

文章编号: 1001-4888(2005)04-0605-05

TC4 动态力学性能研究^{*}

陈 刚¹, 陈忠富¹, 陶俊林², 牛 伟¹, 何 鹏¹

(1. 中物院结构力学研究所, 四川绵阳 919 信箱 401#, 621900; 2. 西南科技大学, 绵阳 621000)

摘要: 材料的本构模型参量是结构冲击动力响应数值模拟的基础。本文运用静态实验机和 SHB 装置, 对 TC4 在常温 $\sim 750\text{C}^\circ$ 、应变率 $10^{-4} \sim 10^3 \text{s}^{-1}$ 下的力学行为进行了研究, 得到了相应的塑性本构模型参量。通过 Taylor 撞击实验及其数值模拟对本构模型参量进行了验证, 表明所得参量可较好描述冲击载荷作用下材料的塑性力学行为。

关键词: 塑性本构模型; Taylor 撞击; TC4 钛合金

中图分类号: O347 **文献标识码:** A

1 前言

TC4 合金是一种 $(\alpha+\beta)$ 型钛合金, 其综合性能优良, 塑性和冲击韧性高, 因而, 在航空航天、船舶、化工及常规兵器等领域得到非常广泛的应用。采用 TC4 材料制作的构件可能会受到高速撞击、爆炸等强动载荷作用, 结构响应的研究需要有相关的材料动态本构关系为基础。材料模型要较充分反映材料在此类情况下高速变形响应, 就必须计及大应变、以及应变率和温度的大幅度变化等对流动应力的影响。对此, 人们提出了多种本构模型来描述金属材料的率相关的动态响应, 例如 Johnson-Cook^[1]、Zerilli-Armstrong^[2]、Steinberg-Guina^[3]和 Follansbee-Kocks (mechanical threshold stress model)^[4]等模型。其中, Johnson-Cook (J-C) 模型是应用最为广泛的模型之一, 如动力学程序 LS-dyna、MSC. Dytran 和 ABAQUS/explicit 均采用了该模型。J-C 模型是在 1980 年代针对撞击、弹道侵入等问题而发展起来的, 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^[5]。

针对 TC4 的一些力学性能研究, 已有很多相关报道。张树华^[6]用长样品方法对 TC4 样品进行了常压下弹性模量测量, 得到了材料的杨氏模量 E 和剪切模量 G 的回归方程。庄仕明等^[7]报导了由短脉冲激光引起的应力波加载及电炮驱动 Mylar 膜平面飞片碰撞 TC4 合金靶的实验及数值计算研究结果。董新龙等^[8]利用紧凑剪切断裂试验和有限元方法数值模拟对 TC4 合金 II 型断裂行为进行了研究。对裂纹开裂方向以几乎沿原裂纹面方向扩展为特征的韧性剪切断裂形态的剪切型扩展进行了探讨。刘勇等^[9]研究了温度、应力、晶粒度对 TC4 合金应力松弛的影响。聂蕾等^[10]采用数理统计原理, 将数值模拟与物理模拟相结合, 研究了锻造热力参数和组织演变过程对 TC4 合金热成形性能的影响, 建立一种适用于 TC4 合金锻造工艺设计和过程控制的新型本构方程。范亚夫等^[11]运用 Hopkinson 拉伸实验和圆筒爆炸试验获取的高速摄影胶片结合数值模拟对 TC4 材料的 J-C 模型参量进行了研究, 通过调节相关材料参数使其与高速摄影胶片吻合, 进而确定 J-C 模型中的相关材料常数, 由于摄影胶片的分辨率等因素, 这种方法得到的结果的精度受到一定的限制, 同时也没有采用其它实验进行验证。

^{*} 收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040)

通讯作者: 陈刚(1971-), 男, 助研, 博士研究生, 主要从事材料与结构的瞬态力学效应研究。E-mail: chengang@caep.ac.cn

本文运用材料试验机对 TC4 钛合金进行静态高温(常温~750°C)拉伸力学性能测试,得到了 TC4 钛合金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 J-C 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

运用 MTS810 试验机开展常温~750°C 的静态拉伸实验,得到了材料静态下大变形的应力应变关系。图 1 给出了不同温度下的拉伸屈服应力($\sigma_{0.2}$)的变化。材料屈服应力随温度升高而降低,在 750°C 时,其屈服应力不到常温的 1/3。

高应变率实验是在 SHPB 系统上进行的,该系统包含共轴安装的三根分别称为撞击杆、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往回的反射脉冲 ϵ_r ,而在输出杆中产生一个向前的透射脉冲 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,可以通过以下公式取得试件的应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 、自然应变 ϵ_s 、真应力 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~自然应变关系:

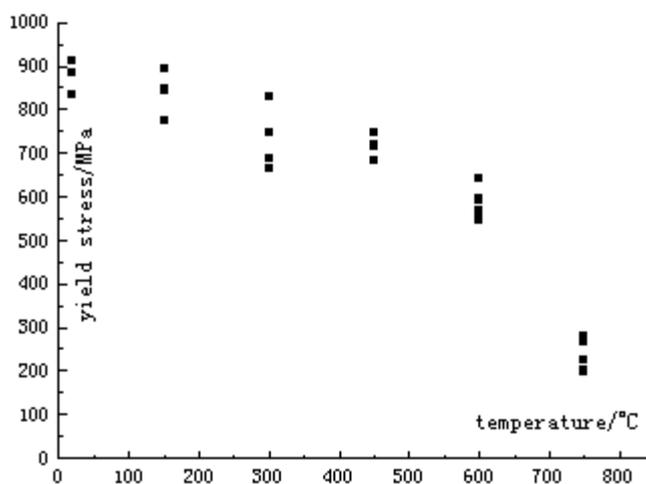


图 1 不同温度下的拉伸屈服应力

Fig. 1 Tensional yield stress varies with temperature

$$\dot{\epsilon}_s = -\frac{2C_0}{l}\epsilon_r \quad (1)$$

$$\epsilon_s = -\ln\left(1 + \frac{2C_0}{l_0}\int_0^t \epsilon_r d\tau\right) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{A}{A_s}E\epsilon_t \quad (3)$$

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, $l = l_0 + 2C_0\int_0^t \epsilon_r d\tau$; 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, 考虑试件材料塑性不可压, $A_s = \frac{l_0}{l}A_0$, A_0 为试件初始横截面积。

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,同时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 2 给出了一发 TC4 材料的实验测试波形图像。由图 2 可见,在波导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。

运用前述公式(1)~(3)对 SHPB 实验的波形数据进行处理,得到了 TC4 在应变率范围在 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的材料动态压缩力学性能。图 3 给出了几个应变率下的应力应变关系的比较,表 1 给出 SHPB 实验中不同应变率下的屈服应力,结果具有一定的分散性,但在总体上,TC4 存在一定的应变率效应,随着应变率的增加,材料的流动应力随之增大。

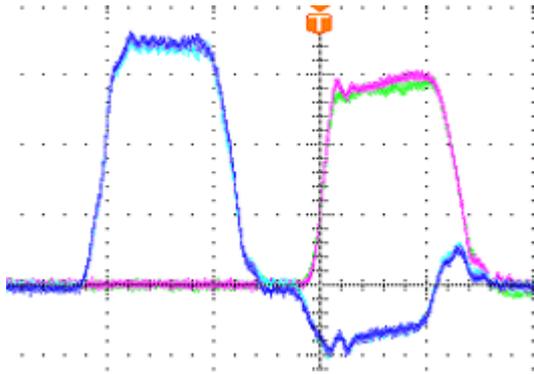


图 2 实验测试波形

Fig.2 Experimental waves

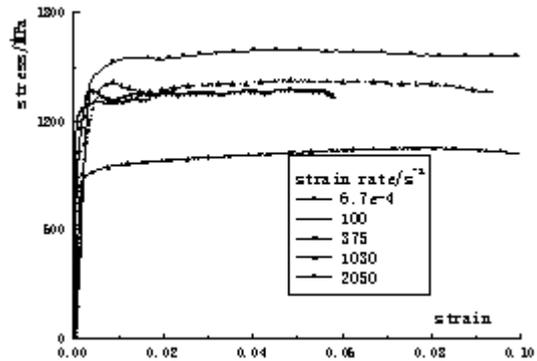


图 3 TC4 在不同应变率下的应力应变曲线

Fig.3 Compressive stress-strain curves of TC4

表 1 TC4 钛合金材料实验的应变率与屈服应力关系

Tab.1 Yield stress of TC4 varies with strain rates

应变率/s ⁻¹	100	130	140	140	160	175	375	390	500
屈服应力/MPa	1300	1330	1300	1330	1300	1240	1340	1350	1300
应变率/s ⁻¹	510	850	890	1030	2050	2050	2130	2160	2450
屈服应力/MPa	1305	1500	1505	1335	1540	1535	1585	1560	1540
应变率/s ⁻¹	2873	3857							
屈服应力/MPa	1565	1553							

3 材料模型参量分析

3.1 J-C 材料模型

J-C 模型是经验型关系, 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:

$$\sigma = f_1(\epsilon) f_2(\dot{\epsilon}) f_3(T) \quad (4)$$

f_1 反映流变应力对应变的依赖性; f_2 反映流变应力的应变率敏感性; f_3 反映流变应力与温度关系。

J-C 模型的具体形式为:

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^m] \quad (5)$$

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

3.2 参量拟合

一般认为金属材料的力学性质具有较好的各向同性, 因此在结果分析中没有区分拉伸与压缩。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:

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho C_p} \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon_p) d\epsilon_p \quad (6)$$

式中, η 为塑性功转化成热的因子, 取为 0.9^[12]; ρ 为材料密度; C_p 为材料比热。

J-C 模型将三种效应进行了解耦处理, 然后再通过乘积方式联系起来, 固定两个变量, 即可得到关于单一因素的简单函数。具体拟合步骤如下:

- 1) 通过常温静态实验和 SHPB 实验获得的屈服点—应变率关系拟合参数 A 和 C ;
- 2) 通过静态高温实验, 拟合得到 m ;
- 3) 考虑所得本构主要用于冲击问题的数值模拟, 主要通过动态实验曲线, 将 A 和 C 代入, 同时计

及(6)的温升和上一步得到的温度软化参量,进行拟合可得到 B 和 n 。

取参考应变率 1s^{-1} ,对前述静动态实验结果通过最小二乘法进行拟合得到了 J-C 模型参量如表 2。

表 2 TC4 钛合金 J-C 模型参量

Tab. 2 Johnson-Cook model parameters of TC4

A/MPa	B/MPa	n	C	m
1135	250	0.2	0.032	1.1

4 本构方程的实验验证

材料模型参数通过一系列温度和应变率的实验确定以后,通过比较撞击实验的本构模型预期结果与实际实验结果来验证本构模型参量是非常必要的。Taylor 圆柱撞击是非常适合的一类验证实验, Taylor 撞击实验易于开展,并且,在撞击过程中,材料变形经历了系列应力状态和大范围的应变率区间^[1]。Taylor 的简单分析可以较好的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。例如,对于理想弹塑性材料,塑性变形主要集中在试件-靶体界面上,而对于应变强化情况,变形几乎传播到整个试件^[12]。

运用 25mm 口径火炮开展了圆柱形弹体撞击刚性靶体的实验。靶体采用 30CrMnSi 250mm 的立方块状体,试件尺寸为 $\phi 25\text{mm} \times 100\text{mm}$ 和 $\phi 25\text{mm} \times 200\text{mm}$,通过网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。实验速度范围为 $170 \sim 260\text{m/s}$,速度在 210m/s 以上的实验中,试件头部出现了破碎。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。同时,在试件碰靶后,靶面无明显凹痕。图 4 给出了长度为 100mm 的实验原始试件及两种撞击速度下的残余试件的照片,其中 $V=213\text{m/s}$ 速度下的试件为碎块的复原。

运用 LS-DYNA 对实验进行了数值模拟,试件材料模型采用 J-C 关系,参数为前述材料实验拟合结果,靶体材料取为弹性。图 5 给出了 181m/s 速度下数值模拟得到的试件塑性变形分布图,在此速度下,最大塑性变形为 0.285,试件中的应变分布极不均匀。图 6 为数值模拟与实验结果的试件外形比较。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,显示所得材料本构模型参数可以较好描述材料在高速变形下的力学性能。



图 4 试件照片

Fig. 4 Photo of specimens

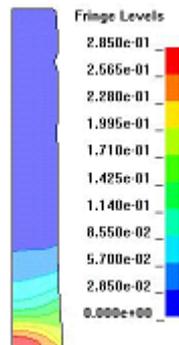


图 5 试件塑性变形分布图

Fig. 5 Plastic strain contours of specimen(181m/s)

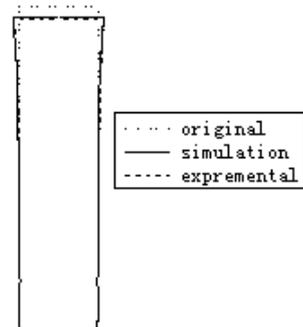


图 6 数值模拟与实验结果的比较

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental result

5 小结

利用静态高温实验和 SHPB 的实验结果,对 TC4 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 圆柱撞击实验及其数值模拟对本构模型参量进行了验证,表明所得结果可以较好的描述材料在高速变形下的力学行为。

在较高速度的 Taylor 撞击试件出现破碎,难于得到较大的塑性变形,表明对于较脆的材料,可验

证的撞击速度受到限制,该方法对于本构模型参量的验证具有一定的局限性。

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[C]. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983. 541~547
- [2] 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
- [3] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-80465, Revision 2, 1979.
- [4] Follansbee P S, Kocks U F. A Constitutive Description of the Deformation of Copper Based on the use of the Mechanical Threshold Stress as an Internal State Variable[J]. Acta Metallurgica, 1988,36:81~93
- [5] Hallquist J O. LS-dyna keyword user's manual v970. Livermore Software Technology Corporation, California, 2003
- [6] 张树华. TC4、16Mn 合金及 A1203 陶瓷的高温弹性模量[J]. 高压物理学报,1995,9(2)(Zhang Shuhua. HIGH TEMPERATURE ELASTIC MODULI OF TC4,16Mn AND A1203 CERAMIC. CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS, 1995,9(2)(in Chinese))
- [7] 庄仕明等. 高应变率下 TC4 及 TC9 钛合金的动态断裂[J]. 高压物理学报,1995,9(2)(Zhuang Shiming, et al. DYNAMIC FRACTURE OF TC4 AND TC9 TITANIUM ALLOY UNDER HIGH STRAIN RATES. CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS, 1995,9(2)(in Chinese))
- [8] 董新龙等. 两种类型的剪切断裂韧性及其裂纹扩展[J]. 宁波大学学报(理工版), 2000,13(1)(DONG Yin-long, et al. Two Types Shear Fracture Toughness and Its Crack Extension. JOURNAL OF NINGBO UNIVERSITY (NSFE), 2000,13(1)(in Chinese))
- [9] 刘勇等. 温度、应力及晶粒度对 TC4 合金应力松弛性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(8)(Liu Yong, et al. Effects of Temperature, Stress and Grain Size on Stress Relaxation in the Alloy TC4. RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2003,32(8)(in Chinese))
- [10] 聂蕾等. TC4 合金的新型本构关系[J]. 航空材料学报, 2001, 21(3)(NIE Lei, et al. New constitutive relationship for Ti-6Al-4V alloy. JOURNAL OF AERONAUTICAL MATERIALS, 2001,21(3)(in Chinese))
- [11] 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测定[J]. 力学与实践, 2003, 25(5)(FAN Yafu, DUAN Zhuping. Cylinder explosive test and material model of Johnson-Cook, MECHANICS IN ENGINEERING, 2003, 25(5)(in Chinese))
- [12] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York, John wiley & sons inc,1994

Study on Plastic Constitutive Relationship Parameters of TC4 Titanium

CHEN Gang¹, CHEN Zhong-fu¹, TAO Jun-lin², NIU Wei¹, HE Peng¹

(1. Institute of structural Mechanics, CAEP, Sichuan 621900, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: The quality of the material model is a key factor affecting the accuracy of results of a finite element simulation, especially of the impact phenomenon. Dynamic mechanical behaviors of TC4 titanium were studied over the strain rate range from 10^{-4} to 10^3 s⁻¹ and temperatures range from room temperature to 750°C with a split Hopkinson pressure bar system and a static material test system. The parameters of Johnson-Cook plastic constitutive relationship which takes into account of the effect of strain, strain rate and temperature on plastic flow stress were obtained through these experiments. The Taylor impact experiment of impact velocity about 200 m/s was carried out. The corresponding numerical simulation was conducted with the explicit finite element code LS-DYNA. The parameters are validated through the comparison between the Taylor experiment with its simulation. The consistency between experimental observation and numerical simulation indicates that the parameters obtained have the ability to describe the plastic behavior of TC4 titanium under high speed deformation.

Key words: dynamic plastic constitutive relationship; Taylor impact; TC4 titanium