



T2 铜的动态力学性能及本构关系

江德斐¹, 林国标¹, 舒大禹², 陈强²

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2. 中国兵器装备集团公司 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 利用 Gleeble1500 热模拟试验机和分离式霍普金森压杆试验装置(SHPB)对 T2 铜进行常温下准静态压缩试验和高应变率下的冲击压缩实验, 获得不同应变率下的应力-应变曲线。结果表明: T2 铜在动态冲击下的强度明显高于准静态压缩下的强度, 具有显著的应变率强化效应; 在动态冲击较低应变速率的区域内, T2 铜的塑性流动应力对应变率很敏感, 具有明显的应变强化和应变率强化效应。但在动态冲击较高应变速率的区域内, 发生相同变形时的应力水平相差不大, 表现出对应变率变化不敏感的性质。对传统的 Johnson-Cook 本构模型进行修正, 拟合曲线与试验曲线吻合较好。

关键词: T2 铜; 霍普金森压杆试验; 应变率效应; 本构模型

中图分类号: O347

文献标志码: A

紫铜是一种重要的有色金属, 塑性好, 密度和声速较高, 是爆炸成形弹丸(Explosively formed projectile, EFP)药型罩广泛使用的低成本材料^[1-2]。在 EFP 过程中, 药型罩被压溃后材料的变形实质是一个动态力学行为, 只有动态力学性能才能真实反映材料在高速冲击下的实际性能。对材料动态力学性能研究的中心任务之一就是建立能描述材料在各种载荷条件下的力学本构模型及其应变率相关性, 药形罩材料的动态本构关系模型的建立是准确进行 EFP 成形数值模拟分析的前提^[3], 因此, 研究紫铜的动态力学性能对于 EFP 战斗部设计具有重要意义。

在动态冲击载荷作用下材料往往表现出与准静态时不同的力学特性。王宝生^[4]对 Cu 含量达 99.99% 的高纯铜用压缩试验技术在应变率为 $6.7 \times 10^3 \sim 3.4 \times 10^4$ 范围内测定的动态应力应变曲线表明流变应力随应变率增加明显提高。孔令超等^[5]研究 TiC 颗粒增强钛基复合材料 TP650 的静动态力学性能, 结果表明, 该复合材料和基体材料的屈服应力均随应变率的增加而提高, 属于应变率敏感材料。刘清风等^[6]利用分离式 Hopkinson 压杆试验装置(SHPB)对无氧铜进行常温下不同应变率($2500 \sim 15500 \text{ s}^{-1}$)的动态力学性能进行了测试, 研究发现无氧铜在受到动态压缩载荷的作用时, 其塑性流动应力对应变率并没有表现出敏感的趋势,

但材料的屈服应力在应变率高于 $1.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时明显增加, 同时材料的应变强化效果降低。鲁世红等^[7]采用微型 SHPB 实验装置对 Al-Mg-Sc 材料在应变率为 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 范围内进行了动态力学行为测试, 选用 Johnson-Cook 本构模型构建了 Al-Mg-Sc 合金高应变率流变方程。张长清等^[8]利用分离式 Hopkinson 压杆试验装置研究了在 $1 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内 TC4-DT 钛合金的动态力学性能, 结果表明: 高应变率时 TC4-DT 钛合金材料存在应变率增强、增塑及应变强化效应。LIU 等^[9]对 2519A 铝合金进行动态力学性能测试及准静态拉伸试验, 研究发现 2519A 铝合金具有应变率效应及温度敏感性。毛萍莉等^[10]采用分离式霍普金森压杆装置在室温下对挤压态 Mg-Gd-Y 镁合金进行动态压缩试验, 结果表明挤压态 Mg-Gd-Y 镁合金随着应变率的提高, 具有正应变率强化效应, 动态压缩力学性能无明显的各向异性。当前国内外对 T2 铜在高应变率条件下的力学行为研究尚少, 由于 T2 铜在药型罩上的大量应用, 因而研究 T2 铜在冲击载荷作用下的动态力学行为具有重要的工程应用价值。

本文作者利用分离式 Hopkinson 压杆装置对 T2 铜进行了动态压缩试验, 研究了 T2 铜在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的动态力学性能。为了便于对比研究

以及本构方程拟合, 还采用 Gleeble1500 热模拟试验机测试了 T2 铜在准静态条件下的力学性能。考虑到绝热温升软化效应, 对 Johnson-Cook 本构模型进行修正, 得到 J-C 模型参数, 为 T2 铜 EFP 战斗部设计提供基础数据。

1 实验

1.1 实验方案

采用 Gleeble1500 热模拟试验机对 T2 铜进行常温下准静态压缩试验, 试样尺寸为 $d6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 应变率为 1×10^{-3} 、 1×10^{-2} 、 1×10^{-1} 和 1 s^{-1} 每种速率做 3 次, 数据处理后取平均。动态压缩试验设备采用分离式 Hopkinson 压杆装置, 应变率为 1×10^3 和 $3 \times 10^3\text{ s}^{-1}$ 时的动态压缩试验选用直径为 12.7 mm 的压杆, 试样尺寸为 $d5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; 应变率为 6×10^3 和 $1 \times 10^4\text{ s}^{-1}$ 的动态压缩试验则选用直径为 5 mm 的压杆, 试样尺寸为 $d2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 实验在常温下进行, 总共分为 4 组, 每组实验在不同的应变率下进行, 每组取得 3 组有效数据, 以保证试验数据的可靠性和可重复性, 并对数据取平均值。

1.2 实验材料及试样制备

本实验中所用的材料为挤压 T2 铜棒, 经 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火, 保温 2 h, 空冷。根据实验设备的相关参数及应变率范围, 准静态压缩试验, 试件尺寸为 $d6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 动态试验试样尺寸为 $d5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 和 $d2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 两种规格, 试样在慢走丝线切割机床上加工。为了保证实验精度, 因此要求两个端面之间的平行度以及端面对轴线之间的垂直度要求小于 0.01 mm , 同时试样两端面粗糙度 R_a 小于 $1.2\text{ }\mu\text{m}$, 以减少压缩过程中压杆与试样端面的摩擦。

1.3 实验原理

动态冲击试验是在分离式霍普金森压杆(SHPB)上进行的, SHPB 技术广泛运用于测量材料在一维应力条件下、应变率为 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4\text{ s}^{-1}$ 范围内的动态力学性能^[11]。该系统是目前研究材料的动态力学性能最基本的实验装置, 实验装置原理如图 1 所示。

该实验装置通过调节气压室中氮气气压, 控制子弹以一定的速度撞击 SHPB 实验装置的入射杆, 在入射杆内产生沿杆传递的入射弹性应力脉冲。当入射杆撞击到试样表面时, 由于输入杆和试样阻抗存在差异, 一部分应力波被反射回输入杆; 另一部分将通过试样

投射到输出杆中, 图 2 所示为 T2 铜 SHPB 实验的典型波形图。

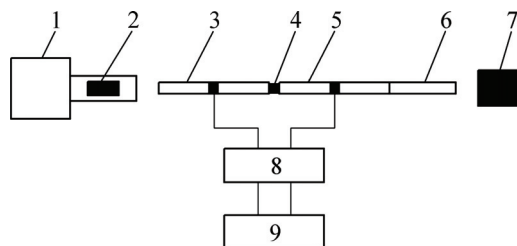


图 1 SHPB 装置原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of SHPB: 1—Gas house; 2—Shot; 3—Incident bar; 4—Specimen; 5—Transmission bar; 6—Absorbing bar; 7—Energy absorber; 8—Strain amplifier; 9—Digital data recorder

在透射波通过试样过程中, 试样将发生高速塑性变形, 部分透射波传入输出杆中沿着输出杆传播并被输出杆捕获最后由能量吸收装置吸收。整个应力波传播过程可用贴在输入杆和输出杆上的应变片进行记录。利用测得的入射波、反射波和透射波, 通过一维应力假设和均匀性假定可以得到应力、应变和应变率的关系^[12-13]:

$$\sigma(t) = EA_0 \varepsilon_t(t) / A_s \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{-2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -2C_0 \varepsilon_r(t) / L_s \quad (3)$$

式中: σ 为屈服应力; ε_t 为透射应变波幅值; ε 为应变; ε_r 为反射应变波幅值; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $C_0 = \sqrt{E/\rho_0}$ 是杆的一维弹性波速; ρ_0 是杆的密度; A_0 和 E 分别是杆的横截面积和弹性模量; A_s 和 L_s 分别是试样的初始横截面积和初始长度。

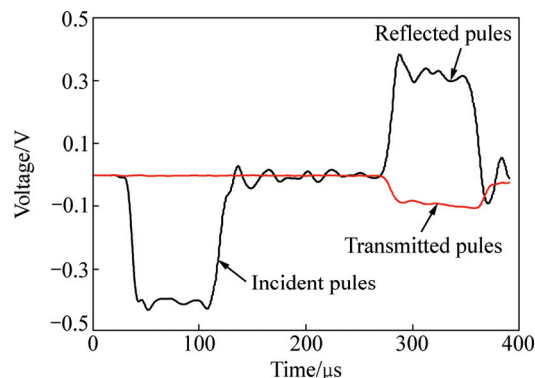


图 2 T2 铜 SHPB 实验的典型波形图

Fig. 2 Typical waveform diagram of SHPB test for T2 copper

2 结果与分析

2.1 准静态力学性能

T2铜在室温和准静态条件下的真应力-真应变曲线如图3所示。由图3可以看出,T2铜在准静态压缩时没有明显的屈服平台。随着应变的增大,塑性变形时的曲线呈平滑上升趋势,材料流动应力迅速增加,呈现显著的应变强化效应。在准静态条件下, $1 \times 10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内较高变形速率下的真应力-真应变曲线高于低应变速率的曲线,但流变应力的幅值变化较小,材料的应变率敏感性较弱。

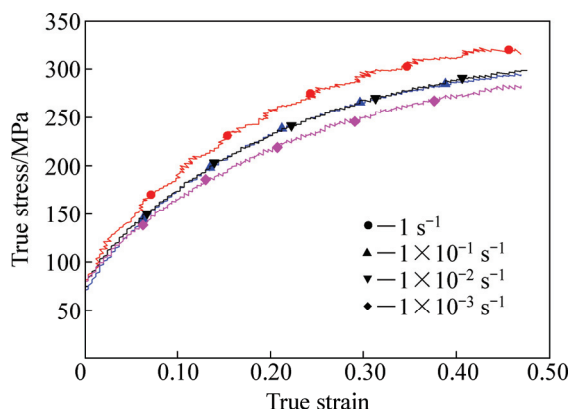


图3 T2铜准静态压缩真应力-真应变曲线

Fig. 3 Quasi-static compressive true stress-true strain curves of T2 copper

2.2 动态力学性能

T2铜的动态力学性能试验测试结果如图4所示,

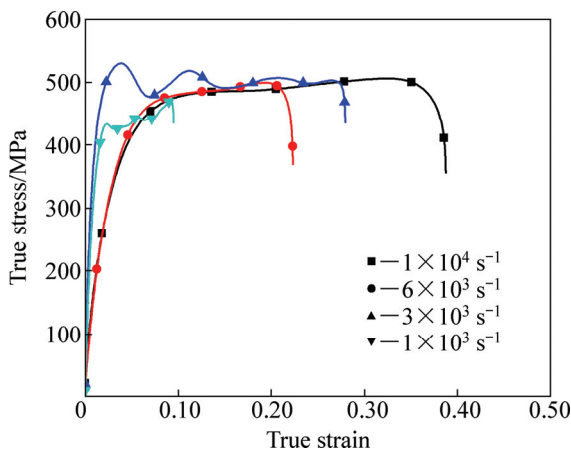


图4 T2铜动态压缩真应力-真应变曲线

Fig. 4 Dynamic compressive true stress-true strain curves of T2 copper

通过式(1)和(2)计算分别得到4种不同应变率下真应力-真应变曲线,可以看出T2铜在高应变率下的力学性能具有如下特点。

1) 在应变速率为1和 $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 条件下压缩变形时,流变应力先随应变的增加而迅速升高,当真应变分别超过0.025和0.035后反而下降,此后真应力随真应变的增加而发生此起彼伏的波浪式变化,而不是一直表现为应变硬化状态。这是由于变形初期,在高应变率的作用下,位错密度急剧增加,故表现出比较高的应变硬化率,随后,由于变形过程中的热量来不及散失,且位错的运动速率滞后于动态压缩速率,材料发生热软化^[14]、并表现为材料强度的小幅度降低。随着变形的进行和应变量的增加,材料继续应变硬化,即应变硬化与热软化交替进行,导致动态流变应力的小幅波动。

2) 在应变率为 $3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 时,当应变超过一定值时,流变应力并不随应变的继续增大而发生明显变化,呈现出稳态流变的特征。进一步发现,T2铜在高应变率下的塑性流动趋势显著增强,即真应力-真应变曲线中的塑性阶段曲线明显变长,表明T2铜材料具有较高的应变率增塑效应,这是由于高应变率下的绝热温升使得材料软化,滑移更易于进行。

3) 比较图3和4中的真应力-真应变曲线,整体上动态压缩的真应力-真应变曲线明显高于准静态的真应力-真应变曲线,说明T2铜具有明显的应变率强化效应。单独比较图4中的4条动态压缩曲线发现同为大试样的 $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 相对于 $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时有较高的流变应力和动态屈服强度,表现出一定的应变率增强效应,具有一定的应变率敏感性。而 $1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 相比较,曲线形状没有发生明显的变化,即相同应变条件下,应力水平相差不大,只是随应变率的增加最终应变变量有所增大,说明在此应变率范围内,材料对应变率变化不敏感。

4) 在高应变率下的塑性变形过程中,应变强化和热软化作用同时进行。一方面,T2铜具有应变强化作用,即流变应力随应变的增加而增加;但另一方面,由于在高应变率变形时载荷作用的时间极短,导致试样内塑性变形功所转化的热能无法在极短时间内释放,因此,高应变率下的变形过程可看成是一个绝热过程,塑性变形功所转化的热能能使试样升温从而导致热软化,这也是室温下随着应变率的增加,材料的应变硬化率减小的原因,如图4中同为大试样的 $6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时的应变硬化率增长趋势相对 $1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 更为显著。

应变分别为0.025和0.075时的流变应力和应变速

率的关系曲线如图5所示,由图5可以看出,在相同的应变下,流变应力均随着应变速率的增加而呈现先增大后减小趋势,材料强度明显降低,承载能力减弱。当应变率在相对较低的情况下,T2铜的应变率强化效应相对较强,表现为流变应力随着应变速率的增加而大幅增加。当应变率在相对较高的情况下,该材料的热软化作用占主导地位,表现为流变应力随着应变速率的增加逐渐减小。

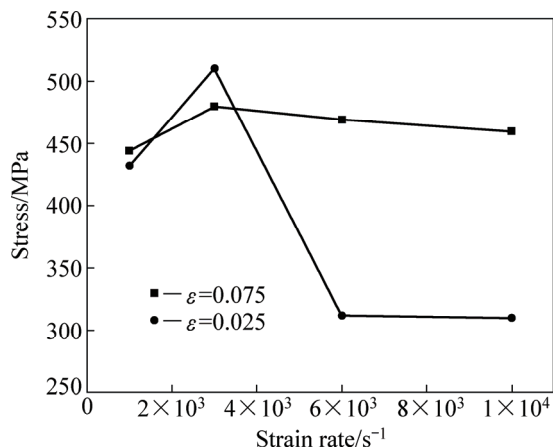


图5 不同应变下流变应力随应变率的变化

Fig. 5 Variation of flow stress with strain rate at different strains

图6所示为T2铜屈服强度和应变速率的关系曲线。由图6可以看出,在较低应变率条件下,T2铜屈服强度明显增加,对应变速率表现出明显的敏感性;在较高应变率条件下,随着应变率的增加,材料的热软化效应显著增强,屈服强度明显下降,但随着应变速率的持续增加屈服强度下降幅度趋于平缓,对应变速率不敏感。

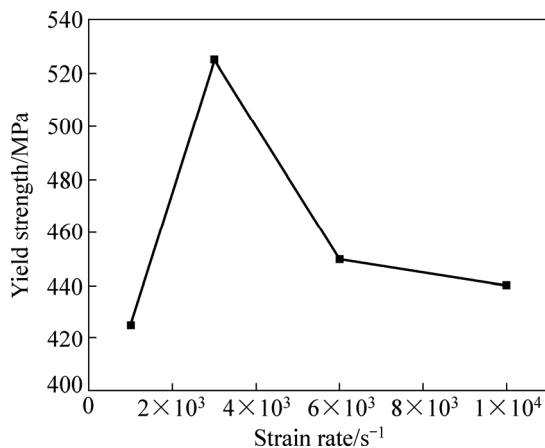


图6 T2铜屈服强度随应变率的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of yield strength of T2 copper with different strain rates

2.3 本构拟合

在工程材料研究中,常用的热-黏塑性本构模型有Johnson-Cook模型(J-C模型)^[15]、Zerilli-Armstrong模型^[16]、Power-Law模型^[17]和Bammann模型^[18]等。J-C模型是一个与应变率和温度相关的经验型的粘塑性模型,可应用于各种晶体结构的材料,故本试验选择J-C模型作为T2铜的本构模型,模型的一般形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_M - T_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: σ 是材料塑性应力; ε 是等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别是参考应变率和等效塑性应变率; T 、 T_0 和 T_M 分别是样品环境温度、室温和材料的熔点,本试验中取 $\dot{\varepsilon}_0$ 、 T_0 和 T_M 分别为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 20°C 和 1083°C ; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为拟合参数。

$$(A + B\varepsilon^n) \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_M - T_0} \right)^m \right]$$

分别描述了材料的应变强化效应、应变率效应和温度软化效应。

则本试验中的本构模型可简化为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (5)$$

首先取参考应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,通过室温下应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的数据拟合出 A 、 B 和 n 的值分别为122 MPa、179.9 MPa和0.33,然后平均各应变率下的数据拟合求得的 C 值,得 $C=0.085$,则相应的本构模型为

$$\sigma = (122 + 179.9\varepsilon^{0.33}) \left[1 + 0.085 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (6)$$

将实验结果和式(6)预测的结果对照,其结果如图7所示。

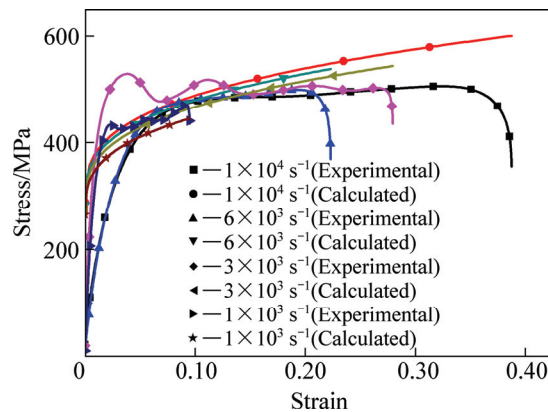


图7 J-C模型计算结果与高应变率下T2铜实验结果的比较

Fig. 7 Comparison for J-C model calculated results with experimental results of T2 copper at high strain rates

由图7可以看出,在应变率较高条件下,该本构模型不能很好地预测T2铜的流变应力,T2铜在高应变率下的塑性变形过程中伴随着温度的升高,温度是应变的函数,所以需考虑变形过程中由于温升而导致材料的软化作用。

高应变率下塑性变形产生的热量无法很快扩散,材料动态变形绝热过程中的温升可以表示为

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为材料的定压比热容; β 为塑性功转化成热的因子。

由于升高的温度是塑性应变的函数,为了简便起见,本文作者在传统模型中直接添加一项与应变率和塑性应变相关的项,用以考虑材料的软化。因此,本构模型变为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 - \langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle k\varepsilon] \quad (8)$$

$$\langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle = \begin{cases} 1 & \dot{\varepsilon} > 1 \\ 0 & \dot{\varepsilon} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

修正后的Johnson-Cook模型比传统模型多了一个无量纲参数 k ,根据实验数据拟合得到各应变率下J-C模型中的参数 C 值和 k 值,求平均后分别为0.094和0.58,则改进后的本构模型为

$$\sigma = (122 + 179.9\varepsilon^{0.33})[1 + 0.094 \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 - \langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle 0.58\varepsilon] \quad (10)$$

$$\langle \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{|\dot{\varepsilon} - 1|} \rangle = \begin{cases} 1 & \dot{\varepsilon} > 1 \\ 0 & \dot{\varepsilon} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

改进后的J-C本构模型计算结果与实验结果比较如图8所示。由图8可看出,与未考虑绝热温升的本

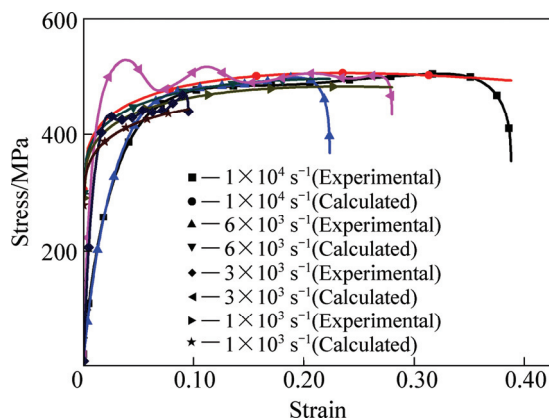


图8 改进的J-C模型计算结果与高应变率下T2铜实验结果的比较

Fig. 8 Comparison for modified J-C model calculated results with experimental results of T2 copper at high strain rates

构模型相比,改进后的本构模型比传统模型能更好地与试验数据吻合。

3 结论

1) 常温准静态压缩时T2铜的塑性流动应力随应变的增加而迅速升高,具有显著的应变强化效应,在相同应变下,动态冲击曲线的应力明显高于准静态应力,应变率强化效应非常明显。

2) 在动态冲击较低应变速率的区域内,T2铜的动态屈服强度和流变应力均随应变速率的增大而升高,表现出一定的应变率敏感性,具有明显的应变强化和应变率强化效应。但在动态冲击较高应变速率的区域内,发生相同变形时的应力水平相差不大,故材料在较高应变率区域内对应变速率的变化不敏感,只有绝热温升使得材料的塑性流动阶段明显增加,塑性流动应力降低,表现出显著的热软化效应。

3) 由于没有考虑绝热过程温度升高对材料的软化效应,利用传统的Johnson-Cook本构模型拟合的曲线与实际情况偏差较大,本文作者在原有公式基础上增加与应变率和塑性应变相关的项,使改进后的J-C本构模型与试验结果能更好地吻合。

REFERENCES

- [1] 赵腾,罗虹,贾万明,马少华,张全孝.药型罩材料技术基本要素探讨[J].兵器材料科学与工程,2007,30(5):77-82.
ZHAO Teng, LUO Hong, JIA Wan-ming, MA Shao-hua, ZHANG Quan-xiao. Influencing factors analysis of the application performance of shaped liner material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 77-82.
- [2] 高晓军,徐宏,郭志俊,林勇.爆炸成形弹药型罩材料的现状和趋势[J].兵器材料科学与工程,2007,30(2):85-88.
GAO Xiao-jun, XU Hong, GUO Zhi-jun, LIN Yong. Development of material in shaped charge liner for EFP[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(2): 85-88.
- [3] 才鸿年,王鲁,李树奎.战斗部材料研究进展[J].中国工程科学,2002,4(12):21-27.
CAI Hong-nian, WANG Lu, LI Shu-kui. Research progress in warhead materials[J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 21-27.
- [4] 王宝生.国外铜药型罩材料动态特性研究[J].兵器材料科学与工程,1993,16(1):53-59.
WANG Bao-sheng. Foreign research dynamic characteristics of

- copper for shaped charge liners[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1993, 16(1): 53–59.
- [5] 孔令超, 宋卫东, 宁建国, 毛小南. TiC 颗粒增强钛基复合材料的静动态力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(10): 1756–1762.
- KONG Ling-chao, SONG Wei-dong, NING Jian-guo, MAO Xiao-nan. Static and dynamic behaviors of TiC particle reinforced titanium matrix composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(10): 1756–1762.
- [6] 刘清风, 程鑫, 王宁昌, 姜峰. 动态冲击载荷下无氧铜的力学性能研究[J]. *机械强度*, 2015, 37(4): 607–612.
- LIU Qing-feng, CHENG Xin, WANG Ning-chang, JIANG Feng. Dynamic mechanical properties of oxygen free copper under the impact load[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015, 37(4): 607–612.
- [7] 鲁世红, 何宁. 高应变率下 Al-Mg-Sc 合金压缩变形的流变方程[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(5): 897–902.
- LU Shi-hong, HE Ning. Constitutive equation of flow for Al-Mg-Sc alloy under high strain rate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(5): 897–902.
- [8] 张长清, 谢兰生, 陈明和, 商国强. 高应变率下 TC4-DT 钛合金的动态力学性能及塑性本构关系[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 323–329.
- ZHANG Chang-qing, XIE Lan-sheng, CHEN Ming-he, SHANG Guo-qiang. Dynamic mechanical property and plastic constitutive relation of TC4-DT Ti alloy under high strain rate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 323–329.
- [9] LIU W H, HE Z T, CHEN Y Q, TANG S W. Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2519A aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2179–2186.
- [10] 毛萍莉, 于金程, 刘正, 董阳, 席通. 挤压态 Mg-Gd-Y 镁合金动态压缩力学性能与失效行为[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(4): 889–897.
- MAO Ping-li, YU Jin-cheng, LIU Zheng, DONG Yang, XI Tong. Dynamic mechanical property and failure behavior of extruded Mg-Gd-Y alloy under high strain rate compression[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(4): 889–897.
- [11] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1949, 62(11): 676–700.
- [12] SASSO M, NEWAZ G, AMODIO D. Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 487(1/2): 289–300.
- [13] LEE WOEI SHYAN, LIU Chen-yang. The effects of temperature and strain rate on the dynamic flow behavior of different steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 426: 101–113.
- [14] 武永甫, 李淑慧, 侯波, 于忠奇. 铝合金 7075-T651 动态流变应力特征及本构模型[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(3): 658–665.
- WU Yong-fu, LI Shu-hui, HOU Bo, YU Zhong-qi. Dynamic flow stress characteristics and constitutive model of aluminum 7075-T651[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(3): 658–665.
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strains rates, temperature and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48.
- [16] ZERILL F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816–1825.
- [17] JIANG F, YAN L, RONG Y M. Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts-Simulations and experiments[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 64(9/12): 1555–1563.
- [18] BAMMANN D J. Modeling temperature and strain and strain rate dependent large deformation of metals[J]. *Applied Mechanics Review*, 1990, 43(5S): 312–319.

Dynamic mechanical property and constitutive relation of T2 copper

JIANG De-fei¹, LIN Guo-biao¹, SHU Da-yu², CHEN Qiang²

(1.School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute,
China South Industries Group Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract: The quasi-static compression and impact experiment under high strain rates of the T2 copper were carried out at room temperature by the Gleeble1500 thermal simulation testing machine and high split Hopkison pressure bar (SHPB) testing technique. The stress-strain curves of materials at different strain rates were obtained. The experimental results show that the strength of T2 copper under dynamic impact is obviously higher than that under quasi-static compression and the strain rate strengthening effect is significant. In the lower strain rate region of the dynamic impact, the plastic flow stress of T2 copper is very sensitive to strain rate, and it has obvious strain hardening and strain rate hardening effect. But in the higher strain rate region of the dynamic impact, the stresses under the same strain are not quite different and they are not sensitive to strain rates. The traditional Johnson-Cook constitutive model is modified to make the fitting curves agree well with the test curves.

Key words: T2 copper; split Hopkison pressure bar test; strain rate effect; constitutive model

Received date: 2015-09-16; **Accepted date:** 2016-01-22

Corresponding author: LIN Guo-biao; Tel: +86-10-83908751; E-mail: lin571@163.com

(编辑 李艳红)