

文章编号: 1001-1455(2008)06-0527-05

不锈钢材料的动态力学性能及本构模型*

尚 兵¹, 盛 精², 王宝珍¹, 胡时胜¹

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 湖北汽车工业学院机械系, 湖北 十堰 442002)

摘要: 利用带有温度调控系统的 SHPB 实验装置测定了 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢在 3 种应变率 (300、1 000、2 700 s⁻¹)、4 种环境温度 (25、300、500 和 700 °C) 下的应力应变关系; 在液压伺服材料试验机 (MTS) 上进行了 3 种温度下的准静态 (0.000 5 s⁻¹) 压缩实验。实验结果表明: 该不锈钢有明显的应变率强化效应和温度软化效应, 并且随着环境温度的升高, 应变率强化效应减弱。对 Johnson-Cook 模型进行了修正, 考虑了冲击过程中绝热温升引起的软化效应。修正后的 Johnson-Cook 模型与实验结果吻合较好。

关键词: 固体力学; 本构关系; SHPB; 不锈钢; Johnson-Cook 模型; 温度效应; 应变率效应

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·1520

文献标志码: A

1 引 言

不锈钢是一种具有高度化学稳定性的钢种系列, 可用于制造飞机发动机的燃油导管、散热器及叶片等。由于上述使用场合涉及高应变率和高温, 因此进行结构设计时, 除了考虑耐腐蚀性, 还必须考虑应变率效应和温度软化效应, 还需要提出描述上述力学特性的本构关系。早期对钢的动态力学性能研究主要限于常温下。G. L. Wulf^[1]研究了 1023 及 4130 钢在高应变率下的力学性能。随后由于应用的需要, C. R. Johnson 等^[2]提出了描述金属材料在大应变、高应变率和高温下力学行为的本构模型。F. J. Zerilli 等^[3]提出了基于位错动力学的本构模型。W. S. Leet 等^[4]对上述模型的应力项进行了修正, 考虑了微观结构因素。S. Nemat-Nasser 等^[5]在研究 DH-36 结构钢时采用了一个基于位错动力学的模型; 之后在研究 Nitronic-50 不锈钢^[6]时又加入了粘性项。但是该模型涉及金属微观理论, 参数拟合较复杂。

由于 Johnson-Cook 模型^[2]的参数可由 Hopkinson 压杆直接确定, 而且各项的物理意义明显, 有大量的文献采用该模型, 并且被嵌入到多种计算机软件中。本文中采用改进的带温控箱的 SHPB 装置对 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢的动态力学性能进行研究, 考虑高速变形导致的热软化对应力应变曲线的影响, 对 Johnson-Cook 模型模型进行修正, 使实验曲线和拟合曲线一致。

2 实验方案

不锈钢的冲击压缩实验是在带有温控箱的分离式 Hopkinson 压杆装置上进行的, 应变片贴在距离杆与试件的界面 500 mm 处, 热源对应变片的信号基本没有影响^[7]。试样选用 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢, 尺寸为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 共做了 3 种应变率、4 种环境温度下的 12 组实验, 实验装置见图 1。

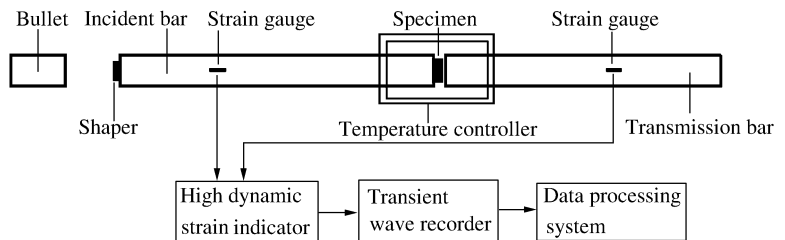


图 1 带有温控装置的 SHPB 设备简图

Fig. 1 Schematic of the SHPB system with a temperature controller

* 收稿日期: 2007-04-11; 修回日期: 2007-11-23

作者简介: 尚 兵(1979—), 男, 硕士。

为了和静态实验比较,在液压伺服材料试验机上进行了准静态实验,利用应变片加刀口法^[8]测得了完整的应力应变曲线。试样尺寸为 $\varnothing 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,静态实验的工作原理见图2。

3 实验结果和分析

图3为环境温度为25、500℃时入射杆与透射杆中不同应变率时的原始波形,图中in表示入射杆, tr表示透射杆。图中应变率越低波形的脉冲时间越长,这是为了最终得到的应力应变曲线的最大应变相差不大。

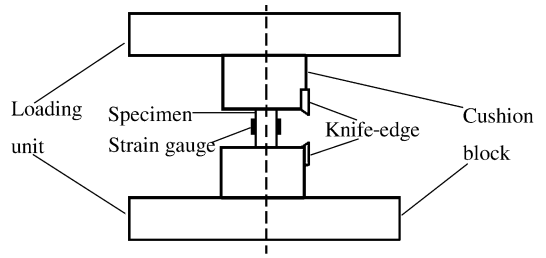


图2 准静态压缩测试装置示意图

Fig. 2 Schematic of the device for the quasi-static compression test

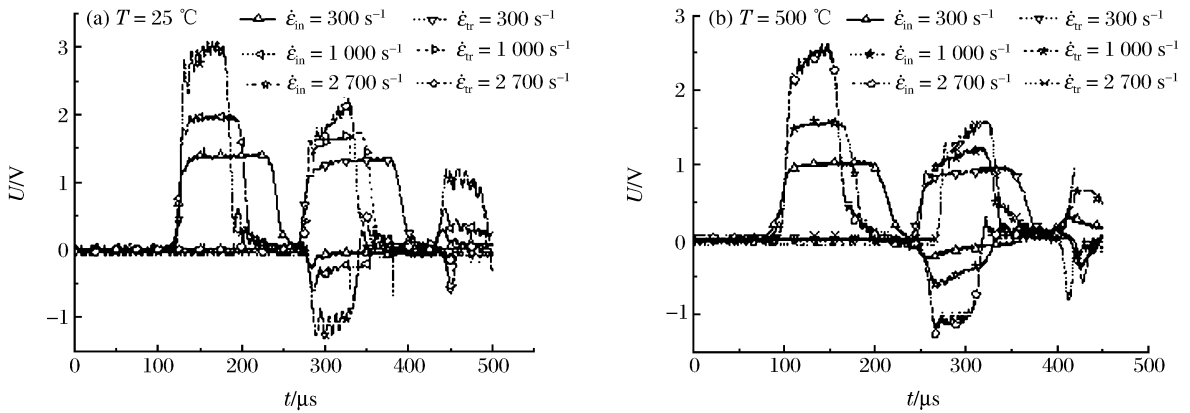


图3 不同应变率下入射杆与透射杆上的原始波形

Fig. 3 Original signal waves in the incident and transmitter bars at different strain rates

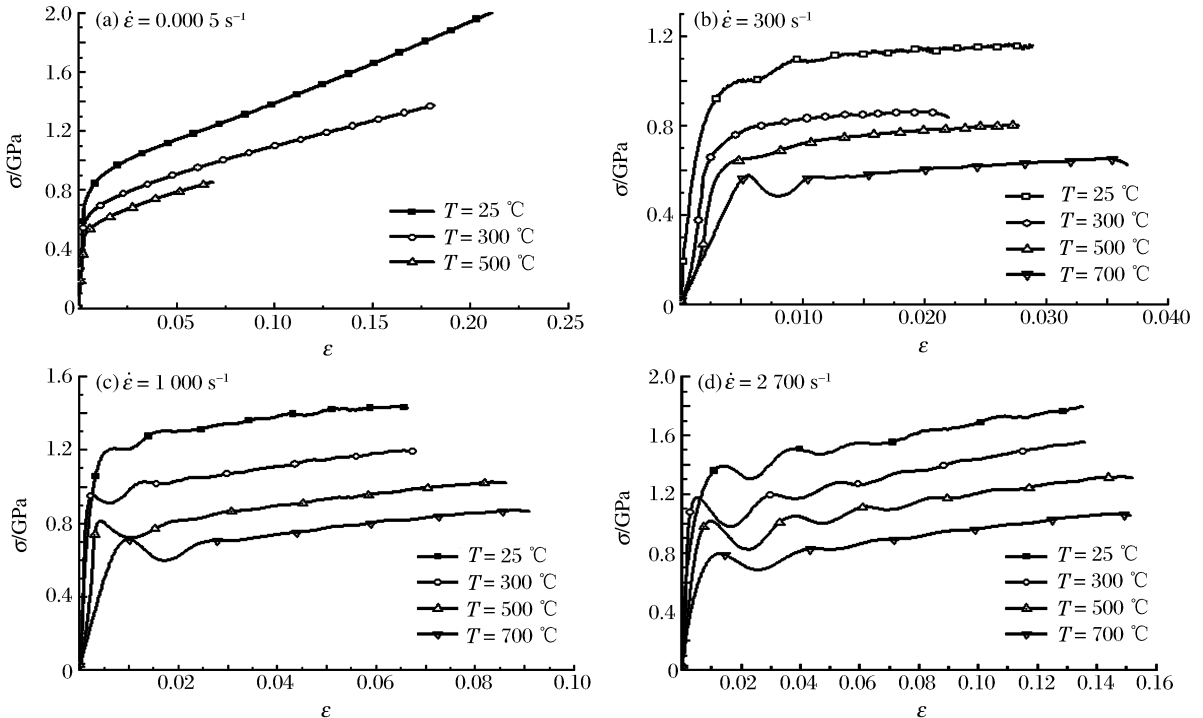


图4 某一应变率下,0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢在不同温度下的工程应力应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-strain curves of 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al stainless steel at 4 different temperatures at a certain strain rate

观察图 4 可以发现：该不锈钢存在明显的温度软化效应，即随着环境温度的升高，材料强度明显降低。分析图 5 可知，(1)该不锈钢有明显的应变率强化效应；(2)动态应力应变曲线与准静态应力应变曲线有相交的趋势，这与 W. G. Guo 等^[6]的研究结果类似。这种相交的趋势是由绝热过程导致试件温度升高引起的。冲击压缩所作的塑性功转变为热能，其中有一小部分被传递到别处，大部分则导致试件的温度升高，随着塑性变形的持续增大，转变为热能的塑性功增多，试件温度升高增大。又因为试件具有明显的温度软化效应，因此随着应变的增大，动态强度与准静态强度的差值减小，从而出现相交的趋势。在高应变率、大变形的情况下，温度的升高可用下式进行计算^[5]

$$\Delta T = \int_0^\gamma \frac{\beta}{\rho C} \tau d\gamma$$

式中： $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ 为试件材料密度， $C = 0.5 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ 为比热容， γ 为塑性应变， τ 为流动应力， $\beta \approx 0.9$ 为塑性功转化为试件温升的比例，当应变为 0.14 时，温度升高约 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因为该不锈钢有明显的温度软化效应，所以这样的温度升高可以导致动态应力应变曲线与准静态应力应变曲线呈现交叉趋势。

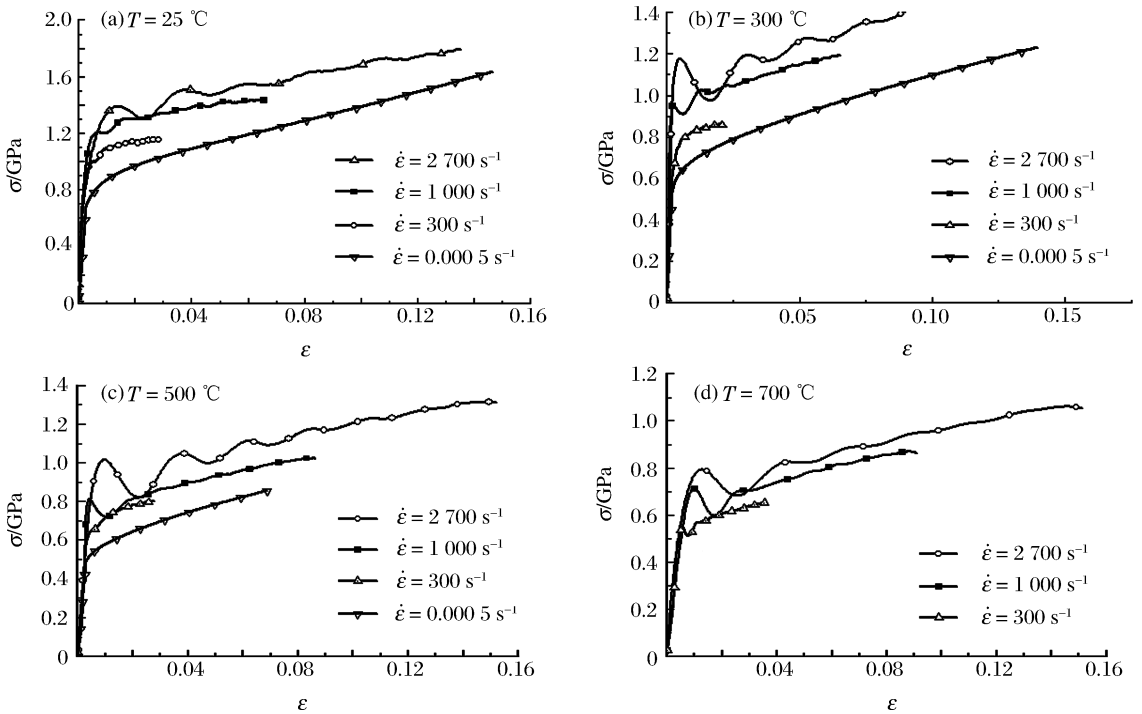


图 5 某一环境温度下，0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢的动静态工程应力应变曲线

Fig. 5 Engineering stress-strain curves of 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al stainless steel at different strain rates at a certain temperature

4 本构关系拟合

Johnson-Cook 模型^[2]是一个与应变率和温度相关的经验型的粘塑性模型，该模型能够描述大多数金属材料在高应变率、大应变以及不同环境温度下的力学性能。

但是根据传统的 Johnson-Cook 模型，拟合时会出现 2 个问题：(1)应力与相对应变率对数之间的线性关系不能反映具有明显应变率效应材料的本构关系，如 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢等。(2)拟合的动态曲线基本上是准静态曲线在竖直方向的平移(稍有发散)，根本不可能实现动态曲线与准静态曲线的汇聚。为了能使 Johnson-Cook 模型与实验结果符合得更好，本文中做了以下 2 点修正：(1)为了更好地反映材料应变率效应在不同应变率范围的差异，在原有模型的基础上增加了应变率对数的平方项^[9]；(2)为了解决上述动态应力应变曲线与准静态应力应变曲线汇聚的问题，考虑了绝热过程导致的

温度升高,在环境温度上叠加了与应变、应变率有关的项,表达如下

$$\sigma_s = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + D \ln^2 \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \left[1 - \left(\frac{T + \langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle > k\varepsilon - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]$$

$$\langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle = \begin{cases} 1 & \dot{\varepsilon} > 1 \\ 0 & \dot{\varepsilon} < 1 \end{cases}$$

式中: σ_s 为材料的流动应力, ε_p 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为相对应变率,在本文中准静态实验应变率为 0.0005 s^{-1} , T 为样品的环境温度, T_r 为室温, T_m 为材料的熔点,该不锈钢的熔点为 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$; A 、 B 、 C 、 D 、 n 、 m 、 k 为拟合参数。

修正后的本构关系中共有 7 个待定系数,拟合结果如表 1 所示,表中还列出了采用传统的 Johnson-Cook 模型拟合的结果。由图 6 可以发现,修正后的 Johnson-Cook 模型与实验曲线吻合较好。

表 1 Johnson-Cook 模型模型参数

Table 1 Parameters for the Johnson-Cook models

Johnson-Cook 模型	A/MPa	B/MPa	n	C	D	m	k/ $^\circ\text{C}$
修正的 Johnson-Cook 模型	700	3 314	0.75	-0.057 1	0.005 5	0.9	2 640
传统的 Johnson-Cook 模型	700	3 314	0.75	0.021 2	0	0.9	0

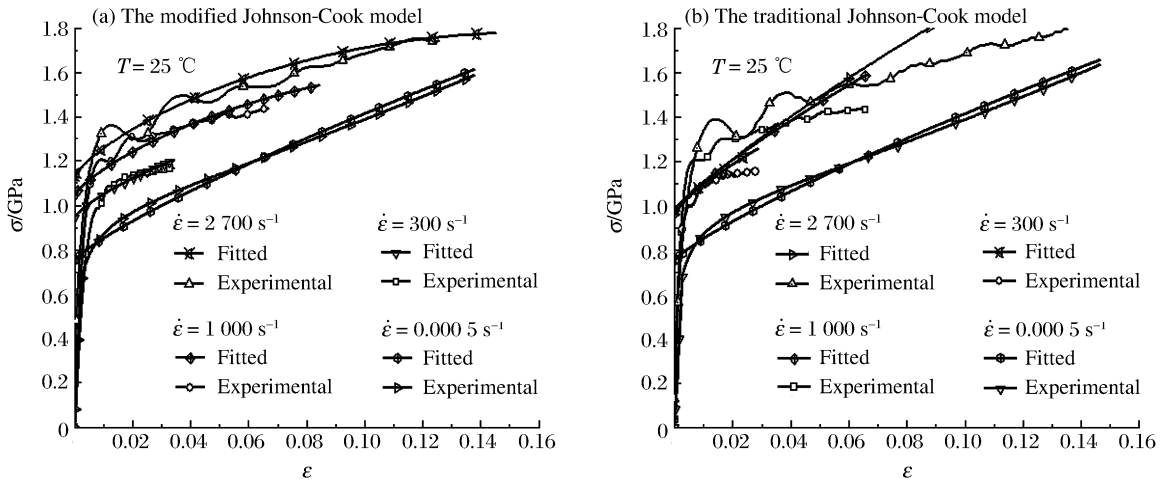


图 6 常温下 Johnson-Cook 模型拟合的应力应变曲线与实验结果的比较

Fig. 6 Comparison of the engineering stress-strain curves fitted with the Johnson-Cook models at different strain rates with the experimental results

5 结论

利用带温控装置的 SHPB 和 MTS 所得的实验结果,讨论了 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al 不锈钢的应变率效应和温度效应,并结合文献分析了准静态应力应变曲线与动态应力应变曲线相交、汇聚的原因。另外,考虑了绝热过程导致温度升高的影响,对 Johnson-Cook 本构模型进行了修正,使拟合曲线与实验曲线具有很好的一致性。

参考文献:

- [1] Wulf G L. The high strain rate compression of 1023 and 4130 steels[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1978,20(12):843-848.
- [2] Johnson C R, Cook W H. A constitutive mode and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperatures[C]//Zhague Z. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics[C]. Netherlands: The Hague, 1983:541-547.

- [3] Zerilli F J, Armstrong R D. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987,61(5):1816-1825.
- [4] Lee W S, Liu C Y. The effects of temperature and strain rate on the dynamic flow behaviour of different steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006,426:101-113.
- [5] Nemat-Nasser S. Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. *Mechanics of Materials*, 2003,35:1023-1047.
- [6] Guo W G, Nemat-Nasser S. Flow stress of Nitronic-50 stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. *Mechanics of Materials*, 2006,38:1090-1103.
- [7] 夏开文,程经毅,胡时胜. SHPB装置应用于测量高温动态力学性能的研究[J]. *实验力学*,1998,13(3):307-313.
XIA Kai-wen, CHENG Jing-yi, HU Shi-sheng. Application of SHPB apparatus to the measurement of high temperature dynamical mechanical behavior of materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998,13(3):307-313.
- [8] 田杰,胡时胜. 准静态压缩应力应变曲线测量方法的探索[J]. *实验力学*,2005,20(2):265-269.
TIAN Jie, HU Shi-sheng. Investigation on the method of measuring quasi-static compression stress-strain curve [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005,20(2):265-269.
- [9] 胡昌明. 镁铝合金(MB2)的动态力学性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.

Dynamic mechanical behavior and constitutive model of stainless steel

SHANG Bing¹, SHENG Jing², WANG Bao-zhen¹, HU Shi-sheng^{1*}

(1. *Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Anhui 230026, Hefei, China;*

2. *Department of Machine, Hubei Automotive Industries Institute, Shiyan 442002, Hubei, China)*

Abstract: Stress-strain curves of 0Cr17Mn5Ni4Mo3Al, at three Strain rates of 300, 1 000, 2 700 s⁻¹ and four temperatures of 25, 300, 500, 700 °C were experimentally obtained by using the split Hopkinson pressure bar equipped with a temperature controller. And the quasi-static experiment (0. 000 5 s⁻¹) was done in the material test system at three temperatures of 25, 300, 500 °C. Experimental results show that the flow stress decreases with temperature but increases with strain and strain rate. The traditional Johnson-Cook model was modified considering the thermal softening caused by the impact adiabatic process. The modified Johnson-Cook model is in good agreement with the experimental results.

Key words: solid mechanics; constitutive model; SHPB; stainless steel; Johnson-Cook model; temperature effect; strain rate effect

* Corresponding author: HU Shi-sheng
E-mail address: sshu@ustc.edu.cn
Telephone: 86-551-3601249