

HRB400Ⅲ级抗震钢筋单轴棘轮行为研究

段 恒¹ 姚 激¹ 付 磊² 黄 坤¹ 罗云蓉² 谢文玲²

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650000; 2. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要: 在室温下研究了 HRB400Ⅲ级抗震钢筋在非对称循环加载下的棘轮行为, 分析了应力幅、平均应力和应力速率对材料棘轮行为的影响。结果表明: 棘轮应变会随着应力幅或者平均应力的增加而增加; 在低应力幅下, 晶内背应力会阻碍棘轮应变的积累; 棘轮应变随着应力速率的增加而相应增加; 然而, 高应力速率下, 材料的疲劳寿命会增加。在非对称循环加载中, 应变能密度会随着应力幅和平均应力的增加而增加; 材料在循环载荷下表现出明显的循环硬化特征。

关键词: 抗震钢筋; HRB400; 非对称加载; 棘轮行为; 疲劳

中图分类号: TU51 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)03-0112-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Methodological System to Describe Uniaxial Ratcheting Behavior of HRB400Ⅲ Aseismic Reinforced Bars

Duan Heng¹, Yao Ji¹, Fu Lei², Huang Kun¹, Luo Yunrong², Xie Wenlin²

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, Yunnan, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sichuan Light Chemical University, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: An experimental study was carried out on the cyclic ratcheting of HRB400Ⅲ aseismic reinforced bars subjected to asymmetric cyclic loading at room temperature. The effects of stress amplitude, mean stress and stress rate on HRB400Ⅲ aseismic reinforced bars were investigated completely. The experimental results indicated that increase of either stress amplitude or mean stress increased the ratcheting strain accumulated in the material. Under low stress amplitude, the intragranular back stress would hinder the accumulation of ratchet strain, meanwhile, ratcheting strain increased with the increase of stress rate. However, at high stress rate, the fatigue life of the material increased. During asymmetric cyclic loading, the strain energy density increased with the increase of stress amplitude and average stress. The material showed obvious cyclic hardening characteristics under cyclic loading.

Key words: aseismic reinforced bars, HRB400, asymmetric loading, ratcheting, fatigue

0 引言

地球上每年都有大量的地震发生, 给人类的生

命和财产造成了巨大损失。为了降低地震带来的损失, 研究人员在建筑物抗震方面作了大量研究工作。随着建筑物抗震技术的发展及对抗震机理的深入分

收稿日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51701133、11562009), 云南省教育厅科学研究基金项目(2017ZZX135), 云南省教育厅基金项目(KKJA201506035), 昆明理工大学分析测试基金(2017M20162110014), 四川省教育厅项目(16ZB0255、18ZA0352), 桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室项目(2018QYJ03、2018QZY01)。

作者简介: 段 恒(1994—)男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事金属材料疲劳断裂研究。Email: 975188707@qq.com; 通讯作者: 姚 激(1974—)男, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 主要从事工程力学和金属材料疲劳断裂研究。Email: 105434620@qq.com。

析,消能抗震成为建筑物抗震技术的一个发展趋势^[1-2]。我国是地震多发区,并且已经进入了第五个地震周期,所以要求钢筋具有良好的综合抗震性能^[3]。建筑结构在地震载荷作用往往承受非对称循环载荷的作用,这使得建筑用钢发生大塑性变形低周疲劳破坏。因此,新修订的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)将HRB400级抗震结构钢筋列建筑结构主要用钢筋,同时将混凝土等级提高到C80级^[4-5]。其目的主要是提高建筑结构的综合抗震性能。材料在非对称应力循环载荷下,产生塑性变形循环累积现象,称为棘轮效应,目前已引起国内外学者以及工程界的广泛重视^[6-7]。在非对称循环作用下,HRB400Ⅲ级抗震钢筋在棘轮应变的累积下会提前失效。因此,为了使建筑结构在地震载荷下最大程度的不被破坏,必须考虑HRB400Ⅲ级抗震钢筋在服役过程中棘轮效应的影响。

目前,国内外众多学者研究了棘轮应变对不锈钢^[8-9]、镁合金^[10-11]等材料的疲劳性能影响,研究表明随着棘轮应变的增加,材料的疲劳寿命均降低;棘轮应变的出现使得材料的疲劳寿命下降,疲劳寿命的高低与施加的平均应力、应力幅值、峰值应力保持时间和加载步骤密切相关。除此之外,少数研究者研究了HRB400Ⅲ级抗震钢筋低周疲劳行为^[12-13],研究结果获得了在循环载荷下材料的循环应力响应特性、循环应力与应变关系,通过拟合Hollomon公式与Manson-Coffin疲劳寿命预测公式,并且通过断口扫描发现,试验钢裂纹起源于试样表面,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。然而,目前尚缺乏棘轮效应对HRB400Ⅲ级抗震钢筋的影响,因此有必要对HRB400Ⅲ级抗震钢筋的棘轮行为进行深入研究,以弥补这方面的研究不足。

1 试验

试验材料为商用HRB400Ⅲ级抗震钢筋,试样参照GB/T15248—2008低周疲劳试验标准进行加工,试样夹持端直径为22 mm,标距段有效长度为20 mm、直径为7.25 mm。其化学成分为(质量分数,%):Si 0.44、Mn 1.47、S 0.026、P 0.037、C 0.23;力学性能:弹性模量209.98 GPa、屈服强度400 MPa、强屈比 ≥ 1.25 、伸长率22%。试验设备为MTS809(100 kN)电液伺服试验机,其控制系统为TestStar控制器。应变测量下,采用标距长度为10 mm的轴向应变引伸计,控制方式为应力控制,加载

波形采用正弦波,试验在室温、大气环境下进行。除了讨论应力循环加载速率的影响,其他应力循环加载速率为200 MPa/s,循环周次设置为1 000周。根据试验方案,多次调整负载,重复测试,加载的平均应力、应力幅值、循环周次和应力速率如表1所示。其中,棘轮应变按式(1)计算。

表1 疲劳试验测试参数
Table 1 Fatigue test parameters

编号	应力幅/ MPa	平均应力/ MPa	循环周 次/周	应力速率/ (MPa·s ⁻¹)
1	30	480	1 000	200
		500	1 000	200
		520	1 000	200
2	50	480	1 000	200
		500	1 000	200
		520	1 000	200
3	70	480	1 000	200
		500	1 000	200
		520	393	200

$$\varepsilon_r = \frac{(\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})}{2} \quad (1)$$

式中 ε_r 为棘轮应变, $\varepsilon_{\max}$ 、 $\varepsilon_{\min}$ 为每一个循环周次中的应变峰值和应变谷值。棘轮应变率定义为 $d\varepsilon_r/dN$,即每一个加载循环下 ε_r 的增量。

2 结果和讨论

2.1 单轴应力循环

在非对称循环加载过程中,棘轮应变随着循环周次的增加逐渐增加。疲劳试验中产生的应力—应变滞回曲线充分揭示了这一现象。HRB400Ⅲ级抗震钢筋在平均应力和应力幅为520 MPa和70 MPa的载荷下,典型的滞回曲线如图1所示。

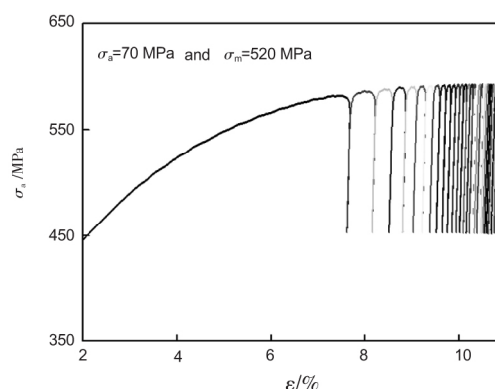


图1 应力幅和平均应力为70 MPa和520 MPa时HRB400Ⅲ级抗震钢筋的典型滞回环曲线

Fig.1 Typical hysteresis curves with stress amplitude of 70 MPa and mean stress of 520 MPa

由于加载条件是不对称的,滞回曲线初期没有闭合,未闭合的滞回曲线是造成材料棘轮现象的原因。随着循环周次的增加,滞回曲线向正向塑性应变方向移动,表明在每个循环过程中材料的应变累积增加。棘轮应变累积的程度由特定周期的最大应变和最小应变的平均值来估算^[14]。

在平均应力和应力幅为 520 MPa 和 70 MPa 载荷下,循环周次和棘轮应变如图 2 所示。从图 2 可知,棘轮应变和循环周次变化曲线可分为三个典型的阶段,即初始阶段、稳定阶段和断裂阶段,这与康国政^[6]等人对 SS304 不锈钢研究成果一致。图 2 棘轮应变演化现象类似于与材料蠕变相关状态,这一现象称为稳定棘轮效应,或者当棘轮应变累积速率趋于零时,称为非塑性的棘轮安定状态^[15]。棘轮应变在循环初期迅速增长,但棘轮应变率逐渐下降;循环到 50 周次后,棘轮应变率下降为一常数,棘轮应变稳定增长;循环到 300 周次后,棘轮应变率急剧增加,导致材料在较短的循环周次就发生断裂失效。

2.2 应力幅的影响

图 3 为平均应力为 520 MPa,不同应力幅对单轴棘轮的影响。图 3(a) 中很明显看出:平均应力为 520 MPa 时,在三种不同的应力幅下,材料都具

有相同的棘轮演化规律,棘轮应变随着应力幅的增加而增加,应力幅值对棘轮应变的影响十分显著。林^[11]等人研究表明,疲劳破坏寿命的降低是由于应力幅值的增加所引起的额外损伤造成,应力幅越高,疲劳寿命越低。图 3(b) 揭示了稳态棘轮应变速率随应力幅的增加而增加,当平均应力为 520 MPa 时,应力幅为 30、50 MPa 和 70 MPa 稳定阶段棘轮应变率为 6.16×10^{-3} 、 6.7×10^{-3} (% / cycle) 和 8.74×10^{-3} (% / cycle)。

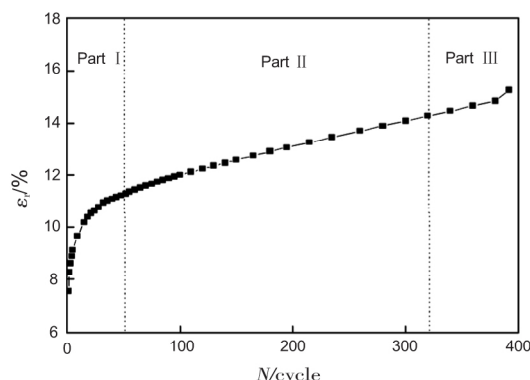


图 2 应力幅和平均应力为 70 MPa 和 520 MPa 时 HRB400III 级抗震钢筋的棘轮应变演化

Fig.2 Ratcheting strain evolution with the constant stress amplitude of 70 MPa and mean stress of 520 MPa

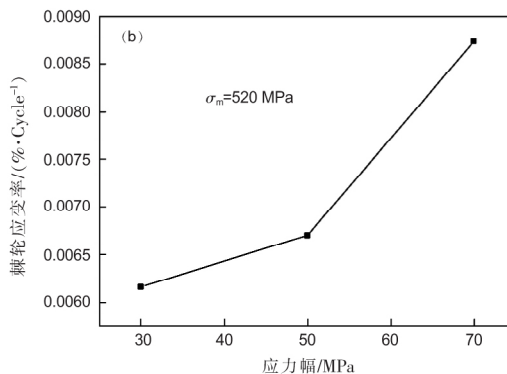
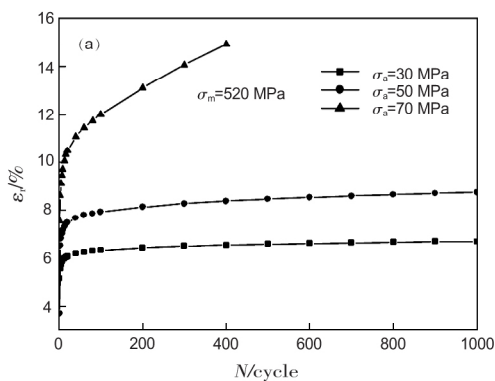


图 3 平均应力为 520 MPa (a) 应力幅对棘轮应变的影响: 棘轮应变演化曲线; (b) 棘轮应变率进化

Fig.3 The effect of stress amplitude on the ratcheting strain with the constant mean stress of 520 MPa

(a) Ratcheting strain evolution; (b) ratcheting strain rate evolution

2.3 平均应力的影响

图 4 为应力幅为 50 MPa,平均应力为 480、500、520 MPa 对棘轮应变的影响。图 4(a) 中可以看出:应力幅恒定为 50 MPa 时,随着平均应力的升高,材料累积棘轮应变越高;平均应力越低,材料积累的累积应变越低。Feaugas 等^[16]对 AISI316L 不锈钢在循环载荷研究中,描述两种背应力的演化过程。文

中的背应力定义为晶内背应力,它是由晶粒内部位错的非均质分布和晶粒间背应力引起。这种背应力状态直接影响了棘轮应变的积累,阻碍了在较低应力水平下的应变提升。图 4(b) 在不同平均应力下,初始拉升阶段三组试验的应力-应变曲线重合良好,表明材料在平均应力一致的情况下,应力-应变响应具有较好的稳定性。

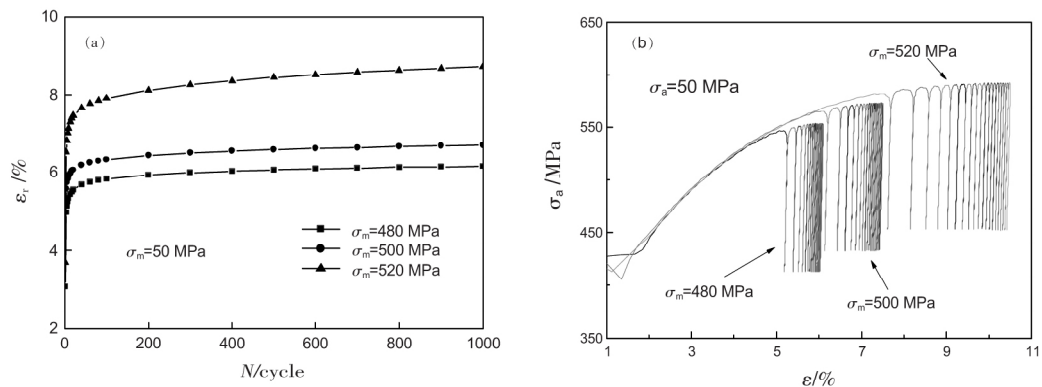


图 4 应力幅为 50 MPa ,平均应力对棘轮应变的影响: (a) 棘轮应变的演化; (b) 应力-应变曲线
Fig.4 Effect of means stress on ratcheting strain with the constant stress amplitude of 50 MPa
(a) Ratcheting strain evolution; (b) stress-strain curve

2.4 应力速率的影响

为了深入研究应力速率对单轴棘轮应变的影响,在恒定平均应力为 520 MPa ,应力幅为 70 MPa 工况下,分别进行应力速率为 500 MPa/s 和 1 000 MPa/s 的循环试验,以试件断裂为最终失效判据标准。试验方案如表 2 所示。

表 2 不同应变速率的棘轮应变测试
Table 2 Ratcheting strain test with different strain rates

应力速率/(MPa·s ⁻¹)	最终棘轮应变/%	循环周次/次
500	9.963	1 499
1 000	10.099	2 070

图 5 揭示了循环周次和棘轮应变的关系,不同加载速率下棘轮应变演化规律相同,随着循环周次的增加,棘轮应变迅速增加,之后逐渐减小;棘轮应变先迅速增加,随后趋于稳定。应力速率对棘轮应变的影响表现为应力速率的增加,棘轮应变相应增加。且应力速率越大,棘轮寿命越长。说明了 HRB400 Ⅲ 级抗震钢筋棘轮行为有明显应力速率依赖性,这与康国政^[8]对 SS304 不锈钢研究结果相似。因为应力速率越高,产生棘轮应变越小;塑性变形累积小,对疲劳损伤越小。因此,疲劳寿命随着应力速率的增加而增加。

2.5 滞回环面积

任何给定循环中,滞回环面积表示材料吸收累积损伤的能量,即应变能密度^[17]。若滞回环面积即应变能密度随着循环周次的增加而增加,则表示材料具有循环硬化特征,反之则具有循环软化特征。图 6(a) 为恒定平均应力 480 MPa 下,应力幅为 30 MPa 和 70 MPa 的循环周次-应变能密度;图 6(b)

为恒定应力幅 30 MPa 下,平均应力为 480 MPa 和 500 MPa 的循环周次-应变能密度。从图 6 可知,HRB400 Ⅲ 级抗震钢筋都具有循环硬化特征,即随着循环周次的增加,应变能密度增加。在循环初期,应变能密度急剧增加;随后趋于循环稳定,这与罗云蓉^[12]等研究结果一致。并且可以观察到:在恒定应力幅或恒定平均应力下,应变能密度都随平均应力或应力幅的增加而增加。

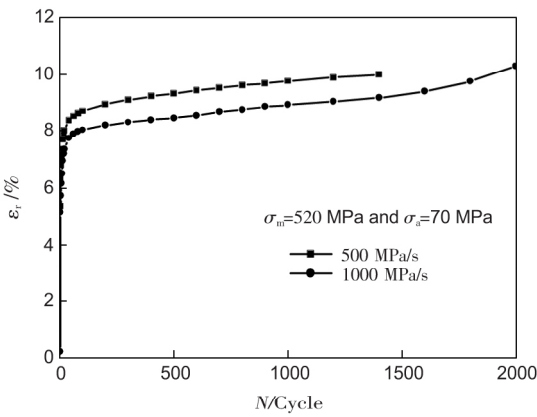


图 5 应力幅为 70 MPa ,平均应力为 520 MPa 的棘轮应变演化
Fig.5 Ratcheting strain evolution with stress amplitude of 70 MPa and mean stress of 520 MPa

3 结论

1) 对 HRB400 Ⅲ 级抗震钢筋单轴棘轮研究表明,棘轮应变分为 3 个阶段:初始阶段、稳定阶段和断裂阶段。循环加载初期,棘轮应变快速累积,棘轮应变率逐渐降低;循环加载中期,棘轮应变呈线性增长,棘轮应变率为常数;循环加载末期,棘轮应变急剧增加,棘轮应变率也相应增加。

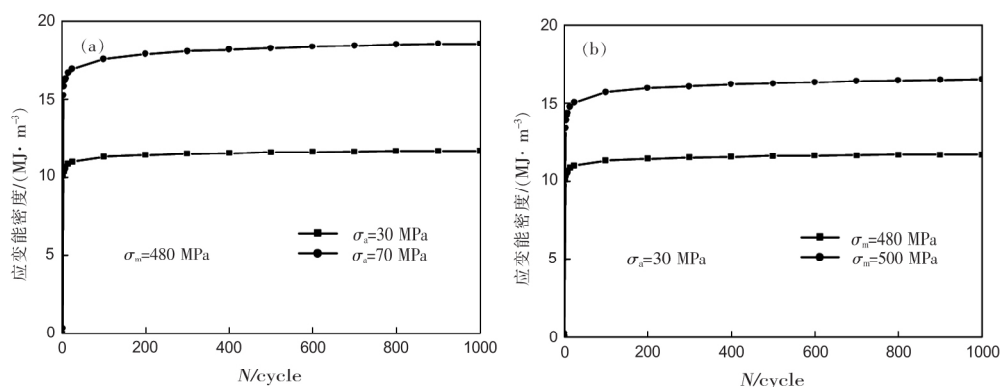


图6 应变能密度—循环周次图 (a) 恒定平均应力为 480 MPa ,应力幅为 30 MPa 和 70 MPa
(b) 恒定应力幅为 30 MPa ,平均应力为 480 MPa 和 500 MPa

Fig.6 Strain energy density—cycles: (a) at constant mean stress of 480 MPa with varying stress amplitude of 30 MPa and 70MPa; (b) at constant stress amplitude of 30 MPa with varying of stress amplitude 480 MPa and 500 MPa

2) 在恒定平均应力或应力幅下,棘轮应变随着应力幅或者平均应力的增加而增加。应力幅和平均应力越大,对材料损伤累积越大。在恒定应力幅和平均应力下,讨论了应力速率对材料棘轮行为的影响。研究表明:应变速率越大,棘轮应变越高。且应力速率越大,棘轮寿命越长。

3) 在恒定平均应力或应力幅下,应力幅或平均应力的升高会使滞回环面积增加,即应变能密度增加;滞回环面积越大,表明材料吸收的能力越多;材料在循环载荷作用下表现出明显的循环硬化特征。

这些结论对于工程设计构建提供了一些理论依据,构造棘轮寿命预测模型提供一定的试验支撑;HRB400 级抗震钢筋在设计时,必须平均应力、应力

幅和应力速率的影响。本文尚未对多轴棘轮,高温条件下的棘轮性能研究,在今后的工作中,有必要进行多轴棘轮和高温条件下的棘轮行为研究。

致谢

本文得到国家自然科学基金青年基金(51701133、11562009),云南省教育厅科学研究基金项目(2017ZZX135),云南省教育厅基金项目(KKJA201506035),昆明理工大学分析测试基金(2017M20162110014),四川省教育厅项目(16ZB0255、18ZA0352),桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室项目(2018QYJ03、2018QZY01)的资助,特此感谢!

参考文献

- [1] Song Fengming, Wen Donghui, Li Zigang. Development and application of low yield point steel [J]. Hot Working Technology, 2008 (6): 90-93.
(宋凤明, 温东辉, 李自刚. 低屈服点钢的发展及应用 [J]. 热加工工艺, 2008(6): 90-93.)
- [2] Ni Zhijun, Liu Xiaorong, Wen Donghui. Production and application of low yield steel thick plate for building seismic resistance [J]. Engineering Seismic Resistance and Reinforcement, 2009(6): 132-137.
(倪志军, 刘孝荣, 温东辉. 建筑抗震用低屈服点钢厚板的生产和应用 [J]. 工程抗震与加固改造, 2009(6): 132-137.)
- [3] Qin Bin, Sheng Guangmin, Gong Shihong. The comprehensive performance of HRB400 seismic reinforcement [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006(5): 37-41.
(秦斌, 盛光敏, 龚士弘. HRB400 抗震钢筋的综合性能 [J]. 钢铁研究学报, 2006(5): 37-41.)
- [4] Wang Quanfeng, Liu Lianglin, Shen Zhangchun. Damage assessment of reinforced concrete columns of HRB400 [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009(2): 175-180.
(王全凤, 刘良林, 沈章春. HRB400 级钢筋混凝土柱损伤的评价 [J]. 地震工程与工程振动, 2009(2): 175-180.)
- [5] Han Yan, Zhou Ali. Analysis on seismic performance of HRB400 high strength reinforced concrete pier [J]. Industrial Buildings, 2019(1): 1-5.

- 2012(10) : 63-67.
(韩艳 ,周阿礼.HRB400 级高强钢筋混凝土墩柱抗震性能分析[J].工业建筑 2012(10) : 63-67.)
- [6] Kang Guozheng ,Gao Qin ,Cai Lixun.Experimental study on temperature effect of cyclic deformation behavior of SS304 stainless steel[J].Materials Engineering 2003(10) : 34-36.
(康国政 ,高庆 蔡力勋.SS304 不锈钢循环变形行为温度效应的实验研究[J].材料工程 2003(10) : 34-36.)
- [7] Kang Guozheng ,Gao Qin ,Yang Xianjie.Experimental study on room temperature and high temperature uniaxial cyclic plasticity of 304 stainless steel[J].Acta Mechanica Sinica 2001(5) : 692-697.
(康国政 ,高庆 杨显杰.304 不锈钢室温和高温单轴循环塑性的实验研究[J].力学学报 2001(5) : 692-697.)
- [8] Kang G Z ,Kan Q ,Zhang H.Time-dependent ratcheting experiments of SS304 stainless steel[J].International Journal of Plasticity 2006 22(5) : 858 -894.
- [9] kan Q H ,Kang G Z ,Zhang J.Uniaxial time-dependent ratchetting: Visco-plastic model and finite element application[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2007 47(2) : 133-144.
- [10] Lin Y ,Liu C ,Chen Zhenghua *et al.*Stress-based fatigue life prediction models for AZ31B magnesium alloy under single-step and multi-step asymmetric stress-controlled cyclic loadings[J].Computational Materials Science 2013 73: 128-138.
- [11] Lin Y ,Liu C ,Chen Zhenghua *et al.*Uniaxial ratcheting and fatigue failure behavior-s of hot-rolled AZ31B magnesium alloy under asymmetrical cyclic stress-controlled loadings[J].Materials Science & Engineering A 2013 573: 234-244.
- [12] Luo Yunrong ,Wang Qinyuan ,Yu Qiang.HRB400 Ⅲ aseismic reinforcement of low cycle fatigue properties[J].Journal of Iron and Steel Research 2015 (6) : 38-42.
(罗云蓉 ,王清远 ,于强.HRB400 Ⅲ级抗震钢筋的低周疲劳性能[J].钢铁研究学报 2015(6) : 38-42.)
- [13] Zhan Suyu ,Sheng Guangmin ,Liu Xudong *et al.*Research on high strain and low cycle fatigue performance of HRB400E seismic reinforcement for building[J].Hot Working Technology 2010(16) : 29-33.
(詹苏宇 盛光敏 刘旭东 等.HRB400E 建筑用抗震钢筋高应变低周疲劳性能研究[J].热加工工艺 2010(16) : 29-33.)
- [14] Kang Guozheng.Experimental study on uniaxial and multiaxial strain cyclic characteristics and ratcheting of 316L stainless steel [J].Journal of Materials Science and Technology 2001(2) : 219-223.
- [15] Kreethi R ,Verma Preeti ,Dutta Krishna.Influence of heat treatment on ratcheting fati-gue behavior and post ratcheting tensile properties of commercial aluminum[J].Trans Indian Inst Met 2015 68(2) : 229-237.
- [16] Feaugas X ,Gaudin C.Ratcheting process in the stainless steel AISI 316L at 300K: an experimental investigation[J].International Journal of Plasticity 2004 20: 643-662.
- [17] Fu Lei ,Wang Qinyuan ,Luo Yunrong *et al.*Effect of pre-torsion strain on ultra-low cycle fatigue performance of Q345R steel [J].Engineering Science and Technology 2008 50(5) : 1-7.
(付磊 王清远 罗云蓉 等.扭转预应变对 Q345R 钢超低周疲劳性能影响研究[J].工程科学与技术 2018 50(5) : 1-7.)

编辑 杨冬梅

(上接第 111 页)

- [2] Gao Huilin.Design and research progress of pipeline steel alloy [J].Welded Pipe 2009 32 (11) : 5-12.
(高惠临.管线钢合金设计及其研究进展[J].焊管 2009 32(11) : 5-12.)
- [3] Gao Huilin.Pipeline steel-welding behavior of microstructure and properties [M].Xi'an: Shanxi Science and Technology Press ,1995.
(高惠临.管线钢—组织 性能 焊接行为 [M].西安: 陕西科学技术出版社 ,1995.)
- [4] Liu Guoquan ,Li Wenqing ,Hu Yongyi.The saturation of nucleation sites at the early stage of subcooled austenite decomposition of low carbon boron steel[J].Acta Metallurgica Sinica ,1991 27(2) : 79-85.
(刘国权 ,李文卿 胡永沂.低碳硼钢过冷奥氏体分解早期 α 形核位置饱和现象[J].金属学报 ,1991 27 (2) : 79-85.)
- [5] Wang Lijun ,Li Faxing ,Zhang Junping *et al.*Measures for improving metallurgical quality of boron-bearing steel produced by EAF process [J].China Metallurgy 2011 21(3) : 24-27.
(王立君 ,李法兴 张君平 等.提高电炉流程生产含硼钢冶金质量的措施[J].中国冶金 2011 21(3) : 24-27.)

编辑 杨冬梅