同幅值的随机往复载荷, 当钢筋混凝土结构处于带裂纹工作状态的时候, 钢筋变形较大, 甚至已经进入塑性变形状态, 对其经受较大地震载荷作用时的力学行为有重要影响。如果继续服役则需对结构经历地震作用后的剩余承载力进行全面评估, 并计算维修成本, 决定是否修缮。结合当前的科学水平和经济条件, 我国对建筑抗震提出了“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”三水准设防目标。随着经济和隔震技术的发展以及对巨震下建筑的安全性和震后修缮成本的考虑, 目前一些学者正在逐步提出“中震不坏, 大震可修, 巨震不倒”的更高设防目标。传统结构是通过梁、柱、节点等承重构件的变形和裂缝扩展来消耗地震能量从而达到抗震目标。大量结构试验证明, 结构的损伤和倒塌与结构最大塑性变形(或采用层间位移角或延性系数)之间具有密切的关系, 因此被广泛应用于结构安全评估。然而, 结构最大塑性变形没有考虑结构在动力往复载荷作用下的累积能量耗散, 具有一定的局限性^[1]。因此, 有必要开展桥梁和土木工程中普遍使用金属材料的本构关系及复杂路径循环加载下钢材损伤和寿命的研究^[2-4], 从而为结构计算、抗震设计、寿命评估和安全评定等工作服务。预加塑性应变会改变钢材的微观组织结构, 预变形后钢材的位错密度变化, 韧性断裂机制发生改变, 材料

^{*} 收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472085, 11632007), 广西重点实验室系统性研究项目资助(2016ZDX07), 广西教育厅项目(2019KY0003)

通讯作者: 常岩军(1979—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 土木工程材料的宏、微观力学行为分析。

Email: changyj@gxu.edu.cn

的强化等都会引起疲劳性能的改变^[5]。研究者对预加拉应变与材料疲劳损伤累计寿命的关系^[6],预轧制变形和高周疲劳损伤与材料微观结构演化的关系进行了研究^[7]。预疲劳循环加载后,材料单轴拉伸破坏表现出来的力学性能(延伸率、断面收缩率、极限强度等)也将会发生很大的改变^[8],临界双滑移取向铜单晶体在适当预循环塑性应变幅下单向变形性能可显著提高^[9]。颜莹等^[10]研究了预疲劳变形对其单向拉伸行为、断口表面变形特征和位错组态的影响,发现恒应力预疲劳下粗晶纯铝的单向拉伸屈服强度明显提高,随着预疲劳周次的提高,屈服强度变化不大,抗拉强度呈现先降低再升高和最终急剧下降的趋势。试验累积的循环数反映材料的塑性变形积累和消耗的外加能量,从恒定应变幅循环试验测得的循环特性和循环后拉伸行为能用来表征材料的剩余承载能力^[11]。

以上分析表明,经历不同循环次数后材料单轴拉伸力学参数的变化适合评价材料在循环加载下的累积损伤度。本文把建筑结构服役过程中钢筋承受的较大变形随机载荷简化成不同应变等幅循环加载,针对目前建筑领域常用 HRB400E 钢筋的单轴拉压循环特性进行研究,并着重分析不同应变等幅循环加载历史对 HRB400E 钢拉伸承载性能的影响。

1 试验方法

试验材料采用广西盛隆冶金有限公司 HRB400E 钢,其化学成分见表 1 所示。圆棒拉伸时材料横截面上应力并非单轴应力状态,而是处于多轴应力状态,直径越大时试件中心区域的多轴应力效应越显著^[12,13],与单轴应力状态下材料的力学行为存在一定差异。为实现试样内部处于均匀单轴应力状态,试样用直径 25mm 的热轧钢筋加工成薄壁圆筒形状,在薄壁圆筒试样两端塞入轻微过盈配合的钢质堵头以保证夹头夹持力满足加载需求。对直径为 25mm 的 HRB400E 钢筋切割抛光并数控加工成总长 185mm,标距段长 50mm,外径 16mm,内径 14mm,壁厚 1mm 的薄壁圆筒试样,几何尺寸如图 1 所示。

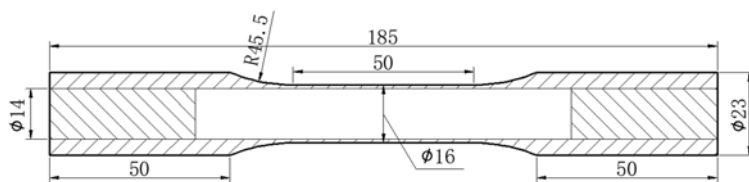


图 1 试样几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 The geometry size of specimen (unit: mm)

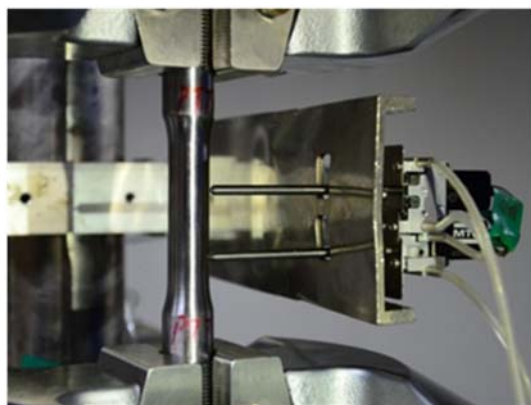


图 2 试样加载和应变测量方法

Fig. 2 The axial-torsion loading and strain measurement methods

表 1 HRB400E 钢化学成分(重量百分比)

Tab. 1 Chemical composition of the HRB400E steel (weight percentage)

C/%	Si/%	Mn/%	Cr/%	Ni/%	S/%	P/%
0.24	0.37	1.27	0.082	0.068	0.026	0.029

试验在广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室的 MTS809 联合拉扭电液伺服试验机上完成,试验机的最大轴向和扭转动加载能力为 $\pm 250\text{kN}$ 和 $\pm 2200\text{N} \cdot \text{m}$ 。采用标距为 25mm 的轴向-扭转应变计测量轴向伸长和扭转角度,轴向应变量程为 $\pm 10\%$,扭转角度量程为 $\pm 5^\circ$,试样加载和应变测量如图 2 所示。

对 HRB400E 钢薄壁圆筒试件分别进行了单轴拉伸试验、不同应变幅值对称拉压循环试验和循环后拉伸试验。单向拉伸试验采用位移控制,加载速度为 0.02mm/s ,循环加载采用应变控制,正弦波循环加载频率为 0.05Hz ,应变幅包括 0.3% 、 0.4% 、 0.5% 、 0.6% 、 0.7% 、 0.8% 、 0.9% 和 1% ,循环次数为 100 周。

2 试验结果

2.1 拉压循环试验

图3为经历了100周典型的对称应变幅循环应力应变滞回曲线(以0.4%和0.8%为例)。HRB400E钢应变加载至0.3%和0.4%后卸载并反向加载过程中均呈现出明显的Bauschinger效应,由屈服段卸载后反向加载呈现截然不同的硬化行为,反向屈服应力也明显不同。循环前5周的滞回曲线变化较明显,随着循环周次的增加,应力应变曲线曲率逐渐减小,屈服应力下降。由图4的循环拉伸应力峰值与循环次数的关系曲线可以看出,循环载荷作用下,应力幅值逐渐降低,滞回环有一定缩小,HRB400E钢在应变幅为0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%和1%时均呈现出循环软化的特性,其中应变幅较大(0.7%、0.8%、0.9%和1%)时循环软化特征不明显,如图4(b)所示。在循环5周前滞回曲线软化速度较快,经历约30周循环后应变幅为0.7%、0.8%、0.9%和1%的对称循环应力应变曲线趋于稳定,滞回曲线几乎重合,因此,纯铝材料可以认为是循环稳定的材料。当应变幅较小时,经历100周循环后循环应力峰值还处于缓慢软化过程,没有达到循环稳定,如图4(a)所示。

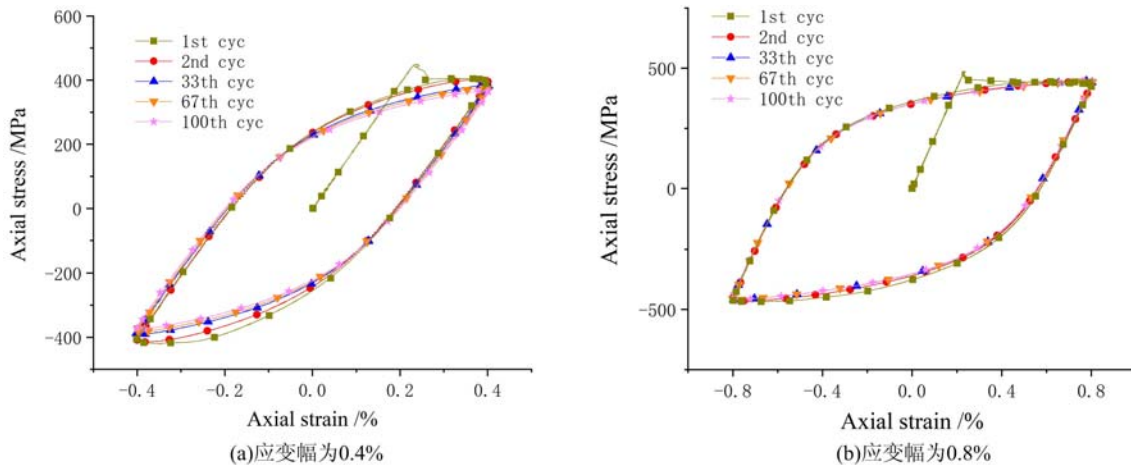


图3 不同应变幅下循环拉伸应力应变滞回曲线

Fig. 3 Stress-strain curve under different symmetric cyclic strain amplitudes

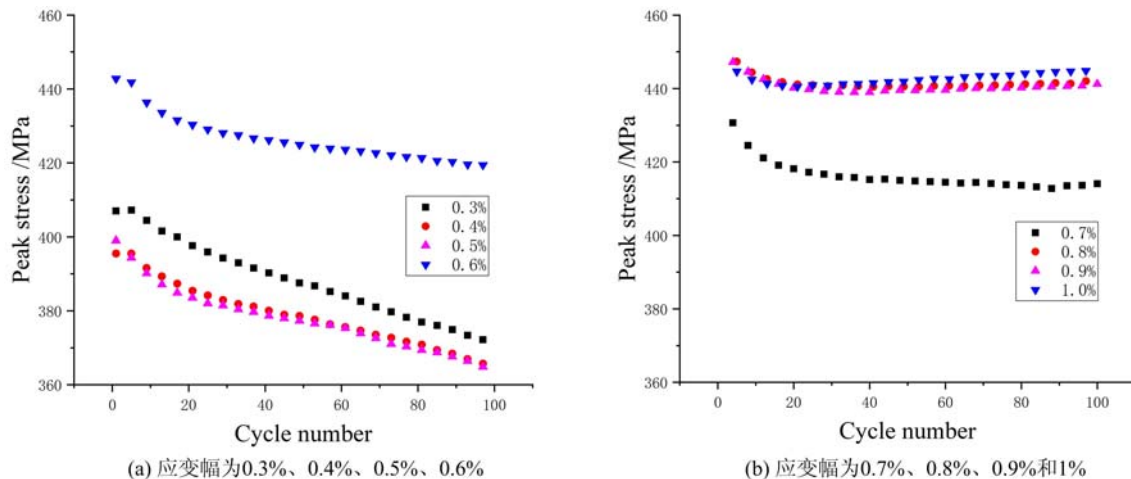


图4 不同应变幅下单位化循环拉伸应力峰值与循环次数的关系

Fig. 4 Peak tensile stresses under tension-compression cyclic test with different strain amplitudes

不同应变幅值循环加载下,不同循环周次产生的单位化塑性功密度(应力应变曲线所围成的面积)如图5所示。循环应变幅为0.3%时,随着循环周次的增加,峰值应力有所下降(如图4(a)所示),而塑性功密度基本保持稳定,这说明随着循环周次的增加,循环应力应变滞回曲线的曲率在不断增加,硬化

特性发生改变。当循环应变幅为 0.4%、0.5% 和 0.6% 时应力应变曲线硬化过程非常接近,前 10 周循环加载阶段塑性功密度明显下降,随着循环周次继续增加塑性功密度基本呈线性下降,这与图 4 所示峰值应力下降趋势和幅度接近。循环应变幅为 0.7% 时,前 10 周循环阶段塑性功密度下降幅度约为 5%,随后塑性功密度基本保持稳定,与循环峰值应力变化趋势相同。循环应变幅为 0.8%、0.9% 和 1% 时,整个循环加载过程中塑性功密度基本保持不变,这与图 4(b) 中的循环峰值应力变化趋势一致,说明循环过程中的硬化行为基本没有发生变化。

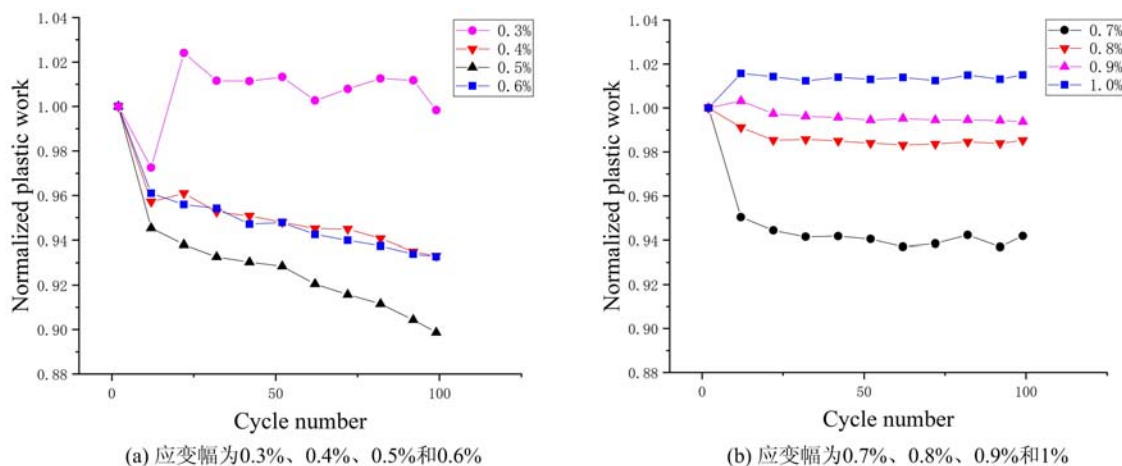


图 5 不同应变幅下单位化循环塑性功密度与循环次数的关系

Fig. 5 The relationship between the cyclic plastic work density and the number of cyclic loading

不同应变幅下拉压对称循环稳定后的滞回曲线如图 6 所示,通过对比可以看出,应变幅值越小,曲线的硬化能力越强。应变幅值大于 0.3% 时,随着应变幅值的增大,应力幅值增加缓慢,HRB400E 钢的应变硬化能力在明显降低。随着应变幅值的增大,滞回曲线围成的面积明显增大,塑性变形较大,应力增长缓慢。应变幅为 0.4% 和 0.5% 时的稳定滞回曲线偏低,这是由于多试样法测得的滞回曲线存在一定的离散性。

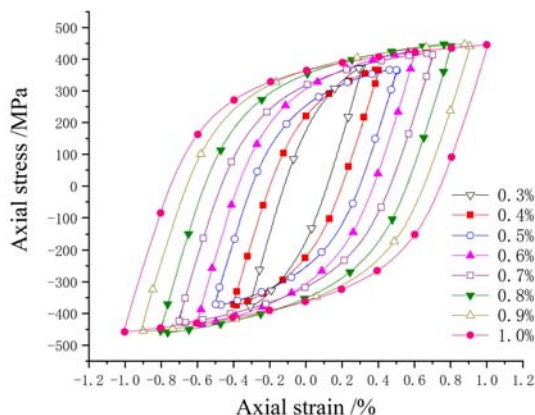


图 6 不同应变幅下的循环稳定应力应变曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of tension-compression cyclic test under different strain amplitudes

2.2 单轴拉伸和拉压循环后拉伸性能

图 7 为 HRB400E 钢单轴拉伸和循环后拉伸的名义应力应变曲线,可以看出 HRB400E 钢单轴拉伸曲线存在一定的离散性,但均呈现钢材拉伸时典型的五个变形阶段:弹性段、屈服段、非线性硬化段、平台段和下降段。硬化应力与拉伸强度极限较为接近时,HRB400E 钢经历了很大的塑性变形阶段(应变 $> 20\%$),材料韧性较好。预循环应变幅为 0.5% 时,循环后的屈服应力低于屈服段的卸载应力(如图 7(a) 所示),预循环应变幅为 1% 时,循环后的屈服应力明显高于屈服段的卸载应力(如图 7(b) 所示)。与单轴拉伸相比,预循环应变幅 0.5% 和 1% 后 HRB400E 钢圆管试件的拉伸强度和断裂应变没有显著

变化。

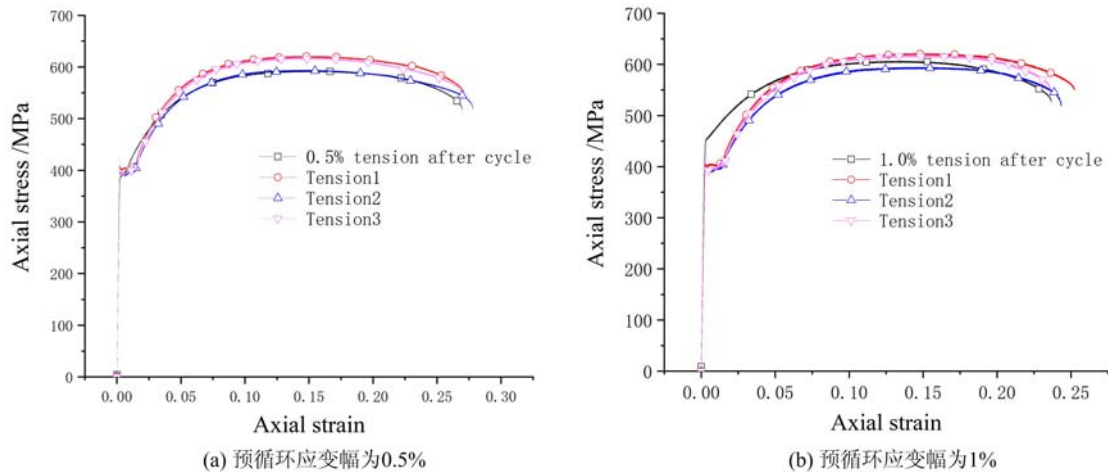


图7 单向拉伸和循环后拉伸应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of monotonic loading and tension after pre-cycle loading

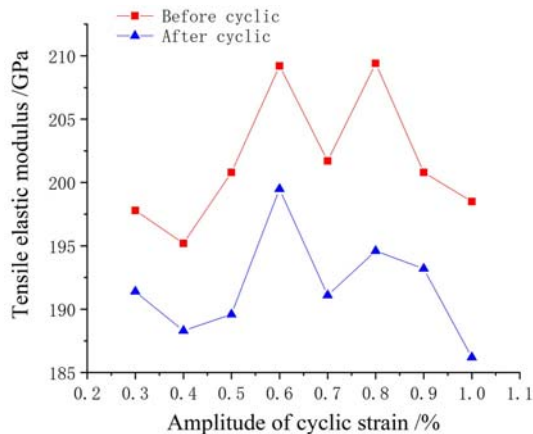


图8 不同应变幅值下单向加载和循环后的拉伸弹性模量

Fig. 8 Tensile elastic modulus of monotonic loading and after pre-cycle loading with different strain amplitudes

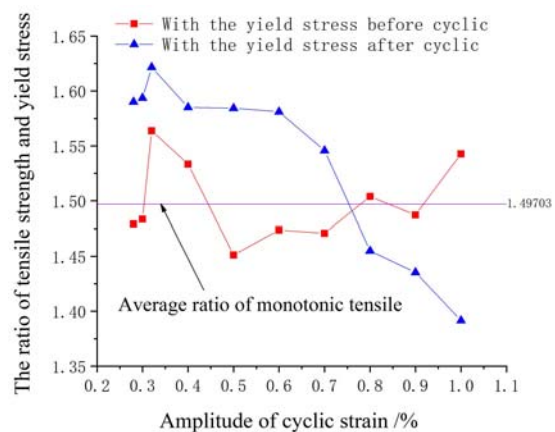


图9 不同应变幅值下单向加载和循环后的拉伸强度与屈服应力比 σ_b/σ_s

Fig. 9 The ratio of tensile strength and yield stress, σ_b/σ_s , of monotonic loading and after pre-cycle loading with different strain amplitudes

循环加载前后材料的拉伸弹性模量与循环应变幅的关系如图8所示。拉伸弹性模量随循环应变幅增大存在一定幅度的波动,但不同应变幅预循环加载条件下循环后材料的拉伸弹性模量均有下降,下降幅度约为3%~8%。为了评价材料的硬化过程,本文引入拉伸强度与屈服应力之比(强屈比)描述材料的硬化能力。HRB400E钢在单轴拉伸载荷作用下的强屈比平均值为1.497,如图9中水平线所示。基于循环加载前屈服应力计算的强屈比与预循环应变幅不存在显著关联,在1.5处上下波动;随着预循环应变幅的增大,基于循环加载后屈服应力计算的强屈比呈下降趋势,从1.6下降至1.4左右,这是因为循环后HRB400E钢的屈服应力会随着预循环应变幅的增大而增大。

2.3 单轴拉伸和拉压循环后拉伸断口形貌

拉伸断裂时试样典型的宏观变形和断口形貌如图10所示,其中图10(b)采用基恩士超景深三维显微系统(VHX-2000)拍摄。循环加载后拉伸的变形过程和断口形态并无明显差异,从图10(a)中可以看出拉伸破坏前薄壁圆筒试样在标距段出现了明显的颈缩现象,颈缩段薄壁圆管试件外径明显缩小,壁厚也显著减小(如图10(b)所示)。与实心圆棒拉伸的杯锥形断口明显不同,薄壁圆管试件拉伸断口粗糙,大多试件为斜断口,有的试件断口为V型断口,断面与试件轴向方向夹角接近45°,整个试件区域内均

为典型的剪切性破坏。拉伸变形过程和断口形态的分析表明,不同幅值循环 100 周后 HRB400E 钢的拉伸塑性变形能力没有明显下降,断裂模式依然为典型的韧性断裂。

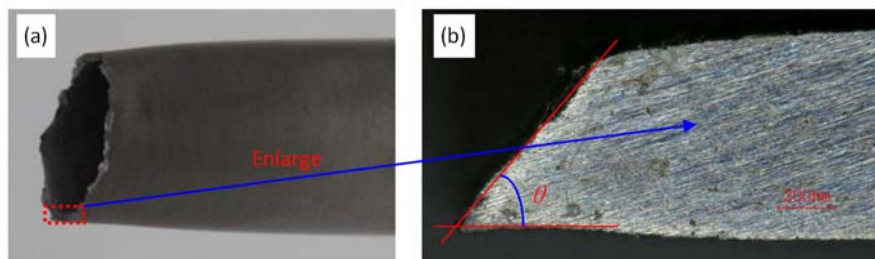


图 10 单轴拉伸和循环后拉伸 HRB400E 钢圆管试样的断口形貌

Fig. 10 Rupture sample of HRB400E steel after uniaxial tension and the tension after cyclic loading

单调拉伸和经历不同应变幅循环再拉伸试样的断口在 SEM(广西大学 FHENOM-F16502)下可观察到的断裂形貌如图 11 所示。经历了 100 周不同应变幅循环后的拉伸断口与单调拉伸断口并没有呈现出明显的差别,韧窝均呈现大小不一,深浅不同,小韧窝较深,大韧窝较浅的特征。结合图 10 中断面与试件轴向所成角度,可以判断两种试验的破坏均为典型的微孔聚集性剪切断裂。纤维区是断面的起裂源,韧窝大小相对均匀,为等轴韧窝,分布较为密集,有的区域相邻的韧窝发生汇聚长大,如图 11(a)所示,纤维区大多位于圆管试件靠近管壁位置。试样断面的中部区域韧窝大小不一,相邻韧窝汇聚不明显,由于每个局部区域应力状态不同,因此等轴韧窝和剪切韧窝交错出现,如图 11(b)所示。图 11(c)给出了断口剪切韧窝区的形态,受剪切作用,断口出现大量的抛物线韧窝,且抛物线凸向一致(如图右上角箭头所示),均指向断裂纤维区。

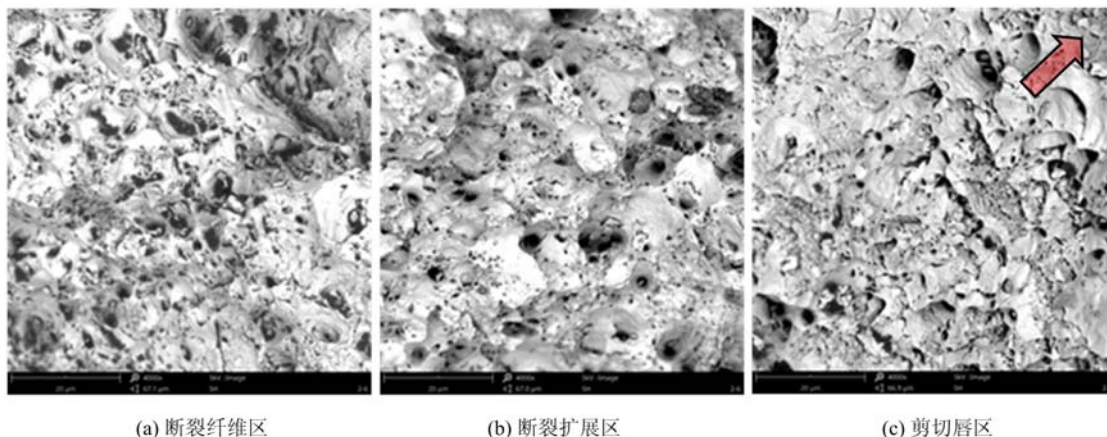


图 11 经历不同预循环试样单轴拉伸破坏的断口形貌(SEM,4000 倍)

Fig. 11 The fracture morphology of different pre-cycle specimens under uniaxial tensile (SEM, at 4000 times magnification)

3 结论

通过本文的试验研究和分析,得到以下结论:

- (1) 循环加载过程中 HRB400E 钢前 10 周应力应变曲线曲率明显变小,峰值应力明显下降,下降幅值约为 5%,呈现循环软化特性。应变循环幅值较小时,随着循环周次继续增加,应力应变曲线峰值应力和塑性功密度依然缓慢降低,应变循环幅值较大时应力应变曲线峰值应力和塑性功密度基本不变。
- (2) HRB400E 钢循环后的拉伸弹性模量均有不同程度下降,下降幅度约为 3%~8%,循环对拉伸强度和断裂应变无明显影响。循环后 HRB400E 钢的屈服极限会随着预循环应变幅的增大而提高,因此材料的硬化效应会随着预循环应变幅的增大而减弱。
- (3) 试件的变形和断口分析表明,与单轴拉伸变形和破坏相比,不同幅值循环 100 周后 HRB400E

钢的拉伸塑性变形能力没有明显下降,断裂模式依然为典型的韧性断裂。循环后拉伸与单调拉伸薄壁圆管试件断口并没有呈现出明显的差别,断面小韧窝很深,断裂纤维区和剪切唇区分别接近圆管试样的内外表面,韧窝较为密集且大小较均匀,断裂扩展区位于圆管试样断面的径向中段,韧窝大小差异较大,在大韧窝周围通常存在较多小韧窝。

参考文献:

- [1] 周福霖,崔杰. 土木工程防灾的发展与趋势浅论[J]. 黑龙江大学工程学报, 2010, 1(4):3—10 (ZHOU Fulin, CUI Jie. Development and tendency of disaster prevention on civil engineering[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2010, 1(4):3—10 (in Chinese))
- [2] 向阳开,郑怡,周志祥,等. 比例及非比例路径下16Mn钢的应力控制循环加载实验[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2):311—314 (XIANG Yangkai, ZHENG Yi, ZHOU Zhixiang, et al. Experiment researches for 16Mn steel under proportional and non-proportional stressing[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2010, 29(2):311—314 (in Chinese))
- [3] Cortese L, Nalli F, Rossi M. A nonlinear model for ductile damage accumulation under multiaxial non-proportional loading conditions[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 85:77—92.
- [4] Rege K, Pavlou D G. A one-parameter nonlinear fatigue damage accumulation model[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98:234—246.
- [5] Majumdar S, Ray K K. Effect of prestrain on the ductile fracture behavior of an interstitial-free steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(12):3541—3553.
- [6] Al-Rubaie K S, Grande M A D, Travessa D N, et al. Effect of pre-strain on the fatigue life of 7050-T7451 aluminium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 464(1-2):141—150.
- [7] Niendorf T, Lotze C, Canadinc D, et al. The role of monotonic pre-deformation on the fatigue performance of a high-manganese austenitic TWIP steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1-2):518—524.
- [8] 高柳,秦胜欢,石车嗣,等. 低碳钢经拉压循环后的剩余强度、延性与表面损伤[J]. 实验力学, 2018, 33(4):525—533 (GAO Liu, QIN Shenghuan, SHI Chesi, et al. Study of residual strength, ductility and surface damage of low-carbon steel after cyclic tension and compression action[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):525—533 (in Chinese))
- [9] Li X W, Wang X M, Guo W W, et al. Effect of cyclic pre-deformation on the uniaxial tensile deformation behavior of [017] Cu single crystals oriented for critical double slip[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(4):1631—1635.
- [10] 颜莹,卢蒙,李小武. 预疲劳变形对粗晶纯Al单向拉伸行为的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(6):658—666 (YAN Ying, LU Meng, LI Xiaowu. Effects of pre-fatigue deformation on the uniaxial tensile behavior of coarse-grained pure Al[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(6):658—666 (in Chinese))
- [11] 张克实,石艳柯,许凌波,等. 对称拉压循环下金属屈服硬化的各向异性与细观变形转动的不均匀性[J]. 金属学报, 2011, 47(10):1292—1300 (ZHANG Keshi, SHI Yanke, XU Linbo, et al. Anisotropy of yielding/hardening and micro inhomogeneity of deformation/rotating for a polycrystalline metal under cyclic tension-compression[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(10):1292—1300 (in Chinese))
- [12] Bao Y B. Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality stress and strain ratios[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72:502—522.
- [13] 刘立熙,朱健,李志强. 基于应力三轴度和罗德参数的6061和7075铝合金材料断裂失效分析[J]. 实验力学, 2017, 32(3):342—350 (LIU Lixi, ZHU Jian, LI Zhiqiang. Fracture failure analysis of 6061 and 7075 aluminum alloy based on stress triaxiality and lode parameter[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(3):342—350 (in Chinese))

Experimental study on elastoplastic behavior of HRB400E steel under low-cycle symmetric loading

CHEN Jian-yun, LU Da-min, MO De-kai, KUANG Zheng, Zhang Ke-shi, CHANG Yan-jun

(Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, College of Civil Engineering and Architectural, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The mechanical behaviors of HRB400E steel under uniaxial tension, tension and compression cycle and tension after cycle at room temperature were studied. The HRB400E thin wall tube specimens were subjected to 100 cycles load with 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 0.9% and 1% tension and compression symmetric cyclic strain amplitudes, and the uniaxial tension test was carried out after cyclic loading. The experimental results show that the curvature of the stress-strain curve of HRB400E steel and the peak stress decreases obviously in the first 10 cycles during cyclic loading, exhibiting the cyclic softening characteristic. The cyclic hysteretic curve stabilizes faster as the cyclic strain amplitude gets larger. The tensile elastic modulus of HRB400E steel decreases about 3%~8% after cyclic loading with different strain amplitudes. The yield stress increases slightly with the increase of pre-cycle strain amplitude. Therefore, the hardening effect based on the strength-yield stress ratio will weaken with the increase of the pre-cycle strain amplitude. Compared with uniaxial tension, there were no significant change in tensile ultimate strength and fracture strain of the tensile after cyclic loading, and the plastic deformation ability does not decrease obviously with the typical plastic shear fracture mode. The fibrous zone and shear lip zone in the tensile fracture surfaces appear near the external surface and internal surface of thin-walled tubular specimens and the propagation zone grows in the center of the fracture surface, in which there are many small dimples around the big dimple.

Keywords: pre-cycle; HRB400E steel; hardening behavior; hysteretic curve; plastic work; fracture surface