文章编号: 1001-1455(2013)06-0581-06

高应变率拉伸加载下无氧铜的本构模型*

汤铁钢,刘仓理
(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究材料在高应变率拉伸加载下的动态响应,利用新型爆炸膨胀环实验技术开展了无氧铜试样环的拉伸加载实验,采用激光干涉测试技术获得了试样环拉伸变形过程的径向速度历史。数值计算发现经典 JC 模型不能较好地描述无氧铜试样环的膨胀过程,于是对 JC 模型进行了修改:增加了应变的指数硬化项来描述拉伸变形的累积效应;增加了应变率的线性项描述拉伸加载时的应变率效应;利用实验数据拟合了修改后的 RJC 模型参数,最终较好描述了无氧铜试样环的膨胀变形过程。

关键词: 固体力学;无氧铜;高应变率;本构模型;拉伸
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

在爆炸、冲击加载研究中,金属材料最常采用的本构模型有 Johnson-Cook 本构模型[1]和 Steinberg 本构模型[2],以及由这 2 种模型演化出来的各种修正模型[3-6]。JC 本构模型中的参数大都是由霍普金森压杆实验确定的,其应变率通常在 10^4 s^{-1}以下,大部分实验数据集中在 $10^2\sim10^3$ s^{-1}。Steinberg 本构模型实际上是忽略应变率效应的高压本构模型,其适用的应变率范围通常在 10^5 s^{-1}以上。

JC 模型主要考虑了材料的应变率效应和温度效应,对于大量金属材料的变形描述都是相当吻合的,因此得到了广泛应用。JC 模型将流动应力表述为应变函数、应变率函数和温度函数的乘积,其表达式为

$$\sigma_{\mathrm{JC}}=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})(1+C\ln\dot{\varepsilon})\left(1-\left(\frac{T-T_{\mathrm{r}}}{T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{r}}}\right)^{m}\right) \tag{1}$$

式中:σ_{JC}为 JC 模型的流动应力;A 为参考温度下的初始屈服应力;B 和 n 为材料应变硬化参数;C 为材料应变率强化参数;m 为材料的热软化参数;T_{r}和 T_{m}为参考温度和熔化温度,一般取 $T_{\mathrm{r}}=300$ K。

但是,JC 模型不关心材料的变形过程,即忽略了材料变形历史的影响。同时 JC 模型中的应变率硬化项采用了简单的对数关系,而金属材料在 $10^3\sim10^4$ s^{-1}附近流动应力呈现明显增加的趋势。因此 JC 模型在 $10^3\sim10^4$ s^{-1}附近对应变率敏感的金属材料的变形过程不能很好地描述。

另一方面,通常认为金属材料的拉压行为是对称的,在弹性变形阶段是没有问题的,对于大塑性变形过程,压缩变形和拉伸变形可能不一定相同,通过压缩实验确定参数的 JC 模型是否能很好地描述拉伸变形过程,是本文中关心的问题。本文中对无氧铜的高应变率拉伸过程进行实验研究,为更好描述无氧铜试样环的膨胀拉伸过程,尝试对 JC 模型进行修改,利用实验数据拟合改进后的 RJC 模型参数,最终较好地描述无氧铜试样环的膨胀变形过程。

1 实 验

爆炸膨胀环实验是实现高应变率拉伸的加载手段之一,最早由 P. C. Johnson 等[7]建立起来。传统爆炸膨胀环实验装置采用两端点雷管起爆,爆轰波对碰后加载驱动器,很容易造成试样环加载的不稳定性。为了更好研究试样环材料的动态拉伸,对爆炸膨胀环实验装置进行了改进[8],实验装置如图 1 所示:由爆炸丝起爆系统、铜丝、炸药、装药筒、驱动器、绝缘塞、试样环等部件组成。爆炸丝在轴线上同步

* **收稿日期**: 2012-05-22; **修回日期**: 2012-07-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(11172279,10872187)
作者简介: 汤铁钢(1974—),男,博士,研究员。

起爆柱形装药，形成柱面爆轰波加载驱动器，柱面冲击波经驱动器传到试样环，从而实现试样环径向膨胀运动。

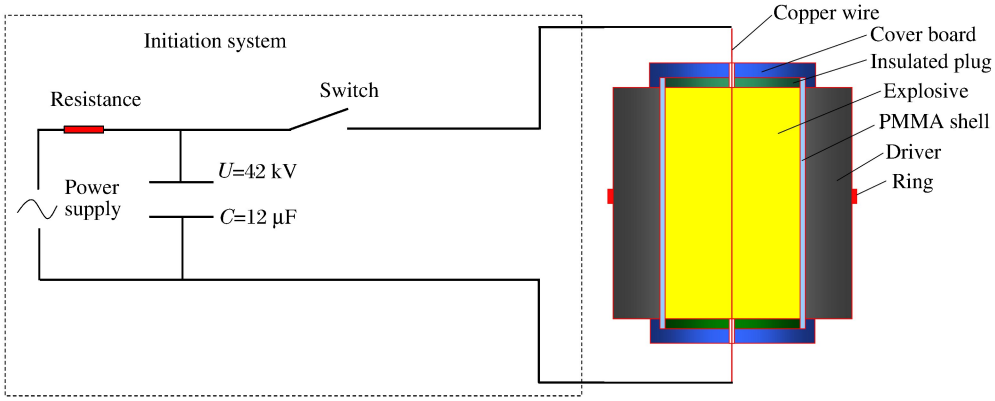

图 1 爆炸膨胀环实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for free expanding ring by explosive loading

在试样环自由膨胀阶段，假定材料不可压缩，在一维应力假定条件下，试样环内环向应力可表示为

$$\sigma = -\rho R\ddot{R} \tag{2}$$

试样环的应变、应变率分别为

$$\varepsilon = \ln \frac{R}{R_0} \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{R}}{R} \tag{4}$$

式中：ρ 为试样环密度，R 为试样环外径，R_0 为试样环初始外径。

实验中无氧铜试样环的尺寸均相同：内径 40 mm、厚 1 mm、宽 2 mm。驱动器均采用 20 钢，外径 40 mm，与试样环紧密配合。除 20080305-1 实验驱动器内径为 19 mm 外，其余所有实验中的驱动器内径均为 17 mm。装药筒均采用有机玻璃，外径与驱动器内径配合，内径尺寸确定装药量。装药为粉末泰安，密度约为 1.15 g/cm^3。实验编号及状态参数见表 1，表中 r_{diver} 为驱动器内径，r_{shell} 为装药筒内径，m_{exp} 为装药量，h_{ring} 为试样环宽度。

实验中采用激光干涉速度（位移）测试技术（VISAR 或 FDI）进行无氧铜试样环的膨胀速度测试，获得了较长加载历程的膨胀速度，如图 2 所示。可以依此进行试样环的应力-应变-应变率的求解。

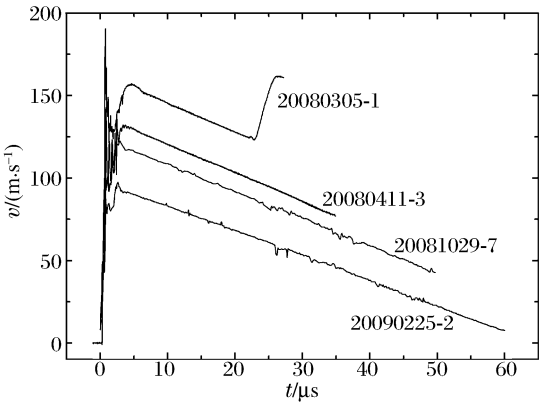

图 2 无氧铜试样环的膨胀速度

Fig. 2 Expanding velocity of OFHC copper ring

表 1 无氧铜试样环的动态拉伸实验参数

Table 1 Parameters of dynamic tensile experiment for OFHC copper ring

实验编号	驱动器材料	r_{diver}/mm	r_{shell}/mm	m_{exp}/g	h_{ring}/mm	测试技术
20080305-1	20 钢	19	17	8.55	2	VISAR
20080411-3	20 钢	17	14	5.60	2	VISAR
20081029-7	20 钢	17	12	4.40	2	FDI
20090225-2	20 钢	17	10	3.00	2	FDI

2　无氧铜的应力-应变-应变率关系

爆炸膨胀环实验的数据处理是该项实验研究中的困难之一，一直困扰着实验研究者。从公式(2)可知，在求解应力时需要对实验测试获得的离散速度数据进行积分和微分。微分对于测试误差的放大极为明显，因此很难获得试样环内准确的真实应力。在数据处理时，R. H. Warnes 等[9]曾对速度曲线采用线性或二项式拟合，然后进行微分计算加速度，进而得到应力-应变关系。R. H. Warnes 等指出，采用更高阶的关系式进行拟合，可以对速度进行更好的近似，但是求解出的应力-应变关系却令人费解。汤铁钢等[10]曾对爆炸膨胀环实验数据处理方法进行过讨论，采用数据光滑后直接差分计算的方法，解释了文献[9]中采用高阶的关系式进行拟合出现的异常现象。

无论采用什么关系式进行拟合，都只能是一种近似。直接差分方法更能直接反映测试结果，同时也反映出了动态实验中的不稳定性。采用二项式拟合和数据光滑后直接差分两种方法对实验数据进行了处理，得到的流动应力-塑性应变关系如图 3 所示。同时可以看到，二项式拟合与直接差分结果符合较好，即二项式拟合结果位于直接差分处理结果的中值附近。

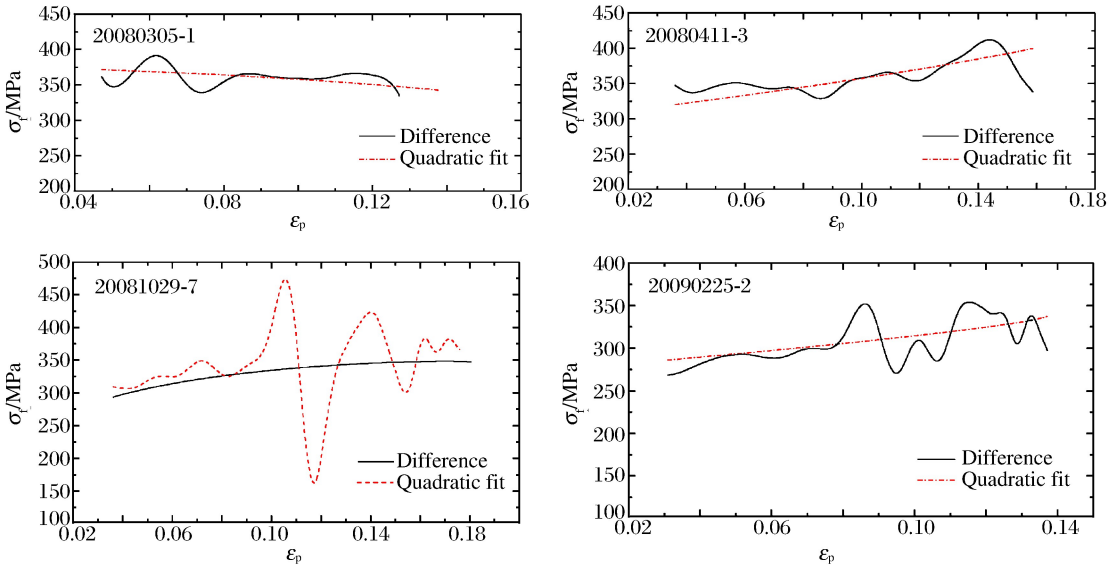

图 3　无氧铜试样环内的流动应力-塑性应变关系

Fig. 3　Relation between the flow stress and the plastic strain of OFHC copper ring

在膨胀环实验中，试样环的拉伸应变率在不断变化，即随着膨胀速度的降低拉伸应变率在下降。数据处理得到的拉伸应变率-塑性应变的关系如图 4 所示。无氧铜的流动应力幅值主要与初始应变率相关，初始应变率越高(4 000～7 000 s^{-1})，流动应力越大。

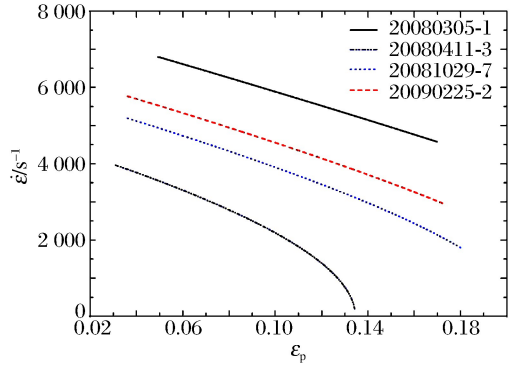

图 4　无氧铜的塑性应变-拉伸应变率关系

Fig. 4　Relation between plastic strain and strain rate of OFHC copper

3 无氧铜的本构模型及参数拟合

在动态实验中无氧铜常作为标准材料，研究无氧铜本构模型的学者较多[11-14]。采用 JC 模型对无氧铜试样环自由拉伸阶段的膨胀速度进行了计算，发现计算结果明显大于实验结果。试图对无氧铜 JC 模型参数进行修正，参数修正后的 JC 模型仍只能较好描述部分实验结果。

计算中不考虑冲击加载阶段，以试样环开始自由膨胀时刻为起点，确定试样环的初始速度、位移、应变、温度等参量，结合材料本构关系，用数值方法求解微分方程组，即可获得试样环的膨胀速度、位移、应力、应变、温度等历史。

采用 JC 模型对无氧铜试样环的自由拉伸变形过程进行计算时，计算速度要大于实验速度，原因是 σ_{JC} 偏小。在材料高应变率加载的大变形过程中，最明显的两个效应就是应变硬化和应变率硬化。采用 JC 模型描述无氧铜试样环的拉伸变形过程时，应变硬化效应和应变率硬化效应表现不够明显，是造成计算速度大于实验结果的原因。

为了能更好地描述无氧铜试样环的膨胀运动，对 JC 模型进行修改：在应变函数项中增加应变的指数硬化项，描述材料拉伸变形历史对材料性能的影响；在应变率函数项中增加应变率的线性项，描述应变率对流动应力随应变率呈现明显的增加趋势，此修改模型称之为 RJC 模型，其表达式为

$$\sigma_{JC}=(A+B\varepsilon_p^n+B_1\mathrm{e}^{-n_1\varepsilon_p})(1+C\ln\dot{\varepsilon}+C_1\dot{\varepsilon})\left(1-\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right) \tag{5}$$

相对于经典的 JC 模型，RJC 模型中增加了 3 个参数，分别为 B_1、n_1 和 C_1，其余参数同 JC 模型。利用实验数据拟合了无氧铜 RJC 模型中增加的 3 个参数，RJC 模型及 JC 模型参数同列于表 2 中。采用 JC 模型及 RJC 模型参数对无氧铜试样环的自由拉伸变形过程进行了计算，计算结果与实验结果的比较如图 5 所示。可以看出，RJC 模型能够较好地描述无氧铜试样环的拉伸变形过程，而 JC 模型计算的速度值均明显大于实验结果。

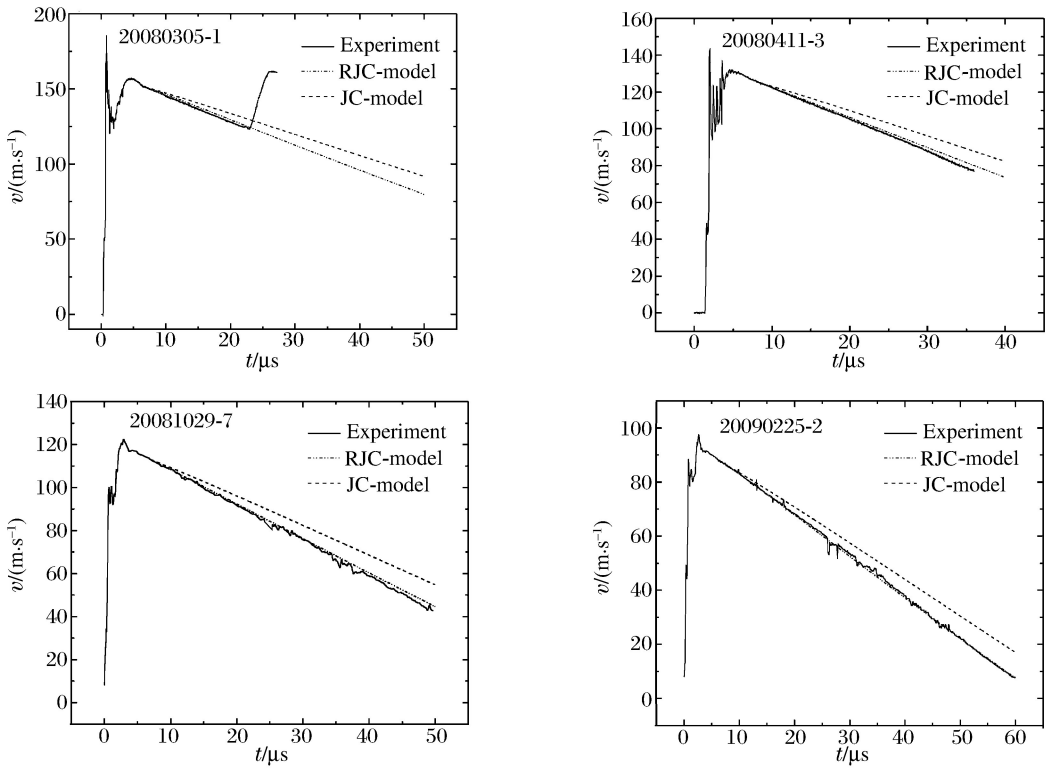

图 5 无氧铜试样环膨胀速度的计算值与实验结果比较

Fig. 5 Comparison between the calculated velocity and the experimental results of OFHC copper ring

表 2 无氧铜的 JC 及 RJC 本构模型参数

Table 2 Parameters for JC and RJC constitutive models of OFHC copper

模型	A/MPa	B/MPa	B_1/MPa	n	n_1	C	C_1	m	T_m
JC	90	292		0.31		0.025		1.09	1 356
RJC	90	292	20	0.31	0.3	0.025	0.000 03	1.09	1 356

3 结　论

通过实验与理论研究，得到以下几点结论：

(1)新型爆炸膨胀环实验技术可以用于金属材料的高应变率拉伸加载研究；

(2)无氧铜试样环的动态拉伸变形过程对应变率比较敏感，经典的 JC 模型不适合描述无氧铜试样环的高应变率拉伸变形过程；

(3)在 JC 模型基础上通过增强应变硬化效应和应变率硬化效应，修改后的 RJC 模型可以较好地描述无氧铜试样环的高应变率拉伸变形过程，计算速度历史与实验吻合较好。

参考文献：

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

[2] Steinberg D J, Lund C M. A constitutive model for strain rates from 10^{-4} to 10^{6} s^{-1}[J]. Journal of Applied Physics, 1998,65(4):1528-1533.

[3] Wallace D C. Flow process of weak shocks in solids[J]. Physical Review B, 1980,22(4):1487-1494.

[4] Wallace D C. Equation of state from weak shocks in solids[J]. Physical Review B, 1980,22(4):1495-1502.

[5] Johnson G R, Holmquist T J. Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants[J]. Journal of Applied Physics, 1988,64(8):3901-3910.

[6] Rule W K, Jones S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(8):609-624.

[7] Johnson P C, Stein B A, Davis R S. Measurement of dynamic plastic flow properties under uniform stress[C]// Symposium on the Dynamic Behavior of Materials. ASTM Special Publication, 1963:195-198.

[8] 汤铁钢，李庆忠，陈永涛，等. 实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术[J]. 爆炸与冲击，2009，29(5)：546-549.
Tang Tie-gang, Li Qing-zhong, Chen Yong-tao, et al. An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):546-549.

[9] Warnes R H, Duffey T A, Karpp R R, et al. An improved technique for determining dynamic material properties using the expanding ring[C]// Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. New York, 1981:23-36.

[10] 汤铁钢，桂毓林，李庆忠，等. 爆炸膨胀环实验数据处理方法讨论[J]. 爆炸与冲击，2010，30(5)：505-510.
Tang Tie-gang, Gui Yu-lin, Li Qing-zhong, et al. Discussion for data processing of explosive expanding ring test [J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):505-510.

[11] 陈大年，胡金伟，金扬辉，等. 高导无氧铜的临界冲击拉伸速度[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：113-117.
Chen Da-nian, Hu Jin-wei, Jin Yang-hui, et al. Critical impact velocity for oxygen-free high-conductivity copper in tension[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):113-117.

[12] 陈大年，范春雷，胡金伟，等. 高导无氧铜的高压与高应变率本构模型研究[J]. 物理学报，2009，58(4)：2612-2618.
Chen Da-nian, Fan Chun- lei, Hu Jin-wei, et al. On constitutive models of oxygen-free high-conductivity copper at high pressure and high strain rates[J]. Acta Physica Sinica, 2009,58(4):2612-2618.

[13] 吴善幸，陈大年，胡金伟，等. 高导无氧铜圆柱-平板冲击实验及不同本构模型效果比较[J]. 爆炸与冲击，2009，29(3)：295-299.
Wu Shan-xing, Chen Da-nian, Hu Jin-wei, et al. A cylinder-plate impact test for oxygen-free high-conductivity

copper[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(3):295-299.

[14] 郭伟国.高导无氧铜在大变形、不同温度和不同应变率下的流动应力和本构模型[J].爆炸与冲击,2005,25(3):244-250.
Guo Wei-guo. Flow stress and constitutive model of OFHC Cu for large deformation different temperatures and different strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(3):244-250.

On the constitutive model for oxygen-free high-conductivity copper under high strain-rate tension*

Tang Tie-gang, Liu Cang-li

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: To study the dynamic response of materials under tensile loading at high strain rates, tensile-loading experiments were conducted on oxygen-free copper expanding rings by applying a new expanding ring experiment technique. The radial velocities of the copper expanding rings during tensile deformation were measured by VISAR or FDI. The empirical Johnson-Cook(JC) constitutive model was used to simulate the expanding process of oxygen-free copper rings. The calculated results are obviously higher than the experimental ones. So a regulative JC model for tensile deformation(RJC)was proposed to improve the empirical JC constitutive model. In the RJC model, a new index term of strain harding was added to describe the accumulated effect in the dynamic tensile deformation process as well as a new linear term of strain rate to describe the strain-rate effect under tensile loading. And the parameters of the RJC model were obtained by fitting to the experiment data. The further numerical results show that the RJC model can describe the expanding deformation process of the oxygen-free copper rings.

Key words: solid mechanics; oxygen-free copper; high strain-rate; constitutive model; tension

* Received 22 May 2012; Revised 17 July 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11172279,10872187)
Corresponding author: Tang Tie-gang, ttg1974@163.com

(责任编辑 曾月蓉)