

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0221

ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型研究*

石永相¹, 施冬梅², 李文钊², 余志统², 尚春明²

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘要: 为了更好的进行 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金药型罩的爆炸成形及侵彻仿真研究, 首要就是建立其材料模型。本文结合 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金力学性能试验结果计算得到了材料的 JH-2 模型参数, 研究确定了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型。为了验证 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型的准确性, 采用 Autodyn 建立了平板撞击试验有限元模型, 模拟了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金材料在高压、高应变率等环境条件下的变形过程, 仿真计算得到的靶板背面自由面粒子速度与试验结果相比, 速度平均偏差均在 3% 以内, 表明 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型能很好的描述该材料在大变形、高应变率、高压等环境条件下的力学行为, 验证了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型准确性。

关键词: ZrCuNiAlAg 块体非晶合金; JH-2 模型; Autodyn; 有限元

中图分类号: O345 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

Zr 基块体非晶合金因为其良好的性能及应用前景已经引起了极大的研究兴趣^[1-5], 它具备较高的非晶形成能力^[6], 因而制备出的 Zr 基非晶合金具备高强度、高硬度、低杨氏模量、高弹性应变和高弹性极限, 且还具备良好的超塑性和良好的断裂韧性。

Zr 基块体非晶合金力学性能的影响因素众多, 包括组成元素、合成温度、试样规格、加载速率等。例如在 ZrCuAl 体系中, Fe 和 Ti 微量金属元素的添加降低了体系的力学性能, 而 Co 元素的添加反而提高了体系的力学性能并呈现出一定的塑性^[7]。在 $Zr_{65-x}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}Y_x$ 合金中, 随着 Y 含量的增加, 合金的热稳定性和力学性能都有所降低^[8]。Zr 基非晶合金制备过程中, 冷却速度越大, 维氏硬度 HV 和弹性模量越小, 当退火温度低于玻璃转变温度时, 硬度随退火温度的提高而提高^[9]。Zr 基非晶合金的制备还存在一个合适的温度, 一定条件下温度的过高或者过低都会影响其抗压强度^[10-11]。试样规格对 Zr 基非晶合金力学性能的影响主要是指试样尺寸和高径比的影响。一般而言随着试样规格的减小, 块体非晶合金的塑性增强, 如: 李杏奇^[12]研究了试样尺寸和高径比对 $Zr_{56}Al_{10.9}Ni_{4.6}Cu_{27.8}Nb_{0.7}$ 块体非晶合金力学性能的影响, 结果表明合金的塑性随着试样尺寸和高径比的减小而增大。试验温度、加载速率等试验条件也会影响 Zr 基非晶合金的力学性能; Ma 等^[13]对 $Zr_{53.5}Cu_{26.5}Ni_5Al_{12}Ag_3$ 块体非晶合金的力学性能开展了研究, 结果表明在应变率为 $1.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 时, 随着温度从室温升高到 593 K 时, 该非晶合金的断裂强度从 1911 MPa 降低到了 1 690 MPa, 当温度增加到 673 K 时, 非晶合金则呈现出均匀变形行为。加载速率的不同会导致 Zr 基非晶合金处于不同的应变率范围, 应变率会对 Zr 基块体非晶合金的力学性能产生影响。

为了更好的将该材料应用于武器弹药中, 掌握其冲击载荷下的动态力学性能, 研究其状态方程、本构模型等就显得特别重要。对于 Zr 基块体非晶合金状态方程和本构模型的研究已经开展了很多: Wang 等^[14]研究表明 ZrTiCuNiBe 块体非晶合金的状态方程适用于 Murnaghan 形式; Pan 等^[15]研究表明 $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 块体非晶合金的 $P-V$ 曲线适合 Bridgman 方程; 潘念侨^[16]采用分离式霍普金森压杆

* 收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2019-07-04

第一作者: 石永相(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 2536973141@qq.com;

通信作者: 施冬梅(1967—), 女, 博士, 副教授, 13383013059@163.com。

(split Hopkinson pressure bar, SHPB)研究了 ZrTiNiCuBe 块体非晶合金的本构关系,拟合出了其 JH-2 模型和 Johnson-cook 模型,对比发现 JH-2 模型能更好的描述材料的力学行为。

本文主要采用万能试验机、SHPB 及轻气炮开展 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金材料的动静态力学性能和 JH-2 模型研究,并应用 Autodyn 有限元软件模拟 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金平板撞击试验过程,进行 JH-2 模型的验证。

1 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金动静态力学性能研究

1.1 准静态压缩试验

对于 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金材料的准静态压缩试验前期已经进行过总结,试验采用的试样压缩前后如图 1 所示,试验通过改变其压缩速度得到不同应变率下准静态压缩试验结果,试验过程及结果详见文献 [17]。

采用 MATLAB 将万能试验机采集到的力和位移的曲线转换为真实应力和真实应变曲线,如图 2 所示。

ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的准静态压缩试验中当压缩速度在 0.1~10 mm/min 变化时,合金的压缩强度变化范围为 1.15~1.37 GPa,最大与最小强度相差 0.22 GPa,平均压缩强度为 1.29 GPa。图 2 中,曲线顶点对应的横坐标值为断裂应变,对应的纵坐标值为断裂应力,曲线斜率为弹性模量,可以发现各个应变率下,应变均随应力的增大而增大,直至试样发生断裂。上述试验结果表明在室温和低应变率条件下 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金具备脆性断裂特征,且无应变率效应。

1.2 分离式霍普金森压杆试验

分离式霍普金森压杆试验采用的试样与准静态压缩试样相同,试验过程中考虑了韧铜整形及马氏体时效钢对压杆端面的防护。分离式霍普金森压杆试验通过改变气室压强来控制撞击杆的撞击速度进而实现不同的加载应变率,不同气压下 SHPB 试验结果如表 1 所示。采用 Matlab 和 Origin 对原始数据进行处理后得到不同应变率条件下材料的动态应力应变曲线,如图 3 所示。

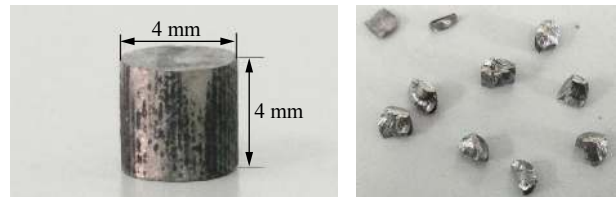


图 1 压缩试样断裂前后

Fig. 1 Before and after fracture of compressed specimens

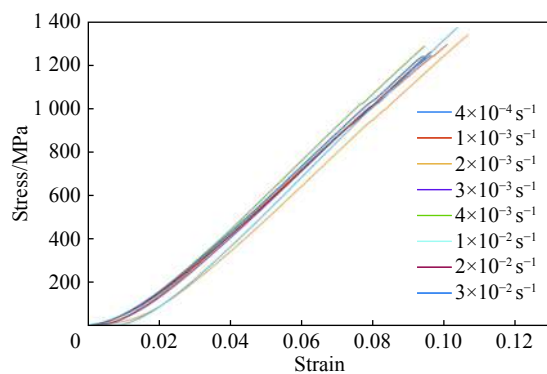


图 2 真实应力-应变曲线

Fig. 2 Real stress-strain curves

表 1 SHPB 试验结果

Table 1 SHPB test results

气压/MPa	应变率/s ⁻¹	原始尺寸/mm	整形片整形片尺寸/mm	压缩强度/GPa
0.17	600	3.84×3.61	10×10×0.25	1.06
0.22	2214	3.81×3.64	10×10×0.25	1.25
0.30	2783	3.85×3.61	10×10×0.25	1.46
0.35	3129	3.82×3.63	10×10×0.25	1.59

整个 SHPB 试验结果表明:

(1)不同应变率条件下,随着应变的增加,应力迅速提高直至试件发生断裂,且压缩变形过程中无明显屈服阶段,试件呈脆性断裂特征;

(2) 随着应变率的增大, 断裂应力即压缩强度逐渐增大, 表明 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金在动态应变率条件下具有明显的应变率强化效应。

1.3 平板撞击试验

采用单级轻气炮开展 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的平板撞击试验研究, 试验原理如图 4 所示。其中飞片材料为无氧高导电性铜 (OFHC), 而靶板由靶环、环氧树脂及 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金, 尺寸为 24 mm×24 mm×4 mm。

试验过程中通过采用长短探针和 PDV 测试技术分别测量飞片的撞击速度及靶板后自由表面速度, 而后采用阻抗匹配法, 依据冲击波速度与质点速度之间的线性关系^[18], 将已知飞片材料 Hugoniot 参数作为标准, 将待测材料的冲击压缩特性与标准材料进行比较, 获得待测材料的 Hugoniot 参数。

试验测得的自由面粒子速度时间曲线如图 5 所示, 由实测的自由面速度历史, 可以得到不同撞击速度下材料的 Hugoniot 弹性极限 σ_{HEL} , 即

$$\sigma_{HEL} = \rho C u_{fs}^{HEL} / 2$$

式中: ρ 为密度, C 为纵波波速, u_{fs}^{HEL} 为弹性段自由面速度幅值。

ZrCuNiAlAg 块体非晶合金平板撞击试验结果详见文献 [17], 其中 u 为质点速度, D 为冲击波速度, 拟合得到其 $D-u$ 型 Hugoniot 曲线方程为 $D = 3971 + 4.077u$, 如图 6 所示, 其中 $C=3\ 971\text{ m/s}$, $S=4.077$, C 、 S 均为材料 Hugoniot 参数。

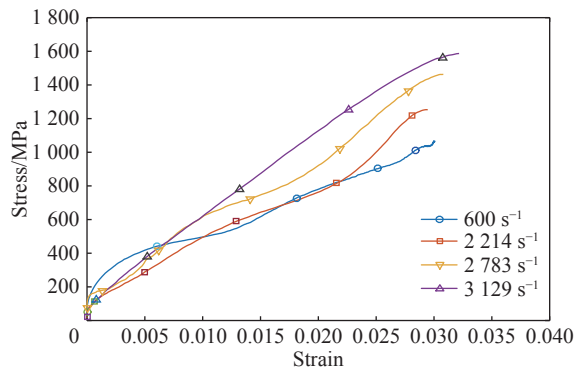


图 3 动态应力应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curve

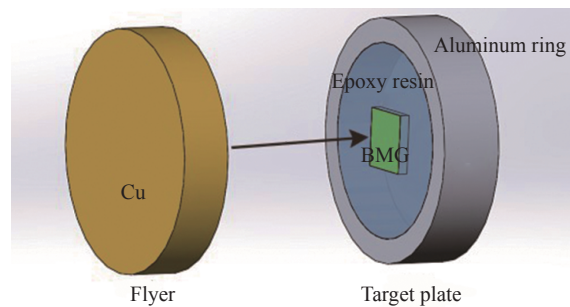


图 4 飞片及靶板

Fig. 4 Flyer and target

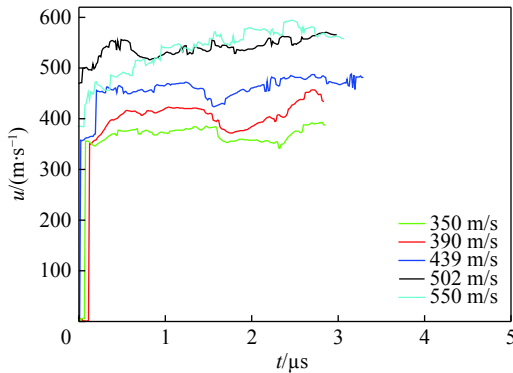


图 5 自由面粒子速度历史

Fig. 5 Velocity history of free surface particles

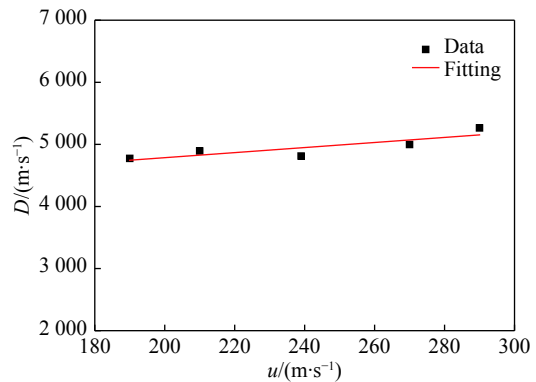


图 6 $D-u$ 曲线

Fig. 6 $D-u$ curve

2 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型

试验中所采用的 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金试样的平均密度 ρ_0 为 6.581 g/cm³, 通过准静态试验获得其弹性模量 E 为 100.36 GPa, 泊松比 ν 为 0.35, 采用 $C = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$ ^[18] 计算求得纵波波速 C 为

4 947.02 m/s, 剪切模量 G 为 37.04 Gpa, 体积模量 k_1 为 111.67 GPa。

2.1 状态方程

状态方程主要用来描述材料的压力、体积应变和内能之间的关系, JH-2 模型中的多项式 (Polynomial) 状态方程形式为:

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad (\mu > 0, \text{压缩}) \quad (1)$$

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e \quad (\mu < 0, \text{拉伸}) \quad (2)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, 为体积应变; p 为压力; ρ_0 为平均密度; ρ 为当前密度; e 为能量; $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, T_1, T_2$ 均为材料常数。

考虑到 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金主要应用于高压、高应变率条件下, 且不考虑绝热温升导致的热软化等, 即忽略内能 e 的影响, 因此适合该合金的多项式 (polynomial) 状态方程可以简化为:

$$p_r = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 \quad (\mu > 0) \quad (3)$$

高压下材料的 $p-\mu$ 曲线可通过平板撞击试验获得。平板撞击试验中一维应变下产生的冲击波满足

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u) \quad (4)$$

设初始条件下质点速度 $u_0 = 0$, 得:

$$\mu = \frac{u}{D - u} \quad (5)$$

利用式 (5) 计算得到 μ , 描绘 (p, μ) 关系曲线, 利用最小二乘法拟合 (p, μ) 的多项式方程, 如图 7 所示。

即状态方程为:

$$p_r = 2.303 \times 10^3 \mu + 4.716 \times 10^4 \mu^2 + 8.873 \times 10^5 \mu^3 \quad (\mu > 0) \quad (6)$$

则与之对应的状态方程参数 A_0, A_1, A_2 的值分别为 $2.303 \times 10^{12}, 4.716 \times 10^{13}, 8.873 \times 10^{14}$ Pa。

2.2 本构模型

JH-2 本构模型描述的等效应力与其等效接触、断裂应力和损伤因子相关, 其定义为^[19]:

$$\sigma^* = \sigma_1^* - D(\sigma_1^* - \sigma_F^*) \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (7)$$

式中: σ_1^* 表示等效接触应力; D 表示损伤因子 ($0 \leq D \leq 1$); σ_F^* 表示等效断裂应力。

当材料未发生损伤 ($D=0$) 时, 等效接触应力表示为:

$$\sigma_1^* = A(p^* + T^*)^N [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (8)$$

当材料完全损伤 ($D=1$) 时, 等效断裂应力表示为:

$$\sigma_F^* = B(p^*)^M [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (9)$$

式中: A, C, N, B, M 为材料常数; $\sigma^* = \sigma/\sigma_{HEL}$, $p^* = p/p_{HEL}$, $T^* = T/p_{HEL}$; σ 为真实应力; p 为静水压力; T 为最大静水拉应力; p^* 表示为等效静水压力; T^* 表示为等效最大静水拉应力; σ_{HLE} 为材料的 Hugoniot 弹性极限; p_{HEL} 为材料处于 Hugoniot 弹性极限时的压力分量; $\dot{\epsilon}$ 表示为材料真实应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 表示为参考应变率。

材料未发生损伤时 ($D=0$), JH-2 本构模型对应的材料状态方程为:

$$p_r = 2.303 \times 10^3 \mu + 4.716 \times 10^4 \mu^2 + 8.873 \times 10^5 \mu^3 \quad (10)$$

根据平板撞击试验结果计算得到材料的 σ_{HLE} 为 5.82 GPa。材料的 Hugoniot 弹性极限 σ_{HLE} 、偏应力

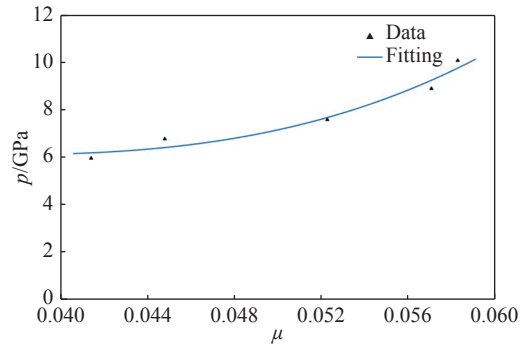


图 7 $p-\mu$ 曲线
Fig. 7 $p-\mu$ curve

张量 S_{HEL} 满足

$$\sigma_{HEL} = p_{HEL} + \frac{2}{3} S_{HEL} \quad (11)$$

$$S_{HEL} = 2G \frac{\mu_{HEL}}{1 + \mu_{HEL}} \quad (12)$$

联立式 (10)~(12) 可得式

$$\sigma_{HEL} = 2.303 \times 10^3 \mu_{HEL} + 4.716 \times 10^4 \mu_{HEL}^2 + 8.873 \times 10^5 \mu_{HEL}^3 + \frac{4}{3} G \left(\frac{\mu_{HEL}}{1 + \mu_{HEL}} \right) \quad (13)$$

由式 (13) 可以求解出 $\mu_{HEL} = 0.00236$, 带入式 (10) 解得 $p_{HEL} = 5.71 \text{ GPa}$ 。

表 2 为 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金压缩力学性能试验结果。

材料未发生损伤时模型中的应变率效应可以解耦。取 $3.1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 和 0.04 s^{-1} 应变率条件下的 (σ, p) 数据, 拟合出 σ - p 关系 σ_1, σ_2 , 将函数 σ_1, σ_2 相除, 得到 $\sigma_1/\sigma_2, p$ 的变化曲线, 如图 8 所示。可以发现当 p 超过 10 GPa 时, σ_1/σ_2 函数值接近于常数 1.08, 将上述参数代入式 (8) 得到:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1 + C \ln 3129}{1 + C \ln 0.04} = 1.08$$

计算得到应变率相关系数 $C = 0.094$ 。由计算过程可知, ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的 JH-2 模型更适用于高压状态下, 压力越高, 其材料参数 C 越准确。

表 2 压缩力学性能试验结果

Table 2 Test results of compressive mechanical properties

试验编号	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	σ/GPa	p/GPa	σ^*	p^*
CMT#1	4×10^{-2}	1.23	0.407	0.211	0.071
CMT#2	4×10^{-2}	1.24	0.409	0.213	0.072
CMT#3	4×10^{-2}	1.24	0.416	0.213	0.072
SHPB#1	2 214	1.25	0.418	0.215	0.073
SHPB#2	2 783	1.46	0.489	0.251	0.086
SHPB#3	3 129	1.59	0.529	0.273	0.093
SHPB#4	3 132	1.64	0.571	0.282	0.100

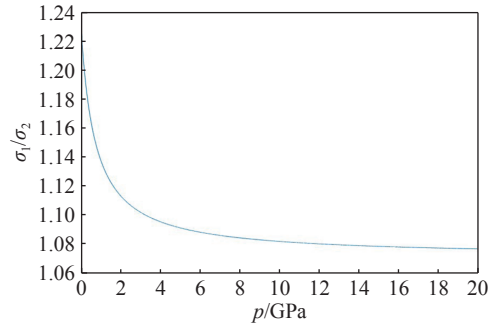


图 8 σ_1/σ_2 - p 的变化曲线

Fig. 8 σ_1/σ_2 - p curve

对于式 (9) 中的未知数 A 和 N , 还需要两个独立方程。选取应变率为 $2\,214 \text{ s}^{-1}$, 压缩强度为 1.25 GPa ; 另一个选取 σ_{HEL} , 应变率为 $5\,000 \text{ s}^{-1}$, 此外假设材料所受的最大静水拉力为 0.4 GPa 。将数据代入式 (9) 得到参数 $A = 0.296, N = 1.153$ 。

因此, 等效接触应力表示为:

$$\sigma_1^* = 0.296(p^* + T^*)^{1.153} [1 + 0.094 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (14)$$

等效断裂应力表达式中 B 和 M 材料参数可通过平板撞击后 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金碎片的强度与压力关系来获得。取平板撞击后块体非晶合金碎片开展准静态压缩试验, 获得其强度与压力的关系如表 3 所示。

将表 3 两组数据带入式 (10) 可得参数 $M = 0.383, B = 1.03$ 。因此, 当材料完全损伤 ($D = 1$) 时, 等效接触应力表示为:

$$\sigma_F^* = 1.03(p^*)^{0.383} [1 + 0.094 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (15)$$

JH-2 本构模型中损伤变量 D 满足:

$$D = \Sigma(\Delta \epsilon_p / \epsilon_p^f) \quad (16)$$

表 3 块体非晶合金碎片准静态压缩试验结果

Table 3 Quasi-static compression test results for bulk amorphous alloy fragments

试验编号	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	σ/GPa	p/GPa	σ^*	p^*
1	1×10^{-2}	1.26	0.42	0.216	0.074
2	2×10^{-2}	1.41	0.43	0.242	0.075

式中 ε_p^f 满足:

$$\varepsilon_p^f = D_1(p^* + \sigma_{lm}^*)/D_2 \quad (17)$$

上式 D_1 、 D_2 为材料的损伤度函数, 由于 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金呈脆性特性, 所以采取试验的方法取得 D_1 、 D_2 的值难度系数较大, 故参考玻璃陶瓷等脆性材料的取值将 D_1 、 D_2 分别取为 0.005 和 1^[19]。

3 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型验证

基于 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的平板撞击试验, 采用 AUTODYN 开展其数值模拟研究, 验证 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的 JH-2 模型的准确性。为了简化整个数值模拟, 忽略固定靶板的靶环及环氧树脂, 仅模拟飞片撞击 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的过程, 试验过程中在 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金背面设置可移动高斯点 A, 如图 9 所示。

有限元模型中, 飞片采用 AUTODYN 材料库中定义的 CU-OFHC 材料模型, 其状态方程和本构模型分别采用 SHOCK 和 Steinberg Guinan 模型。靶板材料为 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金, 材料模型为自定义的 Polynomial 状态方程、JH-2 模型, 其模型参数如表 4 所示。

改变飞片的撞击速度, 模拟计算得到不同飞片撞击速度下 A 点速度时间曲线如图 10 所示, 取冲击波过后第一个平台仿真计算结果与其试验结果进行对比, 如表 5 所示。

从图 10 可以看出不同速度下仿真计算得到的速度时间曲线变化趋势较为接近, 前期上下波动较大, 后期逐渐趋为稳定。从表 5 可以看出计算与试验速度偏差均在 3% 以内, 说明仿真计算得到的结果是准确的, 进一步说明了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型参数的准确性, 表明 JH-2 模型能很好的描述该材料在外界作用下的响应。

4 结 论

(1) 开展了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的动静力学性能试验研究, 研究表明 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金在准静态和动态条件下呈脆性断裂特征, 且动态条件下具有明显的应变率强化效应。

(2) 结合力学性能试验结果, 计算得到了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金的 JH-2 模型参数, 研究确定了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型。

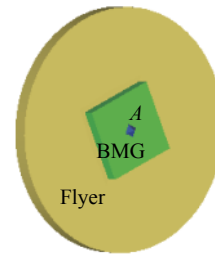


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

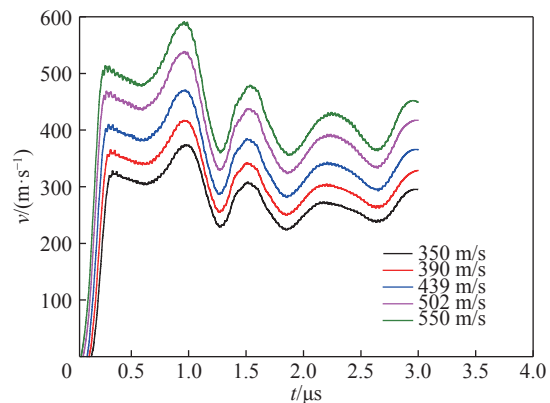


图 10 A 点速度时间曲线

Fig. 10 The velocity-time curve of point A

表 4 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金材料模型参数

Table 4 Material model parameters

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A_1/kPa	A_2/kPa	A_3/kPa	D_1	N	C
6.581	2.303×10^9	4.716×10^{10}	8.873×10^{11}	0.005	1.153	0.094
T_1/kPa	A	B	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{kPa}$	D_2	M	G/kPa
2.303×10^9	0.296	1.03	5.82×10^6	1	0.383	3.704×10^6

表 5 计算与试验结果对比

Table 5 Comparisons between calculated results and experimental results

试验编号	试验速度/(m·s ⁻¹)	计算速度/(m·s ⁻¹)	误差/%
1	350	340	2.9
2	390	379	2.8
3	439	427	2.7
4	502	489	2.6
5	550	535	2.7

(3) 采用 AUTODYN 仿真计算得到的靶板背面粒子速度与试验结果相比, 平均偏差均在 3% 以内, 表明 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型能很好的描述该材料在大变形、高应变率、高压等环境条件下的力学行为, 验证了 ZrCuNiAlAg 块体非晶合金 JH-2 模型的准确性。

参考文献:

- [1] INOUE A, TAKEUCHI A. Recent progress in bulk glassy, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 43(8): 16–30. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.159.
- [2] SHENG H W, LUO W K, ALAMGIR F M, et al. Atomic packing and short-to-medium-range order in metallic glasses [J]. *Nature*, 2006, 439(7075): 419–425. DOI: 10.1038/nature04421.
- [3] MIRACLE D B. A structural model for metallic glasses [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(10): 692–702. DOI: 10.1038/nmat1205.
- [4] LI Yaoqi, SONG Min, HE Yuehui. Effect of quenching mode on the mechanical properties of a $Zr_{64}Al_{10}Ni_{15}Cu_{11}$ metallic glass [J]. *Materials and Design*, 2010, 31(7): 3555–3558. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.040.
- [5] 仇在宏, 杨元政, 赵德强, 等. 锆基块体非晶合金的力学性能研究进展 [J]. *金属功能材料*, 2004, 11(5): 25–27. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8192.2004.05.008.
QIU Zaihong, YANG Yuanzheng, ZHAO Deqiang, et al. Progress in mechanical properties of Zr-based bulk amorphous alloys [J]. *Metallic Functional Materials*, 2004, 11(5): 25–27. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8192.2004.05.008.
- [6] INOUE A, YOKOYAMA Y, SHINOHARA Y, et al. Preparation of bulk Zr-base amorphous alloy by a zone melting method [J]. *Mater Trans, JIM*, 1994, 35(2): 923–926. DOI: 10.2320/matertrans1989.35.923.
- [7] 蒋维科. Zr 基块体非晶合金的制备及力学性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [8] 寇生中, 黄文军, 郑宝超, 等. Y 元素添加对 Zr 基非晶形成和力学性能的影响 [J]. *铸造工程*, 2010, 31(11): 1430–1431.
KOU Shengzhong, HUANG Wenjun, ZHEN Baochao, et al. Glass forming ability and mechanical property of Zr-based alloy with the addition of yttrium [J]. *Foundry Technology*, 2010, 31(11): 1430–1431.
- [9] 武晓峰, 张海峰, 李宏, 等. Zr 基大块非晶合金的微区变形及力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(6): 1368–1371. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2003.06.008.
WU Xiaofeng, ZHANG Haifeng, LI Hong, et al. Deformation and mechanical properties of Zr-based bulk metallic glasses under nanoindenter [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(6): 1368–1371. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2003.06.008.
- [10] MAO J, ZHANG H F, HUA M F, et al. Effects of casting temperature on mechanical properties of Zr-based metallic glasses [J]. *Materials Science and Engineering*, 2010, A527: 981–985. DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.040.
- [11] 邢秋玮. 锆基非晶合金力学性能影响因素的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2445918.
- [12] 李奇奇. Zr 基块体非晶合金压缩力学性能的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011. DOI: 10.7666/d.y1915234.
- [13] MA G, ZHU Z, WANG Z, et al. Deformation behavior of the $Zr_{53.5}Cu_{26.5}Ni_3Al_{12}Ag_3$ bulk metallic glass over a wide range of strain rate and temperatures [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(9): 941–945. DOI: 10.1016/j.jmst.2015.06.001.
- [14] WANG Weihua, WEI Ping, WANG Limin, et al. Equation of state of bulk metallic glasses studied by an ultrasonic method [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(24): 3947–3949. DOI: 10.1063/1.1426272.
- [15] PAN M X, WANG W H, ZHAO D Q, et al. The equation of state and potential function of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002(14): 5665–5671. DOI: 10.1088/0953-8984/14/23/302.
- [16] 潘念侨. Zr 基非晶合金材料动态本构关系及其释能效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [17] 石永相, 施冬梅. ZrCuNiAlAg 块体非晶合金动静态力学性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(6): 83–86. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.06.020.
SHI Yongxiang, SHI Dongmei. Study on dynamic and static mechanical properties of ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(6): 83–86. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.06.020.
- [18] 罗兴柏, 张玉令, 丁玉葵. 爆炸力学理论教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 210.
- [19] 杨震琦, 庞宝君, 王立闻, 等. JH-2 模型及其在 Al_2O_3 陶瓷低速撞击数值模拟中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(5): 464–468. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)05-0463-09.
YANG Zhenqi, PANG Baojun, WANG Liwen, et al. JH-2 model and its application to numericals imulation on Al_2O_3 ceramic

under low-velocity impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(5): 464–468. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)05-0463-09.

Study on JH-2 model of the ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy

SHI Yongxiang¹, SHI Dongmei², LI Wenzhao², YU Zhitong², SHANG Chunming²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;

2. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China)

Abstract: It is very important to establish the material model for the explosive forming and penetration simulation of ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy. In this paper, the JH-2 model parameters of the ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy were calculated by the experimental results. In order to verify the accuracy of the ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy JH-2 model, the finite element model of plate impact test was established by Autodyn. The deformation process of ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy under high pressure and high strain rate was simulated. Compared with the experimental results, the average velocity deviation of the free surface particles on the back surface of the target plate is less than 3%. It is shown that the JH-2 model of ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy can well describe the mechanical behavior of the material under large deformation, high strain rate, high pressure and other environmental conditions, and the accuracy of JH-2 model of ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy is verified.

Keywords: ZrCuNiAlAg bulk amorphous alloy; JH-2 model; Autodyn; finite element

(责任编辑 王小飞)