

文章编号: 1001-1455(2005)05-0451-06

45 钢动态塑性本构参量与验证^{*}

陈 刚, 陈忠富, 陶俊林, 牛 伟, 张青平, 黄西成
(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 运用静态实验机和 SHPB 装置, 对 45 钢在常温 $\sim 750^{\circ}\text{C}$ 、应变率为 $10^{-4}\sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 下的力学行为进行了研究, 拟合得到了 Johnson-Cook 本构模型参量。开展了 Taylor 圆柱撞击的火炮实验, 运用 LS-DYNA 进行了相应的数值模拟, 通过二者的比较对本构模型参量进行了验证, 表明所得模型参量可以较好地描述材料在高速变形下的大应变力学位行为。

关键词: 固体力学; 塑性本构参量; Taylor 实验; 45 钢; SHPB

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130.15

文献标志码: A

1 引 言

在金属快速成型、结构碰撞、弹丸侵彻以及爆炸作用等过程中, 结构材料将发生高速变形。材料的屈服应力、强度极限以及延伸率等参量在不同的变形速度及不同温度条件下将发生改变, 因此, 在分析工程结构在冲击载荷下的响应时, 需要能描述材料在大应变、宽应变率范围以及宽温度范围力学行为的本构模型。典型的本构模型通常定义等效应力为等效塑性应变、等效塑性应变率和温度的函数关系, 高应变率下金属材料的本构关系包括: 基于有效实验数据的纯经验性的本构模型(如 G. R. Johnson 和 W. H. Cook^[1]; A. S. Khan 等^[2]等)和基于材料变形机制的物理本构模型(如 F. J. Zerilli 等^[3])。

45 钢是一种中碳优质结构钢, 具有良好的综合力学性能, 在机械制造、交通运输、国防等方面得到了广泛应用, 人们从许多方面对其力学行为进行了研究。段占强等^[4]开展了钨合金圆柱体垂直冲击 60 mm 厚的 45 热轧钢板实验, 利用扫描电镜和光学金相显微镜研究了 45 钢高速冲击穿孔的显微组织; 许云华等^[5]以退火 45 钢为研究对象, 考察冲击接触载荷下亚表层微观形变特征与损伤; 王丽娟等^[6]采用人工预制内部裂纹法分析了 45 钢高速冲击下裂纹扩展的动态响应行为; 胡昌明等^[7]对 45 号钢在不同环境温度和应变率下的压缩应力应变关系进行研究, 给出了改进应变率项的修正 Johnson-Cook 模型参数拟合, 但没有考虑静动态实验曲线中应变强化的差异, 也没有其他实验论证所获得参数的合理性。

本文中运用材料试验机对 45 钢进行了拉、压、扭的静态力学性能测试, 并进行了静态高温(常温 $\sim 750^{\circ}\text{C}$)拉伸力学性能测试, 得到了 45 钢准静态载荷下的应力应变曲线, 然后利用 SHPB 实验装置获得了其动态压缩应力应变曲线, 拟合获得了相应的 Johnson-Cook 本构模型参数。然后通过 Taylor 圆柱撞击实验及相应的数值模拟对本构参量进行了验证。

2 材料力学性能实验结果

2.1 静态实验

运用 MTS810 试验机和 NDS-1 扭转试验机开展了 45 钢实心柱形试件的静态拉伸、压缩和扭转实验及常温 $\sim 750^{\circ}\text{C}$ 的静态拉伸实验, 得到了准静态条件下材料大变形的应力应变关系及其随温度的变化规律。常温的等效应力应变曲线(见图1)比较显示, 在材料的均匀变形段, 3种应力状态下的结果吻

* 收稿日期: 2004-11-15; 修回日期: 2005-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040)

作者简介: 陈 刚(1971—), 男, 博士研究生, 助理研究员。

合较好,材料具有较好的各向同性,基本满足 Mises 屈服准则。结果同时显示,扭转实验是一种用于测量材料大变形本构关系的理想手段,试件在断裂前均保持均匀变形,不会出现拉伸实验中的颈缩和压缩实验中的鼓状等不均匀变形所导致的大应变本构测量精度下降的影响^[8]。不同温度下的拉伸应力应变曲线(见图 2)显示了材料性能随温度的变化,材料屈服应力随温度上升而下降,到 750℃ 时,不到常温的 1/3。

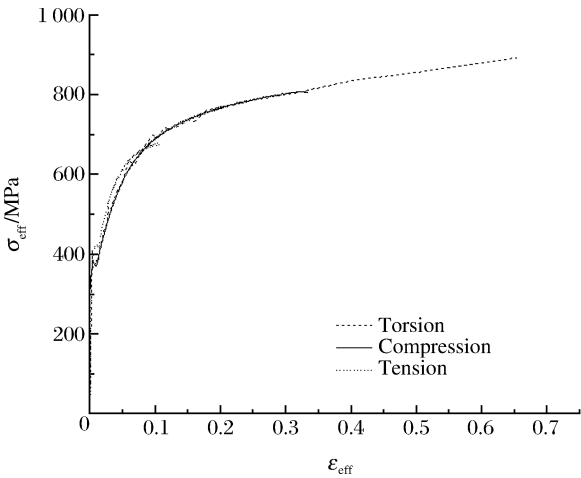


图 1 不同应力状态静态实验结果比较

Fig. 1 Static results of three stress states

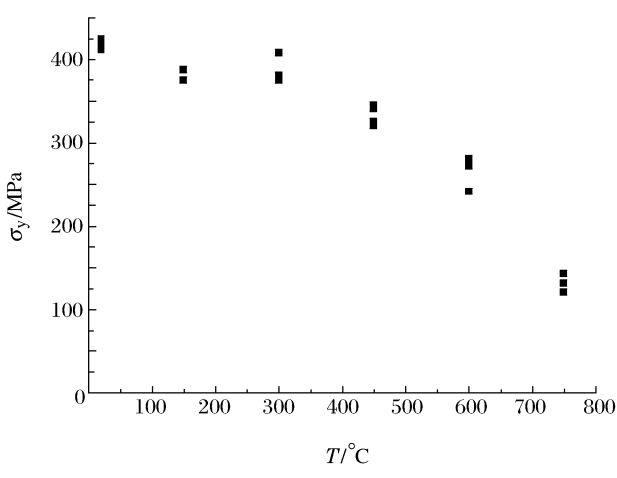


图 2 静态拉伸屈服应力随温度的变化

Fig. 2 Tensional yield stress varies with temperature

2.2 动态实验

动态压缩实验是在 SHPB 系统上进行的,该系统包含共轴安装的 3 根分别称为撞击杆、输入杆、输出杆的弹性长导杆及相关测试系统。试验过程中,将待测材料试件共轴夹持于输入杆与输出杆之间,撞击杆以某一速度撞击输入杆时,在输入杆内产生一个入射脉冲 ϵ_i ,当应力脉冲到达试件前端面后,试件在该应力脉冲作用下发生变形,与此同时,在输入杆中产生一个反射脉冲 ϵ_r ,而在输出杆中产生一个透射脉冲 ϵ_t 。这些脉冲可以通过分别粘贴在输入杆和输出杆上的应变片来测得。利用一维应力假定和均匀性假定,可以获得试件的应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 、应变 ϵ_s 、应力 σ_s 随时间的关系,进而得到试件材料在各个应变率下的真应力-真应变关系

$$\dot{\epsilon}_s = -\frac{2c_0}{l}\epsilon_r, \quad \epsilon_s = -\ln\left(1 + \frac{2c_0}{l_0}\int_0^t \epsilon_r dt\right), \quad \sigma_s = \frac{A}{A_s}E\epsilon_t \tag{1}$$

式中: c_0 为压杆的弹性波速; l_0 为试件的初始长度; l 为试件的瞬时长度; E 为压杆的弹性模量; A 为压杆的横截面积; A_s 为试件的瞬时横截面积。

在实验中采用在输入杆、输出杆上各对称粘贴两片应变片分别测量的方法,可以考察波导杆中的弯曲效应,也可防止某一应变片断线时导致试验无效。同时在实验中使用了输入波形整形技术。图 3 给出了一发 45 钢材料的实验测试波形图像。由图可见,在输出杆同一横截面的相对两侧所测得的应变结果基本一致。弯曲效应较小。因此在出现某一应变片断线而未测到波形时,采用另一应变片的单一波形进行分析处理也是有效的。同时通过波形整形,入射波形的振荡减小,使反射和透射波形的振荡也较小,可以提高实验的精度。

通过 SHPB 实验,得到了 45 钢材料平均应变率范围在 $100\sim4\,000\text{ s}^{-1}$ 间的材料动态压缩力学性能。表 1 给出了实验得到的屈服应力随应变率变化的结果,图 4 给出了几个应变率下的真应力-真应变关系的比较。45 钢具有较强的应变率效应,平均应变率为 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 左右时,材料的屈服应力是静态的 2.3 倍左右。曲线同时显示,材料在不同应变率下的应变强化效应有一定的差异,总体上,高应变率的较低应变率的强化效应弱。

表 1 45 钢材料实验应变率 $\dot{\epsilon}$ 与屈服应力 σ_y 的关系
Table 1 Yield stress of 45 steel varies with strain rates

$\dot{\epsilon}$	σ_y	$\dot{\epsilon}$	σ_y	$\dot{\epsilon}$	σ_y	$\dot{\epsilon}$	σ_y	$\dot{\epsilon}$	σ_y	$\dot{\epsilon}$	σ_y
90	548	295	599	540	660	930	724	1 430	750	1 860	798
160	556	300	600	600	661	1 010	725	1 510	799	3 900	899
270	593	380	628	600	658	1 260	745	1 600	761	3 990	893
280	594	440	632	770	697	1 360	732	1 780	748	4 060	894

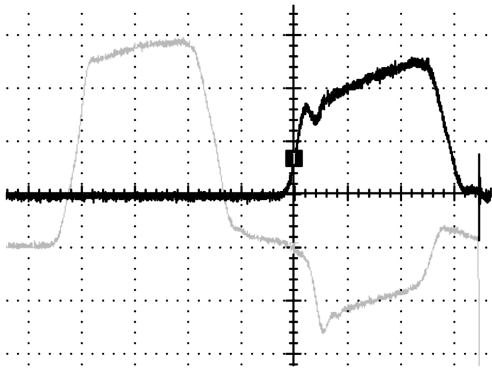


图 3 典型实验测试波形
Fig. 3 Experimental waves

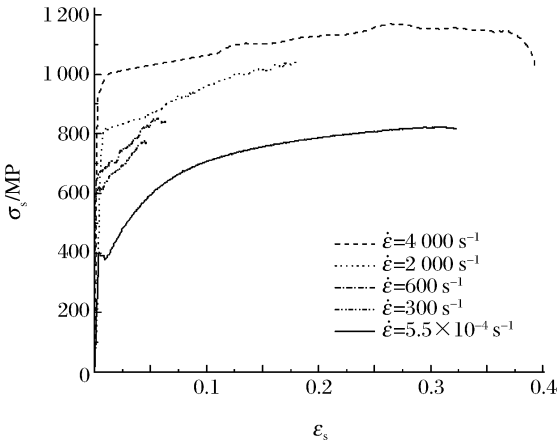


图 4 45 钢压缩应力-应变曲线
Fig. 4 Compressive stress-strain curves of 45 steel

3 45 钢模型及参量

3.1 模型选择

迄今已提出了多种本构模型来描述金属材料的率相关动态响应,这主要有两类:经验本构模型,如:Johnson-Cook(J-C)模型、Kloop-Clifton-Shawki 模型、Campbell 模型、Klepaczko 模型等;以及基于物理学的本构模型,如:Hoge-Mukherjee 模型、Preston-Tonks-Wallace(PTW)模型、Steinberg-Guinan 模型、Steinberg-Guinan-Lund(SGL)模型、Zerilli-Amstrong(ZA)模型、广义 Zerilli-Amstrong 模型和 MTS 模型等。在上述模型中,J-C 模型是得到了广泛应用的模型之一,如动力学程序 LS-dyna, MSC. Dytran 和 ABAQUS/explicit 均采用了该模型。它考虑了温度、应变率和应变等因素,形式简单,具有清晰的物理解释,同时参数较少,并较容易得到。J-C 模型适用于描述金属材料从低应变率到高应变率下的动态行为,甚至可以用于准静态变形的分析。针对前述实验结果采用 J-C 模型进行描述。

J-C 模型代表了一类用乘积关系描述应变影响、应变率影响和温度影响函数关系,其具体形式为

$$\sigma = [A + B(\epsilon^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^m] \tag{2}$$

式中: A, B, n, C, m 为材料参数; $\dot{\epsilon}^*$ 为量纲一应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$; $\dot{\epsilon}^p$ 为有效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率,一般取 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为量纲一温度, T_r 为参考温度, T_m 为熔点温度。

3.2 参量拟合

通过静态常温和高温实验及 SHPB 实验的结果进行参数拟合,同时注意到静态实验为等温过程,而 SHPB 实验为绝热过程。在拟合中考虑了绝热过程中的温升效应所造成的软化效应,其温升为

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c_p} \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon^p) d\epsilon^p \tag{3}$$

式中: η 为塑性功转化成热的因子,取为 $0.9^{[9]}$; ρ 为材料密度; c_p 为材料比定压热容。

通过静态实验和 SHPB 实验获得的屈服点-应变率关系拟合参数 A 、 C ;通过静态高温实验,拟合得到 m ;由于材料静动态应力应变曲线表现出不同的强化规律,与 J-C 模型所描述的强化效应有一定的差异,虽然有研究人员对此提出了修正模型^[2],考虑所得本构主要用于冲击问题的数值模拟,仍采用 J-C 模型原有的形式,但主要通过动态实验曲线,将 A 、 C 代入,同时计及(3)的温升和上一步得到的温度软化参量,进行拟合可得到 B 、 n 。

取参考应变率为 1 s^{-1} ,对静动态实验结果用最小二乘法拟合得到了 J-C 模型参量: $A=507\text{ MPa}$, $B=320\text{ MPa}$, $n=0.28$, $C=0.064$, $m=1.06$ 。

4 本构方程的实验验证

由于材料性能实验采用的是简单加载,并且所测试的应变范围有一定的限制,而在工程结构受到冲击载荷作用时,可能发生不断的加、卸载过程以及应力状态的变化,同时可能发生非常大的塑性变形。因而,由性能实验确定材料模型参数以后,通过将其他撞击实验结果与本构预期结果进行比较来验证本构是非常必要的。Taylor 圆柱撞击是非常适合的一类验证实验,因为在 Taylor 撞击中,材料变形包括了一个大范围的应变率和应变,这些实验可提供超过 10^5 s^{-1} 的应变率和超过 2.0 的应变。而且,也经历了系列应力状态。Taylor 的简单分析可以较好地分析圆柱撞击试件的长度变化,但不能预计试件的形状,而在这方面,应变率和应变强化效应起着非常重要的作用^[9]。

运用 25 mm 口径火炮开展了圆柱形弹体撞击刚性靶体的实验。试件尺寸为 $\varnothing 25\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,通过电磁靶和数码高速摄影测试试件的初始速度,并观测试件撞击的状态。实验速度范围控制在 $150\sim 300\text{ m/s}$,更低的速度下试件的变形不明显,而在更高的速度下试件将出现破碎。高速摄影和回收后的弹体显示撞击状态保持为垂直撞击,结果具有较好的对称性。图 5 给出了实验原始试件及 3 种撞击速度下的残余试件的照片,图 6 为照片中 4 发试件重叠到一起的外形比较。在距弹尾端 40 mm 处即可测量到弹体的膨胀变形,弹体撞击端出现蘑菇形墩粗,并且速度越高越明显。在 290 m/s 的速度撞击情况下,试件长度方向压缩 23 mm,试件直径最大膨胀到 48 mm。

运用 LS-DYNA 对实验进行了数值模拟,试件材料模型采用 Johnson-Cook 关系,参数为前述材料实验拟合结果。图 7 给出了 3 种速度下数值模拟的原始单元网格和撞击结束后的最终变形,试件中的应变呈不均匀分布,在 3 种速度下的最大塑性变形分别为 0.636、1.11、2.04,位于试件撞击端中心部位。图 8 为数值模拟与实验所得的试件外形比较,二者的变形特征是一致的,在长度和径向的变形均符合得较好,表明所得材料本构模型参量在变形远大于材料性能实验的情况下,能够较好地描述材料在高速变形下的力学性能。

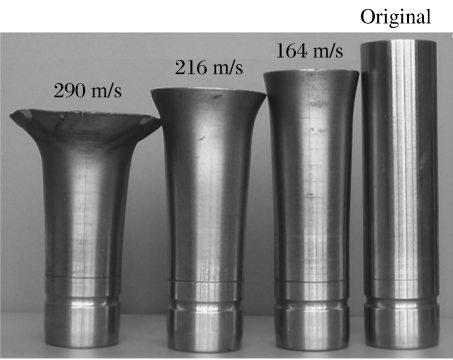


图 5 试件照片

Fig. 5 Photo of specimen

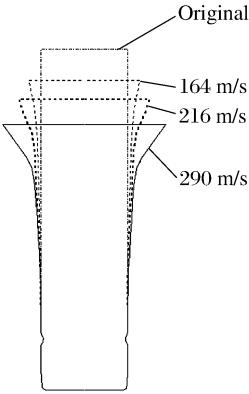


图 6 试件形状比较

Fig. 6 Comparison of specimen shape

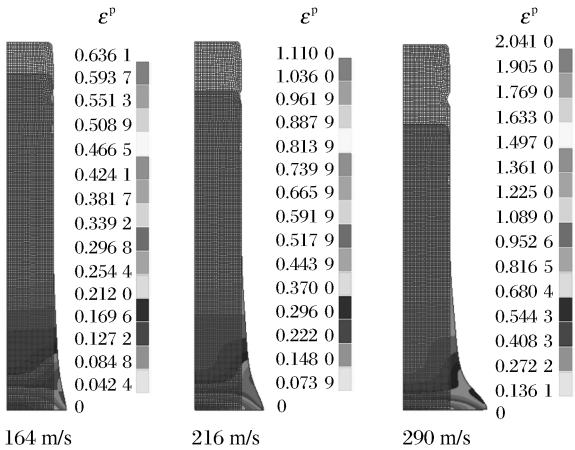


图 7 试件原始单元网格及不同速度下的最终变形

Fig. 7 Original mesh of specimens and their final shapes

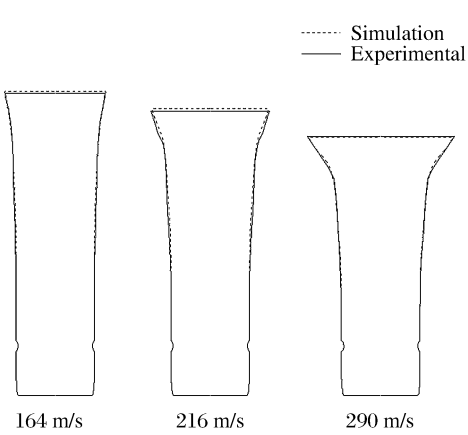


图 8 数值模拟与实验结果的比较

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results

5 小 结

利用静态高温实验和 SHPB 的实验结果,对 45 钢的动态塑性本构模型参量进行了研究,拟合得到了 Johnson-Cook 本构模型参量,通过 Taylor 圆柱撞击实验以及相应的数值模拟对模型参量进行了验证。

在不同撞击速度下,实验与数值模拟结果的试件外形均较为一致,表明所得模型参量可以较好地描述材料在高速变形下较大范围应变的力学行为,所得模型参量可用于工程结构在冲击载荷作用下的力学响应分析,所用方法也可用于其他金属材料本构模型参量的确定。

将不同速度下 Taylor 撞击试件外形的实验结果与数值模拟进行比较,可对模型参量进行验证,但总体上说,还是定性的。对本构模型及其参量的定量评估仍需要开展进一步的研究工作。

参考文献:

[1] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics[C]. The Hague, Netherlands, 1983:541—547.

[2] Khan A S, Liang R. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures: Experiments and modeling[J]. International Journal of Plasticity, 1999,15:1089—1109.

[3] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987,61(5):1816—1825.

[4] 段占强,丛美华,苏会和,等. 45 # 钢高速冲击穿孔的显微组织[J]. 材料研究学报,2001,15(4):403—408. DUAN Zhan-qiang, CONG Mei-hua, SU Hui-he, et al. Microstruture investigation of the penetration bore of 45 steel in high speed impacting[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2001,15(4):403—408.

[5] 许云华,熊建龙,武红,等. 冲击接触载荷下 45 钢的微观塑性变形特征与损伤[J]. 金属学报,2000,36(8):809—812. XU Yun-hua, XIONG Jian-long, WU Hong, et al. Characteristics of micro-deformation and damage of mild carbon steel under impact contact load[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000,36(8):809—812.

[6] 王丽娟,刘立忠,韦东滨. 高速微粗 45 钢圆柱体内部裂纹扩展的动态响应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,32(5):100—102. WANG Li-juan, LIU Li-zhong, WEI Dong-bin. Dynamic response analysis of propagation of internal cracks in high speed up set 45 steel cylinder[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000,32(5):100—102.

[7] 胡昌明,贺红亮,胡时胜. 45 号钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(2):188—192.

- HU Chang-ming, HE Hong-linag, HU Shi-sheng. A study on dynamic mechanical behaviors of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(2):188—192.
- [8] 何蕴增,邹广平. 实心圆试件扭转试验确定大应变本构关系[J]. 力学学报,2001,33(6):828—833.
HE Yun-zeng, ZOU Guang-ping. Determine finite-strain stress-strain relationship by torsion test with cylindrical specimens[J]. Acta Mechanic Sinica, 2001,33(6):828—833.
- [10] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994:374—378.

Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel

CHEN Gang^{*}, CHEN Zhong-fu, TAO Jun-lin, NIU Wei,

ZHANG Qing-ping, HUANG Xi-cheng

(*Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: Dynamic mechanical behaviors of 45 steel have been studied with the split Hopkinson pressure bar(SHPB) and static material test system over a wide range of strain rates and temperatures. The Johnson-Cook constitutive relationship parameters are determined through these experiments. The parameters are validated by comparison between the Taylor experiments and the simulations. The consistency between experimental observation and numerical simulation indicates that the parameters obtained can describe the large strain mechanical behavior of 45 steel under high speed deformation.

Key words: solid mechanics; dynamic plastic constitutive parameter; Taylor impact; 45 steel; SHPB

* Corresponding author: CHEN Gang
E-mail address: chengang@caep.ac.cn
Telephone: 0816-2485419