

高温高应变率对 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢 动态力学性能的影响

张继林¹, 贾海深¹, 易湘斌^{2*}, 窦建明¹, 唐林虎², 秦娟娟¹, 徐创文²

(1. 兰州工业学院, 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州工业学院, 绿色切削加工技术及应用甘肃省高校重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 采用高温分离式霍普金森 (High Temperature Split Hopkinson Pressure Bar) 动态试验装置, 研究了 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在温度 25 ~ 300 °C 和应变率 1 000 ~ 3 000 s⁻¹ 下的动态力学性能。结果表明, 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在 1 000 ~ 3 000 s⁻¹ 范围内表现出应变率强化效应, 在 25 ~ 300 °C 范围内表现出温度软化效应。利用扫描电子显微镜 (SEM) 对应变率为 3 000 s⁻¹ 的变形试样进行微观组织研究。结果表明, 高应变率下, 变形带密度大, 随着变形温度的增加变形带密度降低。

关键词: 奥氏体不锈钢; 06Cr19Ni10; 高应变; 温度软化; 动态力学性能

中图分类号: TF76, TG142.71

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0145-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.022

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Effect of high temperature and high strain rate on the dynamic mechanical properties of 06Cr19Ni10 austenitic stainless steel

Zhang Jilin¹, Jia Haishen¹, Yi Xiangbin^{2*}, Dou Jianming¹, Tang Linhu², Qin Juanjuan¹, Xu Chuangwen²

(1. Gansu Province Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties of austenitic stainless steel 06Cr19Ni10 were studied by a high temperature split-Hopkinson pressure bar (SHPB) at temperatures of 25–300 °C and strain rates of 1000–3000 s⁻¹. The austenitic stainless steel 06Cr19Ni10 shows strain rate strengthening effect in the range of 1 000–3 000 s⁻¹, and temperature softening effect in the range of 25–300 °C. A scanning electron microscope (SEM) was used to observe microstructure of deformed sample at strain rate of 3 000 s⁻¹. It is found that under high strain rate, the deformation zone density is high, and decreases as the deformation temperature increases.

Key words: austenitic stainless steel, 06Cr19Ni10, high strain, temperature softening, dynamic mechanical properties

收稿日期: 2021-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51965031、51865026); 甘肃省青年科技基金计划项目 (21JR7RA351); 甘肃省高等学校创新基金项目 (2018A-129、2020B-243、2021A-156、2021B-319); 甘肃省高等学校产业支撑 (2021-CYZC-52); 兰州工业学院“启智”人才培养计划 (2018QZ-03)。

作者简介: 张继林 (1987—), 男, 甘肃民乐人, 讲师, 硕士, 主要从事材料的动态力学性能、材料疲劳性能以及切削性能研究, E-mail: zjl-0111@163.com。* 通讯作者: 易湘斌, 副教授, E-mail: 530064133@qq.com。

0 引言

奥氏体不锈钢广泛应用于军工、石油化工、生物工程等领域^[1-5], 06Cr19Ni10 不锈钢是一种典型(铬-镍)不锈钢,具有良好的耐蚀性、耐热性,低温强度和机械特性。随着科技的进步,对 06Cr19Ni10 不锈钢零件的加工精度要求提高,其加工和使用受到高温和动态载荷作用,处于高温高应变状态,因此,在高温高应变率条件下对它的动态力学性能研究势在必行。

高温高应变率对力学性能影响的研究表明,随着应变率的增加,材料的应力增加,这种现象称为应变率强化效应;而随着温度的增加,材料的真实应力减少,这种现象称为温度软化效应^[6-10]。到目前为止,对 06Cr19Ni10 不锈钢的研究大多为高温准静态试验和室温动态试验,同时在高应变率耦合高温下的动态力学性能研究较少,并且应变速率和温度对显微组织的研究也较少。张红等^[11]人对某种不锈钢材料在温度 20~800℃ 和应变率 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 下,得到材料在不同温度和应变率耦合作用下的真实应力-应变曲线。许泽建等^[12]人报道了 0Cr18Ni10Ti 焊接头的母材和焊缝在 25~600℃ 温度和 200~3 800 s^{-1} 应变率下的力学性能。尚兵等^[13]人研究了 0Cr1TMn5Ni4M03Al 不锈钢在 3 种应变率 (300、1 000、2 700 s^{-1}) 和 4 种环境温度 (25、300、500、700℃) 下的应力应变关系。何著等^[14]人测定了 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢在多种应变率下的动态应力-应变关系。魏玉伟等^[15]人研究了马氏体含量对 1Cr17Ni1 双相不锈钢动态和准静态力学性能的影响。然而,上述文献未对高温高应变率耦合下的动态力学性能进行研究,也未结合微观组织进行分析研究,为此高温高应变率耦合下研究材料动态力学性能和微观组织显得更为重要。

笔者利用高温分离式霍普金森动态试验装置,测试了 06Cr19Ni10 不锈钢在高温和高应变率下的动态力学性能,得到了真实的应力-应变曲线,研究了不同应变速率和不同温度对其动态力学性能和显微组织的影响 (3 000 s^{-1})。此研究能够补充 06Cr19Ni10 不锈钢的力学性能,可以为后续建立本构方程和进行数值模拟提供理论依据。

1 试验材料及过程

试验材料是从市场上购买张家港浦项不锈钢有

限公司生产的 30 mm 厚不锈钢 06Cr19Ni10 板材,除 Fe 以外的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 06Cr19Ni10 stainless steel %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	0.75	2.00	0.045	0.03	8.22	18.89

试验前材料经过 1 050℃ 加热+保温 30 min+空冷的固溶处理后,首先采用线切割方式将材料加工成 $\varnothing 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 圆柱试样,保证试样端面与圆柱面的垂直度,然后用碳化硅研磨纸抛光试样的两个端面,保证表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。

采用高温分离式霍普金森动态试验装置进行不同温度和不同应变率下的冲击试验,实现四种温度 (25、100、200、300℃) 和五种平均应变速率 (1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 s^{-1}) 下的动态加载,试验用子弹长度 100 mm,压杆直径为 8 mm。为了减少试验的误差,冲击试样载荷面添加润滑剂,同时每种条件下进行三次试验取平均值,得到真实的应力应变关系曲线。冲击试验结束后,沿轴线切割回收试样,研磨、抛光后制作成显微样本,使用 $\text{FeCl}_3 (5 \text{ g}) + \text{HNO}_3 (50 \text{ mL}) + \text{H}_2\text{O} (100 \text{ mL})$ 混合溶液腐蚀 1 min 左右,清洗、干燥之后采用 FEI Inspect F50 扫描电子显微镜对应变率为 3 000 s^{-1} 的变形后试样进行显微组织观察。

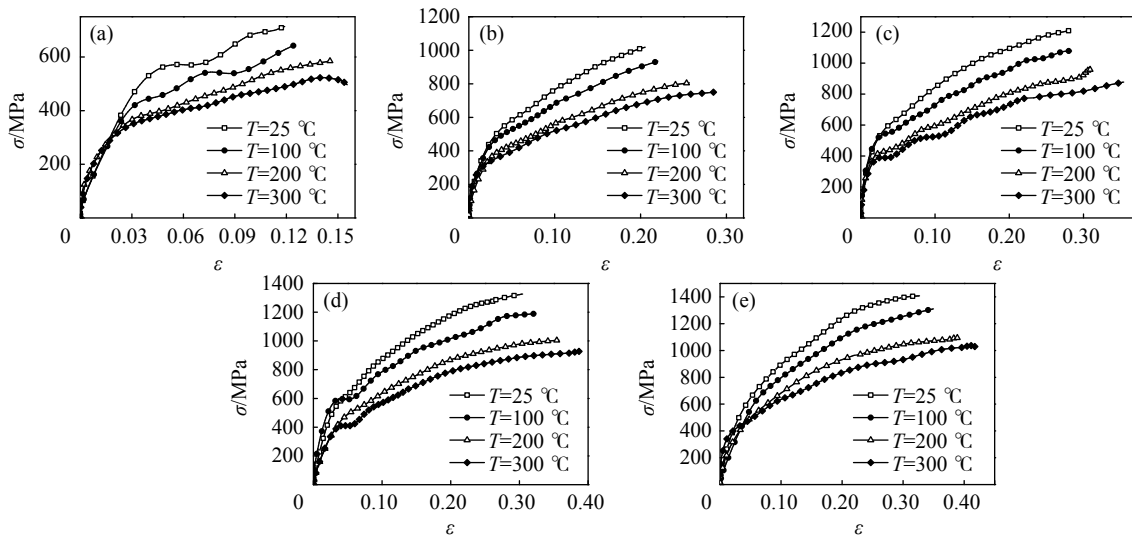
2 试验结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

不同应变率下的真应力-真应变曲线分别如图 1 所示。可以看出,在任意一种应变率下,随着温度的增加,真应力-真应变曲线呈现下降趋势,这是由于随着温度的升高,热激活作用逐渐增强,原子动能也逐渐增大,原子间的结合力逐渐减弱,位错滑移的临界切应力降低,材料的变形抗力降低。同时,随着温度的升高,材料动态再结晶的形核率增大,使晶核长大的驱动力增加,进而使动态再结晶软化作用增强。在任意一种温度下,随着应变率的增加,真应力-真应变曲线呈现上升趋势,这是由于应变速率增加,材料的临界剪切应力增大,在相同的应变率下变形机制具有可比性。应力值达到峰之前,在相同温度和应变率条件下,应力随应变的增加而增大,这是由于在高的应变下,位错密度增加。在整个变形范围内,真应力随着应变的增加而增加,表明应变率起主要

作用, 温度起次要作用。进一步得知, 该材料具有应变率强化效应和温度软化效应。此外, 最大应变随着温度和应变率的增加而增加, 应变率从 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 增加到 $1\,500\text{ s}^{-1}$ 时, 最大应变增幅较明显, 其余阶段有增加但不明显。应变率从 $1\,000 \sim 1\,500\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,500 \sim 2\,000\text{ s}^{-1}$ 、 $2\,000 \sim 2\,500\text{ s}^{-1}$ 、 $2\,500 \sim 3\,000\text{ s}^{-1}$, 应变的最小值依次增加 0.086 32、0.075 97、

0.023 3、0.022, 呈逐渐减少的趋势; 最大值依次增加 0.131 1、0.067 49、0.035 54、0.027 89, 也呈现逐渐减少的趋势。进一步观察, 在同一应变率下, 弹性变形阶段内斜率随着温度的增加而减小, 表现为屈服强度降低。同时, 在同一应变率下, 当温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 塑性变形阶段的斜率最大, 表明应变硬化效应明显。



应变速率: (a) $1\,000\text{ s}^{-1}$; (b) $1\,500\text{ s}^{-1}$; (c) $2\,000\text{ s}^{-1}$; (d) $2\,500\text{ s}^{-1}$; (e) $3\,000\text{ s}^{-1}$

图 1 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在不同应变率下的真应力-真应变曲线

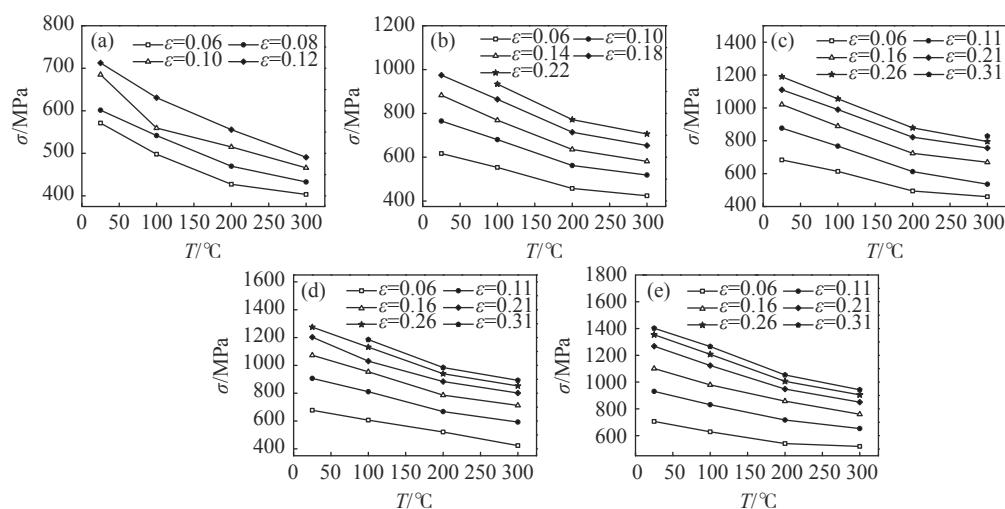
Fig. 1 The true stress- strain curves of 06Cr19Ni10 austenitic stainless steel deformed in different strain rates

2.2 温度对真应力的影响

不同应变率下, 温度和应变率的关系如图 2 所示。从图 2 可知, 在任意应变率下, 随着温度的增加, 应力呈现出降低趋势, 表现出温度软化效应, 特对应力峰值和屈服强度(弹性变形拟合直线与塑性变形拟合直线的交点)进行论述。在不同应变率下, 峰值应力和屈服强度随温度的关系如图 3 所示。如图 3(a) 所示, 峰值应力随着温度的增加而减少, 温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 应变率为 $1\,000$ 、 $1\,500$ 、 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 的峰值应力降幅分别是 190.332、267.189、332.846、399.271、370.860 MPa, 降幅程度不同, 先逐渐变大后减小; 如图 3(b) 所示, 屈服强度随着温度的增加而减少, 温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 应变率为 $1\,000$ 、 $1\,500$ 、 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 的屈服强度降幅分别是 195.016、217.825、231.459、233.66、210.917 MPa, 降幅程度与峰值应力有相似趋势。

2.3 应变率对真应力的影响

对图 1 的数据进行再处理, 得到同一温度下不同应变率的真应力-真应变关系曲线, 如图 4 所示。在塑性变形范围内, 当温度一定时, 真应力随着应变率的增加而增加, 具有应变率强化效应, 但强化的程度不同。为了更加清楚的阐述应变率对真应力的影响, 当应变为 0.1 时, 绘制不同温度下的真应力-应变率曲线, 如图 5 所示。当应变从 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 增加到 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 时, 在温度 25、100、200、 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 真应力分别增加 212.307、235.612、169.713、169.530 MPa。在高应变率下, 应变率对真应力的影响程度明显, 可能由于较多的位错产生。当温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在应变率为 $1\,000$ 、 $1\,500$ 、 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 下, 真应力分别降低 219.067、246.220、318.850、305.899、261.844 MPa。进一步得知, 应变率对真应力的影响程度弱于温度。比如, 温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 应变率 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 的真应力大于温度 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 应变率 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 。这是应变率硬化和热软化效应之间竞争的结果, 这种竞争主导了整个变形过程。



(a) $1\,000\text{ s}^{-1}$; (b) $1\,500\text{ s}^{-1}$; (c) $2\,000\text{ s}^{-1}$; (d) $2\,500\text{ s}^{-1}$; (e) $3\,000\text{ s}^{-1}$

图2 一定应变率下真实应力与温度的关系

Fig. 2 Relationship between true stress and temperature under a certain strain

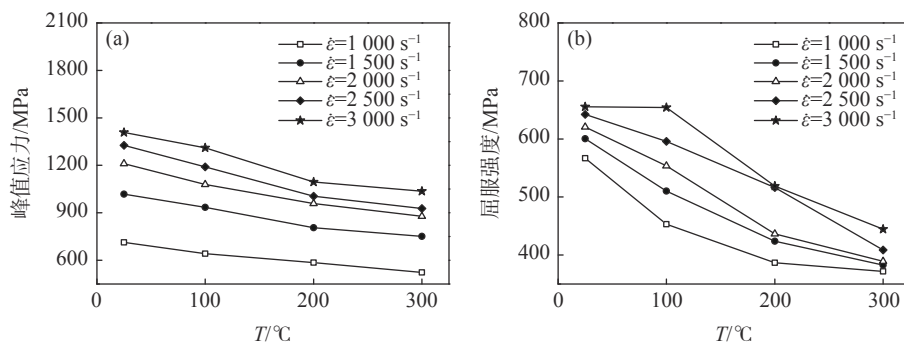
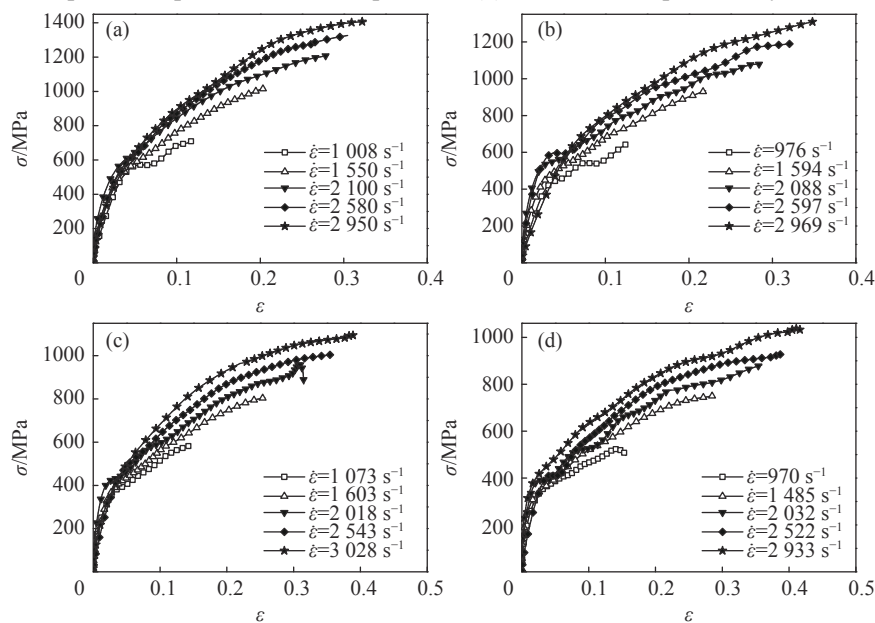


图3 (a) 峰值应力与温度的关系; (b) 屈服强度与温度的关系

Fig. 3 (a) The relationship between peak stress and temperature; (b) The relationship between yield strength and temperature



(a) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

图4 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在一定温度下不同应变率的真实应力-真应变关系的比较

Fig. 4 Comparison of the true strain-stress relationships of 06Cr19Ni10 austenitic stainless steel at different strain rates and fixed deformation temperatures

2.4 显微组织观察

应变率强化使材料塑性变形量增加, 位错密度不断增加, 位错间的交互作用也不断增强, 使变形抗力增加; 同时晶粒变形、破碎形成亚晶粒和亚晶界, 亚晶界阻止位错运动, 使材料的强度和硬度提高^[16-22]。随着温度的增加, 位错在变形过程中通过一定的方式运动, 使部分位错相互抵消, 导致变形带密度降低, 从而真应力随着温度的增加而降低, 表现为温度软化效应。变形带有变形孪晶、层错和位错组成。变形带中变形孪晶^[23-26]占绝大多数, 对形变起增强作用。形变孪晶开始于晶界, 并向晶粒内部生长, 分裂晶粒。

一般情况下, 奥氏体不锈钢变形带密度随着温度的增加而减少, 随着应变率的增加而增加, 低应变率下孪晶相互平行, 高应变率下孪晶交织在一起^[23, 26]。当应变率为 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 时, 在温度 25、100、200、300 °C 下变形后的显微组织如图 6 所示。图 6 中可以看出存在变形带, 呈现出交错的现象, 阻碍位错滑移, 位错堆积, 变形带密度增加, 导致应变率强化。图 6(a) 至 (h) 有些孪晶相互平行, 有些孪晶相

互交织, 交织的占大多数, 变形带密度依次递减, 使真应力应变曲线随着温度增加, 向下移动, 与试验曲线吻合。这正是由于随着温度的升高, 热激活作用增强, 原子动能增大, 原子间的结合力减弱, 位错滑移的临界切应力降低, 材料的变形抗力降低。同时, 材料动态再结晶的形核率增大, 使晶核长大的驱动力增加, 使动态再结晶软化作用增强。

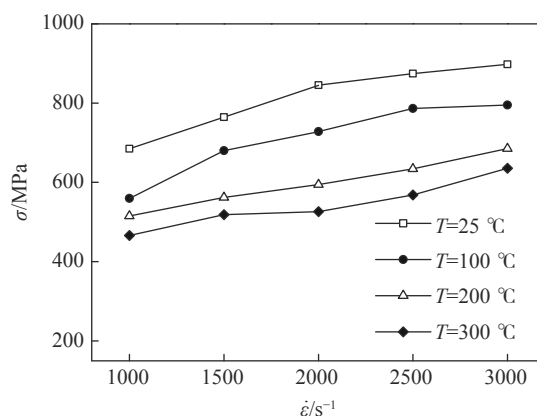
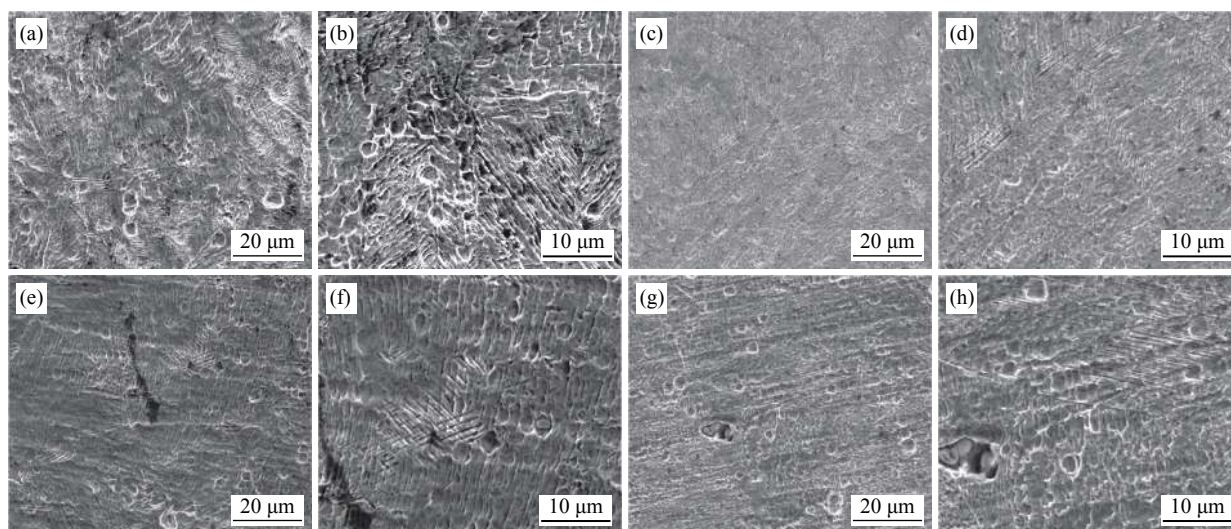


图 5 不同温度下 $\epsilon = 0.1$ 时真实应力与应变率的关系
Fig. 5 The relationship between true stress and strain rate at $\epsilon = 0.1$ at different temperatures



不同放大倍数: (a)、(b) 25 °C; (c)、(d) 100 °C; (e)、(f) 200 °C; (g)、(h) 300 °C

图 6 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在应变率 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 下不同温度变形后的微观组织

Fig. 6 Microstructures of 06Cr19Ni10 austenitic stainless steel after deformation at different temperatures and a strain

3 结论

1) 在应变率 $1\,000$ 、 $1\,500$ 、 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 下, 随着温度的增加, 真应力减小, 但减小的幅度不相同, 峰值的应变增加, 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢表现出明显的温度软化效应。

2) 在温度 25、100、200、300 °C 下, 随着应变率的增加, 真应力增加, 增加的幅度不同, 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢表现出明显的应变率强化效应。

3) 温度软化效应和应变率强化效应与变形带密度大小有关, 高应变率下, 变形带密度大, 随着变形温度的增加变形带密度降低, 这与试验应力的增减相吻合。

4)研究了 06Cr19Ni10 奥氏体不锈钢在高温高应变率下的动态力学性能和微观组织,今后可以利用试验数据建立此材料的本构方程,为数值模拟提供理论依据。

参考文献

- [1] Liu Yong. Studies on welding properties for sealing lip welding structure austenitic stainless steel valve[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
(刘勇. 密封唇焊结构奥氏体不锈钢阀门焊接性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.)
- [2] Huang Chao. Analysis on the mechanical properties of 316 L stainless steel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
(黄超. 316 L 不锈钢力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.)
- [3] Mei Rong, Ren Zhijun, Chou Wei. Hot deformation behavior of 06Cr18Ni11Ti austenitic stainless steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(6): 88–92.
(梅荣, 任志俊, 仇伟. 06Cr18Ni11Ti 奥氏体不锈钢热变形行为研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(6): 88–92.)
- [4] Dai Zhefeng. Stress corrosion test research on 316 L austenitic stainless steel in complex medium condition [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
(戴哲峰. 316 L 不锈钢在复杂介质环境中的应力腐蚀试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.)
- [5] Dong Hanshan, Li Xiaoying. Surface engineering for joint prosthesis: State-of-the-art and future directions[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(5): 1–14.
(董汉山, 李小英. 人造关节材料表面工程的现状及前瞻[J]. 中国表面工程, 2008, 21(5): 1–14.)
- [6] Ling Ling, Li Xingxing, Wang Xuelin, *et al.* Constitutive model of stainless steel 0Cr18Ni9 and its influence on cutting force prediction [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(18): 2243–2248.)
(凌玲, 李星星, 王学林, 等. 0Cr18Ni9 不锈钢本构模型及其对切削力预测影响分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2243–2248.)
- [7] Wang Yan, Wang Mingjia, Cai Dayong, *et al.* Effect of deformation parameters on microstructure evolution of medium carbon steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(4): 65–68.
(王艳, 王明家, 蔡大勇, 等. 高强度奥氏体不锈钢的热变形行为及其热加工图[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(4): 65–68.)
- [8] Wang Y L, Jia G Z, Zhang T, *et al.* Dynamic mechanical behaviors of high-nitrogen austenitic stainless steel under high temperature and its constitutive model[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(4): 835–840.
- [9] Zhang Jing, Jiang Chunxia, Qiao Bangwei. Deformation behavior and constitutive equation of 14Cr17Ni2 steel at high temperature[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(14): 38–43.
(张静, 蒋春霞, 乔帮威. 14Cr17Ni2 钢高温变形行为及本构方程的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(14): 38–43.)
- [10] Wu Liang, Hu Yiseng, Ji Xiang, *et al.* Dynamic mechanical behavior and constitutive model of FV520B martensitic precipitation-hardening steel[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 584–588.
(吴亮, 胡毅森, 纪翔, 等. 马氏体沉淀硬化不锈钢 FV520B 动态力学性能及本构模型的研究[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 584–588.)
- [11] Zhang Hong, Suo Tao, Li Yulong. Mechanical behavior of a stainless steel material at elevated temperatures and high strain rates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 31(1): 78–83.
(张红, 索涛, 李玉龙. 不锈钢材料高温、高应变率下动态力学性能的试验研究[J]. 航空材料学报, 2012, 31(1): 78–83.)
- [12] Xu Zejian, Li Yulong, Liu Mingshuang, *et al.* Dynamic mechanical properties of stainless steel 0Cr18Ni10Ti welded joint at elevated temperatures and high strain rates[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(1): 98–104.
(许泽建, 李玉龙, 刘明爽, 等. 不锈钢 0Cr18Ni10Ti 焊接接头高温、高应变率下的动态力学性能[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 98–104.)
- [13] Shang Bing, Sheng Jing, Wang Baozhen, *et al.* Dynamic mechanical behavior and constitutive model of stainless steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 527–531.
(尚兵, 盛精, 王宝珍, 等. 不锈钢材料的动态力学性能及本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 527–531.)
- [14] He Zhu, Zhao Shougen, Yang Jialing, *et al.* Experimental investigation of the dynamic material property of stainless steel: 0Cr17Ni4Cu4Nb[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(3): 418–421.
(何著, 赵寿根, 杨嘉陵, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢动态力学性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3): 418–421.)
- [15] Wei Yuwei, Li Ning, Wen Yuhua, *et al.* Effect of martensite content on dynamic and quasi-static mechanical properties of 1Cr17Ni1 dual-phase stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(11): 6–10.
(魏玉伟, 李宁, 文玉华, 等. 马氏体含量对 1Cr17Ni1 双相不锈钢动态和准静态力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(11): 6–10.)
- [16] Xu Z, Li Y. Dynamic behaviors of 0Cr18Ni10Ti stainless steel welded joints at elevated temperatures and high strain rates[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(2): 121–130.
- [17] Lee W S, Chen T H, Lin C F, *et al.* Dynamic mechanical response of biomedical 316 L stainless steel as function of strain rate and temperature[J]. Bioinorganic Chemistry and Applications, 2011, (12): 1–13.
- [18] Xiong Z P, Ren X P, Bao W P, *et al.* Effect of high temperature and high strain rate on the dynamic mechanical properties of

- Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 20(9): 835–841.
- [19] Li Guohe, Wang Minjie. Dynamic mechanical properties and constitutive relationship of hardened steel (45 HRC) under high temperature and high strain rate[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 433–438.
(李国和, 王敏杰. 淬硬45钢在高温高应变率下的动态力学性能及本构关系[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 433–438.)
- [20] Bao Weiping, Ren Xueping, Zhang Yi. The characteristics of flow stress and dynamic constitutive model at high strain rates for pure iron[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(5): 125–129.
(包卫平, 任学平, 张毅. 纯铁在高应变率下的流动应力特征及其动态塑性本构关系[J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(5): 125–129.)
- [21] Yan Qiushi, Sun Bowen, Yang Lu. Study on dynamic mechanical behavior of structural stainless steel at elevated temperature and high strain rate[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 128–132.
(闫秋实, 孙博文, 杨璐. 高温高应变率下建筑不锈钢动态力学性能研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 128–132.)
- [22] Zhou Huijiu, Huang Mingzhi. *Strength of metal materials*[M]. Beijing: Science Press, 1989.
(周惠久, 黄明志. *金属材料强度*[M]. 北京: 科学出版社, 1989.)
- [23] Mi Z L, Tang D, Dai Y J, *et al.* In-situ observation on the deformation behaviors of Fe-Mn-C TWIP steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 16(6): 646–649.
- [24] Li D Z, Wei Y H, Liu C Y, *et al.* Effects of high strain rate on properties and microstructure evolution of TWIP steel subjected to impact loading[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(6): 67–73.
- [25] Xiong R G, Fu R Y, Su Y, *et al.* Tensile properties of TWIP steel at high strain rate[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, 16(1): 81–86.
- [26] Xiong Z P, Rm X P, Bao W P, *et al.* Dynamic mechanical properties of the Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP steel after different heat treatments[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 530(12): 426–431.

编辑 杨冬梅

(上接第 134 页)

- [3] Chung S, Yoon J. Numerical analysis of effects of electromagnetic stirring on solidification phenomena in continuous casting[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1996, 23(5): 425–432.
- [4] Luo Bogang, Wang Guorui, Zhou Deguang, *et al.* EMS parameter optimization of continuous caster[J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(10): 32–34, 79.
(罗伯钢, 王国瑞, 周德光, 等. 连铸机电磁搅拌参数的优化[J]. *钢铁*, 2005, 40(10): 32–34, 79.)
- [5] Gong Zhixiang, Chen Gang, Jiao Xingli, *et al.* Effect of mould-electromagnetic stirring on structure and inclusion in 450 mm concasting round billet[J]. *Special Steel*, 2004, 25(4): 35–37.
(龚志翔, 陈刚, 焦兴利, 等. 结晶器电磁搅拌对 $\Phi 450$ mm连铸圆坯组织和夹杂物的影响[J]. *特殊钢*, 2004, 25(4): 35–37.)
- [6] Ji Zhenshuang, Shen Yanchen. Improvement of central segregation of billet by electromagnetic stirring[J]. *Journal of Iron and Steel Studies*, 1992, 4(3): 17–21.
(纪振双, 沈雁臣. 利用电磁搅拌改善铸坯的中心偏析[J]. *钢铁研究学报*, 1992, 4(3): 17–21.)
- [7] Li Guozhong, Chen Feng, Chen Weiqing, *et al.* Effect of mould electromagnetic stirring on carbon segregation of medium carbon continuous casting bloom[J]. *Steelmaking*, 2008, 24(1): 43–46.
(李国忠, 陈峰, 陈伟庆, 等. M-EMS对中碳钢连铸方坯碳偏析的影响[J]. *炼钢*, 2008, 24(1): 43–46.)
- [8] Bo Kaitao, Cheng Guoguang, Wu Jie, *et al.* Mathematical model of molten alloy flow in mold with two pairs of magnetic poles[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1997, 21(4): 334–337.
(薄开涛, 成国光, 吴洁, 等. 双条型磁极作用下结晶器内液态金属流动的数学模型[J]. *北京科技大学学报*, 1999, 21(4): 334–337.)
- [9] Yang Xiaozhi. Effect of electromagnetic stirring on continuous casting billet quality[J]. *Continuous Casting*, 2000(4): 41–42.
(杨晓枝. 电磁搅拌对连铸小方坯质量的影响[J]. *连铸*, 2000(4): 41–42.)
- [10] He Jicheng. Improving steel quality by electromagnetic field[J]. *Iron and Steel*, 2005, 1(40): 24–30.
(赫冀成. 电磁场对改善钢材质量的作用[J]. *钢铁*, 2005, 1(40): 24–30.)
- [11] Thomas B G, Quan Y, Sivaramakrishnan S, *et al.* Comparison of four methods to evaluate fluid velocities in a continuous slab casting mold[J]. *ISIJ International*, 2007, 41(10): 1262–1271.

编辑 邓淑惠