

316 不锈钢拉伸过程微观结构演化研究

孙伶俐,何声馨,刘坤坤,张二亮

(郑州大学机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要: 研究 316 不锈钢在 10^{-3} s^{-1} 应变率下的拉伸硬化特性及拉伸过程中的微观结构演化。对 316 不锈钢进行机械研磨、抛光、化学腐蚀,然后对处理好的样品进行拉伸试验,并通过扫描电子显微镜(SEM)、VHX-2000 超景深显微系统(OM)、原子力显微镜(AFM),分析 316 不锈钢在拉伸变形过程的微观组织和滑移带变化。结果表明: 316 不锈钢的屈服强度 $R_{p0.2} = 319 \text{ MPa}$,抗拉强度 $R_m = 871 \text{ MPa}$,试验结束后,样品伸长率 $\delta = 41\%$,样品表面有明显的起伏不平;随着拉伸变形量的增大,晶粒沿拉伸方向显著增长;在拉伸过程中,滑移带逐渐增多,滑移带高度和数量随着拉伸而增长;拉伸后期,出现晶粒转动和多滑移现象,导致样品表面明显凹凸不平,粗糙度明显增大。

关键词: 316 不锈钢; 拉伸; 微观组织; 滑移带

中图分类号: TF76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2018) 04-0142-04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2018.04.024

开放科学(资源服务) 标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Microstructure Evolution of 316 Stainless Steel During Tensile Process

Sun Lingli, Ho Hsinshen, Liu Kunkun, Zhang Erliang

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: To investigate the microstructure evolution of 316 stainless steel during the slow strain tensile test, strain control is adopted and the strain rate is 10^{-3} s^{-1} . The specimens are mechanically polished, then chemically etched, and the tensile test is carried out. The microstructure is investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM), Atomic Force Microscope (AFM) and Ultra deep field 3D Microscope. The yield strength and tensile strength of 316 stainless steel are 319 MPa, 871 MPa, respectively. And the total elongation of the sample is 41%. The surface of the sample has obvious unevenness. SEM observation shows that the grain elongates remarkably along the tensile direction as the tensile deformation increases. During the tensile process, the slip band increases gradually, and the slip band height and number increase with the stretching. In the later stage of tensile test, grain rotates and multi slips appear, which leads to the obvious roughness on the surface of sample.

Key words: 316 stainless steel, tensile test, microstructure, slip band

0 引言

不锈钢是一种高合金材料,主要特征是不生锈和耐腐蚀。自 20 世纪初问世,距今已有 100 多年历史。目前,不锈钢种类繁多、性能各异,根据其晶体

结构和显微特征的不同,主要可分为五大类:铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢以及沉淀硬化不锈钢。316 不锈钢是典型的奥氏体不锈钢,在高温和常温下均为面心立方晶体结构。316 奥氏体不锈钢在一般铬镍奥氏体不锈钢的基础

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(No.51650110502); 河南省高等学校重点科研项目(17A460025)。

作者简介: 孙伶俐(1991—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为抗疲劳制造技术。E-mail: 2197783629@qq.com。

上添加了约 4% 的钼,因此其在海洋性大气和溶液中的耐腐蚀性有很大提高,在含 Cl 离子的液体介质中,316 不锈钢的耐应力腐蚀范围 304 不锈钢有很大提高,同时钼元素的加入也使 316 不锈钢的室温强度得到增加^[1]; 316 不锈钢还具有耐高温性,其耐热温度达 1 200~1 300 ℃; 优异的耐腐蚀、耐热及良好的可加工性能等优点,使 316 不锈钢广泛应用于车辆结构、海洋防腐、军工及航空航天等领域^[1-3]。

近几年来,国内外学者对不锈钢进行了很多研究。王振华^[4]等人分别对弧形不锈钢试样和管段不锈钢试样进行拉伸试验,结果表明管段试样的拉伸率大于弧形试样。汪志福^[5]等人研究应变速率对 304 不锈钢应变硬化的影响,结果表明应变速率对 304 不锈钢应变硬化能力有一定的敏感性,但是在静态下,其对材料应变硬化能力影响甚微。Mcqueen^[6]等人研究 316LN 奥氏体不锈钢在热变形时的动态再结晶现象,结果表明动态回复、再结晶都可以使金属变软,进而提高金属的塑性。但是到目前为止,关于 316 不锈钢拉伸过程的微观结构、滑移带的演化及其与拉伸性能的关系研究较少。

笔者以 316 奥氏体不锈钢为研究对象,在常温下以特定的应变速率 10^{-3} s^{-1} 进行拉伸试验,得到 316 不锈钢的拉伸性能,并对拉伸过程的微观结构、滑移带的变化进行观察分析,研究拉伸过程中微观结构演化、滑移带变化与不锈钢拉伸性能的关系,为 316 不锈钢的应用与开发提供基础试验数据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料为 316 奥氏体不锈钢薄板,厚度为 2 mm,具体化学成分(质量分数,%)为: C 0.081, Si 0.52, Mn 0.001, P 0.028, Cr 16.51, Ni 10.16, Cu 0.069 4, N 0.05, Mo 2.05, Fe 其余。

1.2 试验过程

首先在 MTS-370.02 1.5 t 轴向液压疲劳试验机上进行拉伸试验,得到 316 不锈钢的拉伸曲线。试验采用应变控制,引伸计标距为 25 mm,加载应变速率为 10^{-3} s^{-1} 且保持不变,直至试样断裂。为观测拉伸过程的微观结构,试样要用 180#、320#、800#、1 200#、2 000#、3 000# 等金相砂纸机械研磨并用金刚石研磨膏抛光,然后超声清洗 3~5 min,再进行化学腐蚀,腐蚀液为 37.5% 的盐酸溶液和 65% 的硝酸溶液按体积比 2:1 混合,腐蚀时间约 1 min,并用酒精将多余

的腐蚀液冲洗干净,吹干;采用相同的应变速率在 MTS 液压试验机对样品进行拉伸。拉伸试样参照国标 GB/T 228—2002 设计,采用线切割加工,具体尺寸如图 1 所示。

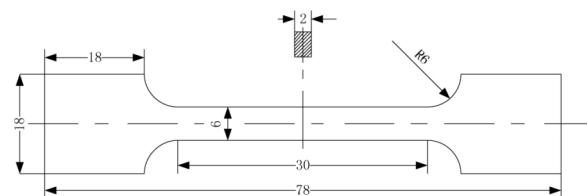


图 1 拉伸试样尺寸示意 (mm)

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen dimension (mm)

1.3 结果测量

对拉伸过程中(应变量分别为 0, 10%, 25%, 45%) 的样品,用 VHX-2000 型超景深显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)观测微观结构,主要分析其整体微观变形及晶粒变形统计;用原子力显微镜(AFM)观测其滑移带变化,分析其形貌参数的变化。所测表面形貌参数如下: S_a 是基于区域形貌的粗糙度参数,指区域形貌的算术平均高度; S_q 是指表面微凸体高度的标准差(均方根高度); S_{ku} 反映的是表面微凸体的峰度,即微凸体峰部的尖度; S_p 是指最大峰值高度。这些参数用以表明表面偏差的垂直特性,是表征表面形貌的重要参数^[8]。

2 结果与讨论

2.1 316 不锈钢的力学性能

金属材料在拉伸试验中都会产生屈服现象,这也是开始发生塑性变形的标志^[9]。对于钢铁材料,其工程应力—应变曲线一般有三种:连续过渡型、均匀屈服型和非均匀屈服型^[9],规定应变量达到 0.2% 时对应的应力为屈服强度,抗拉强度是指在静拉伸条件下的最大承载能力^[9-11]。屈强比是指屈服强度和抗拉强度的比值,屈强比越大,则材料越脆。

在应变速率 10^{-3} s^{-1} 下,316 不锈钢的工程应力—应变曲线和真实应力—应变曲线如图 2 所示,基本拉伸性能为:屈服强度 $R_{p0.2} = 319 \text{ MPa}$,抗拉强度 $R_m = 871 \text{ MPa}$,样品伸长率 $\delta = 41\%$,断面收缩率 $\psi = 50\%$ 。从图 2 可以看出,316 不锈钢在单轴拉伸时表现为连续屈服,无明显屈服平台出现。通过计算

可得 316 不锈钢的屈强比为 0.37,此数值较低,表明 316 不锈钢的塑性非常好。

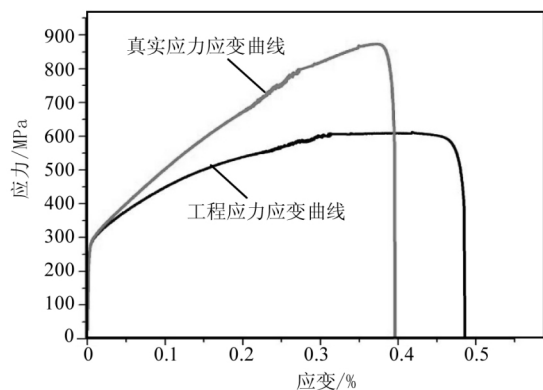
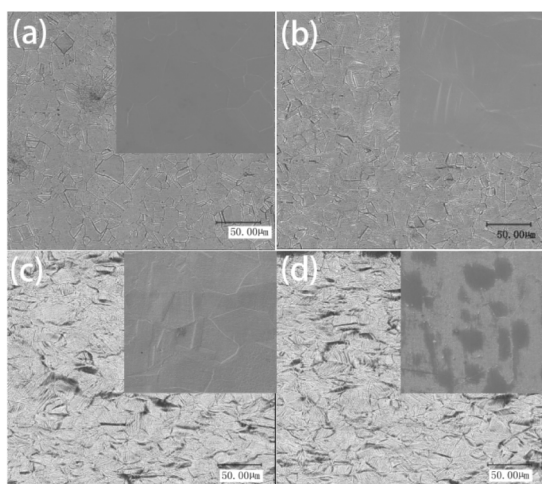


图2 316 不锈钢工程应力—应变和真实应力—应变
Fig.2 Engineer stress-strain and true stress-strain of 316 stainless steel

2.2 316 不锈钢拉伸过程的微观结构

根据应力应变曲线的特征(图2),将拉伸变形过程分为四个阶段,即应变率 ε 分别为 0, 10%, 25%, 45% 时。图3 分别是各阶段的扫描电镜和超景深显微镜下的微观结构。



(a) $\varepsilon=0$; (b) $\varepsilon=10\%$; (c) $\varepsilon=25\%$; (d) $\varepsilon=45\%$

图3 不同拉伸阶段的显微结构

Fig.3 Micrograph of sample at different tensile stages

由图3可以直观地看出,和拉伸前比较,应变达到 10%、25%、45% 时显微组织有非常明显的变化。拉伸试验前,316 不锈钢是均匀的奥氏体组织,晶粒近似于圆形,平均晶粒尺寸约为 $15\ \mu\text{m}$ 。应变达到 10% 的时候,可以看到较浅的滑移带,晶粒开始沿拉伸方向延长,并出现轻微转动。随着拉伸的进行,应

变达到 25% 时,晶粒在拉伸方向明显伸长,滑移带变深晶粒转动明显,在晶界处出现微小开裂,样品表面变粗糙。拉伸应变达到 45% 时,晶粒由近似圆形变成细长形状,晶粒内部出现多向滑移,样品伸长约 18 mm,表面可明显看到粗糙不平,在晶界处、晶粒内部及滑移带处均出现裂纹。根据超景深显微图统计不同阶段的晶粒尺寸,每个阶段各统计 16 张显微图,平均约 300 个晶粒。图4 是根据显微图对晶粒大小进行统计的结果,结果表明拉伸应变达到 25% 时,晶粒尺寸约为 $25\ \mu\text{m}$; 达到 45% 时,晶粒尺寸基本达到 $40\ \mu\text{m}$ 。

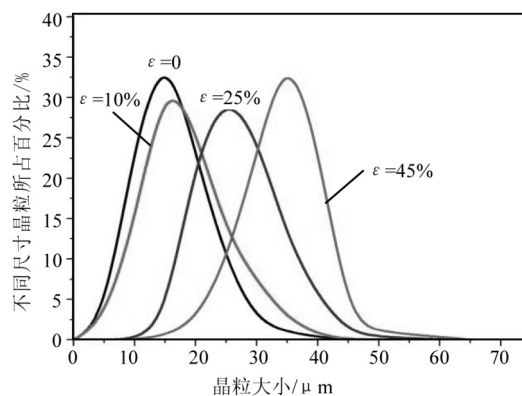
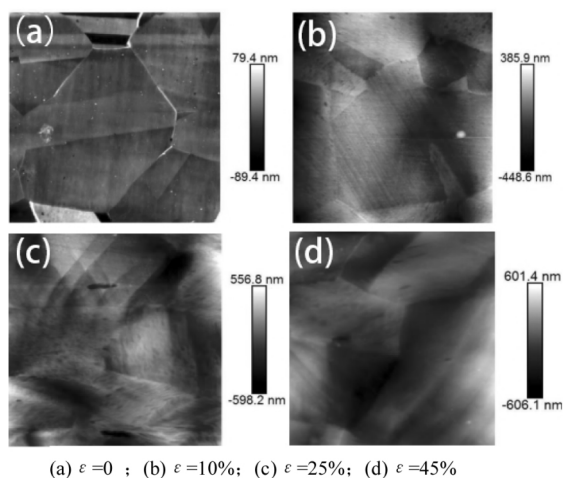


图4 不同拉伸阶段下的晶粒大小统计

Fig.4 Grain size distribution of sample at different tensile stages

2.3 316 不锈钢拉伸过程的滑移带变化

原子力显微镜是通过检测样品表面和微型力敏感元件之间的原子相互作用力来研究材料的表面结果,得到的是原始三维表面图。图5 是原子力显微镜(AFM)下的晶粒形貌,随着拉伸变形量的增加,晶粒内部滑移带越来越多,滑移带高度也逐渐变大,这导致晶粒内粗糙度越来越大;另一方面,随着拉伸的进行,晶粒除了沿拉伸方向增长,也发生了转动,导致多滑移的产生,使样品表面产生较大起伏,样品表面变粗糙。表1 是不同拉伸阶段的形貌参数,由表1 可以看出,随着拉伸的进行, S_a 、 S_q 、 S_p 都呈增大趋势,这是因为在拉伸过程中,滑移带数量逐渐增多,滑移带高度变大,晶粒转动剧烈,导致这些表面形貌参数增大,即表面变得粗糙; S_{ku} 在前三个阶段增大,后减小,因为随着拉伸的进行,滑移带增高,尖度变大, d 点处已处于颈缩阶段,并出现小裂纹,滑移带内的位错结构不能容纳进一步的塑性变形,滑移带开裂,导致 S_{ku} 减小。



(a) $\varepsilon=0$; (b) $\varepsilon=10\%$; (c) $\varepsilon=25\%$; (d) $\varepsilon=45\%$

图 5 不同拉伸阶段的滑移带变化

Fig.5 Slip band variation at different tensile stages

表 1 不同拉伸阶段的形貌参数变化
Table 1 Morphological parameters at different tensile stages

应变率 $\varepsilon/\%$	形貌参数/ μm			
	S_a	S_q	S_{ku}	S_p
0	0.005 06	0.007 36	0.001 7	0.172
10	0.026 8	0.034 7	0.004 04	0.337
25	0.093 4	0.127	0.005 13	0.759
45	0.109	0.135	0.002 72	0.956

参考文献

- [1] Chen Shiyong. Introduction to stainless steel [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 95–96.
(陈世英. 不锈钢概论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 95–96.)
- [2] Liu Guimin, Ma Lili. Study on the mechanical properties and microstructures of a type 316 austenitic stainless steel annealed in air and vacuum [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 139–142.
(刘贵民, 马丽丽. 在空气和真空中退火的 316 奥氏体不锈钢的力学性能及微观结构分析 [J]. 机械强度, 2007, 29(1): 139–142.)
- [3] Wang Zhenhua, Tian Ye, Zhang Long. Tensile test and study on the mechanical properties of stainless steel tubes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012(2): 56–59.
(王振华, 田野, 张龙. 不锈钢管拉伸性能的力学试验 [J]. 塑性工程学报, 2012(2): 56–59.)
- [4] Wang Zhifu, Kong Weihai. Effect of strain rate on 304 austenitic stainless steel strain hardening behavior [J]. Pressure Vessel Technology, 2015(7): 6–11.
(汪志福, 孔韦海. 应变速率对 304 奥氏体不锈钢应变硬化行为的影响 [J]. 压力容器, 2015(7): 6–11.)
- [5] Mcqueen H J, Yue S, Ryan N D, et al. Hot working characteristics of steels in austenitic state [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995(53): 293–310.
- [6] Wang Y, Meletis E I, Huang H. Quantitative study of surface roughness evolution during low-cycle fatigue of 316L stainless steel using scanning whitelight interferometric (SWLI) microscopy [J]. Int. J. Fatigue, 2013(48): 280–288.
- [7] Qiu Conghuai, Shen Yongfeng. Tensile properties and microstructure characterization of a Fe–20Mn–0.6C [D]. Shenyang: North-eastern University, 2012.
(邱从怀, 申勇峰. Fe–20Mn–0.6C TRIP/TWIP 钢拉伸性能及微观结构表征 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.)
- [8] Yang Ruicheng, Xia Yuan, Hu Tianlei, et al. Tensile strain hardening behavior of several kinds of stainless steels [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011(1): 5–8.

3 结论

1) 316 不锈钢以应变速率 10^{-3} s^{-1} 拉伸时, 没有明显的屈服平台, 基本拉伸性能为: 屈服强度 $R_{p0.2} = 319 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $R_m = 871 \text{ MPa}$, 样品伸长率 $\delta = 41\%$, 断面收缩率 $\psi = 50\%$, 屈强比为 0.37, 具有很高的强度和优良的塑性。

2) 316 奥氏体不锈钢基体材料的晶粒基本呈圆形, 平均晶粒大小为 $15 \mu\text{m}$; 拉伸过程中, 其晶粒沿拉伸方向增长, 最终呈扁长状; 拉伸后期, 晶粒出现转动, 这会导致材料表面凹凸不平, 增大材料的表面粗糙度。

3) 拉伸过程中, 晶粒内部出现滑移带, 随着拉伸变形量的增加, 滑移带逐渐增多, 拉伸后期出现的晶粒转动也导致了多滑移的发生, 这也加剧了材料表面的不平整性。

4) 研究了 316 奥氏体不锈钢在单一应变速率下的拉伸过程, 对于其他拉伸速率下的性能仍需进一步研究比较; 对于不同拉伸速率对晶粒转动角度、粗糙度变化快慢等微观组织变化的影响也需要探索研究, 以便进一步理解 316 奥氏体不锈钢的拉伸变形机制。

参考文献

- [1] Kang Y L, Yu H, Fu J, *et al.* Morphology and precipitation kinetics of AlN in hot strip of low carbon steel produced by compact strip production [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 35(1A): 265–271.
- [2] Funakawa Y, Shiozaki T, Tomita K, *et al.* Development of high strength hot-rolled sheet steel consisting of ferrite and nanometer-sized carbides [J]. *ISIJ International*, 2004, 44(11): 1945–1951.
- [3] Kang Yonglin, Fu Jie, Mao Xinping. Comprehensive control theory on microstructure and properties of steel products of thin slab casting and rolling and its application [J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(7): 41–45.
(康永林, 傅杰, 毛新平. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能综合控制理论及应用 [J]. *钢铁*, 2005, 40(7): 41–45.)
- [4] Huo Xiangdong, Hou Liang, Li Liejun, *et al.* Recrystallization of titanium micro-alloyed high strength steel [J]. *Iron and Steel*, 2017, 38(4): 119–125.
(霍向东, 侯亮, 李烈军, 等. 钛微合金化高强钢的再结晶规律 [J]. *钢铁*, 2017, 38(4): 119–125.)
- [5] Zhang L S, Zhang X F, Wang B, *et al.* Numerical analysis of the influences of operational parameters on the braking effect of EMBR in a CSP funnel-type mold [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(1): 295–306.
- [6] Park J K, Samarasekera I V, Thomas B G, *et al.* Thermal and mechanical behavior of copper molds during thin-slab casting (II): Mold crack formation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, 33(3): 437–449.
- [7] Mao Xinping, Huo Xiangdong, Sun Xinjun, *et al.* Study on the Ti micro-alloyed ultra-high strength steel produced by thin slab casting and direct rolling (Invited Report) [C] // *Proceedings of the 2009 International Symposium on Thin Slab Casting and Rolling*, Nanjing, China, 2009: 354–363.
- [8] Mao Xinping, Gao Jixiang, Xie Liqun. Development of VN micro-alloying ultra-fine grain high strength steel produced by thin slab casting and rolling [C] // *Proceedings of 2009 International Symposium on Automobile Steel*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 178–184.
- [9] Lu Z, Cai K, Zhang J. Principles in cast rolling with liquid core of thin slab continuous casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001, 32(3): 459–464.
- [10] Gan Yong. Processing technologies of thin slab casting and rolling producing [J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(8): 24–39.
(干勇. 薄板坯连铸连轧生产技术若干问题 [J]. *钢铁*, 2004, 39(8): 24–39.)
- [11] Zhang H, Zhao L, Tao H B, *et al.* Numerical simulation on fluid flow and heat transfer behaviors in mould of CSP thin slab caster [J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(5): 24–28.
(张慧, 赵连刚, 陶红标, 等. 薄板坯连铸结晶器内流动传热行为的研究 [J]. *钢铁*, 2006, 41(5): 24–28.)
- [12] Kromhout J A, Kawamoto M, Hanao M, *et al.* Development of mould flux for high speed thin slab casting [J]. *Steel Research International*, 2009, 80(8): 575–581.

编辑 杨冬梅

(上接第145页)

(杨芮城, 夏渊, 胡天累, 等. 几种不锈钢的拉伸应变硬化行为 [J]. *兰州理工大学学报*, 2011(1): 5–8.)

- [9] Subhasis Sinha, Jerzy A Szpunar, Kiran Kumar N A P. Tensile deformation of 316L austenitic stainless steel using in-situ electron backscatter diffraction and crystal plasticity simulations [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015(637): 48–55.
- [10] Sun Shicheng. Microstructure and mechanical properties of high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel [D]. Jilin: Jilin University, 2014.
(孙世成. 高氮无镍奥氏体不锈钢微观结构和力学性能研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.)
- [11] Ye Liyan, Li Xifeng, Chen Jun. Influence of tensile strain rates on mechanical properties of 304 austenitic stainless steel at room temperature [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013(2): 89–93.
(叶丽燕, 李细峰, 陈军. 不同拉伸速率对 SUS304 不锈钢室温拉伸力学性能的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2013(2): 89–93.)

编辑 杨冬梅