

具有梯度结构表层 301 不锈钢的压缩性能

史子木, 姜 萍, 谢季佳, 武晓雷

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 利用表面机械研磨处理技术, 在 301 奥氏体不锈钢中得到晶粒尺度呈梯度分布的变形表层, 进行了压缩试验和微观组织观察。结果表明, 变形表层中晶粒可细化至 100 nm。相比原始态的屈服强度 236 MPa, 具有变形梯度表层后屈服强度增加到 436 MPa, 变形后的加工硬化指数为 0.31, 经 400 和 700 的退火后分别增加到 0.32 和 0.35。另外, 随着应变速率的增加, 流变应力增大而加工硬化能力降低。

关键词: 301 不锈钢; 梯度材料; 应变硬化; 应变速率敏感; 表面机械研磨处理

中图分类号: TG113.25; TG142.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2008)08-0061-03

Compressive properties of A ISI 301 stainless steel with gradient structure near surface layer

SHI Zi-mu, JIANG Ping, XIE Ji-jia, WU Xiao-lei

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The gradient nanostructured layer was synthesized on the surface of the 301 stainless steel by means of the surface mechanical attrition treatment (SMAT). The compression tests together with microstructural characterization were conducted. The results show that the grain size is refined to about 100 nm in the deformed layer. The microstructure with the gradient layer increases its yield strength to 436 MPa, as compared 236 MPa of original state. The strain hardening exponent after deformation increases from 0.31 to 0.32 and 0.35, respectively, after annealing at 400 and 700. Furthermore, the flow stress increases with strain rate increasing while strain hardening decreases.

Key words: 301 stainless steel; gradient material; strain hardening; strain rate sensitivity; surface mechanical attrition treatment (SMAT)

通过强烈塑性变形可细化晶粒, 得到纳米/超细晶组织结构, 提高材料的屈服强度^[1-2], 但使其拉伸伸长率明显下降^[1,3], 变形态组织较低的加工硬化能力和非均匀变形导致的塑性失稳是其低拉伸伸长率的主要原因。近期的文献提出了几种通过提高纳米材料加工硬化能力稳定变形的办法^[4-5], 包括在纳米组织中引入微米晶的双重晶粒模型 (bimodal) 以及提高应变速率敏感性。作者利用表面机械研磨处理 (SMAT) 技术, 在 301 不锈钢中得到晶粒尺寸呈梯度分布的变形表层, 对变形态和退火态组织进行压缩性能测试, 研究了屈服强度、加工硬化和应变速率敏感性。

1 试验材料及方法

试验材料为 301 不锈钢, 主要化学成分 (质量分数, %) 为 17.0Cr, 7.5Ni, 1.5Al, 1.0Mn, 1.0Si, 0.09C,

0.04P, 0.03S, 余量 Fe。试样为 $\phi 2$ mm $\times 50$ mm 小圆棒。表面机械研磨处理振动频率 20 kHz, 时间 5 min, 过程中试棒匀速转动, 表面各部位受力变形均匀。取部分表层样品做透射电镜试验。圆棒线切割为 $\phi 2$ mm $\times 3$ mm 的圆柱压缩样, 部分样品做真空退火热处理, 温度分别为 400、500、600 和 700, 时间为 5 min。用 MTS810 液压伺服材料试验机做压缩试验, 每种状态采用 5 个应变速率: 分别为 2×10^{-2} 、 6×10^{-2} 、 6×10^{-3} 、 2×10^{-3} 、 6×10^{-4} 、 2×10^{-4} s⁻¹, 每组重复 3 次, 取平均值。

2 试验结果

图 1 为表面微观组织的 TEM 照片。由图 1 可以看出, 表层组织为等轴状纳米晶, 晶粒尺度在 100 nm 左右。

图 2a 为对不同状态的 301 不锈钢进行压缩试验时测试的真应力-应变曲线, 应变速率为 2×10^{-4} s⁻¹, 从下至上分别对应 301 不锈钢原始态、400、700 退火态以及 SMAT 变形态。可以看出, 原始态组织的屈服强度为 236 MPa, SMAT 后增加到 436 MPa, 增加了

作者简介: 史子木 (1982—), 男, 浙江温州人, 硕士, 主要从事纳米结构组织强化研究。联系电话: 13810090966 Email: winson531@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (50571110, 10721202)

收稿日期: 2008-06-17

85%。退火态的屈服强度按温度升高降低,从 400 屈服 399 MPa 下降到 700 的 356 MPa。随退火温度升高屈服强度呈线性下降。

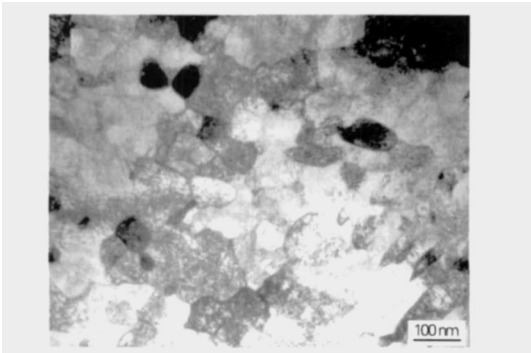


图 1 变形表层微观组织透射电镜图
Fig 1 TEM image of the deformed layer
由公式 (1) 确定材料加工硬化指数 $n^{[6]}$,

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (1)$$

其中 σ 为流变应力, ϵ 为应变, K 是材料强化因子。

原始态的加工硬化指数 n 最大, 为 0.44, 而变形态 n 最小, 为 0.31。经退火后, 硬化指数升高, 从 400 的 0.32 到 700 的 0.35。原始材料未经过加工变形, 硬化率最高, 变形态试样表层晶粒细小, 不如粗晶那样有效储存位错增加后续位错运动的障碍^[7], 并且变形晶粒内部的位错密度接近饱和, 不能产生更多的位错, 外加应变只能使得晶粒转动。退火处理能够回复晶粒尺寸以及降低位错密度, 使材料

重新获得强化能力。退火温度越高越有助于晶粒回复和位错浓度降低, 应变强化能力也越高, 均符合试验现象。

图 2b 为试验材料加工硬化指数随着应变速率的变化曲线, 即 n 值随 $\dot{\epsilon}$ 变化。原始态、变形态和退火态样品随着应变速率增加, 加工硬化指数降低, 说明应变速率对屈服强度的影响比对流变应力的影响大。这结果和 304 不锈钢相似^[9], 原因在于较高的应变速率导致位错运动的减少同样降低了加工硬化率。

由公式 (2) 确定应变速率敏感系数 $m^{[5,8]}$

$$m = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{\sigma, T} = \frac{\log \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}{\log \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)} \quad (2)$$

其中 σ 为流变应力, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, 通常 m 值随着晶粒尺度下降而增高^[9-10]。

选取图 2a 中 $\epsilon = 10\%$, 测得原始态、变形态和退火态 m 值相似, 在 0.012 ~ 0.013 之间, 表层晶粒变形细化以及退火回复对应变速率敏感性影响不显著, 说明对 m 值起主导作用的是未变形基体粗晶而非变形表层。图 2c 为应变 $\epsilon = 10\%$ 时, 试验材料流变应力随应变速率的变化趋势, 流变应力在应变速率范围从 2×10^{-4} 到 2×10^{-2} 的标准对数基本呈线性递增关系, 与其它试验结果类似^[9-10]。

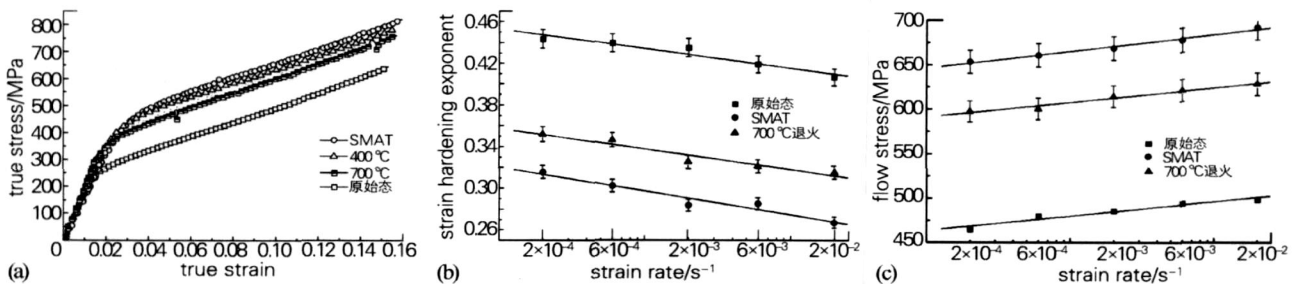


图 2 301 不锈钢压缩试验曲线
(a) 准静态压缩应力-应变曲线 (b) 加工硬化指数随应变速率的变化曲线 (c) 10% 流变应力随应变速率变化曲线

Fig 2 Compressive behavior of 301 stainless steel samples
(a) quasi-static strain-stress curve (b) hardening exponent vs strain rate (c) flow stress vs strain rate (at a strain of 10%)

3 讨论

变形态纳米超细晶结构材料的加工硬化能力很低^[3,6]。然而, 具有晶粒尺度梯度结构表层的 301 不锈钢, 在提高屈服强度同时较大程度上保留了多晶基体的硬化能力。利用退火处理, 能进一步提高硬化能力。流变应力随应变速率增加而增大 (图

2b), 原始态、变形态和退火态 3 种状态下流变应力的应变速率敏感性基本一致, 而均匀材料粗晶和纳米晶流变应力敏感性有显著区别^[4,9]。加工硬化指数 n 随应变速率增大而减小。这是由于降低应变速率使得马氏体相变充分, 位错充分积聚, 则加工硬化能力增加; 反之, 提高应变速率则位错密度降低, 马氏体相变减少。

4 结论

(1)与 301 不锈钢原始态组织相比,具有梯度变形表层的组织使屈服强度提高了 85%。

(2)经退火处理后,301 不锈钢硬化指数从变形态的 0.31 分别升高 400 的 0.32 和 700 的 0.35。原始态、变形态和退火态的加工硬化指数均随应变速率增加而减小。

(3)301 不锈钢原始态、变形态和退火态的流变应力同应变速率的标准对数基本符合单调递增的线性关系,3 种状态的流变应力的应变速率敏感性基本相同。

参考文献:

[1] uksza J, Rumiński M, Ratuszek W, Blicharski M. Texture evolution and variations of α -phase volume fraction in cold-rolled A ISI 301 steel strip [J]. J. of Mater Proc Tech., 2006, 177: 555-560.

[2] Rybal'chenko O V, Dobatkin S V, Kaputkina L M, et al Strength of ultrafine-grained corrosion-resistant steels after severe plastic deformation [J]. Mater Sci Eng A, 2004, 387-389: 244-248.

[3] Chen X H, Lu J, Lu L, Lu K Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel[J]. Scripta Mater,

2005, 52: 1039-1044.

[4] Wang YM, Ma E. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal[J]. Acta Mater, 2004, 52: 1699-1709.

[5] Wei Q, Cheng S, Ramesh K T and Ma E Effect of nanocrystalline and ultrafine grain sizes on the strain rate sensitivity and activation volume: fcc versus bcc metals[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 381: 71-79.

[6] Wang YM, Ma E Mate strain hardening, strain rate sensitivity, and ductility of nanostructured metals[J]. Sci Eng A, 2004, 375-377: 46-52.

[7] Ma E Instabilities and ductility of nanocrystalline and ultrafine-grained metals[J]. Scripta Mater, 2003, 49: 663-668.

[8] Schwaiger R, Moser B, Dao M, et al Some critical experiments on the strain-rate sensitivity of nanocrystalline nickel [J]. Acta Mater., 2003, 51: 5159-5172.

[9] Lee Woei-Shyan, Lin Chi-Feng Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 308: 124-135.

[10] Jia D, Ramesh K T, Ma E, et al Compressive behavior of an electrodeposited nanostructure copper at quasistatic and high strain rates[J]. Scripta Mater., 2001, 45: 613-620.

2008年全国模具失效分析与改性技术研讨会征文通知

由中国机械工程学会失效分析分会主办,全国模具失效分析专业委员会承办的 2008 年全国模具失效分析与改性技术研讨于 2008 年 11 月在广州举行,会议特邀我国模具行业失效分析和改性技术知名专家作专题报告。现在全国范围征集会议论文。

征文范围: 失效分析技术和方法,模具质量管理等; 模具失效案例(冷作模具,热作模具,压铸模具,挤压模具和塑料模具等)分析; 新型模具材料和工艺应用; 模具材料表面改性新技术,提高模具寿命的经验等; 模具制造中的失效问题与信息发布等。应征论文请发电子版,篇幅约 5000 字,请注明 2008 年全国模具失效研讨会会议论文,并附上联系人姓名、单位、通讯地址、邮政编码、电话和电子信箱等。论文截稿日期 2008 年 9 月 30 日。论文经审查后出版会议文集,并推荐优秀论文到全国有关优秀期刊发表。热忱欢迎国内外模具企业参加,并提供样本展示和信息发布活动的平台(样本宣传和信息发布事宜另议)。

联系人: 孙维连教授,河北保定 河北农业大学机电工程学院(071001) E-mail: bd999@eyou.com;电话: 0312-7521580;传真 0312-7521592; 陈再良研究员,北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所(100083) E-mail: zl_chen@163.com 电话/传真: 010-62914115, 010-62920613; 魏兴钊教授,广东广州华南理工大学机械工程学院(510640) E-mail: mexzwei@scut.edu.cn;电话/传真: 020-87111312 (中国机械工程学会失效分析分会)

书 讯

由阎承沛研究员编著《典型零件热处理缺陷分析及对策》一书,2008 年 7 月由机械工业出版社出版,定价: 75 元/册。

该书通过 480 多个典型实例,介绍了材料热处理缺陷分析及其对策。主要内容为齿轮、标准件、大型锻件和电站设备锻件、气动工具及液压元件、工模量具、机床零件、汽车、摩托车、拖拉机类零件、石油化工与采矿钻探机械零件、农机具类零件、电器电子类零件、兵工器械零件、仪器仪表精密零件、舰船器械零件、飞机和航天器零件、轻工、纺织、食品、医疗器械零件,以及其他典型零件的热处理缺陷分析及其对策。该书内容丰富,所列实例具有代表性、普遍性和实用性,在实际热处理生产中具有较高的参考价值。适于热处理工程技术人员阅读使用,亦可供相关专业在校师生、科研人员参考。