

文章编号: 1001-1455(2003)04-0305-04

内爆炸加载条件下圆筒的膨胀、破裂规律研究*

谭成文, 王富耻, 李树奎, 王 鲁

(北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘要: 以经典热粘塑性本构关系(John-Cook 本构关系和 Power law 本构关系)为基础, 建立了更适当表征材料特征的新的、解耦的本构关系。采用 SHPB(分离式霍普金森杆)技术测定了常用弹箭材料 35CrMnSiA 的不同应变率下的应力、应变关系, 并采用拟合的方法确定了本构方程中的材料常数。与高速摄影技术测得的径向位移函数及圆筒材料的损伤演化方程相结合, 建立了控制内爆炸加载圆筒膨胀, 直至破裂的完备方程组, 完成了内爆炸加载圆筒问题的数值模拟, 计算结果与以往有关箭弹材料圆筒膨胀的实验结果符合较好。

关键词: 固体力学; 损伤演化方程; SHPB; 圆筒; 内爆炸加载

中图分类号: O346; O354

国标学科代码: 130°1520

文献标志码: A

1 引 言

对内爆炸加载条件下圆筒的膨胀、破裂规律的研究有着十分重要的理论意义和直接应用背景。科学工作者在这方面作了大量的工作, 但早期的研究工作往往从直观实验出发总结出经验性结论, 直到 G. I. Taylor^[1] 提出著名的壳体动态断裂应力准则——爆轰产物压力降为材料的屈服强度时壳体最终完全破裂后才进入定量的理论研究阶段。封加坡^[2] 适时将损伤力学的研究成果引入到研究工作中, 建立了一个针对微孔洞型损伤材料的损伤演化方程, 对弹壳变形、损伤、破坏过程进行了较为细致的研究, 得到了一系列有意义的结果。后来李永池等^[3~4] 以变形热力学、塑性理论为基础建立了增量型含损伤的热塑性本构关系, 并将其应用于内爆炸圆筒的变形、破坏问题的研究中, 完成了系列的数值模拟, 得到了一些对基础研究和工程应用有意义的结论, 但他的研究未考虑材料的粘性, 这是在爆炸加载条件下不能忽略的。

本文中, 作者在前人对材料本构关系研究的基础上建立了解耦的粘塑性材料本构关系, 并采用 SH-PB 技术确定了材料的本构关系中的材料常数。同时采用高速摄影狭缝扫描技术对圆筒膨胀的径向位移函数和径向速度函数进行了测定。将上述研究结果应用于圆筒的膨胀、破裂规律的研究, 完成了一些有关圆筒膨胀物理量的理论预测。

2 材料动态本构关系

材料动力学响应不同于准静态条件下材料的力学行为, 在这方面前人的积累较少, 但要完成圆筒膨胀参数的理论预测必须确定合适的材料本构关系。对于内爆炸加载圆筒, 圆筒发生贯穿性断裂前要发生很大的塑性变形, 因此必须考虑塑性阶段; 另外, 一般钢铁材料在爆炸载荷作用下的动态断裂过程对应变率都较为敏感, 因此本构关系也要考虑材料粘性的影响。所以本文作者在经典的动态本构方程(Johnson-Cook 本构方程和 Power law 本构方程)基础上建立了另外一个本构关系, 并采用 SHPB 技术确定了其中的材料常数。

Johnson-Cook 本构方程为

$$\tau = (\tau_0 + B\gamma^n)(1 + C \ln(\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0))(1 - T^*{}^m) \quad (1)$$

* 收稿日期: 2002-09-23; 修回日期: 2002-11-29

作者简介: 谭成文(1977—), 男, 博士研究生。

式中： τ_0 、 B 、 C 、 m 、 n 为材料常数， τ 和 γ 分别为真实应力和真实应变， $\dot{\gamma}_0$ 为参考应变率，当材料处于室温环境时， $T^* = 0$ 。

Power law 本构方程为

$$\tau = \tau_0(1 + \gamma/\gamma_0)^N (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^M \exp(-\lambda(T - T_{ref})) \tag{2}$$

式中： N 、 M 、 λ 为材料常数， γ_0 、 T_{ref} 分别为参考应变和参考温度，一般情况下 T_{ref} 取室温，因此当材料处于室温时， $T - T_{ref} = 0$ 。

从上述本构关系的表达式中可以看出，这两个本构关系都包括三个相互间解耦的部分，即应变硬化项、应变率硬化项和温度软化项。文献[4] 的实验结果表明：Johnson-cook 本构方程的应变率硬化项能够较好地反应材料处于大应变、高应变率及高温下的实际情况，而 Power law 本构方程的应变硬化项和温度软化项则更能反应实际情况，因此本文将这两个本构关系中的优点组合起来，形成一个新的本构关系，其形式为

$$\tau = \tau_0(1 + \gamma/\gamma_0)^N (1 + C \ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)) \exp(-\lambda(T - T_{ref})) \tag{3}$$

式中： C 为材料常数。本文中为了计算方便不考虑温度软化问题，因此本构关系可进一步简化为

$$\tau = \tau_0(1 + \gamma/\gamma_0)^N (1 + C \ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)) \tag{4}$$

对于不同的材料需要确定本构关系中的材料常数，SHPB 技术是有效的测量材料高应变率下应力应变关系的技术。本文中测定了常用弹箭材料 35CrMnSiA 在淬火后 250℃回火热处理条件下的系列应力应变关系，采用拟合方法获得了该材料本构关系中的常数，实验曲线如图 1 所示。材料参数为：

$\gamma_0 = 0.00001$ ， $\dot{\gamma}_0 = 3000s^{-1}$ ， $N = 0.17$ ， $C = 0.13$ 。由于不同的应变率条件下材料的热软化效应不同，这里 τ_0 包含了热软化效应，因此要根据应变率的不同进行调整；当应变率低于 0.30 时，最大整体相对误差不大于 5% (如图 1)。

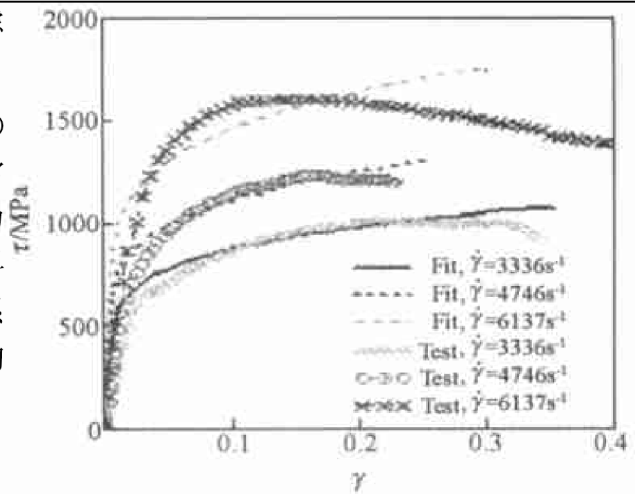


图 1 35CrMnSiA 在淬火后 250℃回火材料的系列应力应变关系
Fig. 1 Stress-strain of steel 35CrMnSiA

3 径向位移函数 $R(t)$ 和径向速度函数 $\dot{u}(t)$

高速摄影技术是爆轰物理研究中常用的技术，该技术可以大大扩大人眼的时域分辨率^[5]，通过高速摄影狭缝扫描技术可以测得圆筒在爆炸加载条件下圆筒的径向位移函数和径向速度函数。

实验采用 JWL 高速摄影系统，转速 37500r/min，直线扫描速度 1.859km/s；圆筒内径 26mm，外径 36mm，壁厚 5mm，如图 2 所示；实验采用密度为 $1.588 \times 10^3 kg/m^3$ 的 TNT 炸药，装药方式为柱状药柱压装。

高速摄影实验照片如图3所示，通过测量，可以得到每间隔特定时间圆筒的径向位移（相对于圆筒

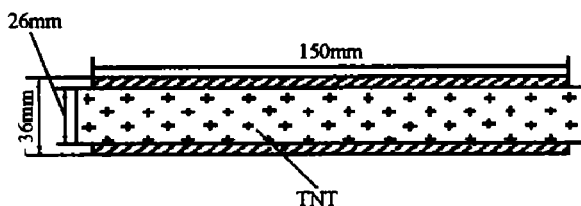


图 2 圆筒及装药示意图
Fig.2 Tube and explosive

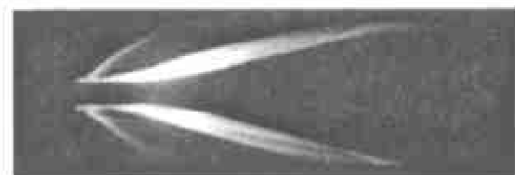


图 3 圆筒狭缝扫描照片(横向代表时间,纵向代表膨胀量)
Fig.3 High speed streak image of tube expansion

轴线),采用数值方法可以得到圆筒膨胀的径向位移函数,其实验测试结果和数值结果如图 4 所示。对位移函数求一阶导数可以得到速度函数,其表达式为

$$R(t) = (-0.00006t^3 + 0.00605t^2 + 1.3)/100 \quad (5)$$

$$u(t) = (-0.00018t^2 + 0.0121t) \times 10^4 \quad (6)$$

式中: $R(t)$ 、 $u(t)$ 和 t 的单位分别为 m、m/s 和 s。

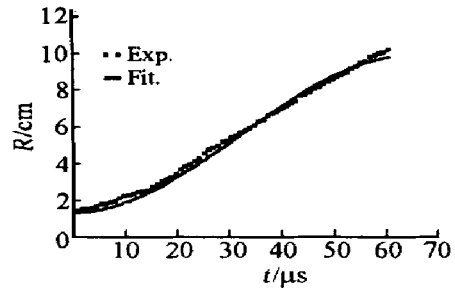


图 4 位移实验数据与拟合曲线

Fig. 4 Experimental data and fitting curve of displacement

4 计算结果与分析

4.1 控制方程

材料本构关系 $\tau = \tau_0(1 + \gamma/\gamma_0)^N(1 + C \ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0))$ (7)

壳体真实应变定义 $\gamma = \ln(1 + \epsilon)$ (8)

薄壁壳体的工程应变近似 $\epsilon = (R(t) - R_0)/R_0$ (9)

工程应变率定义 $\dot{\epsilon} = \frac{1}{R_0} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{u(t)}{R_0}$ (10)

真实应变率 $\dot{\gamma} = \frac{\dot{\epsilon}}{1 + \epsilon}$ (11)

损伤演化方程^[2] $\frac{dD}{dt} = \frac{((1 - D)(\tau - \tau_0))^2}{\eta K}$ (12)

式中: η 和 K 分别为材料的粘性系数和应变强化模量, D 为损伤因子。材料的断裂准则由临界损伤因子 D_c 来确定,因此,将(5)~(11)式代入(12)式得到

$$\frac{dD}{(1 - D)^2} = \frac{\left[\tau_0 \left(1 + \frac{\ln(R(t)/R_0)}{\gamma_0} \right)^N \left[1 + C \ln \left(\frac{u(t)}{\dot{\gamma}_0 R(t)} \right) \right] - \tau_0 \right]^2}{\eta K} dt \quad (13)$$

然后加以合适的断裂准则就可以较精确地计算出断裂时间、断裂应变、断裂应变率、破片初速、应力时间关系等物理量,可以加深人们对内爆炸加载圆筒膨胀、破裂规律的认识。

4.2 计算结果

计算结果用到方程(13),计算中取 $D_c = 0.45$, $\tau_0 = 180 \text{ MPa}$ 。图 5 的损伤演化曲线是典型的热力学曲线。计算结果如下:破裂时间 $12.3 \mu\text{s}$,破裂半径 21 mm ,破片初速度 1216 m/s ,破裂应变 0.538 ,破裂应变率 $5.79 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。预测全部结果处于常用弹材的实验结果范围内,对于 5 mm 壁厚的钢铁材料,圆筒破裂时间一般处于 $10 \sim 20 \mu\text{s}$ 之间,破片初速度处于 $700 \sim 1400 \text{ m/s}$ 之间。

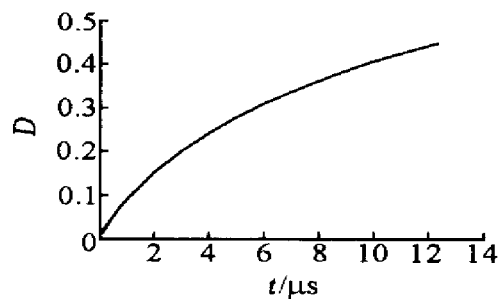


图 5 损伤演化曲线

Fig. 5 Computed damage evolution

5 结 论

(1)以高应变率下经典的材料本构关系为基础,吸收其各自的优点,建立了新的、解耦的材料本构关系,这一新型本构关系除具备原有本构关系的显式、直观的优点外,更能准确地反应高应变率加载条件下材料的热软化行为、应变硬化行为和应变率硬化行为。并且所建的本构关系对所有涉及高应变率问题如侵彻、爆轰等问题普遍适用。

(2)利用所建立的本构关系和高速摄影所测得的径向位移函数和径向速度函数及文献[2]的损伤演

化方程建立了控制内爆炸加载圆筒膨胀、直至破裂的完备方程组,利用数值方法完成了损伤演化曲线的计算,结果表明该损伤演化曲线是典型的动力学曲线,同时完成了对破裂时间、破裂半径、破片初速度、破裂应变、破裂应变率等爆轰物理量的计算。预测结果与以往的实验结果有较好的一致性。表明了该方法在内爆炸加载问题上的实用性。

参考文献:

- [1] Taylor G I. The fragmentation of tubular bombs[A]. Scientific Papers of Taylor, III[M]. London: Cambridge University Press, 1963:387—389.
- [2] 封加坡. 金属动态延性破坏损伤函数模型[D]. 北京:北京理工大学, 1992.
- [3] 李永池, 李大红, 魏志刚, 等. 内爆炸载荷下圆筒变形、损伤和破坏规律研究[J]. 力学学报, 1999, 31(4):442—449.
LI Yong-chi, LI Da-hong, WEI Zhi-gang, et al. Research on the deformation, damage and fracture rules of circular tubes under inside-explosive loading[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(4):442—449.
- [4] 李永池, 王红五, 江松青, 等. 含损伤材料的热粘塑性本构关系和柱壳破裂研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2):105—110.
LI Yong-chi, WANG Hong-wu, JIANG Song-qing, et al. Research on the thermal-viscoplastic constitutive relation of damaged materials and numerical simulation of circular tubes fracture[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2):105—110.
- [5] Nemat-Nasser S, Yeou-Fong Li, Isaacs J B. Experimental/computational evaluation of flow stress at high strain rates with application to adiabatic shear banding[J]. Mechanics of Materials, 1994, 17(1):111—134.
- [6] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎, 等. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000:254—259.

Deformation and fracture of cylindrical tube under inside-explosive loading

TAN Cheng-wen^{*}, WANG Fu-chi, LI Shu-kui, WANG Lu
(School of Material Science and Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the classical thermo-viscoplastic constitutive relations, a new and uncoupled constitutive relation was proposed, which can describe the thermal softening, work hardening and strain rate hardening effects more exactly. For 35CrMnSiA steel, using Hopkinson bar stress-strain were measured under different high strain rates and the constants for the new constitutive equation were fitted. Combined with FENG Jia-po's damage evolution equation, the radial expand history $R(t)$ and the radial profile function $u(t)$, a self-contained governing equation system was established, with which the expanding and fracture problem of a cylindrical tube under inside-explosive loading was computed. A satisfactory agreement between the computation and the experiments is obtained.

Key words: solid mechanics; damage evolution equation; SHPB; cylindrical tube; inside-explosive loading

* Corresponding author: TAN Cheng-wen

E-mail address: chengwentan@263.net; Telephone: 010-68912709